

# Rapporti tecnici INGV

**La stazione sismica in pozzo di  
Sansepolcro (AR): ricerca del sito,  
installazione e primi risultati**

# 86



## **Direttore**

Enzo Boschi

## **Editorial Board**

Raffaele Azzaro (CT)

Sara Barsotti (PI)

Mario Castellano (NA)

Viviana Castelli (BO)

Anna Grazia Chiodetti (AC)

Rosa Anna Corsaro (CT)

Luigi Cucci (RM1)

Mauro Di Vito (NA)

Marcello Liotta (PA)

Lucia Margheriti (CNT)

Simona Masina (BO)

Nicola Pagliuca (RM1)

Salvatore Stramondo (CNT)

Andrea Tertulliani - coordinatore (RM1)

Aldo Winkler (RM2)

Gaetano Zonno (MI)

## **Segreteria di Redazione**

Francesca Di Stefano - coordinatore

Tel. +39 06 51860068

Fax +39 06 36915617

Rossella Celi

Tel. +39 06 51860055

Fax +39 06 36915617

[redazionecen@ingv.it](mailto:redazionecen@ingv.it)



# Rapporti tecnici INGV

## LA STAZIONE SISMICA IN POZZO DI SANSEPOLCRO (AR): RICERCA DEL SITO, INSTALLAZIONE E PRIMI RISULTATI

Riccardo M. Azzara e Francesco Bergamaschi

INGV (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Sezione di Sismologia e Tettonofisica, Osservatorio Sismologico di Arezzo)

# 86



## Indice

Introduzione	5
1. Analisi dei segnali per la ricerca del sito	6
1.1 Misure di rumore sismico ambientale	6
1.2 Valutazione degli effetti di amplificazione locale	10
1.3 Modellazioni numeriche	13
2. Installazione della stazione sismica in pozzo	16
3. Orientazione del sensore in profondità	20
4. Analisi dei dati registrati dalla stazione in pozzo	23
5. Registrazione di eventi sismici e uso della stazione come riferimento per effetti di sito	26
6. Conclusioni	29
Nota	29
Ringraziamenti	29
Bibliografia	30



## Introduzione

L'attività descritta in questo rapporto è stata svolta nell'ambito della Convenzione siglata fra Regione Toscana e INGV (2004 – 2007) avente come tema il “Monitoraggio sismico e la valutazione di pericolosità sismica in centri urbani significativi della Valtiberina” [Bergamaschi et al., 2005 e 2006a; Azzara et al., 2007].

La stazione in pozzo di Sansepolcro fa contemporaneamente parte di una rete locale della Valtiberina, sottoinsieme della Rete Sismica Nazionale dell'INGV e di una rete sismica mirata allo studio delle amplificazioni locali. La prima consta di 8 stazioni sismiche, 6 acquisite in tempo reale nell'ambito della RSN e due (Acquacetra e Sansepolcro) acquisite in locale, la seconda è costituita da tre stazioni sismiche installate nell'area urbana di Sansepolcro

La scelta di un sito per l'installazione di una stazione in pozzo richiede una particolare attenzione e costituisce spesso un'incognita legata al fatto che, a differenza di quanto avviene per le stazioni di superficie, non è possibile conoscere a priori attraverso misure sperimentali quello che sarà il livello del rumore sismico in profondità, ma bisogna invece fare delle previsioni utilizzando ciò che si registra in superficie, confrontandolo con gli andamenti rilevati in altri siti noti o, se sono note la stratigrafia e il modello di velocità, modellando la risposta di superficie per ricostruire quella in profondità (sull'argomento vedi ad es.: [Hutt et al., 2002]).

In questa particolare circostanza un valido ausilio alla individuazione del sito attraverso misure di superficie è venuto dalla presenza di una stazione sismica in pozzo, installata fin dal 2004 a Città di Castello, all'estremo meridionale dell'Alta Valtiberina. I dati registrati dalle due stazioni sismiche di Città di Castello (quella di profondità è stata infatti affiancata per un periodo di circa un anno da una stazione di superficie) si sono rivelati estremamente utili per definire quanto fosse soddisfacente il livello di rumore in superficie del sito prescelto.

L'esecuzione di misure di rumore è stata preceduta da numerosi sopralluoghi effettuati insieme a funzionari della Regione Toscana, in modo da restringere la ricerca a quelle aree già individuate dalla Regione per l'esecuzione di sondaggi geognostici nell'ambito del programma regionale di Valutazione degli Effetti Locali nei centri urbani, edifici strategici e rilevanti (Programma VEL) e nell'ambito dell'attività rivolta alla riduzione del rischio sismico nelle aree produttive prevista nel Documento Unico di Programmazione della Regione Toscana per l'utilizzo dei fondi di provenienza europea (DOCUP Toscana 2000-2006), all'interno del quale sono state programmate una serie di indagini geologiche, geofisiche e geotecniche sui terreni, finalizzate alla valutazione degli effetti locali (microzonazione sismica) nelle aree produttive.

Fin dall'inizio, con l'intento di utilizzare la stazione sismica in pozzo come riferimento per lo studio di effetti di sito in aree edificate, la ricerca si è orientata verso i principali centri urbani significativi della Valtiberina, sono stati infatti ispezionati siti in zona Sansepolcro, Anghiari, Monterchi, Pieve Santo Stefano. La rosa delle possibili collocazioni della stazione si è via via ridotta in base a considerazioni di carattere logistico, di tempistica della realizzazione della perforazione, di possibilità di una modifica della destinazione d'uso dei locali o delle aree prescelte.

In base a tali considerazioni era inizialmente stato prescelto un sito posto in località Tavernelle, nei pressi di Anghiari, sul bordo occidentale della Valle. Il sito, caratterizzato da un basso livello del rumore sismico di fondo [Bergamaschi et al., 2005], dava assicurazioni anche riguardo agli aspetti logistici, l'allaccio dell'energia elettrica e, successivamente, della linea telefonica per il trasferimento dati. Esso costituiva una buona scelta anche dal punto di vista della copertura azimutale per la rete di monitoraggio riguardo l'utilizzo dei dati per la localizzazione di eventi all'interno della Valle.

La scelta di Tavernelle si è purtroppo dimostrata non praticabile a causa del prolungarsi eccessivo dei tempi di realizzazione del sondaggio.

Ciò ha spinto alla ulteriore ricerca di un altro sito idoneo che è stato definitivamente individuato all'interno del giardino prospiciente la palestra della scuola media statale “M. Buonarroti” nell'area urbana di Sansepolcro. La scelta finale consente di raggiungere due scopi: contribuire al monitoraggio della microsismicità della Valle e costituire un riferimento per l'esecuzione di studi di effetti locali nell'area di Sansepolcro. L'installazione è avvenuta in via definitiva nel Novembre 2006.

# 1 Analisi dei segnali per la ricerca del sito

## 1.1 Misure di rumore sismico ambientale

La scelta di un sito per l'installazione di una stazione sismica deve soddisfare essenzialmente due requisiti: presentare un livello di rumore sismico ambientale sufficientemente basso ed essere "praticabile" da un punto di vista tecnico e logistico.

Negli ultimi anni la natura del rumore sismico ambientale è stata oggetto di approfonditi studi mirati a determinare le principali caratteristiche della sua natura sia in termini di sorgenti che lo producono sia del suo contenuto in frequenza e della tipologia di onde che lo costituiscono (ad es.: [SESAME Project, 2004]).

In maniera molto schematica si può affermare che molte attività umane (industrie, traffico, etc.) contribuiscono a generare il cosiddetto "cultural noise", con frequenze di solito superiori a 1 Hz (di importanza locale); mentre le interazioni tra effetti atmosferici, oceani e Terra generano il rumore microsismico, con frequenze tra 0.01 Hz e 0.5 Hz (di rilevanza regionale o continentale).

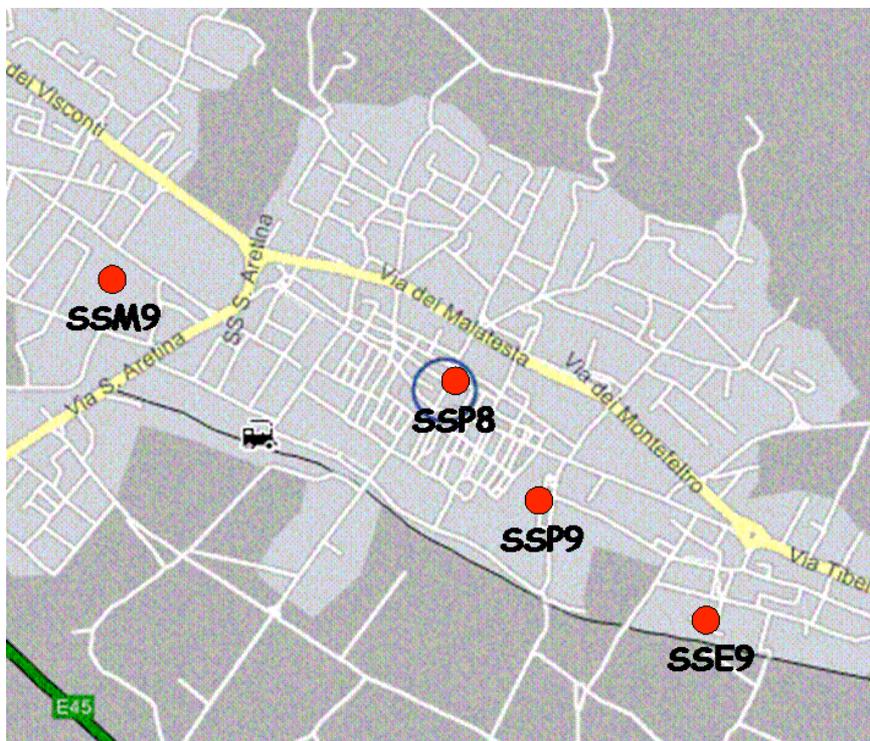
Dal punto di vista della scelta di un sito, il livello del rumore sismico ambientale è l'indicatore della qualità di una stazione sismica in termini di capacità di detezione degli eventi sismici relativamente all'ampiezza del segnale e alla sua frequenza. Secondo lo standard usuale una misura di rumore in un sito che potrà ospitare una stazione sismica, prevede l'esecuzione di una registrazione della durata di alcune ore, meglio ancora se di qualche giorno.

La strumentazione temporanea utilizzata viene installata in modo da riprodurre per quanto possibile quelle che saranno le condizioni della stazione permanente.

Le registrazioni vengono poi analizzate al fine di ottenere delle curve di densità di potenza spettrale (PSD) da confrontare con le curve di riferimento note in letteratura come curve di Peterson (1993).

Nel caso della ricerca di Sansepolcro, sono stati valutati quattro siti all'interno della città prima di decidere quale fosse quello idoneo.

La Fig. 1.1 mostra l'ubicazione delle stazioni sismiche installate a Sansepolcro, posizionate dove erano presenti informazioni di carattere stratigrafico e geotecnico provenienti dalle campagne di misura promosse dalla Regione Toscana in ambito VEL e Docup. Le coordinate geografiche delle stazioni sono elencate in Tab. 1.1.



**Figura 1.1** Ubicazione delle stazioni (pallini rossi) per la valutazione del rumore sismico ambientale all'interno dell'area urbana di Sansepolcro.

Le stazioni sismiche sono state equipaggiate con sismometri a media e larga banda (Lennartz LE-3D/5s e Guralp CMG40T) accoppiati a sistemi di conversione A/D Reftek 72A-07 (24 bit) e, nel caso di SSP9, con sismometro a corto periodo Mark L4C accoppiato a un acquisitore Lennartz DM5800/DU. La strumentazione è stata alloggiata all'interno di locali messi a disposizione dal Comune di Sansepolcro, posizionati nella parte sottostante gli edifici scolastici. I sensori sismometrici sono stati posizionati a diretto contatto con il terreno.

Nel caso della stazione dell'Istituto d'Arte "Giovagnoli", SSP8, la durata della registrazione è stata di alcuni giorni. Le stazioni sismiche della Scuola Elementare "Collodi", SSP9, e della Scuola Elementare "Centofiori", SSE9, sono state installate rispettivamente a partire dalla metà di Ottobre e dalla metà di Dicembre del 2005 e sono tuttora operanti. La stazione della Scuola Media "Buonarroti", SSM9, è stata sostituita da quella in pozzo (SSPD in profondità, SSPS in superficie).

Codice	Lat	Lon	Quota (m)	Località	Strumentazione
SSM9	43.573	12.131	371	Scuola Media "Buonarroti"	Reftek 72A+Guralp CMG40T
SSP8	43.572	12.143	395	Istituto d'Arte "Giovagnoli"	Reftek 72A+LE-3D/5s
SSP9	43.574	12.146	335	Elementare "Collodi"	Lennartz DM5800+MarkL4C
SSE9	43.566	12.150	369	Elementare "Centofiori"	Reftek 72A+Guralp CMG40T

**Tabella 1.1** Coordinate Geografiche e strumentazione utilizzata nelle stazioni sismiche installate nell'area urbana di Sansepolcro.

La disponibilità di registrazioni continue di lunga durata ha consentito di effettuare il calcolo della densità di potenza spettrale media dell'accelerazione del moto del suolo (PSD) per più giorni, in modo da poter verificare anche la stazionarietà del livello di rumore sismico.

Seguendo le indicazioni descritte in [Azzara et al. 2004], la PSD media oraria viene stimata per ogni ora di registrazione, mediando le PSD calcolate su finestre mobili di 60 secondi senza sovrapposizione. Le 24 medie orarie ottenute vengono poi utilizzate per la determinazione della media giornaliera, di quella diurna (dalle ore 8 alle 20 locali) e di quella notturna (dalle 20 alle 8 locali).

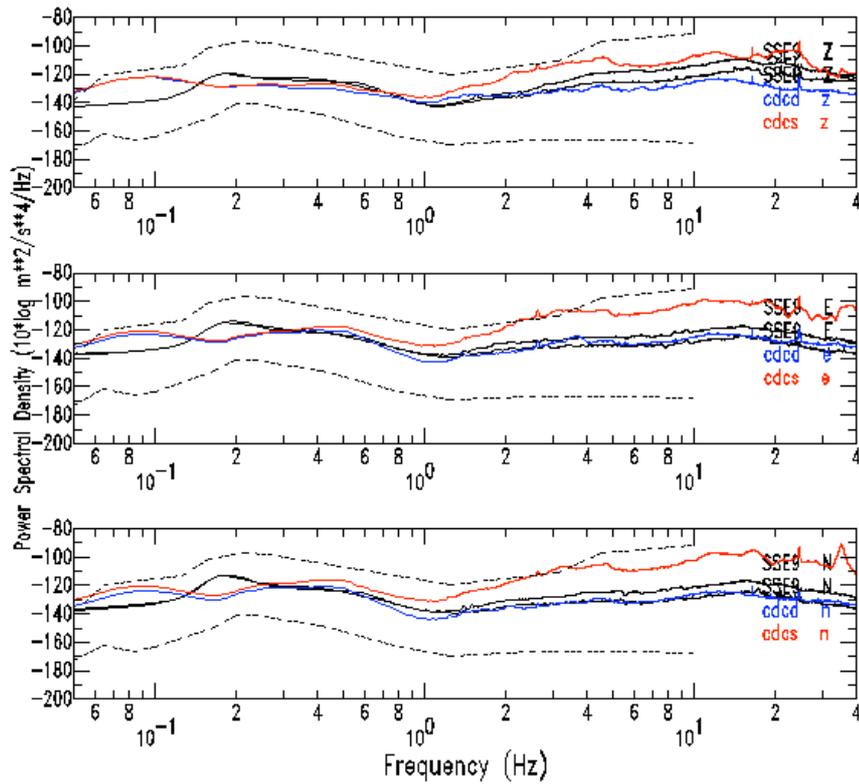
Gli spettri di potenza (PSD) così calcolati vengono messi a confronto con i PSD analogamente calcolati sui dati delle stazioni sismiche (in pozzo e in superficie) installate dall'INGV a Città di Castello e con le curve di Peterson [1993].

I segnali registrati dalle stazioni sismiche di Città di Castello sono stati corretti per la risposta strumentale dei sensori sismici della stazione di superficie e di quella installata a fondo foro, rispettivamente il sismometro a corto periodo LE3Dlite e il sensore da pozzo LE3D/BH, identico a quello installato a Sansepolcro.

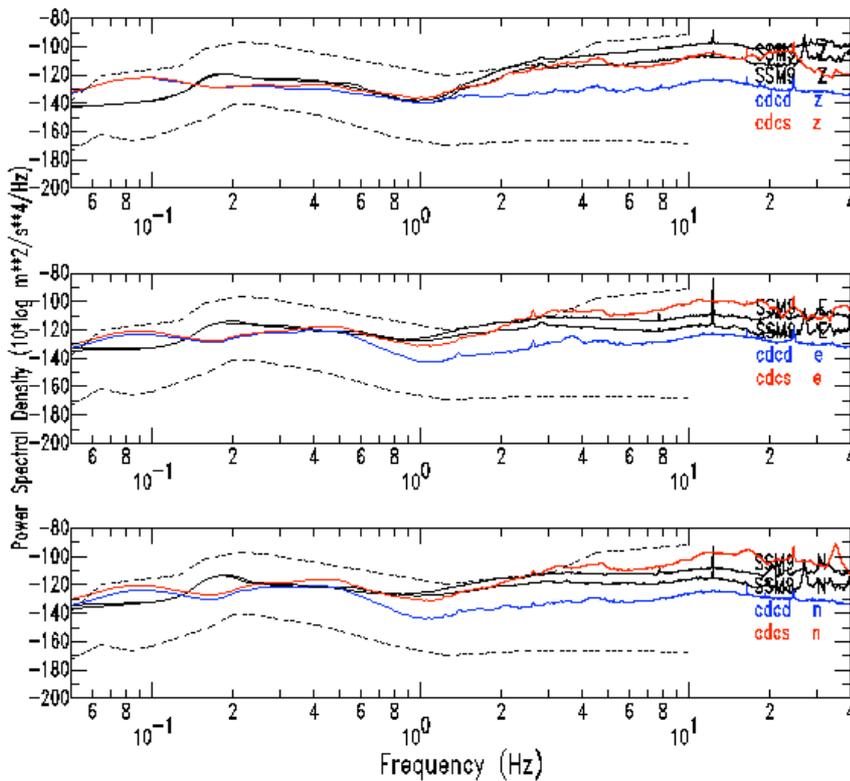
Nelle figure 1.2, 1.3, 1.4, 1.5 vengono illustrati i risultati ottenuti dalle prove di rumore per ogni sito monitorato. Vengono mostrate le PSD su rumore sismico diurno e notturno per le stazioni monitorate all'interno di Sansepolcro (curve nere continue), confrontate con le curve di rumore notturno delle stazioni di Città di Castello (curva continua blu per la stazione in pozzo, curva continua rossa per la stazione di superficie) e le curve di Peterson (curve nere tratteggiate).

Tutte le stazioni di Sansepolcro presentano un livello di rumore che, all'interno della banda investigata (0.1 – 40 Hz) si pone all'interno o poco sopra il limite superiore dell'area delimitata dalle curve di rumore minimo e massimo individuate da Peterson [1993].

Il riferimento fissato dagli spettri delle stazioni sismiche di Città di Castello pone un limite ancora più stringente alla individuazione della "migliore" delle stazioni installate.



**Figura 1.2** Confronto fra le curve PSD del rumore sismico ambientale per il sito della Scuola Elementare “Centofiori”, SSE9, media diurna e notturna (nero), per quello di Città di Castello (cdcd, pozzo; cdes superficie; curve blu e rossa) e le curve di Peterson (linee nere tratteggiate).



**Figura 1.3** Come per la Fig. 1.2 per la stazione della Scuola Media “Buonarroti”, SSM9.

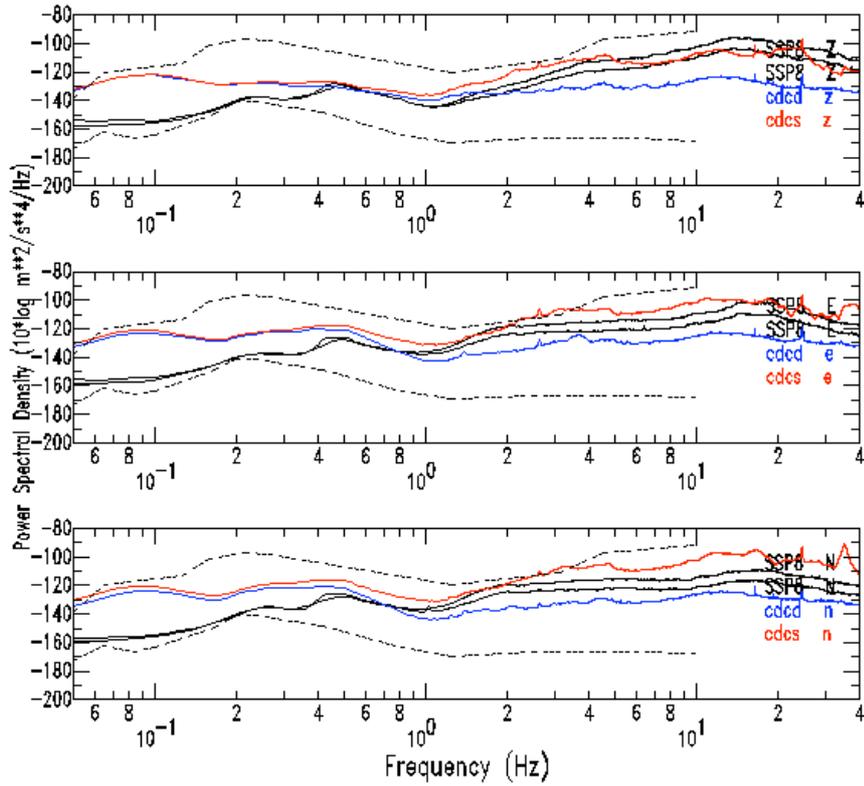


Figura 1.4 Come per la Fig. 1.2 per la stazione dell'Istituto d'Arte “Giovagnoli”, SSP8.

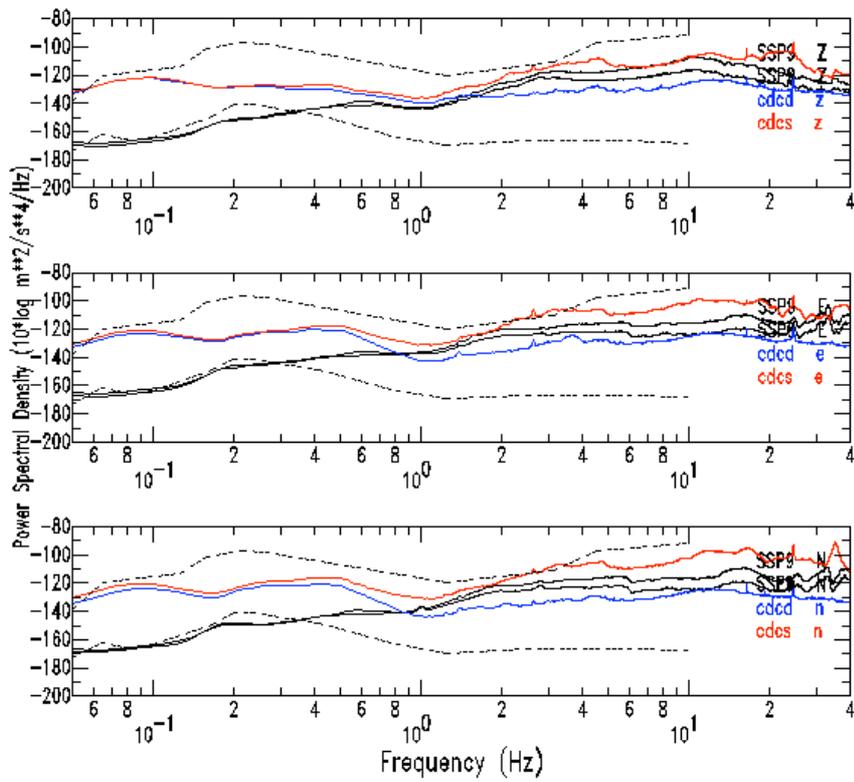
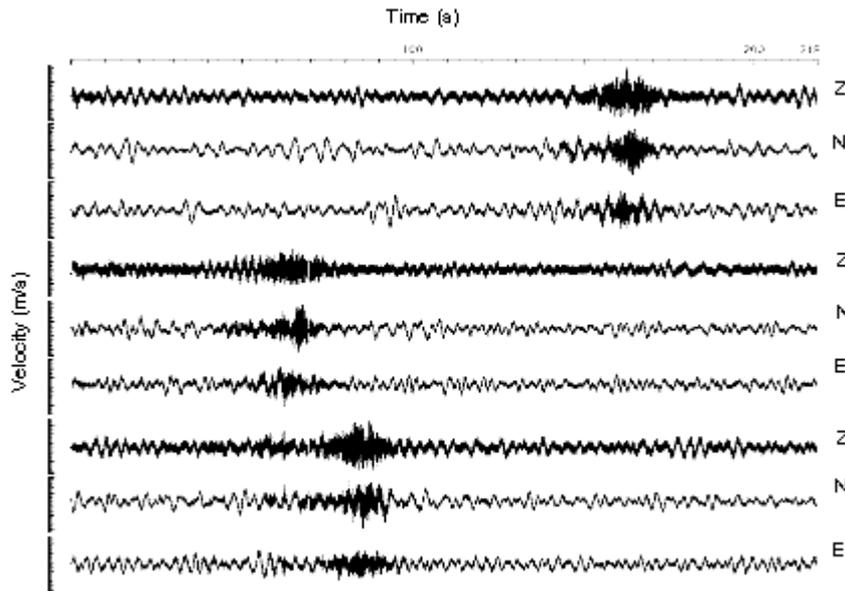


Figura 1.5 Come per la Fig. 1.2 per la stazione della Scuola Elementare “Collodi”, SSP9.

La stazione che presenta il livello spettrale più basso nella banda di frequenze al di sopra di 1 Hz era quella situata nel magazzino comunale sottostante la scuola elementare “Centofiori” (SSE9) (Fig. 1.2). La prossimità del sito al tracciato della linea ferroviaria secondaria che fa scalo a Sansepolcro non influenza in maniera significativa la qualità del segnale registrato (Fig. 1.6).



**Figura 1.6** Esempio di registrazione del passaggio di treni lungo la ferrovia ubicata nelle vicinanze della stazione sismica installata nella scuola elementare Centofiori.

Per frequenze fra 1 e 3 Hz gli spettri sulle tre componenti del moto del suolo presentano un livello di rumore che non si discosta molto da quello della stazione in pozzo di Città di Castello.

La stazione sismica installata nella scuola media “Buonarroti” (SSM9) alle alte frequenze presenta un livello di rumore abbastanza elevato che, comunque, si discosta poco da quello della stazione di superficie di Città di Castello (Fig. 1.3), probabilmente dovuto alla vicinanza della caldaia dell’impianto di riscaldamento della scuola.

La stazione installata all’interno dell’Istituto d’Arte “Giovagnoli” (SSP8) mostra un livello di rumore abbastanza simile a quello della stazione SSM9 (Fig. 1.4).

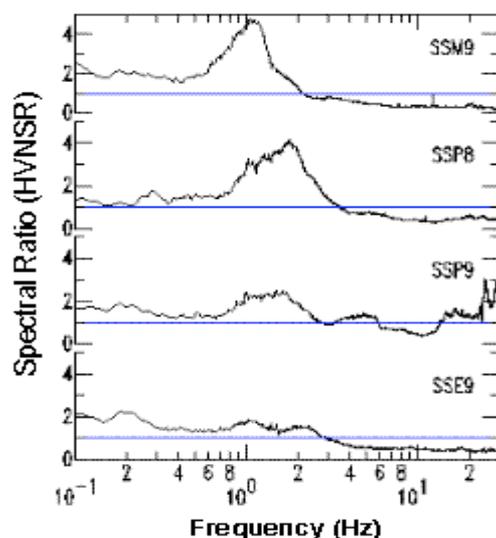
## 1.2 Valutazione degli effetti di amplificazione locale

Al fine di aggiungere alle considerazioni sul livello di rumore del sito osservazioni legate agli effetti di amplificazione del segnale, sono state effettuate analisi dei rapporti spettrali fra componenti orizzontali e verticali del moto del suolo su rumore sismico ambientale (HVNSR) [Nakamura, 1989] e su una selezione di eventi sismici registrati dalle stazioni sismiche nel primo periodo del loro funzionamento (HVSR).

Numerose pubblicazioni documentano come il metodo HVNSR consenta l’identificazione delle frequenze di risonanza del sito [Lermo e Chavez Garcia, 1994; Bard et al,1997], mentre, come discusso ad esempio da Bard [1999], esso in generale tende a sottostimare i rapporti di amplificazione, rispetto a quelli valutati facendo uso di registrazioni di terremoti. Anche se continua a non esserci accordo univoco nella comunità scientifica internazionale riguardo la generale applicabilità del metodo, negli ultimi anni il rumore sismico ambientale si è rivelato come una delle principali fonti di informazione per la microzonazione in aree urbane. In particolare in Italia il metodo è stato utilizzato con successo in numerose occasioni [Cultrera et al., 2004; Cara et al., 2005; Di Giulio et al., 2005; Improta et al., 2005]

La tecnica qui utilizzata è derivata da quella di Nakamura [1989] e descritta in Azzara et al. [2004]. Essa consiste nella determinazione dei rapporti spettrali medi su ogni ora di registrazione, calcolando il rapporto HVNSR su intervalli consecutivi della durata di un minuto. Le 24 medie orarie dei rapporti spettrali vengono a loro volta mediate per ottenere una curva rappresentativa del rapporto HVNSR giornaliero, in

modo analogo a quando descritto a pag. 7 riguardo la PSD media. Ciò consente di ottenere rapporti HVNSR non affetti dalla presenza di transienti nella serie temporale di input.



**Figura 1.7** Rapporti spettrali HVNSR per le stazioni sismiche installate nell'area urbana di Sansepolcro. La linea blu indica come riferimento il valore unitario del rapporto spettrale.

Grazie al fatto che le stazioni sismiche hanno funzionato in modalità di registrazione continua per più giorni è stato possibile verificare la stazionarietà dei rapporti spettrali nel tempo.

Non sono state inoltre riscontrate grosse differenze fra i rapporti spettrali delle due componenti orizzontali rispetto alla verticale (N/V e E/V), si è deciso quindi di mostrare soltanto i risultati ottenuti per la loro media, indicata come H/V.

La Fig. 1.7 mostra le curve HVNSR per le quattro stazioni sismiche installate nell'area urbana di Sansepolcro. È interessante notare come, spostandosi dal limite orientale (SSE9) verso quello occidentale della città (SSM9), i picchi di amplificazione crescono in ampiezza e individuano frequenze di picco via via più basse.

L'altro aspetto comune alle curve HVNSR attiene all'andamento ad alta frequenza (superiore a circa 3 Hz) che presenta su tutte le stazioni una deamplificazione (rapporto < 1) dovuta a un'ampiezza spettrale delle componenti verticali maggiore di quella degli orizzontali, già osservata nelle analisi PSD.

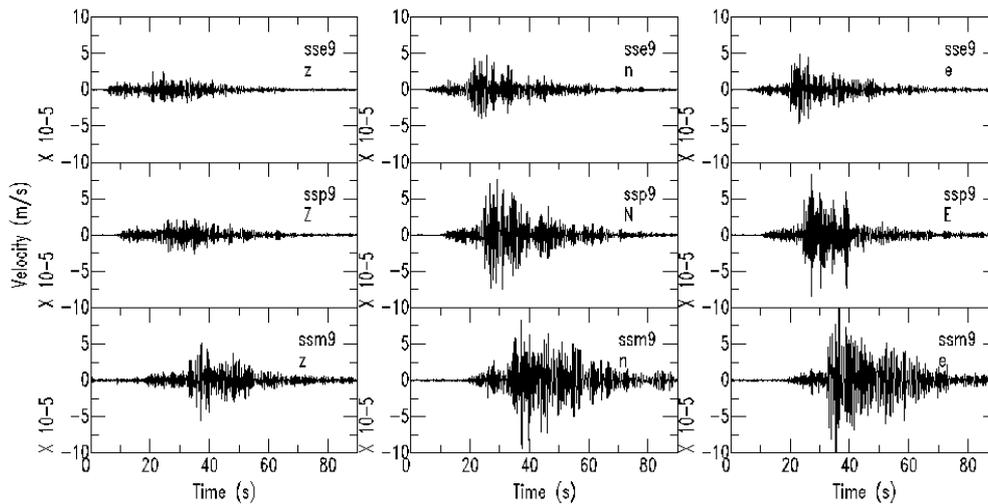
Data e ora (GMT)	Lat	Lon	Dep (km)	Mag	Dist (km)	Località
16 Dic 2005 20:12	42.74	12.74	6.5	3.4	106	Valle del Topino
17 Dic 2005 08:56	43.38	12.41	59.1	2.4	31	Alta Val Tiberina
18 Dic 2005 08:06	42.74	12.75	9.8	3.5	106	Valle del Topino
24 Dic 2005 21:16	42.98	12.89	17.0	2.8	90	Colfiorito-Nocera
25 Dic 2005 08:54	43.76	12.06	7.8	2.1	22	Montefeltro
30 Dic 2005 10:37	43.33	12.46	31.8	2.4	38	Alta Val Tiberina

**Tabella 1.2** Terremoti registrati con buon rapporto segnale/rumore dalle stazioni sismiche di Sansepolcro.

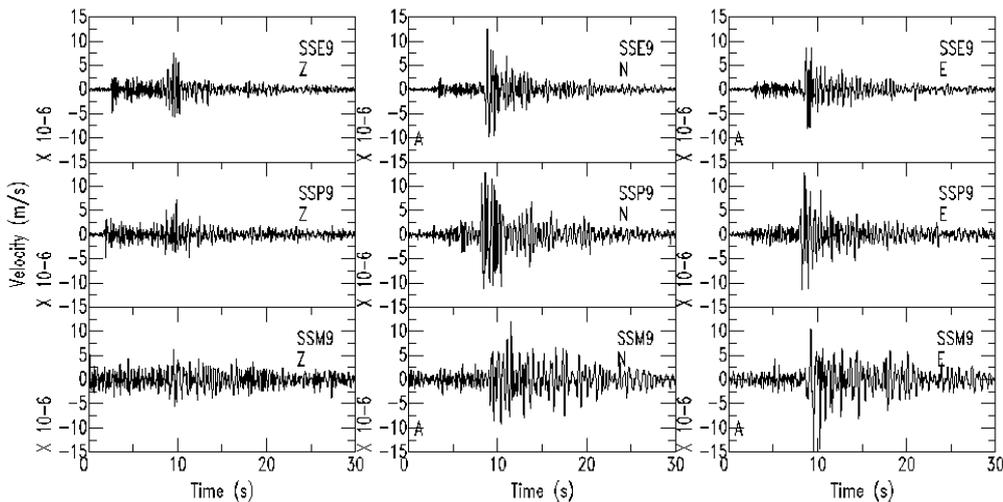
Durante il periodo di funzionamento contemporaneo delle stazioni sismiche SSE9, SSM9 e SSP9 sono stati registrati alcuni eventi sismici. La Tabella 1.2 elenca gli eventi registrati con buon rapporto segnale/rumore (almeno superiore a 3) da tutte le stazioni presenti in area urbana nel periodo 15 – 30 Dicembre, 2005

Le Fig. 1.8 e 1.9 mostrano le registrazioni di due degli eventi indicati in Tab. 1.2. In entrambe le figure la scala delle ampiezze è la stessa per tutti i sismogrammi. Già dalle serie temporali si nota come le stazioni presentino un diverso comportamento, sia nel contenuto in frequenza che nelle ampiezze delle registrazioni. In particolare è abbastanza evidente come la stazione della scuola media “Buonarroti” (SSM9) presenti un'ampiezza media del moto del suolo sicuramente più elevata rispetto alla Scuola “Centofiori” (SSE9), e alla “Collodi” (SSP9).

La disponibilità di dati registrati da più stazioni funzionanti contemporaneamente all'interno dell'area urbana ha consentito di affiancare alla valutazione eseguita su rumore sismico ambientale anche una preliminare valutazione degli effetti di amplificazione effettuata sui primi eventi sismici selezionati.



**Figura 1.8** Forme d'onda delle tre componenti (da sinistra a destra Z-N-E) relative all'evento del 17 Dicembre 2005, 08:08 (GMT) di magnitudo pari a 3.5, localizzato dalle Rete Sismica Nazionale dell'INGV in Umbria, Valle del Topino, circa 100 km a SE di Sansepolcro.



**Figura 1.9** Forme d'onda delle tre componenti del moto del suolo (da sinistra a destra Z-N-E) relative all'evento del 30 Dicembre 2005, 10:37 (GMT) di magnitudo pari a 2.4, localizzato dalle Rete Sismica Nazionale dell'INGV in Umbria, Valle del Topino, circa 38 km a SE di Sansepolcro.

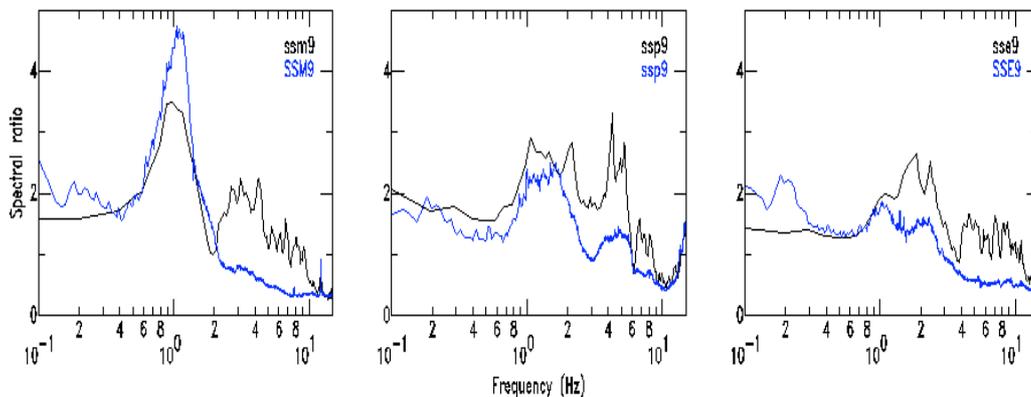
Non avendo individuato fra le stazioni presenti una che possa essere considerata un buon sito di riferimento, si è deciso di effettuare soltanto il calcolo dei rapporti HVSR per ognuna delle stazioni considerate. Il metodo consiste nell'effettuare il rapporto fra gli spettri delle componenti orizzontali e verticali del moto del suolo, calcolati sul sismogramma a partire dall'arrivo della fase S per una durata che

consenta di includere la parte più energetica del segnale [Lermo e Chavez-Garcia, 1993].

Il calcolo del HVSR è preceduto dalla determinazione del rapporto segnale/rumore della finestra di segnale selezionata, in modo da individuare la banda di frequenze significativa. Essa, in media per tutte le stazioni, è stata fissata fra 0.5 e 10 Hz.

Tale banda di frequenza consente di trascurare il fatto che la stazione SSP9 fosse equipaggiata con strumentazione diversa dalle altre due. Il sensore sismometrico a corto periodo utilizzato in SSP9, Mark L4c-3D, fornisce rapporti spettrali che non sono dissimili dal sensore LE-3D/5s [Azzara, 2004], i rapporti HVSR ottenuti con questo sismometro possono essere confrontati con quelli ottenuti da un sensore a banda più larga a patto che il segnale sismico abbia con un contenuto spettrale sufficientemente energetico al di sotto della frequenza propria.

La Fig. 1.10 mostra il risultato dell'analisi HVSR per le tre stazioni SSE9, SSP9, SSM9 (curve nere). Essi sono messi a confronto con le curve HVNSR. È evidente la grossa consistenza fra i due risultati. Per tutte le stazioni, i picchi di risonanza individuati con la tecnica HVNSR combaciano con quelli determinati su un dataset indipendente (eventi sismici) attraverso i rapporti HVSR. Confermando l'ipotesi che tali frequenze possono essere interpretate come le frequenze di risonanza caratteristiche dei siti ove sono alloggiati le stazioni sismiche.



**Figura 1.10** Confronto fra rapporti spettrali HVSR (linee nere) ottenuti utilizzando il data\_set costituito dagli eventi di Tab.1.2 e i rapporti spettrali HVNSR calcolati su rumore sismico ambientale (linee blu).

### 1.3 Modellazioni numeriche

Un aspetto differenzia la scelta di un sito per una stazione sismica in pozzo da una in superficie: la necessità di conoscere a che profondità è possibile intercettare uno strato rigido, in modo da posizionare il sensore all'interno di questo e in modo da non dover eseguire delle perforazioni al buio, senza sapere quanto in profondità si dovrà scavare. In questa ottica, in assenza di informazioni dettagliate sulla costituzione del sottosuolo, prima di procedere alla perforazione è possibile tentare una previsione sfruttando la conoscenza della frequenza di risonanza ricavata dalle misure HV. È noto infatti che le frequenze di risonanza di un sito sono legate agli spessori degli strati amplificanti che sono multipli dispari di  $\lambda/4$  (ad es.: [Ibs-von Seht e Wohlenberg, 1999]) dove  $\lambda$  è la lunghezza d'onda associata alla frequenza considerata. La funzione di trasferimento del sito presenta perciò dei massimi a frequenze che sono legate agli spessori degli strati superficiali secondo la

$$F_{0,n} = n \cdot V_s / (4 \cdot H) \quad (n = 1,3,5, \dots)$$

dove  $F_{0,n}$  indica le frequenze di risonanza associate al modo principale e ai secondari,  $H$  è lo spessore dello strato che determina l'amplificazione,  $V_s$  è la velocità dell'onda S.

Il sito ove è ubicata la stazione SSE è stato escluso fra quelli idonei all'installazione in pozzo perché dai dati downhole rilevati in ambito VEL dalla Regione Toscana, le velocità delle onde S si attestano su valori tipici del bedrock a poco più di 10 m di profondità.

In generale la scelta di una installazione in pozzo non ha come obiettivo solo la riduzione del livello di rumore ambientale alle alte frequenze, ma anche quello di poter essere utilizzata come riferimento per analisi

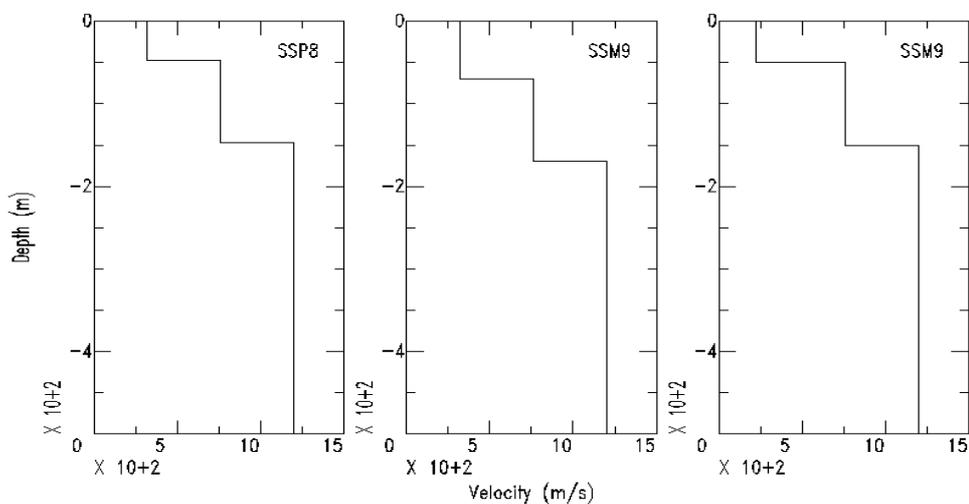
di effetti di sito in area urbana una volta riconosciuto che lo strato in cui è posizionato il sensore sismico in profondità sia quello responsabile del contrasto di impedenza che determina l'amplificazione in superficie. In tale ottica è più significativo scegliere un sito in cui si registri un marcato effetto di amplificazione.

Per questo si è ritenuto necessario concentrarsi sul sito della scuola Buonarroti dove tale effetto di amplificazione risulta più evidente rispetto agli altri sottoposti a monitoraggio (Fig. 1.10).

Partendo da queste considerazioni si è tentato di confrontare l'andamento dei rapporti di Fig. 1.10 con le funzioni di trasferimento che si ottengono dalle modellazioni 1D, secondo il metodo di Thomson e Haskell [Haskell, 1960], utilizzando le informazioni fornite dalla Regione Toscana e disponibili all'indirizzo <http://www.rete.toscana.it/sett/pta/sismica/lr56/VEL/index.htm>.

Per quanto riguarda la stazione SSP8, è stato possibile avere a disposizione dalla Regione Toscana il profilo di velocità ricavato dalle misure downhole effettuate nel sondaggio eseguito presso l'Istituto d'Arte "Giovagnoli".

Il modello è parecchio dettagliato e fornisce informazioni relative sia alle velocità delle onde longitudinali che di quelle trasversali (SH), ottenute in maniera indipendente.



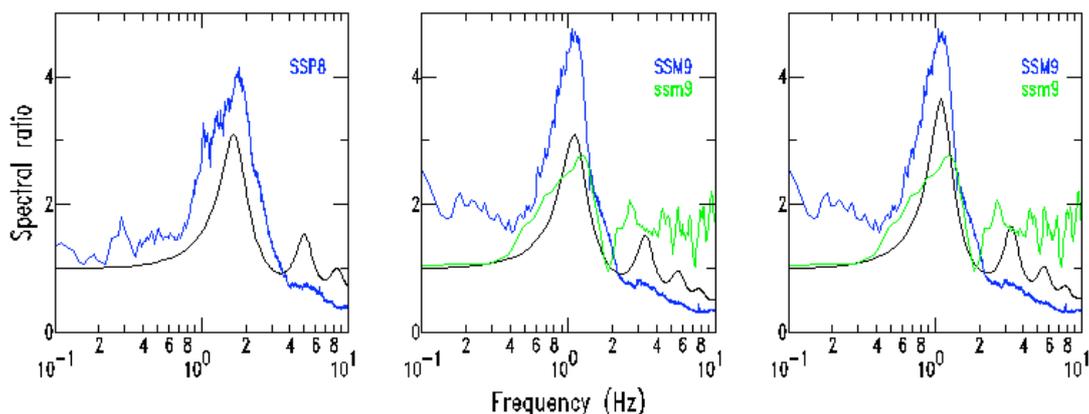
**Figura 1.11** Profili di velocità utilizzati per le modellazioni 1D mostrate in Fig. 1.12.

A partire da tale modello è stato ipotizzato per SSP8 un semplice modello a due strati piani e paralleli, sovrapposti a un semispazio (Fig. 1.11). La velocità del primo strato è ottenuta dalla media pesata delle velocità fornite dalle misure downhole nei primi 47 m, pari a 320 m/s. Il secondo strato a velocità maggiore (760 m/s) presenta uno spessore di 100 m ed è sovrapposto a un semispazio a velocità pari a 1200 m/s.

Il risultato della modellazione (Fig. 1.12) mostra un buon accordo fra la frequenza del picco fondamentale di risonanza ottenuto dal modello di Thomson-Haskell e la misura HVSNR, indicando una buona affidabilità del profilo di velocità utilizzato.

Partendo da questa considerazione si è tentato di effettuare una ricostruzione della funzione di trasferimento 1D per il sito che presenta l'effetto di amplificazione più marcato, quello della scuola media "Buonarroti", SSM9.

In tal caso, in assenza di misure downhole, erano disponibili soltanto le informazioni geofisiche ricavate dalle misure di sismica commissionate dalla Regione Toscana. Esse forniscono indicazioni sulle velocità nei primi 20-30 m, specificando che in tale sito le velocità SH sono sostanzialmente più basse di quelle misurate nel sito "Giovagnoli".



**Figura 1.12** Confronto fra i rapporti spettrali HVNSR (curve blu), i rapporti HVSR (curve verdi) e le funzioni di trasferimento (curve nere) ottenute dalla modellazione 1D [Haskell, 1960], per le stazioni SSP8 e SSM9 (modello 1 e modello 2).

Per SSM9 sono stati ipotizzati due modelli che si differenziano da quello di SSP8 per i parametri geofisici dello strato superficiale. Il primo modello prevede uno strato superficiale a velocità uguale a quella di SSP8 e maggior spessore (70 m) (secondo modello in Fig. 1.11). Il secondo modello prevede una velocità dello strato superficiale estrapolata dalle misure di sismica, pari a 225 m/s e uno spessore dello strato di 50 m (terzo modello in Fig. 1.12).

In entrambe i casi le funzioni di trasferimento teoriche (curve nere) sembrano accordarsi abbastanza bene sia con i rapporti spettrali HVNSR su rumore ambientale (curve blu) sia con gli HVSR, ottenuti sugli eventi sismici (curve continue verdi).

In base all'andamento dei rapporti spettrali e considerato che nel sito dell'Istituto d'Arte (SSP8) il sondaggio già realizzato ha intercettato il substrato rigido a una profondità di circa 50 m, sembrerebbe che nel sito "Buonarroti", in funzione della velocità ipotizzata per le onde di taglio negli strati superficiali e nell'ipotesi che non ci siano grosse variazioni laterali nella litostratigrafia dei due siti, si è potuto ipotizzare che fosse possibile intercettare il substrato effettuando un sondaggio che con buona approssimazione non vada molto oltre i 100 m.

Alla luce dei risultati ottenuti dalle misure effettuate, è stato infine possibile fare delle considerazioni sulla scelta del sito più idoneo all'installazione della stazione sismica in pozzo.

In base alle considerazioni scaturite a seguito dell'analisi dei dati si è ritenuto di poter indicare il sito della scuola media "Buonarroti", SSM9, come quello più idoneo all'installazione della stazione in pozzo. Tale sito presenta un livello del rumore sismico ambientale non estremamente elevato e sicuramente migliorabile in una installazione permanente e inoltre registra il livello di amplificazione più elevato fra tutti quelli sottoposti a monitoraggio. Esso presenta inoltre condizioni logistiche ottimali rispetto agli altri siti indagati.

## 2. Installazione della stazione sismica in pozzo

La fase di installazione della stazione sismica in pozzo è stata preceduta dall'assemblaggio del sistema di ancoraggio del sensore sismico di profondità all'interno di un tubo di acciaio che costituisce la parte finale dell'incamiciatura del foro di perforazione (Fig. 2.1). Il tubo che alloggia il sistema di bloccaggio è chiuso all'estremità posizionata a fondo foro e filettato nella parte superiore, in modo da poter essere avvitato ai tubi in PVC che costituiscono la parte restante dell'incamiciatura. L'utilizzo di due materiali con differenti caratteristiche di propagazione per realizzare l'incamiciatura del pozzo contribuisce a ottenere un disaccoppiamento della parte finale dell'alloggiamento rispetto alla parte più superficiale.



**Figura 2.1** Incamiciatura in acciaio che ospita il sistema di ancoraggio del sensore di profondità (a). In (b) è mostrato il tubo in acciaio che costituisce la parte terminale dell'incamiciatura del foro, (c) e (d) mostrano due particolari rispettivamente della parte sommitale filettata e quella basale chiusa da un coperchio saldato. La fig. (e) mostra l'accoppiamento del tubo in acciaio, alloggiamento del sistema di bloccaggio, al tubo di PVC che costituisce il rivestimento complessivo del foro.

La Fig. 2.2 mostra l'inserimento del tubo in acciaio che contiene il sistema di ancoraggio all'interno del foro da parte del personale della Ditta incaricata della perforazione.

Una volta conclusa la perforazione sono stati eseguiti i lavori di allestimento del sito. Nelle immediate vicinanze del pozzetto di ispezione del sondaggio la Ditta incaricata ha costruito un secondo pozzetto dotato di pilastro per l'alloggiamento del sensore di superficie installato sulla verticale del sensore di profondità. Un armadio da esterno è stato posizionato in una delle rientranze coperte del muro esterno della palestra, in modo da avere a disposizione un luogo sicuro e riparato ove alloggiare il sistema di conversione A/D e di memorizzazione dei dati.



**Figura 2.2** Due fasi della realizzazione del sondaggio. La foto di destra mostra il momento in cui il tubo d'acciaio contenente il sistema di bloccaggio viene inserito all'interno del foro durante la fase di realizzazione del rivestimento interno.

L'armadio contenente il sistema di acquisizione è dotato di alcune prese di corrente e di un interruttore magnetotermico, la connessione alla rete elettrica è stata fornita dal Comune di Sansepolcro. Esso è inoltre predisposto per l'allacciamento alla rete telefonica, in modo da poter predisporre in futuro l'inserimento della stazione sismica all'interno della Rete Sismica Nazionale. Sia il pozzo che il pozzetto per la stazione di superficie sono collegati all'armadio contenente il sistema di acquisizione tramite canalizzazioni interrattate separate. (Fig. 2.3).



**Figura 2.3** Fasi della realizzazione dei lavori di allestimento del sito e immagine dell'armadio utilizzato come alloggiamento della strumentazione.

L'installazione della stazione sismica di profondità è stata preceduta da una verifica della correttezza del diametro interno dell'incamicatura attraverso l'inserimento fino al raggiungimento del fondo di una serie di tutori di acciaio di diametri variabili. L'installazione delle due stazioni sismiche è mostrata nella Fig. 2.4.



**Figura 2.4** Fasi di installazione delle due stazioni sismiche in superficie e in pozzo.

Il sensore borehole ha raggiunto la profondità di circa 117 m dal piano di campagna, consistente con quanto indicato dalla relazione geologica che ha accompagnato la realizzazione del sondaggio. Le due stazioni sismiche sono equipaggiate con sensori sismometrici triassiali rispettivamente Lennartz LE-3D/BH (la stazione di fondo foro), e Lennartz -3D/5s (la stazione di superficie), entrambe sono collegate a un sistema di conversione A/D Lennartz M24 a 24 bit.

Le coordinate geografiche della stazione sismica sono: 43.574N - 12.1314E, 370 m s.l.m.

Le caratteristiche strumentali dei sensori utilizzati sono descritte rispettivamente nella Tab. 2.1 per il sensore di profondità (LE-3D/BH) e in Tab. 2.2 per il sensore di superficie (Le-3D/5s), entrambe tratte dal sito della ditta costruttrice dello strumento (<http://www.lennartz-electronic.de>).

Sensors	3, orthogonal (Z, N, E)
Eigenfrequency, upper frequency limit	1 Hz, 80 Hz
Output constant	400 V/m/s
Damping	0.707 critical
Power supply	+9...+16 V DC
Power consumption	8 mA @ 12 V DC typical
Deviation of theoretical transfer function in the range 0.5 ... 80 Hz	± 0.1 dB
Weight (sensor without cable)	4.9 kg
Overall length (including spike)	100 cm
Length of sensor tube	50 cm
Diameter of sensor tube	approx. 5.8 cm
Inner diameter of borehole casing	min. 7 cm, max.: please inquire
RMS noise @ 1 Hz	3 nm/s
Dynamic range (typical)	136 dB
Poles	3 poles: -4.444 / +4.444j -4.444 / -4.444j -1.083 / 0.000j
Zeros	Triple zero at the origin

**Tabella 2.1** Specifiche tecniche relative al sensore LE-3D/BH, da <http://www.lennartz-electronic.de>.

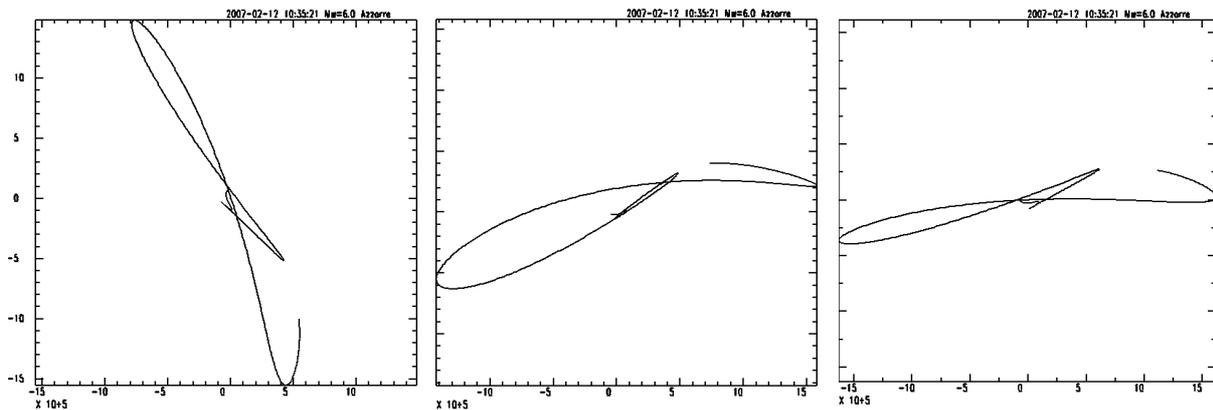
Sensors	3, orthogonal (Z, N, E)
Eigenfrequency, upper frequency limit	0.2 Hz, 40 Hz
Output constant	400 V/m/s
Damping	0.707 critical
Power supply	+9...+16 V DC
Power consumption	10 mA @ 12 V DC typical
Deviation of theoretical transfer function in the range 0.5 ... 80 Hz	± 0.1 dB
Weight (sensor including 1.5 m cable and connector)	6.5 kg
Diameter	195 mm
Height	165 mm
Temperature range	-15 ... +60 °C (centigrade)
RMS noise @ 1 Hz	1 nm/s
Dynamic range (typical)	140 dB
Poles	3 poles: -0.888 / +0.888j -0.888 / -0.888j -0.220 / 0.000j
Zeros	Triple zero at the origin

**Tabella 2.2** Specifiche tecniche relative al sensore LE-3D/5s, da <http://www.lennartz-electronic.de>.

### 3. Orientazione del sensore in profondità

L'installazione di un sensore in un pozzo profondo pone la questione della determinazione della sua orientazione. In generale non è infatti sempre possibile controllare in che modo il sensore si dispone all'interno del pozzo quando viene calato. In assenza di sistemi di posizionamento e orientazione da remoto, è quindi necessario stabilire a posteriori la correzione da apportare ai segnali provenienti dai canali orizzontali in modo da riportarli sul riferimento cartesiano convenzionale con gli assi disposti verso Est e verso Nord.

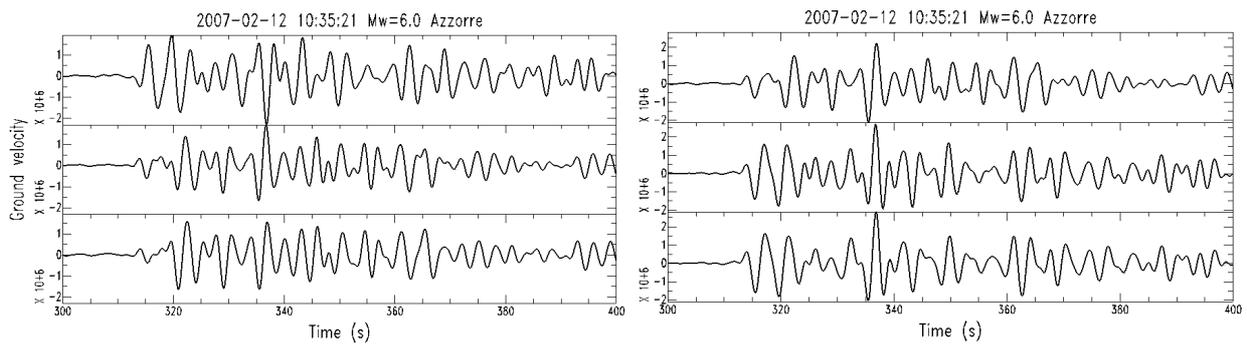
La presenza di una stazione sismica di superficie accoppiata a quella di profondità consente di riconoscere l'orientazione del sensore in pozzo operando sui segnali registrati dalla coppia di strumenti. Seguendo le procedure descritte in Margheriti et al. [2000] e Cocco et al. [2001], sono stati utilizzati tre metodi, il primo consiste nel comparare il *particle motion* prodotto dal primo arrivo di un evento sismico registrato in profondità e in superficie, in modo da individuare l'angolo di rotazione che consente di ottenere la stessa orientazione degli assi orizzontali dei due sensori (Fig. 3.1). Il secondo quello di individuare la corretta orientazione valutando la correlazione fra le forme d'onda orizzontali dei due sensori, ruotando le componenti orizzontali del sensore di pozzo a passi di 2 gradi intorno alla direzione individuata con il primo metodo (Fig. 3.2). Infine il terzo metodo mira a verificare che anche per un terremoto locale dopo aver eseguito la rotazione si riesce a ricostruire il *backazimuth* teorico, calcolato una volta note le coordinate geografiche della stazione e dell'epicentro (Fig. 3.3).



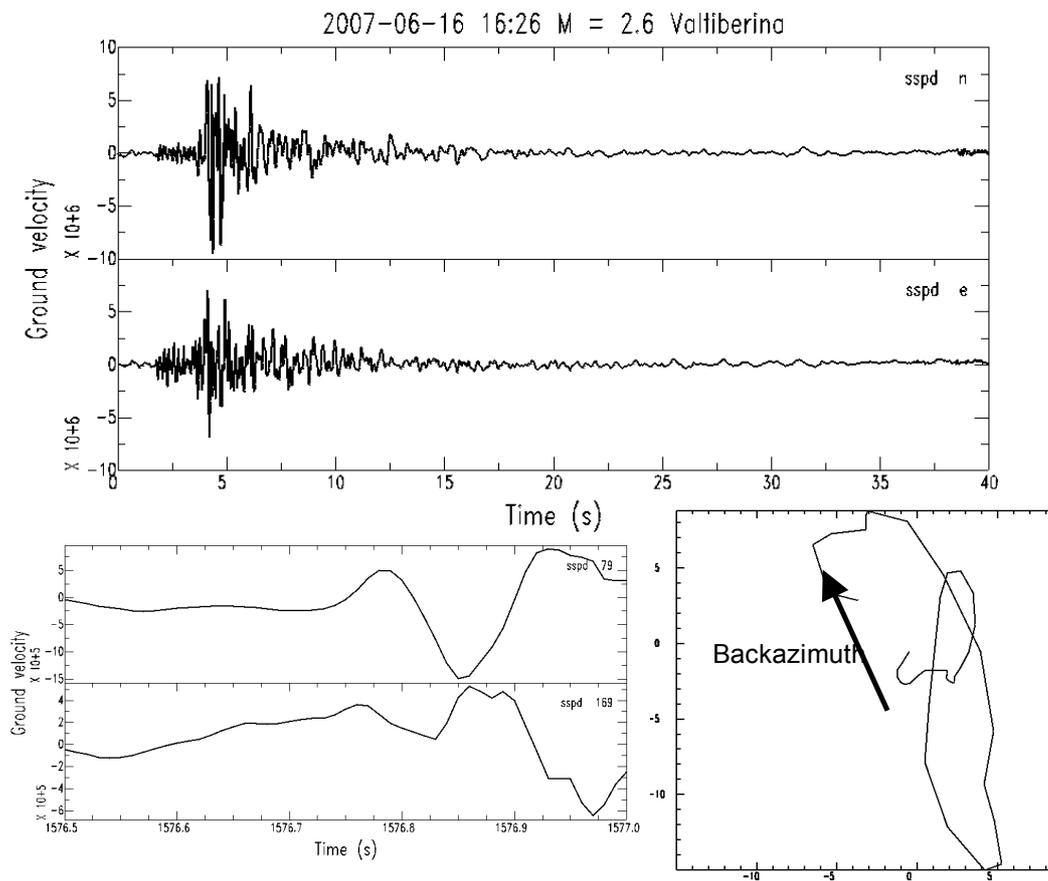
**Figura 3.1** *Particle motion* associato all'arrivo della fase P del terremoto delle Azzorre del 12 Febbraio 2007 ( $M_w = 6.0$ , distanza circa 2100 km). Da sinistra a destra vengono mostrati gli odogrammi ottenuti componendo le registrazioni orizzontali del sensore in pozzo non ruotato, del sensore di superficie e di quello in pozzo ruotato di  $79^\circ$  in senso orario.

Il primo e il secondo metodo sono stati applicati ad alcune delle registrazioni di telesismi avvenuti durante il periodo di funzionamento della stazione sismica. In Fig. 3.1 viene mostrato il confronto fra il *particle motion* del primo arrivo del terremoto di magnitudo 6.0 localizzato a largo delle Azzorre il 12 Febbraio 2007. Il segnale registrato dal sensore di pozzo è stato innanzitutto corretto per la risposta strumentale e convoluto con la curva di risposta del sensore Le-3D/5s installato in superficie. Le forme d'onda sono state filtrate fra 0.1 e 0.5 Hz, in modo da restringere il contenuto spettrale a frequenze che assicurano la coerenza fra i due sensori sismici distanti più di 100 m fra di loro. Il risultato ottenuto indica che le forme d'onda orizzontali del sensore in pozzo devono essere ruotate di  $79^\circ$  in senso orario per essere orientate secondo la convenzione Nord-Est.

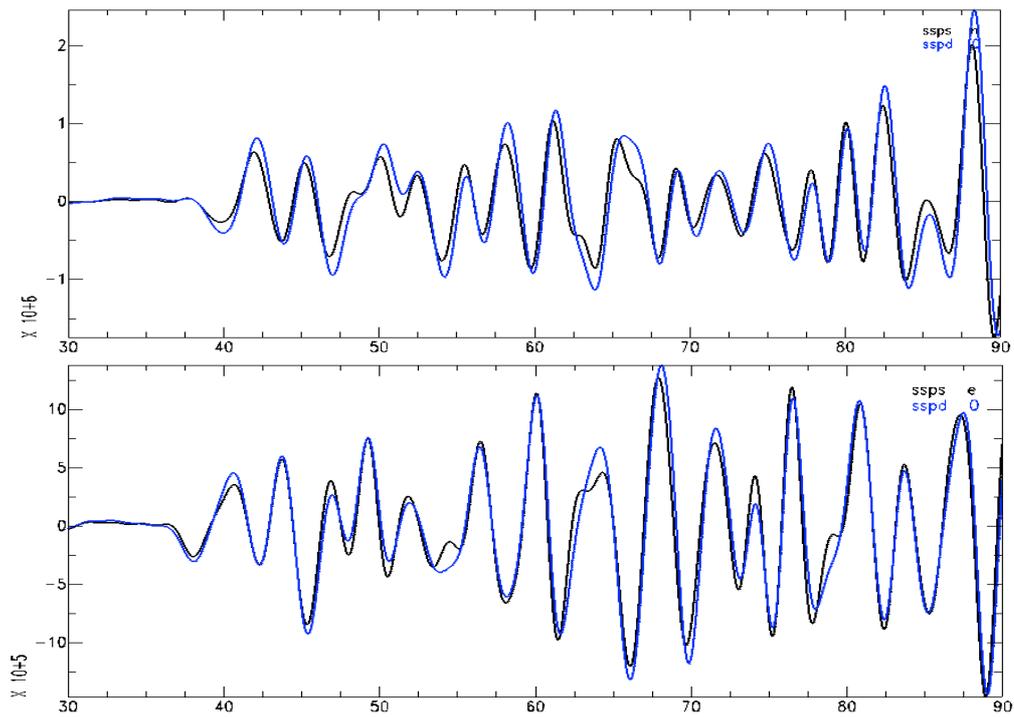
La Fig. 3.4 mostra il confronto fra le due componenti orizzontali della registrazione del terremoto che ha recentemente colpito la regione cinese del Sichuan (12 Maggio, 2008 –  $M = 8.0$ ) rilevate dal sensore di profondità (curva blu) e da quello di superficie (curve nere). La registrazione della stazione di fondo foro è stata corretta per la risposta strumentale e ruotata secondo le indicazioni precedenti, il segnale è stato filtrato fra 0.1 e 0.5 Hz.



**Figura 3.2** Determinazione dell'orientazione del sensore usando le forme d'onda orizzontali di un evento teleseismico. Le forme d'onda del sensore in pozzo sono state corrette per la curva strumentale e poi convolute con la curva del sensore Le3D/5s installato in superficie. Prima di essere confrontate, le forme d'onda sono state filtrate nella banda di frequenze 0.1 – 0.5 Hz. In ogni riquadro dall'alto in basso sono mostrate le forme d'onda del sensore di pozzo non ruotato, quella del sensore di superficie e quella del sensore ruotato. Il riquadro a sinistra è relativo alle componenti NS, quello a destra alle EW.



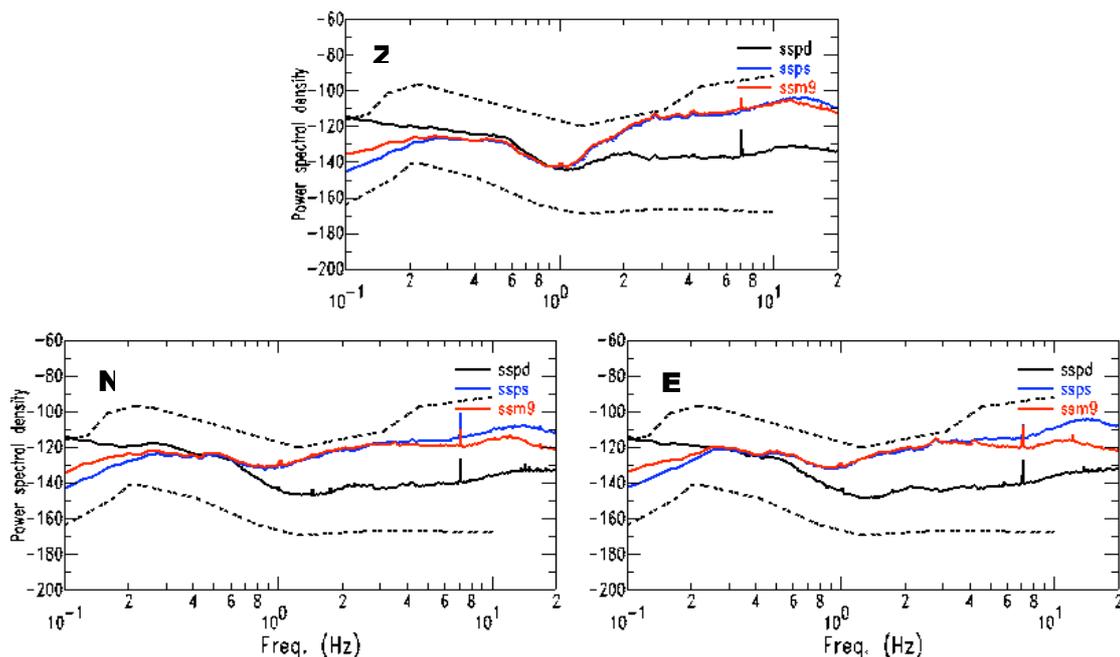
**Figura 3.3** Confronto fra l'orientazione del sensore e il backazimuth teorico (indicato dalla freccia all'interno del riquadro in basso a destra) per un evento locale registrato dalla stazione di pozzo. L'evento di magnitudo 2.6 è quello localizzato in Valtiberina il 16 Giugno 2007 alle 16:26, a una distanza di circa 15 km da Sansepolcro. Nel riquadro superiore sono mostrate le forme d'onda orizzontali registrate dalla stazione di pozzo, in quello inferiore è mostrato un ingrandimento dell'arrivo della fase P diretta dopo la rotazione delle componenti. Accanto a questo è tracciato il particle motion confrontato con il backazimuth teorico dell'evento.



**Figura 3.4** Confronto fra i sismogrammi registrati dalla stazione di fondo foro (in nero) e da quella di superficie (in blu) in occasione del terremoto di Sichuan (12 Maggio 2008, M 8.0). Il segnale registrato dal sensore in pozzo è stato corretto per la curva strumentale e poi convoluto con la curva del sensore Le3D/5s installato in superficie. Le forme d'onda sono state filtrate sulla banda di frequenze 0.1 – 0.5 Hz. Nel riquadro in alto sono mostrate le componenti NS, il riquadro in basso è relativo alle componenti EW.

#### 4. Analisi dei dati registrati dalla stazione in pozzo

Le due stazioni sismiche hanno funzionato con buona continuità fin dal momento dell'installazione, i primi dati registrati sono stati analizzati per effettuare una valutazione del livello di rumore di fondo di entrambe le stazioni. La Fig. 4.1 mostra il confronto fra le curve di densità di potenza spettrale medie calcolate durante le ore notturne di un giorno in cui non sono stati registrati eventi sismici, fra la stazione di fondo foro (curva nera), quella di superficie (curva blu) e quella già presente nel sito nell'ambito della rete installata per lo studio delle amplificazioni locali (SSM9, curva rossa). Il segnale della stazione di fondo foro è stato corretto per la risposta strumentale. È interessante notare l'ottimo accordo fra gli spettri delle stazioni sismiche di superficie poste ad una distanza di circa 100 m l'una dall'altra. Il livello spettrale della stazione di profondità mostra un notevole miglioramento del rumore di fondo del sito pari in potenza a circa 20 dB sulla banda delle alte frequenze (maggiori di 1 Hz). In ampiezza ciò equivale ad un guadagno pari a circa 10 volte fra il sito di profondità e quello di superficie.

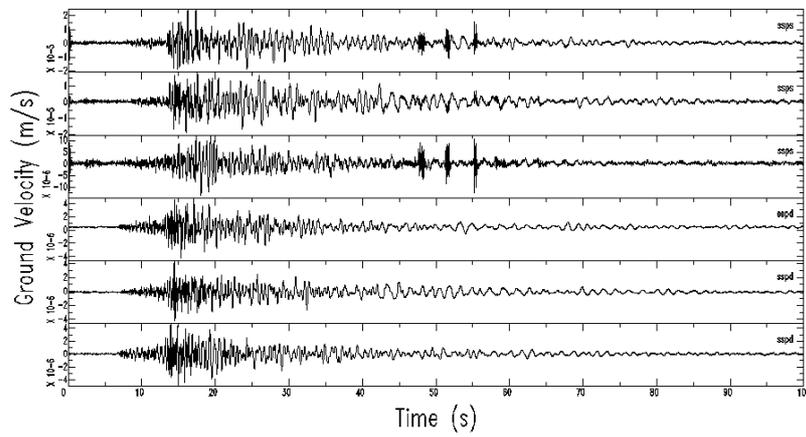


**Figura 4.1** Spettri di densità di potenza spettrale su rumore sismico ambientale registrato in un giorno privo di eventi sismici dalla stazione downhole di Sansepolcro (curve nere), dalla stazione di superficie ad essa accoppiata (curve blu) e dalla stazione sismica installata nelle immediate vicinanze nell'ambito della rete sismica urbana (curve rosse). Dall'alto verso il basso sono mostrate le curve relative alla componente verticale (Z), a quella NS (N) ed EW (E). In tratteggio sono le curve di riferimento di Peterson [1993].

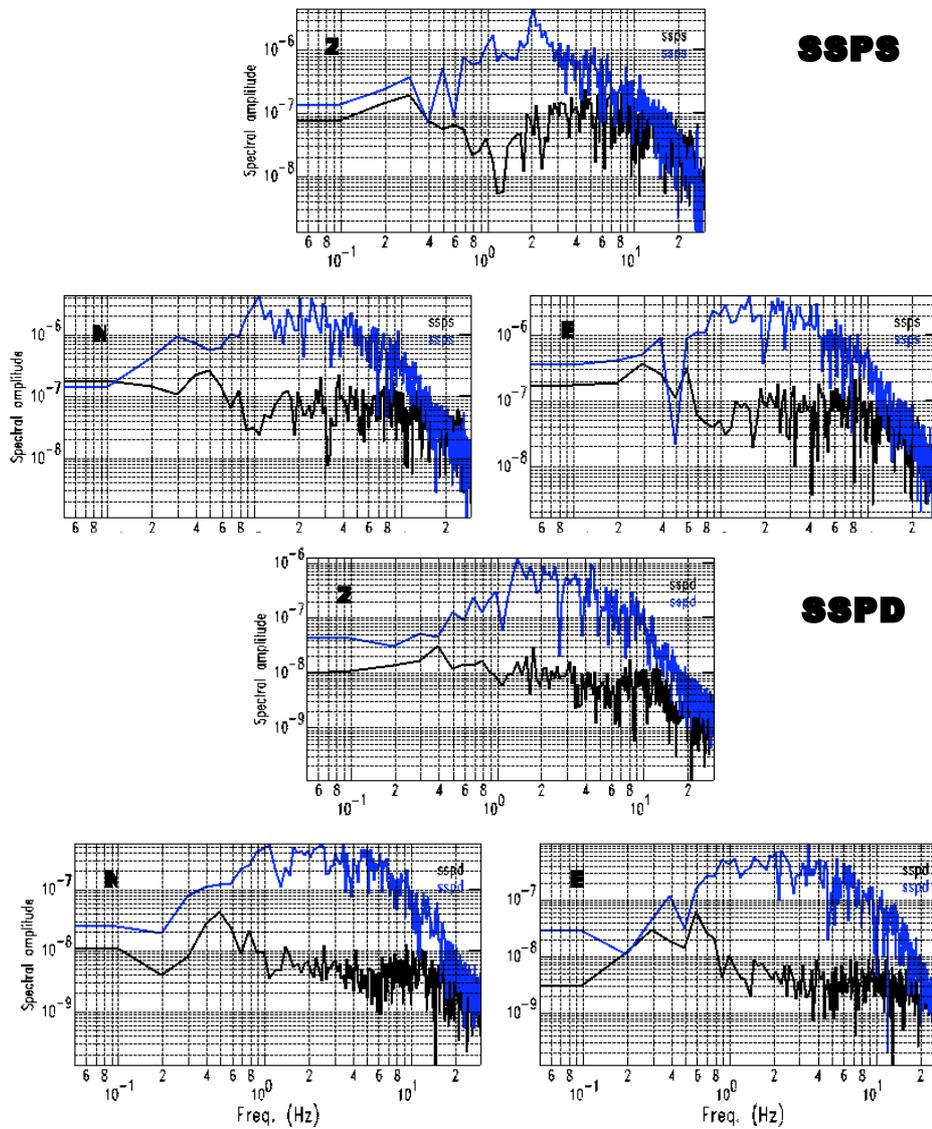
Per quanto riguarda il sito di profondità non si riscontra grossa variazione nel livello di ampiezza spettrale fra giorno e notte. Ciò indica che il sensore installato a fondo foro sembra essere praticamente esente da disturbi dovuti all'attività antropica.

La Fig. 4.2 mostra i sismogrammi dell'evento di magnitudo 2.4 localizzato il 4 Febbraio 2007 nella piana di Gubbio, a una distanza di circa 50 km da Sansepolcro. È abbastanza evidente che, malgrado l'ampiezza del segnale in profondità sia circa 10 volte più piccola di quella del segnale in superficie, la registrazione della stazione di profondità è meno affetta da disturbi.

Il comportamento delle due stazioni è meglio evidenziato dalla Fig. 4.3, dove viene mostrato il confronto fra gli spettri di Fourier del segnale (curve blu) e del rumore sismico ambientale prima del terremoto (curve nere) per le tre componenti delle due stazioni sismiche in occasione del terremoto di Gubbio. È da notare come nella stazione di profondità si registri un rapporto segnale/rumore molto più elevato rispetto alla stazione di superficie e su una banda di frequenze più ampia: 0.4 – 5 Hz per la stazione di superficie; 0.4 – 20 Hz per quella in foro.



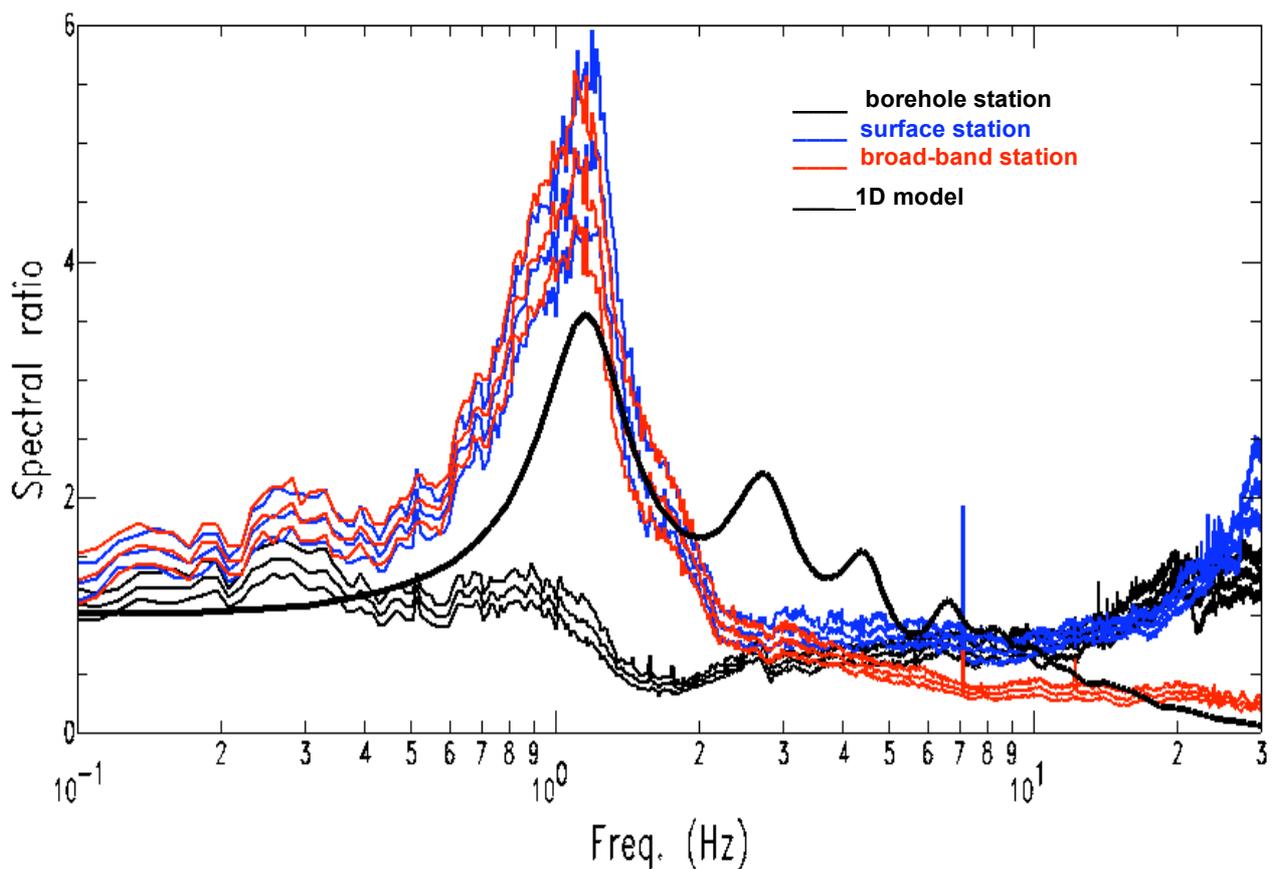
**Figura 4.2** Sismogrammi del terremoto di Gubbio, (4 Febbraio 2007 - 19:06 (GMT)  $M=2.4$ ), a circa 50 km da Sansepolcro. Dall'alto verso il basso le tracce relative alle tre componenti (E, N, Z) della stazione sismica di superficie (ssps) e di quella di profondità (sspd).



**Figura 4.3** Confronto spettrale fra segnale (curve blu) e rumore (curve nere) per il terremoto di Fig. 6. Dall'alto verso il basso sono mostrati gli spettri relativi alle componenti Z, N, E rispettivamente per la stazione di superficie (SSPS) e per quella di profondità (SSPD).

Ciò conforta nel ritenere che la stazione di profondità costituisce un notevole contributo all'incremento delle potenzialità di monitoraggio della microsismicità dell'area, sia in termini di collocazione (è all'interno dell'area urbana di uno centri urbani più significativi della Valtiberina, in un punto che consente una maggior copertura per la localizzazione di eventi all'interno della valle), sia in termini di livello di rumore sismico ambientale proprio.

A conclusione dell'analisi dei primi dati registrati si è proceduto alla valutazione dell'andamento della media giornaliera del rapporto spettrale calcolato su rumore sismico (HVNSR  $\pm$  deviazione standard). La misura è stata effettuata sui segnali registrati contemporaneamente dalle tre stazioni attualmente presenti nella scuola media Buonarroti. Il metodo utilizzato per il calcolo delle medie giornaliere del rapporto spettrale mostrate in Fig. 4.4 è quello descritto in Azzara et. al. [2004], in nero sono tracciate le curve relative alla stazione di profondità (equipaggiata con un sensore Lennartz a 1 Hz), in blu quelle della stazione di superficie (equipaggiata con un sensore Lennartz a 5 s), in rosso quelle della stazione SSM9 (equipaggiata con un sensore Guralp CMG40T a larga banda).



**Figura 4.4** Confronto fra i rapporti spettrali HVNSR ( $\pm$  una deviazione standard) su rumore sismico ambientale fra le stazioni sismiche presenti nella scuola media Buonarroti: stazione sismica di profondità (curve nere), stazione sismica di superficie accoppiata al pozzo equipaggiata con sensore Le3D/5s (curve blu) e stazione sismica a larga banda (sensore Guralp CMG40T) installata temporaneamente nel magazzino comunale (curva rossa). La curve nera a tratto marcato è il modello 1D ricavato utilizzando il profilo di velocità medio ottenuto dalle misure downhole eseguite all'interno del sondaggio.

È evidente una forte congruenza fra i rapporti spettrali delle due stazioni di superficie che, come già osservato in Bergamaschi et al. [2006] e Bergamaschi e Azzara [2007], evidenziano un picco centrato all'incirca sulla frequenza di 1 Hz che, attraverso le modellazioni della risposta teorica 1D [Haskell, 1960], risulta ben correlato con la geologia di superficie descritta in termini stratigrafici e di proprietà fisiche dai carotaggi eseguiti durante la realizzazione del pozzo e dalle misure downhole eseguite dopo la perforazione.

## 5. Registrazione di eventi sismici e uso della stazione come riferimento per effetti di sito

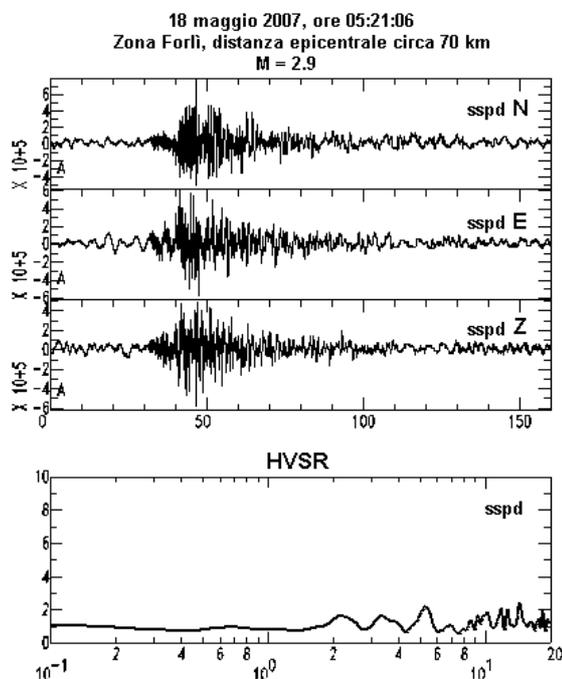
Dal momento dell'installazione della stazione sismica in pozzo alla stesura del presente rapporto non è stata registrata sismicità di particolare rilievo in tutta l'area dell'Appennino Centro-Settentrionale. Il data\_set dei primi mesi di funzionamento della stazione sismica non è sufficientemente corposo da poter operare per definire le caratteristiche di sito delle stazioni sismiche presenti in città attraverso l'uso di tecniche spettrali, utilizzando la stazione di pozzo come riferimento.

Si è comunque proceduto all'analisi preliminare delle forme d'onda degli eventi più significativi, in modo da valutare in via del tutto preliminare la fruibilità della stazione in pozzo per questo tipo di analisi. Gli eventi sismici registrati dalla stazione in pozzo e da tutte le stazioni della rete cittadina con un buon rapporto segnale/rumore sono indicati in Tab. 5.1.

DATA	Ora (GMT)	Lat	Lon	DepthM	M	Area
02/04/07	19:06:00	43.33	12.51	6.4	2.4	Bacino d Gubbio
02/08/07	01:26:00	42.80	13.21	6.4	3.2	Monti Sibillini
02/08/07	01:32:00	42.79	13.18	10.0	3.8	Monti Sibillini
02/14/07	23:10:00	44.31	12.03	17.6	3.3	Zona Forlì
04/13/07	03:45:00	43.78	12.16	4.6	2.2	Montefelro
05/18/07	05:21:00	44.11	12.24	4.5	2.9	Zona Forlì

**Tabella 5.1** Elenco degli eventi sismici registrati dalla rete cittadina di Sansepolcro nei primi mesi dopo l'installazione della stazione in pozzo.

Dapprima è stato verificato che i rapporti HVSR della stazione di pozzo presentassero un andamento sostanzialmente piatto in modo da dare validità alla scelta di utilizzarla come stazione di riferimento.

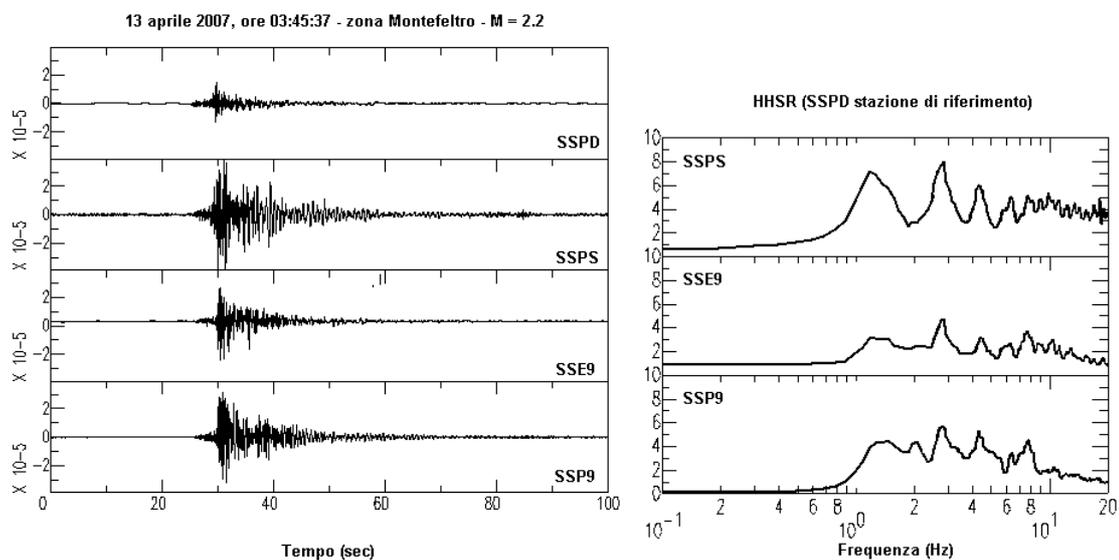


**Figura 5.1** In alto sismogramma registrato dalla stazione in pozzo (SSPD) a seguito del terremoto del 18 Maggio 2007, localizzato dalla Rete Sismica Nazionale dell'INGV nei pressi di Forlì. In basso è mostrata la media dei rapporti HVSR calcolata per la stazione SSPD sugli eventi sismici di Tab. 5.1.

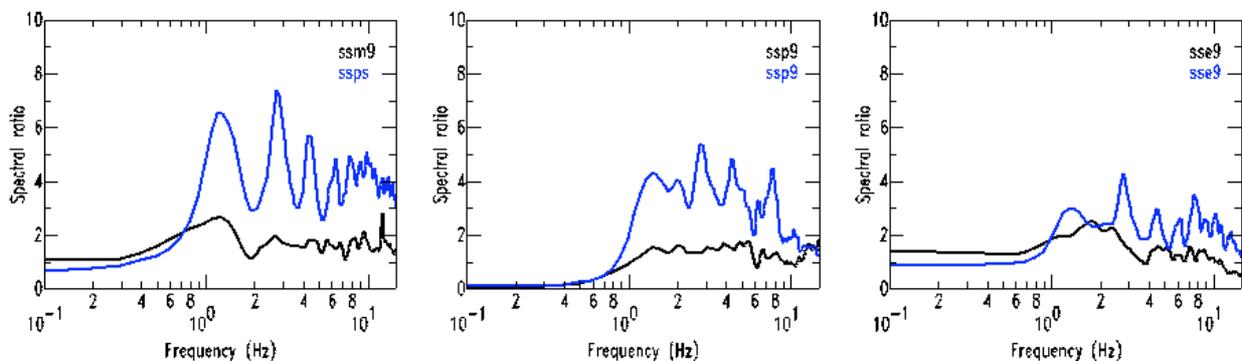
La Fig. 5.1 mostra il sismogramma del terremoto avvenuto il 18 Maggio 2007 nell'area di Forlì (M=2.9), registrato dalla stazione di pozzo. Nella parte inferiore della figura è mostrata la media dei rapporti spettrali HVSR calcolata sugli eventi di Tab. 5.1. In piena coerenza con quanto osservato precedentemente nell'analisi di rumore sismico registrato dalla stazione in pozzo, anche per quanto riguarda i terremoti il rapporto spettrale HVSR non mostra evidenti picchi di amplificazione su tutta la banda di frequenze di interesse ingegneristico (0.1 – 20 Hz). Ciò sembrerebbe confermare la validità della scelta del sito come stazione di riferimento per gli effetti di sito.

Nella Fig. 5.2 viene mostrato un esempio dell'andamento del rapporto spettrale classico (HHSR) fra componenti orizzontali della stazioni della rete sismica urbana operanti all'interno di Sansepolcro e la stazione di pozzo. La stazione SSPS corrisponde alla stazione di superficie installata in parallelo alla stazione di profondità.

Pur tenendo conto del fatto che si tratta dell'elaborazione di un singolo piccolo terremoto, può essere interessante confrontare il risultato di Fig. 5.2 con gli andamenti medi dei rapporti HHSR ottenuti su un data\_set di eventi sismici registrato durante tutto il 2006 e parte del 2007 dalle stazioni della rete cittadina (Fig. 5.3).



**Figura 5.2** A sinistra, sismogrammi registrati dalla componente orizzontale EW delle stazioni installate nell'area urbana di Sansepolcro in occasione del terremoto del 13 Aprile 2007, localizzato dalla Rete Sismica Nazionale dell'INGV in zona Montefeltro. A destra sono mostrati i rapporti spettrali HHSR medi, calcolati sugli eventi di Tab. 5.1, fra le stazioni della rete e la stazione in pozzo, fissata come riferimento.



**Figura 5.3** Confronto fra i rapporti spettrali HHSR su terremoti utilizzando come riferimento una stazione sismica posta al bordo orientale della Valtiberina su affioramento (curve nere) e la stazione di fondo foro, SSPD (curve blu).

In Fig. 5.3 sono riportati gli andamenti dei rapporti spettrali HHSR medi calcolati sulle forme d'onda dei terremoti registrati con buon rapporto segnale/rumore dalle stazioni cittadine. Le curve nere sono i rapporti HHSR rispetto alla stazione di riferimento installata al bordo orientale della Valtiberina su un affioramento roccioso appena fuori dell'abitato biturgense. Le curve blu sono gli HHSR medi calcolati a partire dal data\_set di Tab. 5.1, utilizzando la stazione in pozzo come riferimento. La stazione indicata come SSM9 è la stazione temporanea installata in superficie nello stesso sito della stazione in pozzo.

Mentre l'informazione relativa alle frequenze di picco non risulta sostanzialmente modificata, l'uso della stazione sismica in pozzo come riferimento sembrerebbe individuare nei siti sottoposti a monitoraggio dei livelli di amplificazione considerevolmente più elevati rispetto a quelli calcolati utilizzando il riferimento esterno alla Valle

## **6. Conclusioni**

L'installazione della stazione sismica in pozzo, come ci si aspetta in questi casi, produce un notevole miglioramento nelle potenzialità di monitoraggio sismico della Valtiberina. La sua presenza aggiunge all'interno della valle un ulteriore punto di rilevazione sismica, caratterizzato da un livello qualitativo elevato, sia per le caratteristiche strumentali, sia per la bassa rumorosità sismica del sito scelto.

La concomitanza nello stesso sito di due stazioni (in superficie e in profondità) ha consentito di definire la corretta orientazione del sensore di profondità e consentirà di calibrare le caratteristiche della propagazione negli strati superficiali nel sito in cui la stazione è installata..

La disponibilità di un sistema di conversione A/D a 6 canali e ad alta dinamica potrà in futuro consentire la sostituzione del sensore sismometrico di superficie con un sensore accelerometrico, in modo da incrementare il range di magnitudo rilevabili dalla stazione sismica senza saturare.

La presenza di una stazione sismica di tale qualità all'interno del centro urbano riveste inoltre un notevole interesse dal punto di vista dello studio della risposta locale, in quanto essa rappresenta con ottima approssimazione quella stazione di riferimento necessaria per effettuare analisi di questo tipo.

L'insieme di queste considerazioni avvalorano, semmai fosse necessario ribadirlo, la positività della scelta di installare una stazione sismica in pozzo che è generalmente onerosa sia per il costo della strumentazione, sia per quello dell'allestimento del sito, ma che produce un netto miglioramento nelle potenzialità di monitoraggio all'interno di un'area urbana che non sono quasi mai ottenibili con installazioni di superficie.

## **Nota**

Le attività descritte sono state eseguite nell'ambito della Convenzione fra Regione Toscana e INGV: "Monitoraggio sismico e valutazioni della pericolosità sismica in centri urbani significativi della Valtiberina", 2004 – 2007.

## **Ringraziamenti**

Un particolare ringraziamento va al collega Thomas Braun per il contributo fornito nella fase di installazione del sensore in pozzo e per i commenti e i suggerimenti ricevuti durante la stesura del rapporto.

## Bibliografia

Azzara, R.M. (2004) *Studio degli effetti di amplificazione delle sollecitazioni sismiche del terreno nella città di Arezzo*, Relazione dell'attività svolta da Novembre 2003 ad Aprile 2004 nell'ambito della Convenzione fra Comune di Arezzo e INGV per lo studio degli effetti di amplificazione locale delle onde sismiche all'interno dell'area urbana di Arezzo.

Azzara, R.M., F. Cara, G. Cultrera, G. Di Giulio (2004). *Manuale d'uso per lo scaricamento e l'analisi semiautomatica dei dati registrati da stazioni sismiche per lo studio degli effetti di sito*, Rapporto Tecnico INGV, n. 25, Luglio 2004.

Azzara R.M., Bergamaschi F., Braun T., M. Cocco, Piccinini D., Roselli P. (2007) *Monitoraggio sismico e valutazione della pericolosità sismica in centri urbani significativi dei comuni della Valtiberina*, relazione finale di attività nell'ambito della Convenzione tra la Regione Toscana e l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.

Bard, P.-Y., Duval A.-M., Lebrun B., Lachet C., Rieple J., Hatfeld D. (1997) *Reliability of the H/V technique for site effects measurements: An experimental assessment*, in Seventh International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering July 19-24, Istanbul, Turkey.

Bard P.-Y., (1999). *Microtremor measurements: A tool for site effect estimation?*, in: *The effects of surface Geology on Seismic Motion*, Irikura, Kudo, Okada and Sasatani Eds., 1251 – 1279, Balkema, Rotterdam, Netherlands.

Bergamaschi F., Azzara R.M., Braun T., Piana Agostinetti N., Piccinini D. (2005) *Monitoraggio sismico e valutazione della pericolosità sismica in centri urbani significativi dei comuni della Valtiberina*, Relazione del primo anno di attività nell'ambito della Convenzione tra la Regione Toscana e l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.

Bergamaschi F., Azzara R.M., Fabbroni P., Ferrini M. (2006). *Valutazione degli effetti locali nella città di Sansepolcro (AR): risultati preliminari ottenuti dai dati registrati dalla rete urbana*, Convegno Nazionale del GNGTS, .

Bergamaschi F., Azzara R.M., Braun T., Piccinini D. (2006a) *Monitoraggio sismico e valutazione della pericolosità sismica in centri urbani significativi dei comuni della Valtiberina*, secondo rapporto tecnico di attività nell'ambito della Convenzione tra la Regione Toscana e l'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia.

Bergamaschi F., Azzara R.M. (2007). *Evaluation of local site effects in the city of Sansepolcro (Central Italy): preliminary results obtained by a urban seismic network*, EGU General Assembly, Vienna, 15 – 20 April 2007.

Cara F., Rovelli A., Di Giulio G., Marra F., Braun T., Cultrera G., Azzara R., Boschi E. (2005) *The role of site effects on the intensity anomaly of San Giuliano di Puglia inferred from aftershocks of the Molise, Central Southern Italy, sequence, November 2002*, BSSA., 95, pp. 1457-1468, Aug. 2005.

Cocco M., F. Ardizzoni, R.M. Azzara, L. Dall'Olio, A. Delladio, M. Di Bona, L. Malagnini, L. Margheriti, A. Nardi, (2001). *Broadband waveforms and site effects at a borehole seismometer in the Po alluvial basin (Italy)*, Ann. Geofis., Vol. 44, n. 1, pp. 137-154, Dicembre 2001.

Cultrera G., Azzara R.M., Cara F., D'Anna R., Di Giulio G., Giammarinaro M.S., Passafiume L., Rovelli A., Vallone P. (2004) *Microtremor measurements in Palermo, Italy: a comparison with macroseismic intensity and earthquake ground motion*, 13 World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, Aug 1-6, 2004, Paper No. 15.

- Di Giulio G., Azzara R.M., Cultrera G., Giammarinaro M.S., Vallone P., Rovelli A. (2005) *Effect of local geology on ground motion in the city of Palermo, Italy, as inferred from aftershocks of the 6 September, 2002, Mw 5.9 earthquake*, BSSA., 95, 6, pp. 2328-2341, Dec. 2005.
- Haskell, N.A. (1960) *Crustal reflection of plane SH waves*, J. Geoph. Res., 65, 4147 – 4150.
- Hutt, C.R., H.F. Bolton, L.G. Holcomb, (2002) US contribution to Digital Global Seismograph Networks, in International Handbook of Earthquake & Engineering Seismology, edited by W.H.K. Lee, H. Kanamori, P.C. Jennings, C. Kisslinger, Academic Press, 319-332.
- Ibs-von Seht M., J. Wohlenberg, 1999, Microtremor measurements used to map thickness of soft sediments, B.S.S.A, Vol. 89, N. 1, pp. 250-259, Feb. 1999.
- Improta L., Di Giulio G., Rovelli A. (2005) *Variations of local seismic response in Benevento (Southern Italy) using earthquakes and ambient noise recordings*, Journal of Seismology, 9, 191 – 210.
- Lermo J., F.J. Chavez-Garcia (1993) *Site effect evaluation using spectral ratios with only one station*, BSSA., 83, pp. 1571-1594, 1993.
- Lermo J., F.J. Chavez-Garcia (1994) *Are microtremors useful in site response evaluation?*, BSSA, 84, 5, pp. 1350-1364, Oct. 1994.
- Margheriti L., R.M. Azzara, M. Cocco & A Delladio & A. Nardi (2000). *Analysis of borehole broadband recordings: test site in the Po basin, Northern Italy*, BSSA, 90, 6, pp. 1454-1463, December 2000.
- Nakamura Y. (1989) *A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface*, QR of RTRI, 30, 25-33.
- Peterson J. (1993) *Observations and modelling of seismic background noise*. U.S. Dept. of Interior Geological Survey, Open File Report 93-322. Albuquerque, New Mexico. 1993.
- SESAME Project (2004) Final Report WP8, Nature of noise wavefield, Deliverable D13.08, European Commission – Research General Directorate, Project No. EVG1-CT-2000-00026 SESAME, July 2004.

**Coordinamento editoriale e impaginazione**

Centro Editoriale Nazionale | INGV

**Progetto grafico e redazionale**

Laboratorio Grafica e Immagini | INGV Roma

© 2008 INGV Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia

Via di Vigna Murata, 605

00143 Roma

Tel. +39 06518601 Fax +39 065041181

**<http://www.ingv.it>**



**Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia**