

Univerzita Karlova v Praze

Matematicko-fyzikální fakulta

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



Dana Červinková

Studium zdrojového procesu řeckých zemětřesení

Katedra geofyziky

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

Studijní program: FYZIKA

Studijní obor: obecná fyzika

Praha 2006

Děkuji zejména Prof. RNDr. Jiřímu Zahradníkovi, DrSc., za výjimečnou trpělivost, za mimořádný pedagogický přístup, za neocenitelné rady, za ochotu vždy pomoci a vůbec za vše, s čím mi při vypracovávání práce pomohl.

Děkuji RNDr. Vladimíru Plickovi, Ph.D. za pomoc při vyhledávání dat umístěných v archivu katedry geofyziky na Karlově.

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

V Praze dne 26. 5. 2006

Dana Červinková

Obsah :

Abstrakt práce.....	2
1. Úvod.....	3
1.1. Motivace.....	3
1.2. Cíl práce.....	3
2. Teorie.....	5
2.1. Experimentální zařízení.....	5
2.2. Odezva CMG-3T na skok ve zrychlení.....	7
3. Data a metoda zpracování.....	9
3.1. Použité stanice.....	9
3.2. Použité záznamy.....	9
3.3. Metoda zpracování.....	11
4. Výsledky zpracování dat.....	16
4.1. Zemětřesení 2002 12 03.....	16
4.2. Zemětřesení 2001 04 08.....	19
4.3. Zemětřesení 2001 12 24.....	20
4.4. Zemětřesení 2003 10 31.....	22
4.5. Zemětřesení 2003 11 18.....	26
4.6. Zemětřesení 2004 04 28.....	29
4.7. Zemětřesení 2005 05 29.....	32
5. Závěr.....	36
6. Literatura.....	37

Název práce: Studium zdrojového procesu řeckých zemětřesení

Autor: Dana Červinková

Katedra (ústav): Katedra geofyziky

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

e-mail vedoucího: jz@karel.troja.mff.cuni.cz

Abstrakt: V této práci je studována dlouhoperiodická porucha vyskytující se v seismogramech blízkých zemětřesení na horizontálních složkách, projevující se jako jednostranný puls. Porucha je numericky modelována jako reakce širokopásmového seismometru na skokovou změnu zrychlení. Modelová porucha je potom ze záznamu odečtena. Modelová porucha je charakterizovaná dvěma parametry, časem nasazení a amplitudou skoku zrychlení. Postup zpracování je ukázán na sedmi zemětřeseních z oblasti Korintského zálivu, zaznamenaných na stanicích v Sergoule a Mamousii, společně provozovaných UK-MFF a univerzitou v Patrasu. Z výsledků vyplývá, že parametry poruchy jsou obecně různé pro dvě horizontální složky záznamu téhož zemětřesení na dané stanici. Ve zkoumaných případech měla vždy porucha na složce EW větší amplitudu než na složce NS. V budoucnosti by bylo vhodné metodu modelování a odstranění poruchy, popsanou v této práci, automatizovat. Odstranění poruch je nezbytnou podmínkou pro použitelnost záznamů pro další fyzikální výzkum.

Klíčová slova: zemětřesení, dlouhoperiodická porucha, širokopásmový seismometr

Title: Study of Greek earthquakes source processes

Author: Dana Červinková

Department: Department of geophysics

Supervisor: Prof. RNDr. Jiří Zahradník, DrSc.

Supervisor's e-mail address: jz@karel.troja.mff.cuni.cz

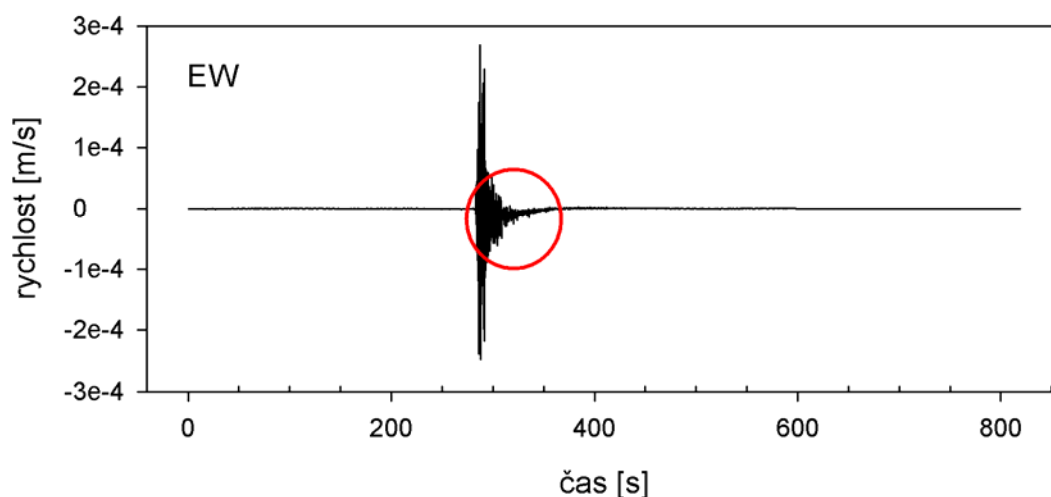
Abstract: In this work, a long-period disturbance is studied, which appears on the horizontal components of seismograms of near earthquakes. It looks like a one-sided pulse. This disturbance is numerically modeled as a response of broad-band seismometer to step in acceleration. The model disturbance is characterized by two parameters: onset time and amplitude of the acceleration step, being searched for during processing. As such, it can be subtracted from record. The whole procedure is demonstrated on seven earthquakes from Corinth Gulf recorded at stations Sergoula and Mamousia, jointly operated by the Charles University and Patras University. Our conclusions are that parameters of disturbances are generally different for two horizontal components for one earthquake recorded at the same station. In studied earthquakes, the disturbances on EW component were always larger than on NS component. In future, the present method of modeling and removing the disturbances should be automated. Unless the disturbance is removed from seismogram, it is impossible to use the records for any physical research.

Keywords: earthquakes, long-period disturbance, broad-band seismometer

1. Úvod

1.1. Motivace

Univerzita Karlova v Praze společně s Univerzitou v Patrasu provozují od r. 1997 několik seismických stanic v Řecku. Od počátku byly na některých záznamech rychlosti z přístroje CMG-3T pozorovány poruchy, které se projevily jako puls trvající přibližně 100 sekund. Poruchy se objevovaly při slabých zemětřeseních v blízkosti stanice a vyskytovaly se výhradně na horizontálních složkách. Ukázka záznamu s poruchou je na obrázku 1.



Obr. 1. Nefiltrovaný záznam zemětřesení 2002 12 03 ze stanice SERG, složka EW. Porucha je vyznačena elipsou.

Při zpracování záznamu s poruchou může dojít k chybám, například při určování parametrů ohniska daného zemětřesení. Je tedy zřejmé, že poruchy znehodnocují záznamy a jejich odstranění je nezbytné.

1.2. Cíl práce

Cílem práce je seznámit se s některými fyzikálními principy přístrojů a s výpočetními programy pro studium zemětřesení pomocí seismogramů v síti blízkých stanic. Jde o nestandardní programy vyvíjené a používané na katedře geofyziky MFF UK.

Konkrétním předmětem zkoumání jsou data z oblasti Korintského zálivu. Záznamy je nutné pečlivě analyzovat, nalézt případné dlouhoperiodické poruchy, poruchy

odstranit a umožnit tak využití těchto seismogramů při určování parametrů ohniska zemětřesení. Některá data jsou k dispozici na stránce <http://seis30.karlov.mff.cuni.cz/> a zbylá lze získat z archivu katedry v Praze na Karlově (kde jsou uložena na CD).

V průběhu zpracování je nutné drobně modifikovat již existující programy.

2. Teorie

2.1. Experimentální zařízení

Každý seismograf lze popsat jako lineární filtr, kompletně charakterizovaný impulzní odezvou h , která vypovídá o jeho přenosových vlastnostech. Mezi vstupem u a výstupem ξ přístroje platí vztah:

$$\xi = u(t) * h(t). \quad (1)$$

Funkci h získáme na výstupu přístroje, je-li na vstupu Diracova δ -distribuce.

Fourierovou transformací impulzní odezvy je komplexní přenosová funkce $H(f)$. Tuto funkci lze vyjádřit pomocí nul n a pólů p :

$$H(f) = A \cdot \frac{-(i \cdot f - n_1)}{(i \cdot f - p_1)} \cdot \frac{(i \cdot f - n_2)}{(i \cdot f - p_2)} \cdot \dots, \quad (2)$$

kde n a p příslušné přenosové funkce jsou v jednotkách Hz a A je konstanta.

Podrobnější informace lze nalézt v různých učebnicích seismologie (například v [2], případně v práci [1]) nebo na <http://geo.mff.cuni.cz/documents/seismologie/seis1/>.

Na stanicích studovaných v této práci jsou umístěny dva typy přístrojů od firmy Guralp.

Guralp CMG-5T (akcelerograf pro silné pohyby, angl. strong-motion accelerometer, zkratka SM) je přístroj zaznamenávající v širokém frekvenčním rozsahu věrně zrychlení pohybu půdy. Jeho vzorkovací frekvence je 20 Hz pro spojitě záznamy a 100 Hz pro spouštěné záznamy.

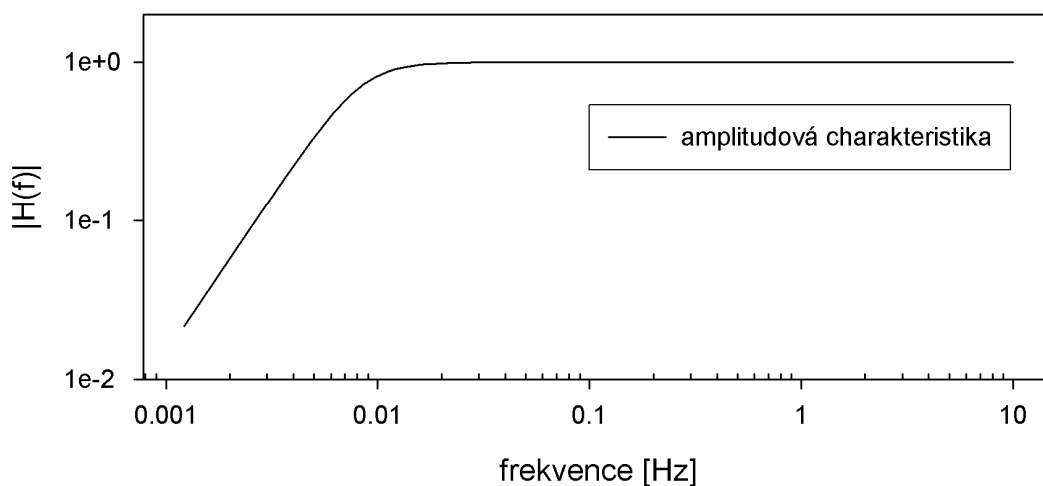
Guralp CMG-3T (širokopásmový seismometr, angl. broad-band seismometer, zkratka BB) zaznamenává věrně rychlost v širokém intervalu frekvencí. Jeho vzorkovací frekvence je stejně jako u předcházejícího přístroje 20 Hz pro spojitě záznamy a 100 Hz pro spouštěné záznamy.

Budeme se zabývat pouze širokopásmovým přístrojem. Jeho nuly a póly jsou v tabulce 1. Z nich lze pomocí vzorce (2) spočítat přenosovou funkci a znázornit její modul a fázi (amplitudovou a fázovou charakteristiku).

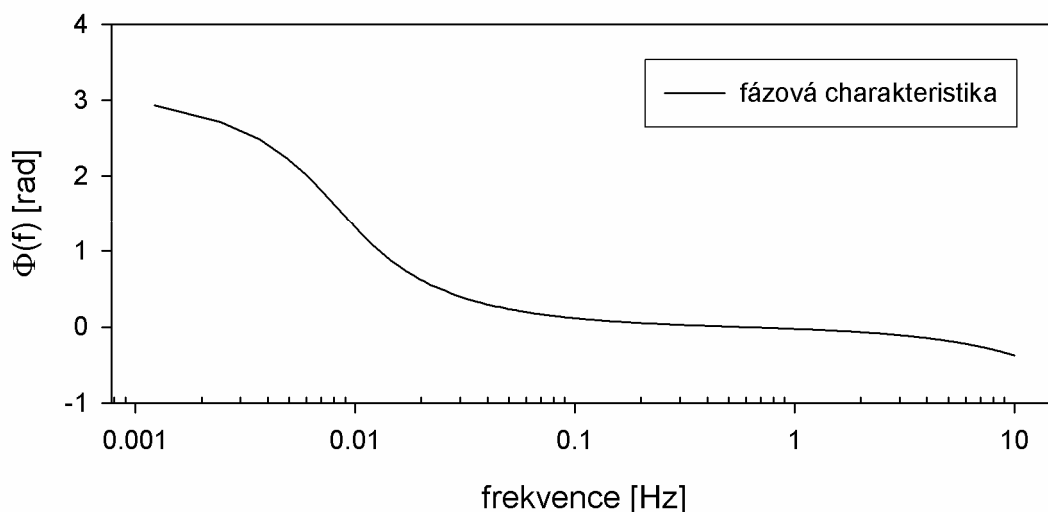
Amplitudová charakteristika přístroje je znázorněna na obrázku 2 a fázová na obr. 3. Je patrné, že rohová perioda přístroje CMG-3T je přibližně 100 s, tomu odpovídá rohová frekvence 0.01 Hz.

Tabulka 1: Nuly a póly přístroje CMG-3T.

nuly	jsou dvě vždy = 0	
póly	reálná část [Hz]	imaginární část [Hz]
1	$5.891 \cdot 10^{-3}$	$+5.89 \cdot 10^{-3}$
2	$5.891 \cdot 10^{-3}$	$-5.89 \cdot 10^{-3}$
3	-31.5	+33
4	-31.5	-33
5	-145	0
konstanta A	$3.02 \cdot 10^5$	



Obr. 2. Amplitudová (bezrozměrná) charakteristika přístroje CMG-3T.

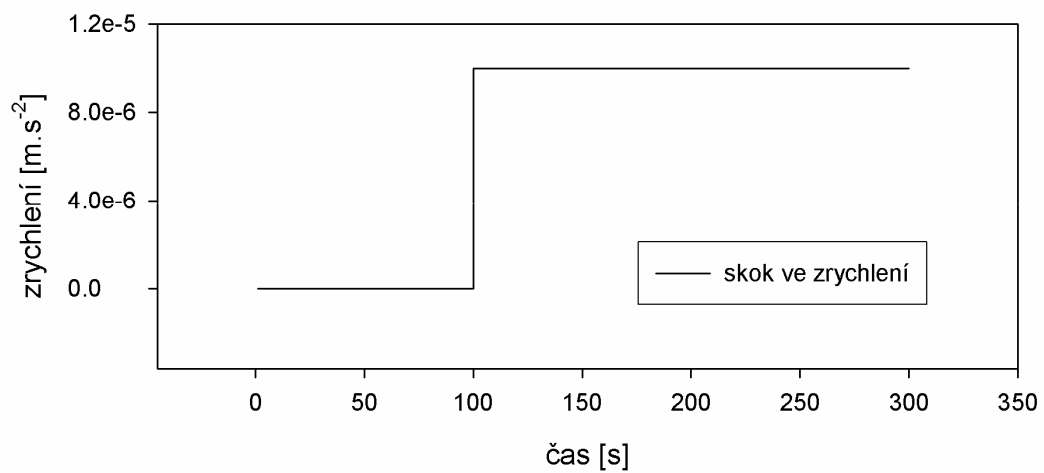


Obr. 3. Fázová charakteristika přístroje CMG-3T.

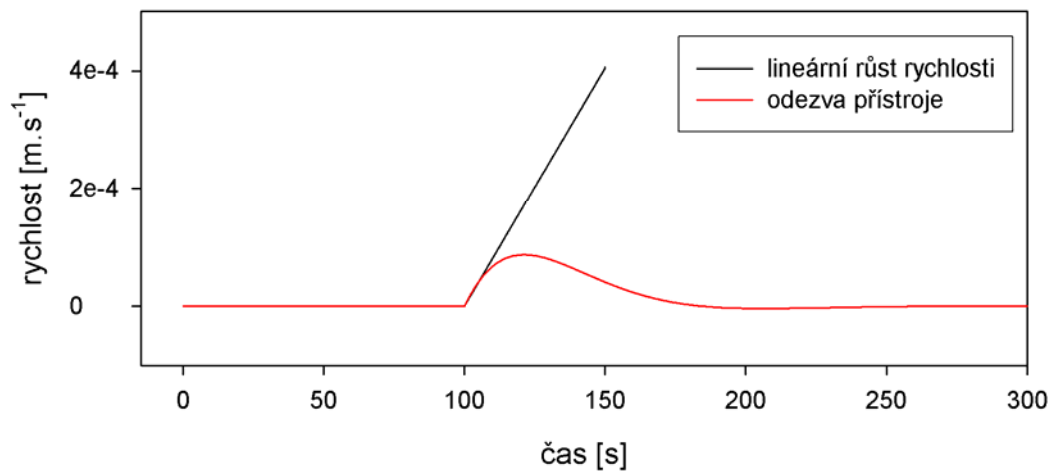
Podrobnější informace o přístrojích jsou uvedeny na stránce <http://seis30.karlov.mff.cuni.cz/>, případně na <http://www.guralp.net/>, nebo také v [3].

2.2. Odezva CMG-3T na skok ve zrychlení

Jak později uvidíme, dlouhoperiodické poruchy lze interpretovat jako odezvu na skok horizontálního zrychlení (což je uvedeno a vysvětleno například v [4]). Vznikají patrně v důsledku náhlého a nevratného náklonu. Prudká změna náklonu vyvolá přidavné horizontální zrychlení, což vysvětluje absenci poruch na vertikální složce. Skok zrychlení odpovídá lineárnímu růstu rychlosti. Protože přístroj nemůže dlouhodobě zaznamenávat tento lineární růst, vzniká dlouhoperiodická porucha a její doba trvání je téměř shodná s rohovou periodou přístroje. Toto můžeme simulovat pomocí předchozích vztahů, kde vstupem $u(t)$ je lineárně rostoucí rychlost. Pokud použijeme fortranský program KOREKCE (autor J. Zahradník, nepublikováno) a zadáme velikost skoku zrychlení (obr. 4), můžeme namodelovat puls vystihující odezvu přístroje (obr. 5) odpovídající lineárnímu růstu rychlosti.



Obr. 4. Příklad možného skoku ve zrychlení ($10^{-5} \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$).



Obr. 5. Odezva přístroje CMG-3T na lineární růst rychlosti.

3. Data a metoda zpracování

3.1. Použité stanice

Jsou použity seismogramy ze seismických stanic v Sergoule (SERG) a Mamousii (MAMO). Jedná se o stanice provozované Univerzitou Karlovou v Praze a Univerzitou v Patrasu. Stanice jsou zakresleny do mapy na obrázku 6, jejich geografické souřadnice jsou uvedeny v tabulce 2. Na obou stanicích jsou umístěny přístroje Guralp CMG-3T a Guralp CMG-5T.



Obr. 6. Umístění seismických stanic SERG a MAMO

v mapě ze stránky <http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:GR-mapa.png>.

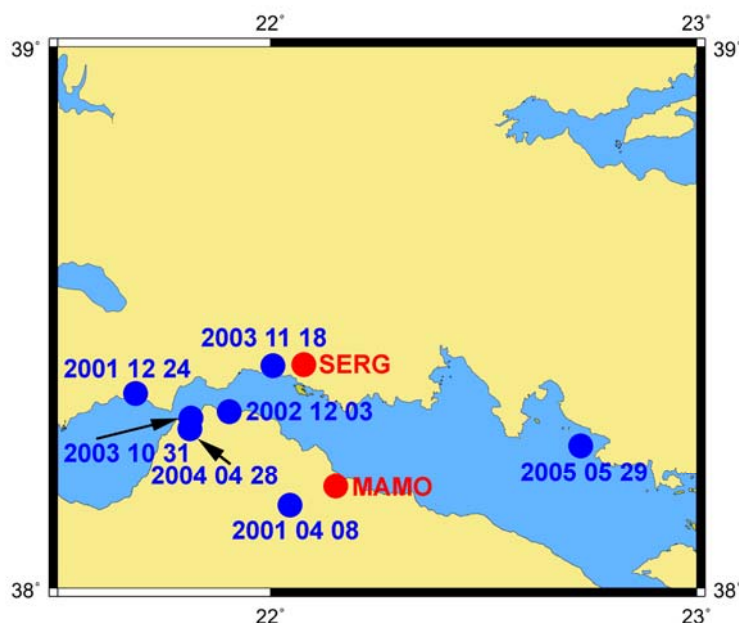
Tabulka 2: Poloha stanic

stanice	sev. šířka [°]	vých. délka [°]
SERG	38.413	22.057
MAMO	38.152	22.143

3.2. Použité záznamy

Je studováno sedm zemětřesení, která se udála v Korintském zálivu (Řecko) v letech 2001 až 2005, ta jsou vyznačena na mapě na obrázku 7. Data lze získat na stránce <http://seis30.karlov.mff.cuni.cz/>, případně lze některá vyhledat přímo z CD umístěných v archivu katedry geofyziky na Karlově.

Čas vzniku, souřadnice epicentra, hloubka hypocentra a lokální magnitudo jednotlivých zemětřesení jsou v tabulce 3. Údaje jsou z katalogů National Observatory of Athens, Institute of Geodynamics (NOA) (http://www.gein.noa.gr/services/Noa_cat/).



Obr. 7. Poloha jednotlivých zemětřesení.

Tabulka 3: Studovaná zemětřesení

datum	svět. čas	sev. šířka [°]	vých. délka [°]	hloubka [km]	magnitudo
2001 04 08	06:12:25.4	38.16	22.05	5	4.1
2001 12 24	20:55:44.7	38.36	21.76	5	4.4
2002 12 03	23:04:39.5	38.34	21.91	10	3.2
2003 10 31	02:33:10.8	38.33	21.82	16	4.0
2003 11 18	18:32:16.4	38.41	22.00	13	4.1
2004 04 28	07:26:58.4	38.32	21.82	15	4.1
2005 05 29	08:55:35.8	38.26	22.73	104	4.4

Základní informace o záznamech jsou uvedeny v tabulce 4. Ve sloupcích SERG a MAMO je uvedeno, která data jsou k dispozici. Používají se následující zkratky:

- sm ... "strong-motion" = záznam z akcelerografu CMG-5T
- bb ... "broad-band" = záznam z širokopásmového seismometru CMG-3T
- 2 ... záznam trvající přibližně dvě minuty (spouštěný, časový krok = 0.01 s)
- 4 ... hodinový záznam (spojitý, časový krok = 0.05 s)

Tabulka 4: Studované záznamy (viz též tabulku 3)

datum	SERG	MAMO
2001 04 08	sm (2, 4)	
2001 12 24	bb (2)	
2002 12 03	bb (2, 4)., sm (2, 4)	bb (2, 4)., sm (4)
2003 10 31	bb (2, 4)., sm (2, 4)	bb (2, 4)., sm (2, 4)
2003 11 18	bb (2, 4)., sm (2, 4)	bb (2, 4)., sm (2, 4)
2004 04 28	bb (2, 4)., sm (2, 4)	sm (2, 4)
2005 05 29	bb (2, 4)., sm (2, 4)	

3.3. Metoda zpracování

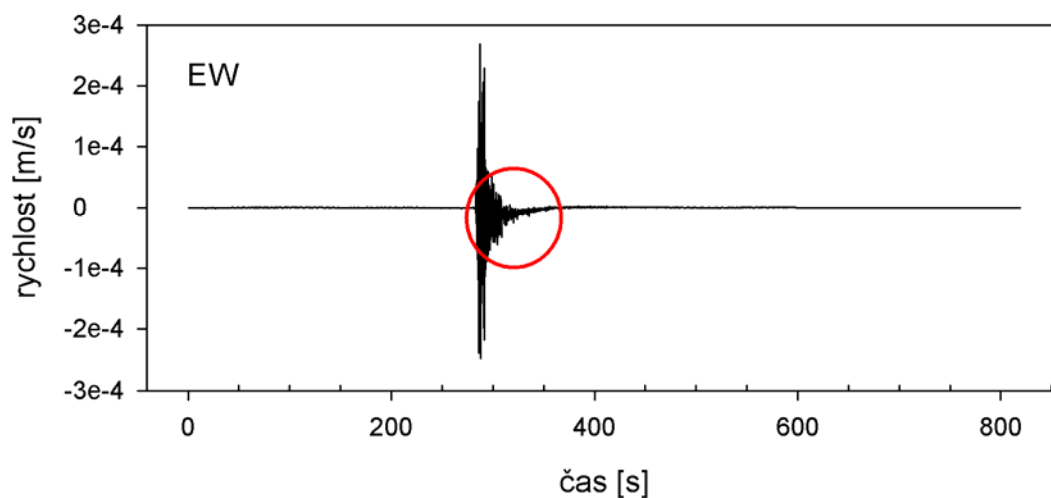
Původní záznamy jsou v binárním formátu *.gcf ("Guralp Compressed Format"). Převod do textového formátu ASCII (*.dat) se provádí pomocí programu Saminfo od téže firmy. Textový soubor obsahuje tři sloupce, odpovídající třem zaznamenaným složkám, v pořadí EW, NS a Z. Program Saminfo ukazuje na obrazovce čas začátku záznamu ("start time"), ale nezapisuje ho do souboru. Tento čas, tvořící důležitou součást spouštěných záznamů, je uveden níže v tabulkách.

V této práci jsou záznamy z přístroje CMG-5T pouze převedeny z formátu *.gcf do formátu *.dat a nejsou dále zpracovány, protože studované poruchy se na nich nemohou vyskytovat.

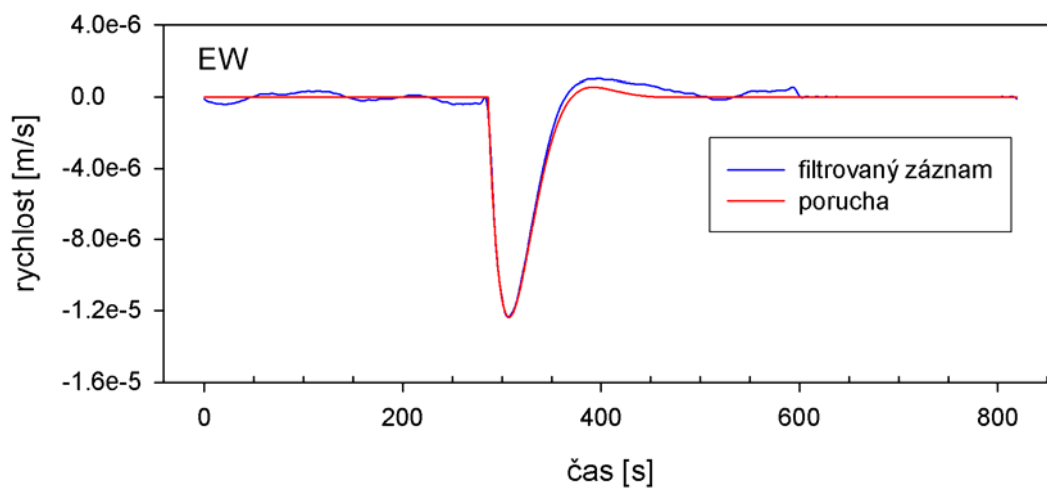
Zpracování dat z přístroje CMG-3T je složitější. Sestává se z několika kroků, které níže demonstrujeme na příkladu zemětřesení 2002 12 03, zaznamenaného v Sergoule. Je použit spojitý hodinový záznam rychlosti, který je upravován pomocí již dříve zmíněného fortranského programu KOREKCE. Při provádění úprav se rychlost nepřevádí ani na zrychlení, ani na posunutí, pouze se přepočítávají hodnoty zaznamenané přístrojem v bitech na hodnoty v $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Na složce EW nefiltrovaného záznamu (obr. 8) je viditelná porucha, kterou je třeba odstranit. K zvýraznění poruchy je použita filtrace typu dolní propusti ($0.0 - 0.0 - 0.1 - 0.1$ Hz), viz obr. 9. Stejný obrázek znázorňuje také dvouparametrický model poruchy, vypočtený jako odezva přístroje CMG-3T na skokovou změnu zrychlení (jak je uvedeno v kapitole 2). Parametry modelové poruchy tvoří čas, v němž došlo ke skoku zrychlení, a amplituda tohoto skoku. Oba parametry byly nalezeny (metodou

zkoušky a chyby) tak, aby poskytly dobrou vizuální shodu modelu se záznamem. Parametry poruch jsou níže v kapitole 4 uváděny v tabulkách.

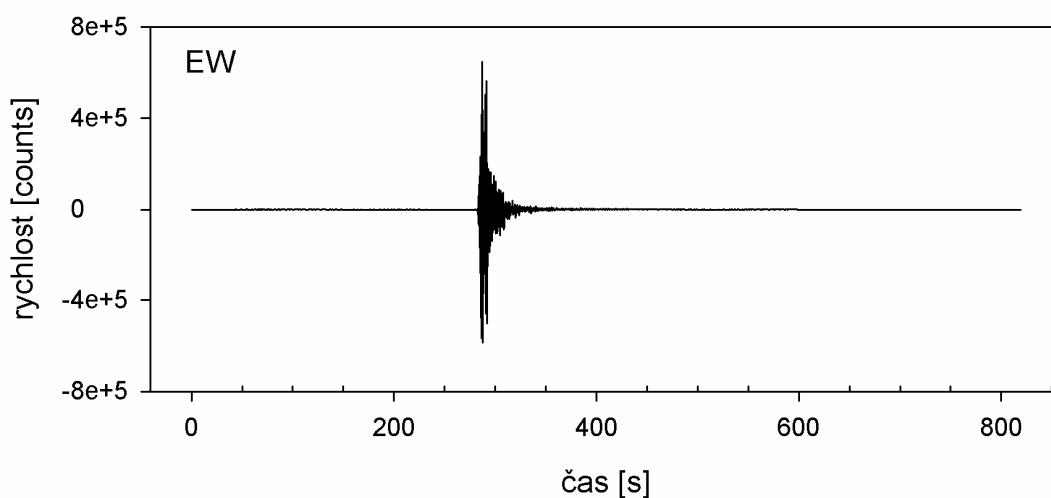


Obr. 8. Nefiltrovaný záznam zemětřesení 2002 12 03 ze stanice SERG, složka EW. Porucha je vyznačena elipsou.



Obr. 9. Záznam z obr. 8 po filtraci (0.0 – 0.0 – 0.1 – 0.1 Hz) a namodelovaná porucha.

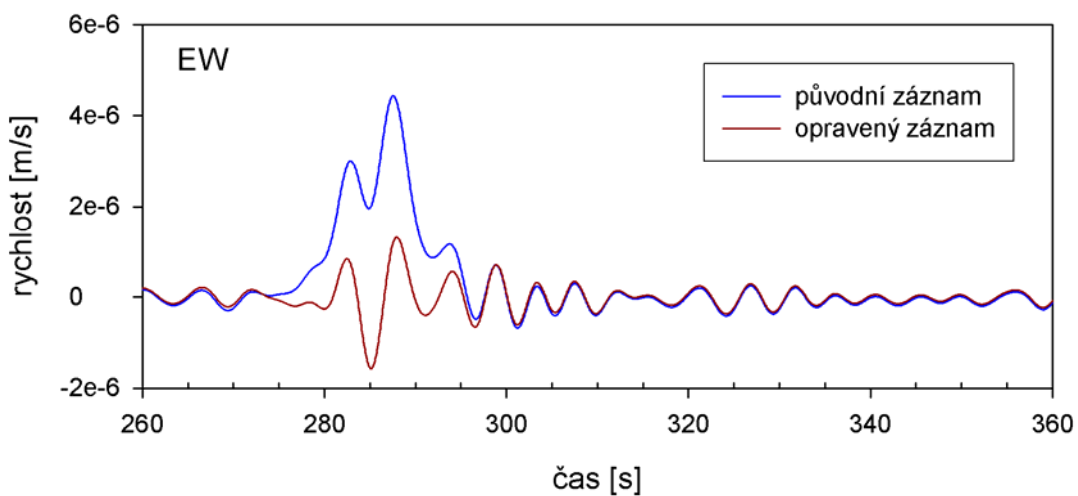
Nyní již můžeme odečíst teoretickou dlouhoperiodickou poruchu z původního nefiltrovaného záznamu, což představuje hlavní výsledek zpracování, viz obr. 10.



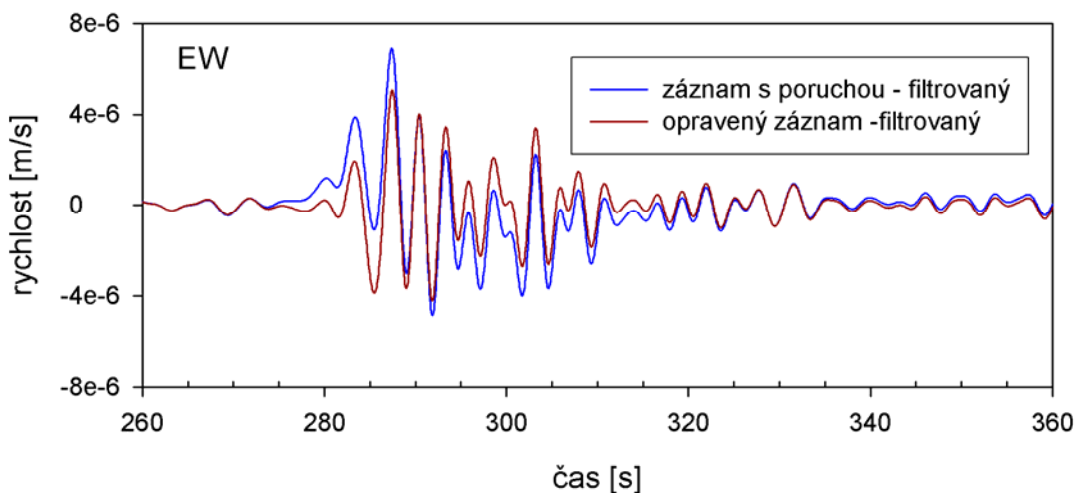
Obr. 10. Výsledný nefiltrovaný záznam po odstranění poruchy.

Ještě ukážeme význam odstranění poruchy. Použijeme filtr (0.0 – 0.05 – 0.1 – 0.3 Hz) a provedeme instrumentální korekci. Porovnání původního a opraveného záznamu je pak na obr. 11. Je vidět, že křivky v grafu se neshodují v místě, kde je v původním záznamu porucha. Zopakujeme ještě podobný test pro jiný frekvenční obor (0.0 – 0.05 – 0.1 – 0.5 Hz) a neprovedeme instrumentální korekci, viz obr. 12. Opět je zde neshoda v místě poruchy původního záznamu, ale již není tak patrná.

Pokud bychom tedy zpracovávali záznamy automaticky (prováděli filtraci a případně i instrumentální korekci) aniž bychom si prohlédli původní záznam, mohli bychom poruchu v závislosti na volbě filtru buď odhalit (obr. 11), nebo přehlédnout (obr. 12), proto je důležité původní záznamy prohlížet, bez instrumentální korekce a bez filtrace, případně v oboru $f < 0.1$ Hz, nebo bez filtrace ale integrované.



Obr. 11. Porovnání záznamu z obr. 8. a opraveného záznamu. U obou byla provedena filtrace (0.0 – 0.05 – 0.1 – 0.3 Hz) a instrumentální korekce.



Obr. 12. Porovnání záznamu z obr. 8. po filtraci (0.0 – 0.05 – 0.1 – 0.5 Hz) a opraveného záznamu po provedení téže filtrace.

Celý postup modelování poruchy a jejího odstranění se provádí i pro složku NS. Obecně platí, že se poruchy na složkách EW a NS téhož záznamu neshodují. Liší se nejen jejich amplituda, ale i čas nasazení. To je důležitý fyzikální poznatek, ale zatím není jednoduše vysvětlitelný. K vysvětlení by mohlo přispět podrobnější studium vztahu mezi časem nasazení a vlnovými skupinami. Není vyloučeno, že nasazení

poruchy souvisí s rozdílným charakterem S vlny na jednotlivých horizontálních složkách.

Ve výsledném souboru obsahujícím opravený záznam jsou tři sloupce (opět v pořadí EW, NS, Z). Hladina záznamu je však nulová. Zjištěné hodnoty jsou přepočítané z m.s^{-1} zpět na bity, takže s ním lze technicky pracovat stejně jako s původním záznamem před odstraněním poruchy.

Bylo také zkontrolováno, že v průběhu zpracování nedochází k nějaké formální systematické chybě. Na trojsložkový záznam byl formálně aplikován celý postup programu KOREKCE. Záznam byl převeden z bitů na m.s^{-1} a umístěn na nulovou hladinu. Od záznamu byly odečteny poruchy s nulovou amplitudou a výsledek byl přepočítán zpět na bity. Po umělém přidání hladiny původního záznamu se výsledek porovnal s původním záznamem. Rozdíly nepřesáhly 1.5 bitu (což je v daném případě 0.0003 %) a lze je považovat za zaokrouhlovací chybu. Takto bylo mimo jiné též ověřeno pořadí sloupců výsledného záznamu, které se shoduje s pořadím složek ve vstupním souboru: EW, NS, Z.

4. Výsledky zpracování dat

Seďm vybraných zemětřesení a metoda zpracování byly popsány v předchozí kapitole. Pro ilustraci bylo použito zemětřesení ze dne 2002 12 03. V ostatních případech se při zpracování postupovalo obdobně, proto jsou v této kapitole výsledky uvedeny především formou tabulek a obrázků.

U každého zemětřesení jsou v tabulkách uvedeny následující parametry: Stanice, typ záznamu (např. bb2, sm4, atd., viz kapitola 3), začátek záznamu ("start time"), jestli je či není záznam přebuzen, zda byla nalezena porucha a pokud ano, jaké jsou její parametry (čas, ve kterém porucha začíná, měřený od počátku daného záznamu a velikost skoku ve zrychlení). Komentovány jsou zde pouze zvláštnosti jednotlivých zemětřesení. Shrnutí některých poznatků je uvedeno v závěru.

Poruchy ve spouštěném záznamu mají stejný charakter jako v záznamu spojitěm, proto jsou zde pro ukázk u uváděny obrázky pouze záznamů spojitých, pokud jsou k dispozici. Jde vždy o analogii obrázků 8 – 12 z kapitoly 3.

Ve spojitěm hodinověm záznamu i ve spouštěném záznamu (z širokopásmového seismometru) ze stanice Mamousia nebyla patrná dlouhoperiodická porucha ("myš"). Ani po filtraci záznamů, která by tuto poruchu zvýraznila, nebyla objevena. Pro další zpracování lze tedy u této stanice ve všech případech používat původní data.

4.1. Zemětřesení 2002 12 03

Parametry tohoto zemětřesení jsou uvedeny v tabulkách číslo 5, 6, 7.

Tabulka 5: Zemětřesení 2002 12 03 Sergoula

SERG	začátek	přebuzení	porucha
bb (2)	23:04:21	NE	ANO
bb (4)	23:00:00	NE	ANO
sm (2)	23:04:23	NE	
sm (4)	23:00:00	NE	

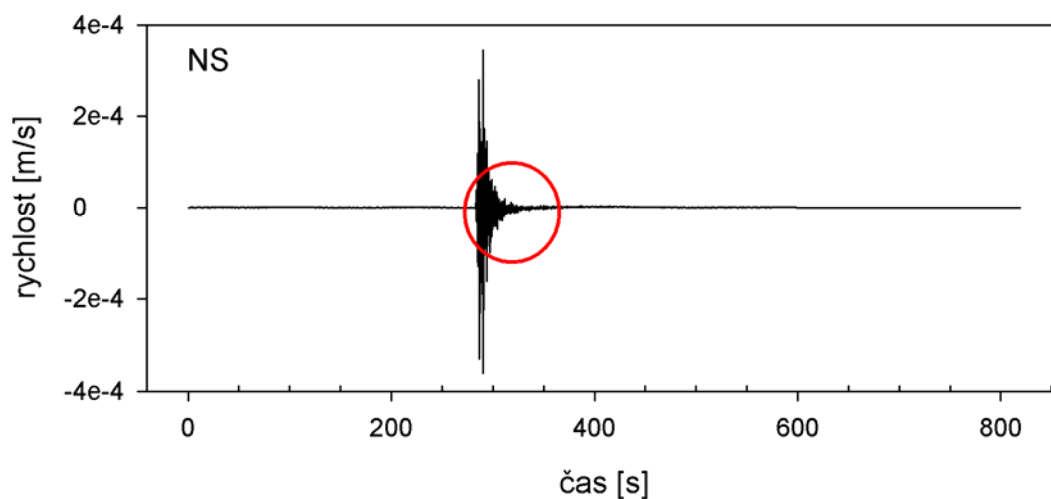
Tabulka 6: Parametry poruch 2002 12 03

SERG	čas EW [s]	skok ve zrychlení EW [m.s ⁻²]	čas NS [s]	skok ve zrychlení NS [m.s ⁻²]
bb (2)	24.8	-1.388 10 ⁻⁶	23.5	-3.711 .10 ⁻⁷
bb (4)	286.0	-1.421 .10 ⁻⁶	286.0	-3.800 .10 ⁻⁷

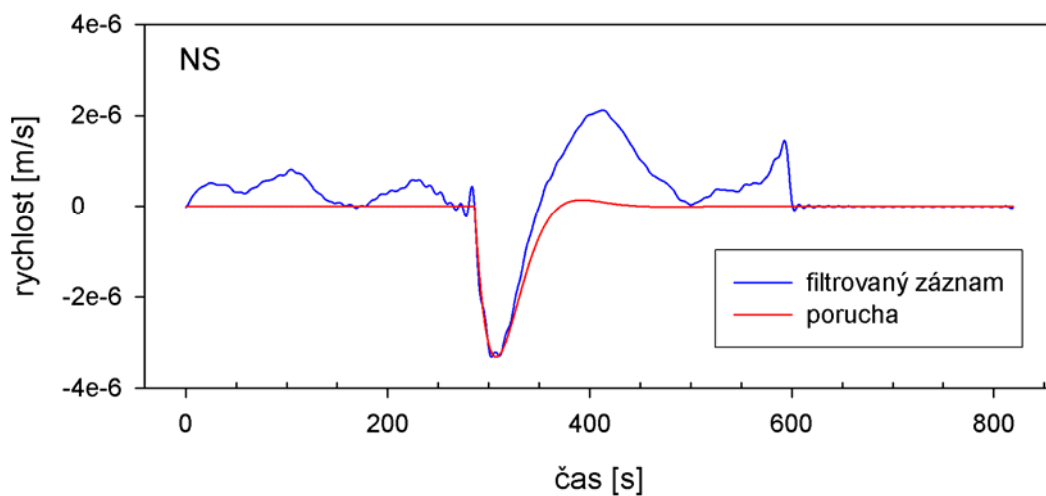
Tabulka 7: Zemětřesení 2002 12 03 - Mamousia

MAMO	Začátek	přebuzení	porucha
bb (2)	23:04:20	NE	NE
bb (4)	23:00:00	NE	NE
sm (4)	23:00:00	NE	

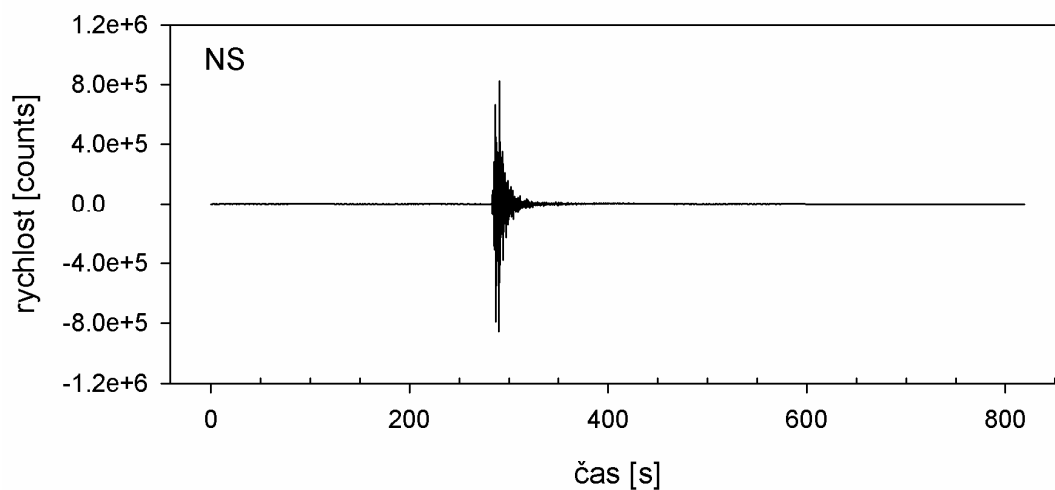
Protože princip odstraňování poruchy je v kapitole 3 vysvětlen na složce EW zemětřesení 2002 12 03, jsou níže uvedeny obrázky pro složku NS spojitého záznamu. Zpracování záznamu je vidět na obrázcích 13 – 17, kde je znázorněna složka EW.



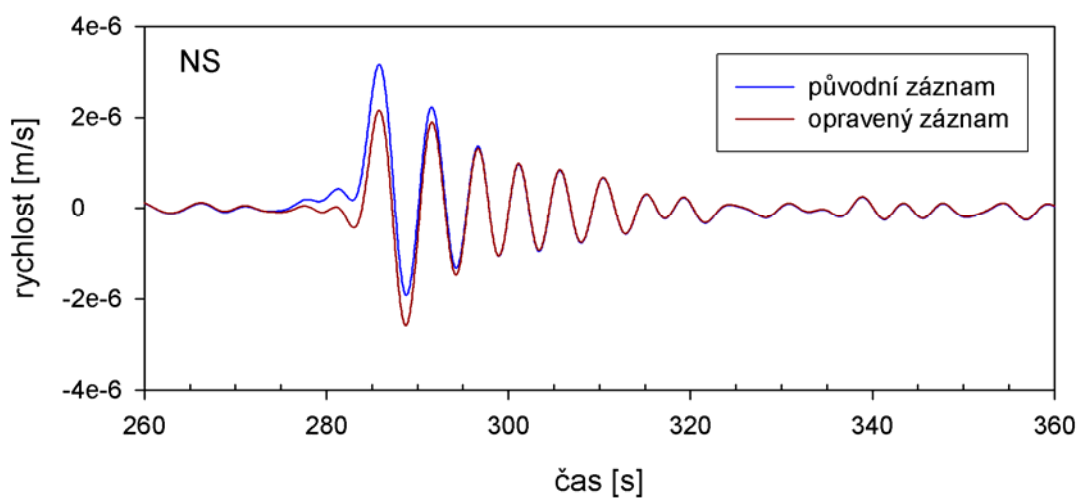
Obr. 13. Nefiltrovaný záznam zemětřesení 2002 12 03 ze stanice SERG, složka NS. Místo, kde byla po filtraci objevena porucha je vyznačeno elipsou.



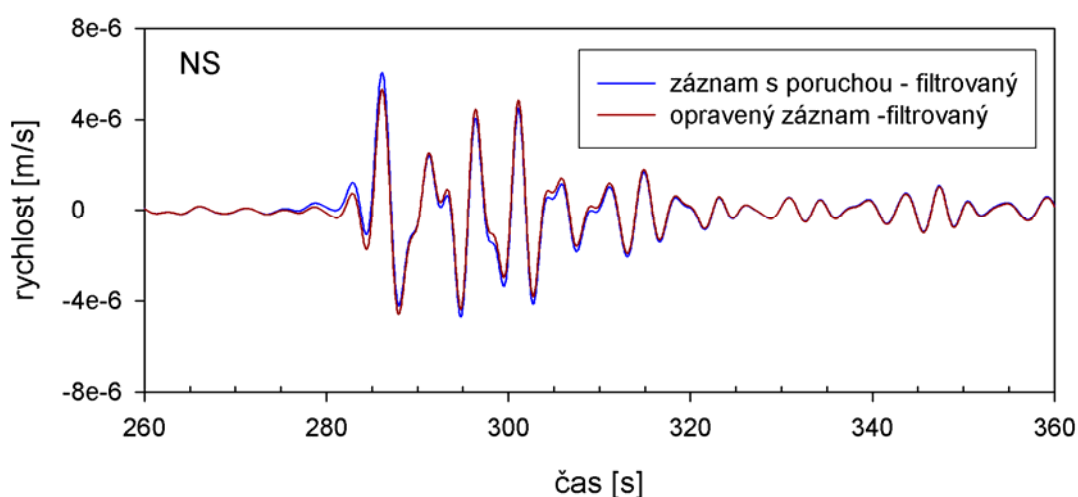
Obr. 14. Záznam z obr. 13. po filtraci (0.0 – 0.0 - 0.1 – 0.1 Hz) a namodelovaná porucha.



Obr. 15. Výsledný nefiltrovaný záznam po odstranění poruchy.



Obr. 16. Porovnání záznamu z obr. 13. a opraveného záznamu. U obou byla provedena filtrace (0.0 – 0.05 až 0.1 – 0.3 Hz) a instrumentální korekce.



Obr. 17. Porovnání záznamu z obr. 13. po filtraci (0.0 – 0.05 - 0.1 – 0.5 Hz) a opraveného záznamu po provedení těžší filtrace.

4.2. Zemětřesení 2001 04 08

Stanice Mamousia začala měřit až v prosinci 2001 a seismogramy ze Sergouly z přístroje CMG-3T nejsou k dispozici. Záznamy tohoto zemětřesení byly tedy pouze vyhledány a převedeny z formátu *.gcf do formátu *.dat. Výsledky zpracování jsou v tabulce 8.

Tabulka 8: Zemětřesení 2001 04 08 - Sergoula

SERG	Začátek	přebuzení
sm (2)	06:12:22	NE
sm (4)	06:00:00	NE

4.3. Zemětřesení 2001 12 24

V tomto případě byl k dispozici pouze spouštěný záznam ze stanice v Sergoule. Podrobnější informace jsou v tabulkách 9, 10 a na obrázcích 18 – 22, kde je znázorněna složka EW.

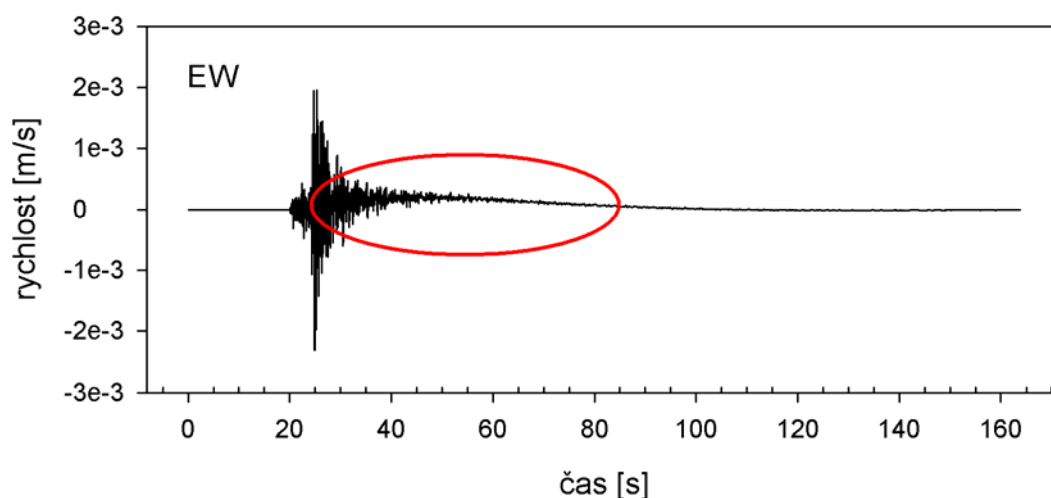
Tabulka 9: Zemětřesení 2001 12 24 - Sergoula

SERG	Začátek	Přebuzení	porucha
bb (2)	20:50:00	ANO-EW,NS	ANO
bb (2-cut)	20:55:30	ANO-EW,NS	ANO

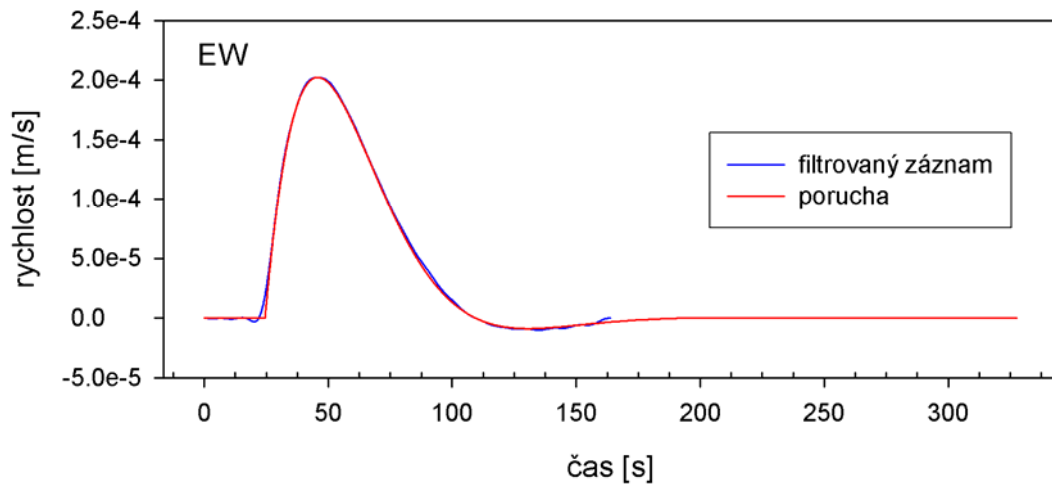
Tabulka 10: Parametry poruch 2001 12 24

SERG	čas EW [s]	skok ve zrychlení EW [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]	čas NS [s]	skok ve zrychlení NS [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]
bb (2-cut)	24.5	$2.321 \cdot 10^{-5}$	24.5	$-1.348 \cdot 10^{-5}$

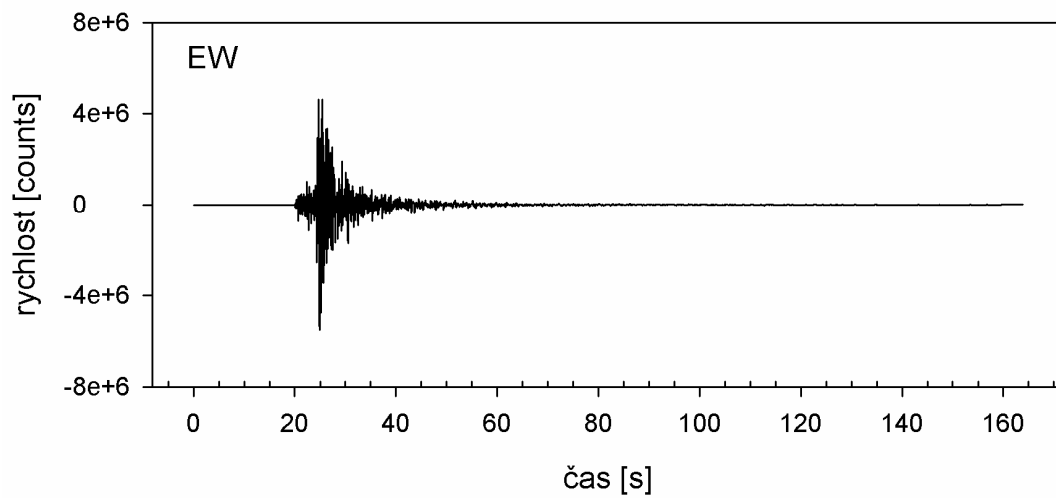
Protože program KOREKCE u spouštěného záznamu zpracovává přibližně prvních 160 sekund seismogramu a v tomto případě nastalo zemětřesení až později, bylo nutné ze záznamu vybrat interval, který se dále používá (v tabulce 9 je označen jako bb (2-cut)).



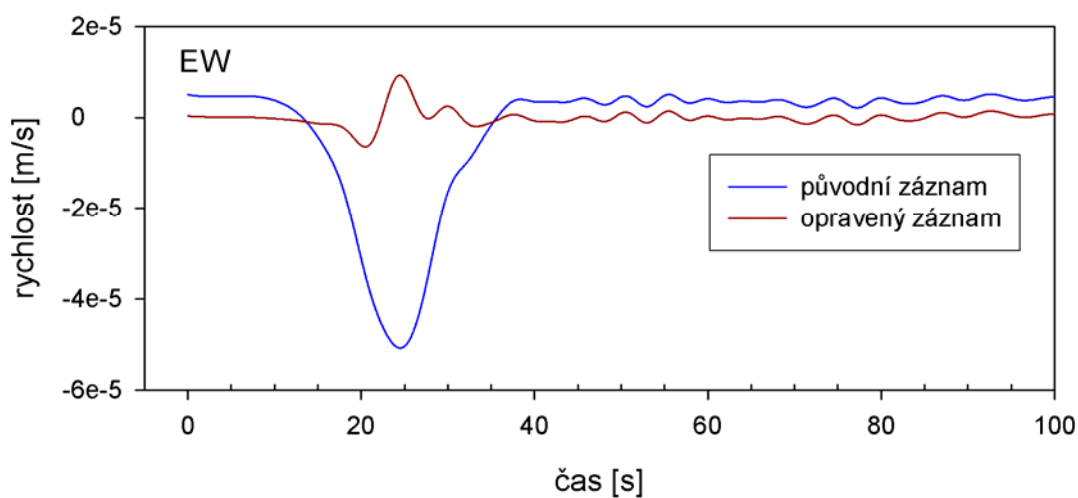
Obr. 18. Nefiltrovaný záznam zemětřesení 2001 12 24 ze stanice SERG, složka NS. Porucha je vyznačena elipsou.



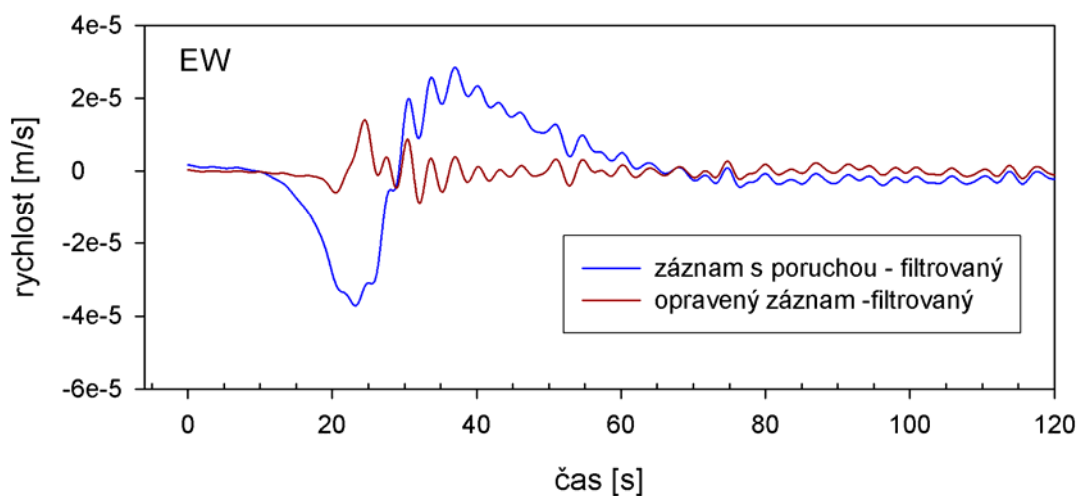
Obr. 19. Záznam z obr. 18. po filtraci (0.0 – 0.0 - 0.1 – 0.1 Hz) a namodelovaná porucha.



Obr. 20. Výsledný nefiltrovaný záznam po odstranění poruchy.



Obr. 21. Porovnání záznamu z obr. 18. a opraveného záznamu. U obou byla provedena filtrace (0.0 – 0.05 – 0.1 – 0.3 Hz) a instrumentální korekce.



Obr. 22. Porovnání záznamu z obr. 18. po filtraci (0.0 – 0.05 - 0.1 – 0.5 Hz) a opraveného záznamu po provedení téže filtrace.

4.4. Zemětřesení 2003 10 31

Parametry tohoto zemětřesení jsou uvedeny v tabulkách číslo 11, 12, 13 a na obrázcích 23 – 27, kde je znázorněna složka EW spojitého záznamu ze Sergouly.

Tabulka 11: Zemětřesení 2003 10 31 - Sergoula

SERG	začátek	přebuzení	porucha
bb (2)	02:32:54	NE	ANO
bb (4)	02:00:00	NE	ANO
bb (4-cut)	02:30:00	NE	ANO
sm (2)	02:32:49	NE	
sm (4)	02:00:00	NE	

Tabulka 12: Parametry poruch 2003 10 31

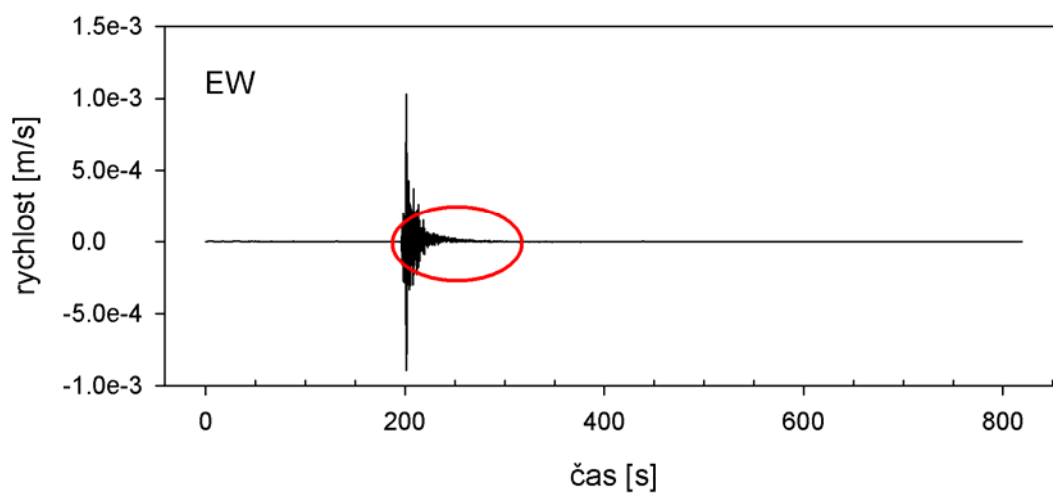
SERG	čas EW [s]	skok ve zrychlení EW [m.s-1]
bb (2)	28.5	$2.092 \cdot 10^{-6}$
bb (4-cut)	202.0	$2.038 \cdot 10^{-6}$

Na složce NS nebyla porucha nalezena.

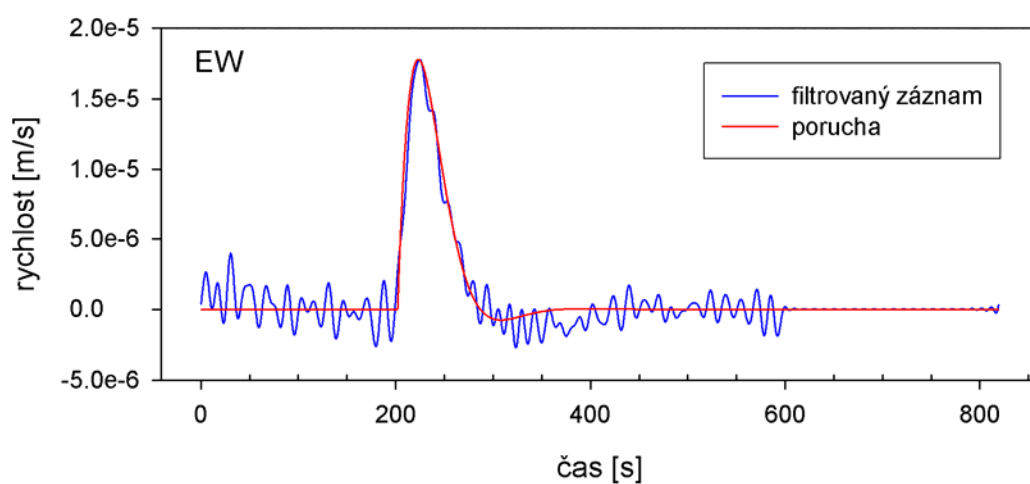
Tabulka 13: Zemětřesení 2003 10 31 - Mamousia

MAMO	začátek	přebuzení	porucha
bb (2)	2:32:57	NE	NE
bb (4)	2:00:00	NE	NE
bb (4-cut)	2:30:00	NE	NE
sm (2)	2:32:58	NE	
sm (4)	2:00:00	NE	

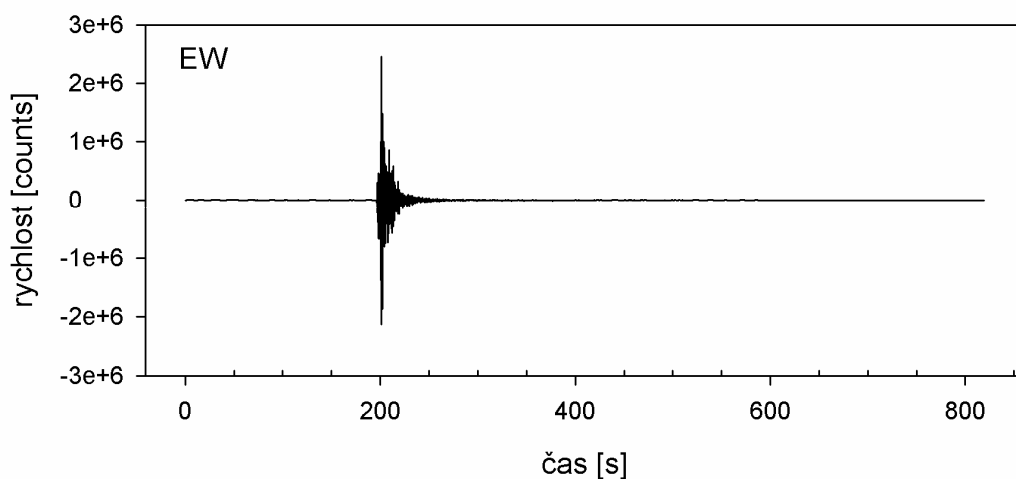
Protože program KOREKCE u spojitého záznamu zpracovává přibližně prvních 13 minut seismogramu a v tomto případě nastalo zemětřesení až později, bylo nutné ze záznamu vybrat interval, který se dále používá (v tabulce 11 a 13 je označen jako bb (4-cut)). U ostatních zemětřesení má bb (4-cut) také tento význam.



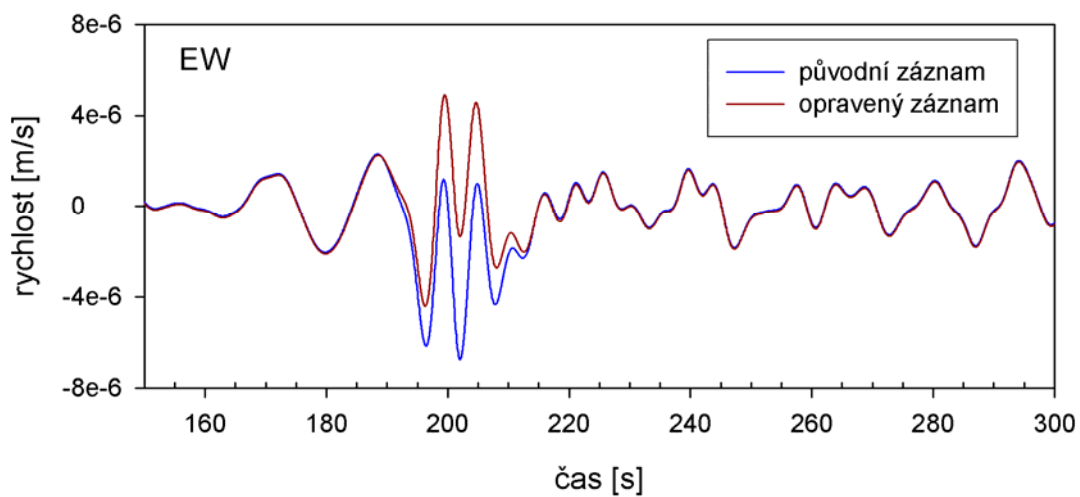
Obr. 23. Nefiltrovaný záznam zemětřesení 2003 10 31 ze stanice SERG, složka NS. Místo, kde byla po filtraci objevena porucha je vyznačeno elipsou.



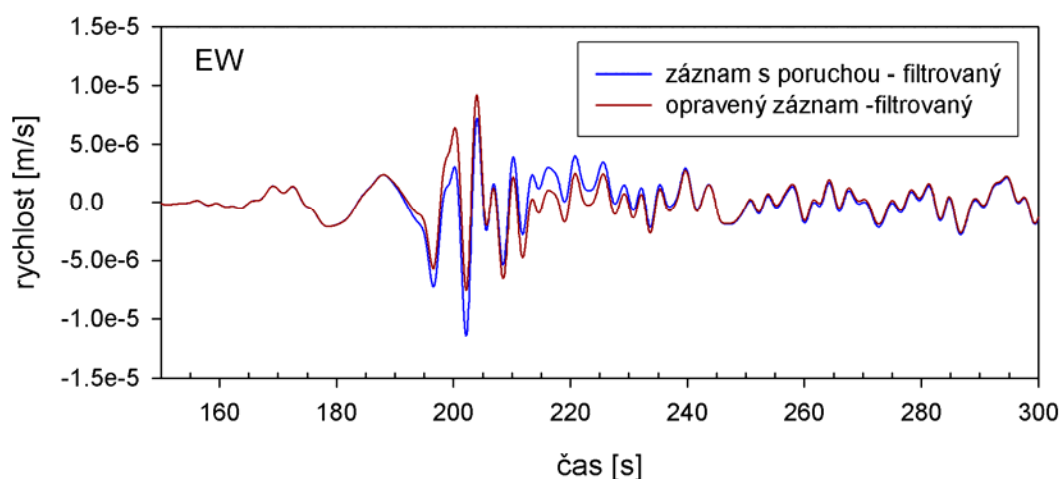
Obr. 24. Záznam z obr. 23. po filtraci (0.0 – 0.0 - 0.1 – 0.1 Hz) a namodelovaná porucha.



Obr. 25. Výsledný nefiltrovaný záznam po odstranění poruchy.



Obr. 26. Porovnání záznamu z obr. 23. a opraveného záznamu. U obou byla provedena filtrace (0.0 – 0.05 – 0.1 – 0.3 Hz) a instrumentální korekce.



Obr. 27. Porovnání záznamu z obr. 23. po filtraci (0.0 – 0.05 - 0.1 – 0.5 Hz) a opraveného záznamu po provedení téže filtrace.

4.5. Zemětřesení 2003 11 18

V tomto případě byl spouštěný záznam ze Sergouly nejen silně přebuzený, ale podivně deformovaný. Překvapivě však v tomto (jediném nám dosud známém) případě se spouštěný záznam choval jinak. Byl sice také přebuzený, ale použitelný. Zpracováván je tedy pouze spouštěný záznam. Podrobnější informace jsou v tabulkách 14, 15, 16 a na obrázcích 28 – 32, kde je znázorněna složka EW ze Sergouly. V tomto případě je amplituda poruchy srovnatelná s amplitudami užitečného signálu.

Tabulka 14: Zemětřesení 2003 11 18 - Sergoula

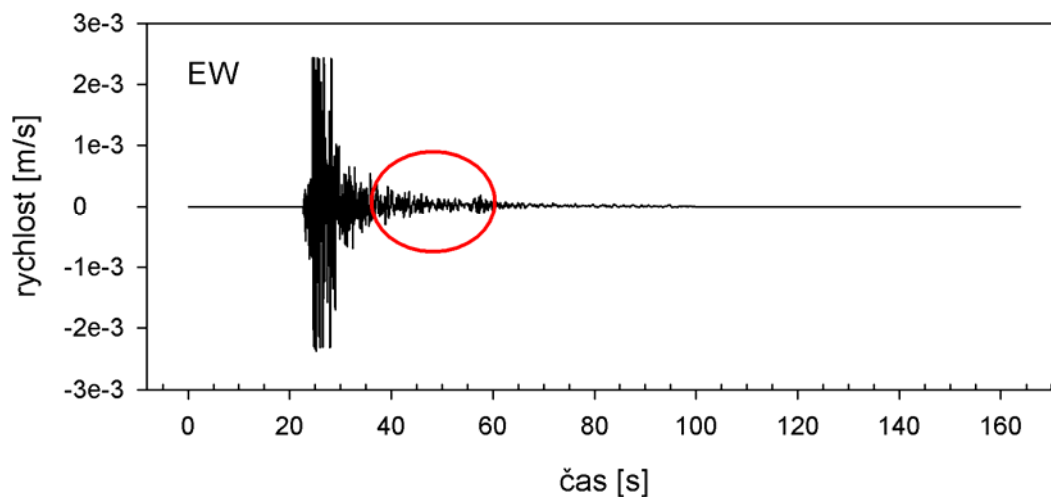
SERG	začátek	Přebuzení	Porucha
bb (2)	18:31:57	ANO-EW, NS, Z	ANO
bb (4)	18:00:00	ANO-EW, NS, Z	NE
bb (4-cut)	18:25:00	ANO-EW, NS, Z	NE
sm (2)	18:31:54	NE	
sm (4)	18:00:00	NE	

Tabulka 15: Parametry poruch 2003 11 18

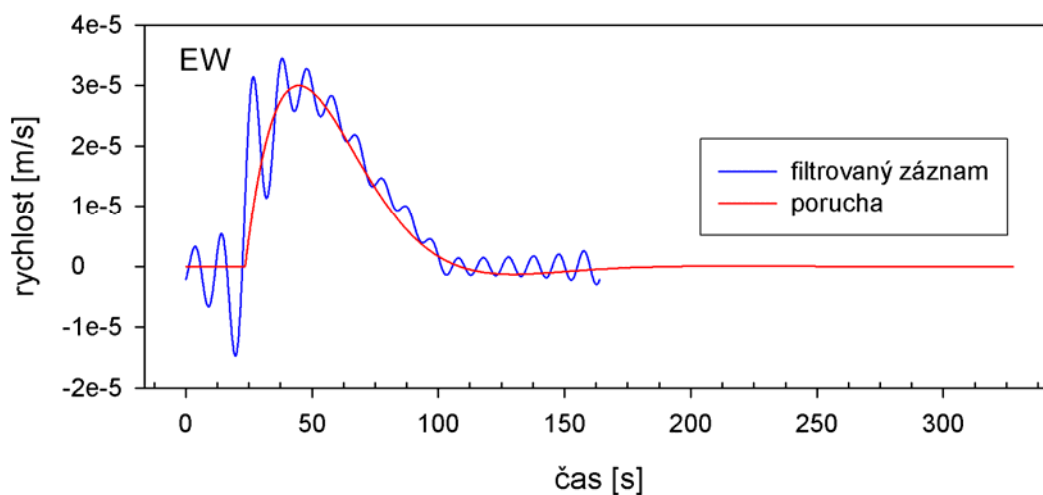
SERG	čas EW [s]	skok ve zrychlení EW [m.s ⁻²]	čas NS [s]	skok ve zrychlení NS [m.s ⁻²]
bb (2)	23.5	3.442 .10 ⁻⁶	31.5	-2.763 .10 ⁻⁶

Tabulka 16: Zemětřesení 2003 11 18 - Mamousia

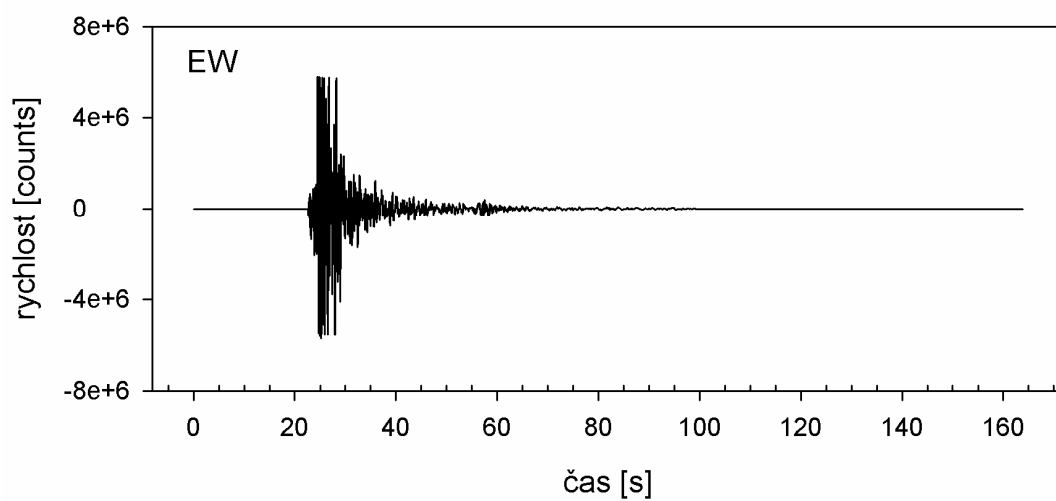
MAMO	začátek	přebuzení	porucha
bb (2)	18:32:03	NE	NE
bb (4)	18:00:00	NE	NE
bb (4-cut)	18:25:00	NE	NE
sm (2)	18:31:58	NE	
sm (4)	18:00:00	NE	



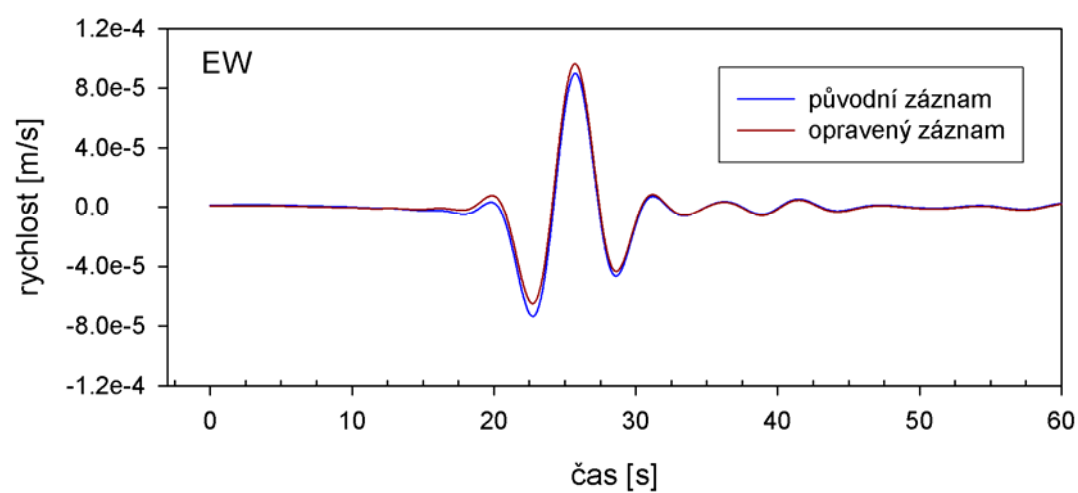
Obr. 28. Nefiltrovaný záznam zemětřesení 2003 11 18 ze stanice SERG, složka EW. Místo, kde se vyskytuje porucha, která zde není patrná, je vyznačeno elipsou.



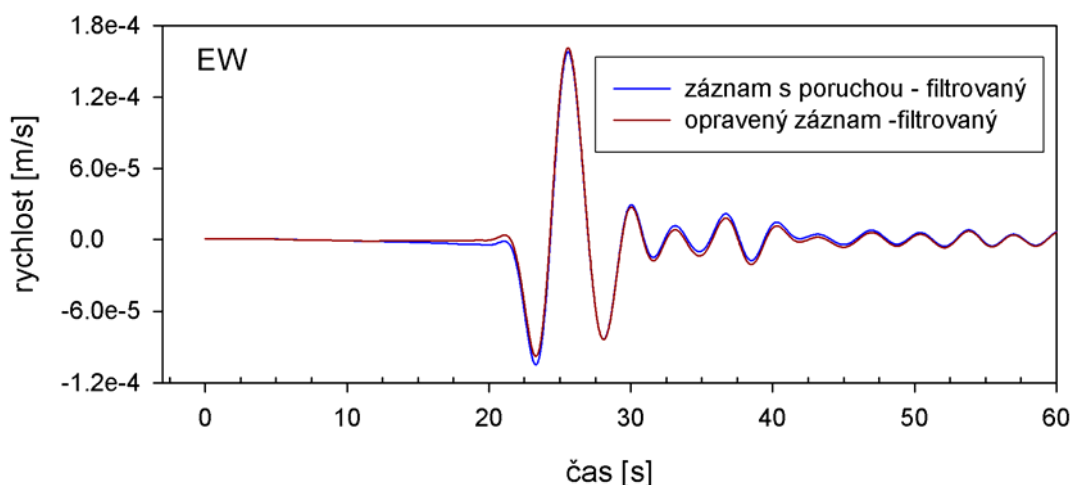
Obr. 29. Záznam z obr. 28. po filtraci (0.0 – 0.0 - 0.1 – 0.1 Hz) a namodelovaná porucha.



Obr. 30. Výsledný nefiltrovaný záznam po odstranění poruchy.



Obr. 31. Porovnání záznamu z obr. 28. a opraveného záznamu. U obou byla provedena filtrace (0.0 – 0.05 - 0.1 – 0.3 Hz) a instrumentální korekce.



Obr. 32. Porovnání záznamu z obr. 28. po filtraci (0.0 – 0.05 - 0.1 – 0.5 Hz) a opraveného záznamu po provedení téže filtrace.

4.6. Zemětřesení 2004 04 28

Parametry tohoto zemětřesení jsou uvedeny v tabulkách číslo 17, 18, 19 a na obrázcích 33 – 37, kde je znázorněna složka EW spojitého záznamu ze Sergouly. K přebuzení došlo pouze u spouštěného záznamu a jen na složce NS.

Tabulka 17: Zemětřesení 2004 04 28 - Sergoula

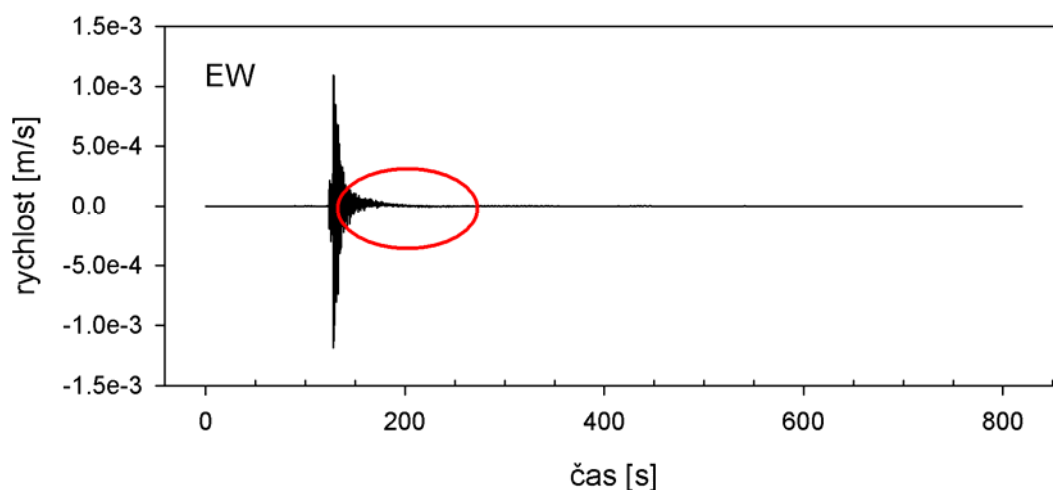
SERG	začátek	přebuzení	porucha
bb (2)	07:26:43	ANO-NS	ANO
bb (4)	07:00:00	NE	ANO
bb (4-cut)	07:25:00	NE	ANO
sm (2)	07:26:42	NE	
sm (4)	07:00:00	NE	

Tabulka 18: Parametry poruch 2004 04 28

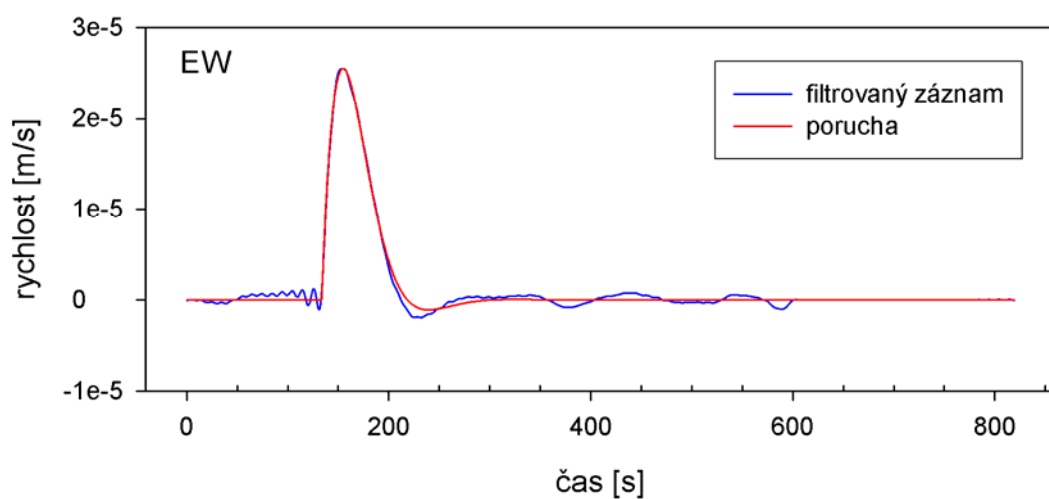
SERG	čas EW [s]	skok ve zrychlení EW [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]	čas NS [s]	skok ve zrychlení NS [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]
bb (2)	30.2	$2.830 \cdot 10^{-6}$	17.5	$7.943 \cdot 10^{-7}$
bb (4-cut)	133.5	$2.932 \cdot 10^{-6}$	120.5	$8.100 \cdot 10^{-7}$

Tabulka 19: Zemětřesení 2004 04 28 - Mamousia

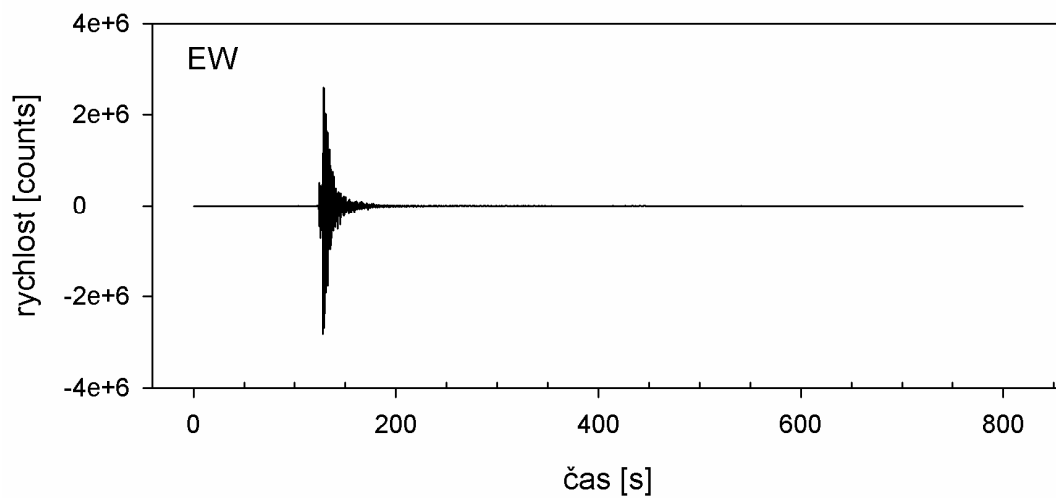
MAMO	začátek	přebuzení
sm (2)	07:26:48	NE
sm (4)	07:00:00	NE



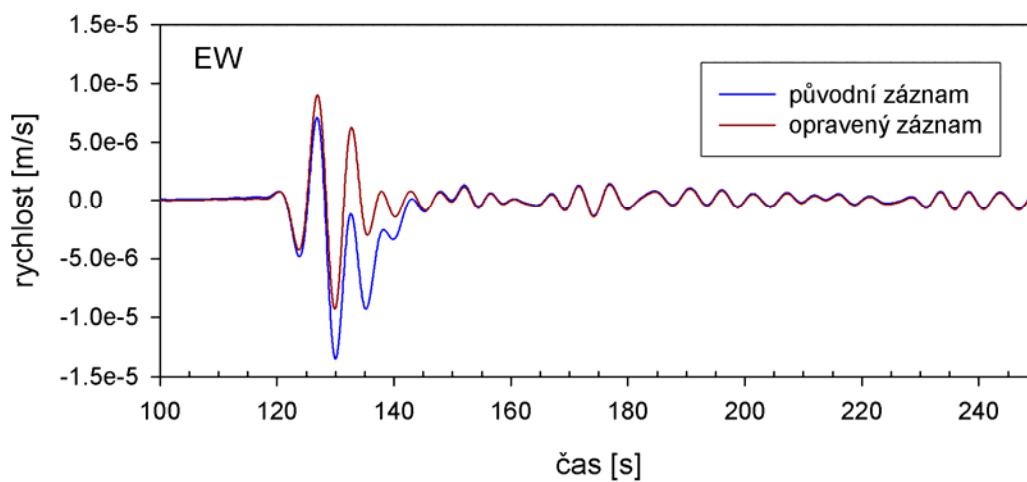
Obr. 33. Nefiltrovaný záznam zemětřesení 2004 04 28 ze stanice SERG, složka EW. Místo, kde se vyskytuje porucha, která zde není patrná, je vyznačeno elipsou.



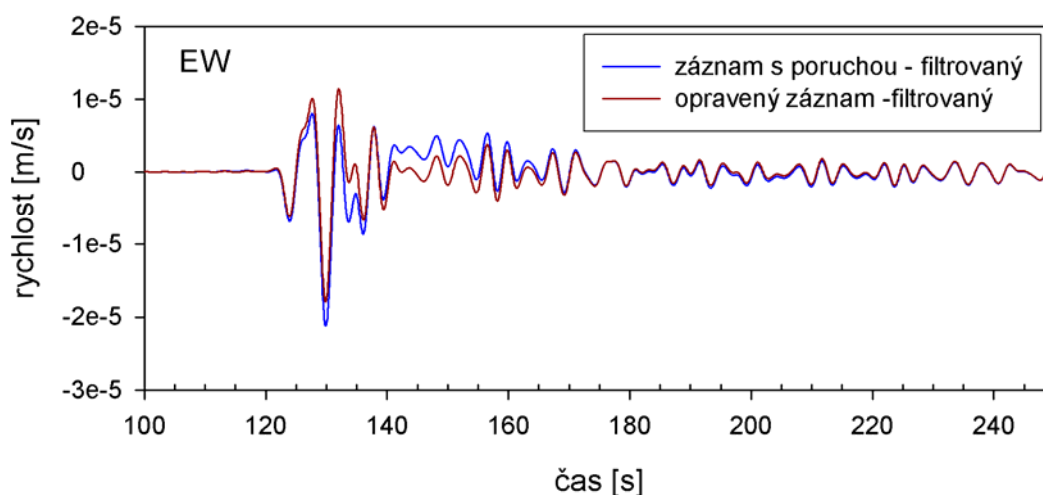
Obr. 34. Záznam z obr. 33. po filtraci (0.0 – 0.0 - 0.1 – 0.1 Hz) a namodelovaná porucha.



Obr. 35. Výsledný nefiltrovaný záznam po odstranění poruchy.



Obr. 36. Porovnání záznamu z obr. 33. a opraveného záznamu. U obou byla provedena filtrace (0.0 – 0.05 - 0.1 – 0.3 Hz) a instrumentální korekce.



Obr. 37. Porovnání záznamu z obr. 33. po filtraci (0.0 – 0.05 - 0.1 – 0.5 Hz) a opraveného záznamu po provedení těžší filtrace.

4.7. Zemětřesení 2005 05 29

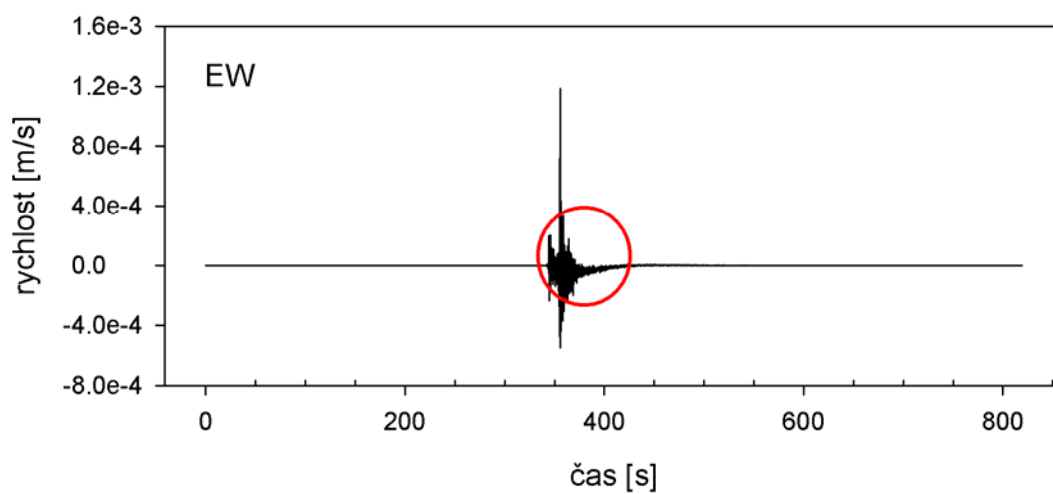
Parametry tohoto zemětřesení jsou uvedeny v tabulkách číslo 20, 21 a na obrázcích 38 – 42, kde je znázorněna složka EW spojitého záznamu ze Sergouly.

Tabulka 20: Zemětřesení 2005 05 29 - Sergoula

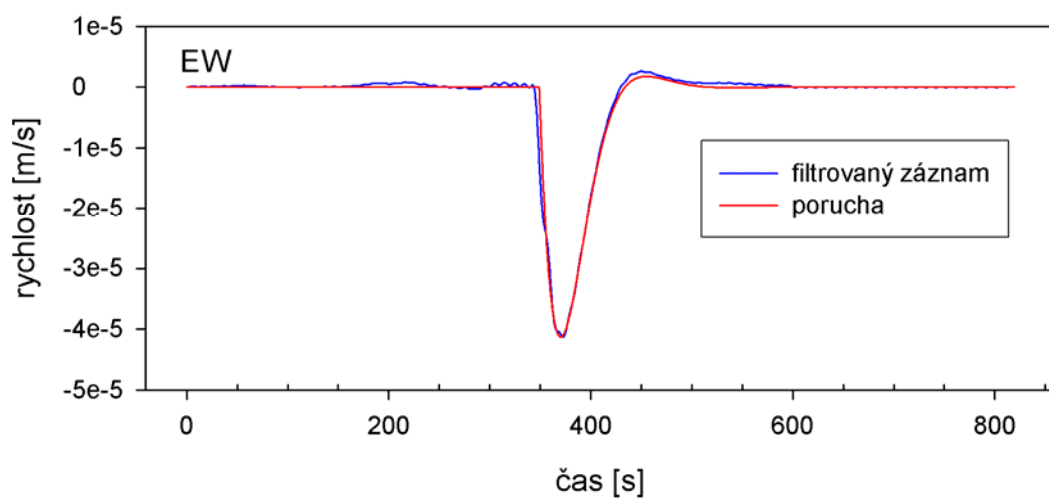
SERG	začátek	přebuzení	porucha
bb (2)	08:55:23	NE	ANO
bb (4)	08:00:00	NE	ANO
bb (4-cut)	08:50:00	NE	ANO
sm (2)	08:55:29	NE	
sm (4)	08:00:00	NE	

Tabulka 21: Parametry poruch 2005 05 29

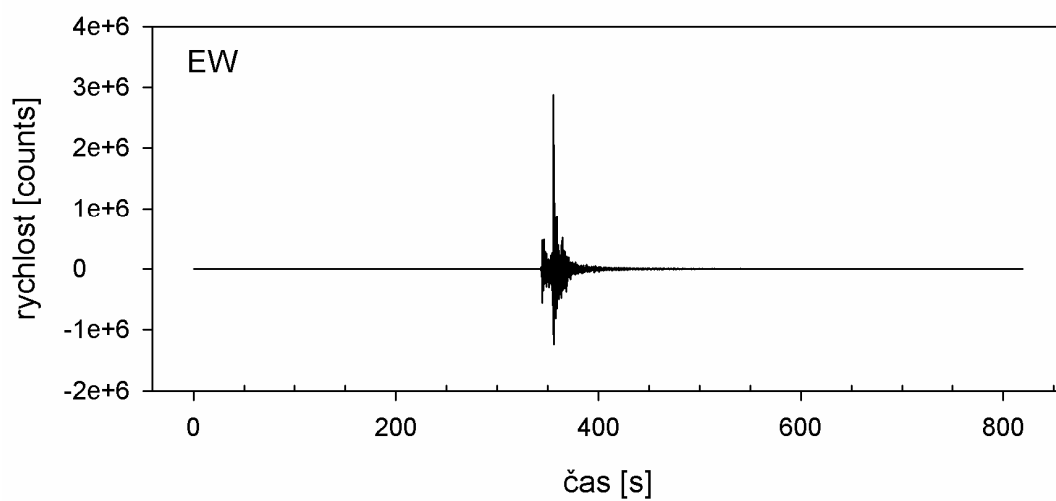
SERG	čas EW [s]	skok ve zrychlení EW [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]	čas NS [s]	skok ve zrychlení NS [$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$]
bb (2)	25.0	$-4.790 \cdot 10^{-6}$	29.5	$1.080 \cdot 10^{-6}$
bb (4-cut)	349.0	$-4.734 \cdot 10^{-6}$	353.0	$1.100 \cdot 10^{-6}$



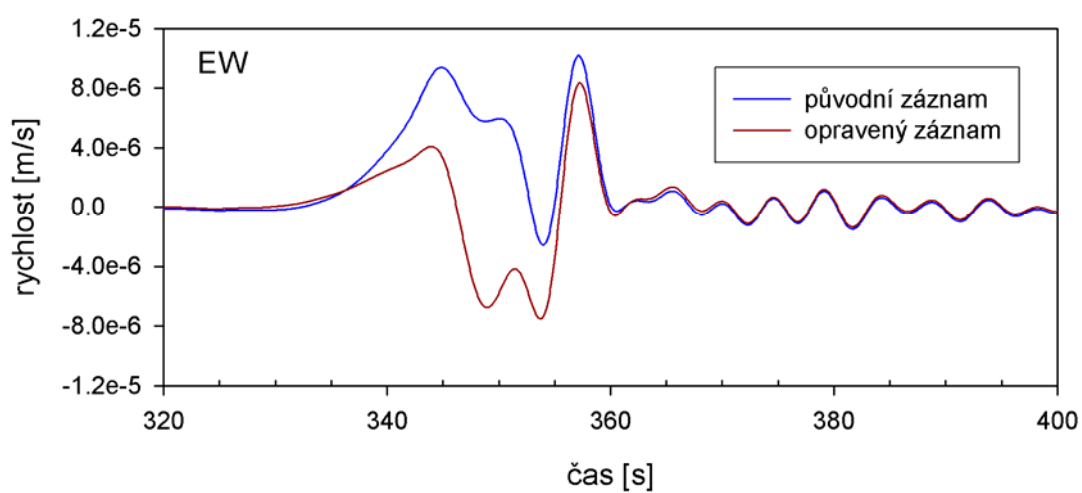
Obr. 38. Nefiltrovaný záznam zemětřesení 2005 05 29 ze stanice SERG, složka EW. Místo, kde se vyskytuje porucha, která zde není patrná, je vyznačeno elipsou.



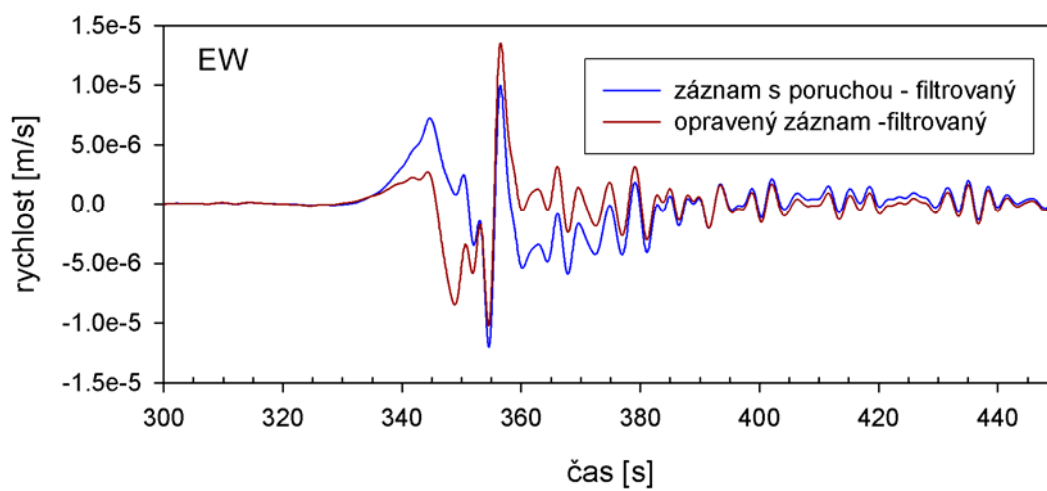
Obr. 39. Záznam z obr. 38. po filtraci (0.0 – 0.0 - 0.1 – 0.1 Hz) a namodelovaná porucha.



Obr. 40. Výsledný nefiltrovaný záznam po odstranění poruchy.



Obr. 41. Porovnání záznamu z obr. 38. a opraveného záznamu. U obou byla provedena filtrace (0.0 – 0.05 - 0.1 – 0.3 Hz) a instrumentální korekce.



Obr. 42. Porovnání záznamu z obr. 38. po filtraci (0.0 – 0.05 - 0.1 – 0.5 Hz) a opraveného záznamu po provedení téže filtrace.

5. Závěr

Bylo studováno sedm zemětřesení z oblasti Korintského zálivu (Řecko). Záznamy z přístroje Guralp CMG-3T byly pečlivě analyzovány. Pokud se na horizontální složce vyskytla dlouhoperiodická porucha, došlo k odstranění této poruchy (oprava záznamu byla nutná v osmnácti případech). Výsledky jsou uvedeny v kapitole 4 a na přiloženém CD.

Obecně lze říci, že porucha na složce EW má jiné parametry než na složce NS. Liší se nejen amplituda, ale i čas nasazení, přičemž porucha na složce NS měla vždy menší velikost amplitudy. Nastal i případ, kdy se porucha vyskytovala pouze na složce EW. Časy nasazení se na jednotlivých horizontálních složkách u záznamu téhož zemětřesení mohou lišit i o více než deset sekund.

Při zpracovávání jednotlivých záznamů nebylo zcela zřejmé, jak hledat parametry poruchy, aby ji co nejlépe vystihly. Umístí-li se modelová porucha tak, že její amplituda splývá s amplitudou reálného záznamu, nelze přesně vystihnout čas nasazení. Pokud tedy zvolíme u modelové poruchy co nejpřesněji čas nasazení, není ve většině případů možné dosáhnout shodu celého časového průběhu poruchy (ačkoliv jejich amplitudy mají stejnou hodnotu, nepřekrývají se). V této práci jsme se snažili volbou parametrů o soulad křivek na co největším časovém intervalu (modelová porucha měla stejně velkou amplitudu jako skutečná a volil se její co nejvhodnější „čas nasazení“).

Zjistili jsme, že modelová porucha vystihuje reálnou poruchu lépe na horizontální složce EW. Může to být způsobeno například tím, že používáme stejnou sadu nul a pólů pro obě složky, zatímco ve skutečnosti se poněkud liší. Poruchy by se v budoucnu mohly použít k novému (přesnějšímu) výpočtu nul a pólů.

Bylo by také vhodné vyvinout program pro automatické odstraňování dlouhoperiodických poruch ze záznamů. V budoucnu je tedy nutné co nejpřesněji charakterizovat tento druh poruchy, aby šlo jednoznačně určit, zda ji zkoumaný záznam obsahuje (poruchy mohou být několika druhů, viz [1], v této práci jsme se zabývali jen jedním druhem). Důležité je také formulovat kritérium pro namodelování poruchy, která nejpřesněji vystihuje reálný záznam.

6. Literatura

- [1] Adamová, P. (2006): Earthquake source process and its complexity. Diplomová práce, MFF UK, Praha.
- [2] Scherbaum, F. (1994): *Basic concepts in digital signal processing for seismologists*. Springer-Verlag 1994.
- [3] Zahradník, J. (2004): How many seismographs do we need to record ground motion at a station? *Studia Geoph. et Geod.* **48**, 483-492.
- [4] Zahradník, J., Plešinger, A. (2005): Long-period pulses in broadband records of near earthquakes. *Bull. Seism. Soc. Am.* **95**, 1928-1939.

Internetové stránky:

<http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:GR-mapa.png>

<http://geo.mff.cuni.cz/documents/seismologie/seis1/>

<http://seis30.karlov.mff.cuni.cz/>

http://www.gein.noa.gr/services/Noa_cat/

<http://www.guralp.net/>