

# Měření napjatosti zemních těles pomocí metody EIS

Jiří Pavlík<sup>1</sup>, Martina Bulgurovská<sup>1</sup>

<sup>1</sup>GEOTest, a.s., Brno – [pavlik@geotest.cz](mailto:pavlik@geotest.cz), [bulgurovsk@geotest.cz](mailto:bulgurovsk@geotest.cz)

## Abstrakt

Průspěvek informuje o metodě měření pomocí elektrické impedanční spektrometrie (EIS), jež byla vyvinutá v Laboratoři vodohospodářského výzkumu VUT Brno. Využití měření elektrické impedance má mnohostranné využití, zejména v hydrogeologii a geotechnice. Při řešení různých geotechnických úloh se ukázalo, že tuto metodu lze využít i pro řešení napjatosti zemních těles, zejména v prostředí svahových nestabilit – sesuvů. Pro řešení této úlohy byla v roce 2016 vyvinuta metodika měření a metoda byla v praxi využita na dvou lokalitách, a to ve dně pískovny v Brně-Černovicích a na sesuvu na levém břehu luhačovické přehradní nádrže. Průspěvek uvádí popis uskutečněných měření a jeho výsledky.

**Klíčová slova:** napjatost zemních těles, sesuvy, elektrická impedanční spektrometrie, monitoring

## 1 ÚVOD

Měření napjatosti zemních i skalních těles představuje jednu z nejobtížnějších úloh v geotechnice. Pro řešení této geotechnické úlohy existuje několik metod, jejichž užití má však určitá omezení – zejména vyžadují přípravné práce většího rozsahu. V prostředí tvořeném zeminami se používají především metody odlehčovací. Jako nejdokonalejší se ukázala konvergenční metoda aplikovatelná však pouze v případě podzemních výrubů (byla využita např. při geotechnickém průzkumu pro tunel Dobrovského v Brně raženého v neogenních jílech). Další metodou, použitelnou v prostředí zemin, je metoda odlehčování kruhovým otvorem vyvinutá původně prof. Menclem a zdokonalená ing. Fussgängerem. Tato metoda, určená především pro stanovení napjatosti v sesuvných územích, však vyžaduje vyhloubení kopané sondy půdorysných rozměrů cca 2 m × 2 m do hloubky dané povrchem zeminy, v níž je napjatost zjišťována.

Metoda EIS byla vyvinuta v rámci výzkumných úkolů EUREKA E!3838, E!4981 a E!7614. Principem metody EIS je měření elektrické impedance zkoušeného prostředí při zavedení vysokofrekvenčního proudu za současného měření obou složek impedance – reálné složky, tj. ohmického odporu a složky imaginární – zejména kapacitního odporu.

Pro měření těchto veličin byl vyvinut přístroj Z-meter, který v průběhu řešení zmíněných výzkumných úkolů prošel několika inovacemi. V současné době se nejvíce používá Z-meter III a nověji zdokonalený Z-meter IV. Způsob měření impedance Z-metrem při různých frekvencích (při tzv. frekvenční analýze) je patrný z obr. 1.

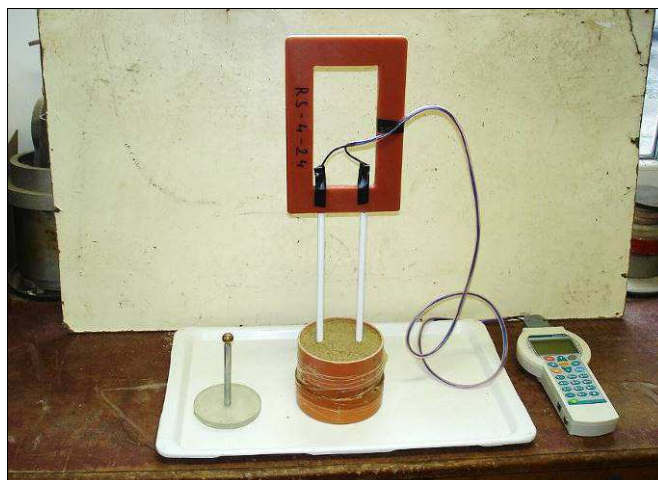
Při zjišťování závislosti elektrické impedance písků z pískovny Hrušovany u Brna a Bzenec-Přívoz frekvenční analýzou se ukázala výrazná shoda křivek závislosti frekvencí na vlhkosti při zhuštění statickým tlakem. Na obr. 2 a 3 jsou ukázány křivky závislosti frekvence písku s přirozenou vlhkostí 7% zhuštěného statickým tlakem 50 kPa odpovídajícímu geostatickému napětí v hloubce odběru cca 3 m na lokalitě Hrušovany u Brna.

Na základě výsledků těchto měření byla vypracována metodika stanovení napjatosti zemního prostředí využívající metodu EIS.

## 2 METODIKA MĚŘENÍ NAPJATOSTI METODOU EIS

Metoda využívající EIS vychází z hodnot frekvenční analýzy měřených Z-metrem in situ a následně v laboratoři na vzorku odebraném při měření in situ a zatěžovaném různými tlaky. Jedná se tedy o metodu komparační využívající měření jiné fyzikální veličiny závislé na hledané napjatosti. K tomu účelu se použije dvojice elektrod uspořádaných ve tvaru vidličky, které se zavedou do povrchu zkoušené zeminy.

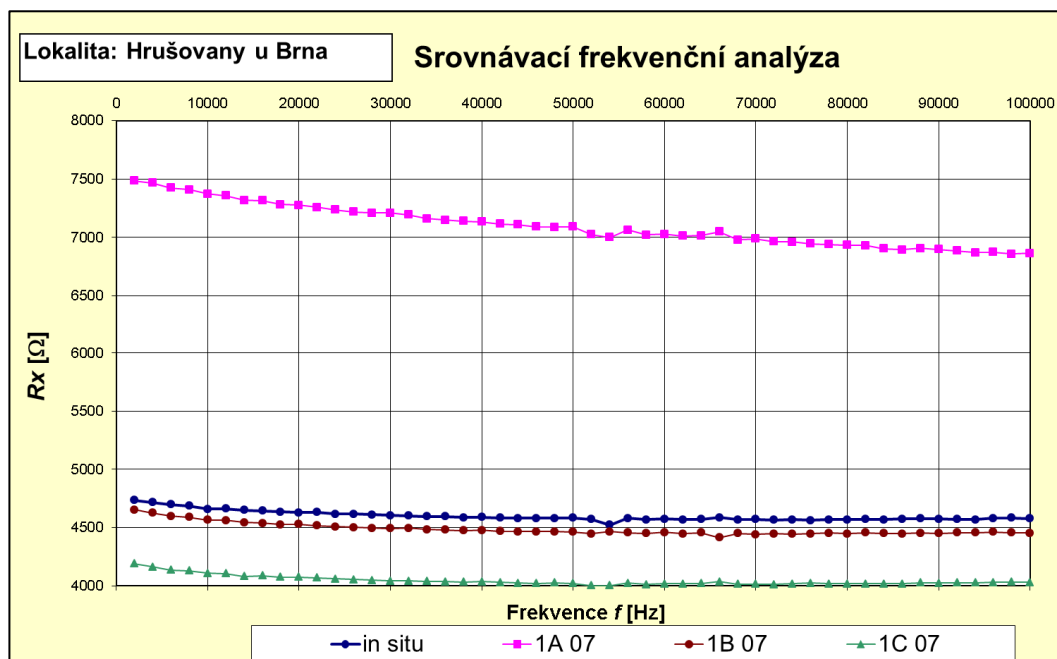
**Obr. 1** Měření frekvenční analýzy dvojicí elektrod uspořádaných do tvaru vidličky napojených na Z-meter III po nasypání písku do zkušební válce a zhutnění statickým tlakem



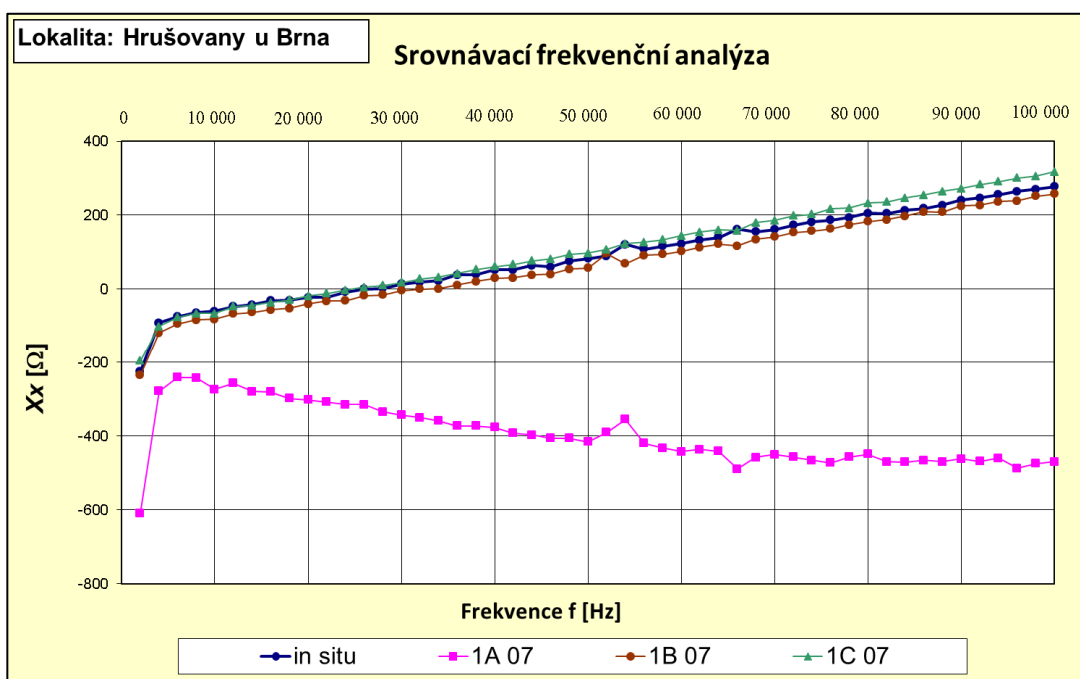
Pro řešení uvedené úlohy byla nejdříve vypracována metodika, která byla zatím s určitým omezením aplikována na dvou lokalitách – v písčovině v Brně-Černovicích, kde byly odkryty terciární písky, a na břehu přehrady v Luhačovicích v sesuvném území tvořeném soudržnými hlínami. Pro stanovení napjatosti byl navržen následující postup:

1. Výběr vhodných lokalit
2. Terénní šetření na lokalitách
  - a) tvořených soudržnými zeminami (nejlépe na staveništích s čerstvě odkrytou základovou spárou). Vyberou se vhodná místa (minimálně 2 pro každý typ zeminy), v každém místě se uskuteční frekvenční analýza a odeberou se vzorky zemin – neporušený, technologický a vzorek porušený pro stanovení vlhkosti. V případě příznivých prostorových a časových podmínek se realizuje Mencl-Fussgängerova zkouška měření napjatosti.
  - b) tvořených nesoudržnými jemnozrnnými (písčitými) zeminami, převážně v písčovinách. Na vybraných místech se uskuteční frekvenční analýza, odebere se 1 technologický vzorek (20 kg) a 1 porušený vzorek pro stanovení vlhkosti. V případě příznivých prostorových a časových podmínek se realizuje Mencl-Fussgängerova zkouška měření napjatosti.
3. Laboratorní práce:
  - a) Nejprve se stanoví přirozená vlhkost na porušených vzorcích a na technologických vzorcích křivky zrnitosti. Dále je třeba stanovit Poissonovo číslo zkoušeného materiálu.
  - b) Na vzorcích soudržných zemin se uskuteční frekvenční analýza při přirozené vlhkosti nejprve na nezátěženém vzorku, dále na vzorcích postupně zatěžovaných po 50 kPa až do maxima 200 kPa (případně do 250 kPa) a ze stanovených křivek závislosti složek impedance na frekvenci stanovených při různých zatíženích se vybere křivka nejvíce se blížící křivce zjištěné měřením in situ. Odpovídající zatížení bude vstupní hodnotou pro výpočet Poissonova čísla a následně pro určení bočního napětí působícího na lokalitě. Pokud bude odebrán další neporušený vzorek bude tento použit pro stanovení deformačních a smykových parametrů..
  - c) Na vzorcích nesoudržných zemin proběhne frekvenční analýza při vlhkostech stejných jako při minulých šetření (0%, 1%, 2%, 3%, 5%, 7%, 10% a při úplném nasycení) a navíc při přirozené vlhkosti na vzorcích nezátěžených a zatěžovaných 50 kPa a 200 kPa. Před zatížením 200 kPa budou vzorky zatěžovány 100 kPa a 150 kPa a na nich se uskuteční frekvenční analýza při přirozené vlhkosti a dvou nejbližších vlhkostech použitých při zatěžovaných vzorcích 50 a 250 kPa. Kromě toho bude stanovena smyková pevnost v závislosti na vlhkosti stejným způsobem v minulých obdobích.

**Obr. 2** Závislost ohmického odporu písku S2 SP na frekvenci měřeného in situ ve srovnání s měřením na vzorku v laboratoři – lokalita Hrušovany u Brna



**Obr. 3** Závislost kapacitního odporu písku S2 SP na frekvenci měřeného in situ ve srovnání s měřením na vzorku v laboratoři – lokalita Hrušovany u Brna



Na obrázcích 2 a 3 ve vysvětlivkách značí A – nehtužený materiál, B – materiál hutněný tlakem 50 kPa, C – materiál hutněný tlakem 200 kPa a 07 – vlhkost zkoušeného písku 7%.

Aby bylo možno stanovit směry hlavních napětí, je nutno impedanci měřit minimálně ve třech různých směrech. Jako nejvhodnější se ukázalo měření ve čtyřech směrech odchýlených o 45°.

**Obr. 4** Dvojice elektrod EIS ve tvaru vidličky napojených na Z-meter III v masce pro měření impedance in situ



Měření impedance ve zmíněných 4 směrech umožní stanovení teoretické elipsy odporů, jejichž osy je možno posléze ztotožnit s osami elips napjatosti – tj. směrů hlavních napětí. Za předpokladu přímé úměrnosti mezi hodnotami odporů a velikostí napětí v zemním tělese působící ve stejných směrech je možno stanovit relativní velikosti hlavních napětí. Poměrné velikosti hlavních napětí se pak jednoduše stanoví podle Hookova zákona z maximálních a minimálních hodnot naměřených odporů – ve směrech os elips odporů stanovených při smluvní frekvenci 8 kHz. Teoreticky správnější je použití hodnot imaginární složky impedance – kapacitního odporu, neboť reálná složka je podstatně více závislá na obsahu vody v zemině. Poměrné velikosti hlavních napětí  $\sigma_1$  a  $\sigma_2$  je možno vyčíslit podle vzorců

$$\sigma_1 = k / E \cdot (X_{max} - \nu \cdot X_{min})$$

$$\sigma_2 = k / E \cdot (X_{min} - \nu \cdot X_{max}),$$

v nichž značí

$X_{max}$  a  $X_{min}$  – maximální a minimální hodnotu kapacitního odporu,

$E$  – modul pružnosti

$\nu$  – Poissonovo číslo

$k$  – konstantu vyjadřující vztah mezi napětím v zemním tělese a hodnotami kapacitního odporu.

Odklon směrů hlavních napětí od souřadných os je možno teoreticky stanovit ze 3 měření v odkloněných směrech. Vzhledem k tomu, že impedanci měříme ve 4 směrech, je vhodnější stanovení zmíněných odklonů graficky, a to tak, aby elipsa odporů se co nejvíce přibližovala k bodům znázorňujícím naměřené hodnoty obou složek impedance, přinejmenším imaginární složky, která lépe vyhovuje měřeným složkám napjatosti.

### 3 VÝSLEDKY MĚŘENÍ NA LOKALITĚ BRNO-ČERNOVICE

Na lokalitě Brno-Černovice se měření uskutečnilo ve dně pískovny, kde byly odkryty terciérní brněnské písky (viz obr. 5).

**Obr. 5** Letecký snímek pískovny v Brně-Černovicích s vyznačením místa měření napjatosti červenou kruhovou značkou.





Zde byla nejdříve změřena napjatost Mencl-Fussgängerovou metodou, přičemž deformace v okolí hloubeného otvoru byly měřeny ve směrech sever – jih a východ – západ (viz obr. 6). Ze zeminy vytěžené při hloubení odlehčovacího otvoru byly odebrány vzorky zeminy, které byly v laboratoři podrobeny zkouškám s cílem stanovení indexových vlastností zkoušené zeminy a deformačních charakteristik potřebných pro vyhodnocení zkoušky napjatosti po nahutnění statickým tlakem 50 kPa. Následně proběhlo měření impedance pomocí Z-metru III napojeným na dvojici elektrod ve tvaru vidličky s distancí elektrod 60 mm zaváděných do povrchu vyšetřované zeminy. Zmíněná EIS vidlička má průměr elektrod 6 mm, jejich délka činí 55 mm (obr. 4). Obě složky impedance – reálná a imaginární byly měřeny při frekvenční analýze, kdy frekvence byla měněna po krocích 2 kHz od 2 kHz do 100 kHz. Frekvenční analýza proběhla ve stejných směrech jako při měření přirozené napjatosti a navíc ve směrech odchýlených o 45°. Pro přesné zavádění elektrod do povrchu pískového tělesa byla použita maska s vyvrtnými otvory v měřených směrech, jak je patrné z obr. 4.

**Obr. 6** Měření napjatosti v pískovně v Brně-Černovicích Mencl-Fussgängerovou metodou

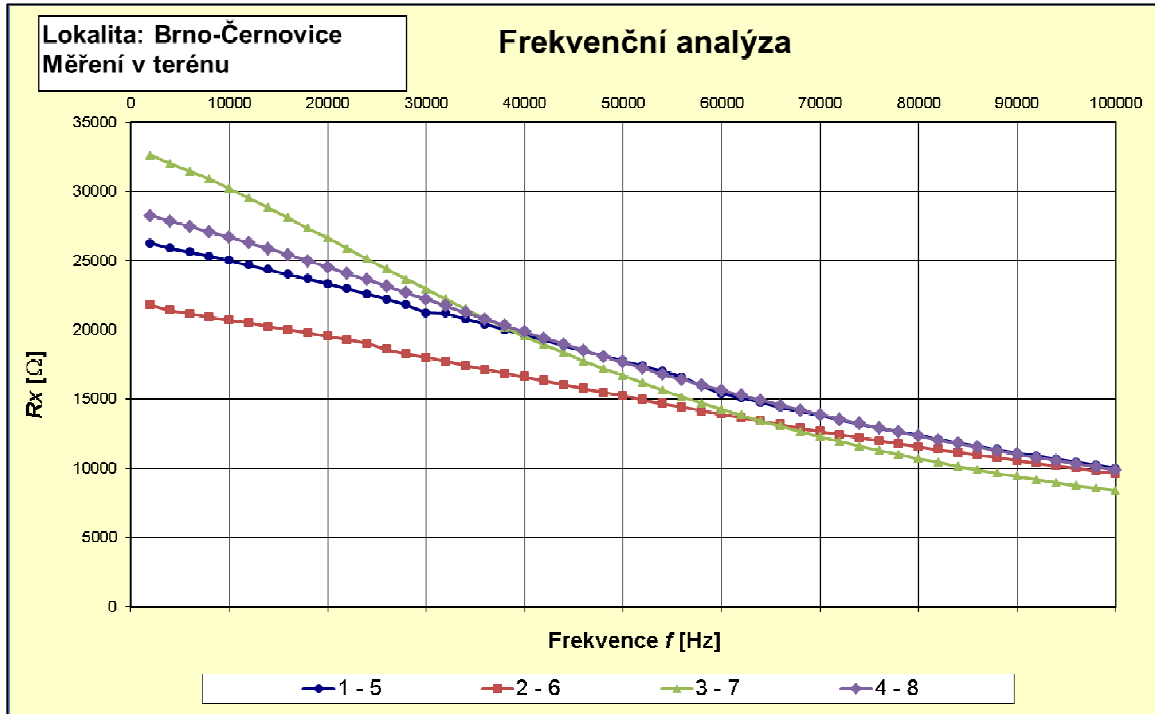


Výsledky frekvenční analýzy ukazují grafy na obr. 7 a 8, v nichž jednotlivé směry měření jsou označeny následovně: Směr S – J symboly 1 – 5, směr SV – JV symboly 2 – 6, směr V – Z symboly 3 – 7 a směr JV – SZ symboly 4 – 8.

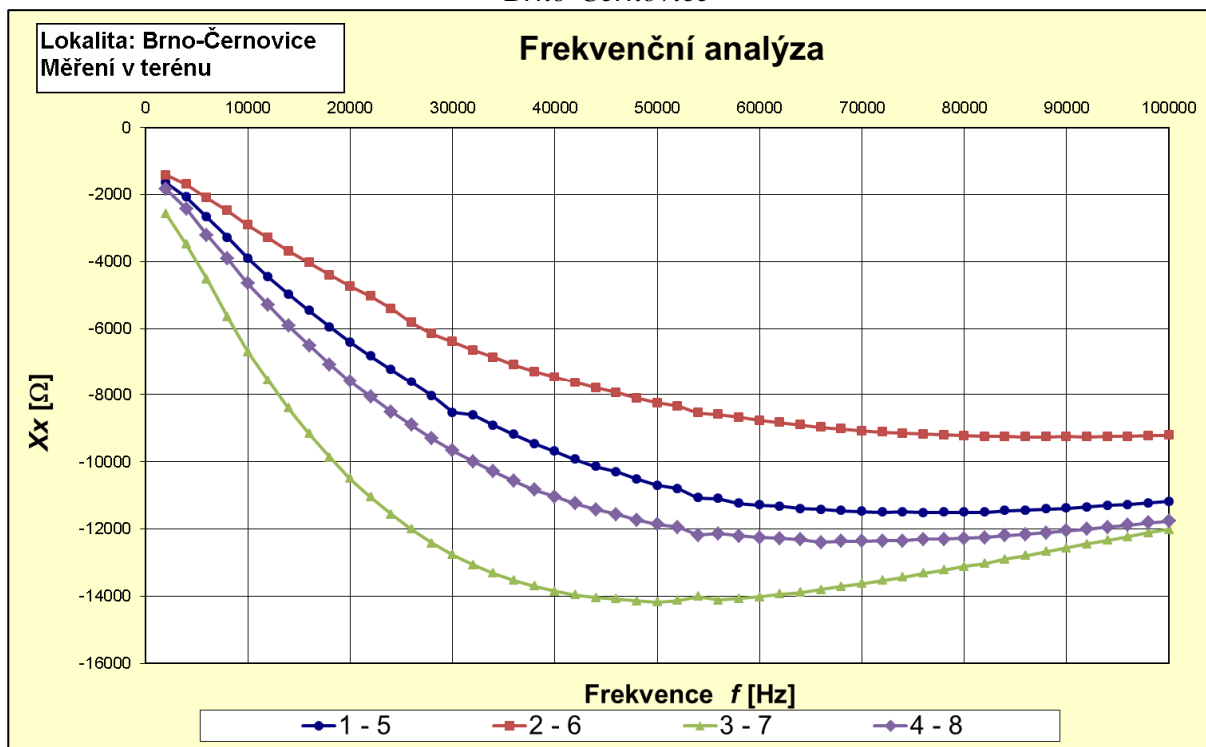
Na lokalitě Brno-Černovice byly stanoveny elipsy napjatosti i z hodnot reálné složky. Osy elipsy stanovené z imaginární složky impedance se prakticky shodovaly se směry S – J a V – Z, zatímco elipsa napjatosti vyhodnocená z reálných složek impedance měla osy odchýlené o 4° od uvedených

směrů. Jejich tvary se téměř shodovaly. Ve srovnání s přímo měřenými hodnotami napětí měření metodou EIS ukázalo poněkud menší rozdíly mezi hodnotami stanovenými v kolmých směrech, rozdíly však nejsou příliš velké (viz obr. 9 a 10).

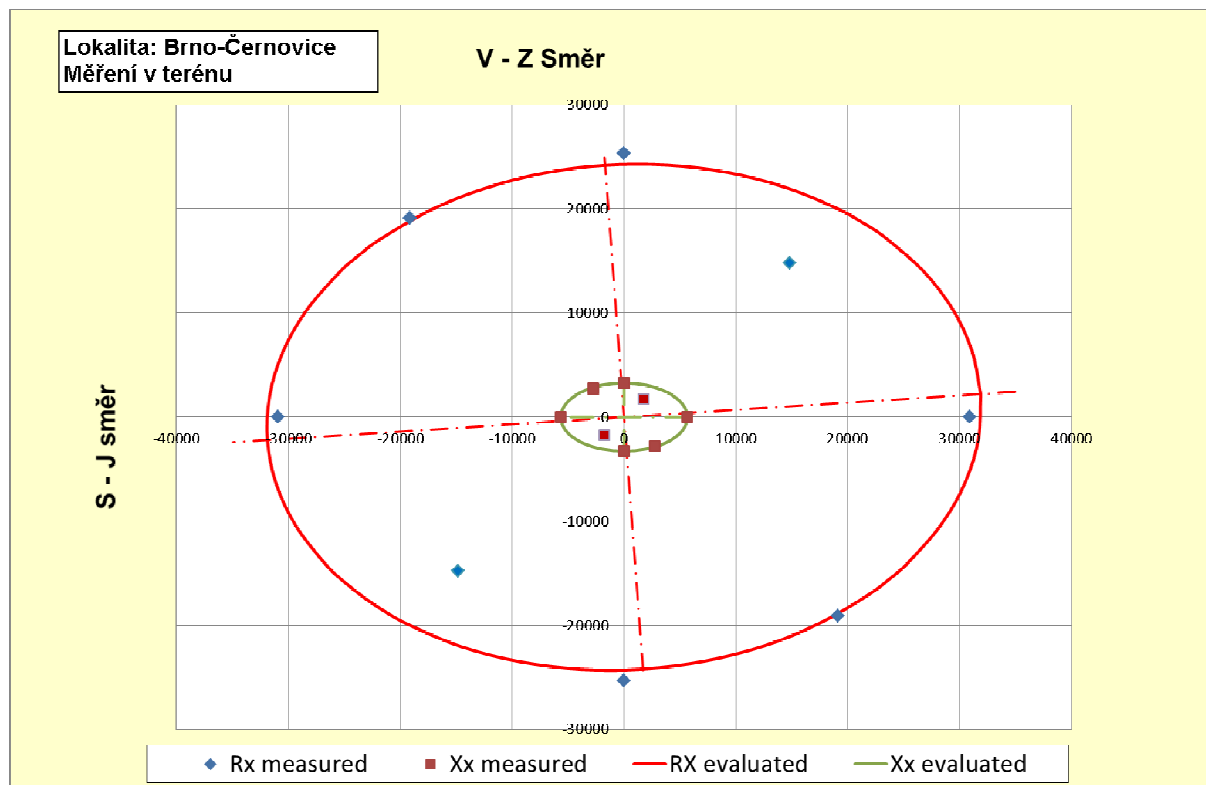
**Obr. 7** Závislost reálné složky impedance na frekvenci při frekvenční analýze v pískovně Brno-Černovice



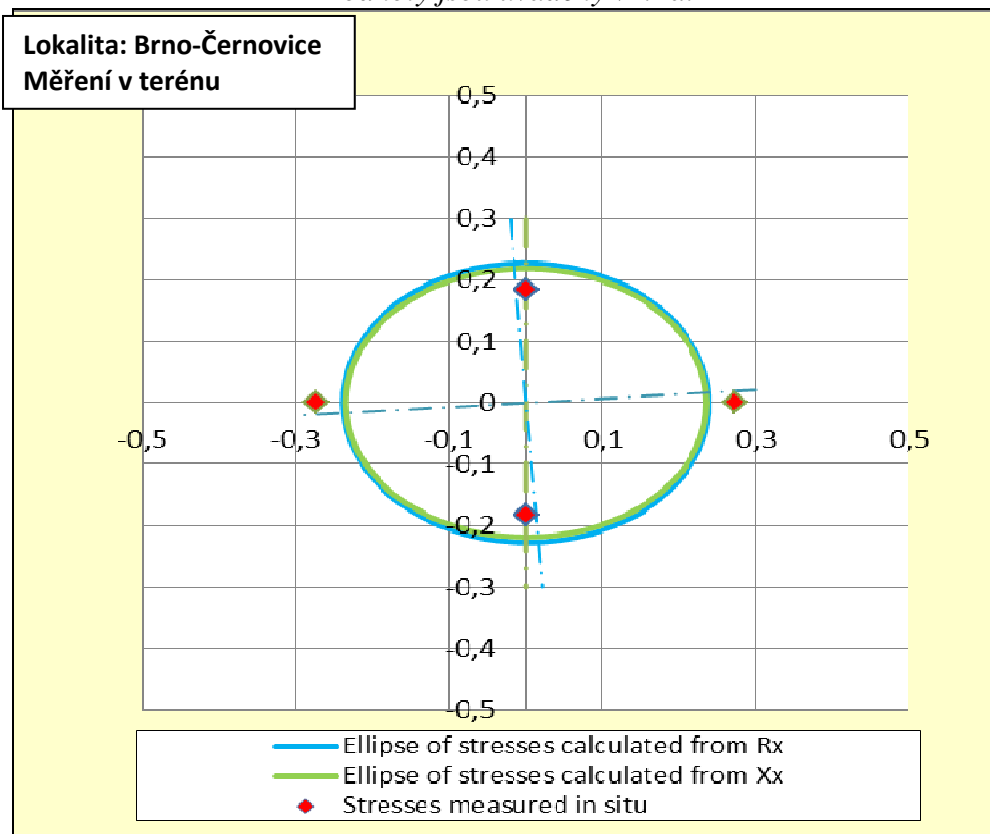
**Obr. 8** Závislost imaginární složky impedance na frekvenci při frekvenční analýze v pískovně Brno-Černovice



**Obr. 9** Teoretické elipsy odporů stanovené z měření v pískovně Brno-Černovice. Hodnoty jsou uváděny v  $\Omega$ .



**Obr. 10** Elipsy napjatosti stanovené z měření metodou EIS na lokalitě Brno-Černovice. Hodnoty jsou uváděny v kPa.



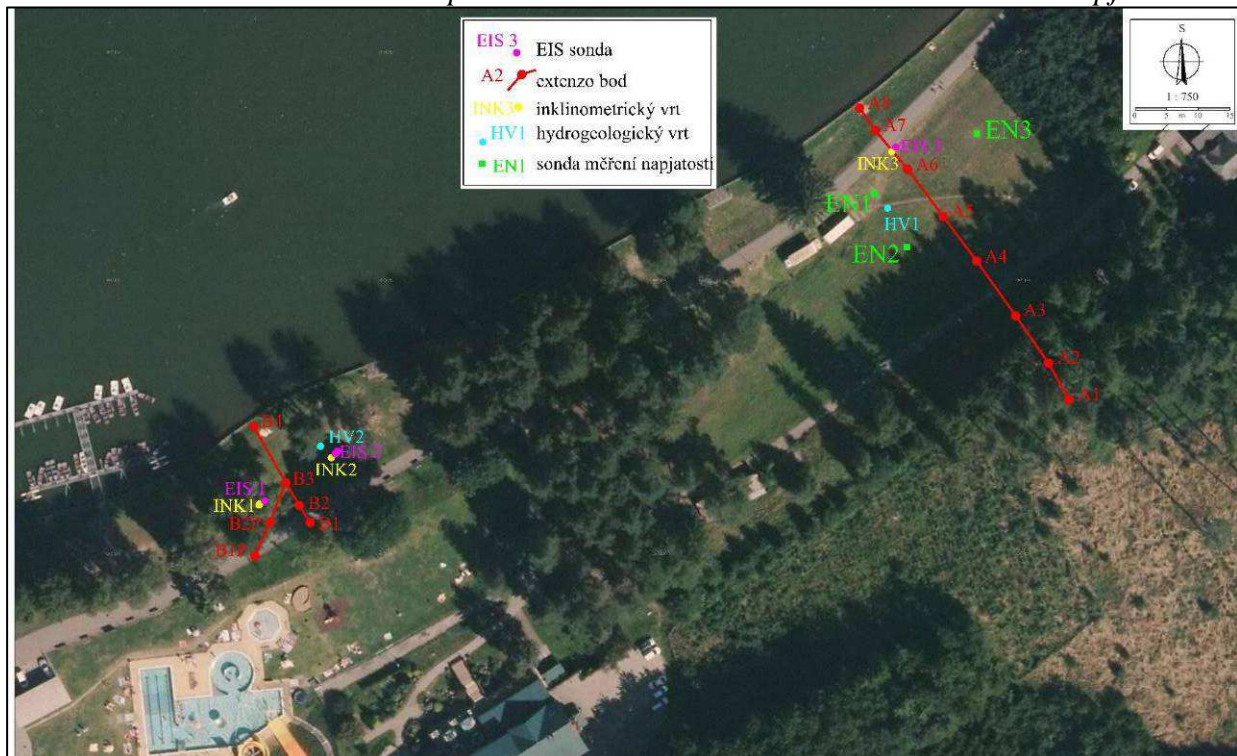


#### 4 VÝSLEDKY MĚŘENÍ NA LOKALITĚ LUHAČOVICE

Na levém břehu VD Luhačovice je částečně aktivovaný (v r. 2011) fosilní sesuv (Obr. 12). Pro sanaci svahu se uskutečnilo přitížení akumulární oblasti sesuvu v prostoru zátopy pomocí navezení lomového kamene. V těle sesuvu byly v této době (r. 2012) osazeny monitorovací prvky (viz. obrázek 11), a to body extenzometrické dráhy, inklinometrické vrty a hydrogeologické pozorovací vrty. Metodami geotechnického monitoringu je sledováno nejen aktuální chování svahu postiženého sesuvem, ale i účinnost opatření a předpokládané uklidnění svahových pohybů po technické zásahu. V roce 2016 zde byly jako další monitorovací prvek sesuvného území instalovány tři hloubkové EIS sondy. V rámci geotechnického monitoringu se uskutečnilo měření napjatosti s cílem posoudit, zda se sesuv může znovu aktivovat.

Pro měření napjatosti byla vybrána tři místa (Obr. 11) v části sesuvu nepostižené nedávnou aktivací pohybů. Pokryv zde je tvořen soudržnými zeminami tříd F5 MI a F6 CI, tj. jíly a hlínami středně plastickými. Jejich konzistence byla pevná a tvrdá.

*Obr. 11 Situace monitorovacích prvků na sesuvu na lokalitě včetně sond měření napjatosti*



V těchto místech byly vyhloubeny mělké kopané sondy rozměrů cca 2 m × 2 m odkrývající zeminu pod vrstvou humusovité hlíny. V těchto sondách proběhla nejprve frekvenční analýza ve 4 směrech obdobně jako na lokalitě Brno-Černovice, přičemž směr 1 – 5 byl ztotožněn se spádnicí svahu sklánějící se k severozápadu. Následovalo měření napjatosti Mencl-Fussgängerovou metodou (Obr. 13) a po jeho ukončení odběr 3 vzorků z každé sondy – porušeného (třídy 3) a technologického (třídy 4) z výkopku vytěženého při hloubení odlehčovacího otvoru a dále vzorku neporušeného (třídy 2) v jeho bezprostředním sousedství pro laboratorní zjištění potřebných charakteristik vyšetřované zeminy.

Výsledky měření impedance v sondě N1 ve všech čtyřech směrech ukazují grafy na obr. 14 a 15. Vyhodnocené elipsy kapacitních odporů při frekvenci 8000 Hz naměřené ve všech sondách a z nich stanovené elipsy napjatosti jsou znázorněny na obrázcích 16 – 21.



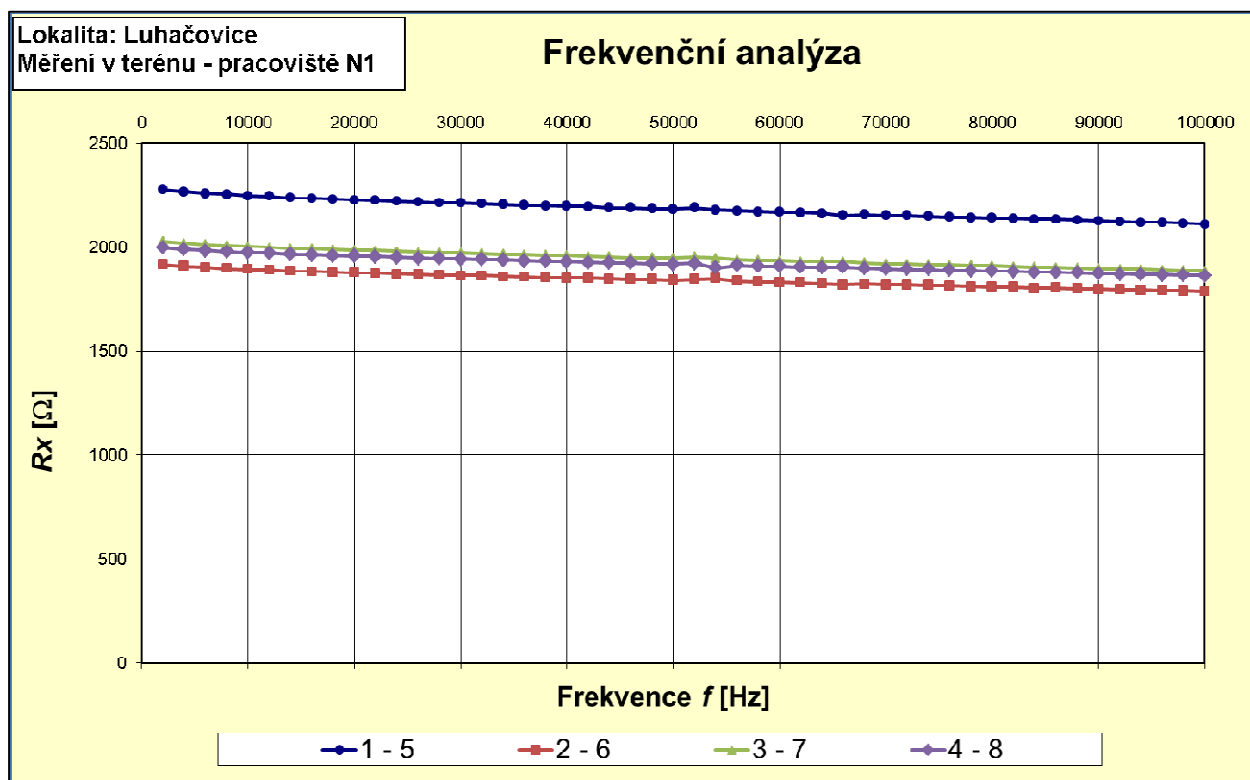
*Obr. 12 Svah na břehu luhačovické přehrady postižený sesuvem (stav z roku 2012)*



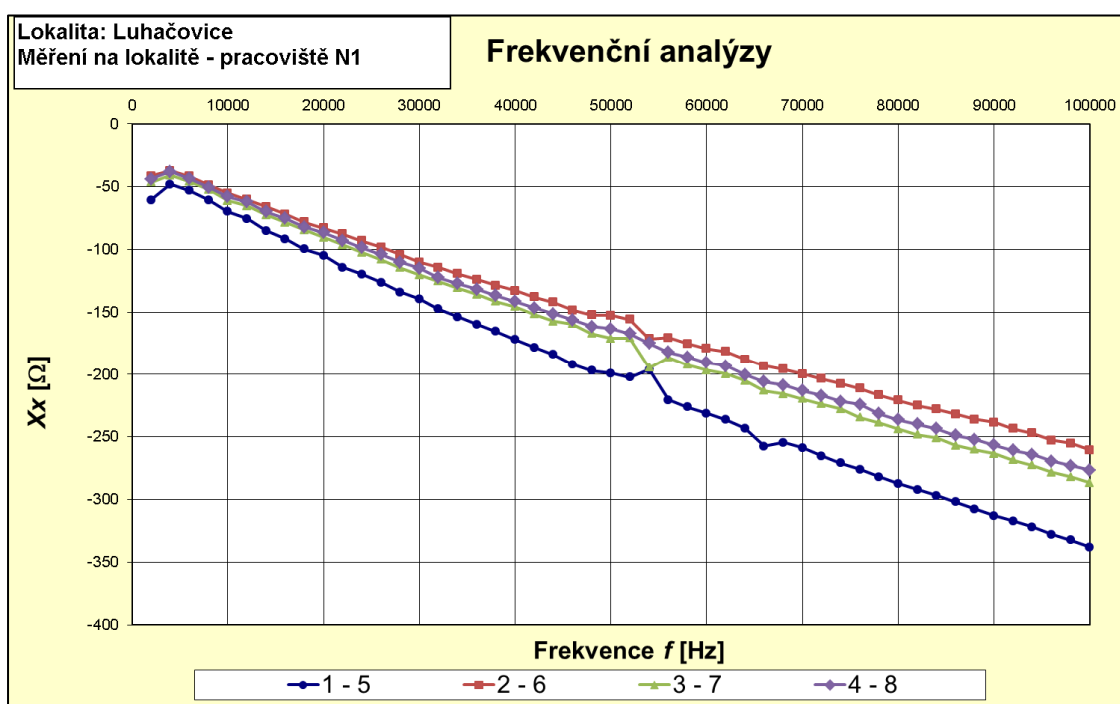
*Obr. 13 Měření napjatosti na lokalitě Luhačovice Mencl-Fussgängerovou metodou*



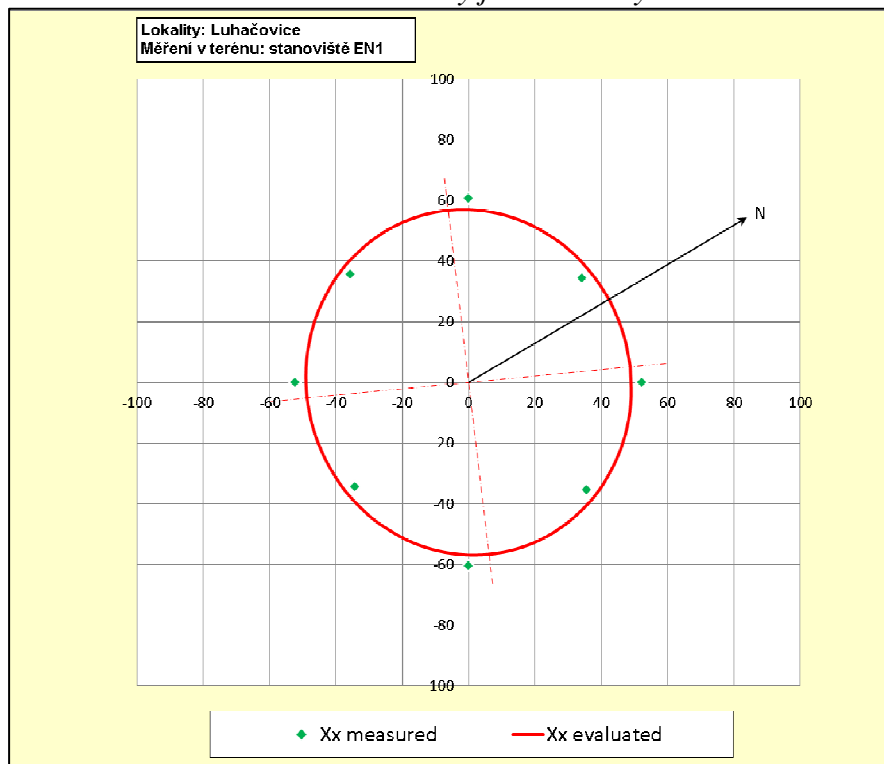
Obr. 14 Závislost reálné složky impedance na frekvenci při frekvenční analýze v sondě N1 na lokalitě Luhačovice



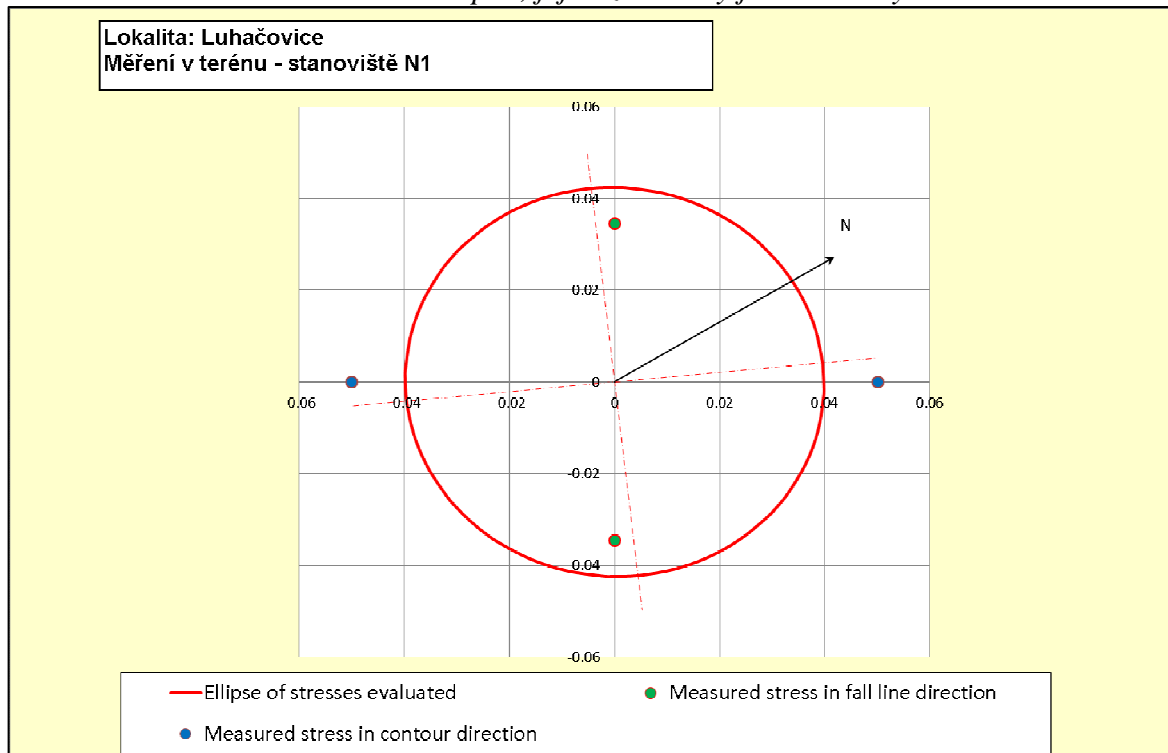
Obr. 15 Závislost imaginární složky impedance na frekvenci při frekvenční analýze v sondě N1 na lokalitě Luhačovice



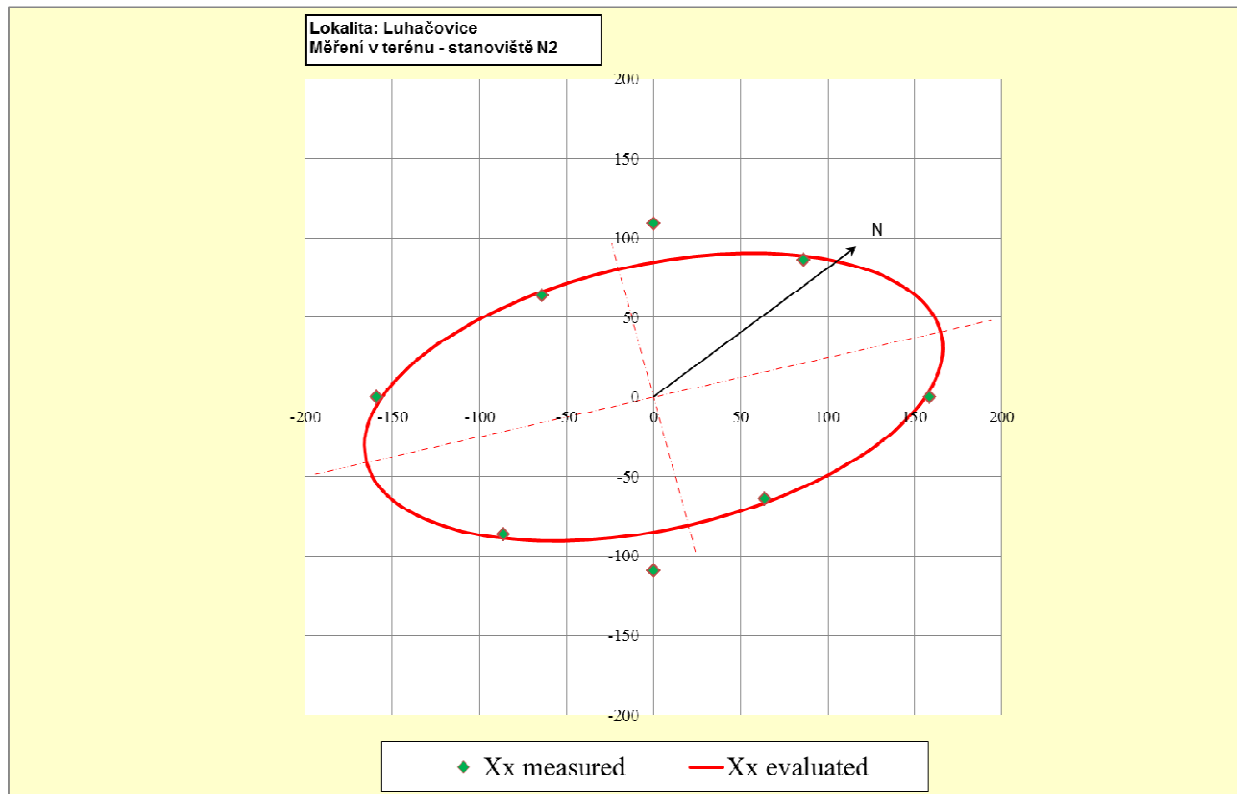
**Obr. 16** Teoretická elipsa kapacitních odporů stanovená z měření v sondě N1 na lokalitě Luhačovice. Hodnoty jsou uváděny v  $\Omega$



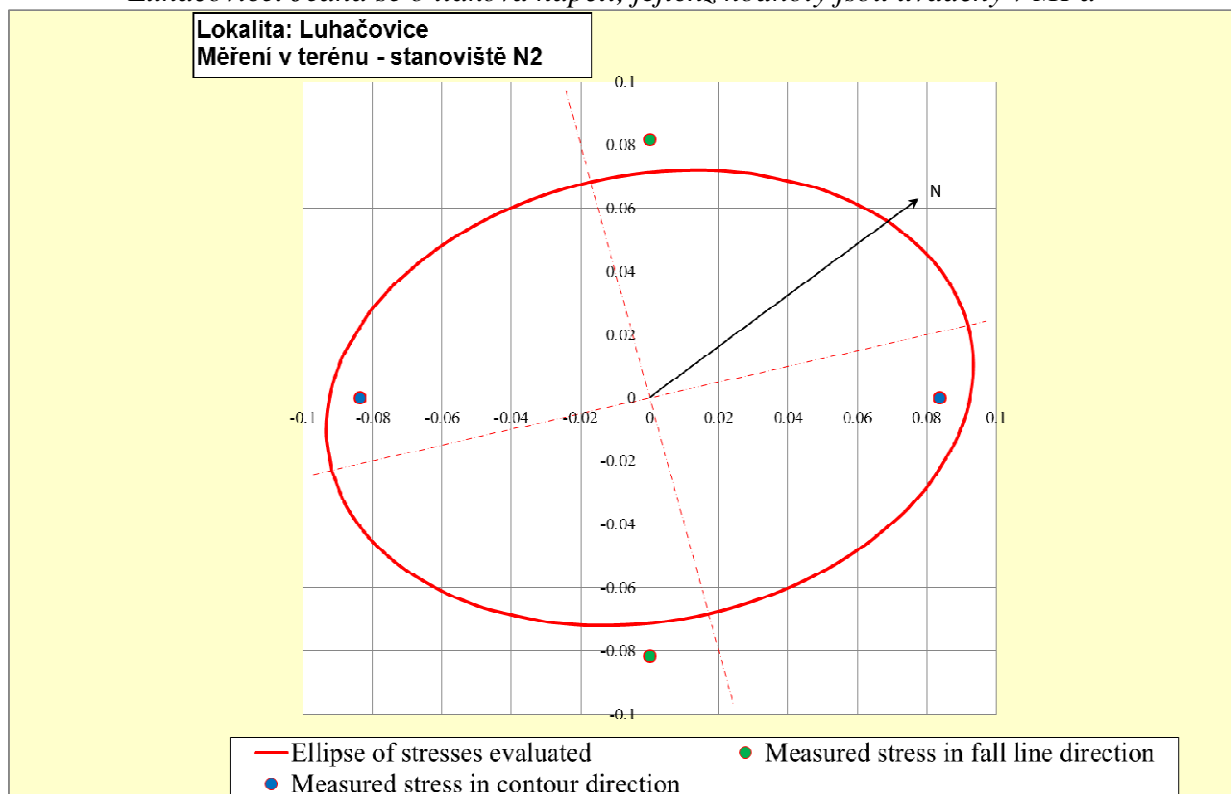
**Obr. 17** Elipsa napjatosti stanovené z měření metodou EIS v sondě N1 na lokalitě Luhačovice. Jedná se o tlaková napětí, jejichž hodnoty jsou uváděny v kPa



**Obr. 18** Teoretická elipsa kapacitních odporů stanovená z měření v sondě N2 na lokalitě Luhačovice. Hodnoty jsou uváděny v  $\Omega$

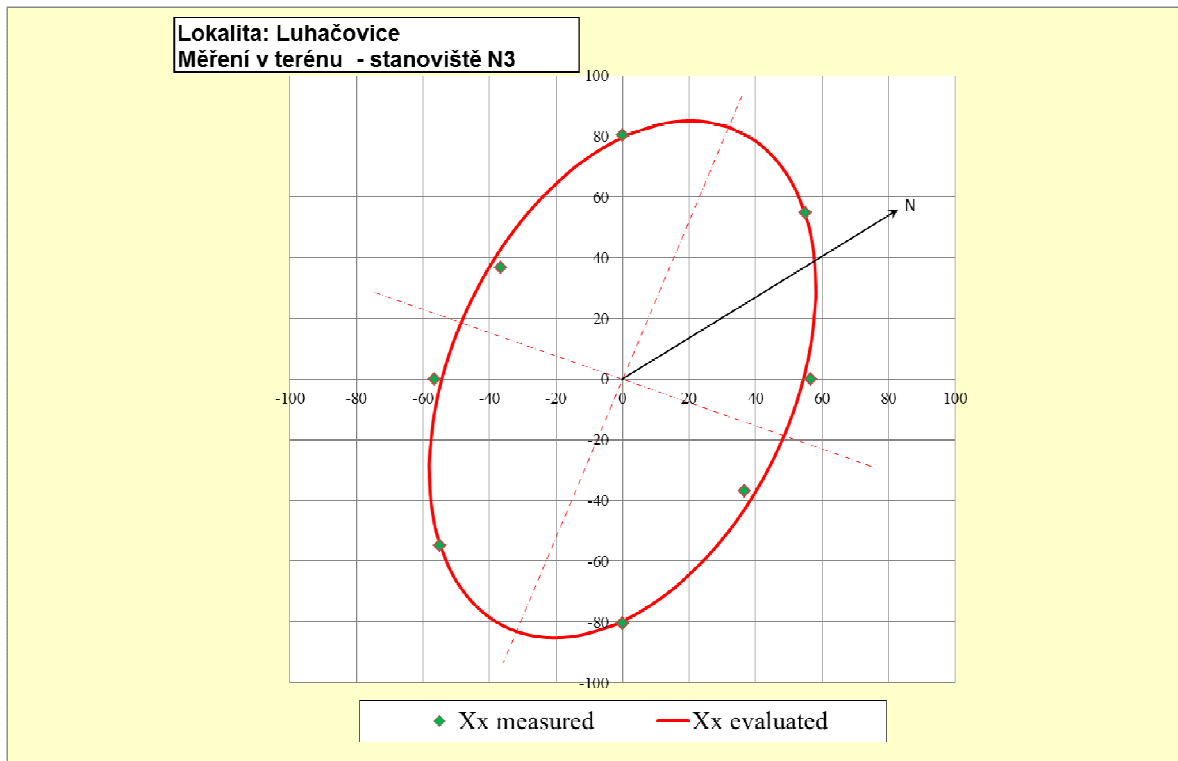


**Obr. 19** Elipsa napjatosti stanovená z měření metodou EIS v sondě N2 na lokalitě Luhačovice. Jedná se o tlaková napětí, jejichž hodnoty jsou uváděny v MPa

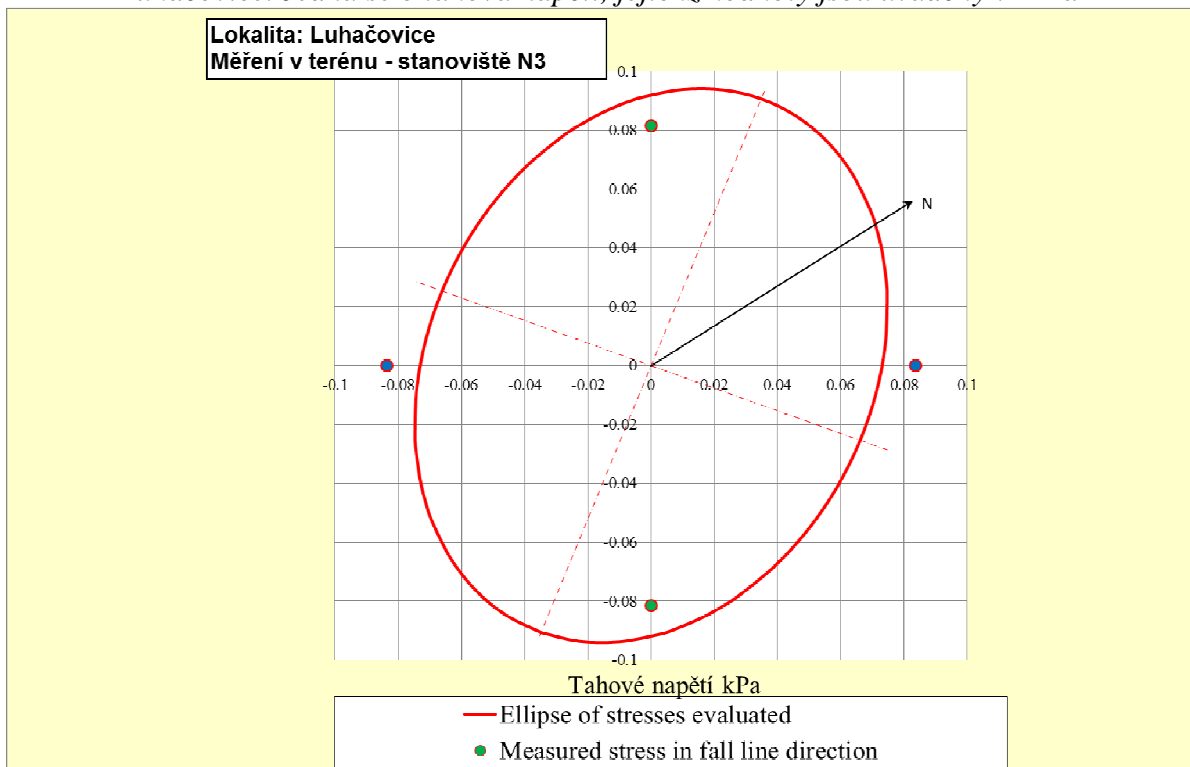




**Obr. 20** Teoretická elipsa kapacitních odporů stanovená z měření v sondě N3 na lokalitě Luhačovice. Hodnoty jsou uváděny v  $\Omega$



**Obr. 21** Elipsy napjatosti stanovené z měření metodou EIS v sondě N3 na lokalitě Luhačovice. Jedná se o tahová napětí, jejichž hodnoty jsou uváděny v MPa



## 5 ZHODNOCENÍ USKUTEČNĚNÝCH MĚŘENÍ

Na lokalitě Brno-Černovice byla měřena napjatost ve dně pískovny se stěnami vysokými přes 30 m. Dno pískovny, jež je protáhlé ve směru východ – západ, bylo v místě měření široké cca 40 m, jak ukazuje letecký snímek lokality na obr. 5. Za předpokladu objemové hmotnosti terciérních písků  $1950 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$  a Poissonově čísla  $\nu = 0,35$  vychází vodorovné napětí v úrovni dna 309 kPa. Ve směru S – J bylo naměřeno napětí hodnotou 183 kPa, v kolmém směru hodnotou 284 kPa. Uvážíme-li skutečnost, že se ve dně poměrně úzkého výkopu v důsledku bulgingu (zvedání dna výkopu) napětí při povrchu mírně snižuje, lze naměřená napětí považovat za odpovídající.

Napětí přímo měřená na lokalitě Luhačovice (obr. 11) byla zjištěna velmi malými hodnotami, často oscilujícími kolem nuly. V sondě N1, jež byla nejbližší odlučné plochy aktivního sesuvu (ve vzdálenosti cca 7 m), byla vyhodnocením měření EIS při frekvenci 8 kHz stanovena napjatost prakticky všesměrná.

V sondě N2 v blízkosti předpokládaného výchozu smykové plochy fosilního sesuvu byla naměřena napjatost ve vrstevnicovém i spádnicovém směru přibližně stejnými hodnotami. Vyhodnocením měření EIS byly stanoveny větší rozdíly, přičemž větší hlavní napětí působí ve směru mírně odchýleném od vrstevnice (o  $14^\circ$ ).

Tahová napětí byla naměřena v sondě N3 umístěné do místa mírného terénního vyboulení, a to nepřilíživě rozdílnými hodnotami ve směru spádnice i vrstevnice. Vyhodnocení měření EIS však ukázalo větší rozdíly, přičemž větší tahová napětí byla zjištěna ve směru odchýleném od spádnice o  $21^\circ$  směřujícím k odlučné oblasti nedávno aktivovaného sesuvu.

Z výsledků měření napjatosti na lokalitě Luhačovice lze usoudit, že měřená část sesuvu je po sanaci uklidněná a zatím nehrozí aktivace sesuvných pohybů. K obnovení svahových pohybů zde by mohlo dojít jen po výrazném zhoršení stabilitních poměrů, což v dohledné době nepředpokládáme.

## 6 ZÁVĚR

Dosažené výsledky měření sondou EIS ukazují, že popisovanou metodou lze poměrně spolehlivě kvalitativně určovat směry hlavních napětí i jejich relativní velikost. Vyhodnocování výstupů z měření EIS sond (ruční vidlička, zabudované hloubkové sondy) spolu s využitím dalších monitorovacích metod ukazuje na možnost využití EIS sond jako součástí komplexního monitorovacího systému sesuvného území.

## LITERATURA

PAŘÍLKOVÁ, J. – PAVLÍK, J.: *Systém sledování vybraných parametrů porézních látek metodou EIS v širokém spektru aplikací*. Dílčí zpráva výzkumného úkolu EUREKA E!7614 za rok 2015. GEOTest a.s., VUT Brno 2016.

PAVLÍK, J.: *Utilization of Method EIS for Determining of Mechanical Properties of Sands*. In: Proceedings of 3rd Conference and working session. Jaroměřice nad Rokytnou, GEOTest a.s., VUT Brno 2015.

PAVLÍK, J.: *Využití metody eis pro měření napjatosti zemních těles*. In: Polní geotechnické metody 2016. Sborník referátů. Ústí nad Labem 2016.

PAVLÍK, J.: *Utilization of Method EIS for Determining of Mechanical Properties of Sands*. In: Proceedings of 3rd Conference and working session. Jaroměřice nad Rokytnou, GEOTest a.s., VUT Brno 2015.

PAVLÍK, J. – BULGUROVSKÁ, M.: *Using the EIS Method to Measure State of Stress in Soil Bodies*. In: Proceedings of 4th Conference and working session. Lednice, GEOTest a.s., VUT Brno 2016.