

Průběžná zpráva číslo 193/2017

**VZNIK A MONITORING EDZ PŘI
VÝSTAVBĚ PVP BUKOV
(ETAPY Č.2-4)**

Autoři: Lubomír Staš, Josef Malík,
Vlastimil Kajzar, Tomáš Kaláb

Ústav geoniky AV ČR, v.v.i.

Ostrava, květen 2017

Název projektu: Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení hlubinného úložiště

Název dílčího projektu: *Chování horninového prostředí / Vznik a monitoring EDZ při výstavbě PVP Bukov*

Název dílčí etapové zprávy: *Vznik a monitoring EDZ při výstavbě PVP Bukov (ETAPY č.2-4)*

Průběžná technická zpráva

Evidenční číslo objednatele: SÚRAO TZ 193/2017

Evidenční číslo poskytovatele: PB-2017-PZ-S1894-023-BukovEDZ

ŘEŠITELÉ:

Ústav geoniky AV ČR, v.v. i.

Autoři: Lubomír Staš, Josef Malík, Vlastimil Kajzar, Tomáš Kaláb

Autorský kolektiv (abecedně): Georgiovská L., Kohut R., Kolcun A., Kukutsch R., Souček K., Zajícová V.

Obsah

1 Úvod	10
2 Etapa 2. Monitoring vzniku a vývoje EDZ v oblasti překopu BZ1-XII metodami CCBM a CCBO (doplnění plánovaného vějíře vrtů) a instalace zařízení pro kontinuální záznam dat.	11
2.1 Popis distribuovaného měřicího systému PVP Bukov.....	11
2.1.1 Popis konkrétního řešení Distribuovaného měřicího systému v PVP Bukov	11
2.1.2 Podružný koncentrátor dat a propojení měřicích bodů.....	15
2.1.3 Aktuální stav a plánovaný průběh dalších prací.....	15
2.1.4 Ilustrační fotografie.....	16
2.2 Rozšíření monitorovací stanice napěťového pole ve staničení 57 m v díle BZ1-XII	17
2.2.1 Popis situace.....	17
2.2.2 Použitá metodika a realizace.....	19
2.2.3 Příklady výsledků měření napětí v horninovém masivu použitím sond CCBO a CCBM	20
2.2.3.1 Měření napětí metodou CCBO	20
2.2.3.2 Měření změn napětí metodou CCBM	21
3 Etapa 3. Provedení přesného 3D skenu tvaru důlního díla PVP Bukov	28
3.1 Technologie laserového skenování	28
3.2 Harmonogram prací	28
3.3 Přístrojové vybavení.....	29
3.4 Realizace skenovacích prací a následný post-processing.....	29
4 Etapa 4 Matematický model vzniku a chování EDZ díla PVP Bukov	33
4.1 Popis metodiky.....	33
4.1.1 Geometrie tunelu a instalace měřicích bodů	33
4.1.2 Postup měření.....	34
4.1.3 Síť z konečných prvků pro modelovou úlohu.....	34
4.1.4 Analýza metodiky pro 3D pro elementární síly na hranici	36
4.1.5 Rovinná varianta	38
4.1.6 Grafy vypočtených konvergenčních křivek pro modelovou úlohu	38
4.1.7 Algoritmus pro určení vhodných dvojic měřicích bodů	39
4.2 Originalita metodiky ve srovnání s jinými postupy měření napětí a výhody navrženého postupu.....	41

4.3	Kalibrace vyvinuté metodiky	41
4.3.1	Horizontální model hlavních směrů	42
4.3.2	Rekonstrukce původních napětí 3D úloha – Bukov	45
5	Závěr	49
6	Citace a seznam literatury	50

Seznam obrázků:

Obr. 1	Blokové schéma topologie DMS instalovaného v PVP Bukov (šedě jsou vyznačeny části DMS, které ještě nemohly být instalovány).....	14
Obr. 2	Hlavní řídicí rozvaděč umístěný ve Vrk 1, vlevo je vidět do DMS připojené zařízení monitorující hydraulický režim vrtu	16
Obr. 3	Záložní hlavní rozvaděč s řídicím PC umístěný ve výklenku BZ1-XII v oblasti monitorovacích vrtů S9-S13	16
Obr. 4	Podružný koncentrátor dat pro připojení tenzometrických měřicích svorníků v lokalitě konvergenční stanice KS2.....	17
Obr. 5	Schéma plánovaného situování vrtů - půdorys; žlutou barvou je vyznačen plánovaný výklenek částečně chránící přípojné místo – záložní řídicí hlavní rozvaděč před přímými účinky postupujících razících prací ve sledovaném díle, (Skutečné charakteristiky vrtů a realizovaná umístění měřicích zařízení lze nalézt v Tab. 1).....	18
Obr. 6	Fotografie použitých sond CCBO (a) a CCBM (b) do vrtů o průměru 76 mm osazených 6 skupinami tenzometrů na kuželové špici.....	19
Obr. 7	Předběžné vyhodnocení tenzoru napětí ve vrtech S9, S11-13, projekce průsečíků směrových přímk hlavních složek napěťového tenzoru na dolní projekční hemisféru, hodnoty jsou v MPa nad značkou, směrové charakteristiky ve stupních pod značkou; (● - σ_1 , ■ - σ_2 , ▲ - σ_3 ; ◀ - směr BZ1-XII)	21
Obr. 8	Typický časový záznam vývoje deformací v mikro-strainech na jednotlivých tenzometrech kuželové sondy CCBM (vrt S9)	22
Obr. 9	Vypočtené průběhy časové závislosti hodnot hlavních složek napěťové změny ve vrtu S9 včetně informace o pozicích ražeb (a) a vývoji jejich prostorové orientace (b) (blíže viz text)	23
Obr. 10	Vypočtené průběhy časové závislosti hodnot hlavních složek napěťové změny ve vrtu S10 včetně informace o pozicích ražeb (a) a vývoji jejich prostorové orientace (b) (blíže viz text)	24
Obr. 11	Vypočtené průběhy časové závislosti hodnot hlavních složek napěťové změny ve vrtu S11 včetně informace o pozicích ražeb (a) a vývoji jejich prostorové orientace (b) (blíže viz text)	25

Obr. 12 Vypočtené průběhy časové závislosti hodnot hlavních složek napěťové změny ve vrtu S12 včetně informace o pozicích ražeb (a) a vývoji jejich prostorové orientace (b) (blíže viz text).....	26
Obr. 13 Vypočtené průběhy časové závislosti hodnot hlavních složek napěťové změny ve vrtu S13 včetně informace o pozicích ražeb (a) a vývoji jejich prostorové orientace (b) (blíže viz text).....	27
Obr. 14 Prostorová situace chodby ZK-1 v době skenování – kompletní mračno bodů + detail na jeho dílčí části.....	30
Obr. 15 Profil chodby ZK-1 ve vzdálenosti 5, 10, 15 a 20 m od její čelby.....	31
Obr. 16 3D model části chodby ZK-1 v oblasti její čelby.	32
Obr. 17 Geometrie tunelu a pozice měřických bodů.	34
Obr. 18 Čelní pohled na vytvořenou výpočetní síť.....	35
Obr. 19 Boční pohled na vytvořenou výpočetní síť.....	35
Obr. 20 Pohled s perspektivou na výpočetní síť.....	36
Obr. 21 Nahrazení tří řešených úloh s postupnou změnou čela tunelu (a změnou vzdálenosti měřícího bodu od čela) (vlevo) jednou úlohou s třemi měřícími body (vpravo).	37
Obr. 22 Průběh konvergence pro vyznačenou dvojici měřických bodů a pro jednotlivé elementární úlohy.....	39
Obr. 23 Vybrané konfigurace měřických bodů a) Konfigurace Babe, b) konfigurace Bace, c) konfigurace Babc, d) Baeg.	40
Obr. 24 Tvar těžební jámy dolu Frenštát.....	42
Obr. 25 Pukliny na stěně betonového ostění šachty.....	43
Obr. 26 Konečně prvková síť pro úlohu havárie na dole Frenštát.....	44
Obr. 27 Naměřené deformace v hloubce 602 m a horizontální složky tenzoru napětí.....	44
Obr. 28 Aproximace měřických bodů na profilech.....	46
Obr. 29 Konvergence mezi měřickými body na druhém profilu.....	46
Obr. 30 Konvergence mezi měřickými body na třetím profilu.....	47
Obr. 31 Konvergence mezi měřickými body na druhém a třetím profilu.....	47
Obr. 32 Zobrazení hlavních složek vypočteného původního napětí z konvergenčních měření, Vizualizace hlavních složek a jejich orientace vůči ose tunelu (x-osa) se směrem 151° (vlevo), vypočtené velikosti poměrů hlavních složek tenzoru napětí (vpravo).....	48

Seznam tabulek:

Tab. 1 Charakteristika geometrie uspořádání měřících vrtů S9 - S14.....	18
Tab. 2 Barevné značení základních úloh.....	38

Dlážděná 6 | 110 00 Praha 1 | ČR

tel.: +420 221 421 511 | fax: +420 221 421 544 | e-mail: info@sura0.cz | www.sura0.cz

IČ: 66000769 | Bankovní spojení: ČNB Praha 1, č. ú. 35-64726011/0710

Tato zpráva je výhradně majetkem SÚRAO a její šíření bez vědomí majitele je zakázáno.

Správa úložišť radioaktivních odpadů byla zřízena k 1. 6. 1997 Ministerstvem průmyslu a obchodu ČR jako státní organizace na základě atomového zákona (§ 26 zákona č. 18/1997 Sb. o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření). Od roku 2000 je SÚRAO ve smyslu § 51 zákona č. 219/2000 Sb. organizační složkou státu.

Tab. 3 Čísla podmíněnosti matic pro některé šestice měřických dvojic bodů.....	40
Tab. 4 Vypočtená vlastní napětí λ_1 , λ_2 a jejich směrové natočení φ	44
Tab. 5 Souřadnice měřických bodů	45

Dlážděná 6 | 110 00 Praha 1 | ČR

tel.: +420 221 421 511 | fax: +420 221 421 544 | e-mail: info@sura0.cz | www.sura0.cz


IČ: 66000769 | Bankovní spojení: ČNB Praha 1, č. ú. 35-64726011/0710

Tato zpráva je výhradně majetkem SÚRAO a její šíření bez vědomí majitele je zakázáno.

Správa úložišť radioaktivních odpadů byla zřízena k 1. 6. 1997 Ministerstvem průmyslu a obchodu ČR jako státní organizace na základě atomového zákona (§ 26 zákona č. 18/1997 Sb. o mírovém využívání jaderné energie a ionizujícího záření). Od roku 2000 je SÚRAO ve smyslu § 51 zákona č. 219/2000 Sb. organizační složkou státu.

Seznam použitých zkratk:

BZ xxx	Místní pojmenování překopů
CCBO	Compact Conical ended borehole Overcoring (metoda měření napětí obvrtáním)
CCBM	Compact Conical ended borehole Monitoring (metoda měření změn napětí)
ČGS	Česká geologická služba
DAQ PC	Počítač určený pro sběr dat
DMS	Distribuovaný měřicí systém
EDZ	Excavation damaged zone
ETH	Ethernet
HÚ	Hlubinné úložiště
KS x	Konvergenční stanice x
PKD	Pobočný koncentrátor dat
PVP	Podzemní výzkumné pracoviště
RS232,RS485	Typ komunikačních linek
ÚGN	Ústav geoniky
S1,S2,S3	hlavní složky tenzoru napěťových změn
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	hlavní složky tenzoru napětí
S-JTSK	Typ geografických souřadnic
SÚRAO	Správa úložišť radioaktivních odpadů
SVA	Měřicí svorník
SW	Software
VrK x	Vrtná komora x
ZK x	Zkušební komora x

 SÚRAO	Vznik a monitoring EDZ při výstavbě PVP Bukov	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 193/2017

Abstrakt

Práce popisuje stav řešení Etap 2-4. Je popsán vyvinutý a nasazený distribuovaný měřicí systém umožňující odečítat data z různých typů měřicích senzorů, ukládat data a předávat je na vzdálené instituce ke zpracování a interpretaci. DMS zejména obsluhuje 6 sond typu CCBM a 3 trojice měřicích svorníků pro zjišťování napěťového pole v předmětné lokalitě PVP Bukov, dále obsluhuje řadu snímačů zejména pro sledování hydrogeologického a teplotního režimu masivu. Jsou provedeny první předběžná vyhodnocení některých napěťových měření CCBO i CCBM. V rámci Etapy 3 jsou popsány první výstupy aplikace 3D scanování v ZK1. V rámci etapy matematického modelování napěťového pole byly připraveny sw nástroje pro stanovení plného tenzoru napětí z měření konvergencí stěn důlního díla při jeho ražbě. Je zde popsána metodika, její podstata i optimalizace podmínek měření. Funkčnost metody byla ověřena na reálných datech z konvergenční stanice KS2, výsledky jsou v souladu s jinými metodami stanovení napěťového pole.

Klíčová slova


úložiště, napěťové pole, 3D scan, Bukov, konvergence, monitoring

Abstract

The report describes the current state of Etapa 2 - 4. It describes distributed developed measuring system which allows to read data from different types of measuring sensors, to store data and to transmit them to a remote storage for their processing and interpretation. DMS mainly operates with 6 pieces of CCBM probes and a trio of measuring bolts for detecting the stress field of the subject area PVP Bukov, it also operates with series of sensors proposed for monitoring the hydrogeological and the thermal regime of the massif. The first preliminary evaluations of some of CCBO and CCBM stress determinations are represented. The first outputs of 3D laser scanning in ZK1 are presented in the Etapa 3. The mathematical modelling stage prepared SW for determining the full stress tensor from measured convergences at the underground work surface and also during its excavation. Here, the method, its essence and optimization of the measurement conditions are described. The functionality of the method was tested on real data from the convergence station KS2, the results are consistent with other methods of determining the stress field.

Keywords

stress field, 3D scan, Bukov, monitoring, convergence, storage, repository

 SÚRAO	Vznik a monitoring EDZ při výstavbě PVP Bukov	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 193/2017

1 Úvod

Tato zpráva byla zpracována v rámci projektu SÚRAO „Výzkumná podpora bezpečnostního hodnocení hlubinného úložiště“, který je součástí přípravy hlubinného úložiště radioaktivních odpadů (dále jen HÚ). Cílem projektu je získat vybraná data, modely, argumenty a další informace potřebné pro zhodnocení potenciálních lokalit pro umístění HÚ z hlediska dlouhodobé bezpečnosti. Na základě veřejného zadávacího řízení byla v červenci 2014 uzavřena čtyřletá smlouva s ÚJV Řež, a. s. a jeho subdodavateli: Českou geologickou službou; ČVUT v Praze; Technickou univerzitou v Liberci; Ústavem Geoniky AV ČR, v. v. i.; a společnostmi Arcadis CZ a. s.; Progeo, s. r. o.; Chemcomex Praha, a. s. a Centrum výzkumu Řež s. r. o. o poskytování výzkumné podpory hodnocení dlouhodobé bezpečnosti v následujících oblastech:

- i. Chování VJP a forem RAO, nepřijatelných do přípovrchových úložišť, v prostředí hlubinného úložiště;
- ii. Chování ukládacích obalových souborů (UOS) VJP a RAO v prostředí hlubinného úložiště;
- iii. Chování tlumících, výplňových a dalších konstrukčních materiálů v prostředí hlubinného úložiště;
- iv. Řešení úložných vrtů a jejich vliv na vlastnosti obklopujícího horninového prostředí;
- v. Chování horninového prostředí;
- vi. Transport radionuklidů z úložiště;
- vii. Další charakteristiky lokalit potenciálně ovlivňující bezpečnost úložiště.


Cíl tohoto dílčího projektu *Vznik a monitoring EDZ při výstavbě PVP Bukov* má úzkou vazbu na problematiku řešenou v dílčím projektu „Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov“. Zejména v geomechanické a geotechnické oblasti předpokládá sloučení poznatků o napětovém a deformačním stavu masivu a jeho změnách v blízkém okolí, indukovaných procesy při jeho budování.

Tato zpráva dokumentuje průběžný stav výzkumu v projektu „Vznik a monitoring EDZ při výstavbě PVP Bukov“. Konkrétně je zaměřena na stav řešení Etap 2- 4:

- Etapa 2 Monitoring vzniku a vývoje EDZ v oblasti překopu BZ₁-XII metodami CCBM a CCBO (doplnění plánovaného vějíře vrtů) a instalace zařízení pro kontinuální záznam dat
- Etapa 3 Provedení přesného 3D skenu tvaru důlního díla PVP Bukov
- Etapa 4 Matematický model chování EDZ díla PVP Bukov

Je popsán vyvinutý a nasazený distribuovaný měřicí systém umožňující odečítat data z různých typů měřicích senzorů, ukládat data a předávat je na vzdálené instituce ke zpracování a interpretaci. V důsledku zpoždění razících prací musely být některé aktivity přizpůsobeny tomuto stavu a přesunuty. To se týká např. problematiky Etapy 3 – naskenování přesného tvaru finálního díla, kde byl zatím realizován pouze sken ZK 1. Pro dokončení plánovaných prací je nutno vyčkat na ukončení razících prací a vyklizení prostor.

Matematické modelování je zaměřeno na popis charakteru napětového pole v nejbližším okolí díla a vymezení zóny ovlivnění důlním dílem na základě komplexního zpracování změřených dat.

 SÚRAO	Vznik a monitoring EDZ při výstavbě PVP Bukov	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 193/2017

2 Etapa 2. Monitoring vzniku a vývoje EDZ v oblasti překopu BZ1-XII metodami CCBM a CCBO (doplnění plánovaného vějíře vrtů) a instalace zařízení pro kontinuální záznam dat.


2.1 Popis distribuovaného měřicího systému PVP Bukov

Na základě zadání tohoto projektu byl vypracován nový koncept monitorování všech žádaných veličin v Podzemním výzkumném pracovišti Bukov na chodbách BZ-XIIJ a BZ1-XII. Na tento systém byly kladeny požadavky zejména na vysokou variabilitu a možnost nezávislého modulárního rozšiřování měřicího systému a možnost připojení všech aktuálně instalovaných čidel v PVP Bukov. V neposlední řadě byl také kladen důraz na přiměřenou finanční náročnost výroby a následného rozšiřování měřicího systému. Těmto požadavkům na variabilitu systému a jednoduchou a ekonomicky nenáročnou rozšiřitelnost měřicího systému bez předchozí znalosti veličin, které bude potřeba k systému v budoucnu připojit, nejlépe vyhovuje koncept distribuovaných měřicích systémů. Dalším parametrem, který lze optimálně splnit pomocí distribuovaných měřicích systémů je ekonomické a jednoduché vedení kabeláže k jednotlivým měřicím bodům, respektive dílčím měřicím skupinám, kdy mezi jednotlivými měřicími skupinami je nutné překonávat vzdálenosti 100 a více metrů a je požadováno galvanické oddělení jednotlivých měřicích skupin. Díky povaze měření, která se v PVP Bukov provádějí, se tyto měřicí body daří bez problémů koncentrovat do skupin rozmístěných zejména u tektonických změn a v několika vybraných monitorovacích stanicích.

Konkrétně je tedy délka propojení nejdále umístěných měřicích bodů na chodbě BZ-XIIJ 200 metrů, délka propojení chodby BZ1-XII s VrK-1 je aktuálně okolo 90m. V minulých týdnech však byly instalovány nové měřicí body v rozrážce ZK-3J. Připojením těchto nových měřicích bodů se prodlouží délka propojení v chodbě BZ1-XII na cca 120m.

2.1.1 Popis konkrétního řešení Distribuovaného měřicího systému v PVP Bukov

V čtvrtém kvartále 2015 až prvním kvartále 2016 byla v PVP Bukov vybudována hlavní část distribuovaného měřicího systému (dále DMS). Do tohoto DMS jsou připojeny jednak SMART senzory s digitálním výstupem měřených dat, ale také senzory s analogovým výstupem. Aktuálně je do tohoto DMS připojeno 9 tenzometrických měřicích svorníků SVA pro měření zatížení těchto svorníků, 6 kuželových tenzometrických sond CCBM 2,5G pro měření změn kompletního vektoru napětí v masivu, 8 analogových senzorů pro měření průtoků, 9 pomocných kanálů pro měření teplot a vlhkostí ve vybraných oblastech, které slouží jako doplňující informace při vyhodnocování změn napětí, a také 13 diagnostických kanálů monitorujících napětí, proudy, vlhkost a teplotu v jednotlivých rozvaděčích. Celý DMS je konstruován tak, že poskytuje krytí minimálně dle IP66 a IK07. Všechny konektory a vstupy do rozvaděčů, v nichž jsou fyzicky umístěny měřicí a pomocné jednotky, jsou v provedení IP68. Tato konstrukce je nutná, aby mohla být zajištěna dlouhodobě spolehlivá funkčnost systému v podmínkách agresivního důlního prostředí.


 SÚRAO	Vznik a monitoring EDZ při výstavbě PVP Bukov	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 193/2017

Instalovaný DMS je navržen v topologii master – slave systém s fixním měřicím cyklem s cyklickým dotazováním. U tohoto typu měřicího cyklu je nutné při přidávání nových měřicích bodů upravit měřicí software, respektive jeho konfiguraci, aby byly tyto nové měřicí body zahrnuty do měřicího cyklu. Při odebrání měřicích bodů není nutné provádět zásahy do nastavení měřicího software. Pokud měřicí software nedostane v definovaném časovém rámci korektní odpověď na enumerační dotaz od dotazované měřicí jednotky, je adresa měřicí jednotky pro následné dotazování hodnot na jejích jednotlivých kanálech v daném měřicím cyklu vyřazena ze zpracování. Tímto způsobem se také měřicí cyklus vyrovnává s případnými chybami v komunikaci anebo v měřicí jednotce. Perioda měřicího cyklu byla zvolena 15 minut. Tato perioda je dostatečná i pro zachycení rychlejších změn a zároveň není množství dat zbytečně velké a je tedy bez problémů možno tato data zpracovávat v běžně užívaných softwarových nástrojích.

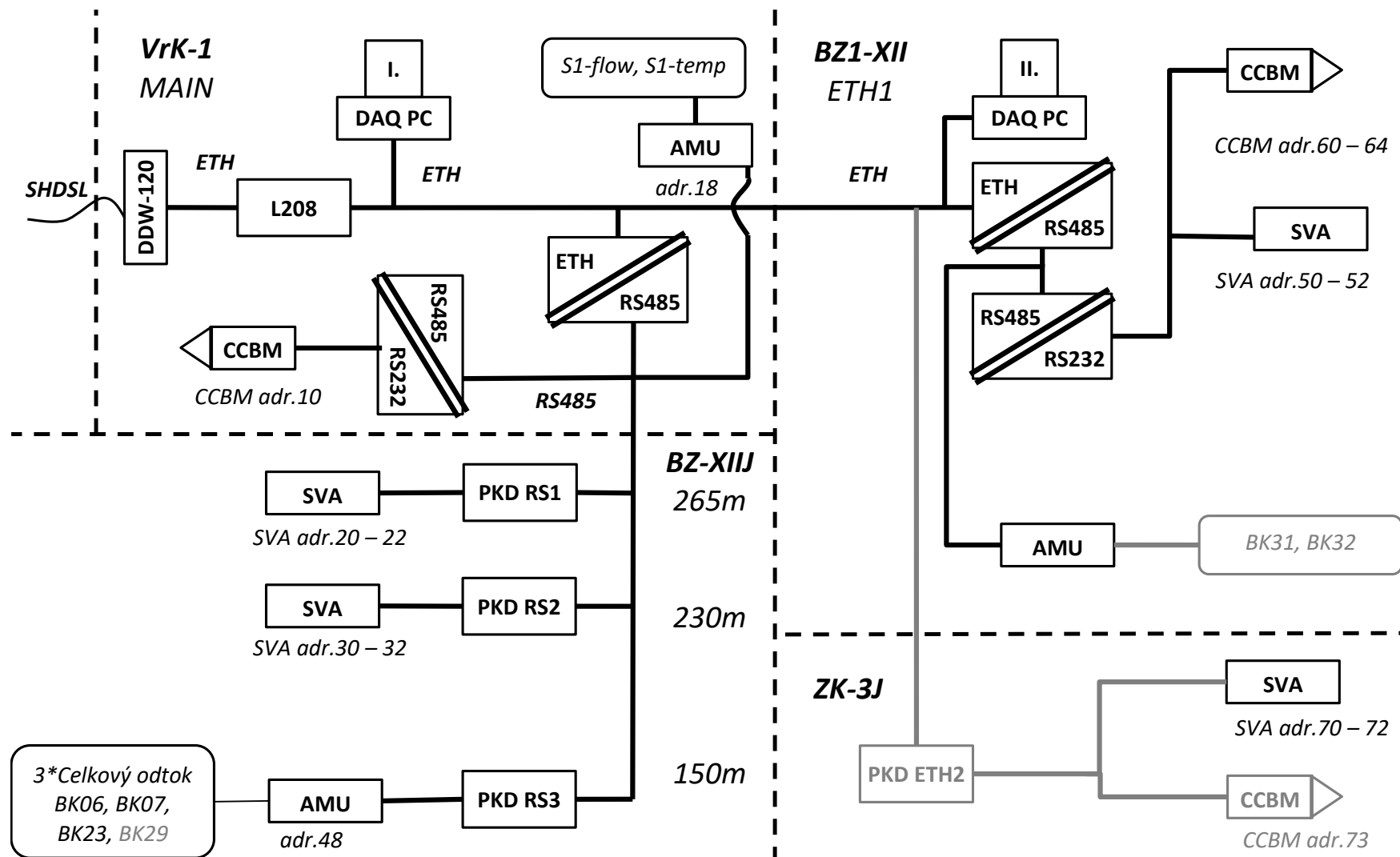
Aby byla zajištěna maximální možná spolehlivost měřicího systému, je vhodné tento DMS koncipovat jako plně redundantní systém. Toto řešení plně redundantního systému však není kvůli neúměrně vysoké ekonomické náročnosti tohoto řešení vhodné. Jako neoptimálnější kompromis mezi zachováním vysoké míry spolehlivosti DMS a pořizovacími náklady na DMS se jeví řešení pomocí částečně redundantního systému. V tomto přístupu jsou brány senzory, kabeláž a podružné koncentrátory dat jako bezporuchové a zdvojen je pouze počítač pro sběr dat a napájecí obvody. Vlastní připojení k napájecí soustavě však není možné provést dvěma nezávislými přívody. Plná redundance napájení tedy nemohla být z důvodu nemožnosti přivedení dvou nezávislých napájecích přívodů zajištěna.

Přenosová média užívaná v instalovaném distribuovaném měřicím systému jsou realizovány metalickými spoji na sběrnicích RS232, RS485 a Ethernet 100Base-TX. Vzhledem k jednoduchosti implementace a dostupnosti standardních komerčních řešení byla linková vrstva (ITU 2016) pro komunikaci s měřicími body zvolena asynchronní sériová linka s komunikačním protokolem AIBus-2. Komunikační protokol AIBus-2 (AIBus-2 2016) byl zvolen jednak kvůli širokému portfoliu standardně vyráběných měřicích jednotek a předchozím příznivým zkušenostem s těmito měřicími jednotkami firmy *TEDIA[®] spol. s.r.o.* (TEDIA 2016), jednak kvůli faktu, že standardně vyráběné sondy CCBM 2,5G mají také implementovanou podporu protokolu AIBus-2. V tomto master – slave protokolu má každá měřicí jednotka přiřazenu svou adresu, pomocí které se master DAQ PC dotazuje na data měřená touto jednotkou. Adresy jsou voleny tak, že v dekadické podobě první číslice určuje měřicí skupinu a druhá číslice pořadové číslo v této skupině. Je tedy jednoduše možné určit, v jakém místě PVP Budov se měřicí jednotka nachází.


Metalický spoj ve standardu RS485 je využíván k propojování páteřní sítě, RS232 pak pro krátká propojení mezi měřicími body a podružnými koncentrátory dat. Přenosová rychlost na sběrnicích RS232 a RS485 byla zvolena standardně užívaná 9600 baud. Ethernet 100Base-TX ve standardním zapojení se v DMS používá jednak pro rozvedení internetové konektivity k jednotlivým bodům a jednak pro propojování počítačů pro sběr dat (DAQ PC) a podružných koncentrátorů dat s ethernetovým připojením (PKD ETH). Na klíčových místech ethernetové infrastruktury jsou použity osvědčené a vysoce spolehlivé průmyslové switche Westermo, konkrétně jako hlavní switch je použit L208 (layer 3) a jako podružný switch SDW-550 (layer 2). Aby byl možný superiorský dohled nad měřicím systémem a mohl být zajištěn automatický přenos dat na datový server, bylo nutné zajistit dovedení internetové konektivity do prostor PVP Bukov. Vzhledem k tomu, že ve čtvrtém kvartále 2015 nebyly finalizovány projekty na výstavbu PVP Bukov, kde je také řešeno přivedení internetové konektivity, muselo být vytvořeno náhradní řešení v podobě přivedení internetové konektivity pomocí metalického

 SÚRAO	Vznik a monitoring EDZ při výstavbě PVP Bukov	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 193/2017

telefonního vedení, které je zde běžně dostupné. Délka metalického telefonního vedení mezi PVP Bukov a dispečinkem závodu Rožná, kde je internetová konektivita dostupná, je zde asi 4km. Maximální spolehlivě dosahovaná a stabilní rychlost na tomto vedení byla otestována 3072 kbit/s. Vzhledem k rychlosti přidělené internetové konektivity ale byla nastavena rychlost přenosu mezi dispečinkem a PVP Bukov na 2688kbit/s. Tímto snížením rychlosti se také zvýší odstup signálu od šumu a tím i spolehlivost spojení. O přenos ethernetu přes SHDSL se starají převodníky Westermo DDW-120Ex. Po přivedení internetové konektivity do PVP Bukov pomocí optických kabelů je možné je přímo připojit přes vhodné SFP moduly přímo do hlavního switchu L208 a odpojit stávající SHDSL vedení.



Obr. 1 Blokové schéma topologie DMS instalovaného v PVP Bukov (šedě jsou vyznačeny části DMS, které ještě nemohly být instalovány)

 SÚRAO	Vznik a monitoring EDZ při výstavbě PVP Bukov	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 193/2017

2.1.2 Podružný koncentrátor dat a propojení měřicích bodů

Aby bylo zajištěno spolehlivé funkce všech měřicích bodů, je nutné jednotlivé měřicí body galvanicky izolovat. Analogové měřicí jednotky firmy TEDIA® spol. s.r.o. mají galvanickou izolaci komunikační linky RS485 integrovanou. Měřicí tenzometrické svorníky SVA a monitorovací kuželové sondy CCBM 2,5G nemají galvanickou izolaci integrovanou a také používají jako fyzickou vrstvu (ITU 2016) standard RS232. Funkci galvanické izolace pro tyto měřicí body tedy společně plní externí DC/DC převodník s galvanickou izolací s galvanicky izolovanými konvertory fyzického rozhraní RS232 – RS485 tM-7520U firmy ICP CON. Tyto převodníky nemají řídicí a vyrovnávací obvody, zajišťují tedy pouze prostou konverzi fyzických vrstev. Konverze komunikačních rychlostí rovněž není možná.

Z funkčního hlediska tedy každý PKD slučuje komunikační sběrnice jednotlivých měřicích jednotek a u měřicích jednotek typu CCBM 2,5G a SVA provádí i galvanické oddělení pro tyto jednotky a konverzi komunikační fyzických vrstev. V PKD ETH1, ETH2 a RS3 jsou instalovány převodníky pro měření analogových veličin. Do PKD RS3 jsou připojeny unifikované analogové signály 4–20mA z měřicích bodů BK23, BK06, BK07 a dále teplota, aktuální průtok a celkové protečené množství vody z jednotky celkového odtoku z PVP Bukov. Analogové kanály instalované v ETH1 a ETH2 slouží pro monitorování změn vlhkosti a teploty prostředí a slouží jako doplňující informace při vyhodnocování změn napětí.

V podružných koncentrátorech dat PKD RS3, PKD ETH1 a PKD ETH2 jsou instalovány diagnostické moduly jednak pro monitorování provozních veličin a stavu v jednotlivých rozvaděčích a jednak moduly, které umožňují vzdálené odpojování a restartování vybraných klíčových částí DMS.

2.1.3 Aktuální stav a plánovaný průběh dalších prací

Aktuálně je do DMS připojeno 9 tenzometrických měřicích svorníků SVA pro měření zatížení těchto svorníků, 6 kuželových tenzometrických sond CCBM 2,5G pro měření změn kompletního tenzoru napjatosti horninového masivu, 8 analogových senzorů pro měření průtoků a také 13 diagnostických kanálů monitorujících napětí, proudy, vlhkost a teplotu v jednotlivých rozvaděčích. Také byly instalovány moduly pro vzdálené odpojování a restartování vybraných klíčových částí DMS.

Připojení nově instalovaných měřicích svorníků SVA adr. 70 – 72 a znovuzapojení odpojené části DMS v chodbě BZ1-XII je plánováno na 27. týden 2016, respektive po dokončení ražebních prací. V tomto termínu bude také znovuobnoveno připojení hnízda sond CCBM 2,5G adr. 60 – 64, hnízda měřicích svorníků SVA adr. 50 – 52 a záložního počítače pro sběr měřených dat DAQ PC II.

Dále je plánováno připojení měřicích bodů BK29, BK15 na chodbě BZ-XIIJ, na chodbě BZ1-XII pak BK31 a BK32. Všechny tyto měřicí body budou mít unifikovaný výstup 4–20mA. Přesný termín instalace nebyl určen ze strany ČGS, která zajišťuje instalaci těchto čidel. Pokud by vyvstaly další požadavky na rozšíření systému, je možné je na základě vzájemné domluvy realizovat. Kapacita systému je omezena pouze výpočetním výkonem DAQ PC (zde je značná rezerva) a kapacitou přenosového média – páteřních linek RS485. I zde je aktuálně značná rezerva ve výkonu.

2.1.4 Ilustrační fotografie



Obr. 2 Hlavní řídicí rozvaděč umístěný ve Vrk 1, vlevo je vidět do DMS připojené zařízení monitorující hydraulický režim vrtu



Obr. 3 Záložní hlavní rozvaděč s řídicím PC umístěný ve výklenku BZ1-XII v oblasti monitorovacích vrtů S9-S13



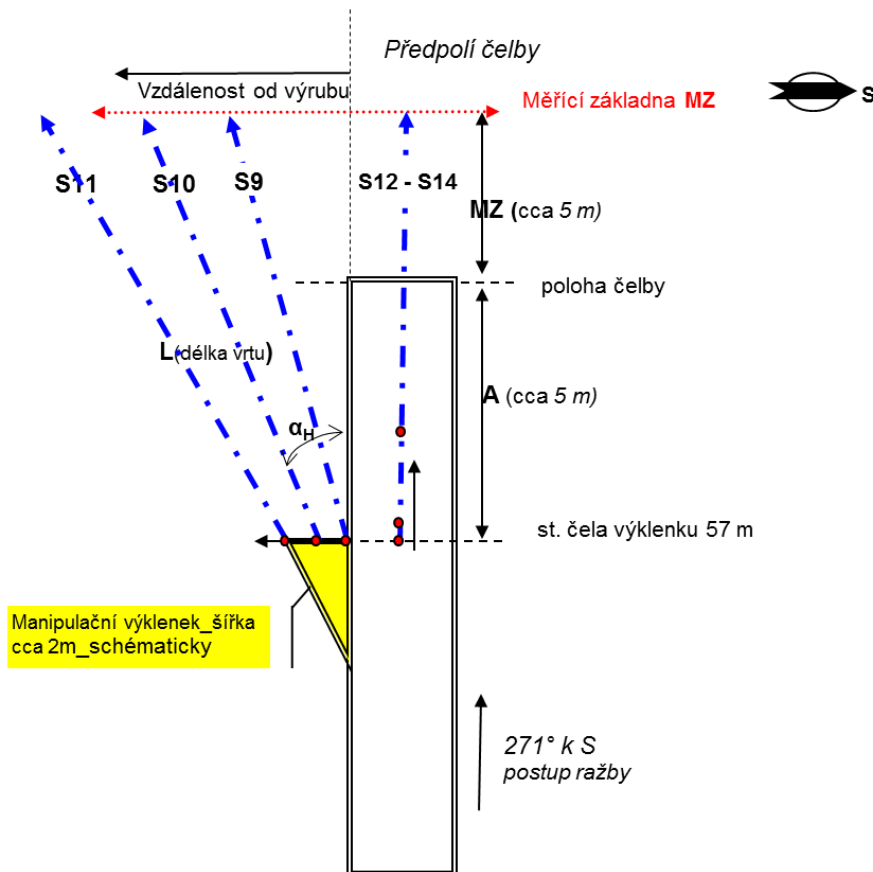
Obr. 4 Podružný koncentrátor dat pro připojení tenzometrických měřicích svorníků v lokalitě konvergenční stanice KS2

2.2 Rozšíření monitorovací stanice napěťového pole ve staničení 57 m v díle BZ1-XII

2.2.1 Popis situace

Součástí této etapy bylo rozšíření sledovací stanice napěťového pole v důlním díle BZ1-XII ve staničení 57m. Realizace této stanice byla úkolem jiného dílčího projektu s názvem „Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov“. V rámci zmíněného původního projektu měla být stanice realizována jako stanice pouze se třemi měřicími sondami situovanými v různých vzdálenostech od líce výrubu. Otevření dílčího projektu „Vznik a monitoring EDZ při výstavbě PVP Bukov“ umožnilo rozšíření této stanice o další 3 měřicí místa.

Za tímto účelem při výstavbě stanice bylo realizováno celkem 6 pilotních jádrových vrtů S9 – S14 o průměru 76 mm ve dvou vějířích po třech. Tři vrty byly vrtány do levého boku směrem do předpolí čelby a situovány tak, aby se potenciální měřicí hnízda – kuželově upravené dno vrtu se sondou CCBO nebo CCBM - nacházely v „horizontální“ rovině a v určených vzdálenostech od boku výrubu důlního díla BZ1-XII. Přesah vrtů za aktuální polohu čelby (přesah měřicí základny) při instalaci měřicího zařízení umožňoval sledovat deformační odezvu masivu ve vybraných místech při přibližování se a následném vzdalování čelby od polohy měřicích sond. Podobně byly realizovány i 3 vrty do stropu díla. Zjednodušené schéma situace je na Obr. 5. (upřesněno v Tab. 1).




Obr. 5 Schéma plánovaného situování vrtů - půdorys; žlutou barvou je vyznačen plánovaný výklenek částečně chránící přípojně místo – záložní řídicí hlavní rozvaděč před přímými účinky postupujících razících prací ve sledovaném díle, (Skutečné charakteristiky vrtů a realizovaná umístění měřicích zařízení lze nalézt v Tab. 1).

V Tab. 1 jsou specifikovány skutečné parametry vrtů a lokace měřicích zařízení při jeho aplikaci. Vrt S14 při dosažení zájmové hloubky procházel značně poškozeným úsekem s výskytem vody, což neumožňovalo jeho využití pro měření napěťových poměrů aplikováním metody CCBO a CCBM, a byl opuštěn.

Tab. 1 Charakteristika geometrie uspořádání měřicích vrtů S9 - S14

Umístění vrtu	č. vrtu	Délka vrtu	Směr vrtu k N	Úklon vrtu	Otočení sondy k tížnici k severu	Staničení ústí vrtu / příčná korekce k obrysu díla	Staničení sondy / Vzdálenost od výrubu	Aplikace
		(m)	(°)	(°)	(°)	(m)	(m)	
LB výklenek	S9	11	259	10	298	57 / 0,5	67,6 / 2,75	CCBO
		11,5			43		68,1 / 2,85	CCBM
	S10	13,7	230	8	191	56,4 / 0,95	66,6 / 9,85	CCBM
	S11	22,1	210	5	23	56,2 / 1,65	66,8 / 20,9	CCBO
		22,6			306		67,1 / 21,3	CCBM
Strop BZ ₁ -XII	S12	9,3	271	26	52	57,9	66,3 / 4,08	CCBO
		9,9			68		66,8 / 4,34	CCBM

 SÚRAO	Vznik a monitoring EDZ při výstavbě PVP Bukov				Evidenční označení:			
					SÚRAO TZ 193/2017			

	S13	14,25	271	48	15	56,3	65,8 / 10,6	CCBO
		14,7			355		66,1 / 10,9	CCBM
	S14	22,7	271	64	xx	55,7	65,7 / 20,4	nepoužito

2.2.2 Použitá metodika a realizace

Metodika měření CCBO a CCBM je založena na vyhledání optimálního řešení tenzoru napjatosti vzhledem k naměřeným deformacím na kuželovém dně vrtu. Závislost deformace konkrétního tenzometrického snímače na kuželové ploše dna vrtu byla popsána již v článku autorů Sugawara a Obara (1999) nebo Stas (2011) jako

$$\varepsilon_{\Lambda}^{\Phi_j} * E = |\mathbf{A}(\Lambda; \mu; \Phi_j)| * |\sigma| \quad (1),$$

kde $\varepsilon_{\Lambda}^{\Phi_j}$ - změřená deformace tenzometru s orientací typu Λ ($\Lambda \in \{T\text{- tangenciální orientace, L- podélná orientace, X- diagonální orientace}\}$); Φ_j - úhlová pozice j-tého tenzometru vzhledem k referenční pozici vztažné souřadné soustavy; $|\mathbf{A}(\Lambda; \mu; \Phi_j)|$ - 6-ti prvková řádková matice popisující deformaci na kuželu na základě působení napětového tenzoru; E –Youngův modul pružnosti; μ - Poissonovo číslo; $|\sigma|$ - tenzor napětí reprezentovaný sloupcovou maticí ($|\sigma|^T = \{\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{yz}, \sigma_{xz}, \sigma_{xy}\}$).


Optimalizační metodou nejmenších čtverců je pak ze soustavy rovnic určen nejvhodnější tvar tenzoru napětí, který nejlépe vyhovuje naměřeným deformacím na všech validních tenzometrických snímačích.

Při aplikaci metody CCBO dochází při jádrovém obvrtávání k plnému odlehčení jádra se sondou - zjistíme aktuální celkový napětový tenzor. V případě dlouhodobého sledování, kdy aplikujeme CCBM, není možné provést odlehčovací obvrtávání - sledujeme tedy jen jeho změny.



Obr. 6 Fotografie použitých sond CCBO (a) a CCBM (b) do vrtů o průměru 76 mm osazených 6 skupinami tenzometrů na kuželové špičce

Tab. 1 také specifikuje, kde byly nasazeny sondy CCBO (viz Obr. 6a) zjišťující momentální napětový stav v okamžiku obvrtávání a kde sondy CCBM (viz Obr. 6b), které reagují následně

 SÚRAO	Vznik a monitoring EDZ při výstavbě PVP Bukov	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 193/2017

po instalaci na změny napěťového pole v okolí sledovaného místa, vyvolané např. změnou geomechanické situace.

Ve čtyřech z pěti použitelných vrtů byly aplikovány 4 sondy CCBO (S9, S11, S12, S13). Po aplikaci CCBO byly ve všech 5 vrtech instalovány sondy CCBM pro dlouhodobý monitoring změn napěťového pole, které jsou připojeny k monitorovacímu systému DMS PVP Bukov s dálkovým přístupem přes Internet.

2.2.3 Příklady výsledků měření napětí v horninovém masivu použitím sond CCBO a CCBM

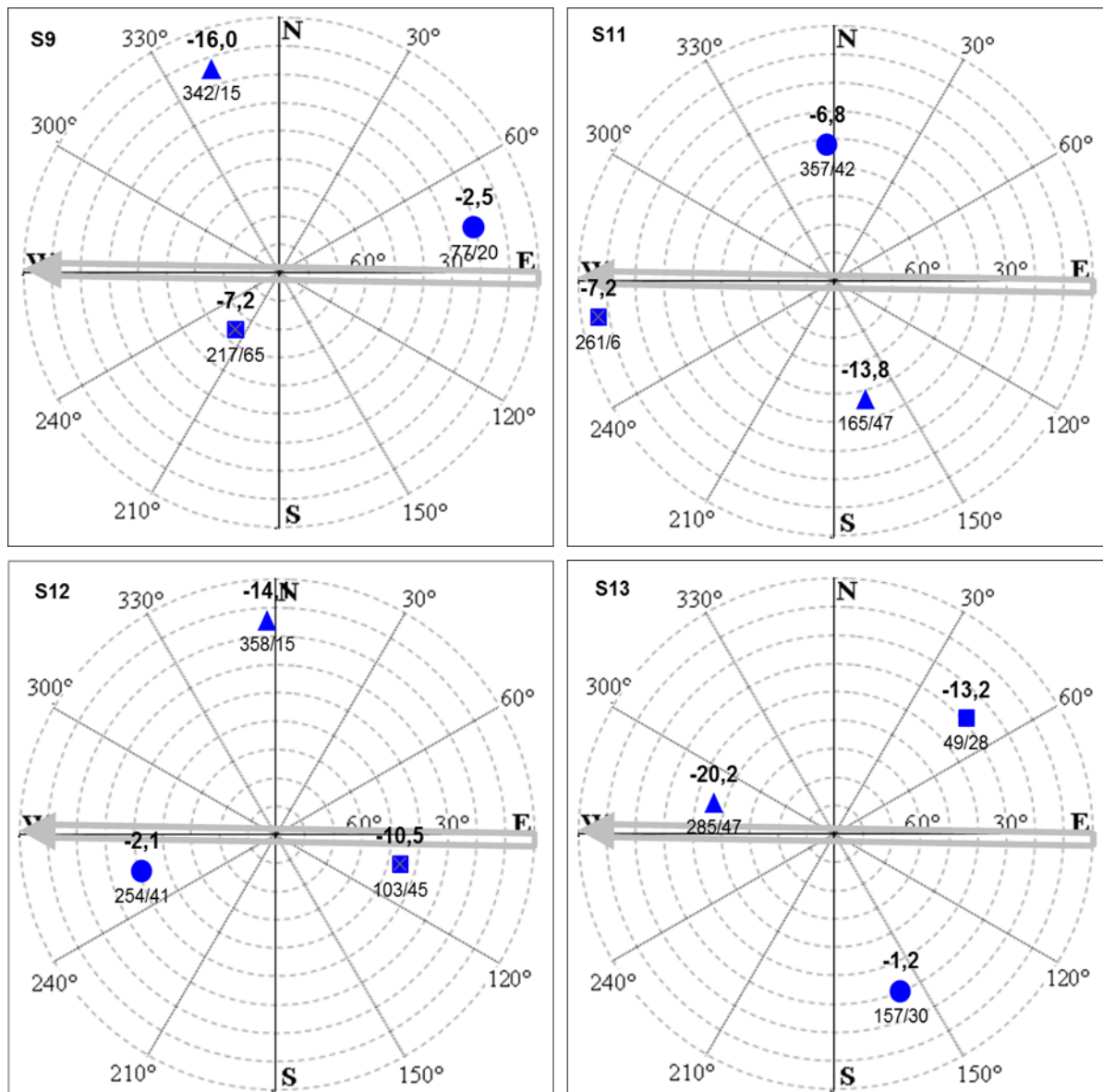
V této kapitole jsou prezentovány výsledky předběžné analýzy napěťových měření ve vrtech S9-S13 v díle BZ1-XII. Je přijata **konvence záporného znaménka komprese**, která je standardně aplikována v matematickém modelování.

Prezentované výsledky nutno chápat jako **předběžné**, neboť zatím nejsou vzájemně provázány, korigovány na aktuální lokální mechanické vlastnosti a též nejsou navázány na reálnou geomechanickou situaci v době měření. Pro výpočet napětí ve všech případech byly aplikovány stejné hodnoty $E=51\text{GPa}$, $\mu=0,18$.

Zpřesnění a validace výsledků v celém komplexu experimentu bude probíhat v dalším období v těsné součinnosti s řešením paralelního dílčího projektu „Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov“ a zjišťováním přesného tvaru díla 3D skenováním v rámci Etapy 3 tohoto projektu.

2.2.3.1 Měření napětí metodou CCBO

Výsledky měření plného tenzoru napětí pro jednotlivé testované vrty jsou prezentovány na schématech Obr. 7. Směr hlavních složek tenzoru napětí je vizualizován projekcí průsečíku směrové přímky patřící hlavní složky napěťového tenzoru na dolní projekční hemisféru. Číslo nad průsečíkem udává velikost dané napěťové složky, čísla pod průsečíkem udávají směrové charakteristiky složky ve formátu azimut úklonu/ úklon.



Obr. 7 Předběžné vyhodnocení tenzoru napětí ve vrtech S9, S11-13, projekce průsečíků směrových přímek hlavních složek napětového tenzoru na dolní projekční hemisféru, hodnoty jsou v MPa nad značkou, směrové charakteristiky ve stupních pod značkou; (● $-\sigma_1$, ■ $-\sigma_2$, ▲ $-\sigma_3$; ← - směr BZ1-XII)

2.2.3.2 Měření změn napětí metodou CCBM

Tato metoda měření je aplikována ve všech pěti použitelných vrtech S9 – S13.

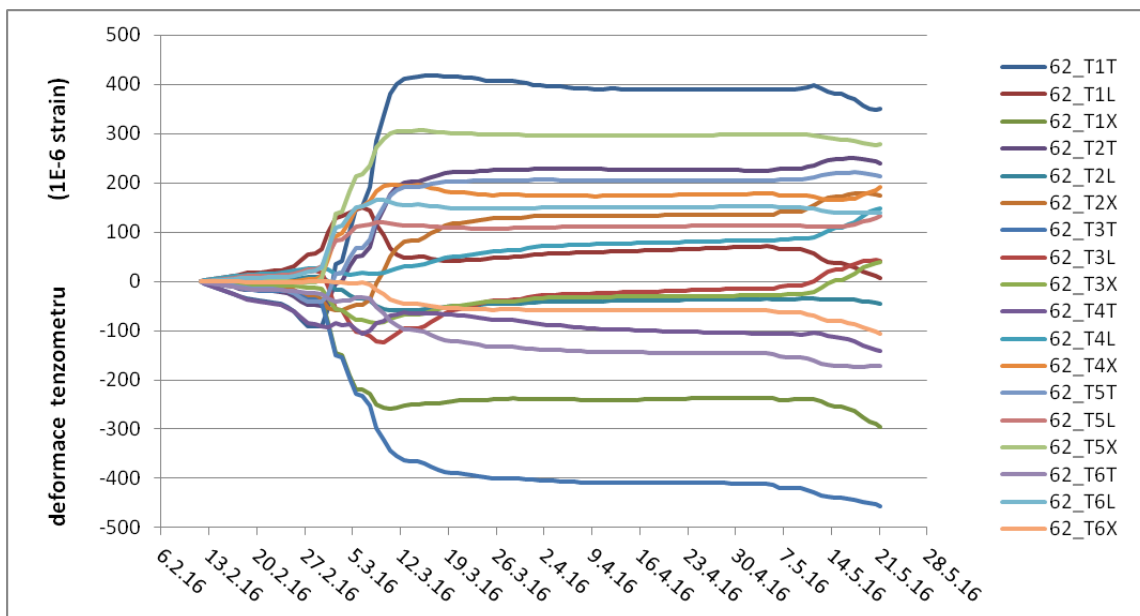
Na Obr. 8 je typický záznam monitorovaných deformací na jednotlivých tenzometrech.

Aplikací vyhodnocovacích procedur pak jsme schopni zkonstruovat celý tenzor napětových změn.

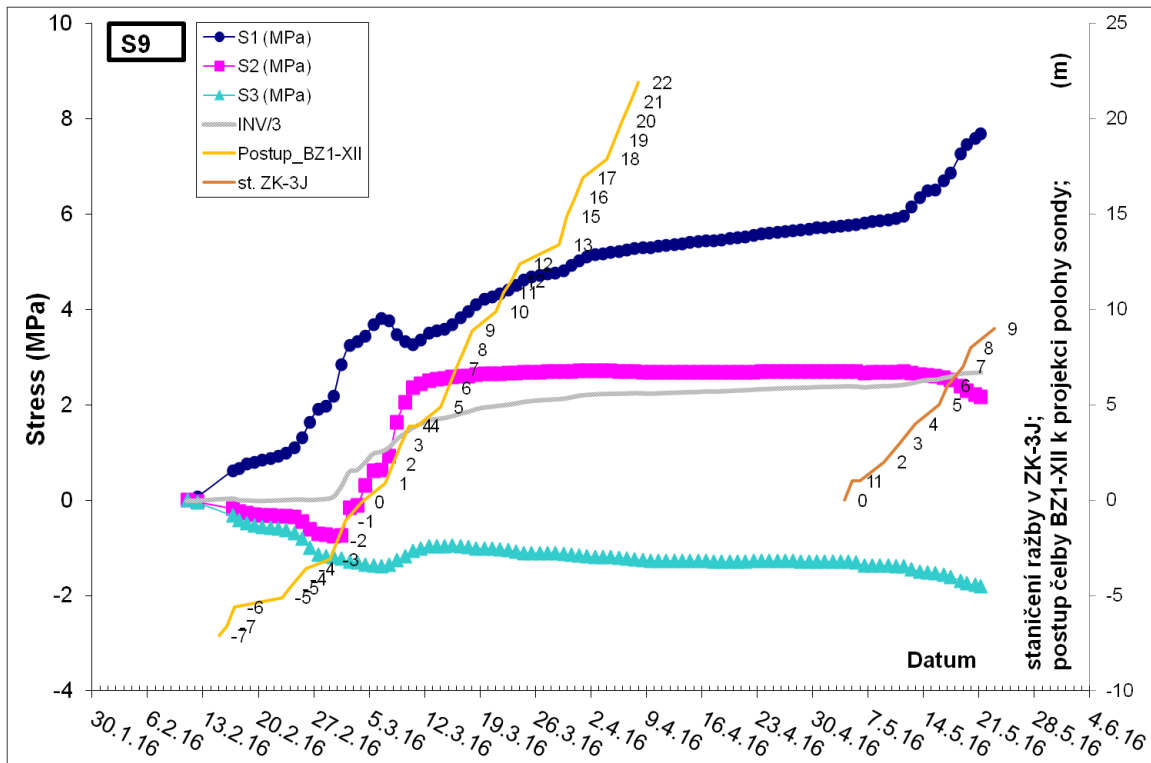
Na následujících obrázcích Obr. 9 - Obr. 13 jsou zobrazeny časové vývoje hodnot hlavních složek tenzoru napětových změn v každém osazeném vrtu. Tento tenzor napětových změn je vztahen k době instalace sond, respektive k počátku registrace dat. Přitom v části obrázků (a) jsou znázorněny vypočtené průběhy časové závislosti hodnot hlavních složek napětové změny vůči původnímu napětovému stavu v konkrétním vrtu v době instalace včetně časové

informace o pozicích blízkých postupujících ražeb. V části (b) je zobrazen postupný vývoj prostorové orientace zjištěných hlavních složek napěťových změn. Plné modré značky odpovídají projekci průsečíků os hlavních složek napěťových změn s dolní projekční hemisférou, prázdné červené značky jsou průsečíky těchto os s horní hemisférou. Tvar značek a barva propojovacích přerušovaných čar je v souladu se značením v části (a) obrázků.

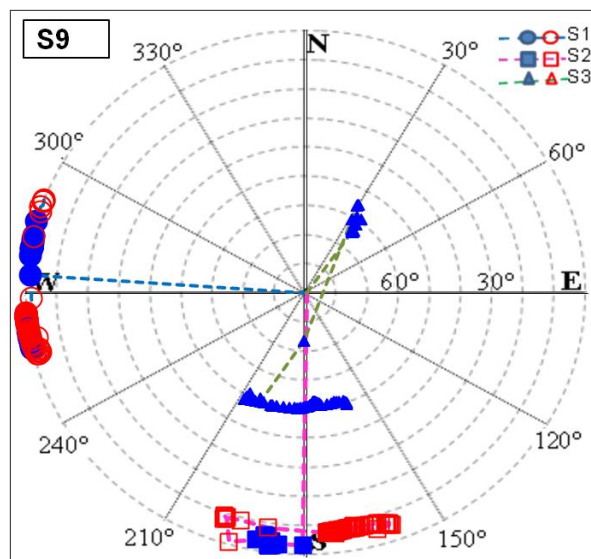
V zobrazených datech je patrný výpadek v období 13.2.-15.2.2016, který byl způsobený neautorizovaným odpojením zařízení od napájecího zdroje. Dále významný výpadek na sondě ve vrtu S12 v době 11.3.-17.5.2016 byl způsoben poškozením přípojného kabelu, zřejmě v důsledku probíhajících hornických prací.



Obr. 8 Typický časový záznam vývoje deformací v mikro-strainech na jednotlivých tenzometrech kuželové sondy CCBM (vrt S9)

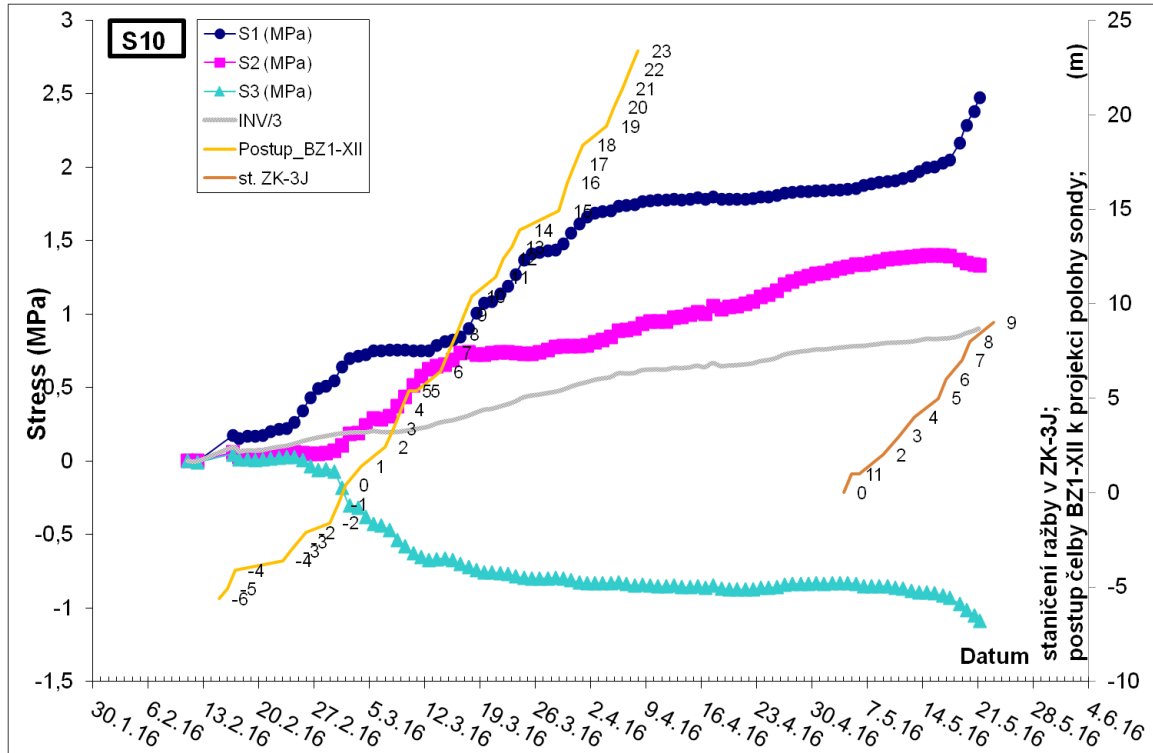


a

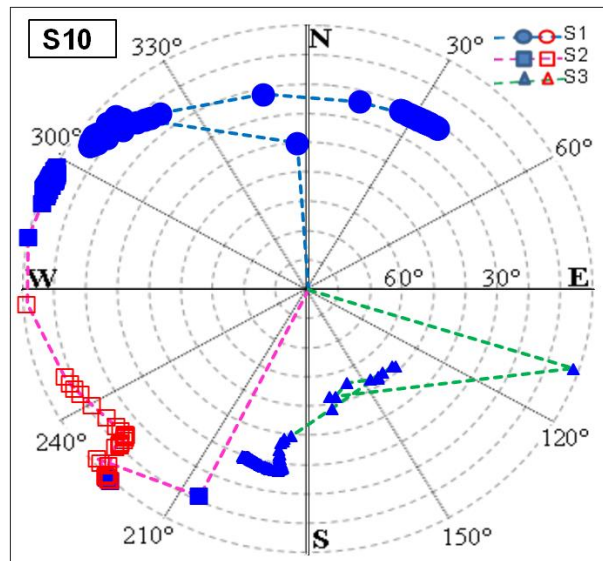


b

Obr. 9 Vypočtené průběhy časové závislosti hodnot hlavních složek napěťové změny ve vrtu S9 včetně informace o pozicích ražby (a) a vývoji jejich prostorové orientace (b) (blíže viz text)

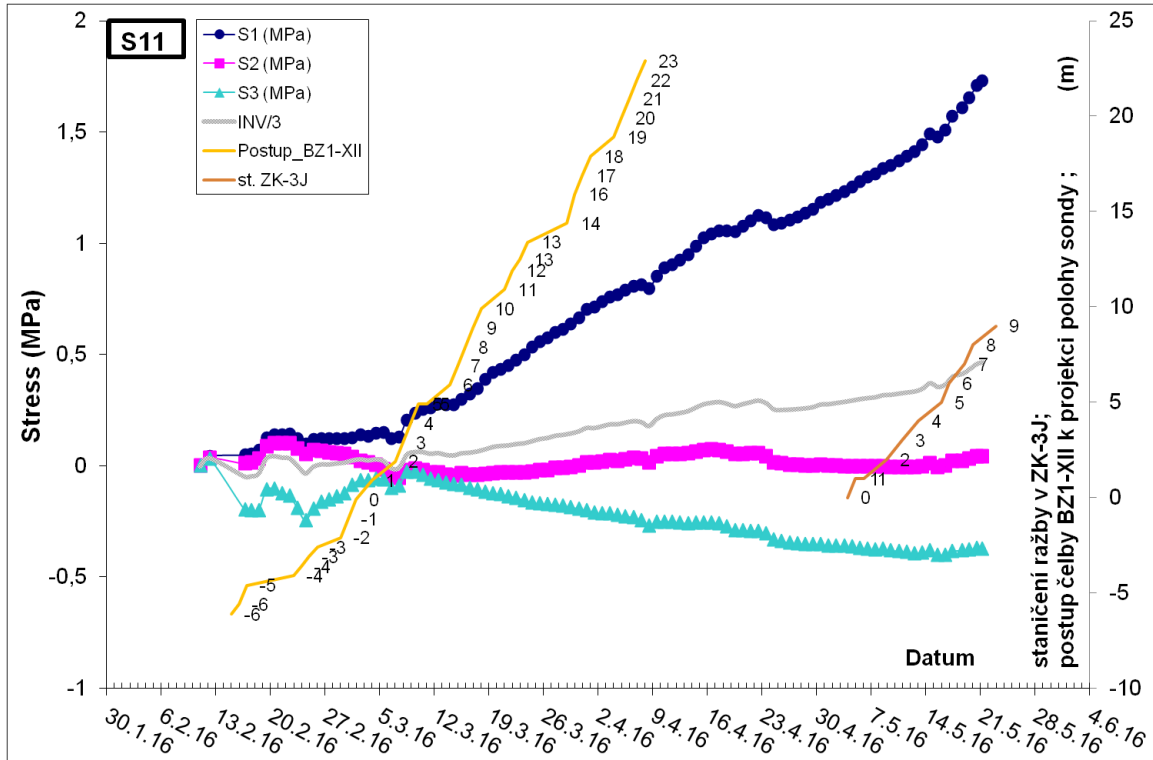


a

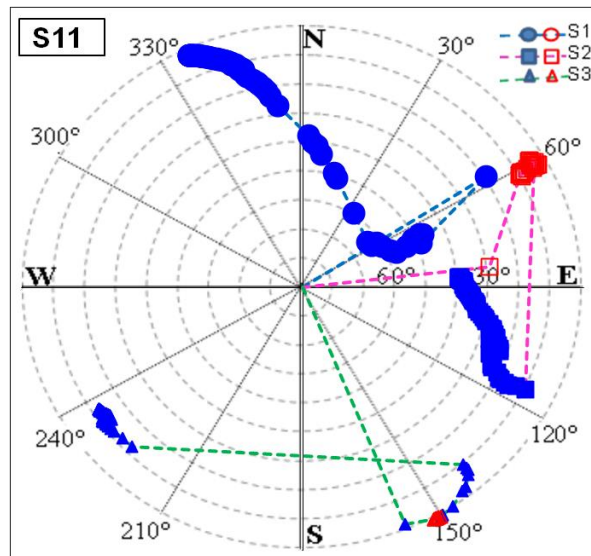


b

Obr. 10 Vypočtené průběhy časové závislosti hodnot hlavních složek napěťové změny ve vrtu S10 včetně informace o pozicích ražeb (a) a vývoji jejich prostorové orientace (b) (blíže viz text)

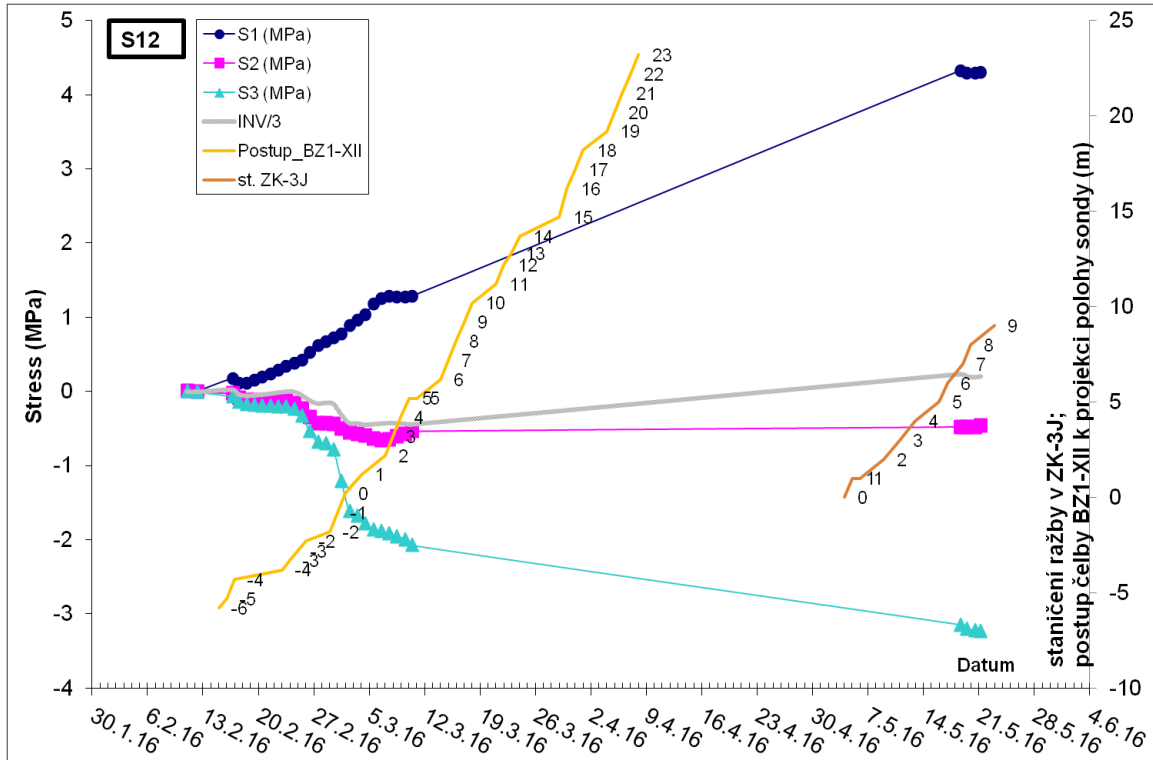


a

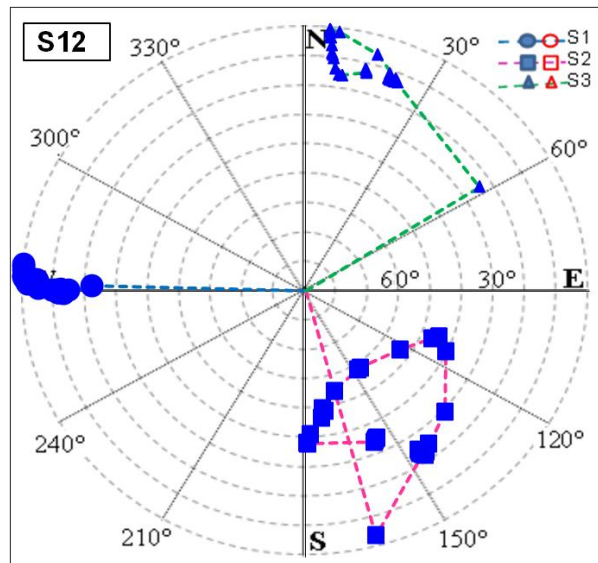


b

Obr. 11 Vypočtené průběhy časové závislosti hodnot hlavních složek napěťové změny ve vrtu S11 včetně informace o pozicích ražeb (a) a vývoji jejich prostorové orientace (b) (bliže viz text)

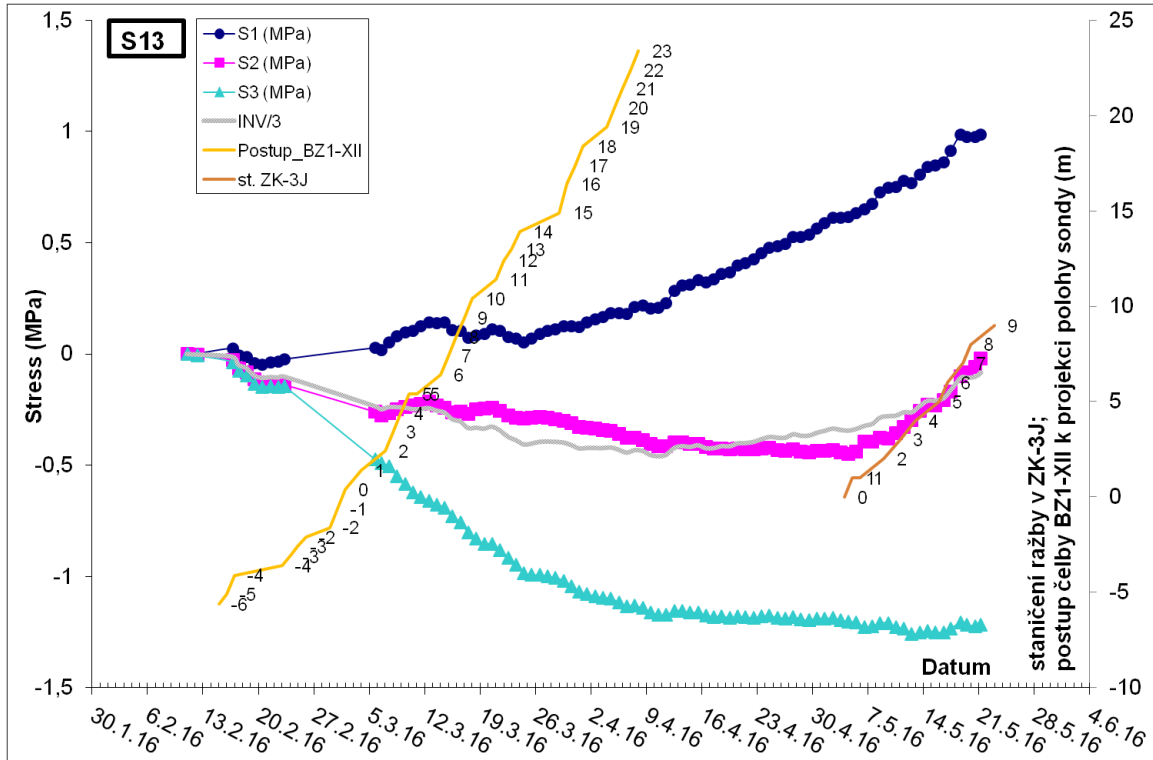


a

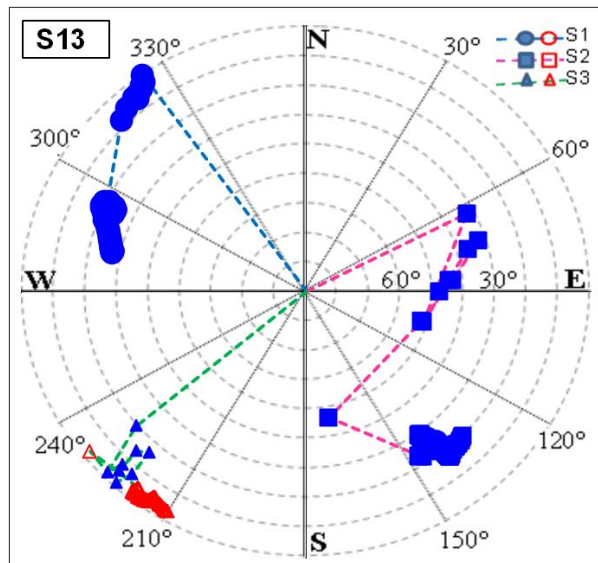


b

Obr. 12 Vypočtené průběhy časové závislosti hodnot hlavních složek napětové změny ve vrtu S12 včetně informace o pozicích ražeb (a) a vývoji jejich prostorové orientace (b) (blíže viz text)




a



b

Obr. 13 Vypočtené průběhy časové závislosti hodnot hlavních složek napětové změny ve vrtu S13 včetně informace o pozicích ražeb (a) a vývoji jejich prostorové orientace (b) (blíže viz text).

 SÚRAO	Vznik a monitoring EDZ při výstavbě PVP Bukov	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 193/2017

3 Etapa 3. Provedení přesného 3D skenu tvaru důlního díla PVP Bukov

Cílem Etapy 3 je provedení přesného 3D skenu důlního díla za účelem zhodnocení kvality razičských prací a získání přesné geometrie důlního díla do navazujících geotechnických a mechanických modelů lokality.

3.1 Technologie laserového skenování

Laserové skenování začíná být široce uplatňovanou technologií v řadě různých průmyslových odvětví. Laserové skenovací systémy vynikají ve schopnosti bezkontaktního určování prostorových souřadnic jakéhokoliv prostorového objektu – budov, struktur, vnitřního prostoru, terénu, a to s mimořádnou rychlostí, přesností, komplexností a bezpečností. Skenovaný objekt je vizualizován ve formě mračen bodů, na kterých je následně možné provádět širokou škálu analytických úloh a rovněž generovat modely těchto objektů.

Pro použití v hornické, geotechnické či geologické praxi nachází tato technologie široké uplatnění např. při řešení specifických úloh - zachycení průběhu důlního díla, posuzování stabilitních poměrů důlních děl, měření konvergencí a konvergenčních profilů, provádění plošných a objemových výpočtů různého charakteru. Účelově lze využít rovněž při projektové činnosti propojením s CAD/GIS nástroji.


Při skenování vybraného objektu se využívá principů rozmítání svazku laserových paprsků, pomocí kterých jsou ve zvolené hustotě prostorově zaměřovány povrchové body zájmového objektu. Na základě intenzity odraženého laserového signálu je teoreticky možné kvantifikovat materiálové rozložení výsledného mračen bodů. Výsledkem následného výpočtu založeného na prostorové polární metodě jsou 3D souřadnice zaměřovaných bodů vyjádřené obecně v souřadnicovém systému skeneru.

K pokrytí celé zájmové oblasti obvykle nestačí provést skenování z jediné skenovací pozice. Vzhledem k relativní vlastní orientaci dílčích mračen bodů pořízených z řady vhodných skenovacích pozic je nezbytné provést transformaci bodů do jednotného souřadnicového systému. K tomuto účelu se využívá obdobně jako ve fotogrametrii vlícovacích bodů rozmístěných v prostoru. Jako vlícovací body jsou využívány kruhové terče s vysokou odrazivostí, které lze snadno v jednotlivých dílčích mračenách bodů identifikovat, případně lze využít i jiné způsoby referencování mračen, např. pomocí kulových objektů.

Hlavním účelem nasazení technologie laserového skenování je komplexní zachycení reálné situace skenovaného prostoru v době skenování. Z těchto výsledků je možné určit parametry zájmového důlního prostoru – tvar, rozměry, pozici prvků důlní výztuže či prvků monitoringu, aj. Nad rámec těchto základních úloh je také možné porovnat skutečný stav s projektem, zjistit velikost výlomů, nadvýlomů apod. a výstupy dále využívat např. při monitoringu. Obecně lze konstatovat, že na základě již jednou naskenovaného prostoru je možné provádět nespočet analytických úloh v závislosti na pozici, kterou si v generovaném mračeně bodů zvolíme.

3.2 Harmonogram prací

Sjednaný harmonogram prací na řešení etapy 3:

 SÚRAO	Vznik a monitoring EDZ při výstavbě PVP Bukov	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 193/2017

1. Realizace skenovacích prací – přípravné práce, doprava, skenování ZK1 , čištění aparatury a export dat do specializovaného software (T: 12/2015)
2. Realizace skenovacích prací – přípravné práce, doprava, skenování důlního díla PVP Bukov, čištění aparatury a export dat do specializovaného software (T: 1/2016 – 3/2016)
3. Zpracování dat – registrace jednotlivých mračen bodů, čištění mračna bodů, subsampling (redukce/optimalizace) mračna bodů, transformace do S-JTSK, tvorba liniových a prostorových řezů, virtuální prezentace dat, export dat do vybraného datového formátu. (T: 4/2016 – 6/2016)
4. Zpracování získaných poznatků do shrnující finální zprávy etapy (T: 6/2016)

V současné době je úspěšně realizován pouze první bod výše uvedeného harmonogramu prací, a to skenování chodby ZK-1, provedené v deklarovaném termínu. Zbývající část prací nemohla být vzhledem ke stále probíhající výstavbě důlního díla realizována, což bylo předem avizováno jako jedno z možných základních rizik úspěšné a včasné realizace jednotlivých plánovaných prací projektu. Práce in situ této etapy jsou totiž limitovány přístupností skenovaných prostor, kde se nemohou nacházet objekty výrazněji zastiňující skenovací paprsek. Skenované prostory musí být před zahájením prací vyklizeny s minimálním výskytem důlní mechanizace, neboť skenování je možno provádět jen mimo provoz související s razíciemi pracemi v této lokalitě, v opačném případě dochází k výraznému navýšení časového fondu nezbytného pro vlastní skenování.

3.3 Přístrojové vybavení

Ke skenování je primárně využíván kompaktní pulsní skener Leica ScanStation C10. Jedná se o zařízení s dlouhým dosahem laserového paprsku, které vyniká prostorovou, délkovou i úhlovou přesností a vysokou rychlostí skenování, viz specifikace vybraných parametrů převzatých z technického listu přístroje:

- Přesnost v poloze: 6 mm/100 m
- Přesnost délek: 4 mm/100 m
- Úhlová přesnost: 60 μ rad / 60 μ rad (12"/12")
- Laserový paprsek: barva zelená, vlnová délka 532 nm, třída 3R (IEC 60825-1)
- Dosah: 300 m @ 90% odrazivosti materiálu, 134 m @18% odrazivosti, min. 0,1 m
- Rychlost skenování: až 50 000 bodů /s
- Zorné pole: vodorovné 360°, svislé 270°
- Pracovní teplota: 0°C až 40°C
- Vlhkost: nekondenzující

3.4 Realizace skenovacích prací a následný post-processing

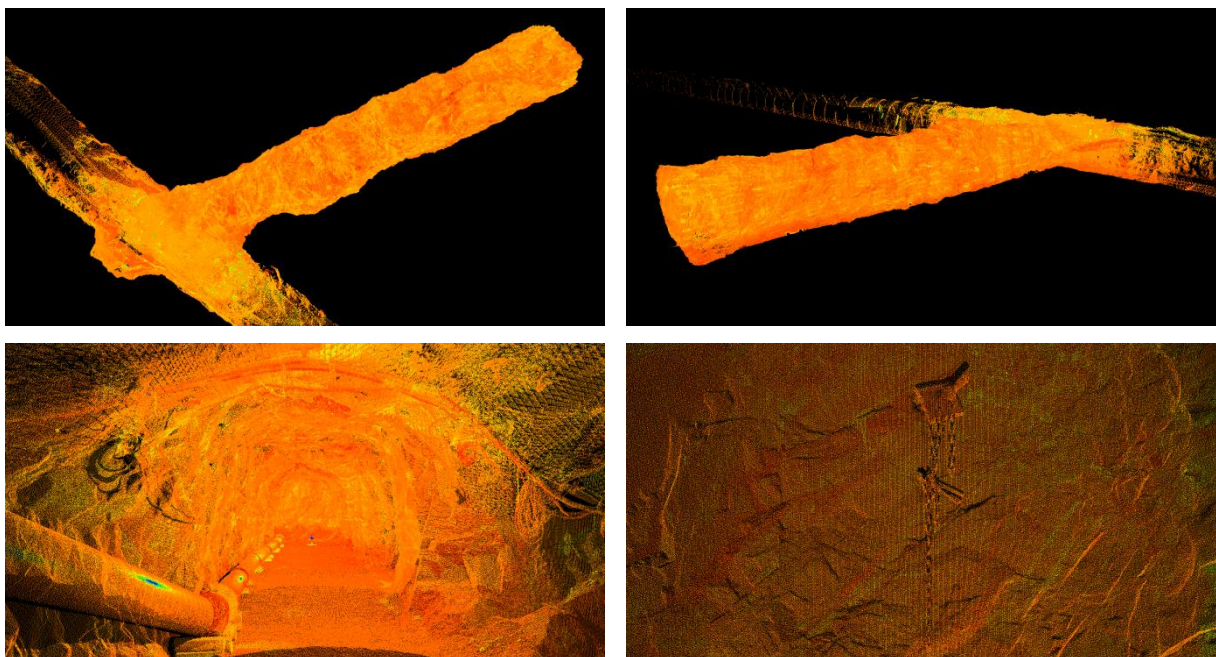
Dne 15. 12. 2015 byla během pilotní fáze skenovaná chodba ZK-1. Rozměry skenovaného důlního díla byly cca 22 x 4 x 4 m.

Skenování bylo prováděno ze sedmi na sebe navazujících pozic s rozlišením 1 cm/10 m. To ve výsledku vede k identifikaci cca 14,5 mil. prostorových bodů (x,y,z) na každé z jednotlivých pozic. Vzájemná vzdálenost skenovacích pozic byla 4 m.

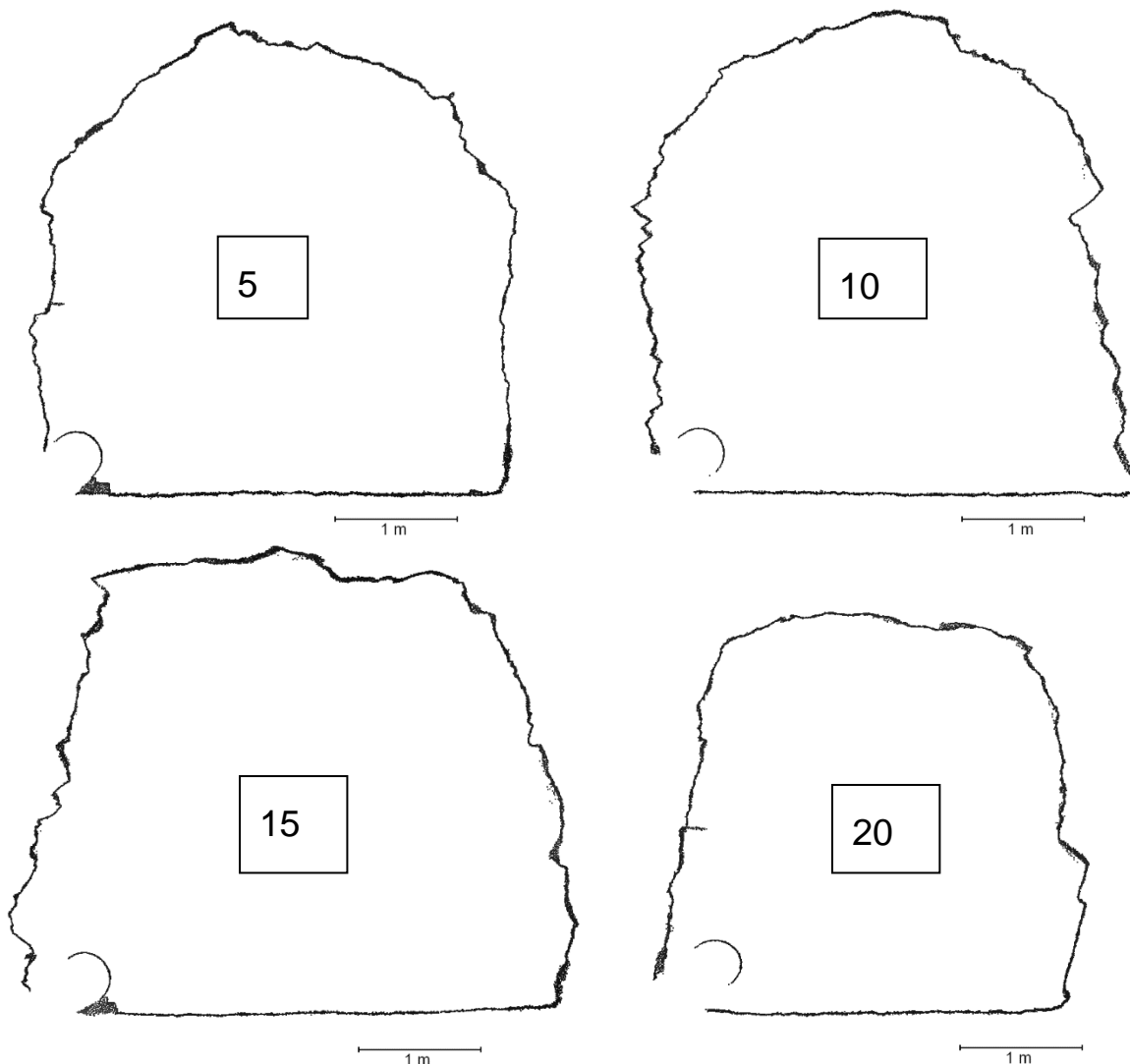
Výstupem následného zpracování dat v software Leica Cyclone je souvislé mračno prostorových bodů detailně popisující skenovaný prostor. Výsledné mračno bodů je registrováno pouze v relativním souřadnicovém systému. Pro řešení navazujících analytických operací zpracování výsledného mračna bodů bylo dále využito následujícího softwarového vybavení – Trimble RealWorks, CloudCompare, MeshLab, 3D Builder. Do budoucna by měl při zpracování dat významně přispět rovněž software 3D Reshaper, jež v nejbližší době rozšíří portfolio programových prostředků realizátora prací.

Účelem skenování chodby ZK-1 bylo kromě zaznamenání prostorové situace tohoto důlního díla také potvrzení zvolené metodiky a způsobu skenovacího postupu v dané lokalitě. Výstupy skenování a následného post-processingu pak sloužily k diskusi se zástupci SÚRAO směřující k ujasnění výsledné formy požadovaných výstupů.

Na Obr. 14, Obr. 15 a Obr. 16 jsou prezentovány některé z grafických výstupů – zobrazení celkového mračna bodů či detail jeho dílčích částí a rovněž vertikální řezy určující profil důlního chodby ZK-1 v různých vzdálenostech od čelby. Z podstaty trojrozměrných prostorových dat je prezentace formou tištěné zprávy velmi limitující. Mnohem jasnější představu o dosažených výsledcích je možné získat teprve prezentací s využitím výpočetní techniky nebo využitím možností formátu 3D PDF pro prezentaci dílčích dat.

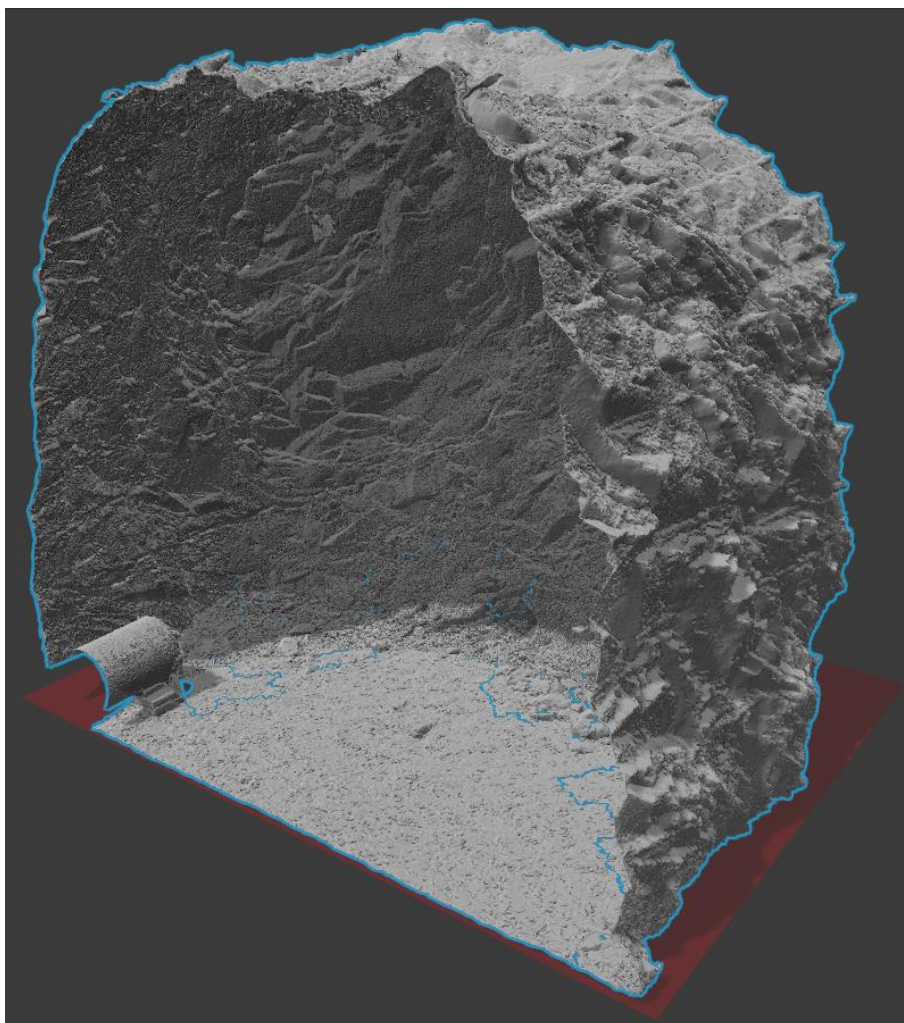


Obr. 14 Prostorová situace chodby ZK-1 v době skenování – kompletní mračno bodů + detail na jeho dílčí části.




Obr. 15 Profil chodby ZK-1 ve vzdálenosti 5, 10, 15 a 20 m od její čelby.

Nad rámec smlouvy bylo rovněž provedeno modelování povrchu chodby ZK-1 triangulační metodou tvorbou sítí. Jako ukázka je na Obr. 16 prezentován 3D model části chodby ZK-1 v oblasti čelby. Takto vytvořený 3D model umožňuje provádět nejen přehledné vizualizace, ale i pokročilé měřičské a analytické úlohy - plošné a objemové výpočty, komparativní srovnání projektu s reálným stavem, analýzu geologických struktur, aj.



Obr. 16 3D model části chodby ZK-1 v oblasti její čelby.

Během následujícího období po ukončení výstavby důlního díla se předpokládá provedení skenování zbývajících částí důlního díla (BZ-XIIJ, BZ1-XII, ZK-2, ZK-3 atd.) při zachování stávajících parametrů skenování. Následovat pak bude post-processing získaných prostorových dat, registrace do souřadného systému S-JTSK a export do odpovídajících datových formátů.

 SÚRAO	Vznik a monitoring EDZ při výstavbě PVP Bukov	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 193/2017

4 Etapa 4 Matematický model vzniku a chování EDZ díla PVP Bukov

Hlavním cílem této části zprávy je popsat software INVGEM, který byl vyvinut a implementován na Ústavu geoniky AVČR. Software slouží k určení všech komponent tenzoru původního napětí jak analýzou konvergencí pro vybrané dvojice bodů na stěnách tunelu v procesu postupného odtěžování horniny tak analýzou změn napětí změřených CCBM a CCBO. Tento produkt vznikl jako dodatečný modul programu GEM, který je dlouhodobě vyvíjen na Ústavu geoniky AV ČR. V této zprávě je pozornost věnována analýze konvergencí, jelikož v době psaní této zprávy nebyly k dispozici potřebná data aby bylo možné určit hodnoty původního napětí pomocí CCBM a CCBO.

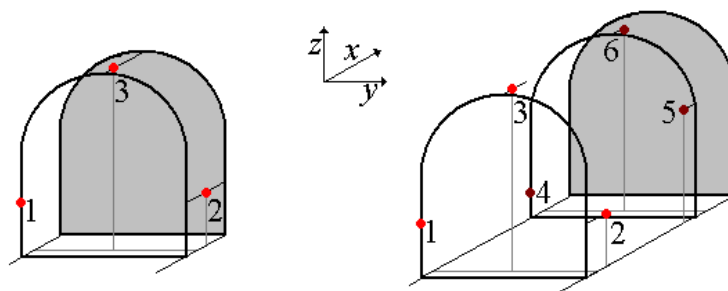
Znalost počátečních napětí je velmi důležitou hodnotou pro posouzení stability podzemních konstrukcí tím, že toto napětí valnou měrou určuje rozložení napěťových polí v okolí těchto konstrukcí (Herle 2003; Jing a Stephanson 2007). Při samotném navrhování tvarů podzemních konstrukcí a jejich orientace v horninovém masívu je znalost úplného tenzoru původního napětí nepostradatelnou hodnotou, která spolu s matematickým modelováním umožňuje určit optimální variantu vedení podzemní konstrukce případně nasazení vyztužovacích technologií (Nečas a Hlaváček 1981; Malík 1998)]. Metodika může být využita při ražbě tunelů, budování podzemních zásobníků plynu a podzemního úložiště jaderného odpadu.

4.1 Popis metodiky

Základním principem níže popsané metodiky je instalace měřických bodů umístěných na stěně tunelu. Měřické body jsou umístěny ve dvou rovnoběžných profilech, které jsou dány řezy specifikovanými dvěma rovnoběžnými rovinami kolnými k podélné ose tunelu. Jsou změřeny vzdálenosti mezi dvojicemi měřických bodů. Poté dochází k vyražení jednoho záběru chodby a k opětovnému přeměření vzdálenosti mezi stejnými dvojicemi měřických bodů. Rozdíl těchto vzdáleností nazýváme konvergence a je možné je získávat v celém procesu ražby. Po dosažení určité vzdálenosti čelby od pozic měřických bodů se tyto hodnoty ustálí. Měření se analyzují pomocí matematického modelování a výsledkem této analýzy je úplný tenzor původního napětí. Věnujme se blíže jednotlivým krokům.

4.1.1 Geometrie tunelu a instalace měřických bodů

Na Obr. 17 je znázorněna rozmístění měřických bodů a jeden elementární krok, který souvisí s postupem čelby o jeden záběr. Měřické body jsou umístěny na dvou rovnoběžných profilech, jak bylo popsáno výše. Je třeba instalovat alespoň tři měřické body na každém profilu, může jich být instalováno i více. Vzdálenost těchto rovin by měla odpovídat průměru tunelu, aby změny vzdálenosti mezi dvojicemi měřických bodů v procesu postupného odebírání horniny byly dobře měřitelné a navíc měřické body na druhém profilu musí být pokud možno co nejbližší k čelu tunelu.



Obr. 17 Geometrie tunelu a pozice měřických bodů.

Nyní je třeba vybrat dvojice měřických bodů, tak, aby bylo technicky možné provést měření, tedy aby tyto dvojice bylo možné spojit úsečkou, která nekoliduje se stěnami tunelu případně s jinými objekty nacházejícími se v tunelu. Vzhledem k tomu, že chceme získat úplný tenzor původního napětí, což je šest nezávislých čísel, musíme vybrat alespoň šest různých dvojic měřických bodů. Mezi nimi musí být zastoupeny dvojice bodů z různých profilů, např. (1,5), (2,4) z Obr. 17.

4.1.2 Postup měření

Po instalaci měřických bodů a výběru dvojic měřických bodů v souladu s doporučeními v předcházejícím odstavci změříme vzdálenosti mezi měřickými body ve vybraných dvojicích měřických bodů. Po vyrazení záběru znovu přeměříme vzdálenosti ve výše zmíněných dvojicích bodů a odečteme tyto vzdálenosti. Tento postup můžeme opakovat v celém procesu postupného odtěžování po jednotlivých záběrech. Tímto způsobem získáme minimálně šestici křivek, což odpovídá vybraným dvojicím bodů. Tato data analyzujeme matematickým modelováním pomocí metody konečných prvků.

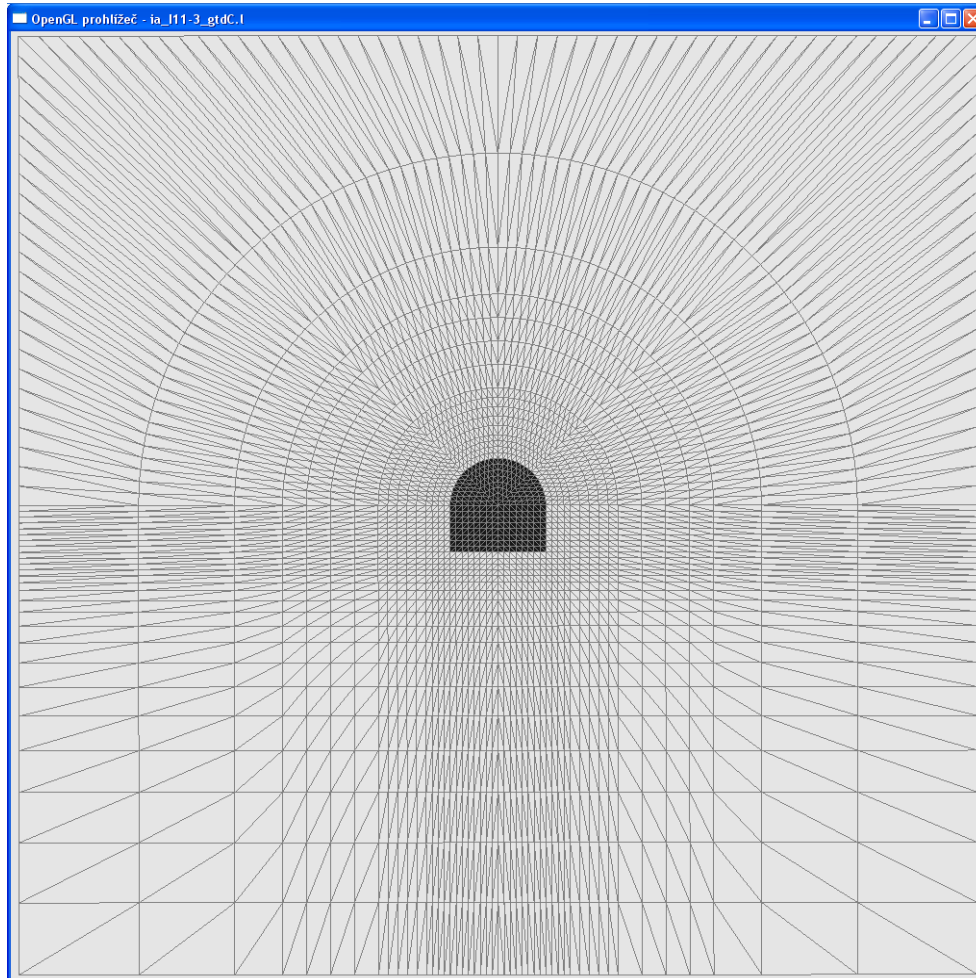
4.1.3 Síť z konečných prvků pro modelovou úlohu

Účelem této části je připravit síť a parametry pro základní modelový příklad, na kterém bude představena celá metodika získávání hodnot původního napětí z naměřených konverzí v průběhu postupného odtěžování tunelu. Tato síť je znázorněna na Obr. 18 -Obr. 20.

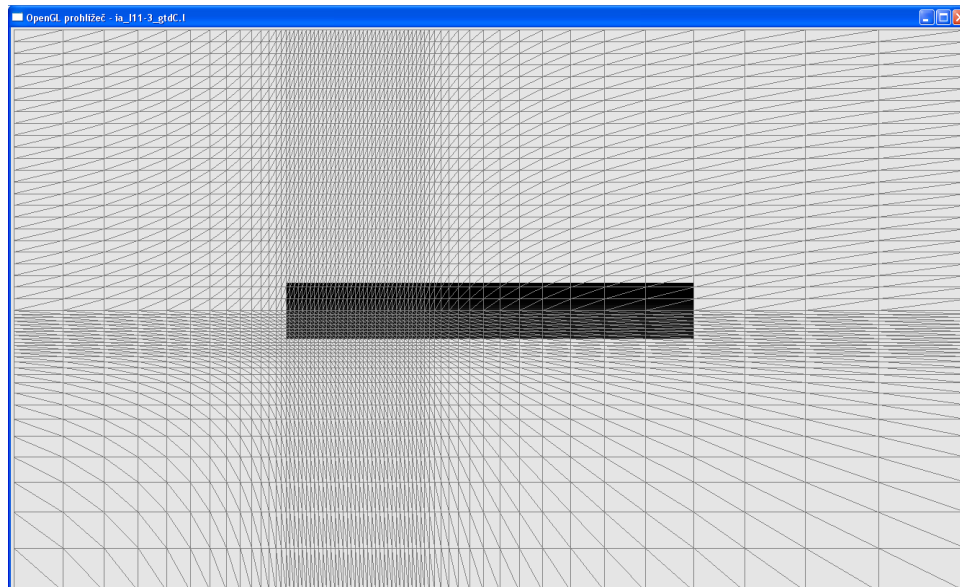
Učiňme konkrétní doporučení pro tvorbu sítě. Samotný tunel je vhodné umístit do rovnoběžnostěnu tak, aby jeho šířka a výška byly alespoň pětinasobkem výšky a šířky modelovaného tunelu.

Na Obr. 18 je znázorněn čelní pohled na modelový tunel spolu se sítí z konečných elementů. Na Obr. 19 je znázorněn boční pohled na tunel a síť z konečných elementů. Obr. 20 znázorňuje perspektivní pohled na tunel a síť, a umožňuje si udělat celkovou představu o geometrii sítě a umístění tunelu v této síti. Síť je z důvodu vyšší přesnosti výpočtů zahuštěna v místě, kde byly instalovány měřičské body.

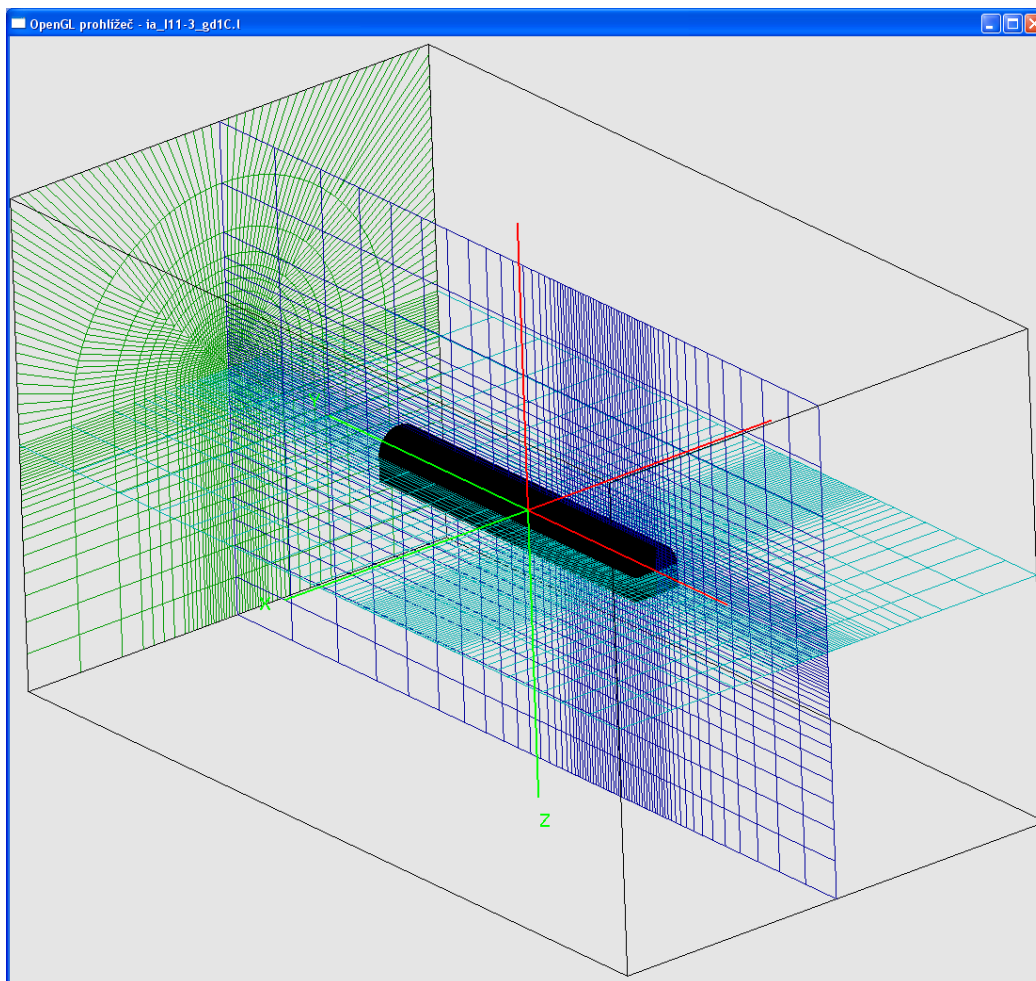
V dalším budeme počítat šest základních úloh, které korespondují s okrajovými podmínkami. Tyto okrajové podmínky reprezentují síly na hranicích rovnoběžnostěnu, které jsou indukované šesticí elementárních tenzorů odpovídající jednotlivým složkám tenzoru původního napětí. Dostatečná vzdálenost mezi stěnami rovnoběžnostěnu a stěnami tunelu zaručí, že výběr oblasti nemá vliv na vypočtená napěťová pole.



Obr. 18 Čelní pohled na vytvořenou výpočetní síť



Obr. 19 Boční pohled na vytvořenou výpočetní síť



Obr. 20 Pohled s perspektivou na výpočetní síť

4.1.4 Analýza metodiky pro 3D pro elementární síly na hranici

Pro výpočet posunutí v měřičských bodech na stěně tunelu při daných okrajových podmínkách je použitý SW GEM3.

Inverzní analýza problému, tj. nalezení okrajových podmínek, v důsledku kterých nastává posunutí ve vybraných bodech v souladu s naměřenými hodnotami, je realizovaná následujícím způsobem:

1. Spočítáme posunutí ${}_1u, {}_2u, {}_3u, {}_4u, {}_5u, {}_6u$, postupně pro okrajové podmínky:

$$\begin{aligned}
 {}_1\sigma &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, & {}_2\sigma &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, & {}_3\sigma &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \\
 {}_4\sigma &= \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, & {}_5\sigma &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, & {}_6\sigma &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}.
 \end{aligned} \tag{1}$$

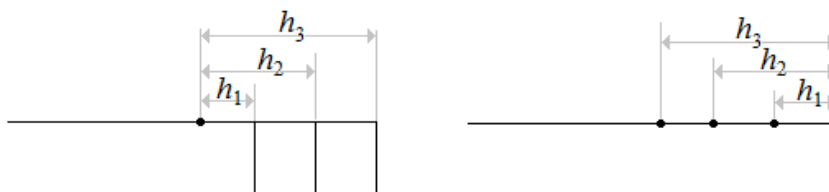
Protože úlohy 1 – 6 (základní úlohy) jsou definované jen s použitím Neumannovských okrajových podmínek (1), úloha nemá jednoznačné řešení v posunutích (Nečas a Hlaváček 1981; Malík 1989,2000)

Řešení se hledá s přesností na tuhé pohyby (posun a rotace).

2. Vzhledem na použitou aproximaci malých deformací, velikost skutečných vzájemných posunutí vybraných uzlů p_i, p_j sítě získáme projekcí

$$\tilde{u}_{ij} = \frac{(p_{ij}, u_{ij})}{\|p_{ij}\|}, \quad \text{kde } \begin{matrix} p_{ij} = p_i - p_j = (x_i, y_i, z_i) - (x_j, y_j, z_j) \\ u_{ij} = u_i - u_j = (u_{x_i}, u_{y_i}, u_{z_i}) - (u_{x_j}, u_{y_j}, u_{z_j}) \end{matrix} \quad (2)$$

3. S ohledem na předpoklad homogenního prostředí, postup ražení tunelu (tj. vliv vzdálenosti čela tunelu na poloze dvojice měřičských bodů) je modelovaný úlohou, kdy konvergenční křivka je určena jako změna vzájemné polohy dvojice měřičských bodů v závislosti na jejich vzdálenosti od čela tunelu -- Obr. 21.



Obr. 21 Nahrazení tří řešených úloh s postupnou změnou čela tunelu (a změnou vzdálenosti měřicího bodu od čela) (vlevo) jednou úlohou s třemi měřicími body (vpravo).

4. Metodou nejmenších čtverců (LSQM) hledáme takovou lineární kombinaci základních úloh


$$u = a_1 u + b_2 u + c_3 u + d_4 u + e_5 u + f_6 u,$$

že

$$\sum_{ij} (d_{ij} + a_1 \tilde{u}_{ij} + b_2 \tilde{u}_{ij} + c_3 \tilde{u}_{ij} + d_4 \tilde{u}_{ij} + e_5 \tilde{u}_{ij} + f_6 \tilde{u}_{ij})^2 \rightarrow \min \quad (3)$$

kde d_{ij} jsou naměřená vzájemná posunutí monitorovaných dvojic bodů i, j a ${}_k \tilde{u}_{ij}$ jsou vypočtená vzájemná posunutí těchto dvojic měřických bodů pro k -tou základní úlohou (1). Řešení zformulovaného problému (3) vede k řešení soustavy (4).

$$\begin{pmatrix} \sum_{ij} (1\tilde{u}_{ij})^2 & \sum_{ij} 1\tilde{u}_{ij} 2\tilde{u}_{ij} & \sum_{ij} 1\tilde{u}_{ij} 3\tilde{u}_{ij} & \sum_{ij} 1\tilde{u}_{ij} 4\tilde{u}_{ij} & \sum_{ij} 1\tilde{u}_{ij} 5\tilde{u}_{ij} & \sum_{ij} 1\tilde{u}_{ij} 6\tilde{u}_{ij} \\ \sum_{ij} 1\tilde{u}_{ij} 2\tilde{u}_{ij} & \sum_{ij} (2\tilde{u}_{ij})^2 & \sum_{ij} 2\tilde{u}_{ij} 3\tilde{u}_{ij} & \sum_{ij} 2\tilde{u}_{ij} 4\tilde{u}_{ij} & \sum_{ij} 2\tilde{u}_{ij} 5\tilde{u}_{ij} & \sum_{ij} 2\tilde{u}_{ij} 6\tilde{u}_{ij} \\ \sum_{ij} 1\tilde{u}_{ij} 3\tilde{u}_{ij} & \sum_{ij} 2\tilde{u}_{ij} 3\tilde{u}_{ij} & \sum_{ij} (3\tilde{u}_{ij})^2 & \sum_{ij} 3\tilde{u}_{ij} 4\tilde{u}_{ij} & \sum_{ij} 3\tilde{u}_{ij} 5\tilde{u}_{ij} & \sum_{ij} 3\tilde{u}_{ij} 6\tilde{u}_{ij} \\ \sum_{ij} 1\tilde{u}_{ij} 4\tilde{u}_{ij} & \sum_{ij} 2\tilde{u}_{ij} 4\tilde{u}_{ij} & \sum_{ij} 3\tilde{u}_{ij} 4\tilde{u}_{ij} & \sum_{ij} (4\tilde{u}_{ij})^2 & \sum_{ij} 4\tilde{u}_{ij} 5\tilde{u}_{ij} & \sum_{ij} 4\tilde{u}_{ij} 6\tilde{u}_{ij} \\ \sum_{ij} 1\tilde{u}_{ij} 5\tilde{u}_{ij} & \sum_{ij} 2\tilde{u}_{ij} 5\tilde{u}_{ij} & \sum_{ij} 3\tilde{u}_{ij} 5\tilde{u}_{ij} & \sum_{ij} 4\tilde{u}_{ij} 5\tilde{u}_{ij} & \sum_{ij} (5\tilde{u}_{ij})^2 & \sum_{ij} 5\tilde{u}_{ij} 6\tilde{u}_{ij} \\ \sum_{ij} 1\tilde{u}_{ij} 6\tilde{u}_{ij} & \sum_{ij} 2\tilde{u}_{ij} 6\tilde{u}_{ij} & \sum_{ij} 3\tilde{u}_{ij} 6\tilde{u}_{ij} & \sum_{ij} 4\tilde{u}_{ij} 6\tilde{u}_{ij} & \sum_{ij} 5\tilde{u}_{ij} 6\tilde{u}_{ij} & \sum_{ij} (6\tilde{u}_{ij})^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_{ij} 1\tilde{u}_{ij} d_{ij} \\ \sum_{ij} 2\tilde{u}_{ij} d_{ij} \\ \sum_{ij} 3\tilde{u}_{ij} d_{ij} \\ \sum_{ij} 4\tilde{u}_{ij} d_{ij} \\ \sum_{ij} 5\tilde{u}_{ij} d_{ij} \\ \sum_{ij} 6\tilde{u}_{ij} d_{ij} \end{pmatrix} \quad (4)$$

	Vznik a monitoring EDZ při výstavbě PVP Bukov	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 193/2017

Pro analýzu naměřených dat je velmi podstatná znalost posunutí korespondující se základními úlohami zformulovanými výše. Grafickému tvaru konvergenčních křivek se budeme věnovat v kap. 4.1.6.

4.1.5 Rovinná varianta

Jsou-li k dispozici měření posunutí jen v jedné rovině kolmé k ose tunelu, ale nejsou známy měření mezi měřickými body v různých rovinách, uvažujeme jen redukovaný napěťový tenzor

v rovině yz, $\sigma = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_y & \tau_{yz} \\ 0 & \tau_{zy} & \sigma_z \end{pmatrix}$, tj. úloha (3) se zredukuje na

$$\sum_{ij} (d_{ij} + a \cdot {}_1\tilde{u}_{ij} + c \cdot {}_3\tilde{u}_{ij} + f \cdot {}_6\tilde{u}_{ij})^2 \rightarrow \min, \quad (5)$$

což vede po běžných úpravách k soustavě

$$\begin{pmatrix} \sum_{ij} ({}_1\tilde{u}_{ij})^2 & \sum_{ij} {}_1\tilde{u}_{ij} {}_3\tilde{u}_{ij} & \sum_{ij} {}_1\tilde{u}_{ij} {}_6\tilde{u}_{ij} \\ \sum_{ij} {}_1\tilde{u}_{ij} {}_3\tilde{u}_{ij} & \sum_{ij} ({}_3\tilde{u}_{ij})^2 & \sum_{ij} {}_3\tilde{u}_{ij} {}_6\tilde{u}_{ij} \\ \sum_{ij} {}_1\tilde{u}_{ij} {}_6\tilde{u}_{ij} & \sum_{ij} {}_3\tilde{u}_{ij} {}_6\tilde{u}_{ij} & \sum_{ij} ({}_6\tilde{u}_{ij})^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a \\ c \\ f \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \sum_{ij} {}_1\tilde{u}_{ij} d_{ij} \\ \sum_{ij} {}_3\tilde{u}_{ij} d_{ij} \\ \sum_{ij} {}_6\tilde{u}_{ij} d_{ij} \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Řešením soustavy (6) dostáváme hledané napětí

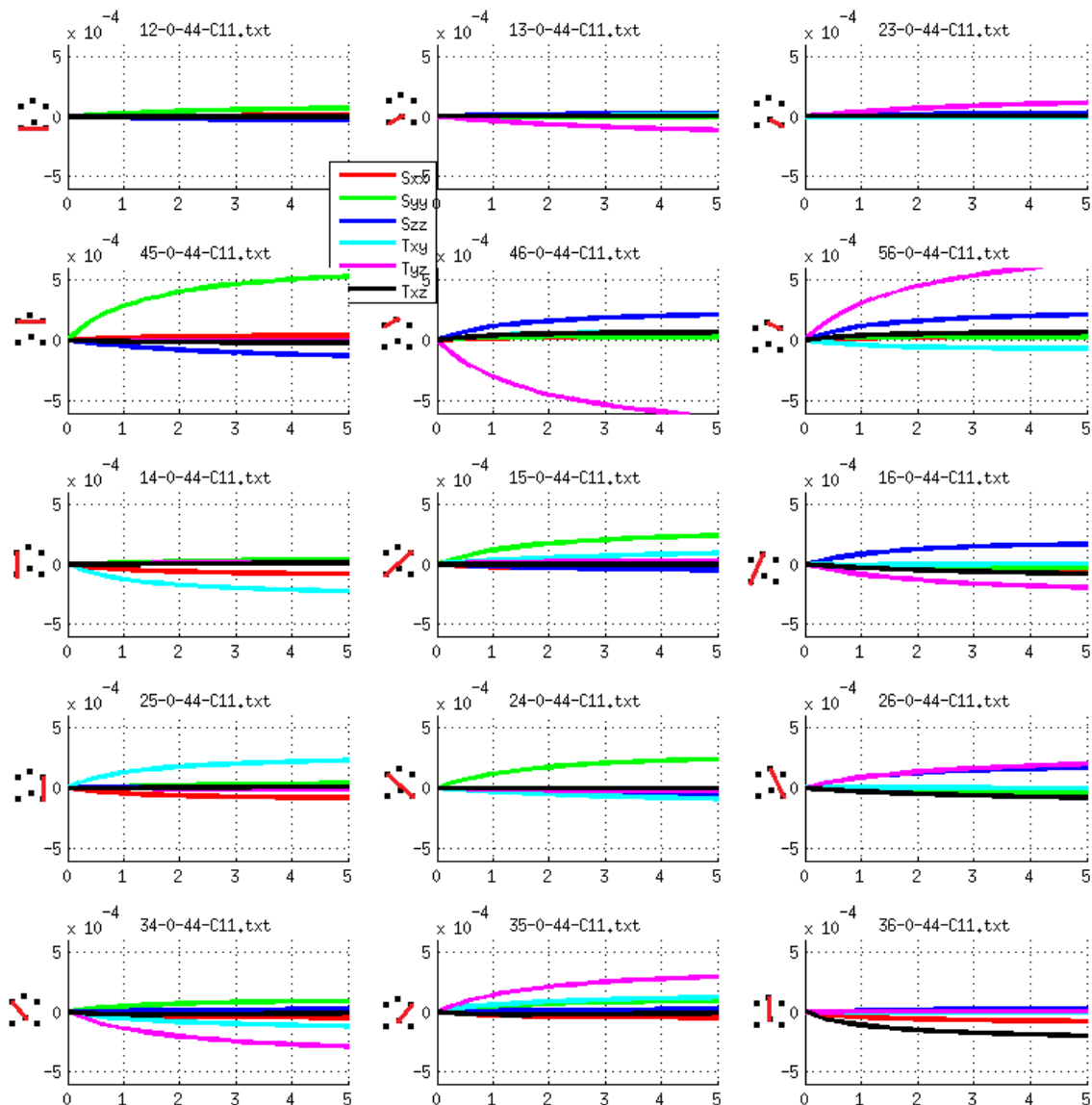
$$\sigma_N = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & a & f \\ 0 & f & c \end{pmatrix}. \quad (7)$$

4.1.6 Grafy vypočtených konvergenčních křivek pro modelovou úlohu

Na Obr. 22 je znázorněn vypočítaný průběh konvergencí mezi jednotlivými dvojicemi bodů s ohledem na reakce na jednotkové síly ${}_k\tilde{u}_{ij}$. Na levé straně grafů na je vyznačena dvojice bodů pro které jsou konvergence znázorněny. (Uvedená dvojice ij je také identifikována v nadpisu grafu: $ij-0-44-C11.txt$.) Barevně jsou odlišeny použité okrajové podmínky k tak, jak je uvedeno v Tab. 2, resp. v legendě.

Tab. 2 Barevné značení základních úloh.

Úloha	Nenulová složka napětí	Barva
1	σ_x	červená (Red)
2	σ_y	zelená (Green)
3	σ_z	modrá (Blue)
4	T_{xy}	tyrkysová (Cyan)
5	T_{yz}	fialová (Magenta)
6	T_{xz}	černá (black)



Obr. 22 Průběh konvergence pro vyznačenou dvojici měřických bodů a pro jednotlivé elementární úlohy

Tyto hodnoty budou použity pro analýzu citlivosti pozice měřických bodů vzhledem na matici podmíněnosti úlohy. Toto nám dává dobrý odhad jak volit co nejlepší pozici jednotlivých měřických bodů.

4.1.7 Algoritmus pro určení vhodných dvojic měřických bodů

Jak bylo ukázáno výše (kap. 4.1.4-5, hledaný tenzor primárního napětí dostáváme řešením soustavy (4) v případě kompletního tenzoru, resp. řešením (6) v případě, že nás zajímají hodnoty tenzoru původního napětí v rovině kolmé k ose tunelu.

Jedná se o poměrně malé soustavy, ale při špatné volbě měřických bodů můžeme dostat špatně podmíněnou soustavu, kdy řešení je velmi citlivé na malé změny použitých dat a tedy na případné chyby měření. Tento fenomén může například nastat, zvolíme-li dvě různé dvojice měřických bodů příliš blízko sebe.

Určení vhodné množiny dvojic měřických bodů je založeno na proceduře, která

- generuje všechny přípustné dvojice měřických bodů,
- sestavuje matice metody nejmenších čtverců s ohledem na generované dvojice,
- vypočítá odpovídající determinant soustavy.

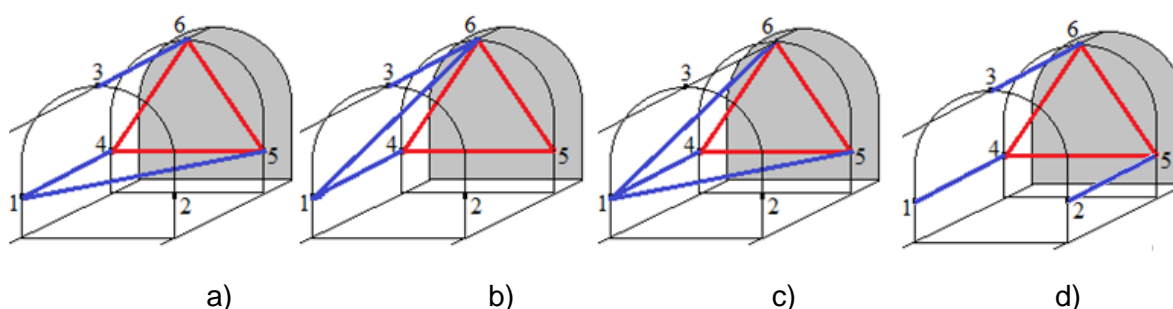
Minimální počet měření je šest. Algoritmus postupně prochází všemi přípustnými konfiguracemi měřických dvojic bodů a vybírá tu, pro kterou je determinant matice v (4) maximální, co je ekvivalentní tomu, že číslo podmíněnosti této matice je minimální.

V Tab. 3 jsou některé výsledky systematicky generovaných dvojic měřických bodů. Přitom tři dvojice jsou z jednoho profilu, $A=(12, 13, 23)$, resp. $B=(45, 46, 56)$ a tři meziprofilové dvojice značíme takto: $a=14, b=15, c=16, d=34, e=36, f=45, g=56, h=64, i=24$. Např. šestici dvojic $(12,13,23,14,15,16)$ zkráceně značíme $Aabc$. Čísla podmíněnosti pro některé vybrané soustavy jsou následující:

Tab. 4 Čísla podmíněnosti matic pro některé šestice měřických dvojic bodů


Aabc	Aabd	Aabe	Aacd	Aace	Aade	Abcd	Abce	Abde	Acde	Aaeg
272	514	191	778	2302	1183	572	895	391	426	127
Babc	Babd	Babe	Bacd	Bace	Bade	Bbcd	Bbce	Bbde	Bcde	Baeg
177	927	147	1211	2718	1589	278	1528	200	2271	58

Z Tab. 5 vyplývá, že nejlepší konfigurace měřických dvojic bodů je na Obr. 23 d) a nejhorší konfigurace je na Obr. 24 b). Nejlepší konfigurace bez dvojice měřických bodů $e=36$ je na Obr. 25 c). Konfigurace měřických bodů $e=36$ je problematická pro reálné měření vzhledem k jejich ztížené dostupnosti, protože body leží na stěně tunelu, který není rovný a při měření se může pásmo opírat o stěnu tunelu.



Obr. 26 Vybrané konfigurace měřických bodů a) Konfigurace Babe, b) konfigurace Bace, c) konfigurace Babc, d) Baeg.

Volba dvojic měřických bodů hraje velmi podstatnou roli, protože výrazně ovlivňuje přesnost určení původního tenzoru napětí, jak je patrné z předcházející analýzy. Je proto vhodné před instalací měřických bodů vypočítat konvergentní křivky a sestavit matici metody nejmenších čtverců pro různé pozice měřících bodů a poté vybrat takovou pozici, pro kterou je číslo podmíněnosti malé, tedy sestavená matice není citlivá na malé nepřesnosti měření.

 SÚRAO	Vznik a monitoring EDZ při výstavbě PVP Bukov	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 193/2017

4.2 Originalita metodiky ve srovnání s jinými postupy měření napětí a výhody navrženého postupu

Navrhovaná metodika vychází z dosud užívaných postupů analýzy konvergencí na jednom profilu tunelu. Tyto postupy umožňují získat jen některé složky tenzoru původního napětí. Jedná se projekci tenzoru napětí do roviny, která je kolmá na podélnou osu tunelu a prochází měřičskými body v profilu, na kterém se provádí měření konvergencí.

Navrhovaná metodika předpokládá měření na dvou profilech, které leží na dvou rovnoběžných rovinách kolmých k ose tunelu. Takováto konfigurace umožňuje získat všechny složky tenzoru původního napětí. Nedílnou součástí této metodiky je i originální přístup k analýze naměřených dat, který je založen na metodě nejmenších čtverců.

Pro určování složek původního napětí v masivu se používají zejména dvě metody:

- Metoda hydroporušování.
- Metoda odlehčení vrtného jádra.

Obě tyto metody se hojně používají v geomechanice a jedná se metody, které jsou poměrně náročné na vybavení a přípravu experimentu. V obou případech musí být vyvrtány speciální průzkumné vrty, do kterých je třeba vložit odpovídající komplikované zařízení a vyhodnotit výsledky měření. V případě hydroporušování můžeme jedním měřením určit pouze některé složky tenzoru původního napětí. V případě, že chceme získat kompletní tenzor napětí, je nutné tento postup opakovat v různě orientovaných vrtech. Metoda odlehčeného vrtného jádra umožňuje získat kompletní tenzor původního napětí v případě, že jako čidlo použijeme jako např. v tomto projektu kónickou sondu (CCBO, CCBM).

Obě zmíněné metody mají lokální charakter, což znamená, že reakce na aplikaci samotného zařízení pochází z bezprostředního okolí, tedy může být zatíženo i relativně velkou chybou.

V případě předkládané metodiky pracujeme s objekty, jejichž velikost je srovnatelná s rozměry tunelu. Navíc porovnání předkládané metodiky spolu se zmíněnými postupy (metoda hydroporušování, CCBO, CCBM) zvyšuje spolehlivost odhadu složek původního napětí a rozšiřuje tímto další možnosti spolehlivého určení napětí v masivu.

Tato metodika je použitelná díky tomu, že konečněprvkový systém GEM3, na rozdíl od běžných konečněprvkových komerčních systémů, umožňuje řešit úlohy s výlučně silovými okrajovými podmínkami.

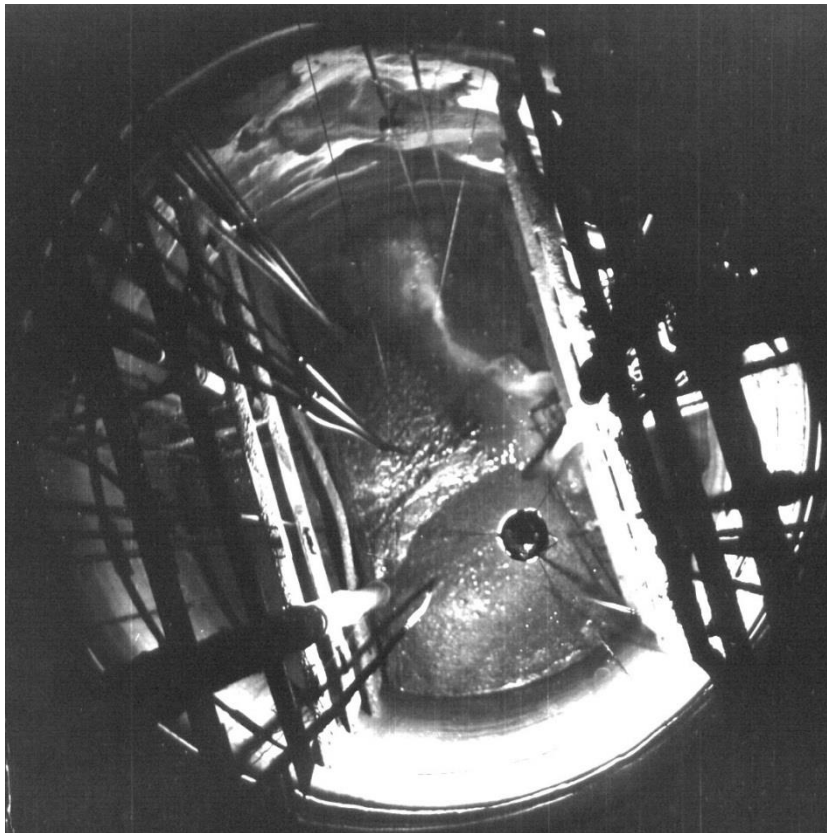
4.3 Kalibrace vyvinuté metodiky

Výsledkem testu programu INVGEM byla analýza dvou různých modelů, kdy z naměřených dat byly získány hodnoty původního tenzoru napětí nebo jeho částí. Jako první testovací úloha byla použita těžební jáma na dole Frenštát. Před havárií byly naměřeny vzdálenosti mezi protějšími body na ostění šachty. Po havárii byly tyto vzdálenosti znovu přeměřeny a rozdíly vzdáleností, které odpovídaly deformaci betonového ostění, byly použity pro určení horizontálních hlavních směrů a jejich poměru. Jako druhá testovací úloha byla použita měření mezi několika dvojicemi bodů na stěnách tunelu v podzemní laboratoři na Bukově. Byly postupně měřeny konvergence při ražbě tunelu a tyto hodnoty byly použity pro určení všech složek původního napětí. Tyto výsledky byly srovnány s měřeními in situ pomocí metody

odlehčeného jádra. Jako výsledek kalibrace je rovněž provedena analýza volby instalace měřických bodů.

4.3.1 Horizontální model hlavních směrů

Tento model se opírá o analýzu měření deformací betonového ostění na šachtě ve Frenštátě, kde došlo v průběhu hloubení k havárii (Martinec et al. 2008). Při hloubení jámy a jejím postupném zapažování probíhala kontinuální měření mezi některými body na betonové výztuži. Tato měření probíhala na řadě profilů v různých hloubkách. Po havárii, kdy došlo k destrukci betonové výztuže v hloubce 650m až po dno těžební jámy, došlo k opětovnému přeměření betonové výztuže v hloubkách nad 650 m. Tvar těžební jámy je znázorněn na Obr. 27.



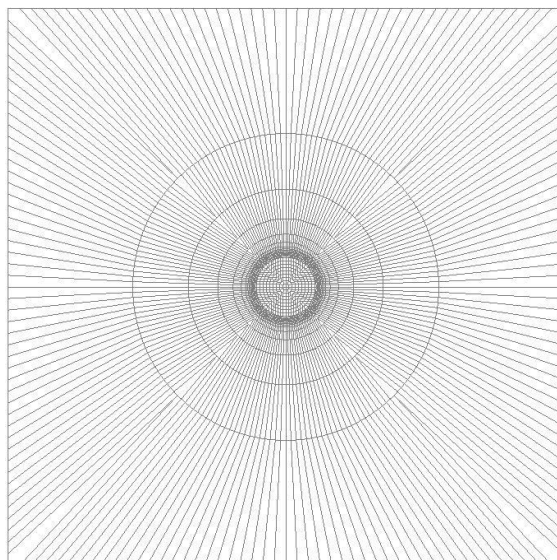
Obr. 27 Tvar těžební jámy dolu Frenštát

Již v době hloubení těžební jámy vznikaly na betonové výztuži podélné pukliny, jak je znázorněno na Obr. 28. Z těchto trhlin se usuzovalo, že v dané oblasti je silně anizotropní napětí v horizontální rovině, což v konečném důsledku bylo příčinou havárie. Použitím inverzní analýzy jsme určili směry hlavních napětí a jejich poměr. Použili jsme metodu popsanou výše, kdy jsme použili rozdíl v naměřených deformacích před havárií a po ní. Toto nám umožnilo určit i absolutní hodnoty hlavních napětí, které však nejsou velmi spolehlivé vzhledem k neznalosti mechanismu porušení při samotné havárii. Není totiž zřejmé, jaká část původního napětí se promítla do následných deformací, ke kterým došlo po destrukci betonového prstence od hloubky 650m. Nicméně můžeme použít hypotézu, že směry hlavních napětí a jejich poměr se zachovává bez ohledu, jaká část původního tenzoru napětí vyvolá následné deformace po havárii.

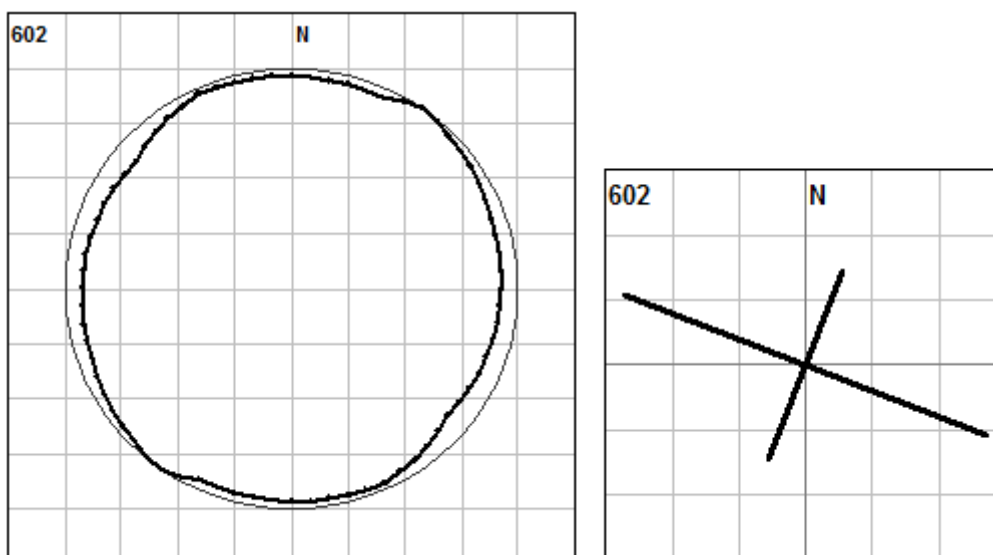


Obr. 29 Pukliny na stěně betonového ostění šachty

Vzhledem k neznalosti průběhu destrukce jsme úlohu řešili jako dvou rozměrnou. Odpovídající konečně prvková síť je znázorněna na Obr. 30. Byly provedeny inverzní analýzy pro profily v různých hloubkách. Výsledek jedné analýzy v hloubce 602 m je znázorněn Obr. 31. Kříž na levé straně obrázku znázorňuje horizontální napětí v hloubce 602 m. Na pravé straně obrázku jsou znázorněny naměřené deformace, které vznikly zhroucením betonového stvolu od hloubky 650 m. Pod deformacemi rozumíme rozdíl mezi naměřenými posuny na protějších bodech na stěně šachty vyztužené betonem a naměřenými posuny ve stejných bodech po havárii. Je rovněž zřejmé, že reakce na vlastní napětí je tím větší, čím je měřený profil blíže k zóně, kde došlo k havárii. Toto je patrné z naměřených dat. Z výše zmíněné úvahy je zřejmé, že uvažovat absolutní výsledky inverzní analýzy za relevantní je problematické. Nicméně směry hlavních napětí a jejich poměr jsou určeny spolehlivě, jak ostatně plyne z Tab. 6, kde jsou shromážděny výsledky inverzních analýz pro profily od 602 do 647 m. Z těchto analýz vyplývá, že poměry vlastních hodnot a směry napětí vykazují určitou konzistenci, která je očekávána. Rovněž je z této tabulky patrné, že absolutní velikosti vlastních hodnot původního napětí rostou při přibližování analyzovaného profilu zóně porušení. Už při hloubení jámy byly očekávány určité problémy, které posléze vyvrcholily havárií, která způsobila značné ekonomické škody. V této době se předpokládalo, že jednou z příčin havárie je anizotropní horizontální napětí, které působí napěťové změny v betonové výztuži. V případě anizotropních sil, které působí na styku horniny s betonovou výztuží, tyto síly vyvolají tahové namáhání v betonové výztuži. Důvodem havárie patrně bylo to, že tyto síly při dosažení určité hloubky překročily kritické hodnoty pevnosti betonu v tahu.




Obr. 30 Konečně prvková síť pro úlohu havárie na dole Frenštát



Obr. 31 Naměřené deformace v hloubce 602 m a horizontální složky tenzoru napětí

 Tab. 6 Vypočtená vlastní napětí λ_1 , λ_2 a jejich směrové natočení φ

Hloubka [m]	λ_1	λ_2	φ	λ_2 / λ_1
602	-4.64	-8.74	-111	1.88
616	-13.07	-21.04	-170	1.61
621	-29.98	-39.2	-112	1.31
627	-10.30	-25.61	-147	2.49
632	-36.02	-45.05	-139	1.25
638	-39.84	-53.48	-135	1.34
641	-63.31	-71.32	-123	1.13
644	-72.44	-76.64	-168	1.06
647	-72.67	-91.42	-113	1.26

 SÚRAO	Vznik a monitoring EDZ při výstavbě PVP Bukov	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 193/2017

Úhel natočení φ je úhel, který svírá větší vlastní napětí s vertikální přímkou, směr Z-V. Úhel je měřen proti směru hodinových ručiček

Výše zmíněná analýza korespondovala s měřením horizontálních napětí metodou hydro-porušování. V tomto případě směry hlavních napětí a jejich poměr odpovídají inverzní analýze. Rovněž orientace trhlin na stěnách betonového tubusu odpovídá směrům hlavních napětí, které byly získány inverzní analýzou. Na soulad vypočtených směrů se skutečnými směry napětí rovněž ukazuje poloha výlomů, které se zjevovaly v průběhu hloubení šachty.

Test na známé úloze prokázal oprávněnost použití této metody v praxi, proto byla aplikována i na lokalitě PVP Bukov (viz níže).

4.3.2 Rekonstrukce původních napětí 3D úloha – Bukov

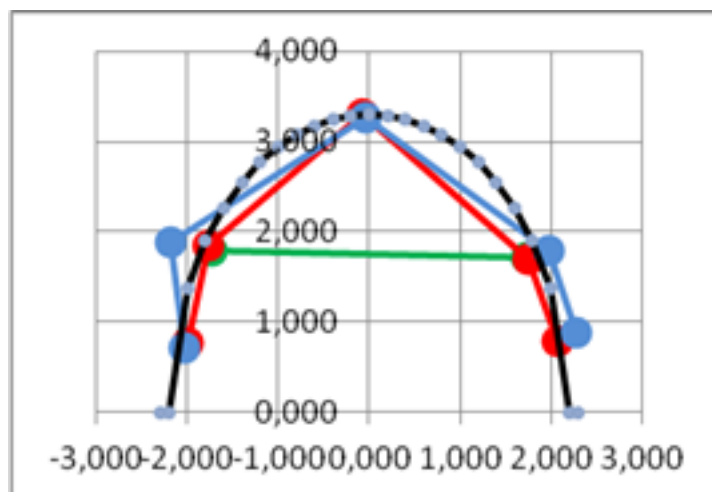
Výše navrženou analýzu pro určení původního tenzoru napětí jsme použili při analýze konvergencí naměřených na podzemní laboratoři Bukov v oblasti KS-2. V tomto případě šlo skutečně o třírozměrnou úlohu, která mohla být porovnána s některými výsledky měření in situ pomocí metody hydro porušování. Jednalo se o skutečnou reálnou úlohu, kdy měřické body byly instalovány na tunelu, který byl ražen technologií trhací práce.

V Tab. 7 jsou zapsány souřadnice měřických bodů na třech profilech.

Tab. 7 Souřadnice měřických bodů

PIN	Původní souřadnice			Projektované souřadnice		
	x	y	z	x'''	y'''	z'''
11	0,000	0,000	0,000	0,000	-1,843	1,800
12	0,654	3,391	-0,078	0,065	1,877	1,722
21	5,442	0,625	-1,024	5,453	-2,138	0,776
22	5,282	0,822	0,040	5,337	-1,826	1,840
23	5,051	2,506	1,504	5,462	-0,076	3,304
24	4,723	4,314	-0,098	5,517	1,885	1,702
25	4,789	4,656	-1,007	5,652	2,136	0,793
31	8,593	1,285	-1,077	8,672	-2,147	0,723
32	8,544	1,129	0,080	8,592	-1,808	1,880
33	7,721	3,141	1,472	8,205	-0,042	3,272
34	7,470	5,154	-0,006	8,378	1,847	1,794
35	7,488	5,466	-0,921	8,461	2,121	0,879

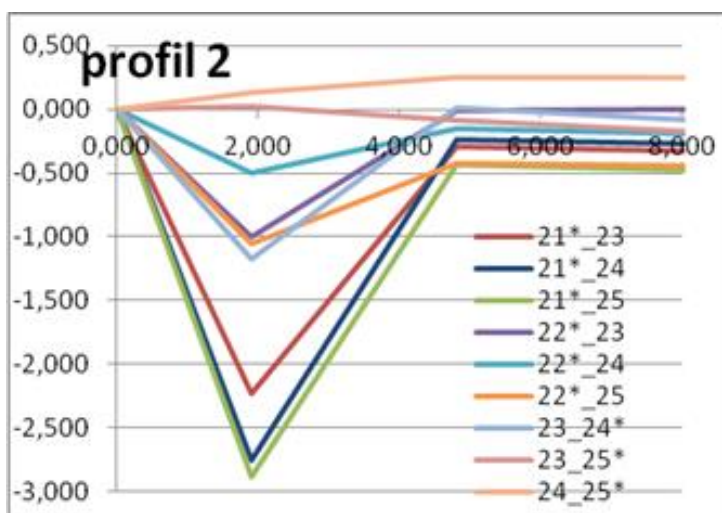
Na Obr. 32 jsou aproximovány pozice měřických bodů. Zelená barva odpovídá nejvzdálenějšímu profilu tunelu vůči čelbě ražby a označujeme tento nejvzdálenější profil číslem jedna. Modrá barva odpovídá číslu tři a koresponduje s nejbližším profilem vůči čelu, červená barva koresponduje s druhým profilem, který je uprostřed.



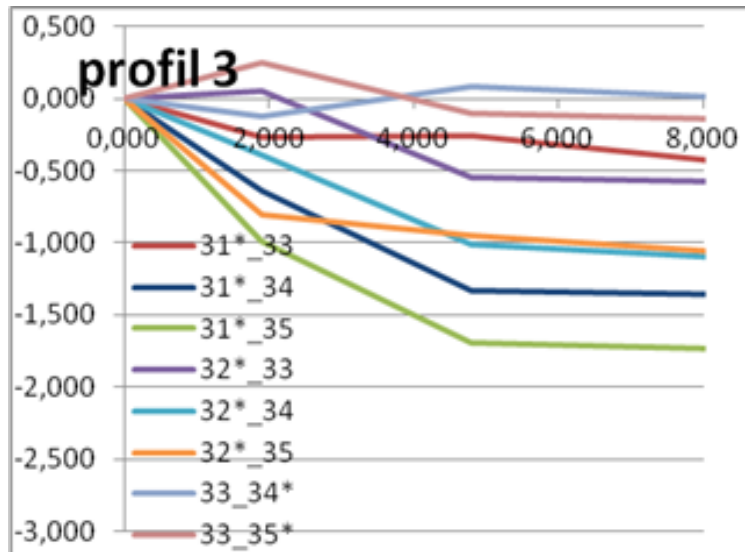
Obr. 32 Aproximace měřických bodů na profilech

Podle stanovené metodiky je třeba vytvořit konečně prvkovou síť a spočítat příslušné elementární úlohy. Poté provést inverzní analýzu založenou na metodě nejmenších čtverců.

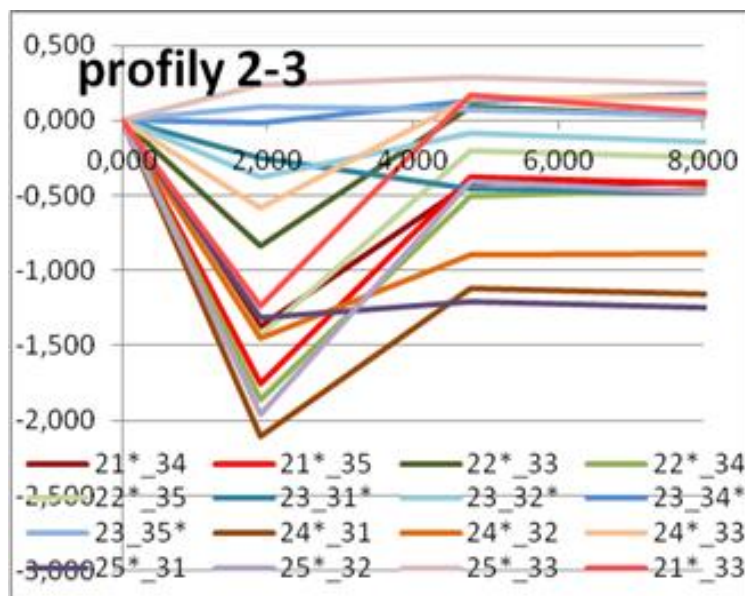
Na následujících obrázcích jsou naměřené konvergence na jednotlivých profilech a mezi profily, což je potřebné pro získání celého tenzoru původního napětí.



Obr. 33 Konvergence mezi měřickými body na druhém profilu

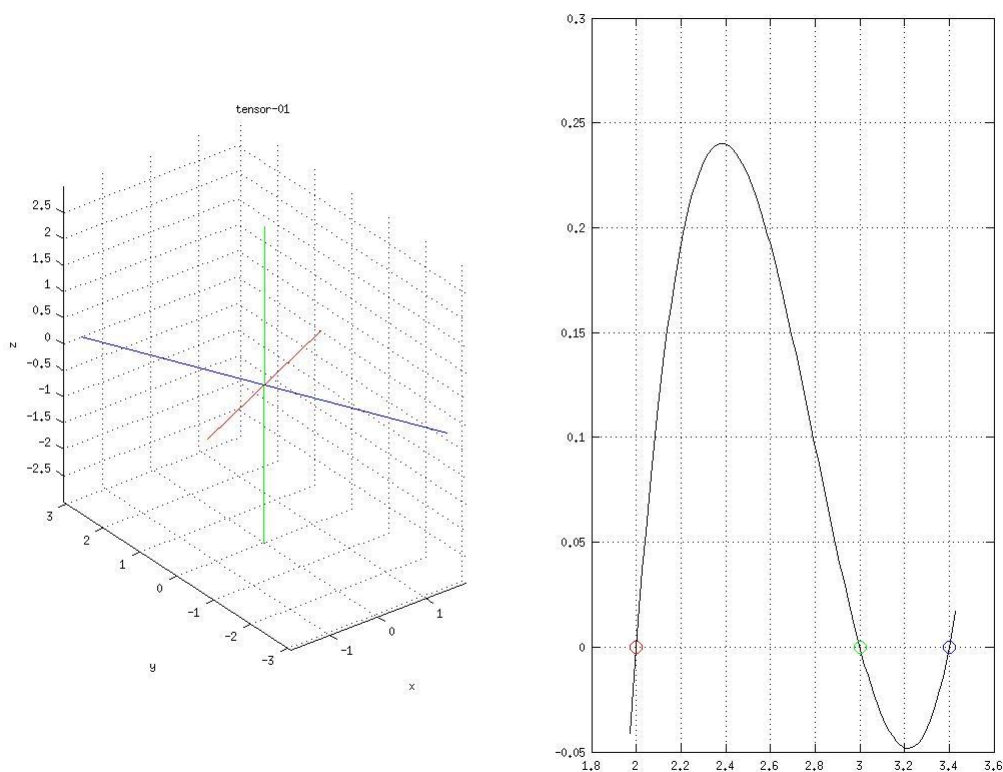


Obr. 34 Konvergence mezi měřickými body na třetím profilu




Obr. 35 Konvergence mezi měřickými body na druhém a třetím profilu

Na Obr. 33, Obr. 34 a Obr. 35 jsou vykresleny naměřené posuny na druhém a třetím profilu a mezi těmito dvěma profily. Tyto posuny korespondují se vzdalováním se čela tunelu od těchto profilů a jsou vlastně reakcí na působení existence původního napětí. To se projevuje právě těmito konverencemi. Tyto údaje zpracujeme v programu INVGEM, který nám znázorní původní tenzor napětí. Vzhledem ke skutečnosti, že neznáme přesně materiálové vlastnosti horniny, ve které je tunel situován, je vhodné tenzor upravit s ohledem na znalost hloubky a váhy nadloží. Touto úpravou rozumíme celkové přeškálování tak, aby vertikální složka odpovídala váze nadloží. Na Obr. 36 je znázorněn tenzor, který je výsledkem výše popsáných výpočtů.



Obr. 36 Zobrazení hlavních složek vypočteného původního napětí z konvergenčních měření, Vizualizace hlavních složek a jejich orientace vůči ose tunelu (x-osa) se směrem 151° (vlevo), vypočtené velikosti poměrů hlavních složek tenzoru napětí (vpravo)

Poznamenejme, x – osa odpovídá podélné ose tunelu, orientované ve směru 151°. Směr většího hlavního původního napětí je odchýlen od osy tunelu o cca 60°, tj. jeho orientace je ve směru cca 30° od severu (SSV-JJZ). K ní kolmá osa odpovídající druhému horizontálnímu hlavnímu napětí je zhruba poloviční. Vertikální složka napětí je zhruba stejně velká jako větší z horizontálních hlavních napětí.

 SÚRAO	Vznik a monitoring EDZ při výstavbě PVP Bukov	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 193/2017

5 Závěr


- Etapa 2 týkající se realizace distribuovaného monitorovacího systému je průběžně plněna. Systém je dle potřeby rozšiřován o plánovaná čidla a měření pro účely tohoto ZL, ale i o měřicí prvky realizované v rámci jiných paralelně běžících subprojektů ZL.

V současné době DMS obsluhuje s periodou 15min 6 sond CCBM, v rámci dalších ZL pak 9 měřících svorníků a řadu hydraulických snímačů. Změřená data jsou jednak zálohovaná v DMS, jednak jsou cíleně vysílána po Internetu na odpovídající instituce k dalšímu zpracování a interpretaci.

Předběžně vyhodnocená napětí získaná aplikací metody CCBO ve 4 měřících vrtech v okolí překopu BZ1-XII ukazují hodnoty, které nejsou v rozporu s hodnotami předpokládanými v oblasti vlivu důlního díla těchto rozměrů. Tyto hodnoty budou jedněmi ze vstupních dat při tvorbě matematického modelu ovlivnění napěťového pole v okolí předmětného důlního díla. Zároveň jsou sledovány změny napěťového pole v souvislosti s časovým vývojem resp. postupem razících prací.

- Etapa 3 týkající se využití skeneru pro přesnou dokumentaci tvaru důlního díla je splněna v oblasti testovací komory ZK-1. Vlastní skenování BZ1-XII může být provedeno až po vyklizení materiálu po razících pracích a zpřístupnění lokality po výluce, což bude teprve realizováno.
- Etapa 4. V rámci této etapy byl vyvinut sw aparát pro zjišťování 3D napěťového pole na základě přesného měření vzájemných konvergencí na sérii měřických bodů situovaných v několika profilech a opakovaně měřených během postupu čela ražby. Funkčnost metodiky byla vyzkoušena na známém případě poškození jam Frenštát a byla aplikována na konvergenční měření v oblasti KS-2 na PVP Bukov. Výsledky jsou ve shodě s dříve naměřenými hodnotami napěťového pole v blízké lokalitě na této hloubkové úrovni. Větší hlavní horizontální napětí je velikostně na úrovni vertikální složky a je orientováno SSV-JJZ. Tento výsledek je kompatibilní s měřeními metodou hydrofracturing ve Vrk-1.

Lze konstatovat, že Etapy č.2 - 4 subprojektu Bukov EDZ v projektu „Výzkumná podpora pro bezpečnostní hodnocení hlubinného úložiště“ jsou v rámci objektivních možností plněny v souladu s technickým zadáním specifikovaným v ZL, ačkoliv z hlediska časového harmonogramu dochází ke zpoždění některých prací objektivně souvisejících s reálným stavem razících prací, které měly být ukončeny dle původního plánu na konci roku 2015 resp. v prvních měsících 2016. Z tohoto pohledu bude nutno ukončení řešení posunout až do roku 2017, tak aby byl dostatek času na vyhodnocení a syntézu získaných poznatků z jednotlivých etap.

 SÚRAO	Vznik a monitoring EDZ při výstavbě PVP Bukov	Evidenční označení:
		SÚRAO TZ 193/2017

6 Citace a seznam literatury

- HERLE I. (2003): Základy matematického modelování v geomechanice. – Nakladatelství Karolinum UK, Praha. ISBN 80-246-0745-X.
- JING L. STEPHANSSON, O. (2007): Fundamentals of Discrete Element Methods for Rock Engineering: Theory and Applications Volume 85: 1-545. – Elsevier. ISBN 978-0-444-82937-5.
- MALÍK J. (1998): Mathematical modelling of rock bolt systems I. – Appl. Math. 43413-438.
- MALÍK J. (2000): Mathematical modelling of rock bolt systems II. – Appl. Math. 45177-203.
- MARTINEC P., DVOŘAK D., SCHEJBALOVÁ B., MALÍK J., KOLCUN A., STAŠ L. ŠŇUPÁREK R., VAŠÍČEK Z. (2008): Geologické prostředí a geologické vlastnosti pokryvu karbonu české části hornoslezské pánve. – Monografie ÚGN AV ČR, Ostrava. ISBN 978-80-86407-54-8
- NEČAS J., HLAVÁČEK I. (1981): Mathematical Theory of Elasto-Plastic Bodies: An Introduction. Elsevier.
- STAS L.; KNEJZLIK J.; PALLA L., SOUCEK K., WACLAWIK P. (2011): Measurement of Stress Changes Using a Compact Conical-ended Borehole Monitoring, Geotechnical Testing Journal Volume: 34 Issue: 6 Pages: 685-693
- SUGAWARA K.; OBARA Y. (2003): Draft ISRM suggested method for in situ stress measurement using the compact conical-ended borehole overcoring (CCBO) technique. Int. J. of Rock Mech. And Min.Sci, Vol.40 Issue 7-8, pp.1189-1203
- TEDIA (2016): TEDIA® SPOL. S R. O. [online]. [cit. 2016-06-07]. Dostupné z: <http://www.tedia.cz>
- AIBUS-2 (2016): AIBUS-2, SPECIFIKACE KOMUNIKAČNÍHO PROTOKOLU [online]. [cit. 2016-06-07]. Dostupné z: <HTTP://WWW.TEDIA.CZ/DOWNLOAD/FILES/AIBUS2.PDF>
- ITU (2016): Data networks and Open System Communications: Open Systems Interconnection – Basic Reference Model: The Basic Model. INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION [online]. [cit. 2016-06-07]. Dostupné z: https://www.itu.int/rec/dologin_pub.asp?lang=e&id=T-REC-X.200-199407-1!!PDF-E&type=items

