

UNIVERZITA KOMENSKÉHO V BRATISLAVE
FAKULTA MATEMATIKY, FYZIKY A INFORMATIKY

APLIKOVATEĽNOSŤ METÓD RELATÍVNEJ
LOKALIZÁCIE NA OHNISKOVÚ ZÓNU MALÉ KARPATY

Bakalárska práca

Bratislava, 2014

Dana Bobuľská

UNIVERZITA KOMENSKÉHO V BRATISLAVE
FAKULTA MATEMATIKY, FYZIKY A INFORMATIKY

APLIKOVATEĽNOSŤ METÓD RELATÍVNEJ
LOKALIZÁCIE NA OHNISKOVÚ ZÓNU MALÉ KARPATY

Bakalárska práca

Študijný program: Fyzika

Študijný odbor: 1160 Fyzika

Školiace pracovisko: Katedra astronómie, fyziky Zeme a meteorológie

Školiteľ: Mgr. Miriam Kristeková, PhD.

Bratislava, 2014

Dana Bobuľská



Univerzita Komenského v Bratislave
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky

ZADANIE ZÁVEREČNEJ PRÁCE

Meno a priezvisko študenta: Dana Bobuľská
Študijný program: fyzika (Jednoodborové štúdium, bakalársky I. st., denná forma)
Študijný odbor: 4.1.1. fyzika
Typ záverečnej práce: bakalárska
Jazyk záverečnej práce: slovenský

Názov: Aplikovateľnosť metód relatívnej lokalizácie na ohniskovú zónu Malé Karpaty
Cieľ: Preskúmať možnosti použitia metód relatívnej lokalizácie na upresnenie hypocentrálnych parametrov zemetrasení z oblasti Malých Karpát.

Vedúci: Mgr. Miriam Kristeková, PhD.
Katedra: FMFI.KAFZM - Katedra astronómie, fyziky Zeme a meteorológie
Vedúci katedry: prof. RNDr. Peter Moczo, DrSc.
Dátum zadania: 29.04.2013

Dátum schválenia: 02.05.2013
prof. RNDr. Jozef Masarik, DrSc.
garant študijného programu

.....
študent

.....
vedúci práce

Pod'akovanie

Ďakujem vedúcej mojej bakalárskej práce, Mgr. Miriam Kristekovej, PhD., za jej podporu, množstvo venovaného času a energie, nápady a veľa podnetných diskusií a konzultácií počas vypracovávania a písania tejto práce.

Chcela by som tiež vyjadriť úprimnú vďaku Dr. Čermákovéj z Geofyzikálneho ústavu AV ČR v Prahe, ktorá nám počas štvordňovej odbornej návštevy na Geofyzikálnom ústave v Prahe poskytla cenné informácie a rady pri oboznámení sa s programom na relokalizáciu zemetrasení metódou dvojitého diferenciálu.

Ďakujem tiež Dr. Lucii Fojtíkovej za jej ústretovosť a poskytnutie vstupných údajov, a tiež doc. Jozefovi Kristekovi za technickú pomoc pri práci s programom.

Ďakujem aj RNDr. Jurajovi Sekerešovi za poskytnutie údajov z lokálnej siete v Malých Karpatoch.

Abstrakt

Dana Bobuľská

Aplikovateľnosť metód relatívnej lokalizácie na ohniskovú zónu Malé Karpaty

Univerzita Komenského v Bratislave

Fakulta matematiky, fyziky a informatiky

Katedra astronómie, fyziky Zeme a meteorológie

Školiteľ: Mgr. Miriam Kristeková, PhD.

Bakalárska práca, 58 strán, 2014

V tejto práci sa venujeme metódam relatívnej lokalizácie zemetrasení a možnostiam aplikácie týchto metód na ohniskovú zónu Malé Karpaty. Oblasť Malých Karpát patrí k najvýznamnejším aktívnym zdrojovým zónam na Slovensku. Zároveň sa v blízkosti nachádza lokalita atómových elektrární Jaslovské Bohunice, čo výrazne zvyšuje dôležitosť dôkladného výskumu seizmickej aktivity a čo najkomplexnejšieho zhodnotenia seizmického ohrozenia tejto oblasti. Metódy relatívnej lokalizácie umožňujú zvýšiť presnosť určenia hypocentrálnych parametrov zemetrasení (poloha, hĺbka ohniska, čas vzniku). Tieto údaje patria k základným vstupným údajom v analýze seizmického ohrozenia skúmanej oblasti. Presnejšie určené hypocentrálne parametre slúžia tiež na analýzu a identifikáciu seizmicky aktívnych zlomov, či presnejšie určenie ohniskových mechanizmov zemetrasení. Princíp týchto metód umožňuje dosiahnuť voči bežným metódam vyššiu presnosť výsledkov aj pri menej známych modeloch prostredia, čo je práve prípad epicentrálnej oblasti Malé Karpaty, kde rýchlostný model doposiaľ nie je dostatočne presne známy.

Na detailné štúdium a aplikáciu relatívnej lokalizácie na zemetrasenia z ohniskovej zóny Malé Karpaty sme zvolili metódu dvojitéch diferencií, a to najmä preto, že v porovnaní s inými metódami relatívnej lokalizácie má menej obmedzení a je možné ju použiť aj na veľkú skupinu zemetrasení rozmiestnených vo väčších vzdialenostiach v priestore. V tejto práci sme dôkladne našťudovali teoretickú stránku metódy dvojitéch diferencií a oboznámili sa s jej aplikáciou, voľbou parametrov a prácou s dostupným softwarom HypoDD. Metódu sme aplikovali na 19 slabých zemetrasení z augusta 2006 pre rôzne voľby parametrov, výsledky sme vzájomne porovnali a rozanalyzovali.

Kľúčové slová: *relokalizácia zemetrasení, metóda dvojitéch diferencií, hypocentrálne parametre, ohnisková zóna Malé Karpaty*

Abstract

Dana Bobuľská

Applicability of the relative location methods to the Malé Karpaty source zone

Comenius University in Bratislava

Faculty of Mathematics, Physics and Informatics

Department of Astronomy, Physics of the Earth and Meteorology

Supervisor: Mgr. Miriam Kristeková, PhD.

Bachelor thesis, 58 pages, 2014

The thesis is devoted to the methods of relative location of earthquakes and possibilities of application of these methods to earthquakes in the Malé Karpaty source zone. The area of Malé Karpaty is one of the most important active source zones in Slovakia. This focal zone is located near the nuclear power plant Jaslovské Bohunice, what significantly increases importance of in-depth investigation of seismic activity and of the comprehensive seismic hazard assessment of this area. Methods of relative location enable to estimate hypocentral parameters of earthquakes (location, depth, origin time) with a higher accuracy. These data belong to basic inputs into seismic hazard analysis. More precisely estimated hypocentral parameters enable also better analysis and identification of seismoactive faults and more accurate estimation of the focal mechanisms of earthquakes. The principle of relative location methods allows to obtain location results with much smaller uncertainties even in the case of not well known velocity model. Therefore this class of methods is suitable also for areas with less known model structure, such as the case of Malé Karpaty source zone. We have performed detailed review of the Double-Difference Method of relative location and we have chosen it for application to the earthquakes recorded in the Malé Karpaty source zone. The main reason was that application of this method is less limited in comparison with other relative location methods and it is possible to use it for a large set of earthquakes, more separated in space one from another. In this thesis, we have carefully studied theory of double difference earthquake location algorithm and we have obtained experiences how to apply the method to real data, how to make suitable choices of parameters and how to use the available software package HypoDD. We have applied this method to set of 19 weak earthquakes that occurred during August 2006. We have performed various tests of relocation for different parameters choices. The results of relocations in these tests were compared and analyzed.

Key words: *relative location, double-difference earthquake location algorithm, hypocentral parameters, Malé Karpaty source zone*

Predhovor

Táto bakalárska práca sa zameriava na metódy relatívnej lokalizácie zemetrasení a možnosti ich aplikácie na zdrojovú zónu Malé Karpaty. Preto sme dôkladne preštudovali v súčasnosti najpoužívanejšie metódy relatívnej lokalizácie, oboznámili sa s dostupnými údajmi z oblasti Malých Karpát a ich kvalitou a na základe toho sme si ako vhodnú metódu na aplikáciu v zdrojovej zóne Malé Karpaty vybrali metódu dvojitéch diferencií. Metódu sme aplikovali na súbor zemetrasení pre rôzne voľby parametrov programu, používaného na relokalizáciu zemetrasení pomocou tejto metódy.

Túto tému bakalárskej práce som si zvolila na základe záujmu o seizmológiu a zemetrasenia a tiež preto, že venovanie sa tejto problematike považujem za dôležité nielen z vedeckého, ale aj socio-ekonomického a hospodárskeho hľadiska, vzhľadom na dôležitosť skúmanej oblasti Malé Karpaty. Metódy relatívnej lokalizácie totiž ponúkajú spresnenie hypocentrálnych parametrov, ktoré tvoria jeden zo základných vstupov do analýzy seizmického ohrozenia danej oblasti.

Táto práca a jej výsledky poskytujú prvú aplikáciu metódy dvojitéch diferencií na zemetrasenia lokalizované na území Slovenska. Získané cenné skúsenosti a poznatky plánujeme využiť v nadväzujúcej diplomovej práci, v rámci ktorej plánujeme metódu dvojitéch diferencií aplikovať na veľký súbor zemetrasení z oblasti Malých Karpát, a tak zlepšiť poznanie seizmického režimu skúmanej oblasti.

Obsah

Zoznam skratiek	8
Úvod	9
1 Súčasný stav riešenej problematiky	11
1.1. Seizmická aktivita v oblasti Malých Karpát a jej monitorovanie v kontexte Slovenska.....	11
1.2. Lokalizácia zemetrasení	15
1.2.1. Absolútna lokalizácia	15
1.2.1.1. Jednoduché metódy na odhad hypocentrálnych parametrov zemetrasenia	15
1.2.1.2. Numerické metódy	18
1.2.2. Relatívna lokalizácia	20
2 Cieľ práce	22
3 Metodika práce a metódy skúmania	23
3.1. Metóda hlavného javu	24
3.2. Metóda dvojítých diferencií (DD)	25
4 Výsledky a diskusia	30
4.1. Popis parametrov a vstupných/výstupných súborov	30
4.2. Relokalizácia súboru zemetrasení v zdrojovej oblasti Malé Karpaty	36
4.2.1. Test s časmi príchodov P a S vln použitými v metóde ME	39
4.2.2. Testy s časmi príchodov P a S vln v katalógu Progseis	40
4.2.2.1. Test s použitím rýchlostného modelu s pomerom $v_p/v_s = 1.75$	43
4.2.2.2. Test s použitím rýchlostného pomeru s pomerom $v_p/v_s = 1.95$	47
4.2.3. Vlastná reinterpretácia záznamov zemetrasení	51
Záver	53
Zoznam použitej literatúry	55

Zoznam skratiek

AEB	Lokálna sieť Atómové elektrárne Bohunice
AEM	Lokálna sieť Atómové elektrárne Mochovce
BUKO	seizmická stanica Bukové
DD	metóda dvojitéch diferencií (z angl. Double Difference)
DVOD	seizmická stanica Dobrá Voda
HRAD	seizmická stanica Hradište
JABO	seizmická stanica Jaslovské Bohunice
KATA	seizmická stanica Katarínka
LAKS	seizmická stanica Lakšár
LANC	seizmická stanica Lančár
LSSVS	Lokálna seizmická sieť Východné Slovensko
ME	metóda hlavného javu (z angl. Master event)
MKNET	Seizmická sieť Malé Karpaty
NSSS	Národná sieť seizmických staníc
PLAV	seizmická stanica Plavecké podhradie
PVES	seizmická stanica Pustá Ves
SMOL	seizmická stanica Smolenice
SPAC	seizmická stanica Špačince

Úvod

V tejto bakalárskej práci sme sa zamerali na metódy relatívnej lokalizácie zemetrasení a na možnosti ich aplikácie v zdrojovej zóne Malé Karpaty. Táto oblasť patrí v súčasnosti k najaktívnejším zdrojovým oblastiam na Slovensku. Zároveň sa v jej blízkosti nachádza atómová elektráreň Jaslovské Bohunice, čo výrazne zvyšuje dôležitosť tejto oblasti a potrebu venovať jej výskumu zvýšenú pozornosť.

Presnosť určovania hypocentrálnych parametrov zemetrasení štandardnými metódami výrazne závisí od presnosti použitého rýchlostného modelu prostredia. Použitie modelov, ktoré dostatočne presne nezodpovedajú reálnej geologickej štruktúre, vedie k značným neurčitostiam v určovaní hypocentrálnych parametrov. Keďže ohnisková oblasť Malých Karpát je tektonicky veľmi zložitou oblasťou, ktorej seizmický model nie je dostatočne presne známy, na zlepšenie presnosti v určovaní hypocentier môžeme zvoliť dva prístupy. Jednou z možností je snaha čo najviac spresniť dostupný seizmický model pomocou iných analýz, druhou možnosťou je vykonať relokalizáciu zaznamenaných zemetrasení pomocou metód tzv. relatívnej lokalizácie. Princíp týchto metód umožňuje dosiahnuť voči bežným metódam vyššiu presnosť výsledkov aj pri menej známych modeloch prostredia.

Presnejšie určenie hypocentrálnych parametrov zemetrasení je dôležitým vstupným údajom do analýzy seizmického ohrozenia záujmovej lokality. Umožňuje tiež presnejšie určenie ohniskových mechanizmov zemetrasení a analýzu ich časových a priestorových variácií, analýzu a identifikáciu seizmicky aktívnych zlomov, čo je dôležité pre poznanie seizmického režimu skúmanej oblasti.

V tejto práci skúmame možnosti použitia metód relatívnej lokalizácie na upresnenie hypocentrálnych parametrov zemetrasení z oblasti Malých Karpát. Na splnenie tohto cieľa bolo potrebné naštudovanie princípov v súčasnosti používaných metód relatívnej lokalizácie, pričom sme sa hlbšie zamerali na metódu dvojitéch diferencií. Táto metóda ponúka menšie obmedzenia ako iné metódy relatívnej lokalizácie, poskytuje väčšiu voľnosť vo výbere dát a je aplikovateľná aj na veľké súbory zemetrasení rozmiestnených vo väčších vzdialenostiach v priestore. Cieľom tejto práce preto bolo ponúknuť dôkladný súhrn poznatkov o tejto metóde, tiež o programe HypoDD, ktorý bol vytvorený autormi metódy dvojitéch diferencií (*Waldhauser & Ellsworth, 2000*), a ktorý umožňuje relokalizovať zemetrasenia pomocou tejto metódy, a tiež aplikácia metódy dvojitéch diferencií na súbor zemetrasení z oblasti Malé Karpaty.

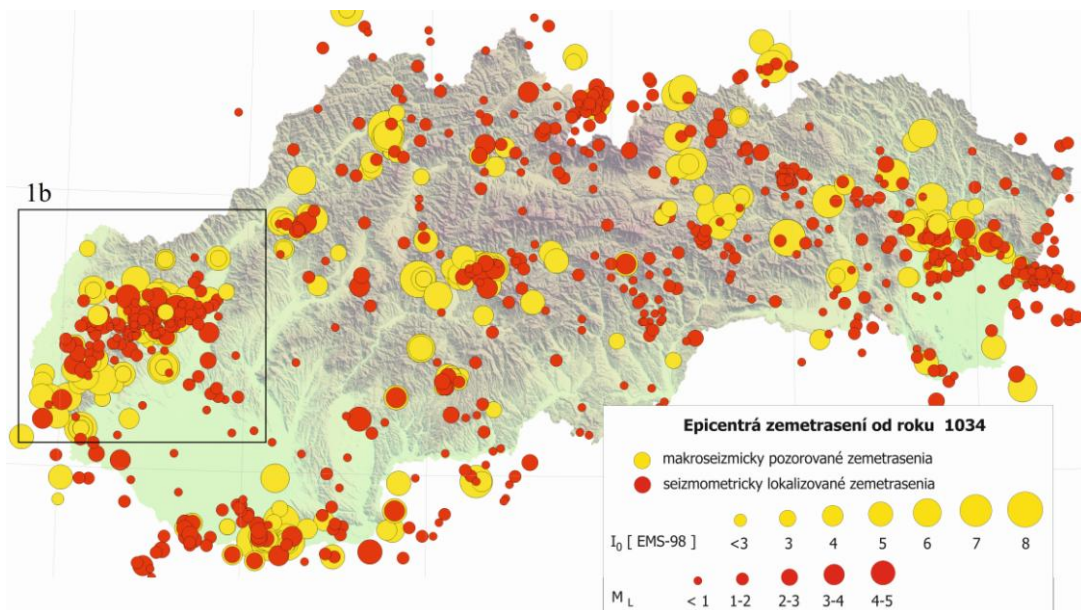
Kapitola 1 tejto práce sa zaoberá podrobným opisom a doterajším výskumom v skúmanej oblasti Malé Karpaty. V tejto kapitole sme tiež zhrnuli poznatky o štandardne používaných metódach lokalizácie a obmedzeniam ich použitia, a to najmä v oblastiach, kde rýchlostný model prostredia nie je presne určený. V závere tejto kapitoly sme opísali základne princípy v súčasnosti používaných metód relatívnej lokalizácie a vzájomne sme ich porovnali. V kapitole 2 sú formulované ciele tejto bakalárskej práce. V kapitole 3 sa venujeme podrobnejšiemu popisu dvoch v súčasnosti najviac používaných metód relatívnej lokalizácie – metóde hlavného javu a metóde dvojitéch diferencií. V tejto kapitole sme obidve metódy vzájomne porovnali a vysvetlili dôvody výberu metódy dvojitéch diferencií na aplikáciu v zdrojovej oblasti Malé Karpaty. V kapitole 4 sú výsledky tejto práce. V prvej časti sme sa venovali podrobnému a prehľadnému popisu jednotlivých vstupných súborov programu HypoDD na relokalizáciu pomocou metódy dvojitéch diferencií, a aj jednotlivých parametrov výpočtu DD relatívnej lokalizácie spolu s praktickými odporúčaniami ako voliť ich hodnoty. Vhodná voľba vstupných parametrov je dôležitým faktorom na presnosť výslednej relokalizácie. Tento podrobný popis poskytuje rýchle zorientovanie sa v parametroch programu HypoDD a zároveň môže slúžiť na oboznámenie sa s programom pre záujemcov o použitie tejto metódy na Slovensku. V druhej časti tejto kapitoly sme sa venovali analýze našich výsledkov aplikácie metódy dvojitéch diferencií na súbor 19 zemetrasení z oblasti Malé Karpaty, vhodnému nastaveniu parametrov parametrov výpočtu pre relatívnu lokalizáciu takéhoto súboru zemetrasení. Popisujeme vykonané testy pre rôzne voľby parametrov výpočtu a pre rôzne pomery rýchlosti P a S vln v rýchlostnom modeli skúmanej oblasti. Keďže tento pomer doposiaľ nie je presne známy, urobili sme aj vlastný odhad realistického pomeru rýchlosti P a S vln v skúmanej oblasti pomocou metódy Wadatiho diagramov. V tejto kapitole sú výsledky testov analyzované a rozdiskutované. V poslednej kapitole sú sformulované závery práce.

1 Súčasný stav riešenej problematiky

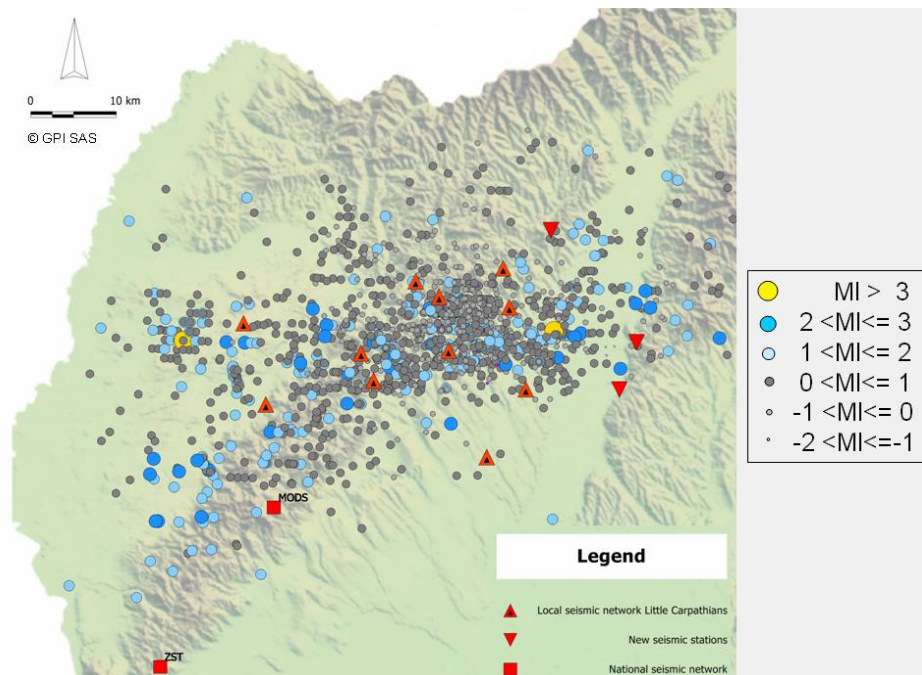
1.1 Seizmická aktivita v oblasti Malých Karpát a jej monitorovanie v kontexte Slovenska

Súčasná seizmická aktivita Slovenska je síce v porovnaní s najaktívnejšími oblasťami sveta relatívne nízka, nemožno ju však zanedbať. Na Slovensku bolo v minulosti niekoľko silných zemetrasení. Tento fakt spolu s pretrvávajúcimi geologickými procesmi, ktoré viedli k silným zemetraseniam na území Slovenska v minulosti, vedie k oprávnenému očakávaniu, že k silným zemetraseniam na území Slovenska dôjde opäť aj v budúcnosti. O pretrvávajúcich geologických procesoch a tektonickej aktivite územia Slovenska svedčí aj niekoľko tisíc zaznamenaných slabých zemetrasení, ale aj makroseizmicky zdokumentovaných silnejších zemetrasení za posledné tisícročie (Moczo et al., 2002). Zemetrasenie je veľmi zaujímavý prírodný proces, pri ktorom sa v krátkom čase uvoľní obrovské množstvo energie a v obývaných oblastiach vedie často k deštruktívnym až katastrofickým účinkom. Predpovedať zemetrasenie v zmysle kedy a kde presne k nemu dôjde, zatiaľ nie je možné. Aj preto je veľmi dôležité dôkladne analyzovať seizmickú aktivitu vo všetkých ohrozených oblastiach, a teda aj na území Slovenska, a tiež adekvátne analyzovať mieru seizmického ohrozenia.

Jednou z najvýznamnejších aktívnych zdrojových zón na Slovensku (obr. 1a) je oblasť Malých Karpát (obr. 1b). Táto oblasť patrí v súčasnosti k seizmicky najviac aktívnym oblastiam na našom území.



Obr. 1a: Epicentrá zemetrasení na území Slovenska v období rokov 1034 – 2012; čiernym rámkom je vyznačená oblasť zobrazená v obrázku 1b (Cipcjar et al., 2013, Katalóg zemetrasení Slovenska - verzia 2012)



Obr. 1.b: Seizmická aktivita v oblasti Malých Karpát v období 3/1987 – 3/2013; trojuholník s bodkou označuje lokálnu sieť AEB, červený trojuholník tri nové seizmické stanice vybudované v roku 2011, štvorce stanice NSSS a krúžky znázorňujú zemetrasenia s lokálnym magnitúdom podľa legendy (Fojtíková, L., Kristeková, M., Málek, J., Zahradník, J. 2013)

V oblasti Malých Karpát sa nachádza lokalita atómových elektrární Jaslovské Bohunice, čo výrazne zvyšuje dôležitosť čo najkomplexnejšieho zhodnotenia seizmického ohrozenia tejto oblasti a tiež potrebu venovať jej výskumu zvýšenú pozornosť. Aj stredne silné zemetrasenia, aké boli v minulosti na území Slovenska pozorované, by mohli napríklad v dôsledku lokálnych efektov spôsobovať na niektorých miestach účinky, ktoré zodpovedajú podstatne silnejším zemetraseniam. Detailná analýza seizmického ohrozenia, výskum lokálnych efektov a poznanie seizmického režimu zdrojovej oblasti Malé Karpaty sú preto veľmi dôležité zo spoločenského aj hospodárskeho hľadiska. K jedným zo základných vstupných údajov do analýzy seizmického ohrozenia záujmovej lokality patria hypocentrálne parametre zaznamenaných zemetrasení (poloha, hĺbka ohniska, čas vzniku). Takéto údaje sa získavajú analýzou seizmických záznamov a procesom tzv. lokalizácie.

Okrem informácií získaných súčasným monitorovaním a analýzou zemetrasení pomocou seizmických staníc ďalšie cenné informácie o seizmickej aktivite územia Slovenska poskytuje analýza historických údajov s pred obdobia monitorovania. Ako bolo spomenuté na začiatku tejto kapitoly, na Slovensku bolo v minulosti niekoľko silných zemetrasení. Tri najsilnejšie dokumentované zemetrasenia na území Slovenska sú zemetrasenie na Strednom Slovensku 5.6.1443, zemetrasenie z 28.6.1763 na území

Komárna a zemetrasenie 9.1.1906 v oblasti Dobrej Vody. U týchto zemetrasení boli ich účinky pozorované na území podstatne väčšom ako je terajšie územie Slovenska

Najstaršie zemetrasenie s epicentrom na území Slovenska, poznatky o ktorom sa zachovali v písomných prameňoch z obdobia, kedy sa stalo, je zemetrasenie z 5. júna 1443 na Strednom Slovensku. Zničilo banské mestečko Banská Štiavnica spolu s okolitými baňami a tiež poškodilo Kremnicu. Epicentrálna intenzita zemetrasenia bola viac ako 8° MSK-64.

Silné zemetrasenie datované 28. júna 1763 v Komárne zničilo 7 kostolov, 279 domov, 63 osôb bolo usmrtených a 102 zranených. Epicentrálna intenzita zemetrasenia bola viac ako 8-9° MSK-64. Od tohto obdobia bol zaznamenaný podstatne väčší počet zemetrasení, keďže touto veľkou tragédiou zemetrasenia viac vstúpili do povedomia ľudí.

Epicentrum jedného z najsilnejších zemetrasení v histórii Slovenska sa nachádza aj v našej záujmovej lokalite Malé Karpaty. Zemetrasenie 9. januára 1906 v oblasti Dobrej Vody bolo najsilnejším zemetrasením s epicentrom na území Slovenska v 20. storočí. Bolo zároveň aj prvým zemetrasením, pre ktoré sú zaznamenané aj seizmometrické pozorovania. Zemetrasenie spôsobilo vážne škody, v epicentrálnej oblasti sa objavili nové zdroje vody. Epicentrálna intenzita zemetrasenia bola 8-9° MSK-64.

Seizmická aktivita na území Slovenska je v súčasnosti monitorovaná seizmickými stanicami lokálnych sietí v okolí lokalít atómovej elektrárne Bohunice (AEB) a atómovej elektrárne Mochovce (AEM) prevádzkovanými spoločnosťou Progseis, seizmickými stanicami Národnej siete seizmických staníc (NSSS), ktoré prevádzkuje Geofyzikálny ústav SAV (GFÚ SAV) a lokálnou sieťou na Východnom Slovensku (LSSVS), ktorú prevádzkuje Fakulta matematiky, fyziky a informatiky UK.

Detailnejšie monitorovanie v oblasti Malých Karpát začalo v roku 1985 vybudovaním lokálnej seizmickej siete MKNET v okolí AEB. Hlavným dôvodom začiatku tohto monitorovania bola bezpečnosť jadrovej elektrárne vzhľadom k seizmickému ohrozeniu. Monitorovanie je možné rozdeliť na dve obdobia: obdobie do 30.8.1992 a obdobie po 30.8.1992.

Seizmické merania v prvom období boli zamerané na hľadanie správnej konfigurácie seizmických staníc lokálnej siete tak, aby bolo možné lokalizovať hypocentrá zemetrasení s čo najväčšou presnosťou a zistiť ich rozloženie v okolí AEB. Analýzou seizmogramov sa určovali hypocentrálne parametre zemetrasení a ich magnitúda. Konfigurácia aj počet seizmických staníc sa v tomto období menili pomerne často

(Cipciar, 2001). V období po 30.8.1992 sa konfigurácia seizmických staníc menila podstatne menej, najpodstatnejšie zmeny boli v počte seizmických staníc, ktorý sa postupne zvyšoval. V roku 2012 bolo zlepšené prístrojové vybavenie väčšiny staníc, kde boli 1s krátko periodické seizmometre vymenené za širšie pásmové 10s.

Seizmickú aktivitu v oblasti Malých Karpát monitoruje 11 seizmických staníc patriacich do lokálnej siete AEB a dve, ktoré sú prevádzkované NSSS – Modra-Piesky a Bratislava-Železná Studnička. Pôvodným hlavným cieľom lokálnej seizmickej siete v okolí AEB bolo určiť hypocentrálne parametre a veľkosť zaznamenaných zemetrasení pre zemetrasenia s lokálnym magnitúdom $M_L > 0$. Súčasná podoba siete umožňuje v niektorých lokalitách registrovať aj zemetrasenia s $M_L < 0$. V roku 2011 boli vybudované a v roku 2012 boli uvedené do prevádzky tri ďalšie seizmické stanice v oblasti Malých Karpát. Boli vybudované v spolupráci GFÚ SAV, USMH AVČR a spoločnosti Progseis. Dôvodom bola existujúca významná seizmická aktivita aj mimo lokálnej siete MKNET smerom na severo-východ. V tejto oblasti sa dokonca vyskytlo jedno z najväčších zemetrasení za obdobie monitorovania sieťou MKNET ($M_L > 3$). Na presnú lokalizáciu a určovanie ohniskových mechanizmov je pritom potrebné, aby stanice boli umiestnené tak, aby ohniska zemetrasení boli vnútri siete. Základná analýza údajov z oblasti Malých Karpát je vykonávaná pracovníkmi firmy Progseis, ktorá prevádzkuje lokálnu seizmickú sieť v okolí AEB. Údaje z oblasti Malých Karpát sú v prípade potreby ďalej analyzované aj seizmológmi na GFÚ SAV, kde sa zhromažďujú aj makroseizmické údaje o zemetraseniach na Slovensku. Pri lokalizácii zemetrasení v oblasti Malých Karpát je sčasti používaný 3D rýchlostný model (*Geofyzika Brno, 1985*), ktorý však nepokrýva celú oblasť Malých Karpát. V takom prípade sa na lokalizáciu zemetrasení v oblasti nepokrytej 3D modelom používa zjednodušený 1D model.

Postup štandardnej analýzy seizmických záznamov spoločnosťou Progseis je nasledovný: na získaných seizmických záznamoch sa najprv identifikujú tie časti, ktoré obsahujú záznamy zemetrasení alebo explózií. V rámci nich sa potom oddelia záznamy vzdialených zemetrasení, blízkych zemetrasení a explózií. Základné spracovanie je vykonávané programom Analyse, sú identifikované nasadenia P a S vlny, odčítanie maximálnej amplitúdy a príslušnej periódy. Pre zemetrasenie, ktoré je zaznamenané aspoň na troch seizmických staniaciach sa vykonáva lokalizácia. Lokalizácia sa vykonáva v dvoch krokoch. Najprv pomocou programu Fasthypo, ktorý pracuje s 1D modelom. V prípade, ak je možné použiť 3D rýchlostný model prostredia, takto získané ohnisko slúži ako vstup do iného programu, ktorý využíva tento 3D model prostredia. Magnitúdo zemetrasenia je

počítané z amplitúdy a periódy maximálnej vlny pre každú stanicu. Výsledné magnitúdo je počítané ako priemer magnitúd z jednotlivých seizmických staníc. Zo získaných informácií je vytvorená databáza, ktorá pre každé zemetrasenie obsahuje všetky analyzované údaje (Cipciar, 2001).

V prvotnom období monitorovania bolo možné odhadnúť ohniskové mechanizmy len pre pár najsilnejších zemetrasení v oblasti Malých Karpát. V rámci projektu APVV Neotact (2007-2010) boli použitím viacerých metód vypočítané ohniskové mechanizmy 40 silnejších zemetrasení z obdobia 2001- 2009, ktoré sú podrobne popísané v článku Fojtíková et al . (2010).

1.2 Lokalizácia zemetrasení

Čo najpresnejšie určené hypocentrálne parametre zemetrasení, ktoré sú výsledkom procesu lokalizácie, sú jedným z dôležitých vstupných údajov do analýzy seizmického ohrozenia záujmovej lokality. Presnejšie určené hypocentrálne parametre zemetrasení ďalej umožňujú presnejšie určenie ohniskových mechanizmov zemetrasení a analýzu ich časových a priestorových variácií, analýzu a identifikáciu seizmicky aktívnych zlomov, čo je dôležité pre poznanie seizmického režimu skúmanej oblasti, a v neposlednom rade aj ako faktor na spresnenie modelu daného prostredia.

V nasledujúcej kapitole sú zhrnuté základné používané metódy lokalizácie zemetrasení, teda metódy na určenie hypocentra (jeho zemepisnú šírku, dĺžku a tiež hĺbku), ako aj čas vzniku zemetrasenia. Presnosť lokalizácie závisí od mnohých faktorov, napríklad kvality konfigurácie seizmických staníc, precíznosti v analýze časových záznamov zemetrasení (najmä pri určovaní časov príchodov seizmických vĺn) a v neposlednom rade aj od úrovne poznania rýchlostného modelu oblasti. Aj preto sa budeme zaoberať ich obmedzeniami vzhľadom na tieto faktory.

1.2.1 Absolútna lokalizácia

1.2.1.1 Jednoduché metódy na odhad hypocentrálnych parametrov zemetrasenia

A) Odhad polohy epicentra

V prípade, ak máme údaje o zemetrasení z aspoň troch staníc, môžeme na odhad polohy epicentra použiť jednoduchú metódu. Poloha epicentra (keďže táto metóda neuvažuje umiestnenie zemetrasenia do hĺbky) sa určí pomocou prieniku kružníc, ktoré majú stred

v mieste polohy stanice a polomer, ktorý sa určí pomocou rozdielu času príchodov P a S vln na danú stanicu. Máme takýto systém rovníc

$$d = v_p(t_p - t_0) \quad (1.1)$$

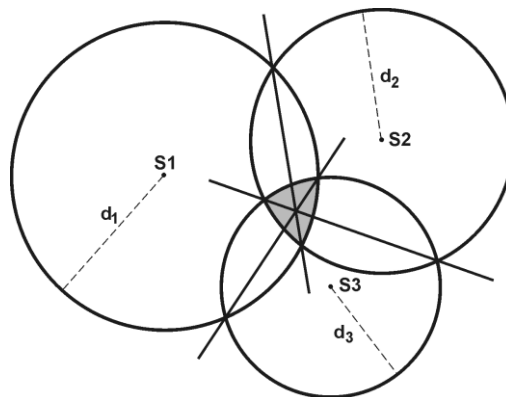
$$d = v_s(t_s - t_0), \quad (1.1)$$

kde d je vzdialenosť ohniska zemetrasenia od stanice, v_p a v_s sú rýchlosti šírenia P, resp. S, vln v danom prostredí, t_p a t_s sú časy príchodov P, resp. S, vln na stanicu a t_0 je počiatkový čas. Vylúčením neznámeho počiatkového času t_0 dostaneme závislosť pre vzdialenosť d

$$d = \frac{v_p \cdot v_s}{v_p - v_s} (t_s - t_p). \quad (1.2)$$

V tejto metóde sa však využíva niekoľko zanedbaní, ktoré majú vplyv na konečnú presnosť lokalizácie. Rozdiel časov príchodov P a S vln sa tu uvažuje ako vzdialenosť od epicentra, ktorá je vo všeobecnosti menšia ako vzdialenosť od hypocentra. V dôsledku toho a tiež nepresností modelu rýchlosti šírenia vln v danom prostredí, či rôznych chýb analýzy záznamov, sa tieto kružnice nepretnú v jednom bode, ale vymedzia určitú oblasť, kde sa s vysokou pravdepodobnosťou nachádza hypocentrum. Aj preto sa táto metóda zvyčajne nepoužíva na definitívne určenie polohy epicentra, je však dobrou počiatkovou lokalizáciou do iných numerických metód, kde je potrebné rozumne zvoliť počiatkovú polohu epicentra.

Na výsledné určenie polohy epicentra z oblasti určenej prienikom kružníc sa používajú tetivy, ktoré sa pretnú v jednom bode (obr. 2).



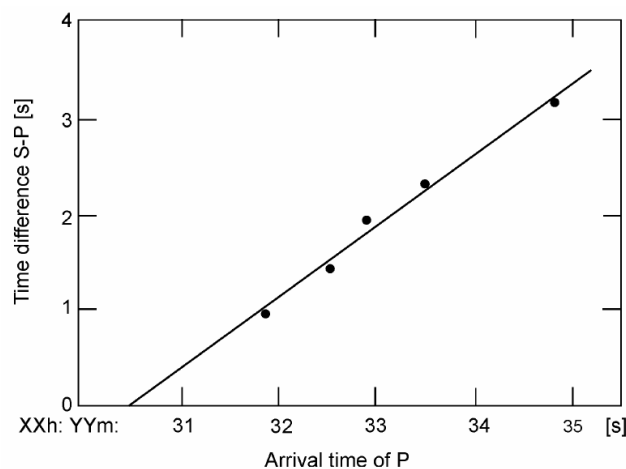
Obr. 2: Určenie polohy epicentra pomocou metódy kružníc a tetív;
 $S1$, $S2$ a $S3$ označujú seizmické stanice a d polomery určené rovnicou (1.2)
 (Havskov et al, 2002)

B) Odhad času vzniku zemetrasenia

Čas vzniku zemetrasenia vieme určiť pomocou jednoduchkej metódy zvanej Wadatiho diagramy (Wadati, 1933). Ak vylúčime z rovníc (1.1) vzdialenosť d , dostávame lineárnu závislosť medzi rozdielom časov príchodov P a S vln a času príchodu P vlny

$$(t_s - t_p) = \left(\frac{v_p}{v_s} - 1 \right) (t_p - t_0). \quad (1.3)$$

Nulový rozdiel času príchodov P a S vln je len v počiatočnom čase, preto ho možno určiť lineárnou regresiou v bode nulového časového rozdielu medzi P a S (obr. 3).



Obr. 3: Znáznornenie Wadatiho diagramu (Havskov et al., 2002), kde je na x-ovej osi zobrazený čas príchodu P vln na stanicu [s] a na y-ovej osi rozdiel časov príchodov P a S vln na danú stanicu [s]

Zo sklonu priamky taktiež možno jednoducho určiť pomer rýchlostí P a S vln

$$\frac{v_p}{v_s} = k + 1. \quad (1.4)$$

Táto metóda môže byť použitá na nezávislé overenie času vzniku zemetrasenia určeného napr. pomocou numerických metód. Odhad času vzniku zemetrasenia a pomeru rýchlosti P a S vln pomocou tejto metódy je možný bez akejkoľvek predchádzajúcej znalosti modelu prostredia. Je však založený na predpoklade, že pomer rýchlosti P a S vln v prostredí medzi hypocentrami a seizmickými stanicami, je konštantný. Preto diagram nie vždy vykazuje priamu lineárnu závislosť, najmä ak sú heterogenity prostredia príliš veľké. Veľké odchýlky bodov od lineárnej závislosti môžu však okrem nekonštantného pomeru rýchlostí P a S vln v prostredí tiež indikovať aj nesprávnu identifikáciu typu seizmickej vlny a/alebo nepresné určenie času príchodu seizmickej vlny na stanicu.

1.2.1.2 Numerické metódy

V praxi sa oveľa častejšie využívajú numerické metódy, kde je možné určiť výslednú lokalizáciu hypocentra omnoho presnejšie. Pri numerických metódach sa uvažuje aj nehomogenita prostredia. Ako už bolo spomenuté, manuálne metódy (napr. vyššie spomínaná metóda kružníc) ponúkajú skôr počiatočný vstup do numerických metód než definitívnu lokalizáciu.

Teoretický čas príchodu t_i^c vlny na i -tu stanicu vieme vyjadriť ako

$$t_i^c = T(x_i, y_i, z_i, x_0, y_0, z_0) + t_0, \quad (1.5)$$

kde T je funkcia času šírenia vlny z hypocentra so súradnicami (x_0, y_0, z_0) na i -tu stanicu so súradnicami (x_i, y_i, z_i) a t_0 je čas vzniku zemetrasenia. Keďže ide o rovnicu so 4 neznámymi, na jej vyriešenie potrebujeme minimálne 4 pozorovania z aspoň troch staníc. Ak máme $n > 4$ pozorovaní, ide o systém rovníc, ktoré očividne nemajú jednoznačné riešenie. Polohu hypocentra teda určíme numericky tak, že na každej stanici minimalizujeme rezíduum. Rezíduum r_i je rozdiel medzi teoreticky vypočítaným (t_i^c) a pozorovaným (t_i^o) časom príchodu vlny na stanicu

$$r_i = t_i^o - t_i^c. \quad (1.6)$$

Keďže T nie je lineárnou funkciou, tento systém rovníc nemožno vypočítať pomocou žiadnych analytických metód ani lineárnych optimalizačných metód.

Jeden zo spôsobov minimalizácie rezídua n pozorovaní je minimalizácia sumy rezíduí kvadratických odchýlok e medzi vypočítaným a pozorovaným časom

$$e = \sum_{i=1}^n (r_i)^2. \quad (1.7)$$

Oblasť, v ktorej sa hypocentrum pravdepodobne nachádza (určenej napríklad pomocou metódy kružníc), sa rozdelí na sieťové body (tak husto, ako to dovoľujú kapacitné možnosti počítača) a pre každý z bodov sa určí suma rezíduí kvadratických odchýlok e . Bod, v ktorom bude e minimálne, je lokálne minimum, ktoré po zväžení a overení inými metódami môžeme prehlásiť za hypocentrum.

Zvýšením výkonu počítačov sa bežnejšie začali používať tzv. iteratívne metódy, ktoré sú síce náročnejšie na výkon počítača, avšak lokalizácia hypocentra je istejšia a presnejšia. Tieto metódy sú založené na linearizácii problému. Najprv sa urobí (dostatočne dobrý, nie náhodný) odhad polohy hypocentra a času vzniku zemetrasenia (napríklad pomocou metód uvedených v časti 1.2.1.1). Predpokladom je, že skutočná poloha hypocentra je dosť blízko odhadovanej. Tým sa problém linearizuje, keďže odchýlky medzi týmito dvoma hodnotami sú dostatočne malé, aby sa funkcia časov šírení mohla aproximovať prvým členom Taylorovho rozvoja

$$r_i = \left(\frac{\partial T}{\partial x_i} \right) \Delta x + \left(\frac{\partial T}{\partial y_i} \right) \Delta y + \left(\frac{\partial T}{\partial z_i} \right) \Delta z + \Delta t = \left(\frac{\partial T}{\partial m_i} \right) \Delta m, \quad (1.8)$$

kde Δx , Δy , Δz a Δt sú korekcie k počiatočnej (vstupnej) hodnote hypocentra a ktoré by pre skutočnú polohu hypocentra mali byť nulové. Keďže ide o rovnicu so 4 neznámymi a rovníc máme v tomto prípade zvyčajne viac než 4, riešenie sa najčastejšie hľadá pomocou metódy najmenších štvorcov. Vypočítané korekcie sa potom prirátajú k počiatočnej lokalizácii hypocentra, a toto nové riešenie sa použije ako začiatkové v ďalšej iterácii (Havskov *et al*, 2002). Iteratívne opakovanie prebieha dovtedy, kým sú hodnoty korekcií dostatočne blízko nule. Táto metóda bola prvýkrát opísaná a použitá Geigerom (1910), preto sa často označuje ako Geigerova metóda. Problémom môže byť, že pri nevhodných podmienkach alebo veľmi zle zvolenej počiatočnej hodnote môžeme určiť len lokálne, nie globálne minimum. Preto je potrebné aplikovať metódu pre viacero typov počiatočných lokalizácií alebo ju kombinovať spolu s inými metódami.

Problémom štandardných lokalizačných metód je veľká závislosť od úrovne poznania seizmického modelu prostredia, t. j. priestorového rozloženia rýchlosti šírenia seizmických vln a hustoty v danej oblasti. Použitím modelov, ktoré dostatočne nezodpovedajú reálnej geologickej štruktúre, sú výsledné hypocentra určené s veľkými nepresnosťami.

Zdrojová zóna Malé Karpaty je oblasťou s veľmi zložitou geologickou štruktúrou. Rýchlostný model v tejto oblasti doposiaľ nie je dostatočne presne známy. V súčasnosti používaný 3D model (Geofyzika Brno, 1985) nepokrýva celú oblasť Malých Karpát, a preto môže byť použitý na lokalizáciu len časti zemetrasení zaznamenaných v tejto oblasti. Navyše, tento model nie je ani dostatočne presný, čo potvrdili aj analýzy počas

projektu EÚ AIM (napríklad *Fojtikova et al., 2011*). Používaný 1D model tiež nemožno považovať za postačujúci, keďže vzhľadom na veľkú priestorovú variabilitu geologického podložia a zložitý systém zlomov v tejto oblasti, nezodpovedá skutočnosti, je len jej priblížením.

Ak chceme lokalizovať zemetrasenia s väčšou presnosťou aj v oblastiach s nedostatočne známym modelom, jednou z možností je snaha čo najviac upresniť dostupný seizmický model pomocou iných analýz pre použitie s bežnými metódami lokalizácie. Druhou možnosťou je lokalizovať zemetrasenia pomocou metód, ktoré sú menej citlivé na znalosť modelu ako štandardné lokalizácie. Takýmito metódami sú tzv. metódy relokalizácie, ktoré umožňujú dosiahnuť voči bežným metódam vyššiu presnosť výsledkov aj pri menej známych modeloch prostredia. V tejto práci sme zvolili druhý prístup, a teda lokalizáciu zemetrasení v zdrojovej oblasti Malé Karpaty pomocou metód relatívnej lokalizácie.

1.2.2 Relatívna lokalizácia

Metódy relatívnej lokalizácie poskytujú oveľa presnejšie určenie hypocentrálnych parametrov ako absolútne metódy vzhľadom k tomu, že nie sú citlivé k nepresnostiam rýchlostného modelu a tiež kompenzujú systematické chyby v časoch príchodov seizmických vln. Nutná podmienka, ktorú musia splňať zemetrasenia vstupujúce do relatívnej lokalizácie je, aby vzdialenosť zemetrasení od staníc, na ktorých boli zaznamenané, bola oveľa väčšia než vzdialenosť medzi samotnými zemetraseniami. V tom prípade možno predpokladať, že dráhy, po ktorých sa šíria seizmické vlny z ohniska k stanici sú pre veľmi blízke zemetrasenia takmer rovnaké.

Bežne sú používané najmä tri metódy relokalizácie – metóda hlavného javu (tzv. Master-event, ďalej označované ako ME), metóda súčasného určovania hypocentra (tzv. Joint hypocenter determination, ďalej JHD) a metóda dvojitéch diferencií (tzv. Double-difference, ďalej DD).

Metóda súčasného určovania hypocentra JHD využíva údaje z viacerých staníc a viacerých zemetrasení na súčasne určenie hypocentrálnych parametrov, korekcií rýchlostného modelu a korekcií na stanicách (*Havskov et al., 2002*). Metóda bola navrhnutá Douglasom v roku 1967, detailný popis je možno nájsť v práci *Pujol (2000)*. Tento prístup umožňuje relatívne lokalizovať navzájom korelovateľné zemetrasenia s malými vzájomnými vzdialenosťami. V záujme zachovania presnosti dát sa však

predpokladá, že zemetrasenia sú zoskupené v malom priestore, aby korekcie rýchlostného modelu boli vykompenzované korekciami na stanicích.

V metóde „hlavného javu“ ME (*Stoddard & Woods 1990; Zollo et al. 1995*) je každé zemetrasenie relatívne lokalizované len voči jedinému konkrétnemu zemetraseniu, tzv. hlavnému (nazývanému tiež master event). Ako hlavný jav sa volí zemetrasenie, ktoré možno absolútne lokalizovať veľmi presne. Relatívne rozdiely sú v tejto metóde definované ako rozdiely medzi pozorovanými a teoretickými časmi v rozdieloch príchodov P a/alebo S vln jednotlivých zemetrasení a hlavného javu na tú istú stanicu. Tento prístup kladie hlavné obmedzenia na maximálne priestorové rozloženie skupiny zemetrasení, keďže v tejto metóde musia byť hypocentrá všetkých analyzovaných zemetrasení dostatočne blízko k hypocentru hlavného javu.

Metóda „dvojitých diferencií“ DD (*Waldhauser & Ellsworth, 2000*) je založená na podobnom princípe ako metóda ME, avšak poskytuje väčšiu voľnosť vo výbere dát, keďže nie je potrebné, aby nejaké jedno konkrétne silnejšie zemetrasenie bolo veľmi presne absolútne lokalizované. Naopak, môže ísť o ľubovoľne veľké množstvo zemetrasení rozmiestnených ďalej v priestore, pričom postačujúce je splnenie nutnej podmienky použitia tejto metódy, aby vzdialenosť medzi dvomi zemetraseniami bola malá v porovnaní so vzdialenosťou medzi týmito zemetraseniami a stanicou. V takomto prípade majú obidve zemetrasenia rovnaký vektor pomalosti smerom k staniciam a rozdiel dráh smerom k stanici medzi takouto dvojicou je nezávislý na nepresnostiach modelu. Táto metóda využíva dvojité diferencie (rozdiely medzi pozorovanými a teoretickými časmi príchodov P a/alebo S vln a súčasne rozdiely vždy pre dvojicu zemetrasení zaznamenaných na tej istej stanici).

Požiadavka aplikovateľnosti metódy JHD na veľmi malý počet zemetrasení umiestnených blízko seba limituje jej využiteľnosť. V metóde ME musia byť hypocentrá všetkých analyzovaných zemetrasení dostatočne blízko k hypocentru hlavného javu, a teda nie je možné aplikovať ju na veľkú oblasť. Metóda sa stáva nepoužiteľnou tiež v prípade, ak v skúmanej oblasti nie je k dispozícii nejaké silnejšie zemetrasenie, ktoré je lokalizované dostatočne presne. Na rozdiel od predchádzajúcich dvoch metód, metóda DD principiálne môže byť aplikovaná aj na veľkú skupinu zemetrasení rozmiestnených vo väčších vzdialenostiach v priestore, pričom stačí, aby vzdialenosť hypocentier dvojice zemetrasení bola dostatočne malá voči vzdialenosti hypocentier k staniciam. Táto vlastnosť metódy DD by mala byť výhodou pre analýzu zemetrasení v oblasti Malých Karpát.

2 Cieľ práce

Hlavným cieľom tejto bakalárskej práce je preskúmať možnosti použitia metód relatívnej lokalizácie na upresnenie hypocentrálnych parametrov zemetrasení z oblasti Malých Karpát. K tomu je potrebné:

- naštudovať princípy v súčasnosti používaných metód relatívnej lokalizácie
- porovnať ich výhody a nevýhody z hľadiska aplikovateľnosti na dostupné údaje z oblasti Malých Karpát
- odporučiť vhodnú metódu a podrobne sa oboznámiť so spôsobom jej aplikácie a voľbou parametrov výpočtu
- naučiť sa pracovať so softwarom, dostupným pre zvolenú metódu
- naštudované postupy aplikovať na reálne údaje z oblasti Malých Karpát pre sériu slabých zemetrasení z augusta 2006 a prakticky overiť použiteľnosť zvolenej metódy na spresnenie polohy ich hypocentier. Overiť vplyv voľby hodnôt niektorých kľúčových parametrov na výsledky relokalizácie.

3 Metodika práce a metody skúmania

Metódy relatívnej lokalizácie poskytujú oveľa presnejšie určenie hypocentrálnych parametrov ako absolútne metódy vzhľadom k tomu, že nie sú citlivé k nepresnostiam rýchlostného modelu a tiež sčasti kompenzujú systematické chyby v určení časov príchodov seizmických vln (*Bouchaala et al., 2013*). Spoločnou nutnou podmienkou použitia týchto metód je, aby vzdialenosť zemetrasení od staníc, na ktorých boli zaznamenané bola oveľa väčšia než vzdialenosť medzi samotnými zemetraseniami. V tom prípade možno predpokladať, že dráhy, po ktorých sa šíria seizmické vlny z ohniska k stanici, sú pre veľmi blízke zemetrasenia takmer rovnaké. Ako konštatuje Kubina (2011) v bakalárskej práci, relatívny rozdiel v čase šírení vln medzi dvoma blízkymi zemetraseniami teda musí byť spôsobený šírením cez časť prostredia medzi oboma hypocentrami. Keďže časť prostredia medzi dostatočne blízkymi hypocentrami môžeme považovať za homogénnu, vzájomnú relatívnu polohu týchto hypocentier je možné určiť veľmi presne nezávisle od nehomogenít celého prostredia. Presnejšie určenie hypocentrálnych parametrov väčšej skupiny zemetrasení, ktoré majú relatívne blízke polohy hypocentier, môže indikovať líniu seizmicky aktívneho zlomu, keďže výsledky metód relokalizácie vykazujú menší rozptyl lokalizovaných zemetrasení. Komplexnejšiu informáciu o zlome poskytujú fokálne mechanizmy, vstupom do ktorých sú čo najpresnejšie určené hypocentrálne parametre dôležitým faktorom.

V tejto kapitole podrobnejšie zhrnieme poznatky o dvoch najpoužívanejších metódach relatívnej lokalizácie: metóde hlavného javu a metóde dvojitéch diferencií. Metóde JHD sa z dôvodu jej obmedzenej použiteľnosti pre väčší súbor zemetrasení viac nebudeme venovať. Odôvodníme, prečo sme na ďalší postup zvolili metódu dvojitéch diferencií, ktorej sa budeme venovať podrobnejšie.

3.1 Metóda hlavného javu

Jedna z prvých a zároveň najpoužívanějších relokalizačných metód je metóda hlavného javu (ďalej len ME). Metóda minimalizuje rozdiely vypočítaných a pozorovaných časov príchodov medzi rozdielom i -teho zemetrasenia a hlavného javu, nazývaným tiež master event, ktorý možno absolútne lokalizovať veľmi presne. Rovnica pre rezíduum dr_i medzi pozorovaným a nameraným relatívnym rozdielom časov príchodov i -teho zemetrasenia a master eventu je

$$dr_k^i = (t_k^i - t_k^{ME})^o - (t_k^i - t_k^{ME})^c. \quad (3.1)$$

Úloha opäť spočíva v minimalizovaní rezídua n pozorovaní, resp. minimalizácia sumy rezíduí kvadratických odchýlok e

$$e = \sum_{i=1}^n (dr_k^i)^2. \quad (3.2)$$

Nutnou podmienkou je, aby master event bol spoľahlivo absolútne lokalizovaný, teda by malo ísť o silnejšie zemetrasenie, ktoré bolo zaznamenané na čo najväčšom počte staníc. Zemetrasenia, ktoré lokalizujeme relatívne vzhľadom na master event musia byť rozmiestnené v čo najbližšom okolí master eventu a tvoriť čo najmenší zhuk a zároveň vzdialenosť medzi zemetraseniami a master eventom musí byť v porovnaní so vzdialenosťou od staníc veľmi malá. Za týchto podmienok môžeme považovať dráhy seizmických vĺn porovnávaných zemetrasení za takmer totožné, pričom malé rozdiely v časoch príchodov môžeme pripísať relatívnym priestorovým rozdielom medzi umiestnením zemetrasení. Vzhľadom na to, že k prepojeniu medzi zemetraseniami dochádza iba prostredníctvom master eventu, absolútna poloha klastra nemusí byť určená presne, keďže poloha všetkých zemetrasení sa určuje len relatívne k master eventu, ktorého poloha je daná fixne.

Táto metóda bola úspešne aplikovaná vo viacerých oblastiach vo svete, napríklad v severnom Švajčiarsku (*Deichmann & Garcia-Fernandez, 1992*), na silný roj 291 zemetrasení v západnej Číne, kde boli určené aj ohniskové mechanizmy pre najsilnejšie zemetrasenia (*Zhou et al, 1999*). V zdrojovej oblasti Malé Karpaty boli v rokoch 2009 - 2013 v rámci projektu EÚ AIM vykonané relokalizácie použitím metódy ME na súbore 15 slabých zemetrasení s lokálnym magnitúdom 0.0 – 2.2 z augusta 2006. Analýza zemetrasnej sekvencie indikovala aktívny zlom v smere juhovýchod - severozápad (*Fojtíková & Málek, 2014, zaslané – osobná komunikácia*).

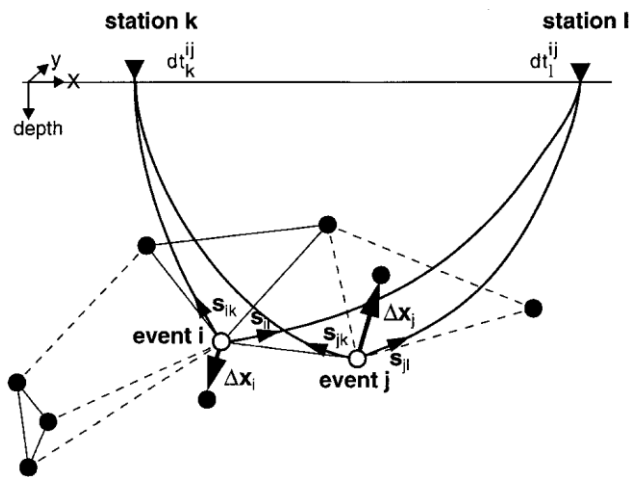
3.2 Metóda dvojitéch diferencií (DD)

Táto metóda bola prvý krát navrhnutá v r. 2000 v práci *A Double-Difference Earthquake Location Algorithm* autormi Felixom Waldhauserom a Williamom Ellsworthom.

Podobne ako v štandardných lokalizačných metódach, aj tu sa využíva rozdiel medzi vypočítaným a pozorovaným časom príchodu P a/alebo S vlny na seizmickú stanicu, avšak nie pre jedno zemetrasenie, ale ako rozdiel pre dvojicu zemetrasení

$$dr_k^{ij} = (t_k^i - t_k^j)^o - (t_k^i - t_k^j)^c. \quad (3.3)$$

Rovnica (3.3) sa nazýva rovnicou dvojitéch diferencií (double-difference). Pozorovaný rozdiel časov príchodov medzi i -tým a j -tým zemetrasením môže byť rozdiel absolútnych časov príchodov odčítaný zo záznamov zemetrasení alebo relatívny čas, určený pomocou kroskorelácií časových záznamov týchto zemetrasení.



Obr. 4: Ilustrácia princípu metódy DD. Krúžky znázorňujú počiatočné (vstupné) lokalizácie, plné čiary spájajú cross-korelované a prerušované čiary katalógové dvojice hypocentier. Na obrázku je zvýraznená jedna z dvojíc hypocentier, i a j , ktoré majú podobnú dráhu smerom k stanicam k a l a ich korekcie Δx .

(Waldhauser & Ellsworth, 2000)

Dvojité rozdiel dr_k^{ij} je určený zmenou hypocentrálnych parametrov pre obidve zemetrasenia i a j , ktorý môžeme pomocou rozdielu rovníc (1.8) pre jednotlivé zemetrasenia vyjadriť ako

$$\left(\frac{\partial t_k^i}{\partial m} \right) \Delta m^i - \left(\frac{\partial t_k^j}{\partial m} \right) \Delta m^j = dr_k^{ij}, \quad (3.4)$$

kde m reprezentuje hypocentrálne parametre (x, y, z, t) a Δm korekcie týchto hodnôt.

Rovnicu (3.4) môžeme zapísať pre všetky páry zemetrasení zaznamenaných na staniách ako sústavu lineárnych rovníc

$$WGm = Wd, \quad (3.5)$$

v ktorej G je matica parciálnych derivácií veľkosti $M \times 4N$ (M je počet pozorovaní DD a N počet zemetrasení), d je vektor obsahujúci dvojité diferencie (3.3), m je vektor dĺžky $4N$, ktorý obsahuje korekcie hypocentrálnych parametrov $[\Delta x, \Delta y, \Delta z, \Delta T]$, ktoré sa snažíme určiť a W je diagonálna matica, ktorá váhuje každú rovnicu podľa kvality vstupných časov príchodov.

Matica G veľkosti $M \times 4N$ má len 8 nenulových prvkov, keďže v každej rovnici sú spojené práve dve zemetrasenia. Ak je nejaké zemetrasenie veľmi slabo prepojené s ostatnými (napríklad odľahlé zemetrasenie s malým počtom „susedov“), matica G je zle podmienená a rovnica (3.5) sa stáva numericky nestabilnou. Jedna možnosť, ako regularizovať takýto zle podmienený systém je zabezpečiť, aby sa v rovniciach nachádzali len zemetrasenia, ktoré majú dobré prepojenie s ostatnými zemetraseniami. Iná možnosť riešenia nestability tohto systému je tlmiači faktor λ

$$W \begin{bmatrix} G \\ \lambda I \end{bmatrix} m = W \begin{bmatrix} d \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (3.6)$$

Riešenie sa nájde váženou metódou najmenších štvorcov pomocou systému normálnych rovníc

$$\hat{m} = (G^T W^{-1} G)^{-1} G^T W^{-1} d. \quad (3.7)$$

Na riešenie tohto systému rovníc sa v metóde DD využívajú 2 numerické prístupy: pomocou metódy SVD (z anglického *singular value decomposition*) alebo metódy konjugovaných gradientov, tzv. LSQR (z anglického *least squares*).

Metóda SVD je použiteľná pre menší počet zemetrasení (nanajvýš okolo 100, závisí od kapacitných možností počítača). Potom rovnicu (3.7) môžeme zapísať tvare

$$\hat{m} = V \Lambda^{-1} U^T d, \quad (3.8)$$

kde U a V sú matice ortonormálnych singulárnych vektorov váženej matice G , Λ je diagonálna matica singulárnych hodnôt G , d reprezentuje dáta v zmysle dvojitých diferencií a \hat{m} je neznámy vektor hypocentrálnych parametrov. Neurčitosti výsledkov DD

relokalizácií použitím metódy SVD sú počítané pre každý výpočet korektnými kovarianciami. Metóda SVD je vhodnejšia pre spracovanie menšieho súboru údajov.

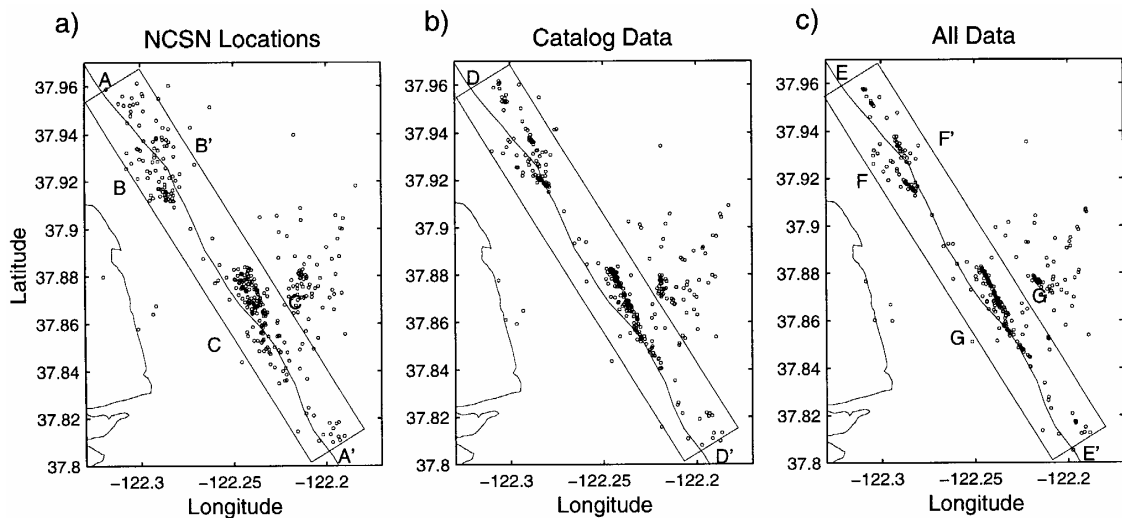
Pri relokalizácii väčšieho počtu zemetrasení sa využíva metóda LSQR, publikovaná Paigeom a Saundersom (1982). Využíva sa riedkosť matice G a je umožňujúce riešiť systém rovníc efektívne. Neznámy vektor m nájdeme pomocou tlmenej rovnice (3.6), kde λ je tlmiaci faktor

$$\left\| W \begin{bmatrix} G \\ \lambda I \end{bmatrix} m - W \begin{bmatrix} d \\ 0 \end{bmatrix} \right\|_2 = 0. \quad (3.9)$$

LSQR je veľmi účinná metóda s minimálnymi požiadavkami na kapacitné možnosti počítača, a preto je použiteľná aj pre veľký počet zemetrasení. Systém 10,000 zemetrasení a z toho vyplývajúce dva milióny rovníc môžu byť vyriešené s mikroprocesorom Sun UltraSparc-II, frekvencia 300MHz, za menej ako 5 minút (Waldhauser & Ellsworth, 2000). Neurčitosti výsledkov DD relokalizácií použitím metódy LSQR sú však v dostupnom softwari určené veľmi nepresne a je vhodné ich presnejšie odhadnúť pomocou iných štatistických metód (vid'. Waldhauser & Ellsworth, 2000).

Na výpočet relokalizácií pomocou metódy DD sa používa program HypoDD od autorov metódy Waldhausera a Ellswortha, ktorý je voľne stiahnuteľný. Program využíva 1D viacvrstvový model (rýchlosť šírenia seizmických vln závisí od hĺbky). Existuje už aj verzia programu využívajúca 3D rýchlostný model, je však len v testovacej fáze bez doterajšieho opublikovania. V programe je potrebné vhodne nastaviť parametre podľa vlastností prostredia a relokalizovaných zemetrasení. Presnosť výslednej relokalizácie totiž závisí od vhodne zvolených parametrov. Pre úspešne aplikovanie metódy je preto vhodné vykonať niekoľko testov, ktorými sa overí ich správne nastavenie. Ak sú parametre optimálne zvolené, neurčitosť výslednej relokalizácie môže byť značne znížená (Bouchaala et al., 2012).

Prvýkrát bola táto metóda úspešne použitá na relokalizáciu zemetrasení v severnej časti Haywardského zlomu v Kalifornii (Waldhauser & Ellsworth, 2000). Na súbor 346 zemetrasení s magnitúdom 0.7 – 4.0 bolo aplikovaných niekoľko testov na určenie správnosti výsledkov a odhad chýb relokalizácie. Výsledky relokalizácie ukázali podstatne menší rozptyl a lepšie viditeľnú líniu zlomu (obr. 5).



Obr. 5: Ukážka zlepšenia lokalizácie po aplikácii metódy DD na časť El Cerrito v oblasti Haywardského zlomu v Kalifornii (na horizontálnej osi je zobrazená zemepisná dĺžka a na vertikálnej osi zemepisná šírka); a) absolútne lokalizácie zemetrasení; b) relokalizácia zemetrasení použitím katalógových časov príchodov; c) relokalizácia zemetrasení použitím katalógových časov príchodov a kroskorelácii (Waldhauser & Ellsworth, 2000)

V Západných Čechách bola metóda DD aplikovaná spolu s metódou ME na roj mikrozemetrasení z roku 2008 (Bouchaala *et al.*, 2013) pre porovnanie oboch metód. Spolu bolo relokalizovaných 483 zemetrasení. Výsledky potvrdili menší rozptyl a presnejšie určenie hypocentier po aplikovaní metód relatívnej lokalizácie v porovnaní s absolútnou lokalizáciou, pričom sa ukázala detailnejšia štruktúra aktívnej zlomovej zóny. Výsledky taktiež indikovali vo všeobecnosti väčšiu presnosť relokalizácie metódou DD voči relokalizácii metódou ME. Výraznejšia presnosť sa dosiahla najmä pri relokalizácii väčšieho počtu zemetrasení, pričom veľkou výhodou sa ukázala nezávislosť na pozícii hlavného javu. Pri syntetických testoch sa použitím metódy DD dosiahla približne dvojnásobná presnosť ako použitím metódy ME.

Ako nadstavbu na metódu DD Zhang a Thurber (2003) vyvinuli tomografiu dvojitých diferencií TomoDD, v ktorej s využitím spresnenia lokalizácie pomocou dvojitých diferencií vytvorili metódu na súčasné spresnenie rýchlostného modelu štruktúry. Výsledky použitím tejto metódy sú presnejšie než použitím obvyklých tomografických metód. Myšlienka spojiť metódu DD s tomografiou sa však objavila už skôr, v prezentácii Ellsworth *et al.* - *Double-difference earthquake locations and their implications for hazards and earthquake physics* (2001).

Na základe naštudovania súčasného stavu v problematike metód relatívnej relokalizácie sme ako perspektívnu metódu pre dôkladnejšie štúdium a aplikáciu na

zdrojovú oblasť Malé Karpaty zvolili metódu DD, najmä z dôvodu možnosti aplikovateľnosti tejto metódy na relokalizáciu aj veľkého počtu zemetrasení, pričom na rozdiel od iných metód nemusia byť všetky hypocentrá zemetrasení blízko pri sebe

Metódu ME sme vylúčili pre jej niekoľko obmedzení. Táto metóda totiž kladie obmedzenie na presnosť lokalizácie jedného zemetrasenia (hlavného javu), voči ktorému sa určujú relatívne lokalizácie ostatných zemetrasení. V zdrojovej oblasti Malé Karpaty však nebolo zaznamenaných veľa silnejších zemetrasení, ktorých absolútnu lokalizáciu možno určiť veľmi presne. Okrem toho vzájomná vzdialenosť medzi hypocentrom hlavného javu a hypocentrami všetkých relokalizovaných zemetrasení musí byť dostatočne malá, čo kladie veľké obmedzenie na celkový počet prelokalizovaných zemetrasení. Keďže v budúcnosti plánujeme určenie relatívnej lokalizácie veľkého súboru zemetrasení z oblasti Malých Karpát, v ktorej bolo doposiaľ zaznamenaných a lokalizovaných niekoľko stoviek zemetrasení, zvolili sme ako vhodnú metódu práve metódu dvojitého diferencií. Metóda DD totiž môže byť aplikovaná aj na veľkú skupinu zemetrasení rozmiestnených vo väčších vzdialenostiach v priestore.

4 Výsledky a diskusia

Na relokalizáciu zemetrasení pomocou metódy DD sa využíva voľne stiahnuteľný program hypoDD, ktorý je k dispozícii od autorov metódy DD Waldhausera a Ellswortha (2000). Manuál k programu hypoDD (Waldhauser, 2001) zahŕňa postup na prípravu vstupných dát, analýzu výstupných dát a popis parametrov a súborov používaných v programe. Niektoré praktické odporúčania pre voľbu parametrov je možné nájsť aj v článku Waldhausera a Ellswortha (2000), prípadne v ďalších prácach, kde bola metóda DD aplikovaná. Keďže parametrov výpočtu je veľa a tieto dôležité odporúčania sú rozptýlené vo viacerých materiáloch a aj v rámci jednej práce sú rozptýlené v rôznych častiach textu, toto všetko značne sťažuje orientáciu v tak podstatnej otázke, akou je význam a dôležitosť jednotlivých parametrov a správna voľba ich hodnôt. Preto aj jedna dôležitá časť výsledkov bakalárskej práce v časti 4.1 spočíva v zosumarizovaní a prehľadnom popísaní jednotlivých vstupných súborov a jednotlivých parametrov výpočtu DD relokalizácie spolu s praktickými odporúčaniami ako voliť ich hodnoty.

V časti 4.2. výsledkov práce sú popísané a rozdiskutované výsledky aplikácie metódy DD na súbor 19 zemetrasení zo zdrojovej oblasti Malé Karpaty spolu s podrobným popisom a diskusiou vykonaných testov.

4.1 Popis parametrov a vstupných/výstupných súborov

Programový balík sa skladá z dvoch samostatných podprogramov, a to ph2dt a hypoDD. V programe ph2dt sa vytvoria také dvojice zemetrasení na jednotlivých staniách, na ktorých boli obidve zemetrasenia zaznamenané a ktoré zároveň spĺňajú podmienky zadané v podobe parametrov. Program hypoDD potom na základe dvojítých diferencií pre dvojice zemetrasení, vytvorené programom ph2dt, tieto zemetrasenia prelokalizuje. Je tiež dôležité poznamenať, že každé zemetrasenie musí mať jednoznačne priradené vlastné ID číslo. V tejto časti výsledkov predkladáme vypracovaný popis vstupných súborov a parametrov, ktoré sú dôležité pre kvalitnú prácu s programom a korektné aplikovanie DD metódy. Popis bol vypracovaný zhrnutím dostupných informácií čerpaných z viacerých časopiseckých článkov a aj na základe praktických skúseností získaných pri osobnej konzultácii s Dr. Čermákovou z Geofyzikálneho ústavu AV ČR v Prahe, ktorá aplikovala metódy DD na relokalizáciu zemetrasení zo zemetrasných rojov v Západných Čechách v rámci svojej PhD. práce. Najprv popíšeme jednotlivé vstupné a výstupné súbory spolu so

zoznamom príslušných použitých parametrov a neskôr sa detailnejšie venujeme jednotlivým parametrom a spôsobu ich voľby.

Vstupné súbory do programu ph2dt:

Ph2dt je časť programu, v ktorom sa vytvárajú dvojice zemetrasení, ktoré vyhovujú požiadavkám zadaným pomocou parametrov vo vstupnom súbore *ph2dt.inp*. Výstupné súbory z tohto programu tvoria vstup do hlavného programu hypoDD.

ph2dt.inp:

– súbor kontrolujúci parametre:

MINWGHT MAXDIST MAXSEP MAXNGH MINLNK MINOBS MAXOBS

station.dat

– súbor, v ktorom sú zadané súradnice používaných seizmických staníc (zemepisná šírka a dĺžka)

phase.dat

– súbor, v ktorom sa zadávajú počiatočné lokalizácie a časy vzniku jednotlivých zemetrasení a tiež absolútne časy príchodov P a/alebo S seizmických vln jednotlivých zemetrasení na stanice

– pre každú fázu sa určuje aj váha podľa presnosti jej určenia, s ktorou vstupuje do relokalizácie [0 – 1 (najlepšia)], pričom fázy s váhou menšou ako 10^{-5} nie sú do relokalizácie zahrnuté

– absolútne časy príchodov seizmických vln na stanice môžu byť určené využitím existujúcich interpretácií záznamov zemetrasení z katalógov alebo vlastnou interpretáciou záznamov zemetrasení z jednotlivých seizmických staníc

Výstupné súbory z programu ph2dt:

dt.ct:

– súbor, v ktorom sú uchovávané rozdiely časov príchodov pre vybrané páry zemetrasení, ktoré vyhovujú zvoleným parametrom zadaným v súbore *ph2dt.inp*

event.dat:

– súbor, ktorý uchováva počiatočné lokalizácie všetkých zemetrasení a je zároveň vstupom do hlavného programu *HypoDD*

event.sel

– v tomto súbore sú zapísané lokalizácie iba vyselektovaných zemetrasení (teda tých, ktoré vyhovovali nastaveným parametrom), ktoré boli ďalej relokalizované

ph2dt.log

– obsahuje informácie o behu programu *ph2dt*, tiež počet „slabých“ a „silných“ zemetrasení (pozri časť Parametre v programe *ph2dt*, konkrétne MINLNK)

Vstupné súbory do programu hypoDD:

hypoDD.inp

– súbor kontrolujúci parametre:

IDAT IPHA DIST OBSCC (OBSCT) ISTART ISOLV NSET NITER
WTCCP (WTCCS) WTCTP (WTCTS) WRCC (WRCT) WDCC (WDCT) DAMP

station.dat (vid'. popis pri výstupných súboroch z *ph2dt*)

dt.ct (vid'. popis pri výstupných súboroch z *ph2dt*)

dt.cc

– súbor obsahujúci rozdiely časov príchodov určených pomocou kroskorelácií pre určené páry zemetrasení

event.dat (vid'. popis pri výstupných súboroch z *ph2dt*)

event.sel (vid'. popis pri výstupných súboroch z *ph2dt*)

Výstupné súbory z programu hypoDD:

hypoDD.loc

– v súbore sú zapísané počiatočné lokalizácie a informácie o všetkých relokalizovaných zemetraseniach a ich polohy vzhľadom na centroid (ťažisko polôh zemetrasení) vytvorený programom hypoDD

hypoDD.reloc

– základný výstup relokalizácie

– v tomto súbore sú uložené relokalizované hypocentrálne parametre zemetrasení spolu s polohou zemetrasení po relokalizácii vzhľadom na centroid

– nachádzajú sa tu tiež informácie o počte vytvorených dvojíc pre kroskorelácie a absolútne časy jednotlivých zemetrasení a ich výsledné RMS

– výsledky osobitne pre každú iteráciu sú uložené v súboroch *hypoDD.reloc.00x*, kde *x* udáva poradové číslo iterácie

hypoDD.sta

– súbor obsahuje súradnice staníc (zemepisná šírka a dĺžka), počet zaznamenaných dvojíc zemetrasení použitých pre výpočet kroskorelácií a pre použitie absolútnych časov na jednotlivých stanicách, a tiež rezídua staníc

hypoDD.res

– informácia o rezíduách všetkých vytvorených dvojíc po poslednej iterácii

hypoDD.log

– obsahuje informácie o behu programu *hypoDD*, prehľad nastavených parametrov a použitých dát

Parametre v programe ph2dt:

MINWGHT

– fázy s menšou váhou ako je MINWGHT nie sú zahrnuté do procesu relokalizácie (váhy jednotlivých fáz sú zadávané v súbore phase.dat)

MAXDIST

– maximálna vzdialenosť (v km) medzi párom zemetrasení a stanicou

MAXSEP

– maximálna vzájomná vzdialenosť (v km) medzi párom zemetrasení, ktorá musí byť vhodne zvolená najmä z dôvodu nutnej podmienky metódy DD, a to aby vzdialenosť medzi párom zemetrasení bola dostatočne malá v porovnaní so vzdialenosťou od stanice

MAXNGH

– maximálny počet susedov (teda počet zemetrasení, s ktorými vytvorí dvojice), ktoré môže mať zemetrasenie

– zemetrasenia sú párované od najbližších vzdialeností do vzdialenosti MAXSEP, alebo kým sa nedosiahne hodnota MAXNGH

MINLNK

– minimálny počet vytvorených fázových párov s iným zemetrasením, aby sa zemetrasenie považovalo za tzv. „silného“ suseda

– ak sa dosiahne hodnota MAXNGH pre nejaké zemetrasenie, sú ako prvé uprednostnené zemetrasenia, ktoré sú vo vzťahu k nemu označené ako „silné“

MINOBS

– minimálny počet pozorovaní pre pár zemetrasení, aby bol vybraný do relokalizácie

– páry, ktorý majú menší počet pozorovaní sú vynechané

MAXOBS

– maximálny počet pozorovaní pre pár zemetrasení (pri veľkom počte zemetrasení, ak by kapacitné možnosti počítača bránili vo vytvorení všetkých možných pozorovaní)

Parametre v programe hypoDD:

IDAT

– označenie typu dát používaných vo výpočte relokalizácie:

1 = len kroskorelácie; 2 = len absolútne (katalógové) časy; 3 = kroskorelácie aj absolútne časy

IPHA

– fázy seizmických vln používané v programe:

1 = len P vlny; 2 = len S vlny; 3 = P aj S vlny

DIST

– maximálna vzdialenosť medzi centroidom klastra zemetrasení a stanicami

OBSCC (pre katalógové dáta **OBST**)

– minimálny počet pozorovaní páru zemetrasení na vytvorenie klastra – od tohto parametra závisí rozmiestnenie zemetrasení do klastrov (menších podjednotiek celého súboru zemetrasení, ktoré sa relokalizujú samostatne)

– typicky je hodnota tohto parametra 8 (za každý stupeň voľnosti pre pár zemetrasení)

– zvyšovanie tohto parametra môže zvýšiť stabilitu riešenia, avšak zároveň rozdeliť klastre na menšie klastre (viac klastrov s menším počtom zemetrasení)

– znižovanie parametra OBSCC (resp. OBST) môže viesť k nahromadeniu zemetrasení do menšieho počtu klastrov, avšak zároveň znížiť stabilitu riešenia

– hodnota OBSCC (OBST) musí byť menšia ako MAXOBS v programe ph2dt, inak nebudú vytvorené žiadne klastre

– OBSCC (OBST) by vo všeobecnosti malo byť menšie, nanajvýš rovné, ako je hodnota MINLNK v ph2dt na zaistenie dostatočného počtu „silných“ susedov medzi blízkymi zemetraseniami

– nastavenie tohto parametra na 0 má za dôsledok nevytváranie klastrov, keďže považuje všetky zemetrasenia za dobre prepojené

ISTART

– nastavenie počiatocnej lokalizácie:

1 = začiatok v centroide klastra (odporúčané pre malé klastre); 2 = začiatok podľa absolútnych lokalizácií

ISOLV

– voľba numerickej metódy pre hľadanie riešenia sústavy rovníc (3.7):

1 = metóda SVD; 2 = metóda konjugovaných gradientov (LSQR)

NSET

– počet iterácii pre súbor váh pre fázy P a S (zvyčajne je pri prvých výpočtoch vhodné zadať NSET=1)

– celkový počet iterácii v relokalizačnom procese bude NSET*NITER

NITER

– predvolený počet iterácii pre úpravu počiatocných hodnôt váh pre fázy P a S (špecifikovaných v parametroch WTCCP, WTCCS, resp. WTCTP, WTCTS). Program potom počas NITER iterácií počiatocné váhy postupne upravuje vzhľadom k priebehu procesu relokalizácie.

– pomôcka pre určenie hodnoty NITER je nasledovná: iterácie by mali byť ukončené, ak zmeny hypocentrálnych parametrov a rezíduí RMS poklesnú pod hladinu šumu (neistoty) vstupných dát (vhodná začiatocná hodnota NITER=5, prípadne viac, v závislosti od presnosti počiatocných lokalizácií a podmienenosti systému)

WTCCP, WTCCS (pre katalógové dáta WTCTP, WTCTS)

– *a priori* váhy pre kroskorelované (resp. katalógové) dáta pre P a S vlny (-9 ak nie sú použité)

WRCC (pre katalógové dáta WRCT)

– maximálne časové rezíduum dvoch zemetrasení (kvôli vylúčeniu príliš odľahlých dvojíc zemetrasení z procesu relokalizácie):

0<1 = absolútna hranica v sekundách (ak je pre nejakú dvojicu zemetrasení väčšie, tak dvojica vypadne)

≥1 = faktor znásobenia štandardnej odchýlky

-9 = žiadne odľahlé zemetrasenia nebudú odstránené

WDCC (pre katalógové dáta WDCT)

– maximálna vzdialenosť v km medzi dvojicou zemetrasení, parameter kontrolujúci prepojenosť medzi zemetraseniami

– program HypoDD odstraňuje dvojice zemetrasení, ktoré sú od seba vo väčšej vzdialenosti ako je hodnota WDCC (resp. WDCT)

– ide o parameter podobný MAXSEP z programu ph2dt, pričom sa odporúča MAXSEP nastaviť na väčšiu hodnotu a experimentovať s postupne nižšími hodnotami WDCT na nájdenie optimálnej hodnoty tohto parametra pre daný výpočet

DAMP

– tlmiaci faktor (zadaný len v prípade, ak je použitá metóda LSQR), ktorý tlmí riešenie sústavy v prípade jeho nestability a jeho výber závisí od systému, ktorý má byť riešený (jeho hodnota sa volí z intervalu 1 - 100)

– podmienenosť systému rovníc (3.6) je vyjadrená číslom podmienenosti (CND), ktoré je dané ako pomer najväčšej a najmenšej vlastnej hodnoty matice a je po výpočte uložené v súbore hypoDD.log, jeho empirická hodnota je 40 - 80

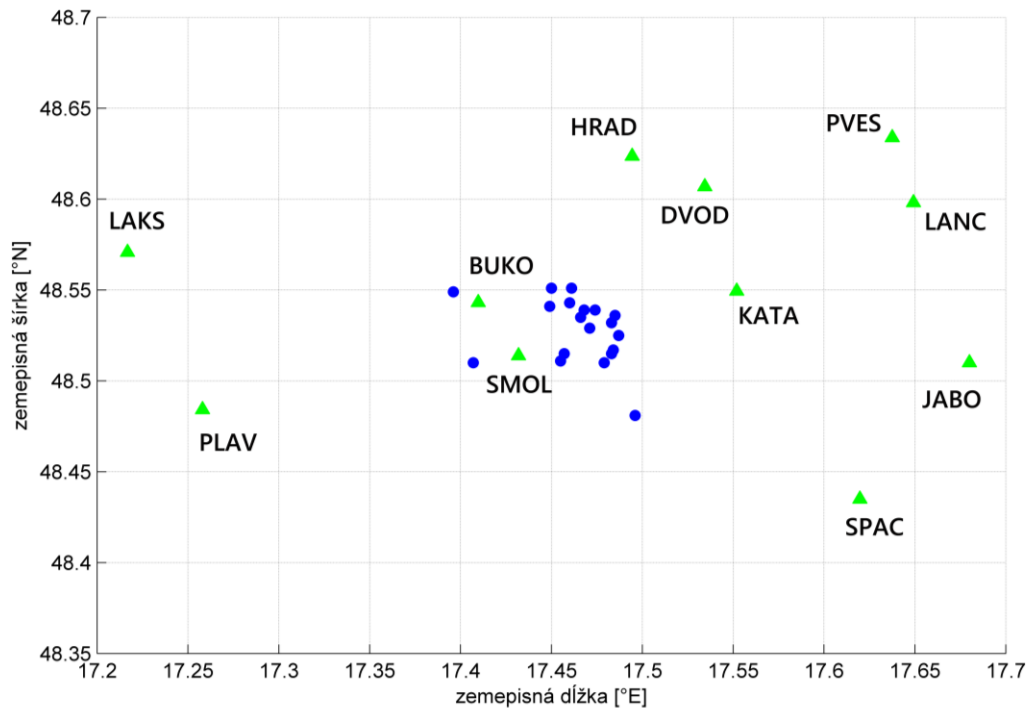
– zlé nastavenie tlmiaceho faktora môžu okrem CND mimo intervalu 40 – 80 indikovať aj príliš veľké alebo malé zmeny v hypocentrálnych parametroch

CID

– číslo konkrétneho klastra známeho z minulého spustenia programu, ak chceme prelokalizovať len jeden klaster

4.2 Relokalizácia súboru zemetrasení v zdrojovej oblasti Malé Karpaty

Metódu DD sme aplikovali na súbor 19 slabých zemetrasení zo zdrojovej oblasti Malé Karpaty z augusta 2006 (obr. 6). Zemetrasenia mali lokálne magnitúda -0.1 až 1.9 , vzorkovacia frekvencia záznamov je 100 Hz. Tento súbor zemetrasení sme zvolili na základe jeho predošlého prelokalizovania pomocou metódy „hlavného javu“ (Fojtíková & Málek, 2014, *zaslaný článok – osobná komunikácia*) z dôvodu porovnania výsledkov a tiež možnosti použitia interpretácie časov príchodov P a S vln na jednotlivé stanice od autorov článku. S týmito časmi nasadenia P a S vln sme urobili jeden z prvých testov, pričom v ostatných sme použili časy nasadenia z katalógu lokálnej siete spoločnosti Progseis, keďže ako vstupné lokalizácie zemetrasení sme použili práve absolútne lokalizácie z tohto katalógu. Všetky testy sme robili s použitím dostupných údajov - absolútnych (katalógových) časov príchodov P aj S vln na stanice. V budúcnosti však chceme doplniť výpočty s využitím kroskorelácií medzi tými zemetraseniami, medzi ktorými je to možné, a tak zvýšiť presnosť výslednej relokalizácie.



Obr. 6: Pohľad zhora na skúmaný súbor zemetrasení; krúžky znázorňujú polohy epicentier zemetrasení; trojuholníky polohy seizmických staníc (s príslušnými skratkami ich názvov), na ktorých boli zemetrasenia zaznamenané

skratka seizm. stanice	zemepisná šírka [°N]	zemepisná dĺžka [°E]
SMOL	48.5139	17.4319
BUKO	48.5431	17.4097
KATA	48.5494	17.5519
DVOD	48.6069	17.5344
HRAD	48.6236	17.4944
LANC	48.5981	17.6492
PVES	48.6339	17.6375
SPAC	48.435	17.6197
PLAV	48.4842	17.258
LAKS	48.5708	17.2167
JABO	48.51	17.68

Tab. 1: Zoznam a polohy seizmických staníc lokálnej siete AEB, z ktorých záznamy zemetrasení boli použité pri aplikácii metódy DD

Na hľadanie riešenia sústavy rovníc (3.7) sme vo všetkých testoch používali numerickú metódu SVD, keďže je vhodná na menší počet zemetrasení a tiež priamo vypočítava aj výsledné nepresnosti a RMS v určení hypocentrálnych parametrov. Vo výpočtoch sme používali 1D viacvrstvý model prostredia (tabuľka 2), ktorý bol

vytvorený zahladením a zjednodušením spomínaného 3D modelu v dizertačnej práci Dr. Fojtíkovej (2009) a neskôr publikovaný v článku *Fojtíkova et al. (2010)*.

vrstva	hlbka [km]	v_p [km/s]
1	0.0	4.0
2	1.9	4.8
3	2.5	5.6
5	4.5	6.0
6	10.0	6.2
7	30.0	8.2

Tab. 2: Použitý 1D rýchlostný viacvrstvový model prostredia
(*Fojtíková et al., 2010*)

V testoch sme sa zamerali najmä na rôzne pomery rýchlosti P a S vln, keďže tento pomer nie je pre oblasť Malých Karpát dostatočne presne známy a veľmi pravdepodobne v priestore veľmi variuje. Hodnota tohto pomeru bola v nami použitom modeli (*Fojtíková et al., 2010*) odhadnutá ako 1.75, nejde však o presnú hodnotu, ale len o približný odhad tohto pomeru v danej oblasti. Viaceré nezávislé testovania ukázali, že táto hodnota nie je pre celú oblasť konštantná a môže kolísať v rozmedzí 1.5 až 1.95 (*Fojtíkova et al., 2010; Kubina, 2011*). Vykonali sme preto testy s viacerými hodnotami pomeru v_p/v_s a výsledky pre jednotlivé testy sme vzájomne porovnali a rozanalyzovali. Vykonali sme aj niekoľko testov na preskúmanie správneho nastavenia parametrov.

Záznamy zo seizmických staníc lokálnej siete AEB majú hodnotu vzorkovacej frekvencie 100 Hz. Túto hodnotu považujeme za pomerne malú, keďže pri relokalizácii v rôznych oblastiach sveta boli zvyčajne použité záznamy so vzorkovacou frekvenciou 250 Hz a viac. Zvýšenie vzorkovacej frekvencie by mohlo prispieť k výslednej presnejšej relokalizácii zemetrasení, najmä v prípade použitia kroskorelačnej techniky na určenie dvojitéch diferencií, ktorú plánujeme použiť v budúcnosti.

Hodnoty neurčitostí v určení hypocentrálnych parametrov metódou DD pri relokalizácii väčšieho počtu zemetrasení zvyčajne bývajú po vhodnom nastavení parametrov rádovo jednotky až desiatky metrov, pre čas vzniku zemetrasenia len niekoľko ms. Takéto nízke hodnoty s malým počtom zemetrasení nemožno dosiahnuť, keďže zemetrasenia nie sú dostatočne dobre prepojené a tým sa vytvorí oveľa menší počet dvojíc ako pri veľkých súboroch zemetrasení. Preto sa chceme v ďalších budúcich testoch

zamerat' na analýzu väčšieho súboru zemetrasení, a tým zvýšiť presnosť výslednej relokalizácie.

Dôvodom, prečo sme na prvú aplikáciu metódy zvolili menší súbor zemetrasení je, že samotná príprava vstupných dát a tiež overovanie kvality vstupných údajov zaberá dlhý čas. Dôkladne sme uvažovali možnosti použitia relokalizačných metód na zdrojovú oblasť Malé Karpaty, podrobne sme našťudovali teoretickú stránku metódy DD, vhodné nastavenie parametrov používaných v aplikácii tejto metódy a použitie metódy na zdrojovú zónu Malé Karpaty. Výsledky našej relokalizácie síce neposkytujú detailnú štruktúru zlomu, keďže počet prelokalizovaných zemetrasení je malý, avšak sú užitočnou prvou aplikáciou metódy DD na epicentrálnu zónu Malé Karpaty. V budúcnosti plánujeme súčasne prelokalizovať väčší počet zemetrasení z rôznych období pre katalógové (absolútne) časy aj pre kroskorelácie. Dôkladná teoretická príprava, oboznámenie sa s dostupnými údajmi a ich kvalitou spolu s vykonanými testami v rámci tejto bakalárskej práce, predstavujú dôležitý krok v príprave na korektnú aplikáciu metódy DD na veľký objem údajov z oblasti Malých Karpát.

V nasledujúcich častiach práce popíšeme testy, ktoré sme vykonali v rámci praktického overovania aplikovateľnosti DD metódy relatívnej relokalizácie pre zemetrasenia z oblasti Malých Karpát.

4.2.1 Test s časmi príchodov P a S vln použitými v metóde ME

Ako prvý zo série testov sme vykonali test s použitím tých istých časov príchodov P a S vln na jednotlivé od autorov práce Fojtíková & Málek (osobná komunikácia, 2014), ktoré boli použité na relokalizáciu týchto zemetrasení pomocou metódy ME. Očakávali sme, že tieto časy sú presnejšie určené voči základným katalógovým interpretáciam, z dôvodu dôkladnej reinterpretácie autormi. Dôkladná interpretácia je veľmi dôležitá, keďže ide o veľmi zložité časové záznamy v dôsledku komplikovanej geologickej štruktúry v oblasti Malých Karpát. Časy príchodov boli určené na 7 staniách z lokálnej siete MKNET. Ako vstupné lokalizácie zemetrasení sme použili absolútne lokalizácie, ktoré sme mali k dispozícii z katalógu spoločnosti Progseis. Absolútne lokalizácie sme od autorov práce Fojtíková & Málek nemohli získať, pretože metóda ME vyžadovala absolútnu lokalizáciu iba jedného javu, a to hlavného. Preto sme museli použiť lokalizácie z iného zdroja (Progseis, s.r.o.). Zároveň sme takto chceli overiť, nakoľko je metóda DD citlivá na takto rôznorodé vstupné údaje.

Parametre sme v tomto teste nastavili tak, aby zemetrasenia tvorili jeden klaster, keďže ide o malé množstvo zemetrasení umiestnených relatívne blízko seba. Tiež sme zvolili MINOBS = 1, MAXOBS = 7 (počet staníc) a MAXNGH = 19 (počet zemetrasení), aby boli do relokalizácie vybrané všetky spárované fázy pre zemetrasenia. Rovnako sme postupovali aj v ďalších testoch, keďže pre malé súbory dát je takýto postup odporúčaný autormi metódy. Obmedzenia sme kládli na maximálnu vzdialenosť medzi párom zemetrasení pomocou parametrov MAXSEP v ph2dt a WDCT v hypoDD, ktoré sa ale pre tento výpočet nedali nastaviť pod hodnoty MAXSEP = 5 a WDCT = 3. Pri nižších hodnotách sa totiž nevytvoril dostatočný počet párov na relokalizáciu, preto program prelokalizoval maximálne dve zemetrasenia.

Výsledky tohto testu obsahovali veľké neurčitosti v určení hypocentrálnych parametrov, pričom sa prelokalizovala len istá časť zo všetkých 19 zemetrasení (pri nami vybranom vhodnom nastavení parametrov to bolo 11, príp. 12). Neurčitosti vo výslednom určení lokalizácií zemetrasení však neklesali pod hodnotu 3 km (priemerná hodnota bola 6.6 km), čo považujeme za neprimerané a výsledky ako neakceptovateľné. Dôvodom je pravdepodobne fakt, že ako časy príchodov sme použili tie, s ktorými sa pracovalo na metóde ME, avšak vstupné absolútne lokalizácie boli použité z katalógu Progseis, pričom na výpočet týchto lokalizácií boli použité iné časy príchodov P a S vln.

Výsledok tohto testu poukazuje na dôležitosť konzistentnosti vo vstupných dátach, keďže rôzne interpretácie tých istých záznamov sú zaťažené rôznymi chybami, čo má za dôsledok výsledné veľké nepresnosti v procese relokalizácie. Preto sme na ďalšie testy zvolili tie isté interpretácie časov príchodov seizmických vln z katalógu Progseis, z ktorých boli určené aj absolútne lokalizácie použité ako vstupné do metódy DD. Aj keď sa pravdepodobne jedná o menej presne určené absolútne časy nasadení P a S vln, sú však zaťažené podobnou chybou ako vstupné lokalizácie.

4.2.2 Testy s časmi príchodov P a S vln z katalógu Progseis

Z dôvodu neúspešného testovania metódy na dáta, pre ktoré boli v programe hypoDD použité iné prvé časy príchodov P a S vln na stanice ako časy príchodov pre ich absolútne lokalizácie, sme metódu otestovali pre konzistentné časy z katalógu Progseis. Všetky vstupné údaje, teda absolútne časy príchodov seizmických vln na stanice a vstupné lokalizácie, tak boli zaťažené konzistentnou chybou. Do testovania sme zaradili aj viac

staníc, keďže v katalógu boli určené časy príchodov na viacerých stanicích ako v prípade reinterpretácie v rámci metódy ME. Do výpočtov bolo zaradených všetkých 11 staníc z lokálnej siete AEB. Tieto dôležité faktory zlepšili presnosť výslednej relokalizácie.

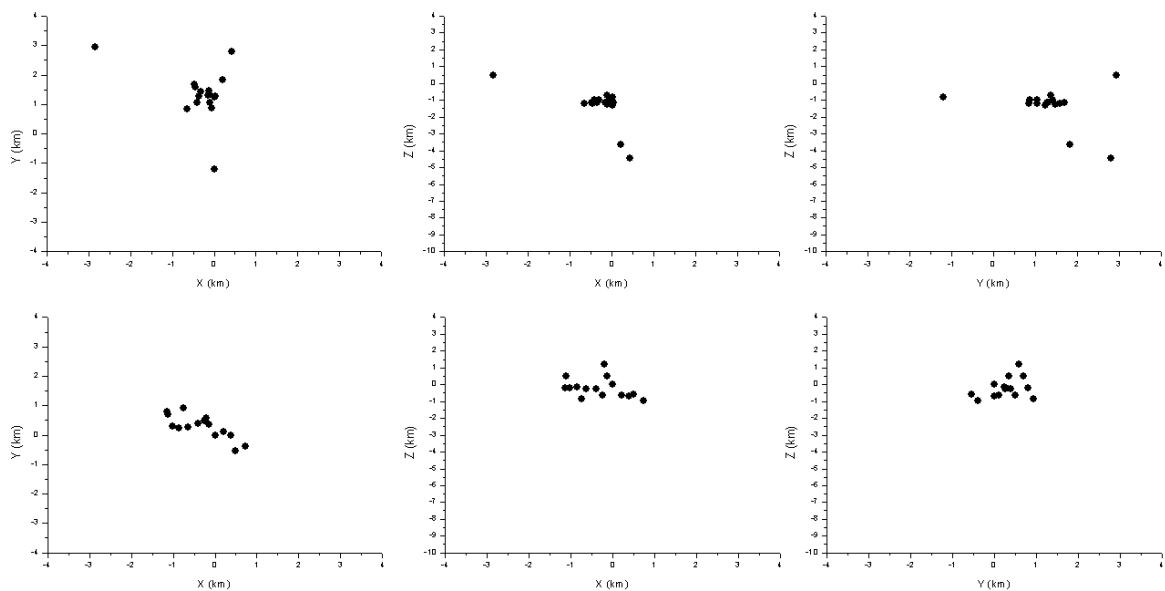
Parametre sme v týchto testoch zvolili podobne ako v predchádzajúcom testovaní, teda MINOBS = 1, MAXOBS = 11 (počet staníc) a MAXNGH = 19 (počet zemetrasení) a tiež tak, aby zemetrasenia tvorili jeden klaster z dôvodu ich malého počtu. Menili sme maximálnu vzdialenosť medzi párom zemetrasení pomocou parametrov MAXSEP v ph2dt a WDCT v hypoDD, pomer rýchlosti P a S vln a počet iterácií, ktorý je rôzny pre rôzne nastavenie parametrov.

Váhy jednotlivých časov príchodov P a S vln sme priradili rovnako, a to s váhou 1 pre každú z fáz, keďže sme nemali priamy vplyv na interpretáciu dát a z katalógov taktiež nemáme žiadne informácie o spoľahlivosti, s akou boli fázy určené. Aj preto je vlastná interpretácia dát omnoho spoľahlivejšia, pričom je pri interpretácii každého záznamu dôležité poznamenať, s akou istotou je daná fáza určená.

Pre všetky relokalizované zemetrasenia sme z katalógových časov príchodov P a S vln na všetky stanice urobili Wadatiho diagramy. Od lineárnej závislosti času príchodu P vlny a rozdielu príchodov P a S vln boli najviac odchýlené hodnoty pre stanicu Lakšárska Nová Ves. Táto stanica, nachádzajúca sa na Záhorí, je na okraji 3D rýchlostného modelu prostredia, z ktorého bol nami používaný 1D model vytvorený. Nachádza sa tiež na sedimentárnej vrstve, čo ovplyvňuje výslednú presnosť interpretácie záznamov. Táto stanica mala aj pre každú relokalizáciu (pre rôzne zvolené hodnoty parametrov) najväčšie hodnoty rezíduí RMS [ms]. Preto sme pre niektoré nastavenia parametrov, ktoré sa ukázali ako najspoľahlivejšie a vykazovali najmenšie nepresnosti, urobili testy, v ktorých sme nepoužili túto seizmickú stanicu. Stanica Špačince, nachádzajúca sa na hrubých sedimentoch, tiež vykazovala vysoké hodnoty RMS po relokalizácií v porovnaní s ostatnými stanicami, preto sme v niektorých testoch vynechali aj záznamy z tejto stanice. Výsledné hodnoty relokalizovaných hypocentrálnych parametrov po takomto obmedzení vychádzali presnejšie, t.j. s menšími neurčitostami.

Na obrázku 7 sú znázornené nami relokalizované zemetrasenia pomocou metódy DD v porovnaní s výsledkami metódy ME z práce *Fojtíková & Málek (2014, zaslaný článok)*. Znázornená výsledná relokalizácia 17 zemetrasení pomocou metódy DD je z výpočtu použitím absolútnych časov príchodov a lokalizácii z katalógu Progseis. Hodnoty parametrov boli v tomto výpočte nastavené na MAXSEP = 8 a WDCT = 7 bez

použitia staníc Lakšárska Nová Ves a Špačince (z dôvodu vysokej hodnoty rezíduí RMS na týchto staniciach). Pomer v_p/v_s bol nastavený na 1.75 rovnako ako v relokizáciach metódou ME. Na obrázku 7 môžeme pozorovať podobné zoskupovanie hypocentier zemetrasení v strede znázornenej oblasti pre obidve metódy relokizácie. V tejto oblasti má podskupina zemetrasení približne rovnaký charakter tvoriaci podobné línie, dokonca vo výsledkoch metódy DD je priestorový rozptyl tejto podskupiny ešte menší ako u ME metódy. Pár hypocentier sa nachádza mimo tohto zhľuku a má o niečo väčší priestorový rozptyl, môže sa však jednať o zemetrasenie z katalógu Progseis, ktoré nebolo možné relokizovať pomocou ME metódy. Konkrétne priradiť ktoré body si navzájom vo výsledkoch týchto metód zodpovedajú je v tomto štádiu analýzy problematické.



Obr.7: Porovnanie relokizácie zemetrasení pomocou metódy ME (Fojtíková & Málek, 2014) a našich výsledkov získaných metódou DD;

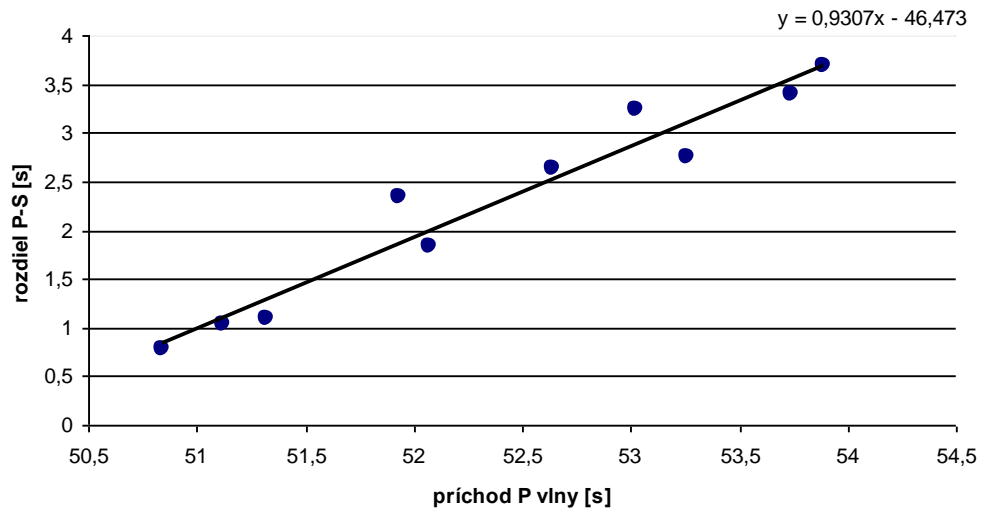
v hornom riadku sú zobrazené polohy zemetrasení relokizovaných pomocou metódy DD vzhľadom na centroid a zobrazenia rôznych pohľadov (x určuje smer východ-západ, y smer sever-juh a z znázorňuje hĺbku),

v dolnom riadku sú polohy zemetrasení relokizovaných pomocou metódy ME vzhľadom na rovnaký centroid;

(autor: L. Fojtíková)

Na odhad realistického pomeru rýchlostí P a S vln v skúmanej oblasti podľa rovnice (1.4) sme použili Wadatiho diagramy, ktoré sme urobili z katalógových časov príchodov P a S vln (jeden z diagramov je znázornený na obr. 8). Tento pomer sme spriemerovaním hodnôt pre všetky použité zemetrasenia odhadli na 1.95. K podobnej strednej hodnote sa pre oblasť Malých Karpát dopracoval vo svojej bakalárskej práci aj

Kubina (2011) použitím nezávislej metódy. Relokalizáciu zemetrasení metódou DD sme preto testovali aj pre model s väčšími hodnotami pomeru rýchlostí ako je štandardná hodnota 1.75.



Obr. 8: Wadatiho diagram (spolu s rovnicou regresie) vytvorený zo záznamov všetkých použitých staníc s výnimkou Lakšárskej Novej Vsi, pre jedno z relokalizovaných zemetrasení

4.2.2.1 Test s použitím rýchlostného modelu s pomerom $v_p/v_s = 1.75$

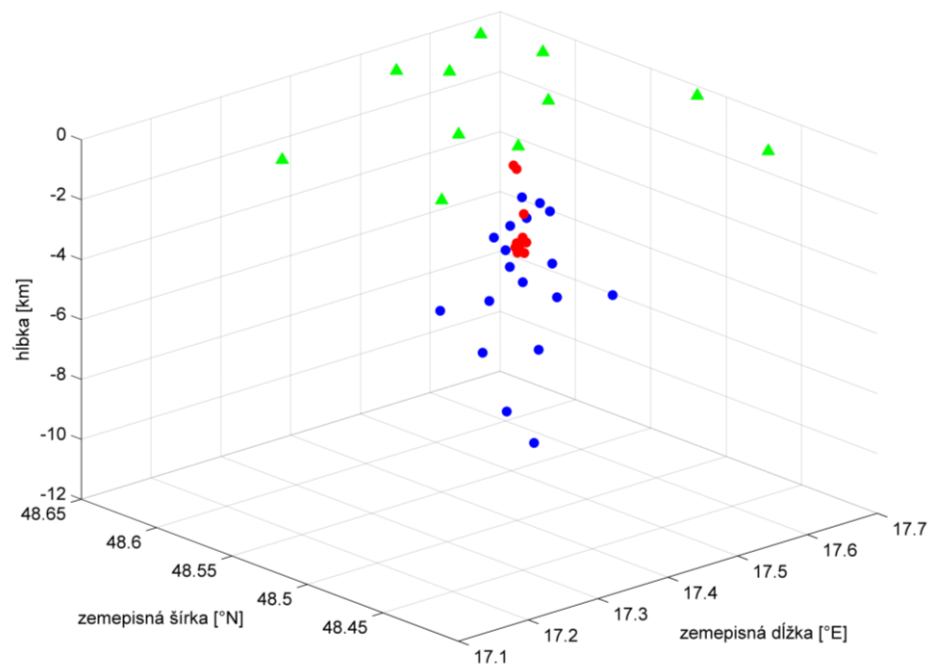
Metódu DD sme aplikovali na súbor 19 zemetrasení popísaných vyššie a s použitím 1D viacvrstvého modelu prostredia (tab. 2) so štandardným pomerom rýchlosti P a S vln v oblasti Malých Karpát.

Pre hodnotu parametra MAXSEP menšiu ako 4 nám program z dôvodu veľkého obmedzenia maximálnej vzdialenosti medzi dvojicou zemetrasení prelokalizoval vždy menej ako 10 zemetrasení. Preto sme počiatočnú hodnotu pre MAXSEP zvolili 4. Zvyšovaním tejto hodnoty sa zvyšoval aj počet prelokalizovaných zemetrasení. Hodnotu tohto parametra, rovnako aj ako parametra WDCT, sme volili z intervalu 4 až 8, pretože pre vyššie hodnoty sa neurčitosti v určení hypocentrálnych parametrov veľmi zvyšovali z dôvodu malého obmedzenia prepojenosti medzi zemetraseniami.

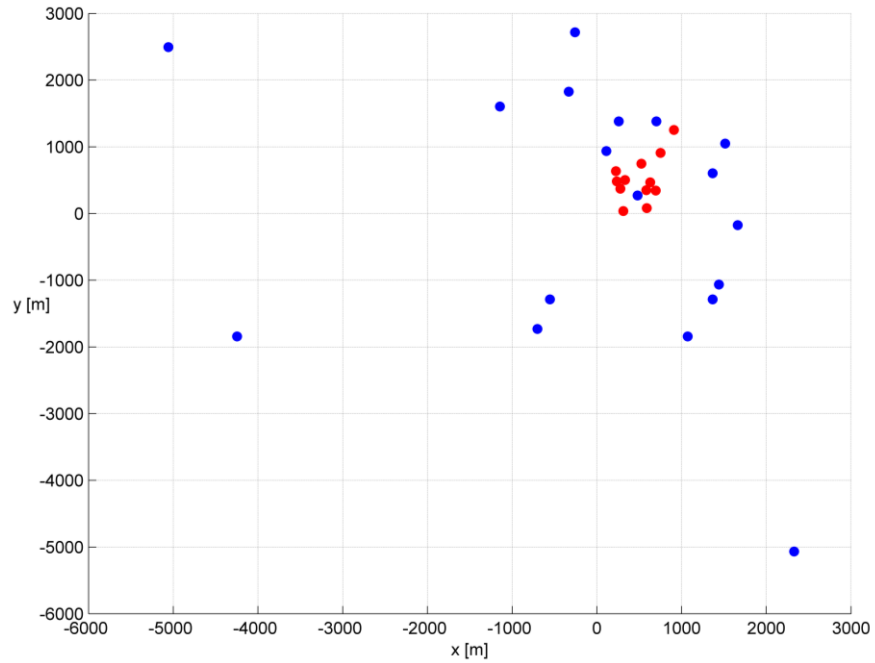
Najlepšie výsledky, teda výsledky s najmenšou neistotou v určení hypocentrálnych parametrov, ktoré budeme ďalej interpretovať, sme dosiahli nastavením parametrov MAXSEP = 5 a WDCT = 4, a tiež MAXSEP = 8 a WDCT = 7.

V prvom prípade sa prelokalizovalo 12 zemetrasení, počet vytvorených párov s P fázami bol 714 a s S fázami 775. Najväčšie RMS zo všetkých staníc, 590 ms, bolo na stanici Lakšárska Nová Ves (LAKS). Po relokalizácii bez použitia záznamov z dvoch staníc s najvyšším RMS - Lakšárska Nová Ves a Špačince (SPAC), sa s rovnakým

nastavením parametrov prelokalizovalo spolu 15 zemetrasení, mierne (rádovo jednotky metrov) sa však zvýšila neurčitosť v určení ich hypocentrálnych parametrov, keďže sa prelokalizovalo väčšie množstvo slabšie prepojených zemetrasení. Po tomto znížení počtu seizmických staníc mala najvyššie RMS po relokalizácii stanica Lančár, 212 ms. S použitím všetkých staníc bola neurčitosť vo výslednom určení hypocentrálnych parametrov priemerne 262.5 m v určení polohy a 44.6 ms v určení počiatočného času. Obrázky 9a a 9b znázorňujú zemetrasenia pred a po aplikácii metódy DD s použitím všetkých 11 staníc. Na obrázku je dobre viditeľný podstatne menší priestorový rozptyl relokalizovaných hypocentier zemetrasení voči pôvodným katalógovým absolútnym lokalizáciám.

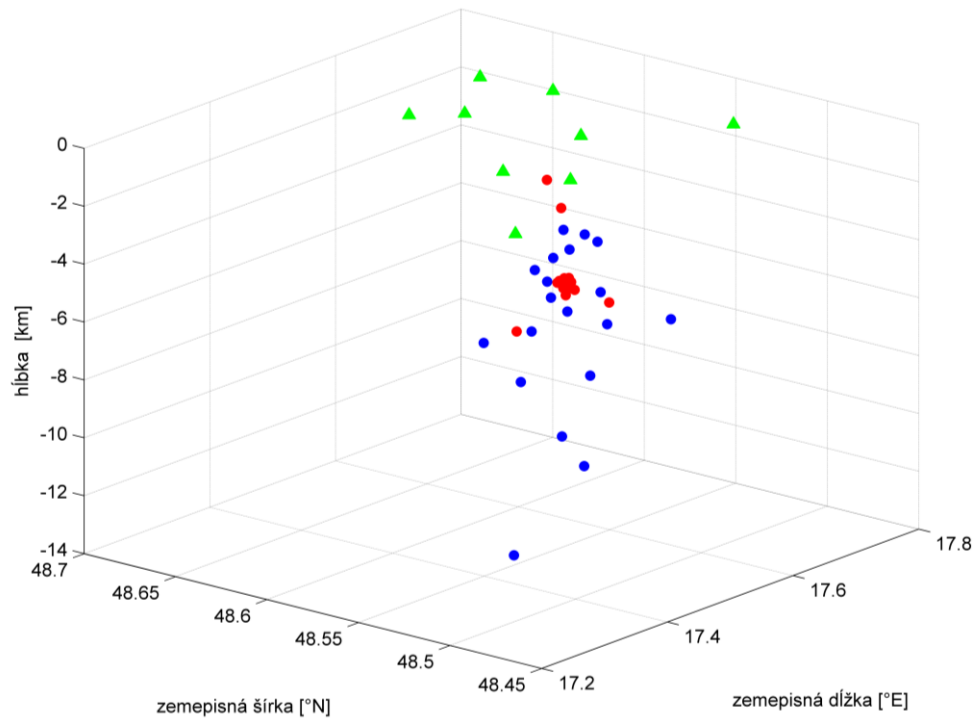


Obr. 9a: 3D pohľad na súbor relokalizovaných zemetrasení s $MAXSEP = 5$ a $WDCT = 4$ (s pomerom $v_p/v_s = 1.75$); krúžky znázornené modrou farbou sú vstupné lokalizácie zemetrasení do metódy DD (určené programom ph2dt), červené krúžky sú lokalizácie po aplikovaní metódy DD a zelené trojuholníky sú všetky použité seizmické stanice (11)

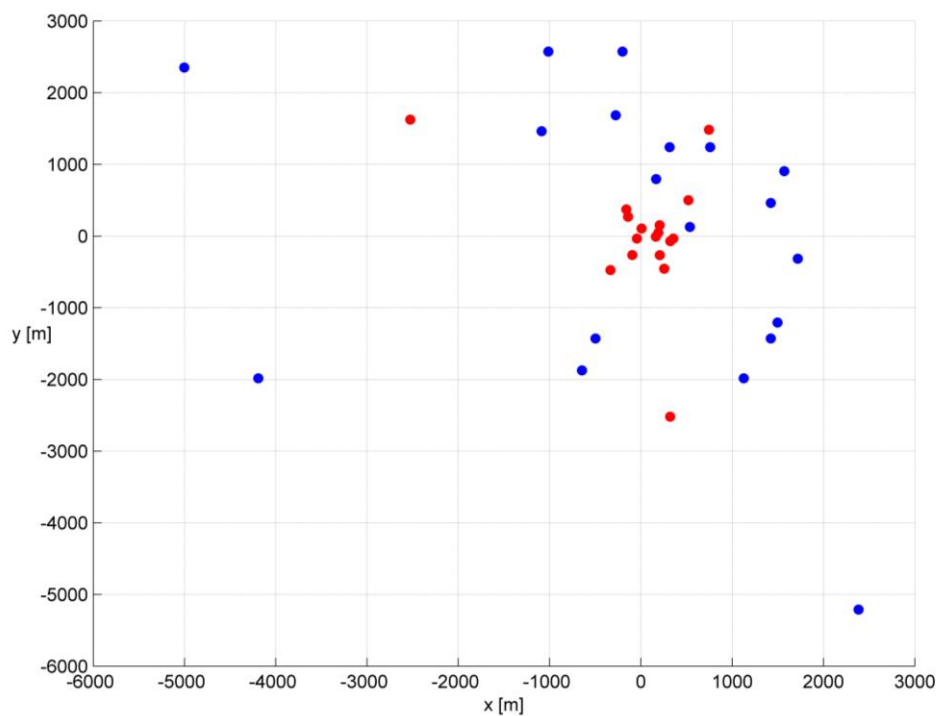


Obr. 9b: Pohľad zhora na polohy relokovaných zemetrasení s $MAXSEP = 5$ a $WDCT = 4$ (s pomerom $v_p/v_s = 1.75$) vzhľadom na ich centroid (s pomerom $v_p/v_s = 1.75$); x -ová súradnica zobrazuje smer východ-západ a y -ová smer sever-juh; krúžky znázornené modrou farbou sú vstupné lokalizácie zemetrasení do metódy DD (určené programom ph2dt), červené krúžky sú lokalizácie po aplikovaní metódy DD

S nastavením parametrov $MAXSEP = 8$ a $WDCT = 7$ sa prelokalizovalo 18 zemetrasení, pričom bez použitia seizmických staníc LAKS a SPAC to bolo 17 (obr. 10a a 10b), no zároveň bola znížená neurčitosť vo výslednom určení hypocentrálnych parametrov z priemerných 375 m v určení polohy a 64.4 ms v určení počiatočného času na 286 m a 47.9 ms. Počet vytvorených párov s P fázami bol 1086 a s S fázami 1127. Na obrázku 10 sú znázornené zemetrasenia pred a po aplikácii metódy DD s použitím 9 staníc (bez LAKS a SPAC). Výsledne určené polohy hypocentier sú veľmi podobné ako pre nastavenie $MAXSEP = 5$ a $WDCT = 4$, prelokalizovalo sa však o 5 zemetrasení viac. Hypocentrá relokovaných zemetrasení v oboch prípadoch tvoria sú zoskupené v podobnom tvare, ktorý je však trochu posunutý v priestore smerom na juho-západ (ide však o rádovo jednotky metrov).



Obr. 10a: 3D pohľad na súbor relokovaných zemetrasení s $\text{MAXSEP} = 8$ a $\text{WDCT} = 7$ (s pomerom $v_p/v_s = 1.75$); krúžky znázornené modrou farbou sú vstupné lokalizácie zemetrasení do metódy DD, červené krúžky sú lokalizácie po aplikovaní metódy DD a zelené trojuholníky sú použité seizmické stanice (9)



Obr. 10b: Pohľad zhora na polohy relokovaných zemetrasení s $\text{MAXSEP} = 8$ a $\text{WDCT} = 7$ (s pomerom $v_p/v_s = 1.75$) vzhľadom na ich centroid; x -ová súradnica zobrazuje smer východ-západ a y -ová smer sever-juh; krúžky znázornené modrou farbou sú vstupné lokalizácie zemetrasení do metódy DD, červené krúžky sú lokalizácie po aplikovaní metódy DD

4.2.2.2 Test s použitím rýchlostného modelu s pomerom $v_p/v_s = 1.95$

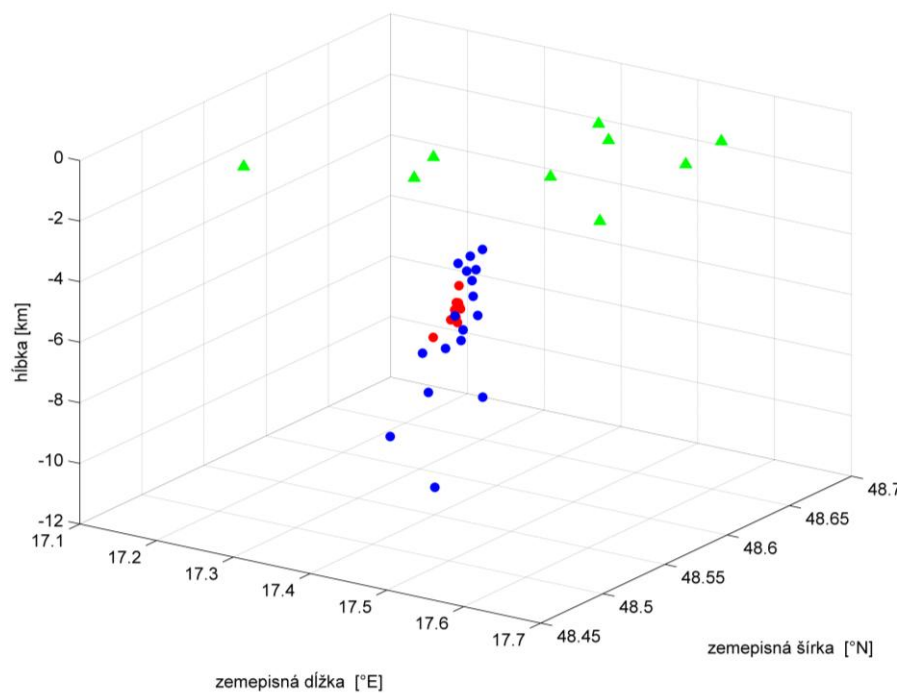
Na základe Wadatiho diagramov, ktoré sme vytvorili pre skúmané zemetrasenia, sme odhadli strednú hodnotu pomeru rýchlosti P a S vln v našej záujmovej lokalite v oblasti Malých Karpát na 1.95. Presná hodnota tohto pomeru pre skúmanú oblasť nie je známa a pravdepodobne v celej oblasti nie je konštantná, keďže ide o oblasť s veľmi zložitou geologickou štruktúrou. Preto sme vykonali niekoľko testov aj pre vyšší pomer v_p/v_s ako je jeho štandardná hodnota 1.75. Chceli sme zistiť citlivosť metódy na voľbu tohto pomeru v skúmanej oblasti.

Vykonali sme niekoľko testov kvôli vhodnému nastaveniu parametrov pre zvolený pomer $v_p/v_s = 1.95$. Hodnoty parametrov MAXSEP a WDCT sme volili z intervalu 4 až 8. Podobne ako v predchádzajúcom teste, aj v tomto nám najmenšie neistoty v určení hypocentrálnych parametrov po aplikácii metódy DD vyšli pre dvojice parametrov MAXSEP = 4, WDCT = 4 a MAXSEP = 8, WDCT = 7.

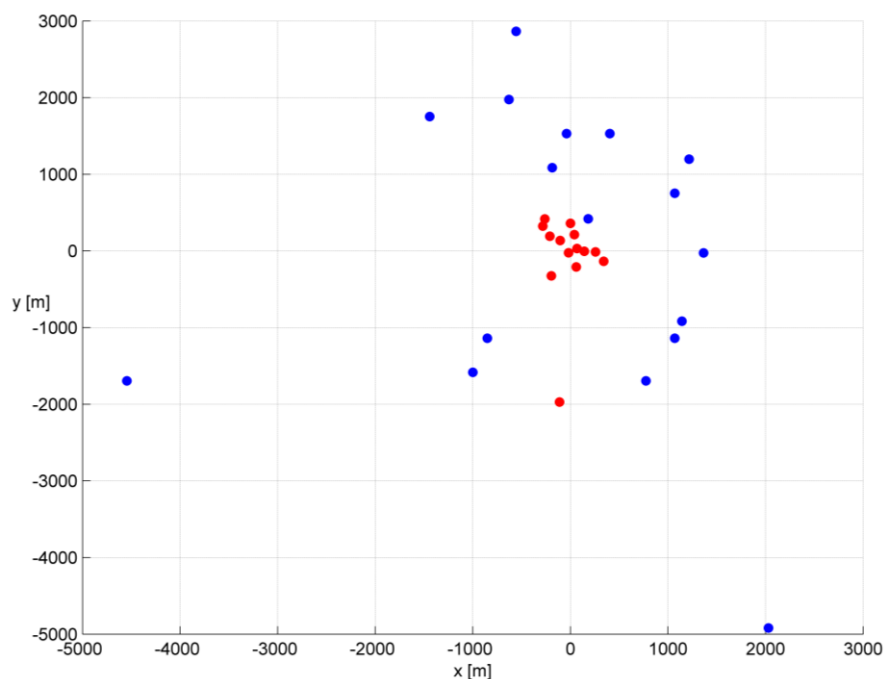
V prvom prípade (MAXSEP = 4, WDCT = 4) sa s použitím všetkých 11 staníc z lokálnej siete AEB prelokalizovalo 16 zemetrasení, počet vytvorených párov s P fázami bol 542 a s S fázami 601. Po vylúčení dvoch seizmických staníc s najvyšším RMS (stanice LAKS a SPAC) sa prelokalizovalo 14 zemetrasení, počet vytvorených párov s P fázami bol 517 a s S fázami 556. Po vylúčení týchto dvoch staníc sa neurčitosť v určení polohy po relokalizácii znížila z 442.8 m na 342.9 m a v určení počiatočného času z 80 ms na 59.1 ms. Na obrázkoch 11a a 11b sú znázornené polohy zemetrasení pred a po aplikácii metódy DD s týmto nastavením parametrov a použitím záznamov z 9 seizmických staníc.

V prípade nastavenia parametrov MAXSEP = 8 a WDCT = 7 sme taktiež z procesu relokalizácie odstránili seizmické stanice LAKS a SPAC z dôvodu vysokých hodnôt rezíduí v porovnaní s ostatnými stanicami. V tomto prípade sa prelokalizovalo 18 zemetrasení, počet vytvorených párov s P fázami bol 1086 a s S fázami 1127. Neurčitosť v určení polohy po relokalizácii bola 282.5 m a v určení počiatočného času z 50.3 ms. Na obrázkoch 12a a 12b sú znázornené polohy zemetrasení pred a po relokalizácii s týmto nastavením parametrov a použitím záznamov z 9 seizmických staníc.

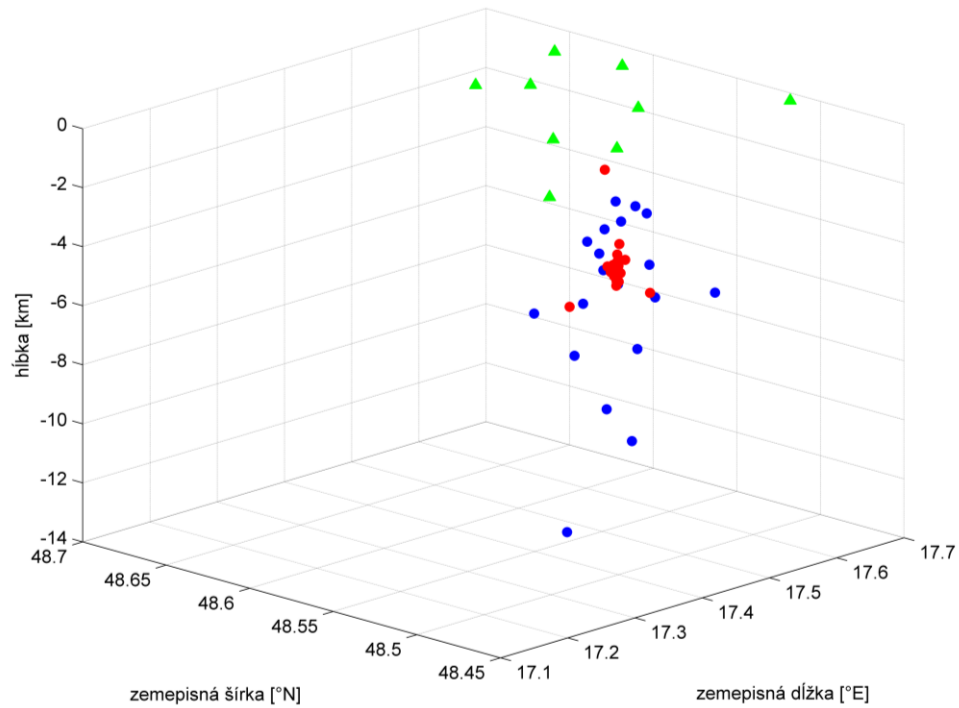
Opäť môžeme pozorovať podobnosť výsledkov oboch nastavení parametrov, pričom výhoda nastavenia vyšších hodnôt týchto parametrov v druhom prípade je viac prelokalizovaných zemetrasení, a tiež menšia neurčitosť vo výslednom určení hypocentrálnych parametrov.



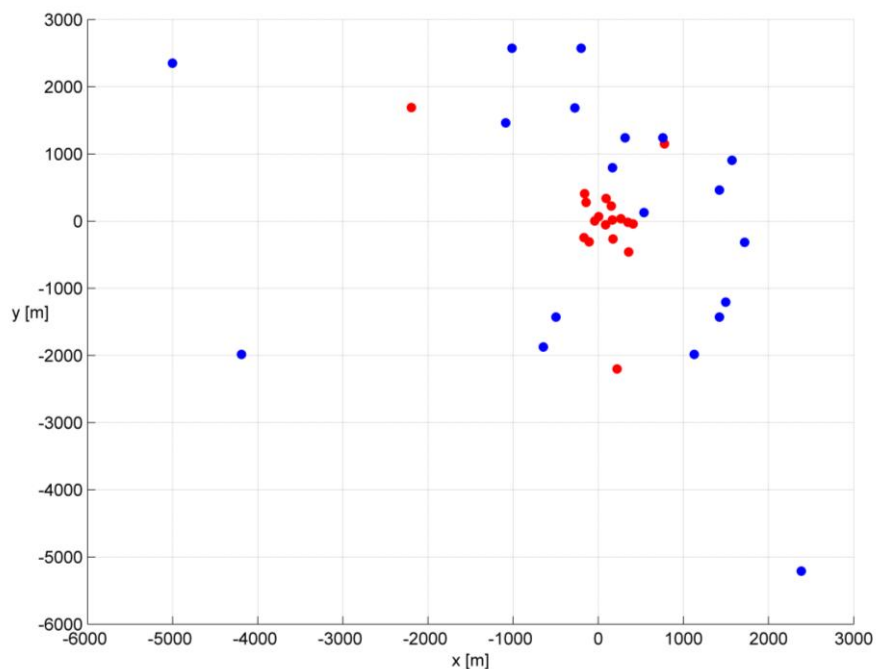
Obr. 11a: 3D pohľad na súbor relokalizovaných zemetrasení s $\text{MAXSEP} = 4$ a $\text{WDCT} = 4$ (s pomerom $v_p/v_s = 1.95$);
 krúžky znázornené modrou farbou sú vstupné lokalizácie zemetrasení do metódy DD, červené krúžky sú lokalizácie po aplikovaní metódy DD a zelené trojuholníky sú všetky použité seizmické stanice (9)



Obr. 11b: Pohľad zhora na polohy relokalizovaných zemetrasení s $\text{MAXSEP} = 4$ a $\text{WDCT} = 4$ (s pomerom $v_p/v_s = 1.95$) vzhľadom na ich centroid;
 x -ová súradnica zobrazuje smer východ-západ a y -ová smer sever-juh;
 krúžky znázornené modrou farbou sú vstupné lokalizácie zemetrasení do metódy DD, červené krúžky sú lokalizácie po aplikovaní metódy DD



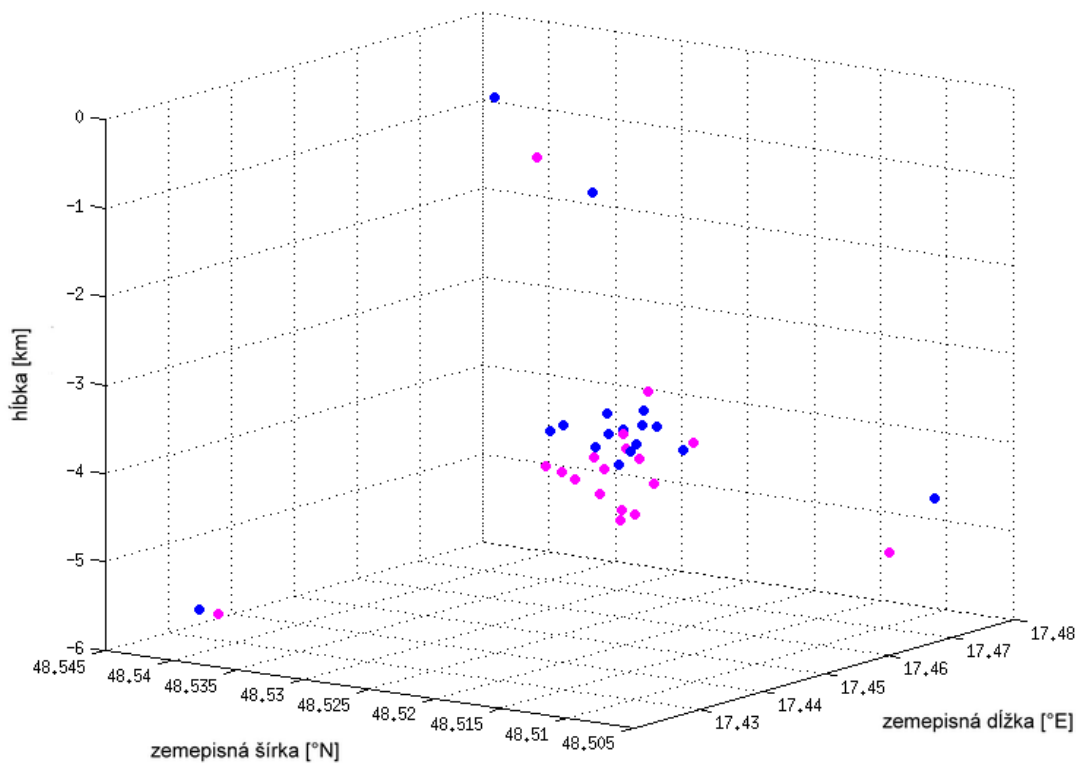
Obr. 12a: 3D pohľad na súbor relokalizovaných zemetrasení s MAXSEP = 8 a WDCT = 7 (s pomerom $v_p/v_s = 1.95$);
 krúžky znázornené modrou farbou sú vstupné lokalizácie zemetrasení do metódy DD, červené krúžky sú lokalizácie po aplikovaní metódy DD a zelené trojuholníky sú všetky použité seizmické stanice (9)



Obr. 12b: Pohľad zhora na polohy relokalizovaných zemetrasení s MAXSEP = 8 a WDCT = 7 (s pomerom $v_p/v_s = 1.95$) vzhľadom na ich centroid;
 x -ová súradnica zobrazuje smer východ-západ a y -ová smer sever-juh;
 krúžky znázornené modrou farbou sú vstupné lokalizácie zemetrasení do metódy DD, červené krúžky sú lokalizácie po aplikovaní metódy DD

Vykonalí sme aj niekoľko ďalších testov pre iné hodnoty pomeru v_p/v_s , konkrétne $v_p/v_s = 1.55$ a tiež pre $v_p/v_s = 1.83$. Výsledky však boli porovnateľné s výsledkami pre pomery 1.75 a 1.95 diskutovanými vyššie.

Na obrázku 13 sú pre porovnanie zobrazené hypocentrá relokalizovaných zemetrasení pre pomery v_p/v_s 1.75 a 1.95. Obidve relokalizácie boli vykonané s nastavením parametrov $MAXSEP = 8$ a $WDCT = 7$. Na obrázku 13 je možné pozorovať relatívny posun centroidov jednotlivých výsledkov relokalizácií pre rôzne hodnoty v_p/v_s voči sebe, pričom tento posun je najmä vo vertikálnom smere. Hĺbka zemetrasenia je pri každej lokalizácii parametrom s najväčšou neistotou určenia, preto aj po relokalizácii určenie hĺbky ostáva najmenej presne určeným hypocentrálnym parametrom. Hypocentrá zemetrasení sa však pre testy s rôznym pomerom rýchlosti P a S vln zoskupovali do približne rovnakého tvaru zoskupenia, len navzájom voči sebe posunutom, pričom vo všetkých prípadoch vytvorili viditeľný menší priestorový rozptyl voči absolútnym katalógovým lokalizáciám.



Obr. 13: 3D pohľad na súbor relokalizovaných zemetrasení metódou DD s hodnotami parametrov $MAXSEP = 8$ a $WDCT = 7$ a rôznymi pomermi v_p/v_s ; modré krúžky znázorňujú relokalizácie zemetrasení pre pomer $v_p/v_s = 1.75$ (17 zemetrasení), ružové krúžky sú relokalizácie zemetrasení pre pomer $v_p/v_s = 1.95$ (18 zemetrasení)

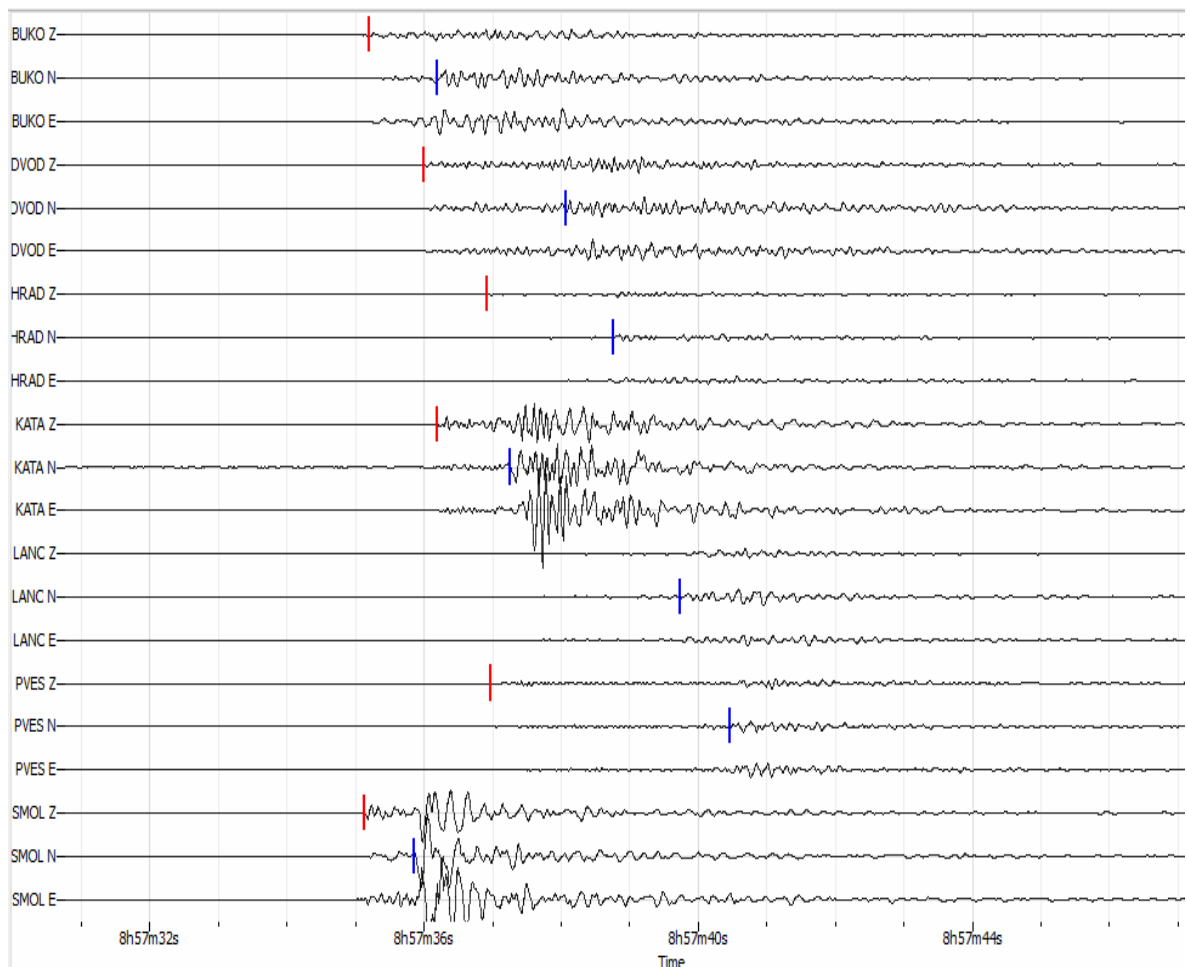
4.2.3 Vlastná reinterpretácia záznamov zemetrasení

Pri analýze výsledkov zo všetkých uskutočnených testov sme dospeli k názoru, že kvalita vstupných údajov zohráva pri aplikácii metódy DD veľmi dôležitú úlohu. Neúspešné testy popísané v kapitole 4.2.1, kde sme použili iné interpretácie časov príchodov P a S vln na seizmické stanice ako boli použité v určení ich absolútnych lokalizácií vstupujúcich do metódy DD, potvrdzujú dôležitosť v kontrole kvality vstupných údajov. Vlastnou reinterpretáciou záznamov tiež budeme môcť priradiť individuálne váhy pre každú určenú fázu podľa istoty, s akou boli pri interpretácii určené. Takéto údaje v existujúcich katalógoch interpretácií k dispozícii nie sú.

Preto sme sa rozhodli o vlastnú interpretáciu týchto záznamov, čím sme chceli znížiť výslednú neurčitost' v určení hypocentrálnych parametrov, a tým zvýšiť kvalitu a spoľahlivosť získaných výsledkov. Na reinterpretáciu sme použili záznamy zo 7 seizmických staníc lokálnej siete AEB, ktoré sú prevádzkované spoločnosťou Progseis, s.r.o. Záznamy sme analyzovali použitím dostupného programového softwaru Geopsy. V dôsledku komplikovanej geologickej štruktúry v zdrojovej oblasti Malých Karpát predstavujú analyzované záznamy zemetrasení veľmi zložité časové signály, u ktorých je náročné spoľahlivo určiť presné časy príchodov P a S vln. Jeden zo záznamov je zobrazený na obrázku 14, kde sú zaznačené naše interpretácie časov príchodov P a S vln. Dôkladná interpretácia je vhodná najmä pri aplikácii metódy DD na menší počet javov, kde nekvalitné vstupné údaje v kombinácii s menším počtom zemetrasení (a teda aj oveľa menším počtom dvojitých diferencií použiteľných na analýzu), spôsobujú zbytočne veľké nepresnosti.

Proces vlastnej reinterpretácie pôvodne nebol cieľom našej práce, avšak pri riešení jej cieľov sme sa rozhodli uskutočniť ho na základe priebežne získaných poznatkov a skúseností s aplikáciou metódy DD. Všetky záznamy pre všetkých 19 zemetrasení sme doposiaľ nestihli reinterpretovať, interpretované záznamy pre 10 zemetrasení možno nájsť v prílohe v tabuľke 1. Váhy sme určovali na stupnici 1-3, pričom váha 1 zodpovedá spoľahlivo určenému času príchodu seizmickej vlny a vyššie číslo horšej kvalite určenia.

Nami reinterpretované časy príchodov seizmických vln plánujeme v budúcnosti použiť na získanie vlastných absolútnych lokalizácií analyzovaného súboru zemetrasení pomocou pomocou štandardne používaného lokalizačného programu FastHypo, ktoré budú vstupnými lokalizáciami do relokalizačnej metódy DD.



Obr. 14: Analýza záznamu zemetrasenia zo súboru 19 skúmaných zemetrasení; červenými čiarami sme označili prvý príchod P vlny, modrými prvý príchod S vlny

Hlavným cieľom, ktorý v budúcnosti (v rámci nadväzujúcej diplomovej práce) plánujeme uskutočniť, je použitie metódy DD na nami reinterpretované a prelokalizované dáta z dôvodu väčšej kontroly nad kvalitou vstupných údajov, a to najmä pri relokizácii menších súborov zemetrasení. Tiež plánujeme z katalógu dát vybrať väčšie množstvo zemetrasení z danej oblasti aj z iných období, nielen roku 2006, a následne ich prelokalizovať pomocou metódy DD. Takto prakticky overíme vplyv počtu relokizovaných zemetrasení na kvalitu výsledkov relokizácie pomocou DD metódy. Vstupné údaje plánujeme ďalej doplniť o kroskorelácie medzi tými zemetraseniami, medzi ktorými je to možné, a aj tým zvýšiť výslednú presnosť relokizácie. Veľké množstvo prelokalizovaných zemetrasení nám poskytne možnosť lepšieho vymapovania seizmicky aktívnych zlomov, čo je dôležité pre poznanie seizmického režimu skúmanej oblasti.

Záver

V tejto práci sme sa venovali metódam relatívnej lokalizácie zemetrasení a možnostiam aplikácie týchto metód na ohniskovú zónu Malé Karpaty. Oblasť Malých Karpát patrí k najvýznamnejším aktívnym zdrojovým zónam na Slovensku, čo sme podrobne popísali a zdôraznili v kapitole 1, kde sme sa venovali aj popisu monitorovania seizmickej aktivity v tejto oblasti. Podrobne sme rozobrali používané štandardné lokalizačné metódy a popísali sme možnosti a obmedzenia ich použitia. Štandardné lokalizačné metódy určujú hypocentrálne parametre zemetrasení s veľkými neistotami najmä v oblastiach, kde rýchlostný model prostredia nie je presne určený. Princíp metód relatívnej lokalizácie umožňuje dosiahnuť voči bežným metódam vyššiu presnosť výsledkov aj pri menej známych modeloch prostredia, čo je práve prípad epicentrálnej oblasti Malé Karpaty, kde rýchlostný model doposiaľ nie je dostatočne presne známy.

Preto sme si v cieľoch našej práce stanovili podrobné naštudovanie princípov v súčasnosti používaných metód relatívnej lokalizácie a súčasne porovnanie ich výhod a nevýhod z hľadiska aplikovateľnosti na zemetrasenia z oblasti Malých Karpát. Dve v súčasnosti najpoužívanejšie metódy relatívnej lokalizácie – metódu master event a metódu dvojitých diferencií – sme podrobne popísali v kapitole 3, pričom v jej závere sme vysvetlili, prečo sme na ďalší postup a aplikáciu v zdrojovej zóne Malé Karpaty zvolili práve metódu dvojitých diferencií.

Na relokalizáciu zemetrasení metódou dvojitých diferencií sa používa voľne stiahnuteľný software HypoDD od autorov tejto metódy, *Walhausera a Ellswortha* (2000). S týmto programom sme sa naučili dôkladne pracovať a taktiež sme sa oboznámili s parametrami, ktorých vhodné nastavenie v programe HypoDD je kľúčové z hľadiska výslednej presnosti v určení hypocentrálnych parametrov. Tieto poznatky sme zhrnuli v prvej časti kapitoly 4 výsledkov, kde sme zosumarizovali a prehľadne popísali jednotlivé vstupné súbory a parametre používané v programe HypoDD, spolu s praktickými odporúčaniami voľby ich hodnôt.

V cieľoch práce sme si taktiež stanovili naštudované postupy vybranej metódy relokalizácie aplikovať na reálne údaje z oblasti Malých Karpát pre sériu zemetrasení z augusta 2006. V druhej časti kapitoly 4 výsledkov podrobne popisujeme aplikáciu metódy dvojitých diferencií na 19 slabých zemetrasení zo zdrojovej oblasti Malé Karpaty. Metódu sme aplikovali pre rôzne voľby parametrov, výsledné polohy hypocentier zemetrasení sme zobrazili v 2D a 3D grafoch pre porovnanie absolútnych katalógových

lokalizácií a relokalizácií po aplikácii metódy DD. Výsledky sme vzájomne porovnali a rozanalyzovali.

Okrem nájdenia vhodných volieb parametrov výpočtu lokalizácie metódou DD pre analyzovaný súbor zemetrasení sme urobili aj testy vplyvu rôzneho pomeru rýchlostí P a S vln v modeli prostredia, keďže presná hodnota tohto pomeru je pre oblasť Malých Karpát neznáma. Zároveň sme pomocou metódy Wadatiho diagramov odhadli realistickú strednú hodnotu pomeru $v_p/v_s = 1.95$. Táto hodnota je v zhode s približným odhadom v práci Kubina 1.9 ± 0.5 získaným pomocou nezávislej metódy.

Výsledky testov s rôznymi hodnotami pomeru v_p/v_s indikujú, že táto hodnota má vplyv najmä na celkový absolútny posun centroidu zoskupenia hypocentier relokalizovaných zemetrasení, a to najmä na posun v hĺbke, ale tvar zoskupenia hypocentier zemetrasení zásadne neovplyvňuje.

Celkovo môžeme konštatovať, že aj keď výsledky aplikovania metódy DD neposkytujú zatiaľ detailnú štruktúru zlomu (kvôli malému súboru relokalizovaných zemetrasení) jasne ukazujú výrazné zníženie priestorového rozptylu hypocentier relokalizovaných zemetrasení voči pôvodným absolútnym lokalizáciám. Lokalizácie pomocou DD metódy majú výrazne nižšie neurčitosti získaných hypocentrálnych parametrov. Metóda DD sa teda javí ako veľmi perspektívna metóda vhodná pre spresnenie hypocentrálnych parametrov zemetrasení z oblasti Malých Karpát.

Jedným z dôležitých záverov pri analýze výsledkov zo všetkých uskutočnených testov je zistenie, že kvalita vstupných údajov zohráva pri aplikácii metódy DD veľmi dôležitú úlohu. Preto sme sa rozhodli urobiť aj vlastnú interpretáciu záznamov skúmaných zemetrasení, čím sme chceli zvýšiť kvalitu a spoľahlivosť získaných výsledkov. Dosiaľ sme reinterpretovali časy príchodov P a S seizmických vln na seizmické stanice v Malých Karpatoch pre 10 zemetrasení, výsledky reinterpretácie možno nájsť v prílohe 1 tejto práce. Nami reinterpretované časy príchodov seizmických vln plánujeme v budúcnosti použiť na získanie vlastných absolútnych lokalizácií analyzovaného súboru zemetrasení, ktoré budú vstupnými lokalizáciami do relokalizačnej metódy DD.

V rámci nadväzujúcej diplomovej práce v budúcnosti plánujeme súčasne prelokalizovať väčší počet zemetrasení z rôznych období pre katalógové (absolútne) časy aj s využitím kroskorelačnej techniky. Dôkladná teoretická príprava, oboznámenie sa s dostupnými údajmi a ich kvalitou spolu s vykonanými testami v rámci tejto bakalárskej práce, predstavujú dôležitý krok v príprave na korektnú aplikáciu metódy DD na veľký objem údajov zo zdrojovej oblasti Malé Karpaty.

Zoznam použitej literatúry

1. ANHUI, S., QIFU, CH., YONG, CH., GANG., L., ZHIQIANG, Z. (2012). *Relocation of Earthquakes in the Northeastern Tianshan Mountains Area and Improvement of Local 1-D Crustal Velocity Model*. Earthquake Science, 2012, vol. 25, no. 5-6, s. 495-503
2. BALFOUR, J. N. (2011). *Sources of Seismic Hazard in British Columbia: What Controls Earthquakes in the Crust?: Dizertačná práca*. Wellington: University of Victoria, 2011, 166 s.
3. BOUCHAALA, F., VAVRYČUK, V., FISCHER, T. (2013). *Accuracy of the master-event and double-difference locations: synthetic tests and application to seismicity in West Bohemia, Czech Republic*. Journal of Seismology, 2013, vol. 17, no. 3, s. 841-859
4. BORMANN, P., SIEGFRIED, W. (2012). *Earthquake location at teleseismic distances from 3-component records (Tutorial with exercise by hand)* - In: Bormann, P. (Ed.), *New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP-2)*, Potsdam: Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, 1-18, 10.2312/GFZ.NMSOP-2_EX_11.2.
5. BORMANN, P., SIEGFRIED, W. (2012). *Estimating the epicenters of local and regional seismic sources, using the circle and chord method (Tutorial with exercise by hand and movies)*. In: Bormann, P. (Ed.), *New Manual of Seismological Observatory Practice 2 (NMSOP-2)*, Potsdam: Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, 1-14, 10.2312/GFZ.NMSOP-2_EX_11.1.
6. BOYLE, K. L., HUTCHINGS, L. J., BONNER, B. P., FOXALL, W., KASAMEYER P. W. (2007). *Double Difference Earthquake Locations at the Salton Sea Geothermal Reservoir*. Geothermal Resources Council, (LLNL, UCRL-TR-233538), 2007
7. CASTELLANOS, F., VAN DER BAAN, M. (2013). *Microseismic Event Locations using the Double-Difference Algorithm*. Department of Physics, University of Alberta, Edmonton, 2013
8. CIPCIAR, A. (2001). *Analýza údajov o zemetraseniach v seizmickej zdrojovej zóne Dobrá Voda: rigorózna práca*. Bratislava: Univerzita Komenského, 2001, 39 s.
9. CIPCIAR, A., CSICSAY, K., SRBECKÝ, M., KRISTEKOVÁ, M., FOJTÍKOVÁ, L., KRISTEK, J., GÁLIS, M., BYSTRICKÝ, E., LABÁK, P., MOCZO, P.,

- PAŽÁK, P., FRANEK, P. (2013). *Katalóg zemetrasení Slovenska - verzia 2012*, Bratislava: GFÚ SAV
10. ČERMÁKOVÁ, H., HORÁLEK, J.: *Space-time distribution of earthquake swarms and background seismicity in the main focal zone of the West Bohemia/Vogtland region: period 1997-2013*, The Fourth annual meeting of the AIM project 2013 (oral presentation, full text on <http://www.ig.cas.cz/en/aim/fourth-annual-meeting>)
 11. DEICHMANN, N., GARCIA-FERNANDEZ, M.: *Rupture geometry from high-precision relative hypocentre locations of microearthquake clusters*, Geophysical Journal International, vol. 110, no. 3, 1992, s. 501–517
 12. DUNN, M. M. (2004). *Relocation of Eastern Tennessee earthquakes using HypoDD*: diplomová práca. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2004, 82 s.
 13. ELLSWORTH, W. L., BEROZA, G. C., CHIARALUCE, L., FUKUYAMA, E., MA, K.-F., PREJEAN, S., RICHARDS-DINGER, K., SAGIYA, T., SCHAFF, D. P., WALDHAUSER, F. (2001). *Double-difference earthquake locations and their implications for hazards and earthquake physics*, 25th Anniversary of the Friuli, Italy, Earthquake Workshop, Udine, Italy, September 2001
 14. FOJTÍKOVÁ, L. (2009). *Momentové tenzory zemetrasení a tektonické napätie v ohniskovej oblasti Malé Karpaty*: dizertačná práca. Bratislava: GFÚ SAV, 2009, 137 s.
 15. FOJTÍKOVÁ, L., GÁLIS, M., ZÁHRADNÍK, J.: *Focal mechanisms of micro-earthquakes in the Little Carpathians using the waveform inversion - influence of the model and of the source time function used*. The Second annual meeting of the AIM project 2011, 29.9. – 30.9. 2011, Praha, Czech Republic (oral presentation, full text on <http://www.ig.cas.cz/en/aim/second-annual-meeting>)
 16. FOJTÍKOVÁ, L., MÁLEK, J., SEKEREŠ, J. (2013). *Seismic identification of a fault activated during earthquake sequence of 2006 in the Little Carpathian region*. *Geologica Carpathica*, submitted
 17. FOJTÍKOVÁ, L., KRISTEKOVÁ, M., MÁLEK, M., ZÁHRADNÍK, Progseis, Ltd. *Uncertainty in locations and moment tensors of micro-earthquakes in Little Carpathians improved by new stations*, The Fourth annual meeting of the AIM project 2013, (oral presentation, full text on <http://www.ig.cas.cz/en/aim/fourth-annual-meeting>).

18. FOJTÍKOVÁ, L., MÁLEK, J., KRISTEKOVÁ, M., BROŽ, M., ŠTRUNC, J., SEKEREŠ, J., SEKEREŠOVÁ D. (2011). The Second annual meeting of the AIM project 2011, 29.9. – 30.9. 2011, Praha, Czech Republic (poster)
19. FOJTÍKOVÁ, L., VAVRYČUK, V., CIPCIAR, A., MADARÁS, J., (2010). *Focal mechanisms of micro-earthquakes in the Dobrá Voda seismoactive area in the Malé Karpaty Mts. (Little Carpathians)*, Slovakia, Tectonophysics, 2010 s. 213–229
20. GEOFYZIKA BRNO, 1985. Rýchlostný model JAB90_3D_B.MOD
21. HAVSKOV, J., BORMANN, P., SCHWEITZER, J., (2002). *Earthquake location*. ASPEI New Manual of Seismological Observatory Practice, Vol. 2, 28 s.
22. KUBINA, F. (2011). *Numerický výpočet časov šírenia seizmických vln v 3D nehomogénnom prostredí a lokalizácia hypocentier zemetrasení: bakalárska práca*. Bratislava: Univerzita Komenského, 2011, 59 s.
23. KULHÁNEK, O. (1990). *Anatomy of seismograms*. Elsevier Science Pub Co., 1990, 178 s.
24. MOCZO, P., LABÁK, P., CIPCIAR, A., KRISTEK, J., KRISTEKOVÁ, M., BIELIK, M., ŠAJGALÍKOVÁ, J. & REŽUCHOVÁ, D., (2002). *100 rokov seizmológie na Slovensku / 100 Years of Seismology in Slovakia*, Geofyzikálny ústav SAV a Fakulta matematiky, fyziky a informatiky UK, Bratislava, 2002, 58 s.
25. SEKEREŠ, J. (2103). *Jaslovské Bohunice seizmické meranie*. Priebežná správa za obdobie 1.7.2006-30.9.2006, Trnava, 81 s.
26. STODDARD, P., WOODS, M.T. (1990). *Master event relocation of Gorda Block earthquakes - implications for deformation*. Geophys Res Lett 17(7):961–964
27. STORK, A. (2012). *Understanding gas and & fluid migration using double-difference earthquake location*. BUMS Sponsors Meeting, Bristol, 15-16 March, 2012, 15 s.
28. VAVRYČUK, V., BOUCHAALA, F., FISCHER, T. (2012). *High-resolution fault tomography from accurate locations and focal mechanisms of swarm earthquakes*. Institute of Geophysics, Academy of Sciences Czech Republic, 2012
29. WADATI, K., (1933). *On travel time of earthquake waves*, Part II. Geophys. Mag.7, 1933, s. 101-111
30. WALDHAUSER, F., SCHAFF, D. P., (2008). *Large-scale relocation of two decades of Northern California seismicity using cross-correlation and double-difference methods*. Journal of Geophysical Research, vol. 113

31. WALDHAUSER, F. (2001). *HYP0DD--A program to compute double-difference hypocenter locations*, U.S. Geologic Survey Open-File Report 01-113.
32. WALDHAUSER, F., ELLSWORTH, W. L. (2000). *A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward fault, California*, Bull. Seismo. Soc. Am. 90, s. 1353-1368
33. YANG, H. (2013). *Locating Earthquakes Using HypoD*, October 25, 2013, Georgia Institute of Technology
34. ZHANG, H., THURBER, H. (2003). *Double-difference tomography: the method and its application to the Hayward Fault, California*. In Bulletin of the Seismological Society of America, vol. 93, no. 5, s. 1875-1889
35. ZHOU, S., XU, Z., HAN, J., XU, H. (1999). *Analysis on the master event method and precise location of 1997 Jiashi strong earthquake swarm in western China*. Acta Seismologica Sinica, vol. 12, no. 3, s. 285-291.

Použité seizmické údaje a internetové zdroje:

Progseis, s.r.o., Trnava

<http://www.ig.cas.cz/en/aim/aim-home>

<http://www.geopsy.com/>