

**Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta
Ústav hydrogeologie, inženýrské geologie a užití geofyziky**

**Charles University in Prague, Faculty of Science
Institute of Hydrogeology, Engineering Geology and Applied Geophysics**

Doktorský studijní program: Aplikovaná geologie
Ph.D. study program: Applied geology

Autoreferát disertační práce
Summary of the Ph.D. Thesis



**Laboratorne štúdium 3D elastickej anizotropie
hornín
Laboratory study of 3D elastic anisotropy of
rocks**

Tomáš Svitek

Školitel/Supervisor: Ing. Tomáš Lokajíček, CSc.

Školitel-konzultant/Supervisor-consultant: RNDr. Václav Vavryčuk, DrSc.

Praha, 2014

Abstrakt

V predkladanej práci je hodnotený význam merania rýchlosti akustických S vln na stanovenie elastickej anizotropie hornín. S vlny sú v porovnaní s P vlnami citlivejšie na anizotropiu prostredia, ktorým sa šíria. Na základe ich štepenia je možné stanoviť silu anizotropie a orientáciu štruktúr, ktoré sú za anizotropné chovanie materiálu zodpovedné. S vlny sú tak nutné k popisu anizotropného chovania materiálu a k stanoveniu kompletného tenzoru elastických parametrov. Aby bolo možné S vlny registrovať bolo však nutné existujúcu meraciu aparatúru vyvinutú pre meranie rýchlostí P vln významne inovovať. Vykonané inovácie poskytli meranie P vln v pozdĺžnom smere a S vln v dvoch navzájom kolmých priečných smeroch. Kalibračné merania na homogénnych izotropných materiáloch potvrdili stálosť a opakovateľnosť registrovaných údajov. Nové usporiadanie ultrazvukového merania na guľových vzorkách za pôsobenia všesmerného hydrostatického tlaku a možnosť registrovať vlnové obrazy S vln umožnilo určovať anizotropiu hornín s kvalitatívne lepšou presnosťou než oproti doterajšiemu spôsobu spracovania. Meranie S vln si vyžiadalo úpravu spracovateľského softwaru a vývoj nových algoritmov interpretácie nameraných dát. K overeniu funkčnosti navrhnutých spracovateľských postupov boli realizované syntetické testy vyhodnocujúce variabilitu, vplyv nepresnosti a typ vstupných premenných pre výpočet tenzoru elastických parametrov. Testy potvrdili, že meranie rýchlostí S vln vedie k významnému zlepšeniu presnosti meranej anizotropie. Ukázalo sa, že meranie rýchlosti P a S1 vln nie je úplne postačujúce. Najlepšie výsledky sú dosiahnuté pri výpočte s prispením rýchlostí P, S1 aj S2 vln. Aplikácia výpočtu na reálne dáta potvrdila výsledky syntetického testu. Práca tak dokumentuje nutnosť znalosti rýchlostí S1 a S2 vln v dostatočnom množstve nezávislých smerov pre hodnoverné stanovenie anizotropie skúmaného materiálu.

Abstract

The presented work evaluates the significance of measuring acoustic S-wave velocities for determination of elastic anisotropy of rocks. The S waves are more sensitive to anisotropic properties of a medium than the P waves. Analyzing the S-wave splitting, it is possible to determine strength of anisotropy as well as the orientation of structures responsible for the anisotropic behavior of the medium. The S waves are necessary for determining the complete tensor of elastic parameters. In order to record the S waves, the measuring head of the present apparatus has been significantly adapted. Implemented innovations provided measurements of the P waves together with two orthogonally polarized S waves. The calibration performed on homogeneous isotropic materials proved that the recorded data are accurate and of high quality. The ultrasonic measurements on spherical samples under confining pressure and recording of the S waveforms significantly improved the accuracy of the retrieved elastic parameters compared to the measurements in standard use. The analysis of the S-wave records also required modifications of the processing software and a development of new algorithms. The proposed methods were tested on synthetic data. The tests evaluated the robustness of the inversion for anisotropy as a function of the number of measurements, their accuracy and type of waves recorded. The tests revealed that measuring the P-wave velocities is not sufficient for calculating the complete tensor of elastic parameters. When using measurements of the P and S1-wave velocities, the accuracy is usually improved. However, the best accuracy is achieved if measurements of the P-, S1- and S2-wave velocities are inverted. The results of the synthetic tests were confirmed by the application of the proposed inversion methods to real data. This application documented the necessity for knowledge of the S1 and S2-wave velocities measured in a sufficient number of independent directions in order to determine anisotropy reliably.

Téma a ciele práce

Predkladaná dizertačná práca sa zaoberá štúdiom elastickej anizotropie hornín pomocou metódy ultrazvukového prežarovania v režime hydrostatického zaťažovania. Dôraz je kladený na vplyv meraných rýchlostí S vln (spoločne v kombinácii s P vlnami) na určovanie elastických vlastností materiálu, ktorým sa vlnenie šíri. Práca je založená na meraní a spracovaní unikátnych laboratórnych dát a na vývoji nových postupov a metód ich interpretácie.

Väčšina zaťažovacích experimentov je štandardne robených na horninových vzorkách tvaru valca, hranolu či kocky (Al-Sahawneh, 2013; Kwasniewski, Li, & Takahashi, 2012; Stanchits, Vinciguerra, & Dresen, 2006). Experimenty vyhodnocované v tejto práci sú vykonané na vzorkách tvaru gule. Napriek tomu, že testovanie guľových vzoriek je datované od 70. – 80. rokov 20. storočia (Klíma et al., 1981; Pros a Babuška, 1968), tento typ experimentov nie je vo svete bežný, čo prispieva k jedinečnosti získavaných znalostí. Aparatúra vytvorená na GFÚ AV ČR, v.v.i. umožňovala prežarovanie P vlnami. Tie však dovoľujú len čiastočný popis anizotropie skúmaného materiálu. K úplnému popisu je nutné pridať údaje o šírení S vln. Z toho dôvodu Ing. Lokajíček, CSc. navrhol modifikáciu aparatúry tak, aby umožňovala prežarovanie horninového vzorku S vlnami, a to ako za atmosférického, tak aj za pôsobenia hydrostatického tlaku (Lokajíček a Svitek, 2015). Prežarovaním vzoriek pomocou P aj S vln v rôznych smeroch je možné získať údaje vedúce k zostrojeniu úplného tenzoru elastických parametrov a interpretácii vlastností hornín. S pôsobiacim hydrostatickým tlakom je možné simulovať zmenu vlastností hornín v zemskej kôre s hĺbkou.

Štruktúra práce

Doktorská práca pozostáva z troch častí. Prvá časť (kapitola 2) sa venuje študovanej téme elastickej anizotropie hornín, popisuje teoretické postupy stanovenia tenzoru elastických parametrov ako i praktické aspekty laboratórneho získavania dát. Primárne spracovanie nameraných vlnových obrazov a spôsoby určovania času príchodu jednotlivých vlnových fáz je diskutované v kapitole 3. Praktickej realizácii experimentu je venovaná kapitola 4. Hlavnú časť (kapitola 5) práce tvorí súbor šiestich autorových prác publikovaných v recenzovaných časopisoch, pričom prvé štyri práce majú priamy vzťah k téme dizertačnej práce a dve ďalšie publikácie sa študovanej témy dotýkajú okrajovo. Štyri kľúčové práce sú podrobnejšie rozoberané, ďalšia práca je uvedená iba v opublikovanej verzii v prílohe (kapitola 8). Záverečná časť práce (kapitola 6) zhŕňa publikované poznatky a hodnotí dosiahnutie cieľov dizertačnej práce. Kapitola 7 obsahuje odkazy na použitú literatúru.

Prvá publikácia Lokajíček & Svitek (2015) pojednáva o metodike ultrazvukového merania guľových vzoriek pomocou P a S vln a uvádza pokroky dosiahnuté oproti spôsobu merania iba P vln.

Druhá publikácia Svitek et al. (2010) sa venuje algoritmu pre automatické určovanie času príchodu P vln na vlnových obrazoch javov akustickej emisie a ultrazvukového prežarovania registrovaných v priebehu jednoosových zaťažovacích experimentov na valcových vzorkách. Publikovaný algoritmus je upravený a použitý k analýze signálov registrovaných počas experimentov na guľových vzorkách. Algoritmus tvorí dôležitú súčasť

spracovania ultrazvukových dát. Pomocou neho sú zisťované rýchlosti šírenia P vln a následne stanovovaná symetria a intenzita ich anizotropie.

Náplňou tretej publikácie Svitek et al. (2014) je preukázanie príspevku laboratórnych ultrazvukových meraní rýchlostí P a S vln na guľových vzorkách k poznaniu elastickej anizotropie hornín. Cieľom práce je upozorniť na prínos informácií, ktoré so sebou prináša meranie rýchlostí S vln a nutnosť ich znalosti pre výpočet kompletného tenzoru elastických parametrov.

Štvrtá práca Lokajíček et al. (2014a) dokladá použiteľnosť vyvinutej metodiky v porovnaní s ďalšími spôsobmi určenia elastickej anizotropie hornín. V práci je študovaný materiál z vrtu Outokumpu, Finsko, z ktorého boli vytvorené vzorky tvaru gule a kocky. Guľová vzorka bola testovaná pomocou ultrazvuku a neutronovej difrakcie a kocka iba pomocou ultrazvuku. V článku sú zhrnuté vzájomné porovnania výsledkov.

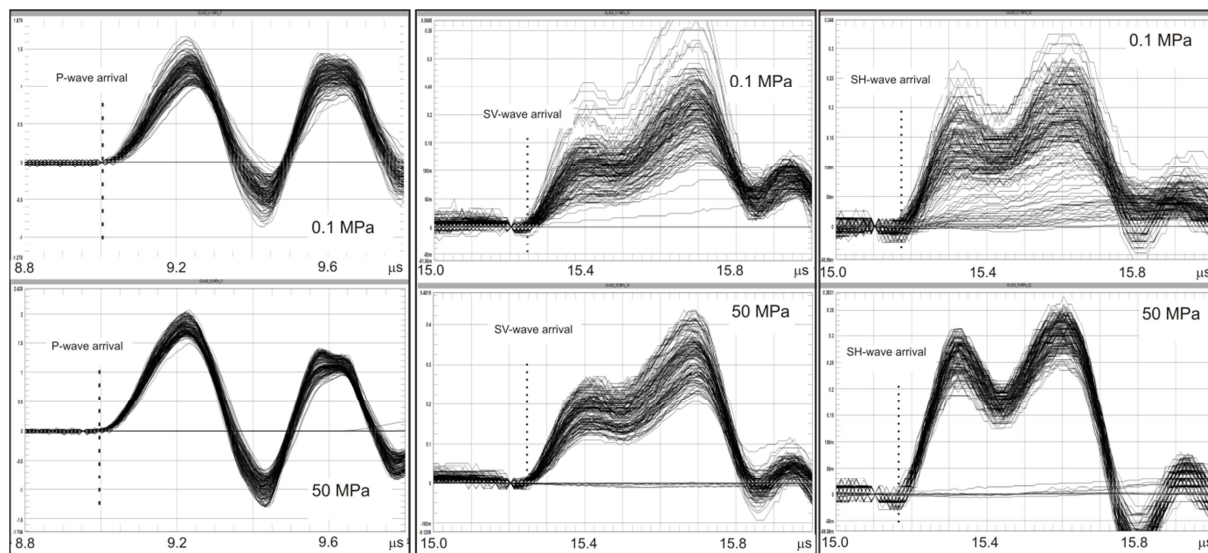
Posledná publikácia má k téme dizertačnej práce okrajový charakter a nie je detailnejšie popisovaná. Práca Lokajíček et al. (2014b) sa venuje štúdiu procesu porušovania betónu v prostredí alkalicko-silikátových reakcií a popisuje určovanie elastických vlastností betónu pomocou ultrazvukového merania.

Výsledky

Lokajíček, T., & **Svitek, T.** (2015). **Laboratory approach to the study of elastic anisotropy in spheres by simultaneous longitudinal and transverse sounding under confining pressure.** *Ultrasonics*, 56, 294-302.

doi:10.1016/j.ultras.2014.08.015

Práca dokumentuje inováciu aparatúry na ultrazvukové meranie guľových horninových vzoriek za pôsobenia hydrostatického tlaku. Pôvodná aparatúra bola schopná merať rýchlosti P vln, po jej vylepšení sú z experimentov prístupné rýchlosti P aj S vln. Guľová horninová vzorka je v jednom meracom kroku prežarovaná snímačmi citlivými na pozdĺžne vlnenie a dvomi, navzájom kolmo polarizovanými, snímačmi S vln. Získaný záznam tak simuluje trojzložkový záznam bežne používaný v seizmologickej praxi. Meranie bolo kalibrované na izotropných materiáloch, ktoré potvrdili stálosť a opakovanosť získaných dát. Presnosť určenia času príchodu S vln odpovedá intervalu ± 2 vzorkovacie body (20 ns). Rozptyl amplitúd P vln sa v závislosti na tlaku pohybuje v rozmedzí $\pm 10 - \pm 20\%$, v prípade S vln je rozptyl omnoho väčší. Za toto chovanie sú zodpovedné kontaktné podmienky medzi snímačmi a vzorkou, ktoré nie sú pre všetky smery vždy rovnaké.



A

B

C

Obr. 1 Vlnové obrazy kalibračného merania na skle pri flaku 0.1 MPa (hore) a 50 MPa (dole); A – vlnové obrazy registrované pozdĺžne polarizovaným snímačom, B - vlnové obrazy registrované vertikálne polarizovaným snímačom, C - vlnové obrazy registrované horizontálne polarizovaným snímačom

Svitek, T., Rudajev, V., & Petružálek, M. (2010). **Determination of P–wave arrival time of acoustic events.** *Acta Montan. Slov.*, 15(2), 145–151.

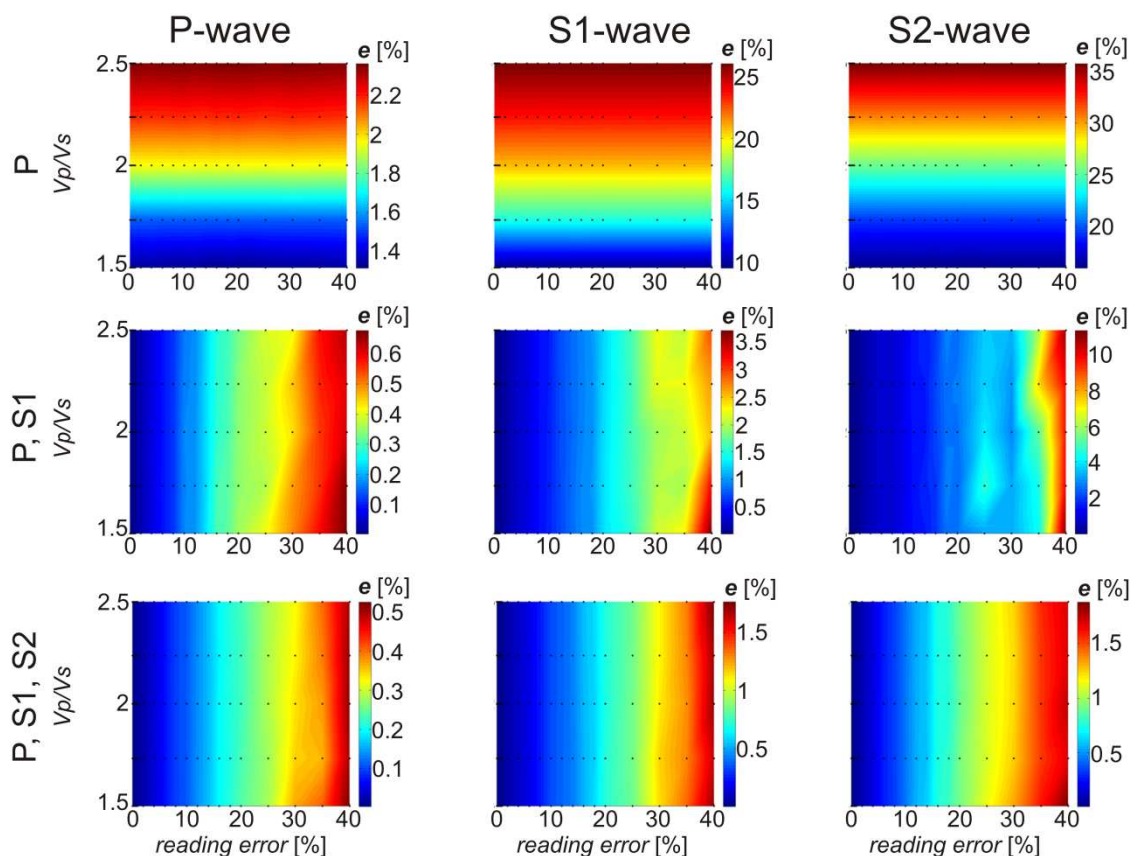
Tento článok pojednáva o spôsobe automatického určovania času príchodu P vln na vlnových obrazoch signálov akustickej emisie a ultrazvukového prežarovania hornín v priebehu jednoosých zaťažovacích experimentov. Tento druh experimentov generuje veľké objemy dát, vlnových obrazov a parametrických vstupov, ktorých manuálne spracovanie by bolo veľmi časovo náročné. Automatická detekcia času príchodu P vln a následný výpočet rýchlosti šírenia je preto doslova nutnosťou pre ďalšie spracovanie dát. Algoritmus v tejto práci uvedený bol aplikovaný aj na ultrazvukové dáta z experimentov na guľových vzorkách.

Základom detekcie času príchodu P vlny je stanovenie tzv. „charakteristickej funkcie“ signálu. Tvar tejto funkcie sa odvíja od metódy použitej k automatickej detekcii času príchodu. Veľmi často používaná metóda je sledovanie pomeru priemerných hodnôt charakteristickej funkcie z krátko a dlhého klzavého okna, známu ako STA/LTA (Allen, 1982). Okrem tohto spôsobu sa tiež používajú metódy založené na analýze vyšších štatistických momentov - HOS (Lokajíček & Klíma, 2006) či Akaikeho určovacieho kritéria (Sedlák, Hirose, Khan, Enoki, & Šikula, 2009). V článku bolo preukázané, že vyvinutý postup automatického určovania času príchodu P vln je vhodný pre použitie na javoch akustickej emisie a je efektívnejší než doposiaľ používaný spôsob založený na metóde HOS a to ako v porovnaní s manuálne určenými nasadeniami tak aj v porovnaní lokalizačných reziduí.

Svitek, T., Vavryčuk, V., Lokajíček, T., & Petružálek, M. (2014). **Determination of elastic anisotropy of rocks from P and S-wave velocities: Numerical modelling and lab measurements.** *Geophys. J. Int.*, 199(3), 1682–1697

Táto práca poukazuje na vplyv prítomnosti S vln na výpočet tenzoru elastických vlastností c_{ijkl} . Výpočet elastického tenzoru je nelineárna inverzná úloha, ktorej riešením je v najvšeobecnejšom prípade určenie všetkých 21 elastických parametrov stanovených pomocou riešenia Christoffelovej rovnice. Inverzný výpočet je realizovaný

iteračným spôsobom, v ktorom je aplikovaná poruchová metóda (Jech & Pšenčík, 1989; Jech, 1991a; Klíma, 1973; Vavryčuk, 2013). Parametre vstupujúce do výpočtu, v prípade aproximácie platnej pre elastické homogénne anizotropné prostredie, sú rýchlosti P a S vln. Keďže v minulosti boli dostupné len rýchlosti P vln, nebolo možné stanoviť kompletný tenzor elastických parametrov pre slabo anizotropné prostredie, na základe všetkých potrebných informácií. V prípade inverzie z rýchlostí P vln je dobre stanovených 15 parametrov, avšak 6 parametrov, súvisiacich so šírením S vln (a_{44} , a_{55} , a_{66} , a_{45} , a_{46} a a_{56}), nie je určených s dostatočnou presnosťou. Navyše v prostredí slabej anizotropie nie je vôbec možné týchto 6 parametrov určiť len s prispením P vln. Preto je pre výpočet kompletného tenzoru elastických parametrov nutné pracovať aj s rýchlosťami S vln. V minulosti, keď ešte neboli k dispozícii rýchlosti S vln bola pri inverzii len s prispením rýchlostí P vln dodatočne potrebná aj rýchlosť S vln. Tá bola dopyčítavaná umelo cez pomer V_P/V_S , ktorý je v Poissonovskom prostredí rovný $\sqrt{3}$. Ako nástroj k posúdeniu presnosti a robustnosti inverzného výpočtu bol navrhnutý syntetický test, ktorý hodnotil vplyv 1) nepresnosti určenia rýchlosti S1 a S2 vln, 2) rozdielnosť počiatočného rýchlostného modelu, ktorý sa odvíjal od zvolenej hodnoty V_P/V_S a 3) metódu výpočtu inverzie podľa typu rýchlostí vstupujúcich do inverzie (P, PS1 alebo PS1S2). Určovanie času príchodu S1 vln je náročný proces, preto sa v jednotlivých variantách uvažovali nepresnosti určenia rýchlosti S1 vln z intervalu 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 25, 30, 35 a 40%. Určovanie času príchodu S2 vln je ešte náročnejšie než pre S1 vlny. V slabej anizotropii nemusia byť vlny S1 a S2 od seba úplne oddelené alebo môže byť príchod S2 vlny ovplyvnený interferenciou s vlnou S1. Preto bola nepresnosť určenia rýchlosti S2 vln uvažovaná ako 1.5 krát väčšia než pre S1 vlny. Rýchlosť P vln je stanovovaná s veľmi veľkou presnosťou, preto sú nepresnosti uvažované v syntetickom teste veľmi malé, len 0.1 %. Všetky náhodné odchylky simulujúce chyby merania boli vygenerované 100 krát kvôli štatistickému zpracovaniu. Počiatočný rýchlostný model predstavuje prvotný odhad prostredia, ktoré sa v použitej poruchovej metóde pokladá za izotropné. Rýchlosť P vln je určená ako priemerná rýchlosť zo všetkých smerov na guľovej vzorke. V prípade, keď nie sú k dispozícii údaje o rýchlosti šírenia S vln je nutné túto rýchlosť dodať do výpočtu formou pomeru V_P/V_S . Hodnoty V_P/V_S boli uvažované z intervalu 1.5 do 2.5. Inverzia bola testovaná pre tri typy vstupných dát: rýchlostí P vln, rýchlosti P a S1 vln a nakoniec rýchlosti P, S1 a S2 vln.

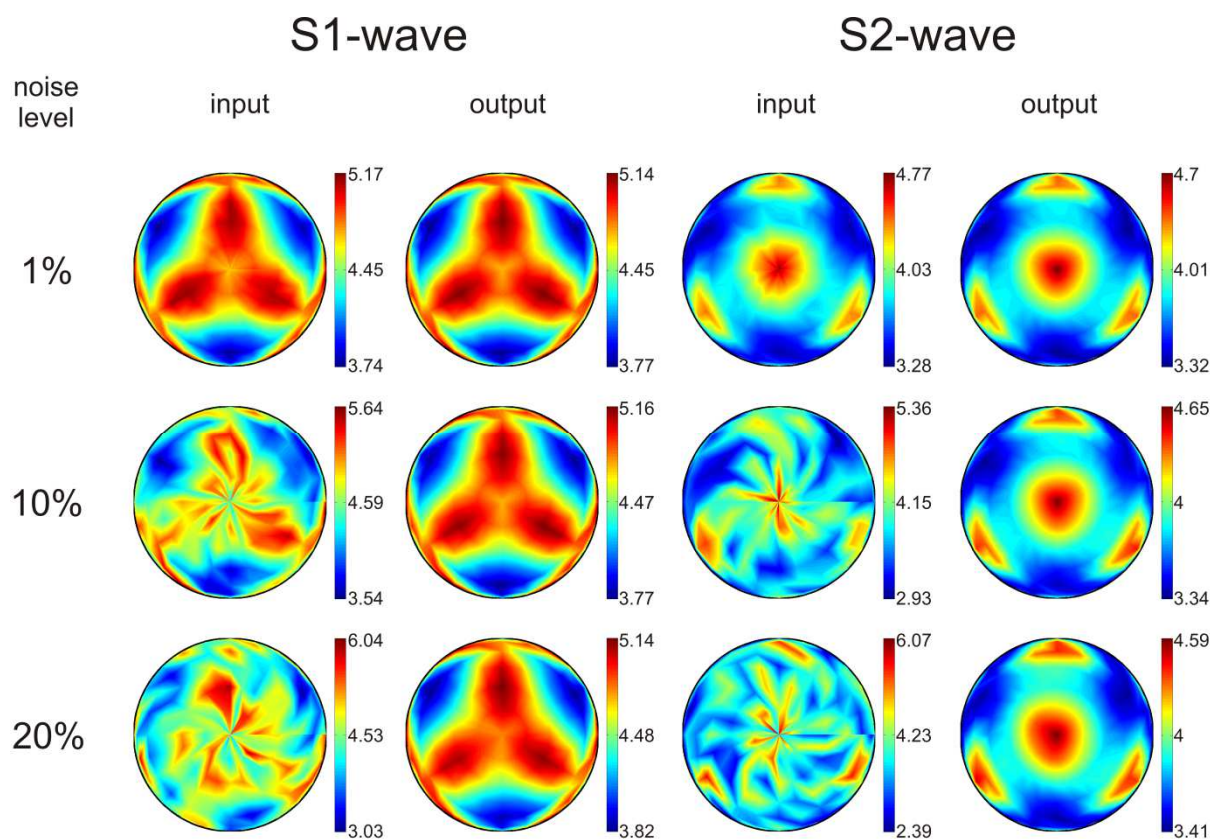


Obr. 2 Chyba inverzie e_{mean} pre rýchlosti P vln (ľavý stĺpec), S1vln (stredný stĺpec) a S2 vln (pravý stĺpec) ako funkcia chyby určenia rýchlosti S1vln (stredný riadok) a S1 a S2 vln (spodný riadok). Chyby vo vrchnom riadku nie sú závislé na nepresnosti určenia rýchlosti S vln pretože sú invertované len P vlny. Os X predstavuje chybu stanovenia času príchodu S1vlny, na ose Y je vynesená počiatočná hodnota „Pomeru“. Farebná škála reprezentuje % odchýlky teoretických a nameraných rýchlostí.

Na základe získaných výsledkov je možné urobiť nasledujúce závery:

- Elastický tenzor určený len na základe rýchlostí P vln (horný rad) je silne závislý na zvolenom pomere V_P/V_S , ktorý do inverzie vstupuje v prvej iterácii. Získané rýchlosti S1 a S2 vln majú výrazne vyššie odchýlky od teoretických rýchlostí než rýchlosti pre P vlny. Priemerná chyba pre S1 a S2 vlny je približne 10 - 15 krát vyššia než v prípade P vln. Z toho dôvodu nie je možné správne interpretovať elastické parametre vzťahované k S vlnám a to napriek tomu, že rýchlosti P vln sú určené s veľmi dobrou presnosťou (maximálna odchýlka je iba 0.1%). Interpretované rýchlosti S1 a S2 vln sú preto veľmi nepresné.
- Elastický tenzor počítaný z rýchlostí P a S1 vln (stredný rad) už vďaka dodaniu informácií o rýchlostiach S1 vln nie je citlivý na hodnotu veličiny V_P/V_S . Presnosť predikovaných rýchlostí závisí na presnosti určenia rýchlosti S1 vln. Za zmienku však stojí fakt, že aj pomerne silne zašumené merania S vln zlepšia presnosť výpočtu elastického tenzoru (Obr. 32, stredný rad). Zapojenie rýchlostí S vln do procesu inverzie výrazne zlepšilo presnosť elastického tenzoru. Dokonca aj aproximácia rýchlostí P vln je lepšia. V prípade, že sú rýchlosti S1 vln určené s nepresnosťou menšou než 15%, je stredná chyba predikovaných P, S1 a S2 vln menšia než 0.3%, 1% a 3% pre daný typ vlny.

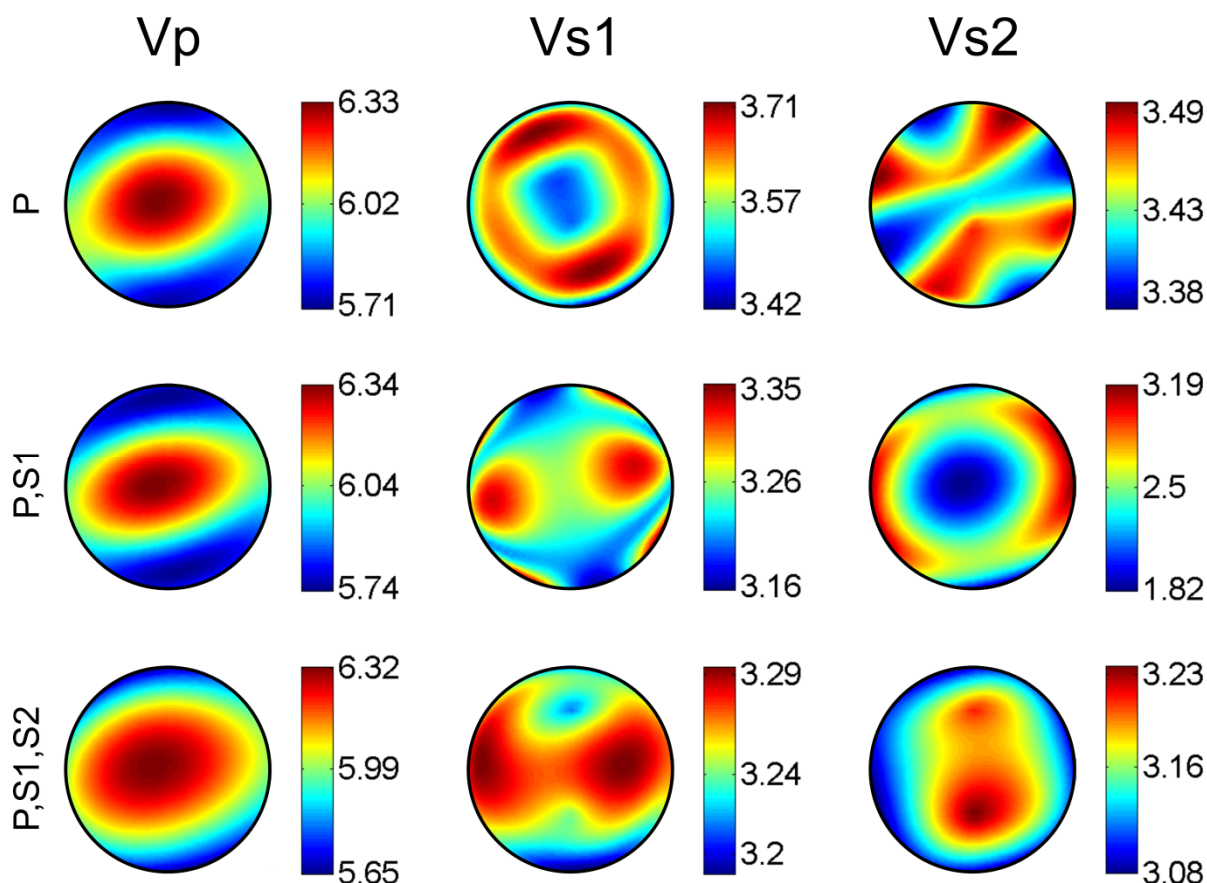
- Elastický tenzor určený z P, S1 a S2 vln (spodný rad) je opäť závislý hlavne od presnosti rýchlostí S1 a S2 vln. Pridaná informácia o S2 vlnách má vplyv na interpretáciu rýchlostí S1 a S2 vln. Zlepšenie interpretácie rýchlostí P vln je len minimálne. Obrázok 3 dokumentuje kvalitu a robustnosť inverzie na príklade rýchlostí S1 a S2 vln. Z tohto obrázku je vidieť, že aj silne zašumené rýchlosti sú invertované s uspokojivou presnosťou.



Obr. 3 Ukážka rýchlostí S1 a S2 vln zašumených náhodným rovnomerným šumom vstupujúcich do inverzie a odpovedajúci výstup. Úroveň šumu rýchlostí S1 vln je 1% (horný rad), 10% (stredný rad) a 20% (spodný rad). Rýchlosti S2 vln sú zašumené 1.5 násobne viac. Obrázok ukazuje, že metóda inverzie PS1S2 je robustná a stabilná aj pre vysoké úrovne šumu.

Druhý syntetický test posudzoval množstvo a rozloženie rýchlostí S vln vstupujúcich do inverzie a hodnotí do akej miery bude inverzia robustná v prípade, že bude počet vstupných rýchlostí S vln menší a priestorové pokrytie nebude optimálne. Preukázalo sa, že pridaním malého množstva smerov s nepresne určeným časom príchodu S1 vlny dôjde k zhoršeniu inverzie. S narastajúcim počtom smerov dochádza k postupnému zlepšovaniu. Je však veľmi zaujímavé, že následné, i minimálne, pridanie informácie o rýchlosti S2 vln výrazne zlepšuje aproximáciu a to aj oproti variante keď nie sú do inverzie uvažované žiadne S vlny.

Aplikácia rôznych metód výpočtu je prezentovaná na vzorke OKU-409 (biotitická rula s výraznou foliáciou z vrhu Outokumpu, Fínsko). Obr. 4. ukazuje rozdiely interpretácie dosiahnutej výpočtom len z rýchlostí P vln (horný rad), z P a S1 vln (stredný rad) a z P, S1 a S2 vln (spodný rad). Na základe výsledkov syntetických testov je možné usudzovať, že za najvierohodnejšie je možné pokladať výsledky získané z inverzie z P, S1 a S2 vln. To dokladajú aj výsledky konvergenencie iteračného výpočtu.



Obr. 4 Porovnanie výpočtu tenzoru elastických parametrov a následnej interpretácie rýchlostí P (ľavý stĺpec), S1 (stredný stĺpec), a S2 vln (pravý stĺpec), na základe typu rýchlostí vstupujúcich do výpočtu: len P vlny (horný riadok), P a S1 vlny (stredný riadok) a P, S1 a S2 vlny (spodný riadok).

Lokajčiek, T., Kern, H., Svítek, T., & Ivankina, T. (2014). **3D velocity distribution of P and S-waves in a biotite gneiss, measured in oil as the pressure medium: Comparison with velocity measurements in a multi-anvil pressure apparatus and with texture-based calculated data.** *Phys. Earth Planet. Inter.*, 231, 1–15. doi:10.1016/j.pepi.2014.04.002

V tejto práci sú výsledky merania S vln na vzorke OKU-409 porovnávané a výsledkami zistenými pomocou merania neutrónovej difrakcie a ďalej sú porovnávané ultrazvukové rýchlosti určené na vzorke tvaru gule a kocky (vzorky boli pripravené z jedného segmentu vrtného jadra). V článku sú ďalej prezentované zmeny rýchlostí P, S1 a S2 vln v závislosti na pôsobiacom napätí.

Porovnaním výsledkov získaných rôznymi metódami je možné vyvodiť nasledujúce závery:

- Systematicky nižšie rýchlosti merané na guli môžu byť spôsobené epoxidom, ktorým je guľová vzorka pokrytá. Tlak vyvíjaný na guľovú vzorku je generovaný olejom, epoxidová vrstva preto plní funkciu ochrany pred infiltrovaním oleja do pórového priestoru študovaného materiálu. Naproti tomu vzorka tvaru kocky je namáhaná osovými napätiami, ktoré generujú piesty a podobná ochrana tak nie je nutná. Bolo zistené, že epoxidová vrstvička na guľových vzorkách nemá výrazný vplyv na rýchlosť šírenia P vln, no ako sa ukazuje rýchlosti S vln sú ňou ovplyvnené do značnej miery.
- Neutrónová difrakcia vystihla rozloženie rýchlostí na guli s veľkou mierou podobnosti ako ultrazvukové meranie. Smery hlavných extrémov (maxím a miním) rýchlostí

P, S1 aj S2 vln korelujú veľmi dobre, napriek tomu, že neutróny nepostihujú rozloženie a orientáciu mikroporušenia, ktoré je vo vzorke prítomné. Neutrónové meranie je porovnávané s ultrazvukovým pri tlaku 70 MPa, kde je pravdepodobné, že nie sú všetky systémy mikroporušenia kompletne uzavreté.

Diskusia a záver

Primárnym cieľom práce je štúdium elastickej anizotropie hornín. K tomuto účelu boli použité ultrazvukové merania na guľových horninových vzorkách. V náväznosti na diplomovú prácu bol vytvorený program na automatické určovanie času príchodu P vln z ultrazvukových meraní. Program bol ďalej rozšírený o množstvo funkcií vedúcich k analýze, výpočtu a interpretácii tenzoru elastických parametrov. Inovácia aparatury a možnosť merania S vln priniesla veľké množstvo nových informácií, ktoré bolo nutné zapracovať do spracovateľského softwaru. Určenie časov príchodov S vln na vlnových obrazoch získaných zo zaťažovacích experimentov sa uskutočňuje poloautomaticky. Jedna tlaková úroveň, väčšinou tá s najvyšším pôsobiacim hydrostatickým tlakom, je interpretovaná manuálne operátorom. K určeniu časov príchodov S vln na nižších tlakových úrovniach je, vďaka podobnosti signálov, využitá korelačná analýza. Nové dáta umožnili porovnať spôsoby určovania elastickej anizotropie. Doposiaľ boli k dispozícii iba merania rýchlostí P vln, preto bolo dôležité porovnať, aký vplyv bude mať implementácia merania rýchlostí S1 a S2 vln do výpočtu tenzoru elastických parametrov. K posúdeniu, ktorý prístup poskytuje najlepšie výsledky, boli využité syntetické testy. Testy preukázali potrebnosť informácie o rýchlostiach S vln pri výpočte tenzoru elastických parametrov. Najlepšie výsledky inverzie boli dosiahnuté v prípade, kedy do výpočtu vstupovali rýchlosti P, S1 aj S2 vln. Výpočet je v tomto prípade veľmi robustný a rýchlo konverguje. Vďaka testom bolo tiež zistené, že je potreba merať rýchlosti šírenia S vln v dostatočnom počte smerov, ktoré sú rovnomerne priestorovo orientované. Všeobecne platí, že presnosť určenia času príchodu sa môže znižovať pri zvyšujúcom sa množstve použitých dát, tj. čím viac smerov vstupuje do inverzie, tým väčšou chybou môžu byť namerané rýchlosti zaťažené.

Spracovaním ultrazvukových meraní na reálnych horninových vzorkách a porovnaním s výsledkami neutrónovej difrakcie a ultrazvukovými meraniami na inej aparatúre bolo zistené, že získané priestorové rozloženie anizotropie materiálu je dostatočne hodnoverné, no dochádza k systematickému znižovaniu nameraných rýchlostí S vln. To naznačuje, že praktická realizácia meraní nie je úplne optimálna. Kvalita nameraných dát, obzvlášť S vln, je veľmi závislá na kvalite kontaktu medzi snímačmi a guľovou vzorkou. Kvázibodový kontakt neumožňuje dostatočný prenos strižnej zložky pohybu, preto je registrovaný vlnový obraz dostatočne kvalitný len v špecifických prípadoch (kedy orientácie snímačov a orientácie vnútornej štruktúry študovaného materiálu sú podobné). Kvalitu vlnového obrazu S vln do značnej miery ovplyvňuje taktiež epoxidový lak, ktorý slúži ako zábrana proti prenikaniu oleja do vnútra materiálu. Je nutné, aby bol epoxidový lak dostatočne pružný a aby vo vysokých tlakoch nepopraskal. Na druhú stranu však platí, že čím pružnejší lak, tým väčší útlm amplitúd signálu a teda i horšie podmienky pre stanovenie času príchodu S vlny či interpretáciu amplitúd P vln. Kvalita registrovaných vlnových obrazov signálov S vln je silne závislá na kvalite kontaktu. Zmena bodového kontaktu na plošný by mohla priniesť výrazné zlepšenie kvality registrovaných vlnových obrazov. Toho by mohlo byť dosiahnuté zmenou plochy snímačov z rovinatej na zakrivenú. Ideálne by bolo keby mala plocha snímača rovnakú krivosť ako je krivosť guľového povrchu vzorky. Alternatívou by mohlo byť vyrobiť snímače, ktorých povrch bude mať krivosť o niečo menšiu než je guľový povrch vzorky. Do akej miery to ale bude zlepšenie je momentálne otáznе. Ďalšou možnosťou ako zlepšiť kontakt snímača so vzorkou je zmeniť tvar vzorky z guľového na mnohosten. Zbrúsením plôch v miestach merania by došlo k vytvoreniu plošného kontaktu

čo by malo priniesť očakávané zlepšenie kvality nameraného signálu. Komplikácie sú v tomto prípade spojené so sieťou meracích bodov, ktorá je redšia na rovníku a hustejšia na pólach. Alternatívou by mohlo byť vytvoriť mnohosten s menším, avšak pre účely inverzie stále dostatočným, počtom smerov, ktoré by boli po povrchu rozložené rovnomerne, v zmysle plošnom a nie uhlovom.

Theme and aims of the study

Proposed dissertation deals with study of elastic and mechanical properties of rocks based on ultrasonic sounding method at hydrostatic loading regime. The main idea is to emphasize the influence of S waves on the process of determining the elastic properties of the media under study, anisotropy description (tensor of elastic parameters) as well as parameters influencing its determination. The paper presents new, unique data and also laboratory procedures and methods that have had to be developed, in order to interpret the data. Most of the loading experiments are realized on rocks samples cylindrical, prism or cube (Al-Sahawneh, 2013; Kwasniewski et al., 2012; Stanchits et al., 2006). Experiments presented in this work have been done on spherical samples. Despite the fact that experiments on spherical samples date back to 70's – 80's of 20th century (Klíma et al., 1981; Pros & Babuška, 1968) this kind of experiment is not very usual in the rest of the world, which contributes to uniqueness of obtained knowledge. Apparatus originally created at Institute of Geophysics AS CR, v. v. i. enabled P wave sounding. This kind of wave, thanks to their simple registration, was initially frequently used for interpretation of rocks elastic properties (Birch, 1961; Christensen, 1966; Pros, Lokajčec, & Klíma, 1998; Pros & Podroužková, 1974). It is important to note that measurement of P-wave velocity only at certain direction does not provide sufficient information to evaluate the anisotropy of media. This is possible only when there are available P-wave velocities in many directions (Bóna, Nadri, & Brajanovski, 2012; Crampin, 1985; Nadri, Bona, & Brajanovski, 2011). Nevertheless, this kind of waves allows only partial description of material anisotropy. To get complete description, it is necessary to know data about shear wave spreading as well. The authors of the apparatus, however, were convinced that due to the use of oil as a pressure medium for loading tests, it is not possible to register S waves, due to the nature of their distribution. The unique way proposed by Ing. Lokajčec contributes to the solution of transferring a shear component from a transmitter to the sample and then from the sample to a receiver that allows sounding of the sample by S waves during acting hydrostatic pressure. Sounding by both wave types (P and S) enables to obtain data leading to determination of the complete tensor of elastic parameters and to interpret rocks properties by 3D velocity model. Tensor of elastic parameters can also be retrieved from an analysis of modal composition of studied material (Mainprice, 1990) or neutron diffraction (Ivankina, Kern, & Nikitin, 2005; Nikitin & Ivankina, 2004; Xie, Wenk, & Matthies, 2003). These methods are then able to prove results obtained by ultrasonic sounding. The acting hydrostatic pressure is than possible to simulate changes in material properties with depth. This will provide a significant improvement in qualitative and quantitative description of the studied material.

The work thus provides new knowledge about the anisotropy of rock materials and deals with analysis of different approaches to the processing of acquired data. Spherical sample allows obtaining a sufficient number of data needed to solve the inverse problem. Another advantage is the uniformity of coverage of experimental data. To some extent, it balances the inaccuracies that are introduced in the processing of data due to the complicated nature of the S waves. Conclusions are supported by the results of synthetic tests that helped to assess the extent that the introduced uncertainties can affect further processing and interpretation of the data. The test results confirm the necessary presence of S waves to the

correct calculation of the tensor of elastic parameters and interpretation of anisotropy of the examined material.

Structure of the thesis

This thesis consists of the three main parts. The first part is dedicated to the study of rock anisotropy, describes the theoretical determinations of the tensor of elastic parameters as well as practical aspects of laboratory data acquisition and focuses on the methods used for data processing and analysis. A major part of the work consists of a set of six author's works published in reviewed journals, the first four works are directly related to the topic of dissertation and two other publications have marginal connections. Four key works are discussed in more detail in Chapter 5, other works are mentioned only in appendix (Chapter 8) in their published version. The final part of the thesis (Chapter 6) summarizes the published findings and underlines the objective of the thesis.

First publication "Laboratory approach to the study of elastic anisotropy in spheres by simultaneous longitudinal and transverse sounding under confining pressure" discusses the methodology of ultrasonic measurement of spherical samples using P- and S-waves and presents the progress achieved against measuring process of only P waves.

The second publication "Determination of P wave arrival time of acoustic events" is dedicated to algorithm for automatically determining the time of arrival of P waves on waveforms of acoustic emission and ultrasonic sounding. Published algorithm is taken and used to analyze the signals registered during experiments on spherical samples. It forms an important part of processing ultrasonic data. By this algorithm, velocities of P waves are detected and subsequently the symmetry and intensity of anisotropy is determined.

Contents of the third publication "Determination of elastic anisotropy of rocks from P- and S-wave velocities: Numerical modeling and lab measurements" is to prove the contribution of laboratory ultrasonic measurements on spherical samples to the knowledge of the mechanical and elastic anisotropy of rocks. The main topic of this paper is to highlight the benefits of information that imply S-wave and necessity of their knowledge for a complete description of the properties of the examined material and calculation of complete elastic tensor parameters.

The fourth work "3D velocity distribution of P- and S-waves in a biotite gneiss, measured in oil as the pressure medium: Comparison with velocity measurements in a multi-anvil pressure apparatus and with texture-based calculated data" demonstrates the applicability of studied methodology within the comparison of the results obtained with two other methods of determining the elastic anisotropy of rocks. The material studied in this paper comes from the borehole Outokumpu, Finland. Two samples, cube and sphere, were created. Spherical sample was tested using ultrasound and neutron diffraction and cube only by ultrasound. The article summarized the results of mutual comparisons.

The last two publications have only marginal meaning to the dissertation topic and are not described in more detail. Work "Determination of the anisotropy of elastic waves monitored by a sparse sensor network" discusses studying rock anisotropy on cylindrical samples, and to determine the anisotropic velocity model uses a triaxial ellipsoid. The work emphasizes the benefits of describing the fracturing process of rocks through the use of this

type of velocity model over the current isotropic one. The publication "Quasi-continuous ultrasonic sounding and changes of ultrasonic signal characteristics as a sensitive tool for the evaluation of ongoing microstructural changes of experimental mortar bars tested for their ASR potential" is dedicated to the study of concrete deterioration process in alkali-silicate reactions and describes the determination of elastic properties of concrete using ultrasonic measurements.

Results

Lokajíček, T., & **Svitek, T.** (2015). **Laboratory approach to the study of elastic anisotropy in spheres by simultaneous longitudinal and transverse sounding under confining pressure.** *Ultrasonics*, 56, 294-302.

doi:10.1016/j.ultras.2014.08.015

This paper documents the innovation of the apparatus for ultrasonic measurement of spherical rock samples under the influence of hydrostatic pressure. The original apparatus was able to measure velocities of P waves while after improvements P and S waves are available. In one measuring step, the spherical rock samples are transmitted by one pair of sensors sensitive to longitudinal waves and two pairs of mutually perpendicular polarized S wave transducers. The obtained recordings thus simulate a three-component recording commonly used in seismological practice. The measurements were calibrated on an isotropic material, which confirmed the stability and repetitiveness of acquired data. The accuracy of the arrival time of S-wave interval corresponds to ± 2 sampling points (20 ns). P-wave amplitudes, depending on the pressure level, vary within the range of $\pm 10 - \pm 20\%$ while in the case of S wave the variance is much larger. Responsibility for this behavior is taken by contact conditions between the sensors and the samples, which are not always the same for all directions always.

Svitek, T., Rudajev, V., & Petružalek, M. (2010). **Determination of P-wave arrival time of acoustic events.** *Acta Montan. Slov.*, 15(2), 145–151.

This article discusses how to automatically determine the time of arrival of P waves on signal waveforms of acoustic emission and ultrasonic sounding of rocks during uniaxial loading experiments. This kind of experiment generates large volumes of data, waveforms and parametric inputs, where manual processing would be very time consuming. Automatic detection of the arrival time of P waves and the subsequent calculation of the propagation velocity is therefore literally a necessity for further data processing. The algorithm given in this work was applied to the ultrasonic data from experiments on spherical samples.

The arrival time determination is often based on determination of so called "characteristic function" of signal or waveform. The shape of this function depends on the method used for automatic detection of the arrival time. A very often used method is to monitor the ratio of the average values of the characteristic function of short and long moving windows, known as STA / LTA (Allen, 1982). In addition to this method, also methods based on analysis of the higher order statistics are used- HOS (Lokajíček & Klima, 2006) or Akaike information criteria (Sedlak, Hirose, Khan, Enoki, & Sikula, 2009). The article has shown that the developed procedure for automatic determination of the P wave arrival times is suitable

for using on acoustic emission waveforms and is more efficient than the currently used method of HOS as compared to manual onsets as well as to localization residue.

Svitek, T., Vavryčuk, V., Lokajíček, T., & Petružálek, M. (2014). Determination of elastic anisotropy of rocks from P and S-wave velocities: Numerical modelling and lab measurements. *Geophys. J. Int.*, 199(3), 1682–1697.

This paper points to the influence of presence of S wave on a calculation of the elastic tensor c_{ijkl} . This calculation is a non-linear problem that leads in general to determination of whole set of 21 elastic parameters through calculation of Christoffel equation. Inversion is realized by iterative method based on perturbation theory (Jech & Pšenčík, 1989; Jech, 1991b; Klíma, 1973; Vavryčuk, 2013). Parameters entering into the calculation, in case of elastic homogeneous anisotropic media, are velocities of P- and S-waves. Since in the past only P-wave velocities were available, it was not possible to determine complete tensor of elastic parameters for weak anisotropic media. In the case of the P-wave velocity inversion, 15 parameters are well resolved but 6 parameters related to the S wave propagation (hereafter the S wave related parameters) a_{44} , a_{55} , a_{66} , a_{45} , a_{46} , and a_{56} are less accurate. Moreover, in the weak anisotropy it is not possible to retrieve these parameters by contribution of only P-wave velocities and knowledge of S-wave velocities is also required by computation process itself. In the past, when S-wave velocities were not available the inversion from only P-wave velocities was calculated with contribution of S-wave velocities obtained through artificial V_P/V_S ratio. In a Poisson's media, the value of this ratio is equal $\sqrt{3}$.

A synthetic test was proposed as a tool for evaluation of accuracy and robustness of inversion. This test evaluates influence of 1) inaccuracy of S1 and S2-wave velocity, 2) differences of initial velocity model that relates to selected value of V_P/V_S and 3) inversion method according to velocity types entering the inversion (P, PS1 or PS1S2). Determination of S1 wave onset time is a difficult process thus values from interval 0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 18, 20, 25, 30, 35 a 40% were assumed as errors of S1-wave velocity. Determination of S2-wave onset time is in comparison with S1-wave even more complicated. In weak anisotropy, S1 and S2 wave could not be totally separated or the S2 wave can interfere with S1 wave. Thus, errors of S2-wave velocities are assumed to be 1.5-times larger than those for S1 wave. P-wave velocities are very well determined, thus errors assumed in synthetic test are very small, only 0.1%. All inaccuracies were generated 100 times for better statistic. Values of V_P/V_S were assumed from interval 1.5 to 2.5. Inversion were tested for three types of input data: P-wave velocities, P- and S1-wave velocities and finally P-, S1- and S2-wave velocities.

According to the results we arrive at the following conclusions:

- Elastic tensor determined by contribution of only P-wave velocities (Fig. 2 - top row) is strongly dependent on chosen ratio V_P/V_S that enters the inversion in its first iteration step. Obtained S1- and S2-wave velocities have significantly higher differences to theoretical velocities than those of P-wave velocities. In comparison with P waves, the mean error regarding S1 and S2 wave is 10 to 15 times higher, respectively. Due to this fact, it is not possible to correctly interpret elastic parameters related to S waves even though the P-wave velocities are determined with very high

accuracy (maximal error is only 0.1%). Thus S1- and S2-wave velocities are very inaccurate.

- Elastic tensor determined by contribution of P- and S1-wave velocities (Fig. 2 - middle row) is no longer sensitive on value V_P/V_S thanks to addition of S1-wave velocities. The accuracy of predicted velocities depends on the accuracy of S1-wave velocity determination. It is worth to notice that even very strongly noised S1-wave velocities can improve calculation of the elastic tensor (Fig. 2, middle row). Involving S-velocities into the inversion remarkably increased the quality of the elastic tensor. Even the approximation of P-wave velocities is better. If the S1-wave velocities are measured with the mean errors less than 15%, the mean errors of the predicted P-, S1- and S2-wave velocities are less than 0.3%, 1% and 3%, respectively.
- Elastic tensor determined by contribution of P-, S1- and S2-wave velocity (Fig. 2 - bottom row) is again dependent mainly on the accuracy of S1- and S2-wave velocities. Additional information of S2-wave velocities influenced only approximation of S1- and S2-wave velocities. Improvement of P-wave velocities is only marginal. Figure 3 illustrates quality and robustness of the inversion on the example of S1- and S2-wave velocities. According to this figure, we can see that even highly noised velocities are inverted with satisfactory accuracy.

The second synthetic test assessed the number and distribution of S-wave velocities entering the inversion and evaluated its robustness in case of smaller number of S-wave velocities and with their worse distribution upon the spherical surface. Results showed that addition of small number of directions where S1-wave velocities are available lead to deterioration of inversion results. Further increase of number of directions brings gradual improvement. However, it is very interesting that subsequent addition of S2-wave velocities, even in minimal number of directions, considerably improves approximation of all velocity types even compared to the case when no S waves are included into the inversion.

Application of different computation methods applied on real data is presented on sample OKU-409 (biotitic gneiss with pronounced foliation from deep drill hole Outokumpu, Finland). Figure 4 shows differences of interpretation obtained by calculation from only P-, S1- and S2-wave velocities in top, middle and bottom row, respectively. Based on results of synthetic test we can conclude that the most reliable results are obtained from the inversion including P-, S1- and S2-wave velocities. This fact is also supported by results of convergence of the iterative calculation.

Lokajčėk, T., Kern, H., **Svitek, T.**, & Ivankina, T. (2014). **3D velocity distribution of P and S-waves in a biotite gneiss, measured in oil as the pressure medium: Comparison with velocity measurements in a multi-anvil pressure apparatus and with texture-based calculated data.** *Phys. Earth Planet. Inter.*, 231, 1–15. doi:10.1016/j.pepi.2014.04.002

In this paper, results of measurements of S waves on a sample OKU-409 are being compared to the results observed by measuring the neutron diffraction and further ultrasonic velocities determined on sample cube and sphere (samples were prepared from one segment of the drill core) are compared as well. The article also presents changes of P-, S1- and S2-waves velocities in dependence on acting stress.

Comparing the results obtained by different methods can be drawn the following conclusions:

- Systematically lower velocities measured on sample sphere can result from epoxy layer that covers the sample. Pressure acting on the sample is generated by oil, epoxy layer thus protects pore space of the media against the oil infiltration. In comparison, the cubic sample is loaded by axial stresses generated by pistons, so this kind of protection is not needed. It was found that epoxy layer on the spherical samples does not have significant influence on P-wave velocities but as it was shown, S-wave velocities are influenced to a considerable extent.
- Neutron diffraction expressed the spatial velocity distribution on sphere with a large degree of similarity as ultrasonic measurements. Directions of a main P-, S1- and S2-wave velocity extremes (maxima and minima) correlate very well. All the more so when one considers the fact that neutrons do not affect the layout and orientation of microcracks, which is present in the sample. The neutron measurement is compared with the ultrasound one at a pressure of 70 MPa which is quite likely that not all of the microcrack systems are completely closed.

Discussion and conclusions

The main object of the work is the study of elastic anisotropy of rocks. For this purpose, ultrasonic measurements on spherical rock samples were used. Following the diploma thesis, software for automatic determination of P wave arrival times from ultrasonic measurements was created. The software was further extended for several functions enabling analysis, computation and interpretation of elastic tensor parameters. Innovation of apparatus and ability of measuring S waves brought a lot of information that had to be implemented in this software. Onset times on S wave waveforms recorded during loading experiments are determined semi-automatically. Onsets of one pressure level, mostly the one of highest loading hydrostatic pressure, are determined manually by human operator. Thanks to similarity of signals at lower pressure levels, cross correlation method is applied for determining S onset times. New data enabled comparison of methods leading to elastic anisotropy determination. Until now, measurements of P-wave velocities were only available, so it was important to compare the impact of the implementation of measurements of S1- and S2-waves velocities in the calculation of the elastic tensor parameters. To evaluate which approach gives best results, synthetic tests were used. These test shown the necessity of presence of S-wave velocities in the calculation of the elastic tensor. The best results of inversion process were obtained when P-, S1- and S2-wave velocities enter the calculation. In this case, the whole calculation process is very robust and converges very quickly. The tests also revealed that for optimal results it is necessary to measure S-wave velocities in a sufficient amount of directions with a regular distribution. However, in general, the accuracy of the arrival time determination may decrease proportionally to increasing the amount of data, i.e. the more directions entering the inversion the more inaccurate velocities may be.

Developed approach was applied on data from real experiment. Obtained results were compared with ones determined by neutron diffraction and ultrasonic sounding on a different apparatus. Mutual comparison shows that there is a very good agreement in spatial distribution of anisotropy; however absolute values of S-wave velocities of our measurements

are systematically lower. This suggests that measuring process at our apparatus is not completely optimized yet. The quality of measured data, especially of S waves, depends on quality of contact conditions between sensors and spherical sample very much. Quasi-point contact does not allow a sufficient transmission of shear component thus the registered waveform is fine enough only in specific cases when the superposition of sensor polarization according to orientation of intrinsic structure of studied material occurred. The quality of S waveforms, in quite high rate, also depends on epoxy resin that is used as a protection against oil infiltration into the sample. It is necessary that the epoxy resin has appropriate elasticity to bear high pressures but in contrary the more elastic epoxy the more S-wave attenuation and the worse conditions for S-wave onset time determination or interpretation of P-wave amplitudes. The quality of registered S waveforms is thus strongly dependent on quality of contact conditions. Based on this fact, the change of point contact to the surface would bring significant increase of quality of registered waveforms. This can be performed by changing the surface of sensors from flat to curved one. The ideal case would be if the surface of the sensor had the same curvature as is the surface of the spherical sample. As an alternative would be to make sensors that have surface of a little less curvature as is the curvature of the surface of the sample. However, to what extent it will improve the contact conditions, is now questionable. Another option how to improve the contact of sensor and sample is to change the shape of the sample from spherical to polyhedron. Grinding the sample at the measurement positions would create a flat contact that should bring expected quality improvement of recorded signal. In this case, complications are connected to the grid of measurement points, which is sparser at the equator but denser at the poles. An alternative could be to create a polyhedron with less, but for the purposes of the inversion still sufficient number of directions that are uniformly distributed over the surface, in terms of surface and not angular.

Použitá literatura / References

- Allen, R. (1982). Automatic phase pickers: Their present use and future prospects. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 72(6B), S225–242.
- Al-Sahawneh, E. I. (2013). Size effect and strength correction factors for normal weight concrete specimens under uniaxial compression stress. *Contemporary Engineering Sciences*, 6(2), 57–68.
- Birch, F. (1961). The velocity of compressional waves in rocks to 10 kilobars: 2. *Journal of Geophysical Research*, 66(7), 2199–2224. doi:10.1029/JZ066i007p02199
- Bóna, A., Nadri, D., & Brajanovski, M. (2012). Thomsen's parameters from p-wave measurements in a spherical sample‡. *Geophysical Prospecting*, 60(1), 103–116. doi:10.1111/j.1365-2478.2010.00917.x
- Crampin, S. (1985). Evaluation of anisotropy by shear-wave splitting. *Geophysics*, 50(1), 142–152. doi:10.1190/1.1441824

- Christensen, N. I. (1966). Elasticity of ultrabasic rocks. *Journal of Geophysical Research*, 71(24), 5921–5931. doi:10.1029/JZ071i024p05921
- Ivankina, T. I., Kern, H. M., & Nikitin, A. N. (2005). Directional dependence of P- and S-wave propagation and polarization in foliated rocks from the Kola superdeep well: Evidence from laboratory measurements and calculations based on TOF neutron diffraction. *Tectonophysics*, 407(1-2), 25–42. doi:10.1016/j.tecto.2005.05.029
- Jech, J. (1991a). Computation of elastic parameters of anisotropic medium from travel times of quasi-compressional waves. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 66(1991), 153–159.
- Jech, J. (1991b). Computation of elastic parameters of anisotropic medium from travel times of quasi-compressional waves. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 66(3-4), 153–159. doi:10.1016/0031-9201(91)90074-R
- Jech, J., & Pšenčík, I. (1989). First-order perturbation method for anisotropic media. *Geophys. J. Int.*, 99, 369–376.
- Klíma, K. (1973). The computation of the elastic constants of an anisotropic medium from the velocities of body waves. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 17(2), 115–122.
- Klíma, K., Pick, M., & Pros, Z. (1981). On the problem of equal area block on a sphere. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 25(1), 24–35. doi:10.1007/BF01613559
- Kwasniewski, M., Li, X., & Takahashi, M. (Eds.). (2012). *True Triaxial Testing of Rocks* (Vol. 8, p. 384). CRC Press.
- Lokajíček, T., & Klíma, K. (2006). A first arrival identification system of acoustic emission (AE) signals by means of a high-order statistics approach. *Measurement Science and Technology*, 17(9), 2461–2466.
- Lokajíček, T., & Svitek, T. (2015). Laboratory measurement of elastic anisotropy on spherical rock samples by longitudinal and transverse sounding under confining pressure. *Ultrasonics*, 56, 294–302. doi:10.1016/j.ultras.2014.08.015
- Mainprice, D. (1990). A FORTRAN program to calculate seismic anisotropy from the lattice preferred orientation of minerals. *Computers & Geosciences*, 16(3), 385–393. doi:10.1016/0098-3004(90)90072-2
- Nadri, D., Bona, A., & Brajanovski, M. (2011). Estimation of stress-dependent anisotropy from P-wave measurements on a spherical sample. *Geophysics*, 76(3), WA91–WA100.
- Nikitin, A. N., & Ivankina, T. I. (2004). Neutron diffractometry in geosciences. *Physics of Particles and Nuclei*, 35(2), 193–224.
- Pros, Z., & Babuška, V. (1968). An apparatus for investigating the elastic anisotropy on spherical rock samples. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 12(2), 192–198. doi:10.1007/BF02587847

- Pros, Z., Lokajíček, T., & Klíma, K. (1998). Laboratory Approach to the Study of Elastic Anisotropy on Rock Samples. *Pure and Applied Geophysics*, 151(2-4), 619–629. doi:10.1007/s000240050133
- Pros, Z., & Podroužková, Z. (1974). Apparatus for investigating the elastic anisotropy on spherical rock samples at high pressure. *Veröff Zentralinst Physic Erde*, 22, 42–47.
- Sedlák, P., Hirose, Y., Khan, S. A., Enoki, M., & Šikula, J. (2009). New automatic localization technique of acoustic emission signals in thin metal plates. *Ultrasonics*, 49(2), 254–62. doi:10.1016/j.ultras.2008.09.005
- Stanchits, S., Vinciguerra, S., & Dresen, G. (2006). Ultrasonic velocities, acoustic emission characteristics and crack damage of basalt and granite. *Pure and Applied Geophysics*, 163(5-6), 975–994. doi:10.1007/s00024-006-0059-5
- Vavryčuk, V. (2013). Inversion for weak triclinic anisotropy from acoustic axes. *Wave Motion*, 50(8), 1271–1282. doi:10.1016/j.wavemoti.2012.11.003
- Xie, Y., Wenk, H.-R., & Matthies, S. (2003). Plagioclase preferred orientation by TOF neutron diffraction and SEM-EBSD. *Tectonophysics*, 370(1-4), 269–286. doi:10.1016/S0040-1951(03)00191-4

Curriculum vitae

Mgr. Tomáš SVITEK
Adresa bydliska: Machkova 2128/5, Praha 11, 149 00
Email: svitek@gli.cas.cz
Mobil: +420 725657671
Tel: +420 224313520
Rodinný stav: ženatý
Dátum narodenia: 3.2.1984
Miesto narodenia: Banská Bystrica, Slovenská Republika
Národnosť: slovenská

VZDELANIE

2008 – súčasnosť Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy v Praze,
doktorandské studium na téma Laboratorní studium 3-D
mechanické anisotropie hornin

2002 - 2008 Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy v Praze,
získán titul magistra v oboru užitá geofyzika

1998 – 2002 Gymnázium J.G. Tajovského, Banská Bystrica,
ukončené maturitou

ZAMESTNANIE

10/2008 – súčasnosť Geologický ústav AV ČR, v.v.i.,
Rozvojová 269, Praha 6, 165 00.
- pracovník vo vede a výskume

ZNALOSŤ JAZYKOV

Anglický: aktívna znalosť slovom aj písmom
certifikát FCE (2011)

ĎALŠIE SCHOPNOSTI

Vodičský preukaz skupiny B, Windows, Mac OS, MS OFFICE, MATLAB, Vallen Systéme,
Surfer, Grapher, Mendeley, Corel

ZAMERANIE

Elastická anizotropia hornín za pôsobenia vysokých tlakov, akustická emisia, laboratórne
ultrazvukové metódy, P a S vlny, hodnotenie mikroporušení a vnútornej štruktúry hornín

PUBLIKAČNÁ A VEDECKÁ ČINNOSŤ:

Svitek, T., Rudajev, V., & Petružálek, M. (2010). Determination of P - wave arrival time of
acoustic events. *Acta Montanistica Slovaca*, 15, 2, 145-151

Petružálek, M., Vilhelm, J., Rudajev, V., Lokajíček, T., & Svitek, T. (2013). Determination of
the anisotropy of elastic waves monitored by a sparse sensor network. *Int.J. Rock Mech.
Min. Sci.*, 60, 208–216.

Lokajíček, T., Kern, H., Svitek, T., & Ivankina, T.I. (2014). 3D velocity distribution of P and
S-waves in a biotite gneiss, measured in oil as the pressure medium: Comparison with
velocity measurements in a multi-anvil pressure apparatus and with texture-based
calculated data. *Phys. Earth Planet. Inter.*, 231, 1–15. doi:10.1016/j.pepi.2014.04.002

- Svitek, T., Vavryčuk, V., Lokajíček, T., & Petružálek, M. (2014). Determination of elastic anisotropy of rocks from P and S-wave velocities: Numerical modelling and lab measurements. *Geophys. J. Int.*, 199(3), 1682–1697
- Lokajíček, T., & Svitek, T. (2015). Laboratory approach to the study of elastic anisotropy in spheres by simultaneous longitudinal and transverse sounding under confining pressure. *Ultrasonics*, 56, 294-302., doi:10.1016/j.ultras.2014.08.015
- Lokajíček, T., Šťastná, A., Petružálek, M., Šachlová, Š., Svitek, T. & Přikryl, R. (2014). Quasi-continuous ultrasonic sounding and changes of ultrasonic signal characteristics as a sensitive tool for the evaluation of ongoing microstructural changes of experimental mortar bars tested for their ASR potential. *Submitted*
- Petružálek, M., Lokajíček, T., & Svitek, T. (2015). Fracturing process of migmatite samples monitored by acoustic emission and ultrasonic sounding. *Submitted*