

Technická zpráva 640/2022

MONITORING AKTIVITY  
KŘEHKÝCH STRUKTUR PVP  
BUKOV A DOLU ROŽNÁ –  
ZÁVĚREČNÉ VYHODNOCENÍ A  
NUMERICKÝ MODEL

Autoři: Josef Stemberk a kol.

Praha, říjen 2022

**Tato zpráva byla zpracována v projektu financovaném SÚRAO. Presentovaná stanoviska a dosažené závěry jsou názory autora (autorů) a nemusí nutně představovat názory SÚRAO.**

**NÁZEV ZPRÁVY:** Monitoring aktivity křehkých struktur PVP Bukov a dolu Rožná - závěrečné vyhodnocení a numerický model

**NÁZEV PROJEKTU:** Monitoring aktivity křehkých struktur PVP Bukov a dolu Rožná

**IDENTIFIKACE V RÁMCI PROJEKTU:** Závěrečná

**ČÍSLO SMLOUVY:** SO2018-054

**AUTORSKÝ KOLEKTIV:** Stemberk J.<sup>1</sup>, Mašín D.<sup>2</sup>, Briestenský M.<sup>1</sup>, Hartvich F.<sup>1</sup>, Fučík Z.<sup>1</sup>

Ústav struktury a mechaniky hornin AV ČR, v.v.i., V Holešovičkách 94/41, 182 09, Praha 8<sup>1</sup>  
Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky, Přírodovědecká fakulta UK, Albertov 6, 128 43, Praha 2<sup>2</sup>

**BIBLIOGRAFICKÝ ZÁPIS:**

STEMBERK J., MAŠÍN D., BRIESTENSKÝ M., HARTVICH F., FUČÍK Z. (2022): Monitoring aktivity křehkých struktur PVP Bukov a dolu Rožná - závěrečné vyhodnocení a numerický model. TZ 640/2022, SÚRAO, Praha.

**Ing. Jan Smutek, Ph.D.**

Manažer projektu (SÚRAO)

**RNDr. Josef Stemberk, CSc.**

Manažer projektu (ÚSMH AV ČR)

## Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b> .....	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Metodika měření aktivních posunů na zlomových poruchách</b> .....	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>Popis monitorovacích míst pro sledování zlomových pohybů v PVP Bukov a důlním díle Rožná</b> .....	<b>11</b>
<b>4</b>	<b>Současné výsledky aktivity křehkých struktur</b> .....	<b>19</b>
4.1	Monitorovací bod 296GWB0001.....	19
4.2	Monitorovací bod 296GWB0002.....	20
4.3	Monitorovací bod 296GWB0004.....	21
4.4	Monitorovací bod 296GWB0005.....	22
4.5	Monitorovací bod 296GWB0006.....	24
4.6	Monitorovací bod 296GWB0007.....	24
4.7	Monitorovací bod 296GWB0008.....	26
4.8	Monitorovací bod 296GWB0009.....	26
4.9	Monitorovací bod 296GWB0010.....	27
4.10	Monitorovací bod 296GWB0011.....	28
4.11	Monitorovací bod 296GWB0012.....	29
4.12	Monitorovací bod 296GWB0013.....	30
4.13	Monitorovací bod 296GWB0014.....	30
<b>5</b>	<b>Numerický model</b> .....	<b>32</b>
5.1	Výpočtová geometrie.....	33
5.2	Výpočetní postup a parametry.....	35
5.3	Výsledky výpočtů.....	39
5.3.1	Výsledky výpočtů přehledně.....	39
5.3.2	Srovnání výsledků s měřenými veličinami .....	47
<b>6</b>	<b>Závěry</b> .....	<b>50</b>
6.1	Měření v PVP Bukov a dole Rožná .....	50
6.2	Srovnání výsledků monitoringu s jinými lokalitami .....	52
6.3	Závěry modelování.....	53
6.4	Doporučení dalšího postupu.....	53

## Seznam použitých zkratk:

MKP	metoda konečných prvků
PVP	podzemní výzkumné pracoviště
SÚRAO	Správa úložišť radioaktivních odpadů
TM-71	terčové měřidlo, extenzometr typu TM-71
3D	třídimenzionální

## Vysvětlení pojmů:

### **Dilatace poruchy**

Otevírání a zavírání struktury v kolmém směru na danou strukturu.

### **Extenzometr**

Přístroj určený ke sledování relativního posunu na křehké struktuře oddělující dva skalní bloky.

### **Metoda konečných prvků**

Matematická metoda řešení fyzikálních úloh pomocí numerické aproximace.

### **Směrný posun/pohyb**

Horizontální pohyb paralelní se směrem křehké struktury.

### **Subvertikální pohyb**

Pohyb ve směru sklonu křehké struktury.

## Abstrakt

Závěrečná zpráva shrnuje výsledky projektu „Monitoring aktivity křehkých struktur PVP Bukov a dolu Rožná“, jehož náplní byl monitoring a hodnocení posunů na vybraných strukturách v období 2019–2022. Pro monitoring bylo použito 10 prostorových extenzometrů TM-71 umožňující měřit posun s přesností až 0,00X mm. Měření posunů bylo prováděno s frekvencí jedenkrát za den a to v 0:00 GMT. Data získaná od konce roku 2019 do srpna 2022 naznačují, že na některých strukturách lze identifikovat pohybový trend blížící se hodnotám kolem 0,1 mm/rok. V květnu a červnu 2021 byl identifikován kompresní režim postihující všechny monitorované struktury. Během této komprese byl pozorován relativní zdvih jižně situovaných bloků vůči blokům severním což je v souladu s výsledky měření posunů na strukturách ve štole Skalka cca 3 km VJV od PVP Bukov. V období 2003 – 2005 zde byl identifikován kompresní režim s několika výzdvihy jižně situovaných bloků celkově cca o 1 mm (Stemberk et al., 2010). Pro vyhodnocení monitorovaných posunů byl sestaven „quasi-2D“ model PVP Bukov, který byl proveden jako 3D horizontální řez v okolí PVP Bukov v úrovni mezi cca -563.5 m a -546.5 m. Pro simulace byl využit software Plaxis 3D VIP. Aplikací horizontálních tlaků na jednotlivé bloky pak byla snaha o zpětnou analýzu naměřených pohybů. Model ukazuje na výrazné horninové horizontální tlaky jejichž hodnoty odpovídají měření napjatosti různými metodami prezentovanými ve zprávě z geotechnického průzkumu oblasti (Souček et al., 2018).

## Klíčová slova

Křehké struktury, zlomy, aktivita, extenzometr, mikroposuny, numerický napjatostní model, metoda konečných prvků, napjatost, PVP Bukov

## Abstract

Final report summarized results of the project „Monitoring of the brittle structure activity within the Bukov URF and the Rožná Mine“ which focused on the monitoring and evaluation of displacements along selected structures during period 2019 – 2022. Ten 3D extensometers TM71 with precision up to 0.00X mm were applied. Displacement data were recorded once per day at 0:00 GMT. Data obtained since the end 2019 till August 2022 indicated trend displacement along some structures with magnitude up to 0.1 mm/y. Compressional regime was identified in May-June 2021 when the relative uplift of the southern blocks was observed. It corresponds to the previous results of fault slip monitoring within the Skalka Gallery about 3 km ESE from the Bukov URF. During 2003 – 2005 several compression periods resulted to the uplift of the southern blocks of about 1 mm (Stemberk et al. 2010). Following analyses of the stress field were performed in "quasi-2D" model, when only the horizontal component of the measured deformations was simulated. Model was constructed as 3D horizontal section around the Bukov URF between levels about -536,5 m and -546.5 m. Software Plaxis 3D VIP was applied for simulation. Using horizontal stress on the individual blocks the back analyses of the measured displacements was performed. The resulting model indicates considerable horizontal stress corresponding to the values determined using different methods in boreholes in the Bukov URF galleries (Souček et al., 2018).

## Keywords

Brittle structures, faults, activity, extensometer, micro-displacements, numerical stress model, finite element method, stress, Bukov URF

# 1 Úvod

Závěrečná zpráva shrnuje výsledky projektu „Monitoring aktivity křehkých struktur PVP Bukov a dolu Rožná“. Cílem projektu byl monitoring a hodnocení posunů naměřených v období 2019–2022 na vybraných strukturách identifikovaných v PVP Bukov a jejich zpracování pomocí numerického modelu pro simulaci aktuálních napjatostních poměrů. Průběžné výsledky projektu byly postupně prezentovány v technických zprávách TZ 526/2020 (Stemberk, Briestenský, Hartvich, Fučík 2020) a TZ 571/2021 (Stemberk, Briestenský, Hartvich, Fučík 2021).

Monitoring byl prováděn celkem 10 prostorovými opticko-mechanickými extenzometry TM-71 umožňující měřit posun na diskontinuitě s přesností až 0,001 mm podél jednotlivých os. 7 extenzometrů bylo instalováno v PVP Bukov a 3 extenzometry v dole Rožná. Po zahájení zaplavování spodních pater dolu Rožná v roce 2020 byly tyto 3 extenzometry přesunuty na další identifikované struktury v PVP Bukov. Měření posunů bylo prováděno s frekvencí jedenkrát za den a to v 0:00 GMT. Data po odečtení byla via internet transportována do ÚSMH AV ČR k dalšímu zpracování, vyhodnocení a analýzám. Pravidelný monitoring byl zahájen v září 2019 a data prezentovaná v této zprávě jsou do konce srpna 2022.

Závěrečné vyhodnocení posunů monitorovaných za celé období bylo provedeno pomocí „quasi-2D“ modelu PVP Bukov, který byl proveden jako 3D horizontální řez v okolí PVP Bukov v úrovni mezi cca -563.5 m a -546.5 m. Aplikací horizontálních tlaků na jednotlivé bloky pak byla snaha o zpětnou analýzu naměřených pohybů. Pro simulace byl využit software Plaxis 3D VIP.

V kapitole 2 je shrnuta metodika monitoringu posunů. V kapitole 3 jsou uvedeny popisy jednotlivých monitorovaných struktur. Souhrnné výsledky monitoringu posunů podél jednotlivých struktur v PVP Bukov jsou shrnuty v kapitole 4. Tvorba, popis a výsledek numerického modelu jsou prezentovány v kapitole 5. V kapitole 6 jsou potom shrnuty základní výsledky vyhodnocení dat monitoringu a numerického modelování. Hodnoty zjištěných posunů na strukturách jsou zde též kvantitativně porovnány se zahraničními i domácími lokalitami, v nichž je dlouhodobě provozován monitoring posunů na zlomech a na závěr jsou formulována doporučení pro další postup.

## 2 Metodika měření aktivních posunů na zlomových poruchách

Pro sledování zlomových posunů, aktivity křehkých struktur, v PVP Bukov a dole Rožná byl použit opticko-mechanický extenzometr TM-71 (Obr. 1). Jedná se o přístroj pro měření relativního 3D posunu a rotací mezi dvěma bloky oddělenými diskontinuitou (Obr. 2b; Košťák 1969; Klimeš et al. 2012; Martí et al. 2013). Přístroj využívá k měření vzájemného posunu jev optické interference (Oster a Nishijima 1963). Optická interference (Obr. 2a) se objeví, když dvě periodické struktury, spirály, se sunou přes sebe za vzniku charakteristických interferenčních proužků (Košťák a Popp 1966; Martí et al. 2013). Interferenční jev lze transformovat do metrického systému počtem proužků v obou polích, tzn. posunu i rotace, a osou symetrie (Košťák a Popp 1966). Velikost posunu mezi středy sklíček je dána počtem interferenčních proužků a směr posunu ukazuje hlavní osa symetrie optického jevu (Obr. 2d). Popis jeho využití pro měření aktivních tektonických pohybů prezentovali např. Klimeš et al. (2012) a Briestenský et al. (2015, 2018).

Extenzometr TM-71 zaznamenává nejen translační posuny mezi bloky, ale i jejich vzájemnou rotaci. Jeho základní předností je dále vysoká přesnost měření dosahující přesnosti až 0,001 mm. Úhel při vzájemné rotaci je měřen s přesností lepší než  $3,2 \times 10^{-4}$  rad ( $\approx 0.018^\circ$ ).

Možnosti a limity extenzometru byly dlouhodobě testovány na mnoha lokalitách např. v České republice, Německu, Slovinsku, Slovensku, Polsku či Arktidě (např. Kontny et al. 2005; Gosar et al. 2009; Šebela et al. 2009; Stemberk et al. 2010, 2015; Briestenský et al. 2015; Hoppe et al. 2015). Briestenský et al. (2010) ukazuje, že sezonní vlivy klimatických jevů lze detekovat a odstranit ze záznamu posunů. Teplotně podmíněné dilatace a kontrakce extenzometru TM-71 jsou počítány a systematicky odstraňovány. Využitelnost pro geodynamický monitoring byla testována i porovnáním s výsledky jiných monitorovacích metod, jako jsou horizontální náklonoměry, geodetická měření, nebo měření pohybů hladiny podzemní vody (Košťák et al. 2011).

Záznam posunu na křehké struktuře může být znázorněn v kartézském souřadném systému XYZ nebo v systému SHP (Košťák, 2006) adaptovanému sklonu měřené křehké struktury (osy s, h, p). Výpočet posunů a korekce na teplotu je podrobně popsána Košťákem (1969). Kartézský systém XYZ v podstatě znázorňuje posuny na měřidle, které nemusí být orientováno kolmo na strukturu ani vodorovně. Cílem instalace je ale ve většině případů instalovat měřidlo kolmo na strukturu nebo vodorovně. V případě čistě svislých struktur je možné zachovat obě dvě podmínky. V případě PVP Bukov jsou většinou měřidla orientována paralelně s průběhem štoly, čímž výsledky v ose X představují dilataci štoly. V závěreční správě uvádíme jak syrová data v XYZ systému, tak i přepočítaná data v SHP systému. V adaptovaném SHP systému pak posuny podél osy h odpovídají horizontálnímu směrnému posunu a představují tzv. strike-slipové posuny. Osa p je kolmá na zlomovou plochu a posuny představují dilataci struktury. Osa s je paralelní se spádnicí zlomové plochy/křehké struktury a představuje subvertikální posun (poklesový či reverzní posun na struktuře). Výsledné grafy pro jednotlivé pozorovací body obsahují tedy hodnoty x, y, z (graf A), rotace podél roviny xy a roviny xz (graf B), pak výslednou transformaci posunů na plochu, tedy dilataci poruchy, směrný posun a subvertikální posun (graf C). Vysvětlivky v obrázcích definují pak smysl pohybu na křehké struktuře.

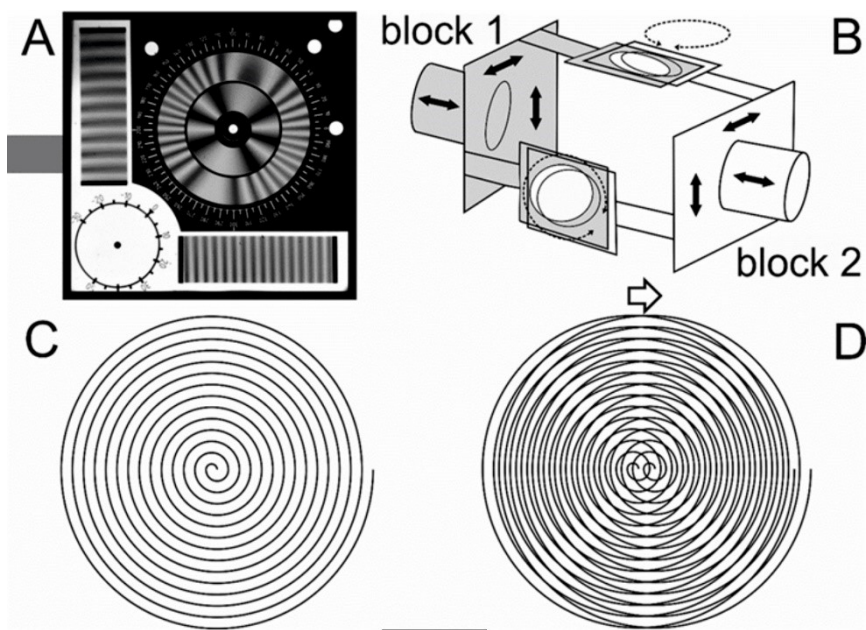
Vzhledem k dostupným údajům o změnách teploty vzduchu v PVP Bukov, je možné podrobit data z posunů na křehkých strukturách statistické analýze a hledat vztah mezi posuny a změnou



teploty vzduchu, které ovlivňuje i dilataci okolního masivu. Pro jednoduchou analýzu jsme ve správě použili Pearsonův korelační koeficient, který definuje míru lineární korelace mezi dvěma soubory dat. Může reprezentovat kladnou lineární korelaci nebo zápornou lineární korelaci. Čím blíže k hodnotě 1 nebo -1, tím je korelace silnější. Míra souvislosti dle Evansa (1996) může být velmi slabá (0,00-0,19), slabá (0,2-0,39), střední (0,4-0,59), silná (0,6-0,79) nebo velmi silná (0,8-1,00). Pro analýzu byla použita data teplot vzduchu z monitorovacího bodu VrK-1 (Vylamová et al. 2020).



Obr. 1 Extenzometr 296GWB0001 v PVP Bukov osazený záznamníkem dat.



Obr. 2

Obr. 2 Opticko-mechanický extenzometr TM-71 a jeho základní charakteristiky: 3-D posun mezi dvěma bloky je odvozený z optické interference zaznamenané podél tří hlavních os. a) interferenční jev vznikající posunem mezi dvěma sklíčky s vyleptanou spirálou; b) schematický náčrt extenzometru TM-71. Šedé části jsou spojeny s blokem 1, bílé části s blokem 2. šipky ukazují možné posuny; c) spirála vyleptaná do sklíčka; d) přesunem sklíček se spirálami vzniká optická interference, šipka ukazuje směr pohybu mezi sklíčky.

### 3 Popis monitorovacích míst pro sledování zlomových pohybů v PVP Bukov a důlním díle Rožná

Na základě smlouvy a schválení vybraných sledovacích bodů, bylo v roce 2019 v PVP Bukov a zbylých částech dolu Rožná osazeno deset bodů extenzometry TM-71 vybavených automatickým záznamníkem (Tabulka 1). Dva extenzometry byly osazeny ve 24. patře, jeden ve 20. patře. V PVP Bukov jsme v roce 2019 osadili sedm extenzometrů na vybraných křehkých strukturách. Bod číslo tři (296GWB0003) nebyl, vzhledem k probíhajícímu geofyzikálnímu měření v rámci projektu „Dlouhodobé monitorování horninového masivu v PVP Bukov nedestruktivními geofyzikálními metodami“ (Bárta et al. 2020) a kvůli možnému ovlivnění měření v tomto projektu, osazen a zůstává jako jeden z potenciálních bodů k budoucímu osazení. Měřidla z 20. a 24. patra byla, v důsledku plánovaného zatápní těchto pater, dne 24. 6. 2020 deinstalována a uschována v nadzemních prostorách o. z. GEAM Dolní Rožínka. Na základě společné dohody se SÚRAO byla následně osazena na schválených křehkých strukturách v PVP Bukov dne 20. 1. 2021.

*Tabulka 1 Přehled sledovaných dokumentačních bodů. Azimut a úhel v tabulce neodpovídá popisu sledovaných struktur, ale vychází ze „Zásad značení dokumentačních bodů v PVP Bukov a jiných částí dolu Rožná (slouží k lokalizaci dokumentačního bodu v profilu podzemního díla)“.*

Číslo dokumentačního bodu	Označení části důlního díla	Staničení (m)	Azimut (°)	Úhel (°)	Doba monitoringu (od-do)
296GWB0001	BZ <sub>1</sub> -XII	70	355	80	9/2019 – 8/2022
296GWB0002	ZK-2	20	90	270	9/2019 – 8/2022
296GWB0004	BZ-XIIJ	220	220	90	9/2019 – 8/2022
296GWB0005	BZ-XIIJ	202	40	280	9/2019 – 8/2022
296GWB0006	BZ-XIIJ	200	40	280	9/2019 – 8/2022
296GWB0007	BZ-XIIJ	170	220	90	9/2019 – 8/2022
296GWB0008	ZK-1	25	355	80	9/2019 – 8/2022
296GWB0009	PŠ1-242	50	223	270	9/2019 – 6/2020
296GWB0010	RV124-83	2	360	270	9/2019 – 6/2020
296GWB0011	Z3-XX	200	170	270	9/2019 – 6/2020
296GWB0012	BZ-XIIJ	269	40	270	1/2021 – 8/2022

296GWB0013	BZ-XIIJ	92,5	40	280	1/2021 – 8/2022
296GWB0014	BZ-XIIJ	22	40	280	1/2021 – 8/2022

### 296GWB0001

- 12. patro, laboratorní chodba BZ<sub>1</sub>-XII, staničení 70 m (Obr. 3);
- Sledovaná křehká struktura: sekundární diskontinuita, 1. řádu, průběžná, zvlněná, vyhlazená, sevřená, vyplněná tektonickým jílem, zvodněná, 156/45 (směr sklonu/sklon), striace 064/10, (zpracováno dle metodiky Horák 2006);
- Charakter křehké struktury vzhledem k požadavkům dle smlouvy o dílo, přílohy č. 3: ii., v., vi., vii. (viz Tabulka 2);
- Severní stěna chodby BZ<sub>1</sub>-XII;
- První měření 26. 9. 2019;
- Přenos dat přes internet.

Tabulka 2 Požadavky na monitorované křehké struktury dle smlouvy SO2018-054.

i.	Regionální zlomová zóna, předpokládané stanoviště: 12, 18. nebo 20. patro dolu Rožná.
ii.	Zvodněná zlomová zóna, do šířky 3 m s kontinuálním výtokem vody, předpokládané stanoviště: PVP Bukov.
iii.	Zlom orientovaný kolmo ke zjištěnému napětí, předpokládané stanoviště: PVP Bukov, 12. patro nebo hluboké horizonty dolu Rožná (místa zjištěných orientací tenzoru napětí).
iv.	Zlom orientovaný paralelně ke zjištěnému napětí, předpokládané stanoviště: PVP Bukov, 12. patro nebo hluboké horizonty dolu Rožná (místa zjištěných orientací tenzoru napětí).
v.	Zlom orientovaný šikmo ke zjištěnému napětí, předpokládané stanoviště: PVP Bukov, 12. patro nebo hluboké horizonty dolu Rožná (místa zjištěných orientací tenzoru napětí).
vi.	Puklinová zóna (křehká struktura menšího měřítko), předpokládané stanoviště: PVP Bukov.
vii.	Stanoviště 7, 8, 9, 10 - v blízkosti projektů na PVP Bukov ( <i>Interakční experiment, Puklinová konektivita</i> ), pro zjištění ovlivnění horninového prostředí těmito experimenty.

### 296GWB0002

- 12. patro, chodba ZK-2, staničení 20 m (Obr. 3);
- Sledovaná křehká struktura: sekundární diskontinuita, 1. řádu, průběžná, zvlněná, vyhlazená, sevřená, vyplněná tektonickým jílem a brekcí, bez zvodnění, 100/58, striace 020/5;
- Východní stěna ZK-2;
- Charakter křehké struktury vzhledem k požadavkům dle smlouvy o dílo, přílohy č. 3: i., iv., vii. (viz viz Tabulka 2);
- První měření 11. 9. 2019;
- Přenos dat přes internet.

**296GWB0004**

- 12. patro, chodba BZ-XIIJ, staničení 220 m (Obr. 3);
- Sledovaná křehká struktura: sekundární diskontinuita, 1. řádu, průběžná, zvlněná, drsná, sevřená, vyplněná tektonickým jílem a brekcií, bez zvodnění, 130/60;
- Charakter křehké struktury vzhledem k požadavkům dle smlouvy o dílo, přílohy č. 3: v., vi. (viz Tabulka 2);
- Jihozápadní stěna štoly BZ-XIIJ;
- První měření 24. 9. 2019;
- Přenos dat přes internet.

**296GWB0005**

- 12. patro, chodba BZ-XIIJ, staničení 202 m (Obr. 3);
- Sledovaná křehká struktura: sekundární diskontinuita, 1. řádu, průběžná, zvlněná, drsná, sevřená, bez výplně, zvodnělá, 350/98, horizontální rýhování, pravostranná;
- Charakter křehké struktury vzhledem k požadavkům dle smlouvy o dílo, přílohy č. 3: ii., iii. (viz Tabulka 2);
- Severovýchodní stěna štoly BZ-XIIJ;
- První měření 24. 9. 2019;
- Přenos dat přes internet.

**296GWB0006**

- 12. patro, chodba BZ-XIIJ, staničení 200 m (Obr. 3);
- Sledovaná křehká struktura: sekundární diskontinuita, 1. řádu, průběžná, zvlněná, drsná, sevřená, vyplněná tektonickou brekcií, bez zvodnění, 140/76;
- Charakter křehké struktury vzhledem k požadavkům dle smlouvy o dílo, přílohy č. 3: v., vi. (viz Tabulka 2);
- Severovýchodní stěna štoly BZ-XIIJ;
- První měření 24. 9. 2019;
- Přenos dat přes internet.

**296GWB0007**

- 12. patro, chodba BZ-XIIJ, staničení 170 m (Obr. 3);
- Sledovaná křehká struktura: primární diskontinuita sekundárně aktivovaná, 2. řádu, průběžná, zvlněná, drsná, sevřená, vyplněná tektonickým jílem a brekcií, bez zvodnění, 220/55;
- Charakter křehké struktury vzhledem k požadavkům dle smlouvy o dílo, přílohy č. 3: iii. (viz Tabulka 2);
- Jihozápadní stěna štoly BZ-XIIJ;
- První měření 12. 9. 2019;
- Přenos dat přes internet.

**296GWB0008**

- 12. patro, chodba BZ-XIIJ, chodba ZK-1, staničení 25 m (Obr. 3);
- Sledovaná křehká struktura: primární diskontinuita, 2. řádu, průběžná, zvlněná, drsná, sevřená, vyplněná tektonickou brekcií, bez zvodnění, 220/68;
- Charakter křehké struktury vzhledem k požadavkům dle smlouvy o dílo, přílohy č. 3: v., vi. (viz Tabulka 2);
- Severní stěna chodby ZK-1;
- První měření 24. 9. 2019;
- Přenos dat přes internet.

**296GWB0012**

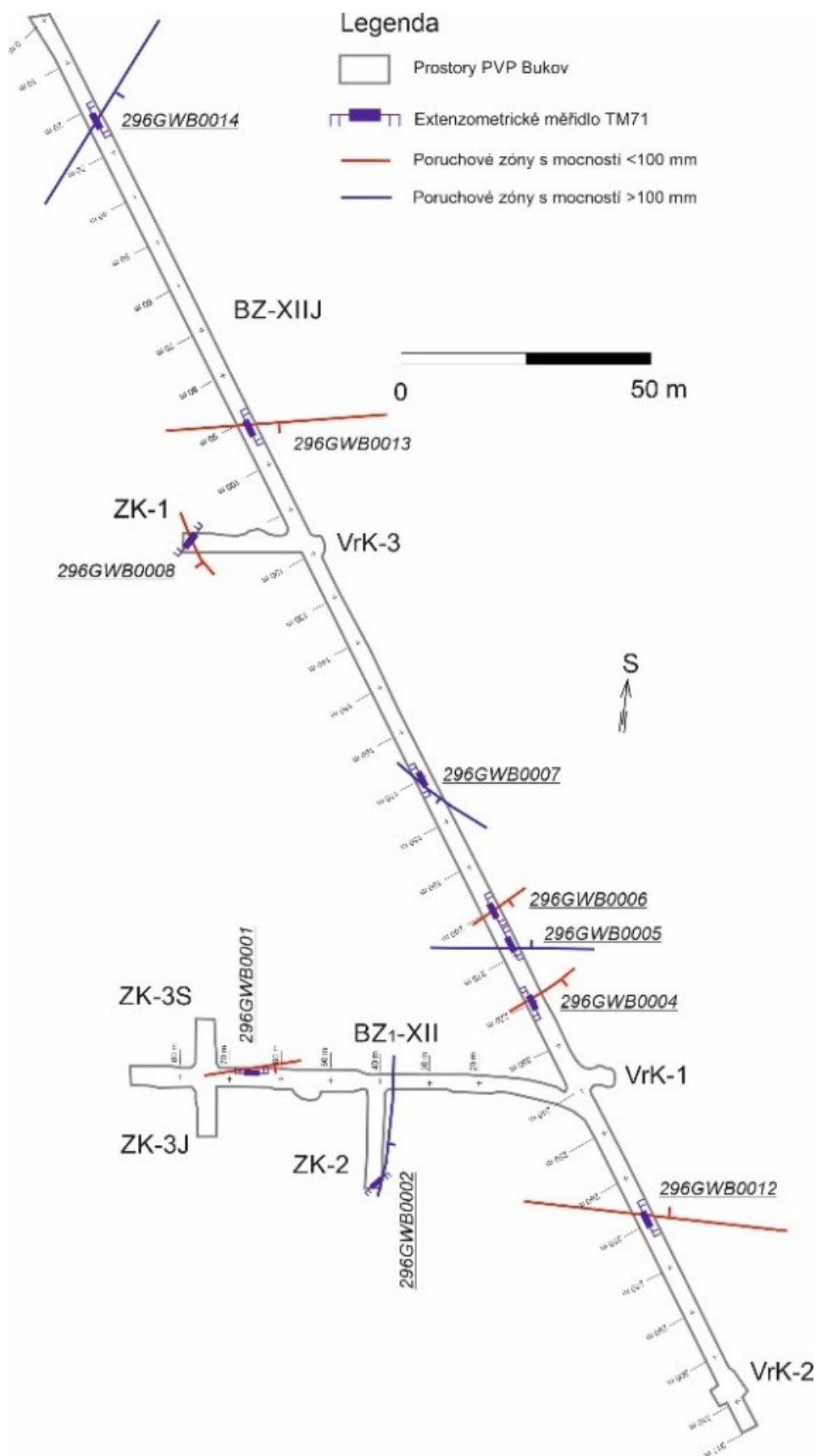
- 12. patro, chodba BZ-XIIJ, staničení 269 m (Obr. 3);
- Sledovaná křehká struktura: sekundární diskontinuita, 1. řádu, průběžná, zvlněná, drsná, sevřená, bez výplně, bez zvodnění, 360/72;
- Charakter křehké struktury vzhledem k požadavkům dle smlouvy o dílo, přílohy č. 3: iii. (viz Tabulka 2);
- Severovýchodní stěna štoly BZ-XIIJ;
- První měření 20. 1. 2021;
- Přenos dat přes internet.

**296GWB0013**

- 12. patro, chodba BZ-XIIJ, staničení 92,5 m (Obr. 3);
- Sledovaná křehká struktura: sekundární diskontinuita, 1. řádu, průběžná, zvlněná, drsná, sevřená, bez výplně, bez zvodnění, 170/75;
- Charakter křehké struktury vzhledem k požadavkům dle smlouvy o dílo, přílohy č. 3: iii. (viz Tabulka 2);
- Severovýchodní stěna štoly BZ-XIIJ;
- První měření 20. 1. 2021;
- Přenos dat přes internet.

**296GWB0014**

- 12. patro, chodba BZ-XIIJ, staničení 22 m (Obr. 3);
- Sledovaná křehká struktura: sekundární diskontinuita, 1. řádu, průběžná, zvlněná, drsná, sevřená, vyplněná tektonickou brekcií, bez zvodnění, 115/60;
- Charakter křehké struktury vzhledem k požadavkům dle smlouvy o dílo, přílohy č. 3: iv, vi. (viz Tabulka 2);
- Severovýchodní stěna štoly BZ-XIIJ;
- První měření 20. 1. 2021;
- Přenos dat přes internet.



Obr. 3 Osazená místa s extenzometrií TM-71 v PVP Bukov s vybranými křehkými strukturami.

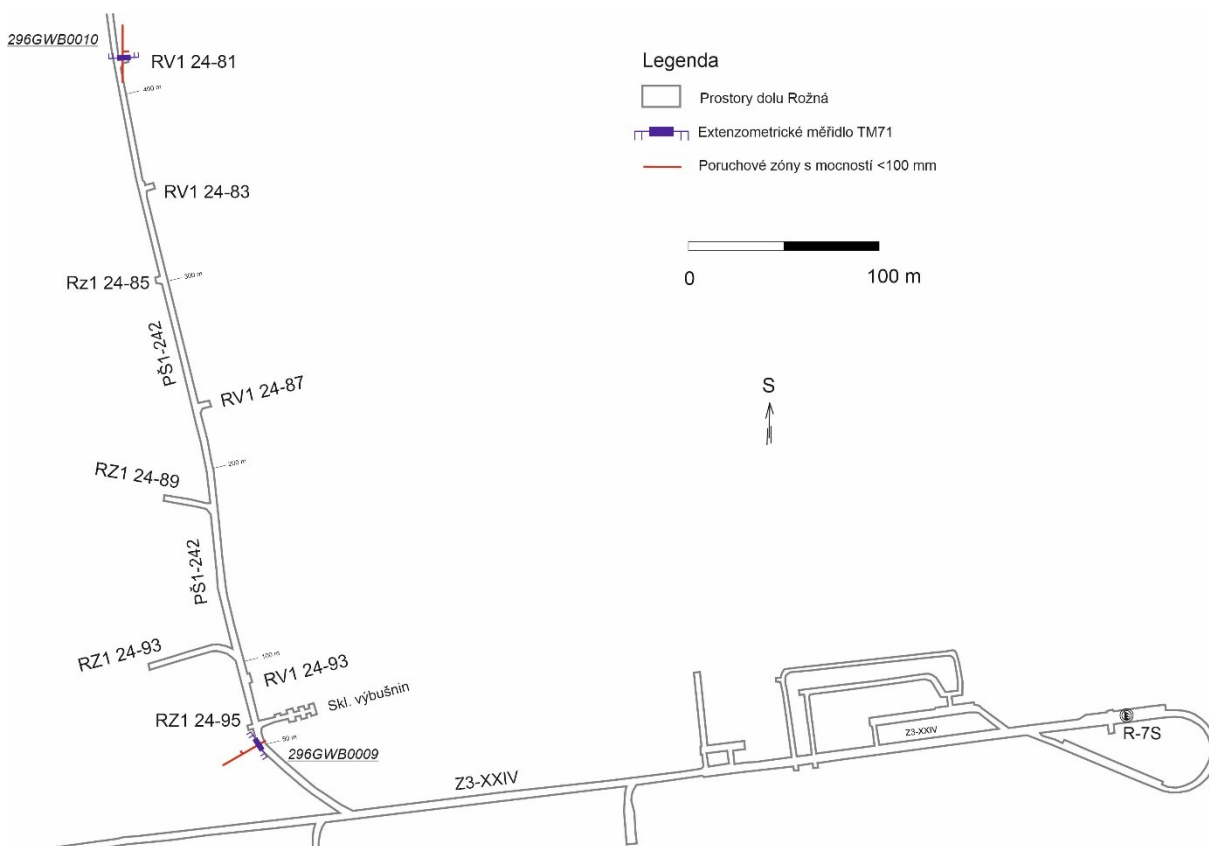
**296GWB0009**

- R1 (původní označení monitorovacího místa, rok instalace 2012);
- 24. patro, chodba PŠ1-242, staničení 50 m (Obr. 4);
- Sledovaná křehká struktura: sekundární diskontinuita, 1. řádu, průběžná, zvlněná, drsná, sevřená, vyplněná tektonickou brekcií, bez zvodnění, 330/85;
- Charakter křehké struktury vzhledem k požadavkům dle smlouvy o dílo, přílohy č. 3: v., vi. (viz Tabulka 2);
- První měření 11. 9. 2019;
- Monitoring ukončený demontáží měřidla dne 24. 6. 2020 z důvodu plánovaného zatápění nižších pater;
- Bez přenosu dat na internet.

**296GWB0010**

- R2 (původní označení monitorovacího místa, rok instalace 2012);
- 24. patro, chodba RV1 24-83, staničení 2 m (Obr. 4);
- Sledovaná křehká struktura: sekundární diskontinuita, 1. řádu, průběžná, zvlněná, drsná, sevřená, vyplněná tektonickou brekcií, bez zvodnění, 090/75;
- Charakter křehké struktury vzhledem k požadavkům dle smlouvy o dílo, přílohy č. 3: iv., vi. (viz Tabulka 2);
- První měření 11. 9. 2019;
- Monitoring ukončený demontáží měřidla dne 24. 6. 2020 z důvodu plánovaného zatápění nižších pater;
- Bez přenosu dat na internet.

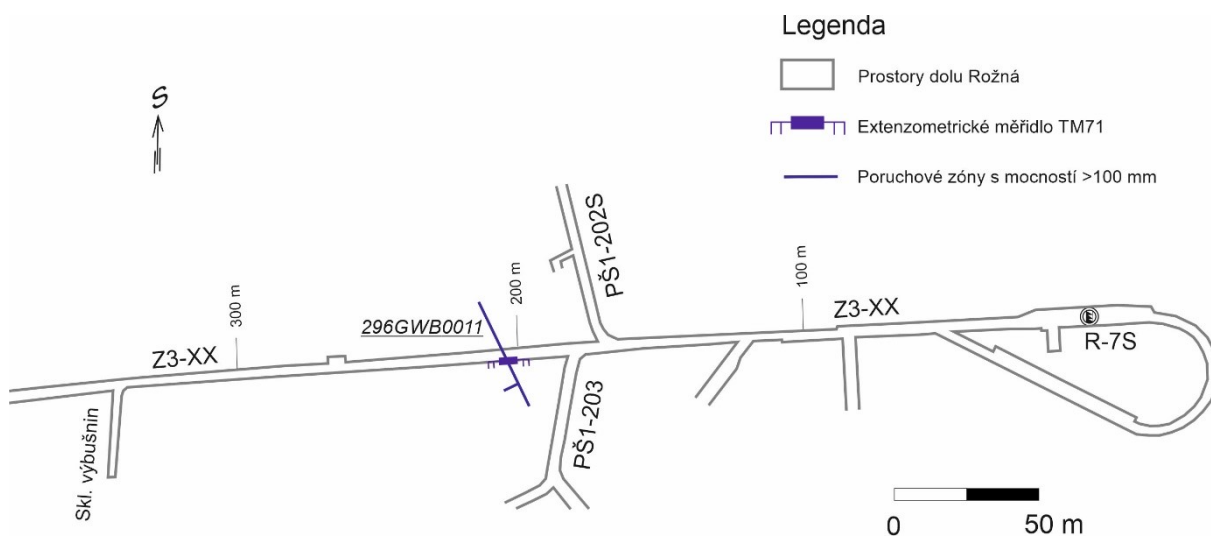




Obr. 4 Osazená místa s extenzometrií TM-71 ve 24. patře důlního díla Rožná.

### 296GWB0011

- 20. Patro, chodba Z3-XX, staničení 200 m (Obr. 5);
- Sledovaná křehká struktura: Sekundární diskontinuita, 1. řádu, průběžná, zvlněná, drsná, sevřená, vyplněná tektonickou brekcií, bez zvodnění, 180/80;
- Charakter křehké struktury vzhledem k požadavkům dle smlouvy o dílo, přílohy č. 3: i., iv. (viz Tabulka 2);
- Jižní stěna štoly Z3-XX;
- První měření 12. 9. 2019;
- Monitoring ukončený demontáží měřidla dne 24. 6. 2020 z důvodu plánovaného zatápění nižších pater;
- Bez přenosu dat na internet.

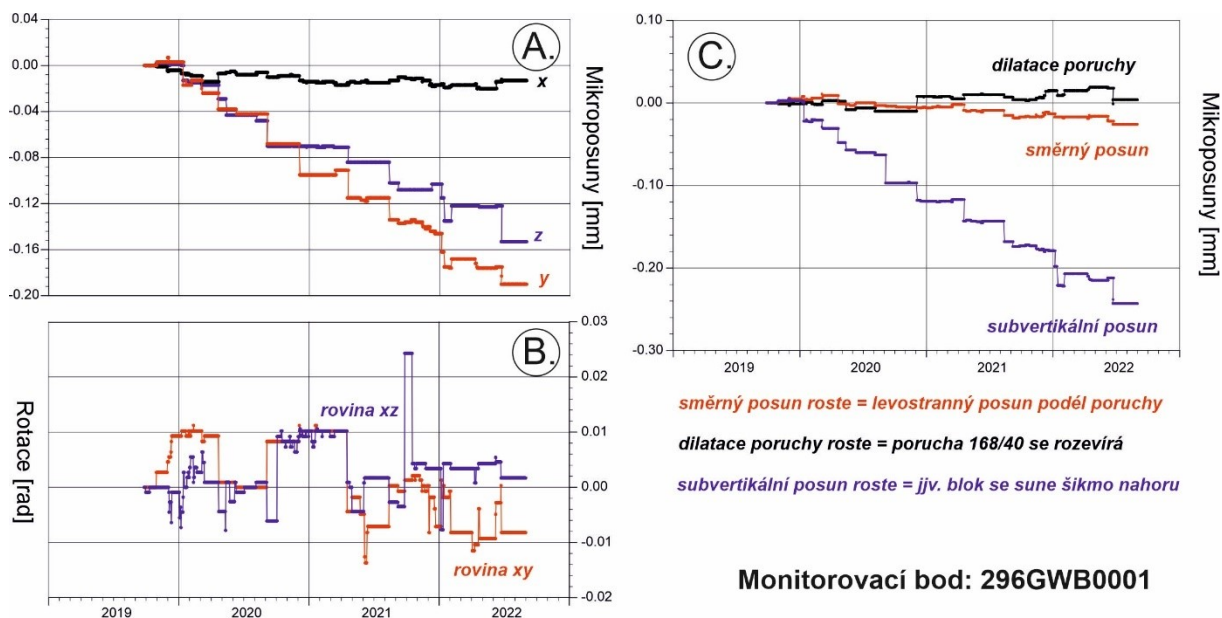


Obr. 5 Osazené místo s extenzometrem TM-71 ve 20. patře důlního díla Rožná.

## 4 Současné výsledky aktivity křehkých struktur

### 4.1 Monitorovací bod 296GWB0001

Současné výsledky prokázaly významný trend v subvertikálním posunu jiv. bloku dolů po křehké struktuře. Jak již bylo prezentováno ve zprávě TZ562/2020 (Stemberk et al. 2020) tento trend není plynulý, ale je vytvářen krátkodobými pulzy/skoky, které z dosavadních výsledků dosahují setin milimetru. Takovým byl např. skok, zaznamenaný 4.9.2020 s hodnotou 0,034 mm (Obr. 6, graf C). Subvertikální trend ze současných výsledků činí 0,1026 mm/rok, tedy zhruba desetiny mm/rok. Patrný je na tomto místě i slabý trend v pravostranném posunu, který za tři roky monitoringu dosáhl hodnotu 0,026 mm. Z hlediska závislosti mezi posuny a teplotou vzduchu na VrK-1 (Vylamová et al. 2020) zde není patrný vztah (Obr. 7). Na základě Pearsonova korelačního koeficientu je korelace pro subvertikální posun střední ( $r = 0,50$ ), pro směrný posun je slabá ( $r = 0,35$ ) a pro dilataci křehké struktury je střední ( $r = -0,53$ ). Souvislost mezi posuny a změnou teploty okolního vzduchu považujeme proto za neprokázanou.



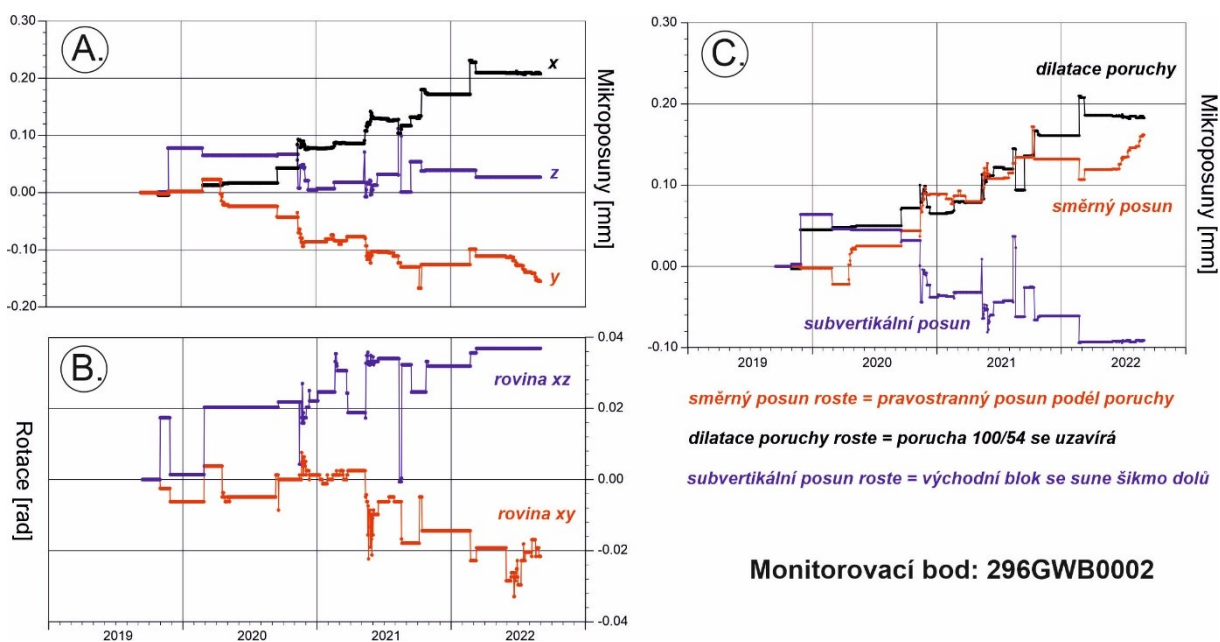
Obr. 6 Výsledky extenzometrického monitoringu na pozorovacím bodě 296GWB0001.



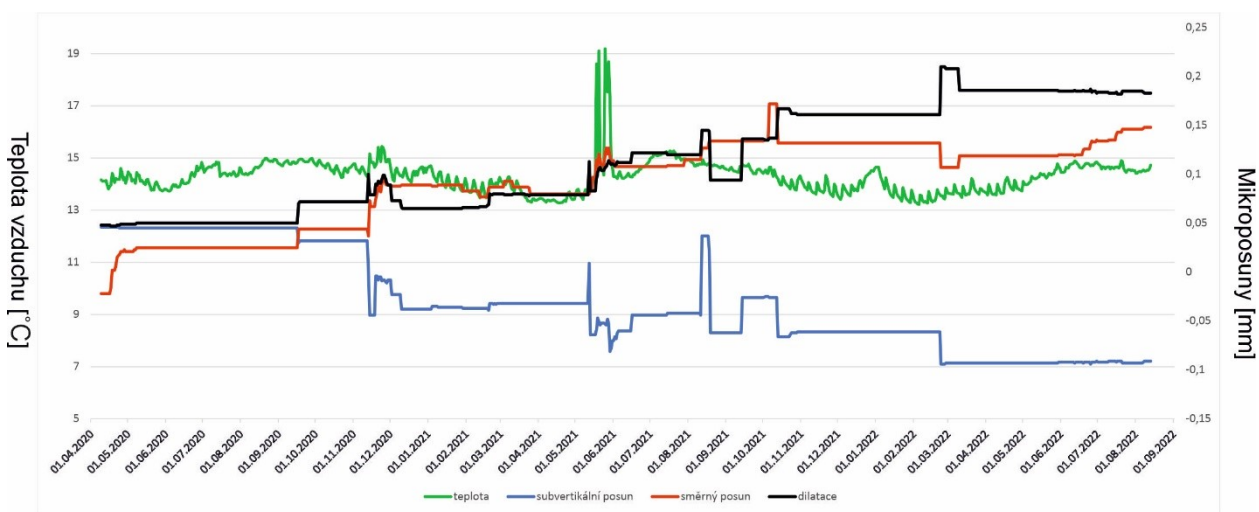
Obr. 7 Závislost teploty vzduchu (Vylamová et al. 2020) a posunů na pozorovacím bodě 296GWB0001.

## 4.2 Monitorovací bod 296GWB0002

Subvertikální posuny na tomto bodě jsou postiženy pulzními pohyby (Obr. 8, graf C), které mají i revezní charakter, jako je např. pulz v termínu 10.8.-19.8.2021. Složka směrného posunu již začíná jevit známky pravostranného trendu a to 0,091 mm/rok. Rovněž uzavírání křehké struktury jeví slabý trend s hodnotou 0,06 mm/rok, který je ale postižený nejenom skokovými akceleracemi ale i reverzním charakterem pulzů jakým byl uvedený pulz 10.8.-19.8.2021 nebo pulz z období 22.2.-10.3.2022. Z hlediska závislosti mezi posuny a průběhem teploty vzduch (Vylamová et al. 2020) zde není patrný vztah. Na základě Pearsonova korelačního koeficientu je korelace pro subvertikální posun velmi slabá ( $r = 0,16$ ), pro směrný posun je velmi slabá ( $r = 0,05$ ) a pro dilataci poruchy je velmi slabá ( $r = -0,12$ ). Z grafu na Obr. 9 je ale patrný vztah mezi pohyby a zvýšenou teplotou v chodbě ZK-2, která poukazuje na probíhající práce v souvislosti s projektem „Puklinová konektivita“ (hydraulické zkoušky; Zuna et al. 2021). Porovnáním s deníkem puklinové konektivity došlo v listopadu 2020 k posunům, které se kryjí s vrtnými pracemi na vrtu S-31. Další výrazný pohyb se udál v květnu 2021, ten se rovněž kryje s aktivitou v chodbě a zvýšenou teplotou vzduchu (Obr. 9). Výše uvedený pulz 10.8.-19.8.2021 se ale nekryje ani se zvýšenou teplotou ani zápisy v pracovním deníku. Podobně nebyl iniciován pohyb ze dne 22.2.2022.



Obr. 8 Výsledky extenzometrického monitoringu na pozorovacím bodě 296GWB0002.

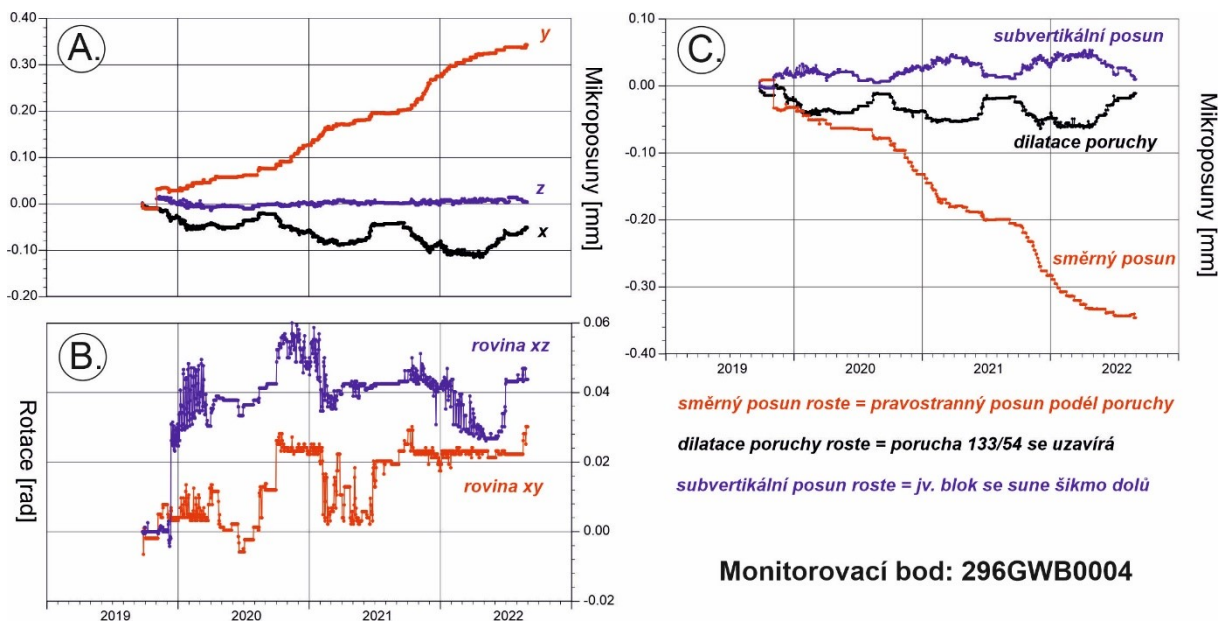


Obr. 9 Závislost teploty vzduchu (Vylamová et al. 2020) a posunů na pozorovacím bodě 296GWB0002.

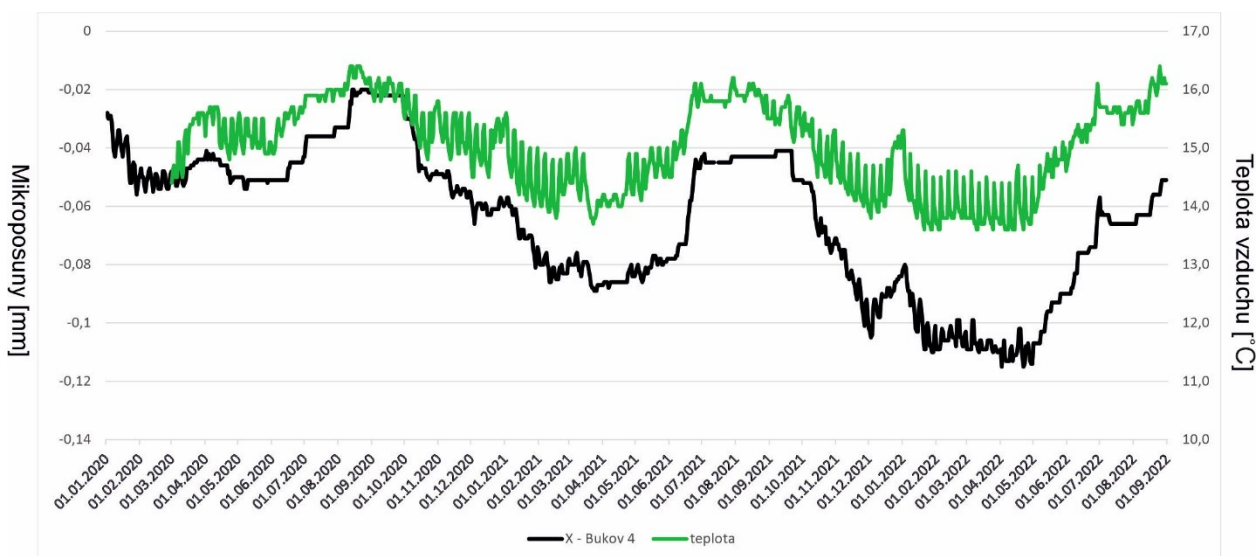
### 4.3 Monitorovací bod 296GWB0004

Z dosavadních výsledků je na tomto místě patrný trend levostranného směrného posunu podél křehké struktury, který může být krátkodobě akcelerován jako dne 6.11.2019 (viz TZ 526/2020). Dosavadní trend směrného posunu činí 0,112 mm/rok. Trend v dilataci křehké struktury ani subvertikálním posunu není zřetelný. Obě složky jsou ale postiženy sezónní složkou, způsobenou pravděpodobně teplotní dilatací masivu, která dosahuje amplitudy 0,04 mm. Tuto dokumentuje i Obr. 11, kde sledovaná osa X (orientována ve směru chodby) kopíruje průměrnou teplotu vzduchu, získanou z bodu VrK-1 (Vylamová et al. 2020). Pearsonův koeficient korelace  $r = 0,86$  prozrazuje velmi silnou korelaci.

Velice výrazné je klidové období od 26.6.2021 do 7.9.2021. Toto období bylo pozorováno i na jiných místech PVP Bukov. Zde se projevilo jak ve vertikálních posunech i ve směrném posunu podél křehké struktury.



Obr. 10 Výsledky extenzometrického monitoringu na pozorovacím bodě 296GWB0004.

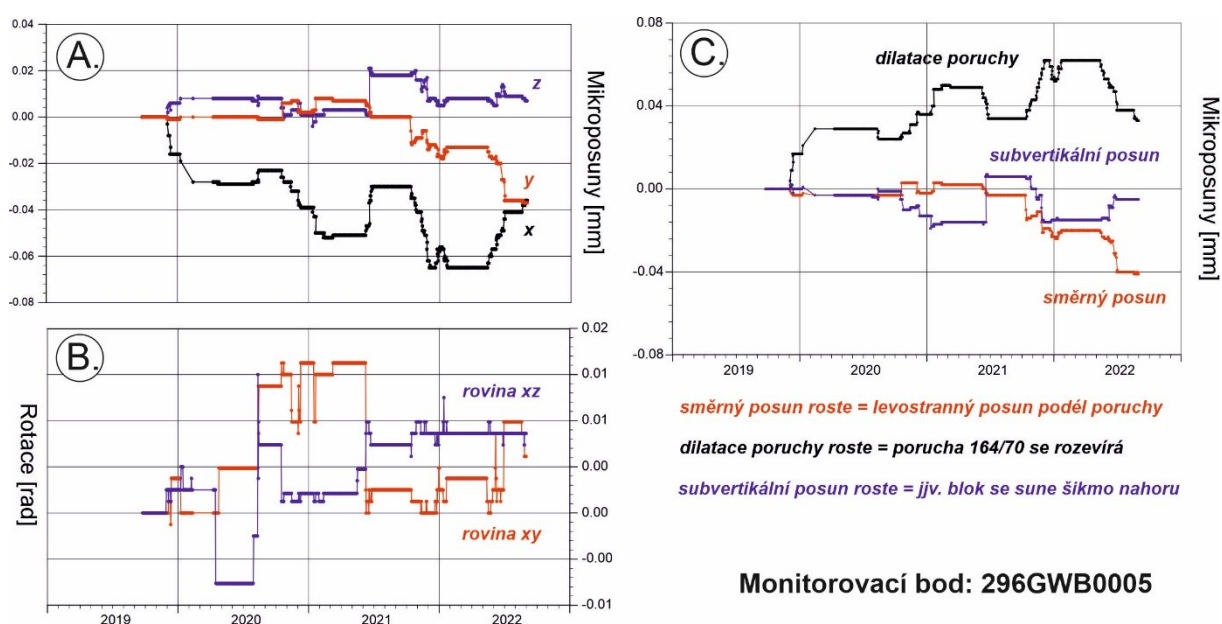


Obr. 11 Závislost teploty vzduchu (Vylamová et al. 2020) a posunu v osy X na pozorovacím bodě 296GWB0004.

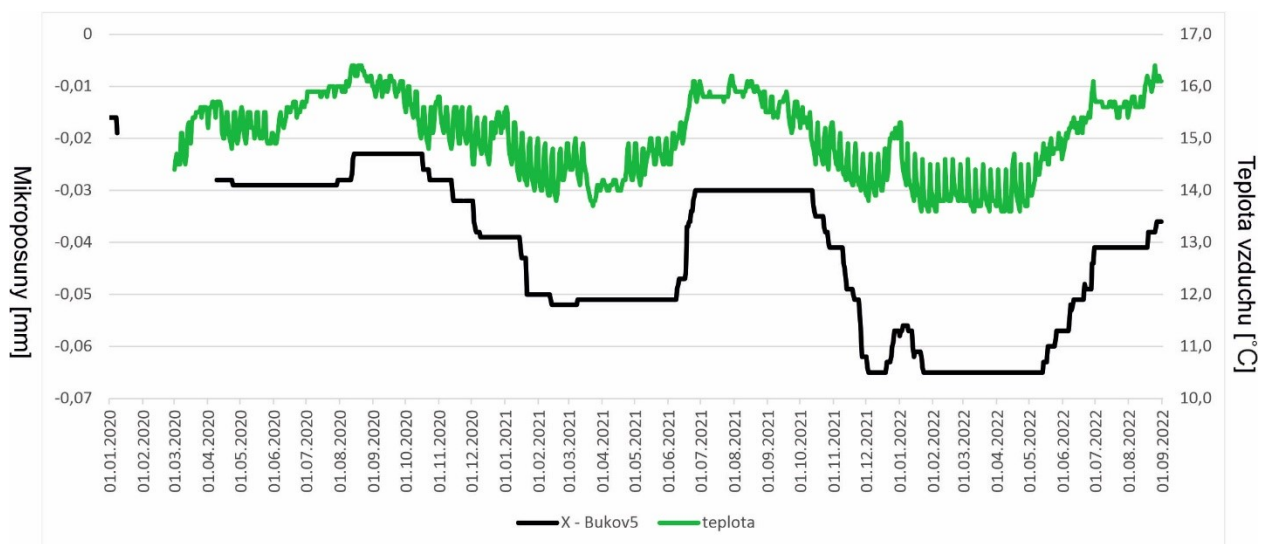
#### 4.4 Monitorovací bod 296GWB0005

Dosavadní výsledky, jak již bylo prezentováno i ve zprávě TZ526/2020 (Stemberk et al. 2020), poukazují na významnou složku dilataci poruchy. Jedná se generelně o trend v otevírání křehké struktury s hodnotou 0,017 mm/rok a ten je také ovlivněn sezónní složkou s amplitudou cca 0,03

mm, způsobenou pravděpodobně teplotní dilatací masivu. Tuto závislost dokumentuje i Obr. 13, kde sledovaná osa X (orientována ve směru štol) kopíruje průměrnou teplotu vzduchu, získanou z bodu VrK-1 (Vylamová et al. 2020). Pearsonův koeficient korelace  $r = 0,81$  prozrazuje velmi silnou korelaci. Z dat je zřetelný náhlý přesmyk jiv. bloku s hodnotou 0,022 mm dne 18.6.2021, který byl doprovázený pravostranným horizontálním posunem podél křehké struktury (Obr. 12, graf C). Přešlé období ale vykazovalo trend opačný, tedy generální pokles jiv. blok. Je nutné ale upozornit na měřítko pohybů, které jsou na tomto pozorovacím bodě v setinách mm. Od 22.6. 2021 do 11.10.2021 nastává období bez jakýchkoliv pohybů (viz taky výsledky na bodě 296GWB0004). V roce 2022 bylo pozorováno podobné období od 22.1. do 13.5. Tyto dvě období byly následovány pravostranným horizontálním posunem a také vertikálním pohybem na křehké struktuře.



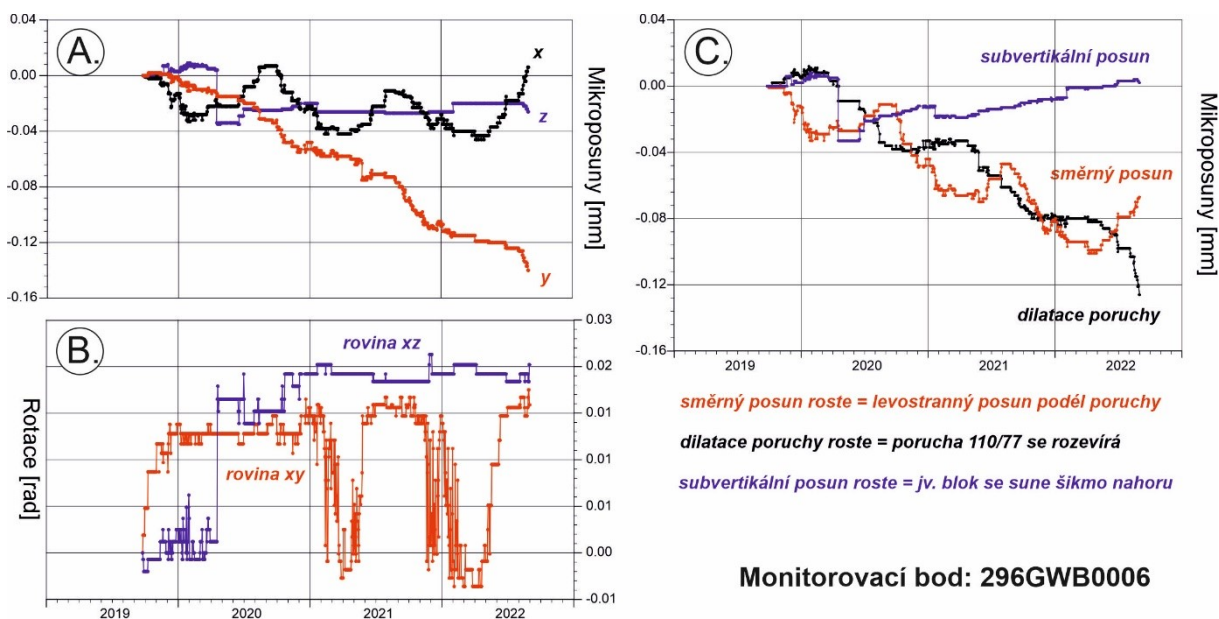
Obr. 12 Výsledky extenzometrického monitoringu na pozorovacím bodě 296GWB0005.



Obr. 13 Závislost teploty vzduchu (Vylamová et al. 2020) a posunu v osy X na pozorovacím bodě 296GWB0005.

## 4.5 Monitorovací bod 296GWB0006

Bod 296GWB006 (Obr. 14, graf C) naznačuje trendy jak v horizontálních pravostranných posunech na křehké struktuře, tak i trend v uzavírání křehké struktury. Obě tyto složky jsou rovněž postiženy sezónní teplotní dilatací s amplitudou 0,01 mm pro otevírání poruchy a 0,018 mm pro směrný posun. Trend v uzavírání poruchy je 0,04 mm/rok a 0,03 mm/rok pro směrný posun podél křehké struktury. Pokud se ale podíváme na složku X (Obr. 14, graf A), která je paralelní s chodbou BZ-XIIJ, tak sezónní amplituda horizontální dilatace ve směru chodby představuje hodnotu 0,04 mm. Pearsonův koeficient korelace  $r = 0,84$  prozrazuje pak velmi silnou korelaci mezi složkou X a teplotou vzduchu na bodě VrK-1 (Vylamová et al. 2020). Občasně můžou být pohyby akcelerovány i skokově např. dne 18.4.2020, kdy došlo k vertikálnímu pohybu (složka Z, Obr. 14, graf A) s hodnotou 0,038 mm.



Obr. 14 Výsledky extenzometrického monitoringu na pozorovacím bodě 296GWB0006.

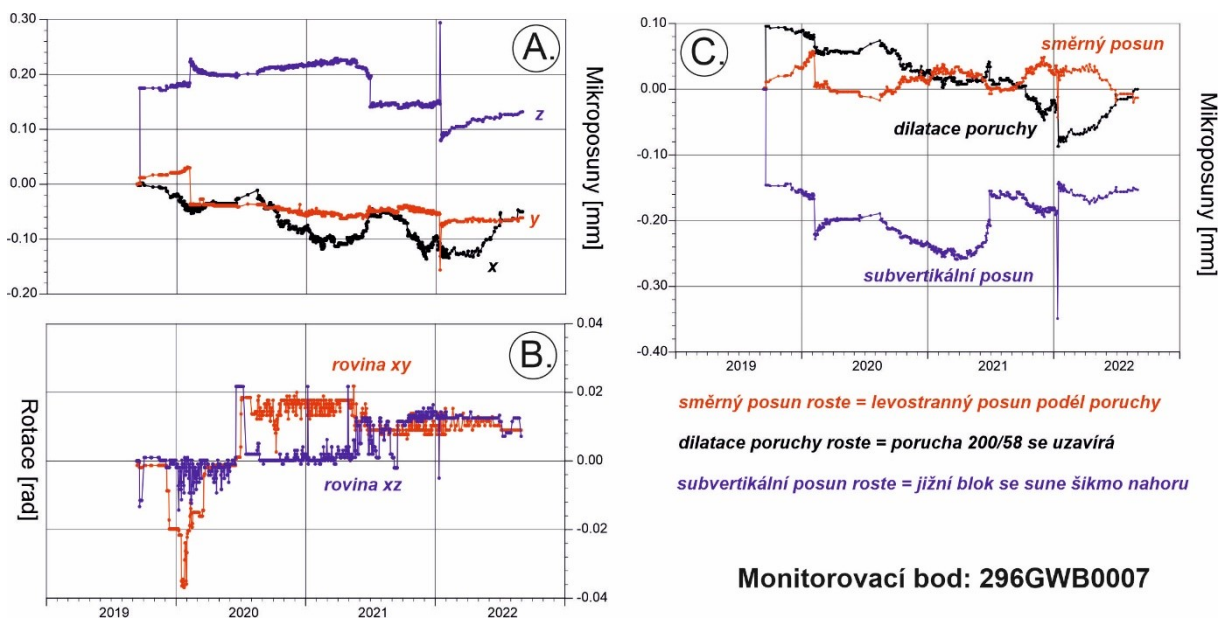
## 4.6 Monitorovací bod 296GWB0007

Pohyby na bodě 296GWB0007 probíhají v režimu trendů subvertikální složky i složky dilatace křehké struktury (Obr. 15, graf C). Trend v subvertikálním posunu je 0,09 mm/rok. Tento je, jak bylo již bylo uvedeno ve zprávě TZ 526/2020, přerušen významnými pulzy nebo reverzním smyslem posunu, jak je např. vidět od května 2021 do začátku července 2021. Velikost subvertikálního pohybu dosáhla v tomto období hodnotu 0,095 mm. Trend v dilataci křehké struktury je 0,07 mm/rok a rovněž může být ovlivněn krátkými událostmi, v průběhu kterých, je smysl dilatace vzhledem k dlouhodobému trendu opačný. Takovou je i událost z června 2021, kdy zároveň na tomto místě dochází k reverzi subvertikálních posunů. V daném období došlo

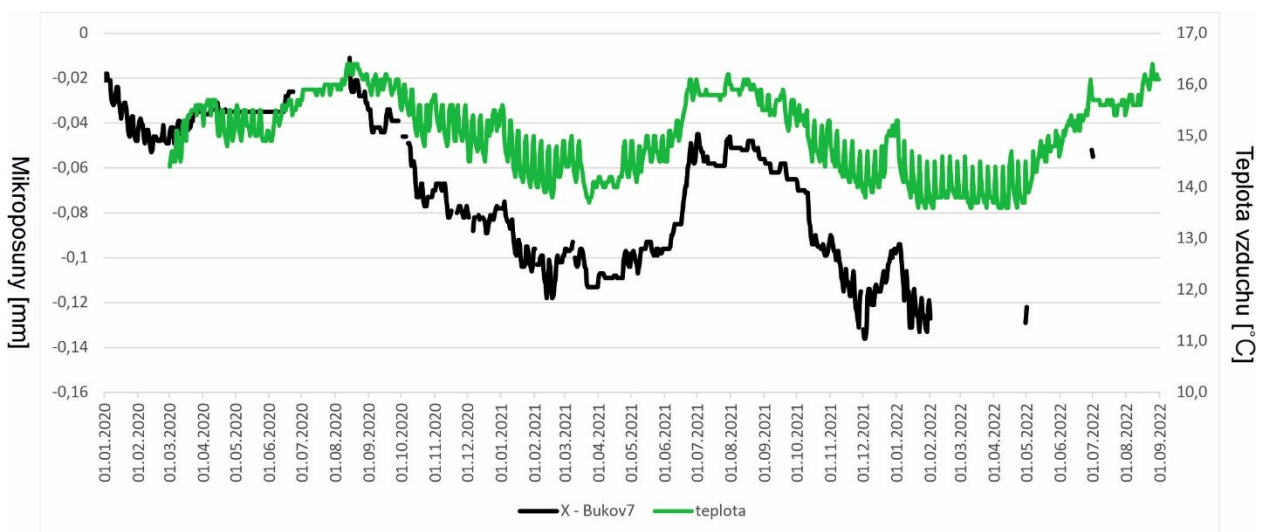


k přesmyku jižního bloku s uzavřením poruchy. Zatím významným spouštěčem vertikálních / subvertikálních akcelerací nebo reverzí se jeví maximum nebo minimum v sezónní amplitudě dilatace křehké struktury. Uvedená shoda je patrná v roce 2020, 2021 i 2022. Dilatace ve směru chodby (složka X) je postižena sezónní složkou, způsobenou pravděpodobně teplotní dilatací masivu. Tuto dokumentuje i Obr. 16, kde sledovaná osa X (orientována ve směru štoly) kopíruje průměrnou teplotu vzduchu (Vylamová et al. 2020), získanou z bodu VrK-1. Pearsonův koeficient korelace  $r = 0,81$  prozrazuje velmi silnou korelaci. Amplituda sezónní dilatace dosahuje maximální hodnotu 0,05 mm/rok.

Velice výrazné je dále klidové období od 26.6.2021 do 7.9.2021, které jsme komentovali na předešlých místech.



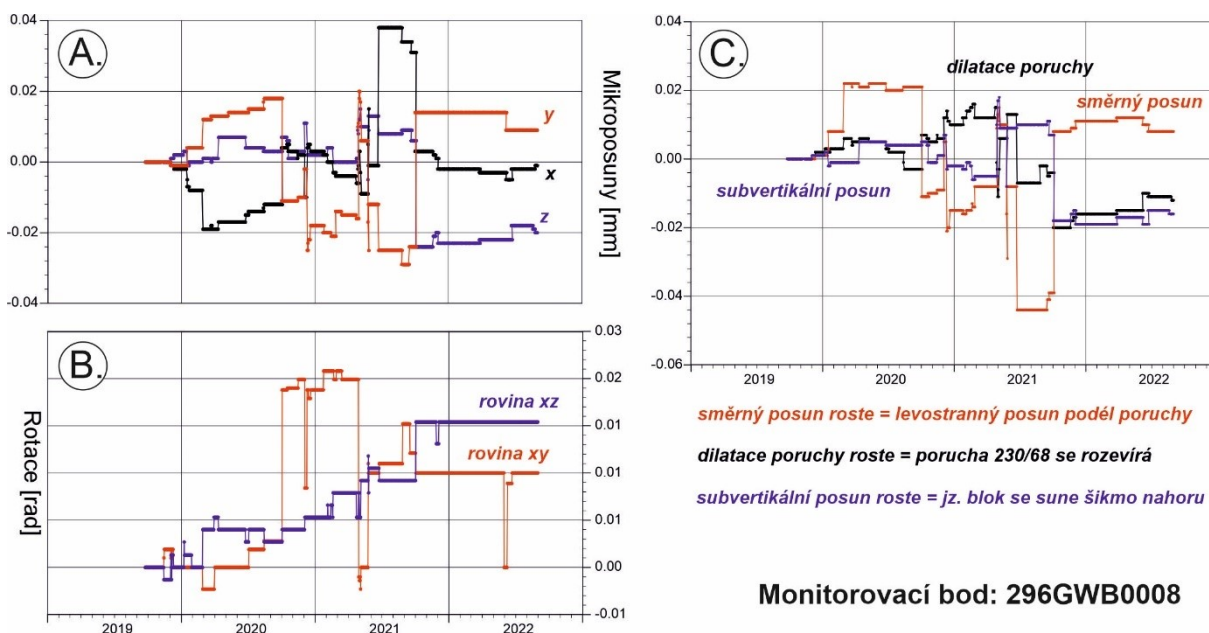
Obr. 15 Výsledky extenzometrického monitoringu na pozorovacím bodě 296GWB0007.



Obr. 16 Závislost teploty vzduchu (Vylamová et al. 2020) a posunu v osy X na pozorovacím bodě 296GWB0007.

## 4.7 Monitorovací bod 296GWB0008

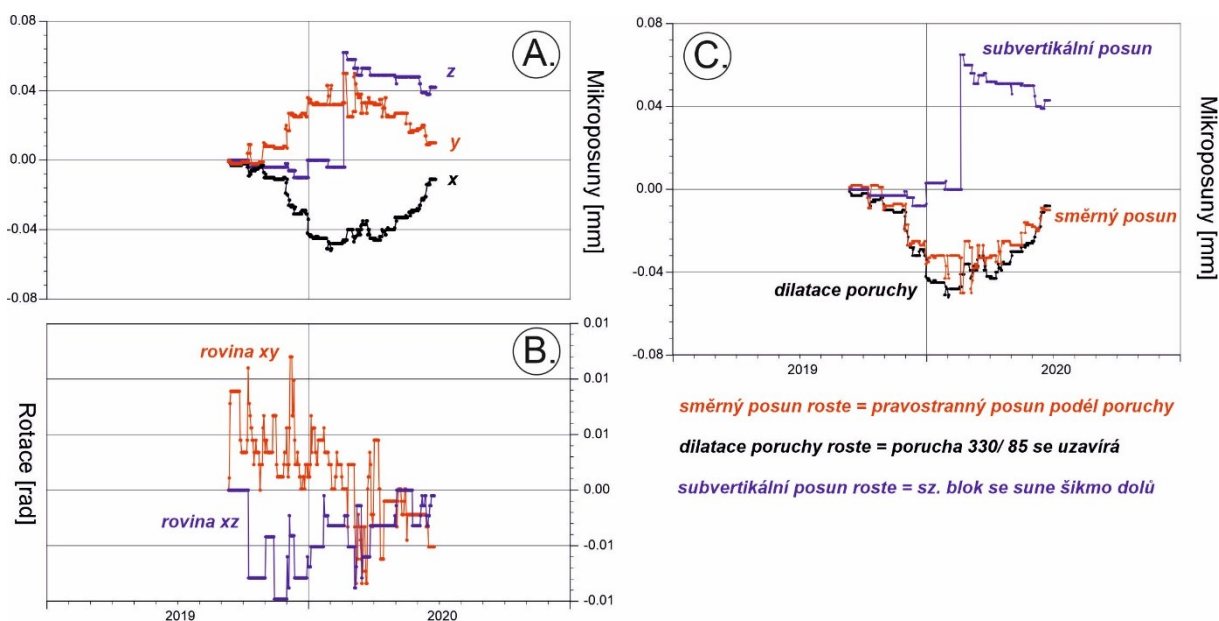
Současné výsledky potvrdily citlivost křehké struktury především na pulzní pohyby (Obr. 17). Posledním pulzem (24. 6. 2021) byl pravostranný posun (0,036 mm) a uzavření struktury (0,006 mm). Po této události dochází i zde k období bez pohybů, stejně jako na výše popsanych lokalitách. Kompresní režim na konci června 2021 s následným obdobím bez pohybů je tedy shodný pro téměř celý PVP Bukov. S ohledem na výsledky ostatních lokalit, nejsou zde patrné pohyby svázané s teplotní dilatací masivu a rovněž pohyby jsou v řádu setin až tisícín milimetru. Vzhledem na velikost pohybů možno považovat tento bod za stabilní a pohyby nevýznamné.



Obr. 17 Výsledky extenzometrického monitoringu na pozorovacím bodě 296GWB0008.

## 4.8 Monitorovací bod 296GWB0009

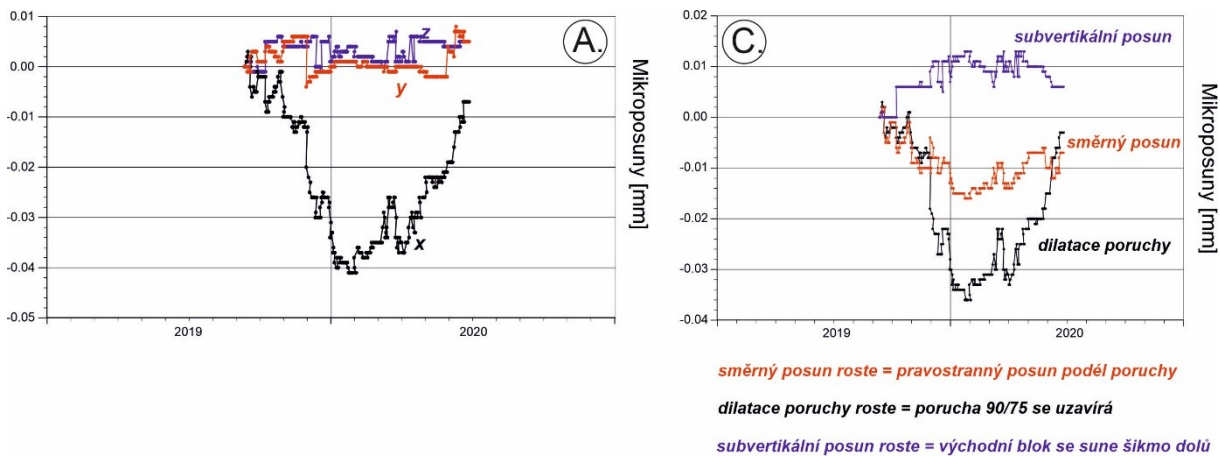
V období 30. 11. 2019 do zhruba 16. 2. 2020 dochází k otevírání křehké struktury s hodnotou 0,038 mm, doplněné levostranným posunem 0,025 mm. Po tomto období došlo dne 20. 2. 2020 k poklesu severozápadního bloku s hodnotou 0,065 mm. Největším posunem tedy na křehké struktuře byl uvedený pokles nadložního bloku (Obr. 18, graf C). Toto předešlé období následuje přesmyk sz. bloku, resp. pokles jv. bloku. Ve stejnou dobu dochází i ke změně směrného posunu z levostranného na pravostranný a struktura se uzavírá. Subvertikální pohyb měl do ukončení monitoringu trendový charakter, sz. blok se sunul šikmo nahoru. Dne 24.6.2020 došlo k deinstalaci měřidla v důsledku rozhodnutí o zatopení spodních pater.



Obr. 18 Výsledky extenzometrického monitoringu na pozorovacím bodě 296WB0009.

## 4.9 Monitorovací bod 296GWB0010

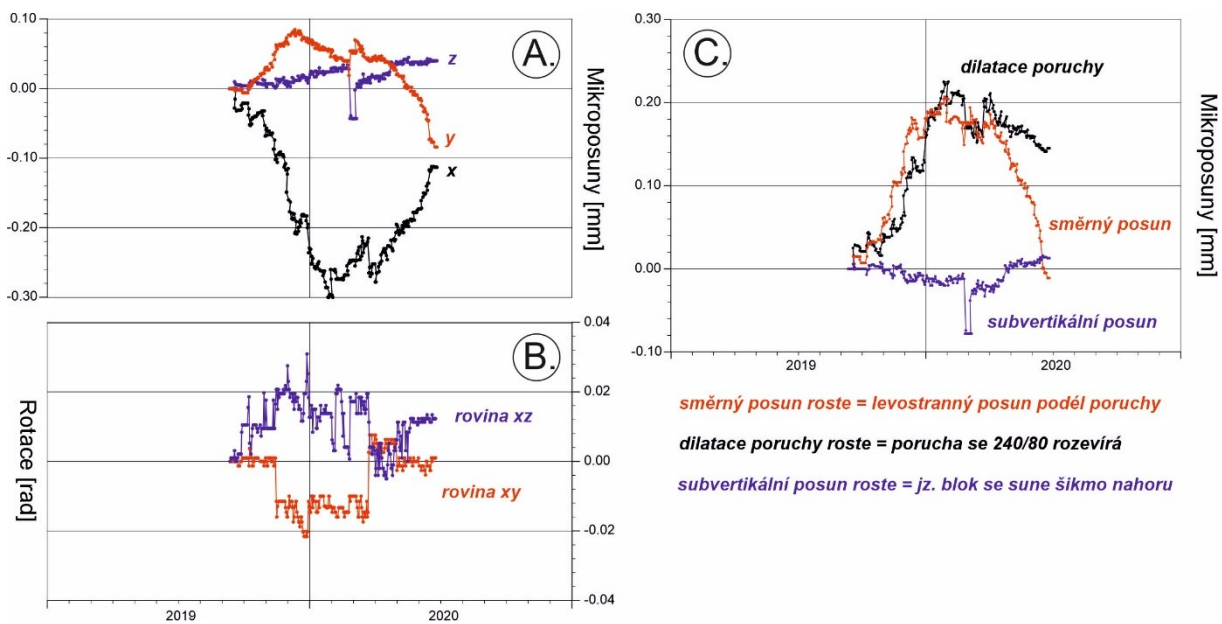
Od začátku sledování dochází na monitorovacím bodě k trendovým posunům na všech osách. Do 23. 1. 2020 došlo k poklesu východního bloku s hodnotou 0,013 mm, levostrannému posunu 0,016 mm a otevření struktury o 0,036 mm (Obr. 19, graf C). Nejvýraznějším posunem bylo tedy otevření. Po tomto období ale následuje perioda s opačným mechanismem pohybu, tedy křehká struktura se uzavírá, doplněné pravostranným posunem a mírným přesmykem východního bloku. Toto období trvá do současnosti, ale bylo přerušeno krátkým pulzem (22. - 27. 3. 2020) s opačným smyslem pohybů, shodným s prvním definovaným obdobím. Nedostatečná čitelnost moiré obrazců na rotacích nám neumožnila vyhodnotit rotační složky blokových pohybů. Způsobila ji opožděná teplotní dilatace měřidla po instalaci. Plánovaná rektifikace skel za účelem lepší čitelnosti rotací byla v termínu únor/březen zrušena v důsledku uzavření dolu v návaznosti na karanténu. Další termín již neměl význam, vzhledem na blízký termín deinstalace měřidla 24. 6. 2020, v důsledku rozhodnutí o zatopení spodních pater.



Obr. 19 Výsledky extenzometrického monitoringu na pozorovacím bodě 296WB0010.

## 4.10 Monitorovací bod 296GWB0011

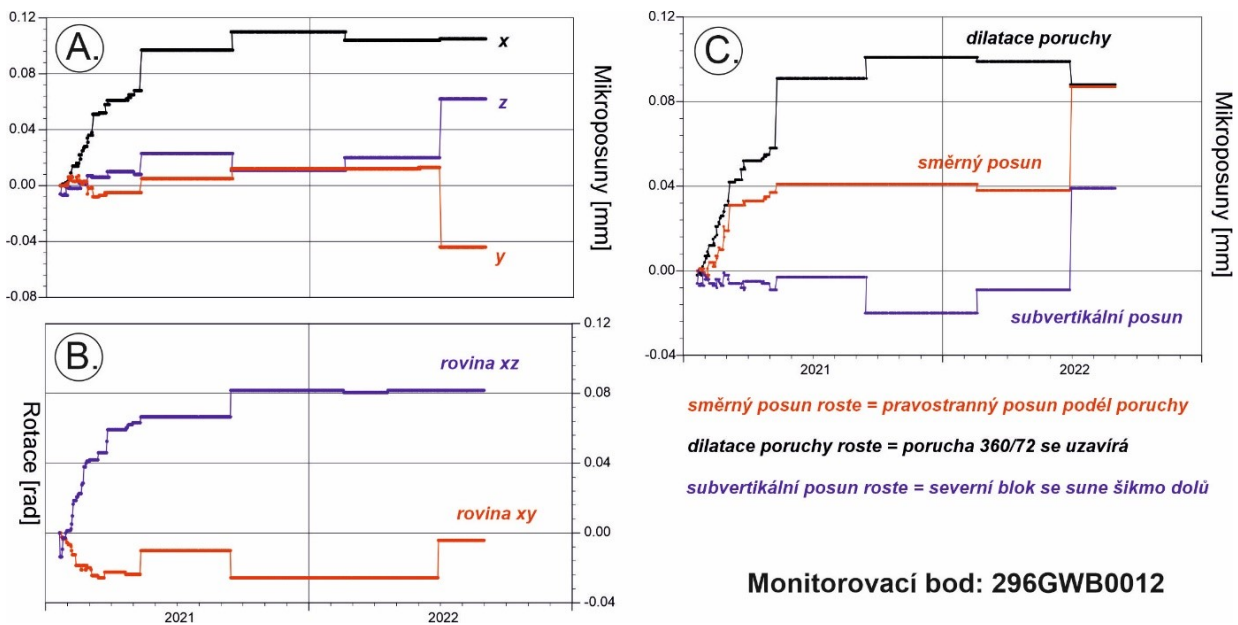
Významným pohybem na sledované křehké struktuře byl směrný posun a dilatace (Obr. 20, graf C). Od začátku monitoringu docházelo k levostrannému posunu, který dosáhl k 28. 1. 2020 hodnotu 0,207 mm a otevření křehké struktury dosáhlo hodnoty 0,223 mm. Od 30. 1. jsme sledovali reverzi jak směrného posunu (na pravostranný), tak i dilatace křehké struktury (na uzavírání křehké struktury), které pokračovali do ukončení monitoringu. Směrný posun dosáhl v termínu od 30.1. 2020 do 24. 6. 2020 hodnotu 0,215 mm. Krátkodobě zde došlo i k významnému poklesu jihozápadního bloku s hodnotou 0,066 mm v termínu od 25. 2. 2020 do 27. 2. 2020. Tento pokles byl pak následován reverzním pohybem, tedy zdvihem jv. bloku (resp. poklesem protilehlého severovýchodního bloku) s hodnotou 0,052 mm v termínu od 5. 3. 2020 do 8. 3. 2020. Dne 24.6.2020 došlo k deinstalaci měřidla v důsledku rozhodnutí o zatopení spodních pater.



Obr. 20 Výsledky extenzometrického monitoringu na pozorovacím bodě 296WB0011.

## 4.11 Monitorovací bod 296GWB0012

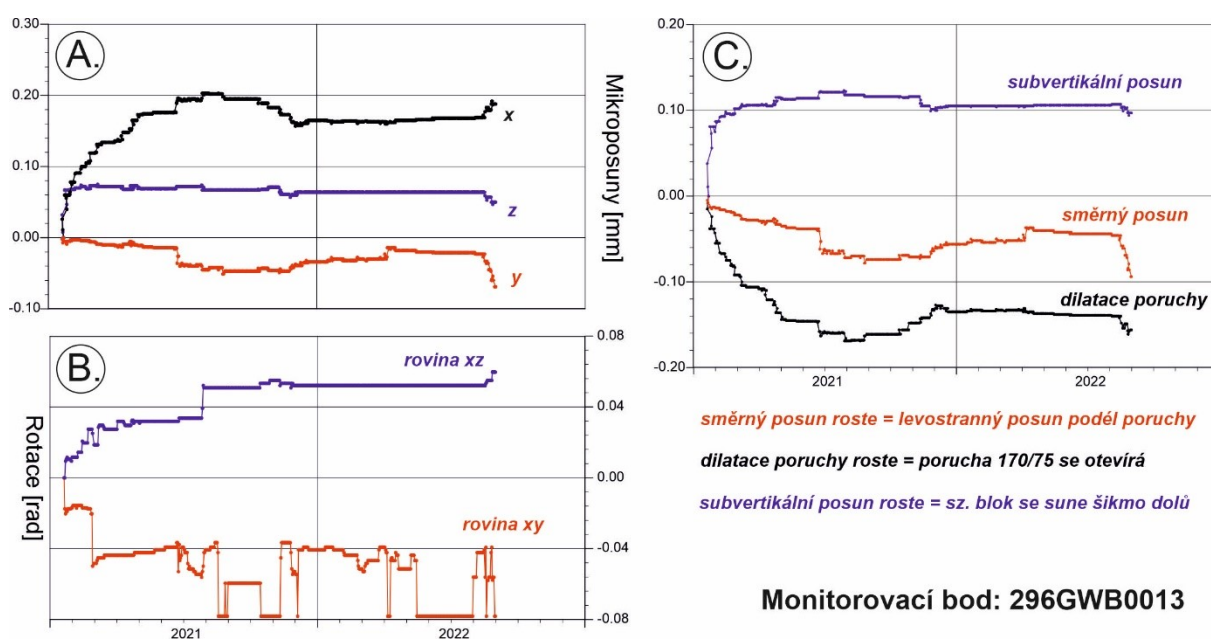
Vzhledem ke krátkosti trvání monitoringu není možné prozatím definovat velikost dlouhodobých trendů na této křehké struktuře (Obr. 21, graf C). Z dosavadních výsledků je ale patrný náznak trendu dilatace křehké struktury a směrného posunu. Dilatace byla akcelerována dne 12.5.2021 o 0,033 mm. Po této události došlo k pozastavení pohybů ve všech složkách. V roce 2022 pak došlo k výraznému pravostrannému posunu v kombinaci s poklesem severního bloku. K události došlo dne 28.6.2022. Velikost směrného posunu byla 0,049 a subvertikálního posunu 0,048 mm.



Obr. 21 Výsledky extenzometrického monitoringu na pozorovacím bodě 296GWB0012.

## 4.12 Monitorovací bod 296GWB0013

Všechny složky pohybu na této křehké struktuře projevují trend, který může být akcelerovaný nebo dočasně utlumený (Obr. 22, graf C). Akceleraci je vidět např. na začátku měření v subvertikální složce pohybu a také ve složce směrného posunu. Směrný pravostranný posun vykazoval v roce 2021 trend 0,067 mm/rok, ale byl akcelerován v termínu 22.6.-30.6.2021 o hodnotu 0,029 mm. Po této události došlo k uklidnění pohybů. Pak se trend mírně obrátil na levostranný s uklidněním směrného posunu v roce 2022. Další akcelerace pohybů ve všech složkách nastává 15.8.2022 a výrazným pohybem se zde stává pravostranný směrný posunu podél křehké struktury. Tento pohyb dále pokračuje do současnosti.

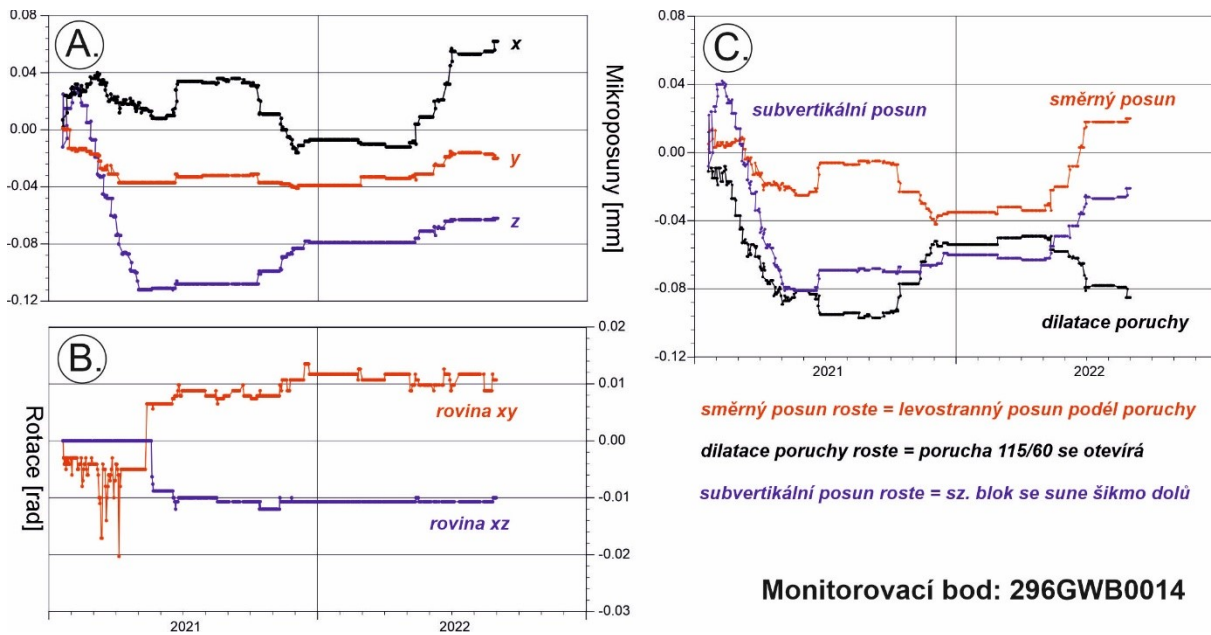


Obr. 22 Výsledky extenzometrického monitoringu na pozorovacím bodě 296WB0013.

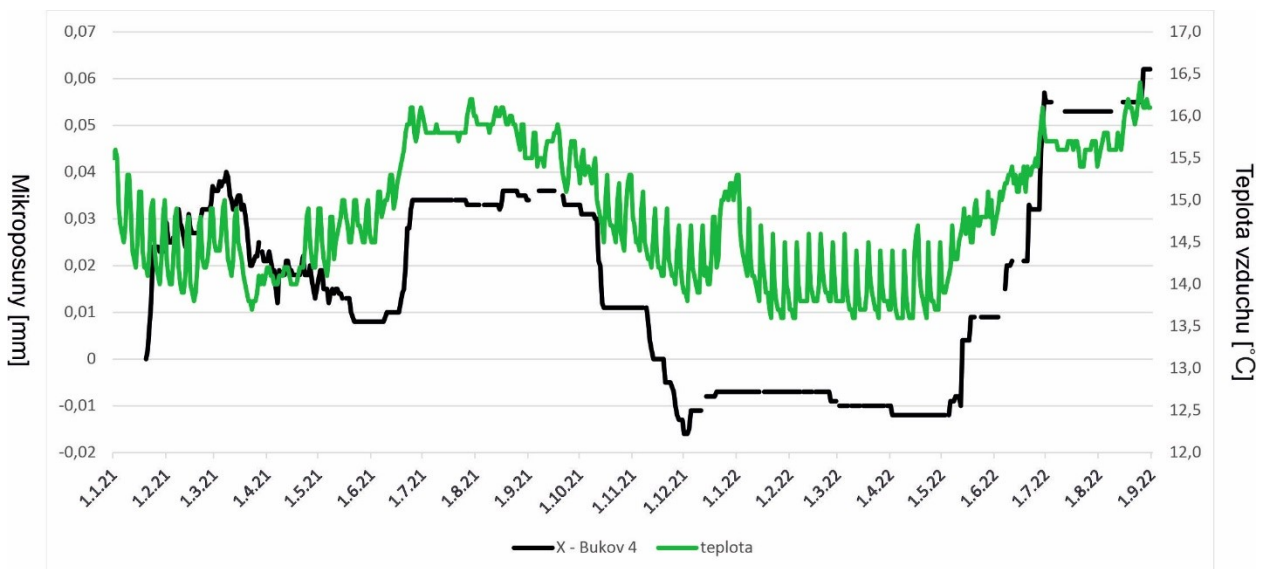
## 4.13 Monitorovací bod 296GWB0014

Všechny složky pohybu na této křehké struktuře projevují trend, který může být akcelerovaný nebo dočasně utlumený (Obr. 23, graf C). Do 8.5.2021 docházelo k aktivitě ve všech složkách posunu a tyto byly pak utlumené dne 8.5.2021. Toto klidové období pokračovalo dál, přerušeno krátkou kompresní událostí s pravostranným smyslem posunu, uzavřením křehké struktury a přesmykem jv. bloku v termínu 17.6.-25.6.2021. Po této události zas dochází k uklidnění posunů. Zklidnění pohybů od 26.6.2021 jsme pozorovali např. na bodech 296GWB0013, 296GWB0008, 296GWB0005, 296GWB0004. Ze současných dat je již možné usuzovat, že posuny budou ovlivněny teplotní dilatací masivu. Pozorovací místo se nachází nejbližší k jámě, a tedy nejvýraznějším změnám teploty ve vztahu k ventilaci podzemního díla. Souvislost s teplotou vzduchu (Vylamová et al. 2020) dokumentuje i Obr. 24, kde sledovaná osa X (orientována ve směru štoly) kopíruje průměrnou teplotu vzduchu, získanou z bodu VrK-1. Pearsonův koeficient korelace  $r = 0,74$  prozrazuje silnou korelaci. Odhadovaná velikost sezónní amplitudy ve složce X bude zhruba 0,05 mm. Na tomto místě bude nutné ale pokračovat ještě minimálně dva roky

s cílem oddělení sezónních cyklů od reálných zlomových pohybů způsobených endogenními procesy.



Obr. 23 Výsledky extenzometrického monitoringu na pozorovacím bodě 296GWB0014.



Obr. 24 Závislost teploty vzduchu (Vylamová et al. 2020) a posunu v osy X na pozorovacím bodě 296GWB00014.

## 5 Numerický model

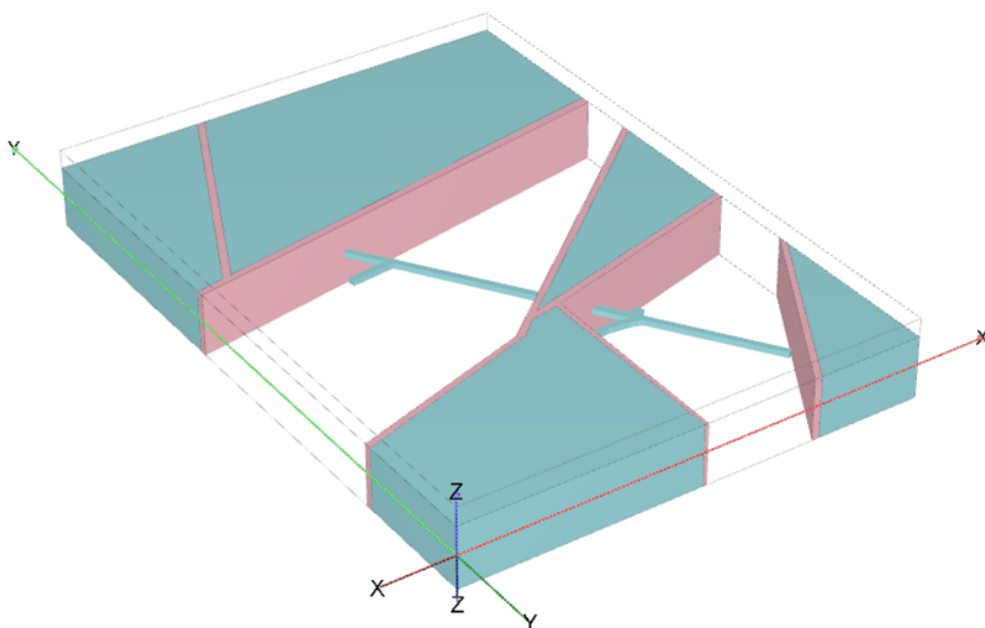
Řešení bylo provedeno v software metody konečných prvků Plaxis 3D VIP. Podrobná dokumentace software je dostupná na webové adrese:

<https://communities.bentley.com/products/geotech-analysis/w/wiki/46137/manuals---plaxis>.

Provedena byla deformační elastická analýza, v rámci níž byly křehké struktury včleněny do modelu jako zóny oslabení (s výrazně nižšími deformačními parametry, než kterými je charakterizován horninový masiv). V rámci řešení byl sestaven tzv. „quasi-2D“ model: jedná se o 3D horizontální řez PVP Bukov v úrovni cca -565 m do -545 m (znázornění modelu je na Obr. 1). Důvodem užití 3D modelovacího nástroje (namísto řešení pomocí *plane-strain* analýzy ve 2D) je možnost zohlednění vlivu vyražení chodeb PVP Bukov na napjatost v horninovém masivu.

V rámci výpočtu byla, po vygenerování počátečního napjatostního stavu a po simulaci ražby podzemních chodeb, snaha o zpětnou analýzu měřených pohybů na diskontinuitách aplikací horizontálních tlaků na jednotlivé bloky. Výsledkem výpočtů je pak informace o napjatostních a tlakových poměrech v oblasti a interpretace porušení tektonickými liniemi.

Vzhledem k tomu, že z hlediska porušení je studováno pouze 2D řešení, jsou interpretovány pouze horizontální pohyby na diskontinuitách, metoda neumožňuje interpretovat vertikální pohyby. Pro interpretaci těchto pohybů by bylo nutné sestavení plně 3D modelu, který byl mimo rámec řešeného úkolu.



Obr. 25 Ilustrační znázornění geometrie modelu užitého v rámci řešení úkolu

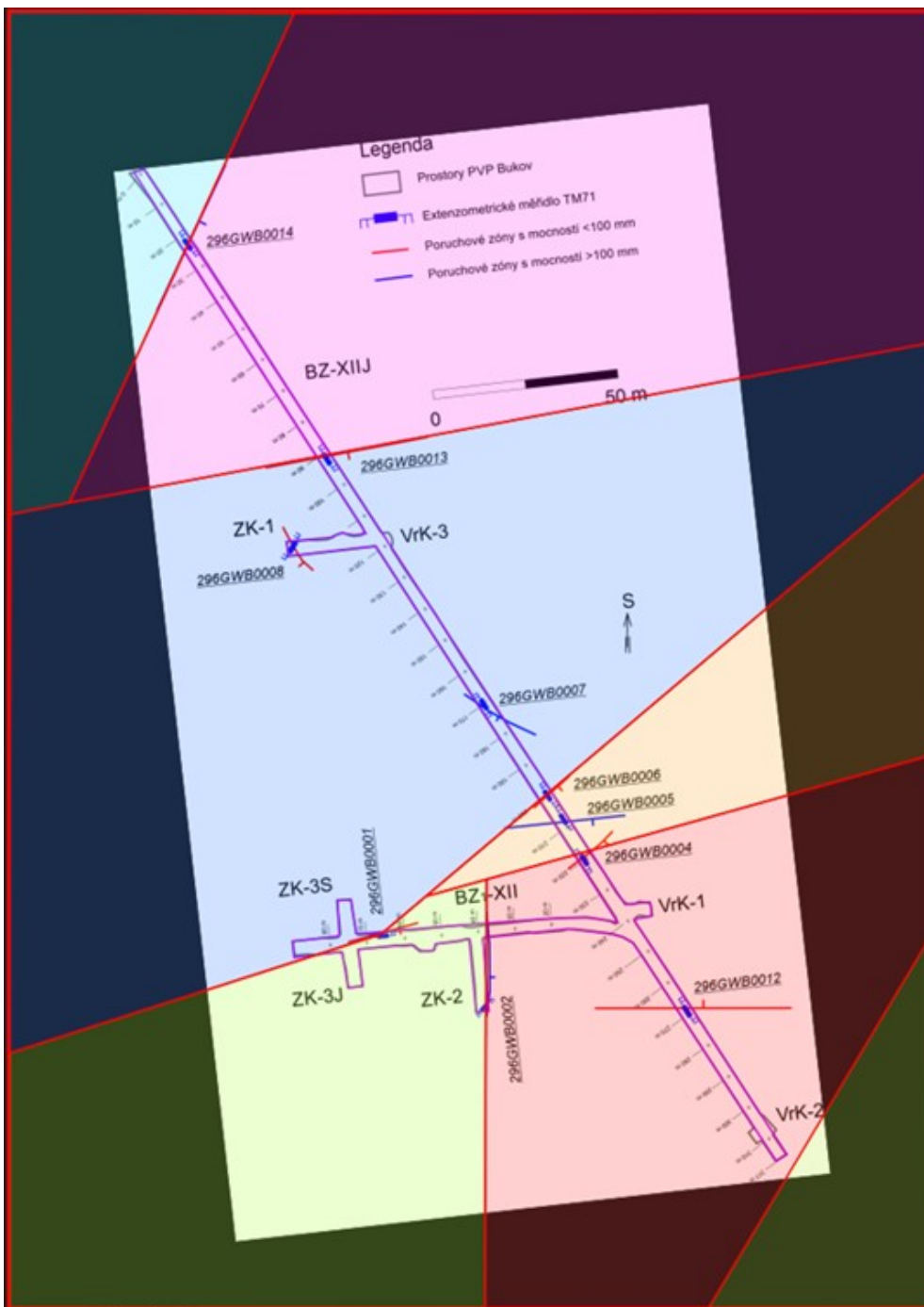


## 5.1 Výpočtová geometrie

Simulovaná oblast měla rozsah 250 x 350 m, přičemž byla provedena volba orientovat oblast dle geografického souřadného systému, zároveň byla oblast rozšířena, aby nezasahovala pouze nejbližší okolí chodeb PVP. Obr. 26 zobrazuje celou simulovanou oblast v kombinaci s mapou PVP Bukov ve standardně využívaném rozsahu a natočení.

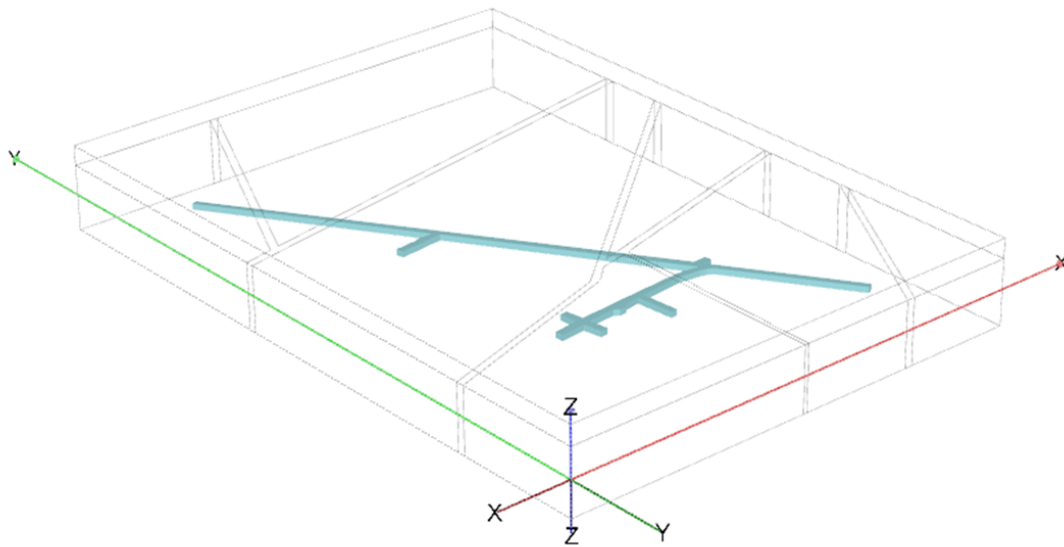
Oblast byla rozčleněná na systém bloků a diskontinuit. Byly definovány pouze ty diskontinuity, kde jsou měřeny významnější horizontální pohyby – volba tedy nesleduje skutečnou mocnost a charakter diskontinuit (viz kapitoly 2 a 3), protože některé významnější diskontinuity nevykazují významnější pohyby, a naopak na některých diskontinuitách, svým charakterem nenápadných, jsou pohyby nezanedbatelné.

Průběh diskontinuit byl též zjednodušen na lineární průběh (s výjimkami), nutný pro zajištění geometrické kompatibility úlohy. Průběh diskontinuit na hranicích oblasti, kde nejsou k dispozici aktuální data, je tedy samozřejmě pouze přibližný. Bloky byly v rámci quasi-2D řešení odděleny přímými vertikálními liniemi. Plně 3D řešení, které by uvažovalo ukloněné linie pro interpretaci vertikálních pohybů, by vyžadovalo větší rozsah oblasti ve vertikálním směru a toto nebylo v rámci úlohy v souladu s objednávkou uvažováno.



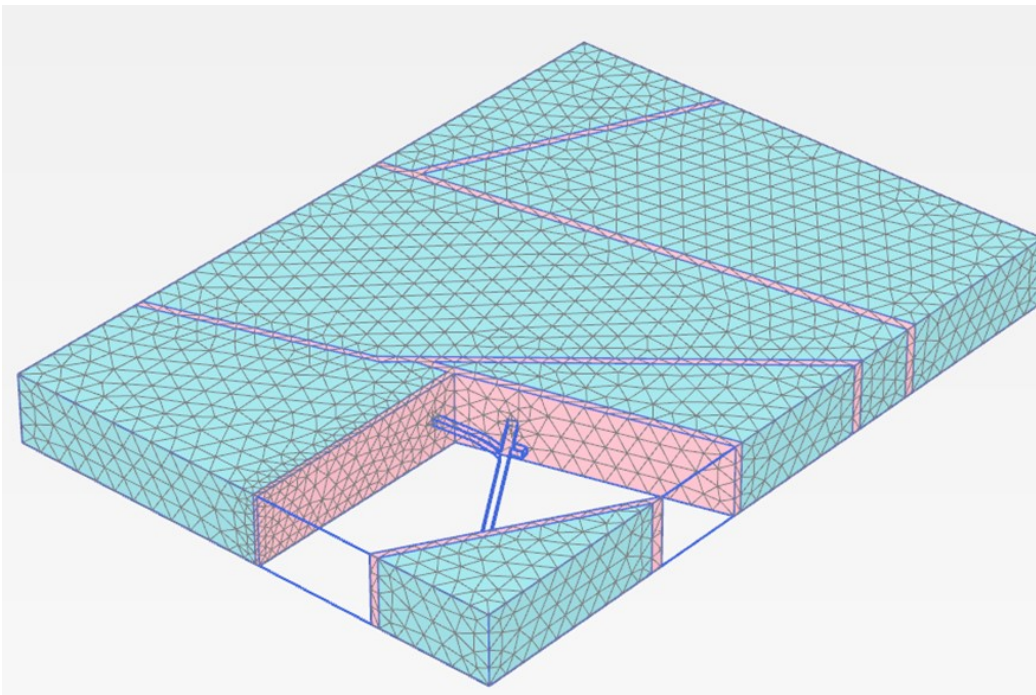
Obr. 26: Simulovaná oblast (vnější obdélník) znázorněná spolu s mapou PVP Bukov (rotovanou pro severo-jížní směrování) včetně uvažovaného rozdělení na kvazihomogenní bloky

V rámci úlohy bylo uvažováno i vyrazení otevřených podzemních prostor laboratoře. Geometrie PVP je zobrazena na Obr. 26, přičemž pro celý model se uvažovala oblast s přesahem  $\pm 15$  m nad a pod úroveň PVP. PVP Bukov je zde zjednodušeno tak, že jsou uvažovány vertikální stěny díla o výšce 3 m (celková vertikální výška modelu je tedy 33 m).



Obr. 27: Uvažovaná geometrie PVP Bukov v rámci simulované oblasti

Pro takto definovanou geometrii byla generována síť metody konečných prvků. Síť obsahuje 22242 10-uzlových elementů a 33798 uzlů (viz Obr. 28).



Obr. 28: Síť metody konečných prvků použitá v modelech

## 5.2 Výpočetní postup a parametry

Pro výpočet byl využit elastický konstituční model, přičemž parametry horninového masivu byly zvoleny dle výsledků geologického a geotechnického průzkumu (Souček et al., 2018) a jsou

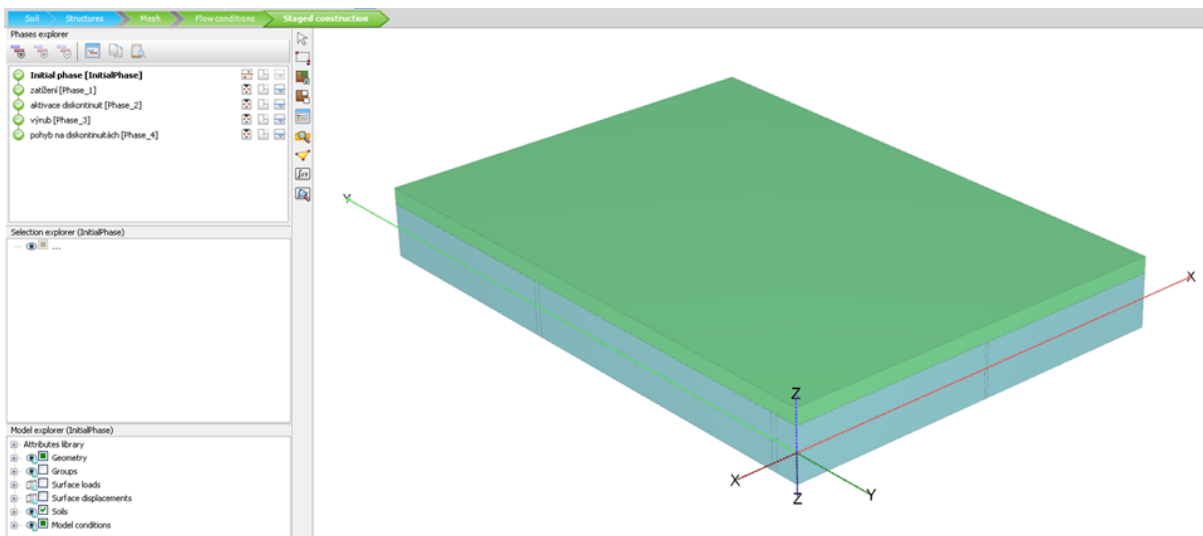
udány v Tabulka 3. Parametry diskontinuity byly zvoleny tak, aby reprezentovaly evidentní zóny oslabení masivu: jejich tuhost byla uvažována jako 1/1000 násobek tuhosti masivu.

Tabulka 3: Parametry horninového masivu a diskontinuit.  $E$  reprezentuje Youngův modul,  $\nu$  Poissonovo číslo a  $\rho$  hustotu.

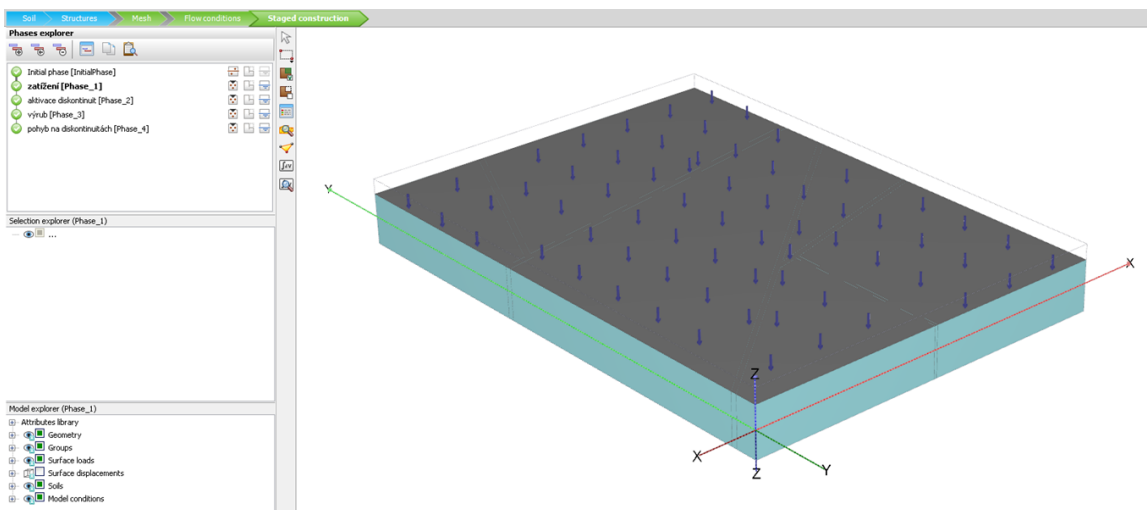
	$E$ [GPa]	$\nu$	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
Horninový masiv	50	0,15	2850
Diskontinuity	0,05	0,15	2850

Model byl řešen v následujících výpočetních fázích, jejichž geometrie je zobrazena v Obr. 29 až Obr. 33:

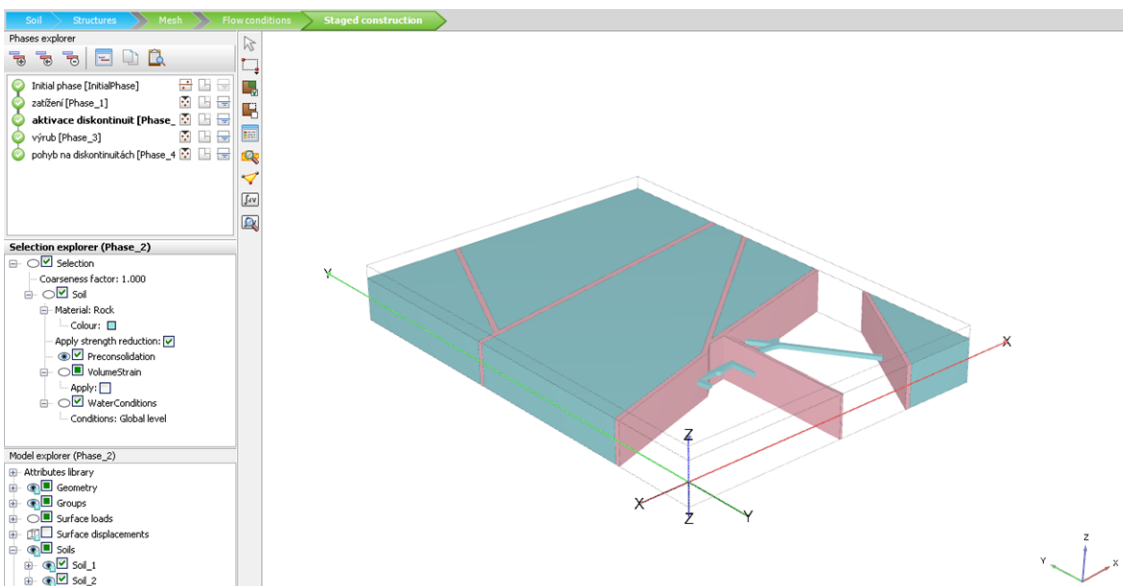
1. V první fázi proběhla inicializace geostatické napjatosti: simulován byl vliv nadloží vyvozující všesměrný (izotropní) tlak 15 MPa. V modelu bylo z důvodu charakteristiky software (nemožnost inicializace počátečního stavu zohledňující povrchové zatížení) nadloží pro zjednodušení geometrie modelováno jako úzká (10 m mocná) vrstva horniny o extrémní objemové hmotnosti 1500 kN/m<sup>3</sup> nastavené tak, aby vyvozovala vyžadovaný všesměrný tlak 15 MPa.
2. V následující fázi byla provedena výměna nadložní vrstvy za ekvivalentní vertikální zatížení povrchové zatížení 15 MN/m<sup>3</sup>. Záměna byla nutná proto, aby uměle užitá vrstva pro inicializaci napjatosti nestabilizovala následně pohyb na diskontinuitách.
3. V třetí fázi byly aktivovány diskontinuity výměnou materiálu horniny za materiál diskontinuit. Jak je zřejmé z Obr. 31, diskontinuity, přestože reprezentují planární geometrické entity se zanedbatelnou šířkou z hlediska celkových rozměrů úlohy, byly za účelem modelu zjednodušeny a rozšířeny tak, aby jejich šířka reprezentovala jeden element v rámci metody konečných prvků (cca 3 m).
4. Ve fázi 4 byla simulována ražba PVP. Vzhledem k tomu, že řešení úlohy není cíleno na geotechnickou analýzu ražby, byl celý výrub odtěžen v jedné fázi a jeho postupná ražba tak simulována nebyla. I přes tento přibližný přístup model reprezentuje výraznou změnu napjatosti v okolí výrubu (viz dále Obr. 34).
5. V závěrečné páté fázi došlo k aplikaci horizontálních tlaků za účelem posunu masivu na diskontinuitách. Nižší či vyšší zatížení než průměrných 15 MPa vede k posunům na rozhraní mezi bloky. Zatížení bylo aplikováno v rozmezí 5 MPa až 30 MPa (ve srovnání s původní hodnotou 15 MPa), viz různé pohledy na Obr. 33, kde je zatížení reprezentováno modrými šipkami. Pro získání staticky určitého řešení byly některé bloky zvoleny jako nehybné ve směru normálovém na hranici s volnou deformací ve směru podélném (viz zelené podpěry na Obr. 33) – relativní deformace v modelu pak simulována vůči nim.



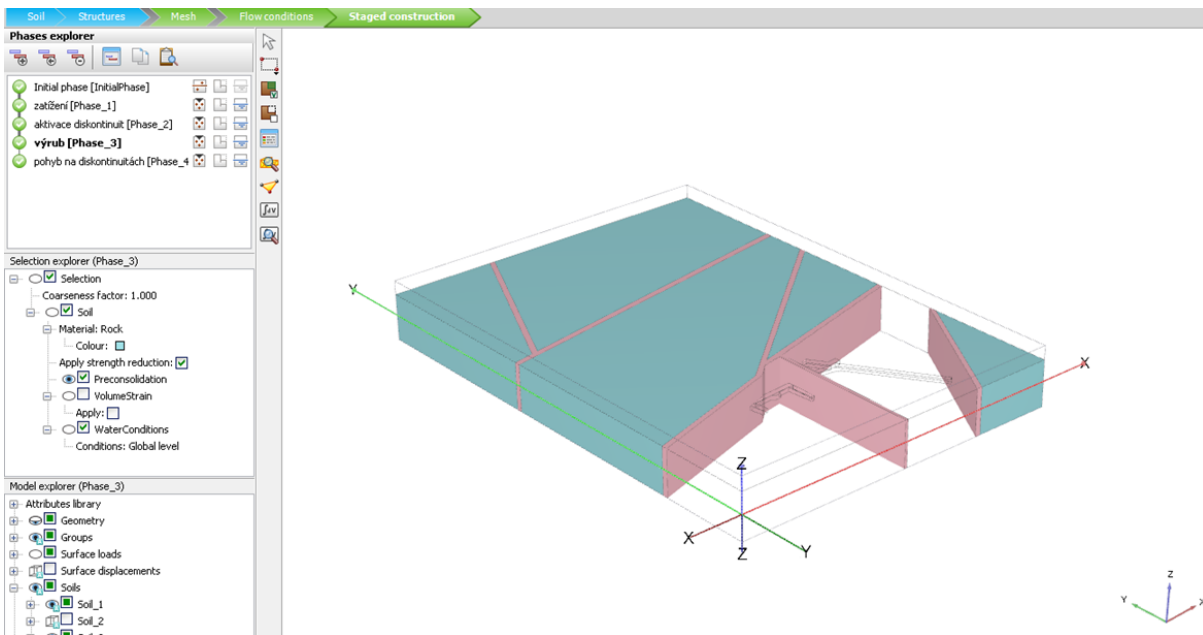
Obr. 29: Geometrie výpočtové fáze 1



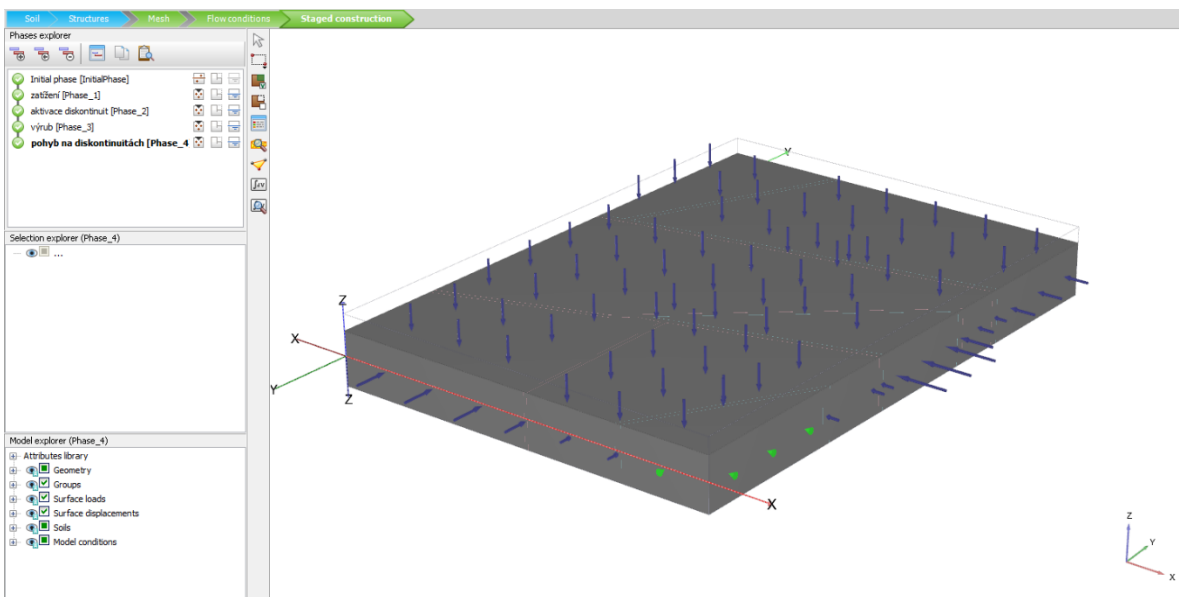
Obr. 30: Geometrie výpočtové fáze 2

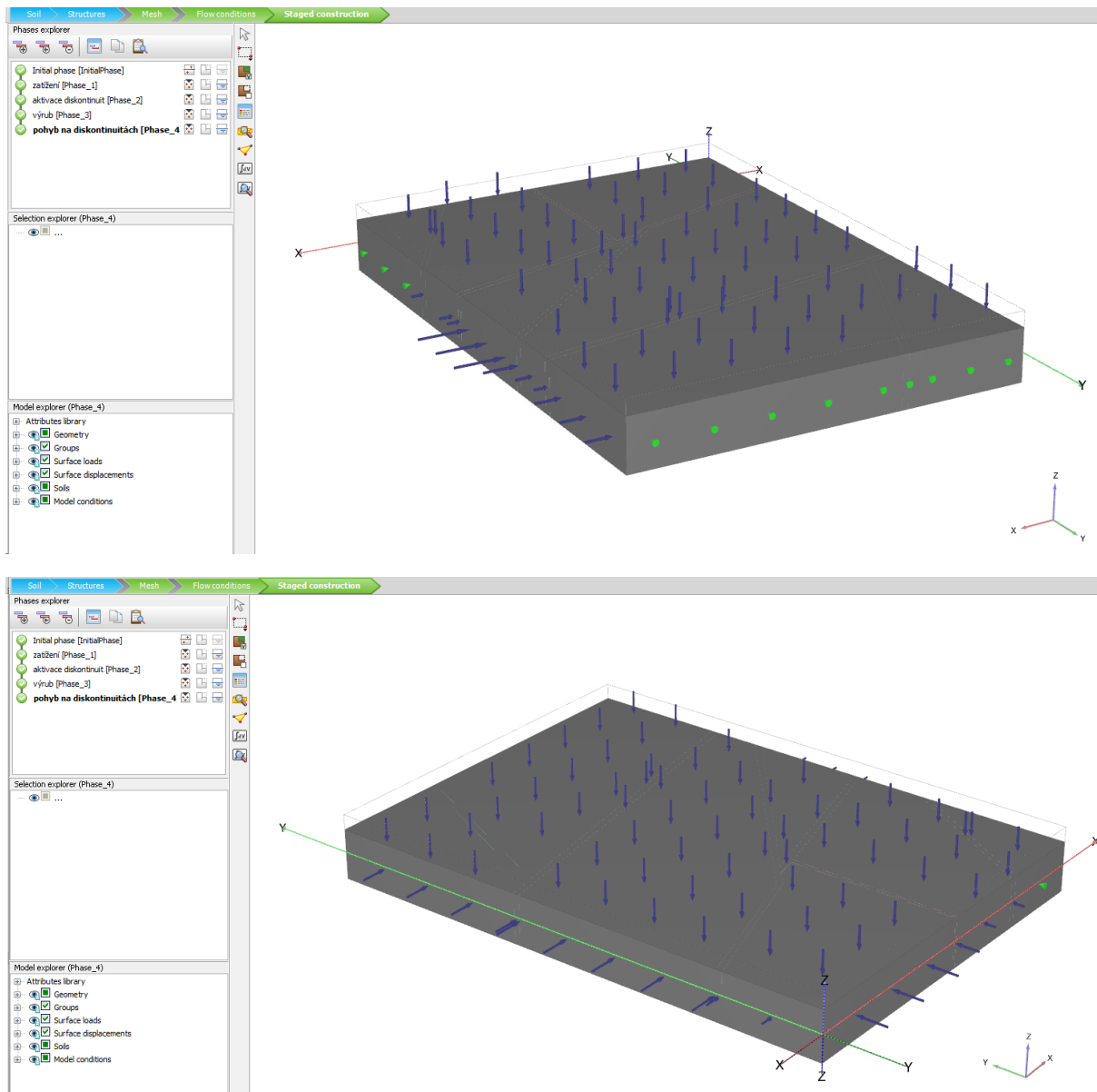


Obr. 31: Geometrie výpočtové fáze 3



Obr. 32: Geometrie výpočtové fáze 4



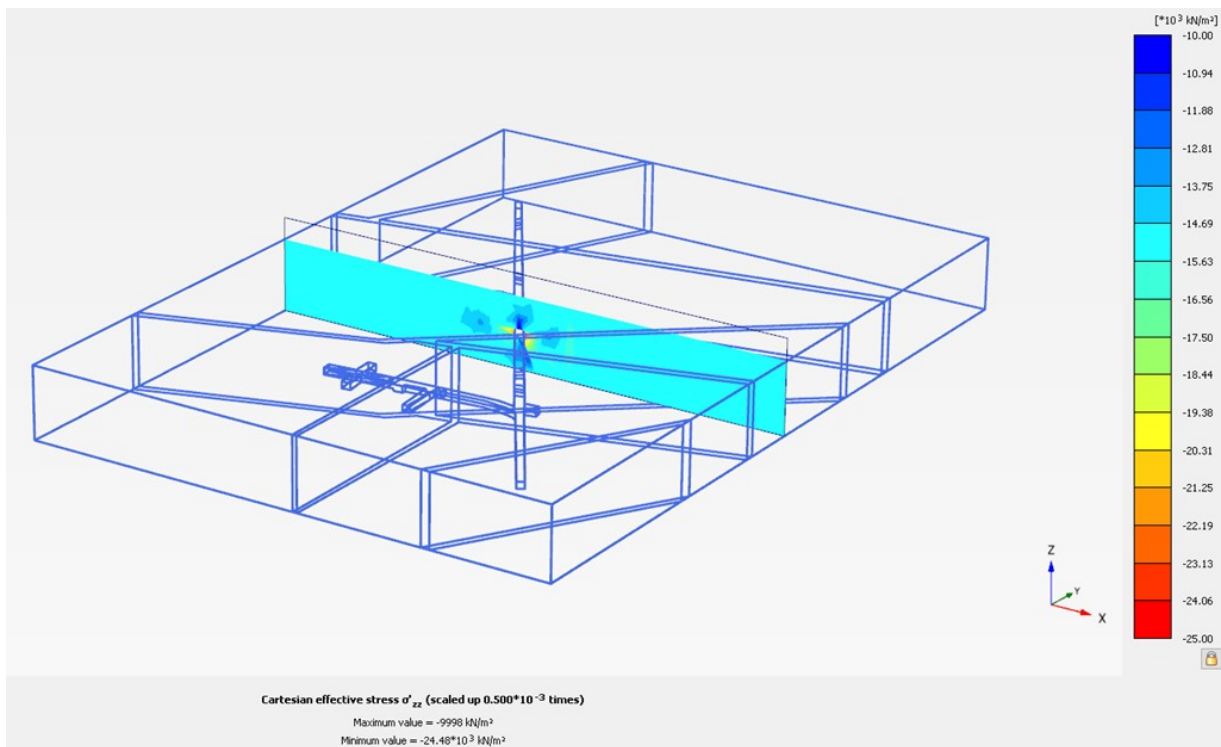


Obr. 33: Geometrie výpočtové fáze 5, pohled z různých směrů

## 5.3 Výsledky výpočtů

### 5.3.1 Výsledky výpočtů přehledně

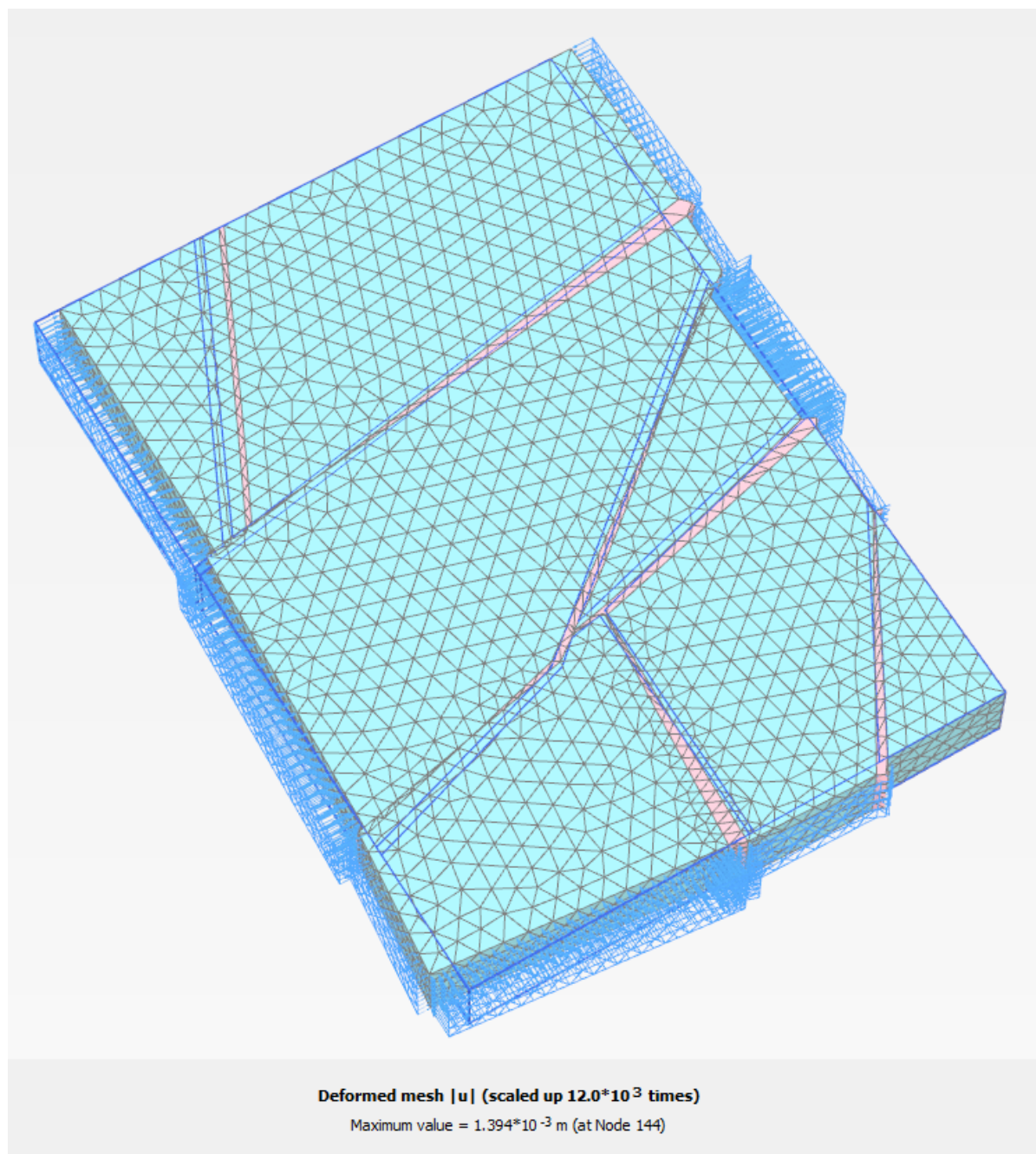
Obr. 34 ilustrativně zobrazuje změnu napjatosti způsobené výrubem ve čtvrté výpočtové fázi. Je zřejmé, že došlo k výrazným změnám oproti počátečnímu geostatickému napětí. Detailní popis napjatosti je mimo rámec tohoto úkolu – pro jeho stanovení by bylo třeba simulovat postupnou ražbu výrubu, využít relevantní materiálový model zohledňující plastické chování masivu a také využít výrazně jemnější síť metody konečných prvků v okolí výrubu.



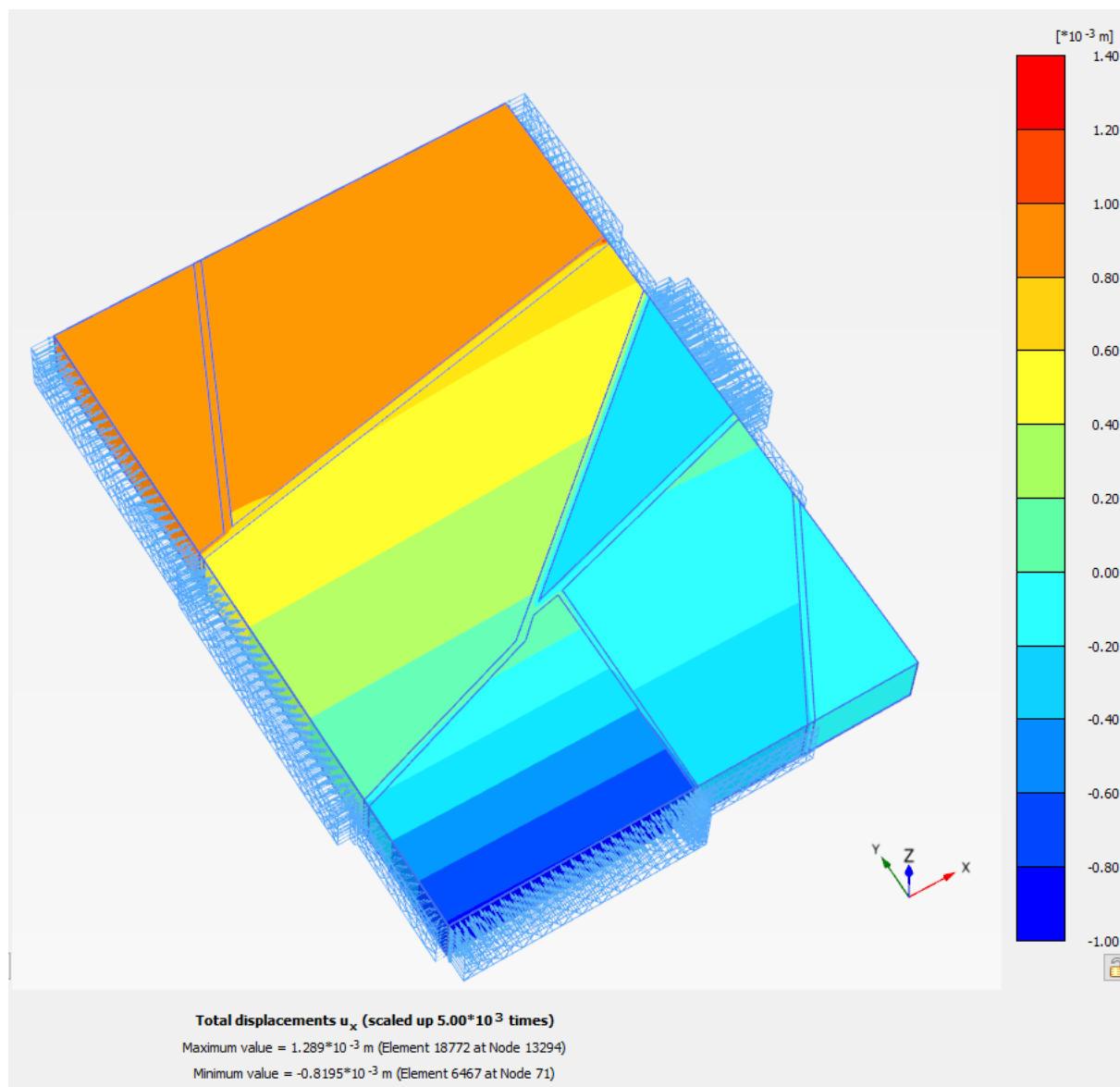
Obr. 34: Ilustrativní znázornění změny napjatosti způsobené výrubem

Relativní pohyby kvazihomogenních bloků a změna napjatosti masivu způsobená geologickými pochody jsou hlavním výstupem modelu. Výsledky jsou postupně prezentovány v až ve formě zobrazení posunů pomocí deformované sítě MKP (zde jsou deformace navýšeny 12000x pro jejich lepší interpretaci). Dále jsou pomocí konturových map zobrazeny hodnoty dvou horizontálních složek posunů a celkového posunu, který je též zobrazen pomocí vektorů. Celková napjatost je reprezentována konturovými mapami normálových složek tenzoru napětí ve dvou horizontálních směrech.

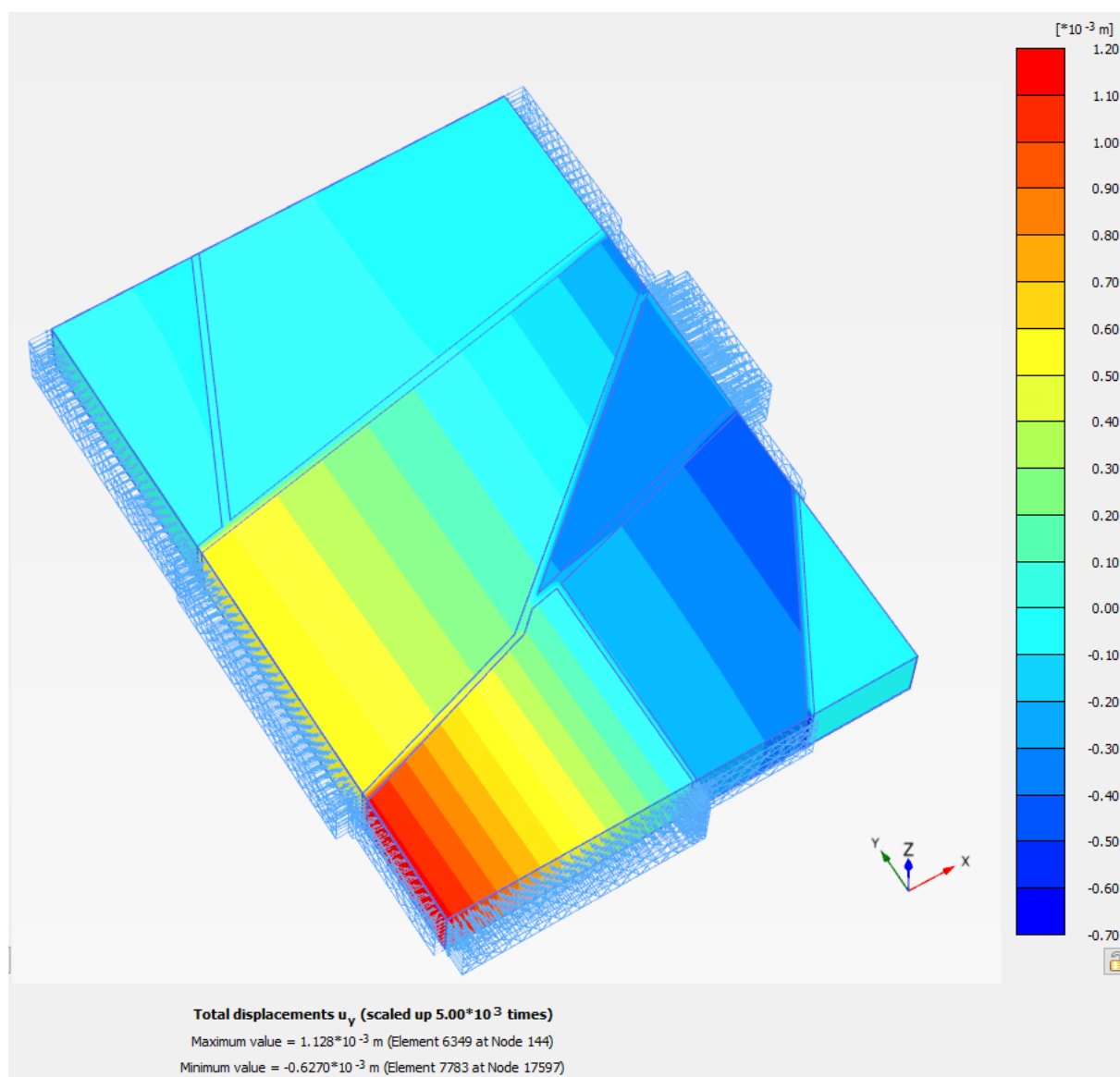




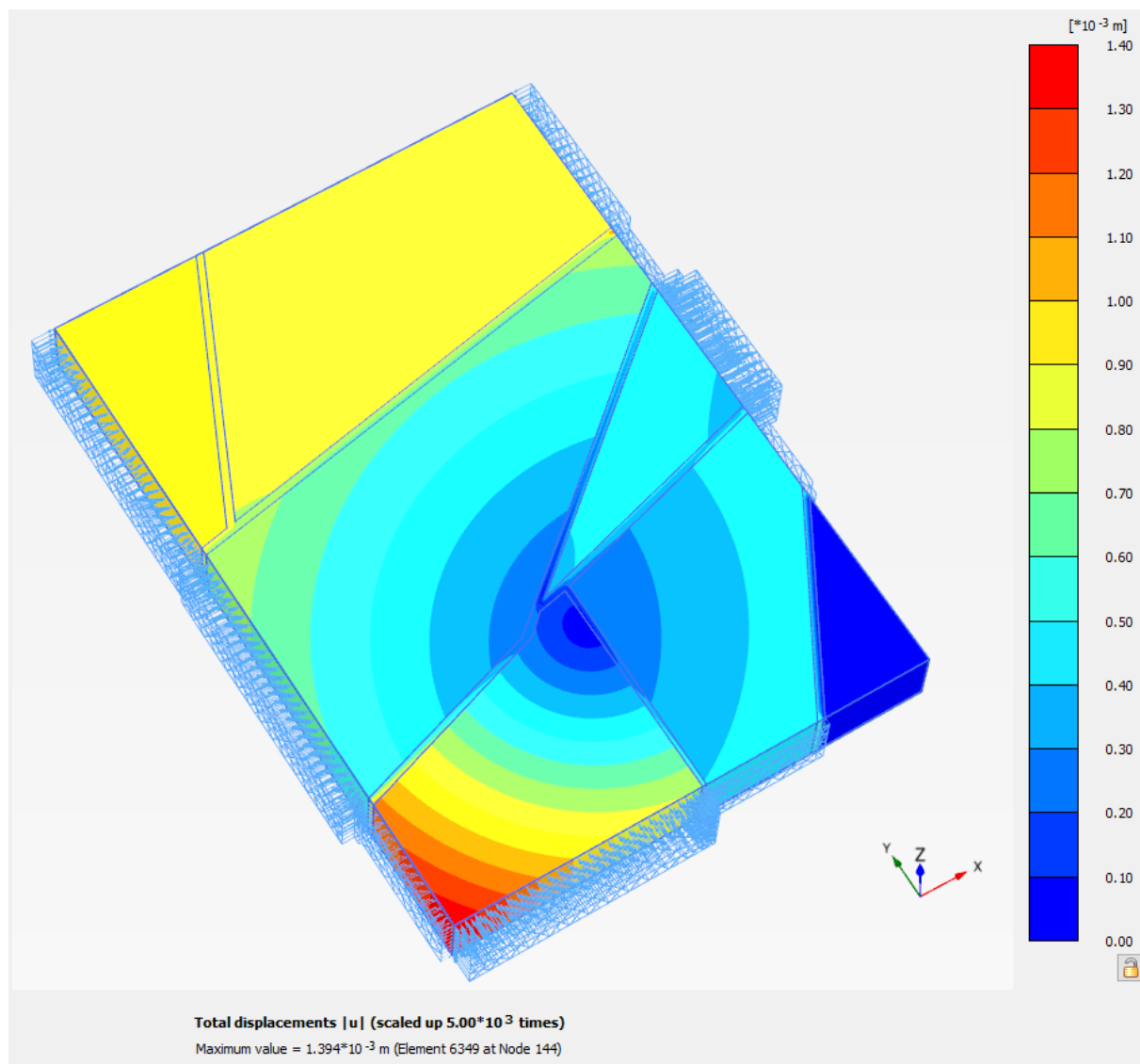
Obr. 35: Zobrazení výsledků výpočtů: deformace sítě (násobené 12000x)



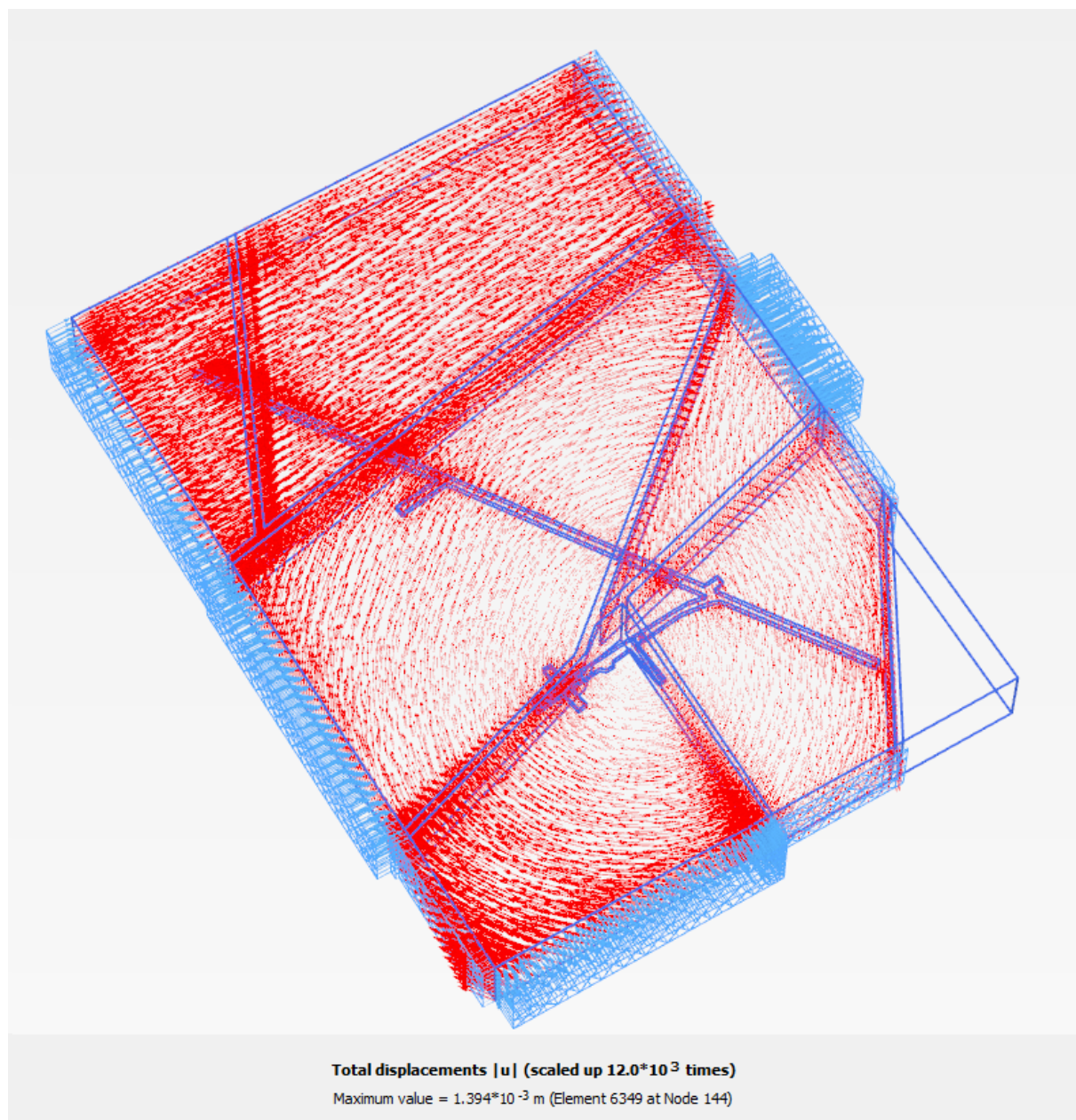
Obr. 36: Zobrazení výsledků výpočtů: horizontální složka posunu, směr  $x$



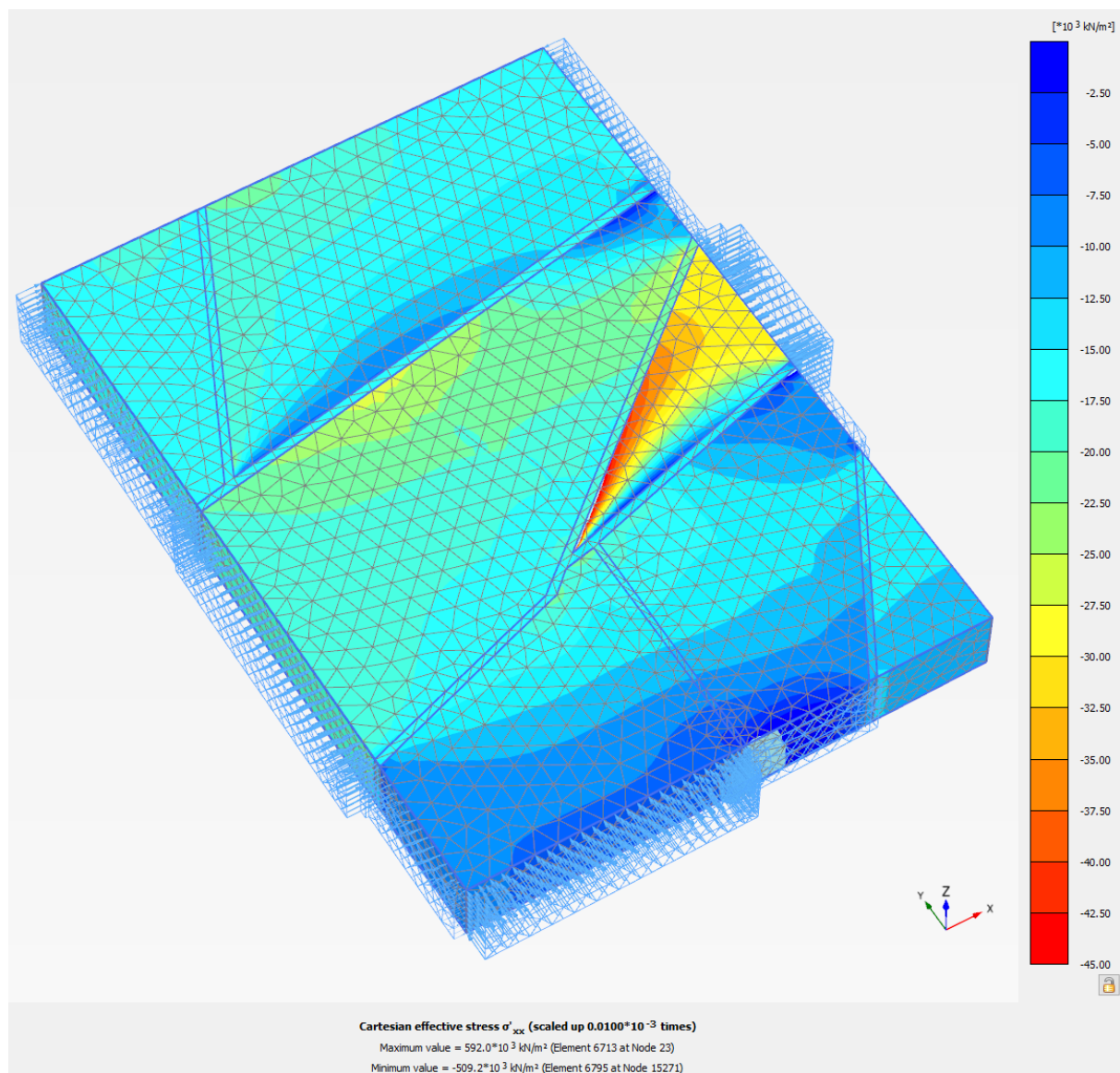
Obr. 37: Zobrazení výsledků výpočtů: horizontální složka posunu, směr y



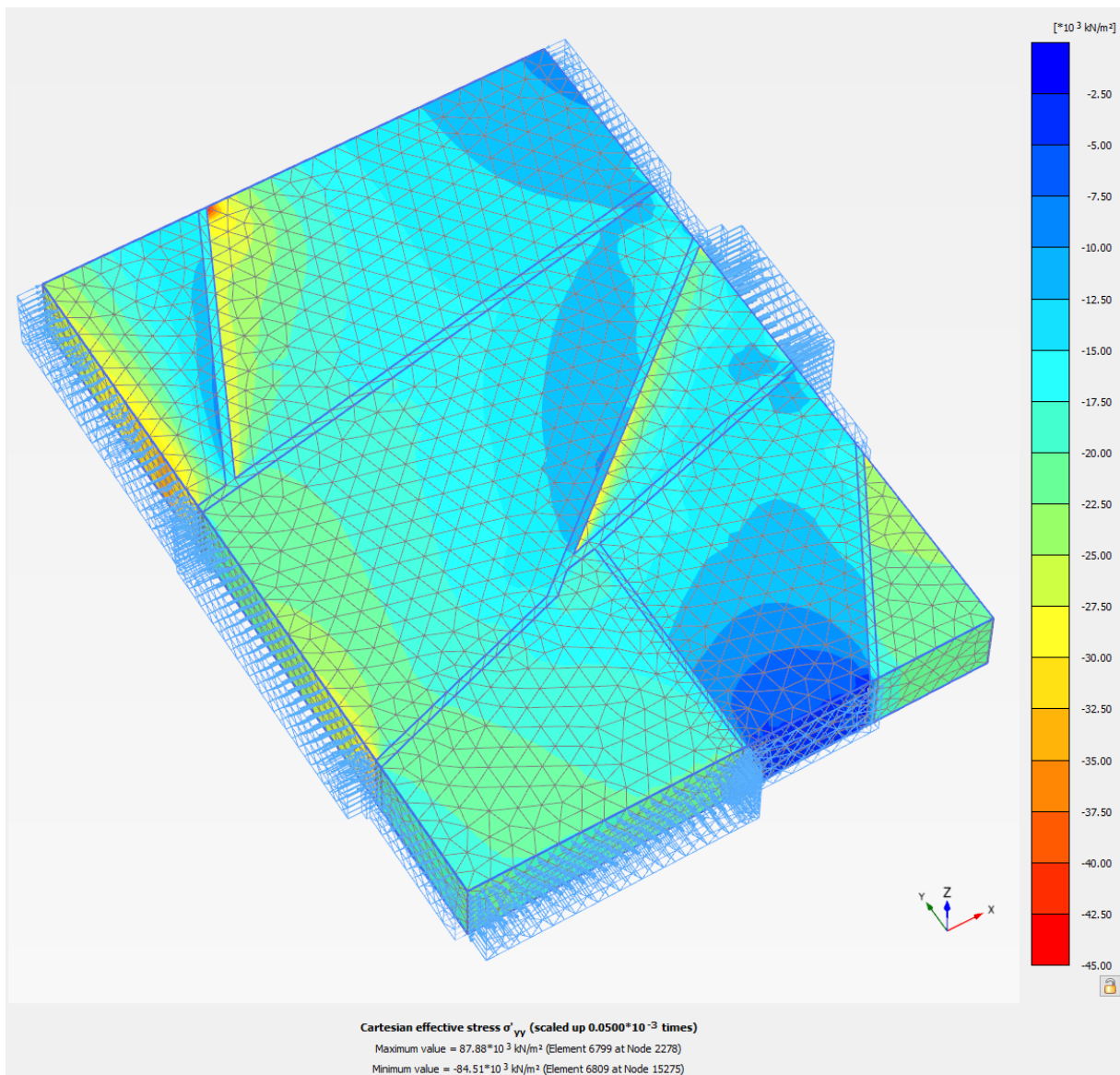
Obr. 38: Zobrazení výsledků výpočtů: celkový posun. Výsledek ukazuje zřejmou rotaci JZ horninového bloku.



Obr. 39: Zobrazení výsledků výpočtů: vektory posunu (násobené 12000x). Výsledek ukazuje zřejmou rotaci JZ horninového bloku.



Obr. 40: Hodnoty napjatosti masivu, horizontální normálová složka tenzoru napětí ve směru x.

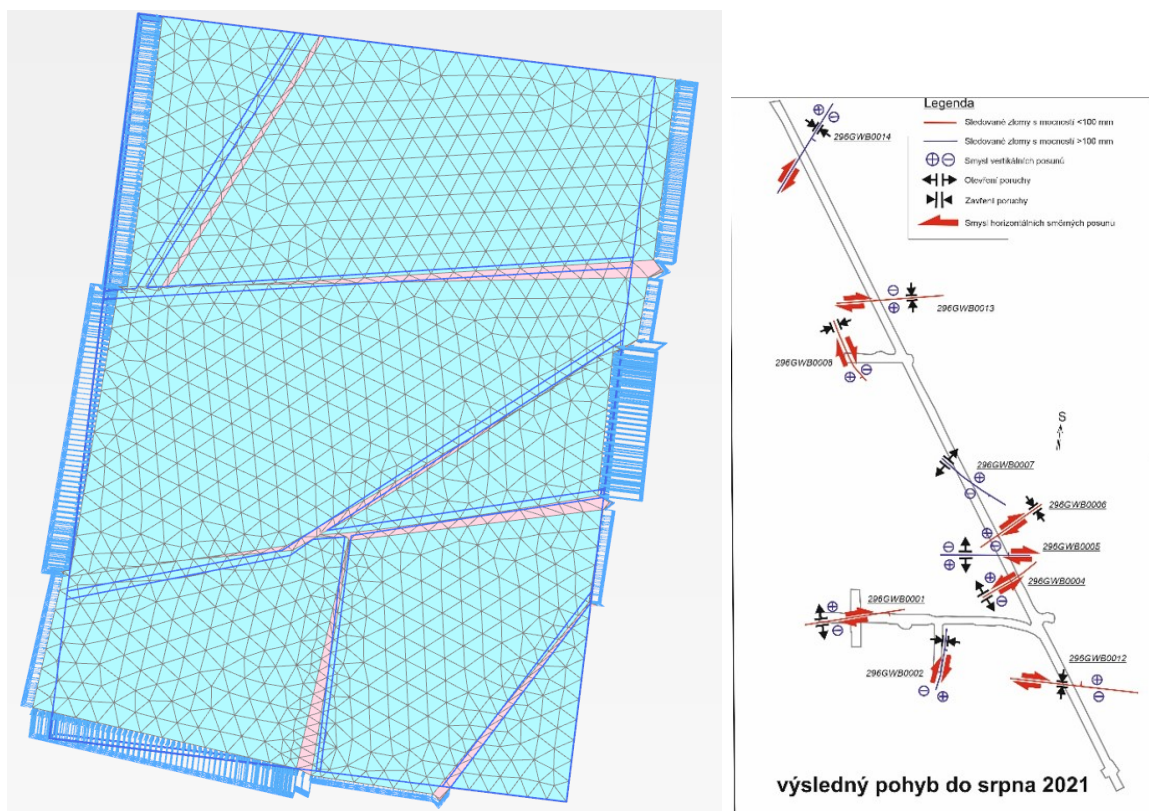


Obr. 41: Hodnoty napjatosti masivu, horizontální normálová složka tenzoru napětí ve směru y.

## 5.3.2 Srovnání výsledků s měřenými veličinami

### 5.3.2.1 Deformace na diskontinuitách

Kvalitativní srovnání měřených deformací s relativním pohybem horninových bloků je na Obr. 42. Z obrázku je patrné, že relativní pohyby na hlavních diskontinuitách jsou reprezentovány korektně.



Obr. 42: Kvalitativní srovnání měřených deformací s relativním pohybem horninových bloků.

Celková velikost deformací je pak zřejmá z Obr. 36 až Obr. 38. Relativní pohyby na blocích dosahují hodnot okolo 0,5 mm, což odpovídá horní hranici měřených posunů na nejméně se pohybujících diskontinuitách. Komplexní charakter optimalizační úlohy umožnil nalézt nastavení vedoucí ke správnému relativnímu pohybu bloků (**Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**), přesná předpověď měřených hodnot je však již mimo možnosti použité metody, která se snaží reprezentovat generelní chování masivu.

Je též třeba dodat, že měření jsou zatížena výraznou sezonní složkou (která v modelu simulována není) a časová řada měření je relativně omezená pro získání informace o dlouhodobých trendech.

### 5.3.2.2 Napjatost

Předpovídané napětí v masivu je zobrazeno na **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** a **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** Předpovídané hodnoty odpovídají zatížením na hranicích oblasti aplikovanému zpětnou analýzou pro získání správných relativních pohybů jednotlivých horninových bloků. Velikosti napětí se pohybují v rozmezí 5 až 30 MPa (v extrémech až 45 MPa v místech koncentrací napětí na hranách a stranách bloků). Výsledky jsou srovnatelné nejen řádově, ale i číselně, s měřením napětí pomocí různých metod prezentovaných ve zprávě Součka et al. (2018), viz Tabulka 4. Hodnoty vertikálního napětí se pohybují poblíž očekávané hodnoty 15 MPa a vykazují menší rozptyl hodnot. Hodnoty horizontálního pak vykazují vyšší rozptyl než hodnoty vertikálního napětí, pohybují se v rozmezí 7 MPa až 38 MPa, což dobře odpovídá předpovídaným hodnotám pomocí numerického modelu 5 až 45 MPa.



Tabulka 4: Výsledky měření napjatosti horninového masivu pomocí různých metod (převzato ze Souček et al., 2018)

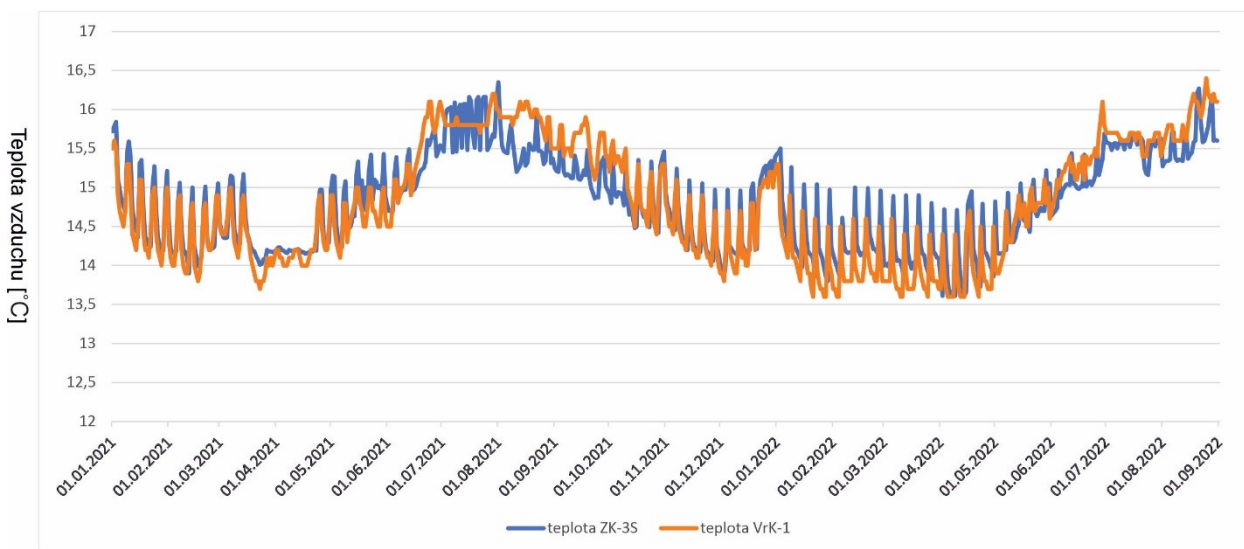
Metoda měření stavu HM	Lokalizace/ č. vrtu	Vzdálenost měření od důlního díla [m]	$S_v$ [MPa]	$S_H$ [MPa]	OH [°]	$S_h$ [MPa]
HF	GS1/ S-8	15 - 30	-16,5*	-17 – -31	358 - 23	-10 – -14
HF	GS3/ S-18	25 - 41	-16,5* (-15,3** přímé měření)	-29 – -38	28 - 45	-12 – -19
CCBO*	GS1/ S-5	14,5 (půdorysná vzdálenost 7,5)	-5,7	-8,1	77	-5,9
CCBO	GS2/S-9	7,4	-7,0	-15,4	16	-2,9
CCBO	GS2/S-11	22,6	-10,6	-10,1	16	-7,2
CCBO	GS2/S-12	6,7	-13,9	-11,2	26	-5,3
CCBO	GS2/S-13	11,6	-14,8	-14,6	144	-5,1
CCBO	GS2/S-21	20	-7,9	-7,0	146	-4,9
INVGEM	KS2	--	-16,5*	-19,8	30 -87***	-11,5
INVGEM	KS3 a KS4	--	-16,5*	-38,0	41	-4,6

## 6 Závěry

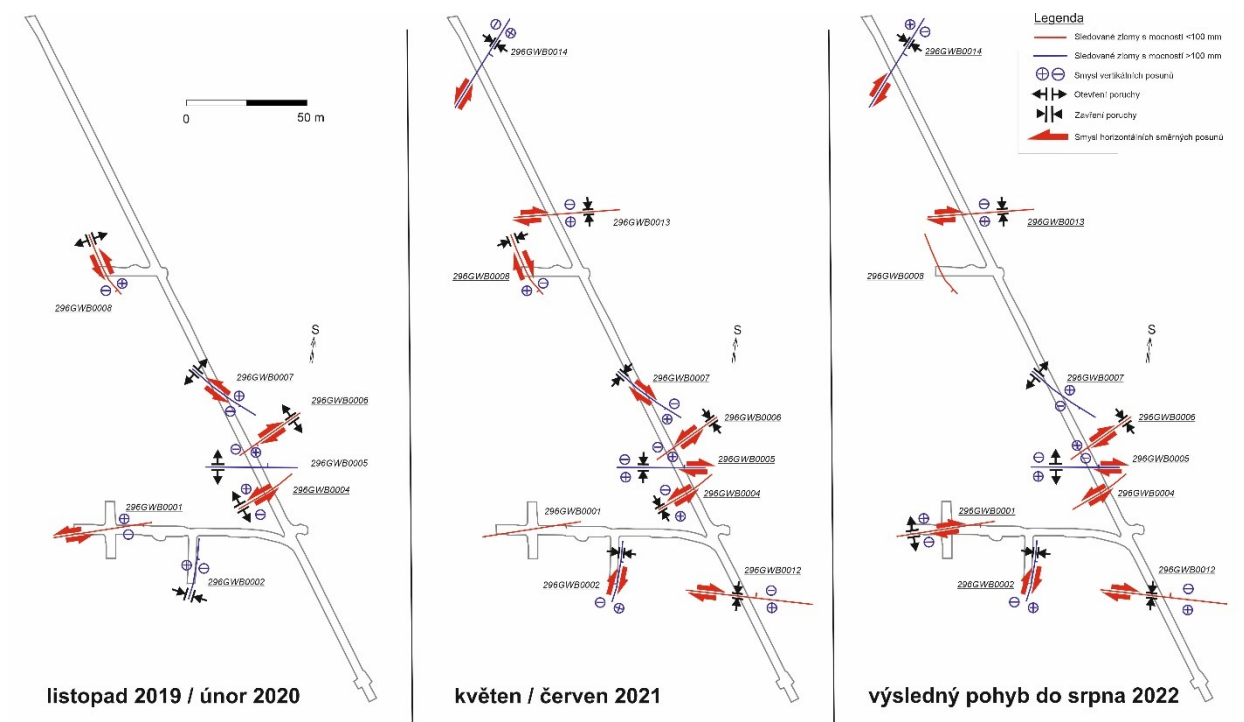
### 6.1 Měření v PVP Bukov a dole Rožná

Měření pohybů na křehkých strukturách, probíhající v PVP Bukov od konce roku 2019 do srpna 2022, může na některých místech díla již prokázat pohybové trendy. Jedná se o trendy v setinách až desetinách mm/rok. Na bodu 296GWB0001 jsme vysledovali trend v subvertikálních posunech 0,1026 mm/rok a pravostranný horizontální posun 0,026; pravostranný směrný posun na bodu 296GWB0002 s trendem 0,091 mm/rok a uzavíráním poruchy 0,06 mm/rok; směrný posun na bodu 296GWB0004 s trendem 0,112 mm/rok; dilataci na bodu 296GWB0004 s trendem 0,17 mm/rok; směrný posun na bodu 296GWB0006 s trendem 0,03 mm/rok a trend uzavírání poruchy s hodnotou 0,04 mm/rok; subvertikální posun na bodu 296GWB0007 s trendem 0,09 mm/rok a uzavírání poruchy s 0,07 mm/rok. Pro celé dílo PVP Bukov tedy z dosavadních měření plynou trendy v posunech do hodnoty 0,1 mm/rok.

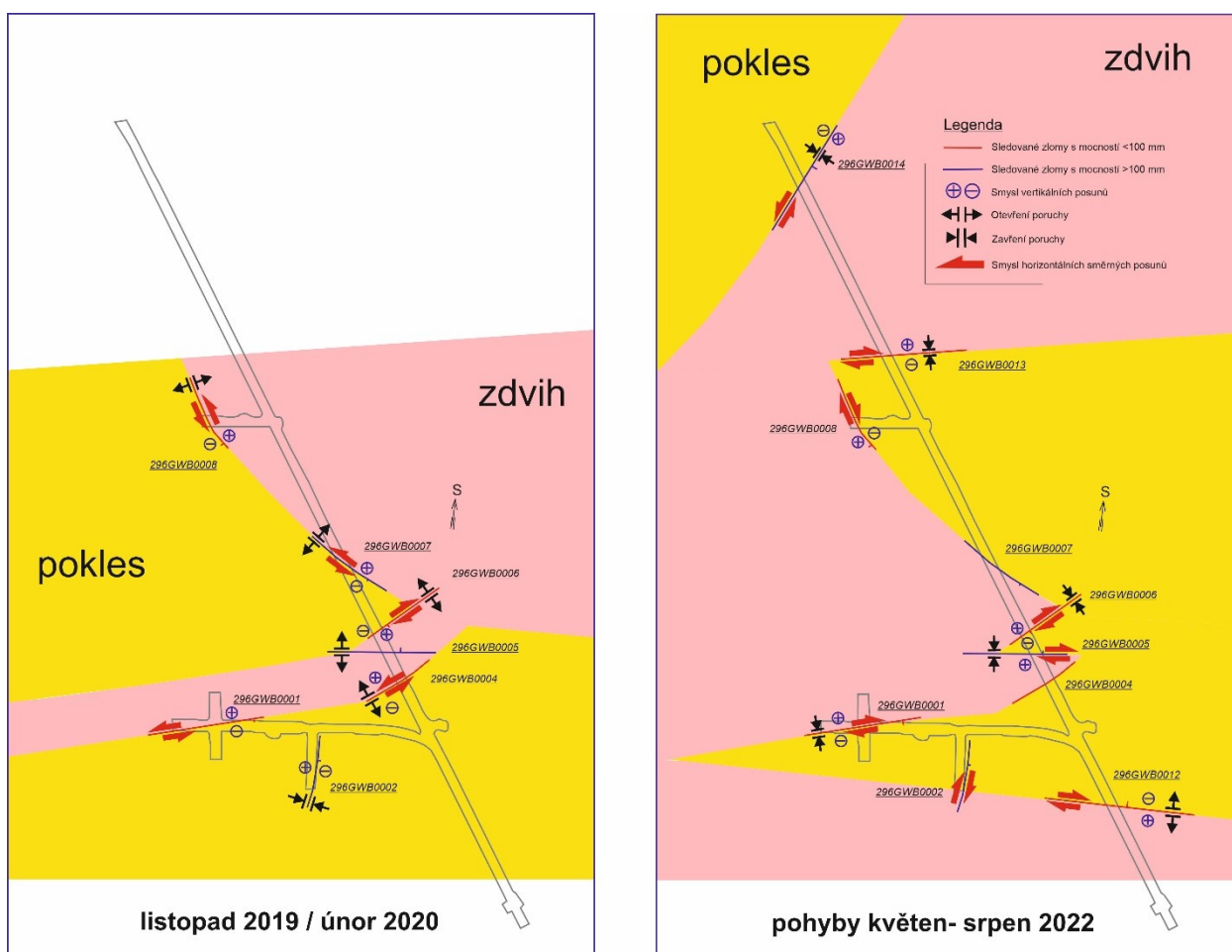
Na třech nových místech 296GWB0012, 296GWB001 a 296GWB0014 není, vzhledem ke krátkému trvání měření od začátku roku 2021, možné tyto trendy definovat. Na vícero místech jsou ale na pohyby naložené sezónní složky způsobené s největší pravděpodobností teplotní dilatací masivu díky výměně vzduchu ventilací. Amplituda této půlroční / sezónní složky je na bodu 296GWB0004 0,04 mm pro subvertikální posun a 0,04 mm pro dilataci struktury; na bodu 296GWB0005 0,03 mm pro dilataci struktury; na bodu 296GWB0006 0,01 mm pro dilataci poruchy a 0,018 mm pro směrný posun; pro dilataci na bodu 296GWB0007 0,05 mm/rok; na bodu 296GWB0014 0,05 mm pro dilataci. Na těchto uvedených bodech je sezónní složka nejvýraznější. Jedná se tedy o hodnoty do 0,05 mm a z dosavadních hodnot se jeví, že nejvyšší amplitudy dosahuje u zón se šířkou  $> 1$  m. Mezi tyto patří sledované zlomy na bodech 296GWB0007 a 296GWB0014. Další měření prokáže tuto hypotézu. Otázkou také zůstává, proč jsou posuny postiženy výrazně jenom v chodbě BZ-XIIJ. Průběh teplot vzduchu, který by měl ovlivňovat teplotní dilataci horninového masivu, je v chodbě ZK-3S a chodbě BZ-XIIJ stejný (Obr. 43). Na místech, které se nacházejí mimo chodbu BZ-XIIJ nepozorujeme pohyby s naloženou sezónní amplitudou, ale byly pozorovány v nižších patrech dolu Rožná na bodech 296GWB0009, 296GWB0010, 296GWB0011. Pro krátkost měření jsme nebyli schopni definovat velikost amplitudy sezónní složky (Stemberk et al., 2020). Tyto body byly, vzhledem k plánovanému zatápění spodních pater, po tři čtvrtě roku monitoringu demontovány. Trendové pohyby bývají na PVP Bukov přerušené, nebo akcelerované pulzními posuny, které se vyskytují v obdobích se zvýšenou tektonickou aktivitou. Takové období jsme pozorovali např. v termínu květen/červen 2021, v průběhu, kterého byl vysledován kompresní režim na sledovaných křehkých strukturách, doprovázen zavíráním poruch a zvedáním obecně jižních (ve smyslu polohy vůči sledovaným strukturám), jihozápadních a jihovýchodních bloků (Obr. 44). Po tomto aktivním období sledujeme období bez pohybů, které obecně začalo dne 26.6.2021. Tento začátek byl vysledován na bodech 296GWB0004, 296GWB0005, 296GWB0008, 296GWB0013, 296GWB0014. Na některých místech byl začátek pozorován i dříve. Výše uvedené kompresní období bylo v kontrastu k extenznímu režimu (Obr. 44), který jsme vysledovali v období listopad 2019 / únor 2020 (viz TZ 526/2020). Změny napětí a režimů dokládá např. i Obr. 45, ze kterého jsou zřetelné i změny ve smyslu pohybů horninových bloků.



Obr. 43 Průběh teplot v chodbách BZ-XIIJ (bod VrK-1) a ZK-3S.



Obr. 44 Schématické znázornění smyslu pohybů na monitorovaných zlomech v PVP Bukov ve dvou významných obdobích, kdy byl pro první charakteristický extenzní režim a pro druhé období režim kompresní. Třetí obrázek znázorňuje výsledný pohyb na zlomech za sledované období (nejedná se ale o dlouhodobé trendy, pro definici, kterých je trvání monitoringu krátké).



Obr. 45 Porovnání režimu vertikálních pohybů pro dvě významná období.

## 6.2 Srovnání výsledků monitoringu s jinými lokalitami

Pro srovnání dosavadních výsledků z PVP Bukov s výsledky z jiných lokalit jsme použili lokality, v nichž probíhá nejdéle provozovaný systematický monitoring posunů na strukturách (15 – 40 let). Tyto lokality jsou rozmístěny v zahraničí v seismoaktivních oblastech jako jsou Krupnik v Bulharsku, Idria ve Slovinsku či Hornorýnský příkop v Německu, tzn. že naměřené hodnoty posunů charakterizují pohyby jednotlivých zlomových struktur v tektonicky aktivních oblastech. Velikosti doposud zjištěných trendů posunu v PVP Bukov při srovnání s dosavadními výsledky z těchto lokalit představují malou hodnotu. Z oblasti Krupniku v jihozápadním Bulharsku byla např. publikována hodnota směrného pohybu 2,7 mm/rok (Avramova-Tacheva et al., 2007); průměrná hodnota pro směrný posun podél zlomu Idria fault ve Slovinsku byla 0,24 mm/rok, krátkodobě až 0,54 mm/rok (Gosar et al., 2011); z oblasti Rýnského příkopu v Německu levostranný směrný posun podél poruchy s hodnotou 0,94 mm/rok (Hoppe et al., 2015).

Dále jsme dosavadní výsledky z PVP Bukov srovnali s výsledky z lokalit, které nejsou situovány v seismoaktivních oblastech a zároveň je v nich dlouhodobý monitoring provozován v podzemních štolách a v podobném rozsahu jako v PVP Bukov, tzn. v lokalitě jsou osazeny vybrané struktury různých směrů. Ve štolě Josef ve středních Čechách, ražené v granitoidch Středočeského plutonu, dosahují hodnoty trendu posunu po strukturách v obdobích pohybové

aktivity kolem setiny mm/rok. Ve štolě v Bedřichově v Jizerských horách ražené v granitoidech Krkonošsko-Jizerského plutonu dosahují hodnoty trendu v obdobích pohybové aktivity hodnot 0,02 – 0,05 mm/rok. Podobné hodnoty posunů v setinách mm/rok jsou registrovány v obdobích pohybové aktivity i v podzemní laboratoři Grimsel ve Švýcarsku. Štola je vyražena v granitoidech Aarského masívu. Je ovšem třeba zdůraznit, že doba, po kterou probíhal monitoring v PVP Bukov je nesrovnatelně kratší než v uvedených lokalitách, kde, vyjma štoly Josef, monitoring probíhá 10 let v Grimselu a 20 let v Bedřichově. A proto i vzhledem k detekci relativně dlouhých období, kdy nedochází na zlomových strukturách k žádným posunům, nebo se zpomaluje jejich rychlost anebo se smysl posunu obrátí, je třeba rychlosti doposud identifikovaných trendů v PVP Bukov brát s rezervou jako orientační hodnotu.

### 6.3 Závěry modelování

V rámci projektu byl sestaven „quasi-2D“ model PVP Bukov, který byl proveden jako 3D horizontální řez v okolí PVP Bukov v úrovni mezi cca -563.5 m a -546.5 m. Pro simulace byl využit software Plaxis 3D VIP.

Tektonické zóny byly včleněny do modelu jako zóny oslabení. Aplikací horizontálních tlaků na jednotlivé bloky pak byla snaha o zpětnou analýzu naměřených pohybů.

Výsledkem je informace o napjatostních a tlakových poměrech v oblasti a interpretace porušení oblasti tektonickými liniemi. Model rámcově předpovídá naměřené směrné posuny, kde předpovědi kvalitativně velmi dobře odpovídají měření a kvantitativně odpovídají řádově. Zde je třeba dodat, že měření jsou zatížena výraznou sezonní složkou (která v modelu simulována není) a časová řada měření je relativně omezená pro získání informace o dlouhodobých trendech.

Model dále jako jeden z hlavních výstupů ukazuje na výrazné horninové horizontální tlaky v oblasti. Pro vyvození měřených posunů bylo třeba variantní zatížení horizontálními tlaky v rozmezí 5 až 30 MPa (při uvažované geostatické hodnotě 15 MPa). Tyto hodnoty velmi dobře odpovídají měření napjatosti různými metodami prezentovanými ve zprávě z geotechnického průzkumu oblasti (Souček et al., 2018). Hodnoty vertikálního napětí se dle průzkumu pohybují poblíž očekávané hodnoty 15 MPa a vykazují menší rozptyl hodnot. Hodnoty horizontálního napětí pak vykazují vyšší rozptyl než hodnoty vertikálního napětí, pohybují se v rozmezí 7 MPa až 38 MPa, což dobře odpovídá předpovídaným hodnotám pomocí numerického modelu 5 až 45 MPa.

### 6.4 Doporučení dalšího postupu

Vzhledem k dosavadním výsledkům získaným v PVP Bukov navrhujeme pokračování pravidelného monitoringu prostorovými extenzometry TM71 instalovanými v prostoru PVP Bukov I. Dále pro porovnání s dynamikou posunů v masívu podstatně méně porušeného diskontinuitami instalovat cca 4 extenzometry TM71 v nové části laboratoře Bukov II. Prodloužení doby monitoringu povede k lepšímu pochopení mechanismu a dynamiky posunů registrovaných na jednotlivých strukturách osazených dilatometry. Zároveň budou průběžně zpřesňovány stress/strain stavy, a to jak bodově, v rámci jednotlivých struktur, tak i plošně, a to v obou částech PVP Bukov. Zároveň bude možné provádět lepší korelace s ostatními fyzikálními daty získávaných jednak monitoringem provozovaným v PVP Bukov ale i korelace s výsledky paralelního monitoringu aktivity křehkých struktur provozovaného ÚSMH v podzemní laboratoři Grimsel (GTS) ve Švýcarsku (aktuálně v provozu 10 přístrojů TM71) či obdobných podzemních

prostorách v Českém masívu jako jsou štola v Bedřichově či štola Josef. Delší řada dat poskytne podklady i pro postupné zpřesňování matematického stress/strain modelu, jehož základem bude matematický model zpracovaný jako výstup 1. etapy monitoringu 2018 – 2022. Jeho řešení bylo ovlivněno dvěma základními nedostatky, jednak že časová řada měření posunů je výrazně zatížena sezónní složkou a není dostatečně dlouhá na to, aby se daly jednoznačně identifikovat dlouhodobé trendy, které jsou cílem modelu, a také že model byl sestaven v tzv. „kvazi 2D“ módu, který neumožňuje interpretaci vertikální složky pohybů. V případě pokračování projektu se doporučuje sestavení plně 3D modelu.

## Reference

- AVRAMOVA-TACHEVA E., DOBREV N. (2007): ON THE APPLICATION OF 3D MONITORING METHODS OF ACTIVE FAULT AND GRAVITATIONAL MOVEMENTS. *GEOLOGICA BALCANICA* 36, 3-4, 13-20.
- BÁRTA J., SLAVÍK L., VILHELM J., BELOV T., JIRKŮ J. (2020): PRŮBĚŽNÁ ZPRÁVA O POZNATCÍCH Z GEOFYZIKÁLNÍCH MĚŘENÍ NA PVP BUKOV – ETAPA 2. – MS SÚRAO, TZ 527/2020, PRAHA.
- BRIESTENSKÝ M., ROWBERRY M. D., STEMBERK J., STEFANOV P., VOZÁR J., ŠEBELA S., PETRO Ľ., BELLA P., GAAL L., ORMUKOV CH. (2015): Evidence of a plate-wide tectonic pressure pulse provided by extensometric monitoring in the Balkan Mountains (Bulgaria). *Geologica Carpathica* 66, 5, 427-438.
- BRIESTENSKÝ M., HOCHMUTH Z., LITVA J., HÓK J., DOBROVIČ R., STEMBERK J., PETRO Ľ., BELLA P. (2018): Present-day stress orientation and tectonic pulses registered in the caves of the Slovensky kras Mts. (south-eastern Slovakia). *Acta Geodynamica et Geomaterialia* 15, 2, 93-103.
- BUKOVSKÁ, Z., VERNER, K. a kol. (2017). Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov, Technická zpráva 191/2017.
- EVANS J.D. (1996): *Straightforward Statistics for the Behavioral Sciences*. Brooks/Cole Publishing, Pacific Grove, pp. 600.
- GOSAR A., ŠEBELA S., KOŠŤÁK B., STEMBERK J. (2009): Surface versus underground measurements of active tectonic displacements detected with TM-71 extensometers in western Slovenia. *Acta Carsol.* 38, 213–226.
- GOSAR A., ŠEBELA S., KOŠŤÁK B., STEMBERK J. (2011): On the state of the TM 71 extensometer monitoring in Slovenia: Seven years of micro-tectonic displacement measurements. *Acta Geodyn. Geomat.* 8, 4, 389–402.
- HOPPE A., KOŠŤÁK B., KUHN G., LEHNÉ R., SIMONS U., STEMBERK J. (2015): Rezente Bewegungen an den Haupttrandverwerfungen im Nördlichen Oberrheingraben. *Jber. Mitt. oberrhein. geol. Ver.* 97, 321-332, Stuttgart.
- HORÁK V. (2006): Puklinatost horninového prostředí. Brno, pp 16.
- KLIMEŠ J., ROWBERRY M. D., BLAHŮT J., BRIESTENSKÝ M., HARTVICH F., KOŠŤÁK B., RYBÁŘ J., STEMBERK J., ŠTĚPANČIKOVÁ P. (2012): The monitoring of slow-moving landslides and assessment of stabilisation measures using an optical-mechanical crack gauge. *Landslides* 9, 3, 407-415.

- KONTNY B., CACOŇ S., KOŠŤÁK B., STEMBERK J. (2005): Methodic analysis of data obtained by monitoring micro-tectonic movements with TM-71 crack gauges in the Polish Sudeten. *Acta Geodyn. Geomater.* 2, 3, 57-67.
- KOŠŤÁK B. (1969): A new device for in-situ movement detection and measurement. *Experimental Mechanics* 9, 374–379.
- KOŠŤÁK B. (2006): Deformation effects in rock massifs and their long-term monitoring. *Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol.*, 39, 3, 249–258.
- KOŠŤÁK B., MRLINA J., STEMBERK J., CHÁN B. (2011): Tectonic movements monitored in the Bohemian Massif. *J. Geodyn.* 52, 34-44.
- KOŠŤÁK B., POPP K. (1966): Moiré strain gauges. *Strain*, 2, 5–16.
- MARTÍ X., ROWBERRY M. D., BLAHŮT J. (2013): A MATLABs code for counting the moiré interference fringes recorded by the optical-mechanical crack gauge TM-71. *Computers & Geosciences* 52, 164–167.
- OSTER G., NISHIJIMA Y. (1963): Moiré patterns. *Scientific American* 208, 54–63.
- STEMBERK J., BRIESTENSKÝ M., CACOŇ S. (2015): The recognition of transient compressional fault slow-slip along the northern shore of Hornsund Fjord, SW Spitsbergen, Svalbard. *Polish Polar Research* 36, 89-103.
- STEMBERK J., BRIESTENSKÝ M., HARTVICH F., FUČÍK Z. (2020): Monitoring aktivity křehkých struktur PVP Bukov a dolu Rožná – průběžný monitoring a vyhodnocení 2. – MS SÚRAO, TZ 526/2020.
- STEMBERK, J., BRIESTENSKÝ, M., HARTVICH F., FUČÍK Z. (2021). Monitoring aktivity křehkých struktur PVP Bukov a dolu Rožná – průběžný monitoring a vyhodnocení 3, *Technická zpráva* 571/2021.
- STEMBERK, J., KOŠŤÁK, B., CACOŇ S. (2010): A tectonic pressure pulse and increased geodynamic activity recorded from the long-term monitoring of faults in Europe. *Tectonophysics* 487, 1–12.
- SOUČEK, K., VAVRO, M., STAŠ, L., KALÁB, Z., KONÍČEK, P. a kol. (2018). Komplexní geologická charakterizace prostorů PVP Bukov – část ii geotechnická charakterizace, závěrečná zpráva, *Technická zpráva číslo* 221/2018.
- ŠEBELA S., TURK J., MULEC J., KOŠŤÁK B., STEMBERK J. (2009): Statistical evaluation of the 3D monitoring of displacements of Dinaric Fault zone in Postojna Cave, Slovenia. *Acta Geodyn. Geomater.* 6, 2, 163-176.
- VYLAHOVÁ P., KOČMAN T., MUSIL R., PRŮCHA P. (2020): Hydrogeologický a hydrochemický monitoring podzemních a důlních vod v prostoru PVP Bukov, etapová zpráva za rok 2020. - MS SÚRAO, TZ 545/2021, Praha.
- ZUNA M., HAVLOVÁ V., JANKOVSKÝ F., ŠVAGERA O., SOSNA K., GVOŽDÍK L., HOLEČEK J., ŘIHOŠEK J., HOFMANOVÁ E., KOČAN K., KRYL J., ZELINKOVÁ T., KOŘALKA S. (2021): VÝZKUM PUKLINOVÉ KONEKTIVITY V PVP BUKOV - PRŮBĚŽNÁ ZPRÁVA Č. 3. TZ 551/2021, SÚRAO, PRAHA.







**SÚRAO**

SPRÁVA ÚLOŽIŠŤ  
RADIOAKTIVNÍCH  
ODPADŮ

NAŠE  
BEZPEČNÁ  
BUDOUCNOST

[www.surao.cz](http://www.surao.cz)