

Měření tenzoru indukovaných napět'ových změn tenzometrickou kuželovou sondou v OKR

Measurement of Tensor Stress Changes by Conical Gauge Probe in Ostrava-Karvina Coal Basin

L. STAŠ¹, K. SOUČEK¹, J. KNEJZLÍK¹, P. WACLAWIK², L. PALLA²

¹ Ústav geoniky AV ČR, v.v.i., Ostrava

² OKD a.s., Ostrava

Abstract

This paper describes the first experience of in-situ measurement of the stress tensor changes during a long wall extraction. A device designed on base of measurement local deformations on compact conical ended borehole was used for long term monitoring of stress changes induced by closed underground human activity. A new device for stress changes tensor measurement was developed on base of deformation measurement applied on conical shaped borehole bottom. In frame of this development the special probe interlocked to data logger was made. This type of device has been used to long term monitoring of the stress – strain changes. A functionality of this device was verified both in the laboratory conditions and in the conditions of Carboniferous rock mass. The changes of stress state of rock mass impacted by progress of long-wall were investigated. This experiment demonstrated that monitored strain changes on borehole bottom are formed both by geomechanical situation based on a progress of long-wall and perhaps by local geomechanical situation based on stress redistribution after boring of measuring borehole and on plastic deformation of creeping rock material. Relatively high time consumption to stabilization of this deformation process after drilling measuring borehole and installation of the probes is shown. Presented examples of stress changes measurement respond the changes of local geomechanical situation well. Measurement by this method gives possibility to more detailed analyse of development of stress state during human activity in underground space.

Úvod

Napět'ová pole jsou jedním ze základních faktorů, které rozhodným způsobem, spolu s mechanickými a přetvárnými vlastnostmi hornin, výrazně ovlivňují chování horského masivu. Proto zjišťování, popř. monitorování změn, napět'ových polí horského masivu má zásadní význam zvláště pro hornictví a další obory zabývající se napět'ovými stavy a projevy napětí v zemské kůře. Poznání napět'ových polí je přínosem pro projektování a zdárnou realizaci geotechnických podzemních projektů (např. pro posouzení stability podzemních prostor, chování navržených výztuží podzemních

objektů, pro časoprostorové situování podzemních objektů) zvláště v netriviálních geomechanických podmínkách jak z hlediska přírodních faktorů ovlivňujících napěťová pole (např. strukturní a geologická stavba horninového masivu, tektonická napětí, trhliny a diskontinuity v horninovém masivu), tak rovněž z hlediska antropogenních faktorů (geomechanická konfigurace podzemních prostor a dynamika jejich změn).

Při dobývání ložisek nerostných surovin dochází k přerozdělování napěťových polí (změn směrů a velikosti působících hlavních napětí), kdy může dojít k enormní koncentraci zatížení hornin v exponovaných predisponovaných oblastech a vzniku anomálních dynamických jevů, někdy ve formě devastujících horských otřesů, které bývají průvodním jevem exploatační činnosti ve specifických důlně-geologických podmínkách. Data získaná z výzkumu velikosti, směrů a změn napětí v horském masivu jsou zásadním přínosem v oblasti matematického modelování, kde mohou být použita jako vstupní parametry, pro získání přesnějšího obrazu o chování horského masivu a podzemních objektů v předmětných oblastech.

Problematika horských tlaků a jejich měření je na Ústavu geoniky předmětem výzkumu již dlouhou dobu. V současné době jsme potřebovali najít takovou metodu, která by byla schopna monitorovat změny napětí vyvolané lidskou aktivitou v podzemí. Dříve na Ústavu používaná metoda hydraulického štěpení vrtné stěny, používaná zejména k zjišťování velikosti a orientaci horizontálních primárních napětí, však má z hlediska geometrického uspořádání experimentu jistá omezení, zároveň se nehodí pro dlouhodobá sledování, kdy lze předpokládat nejen změnu velikosti hlavních napětí, ale i změnu jejich směru. Tato skutečnost nás vedla k hledání jiné vhodnější metody umožňující zjišťovat celý tenzor indukovaného napětí.

Metodické principy

Vývoj zařízení pro tyto účely jsme zahájili na principech poprvé použitých prof. Obarou a prof. Sugawarou z Univerzity v Kumamotu, kteří upravili běžně používanou metodu měření napětí odlehčením vrtného jádra do podoby „compact conical ended borehole overcoring system“ umístěním dostatečného počtu různě orientovaných tenzometrických snímačů na kuželově tvarovaném dně vrtu (NAKAMURA, 1999). Odvrtáním takto připravené stanice lze z deformací na tenzometrech rekonstruovat celý tenzor napětí. Vynecháme-li však fázi odvrtávání, lze pak tuto konfiguraci tenzometrů využít pro dlouhodobé sledování změn tenzoru napětí, přesněji dodatečně- změnové složky tenzoru napětí vztahené k momentu instalace (CCBM) (STAŠ, 2005).

Teorie

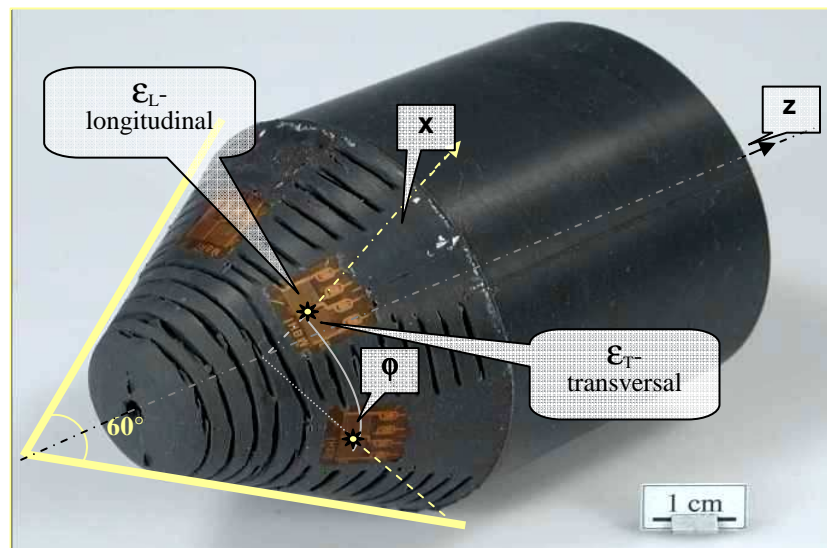
Využití kónického tvaru měřicího zařízení je výhodné jak z hlediska možnosti změřit celý tenzor napětí v jedné pozici tak také z hlediska jednoduché instalace a centrování kuželové sondy ve vrtu

Závislost odpovídajících tenzometrických snímačů je formulována jako (1) (STAŠ, 2004; STAŠ, 2005):

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

kde: $\varepsilon_{\Delta}^{\Phi_j}$ - vypočtená deformace na tenzometru Δ typu ($\Delta \in \{T - \text{příčný}, L - \text{podélný}\}$) a

úhlu umístění na kuželové ploše Φ_j vztaženému k ose x ($j \in \{1, \dots, m\}$, m-počet senzorů); E–Youngův modul; $|\mathbf{A}(\Delta; \Phi_j)|$ je 6-elementová řádková matice; elementy závisí na Δ typu a Φ_j orientaci odpovídajících tenzometrů; $|\boldsymbol{\sigma}|$ - tenzor napětí reprezentovaný sloupcovou maticí ($|\boldsymbol{\sigma}|^T = \{\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}, \sigma_{xy}, \sigma_{xz}, \sigma_{yz}\}$). Optimální řešení tenzoru napětí $|\boldsymbol{\sigma}|$ celého systému je nalezeno metodou nejmenších čtverců rozdílů mezi vypočtenými $\varepsilon_{\Delta}^{\Phi_j}$ a skutečně zjištěnými $\varepsilon_{\Delta\Phi_j}$ deformacemi na odpovídajících tenzometrech.



Obr.1. Popis užitého systému koordinát na fotografii tenzometrické kuželové sondy
 Fig. 1. Description of used coordinated system on the photograph of a gauge probe .

Základní technická data

Aparatura je konstruovaná pro použití ve vrtech o průměru 76 mm, jejichž dno je upraveno speciálními vrtnými kuželovými dláty s vrcholovým úhlem 60°. Samotná sonda je vodotěsná, je opatřena šesti páry vzájemně kolmo orientovaných tenzometrů rozmístěných po obvodu kuželové plochy (Obr. 1). Aparatura byla vyvinuta zejména pro účely měření napětí metodou odlehčení vrtného jádra a je schopna autonomně snímat a zaznamenávat přímo v sondě hodnoty deformací na jednotlivých tenzometrech. Pro tyto účely je v sondě použit mikroprocesor, který řídí celý proces měření a registrace. Pro účely dlouhodobého měření byla vyvinuta speciální varianta zařízení, která je opatřena spojovacím kabelem pro přenos měřených dat do přenosného datalogeru PSION (Obr. 2). Komunikace probíhá na bázi interface RS232. Tato varianta určená pro dlouhodobý monitoring tenzoru napětí byla úspěšně odzkoušena jak v laboratorních podmínkách, tak v praxi v úzké spolupráci s pracovníky Dolu Lazy a Dolu ČSM na jimi doporučených lokalitách.



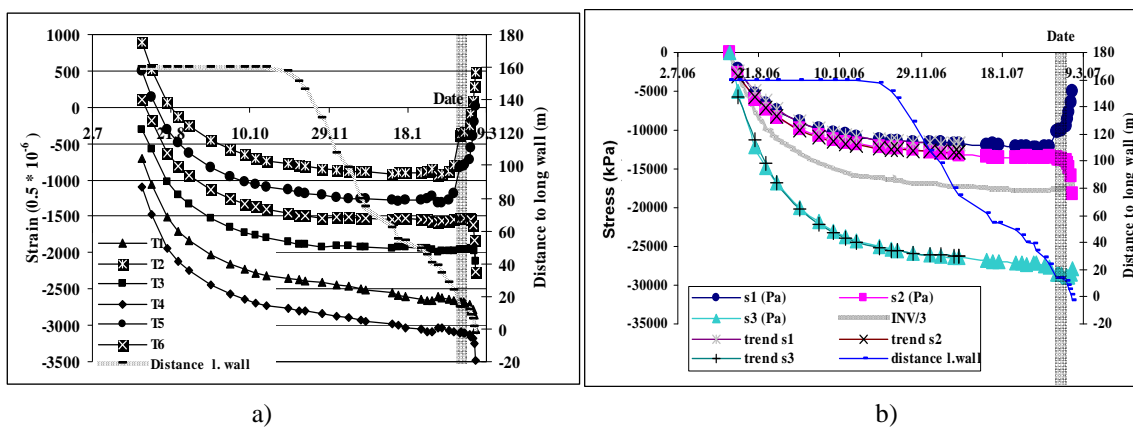
Obr. 2. Sonda pro dlouhodobá měření změn tenzoru napětí (vlevo), externí přenosné záznamové zařízení PSION (vpravo)

Fig. 2. A gauges probe for long term measurement of stress tensor changes (left side), registration unit PSION (right side)

Experimentální měření in-situ

Experimentální tenzometrické stanice byly realizovány ve vrtech o průměru 76 mm ve vzdálenosti 8-16 m od ústí vrtů vrtaných dovrchně do nadloží sloje. Do těchto vrtů byly následně vlepny tenzometrické sondy na předem kuželově vytvarované dno vrtu. Speciálním zařízením fy Pajari byly odečteny prostorové orientace a otočení sond při instalaci v jednotlivých vrtech. Z jádra v blízkosti dna vrtu je laboratorně určován Youngův modul pružnosti a Poissonovo číslo. Tyto mechanické vlastnosti vstupují pak do výpočtu tenzoru napětí. Pro lepení hlavice používáme epoxidové lepidlo “531”, které bylo testováno na dlouhodobou stabilitu a creep efekt kontaktu tenzometr-hornina.

Typický záznam z měření na tenzometrických snímačích kuželové sondy je ukázán na Obr. 3.



Obr. 3. Typický záznam deformací na tenzometrické sondě (a) a jejich formální přepočítání na odpovídající napěťový stav (b)

Fig. 3. Typical deformations record on the gauges of probe (a) and their recalculation on stress state (b).

Při formálním přepočítání deformací na kuželové sondě na odpovídající napěťový stav můžeme velmi často registrovat dvě odlišné části průběhu přepočteného napětí. První

část viditelně nezávisí na postupu porubní fronty. Vyvíjí se jako kompresní deformace okamžitě po začátku měření a dlouho před zahájením dobývání porubu (na Obr. 3 až tři měsíce před rozjezdem porubu). Charakter deformace je stejný na všech senzorech a rychlost změny se postupně snižuje s dobou existence stanice. Tvar výsledných křivek napovídá na relaxační charakter deformace nejspíše vyvolané lokálním odlehčením zatíženého masivu odvrtním vrtu pro měřicí stanici. Tuto část křivek tedy nelze interpretovat jako změnu zatížení masivu jako celku a při výpočtu a interpretaci měření je nutné toto zohlednit.

Předpokládejme isotropní materiál a jednoduchý vztah rychlosti deformace v “relaxační fázi” jako (2). Relaxační deformaci $\Delta\varepsilon(\Delta t)$ pak můžeme vyjádřit jako (3).

$$d\varepsilon/dt = -k \cdot \varepsilon_1(t) \quad (2),$$

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_0 = \varepsilon_1(0) \cdot e^{(-k \cdot t)} + \varepsilon_0, \quad \text{resp.}$$

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_1(0) \cdot e^{(-k \cdot t_1)} (e^{(-k \cdot \Delta t)} - 1) \equiv C \cdot (e^{(-k \cdot \Delta t)} - 1) \quad (3),$$

kde ε – hodnota deformace; k – časový faktor; ε_1 – část pružné deformace působící na hodnotu rychlosti deformace; ε_0 – část deformace pod úrovní plastických deformací + offsetová hodnota na jednotlivých odpovídajících tenzometrech; t_1 , Δt – čas instalace sondy a doba od instalace.

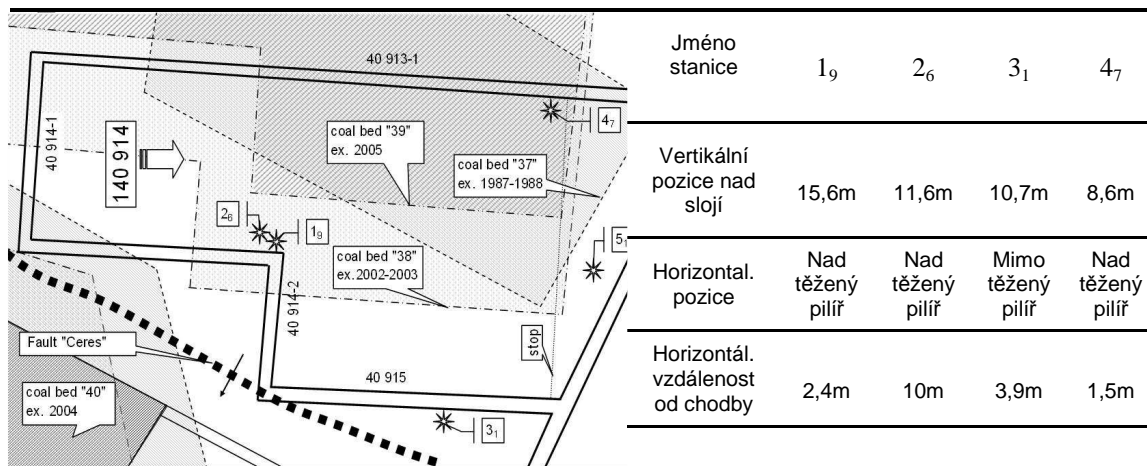
Využitím vztahu (3) jsme více či méně schopni odstínit “relaxační deformace” od deformací způsobených skutečnou změnou napět'ového stavu v masivu např. postupem porubní fronty. Na druhé straně existence „relaxační deformace” umožňuje odhadnout hlavní směry napět'ového tenzoru před ovlivněním lidskou aktivitou (Obr. 5). Všechny dále prezentované výsledky byly tímto způsobem ošetřeny.

Jiný typ deformace spojený s působením vlivu postupu porubní fronty se začíná projevovat až mnohem později (v případě Obr. 3 až ve vzdálenosti porubní fronty cca 40 m před měřicí stanicí).

Důl Lazy

Vyvinuté sondy byly aplikovány v konkrétní geomechanické situaci na vybraných lokalitách porubních chodeb porubu “140914” Situace je schematicky zachycena na obr. 4. Šlo o porub ve 40. sloji z jedné strany probíhající v blízkosti poruchy Ceres, z druhé strany podcházející sařiny 37. - 39. sloje. Oblast přiléhající k poruše Ceres byla preventivně ošetřena odlehčovacími trhacími pracemi.

V této blasti bylo nasazeno celkem 5 kuželových sond (CCBM) z nichž relevantní výsledky poskytly 4. Hvězdice na obr. 4 vyznačují umístění jednotlivých měřicích stanic. Youngův modul a Poissonovo číslo byly určovány z vrtného jádra z bezprostřední blízkosti instalované sondy.

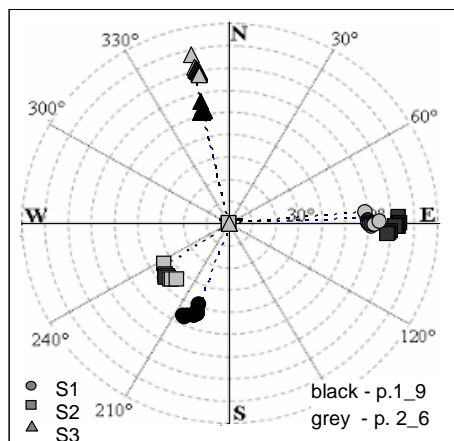


Obr. 4. Schematické znázornění umístění jednotlivých měřicích stanic na lokalitě Lazy
 Fig. 4. Scheme of placing of the gauge probes on the Lazy area

Výsledky měření na stanicích 1₉ a 2₆

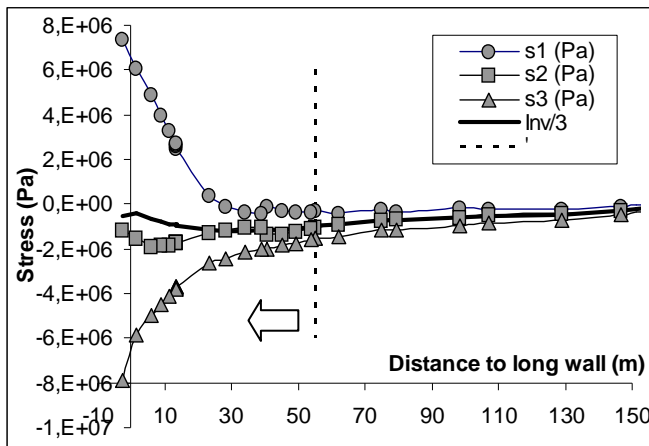
Tyto měřicí stanice byly umístěny v podstatě ve stejném místě chodby jen v různých vzdálenostech nad ní (viz tabulka na Obr. 4). Byly instalovány s dostatečně dlouhým předstihem před rozjezdem porubní fronty, takže “relaxační fáze” se mohla rozvinout dostatečně na obou stanicích a poměrně úspěšně byla ve výpočtech kompenzována. Pozice os hlavních napětí v této době byla relativně stabilní u obou stanic (Obr. 5).

Korelace mezi vývojem změn napětového stavu a postupu porubní fronty je dobře patrná z následujících grafů na Obr. 6ac. Obr. 6bd pak dokumentuje vývoj orientace hlavních os tenzoru indukovaných napětíových změn ve stanicích 1₉ a 2₆ (pro lepší čitelnost pouze od tečkované linie na Obr. 6ac). Vývoj orientace hlavních os napětíových změn je ve zřejmé souvislosti s přibližující se porubní frontou.

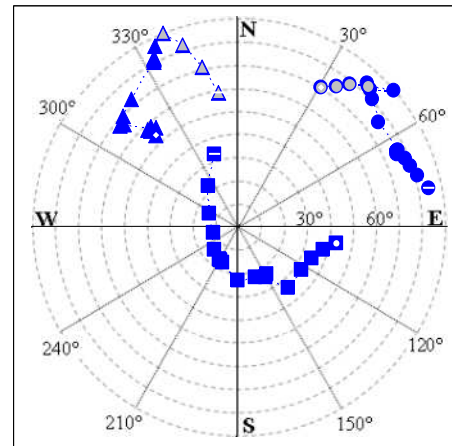


Obr. 5. Záznam pohybu os hlavních napětí v období “relaxační fáze” před zahájením těžby ve stanicích 1₉ a 2₆

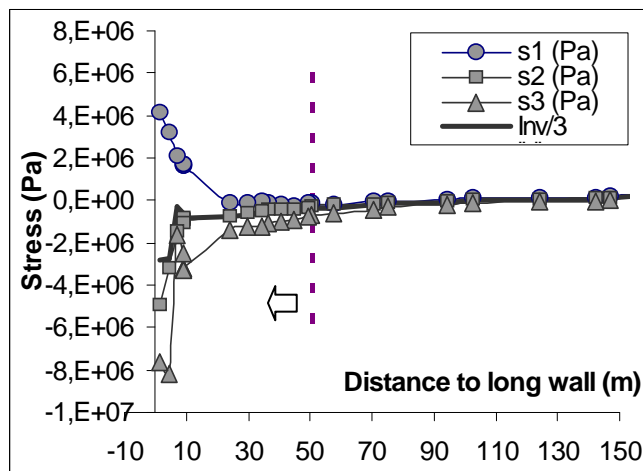
Fig. 5. Record of axes movement of the principal stress during “relaxation phase” before start of long wall progress. (The first positions of axes moving are in centre.)



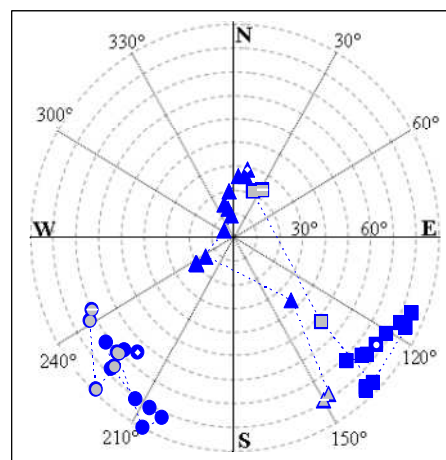
a)



b)



c)



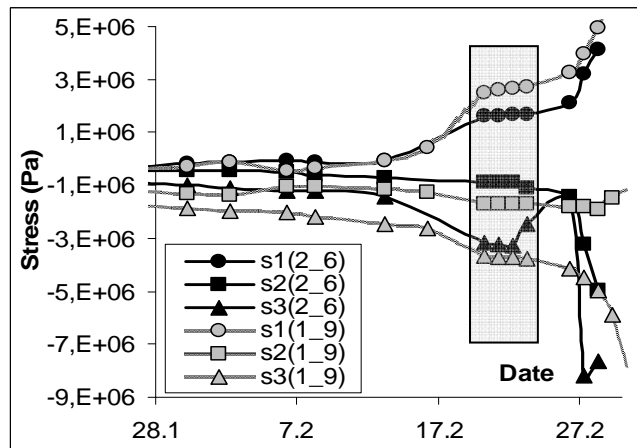
d)

Obr. 6. Vývoj hlavních složek napětových změn indukovaných postupem porubní fronty a jejich orientace (plné - průsečíky s dolní hemisférou, prázdné - s horní hemisférou) na měřicích stanicích 1₉ (a,b) a 2₆ (c,d)

Fig. 6. Development of the stress changes on 1₉ probe (a,b) resp. 2₆ probe (c,d) and orientation of the principle axes like the intersections on down hemisphere (filled) resp. upper hemisphere (empty)

V důsledku technologických problémů musel být postup porubní fronty v období 20.-23.2.2007 pozastaven (Obr. 7 šedá zóna). Na Obr. 7 je vidět, okamžitou reakci vývoje napětových změn v tomto období. Reakce níže umístěné sondy 2₆ se jeví výraznější.

Srovnáním prvních invariantů napětí označených zde jako INV/3 na Obr.6a (stanice 1₉) a Obr. 6c (stanice 2₆) lze konstatovat, že napětové změny v pískovcové nadložní vrstvě ve vzdálenější oblasti stanice 1₉ mají spíše tahový charakter, zatímco v blízkosti kontaktu nadložní vrstvy a těžené sloje (stanice 2₆) se projevuje spíše komprese. Takováto distribuce zatěžování je zcela v souladu s představou ohybové zátěže nadložní vrstvy při postupu porubní fronty.

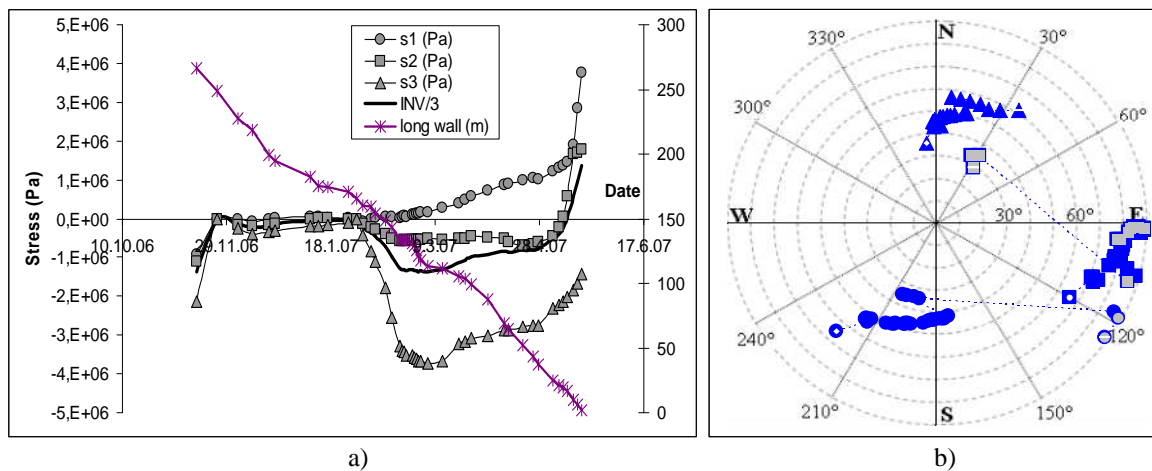


Obr. 7 Vývoj napětíových změn v době kolem pozastavení postupu porubní fronty (20.-23.2.2007 šedá oblast) na stanicích 1₉ a 2₆

Fig. 7. Selected part of development of stress changes on the probes 1₉ and 2₆ around the days of stop progress of long wall face (grey zone)

Komentované výsledky měření na stanicích 3₁ a 4₇

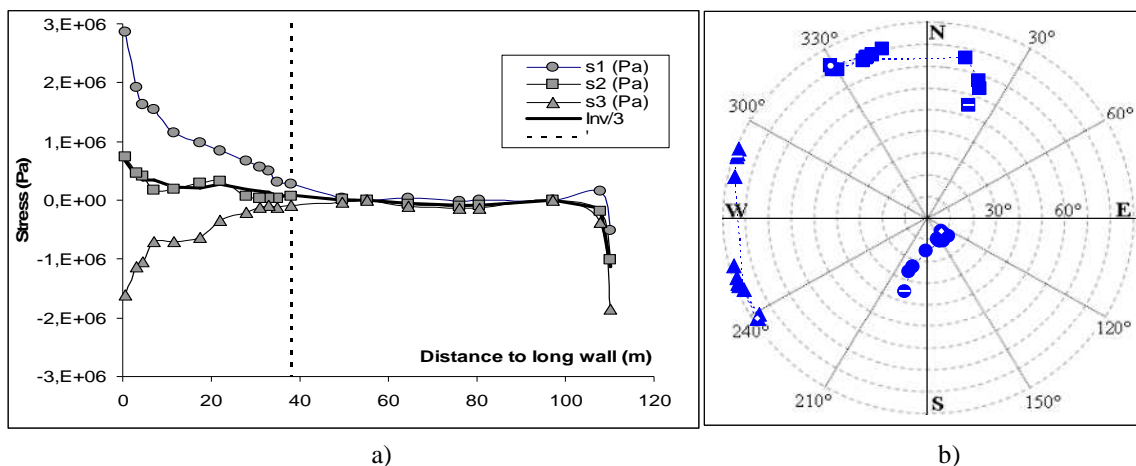
Výsledky na těchto stanicích byly analyzovány podobně jako v předcházejícím případě. Relaxační fáze neměla však typický ideální průběh jako v předcházejících případech, ale byla lineárně klesající. Stanice 3₁ byla realizována v oblasti přiléhající tektonické poruše Ceres (obr. 4), kde zároveň byly realizovány odlehčovací bezvýlomové trhací práce k



Obr. 8. Vývoj napětíových změn na stanici 3₁ a orientace jejich hlavních os jako průsečíků s dolní (plné), resp. horní (prázdné), projekční hemisférou.

Fig. 8. Development of the stress changes on 3₁ probe and orientation of their axes like the intersections on down hemisphere (filled) resp. upper hemisphere (empty)

zamezení případné koncentrace napětí. Data opravená na již zmíněnou lineárně klesající funkci jsou znázorněna na Obr. 8. Na Obr. 8 je také vidět efekt trhacích prací. Dvě trhací práce byly provedeny na přelomu ledna a února ve vzdálenosti cca 100 m a 75 m od stanice. Postupné přerozdělování napětíového stavu probíhalo přibližně 3 následující týdny.



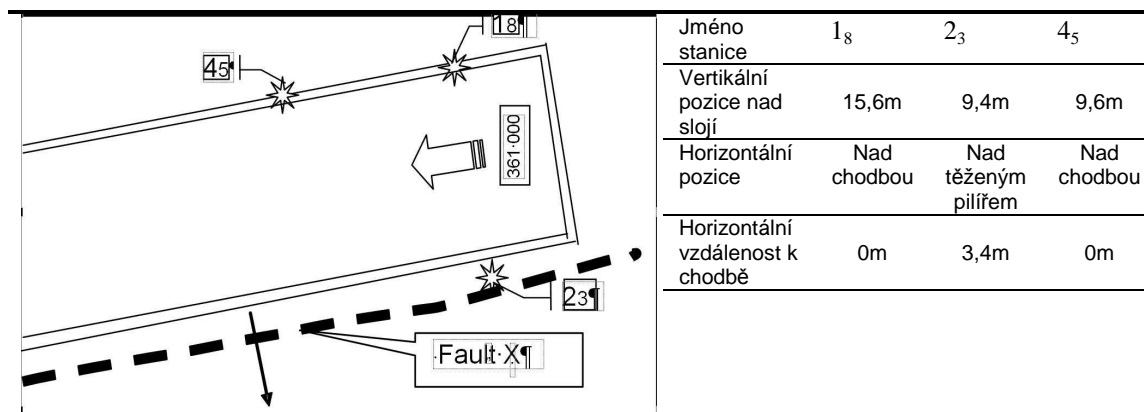
Obr. 9. Vývoj napět'ových změn na stanici 4₇ a orientace jejich hlavních os jako průsečíků s dolní (plné), resp. horní (prázdné), projekční hemisférou.

Fig. 9. Development of the stress changes on 4₇ probe and orientation their axes like the intersections on down hemisphere (filled) resp. upper hemisphere (empty).

Stanice 4₇ byla realizována velmi pozdě již během přibližující se porubní fronty. Z důvodu nedostatku času byla relaxační fáze málo rozvinutá a byla aproximována také jako lineárně klesající funkce. Po této úpravě jsou vypočtené změny napětí v důsledku postupu porubní fronty znázorněny na Obr. 9.

Vliv postupu porubní fronty je znatelný již od cca 50 m před porubní frontou. Maximální tlakové změny jsou orientovány horizontálně kolmo na porubní frontu. To lze opět vysvětlit ohybem nadložní vrstvy.

Důl ČSM



Obr. 10. Schéma umístění měřicích stanic na Dole ČSM

Fig. 10. Scheme of placing of the gauge probes on the ČSM area

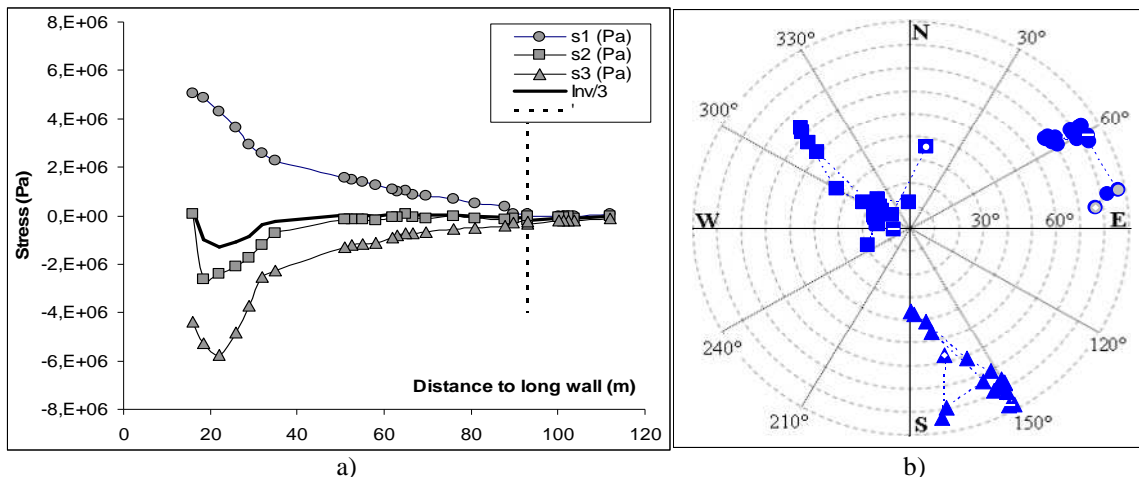
Měření na lokalitě Dolu ČSM probíhalo při postupu porubu 361 000. Lokalizace realizovaných stanic je znázorněna na schématu na obr. 10. Geometrické charakteristiky jsou vyjádřeny v tabulce na obr. 10. Tenzometrické hlavice CCBM byly instalovány do vrtů o průměru 76 mm cca 10 m délky. Sondy ve stanicích 1₈ a 4₅ byly vlepeny do vertikálních dovrchních vrtů a monitorovaly nadloží přímo nad porubní chodbou.

Stanice 2₃ byla realizována v dovrchním 70° ukloněném vrtu směřujícím k poruše “X”.

Výsledky měření stanice 1₈

Měření stanice 1₈ je dokumentováno na Obr. 11. Stanice byla realizována v poměrně stabilním prostředí bez výrazných diskontinuit a poruch. Měření byla korigována na “relaxační fázi” deformací. Vývoj hlavních složek indukovaných napět'ových změn lze registrovat již ze vzdálenosti cca 90 m před porubní frontou. Výrazné změny se však začínají projevovat až při dosažení vzdálenosti 30-20 m před porubní frontou.

Vývoj orientace hlavních os napět'ových změn je znázorněna na Obr. 11b jako průsečíky s dolní, či horní hemisférou. Hodnoty jsou znázorněny pro lepší čitelnost až od vyznačené tečkované linie na obr. 11a.



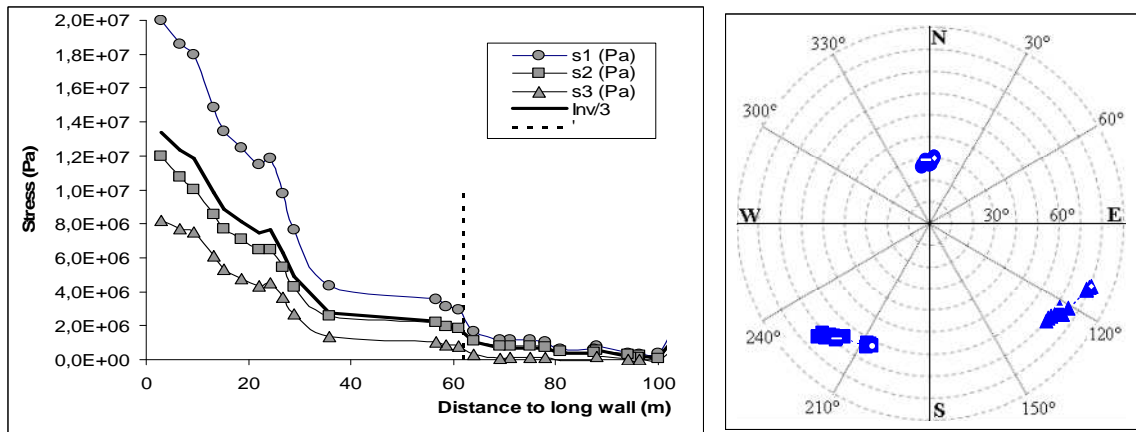
Obr. 11. Vývoj napět'ových změn na stanici 1₈ a orientace jejich hlavních os jako průsečíků s dolní (plné), resp. horní (prázdné), projekční hemisférou.

Fig. 11. Development of the stress changes on 1₈ probe and orientation of their axes like the intersections on down hemisphere (filled) resp. upper hemisphere (empty).

Výsledky měření ve stanici 2₃

Výsledky ve stanici 2₃ byly hodnoceny podobně. Zřejmě v důsledku umístění stanice v bezprostřední blízkosti poruchy “X” vývoj napět'ových změn je poněkud odlišný. Lze si povšimnout, že během celého měření se nevyskytla fáze reprezentující kompresní přitížení (Obr. 12a). Napět'ové změny se začínají projevovat ze vzdálenosti cca 80 m před porubní frontou.

Průběh napět'ových změn na této stanici je výrazně odlišný od průběhů ve stanicích 1₈ a 4₅.

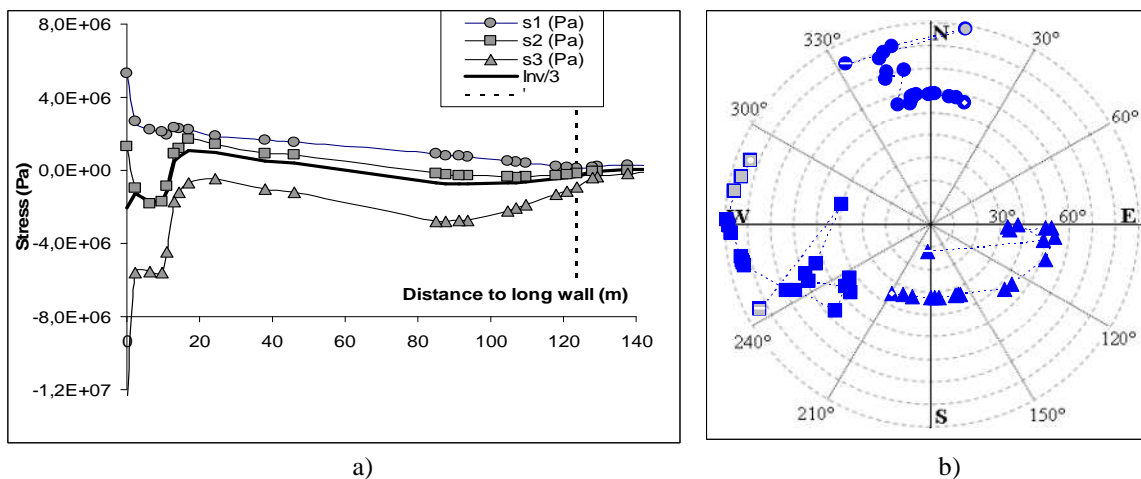


Obr.12. Vývoj napětových změn na stanici 2₃ a orientace jejich hlavních os jako průsečíků s dolní projekční hemisférou.

Fig. 12. Development of the stress changes on 2₃ probe and orientation of their axes like the intersections on down hemisphere.

Výsledky měření na stanici 4₅

Stanice 4₅ byla realizována do nadloží chodby podobně jako stanice 1₈ avšak o 70 m dále od porubní fronty. Byla instalována jako poslední v době již poměrně rychlého postupu porubní fronty, jež se nacházela ve vzdálenosti cca 180 m. Rychlý postup a poměrně nevelká vzdálenost porubu při instalaci nedovolily dostatečně oddělený-neovlivněný výrazný rozvoj relaxační fáze deformace. Obr. 13 dokumentuje chování tenzoru napětových změn v oblasti stanice 4₅. První měsíc po instalaci probíhá postupné kompresní přitěžování složky s₃, což odpovídá vzdálenosti 120-100 m od porubní fronty, následně pak dochází k odlehčování až do doby, kdy porubní fronta dosáhla vzdálenosti 20 m, pak následuje očekávané prudké přitížení až do skončení měření



Obr. 13. Vývoj napětových změn na stanici 4₅ a orientace jejich hlavních os jako průsečíků s dolní (plně), resp. horní (prázdné), projekční hemisférou.

Fig. 13. Development of the stress changes on 4₅ probe and orientation of their axes like the intersections on down hemisphere (filled) resp. upper hemisphere (empty).

destrukcí stanice. Pohyb os hlavních napětových změn je dokumentován na Obr. 13b. Průběh ukazuje jak na ohyb nadložních vrstev, tak na vertikální přitížení v místě měření.

Tahové zatížení blízké severo-jížnímu směru je v tomto případě způsobeno nesymetrickým zatížením nadloží. Nadloží je fixováno nad netěženým pilířem na severu a na jižní straně stanice probíhá odlehčující těžební aktivita.

Závěr

- Bylo vyvinuto nové zařízení k měření tenzoru napěťových změn na bázi tenzometrických deformačních měření na kuželové ploše dna vrtu.
- Typ zařízení propojitý kabelem s přenosným externím koncentrátorem dat se ukázal velmi vhodný pro relativně dlouhodobá měření změn napětí indukovaných lidskou aktivitou v podzemí.
- Funkčnost tohoto zařízení byly ověřena jak v laboratoři tak i in-situ v podmínkách karbonského masivu na lokalitách Dolu Lazy a Dolu ČSM. Byly sledovány změny napěťového stavu nadloží ovlivněné postupem porubní fronty. Experiment ukázal, že deformační změny na kuželovém dně vrtu jsou způsobeny jak předpokládaným působením měnící se geomechanické situace postupem porubní fronty tak i na lokální situaci vycházející ze skutečnosti lokálního odlehčení masivu v bezprostředním okolí odvrtného vrtu, projevující se v relaxaci-plastické deformaci masivu po odvrtání měřicí stanice.
- V podmínkách sledovaných porubů se ukázalo, že pro ustálení této relaxační deformace je nezbytné poměrně dlouhé časové období až několika měsíců.
- Presentované příklady měření změn napětí vyvolané postupem porubní fronty velice dobře korespondují s měnící se geomechanickou situací v důsledku těžby.
- Měření touto metodou umožňuje mnohem detailněji analyzovat vývoj napěťového stavu během antropogenních aktivit v podzemních prostorách.

Poděkování

Výzkum je podporován projektem GA ČR č. 105/06/1768.

Literatura

- NAKAMURA N. ET AL.: Rock stress measurement for limestone open pit mine. 5th Int. Symp. on field Measurements In Geomechanics, 1999, Singapore, Balkema, .Rotterdam
- STAS L., KNEJZLÍK J., RAMBOUSKÝ Z.: Development of conical probe for stress measurement by borehole overcoring method. Acta Geodyn. Geomater. Vol.1, No. 4 (136), 2004, IRSM, Prague
- STAŠ L., KNEJZLÍK, J, RAMBOUSKÝ, Z.: Conical strain gauge probes for stress measurement, Int. Symp. ISRM Eurock 2005 - Impact of Human Activity on the Geological Environment, Czech Rep., Brno, 2005, Balkema, .Rotterdam
- STAŠ L., KNEJZLÍK, J, RAMBOUSKÝ, Z.: Conical strain gauge probe for stress measurement (development), Advanced in Minerál Resources Management and Enironmental Geotechnology 2006, Greece, Hania

Odborné posouzení Ing. Jiří Ptáček, PhD.