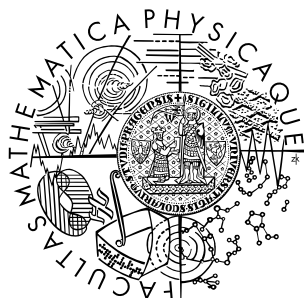


Univerzita Karlova v Praze  
Matematicko-fyzikální fakulta

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



Jiří Vackář

### Částečná automatizace zpracování seismických záznamů

Katedra geofyziky

Vedoucí bakalářské práce: prof. RNDr. Jiří Zahradník, DrSc.

Studijní program: Fyzika, obecná fyzika

2010



Rád bych poděkoval vedoucímu své práce prof. RNDr. Jiřímu Zahradníkovi, DrSc. za skvělé vedení, obětavé a velice podnětné připomínkování napsaných textů a za velkou ochotu a trpělivost při konzultacích. Dále bych chtěl poděkovat RNDr. Františku Gallovičovi, Ph.D. za praktické připomínky a nápady. V neposlední řadě patří mé díky všem členům katedry za vytvoření velice přátelského a příjemného prostředí.

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci napsal samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů. Souhlasím se zapůjčováním práce a jejím zveřejňováním.

V Praze dne 27. 5. 2010

Jiří Vackář



# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>9</b>
<b>2</b>	<b>Získávání a zpracování seismických dat</b>	<b>11</b>
2.1	Seismograf . . . . .	11
2.2	Seismická stanice . . . . .	14
2.3	Seismická data . . . . .	14
2.4	Formáty seismických dat . . . . .	15
<b>3</b>	<b>Seismická data dostupná na internetu</b>	<b>16</b>
3.1	EMSC . . . . .	16
3.2	ORFEUS . . . . .	17
<b>4</b>	<b>Důvody pro rychlé zpracování dat</b>	<b>19</b>
4.1	Systémy včasného varování . . . . .	19
4.2	Predikce tsunami . . . . .	20
4.3	Určování momentových tenzorů . . . . .	20
<b>5</b>	<b>Popis vytvořených programů</b>	<b>22</b>
5.1	Použité technologie . . . . .	22
5.2	Hlídní zeměřesení, reakce na e-maily . . . . .	23
5.3	Určení stanic, vyslání požadavku . . . . .	23
5.4	Zpracování odpovědi, stažení a konverze dat . . . . .	25
5.5	Zaslání upozornění, výstup . . . . .	25
<b>6</b>	<b>Zpracování konkrétního zeměřesení</b>	<b>28</b>
6.1	Zeměřesení v severním Alžírsku 23. května 2010 . . . . .	28
<b>7</b>	<b>Závěr</b>	<b>32</b>
	<b>Literatura</b>	<b>33</b>
<b>A</b>	<b>Zdrojové kódy</b>	<b>36</b>
A.1	parsemail.sh . . . . .	36
A.2	mailrequest.sh . . . . .	38
A.3	orfeus.sh . . . . .	40
A.4	map.gmt . . . . .	43



Název práce: Částečná automatizace zpracování seismických záznamů

Autor: Jiří Vackář

Katedra: Katedra geofyziky

Vedoucí bakalářské práce: prof. RNDr. Jiří Zahradník, DrSc.

e-mail vedoucího: Jiri.Zahradnik@mff.cuni.cz

Abstrakt: Současná seismologie řeší řadu důležitých problémů v krátkém čase po zemětřesení. Například vyvíjí systémy rychlé lokalizace, včasného varování, předpovídá tsunami nebo automaticky určuje momentové tenzory, které vypovídají o velikosti a mechanismu zemětřesení. Klíčovou roli v řešení těchto úloh, které pomáhají zachraňovat životy i majetek a koordinovat záchranné práce, hraje automatické zpracování seismických dat. Tato práce předkládá vlastní automatický systém získávání dat z mezinárodních center. Systém přijímá upozornění na výskyt zemětřesení, určuje seismické stanice vhodné pro další zkoumání mechanismu ohniska, provádí stažení seismogramů z těchto stanic a jejich převedení do vhodného formátu. Vytvořený softwarový aparát je tvořen sadou skriptů, běžících na fakultním serveru, které využívají řadu běžných i geofyzikálních programů, například pro interetovou komunikaci, konverzi formátů či vykreslování map. Tato sada nástrojů po zemětřesení ve Středomoří zajistí, že zpravidla do dvou hodin jsou potřebná data na fakultním serveru připravena ve formě vhodné pro další zpracování. Dvouhodinové zdržení je dané dobou, kterou potřebuje EMSC k lokaci epicentra a datové centrum ORFEUS ke zpracování požadavků na seismogramy. Vlastní akce pomocí programů vytvořených v této práci trvá zpravidla méně než jednu minutu. V budoucnu by bylo možné aparát rozšířit, například automatizací určení momentového tenzoru zemětřesení.

Klíčová slova: seismogram, seismická data, automatizace, zemětřesení

Title: Partial automation of seismic data processing

Author: Jiří Vackář

Department: Department of Geophysics

Supervisor: prof. RNDr. Jiří Zahradník, DrSc.

Supervisor's e-mail address: Jiri.Zahradnik@mff.cuni.cz

Abstract: The present-day seismology is expected to solve many important problems in a short time after the earthquake occurrence. They include, for example, the fast localization, early-warning systems, tsunami predictions, and automatic evaluations of moment tensors (related to the fault size and mechanism of the earthquake). Automation of the data processing is crucial, since quick reactions may save lives and properties and facilitate the emergency response. This work introduces an original system automatically acquiring and processing data from international seismic centers. The system receives earthquake alerts, chooses seismic stations suitable for focal-mechanism studies, downloads seismograms, and converts them into a preferred format. The software has been written as a suite of scripts, running on the department server; they call common software tools as well as specialized geophysical programs, e. g. those for the data communication, and map drawing. As a result, the software toolkit ensures availability of the relevant data on the server within two hours after Mediterranean-area earthquake. The two-hours delay is caused by the time needed by the EMSC center to localize the epicenter, and the ORFEUS center to download and pre-process seismograms from various networks. The running time of the codes developed in the present work is then usually less than one minute. A future extension of this work may include, for example, automation of the whole process of moment-tensor evaluation.

Keywords: seismogram, seismic data, automation, earthquake





# Kapitola 1

## Úvod

Rozvoj výpočetní techniky a metod matematického modelování znamená pro seismologii dříve netušené možnosti. Díky digitálním přístrojům a přenosům dat v reálném čase je možné určit základní parametry zemětřesení během sekund či minut a využít je ke snížení škod na životech i majetku nebo alespoň k lepší koordinaci záchranných prací. Dále je možné modelovat samotný zemětřesný zdroj i šíření vln a studovat mechanismus ohniska i stavbu Země.

Na katedře geofyziky jsou zkoumána významná zemětřesení ve středomořské oblasti. Můžeme jmenovat třeba M5.9 v Aténách 1999 [1], M6.3 u ostrova Lefkáda 2003 [2], sérii otřesů M3.5–4.5 v Korintském zálivu 2008 [3] a M6.3 v pohoří Movri 2008 [4] (M označuje magnitudo). Zemětřesení nejsou zkoumána rutinně, každá událost vede k zlepšení použitých metod. Například u zemětřesení na Lefkádě bylo nalezeno jasné vysvětlení složitosti zdroje dvojitou událostí. Dále byl vytvořen vlastní kód ISOLA pro inverzní úlohu vícebodového zdroje [5].

Katedra dále, ve spolupráci s Universitou v Patrasu, provozuje několik seismických stanic v Řecku<sup>1</sup>. Rovněž jsou k dispozici seismická data ze stovek stanic v Evropě a na Blízkém východě zapojených do projektu ORFEUS. Zpracování dat dosud znamenalo ručně vybrat požadované stanice, stáhnout soubory z datového centra po internetu, případně ještě převést seismogramy do formátu vhodného pro software používaný k dalšímu zpracování. Přirozeně vyvstává potřeba tento proces automatizovat.

Cílem této práce je vytvořit softwarový aparát, který bez interakce s uživatelem zjistí výskyt zemětřesení, určí které stanice jsou vhodné pro studium mechanismu ohniska, z mezinárodního datového centra stáhne data z těchto stanic a převede je do vhodného formátu pro další zpracování. Dále má program přehledně znázornit výsledek práce, nahlásit problémy (např. stanice, které byly mimo provoz, nebo ty, jejichž přístrojové parametry se nedávno změnil) a zaslat upozornění uživatelům.

Uvádím zde ještě stručnou strukturu textu. V kapitole 2 vysvětluji základní pojmy a uvádím stručné informace o seismografu, seismických stanicích a přenosech a ukládání dat. V závěru kapitoly (odstavec 2.4) uvádím popis souborových formátů SEED a SAC. V kapitole 3 se zaměřuji na internetové stránky EMSC a datového centra ORFEUS. Před-

---

<sup>1</sup>Podrobné informace o seismických stanicích katedry geofyziky v Řecku a souvisejícím výzkumu jsou na internetových stránkách <http://seis30.karlov.mff.cuni.cz/>

kládám přehled informací, které lze na stránkách uvedených institucí nalézt, s důrazem na data, která používám v následné práci. Kapitola 4 je rešerší prací týkajících se seismologie v reálném čase a rychlého zpracování zemětřesených dat. Popisuji v ní systémy včasného varování, predikci tsunami a určování momentových tenzorů. Kapitoly 5 a 6 představují vlastní přínos ke studované problematice. V kapitole 5 popisuji vytvořený aparát pro automatické získávání seismických dat. Jedná se o sadu skriptů v jazyce `bash` využívající běžné unixové prostředky i specializovaný geofyzikální software (`rdseed`, `GMT`). Uvádím pouze popis vytvořeného řešení, zdrojové kódy jsou obsaženy v příloze. V kapitole 6 popisuji použití vytvořených programů na získání dat bezprostředně po zemětřesení v severním Alžírsku 23. května 2010.

# Kapitola 2

## Získávání a zpracování seismických dat

V první kapitole zmíním základní pojmy z oblasti seismologie a digitálního zpracování seismických dat. Omezím se pouze na výklad toho, co je potřebné k pochopení následujících kapitol. Vycházím převážně z [6] a [7].

### 2.1 Seismograf

Seismograf je zařízení zaznamenávající kmitavé pohyby zemského povrchu. Jeho základem je setrvačná hmota, která je nějakým způsobem spojena se zemí (například pružinou). Při rozkmitání půdy dojde ke vzájemnému pohybu setrvačné hmoty a země, který je zaznamenáván jako funkce času. U mechanických seismografů byl záznam pořizován např. vyrýváním do vrstvy sazí na pohyblivém pásu papíru. U elektromagnetických seismografů se mechanický pohyb měnil na elektrický signál a ten byl pomocí galvanometru registrován na film. V elektronických seismografech je setrvačná hmota pomocí negativní zpětnovazební smyčky udržována (magneticky či elektrostaticky) v téměř nehybné poloze. Elektrické napětí k tomu potřebné je digitálně zaznamenáváno.

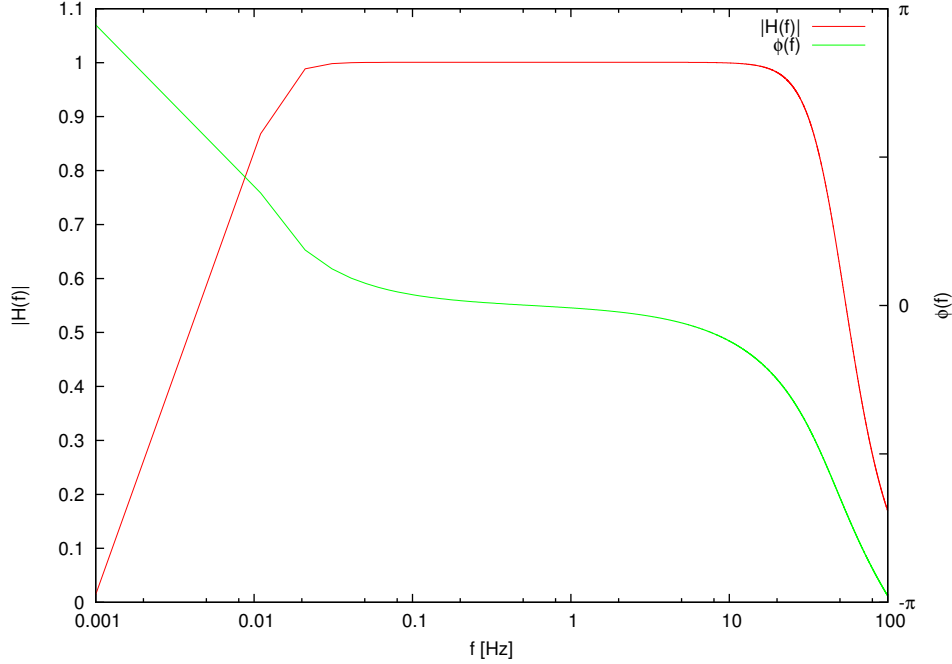
Zaznamenaná data však neodpovídají přímo pohybu země, který nás zajímá. Vztah mezi vstupem  $u$ , kterým může být být posunutí, rychlost nebo zrychlení pohybu půdy, a výstupem  $\xi$  seismografu  $h$  je popsán konvolučním vztahem

$$\xi(t) = u(t) * h(t) . \quad (2.1)$$

Ve spektrální oblasti, čili pomocí Fourierovy transformace tedy

$$X(f) = U(f)H(f) , \quad (2.2)$$

kde  $X(f) = \mathcal{F}(\xi(t))$  atd. Funkci  $h$  nazýváme impulsní odezvou (protože ji dostaneme jako výstup  $\xi$  při vstupu  $u(t) = \delta(t)$ , kde  $\delta$  označuje delta distribuci). Její Fourierův obraz  $H(f)$  je *komplexní přenosová funkce*. Někdy používáme také  $H(\omega)$  kde  $\omega = 2\pi f$  je kruhová frekvence.



Obrázek 2.1: Přenosová funkce širokopásmového přístroje Güralp CMG-3T. Komplexní funkce je znázorněna pomocí amplitudy a fáze. Přístroj má konstantní zvětšení v širokém rozsahu frekvencí, avšak nekonzstantní fázové posunutí.

Přenosovou funkci můžeme vyjádřit pomocí polynomu

$$H(\omega) = \frac{-(i\omega - i\omega_1^N)(i\omega - i\omega_2^N) \dots (i\omega - i\omega_n^N)}{(i\omega - i\omega_1^P)(i\omega - i\omega_2^P) \dots (i\omega - i\omega_p^P)}, \quad (2.3)$$

který substitucí  $s = i\omega$  zjednodušíme na

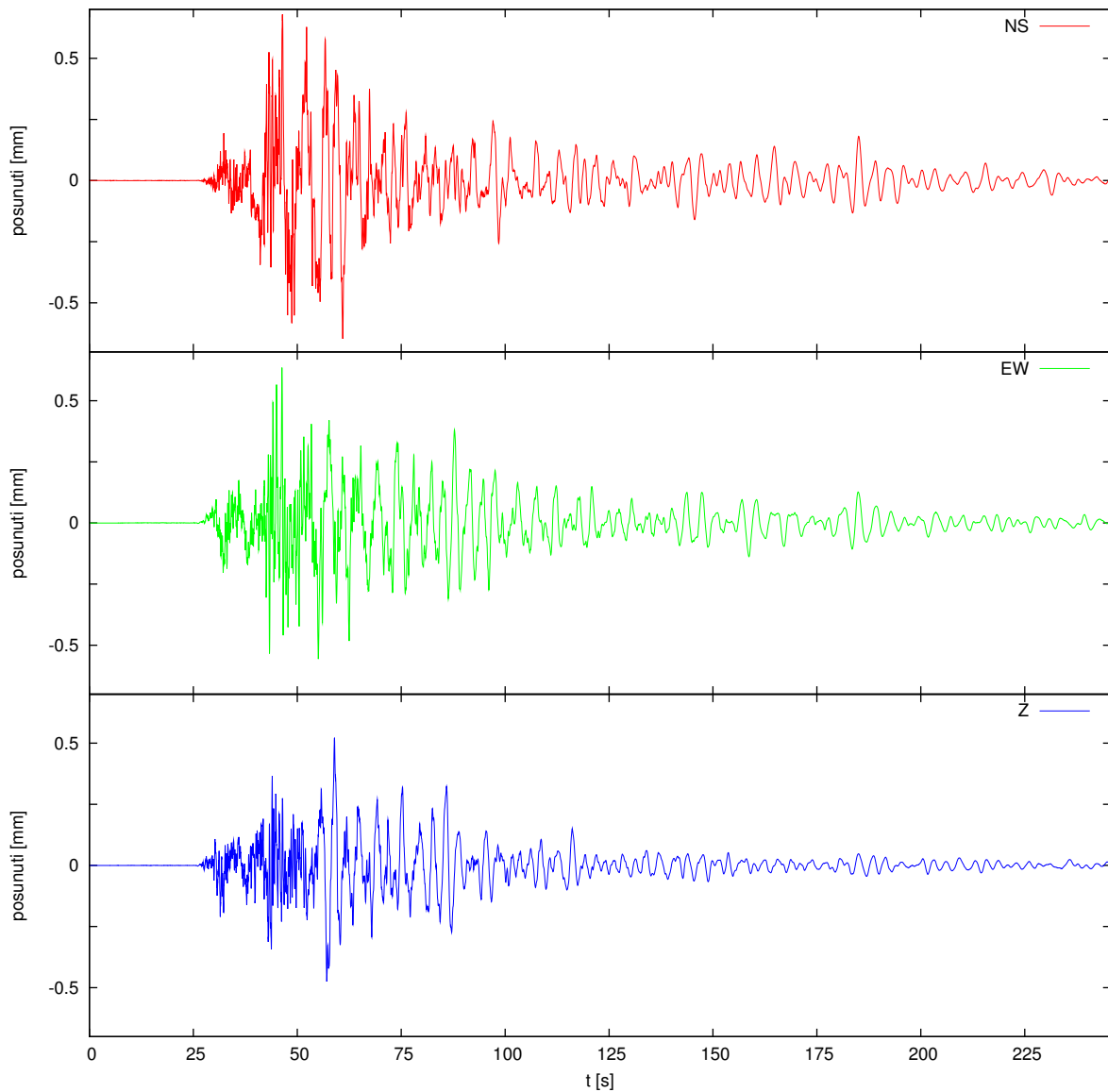
$$H(s) = \frac{-(s - s_1^N)(s - s_2^N) \dots (s - s_n^N)}{(s - s_1^P)(s - s_2^P) \dots (s - s_p^P)}, \quad (2.4)$$

kde  $n$  nazýváme počet komplexních nul s hodnotami  $s_1^N, s_2^N \dots s_n^N$  a  $p$  je počet komplexních pólů (o hodnotách  $s_1^P, s_2^P \dots s_p^P$ ). Počet nul a pólů je obecně různý.

Na výstupu seismografu je napětí, které *AD převodník* mění na digitální signál. Přenosovou funkci musíme tedy přenásobit vhodnou konstantou, abychom měli vztah mezi jedním bitem v záznamu (nazývaným též *count*) a jednotkami pohybu půdy; u rychlosti tedy vztah mezi bitem a metrem za sekundu.

Rozmezí frekvencí, které je přístroj schopen zaznamenat, nazýváme *frekvenčním rozsahem*. Širokopásmové přístroje, *broad-band*, mají většinou rozsah řádově  $10^{-2}$  Hz až  $10^1$  Hz.

Dalším důležitým parametrem přístroje je *dynamický rozsah*, tedy jaké nejslabší a nejsilnější pohyby půdy je schopen přístroj zaznamenat. Rozdíl zrychlení i posunutí mezi silným zemětřesením v blízkosti stanice a seismickým šumem (mikroseismy) je asi 7 řádů. Pohyby půdy mají zrychlení v rozsahu přibližně  $10^{-7}$  až  $2 \cdot 10^0 g$ , kde  $g = 10 \text{ ms}^{-2}$ , posunutí je v rozmezí  $10^{-7}$  až 10 m.



Obrázek 2.2: Zemětřesení o magnitudu  $M_w = 5,3$  v Korintském zálivu 18. ledna 2010. Seismogram pochází z širokopásmového velocigrafu CMG-3T na seismické stanici katedry geofyziky MFF ve 102 km vzdáleném Loutraki. Jde o instrumentálně korigovaný záznam posunutí, to znamená, že pomocí přenosové funkce přístroje byl vypočítán pohyb půdy. Shora dolů vidíme pohyb ve složkách sever-jih, východ-západ a na vertikální ose.

V praxi je velmi obtížné sestavit přístroj s širokým frekvenčním i dynamickým rozsahem. Vedle širokopásmových přístrojů se proto používají přístroje pro silné pohyby, *strong-motion*, nejčastěji se jedná o akcelerografy. Schopnost zaznamenat velké zrychlení je u nich vykoupena vyšším vnitřním šumem, zejména je obtížné jimi zaznamenat pohyby půdy s dlouhou periodou.

Pohyb půdy je obecně trojrozměrný, zaznamenáváme jej tedy ve třech *složkách*. Obvykle jsou složky orientovány podle svislice a vodorovně ve směrech sever–jih a východ–západ. Označujeme je  $Z$ ,  $N$  a  $E$ . Konvencí jsou stanoveny kladné směry os vzhůru, k severu a k východu.

## 2.2 Seismická stanice

Ideálně umístěný seismograf je pevně spojený se skalním podložím na místě s minimálním šumem. V praxi se přístroje umísťují v mělkých (několik metrů hlubokých) šachtách, ve starých štolách a vrtech, případně v hlubokých sklepích domů (nejlépe na betonový pilíř zapuštěný do skalního podloží staticky nespojený s okolím). Šum se snižuje s hloubkou pod povrchem i směrem do nitra skalního masivu.

Abychom měli úplný obraz pohybů země, je vhodné mít na jedné stanici širokopásmový přístroj i přístroj pro silné pohyby [8].

## 2.3 Seismická data

Rozlišujeme *spojitou* a *spouštěnou registraci*. Při spojitě registraci se data z přístroje s vysokou vnitřní vzorkovací frekvencí řídce převzorkují (tzv. decimace) s použitím anti-alias filtru, čímž se výrazně snižuje objem dat. Typické vzorkovací frekvence zaznamenávaných dat jsou 20–100 Hz, v některých sítích až 250 Hz. Objem dat spojitěho záznamu je obrovský, proto se komprimuje vhodným algoritmem.

Při moderních způsobech spouštěné registrace se v paměti uchovává nějaký úsek záznamu (kruhový buffer) a vyhodnocuje se, zda pohyb půdy splní zadanou podmínku. Pokud ano, obsah bufferu se zapíše do trvalé paměti. Výhodou tohoto způsobu, oproti jednoduchému spuštění zaznamenávání silným pohybem půdy, je, že neztrácíme informaci o slabých začátcích otřesů. Spouštěná registrace se používá zejména u přístrojů pro silné pohyby.

Záznamy se buďto na místě ukládají na pevné disky, nebo jsou v reálném čase přenášeny po různých telekomunikačních linkách (např. pomocí družicového spojení) do určitých mezistanic a dále zpravidla po internetu do datového centra.

Jako *metadata* označujeme potřebné informace o stanici, která nám umožní dát binárním datům fyzikální význam a použít je při výzkumu zemětřesení. Jsou to parametry popisující přenosovou funkci a vzorkovací frekvenci a zeměpisná poloha stanice včetně nadmořské výšky.

## 2.4 Formáty seismických dat

### 2.4.1 SEED

Formát SEED (Standard for the Exchange of Earthquake Data) je mezinárodní standard pro výměnu seismických dat. Používá se zpravidla pro data přímo ve formě, jak byla na stanici zaznamenána, bez dalších úprav; hovoříme o nezpracovaných či surových datech. Vznikl jako reakce na problémy, které působilo velké množství vzájemně nekompatibilních formátů jednotlivých institucí, jež přibližně od roku 1970 začaly používat digitální záznamy. V roce 1987 jej FDSN<sup>1</sup> a IASPEI<sup>2</sup> přijaly za svůj standard, čímž se stal široce používaným [19].

SEED umožňuje v jediném souboru uložit více složek z jedné či několika stanic spolu s dalšími potřebnými informacemi – například polohou stanic, typem zařízení, přenosovou funkcí a určením časového období pořízení dat. Standard umožňuje uvést jen některé z těchto informací, čímž dostáváme dvě široce používané varianty formátu: *dataless SEED* obsahuje pouze parametry stanice a *miniSEED* pouze samotné seismogramy. Soubor obsahující obojí nazýváme kompletním SEEDem.

Soubor typu SEED (physical volume) se skládá z jedné či více logických částí (logical volume). Logická část začíná hlavičkami (control headers), které ve formátu ASCII obsahují informace o logické části, kanálech dané stanice a datech. Následují surová data, odpovídající seismogramům jednotlivých stanic, každá v několika složkách [19].

### 2.4.2 SAC

Soubor ve formátu SAC (Seismic Analysis Code Data File Format) obsahuje, na rozdíl od formátu SEED, vždy pouze jednu složku z jedné stanice. Formát existuje v binární a ASCII variantě.

SAC soubor obsahuje hlavičku s pevnou délkou, kde jsou uvedeny například časové údaje začátku záznamu i seismické události, poloha stanice i epicentra a magnitudo. Následuje jedna či dvě datové sekce. Pro časový záznam, což je obvyklé použití, obsahuje jedinou sekci. V případě spektrálních dat první sekce obsahuje buď amplitudu nebo reálnou složku, druhá fázi či imaginární složku [20].

---

<sup>1</sup>International Federation of Digital Seismograph Networks

<sup>2</sup>International Association for Seismology and Physics of the Earth's Interior

# Kapitola 3

## Seismická data dostupná na internetu

V této kapitole se pokusím o stručné shrnutí, jaká seismická data jsou dostupná na internetu, s důrazem na ta data, která jsou používána v mé práci či s tímto tématem souvisí.

### 3.1 EMSC

CENTRE SISMOLOGIQUE EURO-MÉDITERRANÉEN  
EUROPEAN-MEDITERRANEAN SEISMOLOGICAL CENTRE  
<http://www.emsc-csem.org/>

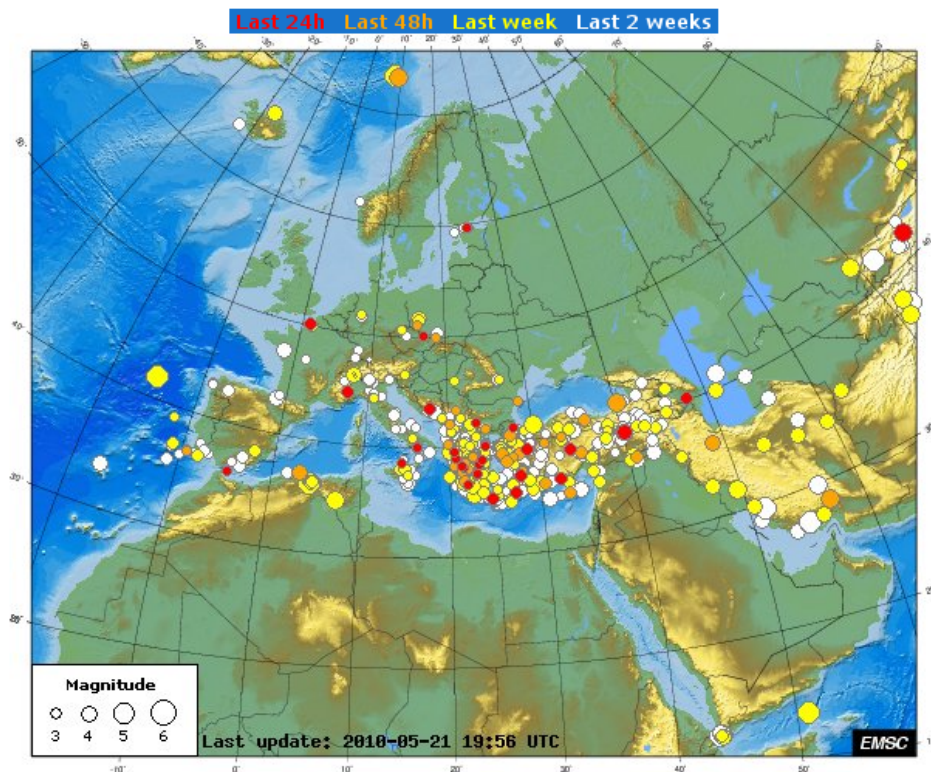
EMSC je nevládní nezisková organizace, jejímiž členy jsou seismologické instituce ve středomořské oblasti a jejím okolí. Z automatického i manuálního zpracování dat v několika desítkách různých seismických sítí získává vypočtené parametry zdroje (čas vzniku, lokaci epicentra, hloubku, magnitudo), časy příchodu jednotlivých vln na seismické stanice a řešení momentového tenzoru. Tato data dále zpracovává a zveřejňuje bezprostředně po výskytu zemětřesení [9]. EMSC získává jen základní data o jevech, nikoli seismogramy.

Na stránkách EMSC [21] nalezneme přehlednou mapu seismických jevů v poslední době (barevně rozlišené z posledních 24 a 48 hodin, posledního týdne a dvou týdnů, viz obrázek 3.1) a tabulkové přehledy dále do minulosti. Ke každému zemětřesení jsou k dispozici základní informace, mapy s vyznačeným epicentrem a seismicitou v oblasti a odkazy na instituce, které poskytly informaci.

Dále je na stránkách přehled významných zemětřesení, kde jsou uvedeny slovní popisy, mapy s vyznačením hlavních zlomových linií a další informace. Další sekci jsou určené momentové tenzory zemětřesení, kterým se věnujeme v odstavci 4.3. V sekci, kterou EMSC nazývá „pouze pro seismology“, nalezneme k seismické události automaticky i manuálně generované zprávy od všech pracovišť, které se jí zabývaly. Můžeme se dostat přímo k časům příchodu vln na jednotlivé stanice.

Pro nás je nejdůležitější sekce „Earthquake Notification Service“. Zde si můžeme založit účet, definovat oblast zájmu a minimální magnitudo a systém nám bude automaticky zasílat e-mailem upozornění na všechna zemětřesení odpovídající zadaným parametrům.





Obrázek 3.1: Mapa zaznamenaných seismických jevů z úvodní stránky EMSC [21].

## 3.2 ORFEUS

OBSERVATORIES AND RESEARCH FACILITIES FOR EUROPEAN SEISMOLOGY  
<http://www.orfeus-eu.org/>

ORFEUS je nezisková organizace, jejímž cílem je koordinace a propagace digitální širokospektrální seismologie ve středomořské oblasti. Provozuje ORFEUS DATA CENTRE, které v reálném čase shromažďuje, archivuje a poskytuje seismogramy z mnoha seismických sítí. Dále je jeho součástí několik pracovních skupin, které se starají o dostupnost dat, technickou podporu a seismický software [22].

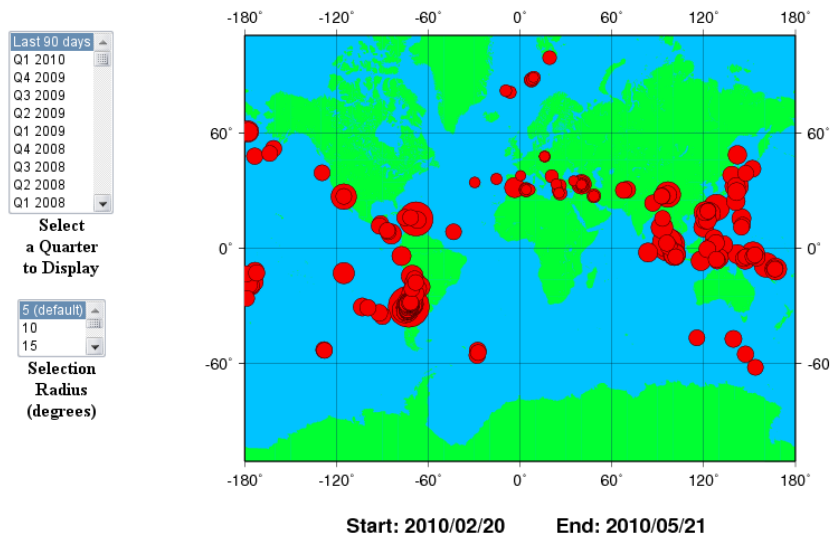
Těžiště stránek leží na seismických datech. Prostřednictvím více různých rozhraní můžeme získat libovolný úsek seismogramu libovolné stanice z období od roku 2002 do současnosti, metadata stanic i sady dat ke konkrétním zemětřesením.

Jsou tři cesty, jak se dostat k potřebným datům. První je FTP server, kde nalezneme všechna zmíněná data. Seismogramy jsou rozdělené do úseků po dnech; podstatnou nevýhodou je, že úsek ze současného dne (tedy soubor, který stále narůstá) není možné stáhnout.

Druhou cestou jsou automatické systémy na vyřizování e-mailových požadavků, mj. služba BREQFAST. Po zaslání požadavku s uvedením kódů stanic, požadovaných složek, počátečního a koncového času a formátu souboru obdržíme odpověď s odkazem, odkud si data můžeme stáhnout. Tuto službu využívám v systému automatického stahování dat (viz kapitola 5).

The map below displays the most recent 90 events or the selected quarter in the ORFEUS POND data repository.

Click on the map to display a listing of events within the selection radius OR [list all events](#).



Obrázek 3.2: Úvodní stránka rozhraní WILBER II datového centra ORFEUS.

Třetí možností získání dat jsou webová rozhraní. Rozhraní WILBER II (viz obrázek 3.2) považuji za nejpřehlednější a má nejširší možnosti. Na jeho úvodní straně vybereme období a na mapě se nám zobrazí zaznamenaná zemětřesení. Po zvolení konkrétního jevu si vybereme ze seznamu stanic, jež zemětřesení zaznamenaly, ty, které nás zajímají. Zadáme složky, o které máme zájem, zvolíme fázi *P* či *S*, kolik minut seismogramu před a po příchodu dané fáze chceme dostat a požadovaný formát souboru. Obvykle do několika minut po potvrzení požadavku dostaneme e-mailem upozornění, že si data můžeme stáhnout.

Na stránkách nalezneme též sekci „software“, kde je přehled mnoha programů užitečných v seismologii. Zaměřuje se na nekomerční software, zejména pod některou z GNU licencí<sup>1</sup>.

<sup>1</sup>GNU GPL a jí podobné licence dávají uživatelům právo svobodně užívat, šířit a modifikovat software a zavazují je šířit odvozená díla pod stejnou licenci.

# Kapitola 4

## Důvody pro rychlé zpracování dat

V návaznosti na zmínky o přenosu dat ze seismických stanic do datového centra v reálném čase vysvětlím význam rychlého zpracování dat. Zmíním několik významných aplikací, které jsou důležité pro obyvatelstvo v seismicky ohrožených oblastech, i ty, které souvisí s pochopením mechanismu ohniska a výzkumem zemětřesení.

Od seismologie v reálném čase (*real time seismology*) a systémů včasného varování, kdy je od prvních zaznamenaných signálů maximálně několik desítek sekund na vyhodnocení dat, přejdeme k predikci tsunami, u které jsou na určení rizika desítky minut.

Posledním odstavcem je určování momentových tenzorů zemětřesení, které se děje v řádu několika hodin. V této oblasti spolupracuje katedra geofyziky s universitou v Patrasu. Programy vytvořené v rámci této bakalářské práce mají mít uplatnění právě při určování momentových tenzorů a určování parametrů ohniska.

### 4.1 Systémy včasného varování

Systémy včasného varování (*early-warning systems*) mají za cíl:

1. minimalizovat ztráty na životech a majetku v hustě zalidněných oblastech a
2. odhadem velikosti otřesů a s tím souvisejících škod pomoci koordinovat záchranné práce bezprostředně po zemětřesení.

Při zpracování vycházím hlavně z [11] a dále z [12].

Systémy jsou založeny na faktu, že  $S$ -vlny a povrchové vlny, které působí největší škody, se šíří přibližně poloviční rychlostí než  $P$ -vlny, a ty mají mnohem menší rychlost než elektrické signály v kabelech či elektromagnetické vlny ve vzduchu.

Systém je tvořen sítí akcelerografů, z nichž jsou data přenášena do centrální stanice, kde jsou v reálném čase vyhodnocována. Pokud je zaznamenáno potenciálně nebezpečné zemětřesení, jsou data zaslána uživatelům.

Systémy zajišťují plně automatické reakce předcházející škodám i přímé varování obyvatelstva.

Příkladem z první skupiny je zastavování vlaků na vysokorychlostních i konvenčních železnicích v Japonsku (které funguje od roku 1983), zastavení nukleární reakce zasunu-

tím regulačních tyčí u Ignalinské jaderné elektrárny v Litvě (v provozu od roku 1999, elektrárna je od roku 2009 uzavřena) a zavírání plynovodů a řízené zastavování strojů.

První systém přímého varování obyvatelstva byl zaváděn od roku 1991 v Ciudad de México (*Mexico City*). Zahrnuje varování žáků ve všech typech škol, vysílání seismického varování v rozhlasových stanicích a další způsoby. Vyžaduje, aby obyvatelé byli předem vyškoleni, co v případě varování dělat, a aby měli nacvičený správný postup.

## 4.2 Predikce tsunami

Vlny tsunami vznikají při zemětřeseních, která jsou provázena nevratným posunutím mořského dna. Šíří se oceánem rychlostí stovek kilometrů za hodinu a při nárazu na pobřeží dosahují výšky až desítek metrů, čímž působí značné škody na životech i majetku. Seismické vlny se od místa zlomu šíří řádově rychleji než tsunami, můžeme je tedy využít k určení ohrožených míst na pobřeží a varování obyvatel.

Potřebujeme plně automatický systém, který je schopen ze seismických dat mnoha stanic určit místo zemětřesné události, magnitudo a potenciál pro vznik tsunami (ne každé podmořské zemětřesení je provázeno vznikem tsunami). Metoda, kterou vyvinul A. Lomax a kol. [10], využívá seismogramů z míst vzdálených ( $30^\circ$ – $90^\circ$ ) a analyzuje signál od příchodu  $P$ -vlny do příchodu  $S$ -vlny. Měří vyzářenou seismickou energii a určuje dobu trvání zemětřesení pomocí vysokofrekvenční analýzy signálu  $P$ -vlny. Z těchto dvou veličin pak určuje seismický moment. Další určená veličina  $M_{ED}$ , *energy-duration magnitude*, je přepočítána na momentové magnitudo  $M_w^{CMT}$  a může být určena do 20 minut od vzniku seismické události. Z poměru vyzářené energie a seismického momentu je možné určit, zda se jedná o zemětřesení doprovázené vznikem tsunami.

Kromě robustního aparátu na zpracování dat potřebujeme i kvalitní a spolehlivé technické řešení, protože zemětřesení může způsobit například poškození podmořských telekomunikačních kabelů či výpadek elektrické sítě. Proto se u stanic zapojených v systémech varování před tsunami (*tsunami warning system*) používá satelitní přenos dat a samozřejmě i záložní zdroj elektrické energie [24].

Po určení místa vzniku tsunami je nutné za pomoci počítačového modelování šíření těchto vln, zejména s ohledem na tvar dna a pobřeží, určit ohrožené oblasti a následně zajistit jejich evakuaci.

## 4.3 Určování momentových tenzorů

Momentový tenzor je důležitou veličinou popisující velikost zemětřesení a mechanismus ohniska. Definujeme jej jako objemový integrál

$$M_{jk}(t) = \int_V \xi_k f_j(\xi, t) d\xi, \quad (4.1)$$

kde  $f_j(\xi, t)$  je objemová síla. Čistě střížné zemětřesení v izotropním prostředí má momentový tenzor ve tvaru dvojitého dipólu (*double-couple*). Obrácenou úlohu zdroje – určení momentového tenzoru ze seismických dat – je výrazně jednodušší řešit pro obecný

(nestřižný) zdroj, protože taková úloha je lineární. Nesmykové složky tenzoru jsou však nestabilními parametry, takže jsou použitelné jen výjimečně, pokud máme data z vhodné sítě a přesný model prostředí [13].

V následujícím textu vycházím z [14], [15] a [16]. Momentový tenzor představuje mnohem více informací o mechanismu zemětřesení než magnitudo a poloha epicentra, navíc dává náhled do mechanismu zlomu. Známe-li jej nedlouho po zemětřesení, je ho možné použít, spolu s konečnými modely zdroje, k určení velikosti otřesů na různých místech na povrchu, což je zásadní pro koordinaci záchranných prací.

Pro automatické určení je třeba nejdříve vybrat seismické stanice, které jsou vhodné vzdálenostně a azimutálně rozmístěny okolo epicentra a jejichž záznamy nejsou zatíženy šumem. Následně jsou data středně- a dlouho-periodicky filtrována, protože vlny s delší periodou jsou méně citlivé na odchylky modelu prostředí od skutečnosti. Pro inverzní úlohu určení momentového tenzoru se používá více různých metod a algoritmů, například kód ISOLA [5]; jejich popis přesahuje možnosti této práce. Obvykle se inverzním výpočtem určuje momentový tenzor pro různé hloubky, pro každou se spočítá přímá úloha šíření seismických vln a hledá se hloubka s nejlepší shodou s pozorovanými daty.

Pokud není dosažena požadovaná shoda, je možné nahradit stanici s největší odlišností předpovídaných a naměřených dat za jinou a výpočet opakovat.

Dále je nutné automaticky posoudit kvalitu nalezeného řešení a v závislosti na ní výsledek okamžitě zveřejnit, ponechat k manuálnímu posouzení či jej nezveřejňovat vůbec.

Důležitou otázkou je, jak je rychlé určování momentových tenzorů přesné. Na toto částečně odpovídá Roumelioti v [17], která srovnává momentové tenzory určené částečně automatickou metodou na Aristotelově universitě v Soluni s odpovídajícími výsledky jiných pracovišť (National Observatory of Athens, Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, University of Patras Seismological Laboratory a Swiss Seismological Service), které každé používá jinou metodu. Výsledkem práce je, že 97 % momentových tenzorů určených na universitě v Soluni je srovnatelných s většinou nezávislých výsledků. Shoda se týká pochopitelně jen smykové části mechanismu, která je velmi robustní veličinou. Je to způsobeno použitím nízkých frekvencí, zpravidla  $f < 0,1$  Hz.

Programy vytvořené v rámci této práce mají za cíl usnadnit získání dat pro studium některých významných středomořských zemětřesení, která jsou na katedře geofyziky zkoumána. Bylo by možné je použít v rámci aparátu na částečně či plně automatické určování momentových tenzorů.

# Kapitola 5

## Popis vytvořených programů

V této kapitole se zaměřím na popis softwarového aparátu, který jsem napsal pro účely této práce. Jedná se o sadu skriptů, které využívají běžných unixových prostředků i specializovaných geofyzikálních programů. Budu popisovat pouze funkce programů a uvedu schéma a ukázky vstupu a výstupu. Kompletní zdrojové kódy a komentář použitých programátorských postupů jsou v příloze. Všechny vytvořené skripty jsou dostupné na internetové stránce <http://geo.mff.cuni.cz/~vackar/bc/>.

### 5.1 Použité technologie

Úlohu jsem řešil na serverech s operačním systémem GNU/Linux, distribucí Mandriva.

Pro všechny skripty jsem zvolil jazyk `bash`, který kombinuje výhody unixového shellu a skriptovacího jazyka. Z první kategorie jsem ocenil zejména přímočaré spouštění dalších programů, snadnou práci s jejich vstupem a výstupem a přímočarou manipulaci se soubory pomocí standardních příkazů operačního systému. Z druhé potom široké možnosti v oblasti podmíněných větví, cyklů, zabudované aritmetiky a práce s regulárními výrazy<sup>1</sup>.

Předání e-mailů vytvořeným skriptům jsem zajistil pomocí souboru `.forward`, který při umístění v domovském adresáři zajistí předání došlé pošty na zadané adresy či v něm uvedeným programům.

Pro zpracování seismogramů používám program `rdseed` (Iris SEED reader) [26], kterým konvertuji soubory z formátu SEED. Mapu s vyznačením epicentra a stanic poskytujících data vykresluji pomocí sady mapových nástrojů GMT [18].

Dále jsou v řešení použity tyto programy:

**mail** řádkový e-mailový klient umožňující posílat ze skriptů e-maily

**wget** neinteraktivní stažení souborů z internetu

**ssh** vzdálené přihlášení na jiné počítače

**bc** program pro matematické výpočty s libovolnou přesností

---

<sup>1</sup>Regulární výraz je řetězec, definující celou množinu řetězců. Lze jej využít k vyhledání textu splňujícího určitá kritéria, rozdělení takového textu definovaným způsobem na podřetězce či nahrazování částí textu [25].

## 5.2 Hlídání zemětřesení, reakce na e-maily

Informace o zemětřeseních získáváme z datového centra EMSC<sup>2</sup>, které uveřejňuje aktuální informace na svých internetových stránkách a nabízí též zasílání e-mailů s upozorněním. Pro automatické zpracování dat používáme druhou možnost, přičemž specifikujeme geografické hranice zájmové oblasti a minimální magnitudo.

Pro představu uvádím (kráceně) upozornění na zemětřesení ve východním Turecku 8. března 2010.

```
Date: Mon, 08 Mar 2010 02:51:44 +0000
From: EMSC <alert@emsc-csem.org>
Subject: EARTHQUAKE: Magnitude 6.1 EASTERN TURKEY 08/03/2010 02:32 (UTC)
```

EMSC earthquake notification

Magnitude 6.1 08/03/2010 02:32 EASTERN TURKEY

A magnitude 6.1 earthquake has occurred EASTERN TURKEY at:  
38.78N 40.13E Depth 10km 08/03/2010 at 02:32:34 (Universal Time)

Earthquake location with respect to nearby cities:

...

Každý došlý e-mail je zpracováván skriptem `parsemail.sh` na fakultním serveru. Je určen odesílatel a pokud se shoduje s některým z definovaných, je provedena určená akce (kromě upozornění od EMSC reaguje skript také na zprávy o vyřízení požadavků na seismogramy od služby BREQFAST, viz odstavec 5.4).

V případě zprávy o výskytu zemětřesení skript nalezne v e-mailu přesný čas události a magnitudo a předá tyto údaje skriptu `mailrequest.sh`, který vyšle požadavek na seismická data službě BREQFAST. Událost je navíc zapsána do logů.

## 5.3 Určení stanic, vyslání požadavku

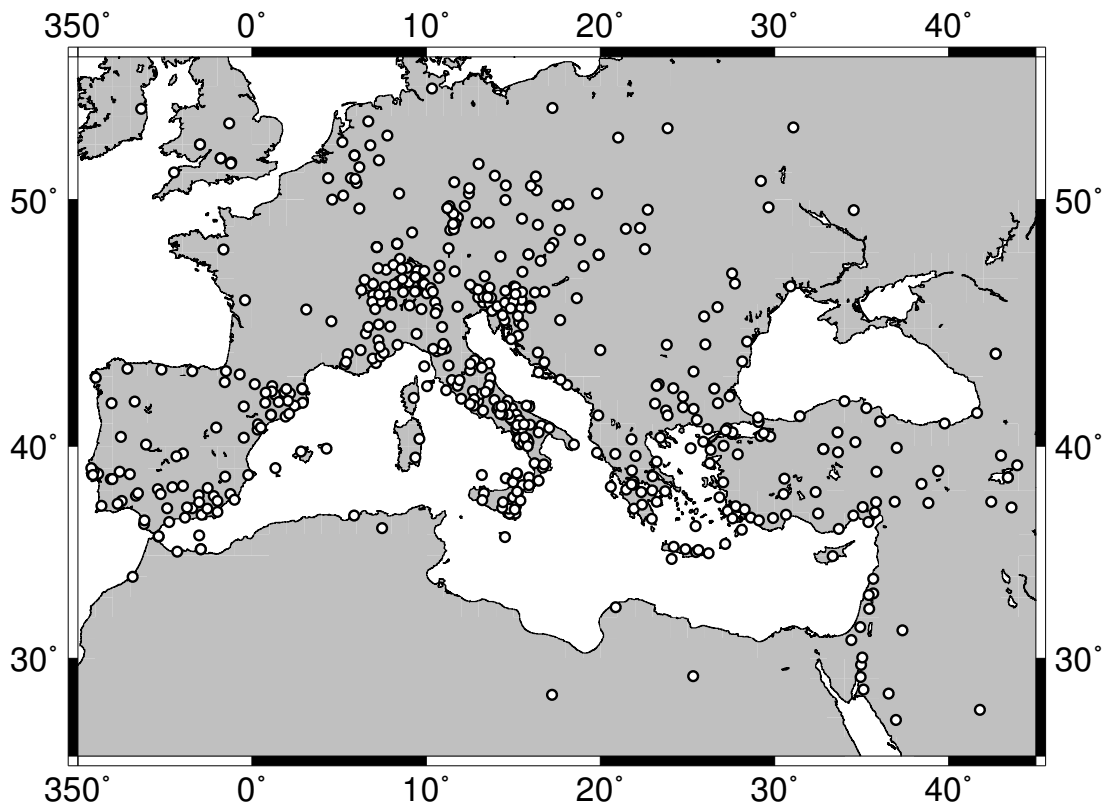
Úkolem skriptu `mailrequest.sh` je nalézt v e-mailu geografické souřadnice epicentra zemětřesení, načíst z konfiguračního souboru seznam seismických stanic, vybrat ty, jejichž data nás budou zajímat, a odeslat e-mail službě BREQFAST datového centra ORFEUS s požadavkem na výřez ze seismogramů okolo dané události.

Čas události a magnitudo zemětřesení jsou parametry při spuštění, požadované délky seismogramů před a po události a formát souborů jsou konfigurovatelné. Skript po spuštění vyhledá v e-mailu souřadnice epicentra a z magnituda  $M_w$  vypočte maximální úhlovou vzdálenost stahovaných stanic jako  $\alpha_{max} = 4^\circ + (M_w - 4) * 2^\circ$ . To nám zajistí, že pro větší zemětřesení budeme mít data z více míst ve větším okruhu.

Následně načte ze souboru seznam několika stovek seismických stanic (viz obrázek 5.1), pro každou spočte úhlovou vzdálenost od epicentra  $\alpha$  a vybere takové, kde  $\alpha < \alpha_{max}$ .

---

<sup>2</sup>European-Mediterranean Seismological Centre, <http://www.emsc-csem.org/>



Obrázek 5.1: Mapa stanic zanesených v databázi programu, ze kterých skript vybírá ty, které leží v okolí epicentra zemětřesení. Jde o širokopásmové stanice zapojené do projektu ORFEUS [27].

Nyní vytvoří požadavek na seismogramy z vybraných stanic a odešle jej službě BREQ-FAST datového centra ORFEUS. Ukázku takového požadavku uvádím níže. Za hlavičkou následují řádky s jednotlivými stanicemi. CLZ GR je kód stanice a sítě, následuje čas počátku a konce seismogramu a BH? označuje všechny tři složky širokopásmového seismogramu. Význam jednotlivých parametrů lze nalézt například v [23].

To: breq\_fast@knmi.nl  
Subject:

```
.NAME Jiri Vackar
.INST Charles University
.EMAIL vackar@karel.troja.mff.cuni.cz
.LABEL vackar
.END
```

```
CLZ GR 2009 11 01 12 11 21.0 2009 11 01 13 11 21.0 1 BH?
TNS GR 2009 11 01 12 11 21.0 2009 11 01 13 11 21.0 1 BH?
```



## 5.4 Zpracování odpovědi, stažení a konverze dat

Jak bylo popsáno v odstavci 5.2, skript `parsemail.sh` vyhodnotí každý došlý e-mail. Pokud pochází od služby BREQFAST, vyhledá v těle e-mailu řádek, který je odkazem na FTP server, požádá o tuto adresu a obdrží výpis FTP adresáře, kde jsou uložena všechna data, o která jsme žádali. Skript vybere poslední, tedy nejnovější, soubor s příponou `.seed` a předá jeho celou adresu skriptu `orfeus.sh`.

Před tím ještě v e-mailu vyhledá řádky s hlášením chyb a zapíše je do logu. Nejčastější chybou je, že data pro některé ze stanic nejsou k dispozici. To může být tím, že stanice byly mimo provoz, datové centrum vyhodnotilo jejich záznamy jako nekvalitní či přenos dat nebyl funkční.

Skript `orfeus.sh` vytvoří adresář pojmenovaný aktuálním časem a do něj stáhne zadaný soubor. Abychom bez ohledu na řazení souborů na první pohled viděli, kde máme poslední stažená data, vytvoří symbolický odkaz pojmenovaný `last` směřující do tohoto adresáře. Nyní pomocí programu `rdseed` (IRIS SEED Reader<sup>3</sup>, Release 4.7.5) ze souboru ve formátu SEED extrahuje pro každou stanicí a všechny její složky seismogram ve formátu SAC, takzvaný *resp file* s parametry zařízení a soubor s póly a nulami popisující přenosovou funkci. Nyní máme v jednom adresáři pro každou složku každé stanice tři soubory, což by v kombinaci s jejich dlouhými a nepřehlednými názvy působilo zmatek. Proto skript vytvoří pro každou stanicí adresář nazvaný jejím kódem a v něm podadresáře pojmenované `sac`, `resp` a `poles.zeros` a do nich všechny získané soubory roztřídí.

Při tom v metadatech nalezne čas poslední změny a pokud došlo v poslední době ke změně parametrů zařízení, upozorní na to v logu i v závěrečném e-mailu (například `Metadata of station MN.CUC changed on 2008,211`). To zabrání tomu, aby byla při následném ručním zpracování data použita s neaktuálními parametry, což by vedlo k chybným výsledkům.

Nakonec program do logu zapíše, pro jaké stanice máme data stažená.

## 5.5 Zaslání upozornění, výstup

Nyní program pomocí sady nástrojů GMT [18] vykreslí mapu, kam zanesep epicentrum a stanice, ze kterých jsou stažená data. Na obrázku 5.2 je mapa vytvořená při stahování dat o zemětřesení 26. 3. 1010 u pobřeží západního Turecka.

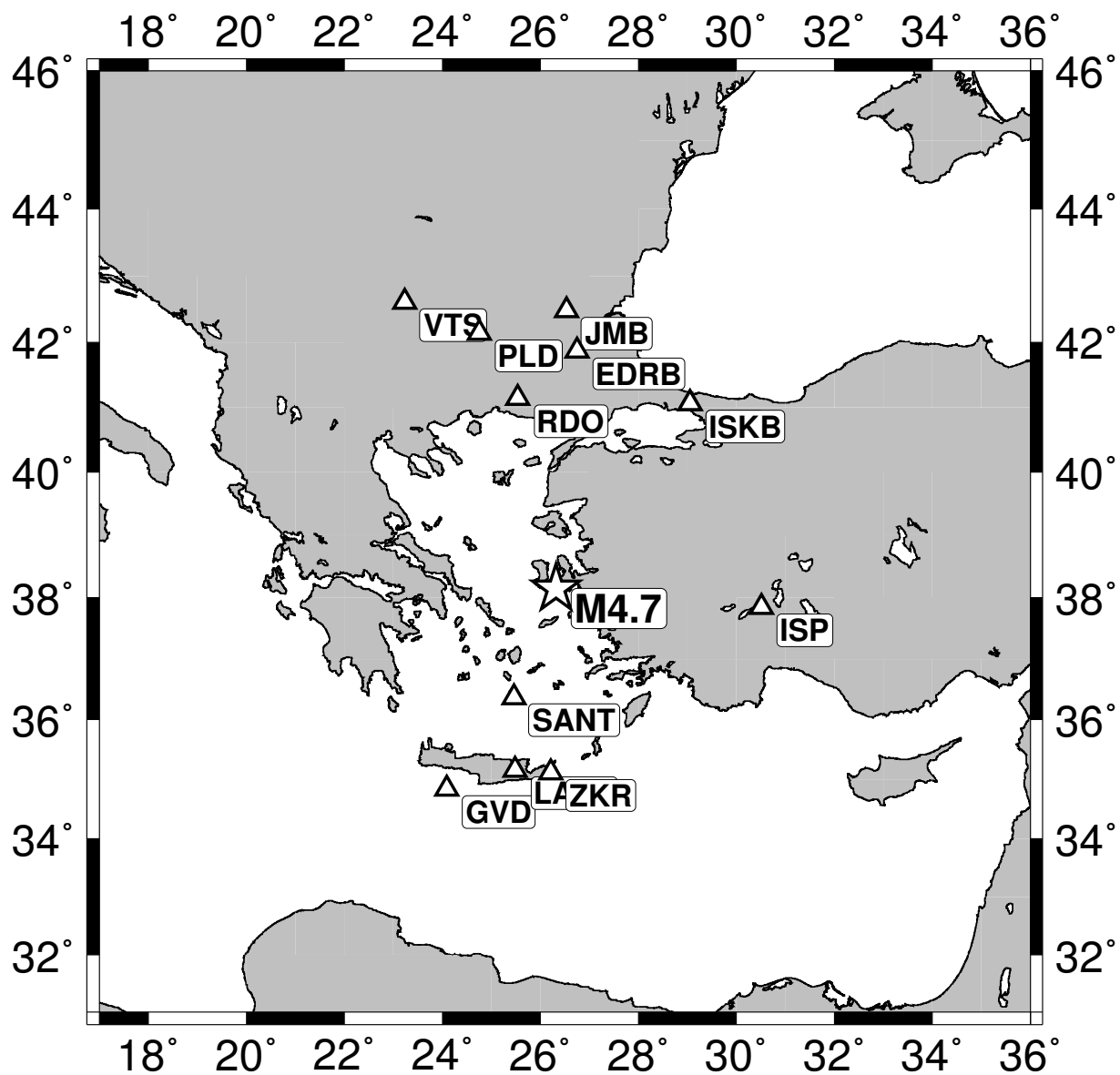
Závěrečnou částí úkolu je zaslání informace, že jsou data k dispozici, a nahlášení případných chyb, ke kterým došlo v průběhu úkolu.

Chyby i důležité události při běhu jsou zaznamenány do logu. Ten existuje v textovém i HTML formátu, který je dostupný prostřednictvím fakultního web serveru.

Závěrečný e-mail je zaslán na zadané adresy a obsahuje název adresáře s daty, seznam stažených stanic, případné upozornění na změnu parametrů přístrojů a odkaz na log.

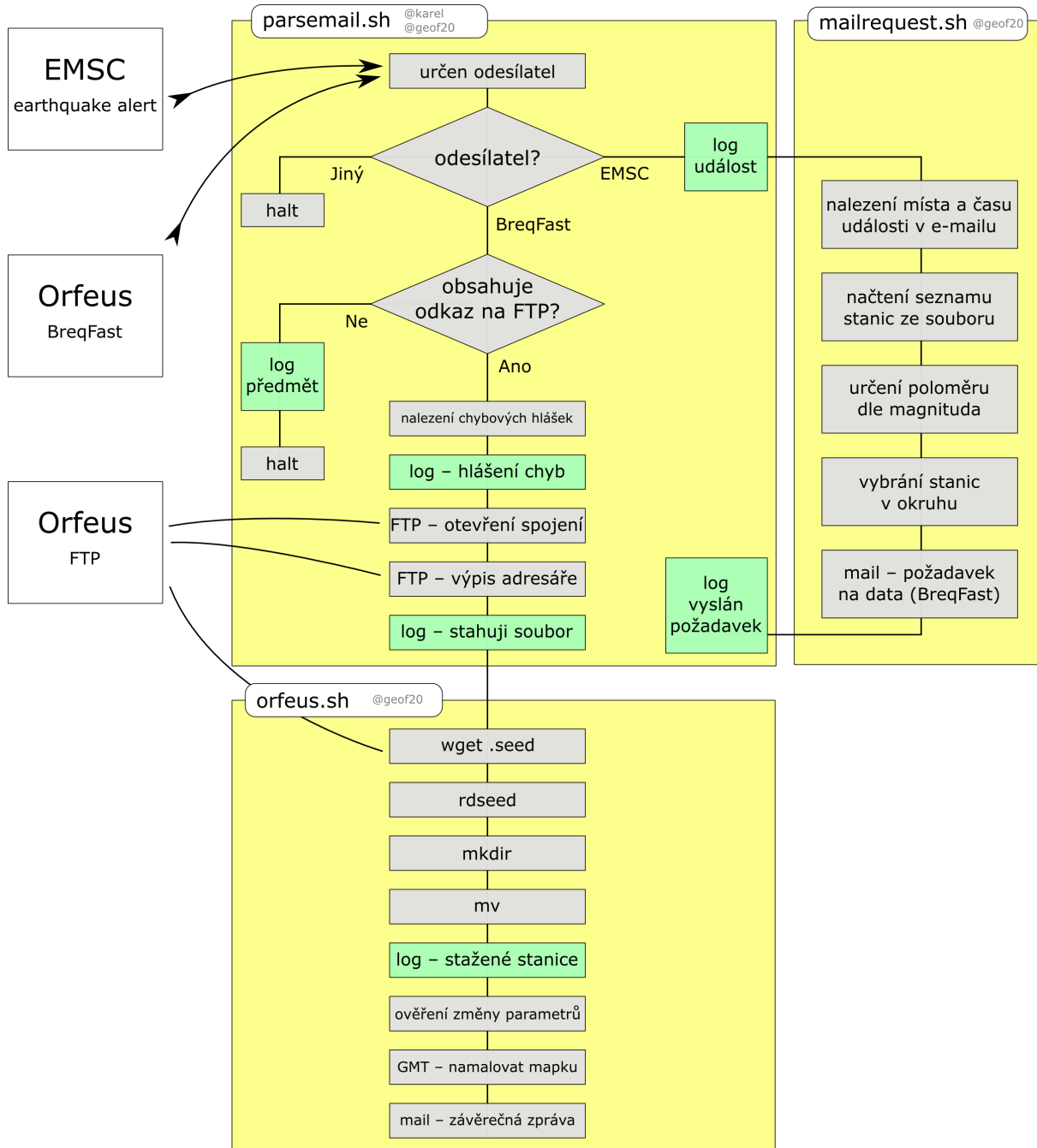
---

<sup>3</sup><http://www.iris.edu/manuals/rdseed.htm>



Obrázek 5.2: Automaticky vykreslená mapa s vyznačeným epicentrem a stanicemi, ze kterých byla stažena data po zemětřesení  $M_w = 4,7$  u pobřeží západního Turecka 26. 3. 2010 18:35 (UTC).

Obrázek 5.3: Blokové schéma funkce vytvořených skriptů



# Kapitola 6

## Zpracování konkrétního zemětřesení

### 6.1 Zemětřesení v severním Alžírsku 23. května 2010

Prvním zemětřesením, pro které byla získána seismická data definitivní verzí programu, bylo zemětřesení s epicentrem 135 km jihovýchodně od Alžíru. Dle zprávy EMSC mělo parametry, které uvádím v následující tabulce.

čas vzniku	2010-05-23 v 13:28:17,9 světového času
magnitudo	$M_b = 4,9$
poloha epicentra	35,84° s. š., 4,12° v. d.
hloubka	10 km

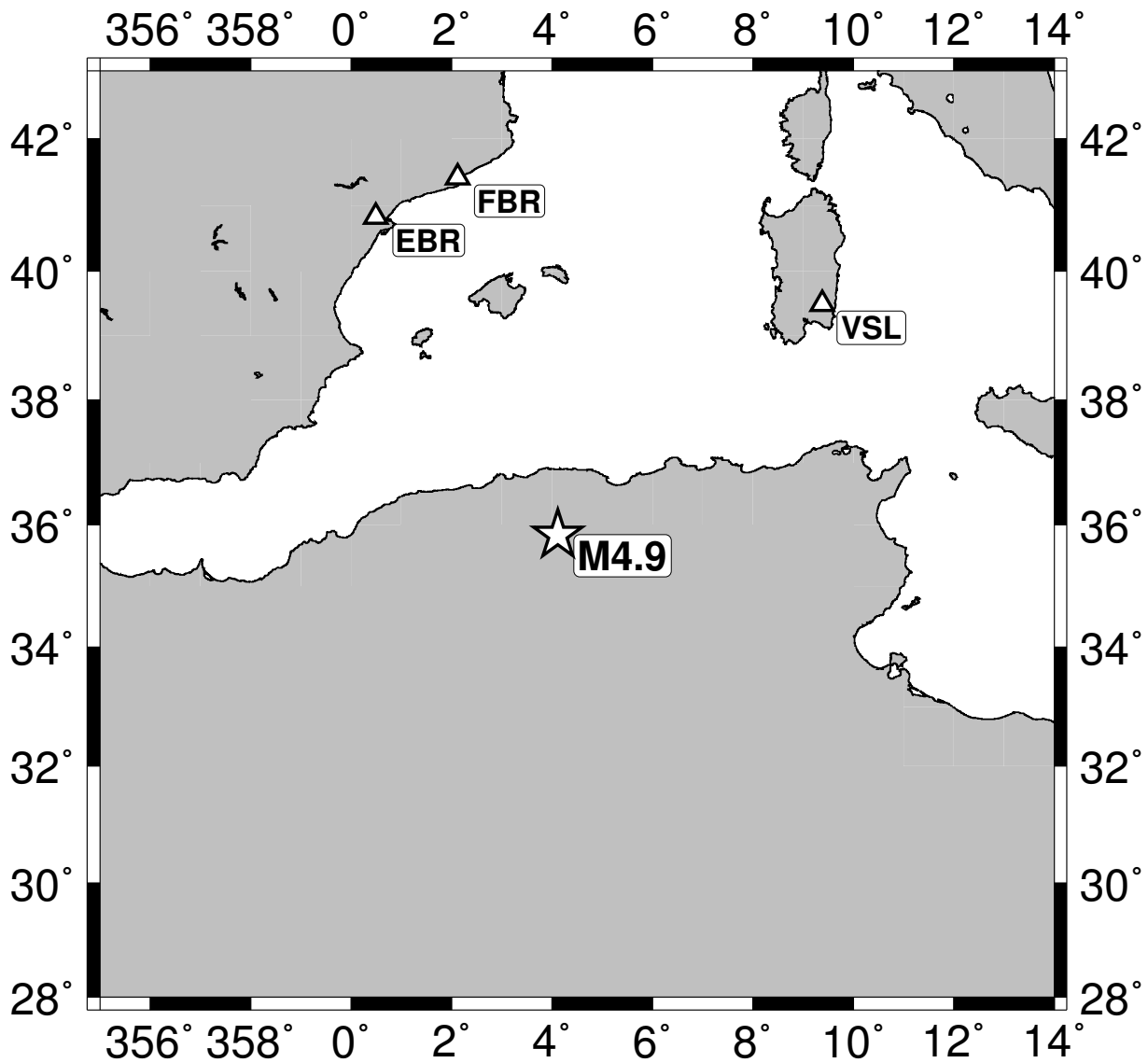
Tabulka 6.1: Parametry zemětřesení dle zprávy EMSC.

Zpráva o zemětřesení od EMSC byla přijata v 15:57:10 SELČ, tedy 29 minut po počátku zemětřesení (odeslána byla o půl minuty dříve). Během tří sekund byly určeny stanice v zájmové oblasti a odeslán požadavek službě BREQFAST. Odpověď přišla o 45 sekund později. Z požadovaných stanic byla data dostupná pro tři – pro jednu na Sardinii a dvě na jihovýchodním pobřeží Španělska.

V 15:58:00, tedy o dvě sekundy později, byla data stažena, převedena do formátu SAC a byl odeslán e-mail uživatelům, že data jsou připravena. Byla také vykreslena mapa, která je na obrázku 6.1.

Dále uvádím log programu. Na první pohled zaujme počet stanic, ze kterých nejsou k dispozici data. Je to dané tím, že v databázi jsou i stanice, které nemají přenos dat v reálném čase, jsou dlouhodobě mimo provoz a také tím, že služba BREQFAST automaticky vylučuje data špatné kvality. Na závěr uvádím (na obrázku 6.3) výřezy ze všech získaných seismogramů zachycující příchod prvních vln.

Je zřejmé, že pouhé tři seismické stanice, navíc v tomto prostorovém rozložení, jsou pro určování parametrů zdroje nedostačující. Tato data tedy poslouží pouze k předvedení funkčnosti vytvořeného programu. Se stanicemi, které máme k dispozici, není reálné zemětřesení v severní Africe vyhodnocovat. Využití programu se očekává v oblasti Řecka, případně Itálie, kde je dostatek seismických stanic.



Obrázek 6.1: Automaticky vykreslená mapa s vyznačeným epicentrem a stanicemi, ze kterých byla stažena data po zemětřesení  $M_b = 4,9$  v severním Alžírsku 23. 5. 2010 13:28:17 (UTC).

2010-05-23 15:57:10 EMSC alert: A magnitude 4.9 earthquake has occurred  
NORTHERN ALGERIA at 23. 05. 2010 13:28

2010-05-23 15:57:13 E-mail request to Orfeus data center succesfully sent

2010-05-23 15:57:42 BreqFast: Subject: BreqFast request

2010-05-23 15:57:58 BreqFast: Subject: BreqFast data shipment

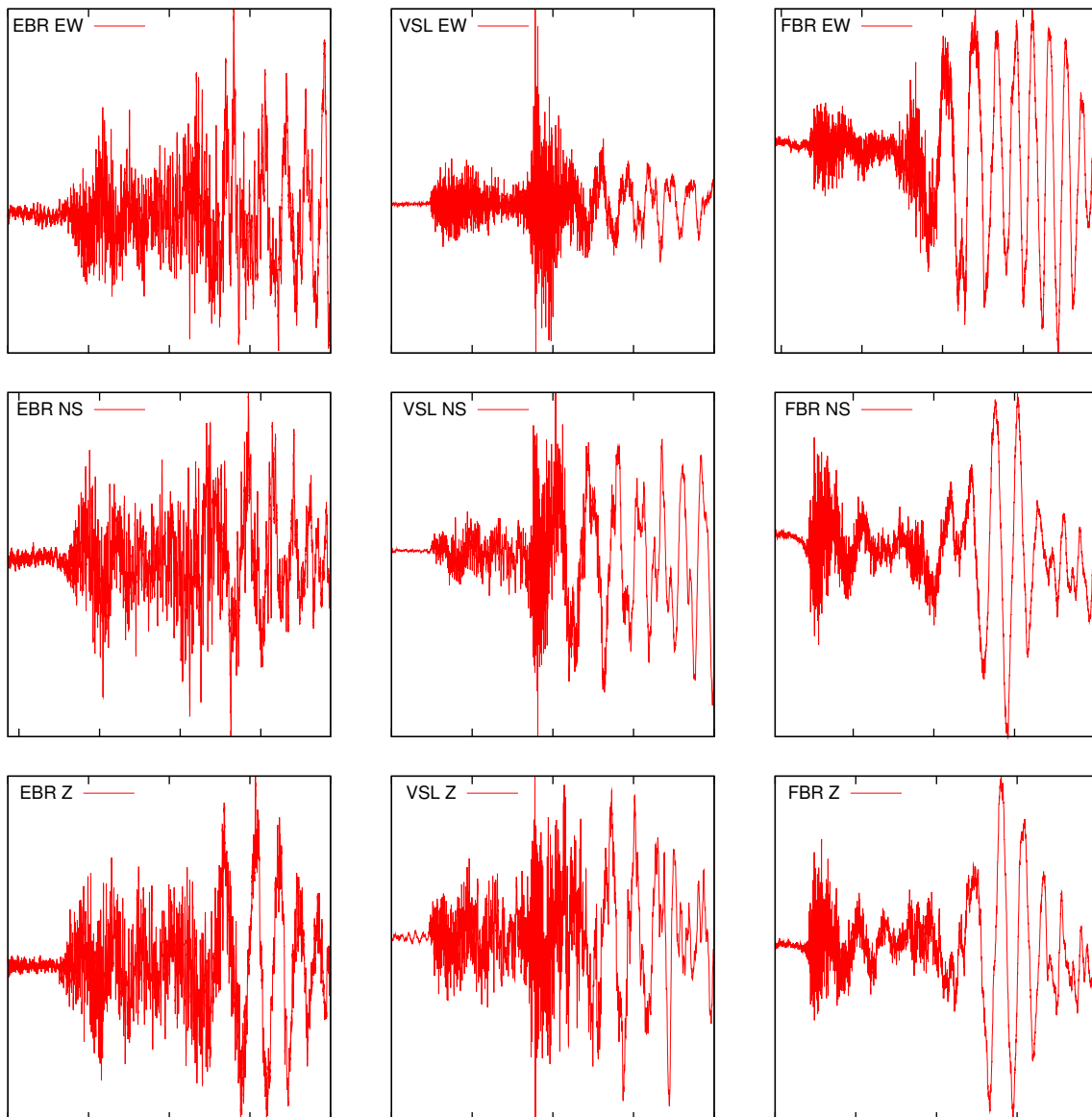
2010-05-23 15:57:58 No data returned for:  
CGAR CA 2010 05 23 12 58 00.0 2010 05 23 13 58 00.0 1 ?H?  
CMAS CA 2010 05 23 12 58 00.0 2010 05 23 13 58 00.0 1 ?H?  
EALB ES 2010 05 23 12 58 00.0 2010 05 23 13 58 00.0 1 ?H?  
EBEN ES 2010 05 23 12 58 00.0 2010 05 23 13 58 00.0 1 ?H?  
EBER ES 2010 05 23 12 58 00.0 2010 05 23 13 58 00.0 1 ?H?  
EIBI ES 2010 05 23 12 58 00.0 2010 05 23 13 58 00.0 1 ?H?  
EMLI ES 2010 05 23 12 58 00.0 2010 05 23 13 58 00.0 1 ?H?  
EMOS ES 2010 05 23 12 58 00.0 2010 05 23 13 58 00.0 1 ?H?  
EMUR ES 2010 05 23 12 58 00.0 2010 05 23 13 58 00.0 1 ?H?  
ESPR ES 2010 05 23 12 58 00.0 2010 05 23 13 58 00.0 1 ?H?  
ETOB ES 2010 05 23 12 58 00.0 2010 05 23 13 58 00.0 1 ?H?  
ETOS ES 2010 05 23 12 58 00.0 2010 05 23 13 58 00.0 1 ?H?  
CART GE 2010 05 23 12 58 00.0 2010 05 23 13 58 00.0 1 ?H?  
MAHO GE 2010 05 23 12 58 00.0 2010 05 23 13 58 00.0 1 ?H?  
MELI GE 2010 05 23 12 58 00.0 2010 05 23 13 58 00.0 1 ?H?  
ACBG IG 2010 05 23 12 58 00.0 2010 05 23 13 58 00.0 1 ?H?  
ACLR IG 2010 05 23 12 58 00.0 2010 05 23 13 58 00.0 1 ?H?  
ASCB IG 2010 05 23 12 58 00.0 2010 05 23 13 58 00.0 1 ?H?  
VELZ IG 2010 05 23 12 58 00.0 2010 05 23 13 58 00.0 1 ?H?  
ABSA YF 2010 05 23 12 58 00.0 2010 05 23 13 58 00.0 1 ?H?

2010-05-23 15:57:58 FTP directory: ftp://www.orfeus-eu.org/pub/userdata/breqfast/vackar

2010-05-23 15:57:59 Downloading file  
ftp://www.orfeus-eu.org:21/pub/userdata/breqfast/vackar/2010-05-23\_13-57-57.seed

2010-05-23 15:58:00 SAC and metadata files saved in directory  
/nfs1/vackar/orfeus/2010-05-23\_15-57-59  
for stations: CA.FBR MN.VSL SS.EBR

Obrázek 6.2: Záznam o stažení dat pro zemětřesení v severním Alžírsku v logu programu.



Obrázek 6.3: Výřezy ze seismogramů zemětřesení v severním Alžírsku. Všechny seismogramy mají shodnou délku 200 s.

# Kapitola 7

## Závěr

V této práci jsem se věnoval dílčímu problému spadajícímu do širokého rámce automatického zpracování zemětřesených dat. Po rešeršní části, objasňující potřeby a možnosti seismologie v reálném čase a rychlého zpracování dat, jsem vytvořil systém pro zcela automatické získávání seismických dat, vhodných ke studiu mechanismu ohniska, bezprostředně po zemětřesení. Řešení využívá jednak běžných unixových prostředků, ale také některých seismologických a geofyzikálních softwarových produktů (`rdseed` a `GMT`).

Vytvořený softwarový aparát provádí tyto činnosti: přijímá e-mailová upozornění na výskyt zemětřesení, v závislosti na magnitudu automaticky vyhledá seismické stanice ve vhodných vzdálenostech a odešle požadavek na výřezy ze seismogramů této události do datového centra ORFEUS. Po zpracování požadavku datovým centrem stáhne soubor ve formátu SEED, který obsahuje požadovaná data, převede jej na soubory SAC, soubory s metadaty a soubory s póly a nulami popisující přenosovou funkci. Tyto soubory roztřídí do formy přehledné pro uživatele a zkontroluje, zda v poslední době nedošlo ke změně metadat přístroje; pokud ano, upozorní na to.

Během zpracování program zaznamenává klíčové operace a případné chyby do logu, v závěru posílá e-mailem upozornění uživatelům. Pomocí nástroje `GMT` vykreslí mapu s epicentrem zemětřesení a stanicemi, ze kterých byla stažena data.

Na příkladu zemětřesení v severním Alžírsku 23. května 2010 bylo ověřeno, že systém je plně funkční. Po třiceti minutách od počátku zemětřesení byla stažena seismická data ze tří stanic a připravena k dalšímu zpracování. Půlhodinové zdržení bylo dané dobou, kterou potřebuje EMSC k lokaci epicentra a datové centrum ORFEUS ke zpracování požadavků na seismogramy, vlastní činnost mnou vytvořených programů trvala 5 sekund.

Pokračováním práce může být využití automatického systému k urychlení výpočtu momentového tenzoru zemětřesení pomocí programů vyvíjených na katedře geofyziky a používaných při studiu významných zemětřesení v Řecku.



# Literatura

- [1] Tselentis, G-A., Zahradník, J. (2000): *The Athens Earthquake of 7 September 1999*, Bulletin of the Seismological Society of America, **90**, 5, 1143–1160.
- [2] Zahradník, J., Serpetsidaki, A., Sokos, E., Tselentis, G-A., (2005): *Iterative deconvolution of regional waveforms and a double-event interpretation of the 2003 Lefkada earthquake, Greece*, Bulletin of the Seismological Society of America, **95**, 1, 159–172.
- [3] Zahradník, J., Janský, J., Plicka, V. (2008): *Detailed waveform inversion for moment tensors of  $M \sim 4$  events; examples from the Corinth Gulf, Greece*, Bulletin of the Seismological Society of America, **98**, 2756–2771.
- [4] Gallovič, F., Zahradník, J., Křížová, D., Plicka, V., Sokos, E., Serpetsidaki, A., Tselentis, G-A. (2009): *From Earthquake Centroid to Spatial-Temporal Rupture Evolution: Mw 6.3 Movri Mountain earthquake, June 8, 2008, Greece*, Geophysical research letters, **36**, L21310.
- [5] Sokos, E., Zahradník, J. (2008): *ISOLA a Fortran code and a Matlab GUI to perform multiple-point source inversion of seismic data*, Computers and Geosciences, **34**, 967–977.
- [6] Lay, T., Wallace, T. C. (1995): *Modern Global Seismology*, Academic Press, San Diego, California.
- [7] Bolt, B. A. (1999): *Eartquakes*, W. H. Freeman and Company, New York.
- [8] Zahradník, J. (2004): *How many seismographs do we need to record ground motion at a station?*, Studia Geophysica et Geodaetica, 48, **2**, 483–492.
- [9] Mazet-Roux, G., Bossu, R., Carreño, E., Guilbert, J. (2005): *Report on EMSC Operational Activities*, [http://www.emsc-csem.org/Doc/EMSC\\_activities\\_2004\\_low.pdf](http://www.emsc-csem.org/Doc/EMSC_activities_2004_low.pdf).
- [10] Lomax, A. (2007): *An energy-duration procedure for rapid determination of earthquake magnitude and tsunamigenic potential*, Geophysical journal international, **3**, 1195.
- [11] Lee, W. H. K., Espinosa-Aranda, J. M. (2002): *Earth-quake early-warning systems: current status and perspectives*, in Early Warning Systems for Natural Disaster Reduction, Springer, Berlin, 409–423.

- [12] Wieland, M., Griesser, M., Kuendig, C. (2000): *Seismic Early Warning System for a Nuclear Power Plant*, in Proceedings of 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand.
- [13] Šílený, J., Vavryčuk, V. a Zahradník, J. (2004): *Střížná a nestřížná zemětřesení*, Čs. časopis pro fyziku, **54**, 173–178.
- [14] Clinton, J. F., Hauksson, E., Solanki, K. (2006): *An Evaluation of the SCSN Moment Tensor Solutions: Robustness of the  $M_w$  Magnitude Scale, Style of Faulting, and Automation of the Method*, Bulletin of the Seismological Society of America, **96**, 5, 1689–1705.
- [15] Bernardi, F., Braunmiller, J., Kradolfer, U., Giardini, D. (2004): *Automatic regional moment tensor inversion in the European-Mediterranean region*, Geophysical journal international, **157**, 703–716.
- [16] Melis, N. S., Konstantinou, K. I. (2006): *Real-time Seismic Monitoring in the Greek Region: An Example from the 17 October 2005 East Aegean Sea Earthquake Sequence*, Seismological Research Letters, **77**, 3, 364–370.
- [17] Roumelioti, Z., Benetatos, Ch., Kiratzi, A., Dreger, D. (2008): *Near-Real Time Moment Tensors for Earthquakes in Greece provided by the Dept of Geophysics, Aristotle University of Thessaloniki (AUTH-solutions)*, [http://geophysics.geo.auth.gr/ss/Moment\\_Tensors\\_EMSC.pdf](http://geophysics.geo.auth.gr/ss/Moment_Tensors_EMSC.pdf)
- [18] Wessel, P., Smith, W. H. F. (1998): *New version of the generic mapping tools released*, Eos, Transactions American Geophysical Union, **79**, 47, 579–579.
- Internetové stránky:
- [19] IRIS – Incorporated Research Institutions for Seismology (2006): *SEED Reference Manual*, [http://www.iris.edu/manuals/SEEDManual\\_V2.4.pdf](http://www.iris.edu/manuals/SEEDManual_V2.4.pdf).
- [20] SAC2000 User’s Manual, [http://www.iris.edu/manuals/sac/SAC\\_Manuals/](http://www.iris.edu/manuals/sac/SAC_Manuals/).
- [21] European-Mediterranean Seismological Centre, <http://www.emsc-csem.org/>.
- [22] Orfeus – Observatories and Research Facilities for European Seismology, <http://www.orfeus-eu.org/>.
- [23] Orfeus – Observatories and Research Facilities for European Seismology: *Breqfast request handler*, <http://www.orfeus-eu.org/Data-info/breqfast.html>.
- [24] European-Mediterranean Seismological Centre (2010): *A contribution to the setting-up of tsunami warning systems in the Mediterranean*, [http://www.emsc-csem.org/Doc/EMSC\\_DOCS/TsunamiWarning.pdf](http://www.emsc-csem.org/Doc/EMSC_DOCS/TsunamiWarning.pdf).
- [25] Regular-Expressions.info, <http://www.regular-expressions.info/>.

- [26] IRIS – Incorporated Research Institutions for Seismology: *rdseed Manual*,  
<http://www.iris.washington.edu/manuals/rdseed.htm>.
- [27] Broadband Station Database,  
<http://www.orfeus-eu.org/WorkingGroups/WG1/station-db-search.html>.

# Příloha A

## Zdrojové kódy

Zde uvádím všechny skripty vytvořené v rámci této práce. Jsou dostupné také na internetové stránce <http://geo.mff.cuni.cz/~vackar/bc/>.

Kromě stručného popisu funkce a reference na příslušné kapitoly uvádím, které řádky je třeba upravit pro změnu parametrů či při přenosu na jiný počítač. Předpokládám umístění skriptů v adresáři `~/bin`.

### A.1 parsemail.sh

#### A.1.1 parsemail.sh@karel

Předání došlé pošty skriptu je zajištěno pomocí souboru `.forward`, jak je popsáno v odstavci 5.1. Toto se děje na serveru KAREL, dále budeme práci řešit na počítači GEOF20. Tento skript pouze zapíše e-mail ze standardního vstupu do textového souboru a spustí další skript na vzdáleném počítači.

Proměnná `$out` na řádce 2 musí souhlasit s proměnnou `$in` v dalších skriptech. Pokud jsou další skripty na stejném počítači, řádek 6 nahradíme za pouhé `~/bin/parsemail.sh`.

```
1 #!/bin/bash
2 out=~/orfeus/mail.txt
3 while read line; do
4     echo $line >> $out;
5 done;
6 ssh geof20 ~/bin/parsemail.sh
```

#### A.1.2 parsemail.sh@geof20

Tento skript je popsán v odstavci 5.2 a první části odstavce 5.4. Nejdříve určí odesílatele e-mailu. Pokud je jím EMSC, zjistí čas a parametry zemětřesení, zapíše je do logu a spustí skript `mailrequest.sh`. Pochází-li e-mail od služby BREQFAST, vyhledá v něm odkaz na odkaz na FTP server, vybere v odkazovaném adresáři nejnovější soubor a předá jej skriptu `orfeus.sh`.

Cestu k vstupnímu souboru popř. souboru s logem na řádce 3 popř. 4 je třeba mít ve shodě s předchozím popř. následujícími skripty.

```
1  #!/bin/bash
2
3  in=/nfs1/vackar/orfeus/mail.txt
4  out=/nfs1/vackar/orfeus/parsemail.log
5
6  function log {
7      time="`date +%F %T`"
8      echo -e "$time $1\n" >> $out
9      echo -e "<p class='\$2'><span>$time </span>\$1</p>\n" >>
      $out.html
10 }
11
12 from="From: (.*)<?([[:alnum:]]_\. -)+@[[:alnum:]]_\. -)+)"
13 earthquake="Subject: EARTHQUAKE: Magnitude ([0-9\.]+) (.*) [[:
      space:]]+([0-9]+)/([0-9]+)/([0-9]+) [[:space
      :]]+([0-9]+:[0-9]+)"
14 ftplink=".*(ftp://www.orfeus-eu.org(:21)?/pub/userdata/
      breqfast/[[:alnum:]]/_\. -)+)"
15
16 while read line; do
17     if [[ $line =~ $from ]]; then
18         sender=${BASH_REMATCH[2]}
19         if [[ $sender =~ alert@.*emsc\-csem.org ]]; then
20             # Earthquake alert from EMSC
21             echo "EMSC" >> $out
22             subject=`cat $in | grep -A 1 Subject:`
23             if [[ $subject =~ $earthquake ]]; then
24                 log "EMSC alert: A magnitude ${BASH_REMATCH
                        [1]} earthquake has occurred ${BASH_REMATCH
                        [2]} at ${BASH_REMATCH[3]}. ${BASH_REMATCH
                        [4]}. ${BASH_REMATCH[5]} ${BASH_REMATCH
                        [6]}" "event"
25                 bin/mailrequest.sh "${BASH_REMATCH[5]}-${{
                        BASH_REMATCH[4]}-${BASH_REMATCH[3]} ${
                        BASH_REMATCH[6]}" ${BASH_REMATCH[1]}
26                 log "E-mail request to Orfeus data center
                        succesfully sent" "info"
27             else
28                 log "EMSC alert: Subject did not match
                        regular expression, halted" "error"
29             fi
30             rm $in
```

```

31         exit
32     elif [[ $sender = breq_fast@knmi.nl ]]; then
33         # BreqFast data shipment
34         subject='cat $in | grep Subject:'
35         log "BreqFast: $subject" "info"
36         error='cat $in | egrep "(No data returned for:)"
37             |([A-Z]{3} [A-Z]{2} [0-9]{4})"'
38         if [[ "$error" ]]; then
39             log "$error" "error"
40         fi
41         ftp='cat $in | grep ftp://'
42         if [[ $ftp =~ $ftplink ]]; then
43             log "FTP directory: ${BASH_REMATCH[1]}" "info"
44             "
45             ftp='wget -q ${BASH_REMATCH[1]}/ -O - | grep
46                 ftp://.*seed'
47             if [[ $ftp =~ $ftplink ]]; then
48                 log "Downloading file ${BASH_REMATCH
49                     [1]}" "info"
50                 bin/orfeus.sh ${BASH_REMATCH[1]}
51             fi
52         fi
53         rm $in
54         exit
55     else
56         # Another sender
57         rm $in
58         exit
59     fi;
60 fi;
61 # echo $line >> $out;
62 done < $in
63 rm $in

```

## A.2 mailrequest.sh

Tento skript je podrobněji popsán v odstavci 5.3. V závislosti na magnitudu zemětřesení určí úhlovou velikost zájmové oblasti, načte ze souboru seznam seismických stanic a vybere ty, které leží v zájmové oblasti. Následně zašle e-mailový požadavek na výřezy ze seismogramů z těchto stanic službě BREQFAST.

Konfigurovatelné parametry na řádcích 3–7 jsou dostatečně popsány komentáři ve skriptu. Na řádcích 8 a 9 je cesta k adresářům, kam se ukládají stažené seismogramy a kde je soubor `stations` se seznamem stanic. Jeho syntaxe je:

<kód sítě>\_<stanice>:<požadované složky>\_<zeměpisná šířka>\_<zeměpisná délka>

tedy například:

```
HP_LTK:~$ cat /dev/null >> /dev/null
```

Dále je možné na řádce 26 změnit vzorec pro výpočet maximální vzdálenosti stahovaných stanic od epicentra v závislosti na magnitudu. Pokud odesíláme e-maily z lokálního počítače, nahradíme poslední řádek za:

```
echo -e "$MAIL" | mail -s "$FORMAT" breq_fast@knmi.nl
```

```
1 #!/bin/bash
2 # configuration
3 BEFORE=1800      # seismogram length before event in seconds
4 AFTER=1800       # seismogram length after event in seconds
5 FORMAT=""        # required format of data (empty variable
   will result in full-seed output, "miniseed" will result in
   miniseed output and "dataless" will result in dataless-
   seed volumes)
6 EMAIL="vackar@karel.troja.mff.cuni.cz" # e-mail for answer
7 LABEL="vackar"   # label used by Breqfast request handler as
   the output directory on the ORFEUS ftp
8 RESDIR="/nfs1/vackar/orfeus"
9 CONFIG="/nfs1/vackar/orfeus/config"
10 in="/nfs1/vackar/orfeus/mail.txt" # textfile with alert from
   EMSC
11 coordinates="([0-9.]+)(N|S) ([0-9.]+)(E|W) Depth ([0-9.]+)km
   " # line contains also origin time
12
13 EVENT='date -ud "$1" +%s' || exit
14 BEGIN=${EVENT-$BEFORE}
15 END=${EVENT+$AFTER}
16 MAGNITUDE=$2
17
18 line='cat $in | egrep "$coordinates"'
19 if [[ $line =~ $coordinates ]]; then
20     lat=${BASH_REMATCH[1]}
21     if [[ ${BASH_REMATCH[2]} = S ]]; then lat="-$lat"; fi
22     lon=${BASH_REMATCH[3]}
23     if [[ ${BASH_REMATCH[4]} = W ]]; then lon="-$lon"; fi
24     depth=${BASH_REMATCH[5]}
25     echo "$lon $lat 18 0 1 1 M$MAGNITUDE" >> $RESDIR/
   epicenter.gmt
26     dist='echo "scale=6; 4+($MAGNITUDE-4)*2" | bc -l' #
   maximal distance of requested stations in degrees
27 fi
28
29 begin='date -ud @$BEGIN +"%Y %m %d %H %M %S.0"'
30 end='date -ud @$END +"%Y %m %d %H %M %S.0"'
```

```

31
32 # e-mail body
33 MAIL=".NAME Jiri Vackar\n.INST Charles University\n.EMAIL
    $EMAIL\n.LABEL $LABEL\n.END\n\n"
34
35 # loading list of stations, adding them to e-mail body
36 regexp="([A-Z]+)_([A-Z0-9]+):([A-Z\?]+) (-?[0-9.]+)
    (-?[0-9.]+)"
37 while read s; do
38     if [[ $s =~ $regexp ]]; then
39         NETWORK=${BASH_REMATCH[1]}
40         STATION=${BASH_REMATCH[2]}
41         CHANNELS=${BASH_REMATCH[3]}
42         LAT=${BASH_REMATCH[4]}
43         LON=${BASH_REMATCH[5]}
44         DIST='echo "scale=6; dr=4*a(1)/180; x=s($lat*dr)*s(
            $LAT*dr)+c($lat*dr)*c($LAT*dr)*c($LON*dr-$lon*dr)
            ; (a(sqrt(1-x^2)/x)/dr < $dist)*(x>0)" | bc -l'
45         if [[ $DIST == 1 ]]; then
46             MAIL="$MAIL$STATION $NETWORK $begin $end 1
                $CHANNELS\n"
47         fi
48     fi
49     # NETWORK='echo $s | awk -F'(_)|(:)|( )' '{ print $1}'
50 done < $CONFIG/stations
51
52 # echo $dist
53 # echo -e $MAIL
54 echo -e "$MAIL" | ssh karel mail -s "\"$FORMAT\""
    breq_fast@knmi.nl

```

### A.3 orfeus.sh

Skript je podrobně popsán v odstavcích 5.4 a 5.5. Stáhne z FTP serveru zadaný soubor ve formátu SEED, pomocí programu `rdseed` jej převede na soubory ve formátu SAC, soubory s metadaty a s nulami a póly a tyto soubory roztrídí dle stanic a typu do adresářové struktury. Během této operace zjišťuje čas poslední změny metadat, na nedávné změny upozorní. Dále seznam stanic, ze kterých jsou stažena data, zapíše do logu a zašle v závěrečném e-mailu uživatelům. Tyto stanice a epicentrum zemětřesení vykreslí do mapy pomocí nástroje GMT.

Proměnné na řádcích 3–10 mají stejný význam jako v předchozích skriptech a musí se shodovat. Na řádce 90 je uvedeno umístění skriptu `map.gmt` a na řádce 94 mj. webová adresa, přes kterou je možné zobrazit log programu. Pokud odesíláme e-maily z lokálního



počítače, nahradíme poslední řádek za:

```
echo -e $TEXT | mail -s "Seismic data processing" $EMAIL
```

```
1 #!/bin/bash
2 # configuration
3 BASEDIR="/nfs1/vackar/orfeus"
4 CONFIG="$BASEDIR/config"
5 RESDIR="$BASEDIR" # results are stored here in date-based
   subdirectories
6 LASTDIR="last" # sym-link to directory with results is
   created in $RESDIR and named $LASTDIR
7 EMAIL="vackar jz" # e-mail for final message
8 ALERT_TRIGGER=730 # alert if metadata has changed in last #
   days
9
10 out=/nfs1/vackar/orfeus/parsemail.log
11 function log {
12     time="'date +%F %T'"
13     echo -e "$time $1\n" >> $out
14     echo -e "<p class='\$2'><span>$time </span> \$1</p>\n" >>
       $out.html
15 }
16
17 # preparing variables and directories
18 DATETIME='date +%Y-%m-%d_%H-%M-%S'
19 TIMEOFCHANGE="([0-9]{4}),0*([0-9]+)"
20 YEAR='date +%Y'
21 DAY='date +%j'
22
23 cd $RESDIR
24 mkdir $DATETIME
25 rm $LASTDIR
26 ln -s $DATETIME $LASTDIR
27 if [[ -e epicenter.gmt ]]; then mv epicenter.gmt $LASTDIR; fi
28
29 #download seed from ftp
30 cd $RESDIR/$LASTDIR
31 wget -q $1 || echo "Downloading $1 failed" > errors
32
33 # Extract files from seed and divide them to directories
34 if [ ! -e errors ]; then
35     file='ls *.seed'
36     ~/bin/rdseed -Rd -p -f $file
37     name="RESP\.([:alpha:]]+)\.([:alpha:]]+)\.\."
38     for file in RESP*; do
```

```

39   if [[ $file =~ $name && ! -e ${BASH_REMATCH[1]}_${BASH_REMATCH[2]} ]] ; then
40       Station="${BASH_REMATCH[1]}_${BASH_REMATCH[2]}"
41       station="${BASH_REMATCH[1]}.${BASH_REMATCH[2]}"
42       mkdir $Station
43       mkdir $Station/sac && mv *$station*.SAC $Station/sac
44       mkdir $Station/resp && mv RESP.$station* $Station/
         resp
45       # Notify of recent changes of resp files
46       pushd $Station/resp
47       for respfile in *; do
48           line='cat $respfile | egrep ^B052F22 | tail -1'
49           if [[ $line =~ $TIMEOFCHANGE ]]; then
50               year=${BASH_REMATCH[1]}
51               day=${BASH_REMATCH[2]}
52               if [[ $ALERT_TRIGGER -gt $[(($YEAR-$year)*365+
                 $DAY-$day)]]; then # first condition
                 prevent overflowing
53                 log "Metadata of station $station changed
                   on $year,$day" "error"
54                 MAILALERT="$MAILALERT\nMetadata of
                   station $station changed on $year,$day
                   "
55                 fi
56             fi
57         done
58         popd
59         mkdir $Station/poles_zeros && mv SAC*$Station*
           $Station/poles_zeros
60         stations="$stations$station "
61         if [[ $stations_re ]]; then
62             stations_re+="|($Station)"
63         else
64             stations_re="($Station)"
65         fi
66     fi
67 done
68 log "SAC and metadata files saved in directory $RESDIR/
   $DATETIME\nfor stations: $stations" "event"
69 cat $CONFIG/stations | egrep $stations_re > stations.txt
70 regexp="([A-Z]+)_([A-Z0-9]+):([A-Z\?]+) (-?[0-9.]+)
   (-?[0-9.]+)"
71 while read s; do
72     if [[ $s =~ $regexp ]]; then

```

```

73     NETWORK=${BASH_REMATCH[1]}
74     STATION=${BASH_REMATCH[2]}
75     LAT=${BASH_REMATCH[4]}
76     LON=${BASH_REMATCH[5]}
77     echo "$LON $LAT 14 0 1 1 $STATION" >> stations.gmt
78     fi
79 done < stations.txt
80 rm stations.txt
81 epicenter='cat epicenter.gmt '
82 regexp="(?![0-9]+)\.[0-9]* (?![0-9]+)\.[0-9]*"
83 if [[ $epicenter =~ $regexp ]]; then
84     dist=7
85     west=${BASH_REMATCH[1]}-2-$dist
86     east=${BASH_REMATCH[1]}+$dist+3
87     nord=${BASH_REMATCH[2]}+$dist+1
88     south=${BASH_REMATCH[2]}-$dist
89 fi
90 . $CONFIG/map.gmt
91
92 fi
93
94 TEXT="Downloading seismic data finished.\n\nSAC and metadata
      files saved in directory $RESDIR/$DATETIME\nfor stations:
      $stations\n\nDetails about data processing:\nhttp://geo.
      mff.cuni.cz/~vackar/orfeus/log.html\n$MAILALERT"
95
96 echo -e $TEXT | ssh karel mail -s \"Seismic data processing
      \" $EMAIL

```

## A.4 map.gmt

Skript pro nástroj GMT, kterým je vykreslována mapa. Souřadnice okrajů jsou v proměnných definovaných ve skriptu `orfeus.sh`, ze kterého je tento spouštěn. Vykreslované stanice a epicentrum jsou načítány z textových souborů, které byly již vygenerovány předšlými skripty.

```

1  #!/bin/bash
2
3  # pscoast
4  # okraje
5     # west=19.5
6     # east=23.5
7     # south=36
8     # nord=40

```

```

9 interval=2
10 # velikost mapoveho ctverce (v cm)
11 scale=15
12 # pobrezi
13 coast=.7p
14 # minimalni plocha
15 area=50
16 # vypln pevniny
17 filling=192
18 # -v verbose
19 # -Df full resolution
20 # -K More PostScript code will be appended later
21 # -O Overlay plot mode
22
23 # psxy
24 # stanice
25 symbolS=t0.4c
26 fillingS=white
27 outlineS=thicker
28 # epicentrum
29 symbolE=a0.8c
30 fillingE=white
31 outlineE=1.5p
32
33 # pstext
34 # obdelnik
35 rectangle=white,0,black
36 # posunuti
37 offset=0.3/-.55
38
39 gmtset ANNOT_FONT_SIZE_PRIMARY 20p # velikost pisma souradnic
    po obvodu
40 pscoast -R$west/$east/$south/$nord -JM${scale}c -Df -W$coast
    -B$interval -A$area -K -G$filling > fig1.ps
41 pstext stations.gmt -J -R -K -O -W$rectangle -D$offset
    >> fig1.ps
42 pstext epicenter.gmt -J -R -K -O -W$rectangle -D$offset
    >> fig1.ps
43 psxy stations.gmt -R -J -K -O -S$symbolS -G$fillingS -
    W$outlineS >> fig1.ps
44 psxy epicenter.gmt -R -J -O -S$symbolE -G$fillingE -
    W$outlineE >> fig1.ps
45
46 ps2pdf fig1.ps

```