

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

**Charles University, Faculty of Science
Institute of hydrogeology, engineering geology and applied
geophysics**

Doktorský studijní program " Aplikovaná geologie
Doctoral study program: Applied Geology

Autoreferát disertační práce
Summary of the Doctoral thesis



Struktura zdrojové oblasti západočeských rojových zemětřesení

The Structure of the West Bohemian Earthquake Swarm Source
Zone

Mgr. Martin Bachura

Školitel/Supervisor: Prof. Tomáš Fischer, PhD.

Praha, 2017

Abstrakt

V tejto práci sme sa zamerali na charakteristiky zemskej kôry z rôznych hľadísk. Ako prvé sme relokovali zemetrasenia z aktivít rokov 2008, 2011 and 2014 za použitia relatívnej metódy *HypoDD* v kombinácii s kroskorelovanými vstupnými dátami. Zvolená metodika sa ukázala ako efektívna a umožnila analyzovanie geometrie zlomovej plochy za pomoci presne lokalizovaných zemetrasení na nej sa vyskytnuvších. Zvolená metodka sa navyše ukázala ako použiteľná na spracovanie dát horšej kvality - automatickými katalógmi s automatickými čítaniami. *HypoDD* spolu s kroskoreláciami je schopné dosiahnuť veľmi dobré relokácie vhodné k mapovaniu zlomovej plochy. Na strane druhej však tento prístup trpí nedostatkami ako nepresná lokácia silných javov (dôsledok rozdielných magnítúd javov pri korelovaní) či vyradenie mnohých zemetrasení v dôsledku filtrovania dát počas behu programu *HypoDD*.

V ďalšom kroku sme skúmali útlmové vlastnosti zemskej kôry v oblasti za pomoci analýzy seismickej kódy. K tomuto účelu sme vybrali 30 javov z rokov 2008, 2011 a 2014. Útlm, vyjadrený bezrozmerným faktorom kvality bol určený pre pokles amplitúd vln kódy - Q_c (coda window method), pre stratu premenou energie na teplo a rozptyl - Q_i and Q_{sc} (multiple lapse time window analysis) a pre P a S vlny - Q_P , Q_S (coda normalization method). Zatiaľ, čo prvé tri boli učernené s uspokojujivými výsledkami, druhé dve treba brať s rezervou. Z pozorovaných frekvenčných závislostí faktorov kvality sa dá usudzovať, že útlm je relatívne nízky - Q sa pohybujú rádovo v prvých tisícoch. Strata energie v dôsledky nedokonalaj elasticity prostredia (anelastický útlm) sa javí byť dominantným faktorom znižujúcim amplitúdy pozorovaným seismickým vlnám v oblasti. Pomocou teórie o úniku "difúznej" seismickej energie do zemskeho plášťa sme sa pokúsili vysvetliť večne diskutovanú frekvenčnú závislosť anelastického útlmu. Ak pripustíme túto teóriu výjde nám, že konštantná hodnota anelastického útlmu Q_i je v rozmedzí 3300 až 4000. Analýza kódy ako taká neumožňuje detailné rozlíšenie útlmu v priestore pre tak malé územie, ako sú Západné Čechy.

Na záver sme študovali reologické vlastnosti materiálu v oblasti zdrojovej zóny zemetrasení. K tomu sme použili "double-difference" metódu a určovali V_P/V_S . K tomu sme použili vopred spočítané presné lokácie zemetrasení a kroskorelované vstupné dáta - časy rozdielov príchodov seismických vln na staniách. K analýze bola zvolená aktivita z roku 2014. V prvom kroku sme rozdelili analyzované zemetrasenia na 7 klasterov kopírujúcich časový a priestorový vývoj aktivity a následne sme pre každý klaster určili hodnotu V_P/V_S . Nízke hodnoty V_P/V_S až 1.59 ± 0.02 boli pozorované v hlbšej partii zlomu, zatiaľ čo plytkejšia časť aktivovanej zlomovej zóny niesla V_P/V_S až 1.73 ± 0.01 . Zhodou okolností tieto nízke hodnoty vo väčšej hĺbke dobre korelujú s prvými mainshock-ami, začiatkami aktivity. Vyššie hodnoty potom pokrývajú oblasť výskytu dotrasov. Toto správanie sa dá interpretovať ako výsledok nasýtenia zlomovej plochy plášťovými fluidami, ktoré pod tlakom spôsobia trhanie (zemetrasenia), dočasné zvýšenie porozity v jeho dôsledku a vyplnenie fluidami. Takýto proces sa vyznačuje znížením V_P/V_S . V následnej etape sa tlak flúid a porozita klesá a V_P/V_S sa avracia k svojej tradičnej Poissonovskej hodnote 1.73. Ďalšia možná interpretácia stojí na pozorovaní, že rozdielne hodnoty V_P/V_S iba odzrkadľujú geologické rozhranie dvoch celkov s rozdielnymi vlastnosťami v oblasti pokrytej zemetraseniami.

Abstract

We analyzed crustal characteristics of Earth's crust under West Bohemia earthquake swarm region from three different optics. Seismic episodes from 2008, 2011 and 2014 were subjects of relocating using double-difference *HypoDD* technique supplemented with cross-correlated input data. used data processing was proved to be efficient and produced highly precise relative locations of swarm earthquakes distributed on a single fault plane. Results were suitable for statistical and detailed spatio-temporal analyses. Moreover, used procedure was applicable even to a data achieved fully automatically (catalogs, picks) with lower initial quality. In that case the relocations are sufficiently good as a tool for mapping underground structures. On the other hand, resulting completeness and locations of stronger events might be biased as a result of sparse data (picks and differential times) and magnitude differences.

Attenuation properties of the crust were derived from coda of 30 earthquakes from 2008, 2011 and 2014 activity. Reliable frequency dependent quality factors were estimated for coda decay - Q_c , intrinsic loss and scattering - Q_i and Q_{sc} using coda window method and multiple lapse time window analysis. Less reliable results were achieved by coda normalization method for P- and S-waves - Q_P , Q_S . According to obtained results it might be conclude that attenuation is rather low (quality factors up to first thousands) and intrinsic loss is dominant attenuation process afflicting the propagation of seismic waves. We tried to explain alway unclear frequency dependent of intrinsic loss quality factor Q_i as a result of diffusive energy leak towards Earth's mantle. If so, then the magnitude of such a leakage enhances the Q_i estimations and causes its frequency dependence. Constant level of real Q_i is then 3300-4000. Coda methods don't allow to study spatial distribution of attenuation for such a small areas like West Bohemia with its seismic network is.

The rheological properties of Earth materials are expressed by their seismic velocities and V_P/V_S ratio, which is easily obtained by the Wadati method. Its double-difference version based on cross-

correlated waveforms enables focusing on very local structures and allows tracking, monitoring and analyzing the fluid activity along faults. We applied the method to three 2014 mainshock–aftershock sequences in the West Bohemia and found pronounced V_P/V_S variations in time and space for different clusters of events located on a steeply dipping fault zone at depths ranging from 7 to 11 km. Each cluster reflects the spatial distribution of earthquakes along the fault plane but also the temporal evolution of the activity. Low values of V_P/V_S ratio down to 1.59 ± 0.02 were identified in the deeper part of the fault zone whereas higher values up to 1.73 ± 0.01 were estimated for clusters located on a shallower segment of the fault. Temporally the low V_P/V_S values are associated with the early aftershocks, while the higher V_P/V_S ratios are related only to later aftershocks. We interpret this behavior as a result of saturation of the focal zone by compressible fluids: in the beginning the mainshock and early aftershocks driven by over-pressured fluids increased the porosity due to opening the fluid pathways. This process was associated with a decrease of the velocity ratio. In later stages the pressure and porosity decreased and the velocity ratio recovered to levels of 1.73, typical for a Poissonian medium and Earth’s crust. Another possible interpretation is that the activity is on intersection of two geological units with different rheological properties and observed V_P/V_S is controlled by the position of the cluster.

Obsah/Contents

1	Úvod	8
2	Ciele práce	8
3	Materiály a metodika	8
3.1	Relokácie	8
3.2	Útlm seizmických vln	9
3.3	V_P/V_S	9
4	Výsledky a diskusia	10
4.1	Relokácie	10
4.2	Útlm seizmických vln	11
4.3	V_P/V_S	13
5	Záver	14
6	Použitá literatúra	15
1	Introduction	17
2	Aims of the study	17
3	Materials and methods	17
3.1	Relocations	17
3.2	Attenuation of seismic waves	18
3.3	V_P/V_S	18
4	Results and discussion	19
4.1	Relocations	19
4.2	Attenuation of seismic waves	20
4.3	V_P/V_S	22
5	Conclusions	23

6	References	24
	Životopis	26
	Curriculum Vitae	28
	Vybrané publikácie/Selected publications	30

1 Úvod

Oblasť Západných Čiech je známa svojou geodynamickou aktivitou. Najvýraznejším z prejavov doznievajúcej geodynamickkej aktivity (terciérnej a kvartérnej) je zemetrasná aktivita - seizmické roje. Tisíce až desaťtisíce slabších zemetrasení (do $M_L = 4.4$) sa počas seizmického roja vyskytnú v Novokosteleckej zdrojovej zóne. Ide o vertikálny segmentovaný zlom orintovaný severo-južne v hĺbke od 12 do 6 km (pozri Obr. 1). Posledné seizmické roje či zemetrasné sekvencie sa vykytli v rokoch 2008, 2011, 2014.

2 Ciele práce

Cieľom tejto práce bolo využiť záznamy západočeských rojových zemetrasení k analýze a hlbšiemu štúdiu ako reologických vlastností lokálnej zemskej kôry, tak i dynamických procesov na zlome samotnom. Zemskú kôru sme analyzovali z hľadiska jej útlmových vlastností, ktoré sme určovali z kódy zemetrasení pomocou širokého spektra metód. Vlastnosti samotnej zdrojovej zóny a procesov na nej prebiehajúcich sme skúmali pomocou analýzy priestorových a časových zmien pomeru rýchlostí šírenia seizmických vln - V_P/V_S . Základom úspechu akejkoľvek analýzy zemetrasnej aktivity, rojovú nevnímajúc je súbor presne lokalizovaných zemetrasení. Tému lokalizácie zemetrasení sme sa tiež v tejto práci venovali.

3 Materiály a metodika

3.1 Relokácie

K relokácii asi štyroch tisíc zemetrasení z roku 2014 (od $M_L = -1.0$ do $M_L = 4.4$) sme použili double-difference metódu *HypoDD* (Waldhauser a Ellsworth, 2000). Tá umožňuje získať veľmi presné relatívne lokácie v rámci malých hustých zemetrasných uskupení - klasterov. Ako vstupné dáta sme použili časy rozdielov príchodov

seizmických fází rôznych dvojíc zemetrasení, ktoré sme určovali pomocou kroskorelácií seismogramov. Počas celej procedúry sme dbali na to, aby sme spolu korelovali iba zemetrasenia s podobným magnitúdom a nespôsobovali tak nechcené efekty - nesprávne lokácie silných javov.

3.2 Útlm seizmických vln

Kóda seismogramu je súbor rozptýlených vln, ktoré v sebe nesú informáciu o prostredí, ktorým sa šíri a ktoré im uberalo energiu - tlmilo ich. Útlm seizmických vln sa charakterizuje pomocou bezrozmernej veličiny zvanej faktor kvality - Q . Pomocou analýzy poklesu amplitúd kódy (CWM - Aki a Chouet, 1975) sme určovali $Q_c(f)$, ktoré z určitých prípadov zodpovedá anelastickému útlmu $Q_i(f)$. Pomocou analýzy relatívneho obsahu energie v kóde seismogramov na rôznych hypocentrálnych vzdialenostiach (MLTWA - Fehler et al., 1992) sme určovali intenzitu útlmu spôsobeného rozptylom a anelasticitou - $Q_{sc}(f)$, $Q_i(f)$. Skúmaním poklesu amplitúd priamych vln normalizovaných kódom (CNM - Aki, 1980) sme určili $Q_P(f)$ a $Q_S(f)$ pre P- a S-vlny. Všetky faktory kvality sme skúmali na frekvenciách od 3 do 24 Hz.

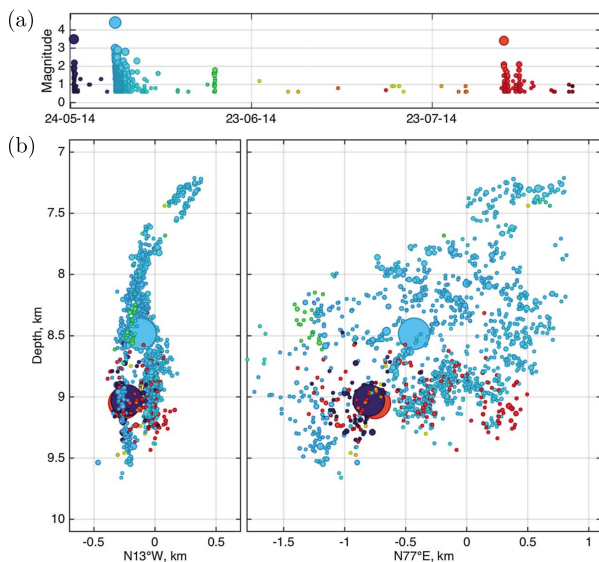
3.3 V_P/V_S

Zmeny pomeru rýchlostí šírenia P a S vln sme analyzovali na aktivite roku 2014. Celú aktivitu sme rozdelili na niekoľko klasterov reflektujúcich časový a priestorový vývoj seizmickej činnosti a pre každý klaster sme určili V_P/V_S pomocou double-difference metódy (Lin a Shearer, 2007; Dahn a Fischer, 2014; Bachura a Fischer, 2016). Ako vstupné dáta boli použité kroskoreláciou určené časy rozdielov príchody P- a S-vln. Zároveň sme testovali určovanie V_P/V_S pomocou modifikovanej relatívnej lokačnej metódy master-event.

4 Výsledky a diskusia

4.1 Relokácie

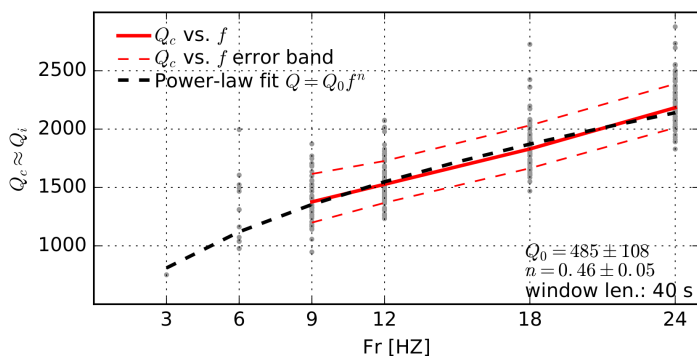
Úspešne sa nám podarilo relokovať 4842 zemetrasení o sile $M_L = -1.0$ až $M_L = 4.4$ (Obr 1). Presnosť lokácií je ± 18 m v horizontálnom smere a ± 25 v smere vertikálnom. Absolútna poloha celého uskupenia však môže byť posunutá, nakoľko sme používali techniku relatívnu - *HypoDD*.



Obr. 1: Relokácie: (a) Časový priebeh aktivity 2014. (b) Dva vertikálne rezy - pohľad zpredu a z boku na zlomovú plochu pod Novým Kostelom. Najsilnejšie javy sú zvýraznené. V Hainzl et al. (2016).

4.2 Útlm seizmických vln

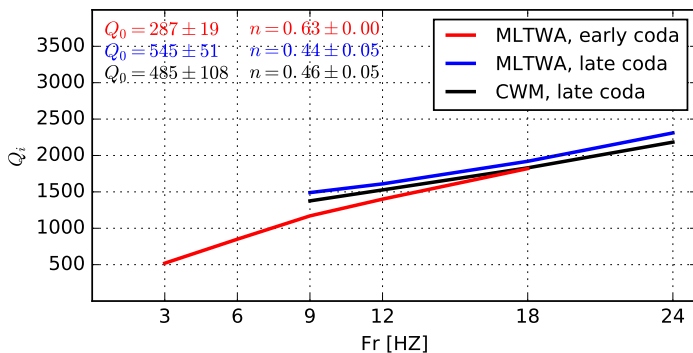
K určovaniu útlmových vlastností zemskej kôry pod Západnými Čechami sme použili silnejšie zemetrasenia s neporušenou kódom z aktivít rokov 2008, 2011 a 2014. Analýzou poklesu amplitúd kódy sme relatívne stabilne určili frekvenčnú závislosť anelastického útlmu na frekvenciách 9 - 24 Hz (Obr. 2).



Obr. 2: Frekvenčná závislosť Q_c určená pomocou CWM. Šedé body reprezentujú jednotlivé určenia Q_c pre kombinácie stanica-jav, červená čiara je výsledná stredná hodnota Q_c , prerušovaná červená čiara reprezentuje štandardnú odchýlku, chybu určenia Q_c . Čierna prerušovaná čiara ukazuje aproximáciu Q_c v zmysle 'power-law' s parametrom $Q_0 = 485$ a exponentom frekvenčnej závislosti $n = 0.46$.

Pomocou metódy MLTWA sme taktiež určili frekvenčnú závislosť faktoru kvality pre anelastický útlm, horšie to však bolo s vierohodným určením intenzity rozptylu seizmických vln. Potešiteľné však je, že aspoň hodnoty $Q_i(f)$ z oboch metód sú viacmenej totožné (Obr. 3).

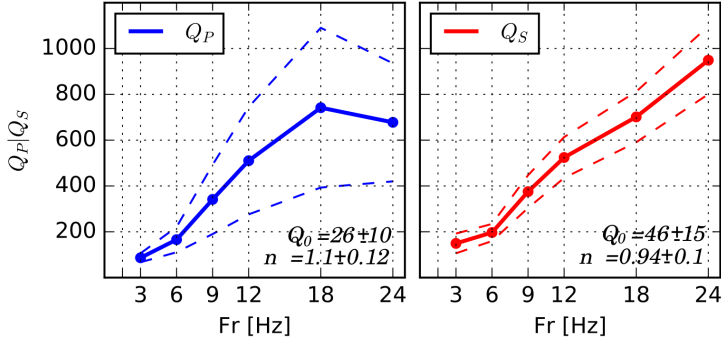
Ťažko vysvetliteľnú frekvenčnú závislosť anelastického útlmu je možné interpretovať ako vplyv zemskeho plášťa - vlny po príchode



Obr. 3: $Q_i(f)$ určené pomocou CWM (čierna), MLTWA pre rôzne datasety (modrá a červená). Koeficienty pre vyjadrenie formou 'power-law' sú zobrazené v grafe.

na MOHO sú absorbované a neodrážajú sa naspäť do kôry (a do kódy). Táto strata energie je frekvenčne závislá a spôsobuje zdanlivú frekvenčnú závislosť $Q_i(f)$. Po korekcii na vplyv plášťa sme určili konštantnú hodnotu Q_i na úrovni 3300 - 4000, čo považujeme za hodnotu zmysluplnú.

Určenie útlmu priamych P- a S-vĺn pomocou CNM nebolo jednoduché a výsledny sú nejednoznačné. Hodnoty $Q_P(f)$ a $Q_S(f)$ sú nižšie než sú predošlých metód - rádovo v stovkách (Obr. 4).

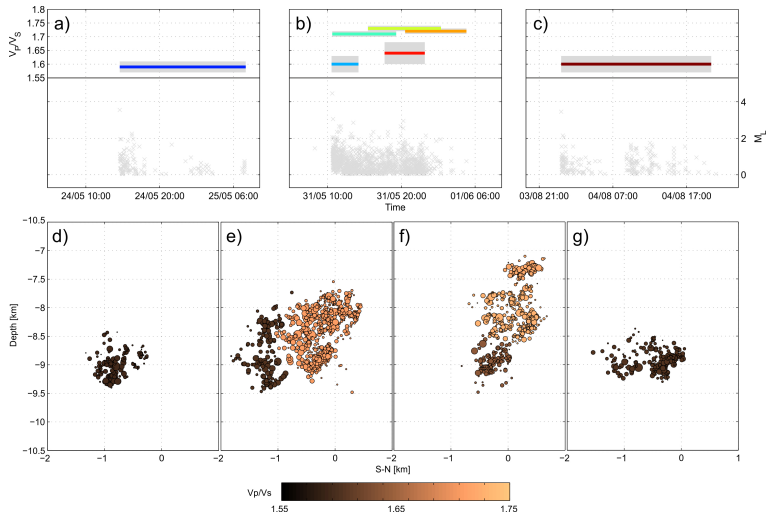


Obr. 4: frekvenčné závislosti Q_P a Q_S určené pomocou CNM, spolu s 'power-law' koeficientami.

4.3 V_P/V_S

V_P/V_S pre jednotlivé skupiny zemetrasení roku 2014 sú zobrazené na Obr. 5. Nízke hodnoty až 1.59 ± 0.02 boli namerané v hlbších častiach aktivovanej plochy, zatiaľ čo vyššie hodnoty 1.73 ± 0.01 v oblastiach bližšie k povrchu. Oblasti s nízkym pomerom rýchlostí zároveň korelujú s oblasťami, kde sa aktivita začala - v oblasti 'mainshockov'. Vyššie pomery rýchlostí potom ležia v oblasti pokrytej dotrasmi.

Variácie V_P/V_S je možno vysvetliť v zmysle zmeny horninového prostredia- oblasti plytšie ako 8.5 km sú tvorené horninami s vyšším V_P/V_S , zatiaľ čo hlbšie oblasti sú charakteristické nižším V_P/V_S . Rovnako hodnoverná však je i interpretácia dynamická - zmeny V_P/V_S sú spôsobené zmenou porozity v zdrojovej oblasti v dôsledku procesov vzniku trhlín a ich nasýtením vysokotlaktým superkritickým CO_2 . Táto interpretácia sa opiera a Biot-Gassmannove rovnice popisujúce chovanie V_P/V_S v závislosti na porozite.



Obr. 5: Určenie V_P/V_S pre jednotlivé klasterové zemetrasení roku 2014: a)-c) V_P/V_S spolu s chybami určenia (šedé) - zobrazenie v časovej škále. d)-g) Zobrazenie klasterov s farbou reflektujúcou určené V_P/V_S , bočný pohľad na zlomovú zónu.

5 Závěry

Charakter aktivity a súčasná infraštruktúra (rozmiestnenie a inštrumentalizácia staníc) umožňuje veľmi presné relatívne lokovanie zemetrasení s presnosťou prvých desiatok metrov (za použitia *HypoDD* v kombinácii s kroskoreláciami). Použitie relokácie môžu byť použité k ďalším aplikáciám, ako je monitoring V_P/V_S . Analýza drobných variácií V_P/V_S umožňuje lepšie pochopiť procesy, ktoré prebiehajú na zlomovej plocha počas aktivity. Pozorovali sme zásadné zmeny v chovaní V_P/V_S počas 'mainshockovej' a 'aftershockovej' fázy - prechod od nízkych hodnôt 1.59 ± 0.02 k hodnotám štandard-

ným, poissonovským 1.73 ± 0.01 . Toto správanie možno najlepšie interpretovať ako zmeny porozity a nasýtenie zóny fluidami, ale i 'statické' vysvetlenie, teda možnú zmenu horninového prostredia v rámci zlomovej plochy je treba brať v úvahu.

Analýza kódy umožnila určenie strednej hodnoty útlmu seizmických vln v dôsledku anelasticity v rozmedzí $Q_i = 3300 - 4000$. Táto hodnota zodpovedá tektonicky stabilnému korovému prostrediu kontinentálnej litosférickej dosky. Treba brať zreteľ na fakt, že toto určenie nedokáže zohľadniť drobné heterogenity, akou je Novokostelecká zlomová zóna a viac vypovedá o zemskej kôre v oblasti ako celku. Ostatné určenia útlmov v oblasti sú otáznne, nakoľko sú zaťažené významnou chybou a nejednoznačnosťou, ničmenej indikujú, že útlm sa zintenzívňuje smerom k povrchu, čo je očakávané pozorovanie.

6 Použitá literatúra

Aki, K. (1980). "Attenuation of shear-waves in the lithosphere for frequencies from 0.05 to 25 Hz". In: *Physics of the Earth's and Planetary Interiors* 21, pp. 50–60.

Aki, K. and B. Chouet (1975). "Origin of coda waves: Source, attenuation and scattering effects". In: *Journal of Geophysical Research* 80, pp. 3322–3342.

Dahm, T. and T. Fischer (2014). "Velocity ratio variations in the source region of earthquake swarms in NW Bohemia obtained from travel time double-differences". In: *Geophysical Journal International* 196, pp. 957–970.

Fehler, M. et al. (1992). "Separation of Scattering and Intrinsic Attenuation for the Kanto-Tokai Region, Japan, Using Measurements of S-wave Energy versus Hypocentral Distance". In: *Geophysical Journal International* 108, pp. 787–800.

Hainzl, S. et al. (2016). "Aftershocks triggered by fluid-intrusion: Evidence for the afterhosck sequence occured 2014 in West Bohemia/Vogtland". In: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*

121.

Lin, G. and P. Shearer (2007). “Estimation local V_p/V_s ratios within similar earthquake clusters”. In: *Bulletin of the Seismological Society of America* 97, pp. 379–388.

Waldhauser, F. and W.L. Ellsworth (2000). “A double-difference earthquake location algorithm: method and application to the Northern Hayward Fault, California”. In: *Bulletin of the Seismological Society of America* 90, pp. 1353–1368.

1 Introduction

The West Bohemia/Vogtland region in the Czech Republic has been the focus of several highly active seismic episodes, expressed in the form of seismic swarms. Recent recorded episodes have occurred in 2008, 2011 and 2014. During the weeks-long or months-long swarm activity, thousands of events were observed with the strongest magnitudes above $M_L = 4$. All events were located in a small planar area beneath the village Nový Kostel at depths ranging from 6 to 12 km below sea level.

2 Aims of the study

The aim of this study was analysis of rheological properties of the Earth's crust and to study dynamic processes on the active Nový Kostel fault zone using records of swarm earthquakes. We analyzed attenuation properties of local crust by studying codas of local earthquakes. To study the dynamics of the fault zone during the mainshock-aftershock sequences we monitored the V_P/V_S and focused on its variations. A precise earthquake location was essential for the purposes our study, so the relative location problem was studied and discussed in the study as well.

3 Materials and methods

3.1 Relocations

We used a double-difference method *HypoDD* (Waldhauser and Ellsworth, 2000) for relocation of approximately 4000 earthquakes from 2014 (from $M_L = -1.0$ to $M_L = 4.4$). The method allows obtaining very precise relative locations of tightly clustered earthquakes. It makes use of arrival time differences that can be measured with high precision by waveform cross-correlation technique. However, it must be stated, that correlating waveforms of two events with different

magnitudes might lead to a systematic bias and might result in mislocation of strong events. During our procedure we controlled used event pairs in order to prevent it.

3.2 Attenuation of seismic waves

Earthquake coda is a composition of scattered waves containing an information on the medium they have traveled through. We are trying to derive the information, particularly the information on its attenuation properties. Loss of the energy due to attenuation might be described by a dimensionless quality factor Q . We used Coda window method (CWM - Aki and Chouet, 1975) to estimate $Q_c(f)$ describing the coda amplitudes delay. In a certain cases $Q_c(f)$ describes anelastic loss $Q_i(f)$. Using Multiple lapse time window analyses MLTWA (Fehler et al., 1992) we estimated intensity of anelastic loss and scattering - $Q_i(f)$, $Q_{sc}(f)$. By use of Coda normalization method (CNM - Aki, 1980) the attenuation of direct P- and S- waves were estimated. All application estimated attenuation properties for frequencies 3-24 Hz.

3.3 V_P/V_S

We analyzed V_P/V_S variations during the 2014 activity using a double-difference method (Lin and Shearer, 2007; Dahn and Fischer, 2014; Bachura and Fischer, 2016). Catalog was split into a few tight clusters reflecting spatial and temporal characteristics of the overall activity and each cluster undergone a double-difference V_P/V_S estimation. Cross-correlated differential times for P- and S-waves were used to ensure the high precision of input data. Moreover, V_P/V_S estimation by modified master-event technique was tested.

4 Results and discussion

4.1 Relocations

We relocated 4842 earthquakes from 2014 with $M_L = \langle -1.0, 4.4 \rangle$ (Fig. 6). Horizontal precision of relative locations is ± 18 m, vertical one is ± 25 m. However, absolute location of the cluster might be shifted, as is common for all relative methods.

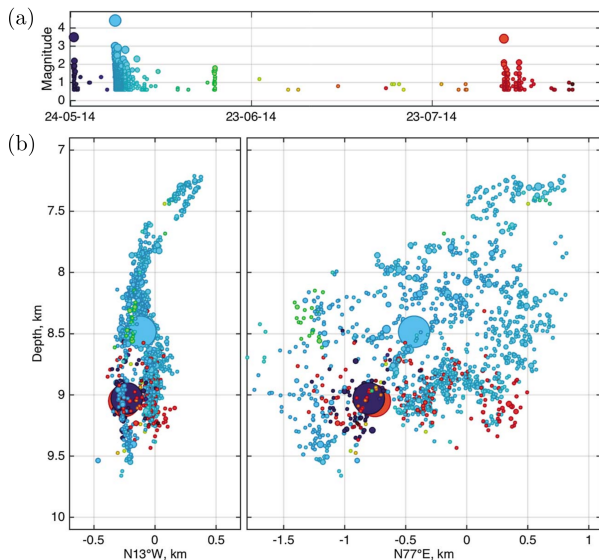


Fig. 6: Relocations: (a) Temporal evolution of 2014 activity. (b) Two vertical cross-sections - front view and side view on the Nový Kostel focal zone. The strongest earthquakes are exaggerated. In Hainzl et al. (2016).

4.2 Attenuation of seismic waves

We applied coda methods on 30 stronger earthquakes from 2008, 2011 and 2014 with codas of sufficient lengths and unbiased by other earthquakes. By application of the CWM we estimated the frequency dependence of $Q_c(f)$ of frequencies 9 - 24 Hz (Fig. 7)

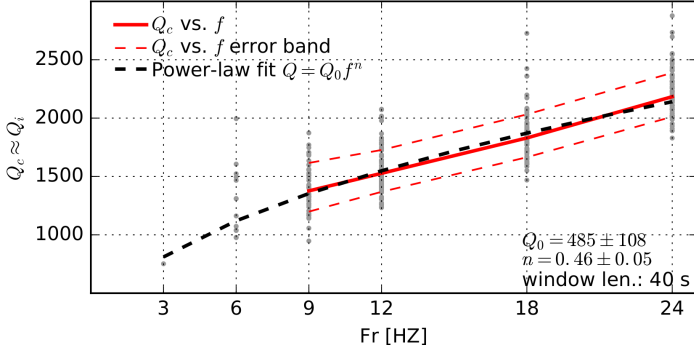


Fig. 7: Frequency dependence of Q_c as estimated by CWM. Grey dots represent single coda Q_c estimates for station-events combinations, red line is resulting mean Q_c , red dashed lines show error intervals represented by a standard deviation. Black dashed line represents the Q_c in the terms of power law with the best fitting $Q_0 = 485$ and power law exponent $n = 0.46$.

By the MLTWA application on two different datasets we reliably estimated $Q_i(f)$ for anelastic loss, but the $Q_{sc}(f)$ estimation was poorly conditioned and was unsuccessful. Estimated values and frequency dependence of $Q_i(f)$ are very similar to CWM results, what gives reliability to the estimation 8)

By many authors hardly acceptable frequency dependence of Q_i can be interpreted as an influence of the Earth's mantle. Seismic waves arriving at MOHO are not scattered back, but are absorbed

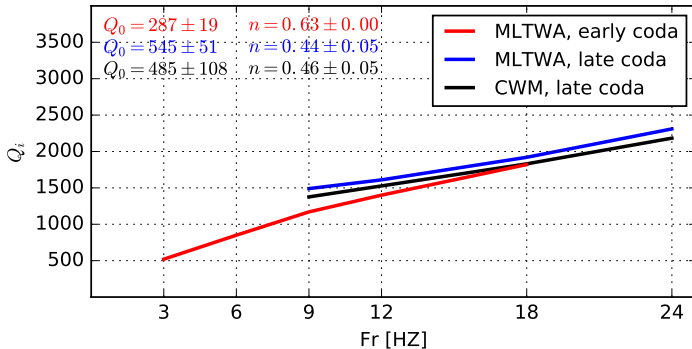


Fig. 8: $Q_i(f)$ revealed by different methods and datasets: the MLTWA on early coda dataset (red), the MLTWA on late coda (blue) and Coda window method CWM on late coda (black). Frequency power-law coefficients are listed inside the plot.

instead. Hence, this frequency dependent effect - energy deficit resulting from mantle absorption causes apparent frequency dependence of intrinsic loss. We applied correction for the mantle influence and obtained constant $Q_i = 3300 - 4000$, what is acceptable value.

Application of CNM method was questionable, since results are not so well conditioned as the results from MLTWA or CWM. Values of $Q_P(f)$ and $Q_S(f)$ are lower - in order of hundreds (Fig. 9)

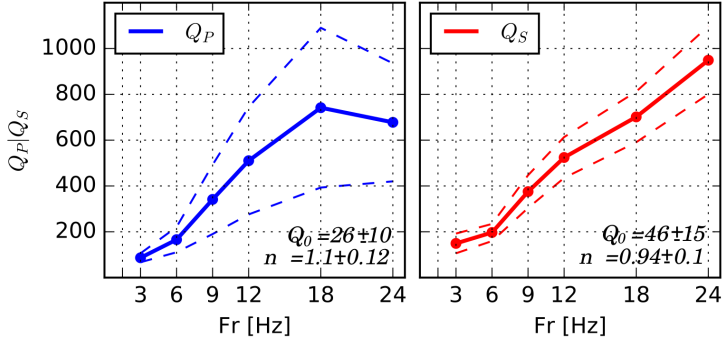


Fig. 9: Frequency dependences of Q_P and Q_S from Coda normalization method (CNM) along with their frequency power-law constants.

4.3 V_P/V_S

V_P/V_S estimations for separate earthquake cluster of 2014 are plotted in Figure 10. Low values down to 1.59 ± 0.02 were observed in deeper portions of the fault zone, below depths of 8.5 km, while values typical for standard poissonian medium (1.73 ± 0.02) were observed above this depth level. Low V_P/V_S values also correlate with areas where the mainshock-aftershock sequences started. High V_P/V_S then cover the area containing aftershocks.

V_P/V_S variations can be interpreted as a change in geology - rheology of the crust around the fault zone, when lower part is composed of materials with low V_P/V_S , while shallower parts contain high V_P/V_S material. Equally valid interpretation is the dynamic one, where V_P/V_S changes reflect porosity changes (as a result of fracturing) and over-pressured supercritical CO_2 saturation of fractures. Latter one can be modeled by Biot-Gassmann equations describing V_P/V_S behavior as a function of porosity in saturated rock.

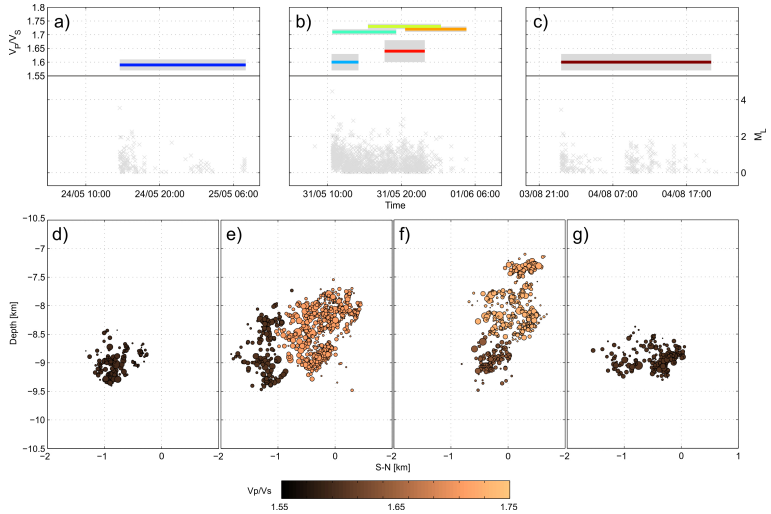


Fig. 10: V_P/V_S of analyzed clusters from 2014: a)-c) V_P/V_S with errors (grey bands) as a function of time. d)-g) Spatial distribution of clusters with colors reflecting V_P/V_S level. Side view towards planar fault zone.

5 Conclusions

Swarm character of West Bohemian activity with its monitoring possibilities allows very precise relative locations of local earthquakes - with precision in first tens of meters, when *HypoDD* software with cross-correlations are used. Resulting relocations are suitable for V_P/V_S monitoring by means of a double-difference method. Detailed study of V_P/V_S variations helps uncover the character of processes occurring within the fault zone. We observed the change in V_P/V_S behavior - transition from low V_P/V_S associated with mainshocks and early aftershocks (1.59 ± 0.02) towards standard poisson-

nian 1.73 ± 0.02 associated with shallower aftershocks. This behavior is the most suitably interpreted as the result of porosity change and fault zone fluid saturation. However, 'static' interpretation based on rock material change in 8.5 km depth must not be omitted.

Coda analyses allowed us to estimate mean value of anelastic loss independent on frequency - $Q_i(f) = 3300 - 4000$. This range is valid for intra-continental crust material. We must keep in mind that coda methods can hardly see small scale Q heterogeneities, as the Nový Kostel focal zone is and is rather integral value describing the crustal area beneath wester part of Czech Republic as a whole, from surface down to MOHO. Other Q estimations obtained from other used methods were associated with relatively high error and uncertainty level. Despite it, they indicate that attenuation is increasing toward surface, what is expected behavior.

6 References

Aki, K. (1980). "Attenuation of shear-waves in the lithosphere for frequencies from 0.05 to 25 Hz". In: *Physics of the Earth's and Planetary Interiors* 21, pp. 50–60.

Aki, K. and B. Chouet (1975). "Origin of coda waves: Source, attenuation and scattering effects". In: *Journal of Geophysical Research* 80, pp. 3322–3342.

Dahm, T. and T. Fischer (2014). "Velocity ratio variations in the source region of earthquake swarms in NW Bohemia obtained from travel time double-differences". In: *Geophysical Journal International* 196, pp. 957–970.

Fehler, M. et al. (1992). "Separation of Scattering and Intrinsic Attenuation for the Kanto-Tokai Region, Japan, Using Measurements of S-wave Energy versus Hypocentral Distance". In: *Geophysical Journal International* 108, pp. 787–800.

Hainzl, S. et al. (2016). "Aftershocks triggered by fluid-intrusion: Evidence for the afterhosck sequence occured 2014 in West Bohemia/Vogtland". In: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*

121.

Lin, G. and P. Shearer (2007). “Estimation local V_p/V_s ratios within similar earthquake clusters”. In: *Bulletin of the Seismological Society of America* 97, pp. 379–388.

Waldhauser, F. and W.L. Ellsworth (2000). “A double-difference earthquake location algorithm: method and application to the Northern Hayward Fault, California”. In: *Bulletin of the Seismological Society of America* 90, pp. 1353–1368.

Životopis

Osobné údaje

NARODENÝ: Malacky, Slovensko
15 September 1987
ADRESA: Štefánikova 709/65, 90501, Senica,
Slovensko

Pracovné skúsenosti

2016-SÚČASNOSŤ	Vedecký pracovník Geofyzikální ústav, Akademie věd ČR Praha
2013-SÚČASNOSŤ	Ph.D. študent Univerzita Karlova, Přírodovědecká Fakulta Praha
2016	Vedecký pracovník, stážista Karlsruher Institut fuer Technologie Karlsruhe, Nemecko

Vzdelanie

2013-SÚČASNOSŤ	Ph.D. štúdium Aplikovaná geologie Univerzita Karlova, Přírodovědecká Fakulta Praha
2011-2013	Mgr. štúdium Aplikovaná geologie - užitá geofyzika Univerzita Karlova, Přírodovědecká Fakulta Praha

2008-2011	Bc. štúdium Hospodaření s přírodními zdroji Univerzita Karlova, Přírodovědecká Fakulta Praha
2006-2008	Bc. štúdium Filologie Univerzita Karlova, Filosofická Fakulta Praha Nedokončené

Schopnosti a znalosti

JAZYKY	Anglicky
IT	Matlab, Python3, Unix, Latex, MS Office, GIMP, Corel

Curriculum Vitae

Personal information

BORN: Malacky, Slovakia
15 September 1987
ADDRESS: Štefánikova 709/65, 90501, Senica,
Slovakia

Working experience

2016-CURRENT	Researcher Institute of Geophysics Academy of Sciences of Czech Rep. Prague
2013-CURRENT	Ph.D. student, researcher Charles University, Faculty of Science Prague
2016	Researcher, scholarship Karlsruher Institut fuer Technologie Karlsruhe, Germany

Education

2013-CURRENT	Ph.D. Applied Geology Charles University, Faculty of Science Prague
2011-2013	Mgr. Applied Geology - Applied geophysics Charles University, Faculty of Science Prague

2008-2011		Bc. Management of natural resources Charles University, Faculty of Science Prague
2006-2008		Bc. štúdium Filology Charles University, Faculty of Philosophy Prague Interrupted

Personal skills and competences

LANGUAGES		English
IT		Matlab, Python3, Unix, Latex, MS Office, GIMP, Corel

Vybrané publikácie/Selected publications

Bachura, M. and T. Fischer (2016). “Coda attenuation analysis of the West Bohemia/Vogtland earthquake swarm area”. In: *Pure and Applied Geophysics* 173, pp. 426-437.

URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s00024-015-1137-3> .

Bachura, M. and T. Fischer (2016). “Detailed velocity ratio mapping during the aftershock sequence as a tool to monitor the fluid activity within the fault plane.” In: *Earth and Planetary Science Letters* 453, pp. 215-222.

URL: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2016.08.017>.

Hainzl, S. and Fischer, T. and Čermáková, H. and Bachura, M. and J. Vlček (2016). “Aftershocks triggered by fluid-intrusion: Evidence for the afterhosck sequence occured 2014 in West Bohemia/Vogtland”. In: *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 121.

URL : <http://dx.doi.org/10.1002/2015JB012582>.