

## Praktické ověřování modelového řešení hydrodynamických a migračních parametrů granitových bloků

Michal Polák<sup>1</sup>, Karel Sosna<sup>2</sup>, Michal Vaněček<sup>3</sup>, Jana Michálková<sup>3</sup>, Radek Hanus<sup>3</sup>, Petra Rousová<sup>3</sup>,  
Tomáš Navrátil<sup>4</sup>, Jiří Záruba<sup>2</sup>, Hana Křížová<sup>2</sup>, Martin Milický<sup>1</sup> a Vlasta Navrátilová<sup>3</sup>

### *Verification of the both hydrogeological and hydrogeochemical code results by an on-site test in granitic rocks*

The project entitled "Methods and tools for the evaluation of the effect of engineered barriers on distant interactions in the environment of a deep repository facility" deals with the ability to validate the behavior of applied engineered barriers on hydrodynamic and migration parameters in the water-bearing granite environment of a radioactive waste deep repository facility. A part of the project represents a detailed mapping of the fracture network by means of geophysical and drilling surveys on the test-site (active granite quarry), construction of model objects (about 100 samples with the shape of cylinders, ridges and blocks), and the mineralogical, petrological and geochemical description of granite. All the model objects were subjected to migration and hydrodynamic tests with the use of fluorescein and NaCl as tracers. The tests were performed on samples with simple fractures, injected fractures and with an undisturbed integrity (verified by ultrasonic). The gained hydrodynamic and migration parameters of the model objects were processed with the modeling software NAPSAC and FEFLOW. During the following two years, these results and parameters will be verified (on the test-site) by means of a long-term field test including the tuning of the software functionality.

**Key word:** hydrogeological parameters, hydrogeochemical code, granitic rock

### Úvod

Hlavním požadavkem na funkčnost hlubinného úložiště radioaktivních odpadů je bezpečné a dlouhodobé oddělení uložených nebezpečných látek od životního prostředí, resp. potravního řetězce. K tomu musí sloužit, jak fixace radionuklidů v ukládaném materiálu, tak geologické prostředí a inženýrské bariéry. Za inženýrské bariéry jsou považovány těsnicí materiály zaplňující jednak manipulační a technologické prostory podzemní struktury, jednak puklinový systém geologické struktury.

Stručně popisované práce jsou součástí výzkumného úkolu "Metody a nástroje hodnocení vlivu inženýrských bariér na vzdálené interakce v prostředí hlubinného úložiště" (Projekt ev. č.: 1H-PK/31 MPO ČR), který je zaměřen na návrh a ověření metodických postupů při hodnocení a predikci účinnosti inženýrských bariér. Základním úkolem tohoto projektu je ověřit možnosti využití matematické modelování pro analyzování dějů v puklinovém prostředí a pro predikci změn těchto dějů způsobených umělých zásahem do tohoto prostředí. V rámci široké škály metod použitých k realizaci cílů tohoto projektu je využíváno laboratorních hydraulických a migračních zkoušek granitových, puklinově porušených vzorků. Výsledky těchto zkoušek poskytují vstupní data pro numerické simulace a slouží rovněž ke kalibraci a verifikaci modelových řešení.

Jako nejvhodnější lokalita pro realizaci projektu byl vybrán granitový lom v Panských Dubenkách (Andres et al., 1985) na Českomoravské Vysočině, kde se těží granit pro dekorační účely. Výhodou této těžební lokality je, že se zde používají málo brizantní trhavin. To znamená, že v hornině je minimum antropogenně vzniklých porušení. Na testovací lokalitě bylo provedeno detailní strukturně geologické mapování a podrobný geochemický, geofyzikální a vrtný průzkum. Dále detailní petrologie horniny, mineralogie a geochemie puklinového prostředí (Weiss a Kužvart, 2005) dále proměření rozevřenosti a orientace puklin, stanovení pórovitosti a plynopropustnosti dvou barevně odlišných typů granitu z Panských Dubenek atd. Na základě výsledků průzkumu byl vytyčen polygon pro provedení in situ testů a odvrtán a geofyzikálně zaměřena síť vrtů pro terénní fázi realizaci projektu.

V granitovém lomu v Panských Dubenkách byly rovněž odebrány horninové vzorky a podzemní voda využita při laboratorních zkouškách. Základním požadavkem na vybrané horninové vzorky je jednoduchá puklinová geometrie, kterou je možné podrobně geometricky popsat a prokazatelně ověřit hydrodynamické a migrační parametry.

<sup>1</sup> Michal Polák, Martin Milický, ProGeo s.r.o. Tiché údolí 113, 252 63 Roztoky u Prahy, Česká republika

<sup>2</sup> Karel Sosna, Jiří Záruba, Hana Křížová, SG – Geotechnika a.s., Geologická 4, 152 00 Praha 5, Česká republika

<sup>3</sup> Michal Vaněček, Jana Michálková, Radek Hanus, Petra Rousová, Vlasta Navrátilová, ISATech s.r.o., Osadní 26, 170 00 Praha 7, 420 723 107 821, Česká republika, [jmichalkova@isatech.cz](mailto:jmichalkova@isatech.cz)

<sup>4</sup> Tomáš Navrátil, AV ČR Rozvojová 135, 160 00 Praha 6, Česká republika  
(Recenzovaná a revidovaná verzia dodaná 8. 1. 2007)

### Laboratorní zkoušky

Nedílnou součástí výzkumného úkolu „Metody a nástroje hodnocení vlivu inženýrských bariér na vzdálené interakce v prostředí hlubinného úložiště“ jsou laboratorní zkoušky, které budou využity pro hodnocení účinnosti aplikovaných inženýrských bariér v puklinovém systému granitoidních hornin. Výsledky laboratorních zkoušek dále slouží pro verifikaci matematických modelů simulujících účinnost inženýrských bariér v granitoidních horninách.

V minulé etapě prací se provedli laboratorní testy hydraulických parametrů válcovitých tělesech, které jsou vysoké 200 mm a jejichž průměr činí 83, 105 a 137 mm. Rozdílný průměr zkušebního tělesa byl volen z důvodu postižení velice rozdílného charakteru diskontinuit.

V současné etapě prací jsou testovány horninové bloky o rozměrech 600x600x600 mm a 800x600x300 mm s přirozenou a s uměle vytvořenou puklinou. Na uměle vytvořené puklině byl simulován pohyb média v různých typech výplní a bariér pukliny.

Kromě stanovení hydraulických a migračních parametrů byla provedena měření okrajových podmínek, například měření pórovitosti (otevřená i celková), objemové hmotnosti, rychlosti ultrazvukových vln s frekvencí 1 MHz, dále pak celkový charakter testované diskontinuity (geometrie, rozevřenost, drsnost) aj.

Hydraulické a migrační parametry horninových bloků s uměle vytvořenou i přirozenou puklinou byly stanoveny za podmínek stacionárního proudění vody a roztoku soli a fluoresceinu v nasyceném prostředí. Zkoušky byly prováděny při rozdílných konstantních hydraulických gradientech, které byly vyvozeny pomocí Boyle-Marriottovy nádoby.

Stanovení hydraulických a migračních parametrů bylo vyhodnoceno z měřených hodnot: objem měřeného média, čas průtoku, vodivost roztoku, intenzita záření roztoku v modrém světle, hydraulický gradient a teplota prostředí.

Výsledky stanovení hydraulických parametrů válcovitých těles ukazují, že hodnoty koeficientu hydraulické vodivosti se pohybují v řádech  $10^{-10}$  až  $10^{-12}$ . Uvedený rozptyl hodnot propustnosti vzorků je způsoben mimo jiné technickým stavem vzorků (přípravou a transportem vzorků). Tento vliv byl objektivně prokázán prozařováním ultrazvukem. Hodnoty koeficientu hydraulické vodivosti se výrazně neliší mezi vzorky, které obsahují zřetelnou puklinu, a vzorky, na nichž puklina vizuálně patrná není. Zřetelné pukliny jsou vyhojené. Médium proudí celým tělesem bez ohledu na to, zda je v tělese patrná puklina či není. Puklinová propustnost byla stanovena na vzorku s uměle vytvořenou puklinou. Hodnota objemového průtoku dosahuje hodnoty  $4,0 \cdot 10^{-7}$  při hydraulickém gradientu 34,4. To odpovídá efektivnímu rozevření pukliny 4,8  $\mu\text{m}$ .

Měřením okrajových podmínek laboratorních testů bylo zjištěno, že:

- objemová hmotnost laboratorních vzorků dosahuje pouze 2600 kg.m<sup>-3</sup>,
- otevřená pórovitost se pohybuje okolo 1,0 %,
- vlhkost se pohybuje mezi 0,27 a 0,44 %,
- rychlosti průchodu ultrazvukových vln kolísají v rozmezí 3,55 až 5,33 km.s<sup>-1</sup> u P-vln a v rozmezí 2,06 až 3,00 km.s<sup>-1</sup> u S-vln,
- tělesa se během testů nedeformovala a nedocházelo k rozevírání puklin.

Výsledky stopovacích zkoušek a zkoušek stanovujících propustnost s konstantním hydraulickým gradientem realizovaných na tělesech s uměle vytvořenou puklinou ukazují, že:

- objemový průtok se pohybuje v řádech 10<sup>-5</sup> a 10<sup>-6</sup> m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>. Tělesa se během testu nedeformovala a nedocházelo k rozevírání pukliny.
- časy příchodu konzervativních stopovacích látek NaCl a fluoresceinu se pohybují v intervalu do 1 minuty. Časy příchodu a časy maximální koncentrace jsou lineárně závislé na hydraulickém gradientu.
- Průnikové křivky NaCl i fluoresceinu charakterizují předpokládané chování proudění vody puklinou.

V průběhu současné etapy zabývající se prouděním fluid přirozenými puklinami bylo dále zjištěno, že:

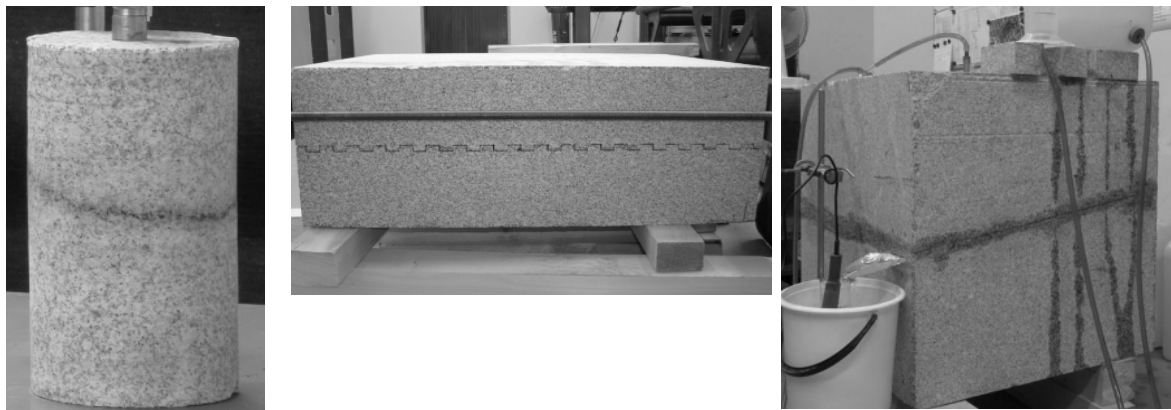
- objemový průtok blokem s trojicí přirozených puklin se pohybuje v řádu  $10^{-7}$  m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> a blokem s jednou subhorizontální puklinou  $10^{-6}$  m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>.
- časy příchodu stopovače NaCl i fluoresceinu se pohybují v intervalu do 20 sekund.
- Průnikové křivky NaCl i fluoresceinu rovněž charakterizují předpokládané chování proudění vody puklinou.

Díky výsledkům posledních hydrodynamických testů puklin injektovaných směsí bentonitu s vodou bylo navrženo změnit injekční směs. V puklinovém systému granitoidních hornin lze použít jílocementové suspenze a chemické směsi.

Bylo rozhodnuto stanovit koeficient hydraulické vodivosti laboratorních vzorků tvaru válce 50x50 mm alternativních materiálů:

1. směsí natrifikovaného bentonitu s vysokým obsahem  $\text{Na}^+$  a vápna s vysokým obsahem  $\text{CaCO}_3$  v různých poměrech (3:1, 2:1, 1:1, 1:2.)
2. směs identického bentonitu a jemného prachu s vysokým obsahem  $\text{SiO}_2$  ( $\text{SiO}_2 < 10\%$ )
3. směsi vodního skla a esterů organických kyselin (etylacetát)
4. polyuretanové pryskyřice.

Na základě výsledků laboratorních testů se vyberou vhodné injekční směsi. Vybranými injekčními směsmi budou parciálně injektovány horninové bloky. Testy stanovující hydrodynamické a migrační parametry přirozených a uměle vytvořených injektovaných horninových puklin se zopakují.



Obr.1. Typy laboratorně testovaných vzorků  
Fig. 1. Types of the laboratory testing samples

### Matematické modelování

Údaje poskytnuté laboratorními a terénními zkouškami představují vstupní, kalibrační a verifikační data pro modelová řešení. V první fázi projektu jsou modelové simulace realizovány na základě výsledků testů. Ve druhé fázi řešení úkolu budou modely použity jako predikční nástroj a pomocí terénních zkoušek bude ověřována jejich přesnost, a tedy míra možnosti využití matematického modelování jako predikčního nástroje pro hodnocení vlivu inženýrských bariér na hydraulické parametry puklinového prostředí. V současné fázi řešení úkolu byly modelové práce zaměřeny především na stanovení metodiky vhodné pro simulace terénních hydraulických a migračních testů. K tomuto účelu jsou využity výsledky laboratorních zkoušek provedených na granitových vzorcích před aplikací inženýrské bariéry.

### Použitá modelovací aplikace

Pro modelové simulace laboratorních zkoušek byly použity dvě modelové aplikace NAPSAC a Feflow. Tyto aplikace budou použity i pro modelová řešení terénních testů. V případě NAPSACu se jedná se o specializovanou aplikaci pro simulaci proudění a transportu v prostředí puklin a puklinových sítí na základě konceptu diskrétní puklinové sítě. V jednotlivých puklinách pracuje na základě koncepce paralelních puklinových ploch nebo proměnlivého rozevření. Proudění je řešeno na základě předpokladu lokální platnosti Poiseuilleovy rovnice metodou konečných prvků a transport je řešen pomocí metody particle tracking. Program umožňuje jak přímé zadávání diskrétních puklin a jejich geometrických parametrů, tak generovat závislé i nezávislé soubory puklin na základě široké nabídky stochastických distribučních funkcí. Program je schopen efektivně pracovat i ve velmi rozsáhlých puklinových sítích (statisíce puklinových ploch).

Program Feflow je komplexní modelovací aplikace pro simulaci průlinového a omezeně i puklinového proudění horninovým prostředím (na základě konceptu diskrétní pukliny). Program umožňuje simulovat puklinovou geometrii volného prostoru pouze generalizovaně, ale poskytuje větší možnost zohlednění puklinové výplně při volbě různého principu hydraulického popisu proudění. Výpočet proudění a transportu je založen na metodě konečných prvků. Ve dvoudimenzionálních diskrétních prvcích, které jsou použity pro

simulaci tektonického porušení ve smyslu koncepce paralelních puklinových stěn, lze k výpočtu využít buď Poiseuilleovy rovnice (pro volný puklinový prostor), nebo Darcyho zákona (pro porézní puklinovou výplň).

### Realizované simulace

Geometrie puklinového prostoru laboratorních vzorků byla v programu NAPSAC simulována pomocí kombinace deterministicky zadávaných puklinových ploch s proměnlivým rozevřením a stochasticky generovaných puklinových sad. Na základě výsledku hydraulických laboratorních zkoušek, které poskytly velikost objemového průtoku vzorkem, byla kalibrována hustota a konektivita puklinové sítě a velikosti parametru hydraulického rozevření pukliny a jeho variability.

Vzorky bez viditelného puklinového porušení byly v aplikaci NAPSAC modelovány pomocí všesměrné, relativně homogenní, stochastické sady puklin s malým hydraulickým rozevřením (v jednotkách  $\mu\text{m}$ ), která simuluje mikrotektonické porušení horniny a v podstatě jej lze považovat za pórovitost granitu. Odladěné parametry této sady byly posléze použity pro simulaci všesměrného porušení v ostatních laboratorních vzorcích a představovaly tedy jakési hodnoty propustnosti horninové matrix.

Při modelování hydraulických a migračních testů porušených vzorků v NAPSACu byla viditelná puklina simulována pomocí diskretní pukliny s proměnlivým rozevřením. Distribuce hydraulického rozevření v puklině byla generována na základě exponenciálního rozdělení dat. Parametry stochastického rozložení rozevření byly laděny na základě zjištěných velikostí průtoků puklinami, na základě informací o velikosti rozevření viditelné pukliny naměřeného na plášti vzorku a na základě průběhu průnikových křivek, které byly zkonstruovány z výsledků laboratorních zkoušek s konzervativními stopovači. Odladěná střední rozevření dominantních puklin poskytujících převážnou část průtoku vzorky byla stanovena v řádu  $10^{-4}$  m pro přirozené i uměle vytvořené pukliny.

Hlavní deterministicky zadávaná puklina (vizuálně identifikovatelná) je v simulaci doplněna jednou až třemi sadami doprovodných puklinových ploch. Tyto sady představují mikrotektonicky porušenou oslabenou zónu granitu v bezprostředním okolí hlavní pukliny. Existence tohoto doprovodného porušení byla prokázána laboratorními testy na vzorcích se sekundárně vyhojenými viditelnými puklinami. Rozevření případných doprovodných puklin bylo laděno na základě velikosti průtoků vzorky s vyhojenými puklinami. Hustota doprovodné puklinové sítě a rozsah doprovodného porušení byl laděn na základě rozsahu zjištěného ze zkoušek s barvivem pomocí klastrové analýzy simulované puklinové sítě. Rovnováha mezi rozevřením puklin a hustotou puklinové sítě byla upravována na základě sklonu regresní přímky proložené body grafu závislosti velikosti měřeného průtoku na hydraulickém gradientu.

Střední hodnoty rozevření simulovaných puklin jsou, při dodržení měřené velikosti průtoku, oproti měřeným hodnotám nižší. Modelové řešení tedy do jisté míry přeceňuje (cca 1,4 krát) velikost průtoku. Toto zjištění odpovídá výsledkům získaným při aplikaci lokálně platné Poiseuilleovy rovnice, které jsou publikovány v odborné literatuře (Nicholl et al., 1999; Konzuk a Kueper, 2004).

V programu Feflow byl pro simulaci testů viditelně neporušených vzorků využit přístup ekvivalentního kontinua, ve kterém je propustnost granitu stanovena na základě předpokladu platnosti Darcyho rovnice pomocí koeficientu hydraulické vodivosti. Modelem odladěná hodnota koeficientu dobře odpovídá hodnotě vypočtené na základě výsledků laboratorních testů.

V programu Feflow byla viditelná puklina simulována pomocí diskretních prvků s konstantním rozevřením a oblast porušená doprovodnou mikrotektonikou byla simulována pomocí zóny zvýšené hydraulické vodivosti. Vodivost této zóny byla odladěna na základě velikosti průtoku vzorky se zcela vyhojenou, nepropustnou puklinou.

Při srovnání výsledků simulací v obou programech byla zjištěna dobrá shoda mezi středním hydraulickým rozevřením viditelné pukliny odladěným v aplikaci NAPSAC a konstantním rozevřením odladěným v aplikaci Feflow.

V rámci modelových řešení byly sestrojeny modelové průnikové křivky průchodu konzervativního stopovače testovanými vzorky. Srovnání modelových a měřených průnikových křivek bylo použito k verifikaci odladění geometrie puklinové sítě. Vesměš bylo dosaženo velmi dobré shody mezi modelovanými a měřenými daty.

### Závěr

V současné fázi řešení úkolu byla provedena příprava testovací lokality pro in situ testy a provedeny laboratorní hydraulické a migrační zkoušky na nezainjektovaných vzorcích. Tyto testy poskytly dostatečné množství dat pro realizace analogických modelových simulací. Simulace, provedené pomocí aplikací programů NAPSAC a Feflow, prokázaly, že matematické modely lze úspěšně použít k simulaci procesů probíhajících v puklinách malého měřítka (puklinové délky do 1 m), pokud testy poskytnou dostatečné množství vstupních a kalibračních parametrů. Možnost použití modelových řešení při simulacích a predikci hydrogeologických procesů v horninového prostředí ve větším měřítka a v případě vyplnění puklinového

prostoru relativně nepropustným materiálem je testována v současné etapě laboratorních prací a bude i náplní v následujících fázích terénních a modelovacích prací v rámci projektu "Metody a nástroje hodnocení vlivu inženýrských bariér na vzdálené interakce v prostředí hlubinného úložiště".

*Tento příspěvek vznikl s podporou Ministerstva průmyslu a obchodu České republiky v rámci projektu registrovaného pod číslem 1H-PK/31 MPO ČR.*

#### Literatura - References

- Andres, E., Kovařík, J., Krejčíř, M., Kužvart, M., Rybařík, V., Vohánka, L., Žůrek, V.: Ložiskový průzkum stavebních surovin. *SPN, Praha 1985.*
- Käss, W. et al.: Tracer technique in geohydrology. *Balkema, Rotterdam, 1998.*
- Konzuk, J. S., Kueper, B. H.: Evaluation of cubic law based models describing single-phase flow through a rough-walled fracture, *Water Resour. Res.*, 40, W02402, 2004.
- Lhotka, M.: Analýza vzorku žuly, *Výzkumná zpráva 2005.*
- Lokajíček, T.: Ultrazvukové prozařování podélných a příčných vln na vzorcích granitu, *Výzkumná zpráva 2005, HS č. 320 / 6637 / 05 – 8.*
- Nichol, N. J., Rajaram, H., Glass, R. J., Detwiler, R.: Saturated flow in a single fracture: Evaluation of the Reynolds equation in measured aperture fields, *Water Resour. Res.*, 35(11), 3361-3373, 1999.
- Verfel, J.: Injektování hornin a výstavba podzemních stěn. *MÚS Bradlo, Bratislava 1992.*
- Weiss, Z., Kužvart, M.: Jílové minerály, jejich nanostruktura a využití. *Karolinum, Praha 2005.*