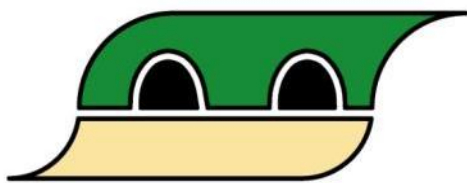


Technická zpráva - SURAO 2014-3047

ZÁVĚREČNÁ ZPRÁVA MOCK-UP-JOSEF (2011-2018)

Autoři: Ing. J. Štáštka, Ph.D.,
prof. Ing. J. Pacovský, CSc.
a kolektiv

Centrum experimentální geotechniky,
Fakulta stavební,
České vysoké učení technické v Praze
Praha, prosinec 2018



Výstavba, provozování a vyhodnocení demonstračního experimentu Mock-up-Josef

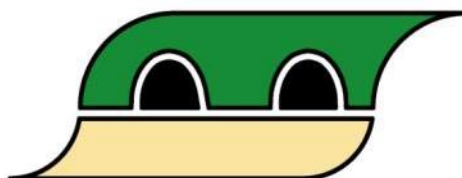
Závěrečná zpráva k projektu

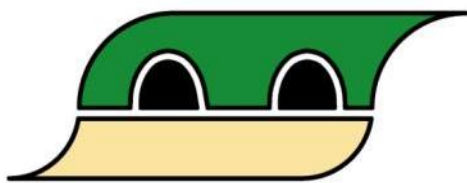
ŘEŠITELÉ:

Centrum experimentální geotechniky, Fakulta stavební, České vysoké učení technické v Praze

Hlavní autoři: Ing. Jiří Štáštka, Ph.D.; prof. Ing. Jaroslav Pacovský, CSc.

Autorský kolektiv (abecedně): prof. Ing. Jaroslav Pacovský, CSc.; Ing. Jiří Svoboda, Ph.D.; Ing. Jiří Štáštka, Ph.D.; Ing. Radek Vašíček, Ph.D.





Obsah

1	Úvod	17
2	Celkové vyhodnocení projektu podle fází	18
2.1	Příprava projektu (I. fáze, 2011)	18
2.1.1	Zahájení základního geotechnického výzkumu použitého bentonitu B 75	18
2.1.2	Charakteristika B 75	19
2.1.3	Stanovení hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku	20
2.1.4	Stanovení Atterbergových mezí a měrné hmotnosti	21
2.1.5	Zahájení výroby bentonitových lisovaných prefabrikátů	21
2.1.6	Zahájení přípravy instrumentace	23
2.1.7	Vyhodnocení I. fáze projektu	23
2.2	Výstavba fyzikálního modelu (II. fáze, 2012)	24
2.2.1	Konstrukce modelu Mock-up-Josef	24
2.2.2	Dno a víko superkontejneru	24
2.2.3	Plášť superkontejneru	25
2.2.4	Skladba bentonitové vrstvy modelu	26
2.2.5	Korozní profily	28
2.2.6	Topné těleso	28
2.2.7	Výstavba superkontejneru	29
2.2.8	Transport vyrobeného superkontejneru na místo uložení modelu	30
2.2.9	Spuštění superkontejneru do úložného vrtu	33
2.2.10	Uzavření fyzikálního modelu, napojení měřidel na datalogery	38
2.2.11	Test monitoringu	39
2.3	Provozování experimentu (III. fáze, 2013-2018)	39
3	Instrumentace modelu a instrumentace přírodní horninové bariéry	40
3.1	Měření tlaku v bentonitové vrstvě	40
3.2	Měření teploty v bentonitové vrstvě	41
3.3	Měření relativní vlhkosti v bentonitové vrstvě	43
3.4	Měření změn napjatosti okolního masivu	45
3.5	Měření teplotních změn v okolí vrtu s modelem	45
3.6	Měření poměrné deformace okolního masivu	45

3.7	Měření velikosti trhlin	46
4	Vyhodnocení naměřených dat	47
4.1	Monitoring vývoje tlaků.....	47
4.1.1	Grafické vyhodnocení tlaků v horizontálních profilech	47
4.1.2	Grafické vyhodnocení tlaků ve vertikálních profilech	51
4.2	Monitoring vývoje teplot v bentonitové vrstvě	55
4.3	Monitoring vývoje relativní vlhkosti.....	59
4.4	Monitoring okolního masivu	60
5	Vyhodnocení odběrů z bentonitové vrstvy	62
5.1	Odběr č. 1	64
5.2	Odběr č. 2	65
5.3	Odběr č. 3	66
5.4	Odběr č. 4	67
5.5	Odběr č. 5	68
5.6	Odběr č. 6	69
5.7	Odběr č. 7	70
6	Shrnutí a diskuse	71
6.1	Výstavba experimentu.....	71
6.2	Monitoring experimentu.....	71
6.3	Vliv technologických spár	74
6.4	Vyhodnocení odběrů	74
6.4.1	Průběh vlhkosti.....	75
6.4.2	Průběh objemových hmotností sušiny	77
6.4.3	Stupeň saturace	79
6.4.4	Vyhodnocení hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku.....	81
6.5	Porovnání s předešlým laboratorním experimentem Mock-up-Cz	83
6.6	Důležité zkušenosti	86
7	Doporučení na zaměření dalšího výzkumu.....	87
7.1	Další provozování experimentu.....	87
7.2	Rozebírání experimentu.....	87
7.3	Numerické modelování procesů v bentonitu a v okolní hornině.....	87

7.4	Vliv zatížení teplem a podzemní vodou na hydraulickou vodivost a bobtnací tlak bentonitu.....	87
8	Závěry	88
9	Bibliografie	90

Dlážděná 6 | 110 00 Praha 1 | ČR

tel.: +420 221 421 511 | fax: +420 221 421 544 | e-mail: info@sura0.cz | www.sura0.cz

IČ: 66000769 | Bankovní spojení: ČNB Praha 1, č. ú. 35-64726011/0710

Tato zpráva je výhradně majetkem SÚRAO a její šíření bez vědomí majitele je zakázáno.

Správa úložišť radioaktivních odpadů byla zřízena k 1. 6. 1997 Ministerstvem průmyslu a obchodu ČR jako státní organizace na základě atomového zákona (§ 26 zákona č. 18/1997 Sb. o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření). Od roku 2000 je SÚRAO ve smyslu § 51 zákona č. 219/2000 Sb. organizační složkou státu.

Seznam obrázků:

Obr. 1 - Závislost objemové hmotnosti při plné saturaci na objemové hmotnosti sušiny pro B75 s vyznačením předpokládané objemové hmotnosti sušiny v modelu.....	19
Obr. 2 - Hydraulická vodivost (k) a bobtnací tlak (σ_{sw} – v grafu ssw) nezatíženého B 75 (výsledky z I. dílčí zprávy [7] a z dalších zkoušek realizovaných v CEG [11]). V grafu jsou i aktualizované hodnoty o vliv sytícího tlaku (v grafu označena jako opravená data).....	20
Obr. 3 - Čistění formy pro lisování prefabrikátů.....	21
Obr. 4 - Plnění formy bentonitem.....	22
Obr. 5 - Ruční hutnění materiálu do formy.....	22
Obr. 6 - Složená forma před začátkem lisování (vlevo) a lisování (vpravo).....	22
Obr. 7 - Rozebrání formy s prefabrikátem (vlevo) a vylisovaný prefabrikát při vážení (vpravo) [12]......	23
Obr. 8 - Vakuové balení a označení prefabrikátu.....	23
Obr. 9 - Vlevo základní půdorysné rozměry modelu: 715 mm celková šířka SK; 700 mm je vnější průměr bentonitových prefabrikátů, 162,5 mm je šířka velkých bentonitových prefabrikátů, 375 mm vnitřní průměr velkých bentonitových prefabrikátů, 320 mm je průměr topného tělesa. Vpravo na obrázku jsou u topného tělesa zřejmé úlomky bentonitových prefabrikátů a zásyp z práškového B75 ve spáře.	24
Obr. 10 - První část pláště superkontejneru (perforovaný plech) s nosnými závitovými tyčemi a umístěnými prvními vrstvami prefabrikátů.....	25
Obr. 11 - Podložení kabelů od monitoringu nerezovými plechy (ochrana proti protlačení kabelů a případnému porušení o hrany děrovaného pláště).	26
Obr. 12 - Ukázka vrstev (vodorovné řezy) a základní rozměry v mm.	27
Obr. 13 - Rozměry bentonitových prefabrikátů v mm ve vodorovném řezu vlevo a vpravo foto z výstavby první vrstvy bentonitových prefabrikátů.	27
Obr. 14 - Hlavní rozměry geotechnické bariéry (33 vrstev, průměr 700 mm a výška 2170 mm) a s červeně naznačeným umístěním topného tělesa, které tvoří ocelový válec o průměru 320 mm a výšce 1300 mm.	27
Obr. 15 - Vlevo umístění korozních vzorků ve 22. vrstvě bentonitových prefabrikátů, vprostřed umístění korozních vzorků ve vrstvě 23. a vpravo sada korozních vzorků před umístěním do modelu.	28
Obr. 16 - Umístění modelu Mock-up-Josef v experimentálním silu během výstavby.....	29
Obr. 17 - Spouštění topného tělesa a jeho umístění do modelu.	29
Obr. 18 - Umístění některých hydraulických tlakových buněk (foto II. měřicího profilu).....	30
Obr. 19 - Model MCJ uložený v ocelovém přebalu při přípravě pro uložení na transportní vozík.....	31

Dlážděná 6 | 110 00 Praha 1 | ČR

tel.: +420 221 421 511 | fax: +420 221 421 544 | e-mail: info@sura0.cz | www.sura0.cz

IČ: 66000769 | Bankovní spojení: ČNB Praha 1, č. ú. 35-64726011/0710

Tato zpráva je výhradně majetkem SÚRAO a její šíření bez vědomí majitele je zakázáno.

Správa úložišť radioaktivních odpadů byla zřízena k 1. 6. 1997 Ministerstvem průmyslu a obchodu ČR jako státní organizace na základě atomového zákona (§ 26 zákona č. 18/1997 Sb. o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření). Od roku 2000 je SÚRAO ve smyslu § 51 zákona č. 219/2000 Sb. organizační složkou státu.

Obr. 20 - Ukládání modelu v povrchové laboratoři do přepravního rámu, který je umístěný na transportním vozíku.	31
Obr. 21 - Model uložený na transportním vozíku před přesunem do podzemí.	32
Obr. 22 - Transport modelu v povrchovém areálu Podzemní laboratoře Josef.	32
Obr. 23 - Transport modelu v podzemí.	33
Obr. 24 - Model při přípravě pro vyjmutí z přepravního rámu.	33
Obr. 25 - Vyjmutí přepravního rámu.	34
Obr. 26 - Instalace modelu do svislé polohy.	34
Obr. 27 - Instalace modelu v přepravním obalu do svislé polohy.	35
Obr. 28 - Model v přepravním obalu nad vrtem.	35
Obr. 29 - Sejmутí ochranného přebalu z modelu.	36
Obr. 30 - Dno modelu nad úložným velkoprofilovým vrtem o průměru 750 mm a hloubce 2800 mm před spouštěním.	36
Obr. 31 - Odstranění ochranné PE folie z modelu.	37
Obr. 32 - Spouštění modelu do úložného vrtu.	37
Obr. 33 - Model ve vrtu.	38
Obr. 34 - Obrázek po uzavření modelu rozpěrnými trubkami.	38
Obr. 35 - Hodnoty teplot oleje uvnitř topného tělesa po celou dobu provozu experimentu (čidla 1 a 2) a teplota na povrchu topného tělesa (čidlo 139).	39
Obr. 36 - Hydraulická tlaková buňka (označení 24) umístěná ve II. měřícím profilu na povrchu bentonitového prefabrikátu.	41
Obr. 37 - vlevo je analogový teploměr s čidlem LM35DZ v ochranné měděné trubičce a vpravo je instalovaný analogový teploměr na povrchu bentonitového prefabrikátu.	42
Obr. 38 - Na obrázku jsou dva svislé řetězové teploměry (v ochranných průhledných plastových trubičkách jsou patrná jednotlivá čidla).	43
Obr. 39 - Detail měřící sondy.	44
Obr. 40 - Svislé umístění Rotroniců (černé kabely) po šířce vodorovného profilu v bentonitovém prefabrikátu. Červené kabely jsou k teplotním čidlům.	44
Obr. 41 - Měřící svorníky (vlevo) a osazené čtyři svorníky v blízkosti ukládacího vrtu.	45
Obr. 42 - Instalovaný nerezový konvergenční trn na boku rozrážky.	46
Obr. 43 - Instalovaný „Crack meter“.	46
Obr. 44 - Vykreslení hodnot z hydraulických tlakových buněk umístěných v profilu a vykreslení teploty z teploměru 113.00.	48
Obr. 45 - Grafické znázornění poklesu teploty vlivem poruch topného systému a vliv poklesu teploty na měřený tlak v profilu II.	48

Obr. 46 - Vykreslení hodnot z hydraulických tlakových buněk umístěných v profilu 2 a vykreslení teploty z teploměru 122 (vzdálenost od topného tělesa 7 cm).	49
Obr. 47 - Vykreslení hodnot z hydraulických tlakových buněk umístěných v profilu 3 a vykreslení teploty z teploměru 132.00 (vzdálenost od topného tělesa 7 cm).....	49
Obr. 48 - Grafické znázornění poklesu teploty vlivem poruch topného systému a vliv poklesu teploty na měřený tlak na čidlo v profilu III.	50
Obr. 49 - Vykreslení hodnot z hydraulických tlakových buněk umístěných v profilu IV a vykreslení teploty z teploměru 144 (umístěného na plášti SK).....	50
Obr. 50 - Vykreslení hodnot z hydraulických tlakových buněk umístěných v profilu V a vykreslení teploty z teploměru 151.00 (vzdálenost od středu modelu 22,8 cm – umístění cca 15,5 cm pod víkem).....	51
Obr. 51 - Vykreslení hodnot z hydraulických tlakových buněk na pozici 1 a vykreslení teploty z teploměru 134.00.....	51
Obr. 52 - Vykreslení hodnot z hydraulických tlakových buněk na pozici 2 a vykreslení teploty z teploměru 134 - čidlo na vnitřním povrchu nerezového pláště uprostřed výšky modelu (pozice čidla viz Obr. 53).	52
Obr. 53 - Vykreslení hodnot z hydraulických tlakových buněk na pozici 3, vykreslení teploty z teploměru 134 - čidlo na vnitřním povrchu nerezového pláště uprostřed výšky modelu a vykreslení hodnot z čidla teploty 1142.20, které měřilo do 1. 7. 2013.	52
Obr. 54 - Vykreslení hodnot z hydraulických tlakových buněk na pozici 4 a vykreslení teploty z teploměru 132.00.....	53
Obr. 55 - Vykreslení hodnot z hydraulických tlakových buněk na pozici 5 a vykreslení teploty z teploměru 1142.20.....	53
Obr. 56 - Vykreslení hodnot z hydraulických tlakových buněk na pozici 6 a vykreslení teploty z teploměru 128.01.....	54
Obr. 57 - Vykreslení hodnot z hydraulických tlakových buněk na pozici 7 a vykreslení teploty z teploměru 117.00.....	54
Obr. 58 - Vykreslení hodnot z hydraulických tlakových buněk na pozici 8 a vykreslení teploty z teploměru 138.02.....	55
Obr. 59 - Průběh teploty měřený řetězovými čidly 118.01 až 118.07	55
Obr. 60 - Průběh teploty měřený řetězovými čidly 128.01 až 128.07.	56
Obr. 61 - Průběh teploty měřený řetězovými čidly 138.01 až 138.04, (pro porovnání analogové čidlo 134 - čidlo na vnitřním povrchu nerezového pláště a uprostřed výšky modelu).....	56
Obr. 62 - Průběh teploty měřený řetězovými čidly 148.01 až 148.07 (pro doplnění čidlo 128.01, které je umístěno na podobné pozici vůči vodorovné ose modelu).	57
Obr. 63 - Průběh teploty měřený řetězovými čidly 158.01 až 158.07 (pro porovnání čidlo 151).....	57

Obr. 64 - Grafické znázornění teploty v čase z různých čidel umístěných zhruba v polovině výšky modelu.	58
Obr. 65 - Vykreslení hodnot relativní vlhkosti a teploty z Rotroniků a umístění Rotroniků v modelu.....	59
Obr. 66 - Na obrázku vlevo je schéma monitoringu okolí vrtu (půdorys) včetně orientačního umístění a označení čidel – vpravo je obrázek z rozrážky, na počvě (dno) jsou vidět odvrtné velkoprofilové vrty. V nejvzdálenějším velkoprofilovém vrtu (u čelby) je instalovaný MCJ.....	60
Obr. 67 - Průběh teploty měřené řetězovými čidly 184.01 až 184.11, která jsou umístěna svisle ve vrtu v hornině (38 cm od hrany vrtu) – nejvyšší měřené teploty jsou na vodorovné úrovni topného tělesa.	61
Obr. 68 - Průběh teploty měřené čidly 191 (teplota vody nad víkem modelu) a 192 (teplota vzduchu v rozrážce).	62
Obr. 69 - Vlevo vodorovný řez bentonitovou vrstvou a označení odběrných míst v bentonitu – odběry v bentonitu jsou zhruba stejně vzdálené od topného tělesa (10 cm); odběry byly realizovány do hloubky skrz víko modelu a vpravo je ukázka odebraných bentonitových jader, která byla po odběru vakuována.....	63
Obr. 70 - Jádra z prvního odběru.....	64
Obr. 71 - Grafy s výsledky z prvního odběru (hnědě naznačeny spáry mezi bentonitovými prefabrikáty).	64
Obr. 72 - Jádra z druhého odběru.	65
Obr. 73 - Výsledky z druhého odběru (hnědě naznačeny spáry mezi bentonitovými prefabrikáty).	65
Obr. 74 - Jádra ze třetího odběru.	66
Obr. 75 - Výsledky ze třetího odběru (hnědě naznačeny spáry mezi bentonitovými prefabrikáty). Do 320 mm byl v tomto místě před tímto odběrem realizován první odběr.....	66
Obr. 76 - Jádra ze čtvrtého odběru.	67
Obr. 77 - Výsledky ze čtvrtého odběru (hnědě naznačeny spáry mezi bentonitovými prefabrikáty). Do 64 cm byl v tomto místě před tímto odběrem realizován druhý odběr.	67
Obr. 78 - Jádra z pátého odběru (odběr byl z důvodu fotodokumentace rozdělen na dvě části).	68
Obr. 79 - Výsledky z pátého odběru (hnědě naznačeny spáry mezi bentonitovými prefabrikáty). Do hloubky 68 cm byl v tomto místě před tímto odběrem realizován druhý odběr.....	68
Obr. 80 - Jádra ze šestého odběru.	69
Obr. 81 - Výsledky ze šestého odběru (hnědě naznačeny spáry mezi bentonitovými prefabrikáty).	69
Obr. 82 - Jádra ze sedmého odběru.	70

Obr. 83 - Výsledky ze sedmého odběru. Do hloubky 82 cm byl v tomto místě před tímto odběrem realizován druhý odběr.	70
Obr. 84 - Grafické znázornění teploty v čase z různých čidel umístěných zhruba v polovině výšky modelu po 56 měsících (TT – topné těleso). Z teplotních dat je zřejmé, že k ustálení hodnot teploty uprostřed modelu v horizontálním směru došlo zhruba začátkem roku 2015.72	
Obr. 85 - Vykreslení teploty při začátku tepelného zatěžování bentonitu (oranžové body), po 54 měsících zatěžování (modré body) a ukázka jednoduchého početního řešení s průměrným součinitelem tepelné vodivosti bentonitu $\lambda = 1 \text{ W/m/K}$ (modré body). Počítáno se součinitelem tepelné vodivosti pro granitické horniny $\lambda = 2,7 \text{ W/m/K}$ (tonalit) [16])......	73
Obr. 86 - Hodnoty relativní vlhkosti z různých vzdáleností vůči poloze topného tělesa u experimentu Temperature buffer test [15]......	74
Obr. 87 - Vykreslení hodnot vlhkosti v závislosti na hloubce vzorku v modelu. Černá barva značí hodnoty z prvního odběru, červená barva značí hodnoty z druhého odběru, zelená barva označuje hodnoty ze třetího odběru, modrá barva označuje hodnoty ze čtvrtého odběru, žlutá barva označuje hodnoty z pátého odběru, oranžová barva ze šestého odběru a šedá barva hodnoty ze sedmého odběru.....	76
Obr. 88 - Vyhodnocení vlhkostí vzorků ze šestého a ze sedmého odběru (zelenou čarou je zobrazena vrchní hrana topného tělesa).	76
Obr. 89 - Vykreslení hodnot vlhkosti v závislosti na hloubce vzorku v modelu. V tomto grafu jsou vyneseny pouze výsledky odběrů na původním bentonitu, tj. na bentonitu, který nebyl odebrán v některém z předcházejících odběrů.	77
Obr. 90 - Vykreslení hodnot objemové hmotnosti sušiny v závislosti na hloubce vzorku v modelu. Černá barva značí hodnoty z prvního odběru, červená barva značí hodnoty z druhého odběru, zelená barva označuje hodnoty ze třetího odběru, modrá barva označuje hodnoty ze čtvrtého odběru, žlutá barva označuje hodnoty z pátého odběru, oranžová barva ze šestého odběru a šedá barva hodnoty ze sedmého odběru.....	78
Obr. 91 - Vyhodnocení objemových hmotností sušiny ze vzorků ze šestého a ze sedmého odběru v místě 3 (zelenou čarou je zobrazena vrchní hrana topného tělesa).	78
Obr. 92 - Vykreslení hodnot objemové hmotnosti sušiny v závislosti na hloubce vzorku v modelu. V tomto grafu jsou vyneseny pouze výsledky odběrů na původním bentonitu, tj. na bentonitu, který nebyl odebrán v některém z předcházejících odběrů.....	79
Obr. 93 - Vykreslení hodnot vypočteného stupně saturace v závislosti na hloubce vzorku v modelu. Černá barva značí hodnoty z prvního odběru, červená barva značí hodnoty z druhého odběru, zelená barva označuje hodnoty ze třetího odběru, modrá barva označuje hodnoty ze čtvrtého odběru, žlutá barva označuje hodnoty z pátého odběru, oranžová barva ze šestého odběru a šedá barva hodnoty ze sedmého odběru.....	80
Obr. 94 - Vykreslení hodnot vypočteného stupně saturace v závislosti na hloubce vzorku v modelu. V tomto grafu jsou vyneseny pouze výsledky odběrů na původním bentonitu, tj. na bentonitu, který nebyl odebrán v některém z předcházejících odběrů.....	80
Obr. 95 - Porovnání hodnot bobtnacího tlaku materiálu B75: nezatíženého (plné černé čtverečky) a z odběrů z experimentu MCJ, zatížení teplem a přirozenou saturací.	81

Dlážděná 6 | 110 00 Praha 1 | ČR

tel.: +420 221 421 511 | fax: +420 221 421 544 | e-mail: info@sura0.cz | www.sura0.cz

IČ: 66000769 | Bankovní spojení: ČNB Praha 1, č. ú. 35-64726011/0710

Tato zpráva je výhradně majetkem SÚRAO a její šíření bez vědomí majitele je zakázáno.

Správa úložišť radioaktivních odpadů byla zřízena k 1. 6. 1997 Ministerstvem průmyslu a obchodu ČR jako státní organizace na základě atomového zákona (§ 26 zákona č. 18/1997 Sb. o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření). Od roku 2000 je SÚRAO ve smyslu § 51 zákona č. 219/2000 Sb. organizační složkou státu.

Obr. 96 - Porovnání hodnot hydraulické vodivosti materiálu B75: nezatíženého (plně černé čtverečky) a z odběrů z experimentu MCJ- zatížení teplem a přirozenou saturací.....	82
Obr. 97 - Půdorysné řezy experimenty v místě topného tělesa vlevo Mock-up-Cz a vpravo MCJ.....	83
Obr. 98 - Zobrazení vlivu obsahu písku (sand content) na bobtnací tlak (swelling pressure) v bentonitu pro čínský bentonit GMZ [26].	84
Obr. 99 - Vliv příměsí grafitu (graphite) na součinitel teplotní vodivosti (thermal conductivity) pro různé vlhkosti (water content) českého bentonitu z Rokle [27].	84
Obr. 100 - Průběh měřených tlaků v experimentu Mock-up-Cz na horizontálním profilu III [12].	85
Obr. 101 - Vykreslení hodnot z hydraulických tlakových buněk umístěných v profilu III u experimentu MCJ a vykreslení teploty z teploměru 132.00 (vzdálenost od topného tělesa 7 cm).	85

Seznam tabulek:

Tabulka 1 - Chemické a mineralogické složení bentonitu B75:	19
Tabulka 2 - Mez tekutosti, mez plasticity a měrná hmotnost bentonitu B 75:	21
Tabulka 3 - Přehled měřících profilů	40
Tabulka 4 - Shrnutí základních informací o provedených odběrech v průběhu provozování MCJ:.....	63
Tabulka 5 - Porovnání vlivu zatížení z in-situ experimentů na hydraulickou vodivost a bobtnacího tlak bentonitu (jedná se o různé druhy bentonitů):.....	82

Seznam textových příloh:

Seznam elektronických příloh:

1. Seznam čidel a hodnoty z měření po celou dobu provozování experimentu.
2. Metodika vyhodnocení hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku - Stanovení hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku - Interní postupy č. 182/21 a 182/22
3. Fotodokumentace

Seznam použitých zkratk:

B 75 - mletý bentonit z ložiska Černý Vrch, který průmyslově dodává Keramost a.s. pod označením Bentonit 75. Bentonit zkoušený v rámci tohoto projektu byl připraven v úpravně v Obrnicích v roce 2010, a právě proto je za zkratkou B 75 uvedeno 2010.

CEG - Centrum experimentální geotechniky – katedra na Fakultě stavební, ČVUT v Praze; jedno z pracovišť poskytovatele

HTB - hydraulická tlaková buňka pro měření tlaku

MCJ - zkratka pro označení experimentu Mock-up-Josef

SK - superkontejner - experiment byl vystavěn v povrchových laboratořích a pak byl jako superkontejner (vše dohromady) odvezen do Podzemní laboratoře Josef

UOS - ukládací obalový soubor s vyhořelým jaderným palivem

Vymezení pojmů:

Buffer - tlumicí materiál použitý jako bariéra okolo UOS, pro omezení průniku podzemní vody k UOS a pro omezení potenciální migrace radionuklidů z UOS sorpcí materiálu bufferu [1]

Backfill - výplňový materiál použitý pro vyplnění tunelů v úložišti po uložení radioaktivních odpadů [1]

Vlhkost - v případě geotechnických materiálových zkoušek bentonitu, není-li uvedeno jinak (monitoring relativní vlhkosti), se jedná o hmotnostní (váhovou) vlhkost; která byla stanovena podle normy [2]

Abstrakt

Projekt „Výstavba, provozování a vyhodnocení demonstračního experimentu Mock-up-Josef“ byl zahájen v dubnu 2011 a jeho provozování je naplánováno do konce roku 2018. Projekt byl rozdělený do několika fází a ty pak dále na jednotlivé dílčí úkoly. Nejdříve byly realizovány dvě přípravné fáze (fáze I - 2011 a fáze II - 2012), po nich následovala nejdelší III. fáze, a to provozování experimentu v Podzemní laboratoři Josef. Původní termín pro ukončení experimentu byl prosinec roku 2015, ale vzhledem k téměř bezproblémovému průběhu a výsledkům bylo provozování prodlouženo o další tři roky. Stěžejním výstupem projektu je experiment Mock-up-Josef (MCJ). Tento in-situ experiment je prvním svého druhu na území ČR a pro jeho návrh byl použit švédský systém KBS-3 V modifikovaný pro podmínky Podzemní laboratoře Josef. Při výstavbě experimentu MCJ byly zúročeny i zkušenosti z experimentu Mock-up-Cz, který byl řešen v laboratořích Centra experimentální geotechniky (FSv ČVUT v Praze) v letech 2002 až 2006.

Hlavním konstrukčním prvkem experimentu je bentonitová vrstva vystavěná z českého bentonitu Bentonit 75. Bentonitová vrstva byla zatěžována teplem od topného tělesa (do 90°C) a přirozeně saturována vodou z okolního horninového prostředí. Oba vlivy vyvolávaly v bentonitu změny, jejichž sledování představovalo další cíl projektu. Pro monitoring procesů byla uvnitř bentonitu instalována čidla měřící vývoj tlaku, teploty a relativní vlhkosti. Ze zatížené bentonitové vrstvy byly také odebírány a vyhodnocovány vzorky. Po stanovení vlhkosti a objemové hmotnosti byl dopočítán stupeň saturace. Mimo tohoto základního geotechnického vyhodnocení (objemové hmotnosti a vlhkosti) probíhaly na vzorkách bentonitu laboratorní zkoušky hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku. Některé vzorky byly předány objednateli pro mineralogické a mikrobiologické rozborů.

Monitorovací systém pro sledování šíření tepla byl instalován i do horniny v okolí experimentu. Především byl monitorován vývoj teplot v různých vzdálenostech od topného tělesa. Změny teploty byly zaznamenávány do vzdálenosti 3 m od svislé osy experimentu.

V této zprávě je shrnuto celé řešení projektu po jednotlivých fázích. Dále zpráva obsahuje vyhodnocená data z monitoringu a výsledky ze všech odběrů bentonitu ze zatížené bentonitové vrstvy.

Tento projekt přinesl nejenom důležité zkušenosti s provozováním experimentu v reálném prostředí podzemní laboratoře, ale také zajímavá data pro tvorbu numerických modelů a výsledky využitelné pro další výzkum (geotechnika, mineralogie, mikrobiologie, atd.).

Klíčová slova

Bentonit, hlubinné úložiště, fyzikální modelování, in-situ, Mock-up-Josef, teplota, tlak

Summary

The construction, operation and evaluation of the Mock-up-Josef demonstration experiment was launched in April 2011 and is scheduled to be terminated at the end of 2018. The project was divided into several phases and, subsequently, further subdivided into individual sub-tasks. The two preparatory phases (Phase I - 2011 and Phase II - 2012) were followed by Phase III (the longest phase of the project), i.e. the operation of the experiment in the Josef Underground Laboratory. The original deadline for the termination of the experiment was set for December 2015; however, due to the almost problem-free operation of the experiment and the importance of the results obtained, it was decided that the experiment would be prolonged for a further three years. The main output of the project consists of the MCJ experiment itself; this in-situ experiment, the first of its kind to be conducted in the Czech Republic, was based on the Swedish KBS-3 V system modified so as to suit the conditions prevailing in the Josef Underground Laboratory. The construction of the MCJ experiment made full use of the experience gained from the operation of the Mock-up-Cz experiment conducted in the Centre of Experimental Geotechnics (CTU in Prague) laboratories from 2002 to 2006.

The main component of the experiment consisted of a layer of Czech Bentonite B75 which was firstly loaded with heat up to 90°C by means of a heater inserted into the experiment and subsequently naturally saturated with water issuing from the surrounding rock environment. Both effects led to changes in the bentonite, the monitoring of which constituted a further objective of the project. In addition, sensors for the measurement of the pressure, temperature and relative humidity were installed inside the bentonite layer for the monitoring of the various processes underway. Samples were taken from the loaded bentonite layer at regular intervals for the evaluation of density and water content and the calculation of the degree of saturation. In addition to the basic geotechnical evaluation of the bentonite, long-term hydraulic conductivity and swelling pressure tests were performed on the material. A number of samples were submitted to partner institutions for the evaluation of mineralogical and microbiological properties.

In addition, monitors for the measurement of heat dissipation were installed in the rock massif in the vicinity of the experiment aimed particularly at monitoring temperature development at various distances from the heater. Temperature changes were also recorded at a distance of around 3 m from the vertical axis of the experiment.

This report provides a stage-by-stage summary of the project and presents the monitored data and results obtained from the study of the samples extracted from the loaded bentonite layer.

The project has provided new experience concerning the development of bentonite as well as extremely interesting data for future modelling purposes and further research in this area (geotechnics, mineralogy, microbiology, etc.).

Keywords

Bentonite, Deep Repository, Physical modelling, In-situ, Mock-up-Josef, Temperature, Pressure

1 Úvod

Tato závěrečná zpráva obsahuje celkové vyhodnocení průběhu projektu, vyhodnocení naměřených dat a doporučení na zaměření dalšího výzkumu v kontinuitě na realizovaný experiment Mock-up-Josef (MCJ).

Experiment MCJ navazuje na laboratorní experiment Mock-up-Cz [3], který byl realizován v laboratořích Centra experimentální geotechniky, Fakulty stavební ČVUT v Praze v letech 2002-2006. Mezi zahraniční, obdobné projekty lze zařadit např. Long-term Experiment of Buffer Material (LOT) [4], Temperature Buffer Test (TBT) [5] realizované v Äspö Hard Rock Laboratory a také FEBEX experiment [6], který se skládal z laboratorního experimentu v CIEMAT (Centre for Energy, Environment and Technology, Španělsko) a in-situ experimentu v Grimselu (Grimsel Test Site; GTS, Švýcarsko).

MCJ je provozován bez větších problémů po dobu 6 let. Původní návrh počítal s provozováním po dobu 3 let. Jedinými vážnějšími problémy v průběhu provozu MCJ jsou nevratné poruchy čidel, občasné výpadky měřicího systému či poruchy na topném systému (např. výpadek elektrického proudu). Většinu poruch, včetně závažnějších se podařilo odstranit v několika dnech či týdnech. Technicky nemožné je opravit čidla, která jsou umístěna v bentonitové vrstvě či v hornině.

Sbíraná data jsou vyhodnocována graficky podle tzv. měřících profilů. Bohužel některá z čidel již neměří reálná data. Poruchy čidel a ústředěn jsou u dlouhodobých experimentů běžné a byly zaznamenány i u předchozího laboratorního experimentu Mock-up-Cz. Ve zprávě jsou dále prezentovány výsledky z monitoringu vybraných čidel za celou dobu provozování experimentu od 12/2012 do 8/2018. Prezentovány jsou zejména hodnoty z čidel HTB (HTB – hydraulická tlaková buňka) a teploměrů. Zpráva dále obsahuje vybrané výsledky monitoringu z okolního prostředí experimentu.

V přípravě projektu byla odzkoušena technologie pro odběr vzorků z bentonitové vrstvy. Oproti odběru vzorků při Mock-up-Cz musel být v MCJ odběr prováděn vertikálně, protože horizontální odběr znemožňují podmínky v místě realizace modelu. Model je obklopený horninou. Sledování objemové hmotnosti nebylo technickým zadáním přímo požadováno, ale dle výsledků Mock-up-Cz bylo zřejmé, že v modelu dojde ke změnám objemové hmotnosti a bude důležité sledovat objemovou hmotnost bariéry. Také bylo zřejmé, že vliv na objemovou hmotnost bude mít technologická spára, kterou bylo nutné ponechat z důvodu bezpečné instalace. Důležité pro celkové vyhodnocení projektu jsou tedy mj. poznatky získané z odebraných vzorků, u kterých jsou vyhodnocovány parametry geotechnické (vlhkost, objemová hmotnost, stupeň saturace, hydraulická vodivost a bobtnací tlak), mineralogické (provádí objednatel) a mikrobiologické (externě prováděno v Technické univerzitě v Liberci – TUL).

2 Celkové vyhodnocení projektu podle fází

Projekt byl rozdělen dle Smlouvy o dílo do tří fází a ty pak na jednotlivé etapy, pro které byly určeny dílčí cíle. Po ukončení etapy projektu byly výsledky a průběh prezentovány a předány objednateli výzkumu ve formě dílčích zpráv. V průběhu projektu bylo odevzdáno a objednatelem odsouhlaseno čtrnáct dílčích zpráv. Poslední XIV. dílčí zpráva byla odevzdána v červenci 2018.

V souladu se Smlouvou o dílo byl fyzikální model MCJ umístěn v Podzemní laboratoři Josef (okr. Příbram, obec Chotilsko). MCJ je provozován v rozrážce JP 61, která má délku 8 m, výšku 3 m a šířku 2,8 m. Rozrážka JP 61 je vyražena v granitických horninách (tonalit) Středočeského plutonu.

2.1 Příprava projektu (I. fáze, 2011)

V I. fázi projektu byly realizovány tyto dílčí cíle: Dokončení vrtných prací při přípravě velkoprofilového úložného vrtu; Zahájení základního geotechnického výzkumu použitého bentonitu; Zahájení výroby bentonitových lisovaných prefabrikátů; Zahájení přípravy instrumentace; Testování topidla a Testování sběrného dataloggeru.

Všechny dílčí cíle byly podrobně popsány v I. dílčí zprávě [7], v této zprávě jsou v dalších kapitolách shrnuty důležité poznatky pouze z některých dílčích cílů.

2.1.1 Zahájení základního geotechnického výzkumu použitého bentonitu B 75

Dle technických podmínek projektu bylo zřejmé, že model bude vystavěn z lisovaného bentonitu (cca $\rho_d=1,750 \text{ g/cm}^3$). Lisované bentonitové prefabrikáty musí splňovat obecné požadavky, které jsou na geotechnickou bariéru kladeny. Tyto obecné požadavky byly převzaty v prvních fázích projektu ze zahraničního výzkumu inženýrských bariér, viz [7]. Důležitá je zejména nízká propustnost. Součinitel hydraulické vodivosti nesmí být větší než $k=10^{-12} \text{ m/s}$. Materiál geotechnické bariéry musí mít i schopnost vyvinout bobtnací tlak větší než $\sigma > 1 \text{ MPa}$, viz další text.

Zhotovitel disponuje přístrojem na měření propustnosti bentonitů s velkou objemovou hmotností (lisovaných). Je to zařízení, které je speciálně vyvinuto pro měření propustnosti bentonitů a které současně měří i bobtnací tlak.

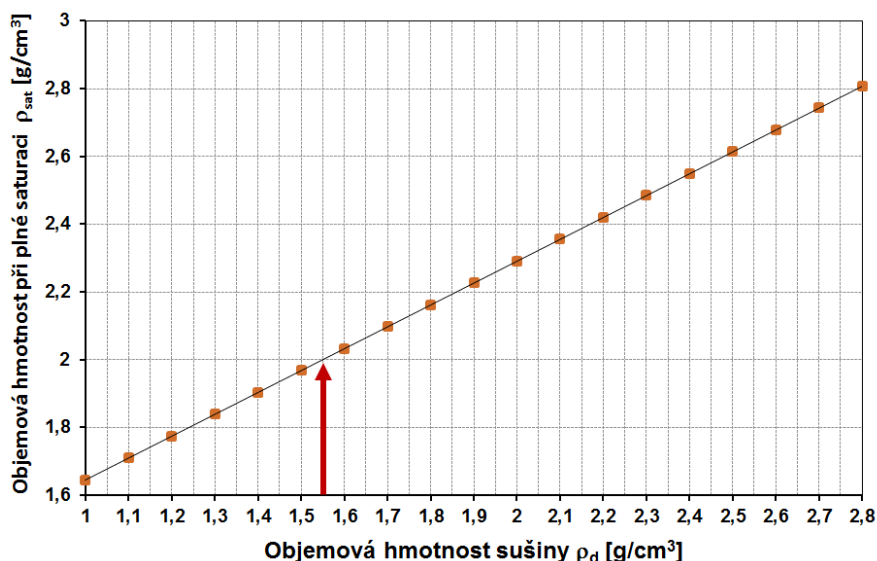
Pro MCJ byl pro geotechnickou bariéru vybrán český bentonit „Bentonit 75“ z úpravny v Obrnicích, kterou provozuje Keramost a. s. Výběr materiálů byl proveden na základě poznatků z Mock-up-Cz a teplotních, hydraulických a mechanických požadavků kladených na buffer.

Požadavky byly v přípravě projektu převzaty z požadavků pro KBS-3V z roku 2006 [8]:

1. **na nízkou hydraulickou vodivost** - tj. max. $k=10^{-12} \text{ m/s}$
2. **na objemovou hmotnost při plné saturaci** -
prevence pohybu koloidních látek - $\rho_{\text{sat}} > 1,650 \text{ g/cm}^3$
vyloučení mikrobiologické aktivity - $\rho_{\text{sat}} > 1,800 \text{ g/cm}^3$
3. **na bobtnací tlak** - zajištění těsnosti a dotěsnění prostoru musí být $\sigma_{\text{sw}} > 1 \text{ MPa}$

Předpokládalo se, že průměrná objemová hmotnost sušiny bude po plné saturaci okolo $1,55 \text{ g/cm}^3$. Podle výsledků realizovaných zkoušek (viz Obr. 2), při předpokládané průměrné objemové hmotnosti, bentonit B 75 splňuje výše uvedené požadavky na bobtnací tlak,

hydraulickou vodivost a na objemovou hmotnost při plném nasycení, protože ta se předpokládala okolo 2 g/cm³. Na Obr. 1 je vyznačena červenou šipkou objemová hmotnost při plném nasycení pro předpokládanou objemovou hmotnost sušiny 1,55 g/cm³.



Obr. 1 - Závislost objemové hmotnosti při plné saturaci na objemové hmotnosti sušiny pro B75 s vyznačením předpokládané objemové hmotnosti sušiny v modelu.

2.1.2 Charakteristika B 75

Na základě výsledků výzkumu byl vybrán vápenatohořečnatý „Bentonit 75“ (B 75). B 75 se těží v ložisku Černý Vrch a je jemně (do 1%) natrifikovaný sodou (uhličitan sodný - Na₂CO₃), i když ho výrobce nabízí jako neaktivovaný bentonit. B 75 je dodáván ve formě jemně mletého prášku s podílem zrn nad 0,063 max. 1%, s vlhkostí 3-12 % (obvykle 8 %) a s pH 7,5, viz [9]. Chemické a mineralogické složení B 75 je popsáno např. v [10], viz Tabulka 1.

Tabulka 1 - Chemické a mineralogické složení bentonitu B75:

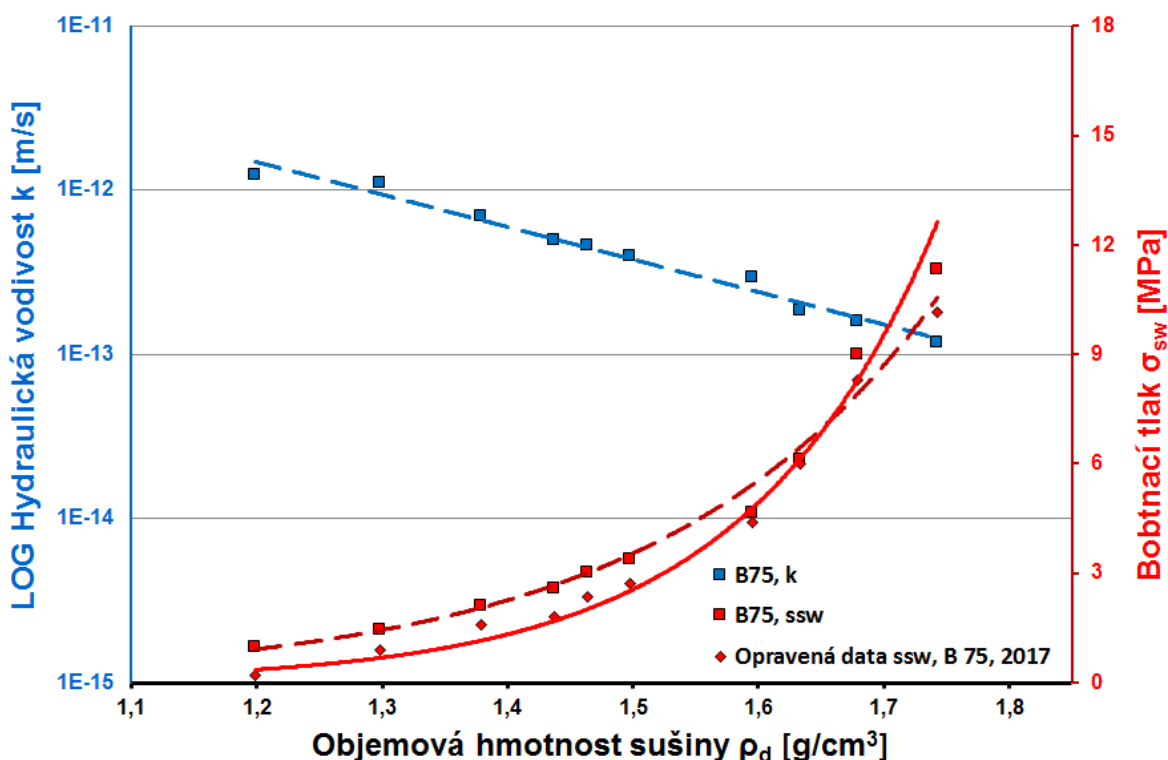
	Content (wt%)	Minerals	Content (wt%)
SiO ₂	51.91	Montmorillonite	75.5
Al ₂ O ₃	15.52	Illite	3.9
TiO ₂	2.28	Kaolinite	3.1
Fe ₂ O ₃	8.89	Quartz	8.1
FeO	2.95	Anatase	2.6
MnO	0.11	Calcite	3.1
MgO	2.22	Siderite	1.8
CaO	4.60	Ankerite	0.5
Na ₂ O	1.21	Cristobalite	1.4
K ₂ O	1.27		
P ₂ O ₅	0.40		
CO ₂	5.15		
Loss of ignition	10.65		
Natural amount of water	6.94 ± 0.43		

*Mineral composition based on chemical composition and X-ray diffraction (XRD) analysis.

2.1.3 Stanovení hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku

Hydraulická vodivost materiálu (k v jednotkách m/s) patří ke klíčovým geotechnickým vlastnostem pro správnou funkci inženýrské bariéry hlubinného úložiště. Hodnoty hydraulické vodivosti závisí zejména na objemové hmotnosti sušiny a mineralogickém složení. Podobně významný je bobtnací tlak bentonitu, který je důležitý pro omezení biologické aktivity v bentonitu a který u bentonitu způsobuje tzv. samohojení (zacelení puklin, spár, apod.)

Zkoušení a vyhodnocení hydraulické vodivosti probíhá na totožných vzorcích jako testy bobtnacího tlaku, tzn. při jedné laboratorní zkoušce v jednom zařízení. Výsledky se vyhodnocují graficky a výsledky pro B 75 jsou uvedeny na Obr. 2. V průběhu projektu byly v rámci jiné práce [11] výsledky bobtnacího tlaku přepočítány z důvodu vlivu sytícího tlaku, a proto byly hodnoty bobtnacího tlaku tímto způsobem aktualizovány i pro experiment MCJ. Vliv sytícího tlaku na bobtnací tlak bentonitu je vykreslený na Obr. 2. Pro porovnání hodnot mezi zatíženým (z odebraných vzorků z modelu MCJ) a nezatíženým bentonitem B 75 byla využita data aktualizovaná, viz kapitola 6.4.4.



Obr. 2 - Hydraulická vodivost (k) a bobtnací tlak (σ_{sw} – v grafu ssw) nezatíženého B 75 (výsledky z I. dílčí zprávy [7] a z dalších zkoušek realizovaných v CEG [11]). V grafu jsou i aktualizované hodnoty o vliv sytícího tlaku (v grafu označena jako opravená data).

2.1.4 Stanovení Atterbergových mezí a měrné hmotnosti

V rámci výzkumu byly stanoveny mez tekutosti (w_L) a mez plasticity (w_P). Způsob stanovení a popis jsou uvedeny v I. dílčí zprávě [7]. V Tabulka 2 je mimo Atterbergových mezí uvedena i měrná hmotnost B 75. Měrná hmotnost byla používána při vyhodnocení stupně saturace odebraných vzorků z MCJ (viz kapitola 5).

Tabulka 2 - Mez tekutosti, mez plasticity a měrná hmotnost bentonitu B 75:

B 75	
$w_{\text{počáteční}}=$	8%
$w_L=$	210%
$w_P=$	61%
$\rho_s=$	2,823 g/cm ³

2.1.5 Zahájení výroby bentonitových lisovaných prefabrikátů

Bentonitové prefabrikáty byly vyráběny na lisu s maximálním tlakem 300 tun. Byly lisovány na objemovou hmotnost sušiny ve vysušeném stavu okolo 1,75 g/cm³, průměrná objemová hmotnost sušiny pro velké prefabrikáty 1,768 g/cm³; rozsah zhruba od 1,65 do 1,80 g/cm³. Vlhkost bentonitu byla cca 7 %. Lisování každého prefabrikátu probíhalo v následujících krocích: příprava materiálu, čištění formy po předchozím lisování (Obr. 3), lisování prefabrikátu – složení formy a plnění formy bentonitem (Obr. 4, Obr. 5 a Obr. 6), rozebírání formy, kontrola a měření vyrobeného prefabrikátu, pečlivé zabalení a označení prefabrikátu. Bylo vylisováno přes 250 velkých obvodových, 50 středních a 8 malých prefabrikátů. Rychlost produkce (lisování) bentonitových prefabrikátů byla cca pět kusů za den. Výstavba fyzikálního modelu v povrchové laboratoři trvala okolo tří měsíců.



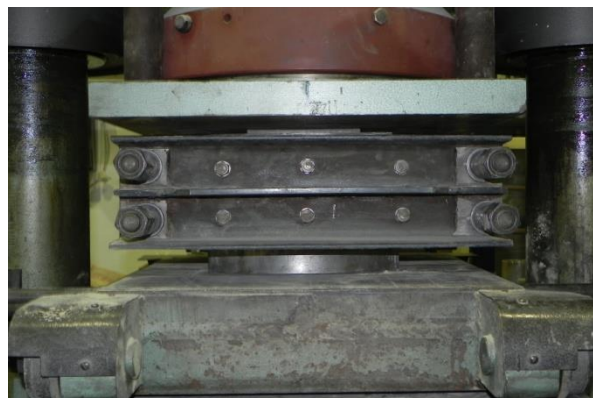
Obr. 3 - Čištění formy pro lisování prefabrikátů.



Obr. 4 - Plnění formy bentonitem.



Obr. 5 - Ruční hutnění materiálu do formy.



Obr. 6 - Složená forma před začátkem lisování (vlevo) a lisování (vpravo).

Při rozebírání formy je nutné postupovat opatrně, aby nedošlo k poškození vylisovaného prefabrikátu. Nejdříve se uvolní přední část formy (Obr. 7 vlevo) a pak se prefabrikát „odrazí“ lisem od zbylých částí formy. Po vyjmutí z formy byl hotový prefabrikát zvážen (Obr. 7 vpravo) a změřena výška každé strany. Vyhovující prefabrikát byl následně zabalen a popsán, viz Obr. 8.



Obr. 7 - Rozebrání formy s prefabrikátem (vlevo) a vylisovaný prefabrikát při vážení (vpravo) [12].



Obr. 8 - Vakuové balení a označení prefabrikátu.

2.1.6 Zahájení přípravy instrumentace

V průběhu I. fáze byla zahájena i příprava instrumentace fyzikálního modelu. Bylo žádoucí geotechnickou bariéru kontinuálně monitorovat a získaná data popisující stav bariéry kontinuálně vyhodnocovat. Vzhledem k zatížení bariéry teplem a saturaci podzemní puklinovou vodou bylo zjevné, že v bariéře bude nutné měřit změny teploty (teploměry), změny tlaku (hydraulické tlakové buňky – HTB) a změny vlhkosti (čidla relativní vlhkosti – Rotronic, odběry bentonitu).

Pro sledování a odečet hodnot tlaku tedy byly použity hydraulické tlakové buňky (HTB), které poskytují přímo hodnoty tlaku. Zhotovitel je využívá pro zjišťování změn napjatosti při ražbě tunelů a již dříve získal zkušenosti při měření vývoje tlaků v geotechnické bariéře (experiment Mock-up-Cz).

Pro popis fyzikálního chování bariéry jako celku je nutné měřit i změny v okolí experimentu, tzn. v hornině. Z tohoto důvodu byla navržena síť monitorovacích vrtů, které byly instrumentovány různými měřicími zařízeními, nicméně nejdůležitější zůstalo sledování teploty.

2.1.7 Vyhodnocení I. fáze projektu

V první fázi projektu byly splněny všechny dílčí cíle projektu dle technického zadání. Hlavními činnostmi byla geotechnická charakterizace vybraného materiálu B75, zahájení výroby bentonitových lisovaných prefabrikátů a zahájení přípravy instrumentace.

2.2 Výstavba fyzikálního modelu (II. fáze, 2012)

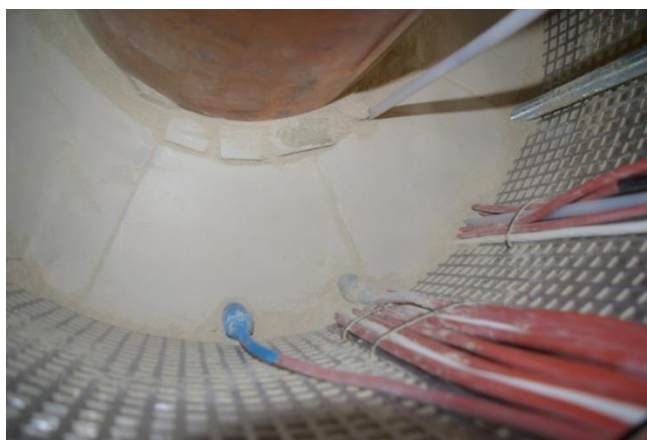
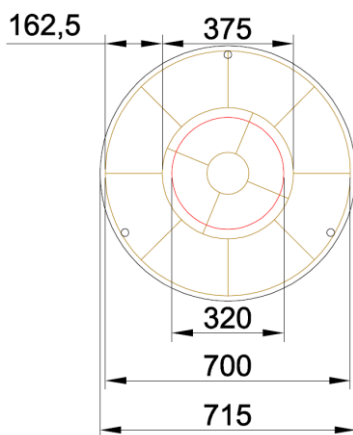
Výstavba modelu byla realizována během jednoho roku. V následujících kapitolách je popsána konstrukce modelu a také jsou popsány některé z realizovaných prací.

2.2.1 Konstrukce modelu Mock-up-Josef

Model byl realizován jako tzv. superkontejner (SK), který byl sestaven v povrchových laboratořích u Podzemní laboratoře Josef. První část modelu představuje bariéra vystavěná z bentonitových prefabrikátů a monitoring bariéry. Druhou částí modelu je topné těleso včetně potřebných čidel a potrubí pro vedení topného oleje. Topné těleso je umístěné uprostřed bariéry z bentonitových prefabrikátů. Další části SK jsou montážní dno, víko, závitové tyče a krycí plášť (obal) z korozivzdorné ocele.

Celkové rozměry SK byly: výška 2210 mm a průměr byl 715 mm. Model byl po výstavbě uložen do velkoprofilového vrtu (úložné studně) o průměru 750 mm a hloubce 2800 mm.

Základní půdorysné rozměry SK jsou uvedeny na Obr. 9. Spáry mezi topným tělesem a velkými bentonitovými prefabrikáty a mezi prefabrikáty a vnějším perforovaným pláštěm byly zaplněny zásypaním z práškového bentonitu a z úlomků bentonitových prefabrikátů, viz Obr. 9 vpravo. Před stavbou a v průběhu výstavby geotechnické bariéry se zvenku plášť SK obalil strečovou PE folií, která chránila bentonitové prefabrikáty před vzdušnou vlhkostí. Během výstavby byly prefabrikáty před vzdušnou vlhkostí také chráněny přesypáním sypkým bentonitem B 75.



Obr. 9 - Vlevo základní půdorysné rozměry modelu: 715 mm celková šířka SK; 700 mm je vnější průměr bentonitových prefabrikátů, 162,5 mm je šířka velkých bentonitových prefabrikátů, 375 mm vnitřní průměr velkých bentonitových prefabrikátů, 320 mm je průměr topného tělesa. Vpravo na obrázku jsou u topného tělesa zřejmé úlomky bentonitových prefabrikátů a zásep z práškového B75 ve spáře.

2.2.2 Dno a víko superkontejneru

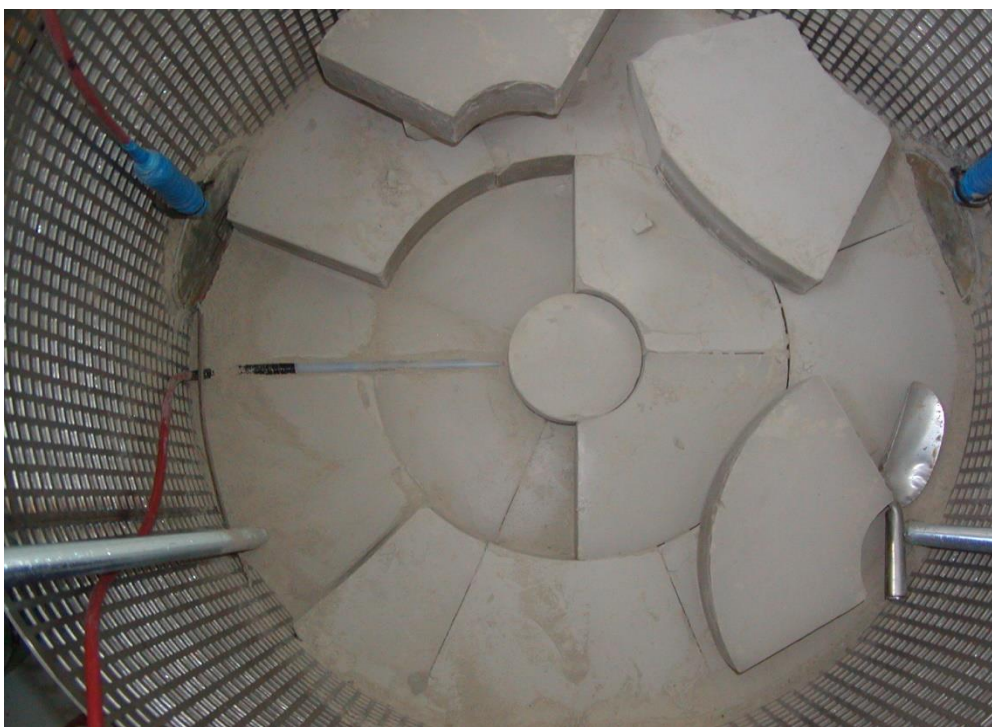
Montážní dno o tloušťce 20 mm slouží jako báze celého modelu. Před výstavbou byl ke dnu přivařen první prstenec pláště (celkem čtyři prstence). Po přivaření pláště mohla začít na dnu výstavba modelu. Víko (tloušťka 20 mm) modelu bylo nainstalováno před převozem modelu k místu uložení. Víko a dno SK byly vyrobeny z korozivzdorné oceli 1.4541/17248. Po domluvě s objednatelem byl použitý materiál pro dno, víko a plášť (viz 2.2.3 kapitola)

konzultován s Ing. Kotnourem ze Škody JS a odpovídá předpokládanému materiálu pláště vnitřního pouzdra UOS.

2.2.3 Plášť superkontejneru

Oproti původnímu návrhu došlo ke změně způsobu úpravy materiálu pláště SK. Tahokov byl nahrazen speciálně děrovaným nerezovým plechem. Děrovaný plech, vzhledem k velikosti děr, by měl více umožnit (potvrdí případné rozebírání modelu) bobtnání bentonitu do mezery mezi SK a povrchem úložného vrtu.

Pro plášť SK byly objednány čtyři prstence, které se postupně na sebe navařovaly. Plášť byl rozdělen na čtyři prstence pro usnadnění montáže modelu (viz Obr. 10). Děrovaný plech byl dodán specializovanou firmou Perfolinea s.r.o. Výrobní technická specifikace použitého děrovaného plechu: Korozivzdorný plech z materiálu 1.4541/17248; děrování čtvercové řadové 10x10 mm; rozteč mezi středy děr 15 mm, materiál tloušťka 2 mm; vnitřní průměr prstence 711 mm, výška 570 mm, svařeno do kruhu.



Obr. 10 - První část pláště superkontejneru (perforovaný plech) s nosnými závitovými tyčemi a umístěnými prvními vrstvami prefabrikátů.

V místech, kde jsou vedeny kabely od instrumentace, se na plášť tvořený děrovaným plechem přivařily nerezové plechy. Tyto plechy slouží jako ochrana kabeláže proti porušení o děrovaný plech při bobtnání bentonitu (Obr. 11).



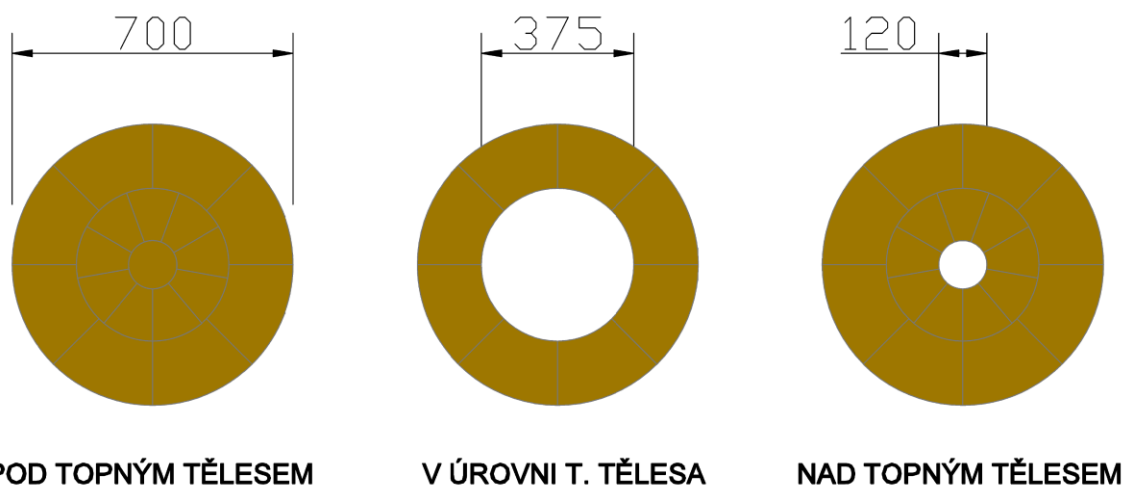
Obr. 11 - Podložení kabelů od monitoringu nerezovými plechy (ochrana proti protlačení kabelů a případnému porušení o hrany děrovaného pláště).

2.2.4 Skladba bentonitové vrstvy modelu

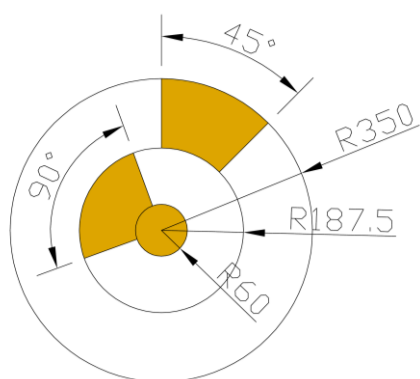
Oproti původnímu záměru vystavět 31 vrstev, je model konstruován ze 33 vrstev bentonitových prefabrikátů. Pod topným tělesem je 6 vrstev, v úrovni topného tělesa je 20 vrstev a nad topným tělesem je umístěno 7 vrstev, viz Obr. 12. Na Obr. 13 jsou zobrazeny půdorysné rozměry bentonitových prefabrikátů (segmentů, tvárnic). Výška vrstvy z prefabrikátů byla do 67 mm. Výška 33. vrstvy bentonitových prefabrikátů byla menší (viz. Obr. 14).

Vnější průměr kruhu tvořeného prefabrikáty je 700 mm. Celkový průměr modelu včetně perforovaného obvodového pláště je 715 mm. Bentonitová vrstva pod topným tělesem je složena ze tří typů bentonitových prefabrikátů (velkého obvodového, malého a středního), viz Obr. 12. Šest spodních vrstev je tedy „plnoprofilových“ (bez středního otvoru). Od sedmé vrstvy byly vynechány malé a střední prefabrikáty, tím se vytvořilo místo pro topné těleso, které bylo instalováno na šestou vrstvu. Nad horní hranu topidla byly při skladbě vrstvy opět použity pouze velké a malé prefabrikáty (bez středních). Zbylým prostorem nad topidlem byly vedeny kabely k monitoringu a trubky k topnému tělesu. Prostor mezi kabely a trubkami se zaplnil zásypaním z práškového B 75 a z rozdrčených prefabrikátů.

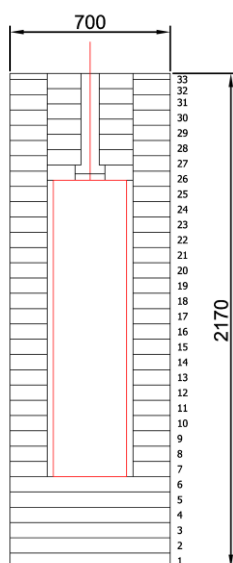
Středové prefabrikáty se také posunuly v horní části experimentu o zhruba 3 cm výše oproti spáře velkých prefabrikátů, protože byly skládány na horní část topidla. Rozdílnost horizontální spáry mezi vnějšími velkými prefabrikáty a mezi středními je patrná na obrázku Obr. 14.



Obr. 12 - Ukázka vrstev (vodorovné řezy) a základní rozměry v mm.



Obr. 13 - Rozměry bentonitových prefabrikátů v mm ve vodorovném řezu vlevo a vpravo foto z výstavby první vrstvy bentonitových prefabrikátů.



Obr. 14 - Hlavní rozměry geotechnické bariéry (33 vrstev, průměr 700 mm a výška 2170 mm) a s červeně naznačeným umístěním topného tělesa, které tvoří ocelový válec o průměru 320 mm a výšce 1300 mm.

2.2.5 Korozní profily

V průběhu výstavby byly do modelu umístěny i korozní vzorky. Tyto vzorky byly soustředěny do dvou profilů (úrovní). Materiál pro zkoušení korozních profilů navrhl ve spolupráci s CEG Ing. Petr Kotnour ze Škody JS a.s. a prof. Ing. Oldřich Matal, CSc. z Energovýzkumu s.r.o. Rozmístění korozních vzorků v segmentech navrhl CEG. Korozní vzorky byly do bentonitových prefabrikovaných segmentů zalisovány. Některé vzorky kovů jsou v experimentu zatíženy nejenom podmínkami v bentonitové vrstvě, ale také rozdílnou teplotou. Soupis vzorků je uveden níže a na Obr. 15 je vyznačeno umístění korozních vzorků.

V modelu umístěné kovové vzorky (viz Obr. 15 vpravo) jsou z materiálů:

1. 1.4541 - nerez – Stejně jako dno modelu, předpokládaný plášť vnitřního pouzdra UOS (čísla vzorků B2-01-01, B2-01-02, B2-01-03)
2. 1.6368 – Uhlíková ocel- kandidátní materiál pro vnější přebal UOS (čísla vzorků B2-02-01, B2-02-02, B2-02-03)
3. Měď – kandidátní materiál pro vnější přebal UOS (označení vzorku B2-03)
4. Titan – kandidátní materiál pro vnější přebal UOS (označení vzorku B2-03)
5. Nikl – kandidátní materiál pro vnější přebal UOS (označení vzorku B2-05)
6. Cínový bronz – kandidátní materiál pro vnější přebal UOS (označení vzorku B2-06)



Obr. 15 - Vlevo umístění korozních vzorků ve 22. vrstvě bentonitových prefabrikátů, vprostřed umístění korozních vzorků ve vrstvě 23. a vpravo sada korozních vzorků před umístěním do modelu.

2.2.6 Topné těleso

Pro simulaci tepelného působení kontejneru s vyhořelým jaderným palivem je v modelu umístěno od 6. vrstvy topné těleso (viz Obr. 14), které zatěžuje bentonitovou vrstvu 90°C. V topném tělese jsou ve speciálním transformátorovém oleji umístěny dvě topné spirály. Provoz topného tělesa je řízen speciálně vytvořeným a odzkoušeným regulátorem s automatickým odečtem teploty.

2.2.7 Výstavba superkontejneru

V povrchové laboratoři u Podzemní laboratoře Josef byla realizována výstavba superkontejneru. Jako místo pro výstavbu bylo vybráno experimentální silo, které se osvědčilo při výstavbě předchozích experimentů, viz Obr. 16. Pro spouštění prefabrikovaných bentonitových prefabrikátů, potřebného materiálu a topného tělesa (Obr. 17) byla nad silo smontována jeřábová dráha. Jeřábová dráha byla také využita pro vyjmutí fyzikálního modelu z experimentálního sila.



Obr. 16 - Umístění modelu Mock-up-Josef v experimentálním silu během výstavby.



Obr. 17 - Spouštění topného tělesa a jeho umístění do modelu.

Výstavba geotechnické bariéry probíhala souběžně s instalací monitoringu (viz kapitola 3). Vzhledem k počtu čidel bylo nutné většinu prefabrikátů dále rozměrově upravovat. Úpravy se týkaly zejména při umístění hydraulických tlakových buněk, teploměrů a vedení kabeláže.



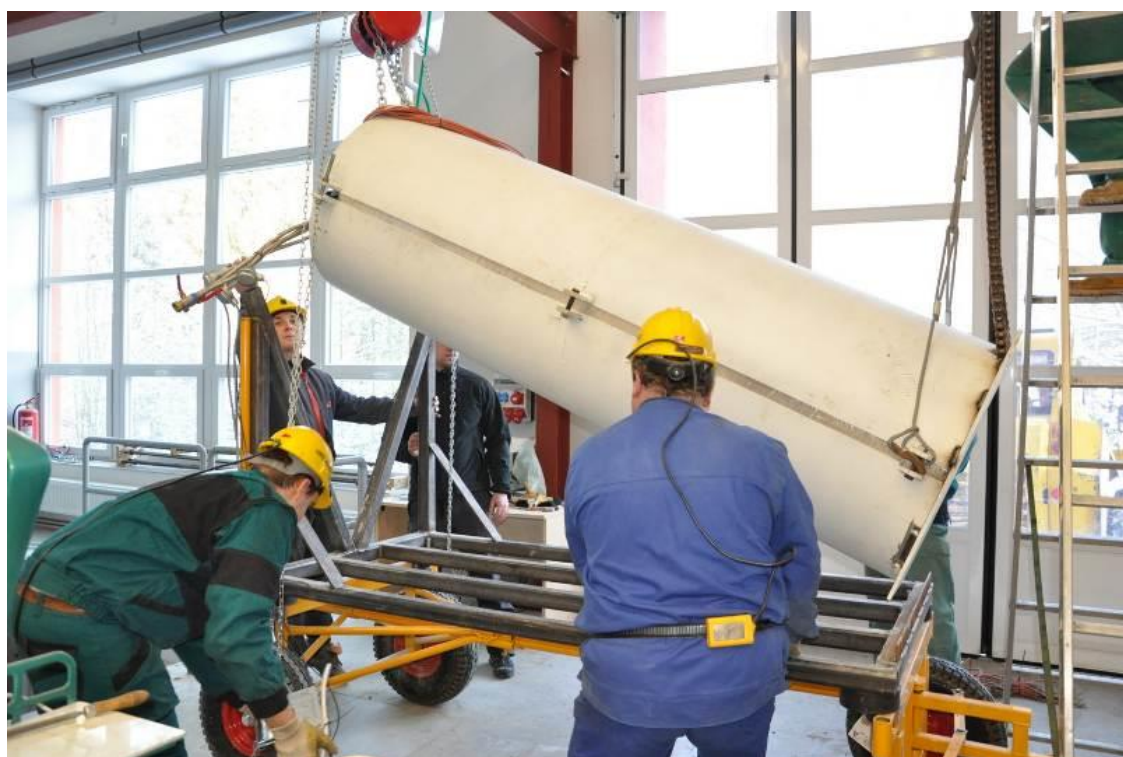
Obr. 18 - Umístění některých hydraulických tlakových buněk (foto II. měřícího profilu).

2.2.8 Transport vyrobeného superkontejneru na místo uložení modelu

Po důkladné přípravě a zkouškách byl v prosinci 2012 fyzikální model MCJ převezen z povrchové laboratoře k úložnému vrtu v rozrážce JP 61. Hmotnost modelu včetně monitoringu a kabeláže činila cca 1950 kg. Model byl převážen ve speciálním ocelovém přebalu o hmotnosti cca 300 kg, který zabezpečil stabilitu modelu při manipulaci. Přebal modelu byl vyroben z ocelové skruže o tloušťce materiálu 10 mm. Skruž byla rozdělena po výšce (2300 mm) na dvě poloviny. Vnitřní průměr skruže odpovídal vnějšímu rozměru superkontejneru a model tak byl bezpečně zafixován pro převoz. Obě části skruže byly k modelu staženy šrouby přes přivařené ocelové patky. Ocelové patky byly využity i při manipulaci s modelem. Jako dno byl ke skruži zesponu přivařen čtvercový ocelový plát ($t=10$ mm). Pro transport byl navržen a zkonstruován transportní vozík. Vzhledem k profilu štoly nebylo možné převézt model ve svislé poloze a model byl uložen na vozík v nakloněné poloze. Nosnost vozíku byla 3 tuny a tvořil ho podvozek a transportní rám (Obr. 20). Model v převozním obalu byl uložen do přepravního rámu v povrchové laboratoři (Obr. 19, Obr. 20) a následně transportován do podzemí pomocí smykem řízeného stroje Locust 853 (Obr. 22, Obr. 23).



Obr. 19 - Model MCJ uložený v ocelovém přebalu při přípravě pro uložení na transportní vozík.



Obr. 20 - Ukládání modelu v povrchové laboratoři do přepravního rámu, který je umístěný na transportním vozíku.



Obr. 21 - Model uložený na transportním vozíku před přesunem do podzemí.

Transport probíhal velice pomalu z důvodu minimalizace otřesů. Pro snížení otřesů byl také přepravní rám oddělen od transportního vozíku pomocí tlumících silentbloků.



Obr. 22 - Transport modelu v povrchovém areálu Podzemní laboratoře Josef.



Obr. 23 - Transport modelu v podzemí.

2.2.9 Spuštění superkontejneru do úložného vrtu

Před spuštěním byl model vyjmut z přepravního rámu (Obr. 24, Obr. 25) a z ocelového přebalu. Vyjmutí modelu z přepravního rámu bylo provedeno pomocí kladkostroje. Přípravky pro zvedání modelu (oko – nosnost 3,2 tuny a kladka - nosnost 2,5 tuny) byly přikotveny na strop štol. Po zvednutí modelu do svislé polohy nad vrtem (Obr. 26, Obr. 27, Obr. 28) byl demontován ocelový přepravní přebal, odstraněna ochranná PE folie z perforovaného pláště SK a model byl spuštěn do úložného vrtu.



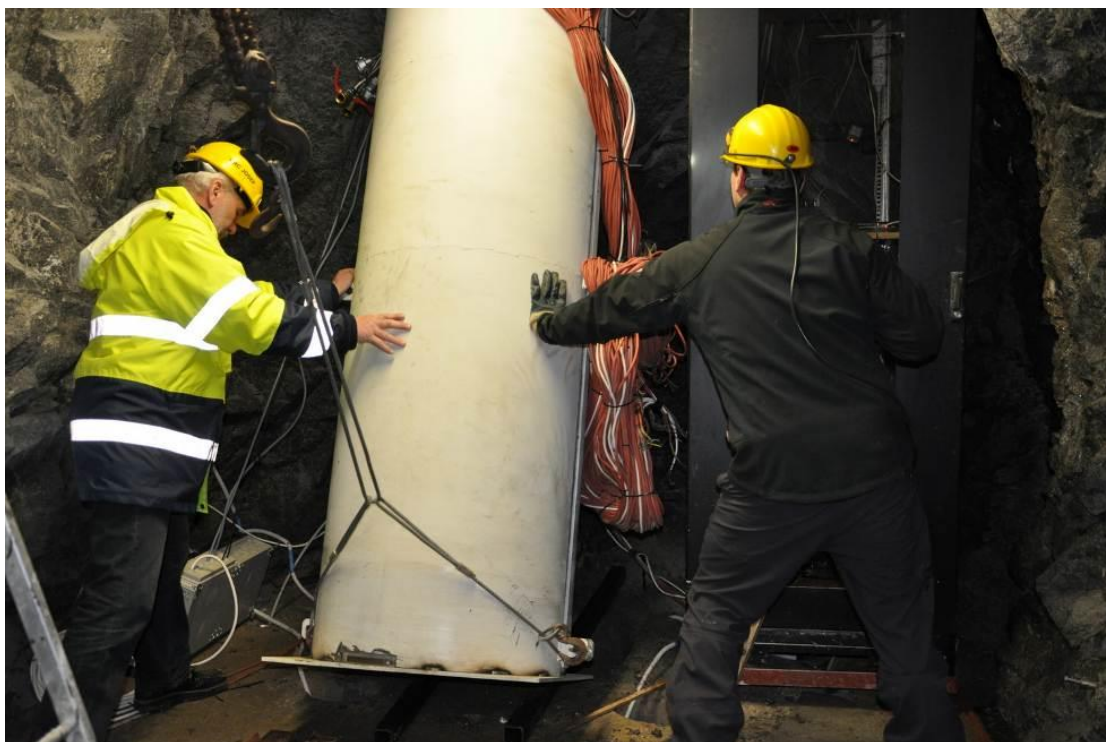
Obr. 24 - Model při přípravě pro vyjmutí z přepravního rámu.



Obr. 25 - Vyjmutí přepravního rámu.



Obr. 26 - Instalace modelu do svislé polohy.



Obr. 27 - Instalace modelu v přepravním obalu do svislé polohy.



Obr. 28 - Model v přepravním obalu nad vrtem.

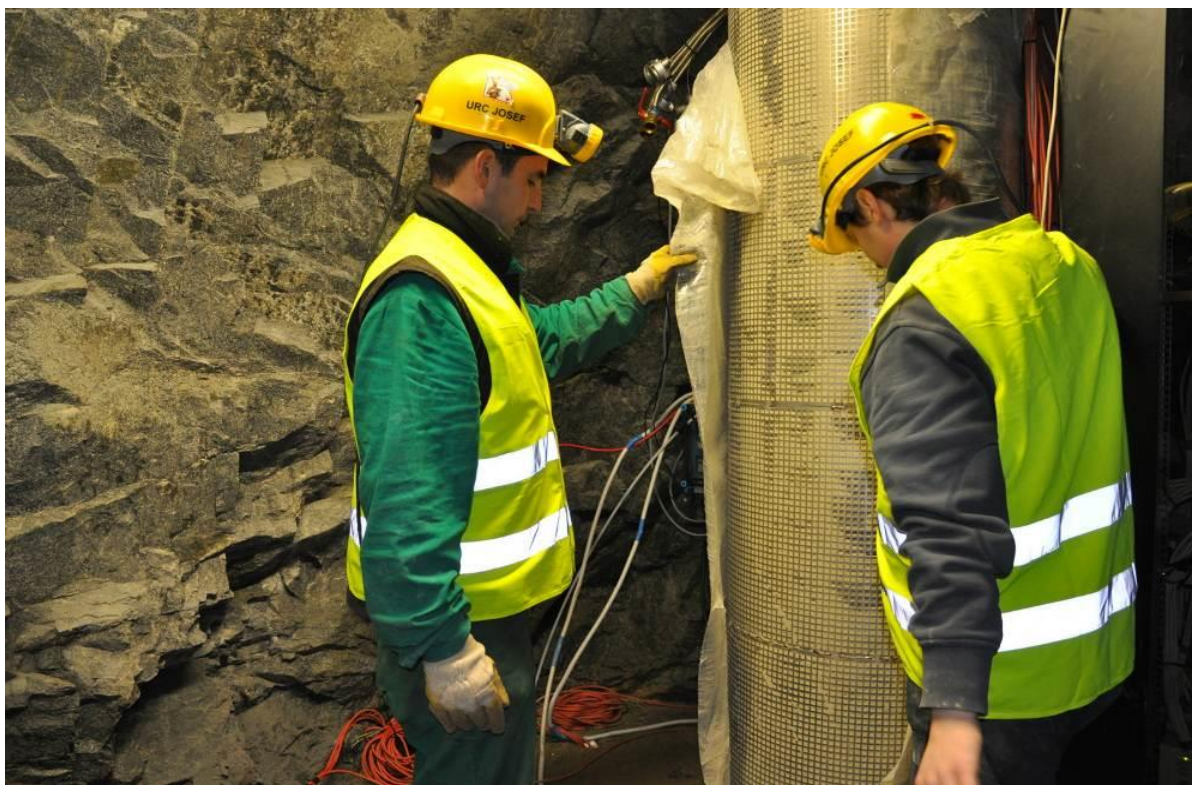
Ještě před sejmutím ochranného přebalu a spuštěním modelu byla veškerá instrumentace napojena na dataloggery a byla ověřena její funkčnost. Instalace modelu je dokumentována na Obr. 29, Obr. 30, Obr. 31, Obr. 32, Obr. 33. Po spuštění bylo víko modelu rozepřeno o strop rozrážky pomocí čtyř ocelových trubek (140/10), viz Obr. 34. Rozpěrné trubky byly dimenzovány na osové zatížení až 4000 kN, které odpovídá maximálnímu teoretickému bobtnacímu tlaku bentonitové bariéry 10 MPa.



Obr. 29 - Sejmutí ochranného přebalu z modelu.



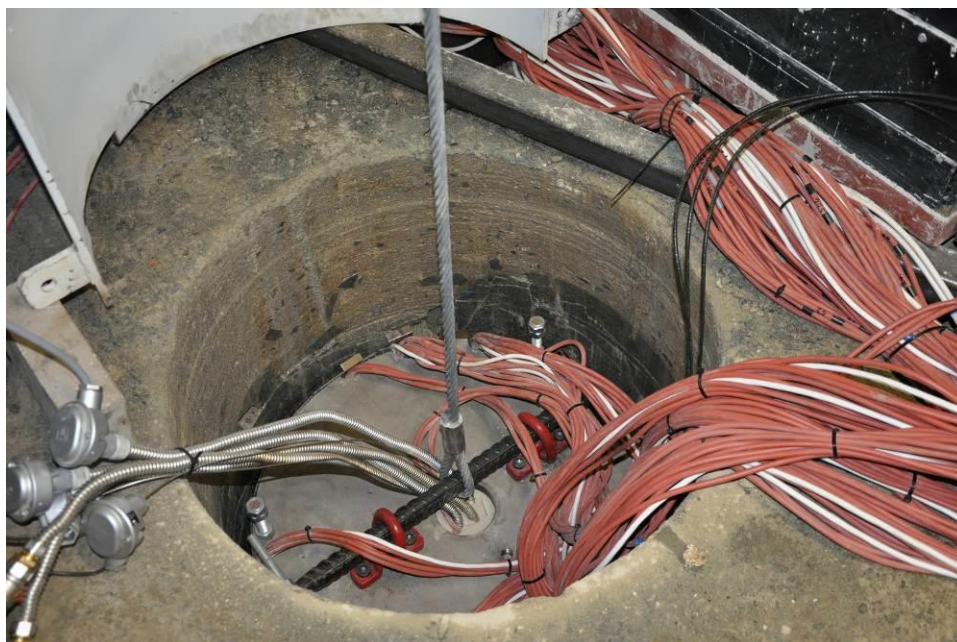
Obr. 30 - Dno modelu nad úložným velkoprofilovým vrtem o průměru 750 mm a hloubce 2800 mm před spuštěním.



Obr. 31 - Odstranění ochranné PE folie z modelu.



Obr. 32 - Spouštění modelu do úložného vrtu.



Obr. 33 - Model ve vrtu.

2.2.10 Uzavření fyzikálního modelu, napojení měřidel na dataloggery

Uzavření modelu nebylo oproti původnímu předpokladu řešeno pomocí šikmých svorníků, ale víko bylo rozepřeno do stropu rozrážky s využitím čtyř rozpěrných trubek (Obr. 34). Monitoring byl napojen před spuštěním modelu. Po zapojení monitoringu byl i odzkoušen přenos dat. Po instalaci ovládacích prvků topidla bylo zahájeno zahřívání bentonitové bariéry (tři týdny od instalace modelu do vrtu). Spára mezi horninou a SK byla pouze z malé části zaplněna křemičitým pískem. Větší vyplnění spáry neumožnilo decentralizované uložení modelu ve vrtu.



Obr. 34 - Obrázek po uzavření modelu rozpěrnými trubkami.

2.2.11 Test monitoringu

Vzhledem k nemožnosti výměny čidel v průběhu experimentu bylo nutné veškerý monitoring uvnitř geotechnické bariéry okamžitě odzkoušet a připojit na měřící ústředny. Před montáží instrumentace byla v rámci testování monitoringu provedena kalibrace čidel pro měření tlaku a teploty, viz [13]. Použitá čidla jsou blíže popsána v kapitole 3.

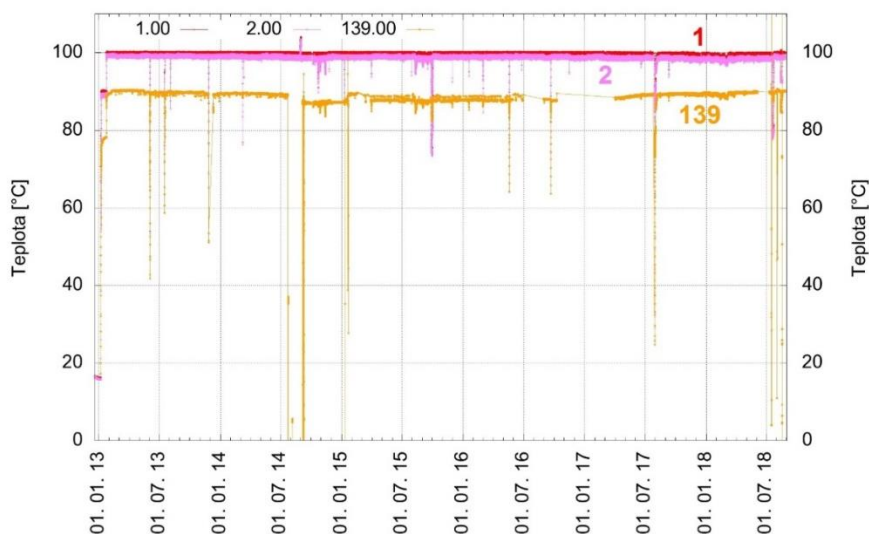
2.3 Provozování experimentu (III. fáze, 2013-2018)

Fyzikální model MCJ byl uložen do připraveného vrtu v prosinci 2012. Ihned po té byl započat kontinuální sběr dat s intervalem 10 minut. Hlavními pracemi ve třetí fázi projektu bylo zajištění provozu experimentu a přístupu k němu (provoz podzemních prostor), kontinuální sběr dat a údržba monitorovacího systému, vyhodnocování získaných informací z monitoringu, reporting prací objednateli výzkumu, realizace a vyhodnocení odběrů bentonitu, atd.

Hlavní milníky při provozu experimentu:

1. 14. 12. 2012 uložení modelu do připraveného vrtu
2. 7. 1. 2013 zapnutí topného tělesa na 90 °C, tj. cca 3 týdny po uložení modelu do vrtu.
3. 23. 1. 2013 zvýšení teploty uvnitř topného tělesa na 100 °C.

Jednou z velice důležitých částí experimentu je topné těleso, které je, stejně jako v projektu Mock-up-CZ, řízeno podle teploty na povrchu topného tělesa. Stejným způsobem byl také řízen například FEBEX experiment [14]. Topné těleso fungovalo bez větších výpadků, krátkodobé výpadky byly způsobeny výpadky proudu a poruchou regulátoru topných těles, které se vždy podařilo odstranit v řádu dnů. Uvnitř topného systému je nastavena teplota na 100 °C, při níž je dosaženo na povrchu topidla teploty 90 °C. Na Obr. 35 je grafické znázornění průběhu teploty v čase z teploměrů č. 1, 2 a 139. Teploměry 1 a 2 měří teplotu oleje v různé výšce uvnitř topného tělesa. Teploměr 139 je umístěný na povrchu topného tělesa (uprostřed výšky topného tělesa, třetí měřící profil). Z Obr. 35 je také zřejmé zvýšení teploty uvnitř topného tělesa v první fázi experimentu z 90 °C na 100 °C.



Obr. 35 - Hodnoty teplot oleje uvnitř topného tělesa po celou dobu provozu experimentu (čidla 1 a 2) a teplota na povrchu topného tělesa (čidlo 139).

3 Instrumentace modelu a instrumentace přírodní horninové bariéry

V zadání projektu a Smlouvě o dílo Mock-Up-Josef byly obě instrumentace zahrnuty ve společné části. Reálně však byly vzhledem k umístění řešení odděleně.

Všechna data z monitoringu jsou kontinuálně sbíraná a ukládána do databáze měřicího systému. Součástí měřicího systému je webové rozhraní, kde lze získat okamžitý přehled o dění v experimentu.

Instalovaná čidla byla soustředěna do devíti měřících profilů I-IX, viz Tabulka 3. Profily I až VI jsou profily v bentonitu. Profily VI, VII a VIII jdou profily instalované do horniny. Profily VI, VII a VIII jsou teplotní profily, které jsou instrumentovány digitálními řetězovými čidly zapojenými paralelně. Profily s převážně řetězovými teploměry VII a VIII byly instrumentovány i teploměry s čidly LM35DZ. Profil IX je, stejně jako teplotní profily VII a VIII, umístěn v hornině. Profil IX obsahuje měřící svorníky s tenzometry, „Crack meter“ tenzometrická čidla pro měření zavírání a rozevírání puklin a také tenzometrická čidla na vzpěrných trubkách.

Tabulka 3 - Přehled měřících profilů

Označení profilu	Umístění	Instalovaná čidla v profilu
Profil I - horizontální	Bentonitová vrstva	Tlaková a teplotní čidla
Profil II - horizontální	Bentonitová vrstva	Tlaková a teplotní čidla
Profil III - horizontální	Bentonitová vrstva	Tlaková a teplotní čidla
Profil IV - horizontální	Bentonitová vrstva	Tlaková, teplotní a vlhkostní (relativní vlhkost) čidla
Profil V - horizontální	Bentonitová vrstva	Tlaková a teplotní čidla
Profil VI - vertikální	Bentonitová vrstva	Teplotní čidla
Profil VII - vertikální	Hornina	Teplotní čidla
Profil VIII – vertikální (kolmý na VII)	Hornina	Teplotní čidla
Profil IX	Hornina	Měřící svorníky, konvergenční profil, posuny

3.1 Měření tlaku v bentonitové vrstvě

Pro měření tlaku se použily hydraulické tlakové buňky. Tato měřidla jsou umístěna v každém měřeném horizontálním profilu v bentonitové vrstvě (I-V), a to jak ve směru radiálním a tangenciálním, tak také ve směru axiálním vzhledem ke svislé ose SK. Toto rozmístění HTB umožňuje měřit vzniklá napětí ve dvou hlavních rovinách SK. Veškeré HTB byly ihned propojeny pomocí kabelů do měřicí ústředny, kde dochází k transformaci naměřených signálů na datové výstupy. Buňky byly po zapojení odzkoušeny pro ověření přenosu signálu do ústředny.



Obr. 36 - Hydraulická tlaková buňka (označení 24) umístěná ve II. měřicím profilu na povrchu bentonitového prefabrikátu.

Počet buněk v jednotlivých měřicích profilech v MCJ – směrem ke svislé ose:

- I. 8 HTB – 3 ve směru axiálním, 3 ve směru radiálním, 2 ve směru tangenciálním
- II. 8 HTB – 3 ve směru axiálním, 3 ve směru radiálním, 2 ve směru tangenciálním
- III. 7 HTB – 2 ve směru axiálním, 3 ve směru radiálním, 2 ve směru tangenciálním
- IV. 7 HTB – 2 ve směru axiálním, 3 ve směru radiálním, 2 ve směru tangenciálním
- V. 7 HTB – 2 ve směru axiálním, 3 ve směru radiálním, 2 ve směru tangenciálním

3.2 Měření teploty v bentonitové vrstvě

Pro měření teploty jsou v MCJ použity již odzkoušené a v praxi ověřené teploměry s čidly LM35DZ (měřicí rozsah do 150°C, viz Obr. 37). Dále se použily digitální řetězové teploměry DS18B20 připojené na společnou sběrnici 1wire. Teploměry s čidly LM35DZ byly použity v předchozím experimentu Mock-up-CZ, kde byly vystaveny vlivu prostředí velice podobnému, jako je u MCJ.

Teploměrná sonda je určena pro měření teploty s využitím ústředny pro polovodičové tenzometry. Je založena na speciálním polovodičovém čidle LM35DZ, které mění svůj odpor téměř lineárně s teplotou. Obvody teploměrné sondy obsahují můstkové zapojení tohoto čidla a zabezpečují napájení můstku vhodným napětím. Toto napětí je odvozeno ze standardního napájecího napětí pro polovodičové tenzometry, které je k dispozici na výstupech použité ústředny. Výstupní napětí můstku je upraveno pro rozsah vstupních napětí ústředny tak, aby měřicí rozsah teplotních čidel byl do 150°C. Čím menší je měřicí rozsah teplotního čidla, tím lze měřit přesnější (menší) difference teploty.



Obr. 37 - vlevo je analogový teploměr s čidlem LM35DZ v ochranné měděné trubičce a vpravo je instalovaný analogový teploměr na povrchu bentonitového prefabrikátu.

Počet teploměrů s LM35DZ čidly v jednotlivých měřících profilech uvnitř modelu MCJ:

- I. 7 teploměrů
- II. 9 teploměrů
- III. 6 teploměrů
- IV. 8 teploměrů
- V. 6 teploměrů

Digitální teploměry DS18B20 jsou přímo kalibrovány výrobcem a jsou schopny měřit v rozsahu od $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$ s volitelným rozlišením 9 – 12 bitů.

Teploměry se připojují pomocí sdílené digitální sběrnice 1wire. Ta umožňuje připojit až 150 čidel. Sběrnice zároveň slouží k napájení čidel.

Využití digitálních čidel DS18B20 na společné sběrnici 1wire má několik výhod:

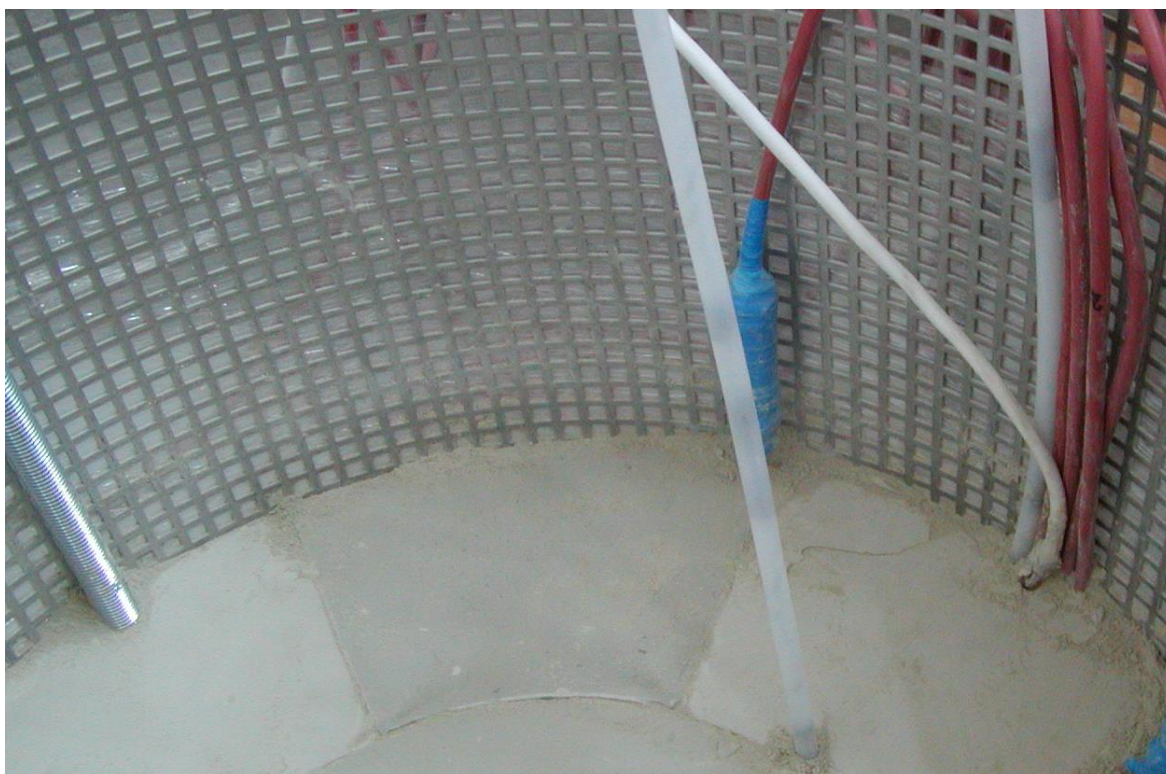
1. Převod hodnot je přímo v čidle a nedochází k problémům na analogovém vedení (útlum, rušení) mezi čidlem a ústřednou.
2. Každé čidlo má svůj jedinečný neměnný identifikační kód uložený do paměti ROM při výrobě, a proto nemůže dojít k záměně čidla.
3. Značná redukce počtu kabelů v experimentu (pro více než 80 čidel je použito pouze 9 kabelů).
4. Tovární kalibrace čidel - není nutné je znovu kalibrovat.
5. Nezávislost měření čidla na délce vedení (sběrnice) k němu.

Nevýhodou je slabá odolnost použité konstrukce čidla proti vlhkosti. Což se prokázalo v průběhu provozování modelu. Všechna řetězová teplotní čidla v bentonitu přestala měřit.

Čidla jsou v experimentu instalována v ochranných plastových trubičkách. V každé trubičce jsou na společném vedení pravidelně rozmístěna měřící čidla DS18B20 tvořící dohromady „řetězový teploměr“ (viz Obr. 38).

V experimentu je instalováno celkem 9 měřících řetězových teploměrů. 4 jsou instalovány v jednom svislém měřicím profilu a po jednom v každém vodorovném profilu (celkem 5 vodorovných):

1. 1x krátký teploměr (vodorovné umístění v úrovni středu topidla) o celkové délce 180 mm, s rozestupem čidel 50 mm,
2. 4x střední (vodorovný – 2 ks pod topidlem a 2 ks nad topidlem) každý o délce 350 mm, s rozestupem 50 mm,
3. 4x dlouhý (svislý – 4 ks v VI. profilu) o celkové délce 2120 mm, s rozestupem čidel 200 mm.



Obr. 38 - Na obrázku jsou dva svislé řetězové teploměry (v ochranných průhledných plastových trubičkách jsou patrná jednotlivá čidla).

3.3 Měření relativní vlhkosti v bentonitové vrstvě

Instalované vlhkoměry jsou průmyslové kabelové sondy Rotronic AG s technologií AirChip 3000 určené pro pevné instalace do agresivního prostředí. Sonda vykazuje velkou teplotní odolnost do 200 °C. Sonda (viz Obr. 39) je určena k připojení na převodník HygroFlex 5 pomocí digitálního konektorového rozhraní. Jako ochrana vlhkostního čidla v hlavě sondy byl vybrán sintrovaný ocelový filtr, jenž dle výrobce vyhovuje prostředí, v němž je sonda umístěna (saturovaný bentonit). Čidla poskytují informaci o relativní vlhkosti a také informaci o teplotě



Obr. 39 - Detail měřící sondy.

Od původního záměru, umístit vlhkostní čidlo v každém profilu, muselo být z důvodu velikosti čidla ustoupeno. Proto vznikla v profilu IV sestava tří čidel Rotronic za sebou umístěných.



Obr. 40 - Svislé umístění Rotroniců (černé kabely) po šířce vodorovného profilu v bentonitovém prefabrikátu. Červené kabely jsou k teplotním čidlům.

3.4 Měření změn napjatosti okolního masivu

Čtyři vertikální monitorovací vrty, umístěné blíž vrtu jsou osazeny měřícími svorníky. Tato měřidla pracují na principu spolupůsobení ocelové tyče s vlepeným tenzometrem. Délka každého měřícího svorníku je tři metry a každý svorník je osazen třemi tenzometry. Tenzometry jsou osazeny od konců svorníku ve vzdálenosti 60 cm a rozstup tenzometrů na svorníku je 90 cm.



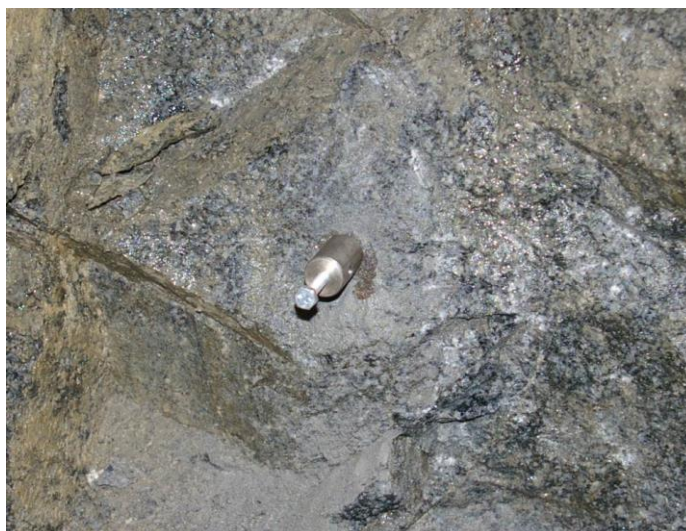
Obr. 41 - Měřící svorníky (vlevo) a osazené čtyři svorníky v blízkosti ukládacího vrtu.

3.5 Měření teplotních změn v okolí vrtu s modelem

Ve vertikálních vrtech pro měření teploty je každých 30 cm po jejich výšce umístěno teplotní čidlo tak, aby bylo dostatečně popsáno teplotní pole okolo experimentu. Po instrumentaci vrtu teplotními čidly byl zbývající volný prostor uvnitř vrtu zainjektován „výplňovou“ hmotou. Pro osazení monitorovacích vrtů teplotních změn jsou použita stejná čidla jako v případě instrumentace u superkontejneru.

3.6 Měření poměrné deformace okolního masivu

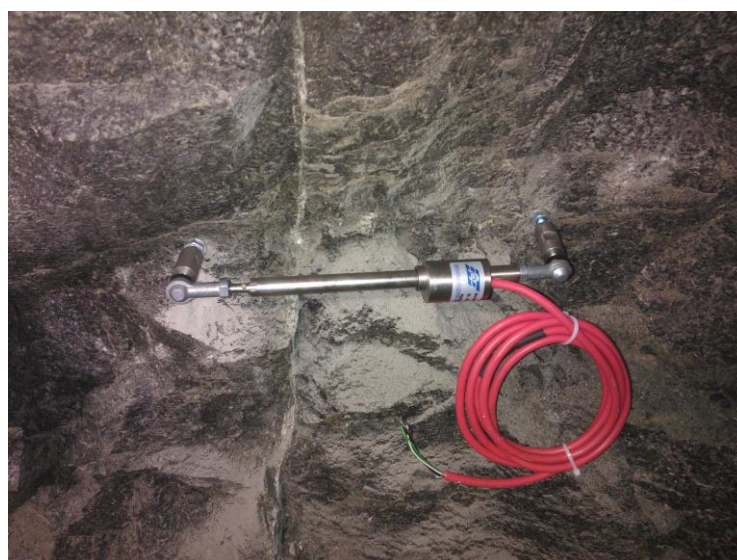
Pro celkový popis přetvoření výrubu rozrážky je použito klasické konvergenční měření. Vzhledem k nepříliš velkým rozměrům rozrážky byly instalovány tři konvergenční body (2x stěna a kalota). Toto třibodové schéma bylo doplněno po spuštění modelu o jeden měřící bod na vrchu betonového plata. Čtyřbodové schéma dostatečně vyhovuje k popsání možné příčné deformace rozrážky. Pro konvergenční měření byly vyrobeny a nainstalovány nerezové konvergenční body (Obr. 42).



Obr. 42 - Instalovaný nerezový konvergenční trn na boku rozrážky.

3.7 Měření velikosti trhlin

Pro doplnění geotechnického monitoringu v oblasti rozrážky, kde je umístěn experiment Mock-up-Josef, bylo navrženo sledování rozevírání nebo naopak smršťování již existujících puklin. Pro měření se použily „Crack metry“ EDJ 40V (strunové tenzometry), které jsou určeny pro měření deformací na pevném podkladu (skalní povrch - Obr. 43). Celkem byla vybrána tři vhodná místa pro instalaci tenzometrů.



Obr. 43 - Instalovaný „Crack meter“.

4 Vyhodnocení naměřených dat

Bentonit je v experimentu zatěžován teplem a je saturován vodou z okolního horninového prostředí. Pro sledování probíhajících procesů byla naistalována do bentonitové vrstvy čidla teploty, tlaku a relativní vlhkosti. Změny hodnot těchto veličin ovlivňuje tepelné zatěžování a postupná saturace bentonitové vrstvy. Spolu se sledováním bentonitové vrstvy jsou sledovány změny v hornině a také je sledována teplota uvnitř topného systému.

4.1 Monitoring vývoje tlaků

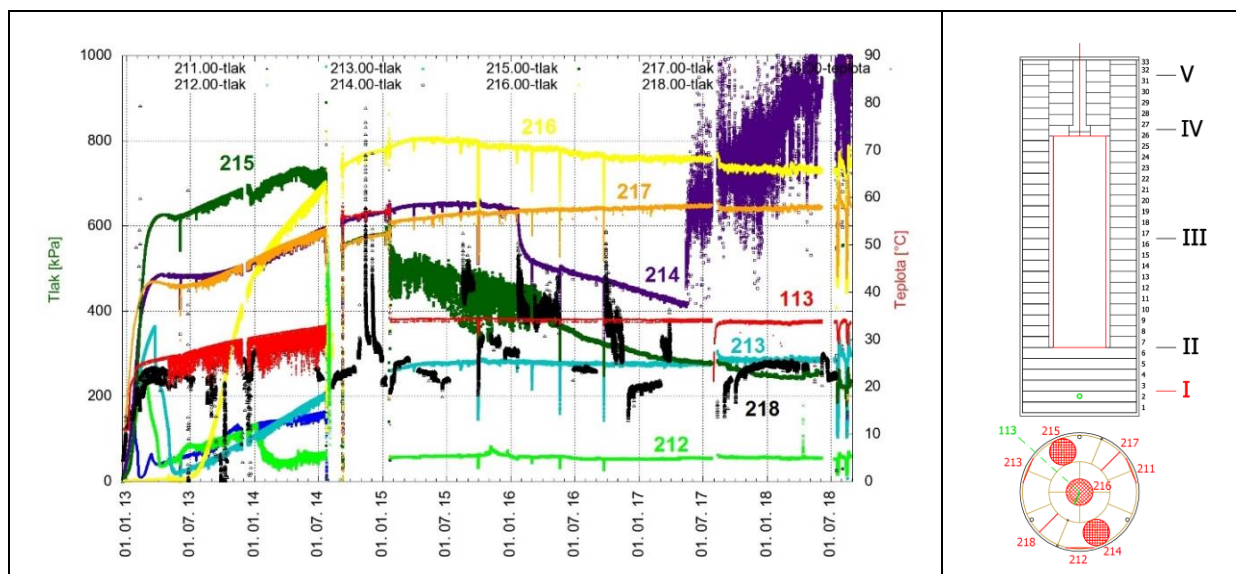
Instalované hydraulické tlakové buňky (HTB) měří vývoj tlaku v bentonitové vrstvě. HTB jsou umístěny v měřicích profilech I až V, a to jak ve směru radiálním, tak také ve směru axiálním a tangenciálním.

4.1.1 Grafické vyhodnocení tlaků v horizontálních profilech

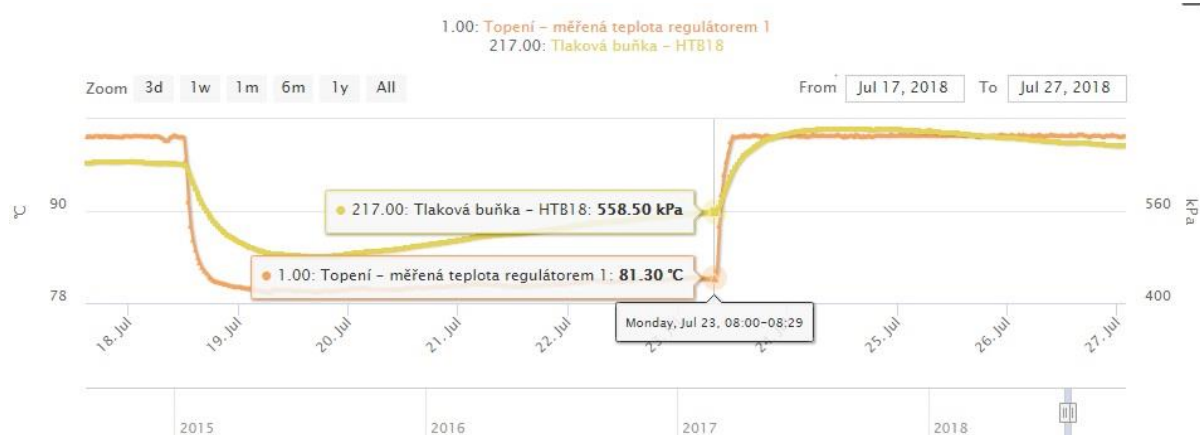
Následující grafy zobrazují průběh tlaků v jednotlivých horizontálních profilech, ve kterých jsou umístěna různě orientovaná čidla. Pro orientaci je vždy graf doplněn obrázkem s umístěním a orientací jednotlivých čidel. Získané hodnoty tlaku jsou zobrazeny v grafu společně s průběhem teploty. Každý graf znázorňuje vždy čidla v jednom z profilů I až V (Obr. 44 až Obr. 50). Graf je vždy pro názornost doplněn řezy modelem. V každém řezu je barevně označena pozice čidla a případně jeho orientace. U vykreslení dat z některých čidel jsou patrné výpadky ústředem. Výpadky v řádu týdnů neohrožují dlouhodobé vyhodnocování experimentu.

Na Obr. 44 jsou zobrazeny hodnoty na profilu I, ve kterém jsou čidla resp. jejich středy umístěny zhruba 14 cm nad dnem modelu. Čidla na pozicích 211, 212 a 213 jsou na plášti a lze předpokládat podle jejich průběhů (pokles hodnot tlaku) v začátcích provozu experimentu, že došlo k deformaci pláště modelu. Čidlo 211 nyní neměří a čidla 212 a 213 měří ustálené hodnoty. Čidlo 216 začalo zaznamenávat větší změny tlaku až začátkem 7/2013 a to bylo zřejmě způsobeno pozdější saturací uprostřed bentonitové vrstvy. Na čidle 216 je nyní viditelný pokles měřených hodnot tlaků. U čidla 217 naopak stále dochází k nárůstu hodnot. Teplotní čidlo 113 zaznamenává hodnotu teploty uprostřed experimentu a zhruba 10 cm nad dnem, tzn. cca 3 cm pod buňkou 216.

Na Obr. 44 jsou zřejmé dva výpadky topného systému v posledních dvou měsících provozování. Výpadky způsobily pokles teploty o cca 20 °C. Jeden z těchto výpadků je graficky zobrazen na Obr. 45. V Obr. 45 je také zobrazen průběh měření tlaku. Pokles tlaku v bentonitu je okamžitý a i přes ustálení teploty dochází k jeho postupnému opětovnému navýšování. Po obnovení činnosti topného systému se tlak zvýší oproti hodnotě před výpadkem a následně probíhá opětovné dorovnání (pokles) tlaku zhruba na hodnoty tlaku před poruchou topného systému. Stejné chování změn tlaku při změně teploty byly zjištěny i u dalších HTB. Je zřejmé, že určitou částí měřeného tlaku je i tlak způsobený teplotou a nejenom bobtnací tlak bentonitu. Dále pak je pravděpodobné, že by došlo k dorovnání tlaku i přes dlouhodobý pokles teploty.

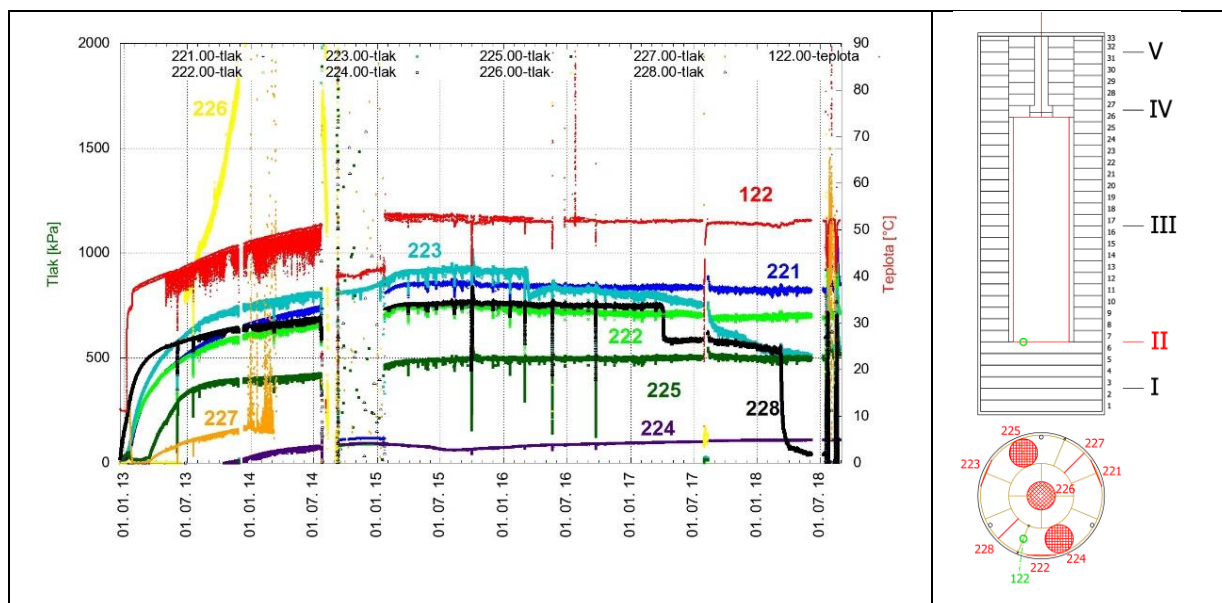


Obr. 44 - Vykreslení hodnot z hydraulických tlakových buněk umístěných v profilu a vykreslení teploty z teploměru 113.00.



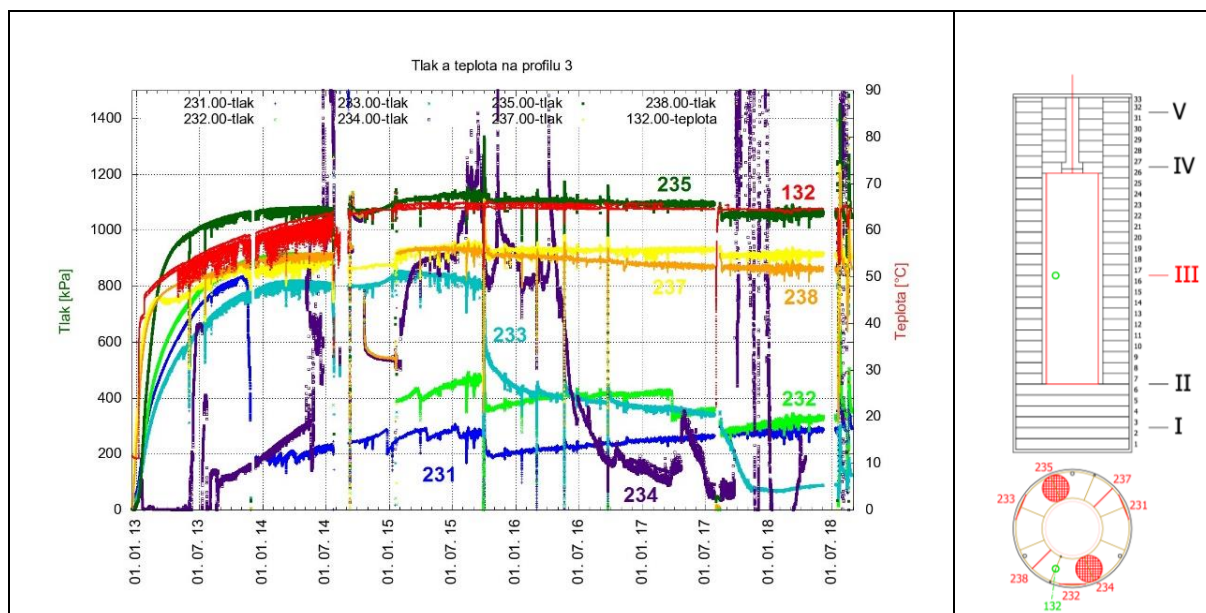
Obr. 45 - Grafické znázornění poklesu teploty vlivem poruch topného systému a vliv poklesu teploty na měřený tlak v profilu II.

Na Obr. 46 jsou zobrazeny hodnoty na profilu II, ve kterém jsou čidla resp. jejich středy umístěny zhruba 36 cm nad dnem modelu. Na Obr. 46 je viditelný nárůst tlaku na čidle 226, který se zastavil až na 5 MPa. Čidlo je nyní nefunkční, a to nejspíše z toho důvodu, že bylo dosaženo maximálního zatížení čidla (tj. 5 MPa). Oproti buňkám v profilu I buňky v profilu II na plášti (221, 222, 223) nevykázaly náhlý pokles a lze tedy předpokládat, že v této výškové úrovni nedošlo k deformaci pláště. U buněk 223 a 228 došlo k náhlým poklesům měřených hodnot, které pouze v jednom případě mohly souviset (pokles u buňky 223) se změnou teploty. Čidla 221, 222, 224, 225 měří již poměrně ustálené hodnoty.

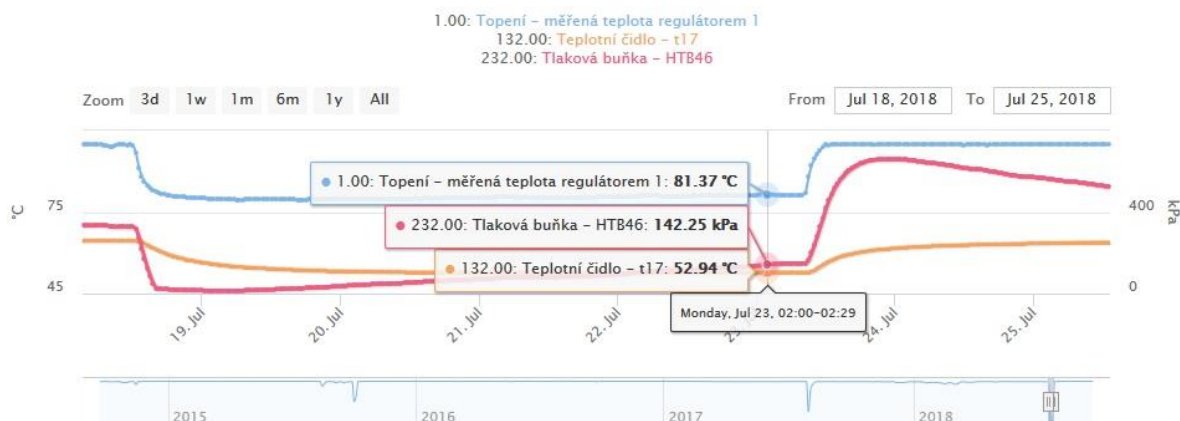


Obr. 46 - Vykreslení hodnot z hydraulických tlakových buněk umístěných v profilu 2 a vykreslení teploty z teploměru 122 (vzdálenost od topného tělesa 7 cm).

Profil III je situován uprostřed výšky modelu. Výsledky jsou zobrazeny na Obr. 47. Za ustálené měření lze pokládat měření na buňkách 235 a 237. U buňky 238 dochází k trvalému poklesu měřených hodnot a u buňky 233 jsou zřetelné poklesy, které mohou být způsobeny uvolněním tlaku na buňky, např. je možná deformace pláště. I u buňky 231 mohlo dojít k uvolnění tlaku (opět nejspíše deformací pláště) a nyní dochází k postupnému nárůstu měřeného tlaku. Stejně jako na profilu I byl vykreslen průběh tlaku při výpadku topného tělesa a při poklesu teploty, viz Obr. 48. Vývoj hodnot tlaku a teploty je téměř stejný jako u vybraných čidel na profilu I.

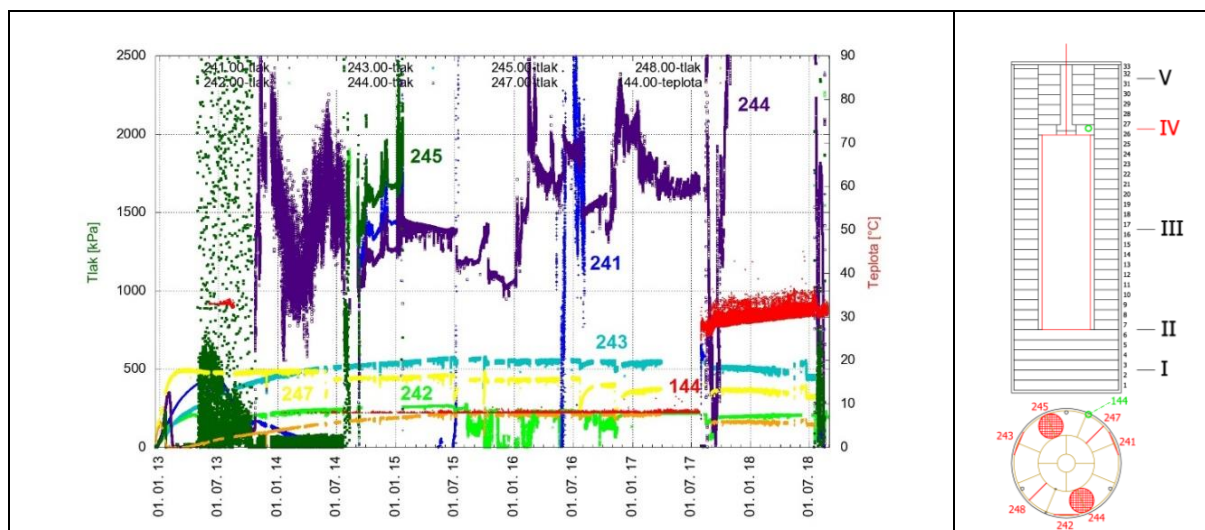


Obr. 47 - Vykreslení hodnot z hydraulických tlakových buněk umístěných v profilu 3 a vykreslení teploty z teploměru 132.00 (vzdálenost od topného tělesa 7 cm).



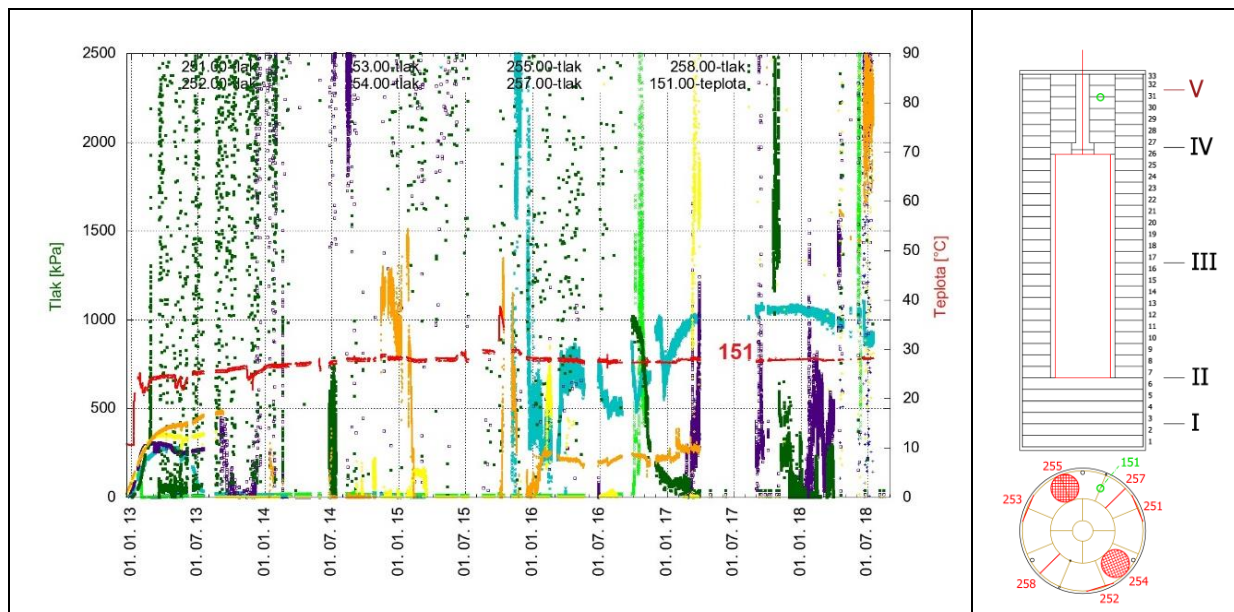
Obr. 48 - Grafické znázornění poklesu teploty vlivem poruch topného systému a vliv poklesu teploty na měřený tlak na čidle v profilu III.

Na profilu IV (viz Obr. 49) lze označit měření na čidlech 242, 243, 247 za dlouhodobě ustálená a na čidlo 247 (např. pokles 1. 7. 16) jsou patrné poklesy měřených dat způsobeny odběrem vzorků v blízkosti čidla (buňky). Čidla 241, 244 a 245 již neměří reálné hodnoty tlaků.



Obr. 49 - Vykreslení hodnot z hydraulických tlakových buněk umístěných v profilu IV a vykreslení teploty z teploměru 144 (umístěného na plášti SK).

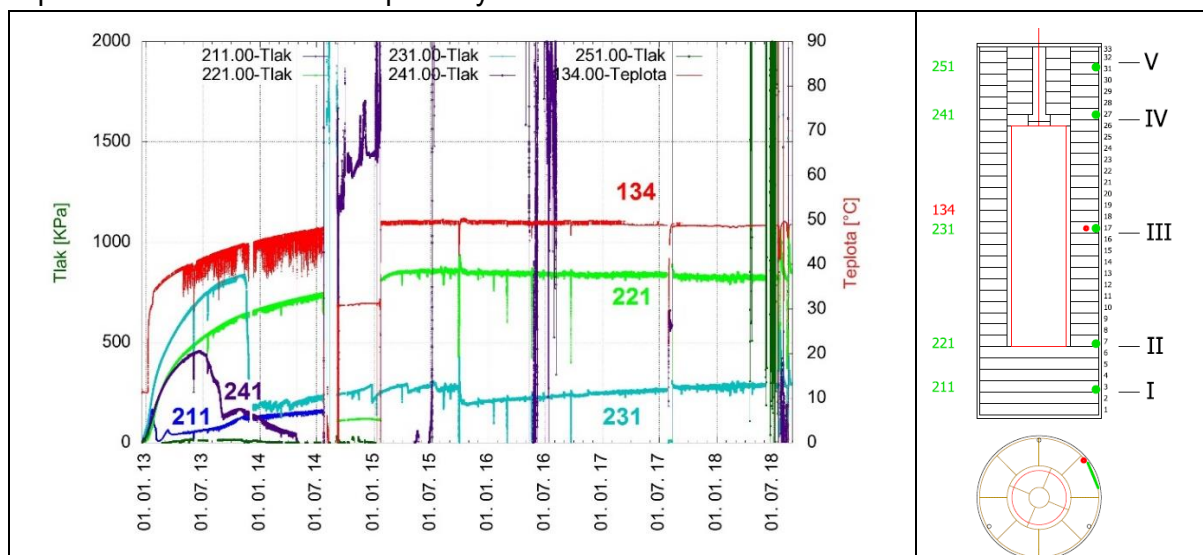
Čidla na profilu V (viz. Obr. 50) jsou od začátku vystavena vyšší vlhkosti a mohlo také dojít k porušení kabelového vedení k čidlům. Kombinace vysoké vlhkosti a mechanické poruchy je zřejmě důvodem, proč tlaková čidla již neměří reálné hodnoty.



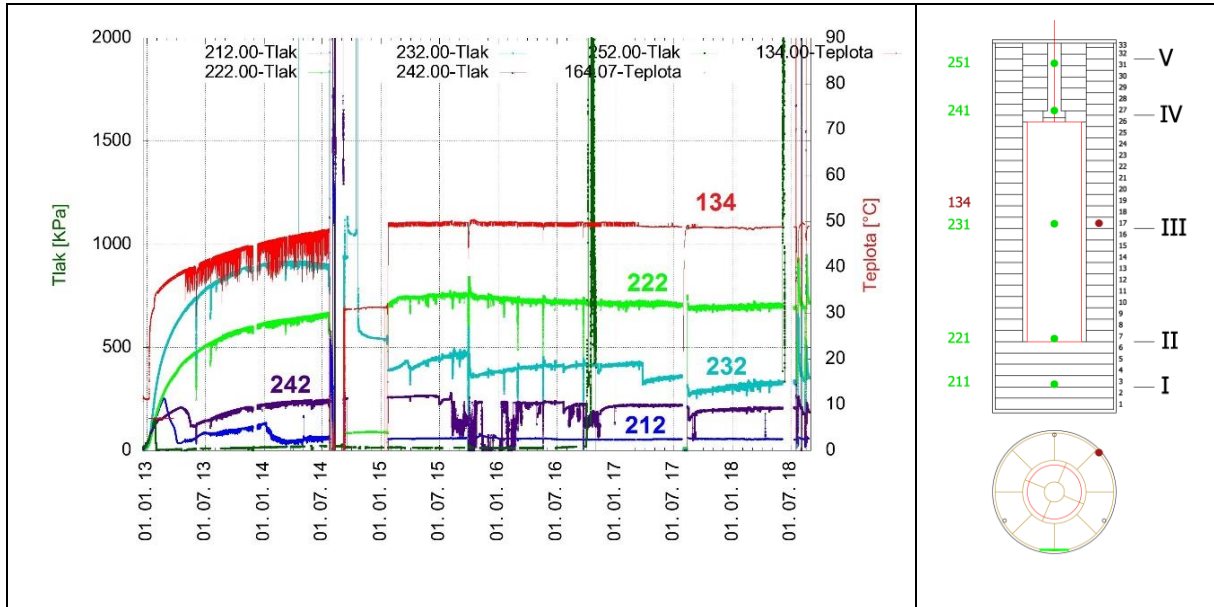
Obr. 50 - Vykreslení hodnot z hydraulických tlakových buněk umístěných v profilu V a vykreslení teploty z teploměru 151.00 (vzdálenost od středu modelu 22,8 cm – umístění cca 15,5 cm pod víkem).

4.1.2 Grafické vyhodnocení tlaků ve vertikálních profilech

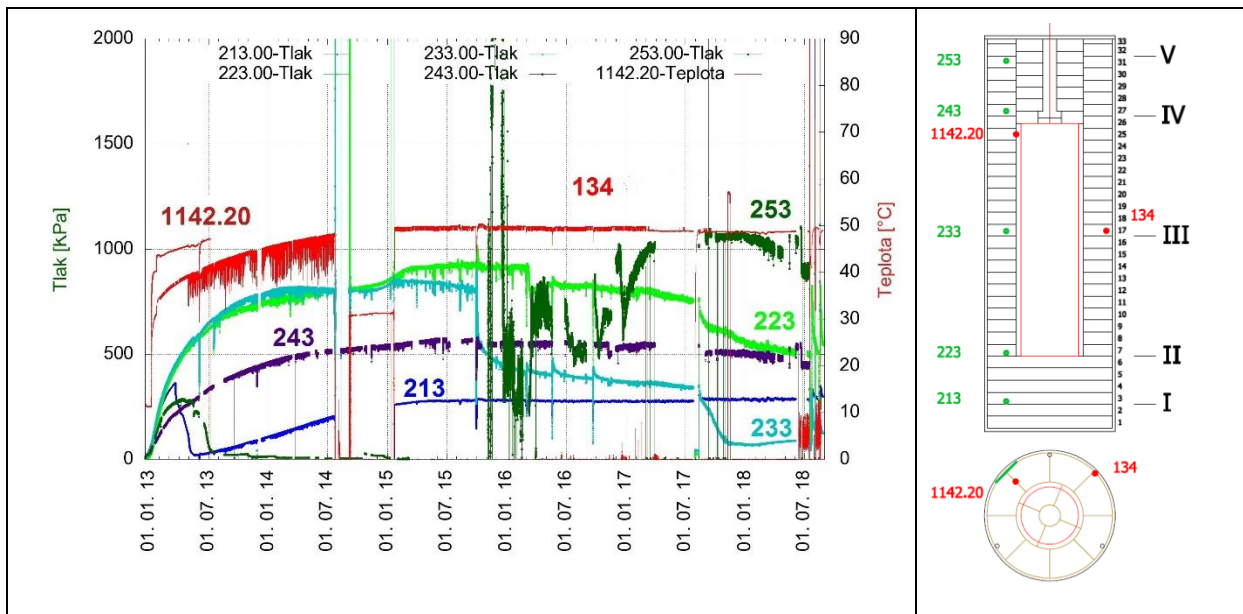
Grafické vyhodnocení podle pozic čidel podává souhrnnou informaci o vertikálním tlakovém profilu. Průběhy měření na jednotlivých čidlech byly diskutovány v předchozí kapitole. Při vyhodnocení čidel podle vertikálních profilů nelze říci, že čidla např. na pozici 1 (5 čidel na plášti modelu, viz Obr. 51) mají stejný či podobný průběh hodnot tlaků. Vliv na nestejný průběhy měřených hodnot (průběh, velikost hodnot) může mít nerovnoměrná saturace bentonitové vrstvy, nerovnoměrné tepelné zatížení, předpokládané deformace pláště, způsob uložení čidla a také poruchy čidel.



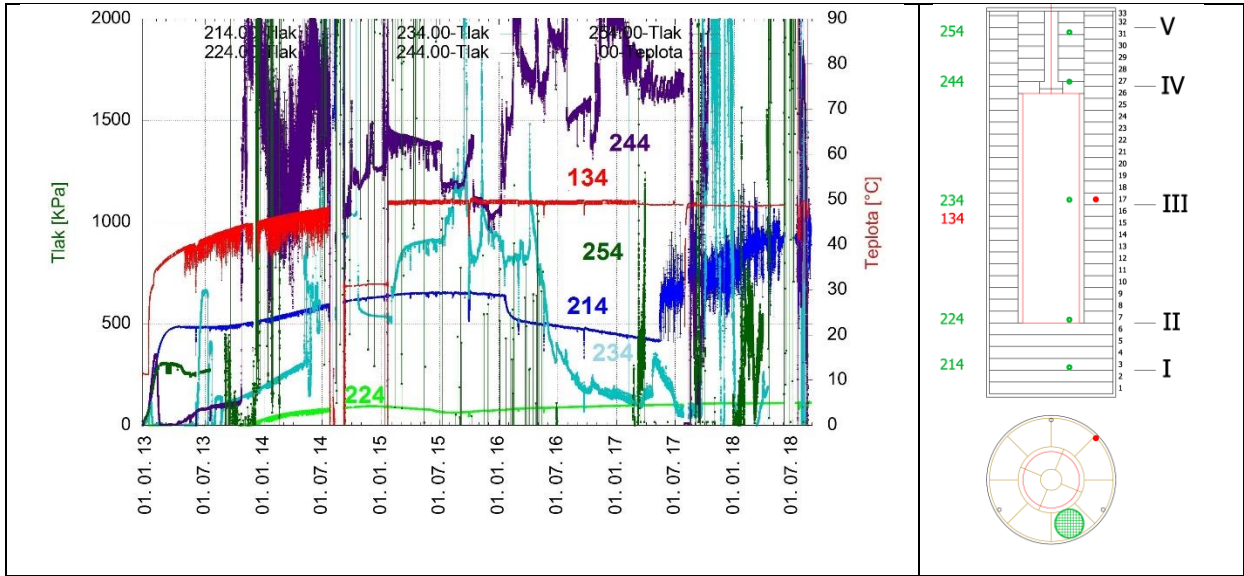
Obr. 51 - Vykreslení hodnot z hydraulických tlakových buněk na pozici 1 a vykreslení teploty z teploměru 134.00.



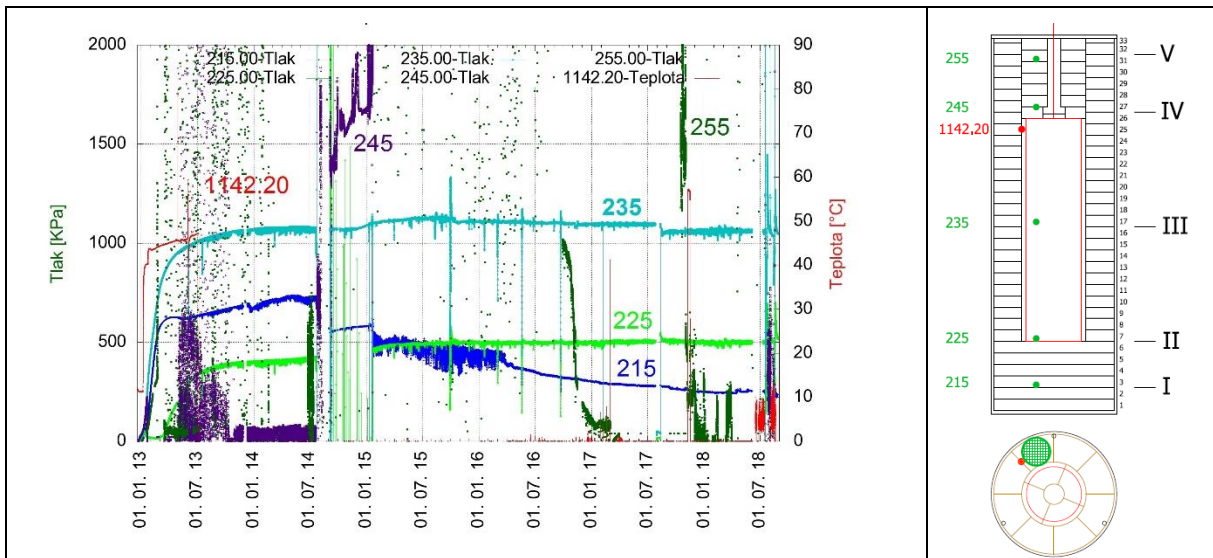
Obr. 52 - Vykreslení hodnot z hydraulických tlakových buněk na pozici 2 a vykreslení teploty z teploměru 134 - čidlo na vnitřním povrchu nerezového pláště uprostřed výšky modelu (pozice čidla viz Obr. 53).



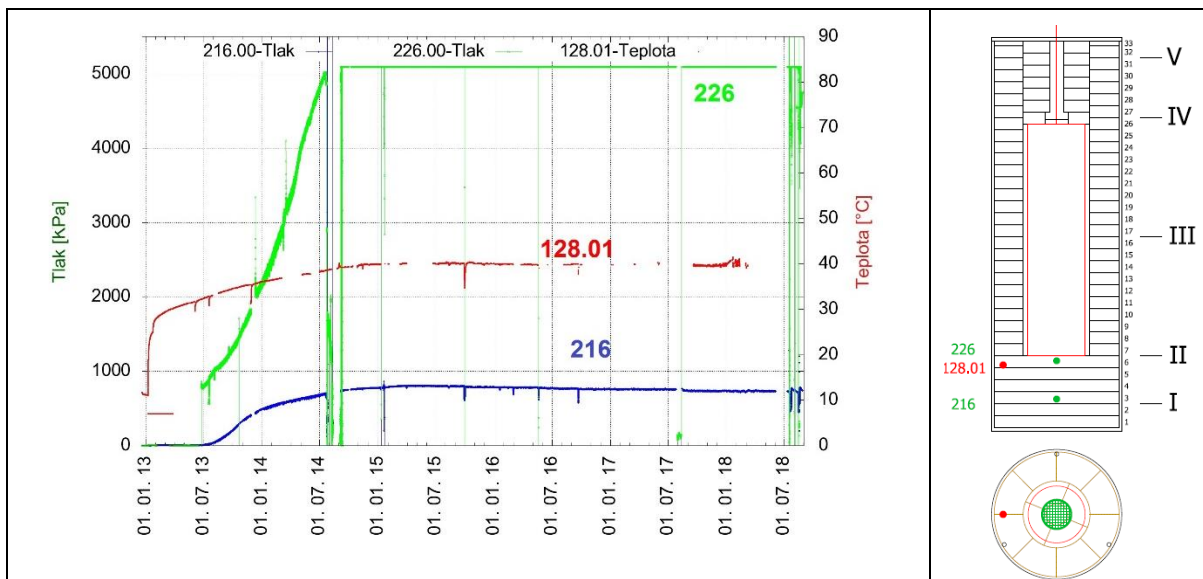
Obr. 53 - Vykreslení hodnot z hydraulických tlakových buněk na pozici 3, vykreslení teploty z teploměru 134 - čidlo na vnitřním povrchu nerezového pláště uprostřed výšky modelu a vykreslení hodnot z čidla teploty 1142.20, které měřilo do 1. 7. 2013.



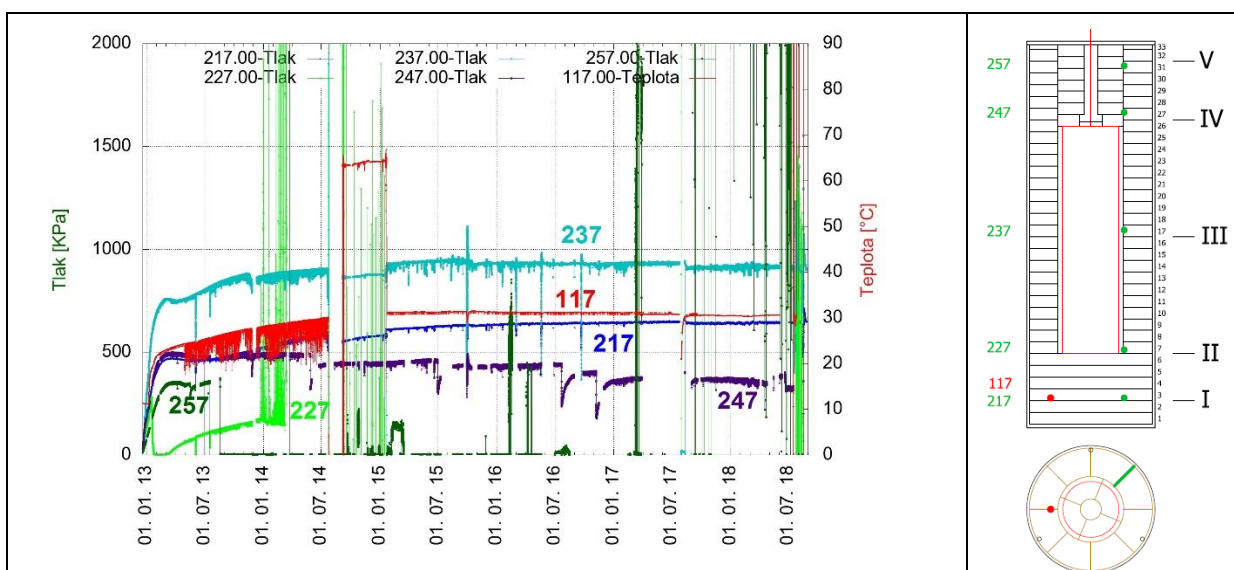
Obr. 54 - Vykreslení hodnot z hydraulických tlakových buněk na pozici 4 a vykreslení teploty z teploměru 132.00.



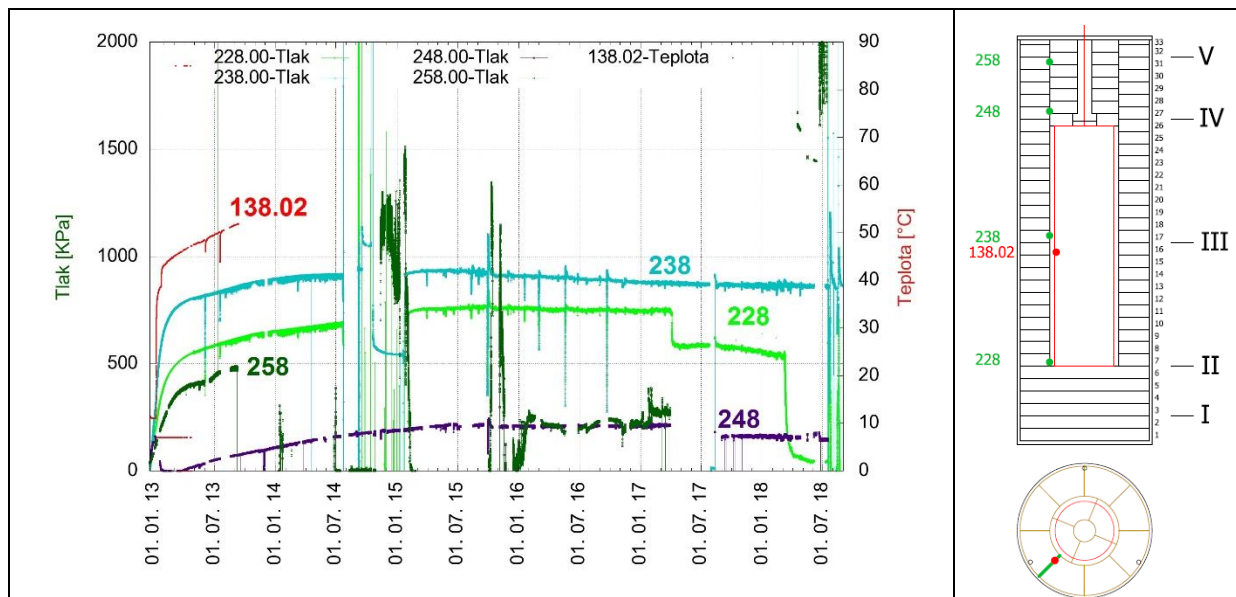
Obr. 55 - Vykreslení hodnot z hydraulických tlakových buněk na pozici 5 a vykreslení teploty z teploměru 1142.20.



Obr. 56 - Vykreslení hodnot z hydraulických tlakových buněk na pozici 6 a vykreslení teploty z teploměru 128.01.



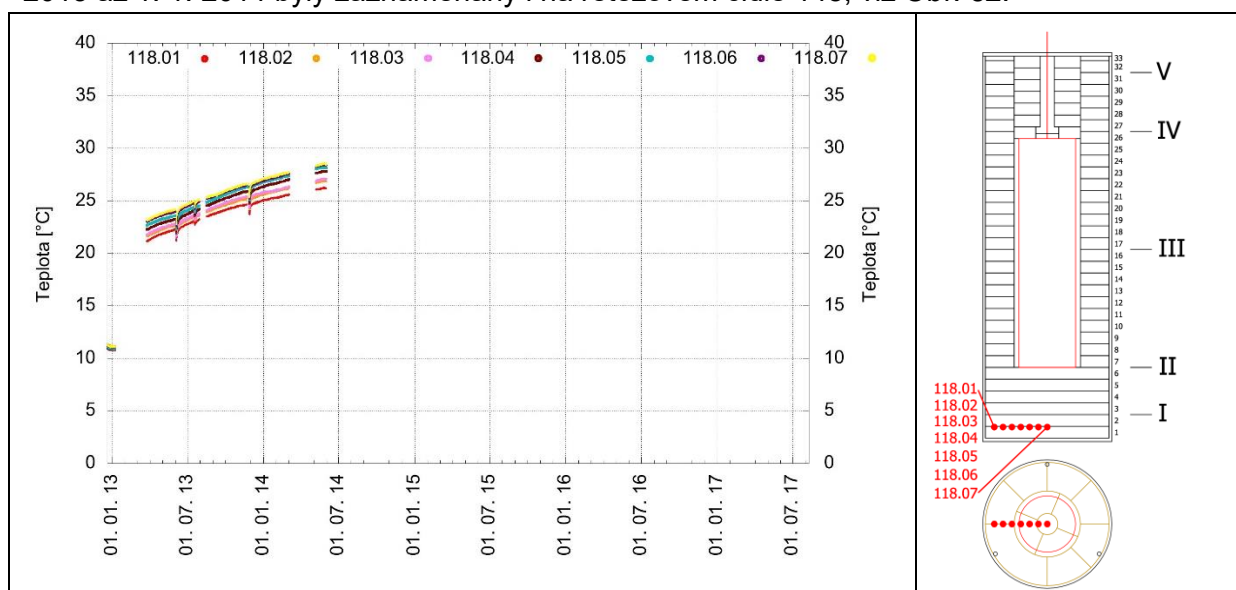
Obr. 57 - Vykreslení hodnot z hydraulických tlakových buněk na pozici 7 a vykreslení teploty z teploměru 117.00.



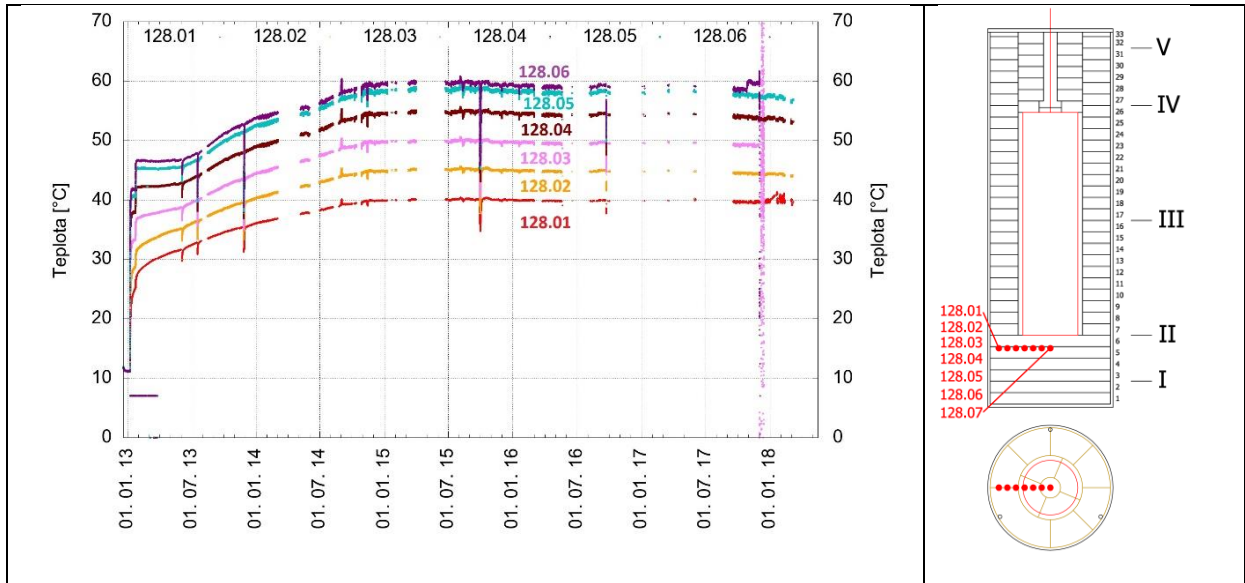
Obr. 58 - Vykreslení hodnot z hydraulických tlakových buněk na pozici 8 a vykreslení teploty z teploměru 138.02.

4.2 Monitoring vývoje teplot v bentonitové vrstvě

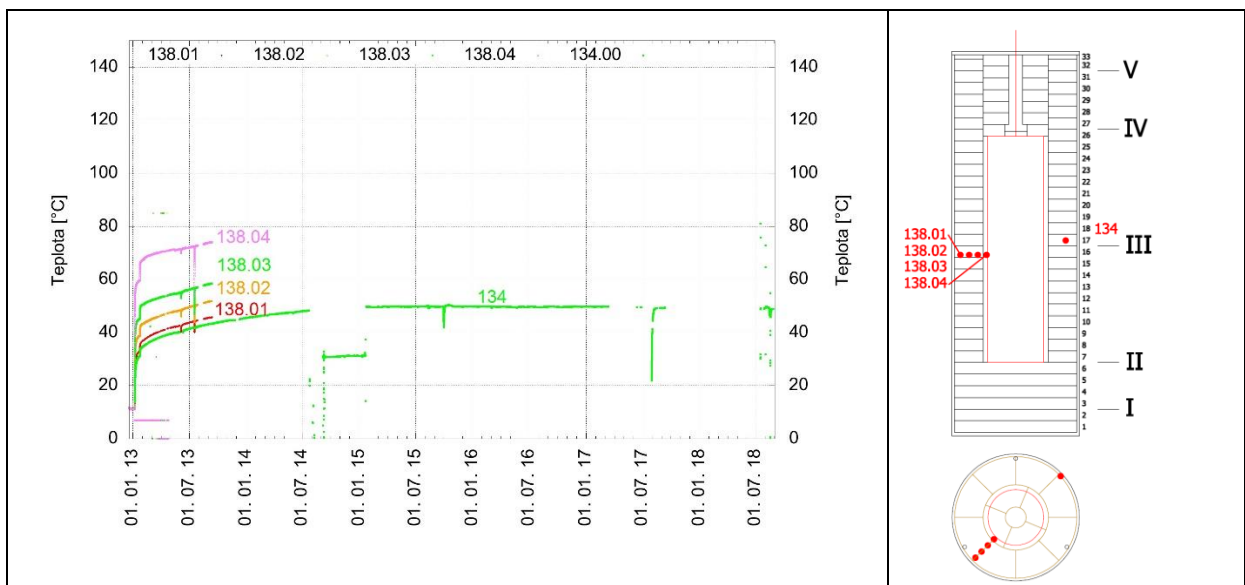
Následující grafy zobrazují průběh v řetězových čidlech, která poskytují informaci o šíření teploty v jednom horizontálním profilu (úsečce), viz Obr. 59, Obr. 60, Obr. 61, Obr. 62 a Obr. 63). I když čidla již neměří, je možné některá data doplnit jinými daty z podobné pozice a případně nasimulovat průběh teploty pro pozici nefunkčního čidla. Např. na Obr. 61 je mimo nefunkčního řetězového čidla vykresleno i analogové čidlo, podle kterého lze nasimulovat průběh na řetězovém čidlu. Důležité je dlouhodobé sledování průběhu teplot, ale v modelu byly detekovány i krátkodobé poklesy či nárůsty, které byly spojeny např. s výpadkem proudu anebo čerpáním vody nad víkem modelu. Čerpání vody bylo zaznamenáno např. na řetězovém čidle 158 (Obr. 63). Tyto krátkodobé změny v období 1. 1. 2013 až 1. 1. 2014 byly zaznamenány i na řetězovém čidle 148, viz Obr. 62.



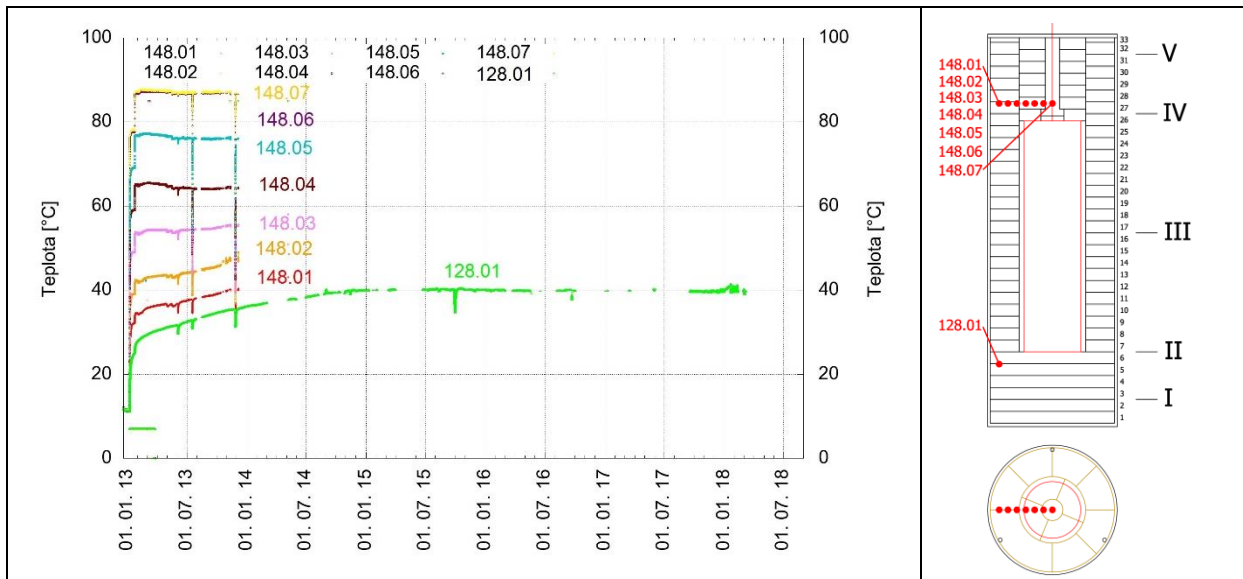
Obr. 59 - Průběh teploty měřený řetězovými čidly 118.01 až 118.07



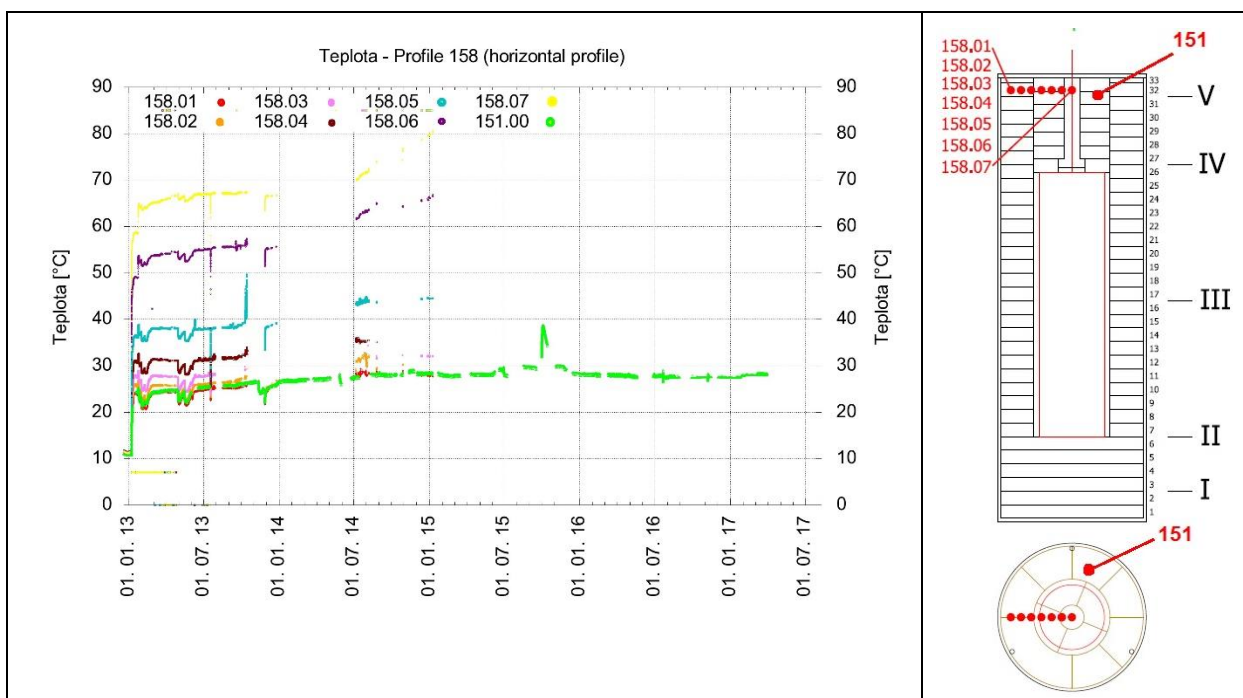
Obr. 60 - Průběh teploty měřený řetězovými čidly 128.01 až 128.07.



Obr. 61 - Průběh teploty měřený řetězovými čidly 138.01 až 138.04, (pro porovnání analogové čidlo 134 - čidlo na vnitřním povrchu nerezového pláště a uprostřed výšky modelu)

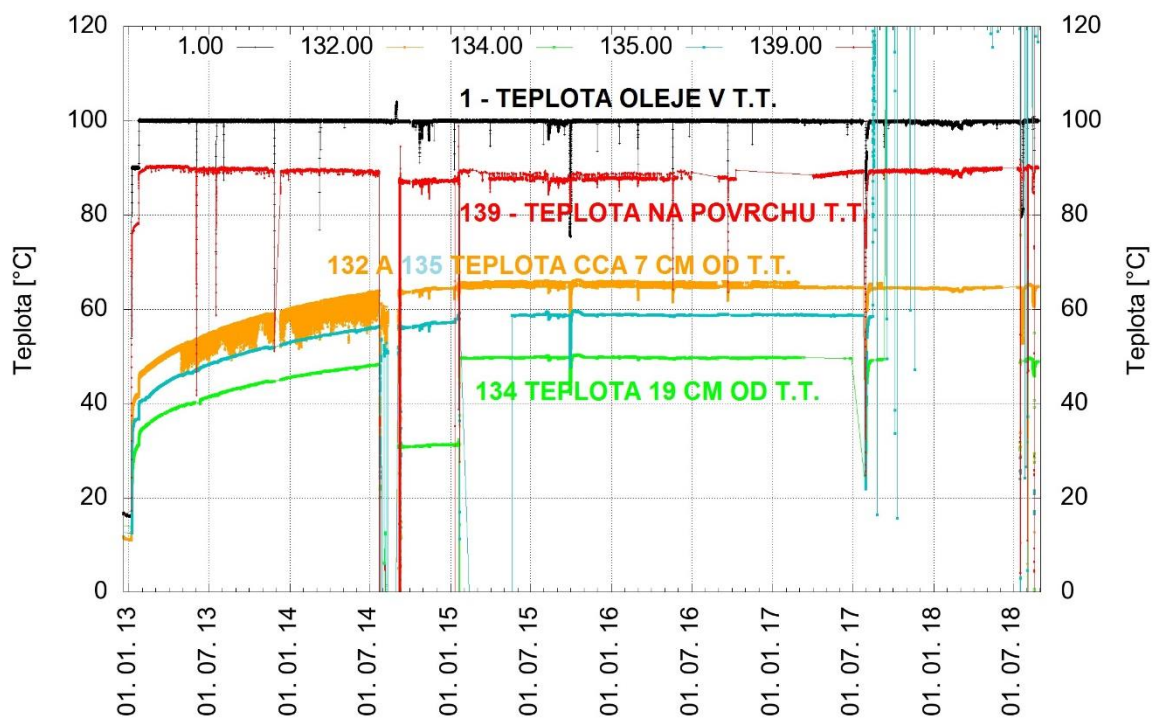


Obr. 62 - Průběh teploty měřený řetězovými čidly 148.01 až 148.07 (pro doplnění čidlo 128.01, které je umístěno na podobné pozici vůči vodorovné ose modelu).



Obr. 63 - Průběh teploty měřený řetězovými čidly 158.01 až 158.07 (pro porovnání čidlo 151).

Teploměry s analogovými čidly ve většině případů měří. Na Obr. 64 je grafické zobrazení teploty v čase z různých čidel, která jsou umístěna zhruba v polovině výšky modelu.



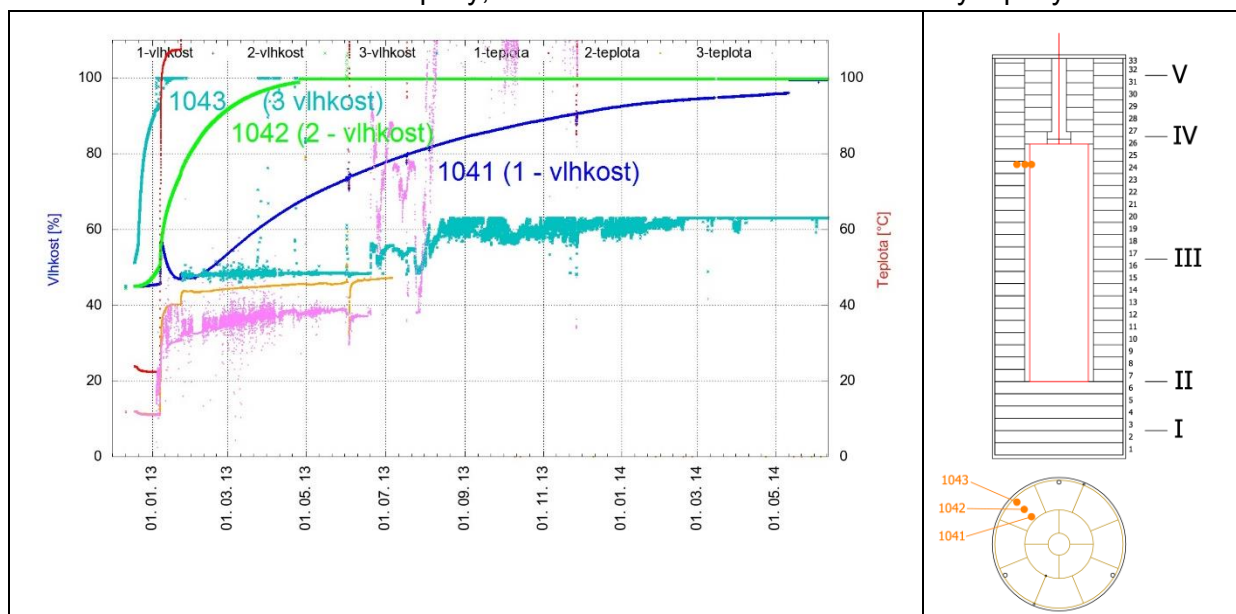
Obr. 64 - Grafické znázornění teploty v čase z různých čidel umístěných zhruba v polovině výšky modelu.

4.3 Monitoring vývoje relativní vlhkosti

Průběh měřených hodnot relativní vlhkosti (čidlo 1041 (1-vlhkost)) ukazuje, že po zapnutí topného tělesa došlo k okamžité změně relativní vlhkosti v bentonitu v blízkosti topného tělesa (Obr. 65). Zapnutí topného tělesa mělo vliv i na vlhkoměr 1042 (2-vlhkost) umístěný uprostřed bentonitového prefabrikátu. Po zahájení zahřívání se zvýšily měřené hodnoty relativní vlhkosti. U topného tělesa má výrazný vliv na vývoj vlhkosti jak saturace z horniny, tak i zahřívání a následná redistribuce vlhkosti (viz nárůst hodnot při zatopení na čidlu 1041 (1-vlhkost)). Popisovaný trend byl v páté dílčí zprávě porovnán s referencí ze zahraničního výzkumu. Vlhkostní redistribuce je podobná jako u referenčního zahraničního projektu Temperature buffer test [15], viz kapitola 6.2.

Podle hodnot relativní vlhkosti ze všech čidel by mohlo být vyvozeno, že bentonit již je plně saturován v celém vodorovném profilu již 1. 5. 2014 (poslední měření z čidla 1041 viz Obr. 65 vlevo). Výsledky z odběrů a postupný nárůst bobtnacích tlaků však plnou saturaci bentonitu nepotvrzovaly. Např. k vyšším nárůstům tlaků docházelo i po 1. 5. 2014.

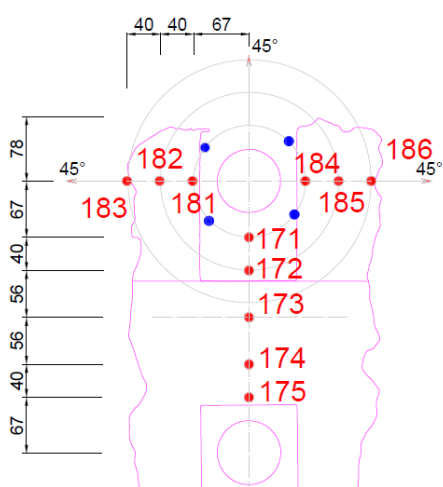
Čidla měla umožnit i měření teploty, ale bohužel neměřila reálné hodnoty teploty.



Obr. 65 - Vykreslení hodnot relativní vlhkosti a teploty z Rotroniků a umístění Rotroniků v modelu.

4.4 Monitoring okolního masivu

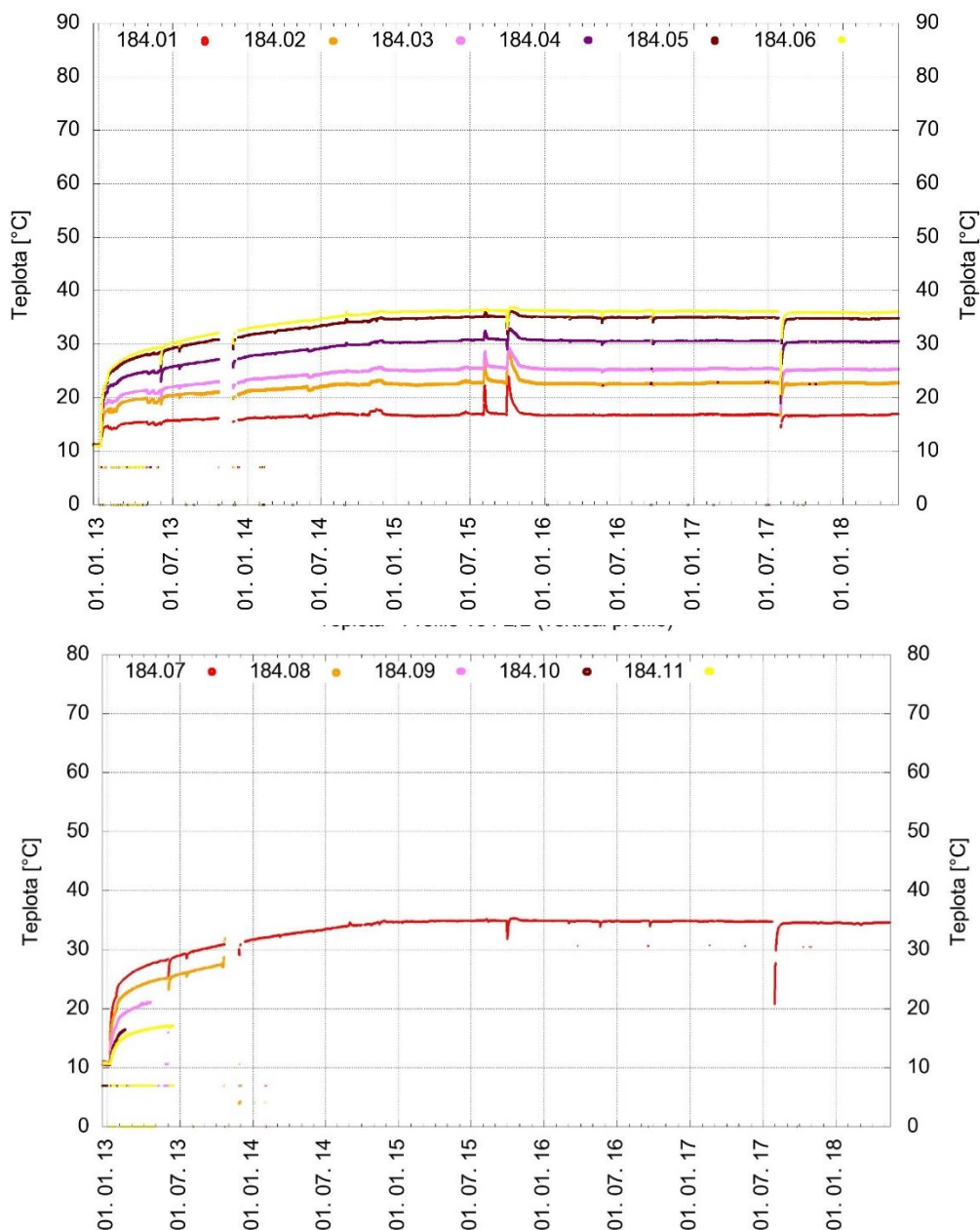
Monitoring okolního masivu byl instalován jako doplňkový k monitoringu bentonitové vrstvy. Nejvíce čidel bylo nainstalováno pro sledování kontinuálního vývoje teploty v hornině. Další čidla jsou určena pro sledování rozevírání puklin (na bocích rozrážky – dvě čidla) a přetvoření v horninovém masivu. Pro monitoring horniny bylo celkem odvrtno 15 svislých vrtů o průměru 42 mm, do kterých byla instalována příslušná čidla. Vodorovné schéma čidel v rozrážce je na Obr. 66. Řetězová čidla pro monitoring šíření tepla jsou označena červenou barvou (11 vrtů s 3 m dlouhými řetězovými teploměry) a čidla pro měření přetvoření okolního masivu (4 vrty s instalovanými 3 m dlouhými měřicími svorníky) jsou označena modrou barvou. Všechny vrty pro čidla byly vyvrtány svisle mimo dvou vrtů pro teploměry u boků rozrážky. Vrty pro čidla 183 a 186 byly odvrtny pod sklonem 45°.



Obr. 66 - Na obrázku vlevo je schéma monitoringu okolí vrtu (půdorys) včetně orientačního umístění a označení čidel – vpravo je obrázek z rozrážky, na počtvě (dno) jsou vidět odvrtné velkoprofilové vrty. V nejvzdálenějším velkoprofilovém vrtu (u čelby) je instalovaný MCJ.

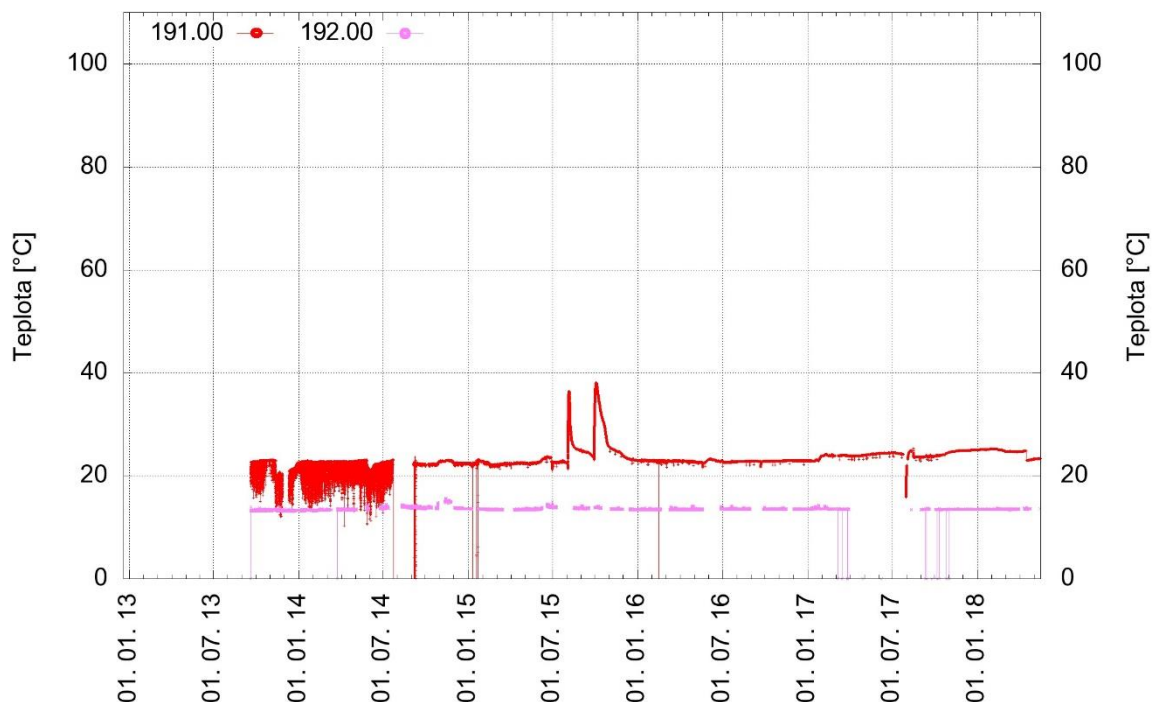
Hodnoty z čidel pro měření přetvoření (měřicí svorníky) a pro sledování rozevírání puklin nejsou v této zprávě prezentovány, protože čidla ve většině případů neměří. Senzory však byly instalovány jako doplňkové a nesouvisí s hlavním cílem, kterým je sledování chování bentonitové vrstvy.

Monitoring teploty okolního masivu je navržen tak, aby bylo dostatečně popsáno šíření tepla – teplotní pole. Z měřených hodnot teplot je patrné, že šíření tepla probíhá i ve vzdálenosti 3,5 m od svislé osy modelu a je patrné i v hloubce okolo 2,5 m. V této vzdálenosti byla za dobu provozování modelu zjištěna změna teploty zhruba o 2,5 °C. Z průběhu teplot je také jasné, že již došlo k ustálení teplot jak v bentonitu (viz Obr. 64), tak i v hornině (například řetězová digitální čidla 184, viz Obr. 67).



Obr. 67 - Průběh teploty měřené řetězovými čidly 184.01 až 184.11, která jsou umístěna svisle ve vrtu v hornině (38 cm od hrany vrtu) – nejvyšší měřené teploty jsou na vodorovné úrovni topného tělesa.

V roce 2018 pokračuje monitoring teploty vody nad víkem modelu a druhé měření monitoruje teplotu vzduchu v rozrážce. Na Obr. 68 jsou vykreslena data z teploměru 191 (teplota vody nad víkem) a z teploměru 192 (teplota vzduchu v rozrážce). Toto měření bylo instalováno v roce 2013 na přání objednatele.



Obr. 68 - Průběh teploty měřené čidly 191 (teplota vody nad víkem modelu) a 192 (teplota vzduchu v rozrážce).

5 Vyhodnocení odběrů z bentonitové vrstvy

Jedinou možností pro vzorkování zatíženého bentonitu jsou vertikální odběry a ty lze realizovat pouze v určitých místech, neboť výrazná část prostoru/plochy bentonitového profilu je obsazena instalovanými čidly.

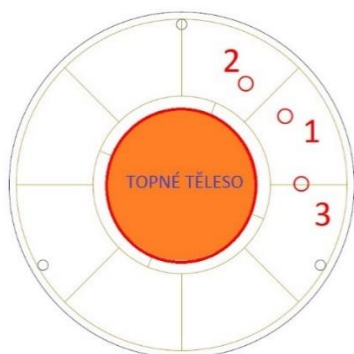
Zhotovitel prací předpokládal provedení odběrů již v přípravě projektu. Byl připraven vhodný jádrový vrták, se kterým byl proveden i finální test (9/2013) na vlhkém lisovaném bentonitu (cca $w=25\%$ a $\rho_d=1,9\text{ g/cm}^3$). Vrták byl navržen a vyroben i s ohledem na průměr vzorku pro laboratorní stanovení propustnosti a bobtnacího tlaku bentonitu. Jádrový vrták o průměru 38 mm s vnitřním průměrem 30 mm umožňuje odebraný bentonit vložit do prstence, který je částí měřicího přístroje pro stanovení propustnosti a bobtnacího tlaku. Pro provedení odběrů bylo nutné provést prostup nerezovým víkem modelu. Po odvrtání víka byly ihned provedeny odběry z modelu. Celkem bylo provedeno sedm odběrů. Jednotlivé vzorky (jádra) byly různě dlouhé podle „odlamování“ bentonitového jádra ve vrtáku. Po realizaci odběru byly vrty zaplněny lisovanými válečky z bentonitu B 75 a pevně uzavřeny. Válečky jsou lisovány na objemovou hmotnost sušiny $1,75\text{ g/cm}^3$ s vlhkostí okolo 10 %.

Při vyhodnocení vzorků z jednotlivých odběrů byla stanovena objemová hmotnost a na základě stanovení vlhkosti mohla být vypočtena objemová hmotnost sušiny. Hmotnostní vlhkost (w), objemové hmotnosti (ρ , ρ_d) a z přípravy projektu známá měrná hmotnost (ρ_s) bentonitu B75 umožnily vypočítat stupeň saturace bentonitu (S_r). Všechny zjištěné veličiny jsou vykresleny v závislosti na vzdálenosti od víka (dle hloubky). Dále byly použity vzorky pro ověření propustnosti a bobtnacího tlaku bentonitu. Laboratorně získané hodnoty zatíženého bentonitu byly porovnány se zkouškami nezatíženého bentonitu z přípravy projektu. V rámci odběrů jsou mj. získávány znalosti a zkušenosti, které umožnily inovaci

techniky pro odběry a při posledním odběru byla odebírána jednotlivá jádra (válečky) o výšce až 8 cm (první odběry výška do 4 cm). Vzorky bentonitu z modelu byly odebírány postupně (celkem sedm odběrů), z různých hloubek a ve třech různých místech. Základní informace o odběrech jsou shrnuty v Tabulka 4. V tabulce je také uvedeno, kolik cm z odběru bylo odebráno v původním bentonitu¹. Na Obr. 69 je vlevo půdorysný řez modelem s lokací tří odběrných míst a vpravo je jeden z odběrů před laboratorním vyhodnocením.

Tabulka 4 - Shrnutí základních informací o provedených odběrech v průběhu provozování MCJ:

číslo odběru	datum realizace	místo odběru (viz Obr. 69 vlevo)	celková hloubka odběru v cm	cm v neodebraném bentonitu
1	26. 11. 2013	1	32	32
2	28. 5. 2014	2	64	64
3	30. 6. 2015	1	64	32
4	21. 7. 2016	2	68	4
5	7. 11. 2016	2	96	28
6	26. 8. 2017	3	82	82
7	7. 9. 2018	3	133	51

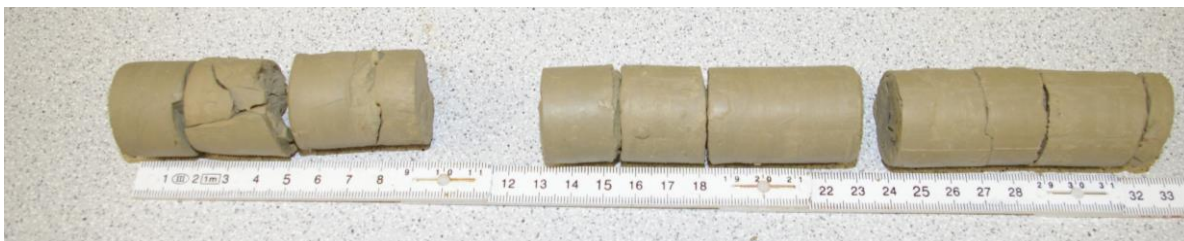


Obr. 69 - Vlevo vodorovný řez bentonitovou vrstvou a označení odběrných míst v bentonitu – odběry v bentonitu jsou zhruba stejně vzdálené od topného tělesa (10 cm); odběry byl realizovány do hloubky skrz víko modelu a vpravo je ukázka odebraných bentonitových jader, která byla po odběru vakuována.

¹ Např. odběr sedm byl odebrán v místě tři, ve kterém již bylo odebráno 82 cm původního bentonitu při odběru šest. Po odběru šest bylo 82 cm zaplněno bentonitovými lisovanými válečky a místo odběru bylo na víku uzavřeno. Při odběru sedm (délka 133 cm) bylo místo tři znovu otevřeno a bylo převrtáno 82 cm v minulém odběru doplněného bentonitu a z původního bentonitu bylo odebráno 51 cm. Celkem tedy bylo získáno při odběru sedm 133 cm bentonitových jader (82 cm doplněných po odběru šest a 51 cm v původním bentonitu).

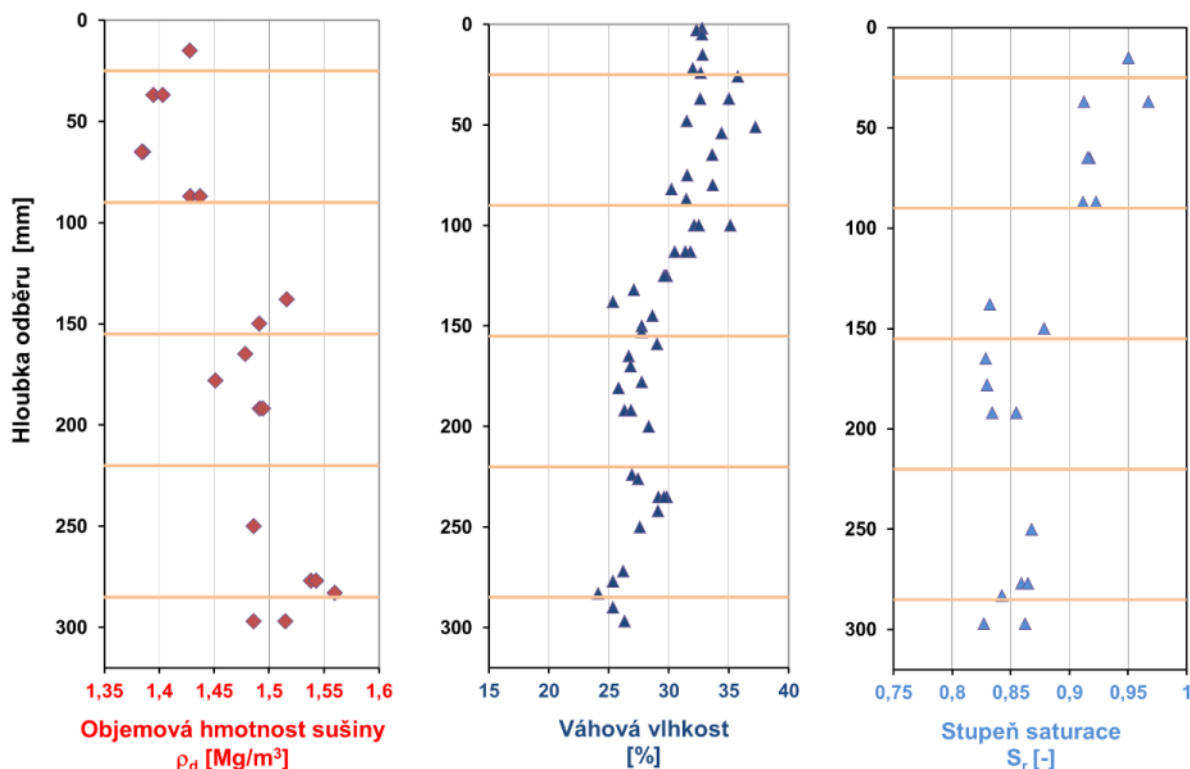
5.1 Odběr č. 1

Provedení prvního odběru (26. 11. 2013) proběhlo bez výraznějších problémů. Pouze ve dvou případech bylo nutné bentonitové jádro rozlámat tak, aby mohlo být vyjmuto z vrtáku. Rozbitá jádra byla použita pouze pro stanovení hmotnostní vlhkosti bentonitu. Odběry byly provedeny z hloubky 0-32 cm (Obr. 70).



Obr. 70 - Jádra z prvního odběru.

Pro vyhodnocení prvního odběru bylo analyzováno více než 50 vzorků. Nejvíce bylo provedeno zkoušek pro vyhodnocení vlhkosti. Dále byly určeny objemové hmotnosti (ρ , ρ_d) a výpočtem byl stanoven stupeň saturace (S_r). Obr. 71 znázorňuje výsledné hodnoty v závislosti na poloze odběru (hloubce od víka). Naznačeno je původní rozhraní vrstev bentonitových tvárnic.



Obr. 71 - Grafy s výsledky z prvního odběru (hnědě naznačeny spáry mezi bentonitovými prefabrikáty).

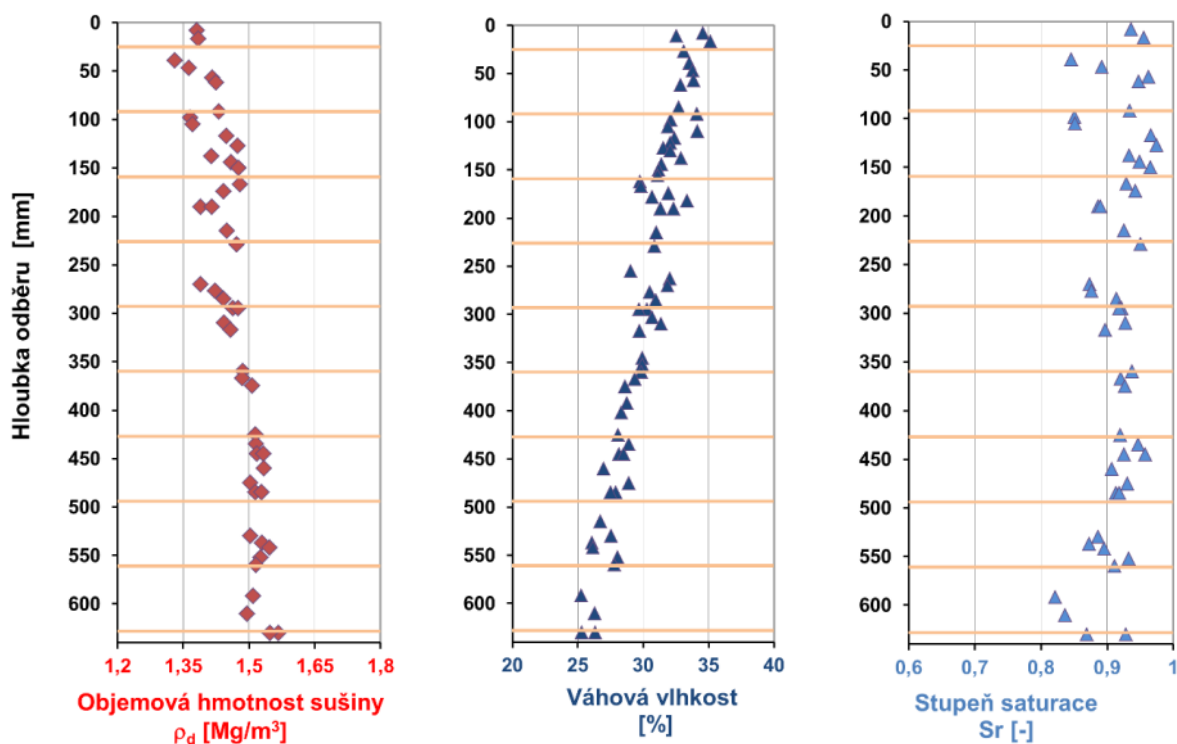
5.2 Odběr č. 2

Pro druhý odběr byl jádrový vrták doplněn přípravkem pro snadnější vytlačování jádra. Druhý odběr byl proveden 28. 5. 2014 do dvojnásobné hloubky oproti prvnímu odběru (Obr. 72) a v místě 2, viz Obr. 69. Odběr byl tedy proveden z hloubky 0-64 cm.



Obr. 72 - Jádra z druhého odběru.

Byly odebrány vzorky pro stanovení objemové hmotnosti, vlhkosti a pro stanovení hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku. Celkem bylo analyzováno 120 vzorků na vlhkost a objemovou hmotnost a výpočtem byl stanoven stupeň saturace bentonitové vrstvy (Obr. 73). Z druhého odběru byly odebrány i vzorky pro stanovení bobtnacího tlaku a hydraulické vodivosti.



Obr. 73 - Výsledky z druhého odběru (hnědě naznačeny spáry mezi bentonitovými prefabrikáty).

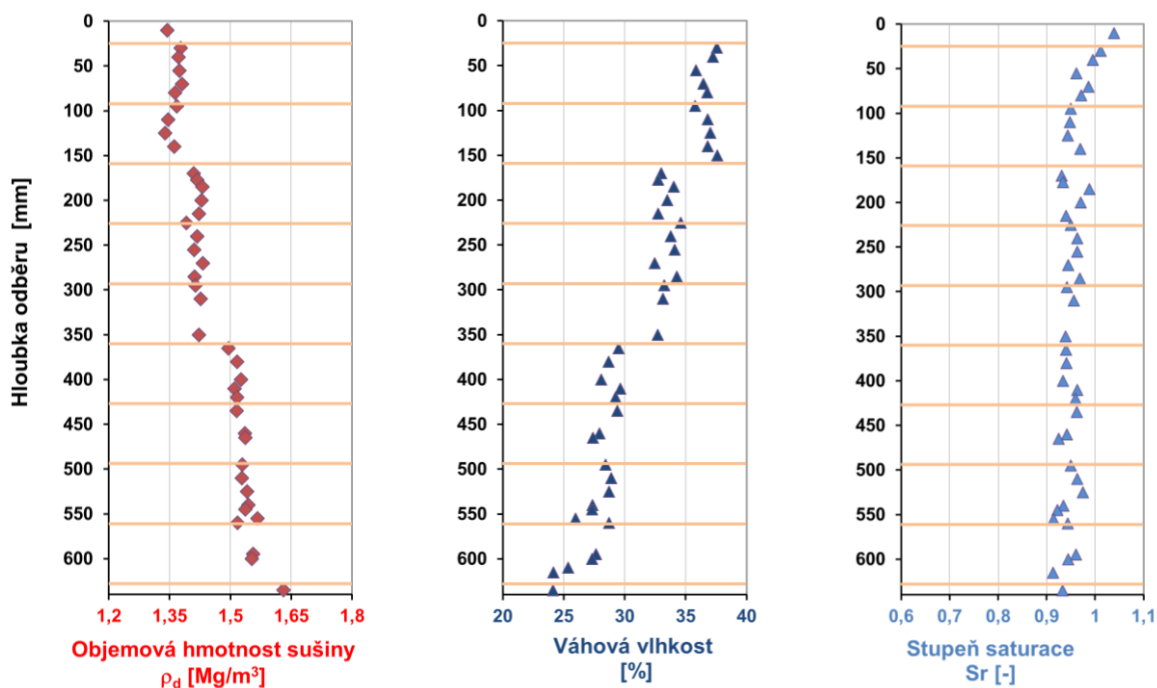
5.3 Odběr č. 3

Odběr č. 3. (Obr. 74) byl realizován 30. 6. 2015 v místě odběru č. 1., ale do větší hloubky – 64 cm.



Obr. 74 - Jádra ze třetího odběru.

Třetí odběr byl vyhodnocen stejným způsobem jako předchozí odběry. Byly odebrány vzorky pro stanovení objemové hmotnosti, vlhkosti a pro stanovení hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku. Objednateli byly předány čtyři vzorky pro stanovení mineralogie. Celkem bylo analyzováno 110 vzorků na vlhkost a objemovou hmotnost a výpočtem byl stanovený stupeň saturace bentonitové vrstvy (Obr. 75). I ze třetího odběru byly odebrány i vzorky pro stanovení bobtnacího tlaku a hydraulické vodivosti.



Obr. 75 - Výsledky ze třetího odběru (hnědě naznačeny spáry mezi bentonitovými prefabrikáty). Do 320 mm byl v tomto místě před tímto odběrem realizován první odběr.

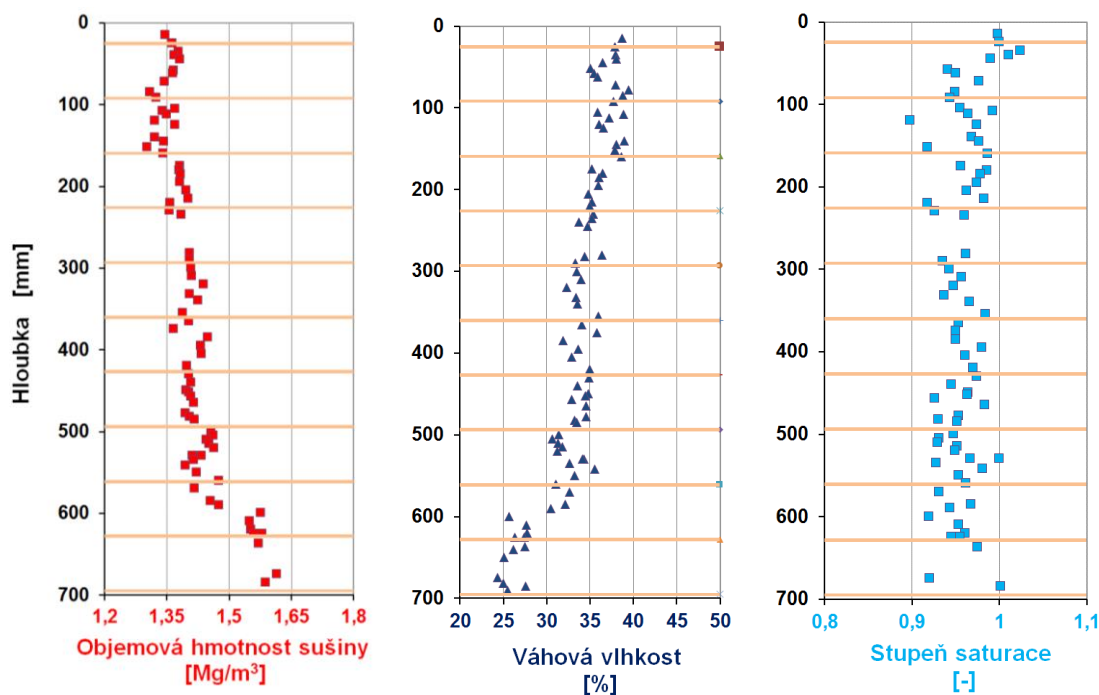
5.4 Odběr č. 4

Odběr č. 4. byl (Obr. 76) realizován 21. 7. 2016 v místě odběru č. 2. do hloubky – 68 cm.



Obr. 76 - Jádra ze čtvrtého odběru.

I ze čtvrtého odběru byly odebrány vzorky pro stanovení objemové hmotnosti, vlhkosti a pro stanovení hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku. Objednateli byly předány vzorky pro stanovení mineralogie. Celkem bylo analyzováno 168 vzorků na vlhkost (83 vzorků) a objemovou hmotnost (85 vzorků) a výpočtem byl stanovený stupeň saturace bentonitové vrstvy, viz Obr. 77. Také u tohoto odběru byly odebrány i vzorky pro stanovení bobtnacího tlaku a hydraulické vodivosti.



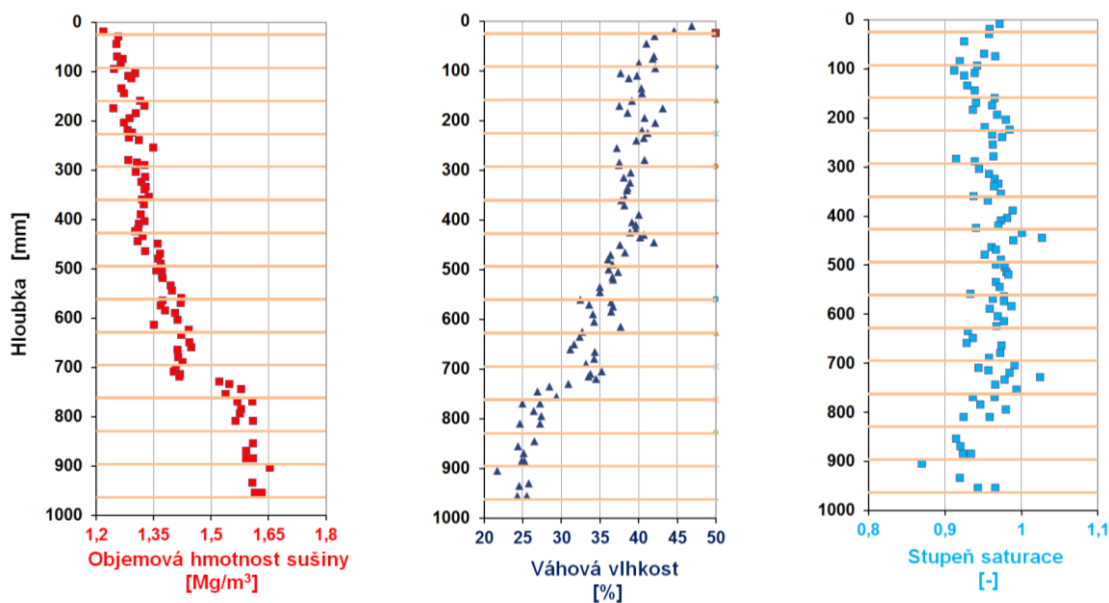
Obr. 77 - Výsledky ze čtvrtého odběru (hnědě naznačeny spáry mezi bentonitovými prefabrikáty). Do 64 cm byl v tomto místě před tímto odběrem realizován druhý odběr.

5.5 Odběr č. 5

Odběr č. 5. (Obr. 78) byl realizován 7. 11. 2016 v místě odběru č. 2. do hloubky - 96 cm. Pátý odběr byl vyhodnocený stejným způsobem jako předchozí odběry. Byly odebrány vzorky pro stanovení objemové hmotnosti, vlhkosti a pro stanovení hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku. Objednateli byly předány čtyři vzorky pro stanovení mineralogie.



Obr. 78 - Jádra z pátého odběru (odběr byl z důvodu fotodokumentace rozdělen na dvě části).



Obr. 79 - Výsledky z pátého odběru (hnědě naznačeny spáry mezi bentonitovými prefabrikáty). Do hloubky 68 cm byl v tomto místě před tímto odběrem realizován druhý odběr.

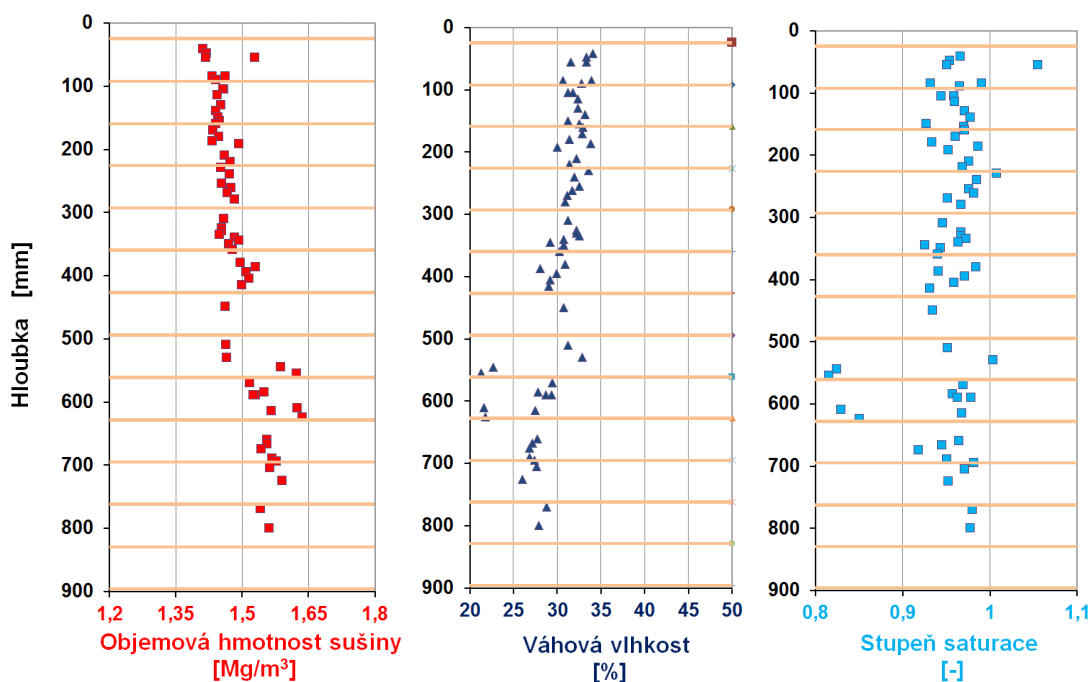
5.6 Odběr č. 6

Byl realizován dne 26. 8. 2017 do hloubky 82 cm v novém místě (označeno jako místo 3).



Obr. 80 - Jádra ze šestého odběru.

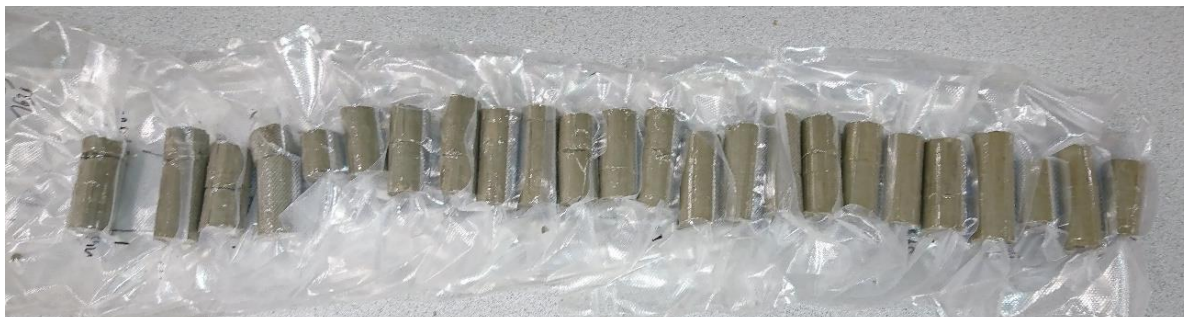
Stejně jako u předchozích odběrů byly odebrány vzorky pro stanovení objemové hmotnosti, vlhkosti a pro stanovení hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku. Objednateli byly opět předány vzorky pro stanovení mineralogie. Celkem bylo analyzováno více než 120 vzorků a výpočtem byl stanovený stupeň saturace bentonitové vrstvy (Obr. 81).



Obr. 81 - Výsledky ze šestého odběru (hnědě naznačeny spáry mezi bentonitovými prefabrikáty).

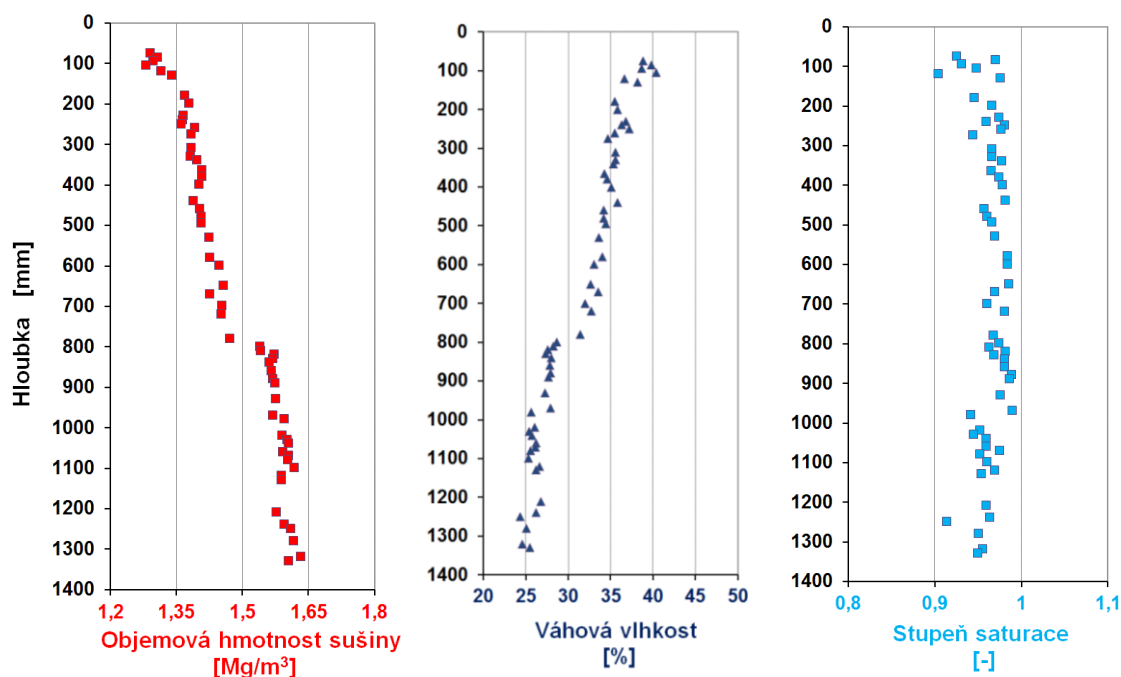
5.7 Odběr č. 7

Byl realizován dne 7. 9. 2018 do hloubky 133 cm v místě 3. Jádra z odběru jsou zobrazena na Obr. 82.



Obr. 82 - Jádra ze sedmého odběru.

Byl vyhodnocen stejně jako předchozí odběry - byly odebrány vzorky pro stanovení objemové hmotnosti, vlhkosti a pro stanovení hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku. Objednateli byly předány dva vzorky pro stanovení mineralogie a tři vzorky pro mikrobiologické vyhodnocení byly předány zástupci TUL. Z geotechnického hlediska bylo analyzováno více než 100 vzorků a výpočtem byl stanovený stupeň saturace bentonitové vrstvy (Obr. 81). I ze sedmého odběru byly odebrány i vzorky pro stanovení bobtnacího tlaku a hydraulické vodivosti. Vyhodnocení těchto dlouhodobých zkoušek se předpokládá koncem listopadu 2018.



Obr. 83 - Výsledky ze sedmého odběru. Do hloubky 82 cm byl v tomto místě před tímto odběrem realizován druhý odběr.

6 Shrnutí a diskuse

V průběhu projektu se nevyskytly výraznější skutečnosti, které by ohrozily provozování experimentu. Problémy v průběhu provozu experimentu byly poruchy čidel, občasné výpadky měřicího systému či poruchy na topném systému (např. výpadek elektrického proudu, poruchy regulátoru topného systému). Většinu poruch, včetně závažnějších se podařilo odstranit v několika dnech či týdnech. Technicky nemožné bylo opravit čidla, která jsou umístěna v bentonitové vrstvě či v hornině.

V následujících kapitolách jsou shrnuty výsledky a některé zkušenosti z průběhu projektu.

6.1 Výstavba experimentu

Experiment byl realizován jako superkontejner v povrchových laboratořích u Podzemní laboratoře Josef. Výstavba zabrala zhruba jeden rok. Bylo připraveno přes 300 kusů bentonitových prefabrikátů, které byly ihned po vylisování chráněny proti vzdušné vlhkosti. Rychlost produkce (lisování) bentonitových prefabrikátů byla okolo pěti kusů za den. Samotná výstavba v povrchové laboratoři trvala okolo tří měsíců. Je zřejmé, že výstavba experimentu z bentonitu mimo podzemní prostředí s 100% vlhkostí, je velice vhodná. Převoz modelu byl provedený během jednoho dne a další den byl model spuštěn do připraveného velkoprofilového vrtu.

6.2 Monitoring experimentu

Souhrnně lze říci, že vývoj teplot a tlaků v modelu je charakterizován plynulým nárůstem během prvních dvou let provozu (od 2013 do 2015). Dle očekávání došlo k nejvýraznějším nárůstům v prvním půl roce po instalaci modelu. U některých měření tlaků byly lokálně detekovány výrazné poklesy. Od roku 2015 jsou teploty a tlaky ve většině sledovaných míst ustáleny. V ostatních případech ke změnám tlaku stále dochází. Změny jsou buď rychlé lokální poklesy anebo dlouhodobé nárůsty či poklesy.

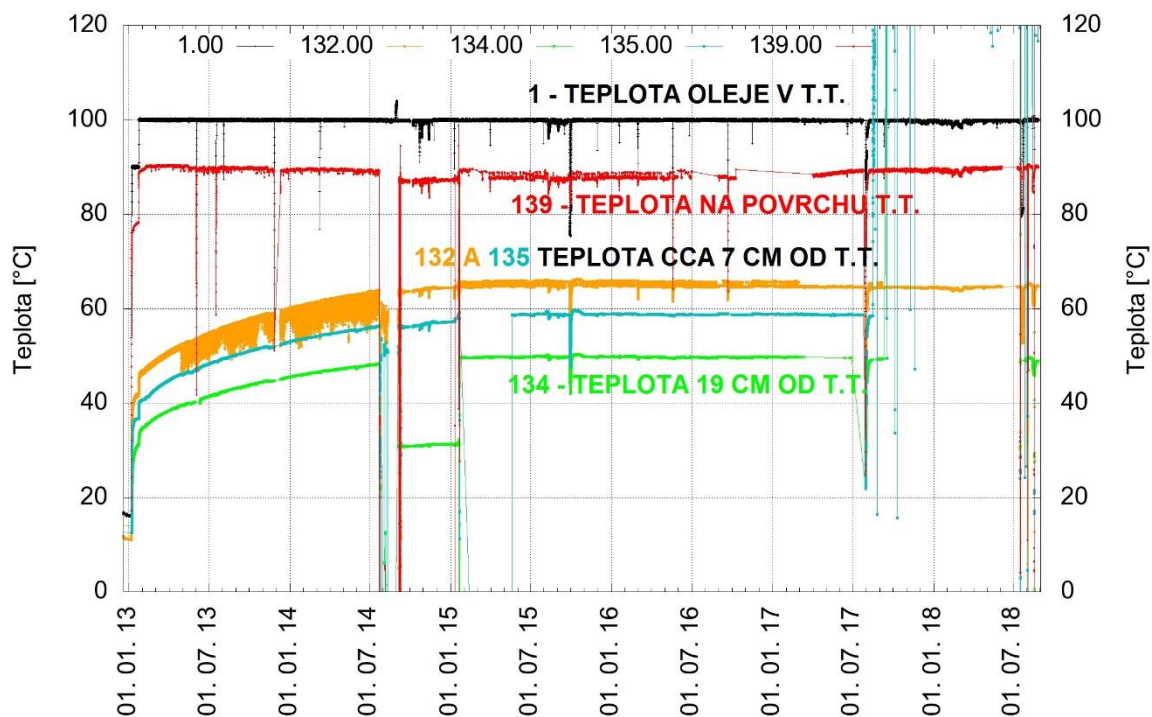
Z průběhů naměřených tlaků a teplot je tedy zřejmé, že postupně dochází k ustálení stavu v modelu. Měřené tlaky většinou nepřesahují hodnoty 1 MPa. Na základě výsledků vstupních laboratorních zkoušek by se měřený tlak měl pohybovat spíše v rozmezí 2 až 3 MPa. Pro průměrnou objemovou hmotnost sušiny v modelu (předpoklad 1,55 g/cm³) by měl být cca 3 MPa při plném nasycení bentonitu. Tlak v modelu oproti tlaku naměřenému v laboratoři ovlivňuje několik faktorů. Jedná se o zatížení teplotou, rozložení vlhkosti v bentonitu, nerovnoměrné rozložení objemové hmotnosti sušiny, nehomogenity v bentonitové bariéře (spáry) a nerovnoměrnost nasycení okolo čidel. Čidla mohou být překážkou pro šíření vlhkosti či homogenizace bentonitové vrstvy. Také jsou pravděpodobné poruchy některých čidel. Vliv na hodnoty měřeného tlaku může mít i způsob uložení čidla v bentonitu, tzn., jak přesně byl při výstavbě modelu opracován bentonitový prefabrikát, aby byl zaručen kontakt s celou plochou čidla. Veškerá data z teploměrů jsou velice cenná, protože lze například nasimulovat průběh teploty během saturace, po saturaci bentonitu a podle dat je patrný průběh teploty v různých částech bentonitové vrstvy. Např. z grafu na Obr. 64, je zřejmé rozdělení teplot v horizontálním směru v čase v různých vzdálenostech od topného tělesa.

Ani po 60 měsících zřejmě nedošlo k ustálení hodnot měřených veličin. Ustálení měření by mohlo indikovat ustálení procesů vedoucích k homogenizaci bentonitové vrstvy. Z aktuálních výsledků monitoringu je zřejmé, že sice dochází k ustálení některých hodnot (hlavně teploty), ale stále jsou také patrné změny hodnot u některých čidel (tlakových).

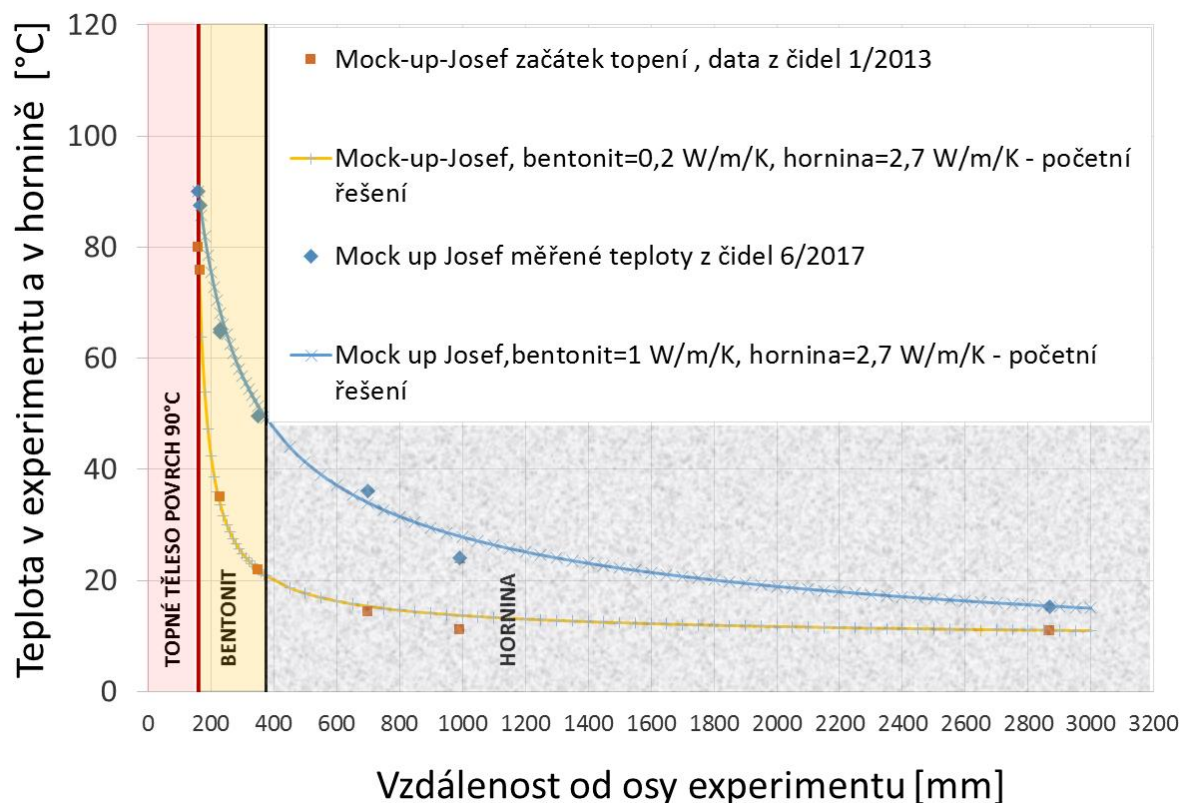
Podle průběhu tlaků a teplot lze říci, že k nejvýraznějším změnám došlo v průběhu prvních dvou až tří let provozu experimentu, např. viz Obr. 84. Stejně zjištění je pravděpodobně zřejmé i z hodnot z odběrů, viz kapitola 6.4.3.

V práci [16] byla provedena početní simulace šíření teplot v horizontálním profilu uprostřed modelu, viz Obr. 85. Po dosazení průměrné tepelné vodivosti 1 W/m/K (součinitel tepelné vodivosti), lze přibližně nasimulovat průběh teploty v modelu po ustálení měřených hodnot. Hodnota součinitele tepelné vodivosti 1 W/m/K byla použita na základě zkušeností z provedených experimentálních měření a podle předpokládaného nerovnoměrného rozložení vlhkosti a objemových hmotností. Stejná hodnota pro součinitel tepelné vodivosti je používána i v zahraničním výzkumu pro modelování průběhů teplot v hlubinném úložišti, např. [17]. Pro simulaci rozložení teploty v počátku byla použita hodnota tepelné vodivosti 0,2 W/m/K, která byla dopočtena podle skutečně naměřených hodnot teplot v modelu, také viz Obr. 85. Pro tonalit (hornina obklopující model) byl do výpočtu dosazen součinitel tepelné vodivosti $\lambda = 2,7$ W/m/K (změřeno podle norem [18]; [19] a uvedeno v práci [16]).

Provedená zjednodušená simulace téměř kopíruje skutečný průběh teploty v modelu a v hornině.

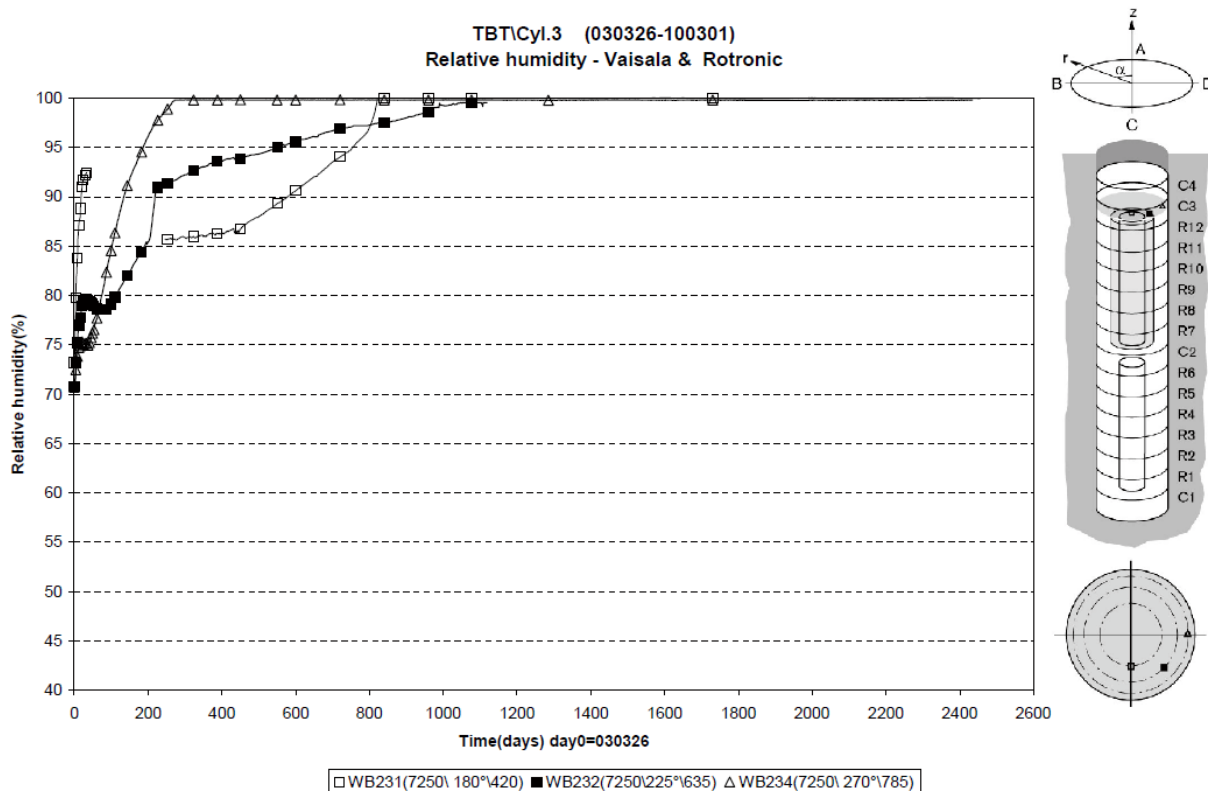


Obr. 84 - Grafické znázornění teploty v čase z různých čidel umístěných zhruba v polovině výšky modelu po 56 měsících (TT – topné těleso). Z teplotních dat je zřejmé, že k ustálení hodnot teploty uprostřed modelu v horizontálním směru došlo zhruba začátkem roku 2015.



Obr. 85 - Vykreslení teploty při začátku tepelného zatěžování bentonitu (oranžové body), po 54 měsících zatěžování (modré body) a ukázka jednoduchého početního řešení s průměrným součinitelem tepelné vodivosti bentonitu $\lambda = 1 \text{ W/m/K}$ (modré body). Počítáno se součinitelem tepelné vodivosti pro granitické horniny $\lambda = 2,7 \text{ W/m/K}$ (tonalit) [16].

Po vykreslení hodnot relativní vlhkosti, byla provedena rešerše zahraniční literatury a byly nalezeny výsledky z projektu Temperature buffer test [15]. Ze získaného grafu (Obr. 86) je patrný podobný průběh hodnot z měření relativní vlhkosti jako v projektu MCJ. Vykreslené hodnoty relativní vlhkosti (na čidlech umístěných blíže k topnému tělesu) po rychlém nárůstu klesají a po určitém intervalu opět dochází k nárůstu měřených hodnot. Na hodnoty z čidla umístěného u kraje modelu nemá nejspíše zvýšení teploty vliv.



Obr. 86 - Hodnoty relativní vlhkosti z různých vzdáleností vůči poloze topného tělesa u experimentu Temperature buffer test [15].

6.3 Vliv technologických spár

Podle výsledků z odběrů bentonitu je zřejmé, že došlo ke snížení objemové hmotnosti sušiny bentonitu oproti vstupní objemové hmotnosti lisovaných bentonitových cihel ($1,75 \text{ g/cm}^3$), a to zřejmě z důvodů bobtnání bentonitu do tzv. technologických spár v experimentu. Technologické spáry tak mohou mít vliv i na celkový tlak bentonitu. Nejenom ze zahraničních prací ([20]; [21]), ale i z výsledků tohoto projektu je zřejmé, že je nutné objem technologických spár co nejvíce snížit, aby byly zachovány parametry bentonitové vrstvy.

6.4 Vyhodnocení odběrů

Vzorky bentonitu byly vyhodnocovány různými způsoby. Zhotovitel prací realizoval geotechnické vyhodnocení (stanovení vlhkosti, objemové hmotnosti, stupně saturace, hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku). Dále pak byly předávány vzorky objednateli pro mineralogické hodnocení a na přání objednatele byly předávány vzorky TUL pro mikrobiologické hodnocení biologické aktivity.

Bentonit je odebírán při provozování modelu a odebraná jádra mají teplotu od $20 \text{ }^\circ\text{C}$ do zhruba $60 \text{ }^\circ\text{C}$ (dle hloubky odběru v modelu). Ihned po odběru je vzorek zavakuován. Pro vyhodnocení odběrů byly používány postupy podle platných norem, pro vyhodnocení hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku byl použit ověřený interní postup zhotovitele. Je zřejmé, že na veličiny má vliv provedení odběru a příprava vzorku před zkouškou. Další vliv mohou mít chyby, které vznikají při provádění zkoušek. Po odběru také dojde ke zvětšení objemu („nabobtnání“) vzorku (snížení objemové hmotnosti) vlivem uvolnění napětí, které na vzorek uvnitř modelu působilo. Pro eliminaci tohoto vlivu byla vždy odebírána část vzorku

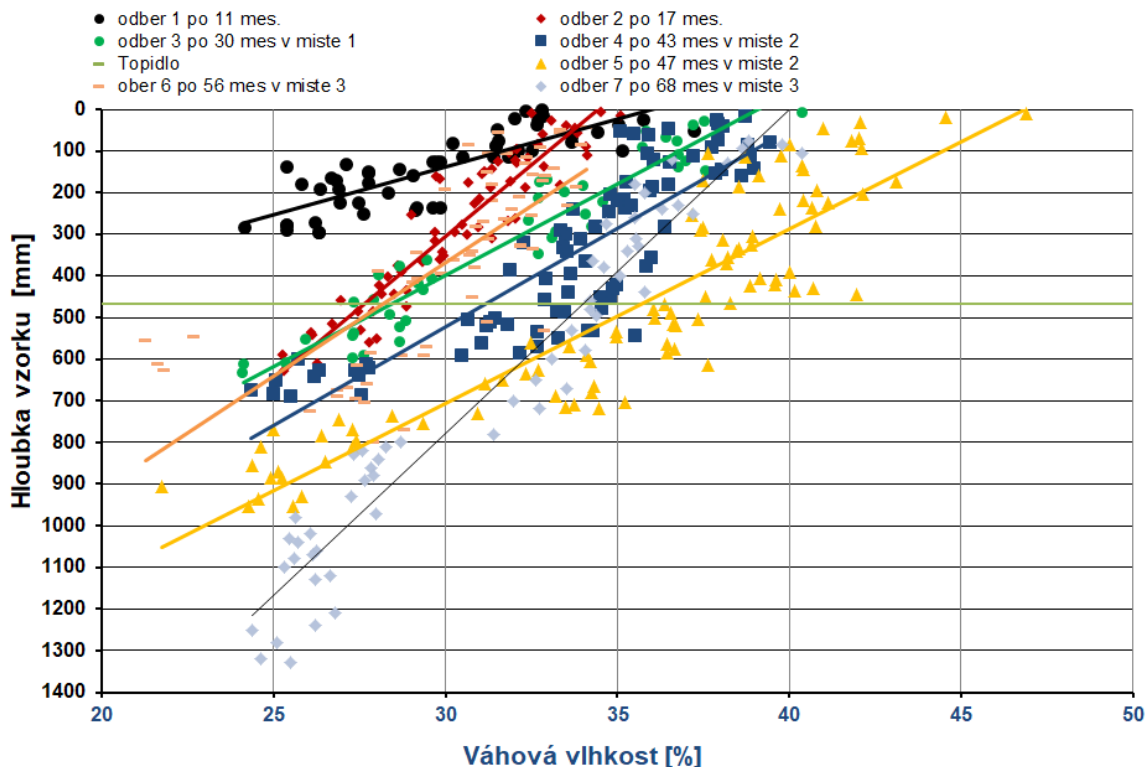
bez okrajových částí. Podle výše uvedeného je tedy zřejmé, že hodnoty zjištěné z odběru jsou zkresleny o různé chyby, ale tento vliv je v řádu procent.

Po vyhodnocení hodnot hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku bentonitu existuje možnost, že zatížení bentonitu v modelu mělo na tyto veličiny vliv. Ten byl pozorován i v obdobných zahraničních projektech. Předmětem tohoto projektu nebylo podrobnější studium vlivu zatížení, a proto je v kapitole 7.4 uveden další možný postup. Metodika způsobu vyhodnocení hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku u zhotovitele je elektronickou přílohou této zprávy.

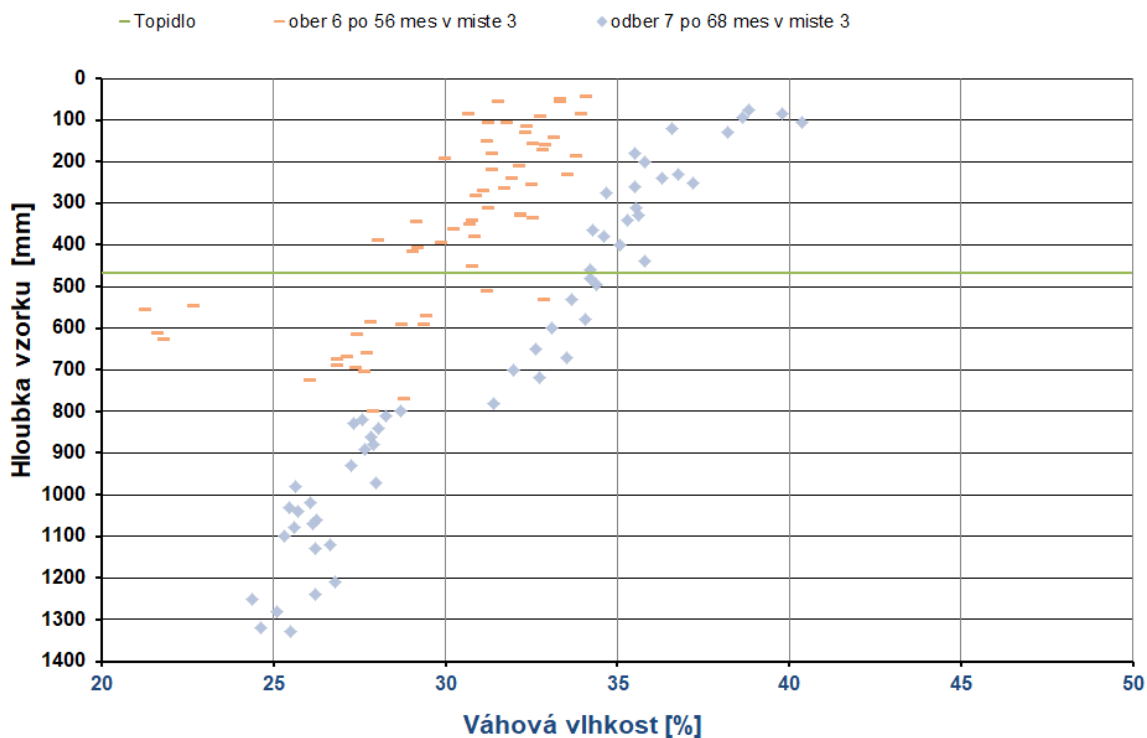
I při provedení posledního sedmého odběru byly patrné původní svislé i vodorovné spáry mezi jednotlivými bentonitovými bloky, ze kterých byl model vystavěn. Bentonitové vzorky se spárami byly označeny a předány objednateli pro mineralogické hodnocení.

6.4.1 Průběh vlhkosti

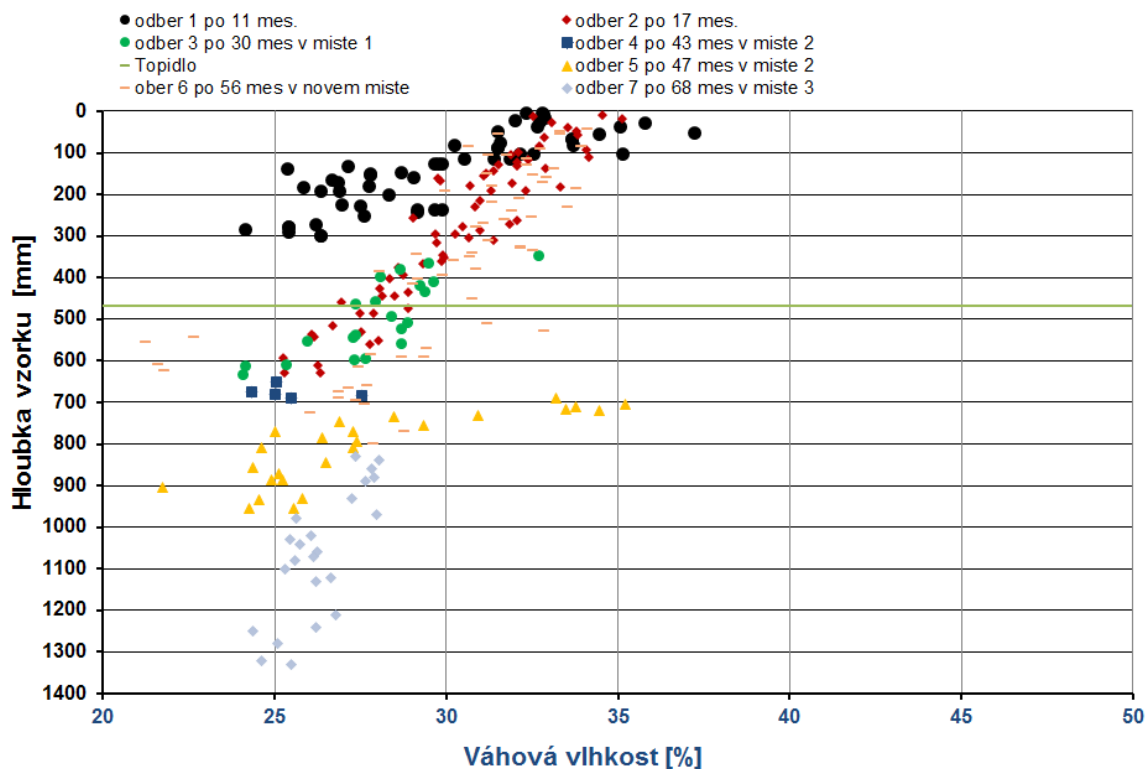
Na Obr. 87 jsou zobrazeny hodnoty ze všech odběrů pro hmotnostní vlhkost. Vlhkost je zobrazena v závislosti na hloubce v experimentu. Graf obsahuje hodnoty jak pro části bentonitové vrstvy, které nebyly převrtány, tak i pro části převrtané, tzn. pro části v místech předchozích odběrů, které byly zaplněny vylišovanými bentonitovými válečky. Ve většině případů je patrná změna při vyhodnocení dříve odebrané části a původního bentonitu, např. u odběru 4 v hloubce okolo 600 mm je patrný rozdíl mezi převrtaným bentonitem a původním o 10 %. Na Obr. 88 jsou vybrané výsledky vlhkostí ze šestého a sedmého odběru, které byly realizovány v místě 3 po intervalu cca 1 rok. Z grafu na obrázku je patrný rozdíl ve vlhkostech (cca 10 %, do hloubky 820 mm) ze šestého odběru původního bentonitu a ze sedmého odběru, kde byly převrtávány vložené bentonitové válečky po šestém odběru. Pro popis stavu původního nepřevratného bentonitu lze tedy použít vlhkosti ze šestého odběru a od hloubky 820 mm lze použít vlhkosti ze sedmého odběru. Z toho je zřejmé, že vlhkosti s hloubkou klesají (do 1330 mm), což zřejmě souvisí s měnící se objemovou hmotností sušiny a stupněm saturace bentonitu. Na Obr. 89 je graf zobrazující hodnoty vlhkosti, které byly zjištěny ze vzorků původního bentonitu pro všechny odběry.



Obr. 87 - Vykreslení hodnot vlhkosti v závislosti na hloubce vzorku v modelu. Černá barva značí hodnoty z prvního odběru, červená barva značí hodnoty z druhého odběru, zelená barva označuje hodnoty ze třetího odběru, modrá barva označuje hodnoty ze čtvrtého odběru, žlutá barva označuje hodnoty z pátého odběru, oranžová barva ze šestého odběru a šedá barva hodnoty ze sedmého odběru.



Obr. 88 - Vyhodnocení vlhkostí vzorků ze šestého a ze sedmého odběru (zelenou čarou je zobrazena vrchní hrana topného tělesa).

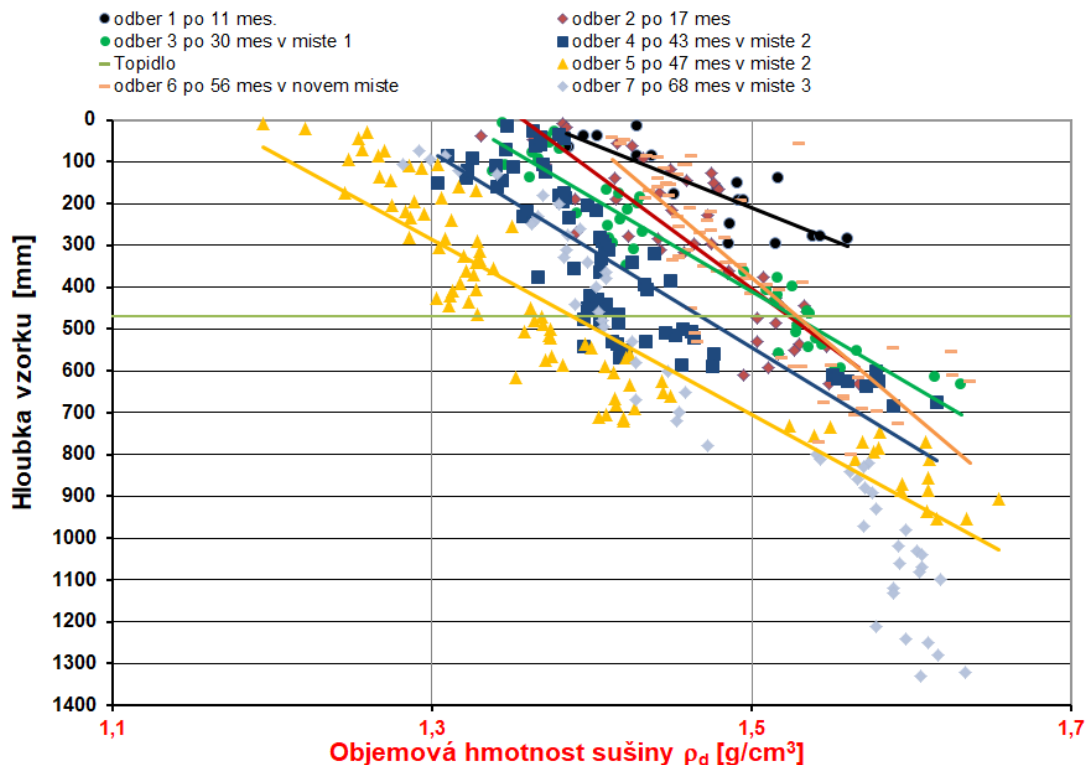


Obr. 89 - Vykreslení hodnot vlhkosti v závislosti na hloubce vzorku v modelu. V tomto grafu jsou vyneseny pouze výsledky odběrů na původním bentonitu, tj. na bentonitu, který nebyl odebrán v některém z předcházejících odběrů.

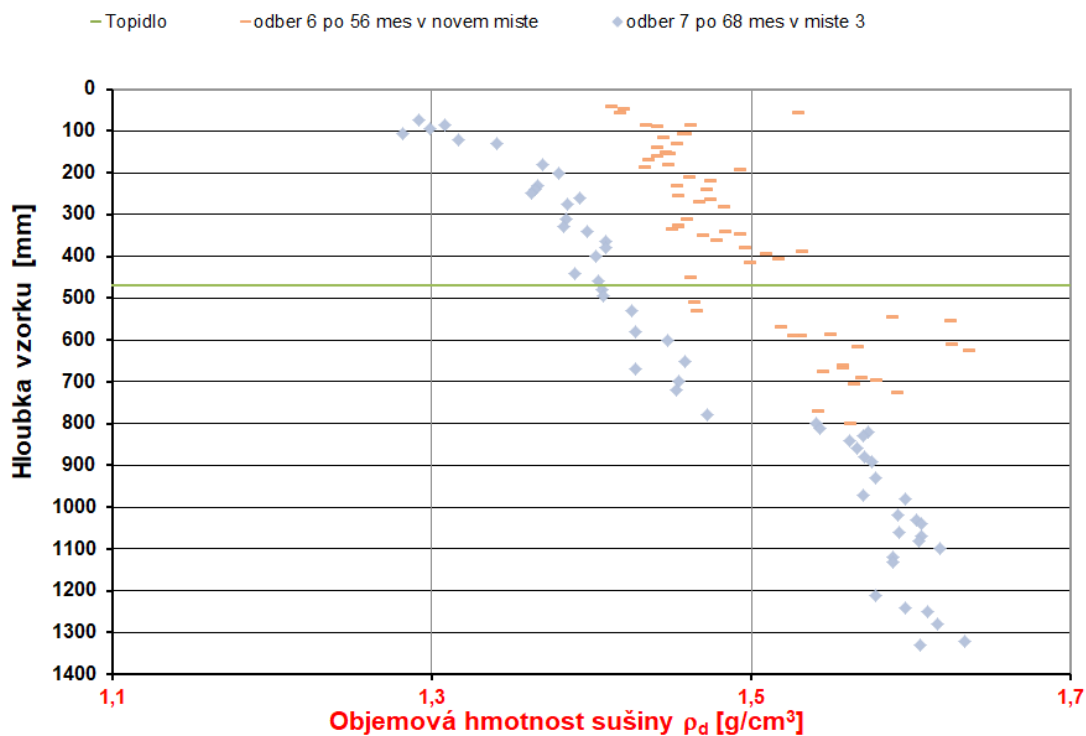
6.4.2 Průběh objemových hmotností sušiny

Na Obr. 90 jsou zobrazeny hodnoty ze všech odběrů pro objemovou hmotnost sušiny a jsou zobrazeny v závislosti na hloubce v experimentu. Graf obsahuje hodnoty jak pro části bentonitové vrstvy, které nebyly převrtány, tak i pro části převrtané, tzn. pro části v místech předchozích odběrů, které byly zaplněny vylišovanými bentonitovými válečky. Stejně jako při vyhodnocení vlhkosti je patrná změna při vyhodnocení dříve odebrané části a původního bentonitu, např. u odběru 4 v hloubce okolo 600 mm je patrný rozdíl mezi převrtaným bentonitem a původním.

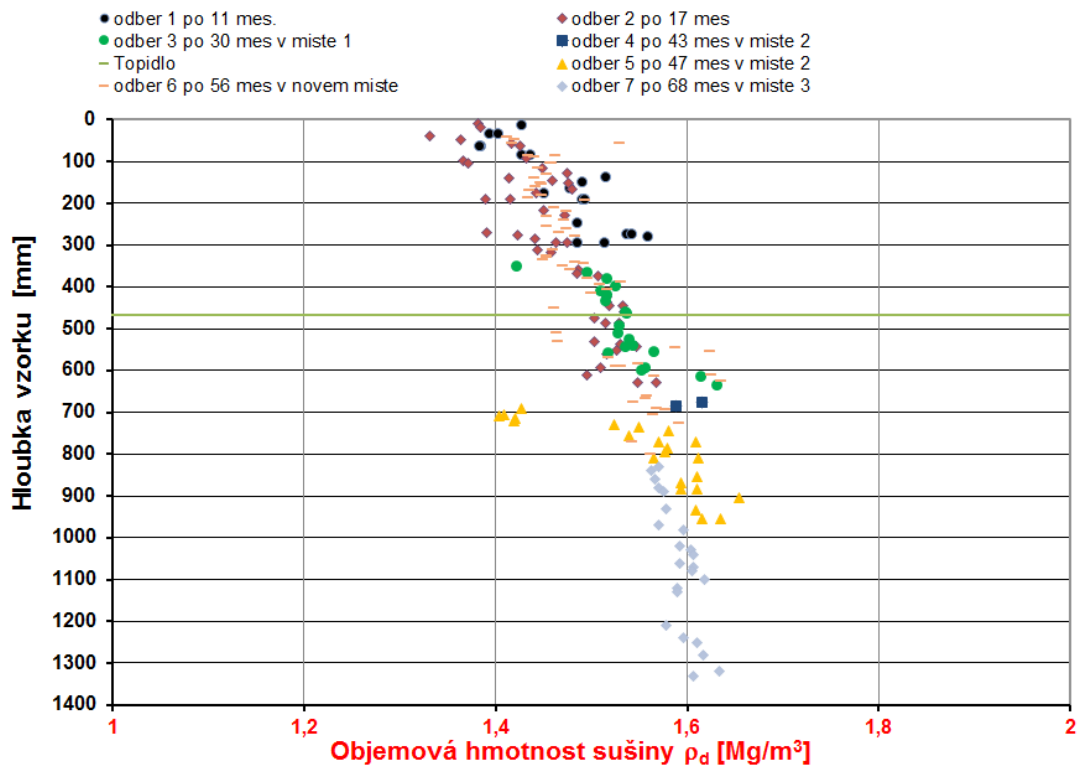
Na Obr. 91 jsou vybrané výsledky objemových hmotností sušiny ze šestého a sedmého odběru. A stejně jako u vlhkostí je z grafu patrný rozdíl (cca $0,1 \text{ g/cm}^3$, do hloubky 820 mm) ze šestého odběru původního bentonitu a ze sedmého odběru, kde byly převrtávány vložené bentonitové válečky po šestém odběru. Pro popis stavu původního nepřevratného bentonitu lze tedy použít hodnoty ze šestého odběru a od hloubky 820 mm lze použít hodnoty ze sedmého odběru. Je tedy zřejmé, že objemové hmotnosti sušiny s hloubkou klesají (do 1330 mm). Výraznější pokles lze pozorovat v hloubce do 400 mm a dále pak od 400 mm není pokles tak výrazný, avšak stále dochází ke zvyšování objemové hmotnosti sušiny s hloubkou. Na Obr. 92 je graf zobrazující hodnoty objemové hmotnosti sušiny, které byly zjištěny ze vzorků původního bentonitu pro všechny odběry.



Obr. 90 - Vykreslení hodnot objemové hmotnosti sušiny v závislosti na hloubce vzorku v modelu. Černá barva značí hodnoty z prvního odběru, červená barva značí hodnoty z druhého odběru, zelená barva označuje hodnoty ze třetího odběru, modrá barva označuje hodnoty ze čtvrtého odběru, žlutá barva označuje hodnoty z pátého odběru, oranžová barva ze šestého odběru a šedá barva hodnoty ze sedmého odběru.



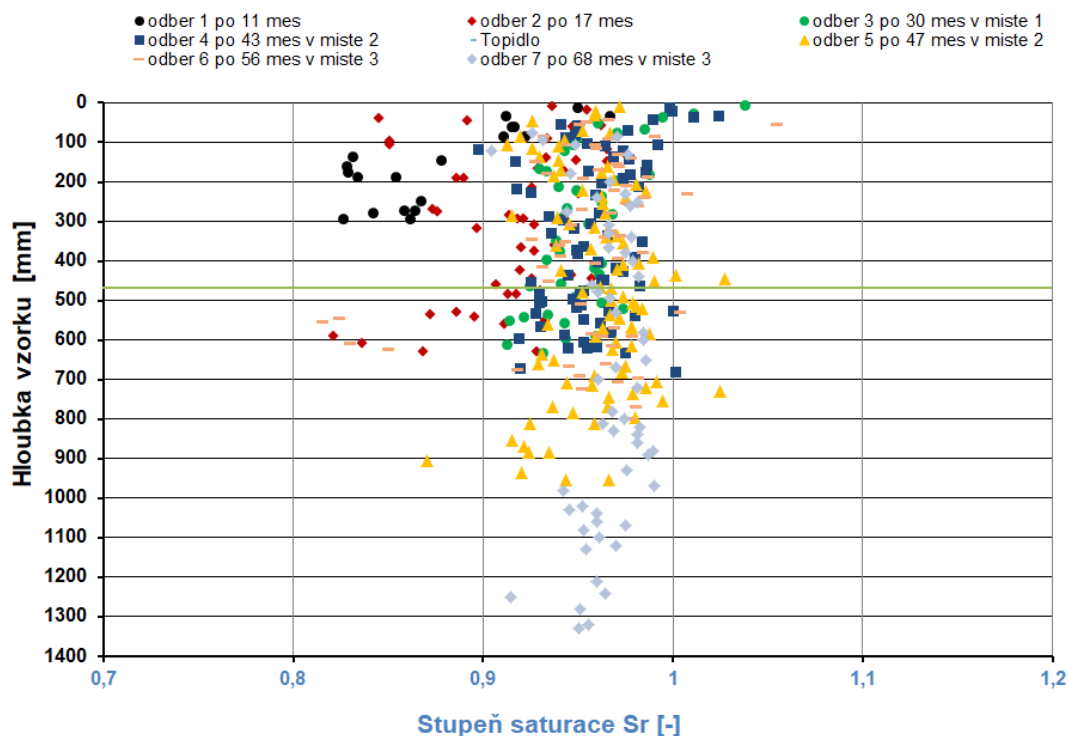
Obr. 91 - Vyhodnocení objemových hmotností sušiny ze vzorků ze šestého a ze sedmého odběru v místě 3 (zelenou čarou je zobrazena vrchní hrana topného tělesa).



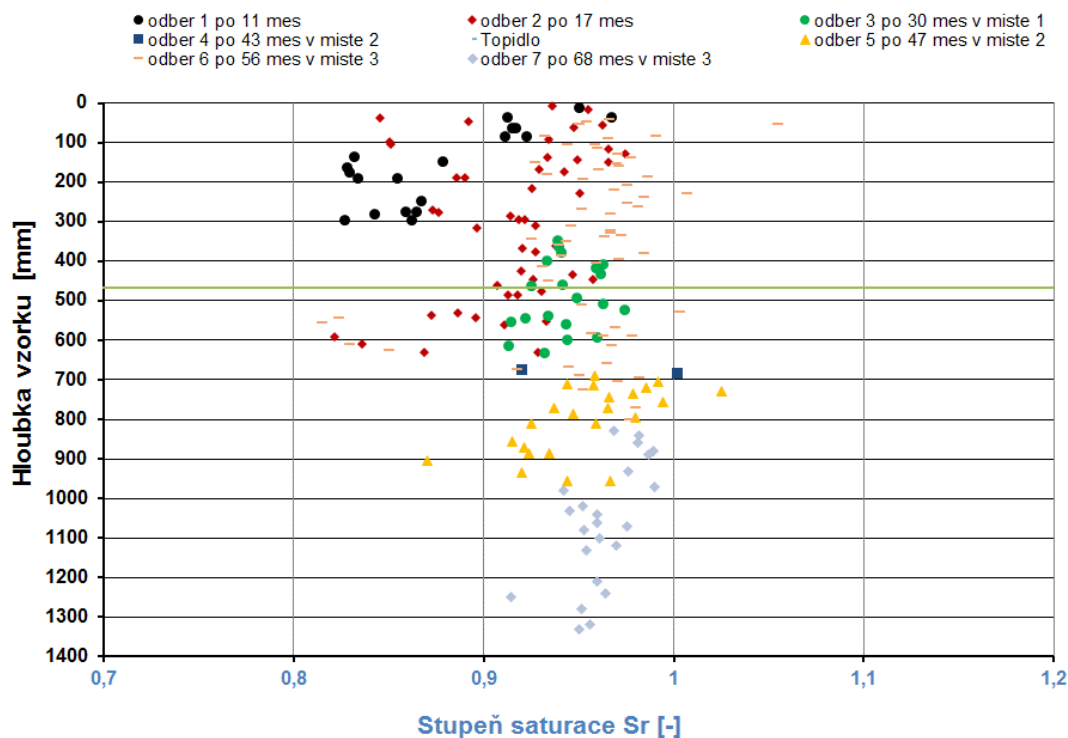
Obr. 92 - Vykreslení hodnot objemové hmotnosti sušiny v závislosti na hloubce vzorku v modelu. V tomto grafu jsou vyneseny pouze výsledky odběrů na původním bentonitu, tj. na bentonitu, který nebyl odebrán v některém z předcházejících odběrů.

6.4.3 Stupeň saturace

Na Obr. 93 jsou vykresleny hodnoty stupně saturace v závislosti na hloubce v experimentu. Stupeň saturace se zhruba od 30 měsíců provozu experimentu blíží plnému nasycení, tzn. 1. U výpočtů z odběrů 1 a 2 a po porovnání s hodnotami stupně saturace z dalších odběrů je možné, že k největším změnám stupně saturace cca uprostřed bentonitové vrstvy došlo v průběhu prvních tří let provozu experimentu. Na Obr. 94 je graf zobrazující hodnoty stupně saturace, které byly vypočteny ze vzorků původního bentonitu pro všechny odběry.



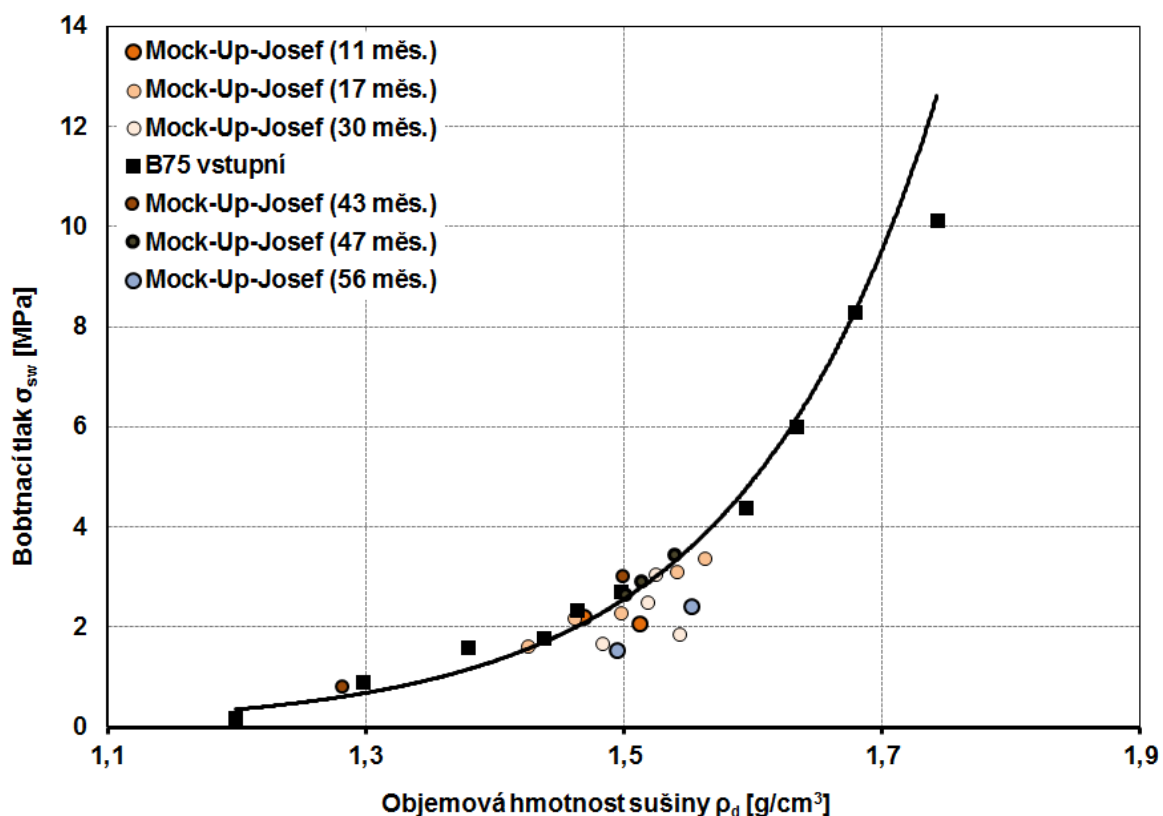
Obr. 93 - Vykreslení hodnot vypočteného stupně saturace v závislosti na hloubce vzorku v modelu. Černá barva značí hodnoty z prvního odběru, červená barva značí hodnoty z druhého odběru, zelená barva označuje hodnoty ze třetího odběru, modrá barva označuje hodnoty ze čtvrtého odběru, žlutá barva označuje hodnoty z pátého odběru, oranžová barva ze šestého odběru a šedá barva hodnoty ze sedmého odběru.



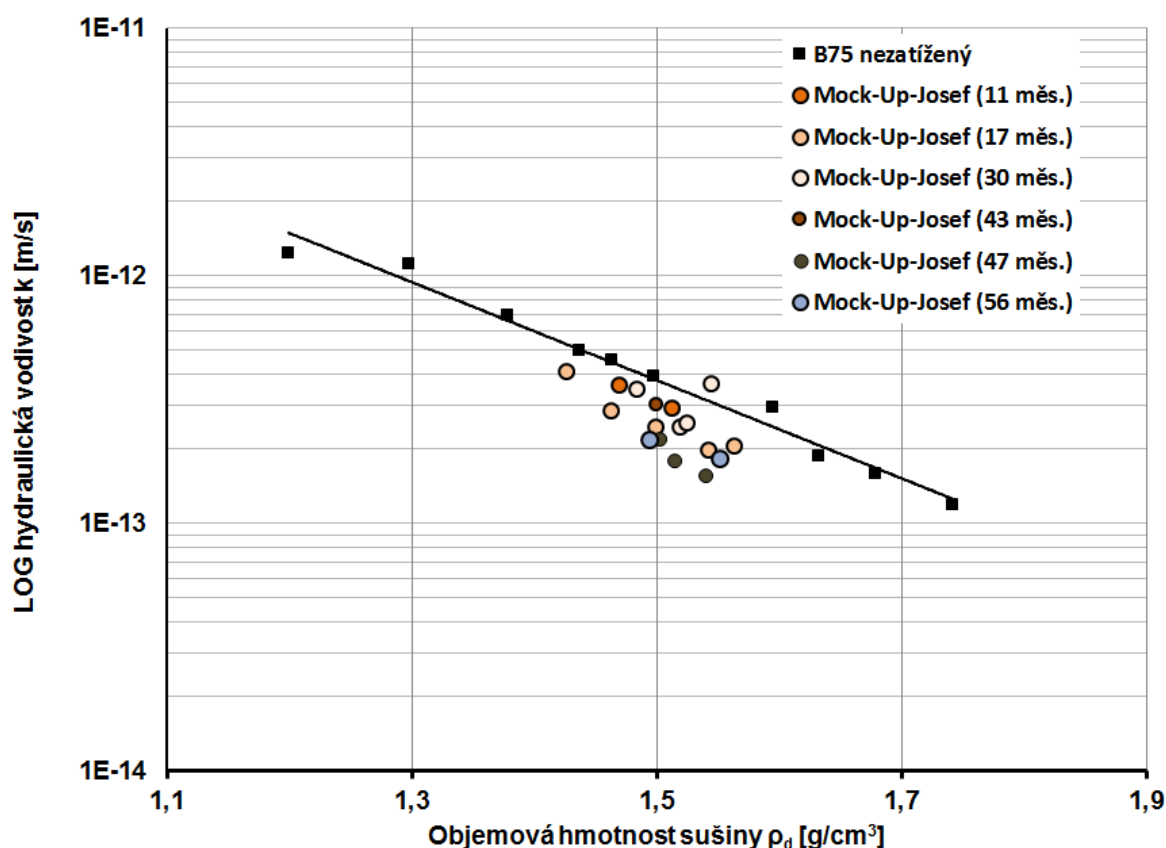
Obr. 94 - Vykreslení hodnot vypočteného stupně saturace v závislosti na hloubce vzorku v modelu. V tomto grafu jsou vyneseny pouze výsledky odběrů na původním bentonitu, tj. na bentonitu, který nebyl odebrán v některém z předcházejících odběrů.

6.4.4 Vyhodnocení hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku

V průběhu projektu byly stanoveny hodnoty hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku bentonitu B 75 pro nezatížený materiál, ale rovněž pro zatížený bentonit. Vyhodnocení je uvedeno graficky na Obr. 95 a Obr. 96. Z vyhodnocení je patrný vliv tepla a saturace na tyto hodnoty. Hydraulická vodivost zatíženého B 75 je nižší než u nezatíženého B 75 a stejně tak je tomu nepatrně u bobtnacího tlaku. Bohužel se v průběhu projektu nepodařilo tyto změny vysvětlit. Téma je však obsáhlé, tzn., bylo by vhodné jej začlenit a rozpracovat v rámci dalšího výzkumu.



Obr. 95 - Porovnání hodnot bobtnacího tlaku materiálu B75: nezatíženého (plné černé čtverečky) a z odběrů z experimentu MCJ, zatížení teplem a přirozenou saturací.



Obr. 96 - Porovnání hodnot hydraulické vodivosti materiálu B75: nezatíženého (plné černé čtverečky) a z odběrů z experimentu MCJ- zatížení teplem a přirozenou saturací.

Tabulka 5 shrnuje výsledky vlivu zatížení bentonitu v různých experimentech. Tabulka byla připravená pro článek Mock-up-Josef experiment – sampling results; Irena Hanusová, Lucie Hausmannová a Jiří Šťástka (2017). Z tabulky je zřejmé, že i v zahraničních experimentech byly pozorovány změny hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku v čase a většina pozorování se shoduje s výsledky z Mock-up-Josef.

Tabulka 5 - Porovnání vlivu zatížení z in-situ experimentů na hydraulickou vodivost a bobtnací tlak bentonitu (jedná se o různé druhy bentonitů):

In-situ experimenty	Hydraulická vodivost	Bobtnací tlak
Mock-up Josef	-	0/-
ABM [22]	0	0/-
CRT [23]	-	0
TBT [24]	0/+	-
LOT [25]	-	0

Zvýšení (+), snížení (-) anebo žádné změny (0) parametrů oproti vstupním hodnotám zkoušených bentonitů; např. u ABM experimentu bylo snížení hodnot bobtnacího tlaku pozorováno pouze u některých bentonitů

6.5 Porovnání s předešlým laboratorním experimentem Mock-up-Cz

Oba experimenty byly realizovány zhruba ve stejném měřítku. Topné těleso bylo svými rozměry zcela identické a půdorysné rozměry bentonitové bariéry (prefabrikátů) byly také stejné. Rozdíly v konstrukčním řešení jsou zřejmé z Obr. 97. Dalším rozdílem je to, že Mock-up-Cz byl realizován v ocelovém válci o vnitřním průměru 800 mm a experiment MCJ ve vrtu v hornině o průměru 750 mm.

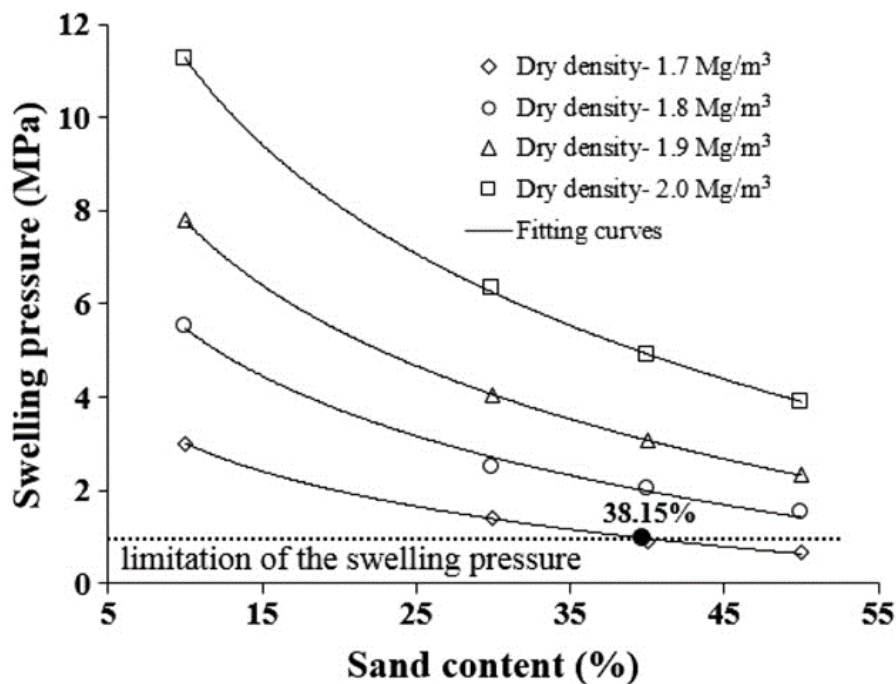


Obr. 97 - Půdorysné řezy experimenty v místě topného tělesa vlevo Mock-up-Cz a vpravo MCJ.

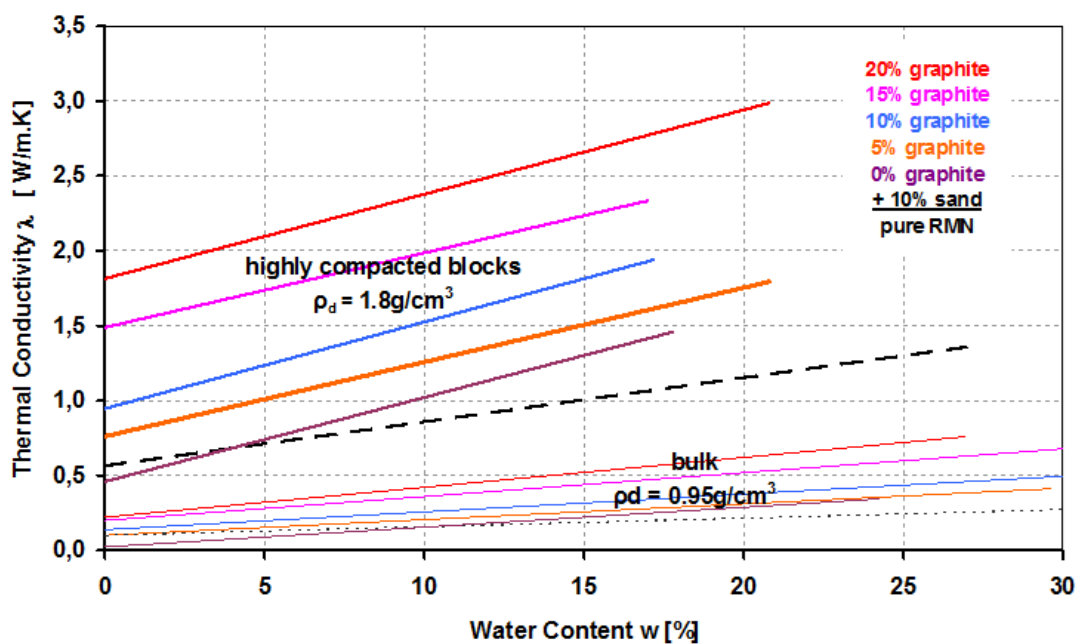
Rozdílný byl také způsob sycení bentonitové vrstvy. U laboratorního experimentu byla vrstva sycena syntetickou granitickou vodou, u experimentu MCJ sycení probíhalo „přírodní“ granitickou vodou. U experimentu MCJ tedy začala saturace téměř okamžitě, protože přítoky do úložného vrtu je složité eliminovat. U experimentu Mock-up-Cz byla saturace experimentu zahájena až zhruba po pěti měsících tepelného zatěžování. Teplota oleje uvnitř topného tělesa byla u experimentu Mock-up-Cz nastavena na 120 °C a u experimentu MCJ je nastavena na 100 °C.

Dalším důležitým rozdílem bylo, že u experimentu MCJ byl použit průmyslově dodávaný bentonit B 75, u experimentu Mock-up-Cz byla použita směs bentonitu, písku a grafitu (v podílu 85/10/5 %). Rozdílné bylo i ložisko původu bentonitu. B 75 je těžený na ložisku Černý vrch a v experimentu Mock-up-Cz byl použit bentonit z ložiska Rokle.

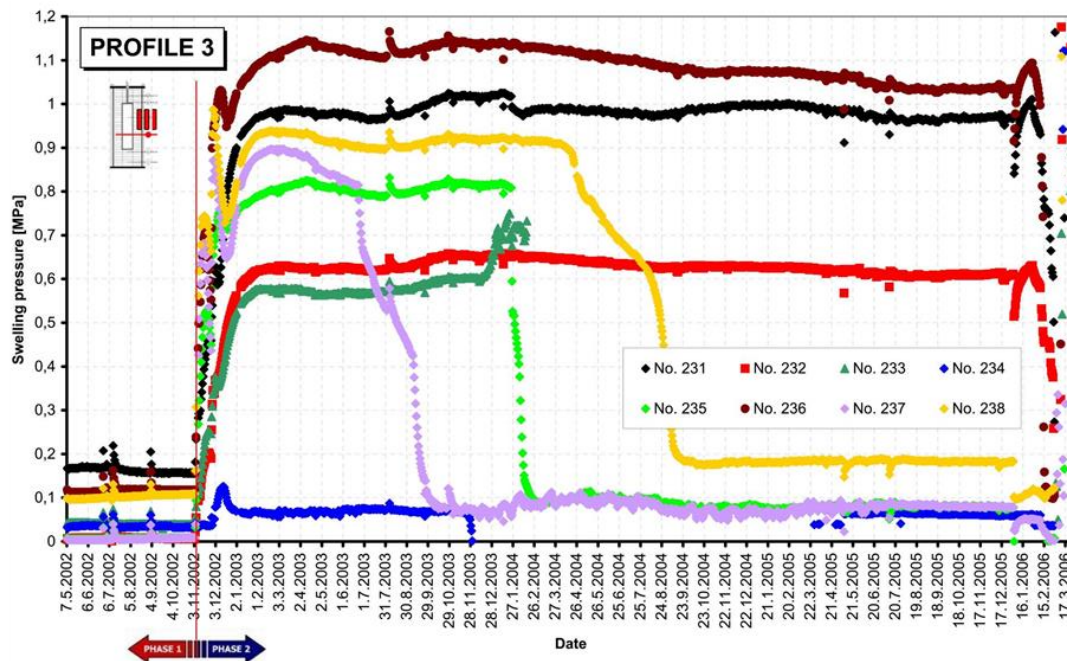
Díky příměsí písku a grafitu byla u experimentu Mock-up-Cz snížena bobtnací schopnost bentonitové vrstvy. Vliv příměsí písku byl např. popsán také v [26] viz graf na Obr. 98. A vzhledem k použití grafitu byla naopak zlepšena její tepelná vodivost, viz např. [27] a graf na Obr. 99. Vzhledem k tomu lze případně srovnat oba modely pouze kvalitním numerickým modelem a ne podle skutečně naměřených dat, i když hodnoty např. tlaků na podobně umístěných profilech jsou srovnatelné, tj. maximální měřený tlak okolo 1 MPa, viz Obr. 100 a Obr. 101.



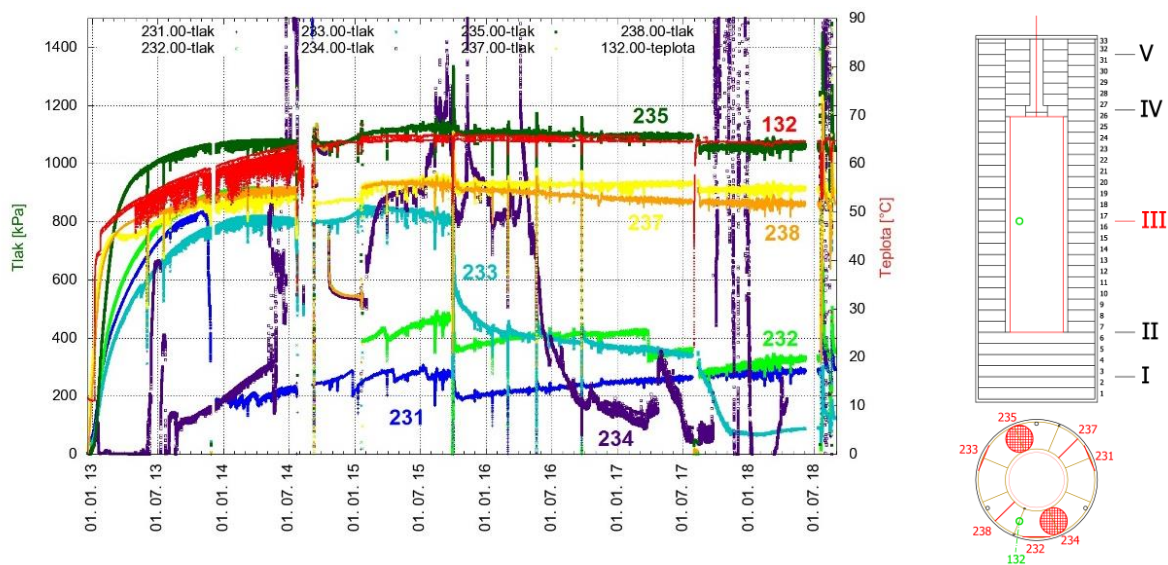
Obr. 98 - Zobrazení vlivu obsahu písku (sand content) na bobtnací tlak (swelling pressure) v bentonitu pro čínský bentonit GMZ [26].



Obr. 99 - Vliv příměsí grafitu (graphite) na součinitel teplotní vodivosti (thermal conductivity) pro různé vlhkosti (water content) českého bentonitu z Rokle [27].



Obr. 100 - Průběh měřených tlaků v experimentu Mock-up-Cz na horizontálním profilu III [12].



Obr. 101 - Vykreslení hodnot z hydraulických tlakových buněk umístěných v profilu III u experimentu MCJ a vykreslení teploty z teploměru 132.00 (vzdálenost od topného tělesa 7 cm).

6.6 Důležité zkušenosti

V této kapitole jsou stručně shrnuty důležité zkušenosti.

- Fyzikální model byl vystaven v povrchové laboratoři, která je vzdálena od úložného místa v podzemí cca 2500 metrů. To lze hodnotit pozitivně, protože bylo nutné řešit dopravu pouze k místu uložení modelu, nikoliv další dopravu, při které by mohlo dojít vlivem otřesů k výraznému poškození bentonitové vrstvy. Bentonitové prefabrikáty nemají téměř žádnou pevnost v tahu a odolnost k dynamickému namáhání, a proto je nutné otřesy při převozu maximálně omezit. I speciálně vyrobený přepravní vozík pro relativně krátkou vzdálenost byl doplněn silentbloky pro eliminaci otřesů.
- Fyzikální model byl uložen do úložného vrtu decentralizovaně, tzn., že spára po odvodu neměla konstantní šířku. To bylo způsobeno nejenom ne zcela rovným dnem ukládacího vrtu (dno bylo vyrovnáno křemičitým pískem), ale také technologií odvrtání vrtu. Velkoprofilové vrtání nezaručuje přesné svislé vrtání a i boky vrtu nejsou rovné. I v budoucích experimentech bude nutné s technologickou spárou počítat, viz např. finský výzkum [20], při kterém bylo provedeno několik testů zaplnění spáry mezi bentonitovou vrstvou a horninou o tloušťce 50 mm (± 25 mm).
- Řetězová digitální čidla jsou vhodná pro měření teplot v bodech ležících na úsečce a vzhledem k tomu, že jsou zapojena na jeden kabel, lze tak ušetřit i počet kabelů v experimentu. Při dalších experimentech bude nutné se více zaměřit na voděodolnost těchto řetězových čidel.
- V průběhu experimentu docházelo k únikům bentonitu okolo víka. Nad víko experimentu byla přivařena ocelová mezikruží, která měla těmto únikům zamezit, ale to se ne zcela podařilo. K únikům bentonitu docházelo i okolo kabelů vedených z experimentu. Nicméně tyto úniky byly ve srovnání s celkovou hmotou bentonitu v bariéře zanedbatelné (řádově kilogramy).
- V případě dalšího podobného výzkumu bude nutné rozhodnout o odběrech z bentonitové vrstvy. Odběry poskytují informace o procesech, které se měnily v čase (např. saturace bentonitu). Na odebraných vzorkách bentonitu je možné provádět další související výzkum (biologie, mineralogie, geotechniky, atd.). Z geotechnického hlediska byl zřejmý vliv odvrtávání bentonitu z místa, kde již byl bentonit odebrán.
- Na řešení podobných experimentů by se měli podílet také odborníci z dalších vědních oborů, např. numeričtí modeláři, biologové, mineralogové, atd.

7 Doporučení na zaměření dalšího výzkumu

Doporučení na další výzkum lze rozdělit na další provozování experimentu, rozebírání experimentu (tzv. dismantling) a navazující výzkum využívající získaná data a poznatky.

7.1 Další provozování experimentu

Pro další provozování experimentu mohou být vhodné čtyři scénáře, a to:

- provozování experimentu se stejným zatěžovacím procesem, tzn. teplotou 90 °C na povrchu topného tělesa,
- vypnutí topného systému a provozování experimentu bez zatížení teplotou,
- vypnutí topného systému a následné opětovné zapnutí topného systému a nebo
- vypnutí topného systému bez dalšího provozování experimentu s okamžitým zahájením rozebírání experimentu.

7.2 Rozebírání experimentu

Geotechnický výzkum se musí zaměřit na rozložení objemové hmotnosti sušiny a vlhkosti v bentonitové vrstvě a dále pak by mohl být zkoumán vliv zatížení v modelu na konzistenční meze, hydraulickou vodivost, bobtnací tlak a na případné změny v termofyzikálních vlastnostech. Před případným rozebíráním by bylo vhodné provést série vertikálních odběrů, protože rozebírání bude trvat několik dnů až týdnů a je pravděpodobné, že dojde v průběhu rozebírání ke změně vlastností bentonitu. Rozebírání experimentu může být také připraveno s ohledem na požadavky dalších vědních oborů, např. mikrobiologický výzkum by se mohl zaměřit na sirmé a sírany redukující bakterie. Další výzkum by mohl být zaměřený na geochemii stejně jako po skončení experimentu Mock-up-Cz. Zkušenost z dismantlingu Mock-up-Cz ukazuje, že je nutné věnovat velkou péči koordinaci a připravenosti všech zúčastněných při odběrech.

7.3 Numerické modelování procesů v bentonitu a v okolní hornině

V dalším navazujícím výzkumu by bylo vhodné provést rozsáhlejší modelování, jehož podkladem budou data z monitoringu, a to jak experimentu MCJ tak předešlého Mock-up-Cz.

7.4 Vliv zatížení teplem a podzemní vodou na hydraulickou vodivost a bobtnací tlak bentonitu

Výsledky z odběrů z MCJ, v souladu s některými informacemi ze zahraničí, poukazují na to, že dlouhodobé zatížení bentonitu může mít vliv na hydraulickou vodivost a bobtnací tlak. Objasnění tohoto problému by mělo být provedeno na základě multidisciplinárního přístupu (geotechnika, mineralogie, geochemie, atd.). Bylo by vhodné připravit laboratorní experimenty, které budou zaměřeny na studium zatížení bentonitu. Experimenty musí mít jasně definované okrajové podmínky. Při těchto zkouškách by také mohlo být objasněno, jaký vliv má metodika získání a manipulace se vzorky či orientace vzorku ke směru lisování bentonitového prefabrikátu.

8 Závěry

V rámci řešení projektu byly splněny všechny dílčí cíle, které byly požadovány technickým zadáním ze Smlouvy o dílo k projektu. Český bentonit B75 je v experimentu dlouhodobě zatěžován teplem do 100 °C a saturován podzemní vodou. Experiment je provozován bez vážnějších problémů již 60 měsíců.

V průběhu přípravy projektu byly stanoveny základní geotechnické parametry bentonitu B 75 z roku 2010.

Po ověření vlastností B 75 bylo přistoupeno k výstavbě prvního českého in-situ modelu úložného místa. Mock-up-Josef byl postaven jako tzv. superkontejner a poté převezen do granitické oblasti Podzemní laboratoře Josef. Výstavba superkontejneru probíhala v povrchové laboratoři u podzemní laboratoře i z důvodu ochrany slisovaného bentonitu proti vysoké vlhkosti v podzemí. Po získaných zkušenostech při výstavbě lze konstatovat, že výstavba podobného experimentu v podzemních podmínkách by byla extrémně náročná.

Vzhledem k nutnosti přepravit model na místo uložení bylo nezbytné navrhnout a zkonstruovat manipulační přípravky (např. manipulační obal, přepravní vozík). Všechny konstrukční části a manipulační pomůcky musely být dimenzovány na hmotnost modelu, která byla dvě tuny.

Hlavní milníky při provozu experimentu jsou: 14. 12. 2012 uložení modelu do připraveného vrtu; 7. 1. 2013 zapnutí topného tělesa na 90 °C, tj. cca 3 týdny po uložení modelu do vrtu a 23. 1. 2013 zvýšení teploty uvnitř topného tělesa na 100 °C.

Hlavní části modelu představovaly bentonitová vrstva z lisovaných bentonitových prefabrikátů (cihel), topné těleso, nerezové konstrukční prvky (dno, víko, perforovaný obal), nosné pozinkované ocelové tyče a prvky monitoringu teploty, tlaku a relativní vlhkosti.

Umístění sice neumožnilo horizontální odběry z bentonitové vrstvy, jako tomu bylo u experimentu Mock-up-CZ, ale tyto byly částečně nahrazeny vertikálními odběry, které byly realizovány ve třech odběrných místech. Dle dostupných informací nebyly doposud u obdobných zahraničních projektů podobné odběry zatížené bentonitové vrstvy provedeny. Odběry poskytly nejenom informace o skutečném stavu bentonitové vrstvy (vlhkosti, objemové hmotnosti, stupeň saturace), ale také poskytly vzorky pro mineralogické a mikrobiologické zkoušky. Vzorky z odběrů byly také použity pro srovnání hodnot hydraulické vodivosti a bobtnacího tlaku mezi zatíženým B 75 a hodnotami vstupními.

Po dohodě s objednatelem výzkumu byly do bentonitové vrstvy umístěny korozní vzorky různých kovových kandidátních materiálů pro ukládací obalový soubor. Vzorky dodaly společnosti Škoda JS a.s. a Energovýzkum s.r.o.

V průběhu monitoringu byla sbírána a vyhodnocována data, a to nejen bentonitové vrstvy, ale také doplňkově z okolního horninového prostředí. I vzhledem k poměrně rozsáhlému monitoringu teplotního pole vznikla unikátní databáze dostupná pro modelování. Ve zprávě jsou graficky prezentována vybraná data z čidel za celou dobu provozu experimentu. Všechna data jsou předána v elektronické podobě jako příloha této zprávy.

Průběhy tlaků v bentonitové bariéře dosud nedosáhly předpokládaných maximálních hodnot. Měřené tlaky se pohybují nejvýše okolo 1 MPa, i když jejich hodnoty byly očekávány spíše okolo 2 MPa. Nedosažení maximálního předpokládaného tlaku v bentonitové vrstvě může být způsobeno mnoha faktory, ale bez důkladného rozebrání, vyhodnocení,

popř. numerického modelu nelze v současnosti jednoznačně identifikovat jeho příčinu. Podle výsledků z odběrů bentonitu je patrné, že došlo k očekávanému snížení objemové hmotnosti sušiny bentonitu na cca $1,55 \text{ g/cm}^3$ oproti vstupní objemové hmotnosti lisovaných bentonitových cihel ($1,75 \text{ g/cm}^3$), a to zřejmě z důvodů bobtnání bentonitu do tzv. technologických spár.

Ustálení všech měřených veličin by mohlo indikovat ustálení procesů vedoucích k homogenizaci bentonitové vrstvy, ale k tomu ani po 60 měsících nedošlo. Z aktuálních výsledků je zřejmé, že sice došlo k ustálení většiny hodnot (především teploty), ale stále jsou patrné změny hodnot u některých tlakových čidel.

Pro další navazující práce byly ve zprávě vypsány možné scénáře provozu experimentu. Dříve než dojde k rozhodnutí o ukončení zatěžování, bylo by vhodné zapojit odborníky na numerické modelování a případně z dalších vědních oborů (mikrobiologie, geochemie, mineralogie, atd.).

9 Bibliografie

- [1] IAEA, . *IAEA Safety Glossary, 2016 Revision*, [online]. Vienna, 2016 [cit. 2017-10-30]. Dostupné z: <https://www-ns.iaea.org/downloads/standards/glossary/iaea-safety-glossary-rev2016.pdf>
- [2] ČSN EN ISO 17892-1: *Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 1: Stanovení vlhkosti*. ARCADIS Geotechnika, a. s, 2014.
- [3] SVOBODA, J. a R. VASICEK. Preliminary geotechnical results from the Mock-Up-CZ experiment. *Applied Clay Science*. 2010, **47**(1-2), 139-146. DOI: 10.1016/j.clay.2008.12.012. ISSN 01691317. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0169131708002949>
- [4] KARNLAND, Ola, Siv OLSSON, Ann DUECK, Martin BIRGENSSON, Ulf NILSSON a Tania HERMAN-HÅKANSSON. *Long term test of buffer material at the Äspö Hard Rock Laboratory, LOT project: Final report on the A2 test parcel* [online]. ISSN 1404-0344 CM Gruppen AB, Bromma, 2009 Svensk Kärnbränslehantering AB Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, 2009, s. 279 [cit. 2017-08-29].
- [5] ÅKESSON, Mattias, Siv OLSSON, Ann DUECK et al. *Temperature buffer test: Hydro-mechanical and chemical/ mineralogical characterizations* [online]. Svensk Kärnbränslehantering AB Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, 2012 [cit. 2017-10-02]. Dostupné z: http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/_Public/44/023/44023223.pdf
- [6] LLORET, A. a M.V. VILLAR. Advances on the knowledge of the thermo-hydro-mechanical behaviour of heavily compacted “FEBEX” bentonite. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 2007, **32**(8-14), 701-715. DOI: 10.1016/j.pce.2006.03.002. ISSN 14747065. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1474706506001835>
- [7] PACOVSKY, Jaroslav, Jiri STASTKA, Lucie HAUSMANNOVA, Zbynek KAISR a Zbynek VENKRBEK. CTU IN PRAGUE, FACULTY OF CIVIL ENGINEERING. *Výstavba, provozování a vyhodnocení demonstračního experimentu Mock-up-Josef: Dílčí zpráva č.1*. Praha, 2011.
- [8] *Nuclear Waste Management of the Olkiluoto and Loviisa Power Plants:: Programme for Research, Development and Technical Design for 2007 – 2009* [online]. OLKILUOTO, FINLAND: Posiva OY, 2006 [cit. 2018-10-17]. Dostupné z: <http://www.posiva.fi/files/345/TKS-2006web.pdf>
- [9] Keramost a.s. - Products - Bentonites - Bentonites for building industry. *Keramost a.s.* [online]. b.r. [cit. 2014-05-20]. Dostupné z: <http://www.keramost.cz/en/products/bentonites/bentonites-for-building-industry>
- [10] DAGMAR, Trpkošová, Večerník PETR, Gondolli JENNY, Havlová VÁCLAVA, Svoboda

JIŘÍ a Hanusová IRENA. Laboratory experiments on bentonite pellet saturation. *Radioactive Waste Confinement: Clays in Natural and Engineered Barriers*. The Geological Society, 2016, , 10. Dostupné také z: https://books.google.cz/books?id=4b_IDgAAQBAJ&pg=PA73&lpg=PA73&dq=Laboratory+experiments+on+bentonite+pellet&source=bl&ots=Qj-9DKJmpW&sig=bGyaZd8onx9FaVaPHJIXWG6jSAY&hl=en&sa=X&ved=0ahUKEwjbgM_22IXUAhWCWiwKHZrdDX8Q6AEIMTAB#v=onepage&q&f=false

- [11] HAUSMANNOVA, Lucie. *Vliv sytícího tlaku na hydraulickou vodivost a bobtnací tlak českých bentonitů*. Praha, 2017. Disertační práce. ČVUT v Praze, Fakulta stavební. Vedoucí práce Ing. Radek Vašíček, Ph.D.
- [12] ČVUT V PRAZE, . *Interní dokumenty Centra experimentální geotechniky*. Praha, b.r.
- [13] PACOVSKÝ, Jaroslav, Jiří SVOBODA, Lucie HAUSMANNOVÁ, Zbyněk VENKRBEČ, Zbyněk KAISR a Jan SMUTEK. *Výstavba, provozování a vyhodnocení demonstračního experimentu Mock-up-Josef: DÍLČÍ ZPRÁVA č.3*. ČVUT v Praze, Fakulta stavební, 2012.
- [14] VILLAR, M. a Antonio LLORET. Dismantling of the first section of the FEBEX in situ test: THM laboratory tests on the bentonite blocks retrieved. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*. 2007, **32**(8-14), 716-729. DOI: 10.1016/j.pce.2006.03.009. ISSN 14747065. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1474706506001860>
- [15] GOUDARZI, Reza, Mattias ÅKESSON a Ulf NILSSON. *Temperature buffer test, Sensors data report (Period 030326–100301) Report No: 13* [online]. Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co, 2010 [cit. 2015-09-18]. Dostupné z: <http://www.skb.se/upload/publications/pdf/P-12-03.pdf>
- [16] ŠTÁSTKA, Jiří. *Řešení problematiky izolování radioaktivních odpadů s využitím fyzikálního modelování*. Praha, 2017. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební. Vedoucí práce Prof. Ing. Jaroslav Pacovský, CSc.
- [17] IKONEN, Kari a Heikki RAIKO. *Thermal Dimensioning of Olkiluoto Repository for Spent Fuel: Working Report 2012-56* [online]. 2012. POSIVA, 2012 [cit. 2014-03-13]. Dostupné z: http://www.posiva.fi/files/3143/WR_2012-56.pdf
- [18] *ASTM D 5334-08: Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Needle Probe Procedure*. West Conshohocken, PA: ASTM International, b.r.
- [19] *ASTM D5930 - 16: Standard Test Method for Thermal Conductivity of Plastics by Means of a Transient Line-Source Technique*. West Conshohocken, PA,: ASTM International, 2016.
- [20] HOLT, Erika, Mia LOIJA, Stefania FORTINO a Pieti MARJAVAARA. *Experimental studies of buffer gap filling with artificial wetting: Working Report 2013-52* [online]. Finland: Posiva, 2014 [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: http://www.posiva.fi/files/3771/WR_2013-52.pdf
- [21] MARJAVAARA, Harri a KIVIKOSKI. *Filling the Gap Between Buffer and Rock in the*



- Deposition Hole: Working Report 2011-33* [online]. In: . 2011. Posiva OY, 2011 [cit. 2013-06-10]. Dostupné z: http://www.posiva.fi/files/1923/WR_2011-33web.pdf
- [22] KUMPULAINEN, Sirpa, Leena KIVIRANTA a Petri KORKEAKOSKI. Long-term effects of an iron heater and Äspö groundwater on smectite clays: Chemical and hydromechanical results from the <I>in situ</I> alternative buffer material (ABM) test package 2. *Clay Minerals*. 2016, **51**(2), 129-144. DOI: 10.1180/claymin.2016.051.2.02. ISSN 00098558. Dostupné také z: <http://openurl.ingenta.com/content/xref?genre=article>
- [23] DUECK, Ann, Lars-Erik JOHANNESSON, Ola KRISTENSSON a Siv OLSSON. *Report on hydro-mechanical and chemical-mineralogical analyses of the bentonite buffer in Canister Retrieval Test: SKB TR-11-07* [online]. Finland: Clay Technology, 2011, , 46 [cit. 2017-8-23]. ISSN 1404-0344. Dostupné z: <http://www.skb.se/publication/2365903/TR-11-07.pdf>
- [24] ÅKESSON, Mattias, Ann DUECK, Ulf NILSSON a Ola KARNLAND. *Temperature buffer test Hydro-mechanical and chemical/ mineralogical characterizations: SKB P-12-06* [online]. In: . Stockholm: Clay Technology AB/ Svensk Kärnbränslehantering AB, 2012, **2012**, s. 84 [cit. 2017-8-23]. ISSN 1651-4416.
- [25] KARNLAND, Ola, Siv OLSSON, Ann DUECK, Martin BIRGERSSON, Ulf NILSSON a Tania HERMAN-HÅKANSSON. *Long term test of buffer material at the Äspö Hard Rock Laboratory, LOT project: SKB TR-09-29* [online]. Stockholm: Svensk Kärnbränslehantering AB, 2009, , 279 [cit. 2017-8-23].
- [26] XU, L., W.M. YE, B. CHEN, Y.G. CHEN a Y.J. CUI. Experimental investigations on thermo-hydro-mechanical properties of compacted GMZ01 bentonite-sand mixture using as buffer materials. *Engineering Geology*. 2016, **213**, 46-54. DOI: 10.1016/j.enggeo.2016.08.015. ISSN 00137952. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0013795216302708>
- [27] VAŠÍČEK, Radek. *Research on the Thermophysical Behaviour of Engineered Barrier Material under Extreme Conditions*. Praha, 2008. PhD thesis. CTU in Prague.

NAŠE BEZPEČNÁ BUDOUCNOST



SÚRAO

Správa úložišť radioaktivních odpadů

Dlážděná 6, 110 00 Praha 1

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

www.surao.cz