

ZJIŠTĚNÍ PROSTOROVÉ
HOMOGENITY
HORNINOVÉHO PROSTŘEDÍ
PŘED PROVEDENÍM
TRHACÍCH PRACÍ POMOCÍ
SEISMICKÉ TOMOGRAFIE

Autoři: Mgr. Tomáš Chabr a kolektiv

Praha, 2021

NÁZEV ZPRÁVY: Zjištění prostorové homogenity horninového prostředí před provedením trhacích prací pomocí seismické tomografie

NÁZEV PROJEKTU: Zjištění prostorové homogenity horninového prostředí před provedením trhacích prací pomocí seismické tomografie

IDENTIFIKACE V RÁMCI PROJEKTU:

Závěrečná zpráva

ČÍSLO SMLOUVY: SO2020-074

Bibliografický zápis:

CHABR T., FILIPSKÝ D. (2021): Zjištění prostorové homogenity horninového prostředí před provedením trhacích prací pomocí seismické tomografie. – TZ 548/2021, Archiv SÚRAO

ŘEŠITELÉ:

INSET s.r.o. ¹

AUTORSKÝ KOLEKTIV: Chabr T.¹, Filipský D.¹

Jozef Urík

Manažer projektu (SÚRAO)

21.06. 2021

Chabr Tomáš

Manažer projektu (INSET s.r.o.)

21.06. 2021

Obsah

| | | |
|----------|-------------------------------------------------------|-----------|
| 1 | Obecné vymezení projektu..... | 8 |
| 1.1 | Náplň a cíl zakázky | 8 |
| 1.2 | Lokalizace prací | 8 |
| 2 | Postup řešení projektu | 12 |
| 2.1 | Terénní práce | 12 |
| 2.1.1 | Použité metody průzkumu | 12 |
| 2.1.2 | Přístrojové vybavení..... | 13 |
| 2.2 | Zpracování naměřených dat..... | 14 |
| 2.2.1 | Prvotní úprava seismických tras..... | 14 |
| 2.2.2 | Odečtení času prvních nasazení | 15 |
| 2.2.3 | Tomografické zpracování souboru odečtených časů | 16 |
| 3 | Výsledky průzkumu | 18 |
| 4 | Závěr | 22 |

Seznam příloh:

Příloha 1: Situace použitých průzkumných vrtů a snímačů, 1:1000

Příloha 2: Výsledek tomografického zpracování, rychlostní pole, 1:1000

Příloha 3: Blokové interpretační schéma, 1:1000

Seznam použitých zkratk:

| | |
|-------|-------------------------------------------------------------------------------|
| DIAMO | DIAMO s. p., název odvozen od sloučeniny diuranát amonný (uranový koncentrát) |
| EDZ | excavation damaged zone |
| GEAM | odštěpný závod DIAMO |
| JJV | jiho-jihovýchod |
| J | jih |
| JJZ | jihojihozápad |
| JV | jihovýchod |
| JZ | jihozápad |
| PVP | podzemní výzkumné pracoviště |
| RQD | Rock Quality Designation |
| S | sever |
| SIRT | Simultaneous Iterative Reconstruction Technique |
| SSV | severoseverovýchod |
| SSZ | severoseverozápad |
| SÚRAO | Správa uložišť radioaktivních odpadů |
| SV | severovýchod |
| SZ | severozápad |
| Z | západ |
| ZJZ | západojihozápad |
| ZSZ | západoseverozápad |

Abstrakt

Prezentovaný text shrnuje výsledky geofyzikálního měření metodou seismické tomografie, které bylo provedeno v rámci přípravné fáze projektu PVP Bukov, II. etapa výstavby. Tomografická měření byla provedena v prostoru 12. patra dolu Rožná, východně od jámy R7S. Pro průzkum bylo využito celkem 5 horizontálních průzkumných vrtů vedených z dopravního ochozu PŠ1-123 východním směrem do masivu tvořeného migmatizovanými biotitovými až amfibol-biotitovými pararulami a hrubozrnnými amfibolbiotitovými stromatitickými migmatity s vložkami amfibolitů. Hlavním cílem průzkumných prací bylo získání představy o prostorové distribuci případných poruchových zón a posouzení homogenity zkoumaného horninového bloku.

Měření byla provedena s využitím technického vybavení pro seismická tomografická měření ve vrtech (snímače rychlosti kmitání do vrtů, hydrofony, seismický zdroj energie do vrtů, registrační aparatura), využity byly také běžné snímací geofony umístěné na stěně důlní chodby. Zpracování naměřených dat zahrnovalo základní úpravu seismických stop (frekvenční filtrace, normalizace amplitud), rozřazení seismických stop do logických celků, přidělení reálných prostorových souřadnic každé stopě a vyčíslení tzv. časů prvního nasazení (čas příchodu signálu do snímače). Získaný soubor časů spolu s odpovídajícími prostorovými souřadnicemi vysílače a zdroje byl poté zpracován s využitím metody SIRT (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique).

Výsledky průzkumu jsou prezentovány ve formě plošného zobrazení distribuce rychlosti šíření podélných seismických vln. Poruchové zóny se obecně projevují snížením seismických rychlostí, ke kterému dochází zejména vlivem rozpuštění horninového masivu.

Klíčová slova

Hlubinné úložiště, rychlost šíření podélných seismických vln, seismická tomografie, PVP, SIRT.

Abstract

Seismic crosshole tomography measurements were realised as a part of project „ Underground Research Facility (URF) Bukov, II. Phase. Seismic crosshole tomography works were carried out during the preparatory part of the project and were placed at 12th level of the former Rožná deep uranium mine, east from shaft R7S, approx. 550 m below the surface. Five cored horizontal boreholes placed at gallery PŠ1-123 were used for the tomography measurements. Migmatized biotitic paragneiss to amphibole-biotitic paragneiss, amphibole-biotitic migmatite and amphibolite are found in this area. Study of spatial distribution of fractured zones or local tectonics was a goal of this measurements.

Special technical equipment for crosshole seismic tomography were used for this survey (borehole geophones, hydrophones, seismic energy source). Data processing involved several basic steps – frequency filtration, amplitude normalization, sorting of seismic traces, assignment of real spatial coordinates to the traces and first arrival times marking. SIRT method (Simultaneous Iterative Reconstruction Technique) was used to process matrix of spatial coordinates and first arrivals (transit time between source and receiver). Seismic p-

waves velocity cross-section is the result of the processing. Presence of lower velocity zones indicates the occurrence of fractured zones.

Keywords

Deep geological repository, seismic p-waves velocity, crosshole seismic tomography, Underground Research Facility (URF), SIRT

1 Obecné vymezení projektu

1.1 Náplň a cíl zakázky

Objednatel – Správa úložišť radioaktivních odpadů (SÚRAO) od roku 2017 úspěšně provozuje Podzemní výzkumné pracoviště Bukov (dále jen „PVP Bukov“), které se nachází na 12. patře (v hloubce 550 m), poblíž jámy B-1 bývalého uranového Dolu Rožná I na Vysočině. PVP Bukov je umístěno v krystalinických horninách, tyto horniny typově odpovídají potenciálním horninám pro HÚ. Laboratoř byla navržena jako systém podzemních prostor v různých geologických podmínkách dle požadavků na konkrétní experimentální činnosti.

Začátkem roku 2021 byly, na základě smlouvy uzavřené mezi SÚRAO a DIAMO, s. p., zahájeny ražby nových podzemních objektů pracoviště PVP Bukov, tzv. II. etapa výstavby, jejímž účelem je navázání na předchozí výzkumné charakterizační práce během výstavby, rozšíření pracoviště a následná realizace nových experimentů v reálném in-situ prostředí.

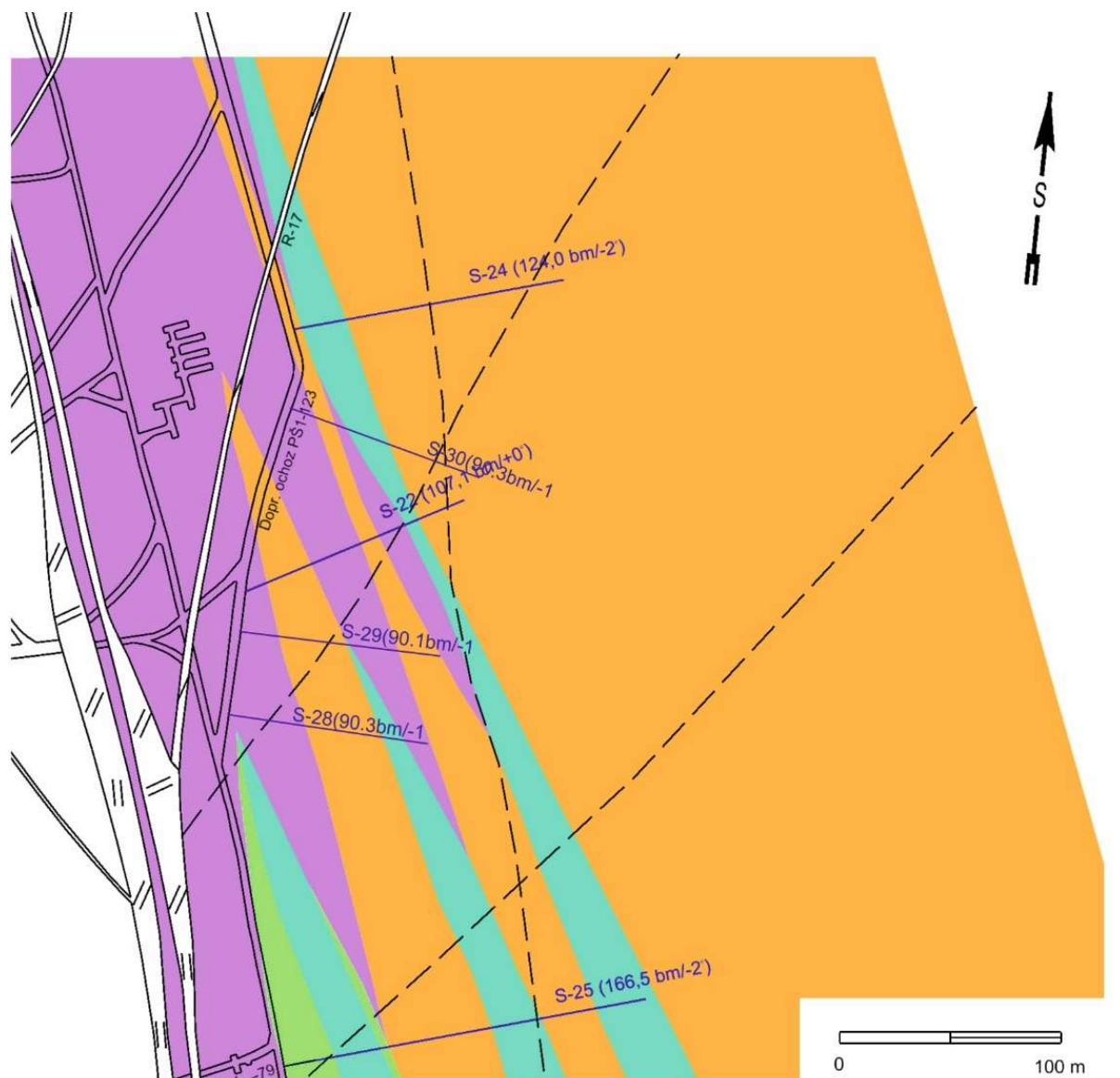
Předmětem zde prezentovaných průzkumných prací bylo získání poznatků o horninovém prostředí v prostoru plánovaného umístění další, tzv. II. etapy podzemního výzkumného pracoviště Bukov. Zjišťovány byly zejména informace o prostorovém uspořádání případných poruchových zón, míře narušení horniny v jejich okolí a posouzení kvality horniny v rámci celého sledovaného prostoru. Hlavní metodou průzkumu byla zvolena seismická tomografie, která byla provedena mezi pilotními průzkumnými horizontálními vrty.









1.2 Lokalizace prací

Práce byly realizovány v bývalém hlubinném uranovém dolu Rožná I, resp. v jeho kontrolovaném pásmu. Důl Rožná se nachází na Vysočině poblíž obce Dolní Rožinka a je v majetku DIAMO, s.p., o.z. GEAM, s jehož pracovníky byly práce realizovány v úzké součinnosti. V podzemí se práce soustředily na oblast 12. patra v prostoru cca 150 m východně od jámy R-7S na dopravním ochozu PŠ1-123, tj. cca 550 m pod zemským povrchem.

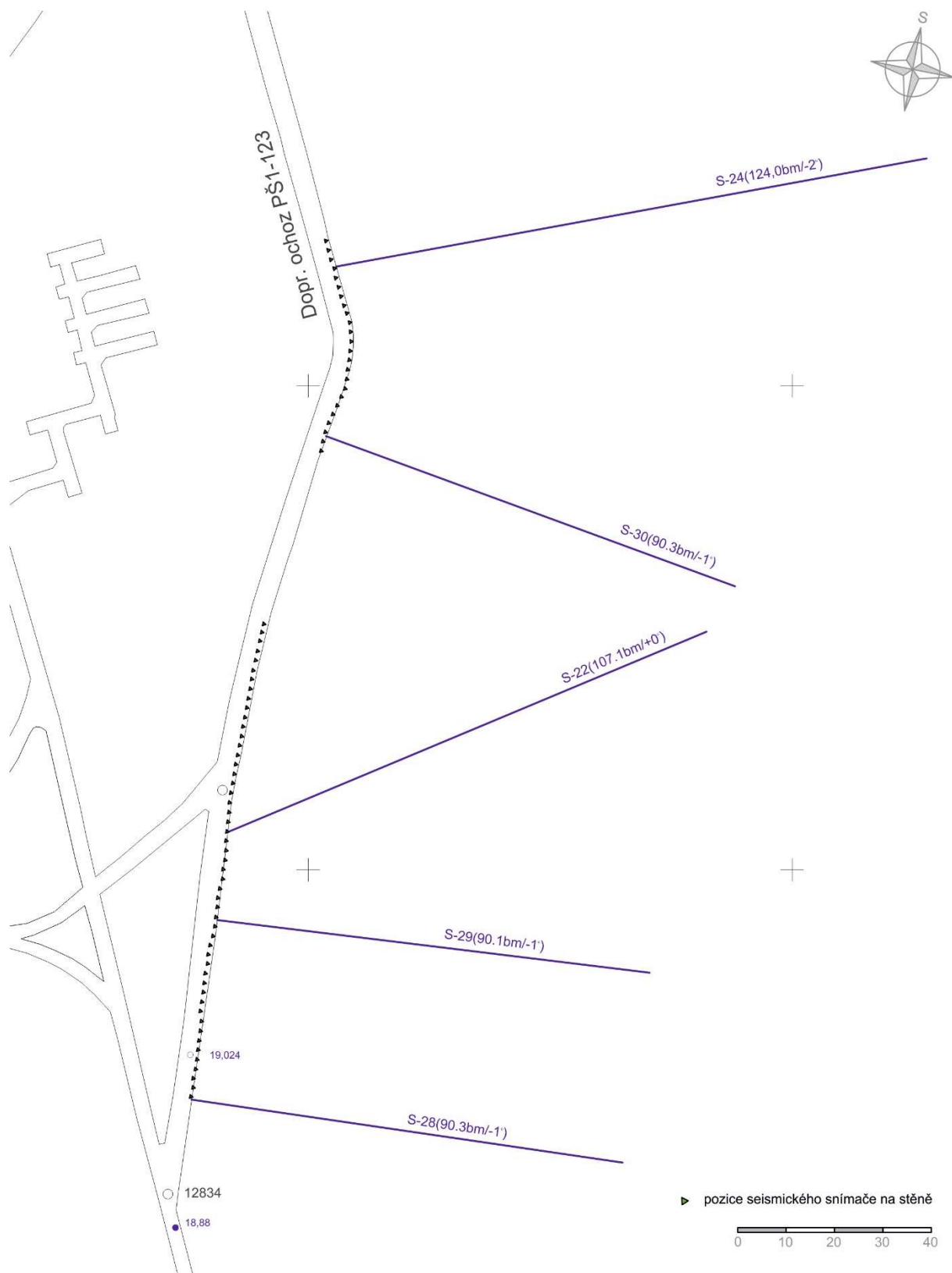
Základní informace o geologické stavbě čerpají z práce Patočka a Jaroš (2018). Studovaná lokalita je z regionálně-geologického pohledu umístěna v horninách gföhlské jednotky moldanubika, v jehož horninovém složení vystupují především cordierit-biotitové a amfibol-biotitové pararuly v různém stupni migmatitizace. Tyto horniny obsahují polohy pestrých horninových vložek amfibolitů, mramorů, erlánů a skarnů. Při východním okraji této jednotky, v oblasti styku se svrateckým krystalinikem, pak vystupuje rozsáhlejší těleso světlých granulitů a polohy serpentinizovaných peridotitů a ortorulových hornin.

Uvažovaný horninový blok je tvořen monotónním metamorfovaným vulkanosedimentárním komplexem, konkrétně jemnozrnnými migmatitizovanými amfibol-biotitovými pararulami, hrubozrnnými amfibolbiotitovými stromatitickými migmatity s vložkami amfibolitů (Obr. 1). Ze struktur křehké tektoniky jsou přítomné výrazné puklinové systémy a zlomy směru SZ-JV a SV-JZ. Na 12. patře se nachází hlavní rudonosná zóna R-1 cca 100 – 150 m západně od spojovacího překopu PŠ1-123 (vztaheno k místu průzkumných tomografických prací).



-  jemně až středně zrnitá, slabě až středně migmatitizovaná biotitová až biotit-amfibolová pararula
-  jemně až středně zrnitý, slabě až středně migmatitizovaný (biotitový) amfibolit
-  středně až hrubě zrnitý migmatit
-  metaultrabazikum
-  jemnozrný erlán-amfibolitový stromatit
-  struktura 1. řádu (kataklazovaná až mylonitizovaná struktura o mocnosti 5-15 m)
-  struktura 2. řádu (kataklazovaná struktura o mocnosti 2-5 m)
-  struktura 3. řádu (struktura o mocnosti 20 cm až 2 m s možnými stopami kataklázy)

Obr. 1 Pozice průzkumných jádrových vrtů v geologické mapě podle Patočka a Jaroš (2018), výřez



Obr. 2 Situace průzkumných vrtů použitých pro tomografická měření (stav k 11/2020) a pozice snímačů na stěně Dopravního ochozu PŠ-123

Pilotní horizontální vrty se nachází ve východní stěně uvedené chodby (Obr. 2). Zájmový horninový blok je vymezen sondami S-24 (v místě budoucí chodby L4a) a S-28 v pozici

plánované osy chodby L8. Celkem bylo pro seismická tomografická měření využito 5 vrtů, mimo 2 krajní uvedené vrty měření proběhlo ve vrtech S-29 (osa chodby L7), S-30 (osa chodby L5) a S-22 (průzkumná sonda vedená ve směru k SV mimo pozici plánovaných chodeb).

Základní údaje o průzkumných sondách, které byly využity k tomografickým měřením, jsou uvedeny v Tab. 1. Shrnutí geologických informací a jejich interpretaci podává již zmíněná práce Patočka a Jaroš (2018).

Tab. 1 Základní údaje o průzkumných sondách (podle Patočka a Jaroš, 2018 - výběr, upraveno)

| index vrtu | datum zahájení | datum ukončení | X | Y | Z | délka vrtu (m) | směr vrtu (°) | sklon vrtu (°) | průměr vrtu (mm) | druh vrtu |
|------------|----------------|----------------|-----------|----------|------|----------------|---------------|----------------|------------------|-----------|
| S-22 | V.17 | XII.17 | 1127892.2 | 622716.5 | 19.5 | 107.1 | 68 | 0 | 76 | jádro |
| S-24 | I.18 | III.18 | 1127773.6 | 622694.7 | 18.4 | 124.0 | 80 | -2 | 76 | jádro |
| S-28 | VIII.20 | IX.20 | 1127947.5 | 622724.1 | 20.2 | 90.3 | 98 | -1 | 76 | jádro |
| S-29 | IX.20 | X.20 | 1127910.4 | 622718.8 | 20.0 | 90.1 | 97 | -1 | 76 | jádro |
| S-30 | X.20 | XI.20 | 1127810.4 | 622696.3 | 18.9 | 90.3 | 110 | -1 | 76 | jádro |



Obr. 3 Okolí vrtu S-22

2 Postup řešení projektu

2.1 Terénní práce

Termíny prací byly stanoveny v úzké návaznosti na realizaci vrtných prací ze strany DIAMO, s.p., přičemž vlastní seismická tomografická měření bylo možné provádět až po odvrtání horizontálních vrtů S-30 (L5), S-29 (L7) a S-28 (L8). Vlastní měření v prostoru 12. patra dolu Rožná bezprostředně navázalo na dokončení vrtných prací. Zahájení tomografického měření v podzemí proběhlo na vyzvu zadavatele 10. listopadu 2020. Terénní práce pak pokračovaly do 22. prosince 2020. Všechny práce v podzemí probíhaly v součinnosti se zaměstnanci DIAMO, s.p., o.z. GEAM a za respektování všech předpisů pro provoz podzemního pracoviště.

2.1.1 Použité metody průzkumu

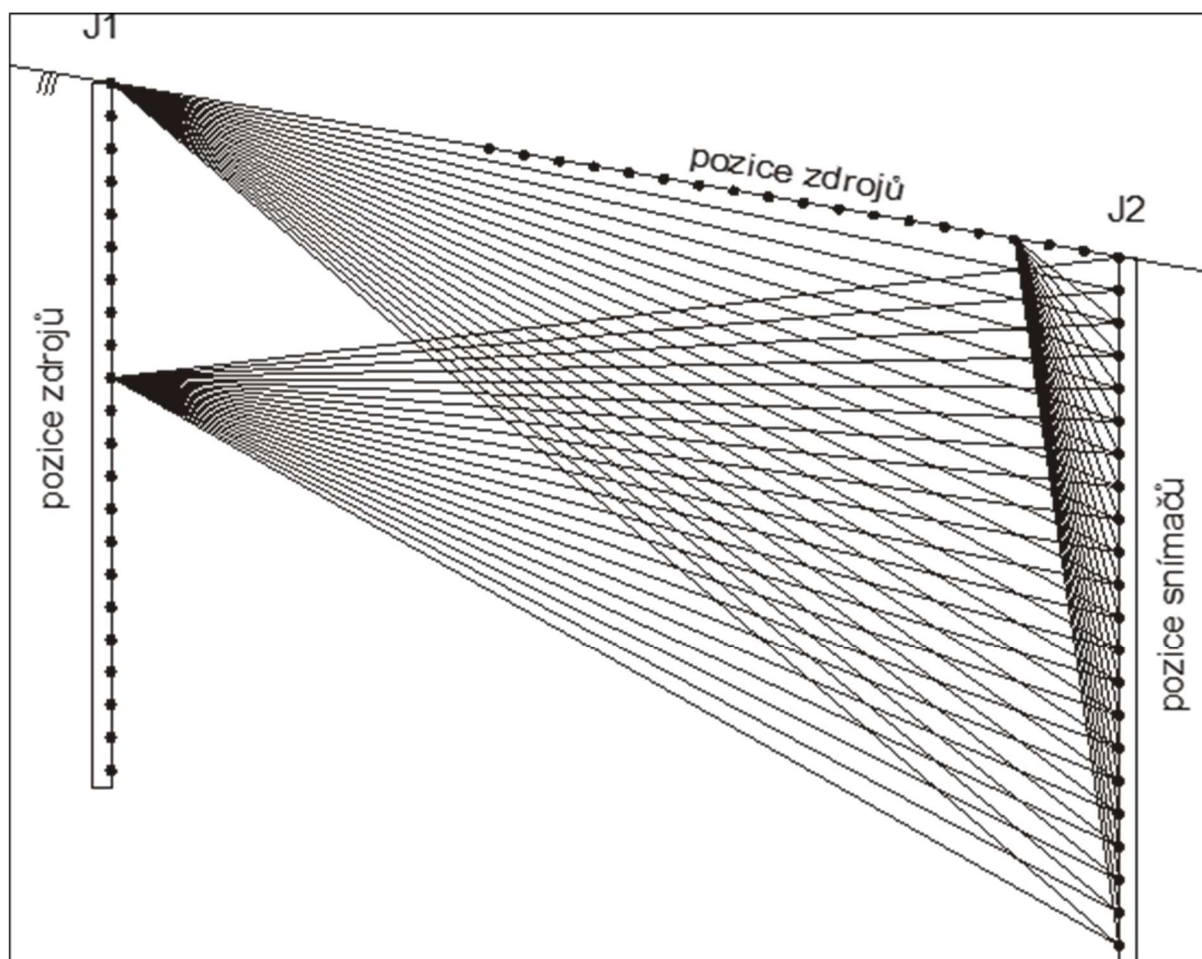
Hlavní průzkumnou metodou pro zkoumání charakteru horninového bloku v prostoru vymezeném průzkumnými horizontálními vrty byla seismická tomografie. V tomto případě byla využita tato metoda ve variantě sledování a následném zpracování časů průchodu mezi prostorově definovaným zdrojem signálu a přijímačem.

Během průzkumných prací bylo měřeno v několika konfiguracích: mezi dvěma vrty nebo mezi vrtem a stěnou chodby (obecné schéma měření viz. Obr. 4). Použitá modifikace metody sleduje rozložení rychlostí šíření seismických vln v horninovém prostředí v prostoru řezu vymezeném liniemi seismických zdrojů a snímačů.

Ve variantě seismického prosvěcování mezi vrty je jeden z použité dvojice měřících vrtů osazen hydrofony s krokem 1 m nebo seismickou sondou se snímači s krokem 0,5 m, druhý vrt je osazen zdrojem spouštěným s krokem 1 – 2 m. Posuzovaná rovina řezu je vymezena oběma vrty. Takový způsob měření byl použit při tomografických měřeních mezi horizontálními vrty S-29 (L7) – S-28 (L8), S-29 (L7) – S-22, S-30 (L5) – S-22, S-30 (L5) – S-29 (L7) a S-22 – S-30 (L5).

Další konfigurací pro seismickou tomografii je měření mezi vrtem a stěnou chodby (obecně povrchem). Obecně je buď ve vrtu umístěn seismický snímač a buzení energie probíhá na stěně nebo je použita obrácená konfigurace – zdroj ve vrtu a snímač na stěně. Pro prezentovaný průzkum byla využita druhá možnost – zdroj ve vrtu a snímače na stěně horního díla. Pro tento způsob měření byly využity všechny průzkumné vrty.

Stěna důlní chodby byla v celém zájmovém prostoru (tj. mezi vrty L8 a S24) proměřena také povrchovou variantou – refrakční seismickou tomografií. V této modifikaci jsou zdroj energie (úderník) i snímače (geofony) umístěny na stěně výrubu. Hlavním cílem tohoto měření je získat co nejvíce informací o distribuci seismických rychlostí v blízkém okolí stěny chodby. V tomto prostoru, kde je hornina mechanicky narušená ražbou, jsou seismické rychlosti výrazně snižené oproti zbytku masivu. Znalost rozložení rychlostního pole v této části posuzovaného bloku je velmi vhodná pro stanovení okrajové podmínky pro zpracování ostatních měření prováděných v „klasické“ tomografické konfiguraci.



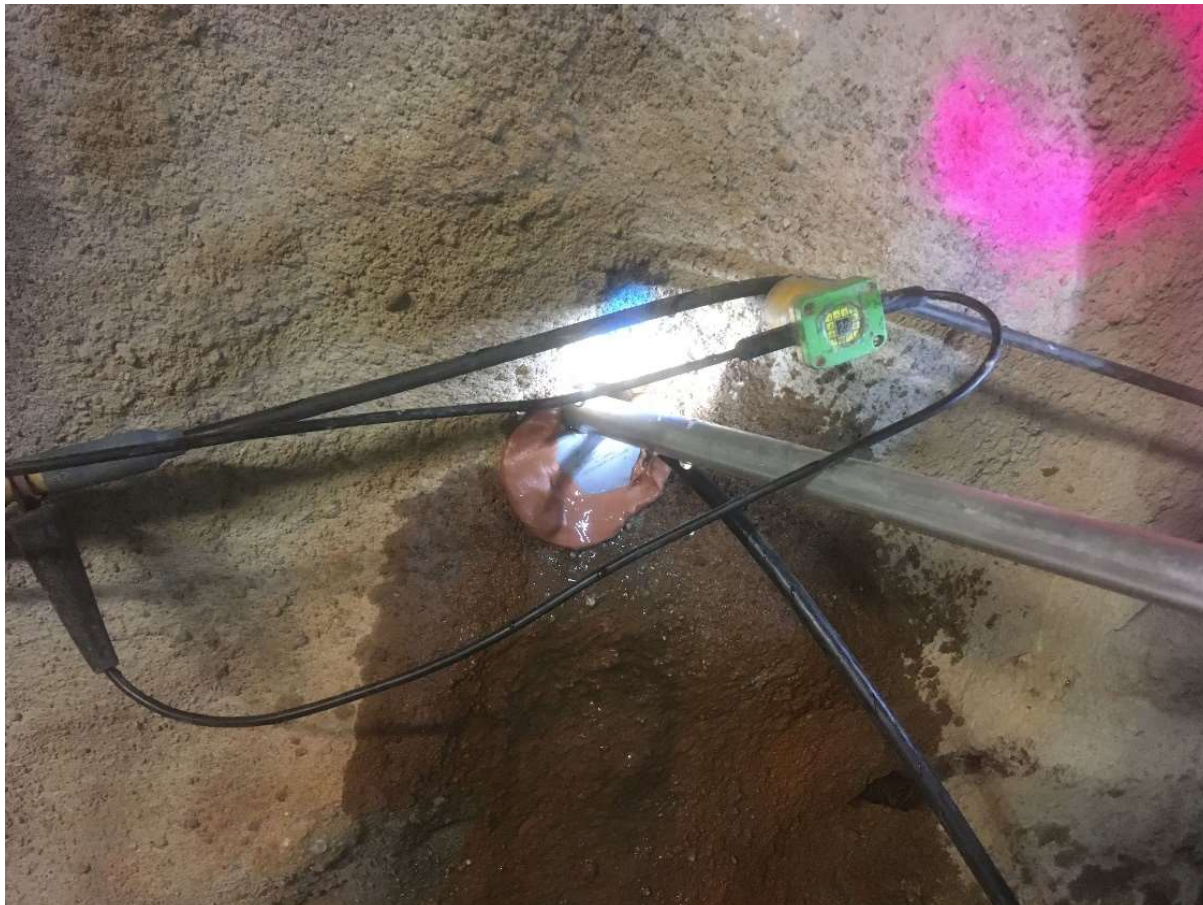
Obr. 4 Příklad uspořádání seismického tomografického měření v systému vrt – vrt (mezi vrty J1 a J2) a vrt – povrch (mezi vrtem J2 a povrchem)

2.1.2 Přístrojové vybavení

Průzkum byl proveden s následujícím technickým vybavením:

- seismograf Terraloc PRO – 48 kanálů, registrace signálu ze snímačů ve vrtu (sonda SSI-8) a ze snímačů na stěně štoly - geofonů (výrobce ABEM, Švédsko);
- seismograf Terraloc MK6 – 24 kanálů, registrace signálu registrovaného hydrofony ve vrtech a ze snímačů sondy sondy SSI-4 ve vrtu (výrobce ABEM, Švédsko);
- snímače rychlosti kmitání (geofony) osazené elementy SM-11 (Sensor, Holandsko) o vlastní frekvenci 30 Hz schopnými registrovat v libovolné poloze měřícího elementu (stěny štoly);
- vrtná sonda vlastní konstrukce SSI-8 osazená osmi trojosými snímači rychlosti kmitání s měřícími elementy OMNI-2400 (15 Hz) s krokem 0,5 m;
- vrtná sonda vlastní konstrukce SSI-4 osazená osmi trojosými snímači rychlosti kmitání s měřícími elementy OMNI-2400 (15 Hz) s krokem 0,5 m;
- řetězec hydrofonů BHC4 s 24 snímači osazenými elementy AQ2000 s frekvenčním rozsahem 1–10 000 Hz, vzdálenost snímačů 1 m (výrobce Geotomographie GmbH, Německo);
- elektrodynamický vrtný seismický zdroj BIS-SH s pulsním generátorem IPG5000 (Geotomographie GmbH, Německo);

- pulsní elektrický vrtný zdroj SBS42 (sparker) s pulsním generátorem IPG5000 (Geotomographie GmbH, Německo);
- jako seismický zdroj na stěně důlní chodby byly použity údery 1 kg úderníku do ocelové podložky.



Obr. 5 Snímač SM11 na stěně chodby u vrtu S-29

2.2 Zpracování naměřených dat

Úprava a zpracování seismických tomografických dat, včetně matematických výpočtů rychlostního pole byly provedeny v programovém prostředí ReflexW (Sandmeier Geophysical Research, Německo). Program obsahuje několik programových modulů, z nichž byly využity zejména modul pro 2D zpracování a editaci signálů a modul pro modelování, tomografii a rekonstrukci tras seismických paprsků.

2.2.1 Prvotní úprava seismických tras

Terénní záznamy ze seismických tomografických měření jsou v úvodní fázi upravovány v několika krocích:

- prvotní editace, případné opravy v záhlaví stop nebo celých záznamů;
- rozřazení seismických tras do logických celků;

- přiřazení prostorových souřadnic jednotlivým seismickým trasám;
- úprava signálu, filtrace, vyrovnání amplitud.

Datové soubory se seismickými záznamy obsahují časové záznamy rychlosti kmitání na jednotlivých použitých snímačích. Každému snímači je přiřazena jedna seismická stopa. Jeden záznam obsahuje obvykle více takových stop, maximální počet je omezen použitou aparaturou (zde 24 stop pro Terraloc Mk6 nebo 48 stop pro Terraloc PRO). Neupravený terénní záznam je ve formátu tzv. „shot gather“, tedy s jednou pozicí zdroje (výbuchu) společnou pro více zobrazených tras odpovídajících jednotlivým snímačům. Pro zpracování tomografických dat je někdy výhodnější použití tzv. „receiver gather“, tedy takového zobrazení, ve kterém jsou řazeny trasy tak, že každá z nich má vždy stejnou pozici přijímače a různou pozici zdroje. Aby bylo možné toto zobrazení získat, je potřeba, aby každá seismická stopa byla ve svém záhlaví unikátně identifikována označením pozice zdroje i snímače. Příklad takového řazení seismických stop ukazuje Obr. 5.

Skutečné prostorové souřadnice všech použitých pozic zdrojů a přijímačů jsou nezbytné pro korektní výpočet rychlostí šíření seismických vln. Jednotlivé průzkumné vrty byly geodeticky zaměřeny pracovníky DIAMO s.p., a to včetně směru a sklonu vrtů. Zaměřeny byly také pozice geofonů na stěně chodby PŠ1-123. Pro vlastní výpočet byla pro zjednodušení použita lokální souřadná soustava, která vznikla posunutím počátku globálních souřadnic JTSK do pozice ústí sondy S-28 (viz. Tab. 1).

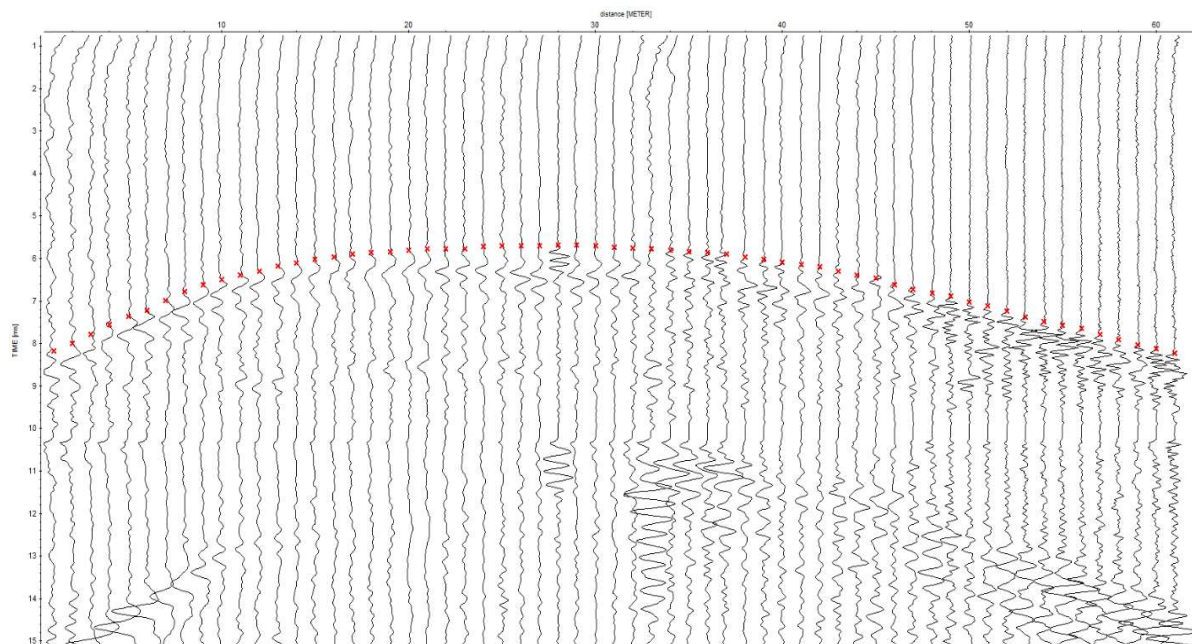
Úprava seismického signálu obvykle zahrnuje standardní 1D procesy. Zejména byly použity následující kroky:

- odstranění DC složky;
- frekvenční filtrace - pásmová propust;
- normalizace amplitud;
- zesílení užitečné části signálu (window gain).

Cílem těchto úprav je zlepšení poměru signál/šum na jednotlivých stopách a zvýraznění té části záznamu, ve které je registrován čas prvního nasazení - tedy příchodu užitečného signálu ze zdroje do přijímače.

2.2.2 Odečtení času prvních nasazení

Upravené a filtrované signály postupují do další, klíčové fáze zpracování naměřených dat. Vyhodnocovanou veličinou je čas příchodu procházející podélné či příčné vlny na dráze od zdroje k přijímači, které jsou umístěny ve známých pozicích ve 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. Tento soubor je ukládán textovém formátu, kde každý řádek obsahuje prostorové souřadnice zdroje, prostorové souřadnice přijímače a odečtený čas příchodu signálu ze zdroje do přijímače. Celkem bylo v rámci popisované úlohy použito téměř 30 tisíc časů v různých kombinacích zdrojů a přijímačů.



Obr. 6 Příklad seismického záznamu mezi vrtů S-28 a S-29 s vyznačením časů prvních nasazení

2.2.3 Tomografické zpracování souboru odečtených časů

Datový soubor odečtených časů příchodů mezi jednoznačně umístěným vysílačem a přijímačem je vstupem pro finální část zpracování - tomografický výpočet rozložení rychlostí šíření seismických vln.

Vlastní výpočet je prováděn metodou SIRT - Simultaneous Iterative Reconstruction Technique (např. Jackson and Tweeton, 1996 nebo Karadeniz a Weber, 2018), což je obecná metoda používaná pro řešení tomografických úloh nejen v geofyzice - původně byla navržena pro zpracování tomografie v lékařské diagnostice. Výhodou metody SIRT je relativně malý počet iterací nutný ke konvergenci výpočtu, menší náročnost na kapacitu paměti, lepší chování v extrémních situacích (nerovnoměrná distribuce dat, nekompletní data apod.). Výpočet rychlostního pole určuje hodnoty rychlosti v uzlových bodech, které tvoří pravoúhloú síť (grid), body vymezují výpočtové plošky nebo objemy. Hodnoty rychlosti jsou určovány v uzlových bodech a interpolovány mezi nimi v ploškách. Cílem výpočtu je upravit vstupní rychlostní model pomocí cyklického opakování tří kroků:

- 1) Ze startovního modelu jsou vypočteny syntetické časy průchodu;
- 2) Soubor syntetických časů je porovnán s časy skutečnými (odečtenými z upravených seismických záznamů) a na základě rozdílů mezi syntetickými a reálnými časovými soubory je vypočtena matice koeficientů pro úpravu vstupního modelu;
- 3) Vypočtené korekce jsou aplikovány na vstupní model. Upravený model je použit pro další iteraci výpočtu dle bodu 1.

Výpočet syntetických časů průchodu, který je součástí lze provádět v zásadě dvěma způsoby. Aproximující předpoklad přímé dráhy paprsků mezi zdroje a přijímačem umožňuje velmi rychlý výpočet, jeho spolehlivost ale významně klesá v prostředí charakterizovaném větší variabilitou rychlostí šíření seismických vln. Naproti tomu použití paprsků se zakřivenou dráhou rapidně prodlužuje čas výpočtu úlohy, ale výsledek je přesnější, zvláště v rychlostně kontrastním

prostředí. Použitý programový balík ReflexW umožňuje použití obou způsobů, možná je také jejich kombinace. Dále je možné již při výpočtu zadat zhlazování (průměrování) rychlostního gridu a také použít tzv. „beam“ (svazek), kdy seismický paprsek ovlivňuje nejen ty buňky, kterými prochází, ale i buňky sousední.

Vlastní tomografický výpočet byl proveden v síti 1x1 m při použití zakřivených drah seismických paprsků pro výpočet syntetických časů. Vstupní model byl sestaven na základě průběhu stěny důlní chodby a dle geometrie jednotlivých použitých vrtů. Podél stěny byla zadána oblast se strmým gradientem rychlosti, místa s dokumentovaným významným snížením kvality jádra (podle indexu RQD) byla ve vstupním modelu také zohledněna. Mimo uvedené oblasti byla do startovacího modelu použita konstantní rychlost šíření seismických vln 5800 m.s.^{-1} . Dobrá shoda, hodnocená podle rozdílů měřených (skutečných) a syntetických časů byla dosažena obvykle po 7 – 10 iteracích, další opakování cyklu již nepřineslo zlepšení.

Výsledkem tomografického výpočtu je přiřazení hodnoty seismické rychlosti ke každému uzlovému bodu výpočtového gridu, který je v rovině výpočtu určen souřadnicemi [X,Y]. Soubor rychlostí je spolu se souřadnicemi exportován jako ASCII GRD soubor a následně je zpracován (zobrazen) v programovém prostředí Surfer (Golden Software).

3 Výsledky průzkumu

Výstupem tomografického zpracování souboru časů průběhu seismických paprsků mezi zdrojem a přijímačem je rychlostní pole, které je definováno hodnotami v každém uzlovém bodě výpočtové sítě. Toto je vykresleno ve formě mapy izolinií s krokem po $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ v programovém prostředí Surfer (Golden Software) a je prezentováno na obrázku Obr. 7 a v grafické příloze 2 (1:500).

Hodnoty seismických rychlostí se ve sledovaném skalním masivu pohybují v rozmezí $5400 - 6300 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. V okrajové části v blízkosti stěny chodby se samozřejmě objevují i nižší rychlosti, což je důsledkem mechanického narušení horniny vlivem ražby. S ohledem na výsledky získané při obdobných tomografických průzkumech v prostředí dolu Rožná (Bukovská et al. 2020) lze za neporušenou nebo slabě porušenou považovat horninu, ve které se seismické rychlosti pohybují nad $5800 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. S intenzitou porušení seismické rychlosti klesají, oblasti mírně porušené lze charakterizovat rychlostmi $5300 - 5800 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, porušení střední intenzity pak charakterizují rychlosti v rozmezí $4800 - 5300 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Intenzivně narušené horniny v blízkém okolí struktur I. řádu vykazuje hodnoty seismických rychlostí v rozmezí $4300 - 4800 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, v rámci poruchové zóny lze pozorovat rychlosti šíření seismických vln v hodnotách $3500 - 4300 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Uvedené intervaly a jejich označení stupněm porušení jsou ovšem relativní, platné pro danou lokalitu. Jedná se (mimo významné poruchové zóny) o neztvrdělé horniny v hloubce více než 500 m pod povrchem. Porušení je tak ovlivněno především četností diskontinuit.

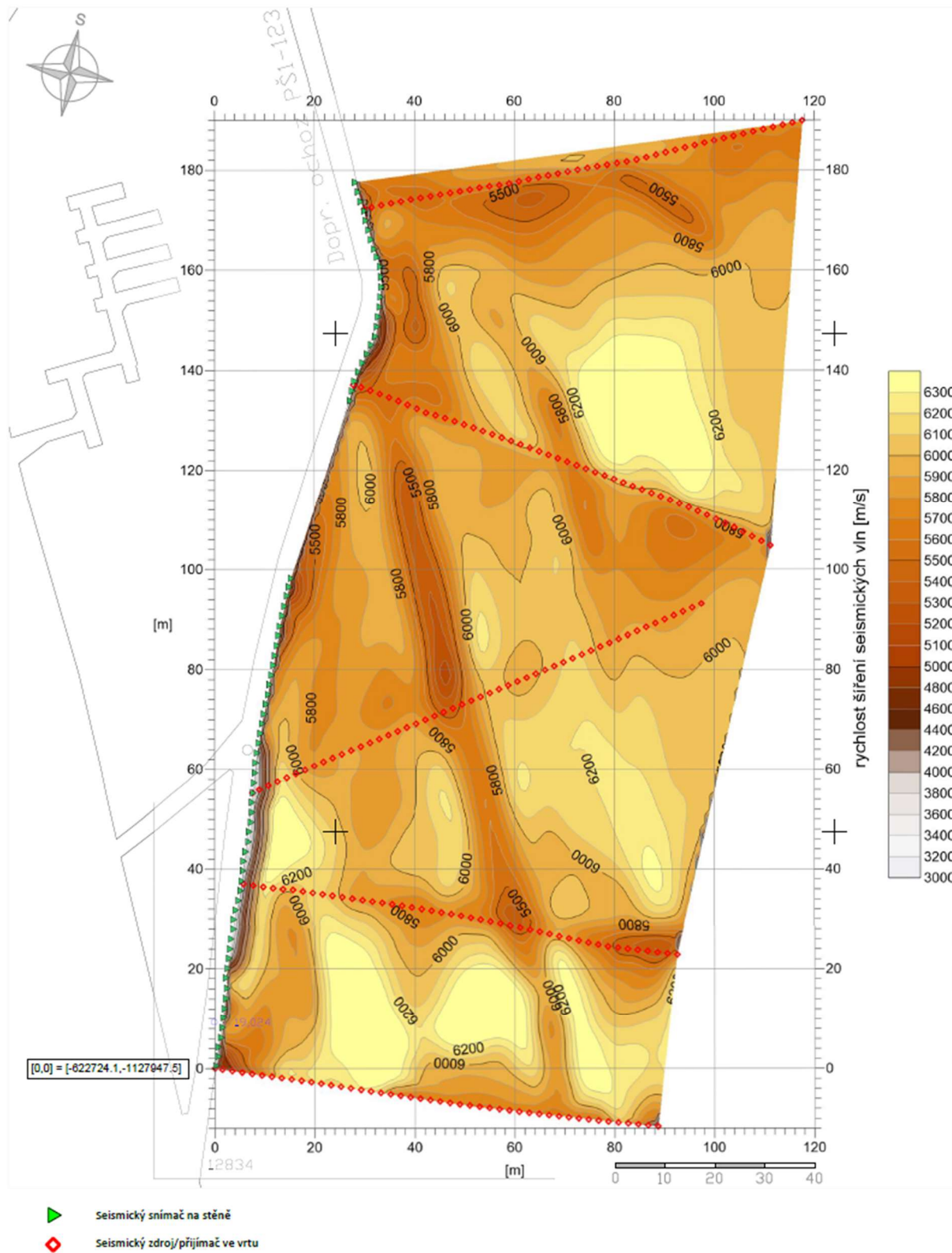
Na základě hodnot seismických rychlostí je zkoumané prostředí rozděleno na bloky neporušené nebo slabě porušené horniny s převažující střední vzdáleností diskontinuit ($600 - 200 \text{ mm}$ dle ČSN EN ISO 14689) a na bloky mírně až středně porušené, kde předpokládáme vzdálenost diskontinuit malou ($60 - 200 \text{ mm}$ dle ČSN EN ISO 14689). Výsledné interpretační schéma je prezentováno na obrázku Obr. 8 a v grafické příloze 3. Vzdálenost diskontinuit a jejich charakter (výplň, rozevření) jsou v rámci sledovaného bloku hornin více určující pro hodnoty seismických rychlostí než typ horniny. Pro všechny horninové typy, které se ve sledovaném prostoru objevují, jsou uváděny hodnoty rychlostí v rozmezích obvykle od $4500 - 6500 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, která se vzájemně překrývají. Určení horninového typu je proto nemožné.

V rámci sledovaného prostoru bylo vymezeno celkem 5 oblastí snížených seismických rychlostí, které jsou interpretovány jako bloky s přítomností mírně až středně porušené horniny se vzdáleností diskontinuit v prvních jednotkách decimetrů (mírné porušení) až v centimetrech (střední porušení). Bloky jsou pro přehlednost označeny písmeny A až E, oblast B je navíc rozdělena na dvě dílčí části. (viz. Obr. 8).

Oblast s označením A je protažená ve směru SSZ-JJV, na severním okraji navazuje prakticky v blízkosti stěny chodby na oblast B1. Seismické rychlosti klesají v některých úsecích bloku pod $5300 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, což ukazuje na středně porušené horniny s malou vzdáleností diskontinuit. Dominují však horniny mírně porušené.

V severní části sledovaného horninového bloku je vymezena oblast částečně porušených hornin s označením B. Ta je dále rozdělena na dvě dílčí části – oblast B1, která leží v širším okolí stěny dopravního ochozu PŠ1-123, částečně tak je porušení hornin v západním okraji způsobené ražbou (EDZ). Druhá část – B2 – leží při severním okraji sledované plochy, který vymezuje pozice vrtu S-24. Lokálně v rámci oblasti B klesají seismické rychlosti k hodnotám

blízkým $5300 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, což indikuje přítomnost hornin se středním porušením. Pro většinu oblastí B však hodnoty rychlostí ukazují na mírně porušené horniny.



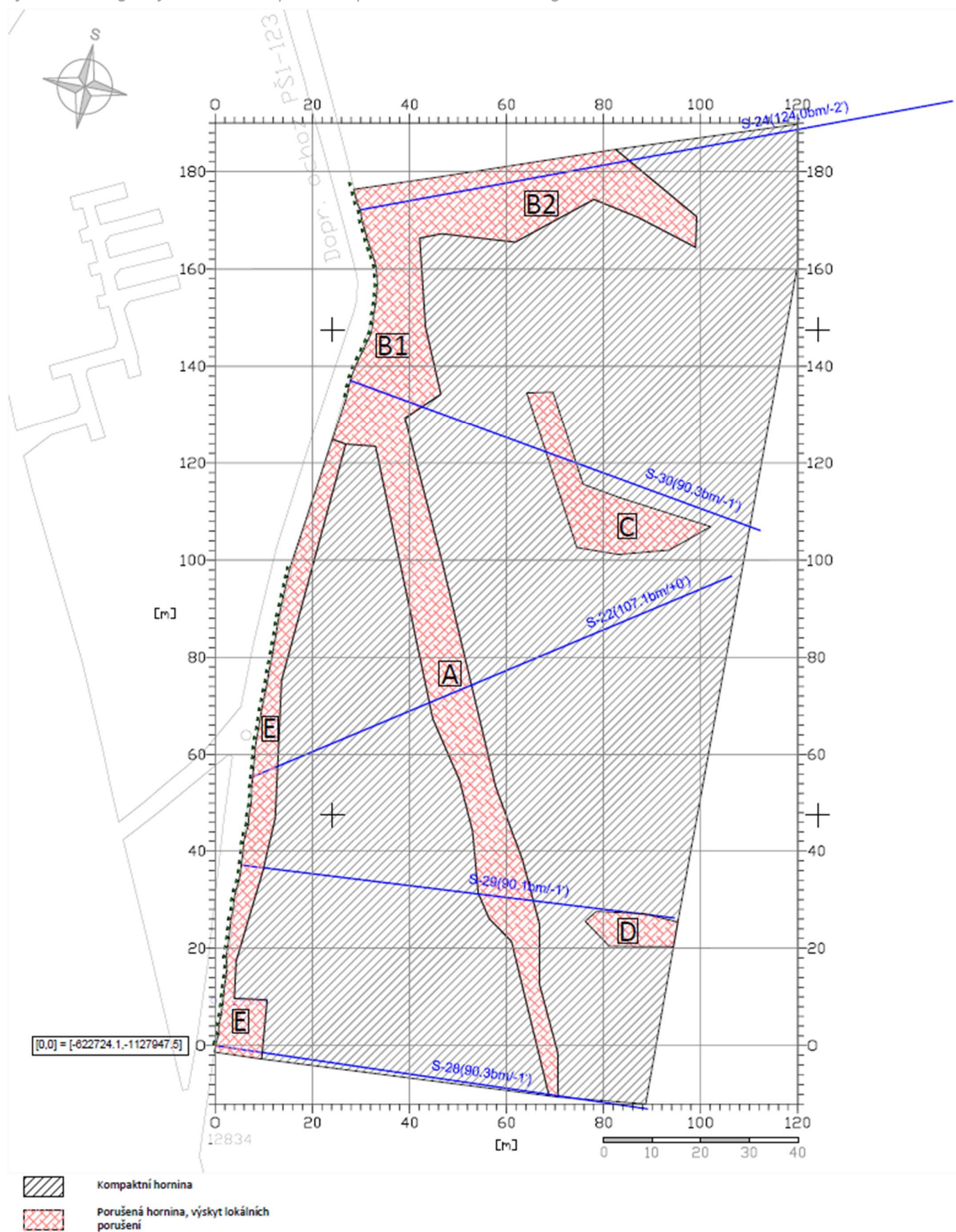
Obr. 7 Výsledek tomografického zpracování, rychlostní pole

Oblast s označením C leží zejména v prostoru jižně od vzdálenější části vrtu S-30. Hodnoty rychlostí neklesají pod $5300 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, středně porušené horniny v tomto prostoru se nevyskytují vůbec nebo jen velmi omezeně.

Plošně nejmenší je indikace s označením D, které je lokalizována u dna vrtu S-29. Pokles seismických rychlostí je lokálně k hodnotám pod $5400 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, což indikuje možnou ojedinělou přítomnost středně porušené horniny.

Oblast s označením E pokrývá okraj sledovaného bloku v blízkosti západní stěny výrubu chodby PŠ1-123. Pokles seismických rychlostí je v této oblasti způsoben zejména hornickou činností.

Spolehlivost stanovení hodnot seismických rychlostí tomografickým zpracováním je ovlivněna několika faktory (prostorové uspořádání pozic zdrojů a přijímačů, anizotropie horninového prostředí, pokrytí výpočtových elementů paprskovými dráhami). V některých částech modelu není možné dostatečné pokrytí seismickými paprsky (v okrajových částech sledovaného bloku, zejména ve východní části u konců průzkumných vrtů). Anizotropie seismických rychlostí je v daném prostředí poměrně významná, (v rámci předchozích výzkumných projektů byla provedena řada laboratorních měření zabývajících se rychlostmi šíření elastických vln signálu ve vzorcích hornin z prostoru dolu Rožná, (např. Bukovská 2017, Bukovská et al. 2020). Vliv anizotropie na výsledky tomografického výpočtu je komplikovaný, závisí zejména na vzájemné orientaci směru převládajících seismických paprsků k hlavním směrům anizotropie ve výpočtové buňce.



Obr. 8 Blokové interpretační schéma

4 Závěr

Detailní měření metodou seismické tomografie sledovalo horninový blok vymezený průzkumnými vrty S-30 (na jihu) a S-24 (na severu) v prostoru 12. patra dolu Rožná I východně od jámy R7S. Cílem bylo posouzení geomechanického stavu přítomných hornin na základě zjištěných rychlostí šíření podélných seismických vln. V zájmovém prostoru je plánováno rozšíření PVP Bukov, které provozuje SÚRAO.

Vyhodnocení tomografických měření a jejich interpretace ukázaly na relativně málo porušené horninové prostředí s převažující střední vzdáleností diskontinuit, charakterizované hodnotami seismických rychlostí nad 5800 m.s^{-1} . V některých úsecích sledovaného horninového bloku jsou patrné rychlosti nižší, pohybující se v intervalu $5300 - 5800 \text{ m.s}^{-1}$, velmi ojediněle i méně. V těchto částech sledovaného bloku jsou vymezeny výskyty mírně porušených hornin s malou vzdáleností diskontinuit, lokálně se ale objevují v místech výrazně snížených rychlostí také středně porušené horniny, u kterých lze očekávat velmi malou vzdálenost diskontinuit. Horninové prostředí v blízkém okolí východní stěny chodby PŠ1-123 je narušené zejména vlivem hornické činnosti.

Výsledné blokové interpretační schéma, sestavené na základě vypočtených rychlostí seismických podélných vln, podává zjednodušenou představu o vnitřní stavbě sledovaného horninového bloku. Spolu s dalšími poznatky může být využito při plánování umístění zkušebních komor realizovaných v rámci rozšíření PVP Bukov, II. Etapa.

Reference

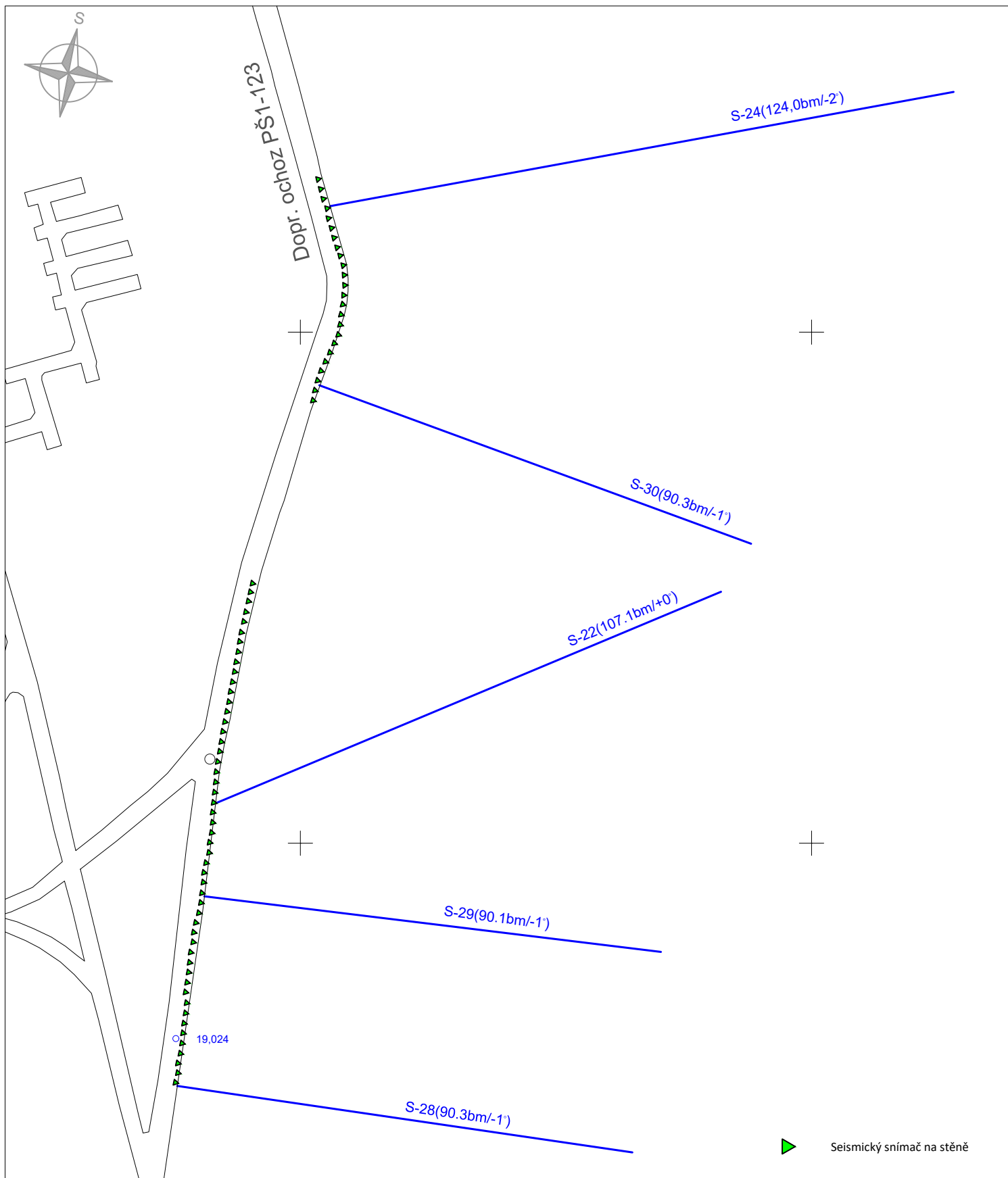
Knihy, články, mapy kapitoly:


- BARTON N. (2009): Rock Quality, Seismic Velocity, Attenuation and Anisotropy. DOI 10.1201/9780203964453, Taylor & Francis/UK.
- BUKOVSKÁ Z., VERNER K., BURIÁNEK D., DOBEŠ P., DUDÍKOVÁ SCHULMANNOVÁ B., ERBAN V., FRANĚK J., HALODOVÁ P., HOLEČEK J., JAČKOVÁ I., JELÉNEK J., KOPAČKOVÁ V., KOUCKÁ L., LAUFEK F., LNĚNIČKOVÁ Z., KOČERGINA J., MYŠKA O., NAHODILOVÁ R., PERTOLDOVÁ J., RUKAVIČKOVÁ L., SOEJONO I., ŠVAGERA O., VESELOVSKÝ F. (2017): Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov – závěrečná zpráva. – TZ 191/2017, Archiv SÚRAO
- BUKOVSKÁ Z., ŠVAGERA O., CHABR T., LEICHMANN J., SOSNA K., SOUČEK K., VAVRO M., ZUNA M., NAVRÁTIL P., BOHDÁLEK P., BOŠKOVÁ M., DOBEŠ P., FILIPSKÝ D., FRANĚK J., GALEKOVÁ E., GEORGIOVSKÁ L., HANÁK J., HAVLOVÁ V., HLISNIKOVSKÝ K., HOLECZY D., JANKOVSKÝ F., JAROŠ, M., JELÉNEK J., JELÍNEK J., KNĚSL I., KOUCKÁ L., KRYL J., KŘÍBEK B., KUBEŠ M., KUBINA L., KUČERA R., KUKUTSCH R., LAUFEK F., MIXA P., MOZOLA J., NÁSIR M. M., PALÁT J., PATOČKA M., POŘÁDEK P., ROSENDORF T., SOEJONO I., STAŠ L., VAVRO L., VESELOVSKÝ F., VOREL J., WACLAWIK P., WERTICH V., ZAJÍCOVÁ V., ZELINKOVÁ T. (2020): Získání dat z hlubokých horizontů dolu Rožná – závěrečná zpráva. – TZ 464/2020, Archiv SÚRAO
- JACKSON M. J., TWEETON D. F. (1996): 3DTOM: Three-Dimensional Geophysical Tomography, Report of Investigations 9617, U.S. Department of the Interior, Bureau of Mines.
- KARADENIZ, M. F., WEBER, G. W. (2018): Iterative Methods for Tomography Problems: Implementation to a Cross-well Tomography problem, 4th International Conference on Operational Research (InteriOR).
- PATOČKA M, JAROŠ M. (2018): Vrtný průzkum PVP Bukov etapa II, Interpretace geologické dokumentace vrtů s-22, s-23, s-24, s-25 a s-26, Technická zpráva 225/2018, DIAMO s.p., odštěpný závod GEAM.
- SANDMEIER K. J. (2021), REFLEXW Manual, version 9.5, www.sandmeier-geo.de

Technické normy a standardy:

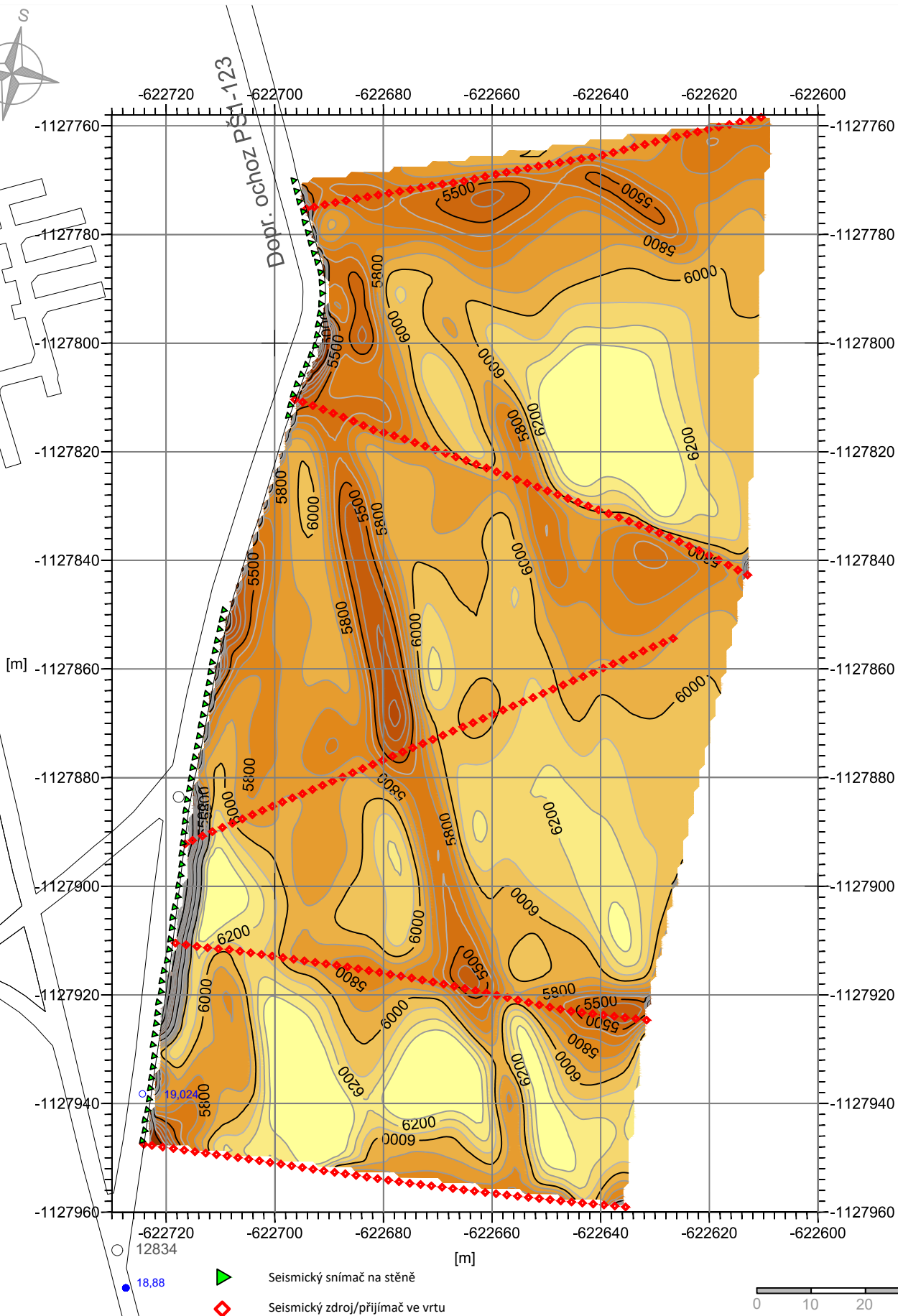
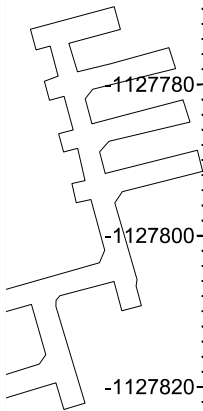
- ČSN EN ISO 14689 (ČSN 721005). *Geotechnický průzkum a zkoušení - Pojmenování, popis a klasifikace hornin*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.


Příloha 1



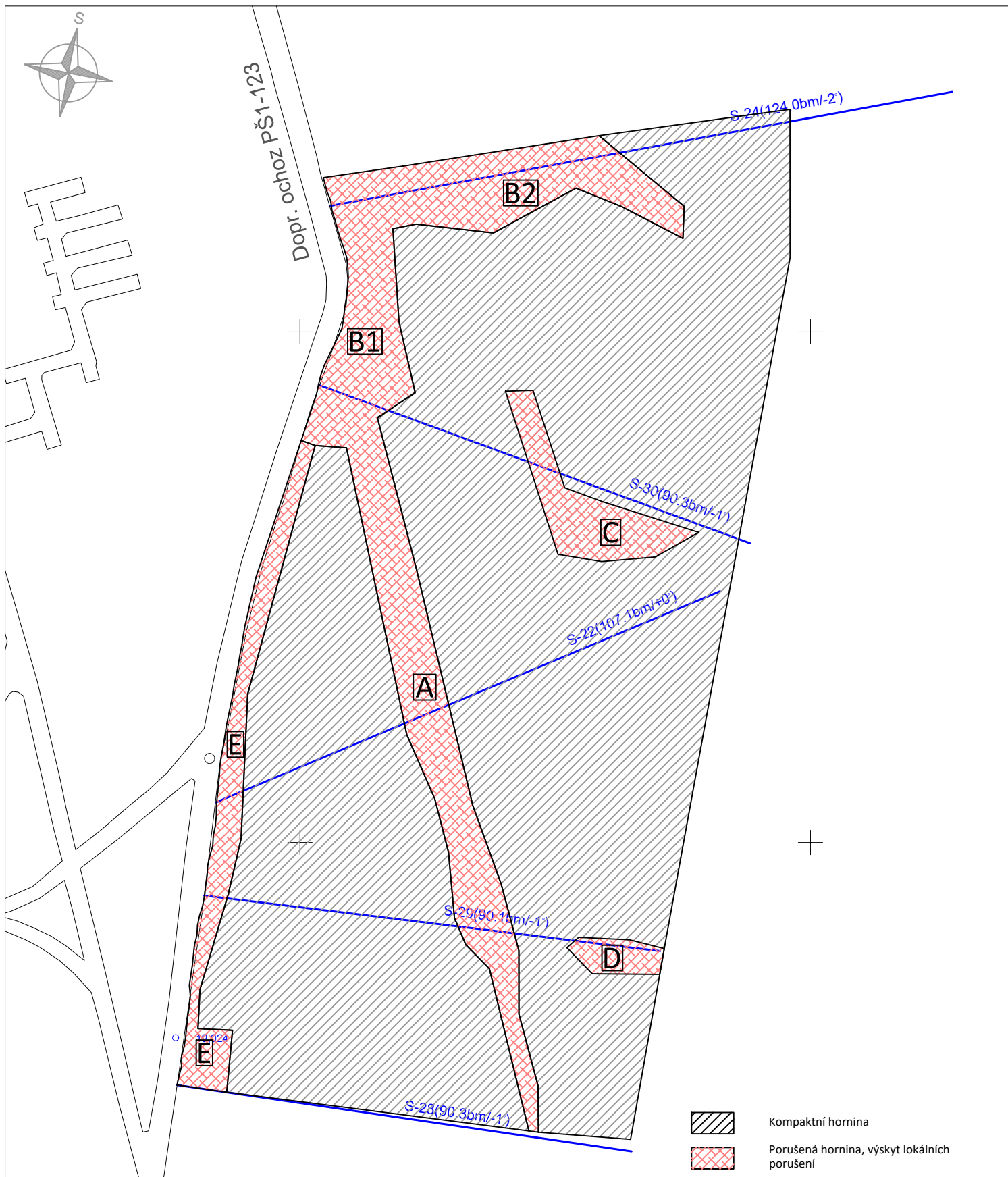
| | | | | | | |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------------|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|---|
| Č. ZAKÁZKY: | 1002 1234 000 | ÚČEL: | ZZ |  INSET s.r.o., Lucemburská 1170/7, 130 00 Praha 3 www.inset.com tel. 221 489 111 | | |
| ZPRACOVAL: | Mgr. T. Chabr | ODP. ŘEŠITEL: | Mgr. T. Chabr | | | |
| STAVBA ZAKÁZKA: | Zjištění prostorové homogenity horninového prostředí pomocí seismické tomografie | | | DATUM: | 05.2021 | |
| OBSAH PŘÍLOHY: | Situace použitých průzkumných vrtů a snímačů | | | MĚŘÍTKO: | 1:1000 | |
| | | | | | ČÍSLO PŘÍLOHY: | 1 |


Příloha 2



| | | | |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| Č. ZAKÁZKY: | 1002 1234 000 | ÚČEL: | ZZ |
| ZPRACOVAL: | Mgr. T. Chabr | ODP. ŘEŠITEL: | Mgr. T. Chabr |
| STAVBA ZAKÁZKA: | Zjištění prostorové homogenity horninového prostředí pomocí seismické tomografie | | |
| OBSAH PŘÍLOHY: | Výsledek tomografického zpracování rychlostní pole | | |
| | |  INSET s.r.o., Lucemburská 1170/7, 130 00 Praha 3 www.inset.com tel. 221 489 111 | |
| | | DATUM: | 05.2021 |
| | | MĚŘÍTKO: | 1:500 |
| | | ČÍSLO PŘÍLOHY: | 2 |

Příloha 3



| | | | | |
|-----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------------|---------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Č. ZAKÁZKY: | 1002 1234 000 | ÚČEL: | ZZ |  INSET s.r.o., Lucemburská 1170/7, 130 00 Praha 3 www.inset.com tel. 221 489 111 |
| ZPRACOVAL: | Mgr. T. Chabr | ODP. ŘEŠITEL: | Mgr. T. Chabr | |
| STAVBA ZAKÁZKA: | Zjištění prostorové homogenity horninového prostředí pomocí seismické tomografie | | | |
| OBSAH PŘÍLOHY: | Blokové interpretační schéma | | | DATUM: 05.2021 MĚŘÍTKO: 1:1000 ČÍSLO PŘÍLOHY: 3 |



SÚRAO

SPRÁVA ÚLOŽIŠŤ
RADIOAKTIVNÍCH
ODPADŮ

NAŠE
BEZPEČNÁ
BUDOUCNOST

info@suro.cz | www.suro.cz