

**VÝZKUM MATERIÁLU URČENÉHO PRO KONSTRUKCI
HLUBINNÉHO ÚLOŽIŠTĚ REALIZOVANÝ V PODZEMNÍ
LABORATOŘI JOSEF**

Abstrakt

System pro trvalé uložení vyhořelého jaderného paliva do hlubinného úložiště je vyvíjen ve světě po několik desetiletí a v současnosti je to nejvhodnější způsob, jak vysoce aktivní zářiče dlouhodobě izolovat od biosféry. Bezpečná izolace vysoce radioaktivních odpadů je založena na multibariérovém systému.

Multibariérový systém tvoří dvě základní bariéry – přírodní a inženýrská. Přírodní bariéru představuje stabilní, minimálně porušená hostitelská hornina. Inženýrská bariéra sestává zejména z konstrukce úložného obalového souboru, ve kterém je vyhořelé jaderné palivo hermeticky uzavřeno, a z jílové vrstvy (bufferu) obklopující obalový soubor v místě jeho uložení. Buffer tak zatěsňuje prostor mezi souborem a okolní horninou.

Výstavbě úložiště předchází rozsáhlý výzkum, který musí prokázat bezpečnost vyvíjeného systému. V Centru experimentální geotechniky (dále CEG) Fakulty stavební ČVUT v Praze probíhá výzkum materiálu pro jílovou bariéru. Je zaměřen zejména na specifikaci jejích vlastností, způsoby výstavby a interakce s okolním prostředím. Při stanovování vlastností jílové vrstvy využívá CEG ve své akreditované laboratoři mj. unikátní zařízení k měření propustnosti a bobtnacího tlaku vysoce zhutněných jílu. Souběžně je realizován výzkum materiálů v in situ podmínkách v Podzemní laboratoři Josef.

Klíčová slova: in-situ výzkum, bentonit, hlubinné úložiště, Podzemní laboratoř Josef

Úvod

Podzemní laboratoř Josef byla vybudována v opuštěné štolě, která byla vyražena v letech 1981-1991 jako průzkumné důlní dílo pro zhodnocení zásob zlata v lokalitách Čelina a Mokrsko. Podzemní laboratoř provozuje Centrum experimentální geotechniky (CEG) Fakulty stavební Českého vysokého učení technického. CEG se zabývá nejenom praktickou výukou studentů, ale důležitou náplní práce je experimentální a výzkumná činnost v této podzemní laboratoři. Ve zrekonstruovaném šachetním objektu v areálu štoly Josefu vznikl v roce 2011 unikátní vědecko-technický park Regionální podzemní výzkumné centrum URC Josef (URC Josef). Propojení URC Josef a Podzemní laboratoře Josef poskytuje kvalitní zázemí pro podzemní experimentální a výzkumnou činnost.

Při geologickém průzkumu v 80. letech bylo vyraženo téměř 8 km štol v různých geologických podmínkách. Podzemní dílo je z větší části situováno v tzv. Jílovském pásmu (tufy, tufitické břidlice, basalty, andezity, ryolity aj.) a menší část se nachází

v horninách Středočeského plutonu (granodiority – tonalit). I vzhledem k různým geologickým podmínkám a dobrému zázemí pro výzkum je v Podzemní laboratoři Josef řešena řada výzkumných projektů.

Jednou z řešených problematik je výzkum materiálů pro bezpečné uložení vyhořelého jaderného paliva, který je zaměřen na ověření vlastností materiálů určených pro výstavbu hlubinného úložiště a na technologické postupy pro aplikaci těchto materiálů. Problematika ukládání je řešena ve spolupráci se zahraničními a tuzemskými specializovanými pracovišti. Především se jedná o výzkum jílové zeminy - bentonitu¹. Bentonit by měl být v multibariérovém systému uložení jednou z bariér. Bentonitová bariéra a konstrukce úložného obalového souboru spolu tvoří tzv. inženýrskou bariéru. Druhou bariérou, tzv. přírodní, je hostitelská geologická formace a dostatečná hloubka uložení (okolo 500 m).

Využití bentonitu v konstrukci hlubinného úložiště je ve světě řešeno po desítky let a vhodnost bentonitu je také zjišťována a ověřována na přírodních analozích, ve kterých brání bentonit migraci radionuklidů po stovky tisíc let. Tedy po podobnou dobu, po kterou musí konstrukce hlubinného úložiště omezit migraci radionuklidů do biosféry. Životnost konstrukce hlubinného úložiště odpovídá poločas rozpadu nejstabilnějších radionuklidů obsažených v kontejneru s vyhořelým jaderným odpadem. V případě úniku radionuklidů přes konstrukci kontejneru, nízké propustný bentonit i přes geologickou formaci musí být aktivita „uniklých“ radionuklidů nižší, než je přirozená aktivita zemského povrchu.

Bentonit by měl mít v hlubinném úložišti dvoje využití. V prvním případě se předpokládá využití bentonitu jako materiálu pro výplň přístupových štol, šachet a zátek². Bentonit či materiál pro výplň se nazývá převzatým termínem backfill. Termín buffer označuje těsnící materiál, kterým bude obklopen kontejner. Hlavním funkcí bufferu je maximální možné omezení případné migrace radionuklidů z kontejneru do horniny. V Obr. 1 je vyznačeno umístění backfillu a bufferu a z obrázku jsou patrné dva možné způsoby uložení kontejneru – vertikální a horizontální.

Výzkum bentonitů v CEG

Výzkumem a experimentálním testování bentonitů se CEG zabývá již cca 15 let. Jedním z významných laboratorních projektů byl Mock-Up-CZ (2000 - 2008). Náplní projektu byla výstavba, provozování a vyhodnocení modelu, ve kterém byly simulovány podmínky v hlubinném úložišti. V modelu byl bentonit použit ve směsi s pískem a grafitem (v poměru 85/10/5). Zatížení teplem při současné saturaci granitickou vodou trvalo 4 roky. Model byl plně instrumentován a umožňoval kontinuální měření všech důležitých parametrů. Experiment poskytl informace o „dlouhodobém“ chování těsnící bariéry. Během provozování bylo naměřeno přes 25 mil. údajů popisujících vývoj (změny) teploty, bobtnacího tlaku, relativní vlhkosti, objemové hmotnosti, vlhkosti, spotřeby saturačního media (granitické vody), spotřeby energie i napjatostního stavu experimentální nádoby [1.].

Na laboratorní výzkum bentonitů navazuje výzkum realizovaný v URC Josef a v Podzemní laboratoři Josef. Jedním z prvních in-situ projektů zaměřených na bentonit byl „Stříkaný backfill“. Ve dvouletém projektu by vyvinuta technologie pro

¹ Bentonit je reziduální, nepřemístěná jílovitá zemina s vysokou sorpční schopností, s vysokou bobtnací schopností, s nízkou propustností a s dobrou plasticitou.

² Zátky budou v úložišti oddělovat štol s uloženými kontejnery od štol, které ještě nebudou zaplněny.

pneumatickou aplikaci bentonitů. Technologie vychází z rozšířené technologie stříkaného bentonitu. V průběhu projektu bylo odladěno složení nástřikové sestavy a složení směsi bentonitu. Zároveň s experimentálními testy probíhalo laboratorní ověřování vlastností připravovaných směsí. Na závěr projektu byl v Podzemní laboratoři Josef proveden in-situ test nástřiku bentonitové směsi. Při testu byl vystavěn model možného zaplnění přístupových štol v hlubinném úložišti. Z Obr. 2 je zřejmý postup výstavby modelu. Nejdříve byla zhutněná spodní část štoly. Materiálem hutněné části modelu byla směs bentonitu a drceného kameniva. Směs byla namíchána v poměru 1:1. Po zhutnění zhruba 2/3 štoly byla zbývající část u kaloty štoly zastříkána novou technologií stříkaného backfillu. V rámci projektu byl například ohodnocen i vliv tzv. příměsově vody, která vlhčí bentonit při nástřiku v trysce, na dosažené zhutnění materiálu (Obr. 3). Z grafu v Obr. 3 je patrné dosažené zhutnění bentonitu ve většině odebraných vzorků přes limit $1,4 \text{ g/cm}^3$ (1400 kg/m^3).

Vzhledem k pozitivním výsledkům z projektu Stříkaný backfill byl realizován projekt „Stříkaný buffer“ - Výzkum možnosti využití stříkaného bentonitu pro konstrukci těsnicí vrstvy (buffer) hlubinného úložiště [4.]. Cílem projektu Stříkaný buffer bylo odzkoušet technologii vysokotlakého nástřiku se strojem Mixokret. Mixokret je stroj původně určený pro mísení a dopravu betonových vlhkých směsí. Náplní projektu bylo také odzkoušení možnosti využít směs bentonitu a drceného ledu. Použití drceného ledu je vhodné pro rovnoměrné provlhčení bentonitu. Vlhčení bentonitu je jednou z důležitých částí technologického postupu pro pneumatický nástřik, protože bez navlhčení nelze bentonit zhutnit na hodnoty požadované pro konstrukci hlubinného úložiště. V závěru projektu Stříkaný buffer byla technologie odzkoušena při aplikaci do makrovzorků. Výsledky zhutnění bentonitu nedosáhly požadované hodnoty pro těsnění kontejneru, ale výzkum poskytl informace, ze kterých lze čerpat při přípravě dalších projektů pro technologické řešení výstavby hlubinného úložiště. Graf č. 2. seznamuje s výsledky zhutnění materiálu po aplikaci. U nástřiků sledované zhutnění nepřesáhlo minimální požadovanou míru objemové hmotnosti sušiny (minimální požadovaná $\rho_d=1,4 \text{ Mg/m}^3$) pro zkoušený materiál.

Dalším projektem, který se zabýval bentonitem, byl projekt „Výzkum vlastností materiálů pro bezpečné ukládání radioaktivních odpadů a vývoj postupů jejich hodnocení“ [5.]. Projekt byl financován ze zdrojů Ministerstva průmyslu a obchodu. Koordinátorem byl Ústav jaderného výzkumu Řež .a. s. a spolupracovaly na jeho řešení další tři výzkumné organizace. V rámci projektu bylo provedeno testování změn důležitých parametrů při dlouhodobém vystavení podmínkám předpokládaným v úložišti. Testy byly realizovány v laboratorních i in situ podmínkách horninového prostředí podzemní laboratoře. Práce se soustředily především na vyzkoušení navržených postupů testování a odzkoušení vyvinutých přípravků a zařízení používaných při testech. In-situ experimenty umožnily výzkum vlivu působení podzemní vody a tepla na stabilitu geochemických i geotechnických parametrů. Dále byly uskutečněny testy interakce různých materiálů, např. bentonit – ocel.

Další podpořeným projektem ze zdrojů Ministerstva průmyslu a obchodu je projekt „Výzkum stability bentonitu v in-situ podmínkách při teplotách do 95°C . Do projektu jsou zapojeny čtyři výzkumné organizace pod vedení firmy Watrad s.r.o. V rámci projektu je v podzemní laboratoři zatěžováno experimentální zařízení (válec bentonitu) teplotou do 95°C . Válec bentonitu byl v roce 2013 umístěn do experimentální studny vyvrtané do počvy jedné ze štol. Tepelnou zátěží je zajištěna

zvýšená interakce vznikajících procesů. Předmětem projektu je hlavně studium interakcí bentonit-granit a bentonit-ocel. Projekt bude ukončen a vyhodnocen v roce 2015 [7.].

Mock-up Josef

Nejvýznamnějším projektem, který je v současnosti v podzemní laboratoři provozován, je demonstrační experiment Mock-up Josef (MUJ), který CEG realizuje pro Správu úložišť radioaktivních odpadů. MUJ je prvním in-situ experimentem svého druhu na území České republiky. Jednou z podmínek bylo testování českého bentonitu.. Důležitými sledovanými geotechnickými parametry jsou nízká hydraulická vodivost a vysoký bobtnací tlak. Pro projekt vybraný bentonit z ložiska Černý vrch (těží Keramost a.s.) splňuje požadavky od objemové hmotnosti sušiny cca 1,4 g/cm³. Hlavní částí modelu je bentonitová bariéra, která se skládá z 33 vrstev bentonitových prefabrikátů, které byly vylisovány na objemovou vlhkost sušiny okolo 1,75 g/cm³. Předpokládá se, že výsledná průměrná objemová hmotnost sušiny v modelu neklesne pod 1,5 g/cm³, a to i po zaplnění všech spár a volných prostor např. mezi jednotlivými bloky. Bentonitová vrstva je v modelu zatěžovaná teplem a podzemní vodou z okolní horniny. Zatížení teplem je zajištěno do bariéry vestavěným topným tělesem. Teplota je udržována na 95°C. Z horniny je bentonit postupně saturován vodou. Model byl vystaven v URC Josef a převezen jako tzv. superkontejner k místu uložení. Pro uložení modelu byla ve vybrané rozrážce vyvrtána velkoprofilová studna o průměru 750 mm a hloubce 2800 mm. Rozměry studny byly navrženy podle rozměrů modelu (průměr 700 mm a výška 2230 mm). Na Obr. 5 je znázorněná konstrukce modelu včetně základních rozměrů a umístění topného tělesa.

Probíhající procesy uvnitř zatížené bentonitové bariéry jsou monitorovány čidly. Čidla jsou soustředěna do pěti měřících horizontální profilů (viz Obr. 5). V modelu je sledován vývoj tlaku, který způsobuje zvětšení objemu bentonitu (bobtnání) při přijímání vody. Dále je sledován vývoj šíření tepla bentonitovou bariérou a rychlost saturace bentonitu pomocí čidel pro měření relativní vlhkosti. Důležité během provozu modelu je průběžné odebírání vzorků bariéry. CEG vyvinulo přípravek, kterým se odběry provádí. Obr. 6 – Foto odebraného jádra z fyzikálního modelu Mock-up Josef (archiv autora článku). U vzorků jsou sledovány vývoj saturace (měření objemové hmotnosti a vlhkosti), hydraulická vodivost a bobtnací tlak. Některé ze vzorků byly předány objednateli výzkumu, který na vzorcích sleduje případné změny mineralogie.

Model obklopující hornina je také monitorována, a to hlavně teplotními čidly, které tak poskytují informace o šíření tepla mimo bentonitovou bariéru. Mimo teploty je v hornině sledováno přetvoření a případné deformace výrubu.

Stejně jako u Mock-up-CZ jsou měřená data průběžně ukládána a deseti minutový interval zabezpečuje kontinuální sledování procesů a dostatečné množství dat pro matematický model ukládacího místa.

Dopas

DOPAS je zkratka pro mezinárodní projekt, jehož částí je i řešení výzkumného úkolu v Podzemní laboratoři Josef. Projekt DOPAS (Demonstration of Plugs and Seals), kterého se účastní 14 evropských organizací, je zaměřen na konstrukční řešení zátek pro potřeby hlubinného úložiště radioaktivních odpadů. Finančně je projekt podpořen ze 7. rámcového programu EURATOM. V podzemní laboratoři je realizován demonstrační experiment EPSP (Experimental Pressure and Sealing Plug). Konstrukční řešení experimentu bylo navrženo v CEG a je v souladu s referenčním

projektem hlubinného úložiště z roku 2011 [8.]. EPSP je složen z těchto částí: tlakovací komory, vnitřní zátky ze stříkaného vláknobetonu, bentonitového těsnění, filtru, vnější zátky z litého betonu a hostitelského horninového prostředí.

Závěr

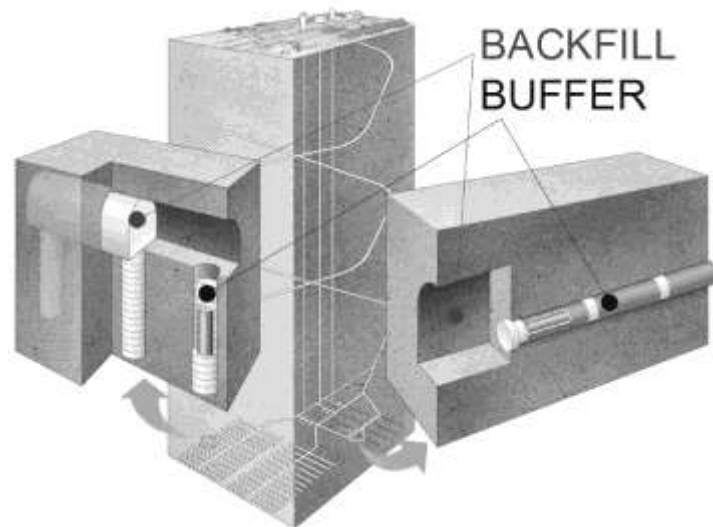
V Podzemní laboratoři probíhá řada výzkumných projektů. Článek seznamuje s výzkumem, jehož hlavním cílem je testování bentonitu pro potřeby ukládání vysoce aktivních odpadů. V rámci projektů jsou vlastnosti bentonitu zjišťovány, ověřovány a vznikají výsledky či jsou soustředěna data, která budou využity pro návrh finální konstrukce hlubinného úložiště či pro modely simulující dlouhodobé zatížení. V podzemní laboratoři jsou realizovány i demonstrační experimenty, při kterých jsou nové technologie odzkoušeny v reálném měřítku.

Poděkování:

Účast na 53. ročníku symposia Hornická Příbram ve vědě a technice byla finančně podpořena z projektu FR-TI4/497 (Výzkum stability bentonitu v in-situ podmínkách při teplotách do 95°C) financovaného ze zdrojů Ministerstva průmyslu a obchodu.

Literatura:

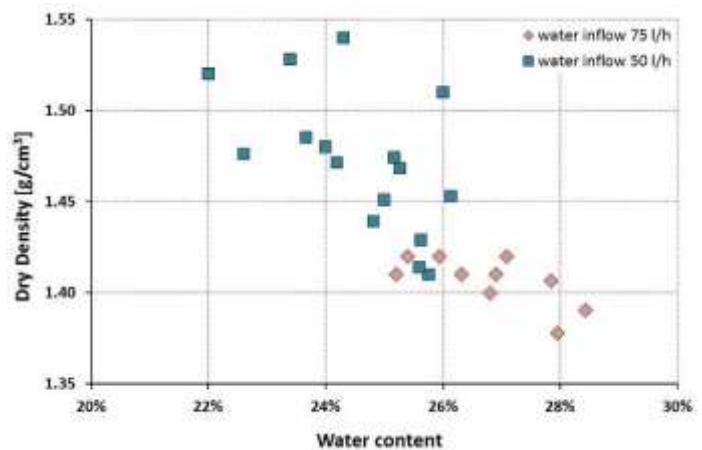
- [1.] Pacovský, J.; The use of the Mock-up-Cz physical model in the design of engineered barriers; In: Management of Natural Resources, Sustainable Development and Ecological Hazards. Southampton: WIT Press, 2007, p. 827-836. ISSN 1746-448X. ISBN 1-84564-048-9.
- [2.] Hausmannová, L. - Vašíček, R. - Šťástka, J.; Sprayed clay technology for the deep repository of high-level radioactive waste; In: Rudarsko-Geološko-Naftni Zbornik. 2012, vol. 2012 (24), no. 24, p. 29-33. ISSN 0353-4529.
- [3.] Svoboda, J. - Šťástka, J. - Smutek, J.; Verification of Sprayed Clay Technology with Respect to the Geological Disposal of Radioactive Waste; In: Acta Geodynamica et Geomaterialia. 2014, vol. 2014, no. 174, p. 145-152. ISSN 1211-1910.
- [4.] Pacovský, J. - Šťástka, J. - Hausmannová, L. - Venkrbec, Z.; Výzkum možnosti využití stříkaného bentonitu pro konstrukci těsnící vrstvy hlubinného úložiště [Výzkumná zpráva]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, 2011. 830-031860A. 61 s.
- [5.] Vašíček, R. - Hausmannová, L. - Holíková, P. - Smutek, J. - Levorová, M. - et al.; Závěrečná zpráva řešení Podetapy 4.1 projektu FR-TI1/362: Výzkum vlastností materiálů pro bezpečné ukládání radioaktivních odpadů a vývoj postupů jejich hodnocení; [Výzkumná zpráva]. Praha: ČVUT v Praze, Fakulta stavební, Centrum experimentální geotechniky, 2011. FR-TI1/362 4.1. 72 s.
- [6.] Šťástka, J.; Mock-up Josef Demonstration Experiment; In: Tunel. 2014, vol. 23, no. 2, p. 65-73. ISSN 1211-0728.
- [7.] Pacovský, J. - Svoboda, J. - Vašíček, R. - Šťástka, J. - Levorová, M. - et al. Dílčí zpráva za II. Etapu - Temperace a monitoring fyzikálního modelu, [Výzkumná zpráva]. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební, 2013. 32 s.
- [8.] Dvořáková, M. - Hanusová, I. - Svoboda, J. - Vencel, M.; Experiment EPSP - Stavba zátky pro hlubinné úložiště radioaktivních odpadů v rámci evropského projektu DOPAS; In: Tunel. 2014, roč. 23, č. 2, s. 4-10. ISSN 1211-0728.
- [9.] SKB [online]. 2008 [cit. 2011-03-10]. Our method of final disposal. Available from: http://www.skb.se/Templates/Standard_24109.aspx



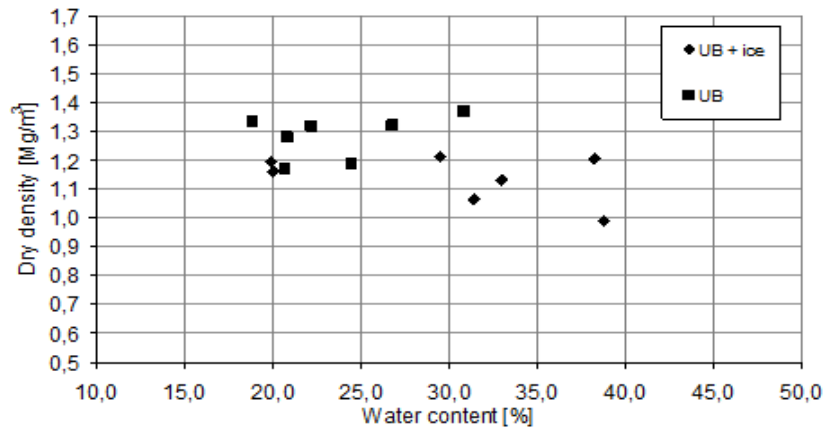
Obr. 1 – Schéma konstrukce hlubinného úložiště s vyznačením výplňového a těsnícího materiálu [9.]



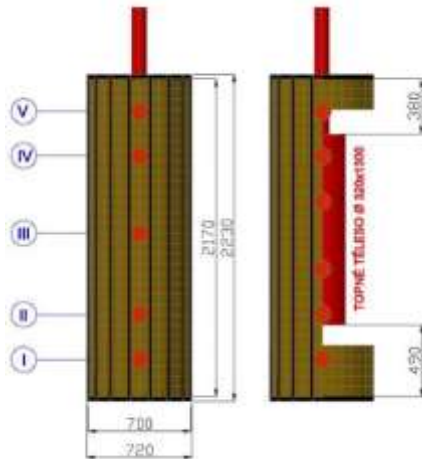
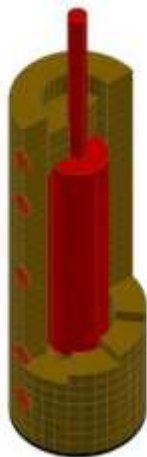
Obr. 2 – Výstavba modelu zaplnění přístupových štol hlubinného úložiště v jedné ze štol Podzemní laboratoře Josef [1.]



Obr. 3 – Ukázka z nástřiku bentonitu technologií Stříkaného backfillu a grafické znázornění výsledků zhutnění bentonitu po nástřiku, z grafu je patrný vliv přítoku vody do nástřikové trysky (water inflow) na dosažené zhutnění - objemovou hmotnost sušiny (dry density v g/cm^3) a vlhkost (water content v %) [1.]



Obr. 4 – Foto vzorku po nástřiku a grafické znázornění výsledků objemové hmotnosti sušiny (dry density v Mg/m^3) a vlhkosti (water content v %) po nástřiku vzorků materiálu označeného jako Ultra bentonit UB [3.]

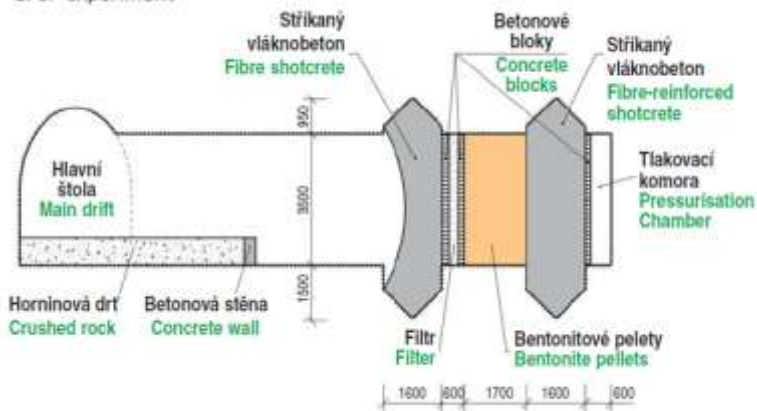


Obr. 5 - Rozměry modelu Mock-up Josef v mm s naznačeným umístěním topného tělesa a s označením umístění vodorovných monitorovacích profilů (I až V) [5.] Vpravo foto ze spuštění modelu do úložné studny (foto archiv autora článku).



Obr. 6 – Foto odebraného jádra z fyzikálního modelu Mock-up Josef (archiv autora článku)

EPSP experiment



Obr. 7 – Demonstrační experiment zátky EPSP (vlevo konstrukční řešení – podélný řez zátkou,