

VLIV ZMĚNY TEPLoty A VLHKOSTI HORNINOVÝCH VZORKŮ NA MĚŘENÍ NAPĚTÍ NA JEJICH POVRCHU

INFLUENCE OF TEMPERATURE AND MOISTURE CONTENT VARIATIONS OF ROCK SPECIMENS ON STRAIN MEASUREMENT ON THEIR SURFACE

Tomáš Kaláb¹, Jaromír Knejzlík²

Abstrakt

Metody stanovení úplného tenzoru napětí horninového masivu pomocí kuželové sondy CCBO a monitorování změn napětí masivu s využitím sondy CCBM jsou založeny na výpočtu hodnot metodou konečných prvků. Do výpočtu vstupují tenzometricky změřené deformace kuželové plochy na čele vrtu a jako parametry elastické parametry horniny.

Při interpretaci výsledků dlouhodobého monitorování změn tenzoru napjatosti masivu sondami CCBM bylo zjištěno, že změny teploty a vlhkosti horniny mohou mít podstatný vliv na měřené hodnoty napětí. Proto bylo provedeno laboratorní měření s cílem posoudit vliv těchto parametrů na měřené hodnoty. Výsledky těchto měření pro čtrnáct vzorků různých hornin jsou publikovány v této práci.

Abstract

Methods for the complete stress tensor determining of the rock massif using conical CCBO probes and monitoring of strain changes in the massif using CCBM probes are based on the calculation based on the finite element method. Deformations of the conical surface of the borehole end measured by strain-gauges are included into calculation procedure; elastic parameters of the rock are inserting as parameters.

It was found during interpretation of long-term monitoring results of changes in stress tensor using CCBM probes that changes of temperature and moisture content of rock massif can have a significant effect on the measured values. Therefore, laboratory measurements were performed to explore the effect of these parameters. The results of these measurements for fourteen specimens of different rocks are published in this paper.

Klíčová slova

měření napětí, tenzometrické čidlo, teplotní roztažnost horniny, roztažnost horniny vlivem vlhkosti, kuželová sonda

Keywords

strain measurement, strain gauge, thermal expansion of rock, moisture expansion of rock, conical probes

1 Úvod

Metoda měření napětového stavu horninového masivu metodou odlehčeného jádra v kuželové geometrii CCBO – Compact Conical-Ended Borehole Overcoring byla vypracována K. Sugavarou a Y. Obarou (Nakamura et al., 1999). Na čele vrtu je vytvořena kuželová plocha, na které se pomocí tenzometrů měří deformace v minimálně 6 nezávislých směrech. Jádro je poté odvrtáno a z naměřených deformací a elastických parametrů horniny lze metodou konečných prvků vypočítat změnu tenzoru napětí (Kang, 2000). Pro spolehlivé vyhodnocení měření je nutný kontinuální záznam dat během obvrtávání. Pro aplikaci této metody v ČR byla vyvinuta sonda CCBO s vestavěným mikroprocesorovým záznamníkem dat (Staš et al. 2005a, b). Pro měření změn napětového stavu horninového masivu byla vyvinuta také speciální varianta sond CCBM (Compact Conical-Ended Borehole Monitoring), (Knejzlík et al., 2008, Kaláb et al., 2011). Pomocí těchto sond se provádí monitorování změn napětí v masivu v dolech OKR a experimentálně jsou použity pro monitorování změn napětí v masivu vyvolaných změnou teploty. Dvě sondy CCBM byly za účelem ověření možnosti dlouhodobého kontinuálního monitorování s telemetrickým přenosem dat instalovány v roce 2007 do distribuovaného měřicího systému v Dole Jeroným (Kaláb et al., 2006, 2008). Výsledky měření byly publikovány (Kaláb et al., 2011, Knejzlík et al., 2011). V naměřených datech od roku 2009 je pozorován dlouhodobý trend nárůstu deformace na měřicích tenzometrech, který nelze vysvětlit změnou mechanického napětí v masivu. Proto byla podrobena kritickému rozboru konstrukce sond CCBM s cílem zjistit příčiny vzniku těchto chyb měření. Byly prověřeny vlastnosti použitého lepidla, avšak byly shledány jako vyhovující. Kvůli použití sond CCBM k měření změn napětí masivu v rozsahu teplot až do 80°C bylo nutno optimalizovat instalaci kompenzačního tenzometru v sondě.

Předpokládali jsme, že v tomto teplotním rozsahu v horninách nedochází k chemickým změnám a ke změnám stavby a že optimální je přilepit kompenzační tenzometr na trámeček z horniny odebrané přímo z místa instalace sondy. K tomu účelu bylo provedeno laboratorní měření teplotní závislosti tenzometru nalepeného na různých tvarech podložek z granitu odebraného z vrtu, do něhož byla instalována sonda CCBM v Dole Jeroným. Při tomto měření byla zjištěna velká nereprodukovatelnost výsledků, jejíž původ byl po řadě experimentů objasněn změnami vlhkosti horniny. Za účelem odhadu závislosti chyby způsobené vlhkostí byl vzorek granitu ve tvaru podélně rozříznutého vrtného jádra položen do misky s vodou a během navlhání do ustáleného stavu byla tenzometrem měřena jeho poměrná deformace. Ta dosáhla hodnoty cca 1000 μStrain (poměrné prodloužení $10^{-6} = 1 \mu\text{Strain}$). Po vyschnutí vzorku se vrátila na výchozí hodnotu. Taková dilatace horniny, vyvolaná pouze změnou její vlhkosti, může způsobit velkou chybu měření napětí v masivu, případně je zcela znemožnit. Bylo zjištěno, že i malé změny vlhkosti, způsobené různou relativní vlhkostí vzduchu v laboratoři, působí větší chyby než změny teploty v rozsahu několika stupňů (Knejzlík et al., 2013).

Délkovou teplotní roztažností hornin se zabývá řada publikovaných prací (např. Zinszner a Pellerin, 2007). Měření byla zpravidla prováděna komerčně vyráběnými dilatometry v teplotním rozsahu až do několika set °C. V tomto teplotním rozsahu dochází v horninách k chemickým změnám, případně ke změnám krystalické stavby. Je známo, že výsledky měření teplotní roztažnosti hornin závisí mimo jiné na režimu ohřevu a nelineární závislost dilatace na teplotě při ohřevu a chladnutí je různá (Vavro a Konečný, 2002, Fojtek et al. 1990).

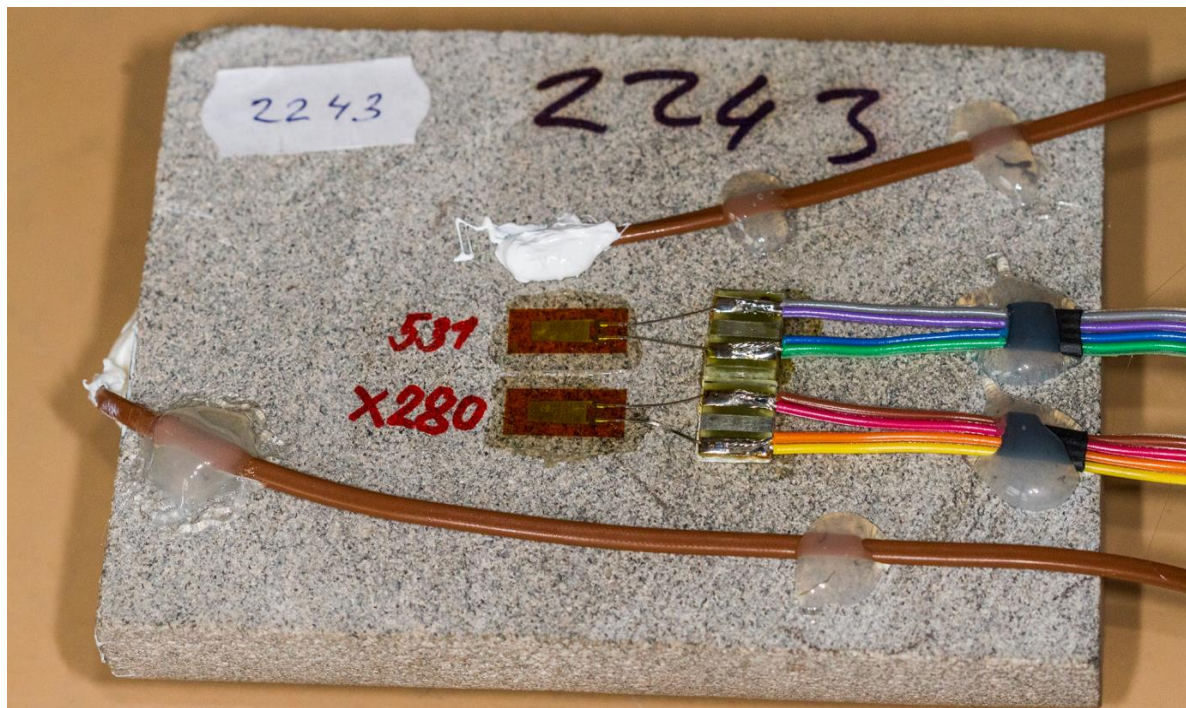
V rozsahu teplot 10 °C– 80 °C, který přichází v úvahu pro aplikace sond CCBM, nejsou spolehlivé údaje o teplotní roztažnosti hornin publikovány. Například Heuze (1983) publikuje závislosti koeficientů délkové roztažnosti různých granitů na teplotě. Pro uvažovaný

rozsah teplot leží jím naměřené hodnoty α v intervalu $7 - 14 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Informací o dilataci hornin vlivem vlhkosti je publikováno velmi málo, publikovány jsou zejména informace o vlivu vlhkosti na elastické vlastnosti hornin (např. Irragore, 2010). Fojtek (1990) uvádí, že pokud se týká vlivu pórovitosti a vlhkosti na teplotní roztažnost hornin platí, že s rostoucí pórovitostí teplotní roztažnost klesá a při zvlhčování pórovité horniny se její koeficienty roztažnosti vzhledem k suchému stavu zvětšují. Publikace, popisující dilataci hornin vlivem změn vlhkosti při konstantní teplotě, se nepodařilo najít.

2 Experimentální porovnávací měření vlivu teploty a vlhkosti na dilataci hornin

Tab. 1 Soubor horninových vzorků pro srovnávací experiment (popis vzorků A. Kožušníková)

Typ horniny	Lokalizace	Číslo vzorku
Mramor šedý - jemnozrnný	Lipová	5335
Granodiorit	Žulová - Nový lom	10252
Laminovaný prachovec	vrt NP 596, hloubka 693m	2362
Pískovec středně zrnitý až jemnozrnný	vrt NP 596, hloubka 1040m	2374
Pískovec jemnozrnný	Prstná, vrt NP 893, hloubka 929m	2297
Pískovec hrubozrnný s hojnými valouny	Prstná, vrt NP 893, hloubka 1018m	2304
Slepenec + hrubozrnný pískovec	Prstná, vrt NP 893, hloubka 1108m	2309
Laminovaný pískovec	Krásná 9, hloubka 929m	2279
Hrubozrnný pískovec až slepenec	Krásná 9, hloubka 1643,5m	2282
Prachovec	Dětmárovice, vrt NP 908, hloubka 909m	2232
Pískovec středně zrnitý	Dětmárovice, vrt NP 908, hloubka 992m	2243
Laminovaný pískovec jemnozrnný	Dětmárovice, vrt NP 908, hloubka 1241m	2239
Hrubozrnný pískovec	Dětmárovice, vrt NP 908, hloubka 1409m	2238
Slepenec	Dětmárovice, vrt NP 892, hloubka 915m	1989



Obr.1 Instalace tenzometrů a teplotních čidel na vzorku horniny

na povrch vzorku instalována termočláňková čidla teploty (Obr. 1).

Lepidlo HBM X280 je speciální lepidlo pro tenzometry, které dodává jejich výrobce. Pro lepení kuželových sond ve vrtech se nepoužívá, neboť vyžaduje dokonale suchý podklad. Sondy CCBO a CCBM se v praxi lepí do vrtů lepidlem Epoxy 531, které tuhne i na vlhkém podkladu při běžných teplotách horninového masivu. Tuhnutí lepidla Epoxy 531 za nízkých teplot kolem 10 °C bylo prověřeno laboratorním experimentem (Knejzlík et al., 2013).

Vzorky hornin byly umístěny v klimatizační komoře, která je schopna udržovat automaticky nastavenou teplotu (Obr. 2). Všechny měřicí tenzometry byly čtyř drátově připojeny na multiplexované vstupy můstku v měřicí ústředně Dewetron DEWE-2602 (Obr. 3). Měřicí tenzometr tvořil 1 větev můstku, ostatní větve tvořily přesné rezistory. Senzory teploty a relativní vlhkosti vzduchu v komoře byly připojeny na další vstupy měřicí ústředny. Měření byla programem automaticky spouštěna v časových intervalech 30 s. Data byla ukládána na HDD a bylo k nim možno přistupovat prostřednictvím počítačové sítě.

Fóliové tenzometry HBM LY11-10/120 jsou konstruovány pro měření na oceli s koeficientem lineární teplotní roztažnosti $\alpha_S = 10,8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. Na materiálu s rozdílným koeficientem teplotní roztažnosti $[\alpha_R]$ vzniká vlivem změn teploty chyba měření deformace. Je-li $\alpha_R > \alpha_S$, je při zvýšení teploty tenzometr natahován, což se projevuje jako zdánlivá kladná hodnota dilatace. Je-li $\alpha_R < \alpha_S$, brání měřený

S cílem získat rychlý odhad vlivu teplotní roztažnosti a roztažnosti v důsledku změny vlhkosti různých typů hornin byl připraven porovnávací experiment, při němž byla současně tenzometricky měřena závislost poměrné deformace vybraných vzorků hornin na čase:

- Při změně teploty z 30 °C na 50 °C a zpět při konstantní pokojové vlhkosti vzduchu.
- Při změně vlhkosti (uložení části vzorku do vody) při konstantní teplotě cca 37 °C.

Pro srovnávací měření bylo vybráno 14 charakteristických typů hornin, ve kterých je měření napětí masivu metodou CCBO nebo CCBM již prováděno, nebo je plánováno. Horninové vzorky pochází z archivu Oddělení laboratorního výzkumu geomateriálů ÚGN (A. Kožušníková) – Tab. 1. Na zabroušený povrch každého vzorku horniny jsou přilepeny dvěma typy lepidel (x280 a Epoxy 531) dva kusy shodných fóliových tenzometrů. Dále jsou

materiál tenzometru v roztažení vlivem teploty a to se projeví paradoxně jako zdánlivá záporná hodnota dilatace. Pro poměrnou deformaci platí vztah:

$$\varepsilon(t) = \frac{2k}{G} \times (\alpha_R - \alpha_S) \times t, \quad (1)$$

kde t = teplota,

k = konstanta,

G = deformační citlivost tenzometru.

Dále uvedené výsledky měření na horninách potvrzují výše uvedené zjednodušené úvahy. Hodnoty lineární teplotní roztažnosti minerálů se pohybují v řádech 10^{-6} a 10^{-5} .



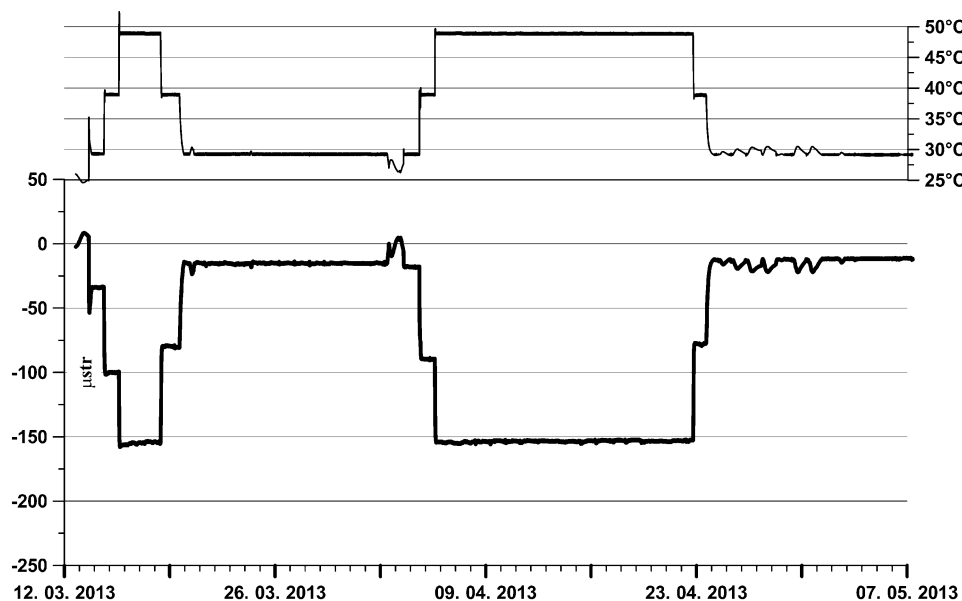
Obr.2 *Vzorky hornin umístěné v klimatizační komoře*



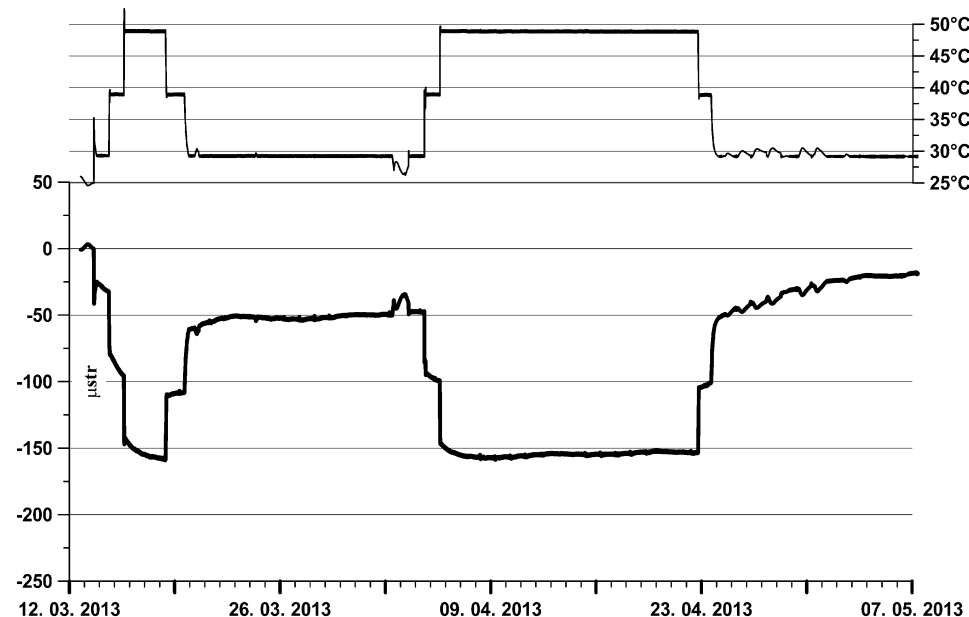
Obr. 3 *Měřicí ústředna Dewetron DEWE-2602 s klimatizační komorou*

2.1 Výsledky porovnávacího měření vlivu změn teploty

Zde uvádíme vybrané výsledky, které charakterizují odlišné chování různých typů hornin. Vzorky byly temperovány na teplotu 28 °C a poté byla teplota skokově zvyšována po 10 °C na 48 °C a byla měřena závislost poměrné deformace na čase. Poté byla teplota po stejných skocích snižována na výchozí hodnotu. Na obrázcích (Obr. 4 – 9) jsou uvedeny dva takového cykly s různou délkou maximálního ohřevu horniny (cca 3 dny a cca 18 dnů), po prvním cyklu je cca 17 dnů. Celková délka experimentu je 12. 3. 2013 – 7. 5. 2013. V horní části obrázků je křivka teploty (rozsah osy je +25 až +50 °C), ve spodní části je křivka poměrné deformace (rozsah osy +50 až -250 μStrain).



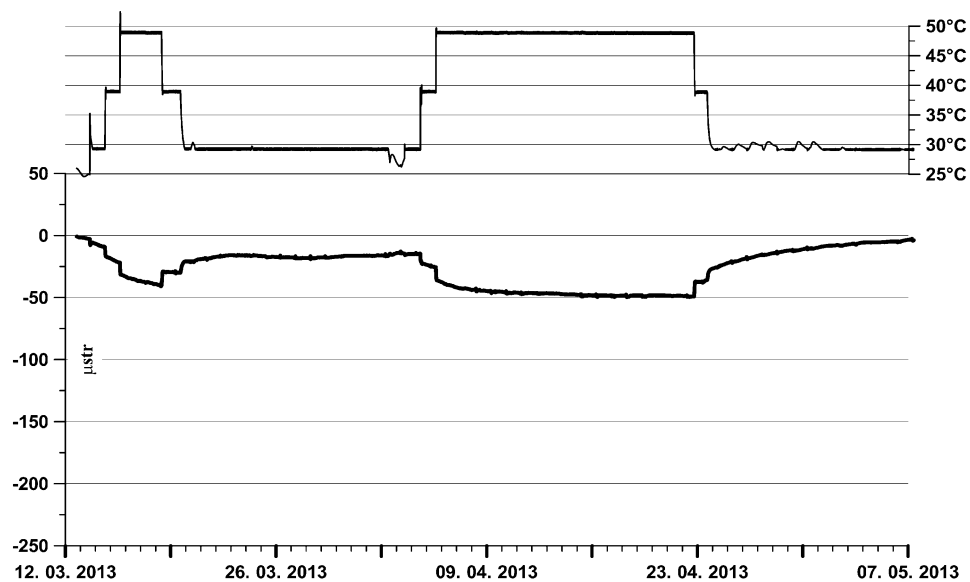
Obr. 4 Mramor šedý, Lipová, vzorek 5335



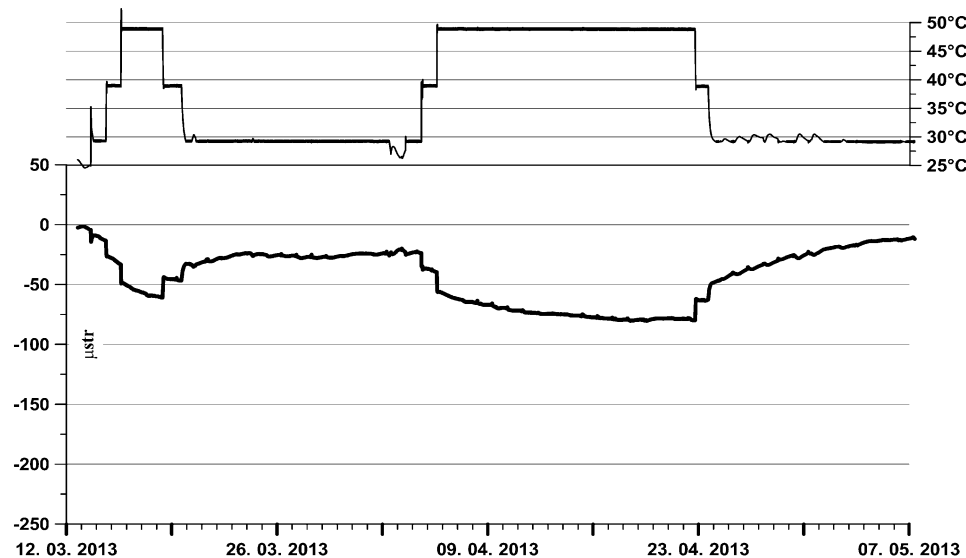
Obr. 5 Granodiorit, Žulová, vzorek 10252

Vzorek 5335 mramoru z Lipové (Obr. 4) se chová ideálně podle předpokladů. Protože je teplotní roztažnost mramoru menší než tenzometru, je naměřena při zvýšení teploty záporná dilatace (kontrakce) cca $\Delta\epsilon/\Delta t = -7,5 \mu\text{Strain}/^\circ\text{C}$. Odezva horniny na změnu teploty je rychlá. Hodnoty poměrných deformací jsou stabilní v čase a jsou reprodukovatelné. Velmi podobné výsledky, co do charakteru závislosti, tak i co do naměřených hodnot relativní deformace, byly získány na vzorku granodioritu z Žulové (Obr. 5). V obou případech hodnota relativní deformace při změně o 20 °C je cca -150 μStrain.

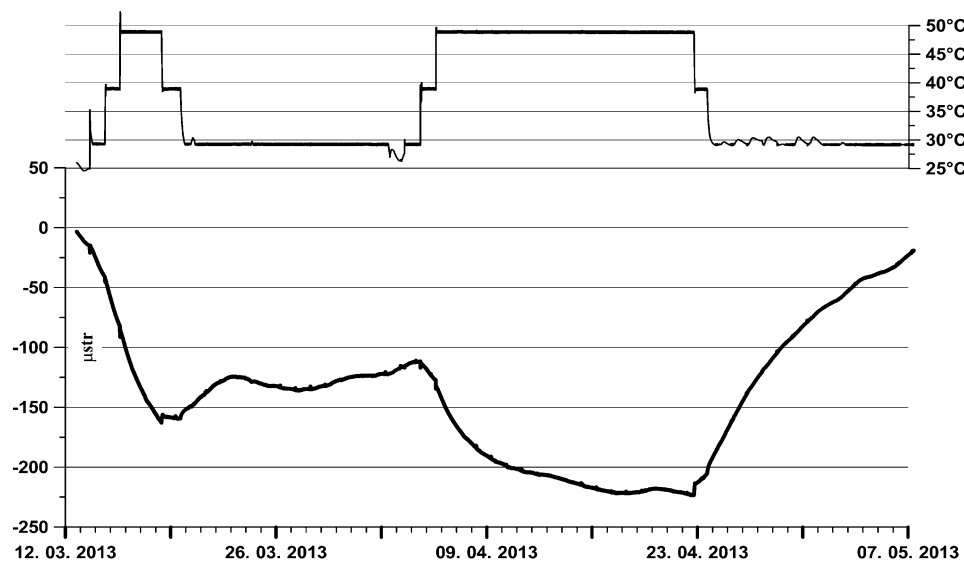
Poměrně malé hodnoty poměrné deformace při dané teplotní změně vykazovaly vzorky pískovce z dětmarovických vrtů (Obr. 6 a 7), a to maximálně do -70 μStrain. V případě pískovců je opět závislost reprodukovatelná, ovšem odezva horniny je značně pomalejší, a to jak při ohřívání, tak i při chladnutí. Naproti těmto výsledkům prachovce ze stejných vrtů (Obr. 8 a 9) mají zcela nereprodukovatelné odezvy a hodnoty relativní deformace při změně o 20 °C dosáhly až -250 μStrain.



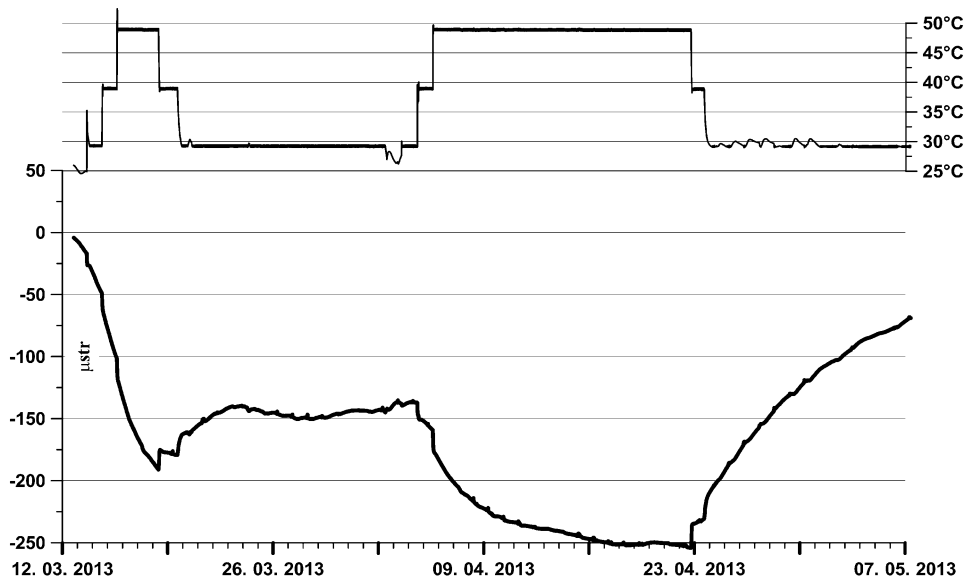
Obr. 6 Pískovec středně zrnitý až jemnozrný, NP596, vzorek 2374



Obr. 7 Pískovec středně zrnitý, NP908, vzorek 2243



Obr. 8 Laminovaný prachovec, NP 596, vzorek 2362



Obr. 9 Prachovec, NP908, vzorek 2232



Obr. 10 Vzorky hornin v klimatizační komoře při měření vlivu navlhnutí

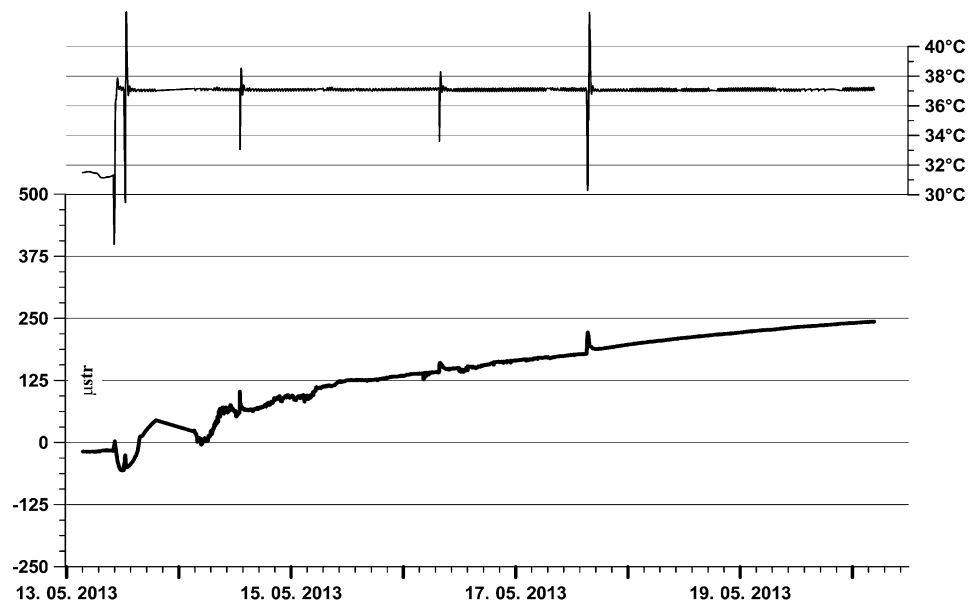
až +40 °C), ve spodní části je křivka poměrné deformace (rozsah osy +500 až -250 μStrain pro Obr. 11 – 13, rozsah osy +2500 – 0 μStrain pro Obr. 14 a rozsah osy +3000 až -250 μStrain pro Obr. 15).

Hodnoty poměrné deformace měřené na vzorcích mramoru (Obr. 11) a pískovce (Obr. 13) se po dobu experimentu víceméně lineárně zvyšovaly, a to do hodnoty cca +250 μStrain . Stejně maximální hodnoty bylo dosaženo i pro vzorek granodioritu (Obr. 12). V tomto případě však došlo během prvního dne k rychlé změně a poté se hodnoty měnily jen velmi málo (přibližně logaritmická závislost). Dramatická změna při navlhání nastala pro vzorky prachovců. Poměrná deformace laminovaného prachovce (Obr. 14) narostla během prvního dne víceméně lineárně na hodnotu téměř +500 μStrain , poté za pouhých cca 6 hodin hodnota vzrostla na téměř +2000 μStrain . Následně již došlo pouze k lineárnímu nárůstu poměrné deformace, který na konci experimentu dosáhl hodnoty 2100 μStrain . Obdobný průběh měla i poměrná deformace na vzorku prachovce (Obr. 15), získané maximální hodnoty však byly ještě vyšší a dosáhly po 4 dnech hodnoty 2750 μStrain . Zde pro tento vzorek experiment skončil, neboť došlo k rozpadnutí vzorku

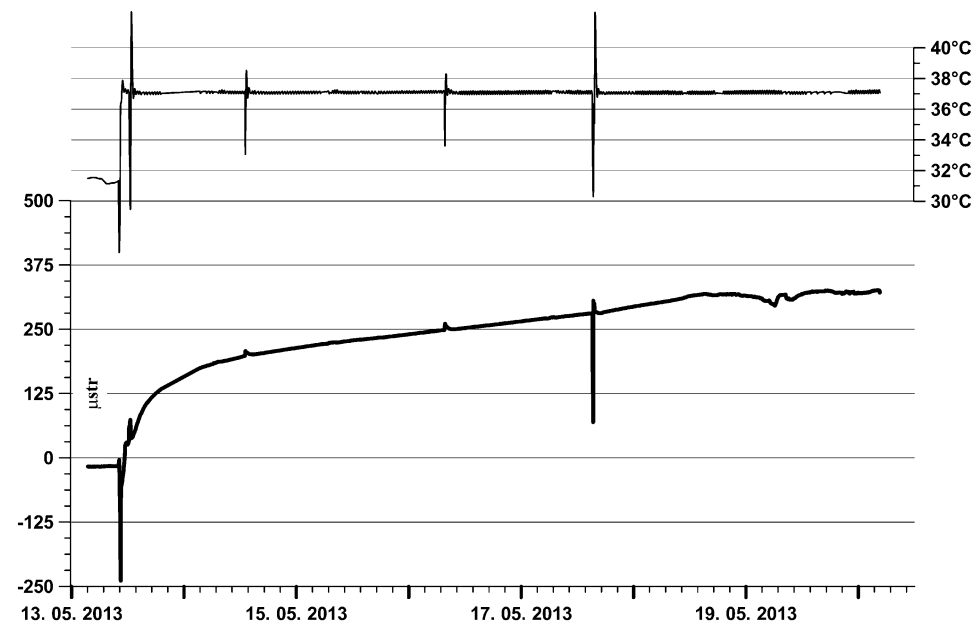
2.2 Výsledky porovnávacího měření vlivu navlhnutí

Cílem této části experimentu nebylo kvantitativní měření závislosti roztažnosti v důsledku změny vlhkosti na přesné hodnotě vlhkosti horniny, ale rozřídění daného souboru vzorků podle velikosti a časového průběhu měřených hodnot při navlhčení. Suché vzorky byly umístěny do misek a ponořeny spodní stranou do vody (Obr. 10). Teplota v komoře byla udržována na konstantní hodnotě 37 °C. Ostré píky na křivce teploty jsou projevem otevření klimatizační komory a následné rychlé vyrovnaní teploty na 37 °C. Za těchto podmínek byla registrována časová závislost poměrné deformace vyvolané postupným samovolným navlháním horninových vzorků.

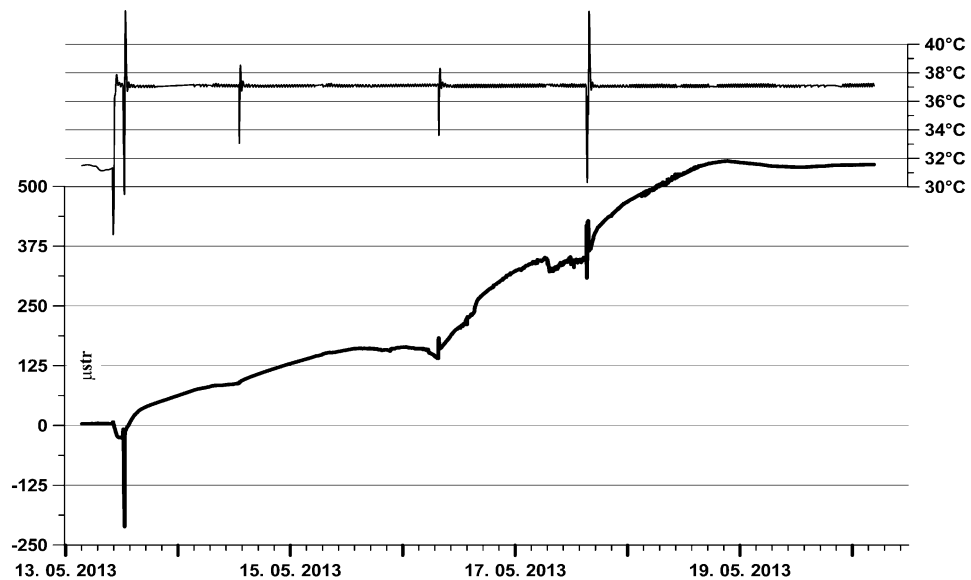
Na obrázcích, Obr. 11 až 15, jsou uvedeny příklady naměřených křivek, přičemž doba navlhání byla cca 7 dnů (13. 5. 2013 – 21. 5. 2013). V horní části obrázků je opět křivka teploty (rozsah osy je +30



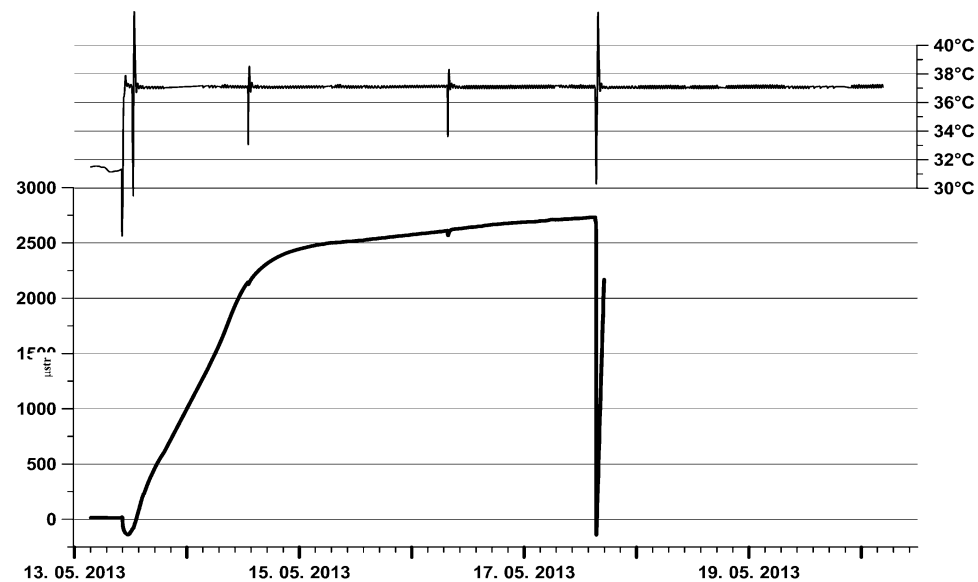
Obr. 11 Mramor šedý, Lipová, vzorek 5335



Obr. 12 Granodiorit. Žulová. vzorek 10252



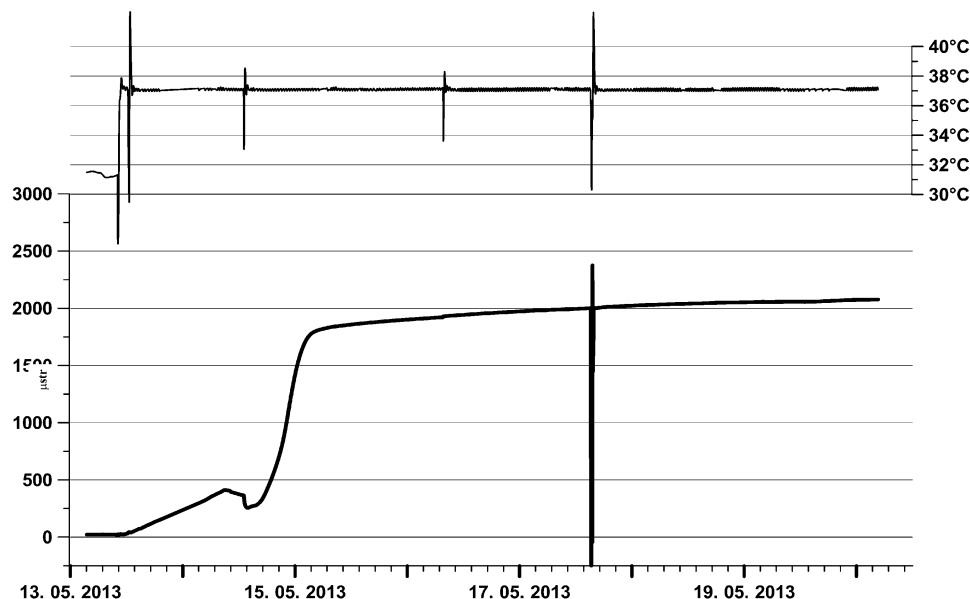
Obr. 13 Pískovec středně zrnitý, NP908, vzorek 2243



Obr. 14 Laminovaný prachovec, NP 596, vzorek 2362

3 Závěr

V příspěvku jsou popsána laboratorní měření, která prokazují vliv změny teploty a vlhkosti vzorku na hodnoty měřené poměrné deformace pomocí tenzometrických čidel. Experiment byl realizován na sadě horninových vzorků, které byly zhotoveny podélným rozříznutím válcových vrtných jader o průměru 7,6 cm. Teplotní rozsah experimentu byl malý a v nízkých teplotách (28 – 48 °C), což odpovídá reálným měřením v terénních podmínkách či důlních dílech. Vliv změny vlhkosti je dokladován pouze hrubě, vlastní saturace vzorku nebyla měřena.



Obr. 15 Prachovec, NP908, vzorek 2232

Změna poměrné deformace při změně teploty o 20 °C se pohybovala do-150 μStrain, pouze u prachovců byla dosažena změna až-250 μStrain, přičemž měřené hodnoty nebyly reprodukovatelné. Mnohem větší vliv na hodnoty poměrné deformace měla změny vlhkosti vzorků. Po vložení vzorku do vody hodnoty poměrné deformace rychle narostly a dosáhly hodnotu až +2750 μStrain. Oba tyto vlivy, zvláště pak změnu vlhkosti, bude potřeba detailněji kvantitativně analyzovat, aby bylo možno získané poznatky uplatnit při opravě měřených dat. Je třeba vzít do úvahy, že chování horninového masivu může být odlišné od chování vzorků v laboratorních podmínkách.

PODĚKOVÁNÍ

Příspěvek je zpracován s podporou na dlouhodobý koncepční rozvoj výzkumné organizace RVO: 68145535 a projektu MPO TIP č. FR-TI3/579.

Literatura

- FOJTEK, A., KNEJZLÍK, J., NOVOTNÝ, I. Metoda měření teplotní délkové roztažnosti tuhých látek. *Sbor. věd. prací VŠB Ostrava, řada hor. geol.*, roč. XXIX, č. 1, p. 9–20, 1990.
- HEUZE, F. E. High-temperature mechanical, physical and thermal properties of granitic rock – a review. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, vol. 20, No. 1, p. 3–10, 1983.
- IRRAGORE, M. T. Z. *Thermo-hydro-mechanical analysis of joints: A theoretical and experimental study*. Department of Geotechnical Engineering and Geosciences, Universitat Politècnica de Catalunya, Barcelona, Spain, 2010.
- KALÁB, Z., KNEJZLÍK, J., KOŘÍNEK, R., ŽŮREK, P. Cultural monument Jeroným Mine, Czech Republic – Contribution to the geomechanical stability assessment. *Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc.*, M-29(395), s. 137–146, 2006.

- KALÁB, Z., KNEJZLÍK, J., KOŘÍNEK, R., KUKUTSCH, R., LEDNICKÁ, M., ŽŮREK, P. Contribution to experimental geomechanical and seismological measurements in the Jeroným Mine. *Acta Geodyn. et Geomater.*, Vol. 5, No. 2(150), p. 213–223, ISSN 1214–9705, 2008.
- KALÁB, Z., KNEJZLÍK, J., RAMBOUSKÝ, Z. Dlouhodobý monitoring změn tenzoru napjatosti v masivu. *International Journal of Exploration Geophysics, Remote Sensing and Environment (EGRSE)*, Vol. XVIII. 1, p. 73–82. CD-ROM ISSN 1803–1447. http://www.caag.cz/egrse/2011-1/clanek_08.pdf, 2011.
- KANG, S. S. Measurements and interpretation of stress history of limestone deposit. A dissertation for Degree of Doctor of Philosophy, Kumamoto, Kumamoto University, MS., 2000.
- KNEJZLÍK, J., RAMBOUSKÝ, Z., SOUČEK, K., STAŠ, L. Second generation of conical strain gauge probe for stress measurement in rock massif. *Acta Geodyn. et Geomat.*, Vol. 5, No. 3 (151), p. 1–9, ISSN 1214–9705, 2008.
- KNEJZLÍK, J., KALÁB, Z., LEDNICKÁ, M., STAŠ, L. Investigation of the medieval Jeroným Mine stability: Present results from a distributed measurement network. In Idziak, A. F., Dubiel, R. – editors: *Geophysics in Mining and Environmental Protection. Ser. Geoplanet: Earth and Planetary Science*, Vol. 2, p. 59–70. © Springer-Verlag Berlin. ISSN 2190–5193, DOI 10.1007/978-3-642-19097-1. <http://www.springerlink.com/content/978-3-642-19097-1#section=917403&page=9&locus=81>, 2011.
- KNEJZLÍK, J., KALÁB, Z., LEDNICKÁ, M., RAMBOUSKÝ, Z. Inovace sond CCBM pro distribuované měřicí systémy. *International Journal of Exploration Geophysics, Remote Sensing and Environment, EGRSE*, Vol. XX. 1, p. 53–65. CD-ROM ISSN 1803–1447, 2013.
- NAKAMURA, N., OHKUBO, R., OBARA, Y., KANG, S. S., SUGAWARA, K., KANEKO, K. Rock stress measurement for limestone open pit mine. In: *Proc. of 5th Int. Symp. on Field Measurements in Geomechanics*, Singapore, Rotterdam: Balkema, p. 375–380, 1999.
- STAŠ, L., KNEJZLÍK, J., RAMBOUSKÝ, Z. Conical strain gauge probe for stress measurements. In Konečný, P. (ed): *Eurock 2005 – Impact of Human Activity on the Geological Environment*, London: Balkema, p. 587–592, ISBN 04 1538 042 1, 2005a.
- STAŠ, L., KNEJZLÍK, J., RAMBOUSKÝ, Z. Měření tenzoru napjatosti horninového masivu pomocí kuželové sondy. *Transactions (Sborník vědeckých prací Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava), Řada stavební*, roč. V, č. 2, p. 179–191, ISSN 1213–1962, 2005b.
- VAVRO, M., KONEČNÝ, P. Vliv teploty a tlaku na vlastnosti hornin. Zpráva k „Smlouvě o dílo č. 424/22/10, Ústav geoniky AVČR, v.v.i., Ostrava, 2002. MS.
- ZINSZNER, B., PELLERIN, F-M. *A geoscientist's guide to petrophysics*. IFP Publications, Paris, France, ISBN 978-2-7108-0899-2, 2007.

Autoři

¹ Ing. Tomáš Kaláb – Ústav geoniky AV ČR, v. v. i., Studentská 1768, 708 00, Ostrava-Poruba, tomas.kalab@ugn.cas.cz

² Ing. Jaromír Knejzlík, CSc. – Ústav geoniky AV ČR, v. v. i., Studentská 1768, 708 00, Ostrava-Poruba, knejzlik@ugn.cas.cz