Exploration Geophysics, Remote Sensing and Environment XXIX.1 (2022)

DOI: 10.26345/EGRSE-027-22-103

APLIKACE VRTNÉHO RADARU V PODZEMNÍCH DÍLECH

APPLICATION OF BOREHOLE RADAR IN UNDERGROUND WORKS

Bláha Pavel[1], Nedvěd Jiří[2], Štainbruch Jakub[3], Waclawik Petr[4], Kukutsch Radovan[5]

Abstrakt

Počátek používání vrtného radaru v podzemních dílech je u nás možné spojit s budováním tunelů pro metro. V tomto článku chceme ukázat možnosti jeho použití v podzemních výzkumných pracovištích. Při testování této metody jsme použili dva typy radarů a několik typů antén o frekvencích 100–500 MHz. Měření byla prováděna jak v klasické reflexní variantě, tak ve variantě prozařování (vrt-štola). Při prvním měření byly na radargramech zjištěny odrazné plochy souběžné s osou vrtu. Jejich vzdálenost od vrtu byla tak velká, že nedovolovala klasické geotechnické vysvětlení. Druhé měření ve vrtu s jiným typem aparatury mělo napomoci vysvětlení efektu souběžných rozhraní. Bohužel, ani tento pokus problém nevyřešil. Bude proto vhodné se v budoucnu touto problematikou dále zabývat.

Abstract

The first local applications of borehole radar in underground can be related to the constructions of underground tunnels. In this article, we want to show the possibilities of its use in underground research facilities. When testing this method, we used two types of radars and several types of antennas with frequencies of 100–500 MHz. Single hole and cross-hole variants of measurement were applied. During the first measurement, reflective interfaces parallel to the borehole axis were found on the radargrams. Their distance from the borehole did not allow a standard geotechnical explanation. The second measurement in a borehole with a different radar system was undertaken to help explain the effect of parallel interfaces. Unfortunately, even this attempt did not solve the problem. Therefore, it will be a task for further study.

Klíčová slova

Vrtný georadar, prozařování, porušení masivu, podzemní výzkumné pracoviště, vrtný průzkum, frakování

Keywords

borehole radar, radiation, rock mass failure, underground research facility, drilling survey, hydraulic fracturing

1. Úvod

Na rozdíl od klasických antén pro povrchová radarová měření jsou antény pro vrtný radar konstruovány tak, že je s nimi možné pracovat jednak v jednovrtné variantě (vysílací i přijímací anténa v jednom vrtu), tak i ve variantě dvouvrtné (každá anténa v jiném vrtu). Vrtní radary používají antény pracující na různých vysílacích frekvencích, což ovlivňuje výsledný dosah průzkumu za stěnu vrtu a jeho rozlišovací schopnost. Převažují georadarové systémy s všesměrnými anténami, registrujícími odrazy z celého okolí vrtu. Pouze některé speciálnější systémy se snaží používat směrové antény, umožňující směrovou orientaci detekovaného reflexu. Výstupem těchto měření je podle varianty měření obraz odrazných ploch v okolí vrtu, nebo tomografický řez zobrazující rozložení fyzikálních vlastností prostředí mezi vrty Vzhledem k tomu, že obě antény jsou při měření v horninovém masivu, dá se předpokládat, že rušení antropogenními vlivy bude menší než u měření na zemském povrchu nebo na stěně báňského díla.

Měření s vrtným radarem bylo realizováno na dvou lokalitách, v experimentální štole Josef na lokalitě Čelina a na XII. patře podzemního výzkumného pracoviště (dále i PVP) Bukov I, založeném a provozovaném Správou úložišť radioaktivního odpadu SÚRAO. Terénní měření na Josefu bylo realizováno ve spolupráci s firmou INSET, měření na Bukově pak s firmou SG Geotechnika i s firmou INSET. Výsledky měření vrtným radarem na obou lokalitách byly vyhodnoceny souhrnně, přičemž měření na lokalitě Bukov bylo uskutečněno dvěma aparaturami. Při vyhodnocování měření byly při zpracování brány v úvahu všechny dostupné informace o výsledcích dalších prací v proměřovaných vrtech, tj. bylo úzce přihlíženo k výsledkům ostatních geofyzikálních měření i geologických a geotechnických zkoumání.

2. Měření na lokalitě Čelina, experimentální štola Josef

Měření byla prováděna před a po frakování a cílem bylo zjistit, zda ve výstupním georadarovém obraze, při zachování shodných parametrů měření, budou patrny změny, ke kterým došlo v horninovém masívu během frakování. Georadarová měření byla realizována aparaturou SIR2000 s anténou TubeWave100 s 27 m dlouhým karotážním kabelem. úpadně vedeném vrtu JT1 v hloubkovém intervalu 0–25 m ve dnech 29. 6. (před frakováním) a 7. 7. 2020 (po frakování). Středy hloubkových intervalů, ve kterých bylo provedeno hydraulické štěpení horniny byly v následujících hloubkách 5,55–6,05; 12,75–13,25; 28,55–29,05 a 34,75–35,25 m. Délka frakovacích úseků byla cca jeden metr. Měření bylo prováděno v diskrétním režimu s krokem 2,5 cm. Měřený záznam měl při 512 vzorcích po 0,49 ns délku 250 ns. Staničení 0 m bylo na úrovni počvy štoly a změřen byl hloubkový interval 0–25,0 m.

Tab. 1 Parametry a nastavení měřící aparatury

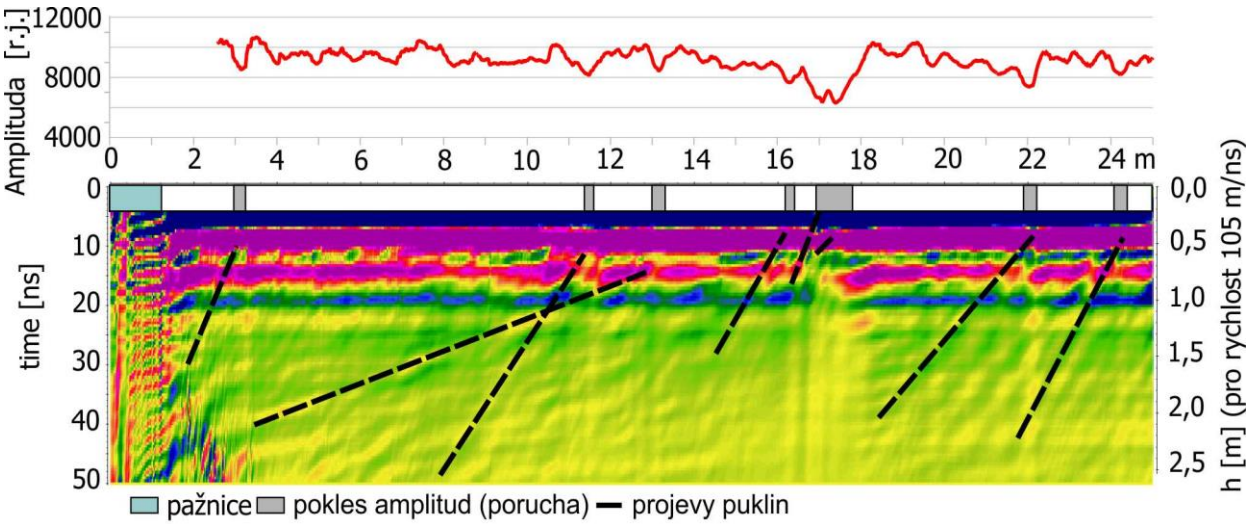
Parametr	Nastavení
Střední frekvence antény	492 MHz
Vzdálenost mezi Tx a Rx	300 mm
Délka vzorku	0,49 ns
Počet vzorků	512
Délka stopy	250 ns
Počet sumací	8/s

Nastavení měřící aparatury a metodika měření byly shodné pro obě měření. Nastavení parametrů měření je uvedeno v tabulce 1. Vrt JT1 byl v hloubkovém intervalu 0–1,2 m vypažen ocelovou pažnicí. Při obou měřeních byla hladina vody ve vrtu prakticky v úrovni počvy. V rámci každého výjezdu byl vrt změřen ve směru shora dolů i zdola nahoru.

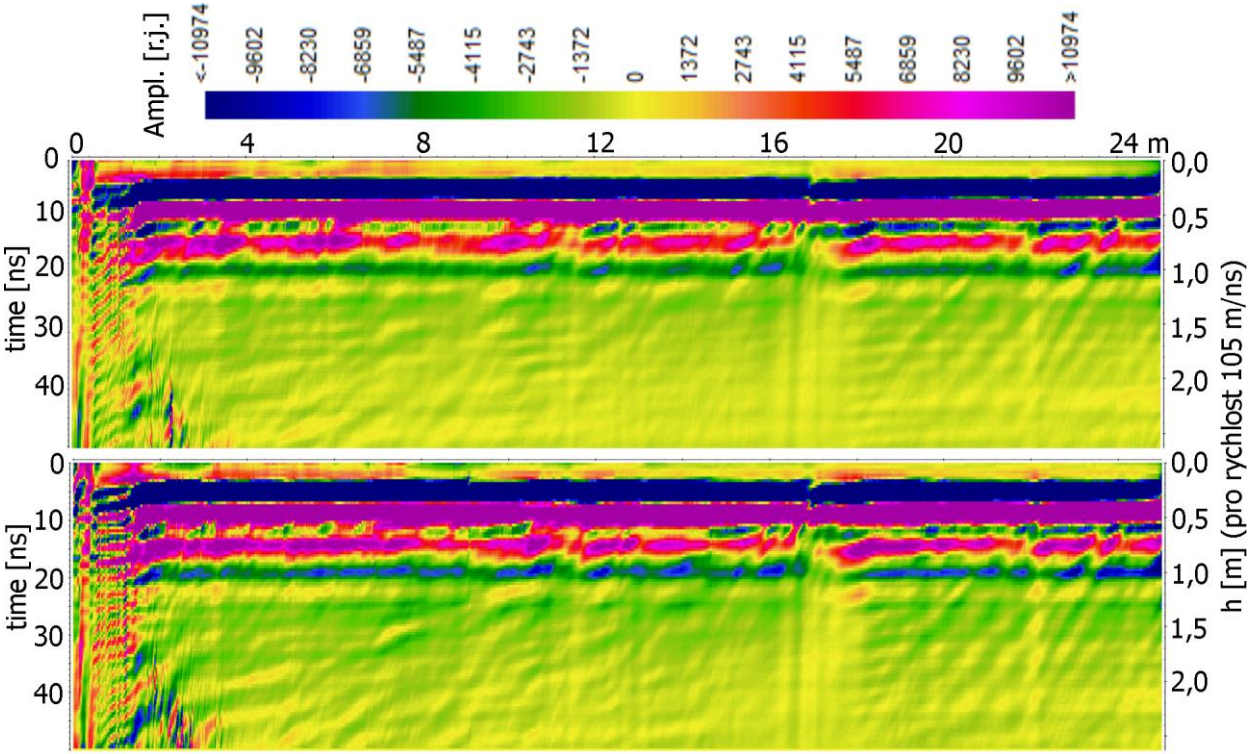
2.1 Primární zpracování dat a výsledky průzkumu

Primární zpracování dat proběhlo v programu ReflexW ver. 8.5. Interpretace byla provedena v programu CorelDraw, a dále bylo provedeno vyhodnocení sumární amplitudy odraženého signálu v programech Excel a Grapher. Na obrázku 1 je uveden GPR časový řez s primární interpretací. Posuzováno bylo časové okno 0–50 ns, což odpovídá přibližně vzdálenosti 2,5 m od stěny vrtu. Na data byla použita FK filtrace pozitivních odrazů, tj. 2D filtrace ve frekvenčně vlnové doméně, která odstraňuje reflexy, jejichž čas se s rostoucí hloubkou zvětšuje. Tím došlo ve výsledném obraze ke zvýraznění úseků puklin, které se ve směru dolů přibližují k vrtu až do místa průsečíku, a naopak byly potlačeny úseky, kde se puklina od vrtu vzdaluje. V řezu je uvedeno jednak časové měřítko, jednak orientační hloubkové.

Z rychlostní analýzy reflexních hyperbol vyplývá, že rychlosti se mění v rozmezí 0,105 až 0,108 m/ns. V prezentovaném řezu byla pozice detekovaných puklin zvýrazněna čárkovanými úsečkami a místa průsečíků se stěnou vrtu vyznačena šedými obdélníčky. Místa průsečíků se ve statistickém



Obr. 1 Radargram s primární interpretací a sumární amplituda

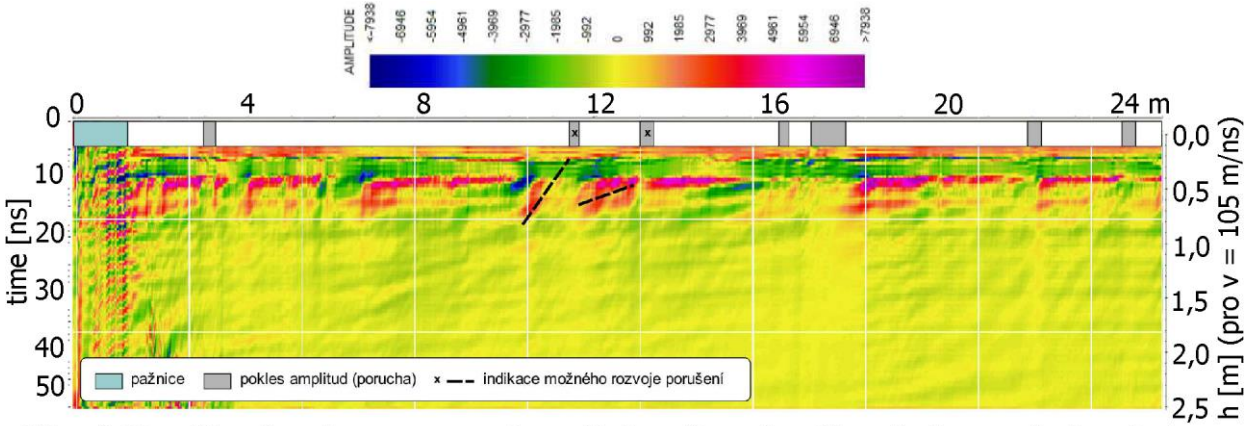


Obr. 2 Porovnání radargramů pořízených před a po frakování

zpracování projevila jako minima absolutních hodnot amplitud registrovaného odraženého signálu, a to zřejmě v důsledku disperze signálu na nerovnostech stěny vrtu v místě křížení s poruchou. Použitá anténa při tomto měření byla všesměrná, takže orientaci puklin nelze určit, lze určit pouze jejich sklon.

Srovnání GPR záznamů #537 a #547, pořízených před a po frakování je uvedeno na obrázku 2. Při opakovaném měření byla celková úroveň měřeného signálu 1,2 × vyšší než při měření pořízeném 29. 6. Důvodem může být jak změna vnějších podmínek měření, tak případná nestabilita výkonu měřícího zařízení.

Po odečtení záznamů pořízených před a po frakování vznikl rozdílový radargram (obr. 3). Ani při větším zesílení nebyl vizuálně zjištěn žádný výrazný rozdíl v intenzitě porušení horninového masivu. Nevýrazné rozdíly se projevily na puklinách protínajících vrt na hloubkové úrovni 11,5 m a 13,1 m.



Obr. 3 Rozdílový radargram zachycující změny signálu před a po frakování

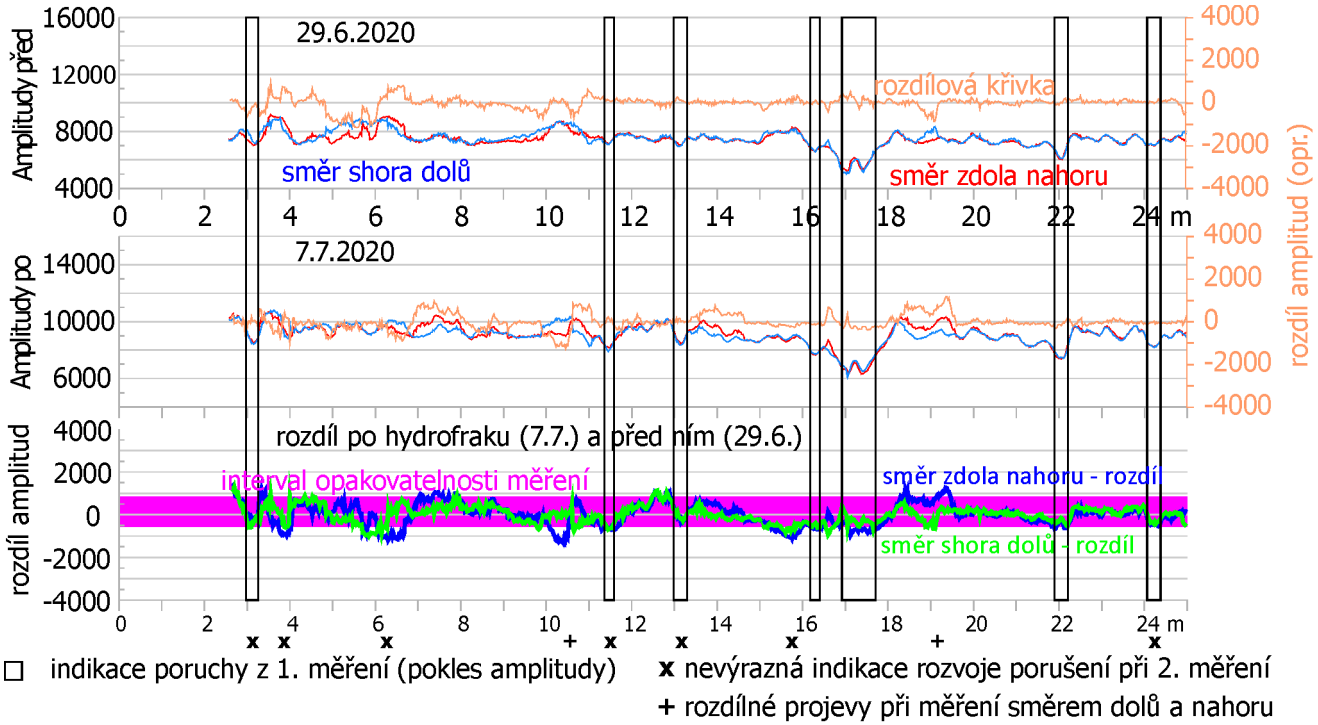
Tab. 2 Statistické vyhodnocení radargramů před a po frakování

	Rozdíl #537-#536 (před frakováním)	Rozdíl #547-#545 (po frakování)
Průměr (d)	59	-69
Maximum	1235	879
Minimum	-1189	-1210
Směrodatná odchylka (SD)	356	291
d+2SD	771	513
d-2SD	-654	-650

2.2 Statistické vyhodnocení dat

Kromě grafického srovnání výsledků opakovaných měření proběhlo i statistické vyhodnocení. Pro každou měřenou stopu byla spočtena sumární hodnota absolutních velikostí amplitud v časovém okně 0–50 ns. Výsledkem měření je graf velikosti sumární amplitudy odraženého signálu pro danou hloubkovou úroveň. Vyhodnocení se omezilo na hloubkový interval 2,5–25 m (ve svrchní části vrtu byl signál silně ovlivněn odrazy od ocelové pažnice). Tabulka 2 udává statistické vyhodnocení opakovatelnosti měření. Srovnávány byly dvojice záznamů pořízených při stejném měření při pohybu směrem dolů a nahoru. Rozdíly v hodnotách měřených na stejné hloubkové úrovni lze přičíst např. odlišné geometrii antény vůči ose vrtu, nestabilitě systému apod. Ze statistického srovnání bylo zjištěno, že hodnoty sumárních amplitud spočtené pro jednotlivé stopy se při prvním měření (tj. 29. 6. 2020) lišily v průměru do 59 (bezrozměrné jednotky) při druhém o 69, což je cca 0,7 % hodnoty intenzity registrovaného signálu (cca 9 × 10^3). Směrodatná odchylka (SD) vyšla pro první měření 291, pro druhé 356. Pokud za interval nespolehlivosti měření považujeme d +/- 2 SD, pak tento interval činí-654 až +771 a rozdíly hodnot amplitud zjištěných při opakovaném měření větší než daný rozsah lze považovat za projev detekovaného porušení horninového masivu během frakování.

Křivky hodnot sumárních amplitud zjištěné na jednotlivých hloubkových úrovních pro jednotlivá měření a rozdíly amplitud registrované při měření před a po frakování jsou uvedeny v grafech na obrázku 4. V amplitudových křivkách byly vyznačeny hloubkové intervaly odpovídající relativním minimům, zjištěné při průjezdu antény směrem dolů (zelená křivka) a nahoru (modrá křivka). Pokles intenzity registrovaného signálu přičítáme difrakci signálu na nerovnostech stěny vrtu v místě poruch, a tedy jej považujeme za indikaci míst křížení puklin s vrtem. Poruchy byly detekovány na hloubkových úrovních 3,1 m; 11,5 m; 13,1 m; 16,3 m; 17,0–17,4 m; 22,1 m a 24,2 m.



Obr. 4 Grafy amplitud odraženého signálu před a po hydrofraku s vyznačením poruchových zón (rozdílová křivka ukazující na rozvoj porušení horninového masívu)

Rozdílový graf uvedený ve spodní části obrázku 4 ukazuje, v kterých hloubkových úrovních došlo mezi oběma opakovanými měřeními k rozdílu registrovaných amplitud. V grafu je vynesen „Fialový pruh“, určující nejistotu měření odpovídající d = +/- 2SD (tj. interval -654 až +771). Opakovaným měřením nebyl registrován žádný výraznější rozdíl, a tedy nepředpokládáme, že v důsledku frakování došlo k významnějšímu porušení horninového masivu ve sledovaném hloubkovém intervalu 2,5–25 m. Nevýrazný pokles intenzity signálu registrovaného po a před frakování byl při opakovaných měření registrován na puklinách křižujících vrt na hloubkové úrovni 3,1 m; 5,6–6,7 m; 11,5 m; 13,1 m; a 24,2 m. Nevýrazný pokles sumárních absolutních hodnot amplitud, a tedy i známky možného, v důsledku frakování nově vzniklého, porušení masívu, byl registrován i mimo detekované pukliny, a to na hloubkových úrovních 3,8 m; 15,7 m. Za nevýrazný pokles považujeme i ty hloubkové intervaly, kde velikost rozdílu sumární amplitudy sice nepřesáhla hodnotu nejistoty měření, ale kde byl lokální pokles intenzity signálu zaregistrován při obou průjezdech (dolů i nahoru).

Diskutabilní zůstávají případy, kdy se rozcházejí rozdílové křivky změřené v jednom a druhém směru, tj. tam, kde v jednom směru došlo při opakovaných měření k poklesu a v opačném směru k relativnímu nárůstu amplitudy odraženého signálu (úseky 10,0–11,0 m a 18,3–19,5 m.) Pro podrobnější analýzu rozdílových křivek není dostatek dat.

2.3 Komplexní hodnocení radarových měření ve vrtu JT-1 v experimentální štole Josef

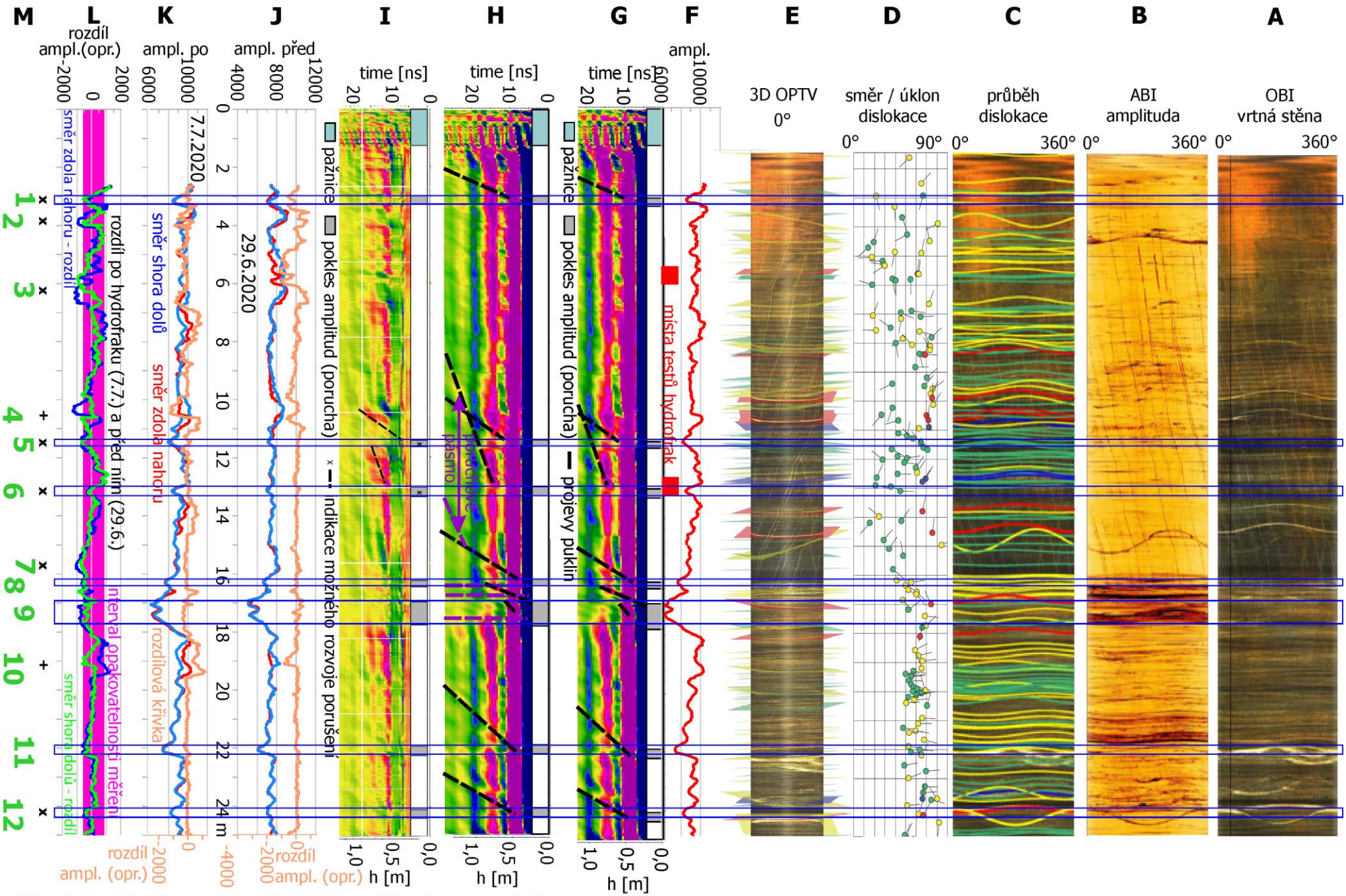
Cílem opakovaných měření georadarem ve vrtu JT1, provedených před a po frakování, bylo zjistit možnosti detekovat změny v horninovém masívu vzniklé v důsledku hydraulického štěpení. Experiment potvrdil použitelnost georadaru při detekci poruch horninového masívu i možnosti jeho využití při sledování rozvoje porušení v čase. Opakovaným měřením byly zjištěny pouze nevýrazné změny registrovaného signálu, ukazující na minimální rozvoj porušení ve sledovaném hloubkovém intervalu 2,5–25 m pod zhlavím vrtu vyvolaný provedeným hydraulickým štěpením. Všechny anomální projevy horninového masivu v okolí vrtu JT1 jsou znázorněny na obrázku 5. Jde nejen o grafickou interpretaci porušení masivu, ale i o jeho projevy na relativních změnách velikosti odraženého signálu.

Obrázek 5 shrnuje všechny výstupy z měření uskutečněných ve vrtu S1. Od shora dolů jsou prezentovány následující dílčí výsledky:

- **A** OBI obraz vrtné stěny,
- **B** ABI amplitudy odraženého signálu;
- **C** ABI interpretované průběhy struktur;
- **D** interpretované struktury (směr, úklon) na základě metod OBI a ABI;
- **E** průběh struktur, žlutá – podrcené zóny označené jako CZS (Crushed Zones System), žlutá – Systém otevřených dislokací označené jako OFS (Open Fractures system), zelená – systém uzavřených dislokací označené jako CFS (Close Fractures System), modrá – sekundárně vyplněné pukliny – tenké označené jako SFS (Secondary Filled Fractures Thin-Small), červená – sekundárně vyplněné pukliny – silné označené jako SFT (Secondary Filled Fractures Thick);
- **F** graf sumární amplitudy pro jednotlivé stopy pro časové okno 0–50 ns;
- **G** interpretace radargramu;
- **H** interpretace radargramu, druhá verze;
- **I** rozdílový radargram zachycující změny signálu před frakováním (#537) a po něm (#547), intenzita signálu byla oproti předchozím řezům cca 1,4x zesílena, aby se zvýraznily nevýrazné změny v rozdílových hodnotách;
- **J** grafy sumárních amplitud nahoru a dolu a jejich rozdíl, před štěpením;
- **K** grafy sumárních amplitud nahoru a dolu a jejich rozdíl, po štěpením;
- **L** grafy rozdílu amplitud odraženého signálu před a po hydraulickém štěpení;
- **M** pásma porušení horninového masivu.

Úkolem tohoto syntetického obrázku je ukázat vazbu jednotlivých anomálií určených z různých geofyzikálních a geotechnických metod. Na vrtu S1 bylo při interpretaci použito dvanáct různých metod a v nejspodnější části obrázku 5, ve sloupci **M,** jsou vyznačena jednotlivá pásma porušení horninového masivu. Za jeden z nejdůležitějších ukazatelů porušení horninového masivu po antropogenním zásahu pokládáme sledování změnu velikosti relativní amplitudy radarového signálu před a po destrukčních geotechnických zkouškách.

Nejmělčí porucha označená jako porucha **1** byla zjištěna v masivu již před frakováním. Na primárních radarových výsledcích se projevuje v hloubce 3,2 m jako výrazná odrazná plocha. Na optické dokumentaci vrtu se zobrazuje jako porucha, která protíná osu vrtu prakticky pod úhlem 90°. Podle rozboru jejího akustického obrazu je ji možné charakterizovat jako uzavřenou dislokaci.



indikace poruchy z obou měření (pokles amplitudy) × nevýrazná indikace rozvoje porušení při 2. měření + rozdílné projevy při měření směrem dolů a nahoru

Obr. 5 Souhrnné hodnocení radarových měření ve vrtu JT1

Je nutné však konstatovat, že úhel jejího projevu na ABI plně neodpovídá úhlu z radarových měření. Vysvětlení této skutečnosti je možné hledat v jejím složitém tvaru, který bude odlišný pro jednoduchého rovinného průběhu. Jednoznačnou indikací této trhliny jsou její projevy na křivkách relativní amplitudy odraženého signálu. Porucha se na nich vyznačuje výrazným poklesem amplitudy v obou měřeních. Nebyl však dokumentován prakticky žádný rozdíl v úrovni signálu při jednotlivých měření shora dolů a zdola nahoru.

Porucha **2** v hloubce 3,8 m určuje místo, kde došlo v období mezi radarovými měřeními k nevýraznému porušení horninového masivu. Tato skutečnost je dost překvapující, protože frakování probíhalo v hloubce cca šest metrů. Jediné možné vysvětlení je ve skutečnosti, že při hydrofraku se zvýšený tlak vody projevil obtečením obturátoru po šikmé puklině. Mělo by se jednat o projev otevření původně podrcené otevřené dislokace (žlutá křivka v grafu **C**).

Porucha **3** v hloubce 6,2 metru je ekvivalentem poruchy **2**. V tomto případě však jde pravděpodobně o otevření již existující pukliny v důsledku hydraulického štěpení. Na akustických metodách je její projev minimální a nejlépe se zobrazuje na křivce ABI amplitudy (graf **B**). Na radargramech je patrná v její blízkosti zelená odrazná plocha, tj. uzavřená dislokace. Výraznější rozdíl je patrný ve velikosti amplitudy radarového signálu. Je poněkud překvapující, že pokles minima signálu se projevuje jinak při různém směru měření. Při měření zdola nahoru je minimum posunuto do vyšších metráží, při měření shora dolů je tomu naopak. Proč tomu tak je není možné na základě provedených měření zjistit.

Porucha **4** v hloubce 10,5 metru je charakterizována rozdílným projevem při měření zdola nahoru a naopak. Jako důkaz je možné sledovat průběhy zelené a modré křivky na grafu **L** naznačující porušení uzavřenými puklinami. Jedná se o něco podobného, co bylo patrné i na poruše **3**. Na radargramech před a po frakování není tato porucha patrná a není patrná ani na rozdílovém radargramu. Na obrazu stěn vrtu s vyznačením poruch je možné v této metráži nalézt dvě „červené“ pukliny (SFT), které znamenají jejich sekundární vyplnění jiným materiálem, než je matečná hornina,

Puklina **5** v hloubce 11,5 metru se na obou měřeních projevuje poklesem amplitudy. Pokles amplitudy je však při každém měření odlišný, takže je možné prohlásit, že v mezidobí došlo k nevýraznému rozvoji porušení horninového masivu. Na akustických měřeních se těsně nad touto polohou nalézají dvě „modré“ pukliny, což nasvědčuje určitému vyhojení původně porušeného masivu. Na maximech akustických amplitud ani na obraze vrtné stěny žádné porušení není patrné.

Puklina **6** v hloubce 13,2 metru má podle radarových měření obdobný charakter jako puklina **5**. Na základě otisku na paměťové sondě byly zjištěny nové pukliny po provedeném hydrofracturingu. V tomto případě by se jednalo o sekundární porušení již na exitující puklině. Ta však byla před realizováním hydrofraku pro metody přímé dokumentace vrtné stěny neviditelná. Radarové křivky změn amplitud jsou u obou poruch podobné a podobné je též i zjištění, že z rozdílových křivek na grafu L vyplývá, že u poruchy 5 a 6 došlo v důsledku frakování k mírnému poklesu amplitudy odraženého signálu v mezích chyby měření se žádné sekundární porušení horninového masivu neprojevilo.

Puklina **7** v hloubce 15,7 metru má již jiný charakter. Při prvním měření nebylo zjištěno žádné porušení horninového masivu. Naopak při druhém měření bylo konstatováno, že při druhém měření bylo určité porušení zjištěno. O jeho existenci napovídá křivka rozdílu

amplitud radarového signálu (graf **L)**. Můžeme konstatovat, že se v tomto případě jedná o ekvivalent poruch **2** a **3**. Na výsledcích měření ABI a OBI nebyly zjištěny žádné indicie porušení horninového masivu,

Puklina **8** v hloubce 16,3 metru má zjištěné indicie porušení v obou směrech měření. Poklesy amplitudy radarového signálu jsou malé, je tedy možné konstatovat, že malé bude i porušení horninového masivu. Jeho projev je patrný na křivkách **J** a **K**. Na radargramech nejsou žádné náznaky porušení horninového masivu, a to ani v jedné z etap měření a Na rozdílových křivkách se projevil pokles amplitud ve směru shora dolů, a naopak nárůst v opačném směru. Tuto disproporci zatím neumíme vysvětlit Na druhé straně je nutné konstatovat, že od této hloubky s největší pravděpodobností je dokumentováno široké pásmo porušení horninového masivu. To se zejména projevuje na grafu amplitudy ultrazvukového signálu (graf **B**).

Puklina **9**, lépe řečeno puklinové pásmo v hloubce 16,9–17,7 metru je charakteristické svojí přítomností v první i druhé etapě měření. Velmi dobře je patrné porušení na křivkách poklesu amplitudy radarového signálu v tomto místě (grafy **F**, **J** a **K**). Na rozdílových křivkách (graf **L**) se výraznější rozvoj porušení masívu před a po frakování neprojevil (tj. detekovaný pokles amplitud se až na bodové výjimky pohybuje v mezích chyby měření). Projev porušení horninového masivu je velmi dobře patrný na amplitudové křivce ultrazvukového signálu. Hnědá barva značící porušení hornin pokrývá de facto skoro jednometrové pásmo (graf **B**). Oproti tomu, na grafu vrtné stěny v ABI (**E**) není v této metráži patrná skoro žádná puklina.

Puklina **10** v hloubce 19,0 metru je patrná pouze na druhé etapě měření. Její projev je velmi malý, a tak můžeme opět konstatovat, že malé je i porušení horninového masivu. Můžeme tedy prohlásit, že se jedná o ekvivalent pukliny **4**. Zajímavá je skutečnost, že u obou těchto poruch byla při srovnání křivek naměřených shora dolů zjištěn po frakování relativní pokles, zatímco v opačném směru měření nárůst amplitud Tuto skutečnost opět neumíme vysvětlit.

Puklina **11** v hloubce 22,0 metrů se vyznačuje poklesem amplitud radarového měření v obou etapách. Na rozdíl od předchozích puklin tohoto typu byly u pukliny 11 zjištěny radarové odrazy i z větší vzdálenosti od vrtu (grafy **G** a **H**). Rozdílový radargram však žádnou anomálii neukazuje. To znamená, že na tuto poruchu frakování v tomto vrtu nemělo žádný vliv. Na optické dokumentaci vrtu je jasný anomální projev této pukliny. Zejména dobře je patrný na poklesu amplitudy ultrazvukového signálu (hnědá barva) v těsném nadloží pukliny. V podloží této pukliny je na obrazu vrtné stěny patrné zesvětlení obrazu (graf **A**). Je pravděpodobné, že v tomto místě bude v horninovém masivu křemenná vložka, nebo vložka z jiného světlého minerálu. Tyto malé rozdíly jsou způsobeny rozdílnou vzdáleností od osy vrtu kde, která metoda popisuje přiléhající horninových masiv. U optických metod (ABI a OBI) je to vrtná stěna, u radarových měření jsou to odrazy z různých hloubek a někdy to může být i difrakce na nerovných stěnách vrtu.

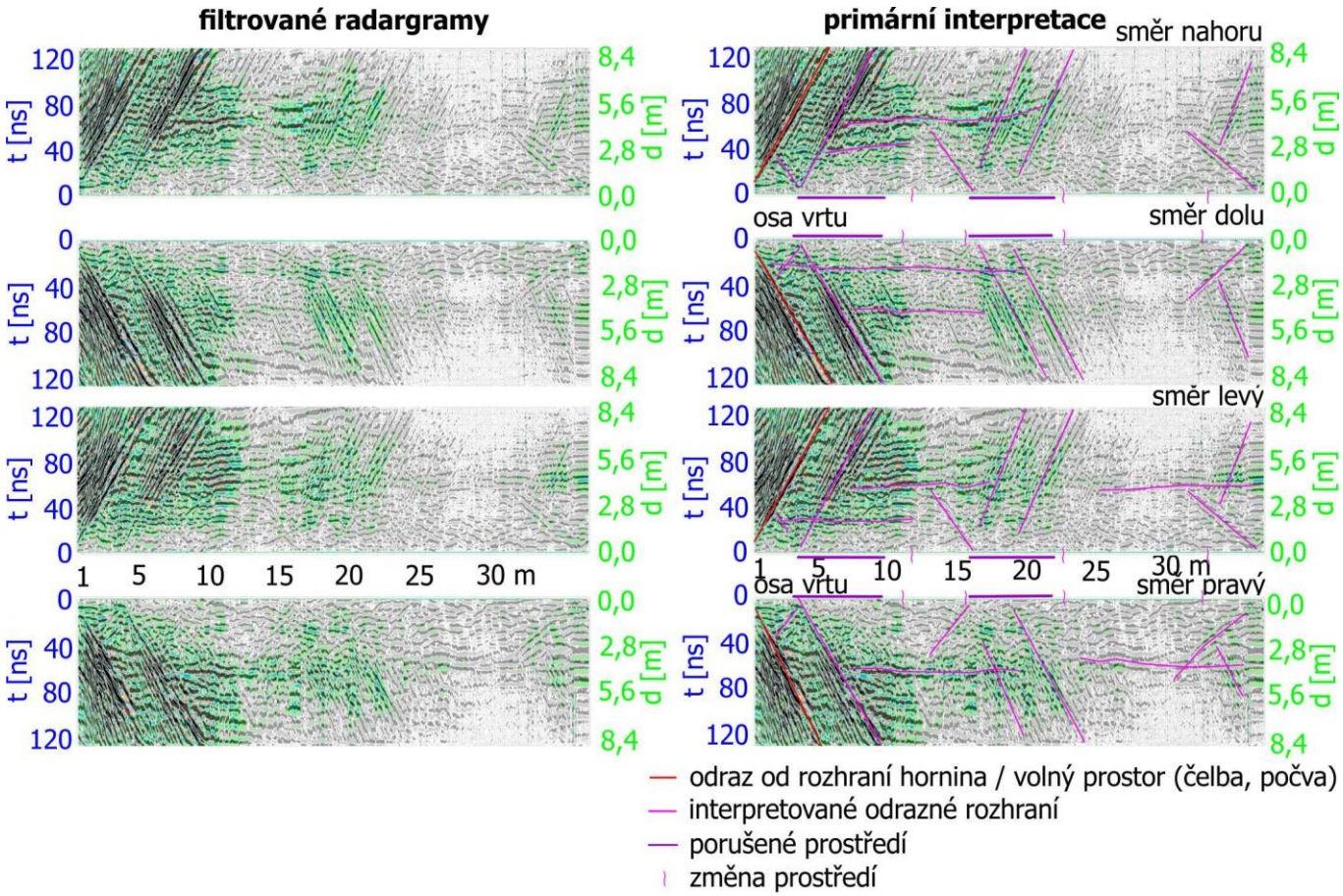
Porucha 12 se projevila mírným poklesem amplitud při opakovaných měřeních (K) a na rozdílové křivce L, kde je ale registrovaný pokles v intervalu chyby měření. Na optické dokumentaci je na grafech **A**, **A** a **C** patrný typický sinusový obraz porušení masivu na plášti celého vrtu. Sklo poruchy je asi 60° a azimut cca 20°.

3. Měření na lokalitě PVP Bukov I, XII. patro

3.1 Měření s částečně stíněnou anténou

Měření s vrtným radarem bylo realizováno i na XII. patře PVP Bukov I. První terénní měření na PVP Bukově I realizovala firma SG Geotechnika. Měření byla provedena aparaturou SIR-20, která je výrobkem americké firmy GSSI. Jedná se o plně digitální aparaturu se záznamem na připojený počítač – notebook, s vrtným anténním systémem TUBEWAVE-100 MHz švédského výrobce Radarteam Sweden AB.

Vrtné antény jsou výrobní firmou charakterizovány jako částečně stíněné, „semi shielded“. Z tohoto důvodu jsme přistoupili k interpretaci terénních měření dvojím způsobem. První předpokládal, že anténa je stíněná, a proto bylo měření v každém směru zpracováno samostatně a následně bylo zhodnoceno prostorově. Ve druhém případě byla měření zprůměrována a průměr je brán jako střední výsledek.



Obr. 6 Filtrované radargramy a primární interpretace

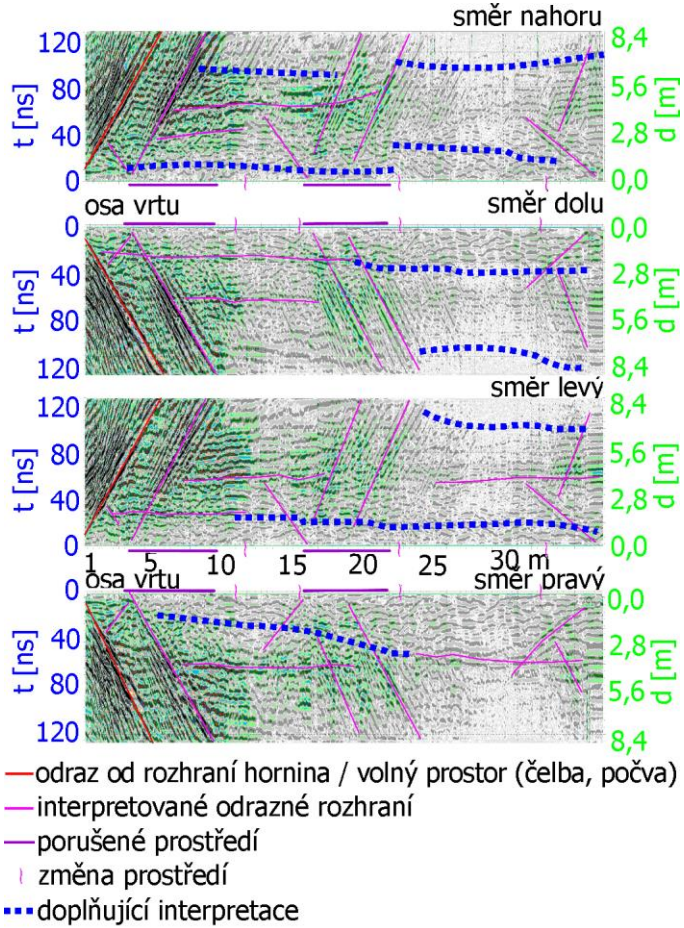
Reflexním systémem měření byly na lokalitě proměřeny vrty S1, S2, S8 a S17. Anténní systém byl zaváděn do vrtu pomocí hranolového soutyčí o segmentech délky dva metry. Čtvercový průřez soutyčí umožnil cílený směr vysílání elektromagnetického vlnění. Výrobce uvádí, že anténní systémy jsou směrové, dosavadní praxe však ukazuje, že v jednom směru je signál významnější, ale o úplném směrovém vysílání nelze hovořit. Měření se provádělo ve čtyřech směrech vzájemně pootočených o 90° s cílem přibližně určit prostorovou orientaci reflexních ploch. Sběr dat byl proveden v kontinuálním režimu, vysílání elektromagnetického impulzu je řízeno pomocí kladky s inkrementálním snímačem, krok měření byl 1 cm. Měřeno bylo vždy od konce vrtu směrem ke zhlaví.

Použitý postup interpretace ukážeme na vrtu S1, odvrtaném z vrtné komory VrK-1. Vrt S1 je prakticky horizontální s přetokem vody z vrtu a byl radarově proměřen do třiceti sedmi metrů. Filtrované radargramy ze všech čtyř směrů měření jsou na obrázku 6 spolu s jejich

primární geofyzikální interpretací. Ve staničeních cca 12,0 m, 15,7 m, 22,8 a 32,0 m byla interpretována změna horninového prostředí. V úseku cca 3,4–9,8 m a v úseku cca 15,8 až 22,0 m bylo detekováno porušené horninové prostředí (pukliny) do vzdálenosti cca 5 metrů od vrtu. Dále byly detekovány možné poruchy protínající vrt – „šikmá“ odrazná rozhraní, mají podobný průběh ve všech směrech měření, zřejmě v podmínkách lokality pravděpodobně směrovost anténních systémů nefunguje. Obdobně tomu je i u odrazných rozhraní souběžných s osou vrtu.

Snaha získat z naměřených materiálů co největší množství informací nás vedla k pokračování rozboru radargramů získaných ve vrtu S1 nad standardní úroveň. Vyhodnocování radargramů je v tomto případě komplikováno zahlcením užitečného signálu odrazy od stěny překopu a jejich následnému opakovanému šíření po kabelu sondy. Tento efekt se nám nepodařilo žádným způsobem eliminovat.

Vyhodnocování radarových měření pokračovalo interpretací dalších dvou zpracovatelů. Souhrn výsledků interpretátorů je na obrázku 7. Původní primární interpretace jsou v obrázku znázorněny fialově, doplňující interpretace pak modře. Ukázalo se, že dalším zpracováním se podařilo identifikovat zejména rozhraní, která jsou souběžná s osou vrtu, nebo s ní svírají ostrý úhel. Překvapujícím poznáním je skutečnost, že na radargramech nejsou typické odrazy ve tvaru hyperboly od ploch diskontinuit jdoucích pod obecným úhlem k ose vrtu (např. Willenberg et al 2004). Určitý náznak je u poruchy v 16 metrech, kde je tato indikace poruchy definována ve směrech nahoru, vlevo i vpravo. Další náznak tohoto efektu je cca v 36 metrech. Vzhledem k další neprůchodnosti vrtu pro radarovou sondu je však patrná jen jedna větev hyperboly.



Obr. 7 Vrt S1 a doplňující interpretace

Následným krokem interpretace bylo seskupení všech interpretovaných rozhraní a jejich následná geotechnická analýza, tj. porovnání výsledků radarových měření s geologickým popisem vrtu a dalšími měřeními v tomto vrtu realizovanými. Výsledek těchto prací je znázorněn na obrázku 8. Dílčí obrázek **A** nahoře ukazuje porovnání výsledků měření s anténou orientovanou nahoru a dolů. Teoreticky by měla být jednotlivá interpretovaná rozhraní z obou směrů totožná. To ovšem platí v případě, že anténa není stíněná. Z obrázku je patrné, že ne vždy je shoda jednoznačná. U kosých rozhraní je shoda až na jedinou výjimku (cca 16 m) dobrá. Složitější je porovnání u rozhraní „subhorizontálních“. Tam je rozdíl v určení vzdálenosti rozhraní od osy vrtu až jeden metr. Porovnáním měření levý oproti pravému (obrázek **B**) vidíme lepší shodu. Tam jsou dokumentovány rozdíly v „hloubkách“ jen v prvních decimetrech.

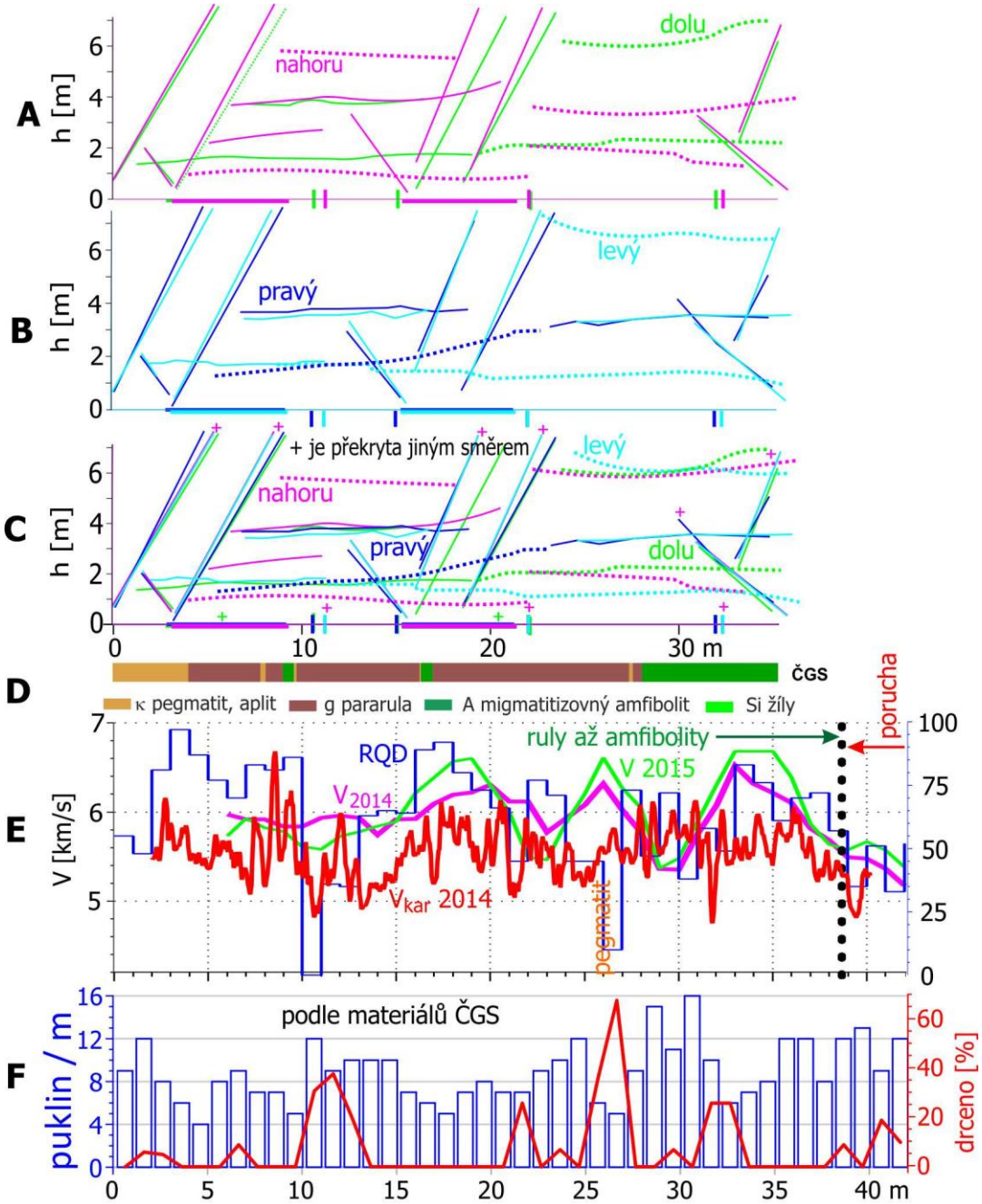
Do následujícího obrázku **C** jsou zakreslena všechna odrazná rozhraní. Znaménkem „+“ jsou označeny odrazy, které jsou zcela překryty. Shrnutím všech směrů je možné konstatovat, že kosá rozhraní si dobře odpovídají. Podle této interpretce je možné identifikovat tři

zásadní kosé odrazné plochy: v 3,5, 16 a 36,5 metrech. U prvního odrazu jsme nenašli ekvivalent ani v geologické ani v geotechnické dokumentaci vrtu. Druhý odraz lze spojovat s vložkou amfibolitu a jejími kontakty s pararulou. Toto rozhraní se projevuje skokovým zvýšením RQD z 65 na 93 %. Spolu s RQD se v blízkosti tohoto kontaktu zvyšuje i rychlost podélných vln zjištěných seizmokarotáží. Třetí odrazné rozhraní pak leží uvnitř pásma kompaktních amfibolitů patrných na dokumentaci ČGS. V této metráži můžeme najít relativní snížení RQD na 65 % a zaznamenat pokles rychlostí podélných vln pod 6,2 km/s.

Původní interpretace porušeného prostředí (barevné čáry na ose x) neodpovídá ani změnám na křivce RQD ani na rychlostních křivkách s výjimkou posledního úseku, od kterého počíná pokles rychlostí do rozsáhlého pásma porušení ve vyšších metrážích. Ze čtyř klasicky interpretovaných míst změn prostředí v 12, 15,7, 22,8 a 32 metrech neodpovídá ani jedno geologickým změnám podle popisu vrtu. Určité indicie jsou patrné na porušení horninového masivu podle křivky RQD. První indikovaná změna v 11 metrech se projevuje pádem RQD na nulové hodnoty v intervalu 10–11 m. I druhé změně (15 m) předchází snížení RQD na 45 %, které dál pokračuje nárůstem na cca na 65 % až do 18 m, kdy začíná znovu klesat. Na třetí ploše ve 22 m klesá RQD na 45 %. a dochází na tomto místě k poklesu rychlosti podélných vln na 5,5 km/s. Čtvrtá změna ve 32 m je provázena poklesem RQD na cca 35 % v předchozím návrtu. Pod touto hloubkou narůstá rychlost podélných vln až na hodnotu 6,7 km/s. Je možné předpokládat, že zde vzniká lokální zóna koncentrovaného napětí.

Jestliže přijmeme předpoklad, že radarové antény jsou stíněné, i když ne ideálně, tak se můžeme pokusit nakreslit prostorový průběh rozhraní souběžných s osou vrtu. Výsledek takovéhoto porovnání je zobrazen na spodní části obrázku 9.

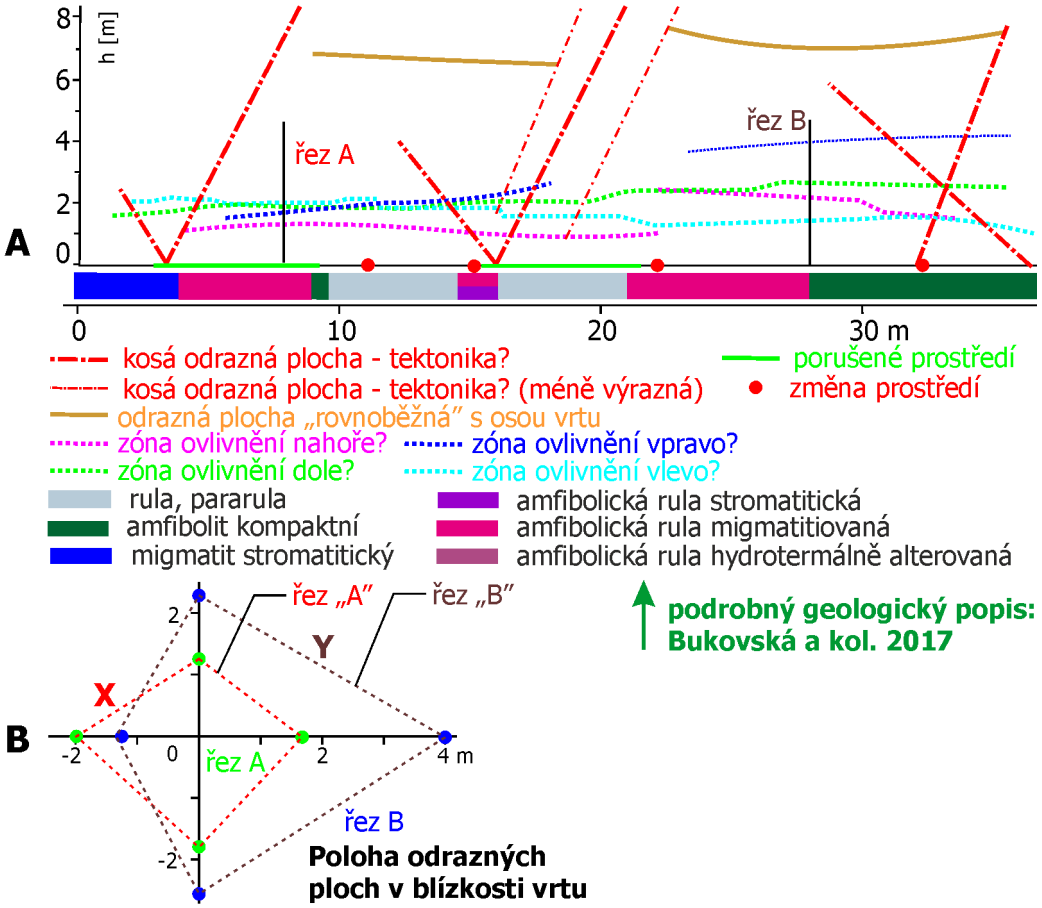
V horní části obrázku (**A**) jsou zobrazeny nejvýznamnější



Obr. 8 Srovnání výsledků vrtného radaru a geotechnických údajů

odrazné plochy. Ty jsou dvojího druhu. Jednak jsou to klasické odrazy od ploch nespojitosti a jednak jsou to odrazy souběžné s osou vrtu. Na tomto obrázku je doplněná podrobná geologické dokumentace vrtu tak, jak byla určena v závěrečné geologické zprávě Bukovská a kol. 2017.

Zatím nezodpovězenou otázkou je, co je příčinou odrazů probíhajících paralelně s osou vrtu. Odpověď na tuto otázku bude nutné řešit rozsáhlou diskuzí všech profesí. Prosté prohlášení, že se jedná o dosah vlivů změn v horninovém masivu po odvrtání vrtu, odporuje všeobecné představě, jak taková zóna vypadá. Podle geotechnických teorií by tato zóna měla být řádově menší. Představa, že odvrtání vrtu o průměru 76 milimetrů způsobí změny v horninovém masivu až čtyři metry za vrtnou stěnu je šokující! K rozsáhlejší diskuzi však bude nutné získat výsledky měření z větší řady vrtů. Další otázkou do této problematiky, je proč reflexní plochy na levé straně vrtu si v řezech A a B prohodily místo (viz prostorový graf na obrázku 9B). Pro tuto skutečnost také neznáme vysvětlení. V tomto případě platí to samé, co v předešlém případě. Vysvětlení může podat jen další měření. Diskuse geofyziků s geology a geotechniky o tomto problému nepřinesla žádný nástin možného vzniku těchto anomálií. Jediným závěrem těchto jednání byl návrh radarových měření ve svislém a vodorovném vrtu jinou aparaturou a jinými anténami.



Obr. 9 Interpretace souběžných radarového měření

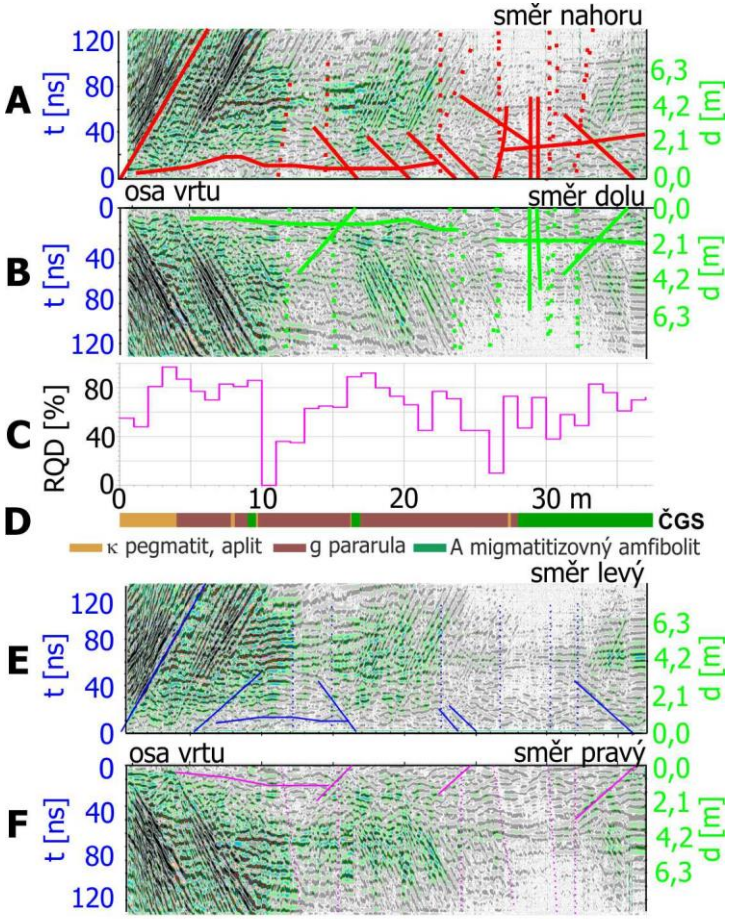
3.2 Měření s nestíněnou anténu

Přijetím axiomu, že anténa TUBEWAVE-100 MHz je všesměrná (není stíněná), je potřebné k interpretaci přistoupit tak, že výsledky měření v jednotlivých směrech je nezbytně nutné graficky průměrovat. U zpracovávaného vrtu S1 jsou proto sestaveny tři verze. První jsou „čisté" radarové záznamy bez jakékoli interpretace. Ve druhé verzi jsou postupně znázorněny radargramy ze všech čtyř interpretovaných směrů doplněné křivkou modifikovaného výnosu jádra (RQD) a geologickým popisem vrtného jádra ze zprávy ČGS. Na třetí verzi je pak výsledná souhrnná interpretace. V tomto systému vyhodnocování vrtného radaru je první znázornění první verze totožné s levou stranou obrázku 6.

Na obrázku 10 – verze dva – je do radargramů vkreslena průměrná interpretace tří zpracovatelů – interpretátorů (Nedvěd J., Kněz J., Bláha P.) v jednotlivých směrech měření o průběhu porušení horninového masivu jednotlivými plochami diskontinuity jdoucími přibližně rovnoběžně (souběžně) s osou vrtu. První výrazná plocha na levé straně radargramu odpovídá odrazu elektromagnetického signálu od stěny vrtné komory VrK-1 či od stěny překopu. Dále jsou zde znázorněny jednotlivé odrazné plochy a rozhraní ve všech měřených směrech nahoru, dolů, vlevo a vpravo (grafy **A**, **B**, **E** a **F**). Odrazné plochy v jednotlivých směrech měření jsou syntézou určování ploch všech tří interpretátorů. Na grafu **C** je znázorněn průběh modifikovaného výnosu jádra. Konečně v grafu **D** je znázorněn geologický popis vrtného jádra.

Pokles RQD v 10–11 metrech má na georadaru odezvu pouze na směru nahoru. Podobně neexistuje jednoznačná radarová odezva poklesu RQD v úseku 21–22 metrů. V úseku 26–27 metrů lze najít odraz ve směru nahoru. Radarové odrazy v okolí 29 metrů mohou mít odezvu v poklesu RQD v úsecích 29–29 m a 30–31 m. Indicie poruchy ve 32,5 m se projevuje poklesem RQD na hodnotu cca 50 %. Z litologických změn se projevuje pouze vložka amfibolitů v cca 16–17 metrech se projevuje radarovým odrazem v 16,5 m ve směrech nahoru, vlevo a vpravo.

Obrázek 11 představuje třetí, tedy souhrnnou interpretaci. Na grafu **A** jsou prezentována porušení a odrazné plochy nespojitosti ze všech čtyř směrů. Na grafu **B** jsou pak projevy ploch diskontinuit zprůměrovány a doplněny jejich projevem na videodokumentaci vrtu a fotografie vrtného jádra. Následují karotážní křivky (Kořalka 2014) objemové hmotnosti a zdánlivého měrného odporu **(C)**, jak byly zjištěny měřením kolegů z Aquatestu. Na nejspodnějších grafech jsou pak doplněny křivky RQD (**E**) a opis vrtného jádra (**F**).



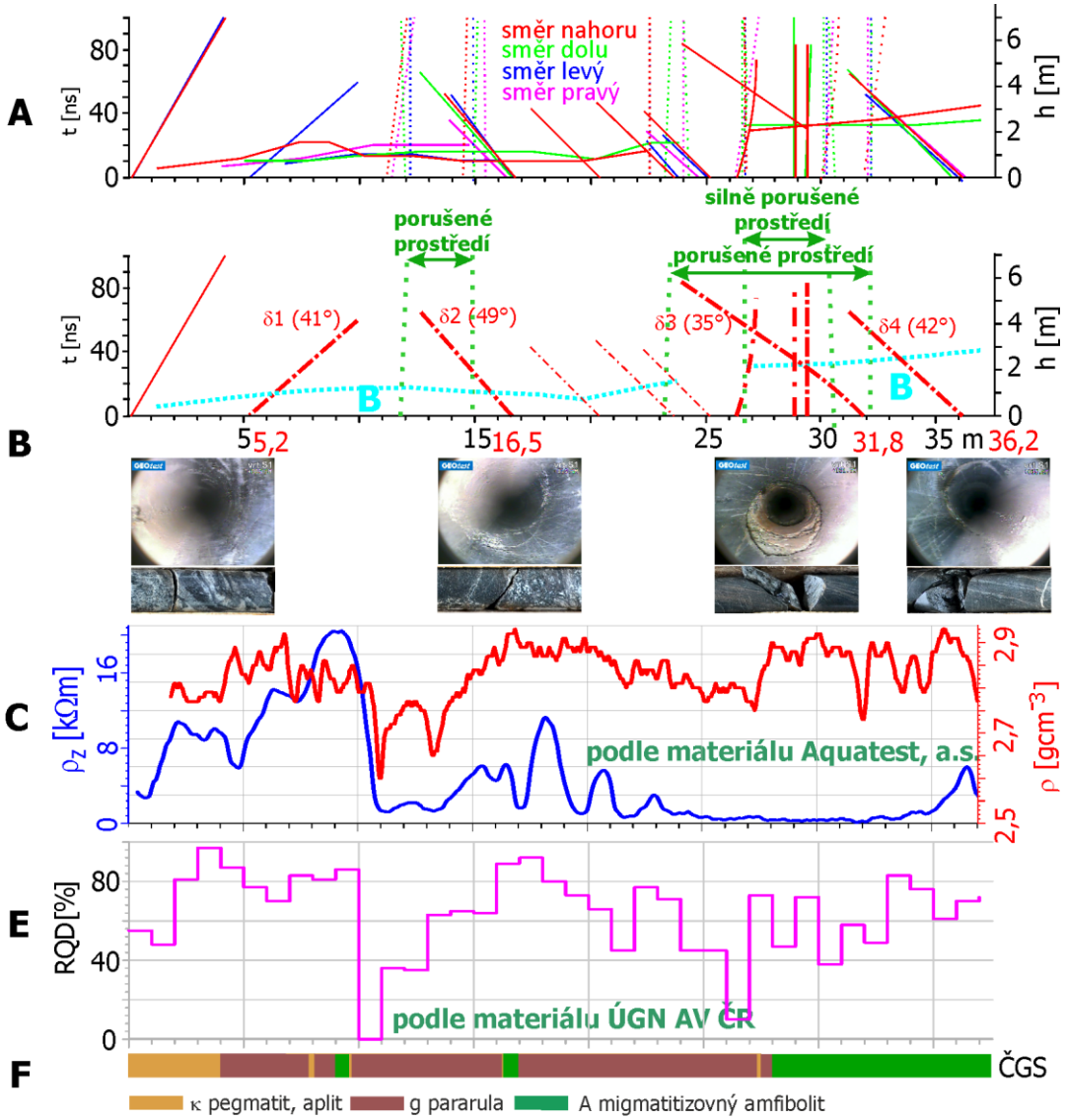
Obr. 10 Vrt S1, doplňující interpretace

Ne u všech ploch nespojitosti se vždy podařilo určit jejich ekvivalentní odrazné plochy ve všech směrech měření. Jsou plochy, jejichž projev se podařilo najít jen v jednom směru (např. 5,2 m a 15,3 m). Naopak jsou plochy, které byly identifikovány ve všech směrech (např. 16,5 m a 36 m). Projevy reflexních rozhraní u posledně zmíněných poruch byly sice registrovány při různé orientaci vrtní antény, ale přicházejí pod stejným úhlem a ve svodném obrázku se tyto projevy překrývají. Toto lze celkem jednoznačně považovat za důkaz původního předpokladu, že použitá anténa vysílá všesměrně a nezávisí tedy na její stranové orientaci. Podstatně větší rozdíly byly nalezeny u ploch jdoucích rovnoběžně nebo téměř rovnoběžně s osou vrtu. V tomto případě byly dokumentovány rozdíly až cca 0,8 m (např. hloubka 7,5 m). Tyto plochy nejsou identifikovatelné podél celé osy vrtu. Tečkovanými čárami jsou vyznačena místa, kde pravděpodobně dochází k zasakování vody z vrtu do podrceného horninového masivu.

Na obrázku **B** je výsledná intepretace jednotlivých poruch a ploch nespojitosti podél osy vrtu. Poruchy protínající stvol vrtu pod obecným úhlem byly zjištěny čtyři: δ1 (5,2 m), δ2 (16,5 m), δ3 (31,8 m) a δ4 (36,2 m). U jednotlivých poruch byly určeny i úhly, které poruchy svírají s osou vrtu. Vzhledem k potvrzené všesměrnosti použité antény nelze stanovit směr, ve kterém se detekovaná porucha vůči ose vrtu nachází. U všech diskontinuit, křižujících vrt, byla detekována pouze jedna jejich část – větev, standartně by se měl v radargramech projevit i symetrický odraz od téže pukliny za místem křížení. Toto ale registrováno nebylo. Rozhraní, které odpovídá nespojitosti souběžné s vrtem, není podél osy vrtu průběžné. Je přerušeno od 23,4 m do 26,8 m. V prostoru mezi osou vrtu a uvedeným rozhraním dochází k zeslabení odraženého elektromagnetického signálu. Důvod je možné hledat ve změně fyzikálních vlastností nebo v porušení horninového masivu, ale pro tuto skutečnost se nepodařilo nalézt geologickou nebo geotechnickou příčinu.

Dalším obrázkem jsou obrazy poruch detekovaných při fotodokumentaci vrtného jádra a při prohlídce video dokumentace vrtů. V některých případech neodpovídá úhel poruchy viditelný na jádře s úhlem, který vyšel z radarových měření a z video dokumentace. To může být způsobeno tím, že porucha na vrtném jádře zobrazuje de facto bodovou událost, kdežto interpretované rozhraní získané z radarových měření i z karotáže prezentuje plochu několika metrů. V metráži 16,5 metru již úhly zjištěné z jádra, video dokumentace a z radaru souhlasí. Totéž platí o poruchách v 31,8 m a 36,2 m.

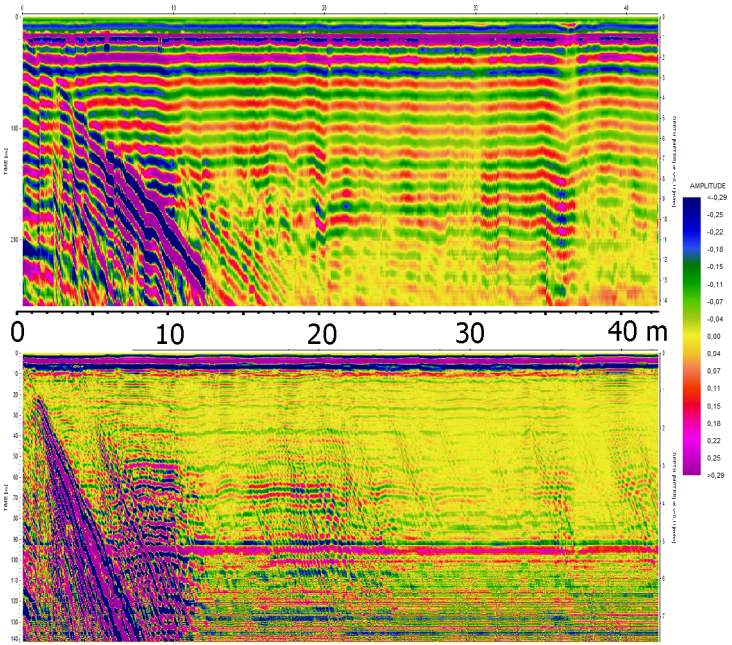
Na karotážních křivkách lze najít projevy poruchy δ1 ve 4,8 m na křivce zdánlivého měrného odporu jeho poklesem na 600 Ωm a v 5,2 m na křivce GGK, kde se objemová hmotnost snižuje o cca 0,06 gcm^{-3}. Rozdílnost určených hloubek vyplývá z kosého průběhu poruchy a z různého hloubkového dosahu jednotlivých karotážních metod. Porucha δ2 v 16,5 m má odezvu pouze na křivce zdánlivého měrného odporu v 17,0 m. Úklon poruchy je opačný oproti poruše δ1, proto také odporové



Obr. 11 Vrt S1, souhrnná interpretace a geofyzikálně-geotechnické zhodnocení

minimum leží na opačných stranách od radarové pozice poruchy. Naopak porucha δ3 se projevuje pouze na křivce objemové hmotnosti poklesem o 0,3 gcm^{-3}. Nenalezení odezvy na odporové křivce je dáno tím, že tato křivka v úseku 24–35 m vytváří rozsáhlé odporové minimum. Poslední porucha δ4 se přímo na karotážních křivkách neobjevuje, což může být dáno tím, že průběh karotážních křivek je ovlivněn další výraznější anomálií obou veličin v hloubkách těsně pod poruchou.

Značně obtížnější je nalézt vztah poruch určených geofyzikálně s geologickou a geotechnickou dokumentaci. Jedinou jednoznačnou odezvou má porucha δ3, která odpovídá poklesu RQD v metráži 30 až 33 m. Geologickou příčinu radarové anomálie δ2 je možné spatřovat v úzké vložce amfibolitů v pararulách v metráži 15,8–16,4 m.



Obr. 12 Radargramy z aparatury SIR2000

3.3 Opakované měření ve vrtu S1

První měření vrtným radarem na PVP Bukov přineslo mimo běžných informací jedno neobvyklé zjištění. Prakticky na všech vrtech byla zjištěna rozhraní, která byla více méně rovnoběžná s osou vrtu. Rozhraní byla od osy vrtu vzdálena 0,2 až 3,5 m. Bylo konstatováno, že tato rozhraní jsou dvojího typu a horninový masiv mezi osou vrtu a prvním rozhraním byl označen jako „A“, masiv mezi prvním a druhým rozhraním jako masiv „B“. Za celou dobu interpretace a zpracování údajů ze všech geofyzikálních měření se nepodařilo najít příčinu, která by mohla vyvolávat tyto anomálie. Odlehčení masivu po odvrtání štíhlých vrtů o průměru 76 mm nemůže způsobit změny tak daleko od osy vrtu. Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto proměřit vrty S1 a S8 znovu s jinou aparaturou, tentokráte s anténami 100 a 500 MHz. K opakovaným georadarovým měřením byl použit přístroj firmy GSSI s kombinací všesměrných nestíněných vrtných antén BA-100 a BA-500 od firmy GEOSCANNERS. Měření bylo prováděno v diskrétním režimu s krokem 0,05 m. Aby nedošlo k uvíznutí antény, byl před měřením vrt vypažen perforovanou PVC pažnicí Ø70 mm. Vrtným georadarem byl proměřen interval 0,4–42,4 m. Ukázka originálních záznamů s použitím antény BA-100 (nahoře) a BA-500 (dole)je na obrázku 12.

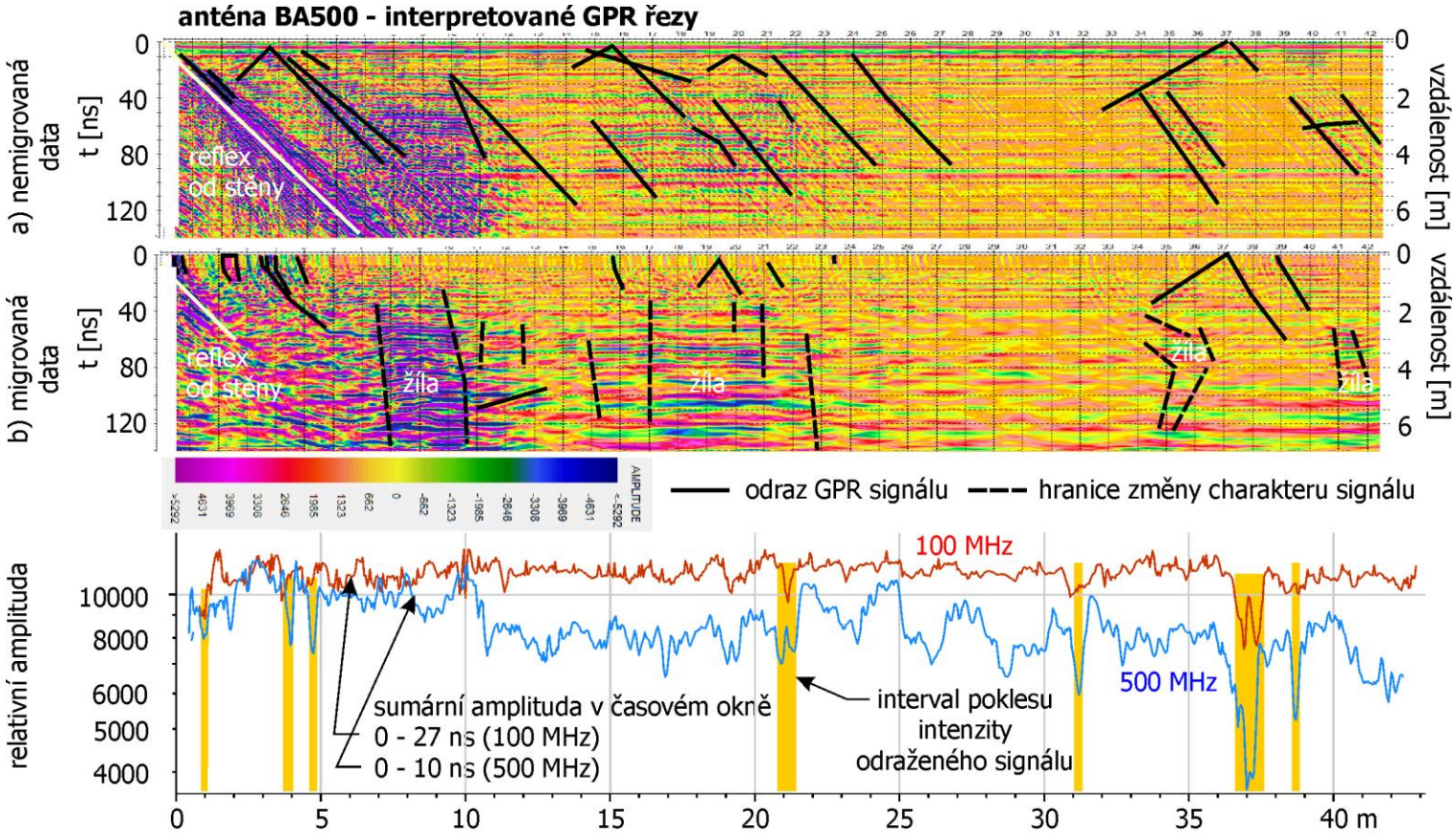
Zpracování naměřených dat proběhlo v programu ReflexW verze 8.5. Interpretace byla provedena jednak v grafickém programu CorelDraw, jednak bylo provedeno vyhodnocení sumární amplitudy odraženého signálu v programu Reflex s grafickou prezentací spočtených křivek v programu Grapher. Při ortogonálním zpracování bylo posuzováno časové okno 0–140 ns, což odpovídá přibližně vzdálenosti do 7 m od stěny vrtu. Na obrázku 13 jsou prezentovány řezy nemigrované (a), níže pak migrované (b) při použití konstantní rychlosti 0,1 m/ns. Díky odstranění difrakčních hyperbol, přicházejících převážně od nerovností na stěně vrtu, došlo u migrovaného řezu k „vyčištění“ obrazu, ale průběh jednotlivých reflexních rozhraní může být vzhledem k proměnlivosti rychlosti šíření elektromagnetického signálu prostředím částečně deformovaný.

Použitá anténa byla všesměrná, takže orientaci puklin nelze určit, určit lze pouze jejich sklon. Dále se v řezech na obrázku 13 projevily změnou intenzity signálu zóny s odlišnými fyzikálními vlastnostmi, jakými mohou být např. žíly, alterace apod. Ve spodní části grafických příloh jsou uvedeny křivky sumárních amplitud odraženého signálu registrované v časovém okně 0–27 ns spočtené pro záznamy anténního systému BA-500 a obdobně i pro frekvenci 100 MHz. Křivky pro frekvenci 500 MHz jsou členitější, než výsledky měření s anténou 100 MHz. Místa křížení poruch s vrtným stvolem se ve statistickém zpracování projevila jako minima, a to zřejmě v důsledku disperze signálu na poruše v okolí vrtu. Frekvence 500 MHz určuje místa oslabení horninového masivu výraznějším poklesem a z amplitudových křivek lze i lépe stanovit šířku poruchové zóny. Toto je dáno jednak vyšší prostorovou rozlišovací schopností vyšší použité frekvence, jednak menší vzdáleností mezi anténním vysílačem a přijímačem.

3.4 Komplexní hodnocení měření vrtným radarem na PVP Bukov

V této podkapitole budou výsledky měření vrtným radarem na PVP Bukov vyhodnoceny souhrnně, tj. budou hodnoceny výsledky vrtných radarových měření oběma aparaturami, tedy měření realizovaná firmou SG Geotechnika i INSET. Při jejich vyhodnocování bylo úzce přihlíženo k výsledkům interpretace 3D ERT, karotáže, RQD, fotografií jádra, videodokumentace a geologického popisu jádra. Závěrem jsou do obrázku vkresleny indicie ploch nespojitosti (porušení masivu) a nakonec jejich korelační čáry. Jednotlivé grafy v obrázku 14 obsahují:

- **A** interpretaci odrazných ploch z radarových měření firmou SG Geotechnika ze všech čtyř směrů plus



Obr. 13 Interpretované radargramy z aparatury SIR2000 a průběh relativních amplitud

interpretace odrazných ploch z radarových měření firmou INSET, migrovaných i nemigrovaných získaných anténou TubeWave 100. Dále jsou zde černě zobrazeny odrazné plochy svázané s nespojitostmi masivu a polohy, kde pravděpodobně dochází k úniku vody z vrtu do masivu;

- **B** křivka sumární amplitudy radarového (**B**) signálu sledovaná v různých časových oknech na obou anténách. Výrazné poklesy sumární amplitudy, zejména na frekvenci 500 MHz, jsou označeny písmeny **a** až **j**.
- **C** rychlosti podélných vln z akustické karotáže (zelená křivka, Kořalka 2014), rychlosti z opakované seizmokarotáže (modrá – rok 2015 a azurová křivka – rok 2014), koeficient porušení z karotáže (fialová křivka, Kořalka 2014);
- **D** karotážní křivky: modrá – objemová hmotnost vypočtená z gama-gama karotáže, zelená – zdánlivý měrný odpor (Kořalka 2014), měrný odpor první řady elementů horninového masivu určený z 3D elektrické odporové tomografe (ERT) – červená křivka;
- **E** pás měrných odporů z 3D ERT;
- **F** křivka kavernometrie – červená křivka, místa pravděpodobných přítoků podzemní vody do vrtu určená videodokumentací – modré šipky;
- **G** fotografie vrtného jádra a záběry z videa na vybraných puklinách;
- **H** modifikovaný index RQD;
- **I** geologický popis vrtu ČGS; jako geofyzici a geotechnici můžeme očekávat, že pokud litologické popisy nejsou sestavovány na základě petrografických laboratorních analýz, jedná se vždy z části o subjektivní názor dokumentujícího geologa.
- **J** interpretovaná pásma porušení.

Souhrnná interpretace na obrázku 14 ukazuje vazbu jednotlivých dílčích anomálií určených z různých geofyzikálních a geotechnických metod. Na vrtu S1 bylo při interpretaci použito sedmnáct různých metod, při čemž radarové odrazy na grafu **A** jsou brány jako tři metody. Výsledkem geofyzikálních prací na vrtu S1 je tedy určení zón oslabení horninového masivu. Ty jsou v obrázku 14 znázorněny zelenou tečkovanou čarou a v pásu **J** je uvedeno i jejich pojmenování (**Z** až **R**). Jako kritérium pro určení porušení horninového masivu jsme brali v úvahu následující indicie:

- křížení odrazných radarových ploch s osou vrtu;
- místa možné komunikace podzemní vody s vrtem zjištěné na radargramech;
- výrazný pokles relativní amplitudy radarového signálu;
- snížení rychlostí podélných vln ať už na klasické karotáži nebo na seizmokarotáži a anomálie karotážně určeného koeficientu porušení;
- pokles objemové hmotnosti, pokles zdánlivého měrného odporu nebo jeho prudká změna z karotáže, pokles měrného odporu nebo jeho prudká změna v první řadě elementů z 3D ERT;
- zvýšení průměru vrtu z karotáže, existence výrazných kaveren na videodokumentaci a místa pravděpodobného přítoku vody do vrtu podle videodokumentace;

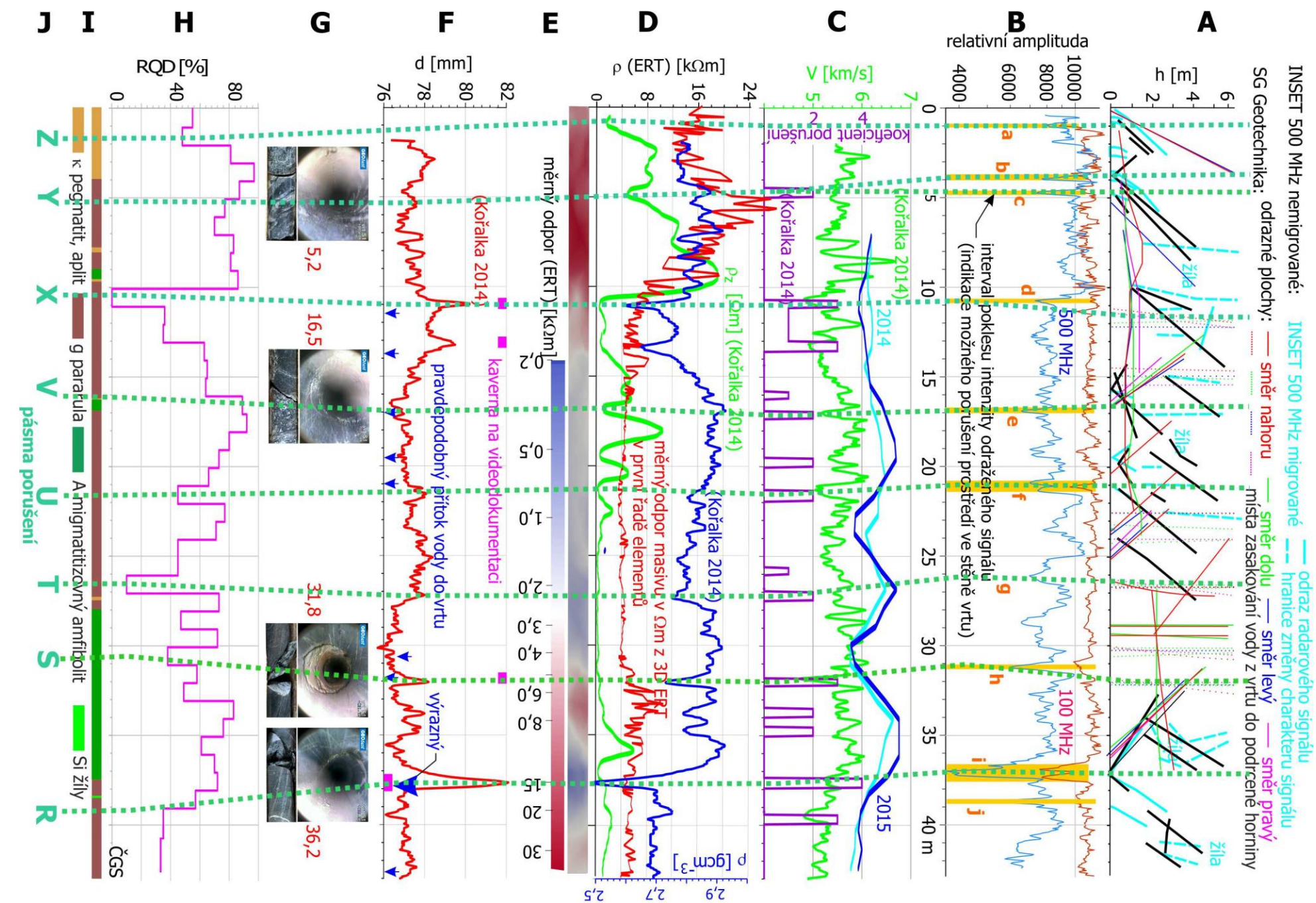
- viditelné plochy nespojitosti na vrtném jádře nebo jeho prudká změna;
- litologické kontakty podle popisu vrtného jádra.

První porušení horninového masivu ve stěně vrtu (**Z**) bylo podle relativní amplitudy detekováno jako diskontinuita **a** v hloubkovém intervalu 0,4–0,8 m (**B**). Porušení je patrné i na radarových odrazech (**A**). Dále zde můžeme konstatovat pokles zdánlivého měrného odporu a mírný pokles RQD. Porucha svírá s osou vrtu úhel přibližně 45°. Celé toto pásmo se nachází v pegmatitech.

Další anomálie minim relativní amplitudy radarového signálu **b** a **c** se na radarových měřeních projevují jako dvě samostatné poruchy **b** a **c** (grafy **B** a **A**) na ostatních měřeních je možné je indikovat pouze jedinou společnou poruchu **Y**. Toto porušení se projevuje určitým poklesem rychlosti podélných vln (**C**), poklesem zdánlivého měrného odporu (**D**), puklinou na optické dokumentaci v 5,2 m (**G**). Porušení se neprojevuje na křivce RQD. Porucha svírá a vrtem úhel cca 41 °. Na geologickém popisu ČGS je v blízkosti dokumentován kontakt pegmatitů a pararul. Indicie poruchy je tedy možné najít v intervalu 3,7–5,2 m.

Radarové projevy poruchy **X** na minimu amplitudy signálu u antény 500 MHZ **d** na grafu indikace odrazných ploch korelují s úseky zjištěné komunikace vody s horninovým masívem v metráži 10,2–11,3 m. Fyzikálně se porucha **X** výrazně projevuje poklesem rychlostí z akustické karotáže a anomálií koeficientu porušení a minimálním snížením seizmických rychlostí z obou seizmokarotážních měření (**C**). Dále v tomto místu můžeme konstatovat existenci úzkého minima objemové hmotnosti se snížením o cca 0,21 gcm^{-3}, poklesem zdánlivých měrných odporů z hodnot okolo 18 kΩm na hodnoty pod 1 kΩm a výrazným poklesem měrných odporů z 3D ERT (**D**). Na této poruše narůstá průměr vrtu z řezného standardu 76 mm na 82 mm. Na videodokumentaci byl v hloubce cca 11,3 m zaznamenán slabý přítok vody do vrtu. Velmi jasný je projev poruchy na křivce RQD, kde jeho hodnota padá až na nulu. Můžeme tedy říci, že tato porucha je jedním z největších porušení horninového masivu v okolí tohoto vrtu. Za určitou zajímavost je možné pokládat snížení objemové hmotnosti okolo metráže 13,4 m. Pokles je velmi výrazný, a to o cca 0,12 gcm^{-3}. Dalším projevem této dílčí poruchy je zvětšení průměru vrtu a indikace na křivce koeficientu porušení. Vzhledem k tomu, že tato anomálie již nemá žádné další fyzikální projevy, je těžké najít vysvětlení jejího vzniku. Litologická příčina nepadá v úvahu, protože ani jeden litologický popis jakoukoli změnu složení hornin nepopisuje. Indicie této poruchy můžeme najít v metráži 10,0 až 11,7 metru.

Radarová odezva odrazné plochy v metráži 15,6 m se jako porucha **V** v okolí metráže 16 m projevuje na křivce relativní amplitudy **e** kde je zaznamenána jako úzké lokální minimum na 500 MHz (na 100 MHz nebyl pokles zaznamenán). Na křivce rychlosti podélných vln byl zjištěn pokles o 1,1 km/s a koeficient porušení zde dosáhl hodnoty 2 (**C**). Na křivce zdánlivých měrných odporů je naopak pokles výrazný a měrné odpory zde klesají pod hranici 1 kΩm. Na měrných odporech z 3D ERT se jejich velikost pohybuje okolo 4,5 kΩm a na křivce GGK nebyla zjištěna žádná anomální hodnota (**D**). Průměr vrtu v tomto místě klesá k 76,5 mm, což zhruba odpovídá neexistenci anomálie objemové hmotnosti. Zato však v 17,2 m byl na videodokumentaci zaznamenán malý přítok vody do vrtu, Toto porušení horninového masivu je patrné i na vrtném jádře a videoinspekci vrtu. RQD se zde skokově mění, s hloubkou narůstá o cca 25 %. Indicie této poruchy můžeme najít v metráži 16,0 až 17,6 m.



Obr. 14 Souhrnná interpretace vrtného radaru ve vrtu S1

Následující porucha **U** se na radaru zobrazuje poklesem amplitudy **f** a odrazy od různých ploch v metráži 19,8 až 20,5 m (**A**). Na karotážních křivkách se porucha projevuje poklesem rychlostí podélných vln až na hodnotu 5,1 km/s. Na křivkách seizmokarotáže žádné indicie poruchy nejsou a koeficient porušení zde dosahuje hodnoty 2 (**C).** Změna zdánlivého měrného odporu dosahuje minimální veličiny a není možné ji přikládat reálný význam. Změny objemové hmotnosti a měrného odporu z 3D ERT jsou minimální (**D**). V místě této poruchy se zvětšuje průměr vrtu asi o 2 mm. Z videodokumentace je opět indikován slabý přítok vody do vrtu (**F**). Na křivkách RQD byl zaznamenán výrazný pokles, a to o 34 %. Na dokumentaci vrtného jádra chybí jakýkoli projev litologických změn. Porucha **U** se projevuje od 19,8 do 22,2 m.

Porucha **T** má jen nevýraznou fyzikální odezvu. Na grafech amplitud se projevila mírným poklesem amplitud 500 MHz (**g**) a na 100 MHz anténě anomální projev chybí. Na odrazných plochách je pouze určitý náznak proudění vody mezi vrtem a masivem. Na rychlostních křivkách všech druhů měření žádný náznak anomálie není patrný. Jediná indicie je nárůst koeficientu porušení na hodnotu 2 (**C)** a na křivce GGK poklesem objemových hmotností o 0,07 g.cm^{-3}. Na měrných odporech žádná anomálie nebyla zjištěna. Důvodem je skutečnost, že porucha **T** leží v širokém pásmu hornin s nízkým měrných odporem. Podle skutečných měrných odporů zjištěných z 3D ERT se hodnoty pohybují okolo veličiny 4 kΩm a zdánlivé měrné odpory z karotáže pak okolo 0,5 kΩm (**D**). Na křivkách kavernometrie je na poruše detekován pokles průměru vrtu, tzn., že pod poruchu by měly být uloženy kvalitnější horniny. V tomto místě nebyl na videokontrole vrtu zjištěn žádný náznak přítoku vody do vrtu (**F**). Hodnota RQD v místě poruchy výrazně poklesla až na 10 %, oproti svému okolí o 35 % (**H**). V litologickém popisu vrtu byla na popisu ČGS zaznamenána pegmatitová žíla. Porucha **T** se projevuje od 25,8 do 27,7 m.

Porucha **S** má projevy na velké většině fyzikálních křivek, a naopak, žádné její indikace se nedají najít na litologickém popisu jádra. Na radargramech můžeme v metráži 30,0 až 30,5 m najít projevy proudění vody mezi vrtem a masivem (**A**). Žádné další radarové projevy nebyly v tomto místě v radarových řezech zaznamenány. Poměrně výrazné pásmo poklesu relativní amplitudy leží těsně na 31 metrech (**h**). V rychlostních grafech je patrný pokles rychlostí určených karotážně, a to až o 0,9 km/s. Na rychlostech ze seizmokarotáže je v tomto místě patrný nárůst rychlostí z nadložního minima. To může být způsobeno tím, že podélná vlna ze seizmokarotáže se může šířit ve větší vzdálenosti od osy vrtu. Nárůst koeficientu porušení dosahuje hodnoty 3. Relativní minimum hodnot objemové hmotnosti leží v okolí 32 metrů a objemová hmotnost zde klesá až o 0,15 gcm^{-3}. Za touto anomálií se začínají postupně zvedat měrné odpory i zdánlivé měrné odpory, které zde z hodnot stovek ohmmetrů narůstají do velikosti až 8 kΩm (**D**). Na výsledcích 3D ERT je v metráži 33 metrů vidět vysokoodporová anomálie. Ta svírá s osou vrtu úhel cca 45°. Proto také její projev na karotážní křivce je posunut do 36 metrů. Na této poruše se zvětšuje průměr vrtu o 2 mm a tuto poruchu je možné spatřit i na fotodokumentaci vrtného jádra a na videodokumentaci vrtných stěn. V tomto místě byl zaznamenán i přítok vody do vrtu (**F**). Na RQD byl zjištěn pokles o 18 %. Porucha **S** se projevuje od 30,0 do 32,2 m.

Poslední detekovaná porucha **R** značí nejvýraznější porušení horninového masivu v celém proměřovaném úseku vrtu S1. Velmi výrazně se projevuje na radarových odrazech, v tomto případě na migrovaném i nemigrovaném řezu (**A**). Ve vzdálenosti asi čtyř metrů od vrtu bylo zjištěno několik žil jiného materiálu, než jsou pararuly. Je pravděpodobné, že se jedná o žíly křemene, které byly litologicky dokumentovány na vrtném jádře v hloubce 38,4 m, a to na obou litologických popisech. Pokles relativní amplitudy (**i**) je u této poruchy

nejvýraznější z celého radarově proměřeného úseku. Hodnota relativní amplitudy klesá u 500 MHz pod 4000 relativních jednotek a výrazně se projevuje i na 100 MHz (porucha **i**). Rozsah anomálie je též největší a sahá od 36,6 m do 37,6 m. Zajímavou skutečností je neexistence rychlostních anomálií v tomto místě (**C**). Jediným možným vysvětlením je, že toto místo je pod vlivem lokálního zvýšení mechanického napětí. Pokud by tato napěťová anomálie neexistovala, pak by v tomto místě musel být zaznamenán i pokles rychlostí. V tomto místě byla zjištěna i nejvyšší hodnota koeficientu porušení, a to čtyři (**D**). Obrovské je snížení objemové hmotnosti, které zde dosahuje oproti nadloží hodnoty cca 0,4 gcm^{-3} a oproti podloží 0,2 gcm^{-3}. Na měrných odporech a ani na zdánlivých měrných odporech nebyly v tomto místě zjištěny žádné anomálie (**E**). V tomto místě došlo ke zvýšení průměru vrtu o 6 mm, což je opět nevyšší číslo registrované v tomto vrtu. Zároveň byl podle videodokumentace dokumentován významný přítok vody do vrtu (**F**). Porucha je též dobře patrná na optické dokumentaci vrtu. Od této poruchy hlouběji do vrtu výrazně klesá RQD. Podle videoprohlídky vrtu porušení horninového masivu s hloubkou dále stoupá. Na dokumentaci vrtného jádra byla cca v 39 m dokumentována žíla křemene. Porucha **S** se projevuje od 30,0 do 32,2 m.

Při sledování jednotlivých anomálií ve vrtu S1 je nutné konstatovat, že indicie porušení masivu, nebo významných odrazných ploch se nedají nalézt na všech sledovaných křivkách změn fyzikálních vlastností a na všech radargramech. To vypovídá o skutečnosti, že žádná z indikovaných ploch neznamená výrazné oslabení horninového masivu, a tím významné zhoršení fyzikálních a mechanických vlastností horninového masivu. Výjimkou je snad porucha **R**. Je samozřejmé, že takovéto hodnocení je subjektivní, a že objektivnějšího hodnocení se lze dopracovat hodnocením fyzikálních a mechanických vlastností in situ a jejich vzájemným převodem založeným na fyzikálních základech.

3.5 Radarové prozařování mezi S17 a ZK-2

Při radarovém prozařování na PVP Bukov byl ve vrtu S17 umístěn vysílací anténní systém a na stěně rozrážky ZK-2 přijímací anténní systém. Měření bylo provedeno souběžným posunem obou anténních systémů po 10 cm. Na obr. 15 jsou vyobrazeny výsledky radarového prozařování a podpůrné parametry pro jeho interpretaci: měrný odpor z 3D ERT, výsledky geologického popisu rozrážky ZK-2: foliace, pukliny a zlomy (Bukovská a kol. 2017) a provozní geologická dokumentace ZK-2 (Patočka 2016). Jednotlivé grafy v obrázku 15 obsahují:

- **A** provozní geologická dokumentace;
- **B** průběh foliace;
- **C** dokumentované pukliny;
- **D** dokumentované zlomy;
- **E** poměrná permitivita a relativní amplitudy prošlého signálu;
- **F** vzdálenost S17 a ZK-2;
- **G** amplituda radarového signálu;
- **H** čas příchodu radarového signálu;

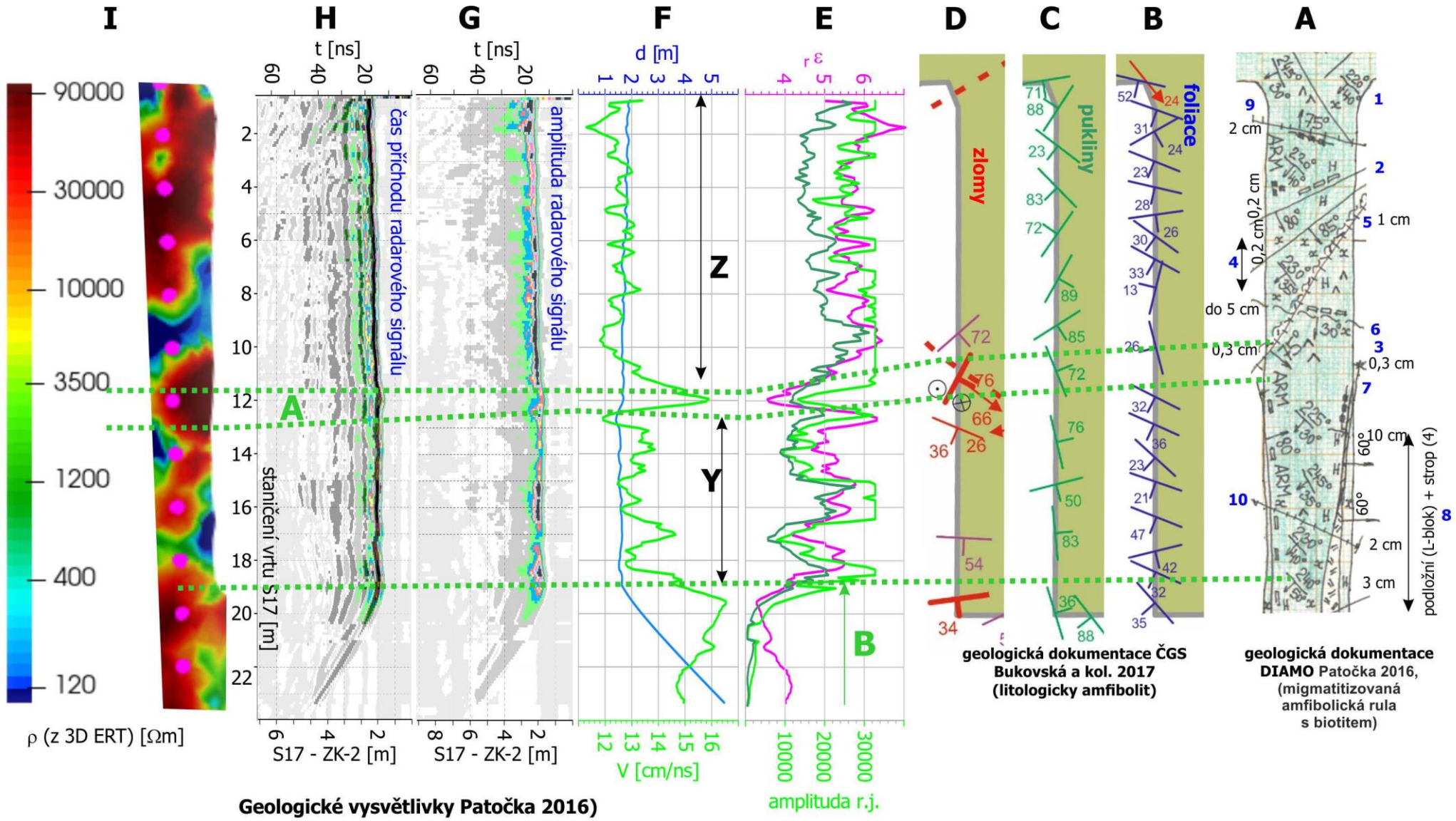
- **I** měrný odpor horninového masivu za západní stěnou ZK-2.

První grafy na obrázku 15 patří geologické dokumentaci zkušební komory ZK-2. Prvním je provozní dokumentace stropu komory Patočka 2016), další tři pak představují dokumentaci České geologické služby (Bukovská a kol. 2017), konkrétně foliaci, pukliny a zlomy. Následují dva grafy sledující relativní amplitudu prošlého radarového signálu a čas příchodu radarových vln a parametry z ní odvozené, tj. rychlost radarových vln a relativní permitivitu. Posledním dílčím grafem je pás měrných odporů, který byl získán 3D interpretací 3D elektrické odporové tomografie, jež byla měřena mezi vrtem S17, geotechnickou laboratoří v metráži 0 až 40 m a překopem BZ-XIIJ v metráži 244 až 276 m. Samotný průběh měrných odporů je doplněn jejich barevnou škálou. Vzdálenost mezi vrtem S17 a stěnou zkušební komory ZK-2 byla určována ze skenovací dokumentace podzemních děl na Bukově, kterou realizovali pracovníci Ústavu geoniky AVČR v Ostravě. Skenovaný byl nejen povrch důlních děl, ale laserový paprsek při skenování pronikal i do vrtného otvoru. Tak bylo možné určit směr vrtu. Z televizní dokumentace vrtu jsme věděli, že vrt je vodorovný. Z vrtu prakticky neodtékala podzemní voda, ale na videozáznamu bylo jednoznačně patrné, že na stěně vrtu podél celé jeho délky stojí voda. Obecně se předpokládá, že snížení amplitudy prošlého radarového signálu lze vysvětlit větším rozptylem elektromagnetického pulzu na puklinovém systému. My jsme se pokusili radarové prozařování interpretovat částečně jiným postupem.

Z radarového prozařování vrtu S17 do komory ZK-2 se podařilo určit dvě výrazně anomální pásma **A** a **B**. První pásmo **A** je možné najít v metrážích 10,2 až 13,0 m. Pásmo je široké asi jeden metr. Jeho projev není na každé metodě ve stejné metráži. Je třeba si uvědomit, že geologický popis popisuje pouze vrtnou stěnu, radarové měření prostor mezi komorou a vrtem a odporová tomografie jde i mírně za stěnu vrtu. K tomu ještě přistupuje obecný průběh jednotlivých diskontinuit, a proto je prakticky nemožné, aby projev jednoho poruchového pásma byl u všech metod na stejné metráži. Druhé pásmo **B** začíná na metráži 18,8 m a pokračuje až do konce proměřovaného úseku vrtu.

Pokud budeme zkoumat vlastnosti horninového masivu určitelné radarovým měřením, tj. rychlost radarových vln potažmo relativní permitivitu, pak je možné konstatovat, že obě vlastnosti se mění v širším rozsahu, než bylo očekáváno. Rychlost radarových vln se mění od 11,3 do 16,6 cm/ns. Pokud vyloučíme anomální pásma, pak se rozsah změn rychlostí sníží na interval 11,3 do 13,8 cm/ns. U relativní permitivity jsou změny obdobné, tj. v celkovém rozsahu kolísají mezi 3,3 až 7,0. Anomální hodnoty relativní permitivity jsou jak „kladné“, tak i „záporné“, tj. jsou větší a menší než normální pole. „Kladné“ hodnoty se od normálního pole liší o 1,0 až 1,4 „záporné pak o 1,5.

Horninový masiv mezi vrtem S17 a zkušební komorou ZK-2 lze rozdělit do tří kvazihomogenních bloků. Blok **Z** sahá od počátku vrtu do metráže 10,8 m, kde končí na poruchovém pásmu **A**. Druhý blok **Y** sahá od 13,0 metru do 18,8 metru, kde končí na poruše **B**. Hodnoty rychlostí elektromagnetických vln se v bloku **Z** pohybují mezi 11,8 až 13,2 cm/ns, v bloku **Y** se rychlostí mění v rozsahu 13,2 až 13,6 cm/ns a v poruše **B** pak mezi 13,0 a 16,5 cm/ns. Relativní permitivita v bloku **Z** se pohybuje v pásmu 5,0–6,2, v bloku **Y** 4,7–6,2. Extrémní hodnoty obou parametrů je možné nalézt v poruchových pásmech. V pásmu **A** rostou radarové rychlosti až na 15,8 cm/ns, v pásmu **B** dokonce na 16,6 cm/ns. Relativní permitivity se projevují opačně, tj. v poruchových pásmech jejich hodnota klesá (**A** na 1,5 a **B** na 4,2). Obecně platí, že poměrná permitivita se u metamorfovaných hornin pohybuje od 3 do 10, výjimečně do 12 (ruly, Karous, 1989).



Geologické vysvětlivky Patočka 2016)

1 albitizace **2** hematitizace **3** albitizace, epidotizace, **ARM** amfobolit migmatitizovaný **4** průběžné sevřené pukliny po 5 cm a mocností do 0,2 cm

5 mylonitizovaná struktura s příměsí „tektonického jílu" a karbonátovou žilou, karbonát bílý, středně zrnitý, „skalní vlhkost", 290/75 je místy silně kataklazovaná

6 mylonitizovaná struktura charakteru tektonické brekcie (silná chlotirizace, přítomnost „tektonického jílu") s šedobílým středně zrnitým karbonátem

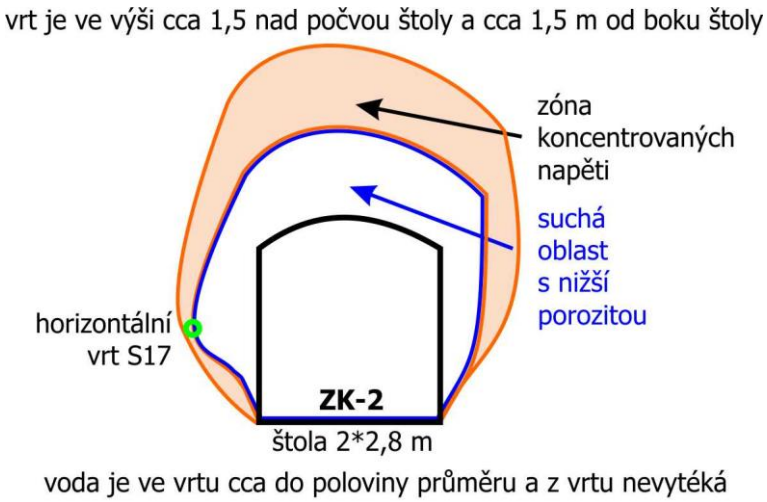
7 puklinová zóna výrazného charakteru, systém průběžných puklin s výraznou hematitizací FeS_2 (sulfidizace, chloritizace); indikátory tektonických dislokací - tektonické ohlazy a striatizace, přítomnost hemetitizovaného „tektonického jílu"; podzemní vody přítomna pouze ve forem+tzv. „skalní vlhkosti" **8** místo výrazné puklinové zóny s intenzivní hematitizací a chloritizací

9 karbonátová žíla se sulfidem (FeS_2) tvořena bílým hrubě zrnitým karbonátem **10** karbonátová žíla tvořená bílým hrubě zrnitým karbonátem bez zrudnění; v okolí hematitizace a metasomatóza (albitizace)

Obr. 15 Souhrnná interpretace radarového prozařování mezi S17 a ZK-2

Vliv obsahu vody na rychlost radarového signálu uvádí u žul například Clayton a kol. Saturované žuly mají rychlost 5 m/ns, nesaturované 7 cm/ns. V našem případě na poruchách rychlost radarového signálu narůstá.

Vysvětlení této okolnosti je relativně složité a není jednoznačné a dosud existuje málo příkladů. Pokus o vysvětlení je uveden na skice v obrázku 16. Po vyražení komory se okolo ní vytvoří zóna koncentrovaného napětí (v obrázku oranžová plocha). Její tvar uvedený ve skice vychází z obecných geotechnických poznatků i z poznatků 3D elektrické odporové tomografie měření ve zkušební komoře ZK-1. Pod touto zónou koncentrovaných napětí se vytvoří zóna odlehčení a zvýšení porozity této části horninového masivu. V ní následně dojde ke snížení vlhkosti čili se dá prohlásit, že zkušební komora ZK-2 drénuje horninový masiv za jejím stěnami. V původně porušeném masivu je drénování rychlejší a vzhledem k předpokládané vyšší porozitě poruchy i výraznější. Tomu napovídají špičkové rychlosti elektromagnetických vln v místě porušení horninového masivu, 15,8 cm/ns (**A**) respektive 16,5 cm/ns (**B**). To dobře odpovídá hodnotám z literatury. Hodnoty rychlostí elektromagnetických vln v neporušeném masivu v okolí zkušební komory ZK-2 klesají až na 11,5 cm/ns (zóna **Z**).



Obr. 16 Schéma změn napětí v okolí ZK-2

4. Závěr

Realizovaná měření vrtným radarem ve vrtech na lokalitách Josef a PVP Bukov přinesla řadu zajímavých nových poznání. Při jejich vyhodnocování se vycházelo jednak ze samotných měření a jednak ze všech geologických, geotechnických a geofyzikálních poznatků, které byly v daném místě k dispozici.

Výhodou realizovaných radarových měření bylo měření dvěma různými aparaturami s třemi různými anténami. Ukázalo se, že měření z obou aparatur nejsou zcela identická, respektive měření nedávají totožné výsledky. Mimo klasického měření s jednou anténou ve vrtu se podařilo realizovat i měření mezi vrtem a stěnou důlního díla, tj. radarové antény byly umístěny každá v jiném díle. Výsledky z těchto měření jsou velmi dobré, zejména je potřebné ocenit skutečnost, že se podařilo určit skutečnou permitivitu a rychlost šíření elektromagnetických vln a její změny. Potvrdil se tak předpoklad, že lokální změna rychlosti elektromagnetických vln může změnit předpokládaný úhel, který svírá zjištěná diskontinuita s osou vrtu.

Opakovaným radarovým měřením se ukázalo, že prvotně zjištěná rozhraní souběžná s osou vrtu, určila pouze jedna aparatura, respektive jeden měřící komplet. Z tohoto důvodu nepovažujeme fyzickou přítomnost takovýchto rozhraní za prokázanou. Ze srovnání výsledků měření různými radarovými systémy vyplynulo, že pouze u části detekovaných anomálií byla zjištěna shoda. Tyto výsledky lze považovat za průkazné. Opakovaným GPR měřením ve vrtu JT1 ve štole Josef se prokázala dobrá shoda při opakovaných měřeních

stejným systémem a možnost sledovat i relativně malé změny v horninovém masívu způsobené rozvojem porušení v důsledku frakování. GPR měření lze tedy použít i při opakovaných měřeních a monitoringu.

Georadarová měření ve vrtu lze použít i v relativně málo porušeném horninovém prostředí, a to nejlépe v komplexu s dalšími geofyzikálními metodami. Detekovat tak lze i takové změny prostředí, které se vizuálně neprojeví při dokumentaci vrtného jádra. Vedle klasické manuální interpretace reflexních rozhraní v radarových řezech byla odzkoušena i nová metoda hodnotící změnu velikosti sumární amplitudy odraženého signálu v daném časovém okně. Na základě komplexního posouzení výsledků GPR měření a dalších geofyzikálních metod
a geotechnických dat získaných na dvou různých lokalitách existuje korelace mezi poklesem relativní amplitudy GPR signálu a místem křížení vrtu s poruchovou zónou. Projev poruchy je intenzivnější a ohraničení poruchového pásma detailnější při použití anténních systémů pracujících na vyšších frekvencích. Zatímco interpretace radarového reflexního řezu je prováděna interpretátorem ručně a je tedy do určité míry ztížena subjektivním přístupem, výhodou statistického vyhodnocení sumární amplitudy záznamu je její objektivita.

Poděkování

Výzkumné práce, z nichž vychází tento článek, byly součástí projektu „Rozvoj geotechnických a geofyzikálních metod pro získání 2D a 3D obrazu geologické stavby“, který byl podporován z rozpočtu MPO. Chtěli bychom MPO poděkovat za možnost tyto výzkumné práce realizovat. Terénní práce byly realizovány z velké části v podzemním výzkumném pracovišti PVP Bukov I a ve štole Josef. Tato díla vybudovala a provozuje Správa úložišť radioaktivních odpadů SÚRAO a ČVUT Praha. Realizace jakýchkoliv činností v prostorách hlubinného dolu je poměrně nákladná, složitá a vyžaduje souhru mnoha profesí a činností (zázemí, technická podpora atd.). Díky součinnosti s oběma organizacemi se podařilo výzkumné práce úspěšně dokončit. Za to patří SÚRAO a ČVUT naše uznání a dík.

Literatura:

BLÁHA, P. *Ověřená technologie, Rozvoj geotechnických a geofyzikálních metod pro získání 2D a 3D obrazu geologické stavby*, GEOtest a.s., 2021, 80 s, MS.

BUKOVSKÁ, Z., VERNER, K. a kol. *Komplexní geologická charakteristika prostorů PVP Bukov, Závěrečná technická zpráva číslo 191/2017*, Česká geologická služba, Praha, 2017, MS.

CLAYTON, C.R.I, MATTHEWS, M.C., SIMONS, N.S. *Site Investigation, Second Edition*, Department of Civil Engineering, University of Surrey, Oxford, Wiley-Blackwell, 1995.

KAROUS, M. *Geoelektrické metody průzkumu*, SNTL, Praha, 1989, 423 s.

KOŘALKA, S. *Závěrečná zpráva o karotážním měření a televizní prohlídce v horizontálním vrtu Bj-1 (Vybudování podzemního výzkumného pracoviště Bukov – Dolní Rožínka)* – interní zpráva, AQUATEST a.s., Praha, 2014, MS.

PATOČKA, M. *Prvotní geologicko-geofyzikální dokumentace ZK2-J*, UD Dolní Rožínka, Dolní Rožínka, 2016, MS.

PATRONE, J. *Using ground-penetrating Radar to Estimate Sediment Load in and Around TwoBoatLake, Western Greenland*, Geotryckeriet, Uppsala universitet, Uppsala, 2013, p.36.

WILLENBERG, H., EVANS, K.F., EBERHARDT, E., LOEW, S., SPILMANN, T., MAURER, H.R. Geological, geophysical and geotechnical investigations into the internal structure and kinematice of an unstable, complex sliding mass in crystalline rock, *9th lnternational Symposium of Landslides*, Rio de Janeiro, Balkema, Leiden, 2004, p. 489–494.

Autoři:

[1] doc. RNDr. Pavel Bláha, DrSc., GEOtest, a.s., Kapitolní 13, Ostrava 700 30, Česká republika, blaha@geotest.cz

[2] RNDr Jiří Nedvěd, SG Geotechnika, Praha, Geologická 2, Česká republika, Jiri.Nedved@geotechnika.cz

[3] RNDr. Jakub Štainbruch, PhD. , INSET s.r.o., Lucemburská 1170/7, Praha 130 00, Česká republika, stainbruch.jakub@inset.com

[4] Ing. Petr Waclawik, PhD., Ústav geoniky AV ČR, v.v.i., Studentská 1768/9, Ostrava 708 00, Česká republika, petr.waclawik@ugn.cas.cz

[5] Ing. Radovan Kukutsch, PhD., Ústav geoniky AV ČR, v.v.i., Studentská 1768/9, Ostrava 708 00, Česká republika, radovan.kukutsch@ugn.cas.cz