

EXPERIMENT EPSP – STAVBA ZÁTKY PRO HLUBINNÉ ÚLOŽIŠTĚ RADIOAKTIVNÍCH ODPADŮ V RÁMCI EVROPSKÉHO PROJEKTU DOPAS

EPSP EXPERIMENT – CONSTRUCTION OF A PLUG FOR A DEEP GEOLOGICAL RADIOACTIVE WASTE REPOSITORY AS PART OF THE EUROPEAN DOPAS PROJECT

MARKÉTA DVOŘÁKOVÁ, IRENA HANUSOVÁ, JIŘÍ SVOBODA, MAREK VENCĽ

ABSTRAKT

Mezinárodní projekt DOPAS (*Demonstration of Plugs and Seals*), kterého se účastní 14 evropských organizací (Posiva, ANDRA, DBE-TEC, GRS, Nagra, NDA, SÚRAO, SKB, ČVUT, NRG, GSL, BTECH, VTT, ÚJV Řež, a. s.) je zaměřen na konstrukční řešení zátek pro potřeby hlubinného úložiště radioaktivních odpadů. Finančně je projekt podpořen ze 7. rámcového programu EUROATOM. Česká část projektu DOPAS (experiment EPSP – *Experimental Pressure and Sealing Plug*) je realizována v Regionálním podzemním výzkumném centru URC Josef (Čelina-Mokrsko). Cílem EPSP je výstavba, monitoring a ověření funkčnosti zátky, ale také detailní charakteristika všech materiálů, které byly pro konstrukci využity.

ABSTRACT

The international DOPAS project (*Demonstration of Plugs and Seals*), which involves the participation of 14 European organisations (Posiva, ANDRA, DBE-TEC, GRS, Nagra, NDA, SÚRAO, SKB, ČVUT, NRG, GSL, BTECH, VTT, ÚJV Řež, a. s.), is concerned with the structural solution for sealing plugs to be used in deep geological radioactive waste repositories. The project is funded by the 7th framework programme – EURATOM. The Czech contribution to the DOPAS project (the EPSP experiment – *Experimental Pressure and Sealing Plug*) consists of an experiment which is being conducted at the Josef Regional Underground Research Centre (Josef URC, Čelina-Mokrsko). The aims of the EPSP experiment are to develop, monitor and verify the functionality of such plugs and to determine a detailed characterisation of the materials from which they are constructed.

1 ÚVOD

Program vývoje hlubinného úložiště radioaktivních odpadů (HÚ) v České republice je založen především na dlouhodobé bezpečnosti uložení vysokoaktivních odpadů. Ke zvýšení bezpečnosti přispěje také konstrukce zátek a těsnících systémů, které jsou v hlubinném úložišti plánovány. V konceptu hlubinného úložiště je navrženo několik typů těchto zátek. Jejich úkolem je bezpečné utěsnění a uzavření jednotlivých ukládacích prostor nejen po celou dobu provozu úložiště, ale i po jeho trvalém uzavření. Zátka musí být konstruována tak, aby odolala vysokým tlakům vznikajícím v důsledku hydrostatického tlaku a objemových změn inženýrských bariér.

Cílem mezinárodního projektu DOPAS je navrhnout využití systému zátek v HÚ, vytvořit detailní design a materiálovou charakteristiku, otestovat stavební technologie a realizovat čtyři experimentální zátky v in-situ prostředí.

Tento čtyřletý (2012–2016) projekt je podporovaný ze zdrojů Evropské komise (7. rámcový program, EURATOM). Koordinátorem projektu je finská společnost Posiva. DOPAS má celkem 14 partnerů z 8 evropských zemí (Posiva, ANDRA, DBE-TEC, GRS, Nagra, NDA, SÚRAO, SKB, ČVUT, NRG, GSL, BTECH, VTT, ÚJV Řež, a. s.).

V roce 2012 byla zahájena výstavba zátky ve švédské podzemní laboratoři Äspö v prostředí granitických hornin, kde jsou přítomny vody s poměrně vysokou salinitou (~75 g/l) (Puigdomeneck, ed., 2001) na rozdíl od českých granitoidů (Pačes, T. et al., 2010).

Finsko realizuje zkušební zátka v podzemní charakterizační laboratoři Onkalo. Ta je umístěna na ostrově Olkiluoto v prostředí migmatitických rul (Dixon et al., 2013).

Ve francouzské laboratoři v Saint Dizier je realizován experiment primárně zaměřený na výzkum těsnících systémů v jílovcích, které jsou finální hostitelskou horninou pro umístění HÚ ve Francii (např. Montes et al., 2004).

1 INTRODUCTION

The programme for the development of a deep geological radioactive waste repository (DGR) in the Czech Republic is based first and foremost on the safe disposal of long-lived highly-active radioactive waste. The safety of such repositories will be enhanced by the efficient performance of the plugs and sealing systems which will make up an important part of the overall disposal system. Several types of sealing plugs will be required, the function of which will be to provide for the sealing and closure of individual waste packages not only throughout the period of repository operation, but also following the permanent closure of the facility. Such plugs will have to provide a high level of resistance to the considerable pressure which will be exerted by hydrostatic forces and volumetric changes within the engineered barriers.

The objective of the DOPAS international project is to design a sealing plug system for DGR use, provide detailed plans for the design of such plugs, test both the characteristics of the materials to be used and the construction technology and to install four experimental in-situ plugs.

This four-year (2012–2016) project is being funded from European Commission financial resources (7th framework programme, EURATOM) and the project coordinator is Finland-based Posiva. A total of 14 partners from 8 European countries are involved in the project (Posiva, ANDRA, DBE-TEC, GRS, Nagra, NDA, SÚRAO, SKB, ČVUT, NRG, GSL, BTECH, VTT, ÚJV Řež, a. s.).

In 2012 the construction of a sealing plug commenced at the Äspö underground laboratory (Sweden) in a granitic rock environment containing water with a relatively high level of salinity (approximately 75g/l) (Puigdomeneck, ed., 2001) in contrast to Czech granitoids (PAČES, T. et al., 2010).

In Finland a similar plug is undergoing testing at the Onkalo underground laboratory located on the island of Olkiluoto in a migmatitised gneiss rock environment (Dixon et al., 2013).

Český experiment EPSP vzniká v reálném horninovém prostředí granitoidů (v Regionálním podzemním výzkumném centru URC Josef). Koncept tohoto experimentu je založen na primárním využití českých materiálů a technologií dostupných v České republice. Jeho úkolem je demonstrovat technickou proveditelnost a funkčnost tlakové zátky umístěné v budoucím hlubinném úložišti radioaktivních odpadů.

2 POPIS PROJEKTU EPSP

Technické řešení zátky bylo navrženo v Centru experimentální geotechniky ČVUT v Praze a vycházelo z konstrukčního návrhu v referenčním projektu 2011 (Pospíšková et al., 2012).

Experiment EPSP, který je rozdělen do 4 etap, realizuje české sdružení partnerů (SÚRAO, ČVUT a ÚJV Řež, a. s.).

První etapa byla zaměřena především na nezbytné laboratorní ověření vhodnosti materiálů použitých pro konstrukci zátky; zejména bentonitu a betonové směsi, na jejichž kvalitu a detailní charakteristiku byl kladen při návrhu zátky největší důraz.

V laboratořích ÚJV Řež, a. s. pak vznikl samostatný fyzikální model v laboratorním měřítku. Cílem tohoto modelu je získání dat pro kalibrace numerických modelů saturace bentonitového materiálu.

Náplní druhé etapy je samotná stavba experimentu, která byla zahájena v roce 2013 injektážními a vrtnými pracemi v experimentální rozrážce M-SCH-Z/SP-59 (obr. 1). Na tyto práce poté plynule naváže výstavba zátky včetně instrumentace celého experimentu a technologického zázemí.

Třetí etapou je tlakování sytícími médii, kdy bude zátka vystavena tlaku až 7 MPa. Po celou dobu bude probíhat kontinuální monitoring experimentu a technologie.

Poslední etapa výzkumu je zaměřena na vyhodnocení dat a poznatků získaných z insitu a laboratorních měření pomocí numerické analýzy a modelování. Výstupem je ověření provozní bezpečnosti konstrukčních prvků zátek v hlubinném úložišti a doporučení pro jejich budoucí realizaci.

3 UMÍSTĚNÍ ZÁTKY V HORNINOVÉM PROSTŘEDÍ

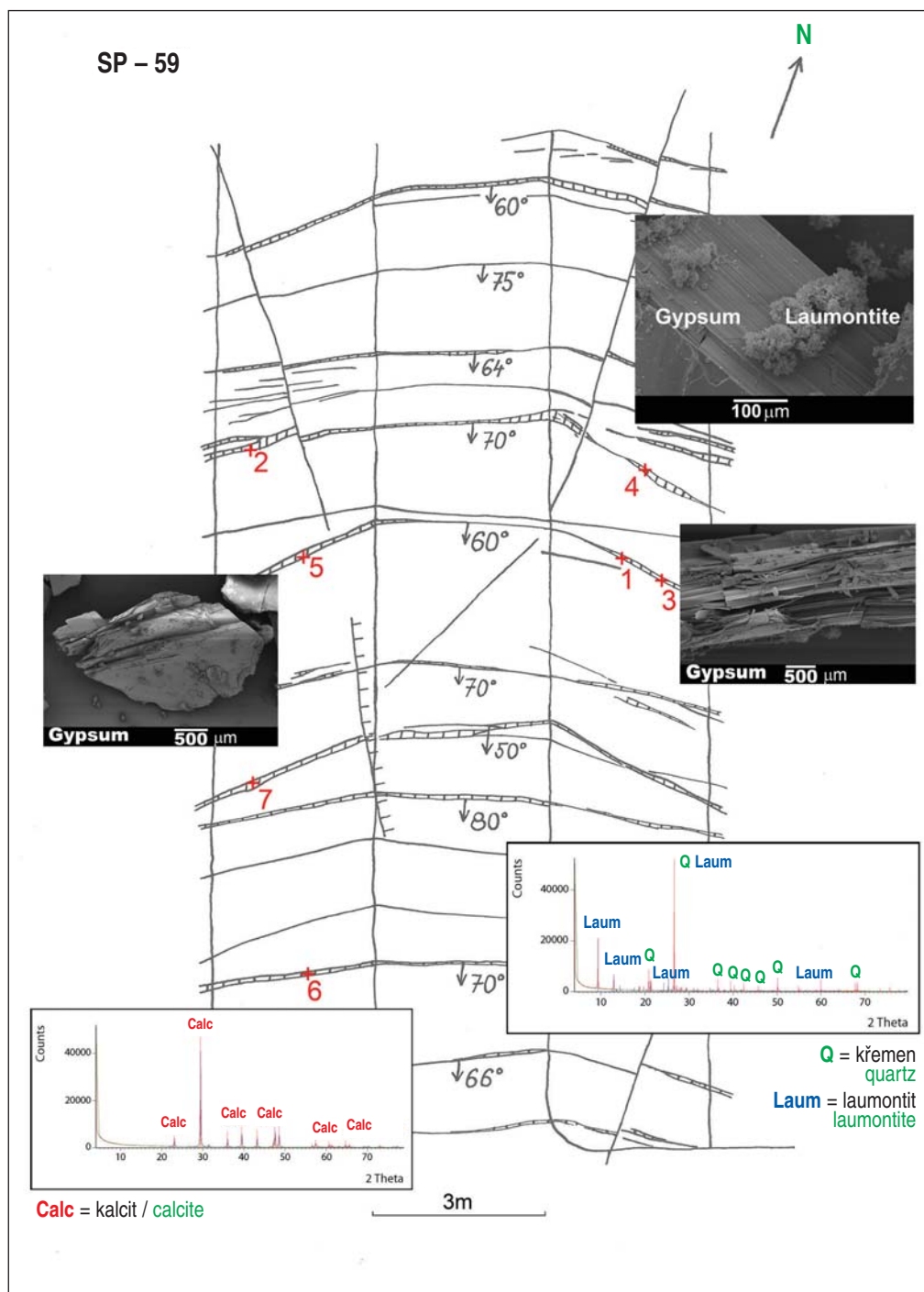
Experiment EPSP je realizován v Regionálním podzemním výzkumném centru URC Josef, které se nachází nedaleko Dobříše v oblasti Au-zrudnění Čelina-Mokrsko. Hostitelskou horninou jsou granitoidy sázavského typu variského stáří (Morávek et al., 1992). Pro účel experimentu byla vybrána rozrážka na Mokrsku západ. Horniny jsou zde protnuty křemennými a křemen-karbonátovými žilami do maximální

In France, an experiment is underway at the Saint Disier laboratory focusing on research into sealing systems in claystones in which it is intended that the French DGR will be constructed (e.g. MONTES et al., 2004).

The Czech EPSP experiment is being conducted in a rock environment consisting of granitoids at the Josef Regional Underground Research Centre (URC). The concept of the experiment is based primarily on the use of Czech materials and technology available in the Czech Republic and the principal aim is to demonstrate the technical viability and functioning of a pressure-resistant plug located in a future DGR.

2 EPSP PROJECT DESCRIPTION

The technical design of the plug was the responsibility of the Centre of Experimental Geotechnics of the Czech Technical University (ČVUT), Prague and was based on a structural proposal contained in Reference Design 2011 (Pospíšková et al., 2012).



Obr. 1 Důlní mapa rozrážky M-SCH-Z/SP-59 s místy odběru vzorků a jejich vyhodnocením
Fig. 1 Mine sheet for gallery niche M-SCH-Z/SP-59 with sample locations and assessment



Obr. 2 Práce v rozrážce SP-59
Fig. 2 Work in gallery niche SP-59

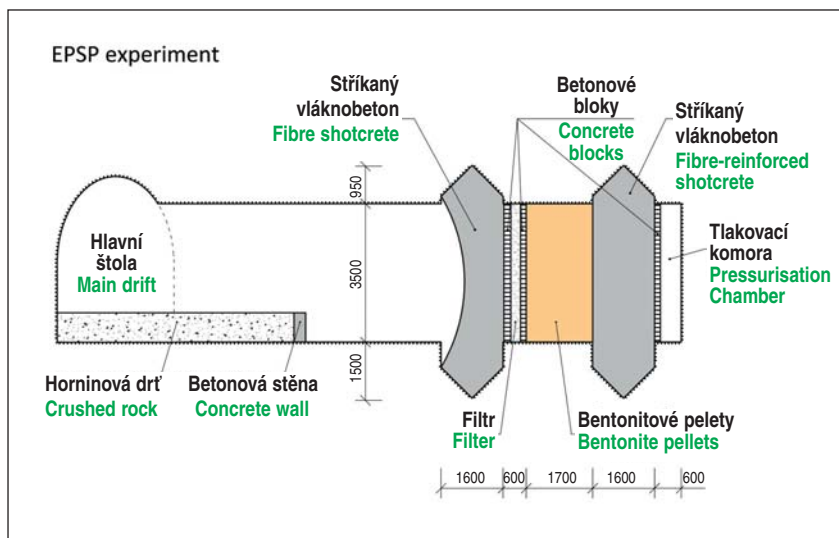
mocnosti 14 cm. Dominantní puklinové systémy jsou vyznačeny v důlněgeologické dokumentaci (obr. 1), která byla upravena podle mapových podkladů Geofondu – Dobříš 1-9/34-24, M-SCH-Z/SP-59.

V roce 2013 bylo provedeno detailní mineralogické studium puklinových výplní v rozrážce SP-59 (obr. 2). Polohy odebraných vzorků jsou zakresleny v mapě na obr. 1. Šest vzorků bylo zanalyzováno pomocí práškové RTG difrakce na VŠCHT (X'Pert PRO s Bragg-Brentanovou geometrií, $\text{CuK}\alpha$, 40 kV, 30 mA, High Score Plus) a SEM na UK PĚF. Difrakční data jednotlivých fází a scany povrchů jsou uvedeny na obrázku 1.

4 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ ZÁTKY EPSP

Pro potřeby EPSP bylo nutno upravit profil rozrážky, který byl rozšířen a byly vytvořeny límce pro betonové zátky. Vzhledem k rozsáhlé EDZ (Excavation Disturbed Zone, zóna rozvolnění masivu) a místy výraznému puklinovému systému musela být kvalita horninového prostředí zlepšena pomocí injektáží. V rozsahu 5 m okolo plánované polohy experimentu byla její pomocí snížena propustnost horniny tak, aby bylo možné použít plánovaných vysokých tlaků (do 7 MPa) nutných pro otestování funkčnosti EPSP. Experiment vyžaduje i rozsáhlé technologické zázemí. To bude umístěno ve 25 m vzdálené rozrážce M-SCH-Z/SP-55. Všechny nutné instalace (tlakovací a vypouštěcí trubky, kabeláž od čidel) budou od zátky k technologickému centru vedeny spojovacími vrty.

Vlastní konstrukce tlakové zátky EPSP má tyto hlavní části (obr. 3, 4): tlakovací komoru, vnitřní zátku ze stříkaného vláknobetonu, bentonitové těsnění, filtr, vnější zátku ze stříkaného vláknobetonu a hostitelské horninové prostředí.



Obr. 3 Konstrukční řešení zátky
Fig. 3 Structural plug design

The EPSP experiment, which is divided into four stages, is being conducted by a Czech consortium made up of SÚRAO, ČVUT and ÚJV Řež, a. s.

The first stage primarily concerned the laboratory verification of the suitability of the materials to be used for plug construction, namely bentonite and a concrete mixture, the quality and detailed characteristics of which received particular attention during work on the design of the plug.

An independent laboratory scale physical model was then constructed at ÚJV Řež's laboratories the objective of which was to obtain data to be used for the calibration of numerical models of the saturation of bentonite.

The second stage consisted of the construction of the in-situ experiment which commenced in 2013 with grouting and drilling work in the M-SCH-Z/SP-59 experimental gallery niche (see Fig. 1). This will be followed by the construction of the plug itself, including the full instrumentation of the experiment and its immediate surroundings.

The third stage will consist of pressurisation by saturation media (air, water and a bentonite suspension) during which the plug will be exposed to pressure of up to 7MPa. The experiment and the technology employed will be monitored constantly throughout this period of the experiment.

The final stage of the experiment will concentrate on the evaluation of the data and knowledge obtained from both the in-situ and laboratory experiments using numerical analysis techniques and modelling. The final output will consist of the verification of the operational safety of the various structural elements of plugs to be used in DGRs and detailed recommendations for the future design and construction of such plugs.

3 EMPLACEMENT OF THE PLUG IN THE ROCK ENVIRONMENT

The EPSP experiment is being conducted at the Josef Regional URC which is located near the town of Dobříš in the Čelina-Mokrosko former gold mining area. The host rock comprises Sázava-type granitoids of the Variscan age (Morávek et al., 1992). A niche in the Mokrosko-West area of the underground facility, which is traversed by quartz and quartz-carbonate veins with a maximum thickness of 14cm, was chosen for the conducting of the experiment. Information on dominant joint systems is recorded in historical mining documentation (see Fig. 1) which was subsequently updated according to map source documents owned by Geofond – Dobříš 1-9/34-24, M-SCH-Z/SP-59.

The detailed mineralogical study of the filling of fissures was carried out in niche SP-59 in 2013 (see Fig. 2); the sampling locations are shown in the map in Fig. 1. Six samples were analysed by means of X-ray powder diffraction at the Institute of Chemical Technology, Prague, VŠCHT (X'Pert PRO with Bragg-Brentan geometry, $\text{CuK}\alpha$, 40kV, 30mA, High Score Plus) and SEM at the Faculty of Science, Charles University in Prague. Diffraction data from individual phases and surface scans is presented in Fig. 1.

4 EPSP PLUG STRUCTURAL SOLUTION

It was necessary for EPSP requirements to modify the profile of the niche, i.e. it was enlarged and collars for the concrete plugs were fitted. As a result of the extensive excavation disturbed zone (EDZ) and a locally significant fissure system, it was also necessary to improve the quality of the rock environment by means of grouting. The permeability of the surrounding rock was reduced to a distance of 5m around the planned location of the experiment in order to allow the application of the planned high pressures

Experiment obsahuje rovněž pomocné konstrukce nutné pro výstavbu (stěny z drenážního betonu), rozsáhlý monitoring a technologické zázemí. Jako tlakovací médium se předpokládá vzduch, voda a bentonitová suspenze.

Do tlakovací komory, umístěné u čelby, je tlakovací médium přivedeno cca 23 m dlouhými spojovacími vrty z paralelní technologické rozrážky. Komora je uzavřena stěnou z drenážního betonu, která slouží jako ztracené bednění pro jednu z hlavních částí EPSP – vnitřní zátka ze stříkaného vláknobetonu.

Vnitřní zátka patří mezi klíčové části a ověření její funkčnosti je jedním z hlavních cílů experimentu. Má dvě základní funkce: statickou a hydraulickou. To znamená zejména zajištění mechanické stability celého systému i za vysokého tlaku a současně omezení proudění zátkou tak, aby nedošlo k porušení bentonitového těsnění vytvořením erozního kanálu v době, kdy ještě není bentonitová těsnicí zóna dostatečně saturovaná.

Bentonitové těsnění je druhou klíčovou částí EPSP a má za úkol hydraulicky oddělit/těsnit prostory před a za zátkou. Bentonit je díky svým bobtnacím, a tedy i samovyhojovacím schopnostem a také díky velmi nízké propustnosti vhodným materiálem pro tuto část. Jeho vlastnosti jsou však závislé, kromě mineralogického složení, zejména na jeho objemové hmotnosti. Aby bylo dosaženo nezbytných vlastností, bude bentonit použit ve formě pelet (obr. 5) lisovaných na vysokou objemovou hmotnost. Cílem je, aby průměrná suchá objemová hmotnost těsnění po instalaci byla minimálně $1,4 \text{ g/cm}^3$, což zajistí dostatečně malou propustnost (hydraulickou vodivost) a dostatečný bobtnací tlak. Součástí experimentu je i otestování vhodné technologie instalace bentonitového těsnění například pomocí stříkaného bentonitu.

Bentonitové těsnění je ukončeno filtrem, který je oboustranně fixován stěnami z drenážního betonu. Stěny slouží jako podpora nejen pro filtr, ale i pro bentonitové těsnění v době výstavby a jako ztracené bednění pro vnější zátka ze stříkaného vláknobetonu.

Filtr je primárně určen pro monitoring průsaků zátkou. Přesto je však napojen spojovacími vrty do technologické rozrážky a je možné ho využít i jako alternativní tlakovací komory.

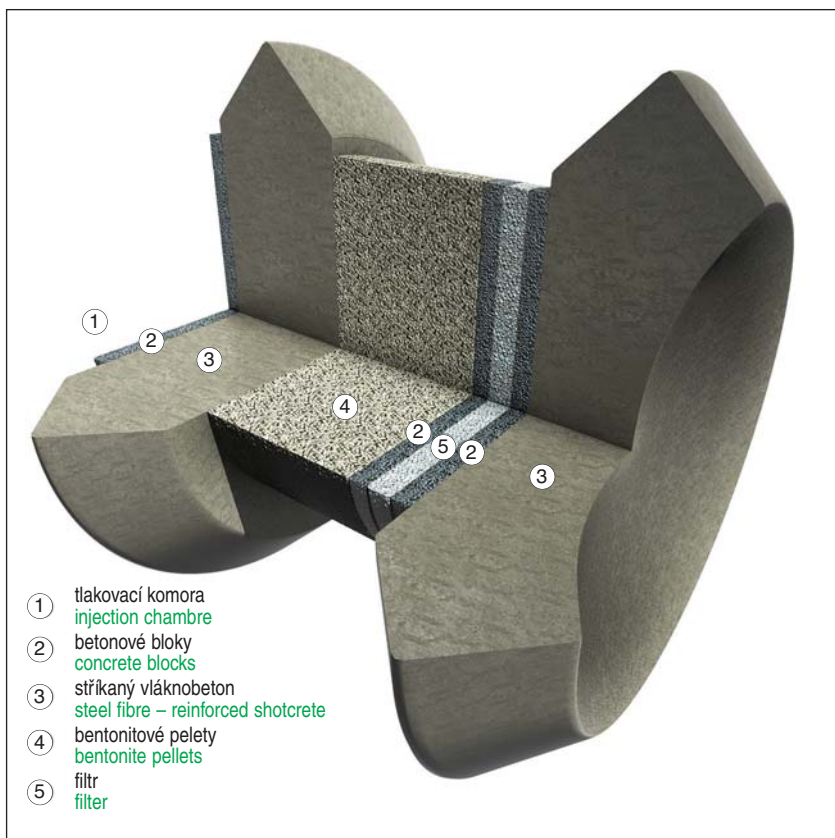
EPSP je uzavřen vnější zátkou ze stříkaného vláknobetonu. Její konstrukce je identická se zátkou vnitřní a jejím účelem je mechanická stabilizace celku.

Součástí experimentu je i vlastní hostitelské prostředí. Popisované inženýrské konstrukce nejsou izolovaným funkčním celkem, ale naopak musí řádně fungovat ve spolupráci se svým okolím.

Předpokládaný postup tlakování experimentu:

- tlaková zkouška vnitřní zátka v době výstavby až do 1 MPa;
- namáhání experimentu vzduchem a vodou (max. do 7 MPa či porušení těsnosti);
- přetěsnění suspenzí (v případě porušení těsnosti);
- opakování namáhání experimentu vzduchem, vodou až do 7 MPa nebo do porušení těsnosti (po přetěsnění).

Konstrukce experimentu je navržena tak, aby poskytovala i alternativní scénáře testování, kdy je filtr použit jako tlakovací komora. To umožňuje nucenou saturaci bentonitového těsnění, otestování obráceného směru proudění (nejprve bentonitem, pak vnitřní betonovou zátkou) a v neposlední řadě otestování (vnější) betonové zátka samostatně.



Obr. 4 Řez zátkou

Fig. 4 Cross-section through the plug

(up to 7MPa) necessary for the testing of the EPSP experiment. In addition, the experiment required that an extensive service centre containing the relevant background technology be installed in the M-SCH-Z/SP-55 gallery niche at a distance of 25m from the experiment proper; pressurising and discharge tubes, sensor cabling etc. lead from the plug to the service centre through connecting boreholes.

The EPSP plug has the following main components (see Figures 3 and 4): a pressurisation chamber, the inner glass fibre-reinforced shotcrete plug, bentonite sealing material, a filter, an external glass fibre-reinforced shotcrete plug and the host rock environment.

The experiment also comprises a number of auxiliary structures such as porous concrete walls, an extensive monitoring system and service centre. The pressurising media will consist of air, water and a bentonite suspension.

The pressurising medium will be transported to the pressurisation chamber via 23m-long connecting boreholes from the neighbouring service centre niche. The chamber is enclosed by a porous concrete wall which will serve to support one of the main elements of the EPSP – the inner glass fibre-reinforced concrete plug.

The inner plug makes up one of the key components of the experiment and verifying that it works efficiently makes up one of the main objectives of the project. It has two basic functions: static and hydraulic which means primarily that it must ensure the mechanical stability of the entire system even under high pressure conditions and, at the same time, must restrict flow through the plug so that the bentonite sealing is not damaged through the creation of an erosion channel in the period in which the bentonite sealing zone is undergoing, but has not yet reached, full saturation.

A further major component of the EPSP is the bentonite sealant, the purpose of which is to hydraulically separate/seal the spaces in front of and behind the plug. Owing to its exceptional swelling properties (and consequent self-healing capacity) and very low permeability, bentonite is particularly suitable for fulfilling this function. However, its sealing properties depend, in addition to its mineralogical composition, principally on its density. Therefore, in order to achieve the

Tab. 1 Silikátová analýza bentonitu B 75_2013 (Večerník et al., 2013)
Table 1 Silicate analysis of bentonite B 75_2013 (Večerník et al., 2013)

hm.	%
SiO ₂	49,83
Al ₂ O ₃	15,35
TiO ₂	2,82
Fe ₂ O ₃	10,9
FeO	3,74
MnO	0,09
MgO	2,88
CaO	2,01
Na ₂ O	0,67
K ₂ O	1,05
P ₂ O ₅	0,63
CO ₂	3,66

5 CHARAKTERISTIKA POUŽITÝCH MATERIÁLŮ

5. 1 Bentonit

Na výrobu pelet byl použit komerční produkt bentonit B 75 (z roku 2013) firmy Keramost, a. s. Jedná se o Ca-Mg neaktivovaný bentonit pocházející z ložiska Černý vrch. Mineralogické a chemické složení bentonitu B 75_2013 je uvedeno na obr. 6 a v tab. 1.

Z geotechnického hlediska je bentonit charakterizován mezi tekutosti, bobtnacím tlakem a hydraulickou vodivostí. Mez tekutosti se pohybuje okolo 170 %. Bobtnací tlak a propustnost bentonitu jsou závislé na ρ_d (suché objemové hmotnosti materiálu). Bobtnací tlak se exponenciálně zvyšuje od 1 MPa do 8 MPa pro materiál s $\rho_d = 1,26-1,64 \text{ g/cm}^3$. Pro průměrné $\rho_d = 1,4 \text{ g/cm}^3$, kterou má bentonit uvnitř experimentu, dosahuje bobtnací tlak cca 2 MPa. Hydraulická vodivost pro stejné rozmezí $\rho_d = 1,26-1,64 \text{ g/cm}^3$ postupně klesá z 10^{-12} m/s až 10^{-13} m/s (Vašíček et al., 2014).

5. 2 Beton

Beton je významnou složkou experimentu EPSP. Ve formě stříkaného vláknobetonu z alkalivzdorných skelných vláken je použit pro klíčové komponenty experimentu – obě betonové zátky. Minimální pevnost vláknobetonu v tlaku je 30 MPa, pevnost v tahu 3 MPa, hydraulická vodivost menší než 10^{-10} m/s (White et al., 2013).

Mimo vlastní betonové zátky je beton použit i pro pomocné konstrukce – stěny ze ztraceného bednění a filtr. Zde je ve formě drenážního (mezerovitěho) betonu tak, aby co nejméně ovlivňoval proudění uvnitř experimentu.

Významnou veličinou sledovanou u betonové směsi použité pro výstavbu zátky a pomocných konstrukcí je hodnota pH výluhu.



Obr. 5 Lisované pelety z bentonitu B75
Fig. 5 Compressed B75 bentonite pellets

required density level, bentonite will be used in the form of highly-compressed pellets (see Fig. 5). The objective is to achieve a minimum average dry density value following installation of 1.4g/cm^3 which will ensure a low degree of permeability (hydraulic conductivity) and sufficiently high swelling pressure. The EPSP experiment also includes the testing of bentonite installation technology, for example the use of the shot clay method.

The bentonite sealant material is fitted with a filter fixed on both sides between the porous concrete walls. The function of the walls is to provide support not only for the filter, but also for the bentonite sealing material during the construction phase as well as to provide temporary support for the outer glass fibre-reinforced concrete plug.

The filter has been designed principally for the monitoring of seepage through the plug. Nevertheless, it is connected through the afore-mentioned boreholes to the service centre niche and can be used, if required, as an alternative pressurising chamber.

The EPSP is enclosed by an outer glass fibre-reinforced plug the structure of which is identical to that of the internal plug and the function of which is to mechanically stabilise the entire block.

The host rock environment also makes up an important component of the experiment. Indeed, the engineering structures described above cannot work in isolation but must function efficiently in harmony with the neighbouring rock massif.

The pressurising of the experiment will comprise the following:

- pressure testing of the inner plug during construction up to 1MPa;
- stressing of the experiment with air and water (max. up to 7MPa or to integrity failure);
- re-sealing with suspension (in the case of an integrity failure);
- repeated stressing of the experiment with air and water up to 7MPa or an integrity failure (following re-sealing).

The design of the experiment even provides for alternative testing scenarios in which the filter can be used as the pressurising chamber enabling the forced saturation of the bentonite sealant, the testing of reverse flow (first by bentonite then by the inner concrete plug) and the separate testing of the outer concrete plug.

5. CHARACTERISTICS OF THE MATERIALS USED

5. 1 Bentonite

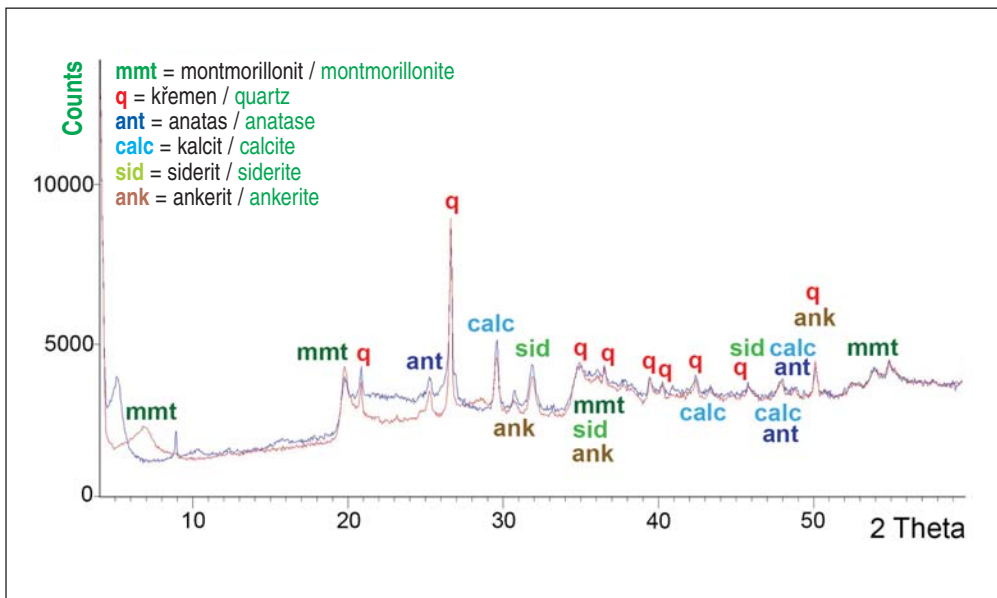
Bentonite B75 (from 2013), a non-activated Ca-Mg bentonite from the Červený Vrch deposit and commercially produced by Keramost, a. s., was used for the production of the pellets. The mineralogical and chemical composition of bentonite B75_2013 is presented in Fig. 6 and in Table 1.

From the geotechnical point of view, bentonite is characterised by the liquid limit, swelling pressure and hydraulic conductivity; the liquid limit fluctuates around 170 per cent and the swelling pressure and permeability depend on ρ_d (the dry density of the material). Swelling pressure potentially increases from 1MPa to 8MPa for a material with $\rho_d = 1.26-1.64\text{g/cm}^3$. For an average of $\rho_d = 1.4\text{g/cm}^3$, i.e. the dry density value of the bentonite in the experiment, swelling pressure reaches around 2MPa. Hydraulic conductivity for the same range of $\rho_d = 1.26-1.64\text{g/cm}^3$ gradually diminishes from 10^{-12}m/s to 10^{-13}m/s (Vašíček et al., 2014).

5. 2 Concrete

Concrete makes up an important component of the EPSP experiment due to its use in the key elements of the experiment in the form of shotcrete reinforced with alkaline-resistant glass fibres (both concrete plugs). The minimum compressive strength of the glass fibre-reinforced concrete is 30MPa, tensile strength is 3MPa and hydraulic conductivity is lower than 10^{-10}m/s (White et al., 2013).

In addition to the plugs themselves, concrete was also used for the construction of the auxiliary structures, i.e. the temporary



Obr. 6 RTG difrakční záznam B 75_2013 (X'Pert PRO, CuK α , 40 kW, 30 mA, High Score Plus, analyzováno na VŠCHT, červené spektrum – vzorek B 75_2013, modré spektrum – tentýž vzorek po glykolaci)

Fig. 6 X-ray diffraction pattern B75_2013 (X'Pert PRO, CuK α , 40 kW, 30 mA, High Score Plus, analysed by the University of Chemical Technology, red spectrum – sample B 75_2013, blue spectrum – the same sample after glycolation)

Pro potřeby projektu je požadováno, aby veškerá použitá betonová směs měla snížené pH (pH výluhu <11,7), z důvodu omezení nepříznivého působení na bentonit.

6 MONITORING EXPERIMENTU

Jedním z hlavních cílů EPSP je ověřit funkčnost navrženého řešení zátky. Proto je velmi důležité znát, jaké procesy v ní probíhají. Experiment je z tohoto důvodu komplexně instrumentován. Instrumentace je navržena tak, aby bylo možné sledovat vývoj hlavních stavových veličin v klíčových místech experimentu. To zahrnuje zejména sledovat:

- odezvu horninového prostředí pomocí měřicích svorníků;
- rozložení teploty a deformace uvnitř obou zátek ze stříkaného vláknobetonu;
- kontaktní napětí mezi zátkami ze stříkaného vláknobetonu a horninou;
- rozložení vlhkosti uvnitř bentonitového těsnění;
- rozložení bobtnacího tlaku uvnitř bentonitového těsnění;
- rozložení pórového tlaku uvnitř bentonitového těsnění;
- tlak a teplotu v tlakovací komoře;
- tlak a teplotu uvnitř filtru;
- množství vody drénované filtrem;
- tlak, množství a typ tlakovacího média.

Důležitou částí prací je i ověření vhodnosti zvolené technologie výstavby pro daný typ konstrukce. Monitoring proto začíná již před zahájením výstavby a celou výstavbu sleduje. Lze jej rozdělit do následujících fází podle jejich hlavní náplně:

- fázi přípravnou (kalibrace systému a získání dat pro klidový stav horninového masivu);
- výstavbu až po dokončení vnitřní zátky (sledování vnitřní zátky – vývoj hydratačního tepla/teploty, monitoring deformací a kontaktních napětí);
- zkoušku vnitřní zátky (odezva vnitřní zátky a horninového prostředí);
- dokončení výstavby experimentu (kontrola instalace bentonitového těsnění a vnější betonové zátky);
- zkušební provoz (kontrola funkčnosti technologie pro tlakování experimentu a kontrola celkové funkce);
- hlavní experimentální program (komplexní sledování chování celého experimentu).

concrete walls and filter, in this case in the form of porous concrete which is designed so as to influence flow within the experiment as little as possible.

The pH value of the leachate makes up an important quantity in terms of the concrete mixture used in the construction of the plug and auxiliary structures. The needs of the project dictate that the pH value of the concrete mixture is kept to the minimum (leachate pH value of <11.7) so as to limit any unfavourable effects on the bentonite sealant.

6 MONITORING OF THE EXPERIMENT

One of the main objectives of EPSP is to verify the effectiveness of the sealing plug; therefore it is essential that the processes taking place within it be accurately determined. Hence, the experiment has been fitted with a comprehensive

instrumentation system which has been designed in such a way that it allows for the monitoring of the development of the principal variables at key stages of the experiment. Principally it comprises the monitoring of:

- the response of the surrounding rock environment using measurement bolts;
- temperature and deformation distribution within both the glass fibre-reinforced shotcrete plugs;
- contact stress between the glass fibre-reinforced shotcrete plugs and the rock;
- moisture distribution within the bentonite sealant;
- swelling pressure distribution within the bentonite sealant;
- pore pressure distribution within the bentonite sealant;
- positive pressure and temperature in the pressurisation chamber;
- pressure and temperature within the filter;
- amount of water drained through the filter;
- pressure and the amount and type of pressurisation medium.

A further important aim of the experiment consists of the verification of the suitability of the construction technology selected for particular structures. The monitoring process therefore commenced prior to the start of the construction stage and will provide for the monitoring of the whole of the construction period which can be divided into the following phases according to main purpose:

- the preparatory phase (calibration of the system and the collection of data for determining the static state of the rock massif);
- construction work up to the completion of the inner plug (monitoring of the inner plug – the development of hydration heat/temperature, the monitoring of deformation and contact stress);
- the testing of the inner plug (inner plug and rock environment response);
- the completion of the construction of the experiment (inspection of the installation of the bentonite sealant and the outer concrete plug);
- trial operation (checking of the functioning of the pressurisation equipment and overall functioning);
- the main experimental programme (comprehensive monitoring of the behaviour of the whole experiment).

Systém monitoringu využívá moderních technologií tak, aby veškerá data byla ihned k dispozici uživateli pro další využití. Sbíraná data jsou kontinuálně ukládána do databáze měřicího systému. Kromě vlastních naměřených dat, která systém uchovává v primárních jednotkách, databáze obsahuje komplexní informace o jednotlivých čidlech instalovaných v experimentu a deník experimentu. Nedílnou součástí měřicího systému je webové rozhraní. To umožňuje jednoduchým způsobem získat přehled o dění v experimentu. Mezi základní informace (služby), které rozhraní poskytuje, patří: seznam čidel s možností vykreslení grafů za zvolené období, 3D vizualizace aktuálního stavu, přehled o funkčnosti systému a deník experimentu.

7 ZÁVĚR

Experiment EPSP realizovaný v Regionálním podzemním výzkumném centru URC Josef je jedním z významných mezinárodních projektů, na kterém se SÚRAO podílí. Po celou dobu jeho trvání je zde kladen vysoký důraz na použití primárně českých materiálů, zejména bentonitu typu B 75 a technologií dlouhodobě vyvíjených v ČR jako například technologie stříkaného bentonitu.

Chování celé zátky po dobu experimentu je pečlivě sledováno systémem monitoringu. Závěrečné vyhodnocení experimentu proběhne za pomoci numerické analýzy a modelování. Úspěšná realizace experimentu EPSP přispěje k prokázání funkčnosti systému těsnících zátek, a tím i k objasnění jedné z mnoha otázek dlouhodobé bezpečnosti hlubinného úložiště radioaktivních odpadů v České republice.

**ING. MARKÉTA DVOŘÁKOVÁ, dvorakova@surao.cz,
RNDr. IRENA HANUSOVÁ, Ph.D., hanusova@surao.cz,
ING. MAREK VENCL, vencl@surao.cz, SÚRAO,
ING. JIŘÍ SVOBODA, Ph.D., jiri.svoboda@seznam.cz,
ČVUT Praha**

Recenzovali: Ing. Petr Večerník, Ing. Alexandr Butovič, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Tento projekt je spolufinancován Evropskou unií v rámci 7. rámcového projektu FP7 Euratom (European Union's European Atomic Energy Community's), grantová dohoda číslo 323273, projekt DOPAS.

Tento projekt je také podpořen z prostředků státního rozpočtu ČR prostřednictvím Ministerstva pro školství, mládež a tělovýchovu – institucionální podpora č. 7G13002.

The monitoring system employs modern technology which allows for the immediate availability of the data collected for end users; the data is stored on a continuous basis in the specially-designed measurement system database. In addition to the measured data, which is stored by the system in primary units, the database also contains comprehensive information from individual sensors installed within the experiment and the experiment's log. The web interface, which makes up an indispensable part of the measurement system, provides for those involved to obtain a general overview of events occurring within the experiment; the basic information services provided by the interface include: a list of sensors which allows for the plotting of graphs over a selected period, the 3D visualisation of the current situation, an overview of the overall functioning of the system and the experiment's log.

7 CONCLUSION

The EPSP experiment currently underway at the Josef Regional Underground Research Centre is one of the most important international projects that SÚRAO (the Czech Radioactive Waste Repository Authority) has ever been involved in. Emphasis has been placed since the commencement of the project on the use of Czech materials, i.e. B75 bentonite, and technologies which have been under development for many years in the Czech Republic, for example sprayed bentonite technology.

The behaviour of the plug will be comprehensively monitored throughout the duration of the experiment. The final assessment of the experiment will involve the use of numerical analysis and modelling techniques. Finally, it is envisaged that the successful completion of the EPSP experiment will contribute towards demonstrating how sealing plug systems behave under real conditions and, thus, towards answering one of the many outstanding questions concerning the long-term safety of a future deep geological radioactive waste repository in the Czech Republic.

**ING. MARKÉTA DVOŘÁKOVÁ, dvorakova@surao.cz,
RNDr. IRENA HANUSOVÁ, Ph.D., hanusova@surao.cz,
ING. MAREK VENCL, vencl@surao.cz, SÚRAO,
ING. JIŘÍ SVOBODA, Ph.D., jiri.svoboda@seznam.cz,
ČVUT Praha**

ACKNOWLEDGEMENTS

The research is being funded from the European Union European Atomic Energy Community (Euratom) Seventh Framework Programme FP7 (2007-2013) according to grant agreement no. 323273, the DOPAS project.

The project is also supported by the Czech Republic via funding provided by the Ministry of Education, Youth and Sports – institutional support grant no. 7G13002.

LITERATURA / REFERENCES

- DIXON, D. et al. Underground Disposal Facility Closure Design 2012. Posiva Working Report 2012-09, Finland : POSIVA, 2012, 96 s. Geofond: Dobříš 1-9/34-24, M-SCH-Z/SP-59.
- MONTES, H. G. et al. Structural modifications of Callovo-Oxfordian argillite under hydration/dehydration conditions. *Applied Clay Science*, 2004, roč. 25, 3-4, 187-194 s.
- MORÁVEK, P. et al. *Zlato v Českém masivu*. 1. vyd. Praha : Český geologický ústav, 1992, 243 s. ISBN 80-7075-088-X.
- PAČES, T. et al. *Výzkum procesů pole vzdálených interakcí HŮ vyhořelého jaderného paliva a vysoce aktivních odpadů*. Souborná zpráva. Praha : Česká geologická služba, 2010, 577 s.
- PUIGDOMENECK, I. ed. *Hydrochemical stability of groundwaters surrounding a spent nuclear fuel repository in a 100,000 year perspective*. SKB Technical Report TR-01-28. Stockholm : SKB, 2001, 83 s.
- POSPÍŠKOVÁ, I. et al. *Aktualizace referenčního projektu hlubinného úložiště radioaktivních odpadů v hypotetické lokalitě*. Závěrečná zpráva. Praha : ÚJV Řež, a. s., 2012, 107 s.
- VAŠÍČEK, R. et al. *Deliverable D3.17 – Interim results of EPSP laboratory testing, DOPAS project FP7 EURATOM, no. 323273*. Průběžná zpráva projektu DOPAS. Praha : Czech Technical University in Prague, 2014, 32 s.
- VEČERNÍK, P. et al. *Odborná podpora při provedení a vyhodnocení experimentu EPSP v rámci projektu DOPAS*. Přehledná zpráva o provedených pracích v roce 2013. Praha : ÚJV ŘEŽ, a. s., 2013, 32 s.
- WHITE, M. et al. *Deliverable D2.1 Design Bases and Criteria, DOPAS project FP7 EURATOM, no. 323273*. Průběžná zpráva projektu DOPAS version 1d4 from 26. November 2013, Galson Sciences Limited, 2013, 95 s.