

La risposta sismica delle vallate alpine

Enrico Priolo

*Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale - OGS
Dipartimento Centro di Ricerche Sismologiche - CRS, Udine-Trieste*



Tolmezzo, Valle del Tagliamento (UD)

Sommario

- Amplificazione del moto del suolo;
- Effetti di amplificazione nelle valli;
- Caratteristiche delle valli alpine;
- Cosa misurare;
- Possibili implicazioni a fini normativi;
- Conclusioni.

Risposta sismica di sito

Per risposta sismica locale si intendono le variazioni dei parametri della pericolosità di base dovute alle condizioni geologiche e geomorfologiche del sito.

Da: Naso, Petitta e Scarascia Mugnozza (2004). *La Microzonazione Sismica*. CD-ROM allegato a *Geologia Tecnica & Ambientale*, 4/2004.

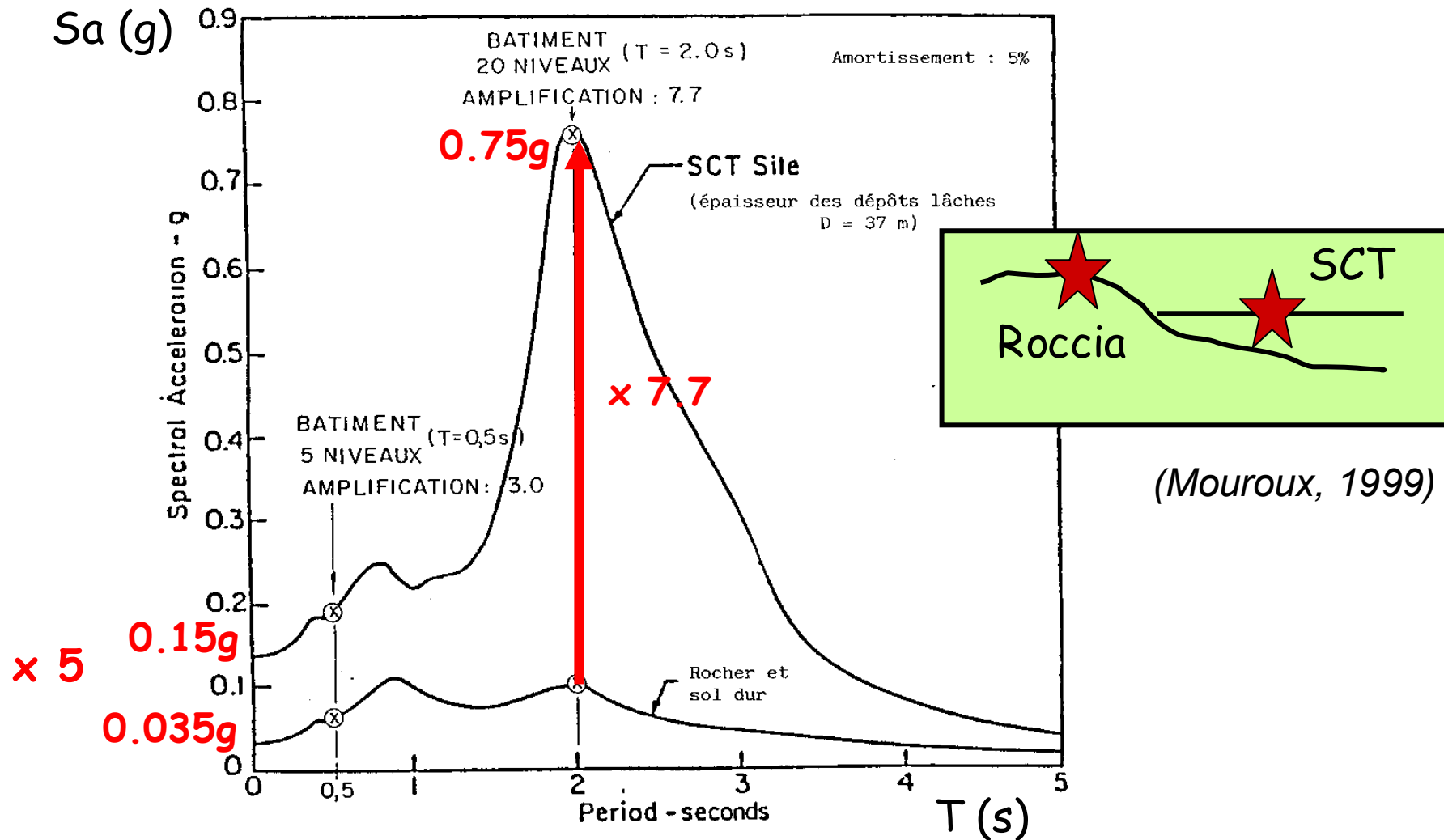
Cause degli effetti di sito:

- geologia locale;
- morfologia superficiale e sepolta.

Gli effetti possono dipendere dalla posizione della sorgente sismica, ovvero dalla direzione di provenienza del campo d'onda.

Effetto di sito devastante

Citta del Messico 1985

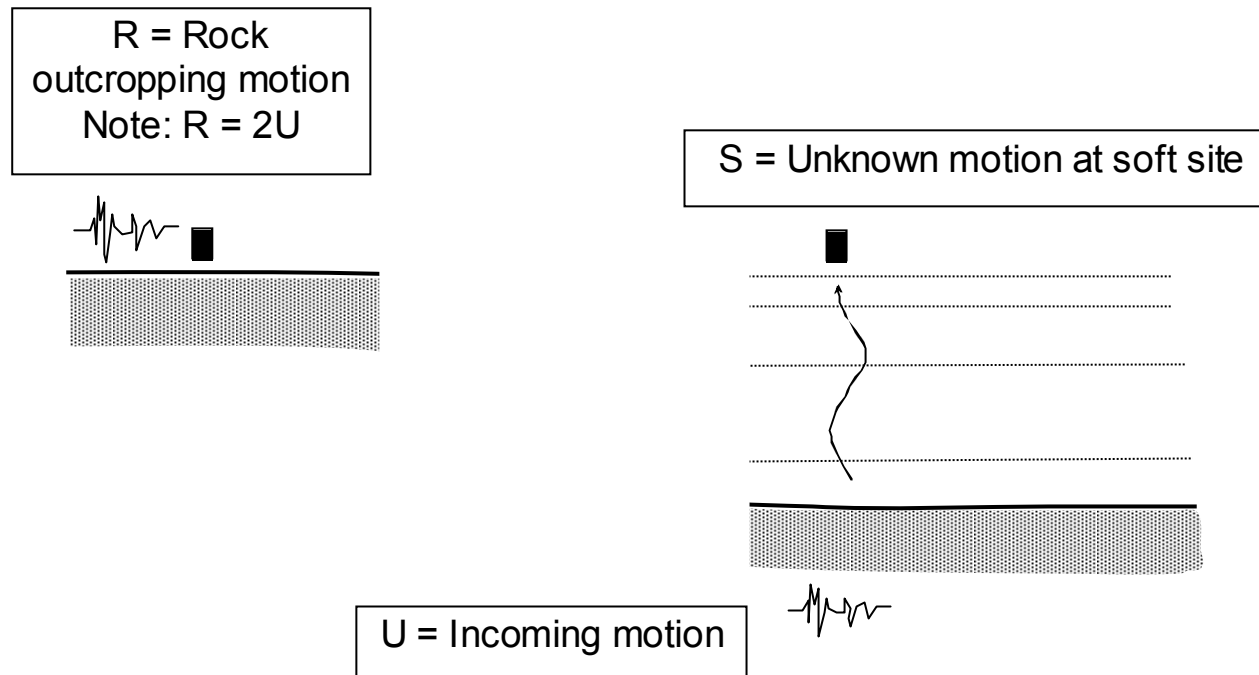


Cause dell'amplificazione

Modello di sito classico: ingegneristico 1D:

- *bedrock rigido;*
- *sedimenti con stratificazione orizzontale.*

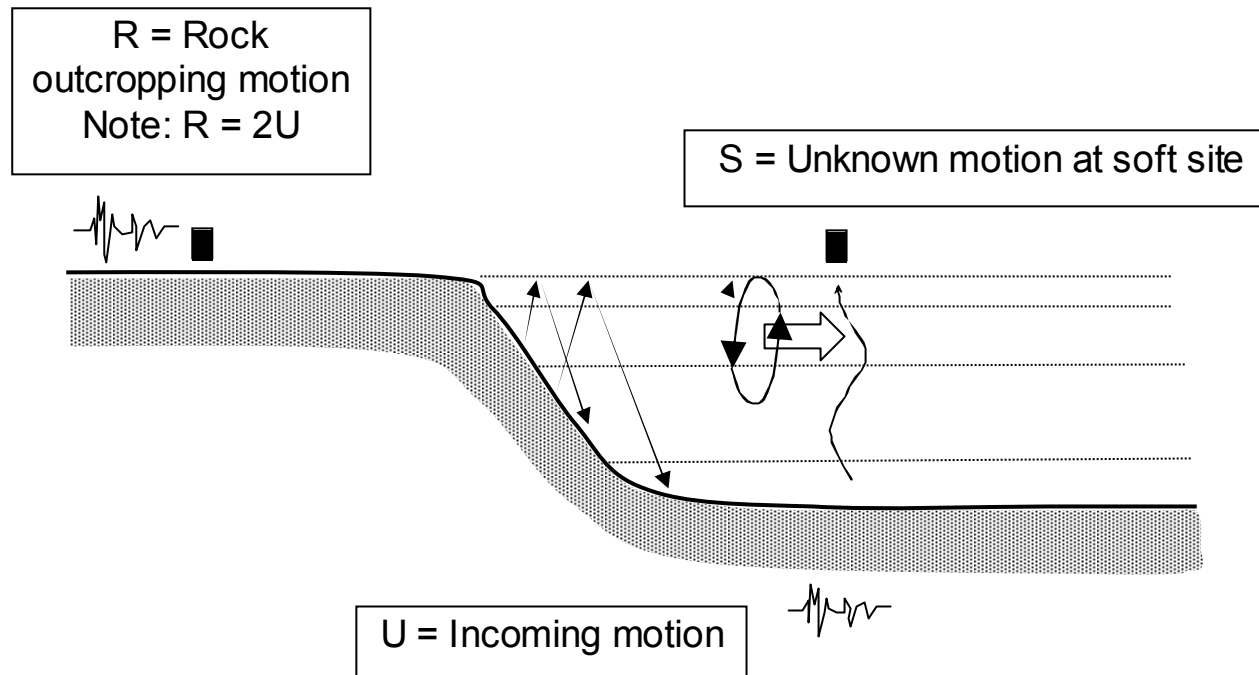
L'amplificazione è effetto dell'intrappolamento dell'energia principalmente per riverberazione verticale.



Cause dell'amplificazione

In presenza di eterogeneità laterali il campo d'onda diventa complesso e si generano altri effetti e tipi di onde:

- **effetti di bordo;**
- **onde di superficie** (di Rayleigh e di Love).



Cause dell'amplificazione

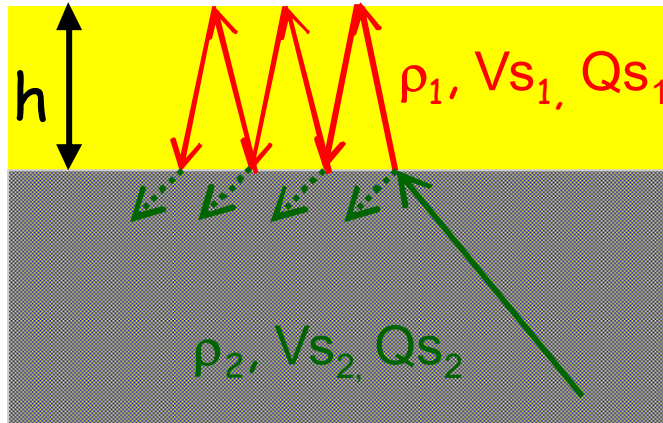
In presenza di eterogeneità laterali il campo d'onda diventa complesso e si generano altri effetti e tipi di onde:

- **effetti di bordo;**
- **onde di superficie** (di Rayleigh e di Love).

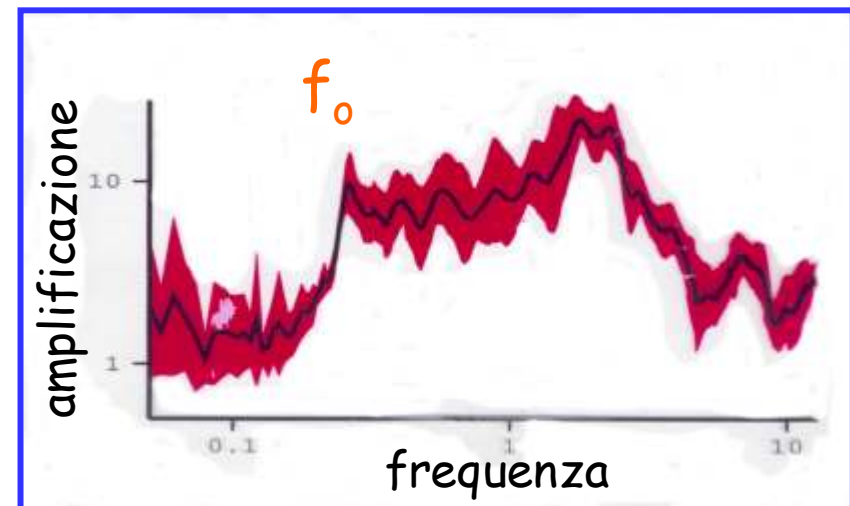
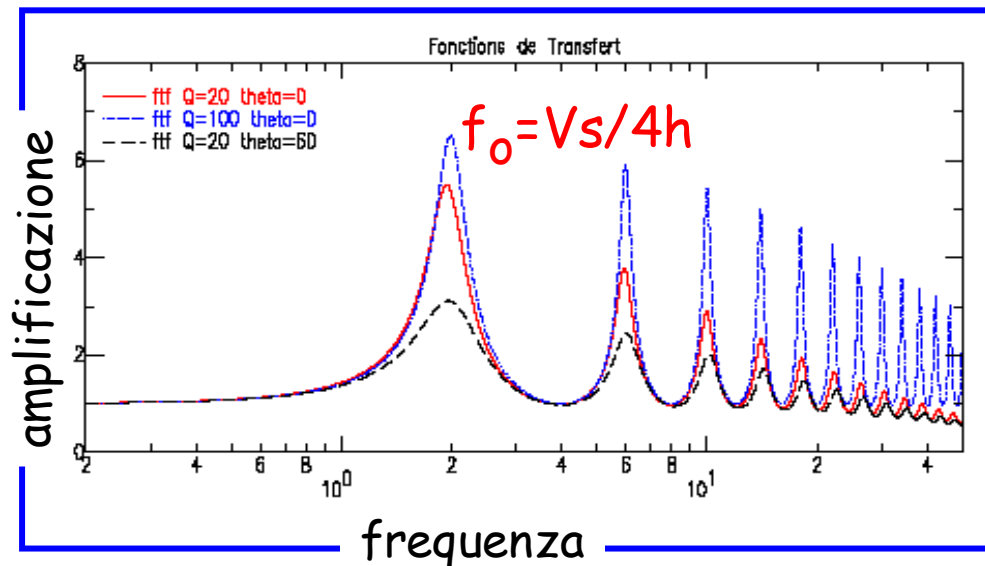
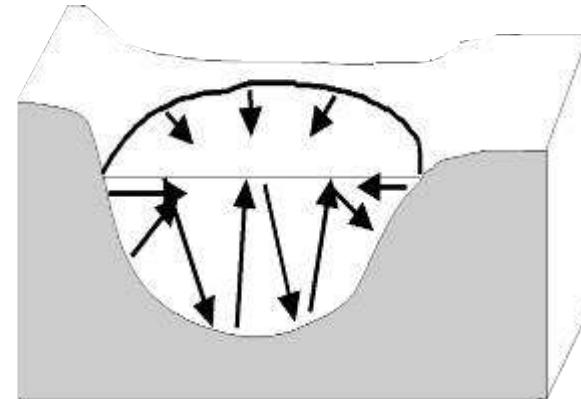
*“The resulting effects of engineering interest are a **large enhancement** of the sediment amplification, the **prolongation** of signal duration and the development of significant **differential motion**.”* (Bard & Bouchon, BSSA, 1985)

Cause dell'amplificazione

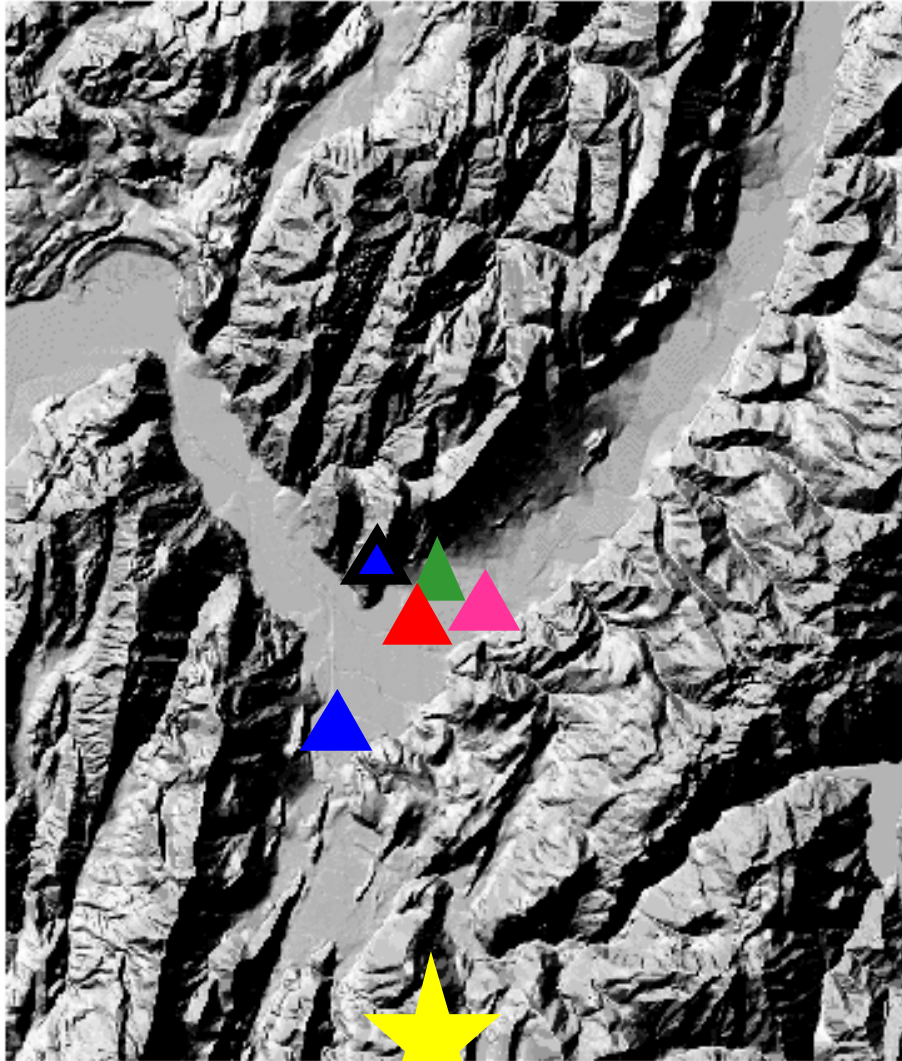
1) **Caso 1D:**
Riverberazione verticale



2) **Caso 2D / 3D:**
Riverberazioni laterali e focalizzazioni
+ sedimenti fini (fluviali e lacustri)

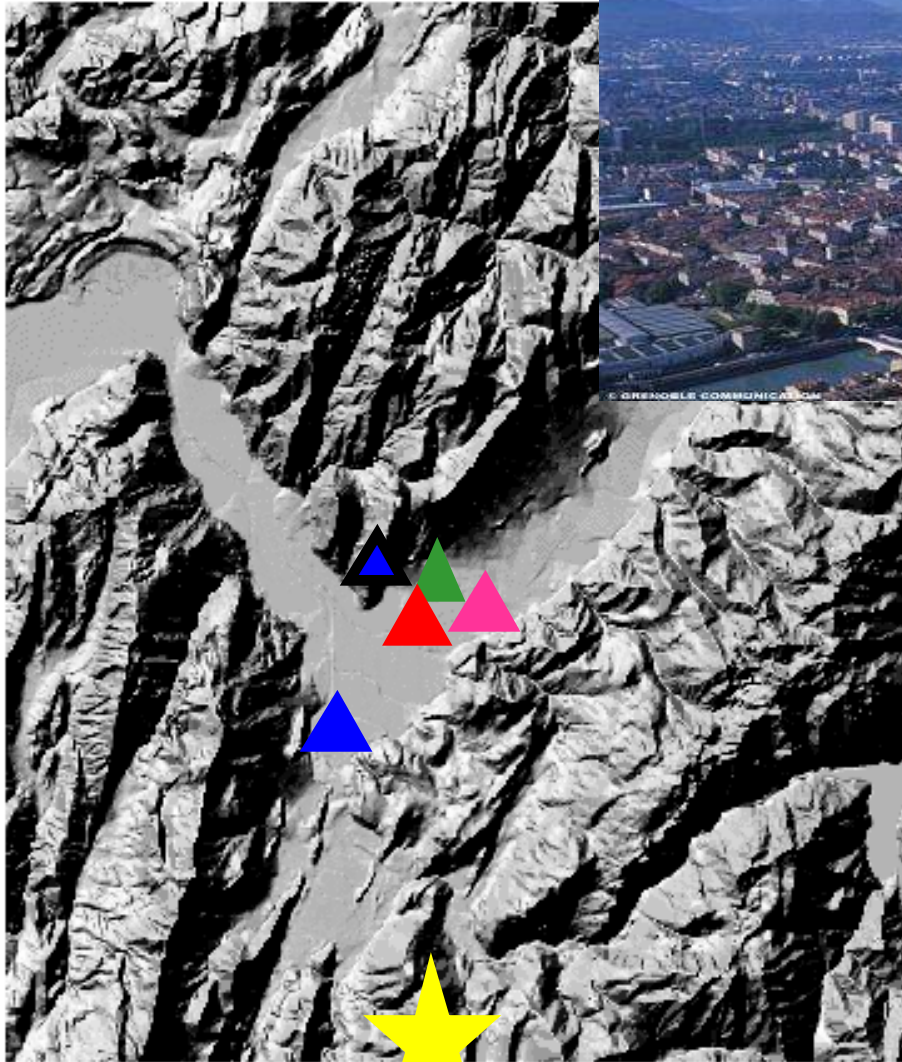


Esempio di valle alpina: Grenoble



- Valle glaciale:
 - Depositi recenti (post-glaciali < 25 000 anni)
 - Spessori elevati (> 900m)
 - Depositi lacustri (argille)
 - Geometria 2D / 3D di valle molto incassata
 - Basamento molto rigido

Esempio di valle alpina: Grenoble



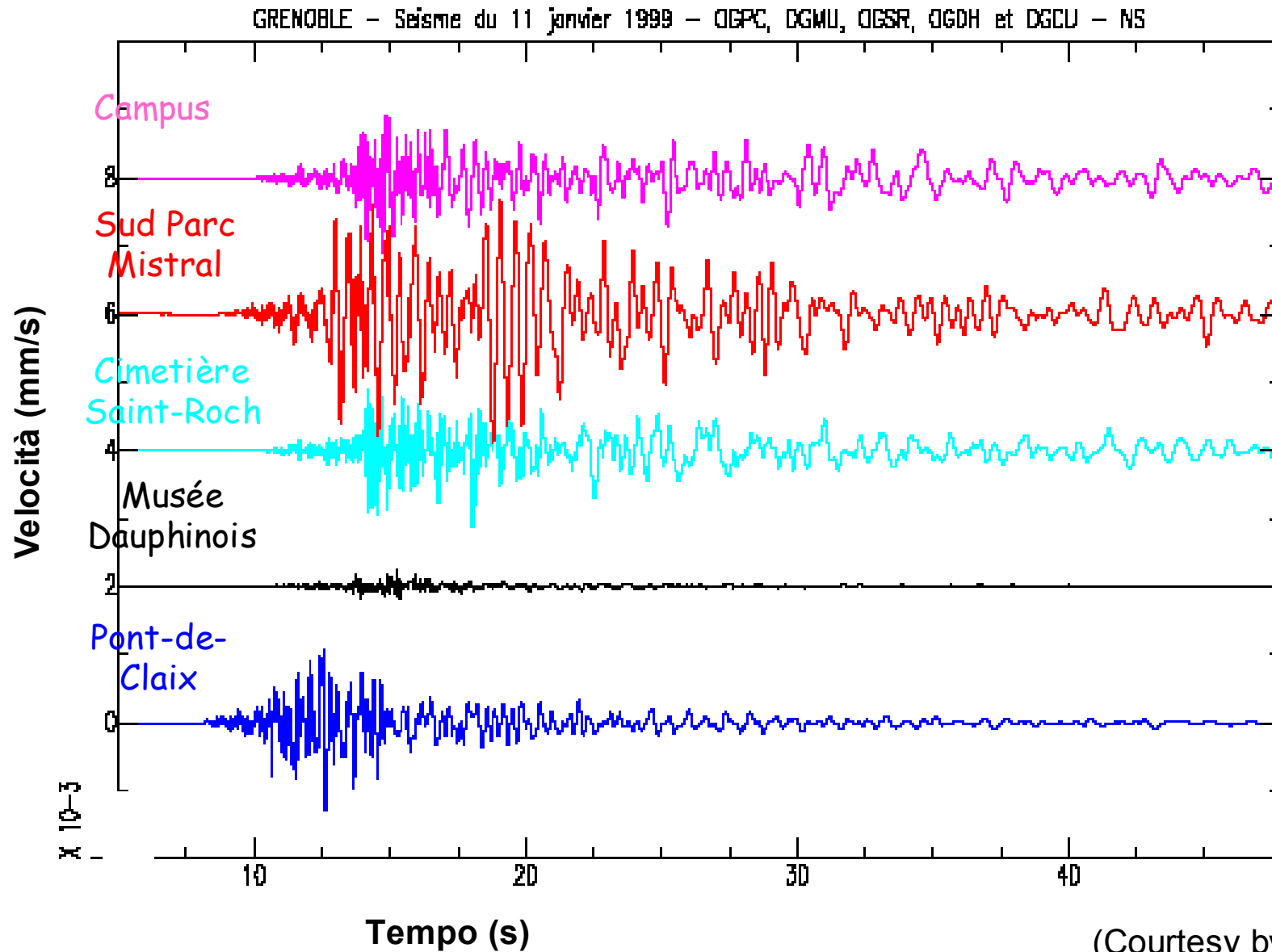
- Valle glaciale:



- Sismicità moderata ma:
 - Urbanizzazione diffusa in tutta la valle (~ 160.000 → 500.000 ab.)
 - Importanti infrastrutture e industrie (nucleari, chimiche, high-tech)
- Esempio: terremoto di Laffrey

Grenoble

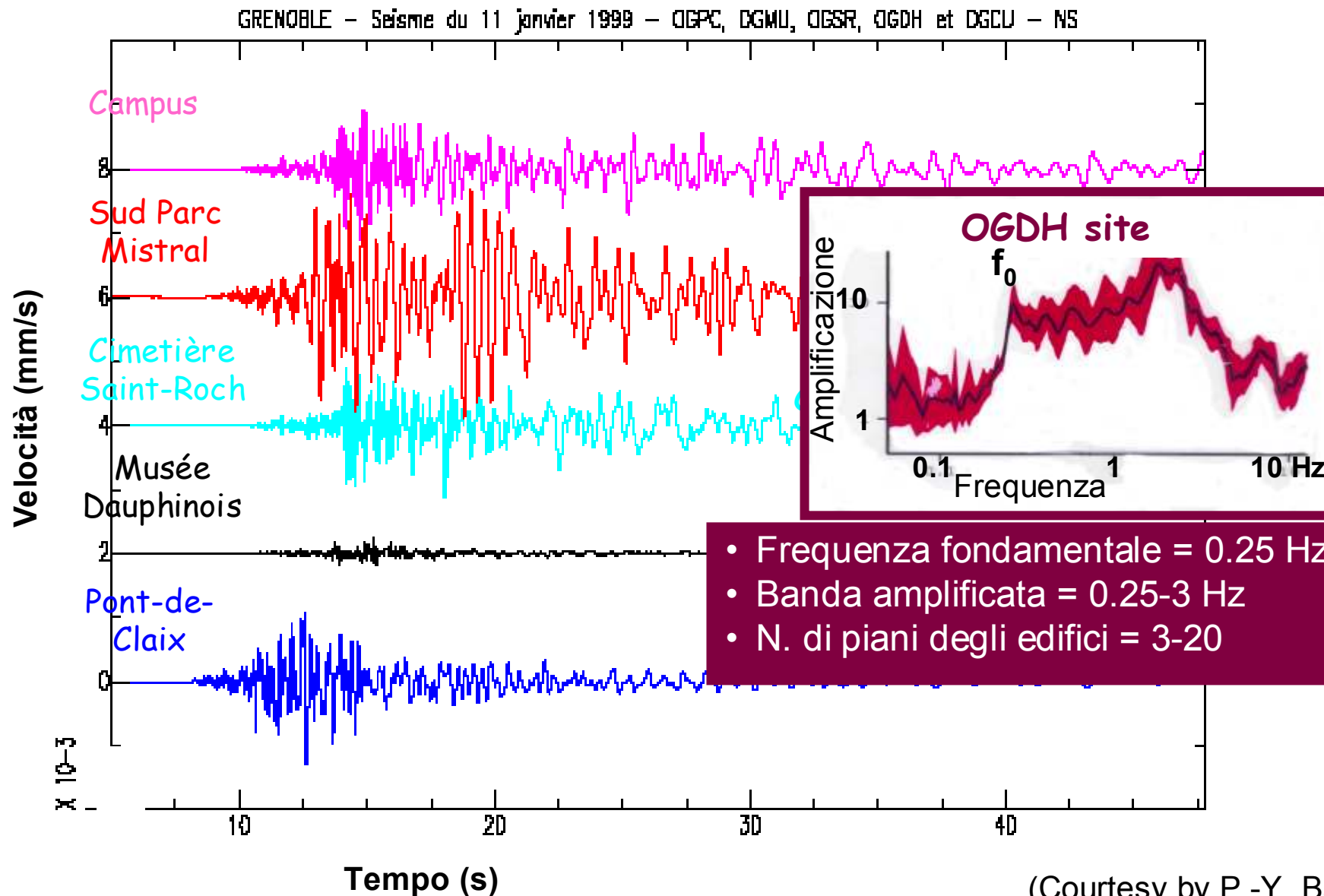
Registrazione del terremoto di Laffrey ($M_L=3.5$) del 11/01/1999



(Courtesy by P.-Y. Bard)

Grenoble

Registrazione del terremoto di Laffrey ($M_L=3.5$) del 11/01/1999

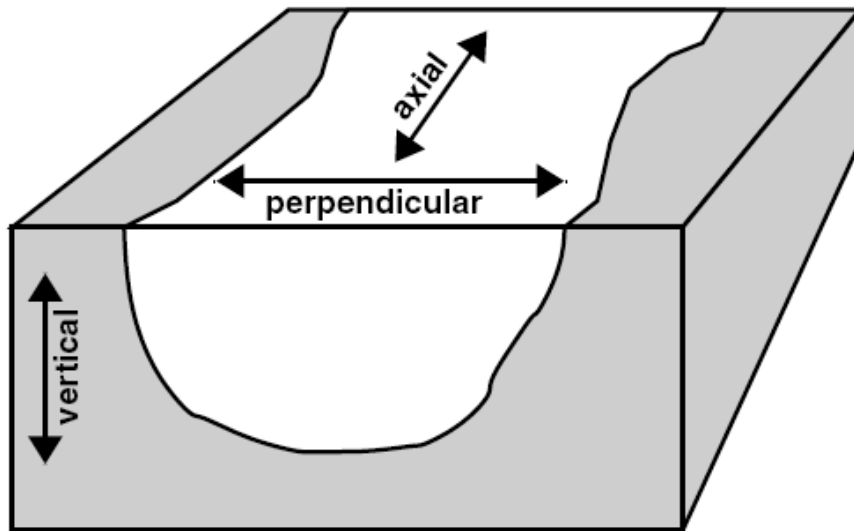


(Courtesy by P.-Y. Bard)

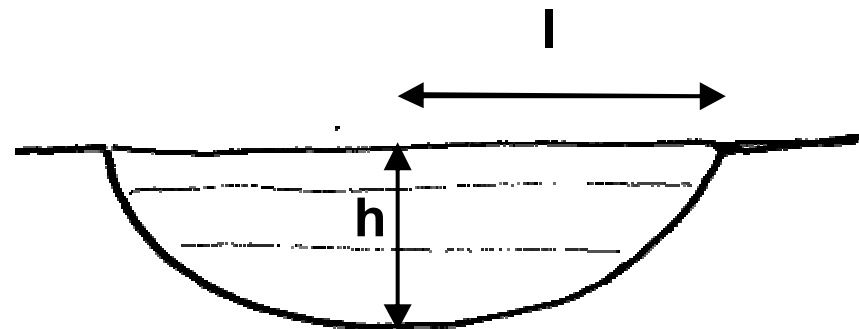
Vibrazione di una valle

Fattori importanti

Assi di simmetria



Rapporto di forma h/l (*Shape Ratio*)



Parametri:

- **geometrici** (forma del bacino e struttura interna);
- **meccanici** (V_p , V_s , ρ , Q_p , Q_s nel basamento roccioso e nel bacino).

⇒ **contrasto di impedenza:** $(\rho_1 V_{s_1}) / (\rho_2 V_{s_2})$

Vibrazione di una valle

(Bard & Bouchon, BSSA, 1985)

Vibrazioni nei tre modi fondamentali:

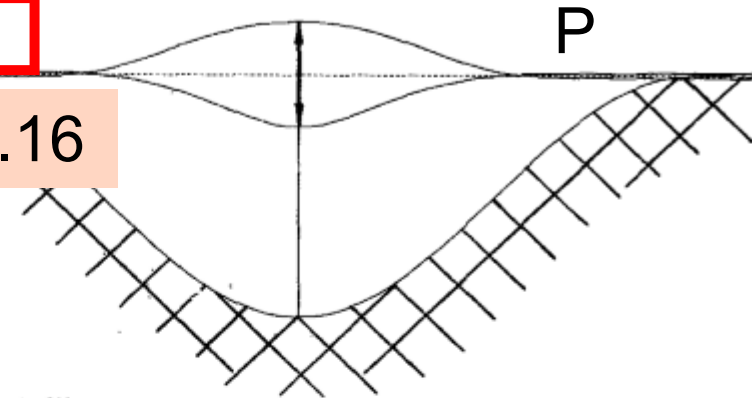
- la frequenza di picco resta invariata lungo tutta la sezione della valle;
- moto in fase;
- graduale decadimento dell'amplificazione dal centro ai bordi.

Frequenza e ampiezza di vibrazione dipendono dalla forma e dalle caratteristiche meccaniche dei depositi.

Bulk mode, incident P waves

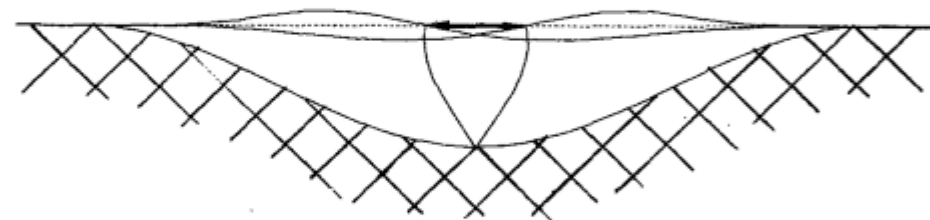
$$h/l = 0.6 ; f_0/f_h = 1.16$$

$$h/l=0.6; f_0/f_h=1.16$$



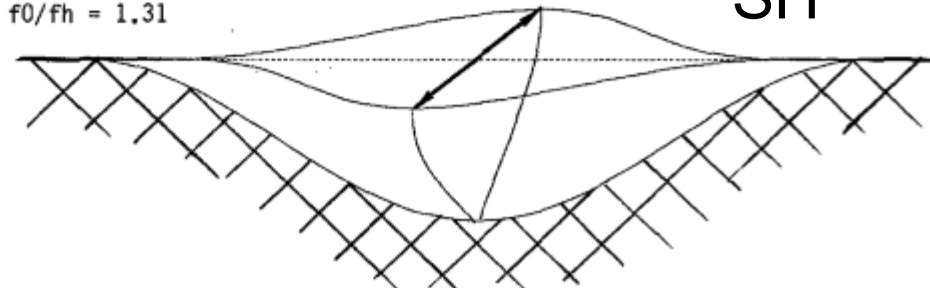
In-plane shear mode, incident SV waves.

$$h/l = 0.3 ; f_0/f_h = 1.41$$



Anti-plane shear mode, incident SH waves.

$$h/l = 0.4 ; f_0/f_h = 1.31$$



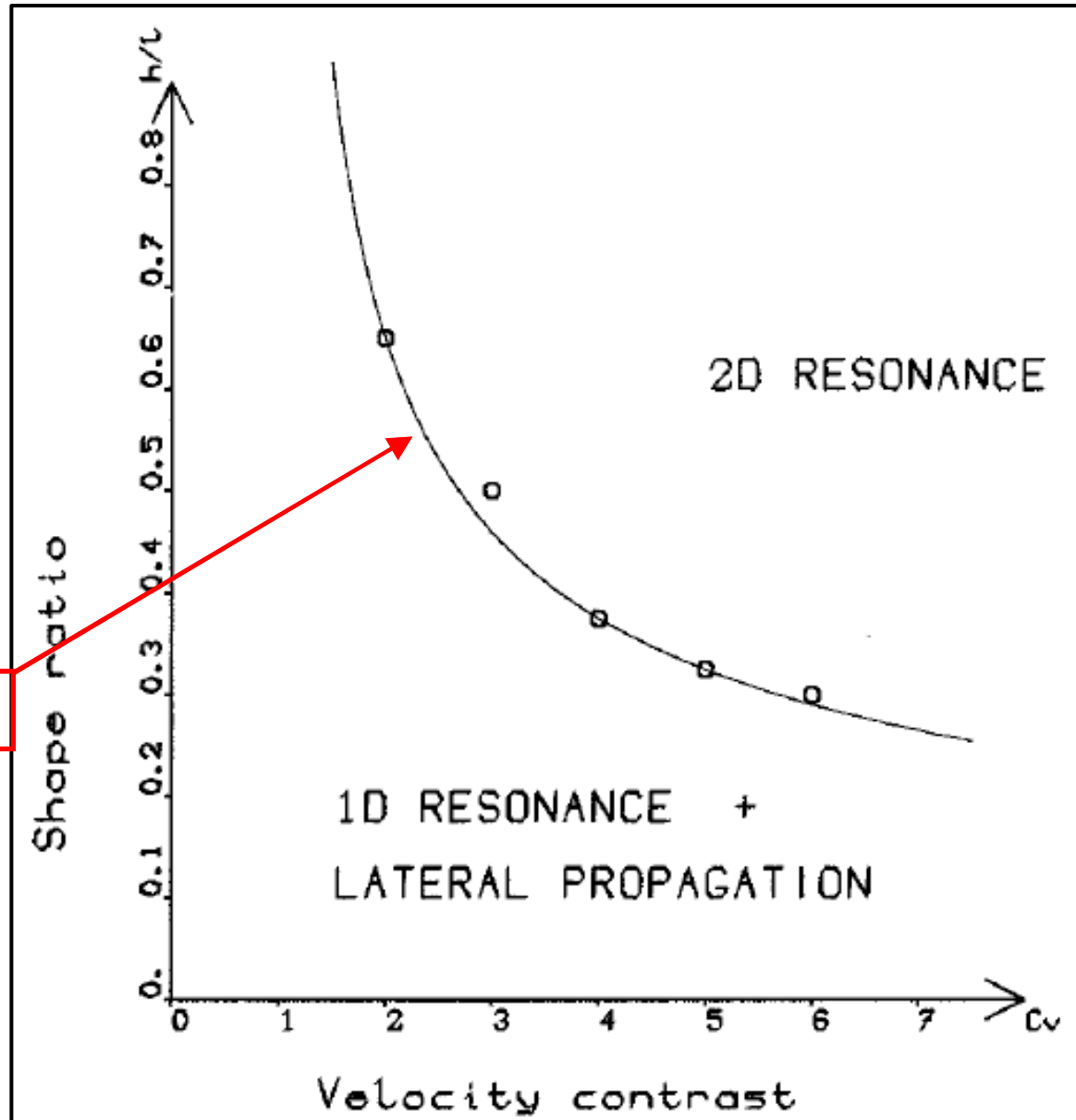
Vibrazione di una valle

(Bard & Bouchon, BSSA, 1985)

Tipo di risposta 1D o 2D?

Il tipo di risposta della valle (1D/2D) dipende dalla **forma** e dal **contrasto di velocità** (o impedenza) tra i depositi e il basamento.

Rapporto di forma critico

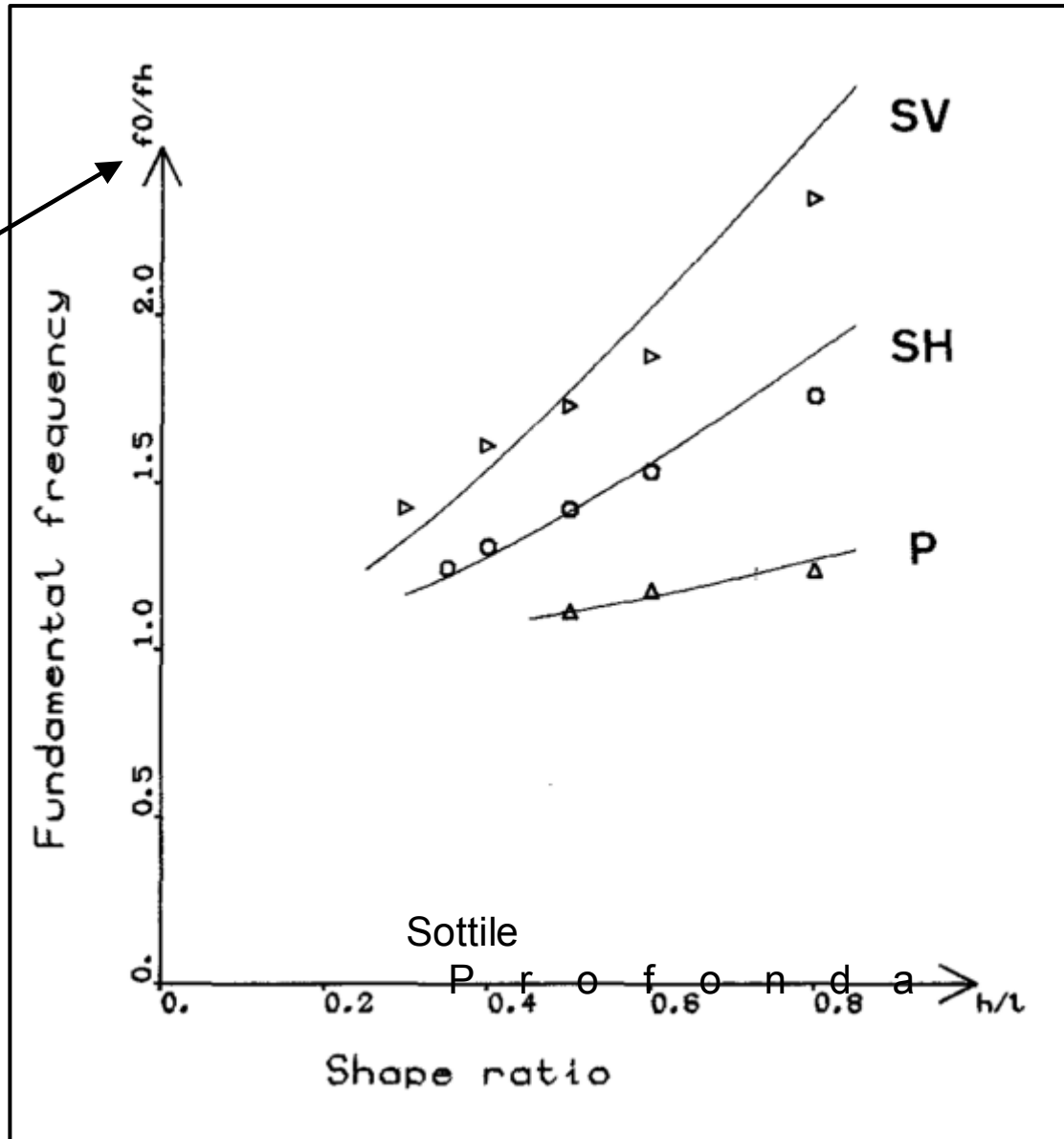


Vibrazione di una valle

(Bard & Bouchon, BSSA, 1985)

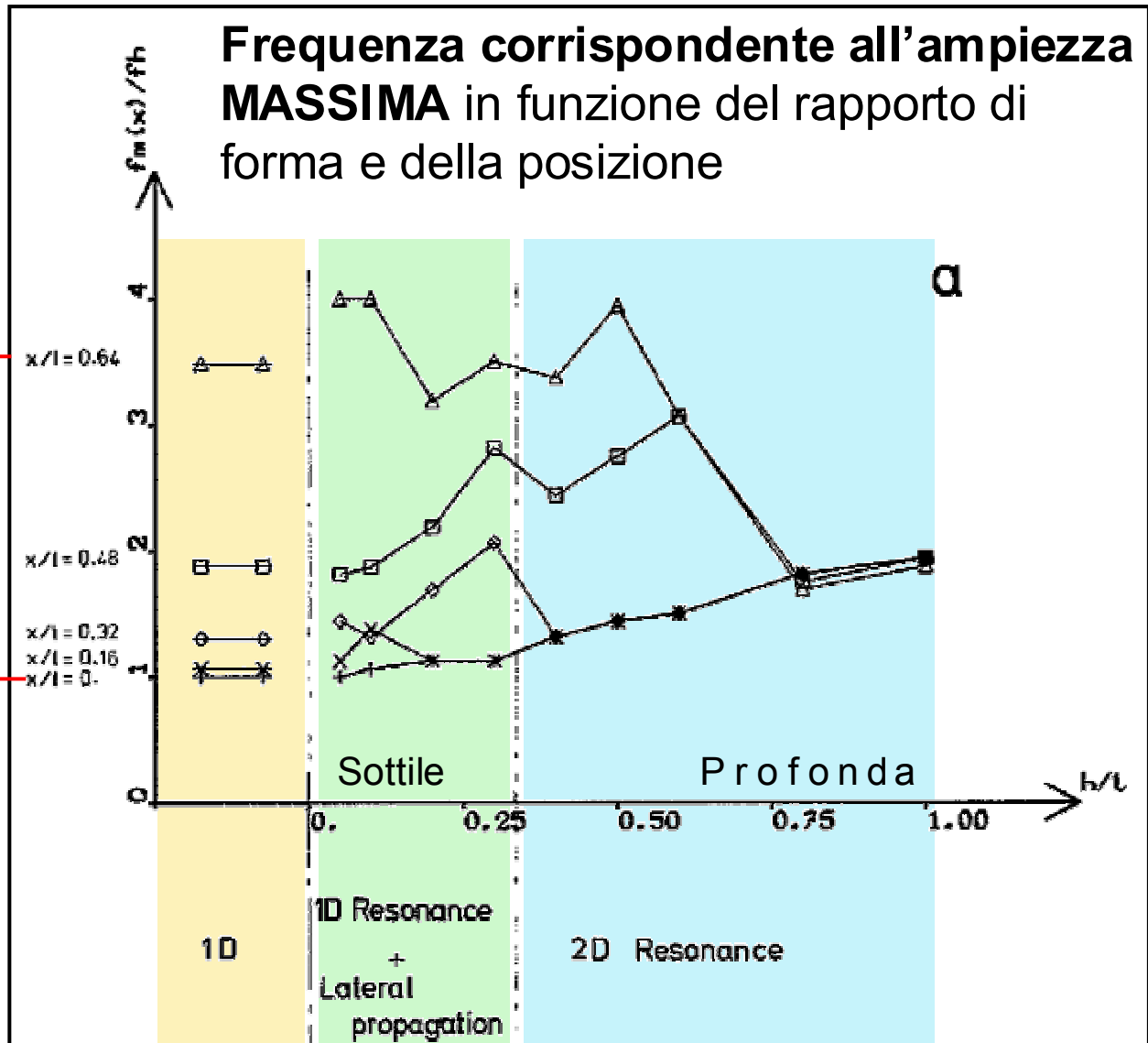
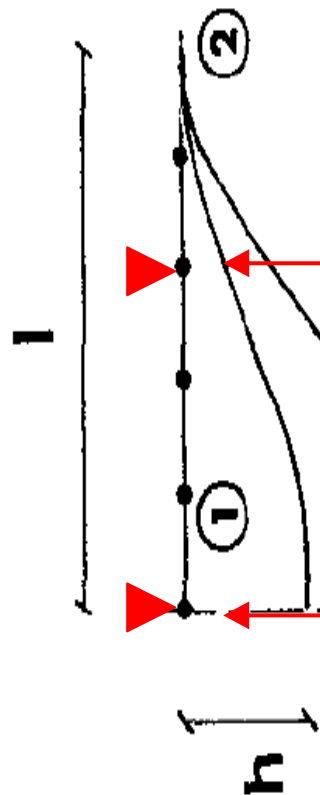
Frequenza fondamentale
in funzione del rapporto di
forma

f_0/f_h frequenza normalizzata
alla frequenza di vibrazione 1D



Vibrazione di una valle

(Bard & Bouchon, BSSA, 1985)



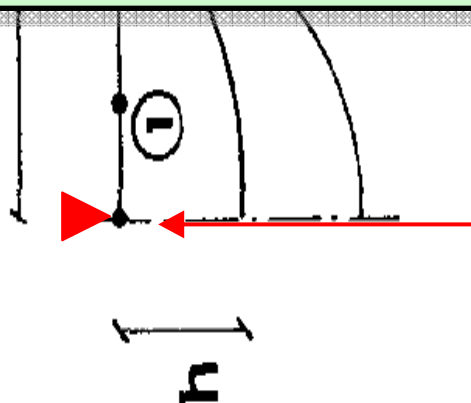
Vibrazione di una valle

(Bard & Bouchon, BSSA, 1985)

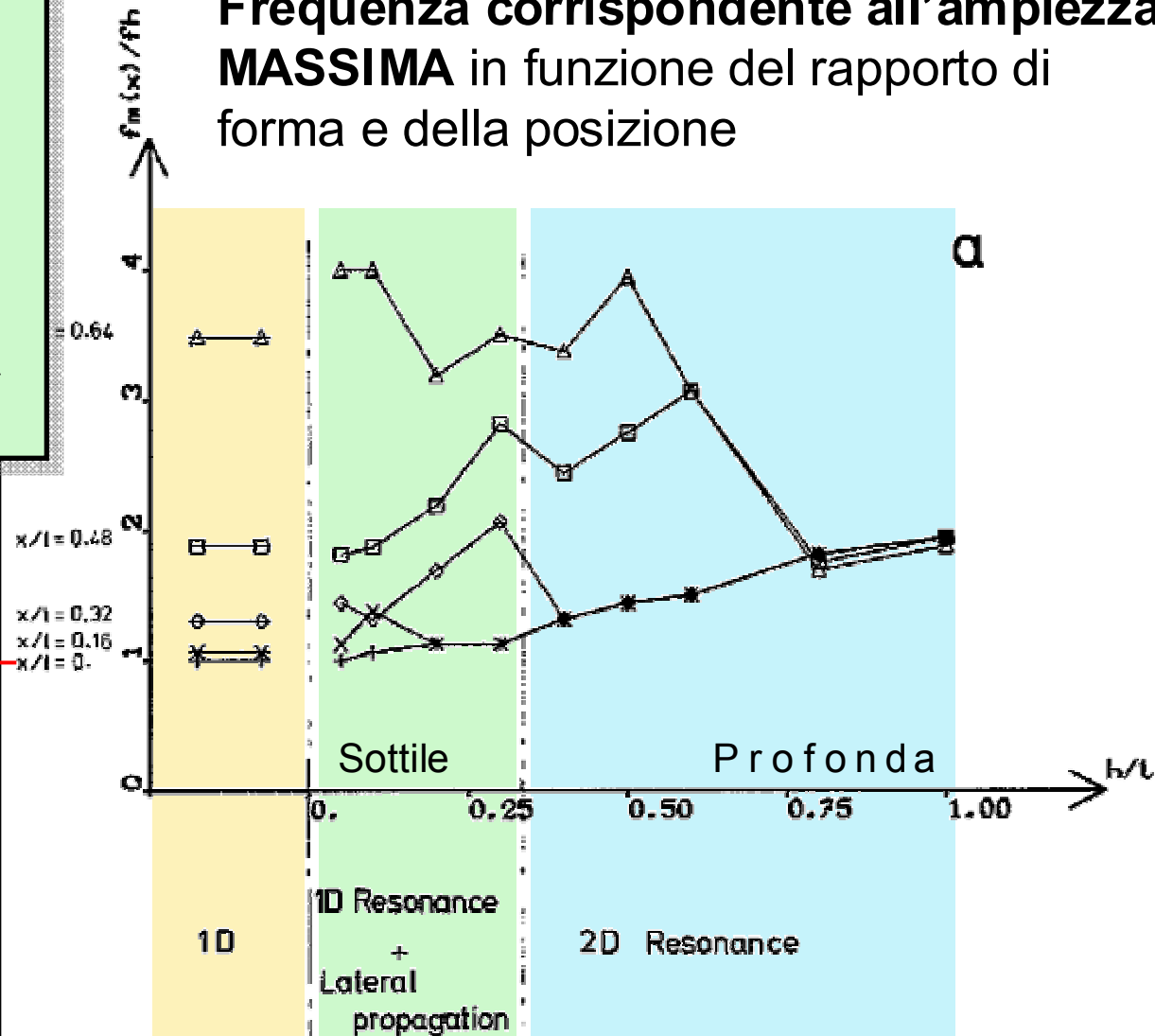
VALLI SOTTILI

Al bordo il moto massimo si esprime a frequenze più alte.

Più verso il centro la frequenza tende a quella 1D, ma è "disturbata".



Frequenza corrispondente all'ampiezza **MASSIMA** in funzione del rapporto di forma e della posizione



Vibrazione di una valle

(Bard & Bouchon, BSSA, 1985)

VALLI SOTTILI

Al bordo il moto massimo si esprime a frequenze più alte.

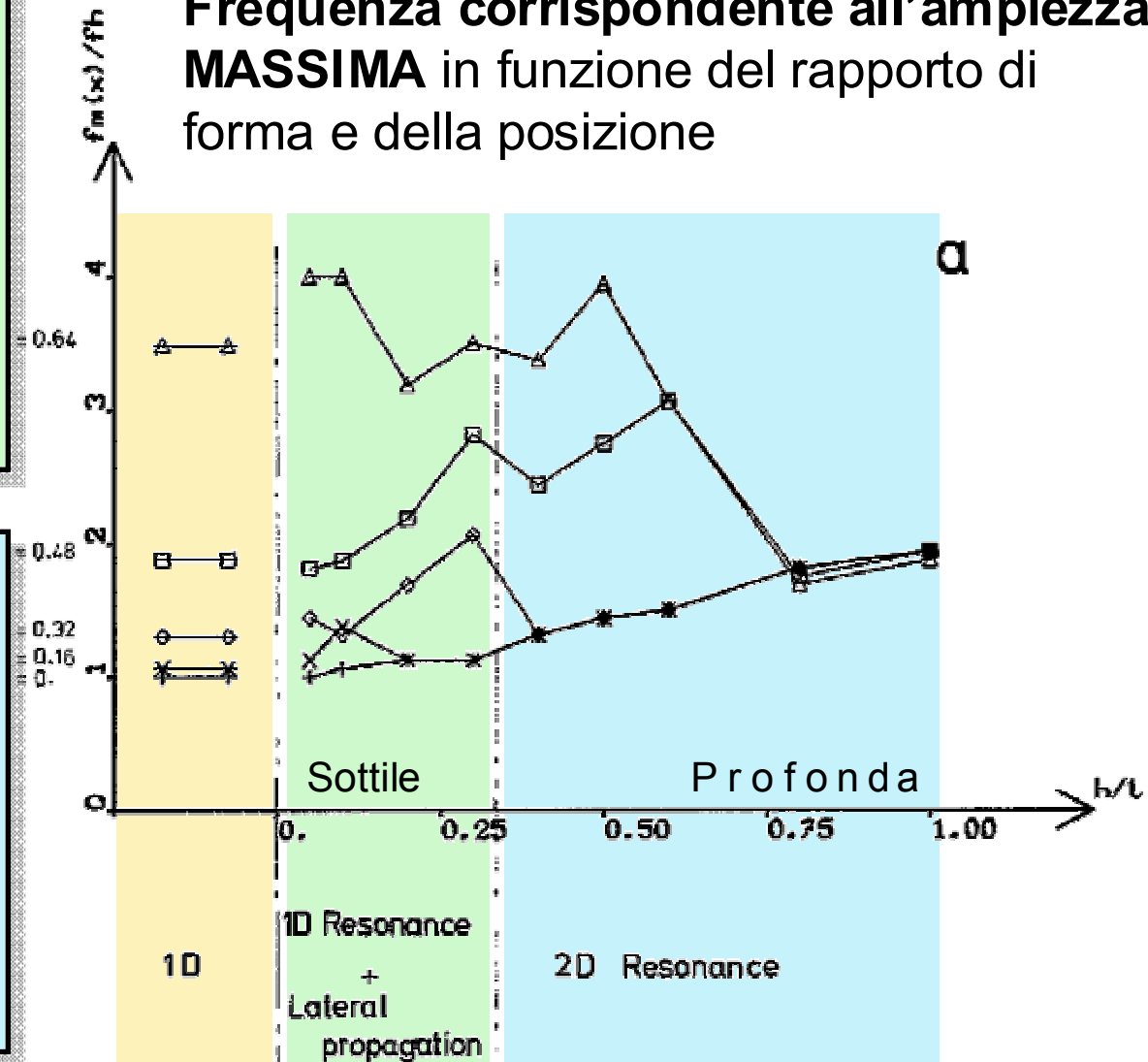
Più verso il centro la frequenza tende a quella 1D, ma è "disturbata".

VALLI PROFONDE

L'area di bordo si restringe.

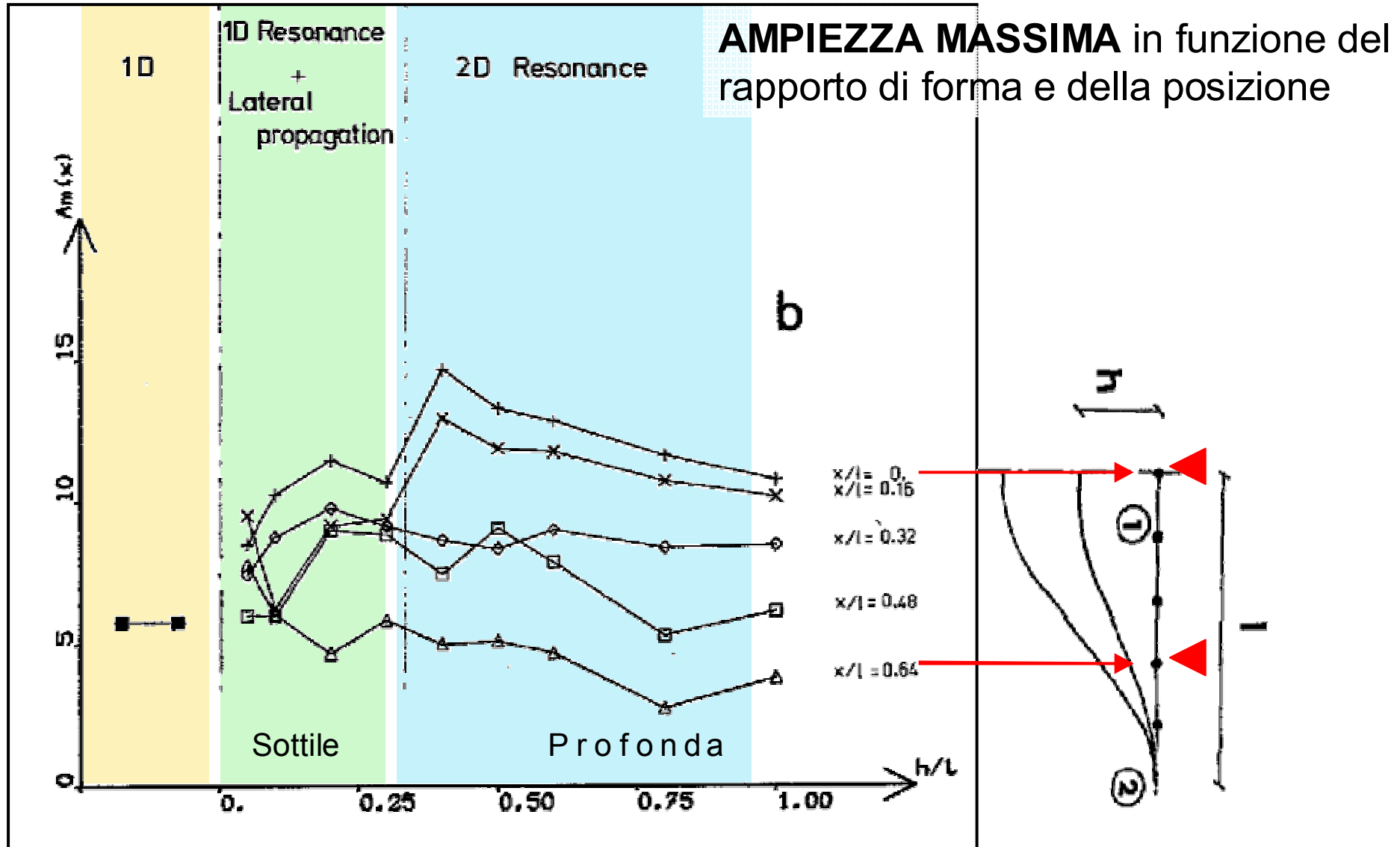
In una vasta area il moto massimo si esprime alle frequenze corrispondenti ai modi 2D.

Frequenza corrispondente all'ampiezza **MASSIMA** in funzione del rapporto di forma e della posizione



Vibrazione di una valle

(Bard & Bouchon, BSSA, 1985)



Vibrazione di una valle

Altri effetti

- La **durata** del segnale aumenta progressivamente all'interno della valle ed è massima in corrispondenza della frequenza fondamentale (*Beauval et al., BSSA, 2003; studio sulla risposta del Volvi Lake Basin*);
- La **topografia** circostante ha scarso effetto rispetto alle amplificazioni che si generano internamente al bacino (*Ma et al., BSSA, 2007; studio sulla risposta del Bacino di Los Angeles*).

Le valli alpine

Il progetto SISMOVALP

Il **progetto SISMOVALP** ha l'obiettivo di individuare e quantificare gli elementi fondamentali che caratterizzano la risposta sismica degli ambienti vallivi alpini in aree sismicamente attive, e di fornire indicazioni per l'aggiornamento della normativa per la progettazione antisismica.

Durata del progetto:

09/2003 – 09/2006 (→ 03/2007)

www-igut.obs.ujf-grenoble.fr/sismovalp

... *sito del progetto*

www2.ogs.trieste.it/sismovalp

... *meeting conclusivo a Tolmezzo
(presentazioni disponibili)*

Le vallate alpine hanno
una medesima origine

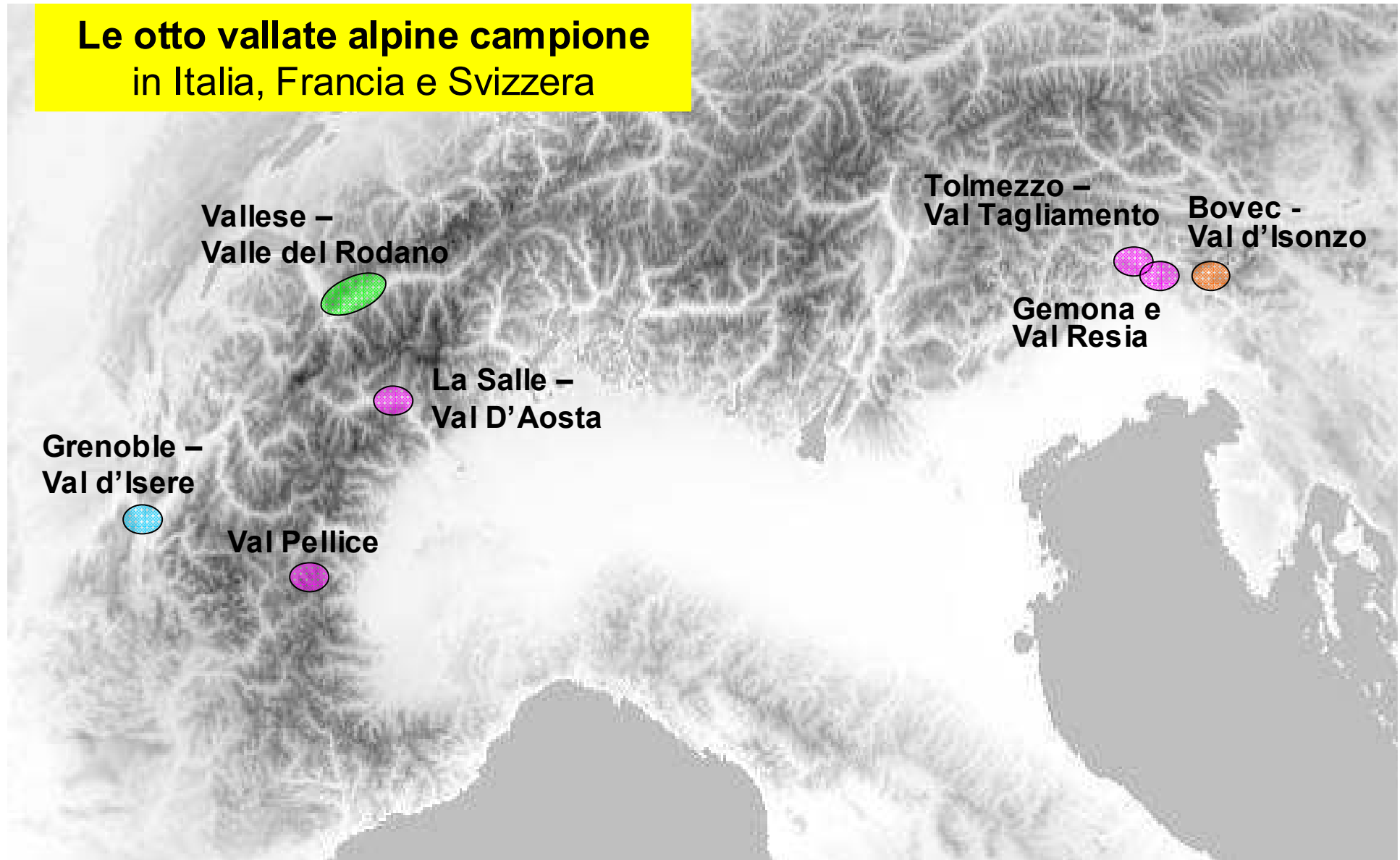
⇒

Si possono riconoscere elementi
costitutivi comuni ed utilizzarli per
valutazioni di hazard sismico

Le valli alpine

Il progetto SISMOVALP

Le otto vallate alpine campione in Italia, Francia e Svizzera



Le valli alpine

Il Progetto SISMOVALP

CDROM1

- Sintesi delle caratteristiche delle valli alpine studiate.
- Codici di calcolo ed elaborazione.

CDROM2

- Dati accelerometrici alpini;
- Sintesi delle pubblicazioni su pericolosità/rischio sismico nelle vallate alpine.



Le valli alpine

Sintesi delle caratteristiche

(Lacave & Lemeille, 2006)

| VALLEY NAME | Grenoble Isère river valley | Lower Valais (Massongex - Aigle) | Bovec basin (upper Soca valley) | Tagliamento river high valley | Gemona del Friuli | Val Resia | Val Pellice | La Salle (Val d'Aosta) |
|----------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| COUNTRY | France | Switzerland | Slovenia | Italy | Italy | Italy | Italy | Italy |
| GEOGRAPHY | | | | | | | | |
| Orientation | NNW - SSE | NNW - SSE | ENE - WSW | NW - SE | E - W | E - W | E - W | NE-SW |
| General shape | Basin Y shape | U shape | basin | U shape | Triangular alluvial fan | V shape | V shape | Triangular alluvial fan |
| Length | 61 km | Total Rhône valley ~150 km, study area 7.5km | 6 km | Total: 40Km, study area:7.5km | 2.4 km | 20 km | 35 km | 1.5 km |
| Main width | 5 km | 5 km | 2 km | 1.5 to 2 km | 1.5 to 2.5 km | 4 to 8 km | 2 km | 2 to 2.5 km |
| Thickness of quaternary deposits | few to 900 m | 0 to 900 m | 0 to 260 m | 0 to 120m | max 100-150 m | 5 to 50 m | 10 to over 180 m (northern side) | max 200 m |
| Elevation above sea level | 198 to 475 m | 380 to 400 m | 350 to 450 m | 270 to 320 m | 195 to 560 m | 400 to 700 m | 400 m to 1000 m (main towns) | 850 to 1100 m |
| HISTORY | | | | | | | | |
| General geological evolution | Riss : first glacial trough dug in the bedrock, glacier melting, lake, lacustrine sediments. Würm : second trough dug in the sediments, down to the bedrock, glacier melting, lake, lacustrine sediments, fluvial deposits. | Several glacial stages, alternating with lacustrine and fluvial environments with recent deltaic and slope deposits on the valley edges | Succession of glacial, lacustrine and fluvial environments during the Quaternary | Two main orogenic phases; intense tectonic activity; several glacial phases in Pleistocene age; today the valley is characterised by Tagliamento river and its tributaries, alluvial fans and tectonic terraces (high 100m to the plain) | Gemona alluvial fan has intermediate character between alluvial and detritic. Rockfalls have also contributed to its formation on the flanks. Fan's surface post-glacial, alluvial deposits | Numerous glaciations, erosive processes alternatively due to glacial and fluvial actions. Today, most of the valley is characterized by alluvial terraces, several tens of meters high. | Lacustrine deposits at the bottom of the valley, with alternating fluvial sequences. Over are fluvial and torretial deposits. To a lesser extent, some glacial deposits. Glacial effects have been very small in this valley. | During the Quaternary, succession of alluvial fan deposits, made up of medium to coarse grain size, on deposits of glacial environment. |

Le valli alpine

Sintesi delle caratteristiche

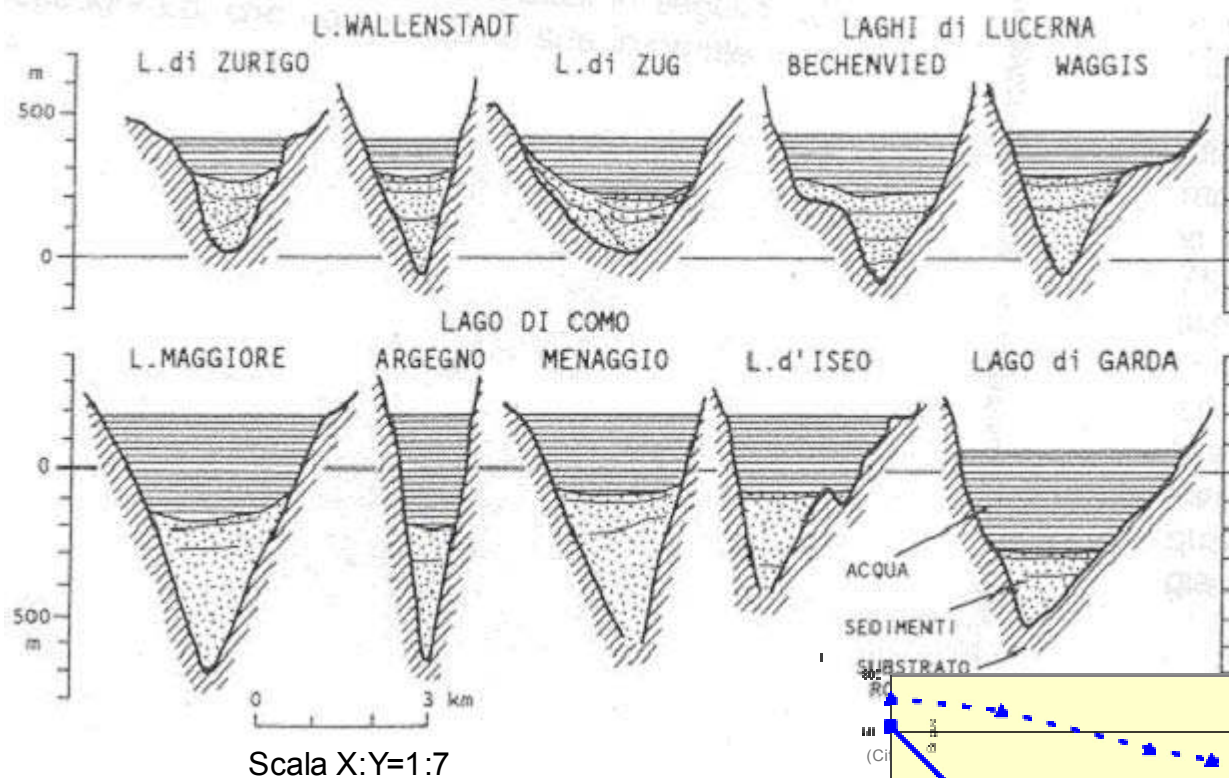
(Lacave & Lemeille, 2006)

| VALLEY NAME | Grenoble Isère river valley | Lower Valais (Massongex - Aigle) | Bovec basin (upper Soca valley) | Tagliamento river high valley | Gemona del Friuli | Val Resia | Val Pellice | La Salle (Val d'Aosta) |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| COUNTRY | France | Switzerland | Slovenia | Italy | Italy | Italy | Italy | Italy |
| GEOGRAPHY | | | | | | | | |
| | | | | | | | | NE-SW |
| | | | | | | | | Triangular alluvial fan |
| | | | | | | | | 1.5 km |
| | | | | | | | | 2 to 2.5 km |
| | | | | | | | | max 200 m |
| | | | | | | | | 850 to 1100 m |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | During the Quaternary, succession of alluvial fan deposits, made up of medium to coarse grain size, on deposits of glacial environment. |
| | Bedrock, glacier melting, lake, lacustrine sediments, fluvial deposits. | slope deposits on the valley edges | Quaternary | and its tributaries, alluvial fans and tectonic terraces (high 100m to the plain) | marks. Fan's surface post-glacial, alluvial deposits | alluvial terraces, several tens of meters high. | glacial deposits. Glacial effects have been very small in this valley. | |

- **Sismicità** diffusa e di media intensità ($M_{max} \leq 6.4$);
- **Spessore depositi quaternari:** variabile (da < 100 a 900 m);
- **Depositi fini lacustri** in ogni valle con presenza di **limi e argille** (possibili non-linearità!);
- In genere **stratificazione interna** orizzontale o sub-orizzontale;
- **Bedrock più rigido** (veloce) di quello usualmente considerato nelle stime di hazard;
- Complessità strutturale a causa di **apporti laterali**;
- Localmente, elevato tasso di **antropizzazione**.

Le valli alpine

Aspetti comuni

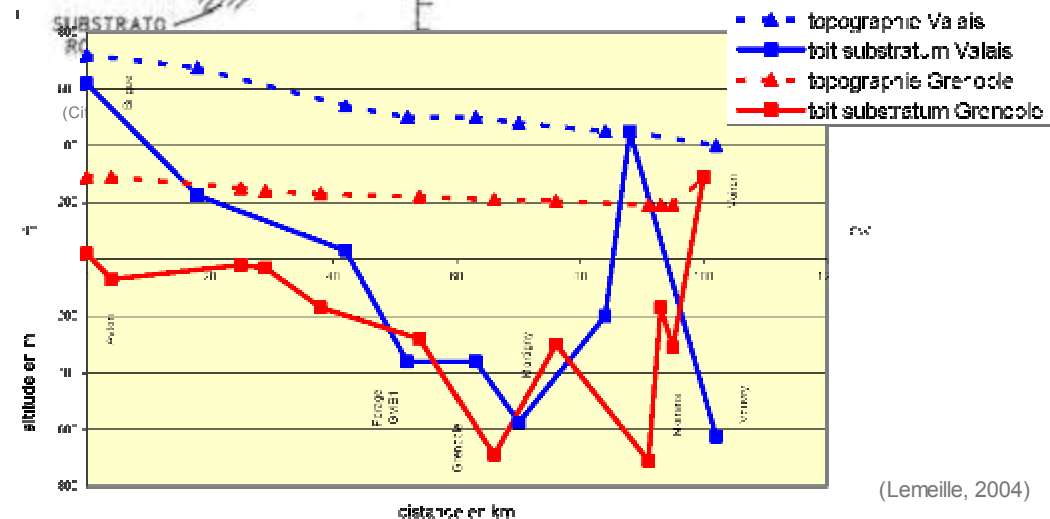


Livello basale comune nel Messiniano.

Le valli italiane sono più profonde e incise. Il fondo del bacino era connesso al mare Mediterraneo che occupava l'area padana (Cita et al, 1990).

Valle del Rodano (Valais, Svizzera)
Val d'Isere (Grenoble, Francia)

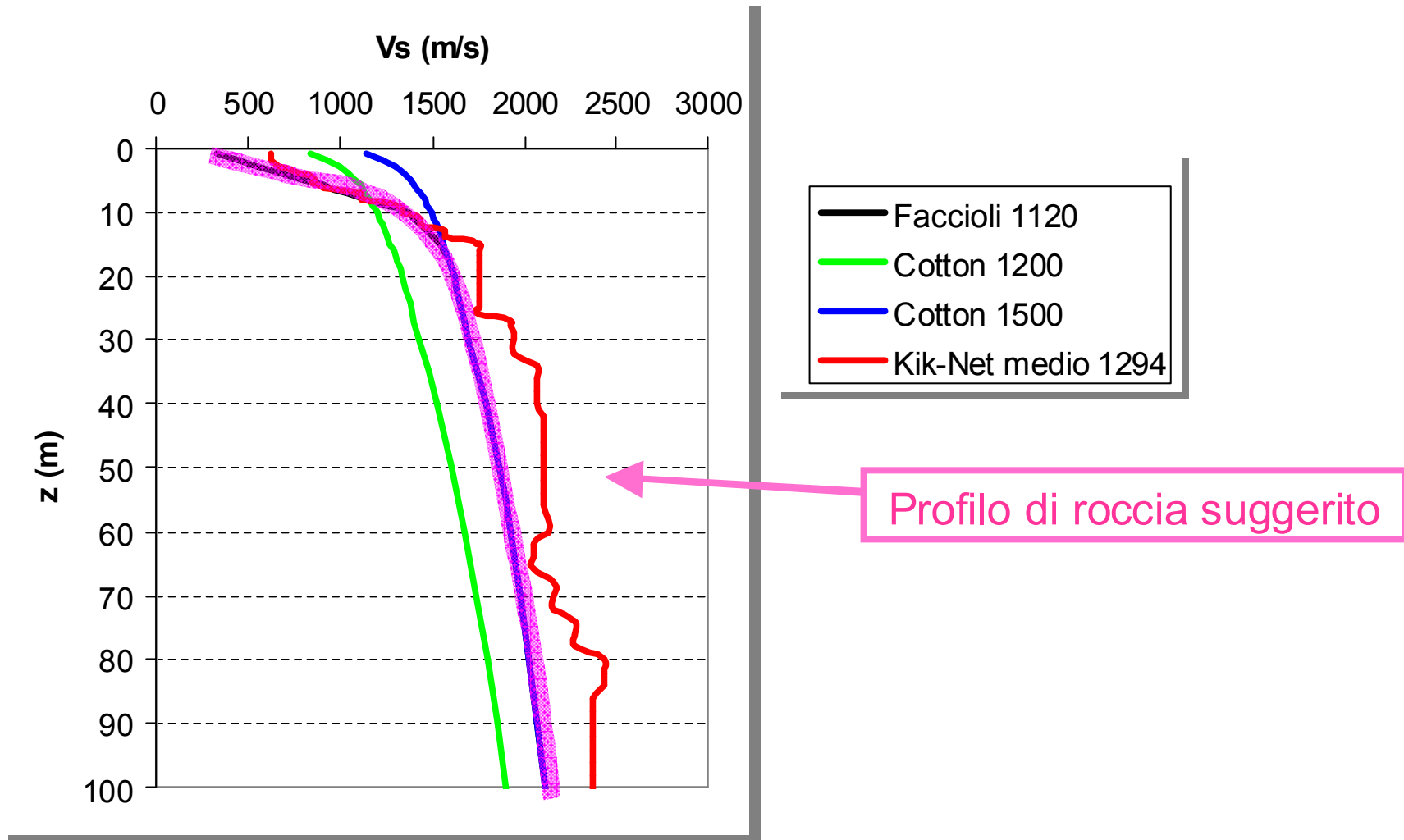
(Lemeille, 2004)



Le valli alpine

Quale profilo di velocità per il substrato roccioso?

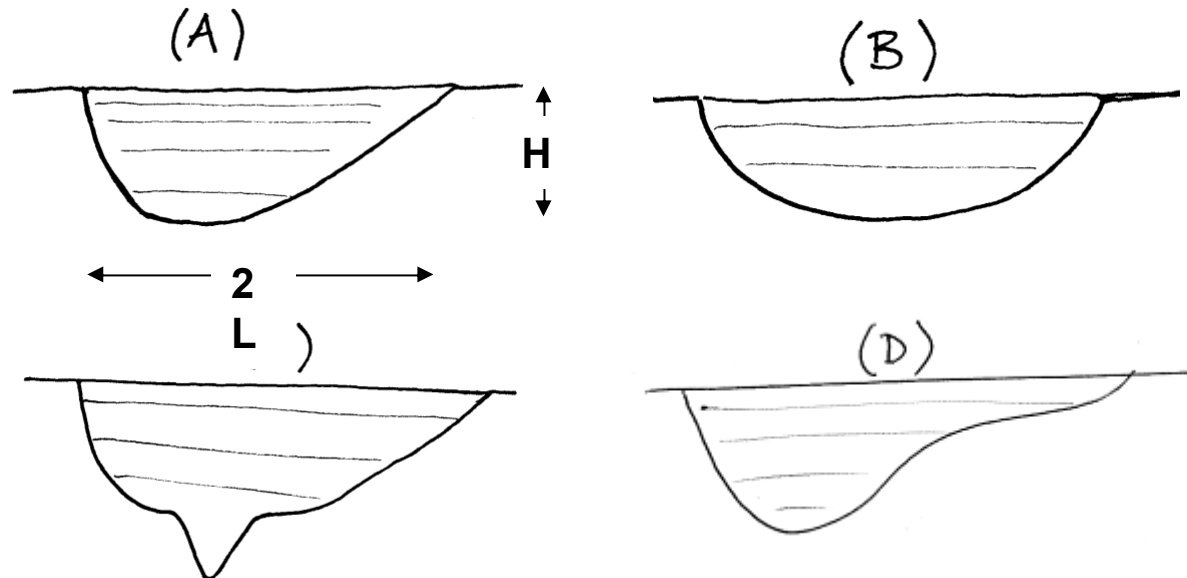
(Paolucci, 2007; Convegno Sismovalp, Tolmezzo)



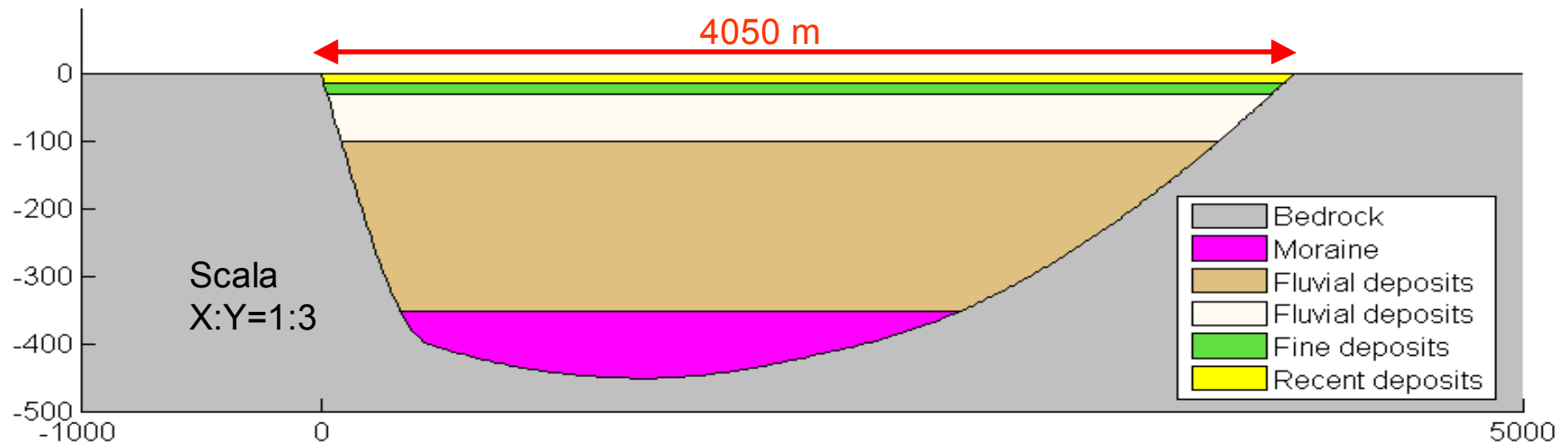
Le valli alpine

Tipologie di valle

| | 2L (m) | H (m) | L/H | Shape | Main Vs Contrasts |
|-----------------------------------------|--------|-------|------|-------|--------------------------------------------------------------|
| Grenoble | 4500 | 550 | 4.1 | A/B | 1.84 at z = 42 m 2.30 at z = 529.5 m 5.09 at z = 552 m |
| Monthey (Valle del Rodano) | 5000 | 640 | 3.9 | D | 3.45 at z=640 m |
| Tolmezzo (Alta Val Tagliamento) | 2000 | 200 | 5 | A/C | 2.36 at z=200 m |
| Gemona (conoide Val Tagliamento) | - | 300 | | - | 3.52 at z=70 m |
| Soca (Val d'Isonzo) | 2500 | < 100 | 12.5 | A/B | |



| Model 0 (M0) | | Modello 2D di riferimento di valle alpina (benchmark 2D) | | | | | | |
|-------------------------------|-----------------------|----------------------------------------------------------|-------------|-------------|-----------|-----------------------------|-------|-------|
| Stratigraphic layout | Units | H (m) | V_s (m/s) | V_p (m/s) | V_p/V_s | ρ (kg/m ³) | Q_s | Q_p |
| Recent Deposits | Sandy Gravel | 0-15 | 250 | 500 | 2.5 | 1600 | 20 | 40 |
| Fine Deposits | Silt & clay | 15-30 | 350 | 700 | 2.5 | 1700 | 20 | 40 |
| Fluvial & Lacustrine Deposits | Silt, clay and gravel | 30-100 | 450 | 900 | 2.5 | 1800 | 30 | 50 |
| Fluvial & Lacustrine Deposits | Silt, clay and gravel | 100-350 | 600 | 1200 | 2.5 | 1900 | 30 | 50 |
| Moraine | = | 350-450 | 800 | 1600 | 2 | 2000 | 50 | 100 |
| Bedrock | Limestone | 450-∞ | 2800 | 5200 | 1.85 | 2500 | 200 | 400 |

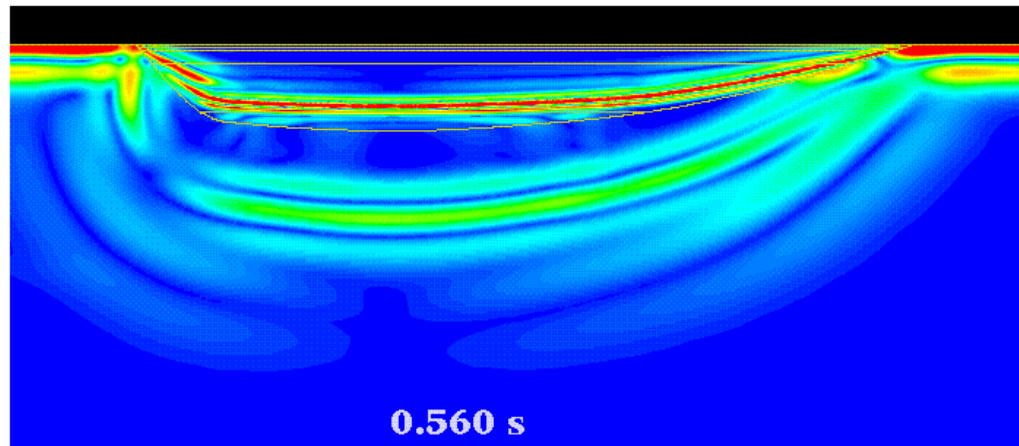


Le valli alpine

Simulazione numerica 2D

(Laurenzano & Priolo, 2006)

Simulazione numerica della propagazione del campo d'onda sismico nel modello M0.



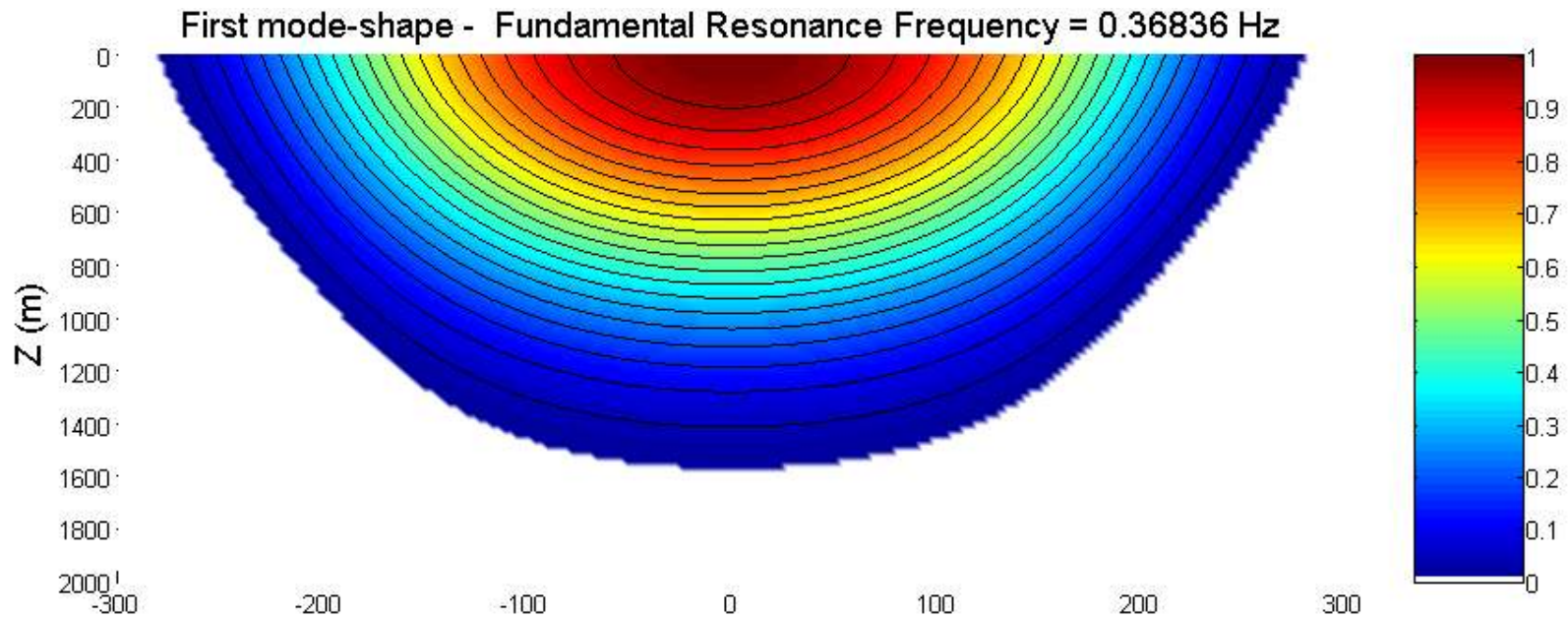
- Profilo valle media Progetto Sismoalp: *benchmark 2D*;
- Onda piana incidente verticalmente;
- Metodo agli elementi spettrali (Priolo, JCA, 2001).

Calcolo della frequenza di risonanza (2D e 3D)

Metodo semplificato di Rayleigh

(Paolucci, *Eqk. Spectra*, 1999)

REFORM: metodo semplificato di Rayleigh per calcolare il modo e la frequenza di vibrazione fondamentale di valli in 2D e 3D (forme semplici).

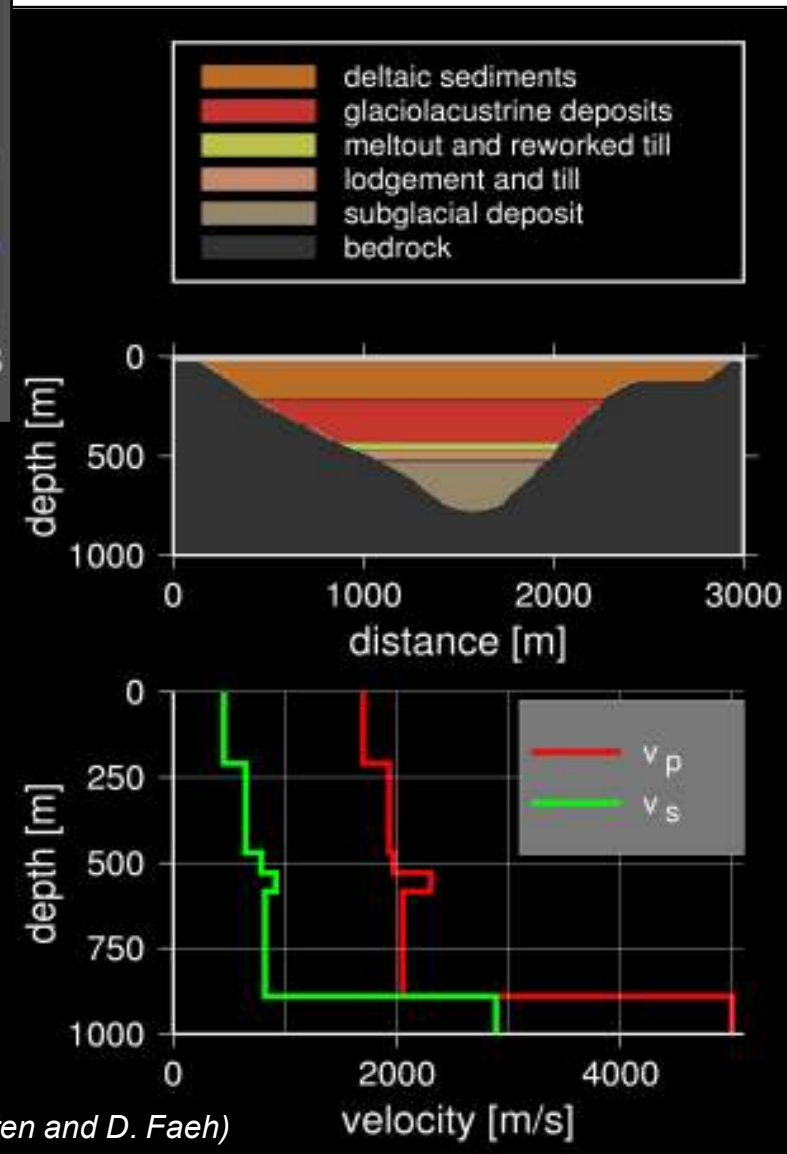
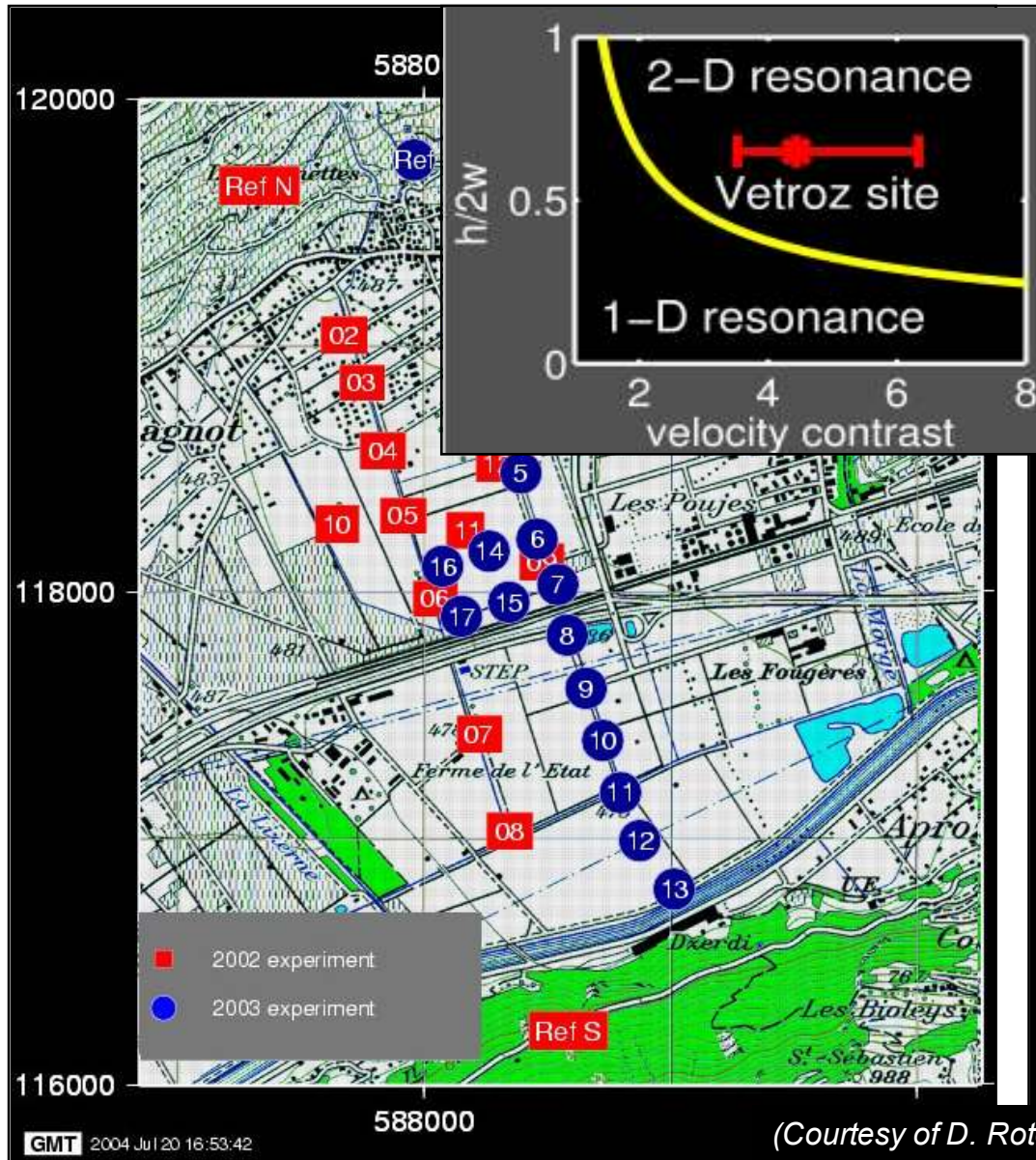


Incluso nel CDRM2 del Progetto SISMOVALP o da richiedere all'autore.

Misure ad array della risposta sismica

Vétroz, Valle del Rodano (Svizzera)

(Roten et al., GJI, 2006)

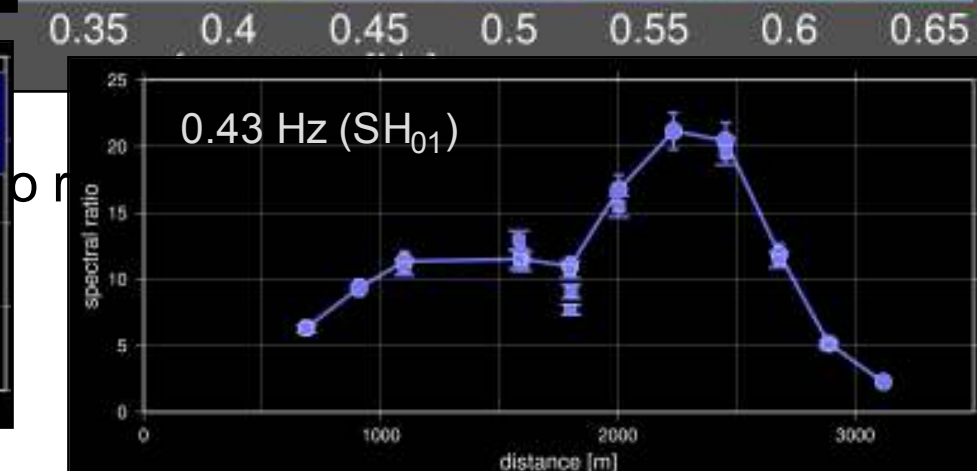
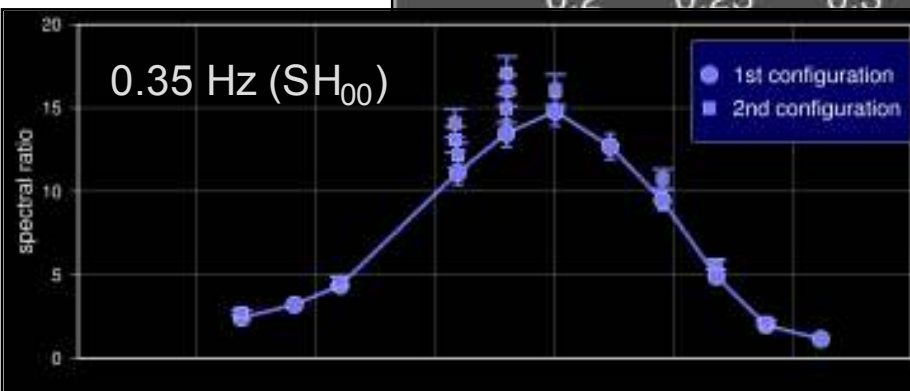
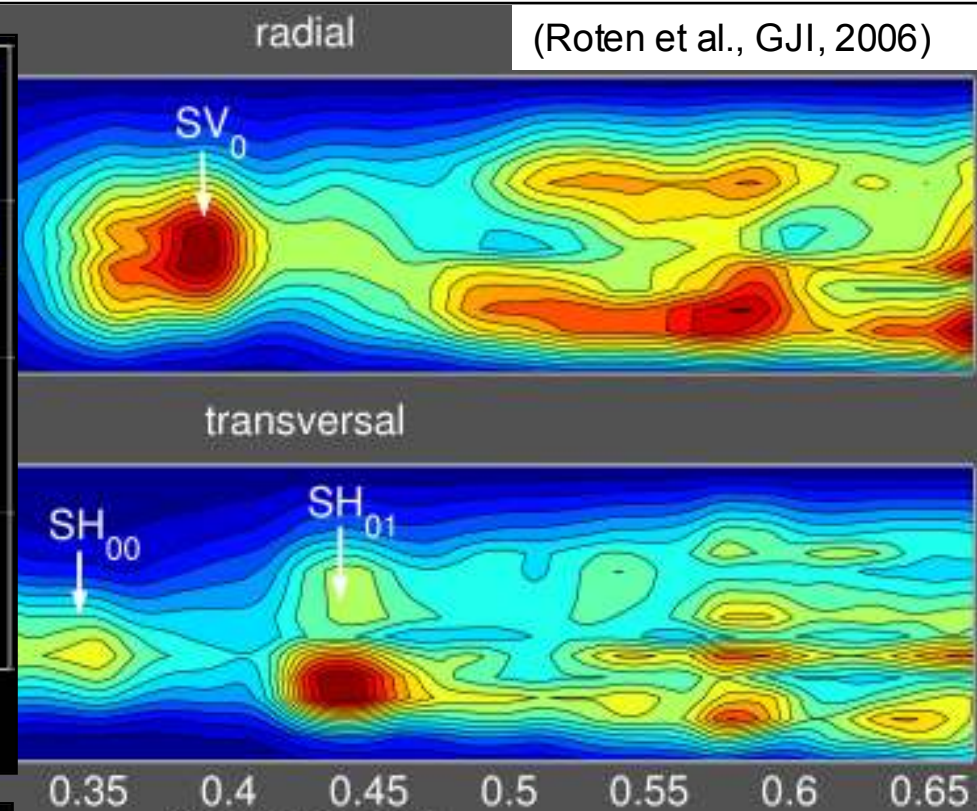
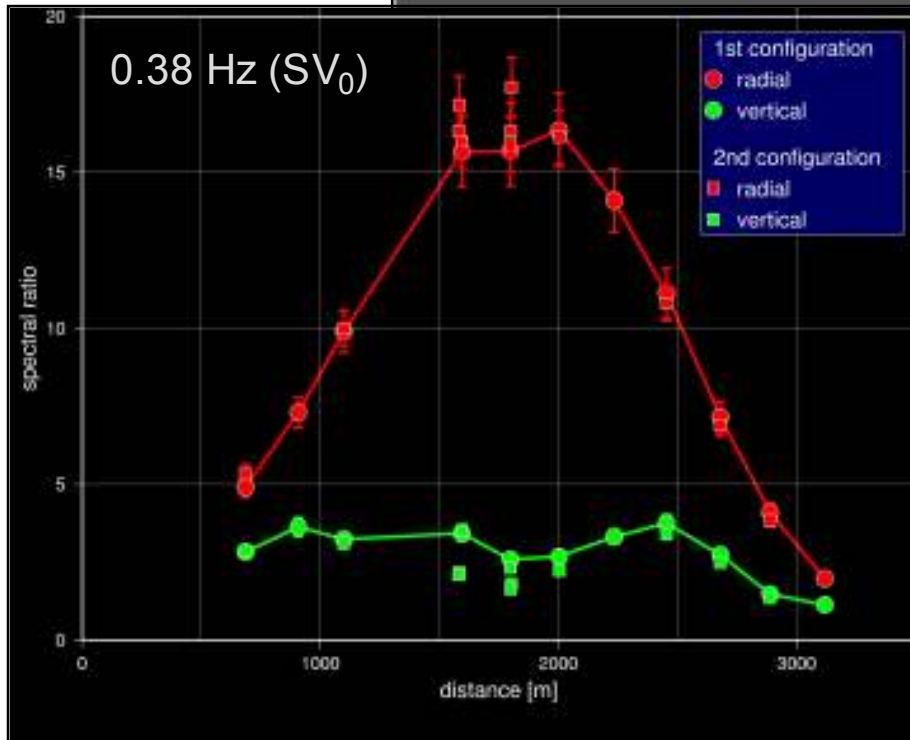


(Courtesy of D. Roten and D. Faeh)

Misure ad array della risposta sismica

Vétroz, Valle del Rodano (Svizzera)

(Roten et al., GJI, 2006)



(Courtesy of D. Roten and D. Faeh)

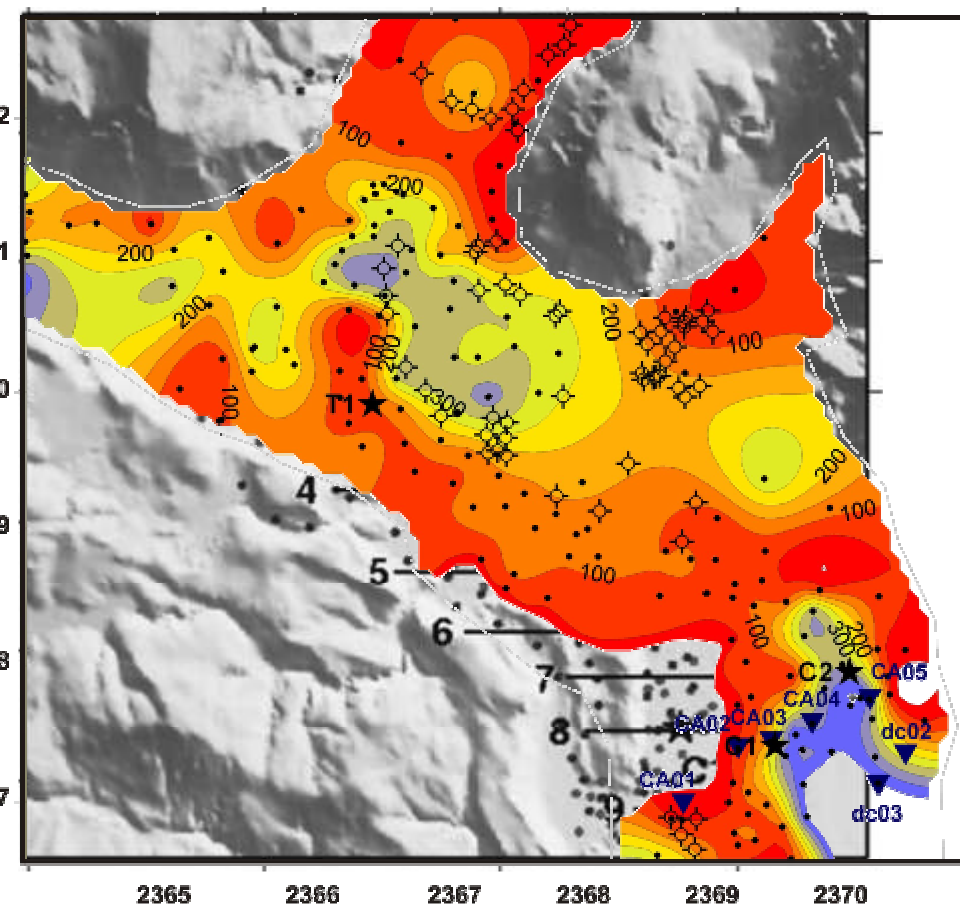
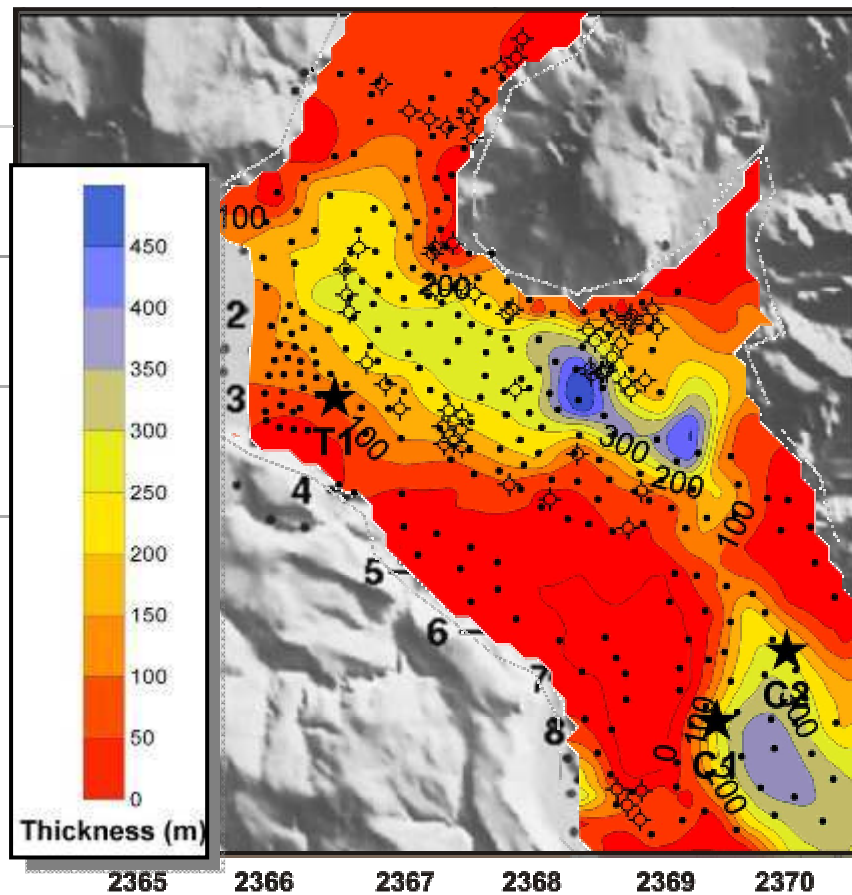
Ricostruzione della morfologia del basamento

Tolmezzo, Valle del Tagliamento (UD)

(Barnaba et al., GJI, in press)

Da anomalia residua di gravità

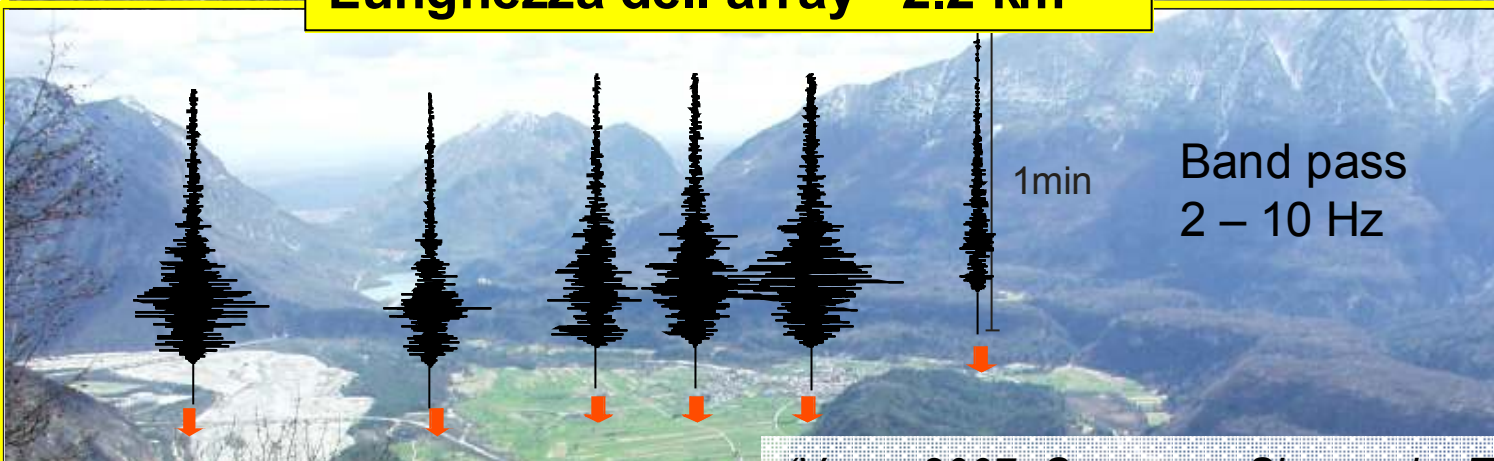
H/V da misure di rumore



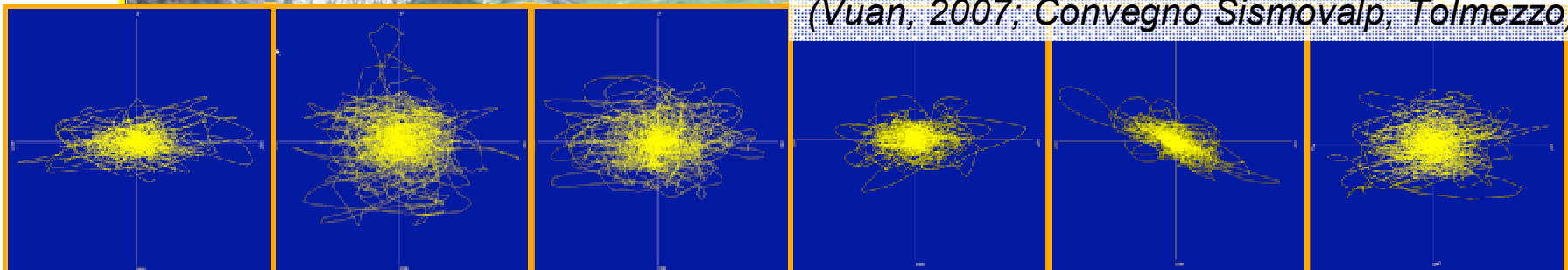
Le isolinee rappresentano lo **spessore dei depositi** quaternari.
I pallini neri rappresentano i **punti di misura**.

Terremoto di Bovec - $M_D=5.1$, 12.07.2004 (45 Km)

Tolmezzo, Valle del Tagliamento (UD)

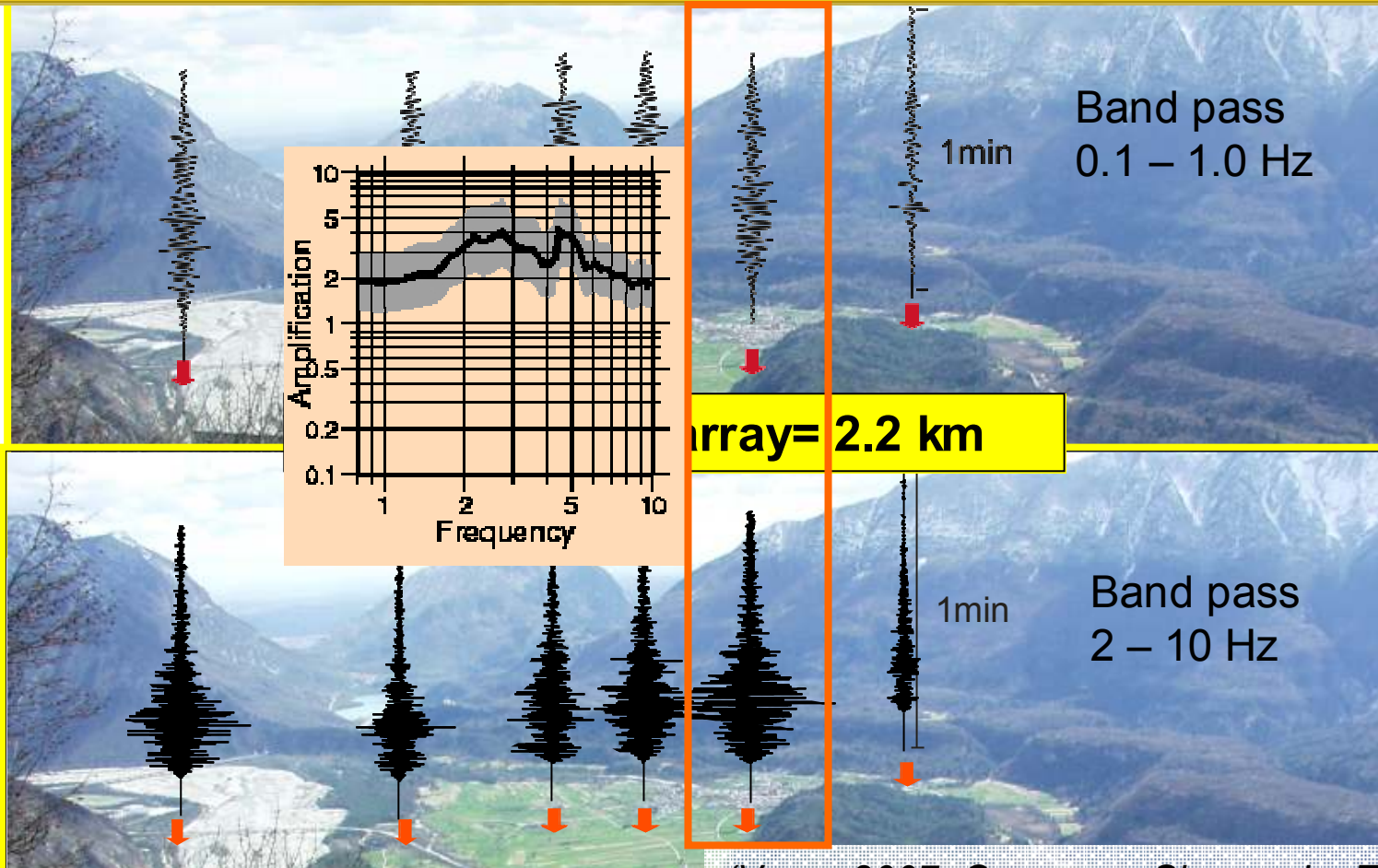


(Vuan, 2007; Convegno Sismoalp, Tolmezzo)

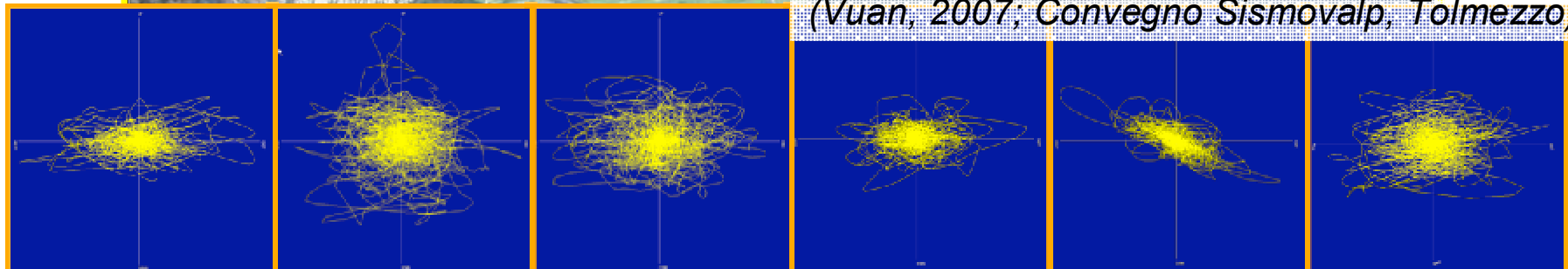


Terremoto di Bovec - $M_D=5.1$, 12.07.2004 (45 Km)

Tolmezzo, Valle del Tagliamento (UD)



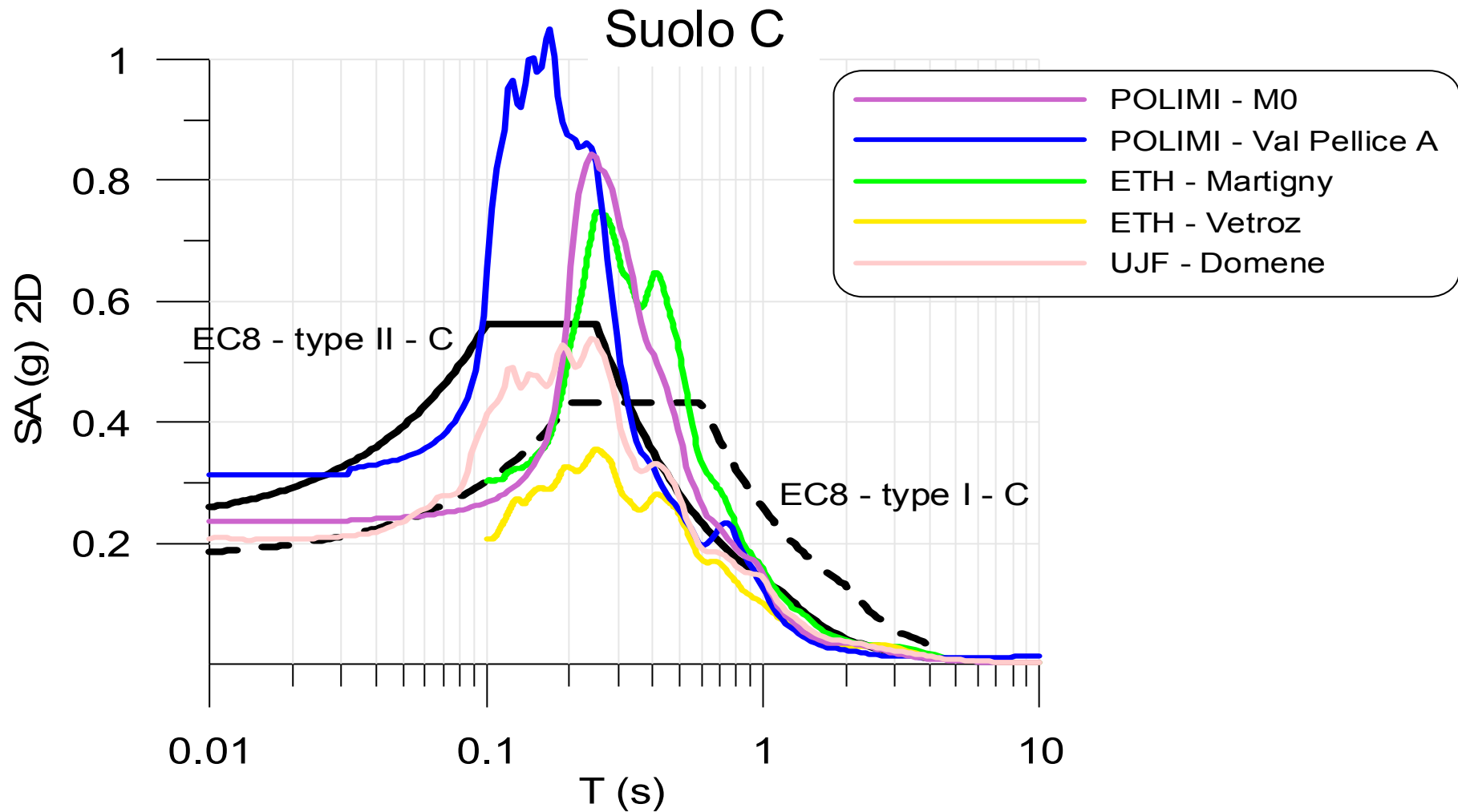
(Vuan, 2007; Convegno Sismoalp, Tolmezzo)



Possibili implicazioni a fini normativi

Spettri di risposta delle valli alpine

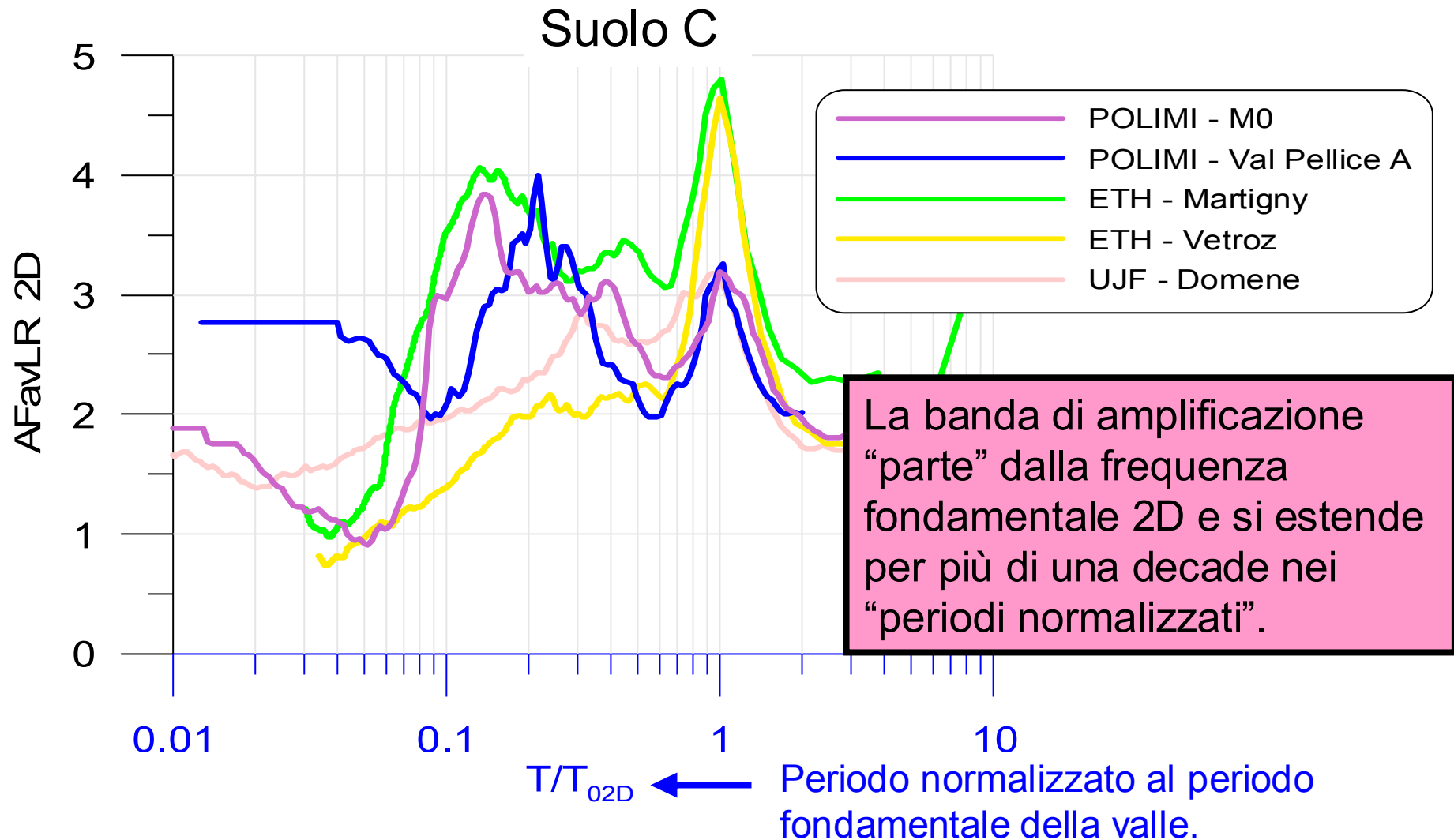
(Paolucci, 2007; Convegno Sismovalp, Tolmezzo)



Possibili implicazioni a fini normativi

Funzioni di amplificazione delle valli alpine

(Paolucci, 2007; Convegno Sismovalp, Tolmezzo)

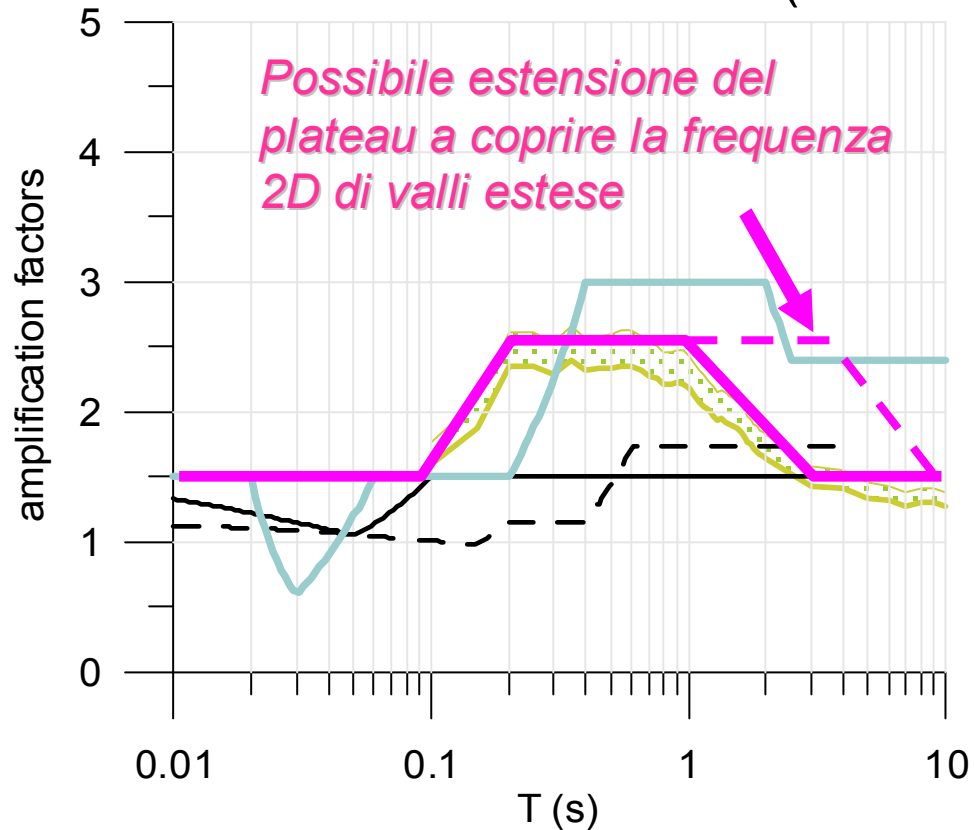


Possibili implicazioni a fini normativi

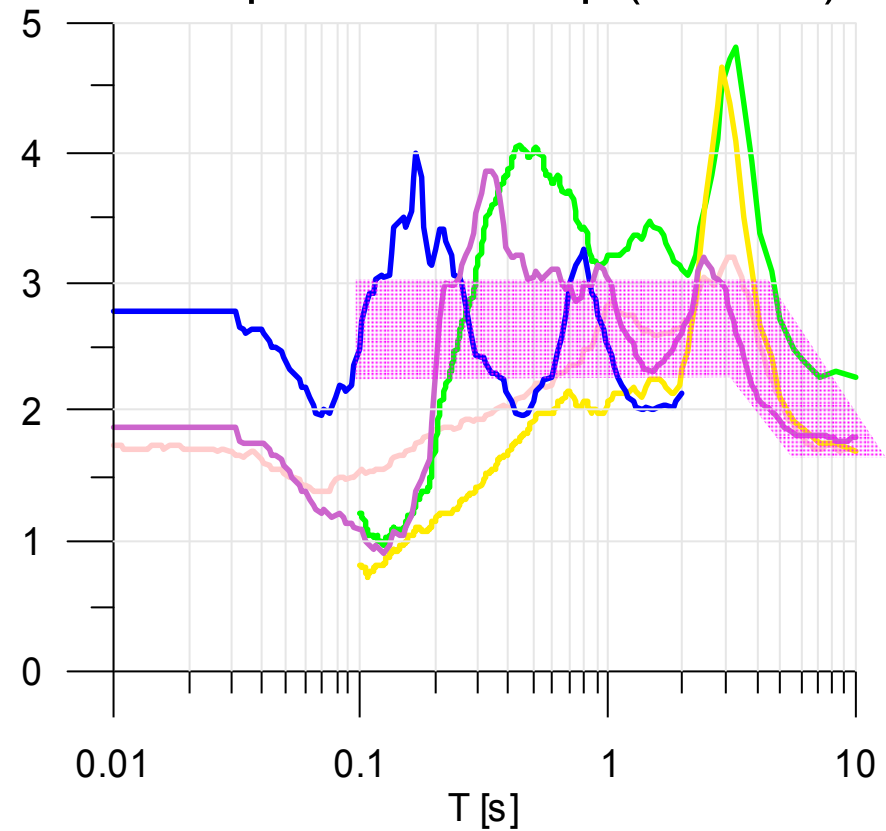
Fattori di amplificazione delle valli alpine

(Paolucci, 2007; Convegno Sismovalp, Tolmezzo)

Normativa e stime recenti (suolo C)



Valli alpine Sismovalp (suolo C)



- EC8 C/A - type I
- EC8 C/A - type II
- EC8 France C/A
- C/A - DRS att. rel. (Faccioli&Cauzzi)

Progetto S5

Conclusioni

- Il moto del suolo nelle valli alpine subisce **forti amplificazioni**. I principali effetti sono:

- ✓ allargamento della banda di amplificazione (0.1 – 10 s);
- ✓ prolungamento del moto (alla frequenza fondamentale 2D e per effetto delle onde di superficie);
- ✓ polarizzazioni a determinate frequenze.

- Le valli alpine sono caratterizzate da **stratigrafie simili**, di cui due aspetti peculiari sono:

- ✓ presenza di sedimenti fluvio-lacustri fini con caratteristiche scadenti;
- ✓ roccia del substrato molto più rigida di quella da normativa.

- Per **stimare** le amplificazioni e comprendere la risposta della valle è importante:

- ✓ definire la morfologia sepolta della valle;
- ✓ misurare il moto del suolo con gruppi di stazioni sincrone (array).

Tutto ciò **in aggiunta** alle misure tradizionali.

Bibliografia

Bard PY, M Bouchon (1985). The two-dimensional resonance of sediment-filled valleys. Bull. Seis. Soc. Am., 75 (2) pp. 519-541

Beauval C, PY Bard, P Moczo, J Kristek (2003). Quantification of frequency-dependent lengthening of seismic ground-motion duration due to local geology: applications to the volvi area (Greece). Bull. Seis. Soc. Am., 93 (1) pp. 371-385

Cita M.B., Gelati R. and Gregnanin A., 1990, Guida Geologica Regionale, Alpi e Prealpi lombarde, Società Geologica Italiana, BE-MA editrice, Milano, 290 p.

Cornou C, PY Bard, M Dietrich (2003). Contribution of Dense Array Analysis to the Identification and Quantification of Basin-Edge-Induced Waves, Part I: Methodology. Bull. Seis. Soc. Am., 93 (6) pp. 2604

Lacave C, F Lemeille (2006). Seismic hazard and alpine valley response analysis: Generic valley configurations. 1st Europ. Conf. Earthq. Eng. and Seis., Geneva, Switzerland, pp. 3–8

Lemeille, F. (2004). Contribution de l'IRSN à la synthèse des éléments généraux sur la géométrie et sur la nature du remplissage des vallées alpines - Projet Européen Sismoalp/Interreg III WP04 (NT n°04-50). Fontenay-aux-Roses, IRSN: 22 pp.

Ma S, R. J Archuleta, M. T Page (2007). Effects of Large-Scale Surface Topography on Ground Motions, as Demonstrated by a Study of the San Gabriel Mountains, Los Angeles, California. Bull. Seis. Soc. Am., 97 (6) pp. 2066-2079

Naso G, Petitta e Scarascia Mugnozza (2004). La Microzonazione Sismica. CD-ROM allegato a Geologia Tecnica & Ambientale, 4/2004.

Roten D, D Fah, C Cornou, D Giardini (1985). Two-dimensional resonances in Alpine valleys identified from ambient vibration wavefields. Geophys J Int (2006) vol. 165 (3) pp. 889-905