

## **Geofyzikální měření v předvrtech a seismické prosvěcování z podzemních staveb**

### **Geophysical measurements in pre-drilled boreholes and seismic screening from underground structures**

**Radek Zelený<sup>1</sup>, Michal Grinč<sup>2</sup>, David Filipický<sup>3</sup>**

#### **Abstrakt**

Ražba průzkumné štoly Radlické radiály v Praze probíhala ve složitém geologickém prostředí s možností výskytu krasových jevů. Pro omezení rizik spojených s průchodem ražby touto oblastí bylo využito geofyzikálních průzkumných metod, zejména seismického prosvěcování v předvrtech a z ražené štoly. Uvedený text se věnuje průzkumu z podzemí. V článku je popsána metodika geofyzikálního měření a jednotlivá geometrická uspořádání použitá v rámci průzkumu. Pro všechny uvedené geometrie seismického prosvěcování jsou uvedeny příklady výstupů. Kromě seismických metod bylo při průzkumu využito i profilové mikrogravimetrie ze štoly a georadarových měření v profilové a vrtné variantě. Při provádění předvrtů byla realizována jejich kamerová prohlídka. U všech uvedených metodik a jejich modifikací je zhodnocen jejich přínos pro omezení rizik při ražbě průzkumné štoly a jsou naznačeny jejich další možnosti.

#### **Klíčová slova**

Podzemní stavby, geofyzikální průzkum, seismické prosvěcování, možnosti využití seismického prosvěcování

#### **Abstract**

Tunnelling of the Radlická radial road in Prague took place in a complex geological environment with the possibility of karst phenomena occurrence. In order to reduce the risks associated with tunnelling through this area, geophysical survey methods, especially seismic screening in pre-drilled boreholes and directly from gallery, were used. This text deals with the underground survey and describes the methodology of geophysical measurements and the geometrical arrangements used in the survey. Examples of outputs are given for all of seismic screening geometries mentioned in the paper. In addition to seismic methods, profiled microgravimetry and georadar measurements from the tunnel as well as its drilling variant were used in the survey. Pre-drilled boreholes were inspected by a boroscope. All of these methodologies and their modifications are evaluated for their contribution to reducing risks of tunnelling and their other options are outlined as well.

#### **Key words**

Underground construction, geophysical survey, seismic tomography, possibilities of using the seismic survey

---

<sup>1</sup> Radek Zelený, Mgr. INSET s.r.o., divize geologie a geofyziky, Lucemburská 1170/7, 130 00 Praha 3, [zeleny.radek@inset.com](mailto:zeleny.radek@inset.com).

<sup>2</sup> Michal Grinč, RNDr., INSET s.r.o., divízia Žilina, Byčická 72, 010 01 Žilina, [grinc.michal@inset.com](mailto:grinc.michal@inset.com).

<sup>3</sup> David Filipický, Mgr., INSET s.r.o., divize geologie a geofyziky, Lucemburská 1170/7, 130 00 Praha 3, [filipsky.david@inset.com](mailto:filipsky.david@inset.com).

## **1 Úvod**

Významnou částí páteřní silniční dopravní sítě Prahy bude Radlická radiála, která má propojit vnitřní a vnější městský okruh v oblasti Jihozápadního města. Specifické podmínky nedovolují čistě povrchové vedení komunikace a součástí projektu jsou i ražené Radlické tunely délky kolem 2 km. Vzhledem k relativní složitosti geologické stavby a ke zkušenostem z jiných ražených děl v Praze bylo rozhodnuto o realizaci průzkumné štoly. Podle stávajících poznatků nebylo možné vyloučit přítomnost nebezpečných krasových jevů a tak byla do geotechnického průzkumu výše uvedené štoly zařazena i geofyzikální měření. Práce byly prováděny jako součást geologicko-geotechnických prací spol. PŮDIS a.s., ražbu průzkumné štoly vedla společnost Subterra a.s.

## **2 Geofyzikální průzkum ze štoly**

Hlavní součástí provedeného geofyzikálního průzkumu ze štoly se stal soubor průzkumných prací zahrnutých do kategorie seismické prosvěcování z podzemních staveb. Pro provádění geofyzikálního průzkumu ze štoly bylo nutno vyvinout a provozně upravit technologický řetězec tak, aby práce v podzemí bylo možné realizovat v časově velmi krátkém období a zároveň získávat data maximální kvality. V případě bezpečnostních předvrtů byl realizován systém zpracování a vyhodnocení umožňující předání výsledků do 24 hodin od zahájení měření.

Další práce již byly součástí schváleného projektu geotechnického průzkumu a seismická měření byla realizována v různých prostorových uspořádáních modifikovaných a reagujících na zjištěné geotechnické skutečnosti.

K průzkumu ze štoly byly jako hlavní použity metody seismické refrakční tomografie, seismokarotáže a seismické tomografie (prosvěcování) v různých prostorových modifikacích. Z dalších metod byly k měření v průzkumné štolě zvoleny metody mikrogravimetrické a radarové v profilové a vrtné variantě.

Seismické metody sledují zemní/horninové prostředí z hlediska rozložení rychlostí šíření seismických vln, které odpovídají jeho elastickým parametrům. Rychlost šíření seismických vln je materiálovým parametrem úzce spojeným s litologickým typem horninového prostředí, porozitou, charakterem výplně pórů a v neposlední řadě geomechanickým stavem sledovaného prostředí (porušením masívu v tektonických zónách, intenzitou zvětrání). Značný vliv na velikost rychlosti šíření má tlak, rychlost tak přirozeně narůstá s hloubkou.

Cíle a principy použitých metod jsou zmíněny v následujících odstavcích.

### **2.1 Mělká refrakční seismika – povrchová refrakční tomografie**

Metodou povrchové refrakční tomografie je sledováno rozložení rychlostí šíření seismických vln pomocí analýzy časů šíření tzv. čelné vlny. Tato je v jisté vzdálenosti od zdroje seismické energie registrována jako čas prvního nasazení a je tak umožněno její přesné vyčíslení. Kombinací různých pozic zdrojů seismické energie a snímačů rychlosti kmitání je získán soubor závislostí času šíření na vzdálenosti od zdroje. Metodami matematické inverze je hledán model prostředí (tedy rozložení rychlostí šíření v geologickém řezu), jehož teoretická odezva vystihuje měřená data.

Metodou je sledován průběh tzv. refrakčního rozhraní, rozložení rychlostí šíření elastických vln v jeho bezprostředním podloží a rozložení rychlostí v pokryvu. V případě měření ze štoly jsou „pokryvem“ horniny porušené vlivem ražby s rychlostí šíření pohybující se kolem hodnoty  $1000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Podložní horniny jsou zastoupeny rychlostmi od cca  $1000$  až do  $6000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Vyšší rychlosti odpovídají nezávětralým pevným vápencům ( $3000 - 6000 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), nižší rychlosti ukazují na přítomnost zvětralých hornin s převahou břidlic ( $1200 - 3500 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Vápence jsou charakteristické rovněž vysokým kladným vertikálním gradientem.

K průzkumu byla použita 48-kanálová aparatura TERRALOC PRO. Snímače SM-11 (30 Hz) byly rozmístěny v linii měřeného profilu s pravidelným krokem 2 m. Zdrojem seismické energie byl sumované údery 10-kg palice do speciální podložky. Pro analýzu byly použity záznamy buzené s krokem zdrojů 4 m.

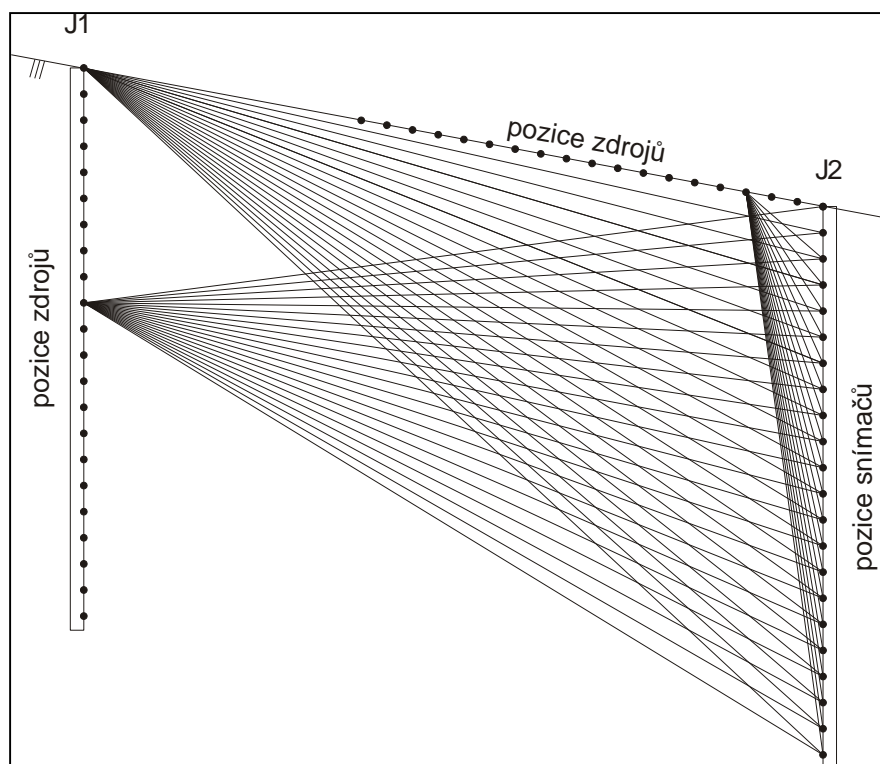
Kombinací různých pozic zdrojů seismické energie a snímačů rychlosti kmitání je získán soubor závislostí času šíření na vzdálenosti od zdroje, který představuje vstupní hodnoty do inverzního iteračního výpočetního procesu. Výpočtem časů šíření pro počáteční rychlostní model zemního/horninového prostředí je získán soubor syntetických časů pro použitou konfiguraci měření. Diskrepance měřených a modelových časů šíření jsou metodami matematické inverze převáděny na difference rychlostního modelu. Opravený rychlostní model vstupuje do dalšího iteračního kroku jako podklad pro výpočet nových časů. Při konvergenci procesu je získán rychlostní model s odezvou, která se neliší od měřených časů o hodnotu větší, než je nejistota měření. Výpočet byl proveden programovým systémem Rayfract<sup>TM</sup> (Intelligent Resources Inc.).

Získaný model sledovaného prostředí je předkládán v podobě tzv. rychlostního řezu. V rychlostních řezech je distribucí rychlostí šíření vedle litologického typu charakterizován především geomechanický stav zemního/horninového prostředí, tj. míra zvětrání, rozpukání, resp. degradace v místě poruchových zón. Skalní horniny jsou obvykle charakterizovány vysokým vertikálním gradientem rychlosti šíření, poruchová zóna se představuje lokálním snížením rychlosti šíření a deformací rychlostního pole v kontrastu s monotónním nárůstem rychlosti šíření seismických vln s hloubkou v neporušených částech řezu.

## **2.2 Seismické prosvěcování**

Měření metodou seismické tomografie bylo prováděno v několika konfiguracích: mezi dvěma vrty, mezi vrtem a povrchem, mezi vrtem a štolou, mezi dvěma štolami. Použité modifikace metody sledují rozložení rychlostí šíření seismických vln v řezu vymezeném liniemi snímačů a zdrojových bodů, např. body zdroje na čelbě a snímači ve vrtech. Měřenou veličinou je vlnová odezva snímače (geofonu) na pulzní zdroj a v tomto průběhu odečtený čas šíření procházející podélné vlny (seismického signálu) mezi zdrojem a přijímačem ve známých pozicích uvnitř vrtu nebo na povrchu. Tento údaj je sledován jako čas prvního nasazení v seismických záznamech. Kombinací různých pozic zdrojů seismické energie a snímačů rychlosti kmitání je získán soubor závislostí času šíření na geometrii měření, který představuje vstupní hodnoty do inverzního nelineárního iteračního procesu. Výpočtem časů šíření pro počáteční rychlostní model zemního/horninového prostředí (definovaný v uzlových bodech výpočetní sítě) je získán soubor syntetických časů pro použitou konfiguraci měření. Rozdíly měřených a modelových časů šíření jsou pak metodami matematické inverze převáděny na difference rychlostního modelu a opravený rychlostní model pak vstupuje do dalšího iteračního kroku jako podklad pro výpočet nových časů. Při konvergenci procesu je získán rychlostní model s odezvou, která se neliší od měřených časů o hodnotu větší, než je nejistota měření.

Ve variantě seismického prosvěcování mezi vrty je jeden z použité dvojice měřících vrtů osazen hydrofony s krokem 1m nebo seismickou sondou se snímači s krokem 0,5 m, druhý vrt je osazen zdrojem spouštěným s krokem 1m (viz obr. 1). Posuzovaná rovina (plocha) řezu prochází mezi oběma vrty.



Obr. 1 Schéma měření seismické tomografie  
Fig. 1 Schematic diagram of seismic tomography

Ve variantě prosvěcování mezi povrchem (čelbou) se ve vrtu nachází seismická sonda se snímači s krokem 0,5 m a zdroj představují sumované údery 5 kg palice do čelby. Pozice bodů úderu představuje průnik rovinu získaného řezu a čelby.

Tomografická měření jsou zpracována do podoby rychlostních řezů s vyznačenými strukturními a litologickými jevy.

Tomografická měření byla doplněna o seismokarotáž, kdy je sledován čas průchodu seismického signálu mezi ústím vrtu, kde se nachází zdroj, a snímači ve vrtu. Výsledkem je seismokarotážní modelová křivka, která ukazuje zastoupení horninových typů charakterizovaných jednou rychlostí šíření seismických vln. Z případných změn lze usuzovat na litologické změny či na přítomnost poruchových zón v okolí vrtu.

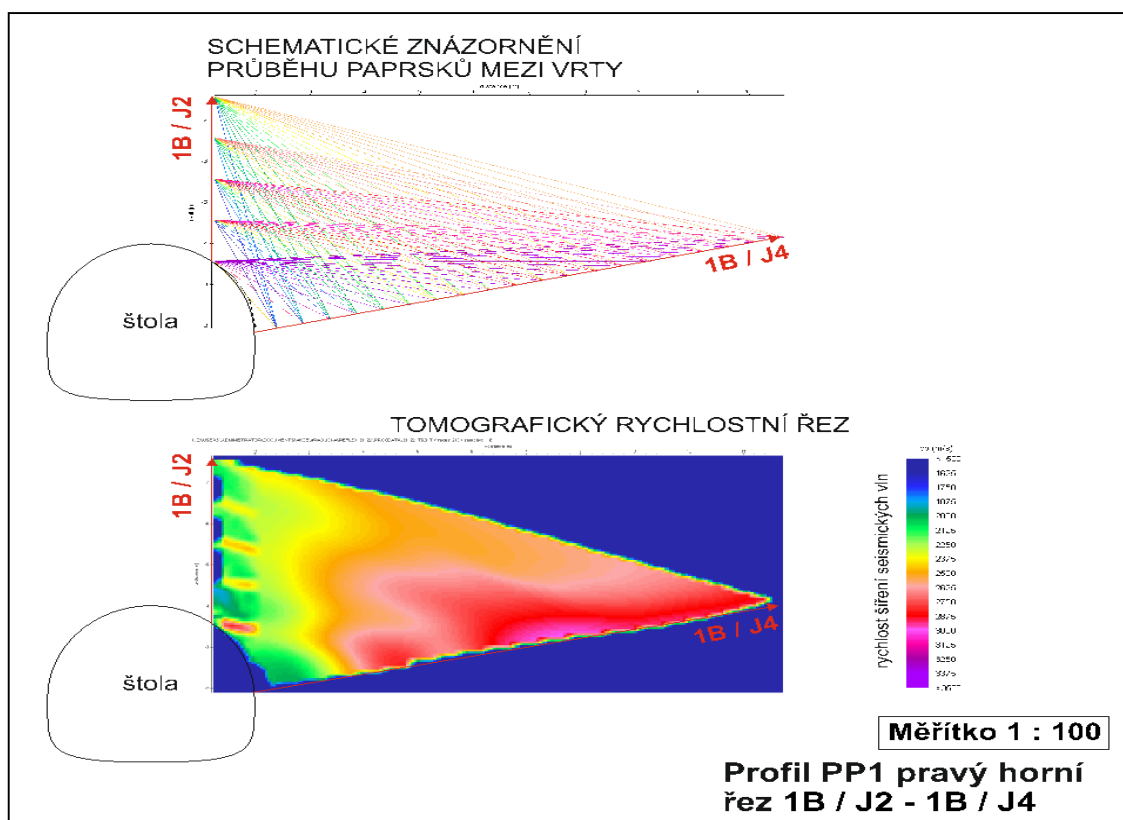
Všechna měření byla prováděna 24 kanálovým seismografem Terraloc Mk6. Jako vrtný zdroj byl použit sparker SBS42, v případě suchých vrtů pak elektrodynamický zdroj BIS-SH, v obou případech s pulsním generátorem IPG (vše Geotomographie GmbH). Jako snímače ve vrtech s vodou byly použity řetězce hydrofonů s vysokofrekvenčními elementy OMNI 2400. U suchých zdrojů byla použita seismická sonda vlastní konstrukce osazená 4 nebo 8 tříosými snímači ve vzdálenosti 0,5 m (viz obr. 2). Délka sondy činí 2, resp. 4 m. Jako doplňkový povrchový zdroj byly použity údery 5 kg úderníku do speciální podložky. Měřicí vrty osazené řetězcem hydrofonů byly v průběhu měření zalévány vodou. V případech nestabilního ostění byly vrty vystrojeny plastovými pažnicemi.



*Obr. 2 Seismický snímač do vrtu – INSET*

*Fig. 2 Seismic borehole probe - INSET*

Tomografický výpočet rychlostního pole šíření seismických vln prostředím byl proveden programovým systémem Rayfract™ (Intelligent Resources Inc.) v pravidelné pravoúhlé výpočetní síti s krokem 0.25 x 0.25 m. Jako nulový vstupní model pro iterační inverzní proces je použito prostředí s gradientem rychlosti 100 m.s<sup>-1</sup> na 1 m hloubky. Seismické paprsky, představující trasu šíření vysokofrekvenční složky seismického signálu, byly počítány jako dvojrozměrné zakřivené trajektorie v rovině řezu. Ta je zde chápána jako svislá rovina procházející body záhlaví použité dvojice vrtů. V případě prosvěcování ve variantě povrch (čelba) / vrt je rovina řezu tvořena linií zdrojových bodů na čelbě a vrtem. V případě zakřivených průběhů vrtaných sond jsou měřené časy šíření opraveny podle skutečné prostorové pozice zdrojů a přijímačů a výsledný předkládaný řez tak lze považovat za průmět obecné plochy měření do proložené roviny



Obr. 3 Seismické prosvěcování mezi vrty ze štoly: princip metody a ukázka rychlostního řezu  
 Fig. 3 Seismic screening between tunnel boreholes: the principle of the method and the demonstration of the velocity cut

### 3 Prostorové modifikace metod seismického prosvěcování

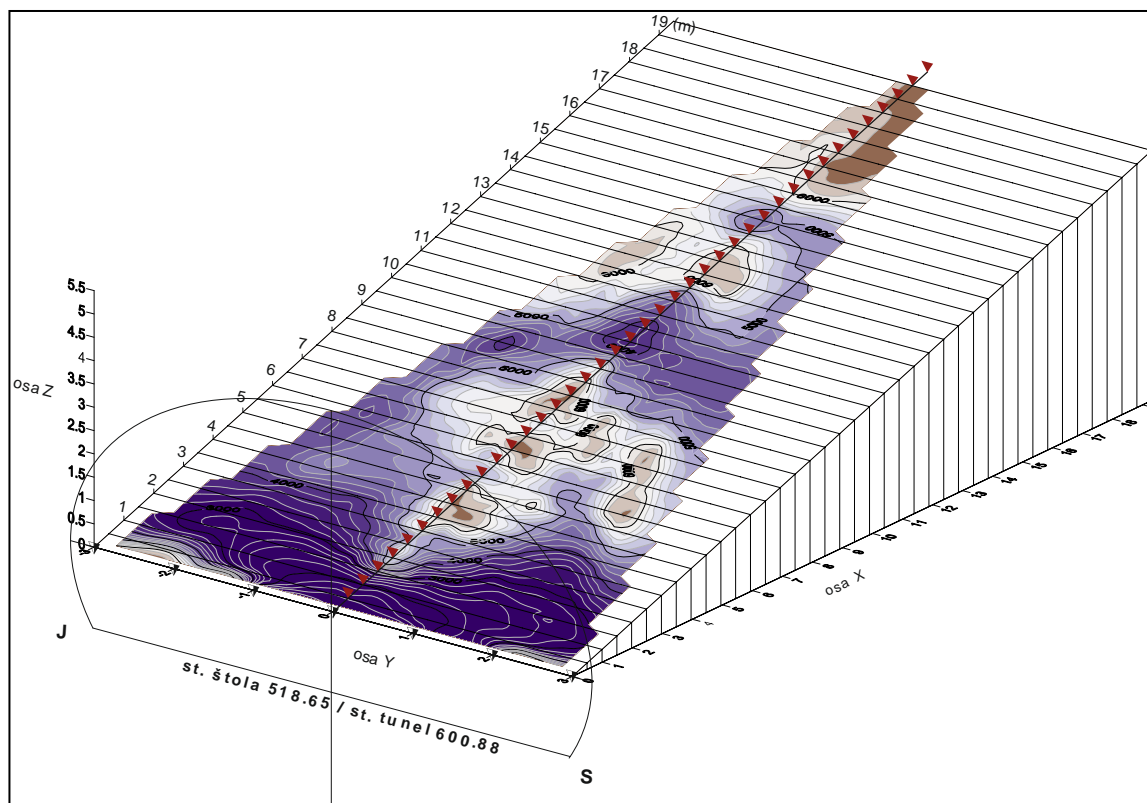
Výsledky geofyzikálního průzkumu zejména seismického prosvěcování reagují na geomechanický stav horninového masivu změnami v rychlostech šíření seismických vln. Výsledné rychlostní řezy v různých prostorových modifikacích tak kromě změn litologických dovolují indikaci významných poruchových struktur a jejich sledování ve zvolené rovině řezu včetně detekce případných krasových jevů. Důležitou součástí informace z rychlostních řezů je rozsah a míra porušení horninového masivu vlivem použitého způsobu jeho rozpojování (trhací práce).

#### a. Bezpečnostní jádrové předvrty z čelby štoly

Dle původních předpokladů a zadání měla být z čelby prováděna pouze seismokarotáž, která popisuje nejbližší okolí vrtu. Po konzultacích z vedoucím geologického průzkumu bylo měření rozšířeno na seismické prosvěcování, které dokáže oproti seismokarotážním měřením postihnout plošné rozložení případných poruch a krasových jevů. Data ze seismokarotáže jsou navíc do plošného měření implementována. Výsledný řez má převážně tvar rovnoramenného trojúhelníku s výškou odpovídající délce vrtu a se základnou na čelbě štoly.

Měření ve štole byla prováděna na základě požadavků stavby bezprostředně po odvrtání bezpečnostních předvrtů v rámci směny následující po dovrtání. Jádrové předvrty měly standardní délku 20 m a byly vedeny dovrchně tak, aby postihly případné poruchy v přístropí a nadloží průzkumné štoly s největším potenciálem negativního ovlivnění stability výrubu. Na těchto vrtech bylo dle schváleného projektu prací postupně prováděno geofyzikální měření sestávající ze seismické tomografie a vrtného georadaru. Výsledky byly průběžně předávány během odpoledne téhož dne, případně následující dopoledne.

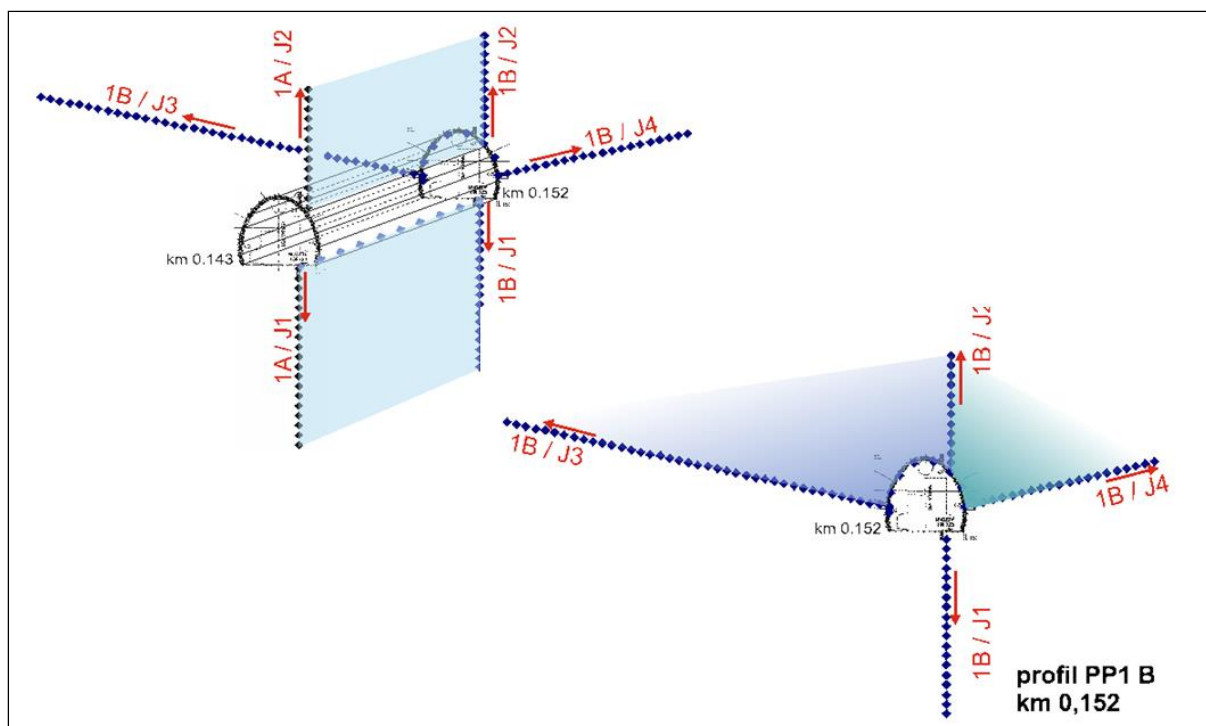
Na základě geofyzikálních měření ve vrtu provedeném z čelby průzkumné štoly byla stanovena základní rajonizace zkoumaného úseku s přihlédnutím k makroskopickému popisu jádrového vrtu a kamerové prohlídce vrtu. Touto rajonizací byly vymezeny nejvýznamnější zjištěné poruchové zóny s možností výskytu krasových jevů a otevřených puklin. V případě nepříznivých podmínek a výskytu krasových jevů byla na základě výsledků operativně upravena technologie ražby. Na následujícím obrázku jsou uvedeny vzájemná poloha čelby štoly a roviny seismického řezu.



Obr. 4 Seismické prosvěcování z čelby štoly: porušené horniny jsou vyznačeny tmavými odstíny modré, červené značky jsou pozice snímačů v bezpečnostním předvrtu  
Fig. 4 Seismic screening from the bank of the tunnel: broken rocks are marked with dark shades of blue, red markers are the sensors positions in the safety pre-drilled borehole

#### b. Presiometrické vějíře z průzkumné štoly

V rámci prováděného geotechnického průzkumu v průzkumných štolách jižní i severní tunelové trouby Radlické radiály bylo realizováno presiometrické měření na celkem devíti vějířích. Jednotlivé vějíře byly sestaveny vždy ze čtyř vrtů se základní geometrií vrtů strop / dno / pravý bok / levý bok. Vrtové vějíře byly realizovány s postupem ražby průzkumné štoly. Po provedení zkoušek a zpřístupnění vrtového profilu byla ve všech vrtech vějířů provedena a následně vyhodnocena vrtná georadarová měření, seismokarotáž a seismické prosvěcování mezi vrty. Seismické prosvěcování mezi vrty bylo realizováno na každém vějíři ve čtyřech řezech daných dvojicí vrtů, mezi nimiž bylo tomografické měření realizováno. Celková metráž vrtů na jednotlivém vějíři činila vždy 60 m. Některé vějíře bylo nutné z technických důvodů modifikovat a tak byla přizpůsobena i geometrie prováděných seismických měření. Na dalším obrázku je uvedena ukázková geometrie standardního i modifikovaného měření na vrtných vějířích.



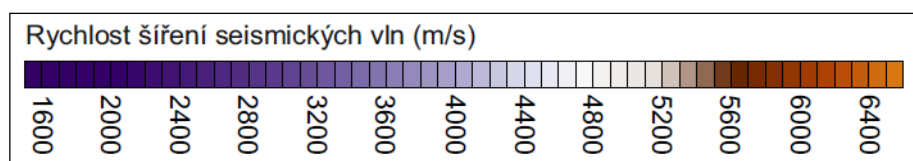
Obr. 5 Seismické prosvěcování na presiometrických vějířích s vyznačenými rovinami vybraných seismických řezů.

Fig. 5 Seismic screening on presiometric cones with marked planes of selected seismic cuts

Cílem geofyzikálních měření na presiometrických vějířích, zejména pak měření seismických, bylo zjištění detailních geologických struktur ve vybraných úsecích štoly. Porovnání výsledných seismických řezů s výsledky presiometrických měření umožnilo zjištěné pevnostní charakteristiky a elastické parametry horninového prostředí interpolovat v ploše řezu mezi vrty presiometrického vějíře. V následující tabulce jsou uvedeny typy hornin zastižené průzkumnou štolou s přerazenými rychlostmi šíření seismických vln.

Tab. 1 Tabulka rychlostí šíření seismických vln pro seismickou tomografii mezi vrty ze štoly  
Tab. 1 Table of seismic wave propagation velocity for seismic tomography between boreholes

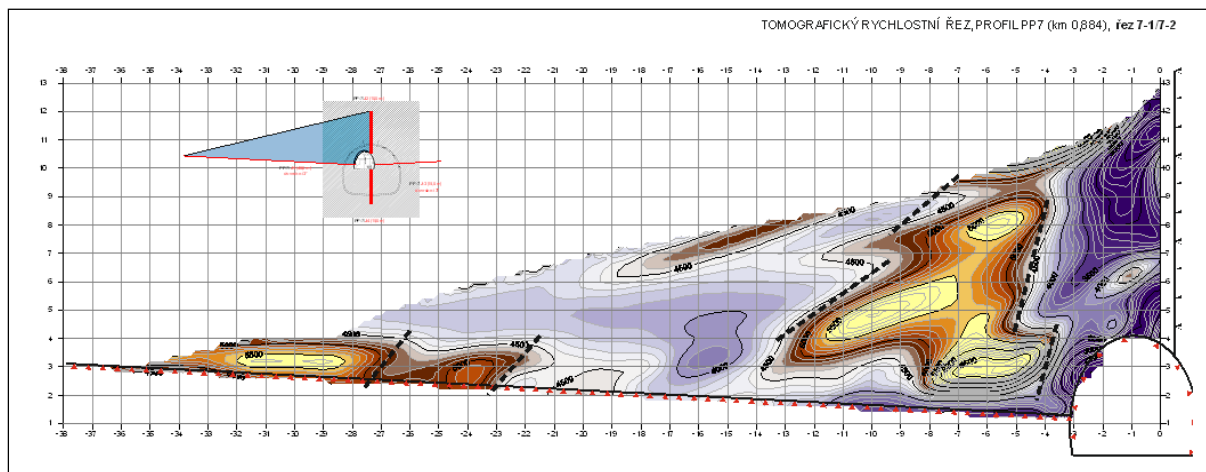
rychlost seismických vln	hodnota (m/s)	horninový typ
velmi nízká	≤ 2000	břidlice zvětralé s velmi vysokou hustotou diskontinuit
nízká	2000 - 3500	břidlice zdravé s vysokou hustotou diskontinuit
střední	3000 - 5000	vápence kompaktní s vysokou hustotou diskontinuit, vápence porušené vlivem ražby a vrtacích prací
vysoká	≥ 5000	vápence kompaktní se střední až nízkou hustotou diskontinuit



Obr. 6 Barevná škála použitá pro výstupy seismických měření.

Fig. 6 Color scale used for seismic measurement outputs.

Výsledky seismické tomografie na presiometrických vějířích byly prezentovány ve formě tomografických rychlostních řezů. Na základě geofyzikálních měření ve vrtech presiometrických vějířů byla stanovena základní rajonizace horninového prostředí ve stanových řezech a rovinách v okolí vrtů. Na následujícím obrázku je uveden příklad výstupu z měření na vrtných vějířích.



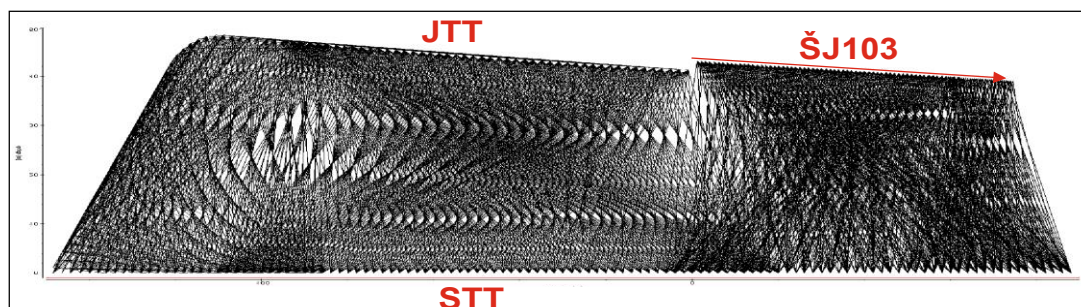
Obr. 7 Seismické prosvěcování na presiometrických vějířích: porušené horniny jsou vyznačeny tmavými odstíny modré, červené značky jsou pozice snímačů ve vrtech a v ostění štoly, ve vrtu bez značek byl umístěn seismický zdroj

Fig. 7 Seismic screening on presiometric cones: broken rocks are marked with dark shades of blue, red marks are positions of sensors in boreholes and lining of tunnel, in a borehole a seismic source was placed

### c. Průzkumné vrty ze štoly

Průzkumné vrty byly vrtány ze štoly severní tunelové trouby (STT) do oblasti jižního tunelu a do oblasti severního tunelu za koncem průzkumné štoly a ze štoly jižní tunelové trouby (JTT) do oblasti jižního tunelu za koncem průzkumné štoly. Všechny vrty byly v souladu s projektem průzkumných prací k využití k provedení geofyzikálního průzkumu. Postup prací a rozšíření průzkumu o štolu v trase JTT otevřely další možnosti využití seismické tomografie. Nově tak bylo možné prosvěcování nejen mezi průzkumnými vrty ale i mezi vrtem a štolou nebo mezi oběma štolami.

Rozšíření průzkumu na prosvěcování mezi štolami a vrtem a štolou si vyžádalo úpravu technologie prováděných prací včetně instrumentace horizontálních geofonů do stěny štoly, zajištění kabelového propojení mezi pracovišti v jednotlivých štolách STT a JTT.

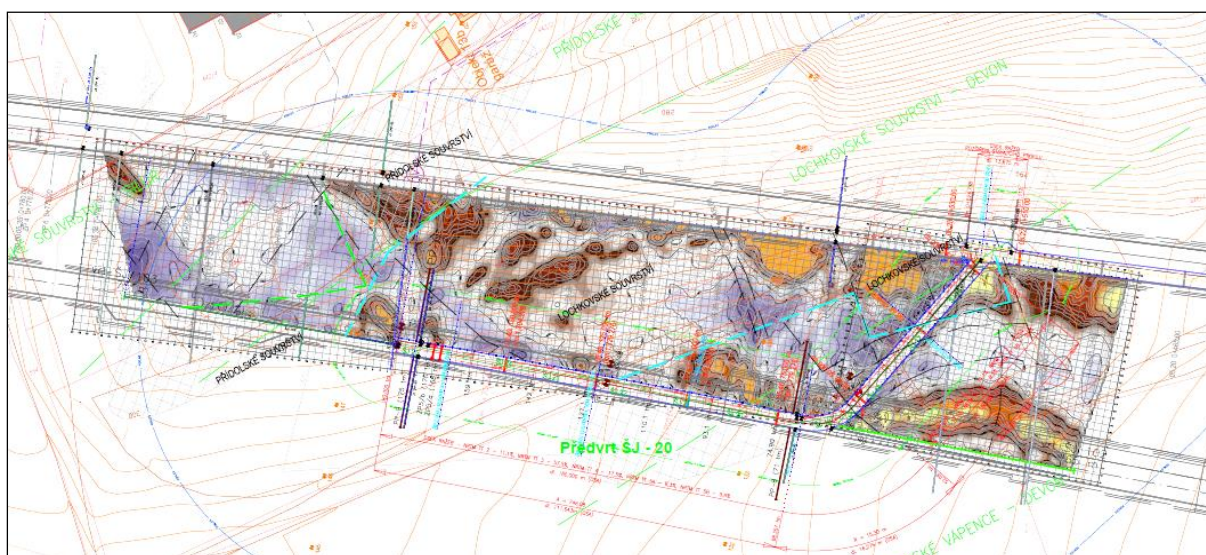


Obr. 8 Rozšíření možností seismické tomografie: Schéma geometrie prosvěcování mezi vrtem ŠJ103 štolou v trase STT a štolami v trase JTT / STT

Fig. 8 Extension of seismic tomography options: Schematic of the screening geometry between the STJ103 borehole, tunnel in the STT direction and the direction JTT / STT

Rozložení rychlostí v získaných tomografických řezech bylo ovlivněno poměrným zastoupením jednotlivých hornin v rovině řezu, prostorovými parametry vrstev a poruch, zejména jejich orientací vůči drahám sledovaných seismických paprsků. V místech relativně nižších rychlostí bylo indikováno vyšší poměrné zastoupení rozpukaných pevných hornin (vápenců). Snížené rychlosti se rovněž vyskytovali v místech litologických změn (polohy břidlic) a v místech přechodu mezi jednotlivými kvazi homogenními bloky hornin. Hranice byly často nespojitě a tektonicky porušené. Vysoké rychlosti šíření seismických vln ( $4000 - 6500 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ) ukazovaly částečnou metamorfózu zastížených vápenců, což odpovídalo geologické situaci dokumentované vrty.

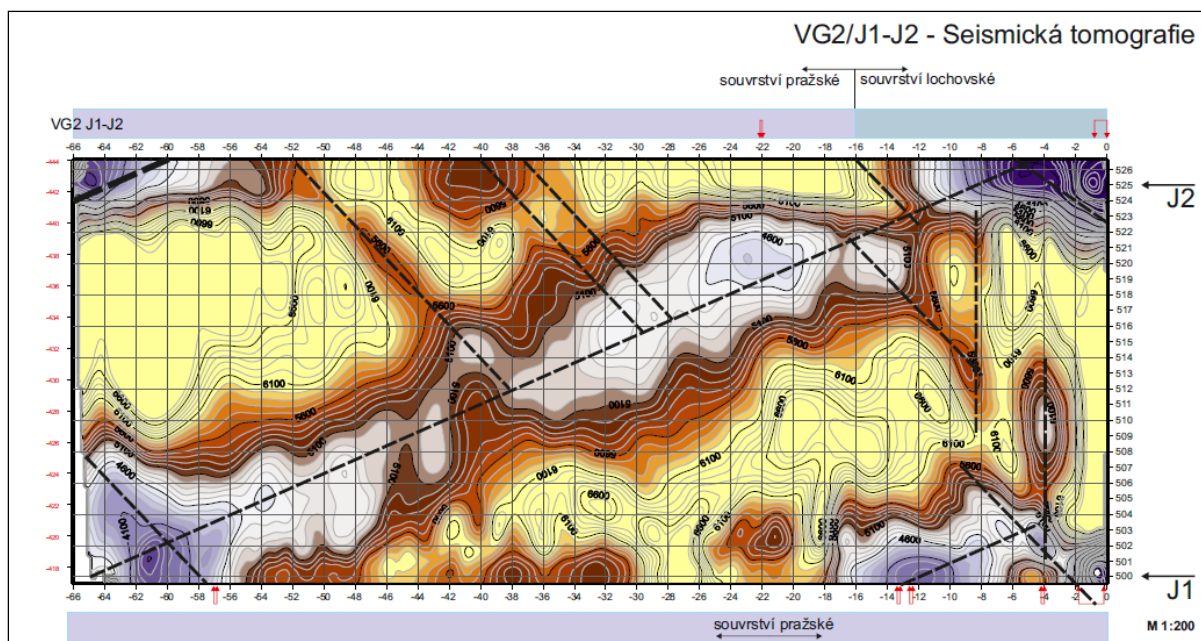
Průzkumné vrty byly prováděny z koncových čeleb obou štol ve směru a v případě JTT i proti směru ražby a na vrtných profilech kolmo ke směru ražby. Vrty dosahovaly délek 60 – 75 m, jejich vzdálenost na vrtných profilech činila 25 – 30 m. Výsledné řezy tak představovaly plošnou mapu v rovině vymezené oběma štolami s distribucí rychlosti šíření v délce 285 m. V takto vymezené oblasti bylo možné na základě poznatků z popisu vrtů přesnější vymezení bloků jednotlivých hornin včetně jejich případného tektonického omezení (viz následující obr. 9).



*Obr. 9 Rozšíření možností seismické tomografie: Výsledné řezy v rovině vymezené oběma štolami s distribucí rychlosti šíření v délce až 285 m*

*Fig. 9 Extension of seismic tomography possibilities: The resulting cuts in the plane defined by the two tunnels with distribution of velocity spreading up to 285 m*

V případě standardních vrtných profilů bylo prosvěcování realizováno vždy minimálně mezi dvojicí vrtů, které tak vymezovaly roviny řezů. V případě vrtů do boků štol se jednalo řezy vedená rovnoběžně s rovinou počvy štol. U vrtů vedených úpadně do dna štol byl výsledný řez orientován v obecné rovině zapadající šikmo pod dno štol ve směru vrtů. Rozměry těchto řezů byly dány délkou vrtů a vzdáleností mezi nimi a dosáhly velikosti až 30 x 70 m. I v těchto řezech byly vymezeny bloky jednotlivých hornin včetně tektonického omezení (viz následující obr. 10).

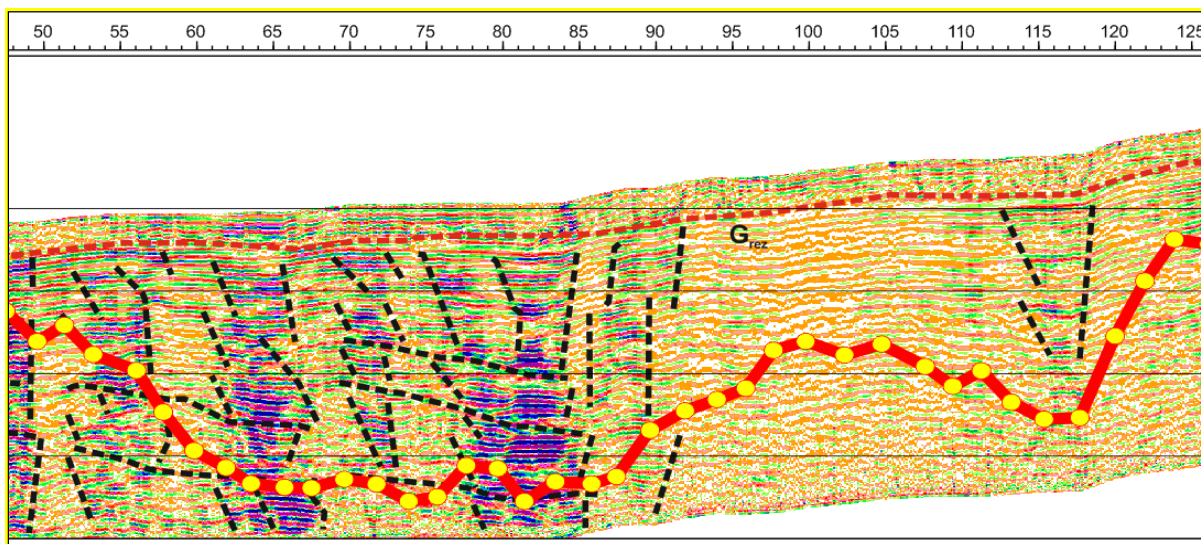


Obr. 10 Seismická tomografie mezi průzkumnými vrtmi J1 a J2  
 Fig. 10 Seismic tomography between exploration boreholes J1 and J2

#### d. Geofyzikální měření z průzkumných štol po jejich vyražení

Po ukončení ražby průzkumných štol v trase STT i JTT byla postupně v obou průzkumných štolách prováděna geofyzikální měření sestávající ze seismické profilové tomografie, georadaru a mikrogravimetrie.

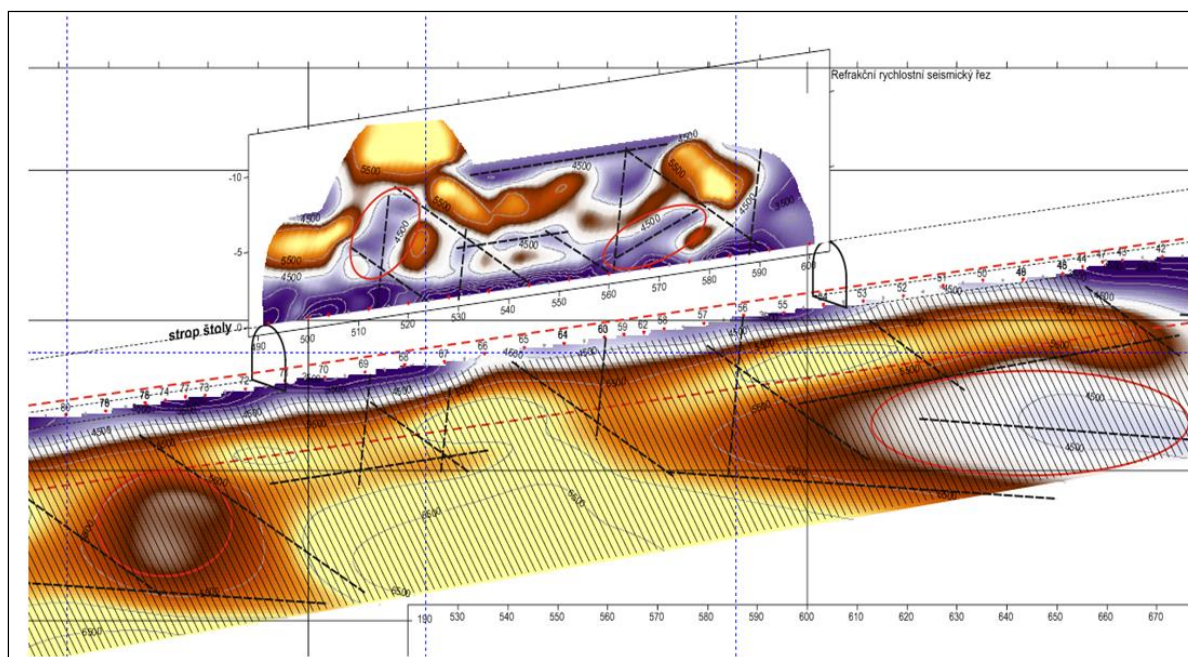
Georadarová a seismická měření byla zpracována do formy podélných řezů. Gravimetrická měření byla spočtena a prezentována jako modifikované Bouguerovy tíhové anomálie.



Obr. 11 Georadarová a gravimetrická měření ze štoly: zvýšená odrazivost v úsecích s lokálním minimem tíhového zrychlení  
 Fig. 11 Georadar and gravimetric measurements from the tunnel: increased reflection in sections with local gravity low

Seismické tomografické profily byly vedeny dnem v ose štoly a ve štole STT v pravém severním boku (směrem k JTT) a ve stropě štoly. Úsek měřený ve stropě štoly byl vytipován

na základě shody významných indikací z měření ze štoly i z povrchových měření. V celém rozsahu rozšíření štoly do JTT byl změřen seismický tomografický profil vedený dnem. V pravém severním boku (směrem k STT) byla, po dohodě se zadavatelem průzkumu, seismická měření realizována v rozšířené variantě jako prosvěcování štola / štola.



Obr. 12 Podélná seismická měření ve štole detailní členění masivu  
Fig. 12 Longitudinal seismic measurements in a detail of the massif

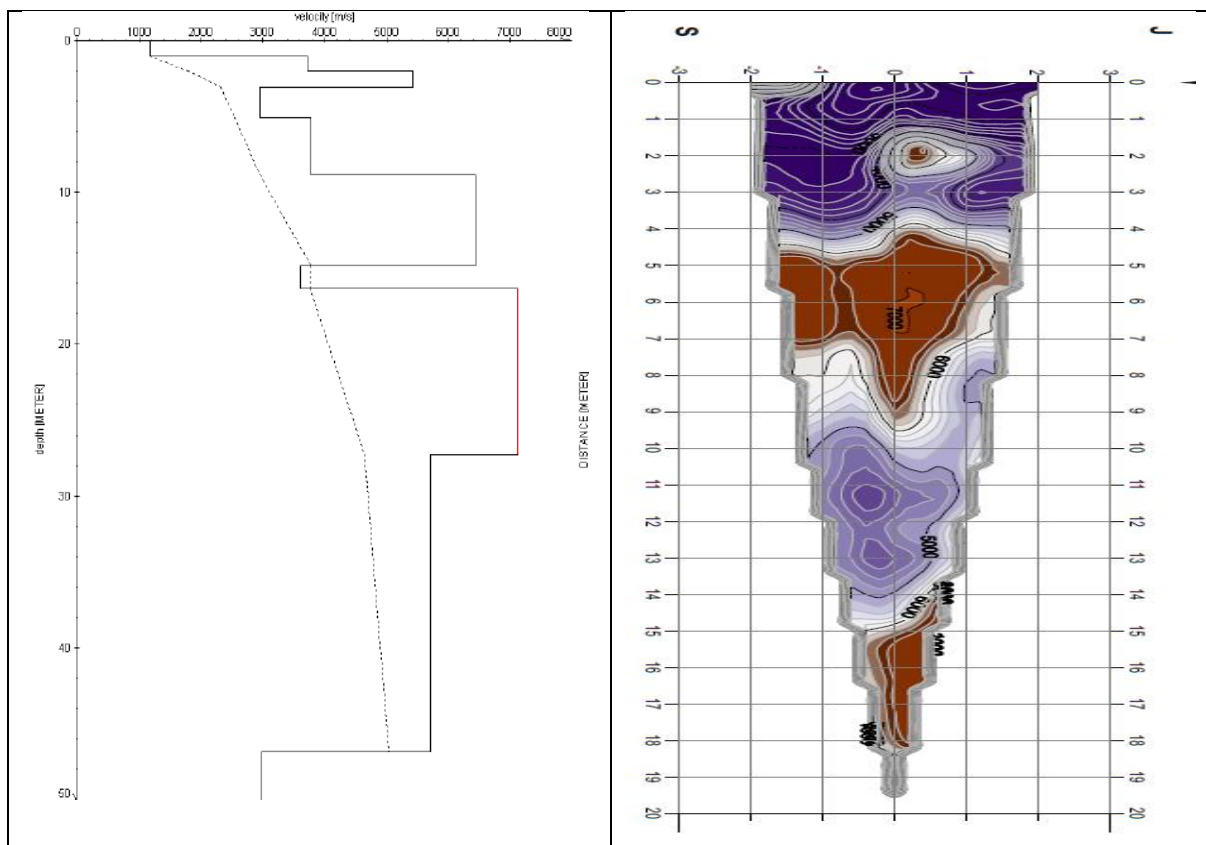
Výsledky podélných zejména seismických měření ve variantě povrchové tomografie dokázaly vymezit jednotlivé kvazihomogenní bloky (litologické celky), rovněž byly detekovány poruchové zóny v pevných horninách, zejména vápencích s dobrou odezvou v gravimetrických a radarových měřeních. V neposlední řadě je ve výsledných řezech patrná v hornině zóna ovlivnění vlivem rozpojování. Mocnost této polohy je charakterizována poklesem rychlostí v mocnosti 1 – 3 m. Míra porušení je různá a pravděpodobně je ovlivněna mírou zvětrání, rozpukáním a charakterem horniny a v neposlední řadě i technologií ražby.

#### 4 Použití geometrických modifikací seismického prosvěcování.

V této diskusní části příspěvku je zhodnocena vhodnost použití jednotlivých geometrických modifikací seismického prosvěcování a jejich přínos pro geotechnický průzkum.

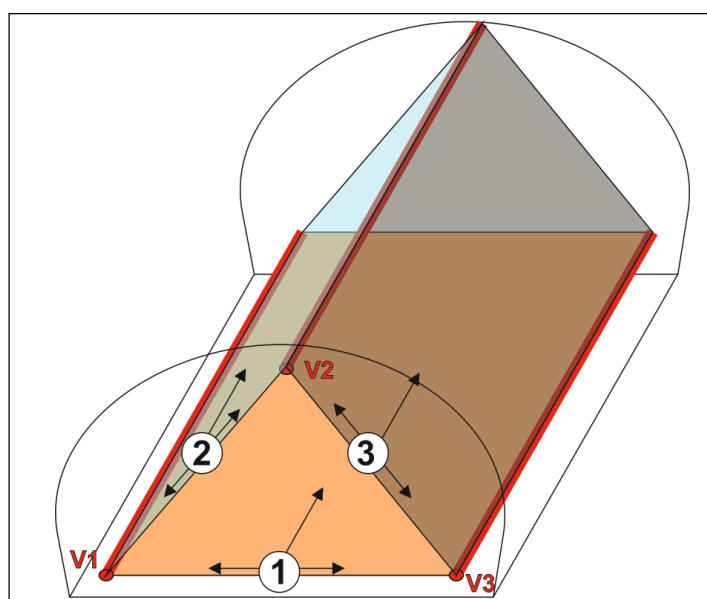
U bezpečnostních jádrových předvrtů můžeme doporučit nahrazení seismokarotáže prosvěcováním vrt – čelba. Toto nahrazení se jeví jako účelné. Rozdíl mezi 1D informací z karotáže (rozložení seismických rychlostí v okolí vrtu) a plošnou mapou distribuce seismických rychlostí ve zvolené rovině je značný. Na prodloužení času nutného k provedení měření není zásadní. Výrazným benefitem pro geotechnika může být i možnost volby roviny řezu dle převažujících směrů poruch či geologické situace.

V geotechnicky složitých a rizikových úsecích, např. při ražbě tunelu pod objekty je vhodnou variantou seismické prosvěcování mezi dvojicí či trojicí vrtů z čelby tunelu s vytvořením až 3 tomografických řezů



Obr. 13 Rozdíl mezi výstupem seismokarotáže a prosvěcováním čelba/vrt  
 Fig. 13 The difference between the output of the seismic logging and screening bench/borehole

Měření vrtných vějířů představuje možnost navázání rychlostí šíření seismických vln na další geotechnické parametry a dovoluje usuzovat na plošnou distribuci geotechnických parametrů dle mapy získané ze seismických tomografických měření.



Obr. 14 Možnosti seismického prosvěcování mezi dvojicí či trojicí vrtů z čelby tunelu v geotechnicky složitých a rizikových úsecích (např. při ražbě tunelu pod objekty)  
 Fig. 14 Possibilities of seismic screening between two or three boreholes from the tunnel bench in geotechnically complex and risky sections (eg. tunnel under construction)

Geofyzikální měření v průzkumných vrtech a podélná měření umožňují reagovat na nová zjištění a případně i na rozšíření prací v rámci geotechnického průzkumu. Tyto metody dovolují účelné prostorové modifikace, které mohou přinést výrazně vyšší množství informací potřebných pro hodnocení složitých geologických poměrů. Pro plné využití možností seismických metod pro účely geotechnického průzkumu byla nutná spolupráce mezi geologem / geotechnikem a zhotovitelem geofyzikálních prací. V neposlední řadě je třeba zmínit, přes značné rozšíření prací nebyl překročen původní rozpočet a práce byly financovány přesuny mezi položkami, které nebylo možné z technických důvodů, jako jsou např. zavalené vrty, či nestabilita vývrtu, možné realizovat. Rovněž bylo využito možnosti nahrazení povrchové seismické tomografie tomografií mezi oběma štolami. Tyto možnosti se pro průzkumné projekty charakteru průzkumných štol, kdy je primárním cílem zjištění geologické stavby, jeví jako klíčové a měly by být standardní součástí podléhající rozhodnutí vedoucího geotechnického průzkumu.



*Obr. 15 Fotografie pořízené při dokumentacích vrtů: Horní dva obrázky představují zastížené zkrasování, levý dolní poruchovou zónu v břidlicích a pravý dolní je záznamem ze zvodnělého vrtu v místě přítoku vody do vrtu z otevřené pukliny*

*Fig. 15 Photo taken during the borehole documentation: The top two pictures represent the karst voids, the bottom left shows fault zone in the slate, and the bottom right is the record from the watered borehole at the place of water inflow to the borehole from the open crack*

Jako velmi účelné se, kromě georadarových měření ve vrtech, ukázalo i pravidelné doplnění dokumentace vrtů kamerovou prohlídkou. Kamerová prohlídka vrtu dovoluje eliminovat nepřesnosti vzniklé manipulací s vrtným jádrem v průběhu vrtání, při jeho ukládání, nebo při jeho převozu. Dále je možné si udělat představu o stavu horniny in situ, je možné

přesně určit místa případných přítoků vody do vrtu, ověřit rozsah zastižených krasových jevů atd. Kamerové prohlídky byly realizovány pomocí kamerového systému Rothenberger ROCAM s digitálním odečtem vzdálenosti. Kamerová hlava s LED diodami je voděodolná a dovoluje i prohlídku zvodnělých vrtů. Na následujících obrázcích jsou uvedeny pro ilustraci vybrané pukliny a krasové jevy zastižené při průzkumu Radlické radiály.

## **5 Závěr**

Provedené průzkumné práce značně rozšířili poznatky o geologických poměrech a geotechnických vlastnostech horninového masivu, které budou zastiženy při stavbě dvou tunelových tubusů velkých silničních tunelů. Již v průběhu průzkumných prací na čelbě docházelo k důležitým zjištěním, která umožnila úpravy technologie ražby a zajištění výrubu. Operativní přístup a spolupráce umožnila změny a přesuny prací tak, aby byly využity možnosti metodiky průzkumu k řešení otázek a problémů, jejichž existenci nebylo možné v době přípravy geotechnického průzkumu odhadnout. Výsledky detailního seismického prosvěcování doplněné o radarová měření a kamerové prohlídky vrtů přinesly nové poznatky a rozšíření informací o geotechnických charakteristikách zjištěných v průzkumné štolě do profilů obou navrhovaných tunelů a umožnily posouzení širokého okolí průzkumné štoly.