

# Multibodové měření vodivosti podzemních vod v puklinovém prostředí

*Petr Polívka, Pavel Kůs, Anna Černá*

*Centrum výzkumu Řež, petr.polivka@cvrez.cz*

## **Abstract**

*Disposal of radioactive waste (RAW) is assumed in the stable geological formations. The system of deep geological repository (DGR) consists of the natural (rock mass) and engineering (storage container, bentonite, etc.) barriers. The Czech concept considers a granitic geological formation as a rock environment. For safety cases and feasibility of DGRs a number of characteristics are necessary. One of the parameters is monitoring the specific conductivity of the groundwater in the crack environment of granites.*

*In common practice the conductivity of aqueous solutions is measured using a conductometer for one measuring point. The electrode area is typically about 1 cm<sup>2</sup> in size and is designed for volumes in units or tens of milliliters. The project was focused on measuring the specific conductivity in the smaller volumes in the order of microliters. An electrode for measuring the specific conductivity was developed, as well as a measuring system for the continuous multi-point measurement. A granite block was transported from the quarry and formatted to required dimensions. A crack was formed in it. Holes for the electrode placement were drilled into the block. Tracer experiments were carried out by injecting KCl solution with a specific conductivity from 1 to 1200  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ .*

*The evaluated data serve to characterize the propagation of non-absorbing contaminants in the crack environment under the DGR conditions. The data were used for following mathematical modeling.*

**Key words:** *water conductivity, monitoring, deep geological repository, radioactive waste*

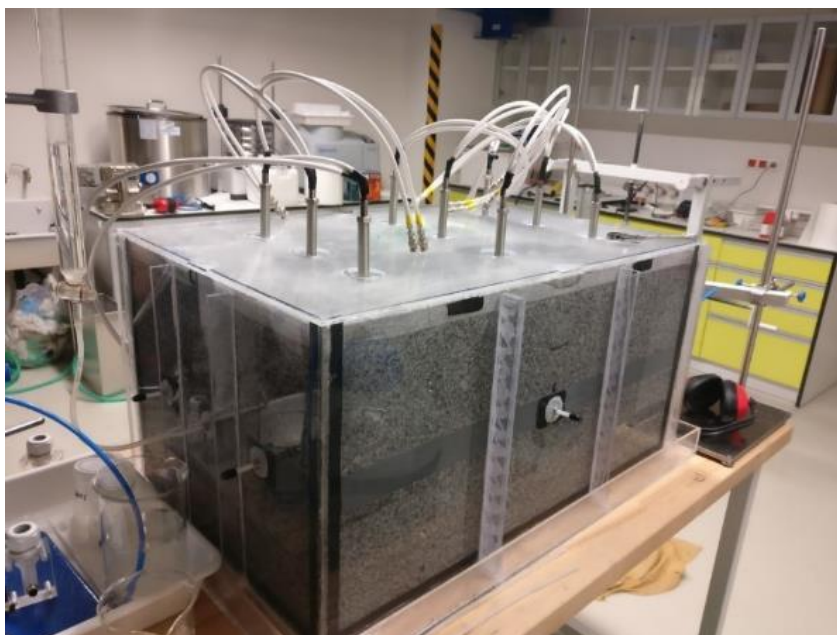
## **Úvod**

Výroba energie z jaderných zdrojů je doprovázena vznikem radioaktivních odpadů (radioaktivních látek), jejichž zneškodňování se předpokládá ukládáním ve stabilních geologických formacích. Geologické prostředí ČR představuje horniny s puklinovou propustností (krystalinikum, ale i zpevněné sedimenty). Jako vstup pro hodnocení bezpečnosti hlubinného úložiště je nutno popsat procesy, které tyto látky potenciálně podstupují v různých prostředích na cestě od zdroje kontaminace až po životní prostředí. Migrace látek v puklinovém prostředí dosud není dostatečně popsána v literatuře. Jedním ze sledovaných parametrů je měření měrné vodivosti podzemních vod v malých prostorách, na kterou se zaměřuje tato práce.

## **Použitý materiál**

Pro experiment byl vybrán reálný zástupce granitické horniny z Českomoravské vrchoviny, který pochází z lomu Mrakotín. Získaný hrubý vzorek MS-2 byl upraven do bloku o rozměrech 80x50x40cm a jeho celková hmotnost byla okolo 500 kg. Uprostřed bloku proběhlo jeho rozlomení na dvě části a tím došlo k vytvoření horizontální pukliny přes celou plochu bloku.

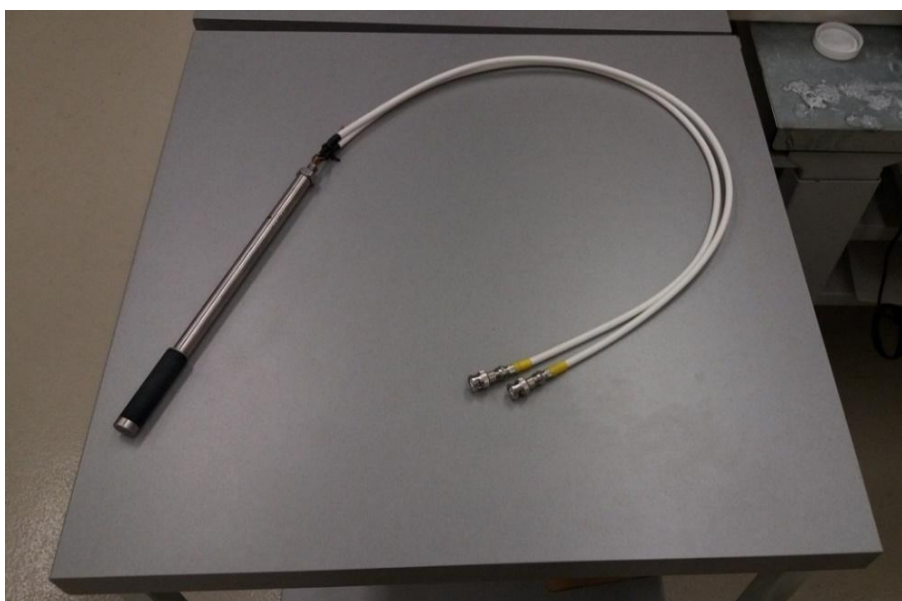
Pro účely měření byla na bloku MS-2 zhotovena pravidelná síť 9 minivrtů. Vrtání bylo uskutečněno pomocí vrtné soupravy HILTI DD 350-CA. Vnější průměr vrtné korunky byl 18 mm. Vrtání probíhalo směrem od pukliny k horní ploše bloku, aby nedošlo k nežádoucímu odštípnutí horniny v místě ukončení vrtu. Vyvrtné otvory byly následně během migračních experimentů osazeny měřicími senzory pro sledování vodivosti. Před sesazením obou částí bloku byly plochy pukliny důkladně očištěny tlakovou vodou a provedeno laserové skenování povrchu pukliny pro detailní charakteristiku reliéfu a dále byly na hranách instalovány trubičky pro vstup a výstup injektovaných kapalin. Na takto vystrojeném bloku bylo provedeno uzavření pukliny a ověřena jeho vodotěsnost.



**Obr. 1 Blok osazený serií paktů a vstupních otvorů v puklině**

### **Přístrojové vybavení**

Pro transport kapalin bylo zvoleno vysokotlaké čerpadlo LCP5020 (INGOS) se safírovými písty, které je konstruované pro HPLC techniku pro přesné čerpání kapalin do nízkých i vysokých tlaků. Jedná se o čerpadlo s recipročním pohonem protilehlých pístů s minimálním mrtvým objemem a jemnou regulací, pomocí kterého se dosáhlo nejplynulejší dodávky kapalin. Současně byla pro měření vyvinuta elektroda vlastní konstrukce se zlatými vodiči s plochým zakončením a ochranným obalem, který zároveň fixoval polohu ve vrtech zhotovených v granitovém bloku. Výhodou je že ochranný obal (pakt) současně plní funkci zafixování polohy a těsnění v hornině. Během série měření byly modifikovány signálové kabely, kde se pro stínění použil koaxiální kabel zakončený vhodnými konektory.



**Obr. 2 Měřicí vodivostní sonda uložena v paktu zakončená BNC konektory**

## Vývoj in-situ aparatury pro měření vodivosti v puklině

Pro výše uvedené specifické podmínky bylo vyvinuto další zařízení (měřicí sestava) pro simultánní vícekanálové měření impedance roztoků ve velmi malých objemech. Multiplexer, který v sobě kombinuje potenciostat s multikanálovou kartou, lze využít pro vícekanálový sběr dat. Konduktometr umožňuje provádět charakterizaci kapalin až na 12 kanálech. Měřicí sondy se připojují přes BNC konektory. Systém je modulární a každý kanál má svoji měřicí kartu. Komunikace probíhá přes virtuální sériový port USB, který je galvanicky oddělený. Zařízení se napájí ze sítě 230 V AC, které je také galvanicky odděleno.

### **Komunikace s PC/NB**

Pro komunikaci s přístrojem slouží samostatný software (aplikace) cmctl, která je napsaná v jazyce Python. V aplikaci lze nastavit parametry měření jako např. frekvenci a dobu záznamu dat. Aplikace s přístrojem komunikuje přes sériový port. Tento přístup má tu výhodu, že lze spustit na libovolném desktopu nebo serveru s operačním systémem Windows/macOS/Linux.

### **Experimentální část**

Hlavním cílem migračního experimentu bylo změřit průběh změn měrné vodivosti vody v síti připravených vrtů s instalovanými senzory pro budoucí matematické modelování migračních experimentů. Pro nástřik byl použit nesorbující stopovač, vodný roztok 0,01M KCl.



Obr. 3 Stopovací experiment

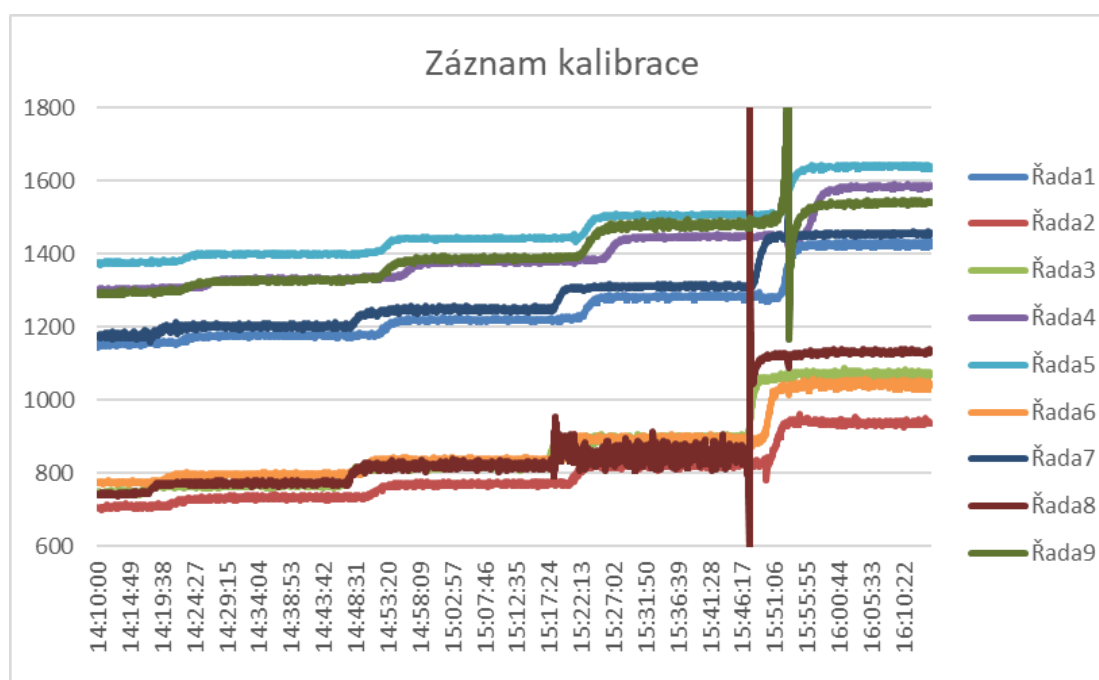
### **Optimalizace měřicí frekvence (100 – 900 kHz)**

Pro ověření volby vhodné měřicí frekvence sběrnice byl použit granitový blok MS-2, který byl umístěn v nerezovém nádrži. Do 7-mi z 9-ti vyvrtaných vertikálních pozic byly instalovány měřicí sondy v

pakrech. Dvě pozice sloužily pro souběžné měření průběhu tlaku. Před měřením byl systém odvzdušněn. Kapalina byla injektována do prostředního – předního vstupního i zadního výstupního otvoru na čela pukliny. Průtok DEMI vody i nástřik stopovače byl během měření udržován na 20 ml/min. Stopovačem byl roztok KCl o měrné vodivosti 1200  $\mu\text{S}/\text{cm}$  a nástřik trval po dobu 1 min. Záznamu dat byl nastaven v intervalu 3 sec. Přepojení stopovače se provedlo při kontinuálním průtoku pomocí trojcestného ventilu. V řídicím programu v NB byla postupně nastavována frekvence v celém rozsahu přístroje: 125, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 600, 700, 800 a 900 kHz. Pro každou frekvenci proběhlo samostatné měření a byla měřena odezva signálu po nástřiku stopovače. Z výsledných průběhů odezvy během experimentů byla vytipována oblast okolo 150 až 300 kHz. Oblast vyšších frekvencí byly silně ovlivněny šumem. Pro upřesnění volby frekvence byla podrobněji provedena další sada měření při frekvenci na sběrnici: 100, 150, 200, 225, 240, 250, 260 a 275 kHz. Uspořádání zůstalo stejné, stopovačem byl roztok KCl o měrné vodivosti 1200  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$  a nástřik trval po dobu 1 min. Na základě výsledků měření v tomto uspořádání byla pro další používání zvolena měřicí frekvence 250 kHz, která vykazovala nejplynulejší průběh a malou odchylkou signálu

### Kalibrace měřicího systému pomocí stopovače KCl

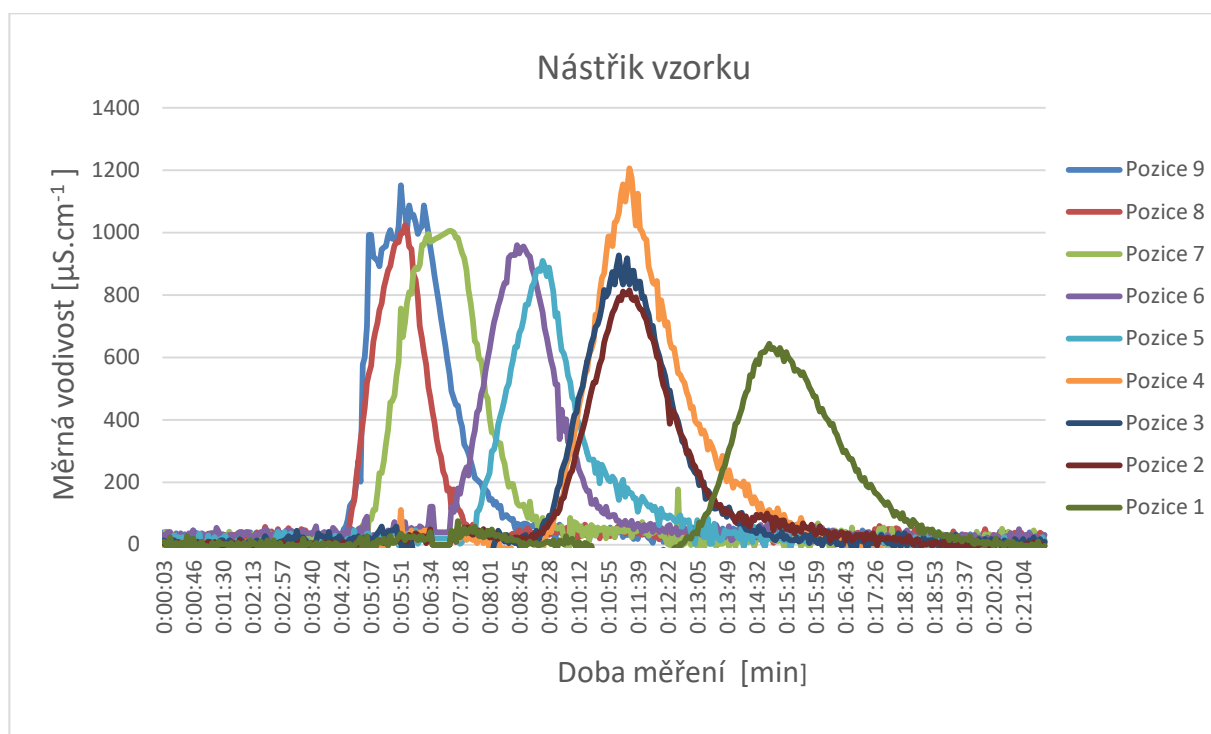
Před měřením vodivosti byla provedena kalibrace měřicího systému průtokem stopovačů o různých koncentracích. Do jednotlivých vyvrtaných otvorů se umístily senzory. Při osazování pakrů proběhlo odvzdušnění bloku osazeného senzory. V případě přítomnosti bublin vzduchu docházelo k zákmitům signálu. Pro kalibraci byly připraveny roztoky KCl o měrné vodivosti 60, 600 a 1200  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ . Byla použita DEMI-voda s měrnou vodivostí 3,5  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ , která sloužil pro propláchnutí systému. Nástřik roztoku KCl byl nastaven na průtok 20 ml/min po dobu 30 min. Pro výpočet průměrné hodnoty odezvy signálu se použila data z posledních 10 min. Jednotlivé průměrné hodnoty odezvy byly proloženy lineární přímkou.



**Obr. 4 Časový průběh odezvy signálu při kalibrace na 9 pozicích na dvou sběrnících Stopovací testy při osazených vodivostních senzorech na dvou sběrnících dat**

Pro přesnější měření byly použity současně dvě sběrnice dat. Do zadání programu na jejich ovládání byla optimalizovaná dvojice různých frekvencí v oblasti okolo 250 kHz. Pro kalibraci systému byly použity připravené roztoky o měrné vodivosti 99,9 pak 300, 600, 1200  $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ . Po ukončení kalibrace došlo k důkladnému propláchnutím (55 min) DEMI-vodou a dále následoval stopovací experiment. Během

experimentu byl aplikován jako vzorek roztok KCl o měrné vodivosti  $1200 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ , doba nástřiku trvala 2 min, průtok byl udržován na 20 ml/min. Z měření byl určen průběh vodivosti z jednotlivých kanálů.



**Obr. 5 Časový průběh konduktivity při stopovacího experimentu, měřeno na devíti pozicích a na dvou nezávislých ústřednách**

## Souhrn a závěr

Byl vyvinut a otestován měřící systém měrné vodivosti vhodný pro aplikace do malých prostor se zaměřením pro puklinové prostředí geologických formací, který umožňoval kontinuální měření vodivosti na všech devíti instalovaných senzorech. Na základě testování byla navržena optimální měřící frekvence sběrnice a určena vhodná pozice umístění jednotlivých sond ve vrtech pro měření vodivosti na všech devíti instalovaných senzorech. Pro zvýšení citlivosti měření byla pro experimenty navržena druhá paralelní sběrnice, která snížila přítomnost parazitických signálů sond a umožnila větší přesnost měření vodivosti na jednotlivých sondách. Výsledná získaná data z průběhu měření vodivosti v granitovém bloku MS-2 byla následně použita pro matematické modelování reálného chování nesorbujících kontaminantů.

## Literatura

Jankovský F., Havlová V., Zuna M., Grecká M., Rosendorf T., Kašpar V., Kůs P., Kotowski J., Polák M., Jankovec J., Zeman O., Milický M., Gvoždík L., Hokr M., Balvín A., Parma P. (2018): Vývoj nástrojů pro studium transportu kontaminantů v puklinovém prostředí. Výzkumná zpráva za rok 2018. Příloha 1 Odborné zprávy projektu TH02030543. Zpráva Z 5099, ÚJV Řež, a.s., 2019.

## Poděkování

Předložená práce vznikla díky projektu podporovaného agenturou TA ČR č. TH02030543 v rámci výzvy Program Epsilon - 2. VS.