

UŽITNÝ VZOR

(19)
ČESKÁ
REPUBLIKA



ÚŘAD
PRŮMYSLOVÉHO
VLASTNICTVÍ

(21) Číslo přihlášky: **2011 - 25014**

(22) Přihlášeno: **20.10.2011**

(47) Zapsáno: **26.04.2012**

(11) Číslo dokumentu:

23717

(13) Druh dokumentu: **U1**

(51) Int. Cl.:

G01N 15/08 (2006.01)

G01N 33/38 (2006.01)

G01N 33/24 (2006.01)

G01M 3/26 (2006.01)

(73) Majitel:

Česká geologická služba, Praha, CZ

(72) Původce:

Bláha Vladimír, Praha, CZ

Holeček Jan Mgr., Beroun, CZ

Rukavičková Lenka Mgr. Ph.D., Praha, CZ

(74) Zástupce:

VYNÁLEZ, s.r.o., Vinohradská 1107/45, Praha 2, 12000

(54) Název užitého vzoru:

Zařízení pro in-situ měření propustnosti hornin, geotechnických a stavebních materiálů

CZ 23717 U1

Zařízení pro *in-situ* měření propustnosti hornin, geotechnických a stavebních materiálů

Oblast techniky

Technické řešení se týká zařízení pro *in-situ* měření propustnosti hornin, geotechnických a stavebních materiálů za použití měření hmotnostního úbytku vtláčeného měřicího média pomocí citlivých vah. Svým využitím technické řešení spadá do oblasti geologie, hydrogeologie, stavebního průmyslu a ekologie.

Dosavadní stav techniky

V posledních 20 letech roste potřeba kvalitního stanovení propustnosti (hydraulické vodivosti) pevných hornin a dalších hydraulických bariér v souvislosti s budováním podzemních zásobníků a úložišť různého typu včetně hlubinného úložiště radioaktivních odpadů. Definování prostorového rozložení a vlastností hydraulických cest, kterými by v případě porušení obalů a bariér v úložišti mohla skladovaná či ukládaná látka migrovat horninovým prostředím na zemský povrch, je nezbytným předpokladem bezpečnostní analýzy stavby. Kromě studia preferenčních cest proudění podzemních vod (otevřené puklinové systémy, poruchové zóny a zlomy) je nutné věnovat pozornost také hydraulickým vlastnostem horninové matrice, která díky svému velkému objemu může sloužit jako retenční prostor a významným způsobem redukovat rychlost migrace znečištění do biosféry.

K testování hydraulických vlastností hornin slouží hydrodynamické zkoušky (HZ). Základním principem hydrodynamické zkoušky je vyvolání kontrolovaného dynamického impulzu ve zvodnělé hornině a následné sledování reakce na tento impuls. Impulzem je obvykle čerpání vody z vrtu nebo její vtláčení do vrtu. Odezva kolektoru je monitorována v čase a prostoru ve formě změn tlaku (výšky hladiny podzemní vody) nebo změn čerpaného (vtláčeného) množství vody.

Při průzkumu prostředí s nízkou hydraulickou vodivostí, není možné v širší míře využívat čerpací zkoušky standardně využívané v hydrogeologickém průzkumu. Proto byla v posledních 20 až 30 letech pro účely hydrogeologického výzkumu, zejména ve spojitosti s vyhledáváním vhodných lokalit pro úložiště radioaktivních odpadů, modifikována či nově vyvinuta řada alternativních typů HZ.

Nejčastěji jsou pro tyto účely využívány vodní tlakové zkoušky (VTZ) (Almén et al. 1986, Pirhonen 1988, Almén et al. 1994, Laaksoharju et al. 1991, Mejías a López-Geta 2003, Ahokas 2003, Gokall-Norman et al. 2005, Mejías et al. 2009). Při vodních tlakových zkouškách je do úseku vrtu odděleného pomocí pakrů vtláčena voda při konstantním (zkušebním) tlaku nebo za konstantního vtláčeného množství. Tlak je měřen buď manometrem na ústí vrtu, nebo tlakovým čidlem přímo v testované etáži. Současně je měřena spotřeba vtláčené vody ($\text{l} \cdot \text{min}^{-1}$, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Standardně jsou aplikovány VTZ s konstantním tlakem, jejichž výhodou je zanedbatelný vliv zásoby vody ve vrtu, možnost měření při velkém rozsahu hodnot hydraulické vodivosti, poměrně velký dosah od vrtu, možnost stanovení skinu, typu kolektoru a hraničních podmínek.

Standardně prováděnými VTZ je možné testovat horniny s hydraulickou vodivostí v rozsahu od 10^{-11} do $10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Spodní limit je dán citlivostí průtokoměrů uzívaných při terénním měření ve speciálně k tomuto účelu sestavených měřicích zařízeních. Spodní hranice rozsahu měření těchto průtokoměrů je obvykle kolem $1 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$, což v závislosti na hodnotě vstupního tlaku a délce testované etáže odpovídá hydraulické vodivosti v řádech 10^{-11} až $10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Například měřicí jednotka PSS3 (SKB downhole pipe string system) využívaná pro měření v hlubokých vrtech společnosti SKB ve Švédsku v rozsáhlém programu zaměřeném na vyhledání vhodné lokality pro hlubinné úložiště radioaktivních odpadů má v oblasti měření průtoků spodní limit $1 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$ (Florberger et al. 2006). Obdobná měřicí jednotka UMH (Mobile Hydrogeological Unit) používaná španělskou geologickou službou IGME je schopná zaznamenat průtoky od $0,5 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$. Ačkoliv existují průtokoměry i s vyšší citlivostí detekce průtoků než $0,5 \text{ ml} \cdot \text{min}^{-1}$ v praxi při terénním měření je jejich použití omezené kvůli jejich měřicímu rozsahu a pro obtížnou mani-

pulaci s takovými zařízeními. U vysoce citlivých průtokoměrů je běžný měřicí rozsah mezi minimálním a maximálním průtokem dán poměrem 1:25 až 1:50 (např. 0,1 až 2,5 ml.min⁻¹). U nízké propustných horninových matic se setkáváme s hodnotami hydraulické vodivosti v rozmezí 4 řádů (10^{-10} až 10^{-14} m.s⁻¹). Pro stanovení takto velkého rozpětí by bylo zapotřebí použít celou

5 kaskádu průtokoměrů, které by se překrývaly svými rozsahy. Velké množství ventilů a dalších komponent v takovém měřicím zařízení způsobuje další problémy v podobě kolísání tlaků při přepínání ventilů a celkově vede k nižší přesnosti celého zařízení. Navíc jsou citlivé průtokoměry náchylné na mechanické poškození při použití byť mírně znečištěného měřicího média. Problémem je i zanášení vnitřních součástí citlivých průtokoměrů minerálními látkami rozpuštěnými v

10 měřicím médiu. Je tak nutné používat nízké mineralizovanou nebo destilovanou vodu, která má jiné vlastnosti než podzemní vody prostupující testovanou maticí v přírodních podmínkách.

Pokud se u těchto výše uvedených zařízení dostane měřená spotřeba při VTZ pod rozsah průtokoměru, hydraulická vodivost testovaného úseku je považována za menší, než hydraulická vodivost odpovídající nejnižší měřitelné spotřebě a technickým parametrům testu. U hlubokých vrtů

15 v horninách s velmi nízkou propustností je testů pod limitem měření velmi významná část. Například Walker et al. (2001) uvádějí pro lokalitu Beberg (Finsjön a Forsmark) ve Švédsku 10 % zastoupení testů pod měřicí limit aparatury a pro lokalitu Ceberg (Gideå) 40 % testů pod limit měření. U jednotlivých vrtů je tento podíl ještě vyšší například na lokalitě Forsmark u vrtu KFM01D dosáhl podíl testů pod nebo velmi blízkých spodnímu limitu měřicí jednotky 63 %.

20 Pro horniny s velmi nízkou propustností (hydraulickou vodivostí) je proto v hydrogeologické praxi i výzkumu používán jiný typ hydrodynamických zkoušek, speciálně vyvinutých pro toto prostředí. Jsou to pulzní testy. Principem pulzního testu je prudké zvýšení tlaku v etáži, které je následováno jejím okamžitým uzavřením a monitoringem poklesu tlaku (Bredehoeft a Papadopoulos 1980, Neuzil 1982, Raven et al. 1990, Rutquist 1996). Do výpočtů hydraulické vodivosti je

25 v tomto typu testu zahrnována stlačitelnost vody a nářadí ve vrtu (v praxi obtížně stanovitelné).

Použití různých druhů testů pro stanovení hydraulické vodivosti a transmisivity hornin přináší problémy při vyhodnocení, zejména při srovnávání výsledných hodnot stanovených různými metodami. Aplikace různých druhů testů na stejný úsek vrtu ukázaly, že se výsledné hodnoty koeficientu hydraulické vodivosti mohou lišit mezi jednotlivými druhy testů až o několik řádů

30 (Almén et al. 1986, Mejías et al. 2009). Odchyly jsou způsobeny rozdílnou metodikou testování, vyhodnocení a rozdílným dosahem testů od osy vrtu.

V průběhu pulzního testu je do testovaného vrtu či úseku vrtu vtlačeno jen velmi nepatrné množství vody, test má tedy velmi malý dosah od stěny vrtu. Pulzním testem je proto často zastižena jen úzká zóna v okolí vrtu postižená vrtným procesem (tzv. skin efekt). Mejías et al. 2009 srovnával výsledky různých typů vodních tlakových zkoušek a pulzních testů. Zatímco hodnoty transmisivity se u VTZ pohybovaly v řádu 10^{-11} až 10^{-6} m².s⁻¹, u pulzních testů byly výsledné hodnoty transmisivity v řádu 10^{-8} a 10^{-9} m².s⁻¹. Autoři došli k závěru, že pulzní testy charakterizují transmisivitu zóny postižené skinefektom. Tato transmisivita byla u testovaného vrtu přibližně 10^{-8} m².s⁻¹. Ke shodě výsledných hydraulických parametrů z VTZ a pulzních testů docházelo tedy pouze v případě, že testovaný úsek jako celek měl transmisivitu blízkou této hodnotě.

40

Z výše uvedených příkladů vyplývá potřeba zajistit možnost realizace jednotného typu testu (VTZ) ve všech úsecích vrtu. Jedině tak může být zajištěna srovnatelnost výsledných hodnot hydraulické vodivosti pro propustné puklinové systémy i neporušenou horninovou matici s velmi nízkou propustností. Váhové měření objemů spotřeb média při VTZ umožní jejich realizaci v úsecích i s extrémně nízkou propustností, kdy je běžné měření průtoku v terénních podmínkách technicky neuskutečnitelné. Dosah zkoušky od osy vrtu lze snadno ovlivnit délkou jejího trvání, což u pulzních testů není možné.

45

Použitá literatura:

- AHOKAS, H. (2003): Summary of hydraulic conductivity measurements and differences between different methods in boreholes KR1 - KR10 at Olkiluoto, Finland. Proceedings of Groudwater in Fractured rocks 2003 (Krásný, Hrkál, Bruthans eds.), Prague, Czech Republic.
- 5 ALMÉN, K.E. et al (1994) : Äspö Hard Rock Laboratory - Feasibility and usefulness of site investigation methods. Experiences from the pre-investigation phase. SKB TR 94-24, Stockholm.
- ALMEN, K.E., ANDERSSON, O., FRIDH, B., JOHANSSON, B.E., SEHLSTEDT, M., GUSTAFSSON, E., HANSSON, K., OLSSON, O., NILSSON, G., AXELSEN, K., WIKBERG, P. (1986): Site investigation. Equipment for geological, geophysical, hydrogeological and hydrochemical characterization. SKB TR 10 86-16.
- BREDEHOEFT, J.D., Papadopoulos S. S. (1980): A method for determining the hydraulic properties of tight formations. Water Resources Research, 16, 1, 233-238.
- FLORBERGER, J., HJERNE, C., LUDVIGSON, J.E., WALGER, E. (2006): Forsmark site investigation. Single-hole injection tests in borehole KFM01D. SKB P-06-195.
- 15 GOKALL-NORMAN, K., LUDVIGSON, J.E., JÖNSSON, S. (2005): Forsmark site investigation. Hydraulic interference test. Boreholes KFM04A, HFM10, HFM13, HFM19 and HFM252. SKB report No. P-05-186. Stockholm.
- LAAKSOHARJU, M. et al. (1991): Light-weight double packer equipment for water sampling and hydraulic measurements in deep drill holes. Geological survey of Finland Report YST-74. Espoo.
- 20 MEJÍAS, M., LÓPEZ-GETA, J.A. (2003): Instrumentation and methodology for the hydraulic characterization of fractured rocks. Proceedings of Groudwater in Fractured rocks 2003 (Krásný, Hrkál, Bruthans eds.). Prague, Czech Republic.
- MEJÍASA, M., RENARDB, P., GLENZB, D. (2009): Hydraulic testing of low-permeability formations: A case study in the granite of Cadalso de los Vidrios, Spain Engineering Geology Volume 107, Issues 3-4, 88-97.
- 25 NEUZIL C.E. (1982): On conducting the modified slug test in tight formations. Water Resources Research 18 (2), 439-441.
- PIRHONEN, V.O. (1988): Combined geophysical and hydraulic methods for 3D mapping of fractures and siting rock caverns in granite. Engineering Geology, 25, 1, 45-68.
- 30 RAVEN, K.G., LAUFLEUR, D. W., SWEEZEY, R.A. (1990): Monitoring well into abandoned deep-well disposal formations at Sarnia, Ontario, Canadian Geotechnical Journal 27, 1, 105-118.
- RUTQVIST, J. (1996): Hydraulic pulse testing of single fractures in porous and deformable hard rocks. Quarterly journal of engineering geology 29, 181-192.
- WALKER, D., RHÉN, I., GURBAN, I. (1997): Summary of hydrogeologic conditions at Aberg, Beberg and Ceberg. SKB report No. TR-97-23. Stockholm.
- 35

Podstata technického řešení

Nově vynalezené zařízení sloužící k měření hydraulické propustnosti nízce propustných matic využívá metodiky měření objemové spotřeby vtláčeného měřicího média - kapaliny - za jednotku času, díky čemuž jsou získané výsledky porovnatelné se standardními metodami VTZ. Pro detekci množství spotřebovaného testovacího média je využíván nový princip měření úbytku hmotnosti za čas pomocí citlivých vah. Při známé hustotě testovacího média lze snadným přepočtem zjistit objemový úbytek za čas, tj. průtok. Přepočet hmotnosti na objem je dán vztahem:

$$V = m \cdot \rho^{-1}$$

kde V je objem v m³, m je hmotnost v kg a ρ je objemová hustota testovacího média v kg.m⁻³. Měření hmotnostních úbytků v čase přináší výhodu vyšší citlivosti aparatury v porovnání s konvenčními zařízeními pracujícími na principu průtokoměrů. Vysoké citlivosti je dosahováno nejen citlivostí a přesností použitých vah, ale i délkou vlastního měření. V praxi je možné zaznamenat

45

úbytek hmotnosti o velikosti prvních jednotek gramů v horizontu hodin až měsíců, což odpovídá až o 4 řády vyšší citlivosti oproti konvenčním zařízením. Dlouhá doba měření má současně pozitivní vliv na velikost objemu testované matrice v okolí měřeného úseku ve vrtu, čím je zkouška delší, tím větší objem matrice v okolí vrtu je zahrnut do měření a tím relevantnější je výsledek měření pro danou matici. Tato skutečnost je novým přínosem v porovnání s pulzními testy, jejichž dosah je v řádu mm od testovaného bodu. Další výhodou nového řešení je i relativní jednoduchost zařízení.

Vlastní měřicí aparatura sestává ze součástí, které lze rozdělit na dvě základní části. První z nich je vybavení a vystrojení vrtu v testované matrici (Obrázek č. 1 a 2.), druhá část zahrnuje vybavení pro generování tlakového impulsu a měření jeho odezvy pomocí vah (Obrázek č. 3). Obě části tvoří nedělitelný komplet a jsou využívány současně a v součinnosti. Čísla v závorkách u následujícího popisu odpovídají popiskům na obrázku č. 1, 2 a 3.

Vybavení pro vystrojení a manipulaci se zařízením ve vrtu zahrnuje: elektrický naviják poháněný elektrickým proudem o napětí 230 V a vybavený lanem, kde ve výhodném provedení je lano z oceli a má délku alespoň 200 m a nosnost alespoň 250 kg; dále vybavení zahrnuje stojan s kladkou opatřenou měřicím kolečkem pro měření aktuální hloubky zapuštění náčiní, injektážní hadičku, která ve výhodném provedení má průměr 6 mm a je zhotovena z polyamidu (PA) nebo teflonu (TFPE) s nízkou roztažností umožňující použít pracovní tlak minimálně 2 MPa, vodní tlakovou pumpu s manometrem využívanou k nafouknutí a upevnění dvojice pryžových pakrů vymezujících testovaný úsek vrtu. Pakry jsou spojeny ocelovou injektážní trubicí, která je ve střední části perforovaná. V tomto místě se vtlačí testovací médium do vymezeného úseku vrtu. Oba pakry jsou přemostěny spojovací hadičkou k rovnoměrné distribuci vody v pakrech; to umožňuje současné nafouknutí nebo vypuštění horního pakru i spodního pakru. Spodní pakr je neprůběžný a je na dolním konci utěsněn šroubovací zásepkou. V podrobném náhledu na Obrázku č. 2 je uveden konstrukční detail hlavy horního pakru. Tento pakr je opatřen pevným nosným ocelovým okem, na kterém je ocelové manipulační lano připevněno pomocí karabiny; výhodné jsou ocelové horolezecké karabiny typu „Mailon“. Spojení mezi ocelovou injektážní trubicí a hadičkou je uskutečněno šroubovací nástrčnou rychlospojkou. Ta byla sadou terénních měření verifikována jako vhodný spojovací člen mezi jakýmkoliv součástmi zařízení opatřenými standardním závitem a PA (TFPE) hadičkami. Systém nástrčných rychlospojek je využíván na všech místech zařízení, kde se takový typ spoje vyskytuje. Šroubovací rychlospojka je využita i pro připojení tlakové hadičky, kterou jsou pakry nafukovány.

Nejdůležitější částí zařízení je soubor součástí, které generují tlakový impuls a detekují spotřeby měřicího média. Mezi základní komponenty patří citlivé váhy s přesností měření 1 gram s rozsahem vážení od 0 do 30 kg, expanzní tlaková nádoba s provozním tlakem do 400 kPa a objemem 4 až 25 l, tlaková láhev se stlačeným vzduchem se sadou redukčních ventilů s výstupním tlakem 100 až 400 kPa nebo obdobné známé zařízení poskytující výstupní tlak v požadovaném rozmezí, tlakové čidlo s rozsahem 50 až 500 kPa, teplotní čidlo s citlivostí minimálně 0,5 °C s rozsahem do 50 °C, injektážní PA nebo TFPE hadička o průměru 6 mm, datalogger - digitální záznamové zařízení ukládající údaje z čidel, údaje o změřených hmotnostech, teplotách a tlaku v určených časových intervalech. Dále zařízení obsahuje izolační polystyrénový box o síle stěny 10 cm se snímatelným víkem umožňující manipulaci se zařízením uvnitř boxu, klimatizační jednotku schopnou udržovat v izolačním boxu nastavenou konstantní teplotu s odchylkou maximálně 1 °C, 24V akumulátory jakožto zdroj elektrické energie, zásobní nádobu na měřicí médium, elektrické odstředivé čerpadlo pro napouštění měřicího média do expanzní nádoby. Hadíčka od čerpadla je k expanzní nádobě připojena pomocí jednocestného ventilu, který má směr propouštění pouze do expanzní nádoby a zabraňuje tak vytékání média zpět do zásobní nádoby. Pro připojení expanzní nádoby na hadičku vedoucí do vrtu je opět použita nástrčná rychlospojka. Záznamové zařízení a klimatizační jednotka při svém provozu během měření spotřebovávají elektrickou energii ze zdroje. Pro dlouhodobý provoz je systém vybaven fotovoltaickými panely o výkonu 270 W dostačující k doplňování elektrické energie ze slunečního záření v místech, kde není dostupná běžná přípojka elektrické energie.

Zařízení bylo primárně vyvinuto pro testování propustnosti respektive nepropustnosti hornin *in-situ*. Zařízení je vhodné i pro testování propustnosti různých stavebních materiálů plnicích těsnicí funkcí. Pro testy v menších vrtech může být vystrojení provedeno manuálně bez vrátku a to i ve variantě s jedním pakrem, kdy je testován úsek mezi pakrem a dnem vrtu.

- 5 Principem metody měření je vytlačování měřicího média z expanzní nádoby přetlakem 100 až 400 kPa pomocí injektážní hadičky do vymezeného úseku mezi pakry a dále do testované matrice. V průběhu jednoho měření je vždy zkušební přetlak měřicího média po celou dobu zkoušky konstantní (obvykle 100 kPa). Jako měřicí médium lze použít jakoukoliv kapalinu, u které je známá objemová hustota. V praxi s ohledem na životní prostředí se jako měřicí médium nejčastěji používá pitná voda nebo voda z místních zdrojů, která je chemicky blízká zkoumanému prostředí. Je však možné použít i různé fyzikálně-chemicky definované solné roztoky. Pomocí citlivých vah je sledován hmotnostní úbytek měřicího média v expanzní nádobě v čase. Protože při úbytku média v expanzní tlakové nádobě postupně klesá tlak, je v ní udržován konstantní tlak pomocí tlakové láhve se stlačeným vzduchem. Konstrukce expanzní tlakové nádoby zajišťuje, že se kapalně měřicí médium a stlačený vzduch díky gumové membráně k sobě nedostanou a měřicí médium se neprovzdušní. Hustota měřicího média je závislá na teplotě, proto je expanzní tlaková nádoba s měřicím médiem i injektážní hadička udržována při konstantní teplotě v izolačním polystyrénovém boxu vybaveném klimatizační jednotkou. Konstantní teplota je jedním z klíčových faktorů ovlivňující správnost měření a je nutné ji udržovat stabilní v izolačním boxu po celou dobu měření. Pro další zlepšení a minimalizování teplotních ztrát je povrch izolačního boxu polepen termoizolační reflexivní fólií. Klimatizační jednotka použitá pro temperování izolačního boxu funguje na principu Peltiérových termočlánků. Je vybavena řídicí elektronikou a v závislosti na aktuální okolní teplotě podle potřeby chladí, nebo naopak hřeje. V průběhu měření jsou aktuální měřené údaje z váhy, tlakového a teplotního čidla průběžně ukládány na paměťové kartě (např. SD kartě) v dataloggeru pro následné vyhodnocení testu. Současně je možné sledovat aktuální hodnoty i vývoj měřených hodnot v čase v grafické podobě na displeji dataloggeru. Pro výpočet hydraulické vodivosti jsou využívány hodnoty hmotnostního úbytku a tlaku. Zaznamenané údaje teploty jsou součástí kontrolního mechanismu kvality měření.

- 30 Kromě samotného technického vybavení potřebného k sestavení zařízení je součástí technického řešení i pracovní postup (metodika) měření.

- Pracovní postup instalace zařízení začíná u stabilizace stojanu s měřicím kolečkem nad ústím vrtu. Následně je sestavena dvojice pakrů, u nichž se pomocí délky střední perforované trubky nastaví délka zkoušeného intervalu ve vrtu. Po připojení pakrů na nosné ocelové lano je k pakrům připojena injektážní hadička a hadička na nafukování pakrů. Poté je celá sestava pomocí navijáku zapuštěna do požadované hloubky do vrtu. Expanzní nádoba je pomocí ponorného odstředivého čerpadla napuštěna měřicím médiem ze zásobní nádoby. Pomocí stlačeného vzduchu z tlakové láhve je v expanzní nádobě vytvořen tlak 100 až 400 kPa. Výška tlaku v expanzní nádobě je volena v závislosti na podmínkách na lokalitě a podle cílů konkrétních testů. Vstupní tlak v rozmezí 100 až 400 kPa je optimální pro VTZ při testování propustnosti hornin *in-situ*. Tlak v nádobě a injektážní hadičce je měřen tlakovým čidlem na ústí expanzní nádoby a je možné jej sledovat na displeji dataloggeru. Při uvolněných pakrech je přetlakem měřicího média z expanzní nádoby zcela vytlačen vzduch z injektážní hadičky. To je velmi důležité, protože případná přítomnost plynu v soustavě negativně ovlivňuje správnost měření. Následně jsou pakry pomocí vodní tlakové pumpy nafouknuty na tlak 1,5 až 2 MPa. Tímto tlakem se pakry utěsní a vymezí měřený interval ve vrtu. Expanzní nádoba, injektážní hadička a tlaková hadička propojující pakr s tlakovou pumpou jsou z co největší části umístěny v klimatizovaném boxu, kde je udržována konstantní teplota. Teplota v boxu je nastavena na střední hodnotu předpokládaného teplotního rozmezí den/noc, aby byly energetické výdaje na chlazení/ohřívání boxu co nejmenší.

- 50 Na dataloggeru je před spuštěním měření nastaven interval záznamu hodnot. Ten může být nastaven s pevnou délkou časového kroku, nebo může být datalogger přepnut do automatického režimu, kdy z rozdílů 3 předchozích měření hmotností a jejich časů se automaticky vypočítává čas následujícího měření. Tento režim je vhodný zejména pro extrémně nepropustné matrice, kdy

je úbytek měřené hmotnosti zaznamenán až po dlouhém čase a je zbytečné ukládat velký počet konstantních změřených hodnot. V automatickém režimu vnitřní program dataloggeru počítá s rozdílem hmotnosti 1 gram. Datalogger je možné naprogramovat i v poloautomatickém režimu, kdy lze nastavit několik časových úseků s různými délkami časového kroku.

- 5 Po nastavení dataloggeru a spuštění záznamu měřených veličin je zahájeno vlastní vtlačení měřicího média do vymezeného intervalu ve vrtu. Délka vtlačení závisí na zadání výzkumných či průzkumných úkolů. Může se pohybovat od několika hodin po několik měsíců. Měřené hodnoty zobrazené na displeji dataloggeru umožňují operativně regulovat parametry testu a volit vhodnou délku testování, například ukončit testování při ustálení úbytku hmotnosti. Sestava zařízení
10 umožňuje bezobslužné fungování testu a to i v místech bez přípojky elektrické energie, což výrazně snižuje náklady na dlouhodobé testovací práce.

Vyhodnocení testů a následné stanovení hydraulické vodivosti (propustnosti) na základě změřených úbytků hmotnosti vtlačného média a zkušebního tlaku probíhá dodatečně podle standardně užívaných postupů uváděných v odborné literatuře pro VTZ.

- 15 Způsob měření lze popsat postupem sestávajícím z následujících kroků:

- 1) Umístění a stabilizace stojanu s elektrickým navijákem a měřicím kolečkem nad ústím vrtu;
- 2) Smontování pakrů a injektážní trubky do jednoho celku, přičemž spodní pakr je na dolním konci utěsněn záslepkou, aby byl neprůběžný;
- 3) Připojení injektážní hadičky pomocí rychlospojky k injektážní trubce, připojení tlakové
20 hadičky vedoucí od tlakové pumpy k hornímu pakru a vzájemné propojení pakrů pomocí spojovací hadičky;
- 4) Zavěšení celku popsaného v krocích 2) a 3) na manipulační ocelové lano pomocí nosného ocelového oka a karabiny;
- 5) Vynulování hodnoty měřicího kolečka a spuštění celku popsaného v krocích 2) a 3) do požadované hloubky měření ve vrtu pomocí elektrického navijáku, přičemž aktuální hloubka zapuštění je kontrolována na měřicím kolečku;
- 6) Smontování expanzní tlakové nádoby, tlakové láhve, čidel, jednocestného ventilu a rychlospojky do jednoho celku, připojení injektážní hadičky pomocí rychlospojky a připojení hadičky vedoucí od čerpadla pomocí jednocestného ventilu;
- 7) Naplnění zásobní nádoby měřicím médiem a připojení elektrického zdroje k čerpadlu;
- 8) Pomocí čerpadla je měřicím médiem naplněna tlaková expanzní nádoba a současně jsou do
30 vrtu pomocí injekční hadičky vytlačeny alespoň 2 objemy hadičky a trubky tak, aby se vytlačil veškerý vzduch z injektážního potrubí a prostoru mezi pakry. Objem injektážního potrubí je nutné vypočítat v závislosti na délce a průměru hadičky a trubky;
- 9) Tlakovou pumpou jsou pakry nafouknuty vodou na tlak 1,5 až 2 MPa a vymezený úsek vrtu je hydraulicky izolován, přičemž tlak vody v pakrech je kontrolován pomocí manometru, který je součástí tlakové pumpy;
- 10) Celek popsaný v kroku 6), kromě tlakové láhve, je umístěn na váhu do klimatizovaného boxu. Kabely od váhy a čidel jsou připojeny k dataloggeru, který je následně připojen ke
40 zdroji elektrické energie;
- 11) Následně je do boxu umístěna co největší část hadičky tak, aby délka hadičky mezi vrtem a izolačním boxem byla co nejkratší;
- 12) Klimatizační jednotka je připojena ke zdroji elektrické energie a je nastavena na střední předpokládanou hodnotu mezi minimální a maximální denní/noční teplotou. Víko boxu je
45 přiklopeno. Před zahájením měření je nutné posečkat, dokud se teplota uvnitř boxu neustálí na konstantní hodnotě nastavené na klimatizační jednotce. Aktuální teplota v boxu je sledována na displeji dataloggeru pomocí teplotního čidla.
- 13) Z tlakové láhve je do horní komory expanzní nádoby napuštěn vzduch o požadovaném zkušebním tlaku (obvykle 100 kPa), přičemž tlak měřicího média v expanzní nádobě je průběžně sledován na displeji dataloggeru pomocí tlakového čidla;
- 50 14) Na dataloggeru je spuštěn záznam hodnot na paměťovou kartu v požadovaném intervalu. Úbytek měřicího média v expanzní nádobě je měřen váhou a je průběžně sledován na dis-

- pleji dataloggeru. O délce a okamžiku ukončení VTZ rozhoduje operátor na základě hodnot a grafického znázornění průběhu zkoušky na displeji dataloggeru;
- 15) Pro průběžné doplňování elektrické energie do zdroje je k tomuto zdroji výhodně připojen fotovoltaický systém.

5 Základní používané pojmy a zkratky:

HZ - hydrodynamická zkouška.

PA - polyamid.

TFPE - teflon.

VTZ - vodní tlaková zkouška.

- 10 Hydraulická vodivost - schopnost horniny propouštět vodu účinkem hydraulického gradientu. Je vyjadřována koeficientem hydraulické vodivosti (m.s^{-1}). V obecné rovině je pro hydraulickou vodivost používán termín „propustnost“.

Transmisivita - schopnost zvodněného kolektoru o určité mocnosti propouštět vodu účinkem hydraulického gradientu. Je vyjadřována koeficientem transmisivity ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$).

- 15 Pakr - součást testovací sestavy, která slouží k izolaci vybraného úseku vrtu. Pryžová součást pakru se po zapuštění pakru do vrtu roztáhne nafouknutím a zatěsní stvol vrtu v daném místě.

Skin efekt (skin) - zóna změněné propustnosti, která se může vytvořit v bezprostředním okolí (plášti) vrtu během vrtného procesu a její vliv na průběh HZ.

Přehled obrázků na výkresech

- 20 Obrázek č. 1: Schematický náčrt zapojení součástí zařízení zapouštěných do vrtu;
Obrázek č. 2: Detail zavěšení trubky a napojení hadiček na trubku a pakr;
Obrázek č. 3: Schematický náčrt zapojení součástí zařízení pro generování a detekci tlakového impulzu včetně podpůrných zařízení.

Příklady provedení technického řešení

25 Příklad 1

- Zařízení na měření propustnosti obsahuje elektrický naviják 1 poháněným elektrickým proudem o napětí 230 V a opatřený ocelovým lanem 10 o délce 200 m a nosnosti 250 kg; dále zahrnuje stojan 2 s kladkou opatřenou měřicím kolečkem 211 pro měření aktuální hloubky zapuštění náčiní, teflonovou injektážní hadičku 3 o průměru 6 mm s nízkou roztlačností umožňující použít pracovní tlak minimálně 2 MPa, vodní tlakovou pumpou 4 s manometrem využívanou k nafouknutí a upevnění dvojice pryžových pakrů 5, 7 vymezujících testovaný úsek vrtu a pryžové pakry 5, 7, kde pakry 5, 7 jsou spojeny ocelovou injektážní trubkou 11, která je ve střední části opatřena perforací pro vtlačení testovacího média do vymezeného úseku vrtu. Oba pakry 5, 7 jsou přemostěny spojovací hadičkou 6 k rovnoměrné distribuci vody v pakrech a k současnému nafouknutí nebo vypuštění obou parků 5, 7. Spodní pakr 7 je neprůběžný a je na dolním konci utěsněn šroubovací záplepkou 8. Injektážní trubka 11 je opatřena pevným nosným ocelovým okem 9 pro připevnění lana 10 pomocí karabiny 111 typu „Mailon“. Spojení mezi ocelovou injektážní trubkou 11 a hadičkou 3 je uskutečněno šroubovací nástrčnou rychlospojkou 12. K připojení tlakové hadičky 14 spojující tlakovou pumpu 4 s pakrem 5 je v místě připojení k parku 5 užitá šroubovací rychlospojka 13.

Zařízení dále sestává z komponent sloužících k provedení měření a zahrnuje tedy dále citlivé váhy 15 s přesností měření 1 gram s rozsahem vážení od 0 do 30 kg, expanzní tlakovou nádobu 16 s provozním tlakem do 400 kPa a objemem 4 až 25 l, tlakovou láhev 17 se stlačeným vzduchem se sadou redukčních ventilů s výstupním tlakem 100 až 400 kPa, tlakové čidlo 18 s rozsahem

hem 50 až 500 kPa, teplotní čidlo 19 s citlivostí minimálně 0,5 °C s rozsahem do 50 °C, data-logger 20 ukládající údaje z čidel 18, 19, údaje o změřených hmotnostech, teplotách a tlaku v určených časových intervalech; dále zařízení obsahuje izolační polystyrénový box 21 o síle stěny 10 cm se snímatelným víkem umožňující manipulaci s komponentami uvnitř boxu 21, klimati-
 5 zační jednotku 22 schopnou udržovat v izolačním boxu 21 nastavenou konstantní teplotu s odchylkou maximálně 1 °C, 24V akumulátory jakožto zdroj 23 elektrické energie, zásobní nádobu 24 na měřicí médium, elektrické odstředivé čerpadlo 25 pro napouštění měřicího média do expanzní nádoby 16, hadičku 251 od čerpadla 25, která je k expanzní nádobě 16 připojená pomocí jednocestného ventilu 26, který má směr propouštění pouze do expanzní nádoby 16 a zabraňuje
 10 tak vytékání média zpět do zásobní nádoby 24. Pro připojení expanzní nádoby 16 na hadičku 3 vedoucí do vrtu je použita nástrčná rychlospojka 27. Datalogger 20 a klimatická jednotka 22 při svém provozu během měření spotřebovávají elektrickou energii ze zdroje 23, přičemž pro dlouhodobý provoz sestává zařízení rovněž z fotovoltaických panelů 28 o výkonu 270 W dostatečující k doplňování elektrické energie ze slunečního záření v místech, kde není dostupná běžná
 15 přípojka elektrické energie.

Zařízení bylo úspěšně aplikováno při terénním měření ve vrtech na třech lokalitách v České republice. Jednalo se o lokalitu Ctětín u Nasavrku, Melechov u Ledče nad Sázavou a Kaliště u Humpolce. Testovanou matricí byly různé typy granitů Českého masivu. Vlastní provedení technického řešení na testovaných lokalitách se shodovalo s výše uvedeným popisem. Testovány
 20 byly úseky horninové matrice bez zjištěných makropuklin v hloubkách od 26 do 86 m pod terénem, mocnost testovaného úseku (vzdálenost pakrů) byla 0,44 m. Pro testy byl standardně nastaven konstantní tlak v expanzní nádobě 100 kPa, což podle hydrogeologických poměrů na konkrétní lokalitě odpovídalo vstupnímu tlaku od 130 do 170 kPa.

Váhově měřené spotřeby vtláčené vody se při těchto testech pohybovaly od 0,004 po 1 ml.min⁻¹. To odpovídá hodnotám koeficientu hydraulické vodivosti v rozsahu 4,0.10⁻¹² až 1,0.10⁻⁹ m.s⁻¹. Měření takto nízkého koeficientu hydraulické vodivosti bylo možné jedině díky tomuto nově vyvinutému zařízení, které umožnilo přesně změřit nepatrné změny úbytku hmotnosti vtláčeného
 25 média v dlouhém časovém úseku.

Příklad 2

30 Způsob měření propustnosti hornin, geotechnických a stavebních materiálů za použití měření hmotnostního úbytku vtláčeného měřicího média pomocí citlivých vah, kde způsob sestává z následujících kroků:

- 1) Umístění a stabilizace stojanu 2 s elektrickým navijákem 1 a měřicím kolečkem 211 nad ústím vrtu.
- 35 2) Sestavení pakrů 5, 7 a injektážní trubky 11 do jednoho celku, přičemž spodní pakr 7 je na dolním konci utěsněn záslepkou 8, aby byl neprůběžný.
- 3) Připojení injektážní hadičky 3 pomocí rychlospojky 12 k injektážní trubce 11, připojení tlakové hadičky 14 vedoucí od tlakové pumpy k hornímu pakru 5 a vzájemné propojení pakrů 5, 7 pomocí spojovací hadičky 6.
- 40 4) Zavěšení celku popsaného v krocích 2) a 3) na manipulační ocelové lano 10 pomocí nosného ocelového oka 9 a karabiny 111,
- 5) Vynulování hodnoty měřicího kolečka 211 a spuštění celku popsaného v krocích 2) a 3) do požadované hloubky měření ve vrtu pomocí elektrického navijáku 1, přičemž aktuální hloubka zapuštění je kontrolována na měřicím kolečku 211.
- 45 6) Sestavení expanzní tlakové nádoby 16, tlakové láhve 17, čidel 18, 19, jednocestného ventilu 26 a rychlospojky 27 do jednoho celku; připojení injektážní hadičky 3 pomocí rychlospojky 27 a připojení hadičky 251 vedoucí od čerpadla 25 pomocí jednocestného ventilu 26.
- 7) Naplnění zásobní nádoby 24 měřicím médiem a připojení elektrického zdroje 23 k čerpadlu 25.
- 50 8) Naplnění tlakové expanzní nádoby 16 měřicím médiem pomocí čerpadla 25 a současně jsou do vrtu pomocí injektážní hadičky 3 vytlačeny alespoň 2 objemy hadičky 3 a trubky 11 tak,

aby se vytlačil veškerý vzduch z injektážního potrubí a prostoru mezi pakry 5, 7. Objem injektážního potrubí je vypočten v závislosti na délce a průměru hadičky 3 a trubky 11.

- 9) Vyplnění pakrů 5, 7 vodou pomocí tlakové pumpy 4 na tlak 1,5 až 2 MPa a hydraulická izolace vymezeného prostoru vrtu, přičemž tlak vody v pakrech je kontrolován pomocí manometru, který je součástí tlakové pumpy 4.
- 10) Umístění celku popsaného v kroku 6), kromě tlakové láhve 17, na váhu 15 do klimatizovaného boxu 21, připojení kabelů od váhy 15 a čidel 18, 19 k dataloggeru 20 a následné připojení dataloggeru 20 ke zdroji 23.
- 11) Umístění co největší části hadičky 3 do boxu 21 tak, aby délka hadičky 3 mezi vrtem a izolačním boxem 21 byla co nejkratší.
- 12) Připojení klimatizační jednotky 22 ke zdroji 23 elektrické energie a její nastavení na střední předpokládanou hodnotu mezi minimální a maximální denní/noční teplotou. Víko boxu 21 je přiklopeno. Před zahájením měření je nutné posečkat, dokud se teplota uvnitř boxu neustálí na konstantní hodnotě nastavené na klimatizační jednotce 22. Aktuální teplota v boxu je sledována na displeji dataloggeru 20 pomocí teplotního čidla 19.
- 13) Z tlakové láhve 17 je do horní komory expanzní nádoby 16 napuštěn vzduch o požadovaném zkušebním tlaku (obvykle 100 kPa). Tlak měřicího média v expanzní nádobě 16 je průběžně sledován na displeji dataloggeru 20 tlakovým čidlem 18.
- 14) Spuštění záznamu hodnot na dataloggeru 20 na paměťovou kartu v požadovaném intervalu. Úbytek měřicího média v expanzní nádobě 16 je měřen váhou 15 a je průběžně sledován na displeji dataloggeru 20. O délce a okamžiku ukončení VTZ rozhoduje operátor na základě hodnot a grafického znázornění průběhu zkoušky na displeji dataloggeru 20.
- 15) Připojení fotovoltaického panelu 28 pro průběžné doplňování elektrické energie do zdroje 23.

25 Průmyslová využitelnost technického řešení

Díky tomuto zařízení a popsané metodě lze v terénních podmínkách (stavby, tunely, podzemní zásobníky, důlní díla) měřit propustnosti velmi málo propustných matric s koeficienty hydraulické vodivosti v rozmezí 10^{-9} až 10^{-14} m.s⁻¹. Citlivost měření za použití technického řešení je o dva až čtyři řády vyšší než citlivost dosud využívaných terénních měřicích zařízení.

- 30 Měření propustností takto nízké propustných matric má praktický význam v geotechnologických oborech a stavebním průmyslu při budování podzemních zásobníků nebo úložišť, u kterých je požadavek na co nejnížší propustnost. Dále je výše uvedené zařízení použitelné při testování kvality a těsnosti geobariér či uměle vytvořených mikroporézních materiálů. Může se jednat o testy jílového těsnění skládkových těles nebo kontrolu kvality betonů u vodárenských objektů.
- 35 Jedná se o nejpřesnější metodu, jak získat údaje o propustnosti geobariér a dalších izolačních materiálů přímo v místě jejich použití.

Získané údaje z měření jsou taktéž využitelné jako primární vstupní data do bezpečnostních analýz, které jsou často součástí schvalovacího řízení při budování výše uvedených děl.

N Á R O K Y N A O C H R A N U

- 40 1. Zařízení pro *in-situ* měření propustnosti hornin, geotechnických a stavebních materiálů využívající metodiky měření objemové spotřeby vtlačeního měřicího média, **v y z n a ě u j í c í s e t í m**, že sestává z elektrického navijáku (1) a ocelového lana (10) se stojanem (2) a kladkou opatřenou měřicím kolečkem (211) pro měření aktuální hloubky zapuštění náčiní, dále sestává z teflonové injektážní hadičky (3) s nízkou roztažností umožňující použít pracovní tlak
- 45 minimálně 2 MPa, vodní tlakové pumpy (4) s manometrem využívané k nafouknutí a upevnění dvojice pryžových pakrů (5, 7) vymezujících testovaný úsek vrtu a pryžové pakry (5, 7) jež jsou

spojeny ocelovou injektážní trubicí (11), která je ve střední části opatřena perforací pro vtlačení testovacího média do vymezeného úseku vrtu, přičemž oba pakry (5, 7) jsou přemostěny spojovací hadičkou (6) k rovnoměrné distribuci vody v pakrech a k současnému nafouknutí nebo vypuštění obou pakrů (5, 7), přičemž spodní pakr (7) je neprůběžný a je na dolním konci utěsněn šroubovací zásepkou (8), injektážní trubka (11) je opatřena pevným nosným ocelovým okem (9) pro připevnění lana (10) pomocí karabiny (111), dále obsahuje šroubovací nástrčnou rychlospojku (12) ke spojení ocelové injektážní trubky (11) a hadičky (3), dále zařízení obsahuje šroubovací rychlospojku (13) k připojení tlakové hadičky (14) spojující tlakovou pumpu (4) s pakrem (5), dále obsahuje váhy (15), expanzní tlakovou nádobu (16) s provozním tlakem do 400 kPa a objemem 4 až 25 l, tlakovou láhev (17) se stlačeným vzduchem se sadou redukčních ventilů s výstupním tlakem 100 až 400 kPa, tlakové čidlo (18) s rozsahem 50 až 500 kPa, teplotní čidlo (19) s citlivostí minimálně 0,5 °C s rozsahem do 50 °C, datalogger (20) pro ukládání údajů z čidel (18, 19) a údaje o změřených hmotnostech, teplotách a tlaku v určených časových intervalech; dále zařízení obsahuje izolační polystyrénový box (21) o síle stěny alespoň 10 cm se snímatelným víkem, klimatizační jednotku (22) k udržení konstantní teploty v izolačním boxu (21) s odchylkou maximálně 1 °C, 24V akumulátory jakožto zdroj (23) elektrické energie, zásobní nádobu (24) na měřicí médium, alespoň jedno elektrické odstředivé čerpadlo (25) pro napouštění měřicího média do expanzní nádoby (16), hadičku (251) od čerpadla (25), jednocestný ventil (26) pro připojení hadičky (251) k expanzní nádobě (16) umožňující směr propouštění pouze do expanzní nádoby (16) a zabráňující vytékání média zpět do zásobní nádoby (24) a dále zařízení obsahuje nástrčnou rychlospojku (27) pro připojení expanzní nádoby (16) na hadičku (3) vedoucí do vrtu, přičemž pro dlouhodobý provoz zařízení rovněž obsahuje alespoň jeden fotovoltaický panel (28) o výkonu 270 W.

2. Zařízení pro *in-situ* měření propustnosti hornin, geotechnických a stavebních materiálů využívající metodiky měření objemové spotřeby vtlačeního měřicího média podle nároku 1, **v y z n a ě u j í c í s e t í m**, že zahrnuje citlivé váhy (15) s přesností měření 1 gram s rozsahem vážení do 30 kg.

3. Zařízení pro *in-situ* měření propustnosti hornin, geotechnických a stavebních materiálů využívající metodiky měření objemové spotřeby vtlačeního měřicího média podle nároku 1, **v y z n a ě u j í c í s e t í m**, že zahrnuje expanzní nádobu (16) jakožto zdroj měřicího média s konstantním tlakem v průběhu měření.

4. Zařízení pro *in-situ* měření propustnosti hornin, geotechnických a stavebních materiálů využívající metodiky měření objemové spotřeby vtlačeního měřicího média podle nároku 1, **v y z n a ě u j í c í s e t í m**, že zahrnuje klimatizační jednotku (22) sloužící k temperování izolačního boxu (21).

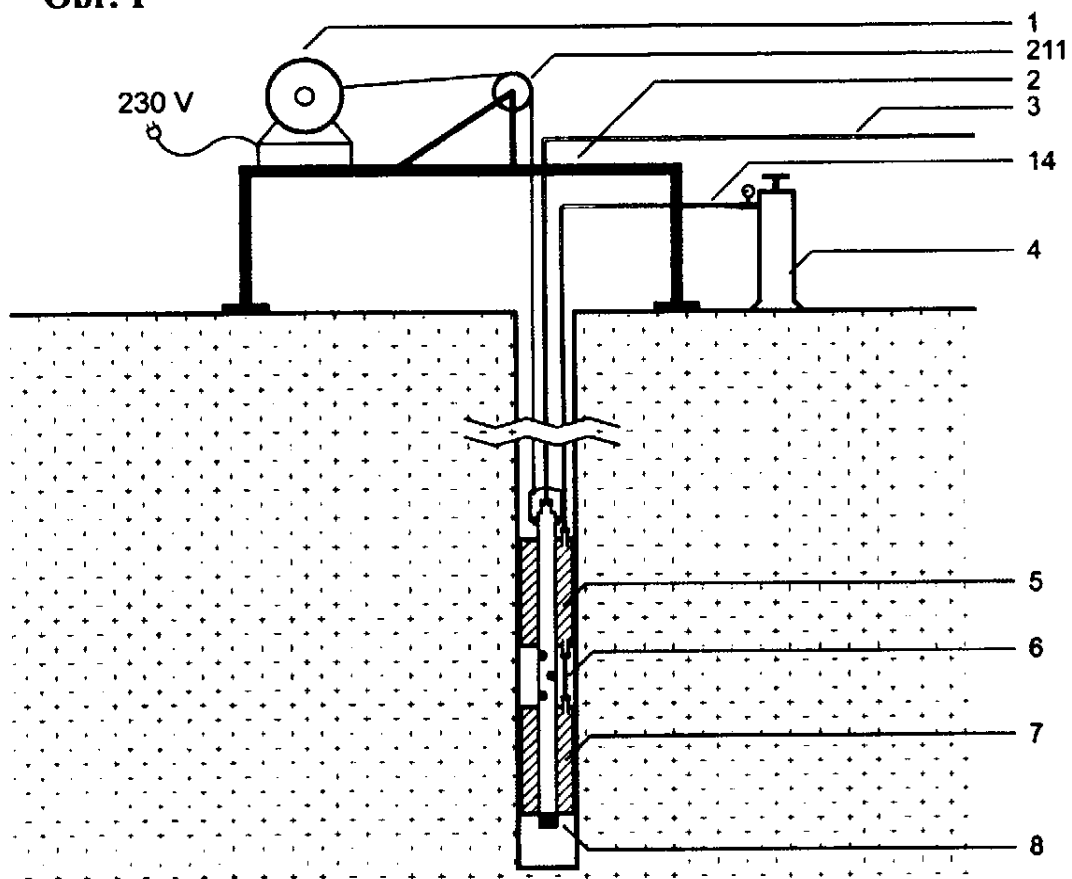
2 výkresy

Seznam vztahových značek:

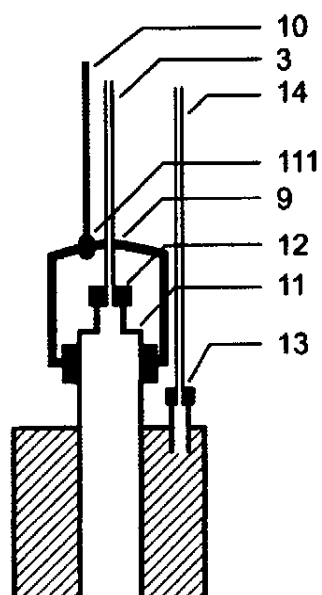
- | | | |
|----|-----|-----------------------|
| | 1 | - naviják |
| 40 | 2 | - stojan s kladkou |
| | 211 | - měřicí kolečko |
| | 3 | - injektážní hadička |
| | 4 | - vodní tlaková pumpa |
| | 5 | - horní pakr |
| 45 | 6 | - spojovací hadička |
| | 7 | - spodní pakr |
| | 8 | - záseпка |
| | 9 | - nosné oko |

	10	- lano
	11	- trubka
	111	- karabina
	12	- rychlospojka
5	13	- rychlospojka
	14	- tlaková hadička
	15	- citlivé váhy
	16	- expanzní tlaková nádoba
	17	- tlaková láhev
10	18	- tlakové čidlo
	19	- teplotní čidlo
	20	- datalogger
	21	- izolační box
	22	- klimatizační jednotka
15	23	- zdroj energie
	24	- zásobní nádoba
	25	- odstředivé čerpadlo
	251	- hadička od čerpadla
	26	- jednocestný ventil
20	27	- rychlospojka
	28	- fotovoltaický panel.

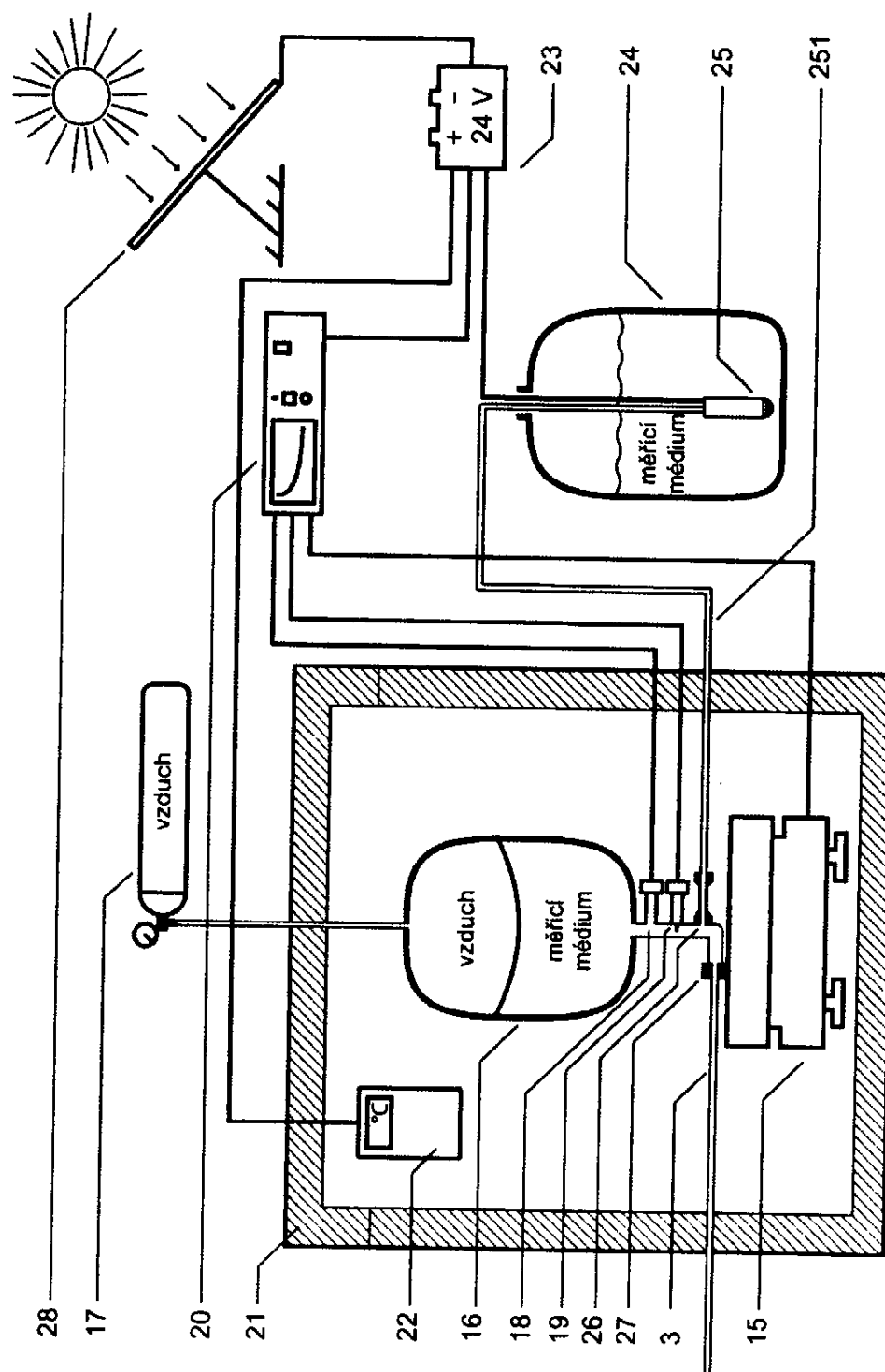
Obr. 1



Obr. 2



Obr. 3



Konec dokumentu