



EUCENTRE

European Centre for
Training and Research in
Earthquake Engineering



Simulazioni di sismogrammi sintetici

Milano, 30 marzo 2007

**Applicazioni nell'Earthquake Early Warning per la
Regione Lombardia**

A cura di: P. Traversa, C. Lai, C. Strobbia, M. Corigliano



EUCENTRE

European Centre for
Training and Research in
Earthquake Engineering



Obiettivi

- Studio di fattibilità di un sistema EEW
- Applicazione per le strutture ospedaliere della Regione Lombardia
- Definizione dei tempi di pre-allarme teoricamente fornibili ai centri abitati
- Stima dei livelli di scuotimento attesi a località determinate
- Test e confronto di programmi di simulazione di accelerogrammi sintetici
- Validazione dei risultati per confronto con registrazioni reali



Scopo di un sistema EEW

- Chiusura (*shut down*) di linee elettriche, sistemi automatici di trasporto di persone ed energia, apparecchiature ed impianti sensibili, per evitare catastrofici effetti di guasti a catena
- Caso degli ospedali: evitare danni irreparabili ad apparecchiature biomediche e/o persone (per es. Interventi chirurgici) grazie ad un preavviso di qualche decina di secondi



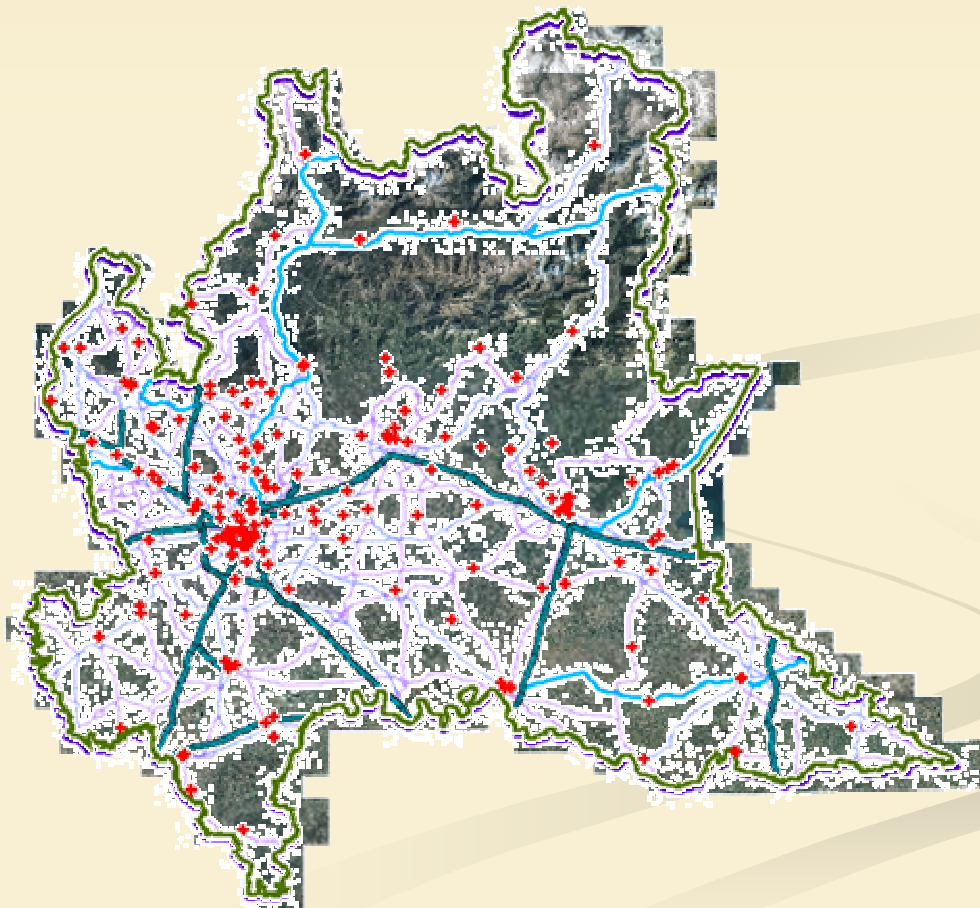
EUCENTRE

European Centre for
Training and Research in
Earthquake Engineering



Ubicazione ospedali nella Regione Lombardia

**209 presidi
ospedalieri**





Principi di base di un sistema EEW

- Le onde longitudinali (P) si propagano ad una velocità superiore rispetto a quelle trasversali (S), alle quali sono associati gli scuotimenti più severi



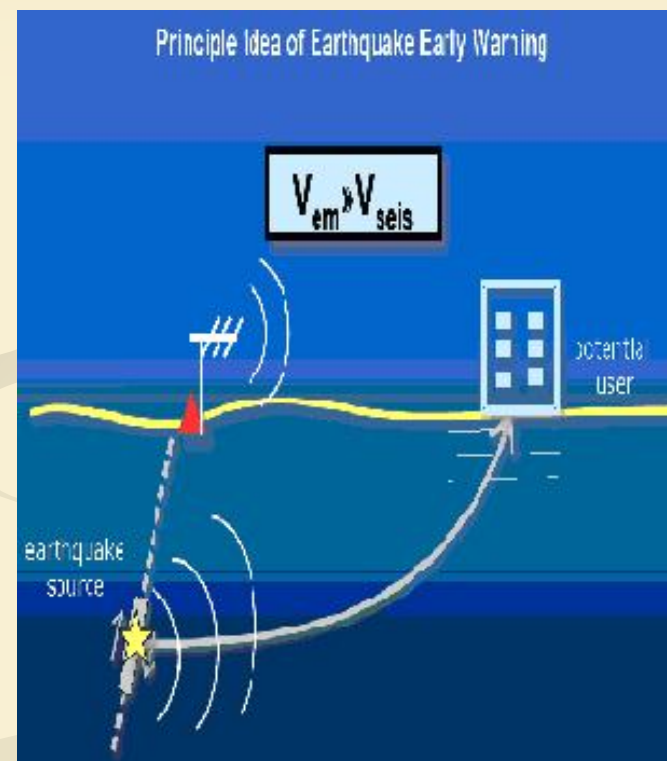
- Localizzazione rapida e stima della magnitudo del terremoto in atto grazie alle caratteristiche delle prime onde P nella zona epicentrale



- Stima della separazione temporale fra l'arrivo delle onde P ed S

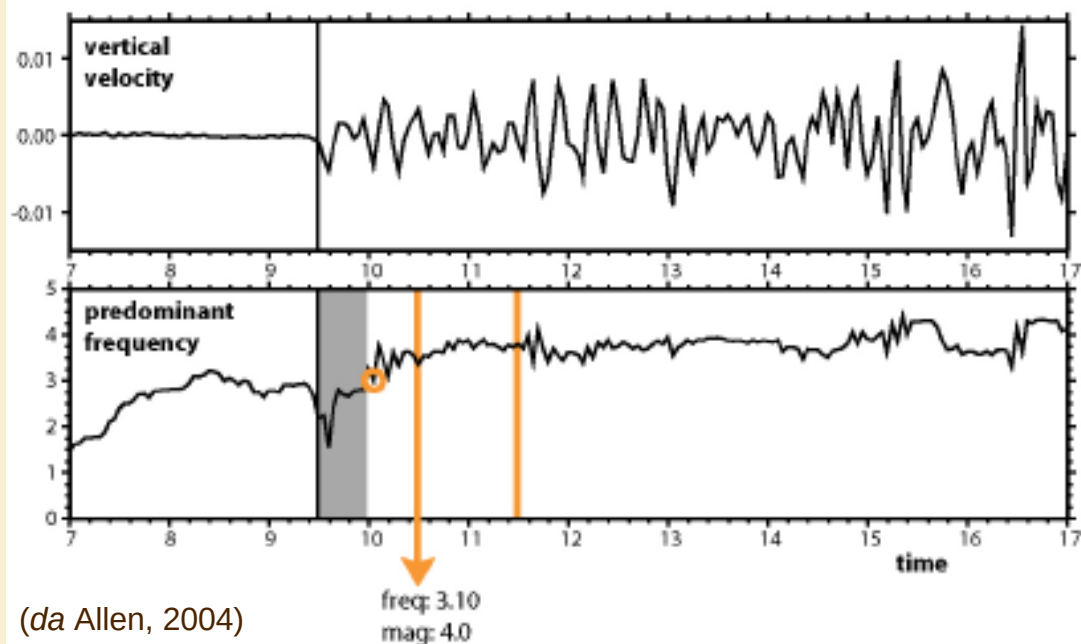
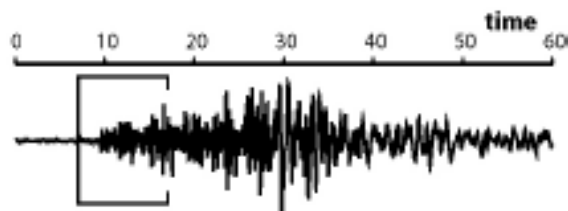


- Noto il modello crostale regionale in cui le onde si propagano, stima del tempo di arrivo della scossa in località determinate



(da Erdik 2006)

Stima della magnitudo _1_

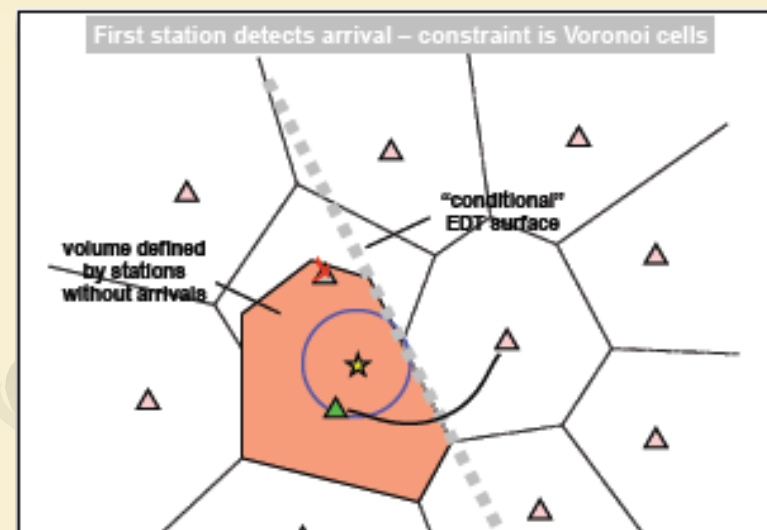


(da Allen, 2004)

Fig. 3. Example magnitude estimation using the single station PDR 50 km from the epicenter of the January 29, 2002, magnitude 3.9, Simi Valley earthquake. The top trace shows the full vertical velocity waveform of which a 10 sec window is shown on the middle trace with the trigger time indicated by a vertical line. The bottom trace is the predominant frequency, f^P , calculated from the vertical velocity after low-passing the waveform at 10 Hz. Magnitude estimation proceeds as follows: (1) The first 0.5 sec of f^P is ignored as it contains transients. (2) The minimum f^P within 1 sec of the trigger, 3.10 Hz, is reported and converted to a magnitude of 4.0. (3) If a lower f^P is recorded within the 2nd second, it is reported and the magnitude estimate is updated to this larger magnitude (this does not occur in this example). Only 2 sec of data are used for small-magnitude events.

Stima della magnitudo _2_

- Formulazione EDT (Equal Differential Time), approccio probabilistico per la stima dell'ipocentro
- Necessità di un'elevata densità di stazioni
- Prima registrazione dell'arrivo: posizione ipocentrale stimata mediante le celle di Voronoi
- Ad ogni iterazione stima raffinata utilizzando l'informazione proveniente dalle registrazioni e dalle stazioni non ancora innescate → aggiornamento della stima del volume probabile in cui è ubicato l'ipocentro



(da Satriano et al., 2006)



Dispositivi Operativi nel mondo ad oggi

- **1868 – Proposta per un sistema EEW a S. Francisco (Cooper)**
- **1985 – Rete computerizzata di allerta nel sud della California (Heaton)**
- **1989 – Prevenzione deragliamento linea alta velocità treno Shinkansen, Giappone (Nakamura)**
- **Anni '90-'00 – Attivati, o in via di attivazione, sistemi EEW a Mexico City, Taywan, Giappone, California, Romania, Grecia e Turchia**
- **In Italia: applicazione nella Regione Campania**

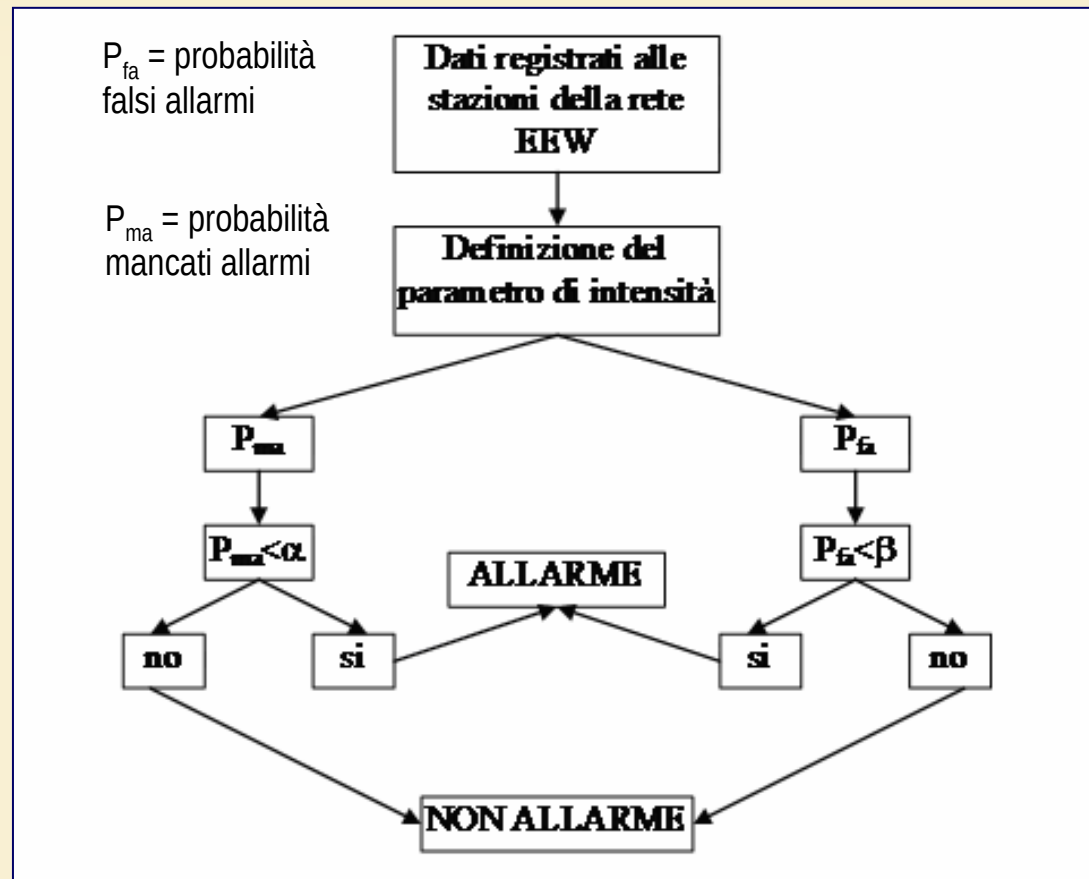


Dati di progetto di un sistema EEW

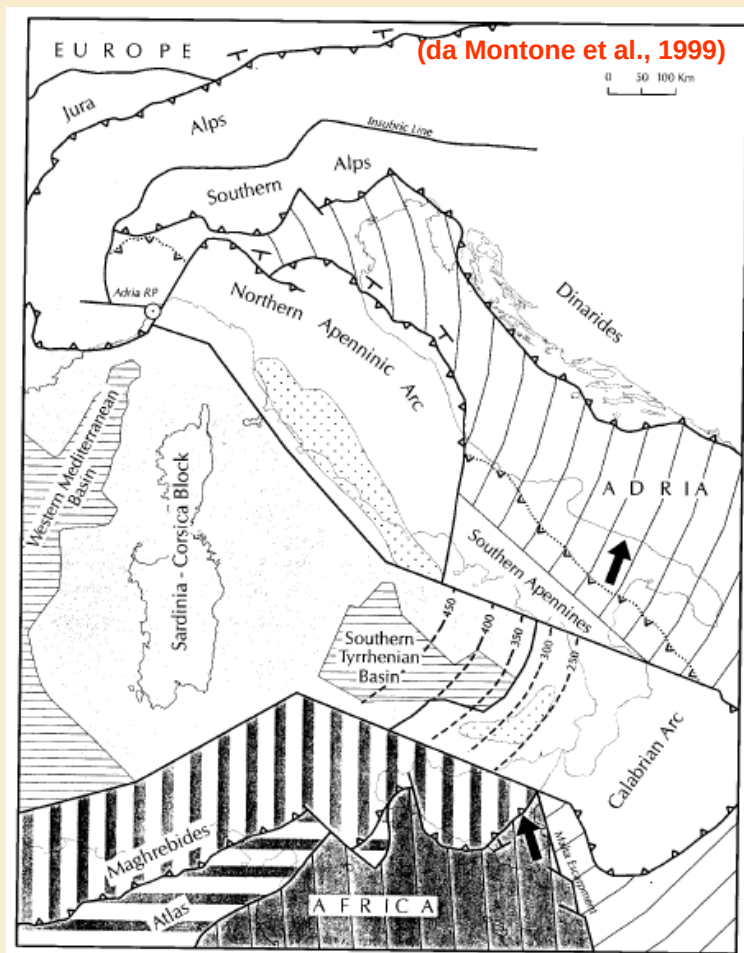
- **Valutazione pre-allarme necessario per attivare misure di protezione**
- **Valore di soglia in termini di intensità oltre il quale inviare l'allarme**
- **Qualità sulla previsione dei parametri caratteristici del terremoto**
- **Tolleranza accettabile in termini di falsi allarmi e mancati allarmi**



Dati di progetto di un sistema EEW



Contesto sismotettonico Italia Settentrionale



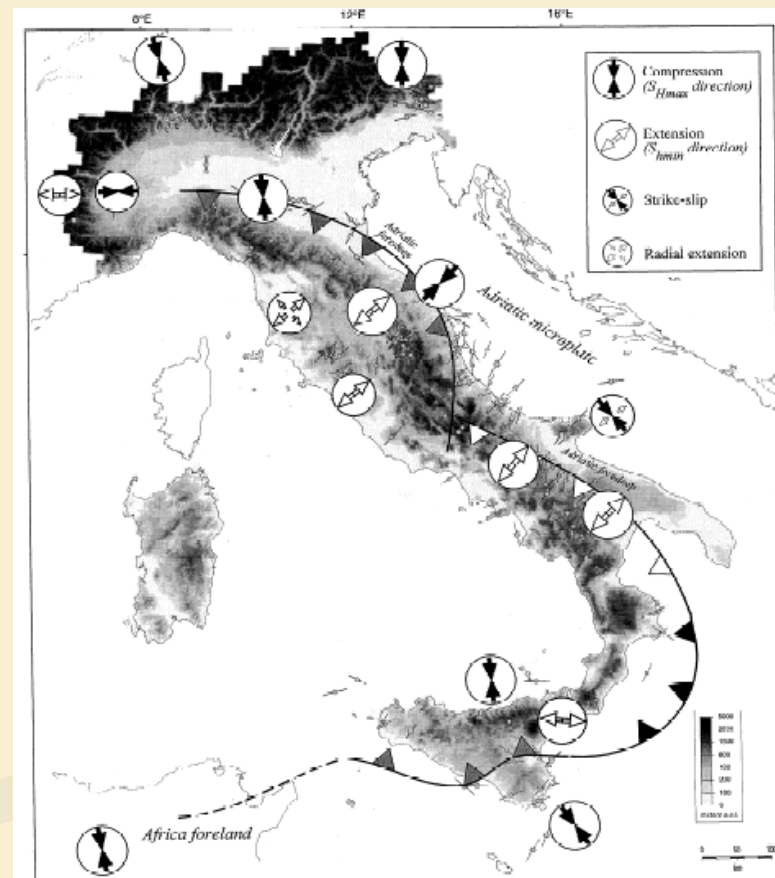
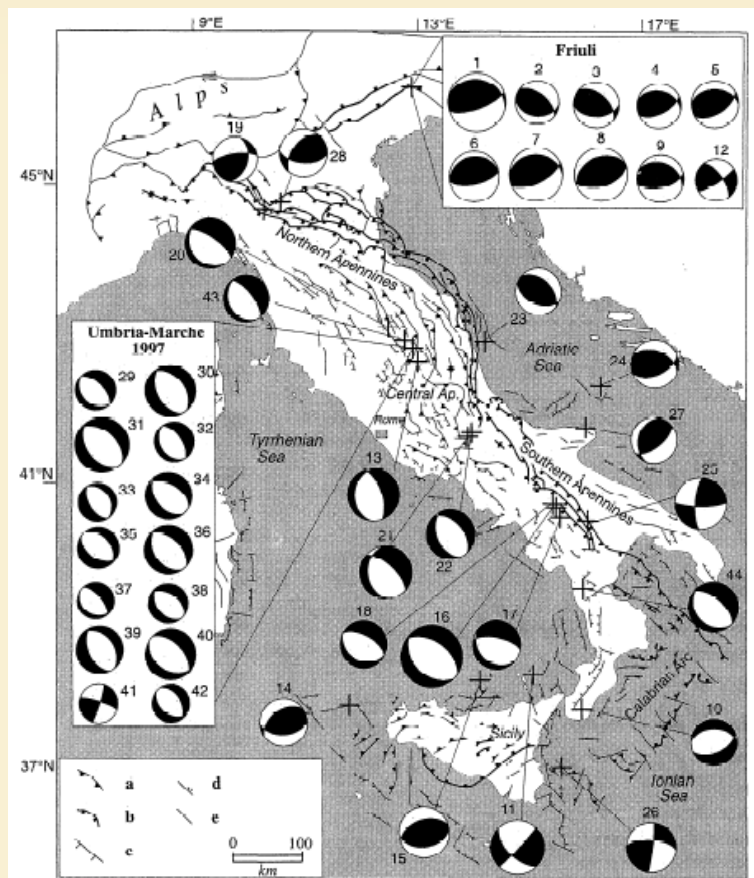
- Massimo stress nelle Alpi orientali (unione con le Dinaridi), terremoti più forti;
- Strutture compressive, terremoti di tipo “thrust faulting” (faglie inverse);
- Meccanismo di spinta prevalente: direzione N-S;
- Massima sismicità nella parte orientale, sporadica nella parte centrale dell’arco alpino;
- Profondità ipocentrali: fra 12 e 25 km.



EUCENTRE

European Centre for
Training and Research in
Earthquake Engineering

Contesto sismotettonico Italia Settentrionale





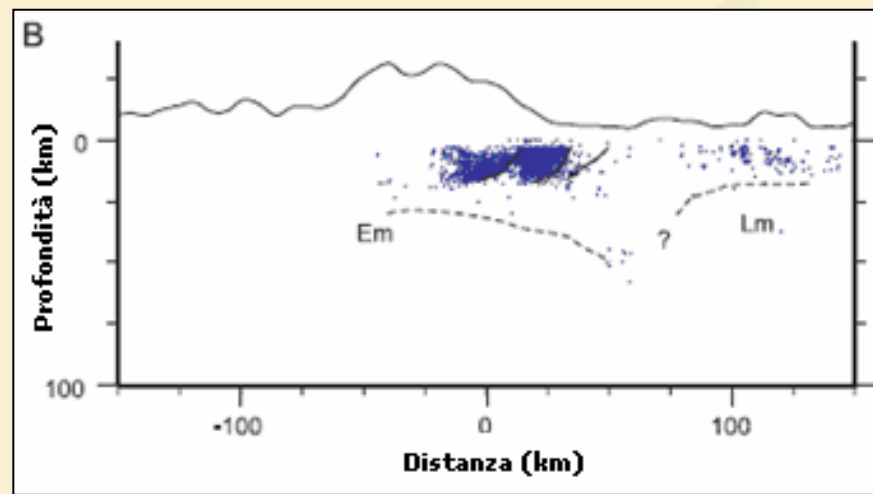
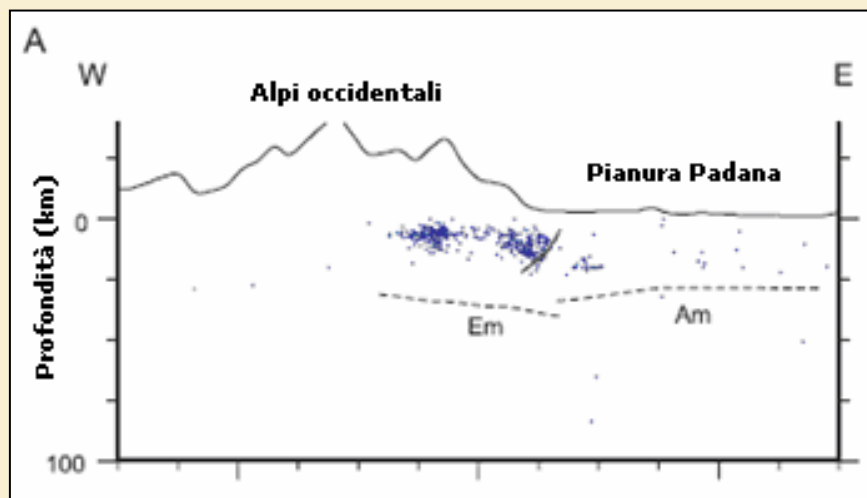
EUCENTRE

European Centre for
Training and Research in
Earthquake Engineering



Contesto sismotettonico Italia Settentrionale

- Sezioni verticali E-W illustranti la sismicità nelle Alpi Occidentali



(da Chiarabba et al., 2005)



Modello crostale utilizzato nelle simulazioni numeriche

- **Struttura superficiale della Pianura Padana: serie di sabbie, marne, argille con intercalazioni di ghiaie per circa 700 m;**
- **Unità di marne e calcari, spessori di 5-6 km ($V_p = 4 - 5.2$ km/s);**
- **Basamento cristallino.**

RIFERIMENTI:

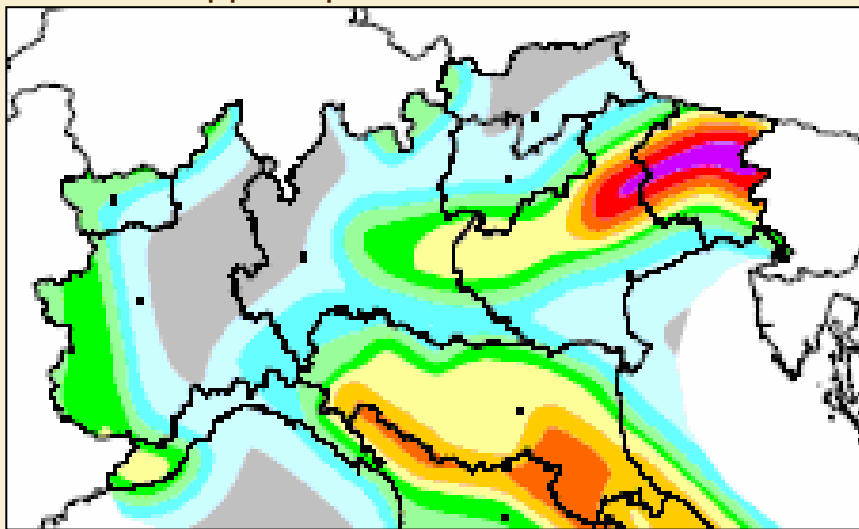
Pieri Groppi (1981)

Di Stefano et al. (1999)

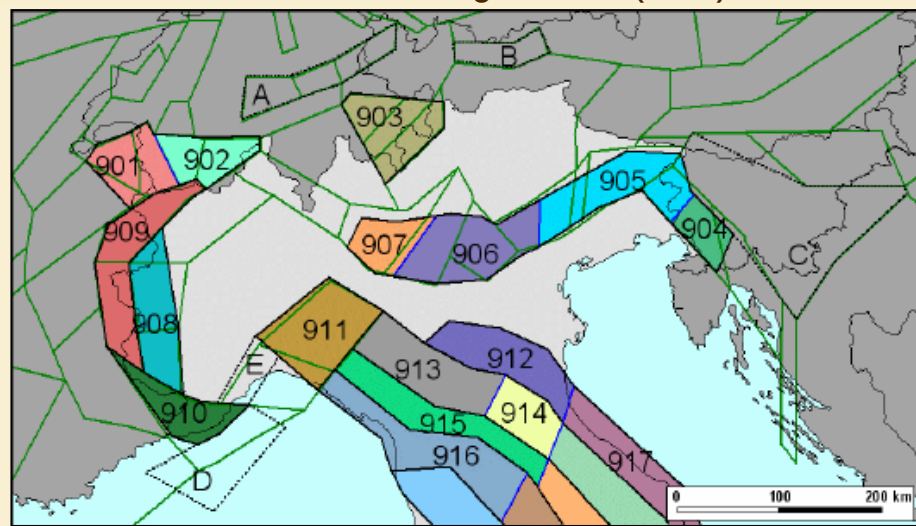
Carta sottosuolo pianura Friulana

Pericolosità sismica in Italia Settentrionale

mappa di pericolosità INGV, 2004



zonazione sismogenetica (ZS9)



Accelerazione massima con il 10% di probabilità di essere superata in 50 anni.
Per suoli rigidi. ($V_s > 800$ m/s; cat. A, punto 3.2.1 del 30 D.M. 14.09.2005).
Riferimento: Ordinanza PCM del 28 aprile 2006 n.3519, All.1b. (INGV, 2006).

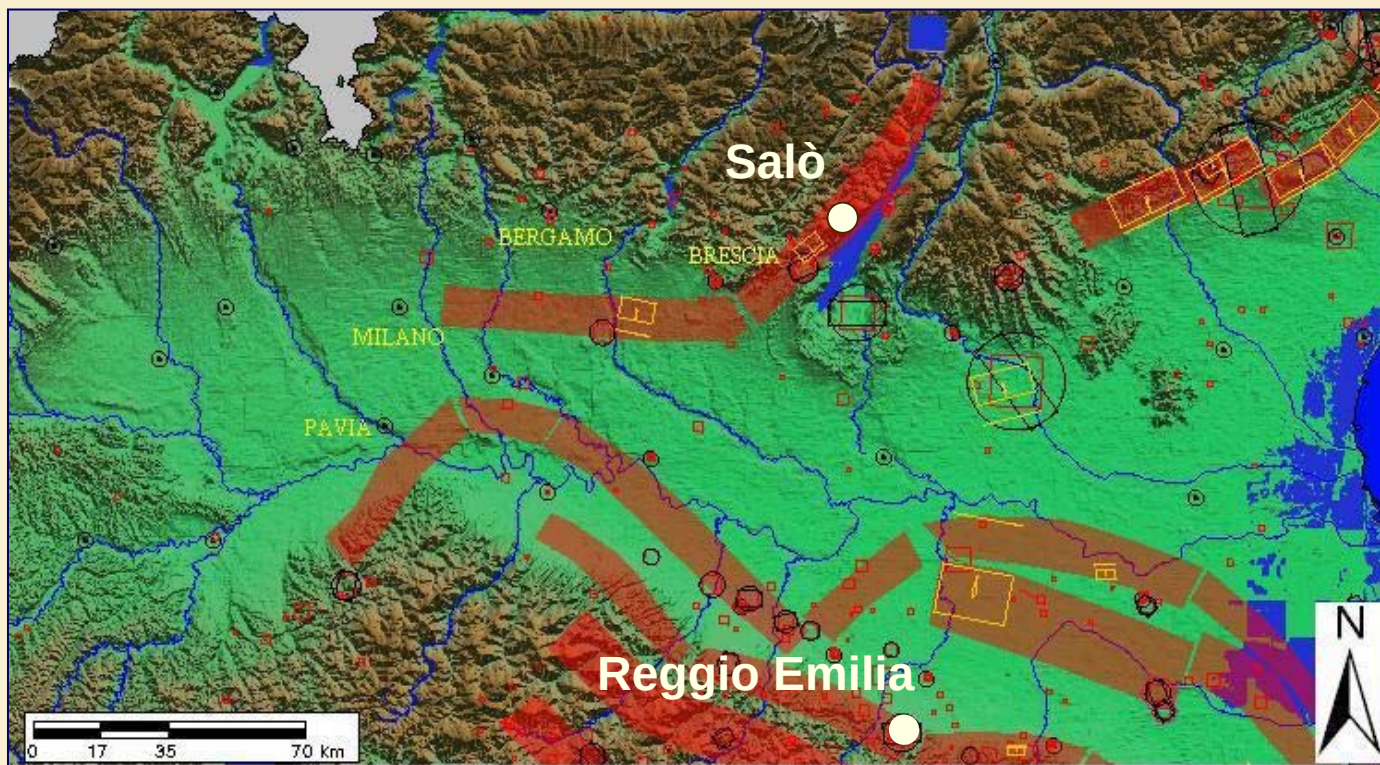


EUCENTRE

European Centre for
Training and Research in
Earthquake Engineering



Sorgenti simogenetiche nella Regione Lombardia



SEISMOGENIC SOURCES

- Geological-Geophysical
- Fault Scarps
- Macroseismic, Well Constr.
- Macroseismic, Poorly Constr.
- Macroseismic, Deep Focus
- Seismogenic Areas
- Debated Areas/Faults

SUPPORT DATA

SEISMICITY

- Historical Earthquakes

GEOGRAPHIC

- Drainage Network

ADMINISTRATIVE

- Large Cities
- Intermediate Cities

Database faglie sismogenetiche DISS 3.0

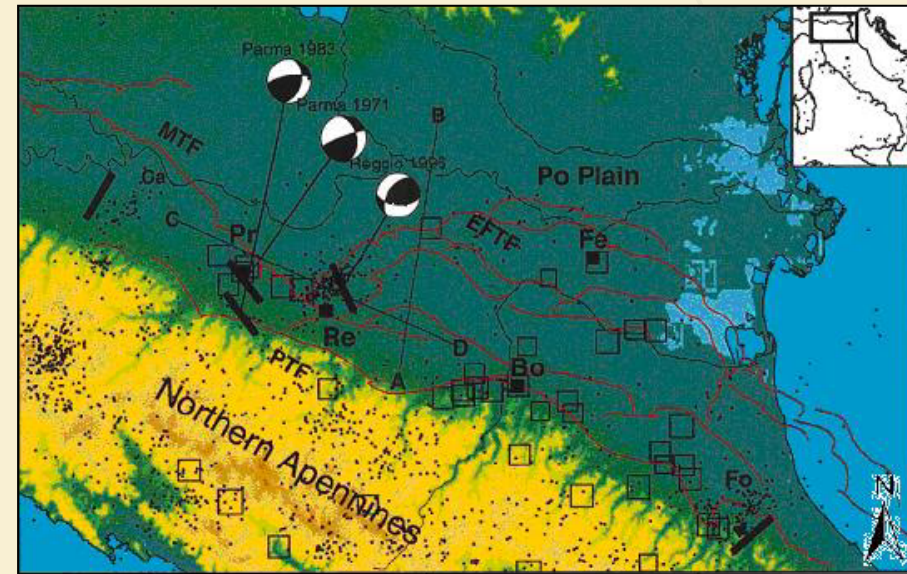


Evento di scenario: Terremoto Reggio Emilia del 15/10/1996

- **Terremoto di Reggio Emilia del 15/10/1996,**
- **Mw 5.4 (ZS 913)**

Riferimenti in Selvaggi et al. (2001)

- Piano di faglia: strike 94° , dip 54° , rake 132°
- Meccanismo focale con assi P sub-orizzontali orientati in direzione NO-SE, parallelamente alla catena appenninica e ortogonali al fronte compressivo padano
- Dislocazione massima $D = 0.53$ m
- Coordinate dell'ipocentro: 44.74° N, 10.68° E
- Profondità ipocentrale: 15 km
- Lunghezza della superficie di rottura: $L = 9$ km
- Ampiezza della superficie di rottura: $W = 3$ km
- Velocità di rottura: 2700 m/s





Evento di scenario: Terremoto di Salò del 24/11/2004

- **Terremoto di Salò del 24/11/2004,**
- **M_w 5.0 (ZS 907)**

Riferimenti in Pessina et al. (2006) e Esposito et al. (2005)

- Piano di faglia: strike 246° , dip 24° rake 113°
- Magnitudo $M_w = 5.0$
- Dislocazione massima $D = 0.41$ m
- Coordinate dell'ipocentro 45.68° N 10.53° E
- Profondità ipocentrale incerta (ipotizzata a 15 km)
- Lunghezza della superficie di rottura: $L = 2,6$ km
- Ampiezza della superficie di rottura: $W = 2,5$ km
- Velocità di rottura 2700 m/s





Valutazione del tempo di pre-allerta

- **Simulazione di sismogrammi sintetici generati dai terremoti di scenario in corrispondenza di varie stazioni “virtuali” sul territorio lombardo;**
- **Identificazione dei primi arrivi delle onde P ed S;**
- **Individuazione della relazione fra la separazione temporale delle due fasi e la distanza epicentrale del punto di simulazione;**
- **Stima del tempo di pre-allerta in corrispondenza dei maggiori centri urbani.**



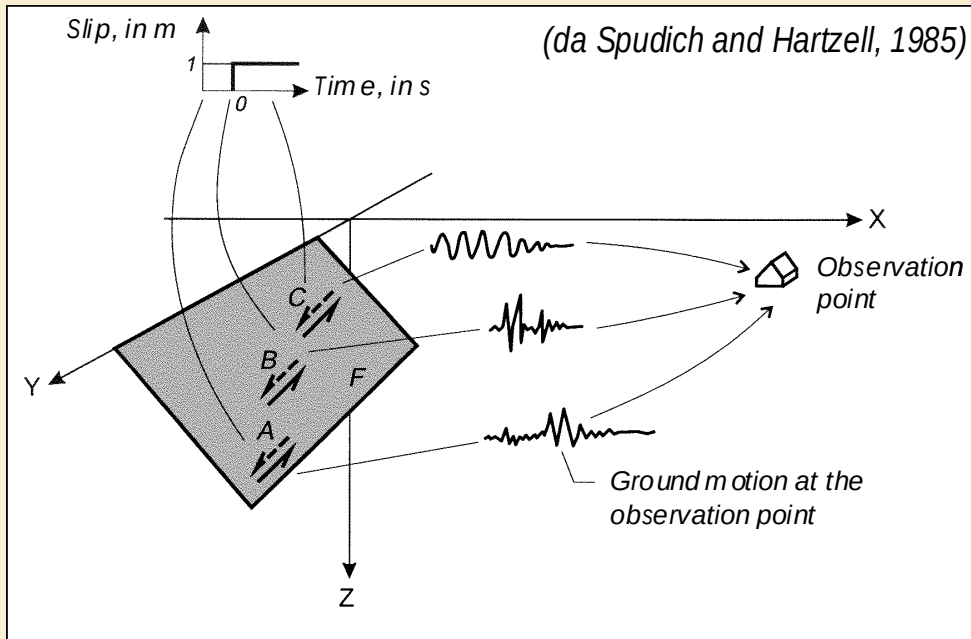
Simulazione Sismogrammi Sintetici

- **Codice di Hisada e Bielak (2003):** modello cinematico di sorgente in mezzo viscoelastico stratificato. Soluzione problema elastodinamico attraverso espressione analitica delle soluzioni asintotiche degli integrali delle funzioni di Green, grazie al metodo generalizzato R/T, dei coefficienti di riflessione e trasmissione, ed alla rappresentazione delle discontinuità in termini tensoriali per la simulazione rispettivamente delle condizioni al contorno e di sorgente.
- **Codice di Herrmann (2002):** modello di sorgente basato sul modello di Haskell (1964) in mezzo stratificato. Soluzione del problema elastodinamico metodo integrazione nel piano complesso del numero d'onda



Simulazione sismogrammi sintetici

- Calcolo funzioni di Green combinate per ottenere serie temporali nelle tre componenti in funzione delle caratteristiche della sorgente
- Propagazione onde sismiche nella crosta → effetti di attenuazione da diffusione geometrica, dissipazione energia di deformazione, rifrazioni e riflessioni, dispersione da eterogeneità crostali.



Layer 1	$h_1, \rho_1, V_{P1}, V_{S1}, D_{P1}, D_{S1}$
Layer 2	$h_2, \rho_2, V_{P2}, V_{S2}, D_{P2}, D_{S2}$
:	:
Layer n_l	$h_{n_l}, \rho_{n_l}, V_{Pn_l}, V_{Sn_l}, D_{Pn_l}, D_{Sn_l}$

ipotesi di mezzo stratificato con
modello costitutivo viscoelastico²¹



EUCENTRE

European Centre for
Training and Research in
Earthquake Engineering

Risultati Simulazione Numerica (Hisada & Bielak, 2003)

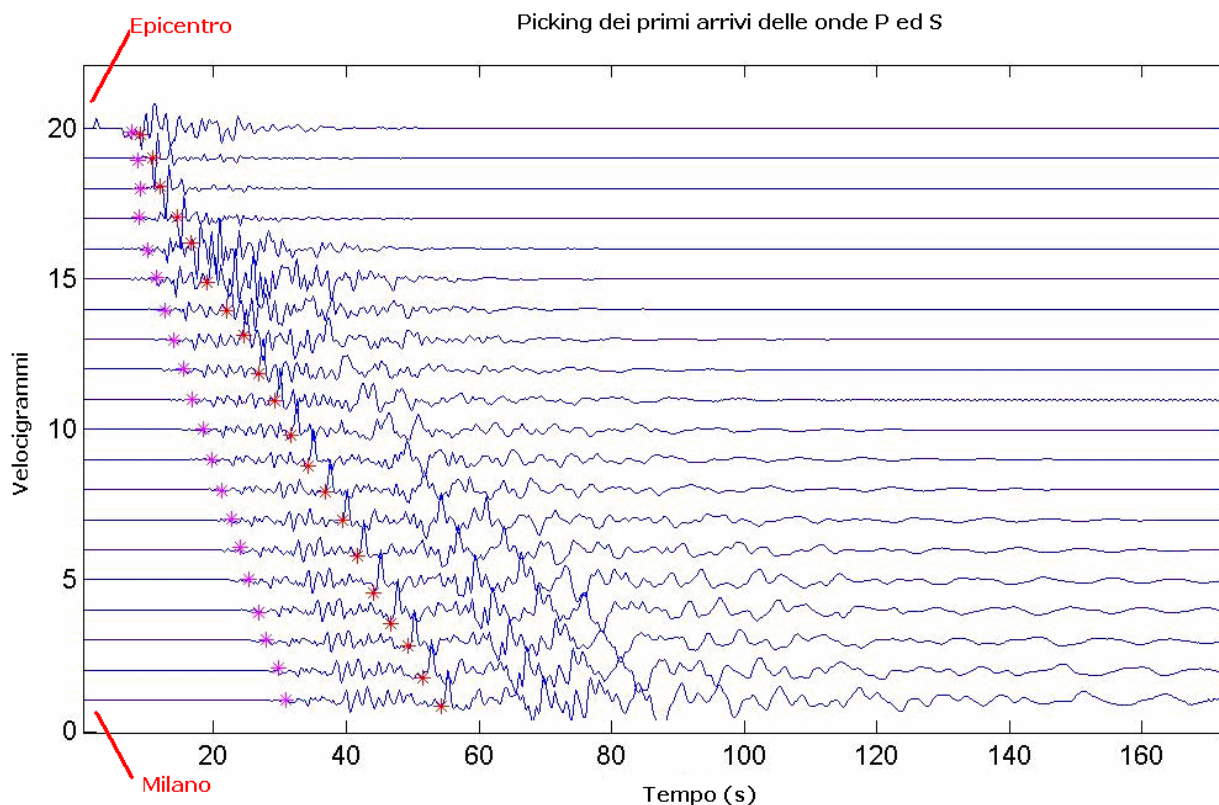




EUCENTRE

European Centre for
Training and Research in
Earthquake Engineering

Risultati Simulazione Numerica (Hisada & Bielak, 2003)



Sono riconoscibili e distinguibili le due fasi

**Velocigrammi
sintetici relativi al
terremoto di Salò
del 24/11/2004**

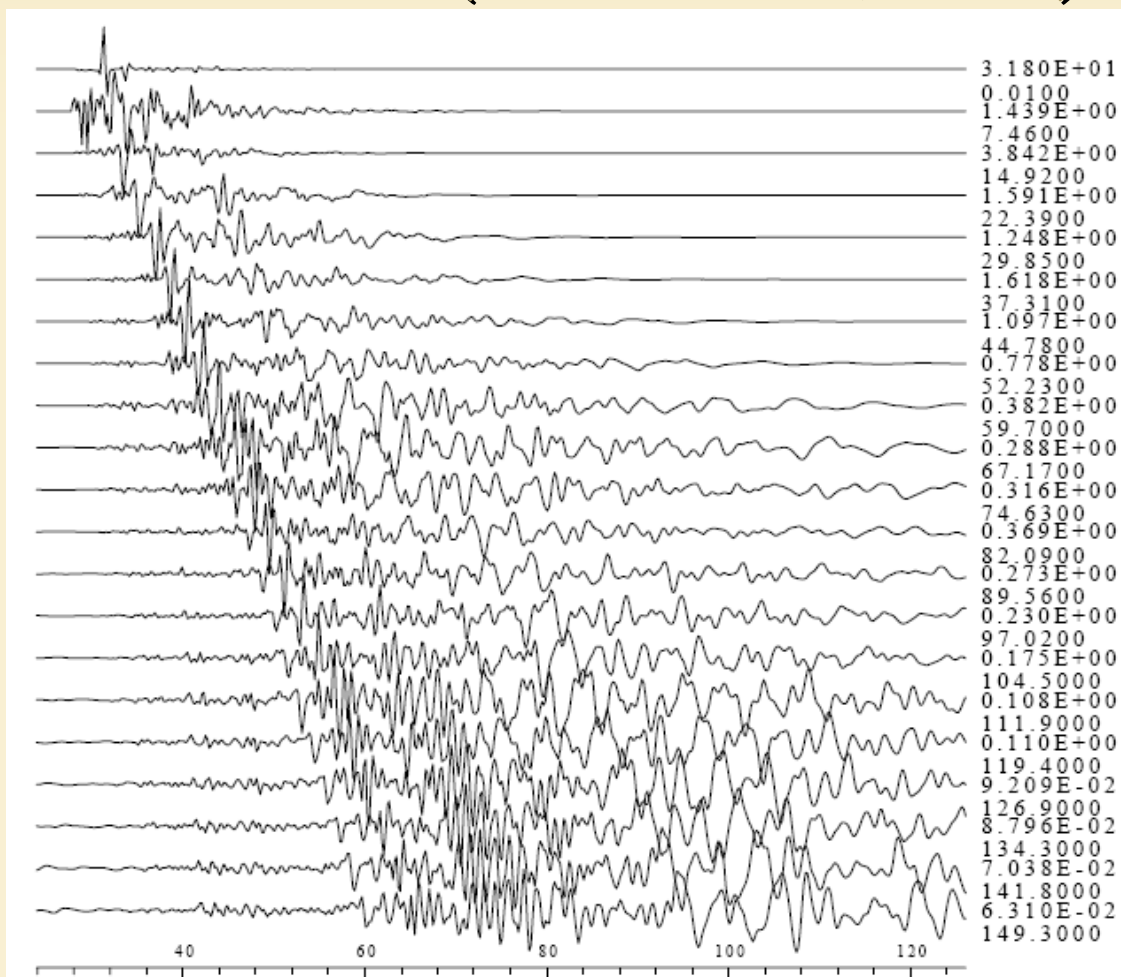


EUCENTRE

European Centre for
Training and Research in
Earthquake Engineering



Risultati Simulazione Numerica (Herrmann, 2002)



Velocigrammi sintetici
relativi al terremoto di
Salò del 24/11/2004



Risultati Simulazione Numerica (Hisada & Bielak, 2003)

Stima dei tempi di pre-allerta e dei livelli di scuotimento:

- **Picking dei primi arrivi delle onde P ed S ai ricevitori virtuali**
- **Separazione temporale fra l'arrivo delle due fasi in funzione della distanza dall'epicentro**
- **Tempo di pre-allerta nei vari centri urbani in funzione della distanza epicentrale**
- **Serie temporali nei punti stessi → possibilità di valutare lo scuotimento massimo atteso**
- **Definizione delle soglie minime di danno delle apparecchiature → fasi decisionali di allarme**



Risultati Simulazione Numerica

■ TEMPI DI PRE-ALLERTA

REGGIO EMILIA	Distanza epicentrale (km)	Arrivo onde P (s)	Delta T (s)	Arrivo onde S (s)	Pre-allerta (s)
Cremona	55.8	11.2	8.4	19.6	16.6
Pavia	108.0	21.6	16.2	37.8	34.8
Bergamo	122.0	24.4	18.3	42.7	39.7
Milano	125.0	25.0	18.8	43.8	40.8

SALO'	Distanza epicentrale (km)	Arrivo onde P (s)	Delta T (s)	Arrivo onde S (s)	Pre-allerta (s)
Brescia	24.8	5.0	4.0	9.0	6.0
Bergamo	67.2	13.4	10.7	24.2	21.2
Piacenza	89.7	17.9	14.3	32.3	29.3
Milano	106	21.2	17.0	38.2	35.2
Pavia	116	23.2	18.6	41.8	38.8



EUCENTRE

European Centre for
Training and Research in
Earthquake Engineering

Risultati Simulazione Numerica (Hisada & Bielak, 2003)

■ LIVELLI DI SCUOTIMENTO

Livelli di scuotimento pressoché
insignificanti per tempi di preavviso
rilevanti ($< 1\%$ g)

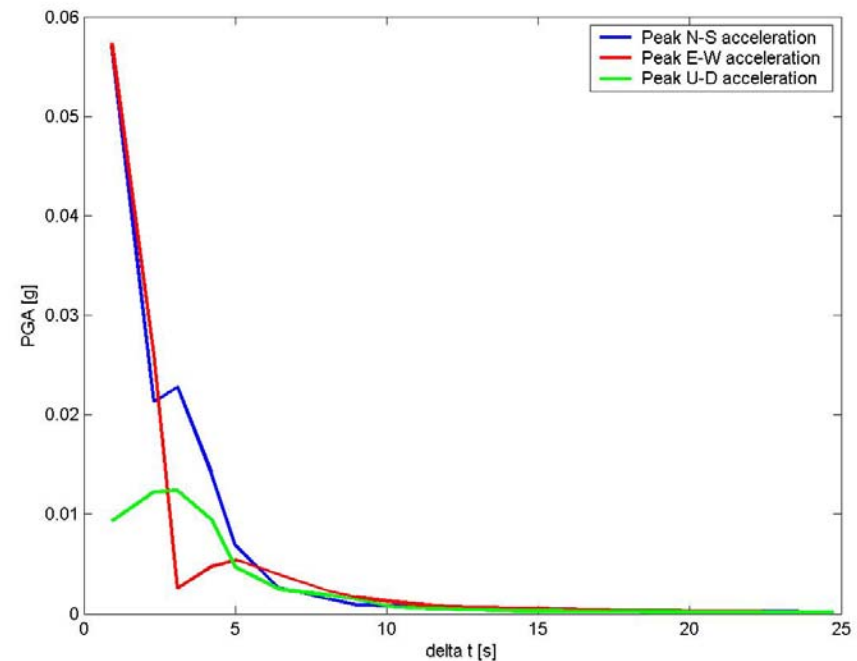


Problema intrinseco per le zone a
bassa-moderata sismicità



Possibili applicazioni
apparecchiature sensibili
(misura e diagnostica)

Valori di PGA in funzione della separazione
temporale fra l'arrivo delle onde P e S



Riferito al terremoto di Salò del 24/11/2004



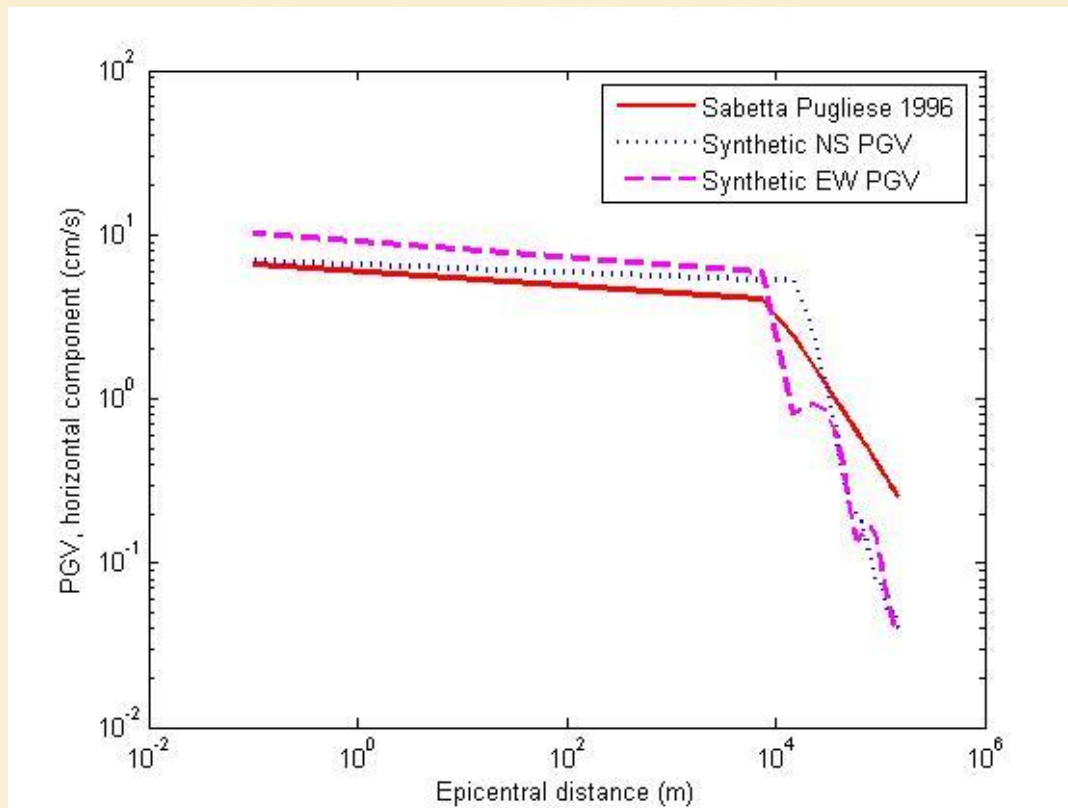
EUCENTRE

European Centre for
Training and Research in
Earthquake Engineering



Risultati Simulazione Numerica (Hisada & Bielak, 2003)

■ CONFRONTO CON LE RELAZIONI DI ATTENUAZIONE



Riferito al terremoto di
Salò del 24/11/2004



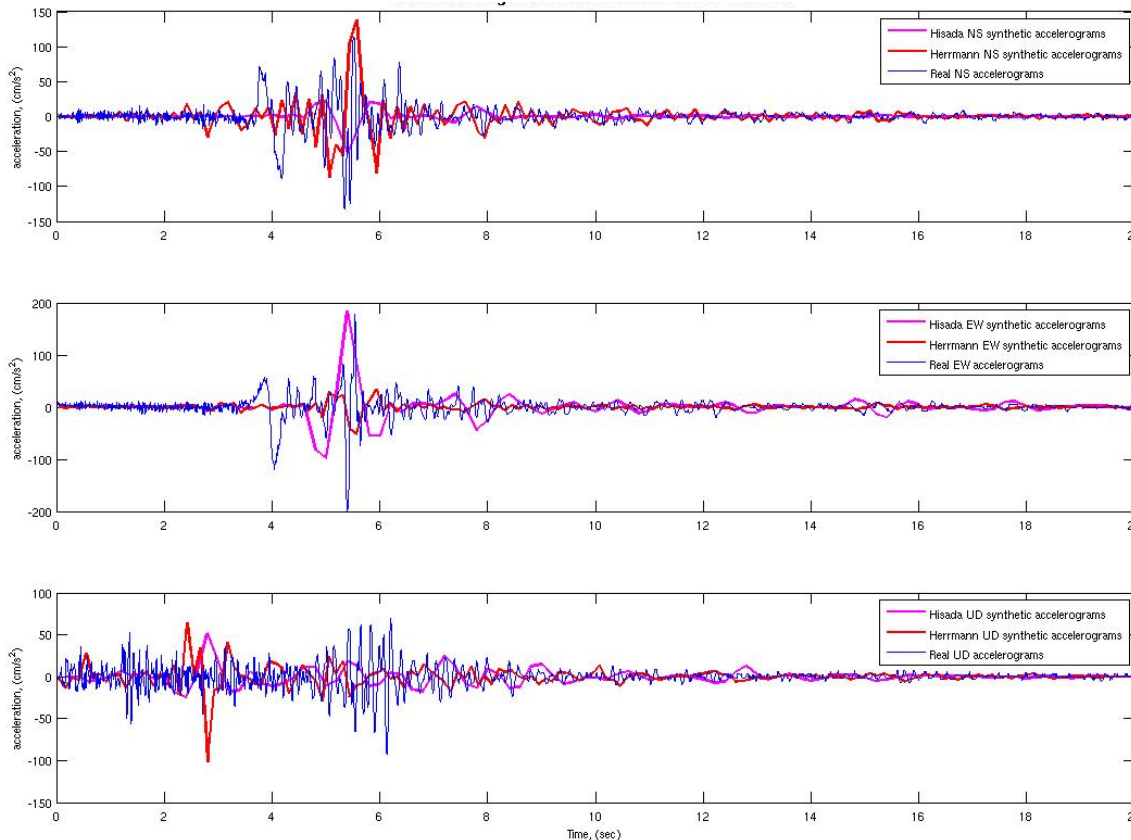
EUCENTRE

European Centre for
Training and Research in
Earthquake Engineering



Risultati Simulazioni Numeriche

■ CONFRONTO CON LE REGISTRAZIONI REALI

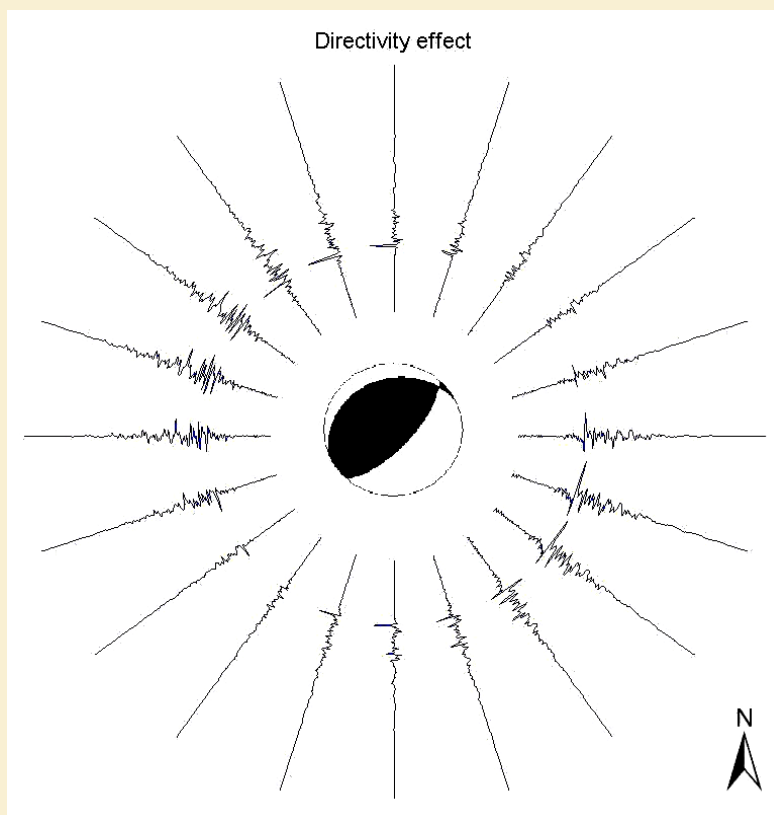


Stazione di
Novellara,
registrazioni reali
terremoto di Reggio
Emilia 1996

- I codici di simulazione non riescono a riprodurre le elevate frequenze del segnale reale
- Ottima riproduzione delle ampiezze dello scuotimento

Risultati Simulazioni Numeriche

■ ANALISI DEGLI EFFETTI DI DIRETTIVITA' DELLE SORGENTI



Effetti maggiori nella
direzione di propagazione
della rottura, congruente
con il meccanismo di
fagliazione

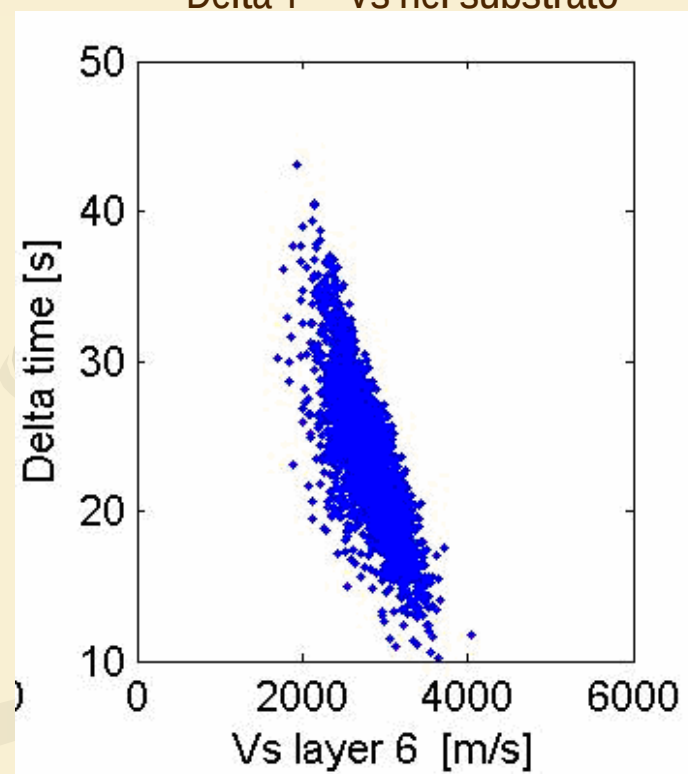
Velocigrammi normalizzati relativi al
terremoto di Reggio Emilia 1996



Sensibilità ai parametri

- **Modello ottico geometrico semplice per valutare l'influenza dei parametri principali del modello sul tempo di pre-allerta fornibile**
 - Parametri più influenti: valori di velocità delle onde sismiche negli strati più spessi del modello crostale
 - Forte correlazione con la velocità delle onde sismiche nel substrato

Delta T ---Vs nel substrato





Considerazioni conclusive

- **Codici di simulazione in grado di riprodurre le ampiezze dello scuotimento prodotto dai terremoti di scenario in punti definiti**
- **Sistemi di calcolo consentono di stimare la separazione temporale fra l'arrivo delle onde P ed S e quindi il tempo di pre-allarme**
- **Stima affidabile dei parametri di picco del moto del terreno (PGA, PGV)**
- **Valutazione degli effetti di direttività**
- **EEWS potenzialmente in grado di fornire buoni tempi di pre-allarme per distanze epicentrali a partire da 50 km circa**
- **Livelli di scuotimento corrispondenti sono di entità modesta (problema intrinseco per zone a bassa sismicità)**
- **Pre-allerta corrispondenti a maggiori livelli di scuotimento entro pochi secondi fino alla quindicina di secondi**