

LA STAZIONE GEOFISICA IPOGEA DELLA GROTTA GIGANTE (CARSO TRIESTINO)

Dipartimento di Geoscienze, Università di Trieste (DiGeo, ex DST)
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV)

Convenzione INGV - DST

Prot. Nr. (INGV) 1189 del 16.04.2002

Prot. Nr. (DST) 72/02 del 22.04.2002

Rapporto annuale
Novembre 2010

Responsabile Scientifico: Dr. Carla Braitenberg

Hanno collaborato:

DiGeo:

Prof. Maria Zadro

Dr. Ing. Ildikò Nagy

Dott. Barbara Grillo

Dott. Daniele Tenze

Dott. Patrizia Mariani

Dipl. Tecn. Sergio Zidarich

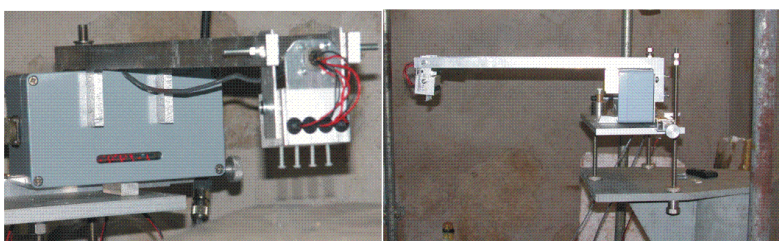
INGV:

Dott. Gianni Romeo

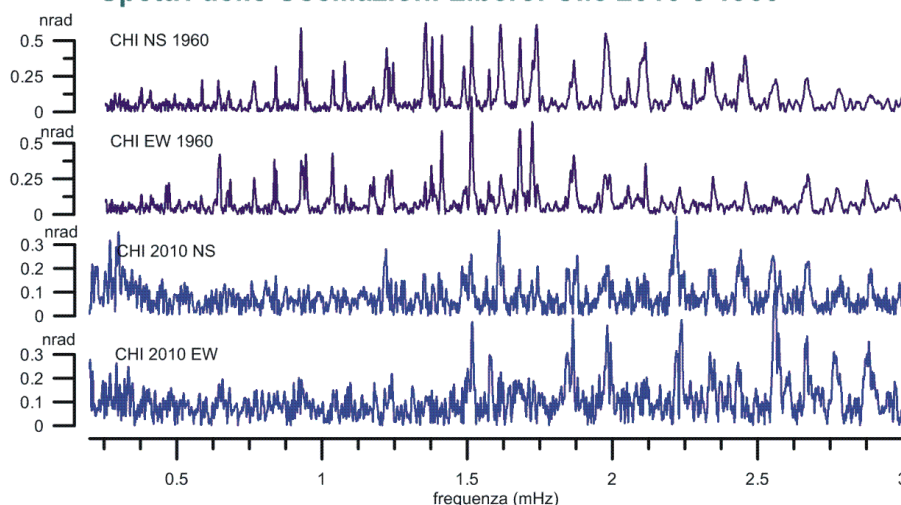
Dott. Quintilio Taccetti

Ing. Giuseppe Spinelli

Sig. Paolo Benedetti.



Spettri delle Oscillazioni Libere: Cile 2010 e 1960



Indice

- 1 Introduzione**
- 2 Aggiornamento del sistema di calibrazione dell'acquisizione digitale**
- 3 Osservazioni delle inclinazioni della verticale e di parametri ambientali per il periodo 2008- 2010.**
- 4 - Osservazioni dei pendoli con acquisizione digitale nell'ambito di frequenze delle onde sismiche**
- 5 Analisi comparata delle registrazioni degli eventi Cile 1960 e Cile 2010**
- 6 Anteprima dall'Encyclopedia of Geophysics, Springer: "Ultra Broad Band Horizontal Pendulums"**
- 7 Ringraziamenti**
- 8 Riferimenti bibliografici**
- 9 Pubblicazioni recenti del gruppo di lavoro (dal 2005)**

1 - Introduzione

Il numero di vittime ed il danno da attività sismica nell'anno 2010 sono stati elevatissimi ed hanno dimostrato la nostra grande vulnerabilità nei confronti di questa calamità naturale, come si è potuto tristemente constatare per gli eventi di Haiti (12 Gennaio 2010, $M=7.0$), Cile (27 Febbraio 2010, $M=8.8$), Turchia (23 Marzo 2010, $M=6.8$) e Quinghai (13 Aprile 2010, $M=6.9$). L'evento del Cile è il maggiore evento registrato dopo l'evento delle Isole Sumatra-Andamane del 26 Dicembre 2004 ed è stato osservato dalla coppia di pendoli orizzontali presenti nella Grotta Gigante. Quest'ultima registrazione è particolarmente importante per lo studio dei mega-eventi, perché il database della Grotta Gigante contiene le registrazioni di tre dei cinque eventi sismici più energetici mai registrati, che sono l'evento del Cile 1960, l'evento delle Isole di Sumatra-Andamane del 2004 e l'evento del Cile 2010. A nostra saputa le registrazioni dei pendoli sono gli unici strumenti oggi attivi con i quali si può eseguire una comparazione diretta delle ampiezze delle oscillazioni libere generate dall'evento del Cile 1960, il maggiore evento mai osservato, e l'evento del Cile 2010. La comparazione delle ampiezze delle oscillazioni libere generate dall'evento delle Isole Sumatra-Andamane 2004 (Park et al., 2004; Stein e Okal, 2005; Braitenberg et al., 2005) con quello del Cile 1960 è stata eseguita e pubblicata (Braitenberg e Zadro, 2007), mentre in quest'anno si è potuto affrontare l'analisi comparata fra i due eventi del Cile (1960 e 2010). Abbiamo trovato che l'evento del Cile 1960 ha generato oscillazioni libere fino a otto volte maggiori, con prevalenza nelle oscillazioni torsionali.

Nell'anno 2009 era stato introdotto un dispositivo ottico ed elettronico con il quale effettuare una calibrazione dei dati digitali acquisiti ed applicare un reset da remoto del sistema di acquisizione. Il dispositivo è stato progettato dal Dott. Gianni Romeo ed alla sua materializzazione ed installazione hanno partecipato il Dott. Quintilio Taccetti in collaborazione con il Ing. Giuseppe Spinelli ed il Sig. Paolo Benedetti. Nell'anno 2010 questo sistema è stato messo a punto e sono state applicate alcune migliorie.

L'anno 2010 vede la riedizione dell'Enciclopedia della Geofisica, edita dall'editore Springer. La nuova edizione comprende una voce sui pendoli orizzontali a banda larga, ed in particolare sulle osservazioni dei pendoli della Grotta Gigante. Nel presente rapporto annuale si riporta in anteprima il contenuto della voce "Ultra Broad Band Horizontal Pendulums".

2 – Aggiornamento del sistema di calibrazione per l’acquisizione digitale

In questo capitolo descriviamo l’aggiornamento del nuovo sistema di calibrazione che ha lo scopo di monitorare la stabilità del sistema digitale di acquisizione (Romeo, 2000; Braitenberg et al., 2004). Il sistema di calibrazione viene attivato da remoto e permette di attivare in sequenza una serie di laser fissi che puntano sul sistema di acquisizione. Le opzioni permettono anche di riavviare il sistema dei laser di acquisizione.

2.1 Aggiornamento del sistema di calibrazione dell’acquisizione digitale

Nei giorni 3-5 novembre 2010 una delegazione dell’INGV ha effettuato un aggiornamento sul dispositivo di calibrazione dell’acquisizione digitale dati dei pendoli della Grotta Gigante. L’installazione è stata effettuata da Giovanni Romeo, Giuseppe Spinelli e Paolo Benedetti, con l’assistenza da remoto di Quintilio Taccetti; la logistica locale era organizzata dalla scrivente e da Daniele Tenze (vedi Fig. 2.1).



Fig. 2.1 Gli addetti all’installazione del sistema di Calibrazione in Grotta Gigante. 3-5 Novembre 2010.

Il sistema di calibrazione consiste in una sorgente luminosa fissa, il cui segnale viene periodicamente registrato e che permette di monitorare la stabilità del sistema digitale dei dati. La sorgente luminosa è costituita da quattro laser; a ciascuna delle due componenti EW e NS compete una quaterna di laser che vengono accesi e spenti in sequenza. L’aggiornamento di quest’anno ha comportato la revisione del sistema ottico interposto fra laser ed acquisitore digitale al fine di aumentare l’illuminazione sui sensori. La modifica permette al calibratore di fornire una luce paragonabile in intensità ai laser di misura, in modo da facilitare il confronto tra il segnale di misura ed il segnale di calibrazione.

Nella Fig. 2.2 si vede il sistema di calibrazione aggiornato.

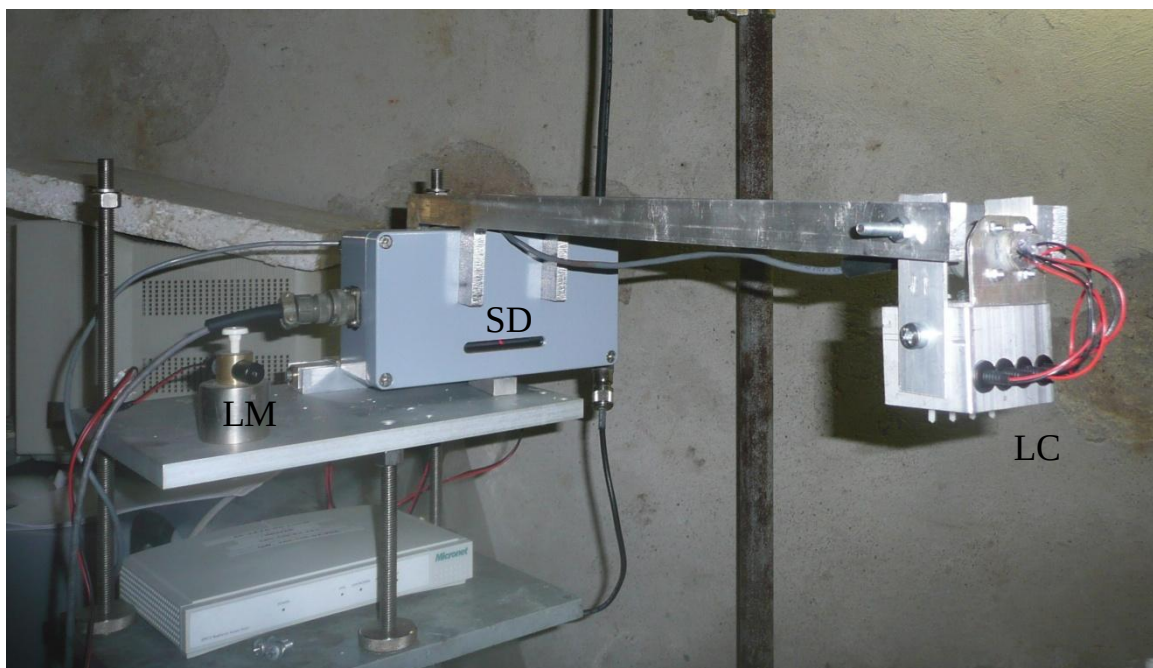


Figura 2.2 – Il dispositivo di calibrazione aggiornato con i quattro di Laser di calibrazione.
LC: Laser di Calibrazione, LM: Laser di Misura, SD: Sistema Digitale di acquisizione

Per accedere all'elettronica di gestione, si colloquia come già in precedenza via la seriale ttys0 tramite il programma di sistema linux "minicom".

Per completezza ricordiamo qui i comandi da inviare tramite il programma minicom.
Su minicom: @h#, questa istruzione mostra tutte le opzioni accettate.

L'utilizzo della calibrazione e' la seguente: si spengono i laser di acquisizione, si accendono in sequenza i otto laser di calibrazione, si rileva il segnale, e si riaccendono i due laser di misura.

In dettaglio, i comandi da trasferire tramite minicom sono:

Spegnere i due laser di acquisizione,
componente NS corrisponde a componente 1
componente EW corrisponde a componente 2

@s# per componente 1,
@t# per componente 2.

Accendere sequenza di calibrazione, che accende in sequenza i quattro laser di calibrazione
@n# per componente 1,
@o# per componente 2.

Attendere 1 minuto perche' si completa la sequenza.
Riaccendere i laser di misura

@u# per componente 1,
@v# per componente 2.

Il sistema di calibrazione può anche essere utilizzato per resettare il sistema digitale di acquisizione, interrompendo tramite un relais il circuito di alimentazione. Questo procedimento si rende qualvolta necessario, quando il PC è stato riavviato per mancanza di corrente.

@a# reset per componente 1,
@b# reset per componente 2,
@c# reset per componente 1 e 2.

2.2 Risultati del sistema di calibrazione aggiornato

Abbiamo effettuato ad oggi tre calibrazioni con il sistema di calibrazione aggiornato, uno in grotta (4 novembre 2011) e due da remoto (9 e 15 novembre 2010). Di seguito ne riportiamo i risultati. Rispetto al sistema precedente, ora il segnale laser in entrata ha maggiore luminosità, per cui non presenta più problemi di rumore a livello di registrazione.

I dati acquisiti vengono salvati su file orari, che hanno approssimativamente 109366 campioni, che corrisponde ad una frequenza di campionamento di 30.3794 campioni al secondo, e un intervallo di campionamento $dt = 0.0329$ sec. Il rilevatore viene esposto al laser di calibrazione per un intervallo di tempo intorno ai 4 secondi, che corrisponde a circa 130 campioni.

Nella Figura 2.3 sono riportate le registrazioni delle tre prove. I valori numerici invece sono riportati nella Tabella 2.1. Troviamo che il valore medio rilevato nelle tre prove è stabile entro un errore di poche unità sulla quarta cifra significativa. L'aggiornamento del sistema ha portato ad una riduzione notevole dell'errore sul valore di calibrazione, che è di due ordini di grandezza migliore a quello ottenuto prima dell'intervento. Durante la prima prova, effettuata in grotta, la luce artificiale era accesa, il che spiega il livello di rumore più elevato durante le fasi di spegnimento dei laser di calibrazione e di acquisizione.

	NS		NS	NS	EW		EW	EW
Laser Calibrazione	N. Campioni/t(sec)		Valor medio	Dev. standard	N. Campioni t/(sec)		Valor medio	Dev. standard
Calibrazione in data 04/11/2010	N	t(sec)			N	t(sec)		
1	130	4.277	0.37224	0.00010	131	4.3099	0.46819	0.00009
2	129	4.2441	0.83314	0.00008	130	4.277	0.79882	0.00008
3	120	3.948	1.16220	0.00007	120	3.948	1.11525	0.00007
4	120	3.948	1.50748	0.00006	121	3.9809	1.49988	0.00007
Calibrazione in data 09/11/2010								
1	130	4.277	0.37238	0.00011	131	4.3099	0.46808	0.00008
2	130	4.277	0.83284	0.00008	130	4.277	0.79762	0.00008
3	120	3.948	1.16106	0.00007	120	3.948	1.11403	0.00008
4	121	3.9809	1.50738	0.00006	120	3.948	1.50047	0.00006
Calibrazione in data 15/11/2010								
1	130	4.277	0.37263	0.00010	130	4.277	0.46807	0.00008
2	130	4.277	0.83321	0.00007	129	4.2441	0.79769	0.00008
3	120	3.948	1.16123	0.00006	119	3.9151	1.11412	0.00007
4	120	3.948	1.50759	0.00005	122	4.0138	1.50052	0.00007

Tabella 2.1 Risultati delle tre calibrazioni effettuate il 4, 9 e 15 novembre 2010.

Nei tre grafici che seguono si vedono i risultati delle tre calibrazioni, del 4, 9 e 15 novembre 2010.

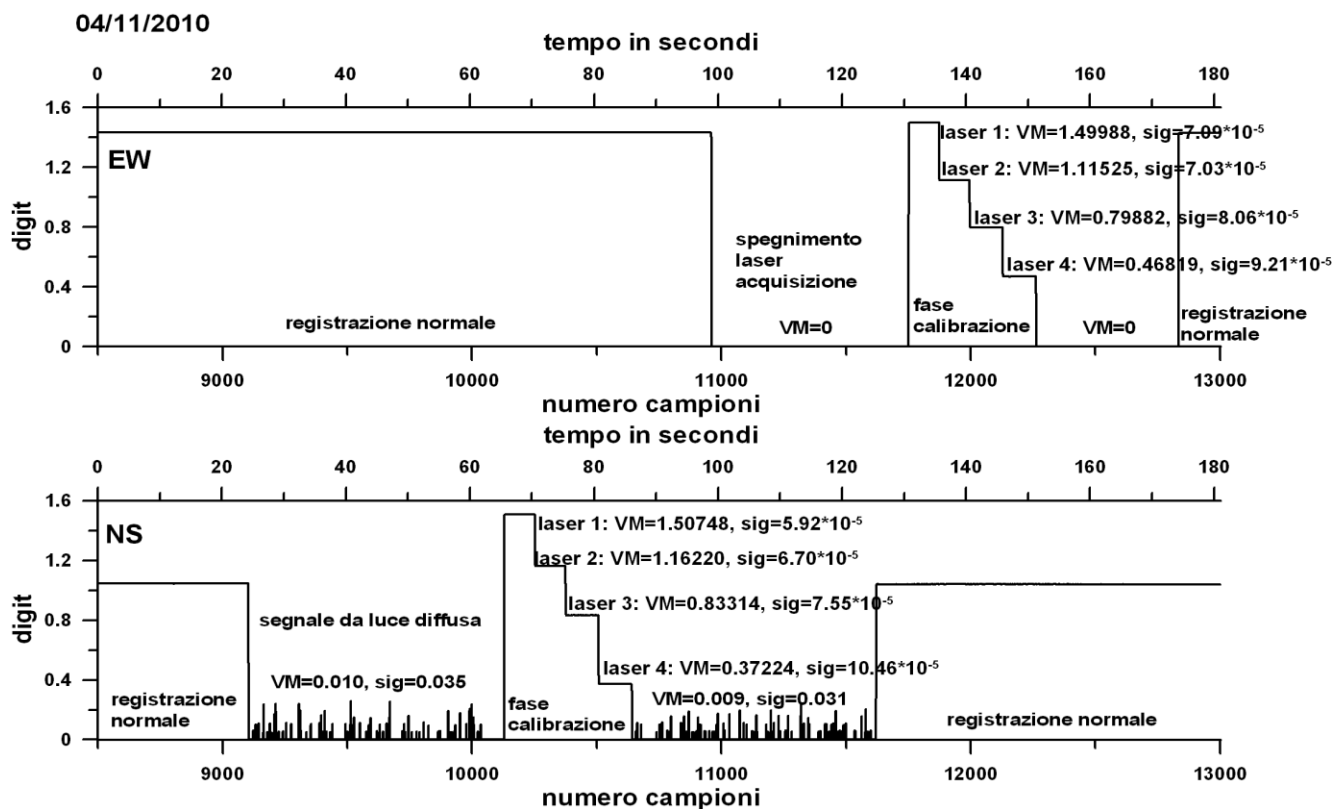


Fig. 2.4 Registrazione della calibrazione. In alto: tempo in secondi, in basso: numero campioni del file. VM: Valor medio, sig.: deviazione standard, N: numero campioni nell'intervallo di calibrazione. a) Prima calibrazione del 4 novembre 2010. Il rumore e' dovuto alla presenza di luce diffusa artificiale.

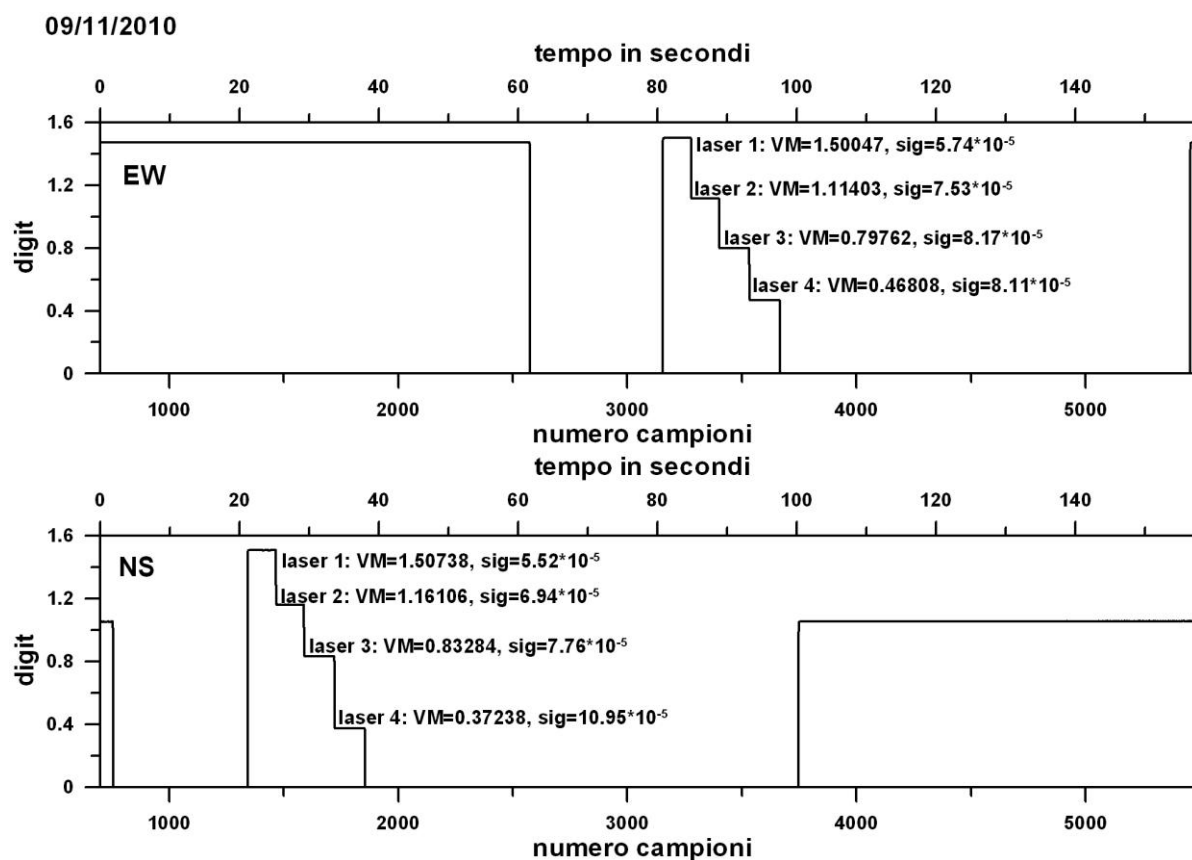


Fig. 2.4 b) Calibrazione del 9 novembre 2010.

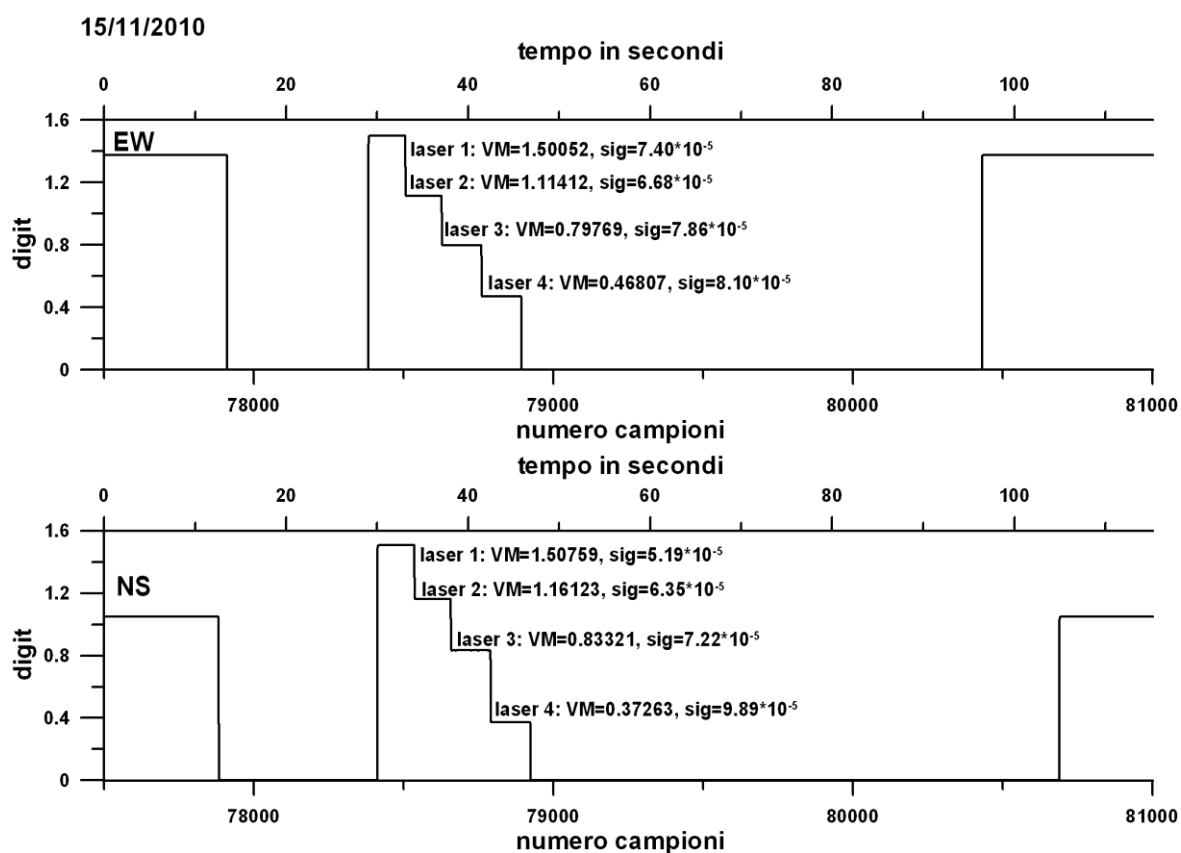


Fig. 2.4 c) Calibrazione del 15 novembre 2010.

Segue nella Figura 2.5 il gruppo di lavoro al termine dei lavori.



Fig. 2.5 Il gruppo di lavoro in Grotta al termine dei lavori.

3 - Osservazioni delle inclinazioni della verticale e di parametri ambientali per il periodo 2008 - 2010.

Qui di seguito vengono riportate le registrazioni effettuate con i pendoli e con i clinometri della Grotta Gigante per il periodo 2008-2010. I pendoli si riferiscono ai pendoli orizzontali che hanno dimensione di 95 m in altezza, mentre con i clinometri si intende la coppia di strumenti di dimensioni più piccole (altezza di 0.5 m). (Braitenberg, 1999; Braitenberg e Zadro, 1999). Inoltre si riportano i grafici delle registrazioni orarie della temperatura, della pressione atmosferica e della piovosità. Infine viene dato un quadro d'insieme della disponibilità delle registrazioni estensimetriche e clinometriche della intera rete strumentale clino-estensimetrica del Friuli gestita dal Dipartimento di Geoscienze.

Ambedue strumenti geodetici (pendoli orizzontali = Long Period Horizontal Pendulum = LPHP; Clinometro = Medium Period Tiltmeter = MPT) sono collocati nella stazione geodetica della Grotta Gigante, ma causa la loro diversa costruzione hanno risposte diverse a seconda delle deformazioni in atto. I pendoli orizzontali hanno l'attacco superiore fissato nella volta della grotta, mentre quello inferiore è fissato nella base. I clinometri invece sono accoppiati al movimento della grotta tramite un treppiede che appoggia sul fondo della grotta. La diversa costruzione implica una differente risposta ai movimenti della grotta che comprendono una deformazione di taglio, come viene illustrato nella Figura 3.1. Una rotazione della grotta invece viene rilevata da ambedue strumenti allo stesso modo.

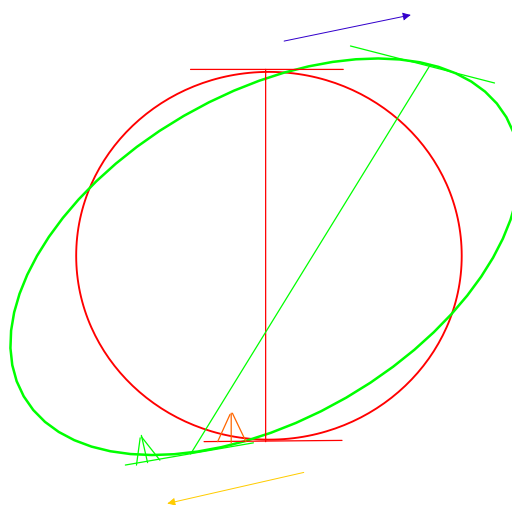


Fig. 3.1 Illustrazione della diversa inclinazione indotta per un clinometro che poggia sul fondo della grotta ed uno che è fissato sulla volta e sul fondo della grotta. Il primo tipo di clinometro è rappresentato dal clinometro MPT ed il secondo dal pendolo della Grotta Gigante LPHP. Quando la deformazione contiene una deformazione di taglio come nel disegno, i due strumenti si inclinano in direzione opposta. Nella pratica questo avviene nella Grotta Gigante per deformazioni indotte dal fiume sotterraneo Timavo.

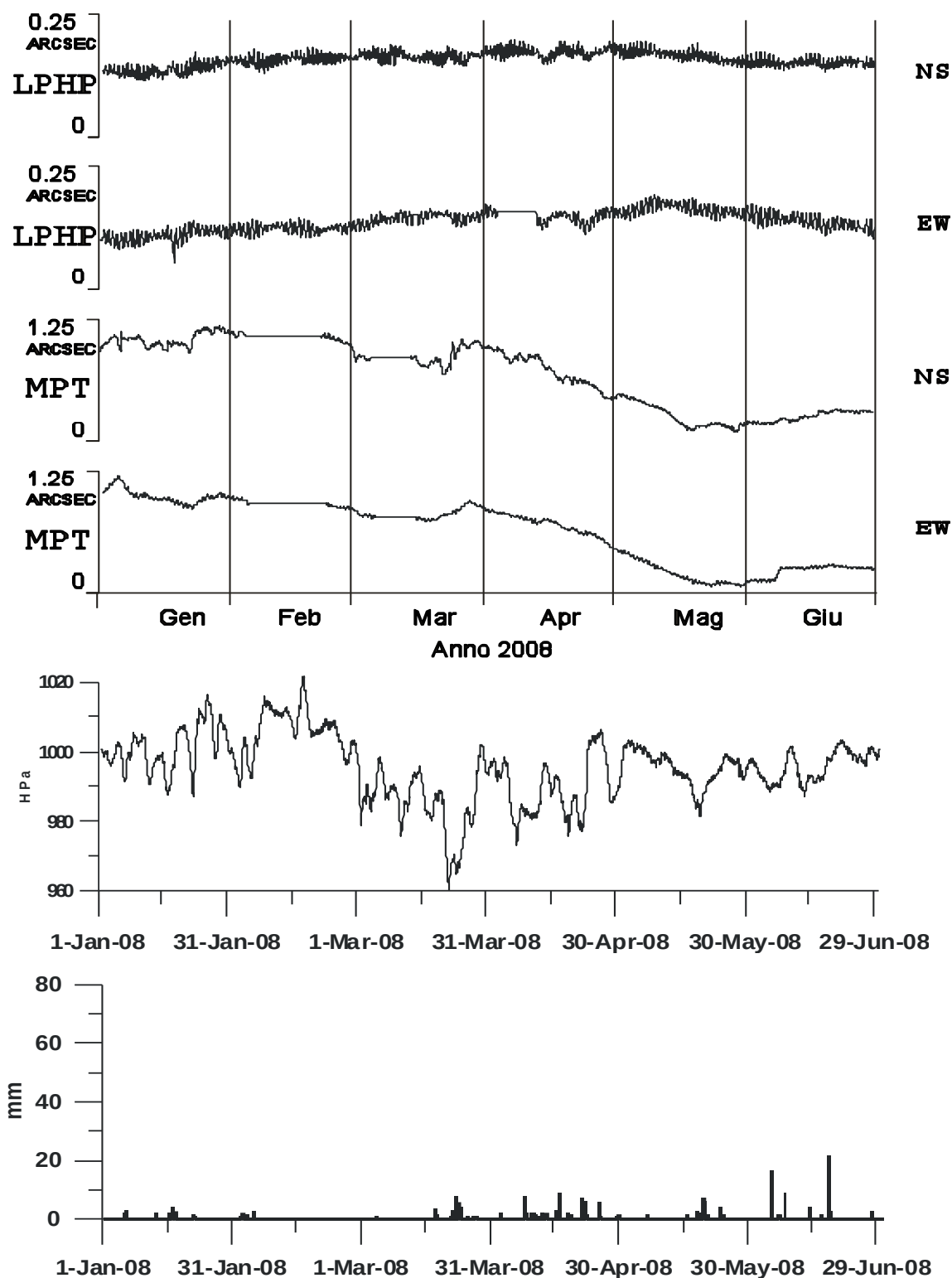


Fig. 3.2- Grafico delle registrazioni effettuate con i pendoli LPHP (Long Period Horizontal Pendulum) e con i clinometri MPT (Medium Period Tiltmeter) della Grotta Gigante per il periodo 2008-2010. Nella parte inferiore del grafico è riportata la registrazione pluviometrica giornaliera (stazione di Trieste. Stravisi, comunicazione personale) e la pressione barometrica. A) Periodo gennaio-giugno 2008

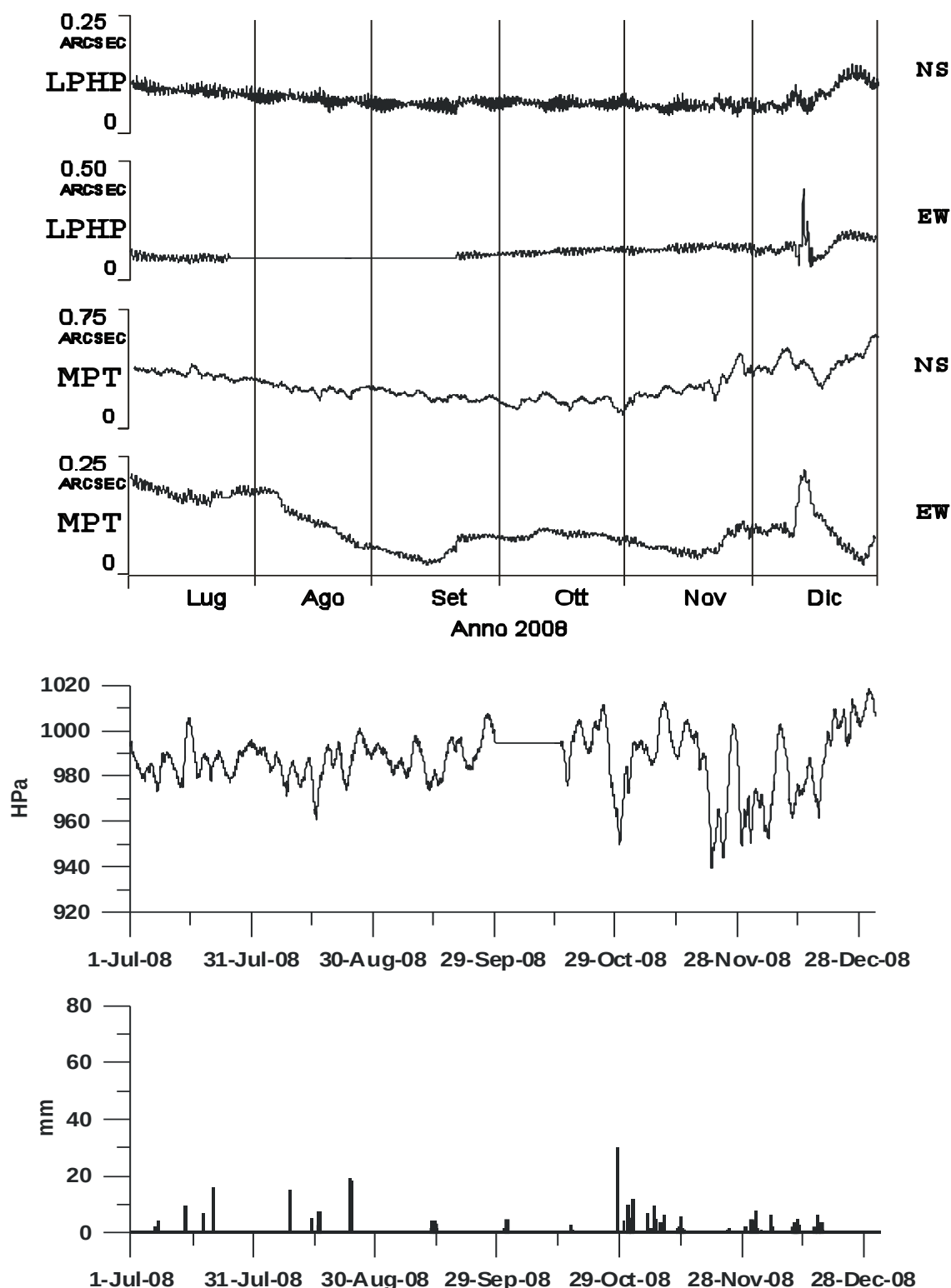


Fig. 3.2b - Grafico delle registrazioni effettuate con i pendoli LPHP e con i clinometri MPT della Grotta Gigante per il periodo 2008-2010. Nella parte inferiore del grafico è riportata la registrazione pluviometrica giornaliera (stazione di Trieste. Stravisi, comunicazione personale) e la pressione barometrica. B) periodo luglio-dicembre 2008

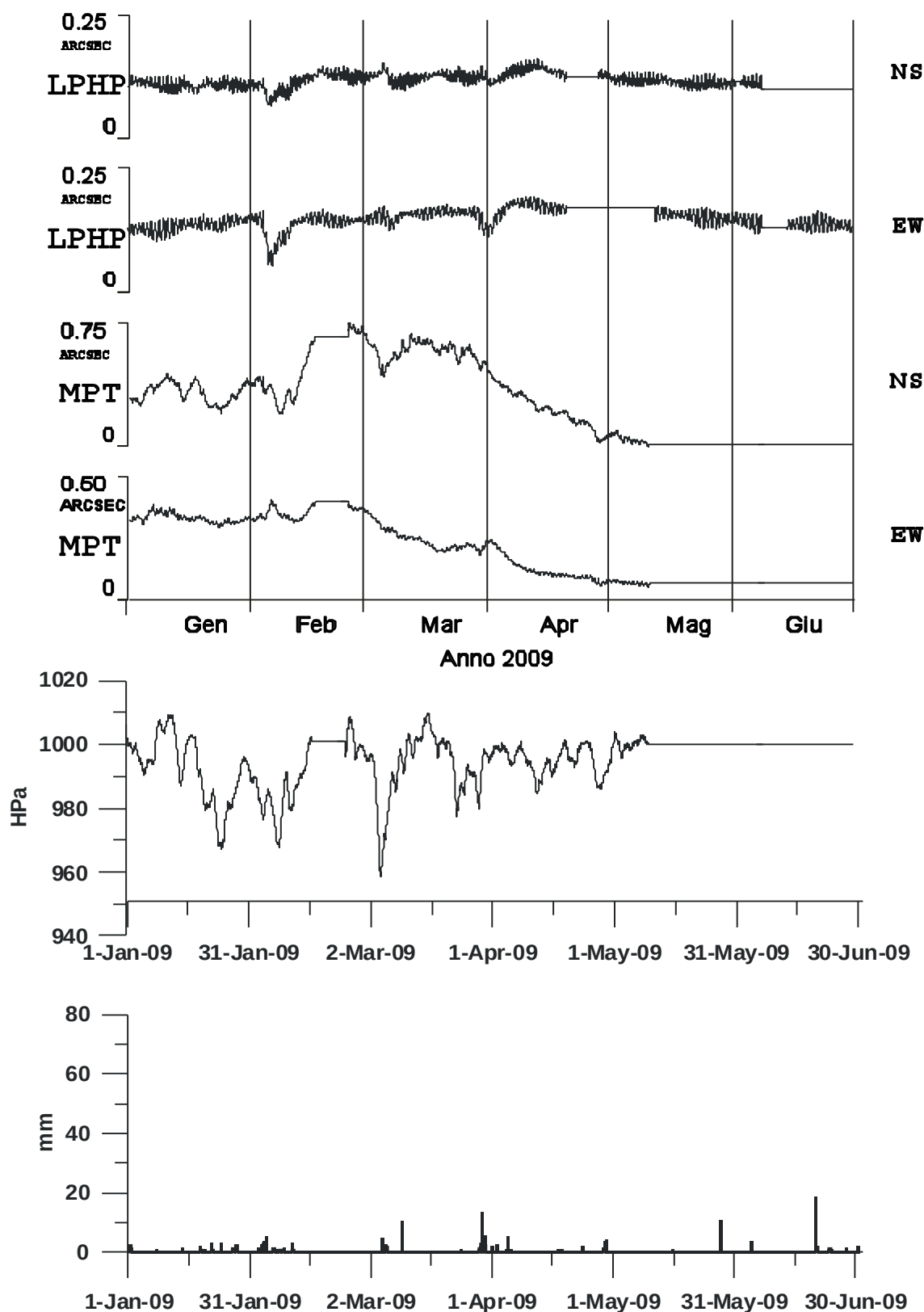


Fig. 3.2c - Grafico delle registrazioni effettuate con i pendoli LPHP e con i clinometri MPT della Grotta Gigante per il periodo 2008-2010. Nella parte inferiore del grafico è riportata la registrazione pluviometrica giornaliera (stazione di Trieste. Stravisi, comunicazione personale) e la pressione barometrica. C) Periodo gennaio-giugno 2009

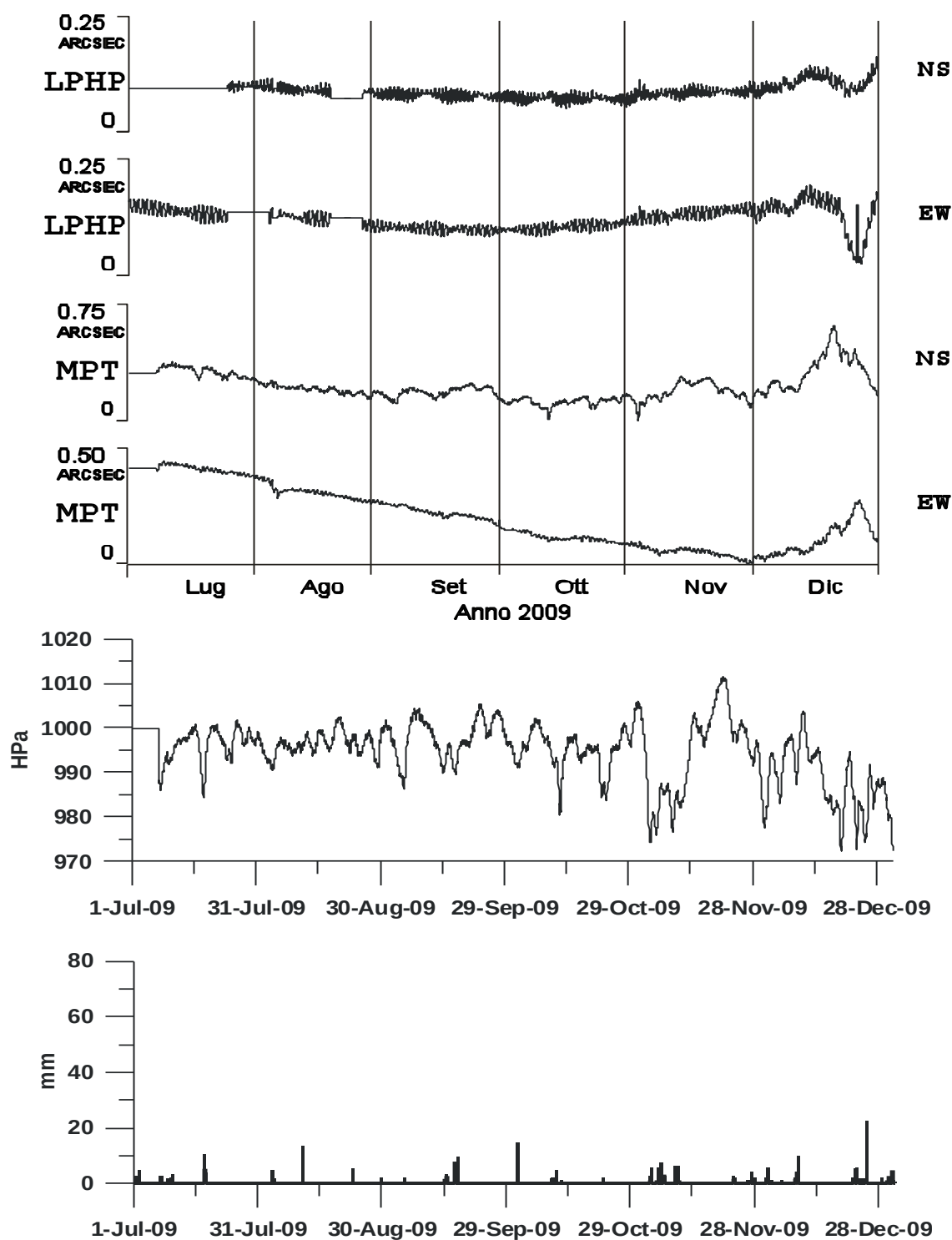


Fig. 3.2d - Grafico delle registrazioni effettuate con i pendoli LPHP e con i clinometri MPT della Grotta Gigante per il periodo 2008-2010. Nella parte inferiore del grafico è riportata la registrazione pluviometrica giornaliera (stazione di Trieste. Stravisi, comunicazione personale) e la pressione barometrica. D) Periodo luglio-dicembre 2009.

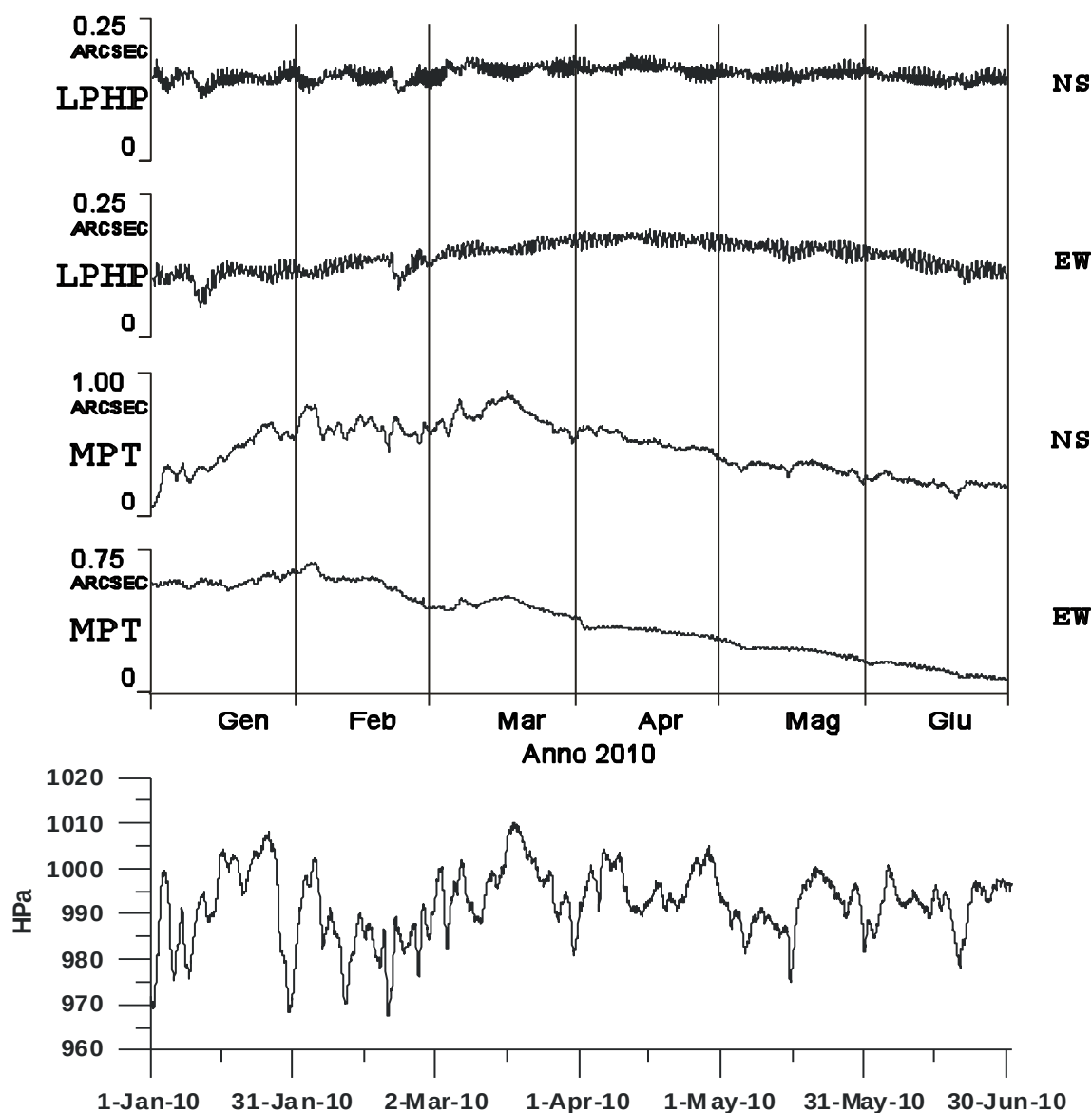


Fig. 3.2e - Grafico delle registrazioni effettuate con i pendoli LPHP e con i clinometri MPT della Grotta Gigante per il periodo 2008-2010. E) Periodo gennaio-giugno 2010. Per questo intervallo temporale attendiamo i dati della precipitazione.

RETE CLINO-ESTENSIMETRICA DI FRIULI DIPARTIMENTO DI GEOSCIENZE - UNIVERSITA' DI TRIESTE REGISTRAZIONI DISPONIBILI PER GLI ANNI '1960 - 2010'

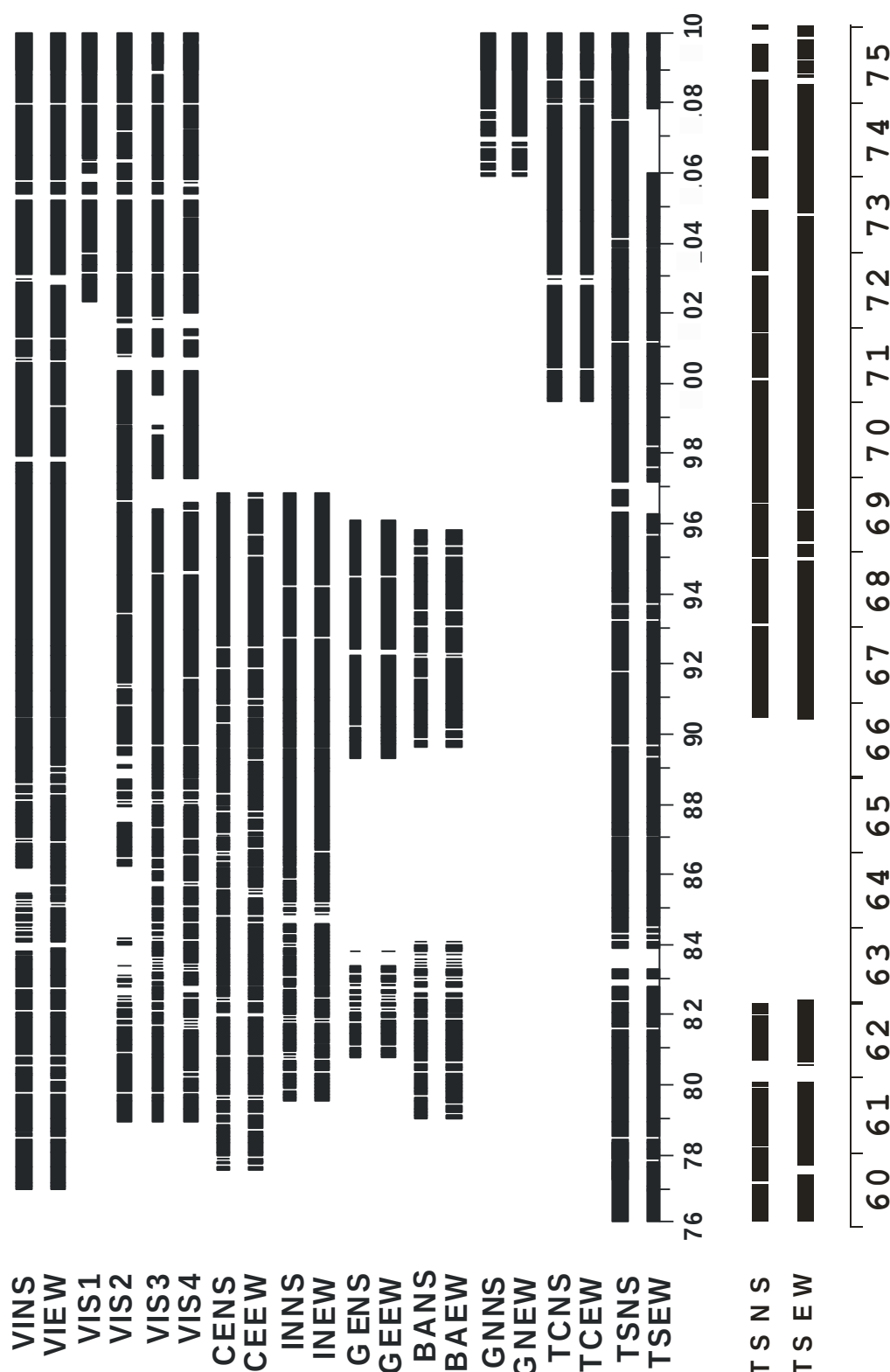


Fig. 3.3 - Quadro d'insieme della disponibilità delle registrazioni della rete strumentale clino-estensimetrica del Friuli e della Grotta Gigante gestita dal Dipartimento di Geoscienze. Le sigle si riferiscono a: VI: Villanova, CE: Cesclans, IN: Invillino, GE: Gemona, BA: Barcis, GN: Genziana. I clinometri (pendoli orizzontali) sono identificati con NS ed EW, mentre i quattro strainmeter (3 orizzontali, uno verticale) con S1, S2, S3, S4. Le sigle TSNS e TSEW si riferiscono ai pendoli LPHP della Grotta Gigante. Il database comprende inoltre l'osservazione di temperatura e pressione, e dei clinometri tradizionali MPT (sigle TCNS e TCEW; dal 1999) della Grotta Gigante.

Riportiamo qui di seguito anche l'insieme delle osservazioni della coppia di pendoli per il periodo dal 1 gennaio 2009 al 30 giugno 2010. Si osserva bene le diverse componenti del segnale, come la variazione annuale, i segnali indotti dalle piene del fiume sotterraneo Timavo, la marea terrestre e la variazione a lungo termine (Zadro e Braitenberg, 1999; Braitenberg, 1999b; Pagot, 2002).

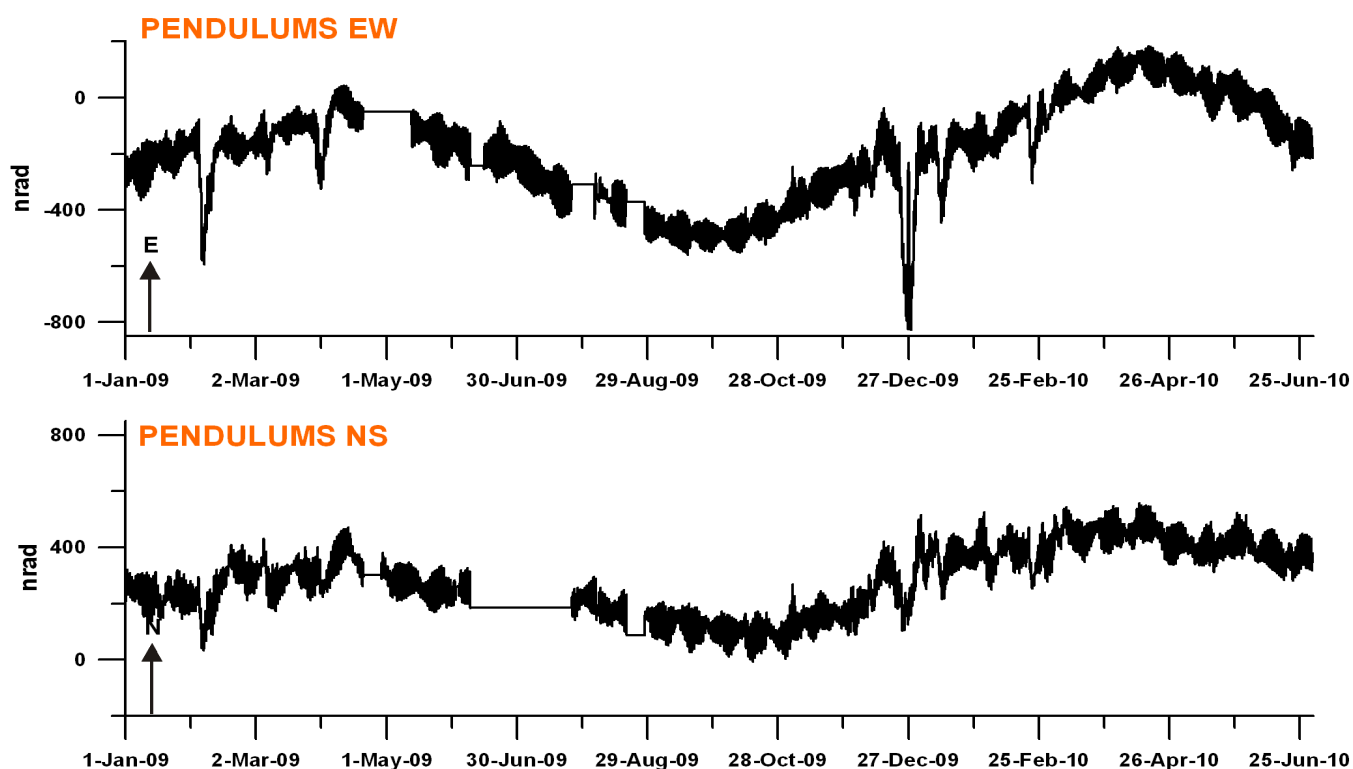


Fig. 3.4 – Registrazioni della coppia di pendoli LPHP ottenute dall'acquisizione digitale per il periodo 01/01/2009 – 30/06/2010, campionamento 1 ora.

4 - Osservazioni dei pendoli LPHP con acquisizione digitale nell'ambito di frequenze delle onde sismiche

Come accennato nel paragrafo 2, il sistema di acquisizione digitale dei pendoli LPHP preleva i dati ad una frequenza elevata: il sistema digitale di prima generazione (CCD) acquisiva i dati ad una frequenza di approssimativamente 15 campioni al secondo, mentre quello di seconda generazione (PSD) li preleva alla frequenza doppia di approssimativamente 30 campioni al secondo. Il sistema di acquisizione digitale fornisce quindi registrazioni nell'ambito delle onde sismiche. A partire da dicembre 2003 si è iniziata l'archiviazione sistematica di tutti gli eventi sismici di magnitudo elevata ($M \geq 6$). La soglia è stata abbassata al valore di $M \geq 4$ per gli eventi più vicini, come per esempio quelli generati nell'area del Mediterraneo, dell'Adriatico e nello spazio Alpino. L'elenco di questi eventi è riportato nella **Tab. 4.1**, e le rispettive registrazioni sono disponibili a richiesta. Gli eventi sono stati selezionati basandosi sul database del NEIC (2010).

Tab.4.1 Maggiori eventi sismici rilevati dai pendoli della Grotta Gigante durante il periodo 01/01/09-30/06/10 (NEIC, 2010). Selezione: Telesismi: $M \geq 6$, eventi Mediterraneo, Adriatico, Alpi: $M \geq 4$. I dati sono stati archiviati e sono disponibili a richiesta.

Selezione: Telesismi: $M \geq 6$, eventi Mediterraneo: $M \geq 4$

TABELLA GRAFICI TERREMOTI DATI DIGITALI INGV

No.	Località	Data	Ora	Mag	File grf, dat
378	Indonesia	03/01/09	19:44	7.6	9003-1922fil.dat 030109Indonesia.grf
379	Indonesia	03/01/09	22:34	7.4	9003-2201fil.dat 030109Indonesia_2.
380	Costa Rica	08/01/09	19:22	6.1	9008-1921fil.dat 080109CRica.grf
381	Loyalty Isl.	15/01/09	07:27	6.7	9015-0709fil.dat 150109Loyalty.grf
382	Kuril Islands	15/01/09	17:50	7.4	9015-1720fil.dat 150109Kuril.grf
383	Kermadec Is.	18/01/09	14:12	6.4	9018-1416fil.dat 180109Kermadec.gr
384	Loyalty Isl.	19/01/09	03:35	6.5	9019-0305fil.dat 190109Loyalty.grf
385	Indonesia	11/02/09	17:35 18:25	7.2 6.0	9042-1720fil.dat 110209Indonesia.grf
386	Indonesia	12/02/09	13:15	6.4	9043-1315fil.dat 120209Indonesia.grf
387	Kermadec Is.	18/02/09	21:54	6.9	9049-2200fil.dat 180209Kermadec.gr
388	Svalbard	06/03/09	10:50	6.5	9065-1012fil.dat 060309Svalbard.grf
389	Indonesia	16/03/09	14:16	6.3	9075-1416fil.dat 160309Indonesia.grf
390	Tonga	19/03/09	18:18	7.6	9078-1821fi.dat 190309Tonga.grf
391	New Guinea	01/04/09	03:55	6.4	9091-0406fil.dat 010409NGuinea.grf
392	Philippine	04/04/09	05:32	6.3	9094-0507fil.dat 040409Philippine.gr
393	Central Italy	06/04/09	01:33 02:37	6.3 4.6	9096-0103fil.dat 060409CItaly.grf
394	Central Italy	07/04/09	17:48	5.5	9097-1718fil.dat 070409CItaly.grf

395	Central Italy	09/04/09	00:53	5.3	9099-0001ful.dat 090409CItaly.grf
396	Central Italy	09/04/09	19:38	5.2	9099-1920fil.dat 090409CItaly_2.grf
397	Central Italy	13/04/09	21:14	5.0	9103-2122fi.dat 130409CItaly.grf
398	S.Sandwich I	16/04/09	14:57	6.6	9106-1517.dat 160409Sandwich.grf
399	Chile	17/04/09	02:08	6.1	9107-0204fil.dat 170409Chile.grf
400	Kuril Islands	18/04/09	19:18	6.6	9108-1921fil.dat 180409Kuril.grf
401	Indonesia	19/04/09	05:23	6.1	9109-0507fil.dat 190409Indonesia.grf
402	Hokkaido	05/06/09	03:31	6.3	9156-0305fil.dat 050609Hokkaido.grf
403	N. Atlantic R	06/06/09	20:33	6.0	9157-2022fil.dat 060609NARidge.grf
404	Papua	23/06/09	14:19	6.7	9174-1416fil.dat 230609Papua.grf
405	Crete	01/07/09	09:30	6.4	9182-0910fil.dat 010709Crete.grf
406	G. of Califor.	03/07/09	11:00	6.0	9184-1113fil.dat 030709Califor.grf
407	Alaska	96/97/09	14:53	6.1	9187-1416fil.dat 060709Alaska.grf
408	Baffin Bay	07/07/09	19:12	6.1	9188-1921fil.dat 070709Baffin.grf
409	Taiwan	13/07/09	18:05	6.3	9194-1820fil.dat 130709Taiwan.grf
410	New Zealand	15/07/09	09:22	7.8	9196-0912fil.dat 150709NZelanda.grf
411	Papua	15/07/09	20:11	6.1	9196-2022fil.dat 150709Papua.grf
412	Gulf of Calif.	03/08/09	18:00 18:42	6.9 6.2	9215-1820fil.dat 030809GCalif.grf
413	Japan	05/08/09	00:18	6.1	9217-0002fil.dat 050809Japan.grf
424	Japan	09/08/09	10:56	7.1	9221-1114fil.dat 090809Japan.grf
425	Andaman Isl. Japan	10/08/09	19:56 20:07	7.5 6.4	9222-2023fil.dat 100809Andaman.grf
426	Japan	12/08/09	22:49	6.6	9224-2200fil.dat 120809Japan.grf
427	Indonesia	16/08/09	07:38	6.6	9228-0709fil.dat 160809Indonesia.grf
428	Japan	17/08/09	10:11	6.0	9229-1012fil.dat 170809Japan.grf
429	Banda Sea China	28/08/09	01:51 01:52	6.8 6.2	9240-0103fil.dat 280809Banda.grf
430	Samoa Islan.	30/08/09	14:52	6.6	9242-1517fil.dat 300809Samoa.grf
431	Java	02/09/09	07:55	7.0	9245-0811fil.dat 020909Java.grf
432	Albania	06/09/09	21:50	5.5	9249-2122fil.dat 060909Albania.grf
433	Georgia	07/09/09	22:42	5.9	9250-2123fil.dat 070909Georgia.grf
434	Venezuela	12/09/09	20:06	6.4	9255-2022fil.dat 120909Venezuela.gr
435	Bhutan	21/09/09	08:53	6.1	9264-0810fil.dat 210909Bhutan.grf
436	Mexico	24/09/09	07:16	6.3	9267-0709fil.dat 240909Mexico.grf
437	Samoa Islan.	29/09/09	17:48	8.0	9272-1821fil.dat 290909Samoa.grf
438	Sumatra	30/09/09	10:16	7.6	9273-1013fil.dat 300909Sumatra.grf
439	Sumatra	01/10/09	01:52	6.6	9274-0204fil.dat 011009Sumatra.grf
440	Celebes Sea Vanuatu	07/10/09	21:41 22:03	6.7 7.8	9280-2201fil.dat 071009Celebes.grf

	Santa Cruz I. Vanuatu		22:18 23:14	7.7 7.3	
441	Santa Cruz I.	08/10/09	02:13	6.6	9281-0204fil.dat 081009SCruz.grf
442	Vanuatu Santa Cruz I.	08/10/09	08:29 08:35	6.8 6.5	9281-0810fil.dat 081009Vanuati.grf
443	Mauritius	12/10/09	03:16	6.0	9285-0305fil.dat 121009Mauritius.grf
444	Alaska	13/10/09	05:37	6.2	9286-0507fil.dat 131009Alaska.grf
445	Alaska	13/10/09	20:22	6.3	9286-2022fil.dat 131009Alaska2.grf
446	Samoa Isl.	14/10/09	18:00	6.3	9287-1820fil.dat 141009Samoa.grf
447	Hindu Kush	22/10/09	19:51	6.2	9295-1921fil.dat 221009Hindu.grf
448	Banda Sea	24/10/09	14:41	6.9	9297-1416fil.dat 241009Banda.grf
449	Hindu Kush	29/10/09	17:45	6.2	9302-1719fil.dat 291009Hindu.grf
450	Japan	30/10/09	07:04	6.8	9303-0709fil.dat 301009Japan.grf
451	Ionian See	03/11/09	05:25	5.7	9307-0506fil.dat 031109Ionian.grf
452	Indonesia	08/11/09	19:42	6.6	9312-1921fil.dat 081109Indonesia.grf
453	Fiji	09/11/09	10:45	7.2	9313-1013fil.dat 091109Fiji.grf
454	Chile	13/11/09	03:06	6.5	9317-0305fil.dat 131109Chile.grf
455	Queen Ch. Is.	17/11/09	15:31	6.6	9321-1517fil.dat 171109QCHI.grf
456	Tonga	24/11/09	12:47	6.8	9328-1315fil.dat 241109Tonga.grf
457	Loyalty Isl.	09/12/09	09:46	6.4	9343-1012fil.dat 091209Loyalty.grf
458	C.Mid-Atl.R.	09/12/09	16:01	6.4	9343-1618fil.dat 091209MCAR.grf
459	Taiwan	19712/09	13:02	6.4	9353-1315fil,dat 191209Taiwan.grf
460	Sandwich Isl.	05/01/10	04:56	6.7	10005-0507f.dat 050110Sandwich.grf
461	Solomon Isl.	05/01/10	12:16 13:12	6.8 6.0	10005-1214f.dat 050110Solomon.grf
462	Solomon Isl.	09/01/10	05:52	6.3	10009-0608f.dat 090110Solomom.grf
462	California	10/01/10	00:28	6.5	10010-0002f.dat 100110California.grf
463	Haiti	12/01/10	21:53	7.0	10012-2201f.dat 120110Haiti.grf
464	Greece	18/01/10	15:56	5.4	10018-1516f.dat 180110Greece.grf
465	Greece	22/01/10	00:47 00:51	5.4 5.2	10022-0001f.dat 220110Greece.grf
466	S.Indian Rid.	05/02/10	06:59	6.2	10036-0709fi.dat 050210SIndR.grf
467	Kuril Island	06/02/10	04:45	6.1	10037-0406f.dat 060210Kuril.grf
468	Japan	07/02/10	06:10	6.4	10038-0608f.dat 070210Japan.grf
469	Crete	11/02/10	21:57	5.3	10042-2122f.dat 110210Crete.grf
470	China-Russia	18/02/10	01:13	6.9	10049-0103f.dat 180210CRKNB.grf
471	Japan	26/02/10	20:31	7.0	10057-2023f.dat 260210Japan.grf
472	Chile	27/02/10	06:34 06:53 07:12	8.8 6.2 6.0	10058-0609f.dat 270210Chile.grf

			07:37 08:01 08:25	6.0 6.9 6.1	
473	Chile	28/02/10	11:26	6.1	10059-1113f.dat 280110Chile.grf
474	Chile	03/03/10	17:44	6.0	10062-1719f.dat 030310Chile.grf
475	Taiwan Chile	04/03/10	00:19 02:00	6.4 6.1	10063-0002f.dat 040310TaiChi.grf
476	Chile	04/03/10	22:39	6.3	10063-2200f.dat 040310Chile.grf
477	Chile	05/03/10	11:47	6.6	10064-1113f.dat 050310Chile.grf
478	Indonesia	05/03/10	16:07	6.5	10064.1618f.dat 050310Indonesia.grf
479	Turkey	08/03/10	02:33	6.0	10067-0203f.dat 080310Turkey.grf
480	Chile	11/03/10	14:40 14:55 15:06	6.9 6.7 6.0	10070-1416f.dat 110310Chile.grf
481	Indonesia	14/03/10	00:58	6.4	10073-0103f.dat 140310Indonesia.grf
482	Japan	14/03/10	08:08	6.5	10073-0810f.dat 140310Japan.grf
483	Chile	15/03/10	11:08	6.1	10074-1113f.dat 150310Chile.grf
484	Chile	16/03/10	02:22	6.7	10075-0204f.dat 160310Chile.grf
485	Papua	20/03/10	14:01	6.2	10079-1416f.dat 200310Papua.grf
486	Andaman Is.	30/03/10	16:55	6.6	10089-1719f.dat 300310Andaman.grf
487	Mexico	04/04/10	22:41	7.2	10094-2201f.dat 040410Mexico.grf
488	Indonesia	06/04/10	22:15	7.7	10096-2201f.dat 060410Indonesia.grf
489	Solomon Isl.	11/04/10	09:41	6.8	10101-0911f.dat 110410Solomon.grf
490	Spain	11/04/10	22:08	6.3	10101-2200f.dat 110410Spain.grf
491	China	13/04/10	23:50	6.9	10103-2301f.dat 130410China.grf
492	Papua	17/04/10	23:15	6.2	10107-2301f.dat 170410Papua.grf
493	Crete	24/04/10	15:01	5.2	10114-1516f.dat 240410Crete.grf
494	Taiwan	26/04/10	03:00	6.5	10116-0305f.dat 260410Taiwan.grf
495	Bering Sea	30/04/10	23:12 23:16	6.4 6.0	10120-2301f.dat 300410Bering.grf
496	Chile	03/05/10	23:10	6.3	10123-2301f.dat 030510Chile.grf
497	Sumatra	05/05/10	16:29	6.5	10125-1618f.dat 050510Sumatra.grf
498	Peru	06/05/10	02:43	6.2	10126-0204f.dat 060510Peru.grf
499	Sumatra	09/05/10	06:00	7.2	10129-0609f.dat 090510Sumatra.grf
500	Brazil	24/05/10	16:18	6.5	10144-1618f.dat 240510Brazil.grf
501	N.M-Atl. R.	25/05/10	10:09	6.3	10145-1012f.dat 250510NMAR.grf
502	Ryukyu Isl.	26/05/10	08:53	6.4	10146-0911f.dat 260510Ryukyu.grf
503	India	31/05/10	19:52	6.4	10151-1921f.dat 310510India.grf
504	Vanuatu	09/06/10	23:23	6.0	10160-2301f.dat 090610Vanuatu.grf
505	Nicobar Isl.	12/06/10	19:27	7.5	10163-1922f.dat 120610Nicobar.grf

506	Japan	13/06/10	03:33	6.1	10164-0305f.dat 130610Japan.grf
507	Papua	16/06/10	03:06	6.2	10167-0306f.dat 160610Papua.grf
			03:16	7.0	
			03:58	6.6	
508	Mexico	30/06/10	07:22	6.3	10181-0709f.dat 300610Mexico.grf

Allo scopo di isolare le osservazioni sismologiche dal restante segnale osservato, è stato applicato un filtro al coseno di passa banda, con periodi di taglio di 120 sec e 4 sec, rispettivamente. La limitazione nella frequenza superiore e' dettata dalla soglia di rumore della registrazione. E' stato calcolato lo spettro di ampiezza medio per le sequenze di cui sopra, ed e' stata stimata la frequenza superiore, alla quale lo spettro devia dalla relazione lineare nella rappresentazione bi-logaritmica. Tale frequenza è stata stimata a 0.25 Hz. La frequenza inferiore e' stata scelta in modo da eliminare le periodicità lunghe, ed e' stata scelta pari a 0.0167 Hz, che corrisponde al periodo di 120 sec. I dati filtrati passa banda sono rappresentati nelle **Fig. 4.1 A-Z**, per una selezione degli eventi disponibili.

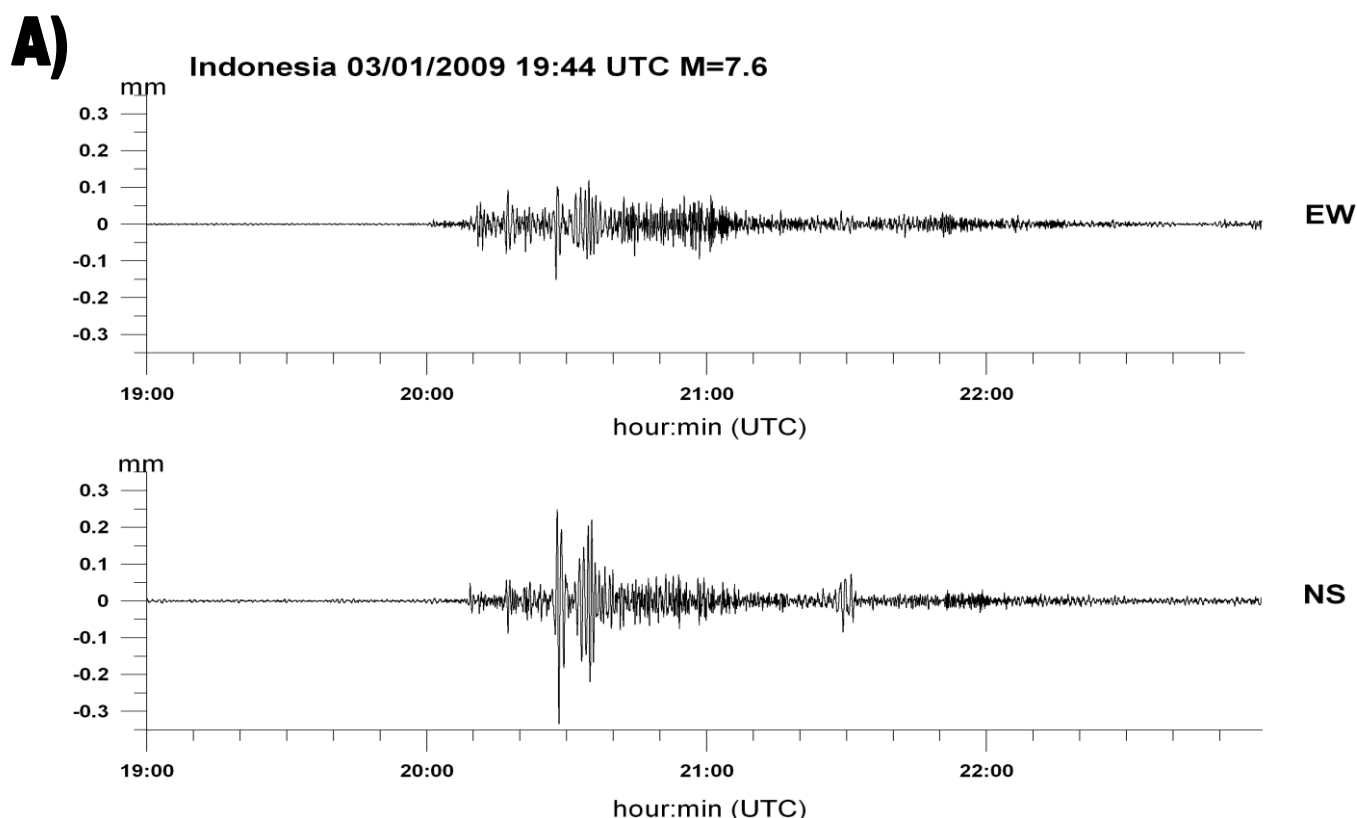
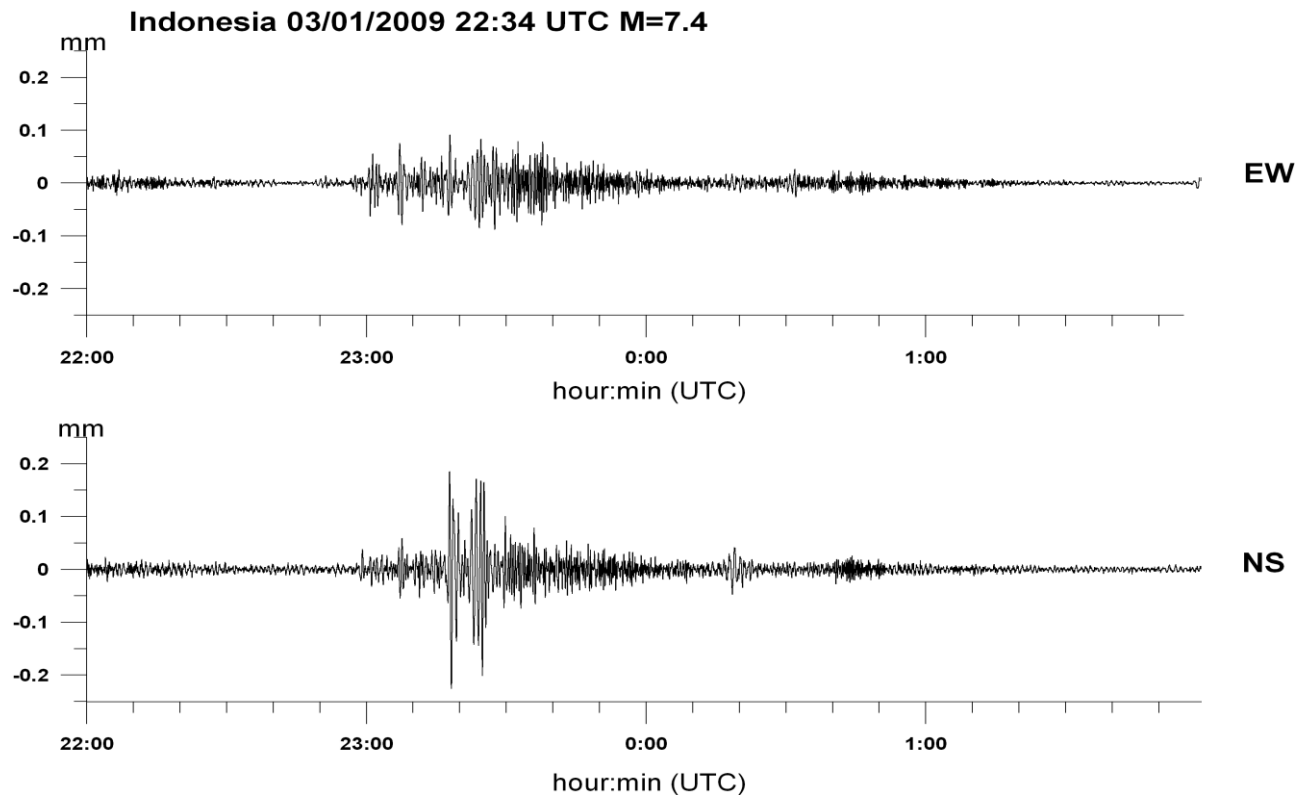
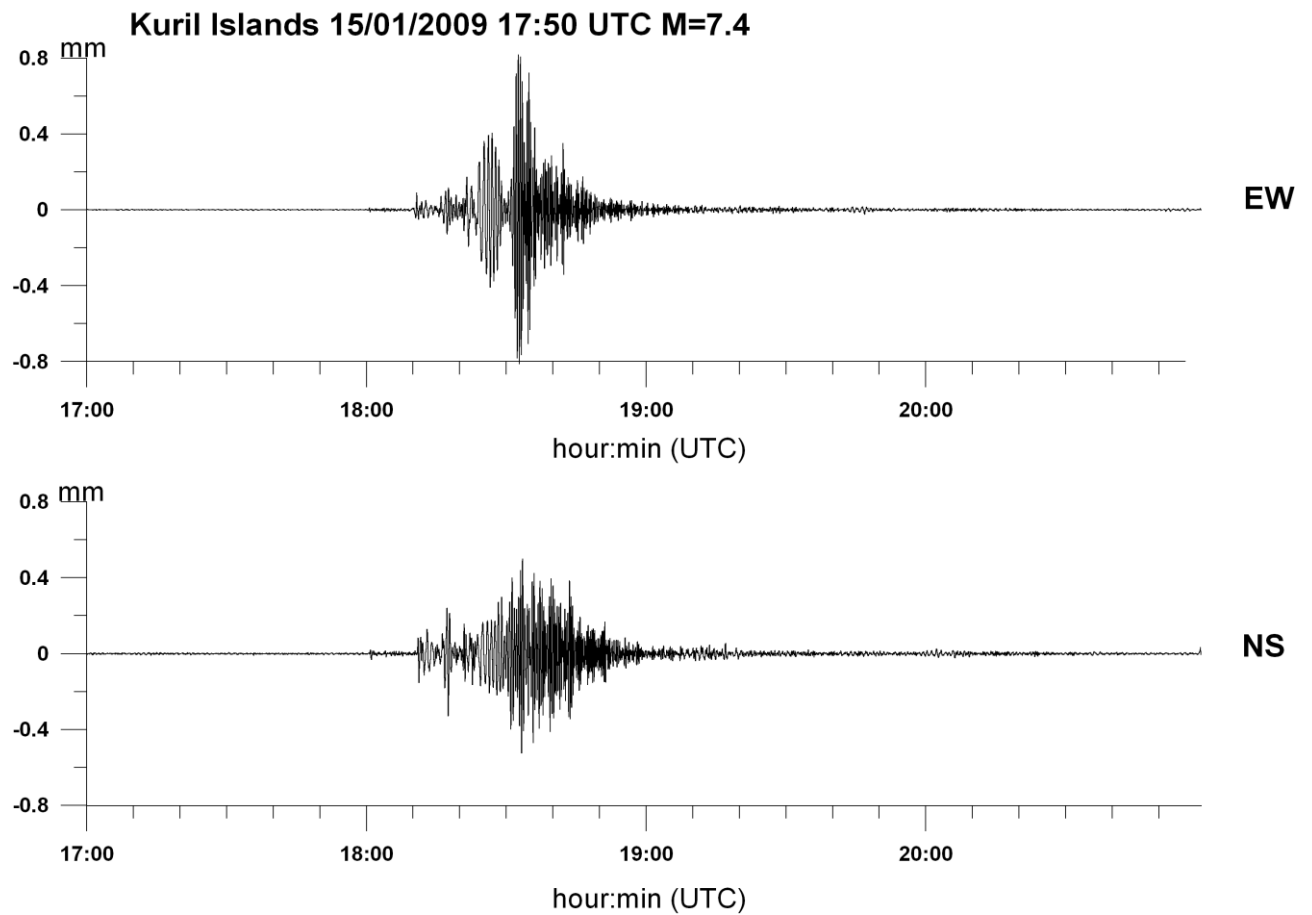


Fig. 4.1 (A-Z) – Registrazione di alcuni eventi sismici di magnitudo rilevante avvenuti durante il periodo dal 01 gennaio 2009 a 30 giugno 2010 (vedi Tab. 4.1). I dati originali sono stati filtrati con un filtro passa banda con banda passante per le frequenze comprese fra 0.0167 Hz e .25 Hz.

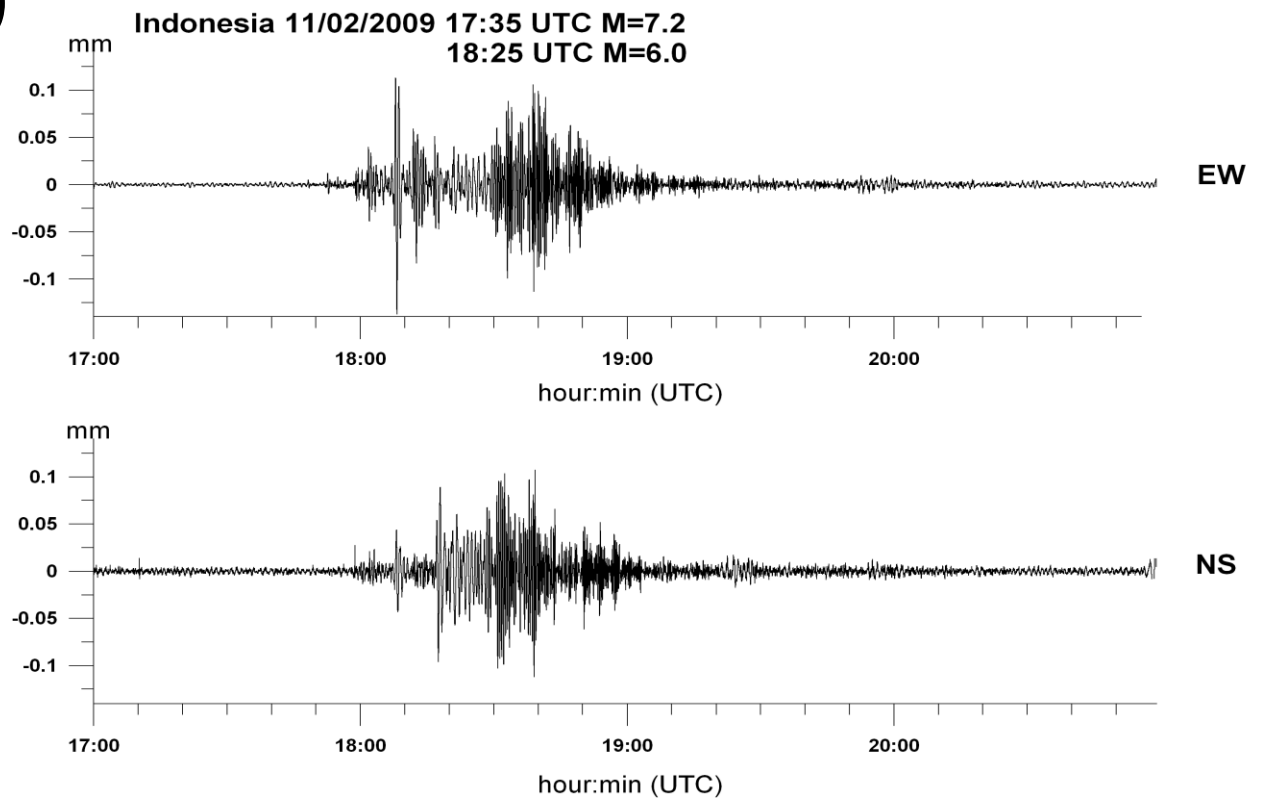
B)



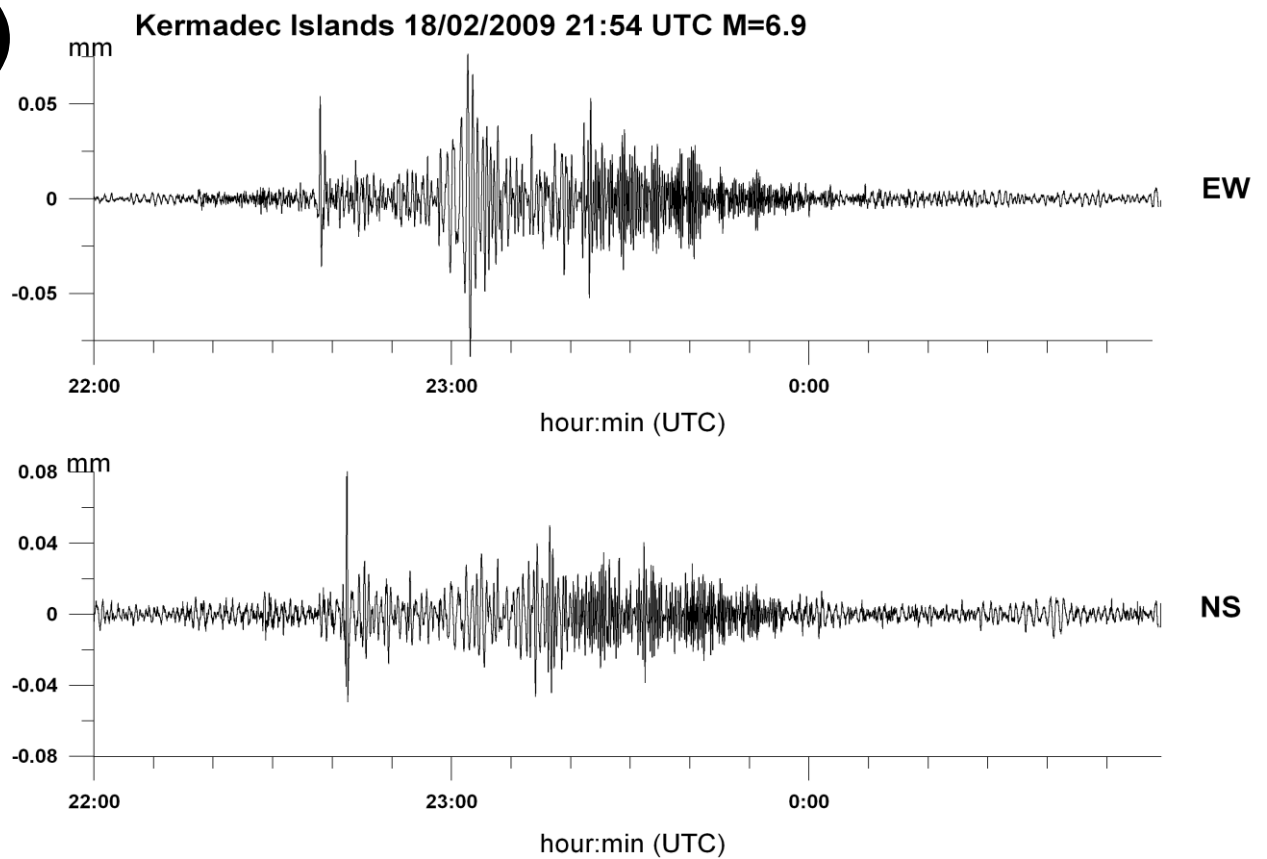
C)



D)

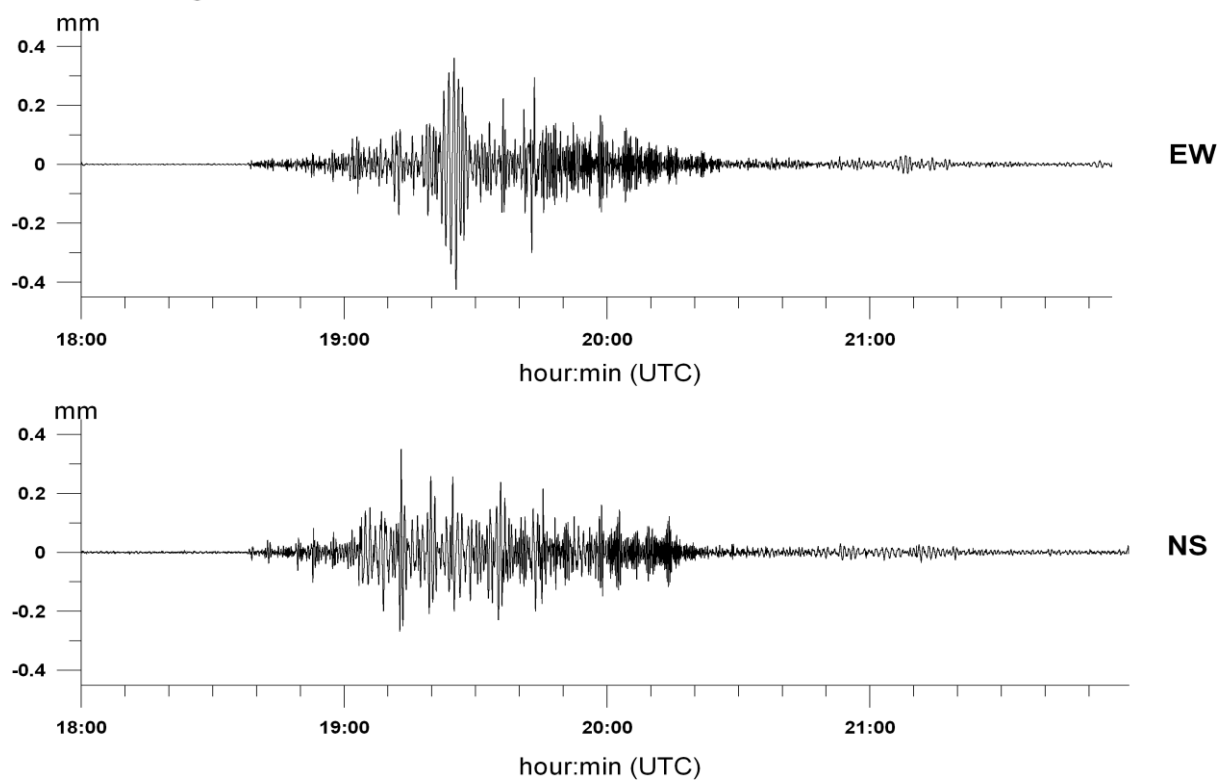


E)



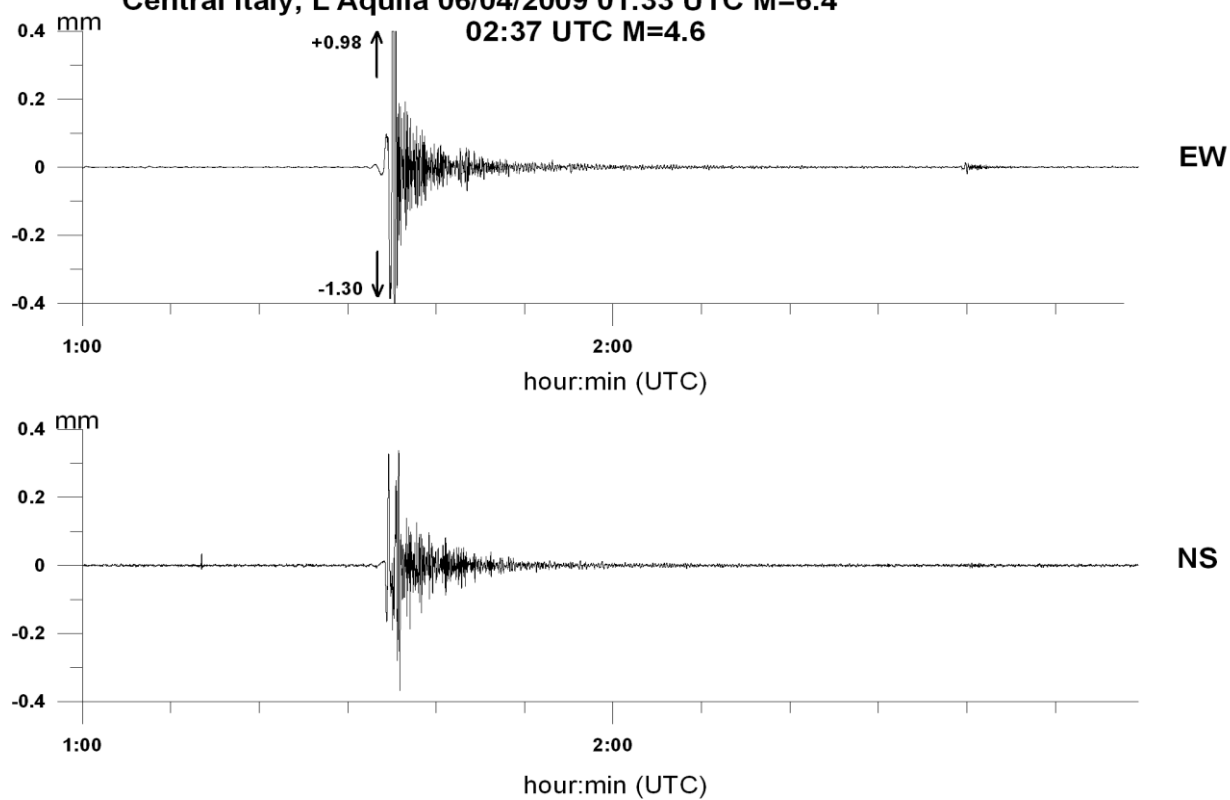
F)

Tonga 19/03/2009 18:18 UTC M=7.6



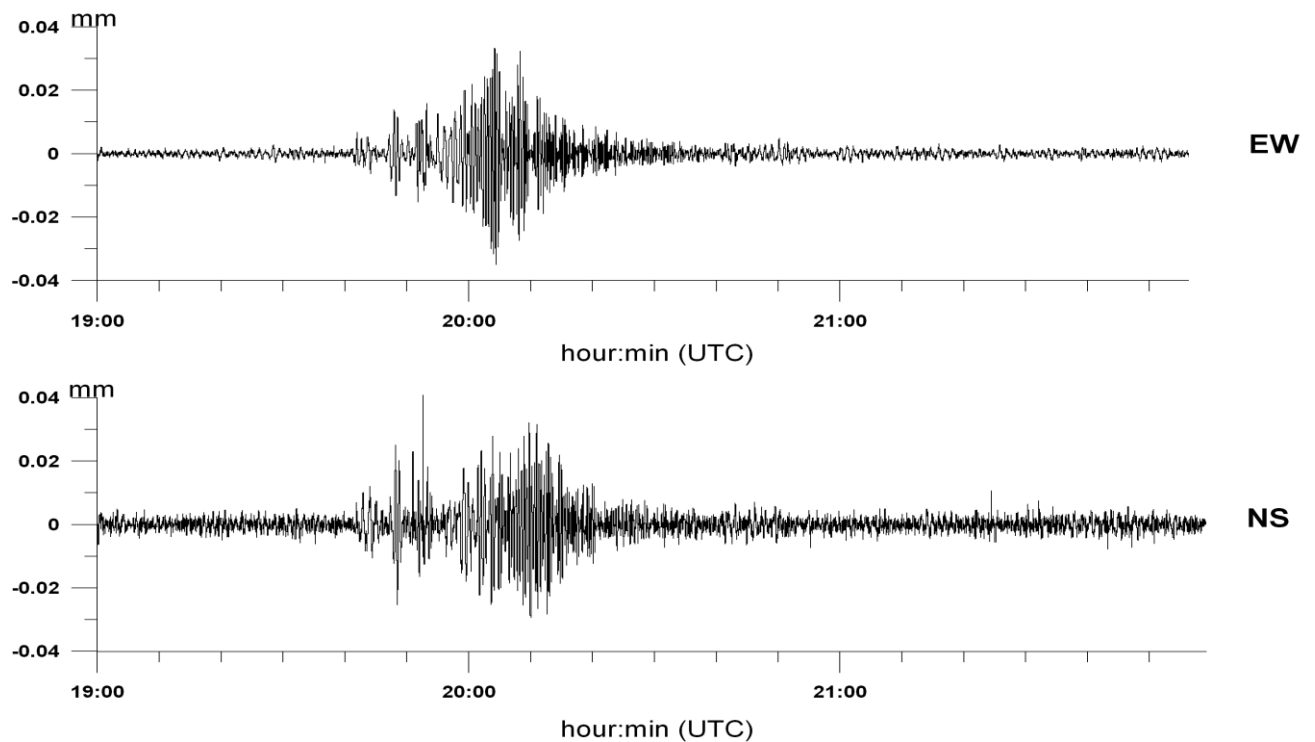
G)

Central Italy, L'Aquila 06/04/2009 01:33 UTC M=6.4
02:37 UTC M=4.6



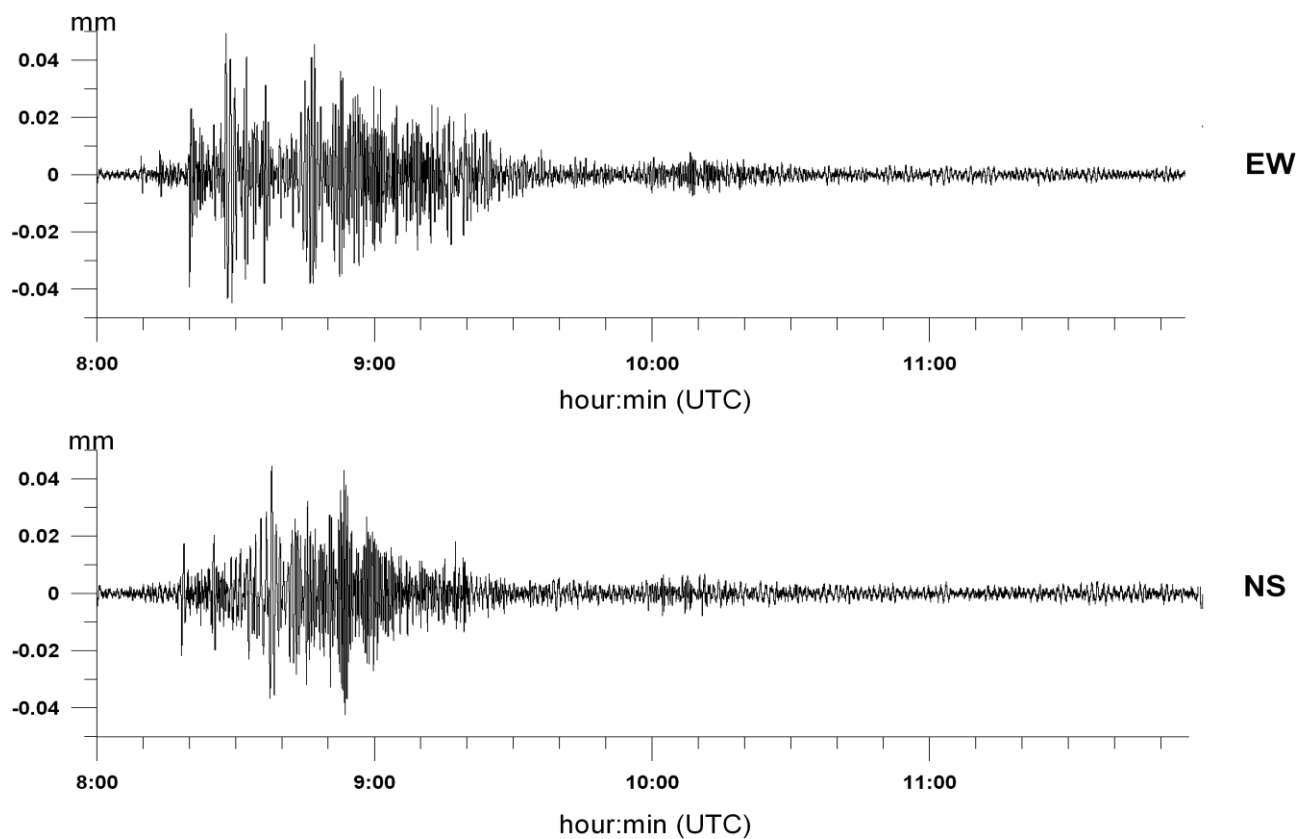
H)

Kuril Islands 18/04/2009 19:18 UTC M=6.6



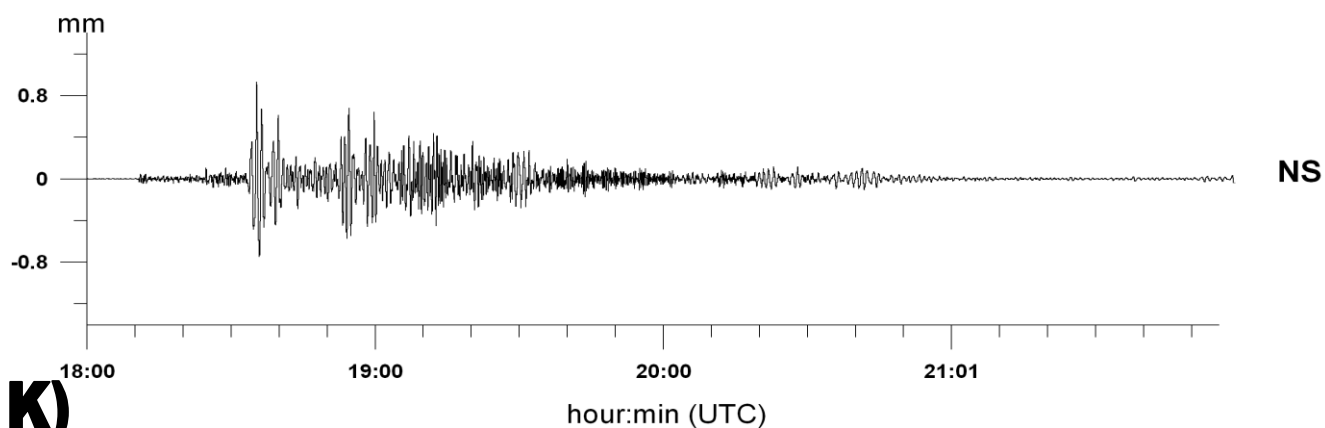
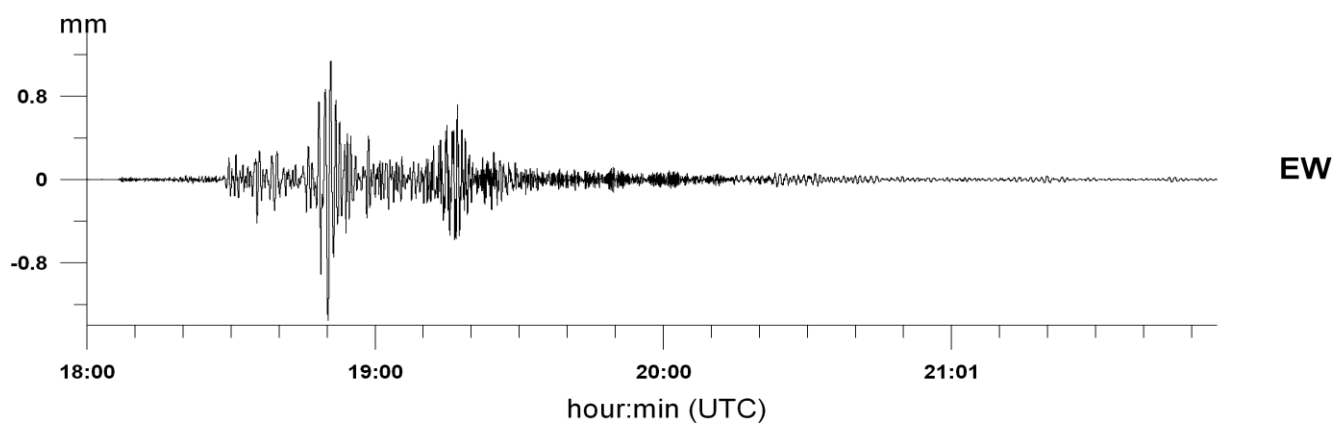
I)

Java 02/09/2009 07:55 UTC M=7.0



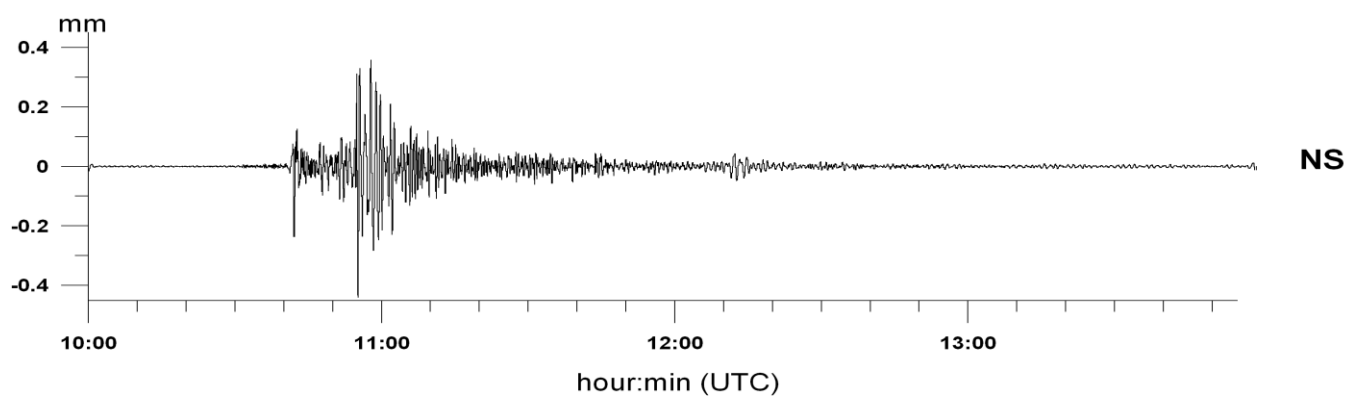
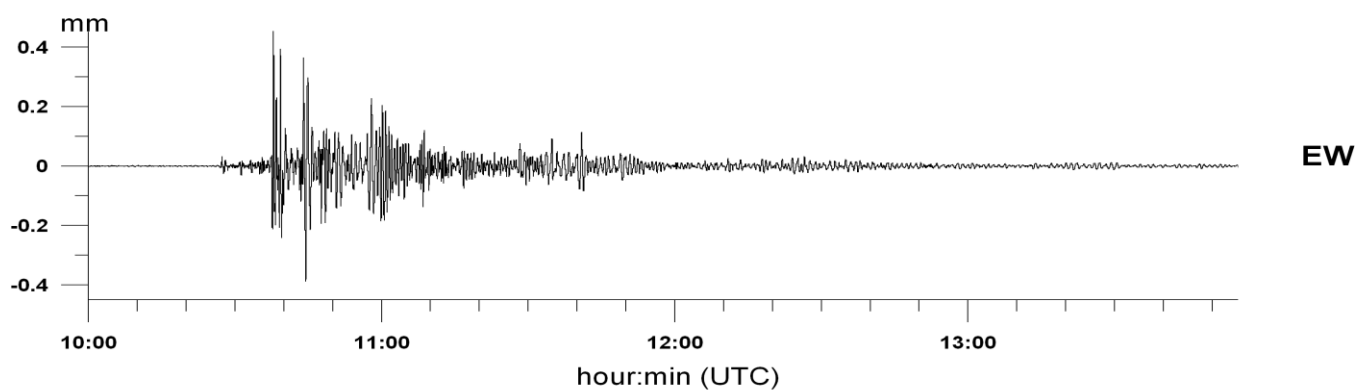
J)

Samoa Islands 29/09/2009 17:48 UTC M=8.0

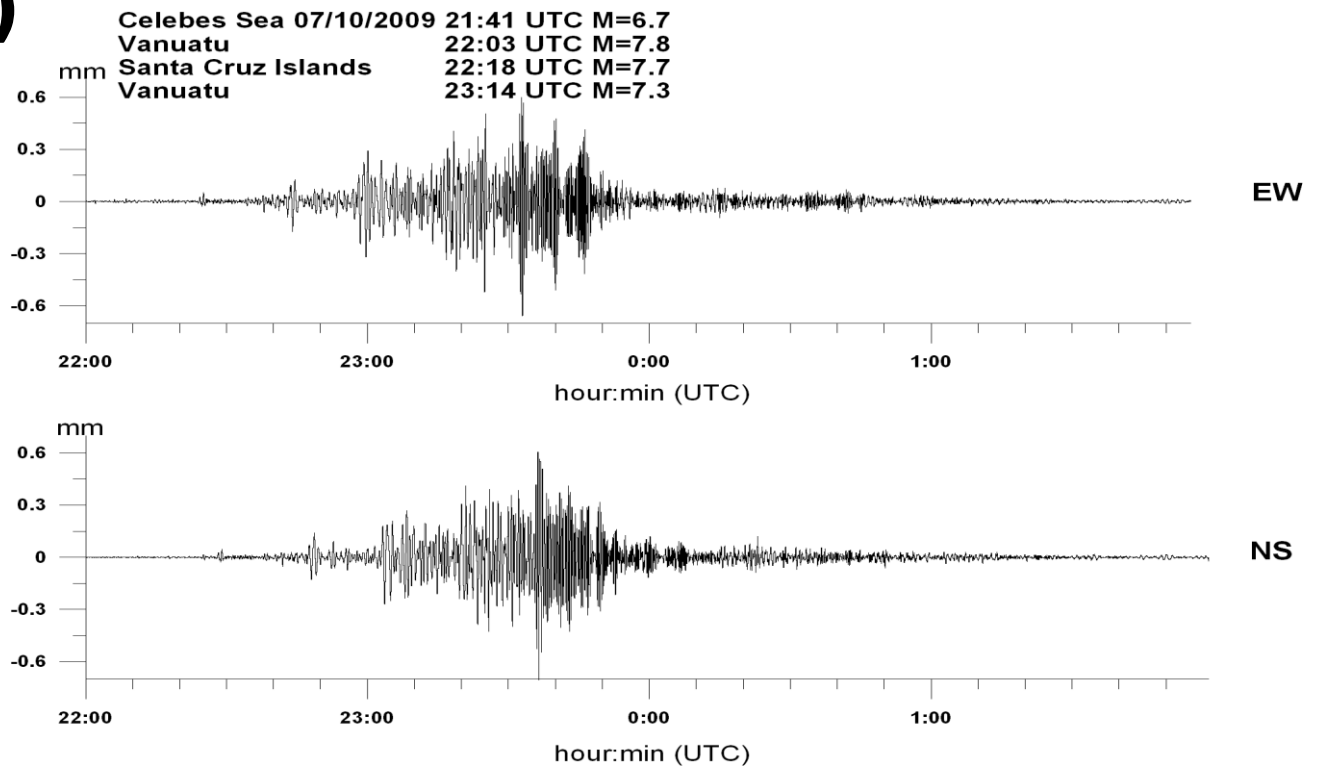


K)

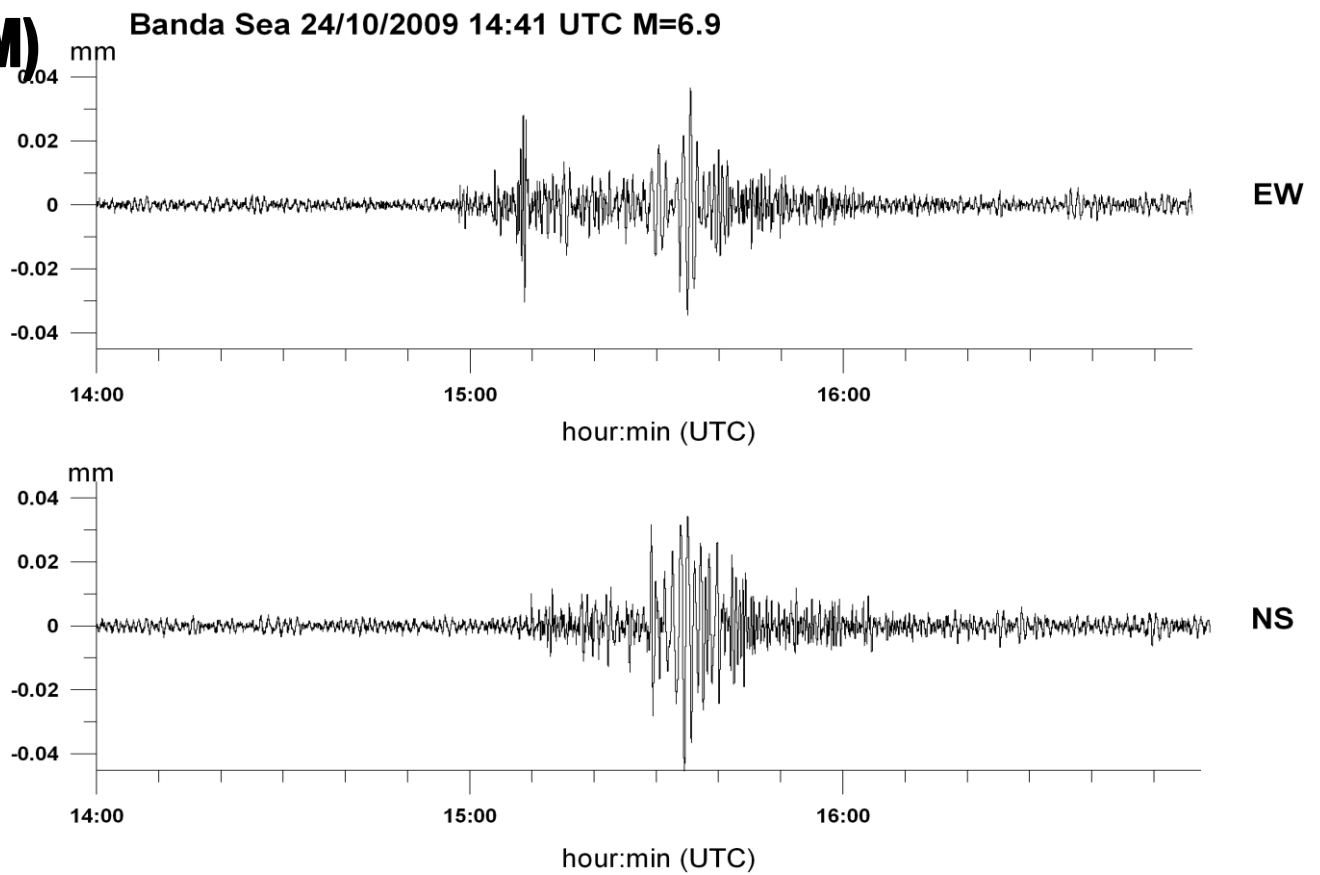
Sumatra 30/09/2009 10:16 UTC M=7.6



L)

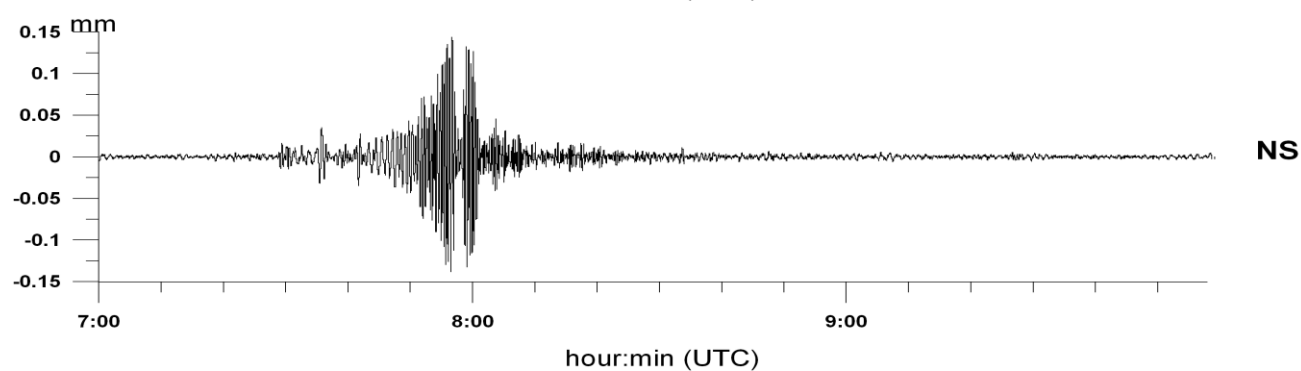
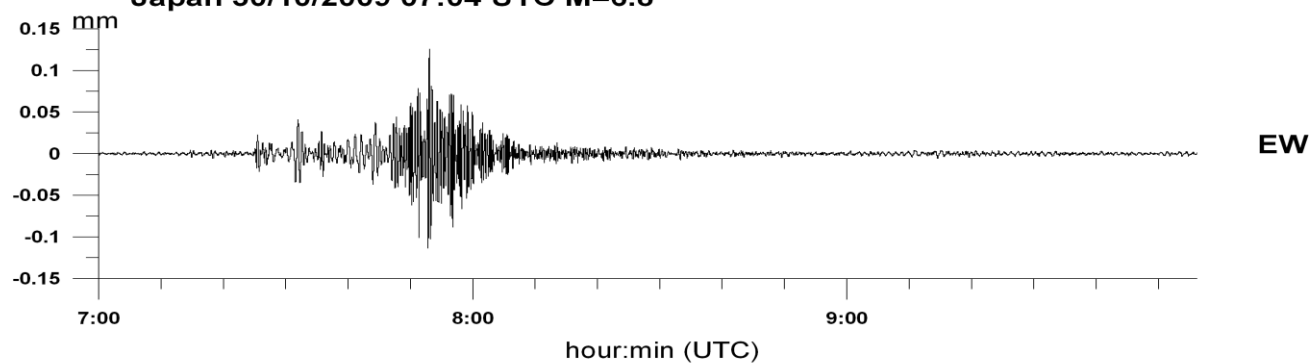


M)



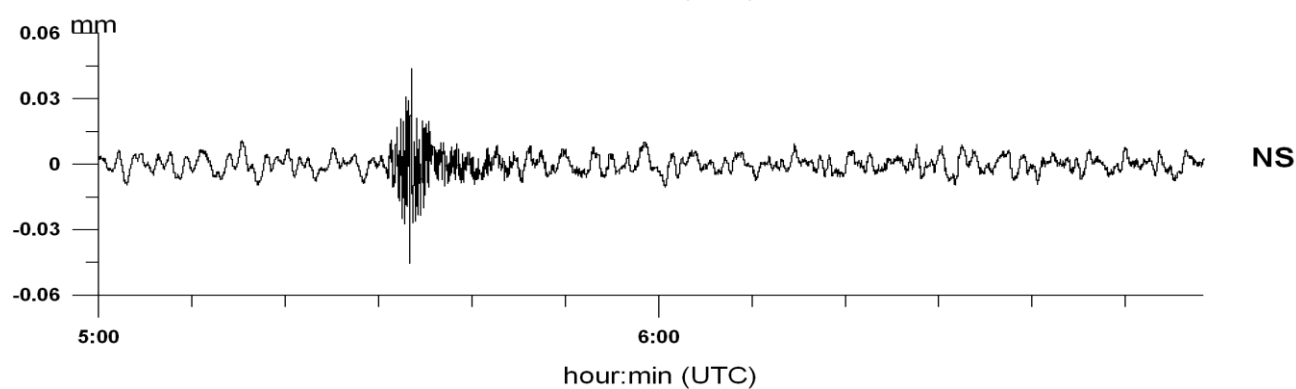
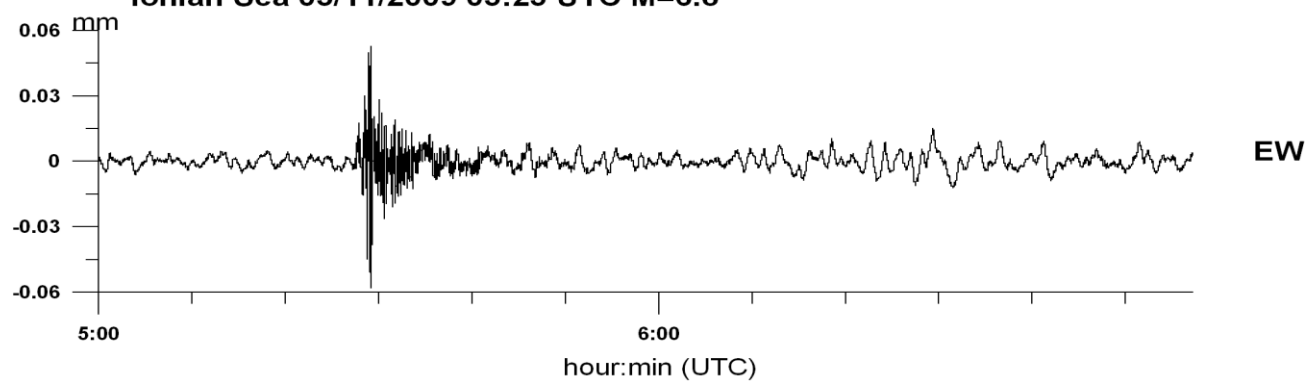
N)

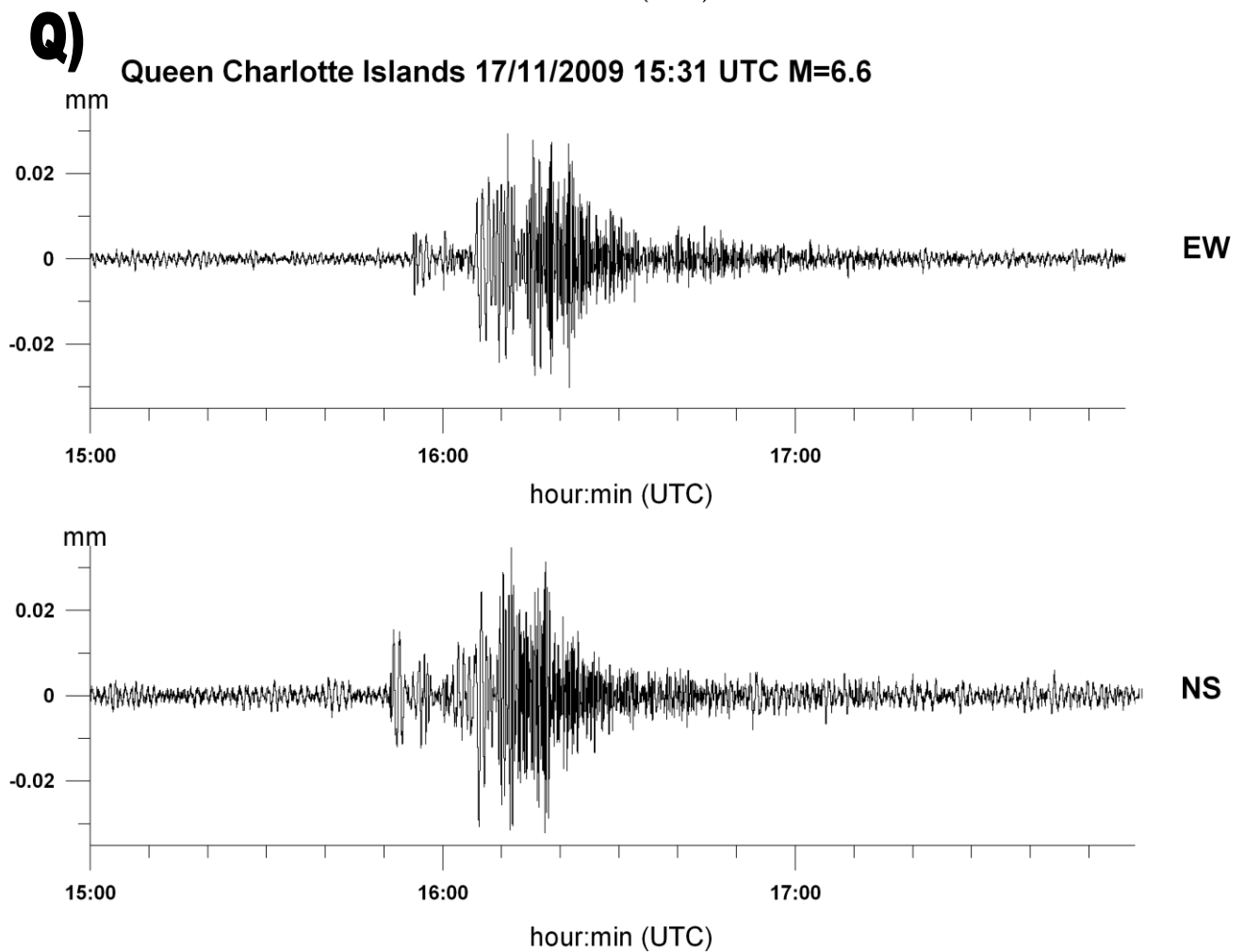
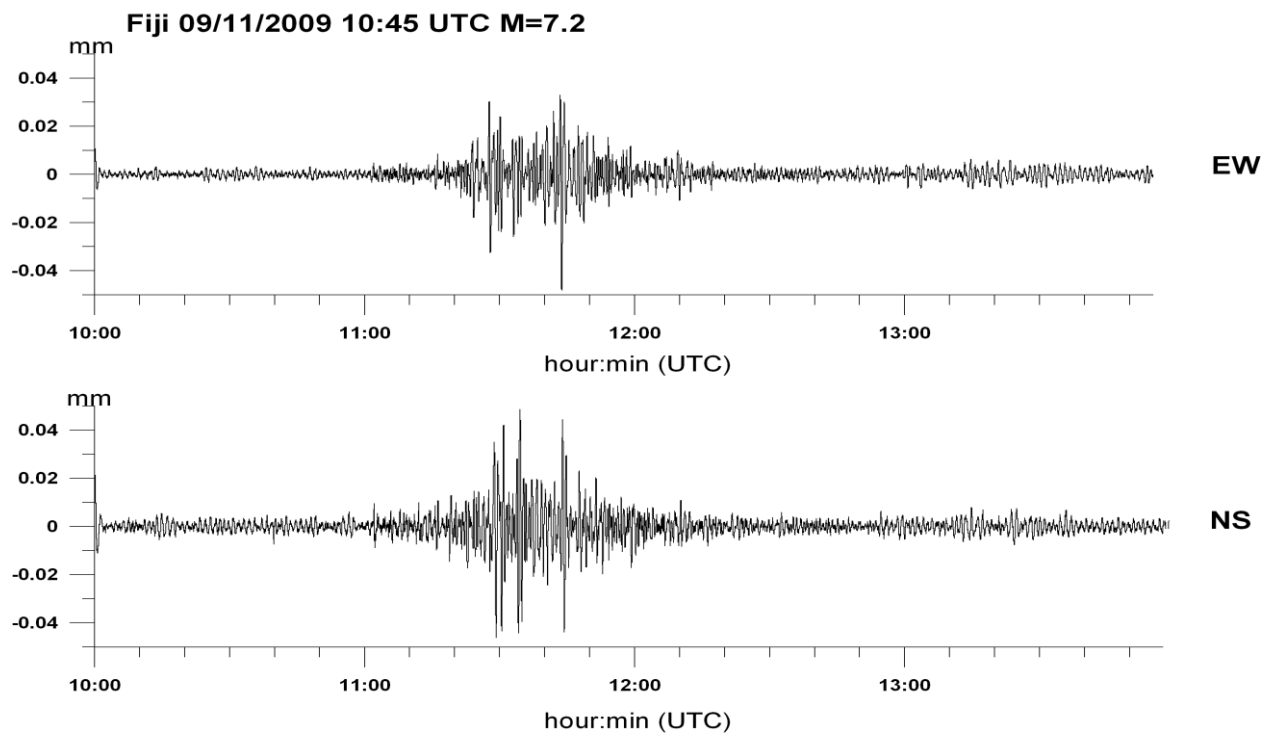
Japan 30/10/2009 07:04 UTC M=6.8



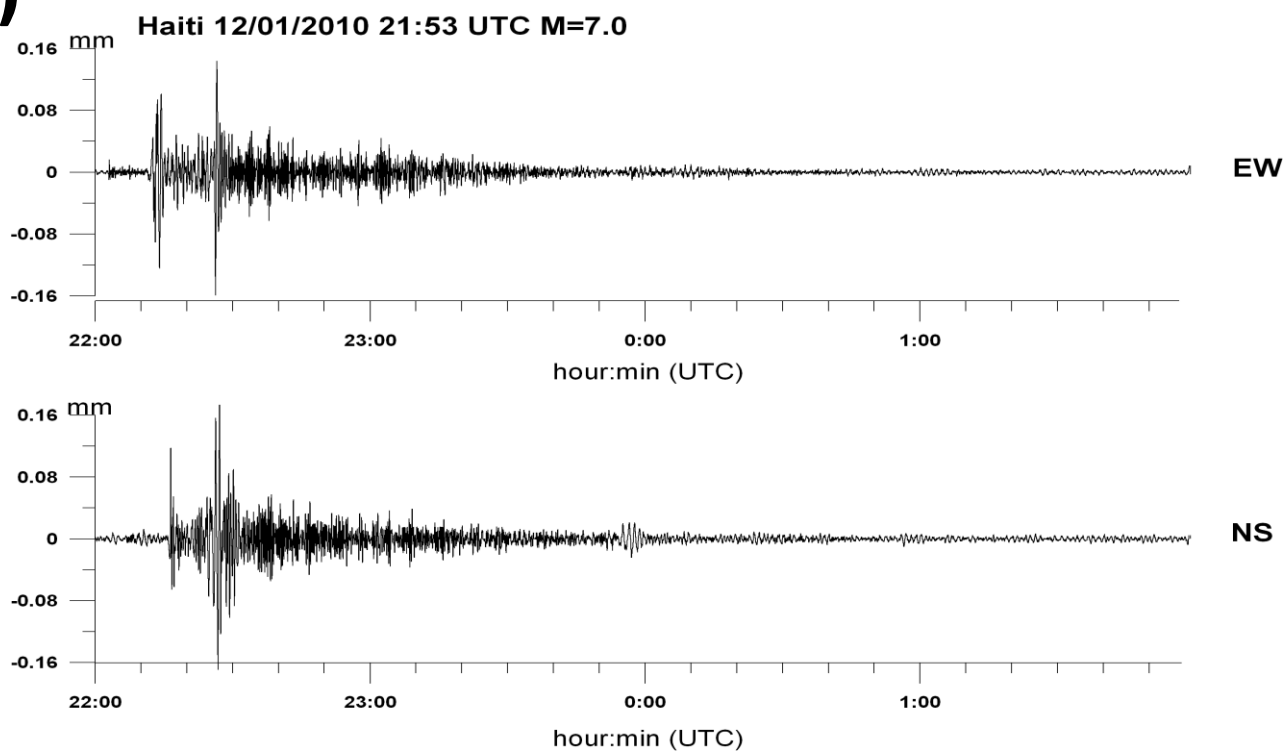
O)

Ionian Sea 03/11/2009 05:25 UTC M=6.8

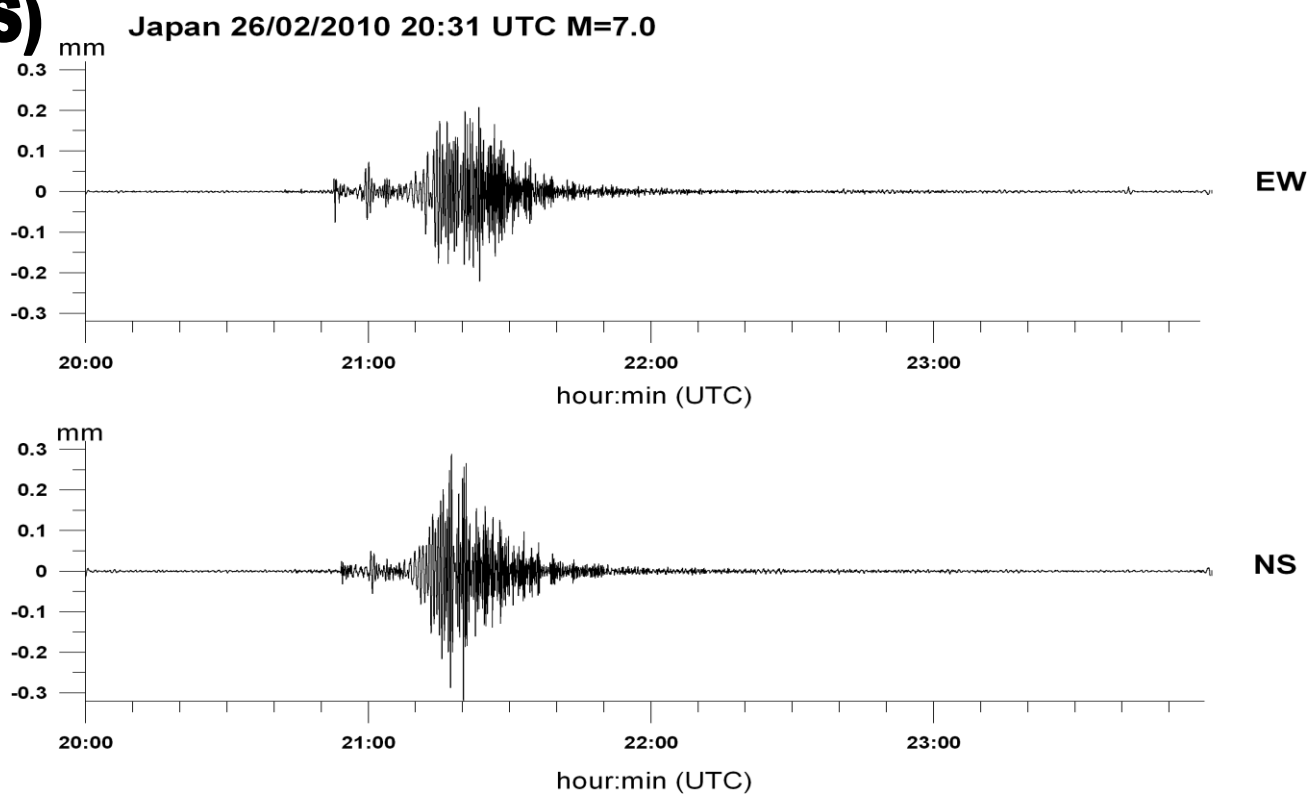




R)

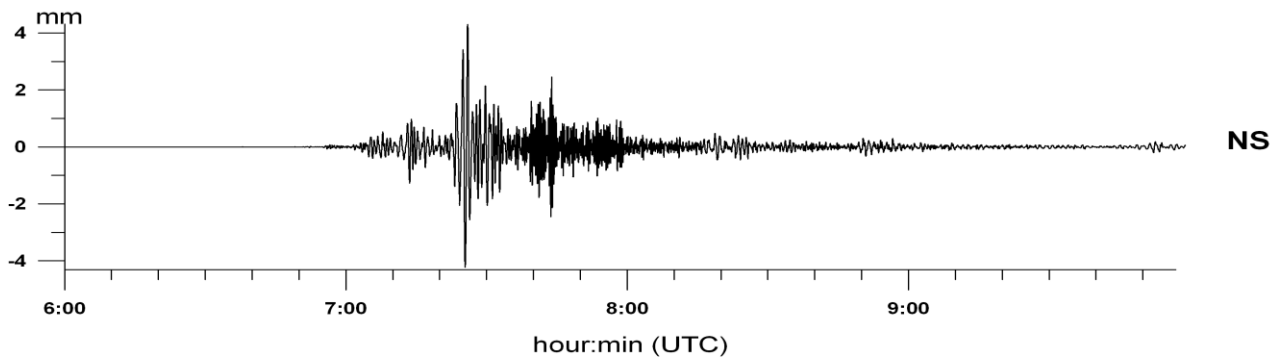
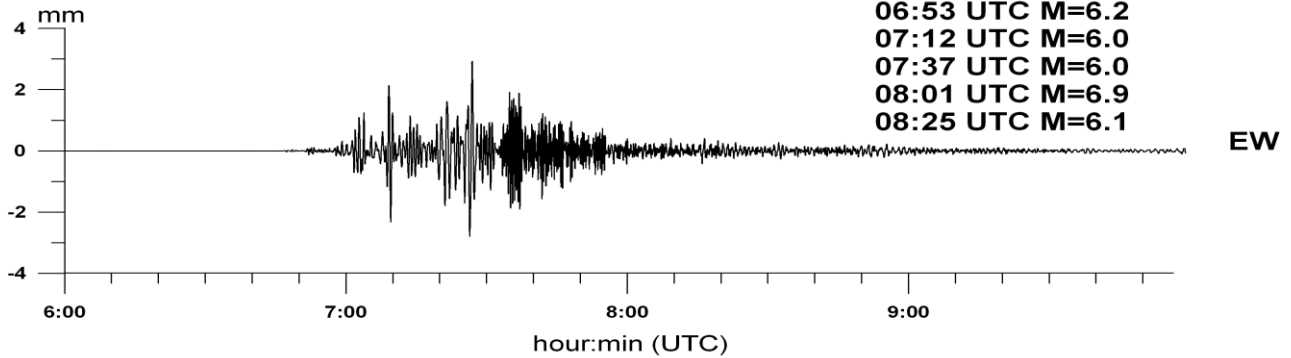


S)



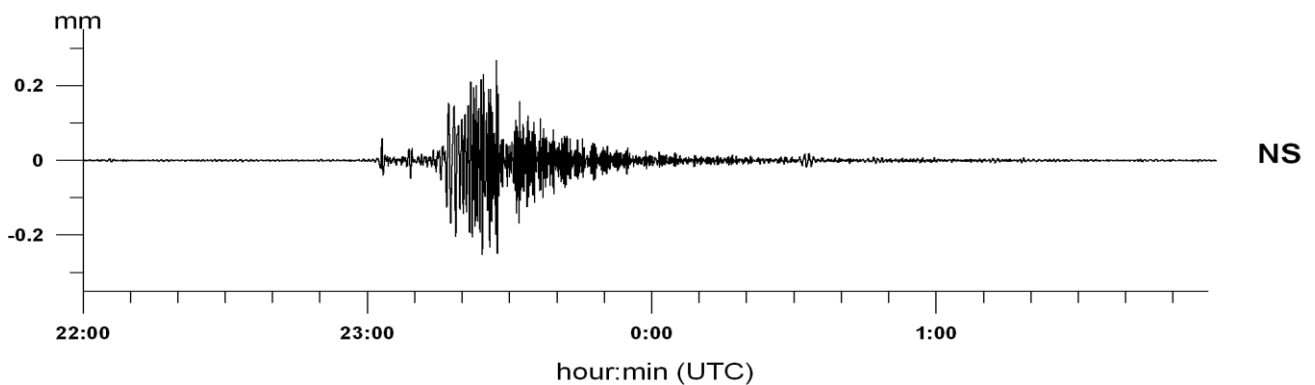
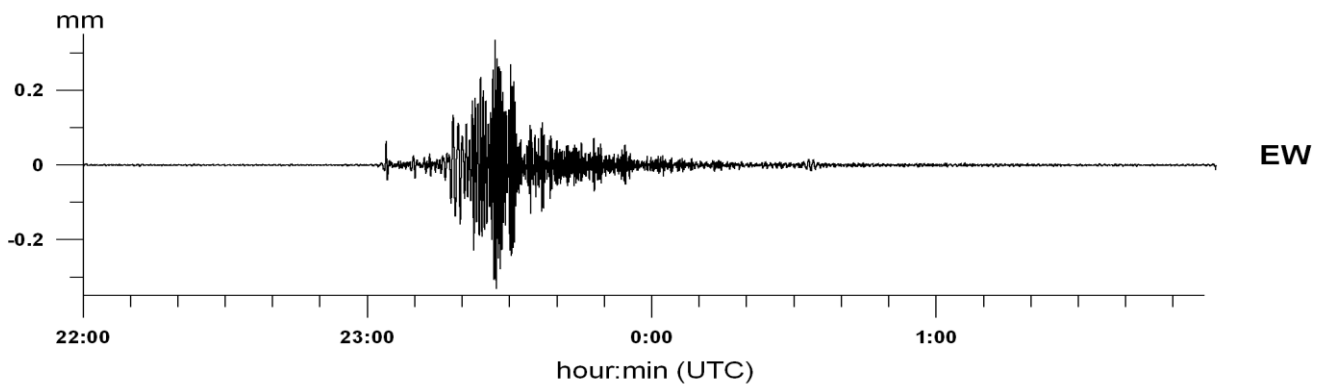
T)

Chile 27/02/2010 06:34 UTC M=8.8
06:53 UTC M=6.2
07:12 UTC M=6.0
07:37 UTC M=6.0
08:01 UTC M=6.9
08:25 UTC M=6.1

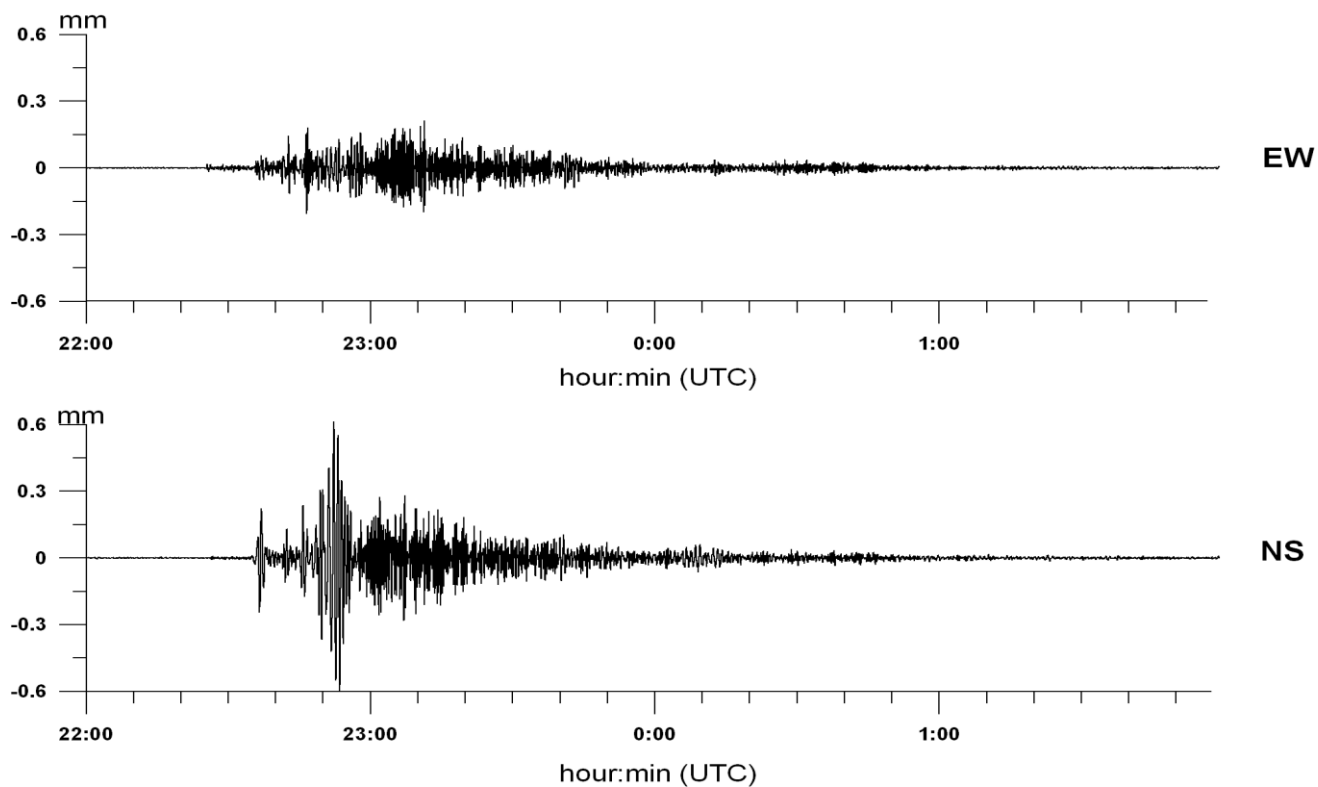


U)

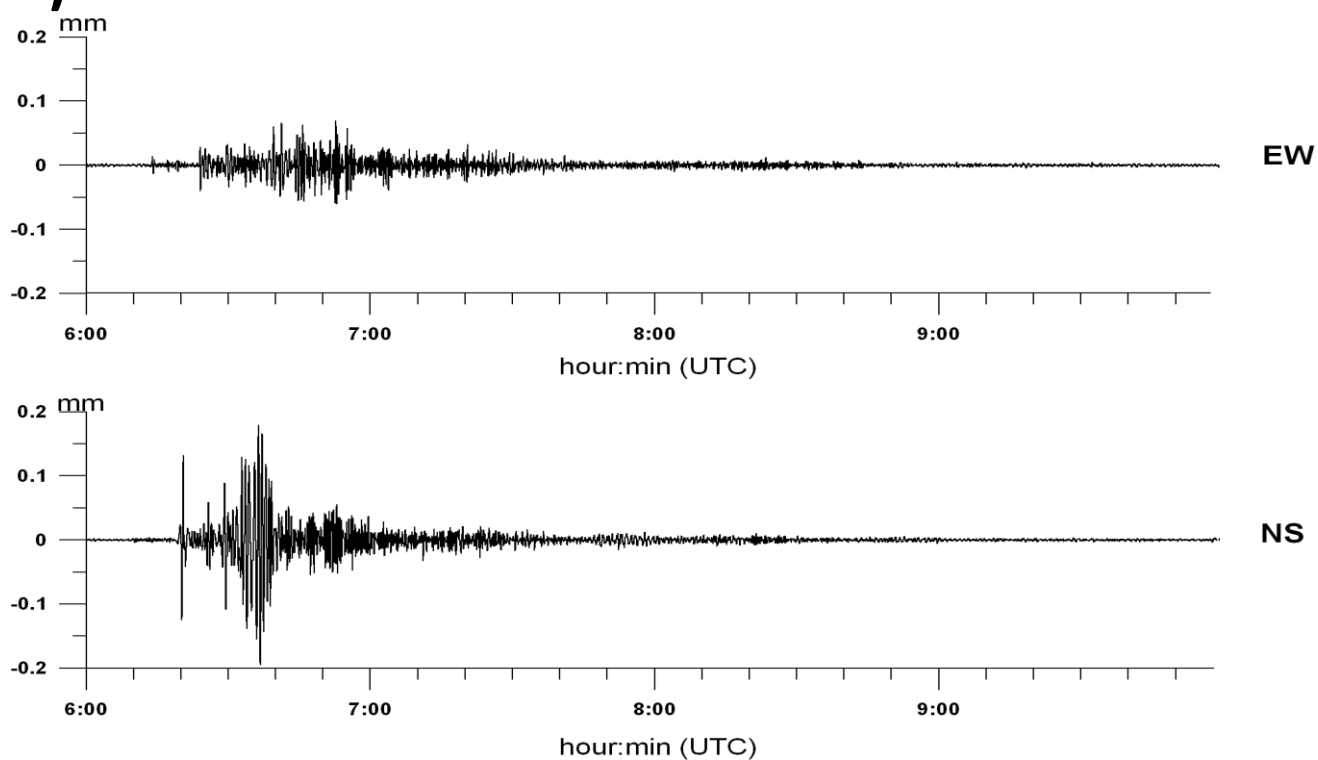
Mexico 04/04/2010 22:41 UTC M=7.2



V) Indonesia 06/04/2010 22:15 UTC M=7.7

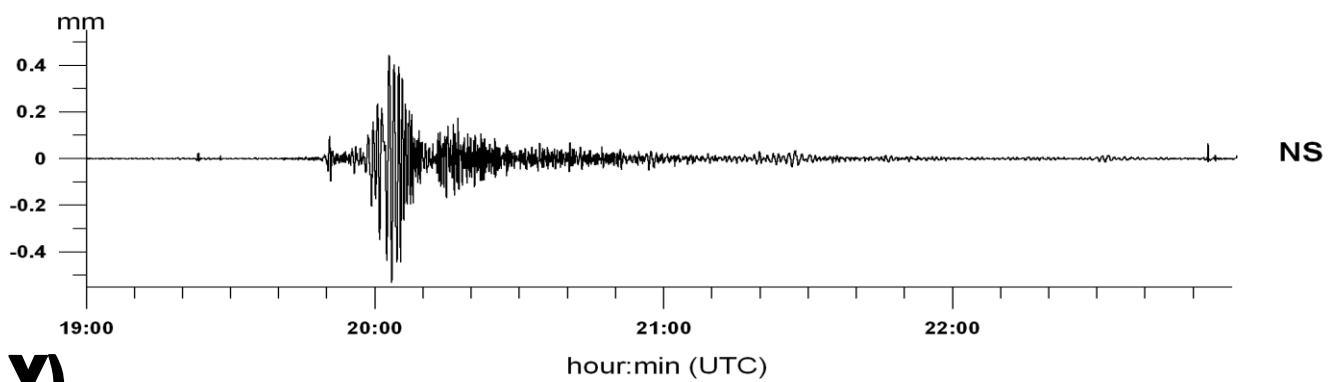
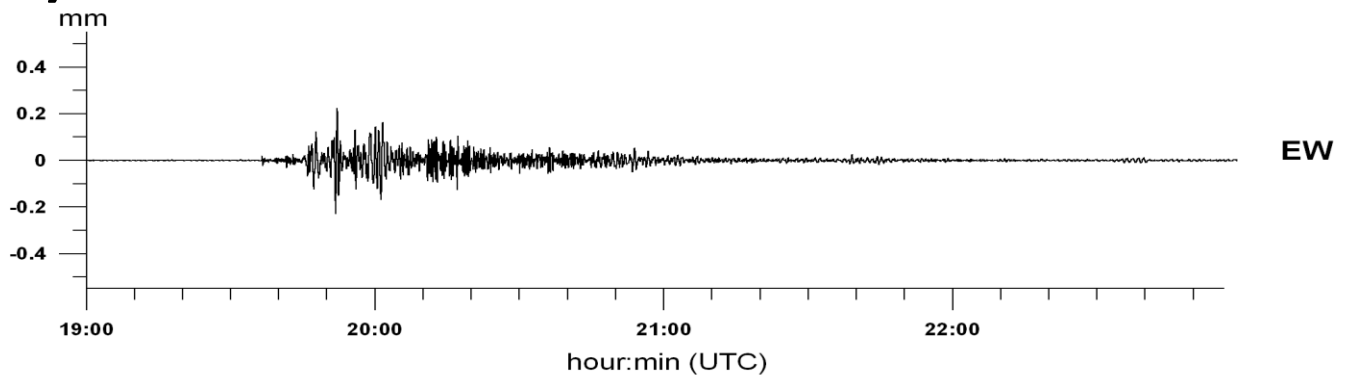


W) Sumatra 09/05/2010 06:00 UTC M=7.2



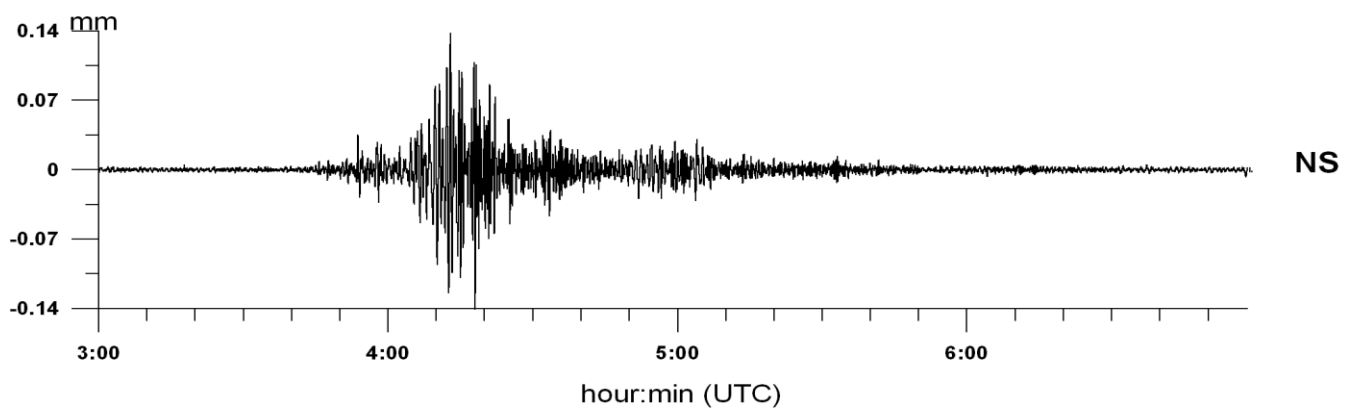
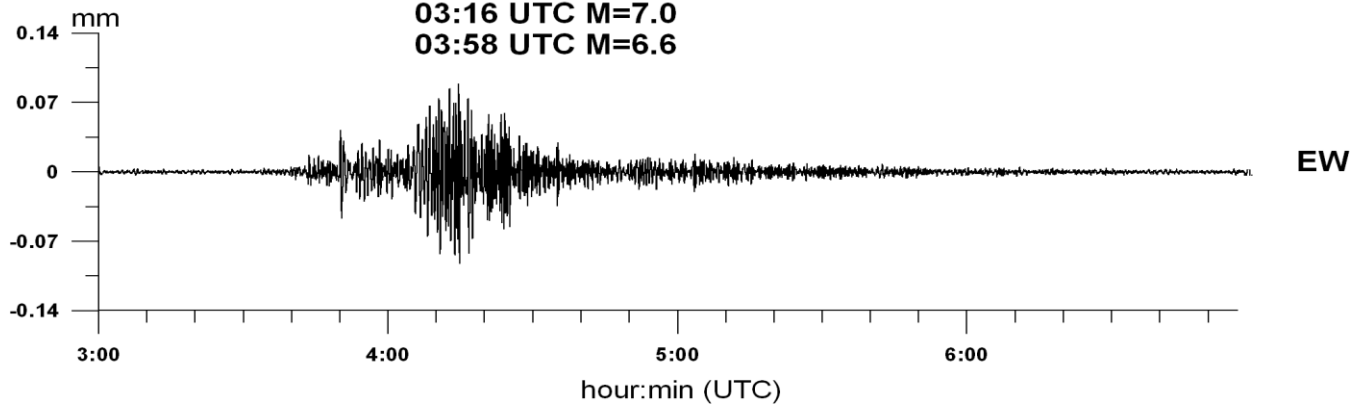
X)

Nicobar Islands, India Region 12/06/2010 19:27 UTC M=7.5



Y)

**Papua 16/06/2010 03:06 UTC M=6.2
03:16 UTC M=7.0
03:58 UTC M=6.6**



5 Analisi comparata delle registrazioni degli eventi Cile 1960 e Cile 2010

I pendoli della Grotta Gigante hanno registrato i tre maggiori eventi del secolo passato, che erano l'evento del Cile 1960 ($M=9.5$), delle Isole Sumatra-Andamane del 2004 ($M=9.0$) e del Cile 2010 ($M=8.8$), dove le magnitudo si riferiscono a quelle pubblicate dal NEIC. Pur avendo subito degli aggiornamenti dal 1960, le proprietà meccaniche dei pendoli sono rimaste invariate, come anche il luogo di misura. Infatti i pendoli dal 1960 sono sempre stati nella stessa stazione, ed il fattore di ampiezza è perfettamente controllabile grazie al rilevamento delle maree terrestri, stabili nel tempo.

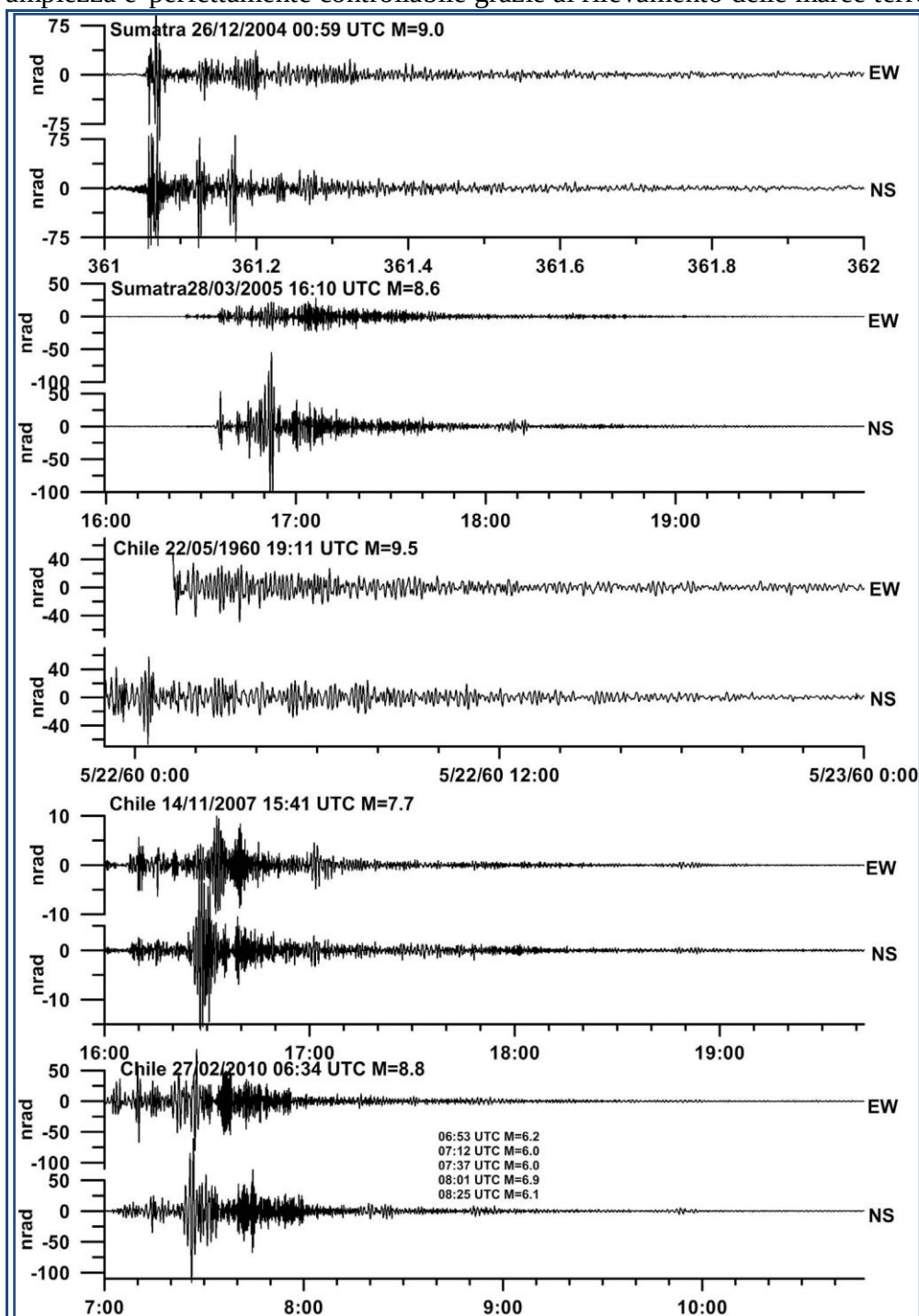


Fig 5.1. Osservazioni degli eventi del secolo di Cile e Isole Sumatra-Andamane.

La Figura 5.1 riporta le osservazioni degli eventi del Cile 1960, 2007, 2010 e dei due eventi rilevanti delle Isole Sumatra Andamane degli anni 2004 e 2005. La registrazione del 1960 era su carta fotografica ed è stata digitalizzata successivamente con un campionamento di 1 minuto. Gli altri eventi sono stati registrati con l'acquisizione digitale costruita e progettata da Gianni Romeo e Quintilio Taccetti (INGV, Roma). L'acquisizione digitale registra i dati con un campionamento molto più elevato di 30 campioni al secondo. Questo spiega il maggiore contenuto di alte frequenze delle osservazioni moderne. Altra caratteristica della registrazione storica digitalizzata è che inizia quattro a cinque ore (Est-Ovest: 304 min; Nord-Sud: 229 min) dopo il tempo origine dell'evento, perché il primo movimento era troppo veloce e di ampiezza troppo elevata per aver impresso un segnale sulla carta fotografica. Allo scopo dell'analisi comparata degli eventi, analizziamo le ampiezze dei modi delle oscillazioni libere attivate. Eseguiamo l'analisi spettrale delle diverse osservazioni seguendo la procedura illustrata in Braitenberg e Zadro (2007). Il metodo consiste nel calcolare K spettri della serie temporale di N campioni equidistanti. Ogni spettro viene calcolato con una diversa lunghezza della serie temporale, variabile dalla lunghezza massima di $T_{\max}=(N-1)dt$ fino alla lunghezza minima $T_K=(N-1)dt-(K-1)dt_K$, con dt_K un intervallo temporale opportunamente scelto. I K spettri risolvono allora diverse frequenze $f_{nK}=(n-1)/T_K$, con $n=1,2,\dots,N/2$. I K spettri diversi vengono uniti in uno spettro composito unico. Il vantaggio di questo metodo è, che i picchi spettrali che possibilmente ricadono fra due frequenze risolte dello spettro unico, vengono risolte senza condizioni di ambiguità. In Fig. 5.2a si mostra l'esempio di una serie temporale sintetica, consistente di quattro oscillazioni smorzate. Nella Fig. 5.2b Si mostrano i diversi spettri: lo spettro di Fourier (linea pesante), lo spettro composito usando una funzione di finestra al coseno con $M=N/2$ (linea tratteggiata) e $M=N/3$ (linea continua leggera). Il parametro M indica il numero di campioni affetti dallo smussamento della finestra con la funzione cosinusoidale (vedi dettagli in Braitenberg e Zadro, 2007). Si osserva come lo spettro composito risolve meglio le oscillazioni della serie temporale.

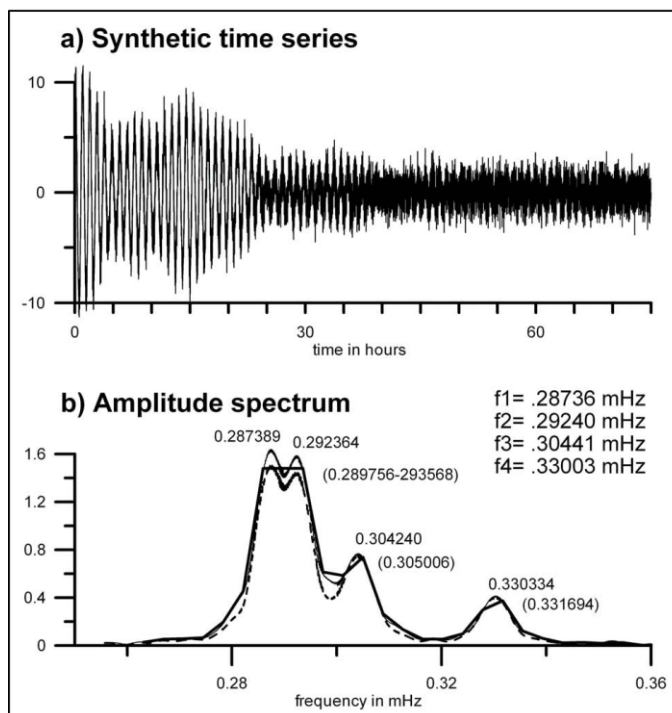


Fig. 5.2 Spettro di Fourier (linea pesante) e spettro composito (linea tratteggiata e linea fine) di una sequenza sintetica (da Braitenberg e Zadro, 2007).

L'analisi spettrale delle sequenze temporali degli eventi sismici viene eseguita su una serie temporale della lunghezza pari a 75 ore. Questo corrisponde ad un numero di campioni pari a $N=9000$ per l'evento del Cile 1960 (campionamento 30 sec) ed un numero $N=18000$ per tutti gli altri eventi (campionamento 15 sec). La distanza fra evento e stazione è pari a 114° per gli eventi del Cile e 82° per gli eventi Sumatra. Nella Figura 5.3 presentiamo gli spettri per l'evento di Sumatra-Andamane 2004, e per gli eventi Cile 2007, 2010 e Cile 1960. L'evento di Sumatra dell'anno 2007 ha generato ampiezze deboli delle oscillazioni libere, per cui lo spettro risulta piuttosto rumoroso. Nella figura si osserva come i modi delle oscillazioni libere sono bene individuati. L'evento del Cile 1960 presenta ampiezze relativamente maggiori nei modi più bassi. Analizzando in dettaglio i modi più bassi $0S2$, $0T2$ e $2S1$, possiamo osservare lo splitting delle frequenze, causato dall'influenza della rotazione terrestre. Nella Figura 5.4 gli spettri osservati vengono confrontati con le frequenze teoriche, seguendo i modelli di Zürn e Widmer (comunicazione personale) e Dahlen e Sailor (1979).

Infine calcoliamo i rapporti d'ampiezza per i due eventi del Cile, dell'anno 2010 e 1960, ed i risultati sono riportati nella Figura 5.5. La procedura era quella di individuare le ampiezze di singoli modi in ambedue spettri, partendo dalle frequenze teoriche. Per i modi individuati in ambedue eventi abbiamo poi calcolato i rapporti delle ampiezze. Troviamo che l'evento del Cile del 1960 ha generato modi di oscillazione con ampiezze da due a otto volte maggiori dell'evento del Cile del 2010.

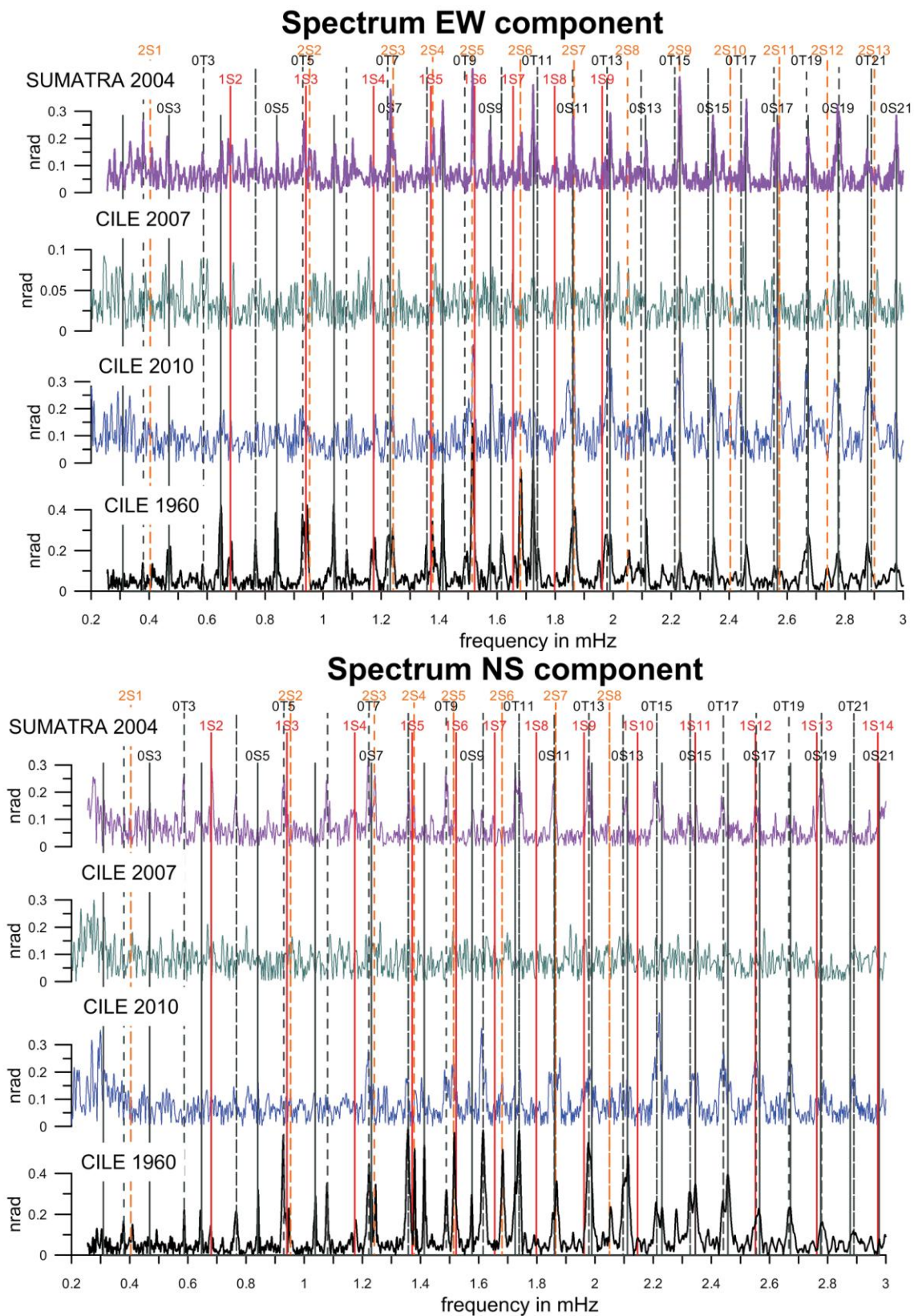


Fig. 5.3 Spettro di ampiezza delle osservazioni dei pendoli della Grotta Gigante nell'intervallo delle oscillazioni libere. Linee verticali indicano le frequenze teoriche dei modi torsionali (nero) e sferoidali (rosso). Spettri per tre eventi sismici del Cile ed uno delle isole Andamane - Sumatra.

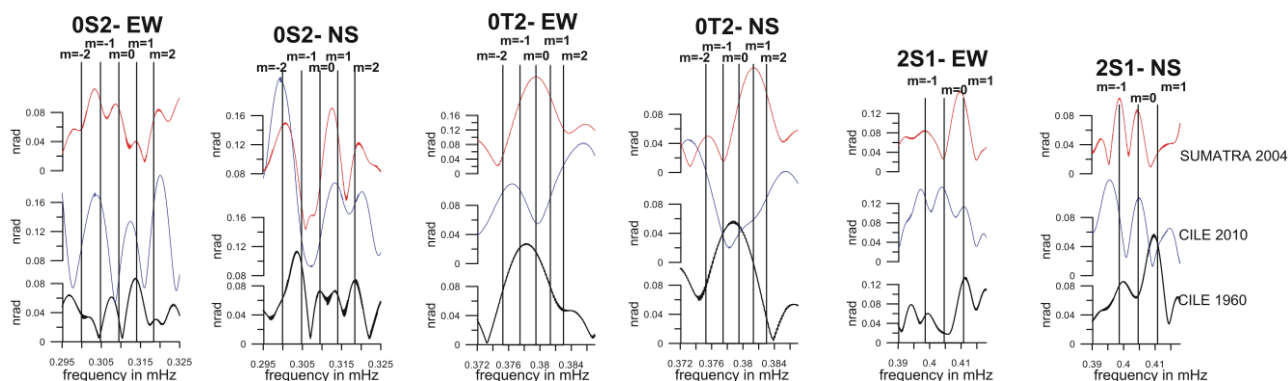


Fig. 5.4 Illustrazione dello splitting delle frequenze spettrali per i primi modi d'oscillazione libera 0S2, 0T2 e 2S1. L'indice m indica l'ordine della oscillazione. In assenza di rotazione terrestre i modi d'oscillazione con m differente degenerano alla stessa frequenza.

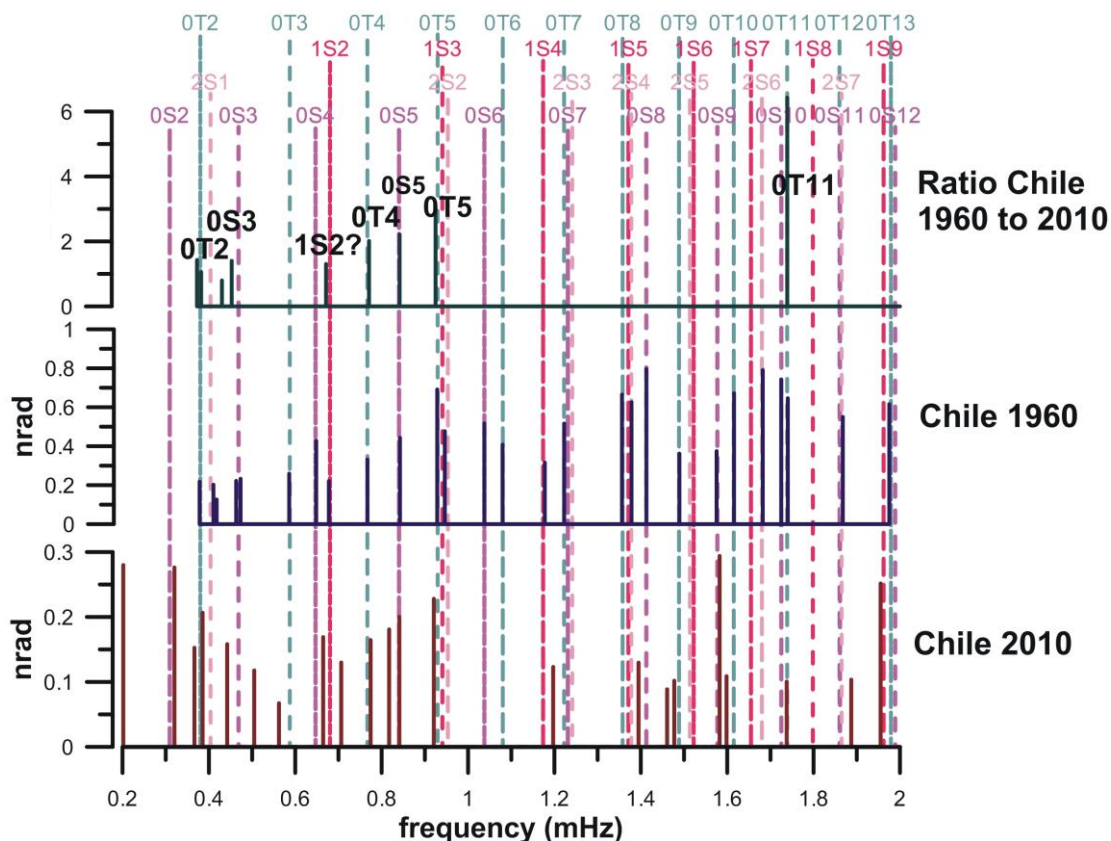


Fig. 5.5 Comparazione delle ampiezze dei modi d'oscillazione libera generati dai due eventi del Cile 1960 e 2010. In alto il rapporto delle ampiezze per i modi attivati in ambedue eventi. L'evento del 1960 ha generato modi con ampiezze che sono da due a otto volte maggiori dell'evento del 2010.

6) Anteprima della voce “ Ultra broad band horizontal geodetic pendulums” del’Encyclopedia of Geophysics edita dall’editore Springer

ULTRA BROAD BAND HORIZONTAL GEODETIC PENDULUMS

Synonym: Ultra broad band long base tiltmeter

Definition

The ultra broad band horizontal geodetic pendulum is a device designed to measure the earth crustal movement in the range of periods typical of secular movements to seismic deformations. It measures the variation of the plumb line (vertical) with respect to the direction of two earth-fixed reference points (Zadro and Braitenberg, 1999).

Instrument description

The vertical pendulum is made of a mass suspended by a rod or wire which can oscillate in the vertical plane about a horizontal axis. For small amplitudes the oscillation period T depends on the moment of inertia K , the distance s of the center of mass from the rotation axis, the mass m and the gravity acceleration g following the equation $T = 2\pi \sqrt{\frac{K}{mgs}}$. If the pendulum is allowed to oscillate about an inclined axis, the angle of the rotation axis with the vertical being φ , the period of oscillation is defined by $T = 2\pi \sqrt{\frac{K}{mg \cos \varphi}}$. For small values of the angle φ , the rotation axis is near to vertical and the pendulum is called horizontal pendulum. Compared to the vertical pendulum of equal dimensions, the horizontal pendulum has an increased oscillation period. The first realizations of a horizontal pendulum were done in 1830 (Lorenz Hengler), and developed further by Zöllner (Zöllner, 1871; 1872). The construction of Zöllner is made of a horizontal rod on which at one end a mass is attached. At the other end and at a small distance from it the rod is connected by two wires to a housing structure (see Fig. 1). The two wires are near to vertical above each other. Supposing the upper fixed point is shifted with respect to the lower fixed point along the Meridian, so that the line connecting the two fixed points makes an angle φ with the vertical, then the rod has its equilibrium position in the Meridian plane. If the direction of the vertical changes due to the influence of the gravitational attraction of the moon or sun towards east by a small angle α , the rod will rotate towards east by the angle α . A similar rotation of the rod will be produced by the inclination of the housing structure or by a horizontal eastward movement of the housing structure as could be provoked by the passage of a seismic wave. In order to have an instrument sensitive in both NS and EW directions, usually a couple of orthogonally mounted pendulums is installed at one station. The movement of the rod is recorded by a space sensitive device, as a magnetic induction coil mounted at the extreme of the rod or by an optical device that records the light ray reflected by a mirror mounted on the rod (e.g. Braitenberg et al., 2006).

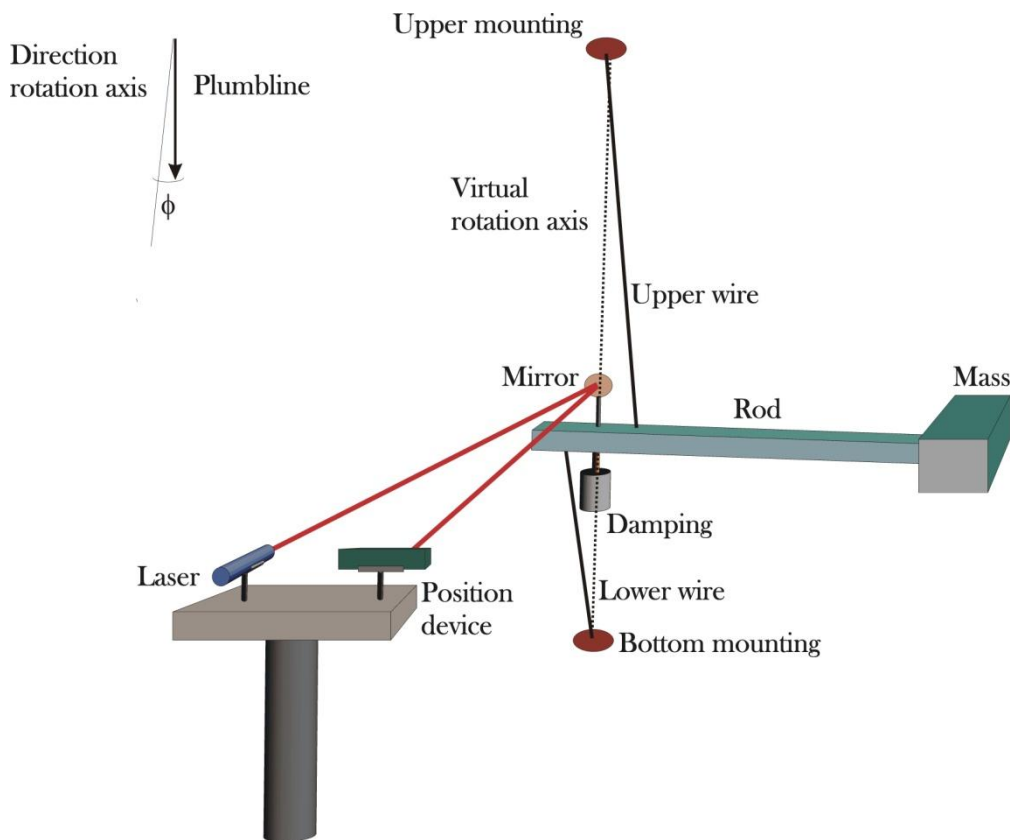


Figure 1: Cartoon of a horizontal geodetic pendulum. The rod with the mass rotates in the horizontal plane about the virtual rotation axis. The angle ϕ of the virtual rotation axis with the plumb line is essential for the amplification factor of the pendulum.

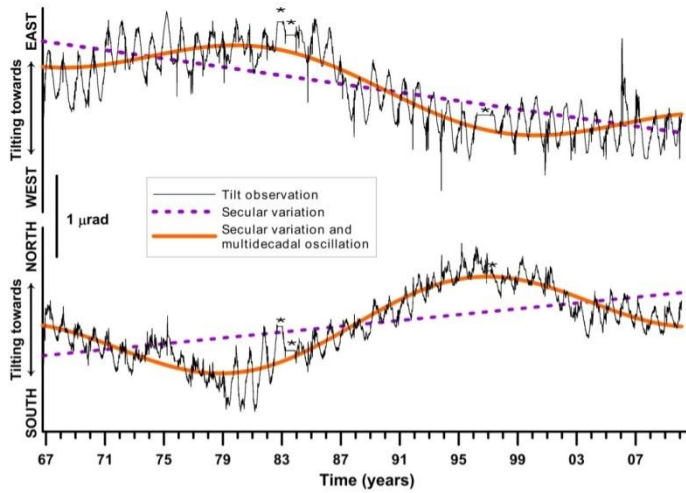
Grotta Gigante horizontal pendulums

The largest prototype of a horizontal pendulum was built in 1959 by Antonio Marussi (Marussi, 1959) in a natural cave (Grotta Gigante) situated in the Italian Carst at 275 m above sea level near the town of Trieste, Italy. Trieste is a port on the Adriatic Sea, 150 km East of Venice. The upper and lower wires of the horizontal pendulum-rod are fixed directly into the rock, at a vertical distance of 95 m. The oscillation period of the pendulum is near to 6 min, and damping is critical. The original recording of the pendulum was on photographic paper, which was changed to a digital system in the year 2002. The instrument is very stable, and records multi-decennial crustal movements. The digital system has a sampling rate of 25 Hz, which makes it possible to observe fast movements of the pendulum caused by the passage of seismic waves. The smallest resolved tilt is 0.009 nrad (1 nrad= 10^{-9} radians).

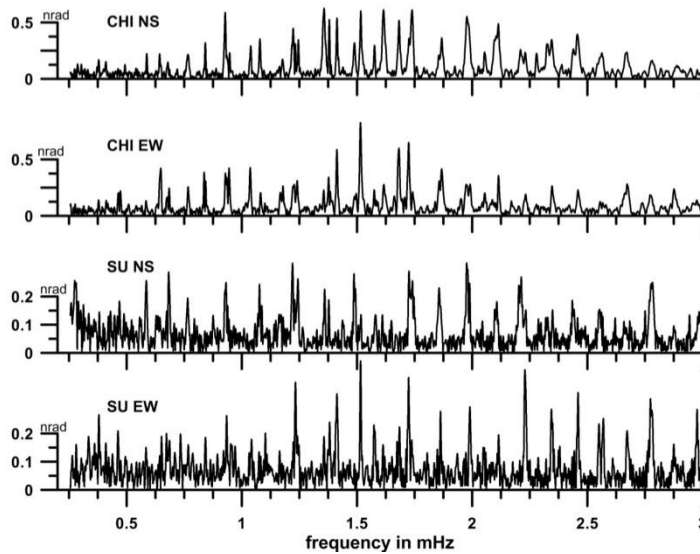
The continuous record of tilt extends from 1966 to the present and demonstrates that the cave deforms continuously due to very different causes that act independently from each other. Each generates a characteristic signal contributing to the complex deformation of the cave. The graph in Fig. 2a displaying the entire tilt sequence shows a secular drift which adds to an oscillation with a period of 33 years. The long term movement is a tilt of the cave towards NW, parallel to the coastline and is probably tied to a deformation of the Adria plate that is bent below the load of the sediments in front of the South Alpine mountain chain. The cause of the multi-annual oscillation is presently unknown, and could be tied to large scale deformations imposed by the active deformation due to the collision of the Adria and the Eurasian plate, causing the seismicity at the contact between the sedimentary plain and the South Alpine mountains. The tilting of the cave with

an annual period (mean period=365.6 days and mean amplitude=300 nrad for years 1966-2008; oscillation amplitude defined as half the peak to peak signal) has a characteristic orientation with extreme values in mid September and mid March. The annual tilting is due to the combined effect of the deformations due to the annual surface temperature variations (sinusoidal with an amplitude of 9.2 °C) and to the variable loading of the Adriatic Sea.

A



B



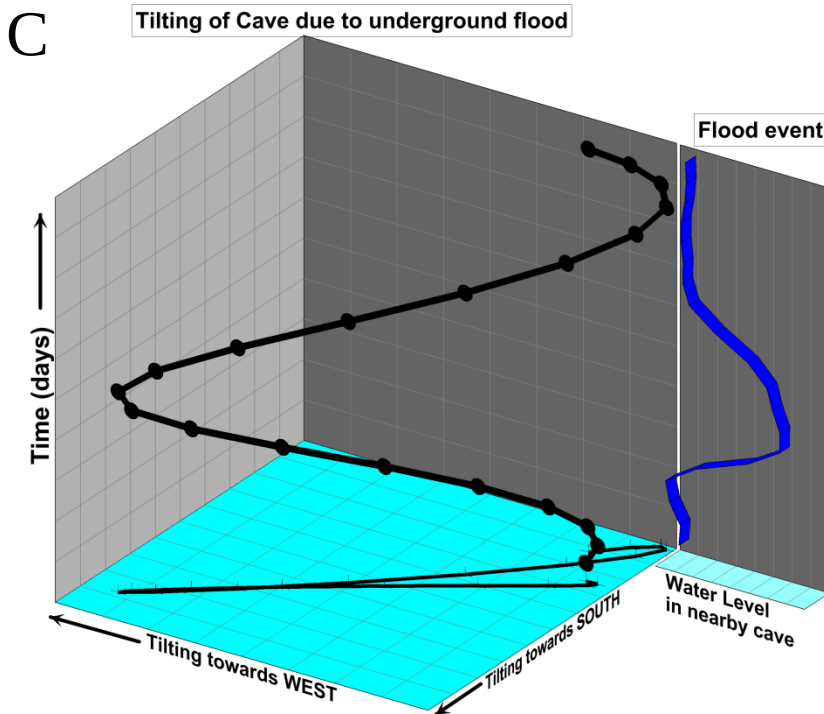


Figure 2: The graph shows the continuous time series of tilt recorded by the horizontal geodetic pendulum of Grotta Gigante. A) Black continuous line are the NS and EW records with daily sampling. The regular oscillation is the annual tilting. The multi-decadal variation is the sum of an oscillation of 33 years (thick line) and a linear variation (dashed line). The spikes are due to tilting caused by floods of the underground carstic water flow. Asterisks mark data interruptions. B) Spectral amplitudes in the frequency range of the free oscillations following the earthquakes of Chile 1960 (CHI-NS, CHI-EW) and Sumatra-Andaman 2004 (SU-NS, SU-EW). C) The tilting of the cave due to the underground flooding: The thick line shows tilting of the cave during the flood, the z-axis is the time. The thinner line shows the tilting during the flooding in the EW and NS direction. Furthermore, the water level in a nearby cave during a flood is shown.

The earth tides generate a tilting which is due to the regular deformation of the earth in response to the gravitational attraction of moon and sun, with predominantly diurnal and semidiurnal periods. The amplitude of the earth tide tilting is 39 nrad, the gravitational attraction and the load of the ocean tide contribute to an additional tilt signal at the same tidal frequencies, but phase shifted with respect to the astronomical earth tide, leading to a total tidal tilting signal with a maximum amplitude of 90 nrad. The fault rupture of an earthquake leads to the generation of the well known seismic waves that propagate along the earth surface and through earth's interior. Another movement caused by earthquakes is the oscillation of the earth at its resonance-frequencies, called the free oscillations. The crustal rupture causes the earth to pulsate in the spherical and torsional oscillation modes. The gravest spheroidal mode 0S2 where the earth deforms with an ellipsoidal pattern has a 54 min period, the more complicated modes having shorter periods. The gravest torsional mode 0T2 has a period of 43.9 min, one earth hemisphere rotating with respect to the other around a central axis (Bolt and Marussi, 1962). The geodetic pendulums of the Grotta Gigante station are the only instruments in the world that recorded the free oscillations generated by the greatest ($M=9.5$, Chile, 1960; NEIC, 2010), third greatest ($M=9.1$, Sumatra Andama Islands, 2004; NEIC, 2010), and fifth greatest earthquake ($M=8.8$; Chile, 2010; NEIC, 2010) ever recorded in

instrumental seismology. The observations showed that the amplitude of the free oscillations of the Chile 1960 earthquake were up to four and a half times greater than those generated by the Sumatra-Andaman 2004 event (Braitenberg and Zadro, 2007), the greatest enhancement being found for the torsional modes (see spectrum in Fig. 2b). The cave deforms not only due to periodic signals, similar to the ones we described before, but also due to transients, as pressure variations and underground water flow. The underground water flow is particularly interesting in carstic areas: the water from rainfall penetrates into the rock through pores and cracks until it finds an impermeable layer along which it flows downstream towards the sea. The Italian Carst is particular in this respect, as an entire surface river with an average flow of $9 \text{ m}^3/\text{sec}$ reaching peaks of $100 \text{ m}^3/\text{sec}$ during strong rainfalls, with extreme values up to $390 \text{ m}^3/\text{sec}$, disappears after its passage through a natural cave (Skocjanske Jame, 2010). The underground river remains concealed for 33 km, until it emerges as a spring from the foot of the Carst and flows into the Adriatic Sea. The path of the flow is unknown, but its presence is identified by the geodetic pendulums. The cave responds in a characteristic direction to floods, with a signal that lasts in total between four and eight days. The length of the deformation is indicative of the time the underground river takes to accommodate for the increased influx of water through the rainfall. The hydrologic induced tilt signal is up to 300 nrad according to the existing records. Table 1 summarizes the different causes that generate a tilting of the cave together with the expected amplitude.

Table 1 Identified causes that deform the Grotta Gigante cave with characteristic periods and amplitudes. *Oscillation amplitude defined as half of the peak to peak excursion.

Cause of deformation	Characteristic period	Tilt maximum observed amplitude	Notes
Plate tectonics secular movement	Secular movement, near to static	31.4 nrad/yr	
Plate tectonics multi-annual oscillation*	33 years	316 nrad	
Annual variation*	365.6 days	300 nrad	Orientation towards N60°E in mid March and towards N240°E in mid September
Earth tides*	Daily, half daily	39 nrad	
Ocean loading*	Daily, half daily	60 nrad	
Free oscillations* of the earth	54 minutes to a few minutes	Up to 0.7 nrad	
Underground water flow	A few days	Up to 300 nrad	

Besides the horizontal geodetic pendulums other types of instruments exist with which tilt is observed. In the horizontal watertube the differential waterlevel at each end of the tube is measured by laser interferometry (e.g. Ferreira et al., 2006). The length of the tube extends over several tens of meters. Presently active instruments are found e.g. at the Finnish Geodetic Institute, Metsähovi

mine (Ruotsalainen, 2008) and in California (Piñon Flat Observatory, University of California, San Diego). Vertical pendulums are mounted in boreholes for measuring tilt and the displacement of the pendulum is detected by a capacitive transducer with resolution of 0.2 msec; examples are the tiltmeters of the Geodynamic Observatory Moxa, Thuringia, Germany. Application of a tilt array of this type to monitor pore pressure variations and minor earthquakes are given by Jahr et al. (2008). Portable short-base tiltmeters are used for volcanic monitoring, where the expected tilts are larger than for crustal deformation studies and therefore require less resolution and stability in time. The electronic tiltmeters record the movement of an air bubble in a conducting fluid. These instruments are used for volcanic monitoring of the USGS.

Summary

The ultra broad band horizontal geodetic pendulum measures the inclination of a reference axis with respect to the vertical. The prototype installed in the Giant Cave in North-Eastern Italy has shown that the deformations that affect the upper crust are due to tectonic effects (seismic waves, free oscillations of the earth, coseismic deformation, tectonic plate deformation) and due to environmental effects (thermoelastic deformation, hydrologic waterflow, ocean loading). The existing record of the greatest seismic event ever measured, the Chile 1960 earthquake, allows to make an absolute magnitude comparison with recent events due to the fact that amplitude factor, the instrumental setup and the location are perfectly known and controllable today.

Bibliography

Bolt, B.A., and Marussi, A., 1962. Eigenvibrations of the earth observed at Trieste, Geophys. J. R. astr. Soc., 6: 299-311.

Braitenberg, C., Romeo, G., Taccetti, Q., and Nagy, I., 2006. The very-broad-band long-base tiltmeters of Grotta Gigante (Trieste, Italy): secular term tilting and the great Sumatra-Andaman Islands earthquake of December 26, 2004, J. of Geodynamics, 41: 164-174.

Braitenberg, C., and Zadro, M., 2007. Comparative analysis of the free oscillations generated by the Sumatra-Andaman Islands 2004 and the Chile 1960 earthquakes, Bulletin of the Seismological Society of America, 97: S6-S17, doi: 10.1785/0120050624.

Ferreira, A. M. G., d'Orey, N. F., Woodhouse, J. H., Zürn, W., 2006. Comparison of fluid tiltmeter data with long-period seismograms: Surface waves and Earth's free oscillations, J. Geophys. Res., 111: B11, B11307 / 17

Jahr, T., Jentzsch, G., Gebauer, A., and Lau, T., 2008. Deformation, seismicity, and fluids: Results of the 2004/2005 water injection experiment at the KTB/Germany, J. Geophys. Res., 113: B11410, doi:10.1029/2008JB005610.

Marussi, A., 1959. The University of Trieste station for the study of the tides of the vertical in the Grotta Gigante. In Proceedings of the III Int. Symposium on Earth Tides, Trieste, 1960, pp. 45-52.

NEIC, 2010. National Earthquake Information Center, <http://earthquake.usgs.gov/>

Ruotsalainen, H.E., 2008. Recording deformations of the Earth by using an interferometric water level tilt meter. In Korja, T., Arhe, K., Kaikkonen, P., Korja, A., Lahtinen, R., and Lunkka, J. P. (editors) Fifth symposium on the structure, composition, and evolution of the Lithosphere in Finland, Inst. of Seismology, University of Helsinki, Report S-53, 103-106.

Skocjanske Jame, 2010. <http://www.park-skocjanske-jame.si/>

Zadro, M., and Braitenberg, C., 1999. Measurements and interpretations of tilt-strain gauges in seismically active areas, Earth Science Reviews, 47: 151-187.

Zöllner, K.F., 1872. Zur Geschichte des Horizontalpendels, Kgl. sächs. Gesellsch. der Wissensch. zu Leipzig, math.-phys. Klasse, November 1872

Zöllner, K.F., 1871. Über einen neuen Apparat zur Messung anziehender und abstoßender Kräfte, Kgl. sächs. Gesellsch. der Wissensch. zu Leipzig, 27. Nov. 1869 und 1. Juli 1871

Cross-references

Earth tides

Free oscillations of the earth

Great Earthquakes

Tiltmeter

International Geophysical year

Seismic instrumentation

Links to geodynamic observatories with active tiltmeters:

Geodynamic Observatory Moxa: <http://www.geo.uni-jena.de/Homepage-Moxa-englisch/start.html>

Plate Boundary Project, Earthscope, <http://www.earthscope.org/observatories/pbo>

Finnish Geodetic Institute: http://www.fgi.fi/tutkimus/tiedot_aiheesta_eng.php?projekti=19

University California San Diego: <http://pfostrain.ucsd.edu>

USGS volcano monitoring with tiltmeters:

<http://volcanoes.usgs.gov/activity/methods/deformation/tilt/index.php>

Carla Braitenberg

6 Ringraziamenti

Si ringrazia il Gruppo di Oceanografia e Meteorologia del Dipartimento di Geoscienze (Università di Trieste) ed in particolare il prof. Franco Stravisi, per la disponibilità dei dati meteorologici e mareografici di Trieste. I dati pluviometrici e di temperatura registrati nei pressi della Grotta Gigante si riferiscono alla stazione meteorologica di Borgo Grotta (Trieste) della Commissione Grotte “Eugenio Boegan”, Società Alpina delle Giulie, Sezione Trieste del C.A.I. e ci sono stati forniti da Renato R. Colucci, ISMAR, CNR. Si ringrazia l’Istituto Nazionale di Oceanografia e Geofisica Sperimentale, Centro Ricerche Sismologiche, per la disponibilità dei dati sismici in Friuli.

8 Riferimenti bibliografici per i capitoli 1-4

- Braitenberg, C. (1999a). The Friuli (NE Italy) tilt/strain gauges and short term observations. *Annali di Geofisica*, **42**, 1-28.
- Braitenberg, C., (1999b). Estimating the hydrologic induced signal in geodetic measurements with predictive filtering methods. *Geophys. Res. Letters* **26**, 775-778.
- Braitenberg, C., and M. Zadro (1999). The Grotta Gigante horizontal pendulums – instrumentation and observations, *Boll. Geof. Teor. Appl.*, **40**, 577-582.
- Braitenberg C., Zadro M. (2007) Amplitude ratios of the free oscillations generated by the Sumatra-Andaman Islands 2004 and the Chile 1960 earthquakes, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 97, No. 1A, pp. S6–S17, January 2007, doi: 10.1785/0120050624.
- Braitenberg, C., G. Romeo, Q. Taccetti, and Nagy I. (2005). The very-broad-band long-base tiltmeters of Grotta Gigante (Trieste, Italy): secular term tilting and the great Sumatra-Andaman Islands earthquake of December 26, 2004, *J. of Geodynamics*, in press.
- Braitenberg, C., I. Nagy, G. Romeo, and Q. Taccetti (2004). The very broad-band data acquisition of the long-base tiltmeters of Grotta Gigante (Trieste, Italy) in: *Progress in Geodesy and Geodynamics*, Zhu Yaoshong and Sun Heping (Eds.), 457-462, Hubei Science and Technology Press, Wuhan, ISBN 7-5352-3194-2/P.10.
- Dahlen, F.A. and Sailor, R.V. (1979) Rotational and elliptical splitting of the free oscillations of the Earth, *Geophysical Journal International*, **58**, 609-623.
- Kanamori, H. (1977). The energy release in great earthquakes, *J. Geophys. Res.*, **82**, 2981-2987.
- Neic (2010) National Earthquake Information Center – NEIC, <http://earthquake.usgs.gov/regional/neic/>
- Pagot E., (2002) Effetti mareali, atmosferici e tettonici rilevati nelle stazioni clinometriche al bordo NE della placca adriatica, Tesi di laurea in Scienze Geologiche, Università di Trieste, a.a. 2000-2001.
- Park, J., T. A. Song, J. Tromp, E. Okal, S. Stein, G. Roullet, E. Clevede, G. Laske, H. Kanamori, P. Davis, J. Berger, C. Braitenberg, M. Van Camp, X. Lei, H. Sun, H. Xu, and S. Rosat (2005). Earth’s free oscillations excited by the 26 December 2004 Sumatra-Andaman earthquake, *Science*, **308**, 1139-1144.
- Romeo G., (2000) Digitization of optical lever instruments – *Annali di Geofisica*, Vol 43 545-557
- Stein, S., and E. Okal (2005). Speed and size of the Sumatra earthquake, *Nature*, **434**, 581-582.
- Stravisi F., Purga N. (2009): Dati meteorologici di Trieste - anno 2008, Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Trieste, internal report, 114, (06/1), 49 pag.
- Zadro, M., and C. Braitenberg (1999). Measurements and interpretations of tilt-strain gauges in seismically active areas. *Earth Science Reviews*, **47**, 151-187.

9 Pubblicazioni recenti del gruppo di lavoro (dal 2005)

- Ebblin C., Zille A., Rossi G. (2005). The running-cone method for the interpretations of conical fold geometries: an example from the Badia valley, Northern Dolomites (NE Italy). *J. of Structural Geology*, 27, 139-144.
- Rossi G., Ebblin C., Zadro M. (2005). 3D finite - elements kinematic model of the Adria northern region : stress analysis. *Bollettino di geofisica Teorica ed Applicata*, 46, 23-46.
- Caporali A., Braitenberg C., Massironi M. (2005) Geodetic and Hydrological Aspects of the Merano Earthquake of July 17, 2001, *J. of Geodynamics*, 39, 317-336.
- Park J., Song T. A., Tromp J., Okal E., Stein S., Roult G., Clevede E., Laske G., Kanamori H., Davis P., Berger J., Braitenberg C., Van Camp M., Lei X., Sun H., Xu H., Rosat S., 2005, Earth's free oscillations excited by the 26 december 2004 Sumatra-Andaman earthquake, *Science*, 308, 1139-1144.
- Ebbing J., C. Braitenberg and H.-J. Götze (2005) The lithospheric density structure of the Eastern Alps, *Tectonophysics* 414, 145-155.
- Zanolla C., Braitenberg C., Ebbing J., Bernabini M., Bram K., Götze H.-J., Giammetti S., Longoni R., Meurers B., Nicolich R., Palmieri F. (2005) New gravity maps of the Eastern Alps and significance for the crustal structures, *Tectonophysics*, 414, 127-143
- Braitenberg C., Romeo G., Taccetti Q., Nagy I. (2005) The very-broad-band long-base tiltmeters of Grotta Gigante (Trieste, Italy): secular term tilting and the great Sumatra-Andaman Islands earthquake of December 26, 2004, *J. of Geodynamics*, 41, 164-174.
- Braitenberg, C., Wienecke, S., Wang, Y. (2006) Detection of buried structures along a ridge axis from satellite derived gravity field, *Journ. Geophys. Res.*, VOL. 111, B05407, doi:10.1029/2005JB003938,
- Pinato Gabrieli C., Braitenberg C., Nagy I., Zuliani D. (2006) Tilting and horizontal movement at and across the northern border of the Adria plate, Edts. Gil A.J. e Sansò F., *Geodetic Deformation Monitoring: From Geophysical to Engineering Roles*, 306 pp., Springer Verlag. 129-137. ISBN-10: 3-540-38595-9. (IAG Symposium Jaén, Spain, March 7-19,2005; Series: International Association of Geodesy Symposia , Vol. 131) <http://www.springer.com/italy/home/generic/search/results?SGWID=6-40109-22-173674905-0>
- Braitenberg C., Zadro M. (2007) Amplitude ratios of the free oscillations generated by the Sumatra-Andaman Islands 2004 and the Chile 1960 earthquakes, *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 97, No. 1A, pp. S6–S17, January 2007, doi: 10.1785/0120050624.
- Wienecke S., Braitenberg C., Goetze H.-J. (2007) A new analytical solution estimating the flexural rigidity in the Central Andes, *Geophys. J. Int.*, 169, 789-794, doi:10.1111/j.1365-246X.2007.3396.x.
- Shin, H. Xu, C.Braitenberg, J. Fang, Y. Wang (2007) Moho undulations beneath Tibet from GRACE-integrated gravity data, *Young H. Geophys. J. Int.*, doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03457.x, 1-15.
- Ebbing, J., Braitenberg C. & S. Wienecke (2007) Insights into the lithospheric structure and the tectonic setting of the Barents Sea region from isostatic considerations, *Geophys. J. Int.*, Vol.

171, pp. 1390-1403, doi: 10.1111/j.1365-246X.2007.03602.x

- Shin Y. H., Shum C.-K., Braitenberg C., Lee S. M., Xu H., Choi K. S., Baek J. H., Park J. U. 2009. Three – dimensional fold structure of the Tibetan Moho from GRACE gravity data. *Geophysical Research Letters*, Vol. 36, L01302, doi:10.1029/2008GL036068, 2009.
- Braitenberg, C., Ebbing, J. 2009. The GRACE-satellite gravity and geoid fields in analysing large scale, cratonic or intracratonic basins, *Geophysical Prospecting*, vol. 57, no. 4, 559-571, DOI: 10.1111/j.1365-2478.2009.00793.x
- Braitenberg, C., Ebbing, J 2009. New insights into the basement structure of the west-Siberian basin from forward and inverse modelling of Grace satellite gravity data,. *J. Geophysical Res.*, 114, B06402, doi:10.1029/2008JB005799, 2009.
- Antonioli F., Ferranti L., Fontana A., Amorosi A. M., Bondesan A., Braitenberg C., Dutton A., Fontolan G., Furlani S., Lambeck K., Mastronuzzi G., Monaco C., Spada G., Stocchi P. 2009. Holocene relative sea-level changes and vertical movements along the Italian and Istrian coastlines, *Quaternary International*, 206, 102-133, ISSN 1040-6182, DOI: 10.1016/j.quaint.2008.11.008.
- Mariani P., Braitenberg C., Antonioli F. 2009. Sardinia coastal uplift and volcanism. *Pure and Applied Geophysics*, 166, 1369-1402. DOI :10.1007/s00024-009-0504-3
- Gimenez M. E., Braitenberg C., Martinez M. P., Introcaso A. 2009. A comparative analysis of seismological and gravimetric crustal thicknesses below the Andean Region with flat subduction of the Nazca Plate. *International Journal of Geophysics*, Volume 2009, Article ID 607458, 8 pages, doi:10.1155/2009/607458
- Pinto L. G. R., Pádua M. B., Ussami N., Vitorello I., Padilha A. L., Braitenberg C. 2010. Magnetotelluric deep soundings, gravity and geoid in the south São Francisco craton: Geophysical indicators of cratonic lithosphere rejuvenation and crustal underplating, *Earth and Planetary Science Letters*, 297, 423-434, doi:10.1016/j.epsl.2010.06.044
- Barnaba C., Marello L., Vuan A., Palmieri F., Romanelli M., Priolo E., Braitenberg C. 2010. The buried shape of an alpine valley from gravity surveys, seismic and ambient noise analysis. *Geophysical Journal International*, 180, 715-733, doi:10.1111/j.1365-246X.2009.04428.x
- Braitenberg C., Mariani P., Tunini L., Grillo B., Nagy I. 2010. Vertical crustal movements from differential tide gauge observations and satellite altimetry in southern Italy. *Journal of Geodynamics*, doi:10.1016/j.jog.2010.09.003

Riviste nazionali

- Braitenberg C., Nagy I., Grillo B. (2005). Alcune informazioni sulla stazione geofisica ipogea della Grotta Gigante (Carso Triestino). *Progressione* 52, *ATTIVITA' E RIFLESSIONI DELLA COMMISSIONE GROTTA "E. BOEGAN"*, Supplemento semestrale ad "ATTI E MEMORIE"- Anno XXVIII, n.1-2, 2005, 60-69.

- Braitenberg C., Grillo B., Nagy I. , Zidarich S., Piccin A., (2007) La stazione geodetico-geofisica ipogea del Bus de la Genziana (1000VTV) - Pian Cansiglio, Atti e Memorie della Commissione Grotte "E. Boegan", Società Alpina della Giulie CAI, Trieste, Italia, Vol. 41:105-120.
- Grillo B.. 2007. Contributo alle conoscenze idrogeologiche dell'Altopiano del Cansiglio. Atti e memorie della Commissione "E. Boegan", Vol.41, 5-15.
- Guidi P., Grillo B. 2008. Una grotta imperiale.Cent'anni di esplorazioni, turismo e ricerche nella Grotta Gigante. Speleologia, Anno XXIX – Giugno 2008, 58, 24-30.
- Grillo B., Braitenberg C., Nagy I. 2010. I clinometri del Bus de La Genziana (1000VTV). Speleologia Veneta

Presentazioni a Convegni:

- Braitenberg C., Wienecke S, Ebbing, J. , Born, W., Redfield, T. 2007 JOINT GRAVITY AND ISOSTATIC ANALYSIS FOR BASEMENT STUDIES - A NOVEL TOOL, Extended Abstracts, EGM 2007 International Workshop, Innovation in EM, Grav and Mag Methods: a new Perspective for Exploration, Villa Orlandi, Capri - Italy , 15-18 April 2007 (<http://www2.ogs.trieste.it/egm2007/>),
- Braitenberg, C., Ebbing, J. 2007 The gravity potential derivatives as a means to classify the Barents Sea Basin in the context of cratonic basins, Extended Abstracts, EGM 2007 International Workshop, Innovation in EM, Grav and Mag Methods: a new Perspective for Exploration, Villa Orlandi, Capri - Italy , 15-18 April 2007 (<http://www2.ogs.trieste.it/egm2007/>)
- Braitenberg C., Grillo B., Mariani P., Arena G. 2008. Tassi di innalzamento da osservazioni mareografiche e altimetriche satellitari. In: Di Bucci D., Neri G., Valensise L. (Edts.) 1908 – 2008 Scienza e Società a cento anni dal Grande Terremoto, Reggio Calabria, 10-12 Dicembre 2008, Miscellanea INGV, 2008_3, pp. 21-22.
- Mariani P., Braitenberg C. 2008. Sea level change and relationship with the volcanic load: the Sardinian Volcanism. In: Oggiano, L. Carmignani, A. Funedda, P. Conti. (Edts.), Rendiconti On line Società Geologica Italiana, 84° Congresso Nazionale Sassari 15-17 settembre 2008. Sassari, Sassari 15-17 settembre 2008 G. vol. 3, p. 526-527.
- Mariani P., Braitenberg C., Antonioli F. 2008. Variazione della linea di costa in relazione al carico vulcanico: il caso del vulcanismo sardo. In: Riassunti estesi, 27° Convegno Nazionale Gruppo Nazionale di Geofisica della Terra Solida. Trieste, 6-8 Ottobre 2008., pp. 71-74.
- Braitenberg C., Ebbing J. 2008. New insights into the basement structure of the West Siberian basin from forward and inverse modelling of Grace Satellite gravity data, In: Riassunti estesi, 27° Convegno Nazionale Gruppo Nazionale di Geofisica della Terra Solida. Trieste, 6-8 Ottobre 2008., pp. 409-411.

- Pinto L.G.R., Pádua M.B., Ussami N., Vitorello I., Padilha A.L., Braitenberg C. (2008) Integração de dados Gravimetricos, Geoide e Magnetotelluricos no SE do Craton S. Francisco: underplating magmatico, soerguimento e erosão no Cretaceo Inferior, III Simpósio Brasileiro de Geofísica, 26 a 28 de novembro de 2008, Hotel Crowne Plaza, Belém, Pará, Brasil, 1-5, Copyright 2008, SBGf, Sociedade Brasileira de Geofísica
- Grillo B., Braitenberg C., Nagy I., Dilella C. 2009. The study of karstic aquifers by geodetic measurements in Friuli Venezia Giulia. Epitome Congresso Nazionale GeoItalia - Federazione Italiana di Scienze della Terra: 73, Rimini 07 - 11 settembre 2009.
- Braitenberg C., Grillo B., Mariani P., Tunini L., Nagy I. 2009. Vertical crustal movement from tide gauges and satellite altimetry. Abstract. Convegno annuale dei progetti sismologici (S1), Roma, 19-21 ottobre 2009.
- Braitenberg C., Mariani P., Grillo B., Nagy I. 2009. Vertical crustal movements from comparative analysis of spaceborn and local sea level change observations. 3rd Coastal Altimetry Workshop, 17-18 September 2009, Frascati (Rome), Italy, Abstract List, pp.8, www.coastalt.eu
- Grillo B., Braitenberg C., Nagy I., Piccin A. 2009. Tilting tra il Friuli-Venezia Giulia ed il Veneto dal 2006 al 2008, Atti del 3° Congresso Nazionale AIGA - Centro di GeoTecnologie, Università di Siena, San Giovanni Valdarno (AR), 25-27 Febbraio 2009
- Braitenberg C., A. Russian, P. Mariani, J. Ebbing, 2009. Gravity-gradient fields in mapping unknown structures of the African plate, Out of Africa, 140 years with Kevin Burke and Lee Ashwal, 15-18 november, 2009, Witwatersrand University, Johannesburg, South Africa. Abstract book, p. 14. , <http://www.geodynamics.no/outofafrica/outofafrica-abstractbook-upd.pdf>
- Braitenberg C., Cucchi F., Devoti R., Grillo B., Nagy I., Tenze D., Zini L. 2010. The study of karstic aquifers by geodetic measurements in Friuli Venezia Giulia (North East Italy) for a water sustainable management, Abstract, Hydro Predict' 2010, International Interdisciplinary Conference on Prediction for Hydrology, Ecology and Water Resources Management, Prague, 20-23 September, 2010.
- Ferrante S., Braitenberg C., Ebbing J. 2010. The basalt geometry in the west siberian basin from satellite gravity, magnetics and seismics. EGM 2010 International Workshop, Adding new value to Electromagnetic, Gravity and Magnetic Methods for Exploration, Capri, Italy, April 11-14, 2010. 1-4.
- Braitenberg C., Russian A., Mariani P., Nagy I. 2010. The new global gradient tensor in detecting basement units. Geophysical Research Abstract Vol.12. EGU2010-12894-3, EGU General Assembly Vienna, 02-07 May 2010.
- Mariani P., Braitenberg C., Ussami N. 2010. The new satellite derived gradient fields for gaining a better understanding of the Parana' Basin. EOS Trans. AGU, 91(26), Meet. Am. Suppl. Abstract G13A-02 (The Meeting of the Americas – AGU, Foz do Iguassu, Brazil, 8-12 August 2010)

- Zadro M., Braitenberg C., Nagy I. 2010. The free oscillations models of Chile 2010 and 1960 events observed with the Grotta Gigante horizontal pendulums. *Eos Trans. AGU*, 91(26), Meet. Am. Suppl., Abstract U41A-01 (The Meeting of the Americas – AGU, Foz do Iguassu, Brazil, 8-12 August 2010)
- Uieda L., Ussami N., Braitenberg C. 2010. Computation of the gravity gradient tensor due to topographic masses using tesseroids, *Eos Trans. AGU*, 91(26), Meet. Am. Suppl. Abstract G22A-04, (The Meeting of the Americas - AGU, Foz do Iguassu, Brazil, 8-12 August, 2010)
- Braitenberg C., Reguzzoni M. 2010. Expected sensitivity of GOCE satellite to detect basement and Moho undulations, *Eos Trans. AGU*, 91(26), Meet. Am. Suppl., Abstract G22A-02, (The Meeting of the Americas - AGU, Foz di Iguassu, Brazil, 8-12 August, 2010)
- Braitenberg C., Reguzzoni M. 2010. Sensitivity of satellite GOCE to detect basement and Moho undulations. In: Riassunti estesi, 29° Convegno Nazionale Gruppo Nazionale di Geofisica della Terra Solida. Prato, 26-28 Ottobre 2010, 511.
- Sansò F., Gatti A., Reguzzoni M., Sampietro D., Sabadini R., Barletta V., Bordoni A., Braitenberg C., Mariani P., Poulain P. M., Mauri E., Casotto S., Panzetta F., Solitro F., Fontan E., Fermi M., Chersich M., Osmo M., Bianco G. 2010. GOCE-ITALY: un progetto dell'Agenzia Spaziale Italiana per applicazioni geofisiche nell'area del mediterraneo basate sui dati della missione spaziale GOCE, In: Riassunti estesi, 29° Convegno Nazionale Gruppo Nazionale di Geofisica della Terra Solida. Prato, 26-28 Ottobre 2010, 537-540.
- Grillo B., Braitenbreg C., Devoti R., Zuliani D., Nagy I., Fabris P. 2010. The study of aquifers by geodetic measurements in Cansiglio Plateau (North – Eastern Italy), In: Riassunti estesi, 29° Convegno Nazionale Gruppo Nazionale di Geofisica della Terra Solida. Prato, 26-28 Ottobre 2010, 411-414.
- Tenze D., Braitenberg C., Nagy I. 2010. Deformazioni del Carso in risposta ai fattori ambientali, In: Riassunti estesi, 29° Convegno Nazionale Gruppo Nazionale di Geofisica della Terra Solida. Prato, 26-28 Ottobre 2010, 125-126.
- Tunini L., Braitenberg C., Ricker R., Mariani P., Grillo B. 2010. Vertical land movement for the Italian coasts by altimetric and tide gauges measurements. *ESA Living Planet Symposium*, Bergen, 27/06/2010-02/07/2010.
- Sansò F., Bianco G., Braitenberg C., Casotto S., Fermi M., Poulain P., Sabadini R., Solitro F. 2010. GOCE ITALY: Scientific tasks and first results. *ESA Living Planet Symposium*, Bergen, 27/06/2010-02/07/2010.