

# LA STAZIONE GEOFISICA IPOGEA DELLA GROTTA GIGANTE (CARSO TRIESTINO)

Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Trieste (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  
marzo 2005

Responsabile Scientifico: Dr. Carla Braitenberg

Collaboratori:

DST:

Prof. Claudio Ebblin

Prof. emerit. Maria Zadro

Dr. Ing. Ildikò Nagy

Dipl. Tecn. Sergio Zidarich

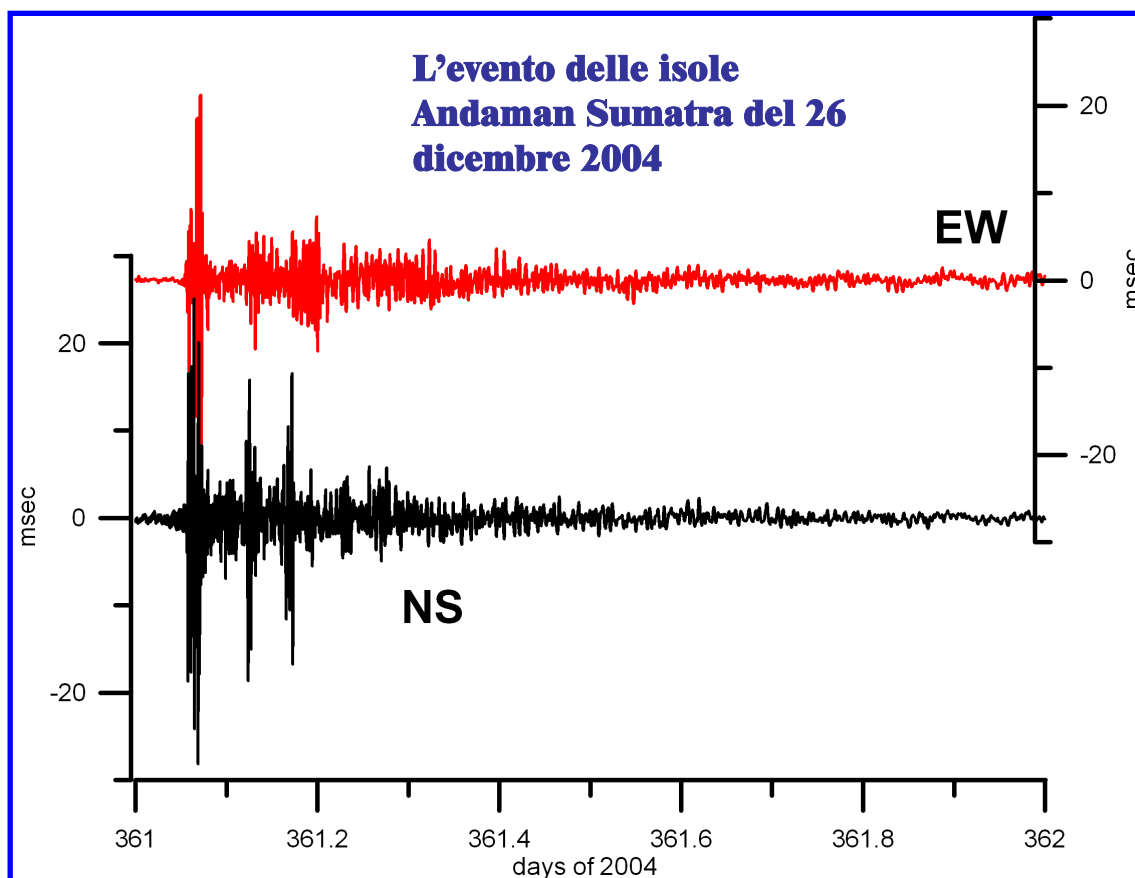
Michele Spinella

Chiara Pinato Gabrieli

INGV:

Dr. Gianni Romeo

Dr. Quintilio Taccetti



## **Indice**

### **1 Introduzione**

### **2 Illustrazione della strumentazione geodetica e del database**

#### **2.1. Pendoli orizzontali a lungo periodo-LPHP, clinometri -MPT**

##### **2.1.1 Principio di funzionamento del clinometro di tipo Zöllner**

##### **2.1.2 Fattore di amplificazione statico**

#### **2.2 Funzione di trasferimento del pendolo LPHP per spostamenti del suolo nel caso dinamico**

##### **2.2. Database di fattori ambientali**

### **3 Il sistema d'acquisizione digitale dei pendoli LPHP**

#### **3.1 Principio di funzionamento del secondo sistema di acquisizione digitale degli LPHP costruito a cura dell' INGV.**

#### **3.2 Fattori di amplificazione-aggiornamento della taratura dell'acquisizione digitale**

### **4 Intervento su una delle due guaine di protezione- da polietilene a PVC**

### **5 Osservazioni delle inclinazioni della verticale e di parametri ambientali per il biennio 2003- 2004.**

### **6 Osservazione degli eventi sismici maggiori da dicembre 2003 a marzo 2005**

### **7 L'evento sismico delle isole Andaman-Sumatra del 26 dicembre 2004, M=9.0 (in lingua inglese: The Andaman-Sumatra islands Earthquake M=9.0, December 26, 2004)**

### **8 Deformazione crostale negli anni 1966-2004 (in lingua inglese: Secular crustal deformation for the years 1966-2004)**

### **9 L'evento sismico di Bovec (Slovenia) del 12 luglio 2004, M=5.1 (in lingua inglese: The recording of the Bovec Slovenian seismic event, July 12, 2004, M=5.1)**

### **10 Ringraziamenti**

### **11 Riferimenti bibliografici**

### **12 Pubblicazioni recenti del gruppo di lavoro (dal 1999)**

## 1 - Introduzione

L'anno 2004 entrerà nella storia per il catastrofico evento sismico del 26 Dicembre 2004 delle isole Andaman-Sumatra di  $M=9.0$ . Lo Tsunami generato da esso colpì 10 paesi dell'Asia meridionale e dell'Africa orientale e provocò 283100 vittime (NEIC, 23 Feb. 2005). E' stato il quarto evento in grandezza dal 1900, preceduto dall'evento Cileno del 1960 di magnitudo  $M=9.5$ , e dagli eventi dell'Alaska del 1957 e del 1964, di magnitudo 9.1 e 9.2, rispettivamente. I pendoli orizzontali della Grotta Gigante avevano registrato già l'evento del Cile e le osservazioni hanno permesso di determinare le frequenze delle oscillazioni libere della terra ed i fattori Q per i diversi modi di oscillazione. La eccezionale dimensione dei pendoli (100 m di altezza) li rende unici al mondo soprattutto per l'osservazione dei modi torsionali fondamentali di basso ordine. Gli strumenti hanno registrato anche l'evento delle Isole Sumatra-Andaman, per cui abbiamo a nostra disposizione le registrazioni con lo stesso strumento sia dell'evento del Cile 1960 che quello del 2004. Questo permette un confronto diretto delle magnitudo di questi due eventi dedotto dalle oscillazioni libere. Dedichiamo uno dei paragrafi alla documentazione del recente evento ed all'analisi preliminare degli spettri in frequenza. Riguardo alle osservazioni dello stesso evento con sismografi Broad Band, la nostra registrazione evidenzia la presenza di una buona parte dei modi fondamentali torsionali (OT2, OT3, OT4,...). Anche i gravimetri superconduttori, che hanno fornito ottimi risultati per le onde sferoidali, non hanno quasi registrato le onde torsionali. Interessante è anche la presenza di frequenze più basse dei modi fondamentali, già osservate nel 1960, ed attribuite all'interazione non-lineare dei modi torsionali e sferoidali.

Il Friuli è stato scosso nel 2004 dall'evento di Bovec del 12 luglio di  $M=5.1$ , il cui epicentro e meccanismo focale era pressoché identico alla scossa di  $M=5.6$  del 12 aprile 1998. Abbiamo ottime osservazioni di questo evento nella Grotta Gigante, come anche in termini deformazioni permanenti nella stazione di Villanova (3 estensimetri orizzontali, un estensimetro verticale, 2 clinometri).

Lo strumento della Grotta Gigante ha subito nel 2004 un intervento sui tubi di protezione in plastica, che risentono della radiazione UV presente in Grotta.

Migliorie strumentali hanno riguardato l'installazione di un termometro centesimale digitale ed un dispositivo per l'osservazione della pressione barometrica. Ambedue sono importanti per monitorare due dei fattori ambientali che possono influenzare le misure di deformazione, che sono la temperatura e la pressione barometrica.

In questa edizione del rapporto annuale si introduce una novità: mentre la parte tecnica e strumentale viene redatta come prima in lingua italiana, si passa all'inglese per tre capitoli, quello che comprende la descrizione dell'analisi delle oscillazioni libere, quello che copre le evidenze sperimentali riguardo alle deformazioni secolari e quello che descrive le osservazioni dell'evento di Bovec 2004.

## 2- Illustrazione della strumentazione geodetica e del database

L'interpretazione di dati geodetici in termini della deformazione crostale e degli sforzi deve opportunamente anche considerare tutti i fattori ambientali che potrebbero contribuire ad un segnale registrato. Per la Grotta Gigante sono da considerare la pressione barometrica, l'influenza dei corsi d'acqua superficiali e sotterranei, la temperatura ed il carico delle maree dell'Adriatico. Il nostro

data-base e' comprensivo per questo motivo non solo delle registrazioni geodetiche, ma anche di quelle ambientali. In seguito viene illustrata la strumentazione geodetica e viene poi fatto cenno sulla fonte dei dati ambientali.

## 2.1.pendoli orizzontali a lungo periodo-LPHP, clinometri -MPT)

Nella Grotta Gigante sono installati due tipi di strumenti che misurano l'inclinazione della verticale, che sono una coppia di clinometri tradizionali (MPT) delle dimensioni verticali di 0.5 m circa, ed una coppia di pendoli orizzontali (LPHP), che hanno una lunghezza di 100 m e sfruttano tutta la grandezza della cavità. Ambedue sono pendoli orizzontali con sospensione del tipo Zöllner (vedi oltre), differiscono però in una importante differenza costruttiva, come illustrato in quanto segue.

### 2.1.1 Principio di funzionamento del clinometro del tipo Zöllner

I clinometri MPT ed anche i pendoli LPHP sono pendoli orizzontali a sospensione Zöllner: l'asta del pendolo con la massa è sospesa orizzontalmente da due fili, uno superiore ed uno inferiore (vedi Fig. 2.1-2.2), in modo che l'asta ruoti nel piano orizzontale. La rotazione dell'asta avviene attorno ad un'asse di rotazione virtuale, che passa per il punto di attacco superiore del filo superiore ed inferiore del filo inferiore. L'inclinazione dell'asse di rotazione virtuale dovuta a movimenti crostali

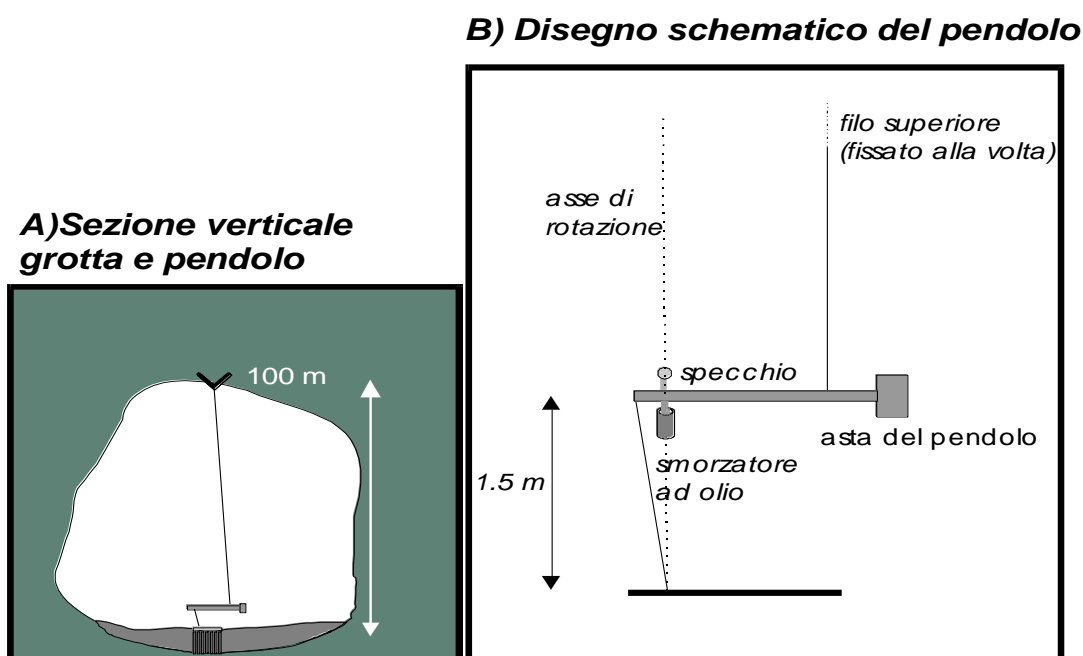


Figura 2.1: Disegno schematico del pendolo orizzontale (long period horizontal pendulum-LPHP) della Grotta Gigante (TS).

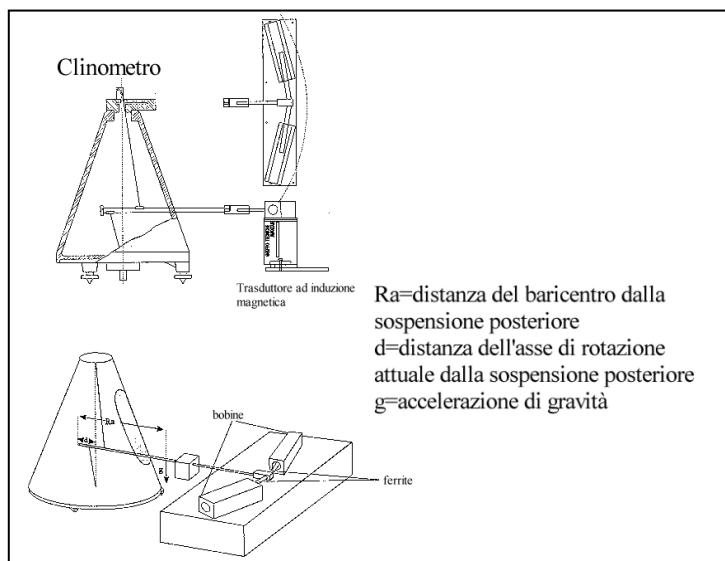


Fig 2.2 – Disegno schematico del clinometro(MPT) di costruzione del DST. L'acquisizione digitale avviene tramite un trasduttore ad induzione magnetica.

o ad effetti mareali viene registrata da una escursione dell'asta con un angolo che è di diversi ordini di grandezza maggiore dell'inclinazione dell'asse.

Le inclinazioni vengono misurate secondo due componenti, quella NS ed EW, registrate rispettivamente da due pendoli posti nella stazione di misura. I pendoli LPHP della Grotta Gigante (Marussi, 1959) differiscono dai clinometri per un aspetto costruttivo importante: i due fili di sospensione del pendolo orizzontale sono fissati direttamente alla volta ed alla base della cavità, rispettivamente (vedi Fig. 2.1). In questo modo i pendoli della Grotta Gigante sfruttano tutta l'altezza della spettacolare cavità naturale (100 m), e, grazie alle loro eccezionali dimensioni geometriche e meccaniche, permettono di ottenere una grande stabilità, con un periodo proprio di oscillazione di 6 minuti.

### 2.1.2 Fattore di amplificazione statico dei pendoli orizzontali

Come mostrato nel paragrafo precedente, i clinometri MPT ed i pendoli orizzontali LPHP sono ambedue caratterizzati dalla sospensione Zöllner. Nella Tab. 2.1 sono elencate le principali caratteristiche strumentali di ambedue strumenti. Il fattore di amplificazione trova un'espressione in funzione del periodo di oscillazione del pendolo nel piano orizzontale e verticale. Sia  $J_0$  il momento d'inerzia rispetto all'attuale asse di rotazione,  $R$  la distanza fra il baricentro e l'asse attuale di rotazione,  $i$  l'angolo di inclinazione dell'asse di rotazione attuale rispetto alla verticale, e  $g$  il valore della gravità; il periodo di oscillazione  $T_0$  del pendolo nel piano orizzontale è pari a:

$$T_0 = 2\pi \sqrt{\frac{J_0}{mgR \sin(i)}}$$

Con ( $R_a$ ) la distanza fra il baricentro dell'asta ed il punto di sospensione posto all'estremo dell'asta del pendolo (vedi Fig. 2.2), il periodo di oscillazione ( $T_a$ ) del pendolo fissato all'estremo dell'asta nel piano verticale è dato da:

$$T_a = 2\pi \sqrt{\frac{J_0 + mR_a^2 - mR^2}{mgR_a}},$$

L'amplificazione statica è data dall'inverso del seno dell'angolo di inclinazione  $i$ , che con le due espressioni è dato da:

$$A = \frac{1}{\sin(i)} = \frac{T_0^2}{(2\pi)^2} \frac{gR}{\frac{T_a^2}{(2\pi)^2} gR_a + R^2 - R_a^2}$$

L'amplificazione del segnale registrato dipende poi ulteriormente dalla distanza fra il punto di registrazione e l'asse di rotazione attuale del pendolo orizzontale. Per i clinometri MPT, che vengono registrati con un trasduttore ad induzione costruito dalla Ditta **Gruppo Tecniche Avanzate di Trieste**, la distanza ammonta a 51.66 cm. Per i pendoli orizzontali (LPHP) in registrazione analogica su carta fotografica, la distanza ammonta a 5 m, mentre per l'acquisizione digitale, la distanza  $e'$  di 90 cm.

quantity	symbol	value
Distance between upper and lower mountings		50 cm
Weight of housing case		45 kg
Total weight of the pendulum, including the wires	m	679 gr.
Distance of the centre of gravity from the rear suspension	$R_a$	32.0 cm
Distance of the actual axis of rotation from the rear suspension	d	3.9 cm
Moment of inertia with respect to the actual axis of rotation	$J_O$	5,500 gr cm <sup>2</sup>
Period of oscillation in the vertical plane, determined experimentally	$T_a$	1.3 sec
Period of oscillation in the horizontal plane	$T_O$	maintained to 90 sec
Recording:	hourly sampling rate	
-previous to 1990: Analogical	-scintillation on sparker paper.	
-after 1990: Digital	-Inductive displacement transducer	

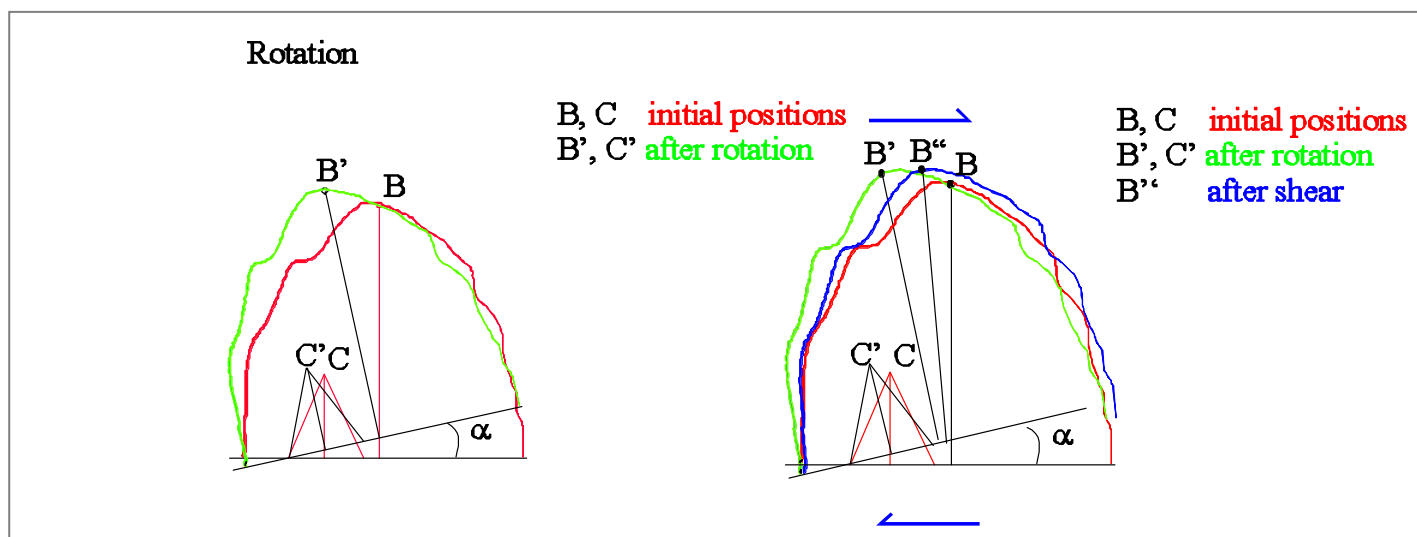
Tabella 2.1a) Caratteristiche tecniche dei pendoli MPT ( in inglese)

Quantity described	symbol	Pendulum A (EW)	Pendulum B (NS)
Distance between upper and lower mountings		94.9 m	95.5 m
Total weight of the pendulum, including the wires	m	18.374 kg	18.340 kg
Distance of the centre of gravity from the rear suspension	$R_a$	141.8 cm	141.7 cm
Distance of the actual axis of rotation from the rear suspension	d	17.3 cm	17.5 cm
Moment of inertia with respect to the actual axis of rotation	$J_O$	307.2 10 <sup>6</sup> gr cm <sup>2</sup>	305.5 10 <sup>6</sup> gr cm <sup>2</sup>
Period of oscillation in the vertical plane, determined experimentally	$T_a$	2.46 sec	2.46 sec
Period of oscillation in the horizontal plane	$T_O$	360 sec	360 sec
Operation mode		critical damping	critical damping
Recording		Analogical on photographic paper and digital	Analogical on photographic paper and digital

Tabella 2.1b) Caratteristiche tecniche dei pendoli LPHP ( in inglese)

## 2.2 Differenze tra il segnale rilevato dai pendoli LPHP e dai clinometri MPT in risposta a deformazioni di taglio della grotta

Nella **Fig. 2.3** sono illustrate due diverse deformazioni: la prima è costituita da una sola rotazione, mentre la seconda rappresenta una rotazione ed una deformazione di taglio. Possiamo allora osservare come i due tipi di pendoli registrano segnali diversi nei due casi. Nella figura, il triangolo piccolo con vertice C rappresenta in modo schematico il clinometro, mentre l'asse indicata dalla lettera B collega i punti di sospensione (superiore ed inferiore) del pendolo LPHP. Si può notare come nel primo caso, di sola rotazione, i due strumenti daranno in uscita il medesimo segnale, mentre nel secondo caso, il segnale registrato dal pendolo LPHP sarà diverso, e potrà essere orientato in direzione opposta, in quanto la grotta ha subito non solo una rotazione ma anche una deformazione di taglio. Ovviamente per la particolare costruzione, soltanto i pendoli LPHP risentiranno della deformazione di taglio, mentre i clinometri tradizionali, come anche il sismografo Broad band (BB) presente nella grotta, non sono sensibili a tale segnale.



*Fig. 2.3 – Illustrazione della differenza osservata dai pendoli LPHP e dai clinometri MPT per una rotazione della grotta di angolo  $\alpha$  ed una rotazione alla quale si aggiunge una deformazione di taglio. Il segnale rilevato dal clinometro è rappresentato dal triangolo con vertice C (C', C'') e quello rilevato dal pendolo orizzontale dall'asse con vertice B, B', B''). Si può osservare come la deformazione di taglio viene soltanto osservata dal pendolo orizzontale LPHP, mentre il clinometro, che poggia sul fondo della grotta, è sordo a tale segnale.*

## 2.2 Funzione di trasferimento del pendolo LPHP per spostamenti del suolo nel caso dinamico

La risposta del pendolo orizzontale ad una sollecitazione del suolo è descritta dalla equazione:

$$\ddot{\vartheta} + 2\lambda\Omega\dot{\vartheta} + \Omega^2\vartheta = -\frac{\ddot{u}}{l} \quad (1)$$

dove:  $\vartheta$  è l'angolo di rotazione del pendolo nel piano orizzontale, misurato via raggio ottico o laser come spostamento lineare su un registratore,  $u$  è lo spostamento del terreno, perpendicolare al piano verticale che contiene l'asta del pendolo,  $\Omega$  è la frequenza angolare propria del pendolo nel piano orizzontale pari a  $2\pi/T$ ,  $l$  è la lunghezza ridotta e  $\lambda$  è il coefficiente di smorzamento.

l	Lunghezza ridotta	1343.2 mm
T	Periodo proprio del pendolo	360 sec
$\lambda$	Coefficiente di smorzamento.	0.85

Tab. 2.1 - Valori numerici dei parametri che determinano la funzione di trasferimento dei pendoli LPHP

Ponendo  $u(t) = ae^{i\omega t}$  e  $g(t) = Ae^{i(\omega t - \varphi)}$ , si ottiene:

$$-A\omega^2 + 2A\lambda\Omega i\omega + A\Omega^2 = a/l \omega^2 [\cos \varphi + i \sin \varphi] \quad (2)$$

Dalla (2) ricaviamo la funzione trasferimento per le onde sismiche:

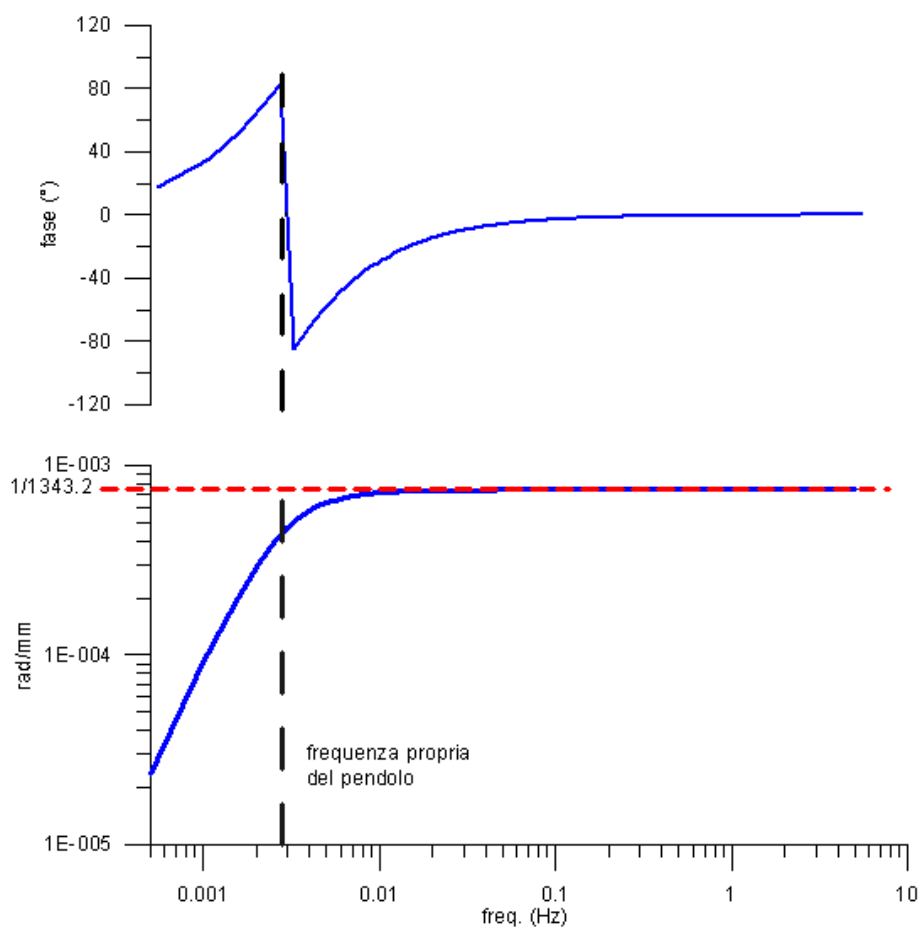
$$\frac{A_{(\omega)}}{a_{(\omega)}} = \frac{1}{l} \left\{ \left[ \frac{\Omega^2}{\omega^2} - 1 \right]^2 + 4\lambda^2 \frac{\Omega^2}{\omega^2} \right\}^{-1/2} \quad (3)$$

e per lo sfasamento:

$$\tan \varphi_{\omega} = \frac{2\lambda\Omega\omega}{\Omega^2 - \omega^2} \quad (4)$$

La curva di risposta del pendolo a sollecitazioni del suolo per effetto dinamico è riportata nella **Fig.2.5**. Si osserva come la curva di risposta dei pendoli LPHP, andando verso le alte frequenze, si normalizza e, quindi equivale ad un'amplificazione costante.





*Fig. 2.5 – La figura illustra la curva di risposta dinamica dei pendoli orizzontali LPHP: in alto lo sfasamento ed in basso la curva di risposta in radianti di rotazione dell'asta per mm di spostamento del suolo.*

### 3 Fattori di amplificazione-aggiornamento della taratura dell'acquisizione digitale

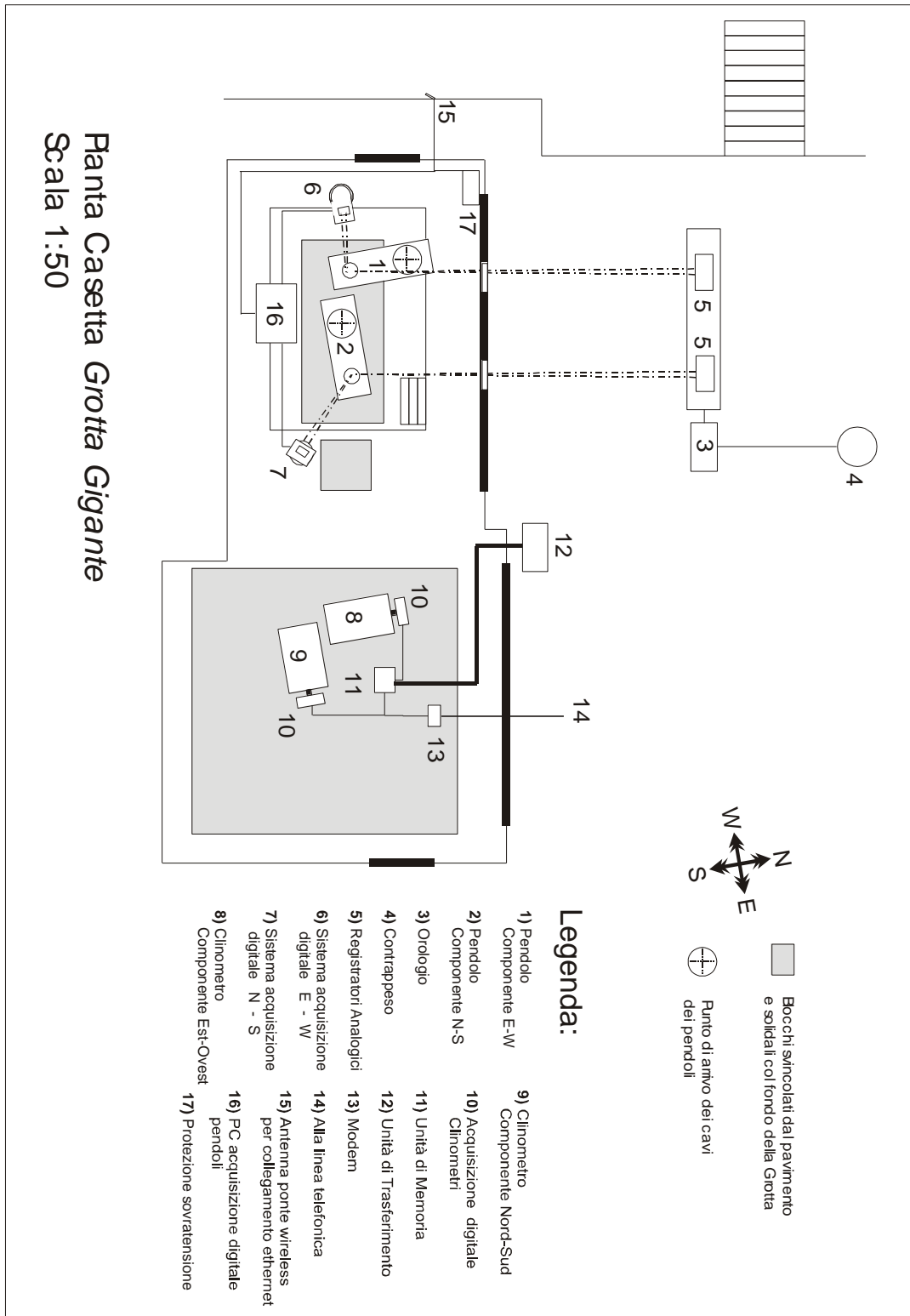


Fig. 3.1 - Pianta schematica della strumentazione presente nell'edificio sito in fondo alla Grotta Gigante.

Come illustrato nel rapporto del 2003, il rilevatore di seconda generazione effettua, come il primo, l'intercettazione di un fascio laser riflesso da uno specchietto montato sull'asta del pendolo. Il rilevatore di posizione del fascio laser è un dispositivo ottico analogico PSD (Position Sensitive Detector). Il meccanismo di funzionamento è estremamente semplice e, sebbene questi sensori non possiedano l'accuratezza di un sensore CCD (la linearità è pessima alle estremità), la facilità d'uso li rende appetibili in molti casi. Il sensore è formato da una lunga giunzione *P-N* che può essere illuminata attraverso una metallizzazione trasparente. L'installazione del sistema di acquisizione è stata effettuata il 17 dicembre 2003 in collaborazione con il Dott. Gianni Romeo ed il Dott. Quintilio Taccetti. Da tale data il sistema di acquisizione digitale nuovo è stato in funzione ininterrottamente. Avendo più di un anno di dati a disposizione si è potuto fare una verifica sulla linearità del sistema di acquisizione. A tale scopo si sono confrontate le registrazioni ottiche su carta fotografica con quelle digitali. Il campionamento dei dati digitali è stato ridotto a quello dei dati digitalizzati dalla carta pari ad una ora.

Nella **Fig. 3.5** sono visibili (in colore rosso) le registrazioni digitali in  $10^5$  unità e con tratto nero le registrazioni analogiche effettuate su carta fotografica e successivamente digitalizzate a mano in msec. L'intervallo di tempo rappresentato è di un anno. Il fattore da determinare è  $\alpha$ : fattore di conversione da unità digitali all'angolo di inclinazione del pendolo per i movimenti quasi-statici, dove la dinamica del pendolo è trascurabile. Il fattore di conversione è stato calcolato tramite regressione lineare. Avendo a disposizione oramai un anno di dati, si è potuto controllare la linearità del sistema su un'ampiezza di 120 msec. Per l'intervallo a disposizione, la linearità è risultata buona, come si può verificare nella **Fig. 3.6**.

Nella **tab. 3.1** sono riassunti i fattori di conversione di interesse. Per quanto riguarda la registrazione di eventi sismici, alle frequenze molto maggiori della frequenza propria del pendolo, l'escursione di un digit di registrazione digitale equivale ad un movimento del suolo dell'ampiezza di  $2.763 \cdot 10^{-7}$  m e  $2.871 \cdot 10^{-7}$  m per le componenti EW e NS, rispettivamente, per il sistema a PSD.

Rimane un problema da risolvere, che è costituito dalla presenza di spikes irregolari, generati dal sistema digitale. Una ipotesi è, che sono attribuibili ad un difetto del laser di tipo industriale, il cui fascio non mantiene costantemente la stessa direzione, ma devia la sua direzione ad intervalli irregolari, generando i "spikes". Il problema potrebbe essere migliorato dalla sostituzione del dispositivo laser con un tipo di qualità più elevata.

	NS	EW
Fattore di amplificazione statica: conversione dall'inclinazione del pendolo alla rotazione orizzontale dell'asta del pendolo (febbraio 2004 a marzo 2005)	23950	26330
Fattore di conversione da un digit di registrazione digitale all'inclinazione dell'asse del pendolo. (Movimenti quasi-statici)	-1.96 $10^{-3}$ msec/digit -9.51 $10^{-12}$ rad/digit	-1.61 $10^{-3}$ msec/digit -7.42 $10^{-12}$ rad/digit

*Tab.3.1: Fattore di conversione per il pendolo LPHP nel caso della registrazione ottica e quella digitale per il sistema digitale di seconda generazione.*

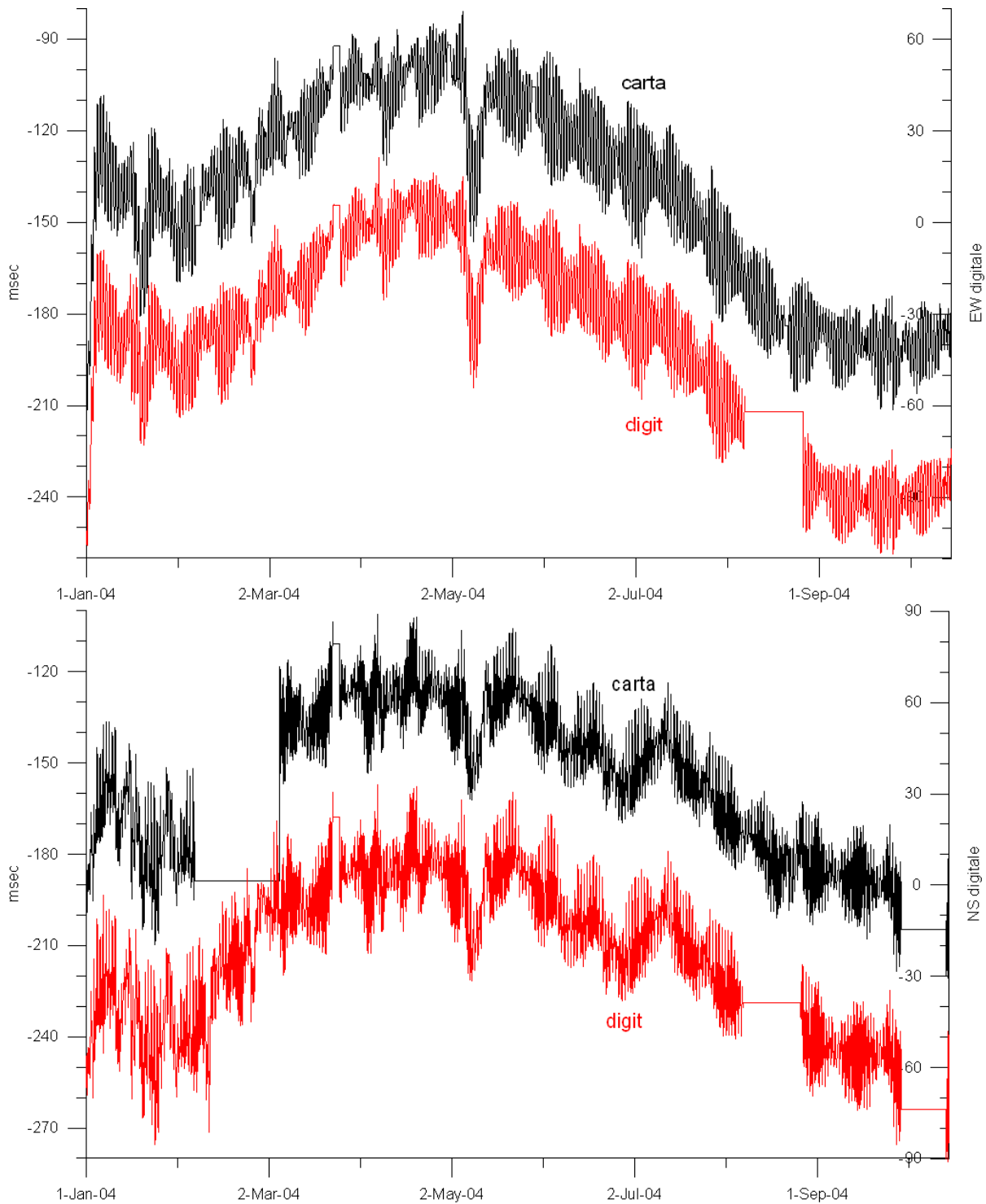
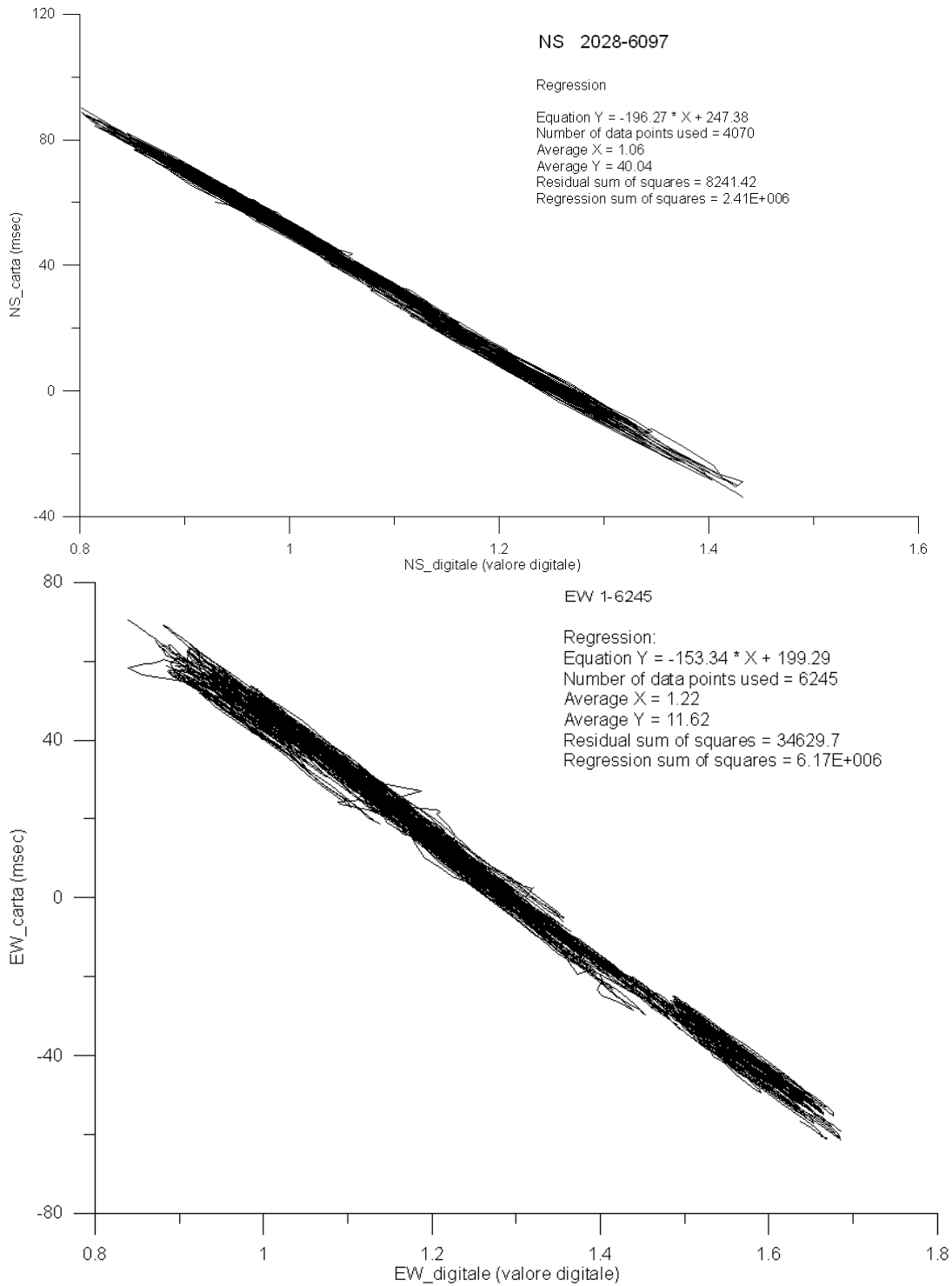


Fig. 3.5 – Confronto fra le registrazioni dei pendoli LPHP ottenute dall’acquisizione su carta fotografica (in nero) e digitale (rosso) per l’anno 2004. I valori digitali vengono letti con 5 cifre significative, per cui l’unità digitale(1 digit) è pari a  $10^{-5}$ .



*Fig. 3.6 – Retta di regressione fra le registrazioni dei pendoli LPHP ottenute dall'acquisizione su carta fotografica e digitale. Il dati coprono l'intervallo di tempo rappresentato nel grafico 3.5*

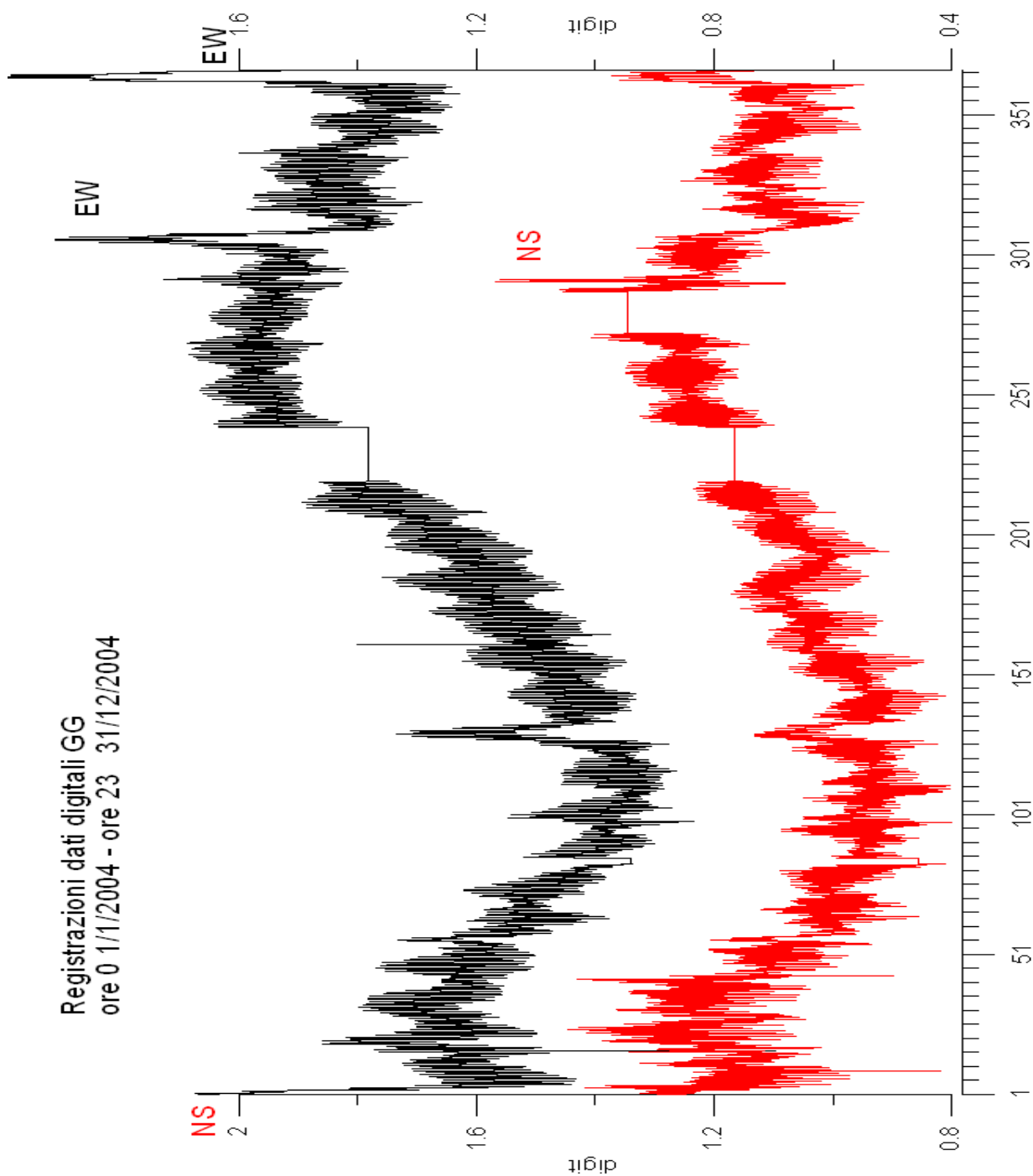
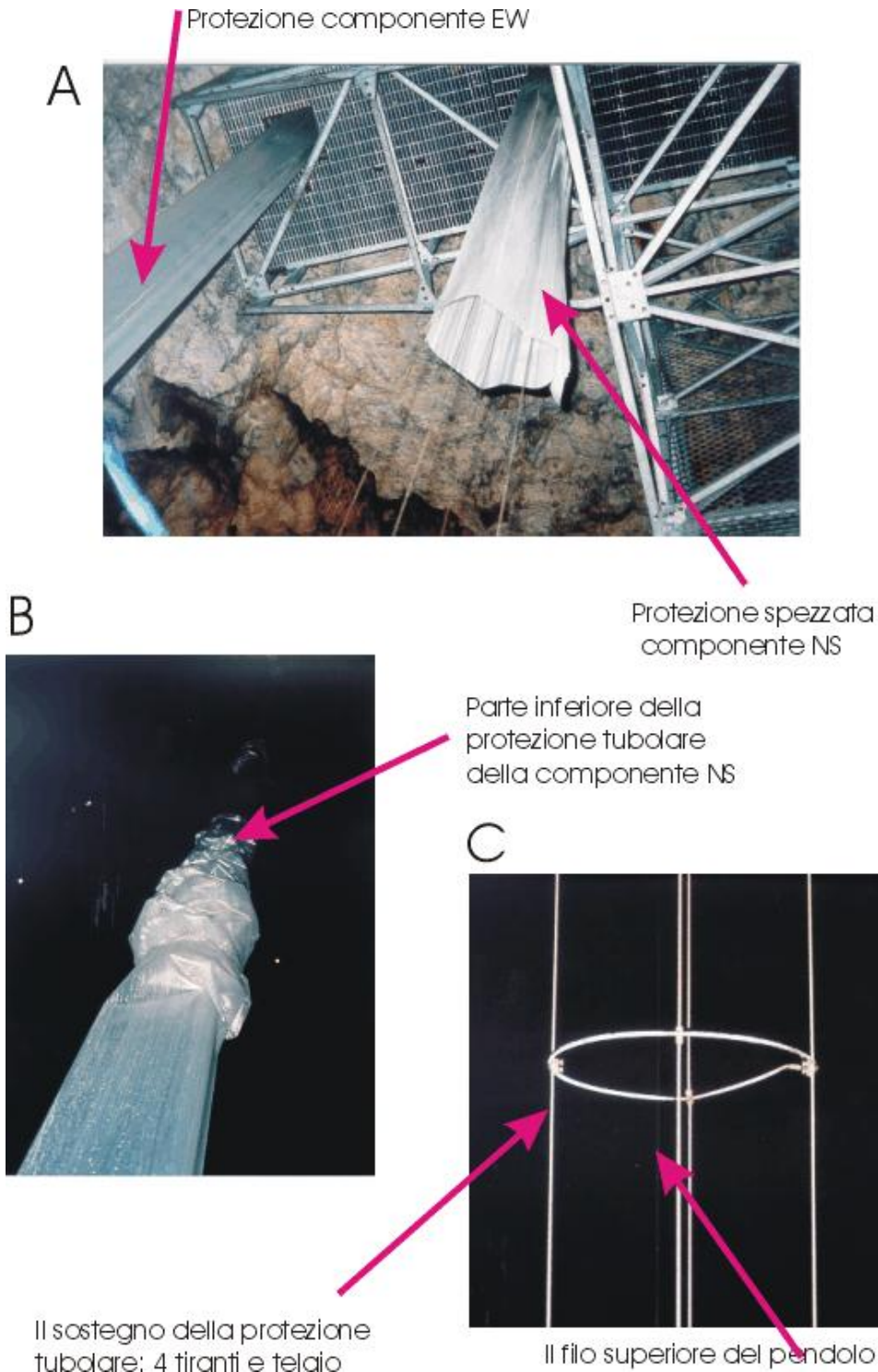


Fig. 3.7 - L registrazione dei pendoli LPHP con acquisizione digitale per l'anno 2004. Campionamento ridotto a 1min.

#### 4- Sostituzione di un segmento delle due guaine di protezione

I due pendoli LPHP della lunghezza di approssimativamente 95 m sono protetti ciascuno da una guaina tubolare in polietilene dello spessore di 0.3 mm. La guaina è stata costruita in un pezzo unico di materiale per garantire la massima resistenza. All'interno della guaina corrono quattro fili in acciaio inossidabile ai quali, ad intervalli regolari, sono fissati con quattro morsetti, anelli del diametro di 30 cm, che hanno la funzione di mantenere la guaina nella forma tubolare. Già nel dicembre del 2003 è stato effettuato un intervento sulla guaina della componente NS, che era ceduta in forma di un taglio orizzontale e verticale. All'atto della riparazione è risultato, che il materiale in polietilene del tubo si è gravemente deteriorato nel tempo, ed ha perso la sua proprietà di elasticità, diventando fragile. La causa del deterioramento è da imputarsi alla radiazione ultravioletta che irradia la grotta durante le ore notturne, per prevenire la crescita di vegetazione nell'interno della grotta. I tagli erano stati temporaneamente riparati, per garantire il corretto funzionamento del pendolo, con la previsione della sostituzione delle guaine nel corso dell'anno successivo. La riparazione era efficiente per sette mesi, dopo di che la guaina della componente NS si è spezzata trasversalmente in ottobre del 2004, ed è scesa verso il basso come una calza sostenuta dai quattro tiranti in acciaio (vedi **Fig. 4.1**). È stato necessario un intervento specializzato e delicato, in quanto l'operazione doveva essere effettuata calandosi dall'alto della grotta lungo le guaine ad un'altezza di circa 95m sopra il fondo della grotta. Questo lavoro è stato affidato alla ditta Edoardo Clemente di Trieste, e la **Fig. 4.2** illustra una fase dell'intervento e la guaina a riparazione effettuata. La riparazione consisteva nella sostituzione di un segmento del tubo in polietilene con un foglio in materiale PVC trasparente, incollato lungo una giuntura longitudinale per creare la forma tubolare.

La riparazione effettuata il 20 ottobre 2004 deve considerarsi temporanea, in quanto sarà indispensabile una sostituzione completa della guaina. Nell'anno 2005 o al massimo 2006, si dovrà provvedere alla sostituzione delle guaine, il che comporterà una notevole spesa economica.



**Fig. 4.1** *Illustrazione della rottura della guaina della componente NS del pendolo. A)Viene illustrata la volta della grotta e l'attacco superiore dei pendoli.B) La parte inferiore della guaina, che è scesa in basso verso il fondo della grotta. Foto presa dal fondo della grotta. C) Foto di dettaglio che illustra i quattro tiranti ed il telaio che formano la struttura a sostegno dei tubi di protezione ed il filo superiore del pendolo.*



A



B



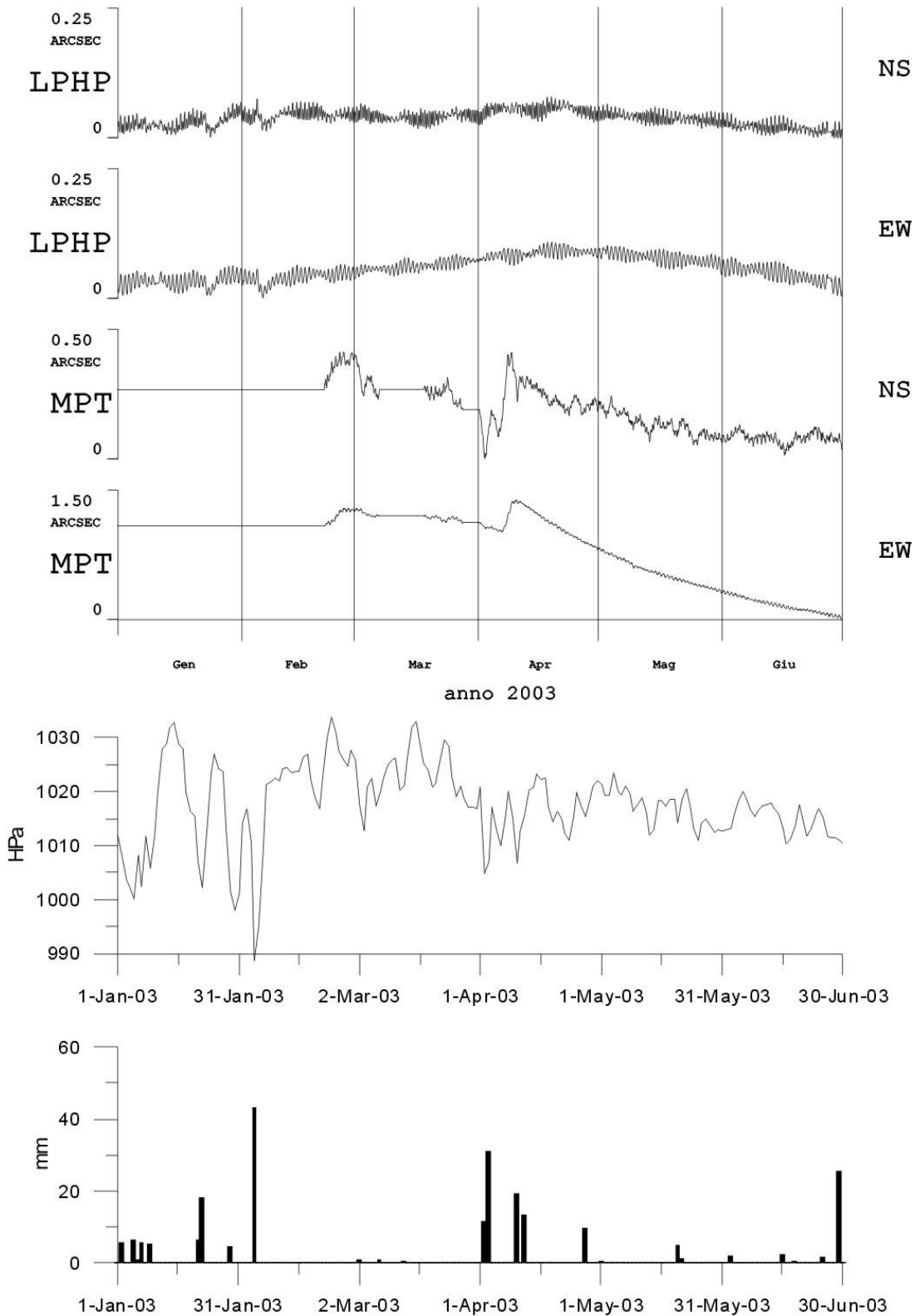
C



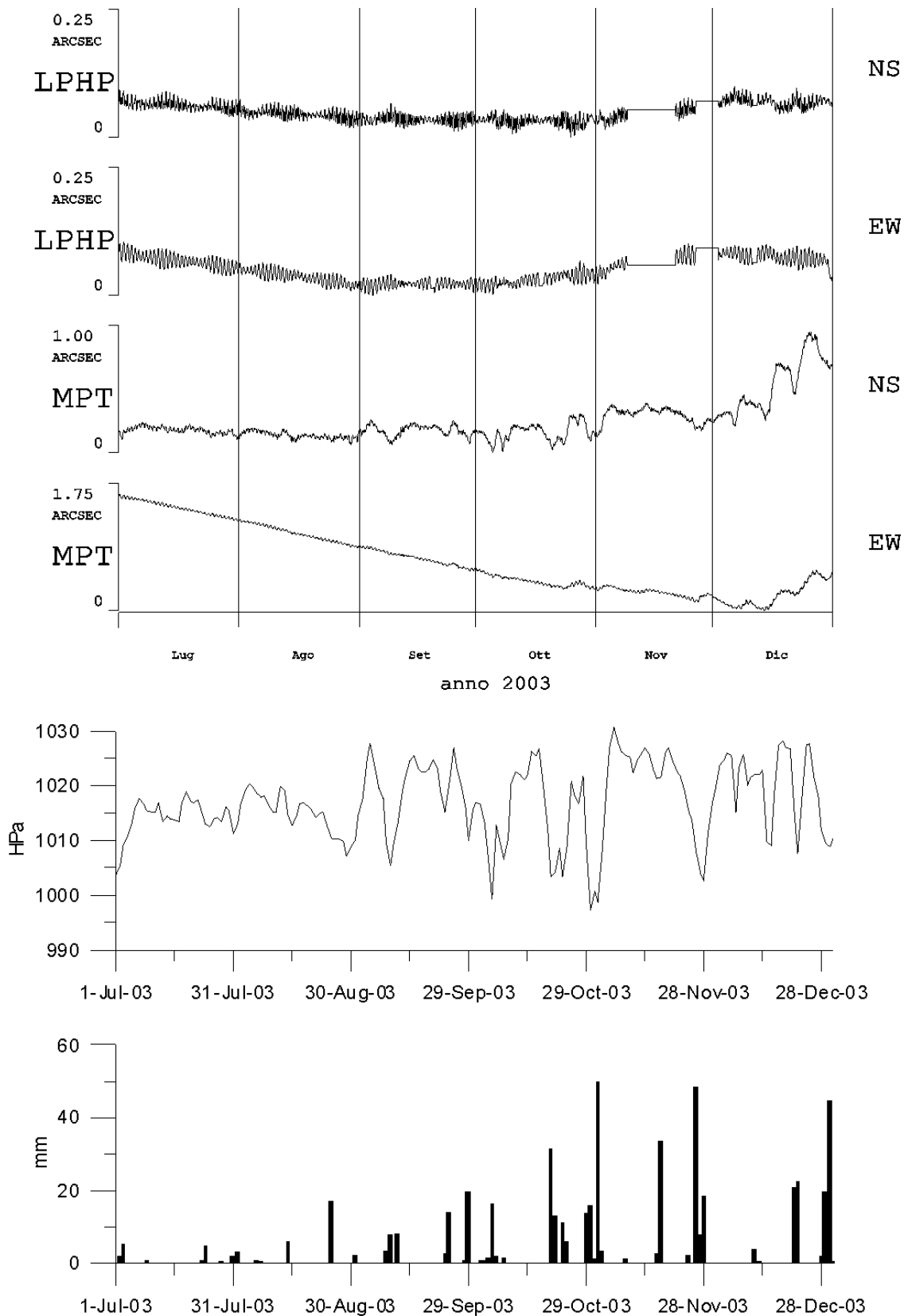
**Fig. 4.2** *Illustrazione della riparazione della guaina della componente NS del pendolo. A) una fase della riparazione: è stato inserito un segmento in PVC trasparente. La persona impegnata nei lavori si viene a trovare 95 m sopra il fondo della grotta. B) Una fase della riparazione della guaina. C) La guaina a riparazione ultimata.*

## **5 - Osservazioni delle inclinazioni della verticale e di parametri ambientali per il biennio 2003- 2004.**

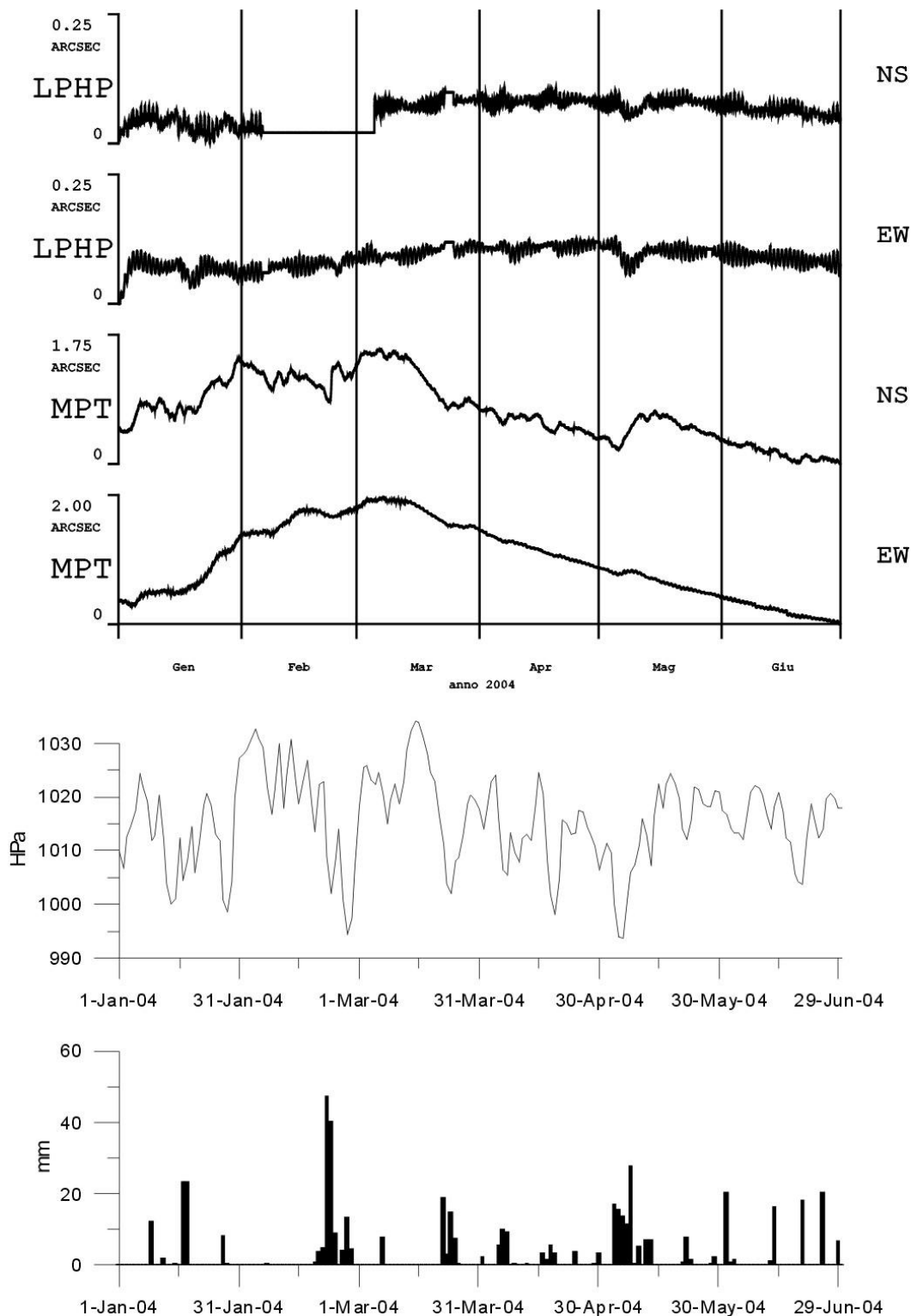
Qui di seguito vengono riportate le registrazioni effettuate con i pendoli LPHP e con i clinometri MPT della Grotta Gigante per il biennio 2003-2004. Inoltre si riportano i grafici delle registrazioni orarie della temperatura, della pressione atmosferica e della piovosità per gli anni 2003 e 2004. Infine viene dato un quadro d'insieme della disponibilità delle registrazioni estensimetriche e clinometriche della intera rete strumentale clino-estensimetrica del Friuli gestita dal DST.



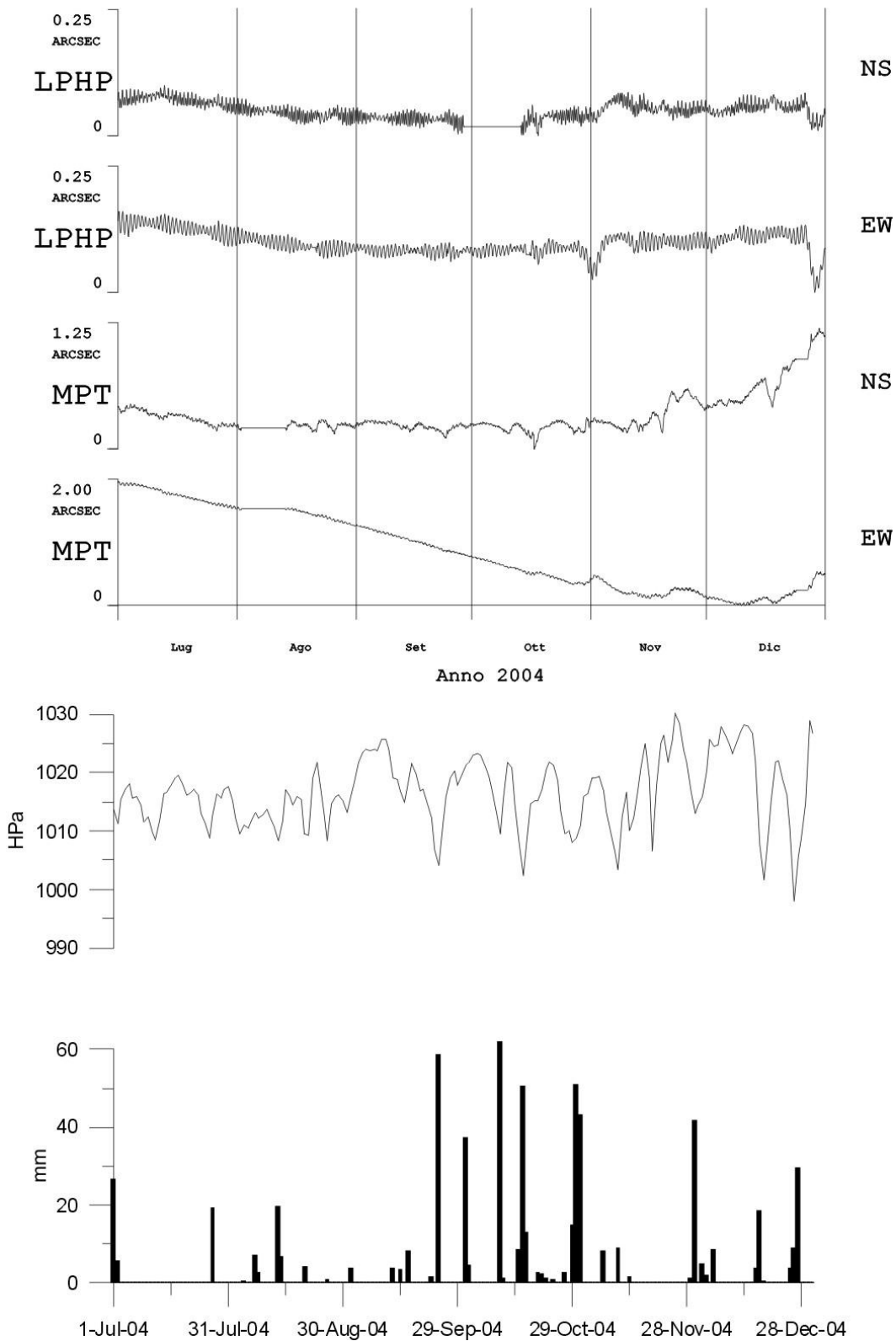
**Fig. 5.1-** Grafico delle registrazioni effettuate con i pendoli LPHP e con i clinometri MPT della Grotta Gigante per il biennio 2003-2004. Nella parte inferiore del grafico è riportata la registrazione pluviometrica giornaliera e la pressione barometrica. A) Periodo gennaio-giugno 2003



**Fig. 5.1b** - Grafico delle registrazioni effettuate con i pendoli LPHP e con i clinometri MPT della Grotta Gigante per il biennio 2003-2004. Nella parte inferiore del grafico è riportata la registrazione pluviometrica giornaliera e la pressione barometrica. B) periodo luglio-dicembre 2003



**Fig. 5.1c** - Grafico delle registrazioni effettuate con i pendoli LPHP e con i clinometri MPT della Grotta Gigante per il biennio 2003-2004. E' visibile anche la registrazione pluviometrica giornaliera. C)Periodo gennaio-giugno 2004



**Fig. 5.1d** - Grafico delle registrazioni effettuate con i pendoli LPHP e con i clinometri MPT della Grotta Gigante per il biennio 2003-2004. E' visibile anche la registrazione pluviometrica giornaliera. D) Periodo luglio-dicembre 2004.

**RETE CLINO - ESTENSIMETRICA DI FRIULI  
DIPARTIMENTO DI SCIENZE DELLA TERRA - UNIVERSITA' DI TRIESTE  
REGISTRAZIONI DISPONIBILI PER GLI ANNI '1960 - 2004'**

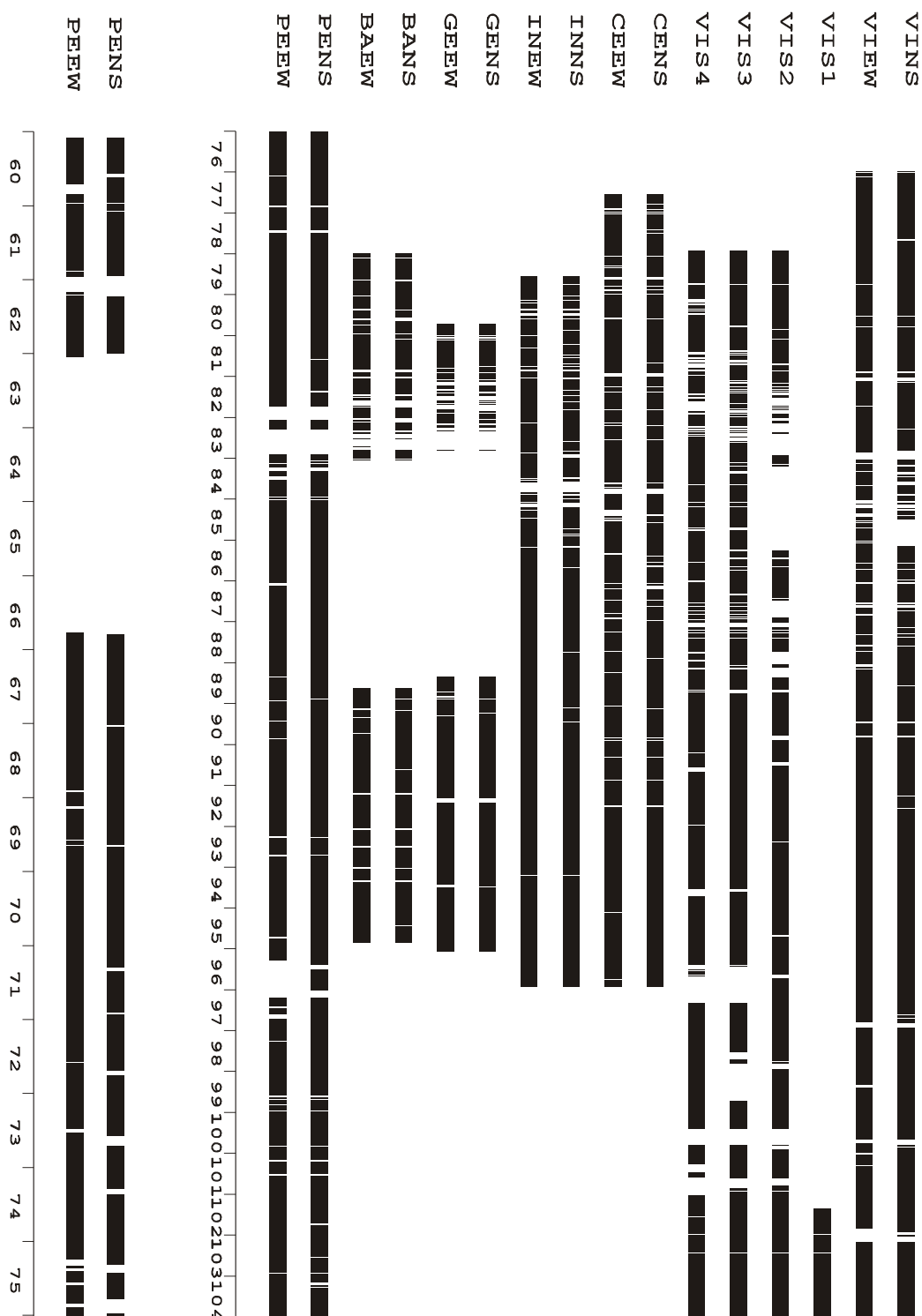


Fig. 5.3 - Quadro d'insieme della disponibilità delle registrazioni della rete strumentale clino-estensimetrica del Friuli e della Grotta Gigante gestita dal DST. Le sigle si riferiscono a: VI: Villanova, CE: Cesclans, IN: Invillino, GE: Gemona, BA: Barcis. I clinometri (pendoli orizzontali) sono identificati con NS ed EW, mentre i quattro strainmeter (3 orizzontali, uno verticale) con S1, S2, S3, S4. Le sigle PENS e PEEW si riferiscono ai pendoli LPHP della Grotta Gigante. Il database comprende inoltre l'osservazione di temperatura e pressione, e dei clinometri tradizionali MPT (dal 1999) della Grotta Gigante.

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

Come accennato nel paragrafo 3, 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, del Adriatico e nello spazio Alpino. L'elenco di questi eventi è riportato nella **Tab. 6.1**, e sono disponibili a richiesta. Gli eventi sono stati selezionati dal database del NEIC.

**Tab.6.1** Maggiori eventi sismici rilevati dai pendoli della Grotta Gigante durante il periodo 26/12/03-14/03/05 (NEIC). Selezione: Telesismi:  $M \geq 6$ , eventi Mediterraneo, Adriatico, Alpi:  $M \geq 4$ . I dati sono stati archiviati e sono disponibili a richiesta.

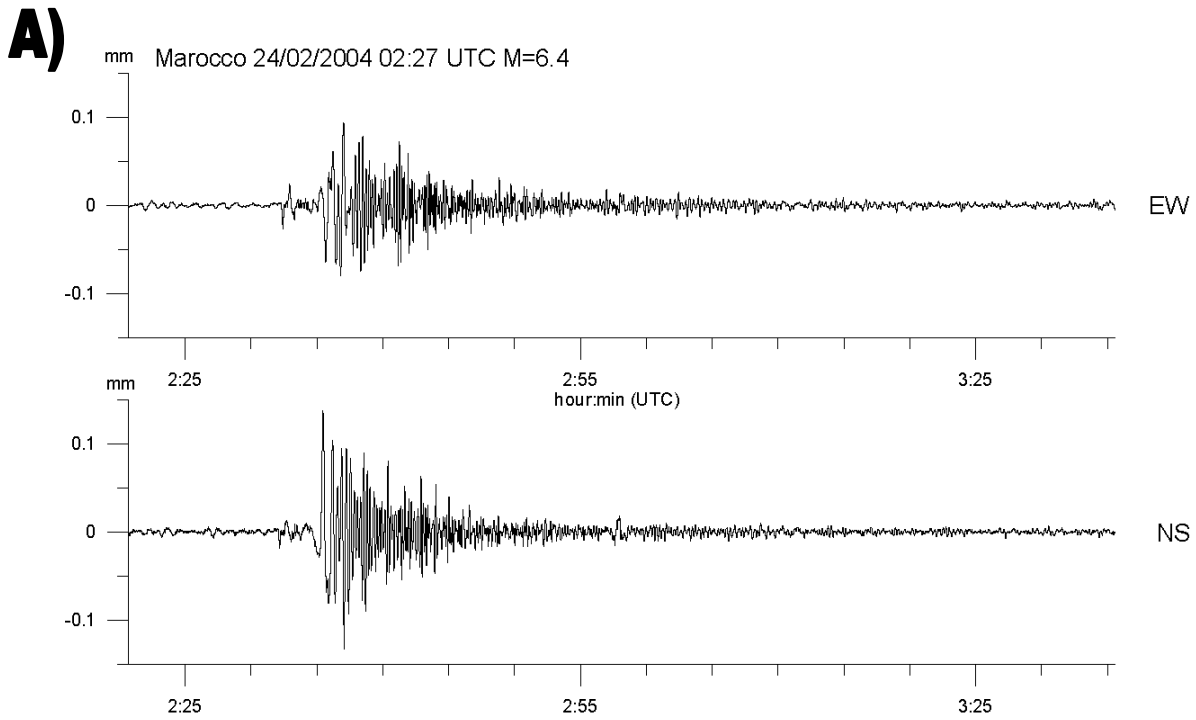
No.	Localita'	Data	Ora	M	File dati e file grafico
1	Iran	26/12/03	1:57	6.8	360-0305fil.dat 261203Iran.grf
2	Loyalty Isl.	26/12/03	21:26	6.8	360-2200.fil 261203Loyalty.grf
3	Loyalty Isl.	27/12/03	16:01	7.3	361-1719fil.dat 271203Loyalty.grf
4	Loyalty Isl.	03/01/04	16:23	7.1	003-1719fil.dat 030104Loyalty.grf
5	Ceram Sea	28/01/04	22:16	6.7	028-2200fil.dat 280104CeramSea.grf
6	Indonesia	05/02/04	21:08	7.1	036-2123fil.dat 050204Indonesia.grf
7	Indonesia	07/02/04	2:42	7.5	038-0205fil.dat 070204Indonesia.grf
8	Indonesia	08/02/04	8:58	6.9	039-0911fil.dat 080204Indonesia.grf
9	Morocco	24/02/04	2:27	6.4	055-0204fil.dat 240204Morocco.grf
10	Crete	17/03/04	5:21	6.1	77-0507fil.dat 170304Crete.grf
11	Hindu Kush	05/04/04	21.24	6.6	96-2123fil.dat 050404HinduKush.grf
12	Jan Mayen	14/04/04	23:08	6.2	105-2301fil.dat 140404JanMayen.grf
13	Indonesia	23/04/04	1:50	6.7	114-0104fil.dat 230404Indonesia.grf
14	Chile	03/05/04	4:37	6.7	124-0406fil.dat 030504Chile.grf
15	Sicily	05/05/04	13:40	5.3	126-1315fil.dat 050504Sicily.grf
16	Taiwan	19/05/04	7:04	6.4	140-0709fil.dat 190504Taiwan.grf
17	Iran	28/05/04	12.39	6.3	149-1214fil.dat 280504Iran.grf
18	Japan	29/05/04	20:56	6.6	150-2123fil.dat 290504Japan.grf
19	Kamchatka	10/06/04	15:20	6.9	162-1517fil.dat 100604Kamchatka.grf
20	QueenChIsl.	28/06/04	9:50	6.8	180-1012fil.dat 280604QueenCh*.grf
21	Bovec	12/07/04	13:04	5.7	194-1315fil.dat 120704Bovec.grf



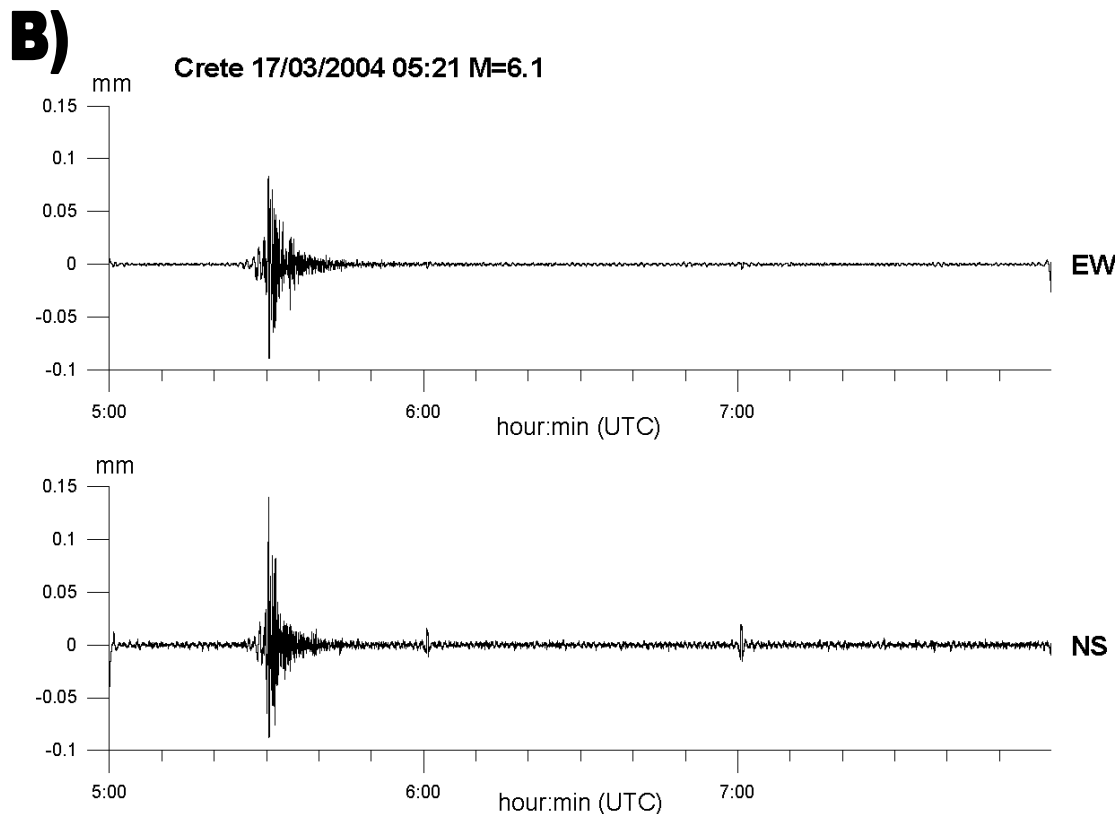
22	Fiji	15/07/04	4:27	7.1	197-0406fil.dat 150704Fiji.grf
23	Japan	22/07/04	9:45	6.1	204-1012fil.fdat 220704Japan.grf
24	Indonesia	25/07/04	14:35	7.3	207-1416fil.dat 250704Indonesia.grf
25	Indonesia	28/07/04	3:56	6.5	210-0406fil.dat 280704Indonesia.grf
26	Chile-Arg.	28/08/04	13:41	6.5	241-1315fil.dat 280804Chile.grf
27	Japan	05/09/04	10:07	7.2	249-0911fil.dat 050904Japan1.grf
28	Japan	05/09/04	14:57	7.4	249-1416fil.dat 050904Japan2.grf
29	S.Sandwich	06/09/04	12:43	6.9	250-1113fil.dat 060904SSandwichI.grf
30	Taiwan	08/11/04	15:55	6.3	313-1517fil.dat 081104Taiwan.grf
31	Solomon Is.	09/11/04	23:58	6.9	314-2301fil.dat 091104Solomon.grf
32	Solomon Is.	11/11/04	17:33	6.8	316-1618fil.dat 111104Solomon.grf
33	Indonesia	11/11/04	21:27	7.5	316-2022fil.dat 111104Indonesia.grf
34	Colombia	15/11/04	09:07	7.2	320-0810fil.dat 151104Colombia.grf
35	Costarica	20/11/04	08:08	6.4	325-0709fil.dat 201104Costarica.grf
36	Leeward Isl.	21/11/04	11:41	6.4	326-1012fil.dat 211104Leeward.grf
37	New Zeal.	22/11/04	20:26	7.1	327-1921fil.dat 221104NewZealand.gr
38	L. di Garda	24/11/04	23:00	5.3	329.2200fil.dat 241104LGarda.grf
39	Adriatic Sea	25/11/04	6:21	5.2	330-0507fil.dat 251104Adriatic.grf
40	Indonesia	26/11/04	2:25	7.2	331-0103fil.dat 261104Indonesia.grf
41	Easter Isl.	28/11/04	2:35	6.6	333-0103fil.dat 281104EasterI.grf
42	Japan	28/11/04	18:32	7.0	333-1719fil.dat 281104Japan.grf
43	Japan	06/12/04	14:15	6.8	341-1315fil.dat 061204Japan.grf
44	Honduras	14/12/04	23:20	6.8	349-2200fil.dat 141204Honduras.grf
45	Kuril Island	18/12/04	06:46	6.5	353-0507fil.dat 181204Kuril.grf
46	MacQuarie	23/12/04	14:59	8.1	358-1416fil.dat 231204MacQuarie.grf
47	Indonesia	26/12/04	00:59	9.0	361-0104fil.dat 261204Indonesia.grf
48	India	26/12/04	04:21	7.5	361-0406fil.dat 261204India.grf
49	India	26/12/04	09:20	6.6	361-0911fil.dat 261204India2.grf
50		01/01/05	06:26	6.7	5001-0608fil.dat 010105.grf
51	Dodecanese	10/01/05	23:49	5.1	5010-2301fil.dat 100105Dodecanese.gr
52	Mid-AtlanR	12/01/05	08:40	6.8	5012-0810fil.dat 120105MidAtlanR.grf
53	W.CarolinaI	16/01/05	20:18	6.6	5016-0709fil.dat 160105WCarolina.grf
54	Japan	18/01/05	14:09	6.3	5018-1416fil.dat 180105Japan.grf
55	Japan	19/01/05	06:12	6.5	5019-0608fil.dat 190105Japan.grf
56	Ecuador	21/01/05	13:45	6.0	5021-1315fil.dat 210105Ecuador.grf
57	Solomon Is.	22/01/05	20:30	6.4	5022-2022fil.dat 220105Solomon.grf
58	Indonesia	23/01/05	20:10	6.2	5023-2023fil.dat 230105IndMed.grf
59	E.Mediterr.		22:36	5.8	
60	Nicobar Isl.	24/01/05	04:17	6.3	5024-0406fil.dat 240105Nicobar.grf
61	Turkey	25/01/05	16:44	5.9	5025-1618fil.dat 250105Turkey.grf

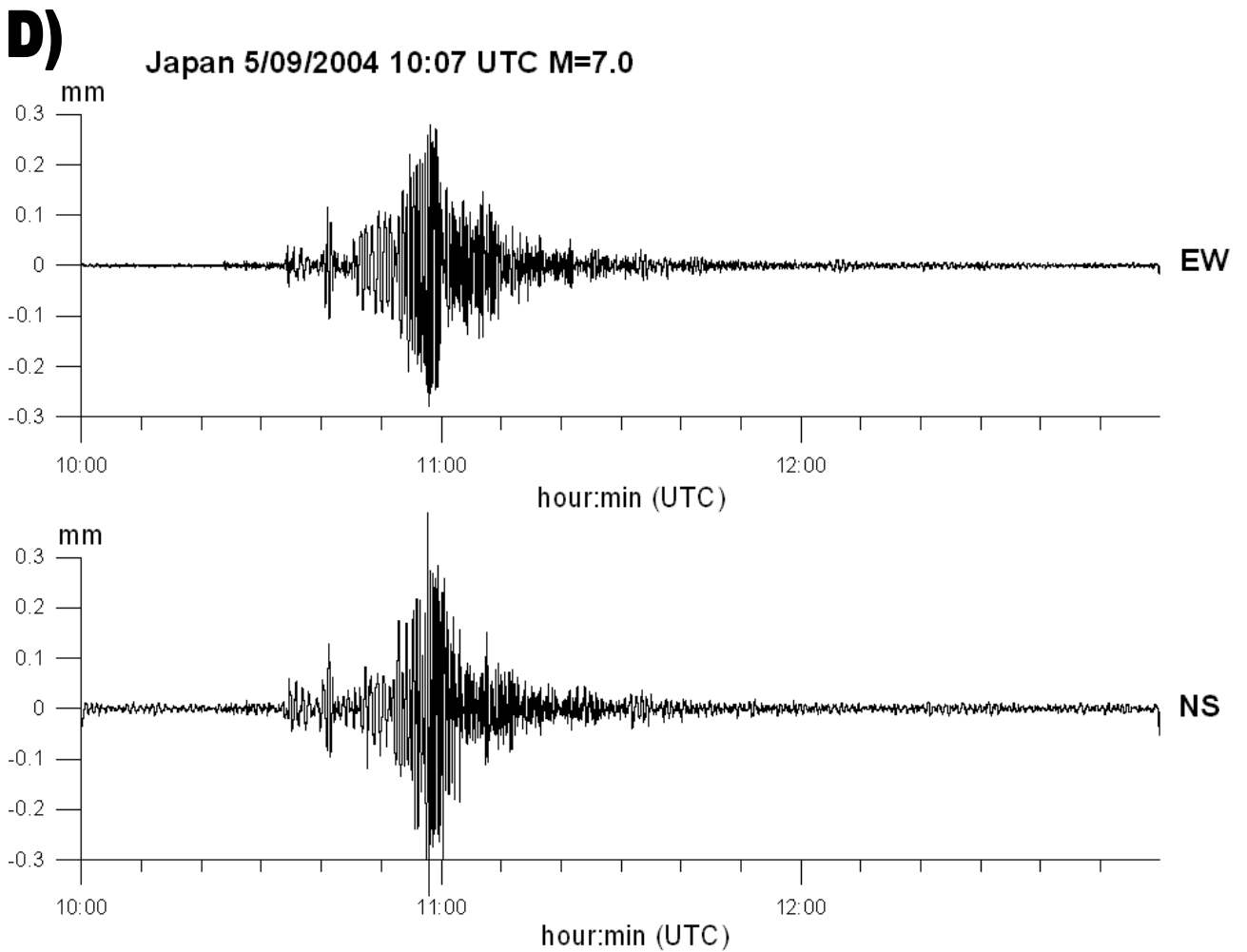
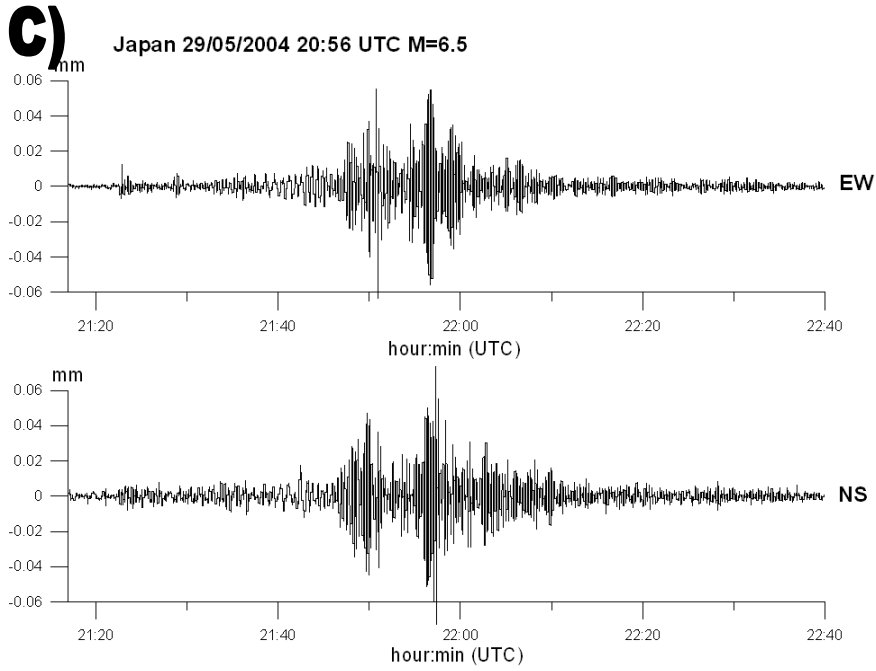
62	Ionian See	31/01/05	01:06	5.8	5031-0103fil.dat 310105IonianSee.grf
63	Philippines	05/02/05	12:23	7.1	5036-1223fil.dat 050205Philippines.grf
64	China	14/02/05	23:38	6.1	5045-2301fil.dat 140205China.grf
65	Indonesia	15/02/05	14:42	6.4	5046-1416fil.dat 150205Indonesia.grf
66	Mid-AtlanR	16/02/05	20:28	6.6	5047-2022fil.dat 160205MidAtlanR.grf
67	Indonesia	19/02/05	00:05	6.5	5050-0002fil.dat 190205Indonesia.grf
68	Iran	22/02/05	02:52	6.4	5053-0204fil.dat 220205Iran.grf
69	Indonesia	26/02/05	12:57	6.8	5057-1315fil.dat 260205Indonesia.grf
70	Banda Sea	02/03/05	10:42	7.1	5061-1012fil.dat 020305BandaSea.grf
71	Severnaya Z	06/03/05	04:40	6.2	5065-0406fil.dat 060305Severnaya.grf
72	Turkey	12/03/05	07:36	5.4	5071-0708fil.dat 120305Turkey.grf
73	Iran	13/03/05	03:31	6.0	5072-0305fil.dat 130305Iran.grf
74	Turkey	14/03/05	01:56	5.4	5073-0102fil.dat 140305Turkey.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. 6.1 A-L**, per una selezione degli eventi disponibili.

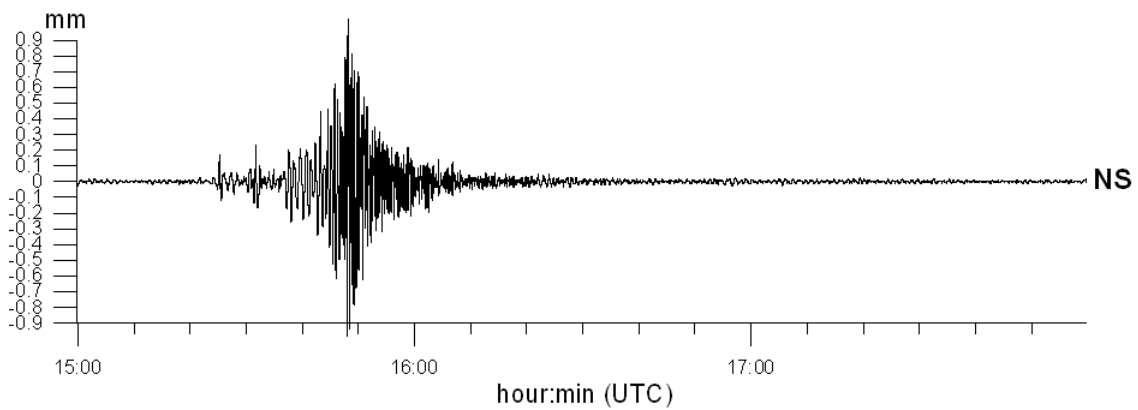
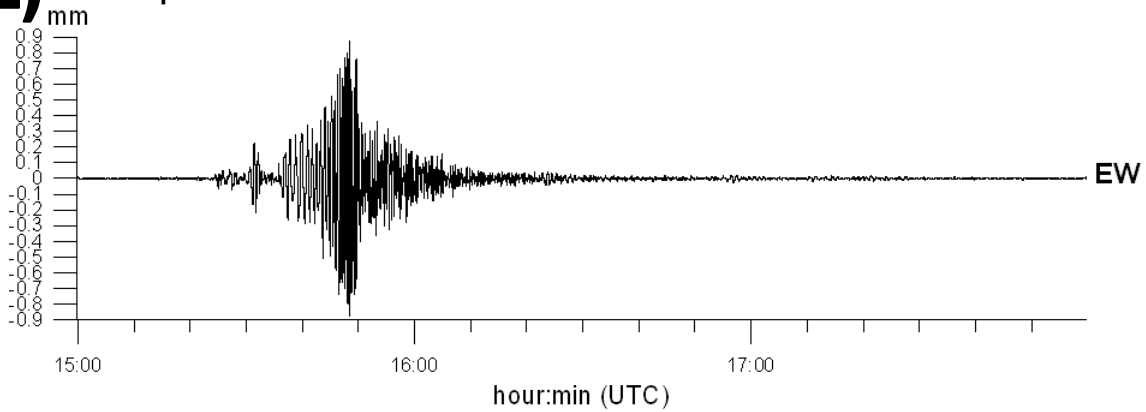


**Fig. 6.1 (a-l)** – Registrazione di alcuni eventi sismici di magnitudo rilevante avvenuti durante il periodo dal 26 dicembre 2003 a 14 marzo 2005 (vedi Tab. 6.1). I dati originali sono stati filtrati con un filtro passa banda con banda passante per le frequenze comprese fra 0.0167 Hz e .25 Hz.

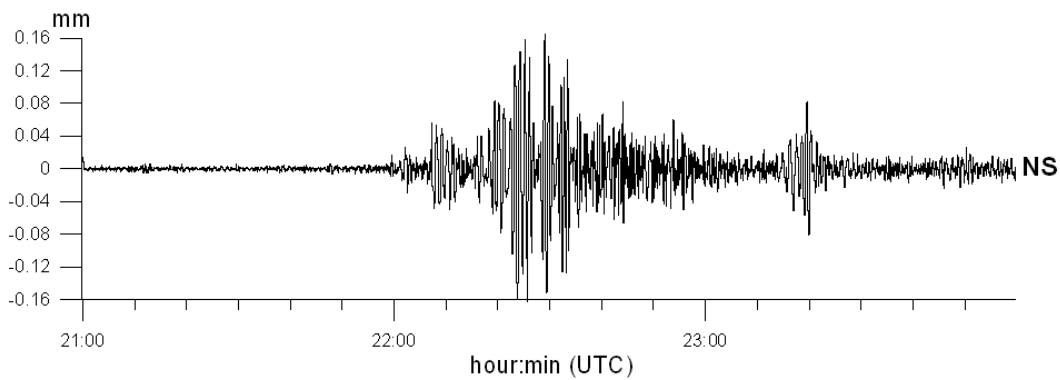
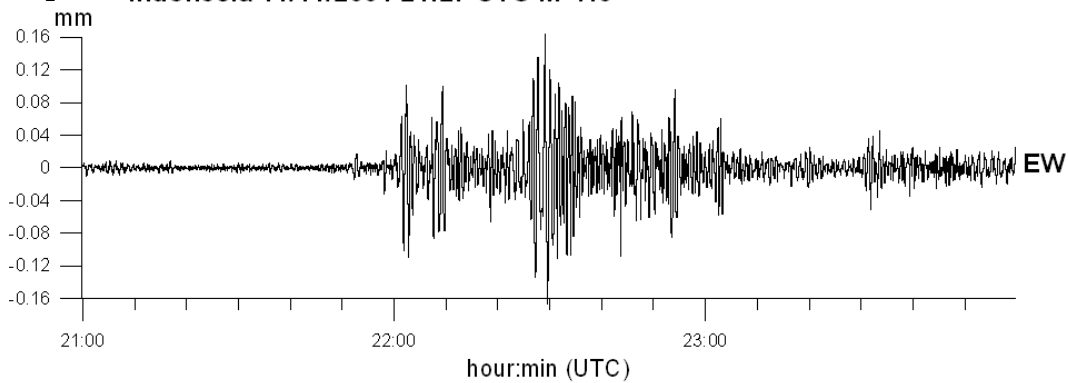




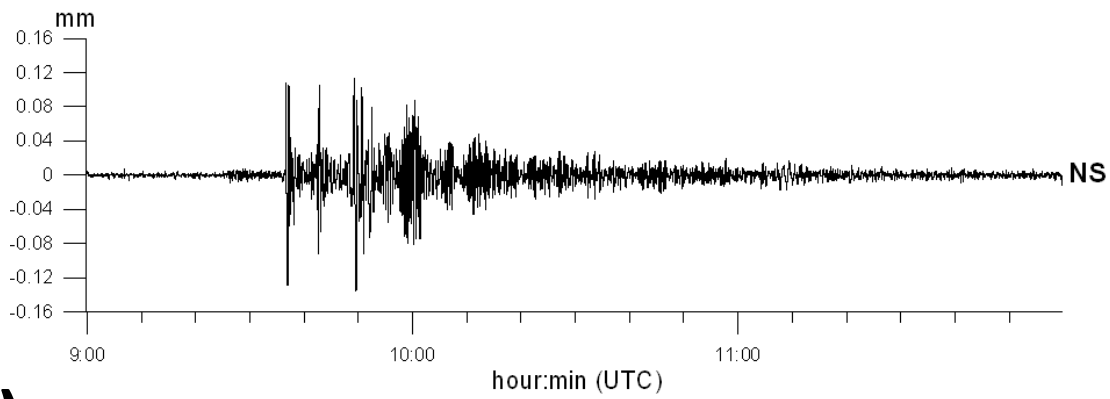
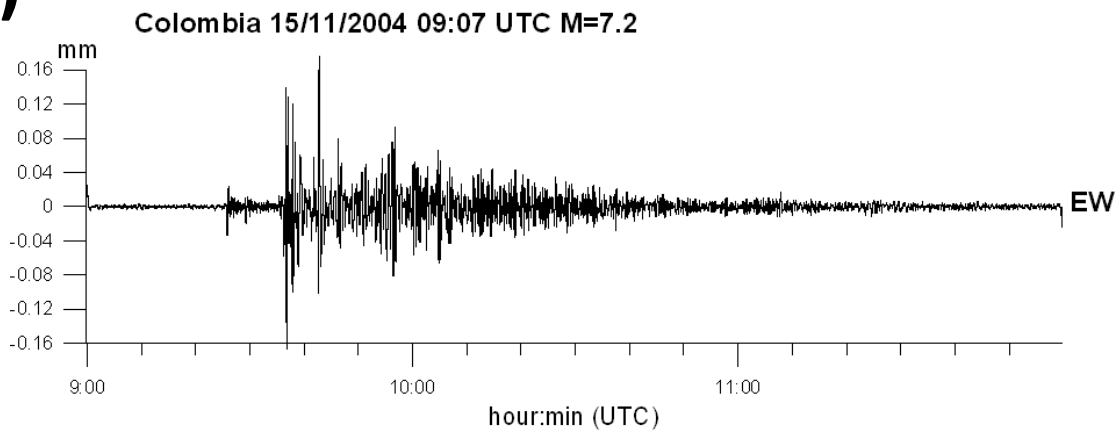
## E) Japan 5/09/2004 14:57 UTC M=7.4



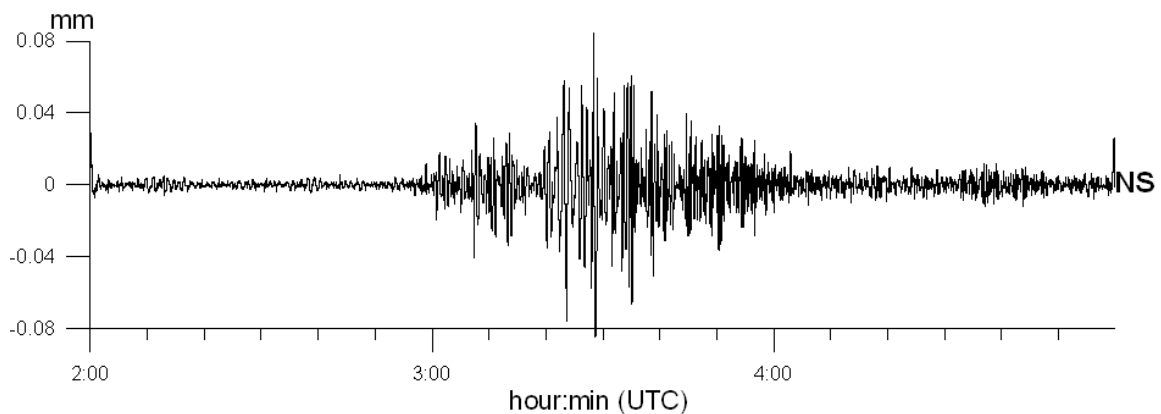
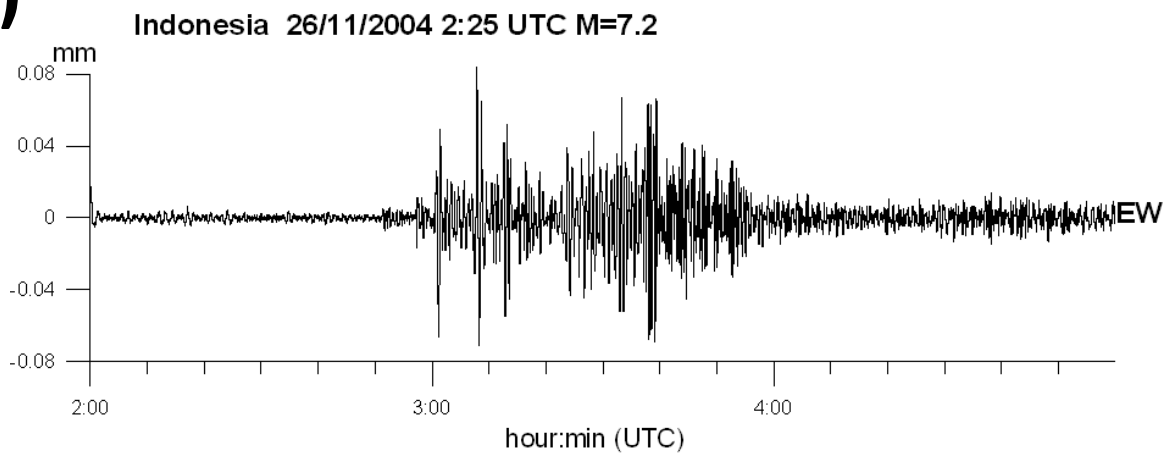
## F) Indonesia 11/11/2004 21:27 UTC M=7.5

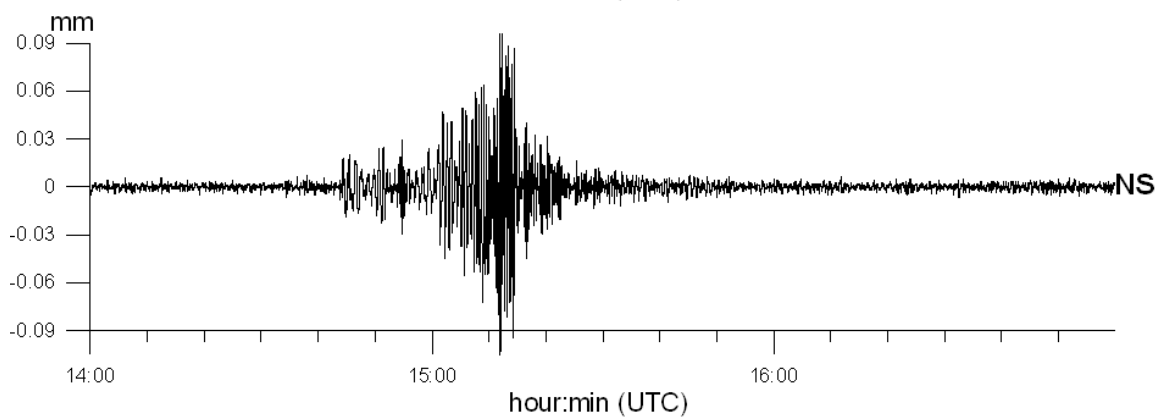
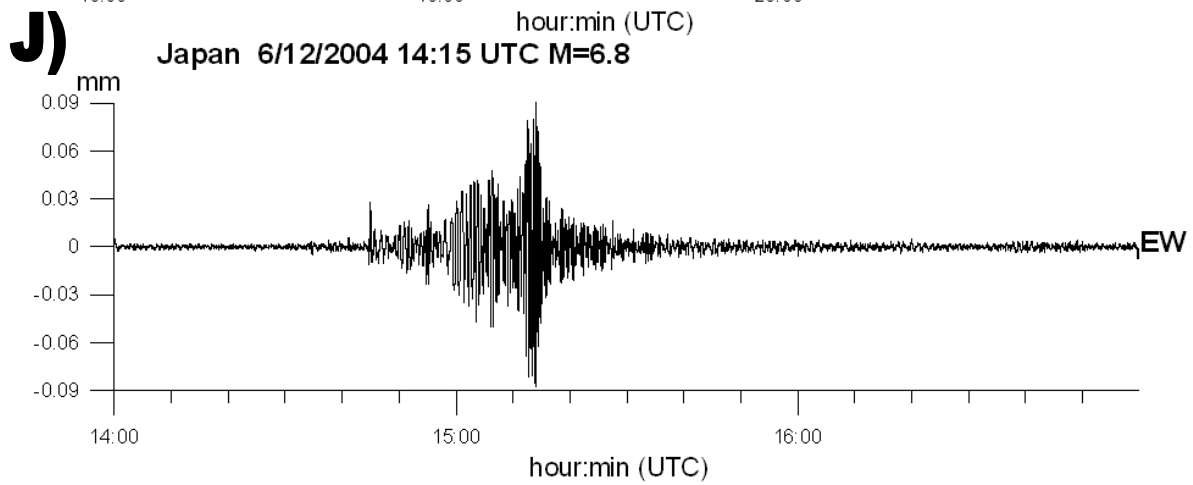
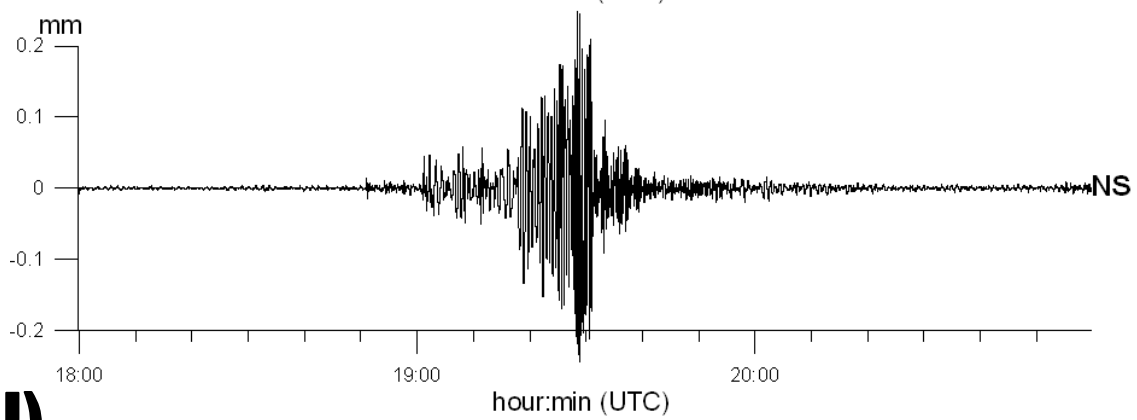
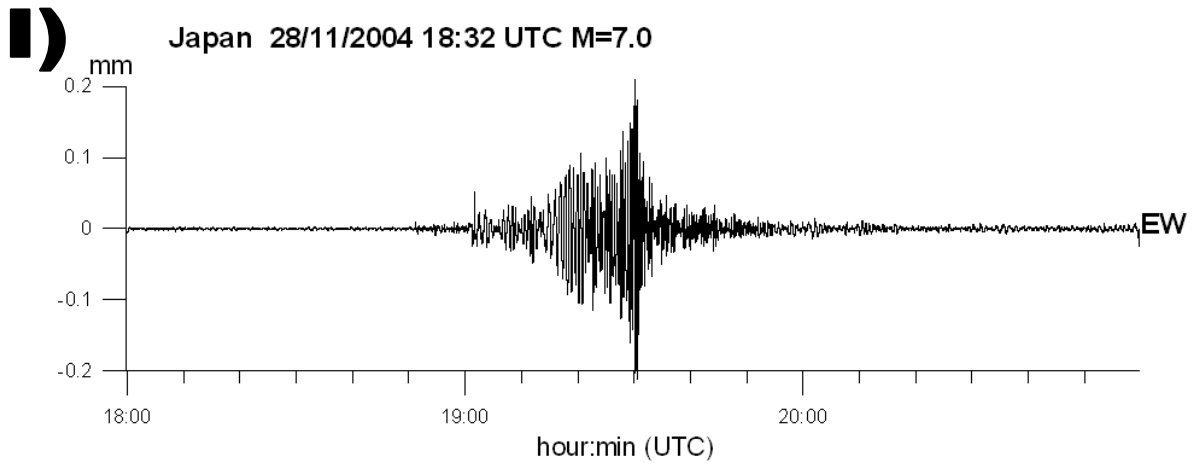


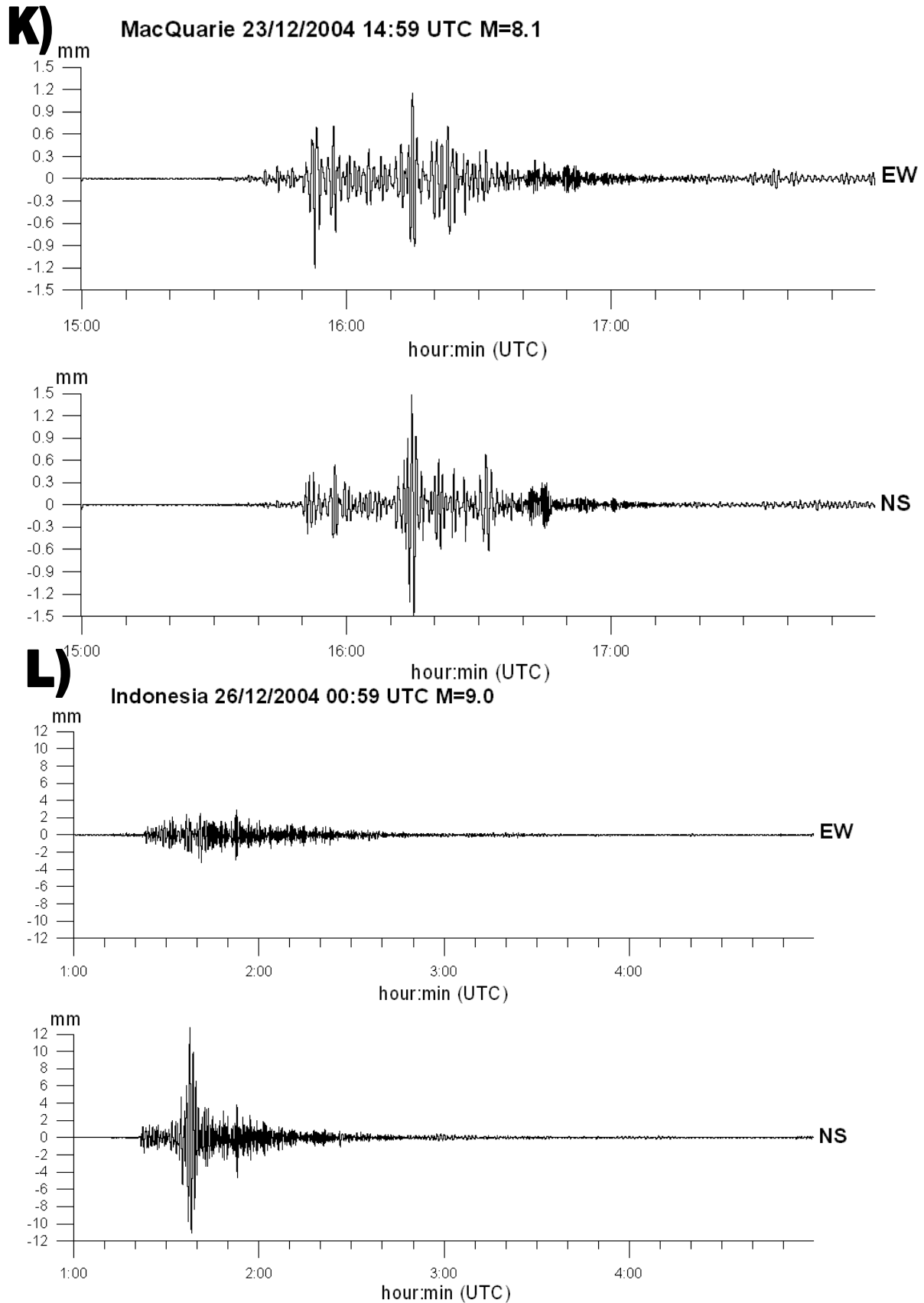
## G)



## H)





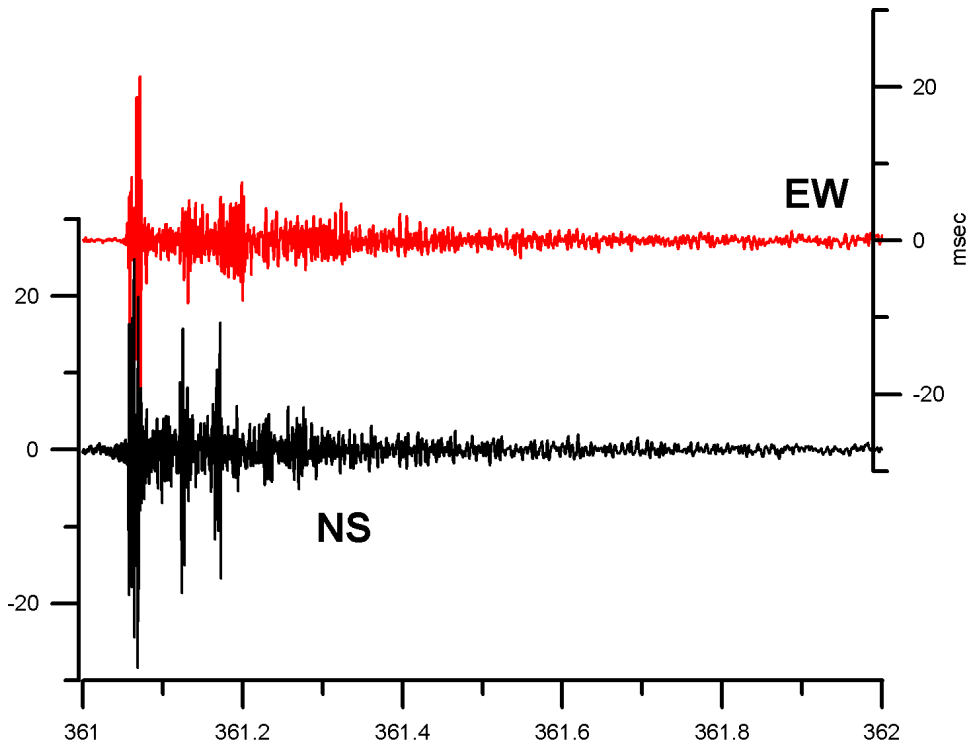


**Fig. 6.3 L)** Il disastroso evento delle Isole Andaman-Sumatra del 26 dicembre 2004. Una discussione più approfondita dell'evento è riportata nel paragrafo 7.

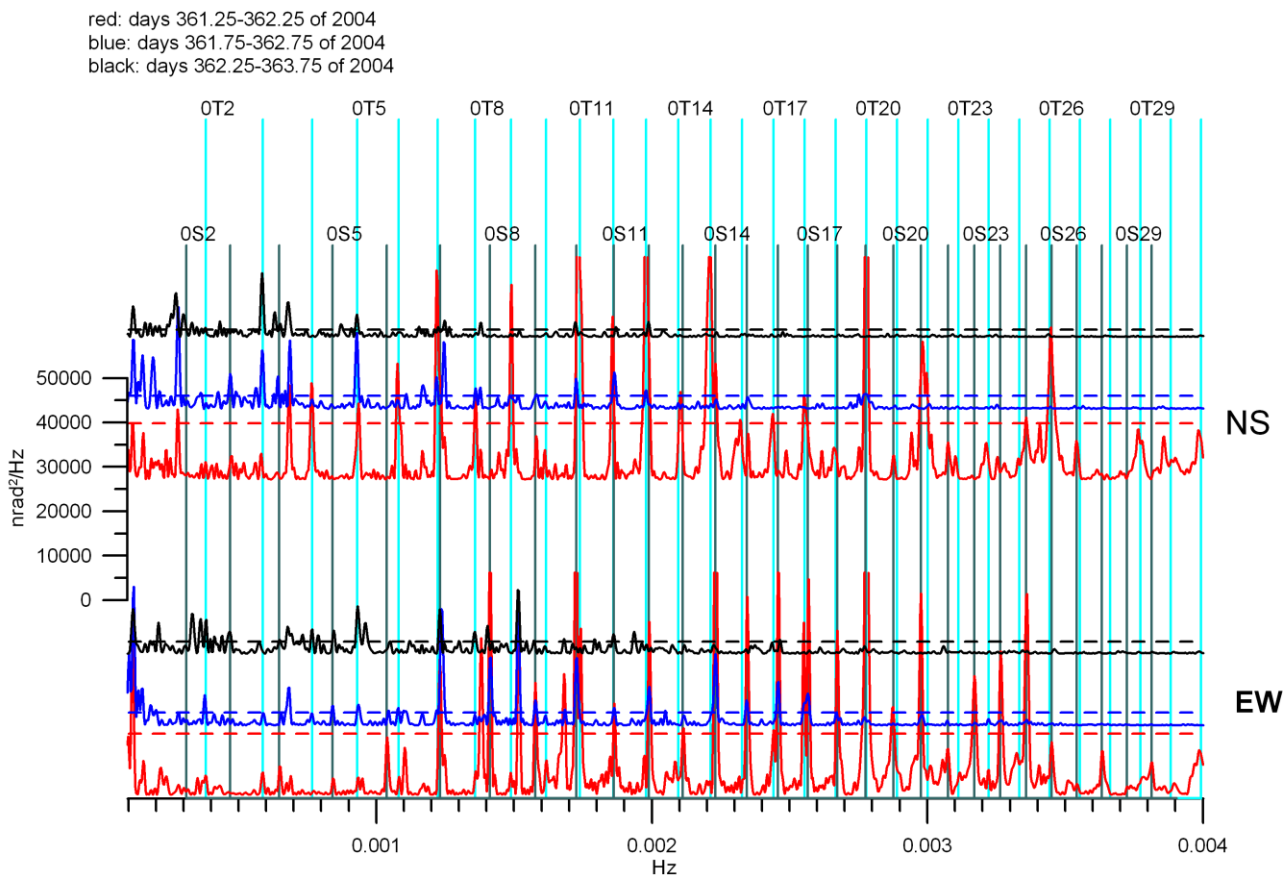


## 7- The Sumatra-Andaman Islands M=9 earthquake December 26, 2004 record

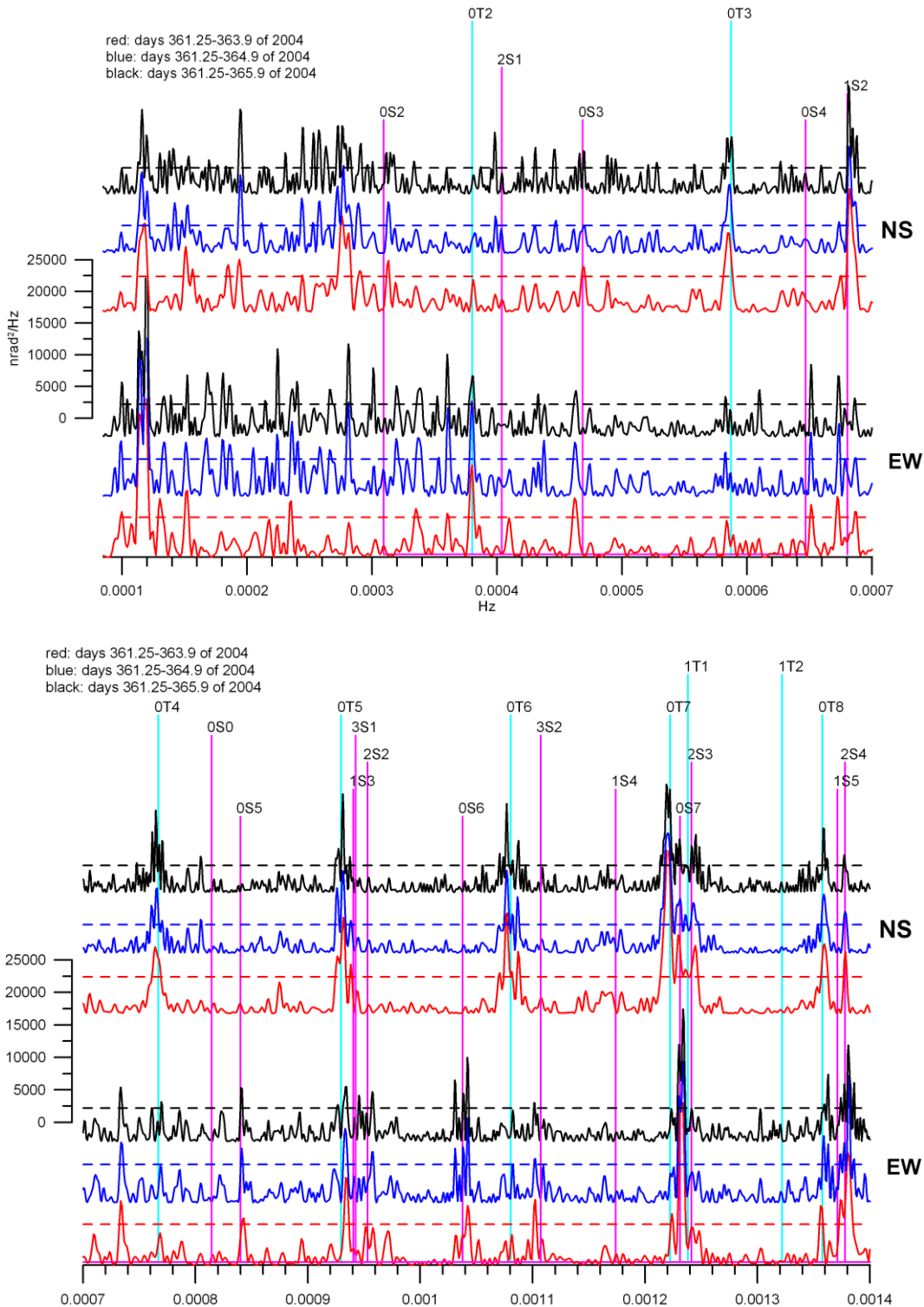
The increase in the signal and time resolution of the new digital acquisition system makes it possible to record the horizontal ground movement due to the passage of seismic waves with the long-base pendulums. The instrumental response function of the pendulums is that of a damped oscillator with damping factor of 0.85 and a reduced pendulum length of 134.32 cm. The eigenfrequency of the pendulums is of 360 sec. The recent seismic event off the western coast of northern Sumatra, which occurred on Dec. 26, 2004, with magnitude  $M=9.0$ , at depth=30km, and at the epicentral location with coordinates Latitude  $3.30^{\circ}\text{N}$ , Longitude  $95.96^{\circ}\text{E}$  (Neic, 2004) was well recorded. In order to isolate the observation of the seismic event, the original data are first detrended by least-squares fitting of a polynomial curve of 2<sup>nd</sup> order, then a band-pass filter is applied, with passing band from 5000 sec to 300 sec period. In **Fig. 7.1** the detrended and filtered data sequence is shown. In **Fig. 7.2** the Power spectral density of the time series following the seismic event is shown. We present two groups of spectra, the first with a constant window length shifted in time, the second with an increasing window length, for enhanced spectral resolution. The first group is apt to evaluate the higher frequencies (e.g. above 1.4 mHz) modes, which decay quicker in time and do not necessitate maximum spectral resolution. We have used three overlapping time windows of 24 h length, each shifted by 12 h. The first one starts at day 361.25 of 2004, after the greatest amplitude shocks of the earthquake. In **Fig. 7.2a** the three spectra are shown, together with the frequencies of the torsional ( ${}_nT_1$ ) and spheroidal ( ${}_nS_1$ ) free oscillations of fundamental mode  $n=0$  and variable degree "l". The horizontal broken line shows the 95% confidence level of a spectral peak to be significant. This level was obtained by calculating the statistical distribution of the spectral energies in the frequency range from 0 to 5 mHz, and determining the level above which only 5% of the energies fall. If all spectral energies were distributed randomly, a spectral energy above this level would have 5 % probability to be observed. This translates to the fact that all spectral peaks ranging above this level are significant to the 95% level. The upper limit of 5mHz was chosen applying the criteria that energies above this range are practically nonexistent. The decay of the spectral density of the higher frequency modes in the frequency range 1 mHz to 3.5 mHz can be seen from the observation that the spectral density decays from one spectrum to the next. In the lower frequency band (below 1.4 mHz), where a higher frequency resolution is necessary, we have calculated the spectra for increasing time windows, using time windows of 65, 89 and 113 hours. The results are graphed in **Fig. 7.2b**, where the persistence of several spectral peaks can be seen. As before, the 95% significance limit is shown as a horizontal broken line. Nearly all the lower frequency modes are present in the spectra, as e.g.  ${}_0T_2$ ,  ${}_0T_3$ ,  ${}_0T_4$ ,  ${}_0T_5$  and  ${}_2S_1$ ,  ${}_0S_3$ ,  ${}_0S_4$ ,  ${}_1S_2$ . We find significant spectral peaks at frequencies lower than the free oscillations, and at frequencies intermediate to the published free oscillations, the nature of which requires further study.



**Figure 7.1:** Recording of the Sumatra-Andaman Islands seismic event of December 26, 2004. (M=9.0, depth=30 km). The detrended, band pass filtered data are shown.



**Figure 7.2:** Spectral analysis of the Sumatra-Andaman Islands event. **a)** the spectral analysis is carried out on 3 sliding time-windows of 24 each, shifted by 12 hours. The red, blue and black line pertain to the windows starting at days 361.25, 361.5 and 361.75 of 2004, respectively. The broken line indicates the 95% confidence level that a spectral peak be significant. The vertical lines show the frequencies of the fundamental Spheroidal (grey) and Torsional (light blue) modes of the free oscillations of the earth (Masters and Widmer, 1995); every fourth mode is labelled.

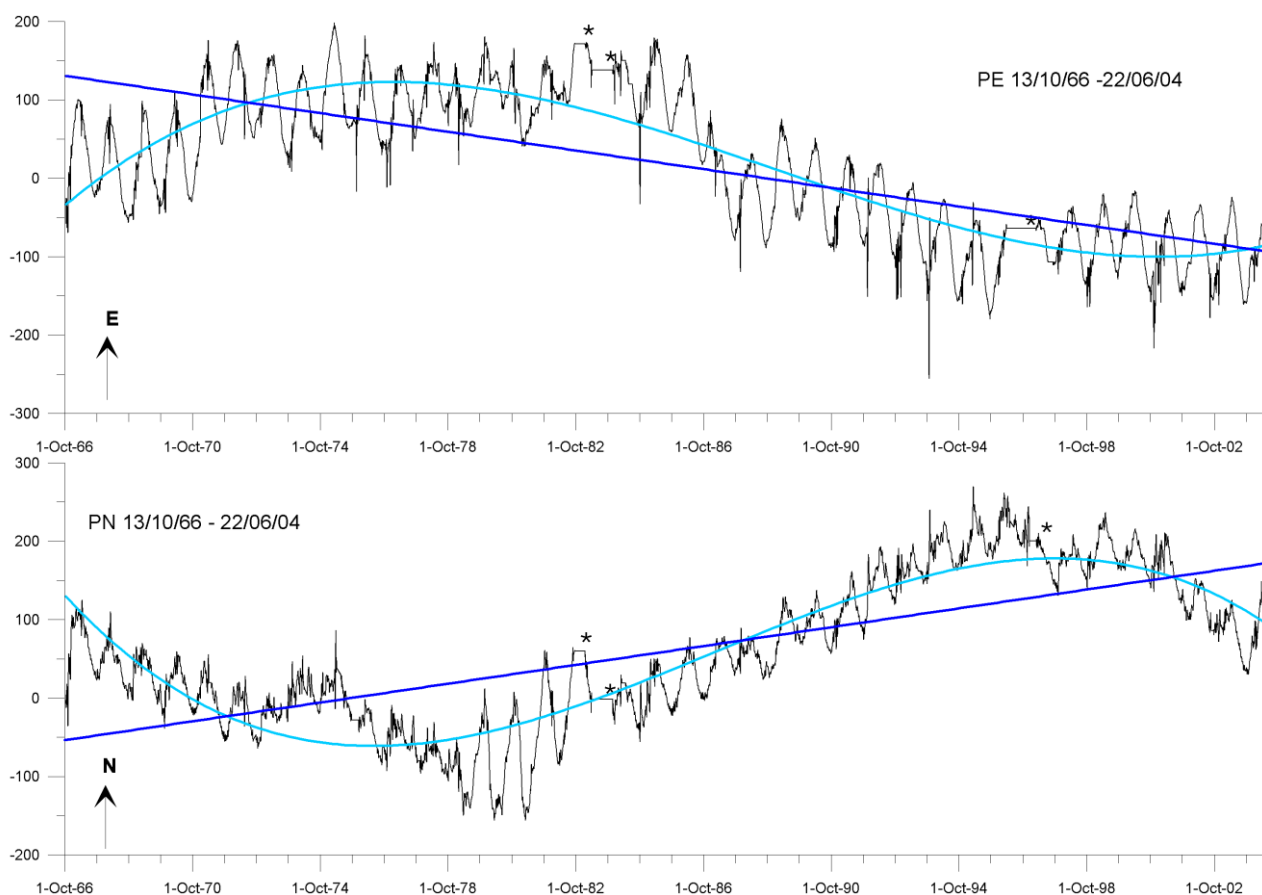


**Figure 7.2b:** the spectral analysis is carried out on 3 time-windows of increasing length. The red, blue and black lines pertain to the windows starting at day 361.25 and ending at days 363.9, 364.9 and 365.9 of 2004, respectively. The broken line indicates the 95% confidence level that a spectral peak be significant. The vertical lines show the frequencies of all the published spheroidal (pink) and torsional (light blue) modes of the free oscillations of the earth for this frequency range (Masters and Widmer, 1995). The spectrum has been divided into two frequency intervals, from 0.1 to 0.7 mHz and from 0.7 to 1.4 mHz.

## 8 Secular crustal deformation for the years 1966-2004.

The long period continuous observations of the tiltmeters, which cover the remarkable time interval of nearly 40 years, are shown in **Fig. 8.1a**). The original data sampling of the photographic readout is hourly, which has been reduced to daily sampling after application of an anti-alias filter.

One evident feature of the observations is the regular yearly oscillation, seen in all crustal deformation stations of good quality, and due mainly to the thermal influence of one year period on the deformation; to some extent it is also due to the yearly variation of the subsurface waters, which though do not have such a regular oscillation (e.g. Zadro and Braitenberg, 1999; Braitenberg et al., 2001). By band-pass filtering the records with a cosine-tapered frequency filter (corner-periods equal to 300 and 400 days) we have isolated the yearly variation.

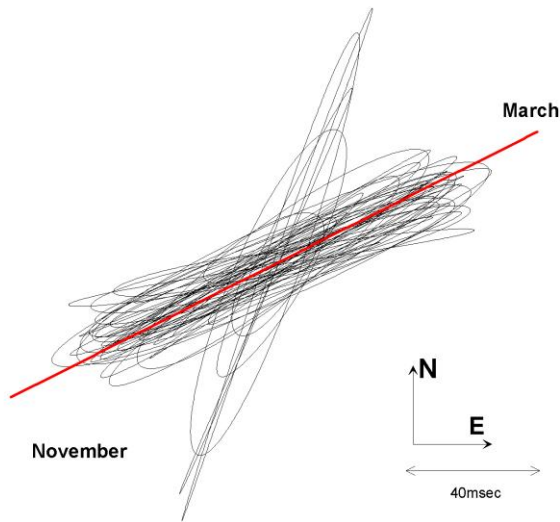


**Figure 8.1:** The secular deformation of the cave as recorded by the long-base tiltmeters from October 13, 1966 to June 22, 2004. **a)** Time-series of the NS and EW components: PE and PN refer to the EW and NS component, respectively. Interruptions longer than 75 days are denoted by an asterisk. Shown is the data curve (continuous line), the interpolation with a 2<sup>nd</sup> order polynomial (light blue line) and the interpolated linear variation (dark blue line). The linear variation amounts to 8.55 msec/year towards NW.

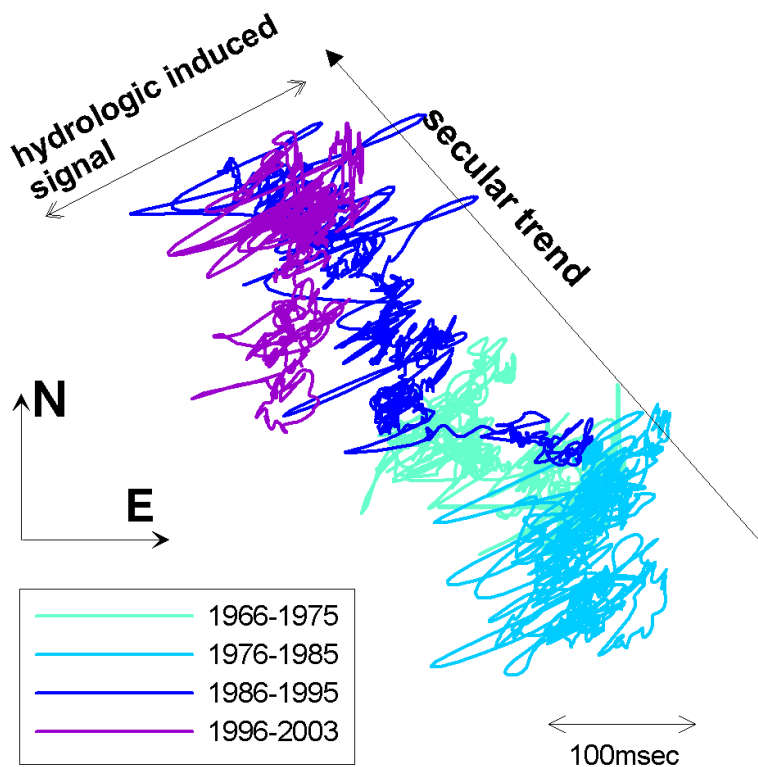
**Fig. 8.1b)** shows the tilt-vector for the yearly variation for the entire observed time interval. The yearly tilt variation is polarized along the azimuth N64E, with the maximum tilting excursions towards NEE in March and towards SWW in November.

**Fig. 8.1c)** shows the hodograph of the residual tilt-vector, cleaned from the yearly variation. The mean secular trend towards NE is visible, with inversions in the rate-directions in 1979/1981 and 1995/1997 (see **Fig. 8.1a**). The linearly interpolated secular trend amounts to 8.55 msec/yr over the time interval of 37 years. We have investigated whether the observed secular trend may be caused by long-term changes of environmental agents, which are temperature, atmospheric pressure, rainfall and ocean loading.

Long term recording of daily atmospheric pressure is also available at a station above the cave. **Fig. 8.2** shows the original daily records, and (red) the low pass filtered recording (365 days running mean) freed from the yearly variation. In the years 1961-2004 the average pressure is  $1016.05 \pm 0.058$  hPa, with the minimum value of 972.76 hPa, and the maximum value of 1041.01 hPa, and a standard deviation from the mean of 7.39 hPa. The long term trend is near to zero. These values agree with a statistical study on 30 years of data recorded in a station situated in the town of Trieste, at 6km distance. These pressure observations (1960 to 1990) have shown that the yearly average was limited within the bounds of 1018 hPa and 1014 hPa (Stravisi, 1994). We have carried out a statistical analysis of the influence of atmospheric pressure variations on the pendulum records by regression analysis. For this purpose 2 years of pressure and tilt records were band-pass filtered with a cosine taper filter with cut-off periods of 30 and 720 hours, in order to free the data from the tidal band and limit the variations to variations of 1 month. These periods were chosen, as the influence on the tidal band was calculated separately introducing also the tidal earth response, and because the tilt variations for periods longer than a month are influenced by the seasonal signal, present to a much lesser extent in the pressure data. It is found that the response to pressure from the tidal band to the band of 1 month is very small and equal to 0.2 msec/hPa (Pagot, 2001). This shows that the influence of pressure on the secular term tilting is insignificant, as it contributes to the most by less than 1 msec (1018 hPa-1014 hPa multiplied by 0.2 msec/hPa) over the entire observation interval.

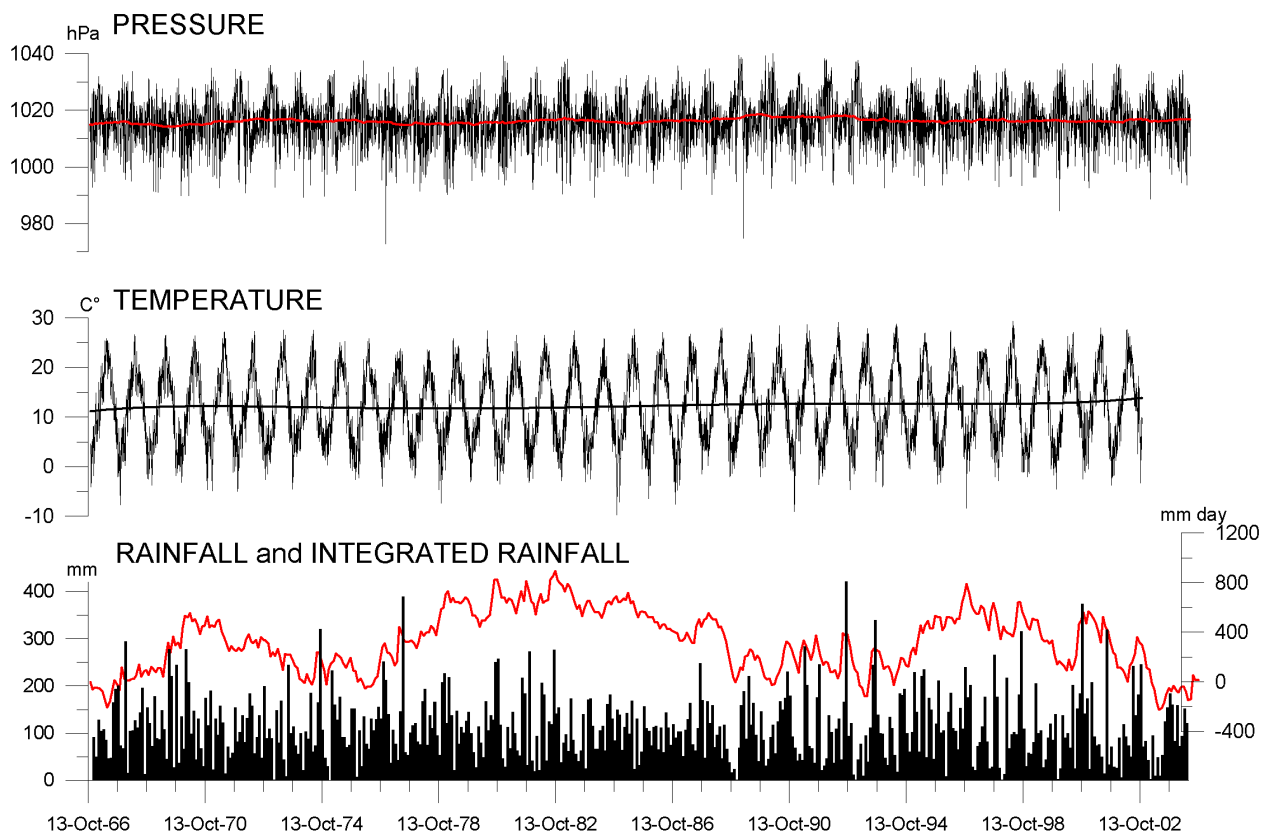


**Figure 8.1b:** Hodograph of the tilt-vector showing the periodic yearly variation; the yearly variation has been extracted from the observations by band-pass filtering. The yearly variation is polarised along a NE-SW orientation (red line, linear regression), except for some exceptional years. The yearly variation is ascribed to temperature and hydrologic effects. Inversions of the tilting direction occur in November and March.



**Figure 8.1c:** Tilt-hodograph, which shows the secular variation of the tilt-vector. The colour coding refers to different time windows. The original records with daily sampling have been cleaned from the yearly variation.

The continuous long-term measurements of temperature inside the cave are unavailable, but measurements over the years have been made. Between 1969 and 1973 the yearly average temperature in the cave varied between 11.61°C and 11.56°C, with annual average variations between 0.3°C and 0.65°C (Tommasini, 1974). The long-term daily measurements of external temperature above the cave, between the years 1967 and 2002 are available (**Fig. 8.2**). The yearly average temperature is  $12.25 \pm 0.064$  °C. Extremal values were  $-9.8$ °C and  $30.5$ °C, with a standard deviation of  $7.28$ °C. The incremental coefficient of the regression line resulted to  $0,038$ °C/year, which amounts to an increase of  $1.33$ °C in the 35 years since 1967. Considering the yearly signal of tilting and temperature variation, we compare the standard deviation of  $7.28$ °C for temperature with the amplitude of  $37.8$  msec of yearly tilting with azimuth N64E. In the case that the yearly tilting variation be entirely temperature induced, the tilt responds at the most with an amplitude of  $37.8$  msec/ $7.28$ °C, equal to  $5.2$  msec/°C. With a mean temperature increase of  $1.33$ °C in 35 years, this would amount to a maximal effect of  $5.2$ msec/°C \*  $1.33$ \*°C, equal to  $6.8$  msec, which is very small compared to the observed long term tilting of above  $300$  msec. We may conclude that the long term increase of temperature cannot be considered to have a significant effect on the long term deformation.



**Figure 8.2:** Long-term observation of local ambient factors at station Borgo Grotta: a) atmospheric pressure b) external temperature c) rainfall and d) detrended integral of rainfall. Data from the Meteorologic station of Borgo Grotta (Commissione Grotte Eugenio Boegan), except for pressure, measured at Trieste (Stravisi, 2004).

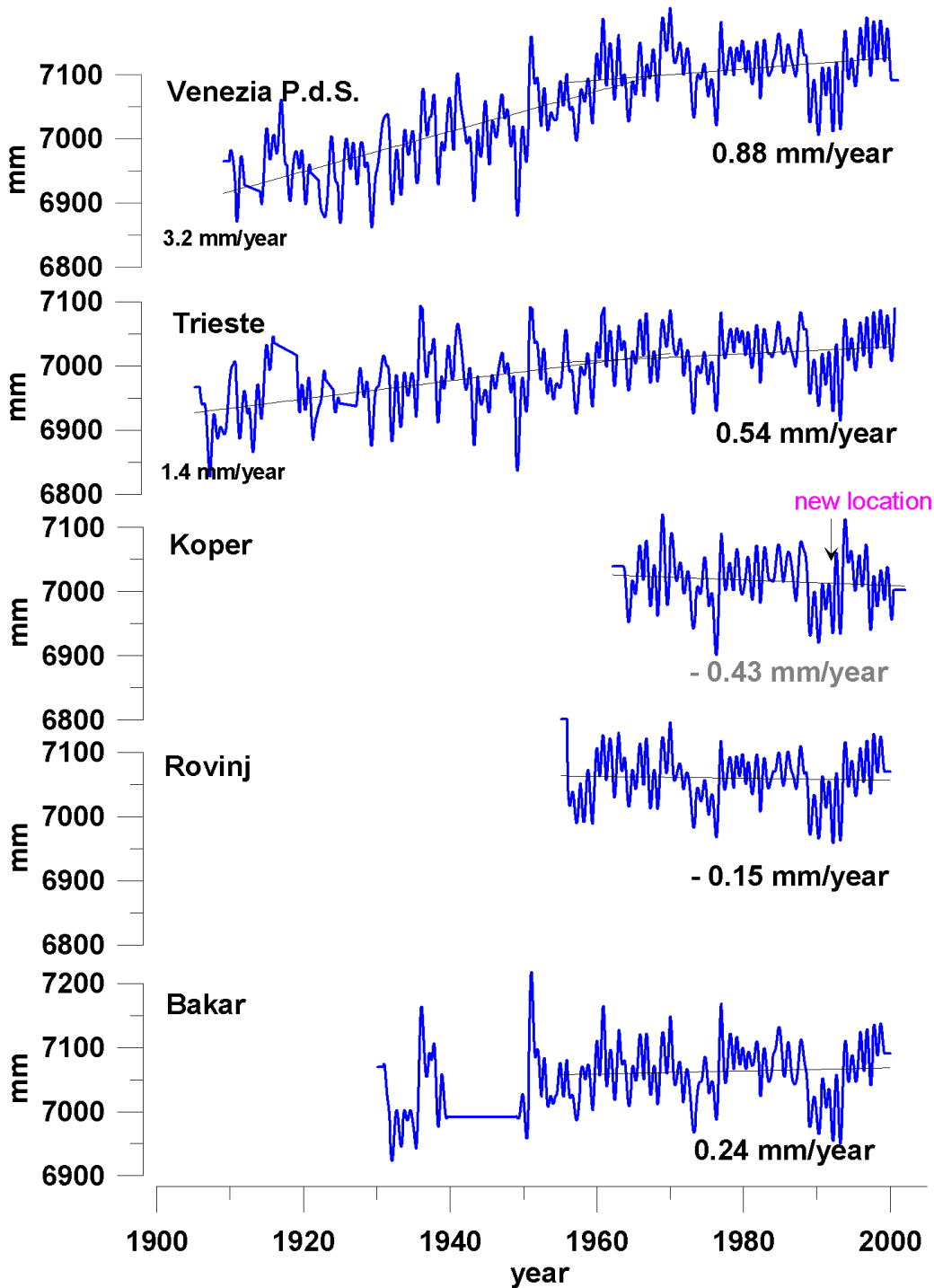
The rainfall is available for the years 1967 to 2004 as monthly amount of rain (mm), measured above the cave. The average amount of monthly rain is  $11.5 \pm 3.3$  mm, with extremal values of  $0.2$  and  $420.6$  mm, and standard deviation from the mean of  $69.6$ mm. For the purpose of comparison



with the tiltmeters, we also calculate the time integral of rainfall, and subtract the mean average increase. This corresponds to a bucket with a constant outlet and has been shown to be an appropriate first order means to evaluate the hydrologic effect in deformation measurements (e.g. Braitenberg, 1999a,b). The detrended rainfall integral (**Fig. 8.2**) shows a long-period variation, with maxima in the years 1970.4, 1982.9, 1997 and minima in 1976.4, 1993.5, 2003.6. The periodicity of this variation is much shorter than the one found in the tilt-meters (half-period of near to 20 years), and can thus be excluded to be responsible for the observed long term observation.

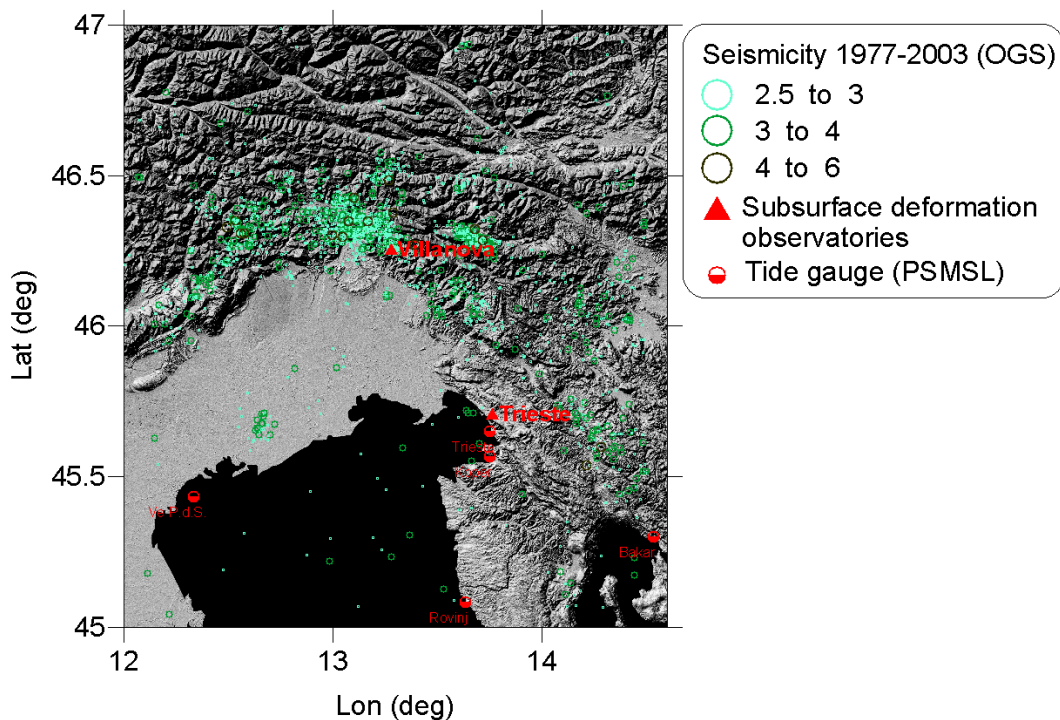
The relative variation of sea level, as measured by the tide gauge of Trieste is available for the years 1905 to 2002, with monthly sampling. The data, shown in **Fig. 8.3** are taken from the PSMSL database (PSMSL, 2004), and have been low-pass filtered in order to reduce the high-amplitude yearly variation. The low-pass filter is a Hamming-filter with cut-off period of 12 months. The mean relative sea level has increased between 1906 to 2002 by an average rate of 1.1 mm/yr, leading to a net relative increase of 11 cm. Presently, the exact calculation of the loading effect of the sea level rise on the tilt at Grotta Gigante is in progress and shall be presented in a following paper. Therefore now we may estimate the order of magnitude of the contribution of sea level rise on tilt, by considering the loading effects of the semidiurnal and diurnal tides, which have been calculated precisely. Theoretical calculations (Zadro and Chiaruttini, 1975) have shown that ocean loading of the Adriatic on the pendulums is near to linearly proportional to the sea level in the gulf of Trieste, linear coefficients being -0.19 and -0.18 msec/cm for the NS and EW components for the diurnal tides and -0.14 and -0.19 msec/cm for the NS and EW components for the semidiurnal tides, for an increase in sea level (N and E directions both positive). We can use these coefficients to estimate the order of magnitude of the loading due to the sea-level rise in the Trieste gulf. By using the greater of the coefficients (0.19 msec/cm), the overall loading effect due to a sea level rise of 11 cm over the entire time interval is of 2 msec. Also allowing this factor to be underestimated by 100%, which it is unlikely to be, the effect is negligible with respect to the observed secular tilting of 316 msec over the same time interval.

We have analysed the tide gauge data of Trieste also with the aim of detecting a differential relative sea level change with respect to other PSMSL stations of the northern Adriatic Sea. The locations available in the database for our purpose are Venezia, Koper, Luka Koper, Rovinj, and Bakar (**Fig.8.4**). Among the different stations available for Venice, we choose the station Venezia Punta della Salute, as it has the longest observed time interval. Koper and Luka Koper refer to the same town, but the station Koper was moved to a new location in 1992 and given the new name Luka Koper. All data were processed in the same manner as described before for the Trieste station. We determined the relative sea level rise by linear regression analysis over a time interval common to the different stations, which extends from 1955 to 2000. **Fig. 8.3** shows the different stations, the linear interpolation, and the value of the interpolated sea level change. The evident change in sea level rate in Venice is a known fact and is ascribed to the ceasing of subsurface anthropogenic water-withdrawal up to 1970 (Tiezzi and Marchettini, 1997). The cause of the change in the rate at the Trieste station at approximately the same time is of unknown origin. The presence of a correlated oscillation of decadal period is observed in all stations. It has been shown, that the interval of 45 years is on the lower limit of determining average sea level trends (Douglas, 2001), due to the decadal variability of sea level curves. Nonetheless in our case the relative trend difference estimates are reliable, as they refer to the same time interval and because the decadal variation is highly correlated in all stations. We find that the Venice station has the highest sea level rate (0.88 mm/yr), followed by the Trieste station (0.55 mm/sec). The station Koper cannot be considered, as there seem to be some problems after the shift to the new station position, as the decadal variations is no longer correlated with the other stations.



**Figure 8.3:** Monthly record of tide gauge measurement of sea level in the upper Adriatic, including the locations Venezia Punta della Salute, Trieste, Koper, Rovinj and Bakar. The regression lines are calculated on the common time interval of years 1955-2000. For Trieste and Venice, furthermore the mean sea level rise has also been calculated for the years 1905-1970 and 1907-1970, respectively.

The station Bakar has a lower trend of 0.24 mm/yr, whereas the station Rovinj, seated on the Istria promontory shows a lowering of the sea level by 0.15 mm/yr. The differential rate between Trieste and Rovinj is thus 0.7 mm/sec, which we will see further down is compatible with the observations of submerged tidal notches.



**Figure 8.4:** Topographic map of the investigated area, with the locations of the Long-base pendulum Grotta Gigante station (Trieste, Italy) and the tilt-strain observatory Villanova (Italy). Also shown are the tide-gauge stations of the PSMSL database (PSMSL, 2004) and the local seismicity (OGS, 2004).

The NW secular term tilting observed by the pendulum and the differential sea level change of the North Adriatic PSMSL stations are very interesting, as these observations are in agreement with geological-geomorphological evidences of a Plio-Quaternary tilting of the Karst-Plateau. The NW tilting of the Karst has been proposed by Carulli et al. (1980) and recently by Antonioli et al. (2004) on the basis of the following observation. A karstic cave at the depth of -180 m has been found 30 km Northwest of Trieste by drilling a borehole (Albrecht and Mosetti, 1987). The cave must have formed above sea level, as subsurface water erosion was responsible for its formation. Another observation was that of a sequence of submerged marine terraces in the gulf of Trieste. The uppermost terrace at the level of -20 m was attributed (Antonioli et al., 2004) to the MIS 5.5 (marine isotope stage, about 125 ka). This marine terrace was correlated by Albrecht and Mosetti (1987) to a sediment horizon of the drill-log seated at the depth of 75 m. If the timing of those features is correct, this observation would imply a NW tilt of the coast by the amount of 3 msec/yr (55 m depth difference on a distance of 30 km in 125 000 years). Another piece of evidence comes from the presence of a topographic palaeo-surface separated by a visible scarp due to a lithological discontinuity (Flysch-limestone) highlighting the tilting of the Karst area by 60-70 m over a stretch of 50 km in SE-NW direction (Antonioli et al., 2004). Furthermore the depth of marine notches along the coast, ranging from north of Trieste to the Croatian Coast was studied. North of Trieste a submerged notch was found at the depth of -1.7m (Antonioli et al., 2004), whereas along the nearby

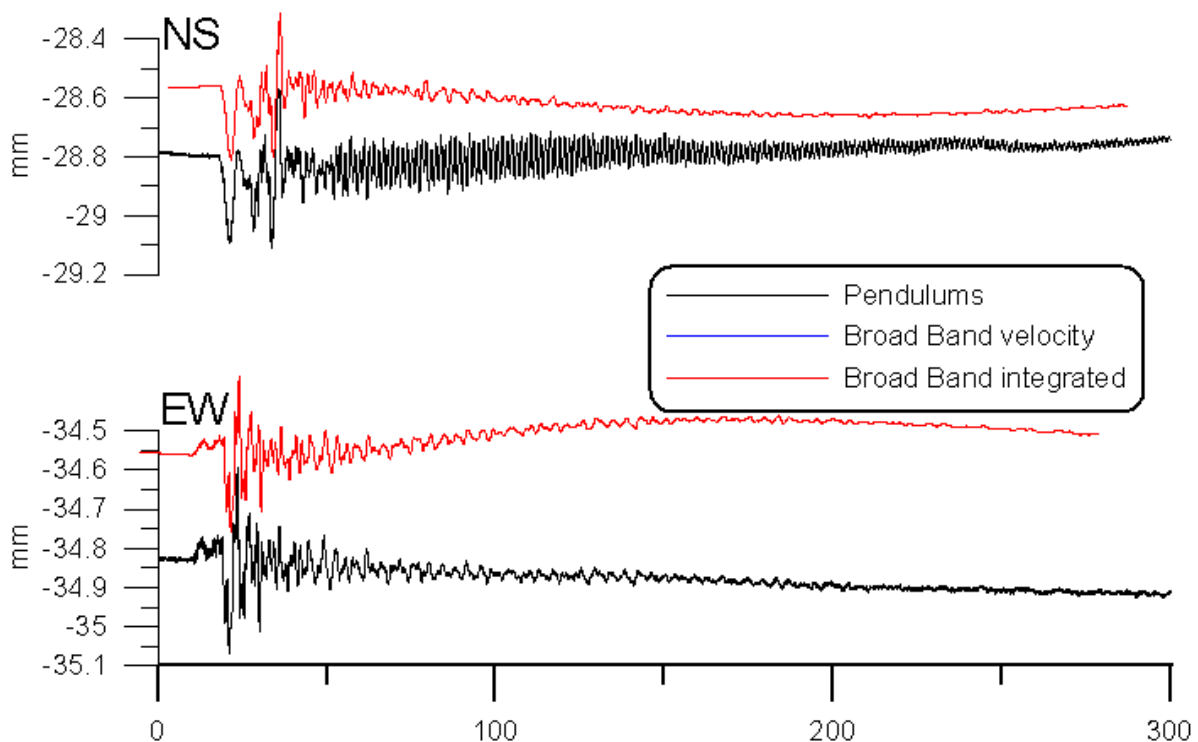
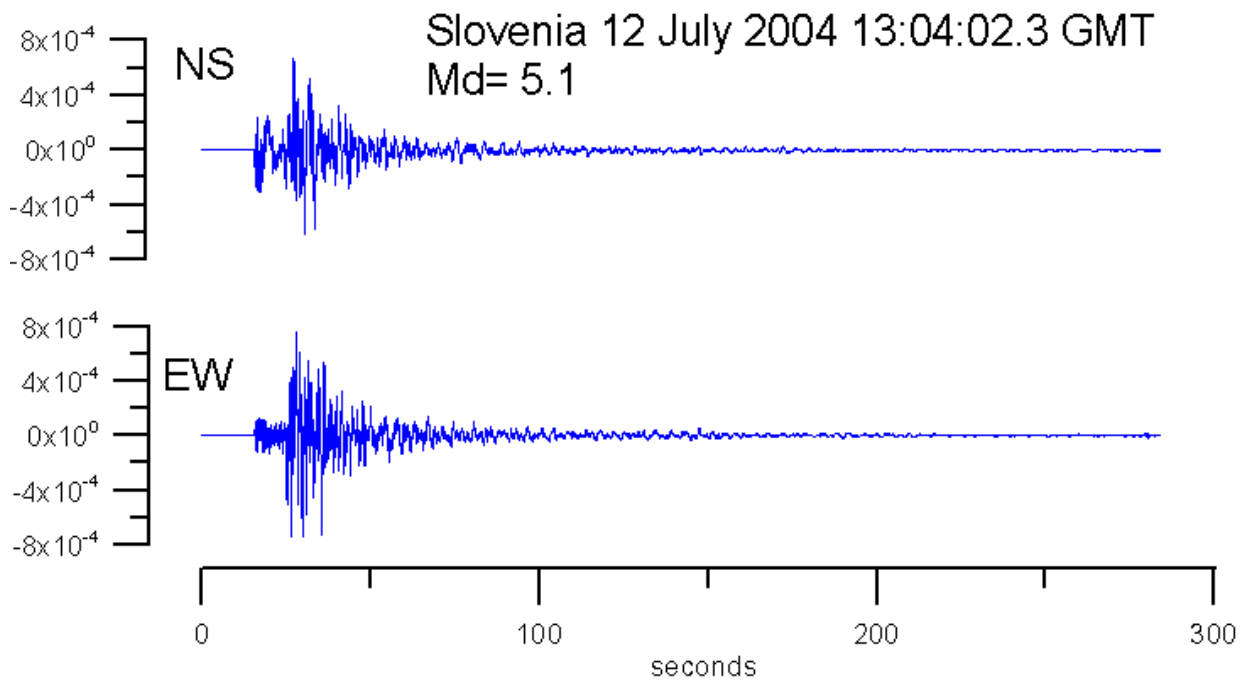
Istria Peninsula the notch was found at the shallower depth of  $-0.6\text{m}$  (Fouache et al., 2000). According to Fouache et al. (2000) this notch corresponds to the sea level of Roman antiquity, i.e. at 2000 years. This last observation translates into a differential vertical movement rate of  $0.5\text{ mm/yr}$ , between Trieste and the Istria Peninsula, which is on the same order of magnitude of what we found for the differential movement of the tide gauges ( $0.7\text{ mm/yr}$ ).

The secular deformation indicates a NW tilting of the cave, which seems to be a regional signal that can be extrapolated to the Karst block into which the cave has been cut. The observed tilting is in agreement with geomorphological observations and differential relative sea level changes observed along the coastline. The NW tilting rates have had an acceleration and slowdown, with minimal tilting rates in the years 1979-1981 and 1995-1997. The observed long term tilting and the rate changes cannot be explained by atmospheric effects as temperature, pressure or hydrologic system changes or either sea loading effects. Although the records are influenced by these agents, the agents do not present the secular term signals we find in the records of the pendulums. It must be concluded that the observed secular term deformations are of tectonic origin.

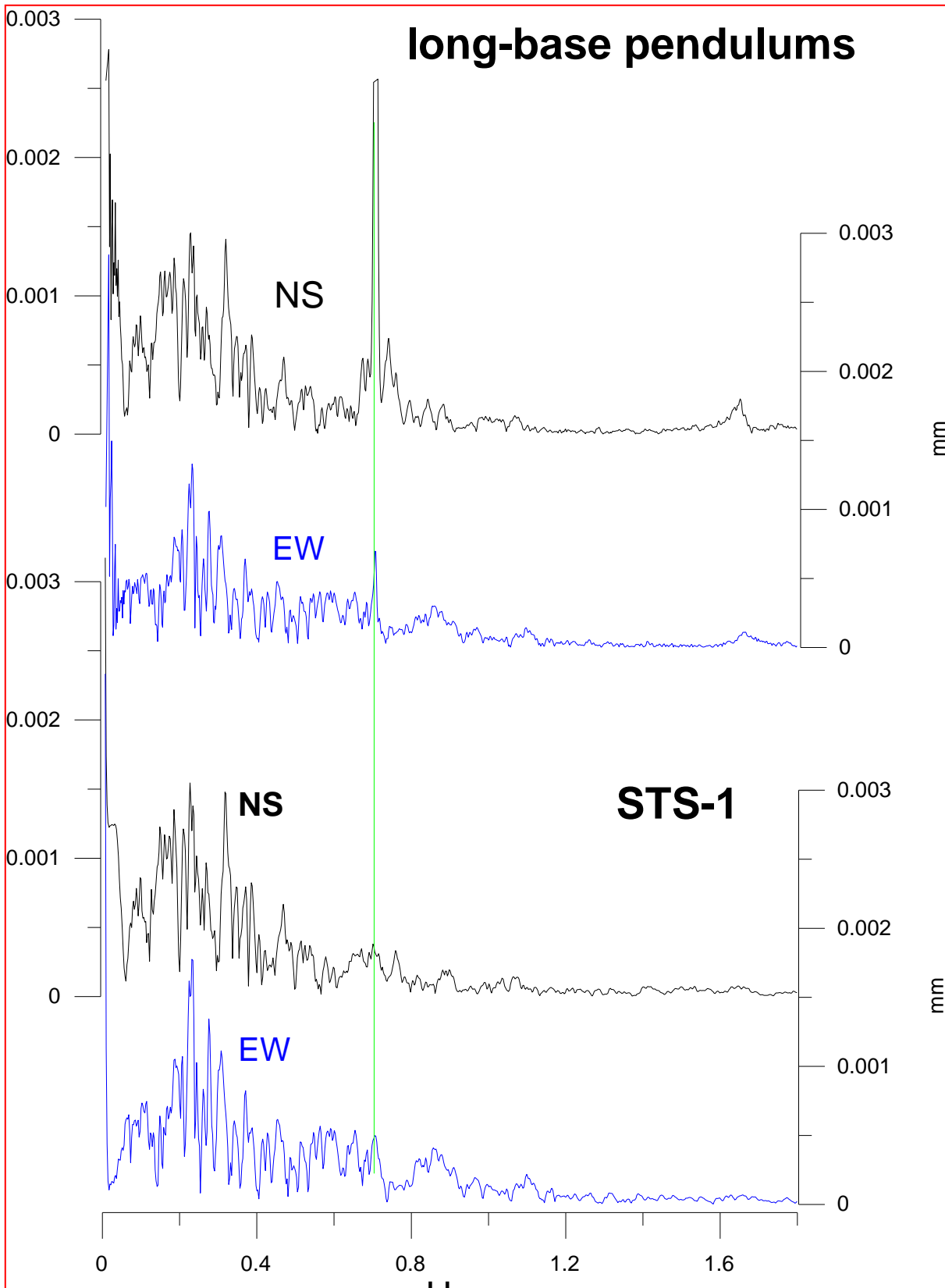
### **9 The recording of the Bovec Slovenian seismic event, July 12, 2004, $M=5.1$**

On July 12, 2004 a  $M=5.1$  event occurred in Slovenia near the border to Italy in the exact epicentral position of a seismic event of similar magnitude and fault plane solution which occurred on 12 April 1998 with  $M=5.6$ . During the time of both seismic events the subsurface crustal deformation station of Villanova (Italy) at about 30 km epicentral distance was operative with 2 tiltmeters and 3 horizontal extensometers. For both seismic events the coseismic tilt and linear deformation at the station were observed. The event of 2004 was preceded 15 days ahead by a linear extension orthogonal to the strike of the fault of 100 nstrain which occurred during the interval of 2 hours. Here we show the seismologic observations of the event obtained from both the long base pendulums and the Broad band seismometer present in the Grotta Gigante.

The records are shown in **Fig 9.1**: the upper graph shows the velocity trace from the Broad Band seismometer (STS-1), the lower graph the time integral of the STS-1 and the recording of the pendulums. There is good agreement between the two instruments, when considering the recorded amplitude. The time integration of the STS-1 introduces a long period signal, which is not present in the long base pendulums. The NS component of the long base pendulum is affected by a mono-frequency oscillation, with period equal to 1.3 sec. The spectrum of the time integrated STS-1 record and of the long base pendulums is shown in **Fig. 9.2**. The anomalous periodicity on the NS component has revealed to be a resonance effect to vertical movement, as we discovered from the impulse-like excitation of both NS and EW pendulum beams. The resonance is absent on the EW component. It shall be investigated in the future what the resonance on the NS component is due to and how it can be reduced.



**Fig. 9.1:** The observation of the Bovec (Slovenia) event of July 2004. Upper trace shows the velocity record from the STS-1 in Grotta Gigante, lower trace the record of displacement from the integrated time series of the STS-1 and from the long base pendulums. On the NS component the long base pendulum a resonance at 1.3 sec occurs.



**Fig. 9.2:** Amplitude spectra for the displacement time series from STS-1 and the long base pendulums of Grotta Gigante for the Bovec (Slovenia) event of July 2004. The resonance frequency (period=1.3 sec) on the NS component is evidenced by the vertical green line.

## 10 Ringraziamenti

Si ringrazia il gruppo di Sismologia del DST e l'OGS per la disponibilità dei dati del sismografo Broad Band della Grotta Gigante ed il Gruppo di Oceanografia e Meteorologia del DST 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.

## 11 Riferimenti bibliografici- References

- Antonioli, F., Carulli, G.B., Furlani, S., Auriemma, R., Marocco, R., 2004. The enigma of submerged marine notches in northern Adriatic Sea. *Quaternaria Nova*, in press.
- Bolt, B.A., Marussi, A. 1962. Eigenvibrations of the earth observed at Trieste, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 6, 299-311.
- Bozzi Zadro, M., Marussi, A. 1967. Polarization and total energy spectra of the eigenvibrations of the earth recorded at Trieste, *Geophys. J. R. astr. Soc.*, 12, 425-436.
- Braitenberg, C., 1999. Estimating the hydrologic induced signal in geodetic measurements with predictive filtering methods. *Geophys. Res. Letters* 26, 775-778.
- Braitenberg, C., 1999. The Friuli (NE Italy) tilt/strain gauges and short term observations. *Annali di Geofisica*, 42, 1-28.
- Braitenberg, C., 1999. The hydrologic induced strain – a review. *Marees Terrestres Bulletin D'Informations* 131, 1071-1081.
- Braitenberg, C., Nagy, I., Negusini, M., Romagnoli, C., Zadro, M., Zerbini S., 2001. Geodetic measurements at the northern border of the Adria plate, *J. of Geodynamics*, 32, 267-286
- Braitenberg, C., Zadro, M., 1999. The Grotta Gigante horizontal pendulums – instrumentation and observations. *Boll. Geof. Teor. Appl.*, 40, 577-582.
- Brusatin M., (2002) Osservazioni geodesico-geofisiche in cavità nella banda  $4 \cdot 10^{-7} - 1$  Hz ed effetti di sito, Tesi di laurea in Scienze Geologiche, a.a. 2001-2002.
- Carulli, G.B., Carobene, L., Cavallin, A., Martinis, B., Onofri, R. 1980. Evoluzione strutturale plio-quadernaria del Friuli e della Venezia Giulia. In: "Contributi preliminari alla realizzazione della Carta neotettonica d'Italia", pubbl. n° 356 P.F. Geodinamica, C.N.R., 489-545.
- Chiaruttini C., (1973) Effetti di carico su una terra elastica stratificata, Tesi di laurea in Fisica Terrestre, a.a. 1972-1973.
- Douglas, B.C., 2001. An introduction to sea level Sea level change in the era of the recording tide gauge, In: Douglas, B.C., Kearney, M.S., Leatherman, S.P., (Eds.), *Sea level rise*. Academic Press, San Diego, pp. 1-233.
- Ebblin C. and Zadro M.,(1980) Strain determinations with tiltmeters in cavities. *Tectonophysics*, 68.
- Fouache, E., Faivre, S., Dufaure, J.J., Kovacic, V., Tassaux, F. 2000. New observations on the evolution of the Croatian shoreline between Poreč ad Zadar over the past 2000 years. *Z. Geomorph. N. F., Suppl.-Bd.* 122, 33-46.
- Marussi, A., 1959. The University of Trieste station for the study of the tides of the vertical in the Grotta Gigante. *Proceedings of the III Int. Symposium on Earth Tides*, Trieste, 1960, 45-52.

- 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, 45-52.
- Masters, T.G., Widmer, R. 1995. Free oscillations: frequencies and attenuations, in: Global Earth Physics, A Handbook of Physical Constants, AGU reference shelf 1.
- NEIC, 2004. USGS Earthquake Hazards Program, <http://earthquake.usgs.gov/>
- OGS, 2005. Ist. Nazionale di Oceanografia e Geofisica Sperimentale, Centro di Ricerche Sismologiche, Udine, Italia, <http://www.crs.inogs.it/>
- Pagot E.,(2001) 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.
- Polli S., (1959) La propagazione delle maree nell'Adriatico. Atti X° Convegno Ass. Geof. It.
- PSMSL, 2004. Permanent Service for Mean Sea Level, Proudman Oceanographic Laboratory, Liverpool, United Kingdom, <http://www.pol.ac.uk/psmsl/>
- Rodgers, P.W., 1968. The response of the horizontal pedulum seismometer to rayleigh and love waves, tilt, and free oscillations of the earth. Bulletin Of the Seismological Society of America 58/ 5, 1384-1406.
- Romeo G., (2000) Digitization of optical lever instruments – Annali di Geofisica, Vol 43 545-557
- SRTM, 2005. Shuttle Radar Topography Mission, <http://srtm.usgs.gov/>.
- Stravisi, F., 1994. Trieste 1961-1990 Pressione atmosferica: dati mensili e statistiche. Università' di Trieste, Ist. di Geodesia e Geofisica, Internal Report 94/1,1-27.
- Stravisi, F. (2004). Pressione atmosferica a Trieste - 2003, Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Trieste, internal report,101, (04/3), 47 pag.
- Tiezzi, E., Marchettini, N.,1997. Venezia e il problema delle acque alte. Il rischio di danno al patrimonio urbano a causa della crescita relativa del livello del mare. Quaderni Trimestrali Consorzio Venezia Nuova, 5/2, 23-45.
- Tommasini, T., 1974. Ventitre' anni di termogravimetria alla Grotta Gigante sul Carso Triestino, 1951-64. Societa' Alpina delle Giulie, Atti e Memorie della Commissione Grotte Eugenio Boegan, Trieste, pp. 51-64.
- Zadro M. and Chiaruttini C., (1975) Loading effects of the Mediterranean tides. In: Proceedings of the Seventh Symposium on Earth Tides, 495-501.
- Zadro M., (1972) Earth tides ocean load effects recorded at Trieste. Boll. Geof. Teor. Appl., 14, 192-202.
- Zadro, M., Braitenberg, C., 1999. Measurements and interpretations of tilt-strain gauges in seismically active areas. Earth Science Reviews, 47, 151-187.
- Zadro, M., Chiaruttini, C., 1975. Loading effects of the Mediterranean tides. In: Proceedings of the Seventh Symposium on Earth Tides, 495-501.

## 12 Pubblicazioni recenti del gruppo di lavoro (dal 1999)

- Garavaglia M., 1999. Misure di radon e di deformazione in un'area sismica, Tesi di Dottorato (relatore Prof. M. Zadro) Università di Trieste.
- Garavaglia M., Braitenberg C., Zadro M. and F.Quattrocchi (1999) Radon measurements in soil and water in the seismic Friuli area, Il Nuovo Cimento, 22, 415-422.
- Braitenberg C. (1999) Estimating the hydrologic induced signal in geodetic measurements with predictive filtering methods. Geophys. Res. Letters, 26, 775-778.



- Braitenberg C. (1999) The hydrologic induced strain – a review. *Marees Terrestres Bulletin D'Informations*, 131, 1071-1081.
- Rossi G., Zadro M., Ebblin C., 1999. "Geodynamic processes at the northern boundary of Adria plate: strain-tilt measurements and modelling", in: *Proceedings of Second IAG Symposium "Geodynamics of the Alps-Adria Area by means of Terrestrial and Satellite Methods"*, Colic K. and Moritz H. (Eds): *Proc. of the Second International symposium "Geodynamics of the Alps-Adria area by means of terrestrial and Satellite methods, Zagreb and Graz, 1999:271-282.*
- Dal Moro G., Zadro M., 1999. Remarkable tilt-strain anomalies preceding two seismic events in Friuli (NE Italy): their interpretation as precursors, *Earth and Planetary Science Letters*, 170, 119-129.
- Zadro M. and Braitenberg C. (1999) Measurements and interpretations of tilt-strain gauges in seismically active areas. *Earth Science Reviews*, 47, 151-187.
- Braitenberg C. (1999) The Friuli (NE Italy) tilt/strain gauges and short term observations. *Annali di Geofisica*, 42, 1-28.
- Braitenberg C., Zadro M. (1999) The Grotta Gigante horizontal pendulums – instrumentation and observations. *Boll. Geof. Teor. Appl.*, Vol. 40, N°. 3/4, 577-582.
- Braitenberg C. and Zadro M. (1999) Iterative 3D gravity inversion with integration of seismologic data. *Boll. Geof. Teor. Appl.*, Vol. 40, N°. 3/4, 469-476.
- Braitenberg C., Zadro M., Fang J., Wang Y., Hsu H.T. (2000) Gravity inversion in Quinghai-Tibet plateau, *Physics and Chemistry of the Earth*, 25/4, 381-386.
- Braitenberg C., Zadro M., Fang J., Wang Y., Hsu H.T. (2000) The gravity and isostatic Moho undulations in Qinghai-Tibet plateau, *Journal of Geodynamics* 30/5, 489-505.
- Braitenberg, C. (2000) Non-random spectral components in the seismicity of NE Italy, *Earth Planet. Science Lett.*, 179/2, 379-390.
- Dal Moro G., Garavaglia M., Zadro M., 2000. Tilt-strain measurements in the NE Italy seismic area: Precursor analysis and atmospheric noise effects. *Physics and Chemistry of the Earth*, 25/3, 271-276.
- Garavaglia M., Dal Moro G., Zadro M., 2000. Radon and tilt measurements in a seismic area: Temperature effects. *Physics and Chemistry of the Earth*, 25/3, 233-237.
- Jentsch, G., Malischewsky, P., Zadro, M., Braitenberg, C., Latynina, A., Tikhomirov, A. and Verbitzky, T., (2001): Seismicity and deformation in areas of high and low seismic hazard. *Journal of the Geodetic Soc. of Japan*, 47, 82-87.
- Braitenberg, C., and Zadro, M. (2001) Time series modeling of the hydrologic signal in geodetic measurements, *Journal of the Geodetic Soc. of Japan*, 47, 95-100.
- Dal Moro G., Ebblin C., Zadro M. (2001). The FEM in the interpretation of tilt/strainmeter observations in a cave: Air pressure loading effects. *Journal of the Geodetic Society of Japan*, 47/1, 88-94.
- Ebbing, J., Braitenberg, C. and Götze H.-J. (2001) Forward and inverse modelling of gravity revealing insight into crustal structures of the eastern Alps, *Tectonophysics*, 337, 191-208.
- Braitenberg, C., Nagy, I., Negusini, M., Romagnoli, C., Zadro, M. and Zerbini S. (2001) Geodetic measurements at the northern border of the Adria plate, *Millennium Issue of the Journal of Geodynamics*, Vol. 32, N. 1/2, 267-286.
- Braitenberg, C., Ebbing, J., Götze H.-J. (2002). Inverse modeling of elastic thickness by convolution method - The Eastern Alps as a case example, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 202, 387-404.
- Braitenberg, C., Wang, Y., Fang, J., Hsu, H.T. (2003) Spatial Variations of flexure parameters over the Tibet-Quinghai Plateau, *Earth Planet. Sci. Lett.*, 205, 211-224.

- Braitenberg, C., Ebbing, J., Götze, H.-J. (2003) New inputs from the transalp transect to the understanding of isostasy in the Eastern Alps, (Extended Abstract), Transalp Conference, Trieste (Italy), 10-12 February, 2003, *Memorie di Scienze Geologiche*, Vol. 54, 75-78.
- Götze H.-J., Schmidt S., Braitenberg, C. (2003) A new buried Maar near Kreckwitz (East-Saxony)? *Z. geol. Wiss.*, Berlin, 31, 4-6: 343-352.
- Ebblin, C., Zille, A., Rossi, G. (2004) The running-cone for the interpretation of conical fold geometries: an example from the Badia Valley, Northern Dolomites (NE-Italy). *J. Of Structural Geology*, in press.
- Zille (2004) 3-D imaging of active structures with earthquake locations, Friuli seismic region, NE-Italy, *Tesi di Dottorato*, Tutore: Prof. C. Ebblin.
- Braitenberg, C., Pagot, E., Wang, Y., Fang, J. (2004) Bathymetry and crustal thickness variations from gravity inversion and flexural isostasy, in: *Satellite Altimetry for Geodesy, Geophysics and Oceanography*, C. Hwang, C.K. Shum, J. Li (Eds.), Springer Verlag, 143-149, ISBN 3-540-420211-0.
- Braitenberg, C., Nagy I., Romeo G., Taccetti Q. (2004) The very broad-band data acquisition of the long-base tiltmeters of Grotta Gigante (Trieste, Italy) in: *Progress in Geodesy and Geodynamics*, Zhu Yaozhong and Sun Heping (Eds.), 457-462, Hubei Science and Technology Press, Wuhan, ISBN 7-5352-3194-2/P.10.
- Braitenberg C., I. Nagy, S. Papacchioli (2004) I pendoli della Grotta Gigante, *Rassegna Tecnica del Friuli Venezia Giulia*, anno LV, 16-20.
- Caporali A., Braitenberg C., Massironi M. (2005) Geodetic and Hydrological Aspects of the Merano Earthquake of July 17, 2001, *J. of Geodynamics*, in press.
- Ebbing J., C. Braitenberg and H.-J. Götze (2005) The lithospheric density structure of the Eastern Alps, accepted *Tectonophysics*
- Zanolla C., Braitenberg C., Bernabini M., Bram K., Ebbing J., Götze H.-J., Giammetti S., Longoni R., Meurers B., Nicolich R., Palmieri F. (2005) Compilation of gravity data in the Eastern Alps, accepted *Tectonophysics*
- 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 Sumatra-Andaman Islands M=9 earthquake of December 2004, submitted *J. of Geodynamics*