

Univerzita Karlova v Praze

Přírodovědecká fakulta

Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky



**Hydraulické a mechanicko-fyzikální vlastnosti skalních
hornin:**

**Experimentální stanovení a interpretace výsledků
testování granitů**

Doktorská disertační práce

Karel Sosna

Vedoucí disertační práce: **Ing. Milan Brož, CSc.**

Praha, 2011

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Praze, 31.5.2011

Podpis

Poděkování

Za cenné rady a pomoc bych rád poděkoval zejména Ing. M. Brožovi, CSc. (ÚSMH AVČR), Ing. J. Zárubovi, MBA, Mgr. H. Křížové, Mgr. A. Vojtěchové Ph.D., RNDr. J. Najserovi Ph.D. a Ing. M. Novákovi (ARCADIS Geotechnika), RNDr. M. Milickému, Mgr. M. Polákovi a Ing. L. Gvoždíkovi (Progeo), Mgr. M. Vaněčkovi a RNDr. R. Hanusovi (ISATech), Mgr. P. Nakládalovi (KKVZ), Mgr. O. Nolovi a Ing. J. Nepožítovi, CSc. (AQUATEST), Mgr. L. Rukavičkové Ph.D. (ČGS) a Ing. J. Boháčovi, CSc.(PřF UK).

Za pomoc s laboratorními a terénními pracemi vděčím zejména A. Chýlemu, Z. Fialovi a Mgr. L. Doležalové a Mgr. L. Novákové.

Tato práce vznikla s podporou Ministerstva průmyslu a obchodu České republiky v rámci projektů registrovaných pod čísly 1H-PK/31 a FR-TI1/367.

Abstrakt

Tato práce je zaměřena na proudění podzemní vody a transport kontaminantů podzemní vodou v prostředí granitových hornin. V práci je převážně diskutován advektivní a disperzní typ transportu kontaminantů. Transport kontaminantů difúzí je komentován pouze okrajově v souvislosti s pórovitostí horninové matrice. Základním cílem předkládané práce bylo charakterizování granitového prostředí z hlediska výzkumu jeho hydraulických a mechanicko-fyzikálních parametrů. Dílčími cíly bylo laboratorní ověření těsnicí funkce injekční směsi v puklinovém prostředí granitových bloků, charakterizování pórovitosti a propustnosti granitové matrice v laboratorním měřítku, zjištění vzájemného propojení puklin mezi vrty *in situ* a stanovení souvislostí mezi strukturou horniny a rychlostmi seismických vln.

Jako vhodné injekční látky byly vybrány 4 směsi bentonitu a cementu v různých hmotnostních poměrech. Na základě výsledků stanovení koeficientu hydraulické vodivosti laboratorních vzorků a dalších aspektů jako např. objemová stálost byla vybrána vhodná injekční směs, kterou byly granitové bloky parciálně injektovány.

Propustnost a pórovitost horninové matrice granitu z lokality Panské Dubenky byla testována na třech laboratorních vzorcích. Hydraulická vodivost byla určena v průběhu deseti testů s rozdílnými konstantními hydraulickými gradienty v nasyceném prostředí. Z výsledků vyplývá, že má testovaný granit průměrnou otevřenou pórovitost 1,05%, celkovou pórovitost 1,13% a koeficient hydraulické vodivosti $4,0 \times 10^{-12} \text{ m.s}^{-1}$. Růstu otevřené pórovitosti laboratorních vzorků odpovídá růst jejich koeficientu hydraulické vodivosti.

Ověření těsnicí funkce injekční směsi bylo realizováno na laboratorním tělese s přirozenou puklinou a dvou tělesech s uměle vytvořenými puklinami z lokality Panské Dubenky. Na volných puklinách byly realizovány stopovací zkoušky s roztokem chloridu sodného a fluoresceinu současně s měřením objemových průtoků v závislosti na definovaném konstantním hydraulickém gradientu v nasyceném prostředí. Poté byly injekční vrty v laboratorních blocích zatěsněny pomocí jílocementové směsi. Následně byly stopovací zkoušky zopakovány. Porovnáním stopovacích zkoušek volných a injektovaných puklin bylo zjištěno, že injekční směs snižuje při shodném hydraulickém gradientu průtok vody o pět řádů a že po její aplikaci se i při hydraulickém gradientu vyšším o tři řády sníží časy prvního objevení stopovače z vteřin na desítky minut a časy maximální koncentrace z minut na hodiny.

Zjištění vzájemného propojení puklin mezi vrty na lokalitě Panské Dubenky bylo realizováno pomocí cross-hole testů se stopovačem fluoresceinem. Data z realizovaných C-H testů byla použita k tvorbě geometrického modelu puklinového systému zájmové lokality a sloužila rovněž ke kalibraci hydrogeologického modelu. Výsledky C-H testů ukazují, že jednotlivé vrty jsou nejčastěji propojeny subhorizontálními puklinami. Vertikální pukliny mají většinou funkci těsnicí.

Vzájemné souvislosti mezi strukturou hornin a rychlostmi seismických vln byly studovány na laboratorních vzorcích ze sedmi lokalit granitoidních hornin v Českém masivu. Rychlosti seismických vln byly měřeny na laboratorních vzorcích, které byly nenasycené, nasycené a vysušené. Rychlosti seismických vln vzorky byly porovnány s jejich objemovou hmotností, pórovitostí a koeficientem hydraulické vodivosti. Dále byly porovnány hodnoty Youngova modulu pružnosti vyhodnocené z rychlosti šíření seismických vln (dynamicky) a stanovené v průběhu jednoosého stlačování (staticky). Rychlosti P-vln i S-vln ve vysušených vzorcích byly nižší než ve vzorcích nasycených. Většina vzorků vykazovala mírnou anizotropii rychlostí. Seismická měření na vzorcích postihla i relativně malé nehomogenity fyzikálních parametrů v rámci monotónního profilu vrtu a indikovala pozvolné litologické přechody. Vzorky ze 4 lokalit vykazovaly nárůst rychlosti seismických vln společně z růstem objemové hmotnosti. Vzorky ze 3 lokalit měly trend poklesu rychlosti seismických vln společně z růstem otevřené pórovitosti. Na vysušených vzorcích z šesti lokalit byl trend snižujících se seismických rychlostí se zvyšujícím se koeficientem hydraulické vodivosti korelovan. Hodnoty dynamických modulů pružnosti stanovených na přirozeně vlhkých vzorcích byly

vyšší než hodnoty modulů statických. Rychlosti P-vln a S-vln měřené napříč vzorky umístěnými v lisu se v průběhu stlačování zvyšovaly. Rozdíl hodnot dynamického a statického modulu pružnosti se v průběhu zatěžování snižoval. Nasycené vzorky měly nižší pevnost v prostém tlaku a statický modul pružnosti než vysušené vzorky ze stejné hloubky. Naopak modul pružnosti stanovený ultrazvukovým prozařováním byl vyšší v nasycených vzorcích než ve vysušených vzorcích z téže hloubky.

Přínosem této práce a současně uveřejněných publikací je komplexní zpracování vlastností granitoidních hornin všemi dostupnými metodami měření s výhledem na realizaci podzemního úložiště radioaktivních odpadů.

Abstract

This work is focused on the groundwater flow and transport of contaminants in the environment of granitic rocks. Mainly advective and dispersive types of transport of contaminants are discussed in this work. Transport of contaminants by diffusion is mentioned only marginally in relation to porosity of rock matrix. The main aim of this work was to characterize hydraulic and mechanical-physical parameters of the granite. Partial objectives were to verify the sealing function of the laboratory grout mixture in fractured granite blocks, to characterize the porosity and hydraulic conductivity of the granite matrix at laboratory scale, to find connection between boreholes *in situ* and to establish a link between the structure of rocks and velocities of seismic waves.

Four bentonite and cement mixtures in different weight ratios have been selected as a grout mixture. Suitable injection mixture was selected based on the results of hydraulic conductivity coefficient, and other aspects, such as volumetric stability. The granite blocks were partially grouted by using of the selected grout mixture.

Hydraulic conductivity and porosity of the granite rock matrix from the Panské Dubenky test site was tested at three laboratory samples. Hydraulic conductivity was determined with different constant hydraulic gradients in the saturated environment. The results show that the tested granite has open porosity 1.05%, total porosity 1.13% and coefficient of hydraulic conductivity $4.0 \times 10^{-12} \text{ m.s}^{-1}$. Increase of the open porosity of the samples corresponds to the increase of the hydraulic conductivity.

Verification of the sealing function of the grout mixture was carried out on laboratory blocks with natural and artificial fractures from the Panské Dubenky test site. Tracer tests in open fractures were carried out with sodium chloride and sodium fluorescein. At the same time the flow rate based on a defined constant hydraulic gradient in a saturated environment was measured. The injection boreholes of the granite blocks were then grouted using bentonite-cement grout mixture. Subsequently, tracer tests were repeated. It was found that grout mixture decreases flow of water five times at the same hydraulic gradient. After application of grout mixture, even when the hydraulic gradient increased by three orders of value, the time of first arrival of tracers increased from seconds to tens of minutes and the time of peak concentration increased from minutes to hours.

The findings of connectivity between boreholes in the Panské Dubenky test site were realized by cross-hole (C-H) tracer tests with fluorescein. The results of C-H tests were used to create a geometric model of fracture net and to calibrate the hydrological model. The results of C-H test show that boreholes are most often connected by subhorizontal fractures. Vertical fractures had usually sealing function.

Relation between the structure of rocks and velocities of seismic waves was studied in laboratory samples from seven localities of granitoid rocks in the Czech Massif. Seismic wave velocities were measured in laboratory samples, which were unsaturated, saturated and dried. Velocities of seismic waves were compared with their bulk density, open porosity and coefficient of hydraulic conductivity. Furthermore, comparison of the Young's modulus evaluated from the velocity of seismic waves (dynamic) and from uniaxial compression tests (static) was made. Velocities of P-waves and S-waves in the dried samples were lower than in the saturated samples. Most of the samples showed moderate anisotropy of velocity. Relatively small inhomogeneities of the physical parameters of the monotonic profile of the borehole and gradual lithological transition were indicated by seismic measurements. Samples from four sites showed an increase in the velocities of seismic waves along the density increase. Samples from three locations showed decrease of seismic waves velocities along the increase of open porosity. The dried samples from six localities showed a trend of decreasing seismic velocity with increasing coefficient of hydraulic conductivity. Values of dynamic modulus of elasticity determined on naturally wet samples were higher than the static modules. Velocities of P-waves and S-waves measured across the sample increased during uniaxial compression. The difference between the dynamic and static modulus

decreased during loading. Saturated samples had lower unconfined compressive strength and static modulus of elasticity than dry samples from the same depth. Conversely modulus determined by ultrasound was higher in saturated samples than in the dried samples from the same depth.

The contribution of this work and published papers is a complex processing of the granitic rocks properties with use of all available measurement methods with a view to implementing the underground disposal site of radioactive waste.

Obsah

1. ÚVOD	- 10 -
1.1 MOTIVACE A CÍLE PRÁCE	- 10 -
1.2 USPOŘÁDÁNÍ PRÁCE	- 11 -
2. GEOLOGIE STUDOVANÉ LOKALITY	- 12 -
3. JÍLOCEMENTOVÉ INJEKČNÍ SMĚSI	- 15 -
3.1 SLOŽENÍ SMĚSÍ A PŘÍPRAVA VZORKŮ	- 15 -
3.2 ZÁKLADNÍ PARAMETRY INJEKČNÍCH SMĚSÍ	- 16 -
3.3 PEVNOST V PROSTÉM TLAKU INJEKČNÍCH SMĚSÍ.....	- 16 -
3.4 KOEFICIENT HYDRAULICKÉ VODIVOSTI JÍLOCEMENTOVÝCH SMĚSÍ	- 18 -
3.4.1 Úprava vzorků.....	- 18 -
3.4.2 Metodika prací.....	- 18 -
3.4.3 Výsledky a diskuze.....	- 19 -
3.5 VÝBĚR SMĚSÍ K INJEKTOVÁNÍ PUKLIN	- 23 -
3.6 SHRNUTÍ	- 24 -
4. PROPUSTNOST A PÓROVITOST GRANITOVÉ MATRICE	- 25 -
4.1 PŘÍPRAVA VZORKŮ A PRACOVNÍ POSTUP	- 25 -
4.2 OBJEMOVÁ HMOTNOST	- 27 -
4.3 PÓROVITOST	- 27 -
4.4 VÝSLEDKY A DISKUZE	- 28 -
4.5 SHRNUTÍ	- 29 -
5. PUKLINOVÁ PROPUSTNOST GRANITOVÝCH BLOKŮ	- 30 -
5.1 PŘÍPRAVA VZORKŮ	- 30 -
5.2 PRACOVNÍ POSTUP	- 32 -
5.2.1 Testování volných puklin	- 32 -
5.2.2 Parciální injektáž puklin	- 34 -
5.2.3 Testování injektovaných puklin	- 34 -
5.3 VYHODNOCENÍ	- 35 -
5.3.1 Charakter stopovacích látek a kalibrace detekčních zařízení	- 35 -
5.3.1.1 Chlorid sodný	- 35 -
5.3.1.2 Fluorescein	- 37 -
5.3.2 Metodika vyhodnocení.....	- 41 -
5.3.2.1 Objemový průtok	- 41 -
5.3.2.2 Průnikové křivky	- 42 -
5.4 VÝSLEDKY A DISKUZE	- 45 -
5.4.1 Proudění ve volných puklinách	- 45 -
5.4.1.1 Objemový průtok přirozenou puklinou.....	- 45 -
5.4.1.2 Objemový průtok uměle vyrobenými puklinami	- 46 -
5.4.1.3 Průnikové křivky přirozenou puklinou	- 49 -
5.4.1.4 Průnikové křivky umělými puklinami	- 51 -
5.4.2 Proudění v injektovaných puklinách	- 56 -
5.4.2.1 Proudění v přirozené puklině.....	- 56 -
5.4.2.2 Proudění v umělých puklinách	- 58 -
5.4.3 Porovnání proudění ve volných a injektovaných puklinách	- 60 -
5.5 SHRNUTÍ	- 61 -
6. TERÉNNÍ CROSS-HOLE TESTY	- 62 -
6.1 VRTNÉ A GEODETICKÉ PRÁCE	- 62 -
6.2 IDENTIFIKACE PUKLIN VE VRTECH POMOCÍ TELEVIZNÍCH KAMER	- 66 -
6.3 METODIKA MĚŘENÍ.....	- 69 -
6.4 VÝSLEDKY A DISKUZE	- 71 -
6.4.1 C-H test 1	- 73 -
6.4.2 C-H test 2	- 73 -
6.4.3 C-H test 3	- 74 -

6.4.4	C-H test 4	- 75 -
6.4.5	C-H test 5	- 76 -
6.4.6	C-H test 6	- 77 -
6.4.7	C-H test 7	- 78 -
6.4.8	C-H test 8	- 79 -
6.4.9	C-H test 9	- 80 -
6.4.10	C-H test 10	- 81 -
6.4.11	C-H test 11	- 82 -
6.4.12	C-H test 12	- 83 -
6.4.13	C-H test 14	- 84 -
6.4.14	C-H test 15	- 85 -
6.4.15	C-H test 16	- 86 -
6.4.16	C-H test 17	- 87 -
6.4.17	C-H test 18	- 88 -
6.4.18	C-H test 19	- 89 -
6.4.19	C-H test 21	- 90 -
6.4.20	C-H test 22	- 91 -
6.4.21	C-H test 23	- 92 -
6.4.22	C-H test 24	- 93 -
6.5	SHRnutí	- 94 -
7.	LABORATORNÍ ULTRAZVUKOVÉ PROZAŘOVÁNÍ	- 95 -
7.1	GEOLOGIE STUDOVANÝCH LOKALIT	- 96 -
7.1.1	Panské Dubenky (PDV-1)	- 97 -
7.1.2	Melechov-Kostelní les (MEV-1)	- 97 -
7.1.3	Melechov-Zadní les (Mel-4)	- 98 -
7.1.4	Potůčky-Podlesí (PTP-4a)	- 99 -
7.1.5	Krásno (Kž-25)	- 102 -
7.1.6	Cínovec (CS-1)	- 103 -
7.1.7	Pozdátky (PZV-1)	- 104 -
7.2	METODIKA LABORATORNÍCH TESTŮ	- 106 -
7.2.1	Příprava vzorků	- 106 -
7.2.2	Ultrazvukové prozařování	- 106 -
7.2.2.1	Technické parametry	- 106 -
7.2.2.2	Metodika vyhodnocení	- 108 -
7.2.3	Objemová hmotnost	- 109 -
7.2.4	Otevřená pórovitost	- 109 -
7.2.5	Koeficient hydraulické vodivosti	- 109 -
7.2.6	Stupeň nasycení	- 110 -
7.2.7	Jednoosé stlačování	- 110 -
7.2.7.1	Pracovní postup	- 111 -
7.2.7.2	Metodika vyhodnocení	- 113 -
7.3	VÝSLEDKY A DISKUZE	- 114 -
7.3.1	Porovnání rychlosti seismických vln a hloubky	- 114 -
7.3.1.1	Panské Dubenky	- 114 -
7.3.1.2	Melechov-Kostelní les	- 117 -
7.3.1.3	Melechov-Zadní les	- 120 -
7.3.1.4	Potůčky-Podlesí	- 123 -
7.3.1.5	Krásno	- 126 -
7.3.1.6	Cínovec	- 129 -
7.3.1.7	Pozdátky	- 132 -
7.3.2	Porovnání rychlosti seismických vln a objemové hmotnosti	- 135 -
7.3.3	Porovnání rychlosti seismických vln a otevřené pórovitosti	- 141 -
7.3.4	Porovnání rychlosti seismických vln a koeficientu hydraulické vodivosti	- 146 -
7.3.5	Porovnání statických a dynamických modulů pružnosti	- 152 -
7.4	SHRnutí	- 159 -
8.	SHRnutí VÝSLEDKŮ A ZÁVĚRY	- 161 -
9.	LITERATURA	- 163 -

1. Úvod

1.1 Motivace a cíle práce

Proudění podzemní vody a transport kontaminantů podzemní vodou v prostředí krystalinických horninových formací se svým charakterem výrazně odlišují od procesů, které probíhají v prostorech sedimentárních pánví. Horninové prostředí hydrogeologických masivů se z hlediska proudění a transportu projevuje jako silně heterogenní a anizotropní. Puklinové kolektory hydrogeologických masivů byly v minulosti opomíjeny vzhledem k limitované možnosti dlouhodobého a intenzivního vodohospodářského využití. V posledních desetiletích se problematika puklinových kolektorů v hydrogeologických masivech dostává do popředí společenského a tím i vědeckého hydrogeologického zájmu. Generelně nízká propustnost hornin masivů a jejich vysoká pevnost jsou ideálními vlastnostmi pro budování podzemních zásobníků plynu, paliv nebo úložišť odpadů včetně vysoce aktivního vyhořelého jaderného paliva. Hlavním požadavkem na funkčnost hlubinného úložiště radioaktivních odpadů je bezpečné a dlouhodobé (řádově desítky tisíc let) 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 těsnící materiály zaplňující jednak manipulační a technologické prostory podzemní struktury, jednak puklinový systém geologické struktury. Hydrogeologický masiv, představovaný starými, tektonicky stabilními, krystalinickými horninovými celky, splňuje velmi dobře nároky na bezpečnost takových úložišť. Obzvláště v případě, pokud jsou úložné prostory dobře zatěsněny a situovány do dostatečných hloubek pod povrchem. Významným limitujícím faktorem v tomto směru je tektonické porušení hornin masivů a podzemní voda, která představují hlavní rizikový faktor pro realizaci takových úložišť jako prakticky jediné dynamické médium celého prostředí.

Cílem této práce bylo charakterizování granitového prostředí z hlediska stanovení jeho hydraulických a mechanicko-fyzikálních parametrů.

Základním cílem bylo laboratorní ověření těsnící funkce injekční směsi v puklinovém prostředí granitových bloků. Za tím účelem bylo třeba realizovat stopovací zkoušky v puklinách laboratorních bloků, najít a popsat vlastnosti vhodné injekční směsi a tou bloky injektovat a následně stopovací zkoušky zopakovat.

Následujícím cílem bylo charakterizování pórovitosti a propustnosti granitové matrice v laboratorním měřítku.

Dalším cílem bylo zjištění vzájemného propojení puklin mezi vrty na lokalitě *in situ* pomocí cross-hole testů.

Posledním cílem bylo stanovení vzájemných souvislostí mezi strukturou horniny charakterizovanou rychlostmi seismických vln a jejími hydraulickými a mechanicko-fyzikálními parametry. Rychlosti seismických vln laboratorních vzorků se měly porovnat s jejich objemovou hmotností, pórovitostí a koeficientem hydraulické vodivosti. Dále se měly porovnat hodnoty Youngova modulu pružnosti vyhodnocené z rychlosti šíření seismických vln (dynamicky) a stanovené v průběhu jednoosého stlačování (staticky).

1.2 Uspořádání práce

Následně je tato práce rozdělena do 6 kapitol. V kapitole 2 je popsána geologie lokality Panské Dubenky, na které probíhaly terénní testy a ze které pocházely laboratorní vzorky testované v kapitolách 4 a 5.

Kapitola 3 se zabývá jílocementovými směsmi, vhodnými k injektáži puklinových systémů. V této kapitole jsou komentovány výsledky stanovení viskozity, dekantace, objemové hmotnosti, pevnosti v prostém tlaku a koeficientu hydraulické vodivosti injekčních směsí. Výsledky byly publikovány v Sosna et al. (2009).

Kapitola 4 se věnuje pórovitostí a hydraulickou vodivostí granitu z lokality Panské Dubenky. Výsledky byly publikovány v Polák et al. (2005, 2007a), kde jsem spoluautorem článků.

Kapitola 5 popisuje stopovací zkoušky s roztokem chloridu sodného a sodného fluoresceinu a měření objemových průtoků v závislosti na definovaném konstantním hydraulickém gradientu ve volných a injektovaných puklinách v granitových blocích. Výsledky byly publikovány v Sosna et al. (2007).

Kapitola 6 představuje výsledky terénních cross-hole testů realizovaných na lokalitě Panské Dubenky, které sloužily jako podklad k tvorbě geometrického a hydrogeologického modelu lokality. Výsledky byly publikovány v Sosna et al. (2009a) a Polák et al. (2008, 2009), kde jsem spoluautorem článků.

Kapitola 7 porovnává rychlosti seismických vln měřených na laboratorních vzorcích, které byly nenasycené, nasycené a vysušené, s jejich objemovou hmotností, pórovitostí a koeficientem hydraulické vodivosti. Výsledky s mým spoluautorstvím byly publikovány v Najser et al. (2011) a Nováková et al. (2011). Dále obsahuje porovnání statických a dynamických modulů pružnosti, publikované v Sosna (2011).

2. Geologie studované lokality

Zájmová lokalita byla vymezena v granitovém lomu, který se nachází v katastru obce Panské Dubenky, které leží v jihozápadní části okresu Jihlava v kraji Vysočina. Zájmová oblast je z orografického hlediska součástí celku Javoříčské vrchy, které jsou dílčím celkem Českomoravské vrchoviny. Granitový lom, v jehož, v současné době nevyužitě, části byl situován zájmový polygon, se nachází na západním svahu nepřilíš výrazného kopce, který dosahuje nadmořské výšky cca 694 m n. m. Lom leží v nadmořské výšce přibližně 650 m n. m. Současná geomorfologická stavba území je následkem výzdvihu starých hercynských struktur, jejichž součástí byla hlubinná magmatická tělesa. K výzdvihu došlo v období tvorby alpsko-karpatského horstva. Při tomto vyklenutí došlo k rozpuštění masivu a k tektonickým pohybům po liniích směru SV-JZ a SZ-JV.

V rámci ČR lze oblast, kde se nachází zájmové území, klimaticky popsat jako chladnou s průměrnou roční teplotou 6°C (průměr let 1901-1950). Průměrný roční úhrn srážek je přibližně 700 mm (ČHMÚ).

Nejvýznamnější strukturně tektonickou jednotkou celého širšího regionu je centrální moldanubický masív, který vystupuje v ose antiklinoria Českomoravské vrchoviny a táhne se ve směru SSV–JJZ od Sázavy až do rakouského Waldviertelu. Rozšiřuje se směrem k jihu z asi 6 km na Havlíčkovobrodsku do asi 25 km v prostoru státní hranice s Rakouskem. Celý masív diskordantně proráží antiklinálním pásmem, původně tvořeným cordieriticko-biotitickými pararulami a migmatity, které se místy vyskytují v podobě reliktů pláště i na hlavním tělese plutonu.

Zájmové území je budováno středně zrnitým dvojslídovým granitem s proměnlivým obsahem vyrostlic živců. Hornina je masivní a kompaktní. Tvoří homogenní stavby s ojedinělými hypidiomorfně omezenými vyrostlicemi draselného živce. Minerální složení tvoří křemen, draselný živec, plagioklas, biotit a muskovit (Obr. 1). Mezi akcesorie patří apatit, zirkon, sericit a andaluzit (Domečka K., Sasínová R., 2005).

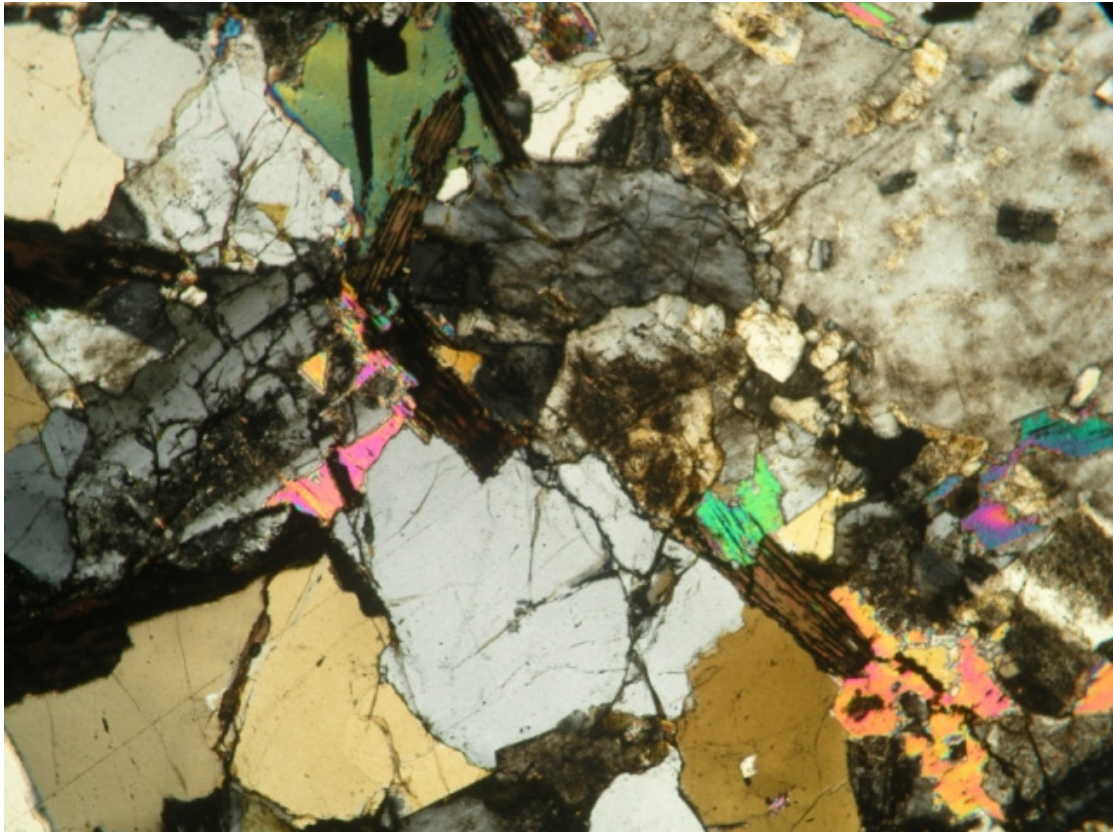
Rozšíření granitu k západu je omezeno tektonickou linií SSV-JJZ směru, za níž jsou vymapovány horniny pláště označené jako biotitický a sillimanit-biotitický, flebit-nebullitický migmatit s kordieritem. Jižně od Panských Dubenek probíhá tektonická linie ZSZ-VJV směru, podle níž je posunut západní kontakt hornin centrálního masivu asi o 500 m dále k západu (Obr. 2). V tomto vzniklém tektonickém bloku je v těsné blízkosti zmíněné ZSZ poruchy lokalizován zájmový lom.

Zájmové území je součástí dílčího povodí 1-07-03-032 Hamerský potok, které je součástí povodí Lužnice. Dlouhodobý základní odtok podzemní vody se v této oblasti pohybuje mezi 3 a 5 l/s/km² (Krásný et al., 1982).

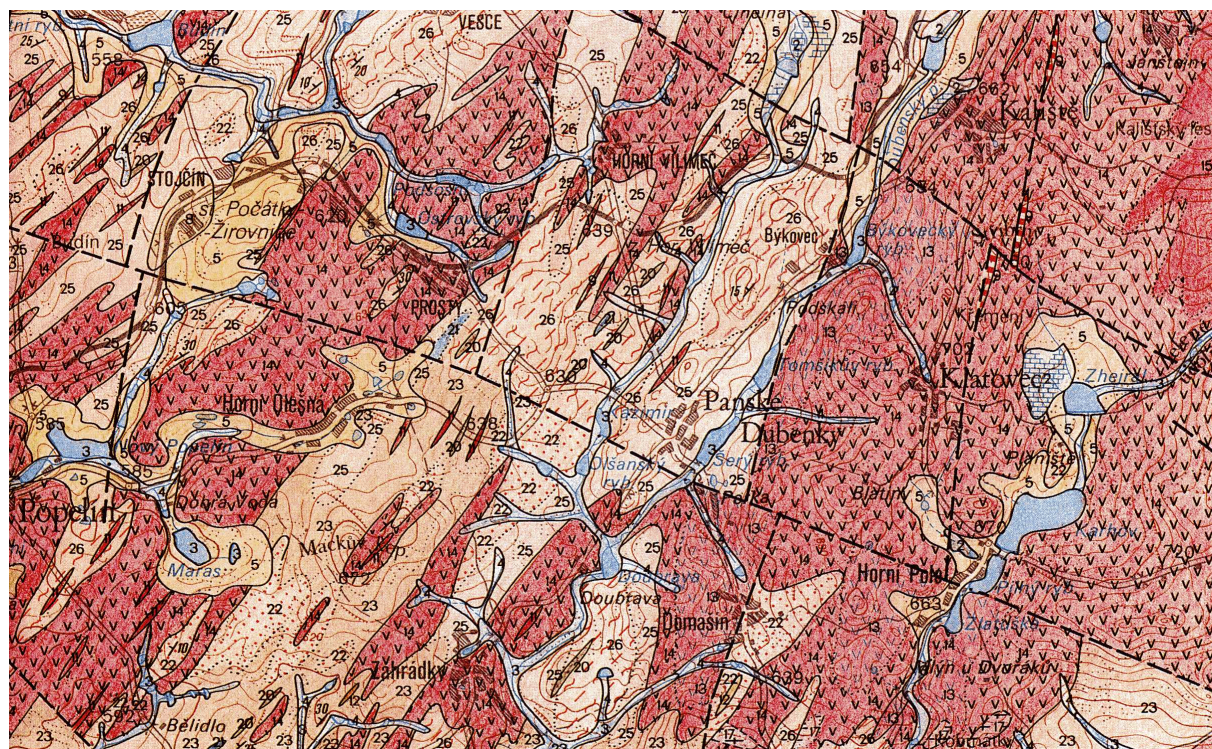
Hamerský potok tvoří lokální drenážní bázi zájmového území. Protéká cca 200 m západně od lomu směrem JJV-SSZ v nadmořské výšce cca 610 m n. m. Na drenáži podzemní vody se mohou určitou měrou podílet rybníky vybudované v nivě Hamerského potoka. Z hydrogeologického hlediska je zájmové území hydrogeologickým masivem. Aktivní oběh podzemní vody je vázaný na přípovrchovou zónou zvětralinového pláště a rozpojení puklin. Mocnost této zvodně se patrně pohybuje v řádu prvních desítek metrů. Pod touto zvodní se nachází zóna zpomaleného oběhu podzemní vody. Ta je tvořena systémem otevřených puklin a poruchových zón masivu. Dosah této zóny je podle zkušeností pravděpodobně do hloubek kolem 300 m. Hlubší partie masivu již představují zónu stagnace podzemních vod. V této zóně se doba zdržení pohybuje v řádech tisíců let a více. Výjimku mohou tvořit hluboká, relativně dobře propustná poruchová pásma, na kterých může docházet k relativně rychlému oběhu podzemních vod. Větší zvodnění infiltračního charakteru lze očekávat pouze v mocnějších poruchových zónách, z nichž jedna je známa v předpolí lomové stěny. Vydatnosti pramenů odvodňujících tektoniku dosahují i několika l/s. K pramenům tohoto

charakteru lze zařadit vývěry zachycené JV od obce Panské Dubenky. Ve vzdálenosti cca 300 m severozápadním směrem od lomu jsou dvě kopané studny, které představují zdroj vody pro obec Panské Dubenky. Studny mají stanovená ochranná pásma a využitelnou vydatnost 0.8 l/s z každé studny. Infiltrační oblast pro tyto studny se patrně nachází na zalesněném návrší severně od lomu. Vzhledem k puklinovému charakteru kolektoru nelze infiltrační oblast přesně specifikovat, ale vzhledem k charakteru reliéfu lze předpokládat, že povrchový odtok z lomu směřuje mimo ochranné pásmo studní (Vaněček M., 2005).

Obr. 1: Výbrus granitu, XPL, 40x zvětšeno, (Domečka K., Sasínová R., 2005)



Obr. 2: Geologická mapa ČR. List 23–32 Kamenice nad Lipou. Měřítko 1:50 000, (Hron J., 1995)



3. Jílocementové injekční směsi

Propustnost skalních hornin je dána především jejími diskontinuitami a stavem rozpuštění a navětrání masívu. Vyskytne-li se potřeba snížit propustnost horninového masívu, přistupuje se k injektáži puklinového systému. Skalní masiv lze utěsnit různými hmotami. Volba druhu použité injekční hmoty nezávisí pouze na velikosti rozvětvení puklin, na přípustném průsaku podzemní vody injekční clonou, na charakteru podzemní vody, ale též na vlastnostech vedlejších produktů injekčních hmot.

Jílocementová suspenze je stabilní a nesedimentuje. Její výroba je jednoduchá a složení většinou stále stejné. Směs se při injektování nezahušťuje. Dobře připravená jílocementová suspenze se nemísí snadno s vodou. Proto nehrozí nebezpečí, že se směs vypláchne. Směs zatuhne v takové formě, v jaké je připravena. Zkušenosti při injektování skalních hornin jílocementovou směsí potvrzují přednosti používání dobře aktivované směsi v dezintegrátoru (Verfel, 1983).

Použití směsí bentonitu a cementu jako fyzikálně chemické bariéry v prostředí úložiště toxických průmyslových odpadů popisují Arnould et al. (1992). Ve své práci studují schopnost směsí adsorbovat kationty olova, kadmia, rtuti, cesia a stroncia. Stabilizaci splaškového kalu s obsahem těžkých kovů pomocí malty s příměsí bentonitu studoval Katsioti et al. (2008). Ve své práci popisuje vyluhovatelnost směsi kalu (50%), cementu (30%) a bentonitu (20%). Použití bentonitu na imobilizaci radioaktivního koncentráту v cementové matici studoval Plecas et al. (2006). Měřil vyluhovatelnost cesia, kobaltu a stroncia po 300 dnech. Účinnost cemento-bentonitové podzemní stěny v úložišti nízkoaktivního radioaktivního odpadu studoval Trivedi et al. (1992). Zjistil, že její propustnost *in situ* je 10^{-8} m.s^{-1} , což je o řád více než v případě laboratorních vzorků. Chemickou odolnost bentonito-cementových podzemních stěn studoval Garvin et al. (1999). Zjistil, že přídavek popílku zvyšuje odolnost více než přídavek vysokopeční strusky. Podzemní bentonito-cementové stěny dále studovali Davis (1988), Plee et al. (1990) a Schweitzer (1989). Průnik bentonito-cementové injekční směsi do jemně rozpuštěné horniny studoval Gandais et al. 1989.

3.1 Složení směsí a příprava vzorků

K přípravě injekčních směsí byl použit bentonit označený GA z produkce Keramost-Most (závod Obrnice) a portlandský cement označený CEM I 42,5 R z produkce Holcim Prachovice.

Směsi natrifikovaného bentonitu s vysokým obsahem Na^+ a vápna byly míchány v hmotnostních poměrech 3:1, 2:1, 1:1, 1:2. Receptura injekčních směsí je uvedena v tabulce (Tab. 1). Aktivace směsi byla dosažena pomocí rychloběžného dezintegrátoru. Směs byla míchána 5 minut. Poté byly směsi odlity do odběrných pouzder průměru 60 a 105 mm.

Tab. 1: Receptura injekčních směsí

Směs	Hmotnost bentonitu (g) / 1l vody	Hmotnost cementu (g) / 1l vody
3:1	297	99
2:1	264	132
1:1	198	198

Směs	Hmotnost bentonitu (g) / 1l vody	Hmotnost cementu (g) / 1l vody
1:2	132	264

3.2 Základní parametry injekčních směsí

Mezi základní parametry charakterizující injekční směs patří viskozita, dekantace (odstoj vody) a objemová hmotnost.

Viskozita charakterizuje tekutost suspenze. Stanovuje se přístrojem Marsh, což je nálevka vysoká 305 mm, horní průměr 152,5 mm, zakončená dole trubičkou 50,8 mm dlouhou, s vnitřním průměrem 4,8 mm. Viskozita je udána časem, za který proteče z 1500 ml suspenze nalité do nálevky 947 ml do odměrné nádoby (Bareš, 1984).

Odstoj vody je ukazatelem stupně koloidnosti suspenze. Čím vyšší je stupeň koloidnosti suspenze, tj. čím jemnější jsou jílové částice a čím více váže vodu, tím menší je odstoj vody, tím je suspenze stabilnější. Požaduje se odstoj vody menší než 5% za 24 hodin (Černý a Kouba, 1984).

Objemová hmotnost určuje hodnotu hydrostatického tlaku suspenze. Měří se naplněním odměrného válce 1 litrem suspenze a vážením na vahách.

Výsledky testů jílocementových směsí jsou shrnuty v tabulce (Tab. 2). Po 24 hodinách nebyla vizuálně sledována významná dekantace vody.

Tab. 2: Základní parametry injekčních směsí

Směs	Viskozita (min:s:set)	Dekantace (%)	Objemová hmotnost (kg/m ³)
3:1	2:07:10	<5	1220,8
2:1	0:44:70	<5	1230,8
1:1	0:38:17	<5	1222,2
1:2	0:31:04	<5	1226,8

3.3 Pevnost v prostém tlaku injekčních směsí

Pevnost v prostém tlaku byla stanovena na válcovitých vzorcích s rozměry 60×120 mm. Vzorky byly testovány po 7, 14, 28 a 120 dnech zrání směsi. Během zrání byly vzorky uloženy v klimatizovaném boxu s konstantní teplotou a vlhkostí. Princip stanovení tkví v osovém zatěžení vzorku v lisu, kdy na vzorek nepůsobí radiální napětí (ČSN EN 1926). Test byl ukončen po překročení pevnosti materiálu. Zaznamenávána byla síla, při které došlo k porušení vzorku. Ihned byl rovněž odebrán vzorek ke stanovení vlhkosti materiálu. Výsledky jsou shrnuty v následujících tabulkách (Tab. 3, Tab. 4) a grafech (Obr. 3, Obr. 4).

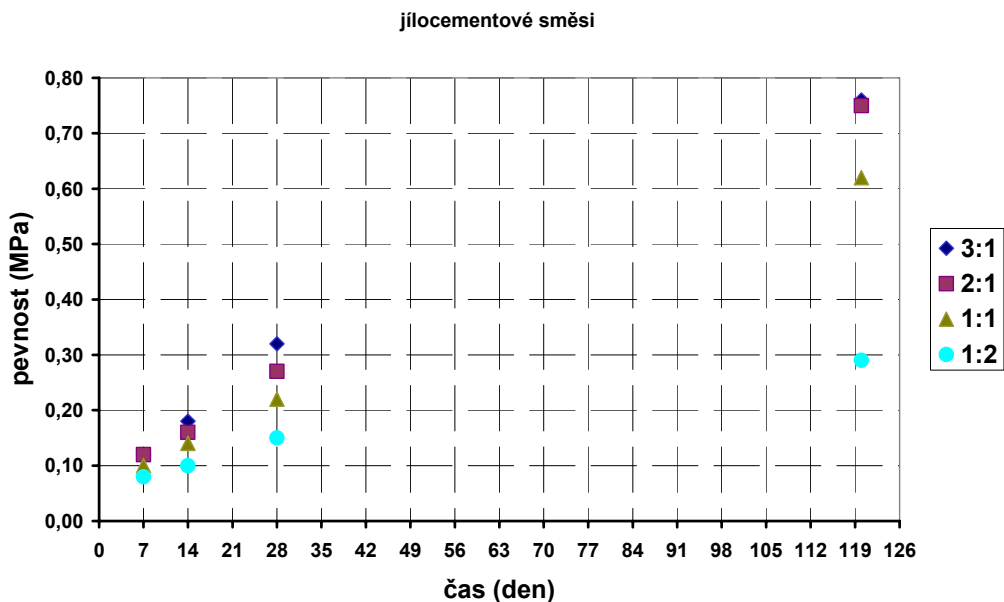
Tab. 3: Pevnost v prostém tlaku směsí jílocementu

Směs	Pevnost (MPa) po 7 dnech zrání	Pevnost (MPa) po 14 dnech zrání	Pevnost (MPa) po 28 dnech zrání	Pevnost (MPa) po 120 dnech zrání
3:1	0,12	0,18	0,32	0,76
2:1	0,12	0,16	0,27	0,75
1:1	0,10	0,14	0,22	0,62
1:2	0,08	0,10	0,15	0,29

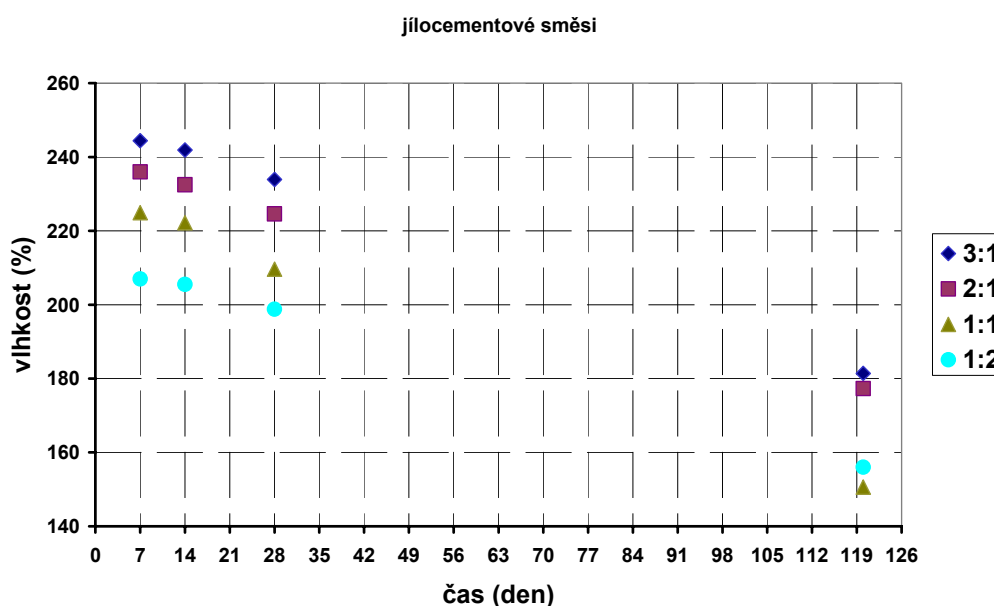
Tab. 4: Vlhkost směsí jílocementu

Směs	Vlhkost (%) po 7 dnech zrání	Vlhkost (%) po 14 dnech zrání	Vlhkost (%) po 28 dnech zrání	Vlhkost (%) po 120 dnech zrání
3:1	244,4	241,9	233,9	181,4
2:1	236,0	232,5	224,6	177,4
1:1	224,9	222,2	209,6	150,6
1:2	207,0	205,5	198,8	156,0

Obr. 3: Pevnost v prostém tlaku směsí jílocementu



Obr. 4: Vlhkost při stanovení pevnosti v prostém tlaku směsí jílocementu



Z grafů (Obr. 3, Obr. 4) je patrné, že nejvyšší pevnosti dosahují vzorky obsahující největší obsah bentonitu. Tyto vzorky (3:1) mají rovněž nejvyšší vlhkost, která s časem lineárně klesá. To je kromě tvorby cementačních vazeb další příčinou nárůstu pevnosti po 120 dnech.

3.4 Koeficient hydraulické vodivosti jílocementových směsí

3.4.1 Úprava vzorků

Vzorky byly po odlití ponechány zrát 14 dní v klimatizovaném boxu. Po vyjmutí vzorků z pouzder průměru 105 mm jim byly na pile zařízány podstavy. Výška vzorků byla upravena na 50 mm. Vzorky byly zváženy a posuvným měřítkem byly změřeny jejich přesné rozměry.

3.4.2 Metodika prací

Vzorky byly umístěny na vodou nasycenou karborundovou destičku spočívající na podstavě komory propustoměru. Po nasazení horní drenážní destičky byly vzorky opatřeny gumovou membránou. Posléze byla nasazena horní drenáž a vzorek utěsněn O-kroužky. Po nasazení samotné komory byl celý systém zavodněn a na vzorek bylo aplikováno radiální napětí.

Všechny testy byly provedeny s konstantními hydraulickými gradienty. Rozdíly tlakových výšek hladin odpovídaly rozdílům napětí působícího na spodní a horní podstavu vzorku. Tlaky byly v průběhu testů udržovány konstantní pomocí regulátorů GDS nebo pomocí Boyle-Marriotovy nádoby.

V průběhu stanovení propustnosti byla zaznamenávána následující data: objem a tlak tekutiny vytlačené ze vzorku, čas a teplota.

Po ukončení každé sady testů s rozdílnými hydraulickými gradienty byly vzorky odstrojeny a ihned zváženy na vahách. Poté byly vzorky sušeny v peci při teplotě 105°C po dobu minimálně 24 hodin. Posléze byly opět zváženy.

Koeficient hydraulické vodivosti k stanovený podle Darcyho zákona byl vypočten podle vztahu (1):

$$k = \frac{v}{i} \quad (1)$$

kde v odpovídá rychlosti proudění
a i hydraulickému gradientu.

Rychlost proudění v se stanoví rovnicí (2):

$$v = \frac{V}{A \cdot t} \quad (2)$$

kde V odpovídá objemu proteklého média,
 A odpovídá filtrační ploše vzorku
a t času.

Hydraulický gradient i se stanoví rovnicí (3):

$$i = \frac{\delta h}{\delta l} \quad (3)$$

kde δh odpovídá nejkratší drenážní dráze vzorkem
a δl odpovídá rozdílu tlakových výšek hladin.

Filtrační plocha vzorku A se stanoví rovnicí (4):

$$A = \pi \cdot (d^2 / 4) \quad (4)$$

kde d odpovídá průměru vzorku.

Do všech výsledků stanovení propustnosti byla zahrnuta korekce na konstantní laboratorní teplotu. To umožňuje jejich vzájemné porovnání.

Teplotní koeficient T byl vypočten podle rovnice uvedené v (ČSN CEN ISO/TS 17892-11) (5):

$$T = \frac{1,359}{(1 + 0,0337 \cdot t + 0,00022 \cdot t^2)} \quad (5)$$

kde t odpovídá průměru teplot mezi po sobě jdoucími stanoveními.

3.4.3 Výsledky a diskuze

Celkem bylo vyhodnoceno 34 testů stanovujících propustnost s konstantním sklonem. Výsledky stanovení parametrů propustnosti jednotlivých testů jsou uvedeny v tabulce (Tab. 5). Každá výsledná hodnota objemového průtoku a koeficientu hydraulické vodivosti byla brána jako průměrná hodnota stanovená z jednotlivých stanovení v průběhu testu. Z tohoto statistického souboru byly odebrány hodnoty, které se od ostatních výrazně liší. K tomu docházelo většinou chybou při měření nebo v počátečních částech testů než se proudění ustálilo. Následně byly výsledky přehledně zobrazeny v grafech (Obr. 5, Obr. 6, Obr. 7, Obr. 8). Na vodorovné ose je vynesena čas, na svislé ose koeficient hydraulické vodivosti.

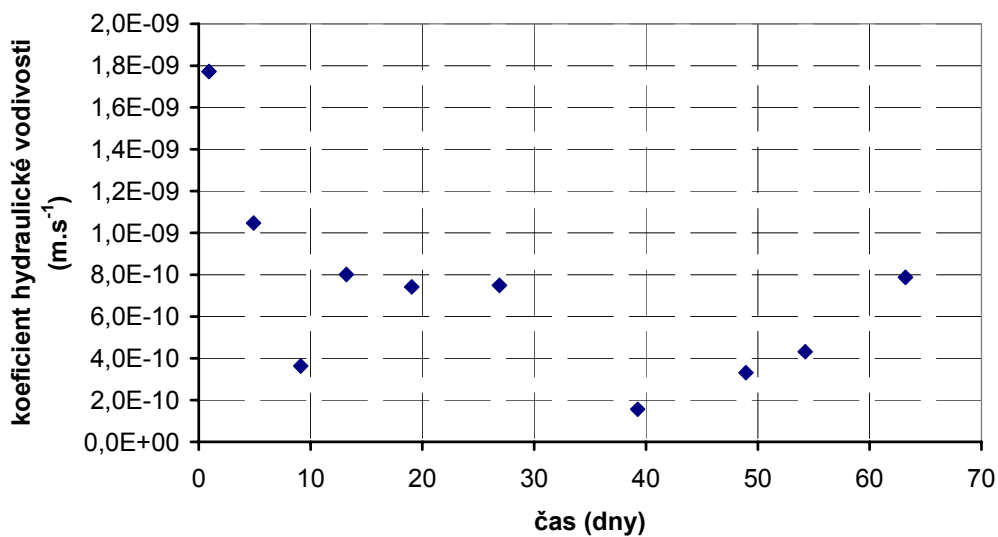
Tab. 5: Koeficient hydraulické vodivosti jílocementových směsí

Směs	Hydraulický gradient (-)	Koeficient hydraulické vodivosti (m.s ⁻¹) přepočtený na 10°C
3:1	30	1,77×10 ⁻⁹
	20	1,05×10 ⁻⁹
	10	3,63×10 ⁻¹⁰
	10	8,01×10 ⁻¹⁰
	30	7,42×10 ⁻¹⁰
	20	7,49×10 ⁻¹⁰
	10	1,56×10 ⁻¹⁰
	10	3,32×10 ⁻¹⁰
	10	4,31×10 ⁻¹⁰
	20	7,87×10 ⁻¹⁰
2:1	20	6,89×10 ⁻⁹
	10	3,98×10 ⁻⁹
	4	2,90×10 ⁻⁹
	4	2,93×10 ⁻⁹
	2	1,66×10 ⁻⁹
	10	2,01×10 ⁻⁹
	6	1,56×10 ⁻⁹
	6	4,82×10 ⁻⁹
1:1	10	2,50×10 ⁻⁸
	4	4,62×10 ⁻⁹
	4	2,24×10 ⁻⁸
	2	1,56×10 ⁻⁸
	10	1,31×10 ⁻⁸
	6	6,20×10 ⁻⁸
	6	8,92×10 ⁻⁸
1:2	10	1,70×10 ⁻⁷
	6	1,64×10 ⁻⁷
	4	1,59×10 ⁻⁷
	2	1,36×10 ⁻⁷
	10	1,25×10 ⁻⁷

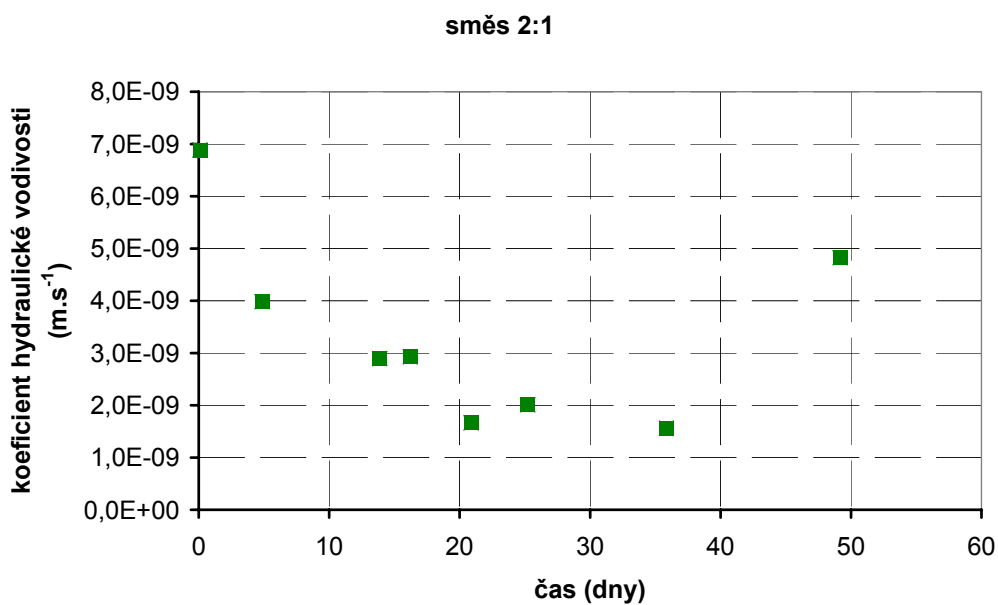
Směs	Hydraulický gradient (-)	Koeficient hydraulické vodivosti ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$) přepočtený na 10°C
1:2	6	$1,09 \times 10^{-7}$
	6	$8,19 \times 10^{-8}$
	1	$7,50 \times 10^{-8}$
	6	$7,80 \times 10^{-8}$

Obr. 5: Koeficient hydraulické vodivosti jílocementové směsi 3:1 v čase

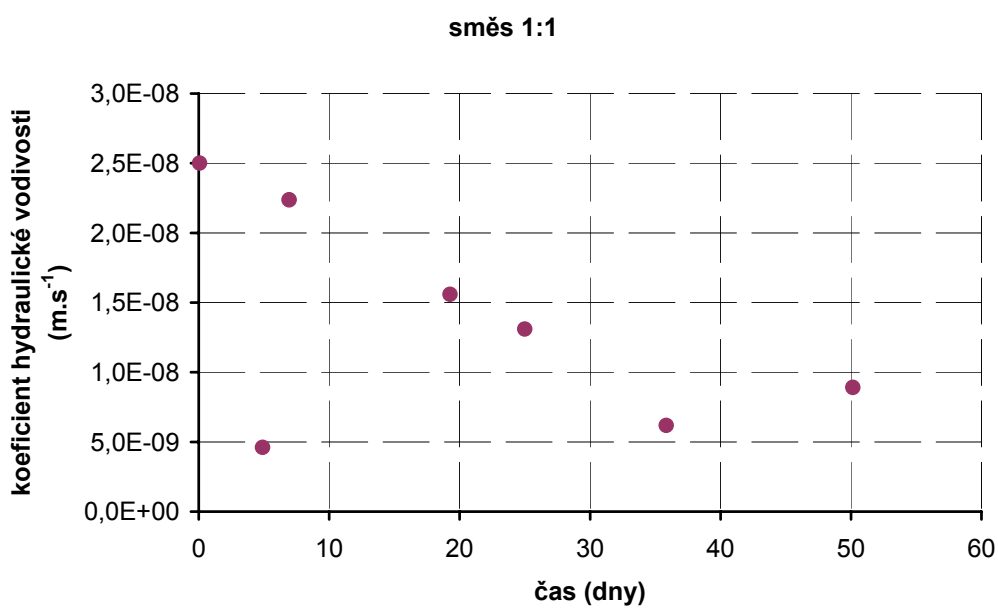
směs 3:1



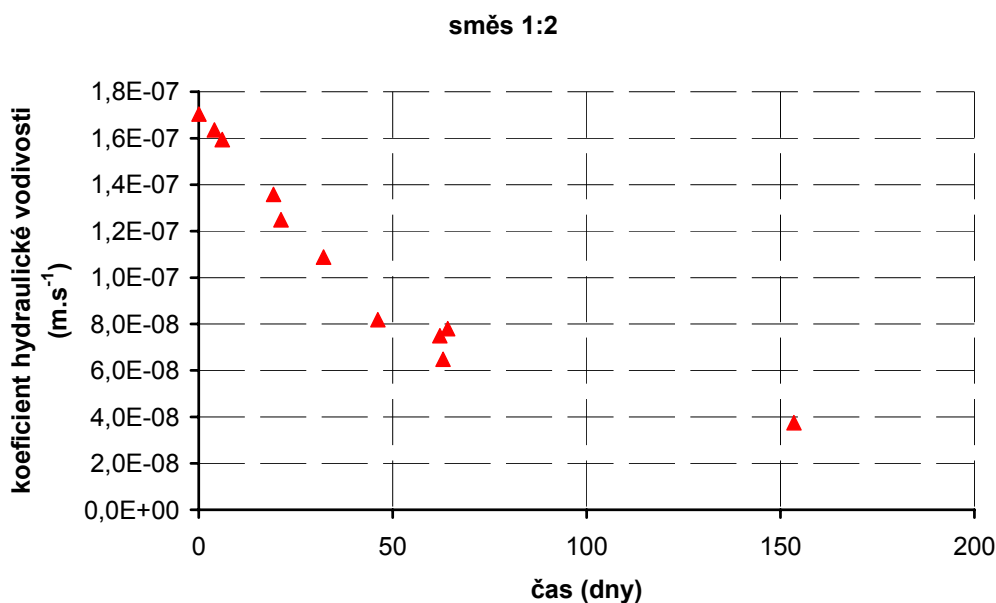
Obr. 6: Koeficient hydraulické vodivosti jílocementové směsi 2:1 v čase



Obr. 7: Koeficient hydraulické vodivosti jílocementové směsi 1:1 v čase



Obr. 8: Koeficient hydraulické vodivosti jílocementové směsi 1:2 v čase



Z výše uvedených grafů (Obr. 5, Obr. 6, Obr. 7, Obr. 8) vyplývá, že nejpropustnější je vzorek obsahující převahu cementu. Hodnota koeficientu hydraulické vodivosti injekčních jílocementových směsí se pohybuje v rozmezí řádů 10^{-7} m.s⁻¹ až 10^{-10} m.s⁻¹. Dále lze sledovat trend postupného snižování propustnosti v čase. To může souviset se zanášením preferenčních cest. Čím je vzorek méně propustný, tím se hodnota koeficientu hydraulické vodivosti ustaluje dříve.

3.5 Výběr směsi k injektování puklin

Důležitým aspektem při výběru vhodné injekční směsi je její objemová stálost. Není-li zaručena, může dojít k vyplavení materiálu z pukliny. Na následující fotografii je zachycena sada kontrolních vzorků, které byly záměrně ponechány na atmosférické vlhkosti. Vysycháním vzorků dochází k jejich smrštění. Výsledky testů stanovujících vlhkost materiálů ukazují na vyšší vlhkost materiálu s větším podílem bentonitu. To společně se strukturou a složením materiálu má za následek značnou objemovou nestálost. Naopak vzorky s vyšším podílem cementu zůstávají déle měkké a jeví se jako objemově stálé (Obr. 9).

Obr. 9: Objemová stálost směsí jílocementu



Dalším důležitým aspektem při výběru vhodné injekční směsi je její propustnost a injektovatelnost puklinového systému. Díky výše uvedeným testům bylo zjištěno, že hodnota koeficientu hydraulické vodivosti injekčních jílocementových směsí se pohybuje v rozmezí řádů 10^{-7} m.s⁻¹ až 10^{-10} m.s⁻¹. Z nich je nejpropustnější vzorek obsahující převahu cementu. Injektovatelnost směsi je dána její viskozitou stanovenou po aktivaci. Ta se kontroluje zkouškou Marsh. Jílocementové směsi se pohybují mezi 31 vteřinami až 2 minutami.

Pro potřeby dalšího testování hydrodynamických parametrů puklin byla jako vhodný injekční materiál vybrána jílocementová směs s poměrem bentonitu k cementu 1:2. Hlavními výhodami této směsi je její objemová stálost a relativně vyšší propustnost, jež umožňuje zrychlení sady testů.

3.6 Shrnutí

U vybraných jílocementových směsí byla určena vhodná receptura míchání a přípravy vzorků a byla odlita zkušební laboratorní tělesa. Při přípravě vzorků byly stanoveny základní parametry injekčních směsí, mezi něž náleží viskozita, dekantace a objemová hmotnost. Zkušební laboratorní tělesa byla podrobena testům určujícím jejich pevnost v prostém tlaku a koeficient hydraulické vodivosti.

Na základě výsledků stanovení koeficientu hydraulické vodivosti laboratorních vzorků a dalších aspektů jako např. objemová stálost byla vybrána vhodná injekční směs, kterou byly granitové bloky parciálně injektovány.

4. Propustnost a pórovitost granitové matrice

Laboratorní propustnost byla stanovena měřením průtoku v trojosém přístroji při rozdílných hydraulických gradientech. Dále byla stanovena celková a otevřená pórovitost a objemová hmotnost laboratorních vzorků žuly.

Propustnost a pórovitost horninové matrice studovaly mimo jiné Gallé (1994), Degueldre et al. (1996), Zhao (1998), Hellmuth et al. (1999), Tullborg a Larson (2006) a Bongiolo et al. (2007). Laboratorní měření hydraulické vodivosti založené na měření propustnosti vzorku plynnou látkou studovali Schild et al. (2001), Ota et al. (2003) a Autio et al. (1998).

Celková pórovitost se dělí na spojitou (otevřenou) pórovitost (je charakterizovaná prouděním a difuzí) a nespojitou (uzavřenou). Celková pórovitost charakterizuje objem horniny, který není vyplněný minerály, a je součtem efektivní pórovitosti (dominantním typem transportu fluid je zde proudění), difuzivní pórovitosti (převládajícím typem transportu je difuze ve vodou vyplněných pórech) a reziduální pórovitosti (nespojité póry, v nichž žádný transport neprobíhá) (Norton a Knapp (1977) in Tullborg a Larson (2006)).

Bongiolo et al. (2007) rozděluje mikrotrhliny tvořící pórovitost na intragranulární, transgranulární a intergranulární. Intragranulární mikrotrhliny mohou představovat izolované trhliny uvnitř jednotlivých minerálů nebo mohou být napojeny na jiný systém mikrotrhlin. Transgranulární mikrotrhliny představují jednotlivé trhliny, které procházejí napříč minerály. Intergranulární mikrotrhliny pak tvoří systém mikrotrhlin mezi jednotlivými minerály.

Nejpoužívanější metodou pro měření pórovitosti je vodní gravimetrie (Tullborg a Larson 2006). Stanovení pórovitosti pomocí neutronové radiografie uvádí např. Degueldre et al. (2006). Použití rtuťové porozimetrie na vzorcích granitických hornin uvádějí např. Hellmuth et al. (1999) nebo Kelokaski et al. (2006). Častým příkladem použití monomeru jako impregnačního činidla je např. metoda ^{14}C -PMMA (Bongiolo et al., 2007; Hellmuth et al., 1999; Kelokaski et al., 2006; Autio et al., 1998). Vliv přípravy vzorků na měřenou pórovitost demonstrovali např. Tullborg a Larson (2006). Vliv změny přirozené napjatosti horniny na pórovitost studovali Ota et al. (2003) a Schild et al. (2001). Charakter zóny porušení vzniklou při experimentální ražbě pro výzkum úložišť radioaktivního odpadu na základě mikroskopické analýzy popisují Autio et al. (1998).

4.1 Příprava vzorků a pracovní postup

Před zahájením testů byly vzorky tvaru válce výšky 150 mm a průměru 83 mm provrtány podél osy vedoucí středem kruhových podstav válců. To bylo provedeno jádrovým vrtáním o průměru 18 mm pomocí vrtačky HILTI DD 200. Podstavy a stěny válců byly dále zbaveny ostrých hran a nerovností. Poté byly posuvným měřidlem změřeny vnější rozměry vzorků.

Za účelem nasycení pórů horniny tekutinou byly vzorky před zahájením testů vařeny v destilované vodě. Po vychladnutí byly vzorky vyjmuty z vodní lázně, otřeny navlhčenou tkaninou a zváženy.

Posléze byly vzorky umístěny na gumovou destičku spočívající na podstavě komory trojosého přístroje. Po nasazení horní podstavy trojosé komory byly podstavy vzorku opatřeny pruhy gumové membrány. Ta sloužila k utěsnění kontaktů mezi vzorkem a podstavami komory.

Poté byla nasazena samotná komora a závěs zajišťující konstantní osově napětí.

Oba oddělené systémy (tj. komora trojosého přístroje a vrt napříč vzorkem propojený horní a dolní podstavou s byretami) byly zavodněny. U trojosé komory se tak dělo litím destilované

vody do vývodu ve spodní podstavě komory. Horním ventilem byla komora odzdušněna. Vzorek byl zavodněn litím destilované vody do dalšího vývodu ve spodní podstavě komory. Odzdušněn byl vývodem v horní podstavě.

Před zahájením měření propustnosti byl v trojosé komoře zvýšeno radiální napětí a osově napětí. Osově napětí bylo stanoveno podle podmínky $K_0=0,5$ na dvojnásobek radiálního napětí. Radiální napětí bylo zajištěno regulátorem tlaku kapalin GDS. Osově napětí bylo zajištěno přiložením patřičného závaží na závěs trojosé komory.

Všechny zkoušky byly provedeny s konstantními hydraulickými gradienty. Rozdíly tlakových výšek hladin odpovídaly rozdílům radiálního napětí působícího na plášť vzorku a napětí uvnitř vrtu ve vzorku. Oba tlaky byly v průběhu testů udržovány konstantní pomocí regulátorů GDS.

V průběhu stanovení propustnosti byla zaznamenávána následující data: objem a tlak tekutiny vtlačené do trojosé komory, objem a tlak tekutiny vytlačené ze vzorku, čas, teplota a tlak prostředí a změna výšky vzorku.

Po ukončení každé sady testů s rozdílnými hydraulickými gradienty byly vzorky odstrojeny a ihned zváženy na vahách. Poté byly vzorky sušeny v peci při teplotě 105°C po dobu minimálně 24 hodin. Posléze byly opět zváženy.

Obr. 10: Laboratorní vzorek v trojosé komoře



4.2 Objemová hmotnost

Objemová hmotnost byla měřena modifikovaným postupem podle normy (ČSN EN 1936).

Objemová hmotnost se vyjádří jako poměr hmotnosti suchého zkušební tělesa m_d a jeho zdánlivého objemu V_b rovnicí (6):

$$\rho_b = \frac{m_d}{V_b} \quad (6)$$

Zdánlivý objem byl vypočten z rozměrů zkušebních těles. Zkušební tělesa byla sušena při 105°C.

4.3 Pórovitost

Otevřená pórovitost p_o byla vypočtena podle vztahu (7) uvedeného v normě (ČSN EN 1936):

$$p_o = \frac{m_s - m_d}{m_s - m_h} \cdot 100 \quad (7)$$

kde m_s odpovídá hmotnosti nasyceného zkušební tělesa

m_d odpovídá hmotnosti vysušeného zkušební tělesa

m_h odpovídá hmotnosti zkušební tělesa ponořeného do vody.

Pracovní postup byl pro experimentální účely mírně upraven. Stav 100% nasycení vzorku vodou byl definován jako stav po konci zkoušky stanovující propustnost. Zkušební tělesa byla sušena při 105°C. Zdánlivý objem potřebný k dosazení do výpočtu otevřené pórovitosti byl alternativně zjištěn z rozměrů zkušebních těles.

Celková pórovitost ρ byla vypočtena podle vztahu (8) uvedeného v normě (ČSN EN 1936):

$$\rho = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_r}\right) \cdot 100 \quad (8)$$

kde ρ_b odpovídá objemové hmotnosti zkušební tělesa

a ρ_r odpovídá měrné hmotnosti zkušební tělesa.

Existuje několik způsobů stanovení měrné hmotnosti zkušební tělesa. Jedním z nich je zkouška v pyknometru.

Měrná hmotnost ρ_r stanovená v pyknometru se určí podle vztahu (9):

$$\rho_r = \frac{m_e}{m_2 + m_e - m_1} \cdot \rho_{rh} \quad (9)$$

kde m_e odpovídá hmotnosti rozetřeného a vysušeného zkušební tělesa

m_1 odpovídá hmotnosti pyknometru naplněného vodou a rozetřeným zkušebním tělesem

a m_2 odpovídá hmotnosti pyknometru naplněného vodou.

4.4 Výsledky a diskuze

Celkem bylo vyhodnoceno 10 testů stanovujících propustnost s konstantním sklonem.

Koeficient hydraulické vodivosti k stanovený podle Darcyho zákona byl vyhodnocen podle vztahu uvedeném v kapitole **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**

Filtrační plocha vzorku A byla stanovena rovnicí (10):

$$A = \pi \cdot d \cdot h_m \quad (10)$$

kde d odpovídá průměru vzorku

a h_m vzdálenosti membrán.

Výsledky testů jsou uvedeny v následující tabulce (Tab. 6). Průměrná měrná hmotnost byla 2646 kg.m^{-3} . Každá výsledná hodnota objemového průtoku a koeficientu hydraulické vodivosti uvedená v tabulce je průměrnou hodnotou jednotlivých stanovení v průběhu testu. Z tohoto statistického souboru byly odebrány hodnoty, které se od ostatních výrazně liší. K tomu dochází většinou chybou při měření nebo v počátečních fázích testu než se proudění ustálí. Z tabulky (Tab. 6) je patrné, že růstu otevřené pórovitosti odpovídá růstu koeficientu hydraulické vodivosti. Rozdíl otevřené a celkové pórovitosti je 0,03% až 0,15%. Z tabulky rovněž vyplývá, že růst pórovitosti souvisí se snižováním objemové hmotnosti, což pravděpodobně indikuje větší míru zvětrání.

Tab. 6: Objemová hmotnost, pórovitost a koeficient hydraulické vodivosti vzorků granitu z Panských Dubenek

Vzorek	Objemová hmotnost (kg.m^{-3})	Otevřená pórovitost (%)	Celková pórovitost (%)	Hydraulický gradient (-)	Koeficient hydraulické vodivosti (m.s^{-1}) přepočtený na 10°C
V-1	2611	1,16	1,31	42,4	$4,9 \times 10^{-12}$
				88,3	$6,3 \times 10^{-12}$
				308,0	$7,4 \times 10^{-12}$
V-12	2620	0,96	0,99	46,2	$2,2 \times 10^{-12}$
				94,7	$2,0 \times 10^{-12}$
				320,5	$2,5 \times 10^{-12}$
				962,9	$1,9 \times 10^{-12}$
V-18	2618	1,04	1,08	45,1	$4,6 \times 10^{-12}$
				90,3	$3,7 \times 10^{-12}$
				463,3	$4,0 \times 10^{-12}$

4.5 Shrnutí

Celkem bylo provedeno a vyhodnoceno 10 testů stanovujících propustnost horninové matrice s konstantním sklonem. Z výsledků vyplývá, že má testovaný granit průměrnou objemovou hmotnost 2616 kg.m^{-3} , otevřenou pórovitost 1,05%, celkovou pórovitost 1,13% a koeficient hydraulické vodivosti $4,0 \times 10^{-12} \text{ m.s}^{-1}$. Růstu otevřené pórovitosti laboratorních vzorků odpovídá růst jejich koeficientu hydraulické vodivosti.

5. Puklinová propustnost granitových bloků

V této kapitole jsou popsány laboratorní zkoušky na blocích granitových hornin, které obsahují přirozenou nebo uměle vyrobenou puklinu. Hlavní výhodou testování uměle vyrobené pukliny spočívá v její snadné identifikaci a jednoznačně definované geometrii. Cílem této práce je stanovení hydrodynamických a migračních parametrů studovaného puklinového systému, jeho následné zatěsnění injekční směsí a ověření její účinnosti.

Laboratorní práce zaměřené na stanovení hydrodynamických a migračních parametrů přirozených a umělých puklin v granitových horninových blocích zahrnují stanovení celkového charakteru studovaných diskontinuit, laboratorní stanovení propustnosti měřením objemového průtoku při rozdílných konstantních hydraulických gradientech a stopovací zkoušky používající jako stopovací látky chlorid sodný a sodný fluorescein uranin.

Stopovací zkoušky jsou zejména rozšířené při studování krasových oblastí. Stopovacími zkouškami v krasu se zabýval např. Atkinson et al. (1973), Smart (1988), Thrailkill et al. (1991), Käss et al. (1998) a Field (2002). Při stopovací zkoušce se na jednom místě injektuje stopovací látka do prostředí a na místě druhém se látka sleduje. Cílem je zjistit propojení obou míst a odvození charakteru prostředí, kterým stopovací látka prostupovala.

Kvantitativní stopovací zkoušky musí splnit následující základní hlediska. Četnost odběrů vzorků musí být dostatečná, aby mohla být spolehlivě popsána průniková křivka stopovače (závislost koncentrace objeveného stopovače na čase) na sledovaných profilech. Na místech injektáže stopovače i na všech sledovaných profilech musí být měřeny průtoky, aby bylo možné bilancovat množství proteklého stopovače. Z výsledků takové zkoušky lze odvodit časy zdržení vody v krasovém kanálu, rychlosti proudění podzemní vody, objem krasových kanálů v kolektoru a Pecletova čísla (Field, 2002).

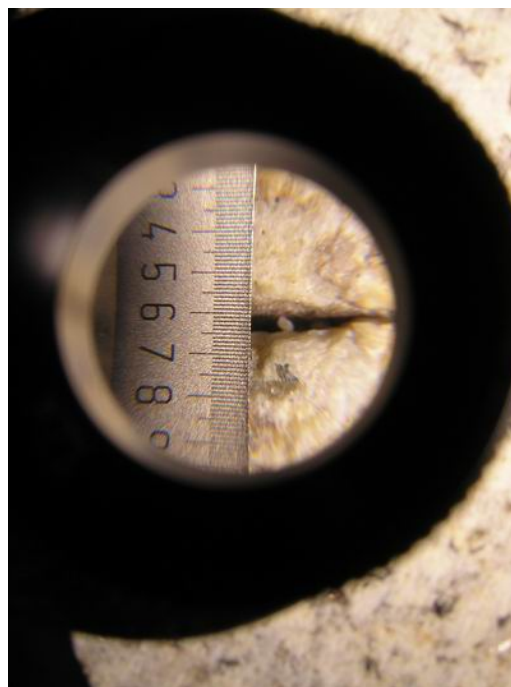
Závislostí průtoku vody puklinou na tlaku se zabývali Zhang et al. (2006). Na základě laboratorních experimentů navrhli vztah mezi propustností a rozevřením pukliny. Migraci nesorpčních radioaktivních stopovacích látek přírodní granitovou puklinou studovali Park et al. (1996). Laboratorními migračními experimenty uměle vyrobené pukliny se zabývali Park et al. (2002). Tuto studii zaměřil na interpretaci retardace a difúze stopovače v puklině do matrice granitu. Migraci radionuklidů přírodní puklinou v granitovém jádře studovali Neretnieks et al. (1982) a Moreno et al. (1985). Barton a Quadros (1997) studovali vliv rozevření a hrubosti puklin na jejich injektovatelnost. Při testech též diskutovali průběh puklinové propustnosti při současném smykání horniny. Rozevření přírodní jednoduché pukliny v granitu pomocí injektáže fluorescenční epoxidové pryskyřice studovali Hakami a Larsson (1996).

5.1 Příprava vzorků

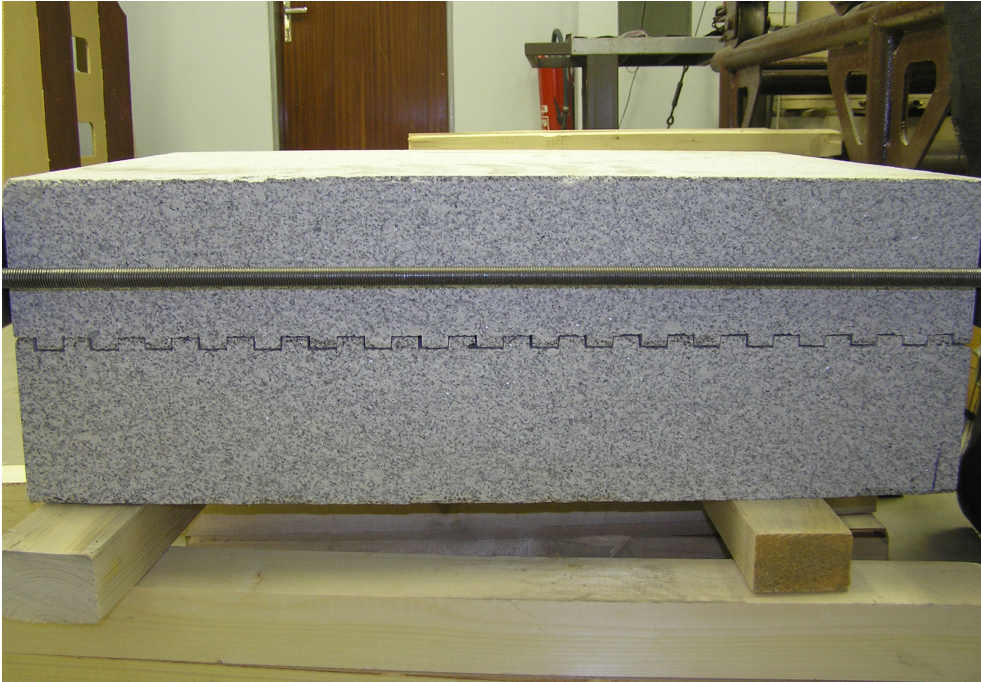
Laboratorní vzorek označený jako A-I-K-PV měl tvar krychle s rozměry 600×600×600 mm a obsahoval jednu subhorizontální přirozenou puklinu (Obr. 11). Její rozevření kolísalo mezi 0,1 až 1,8 mm. Puklina byla průběžná a rozevřená se středním rozevřením 1,0 mm. Před zahájením testů byl vzorek provrtán podél osy vedoucí středem podstavy bloku. To bylo provedeno jádrovým vrtáním s vodním výplachem o průměru 18 mm pomocí vrtačky HILTI DD 200. Puklina byla na povrchu bloku zatěsněna silikonovou pastou. Úsek dlouhý 50 mm na nejnižším místě subhorizontální pukliny na bloku byl ponechán nezatěsněn a opatřen přepadem. Přepadem byla jímána voda z následných testů. V průběhu druhé fáze, kdy byla testována zatěsněná puklina, byl do bloku vyvrtán injekční vrt. Ten byl umístěn na poloviční vzdálenosti mezi vtláčecím vrtem a přepadem.

Laboratorní vzorky označené jako HR-1 a HR-2 (Obr. 12) byly složeny z dvojice hranolů s rozměry 600×800×150 mm. Na jedné z jejich ploch byly uměle vytvořené zářezy, které po sesazení bloků tvořily puklinu. Před zahájením testů byl horní z dvojice bloků provrtán. Vtláčecí vrt o průměru 18 mm byl umístěn v podélné ose ve vzdálenosti 10 mm od kratší hrany bloku. Jímací vrt o průměru 65 mm byl umístěn v podélné ose ve vzdálenosti 10 mm od protější kratší hrany bloku. Injekční vrt byl umístěn ve středu hranolovitého tělesa. To bylo provedeno jádrovým vrtáním s vodním výplachem pomocí vrtačky HILTI DD 200. Puklina na hřebeni označeném HR-2 byla vyplněna granitovou drtí frakce 0,5 až 1,0 mm. Maximální pórovitost použité frakce stanovená volným sypaním do válce o známém objemu byla 48,7%. Minimální pórovitost stanovená vibračním hutněním frakce v identickém odměrném válci byla 38,8%. Po vyvrtání patřičných otvorů došlo k sesazení obou bloků. Okraje uměle vytvořené pukliny byly zatěsněny pomocí silikonové pasty.

Obr. 11: Přirozená puklina na vzorku označeném jako A-I-K-PV



Obr. 12: Umělá puklina na vzorku označeném jako HR-1



5.2 Pracovní postup

5.2.1 Testování volných puklin

Do vtláčecích vrtů na laboratorních blocích byl v průběhu hydrodynamických testů umístěn pakr, který byl hadicí propojen s Boyle-Mariottovou lahví. Konstantní rozdíly tlakových výšek hladin byly vyvozeny zvednutím Boyle-Mariottových lahví do patřičné výšky nad puklinu vzorku (blok s přirozenou puklinou A-I-K-PV) nebo nad hladinu vody v jímacích vrtech (hřebeny s umělými puklinami HR-1 a HR-2). Před všemi testy byly pukliny nasyceny vodou. V průběhu hydrodynamických testů byla zaznamenávána následující data: objem tekutiny protéká vzorkem (měřeno na vstupu v Boyle – Mariottově láhvi), čas a teplota prostředí.

Ke stopovacím zkouškám byly využity horninové bloky připravené k testům stanovujícím jejich objemový průtok (Obr. 13). První stopovací zkoušky byly uskutečněny s chloridem sodným, který je pro svou snadnou detekovatelnost při stopovacích zkouškách nejvíce oblíben (Käss et al., 1998). Princip metody tkví ve sledování změn vodivosti protékající vody způsobené roztokem chloridu sodného (Kopáč, 2007).

Roztok chloridu sodného byl připraven smísením 1 gramu NaCl a 1 litru destilované vody. Po důkladném promíchání a rozpuštění NaCl byla změřena pomocí konduktometru HI8733 jeho vodivost a následně byl roztok přelit do Boyle-Mariottovy láhve o objemu 1 litru umístěné ve známé výšce nad puklinou nebo jímacím vrtem a spojené hadicí a pakrem s vtláčecím vrtem.

Před zahájením testu protékala vtláčecím vrtem do horninového bloku odvdzušněná destilovaná voda. Ta byla vedena hadicí z Boyle-Mariottovy láhve o objemu 20 litrů umístěné ve stejné výšce jako Boyle-Mariottova láhev s roztokem soli. Měření bylo zahájeno v okamžiku, kdy se otevřením kohoutu začal do horninového bloku vtláčet roztok soli.

V průběhu testu byla zaznamenávána následující data: vodivost vody smíchané s roztokem soli na výstupu v jímacím vrtem, čas a teplota prostředí. Data byla zaznamenávána ručně v intervalu 5 vteřin.

Po vyčerpání 0,5 l roztoku soli byl kohout opět uzavřen a byl zaznamenán čas. Dále protékala horninovým blokem pouze destilovaná voda z větší Boyle-Mariottovy láhve. Test byl ukončen poté, co se všechna sůl z horninového bloku vyplavil a hodnota vodivosti měřené v baňce na přepadu nebo v jímacím vrtu se vrátila na hodnotu původní na začátku testu.

Na přepadu z pukliny nebo jímacího vrtu byla v průběhu testu opakovaně pomocí odměrného válce a stopek kontrolována hodnota objemového průtoku vody horninovým blokem, který byl stejný v průběhu celého testu.

Dalším typem stopovače byla sodná sůl fluoresceinu $C_{20}H_{10}Na_2O_5$ uranin (dále fluorescein). Princip metody tkví ve fluorescenci roztoku fluoresceinu při ozáření modrým světlem.

Roztok byl připraven smísením 3 mg fluoresceinu a 1 l destilované vody.

Průběh stopovacích zkoušek byl identický s testy s NaCl. Jako měřící zařízení byla použita speciální televizní kamera s modrým světlem umístěná na přepadu z pukliny nebo v jímacím vrtu. Záběry z kamery byly ve 2 sekundovém intervalu ukládány v počítači.

Stopovací zkouška byla ukončena poté, co kamera ukazovala stejně tmavé záběry, jaké byly vidět před zahájením stopování. Bylo tak možné předpokládat, že již byl fluorescein z prostředí pukliny vyplaven. V průběhu testu byl rovněž zaznamenán čas, kdy byl roztok vyčerpán a dále bylo provedeno několik kontrolních stanovení objemového průtoku vody na přepadu z pukliny nebo z jímacího vrtu.

Obr. 13: Konfigurace stopovací zkoušky na bloku A-I-K-PV (v pozadí Boyle-Mariottovy lahve s destilovanou vodou a roztokem stopovače, uprostřed vtláčečí vrt, v popředí přepad nezatěsněné části pukliny a sonda konduktometru v jímací baňce)



5.2.2 Parciální injektáž puklin

Pro potřeby dalšího testování hydrodynamických a migračních parametrů zainjektované přirozené a umělé pukliny byla jako vhodný injekční materiál vybrána jílocementová směs s poměrem bentonitu k cementu 1:2, jejíž vlastnosti jsou popsány v kapitole 3.

Hlavními výhodami této směsi je její objemová stálost a relativně vyšší propustnost, jež umožňuje zrychlení sady testů.

Její hlavní nevýhodou je poměrně nízká viskozita. Optimální čas testu Marsh, který stanovuje viskozitu injekční směsi časem průtoku definovanou nálevkou, je 41 ± 2 vteřiny (Verfel, 1983). V tomto případě bylo změřeno 31 vteřin.

Z důvodů jednoznačné definovatelnosti tvaru injekčního mraku a reálné době testu bylo přistoupeno pouze k částečné injektáži horninového tělesa. Rozhodující úlohu pro velikost injekčního mraku má propustnost injekční směsi. Injektáž celého tělesa by testy neúměrně prodlužovala a pravděpodobně by se i ohrozila možnost interpretace probíhajícího testu.

Z výše uvedených důvodů byl na laboratorních tělesech injektován pouze injekční vrt, který byl umístěn mezi vtláčecím vrtem a výtokem z pukliny nebo jímacím vrtem. Do vrtu nad puklinu byla umístěna přírodní buničina. Ta zabraňovala výtoku injekční směsi z injekčního vrtu do puklin a tím umožnila pravidelné geometrické omezení injekčního mraku. Injekční směs se do injekčního vrtu aplikovala až 20 minut po její aktivaci. V této době se již začínají vytvářet ve směsi cementační vazby a směs nabývala vyšší viskozity. Tím bylo zajištěno, že se nerozlévala v puklinách horninových bloků. Do vzorku A-I-K-PV bylo tímto způsobem aplikována směs, která vytvořila v injekčním vrtem pravidelné těleso tvaru válce s průměrem 18 mm a výškou 120 mm. Do vzorku HR-1 bylo aplikována směs, která vytvořila těleso tvaru válce s průměrem 18 mm a výškou 45 mm. Ve vzorku HR-2 tak vznikl válec s identickým průměrem a výškou 42 mm.

5.2.3 Testování injektovaných puklin

Po zatuhnutí injekční směsi bylo přistoupeno k samotnému testování hydrodynamických a migračních parametrů bloků s puklinami. Míšení roztoku stopovače a jeho transport puklinou zajišťovala peristaltická pumpa (Obr. 14), která tvořila konstantní pozadový průtok. Peristaltická pumpa byla napojena pomocí hadice na vtláčecí vrt. Voda protékala horninovými bloky, kde se mísila s roztokem stopovače, a posléze z pukliny vytékala na opačné straně tělesa přepadem nebo jímacím vrtem. Přítok stopovačů do tělesa injekčním vrtem zajišťovala Boyle-Marriottova nádoba. Ta byla v případě bloku A-I-K-PV umístěna tak, že rozdíl tlakových hladin činil 2,55 m. V případě HR-1 byl rozdíl tlakových hladin 2,57 m a v případě HR-2 byly umístěny 1,93 m nad tělesem. Společně s nádobou se stopovači byla ve stejné výšce umístěna identická Boyle-Marriottova nádoba obsahující čistou vodu, která sloužila k následnému vyplavení stopovače z injekční bariéry.

Stopovací roztok byl připraven smísením 10 g NaCl, 3 mg fluoresceinu a 1 litru destilované vody. Po důkladném promíchání byla změřena pomocí konduktometru WTW jeho vodivost a následně byl roztok přelit do Boyle-Marriottovy láhve o objemu 1 litru umístěné ve známé výšce nad vtláčecím vrtem.

Před zahájením testu protékala vtláčecím vrtem do horninového bloku odvdzušněná destilovaná voda. Měření bylo zahájeno v okamžiku, kdy se otevřením kohoutu začal do horninového bloku vtláčet roztok stopovače.

V průběhu testu byla zaznamenávána následující data: vodivost vody smíchané s roztokem soli na výstupu v jímacím vrtem, čas a teplota prostředí. Ke stanovení koncentrace

fluoresceinu byla použita speciální televizní kamera s modrým světlem rovněž umístěná v jímacím vrtu. Záběry z kamery byly ukládány v počítači v intervalu 1 minuty. Vodivost vody byla zaznamenávána automaticky v konduktometru v intervalu 1 minuty.

Po vyčerpání definované množství roztoku stopovače byl kohout opět uzavřen a byl zaznamenán čas. Dále protékala injekčním vrtem pouze odzdušněná voda z druhé Boyle-Marriottovy láhve. Test byl ukončen poté, co se všechny roztok stopovače z horninového bloku vyplavil a hodnota vodivosti měřené v jímacím vrtu se vrátila na počáteční hodnotu.

Na přepadu z jímacího vrtu byla v průběhu testu opakovaně pomocí odměrného válce a stopka kontrolována hodnota objemového průtoku vody horninovým blokem.

Obr. 14: Konfigurace stopovací zkoušky na bloku HR-2 (v pozadí peristaltická pumpa a vtláčecí vrt, uprostřed injekční vrt, v popředí jímací vrt s televizní kamerou a sondou konduktometru)



5.3 Vyhodnocení

5.3.1 Charakter stopovacích látek a kalibrace detekčních zařízení

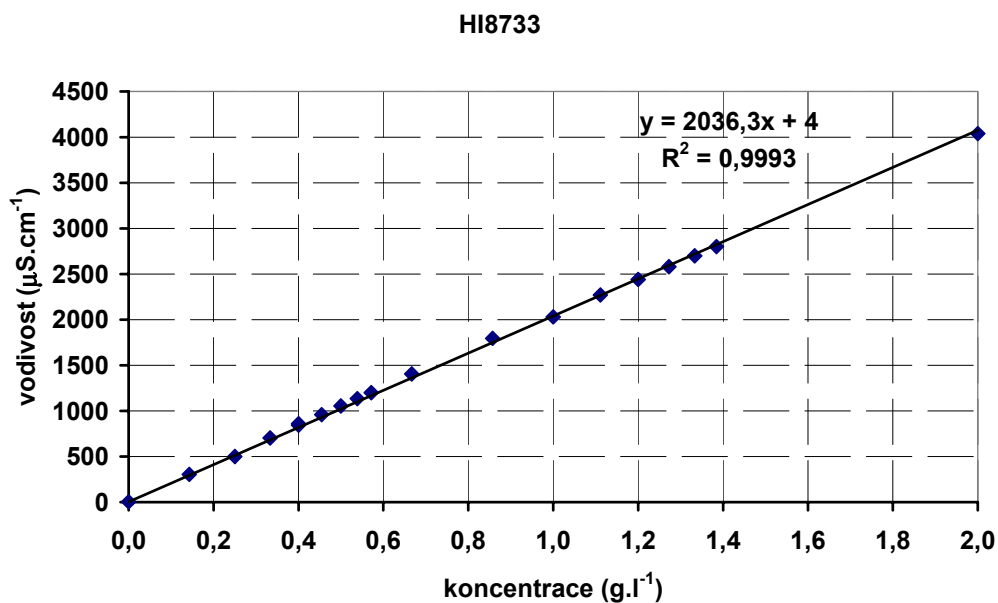
5.3.1.1 Chlorid sodný

Chlorid sodný se v přírodě mimo jiné vyskytuje jako sůl kamenná. Její molekulární hmotnost je 58,44 g/mol. Rozpustnost ve vodě dosahuje při 25°C hodnoty 360 g/l. Ve vodě se chlorid

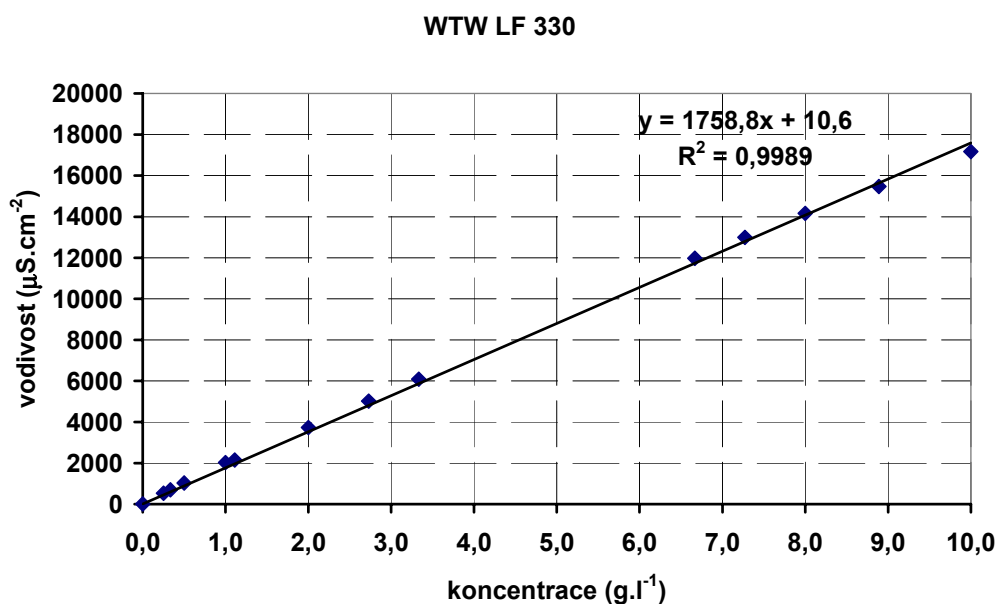
sodný rozdělí na ionty Na^+ a Cl^- . Oba ionty se ve vodě vyskytují přirozeně a v dobře stanovitelných koncentracích (Käss et al., 1998).

Kalibrace měření byla provedena za účelem zjištění vztahu mezi vodivostí a koncentrací roztoku soli. Pomocí pipety byl do destilované vody přidáván roztok o známé koncentraci. Současně byla měřena vodivost roztoku. Získaná data byla vykreslena v následujících grafech (Obr. 15, Obr. 16).

Obr. 15: Kalibrace konduktometru HI8733



Obr. 16: Kalibrace konduktometru WTW LF 330



Z grafů (Obr. 15, Obr. 16) vyplývá, že závislost mezi koncentrací c a vodivostí H je lineární a lze jí popsat rovnicemi (11) a (12):

$$H = 2036,3 \cdot c + 4 \quad (\text{konduktometr HI8733 použitý při testování volných puklin}) \quad (11)$$

$$H = 1758,8 \cdot c + 10,6 \quad (\text{konduktometru WTW LF 330 použitý při testování injektovaných puklin}) \quad (12).$$

5.3.1.2 Fluorescein

Stopovací látka známá pod jménem uranin má přesné chemické jméno 3-hydroxy-6-oxo-9-(2'-karboxyfenyl)-xanten sodný. Synonyma pro tuto látku jsou Spiro[isobenzofuran-1(3H),9'-[9H]xanthene]-3-one,3',6'-dihydroxy-, disodium, Fluoreszein Natrium, Sodiumfluorescein, Resorcinphthaleinsodium, Basacidgelb 226, Sicomet nebo Hydroxy-o-carboxy-phenyl-Fluoran-Natrium. Chemický vzorec má $C_{20}H_{10}Na_2O_5$. Molekulární hmotnost je 376,28 g/mol. Zhášecí maxima jsou při 491 nm (hlavní absorpce) a 322 nm (sekundární maximum). Fluorescenční maximum je při osvětlení s vlnovou délkou 512 nm. Specifické dekadické zhášení při 491 nm je $0,2001 \text{ l} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{mg}^{-1}$. Molární dekadické zhášení při 491 nm je $84,000 \text{ l} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1}$. Rozpustnost ve vodě při 20°C je vyšší než 600 g/l. Fluorescein je nerozpustný v benzenu, benzínu a etylacetátu a těžko rozpustný v propanolech, 1-butanolu, acetonu a etanolu (pouze 10 g/l). Difúzní konstanta je $1,9 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Fluorescein byl objeven roku 1871 A.v. Baeyerem, držitelem Nobelovy ceny za chemii roku 1905, tavením rezorcínu a anhydridu kyseliny ftalové v molekulárním poměru 2:1 při použití chloridu zinečnatého jako katalyzátoru. Fluorescein vytváří červené krystalky, které jsou ve vodě 20°C teplé rozpustné pouze do 0,05 g/l. Vodný roztok světélkuje velmi slabě. Fluorescein je dobře rozpustný v alkoholu a éteru. Na tom je založena jedna z obohacujících metod. Přidáním alkalické soli velmi vzrůstá jeho fluorescence a rozpustnost. Fluorescence je způsobena aniontem alkalické soli. V průběhu krystalizace tvoří tmavě červené podlouhlé krystaly, které nefluoreskují. Koncentrovaný roztok fluoresceinu je rovněž tmavě červený a nefluoreskuje. Fluorescence se objevuje až při silném naředění vodou, kdy roztok disociuje na sodné kationty a anionty fluoresceinu. Intenzita fluorescence silně závisí na koncentraci vodíkových iontů. Maximální fluorescence je dosaženo při hodnotách pH vyšších než 8,5. Při pH rovno 7 je intenzita fluorescence pouze 80% maximální hodnoty. V roztocích s nízkým pH intenzita klesá. Čím je prostředí kyselejší, tím je přítomno více modrozelených kationtů fluoresceinu, které fluoreskují pouze slabě. Kationt fluoresceinu má silné sorpční vlastnosti a je lipofilní, tzn. rozpouštědla mohou vytahovat kationt ze sorbentu. Konverze aniontu na kationt je vratná. Poté co se zvýší pH, se fluorescence vrátí na původní intenzitu. Fluorescein patří do skupiny barviv, jež lze charakterizovat nízkou stálostí. To je způsobeno citlivými reakcemi na jisté přírodní vlivy. Vratný vliv hodnoty pH byl popsán výše. Další vlivy jsou nevratné. Silná oxidační činidla, speciálně chemická činidla používaná k dezinfekci vody, fluorescein ničí. Oxid chloričitý ho ničí rychleji než chlor, oba ho ovšem ničí kompletně. Rovněž ozón degraduje fluorescein. Další oxidační činidla jako manganistany nebo chromany nejsou dost silné, aby ho zničily. Rovněž redukční činidla na něj nemají vliv. Rozpuštěný fluorescein dále ničí světlo. Hnědé sklo zpomaluje jeho rozklad. V bezbarvé skleněné lahvi je sluneční svit schopen zničit fluorescein během týdne. Předpokládá se, že na jílovcích, slínovcích a prachovcích se vyskytuje adsorpce fluoresceinu. Avšak testy vedly k výsledkům, že ho jílové minerály neadsorbují. Podle rozmanitých zkušeností je ve štěrkopiscích schopný putovat na velké vzdálenosti. Pouze u podzemních vod, jež jsou kyselé, stopovací zkoušky selhávají. Fluorescein zde přebírá formu kationtu, která nefluoreskuje a sorbuje se a proto nemůže být sledována (Käss et al., 1998).

Ke stopovacím zkouškám s fluoresceinem byla vyvinuta speciální kamera vybavená dvěma optickými filtry a zdroji světla umožňující detekci stopovače v reálném čase (Nakládal a Hanus, 2005). Při použití oranžového světla a filtru lze pozorovat jednotlivé objekty před kamerou. Při použití modrého světla definované vlnové délky 490 nm a oranžového filtru lze

kamerou sledovat pouze fluorescenci roztoku fluoresceinu. Černobílý televizní signál z kamery je veden do televizní karty nainstalované v PC.

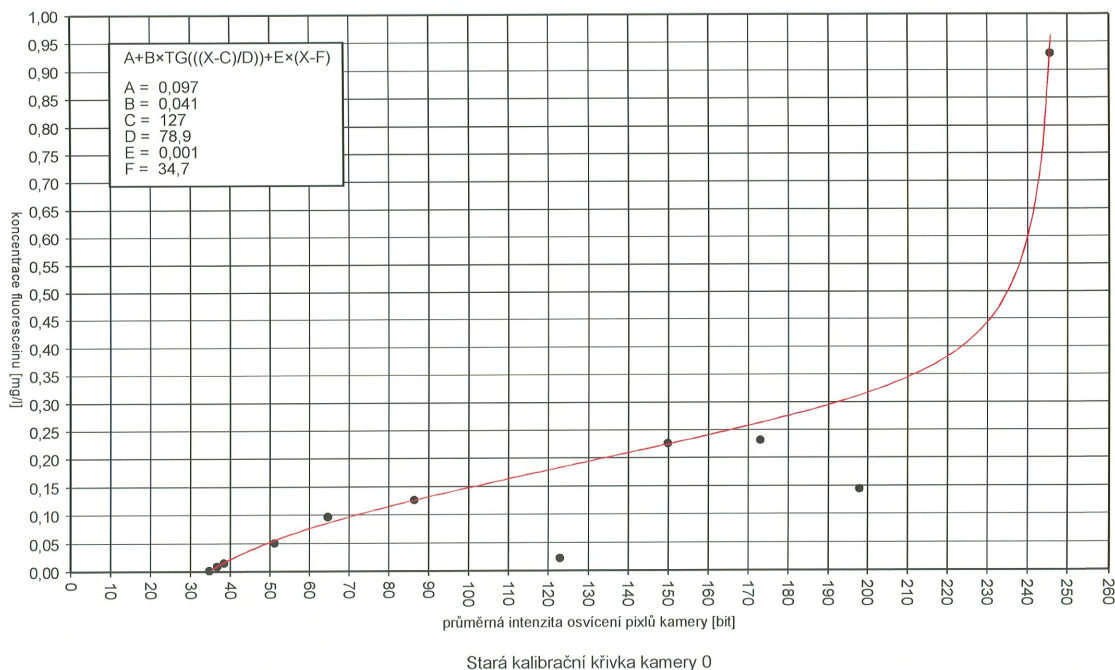
Vyvinuté zařízení je vhodné ke sledování postupu stopovacího činidla v kapalném prostředí tak, aby nebyly narušeny přirozené podmínky. Použité zařízení má několik výhod oproti současnému stavu techniky. Zařízení je možné přesně umístit do zájmové struktury a tím mít vizuální kontrolu nad stavem a ději v místě umístění kamery. Pomocí kamery lze vizuálně sledovat dynamiky pohybu stopovacího média, vyhodnocení laminárního resp. turbulentního proudění. Po kalibraci zařízení nejsou nutné další laboratorní rozbory. Nedochozí k degradaci stopovací látky způsobené přepravou do laboratoře (Vaněček et al., 2009).

Obr. 17. Televizní kamera umožňující detekci fluoresceinu



System použitý při testování volných puklin byl kalibrován při nastavení jasu na úrovni 220 a kontrastu 127 z 255. Kalibrace probíhala při neznámých koncentracích fluoresceinu, které byly následně stanoveny chemickofyzikální analýzou na Přírodovědecké fakultě UK (fluorimetrie). Koncentrace byly zvoleny s ohledem na osvětlení snímáče kamery. V průběhu analýzy fluoresceinu došlo ke ztrátě stopovače a proto byla kalibrační křivka na základě získaných analýz a následných kalibrací nových kamer aproximována. Výsledky kalibrace jsou zachyceny v následujícím grafu (Obr. 18).

Obr. 18: Kalibrace televizní kamery 0

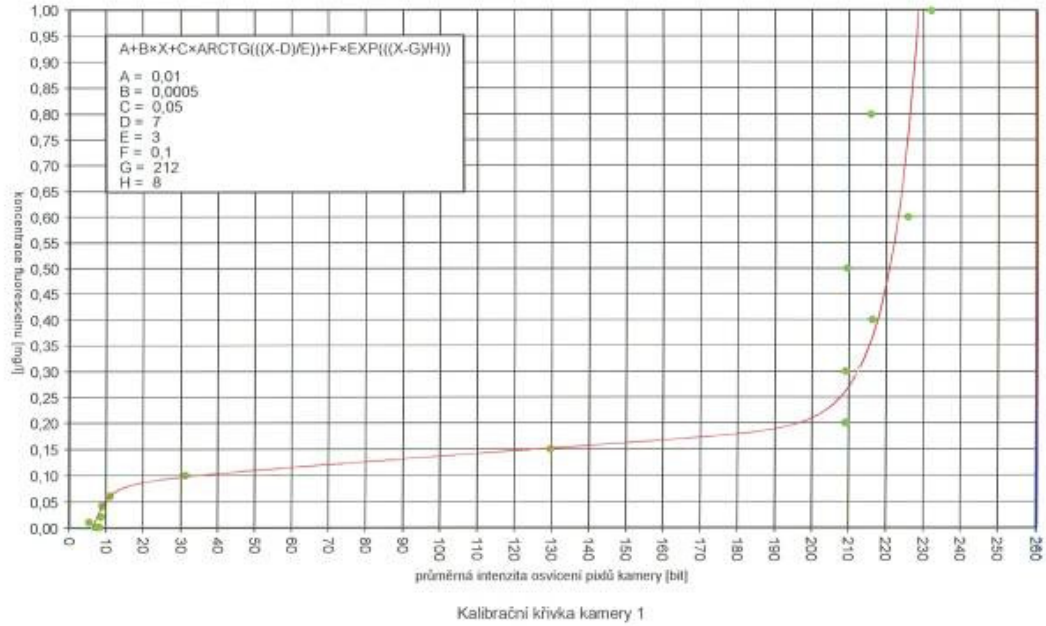


Z grafu (Obr. 18) je patrná závislost koncentrace $c \text{ mg.l}^{-1}$ na průměrné intenzitě osvětlení pixelů kamery x (13):

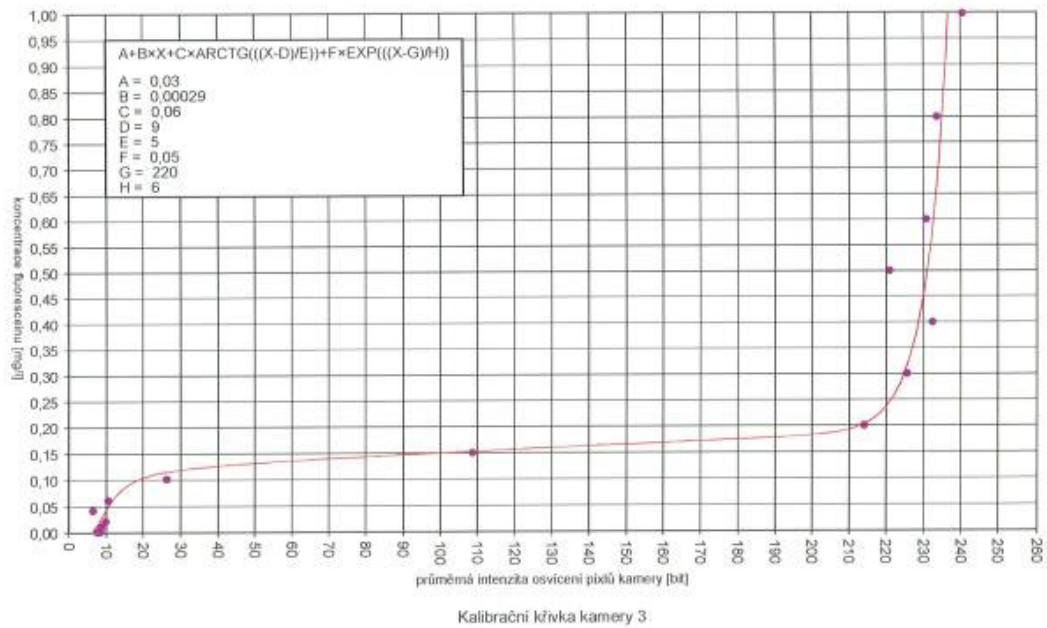
$$c = 0,097 + 0,041 \times \tan\left(\frac{x - 127}{78,9}\right) + 0,001 \times (x - 34,7) \quad (13)$$

Systém použitý při testování injektovaných puklin byl kalibrován při nastavení jasu na úrovni 220 a kontrastu 127 z 255. Kalibrace televizních kamer použitých při testování injektovaných puklin probíhala přidáváním definovaného objemu roztoku uraninu o známé koncentraci do destilované vody. K testům byly použity kamery 1 a 3. Jejich kalibrační křivky jsou vyobrazeny níže (Obr. 19, Obr. 20).

Obr. 19: Kalibrace televizní kamery 1



Obr. 20: Kalibrace televizní kamery 3



Z grafů (Obr. 19, Obr. 20) je patrná závislost koncentrace c mg.l^{-1} na průměrné intenzitě osvětlení pixelů kamery x (14) a (15):

$$c = 0,01 + 0,0005 \times x + 0,05 \times \arctan\left(\frac{x-7}{3}\right) + 0,1 \times e^{\frac{x-212}{8}} \quad (14)$$

$$c = 0,03 + 0,00029 \times x + 0,06 \times \arctan\left(\frac{x-9}{5}\right) + 0,05 \times e^{\frac{x-220}{6}} \quad (15)$$

u kamer 1 a 3.

5.3.2 Metodika vyhodnocení

5.3.2.1 Objemový průtok

Hydrodynamické testy byly vyhodnoceny pomocí rovnice stanovující objemový průtok q (16):

$$q = \frac{V}{t} \quad (16)$$

kde V odpovídá objemu protečeného média

a t času.

Do všech výsledků stanovení objemového průtoku byla zahrnuta korekce na konstantní laboratorní teplotu uvedená v kapitole 3.4.2, která umožňuje vzájemné porovnání výsledků.

Rozevření pukliny bylo vypočteno dosazením do Poiseuillova vzorce (17):

$$q = -\frac{d^3}{12 \cdot \mu} \cdot i \quad (17)$$

kde q odpovídá specifickému průtoku,

d rozevření pukliny,

μ dynamické viskozitě tekutiny

a i hydraulickému gradientu.

Specifický průtok puklinou q je definován jako průtok příčkou pukliny kolmou ke směru proudění v puklině. Jeho hodnota byla vypočtena dělením hodnoty objemového průtoku šířkou tělesa.

Dynamická viskozita tekutiny μ je pro vodu o teplotě 24°C rovna hodnotě $1,002 \cdot 10^{-3}$ Pa.s.

Hydraulický gradient i se stanoví rovnicí (18):

$$i = \frac{\delta h}{\delta l} \quad (18)$$

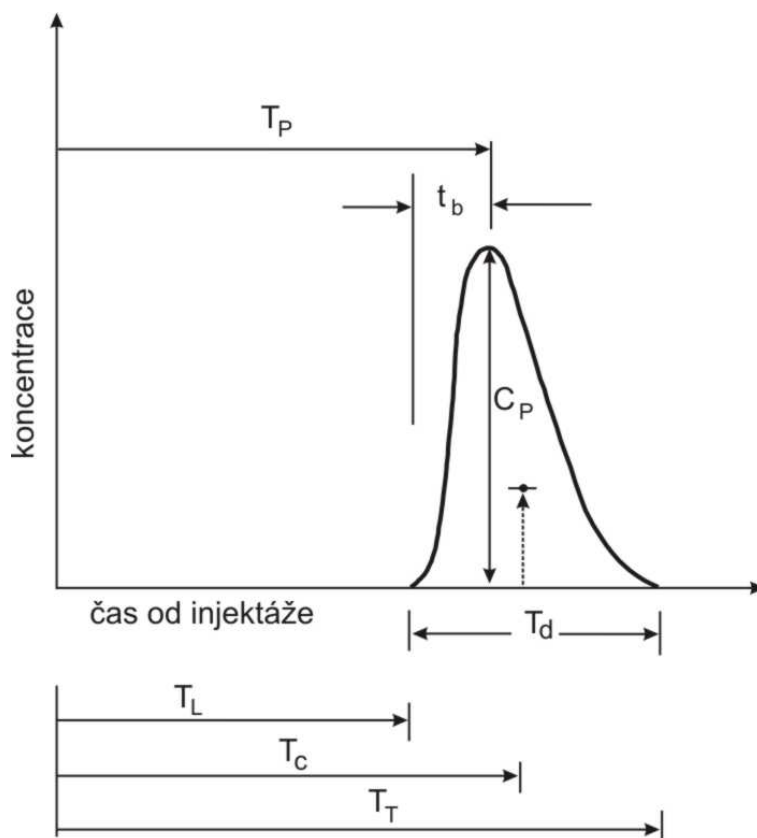
kde δh odpovídá nejkratší drenážní dráze vzorkem

a δl odpovídá rozdílu tlakových výšek hladin.

5.3.2.2 Průnikové křivky

Stopovací zkoušky, jejichž výsledky jsou diskutovány v této práci, byly vyhodnoceny programem Qtracer2, jehož tvůrcem je Field (2002). Po zadání vstupních informací do programu z tvarů průběhové křivky (Obr. 21) lze získat řadu parametrů, které charakterizují prostředí mezi místem injektáže a místem sledování stopovací zkoušky (Field, 2002).

Obr. 21: Průniková křivka stopovací zkoušky (zjednodušeno podle Fielda (2002) in Vojtěchová (2010)). Křivka vyjadřuje průběh koncentrace stopovací látky v čase na jednom sledovaném místě. V grafu je na časové ose naznačeno odečítání jednotlivých časových úseků: T_L je časový úsek od injektáže po první objevení stopovače v místě sledování, T_P je časový úsek po maximální koncentraci (C_P), t_b je čas od prvního objevení po maximální koncentraci, T_d je čas od prvního objevení stopovače po vyznění koncentrace, T_C definuje časový úsek po těžiště průnikové křivky a T_T je čas od injektáže po vyznění koncentrace



T_L značí „čas prvního objevení“, je to časový úsek od injektáže po první zvýšení koncentrace stopovače nad pozadí v místě vzorkování.

T_P značí „čas maximální koncentrace“, definuje časový úsek od injektáže po maximální koncentraci.

T_C značí „střední doba zdržení“, je to časový úsek po těžiště průnikové křivky, který se vypočte podle vztahu (19):

$$T_C = \frac{\int_0^{\infty} tC(t)Q(t)dt}{\int_0^{\infty} C(t)Q(t)dt} \quad (19)$$

kde C odpovídá koncentraci stopovače,
a Q vydatnosti vody.

T_T značí „čas od injeztáže po vyznění koncentrace“. Na rozdíl od předchozích je tento čas obtížné určit, protože koncentrace stopovače se po maximální koncentraci obvykle asymptoticky blíží pozadí a tento parametr je tak silně ovlivněn přesností měření stopovače nad úrovní pozadové koncentrace.

Přímá migrační vzdálenost x_s je vzdálenost mezi body injeztáže a sledování.

Maximální rychlost stopovače v_L se získá vydělením migrační vzdálenosti a času prvního objevení.

Střední rychlost stopovače v_C je rovna podílu migrační vzdálenosti x_s a střední doby zdržení T_C (20).

$$v_C = \frac{\int_0^{\infty} \frac{x_s}{t} C(t)Q(t)dt}{\int_0^{\infty} C(t)Q(t)dt} \quad (20)$$

Zasažený objem V je roven součinu průtoku vody a střední doby zdržení T_C stopovače v systému (21). Jedná se přirozeně jen o tu část objemu kanálu, která byla zasažena mrakem stopovače.

$$V = \int_0^{\bar{t}} Qdt \quad (21)$$

Dělením zasaženého objemu V vzdáleností x_s a šířkou pukliny z_s získáme průměrný dosah stopovače v puklině y_s (22).

$$y_s = \frac{V}{x_s \cdot z_s} \quad (22)$$

Pecletovo číslo P_e : se stanoví podle vztahu (23):

$$P_e = \frac{\bar{v}x_s}{Dx_s} \quad (23)$$

Pecletovo číslo vyjadřuje míru relativního příspěvku mechanické disperze a difuze na transport rozpuštěné látky ve srovnání s transportem v rámci advekce.

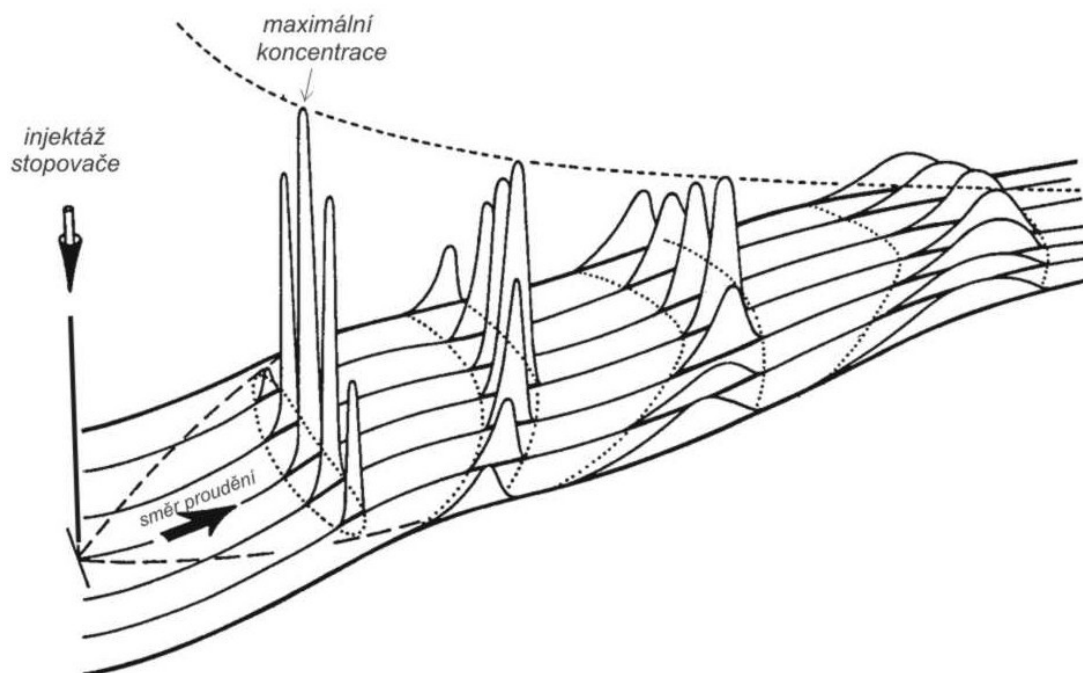
$P_e < 0,4$ při transportu převládá difuze a disperze.

$P_e 0,4 - 6,0$ přechod difuze a advekce.

$P_e > 6,0$ při transportu převládá advekce stopovače.

Podélná a příčná disperze (Obr. 22) jsou procesy, které ovlivňují rozptyl stopovače, přičemž vliv příčné disperze lze zanedbat. Podélná disperze je definována koeficientem disperze, který je přímo úměrný součinu rychlosti a konstanty označované jako podélná disperzivita, která koreluje s velikostí prvků tvořících prostupované prostředí.

Obr. 22: Rozptyl stopovače ve směru proudění (Field (2002) in Vojtěchová (2010))



Koeficient disperze D_L je definován vztahem (24):

$$D_L = \sigma_t^2 \times \frac{v^3}{2.x_s} \quad (24)$$

kde

$$\sigma_t^2 = \frac{\int_0^{\infty} (t - T_c)^2 C(t) Q(t) dt}{\int_0^{\infty} C(t) Q(t) dt} \quad (25)$$

σ_t je standardní odchylka pro střední dobu zdržení T_c (25).

Podélná disperzivita (m) odpovídá podílu koeficientu disperze D_L a střední rychlosti stopovače v_c .

Zachycené množství stopovače M_o je pro každé vzorkované místo dáno rovnicí (26):

$$M_0 = \int_0^{\infty} C(t)Q(t)dt \quad (26)$$

Celkové zachycené množství M_T je součtem zachycených množství stopovače ze všech sledovaných míst (27).

$$M_T = \sum_{i=1}^n M_{0_i} \quad (27)$$

Návratnost stopovače je podíl celkového zachyceného množství stopovače a množství, které bylo do systému injektováno. V případě zachycení veškerého injektovaného stopovače je návratnost 100%, ale v reálných případech bývá tato hodnota nižší. Nízké hodnoty návratnosti stopovače indikují buď nekonzervativní chování stopovače, nebo skutečnost, že stopovač proudil i mimo sledované profily.

5.4 Výsledky a diskuze

5.4.1 Proudění ve volných puklinách

5.4.1.1 Objemový průtok přirozenou puklinou

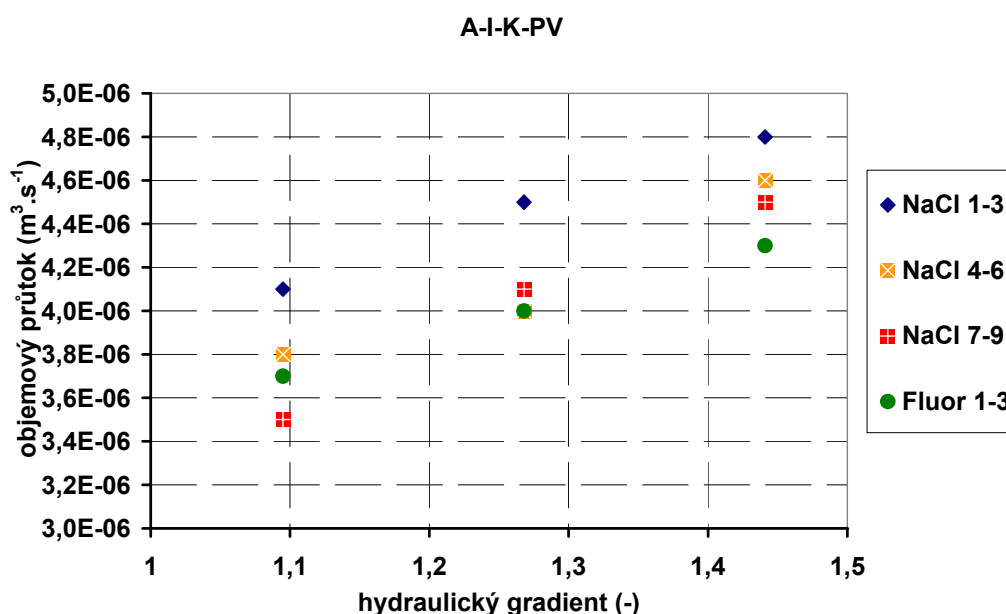
Objemový průtok volnou puklinou horninového bloku A-I-K-PV byl stanoven z 12 měření, které probíhaly při 3 rozdílných hydraulických gradientech. Výsledky jsou uvedeny v následující tabulce (Tab. 7):

Tab. 7: Objemový průtok a rozevření pukliny bloku A-I-K-PV

Označení testu	Hydraulický gradient (-)	Objemový průtok při laboratorní teplotě ($m^3 \cdot s^{-1}$)	Objemový průtok přepočtený na $10^\circ C$ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	Rozevření pukliny (m)
NaCl1	1,095	$5,6 \times 10^{-6}$	$4,1 \times 10^{-6}$	0,00131
NaCl2	1,268	$6,2 \times 10^{-6}$	$4,5 \times 10^{-6}$	0,00129
NaCl3	1,441	$6,7 \times 10^{-6}$	$4,8 \times 10^{-6}$	0,00126
NaCl4	1,095	$5,2 \times 10^{-6}$	$3,8 \times 10^{-6}$	0,00128
NaCl5	1,268	$5,6 \times 10^{-6}$	$4,0 \times 10^{-6}$	0,00124
NaCl6	1,441	$6,5 \times 10^{-6}$	$4,6 \times 10^{-6}$	0,00124
NaCl7	1,095	$4,9 \times 10^{-6}$	$3,5 \times 10^{-6}$	0,00125
NaCl8	1,268	$5,7 \times 10^{-6}$	$4,1 \times 10^{-6}$	0,00125
NaCl9	1,441	$6,3 \times 10^{-6}$	$4,5 \times 10^{-6}$	0,00123
Fluor1	1,095	$5,0 \times 10^{-6}$	$3,7 \times 10^{-6}$	0,00126
Fluor2	1,268	$5,6 \times 10^{-6}$	$4,0 \times 10^{-6}$	0,00123
Fluor3	1,441	$6,0 \times 10^{-6}$	$4,3 \times 10^{-6}$	0,00121

Po vynesení hodnot z tabulky (Tab. 7) do grafu (Obr. 23), kde je na vodorovné ose hydraulický gradient a na svislé ose objemový průtok, lze konstatovat, že je jejich závislost lineární. Proudění je laminární, odpovídá Darcymu zákonu. Rozptyl hodnot je pravděpodobně způsoben nepřesnostmi způsobenými při měření.

Obr. 23: Závislost objemového průtoku na hydraulickém gradientu na bloku A-I-K-PV



5.4.1.2 Objemový průtok uměle vyrobenými puklinami

Objemové průtoky volnými uměle vytvořenými puklinami horninovými bloky HR-1 a HR-2 byly stanoveny z 20 měření, které probíhaly při rozdílných hydraulických gradientech. Výsledky jsou uvedeny v následující tabulce (Tab. 8):

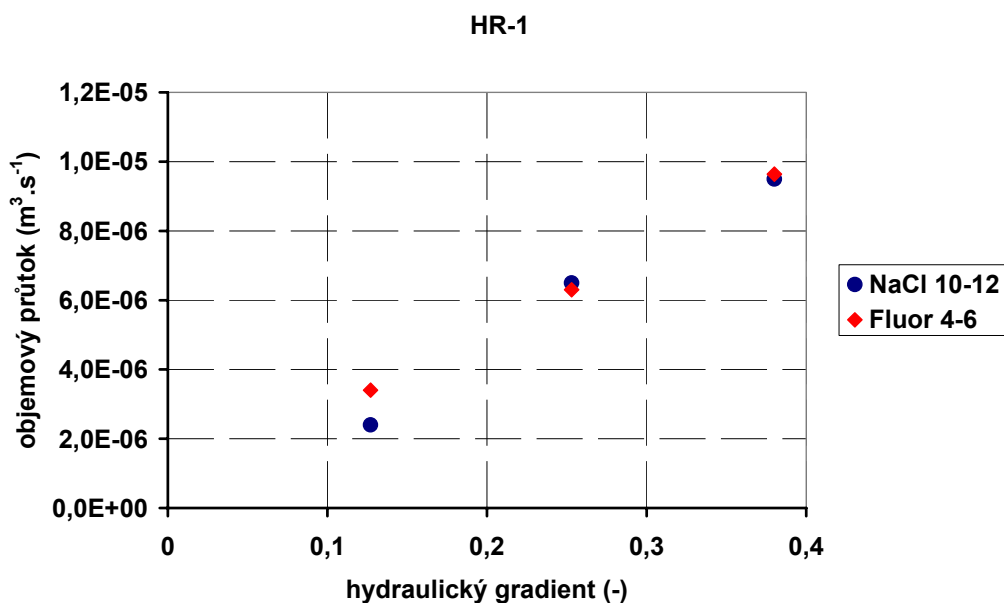
Tab. 8: Objemový průtok a rozevření puklin bloků HR-1 a HR-2

Označení vzorku	Označení testu	Hydraulický gradient (-)	Objemový průtok při laboratorní teplotě (m ³ .s ⁻¹)	Objemový průtok přepočtený na 10°C (m ³ .s ⁻¹)	Rozevření pukliny (m)
HR-1	NaCl10	0,127	3,4×10 ⁻⁶	2,4×10 ⁻⁶	0,0052
	NaCl11	0,253	9,2×10 ⁻⁶	6,5×10 ⁻⁶	0,0057
	NaCl12	0,380	1,4×10 ⁻⁵	9,5×10 ⁻⁶	0,0057
	Fluor4	0,127	4,9×10 ⁻⁶	3,4×10 ⁻⁶	0,0058
	Fluor5	0,253	9,0×10 ⁻⁶	6,3×10 ⁻⁶	0,0056
	Fluor6	0,380	1,4×10 ⁻⁵	9,6×10 ⁻⁶	0,0057

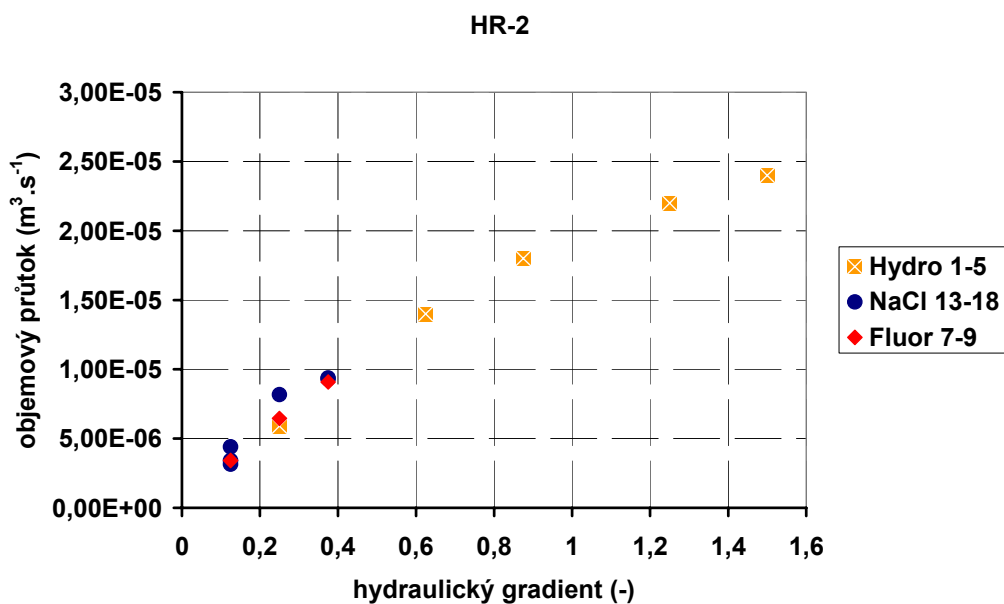
Označení vzorku	Označení testu	Hydraulický gradient (-)	Objemový průtok při laboratorní teplotě ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	Objemový průtok přepočtený na 10°C ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	Rozevření pukliny (m)
HR-2	Hydro1	0,25	$8,3 \times 10^{-6}$	$5,9 \times 10^{-6}$	0,0055
	Hydro2	0,625	$2,0 \times 10^{-5}$	$1,4 \times 10^{-5}$	0,0054
	Hydro3	0,875	$2,5 \times 10^{-5}$	$1,8 \times 10^{-5}$	0,0053
	Hydro4	1,25	$3,1 \times 10^{-5}$	$2,2 \times 10^{-5}$	0,005
	Hydro5	1,5	$3,5 \times 10^{-5}$	$2,4 \times 10^{-5}$	0,0049
	NaCl13	0,25	$1,2 \times 10^{-5}$	$8,2 \times 10^{-6}$	0,0062
	NaCl14	0,125	$4,5 \times 10^{-6}$	$3,2 \times 10^{-6}$	0,0057
	NaCl15	0,375	$1,3 \times 10^{-5}$	$9,3 \times 10^{-6}$	0,0057
	NaCl16	0,125	$5,0 \times 10^{-6}$	$3,4 \times 10^{-6}$	0,0058
	NaCl17	0,375	$1,4 \times 10^{-5}$	$9,4 \times 10^{-6}$	0,0057
	NaCl18	0,125	$6,6 \times 10^{-6}$	$4,4 \times 10^{-6}$	0,0063
	Fluor7	0,125	$5,0 \times 10^{-6}$	$3,4 \times 10^{-6}$	0,0058
	Fluor8	0,25	$9,4 \times 10^{-6}$	$6,4 \times 10^{-6}$	0,0057
	Fluor9	0,375	$1,3 \times 10^{-5}$	$9,1 \times 10^{-6}$	0,0056

Vypočtené hodnoty rozevření pukliny jsou vyšší než hodnoty reálné pohybující se okolo 0,0005 m. To může být způsobeno nelinearitou proudění vody v celé šířce tělesa. Po vynesení hodnot do grafu (Obr. 24), kde je na vodorovné ose hydraulický gradient a na svislé ose objemový průtok, lze konstatovat, že je jejich závislost lineární. Proudění je laminární, odpovídá Darcymu zákonu. Rozptyl hodnot je pravděpodobně způsoben nepřesnostmi způsobenými při měření.

Obr. 24: Závislost objemového průtoku na hydraulickém gradientu na bloku HR-1



Obr. 25: Závislost objemového průtoku na hydraulickém gradientu na bloku HR-2



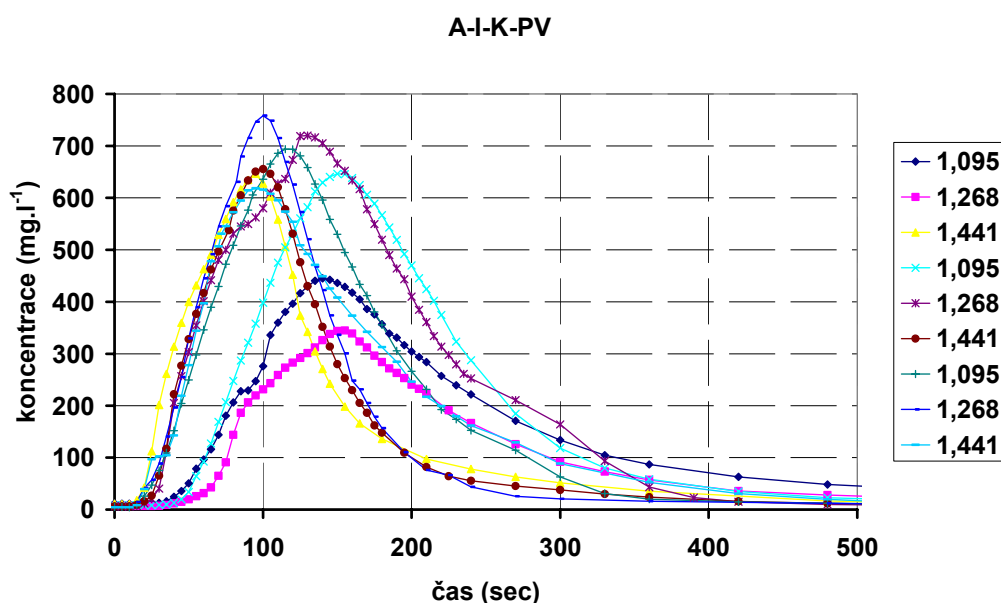
V předchozím grafu (Obr. 25) jsou barevně odlišeny testy stanovující objemový průtok (Hydro 1-5 žluté čtverce) a kontrolní měření objemových průtoků při stopovacích zkouškách (NaCl 13-18 modré kruhy, Fluor 7-9 červené kosočtverce). Z grafu je patrné, že již od hydraulického gradientu 0,625 neroste objemový průtok lineárně. To lze vysvětlit změnou laminárního proudění na turbulentní, při kterém již Darcyho zákon neplatí ve své lineární formě. Následující stopovací zkoušky byly proto realizovány při gradientech nižších (do 0,375).

5.4.1.3 Průnikové křivky přirozenou puklinou

Hlavním výstupem stopovacích zkoušek byly průnikové křivky. Jejich průběh znázorňovaly změny vodivosti roztoku zaznamenané v průběhu testu, které byly přepočteny na koncentrace stopovací látky chloridu sodného. Podle jejich tvaru lze posuzovat vlastnosti prostředí jako je např. disperze částic. Čím je křivka pozvolnější, tím je rozptýlení (neboli disperze) částic stopovače větší.

Na bloku A-I-K-PV s přirozenou puklinou bylo vyhodnoceno 9 stopovacích zkoušek s chloridem sodným při 3 rozdílných konstantních hydraulických gradientech. Průnikové křivky jsou zachyceny na následujícím obrázku (Obr. 26).

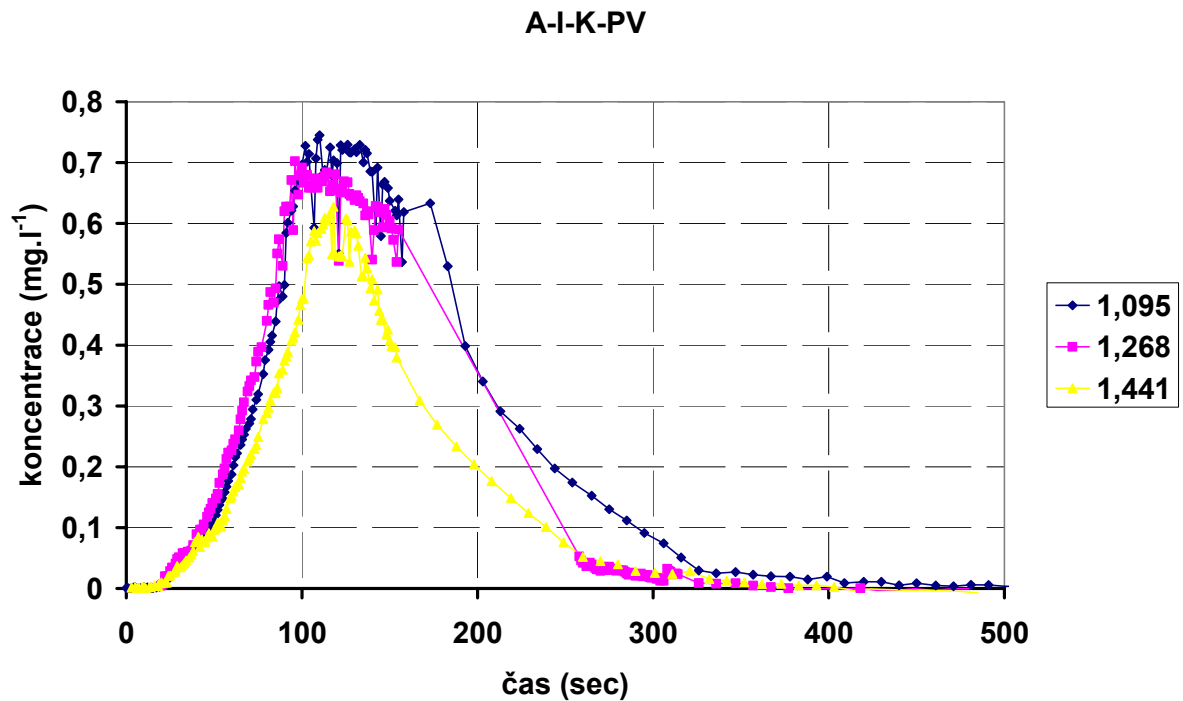
Obr. 26: Průnikové křivky chloridu sodného na bloku A-I-K-PV



Po zanedbání prvních dvou testů (modré kosočtverce $i=1,095$ a růžové čtverce $i=1,268$), kdy byly v konduktometru slabé baterie a výsledky jsou proto zkresleny a nemají fyzikální význam, lze říct, že ostatní křivky charakterizují předpokládané chování proudění vody puklinou. Relativně strmý nárůst a pokles vodivosti indikují malý rozptýl částic stopovače v puklině. Po dočerpání dochází k vymývání stopovače z pukliny. V tabulkách (Tab. 9, Tab. 10) byly tyto dva testy označeny červenou barvou.

Na bloku A-I-K-PV s přirozenou puklinou byly vyhodnoceny 3 stopovací zkoušky s fluoresceinem při 3 rozdílných konstantních hydraulických gradientech. Průnikové křivky jsou zachyceny na následujícím obrázku (Obr. 27). Sekvence černobílých (grayscale) obrázků ve formátu BMP (windows bitmap) získaných z jednotlivých testů byla seřazena vyvinutým počítačovým programem, který vypočítal průměrné ozáření snímače kamery. Tyto hodnoty byly na základě kalibrační křivky přepočítány na konkrétní koncentrace roztoku fluoresceinu.

Obr. 27: Průnikové křivky fluoresceinu na bloku A-I-K-PV



Výsledky stopovacích zkoušek vyhodnocených pomocí programu Qtracer2 na bloku A-I-K-PV jsou uvedeny v následujících tabulkách (Tab. 9) a (Tab. 10).

Tab. 9: Výsledky stopovacích zkoušek na bloku A-I-K-PV

Označení testu	Hydraulický gradient (-)	Čas prvního objevení (min:sec)	Čas maximální koncentrace (min:sec)	Střední doba zdržení (min:sec)	Střední rychlost (m.hod ⁻¹)	Maximální rychlost (m.hod ⁻¹)
NaCl1	1,095	0:25	2:20	1:26	14,49	49,97
NaCl4	1,095	0:30	2:30	1:31	13,63	41,64
NaCl7	1,095	0:15	1:55	1:02	20,11	83,28
NaCl2	1,268	0:30	1:35	1:32	13,61	41,64
NaCl5	1,268	0:15	2:10	1:04	19,43	83,28
NaCl8	1,268	0:15	1:40	0:56	22,29	83,28
NaCl3	1,441	0:15	1:35	0:46	26,88	83,28
NaCl6	1,441	0:15	1:40	0:54	23,28	83,28
NaCl9	1,441	0:15	1:35	0:52	24,04	83,28
Fluor1	1,095	0:23	1:50	1:14	16,78	54,31
Fluor2	1,268	0:20	1:36	1:08	18,39	62,46
Fluor3	1,441	0:18	1:58	1:18	15,95	69,40

Tab. 10: Výsledky stopovacích zkoušek na bloku A-I-K-PV (pokračování)

Označení testu	Hydraulický gradient (-)	Koeficient disperze ($\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$)	Podélná disperze (m)	Pecletovo číslo (-)	Zasažený objem (m^3)	Dosah v puklině při rozevření 0,001 m (m)	Návratnost (%)
NaCl1	1,095	$6,44 \times 10^{-5}$	0,016	22	$4,9 \times 10^{-4}$	1,412	94
NaCl4	1,095	$5,54 \times 10^{-5}$	0,014	24	$4,7 \times 10^{-4}$	1,354	104
NaCl7	1,095	$1,54 \times 10^{-4}$	0,027	13	$3,1 \times 10^{-4}$	0,893	96
NaCl2	1,268	$1,00 \times 10^{-4}$	0,026	13	$5,7 \times 10^{-4}$	1,643	74
NaCl5	1,268	$1,90 \times 10^{-4}$	0,035	10	$3,6 \times 10^{-4}$	1,037	136
NaCl8	1,268	$1,60 \times 10^{-4}$	0,025	14	$3,2 \times 10^{-4}$	0,922	88
NaCl3	1,441	$2,70 \times 10^{-4}$	0,036	10	$3,1 \times 10^{-4}$	0,893	95
NaCl6	1,441	$1,50 \times 10^{-4}$	0,023	15	$3,5 \times 10^{-4}$	1,009	92
NaCl9	1,441	$1,50 \times 10^{-4}$	0,022	15	$3,3 \times 10^{-4}$	0,951	121
Fluor1	1,095	$7,40 \times 10^{-5}$	0,016	22	$3,7 \times 10^{-4}$	1,066	35
Fluor2	1,268	$8,80 \times 10^{-5}$	0,017	20	$3,7 \times 10^{-4}$	1,066	37
Fluor3	1,441	$8,20 \times 10^{-5}$	0,002	19	$4,7 \times 10^{-4}$	1,354	27

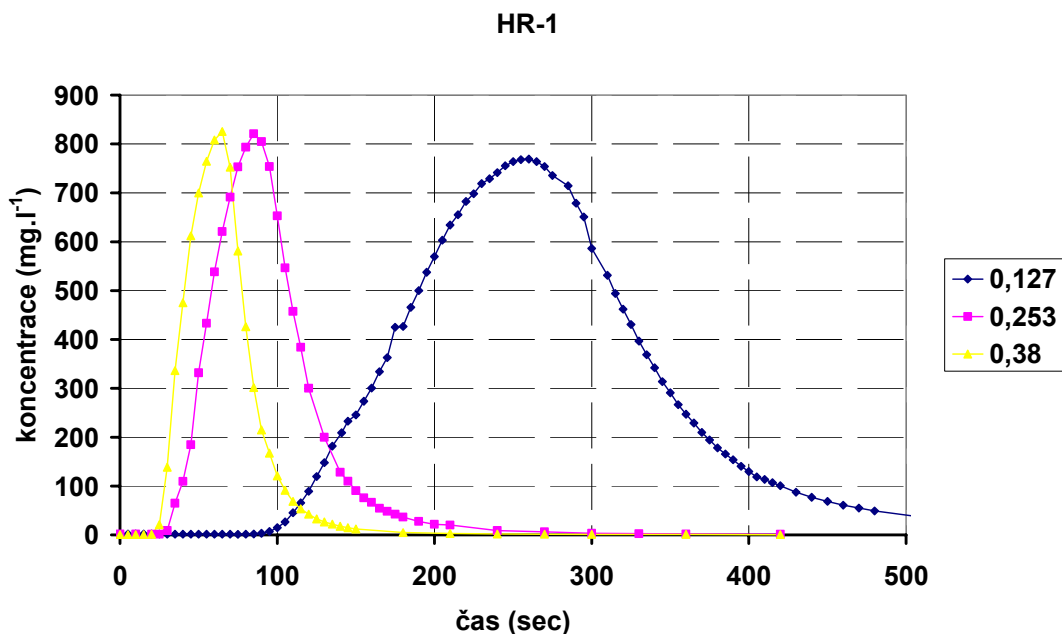
Z grafů (Obr. 26, Obr. 27) a tabulek (Tab. 9, Tab. 10) vyplývá, že průnikové křivky, stejně jako časy prvního objevení a maximální koncentrace, mají podobný tvar nebo hodnotu. Rozdíly hydraulického gradientu byly pravděpodobně tak nepatrné a rychlost celého testu tak krátká, že se pomocí používaného konduktometru a intervalu odečítání hodnot (5 sekund) nepodařilo zachytit drobné rozdíly průnikových křivek a jednotlivých časů. V případě stopovacích zkoušek s fluoresceinem se čas prvního objevení stopovače snižoval se zvyšujícím se hydraulickým gradientem, rozdíl je ale pouze 2-3 vteřiny. Střední rychlost proudění se pohybovala mezi $13,63 \text{ m} \cdot \text{hod}^{-1}$ a $26,88 \text{ m} \cdot \text{hod}^{-1}$, maximální mezi $41,64 \text{ m} \cdot \text{hod}^{-1}$ a $83,28 \text{ m} \cdot \text{hod}^{-1}$. Koeficient disperze nabýval hodnot mezi $5,54 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ a $2,70 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Pecletovo číslo indikovalo převládající advekční transport stopovačů. Zasažený objem byl mezi $4,7 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ a $3,1 \times 10^{-4} \text{ m}^3$. Hodnoty dosahu v puklině, vypočtené z objemu zasaženého stopovačem, vzdáleností a průměrné šířky pukliny, jsou vyšší než rozměry bloku. To je pravděpodobně způsobeno tím, že uvnitř bloku je rozevření pukliny větší než 1,0 mm, které bylo měřeno na stěně bloku. Návratnost stopovače NaCl se pohybuje okolo 100%. Vyšší návratnost je pravděpodobně způsobena míšením vody v jímací nádobě a jiným umístěním konduktometru. Nízká návratnost fluoresceinu je pravděpodobně způsobena chybnou kalibrací kamer.

5.4.1.4 Průnikové křivky umělými puklinami

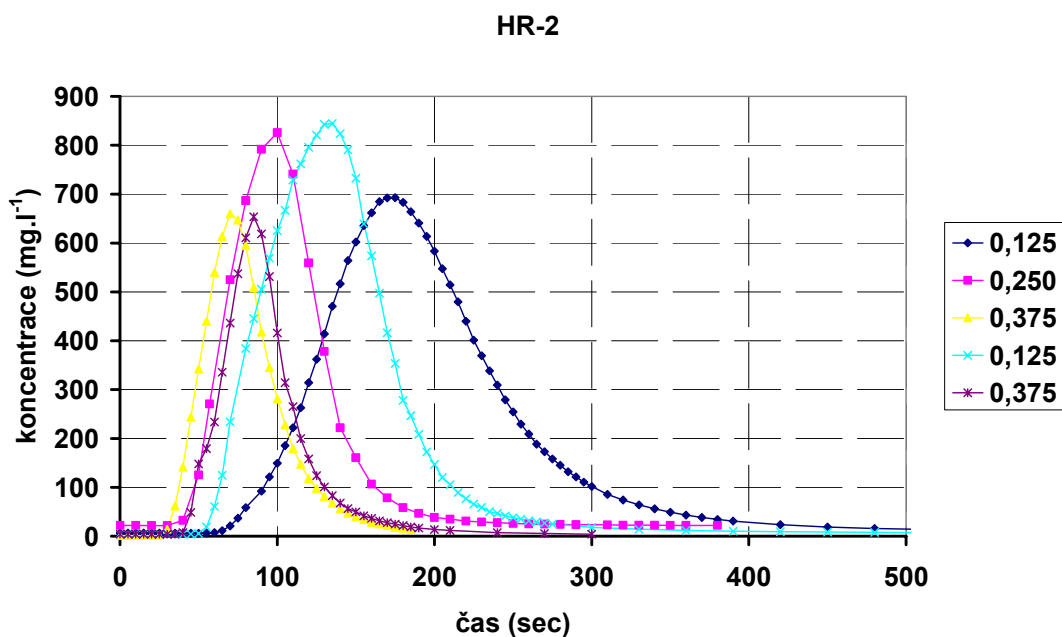
Na blocích HR-1 a HR-2 s umělými puklinami bylo vyhodnoceno 8 stopovacích zkoušek s chloridem sodným a 6 stopovacích zkoušek s fluoresceinem při 3 rozdílných konstantních hydraulických gradientech. Průnikové křivky NaCl jsou vyobrazeny v grafech (Obr. 28, Obr. 29). Průnikové křivky fluoresceinu jsou zachyceny v grafech (Obr. 30, Obr. 31). Výsledky

stopovacích zkoušek jsou uvedeny v následujících tabulkách (Tab. 11, Tab. 12, Tab. 13, Tab. 14). Průnikové křivky na HR-1 (Obr. 28) vykazují trend zvyšování hodnoty dosaženého vrcholu vodivosti a zúžení tohoto vrcholu v závislosti na zvyšujícím se hydraulickém gradientu. To vypovídá o zrychlení proudění puklinou a zmenšení ředění roztoku stopovače vodou.

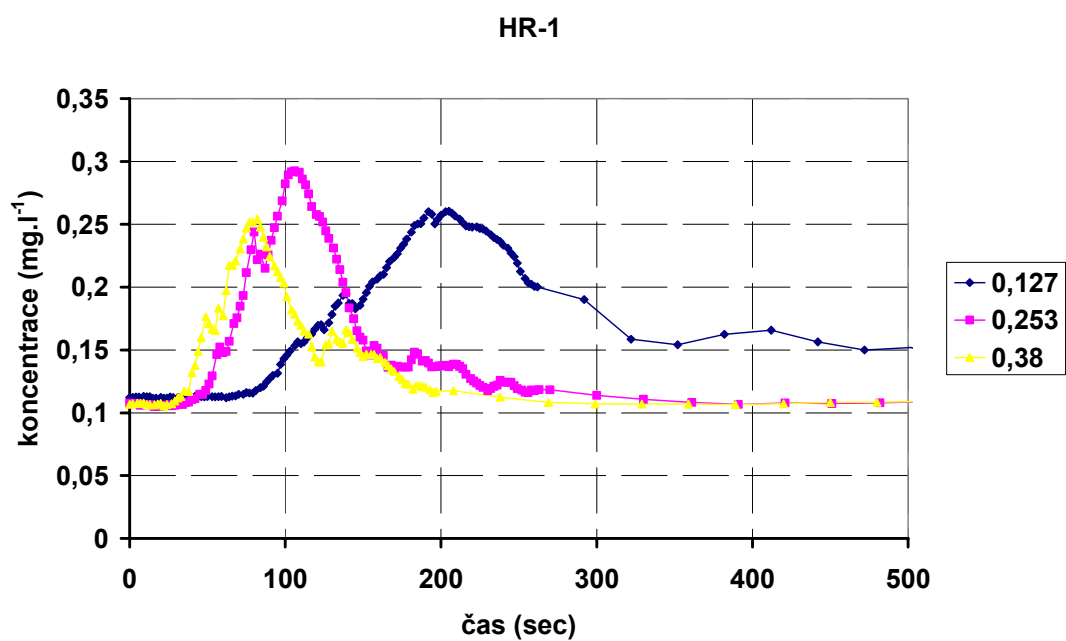
Obr. 28: Průnikové křivky chloridu sodného na bloku HR-1



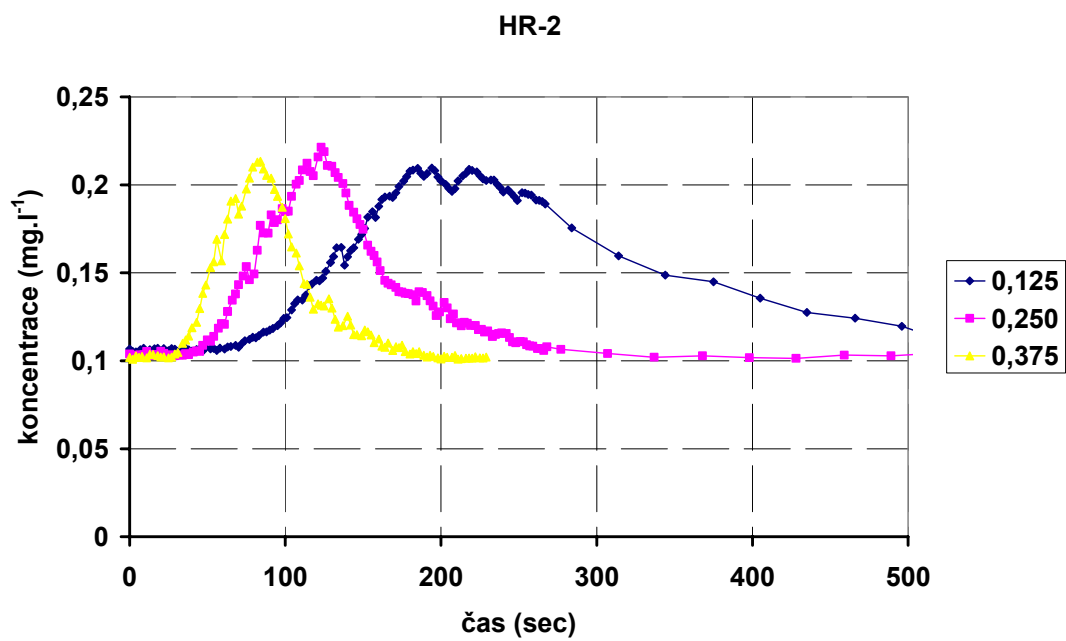
Obr. 29: Průnikové křivky chloridu sodného na bloku HR-2



Obr. 30: Průnikové křivky fluoresceinu na bloku HR-1



Obr. 31: Průnikové křivky fluoresceinu na bloku HR-2



Tab. 11 Výsledky stopovacích zkoušek na bloku HR-1

Označení testu	Hydraulic ký gradient (-)	Čas prvního objevení (min:sec)	Čas maximální koncentrace (min:sec)	Střední doba zdržení (min:sec)	Střední rychlost (m.hod ⁻¹)	Maximální rychlost (m.hod ⁻¹)
NaCl10	0,127	1:25	4:20	2:51	16,64	33,48
NaCl11	0,253	0:30	1:25	0:55	51,76	94,85
NaCl12	0,380	0:20	1:05	0:39	72,67	142,27
Fluor4	0,127	1:02	3:25	4:58	12,31	45,89
Fluor5	0,253	0:36	1:46	1:15	37,87	79,04
Fluor6	0,380	0:27	1:22	1:44	34,58	105,39

Tab. 12: Výsledky stopovacích zkoušek na bloku HR-1 (pokračování)

Označení testu	Hydraulic ký gradient (-)	Koeficient disperze (m ² .s ⁻¹)	Podélná disperze (m)	Pecletovo číslo (-)	Zasažený objem (m ³)	Dosah v puklině při rozevření 0,0005 m (m)	Návratnost (%)
NaCl10	0,127	1,60×10 ⁻⁴	0,036	22	5,7×10 ⁻⁴	1,442	94
NaCl11	0,253	5,50×10 ⁻⁴	0,038	21	5,0×10 ⁻⁴	1,265	99
NaCl12	0,380	1,10×10 ⁻³	0,055	14	5,3×10 ⁻⁴	1,341	104
Fluor4	0,127	2,55×10 ⁻⁴	0,074	11	1,44×10 ⁻³	3,644	11
Fluor5	0,253	2,34×10 ⁻⁴	0,022	36	6,76×10 ⁻⁴	1,711	9
Fluor6	0,380	5,12×10 ⁻⁴	0,053	15	1,46×10 ⁻³	3,694	9

Tab. 13 Výsledky stopovacích zkoušek na bloku HR-2

Označení testu	Hydraulický gradient (-)	Čas prvního objevení (min:sec)	Čas maximální koncentrace (min:sec)	Střední doba zdržení (min:sec)	Střední rychlost (m.hod ⁻¹)	Maximální rychlost (m.hod ⁻¹)
NaCl16	0,125	1:00	2:55	3:22	18,55	47,99
NaCl18	0,125	0:50	2:15	1:26	33,52	57,59
NaCl13	0,25	0:40	1:40	1:06	43,90	71,99
NaCl15	0,375	0:25	1:10	0:49	58,28	115,19
NaCl17	0,375	0:40	1:25	1:03	45,51	71,99
Fluor7	0,125	1:14	3:14	2:12	21,84	38,91
Fluor8	0,25	0:43	2:03	2:13	28,06	66,97
Fluor9	0,375	0:29	1:24	1:29	43,12	99,30

Tab. 14: Výsledky stopovacích zkoušek na bloku HR-2 (pokračování)

Označení testu	Hydraulický gradient (-)	Koeficient disperze (m ² .s ⁻¹)	Podélná disperze (m)	Pecletovo číslo (-)	Zasažený objem (m ³)	Dosah v puklině při rozevření 0,0005 m (m)	Návratnost (%)
NaCl16	0,125	2,00×10 ⁻⁴	0,039	21	1,01×10 ⁻³	2,525	88
NaCl18	0,125	4,00×10 ⁻⁴	0,042	19	5,70×10 ⁻⁴	1,425	105
NaCl13	0,25	4,40×10 ⁻⁴	0,036	22	6,20×10 ⁻⁴	1,550	102
NaCl15	0,375	3,70×10 ⁻⁴	0,023	35	6,60×10 ⁻⁴	1,650	95
NaCl17	0,375	2,00×10 ⁻⁴	0,016	50	8,80×10 ⁻⁴	2,200	88
Fluor7	0,125	1,83×10 ⁻⁴	0,030	27	6,59×10 ⁻⁴	1,648	7
Fluor8	0,25	4,23×10 ⁻⁴	0,054	15	1,23×10 ⁻³	3,075	6
Fluor9	0,375	5,19×10 ⁻⁴	0,043	19	1,17×10 ⁻³	2,925	6

Z tabulek (Tab. 11, Tab. 12, Tab. 13, Tab. 14) vyplývá, že se čas prvního objevení a maximální koncentrace snižuje se zvyšujícím se hydraulickým gradientem. Střední rychlost proudění se pohybovala od 16,64 m.hod⁻¹ do 72,67 m.hod⁻¹ (HR-1) a od 18,55 m.hod⁻¹ do 58,28 m.hod⁻¹ (HR-2). Maximální rychlost proudění byla mezi 33,48 m.hod⁻¹ a 142,27 m.hod⁻¹ (HR-1) a mezi 38,91 m.hod⁻¹ a 115,19 m.hod⁻¹ (HR-2). Koeficient disperze nabýval hodnot mezi 1,60×10⁻⁴ m².s⁻¹ a 1,60×10⁻³ m².s⁻¹ (HR-1) a mezi 1,83×10⁻⁴ m².s⁻¹ a 5,19×10⁻⁴ m².s⁻¹ (HR-2). Pecletovo číslo indikovalo převládající advekční transport stopovačů. Zasažený objem byl mezi 5,70×10⁻⁴ m³ a 1,44×10⁻³ m³ (HR-1) a mezi 5,70×10⁻⁴ m³ a 1,01×10⁻³ m³ (HR-2). Hodnoty dosahu v puklině, vypočtené z objemu zasaženého stopovačem, vzdáleností a

průměrné šířky pukliny, jsou vyšší než rozměry bloku. To je pravděpodobně způsobeno tím, že uvnitř bloku je rozevření pukliny větší než 0,5 mm, které bylo měřeno v jímacím vrtu v bloku. Návratnost stopovače NaCl se pohybuje okolo 100%. Nízká návratnost fluoresceinu je pravděpodobně způsobena chybnou kalibrací kamer.

5.4.2 Proudění v injektovaných puklinách

5.4.2.1 Proudění v přirozené puklině

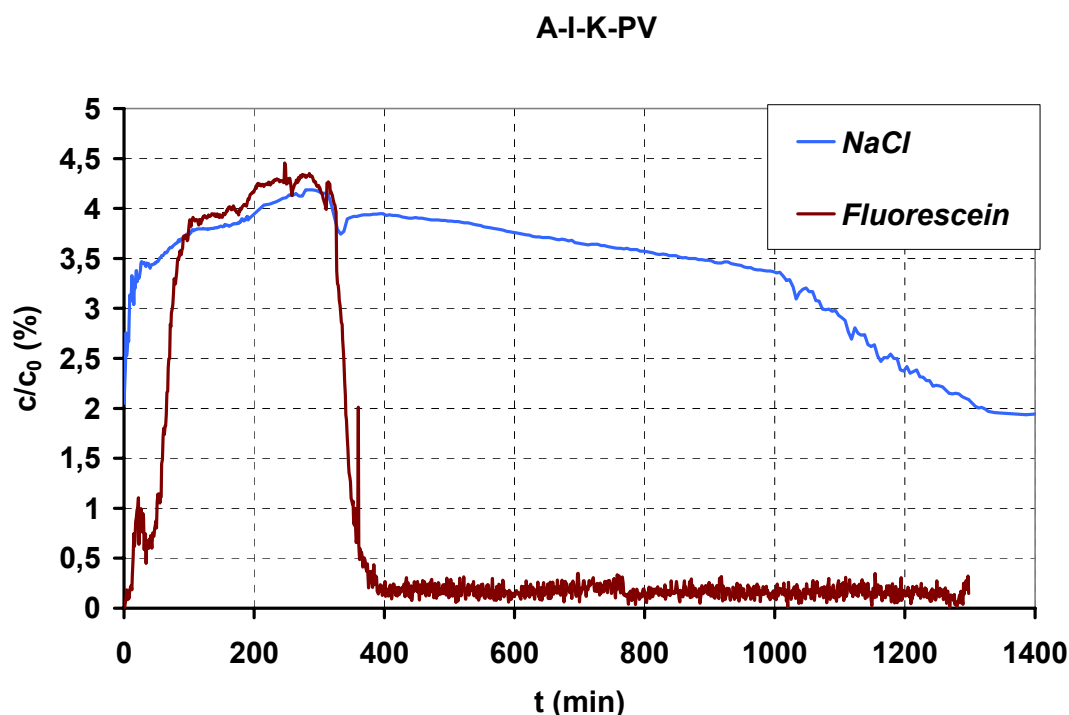
Na bloku A-I-K-PV s přirozenou injektovanou puklinou byla vyhodnocena 1 stopovací zkouška s roztokem chloridu sodného a fluoresceinu. Stanovení hydrodynamických a migračních parametrů přirozené pukliny bylo vyhodnocováno z měřených hodnot: objem měřeného média, čas průtoku, vodivost roztoku, intenzita záření roztoku v modrém světle, hydraulický gradient a teplota prostředí. Vodivost roztoku a snímky z kamery byla automaticky ukládány v konduktometru a v PC v intervalu 1 minuty.

Hydrodynamické parametry pukliny byly stanoveny podle vztahu uvedeného v kapitole 5.3.2. Konstantní průtok byl zajišťován peristaltickou pumpou. Kontrolním měřením byl stanoven objemový průtok tělesem A-I-K-PV na hodnotu $2,2 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Hydrodynamické parametry injekční směsi jsou popsány v kapitole 3.4.3. Kontrolním měřením v průběhu testu bylo zjištěno, že je koeficient hydraulické vodivosti směsi v tělese téměř o půl řádu vyšší než vzorku v propustoměru. Koeficient hydraulické vodivosti byl vypočten z veličin: objem proteklé vody, čas, hydraulický gradient a plocha tělesa injekční směsi. V případě testů na A-I-K-PV je hodnota koeficientu hydraulické vodivosti rovna $2,10 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. V propustoměru se hodnota koeficientu blížila k $7,8 \cdot 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

V následujícím grafu (Obr. 32) jsou vyobrazeny normalizované průnikové křivky obou stopovačů při stopovací zkoušce. Normalizace probíhala dělením aktuální koncentrace koncentrací počátečního roztoku. Výsledky vyhodnocené pomocí programu Qtracer2 jsou souhrnně uvedeny v tabulce (Tab. 15 a Tab. 16). Bilančním výpočtem bylo zjištěno, že v průběhu stopovací zkoušky na bloku A-I-K-PV bylo zachyceno 3,53 krát větší množství NaCl než bylo do systému vpouštěno. To lze vysvětlit tím, že konduktometr měří celkovou vodivost a ne pouze chlorid sodný. Z bariéry se vyplavoval Ca^{2+} , který vodivost výrazně zvýšil a deformoval průnikovou křivku. Dále jsou proto komentovány pouze výsledky stopovací zkoušky s fluoresceinem. Z průnikové křivky fluoresceinu bylo zjištěno, že čas prvního objevení stopovače byl 13 minut a čas maximální koncentrace 4 hodiny a 17 minut od začátku testu, což přibližně odpovídá času, kdy byl dočerpán roztok stopovače. Střední rychlost proudění byla $0,13 \text{ m} \cdot \text{hod}^{-1}$, maximální $0,76 \text{ m} \cdot \text{hod}^{-1}$. Koeficient disperze byl $4,2 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Pecletovo číslo odpovídá advekčnímu transportu stopovače. Hodnoty zasaženého objemu a dosahu v puklině jsou nadhodnocené.

Obr. 32: Normalizované průnikové křivky chloridu sodného a fluoresceinu na bloku A-I-K-PV



Tab. 15: Výsledky stopovací zkoušky na injektovaném bloku A-I-K-PV

Stopovač	Hydraulický gradient (-)	Čas prvního objevení (hod:min)	Čas maximální koncentrace (hod:min)	Střední doba zdržení (hod:min)	Střední rychlost (m.hod ⁻¹)	Maximální rychlost (m.hod ⁻¹)
Fluorescein	21,35	0:13	4:07	1:17	0,13	0,76
NaCl		Vodivost roste ihned	4:39 (25 minut po dočerpání stopovače)	0:56	0,18	Nelze vyhodnotit

Tab. 16: Výsledky stopovací zkoušky na injektovaném bloku A-I-K-PV (pokračování)

Stopovač	Hydraulický gradient (-)	Koeficient disperze (m ² .s ⁻¹)	Podélná disperze (m)	Pecletovo číslo (-)	Zasažený objem (m ³)	Dosah v puklině při rozevření 0,001 m (m)	Návratnost (%)
Fluorescein	21,35	$4,2 \times 10^{-6}$	0,011	14	$1,45 \times 10^{-3}$	8,788	220
NaCl		$1,43 \times 10^{-7}$	0,029	6	$1,06 \times 10^{-3}$	6,424	353

5.4.2.2 Proudění v umělých puklinách

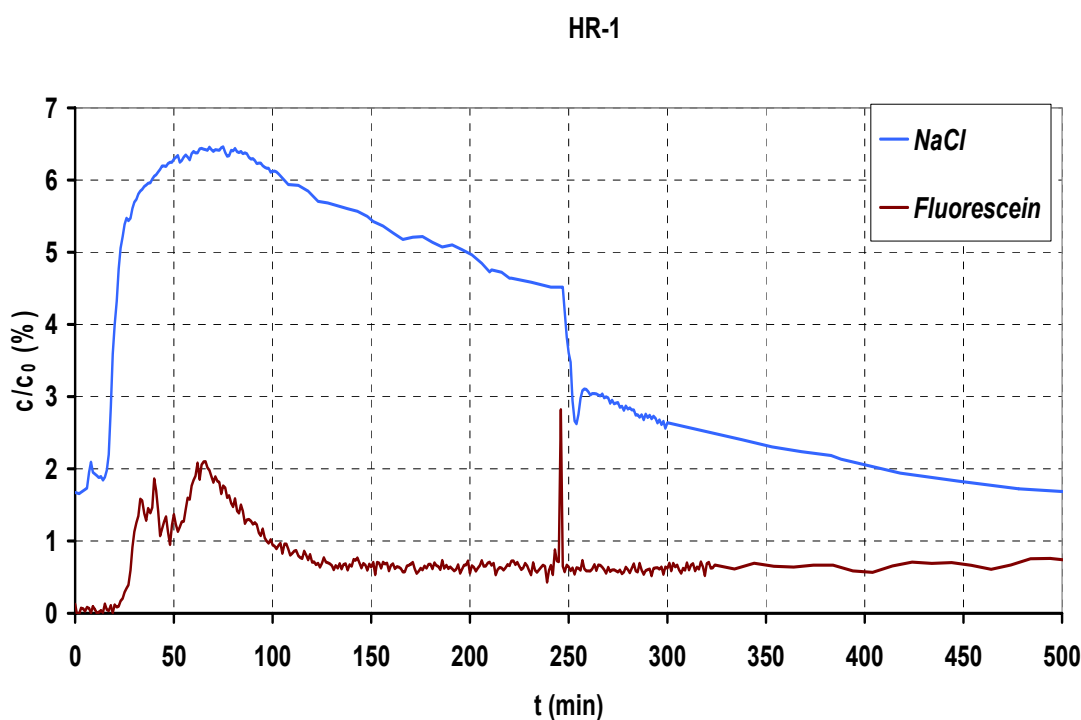
Na každém z bloků HR-1 a HR-2 s umělými injektovanými puklinami byla vyhodnocena 1 stopovací zkouška s roztokem chloridu sodného a fluoresceinu uraninu.

Hydrodynamické parametry pukliny byly stanoveny podle vztahu uvedeného v kapitole 5.3.2. Konstantní průtok byl zajišťován peristaltickou pumpou. Kontrolním měřením byl stanoven objemový průtok tělesem HR-1 na hodnotu $2,4 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a tělesem HR-2 na hodnotu $2,4 \cdot 10^{-7} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

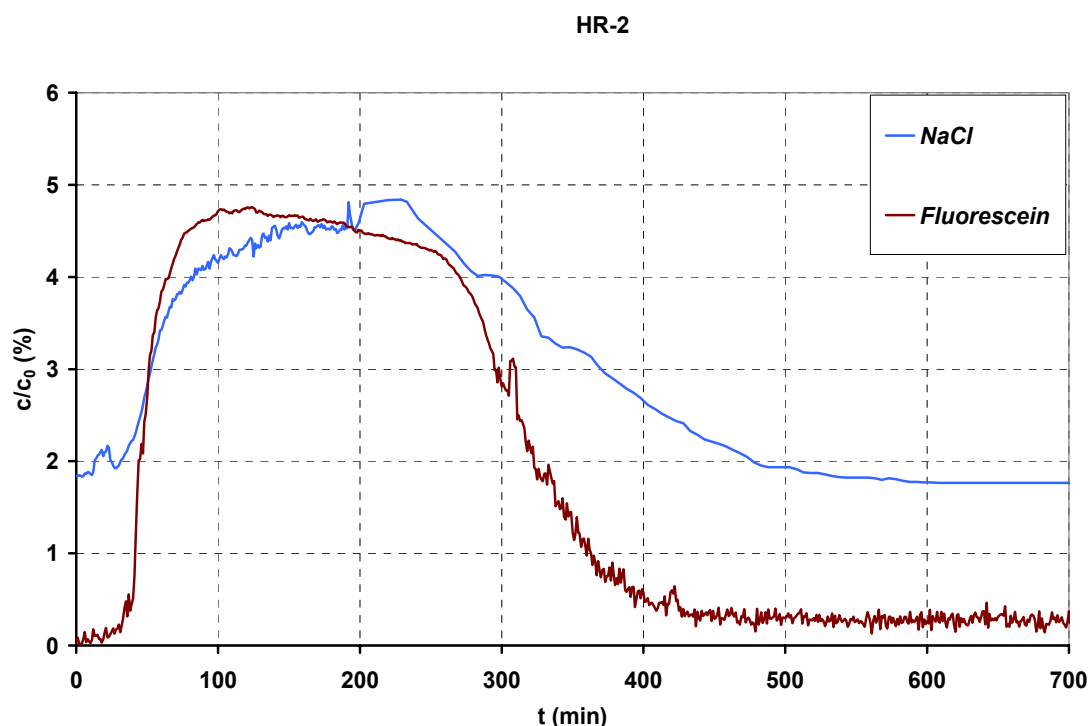
Hydrodynamické parametry injekční směsi jsou popsány v kapitole **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** Kontrolním měřením v průběhu testů bylo zjištěno, že je hodnota koeficientu hydraulické vodivosti směsi v tělese HR-1 rovna $1,24 \cdot 10^{-7} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a v tělese HR-2 $6,6 \cdot 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. V propustoměru se hodnota koeficientu blížila k $7,8 \cdot 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

V následujících grafech (Obr. 33, Obr. 34) jsou vyobrazeny normalizované průnikové křivky obou stopovačů při stopovacích zkouškách. Normalizace probíhala dělením aktuální koncentrace koncentrací počátečního roztoku. V průběhu testu na bloku HR-1 (Obr. 33) došlo po dočerpání roztoku stopovače (150 ml) a vyplachování směsi čistou vodou k protržení bariéry a náhlému úniku vody z lahve, což se projevilo na křivce chloridu sodného rychlým poklesem koncentrace. Vysoký peak na křivce uraninu nemá fyzikální podstatu. Vznikl, protože bylo při protržení směsi nutno rozsvítit normální osvětlení, na což reagovala televizní kamera.

Obr. 33: Normalizované průnikové křivky chloridu sodného a fluoresceinu na bloku HR-1



Obr. 34: Normalizované průnikové křivky chloridu sodného a fluoresceinu na bloku HR-2



Výsledky stopovacích zkoušek jsou shrnuty v následujících tabulkách (Tab. 17, Tab. 18, Tab. 19, Tab. 20). Průnikové křivky NaCl nejsou z důvodu zkreslení výsledků vyplavováním Ca^{2+} dále komentovány. Z průnikových křivek fluoresceinu bylo zjištěno, že čas prvního objevení stopovače byl 23 minut (HR-1) a 12 minut (HR-2) a čas maximální koncentrace 1 hodina 6 minut (HR-1) a 2 hodiny 4 minuty (HR-2). Střední rychlost proudění byla $0,59 \text{ m.hod}^{-1}$ (HR-1) a $0,46 \text{ m.hod}^{-1}$ (HR-2), maximální rychlost byla $1,00 \text{ m.hod}^{-1}$ (HR-1) a $1,96 \text{ m.hod}^{-1}$ (HR-2). Koeficient disperze byl $2,96 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (HR-1) a $1,68 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (HR-2). Hodnoty zasaženého objemu a dosahu v puklině jsou nadhodnocené. Vyšší návratnost fluoresceinu u testu na bloku HR-2 je pravděpodobně způsobena míšením vody v jímacím vrtu a jeho pomalým vyplavováním ze spodní části umělé pukliny, zvláště z prostor u okraje tělesa.

Tab. 17: Výsledky stopovacích zkoušek na injektovaném bloku HR-1

Stopovač	Hydraulický gradient (-)	Čas prvního objevení (hod:min)	Čas maximální koncentrace (hod:min)	Střední doba zdržení (hod:min)	Střední rychlost (m.hod^{-1})	Maximální rychlost (m.hod^{-1})
Fluorescein	57,11	0:23	1:06	0:39	0,59	1,00
NaCl		0.18	1:15 (2:52 před dočerpáním stopovače)	0:23	0,99	1,29

Tab. 18: Výsledky stopovacích zkoušek na injektovaném bloku HR-1 (pokračování)

Stopovač	Hydraulický gradient (-)	Koeficient disperze ($m^2 \cdot s^{-1}$)	Podélná disperze (m)	Pecletovo číslo (-)	Zasažený objem (m^3)	Dosah v puklině při rozevření 0,5 mm (m)	Návratnost (%)
Fluorescein	57,11	$2,96 \times 10^{-6}$	0,018	22	$8,23 \times 10^{-4}$	4,262	61
NaCl		$3,22 \times 10^{-6}$	0,012	33	$4,94 \times 10^{-4}$	2,558	146

Tab. 19: Výsledky stopovacích zkoušek na injektovaném bloku HR-2

Stopovač	Hydraulický gradient (-)	Čas prvního objevení (hod:min)	Čas maximální koncentrace (hod:min)	Střední doba zdržení (hod:min)	Střední rychlost ($m \cdot hod^{-1}$)	Maximální rychlost ($m \cdot hod^{-1}$)
Fluorescein	46,39	0:12	2:04	0:51	0,46	1,96
NaCl		0:13	3:12 (při dočerpání stopovače)	1:17	0,31	1,80

Tab. 20: Výsledky stopovacích zkoušek na injektovaném bloku HR-2 (pokračování)

Stopovač	Hydraulický gradient (-)	Koeficient disperze ($m^2 \cdot s^{-1}$)	Podélná disperze (m)	Pecletovo číslo (-)	Zasažený objem (m^3)	Dosah v puklině při rozevření 0,5 mm (m)	Návratnost (%)
Fluorescein	46,39	$1,68 \times 10^{-6}$	0,013	30	$1,03 \times 10^{-3}$	5,286	582
NaCl		$3,58 \times 10^{-6}$	0,042	9	$1,55 \times 10^{-3}$	7,947	330

5.4.3 Porovnání proudění ve volných a injektovaných puklinách

Díky realizovaným sériím testům bylo možno porovnat hydrodynamické a migrační parametry volné a injektované pukliny.

Z tabulky (Tab. 7) je patrné, že se objemový průtok volnou puklinou v bloku A-I-K-PV pohybuje při hydraulickém gradientu v řádu jednotek okolo hodnoty $4,0 \times 10^{-6} m^3 \cdot s^{-1}$. Objemový průtok injekční směsí v bloku A-I-K-PV je $4,6 \times 10^{-9} m^3 \cdot s^{-1}$ při hydraulickém gradientu 21,35. Z těchto hodnot vyplývá, že injekční směs snižuje průtok vody o čtyři řády při jednotkovém gradientu.

Z tabulky (Tab. 8) je patrné, že se objemový průtok volnou umělou puklinou v blocích HR-1 a HR-2 pohybuje při hydraulickém gradientu v řádu desetin okolo hodnoty $6,0 \times 10^{-6} m^3 \cdot s^{-1}$. Objemový průtok injekční směsí v bloku HR-1 je $8,6 \times 10^{-9} m^3 \cdot s^{-1}$ při hydraulickém gradientu 57,11 a $3,1 \times 10^{-9} m^3 \cdot s^{-1}$ při hydraulickém gradientu 46,39 v bloku HR-2. Z těchto hodnot vyplývá, že injekční směs snižuje průtok vody o pět řádů při jednotkovém gradientu.

Porovnáním výsledků stopovacích zkoušek provedených na volné a injektované puklině na bloku A-I-K-PV (Tab. 9, Tab. 15) bylo zjištěno, že po aplikaci injekční směsi se i při hydraulickém gradientu vyšším o dva řády sníží časy prvního objevení z vteřin na desítky minut a časy maximální koncentrace z minut na hodiny.

Porovnáním výsledků stopovacích zkoušek provedených na volné a injektované puklině na blocích HR-1 a HR-2 (Tab. 11, Tab. 13, Tab. 17, Tab. 19) bylo zjištěno, že po aplikaci injekční směsi se i při hydraulickém gradientu vyšším o tři řády sníží časy prvního objevení z vteřin na desítky minut a časy maximální koncentrace z minut na hodiny.

5.5 Shrnutí

Cílem této kapitoly bylo laboratorní ověření těsnící funkce injekční směsi v puklinovém prostředí granitových bloků. Testována bylo těleso s přirozenou puklinou a dvě tělesa s puklinami umělými. Na volných puklinách byly realizovány stopovací zkoušky s roztokem chloridu sodného a fluoresceinu současně s měřením objemových průtoků v závislosti na definovaném konstantním hydraulickém gradientu v nasyceném prostředí. Poté byly injekční vrty v laboratorních blocích zatěsněny pomocí jílocementové směsi blíže definované v kapitole 3.5. Následně byly stopovací zkoušky zopakovány.

Porovnáním stopovacích zkoušek volné a injektované přirozené pukliny bylo zjištěno, že injekční směs snižuje při shodném hydraulickém gradientu průtok vody o pět řádů a že po její aplikaci se i při hydraulickém gradientu vyšším o tři řády sníží časy prvního objevení stopovače z vteřin na desítky minut a časy maximální koncentrace z minut na hodiny.

Porovnáním stopovacích zkoušek volných a injektovaných umělých puklin bylo zjištěno, že injekční směs snižuje průtok vody o pět řádů při shodném hydraulickém gradientu (objemový průtok se sníží z hodnoty $1 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ při hydraulickém gradientu v řádu desetin na $1 \times 10^{-9} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ při hydraulickém gradientu v řádu desítek) a že po aplikaci injekční směsi se i při hydraulickém gradientu vyšším o tři řády sníží časy prvního objevení z vteřin na desítky minut a časy maximální koncentrace z minut na hodiny.

Koeficient disperze částic stopovače se po aplikaci injekční směsi sníží o dva řády z hodnot okolo $1 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ na $1 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

6. Terénní cross-hole testy

Cílem této kapitoly je poskytnutí dat potřebných k tvorbě geometrického a hydrogeologického modelu puklinové sítě vymezené v zájmové lokalitě (kapitola 2). K zjištění vzájemného propojení puklin mezi jednotlivými vrty na testovacím polygonu v granitovém kamenolomu byly použity tzv. cross-hole testy (C-H testy). Cross-hole testy realizované vždy mezi dvojicí vrtů probíhaly za podmínek stacionárního proudění vody. Detekce stopovací látky fluoresceinu probíhala pomocí televizních kamer vybavených žlutým filtrem a modrým světlem definované vlnové délky.

Spojitosť puklin v granitovém bloku okolo experimentu FEBEX v podzemní laboratoři v Grimselu pomocí C-H testů studovali Martinez-Landa a Carrera (2006). Hydraulické propojení mezi puklinami v podložním kolektoru u Mirror Lake pomocí C-H testů a karotáže studoval Paillet (1993). Le Borgne et al. (2006) pomocí C-H testů s průtokoměry zjistili, že na lokalitě Ploemeur existují v krystalinickém kolektoru propustné zóny propojené na vzdálenost minimálně 150 m. Cha et al. (2006) použili C-H testy při návrhu drenážního systému podzemního úložiště zemního plynu.

6.1 Vrtné a geodetické práce

Vrtné práce byly realizovány v granitovém lomu, který se nachází v katastru obce Panské Dubenky. Lokalita je blíže popsána v kapitole 2.

Na testovací lokalitě bylo zhotoveno celkem 12 vrtů, které byly hluboké 2,90 až 8,55 m. První dva pokusné vrty byly realizovány rotačně příklepovou technologií vrtání (pneumatické) bez stativu. Jako výplach byl použit stlačený vzduch. Průměr vrtů byl 50 mm. Další vrty (injekční a monitorovací) byly provedeny jádrově diamantově rotační technologií s jednoduchou jádrovkou (vrtná souprava Hilti DD 200). Jako výplach byla použita voda. Průměr vrtů byl 76 mm.

Vrty, výrazné terénní body a hranice polygonu byly polohově a výškově geodeticky zaměřeny. Souřadnice byly odečteny v relativních hodnotách bez připojení na některý z mapových systémů. Polohopisně a výškopisně bylo zaměřeno celkem 62 bodů. Z těchto bodů 12 představovalo zaměření vrtů, 12 definovalo ohraničení polygonu (vymezeného oplocením) a 4 zaměřovaly patu lomové stěny. Další body datového souboru byly umístěny tak, aby polohopisně a výškově definovaly význačné body patrné na povrchu testovacího polygonu. Veškeré zaměřené geodetické body, spolu s významnými liniemi v zájmovém polygonu, jsou vyznačeny v následujícím obrázku (Obr. 35).

Popis puklin je přehledně popsán v následující tabulce (Tab. 21).

Tab. 21: Popis puklin z vrtných jader

Vrt	Terén relativně (m)	Hloubka (m)	Úroveň pukliny relativně (m)	Popis pukliny
3	97,69	7,40	97,36	Bez vody a výplně
			97,06	Bez vody a výplně
			96,95	Slabě mineralizovaná

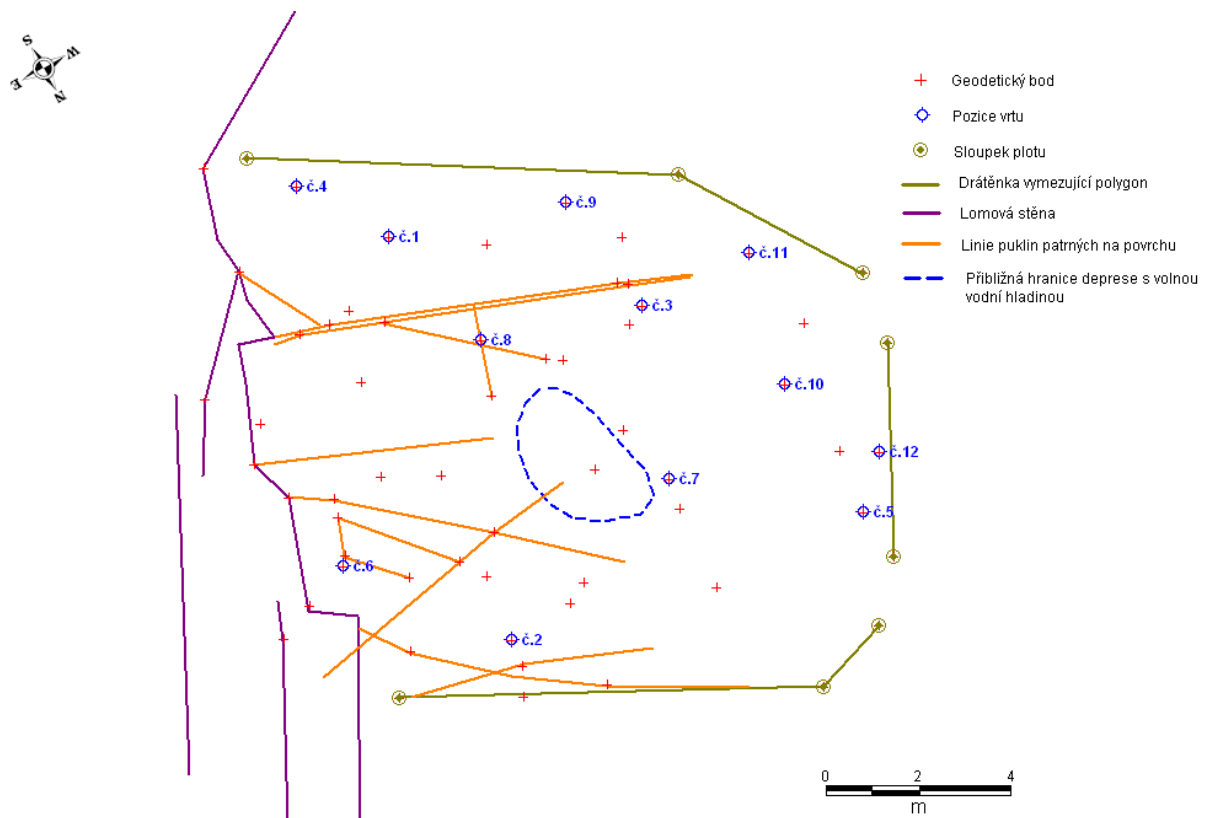
Vrt	Terén relativně (m)	Hloubka (m)	Úroveň pukliny relativně (m)	Popis pukliny
			96,50	Akumulace slíd, slabě limonitizovaná
			94,43	Výrazná puklina, zčásti zaplněna jílem
			92,01	Výrazná puklina, chlorit, limonit, jííl
			92,00	Výrazná puklina, chlorit, limonit, jííl
			90,69	Výrazná puklina, chlorit, limonit, jííl
			90,49	Výrazná puklina, chlorit, limonit, jííl
			90,30	Výrazná puklina, chlorit, limonit, jííl
4	99,34	6,37	96,99	Nevýrazná puklina , zčásti chloritizovaná
			96,37	Puklina vyplněná chloritem
			95,59	Výrazná puklina vyplněná limonitem
			95,02	Puklina vyplněná chloritem
			94,95	Výrazná puklina vyplněná limonitem
			94,93	Výrazná puklina vyplněná limonitem
			94,86	Výrazná puklina vyplněná limonitem
			93,57	Výrazná puklina vyplněná limonitem
			93,55	Výrazná puklina vyplněná limonitem
			92,93	Výrazná puklina vyplněná limonitem
5	97,81	6,73	93,75	Rozpukáno, síť subhorizontálních puklin
			93,60	Rozpukáno, síť subhorizontálních puklin
			91,75	Subhorizontální puklina, jííl
			91,35	Subhorizontální puklina, jííl
6	98,78	7,94	96,7-96,2	Subvertikální puklina vyplněná jíilem
			95,48	Výrazná puklina, jííl
			95,48	Výrazná puklina, jííl, chlorit, limonit
			95,46	Výrazná puklina, jííl, chlorit, limonit
			95,44	Výrazná puklina, jííl, chlorit, limonit
			95,42	Výrazná puklina, jííl, chlorit, limonit
			95,38	Výrazná puklina, jííl, chlorit, limonit
			95,34	Výrazná puklina, jííl, chlorit, limonit
			95,12	Výrazná puklina, jííl, chlorit, limonit
			94,55	Puklina, limonit
7	97,67	8,30	96,87	Puklina bez mineralizace
			96,62	Puklina bez mineralizace

Vrt	Terén relativně (m)	Hloubka (m)	Úroveň pukliny relativně (m)	Popis pukliny
			96,57	Puklina bez mineralizace
			95,82	Puklina vyplněná chloritem a limonitem
			94,86	Nevýrazná puklina částečně vyplněná jílem
			94,74	Nevýrazná puklina částečně vyplněná jílem
			93,42	Rozevřená limonitizovaná puklina
			93,12	Limonitizovaná puklina
			91,91	Puklina bez mineralizace
			91,77	Chloritizovaná puklina
			91,17	Velmi slabě mineralizovaná puklina
			90,22	Rozpukaná zóna
8	97,78	8,32	97,28	Silně limonitizovaná puklina, částečně vyplněná jílem
			95,33	Puklina
			93,78	Silně limonitizovaná puklina, živce mírně kaolinizovány
			93,48	Puklina bez mineralizace
			93,38	Silně limonitizovaná puklina, slabě vyplněná jílem
			93,25	Puklina bez mineralizace
			93,15	Puklina bez mineralizace
			92,98	Puklina bez mineralizace
			92,58	Puklina, ztráta výplachu
			92,46	Puklina mírně vyplněná limonitem a jílem
			92,03	Mírně limonitizovaná puklina
			91,83	Nevýrazné pukliny
			91,68	Limonitizovaná puklina, mírně kaolinitizované živce
			91,63	Limonitizovaná puklina, mírně kaolinitizované živce
9	97,97	8,20	97,92	Nevýrazná subhorizontální puklina
			97,76	Nevýrazná subhorizontální puklina
			96,97	Výrazná limonitizovaná puklina 10°
			96,66	Nevýrazná puklina
			94,97	Jemně rozpukáno
			94,82	Nevýrazná puklina
			94,27	Puklina bez mineralizace
			93,04	Limonitizovaná puklina

Vrt	Terén relativně (m)	Hloubka (m)	Úroveň pukliny relativně (m)	Popis pukliny
			92,57	Ztráta výplachu
			92,34	Limonitizovaná puklina
			92,17	Limonitizovaná puklina
			92,12	Chloritem vyhojená puklina
			91,22	Silně limonitizovaná puklina
			90,57	Jemně rozpuháno
			90,37	Jemně rozpuháno
			90,17	Jemně rozpuháno
10	97,52	8,20	96,47	Silně limonitizovaná puklina
			95,40	Mikrotrhliny
			92,12	Podrcené jádro
			91,01	Limonitizovaná puklina
			90,92	Silně popukáno a limonitizováno
			90,12	Puklina vyplněná chloritem
11	97,27	8,20	96,44	Slabě limonitizovaná puklina
			96,32	Slabě limonitizovaná puklina
			96,27	Slabě limonitizovaná puklina
			95,50	Slabě limonitizovaná puklina
			95,14	Slabě limonitizovaná puklina
			95,03	Slabě limonitizovaná puklina
			93,17	Puklina bez mineralizace, ztráta výplachu
			90,87	Silně limonitizovaná puklina
12	97,64	8,55	95,59-95,48	Subvertikální limonitizovaná puklina
			95,08	Silně limonitizovaná puklina
			94,34	Limonitizovaná puklina
			93,84	Subvertikální puklina bez limonitizace
			93,44	Subvertikální limonitizovaná puklina
			93,29	Síť trhlinek, ztráta výplachu
			91,18	Slabě limonitizovaná puklina
			90,52	Silně limonitizovaná puklina
			90,19	Silně limonitizovaná puklina
			90,04	Silně limonitizovaná puklina

Vrt	Terén relativně (m)	Hloubka (m)	Úroveň pukliny relativně (m)	Popis pukliny
			89,99	Silně limonitizovaná puklina
			89,59	Drobné trhlinky

Obr. 35: Schéma testovacího polygonu v kamenolomu Panské Dubenky (Polák M. et al. 2007)



6.2 Identifikace puklin ve vrtech pomocí televizních kamer

Po vrtných pracích byly jádrové vrty 3 až 12 prohlédnuty pomocí televizní kamery. Kamerové prohlídky vrtů poskytly údaje o úrovni puklin a jejich směru sklonu a přibližném rozevření (Tab. 22). Při měření byly zaznamenány směry sklonu jednotlivých puklinových ploch pomocí kompasu instalovaném na kameře. Rozevření puklin naměřené pomocí vizuální prohlídky vrtů kamerou bylo pouze orientační, protože lze předpokládat, že docházelo ke značnému poškození hran průsečíků pukliny a pláště vrtu při vrtní. Přesto tento údaj poskytl informaci, ze které se posuzovala důležitost pukliny z hlediska proudění.

Tab. 22: Popis puklin z televizních kamer ve vrtech

Vrt	Terén relativně (m)	Hloubka (m)	Úroveň pukliny relativně (m)	Rozevření (mm)	Směr sklonu (°)	Popis pukliny			
3	97,69	7,40	97,29	1-2	22-25	Pukliny (patrně křížení)			
			97,09	1	44-46	Puklina			
			96,89	1-5	22-25	Puklina s nárůsty železa			
			94,39	2-5	37-38	Puklina			
			92,09	1-5	15-19	Křížení puklin			
			91,69	0,1-0,5	25	Puklina			
			91,74	0,1-0,5	25	Puklina			
			90,69	0	25	Vyhojená puklina			
			4	99,34	6,37	97,84	1-3	15-16	Křížení puklin
96,74	2-3	15-17				Puklina			
95,54	0,5-2	30				Puklina			
94,84	0,1-1	70-90; 55-63				Křížení puklin			
93,64	3-6	17-19				Pukliny			
5	97,81	6,73				95,51	0,5-2	20-25	Puklina
			91,51-91,01	1-2; 0,5	35, 70	Soustava puklin			
			91,01	1-2	15-70	Puklina			
			90,81	1-5	25-35	Puklina			
			6	98,78	7,94	98,28	0,1	25-40	Křížení puklin
96,78-96,28	0,1-0,5	80-90				Puklina			
95,53	0,5-2	15-18				Puklina			
95,48	0,5-2	12-16				Puklina			
95,28	0	80-90				Vertikální puklina			
94,78	1-4	35-40				Puklina			
90,88	0,5	25				Puklina			
7	97,67	8,30				96,27	1-3	20-24	Puklina
						95,17	1-3	27-35	Puklina
			92,17	3-5	22-28	Puklina			
			91,57	1-3	25-30	Puklina			
			90,07	0-0,1	37-45	Sevřená puklina			
8	97,78	8,32	97,48	0,1-0,5	60-70	Puklina			
			95,78-95,28	0,1-0,5; 1-3	77-80; 22	Křížení puklin			
			93,78	1-3; 0,1	27-32	Pukliny			

Vrt	Terén relativně (m)	Hloubka (m)	Úroveň pukliny relativně (m)	Rozevření (mm)	Směr sklonu (°)	Popis pukliny
			92,48	0,5-2	20-25	Puklina
			91,78	2-5	18-20	Puklina
			91,73	1-3	10-15	Puklina
9	97,97	8,20	96,97	1-3	0-6	Systém rovnoběžných puklin
			96,77	0,5-1	45	Puklina
			95,97	0,1	90	Svislá puklina
			94,27	1-2	60-70	Puklina
			93,97-93,47	0,1-0,5	87-90	Svislá puklina
			92,97-92,67	0	35	Systém puklin
			91,87	1-3	20-40	Puklina
			91,87-91,57	0	70	Šikmá vyhojená puklina
			90,87	0-0,1	60	Zavřená puklina
			90,47	10-15	20-22	Velmi otevřená puklina
10	97,52	8,20	96,52	0,5-2	25-32	Puklina
			95,32	0,5-1	20-30	Puklina
			93,72	1-3	30	Puklina
			91,02	1-2	18-20	Puklina
			90,82	0,1-0,5	20-35	Systém paralelních puklin
			90,22	1-2	40-45; 25-35	Puklina se změnou sklonu
11	97,27	8,20	95,87-93,87	0		Pukliny s andalusitem
			93,27	0,5-2	22-30	Puklina
			91,07	1-4	25-30	Dvojice puklin
			89,47	1-4	22-30	Puklina
12	97,64	8,55	95,54	0,5-3	76-80	Křížení puklin
			95,14	0,5-5	48-50	Puklina
			93,34	1-2	12-15	Puklina
			90,74	1-3	18-20	Puklina
			90,34	0,5-1	28-30	Puklina
			90,14-89,84	0,5-1	70-80	Svislá puklina

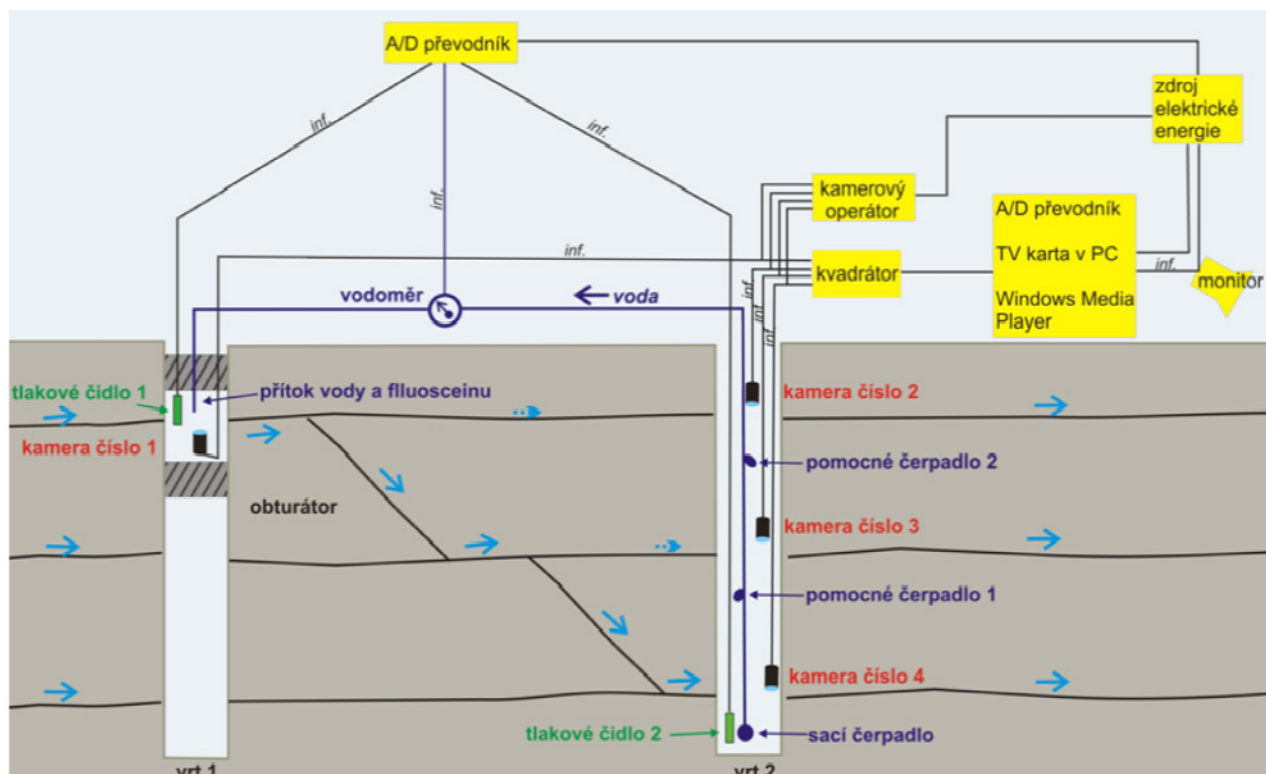
Při porovnání údajů o distribuci puklin v jednotlivých vrtech zjištěných z popisu vrtných jader (Tab. 21) a z prohlídek vrtů pomocí kamery (Tab. 22) je patrné, že oba soubory jsou do jisté

míry odlišné. Lze předpokládat, že údaje poskytnuté kamerovým měřením více odpovídají realitě, a proto byla těmto hodnotám přisouzena větší váha.

6.3 Metodika měření

Testy byly realizovány mezi vybranými dvojicemi vrtů, tak aby bylo možné zjistit propojení jednotlivých puklin mezi vrty. Testy probíhaly za podmínek stacionárního režimu proudění při umělém gradientu. Schéma testu je znázorněno na následujícím obrázku (Obr. 36). V injekčním vrtu byl umístěn pakr (obturátor) izolující samostatnou puklinu, který byl osazen kamerou a hladinoměrem. Čerpací vrt byl ponechán volný. Kamery byly osazeny na úrovních jednotlivých puklin. Vzhledem k relativně velkému průtoku vody puklinami při vytvářeném gradientu byla využívána podzemní voda z čerpaného vrtu a vznikl tak uzavřený okruh. Při testech byly měřeny hodnoty průtoku systémem, hladiny podzemní vody v testovaných vrtech (ve vymezeném úseku vtláčecího vrtu a v celém úseku vrtu čerpacího) a lokalizace a čas příchodu barviva Na-fluorescein do čerpacího vrtu. C-H testy byly zahájeny čerpáním podzemní vody z pozorovacího vrtu a jejího současného vtláčení do úseku vymezeného pakrem v injekčním vrtu. Po ustálení hladiny podzemní vody v obou vrtech, které bylo ověřeno pomocí instalovaných tlakových čidel, byl do injektované vody vsříknut omezený objem stopovací látky fluoresceinu. Pomocí první kamery bylo zaznamenáno vymývání barviva v injekčním vrtu. Pomocí dalších tří kamer bylo prováděno sledování a záznam signálu v čerpacím vrtu. Tyto kamery zaznamenaly lokalizaci a okamžik přítoku stopovače do pozorovacího vrtu. Tak bylo možné identifikovat hydraulické propojení testované dvojice vrtů konkrétní puklinou v podmínkách stacionárního režimu proudění.

Obr. 36: Schéma C-H testu, (Polák M. et al., 2007)



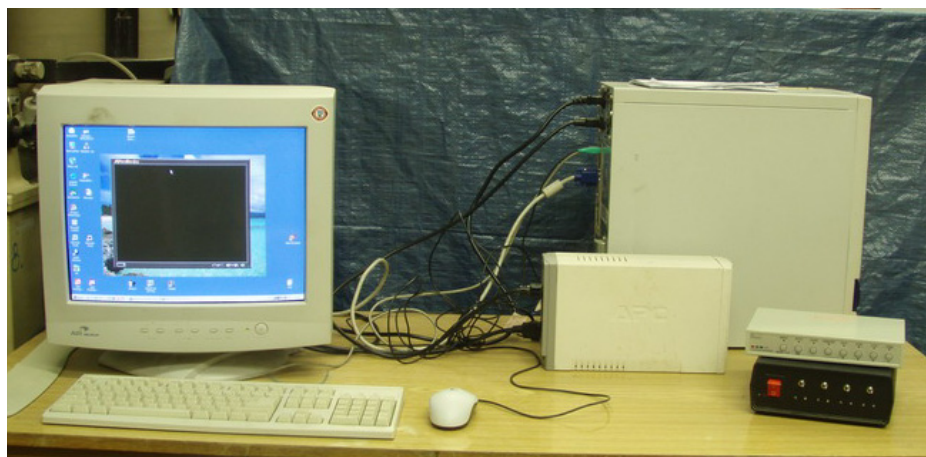
Pakr použitý k izolaci jednotlivé pukliny v injekčním vrtu je zachycen na obrázku (Obr. 37). Těsnící část je tvořena ze dvou gumových vaků, které jsou společně plněny stlačeným vzduchem polyetylenovou tlakovou hadicí. V pakru je umístěna televizní kamera, umožňující při použití modrého světla definované vlnové délky 490 nm a oranžového filtru detekci uraninu v reálném čase. Dále je v pakru umístěna tlaková sonda (typ Tedia) sloužící ke kontinuálnímu záznamu pohybu úrovně hladiny podzemní vody.

Obr. 37: Pakr s koncovou částí na bílém podkladě, tlakovou lahví sloužící k plnění vaků a kabeláží od televizní kamery a tlakového čidla.



Softwarové zpracování výstupu z kamer je zachyceno na obrázku (Obr. 38). Zpracování obrazu ze čtyřech měřících kamer (3 kamery sledující puklinový systém + 1 kamera je umístěna v pakru) do jednoho složeného obrazu zajišťoval kvadrátor. Analogový výstup z kvadrátoru byl přepracováván do digitálního signálu A/D převodníkem (TV kartou) od firmy Aver-TV. K vlastnímu záznamu zpracovaného signálu byl použit software vyvinutý firmou Radek Chalupa. Ten umožnil zaznamenávat obraz (720 × 576 pixelů ve formátu greyscale) ve zvolených časových intervalech od cca 1s výše. Kamerový operátor sloužil k přepínání zdroje světla mezi světlem žlutým sloužícím k prohlídce vrtů a světlem modrým sloužícím k detekci fluoresceinu.

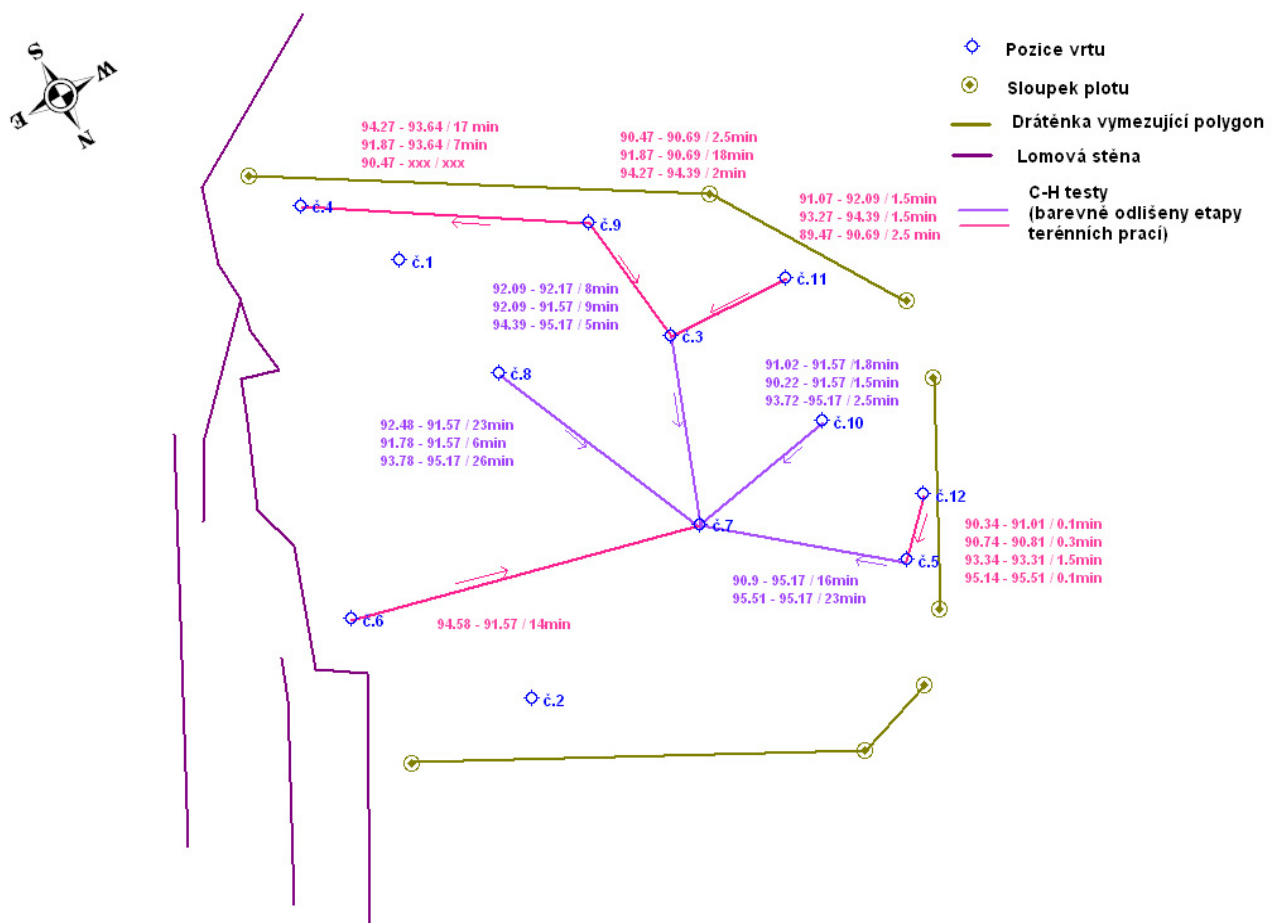
Obr. 38: Softwarové zpracovávání naměřených dat, v pravém dolním rohu kvadrátor, pod ním kamerový operátor



6.4 Výsledky a diskuze

Celkem bylo vyhodnoceno 25 C-H testů. V následujícím obrázku (Obr. 39) jsou zobrazeny všechny C-H testy, které byly k dispozici pro sestavení geometrického modelu puklinové sítě v zájmovém polygonu a které byly použity ke kalibraci hydrogeologického modelu. U každé dvojice vrtů, která byla testována, jsou uvedeny úrovně vzájemně komunikujících průsečíků příslušných vrtů s puklinami a průnikový čas. Časové údaje v tomto obrázku nelze vzájemně porovnávat vzhledem k rozdílným hydraulickým gradientům při jednotlivých testech.

Obr. 39: Schéma rozmístění C-H testů, (Polák M. et al., 2007)



Rozdíly hladin pro jednotlivé testy, měřené průtoky a průnikové časy stopovače jsou přehledně shrnuty v následující tabulce (Tab. 23). Do výsledků nebyly zahrnuty tři C-H testy. V průběhu testů s pořadovým číslem 13 a 20 nebyl detekován stopovač v čerpaném vrtu. Test 25 nebyl využit, protože při běžné úrovni čerpáním neovlivněné hladiny podzemní vody byl puklinový průsečík s vrtem 8 v úrovni 95.28 m rel. nad hladinou podzemní vody.

Tab. 23: Výsledky C-H testů

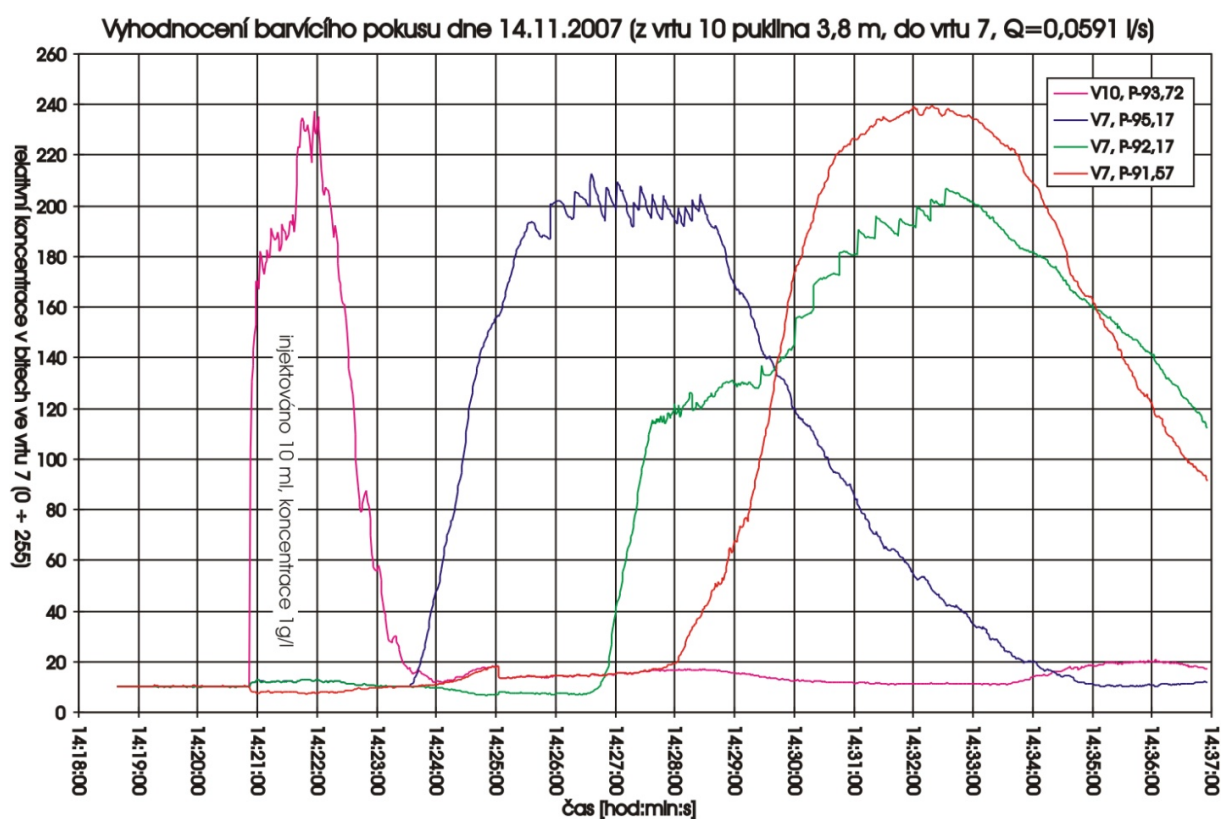
Pořadí testu	Injektáž		Rozdíl hladin mezi vtláčecím a čerpaným vrtem (m)	Průtok (l.s ⁻¹)	Čas příchodu (min:sec)	Detekce	
	Vrt	Relativní úroveň pukliny (m)				Vrt	Relativní úroveň pukliny (m)
1	10	93,72	0,10	0,0563	2:30	7	95,17
2	10	91,02	0,46	0,0504	2:00	7	91,57
3	10	90,22	0,21	0,0545	1:30	7	91,57
4	5	95,51	0,91	0,0590	23:00	7	95,17
5	5	90,91	0,27	0,0519	17:00	7	95,17
6	3	94,39	0,10	0,0554	5:30	7	95,17
7	3	92,09	0,37	0,0557	8:00	7	92,17
8	8	93,78	1,05	0,0438	24:00	7	95,17
9	8	92,48	2,32	0,0359	22:00	7	91,57
10	8	91,78	0,10	0,0569	6:24	7	91,57
11	6	94,58	0,17	0,0499	16:00	7	91,57
12	9	94,27	0,12	0,0472	2:00	3	94,39
13	9	91,87	1,23	0,0431	17:00	3	90,69
14	9	90,47	0,01	0,0419	2:48	3	90,69
15	11	93,27	0,08	0,0473	1:30	3	94,39
16	11	91,07	0,31	0,0492	1:00	3	92,09
17	11	89,47	0,06	0,0414	3:00	3	90,69
18	9	94,27	0,17	0,0377	16:00	4	93,64
19	9	91,87	0,06	0,0485	7:00	4	93,64
20	9	90,47	0,17	0,0481	30:00	4	93,64
21	12	95,14	1,38	0,0422	0:05	5	95,51
22	12	93,34	0,12	0,0544	1:30	5	93,31
23	12	90,74	0,15	0,0558	0:17	5	91,01
24	12	90,34	0,18	0,0484	0:10	5	91,01
25	8	95,28	0,47	0,0420	6:00	7	95,17

V dalších kapitolách jsou popsány jednotlivé testy a jsou zde uvedeny průnikové křivky, které zachycují průnik stopovací látky puklinami. Na horizontální ose je čas, na vertikální relativní koncentrace stopovače v bitech.

6.4.1 C-H test 1

Testována byla dvojice vrtů 10 a 7. Do pukliny v úrovni 93,72 m rel., která byla od zbytku vrtu 10 oddělena pakrem, byla injektována voda čerpaná z vrtu 7. Po ustálení průtoku a hladin v obou vrtech bylo do odizolovaného úseku vrtu 10 injektováno 10 ml roztoku barviva s koncentrací 1 g/l. Ve vrtu 7 byly instalovány 3 sledovací kamery, které detekovaly přítok barviva konkrétní puklinou do vrtu. Interpretace záznamu údajů z kamer je uvedena v grafu (Obr. 40). Z grafu je patrné, že barvivo přiteklo do vrtu puklinou, která má ve vrtu 10 výškovou úroveň 95.17 m rel. Signály ostatních kamer jsou pouze důsledkem vertikálního pohybu barviva ve vrtu směrem k čerpadlu, které je umístěno pod nimi. Vzájemná hydraulická komunikace mezi vrtu 10 a 7 je pro C-H test 1 předpokládána v rámci jedné průběžné subhorizontální pukliny.

Obr. 40: Vyhodnocení C-H testu 1 (Nakládal P., 2008)

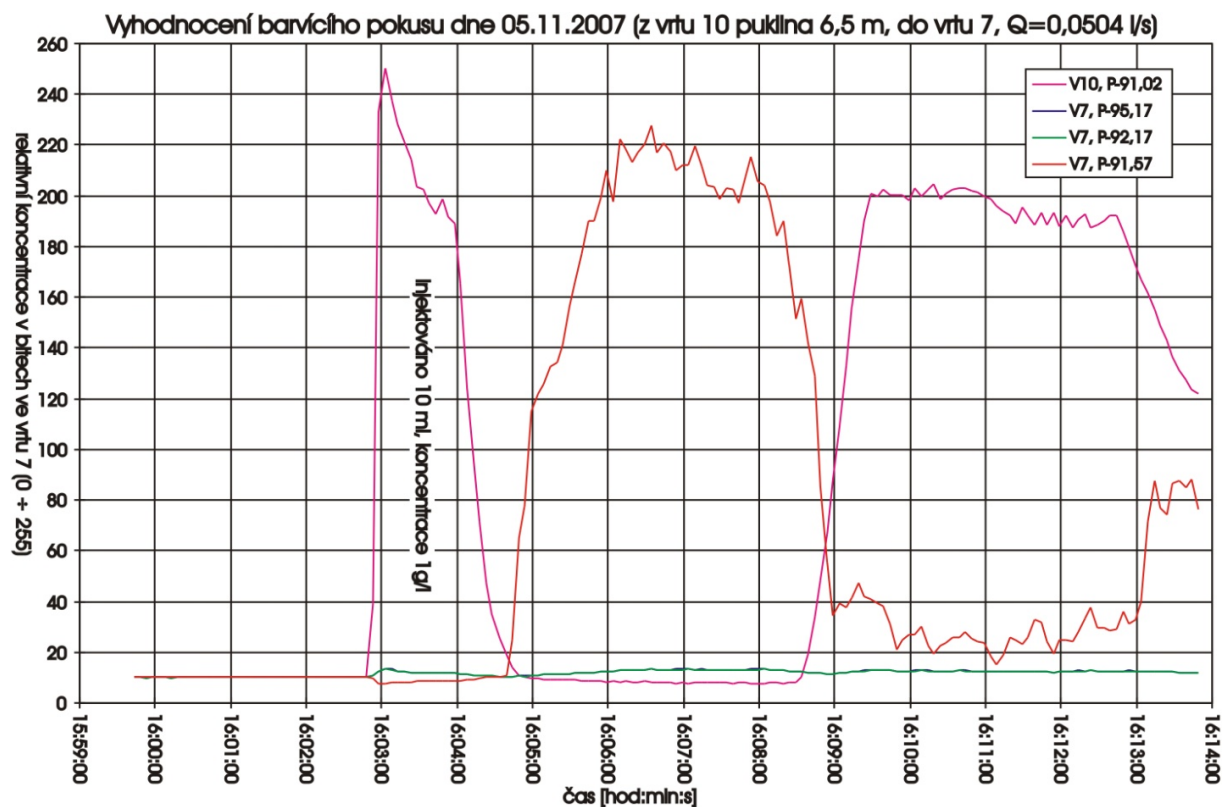


6.4.2 C-H test 2

Testována byla dvojice vrtů 10 a 7. Do pukliny v úrovni 91,02 m rel., která byla od zbytku vrtu 10 oddělena pomocí pneumatického pakru, byla injektována voda čerpaná z vrtu 7. Po ustálení velikosti průtoku systémem a hladin v obou vrtech bylo do odizolovaného úseku vrtu 10 injektováno 10 ml roztoku barviva s koncentrací 1 g/l. Ve vrtu 7 byly instalovány 3 sledovací kamery, které detekovaly přítok barviva konkrétní puklinou do vrtu. Interpretace záznamu údajů z kamer je uvedena v grafu (Obr. 41). Z grafu je patrné, že barvivo přiteklo do vrtu puklinou, která má ve vrtu 7 výškovou úroveň 91,57 m rel. Vzájemná hydraulická komunikace mezi vrtu 10 a 7 je při C-H testu 2 předpokládána v rámci dvou subhorizontálních puklin.. Puklina v úrovni 91,02 m rel. ve vrtu 10 je pravděpodobně pouze lokálního charakteru s odlišným sklonem. To vyplývá z následujícího C-H testu 3, kdy puklina

v úrovni 90,22 m rel. ve vrtu 10 rovněž komunikovala s puklinou v úrovni 91,57 m rel. ve vrtu 7.

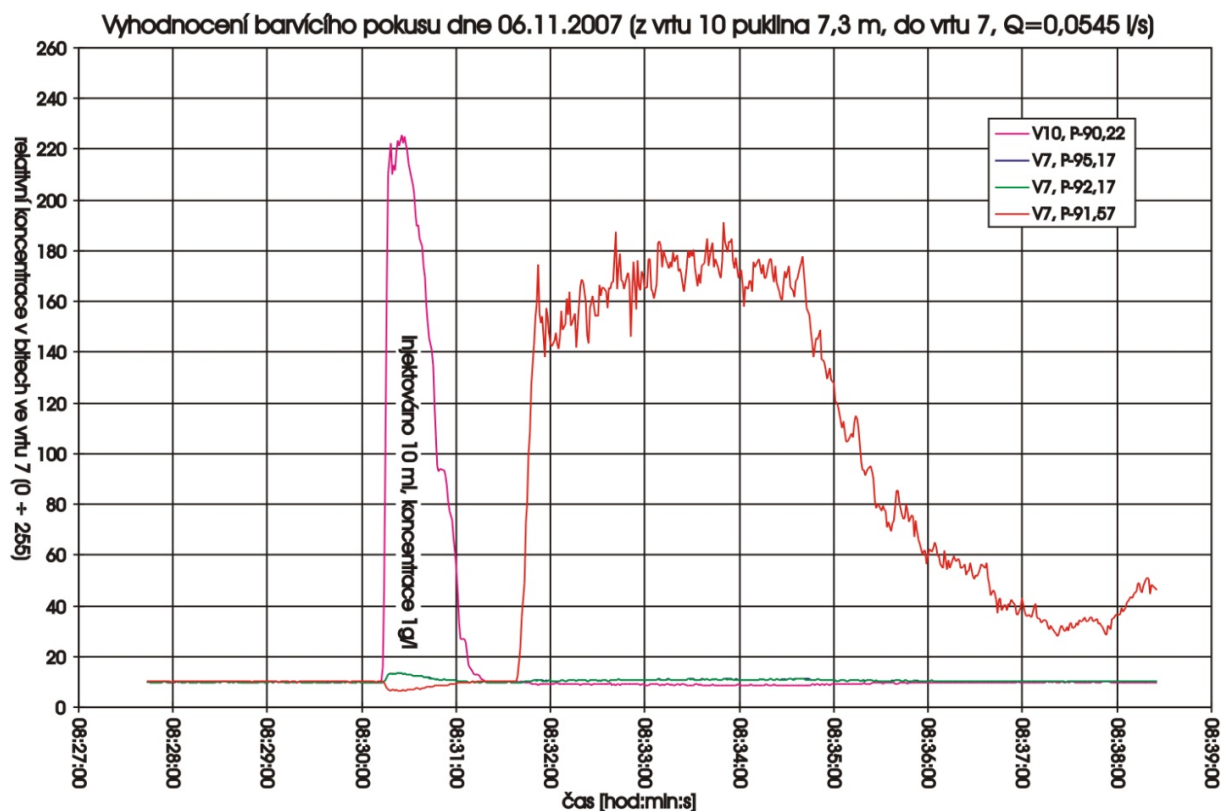
Obr. 41: Vyhodnocení C-H testu 2 (Nakládal P., 2008)



6.4.3 C-H test 3

Testována byla dvojice vrtů 10 a 7. Do pukliny v úrovni 90,22 m rel., která byla od zbytku vrtu 10 oddělena pomocí pneumatického pakru, byla injektována voda čerpaná z vrtu 7. Po ustálení velikosti průtoku systémem a ustálení hladin v obou vrtech bylo do odizolovaného úseku vrtu 10 injektováno 10 ml roztoku barviva s koncentrací 1 g/l. Ve vrtu 7 byly instalovány 3 sledovací kamery, které detekovaly přítok barviva konkrétní puklinou do vrtu. Interpretace záznamu údajů z kamer je uvedena v grafu (Obr. 42). Z grafu je patrné, že barvivo přiteklo do vrtu puklinou, která má ve vrtu 7 výškovou úroveň 91,57 m rel. Hydraulická komunikace mezi vrtu 10 a 7 je v rámci C-H testu 3 předpokládána přes jednu subhorizontální puklinu.

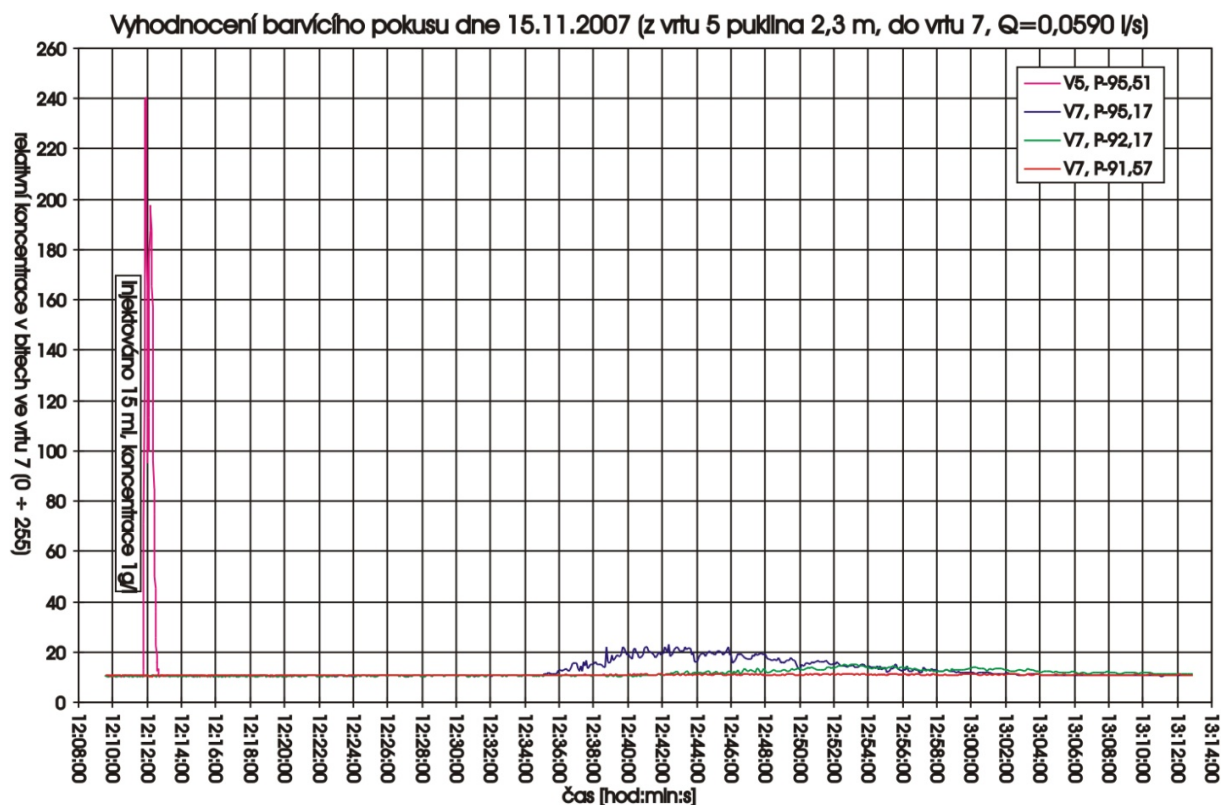
Obr. 42: Vyhodnocení C-H testu 3 (Nakládal P., 2008)



6.4.4 C-H test 4

Při této zkoušce byla testována dvojice vrtů 5 a 7. Do pukliny v úrovni 95,51 m rel., která byla od zbytku vrtu 5 izolována pakrem, byla injektována voda čerpaná z vrtu 7. Po ustálení velikosti průtoku vody mezi vrty 5 a 7 a ustálení hladin v obou vrtech bylo do odizolovaného úseku vrtu 5 injektováno 15 ml roztoku barviva s koncentrací 1 g/l. Ve vrtu 7 byly instalovány 3 záznamové kamery, které detekovaly přítok barviva konkrétní puklinou do vrtu. Interpretace záznamu údajů z kamer je uvedena v grafu (Obr. 43). Z grafu je patrné, že barvivo přiteklo do vrtu puklinou, která má ve vrtu 7 výškovou úroveň 95,17 m rel. Z grafu je rovněž patrné, že barvivo doteklo do vrtu za relativně dlouhou dobu (23 min) a jeho koncentrace byla oproti injektované nízká. Z tohoto faktu je patrné, že je hydraulická komunikace mezi izolovaným úsekem vrtu 5 a vrtem 7 pomalá. Pravděpodobně jsou subhorizontální pukliny ve vrtu 5 a vrtu 7 propojené vertikální puklinou, která je uzavřená.

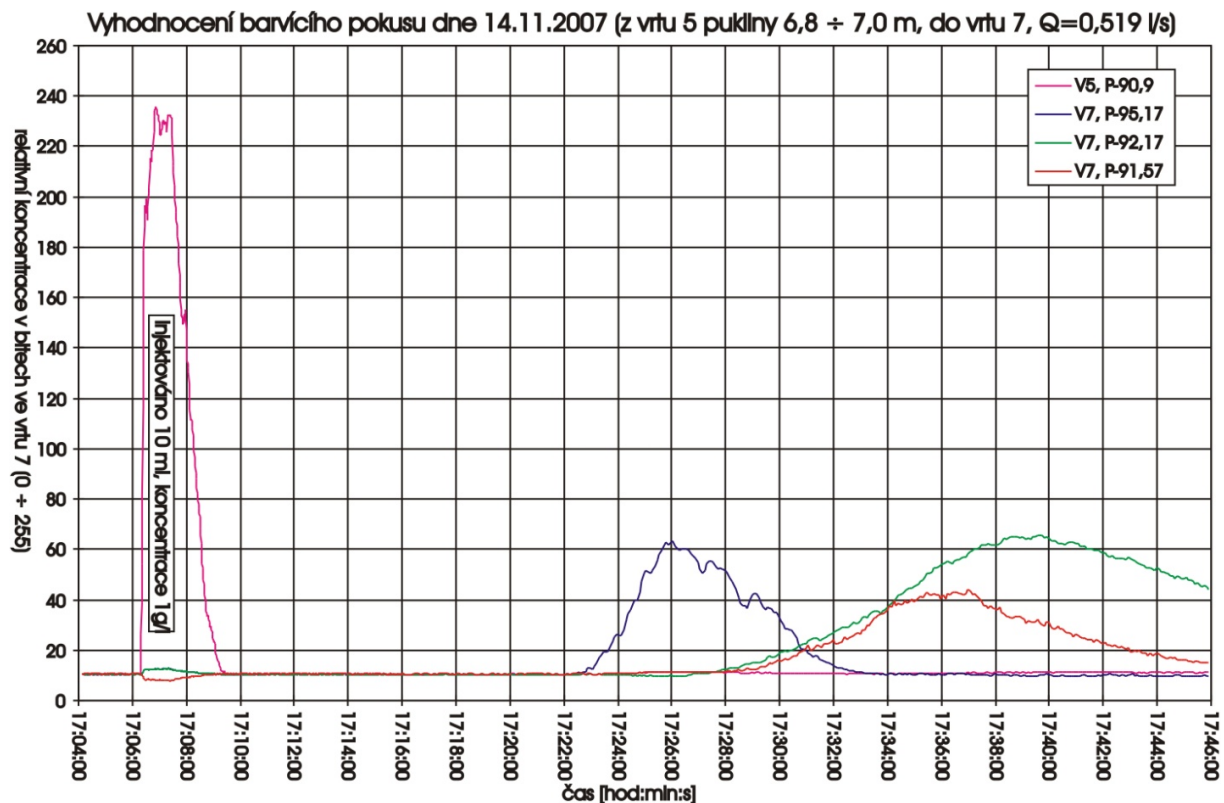
Obr. 43: Vyhodnocení C-H testu 4 (Nakládal P., 2008)



6.4.5 C-H test 5

Testována byla dvojice vrtů 5 a 7. Do pukliny v úrovni 91,01 m rel., která byla od zbytku vrtu 5 oddělena pomocí pneumatického pakru, byla injektována voda čerpaná z vrtu 7. Po ustálení velikosti průtoku systémem a hladin v obou vrtech bylo do odizolovaného úseku vrtu 5 injektováno 10 ml roztoku barviva s koncentrací 1 g/l. Ve vrtu 7 byly instalovány 3 záznamové kamery, které detekovaly přítok barviva konkrétní puklinou do vrtu. Interpretace záznamu údajů z kamer je uvedena v grafu (Obr. 44). Z grafu je patrné, že barvivo přiteklo do vrtu puklinou, která má ve vrtu 7 výškovou úroveň 95,17 m rel. Signály ostatních kamer jsou pouze důsledkem vertikálního pohybu barviva ve vrtu směrem k čerpadlu, které je umístěno pod nimi. Hydraulická komunikace mezi vrty 5 a 7 je při C-H testu 5 předpokládána v rámci subhorizontálních puklin, propojených vertikální puklinou. To vyplývá z přechozího C-H testu 4, kdy puklina v úrovni 95,51 m rel. ve vrtu 5 rovněž komunikovala s puklinou v úrovni 95,17 m rel. ve vrtu 7.

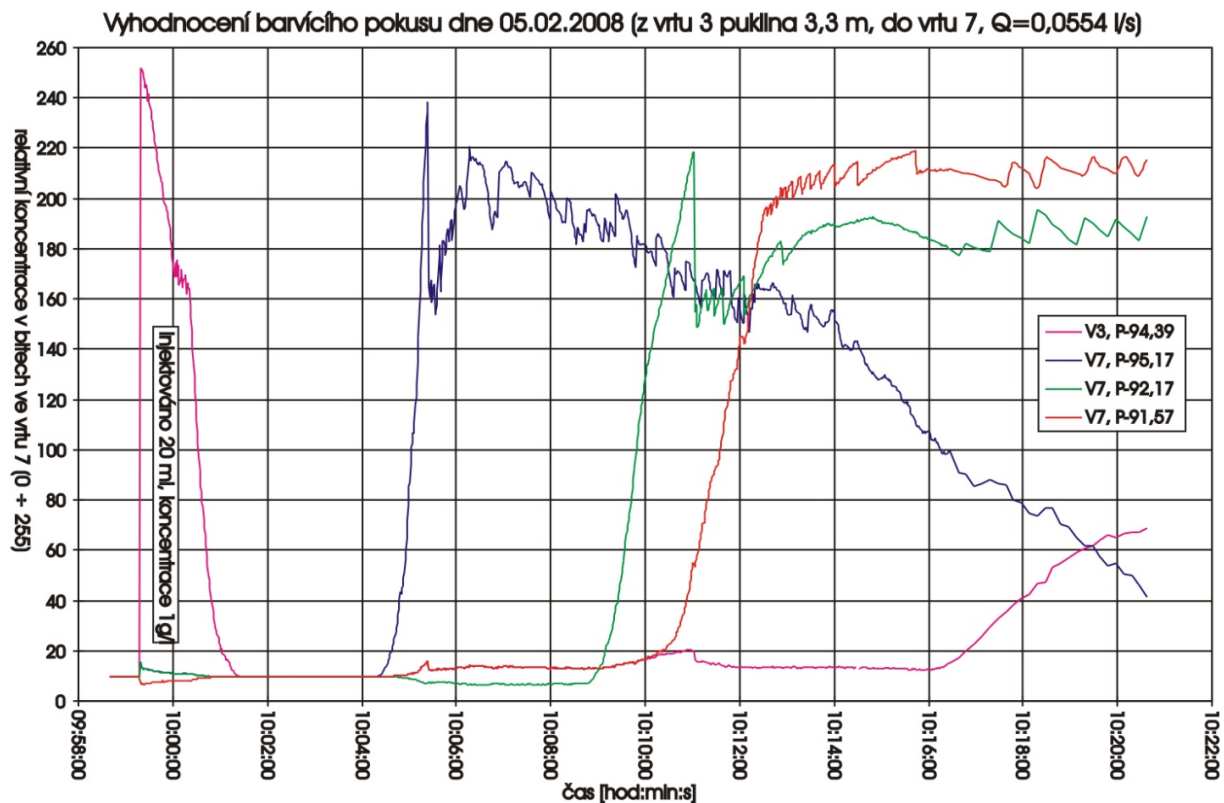
Obr. 44: Vyhodnocení C-H testu 5 (Nakládal P., 2008)



6.4.6 C-H test 6

Testována byla dvojice vrtů 3 a 7. Do pukliny v úrovni 94,39 m rel., která byla od zbytku vrtu 3 oddělena pomocí pakru, byla vtlačena voda čerpaná z vrtu 7. Po ustálení velikosti průtoku a hladin vody v obou sledovaných vrtech bylo do odizolovaného úseku vrtu 10 injektováno 20 ml roztoku barviva s koncentrací 1 g/l. Ve vrtu 7 byly instalovány 3 sledovací kamery, které detekovaly přítok barviva do vrtu konkrétním puklinovým průsečíkem. Interpretace záznamu údajů z kamer je uvedena v grafu (Obr. 45). Z grafu je patrné, že barvivo přitéklo do vrtu puklinou, která má ve vrtu 7 výškovou úroveň 95,17 m rel. Signály ostatních kamer jsou pouze důsledkem vertikálního pohybu barviva ve vrtu směrem k čerpadlu, které je umístěno pod nimi. Výsledek testu potvrzuje dobrou komunikaci mezi izolovaným úsekem vrtu 3 a nejvyšším zvodnělým puklinovým průsečíkem vrtu 7.

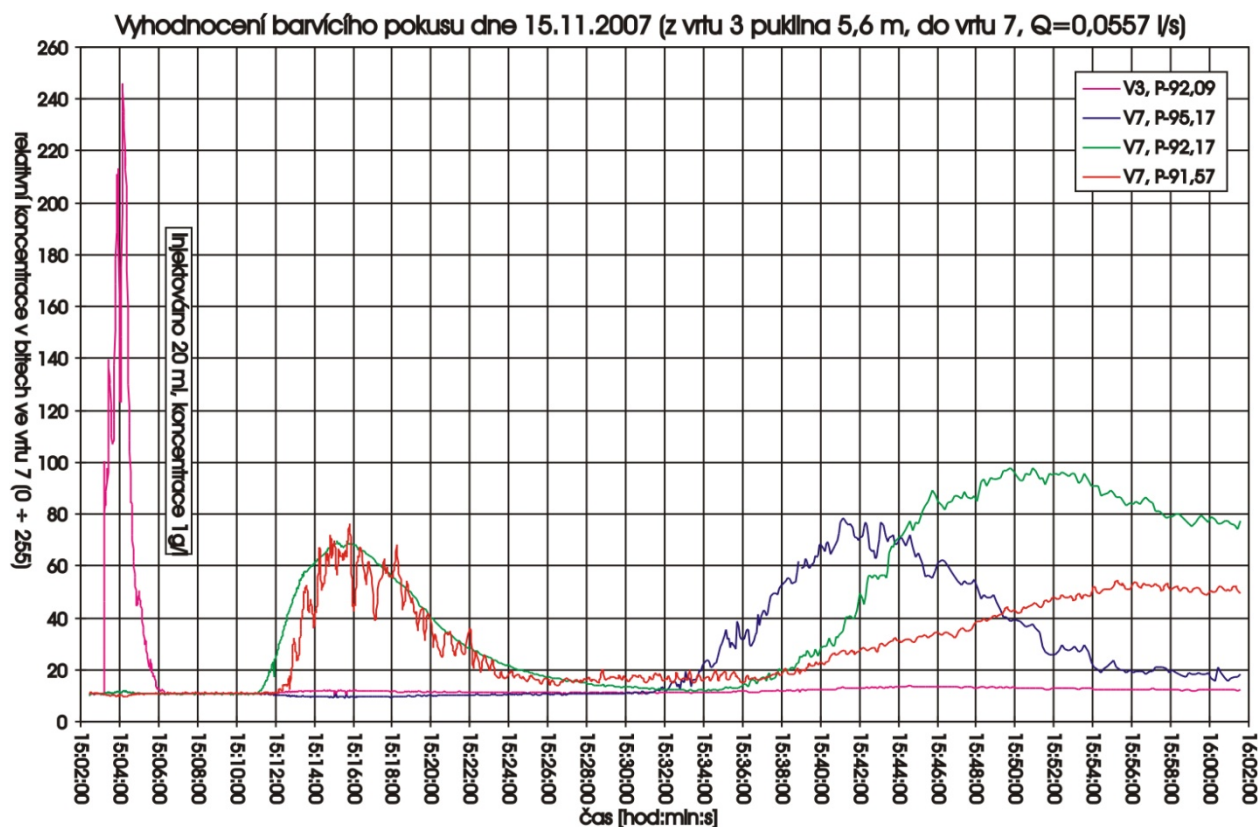
Obr. 45: Vyhodnocení C-H testu 6 (Nakládal P., 2008)



6.4.7 C-H test 7

Testována byla dvojice vrtů 3 a 7. Do pukliny v úrovni 92,09 m rel., která byla od zbytku vrtu 3 oddělena pomocí pneumatického pakru, byla injektována voda čerpaná z vrtu 7. Po ustálení velikosti průtoku systémem a ustálení hladin vody v obou vrtech bylo do odizolovaného úseku vrtu 10 injektováno 20 ml roztoku barviva s koncentrací 1 g/l. Ve vrtu 7 byly instalovány 3 sledovací kamery, které detekovaly přítok barviva konkrétní puklinou do vrtu. Interpretace záznamu údajů z kamer je uvedena v grafu (Obr. 46). Z grafu je patrné, že barvivo přiteklo do vrtu nejprve puklinou, která má ve vrtu č.7 výškovou úroveň 92,17 m rel. Významná část injektovaného barviva s určitým zpožděním dotekla do vrtu 7 ještě puklinou v úrovni 95,17 m rel. Záznam kamery z pukliny v úrovni 91,57 ve vrtu 7 je důsledkem pohybu barviva ve vrtu k čerpadlu, které je umístěno pod puklinami. Mezi testovanou puklinou ve vrtu 3 a čerpaným vrtem 7 je předpokládána hlavní komunikační cesta subhorizontální puklinou přímým spojením. Druhá dráha vede přes vertikální puklinu.

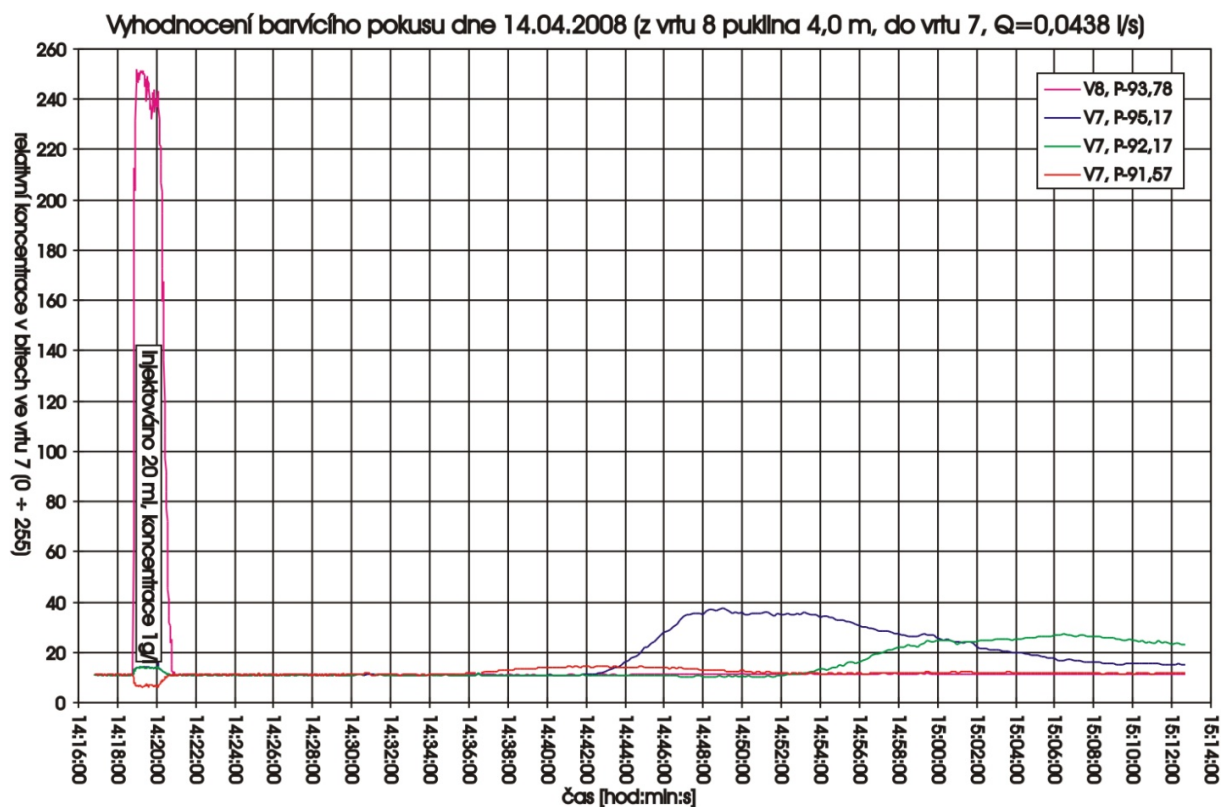
Obr. 46: Vyhodnocení C-H testu 7 (Nakládal P., 2008)



6.4.8 C-H test 8

Testována byla dvojice vrtů 8 a 7. Do pukliny v úrovni 93,78 m rel., která byla od zbytku vrtu 8 oddělena pakrem, byla injektována voda čerpaná z vrtu 7. Po ustálení průtoku vody a hladin v obou vrtech bylo do odizolovaného úseku vrtu 8 injektováno 20 ml roztoku barviva s koncentrací 1 g/l. Ve vrtu 7 byly instalovány 3 sledovací kamery, které detekovaly přítok barviva konkrétní puklinou do vrtu. Interpretace záznamu údajů z kamer je uvedena v grafu (Obr. 47). Z grafu je patrné, že barvivo přiteklo do vrtu puklinou, která má ve vrtu 7 výškovou úroveň 95,17 m rel. Množství stopovacího barviva detekovaného ve vrtu 7 je významně nižší než množství barviva injektovaného do vrtu 8, a to i přesto, že rozdíl ustálených hladin ve vrtech byl při testu 1,05 m. Průnikový čas barviva je rovněž relativně dlouhý, vzhledem k uměle vytvořenému gradientu mezi vrty. Lze tedy předpokládat, že hydraulické spojení zjištěné při tomto testu není v případě přirozených podmínek proudění příliš významné. Vzájemná hydraulická komunikace mezi vrty 8 a 7 je pro C-H test 8 předpokládána v rámci více subhorizontálních a vertikálních puklin.

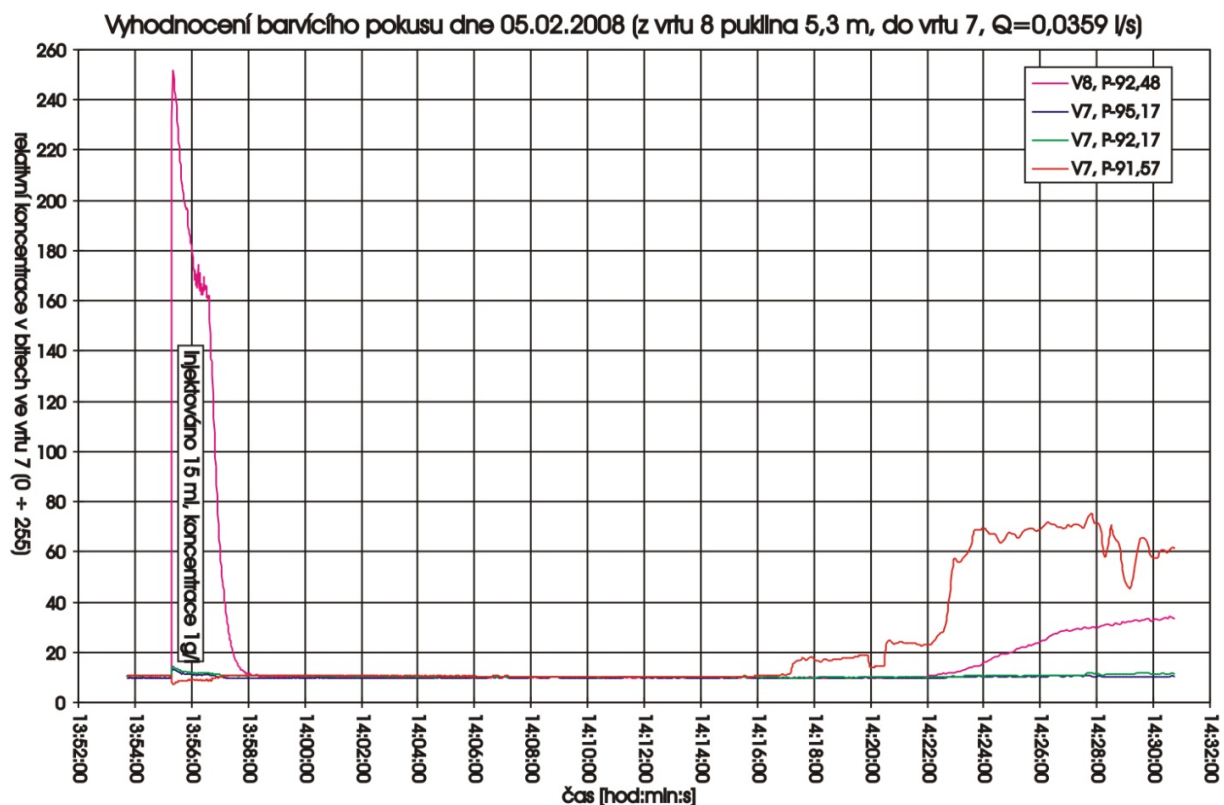
Obr. 47: Vyhodnocení C-H testu 8 (Nakládal P., 2008)



6.4.9 C-H test 9

Testovanou dvojicí vrtů byly vrt 8 a 7. Do pukliny v úrovni 92,48 m rel., která byla od zbytku vrtu 8 oddělena pneumatickým pakrem, byla injektována voda čerpaná z vrtu 7. Po ustálení průtoku vody a hladin v obou vrtech bylo do odizolovaného úseku vrtu 8 injektováno 15 ml roztoku barviva s koncentrací 1 g/l. Ve vrtu 7 byly instalovány 3 sledovací kamery, které detekovaly přítok barviva konkrétní puklinou do vrtu. Interpretace záznamu údajů z kamer je uvedena v grafu (Obr. 48). Z grafu je patrné, že barvivo přiteklo do vrtu puklinou, která má ve vrtu 7 výškovou úroveň 91,57 m rel. Při tomto testu byl rozdíl hladin mezi oběma vrty velmi vysoký (2,32 m). Přesto je průnikový čas (22 min) velmi dlouhý, což indikuje, že je hydraulické propojení pakrem odizolovaného úseku vrtu 8 s vrtem 7 nevýznamné. Vzájemná hydraulická komunikace mezi vrty 8 a 7 je pro C-H test 9 předpokládána v rámci více subhorizontálních a vertikálních puklin.

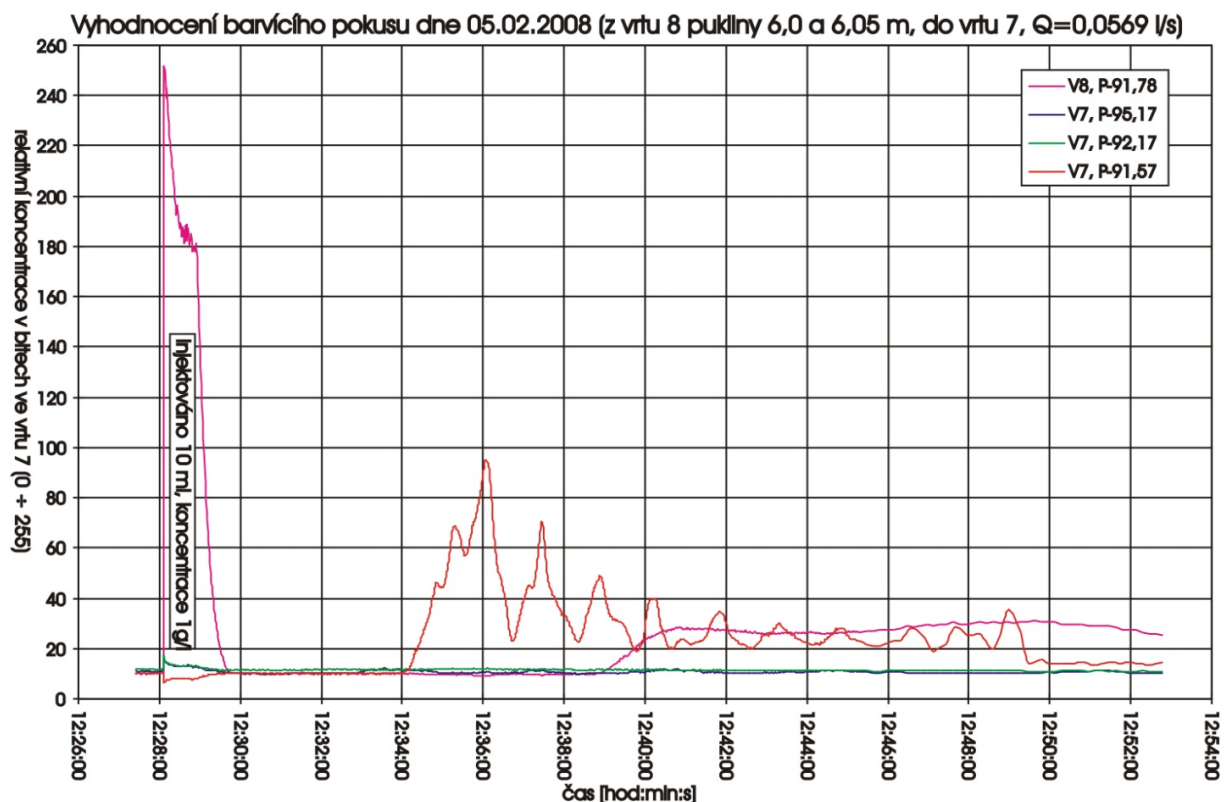
Obr. 48: Vyhodnocení C-H testu 9 (Nakládal P., 2008)



6.4.10 C-H test 10

Testována byla dvojice vrtů 8 a 7. Do pukliny v úrovni 91,78 m rel., která byla od zbytku vrtu 8 oddělena pakrem, byla injektována voda čerpaná z vrtu 7. Po ustálení průtoku vody a hladin v obou vrtech bylo do odizolovaného úseku vrtu 8 injektováno 10 ml roztoku barviva s koncentrací 1 g/l. Ve vrtu 7 byly instalovány 3 sledovací kamery, které detekovaly přítok barviva konkrétní puklinou do vrtu. Interpretace záznamu údajů z kamer je uvedena v grafu (Obr. 49). Z grafu je patrné, že barvivo přiteklo do vrtu puklinou, která má ve vrtu 7 výškovou úroveň 91,57 m rel. Hydraulická komunikace mezi vrty 8 a 7 je při C-H testu 10 předpokládána v rámci ukloněných horizontálních puklin propojených vertikální puklinou.

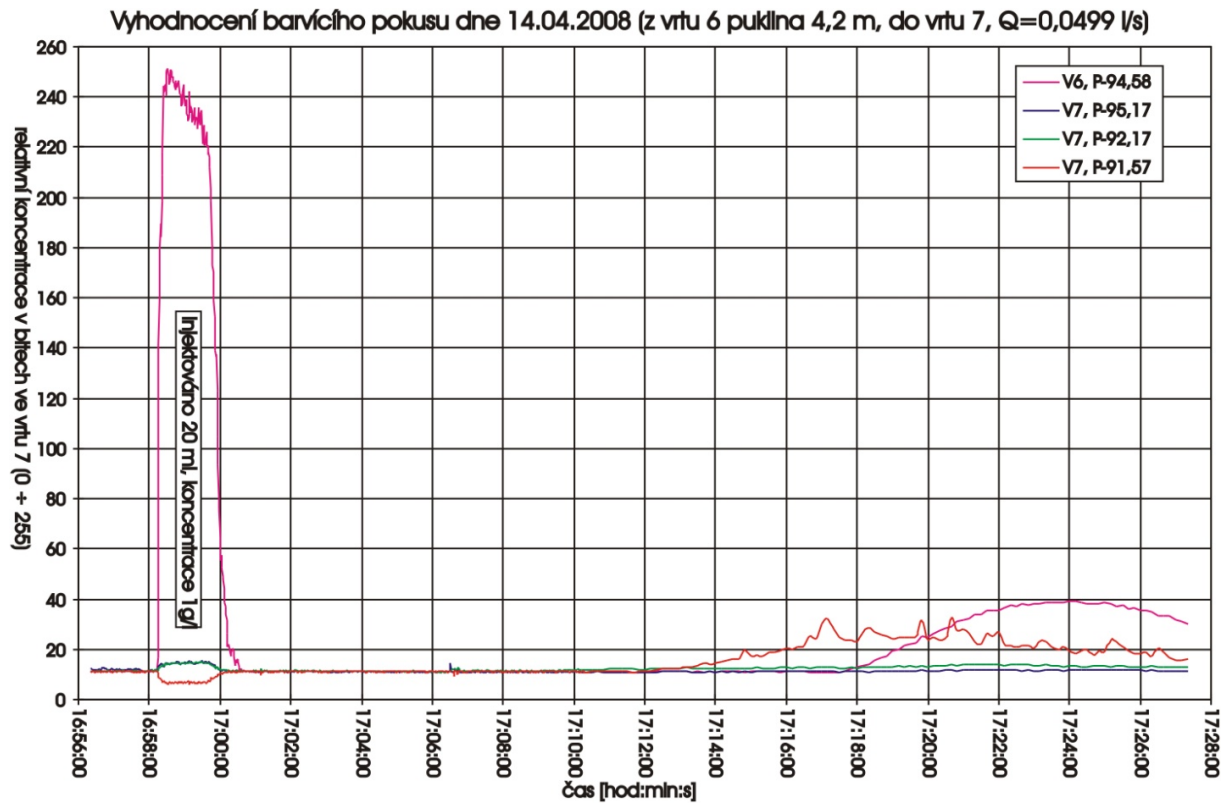
Obr. 49: Vyhodnocení C-H testu 10 (Nakládal P., 2008)



6.4.11 C-H test 11

Testována byla dvojice vrtů 6 a 7. Do pukliny v úrovni 94,58 m rel., která byla od zbytku vrtu 6 oddělena pakrem, byla injektována voda čerpaná z vrtu 7. Po ustálení průtoku vody systémem a ustálení úrovní hladin v obou vrtech bylo do odizolovaného úseku vrtu 8 injektováno 20 ml roztoku barviva s koncentrací 1 g/l. Ve vrtu 7 byly instalovány 3 sledovací kamery, které detekovaly přítok barviva konkrétní puklinou do vrtu. Interpretace záznamu údajů z kamer je uvedena v grafu (Obr. 50). Z grafu je patrné, že barvivo přiteklo do vrtu puklinou, která má ve vrtu 7 výškovou úroveň 91,57 m rel. Množství stopovacího barviva detekovaného ve vrtu 7 je významně nižší než množství barviva injektovaného do vrtu 6. Průnikový čas barviva je rovněž relativně dlouhý. Mezi testovanou puklinou ve vrtu 6 a čerpaným vrtem 7 je předpokládána hlavní transportní cesta subhorizontálními puklinami s krátkým přetokem přes vertikální puklinu.

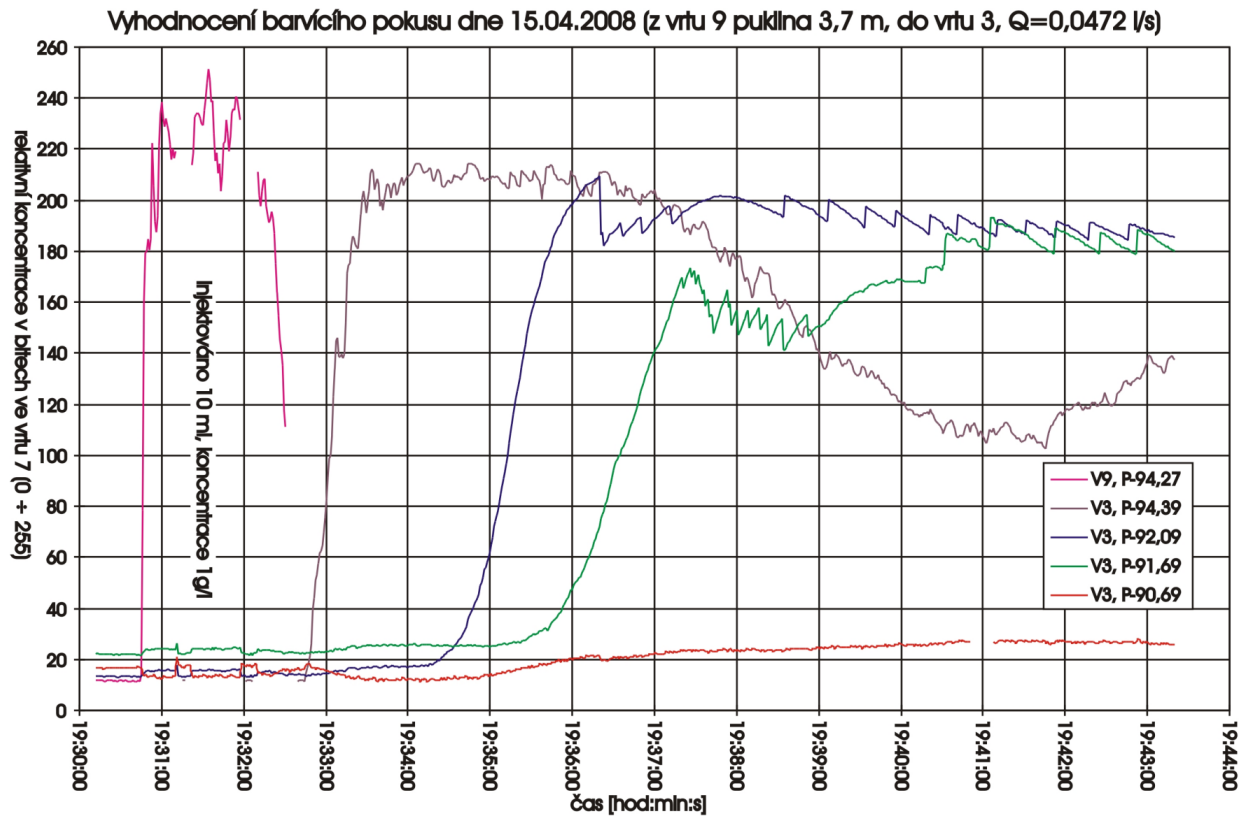
Obr. 50: Vyhodnocení C-H testu 11 (Nakládal P., 2008)



6.4.12 C-H test 12

Testována byla dvojice vrtů 9 a 3, kdy do pukliny v úrovni 94,27 m rel., která byla od zbytku vrtu 9 oddělena pakrem, byla injektována voda čerpaná z vrtu 3. Po ustálení průtoku a hladin v obou vrtech bylo do odizolovaného úseku vrtu 9 injektováno 10 ml roztoku barviva s koncentrací 1 g/l. Ve vrtu 3 byly instalovány 4 sledovací kamery, které detekovaly přítok barviva konkrétní puklinou do vrtu. Interpretace záznamu údajů z kamer je uvedena v grafu (Obr. 51). Z grafu je patrné, že barvivo přitéklo do vrtu puklinou, která má ve vrtu 3 výškovou úroveň 94,39 m rel. Signály ostatních kamer ve vrtu 3 jsou pouze důsledkem vertikálního pohybu barviva ve vrtu směrem k čerpadlu, které je umístěno nad jeho dnem. Vzájemná hydraulická komunikace mezi vrtými 9 a 3 je pro C-H test 12 předpokládána v rámci jedné subhorizontální pukliny.

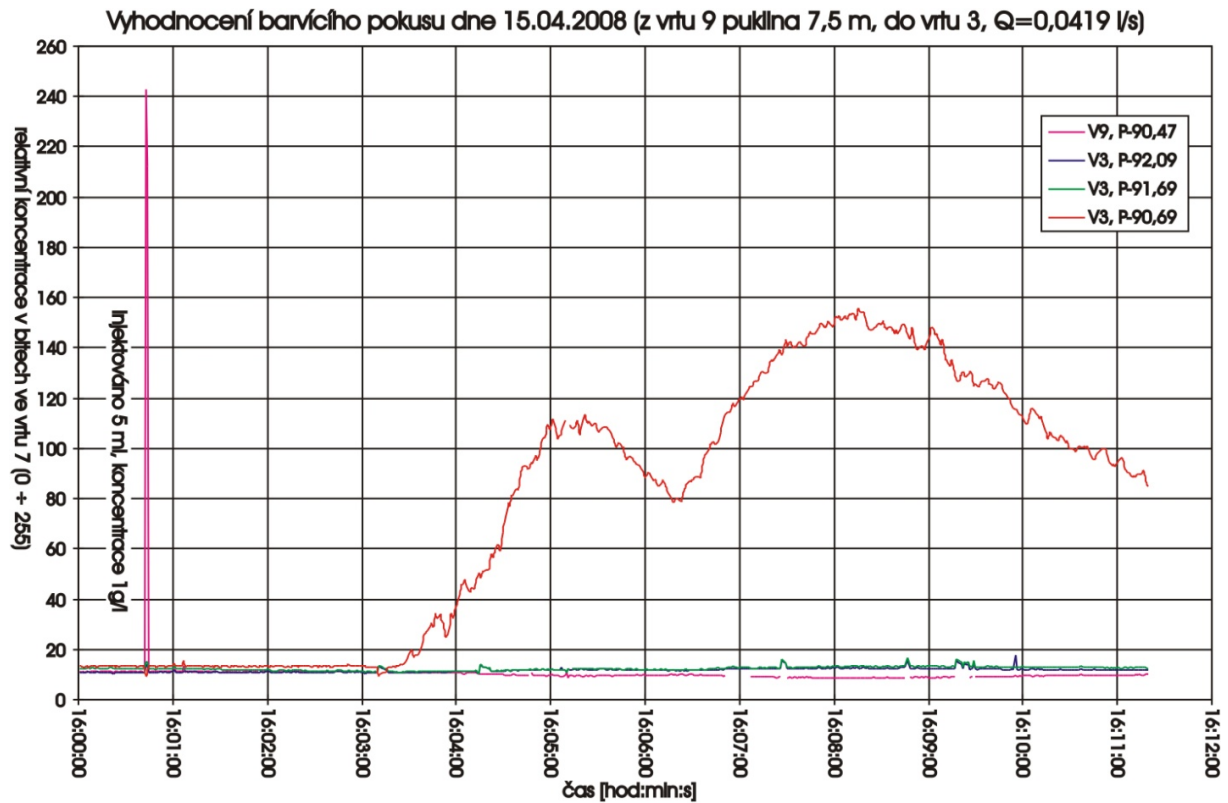
Obr. 51: Vyhodnocení C-H testu 12 (Nakládal P., 2008)



6.4.13 C-H test 14

Testována byla dvojice vrtů 9 a 3. Do pukliny v úrovni 90,47 m rel., která byla od zbytku vrtu 9 oddělena pakrem, byla injektována voda čerpaná z vrtu 3. Po ustálení průtoku a hladin v obou vrtech bylo do odizolovaného úseku vrtu 9 injektováno 5 ml roztoku barviva s koncentrací 1 g/l. Ve vrtu 3 byly instalovány 3 sledovací kamery, které detekovaly přítok barviva konkrétní puklinou do vrtu. Interpretace záznamu údajů z kamer je uvedena v grafu (Obr. 52). Z grafu je patrné, že barvivo přiteklo do vrtu puklinou, která má ve vrtu 3 výškovou úroveň 90,69 m rel. Pro simulovaný C-H test 14 je předpokládána vzájemná hydraulická komunikace mezi vrtu 9 a 3 v rámci jedné subhorizontální pukliny.

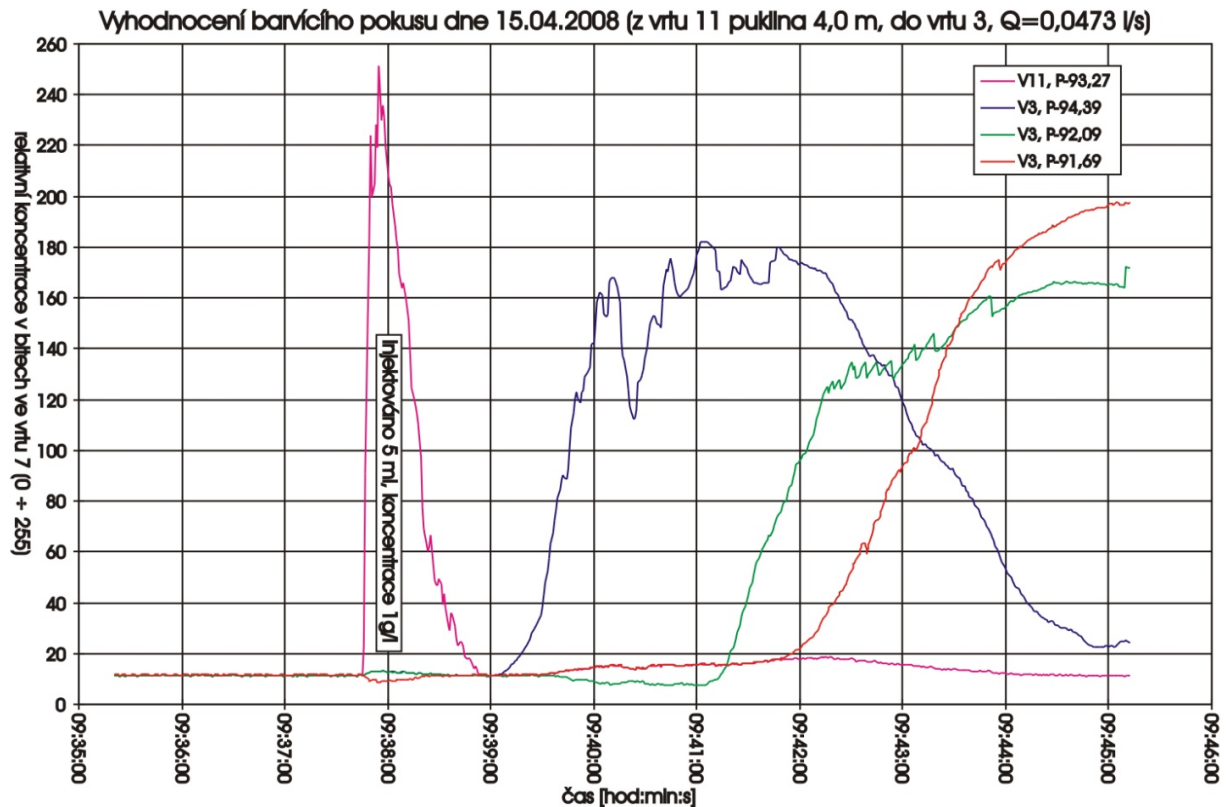
Obr. 52: Vyhodnocení C-H testu 14 (Nakládal P., 2008)



6.4.14 C-H test 15

Testována byla dvojice vrtů 11 a 3. Do pukliny v úrovni 93,27 m rel., která byla od zbytku vrtu 11 oddělena pakrem, byla injektována voda čerpaná z vrtu 3. Po ustálení průtoku a hladin vody v obou vrtech bylo do odizolovaného úseku vrtu 11 injektováno 5 ml roztoku barviva s koncentrací 1 g/l. Ve vrtu 3 byly instalovány 3 sledovací kamery, které detekovaly přítok barviva konkrétní puklinou do vrtu. Interpretace záznamu údajů z kamer je uvedena v grafu (Obr. 53). Z grafu je patrné, že barvivo přitéklo do vrtu puklinou, která má ve vrtu 3 výškovou úroveň 94,39 m rel. Signály ostatních kamer jsou pouze důsledkem vertikálního pohybu barviva ve vrtu směrem k čerpadlu, které je umístěno pod nimi. Transportní cesta je pro C-H test 15 předpokládána subhorizontálními puklinami.

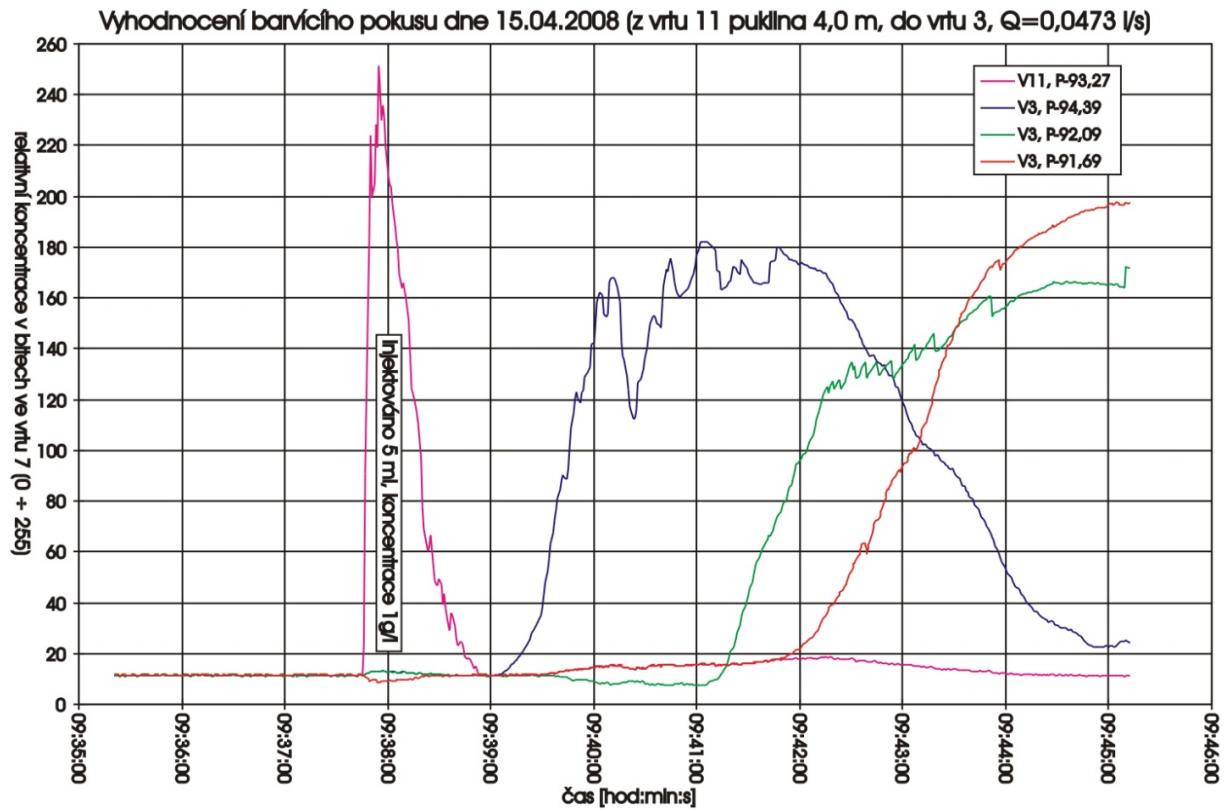
Obr. 53: Vyhodnocení C-H testu 15 (Nakládal P., 2008)



6.4.15 C-H test 16

Testována byla dvojice vrtů 11 a 3. Do pukliny v úrovni 93,27 m rel., která byla od zbytku vrtu 11 oddělena pakrem, byla injektována voda čerpaná z vrtu 3. Po ustálení průtoku a hladin vody v obou vrtech bylo do odizolovaného úseku vrtu 11 injektováno 5 ml roztoku barviva s koncentrací 1 g/l. Ve vrtu 3 byly instalovány 3 sledovací kamery, které detekovaly přítok barviva konkrétní puklinou do vrtu. Interpretace záznamu údajů z kamer je uvedena v grafu (Obr. 54). Z grafu je patrné, že barvivo přiteklo do vrtu puklinou, která má ve vrtu 3 výškovou úroveň 94.39 m rel. Signály ostatních kamer jsou pouze důsledkem vertikálního pohybu barviva ve vrtu směrem k čerpadlu, které je umístěno pod nimi. Transportní cesta je pro C-H test 15 předpokládána dvěma subhorizontálními puklinami.

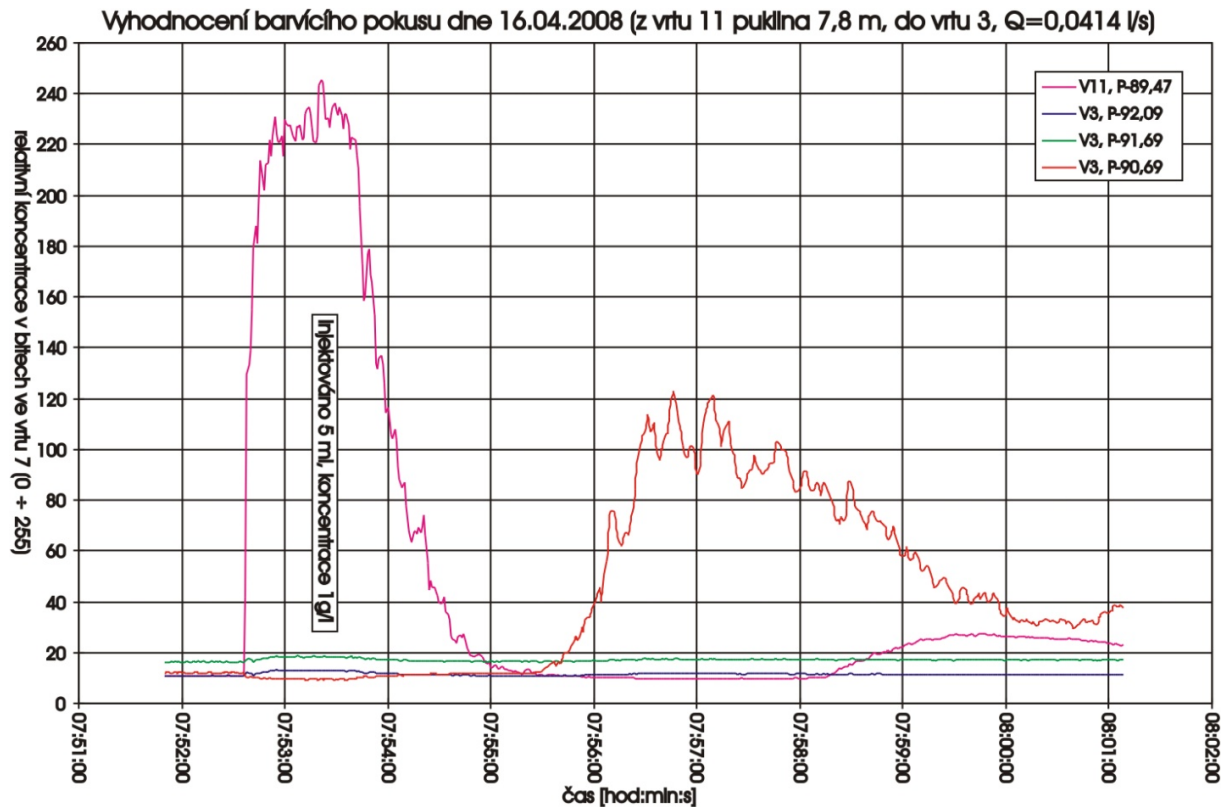
Obr. 54: Vyhodnocení C-H testu 16 (Nakládal P., 2008)



6.4.16 C-H test 17

Testována byla dvojice vrtů 11 a 3. Do pukliny v úrovni 89,47 m rel., která byla od zbytku vrtu 11 oddělena pakrem, byla injektována voda čerpaná z vrtu 3. Po ustálení průtoku a hladin v obou vrtech bylo do odizolovaného úseku vrtu č. 11 injektováno 5 ml roztoku barviva s koncentrací 1 g/l. Ve vrtu 3 byly instalovány 3 sledovací kamery, které detekovaly přítok barviva konkrétní puklinou do vrtu. Interpretace záznamu údajů z kamer je uvedena v grafu (Obr. 55). Z grafu je patrné, že barvivo přiteklo do čerpacího vrtu puklinou, která má ve vrtu 3 výškovou úroveň 90,69 m rel. Při C-H testu 17 je předpokládána hlavní transportní cesta dvěma subhorizontálními puklinami propojené vertikální puklinou.

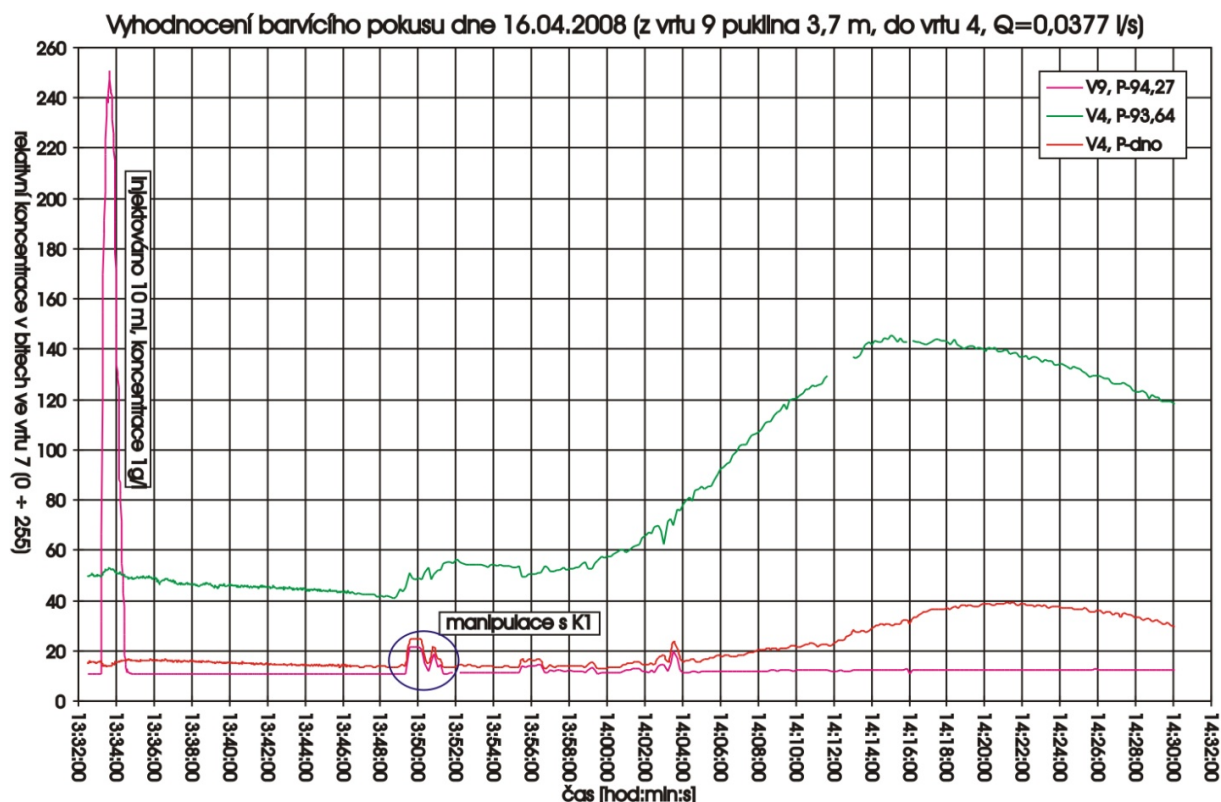
Obr. 55: Vyhodnocení C-H testu 17 (Nakládal P., 2008)



6.4.17 C-H test 18

Testována byla dvojice vrtů 9 a 4. Do pukliny v úrovni 94,27 m rel., která byla od zbytku vrtu 9 izolována pomocí pakru, byla vtlačena voda čerpaná z vrtu 4. Po ustálení hodnoty průtoku a po ustálení hladin v obou vrtech bylo do odizolovaného úseku vrtu 9 injektováno 10 ml roztoku barviva s koncentrací 1 g/l. Ve vrtu 4 byly instalovány 2 sledovací kamery, které detekovaly přítok barviva a určili konkrétní puklinu, která komunikuje s pakrem odděleným úsekem vrtu 9. Interpretace záznamu údajů z kamer je uvedena v grafu (Obr. 56). Z grafu je patrné, že barvivo přiteklo do vrtu puklinou, která má ve vrtu 4 výškovou úroveň 93,64 m rel. Při C-H testu 17 je předpokládána hlavní transportní cesta dvěma subhorizontálními puklinami propojené vertikální puklinou.

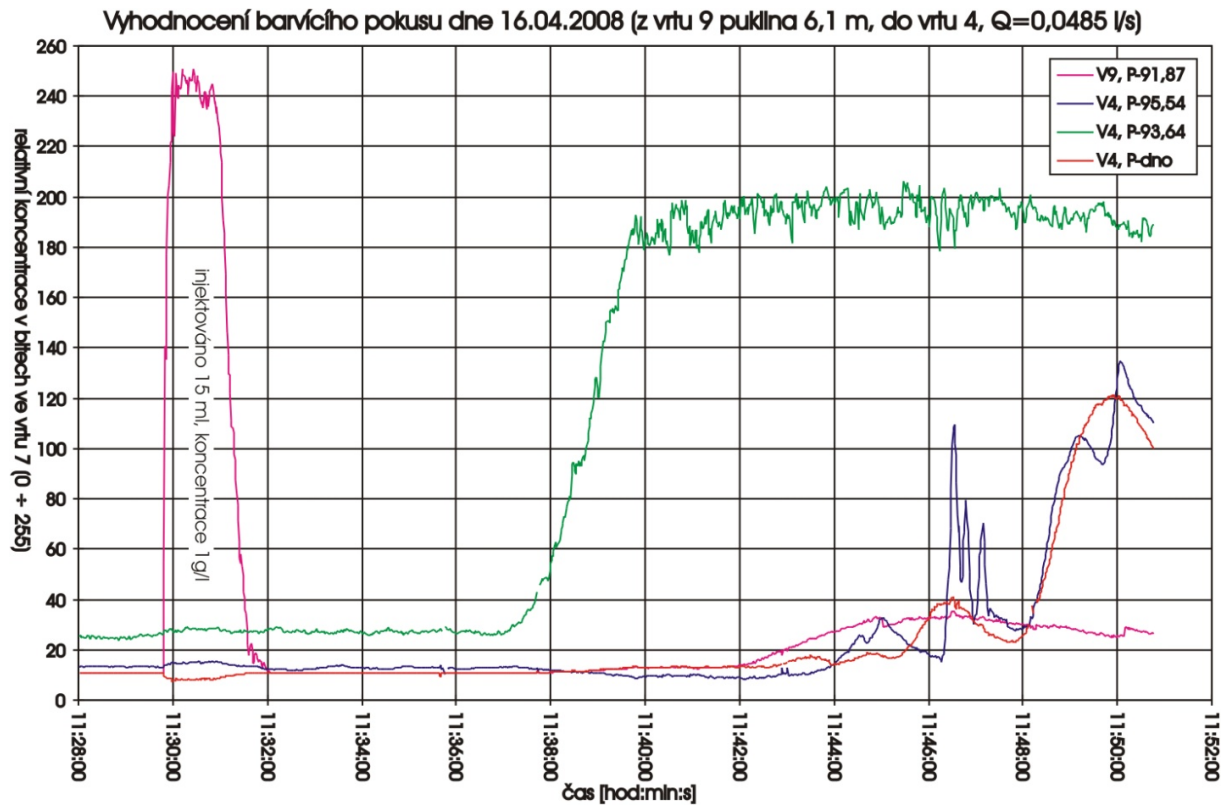
Obr. 56: Vyhodnocení C-H testu 18 (Nakládal P., 2008)



6.4.18 C-H test 19

Testována byla dvojice vrtů 9 a 4. Do pukliny v úrovni 91,87 m rel., která byla od zbytku vrtu 9 oddělena pakrem, byla injektována voda čerpaná z vrtu 4. Po ustálení hodnoty průtoku a hladin v obou vrtech bylo do odizolovaného úseku vrtu 9 injektováno 15 ml roztoku barviva s koncentrací 1 g/l. Ve vrtu 4 byly instalovány 3 sledovací kamery, které detekovaly přítok barviva konkrétní puklinou do vrtu. Interpretace záznamu údajů z kamer je uvedena v grafu (Obr. 57). Z grafu je patrné, že barvivo přitéklo do vrtu puklinou, která má ve vrtu 4 výškovou úroveň 93,64 m rel. Signály ostatních kamer jsou pouze důsledkem vertikálního pohybu barviva ve vrtu směrem k čerpadlu, které je umístěno pod nimi. Vzájemná hydraulická komunikace mezi vrti 9 a 4 je pro C-H test 19 předpokládána v rámci jedné subhorizontální pukliny.

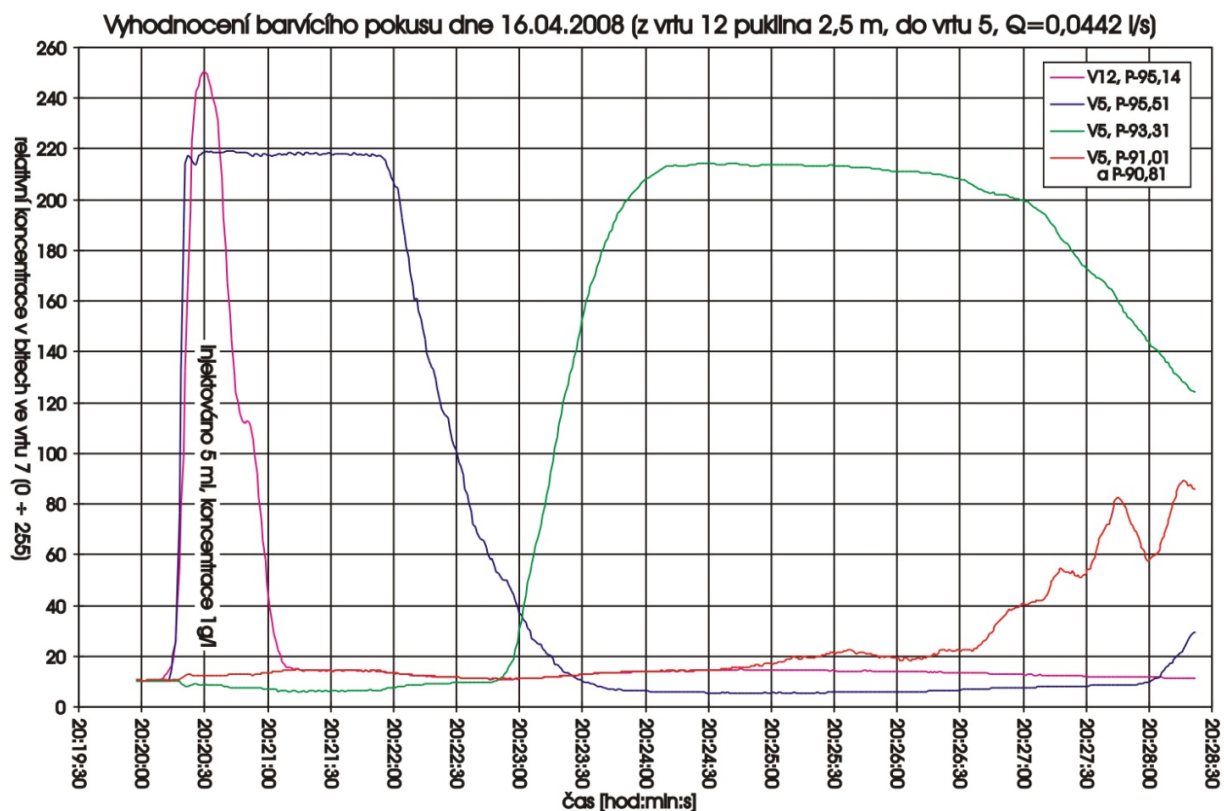
Obr. 57: Vyhodnocení C-H testu 19 (Nakládal P., 2008)



6.4.19 C-H test 21

Testována byla dvojice vrtů 12 a 5. Do pukliny v úrovni 95,14 m rel., která byla od zbytku vrtu 12 oddělena pakrem, byla injektována voda čerpaná z vrtu 5. Po ustálení průtoku systémem a ustálení hladin v obou vrtech bylo do odizolovaného úseku vrtu 12 injektováno 5 ml roztoku barviva s koncentrací 1 g/l. Ve vrtu 5 byly instalovány 3 sledovací kamery, které detekovaly přítok barviva konkrétní puklinou do vrtu. Interpretace záznamu údajů z kamer je uvedena v grafu (Obr. 58). Z grafu je patrné, že barvivo přiteklo do vrtu puklinou, která má ve vrtu 5 výškovou úroveň 95,51 m rel. Signály ostatních kamer jsou pouze důsledkem vertikálního pohybu barviva ve vrtu směrem k čerpadlu, které je umístěno pod nimi. V rámci C-H testu 21 je vzájemná hydraulická komunikace mezi vrtu 12 a 5 předpokládána přes jednu subhorizontální puklinu.

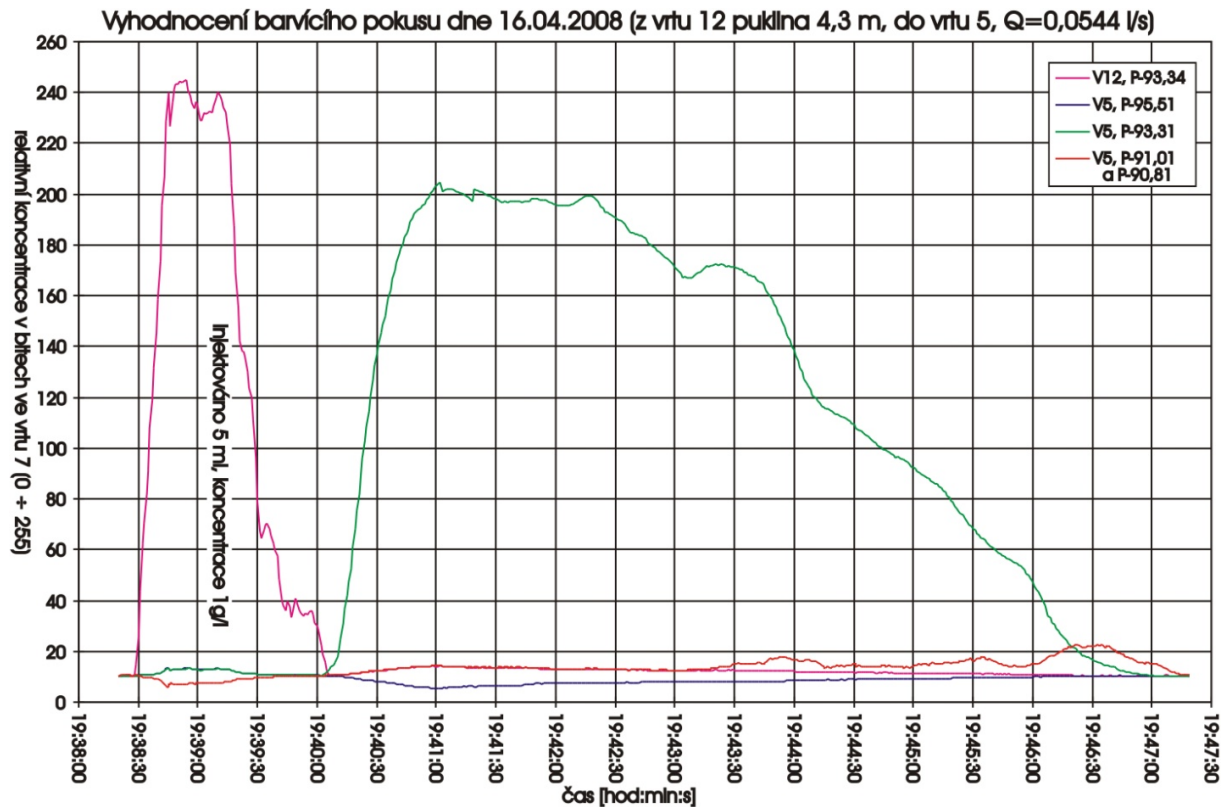
Obr. 58: Vyhodnocení C-H testu 21 (Nakládal P., 2008)



6.4.20 C-H test 22

Testována byla dvojice vrtů 12 a 5. Do pukliny v úrovni 93,34 m rel., která byla od zbytku vrtu 12 oddělena pomocí pakru, byla injektována voda čerpaná z vrtu 5. Po ustálení průtoku vody systémem a ustálení hladin vody v obou sledovaných vrtech bylo do odizolovaného úseku vrtu 12 injektováno 5 ml roztoku barviva s koncentrací 1 g/l. Ve vrtu 5 byly instalovány 3 sledovací kamery, které detekovaly přítok barviva konkrétní puklinou do vrtu. Interpretace záznamu údajů z kamer je uvedena v grafu (Obr. 59). Z grafu je patrné, že barvivo přiteklo do vrtu puklinou, která má ve vrtu 5 výškovou úroveň 93.31 m rel. Vzájemná hydraulická komunikace mezi vrtů 12 a 5 je při C-H testu 22 předpokládána v rámci jedné subhorizontální pukliny.

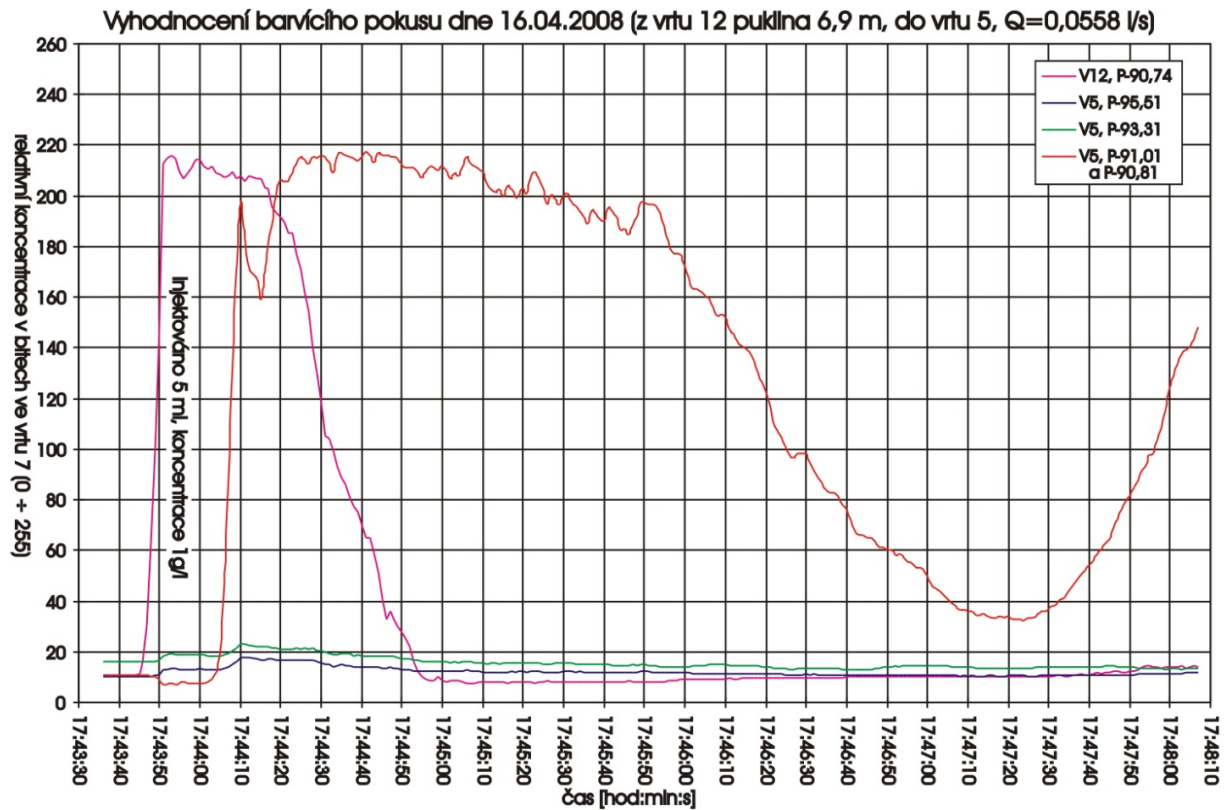
Obr. 59: Vyhodnocení C-H testu 22 (Nakládal P., 2008)



6.4.21 C-H test 23

Testována byla dvojice vrtů 12 a 5. Do pukliny v úrovni 90,74 m rel., která byla od zbytku vrtu 12 odizolována pakrem, byla injektována podzemní voda čerpaná z vrtu 5. Po ustálení průtoku systémem a ustálení hladin vody v obou testovaných vrtech bylo do odizolovaného úseku vrtu 12 injektováno 5 ml roztoku barviva s koncentrací 1 g/l. Ve vrtu 5 byly instalovány 3 sledovací kamery, které detekovaly přítok barviva konkrétní puklinou do vrtu. Interpretace záznamu údajů z kamer je uvedena v grafu (Obr. 60). Z grafu je patrné, že barvivo přiteklo do vrtu 5 některou z dvojice puklin v úrovních 91,01 a 90,81 m rel., které byly sledovány jednou kamerou. Při C-H testu 23 je předpokládána vzájemná hydraulická komunikace vrtů 12 a 5 v rámci jedné subhorizontální pukliny.

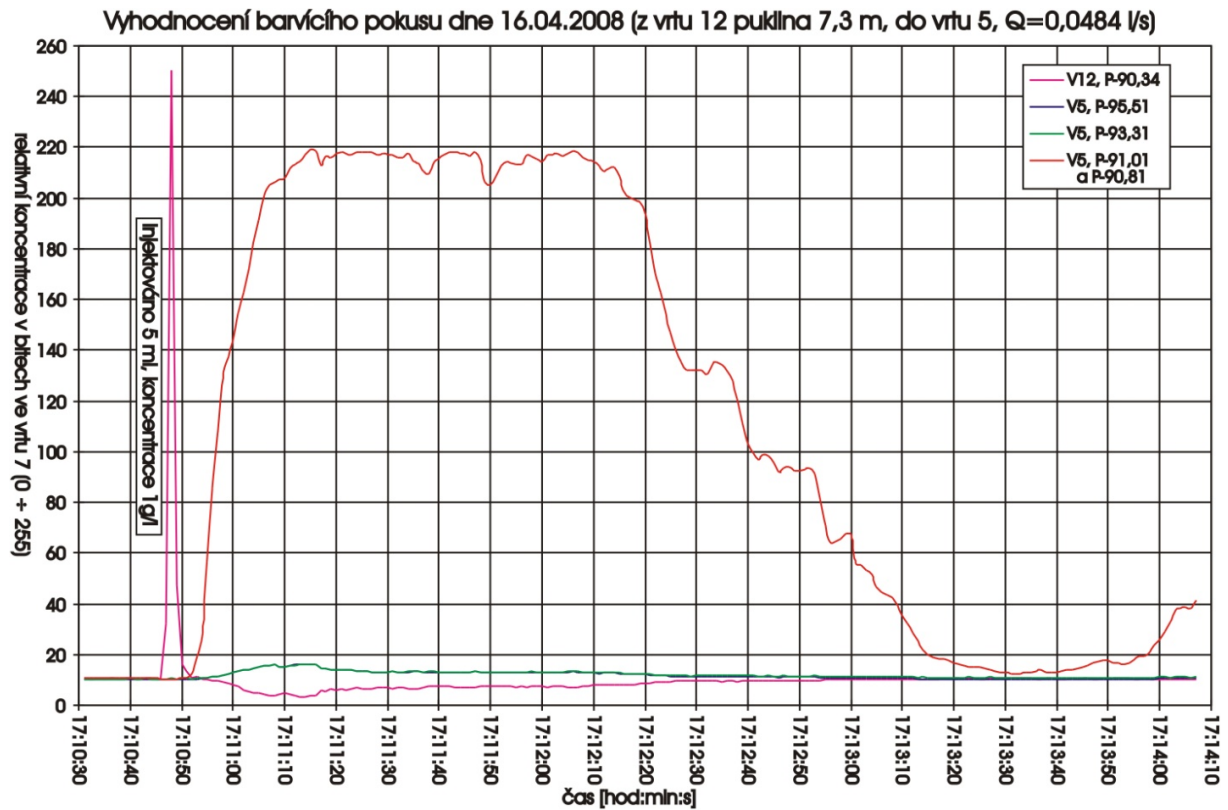
Obr. 60: Vyhodnocení C-H testu 23 (Nakládal P., 2008)



6.4.22 C-H test 24

Testována byla dvojice vrtů 12 a 5. Do pukliny v úrovni 90,34 m rel., která byla od zbytku vrtu 12 oddělena pomocí pakru, byla injektována voda čerpaná z vrtu 5. Po ustálení průtoku vody systémem a ustálení hladin vody v obou sledovaných vrtech bylo do odizolovaného úseku vrtu 12 injektováno 5 ml roztoku barviva s koncentrací 1 g/l. Ve vrtu 5 byly instalovány 3 sledovací kamery, které detekovaly přítok barviva konkrétní puklinou do vrtu. Interpretace záznamu údajů z kamer je uvedena v grafu (Obr. 61). Z grafu je patrné, že barvivo přiteklo do vrtu 5 některou z dvojice puklin v úrovních 91,01 a 90,81 m rel., které byly sledovány jednou kamerou. Při C-H testu 24 je předpokládána vzájemná hydraulická komunikace vrtů 12 a 5 v rámci dvou subhorizontálních puklin.

Obr. 61: Vyhodnocení C-H testu 24 (Nakládal P., 2008)



6.5 Shrnutí

Data z realizovaných C-H testů byla použita k tvorbě geometrického modelu puklinového systému zájmové lokality a sloužila rovněž ke kalibraci hydrogeologického modelu. Výsledků C-H testů ukazují, že jednotlivé vrty jsou nejčastěji propojeny subhorizontálními puklinami, které s mírným sklonem zapadají směrem od lomové stěny. Toto zjištění velmi dobře koresponduje s výsledky orientačních směrů a sklonů získaných při prohlídce vrtů pomocí kamer. Vertikální pukliny mají většinou funkci těsnící. Hlavní výhodou použití televizních kamer tkví v možnosti jejich přesného umístění na studovanou strukturu, okamžitého zjištění času příchodu stopovací látky a kontinuálního záznamu dat.

7. Laboratorní ultrazvukové prozařování

Cílem této kapitoly je charakterizování granitového prostředí z hlediska výzkumu jeho parametrů geofyzikálními metodami a stanovení vzájemných souvislostí mezi strukturou horniny souvisejícími se seismickými vlastnostmi. Kromě klasických stanovení geomechanických parametrů horninového prostředí má významnou roli i geofyzikální měření. K tomu je možné využít zejména seismické metody určené k stanovení fyzikálních charakteristik granitového vzorku a k porovnání s jeho mechanickými vlastnostmi.

Pro studium bylo vybráno sedm lokalit granitoidních hornin v Českém masivu. Rychlosti seismických vln byly měřeny na laboratorních vzorcích, které byly nenasycené, nasycené a vysušené. Rychlosti seismických vln byly porovnány z jejich objemovou hmotností, pórovitostí a koeficientem hydraulické vodivosti. Dále byly porovnány hodnoty Youngova modulu pružnosti vyhodnocené z rychlosti šíření seismických vln (dynamicky) a stanovené v průběhu jednoosého stlačování (staticky).

Metoda laboratorního ultrazvukového prozařování je obecně používaná a umožňuje i stanovení anizotropie hornin. Podrobným výzkumem anizotropie hornin její změny v důsledku působícího všestranného tlaku se zabývali např. Pros et al. (1998), Martínková et al. (2000), Pros et al. (2003), Kern et al. (2008). Na speciální aparatuře získali hodnoty anizotropie rychlostí šíření ultrazvukových vln až do tlaku 200 MPa. Menéndez et al. (1999), Reuschlé et al. (2006), Chaki et al. (2008), Takarli et al. (2008) studovali pomocí seismického prozařování vliv tepelného namáhání na mikrostrukturu granitu. Menéndez et al. (1999) použili ultrazvukové prozařování vedle konfokálního laserového mikroskopu při studiu prasklin vzniklých tepelným a mechanickým namáháním granitových vzorků. Pomocí stanovení změn rychlostí P-vln potvrdili, že při mechanickém namáhání vznikají trhliny přednostně orientované paralelně se směrem tlaku. Naopak tepelné namáhání indukuje ve vzorcích trhliny orientované všesměrně. Reuschlé et al. (2006) studovali závislost rychlosti šíření P-vln na velikosti pórového a komorového tlaku termálně namáhaných nasycených granitových vzorků. Ověřili, že snižování pórového tlaku vede k uzavírání mikrotrhlin a růstu rychlosti P-vln až do dosažení plató odpovídajícího prahovému pórovému tlaku. Rostoucí komorový tlak zvyšuje rychlosti P-vln. Chaki et al. (2008) studovali vliv tepelného namáhání na rychlost šíření P-vln. Změřili výrazný pokles rychlosti P-vln mezi 500-600°C související s přeměnou křemene α/β . Takarli et al. (2008) studovali vliv cyklického ochlazování a zahřívání (-20°C až 20°C) na rychlosti P-vln ve vysušených a nasycených vzorcích granitu. V obou případech zaznamenali pokles rychlostí P-vln způsobený vznikem nových mikrotrhlin a rozšiřováním těch původních. Schild et al. (2001) měřili rychlost P-vln na vzorcích impregnovaných akrylátovou pryskyřicí *in situ* a vzorcích neimpregnovaných. Studovali vliv všesměrného tlaku, směrové orientace a nasycení na rozlišení přírodních trhlin od trhlin indukovaných uvolněním litostatického tlaku a vrtáním a přípravou vzorků. Popisují vyšší rychlost P-vln v nasycených vzorcích než ve vzorcích vysušených a vyšší rychlosti v impregnovaných vzorcích související s jejich nižší pórovitostí. Tento rozdíl klesá s rostoucím napětím na vzorek. Rychlosti P-vln ale s rostoucím napětím rostou.

Porovnáním statických a seismických elastických konstant hornin se zabýval Zismman (1933). Rozdíl mezi statickými a dynamickými moduly pružnosti vysvětluje existencí pórů a mikrotrhlin, které ovlivňují statické stanovení modulů. Dynamicky stanovené moduly naopak charakterizují matici horniny bez pórů a mikrotrhlin. Čím je hornina kompaktnější, tím jsou rozdíly v naměřených modulech menší. Howarth (1984) vyvinul přístroj, který měřil současně statické a dynamické moduly horninových vzorků během trojosého stlačování. Z jeho pozorování vyplývá, že se rozdíly mezi oběma moduly snižují se zvyšujícím se komorovým tlakem. Tento fenomén vysvětluje uzavíráním mikrotrhlin působícím tlakem. Oda et al. (1990) studovali rychlost P-vln při různých frekvencích piezosnímačů v suchých granitových vzorcích během jednoosého stlačování. Mezi výsledky uvádějí, že rychlost P-vln během

zatěžování roste do hodnoty 0,5 pevnosti v prostém tlaku, poté klesá. Větší pokles rychlosti naměřili při nižších frekvencích piezosnímačů. Ciccotti a Mulargia (2004) uvádějí, že rozdíl mezi statickým a dynamickým modulem pružnosti může být způsoben rozdílnou velikostí přetvoření během testů. Olsen et al. (2004) studovali statický a dynamický modul pružnosti křídového vápence. Rozdíly modulů vysvětlují nevratným přetvořením během jednoosého stlačování. Youngův modul vyhodnocený z odlehčovací větve jednoosého stlačování koreluje s modulem získaným akustickou karotáží.

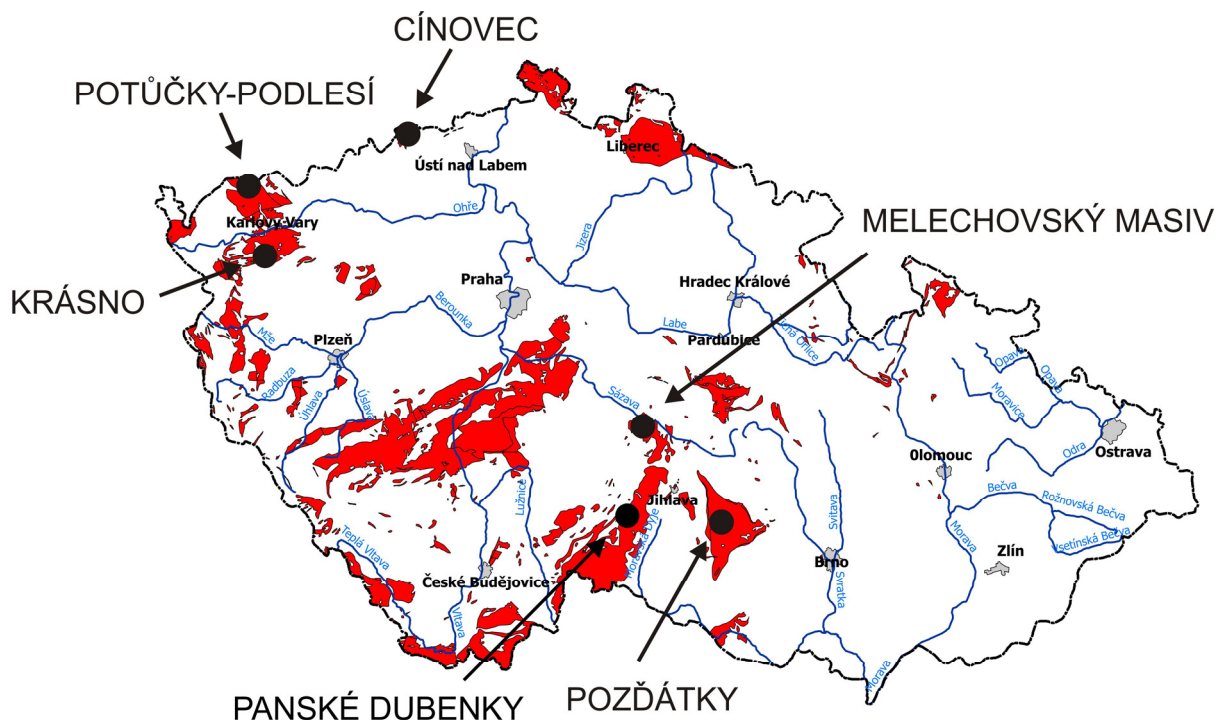
Prakoso a Kulhawy (2011) studovali vliv průměru vzorku a vlhkosti na pevnost v prostém tlaku. Ve své práci uvádějí standardní průměr vzorku 50-58 mm. Pevnost v prostém tlaku nasycených vzorků je o 10-20% nižší než pevnost vzorků vysušených.

Heap et al. (2009) studovali vývoj modulu pružnosti vysušených a nasycených vzorků basaltu během cyklického jednoosého zatěžování. Během cyklického zatěžování se zvyšujícím se napětím zaznamenali pokles modulu pružnosti a nárůst Poissonova čísla. Tyto změny vysvětlili růstem trhlin. Mezi nasycenými vysušenými vzorky nepozorovali změny.

7.1 Geologie studovaných lokalit

Celkem bylo studováno sedm lokalit (Obr. 62), které se nachází v granitoidech v oblasti Českého masivu a která budou následně stručně popsána. Testována byla 4 archivní vrtná jádra a 3 vrtná jádra z vrtů nových, realizovaných v roce 2010.

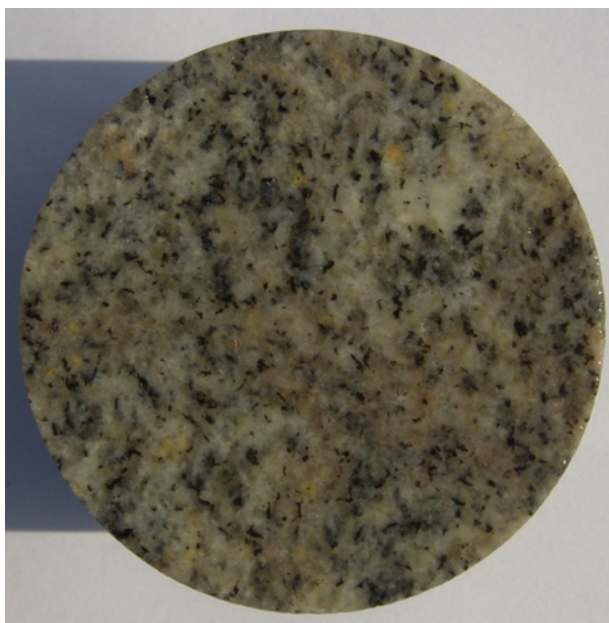
Obr. 62: Přehledná mapa České republiky s vyznačením výskytu granitoidních hornin (červená barva) a polohy vybraných lokalit, Rukavičková et al., 2009)



7.1.1 Panské Dubenky (PDV-1)

První studovaná lokalita se nachází v granitovém lomu v katastru obce Panské Dubenky. Její geologie je popsána v kapitole 2. Na lokalitě byl v roce 2010 technologií wire-line realizován 100 metrů hluboký jádrový vrt PDV-1. Vrt zastihl v hloubce 18 m drobnozrnný řídkce porfyrický dvojslídny granit s vyrostlicemi ortoklasu, který přechází v hloubce 60 m do granitu neporfyrického (Obr. 63).

Obr. 63: Drobnozrnný řídkce porfyrický dvojslídny granit z vrtu PDV-1



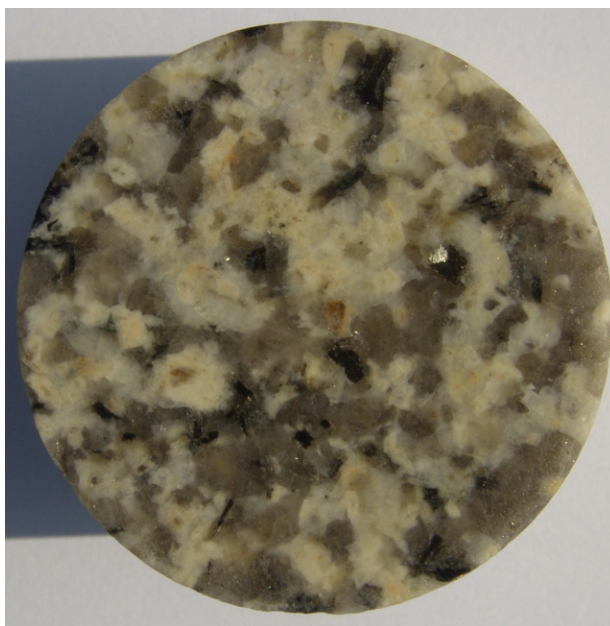
7.1.2 Melechov-Kostelní les (MEV-1)

Lokalita Kostelní les (Obr. 65) se nachází na severozápadním svahu vrchu Melechov, přibližně 750 m od vrcholu (709 m n. m.), v katastru obce Kouty. Geologicky byl vrt MEV-1 situován do intruze hrubozrnného dvojslídneho granitu melechovského typu. Melechovský granit je nejmladší intruzivní součástí melechovského masivu, který je nejsevernější částí moldanubického plutonu.

Z hlediska petrografického je melechovský granit hrubozrnný, neporfyrický dvojslídny granit. Je tvořen křemenem, draselným živcem, kyselým plagioklasem (převážně albitem), v různé míře chloritizovaným biotitem a muskovitem. Vedlejší součástí je hojný apatit. Z akcesorických minerálů je přítomen zirkon, monazit a Ti-oxidy (Rukavičková et al., 2009).

Na lokalitě byl v roce 2010 technologií wire-line realizován 100 metrů hluboký jádrový vrt MEV-1, který zastihl v celé své hloubce středně až hrubě zrnitý dvojslídny granit melechovského typu (Obr. 64). Hornina byla navětrána do hloubky 53 m, ve větších hloubkách byla zcela čerstvá.

Obr. 64: Středně až hrubě zrnitý dvojslídny granit z vrtu MEV-1

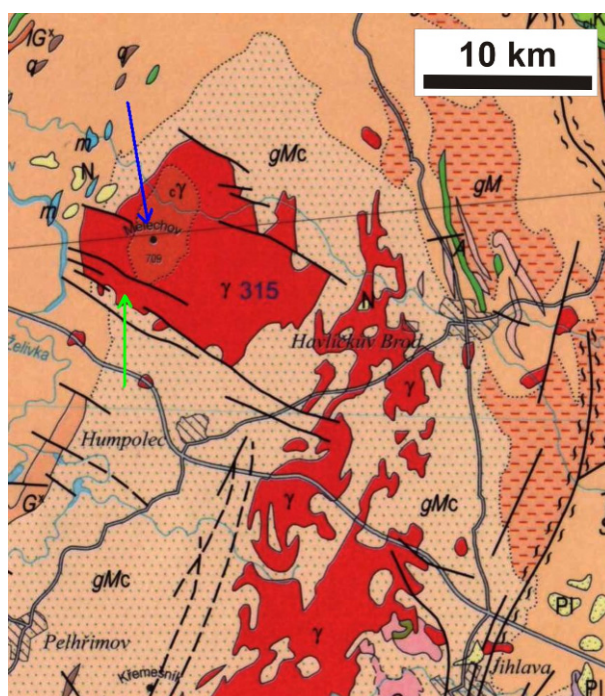


7.1.3 Melechov-Zadní les (Mel-4)

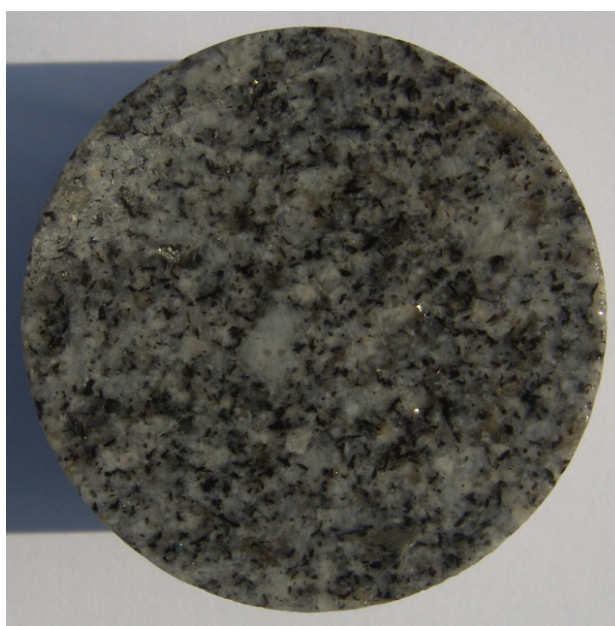
Lokalita Zadní les (Obr. 65) se nachází v lipnickém typu granitu, v jižní části melechovského masivu, severně od obce Kaliště, poblíž kontaktu s okolním krystalinikem. Vrt Mel-4 se nachází v nevýrazné depresi bezejmenného potoka, který se vlévá do rybníku Pařez u osady Staré Hutě.

Vrt Mel-4 byl realizován v roce 2005 a dosáhl hloubky 193,6 m. Vrt prošel povrchovou vrstvou půdy a granitového eluvia *in situ* a v hloubce 2,9 m vstoupil do drobnozrnitého dvojslíditého granitu lipnického typu (Obr. 66). Četnost puklin je zpočátku vysoká, v hloubkách pod 50 m je výrazně nižší. Lipnický granit nese typické znaky tektonického usměrnění a v některých úsecích (např. 30-34 m) obsahuje drobné xenolitky (do 1 cm) pararul. V hloubce 23 až 65 m vrt protnul tři ploché proniky leukogranitu s podřízenými pegmatitovými šlírami. Další skupina leukogranitových žil byla zastižena v hloubce cca 152-162 m (Rukavičková et al., 2009).

Obr. 65: Geologická situace okolí vrtů v melechovském masivu (modrá šipka MEV-1, zelená šipka Mel-4), (mapový podklad Cháb et al. 2007)



Obr. 66: Drobnozrnný dvojslídny granit z vrtu Mel-4

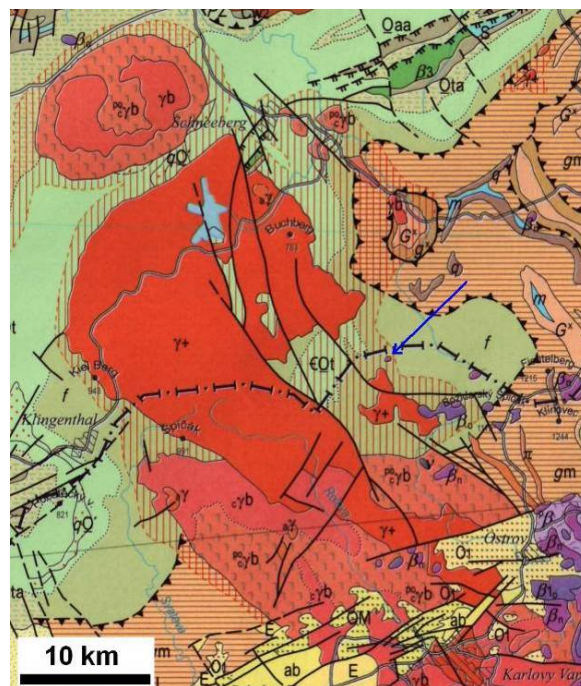


7.1.4 Potůčky-Podlesí (PTP-4a)

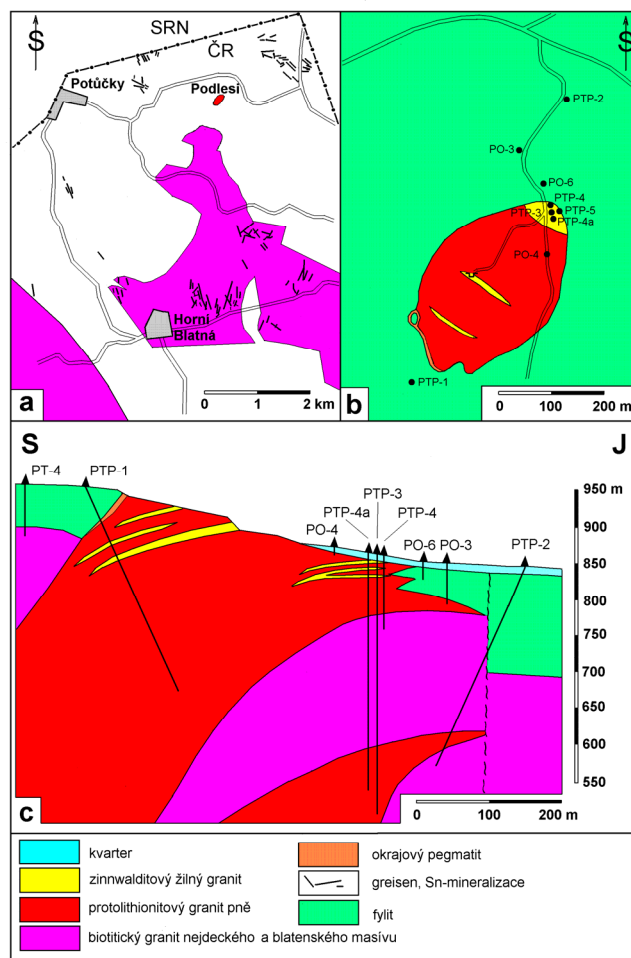
Granitový peň Podlesí (Obr. 67) se nachází v západní části Krušných hor, 2 km sv. od obce Potůčky. Geologicky patří granitový peň Podlesí k nejdeckému masivu, jehož je nejsilněji frakcionovanou dílčí intruzí (Breiter, 2002). Okolí pně je tvořeno jednak ordovickými chlorit-sericitickými fylity s vložkami kvarcitů a metabazitů, jednak biotitickými granity, relativně starší součástí nejdeckého masivu. Intruzivní kontakt granitového pně s fylity je ostrý. Fylity

byly do vzdálenosti několika desítek až prvních stovek m kontaktně metamorfovány do facie protolithionit-topazových rohovců a turmalinizovány. Biotitický granit byl muskovitizován a sericitizován do vzdálenosti 5-25 m od kontaktu. Vnitřní stavba granitového pně byla studována pomocí několika vrtů do maximální hloubky 350 m. Peň má složitou jazykovitou stavbu (Obr. 68). Těleso koření pravděpodobně na jz. straně a směrem vzhůru a k sv. se rozděluje do dvou jazykovitých proniků. Kromě toho z pně vybíhá do nadložních fylitů několik žilných apofýz o mocnosti do 20-30 cm. Hlavní horninou pně je albit-protolithionit-topazový granit (Obr. 69), který lze rozdělit do dvou facií. „Horní“ facie buduje cca nejvyšších 30-40 m pně. Je jemnozrná a porfyrická. Tato facie reprezentuje rychle utuhlou okrajovou část primární taveniny. „Spodní“ facie budující převážnou část pně je středně zrnitá, neporfyrická. Tato facie krystalizovala pomaleji z taveniny obohacené fluidy a volatiliemi. Nejvyšší část pně je současně lemována cca 50 cm mocnou vrstvou okrajového pegmatitu (stockscheideru). V nejvyšších 100 m pně je granit pně prorážen sérií plochých žil albit-zinnwaldit-topazového granitu (Rukavičková et al., 2009).

Obr. 67: Geologická situace okolí vrtu PTP-4a v Podlesí, vrt vyznačen modrou šipkou), (mapový podklad Cháb et al. 2007)



Obr. 68: Geologická mapa a profil žulovým pněm Podlesí: a- přehledná mapa, b- detailní mapa, c- geologický profil, (Rukavičková et al., 2009)



Obr. 69: Albit-protolithionit-topazový granit z vrtu PTP-4a

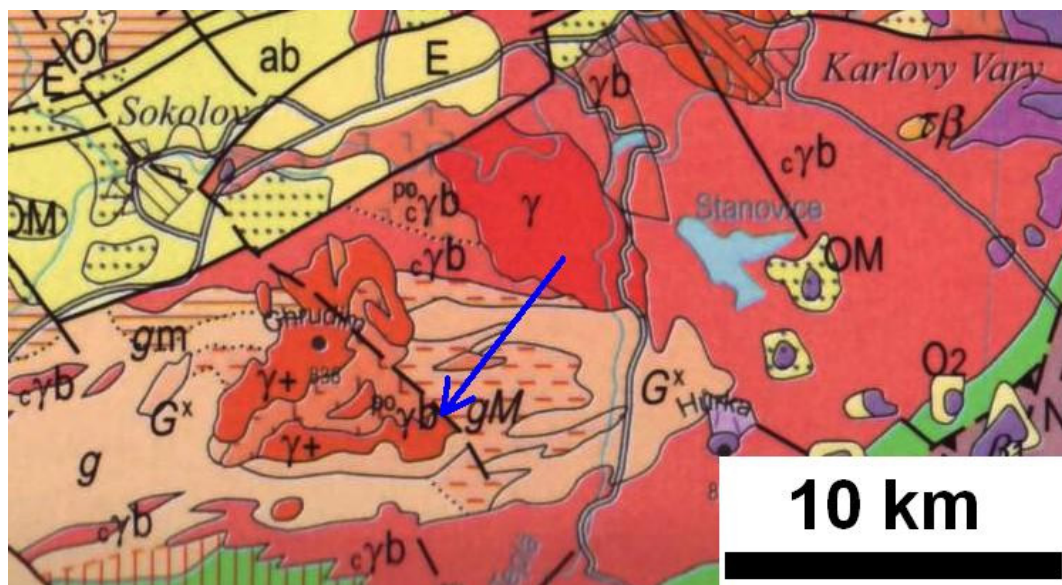


7.1.5 Krásno (Kž-25)

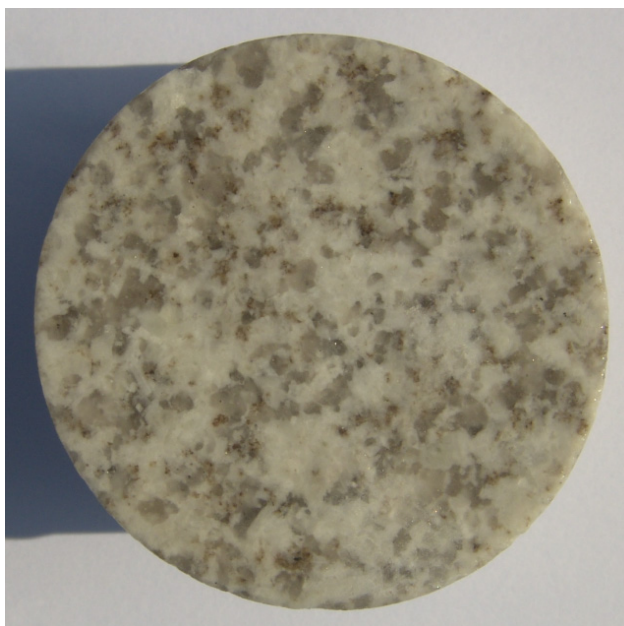
Průzkumný vrt Kž-25 (Obr. 70) je umístěn v živcovém lomu severozápadně od obce Krásno v západních Čechách. Geologicky se jedná o leukokrání granit s polohami feldspatitů, který se nachází na východním okraji granitového masivu Slavkovského lesa. Okolní horninou (podloží) je albit-protolithionit-topazový granit typu Čistá. Dále k severu vystupuje i geologicky starší výrazně porfyrický dvojslídny granit typu Třidomí. Při nadložním okraji granitového masivu jsou lokálně vyvinuty greiseny. Výchoz granitu je na vsv. tektonicky omezen zlomem Vysokého kamene, podle nějž východně ležící kra poklesla v řádu několika stovek m. Díky tektonickému poklesu se ve východní kře zachovaly i nejvyšší části granitových pňů s ložisky Sn a W, zatímco v západní kře jsou odkryta spodní patra již silně denudovaných pňů (Jarchovský in Breiter ed.1998).

Leukokrání granit (Obr. 71) je středně až drobně zrnitý, má hypidiomorfní texturu s proměnlivým poměrem obou živců a pouze vzácným výskytem slíd. Při vymizení slídy a snížení obsahu křemene přechází granit do feldspatitu. V lomu bylo zastiženo i mnoho drobných pegmatitových tělísek, a to jak šlírovitých smouh postupně se vyvíjejících z granitu, tak pravých intruzivních žil s ostrým kontaktem. Některé z pegmatitů obsahovaly minerály Be. V leukokrání granitu jsou časté výskyty druhotných minerálů uranu (Rukavičková et al., 2009).

Obr. 70: Geologická situace okolí vrtu Kž-25 na lokalitě Krásno, (vrt vyznačen modrou šipkou), (mapový podklad Cháb et al. 2007)



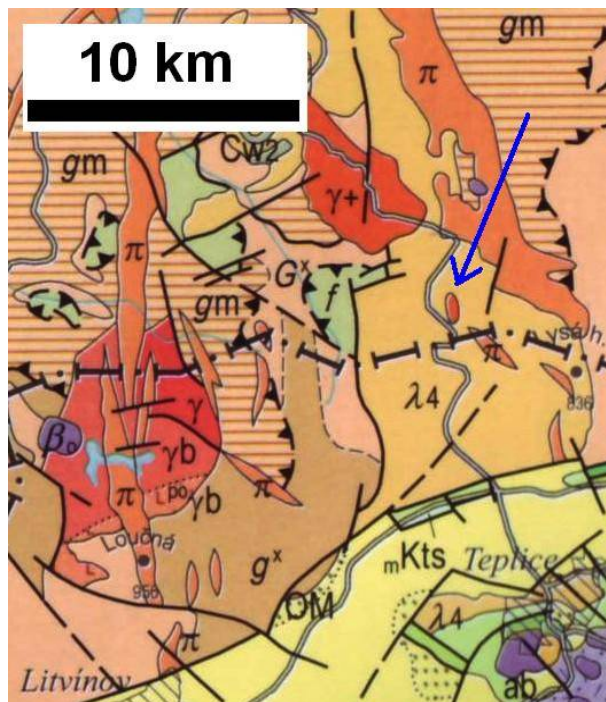
Obr. 71: Středně až drobně zrnitý leukokrání granit z vrtu Kž-25



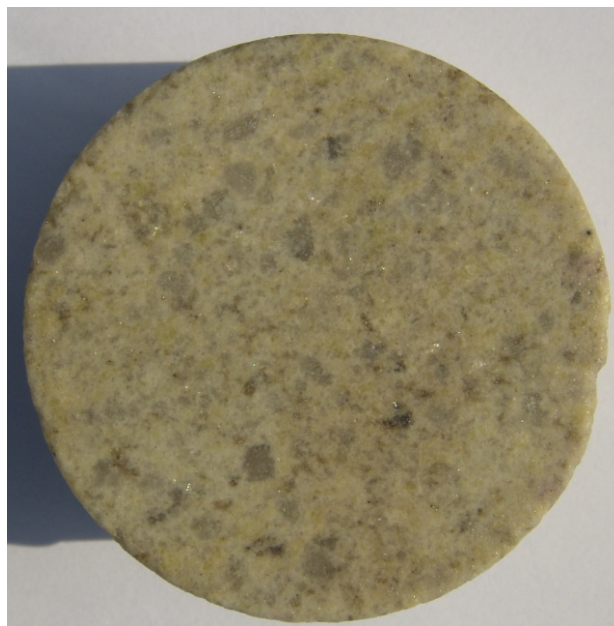
7.1.6 Cínovec (CS-1)

Lokalita Cínovec (Obr. 72) se nachází ve vrcholové části Krušných hor, v nadmořské výšce 850 až 880 m. Vrt CS-1 s archivním vrtným jádrem leží v katastru obce Cínovec poblíž hranice s Německem. Cínovecký granitový masívek je situován přímo na česko-německé hranici v obci Cínovec. Asi $\frac{2}{3}$ masivku leží v Čechách, zbytek v Sasku. Granitová kopule Cínovec je jednou z několika dílčích elevací cínovecko-krupského granitového plutonu. Tento pozdně variský pluton pronikl podél SZ-JV zlomu do ryolitů teplické kaldery. Pluton má tvar SZ-JV protaženého hřbetu, z něhož vystupuje ještě několik kopulovitých až strmých pňovitých výběžků. Pluton se skládá ze dvou hlavních typů granitů. Relativně starší je biotitický granit typu Preiselberk, mladší je albit-zinnwaldit-topazový granit cínovecký (Obr. 73). Větší část plutonu je skryta, na povrch vystupuje pouze několik elevací. Od jv. k sz. to je peň Knetlu (zinnwalditový granit), masívek Preiselberku (biotitický granit) a masívek cínovecký (zinnwalditový granit). Hloubkové vztahy obou granitů jsou různé. Častěji intruduje zinnwalditový granit z hloubky do granitu biotitického, na Cínovci ale zinnwalditový granit tvoří jazykovitou intruzi, která pronikla podél kontaktu biotitického granitu s ryolitem a zaujala pozici nad starším biotitickým granitem (Rukavičková et al., 2009).

Obr. 72: Geologická situace okolí vrtu CS-1 na lokalitě Cínovec, (vrt vyznačen modrou šipkou), (mapový podklad Cháb et al. 2007)



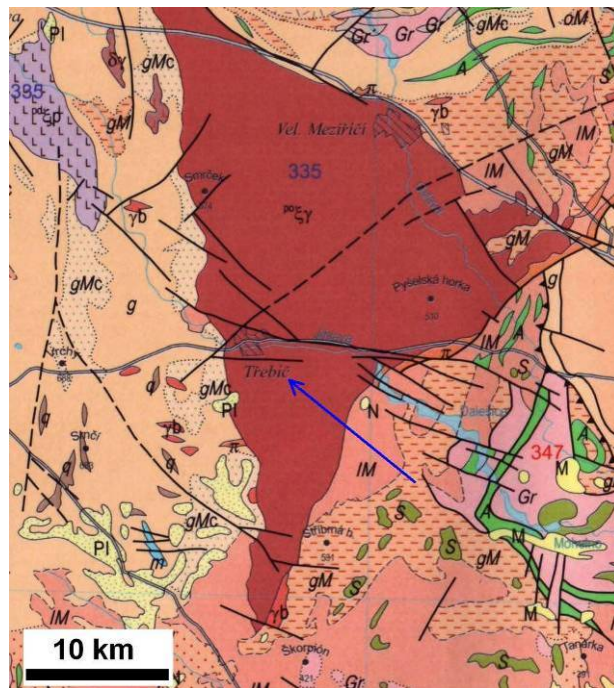
Obr. 73: Albit-zinnwaldit-topazový granit z vrtu CS-1



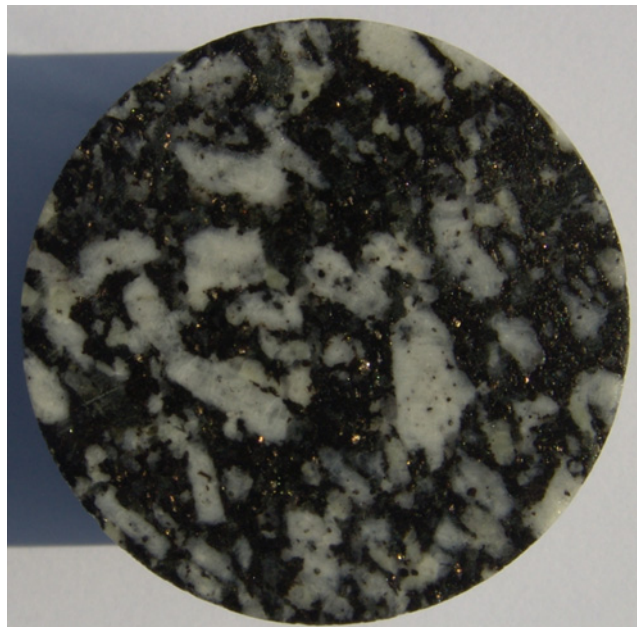
7.1.7 Pozďátky (PZV-1)

Lokalita Pozďátky (Obr. 74) leží 600 m jiz od obce Pozďátky u Třebíče. Na lokalitě byl v roce 2010 technologií wire-line realizován 100 metrů hluboký jádrový vrt PZV-1. Geologicky je vrt PZV-1 tvořen melasyenit (durbachity) třebíčského plutonu. Vrt zastihl v hloubce 4 m hrubozrnný hustě porfyrický amfibol-biotitický melasyenit, který přechází v hloubce 21 m do středně zrnitého řídkce porfyrického amfibol-biotitického melasyenitu (Obr. 75).

Obr. 74: Geologická situace okolí vrtu PZV-1 na lokalitě Pozd'átky, (vrt vyznačen modrou šipkou), (mapový podklad Cháb et al. 2007)



Obr. 75: Středně zrnitý řídkce porfyrický amfibol-biotitický melasyenit z vrtu PZV-1



7.2 Metodika laboratorních testů

7.2.1 Příprava vzorků

Vzorky ze všech vrtů byly odebrány v pravidelném hloubkovém intervalu 10 m a to od hloubky přibližně 10 m do 100 m. Vzorkována byla reprezentativní jádra horniny „technicky zdravé“ bez puklin.

Laboratorní vzorky z archivních vrtů Kž-25 a CS-1 vznikly převrtáním původních velkoprofilových jader technologií jádrového vrtání s vodním výplachem. Vnitřní průměr vrtného nástroje byl 50 mm. Nově vzniklá vrtná jádra průměru 50 mm byla nařezána na pile s diamantovým kotoučem a vodním chlazením na segmenty výšky 50 a 100 mm, jejichž podstavy byly na pile a následně pomocí karborundové destičky zarovnaný.

Vrtná jádra z vrtů PDV-1, MEV-1, Mel-4, PTP-4a a PZV-1 měla průměr 45–48 mm. Laboratorní vzorky vznikly nařezáním na pile s diamantovým kotoučem a vodním chlazením na segmenty požadované délky 50 a 100 mm a následným zarovnáním jejich podstav.

Ke stanovení rychlosti šíření seismických vln, objemové hmotnosti, otevřené pórovitosti a koeficientu hydraulické vodivosti sloužily vzorky ve tvaru válce výšky 50 mm a průměru 45–50 mm. Vzorky byly nejprve vysušeny v peci, poté syceny pomocí vakuové pumpy, následně byly umístěny do trojose komory, kde byl stanoven jejich koeficient hydraulické vodivosti a na závěr opět vysušeny.

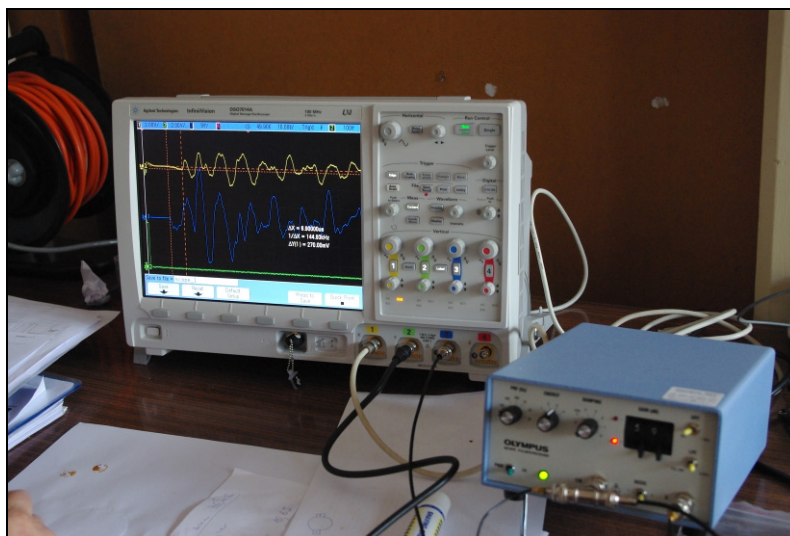
Ke stanovení pevnosti v prostém tlaku a deformačních parametrů v průběhu jednoosého stlačování sloužily vzorky ve tvaru válce výšky 100 mm a průměru 45–50 mm.

7.2.2 Ultrazvukové prozařování

7.2.2.1 Technické parametry

Jako zdroj ultrazvukových pulzů byl použit generátor a zesilovač firmy Olympus tovární značky 5072PR (Obr. 76) na kterém byly vytvářeny obdélníkové pulsy, které byly se strmou náběžnou hranou 2–20 ns /100 V posílány na budící piezokrystal. Zároveň časovací obvod budiče spouštěl časovou základnu digitálního osciloskopu. Velikost budícího napětí na piezokrystalu byla nastavena dle velikosti horninového vzorku a útlumu signálu v rozsahu 100 V až 500 V. Četnost impulsů byla nastavena na 3 prozáření za sekundu. K prozařování P-vlnami byla použita dvojice piezosnímačů V 103 od firmy Olympus, pro prozařování S-vlnami byly použity snímače V 153 od téže firmy. Snímače mají rezonanční kmitočet 1 MHz. Jeden snímač byl použit jako vysílač, druhý jako přijímač. Snímače byly z důvodu dokonalejšího přenosu ultrazvukových vibrací ošetřeny vazelínami High Z (P-vlny) a Shear Gel (S-vlny) firmy Sonotech. Do vysílače byly přiváděny napěťové pulsy ze zdroje ultrazvukového signálu. Z přijímače byl signál veden na vysokofrekvenční zesilovač, který umožňuje nastavení optimálního zesílení signálu. Zpoždění signálu bylo vyhodnocováno na čtyřkanálovém digitálním osciloskopu DSO7014A od firmy AGILENT se 100 MHz vzorkováním. Časová základna měřicího kanálu byla spouštěna časovačem ze zdroje ultrazvukového signálu. Ze snímací sondy byl signál procházející vzorkem po zesílení přiveden na vstup druhého kanálu osciloskopu. Signál byl z důvodu odstranění nežádoucích rušivých fluktuací 8× průměrován. Pomocí kurzorů se u P-vln odečítal čas mezi vyslaným signálem a počátkem první náběžné hrany přijímaného signálu (Obr. 77). V případě S-vln se hledá v oblasti 1,6 až 1,9 násobku časového zpoždění P-vlny počátek změny frekvence a amplitudy signálu (Obr. 78) (Brož et al., 2009).

Obr. 76: Ultrazvuková měřící aparatura, osciloskop vlevo, budič a zesilovač vpravo



Obr. 77: Záznam času příchodu P-vlny na obrazovce osciloskopu



Obr. 78: Záznam času příchodu S-vlny na obrazovce osciloskopu



7.2.2.2 Metodika vyhodnocení

Laboratorní vzorky ve tvaru válce výšky 50 mm a průměru 45–50 mm byly prozařovány ultrazvukem celkem třikrát. První měření bylo realizováno, když byly vzorky přirozeně vlhké resp. vysušené na vzduchu. Druhé měření probíhalo, když byly póry vzorků 100% nasyceny vodou (po testech stanovujících jejich koeficienty hydraulické vodivosti). Třetí měření se odehrálo po vysušení vzorků v peci při teplotě 105°C. Každý vzorek byl prozařován ve třech vzájemně kolmých směrech. První směr odpovídal ose vrtu (mezi podstavami válce), druhý směr byl veden na plášti válce kolmo na osu protažení minerálů a třetí byl ve směru protažení minerálů.

Vybrané laboratorní vzorky z vrtů PDV-1, MEV-1, PTP-4a a PZV-1 ve tvaru válce výšky 100 mm a průměru 45–50 mm byly prozařovány ultrazvukem v průběhu jejich jednoosého stlačování v lisu. Testy probíhaly na vzorcích přirozeně vlhkých resp. vysušených na vzduchu (PDV-1, MEV-1 a PZV-1) a na vzorcích nasycených a vysušených (PTP-4a).

Rychlost P-vln v_p a S-vln v_s byla vyhodnocena podle vztahů (28) a (29):

$$v_p = \frac{l}{t_p} \quad (28)$$

$$v_s = \frac{l}{t_s} \quad (29)$$

kde l odpovídá nejkratšímu rozměru vzorku mezi piezosnímači

a t_p resp. t_s odpovídá času příchodu podélné resp. příčné vlny.

Dynamický Youngův modul pružnosti E_d , dynamický střižný modul G_d a Poissonovo číslo ν_d byly vyhodnoceny podle vztahů (30), (31) a (32), (Zisman W. A., 1933):

$$E_d = \frac{\rho \cdot v_s^2 \cdot (3 \cdot v_p^2 - 4 \cdot v_s^2)}{v_p^2 - v_s^2} \quad (30)$$

$$G_d = \rho \cdot v_s^2 \quad (31)$$

$$v_d = \frac{v_p^2 - 2 \cdot v_s^2}{2 \cdot (v_p^2 - v_s^2)} \quad (32)$$

kde ρ odpovídá objemové hmotnosti vzorku

v_p odpovídá rychlosti podélných vln

a v_s odpovídá rychlosti příčných vln.

7.2.3 Objemová hmotnost

Objemová hmotnost byla stanovena podle modifikované metodiky normy (ČSN EN 1936) uvedené v kapitole 4.2. Zdánlivý objem byl zjištěn z vážení nasycených zkušebních těles pod vodou. Zkušební tělesa byla sušena při 105°C.

7.2.4 Otevřená pórovitost

Otevřená pórovitost je dána vzájemně propojeným systémem pórů přístupných pro vodu a umožňujících proudění, tzv. efektivní pórovitostí, a drobnými nepropojenými póry a mikrotrhlinami na povrchu vzorku, které mohou být nasyceny vodou. (Norton a Knapp (1977) in Tullborg a Larson (2006)).

Otevřená pórovitost byla stanovena podle modifikované metodiky normy (ČSN EN 1936) uvedené v kapitole 4.3.

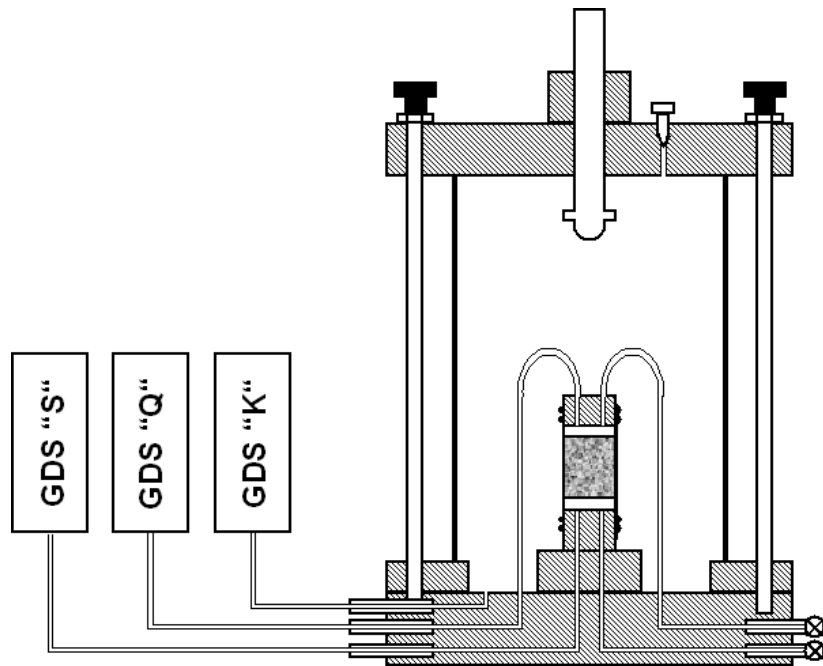
Zdánlivý objem byl zjištěn z vážení nasycených zkušebních těles pod vodou. Stav 100% nasycení vzorku odpovídal stavu vzorku po vyjmutí z trojosé komory, kde se stanovoval jeho koeficient hydraulické vodivosti, protože během měření v trojosé komoře se vzorek dosytil (jeho hmotnost byla vyšší než při sycení pomocí vakua).

Sušení vzorků probíhalo při 105°C po dobu 24 hodin. Zahřívání vzorků na požadovanou teplotu probíhalo plynule postupným nárůstem teploty z 20°C po dobu 4 hodin (cca 1°C za 3 minuty). Smyslem postupného zahřívání je zabránění vzniku dalších mikrotrhlin ve vzorku vlivem vysokého teplotního gradientu při zahřívání (Reuschlé et al., 2006, Chaki et al., 2008). Vzorky byly před zahájením sušení v peci umístěny v otevřeném exsikátoru. Před zahájením poklesu teploty se vzorky uzavřely do exsikátoru, aby se zabránilo přístupu vzdušné vlhkosti do vzorků během poklesu teploty. Po dosažení pokojové teploty byl exsikátor vyjmut z pece a vzorky se před zvážením ponechaly dalších 24 hodin, aby se zcela ustálila jejich vnitřní teplota (Najser et al., 2010).

7.2.5 Koeficient hydraulické vodivosti

Koeficient hydraulické vodivosti laboratorních vzorků byl stanoven propouštěním vody vzorky instalovanými v trojosých komorách vyrobených firmou Wykeham Farrance. Po nasycení vzorků ve vakuu byl vzorek umístěn do trojosé komory (Obr. 79). Systém horní i dolní drenáže byl před zkouškou odzdušněn. Následně byl na vzorky vyvozen všesměrný tlak tak, aby efektivní napětí uvnitř vzorku odpovídalo průměrnému efektivnímu napětí v horninovém masivu v hloubce odběru daného vzorku. Vzorky byly v nově nastavených tlakových podmínkách ponechány dalších 24 hodin, aby se ustálil tlak v mikrotrhlinách. Poté proběhlo měření propustnosti při konstantním rozdílu tlaků na obou podstavách vzorku (Najser et al., 2010).

Obr. 79: Schéma trojosé komory se vzorkem a regulátory tlaku GDS, (Najser et al., 2010)



Vyhodnocení zkoušky proběhlo pomocí vztahů uvedených v kapitole 3.4.2.

7.2.6 Stupeň nasycení

Stupeň nasycení vyjadřuje míru nasycení pórů horniny vodou. Je definován jako poměr objemu vody v pórech ku celkovému objemu pórů. Stupeň nasycení S_r byl vypočten pomocí vztahu (33):

$$S_r = \frac{\rho - \rho_d}{n \cdot \rho_w} \quad (33)$$

kde ρ je objemová hmotnost v přirozeném stavu

ρ_d je objemová hmotnost vysušeného vzorku

n je otevřená pórovitost

a ρ_w je objemová hmotnost vody.

Stupeň nasycení byl použit při vyhodnocování a vzájemném porovnání výsledků zatěžovacích zkoušek.

7.2.7 Jednoosé stlačování

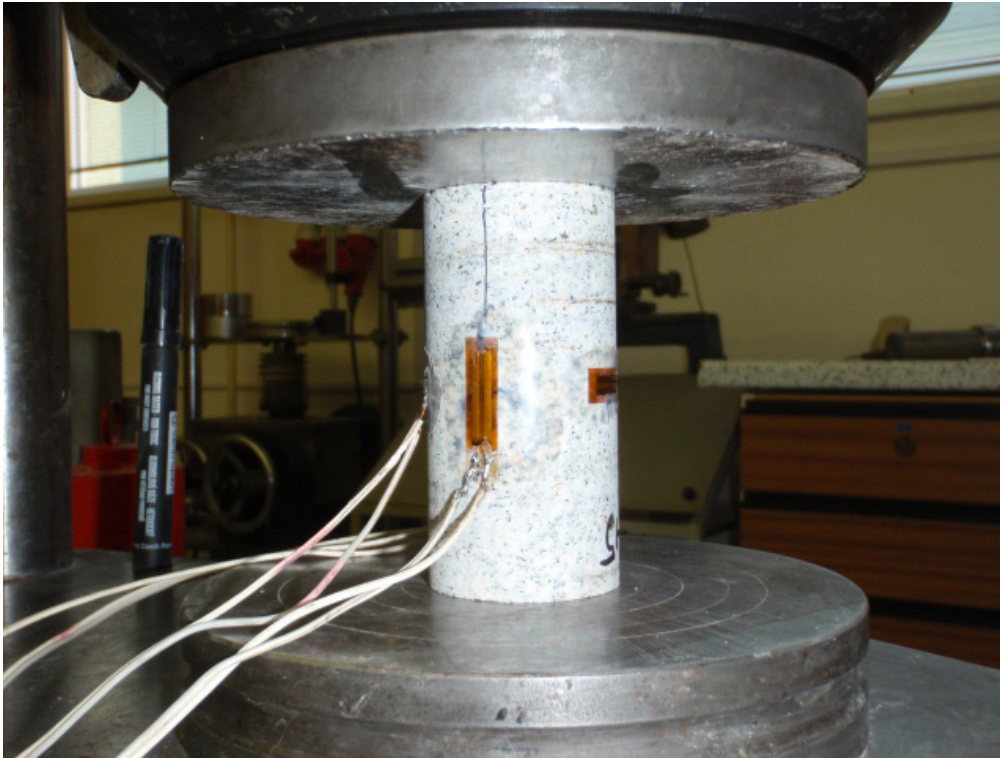
V průběhu jednoosého stlačování byly stanoveny deformační vlastnosti horninových vzorků a jejich pevnost v prostém tlaku. Metodika testů vycházela ze Zavorala (1987).

Podstatou zkoušky, která stanovuje deformační parametry horniny, je zatěžování vzorku horniny pravidelného tvaru (50×100 mm) jednoosým tlakem za současného měření podélné a příčné deformace vzorku.

7.2.7.1 Pracovní postup

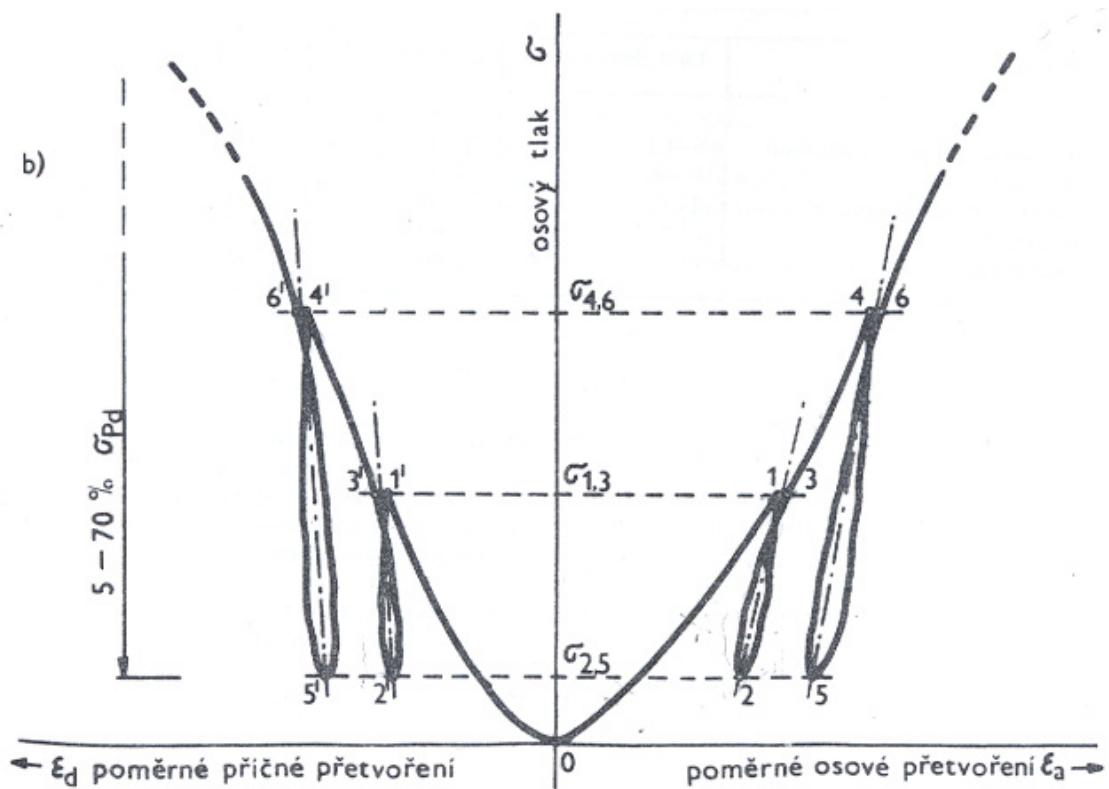
Před zahájením zkoušky byly na zkušební tělesa tvaru válce průměru 50 mm a výšky 100 mm přilepeny 4 odporové tenzometry (20/120LY41 Hottinger Baldwin Messtechnik). Tenzometry délky 20 mm (Obr. 80) byly umístěny symetricky po obvodu zkušebního tělesa, pro osově deformace svise doprostřed výšky tělesa, pro příčné deformace vodorovně uprostřed výšky tělesa (oboje dvoje tenzometry naproti sobě přes střed tělesa).

Obr. 80: Laboratorní vzorek v lisu s tenzometry měřícími podélné a příčné deformace



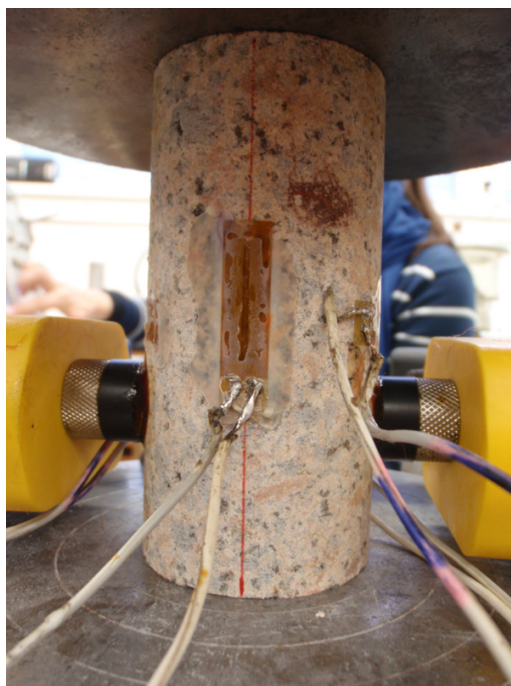
Každé zkušební těleso bylo podrobena 5 zatěžovacím cyklům při stálém gradientu osového tlaku $0,5 \text{ MPa}\cdot\text{s}^{-1}$. Zatěžovací cyklus je část deformačního měření s postupně rostoucím napětím do předem zvolené maximální úrovně napětí na zatěžovací větvi a následným snižováním k zvolené minimální úrovni napětí na odlehčovací větvi. Zatěžovací maxima byla přibližně volena v rozsahu 20, 30, 40, 50 a 60% pevnosti v prostém tlaku. Odlehčovací minimum bylo přibližně 5% této pevnosti. Tyto hodnoty zatěžovacích maxim zaručily, že se zkušební vzorky přetvářely v oboru pružných deformací. V průběhu zkoušky byly zaznamenávány hodnoty síly a osového a příčného přetvoření. Osově a příčně přetvoření bylo měřeno na každé zatěžovací a odlehčovací větvi všech cyklů. Schématický deformační diagram je zachycen na následujícím obrázku (Obr. 81).

Obr. 81: Schématický přetvárný diagram (Zavoral, 1987)



V průběhu jednoosého cyklického zatěžování vybraných vzorků z vrtů PDV-1, MEV-1, PTP-4a a PZV-1 byla měřena rychlost šíření podélných a příčných vln napříč vzorky. Piezosnímače ultrazvukové aparatury (Obr. 82) byly umístěny v dolní třetině na plášti vzorku pod tenzometry měřícími příčné přetvoření. V průběhu prvního cyklického zatěžování byly registrovány podélné vlny, v průběhu druhého zatěžování se měřily příčné vlny.

Obr. 82: Umístění piezosnímačů ultrazvukové aparatury v průběhu jednoosého zatěžování



Po stanovení deformačních parametrů byly vzorky osově zatěžovány až do překročení meze pevnosti. Tím byla stanovena jejich pevnost v prostém tlaku.

7.2.7.2 Metodika vyhodnocení

Velikost osového tlaku σ byla stanovena podle vztahu (34):

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (34)$$

kde F je působící osová síla

A je počáteční plocha příčného průřezu zkušebního tělesa.

Poměrné přetvoření zkušebního tělesa bylo vypočteno podle vztahů (35) a (36):

$$\varepsilon_a = \frac{\Delta l}{l} \quad (35)$$

$$\varepsilon_d = \frac{\Delta d}{d} \quad (36)$$

kde ε_a je poměrné osově přetvoření

ε_d je poměrné příčné přetvoření

l je počáteční délka měrné základny

Δl je změna délky měrné základny

d je počáteční příčný rozměr zkušebního tělesa

Δd je změna příčného rozměru zkušebního tělesa.

Základní přetvárné charakteristiky horninových materiálů byly stanoveny ze vztahů:

Modul pružnosti E stanovený z hysterezi smyčky prvního a druhého zatěžovacího cyklu (37)

$$E = \frac{\sigma_{1,3} - \sigma_{2,5}}{\frac{\varepsilon_{a1} - \varepsilon_{a3}}{2} - \varepsilon_{a2}} \quad (37)$$

kde $\sigma_{1,3}$ je maximální úroveň osového tlaku zatěžovací větve prvního cyklu

$\sigma_{2,5}$ je minimální úroveň osového tlaku odlehčovací větve prvního cyklu

ε_{a1} je průměrná hodnota poměrného osového přetvoření v bodě 1 přetvárné křivky

ε_{a2} je průměrná hodnota poměrného osového přetvoření v bodě 2 přetvárné křivky

ε_{a3} je průměrná hodnota poměrného osového přetvoření v bodě 3 přetvárné křivky.

Analogicky byly vypočteny moduly pružnosti z hysterezích smyček dalších cyklů.

Poissonovo číslo ν bylo stanoveno z hysterezí smyčky prvního a druhého zatěžovacího cyklu (38)

$$\nu = \frac{\frac{\varepsilon_{d1} + \varepsilon_{d3}}{2} - \varepsilon_{d2}}{\frac{\varepsilon_{a1} + \varepsilon_{a3}}{2} - \varepsilon_{a2}} \quad (38)$$

kde ε_{a1} je průměrná hodnota poměrného osového přetvoření v bodě 1 přetvárné křivky

ε_{a2} je průměrná hodnota poměrného osového přetvoření v bodě 2 přetvárné křivky

ε_{a3} je průměrná hodnota poměrného osového přetvoření v bodě 3 přetvárné křivky

ε_{d1} je průměrná hodnota poměrného příčného přetvoření v bodě 1 přetvárné křivky

ε_{d2} je průměrná hodnota poměrného příčného přetvoření v bodě 2 přetvárné křivky

ε_{d3} je průměrná hodnota poměrného příčného přetvoření v bodě 3 přetvárné křivky.

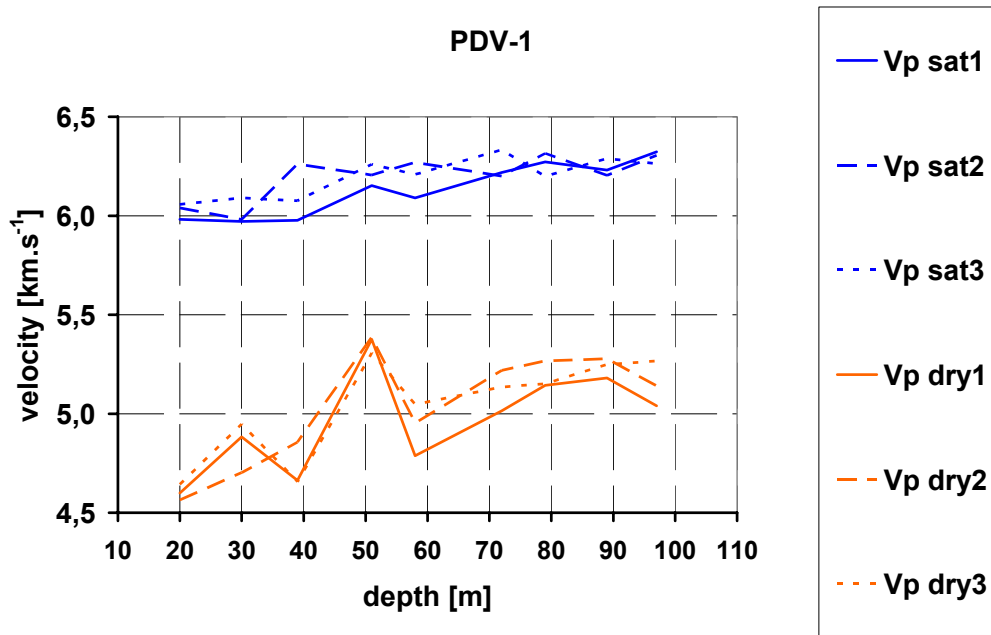
7.3 Výsledky a diskuze

7.3.1 Porovnání rychlosti seismických vln a hloubky

7.3.1.1 Panské Dubenky

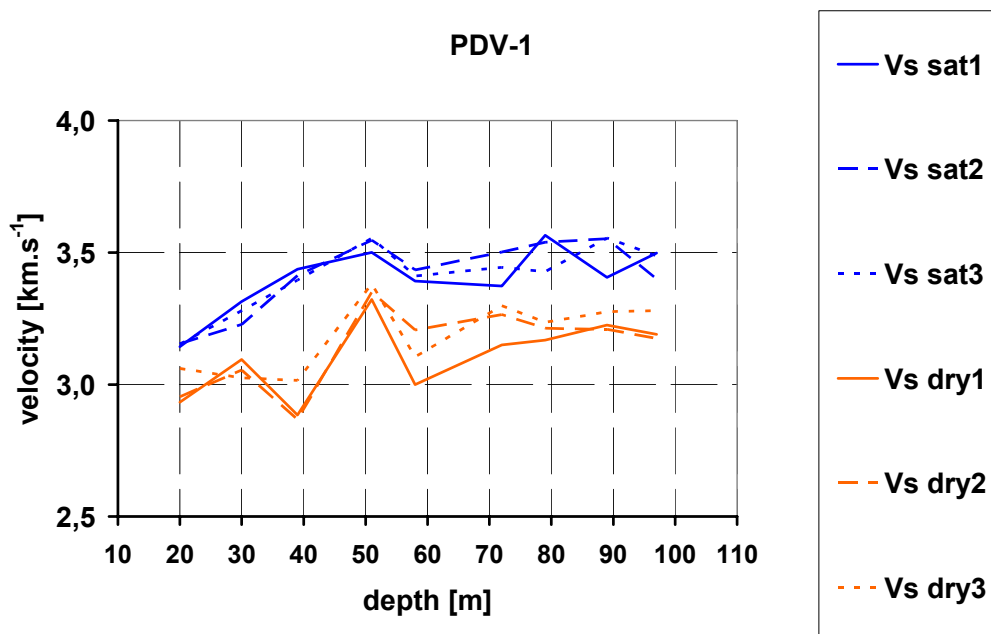
V grafu (Obr. 83) je zachycen průběh rychlosti P-vln s hloubkou vzorků. Rychlosti P-vln ve vysušených vzorcích vrtu PDV-1 se pohybují v rozmezí od 4,57 km.s⁻¹ do 5,39 km.s⁻¹. Rychlosti P-vln v nasycených vzorcích se pohybují v rozmezí od 5,97 km.s⁻¹ do 6,33 km.s⁻¹.

Obr. 83: Rychlost P-vln ve vzorcích z vrtu PDV-1 v závislosti na hloubce



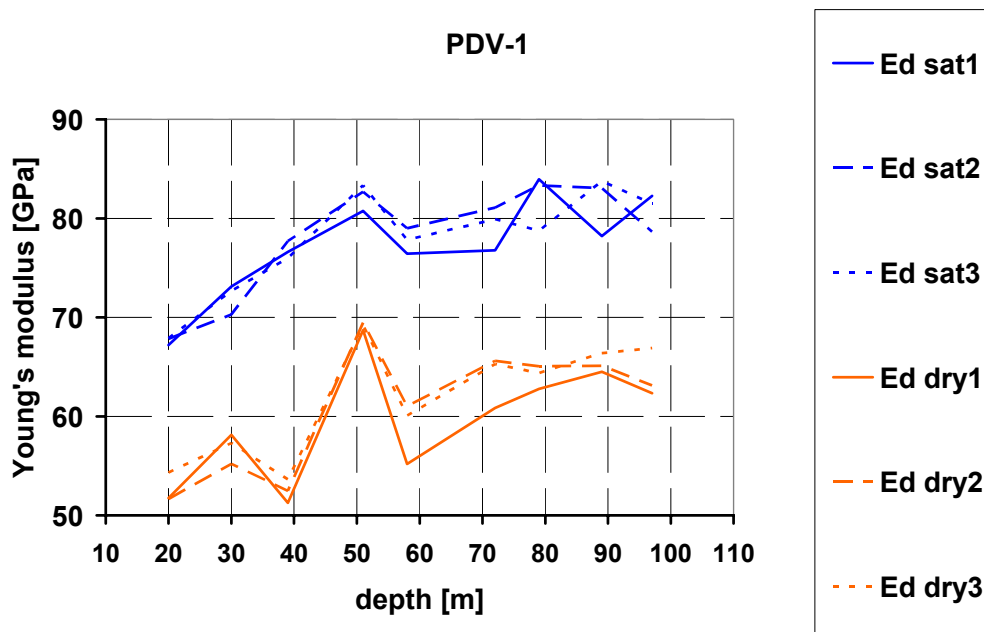
V grafu (Obr. 84) je zachycen průběh rychlosti S-vln s hloubkou vzorků. Rychlosti S-vln ve vysušených vzorcích vrtu PDV-1 se pohybují v rozmezí od 2,87 km.s⁻¹ do 3,38 km.s⁻¹. Rychlosti S-vln v nasycených vzorcích se pohybují v rozmezí od 3,14 km.s⁻¹ do 3,57 km.s⁻¹.

Obr. 84: Rychlost S-vln ve vzorcích z vrtu PDV-1 v závislosti na hloubce



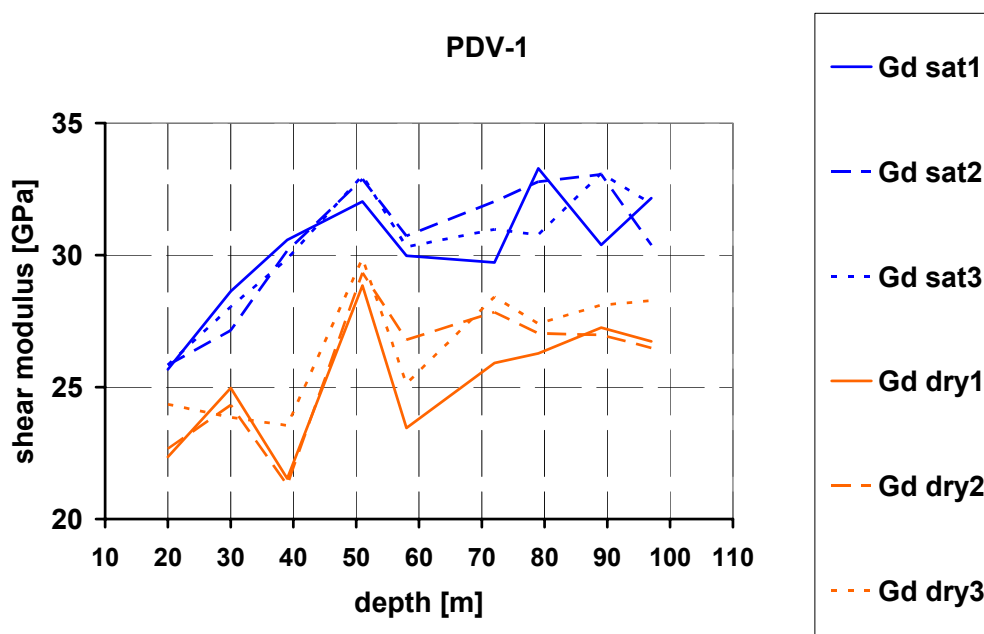
V grafu (Obr. 85) je zachycen průběh dynamického modulu pružnosti v tlaku s hloubkou vzorků. Hodnoty modulu ve vysušených vzorcích vrtu PDV-1 se pohybují v rozmezí od 51,3 GPa do 69,5 GPa. Hodnoty modulu v nasycených vzorcích se pohybují v rozmezí od 67,2 GPa do 84,0 GPa.

Obr. 85: Dynamický Youngův modul vzorků z vrtu PDV-1 v závislosti na hloubce



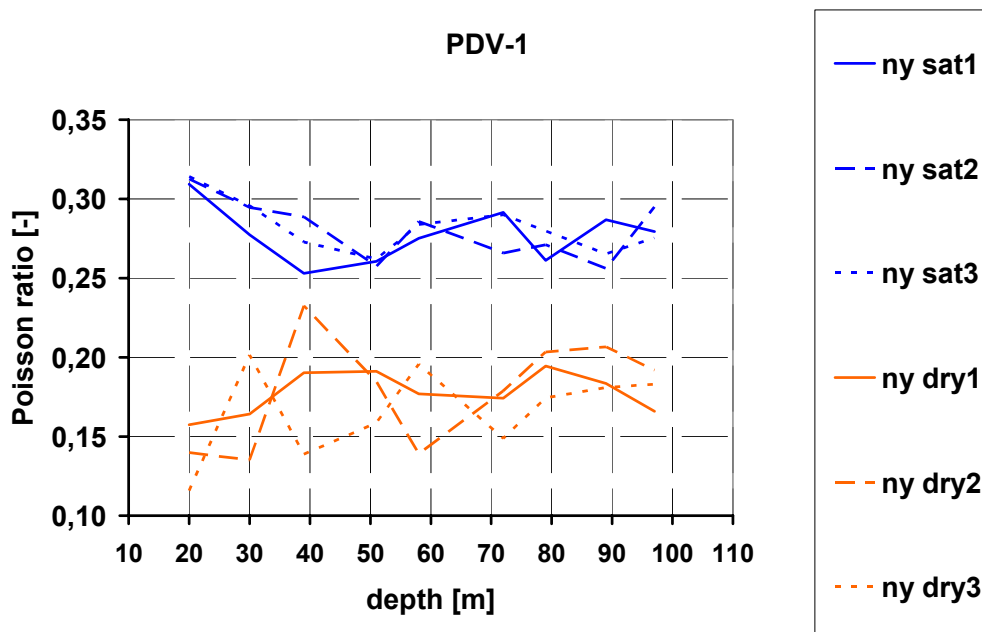
V grafu (Obr. 86) je zachycen průběh dynamického modulu pružnosti ve stříhu s hloubkou vzorků. Hodnoty modulu ve vysušených vzorcích vrtu PDV-1 se pohybují v rozmezí od 21,3 GPa do 29,9 GPa. Hodnoty modulu v nasycených vzorcích se pohybují v rozmezí od 25,7 GPa do 33,3 GPa.

Obr. 86: Dynamický střížný modul vzorků z vrtu PDV-1 v závislosti na hloubce



V grafu (Obr. 87) je zachycen průběh Poissonova čísla s hloubkou vzorků. Hodnoty Poissonova čísla ve vysušených vzorcích vrtu PDV-1 se pohybují v rozmezí od 0,12 do 0,23. Hodnoty Poissonova čísla v nasycených vzorcích se pohybují v rozmezí od 0,25 do 0,31.

Obr. 87: Poissonova čísla vzorků z vrtu PDV-1 v závislosti na hloubce

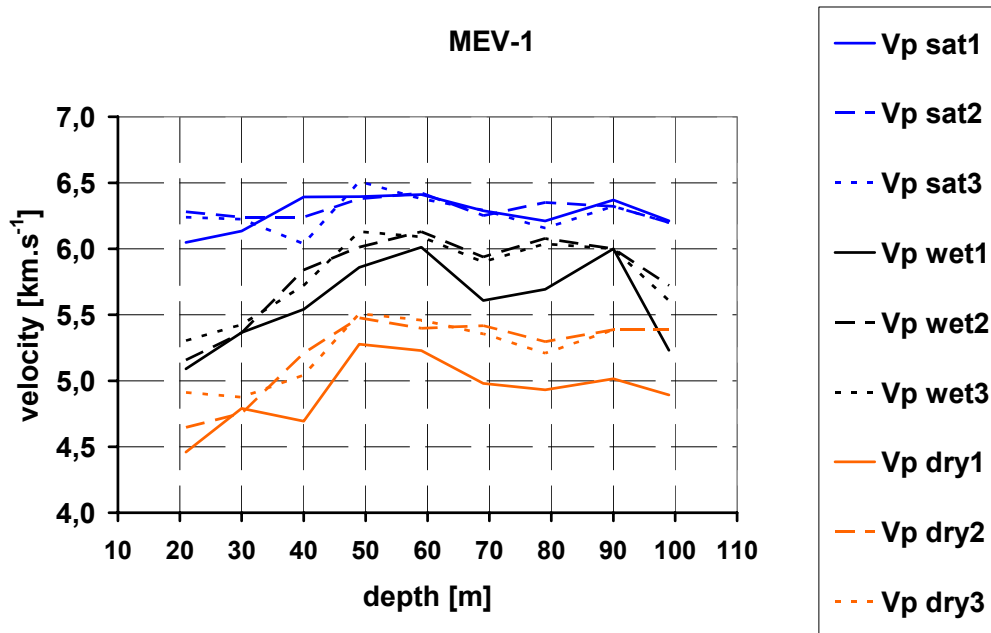


Z výše uvedených grafů (Obr. 83, Obr. 84, Obr. 85, Obr. 86) vyplývá, že rychlost P-vln a S-vln a z nich vypočtených modulů pružnosti v tlaku a stříhu ve vrtu PDV-1 s hloubkou roste. Pokles rychlostí mezi vzorky z hloubky 50 a 60 m je způsoben přechodem porfyrického do neporfyrického granitu ve vrtu PDV-1. Vzorky vykazují anizotropii rychlosti. Rychlost P-vln v ose vrtu je až o 5% nižší než ve směrech horizontálních.

7.3.1.2 Melechov-Kostelní les

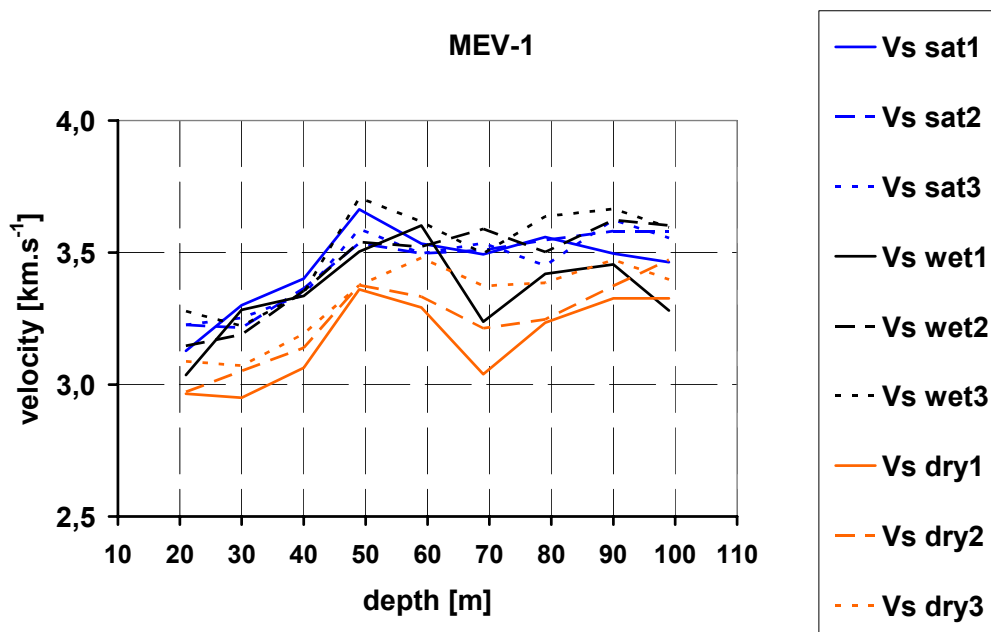
V grafu (Obr. 88) je zachycen průběh rychlosti P-vln s hloubkou vzorků. Rychlosti P-vln ve vysušených vzorcích vrtu MEV-1 se pohybují v rozmezí od 4,46 km.s⁻¹ do 5,51 km.s⁻¹. Rychlosti P-vln v nasycených vzorcích se pohybují v rozmezí od 6,04 km.s⁻¹ do 6,51 km.s⁻¹.

Obr. 88: Rychlost P-vln ve vzorcích z vrtu MEV-1 v závislosti na hloubce



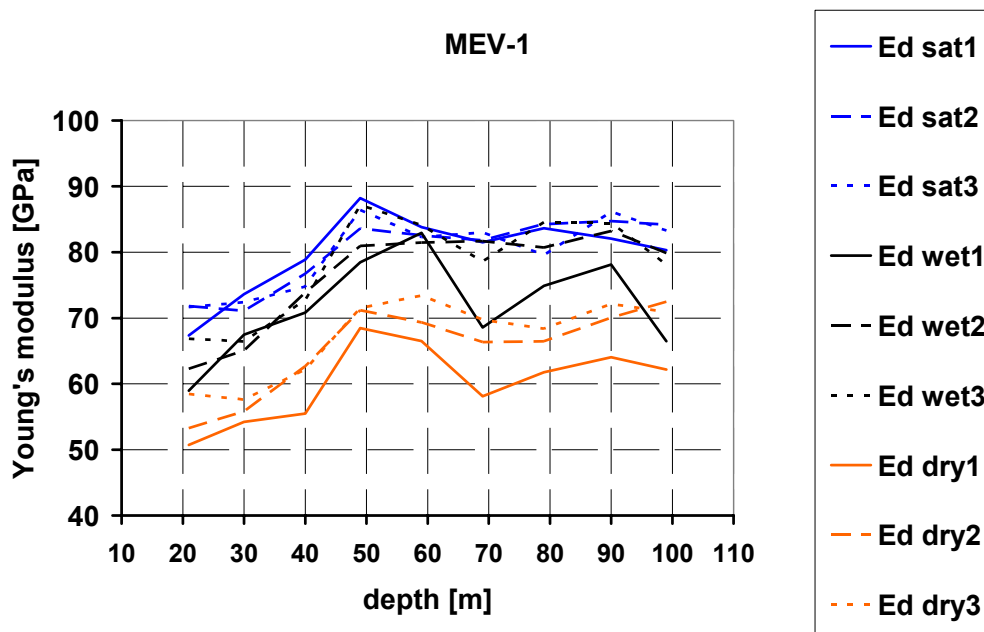
V grafu (Obr. 89) je zachycen průběh rychlosti S-vln s hloubkou vzorků. Rychlosti S-vln ve vysušených vzorcích vrtu MEV-1 se pohybují v rozmezí od 2,95 km.s⁻¹ do 3,48 km.s⁻¹. Rychlosti S-vln v nasycených vzorcích se pohybují v rozmezí od 3,13 km.s⁻¹ do 3,66 km.s⁻¹.

Obr. 89: Rychlost S-vln ve vzorcích z vrtu MEV-1 v závislosti na hloubce



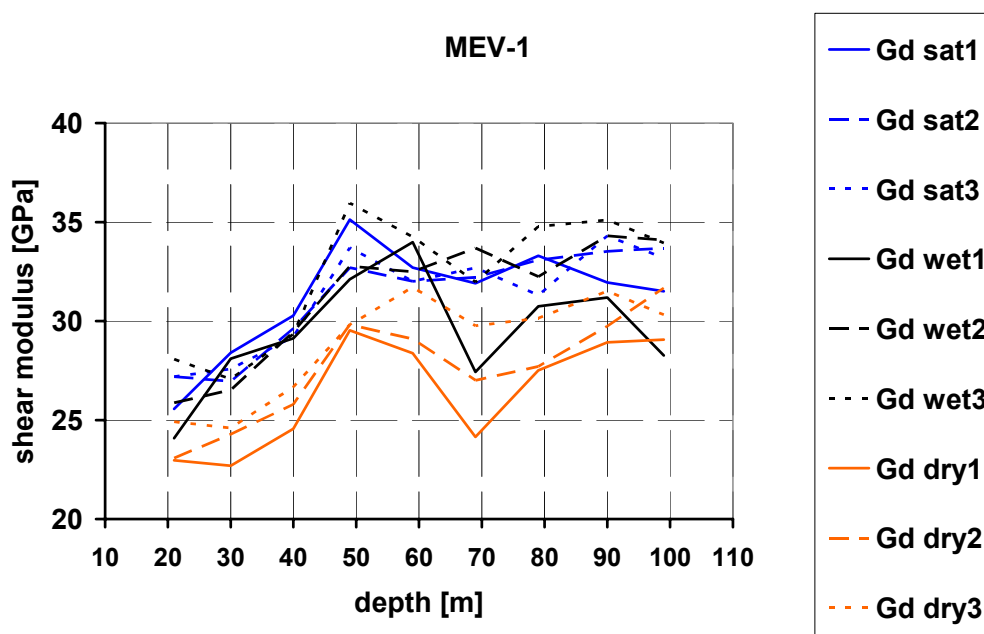
V grafu (Obr. 90) je zachycen průběh dynamického modulu pružnosti v tlaku s hloubkou vzorků. Hodnoty modulu ve vysušených vzorcích vrtu MEV-1 se pohybují v rozmezí od 50,7 GPa do 73,4 GPa. Hodnoty modulu v nasycených vzorcích se pohybují v rozmezí od 67,4 GPa do 88,2 GPa.

Obr. 90: Dynamický Youngův modul vzorků z vrtu MEV-1 v závislosti na hloubce



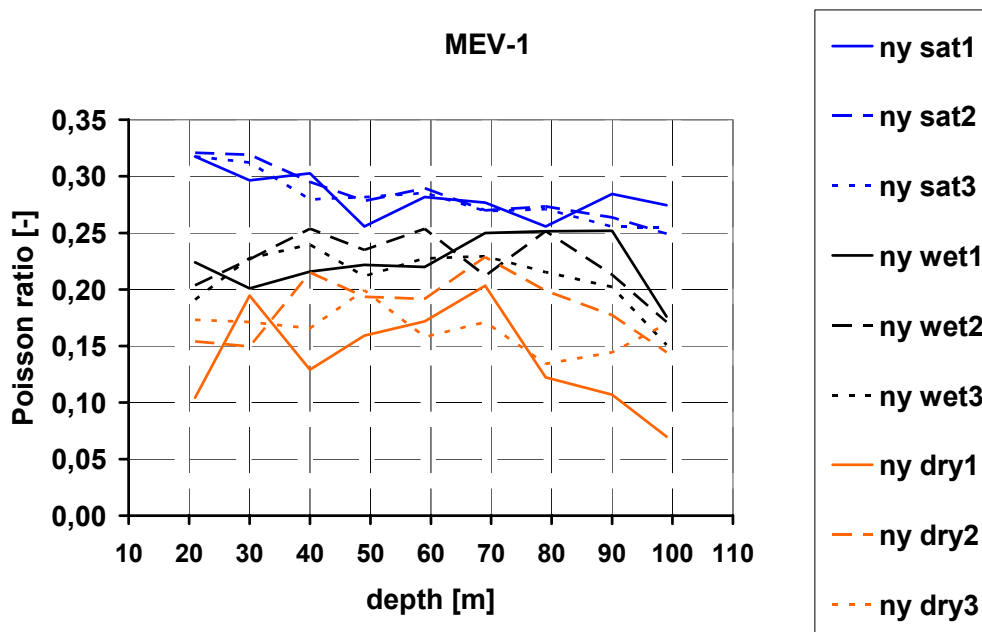
V grafu (Obr. 91) je zachycen průběh dynamického modulu pružnosti ve stříhu s hloubkou vzorků. Hodnoty modulu ve vysušených vzorcích vrtu MEV-1 se pohybují v rozmezí od 22,7 GPa do 31,7 GPa. Hodnoty modulu v nasycených vzorcích se pohybují v rozmezí od 25,6 GPa do 35,1 GPa.

Obr. 91: Dynamický střížný modul vzorků z vrtu MEV-1 v závislosti na hloubce



V grafu (Obr. 92) je zachycen průběh Poissonova čísla s hloubkou vzorků. Hodnoty Poissonova čísla ve vysušených vzorcích vrtu MEV-1 se pohybují v rozmezí od 0,07 do 0,23. Hodnoty Poissonova čísla v nasycených vzorcích se pohybují v rozmezí od 0,25 do 0,32.

Obr. 92: Poissonova čísla vzorků z vrtu MEV-1 v závislosti na hloubce

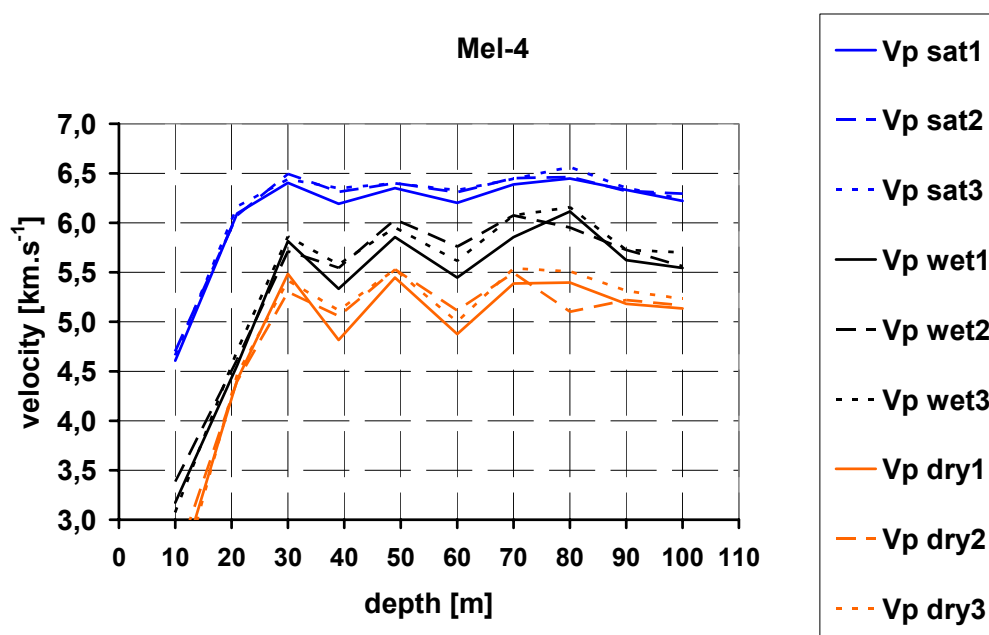


Z výše uvedených grafů (Obr. 88, Obr. 89, Obr. 90, Obr. 91) vyplývá, že rychlost P-vln a S-vln a z nich vypočtených modulů pružnosti v tlaku a střihu roste ve vrtu MEV-1 do hloubky 50 m, poté je v podstatě konstantní. Růst rychlostí odpovídá snižující se míře navětrání horniny, která podle geologického popisu v hloubce 53 m přechází do horniny zcela čerstvé. Vzorky vykazují anizotropii rychlosti. Rychlost P-vln v ose vrtu je až o 7% nižší než ve směrech horizontálních. Oba trendy jsou lépe patrné na vysušených vzorcích.

7.3.1.3 Melechov-Zadní les

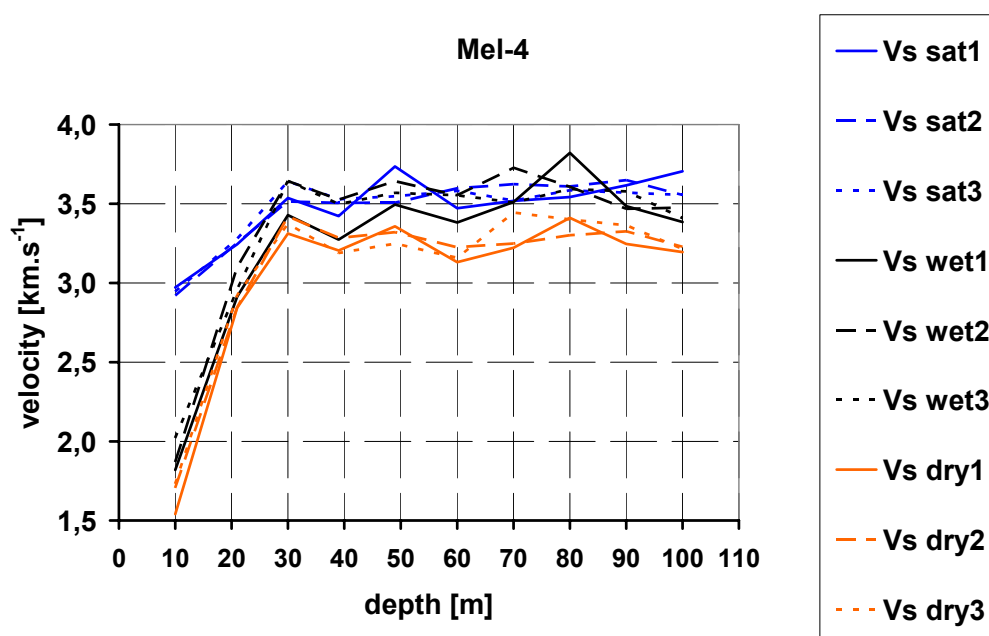
V grafu (Obr. 93) je zachycen průběh rychlosti P-vln s hloubkou vzorků. Rychlosti P-vln ve vysušených vzorcích vrtu Mel-4 se pohybují v rozmezí od 2,18 km.s⁻¹ do 5,54 km.s⁻¹. Rychlosti P-vln v nasycených vzorcích se pohybují v rozmezí od 4,61 km.s⁻¹ do 6,56 km.s⁻¹.

Obr. 93: Rychlost P-vln ve vzorcích z vrtu Mel-4 v závislosti na hloubce



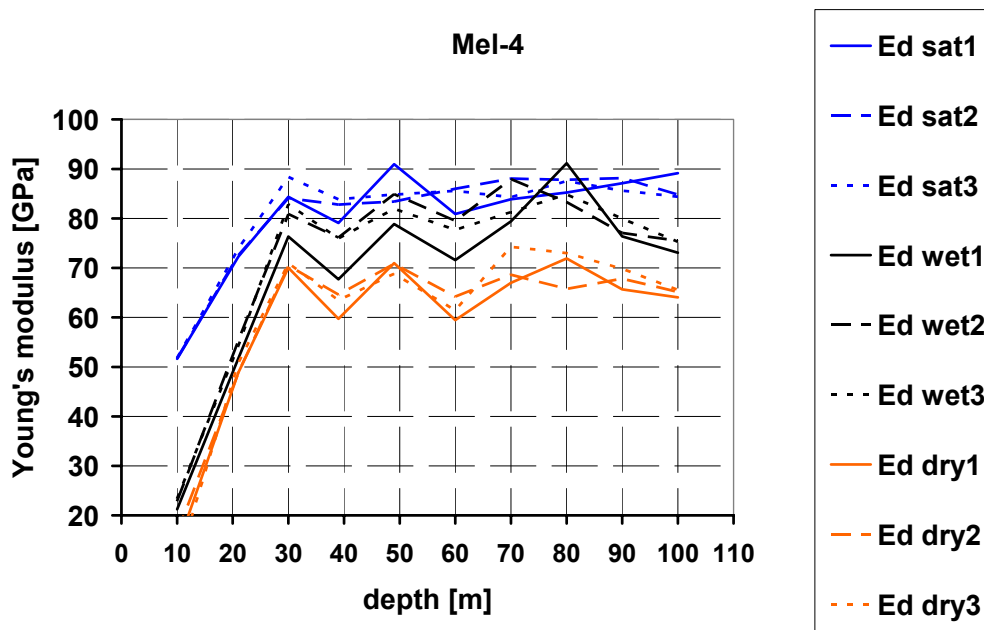
V grafu (Obr. 94) je zachycen průběh rychlosti S-vln s hloubkou vzorků. Rychlosti S-vln ve vysušených vzorcích vrtu Mel-4 se pohybují v rozmezí od 1,54 km.s⁻¹ do 3,44 km.s⁻¹. Rychlosti P-vln v nasycených vzorcích se pohybují v rozmezí od 2,92 km.s⁻¹ do 3,74 km.s⁻¹.

Obr. 94: Rychlost S-vln ve vzorcích z vrtu Mel-4 v závislosti na hloubce



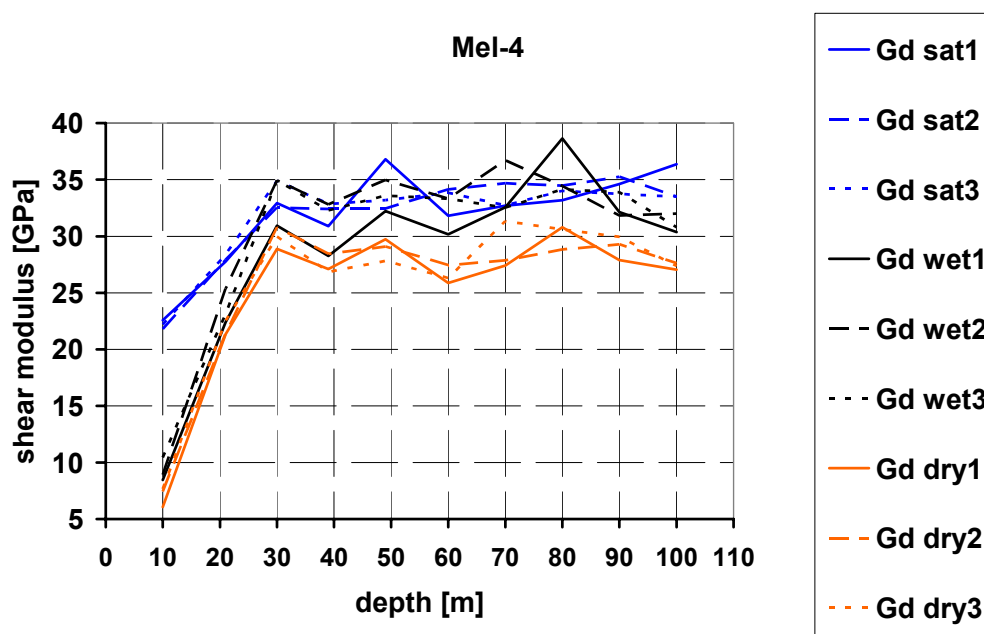
V grafu (Obr. 95) je zachycen průběh dynamického modulu pružnosti v tlaku s hloubkou vzorků. Hodnoty modulu ve vysušených vzorcích vrtu Mel-4 se pohybují v rozmezí od 9,9 GPa do 74,3 GPa. Hodnoty modulu v nasycených vzorcích se pohybují v rozmezí od 51,7 GPa do 91,0 GPa.

Obr. 95: Dynamický Youngův modul vzorků z vrtu Mel-4 v závislosti na hloubce



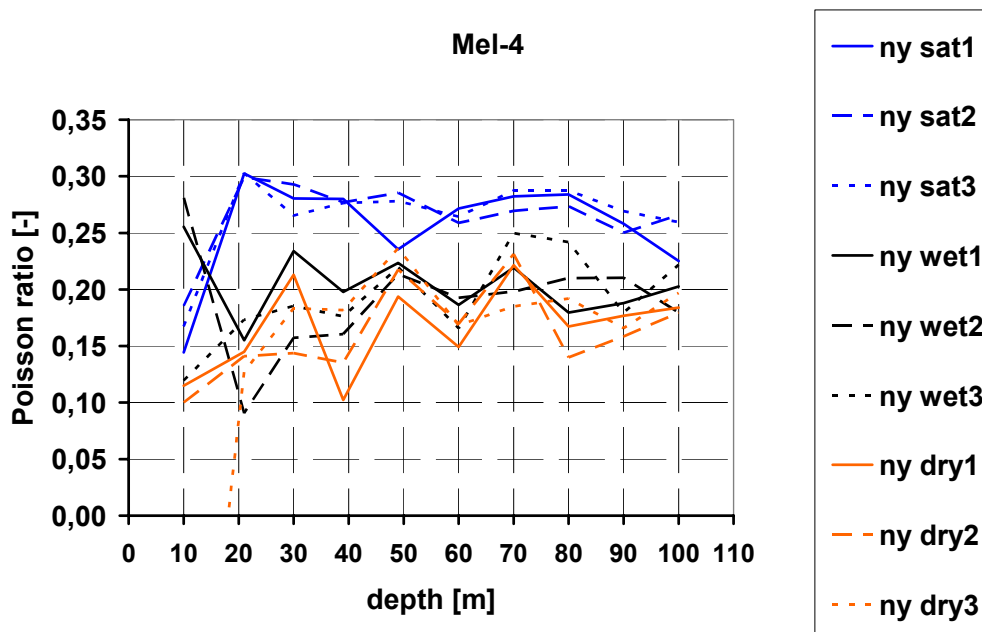
V grafu (Obr. 96) je zachycen průběh dynamického modulu pružnosti ve stříhu s hloubkou vzorků. Hodnoty modulu ve vysušených vzorcích vrtu Mel-4 se pohybují v rozmezí od 6,1 GPa do 31,3 GPa. Hodnoty modulu v nasycených vzorcích se pohybují v rozmezí od 21,8 GPa do 36,8 GPa.

Obr. 96: Dynamický střížný modul vzorků z vrtu Mel-4 v závislosti na hloubce



V grafu (Obr. 97) je zachycen průběh Poissonova čísla s hloubkou vzorků. Hodnoty Poissonova čísla ve vysušených vzorcích vrtu Mel-4 se pohybují v rozmezí od 0,10 do 0,24. Hodnoty Poissonova čísla v nasycených vzorcích se pohybují v rozmezí od 0,14 do 0,30.

Obr. 97: Poissonova čísla vzorků z vrtu Mel-4 v závislosti na hloubce

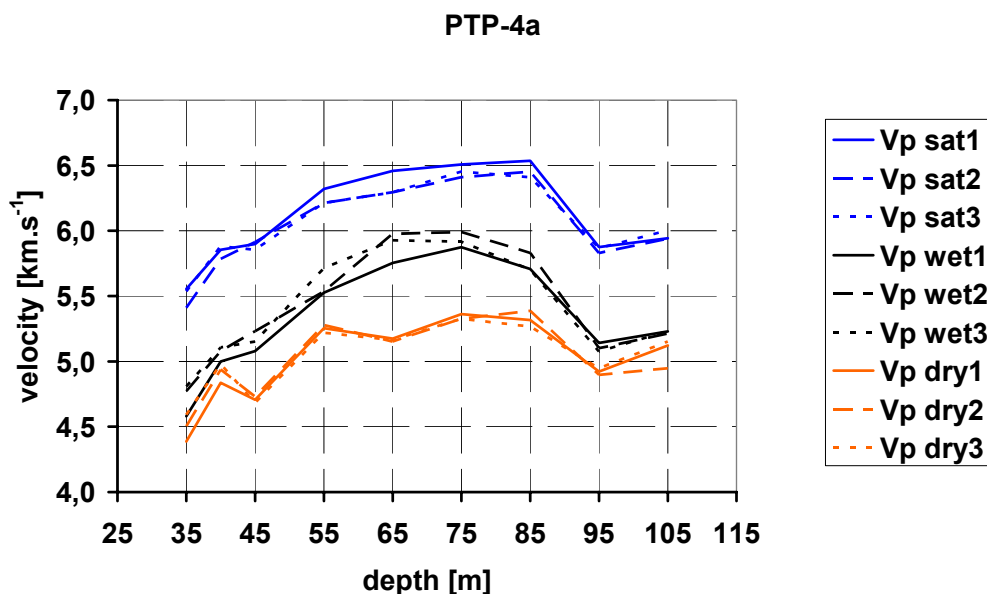


Z výše uvedených grafů (Obr. 93, Obr. 94, Obr. 95, Obr. 96) vyplývá, že rychlost P-vln a S-vln a z nich vypočtených modulů pružnosti v tlaku a stříhu ve vrtu Mel-4 roste do hloubky 30 m, poté je v podstatě konstantní. Růst rychlostí odpovídá snižující se míře navětrání horniny. Vzorky vykazují anizotropii rychlosti. Rychlost P-vln v ose vrtu je až o 5% nižší než ve směrech horizontálních. Oba trendy jsou lépe patrné na vysušených vzorcích.

7.3.1.4 Potůčky-Podlesí

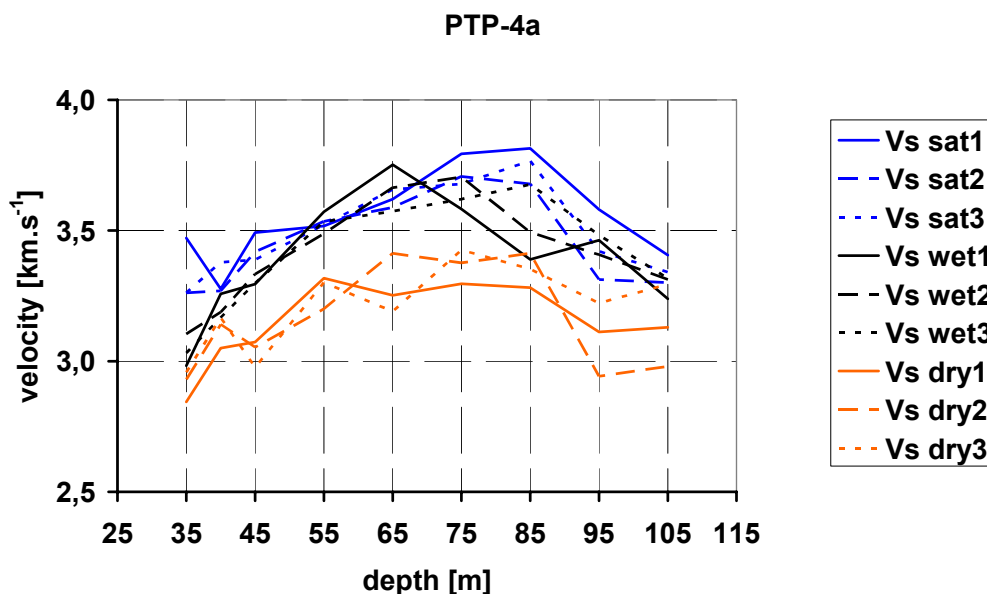
V grafu (Obr. 98) je zachycen průběh rychlosti P-vln s hloubkou vzorků. Rychlosti P-vln ve vysušených vzorcích vrtu PTP-4a se pohybují v rozmezí od $4,39 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ do $5,39 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. Rychlosti P-vln v nasycených vzorcích se pohybují v rozmezí od $5,41 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ do $6,54 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$.

Obr. 98: Rychlost P-vln ve vzorcích z vrtu PTP-4a v závislosti na hloubce



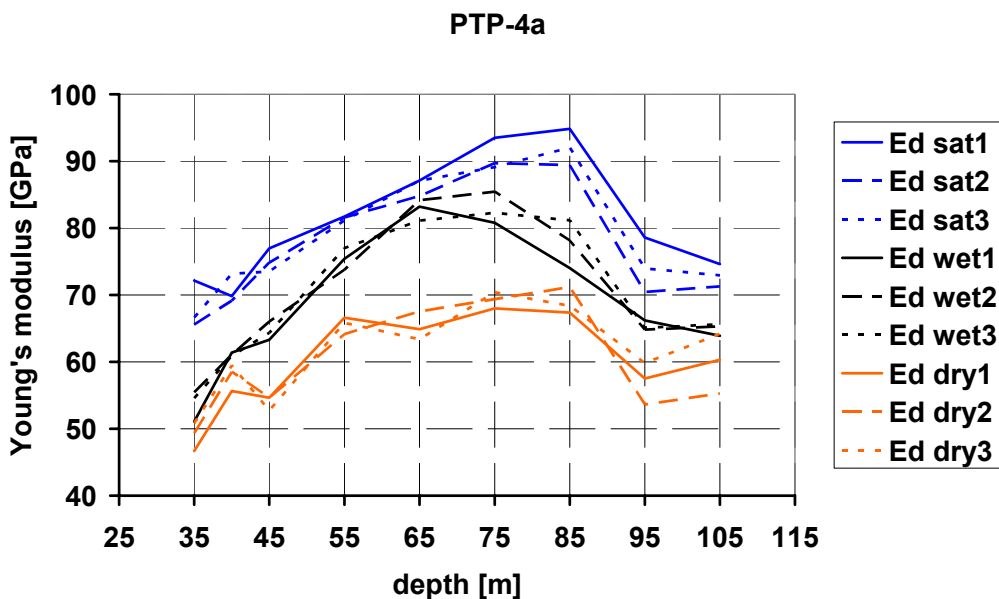
V grafu (Obr. 99) je zachycen průběh rychlosti S-vln s hloubkou vzorků. Rychlosti S-vln ve vysušených vzorcích vrtu PTP-4a se pohybují v rozmezí od 2,84 km.s⁻¹ do 3,43 km.s⁻¹. Rychlosti S-vln v nasycených vzorcích se pohybují v rozmezí od 3,13 km.s⁻¹ do 3,82 km.s⁻¹.

Obr. 99: Rychlost S-vln ve vzorcích z vrtu PTP-4a v závislosti na hloubce



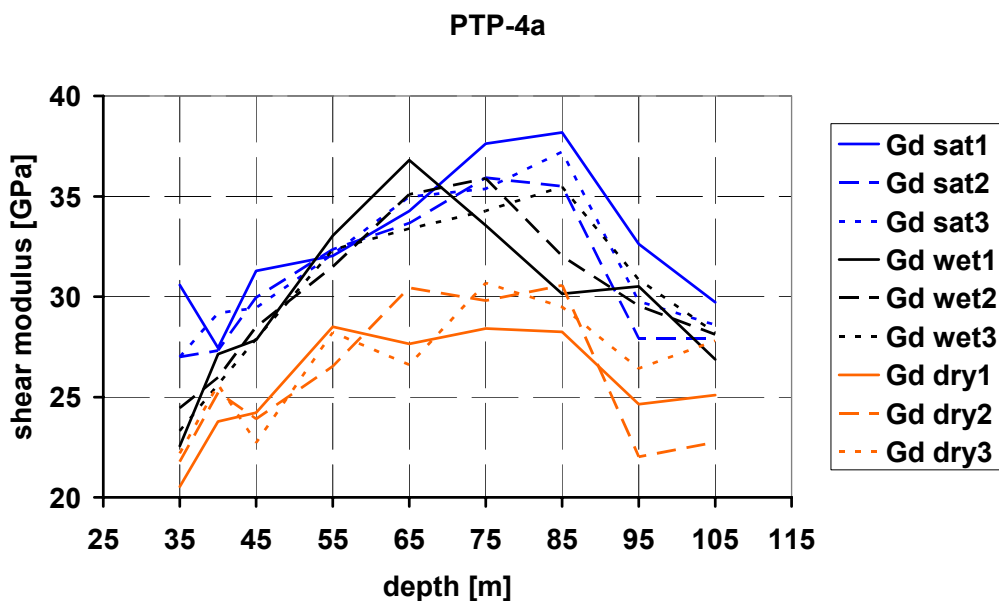
V grafu (Obr. 100) je zachycen průběh dynamického modulu pružnosti v tlaku s hloubkou vzorků. Hodnoty modulu ve vysušených vzorcích vrtu PTP-4a se pohybují v rozmezí od 46,7 GPa do 71,2 GPa. Hodnoty modulu v nasycených vzorcích se pohybují v rozmezí od 63,2 GPa do 94,8 GPa.

Obr. 100: Dynamický Youngův modul vzorků z vrtu PTP-4a v závislosti na hloubce



V grafu (Obr. 101) je zachycen průběh dynamického modulu pružnosti ve stříhu s hloubkou vzorků. Hodnoty modulu ve vysušených vzorcích vrtu PTP-4a se pohybují v rozmezí od 20,5 GPa do 30,7 GPa. Hodnoty modulu v nasycených vzorcích se pohybují v rozmezí od 24,9 GPa do 38,2 GPa.

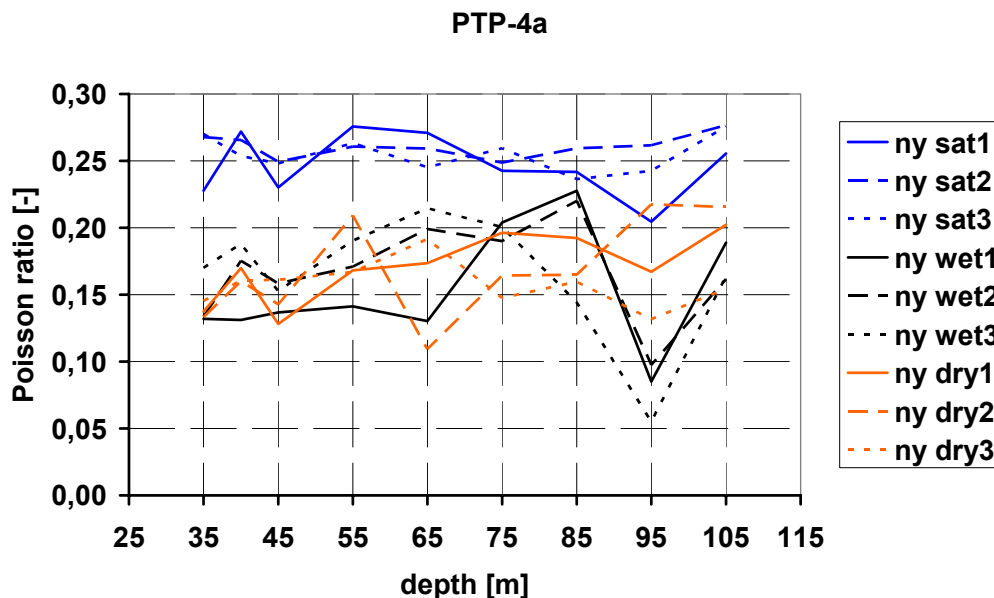
Obr. 101: Dynamický střížný modul vzorků z vrtu PTP-4a v závislosti na hloubce



V grafu (Obr. 102) je zachycen průběh Poissonova čísla s hloubkou vzorků. Hodnoty Poissonova čísla ve vysušených vzorcích vrtu PTP-4a se pohybují v rozmezí od 0,11 do

0,22. Hodnoty Poissonova čísla v nasycených vzorcích se pohybují v rozmezí od 0,18 do 0,28.

Obr. 102: Poissonova čísla vzorků z vrtu PTP-4a v závislosti na hloubce

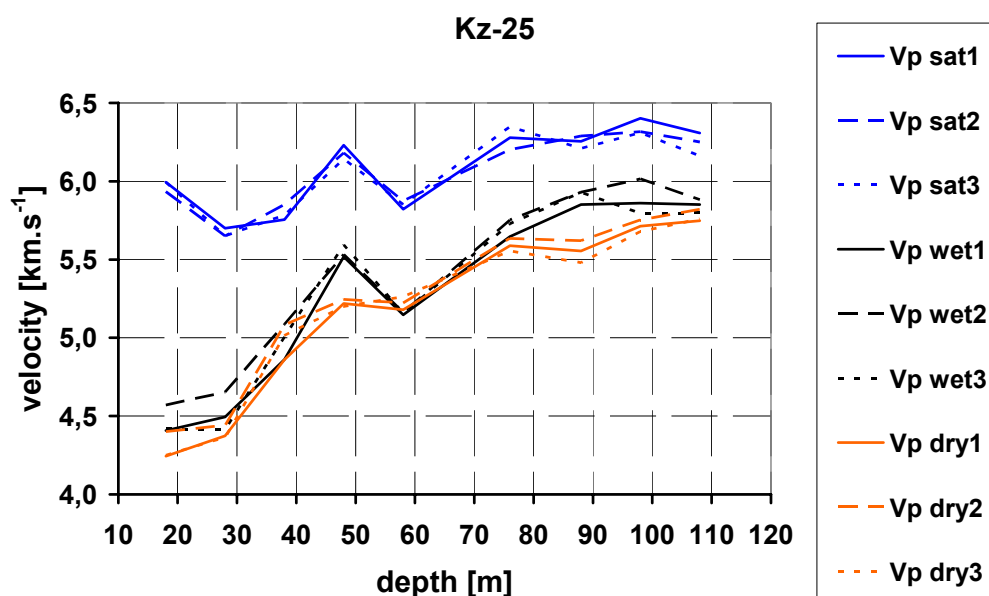


Z výše uvedených grafů (Obr. 98, Obr. 99, Obr. 100, Obr. 101) vyplývá, že rychlost P-vln a S-vln a z nich vypočtených modulů pružnosti v tlaku a stříhu roste ve vrtu PTP-4a do hloubky 85 m, poté klesá. Růst rychlostí odpovídá snižující se míře navětrání horniny. Pokles rychlostí dvou nejhlubších vzorků je způsoben alterací, která provází změnu litologie. Protolithionitový granit přechází v hloubce 100 m do granitu biotitického. Vysušené vzorky téměř nevykazují anizotropii rychlosti. Rychlost P-vln v ose vrtu v nasycených vzorcích je až o 2,5% vyšší než ve směrech horizontálních. Rychlost P-vln v ose vrtu v nenasycených vzorcích je naopak až o 3,7% nižší než ve směrech horizontálních.

7.3.1.5 Krásno

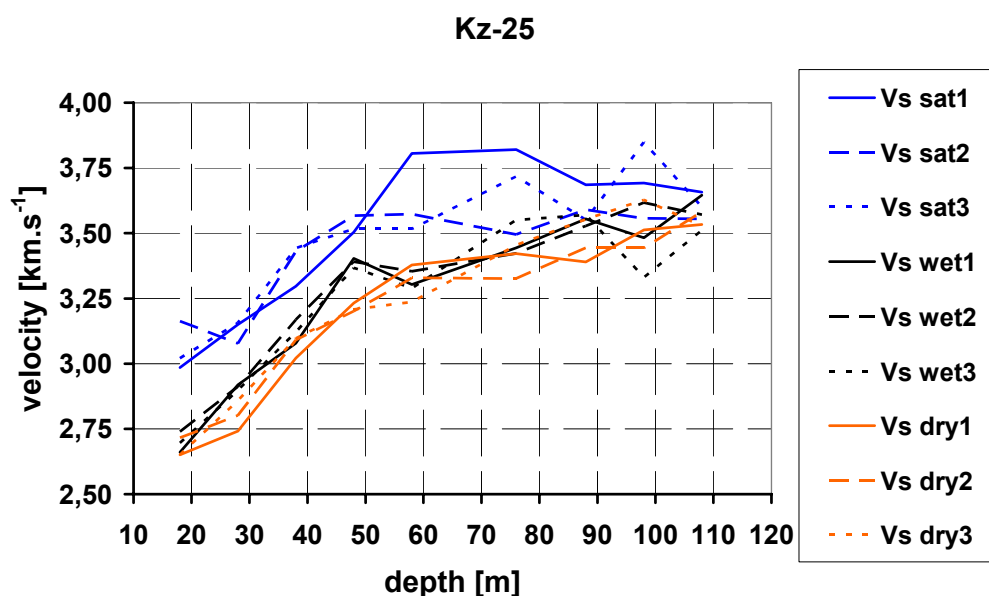
V grafu (Obr. 103) je zachycen průběh rychlosti P-vln s hloubkou vzorků. Rychlosti P-vln ve vysušených vzorcích vrtu KŽ-25 se pohybují v rozmezí od $4,24 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ do $5,82 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. Rychlosti P-vln v nasycených vzorcích se pohybují v rozmezí od $5,65 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ do $6,40 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$.

Obr. 103: Rychlost P-vln ve vzorcích z vrtu Kž-25 v závislosti na hloubce



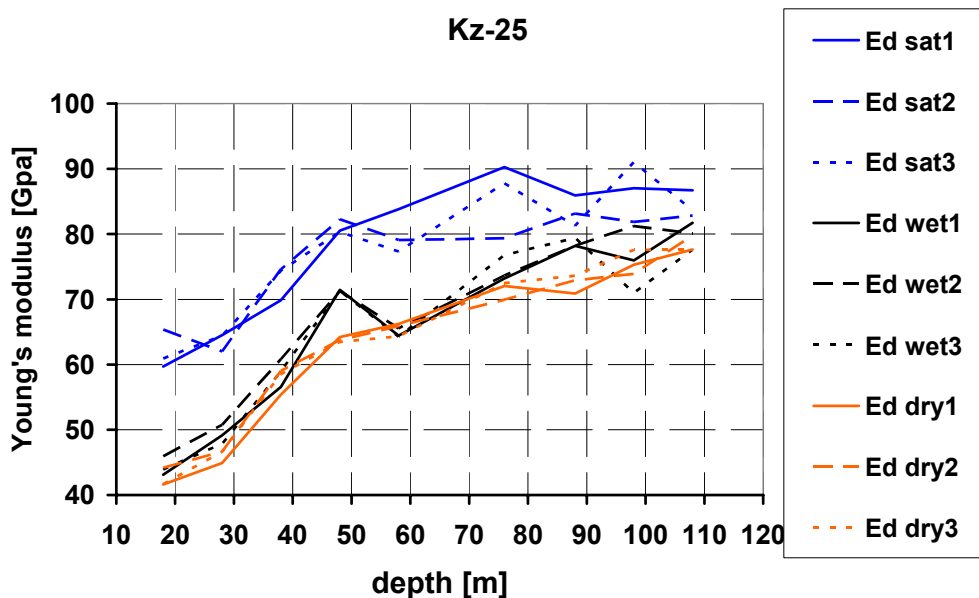
V grafu (Obr. 104) je zachycen průběh rychlosti S-vln s hloubkou vzorků. Rychlosti S-vln ve vysušených vzorcích vrtu Kž-25 se pohybují v rozmezí od 2,65 km.s⁻¹ do 3,63 km.s⁻¹. Rychlosti S-vln v nasycených vzorcích se pohybují v rozmezí od 2,99 km.s⁻¹ do 3,85 km.s⁻¹.

Obr. 104: Rychlost S-vln ve vzorcích z vrtu Kž-25 v závislosti na hloubce



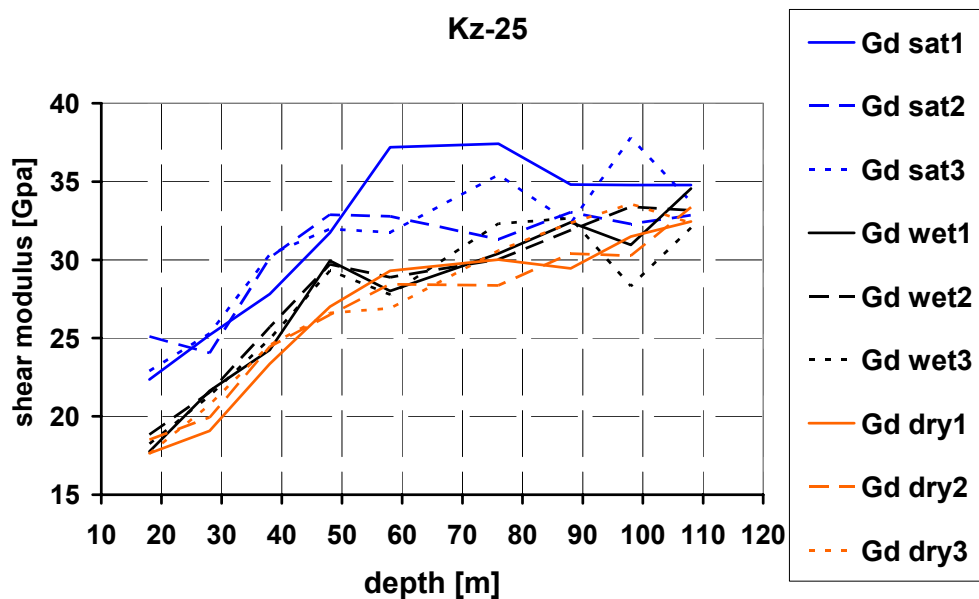
V grafu (Obr. 105) je zachycen průběh dynamického modulu pružnosti v tlaku s hloubkou vzorků. Hodnoty modulu ve vysušených vzorcích vrtu Kž-25 se pohybují v rozmezí od 41,6 GPa do 79,8 GPa. Hodnoty modulu v nasycených vzorcích se pohybují v rozmezí od 59,7 GPa do 91,0 GPa.

Obr. 105: Dynamický Youngův modul vzorků z vrtu Kž-25 v závislosti na hloubce



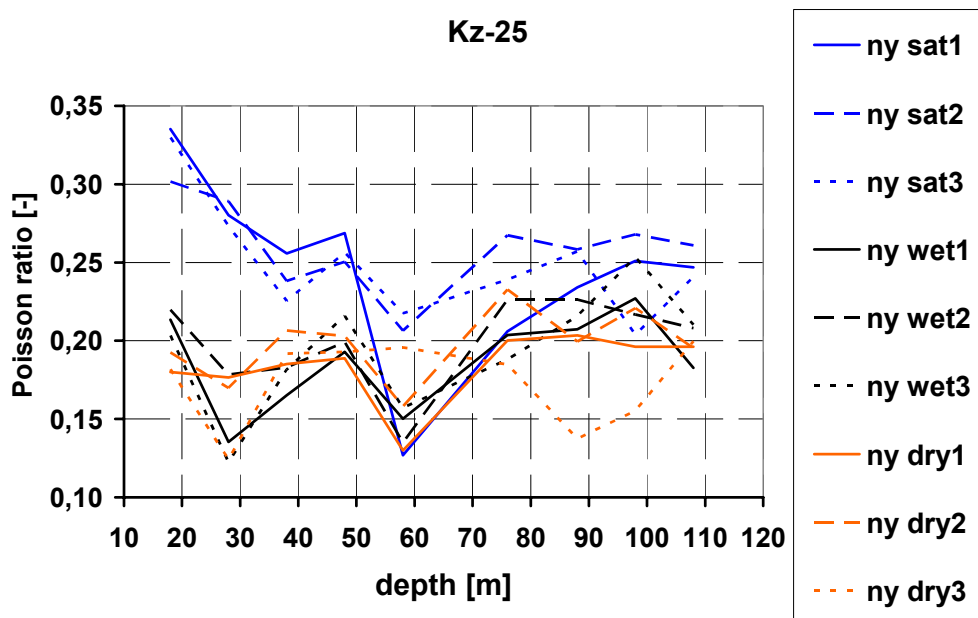
V grafu (Obr. 106) je zachycen průběh dynamického modulu pružnosti ve stříhu s hloubkou vzorků. Hodnoty modulu ve vysušených vzorcích vrtu Kž-25 se pohybují v rozmezí od 17,6 GPa do 33,6 GPa. Hodnoty modulu v nasycených vzorcích se pohybují v rozmezí od 22,4 GPa do 37,8 GPa.

Obr. 106: Dynamický střížný modul vzorků z vrtu Kž-25 v závislosti na hloubce



V grafu (Obr. 107) je zachycen průběh Poissonova čísla s hloubkou vzorků. Hodnoty Poissonova čísla ve vysušených vzorcích vrtu Kž-25 se pohybují v rozmezí od 0,12 do 0,23. Hodnoty Poissonova čísla v nasycených vzorcích se pohybují v rozmezí od 0,13 do 0,34.

Obr. 107: Poissonova čísla vzorků z vrtu Kž-25 v závislosti na hloubce

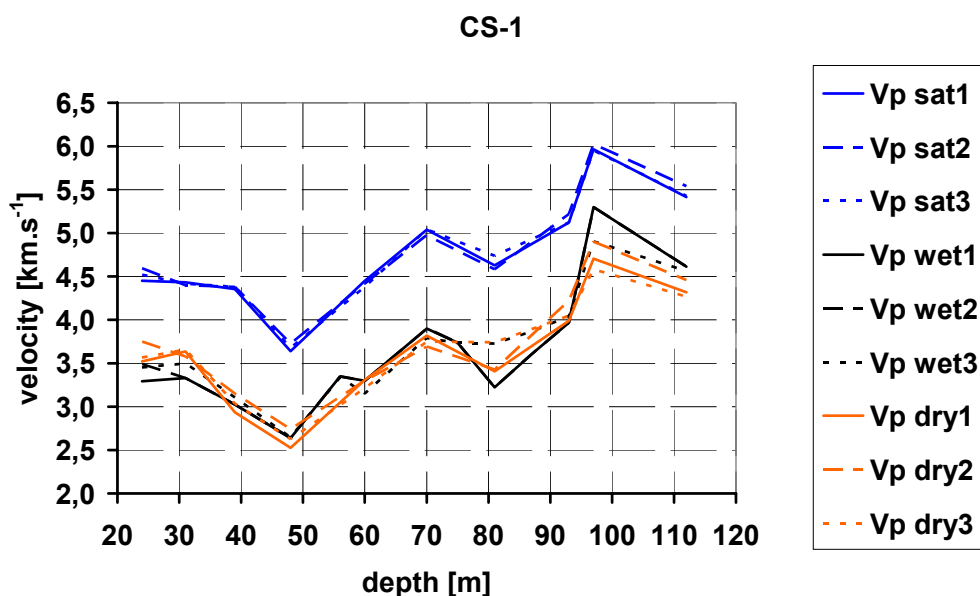


Z výše uvedených grafů (Obr. 103, Obr. 104, Obr. 105, Obr. 106) vyplývá, že rychlost P-vln a S-vln a z nich vypočtených modulů pružnosti v tlaku a střihu ve vrtu Kž-25 plynule roste. Růst rychlostí odpovídá snižující se míře navětrání horniny. Vyšší hodnota rychlostí v nasyceném vzorku z hloubky 48 m je pravděpodobně odrazem lokální nehomogenity horniny. Výraznější anizotropii rychlostí S-vln vykazují nasycené vzorky z hloubek větších než 58 m. Rychlost S-vln v ose vrtu v těchto vzorcích je až o 8% vyšší než ve směrech horizontálních.

7.3.1.6 Cínovec

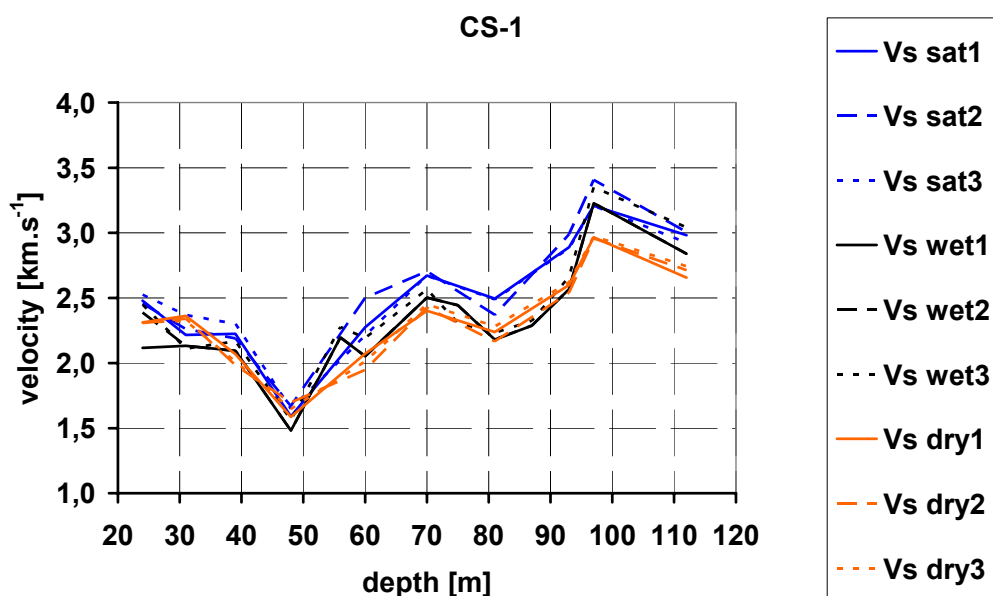
V grafu (Obr. 108) je zachycen průběh rychlosti P-vln s hloubkou vzorků. Rychlosti P-vln ve vysušených vzorcích vrtu CS-1 se pohybují v rozmezí od 2,53 km.s⁻¹ do 4,90 km.s⁻¹. Rychlosti P-vln v nasycených vzorcích se pohybují v rozmezí od 3,64 km.s⁻¹ do 6,02 km.s⁻¹.

Obr. 108: Rychlost P-vln ve vzorcích z vrtu CS-1 v závislosti na hloubce



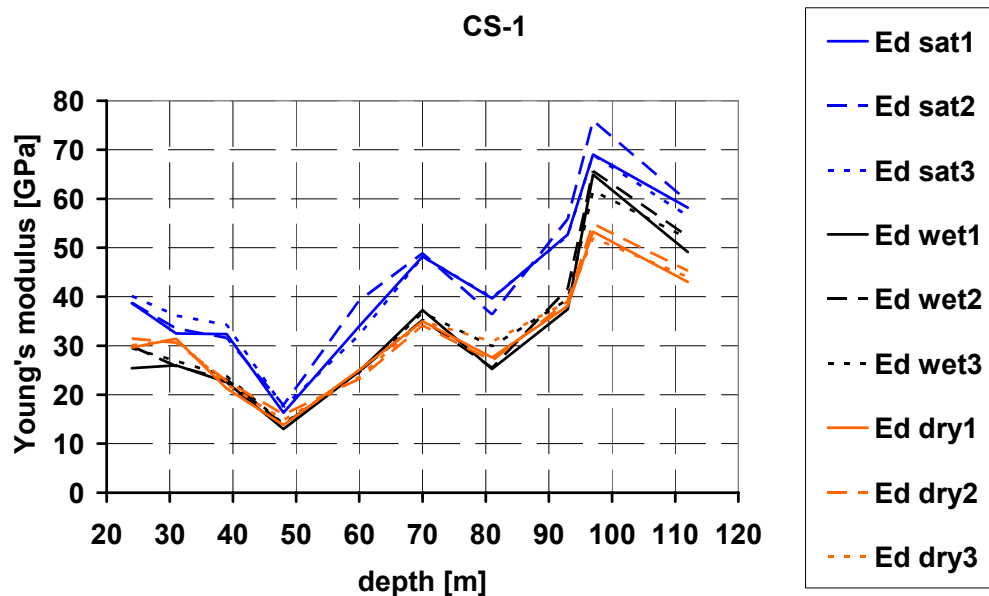
V grafu (Obr. 109) je zachycen průběh rychlosti S-vln s hloubkou vzorků. Rychlosti S-vln ve vysušených vzorcích vrtu CS-1 se pohybují v rozmezí od 1,59 km.s⁻¹ do 2,97 km.s⁻¹. Rychlosti S-vln v nasycených vzorcích se pohybují v rozmezí od 1,59 km.s⁻¹ do 3,41 km.s⁻¹.

Obr. 109: Rychlost S-vln ve vzorcích z vrtu CS-1 v závislosti na hloubce



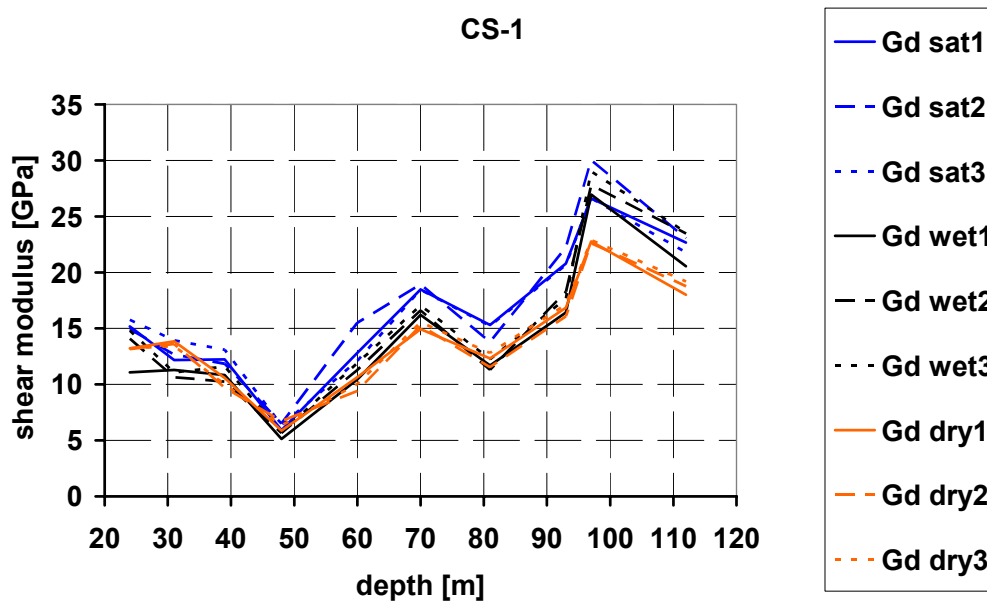
V grafu (Obr. 110) je zachycen průběh dynamického modulu pružnosti v tlaku s hloubkou vzorků. Hodnoty modulu ve vysušených vzorcích vrtu CS-1 se pohybují v rozmezí od 13,8 GPa do 54,9 GPa. Hodnoty modulu v nasycených vzorcích se pohybují v rozmezí od 16,3 GPa do 76,0 GPa.

Obr. 110: Dynamický Youngův modul vzorků z vrtu CS-1 v závislosti na hloubce



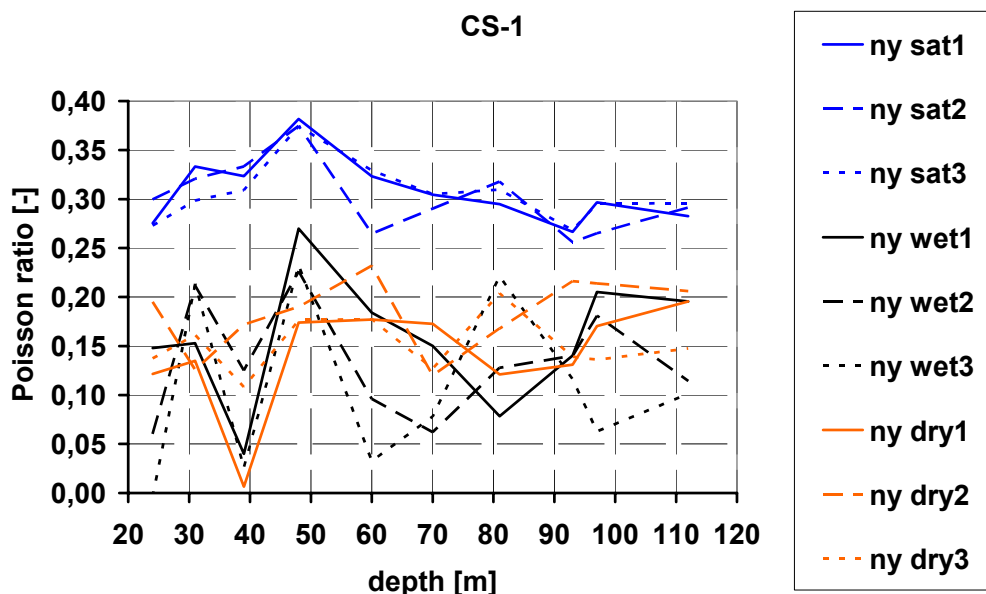
V grafu (Obr. 111) je zachycen průběh dynamického modulu pružnosti ve stříhu s hloubkou vzorků. Hodnoty modulu ve vysušených vzorcích vrtu CS-1 se pohybují v rozmezí od 5,9 GPa do 22,9 GPa. Hodnoty modulu v nasycených vzorcích se pohybují v rozmezí od 5,9 GPa do 30,0 GPa.

Obr. 111: Dynamický střížný modul vzorků z vrtu CS-1 v závislosti na hloubce



V grafu (Obr. 112) je zachycen průběh Poissonova čísla s hloubkou vzorků. Hodnoty Poissonova čísla ve vysušených vzorcích vrtu CS-1 se pohybují v rozmezí od 0,01 do 0,23. Hodnoty Poissonova čísla v nasycených vzorcích se pohybují v rozmezí od 0,26 do 0,38.

Obr. 112: Poissonova čísla vzorků z vrtu CS-1 v závislosti na hloubce

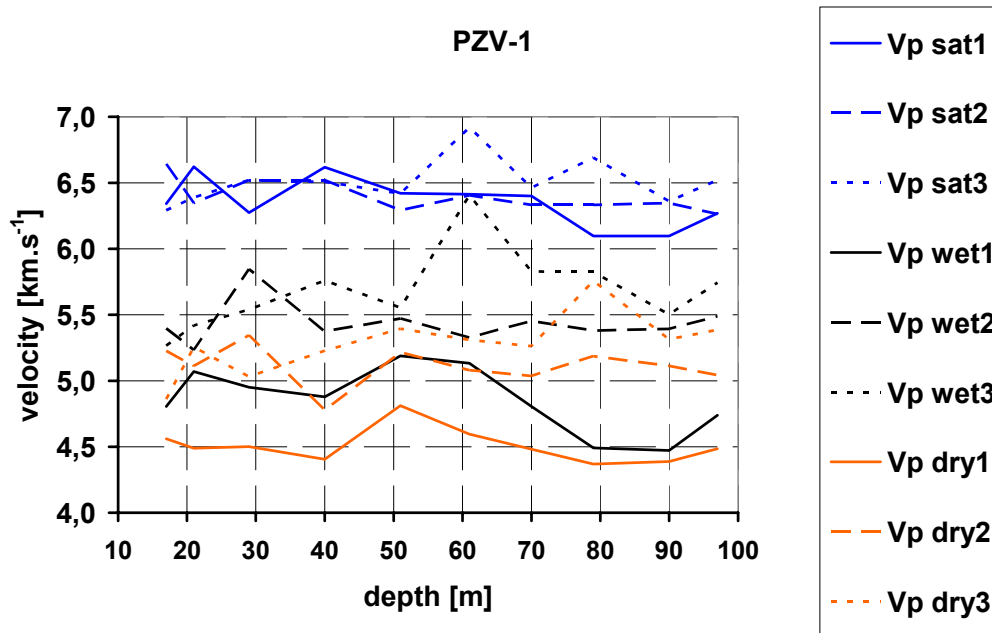


Z výše uvedených grafů (Obr. 108, Obr. 109, Obr. 110, Obr. 111) vyplývá, že rychlost P-vln a S-vln a z nich vypočtených modulů pružnosti v tlaku a stříhu ve vrtu CS-1 roste. Nižší hodnoty rychlostí ve vzorku z hloubky 48 m jsou pravděpodobně způsobeny tím, že vrt CS-1 prošel ve své hloubce 46 m až 48 m starou dobývkou greisenového ložiska, takže hornina v podloží byla ovlivněna těžbou. Vzorek z hloubky 81 m je ovlivněn blízkým kontaktem zinnwalditového granitu a greisenu, který je v hloubce 79,6 m. Pokles rychlostí ve vzorku z hloubky 112 m je způsoben jeho alterací, vzorek obsahuje vyšší obsah zinnwalditu. Tyto vzorky s nižší rychlostí vykazují vyšší anizotropii rychlostí. Rychlost P-vln v ose vrtu ve vysušených vzorcích je až o 8,5% nižší než ve směrech horizontálních.

7.3.1.7 Pozdávky

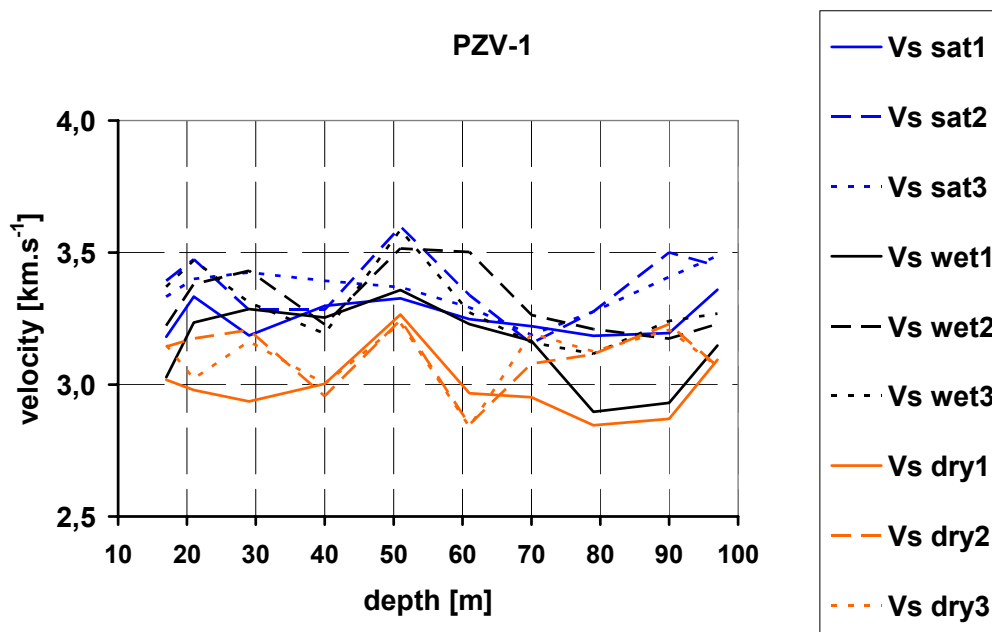
V grafu (Obr. 113) je zachycen průběh rychlosti P-vln s hloubkou vzorků. Rychlosti P-vln ve vysušených vzorcích vrtu PZV-1 se pohybují v rozmezí od $4,37 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ do $5,76 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$. Rychlosti P-vln v nasycených vzorcích se pohybují v rozmezí od $6,10 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$ do $6,92 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$.

Obr. 113: Rychlost P-vln ve vzorcích z vrtu PZV-1 v závislosti na hloubce



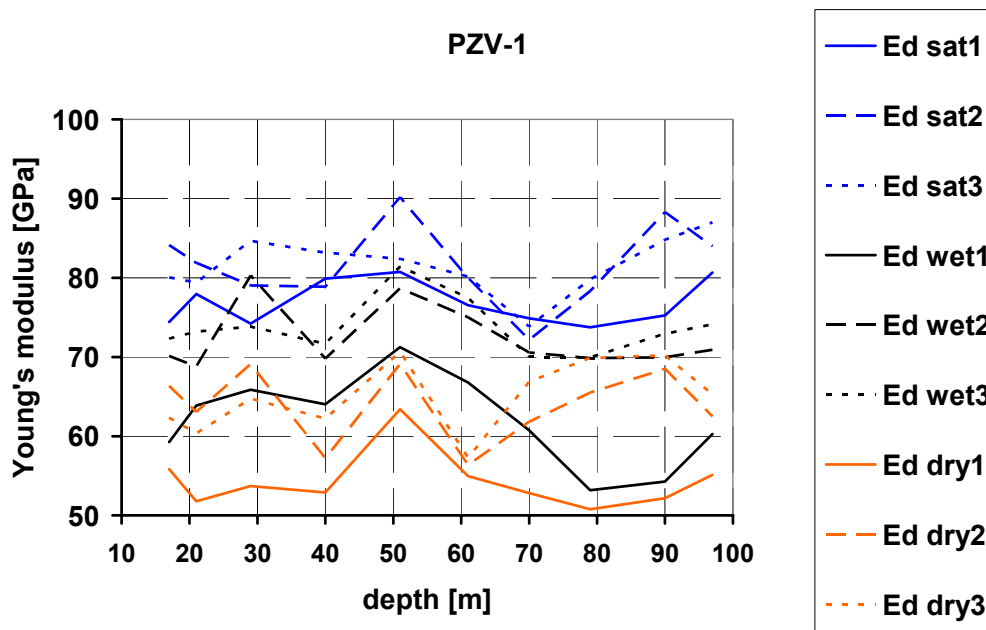
V grafu (Obr. 114) je zachycen průběh rychlosti S-vln s hloubkou vzorků. Rychlosti S-vln ve vysušených vzorcích vrtu PZV-1 se pohybují v rozmezí od 2,84 km.s⁻¹ do 3,27 km.s⁻¹. Rychlosti S-vln v nasycených vzorcích se pohybují v rozmezí od 3,16 km.s⁻¹ do 3,60 km.s⁻¹.

Obr. 114: Rychlost S-vln ve vzorcích z vrtu PZV-1 v závislosti na hloubce



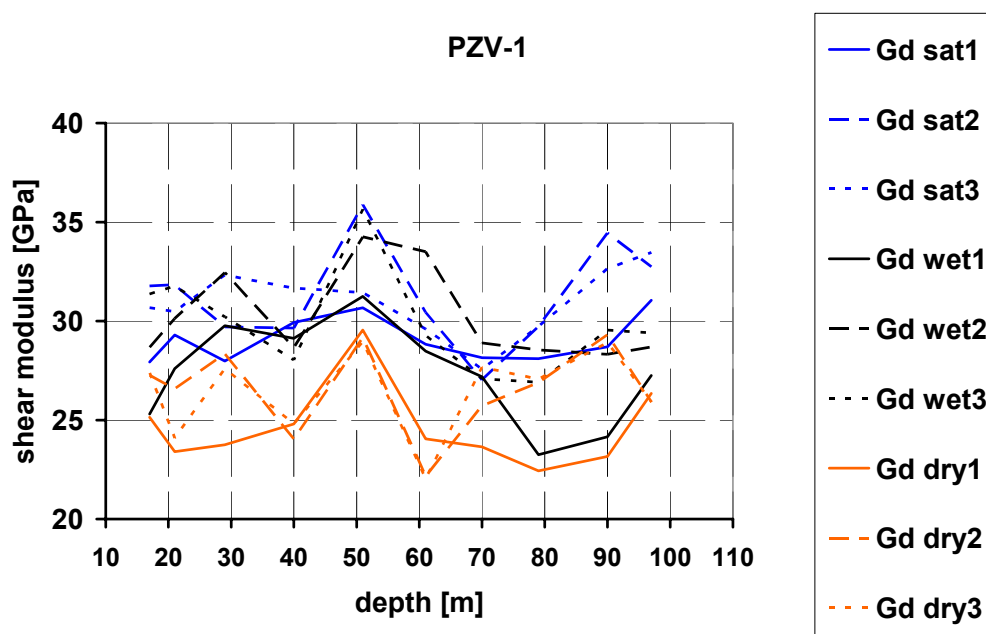
V grafu (Obr. 115) je zachycen průběh dynamického modulu pružnosti v tlaku s hloubkou vzorků. Hodnoty modulu ve vysušených vzorcích vrtu PZV-1 se pohybují v rozmezí od 50,8 GPa do 70,7 GPa. Hodnoty modulu v nasycených vzorcích se pohybují v rozmezí od 72,2 GPa do 90,2 GPa.

Obr. 115: Dynamický Youngův modul vzorků z vrtu PZV-1 v závislosti na hloubce



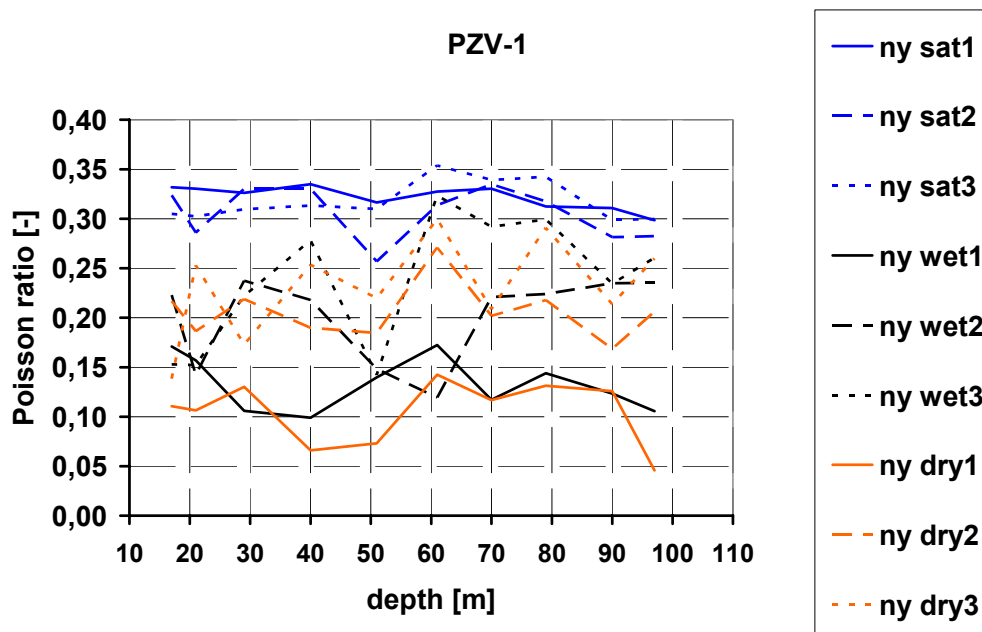
V grafu (Obr. 116) je zachycen průběh dynamického modulu pružnosti ve stříhu s hloubkou vzorků. Hodnoty modulu ve vysušených vzorcích vrtu PZV-1 se pohybují v rozmezí od 22,0 GPa do 29,5 GPa. Hodnoty modulu v nasycených vzorcích se pohybují v rozmezí od 27,0 GPa do 35,9 GPa.

Obr. 116: Dynamický střížný modul vzorků z vrtu PZV-1 v závislosti na hloubce



V grafu (Obr. 117) je zachycen průběh Poissonova čísla s hloubkou vzorků. Hodnoty Poissonova čísla ve vysušených vzorcích vrtu PZV-1 se pohybují v rozmezí od 0,05 do 0,30. Hodnoty Poissonova čísla v nasycených vzorcích se pohybují v rozmezí od 0,26 do 0,35.

Obr. 117: Poissonova čísla vzorků z vrtu PZV-1 v závislosti na hloubce



Na výše uvedených grafech (Obr. 113, Obr. 114, Obr. 115, Obr. 116) není patrný vztah mezi rychlostí P-vln a S-vln a z nich vypočtených modulů pružnosti v tlaku a stříhu a hloubky vzorků ve vrtu PZV-1. Horninové vzorky vykazují silnější anizotropii rychlostí. Rychlost P-vln v ose vrtu ve vysušených vzorcích je až o 25% nižší než ve směru protažení zrn a o 15% nižší než ve směru kolmém na protažení zrn.

Všechny grafy zobrazující závislost Poissonova čísla na hloubce (Obr. 87, Obr. 92, Obr. 97, Obr. 102, Obr. 107, Obr. 111, Obr. 117) ukazují veliký rozptyl měřených dat. Dynamické hodnoty Poissonova čísla jsou často náchylné k významným chybám ((Siggins (1993) in Gercek (2007)).

Z grafů je ale patrný trend snižujícího se Poissonova čísla s hloubkou. Tento trend je nejvýraznější na hodnotách nasycených vzorků. Trend je způsoben snižujícím se poměrem rychlosti podélné a příčné vlny směrem do hloubky. Nejvyšší hodnoty Poissonova čísla dosahují vzorky nasycené, poté následují nenasycené a nejnižší hodnoty Poissonova čísla mají vysušené vzorky. Důvodem jsou vyšší hodnoty rychlostí P-vln v nasycených vzorcích, oproti rychlostem ve vzorcích vysušených. Hodnoty rychlostí S-vln takových rozdílů nedosahují.

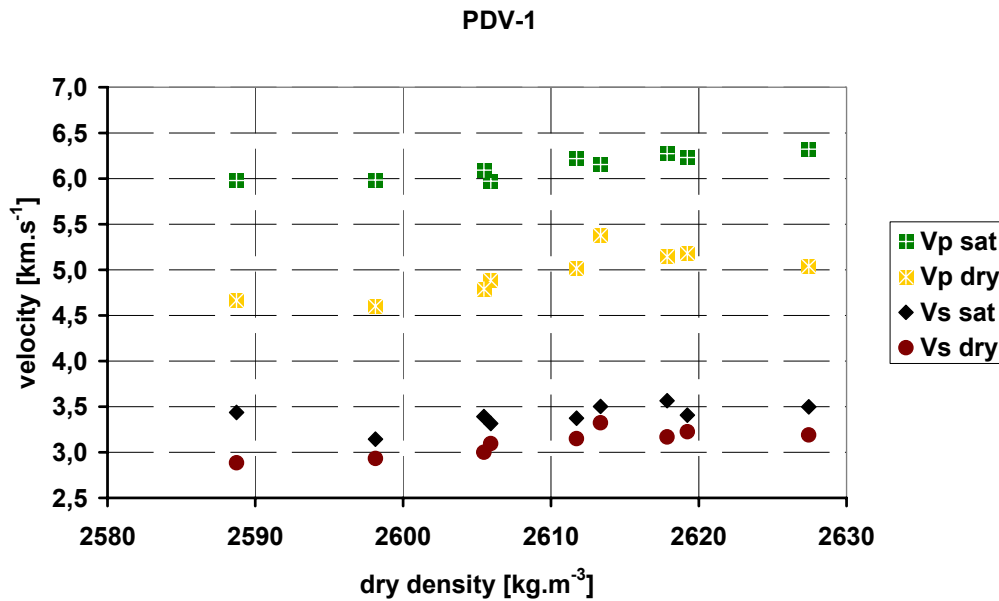
7.3.2 Porovnání rychlosti seismických vln a objemové hmotnosti

V grafech uvedených v této kapitole jsou porovnány výsledky měření rychlostí P-vln a S-vln nasycenými, nenasycenými a vysušenými vzorky s hodnotami objemové hmotnosti vysušených hornin, které byly stanoveny na identických vzorcích. Z důvodu větší přehlednosti byly v grafech použity pouze hodnoty rychlostí P-vln a S-vln měřených mezi

podstavami v ose vzorků, která odpovídá vertikále ve vrtu. Výsledky objemové hmotnosti jsou zpracovány ve zprávě (Najser et al., 2010).

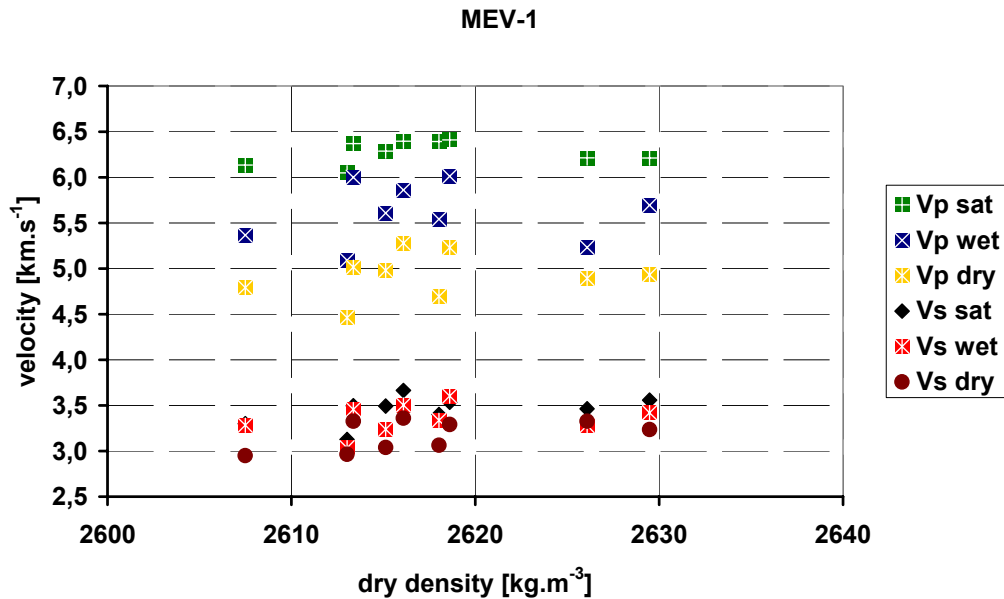
V grafu (Obr. 118) je zachycen vztah mezi rychlostmi P-vln a S-vln a objemovou hmotností vysušených vzorků z vrtu PDV-1. V grafu je patrný trend zvyšující se rychlosti P-vln ve vysušených vzorcích (žluté čtverce) se zvyšující se objemovou hmotností vysušených vzorků.

Obr. 118: Vztah mezi rychlostmi P-vln a S-vln a objemovou hmotností vysušených vzorků z vrtu PDV-1



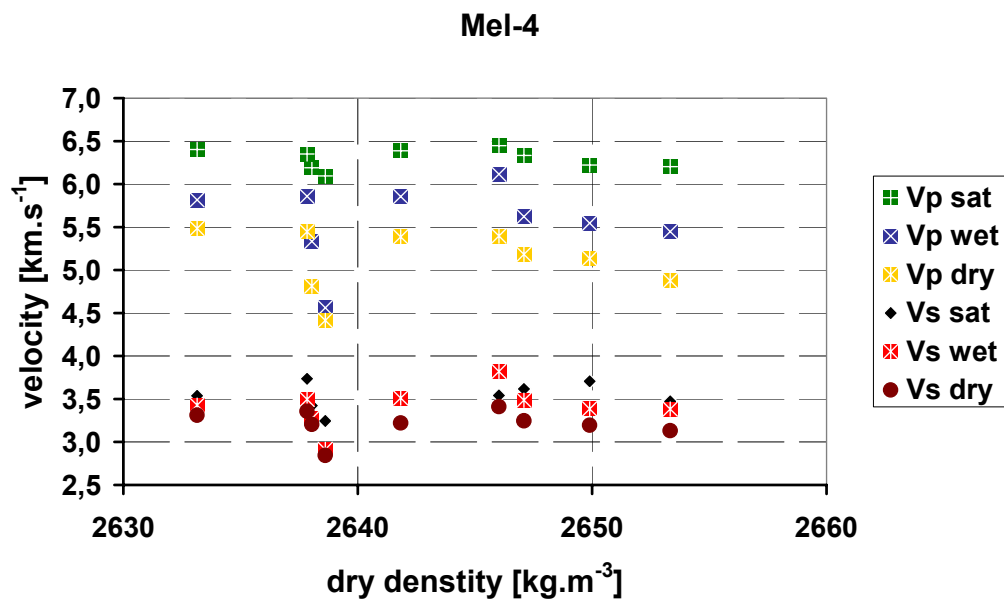
V grafu (Obr. 119) je zachycen vztah mezi rychlostmi P-vln a S-vln a objemovou hmotností vysušených vzorků z vrtu MEV-1. Z grafu je patrné, že se hodnoty rychlostí P-vln a S-vln v závislosti na objemových hmotnostech příliš neliší. Hodnoty objemových hmotností mají malý rozsah a téměř se nemění v celé délce vrtu.

Obr. 119: Vztah mezi rychlostmi P-vln a S-vln a objemovou hmotností vysušených vzorků z vrtu MEV-1



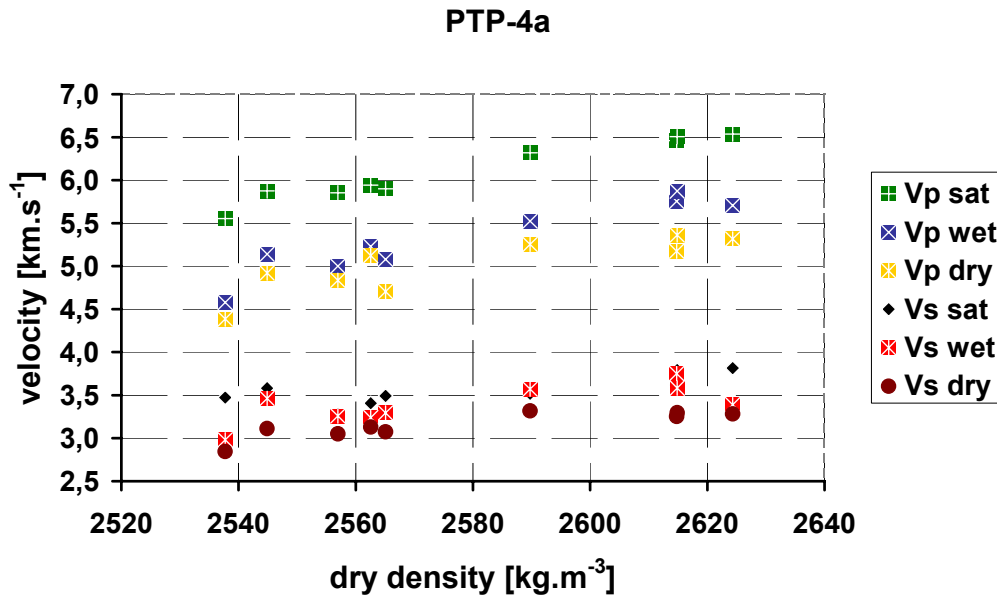
V grafu (Obr. 120) je zachycen vztah mezi rychlostmi P-vln a S-vln a objemovou hmotností vysušených vzorků z vrtu Mel-4. Z grafu je patrné, že se hodnoty rychlostí P-vln a S-vln v závislosti na objemových hmotnostech příliš neliší. Hodnoty objemových hmotností se příliš nemění (z vyhodnocení byl vyřazen navětralý vzorek z hloubky 10 m, který měl suchou objemovou hmotnost 2557 kg.m⁻³).

Obr. 120: Vztah mezi rychlostmi P-vln a S-vln a objemovou hmotností vysušených vzorků z vrtu Mel-4



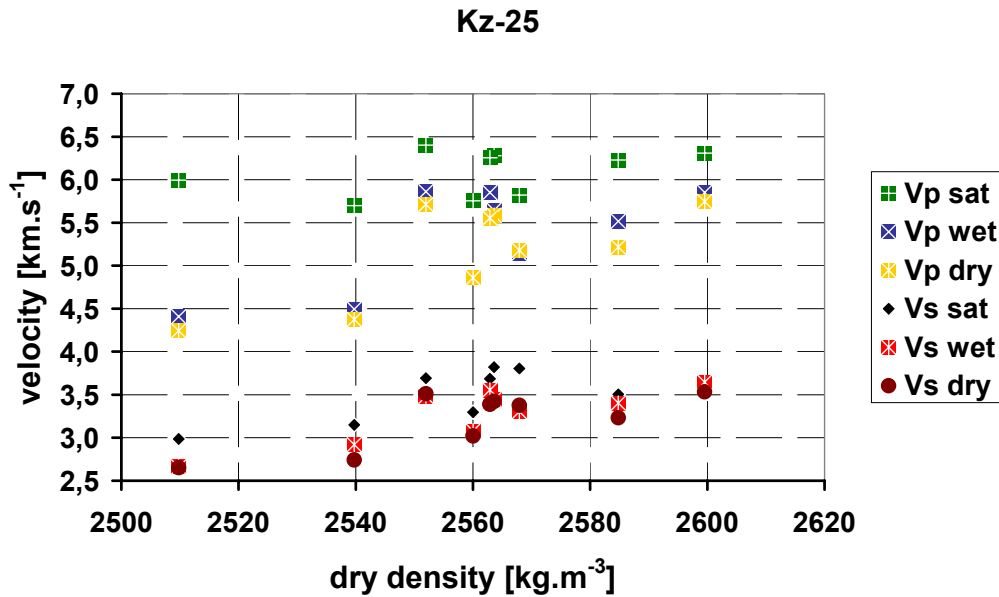
V grafu (Obr. 121) je zachycen vztah mezi rychlostmi P-vln a S-vln a objemovou hmotností vysušených vzorků z vrtu PTP-4a. V grafu je patrný trend zvyšující se rychlosti P-vln a S-vln se zvyšující se objemovou hmotností vysušených vzorků. Změna objemové hmotnosti o 80 kg.m^{-3} přibližně odpovídá změně rychlosti P-vln v nasycených vzorcích o $1,00 \text{ km.s}^{-1}$ (zelené čtverce).

Obr. 121: Vztah mezi rychlostmi P-vln a S-vln a objemovou hmotností vysušených vzorků z vrtu PTP-4a



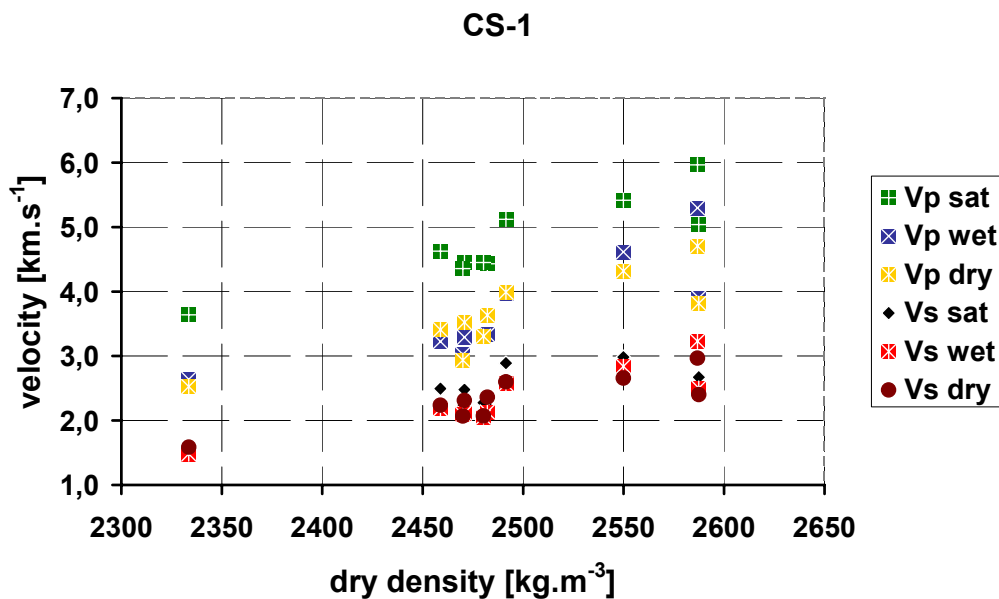
V grafu (Obr. 122) je zachycen vztah mezi rychlostmi P-vln a S-vln a objemovou hmotností vysušených vzorků z vrtu Kž-25. V grafu je patrný trend zvyšující se rychlosti P-vln a S-vln se zvyšující se objemovou hmotností vysušených vzorků. Změna objemové hmotnosti o 90 kg.m^{-3} přibližně odpovídá změně rychlosti P-vln ve vysušených vzorcích o $1,50 \text{ km.s}^{-1}$ (žluté čtverce).

Obr. 122: Vztah mezi rychlostmi P-vln a S-vln a objemovou hmotností vysušených vzorků z vrtu Kž-25



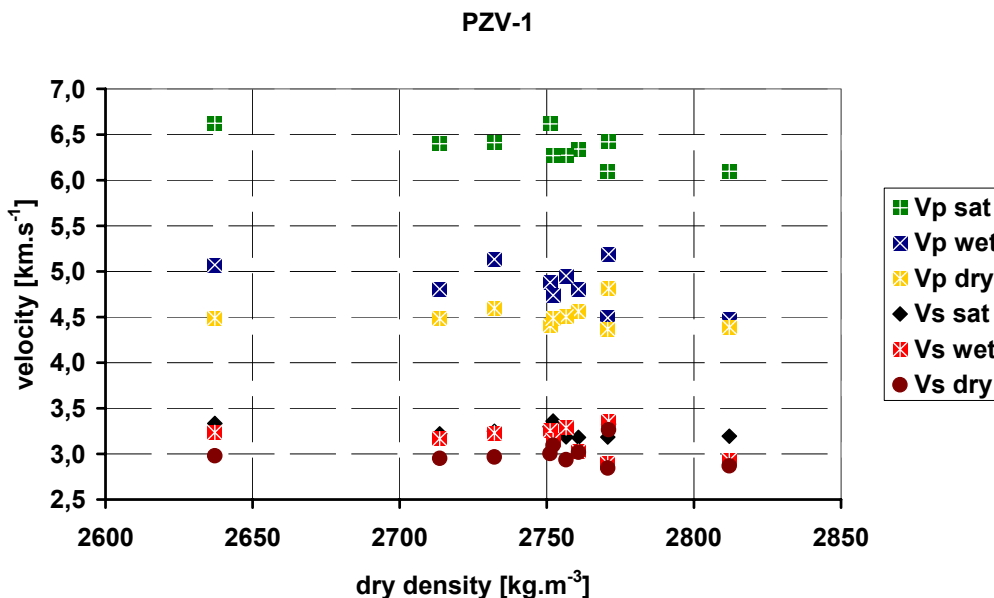
V grafu (Obr. 123) je zachycen vztah mezi rychlostmi P-vln a S-vln a objemovou hmotností vysušených vzorků z vrtu CS-1. V grafu je patrný trend zvyšující se rychlosti P-vln a S-vln se zvyšující se objemovou hmotností vysušených vzorků. Změna objemové hmotnosti o 250 kg.m^{-3} přibližně odpovídá změně rychlosti P-vln ve vysušených vzorcích o $2,18 \text{ km.s}^{-1}$ (žluté čtverce).

Obr. 123: Vztah mezi rychlostmi P-vln a S-vln a objemovou hmotností vysušených vzorků z vrtu CS-1



V grafu (Obr. 124) je zachycen vztah mezi rychlostmi P-vln a S-vln a objemovou hmotností vysušených vzorků z vrtu PZV-1. Z grafu je patrné, že se hodnoty rychlostí P-vln a S-vln v závislosti na objemových hmotnostech téměř neliší a to i přes velký rozsah objemových hmotností.

Obr. 124: Vztah mezi rychlostmi P-vln a S-vln a objemovou hmotností vysušených vzorků z vrtu PZV-1



Z grafů uvedených v této kapitole vyplývá, že trendy změn rychlostí se změnami objemové hmotnosti jsou nejvíce patrné v případě rychlostí P-vln ve vysušených vzorcích. V následujícím grafu (Obr. 125) je zobrazena závislost objemové hmotnosti na rychlosti P-vln vysušenými vzorky (měřeno mezi podstavami vzorků ve vertikále vrtu). Z grafu je zřejmé, že mezi studovanými lokalitami neexistuje jednoznačná obecná závislost mezi rychlostí seismických vln a objemovou hmotností. V případě vzorků z lokalit Cínovec (CS-1), Krásno (Kž-25), Potůčky-Podlesí (PTP-4a) a částečně Panské Dubenky (PDV-1) si lze povšimnout nárůstu rychlosti P-vln společně s růstem objemové hmotnosti. Vzorky z lokalit Melechov-Kostelní les (MEV-1) a Melechov-Zadní les (Mel-4) mají takřka v celém profilu stejnou objemovou hmotnost, rychlosti P-vln se ale výrazně mění. Naopak vzorky z lokality Pozďátky (PZV-1) mění objemovou hmotnost, rychlost P-vln se však razantně nemění. Trend růstu rychlosti P-vln s rostoucí objemovou hmotností neodpovídá obecné rovnici pro rychlost P-vln v_p (39):

$$v_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3} \cdot \mu}{\rho}} \quad (39)$$

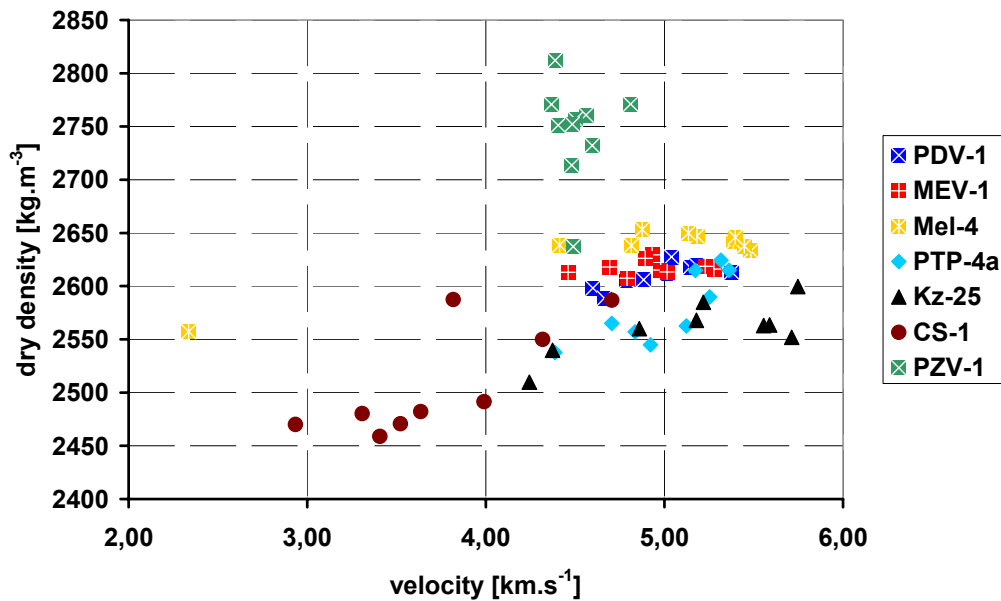
kde K odpovídá modulu objemové stlačitelnosti

μ odpovídá modulu pružnosti ve střihu

a ρ objemové hmotnosti.

Tento trend lze vysvětlit tím, že elastické moduly vzorku rostou rychleji než jeho objemová hmotnost.

Obr. 125: Vztah mezi rychlostmi P-vln a objemovou hmotností ve vysušených vzorcích

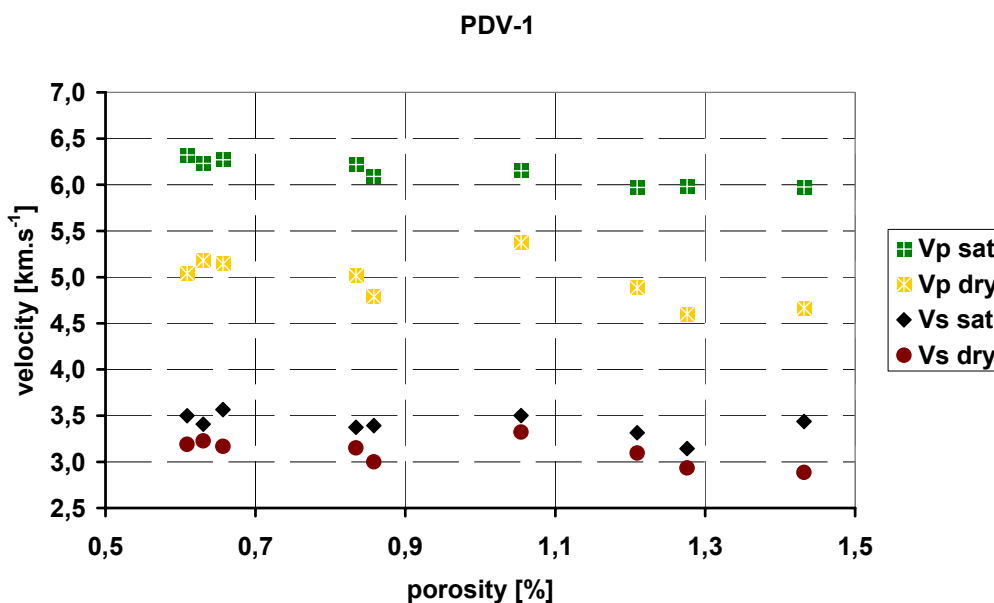


7.3.3 Porovnání rychlosti seismických vln a otevřené pórovitosti

V grafech uvedených v této kapitole jsou porovnány výsledky měření rychlostí P-vln a S-vln nasycenými, nenasyčenými a vysušenými vzorky s hodnotami otevřené pórovitosti horniny, které byly stanoveny na identických vzorcích. Z důvodu větší přehlednosti byly v grafech použity pouze hodnoty rychlostí P-vln a S-vln měřených mezi podstavami v ose vzorků, která odpovídá vertikále ve vrtu. Výsledky otevřené pórovitosti jsou zpracovány ve zprávě (Najser et al., 2010)

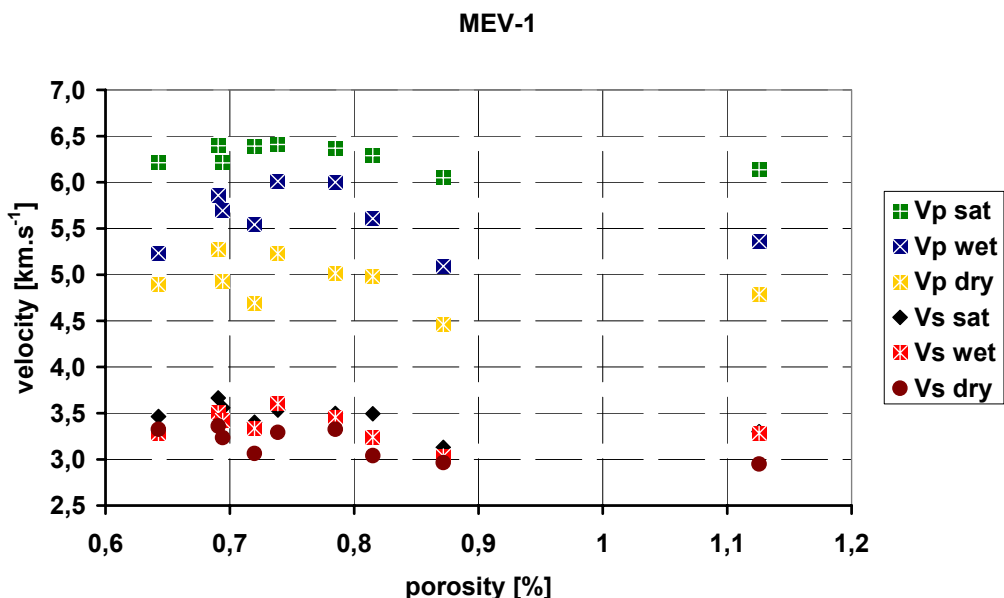
V grafu (Obr. 126) je zachycen vztah mezi rychlostmi P-vln a S-vln a otevřenou pórovitostí z vrtu PDV-1. V grafu je patrný trend snižující se rychlosti P-vln ve vysušených vzorcích (žluté čtverce) se zvyšující se otevřenou pórovitostí.

Obr. 126: Vztah mezi rychlostmi P-vln a S-vln a otevřenou pórovitostí z vrtu PDV-1



V grafu (Obr. 127) je zachycen vztah mezi rychlostmi P-vln a S-vln a otevřenou pórovitostí z vrtu MEV-1. Z grafu je patrné, že se hodnoty rychlostí P-vln a S-vln v závislosti na otevřené pórovitosti příliš neliší. Hodnoty otevřené pórovitosti mají malý rozsah a téměř se nemění v celé délce vrtu.

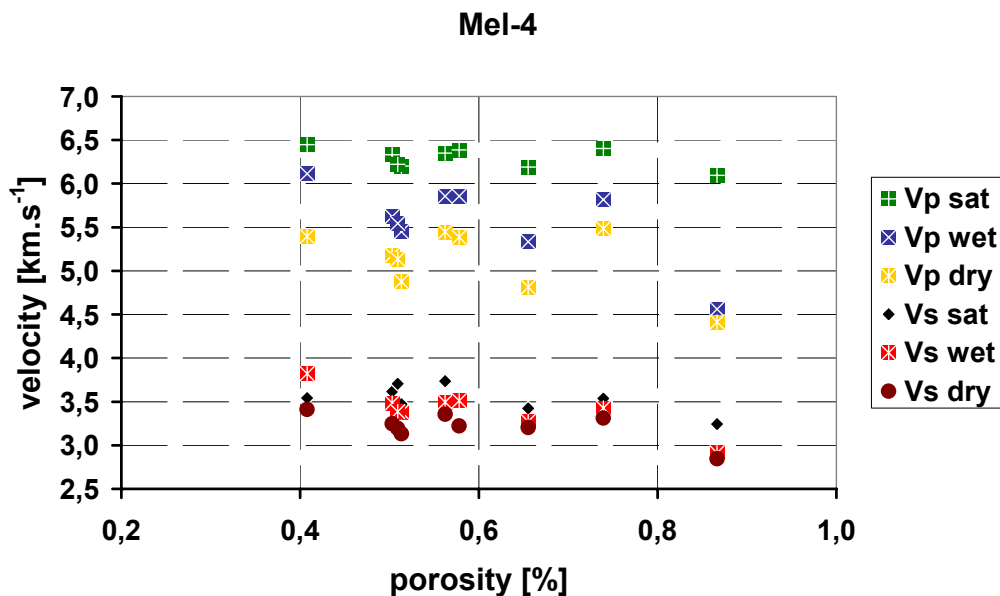
Obr. 127: Vztah mezi rychlostmi P-vln a S-vln a otevřenou pórovitostí z vrtu MEV-1



V grafu (Obr. 128) je zachycen vztah mezi rychlostmi P-vln a S-vln a otevřenou pórovitostí z vrtu Mel-4. V grafu je patrný trend snižující se rychlosti P-vln ve vysušených vzorcích (žluté čtverce) se zvyšující se otevřenou pórovitostí. Hodnoty otevřených pórovitostí se téměř

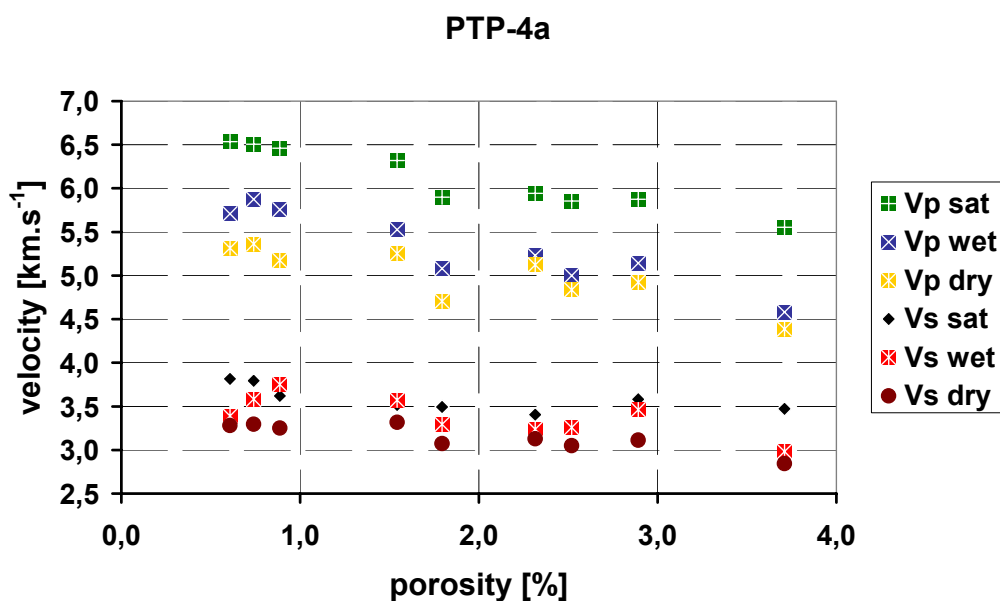
nemění (z vyhodnocení byl vyřazen navětralý vzorek z hloubky 10 m, který měl otevřenou pórovitost 3,71%).

Obr. 128: Vztah mezi rychlostmi P-vln a S-vln a otevřenou pórovitostí z vrtu Mel-4



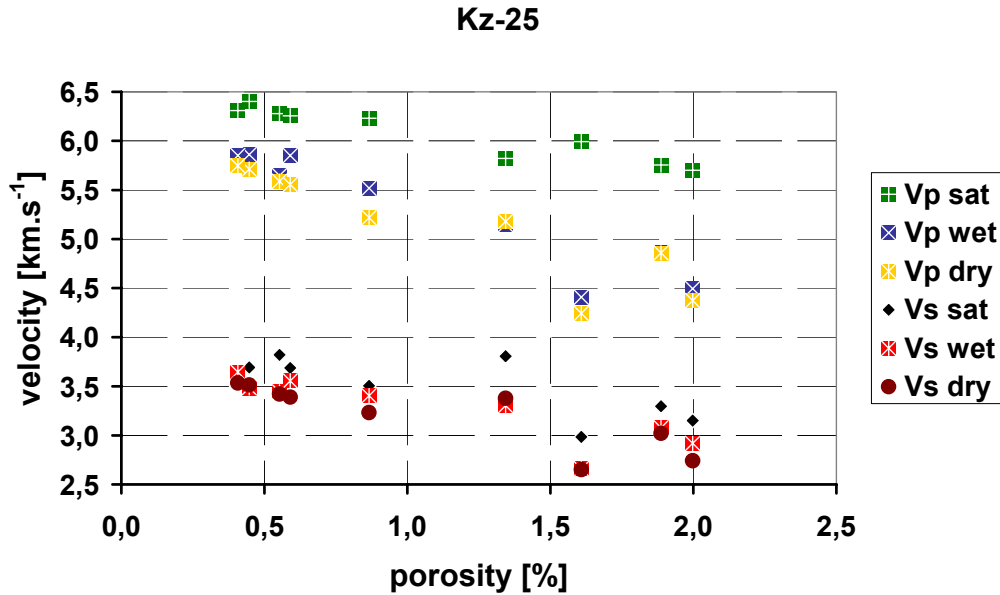
V grafu (Obr. 129) je zachycen vztah mezi rychlostmi P-vln a S-vln a otevřenou pórovitostí z vrtu PTP-4a. V grafu je patrný trend snižující se rychlosti P-vln a S-vln se zvyšující se otevřenou pórovitostí horniny. Změna otevřené pórovitosti o 3% přibližně odpovídá změně rychlosti P-vln v nasycených vzorcích o 1,00 km.s⁻¹ (zelené čtverce).

Obr. 129: Vztah mezi rychlostmi P-vln a S-vln a otevřenou pórovitostí z vrtu PTP-4a



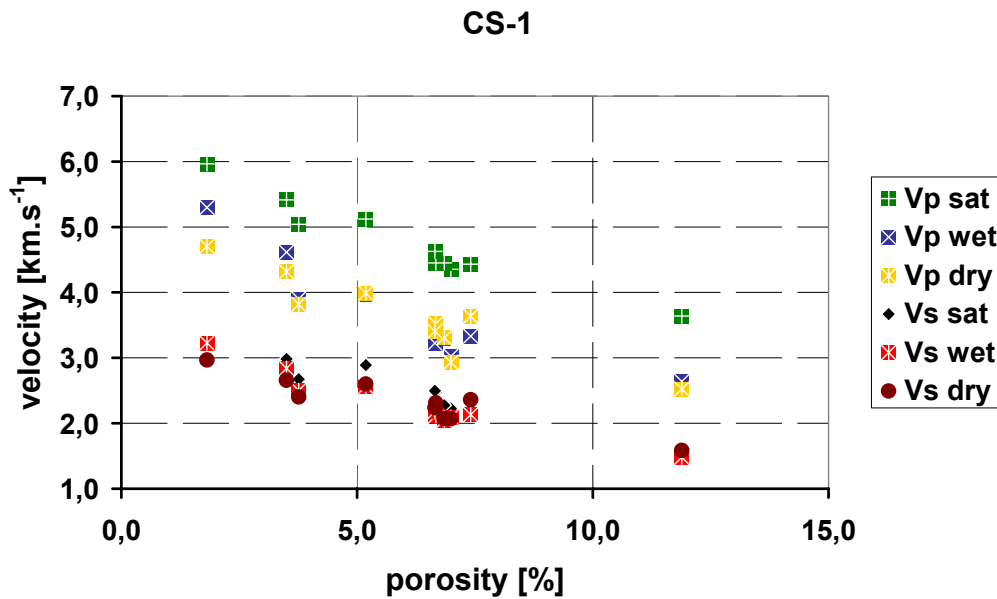
V grafu (Obr. 130) je zachycen vztah mezi rychlostmi P-vln a S-vln a otevřenou pórovitostí z vrtu Kž-25. V grafu je patrný trend snižující se rychlosti P-vln a S-vln se zvyšující se otevřenou pórovitostí horniny. Změna otevřené pórovitosti o 1,5% přibližně odpovídá změně rychlosti P-vln ve vysušených vzorcích o $1,37 \text{ km.s}^{-1}$ (žluté čtverce).

Obr. 130: Vztah mezi rychlostmi P-vln a S-vln a otevřenou pórovitostí z vrtu Kž-25



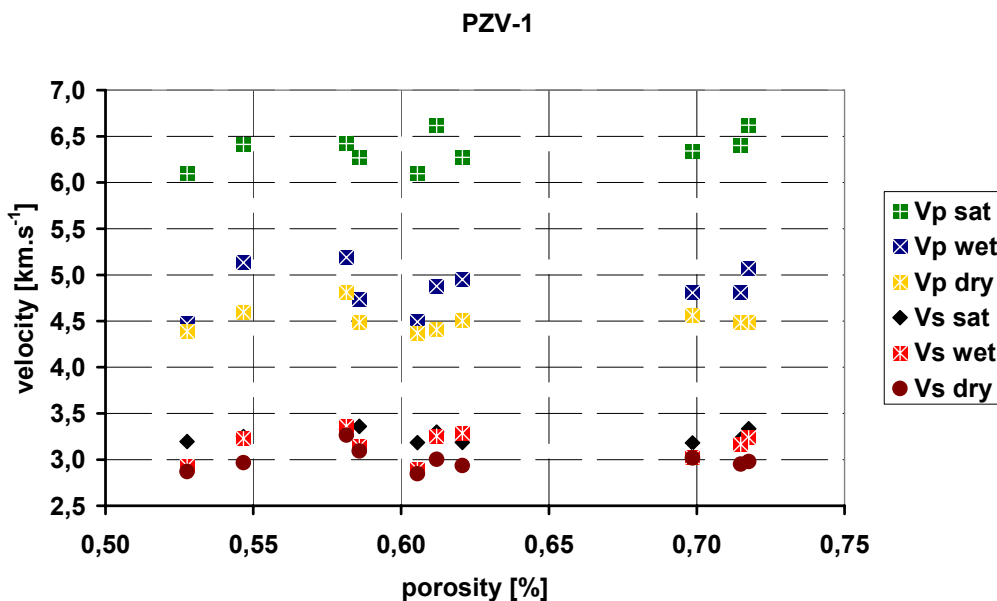
V grafu (Obr. 131) je zachycen vztah mezi rychlostmi P-vln a S-vln a otevřenou pórovitostí z vrtu CS-1. V grafu je patrný trend snižující se rychlosti P-vln a S-vln se zvyšující se otevřenou pórovitostí horniny. Změna otevřené pórovitosti o 10% přibližně odpovídá změně rychlosti P-vln v nasycených vzorcích o $2,33 \text{ km.s}^{-1}$ (zelené čtverce).

Obr. 131: Vztah mezi rychlostmi P-vln a S-vln a otevřenou pórovitostí z vrtu CS-1



V grafu (Obr. 132) je zachycen vztah mezi rychlostmi P-vln a S-vln a otevřenou pórovitostí z vrtu PZV-1. Z grafu je patrné, že se hodnoty rychlostí P-vln a S-vln v závislosti na otevřené pórovitosti příliš neliší. Hodnoty otevřené pórovitosti se téměř nemění v celé délce vrtu.

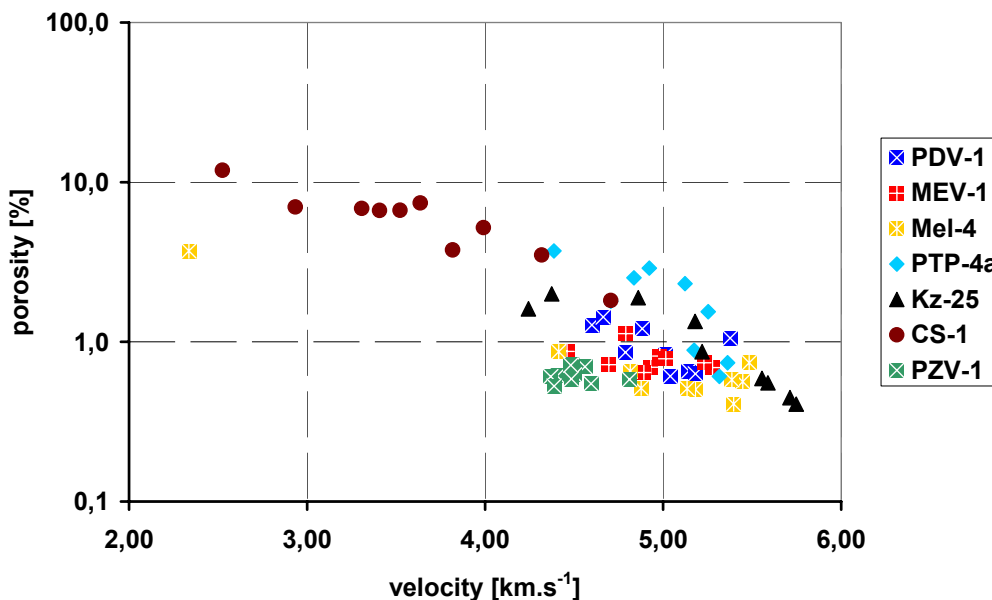
Obr. 132: Vztah mezi rychlostmi P-vln a S-vln a otevřenou pórovitostí z vrtu PZV-1



Z grafů uvedených v této kapitole vyplývá, že trendy změn rychlostí se změnami otevřené pórovitosti jsou nejvíce zřetelné v případě rychlostí P-vln ve vysušených vzorcích. V následujícím grafu (Obr. 133) je zobrazena závislost otevřené pórovitosti na rychlosti P-vln vysušenými vzorky (měřeno mezi podstavami vzorků ve vertikále vrtu). Z grafu je zřejmé, že mezi studovanými lokalitami neexistuje jednoznačná obecná závislost mezi rychlostí

seismických vln a otevřenou pórovitostí. V případě vzorků z lokalit Cínovec (CS-1), Krásno (Kž-25), Potůčky-Podlesí (PTP-4a) si lze povšimnout poklesu rychlosti P-vln společně z růstem otevřené pórovitosti. Vzorky z lokalit Panské Dubenky (PDV-1), Melechov-Kostelní les (MEV-1), Melechov-Zadní les (Mel-4) a Pozdátky (PZV-1) mají takřka v celém profilu stejnou otevřenou pórovitost, rychlosti P-vln se ale výrazně mění.

Obr. 133: Vztah mezi rychlostmi P-vln a otevřenou pórovitostí ve vysušených vzorcích

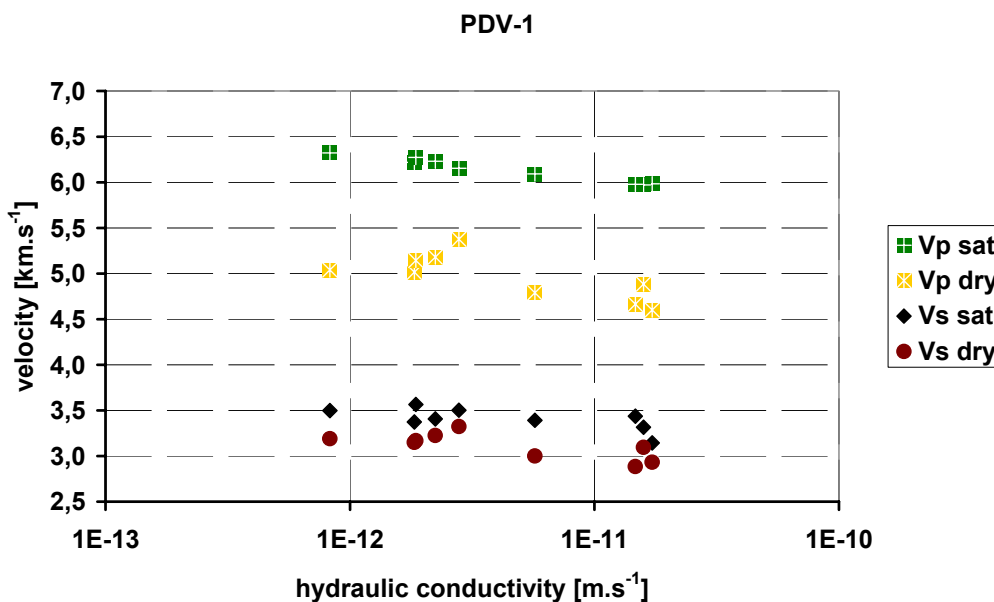


7.3.4 Porovnání rychlosti seismických vln a koeficientu hydraulické vodivosti

V grafech uvedených v této kapitole jsou porovnány výsledky měření rychlosti P-vln a S-vln nasycenými, nenasycenými a vysušenými vzorky s hodnotami koeficientu hydraulické vodivosti horniny, které byly stanoveny na identických vzorcích. Z důvodu větší přehlednosti byly v grafech použity pouze hodnoty rychlostí P-vln a S-vln měřených mezi podstavami v ose vzorků, která odpovídá vertikále ve vrtu. Výsledky koeficientu hydraulické vodivosti jsou zpracovány ve zprávě (Najser et al., 2010).

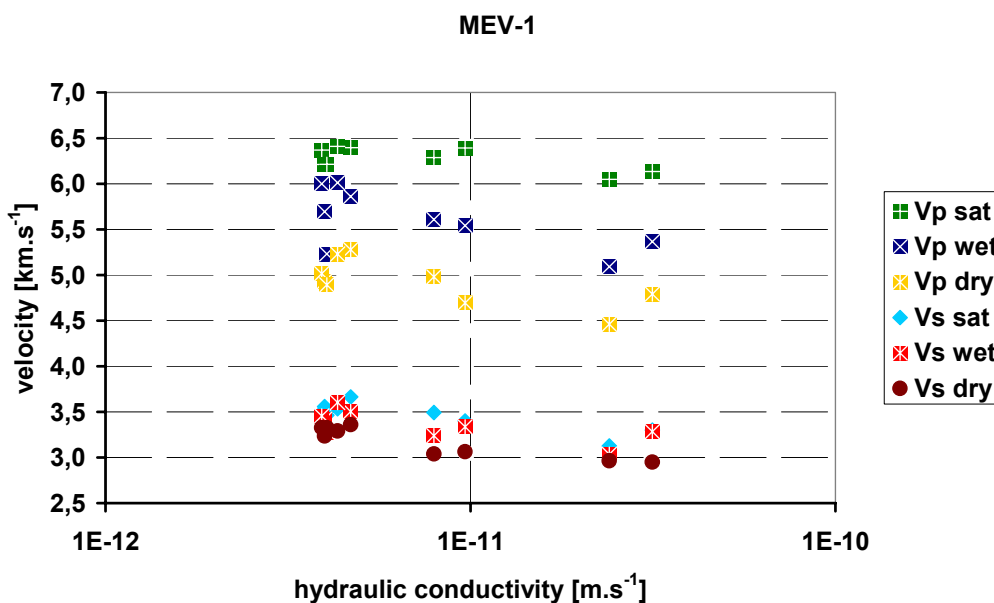
V grafu (Obr. 134) je zachycen vztah mezi rychlostmi P-vln a S-vln a koeficientem hydraulické vodivosti z vrtu PDV-1. V grafu je patrný trend snižujících se seismických rychlostí se zvyšujícím se koeficientem hydraulické vodivosti. Růst hydraulické vodivosti o řád přibližně odpovídá snížení seismických rychlostí o 0,44 km.s⁻¹.

Obr. 134: Vztah mezi rychlostmi P-vln a S-vln a koeficientem hydraulické vodivosti z vrtu PDV-1



V grafu (Obr. 135) je zachycen vztah mezi rychlostmi P-vln a S-vln a koeficientem hydraulické vodivosti z vrtu MEV-1. V grafu je patrný trend snižujících se seismických rychlostí se zvyšujícím se koeficientem hydraulické vodivosti. Růst hydraulické vodivosti o řád přibližně odpovídá snížení seismických rychlostí o $0,50 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$.

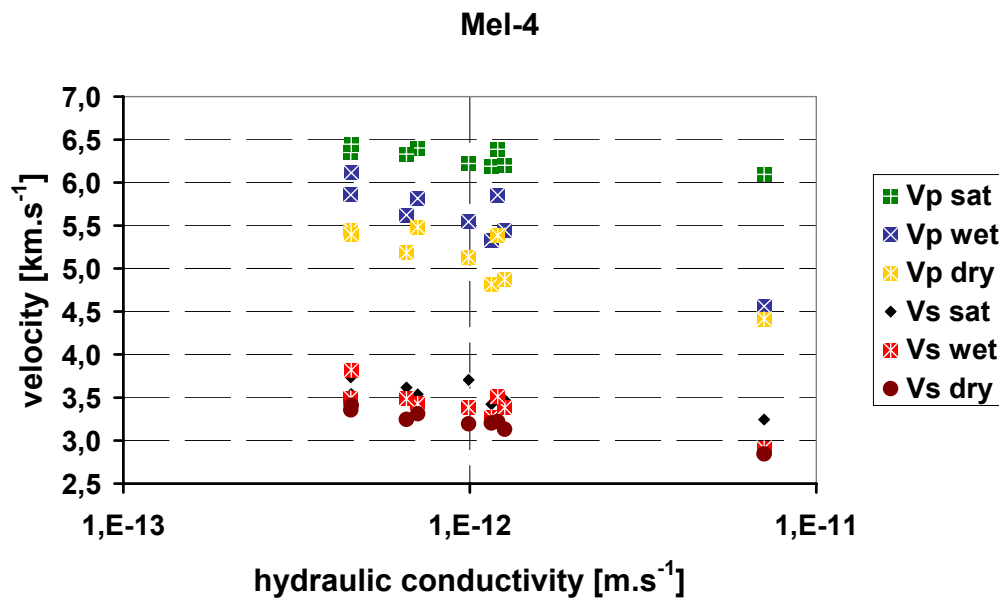
Obr. 135: Vztah mezi rychlostmi P-vln a S-vln a koeficientem hydraulické vodivosti z vrtu MEV-1



V grafu (Obr. 136) je zachycen vztah mezi rychlostmi P-vln a S-vln a koeficientem hydraulické vodivosti z vrtu Mel-4. V grafu je patrný trend snižujících se seismických rychlostí

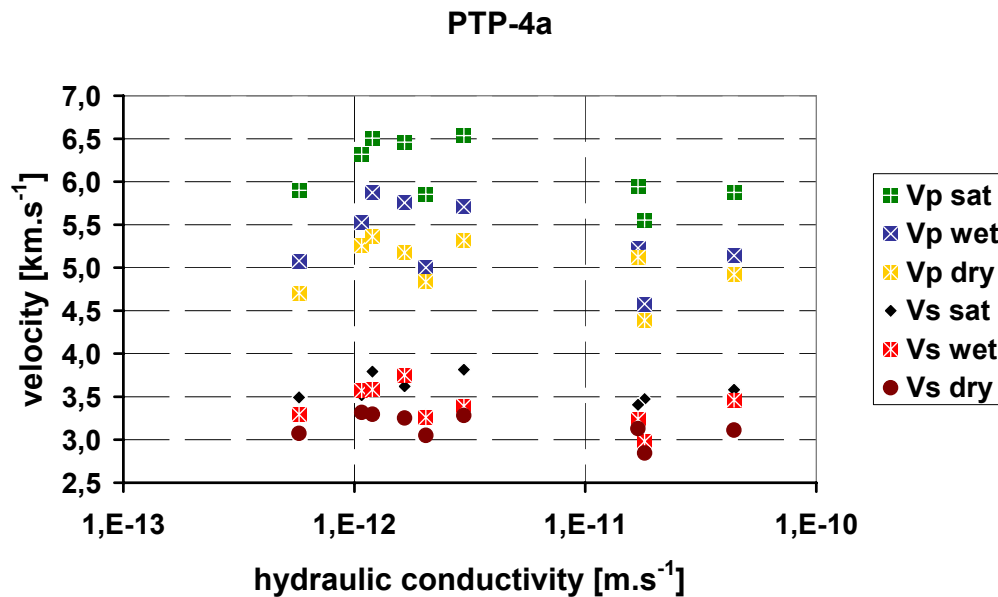
se zvyšujícím se koeficientem hydraulické vodivosti. Růst hydraulické vodivosti o řád přibližně odpovídá snížení seismických rychlostí o $0,50 \text{ km.s}^{-1}$. Rychlost P-vln vysušenými vzorky se dokonce snižuje o $1,00 \text{ km.s}^{-1}$ (žluté čtverce). Z vyhodnocení byl vyřazen vzorek z hloubky 10 m, jehož koeficient hydraulické vodivosti je $1,12 \times 10^{-9} \text{ m.s}^{-1}$.

Obr. 136: Vztah mezi rychlostmi P-vln a S-vln a koeficientem hydraulické vodivosti z vrtu Mel-4



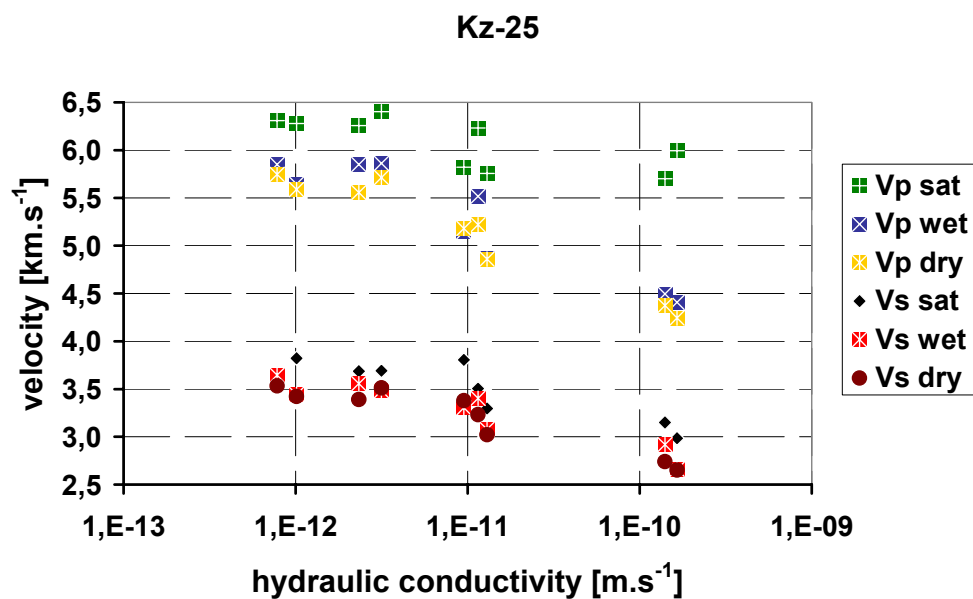
V grafu (Obr. 137) je zachycen vztah mezi rychlostmi P-vln a S-vln a koeficientem hydraulické vodivosti z vrtu PTP-4a. V grafu je patrný trend snižujících se seismických rychlostí se zvyšujícím se koeficientem hydraulické vodivosti. Trend není výrazný, data mají větší rozptyl.

Obr. 137: Vztah mezi rychlostmi P-vln a S-vln a koeficientem hydraulické vodivosti z vrtu PTP-4a



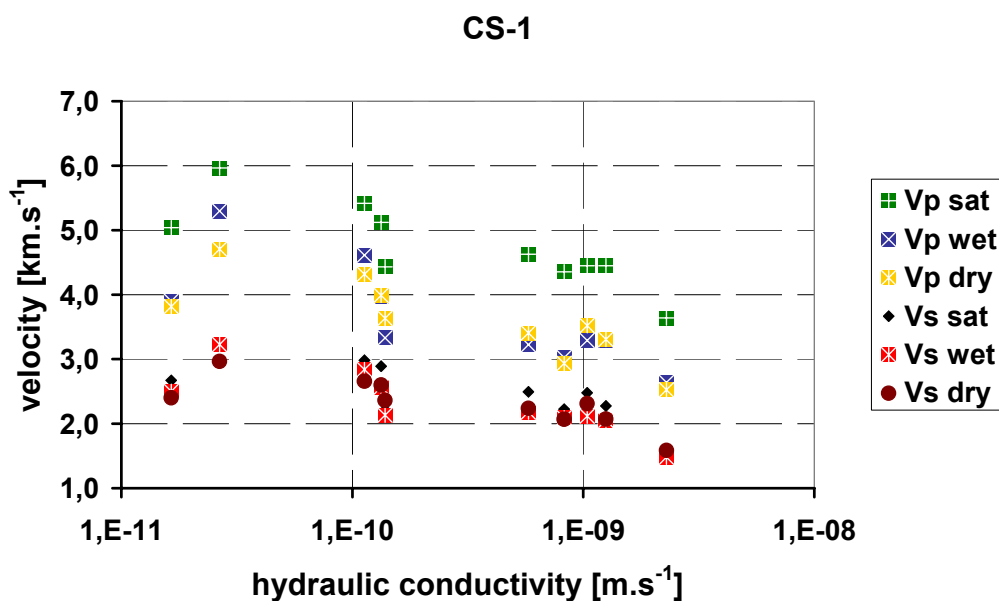
V grafu (Obr. 138) je zachycen vztah mezi rychlostmi P-vln a S-vln a koeficientem hydraulické vodivosti z vrtu Kž-25. V grafu je patrný trend snižujících se seismických rychlostí se zvyšujícím se koeficientem hydraulické vodivosti. V případě vysušených vzorků (žluté čtverce) odpovídá růst hydraulické vodivosti o 2 řády snížení seismických rychlostí o 1,50 km.s⁻¹.

Obr. 138: Vztah mezi rychlostmi P-vln a S-vln a koeficientem hydraulické vodivosti z vrtu Kž-25



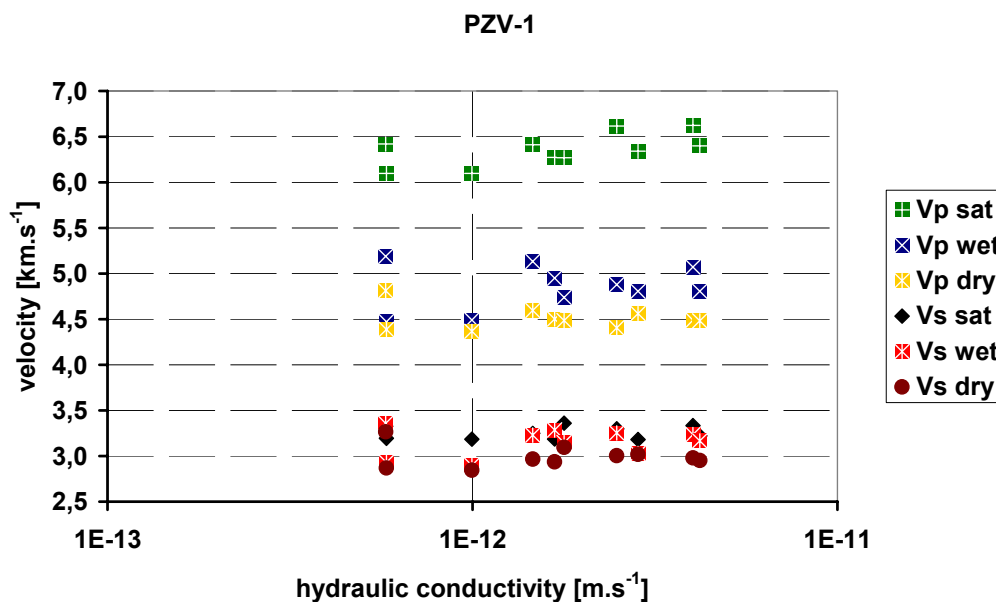
V grafu (Obr. 139) je zachycen vztah mezi rychlostmi P-vln a S-vln a koeficientem hydraulické vodivosti z vrtu CS-1. V grafu je patrný trend snižujících se seismických rychlostí se zvyšujícím se koeficientem hydraulické vodivosti. V případě vysušených vzorků (žluté čtverce) odpovídá růst hydraulické vodivosti o 2 řády snížení seismických rychlostí o $2,18 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$.

Obr. 139: Vztah mezi rychlostmi P-vln a S-vln a koeficientem hydraulické vodivosti z vrtu CS-1



V grafu (Obr. 140) je zachycen vztah mezi rychlostmi P-vln a S-vln a koeficientem hydraulické vodivosti z vrtu PZV-1. Z grafu je patrné, že se hodnoty seismických rychlostí příliš nemění a změna koeficientu hydraulické vodivosti o řád na ně nemá vliv.

Obr. 140: Vztah mezi rychlostmi P-vln a S-vln a koeficientem hydraulické vodivosti z vrtu PZV-1



Z grafů uvedených v této kapitole vyplývá, že trendy změn rychlostí se změnami koeficientu hydraulické vodivosti jsou nejvíce zřetelné v případě rychlostí P-vln ve vysušených vzorcích. V následujícím grafu (Obr. 141) je zobrazena závislost koeficientu hydraulické vodivosti na rychlosti P-vln vysušenými vzorky (měřeno mezi podstavami vzorků ve vertikále vrtu). V grafu je patrný trend snižujících se seismických rychlostí se zvyšujícím se koeficientem hydraulické vodivosti u lokalit Panské Dubenky (PDV-1), Melechov-Kostelní les (MEV-1), Melechov-Zadní les (Mel-4), Potůčky-Podlesí (PTP-4a), Krásno (Kž-25) a Cínovec (CS-1). Výjimku tvoří lokalita Pozdřátky (PZV-1), kde se rychlosti P-vln s klesající hydraulickou vodivostí výrazně nemění. Po vyřazení lokality Pozdřátky z celkového vyhodnocení lze data rychlostí P-vln vysušenými vzorky a koeficientu hydraulické vodivosti vzájemně úspěšně korelovat (Obr. 142). Výsledný vztah má tvar (39):

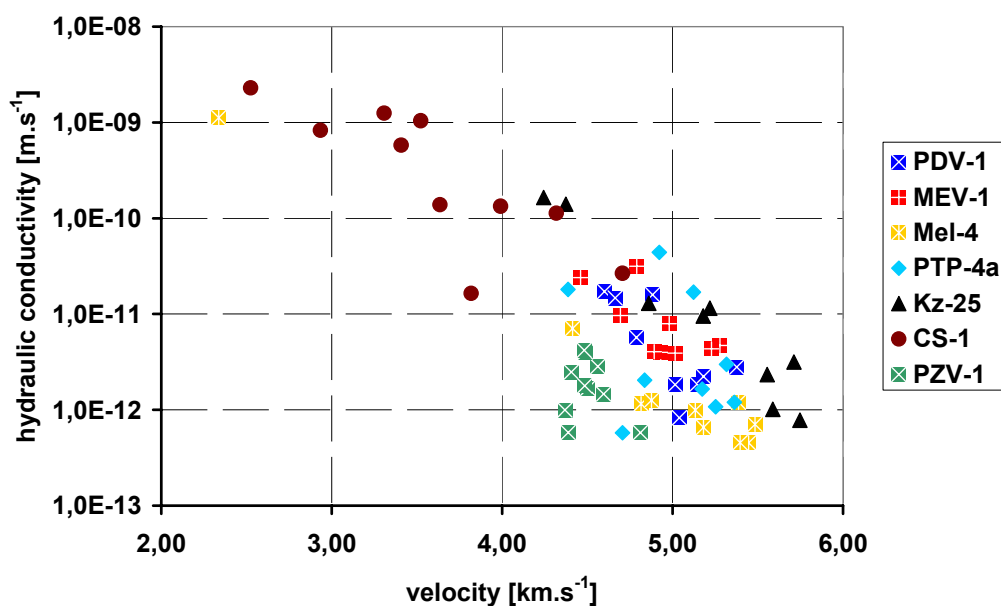
$$k = 2 \times 10^{-6} \cdot e^{-2,6232 \cdot v_p} \quad (40)$$

kde k je koeficient hydraulické vodivosti.

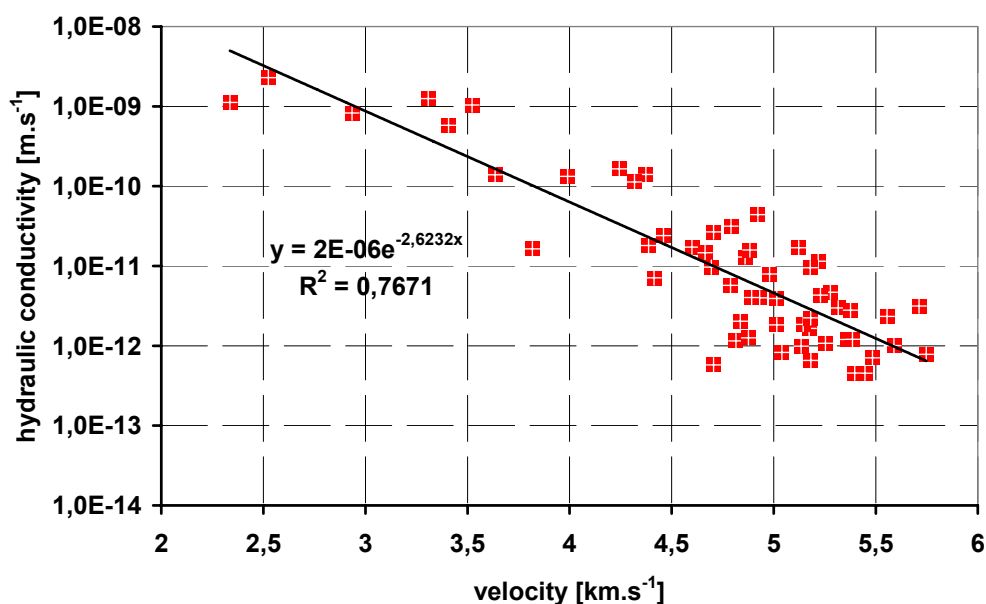
v_p je rychlost P-vln vysušenými vzorky.

Koeficient spolehlivosti $R^2=0,7671$.

Obr. 141: Vztah mezi rychlostmi P-vln a koeficientem hydraulické vodivosti ve vysušených vzorcích



Obr. 142: Korelace rychlostí P-vln a koeficientu hydraulické vodivosti ve vysušených vzorcích z vrtů PDV-1, MEV-1, Mel-4, PTP-4a, Kž-25, CS-1



7.3.5 Porovnání statických a dynamických modulů pružnosti

Statické moduly pružnosti byly stanoveny z hysterezních smyček při cyklickém jednoosém stlačování vzorků výšky 100 mm a průměru 45-50 mm. Všechny vzorky byly testovány v jejich přirozeném stavu, který odpovídal různému stupni nasycení pórů vodou. Výsledky pevnostních a pružnostních charakteristik vzorků z vrtů PDV-1, MEV-1, PTP-4a, Kž-25 a PZV-1 jsou shrnuty v následující tabulce (Tab. 24). V tabulce jsou uvedeny hodnoty modulů

pružnosti v tlaku a Poissonova čísla, které tvoří aritmetický průměr hodnot z jednotlivých zatěžovacích cyklů. V průběhu rostoucího zatěžování se hodnoty modulu pružnosti i Poissonova čísla zvyšovaly. Poissonovo číslo horniny, které je konstantní během lineárně elastické deformace, se začne díky vzniku nových mikrotrhlin nebo rozšiřování existujících zvyšovat ((Bieniawski (1967) in Gercek (2007))).

Tab. 24: Pevnostní a pružnostní charakteristiky vzorků z vrtů PDV-1, MEV-1, PTP-4a, Kž-25 a PZV-

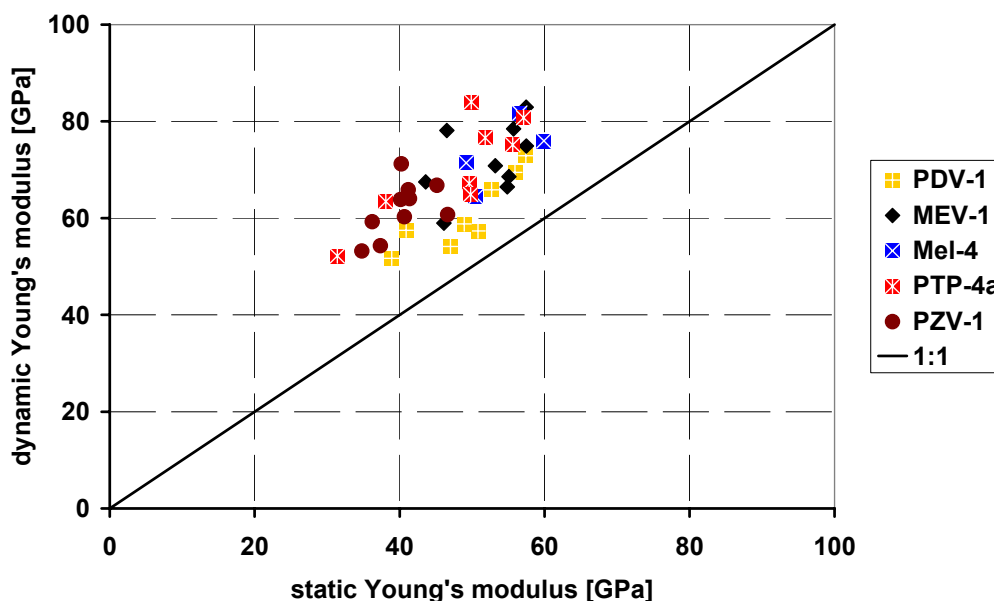
Vrt	Hloubka (m)	Modul pružnosti v tlaku (GPa)	Poissonovo číslo (-)	Pevnost v prostém tlaku (MPa)	Stupeň nasycení (%)
PDV-1	20	38,9	0,23	111,01	39,2
	30	40,9	0,21	145,00	24,8
	51	50,8	0,20	130,24	28,5
	58	47,0	0,20	183,23	35,0
	72	48,9	0,15	203,19	24,0
	79	52,7	0,21	188,18	76,1
	89	55,9	0,19	134,94	47,6
	97	57,4	0,18	199,99	49,3
MEV-1	21	46,1	0,13	128,70	22,9
	30	43,6	0,19	52,14	35,5
	40	53,2	0,18	123,71	27,8
	49	55,7	0,19	57,26	43,4
	59	57,5	0,18	73,17	27,1
	69	55,1	0,19	99,40	24,5
	79	57,5	0,20	139,09	12,5
	96	46,5	0,16	85,66	38,2
	99	54,9	0,19	150,03	46,7
Kž-25	48	49,2	0,24	118,71	34,6
	58	50,5	0,24	142,02	37,2
	98	59,9	0,23	161,24	67,1
	108	56,6	0,19	105,70	73,7
PTP-4a	35	31,4	0,20	90,12	32,4
	45	38,1	0,20	88,42	78,0
	55	51,8	0,20	129,24	58,3
	65	49,9	0,17	84,66	45,1
	75	57,1	0,22	143,07	54,1
	85	55,6	0,20	120,88	32,9

Vrt	Hloubka (m)	Modul pružnosti v tlaku (GPa)	Poissonovo číslo (-)	Pevnost v prostém tlaku (MPa)	Stupeň nasycení (%)
PTP-4a	95	49,6	0,21	154,50	17,3
	105	49,8	0,24	146,23	21,6
PZV-1	17	36,2	0,17	85,52	28,6
	21	40,1	0,16	143,52	27,9
	29	41,2	0,20	61,76	32,2
	40	41,4	0,16	108,65	16,3
	51	40,3	0,17	86,61	34,4
	61	45,2	0,17	98,17	54,9
	70	46,6	0,19	72,01	14,0
	79	34,8	0,17	69,90	16,5
	90	37,4	0,19	85,84	19,0
	97	40,7	0,21	98,98	17,1

V následujícím grafu (Obr. 143) jsou porovnány hodnoty statických a dynamických modulů pružnosti. Dynamické moduly pružnosti byly stanoveny ultrazvukovým prozařováním vzorků výšky 50 mm a průměru 45-50 mm, na kterých byly následně stanoveny koeficienty hydraulické vodivosti, otevřené pórovitosti a objemové hmotnosti. Tyto vzorky pochází ze stejné hloubky a v době prozařování měly stejný stupeň nasycení jako vzorky stlačované v lisu (v grafech v kapitole 7.3.1 jsou označeny jako *wet*). V grafu jsou použita měření ve směru mezi podstavami, která odpovídá vertikále vrtu a směru stlačování hornin v lisu. Hodnoty dynamických modulů pružnosti z vrtu PDV-1 byly stanoveny na vzorcích výšky 100 mm, které byly následně stlačovány v lisu.

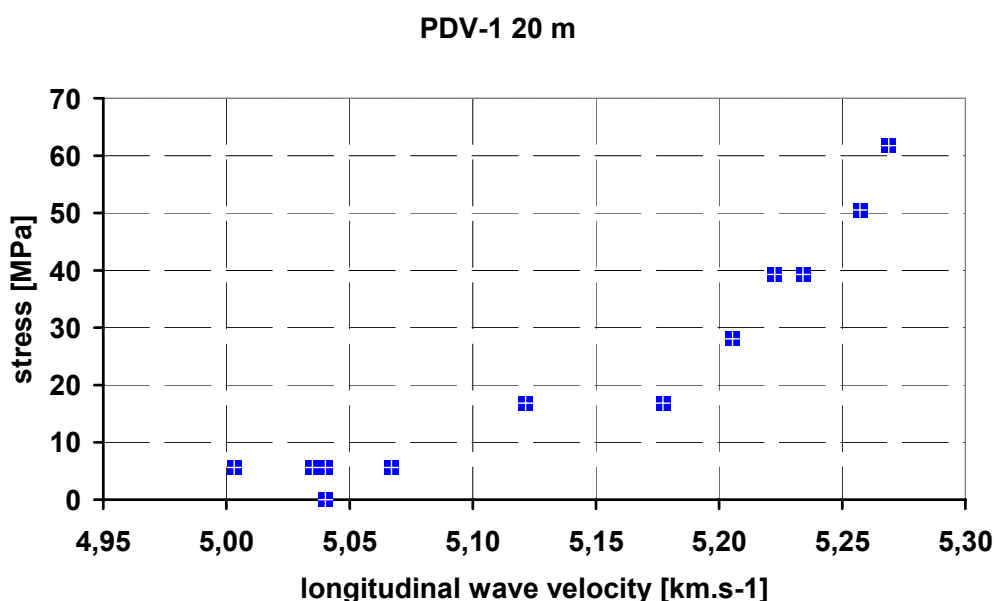
Z grafu (Obr. 143) je patrné, že jsou hodnoty dynamických modulů vyšší než hodnoty modulů statických. V případě vzorků z lokality Panské Dubenky (PDV-1) je průměrný rozdíl 25%, v případě vzorků z lokality Melechov-Kostelní les (MEV-1) 38%, v případě vzorků z lokality Potůčky-Podlesí (PTP-4a) 49%, v případě vzorků z lokality Krásno (KŽ-25) 36% a v případě vzorků z lokality Pozdřátky (PZV-1) dokonce 54%. Tento rozdíl je pravděpodobně způsoben rozdílnými hodnotami osového přetvoření během obou testů (Tatsuoka et al., 1997), (Ciccotti a Mulargia, 2004).

Obr. 143: Porovnání statických a dynamických modulů pružnosti vzorků z vrtů PDV-1, MEV-1, PTP-4a, Kž-25 a PZV-1

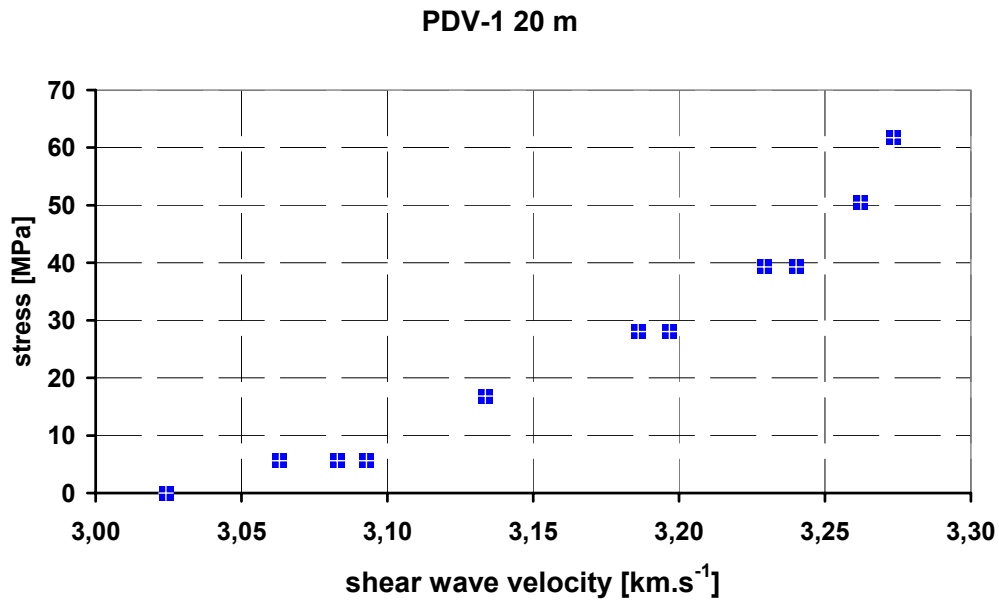


Vybrané vzorky z lokalit Panské Dubenky (PDV-1), Melechov-Kostelní les (MEV-1) a Pozdátky (PZV-1) byly během jednoosého stlačování napříč prozařovány ultrazvukem. Typický průběh rychlostí P-vln a S-vln je zachycen v následujících grafech (Obr. 144, Obr. 145). Z grafů je patrné, že se rychlosti P-vln a S-vln v průběhu stlačování zvyšují. Zatížením na 55,5% pevnosti v prostém tlaku došlo ke zvýšení rychlosti P-vln o 4,5% a rychlosti S-vln o 8,3%. Nárůst rychlostí seismických vln indikuje uzavírání pórového prostoru během zatěžování.

Obr. 144: Průběh rychlostí P-vln během zatěžování vzorku PDV-1 z hloubky 20 m

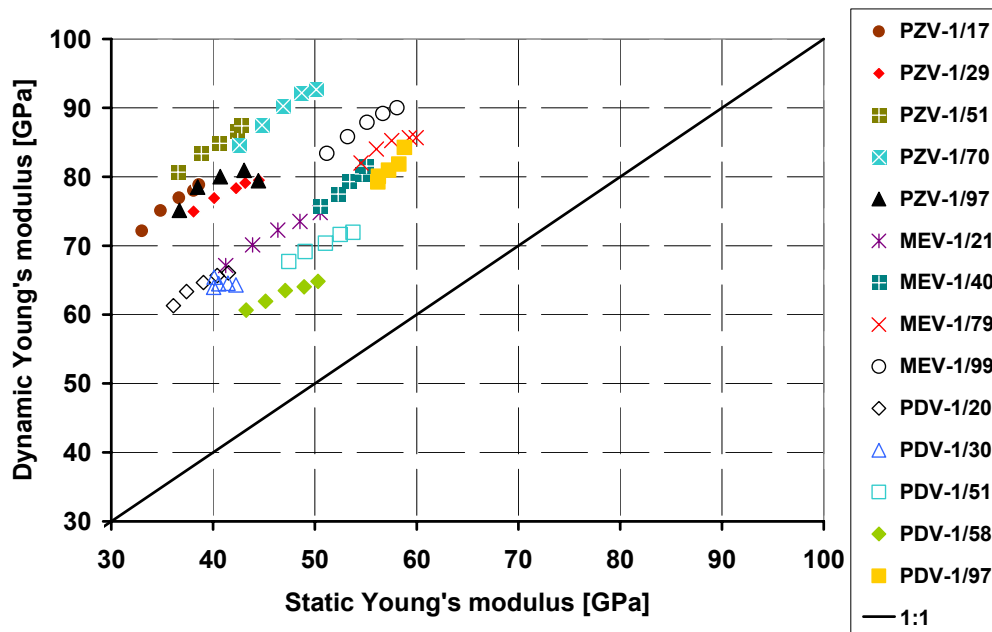


Obr. 145: Průběh rychlostí S-vln během zatěžování vzorku PDV-1 z hloubky 20 m



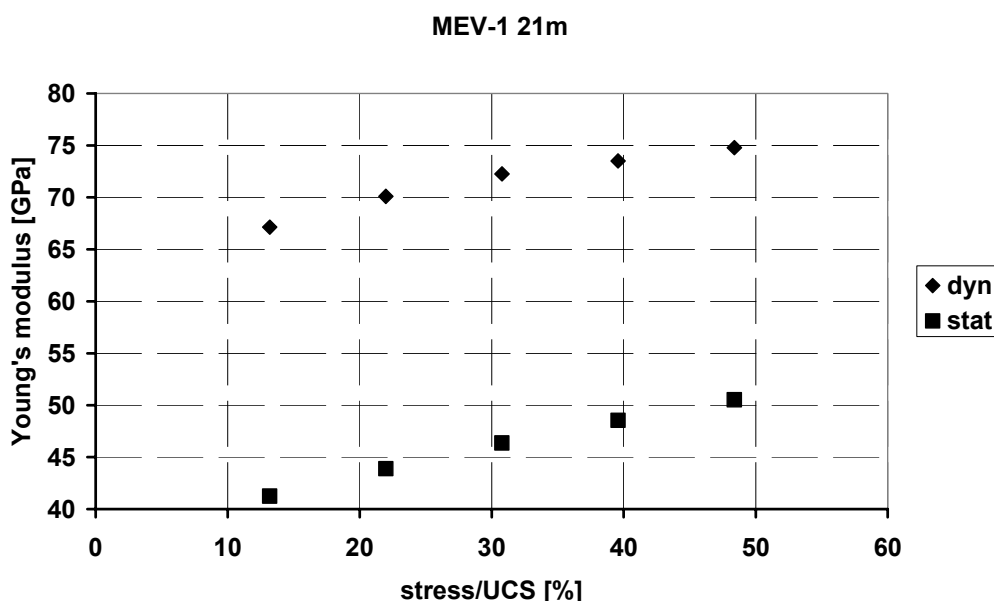
V následujícím grafu (Obr. 146) je zachyceno porovnání statických a dynamických modulů pružnosti měřených v průběhu zatěžování. Body v grafu odpovídají hodnotám z jednotlivých zatěžovacích stupňů. Moduly pružnosti rostou se zvyšujícím se napětím na vzorky. Z grafu je patrné, že jsou hodnoty dynamických modulů vyšší než hodnoty modulů statických. V případě vzorků z lokality Panské Dubenky (PDV-1) je průměrný rozdíl 47,5%, v případě vzorků z lokality Melechov-Kostelní les (MEV-1) 52,6% a v případě vzorků z lokality Pozdátky (PZV-1) dokonce 99,8%.

Obr. 146: Porovnání statických a dynamických modulů pružnosti vzorků z vrtů PDV-1, MEV-1 a PZV-1 v průběhu zatěžování



Rozdíl hodnot dynamického a statického modulu pružnosti se v průběhu zatěžování snižoval. Tento jev je dokumentován na příkladu vzorku z vrtu MEV-1 z hloubky 21 m (Obr. 147). Při prvním zatěžovacím stupni (13,2% pevnosti v prostém tlaku) byl rozdíl naměřených modulů 62,8%. Při pátém zatěžovacím stupni (48,4% pevnosti v prostém tlaku) byl rozdíl naměřených modulů 48,1%.

Obr. 147: Vývoj dynamického a statického modulu pružnosti v průběhu zatěžování na vzorku z vrtu MEV-1 z hloubky 21 m



Vliv nasycení horniny byl studován na dvou dvojicích vzorků z vrtu PTP-4a z hloubek 85 m a 105 m. Jeden z dvojice vzorků byl zatěžován v nasyceném stavu, druhý byl zatěžován vysušený. Současně se zatěžováním byly vzorky napříč prozařovány ultrazvukovou aparaturou. Výsledky průměrného modulu pružnosti, Poissonova čísla a pevnosti v prostém tlaku jsou přehledně shrnuty v následující tabulce (Tab. 25). Z tabulky vyplývá, že voda snižuje pevnost horniny v prostém tlaku a statický modul pružnosti. Naopak modul pružnosti stanovený ultrazvukovým prozařováním je vyšší v nasycených vzorcích než ve vysušených vzorcích z téže hloubky. To je způsobeno tím, že se vlnění šíří rychleji pórovým prostorem, který je vyplněný vodou, než póry vyplněnými vzduchem.

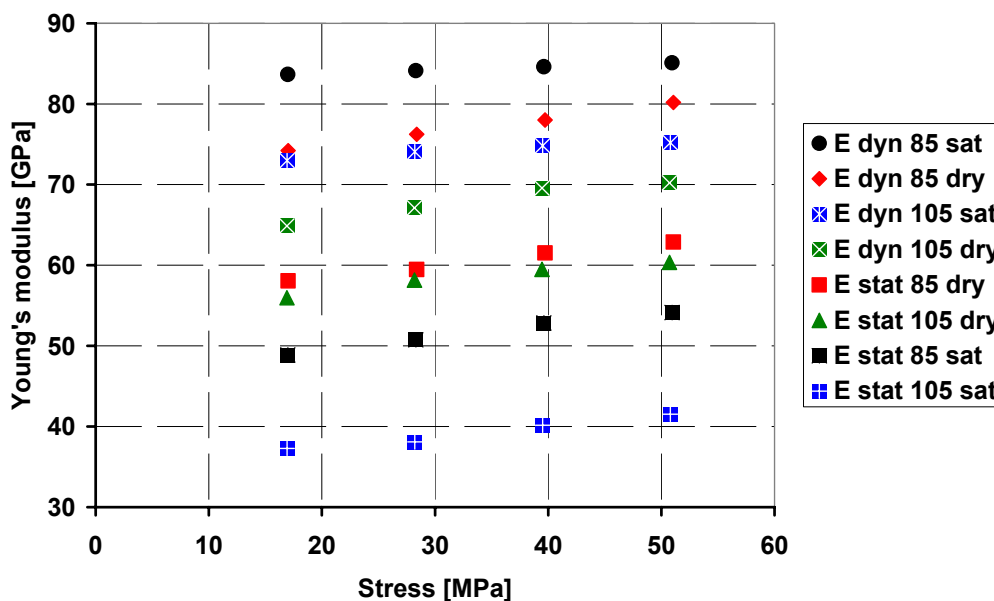
Tab. 25: Pevnostní a pružnostní charakteristika nasycených a vysušených vzorků z vrtu PTP-4a z hloubek 85 m a 105 m

Hloubka a stav vzorku z vrtu PTP-4a	staticky		dynamicky		Pevnost v prostém tlaku (MPa)
	Modul pružnosti (GPa)	Poissonova číslo (-)	Modul pružnosti (GPa)	Poissonova číslo (-)	
85 m, vysušený	60,5	0,20	77,2	0,21	173,74
85 m, nasycený	51,7	0,20	84,4	0,28	140,19

Hloubka a stav vzorku z vrtu PTP-4a	staticky		dynamicky		Pevnost v prostém tlaku (MPa)
	Modul pružnosti (GPa)	Poissonova číslo (-)	Modul pružnosti (GPa)	Poissonova číslo (-)	
105 m, vysušený	58,5	0,24	67,9	0,18	170,55
105 m, nasycený	39,3	0,16	74,3	0,25	82,71

V následujícím grafu (Obr. 148) je zachyceno porovnání statických a dynamických modulů pružnosti měřených v průběhu zatěžování. Body v grafu odpovídají hodnotám z jednotlivých zatěžovacích stupňů. Moduly pružnosti rostou se zvyšujícím se napětím na vzorky. Z grafu je patrné, že jsou hodnoty dynamických modulů vyšší než hodnoty modulů statických. Dynamické moduly nasycených vzorků vykazují pozvolnější nárůst s rostoucím napětím než moduly vysušených vzorků. To je způsobeno menším nárůstem rychlosti P-vln a S-vln nasycenými vzorky než vzorky vysušenými, v kterých se při stlačení pórového prostoru rychlosti šíření seismických vln mění výrazněji.

Obr. 148: Porovnání statických a dynamických modulů pružnosti nasycených a vysušených vzorků z vrtu PTP-4a v průběhu zatěžování



7.4 Shrnutí

Cílem této kapitoly bylo charakterizování granitového prostředí z hlediska výzkumu jeho parametrů pomocí geofyzikálních metod a stanovení vzájemných souvislostí mezi strukturou horniny a rychlostmi seismických vln. Pro studium bylo vybráno sedm lokalit granitoidních hornin v Českém masivu. Rychlosti seismických vln byly měřeny v laboratoři na vzorcích, které byly nenasycené, nasycené a vysušené. Rychlosti seismických vln byly porovnány s jejich objemovou hmotností, pórovitostí a koeficientem hydraulické vodivosti. Dále byly porovnány hodnoty Youngova modulu pružnosti vyhodnocené z rychlosti šíření seismických vln (dynamicky) a stanovené v průběhu jednoosého stlačování (staticky).

Rychlosti P-vln ve vysušených vzorcích se většinou pohybovaly v rozmezí od 4,4 km.s⁻¹ do 5,4 km.s⁻¹. Rychlosti P-vln v nasycených vzorcích se většinou pohybovaly v rozmezí od 5,9 km.s⁻¹ do 6,5 km.s⁻¹. Rychlosti S-vln ve vysušených vzorcích byly většinou v rozmezí od 2,8 km.s⁻¹ do 3,4 km.s⁻¹. Rychlosti S-vln v nasycených vzorcích byly většinou v rozmezí od 3,1 km.s⁻¹ do 3,7 km.s⁻¹. Hodnoty dynamického modulu pružnosti v tlaku ve vysušených vzorcích se většinou pohybovaly v rozmezí od 50 GPa do 70 GPa. Hodnoty modulu v nasycených vzorcích se většinou pohybovaly v rozmezí od 65 GPa do 90 GPa. Hodnoty dynamického modulu pružnosti ve stříhu ve vysušených vzorcích byly většinou mezi 20 GPa a 30 GPa. Hodnoty střížného modulu v nasycených vzorcích byly mezi 25 GPa do 35 GPa. Hodnoty dynamického Poissonova čísla ve vysušených vzorcích byly do 0,23. Hodnoty dynamického Poissonova čísla v nasycených vzorcích se pohybovaly okolo 0,33. Poissonovo číslo klesalo s hloubkou. Tento trend byl způsoben snižujícím se poměrem rychlosti podélné a příčné vlny směrem do hloubky. Rychlosti P-vln a S-vln v nenasycených vzorcích byly v intervalu mezi rychlostmi nižšími vysušenými a vyššími nasycenými vzorky.

Většina vzorků vykazovala mírnou anizotropii rychlostí. Nejvyšší byla naměřena ve vzorcích z vrtu PZV-1. Rychlost P-vln v ose tohoto vrtu ve vysušených vzorcích byla až o 25% nižší než ve směru protažení zrn a o 15% nižší než ve směru kolmém na protažení zrn.

Seismická měření na vzorcích postihla i relativně malé nehomogenity fyzikálních parametrů v rámci monotónního profilu vrtu a indikovala pozvolné litologické přechody. Velmi dobře indikovala navětrání hornin.

Vzorky z lokalit Cínovec (CS-1), Krásno (Kž-25), Potůčky-Podlesí (PTP-4a) a částečně Panské Dubenky (PDV-1) vykazovaly nárůst rychlosti P-vln a S-vln společně z růstem objemové hmotnosti. Rychlost P-vln závisí na poměru elastických modulů a objemové hmotnosti. Trend růstu rychlostí s rostoucí objemovou hmotností se přikládá vyššímu růstu elastických modulů.

Vzorky z lokalit Cínovec (CS-1), Krásno (Kž-25), Potůčky-Podlesí (PTP-4a) měly trend poklesu rychlosti P-vln a S-vln společně s růstem otevřené pórovitosti.

Na vysušených vzorcích z lokalit Panské Dubenky (PDV-1), Melechov-Kostelní les (MEV-1), Melechov-Zadní les (Mel-4), Potůčky-Podlesí (PTP-4a), Krásno (Kž-25) a Cínovec (CS-1) byl patrný trend snižujících se seismických rychlostí se zvyšujícím se koeficientem hydraulické vodivosti. Tento trend byl korelován.

Hodnoty dynamických modulů pružnosti stanovených na přirozeně vlhkých vzorcích byly vyšší než hodnoty modulů stanovených staticky. V případě vzorků z lokality Panské Dubenky (PDV-1) byl průměrný rozdíl 25%, v případě vzorků z lokality Melechov-Kostelní les (MEV-1) 38%, v případě vzorků z lokality Potůčky-Podlesí (PTP-4a) 49%, v případě vzorků z lokality Krásno (Kž-25) 36% a v případě vzorků z lokality Pozďátky (PZV-1) dokonce 54%. Tento rozdíl je pravděpodobně způsoben rozdílnými hodnotami osového přetvoření během obou testů (Tatsuoka et al., 1997).

Rychlosti P-vln a S-vln měřené napříč vzorky umístěnými v lisu se v průběhu stlačování zvyšovaly. Nárůst rychlostí seismických vln indikoval uzavírání pórového prostoru během

zatěžování. Moduly pružnosti rostly se zvyšujícím se zatěžováním vzorků. Rozdíl hodnot dynamického a statického modulu pružnosti se v průběhu zatěžování snižoval.

Nasyčené vzorky měly nižší pevnost v prostém tlaku a statický modul pružnosti než vzorky vysušené ze stejné hloubky. Naopak modul pružnosti stanovený ultrazvukovým prozařováním byl vyšší v nasycených vzorcích než ve vysušených vzorcích z téže hloubky. To bylo způsobeno tím, že se vlnění šířilo rychleji pórovým prostorem, který byl vyplněný vodou, než póry vyplněnými vzduchem. Dynamické moduly vysušených vzorků rostly s rostoucím napětím výrazněji než moduly nasycených vzorků. To bylo způsobeno menším nárůstem rychlosti P-vln a S-vln nasycenými vzorky než vzorky vysušenými, v kterých se při stlačení pórového prostoru měnila rychlost více.

8. Shrnutí výsledků a závěry

Základním cílem předkládané práce bylo charakterizování granitového prostředí z hlediska výzkumu jeho hydraulických a mechanicko-fyzikálních parametrů. Dílčími cíly bylo laboratorní ověření těsnící funkce injekční směsi v puklinovém prostředí granitových bloků, charakterizování pórovitosti a propustnosti granitové matrice v laboratorním měřítku, zjištění vzájemného propojení puklin mezi vrty na lokalitě *in situ* a stanovení souvislostí mezi strukturou horniny a rychlostmi seismických vln.

Jako vhodné injekční látky byly vybrány 4 směsi bentonitu a cementu v různých hmotnostních poměrech. Při přípravě směsí byly stanoveny jejich základní parametry, mezi něž patří viskozita, dekantace a objemová hmotnost. Zkušební laboratorní tělesa byla podrobena testům určujícím jejich pevnost v prostém tlaku a koeficient hydraulické vodivosti. Na základě výsledků stanovení koeficientu hydraulické vodivosti laboratorních vzorků a dalších aspektů jako např. objemová stálost byla vybrána vhodná injekční směs, kterou byly granitové bloky parciálně injektovány. Její koeficient hydraulické vodivosti byl $7,8 \cdot 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Propustnost a pórovitost horninové matrice granitu z lokality Panské Dubenky byla testována na třech laboratorních vzorcích. Hydraulická vodivost byla určena v průběhu 10 testů s rozdílnými konstantními hydraulickými gradienty v nasyceném prostředí. Z výsledků vyplývá, že má testovaný granit průměrnou objemovou hmotnost $2616 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, otevřenou pórovitost 1,05%, celkovou pórovitost 1,13% a koeficient hydraulické vodivosti $4,0 \cdot 10^{-12} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Růstu otevřené pórovitosti laboratorních vzorků odpovídá růst jejich koeficientu hydraulické vodivosti.

Ověření těsnící funkce injekční směsi bylo realizováno na laboratorním tělese s přirozenou puklinou a dvou tělesech s puklinami umělými z lokality Panské Dubenky. Na volných puklinách byly realizovány stopovací zkoušky s roztokem chloridu sodného a fluoresceinu současně s měřením objemových průtoků v závislosti na definovaném konstantním hydraulickém gradientu v nasyceném prostředí. Poté byly injekční vrty v laboratorních blocích zatěsněny pomocí jílocementové směsi. Následně byly stopovací zkoušky zopakovány. Porovnáním stopovacích zkoušek volné a injektované přirozené pukliny bylo zjištěno, že injekční směs snižuje při shodném hydraulickém gradientu průtok vody o pět řádů a že po její aplikaci se i při hydraulickém gradientu vyšším o tři řády snižuje časy prvního objevení stopovače z vteřin na desítky minut a časy maximální koncentrace z minut na hodiny. Porovnáním stopovacích zkoušek volných a injektovaných umělých puklin bylo zjištěno, že injekční směs snižuje průtok vody o pět řádů při shodném hydraulickém gradientu (objemový průtok se snižuje z hodnoty $1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ při hydraulickém gradientu v řádu desetin na $1 \cdot 10^{-9} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ při hydraulickém gradientu v řádu desítek) a že po aplikaci injekční směsi se i při hydraulickém gradientu vyšším o tři řády snižuje časy prvního objevení z vteřin na desítky minut a časy maximální koncentrace z minut na hodiny. Koeficient disperze se po aplikaci injekční směsi snižuje o dva řády z hodnot okolo $1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ na $1 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

Zjištění vzájemného propojení puklin mezi vrty na lokalitě Panské Dubenky bylo realizováno pomocí cross-hole testů se stopovačem fluoresceinem. Data z realizovaných C-H testů byla použita k tvorbě geometrického modelu puklinového systému zájmové lokality a sloužila rovněž ke kalibraci hydrogeologického modelu. Výsledků C-H testů ukazují, že jednotlivé vrty jsou nejčastěji propojeny subhorizontálními puklinami. Vertikální pukliny mají většinou funkci těsnící. Hlavní výhodou použití televizních kamer tkví v možnosti jejich přesného umístění na studovanou strukturu, okamžitého zjištění času příchodu stopovací látky a kontinuálního záznamu dat.

Vzájemné souvislosti mezi strukturou hornin a rychlostmi seismických vln bylo studováno na laboratorních vzorcích ze sedmi lokalit granitoidních hornin v Českém masivu. Rychlosti

seismických vln byly měřeny na laboratorních vzorcích, které byly nenasycené, nasycené a vysušené. Rychlosti seismických vln vzorky byly porovnány s jejich objemovou hmotností, pórovitostí a koeficientem hydraulické vodivosti. Dále byly porovnány hodnoty Youngova modulu pružnosti vyhodnocené z rychlosti šíření seismických vln (dynamicky) a stanovené v průběhu jednoosého stlačování (staticky). Rychlosti P-vln i S-vln ve vysušených vzorcích byly nižší než ve vzorcích nasycených. Hodnoty Poissonova čísla klesaly s hloubkou. Tento trend byl způsoben snižujícím se poměrem rychlosti podélné a příčné vlny směrem do hloubky. Většina vzorků vykazovala mírnou anizotropii rychlostí. Nejvyšší byla naměřena ve vzorcích z vrtu PZV-1. Rychlost P-vln v ose tohoto vrtu ve vysušených vzorcích byla až o 25% nižší než ve směru protažení zrn a o 15% nižší než ve směru kolmém na protažení zrn. Seismická měření na vzorcích postihla i relativně malé nehomogenity fyzikálních parametrů v rámci monotónního profilu vrtu a indikovala pozvolné litologické přechody. Velmi dobře indikovala navětrání hornin. Vzorky ze 4 lokalit vykazovaly nárůst rychlosti seismických vln společně z růstem objemové hmotnosti. Vzorky ze 3 lokalit měly trend poklesu rychlosti seismických vln společně z růstem otevřené pórovitosti. Na vysušených vzorcích z šesti lokalit byl trend snižujících se seismických rychlostí se zvyšujícím se koeficientem hydraulické vodivosti korelován. Hodnoty dynamických modulů pružnosti stanovených na přirozeně vlhkých vzorcích byly vyšší než hodnoty modulů statických. Rychlosti P-vln a S-vln měřené napříč vzorky umístěnými v lisu se v průběhu stlačování zvyšovaly. Nárůst rychlostí seismických vln indikoval uzavírání pórového prostoru během zatěžování. Moduly pružnosti rostly se zvyšujícím se napětím na vzorky. Rozdíl hodnot dynamického a statického modulu pružnosti se v průběhu zatěžování snižoval. Nasycené vzorky měly nižší pevnost v prostém tlaku a statický modul pružnosti než vzorky vysušené ze stejné hloubky. Naopak modul pružnosti stanovený ultrazvukovým prozařováním byl vyšší v nasycených vzorcích než ve vysušených vzorcích z téže hloubky. To bylo způsobeno tím, že se vlnění šířilo rychleji pórovým prostorem, který byl vyplněný vodou, než póry vyplněnými vzduchem. Dynamické moduly nasycených vzorků rostly s rostoucím napětím méně výrazně než moduly vysušených vzorků.

Přínosem této práce a současně uveřejněných publikací je komplexní zpracování vlastností granitoidních hornin všemi dostupnými metodami měření s výhledem na realizaci podzemního úložiště radioaktivních odpadů. Tato práce je zejména zaměřena na proudění podzemní vody a transport kontaminantů podzemní vodou v prostředí granitových hornin. V práci je převážně diskutován advekční a disperzní typ transportu kontaminantů. Transport kontaminantů difúzí je komentován pouze okrajově v souvislosti s pórovitostí horninové matrice. Pórovitost je hlavní parametr ovlivňující nejen hydraulické ale i mechanické a fyzikální parametry horniny. Studium vizualizace pórového prostoru pomocí rozdílných metod se v poslední době zabývá řada prací (např. Autio et al. (1998), Degeldre et al. (1996), Hellmuth et al. (1999), Menéndez et al. (1999)). K dalšímu studiu pórovitosti granitů lze tedy doporučit použití metody odlišné od široce rozšířené metody vodní gravimetrie. Jiným významným tématem vhodným k dalšímu studiu, kterého se dotkla tato práce, je vliv teploty na propustnost horniny. S rostoucí teplotou nejen klesá dynamická viskozita vody, ale dochází i k termální expanzi hornin, kterou doprovází uzavírání mikrotrhlin a pokles hydraulické vodivosti. Teplota má vliv i na strukturu a mechanické parametry hornin (např. Chaki et al. (2008), Reuschlé et al. (2006), Takarli et al. (2008)), které lze vyhodnotit mimojiné pomocí ultrazvukového prozařování. Laboratorní studium mechanických parametrů je vhodné doplnit o stanovení trojosé pevnosti a stanovení akustických emisí během stlačování (např. Heap et al. (2009)). Velmi důležité je přenesení poznatků zjištěných v laboratorních podmínkách do podmínek *in situ*. Např. výsledky Schilda et al. (2001) a Oty et al. (2003) uvádějí 2-3 násobně vyšší pórovitost stanovenou na vzorcích z vrtných jader ve srovnání s identickou horninou *in situ* způsobenou vlivem odlehčení.

9. Literatura

- Arnould, M., Clement, C., Gouvenot, D., Struillou, R., 1991. New sorbing grouts for radioactive and toxic heavy metals. *Engineering Geology*, 30, 127-139.
- Atkinson, T.C., Smith D.I., Lavis J.J., Whitaker R.J., 1973. Experiments in tracing underground waters in limestones, *J. Hydrol.*, 19, 323-49.
- Autio, J., Siitari-Kauppi, M., Timonen, J., Hartikainen, K., Hartikainen, J., 1998. Determination of the porosity, permeability and diffusivity of rock in the excavation-disturbed zone around full-scale deposition holes using the ^{14}C -PMMA and He-gas methods. *Journal of Contaminant Hydrology* 35, 19-29.
- Bareš, P., 1984. *Provádění kotev v horninách*, Vodní Stavby. Praha.
- Barton, N., de Quadros, E.F., 1997. Joint aperture and roughness in the prediction of flow and groutability of rock masses. *Int. J. Rock Mech. & Min. Sci.*, 34:3-4, Paper No. 252.
- Bieniawski, Z., T., 1967. Stability concept of brittle fracture propagation in rock. *Eng. Geol.*, 2, 149-62.
- Bongiolo, E.M., Bongiolo, D.E., Sardini, P., Mexias, A.S., Siitari-Kauppi, M., Gomes, M.E.B., Formoso, M.L.L., 2007. Quantification of porosity evolution from unaltered to propylitic-altered granites: the ^{14}C -PMMA method applied on the hydrothermal system of Lavras do Sul, Brazil. *Annals of the Brazilian Academy of Science*, 79, 503–517.
- Breiter, K., 2002. From explosive breccia to unidirectional solidification textures: magmatic evolution of a phosphorus- and fluorine-rich granite system (Podlesí, Krušné hory Mts., Czech Republic). *Bulletin of the Czech Geological Survey*, 77, 67-92.
- Brož, M., Nováková, L., Štrunc, J., 2009. Metodiky geofyzikálního hodnocení granitového prostředí geofyzikálními metodami. Etapová zpráva o řešení projektu v roce 2009. Výzkum vlivu mezizrné propustnosti granitů na bezpečnost hlubinného ukládání do geologických formací a vývoj metodiky a měřící aparatury, FR-TI1/367. Ústav struktury a mechaniky hornin AV ČR, Praha.
- Casper, O., Fabricius, I., L., Krogsboll, A., Prasad, M., 2004. Static and dynamic Young's Modulus for Lower Cretaceous chalk. A low frequency scenario. AAPG International Conference, October 24-27, Cancun, Mexico.
- Ciccotti, M., Mulargia, F., 2004. Differences between static and dynamic elastic moduli of a typical seismogenic rock. *Geophys. J. Int.*, 157, 474-477.
- Černý, W., Kouba, A., 1984. *Provádění podzemních stěn*, Vodní Stavby. Praha.
- ČSN CEN ISO/TS 17892-11 Geotechnický průzkum a zkoušení – Laboratorní zkoušky zemin – Část 11: Stanovení propustnosti zemin při konstantním a proměnném spádu.
- ČSN EN 1926 Zkušební metody přírodního kamene – Stanovení pevnosti v tlaku.
- ČSN EN 1936 Zkušební metody přírodního kamene – Stanovení měrné a objemové hmotnosti a celkové a otevřené pórovitosti.
- Davis, K.E., 1988. Laboratory evaluation of slurry wall materials of construction to prevent contamination of groundwater from organic constituents, *Waste Management and Research*, 6, 201-215.
- Degueldre, C., Pleinert, H., Maguire, P., Lehman, E., Missimer, J., Hammer, J., Leenders, K., Böck, H., Townsend, D., 1996. Porosity and pathway determination in crystalline rock by positron emission tomography and neutron radiography. *Earth and Planetary Science Letters*, 140, 213–225.

- Domečka, K., Sasínová, R., 2005. Panské Dubenky, Petrografický popis, č.z. 05 0958 – 011, Stavební Geologie-Geotechnika, Praha.
- Field, M., 2002. The QTRACER2 program for Tracer Breakthrough Curve Analysis for Tracer Tests in Karstic Aquifers and Other hydrologic Systems. – U.S. Environmental protection agency, hypertext multimedia publication in the Internet at <http://cfpub.epa.gov/ncea/cfm/recordisplay.cfm?deid=54930>
- Gallé, C., 1994. Neutron porosity logging and core porosity measurements in the Beauvoir granite, Massif Central Range, France. *Journal of Applied Geophysics* 32, 125–137.
- Gandais, M., Delmas, F., 1989. High penetration C3S bentonite-cement grouts for finely fissured and porous rock, Proc Int Conference on Foundations and Tunnels, London, 24–26 March 1987V2, 29–33. Publ Edinburgh: Engineering Technics Press,
- Garvin, S.L., Hayles, C.S., 1999. The chemical compatibility of cement–bentonite cut-off wall material, *Construction and Building Materials*, 13, 329-341.
- Gercek, H., 2007. Poisson's ratio values for rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 44, 1-13.
- Hakami, E., Larsson, E., 1996. Aperture measurements and flow experiments on a single natural fracture. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science and Geomechanics Abstracts*, 33, 395-404.
- Heap, M.,J., Vinciguerra, S., Meredith, P., G., 2009. The evolution of elastic moduli with increasing crack damage during cyclic stressing of a basalt from Mt. Etna volcano. *Tectonophysics*, 471, 153-160.
- Hellmuth, K.H., Siitari-Kauppi, M., Klobes, P., Meyer, K., Goebbels, J., 1999. Imaging and analyzing rock porosity by autoradiography and Hg-porosimetry/X-ray computertomography - applications. *Physical and Chemical Earth*, 24, 569–573.
- Cha, S.-S., Lee, J.-Y., Lee, D.-H., Amantini, E., Lee, K.-K., 2006. Engineering characterization of hydraulic properties in a pilot rock cavern for underground LNG storage. *Engineering Geology*, 84, 229-243.
- Cháb, J., Stráník, Z., Eliáš, M., Adamovič, J., Babůrek, J., Breiter, K., Cajz, V., Domečka, K., Fišera, M., Hanžl, P., Holub, V., Hradecký, P., Chlupáč, I., Klomínský, J., Mašek, J., Mlčoch, B., Opletal, M., Otava, J., Pálenský, P., Prouza, V., Růžička, M., Schovánek, P., Slabý, J., Valečka, J., Žáček, V., 2007. Geologická mapa České republiky 1:500 000 bez kvarterního pokryvu. Česká geologická služba. Praha.
- Chaki, S., Takarli, M., Agbodjan, W.P., 2008. Influence of thermal damage on physical properties of a granite rock: Porosity, permeability and ultrasonic wave evolutions. *Construction and Building Materials* 22, 1456–1461.
- Jarchovský, T., 1998. Sn-W mineralization in the Krásno district. In: Breiter K. (1998, ed): Genetic significance of phosphorus in fractionated granites – Genetic significance of phosphorus in fractionated granites - Excursion guide. s. 77-92. Česká geologická služba, Praha.
- Käss, W., Behrens, H., Himmelsbach, T., Hötzl, H., Hunkeler, D., Leibundgut, C. H., Moser, H., Rossi, P., Schultz, H. D., Stober, I., Werner, A., 1998. Tracer technique in geohydrology. Balkema, Rotterdam.
- Katsioti, M., Katsiotis, N., Rouni, G., Bakirtzis, D., Loizidou, M., 2008. The effect of bentonite/cement mortar for the stabilization/solidification of sewage sludge containing heavy metals. *Cement and Concrete Composites*, 30, 1013-1019.
- Kelokaski, M., Siitari-Kauppi, M., Sardini, P., Möri, A., Hellmuth, K.-H., 2006. Characterisation of pore space geometry by ¹⁴C-PMMA impregnation—development work for in situ studies. *Journal of Geochemical Exploration* 90, 45–52.

- Kern, H., Ivankina, T.I., Nikitin, A.N., Lokajíček, T., Pros, Z., 2008. The effect of oriented microcracks and crystallographic and shape preferred orientation on bulk elastic anisotropy of a foliated biotite gneiss from Outokumpu. *Tectonophysics*, 457, 143-149.
- Kopáč, J., 2007. Měření průtoku pomocí stopovačů: NaCl a měření konduktivity, diplomová práce, PŘF UK, Praha.
- Krásný, J., Kněžek, M., Šubová, A., Daňková, H., Matuška, M., Hanzel, V., 1982. Odtok podzemní vody na území Československa. Český hydrometeorologický ústav, Praha.
- Le Borgne, T., Bour, O., Paillet, F.L., Caudal J.-P., 2006. Assessment of preferential flow path connectivity and hydraulic properties at single-borehole and cross-borehole scales in a fractured aquifer. *Journal of Hydrology*, 328, 347-359.
- Martinez-Landa, L., Carrera, J., 2006. A methodology to interpret cross-hole tests in a granite block. *Journal of Hydrology*, 325, 222-240.
- Martínková, M., Pros, Z., Lokajíček, T., Klíma, K., Kotková, J., 2000. Experimentally determined P-wave velocity anisotropy for rocks related to the western Bohemia seismoactive region. *Studia geoph. at geod.*, 44, 581-589.
- Menéndez, B., David, C., Darot, M., 1999. A Study of the Crack Network in Thermally and Mechanically Cracked Granite Samples using Confocal Scanning Laser Microscopy. *Phys. Chem. Earth*, 24, 627-632.
- Moreno, L., Neretnieks, I., Eriksen, T., 1985. Analysis of Some Laboratory Tracer Runs in Natural Fissures. *Water Resources Research*, 21, 951-958.
- Najser, J., Sosna, K., Záruba, J., Bláhová, J., Fiala, Z., Chýle, A., Křížová, H., Petřina, V., Plšková, M., Rott, J., Růžička, J., Šebelová, J., 2010. Laboratorní výzkum archivních horninových vzorků, Etapová zpráva o řešení projektu v roce 2010. Výzkum vlivu mezizrné propustnosti granitů na bezpečnost hlubinného ukládání do geologických formací a vývoj metodiky a měřící aparatury, FR-TI1/367. ARCADIS Geotechnika, Praha.
- Najser, J., Sosna, K., Nováková, L., Brož, M., Kasíková, J., Michálková, J., Novák, P., Vaněček, M., Záruba, J., 2011. The relationship between matrix hydraulic conductivity and P-wave and S-wave ultrasound velocities in granites. *Proc. GeoProc2011*, Perth, Australia, submitted.
- Nakládal, P., Hanus, R., 2005. Metody a nástroje hodnocení vlivu inženýrských bariér na vzdálené interakce v prostředí hlubinného úložiště. Etapa 2. Karotážní kamera. Dílčí zpráva. ISATech, Praha.
- Nakládal, P., 2008. Panské Dubenky – Měření průběhu a hydrodynamických parametrů puklinového prostředí. Praha.
- Neretnieks, I., Eriksen, T., Tähtinen, P., 1982. Tracer Movement in a Single Fissure in Granitic Rock: Some Experimental Results and Their Interpretation. *Water Resources Research*, 18, 849-858.
- Norton, D., Knapp, R., 1977. Transport phenomena in hydrothermal systems; the nature of porosity. *Am. J. Sci.*, 277, 913-936.
- Nováková, L., Sosna, K., Brož, M., Najser, J., Novák, P., 2011. Geomechanical parameters of the Podlesí granites and its relationship to seismic velocities. *Acta Geodyn. Geomater.*, submitted.
- Oda, H., Nishizawa, O., Kusunose, K., Hirata, T., 1990. Frequency-Dependence of Velocity and Attenuation of Elastic Waves in Granite under Uniaxial Compression. *Pageoph*, 133.

- Ota, K., Möri, A., Alexander, W.R., Frieg, B., Schild, M., 2003. Influence of the mode of matrix porosity determination on matrix diffusion calculations. *Journal of Contaminant Hydrology* 61, 131–145.
- Paillet, F.L., 1993. Using borehole geophysics and cross-borehole flow testing to define hydraulic connections between fracture zones in bedrock aquifers. *Journal of Applied Geophysics*, 30, 261-279.
- Park, Ch.K., Vandergraaf, T.T., Drew, D.J., Hahn, P.S., 1996. Analysis of the migration of nonsorbing tracers in a natural fracture in granite using a variable aperture channel model. *Journal of Contaminant Hydrology*, 26, 97-108.
- Park, Ch.K., Ryu, B.H., Hahn, P.S., 2002. Migration characteristics of some chemical species in a granite fracture according to their chemical properties. *Korean J. Chem. Eng.*, 19, 765-772.
- Plee, D., Lebedenko F., Obrecht, F., Letellier, M., Damme, H.V., 1990. Microstructure, permeability and rheology of bentonite — cement slurries, *Cement and Concrete Research*, 20, 45-61.
- Plecas, I., Dimovic, S., Smiciklas I., 2006. Utilization of bentonite and zeolite in cementation of dry radioactive evaporator concentrate, *Progress in Nuclear Energy*, 48, 495-503.
- Polák, M., Milický, M., Hanus, R., Vaněček, M., Michálková, J., Navrátilová, V., Rousová, P., Sekulová, J., Vík, M., Sosna, K., Horáček, M., 2005. Metody a nástroje hodnocení vlivu inženýrských bariér na vzdálené interakce v prostředí hlubinného úložiště, XII. národní hydrogeologický kongres, České Budějovice.
- Polák, M., Sosna, K., 2007a. Praktické ověřování modelového řešení hydrodynamických a migračních parametrů granitových bloků, *Acta Montanistica Slovaca*, 12, 232-236.
- Polák, M., Milický, M., Uhlík, J., Zeman, O., Chaloupková, M., Hasl, P., Dragomir, F., 2007. Metody a nástroje hodnocení vlivu inženýrských bariér na vzdálené interakce v prostředí hlubinného úložiště. Etapa 4. Kalibrace analogického PC modelu testovací lokality. Dílčí zpráva. Progeo, Praha.
- Polák, M., Doležalová, L., Sosna, K., 2008. Interpretace puklinové sítě na základě terénních měření, *Zpracování a interpretace dat z průzkumných a sanačních prací V*, ISBN: 978-80-86832-40-1.
- Polák, M., Gvoždík, L., Sosna, K., Vaněček, M., 2009. Modelování hydrodynamických zkoušek v puklinovém prostředí, 10. Česko-Slovenský mezinárodní hydrogeologický kongres, Ostrava, 143-146. ISBN 978-80-248-2026-2
- Prakoso, W., A., Kulhawy, F., H., 2011. Effects of trstiny Conditions on Intact Rock Strength and Variability. *Geotech. Geol. Eng.*, 29, 101-111.
- Pros, Z., Lokajíček, T., Klíma, K., 1998. Laboratory approach to the study of elastic anisotropy on rock samples. *Pure and applied geophysics*, 151, 619-629.
- Pros, Z., Lokajíček, T., Přikryl, R., Klíma, K., 2003. Direct measurement of 3D elastic anisotropy on rocks from the Ivrea zone (Southern Alps, NW Italy). *Tectonophysics*, 370, 31-47.
- Reuschlé, T., Gbaguidi Haore, S., Darot, M., 2006. The effect of heating on the microstructural evolution of La Peyratte granite deduced from acoustic velocity measurements. *Earth and Planetary Science Letters* 243, 692–700.
- Rukavičková, L., Breiter, K., Holeček, J., Pačes, T., Procházka, J., Hanák, J., Dobeš, P., Havlová, V., Večerník, P., Hercík, M., 2009. Etapová zpráva o řešení projektu v roce 2009. Výzkum vlivu mezizrnné propustnosti granitů na bezpečnost hlubinného ukládání do geologických formací a vývoj metodiky a měřicí aparatury, FR-TI1/367. Česká geologická služba, Praha.

- Schild, M., Siegesmund, S., Vollbrecht, A., Mazurek, M., 2001. Characterization of granite matrix porosity and pore-space geometry by in situ and laboratory methods. *Geophys. J. Int.*, 146, 111-125.
- Schweitzer, F., 1988. Longterm permeability to water of bentonite-cement-diaphragm walls, *Geotechnik*, 11, 153-157.
- Siggins, A., F., 1993. Dynamic elastic tests for rock engineering. In: Hudson, J., A., et al., editors. *Comprehensive rock engineering*. Vol. 3, London: Pergamon; 601-18.
- Smart, C.C., 1988. Quantitative tracing of the Malign karst system, Alberta, Canada', *J. Hydrol.*, 98, 185–204.
- Sosna, K., Brož, M., Štrunc, J., 2007. Laboratorní stanovení hydrodynamických a migračních parametrů granitových bloků a jejich vztah k šíření seismických vln, *Transactions - Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava, řada stavební*, 2007, roč. 7, č. 2, s. 311-317. ISSN: 1213-1962.
- Sosna, K., Brož, M., 2009. Hydrodynamic and migration parameters of granite fractures and injection grout at laboratory scale. *European Congress on Regional Geoscientific Cartography and Information Systems*, Munich, 324-325.
- Sosna, K., Brož, M., Vaněček, M., Polák, M., 2009a. Exploration of a Granite Rock Using a TV Camera, *Acta Geodyn. Geomater.*, Vol. 6, No. 4 (156), 453-463, ISSN 1214-9705. AV ČR, Praha.
- Sosna, K., 2011. Laboratory determination of mechanical properties of a granite rocks. 21ste *European Young Geotechnical Engineers Conference*, Rotterdam, The Netherlands, submitted.
- Takarli, M., Prince, W., Siddique, R., 2008. Damage in granite under heating/cooling cycles and water freeze–thaw condition. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 45, 1164-1175.
- Tatsuoka, F., Jardine, R. J., Lo Presti, D., Di Benedetto, H., Kodaka, T., 1997. Characterising the pre-failure deformation properties of geomaterials. *Proc. 14th Int. Conf. on SMFE, Hamburg*, Rotterdam, Balkema.
- Thraillkill, L.J., Sullivan, S.B., Gruzic, D.R., 1991. Flow parameters in a shallow conduit-flow carbonate aquifer, Inner Bluegrass karst Region, Kentucky, USA. – *J. Hydrol.*, 129, 87-108.
- Trivedi, D. P., Holmes, R. G. G., Brown D., 1992. Monitoring the in-situ performance of a cement/bentonite cut-off wall at a low level waste disposal site. *Cement and Concrete Research*, 22, 339-349.
- Tullborg, E.L., Larson, S.Å., 2006. Porosity in crystalline rocks – A matter of scale. *Engineering Geology*, 84, 75–83.
- Vaněček, M., Vaněček, M. jun., Verner, K., Žák, J., 2005. Metody a nástroje hodnocení vlivu inženýrských bariér na vzdálené interakce v prostředí hlubinného úložiště. Etapa 2. Charakteristika geologických poměrů výzkumného pracoviště in-situ v žulovém lomu v Panských Dubenkách. Dílčí zpráva. *Geoterm*, Praha.
- Vaněček, M., Michálková, J., Hanus, R., Nakládal, P., Doležalová, L., Záruba, J., Sosna, K., Gvoždík, L., Polák, M., Milický, M., Navrátil, T., Rohovec, J., 2009. Detekce fluoresceinu pomocí TV kamery při stopovací zkoušce, 10. Česko-Slovenský mezinárodní hydrogeologický kongres, Ostrava, 143-146. ISBN 978-80-248-2026-2.
- Verfel, J., 1983: *Injektování hornin a výstavba podzemních stěn*, 147. SNTL. Praha.

- Vojtěchová, A., 2010. Charakterizace krasových kanálů a proudění v nich: využití stopovacích zkoušek, čar vyprazdňování a překročení a autokorelace. Doktorská disertační práce, PŘF UK, Praha.
- Zavoral, J., 1987. Metodiky laboratorních zkoušek v mechanice zemin a hornin III. Český geologický úřad. Praha.
- Zhang, J., Standifird, W.B., Roegiers, J.C., Zhang, Y., 2007. Stress-dependent fluid flow and permeability in fractured media: from lab experiments to engineering applications. *Rock Mech. Rock Engng.*, 40, 3-21.
- Zhao, J., 1998. Rock mass hydraulic conductivity of the Bukit Timah granite, Singapore. *Engineering Geology*, 50, 211–216.
- Zisman, W., A., 1933. Comparison of the statically and seismologically determined elastic constants of rocks. *Geology*, 19, 680–686.