

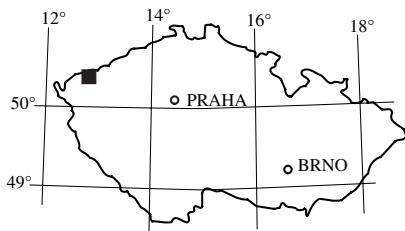
HYDROGEOLOGICKÝ VÝZKUM PUKLINOVÉHO PROSTŘEDÍ NA LOKALITĚ POTŮČKY-PODLESÍ V KRUŠNÝCH HORÁCH

Hydrogeological research of fractured rocks on the Potůčky-Podlesí site in the Krušné hory Mts.

LENKA RUKAVIČKOVÁ

Česká geologická služba, Klárov 3, 118 21 Praha 1

(01-43 Horní Blatná)



Key words: water pressure tests, interference tests, hydraulic conductivity, multipacker system, fractured rocks

Abstract: Three hydrogeological boreholes PTP3, PTP4a and PTP5 deep 350, 300 and 300 m, respectively, were drilled in a granite massif in the Krušné hory Mts. Hydraulic properties of the fractured formation with low conductivity were investigated with modified water pressure tests. All tests were carried out on isolated borehole intervals separated by packers. The recognized values of the coefficient of hydraulic conductivity k are in the order from 10^{-9} to $10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ for the subsurface fracture-opening zone in the depths up to approx. 100 m, from 10^{-10} to $10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ in the middle part up to 170 m and from 10^{-11} to $10^{-10} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ for the deepest part of boreholes. Pressure responses to a drilling and to a hydrodynamic testing in the borehole PTP5 were recorded in 12 isolated intervals of the boreholes PTP3 and PTP4a using the newly developed multipacker system. The field data will be used as the input and as the control of realistic output of the mathematical modeling.

Úvod

Studium proudění podzemních vod a transportu kontaminantů v puklinovém prostředí je v posledních dvou desítkách let celosvětově v popředí geologických výzkumných prací. Do puklinového prostředí pevných hornin jsou projektována úložiště různých typů odpadů a podzemní zásobníky. Řada sanací kontaminovaných lokalit se neobejde bez kvalitní predikce proudění a transportu puklinovou sítí. Stanovení hydraulických a transportních parametrů je v anizotropním, heterogenním prostředí rozpukaných hornin velmi obtížné a vyžaduje zapojení nových metod terénního i laboratorního výzkumu. Jeho nedlouhou součástí je matematické modelování.

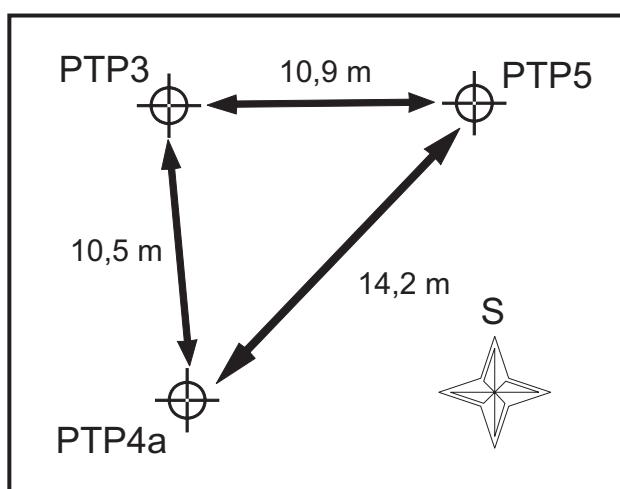
V České republice se komplexnímu výzkumu puklinového prostředí granitového masivu na lokalitě Potůčky-Podlesí věnoval projekt MŽP ČR VaV 630/3/00 a v současné době dále věnuje navazující projekt VaV/660/2/03. Lokalita se nachází v západní části Krušných hor 2 km sv. od obce Potůčky, na severním svahu vrchu Pískové skály. Je tvořena granitovým pněm Podlesí, biotitickými granity, které naleží k nejdeckému masivu, a ordovickými chlorit-seřicitickými fylity (BREITER 2004).

V rámci prvního projektu byly vyvrty dva výzkumné vrty PTP3 a PTP4a do hloubky 350 a 300 m. V roce 2004 byl vyvrty nový vrt PTP5 do hloubky 300 m. Pozice vrtů a jejich vzdálenost (obr. č. 1) umožňuje detailní studium hydraulických vlastností puklinové sítě a komunikace mezi vrtů.

Metodika

Na základě zhodnocení výsledků projektu VaV 630/3/00 (RUKAVIČKOVÁ a kol. 2002) jsme zvolili modifikovanou verzi vodních tlakových zkoušek (VTZ) jako základní metodu pro terénní hydraulické testování v roce 2004. V prostředí s velmi malou propustností nelze čerpací zkoušky prakticky provádět, nevýhodou slug testů je velmi malý dosah od stěn vrtu a neúnosně dlouhá doba trvání testu při koeficientu filtrace $k < 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (BUTLER 1997).

VTZ byly prováděny etážově, voda byla vtláčena do úseku vrtu izolovaného pomocí dvojice pakrů. Při standardním provedení VTZ byla délka testované etáže 6,08 m, voda byla vtláčena po dobu jedné hodiny při konstantním zkušebním tlaku 400 kPa. Poté následoval monitoring poklesu tlaku v uzavřené etáži opět po dobu jedné hodiny. Délka standardních VTZ byla stanovena s ohledem na možnost co nejlepšího záznamu dynamiky zkoušky na jedné straně a s ohledem na reálné finanční a časové možnosti projektu na straně druhé. Delší doba trvání VTZ by přines-



Obr. 1. Vzájemná pozice výzkumných vrtů na lokalitě Potůčky-Podlesí.

la vyšší míru přiblížení k ustálenému stavu, při velkém počtu VTZ by ale výrazně omezila naší možnost věnovat se zkouškám speciálním, sloužícím k ověření různých hypotéz a míry komunikace ve svrchních částech vrtu.

U speciálních VTZ jsme volili délku etáže, délku trvání zkoušky i zkušební tlak s ohledem na cíl konkrétní VTZ.

Při všech VTZ byl v intervalu 10 sekund monitorován tlak pod testovanou etáží, v etáži mezi pakry, nad testovanou etáží (výška volné hladiny podzemní vody ve vrtu), vstupní tlak na ústí vrtu a v případě objemového odečtu spotřeb vtláčené vody i výška hladiny v odměrné nádobě vhodné velikosti. Čidla nad a pod testovanou etáží zaznamenávala obtékání pakrů puklinovou sítí, tlakové čidlo mezi pakry sloužilo k výpočtu tlakových ztrát při vysokých spotřebách a tlakové čidlo na ústí vrtu monitorovalo případné výchyly vstupního tlaku.

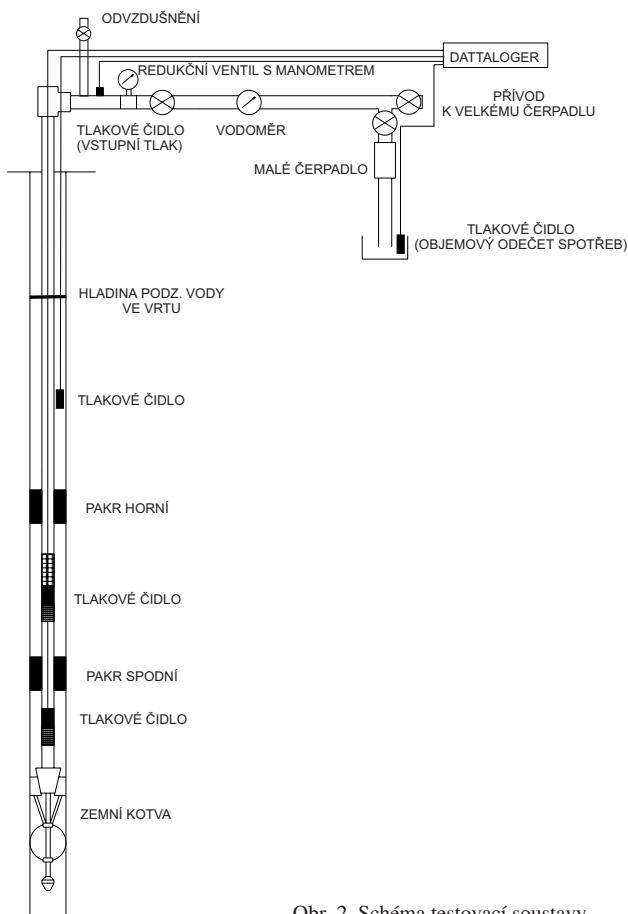
Schéma testovací soustavy pro standardní VTZ je uvedeno na obrázku 2.

Vrty PTP3 a PTP4a byly osazeny multipakovými systémy, které umožňovaly sledovat reakce na vrtání vrtu PTP5 a na VTZ v něm prováděné ve dvou směrech. Reakce v celém 12 izolovaných úsecích monitorovaných vrtů měřila kontinuálně tlaková čidla. Příklad záznamu reakcí na vrtání vrtu PTP5 je uveden na obrázku 1 v příloze XIV.

Výsledky výzkumu

V roce 2004 jsme na testovacím vrtu PTP5 provedli celkem 43 standardních VTZ v intervalu 30,81–291,80 m. Celkové spotřeby vtláčené vody v první hodině měření se pohybovaly od 0,04 litru do 241 litrů. Průměrné minutové spotřeby kolísaly v rozsahu pěti řádů od 10^{-4} po jednotky $1 \cdot \text{min}^{-1}$. Nejmenší spotřeby byly zaznamenány v hloubkách pod 200 m, nejvyšší spotřeby byly na úrovni karotáží zachycených puklin (LUKEŠ 2004) ve svrchních 90 m vrtu. K primárnímu vyhodnocení standardních VTZ jsme využili Moyův vzorec pro ustálené proudění (MOYE 1967). Hodnoty k ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) pro jednotlivé testované etáže vrtu PTP5 jsou graficky znázorněny na obrázku 3.

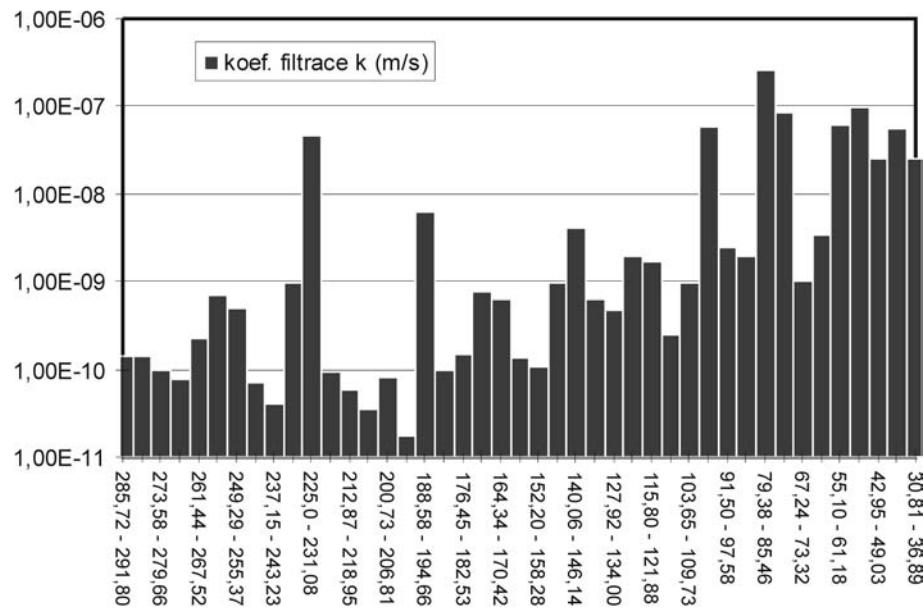
Tyto výsledky dobře dokumentují vývoj propustnosti masivu s hloubkou. V hloubkách pod 150 m je k vypočtený Moyovou metodou nejčastěji v rádu $10^{-11} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ nebo v nižších hodnotách rádu $10^{-10} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Vyšší hodnoty k u některých etáží nejčastěji indikují existenci propustných vertikálních puklin, které při VTZ způsobují obtékání pakrů. Výsledný koeficient filtrace pak z velké části charakterizuje propustnost systému maximálně jednotek puklin a jen z malé části



Obr. 2. Schéma testovací soustavy.

propustnost horninového prostředí jako celku. Rozdíl se zvětšuje s klesající propustností horninového prostředí.

V hloubkovém úseku od 170 m do 100 m hodnota k přechází do vyšších hodnot rádu 10^{-10} a zasahuje až do nižších



Obr. 3. Koeficienty filtrace testovaných etáží vrtu PTP5 na lokalitě Potůčky-Podlesí. Na ose x jsou vyznačeny etáže testované standardními VTZ (m pod terénem).

hodnot řádu 10^{-9} m . s⁻¹. Projevuje se zde vyšší míra otevření puklin, úseky s velmi nízkou propustností $k = 1 \cdot 10^{-10}$ m . s⁻¹ a menší se vyskytuje jen ojediněle v úseku okolo 160 m.

V pásmu rozvolnění puklin od 100 m výše se výrazně projevují jednotlivé propustné pukliny propojené sítí vedených puklin s nižší propustností; k kolísá v rozsahu tří řádů od $1,01 \cdot 10^{-9}$ po $2,56 \cdot 10^{-7}$ m . s⁻¹. U většiny VTZ byla zaznamenána rychlá komunikace po propojených puklinových systémech, a to jak mezi vrty, tak v testovaném vrchu PTP5 mezi vymezenou etáží a volnými částmi vrchu. Propustnost testované etáže je zde jednoznačně dána propustností významných puklin a jejich počtem. Nejvyšší $k = 2,56 \cdot 10^{-7}$ m . s⁻¹ měla etáž v hloubce 79,4–85,5 m. Hodnoty propustnosti velmi dobře korelují s výsledky kartáče (LUKEŠ 2004).

Všechny VTZ byly interferenční, s kontinuálním monitoringem tlakových poměrů v sousedních vrtech. Reakce byly zaznamenány na VTZ od hloubky 110 m výše (vrh PTP5). Na VTZ ve spodních částech vrchu PTP5 tlaková čidla v monitorovaných vrtech nereagovala. Na obrázku 2 v příloze XIV je schematicky znázorněna komunikace mezi vrty v úseku 30–120 m pod terénem.

Reakce zaznamenané na vrchu PTP3 jsou u většiny VTZ výraznější a rychlejší než u vrchu PTP4a. To je z velké části způsobeno rozdílnou vzdáleností monitorovaných vrchů od testovaného vrchu PTP5, která je u vrchu PTP3 10,9 m a u vrchu PTP4a 14,2 m. U některých VTZ jsou ale rozdíly amplitud a zpoždění reakcí tak výrazné, že nemohou být způsobeny pouze rozdílem vzdáleností. Důvodem může být kromě nesymetrického vývoje propustnosti v různých směrech hlavně vysoká míra propojení propustných subhorizontálních puklinových systémů vertikálními puklinami a stvoly vrchu v rámci monitorované etáže.

Reakce jsou symetrické na obou monitorovaných vrtech. To znamená, že pokud při konkrétní VTZ reagují dvě monitorované etáže na vrchu PTP3, reagují současně dvě etáže v odpovídajících hloubkách na vrchu PTP4a. Tato skutečnost podporuje naši výše uvedenou hypotézu, zejména pak

odpovídá komunikaci přes stvol vrchu. Symetrie reakcí se ztrácí v hloubkách pod 96 m.

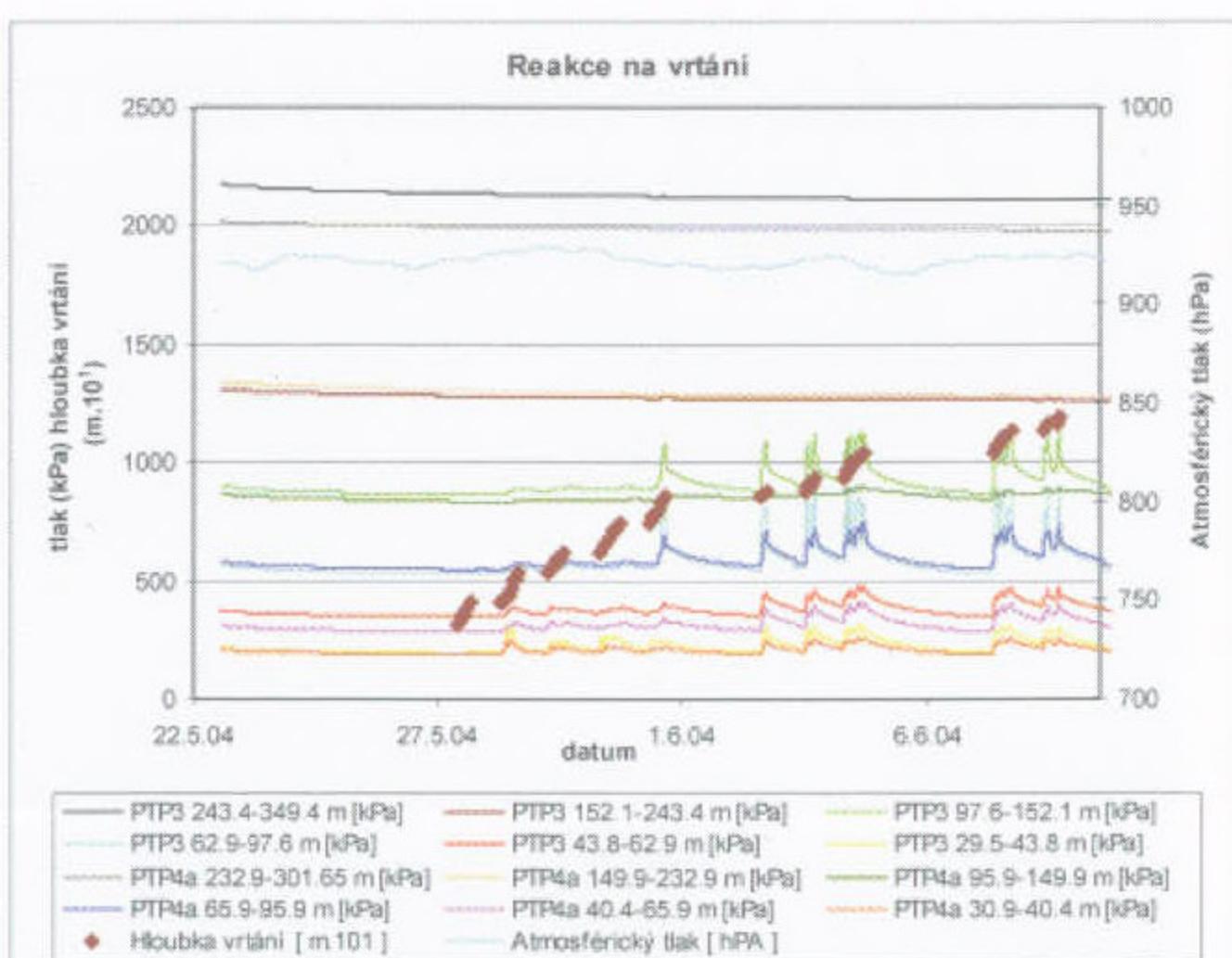
Zřetelná komunikace a současně i vyšší propustnost byla zaznamenána ve třech hloubkových úsecích vrchu PTP5, můžeme mluvit o třech dílčích puklinových systémech v hloubkách: 37–61, 74–86 a 97–110 m. Z charakteru reakcí vyplývá, že uvedené puklinové systémy spolu navzájem komunikují.

Výsledky terénního hydrogeologického výzkumu jsou v současné době využívány pro kalibraci a verifikaci matematického modelu proudění podzemní vody puklinovým prostředím, který je vyvíjen ve spolupráci s Technickou univerzitou v Liberci.

Literatura

- BREITER, K. (2004): Geologický výzkum na lokalitě Potůčky-Podlesí. Dílčí zpráva. In: RUKAVIČKOVÁ, L. a kol. (2004): Vývoj metodiky identifikace a matematického modelování proudění a geochemické interakce v rozpukaném prostředí kompaktních hornin, VaV/660/2/03. Etapová zpráva za rok 2004. – MS MŽP, Praha.
- BUTLER, J. J. Jr. (1997): The Design, Performance and Analysis of Slug Tests. – Bocca Raton, Lewis Publishers.
- LUKEŠ, J. (2004): Zpráva o karotážním měření ve vrchu PTP5. Dílčí zpráva. In: RUKAVIČKOVÁ, L. a kol. (2004): Vývoj metodiky identifikace a matematického modelování proudění a geochemické interakce v rozpukaném prostředí kompaktních hornin, VaV/660/2/03. Etapová zpráva za rok 2004. – MS MŽP, Praha.
- MOYE, D. G. (1967): Diamond drilling for foundation exploration. – Australian Civil Engineering Trans. 9, 95–100.
- RUKAVIČKOVÁ, L. a kol. (2002): Hydrodynamické testy ve vrtech PTP-3 a PTP-4a na lokalitě Potůčky-Podlesí. Dílčí zpráva. In: PAČES, T. a kol. (2002): Komplexní geochemický výzkum interakcí a migrací organických a anorganických látek v horninovém prostředí, VaV/630/3/00. – MS MŽP, Praha.
- RUKAVIČKOVÁ, L. (2004): Hydrogeologický výzkum ve vrtech na lokalitě Potůčky-Podlesí. Dílčí zpráva. In: RUKAVIČKOVÁ, L. a kol. (2004): Vývoj metodiky identifikace a matematického modelování proudění a geochemické interakce v rozpukaném prostředí kompaktních hornin, VaV/660/2/03. Etapová zpráva za rok 2004. – MS MŽP, Praha.

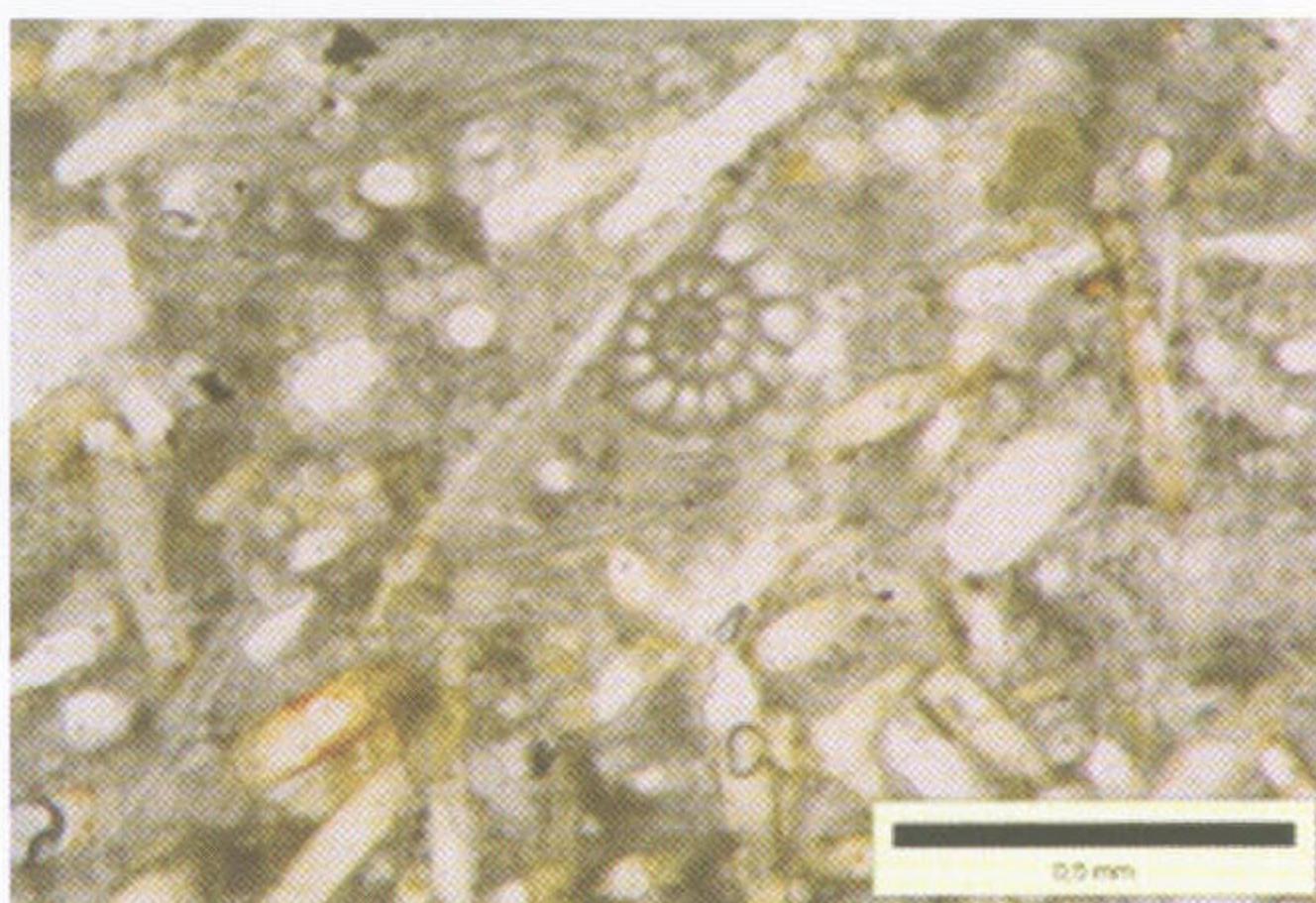
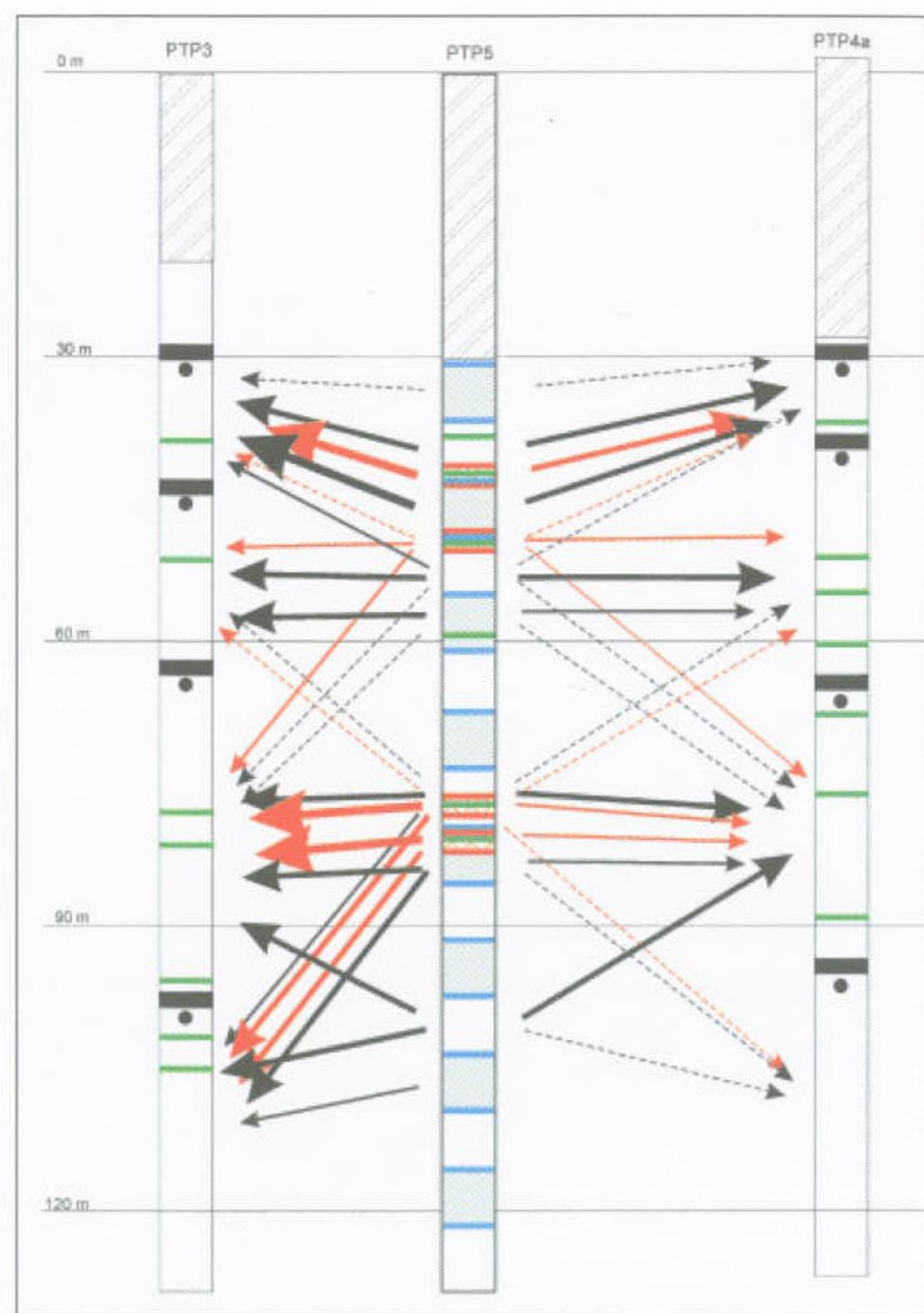
Grafy jsou v příloze XIV



1 | 2

- Příklad záznamu reakcí monitorovaných etáží vrtů PTP3 a PTP4a na vrtání vrtu PTP5.
- Komunikace mezi vrty na lokalitě Potůčky-Podlesí. Zapažený úsek vrtů je vyznačen šrafou. Na obou monitorovaných vrtech PTP3 a PTP4a je silnou černou čarou zakresleno umístění pakrů multipakových systémů a černým kruhem umístění tlakových čidel. Hloubky přítoku podzemní vody do vrtů indikované karotáží – metodou rezistivimetrie při čerpání (LUKEŠ 2004) – jsou ve všech vrtech znázorněny zelenými liniemi. Testovaný vrt PTP5 je rozdělen na etáže se stabilní délkou 6,08 m, etáže jsou pro větší názornost odlišeny barevně. Modré linie odpovídají umístění pakrů při standardních VTZ. Černé šipky ukazují směr a velikost reakcí na standardní VTZ, které byly zaznamenány v monitorovaných vrtech. Síla čáry odpovídá kvantitě reakce. Červenými šipkami jsou znázorněny reakce na speciální VTZ na jednotlivých významných puklinách, tj. puklinách indikovaných karotáží, u kterých byla vyšší propustnost ověřena standardními VTZ. Pukliny v hloubkách 42,5, 49,5, 77,5 a 81,0 m byly izolovány pomocí dvojice pakrů s konstantní vzdáleností 2,05 m. Umístění pakrů ukazují červené linie, testované etáže jsou červeně vyšrafovány.

K článku L. Rukavičkové na str. 166



Vápenatý silicit z Přemyslovského paláce v Olomouci s průřezem schránky foraminifery *Heterostegina costata* d'ORB.

K článku J. Šrámka na str. 150



Pohled do výkopu na horizont s rozbitymi zlomky gotických skulptur se stopami zlacení a polychromie, se zlomky malovaných okenních vitráží, torzy architektonických článků a částmi železné okenní mříže. Všechny artefakty nesou stopy záměrné destrukce a požáru.

K článku J. Šrámka a K. Nováčka na str. 153