



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



KRYCÍ LIST – VÝSTUPY

Název výstupu	Sada dat o směru a velikosti tektonického napětí ve vybraných lokalitách
Výzkumný program	VP2 - Indukovaná seismická a tektonická napětí
Partner/partneři	Ústav struktury a mechaniky hornin AV ČR a Přírodovědecká fakulta UK
Termín zpracování	5/2020

Název projektu	Modernizace výzkumné infrastruktury RINGEN (RINGEN+)
Registrační číslo	CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_013/0001792
Žadatel	Univerzita Karlova – Přírodovědecká fakulta



Sada dat i sněru a velikosti tektonického napětí ve vybraných lokalitách

Tomáš Fischer, Filip Hartvich a Jakub Stemberk

Úvod

V rámci projektu Ringen+ byly osazeny na vybraných tektonických poruchách 3D dilatometry TM-71, a to jednak v okolí plánovaného hlubinného geotermálního výměníku, jednak na srovnávací lokalitě hlubinného dolu Mokrsko-Čelina v krystaliniku Jílovského pásma. Data jsou odesílána a shromažďována na serverech ÚSMH a dále zpracovávána. Informace o monitorovaných lokalitách jsou na webové stránce www.tecnet.cz (celá síť TM-71) a <https://ringen.cz/cz/sluzby/vybaveni-a-technologie/TM71> Tato první fáze se vztahuje ke klidovém režimu, tj. před zahájením invazivních prací v souvislosti s geotermálními vrty a budováním HTV.

Pro realizaci geologického geotermálního výměníku s pomocí hydraulické stimulace je nutné předem znát orientaci hlavních komponent napětí, a také velikost minimální a maximální složky napětí. Určování směrů a velikosti napětí je možné provést pomocí různých postupů a metod, za využití různých datových podkladů. Tradičním způsobem získávání dat pro určení tektonického napětí je analýza tektonických pohybů určených in situ (nebo podle orientovaných výbrusů) podle dokladů na zlomových plochách (striace, Riedlovy střihy). Dále lze tektonické napětí odvozovat ze seismických dat, na základě fokálních mechanismů zemětřesných eventů, ve vrtech pomocí speciální karotážních metod (Minifrac, deformace jádra), případně dalšími způsoby.

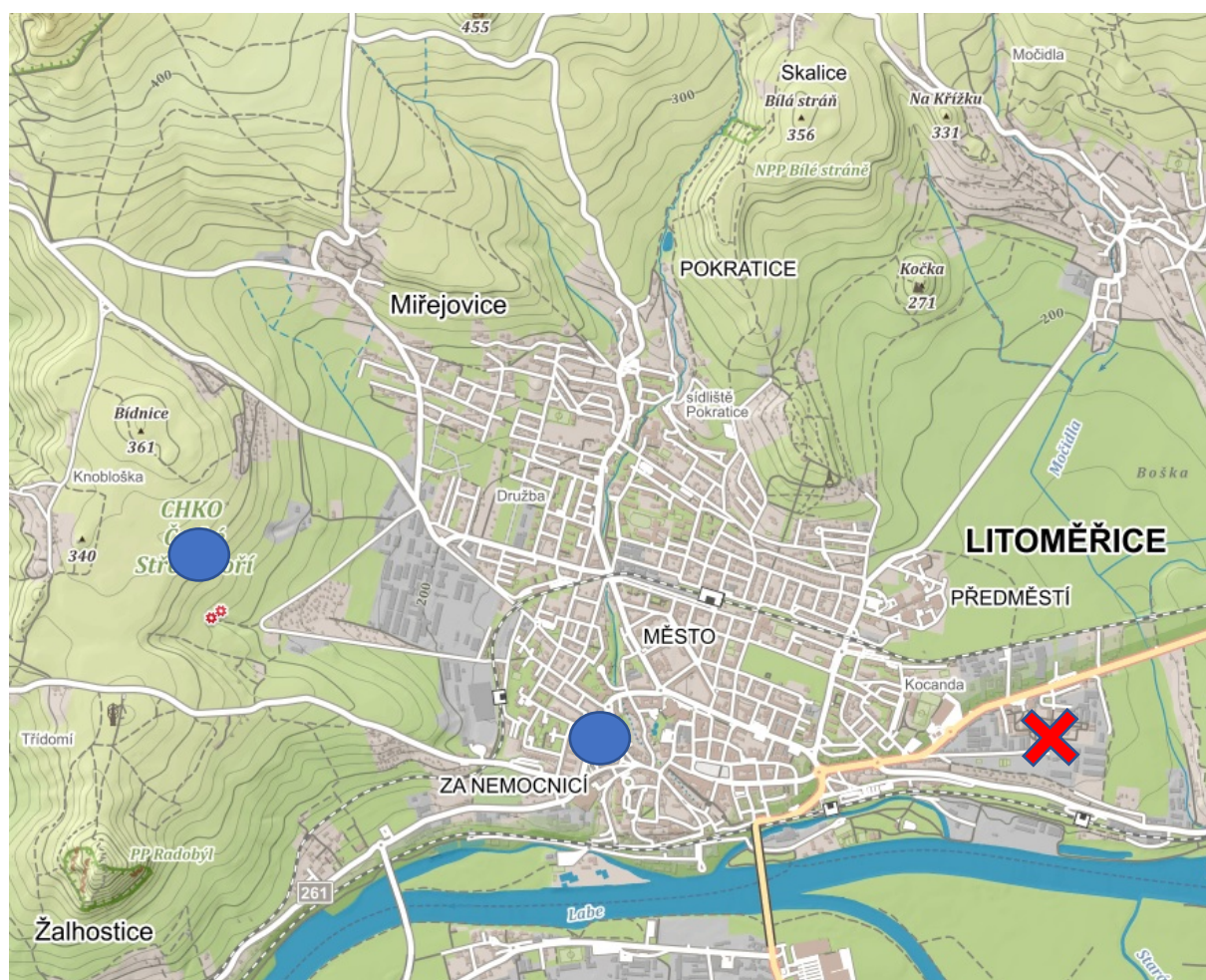
V tomto případě jsme jako podkladových dat využili přibližně tříletých záznamů mikroposunů a rotací na tektonických poruchách, měřených sítí přesných 3D dilatometrů TM-71. Jedná se o ekvivalent terénních měření na zlomech, kdy směr a velikost pohybu není zjišťován podle striací na ploše zlomu, ale přímo měřen přístrojem TM-71. Vektor pohybu tak představuje fiktivní obraz striace. Dále bylo k výpočtům minimální složky horninového napětí využito karotážního měření ve vrtu PGVT-LT 1, provedeného v lednu 2020.

Metodika

Jak bylo zmíněno výše, jako podkladových dat k výpočtům orientace napětí jsme využili záznamu mikroposunů a rotací na tektonických poruchách. Výhodou takto pořízených dat je, že lze takto rekonstruovat i velmi malé pohyby, které je obtížné (na výbrusech) nebo nemožné (v terénu) vidět na zlomové ploše. Další výhodnou vlastností této metody je přesná znalost času, kdy k události došlo, oproti analýze zlomové plochy, kdy lze datování provést velmi



obtížně a nepřesně. V neposlední řadě, takto naměřená data mají vždy známý smysl pohybu (levostranný/ pravostranný/ přesmykový/ poklesový), na rozdíl od přímého měření striací na zlomových plochách, kdy u mnohých dat tento smysl nelze určit. Naopak nevýhodou je, že tuto metodu určení napětí v hornině lze použít pouze na období, kdy je měření pomocí TM-71 prováděno, což je obvykle několik posledních let.



Obr. 1. Poloha 3D dilatometrů TM-71 v okolí Litoměřic (modrý kruh) a vrtu PVGT-LT1 (červený kříž)

Pro určení velikosti a směru napětí na základě měření na tektonických poruchách pomocí 3D dilatometrů TM-71 je třeba nejdříve určit jednotlivé eventy, kdy došlo k pohybu. Vzhledem k subvertikální orientaci sledovaných poruch se sledují pouze vertikální (S) a horizontální (H) složka, nikoli rozevírání a svírání spár (P). Po identifikaci zřetelných eventů jsou pohyby složeny a přepočteny na 3D vektor, který představuje myšlenou striaci na



sledované poruše. Geometrické parametry vektoru pohybu jsou vloženy do sw. FaultKin (Allmendinger 2016). Zde jsou pomocí přibližné grafické metody vypočteny směry napětí (σ_1 – maximální komprese a σ_3 – maximální extenze) a identifikován režim každé napjatostní fáze (tj. zda převládá komprese/extenze či jsou přibližně totožné). Výstupy jsou zobrazeny pro jednotlivé eventy v podobě sférických grafů.

Optimální metodou pro měření horninového napětí ve vrtu je metoda Minifrac, kdy se s pomocí zvýšeného tlaku vody ve vybraném úseku vrtu vytvoří tahová trhlina. Z grafu závislosti tlaku na čase se pak určí zavírací napětí trhliny, které odpovídá minimální složce napětí. Směr minimální složky napětí je pak kolmý na směr růstu trhliny. V případě, že se namísto nové trhliny aktivuje již existující smyková trhlina, je možno pro určení složek napětí použít metodiku HTPF.

Určení směrů a velikostí tektonického napětí v okolí plánovaného HTV Litoměřice

Na základě přibližně tříleté periody měření na čtyřech 3D dilatometrech TM-71, instalovaných na lokalitách Litoměřice 1 a 2 a Richard 1 a 2 s frekvencí měření 1x za 24 hodin byly vypočteny směry a velikosti napětí pro jednotlivé napjatostní eventy, které se projeví na monitorovaných tektonických poruchách.

Nejdříve byly identifikovány jednotlivé eventy, kdy došlo na sledovaných poruchách ke sledovatelným a kvantifikovatelným pohybům. Na přístroji Litoměřice 1 (LIT1) se pozorované pohyby se udály ve třech obdobích: 01-08/2017, 03-08/2018 a 02/2019.

První období zahrnuje největší pohyby (celkem přes 0,1 mm), které je nicméně třeba považovat za „sedání“ měření, tedy redistribuci lokálního napětí v důsledku zásahu do masivu při instalaci. V období jara až léta 2018 dochází k malému (0,06 mm), částečně vratnému pohybu na ose X. Poslední období aktivity v únoru 2019 se projevilo na všech osách, ale vzhledem k minimální velikosti pohybu jde o měření s velkou nejistotou.

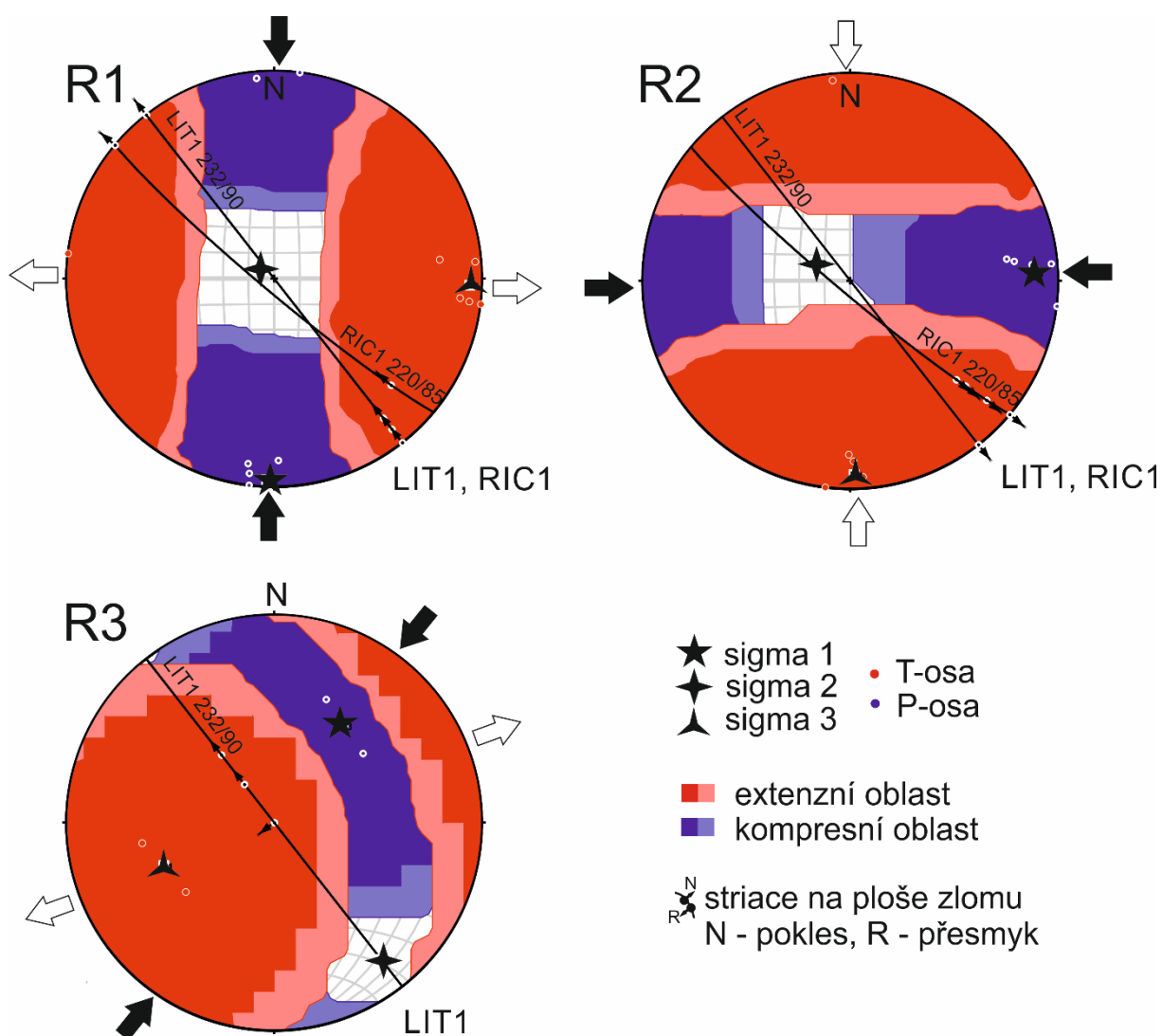
Na přístroji Litoměřice 2 (LIT2) byly zaznamenány pouze nevelké dva jednotlivé pohyby (na ose X 05/2017 a na ose Z 07/2017), které nemohly být pro výpočet napětí využity. Na přístroji Richard 1 (RIC1, obr. 5) byly zaznamenány tři období aktivity, převážně na všech třech osách: 02-03/2018, 09/2018 a 08-11/2019, zatímco na přístroji Richard 2 (RIC2) nebyly zachyceny žádné pohyby.

Výsledky výpočtu napětí v okolí Litoměřic (na základě měření LIT1 a RIC1) jsou v podobě sférických grafů zobrazeny na obr. 2. První fáze R1 fáze představuje kompresi orientovanou přibližně ve směru S-J, což vychází z transtenzního režimu na poruchách přibližně směru SZ-JV. Celkem byla vypočtena na základě sedmi pohybových eventů na zlomových plochách LIT1 a



RIC1.

Druhá napěťová fáze R2 představuje kompresi přibližně ve směru Z-V. Také tato transtenzní fáze byla zachycena na poruchách RIC1 a LIT1 a byla vypočtena na základě pěti eventů.



Obr. 2. Sférické grafy zobrazují orientaci extenze a komprese ve třech identifikovaných fázích (R1-R3) v okolí Litoměřic.

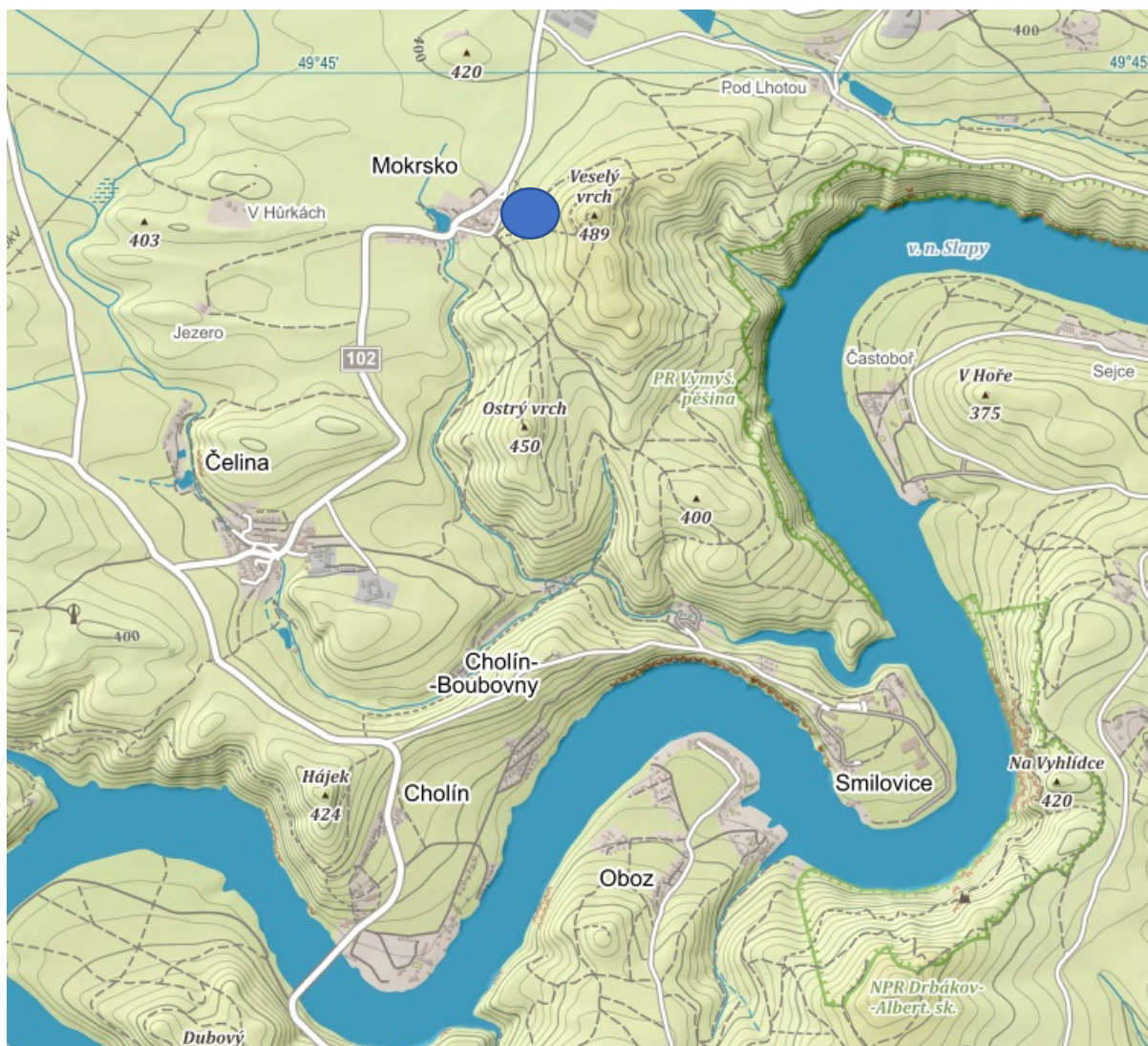
Konečně poslední pozorovaná fáze napětí R3 je spočteno na základě 3 eventů naměřených na zlomu osazeným přístrojem LIT1. Protože byl výpočet založen na pouhých třech vektorech, nevelkého rozsahu a to ještě pozorovaných na svislé poruše, je obtížné určit režim napětí –



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



jedná se o vertikální pohyb, který by mohl být i jiného než tektonického původu (např. sedání nebo creepový svahový pohyb).



Obr. 3. Poloha 3D dilatometrů TM-71 na lokalitě Josef (modrý kruh)

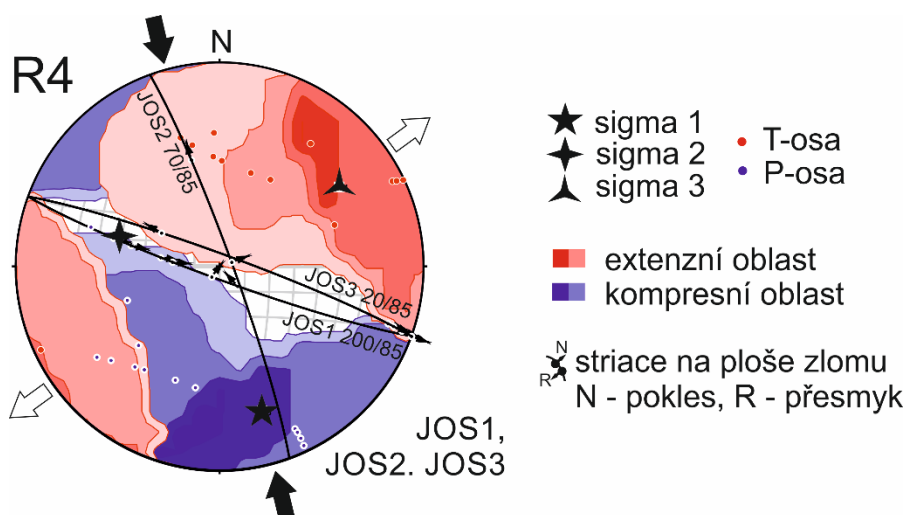
Určení směrů a velikostí tektonického napětí v na lokalitě Josef

Na třech přístrojích TM-71 instalovaných na lokalitě Josef v bývalém důlním komplexu Mokrsko-Čelina probíhá měření od listopadu 2016. Na lokalitě Josef (JOS1, JOS2 a JOS3) vykazují všechny tři přístroje nevelké, ale jednoznačné trendy pohybů, zřejmě tektonického



původu.

Výsledky výpočtu napětí v okolí lokality Josef (na základě měření JOS1, JOS2 a JOS3) jsou v podobě sférického grafu zobrazeny na obr. 4. Zde byla identifikována jen jedna fáze napětí, která převažuje prakticky po celou pozorované období. Tato fáze představuje kompresi orientovanou přibližně ve směru SSZ-JJV. Celkem byla vypočtena na základě 21 pohybových eventů na všech zlomových plochách. Takto orientované napjatostní pole je svými parametry velmi podobné přepokládaným napjatostním polím jiných autorů na dalších lokalitách v Českém masivu stanovených jinými metodami (např. Vavryčuk et al. (2013) v západních Čechách, Špaček et al. (2006) na střední Moravě).



Obr. 4. Sférické grafy zobrazují orientaci extenze a komprese ve třech identifikovaných eventech na lokalitě Josef.

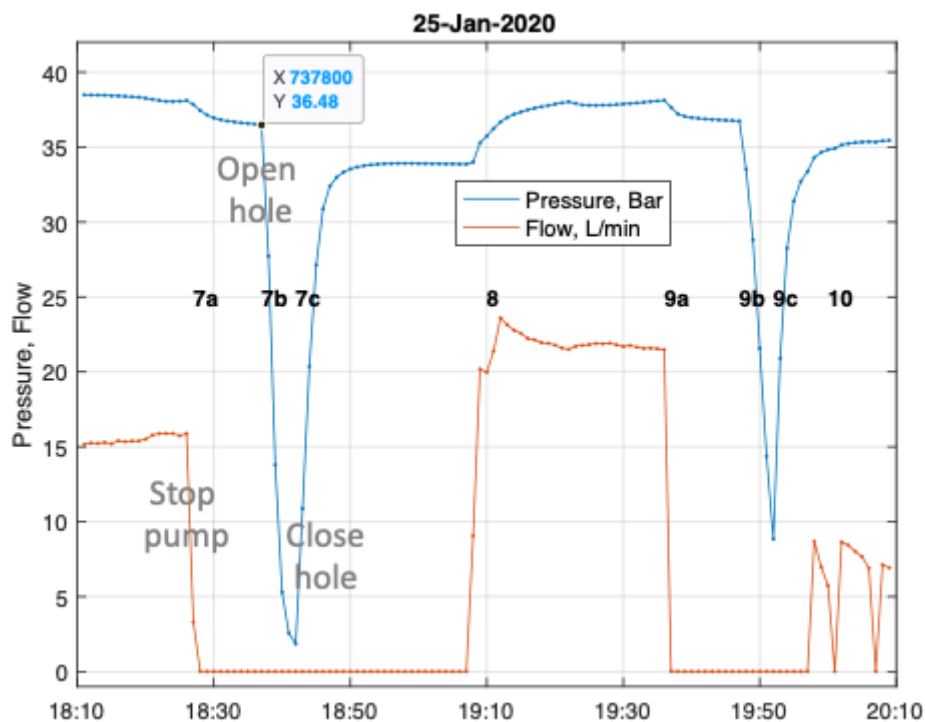
Odhad velikosti minimální složky horninového napětí v oblasti Litoměřic

V důsledku kavernace vrtu nebylo možno metodu Minifrac s ohledem na dostupné finanční prostředky využít. Namísto toho jsme provedli horní odhad minimální složky napětí s využitím dat hydraulických testů provedených ve vrtu LT1 ve dnech 24 až 27. ledna 2020.

Při testech byla do vrtu přes tlakové zhlaví vtláčována voda a byl sledován průběh tlaku a průtoku. Z technických důvodů byl tlakován vrt v celé délce otevřeného stvolu, tj. mezi 852 a 1660 m hloubky. Při tlacích pod 4 MPa byl průtok velmi malý, dosahoval jen zlomky L/min, což indikovalo nepropustnou horninovou formaci. Při překročení 4,1 MPa však průtok rychle narostl a tlak poklesl, což ukázalo na otevření trhliny, jejíž poloha v hloubce 880 m byla

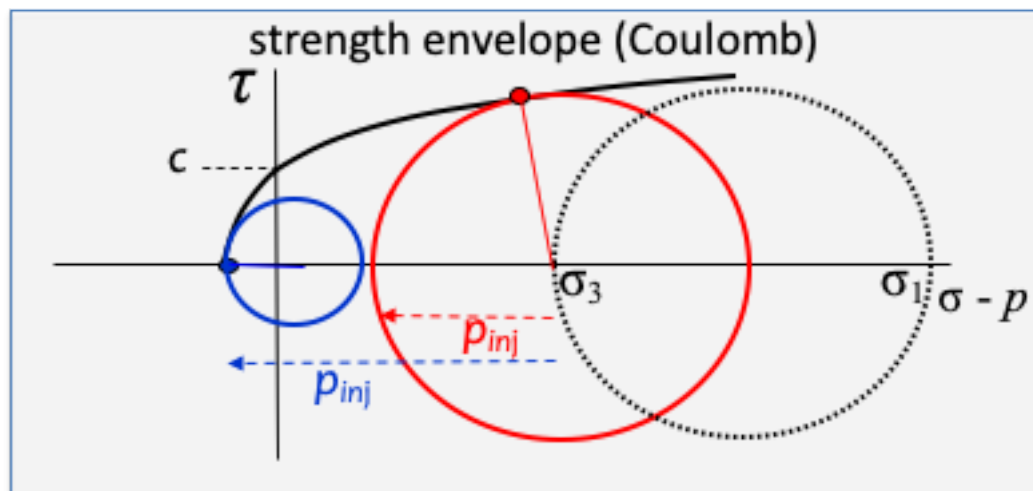


identifikována s pomocí teplotních měření podél vrtu metodou DTS. Zavírací tlak se pohyboval kolem 3.7 MPa (viz. Obr. 5).



Obr. 5. Průběh tlaku vody na zhlaví vrtu a průtoku při injektáži do vrtu PVGT-LT1

Pro ocenění vztahu mezi zavíracím tlakem obecně orientované trhliny a minimální složkou napětí je třeba provést jednoduchou úvahu založenou na Mohr-Coulombově diagramu (Obr. 6). Z ní plyne, že pro aktivaci smykové trhliny je třeba nižší tlak vody než pro otevření nové tahové trhliny. Zavírací tlak obecně trhliny je tedy vždy horním odhadem minimální složky napětí. Uvážíme-li tlak sloupce vody v hloubce 880 m 8.8 MPa, vychází celkový zavírací tlak vody na $8,8 + 3,7 = 12,5$ MPa. Vyjádříme-li jej jako lineární funkci hloubky, vychází vztah $\sigma_3 \leq 1.41 \cdot p_{\text{water}}$, což je hodnota nižší než např. v lokalitě Soultz-Sous-Forets, pro niž je uváděn vztah $\sigma_3 = 1.41 \cdot p_{\text{water}}$ (Valley & Evans, 2019).



Obr. 6. Mohr-Coulombův diagram ukazující, že pro aktivaci smykové trhliny (červená) je třeba nižší tlak vody než pro otevření nové tahové trhliny (modrá)

Závěr

Na základě tříleté řady měření tektonických mikroposunů pomocí 3D dilatometrů TM-71 byla provedena rekonstrukce napětí v masivu na lokalitách Litoměřice a Josef (viz tab. 1). Tímto způsobem bylo určeno několik napěťových fází v lokalitě Litoměřice (R1-3) a jedna na lokalitě Josef (R4). Velikosti napětí bohužel z měřených pohybů zatím nebylo možné určit, protože je doba měření dosud krátká a nevznikl dostatečný počet eventů, které by bylo možné k výpočtům použít, a karotážní metodu Minifrac rovněž nebylo možné využít v důsledku kavernace vrtu, nicméně byly provedeny odhady minimální složky napětí v hornině pomocí hydraulických testů.

Tab. 1

Lokalita	Fáze	Režim	σ_1	σ_2	σ_3	n
LIT1, RIC1	R1	Transtenzní	182/4	302/82	92/7	7
LIT1, RIC1	R2	Transtenzní	87/13	299/75	179/8	5
LIT1	R3	Svahový pohyb?	35/42	142/18	249/42	3
JOS1, JOS2, JOS3	R4	Transtenzní	164/27	287/47	56/30	21



EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání



Literatura:

Špaček, P., Sýkorová, Z., Pazdírková, J., Švancara, J. and Havíř, J. (2006): Present-day seismicity of the south-eastern Elbe Fault System (NE Bohemian Massif). *Studia Geophysica et Geodaetica*, 50, No. 2, 233-258.

Valley, B. and Evans, K.F. (2019): Stress magnitudes in the Basel enhanced geothermal system. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, Vol. 118, 1-20

Vavryčuk, V., Bouchala, F. and Fischer, T. (2013): High-resolution fault image from accurate locations and focal mechanisms of the 2008 swarm earthquakes in West Bohemia, Czech Republic, *Tectonophysics*, 590, 189-195. DOI: 10.1016/j.tecto.2013.01.025

Zdrojová data

(geometrické a velikostní parametry pozorovaných eventů mikroposunů na přístrojích TM-71)

Locality	Event	No.	Date	a_p	Φ_p	Převod na dolní polokouli – a_s	Φ_s – stupně	$\sqrt{u^2 + v^2}$	$w / s $	Úhel total/smyk – převod na stupně
LIT1	E0	1	4.2.2017-6.2.2017	232°	90°	142,00°	15,95°	0,007	-3,43401	-73,76°
LIT1	E1	2	18.2.2017-23.2.2017	232°	90°	142,00°	9,46°	0,006	-6,08276	-80,66°
LIT1	E2	3	3.4.2017-11.4.2017	232°	90°	322,00°	0,00°	0,004	-6,5	-81,25°
LIT1	E3	4	14.6.2017-17.6.2017	232°	90°	322,00°	56,31°	0,007	-3,60555	-74,50°
LIT1	E4	5	14.2.2018-16.2.2018	232°	90°	232,00°	90,00°	0,001	13	85,60°
LIT1	E5	6	6.5.2018-6.6.2018	232°	90°	322,00°	45,00°	0,001	-9,19239	-83,79°
LIT1	E6	7	26.1.2019-20.2.2019	232°	90°	322,00°	71,57°	0,003	5,375872	79,46°
LIT1	E7	8	29.8.2019-30.8.2019	232°	90°	322,00°	0,00°	0,002	-3	-71,57°
LIT1	E8	9	2.1.2020-4.1.2020	232°	90°	142,00°	0,00°	0,003	0	0,00°
RIC1	E1	10	19.2.2018-3.3.2018	220°	85°	132,50°	26,46°	0,002	4,024922	76,05°
RIC2	E2	11	29.3.2018-30.3.2018	220°	85°	132,99°	30,83°	0,012	0,685994	34,45°
RIC3	E3	12	12.9.2018-13.9.2018	220°	85°	310,00°	0,00°	0,006	0,5	26,57°
RIC4	E4	13	21.8.2019-19.11.2019	220°	85°	132,38°	25,41°	0,049	-0,5538	-28,98°



RIC5	E5	14	14.1.2020-28.1.2020	220°	85°	131,25°	13,98°	0,004	0,727607	36,04°
RIC6	E6	15	10.2.2020-11.2.2020	220°	85°	310,00°	0,00°	0,002	0,5	26,57°
RIC7	E7	16	28.2.2020-14.4.2020	220°	85°	130,00°	0,00°	0,005	0,4	21,80°
JOS1	E1	17	22.6.2017-23.6.2017	200°	85°	278,50°	66,30°	0,008	0,656532	33,29°
JOS1	E2	18	11.2.2018-12.2.2018	200°	85°	124,65°	70,92°	0,003	0,632456	32,31°
JOS1	E3	19	10-6-2018-1.7.2018	200°	85°	110,00°	0,00°	0,003	0,333333	18,43°
JOS1	E4	20	8.9.2018-9.9.2018	200°	85°	283,37°	52,84°	0,010	0,5	26,57°
JOS1	E5	21	26.10.2018- 27.10.2018	200°	85°	275,35°	70,92°	0,009	0,210819	11,90°
JOS1	E6	22	10.10.2019- 11.10.2019	200°	85°	137,61°	79,31°	0,006	0	0,00°
JOS1	E7	23	10.1.2020-11.1.2020	200°	85°	285,02°	44,78°	0,001	0,707107	35,26°
JOS1	E8	24	26.3.2020-27.3.2020	200°	85°	218,15°	84,74°	0,035	0,799674	38,65°
JOS2	E1	25	13.2.2018-11.3.2018	70°	85°	70,00°	85,00°	0,002	-2	-63,43°
JOS2	E2	26	20.8.2018-21.8.2018	70°	85°	344,98°	44,78°	0,001	-1,41421	-54,74°
JOS2	E3	27	26.9.2018-27.9.2018	70°	85°	70,00°	85,00°	0,012	-0,16667	-9,46°
JOS2	E4	28	14.12.2018- 15.12.2018	70°	85°	70,00°	85,00°	0,001	-2	-63,43°
JOS2	E5	29	9.10.2019-10.10.2019	70°	85°	342,50°	26,46°	0,002	-1,34164	-53,30°
JOS2	E6	30	14.4.2020-15.4.2020	70°	85°	70,00°	85,00°	0,001	-2	-63,43°
JOS2	E7	31	11.5.2020-12.5.2020	70°	85°	342,50°	26,46°	0,002	-1,78885	-60,79°
JOS3	E1	32	3.6.2017-4.6.2017	20°	85°	110,00°	0,00°	0,004	-0,25	-14,04°
JOS3	E2	33	9.9.2017-10.9.2017	20°	85°	110,00°	0,00°	0,008	0,25	14,04°
JOS3	E3	34	29.10.2017- 30.10.2017	20°	85°	110,00°	0,00°	0,003	-0,33333	-18,43°
JOS3	E4	35	19.1.2018-20.12.2018	20°	85°	110,00°	0,00°	0,004	0,75	36,87°
JOS3	E5	36	1.4.2018-2.4.2018	20°	85°	110,00°	0,00°	0,005	0	0,00°
JOS3	E6	37	26.7.2018-27.7.2018	20°	85°	110,00°	0,00°	0,005	0	0,00°
JOS3	E7	38	24.10.2018- 25.10.2018	20°	85°	109,50°	5,69°	0,010	0,099504	5,68°
JOS3	E8	39	3.2.2019-17.2.2019	20°	85°	108,75°	13,98°	0,008	0,242536	13,63°
JOS3	E9	40	1.4.-2.4.2019	20°	85°	110,00°	0,00°	0,006	0	0,00°
JOS3	E10	41	4.10.2019-8.10.2019	20°	85°	109,00°	11,27°	0,005	0,980581	44,44°
JOS3	E11	42	2.12.2019-12.1.2020	20°	85°	110,00°	0,00°	0,003	-0,66667	-33,6901
JOS3	E12	43	13.2.2020-14.2.2020	20°	85°	299,89°	63,00°	0,002	1,341641	53,30077