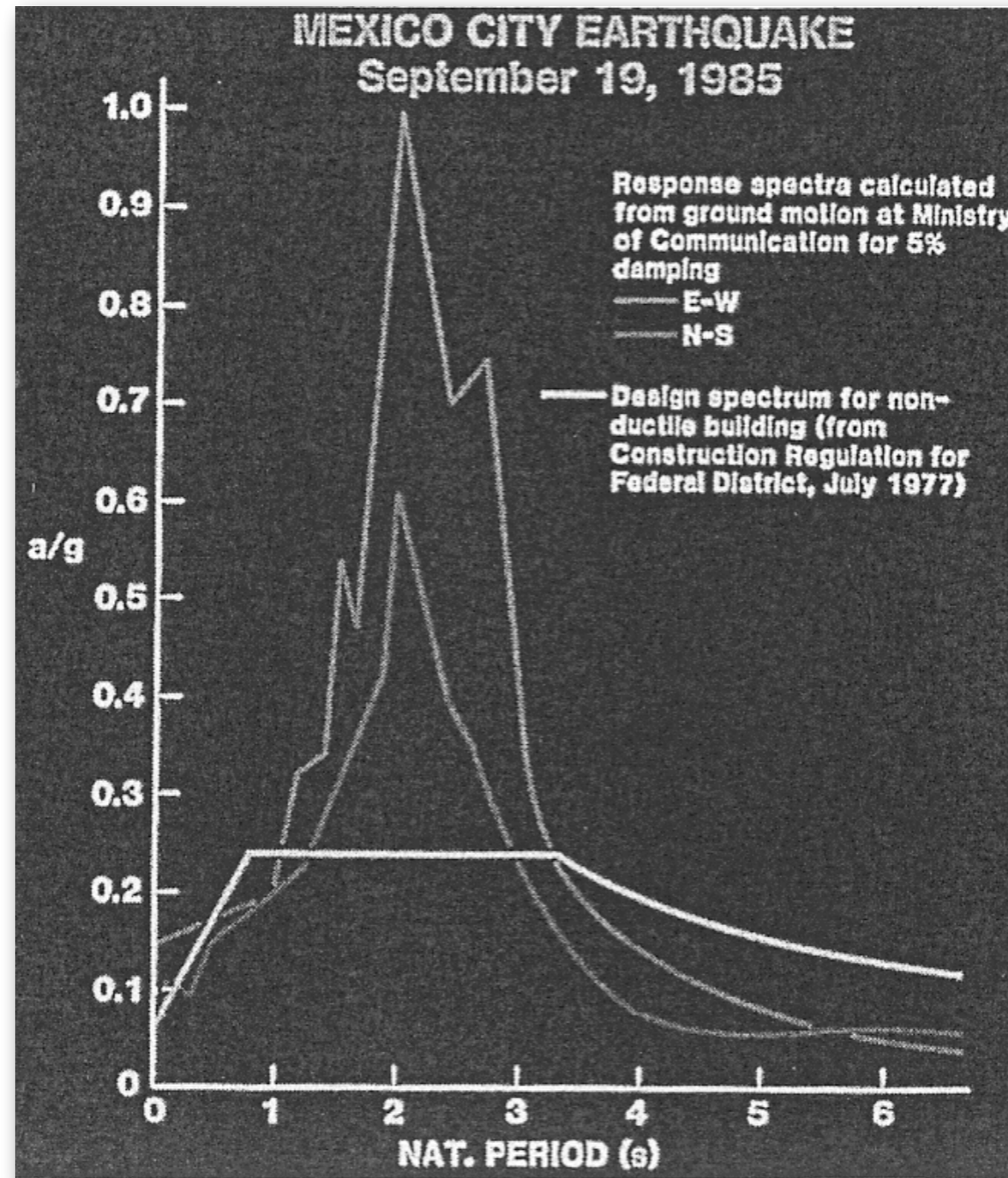
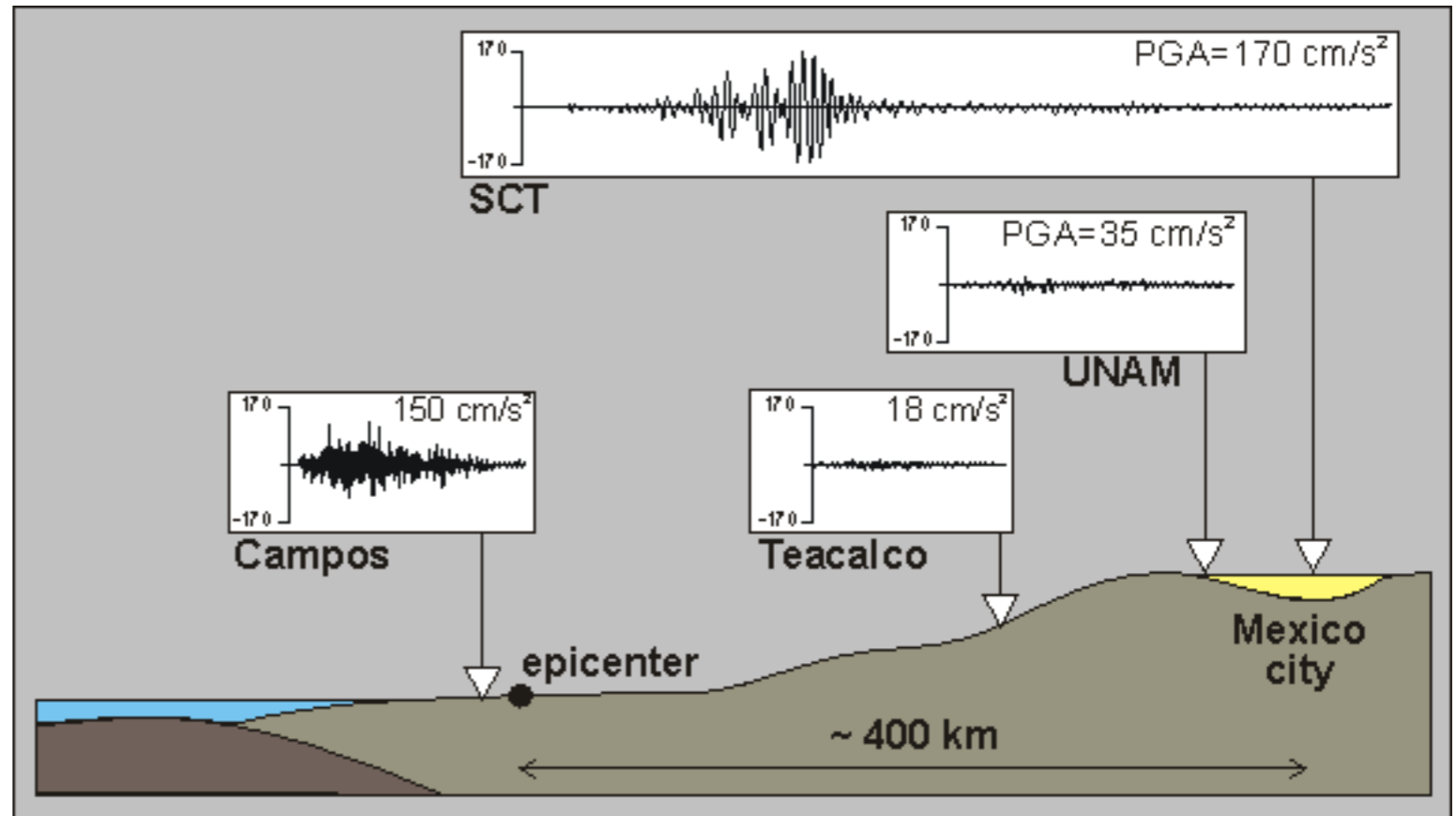
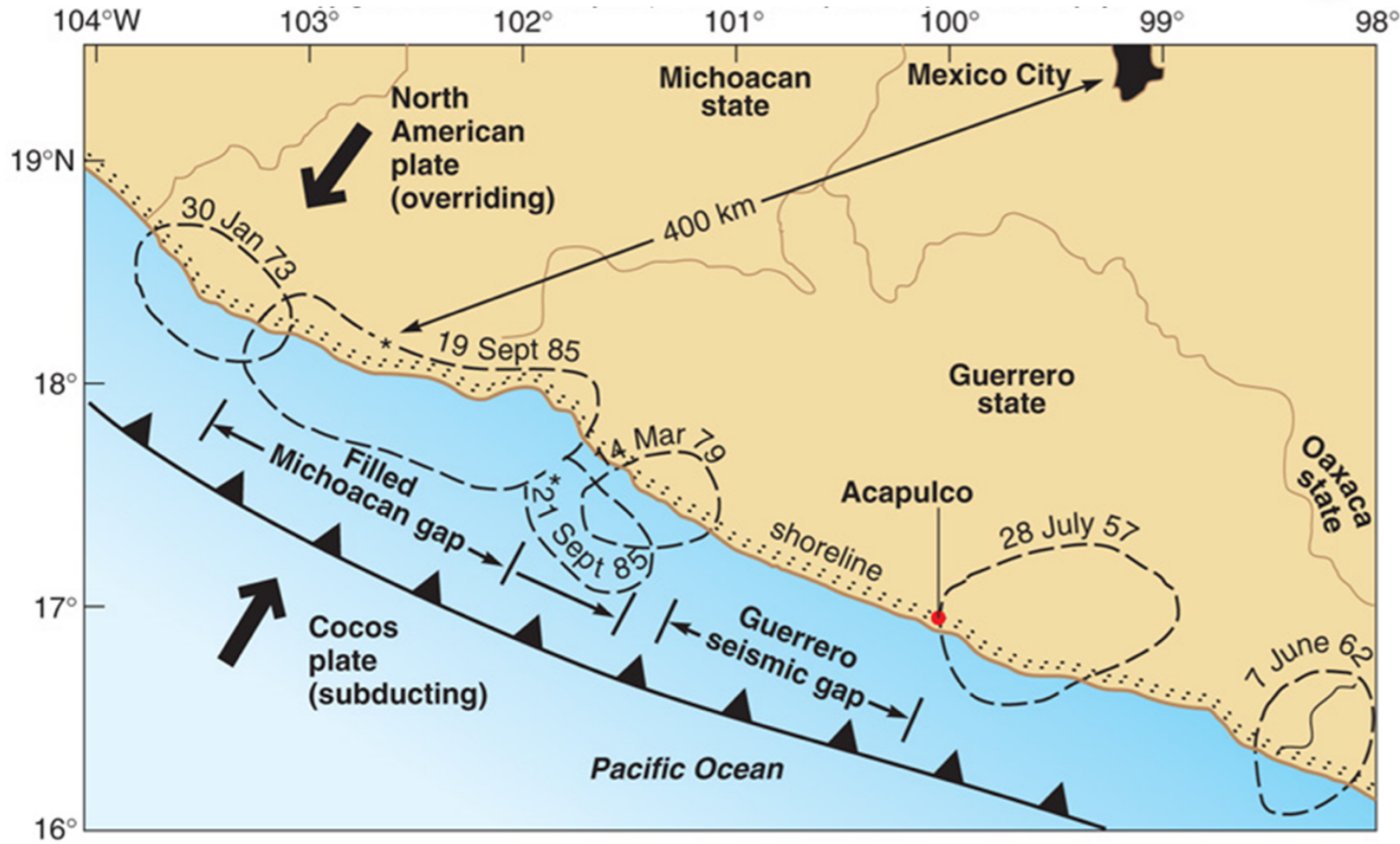


MZS - Engineering Seismology



Michoacan 1985 event: way to DF..



Tenochtitlan and Mexico City (DF)

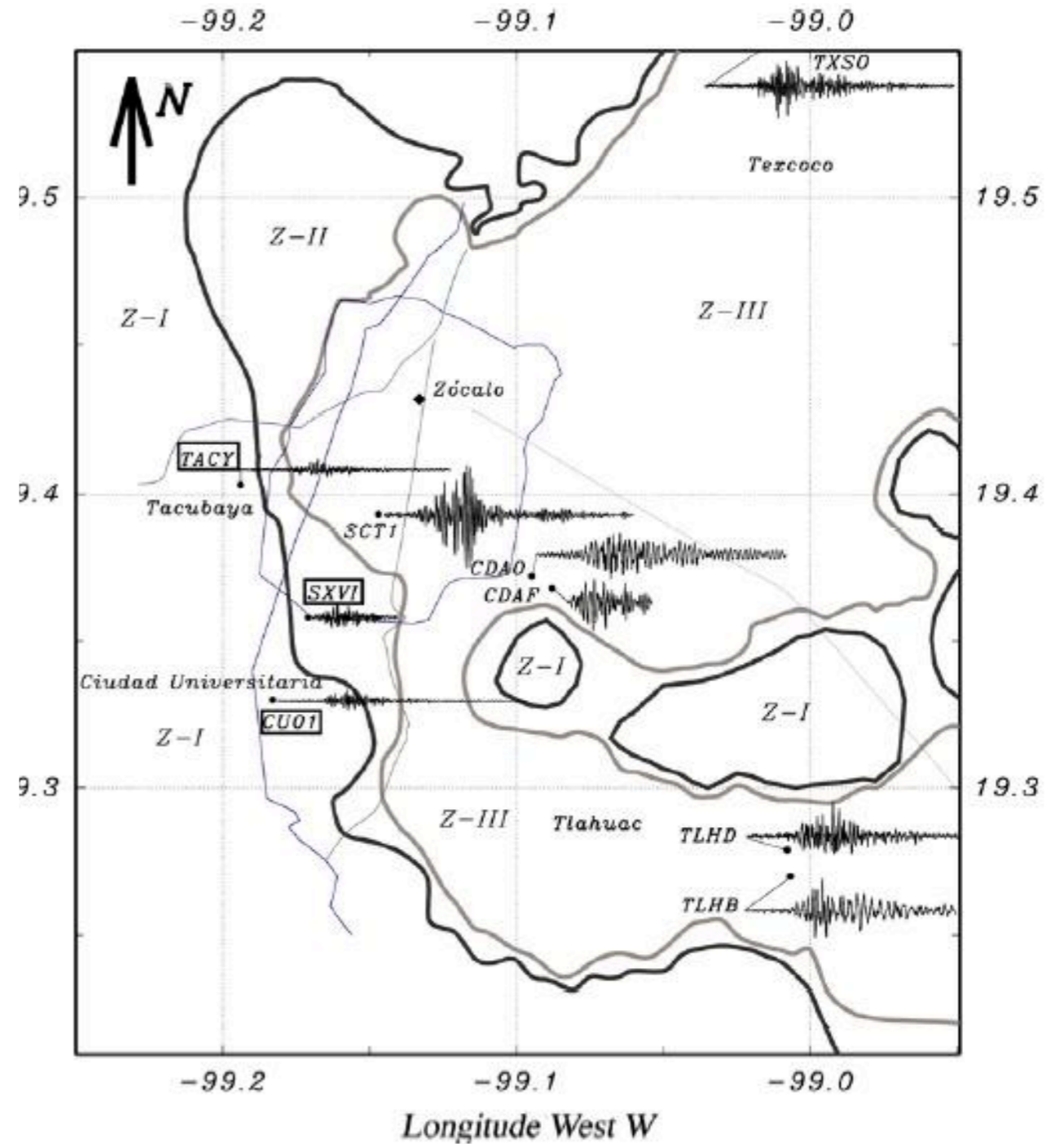
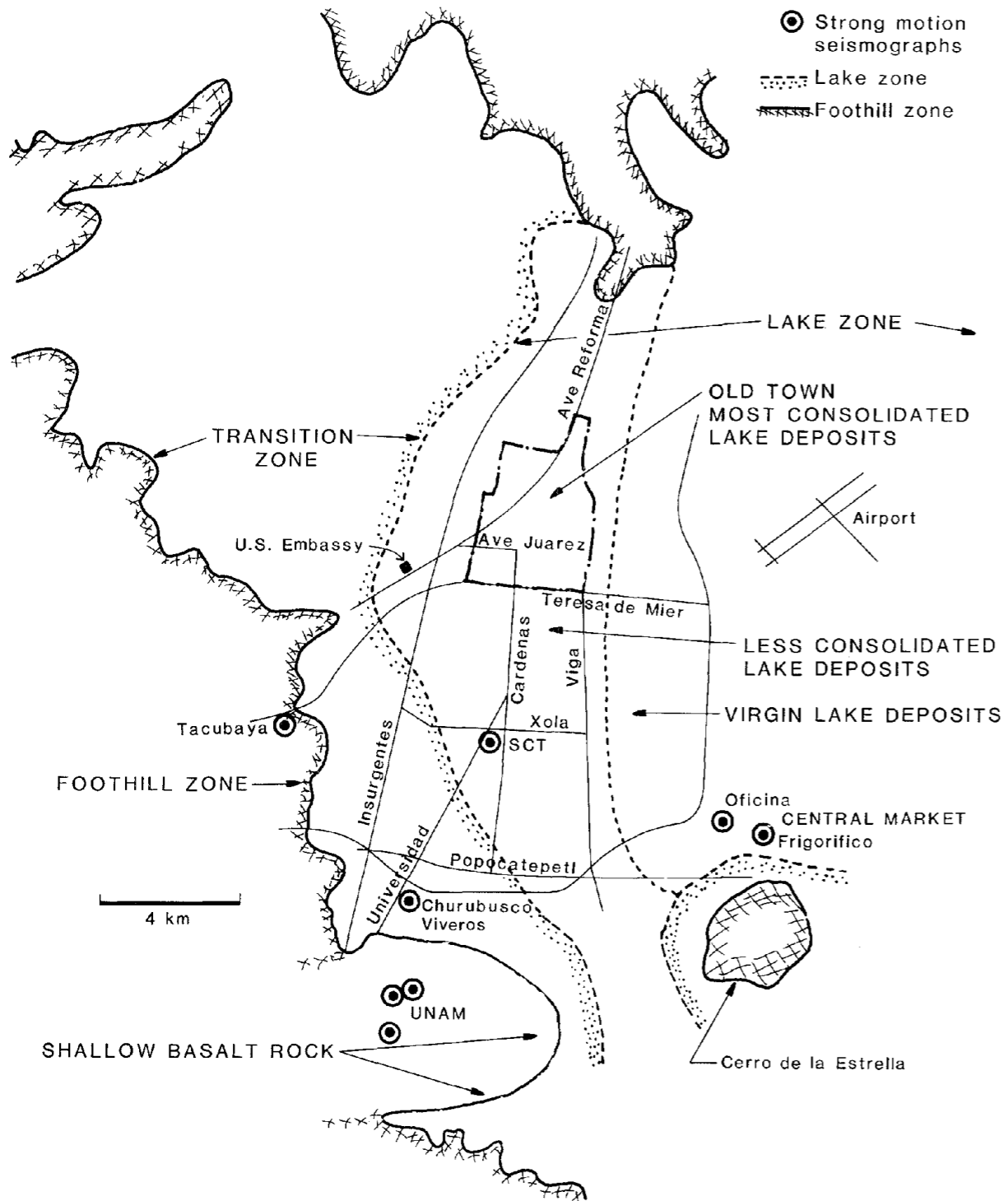


La ciudad de Tenochtitlan y su entorno en el siglo XVI Pintura de Miguel Covarrubias, Museo Nacional de Antropología, México DF



The actual boundaries of the World Heritage Property follows the boundaries of the Historical Monuments Zones, according to the limits of the city in the 19th century (perimeter A), and a buffer zone (perimeter B)

Michoacan 1985 event: GM in DF



Michoacan 1985 event: damage in DF



Wreckage of a twenty-one-story building in
Conjunto Pino Suarez Complex



Totally destroyed office building in the foreground,
while the 44-floor Torre Latinoamericana office
building, in the background on the right, stands

Response spectra

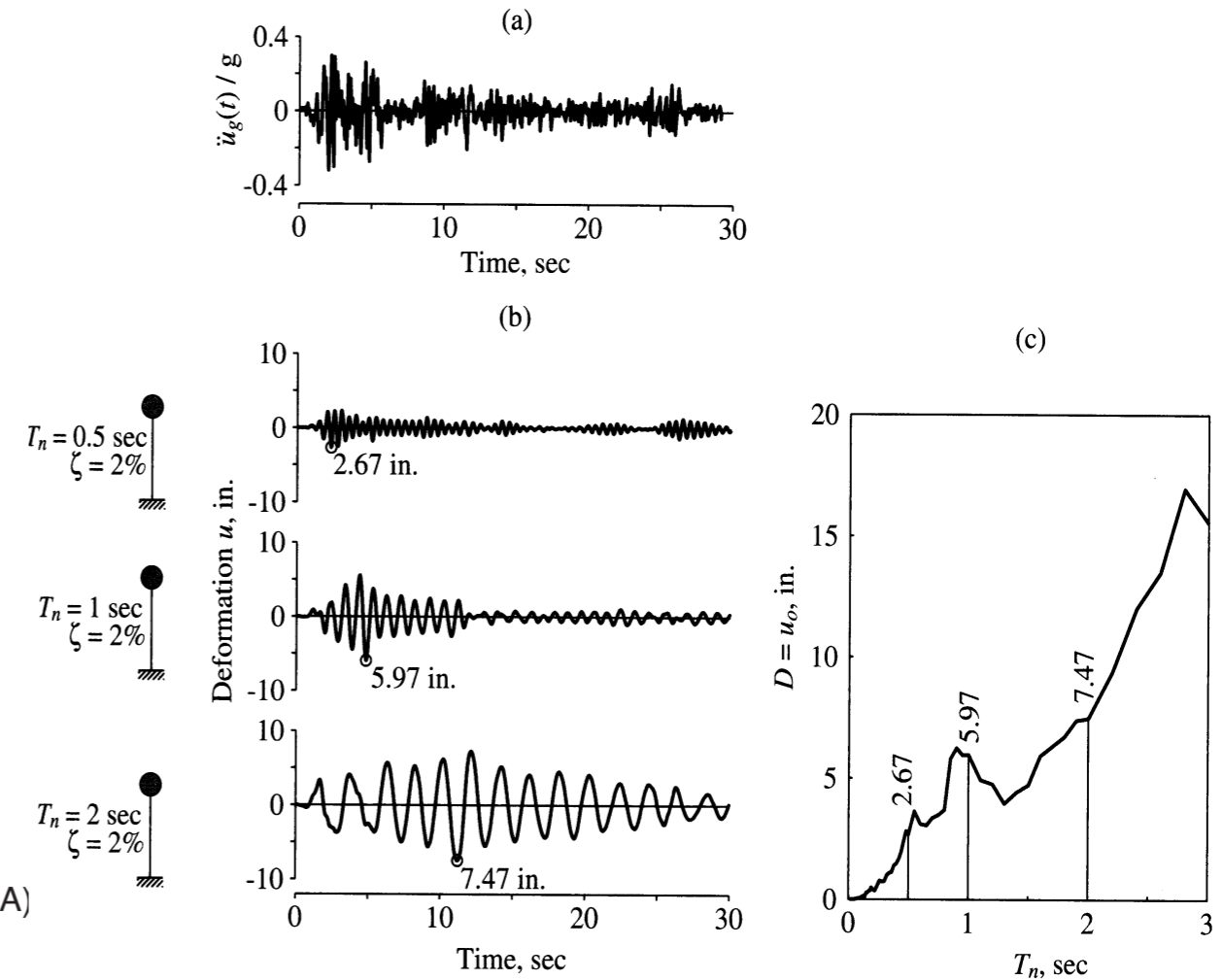
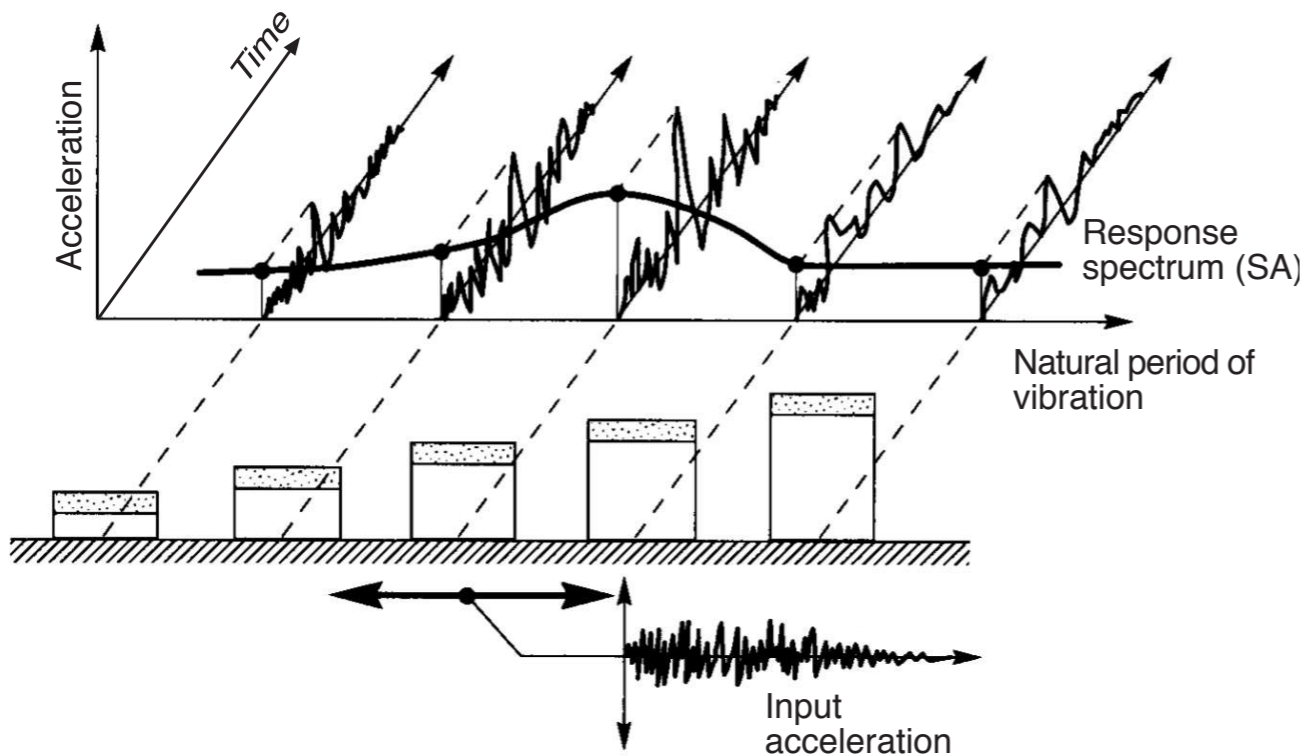
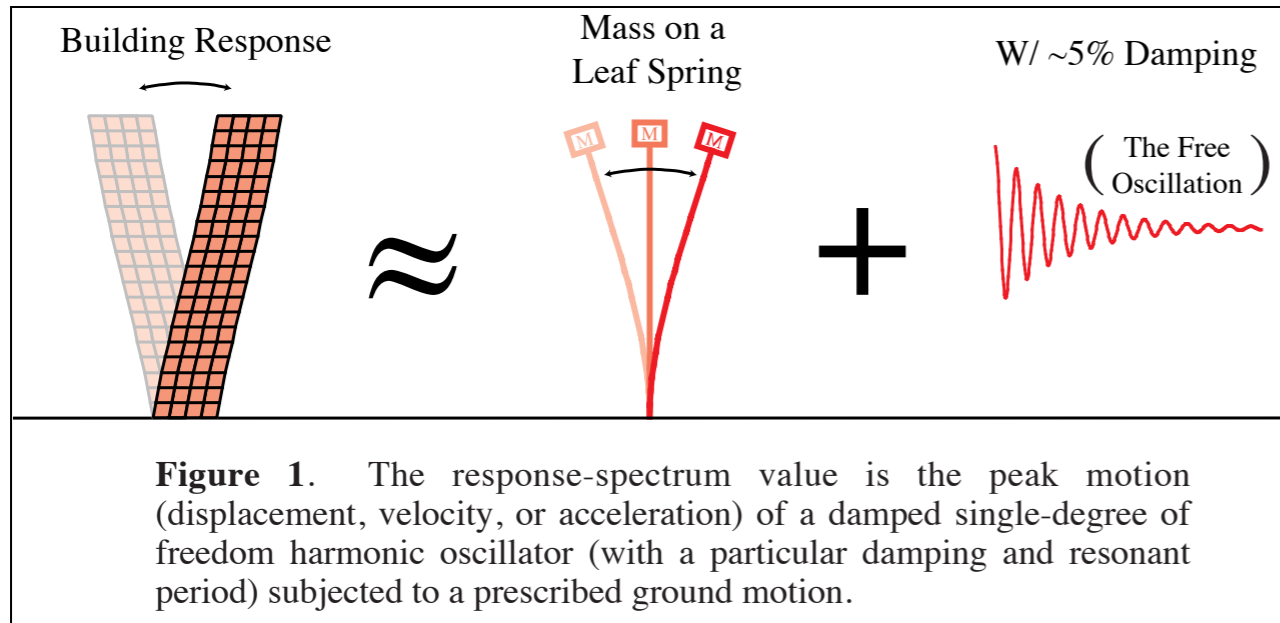


Figure 6.6.1 (a) Ground acceleration; (b) deformation response of three SDF systems with $\zeta = 2\%$ and $T_n = 0.5, 1,$ and 2 sec; (c) deformation response spectrum for $\zeta = 2\%$.

SHA dualism: P & D

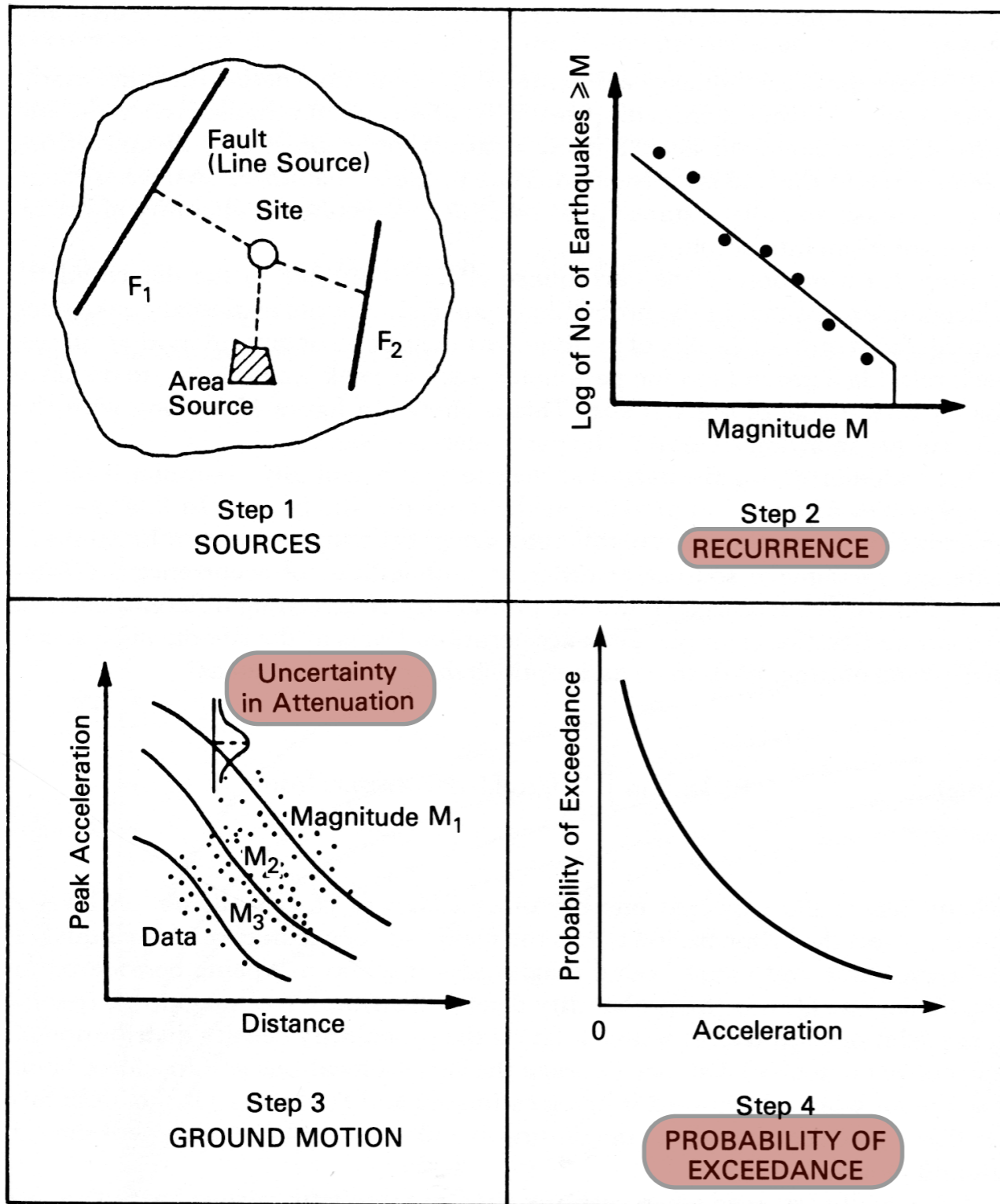


FIGURE 10.2 Basic steps of probabilistic seismic hazard analysis (after TERA Corporation 1978).

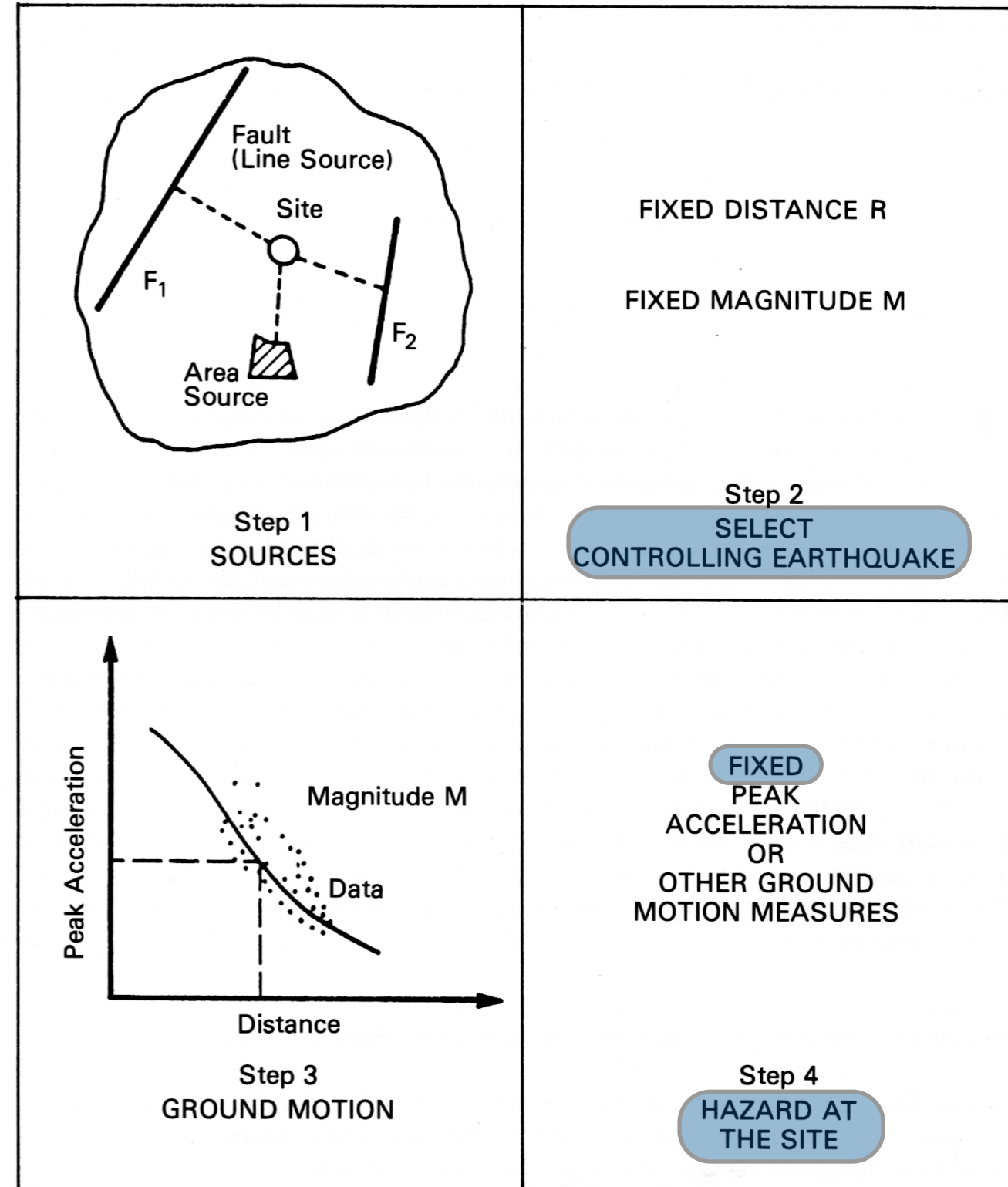


FIGURE 4.1 Basic steps of deterministic seismic hazard analysis (after TERA Corporation 1978).

“Earthquake Hazard Analysis”, Reiter, 1990

Italian building code (NTC08/18)

● Seismic classification

<https://rischi.protezionecivile.gov.it/it/sismico/attivita/classificazione-sismica>

● Seismic hazard

<http://esse1.mi.ingv.it>

● NTC08 Seismic code (§ 2.*; 3.2; 7.*)

<https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2008/02/04/08A00368/sg>

● NTC18 Seismic code (§ 2.*; 3.2; 7.*)

<https://www.gazzettaufficiale.it/eli/gu/2018/02/20/42/so/8/sg/pdf>

<https://www.gazzettaufficiale.it/eli/id/2019/02/11/19A00855/sg>

Italian code NTC18 - Seismic Action

L'azione sismica è caratterizzata da 3 componenti traslazionali, due orizzontali contrassegnate da X ed Y ed una verticale contrassegnata da Z, da considerare tra di loro indipendenti. Le componenti possono essere descritte, in funzione del tipo di analisi adottata, mediante una delle seguenti rappresentazioni:

- accelerazione massima in superficie;
- accelerazione massima e relativo spettro di risposta in superficie;
- storia temporale del moto del terreno.

Le due componenti ortogonali indipendenti che descrivono il moto orizzontale sono caratterizzate dallo stesso spettro di risposta o dalle due componenti accelerometriche orizzontali del moto sismico.

Italian code NTC18 - Elastic spectra

Lo spettro di risposta elastico in accelerazione è espresso da una forma spettrale (spettro normalizzato) riferita ad uno smorzamento convenzionale del 5%, moltiplicata per il valore della accelerazione orizzontale massima a_g su sito di riferimento rigido orizzontale.

Sia la forma spettrale che il valore di a_g variano al variare della probabilità di superamento nel periodo di riferimento P_{VR} (vedi § 2.4 e § 3.2.1).

Gli spettri così definiti possono essere utilizzati per strutture con periodo fondamentale minore o uguale a 4,0 s. Per strutture con periodi fondamentali superiori lo spettro deve essere definito da apposite analisi oppure l'azione sismica deve essere descritta mediante **storie temporali del moto del terreno**.

Italian code NTC18 - Elastic spectra

Lo spettro di risposta (componente orizzontale) è definito a partire dai valori dei seguenti parametri, validi per sito di riferimento su suolo rigido:

- a_g accelerazione orizzontale massima al sito
- F_0 è il fattore che quantifica l'amplificazione spettrale massima, su sito di riferimento rigido orizzontale, ed ha valore minimo pari a 2,2
- T_C^* (valore di riferimento per la determinazione del) periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.
Viene quindi definito: $T_C = C_C T_C^*$
dove C_C dipende dalla categoria del sottosuolo

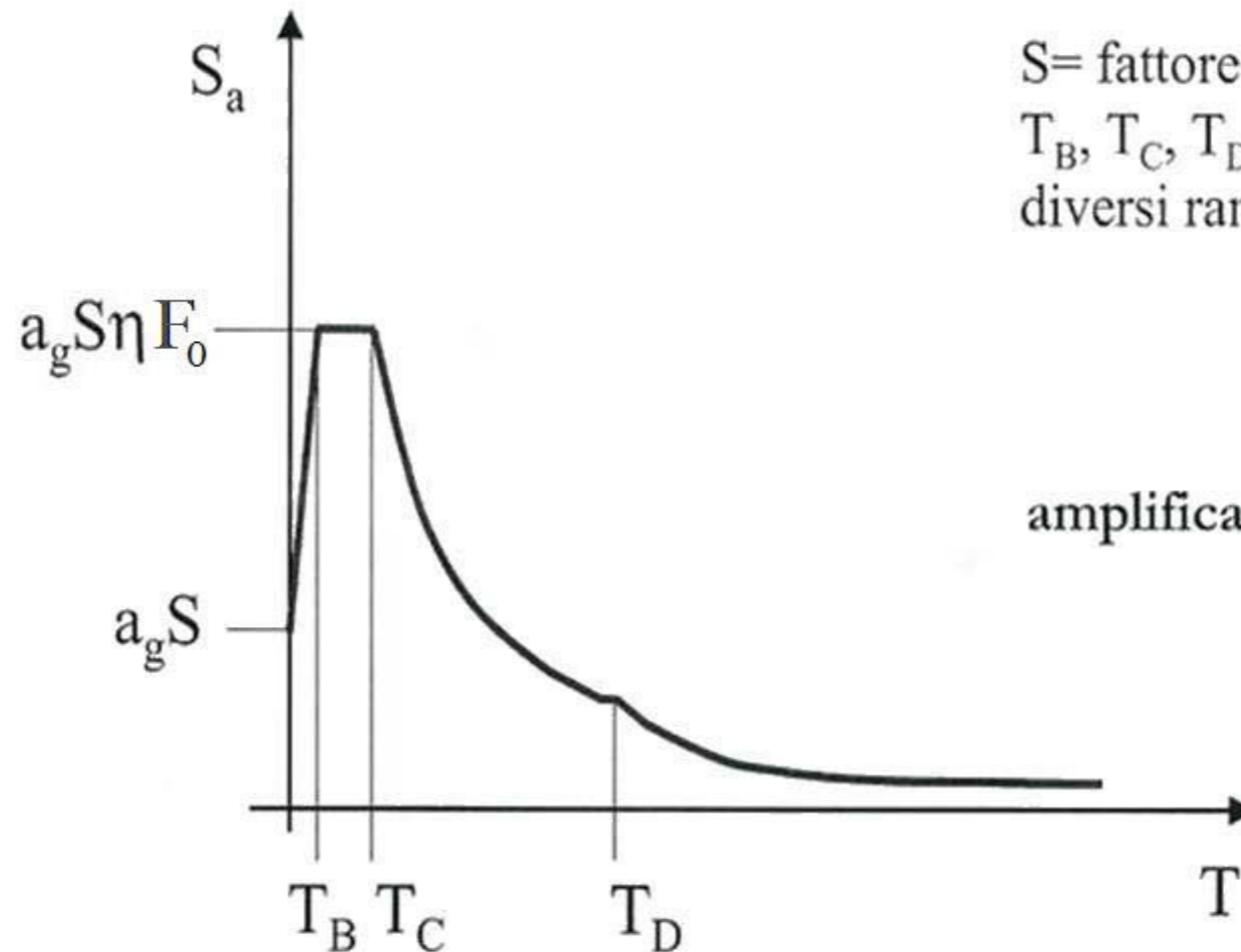
I valori di tali parametri sono forniti dalla NTC18, per tutti i siti considerati, in forma tabellare. Per la pericolosità in particolare (a_g):

<http://essel.mi.ingv.it>

Italian code NTC18 - from hazard to “design”

- Per ciascun nodo del reticolo di riferimento e per ciascuno dei periodi di ritorno T_R considerati dalla pericolosità sismica, i tre parametri si ricavano riferendosi ai valori corrispondenti al 50–esimo percentile ed attribuendo a F_0 e T_C^* i valori ottenuti imponendo che...
- le forme spettrali in accelerazione, velocità e spostamento previste dalle NTC scartino al minimo dalle corrispondenti forme spettrali previste dalla pericolosità sismica (la condizione di minimo è imposta operando ai minimi quadrati, su spettri di risposta normalizzati ad uno, per ciascun sito e ciascun periodo di ritorno).

Italian code NTC18 - Elastic spectra



S = fattore di amplificazione

T_B, T_C, T_D = periodo che separano i diversi rami dello spettro



amplificazione del terreno

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left[\frac{T}{T_B} + \frac{1}{\eta \cdot F_0} \cdot \left(1 - \frac{T}{T_B} \right) \right] \quad S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left(\frac{T_C}{T} \right)$$

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0$$

$$S_e(T) = a_g \cdot S \cdot \eta \cdot F_0 \cdot \left(\frac{T_C \cdot T_D}{T^2} \right)$$

- T_B è il periodo corrispondente all'inizio del tratto dello spettro ad accelerazione costante, $T_B = T_C / 3$; T_D è il periodo corrispondente all'inizio del tratto a spostamento costante dello spettro, espresso in secondi mediante la relazione: $T_D = 4.0 * a_g/g + 1.6$
- η è il fattore che altera lo spettro elastico per coefficienti di smorzamento viscosi convenzionali ξ diversi dal 5%, ($\eta = [10/(5+\xi)]^{0.5} \geq 0,55$), e valutato sulla base di materiali, tipologia strutturale e terreno di fondazione

Site effects and NTCI8 - Elastic spectra & soil

S è il coefficiente che tiene conto della categoria di sottosuolo e delle condizioni topografiche mediante la relazione: $S = S_S \cdot S_T$

S_S è il coefficiente di amplificazione stratigrafica

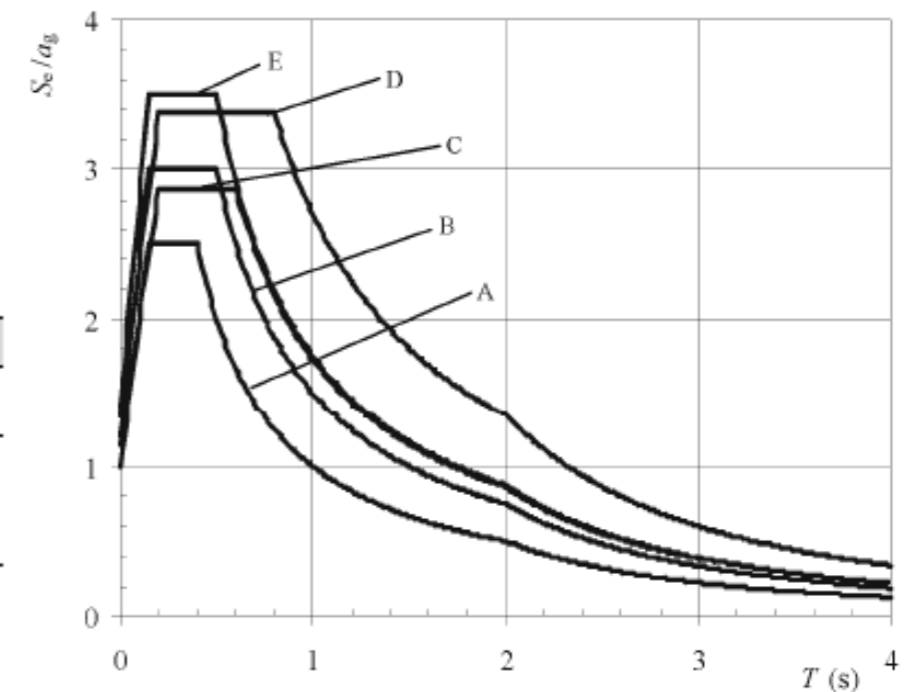
S_T è il coefficiente di amplificazione topografica

Tab. 3.2.V – Valori massimi del coefficiente di amplificazione topografica S_T

Categoria topografica	Ubicazione dell'opera o dell'intervento	S_T
T1	-	1,0
T2	In corrispondenza della sommità del pendio	1,2
T3	In corrispondenza della cresta di un rilievo con pendenza media minore o uguale a 30°	1,2
T4	In corrispondenza della cresta di un rilievo con pendenza media maggiore di 30°	1,4

Tab. 3.2.IV – Espressioni di S_S e di C_C

Categoria sottosuolo	S_S	C_C
A	1,00	1,00
B	$1,00 \leq 1,40 - 0,40 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,20$	$1,10 \cdot (T_C^*)^{-0,20}$
C	$1,00 \leq 1,70 - 0,60 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,50$	$1,05 \cdot (T_C^*)^{-0,33}$
D	$0,90 \leq 2,40 - 1,50 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,80$	$1,25 \cdot (T_C^*)^{-0,50}$
E	$1,00 \leq 2,00 - 1,10 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,60$	$1,15 \cdot (T_C^*)^{-0,40}$



Site effects and NTC18 - Soil classification

3.2.2 CATEGORIE DI SOTTOSUOLO E CONDIZIONI TOPOGRAFICHE

Categorie di sottosuolo

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, l'effetto della risposta sismica locale si valuta mediante specifiche analisi, da eseguire con le modalità indicate nel § 7.11.3. In alternativa, qualora le condizioni stratigrafiche e le proprietà dei terreni siano chiaramente riconducibili alle categorie definite nella Tab. 3.2.II, si può fare riferimento a un approccio semplificato che si basa sulla classificazione del sottosuolo in funzione dei valori della velocità di propagazione delle onde di taglio, V_S . I valori dei parametri meccanici necessari per le analisi di risposta sismica locale o delle velocità V_S per l'approccio semplificato costituiscono parte integrante della caratterizzazione geotecnica dei terreni compresi nel volume significativo, di cui al § 6.2.2.

Tab. 3.2.II – *Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato.*

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.</i>
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.</i>
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.</i>
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.</i>
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.</i>

Site effects and NTC18 - $V_{S,eq}$

La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, $V_{S,eq}$ (in m/s), definita dall'espressione:

$$V_{S,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_{S,i}}} \quad [\text{m / s}]$$

con h_i spessore dell' i -esimo strato; $V_{S,i}$ velocità delle onde di taglio nell' i -esimo strato; N numero di strati; H profondità del substrato, definito come quella formazione costituita da roccia o terreno molto rigido, caratterizzata da V_S non inferiore a 800 m/s.

Per depositi con profondità H del substrato superiore a 30 m, la velocità equivalente delle onde di taglio $V_{S,eq}$ è definita dal parametro $V_{S,30}$, ottenuto ponendo $H=30$ m nella precedente espressione e considerando le proprietà degli strati di terreno fino a tale profondità.

V_{S30}

Nelle definizioni precedenti V_{S30} è la velocità media di propagazione dei primi 30 m di profondità delle onde di taglio e viene calcolata con la seguente espressione:

$$V_{S30} = \frac{30}{\sum_{i=1,N} \frac{h_i}{V_i}} \quad [\text{m / s}]$$

dove h_i e V_i indicano lo spessore (in m) e la velocità delle onde di taglio (per deformazioni di taglio $\gamma < 10^{-6}$) dello strato i -esimo, per un totale di N strati presenti nei 30 m superiori.

Site effects and NTC18 - Topography

Per condizioni topografiche complesse è necessario predisporre specifiche analisi di risposta sismica locale. Per configurazioni superficiali semplici si può adottare la seguente classificazione (Tab. 3.2.III):

T1 Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$

T2 Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$

T3 Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15 \leq i \leq 30^\circ$

T4 Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$

Le suesposte categorie topografiche si riferiscono a configurazioni geometriche prevalentemente bidimensionali, creste o dorsali allungate, e devono essere considerate nella definizione dell'azione sismica se di altezza maggiore di 30 m.

NTC18 - Time histories (3.2)

Gli stati limite, ultimi e di esercizio, possono essere verificati mediante l'uso di storie temporali del moto del terreno artificiali o naturali...

L'uso di storie temporali del moto del terreno artificiali non è ammesso nelle analisi dinamiche di opere e sistemi geotecnici.

L'uso di storie temporali del moto del terreno generate mediante simulazione del meccanismo di sorgente e della propagazione è ammesso a condizione che siano adeguatamente giustificate le ipotesi relative alle caratteristiche sismogenetiche della sorgente e del mezzo di propagazione e che, negli intervalli di periodo sopraindicati, l'ordinata spettrale media non presenti uno scarto in difetto superiore al 20% rispetto alla corrispondente componente dello spettro elastico.

L'uso di storie temporali del moto del terreno naturali o registrate è ammesso a condizione che la loro scelta sia rappresentativa della sismicità del sito e sia adeguatamente giustificata in base alle caratteristiche sismogenetiche della sorgente, alle condizioni del sito di registrazione, alla magnitudo, alla distanza dalla sorgente e alla massima accelerazione orizzontale attesa al sito.

NTC18 - Space variability (3.2.4.1)

Nei punti di contatto con il terreno di opere con sviluppo planimetrico significativo, il moto sismico può avere caratteristiche differenti, a causa del carattere asincrono del fenomeno di propagazione, delle disomogeneità e delle discontinuità eventualmente presenti, e della diversa risposta locale del terreno.

Degli effetti sopra indicati deve tenersi conto quando essi possono essere significativi e in ogni caso quando le condizioni di sottosuolo siano così variabili lungo lo sviluppo dell'opera da richiedere l'uso di accelerogrammi o di spettri di risposta diversi.

NTC18 - Local response (7.11.3)

Il moto generato da un terremoto in un sito dipende dalle particolari condizioni locali, cioè dalle caratteristiche topografiche e stratigrafiche del sottosuolo e dalle proprietà fisiche e meccaniche dei terreni e degli ammassi rocciosi di cui è costituito. Alla scala della singola opera o del singolo sistema geotecnico, l'analisi della risposta sismica locale consente quindi di definire le modifiche che il segnale sismico di ingresso subisce, a causa dei suddetti fattori locali.

...

Nelle analisi di risposta sismica locale, l'azione sismica di ingresso è descritta in termini di storia temporale dell'accelerazione (accelerogrammi) su di un sito di riferimento rigido ed affiorante con superficie topografica orizzontale.

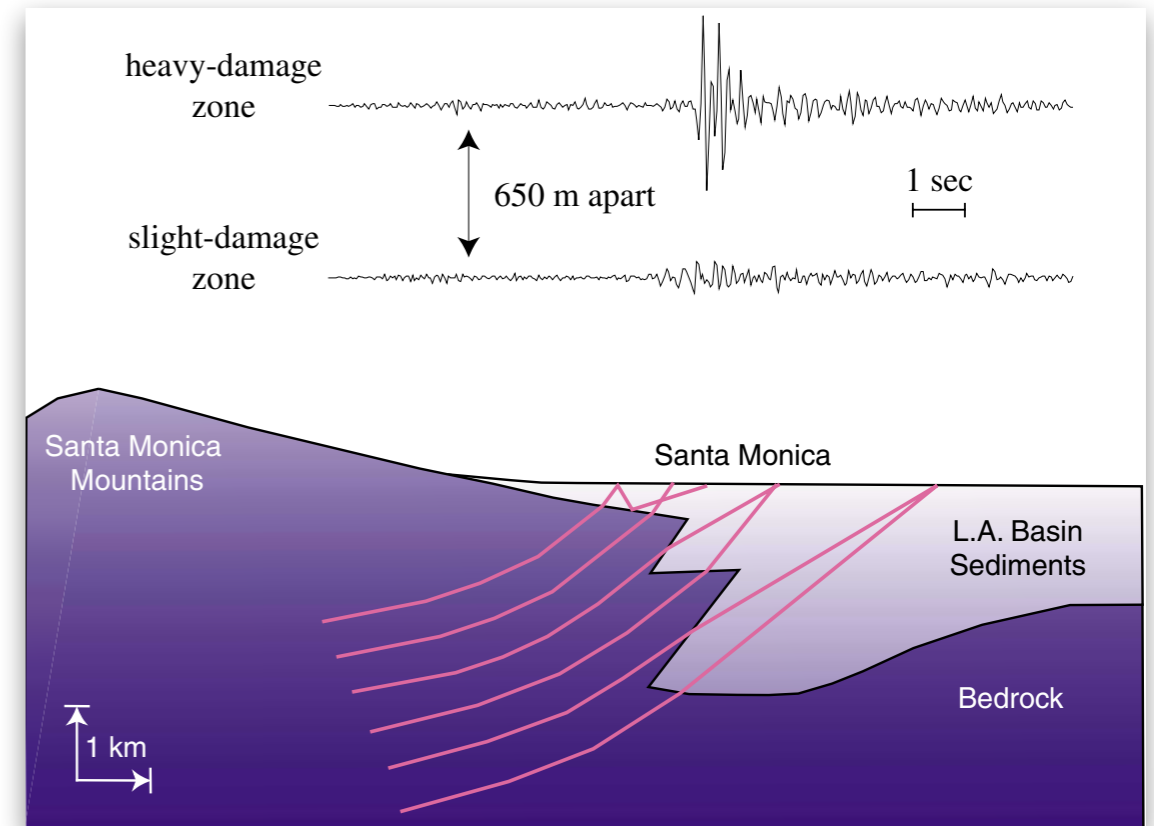
L'applicazione del metodo richiede la valutazione dell'accelerazione critica, che deve essere valutata con i valori caratteristici dei parametri di resistenza, e dell'azione sismica di progetto, che deve essere rappresentata mediante storie temporali delle accelerazioni. Gli accelerogrammi impiegati nelle analisi, in numero non inferiore a 7, devono essere rappresentativi della sismicità del sito e la loro scelta deve essere adeguatamente giustificata (vedi § 3.2.3.6). Non è ammesso l'impiego di accelerogrammi artificiali.

SURFACE TOPOGRAPHY EFFECTS

(convexity) sensitivity to:

- a) type of wavefield
- b) angle of incidence
- c) shape and sharpness

GROUNDSHAKING SITE EFFECTS



SOFT SURFACE LAYERING

a) 1-D: trapping of waves for impedance contrast; vertical resonances

$$f_n = [(2n+1)\beta]/4H; A \approx (\rho_2 v_2)/(\rho_1 v_1)$$

b) 2-D, 3-D: complex energy focusing; diffraction effects;
basin edge waves

1D site effects

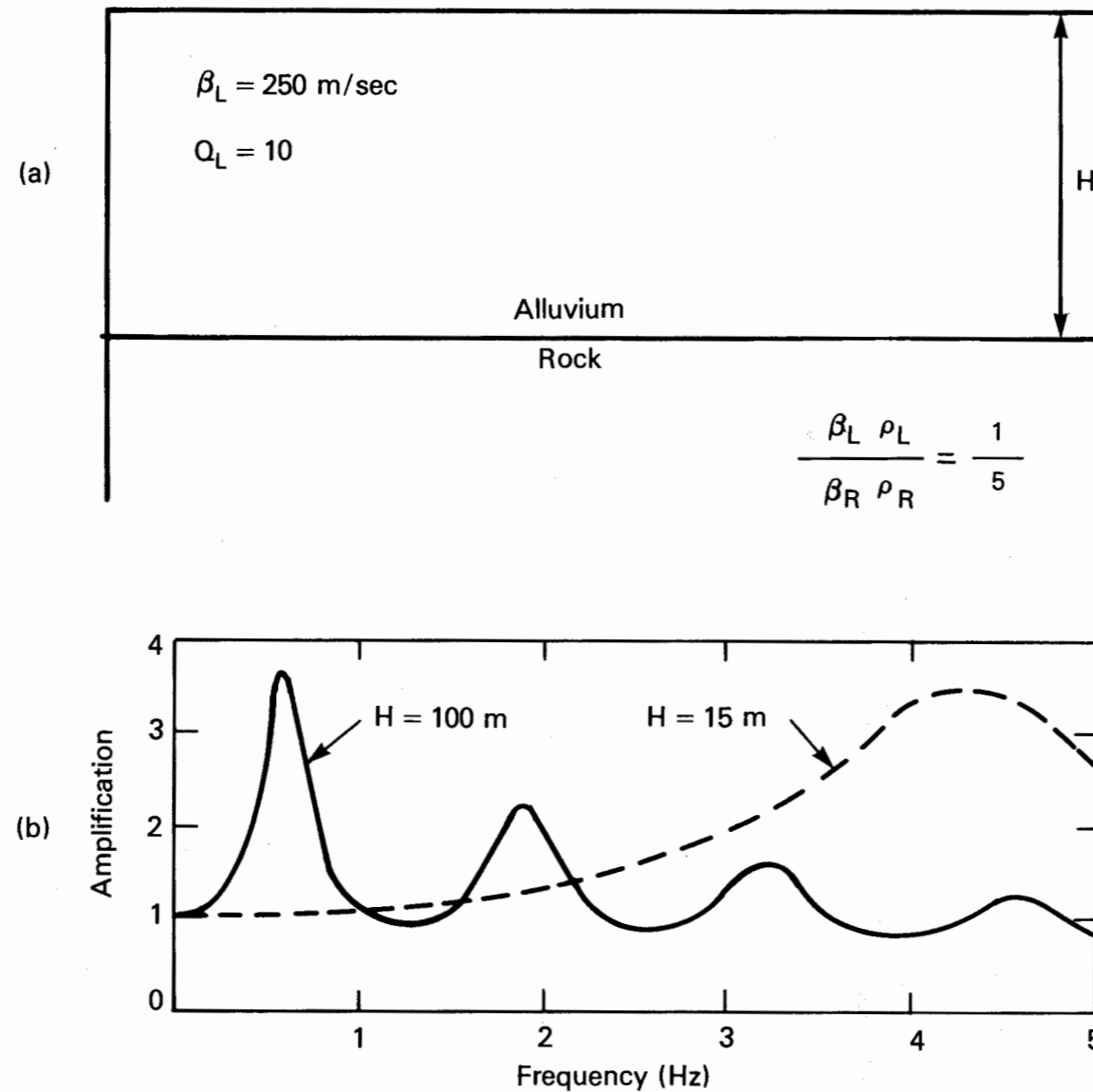


FIGURE 8.2 Model of site amplification. (a) Cross-section of alluvial layer of thickness H overlying rock. Impedance of rock is five times impedance of alluvium. (b) Amplification factors in the frequency domain for two thicknesses of alluvium (after Murphy and O'Brien 1978).

$$|U_L(\omega)| = 2.0 \left[\cos^2(k_L H) + \left(\frac{\rho_L v_L}{\rho_H v_H} \right) \sin^2(k_L H) \right]^{-1/2}$$

WEAK (AND STRONG) MOTION

- a) S/B spectral ratio (Borcherdt, 1970)
- b) generalized inversion scheme (Andrews, 1986)
- c) coda waves analysis (Margheriti et al., 1994)
- d) parametrized source and path inversion (Boatwright et al., 1991)
- e) H/V spectral ratio (receiver function) (Lermo et al., 1993)

EMPIRICAL TECHNIQUES FOR SITE EFFECT ESTIMATION

$$R_{ij}(\omega) = E_i(\omega) \cdot P_{ij}(\omega) \cdot S_j(\omega)$$

MICROTREMORS

- a) peak frequencies examination
- b) S/B spectral ratio
- c) H/V spectral ratio (Nagoshi, 1971; Nakamura, 1989)
- d) array analysis (Malagnini et al., 1993)

Important issues in SRE

- Near surface effects: impedance contrast, velocity
 - geological maps, V_{s30}
 - Basin effects
- Basin-edge induced waves
 - Subsurface focusing

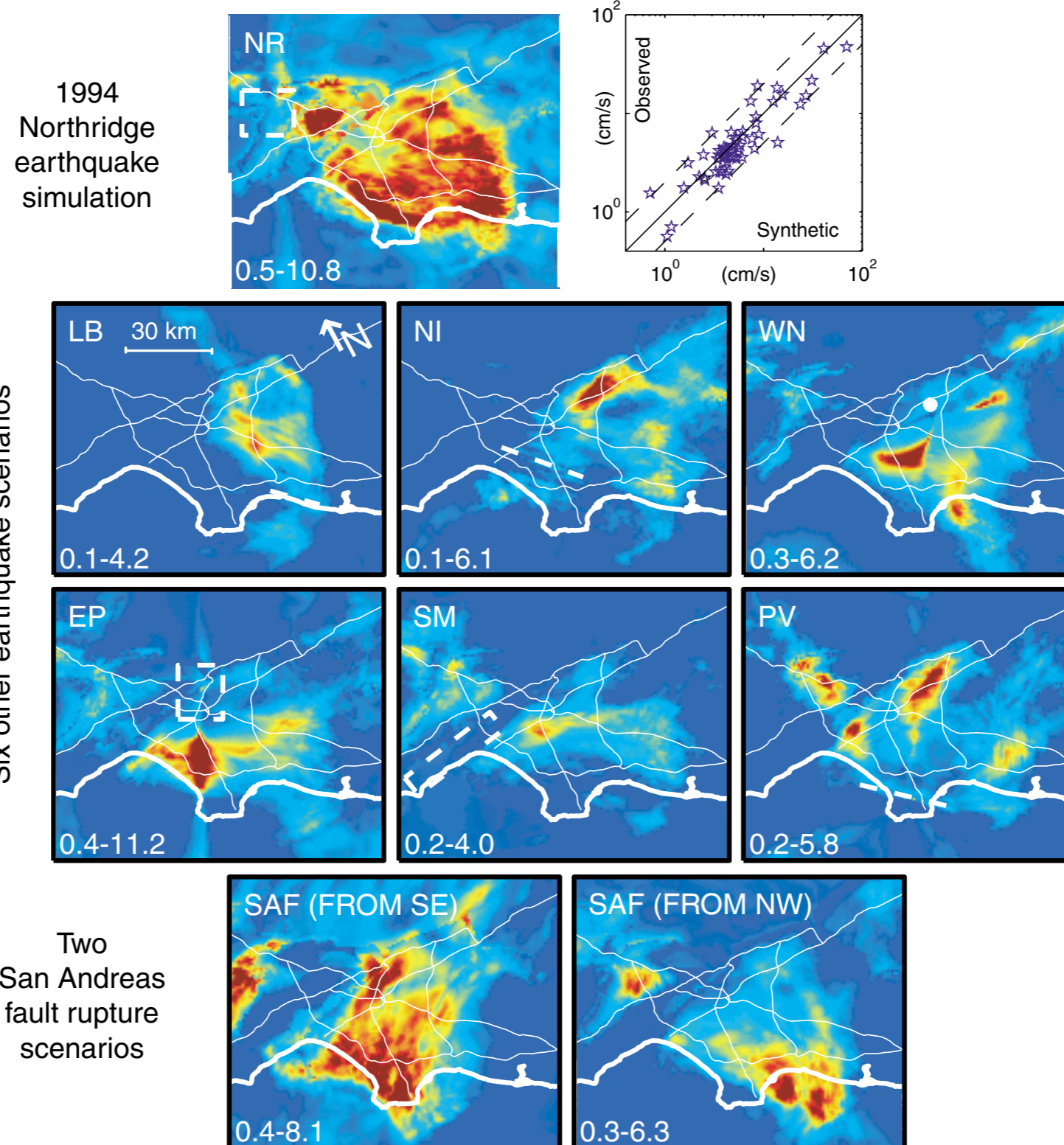
In SHA the site effect should be defined as the average behavior, relative to other sites, given all potentially damaging earthquakes.

This produces an **intrinsic variability** with respect to different earthquake locations, that cannot exceed the difference between sites

Amplification patterns...

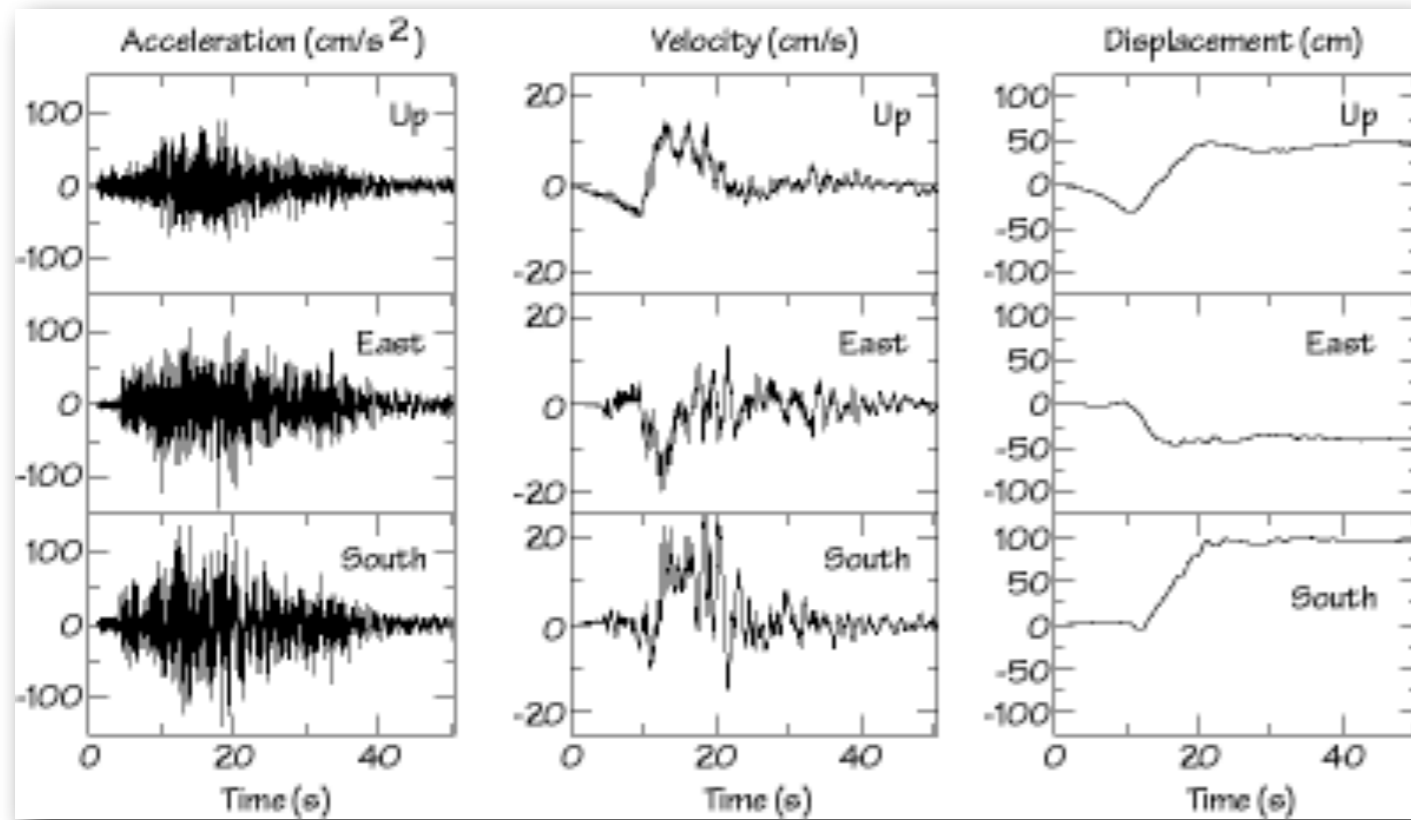
...may vary greatly among the earthquake scenarios, considering different source locations (and rupture ...)

Peak Velocity Amplification from the 3D Simulations of Olsen (2000)



SCEC
Phase 3
Report

Seismic Source effects



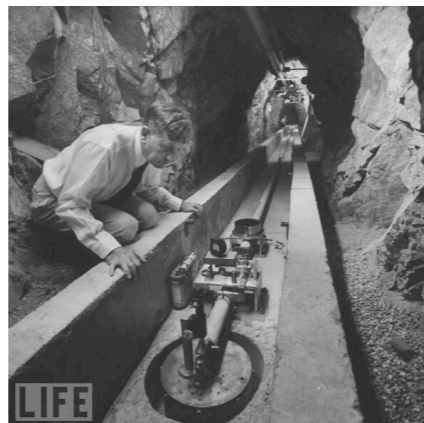
Michoacan, 1985

Fling & Directivity aka

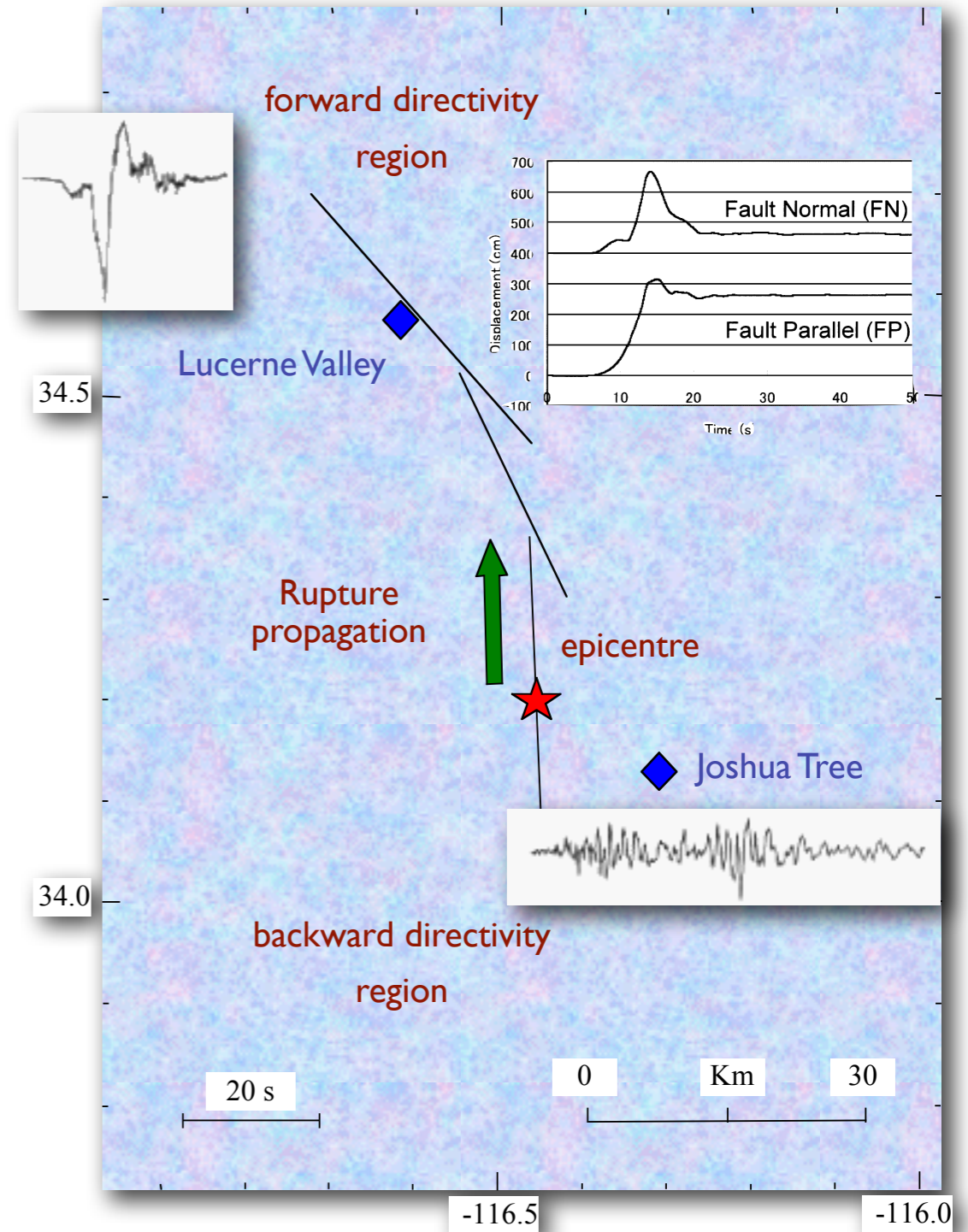
Near-field & Near-source



Sir Georges Stokes



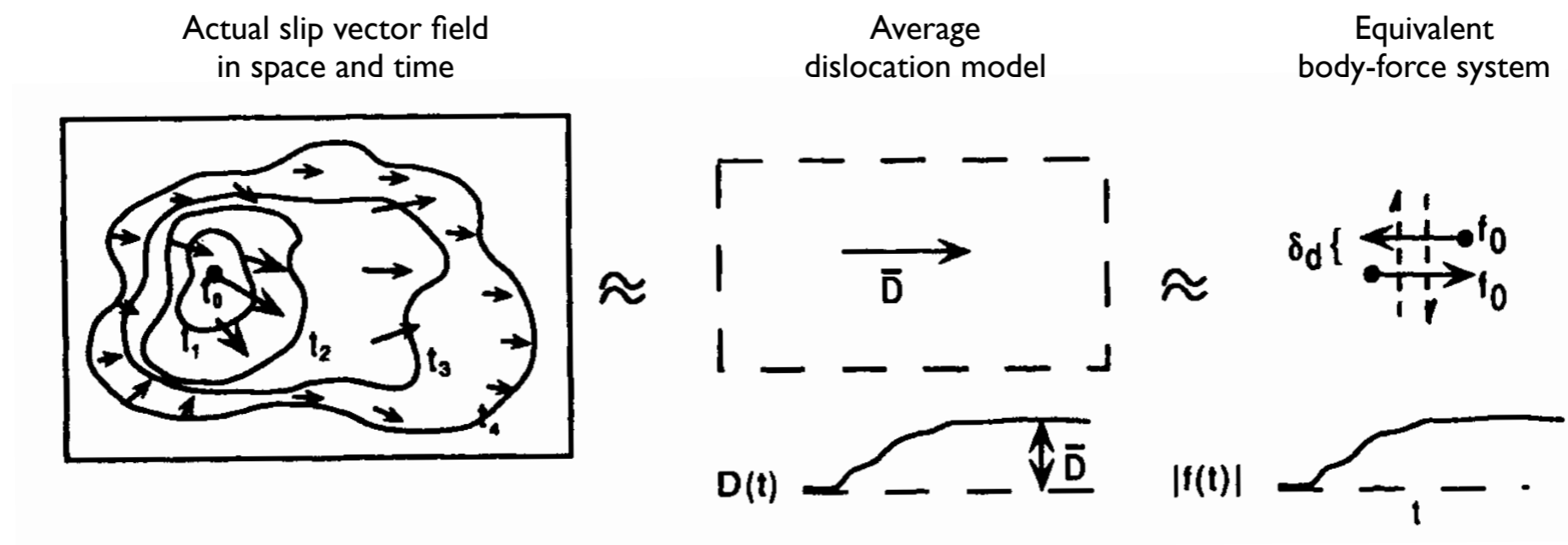
Hugo Benioff



Landers, 1992

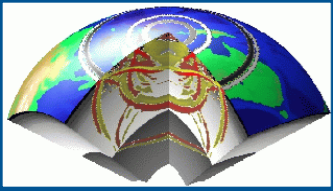
Equivalent Forces

The observable seismic radiation is through energy release as the fault surface moves: formation and propagation of a crack. This complex dynamical problem can be studied by kinematical equivalent approaches.

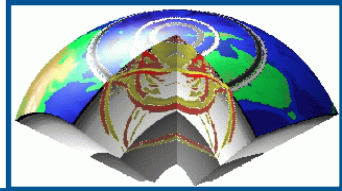


The scope is to develop a representation of the displacement generated in an elastic body in terms of the quantities that originated it: body forces and applied tractions and displacements over the surface of the body.

The actual slip process will be described by superposition of equivalent body forces acting in space (over a fault) and time (rise time).

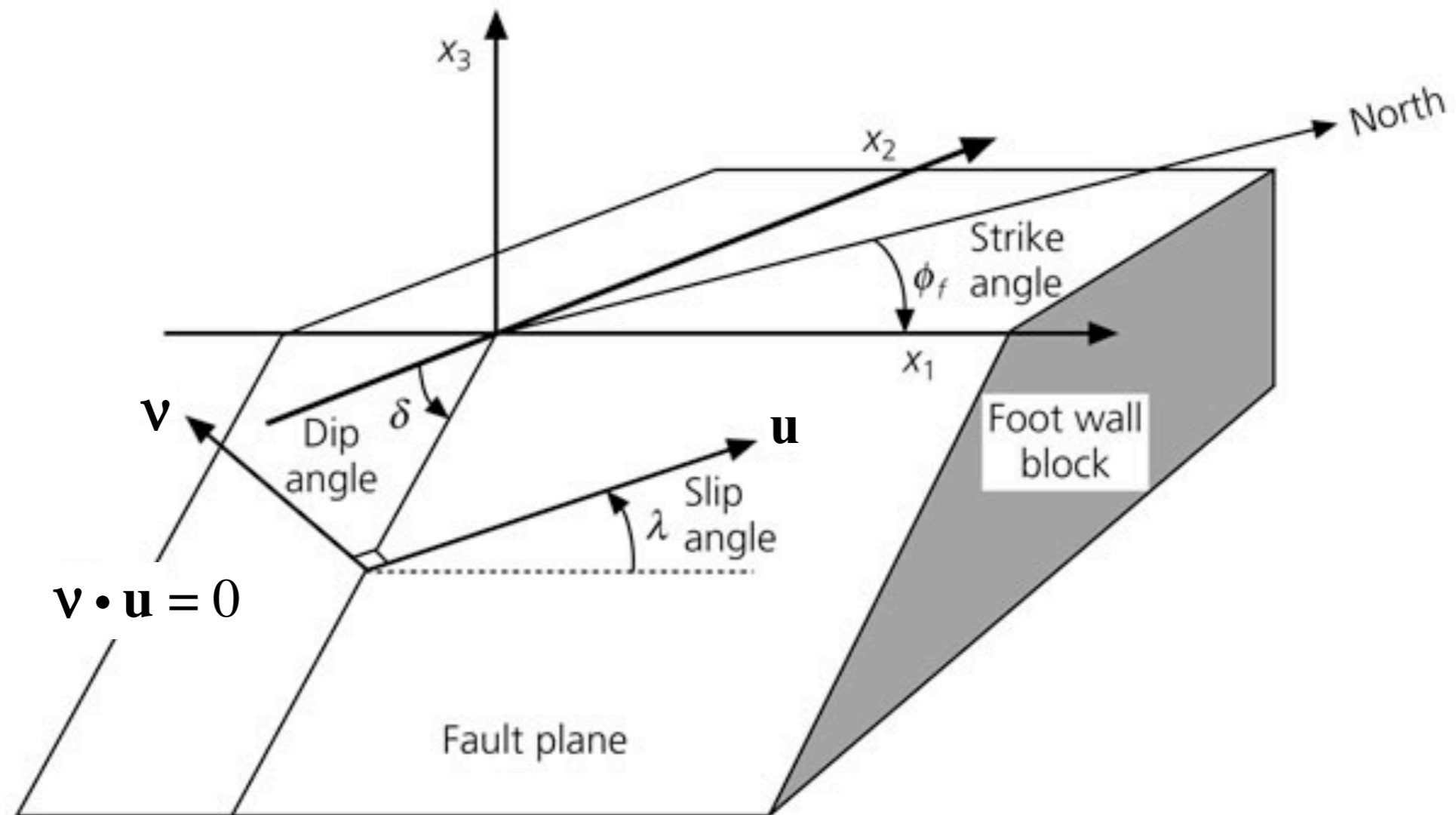


Moment tensor and fault plane solution



$$\mathbf{u} = \begin{cases} [\bar{u}] (\cos \lambda \cos \phi + \cos \delta \sin \lambda \sin \phi) \hat{\mathbf{e}}_x \\ [\bar{u}] (\cos \lambda \sin \phi - \cos \delta \sin \lambda \cos \phi) \hat{\mathbf{e}}_y \\ [\bar{u}] (-\sin \delta \sin \lambda) \hat{\mathbf{e}}_z \end{cases} \quad \mathbf{v} = \begin{cases} (-\sin \delta \sin \phi) \hat{\mathbf{e}}_x \\ (-\sin \delta \cos \phi) \hat{\mathbf{e}}_y \\ (-\cos \delta) \hat{\mathbf{e}}_z \end{cases}$$

Figure 4.2-2: Fault geometry used in earthquake studies.



Final source representation

$$u_n(\mathbf{x}, t) = \iint_{\Sigma} [u_i] c_{ijpq} v_j * \frac{\partial G_{np}}{\partial \xi_q} d\Sigma$$

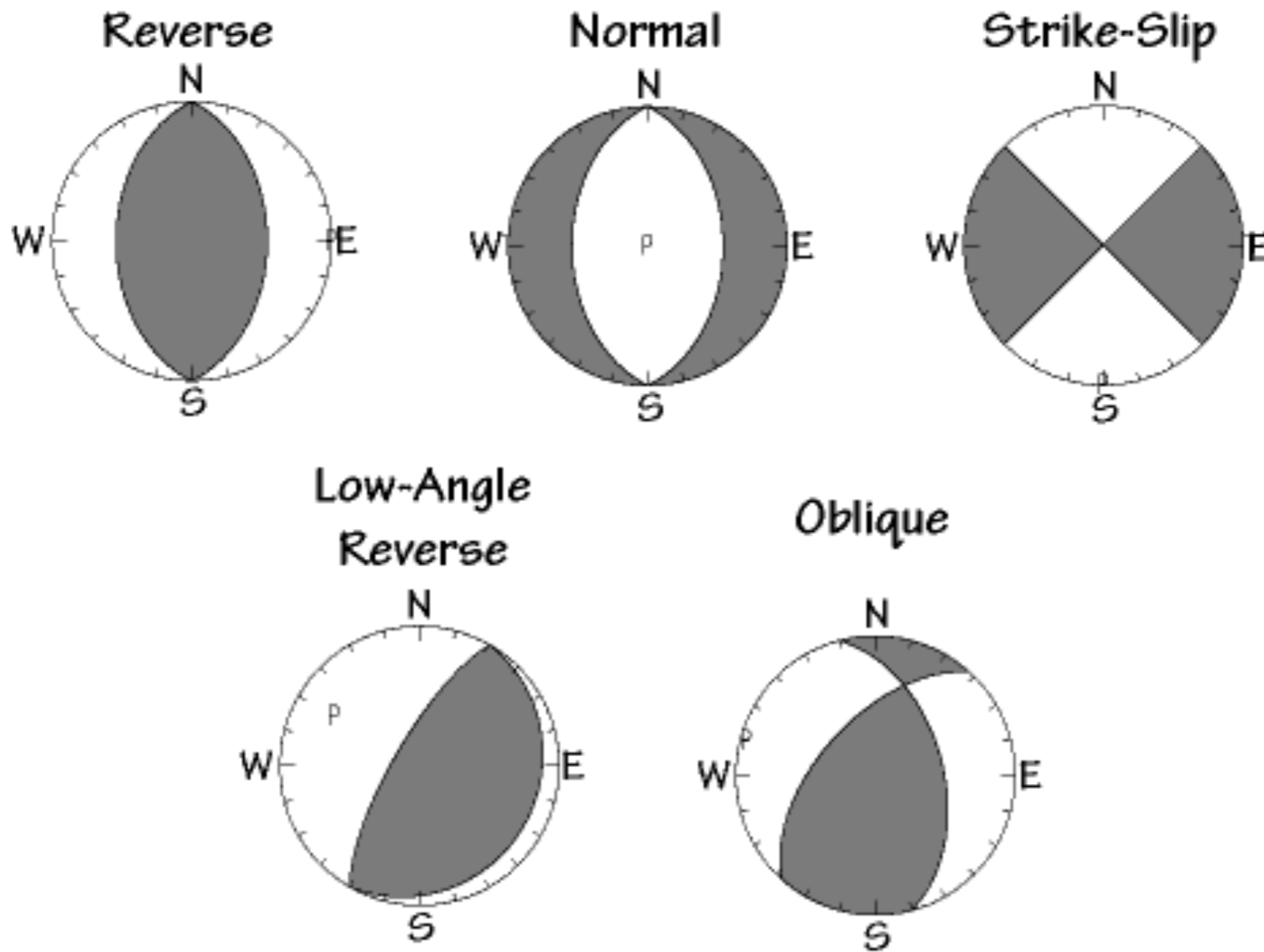
$$m_{pq} = [u_i] c_{ijpq} v_j \quad u_n(\mathbf{x}, t) = \iint_{\Sigma} m_{pq} * \frac{\partial G_{np}}{\partial \xi_q} d\Sigma$$

And if the source can be considered a point-source (for distances greater than fault dimensions), the contributions from different surface elements can be considered in phase.

Thus for an effective point source, one can define the moment tensor:

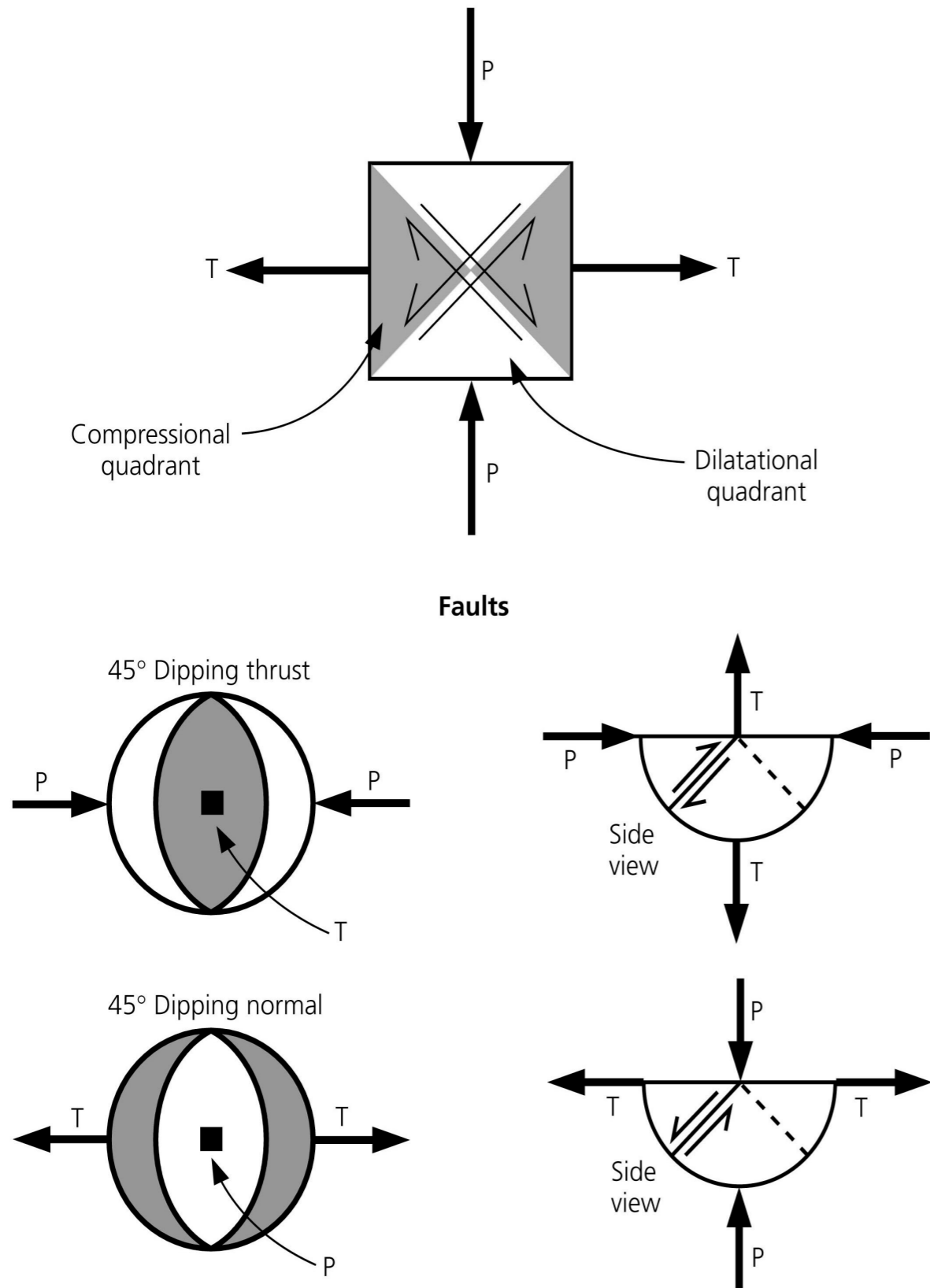
$$M_{pq} = \iint_{\Sigma} m_{pq} d\Sigma$$
$$u_n(\mathbf{x}, t) = M_{pq} * G_{np,q}$$

The Principal Mechanisms

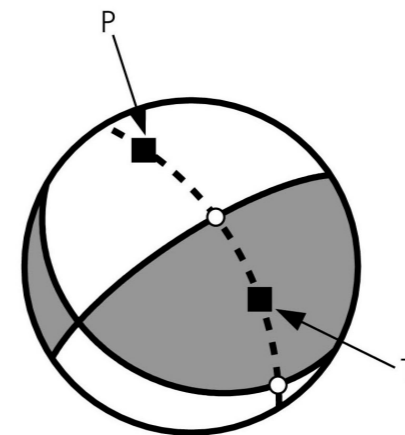


FM & stress axes

Figure 4.2-16: Relation between fault planes and stress axes.



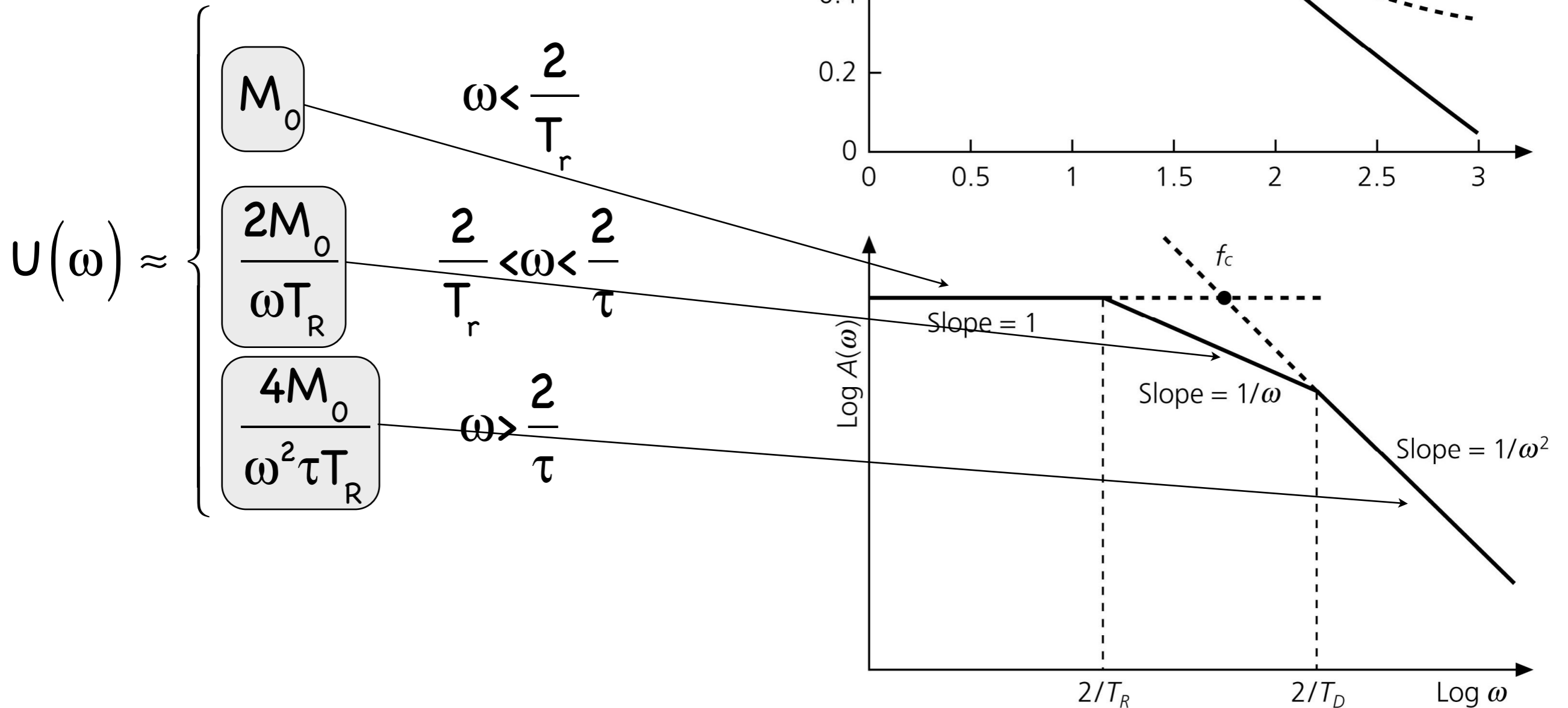
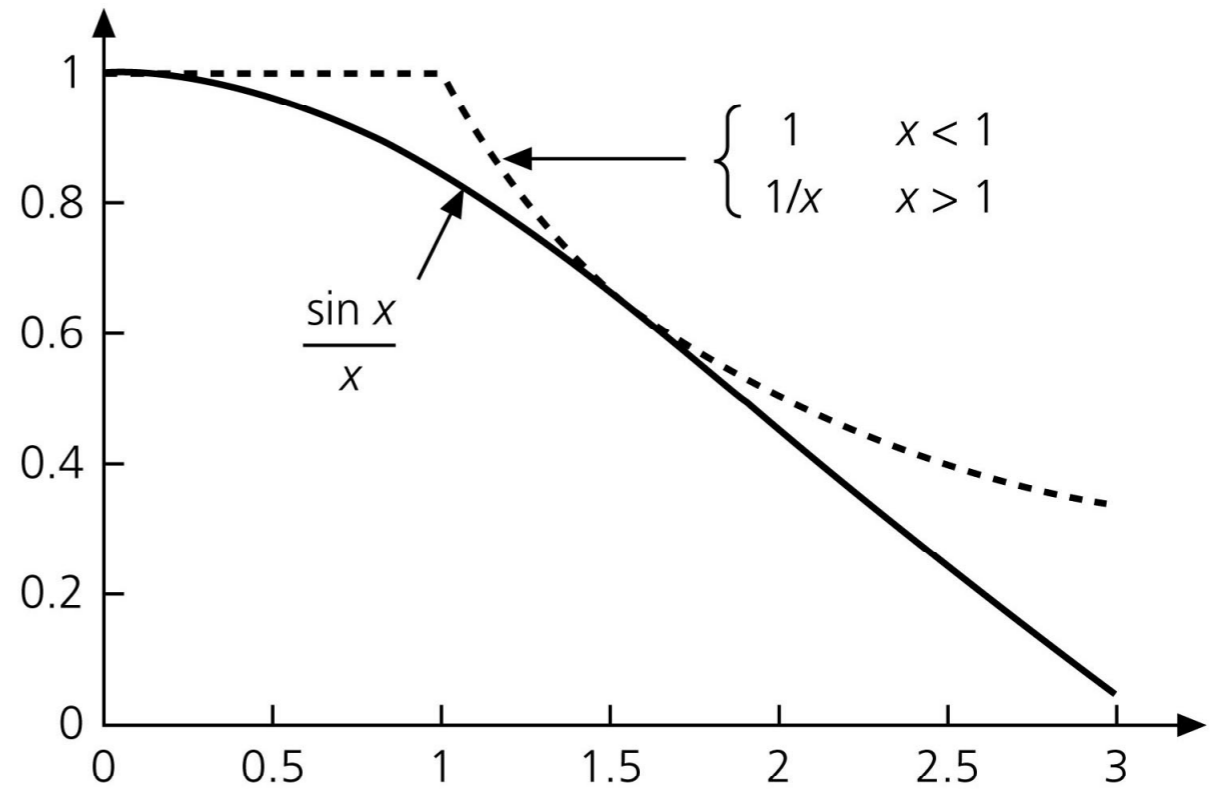
To obtain P and T axes:



On the meridian connecting the poles, the points half-way between the nodal planes are the **P** and **T** axes

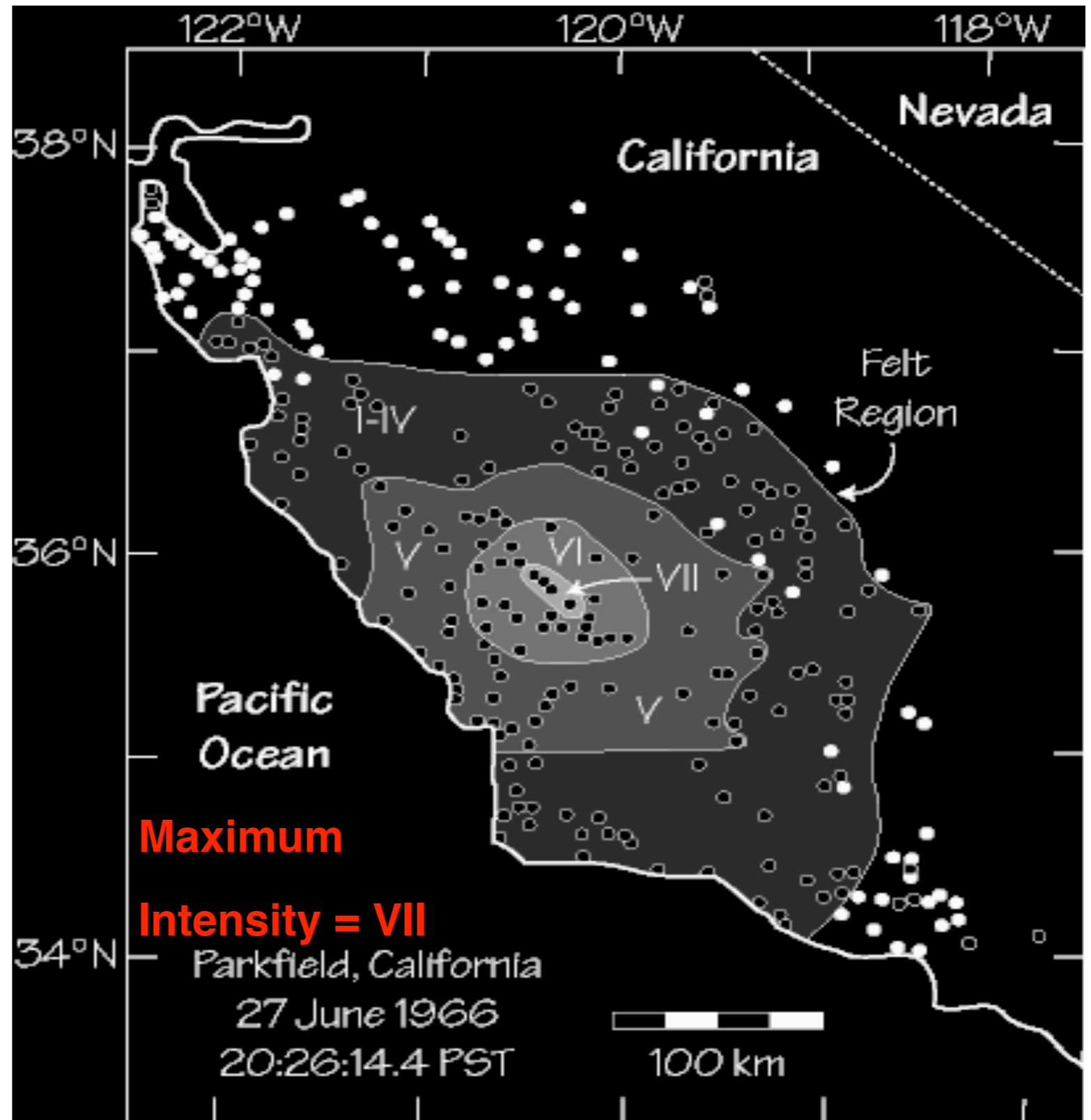
Source spectrum

Figure 4.6-4: Approximation of the $(\sin x)/x$ function, and derivation of corner frequencies.

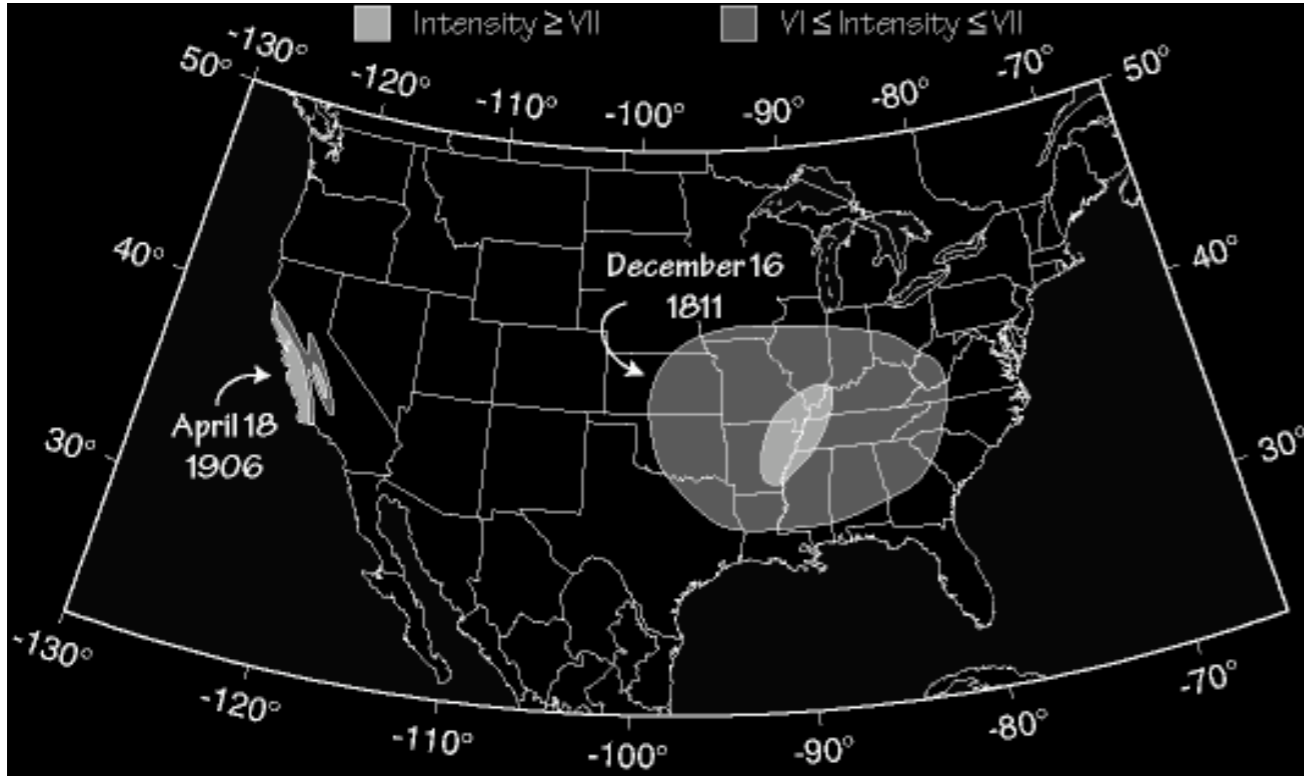


Maximum Intensity

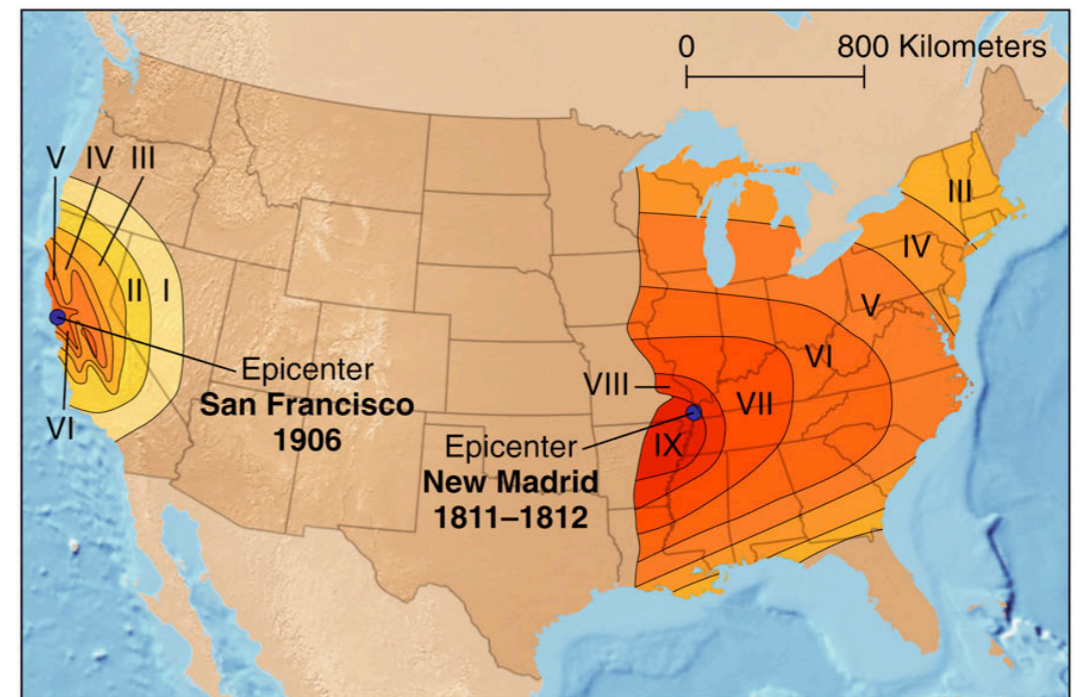
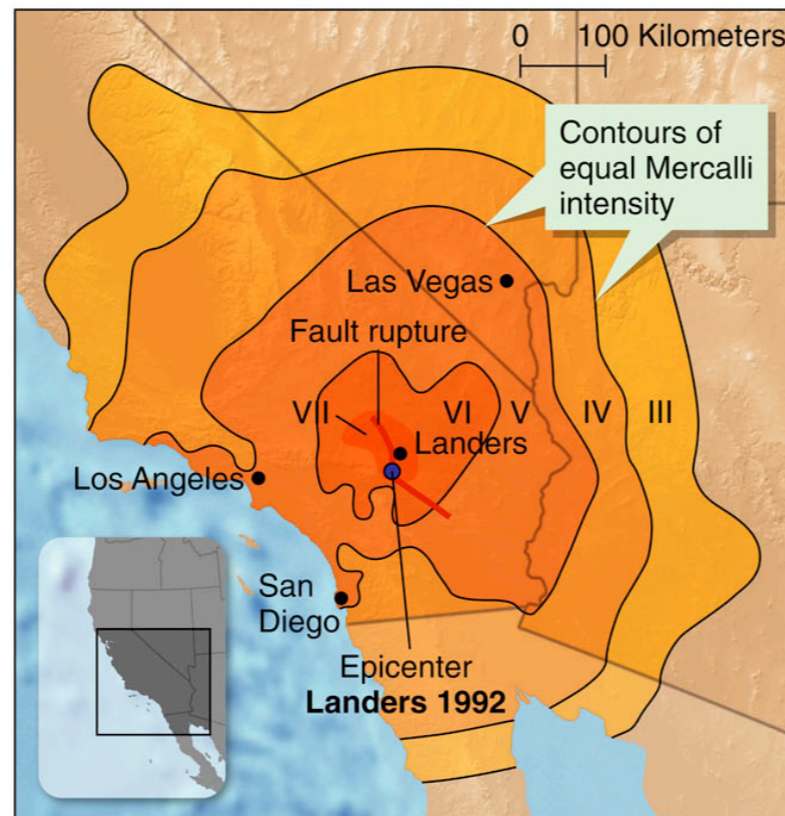
Maximum Intensity is used to estimate the size of historical earthquakes, but suffers from dependence on depth, population, construction practices, site effects, regional geology, etc.



1906 SF and 1811-12 New Madrid



These earthquakes were roughly the same size, but the intensity patterns in the east are broader than in the west (wait for Q...)



Mercalli Intensity and Richter Magnitude

Magnitude	Intensity	Description
1.0-3.0 Micro	I	I. Not felt except by a very few under especially favorable conditions.
3.0 - 3.9 Minor	II - III	II. Felt only by a few persons at rest, especially on upper floors of buildings. III. Felt quite noticeably by persons indoors, especially on upper floors of buildings. Many people do not recognize it as an earthquake. Standing motor cars may rock slightly. Vibrations similar to the passing of a truck. Duration estimated.
4.0 - 4.9 Light	IV - V	IV. Felt indoors by many, outdoors by few during the day. At night, some awakened. Dishes, windows, doors disturbed; walls make cracking sound. Sensation like heavy truck striking building. Standing motor cars rocked noticeably. V. Felt by nearly everyone; many awakened. Some dishes, windows broken. Unstable objects overturned. Pendulum clocks may stop.
5.0 - 5.9 Moderate	VI - VII	VI. Felt by all, many frightened. Some heavy furniture moved; a few instances of fallen plaster. Damage slight. VII. Damage negligible in buildings of good design and construction; slight to moderate in well-built ordinary structures; considerable damage in poorly built or badly designed structures; some chimneys broken.
6.0 - 6.9 Strong	VII - IX	VIII. Damage slight in specially designed structures; considerable damage in ordinary substantial buildings with partial collapse. Damage great in poorly built structures. Fall of chimneys, factory stacks, columns, monuments, walls. Heavy furniture overturned. IX. Damage considerable in specially designed structures; well-designed frame structures thrown out of plumb. Damage great in substantial buildings, with partial collapse. Buildings shifted off foundations.
7.0 and higher Major great	VIII or higher	X. Some well-built wooden structures destroyed; most masonry and frame structures destroyed with foundations. Rails bent. XI. Few, if any (masonry) structures remain standing. Bridges destroyed. Rails bent greatly. XII. Damage total. Lines of sight and level are distorted. Objects thrown into the air.

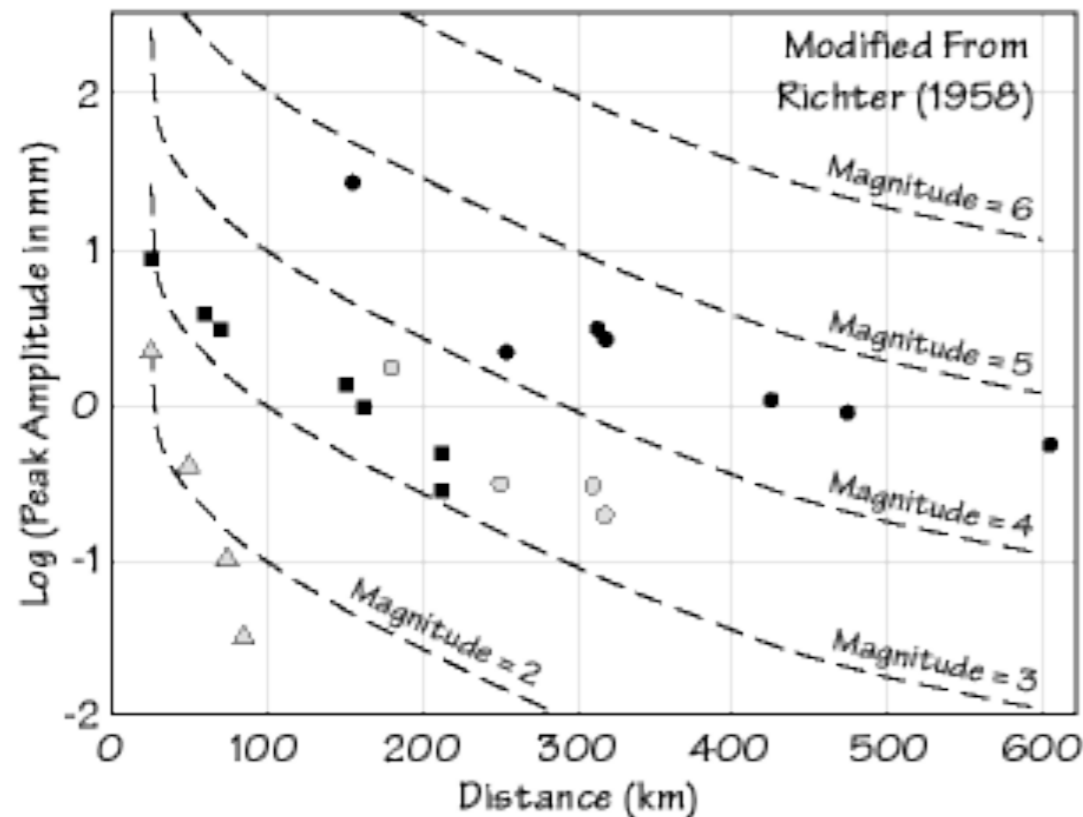
Intensity scales

MM	RF	JMA	MCS	MSK
I	I		II	I
II			III	II
III				III
IV	IV	I	IV	III
V	V		II	IV
VI	VI		III	V
VII	VII	IV	VII	VI
VIII			VIII	VII
IX			IX	VIII
X	VIII	V	IX	VII
XI			X	VIII
XII			XI	IX
	IX	VI	XII	X
			X	XI
			X	XII
	X	VII		XI

MM – Modified Mercalli; RF – Rossi-Forel; JMA – Japanese Meteorological Agency;
MCS – Mercalli-Cancani-Sieberg; MSK – Medvedev-Sponheuer-Karnik

Magnitude Scales - Richter

The concept of magnitude was introduced by Richter (1935) to provide an objective instrumental measure of the size of earthquakes. Contrary to seismic intensity, I , which is based on the assessment and classification of shaking damage and human perceptions of shaking, the magnitude M uses instrumental measurements of earth ground motion adjusted for epicentral distance and source depth.



The original Richter scale was based on the observation that the amplitude of seismic waves systematically decreases with epicentral distance.

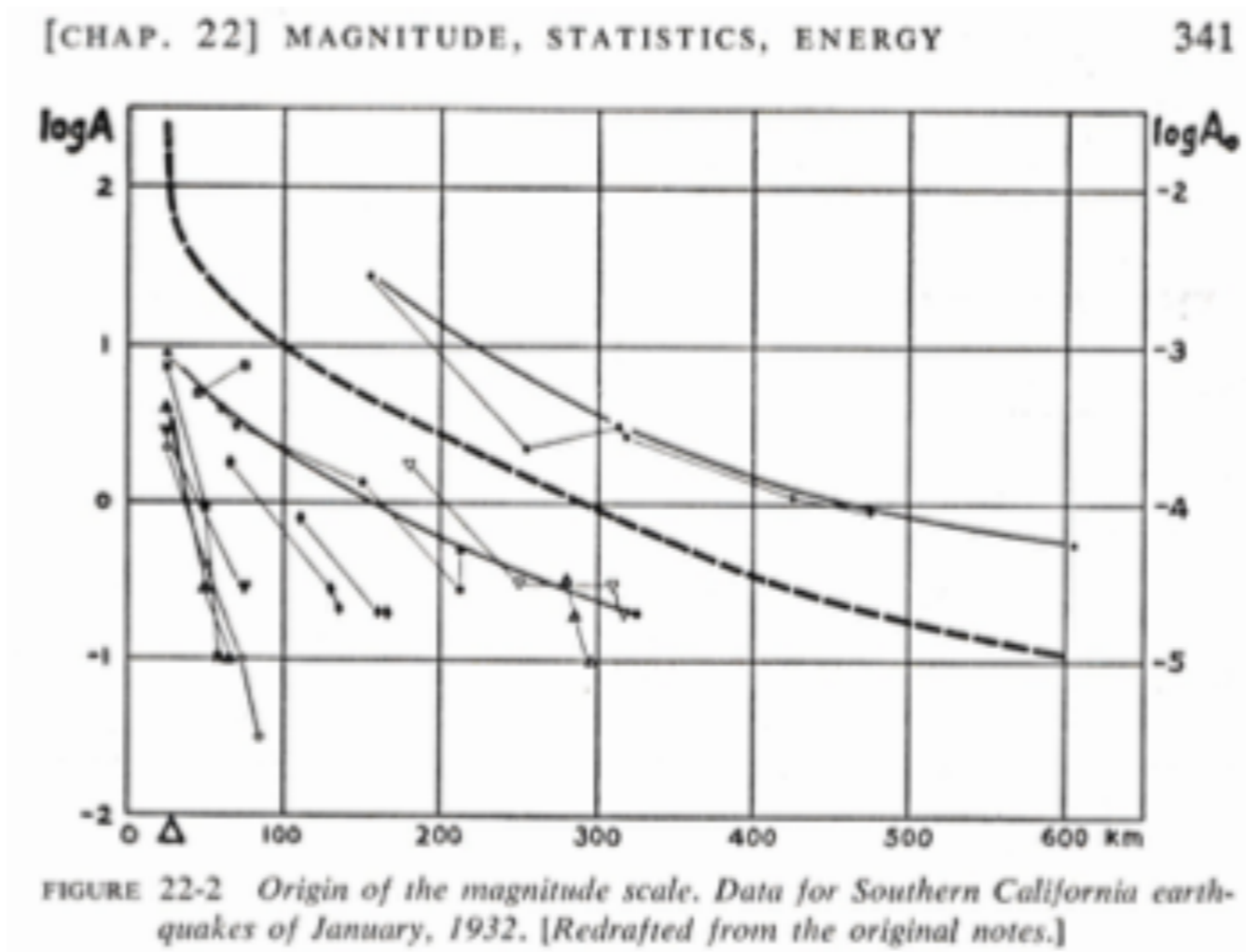
Data from local earthquakes in California



The relative size of events is calculated by comparison to a reference event, with $M_L=0$, such that A_0 was $1 \mu\text{m}$ at an epicentral distance, Δ , of 100 km with a Wood-Anderson instrument:

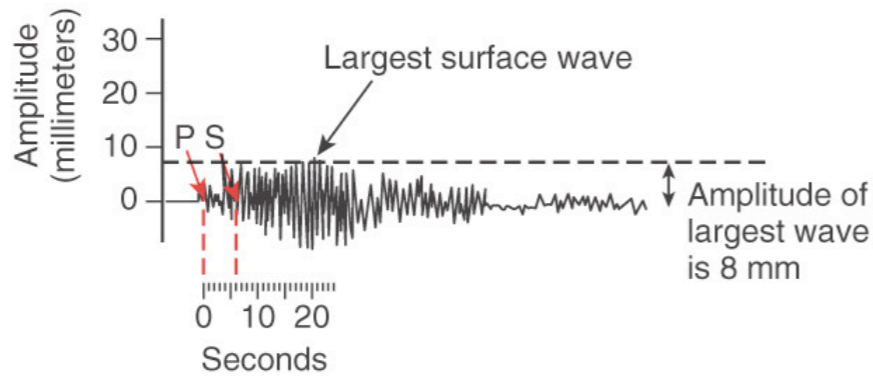
$$M_L = \log(A/A_0) = \log A - 2.48 + 2.76\Delta.$$

Magnitude Scales - Richter



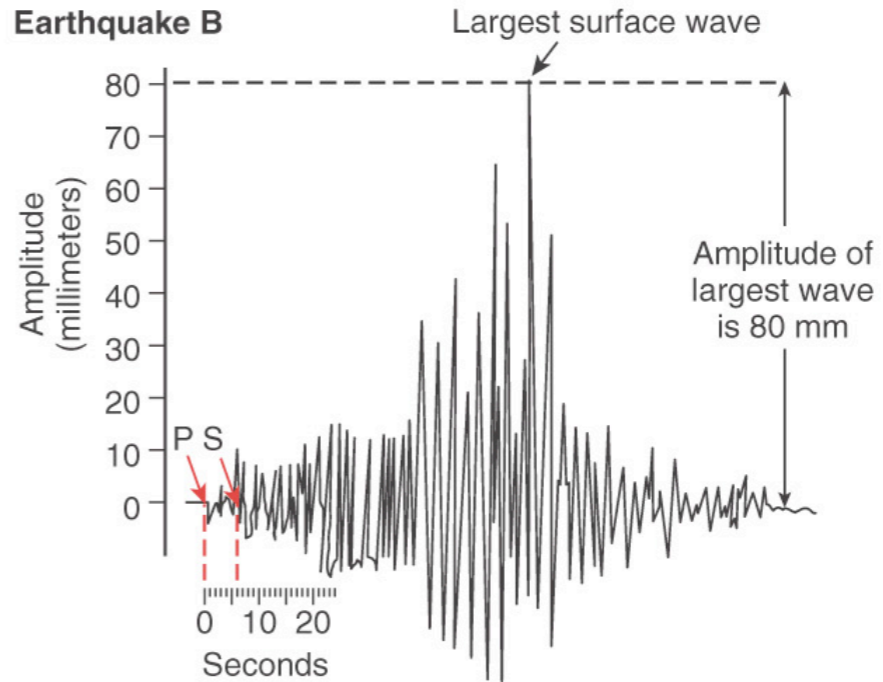
“I found a paper by Professor K. Wadati of Japan in which he compared large earthquakes by plotting the maximum ground motion against distance to the epicenter. I tried a similar procedure for our stations, but the range between the largest and smallest magnitudes seemed unmanageably large. Dr. Beno Gutenberg then made the natural suggestion to plot the amplitudes logarithmically. I was lucky because **logarithmic plots are a device of the devil**. I saw that I could now rank the earthquakes one above the other. Also, quite unexpectedly the attenuation curves were roughly parallel on the plot. By moving them vertically, a representative mean curve could be formed, and individual events were then characterized by individual logarithmic differences from the standard curve. This set of logarithmic differences thus became the numbers on a new instrumental scale. Very perceptively, Mr. Wood insisted that this new quantity should be given a distinctive name to contrast it with the intensity scale. My amateur interest in astronomy brought out the term "magnitude," which is used for the brightness of a star.”

Earthquake A

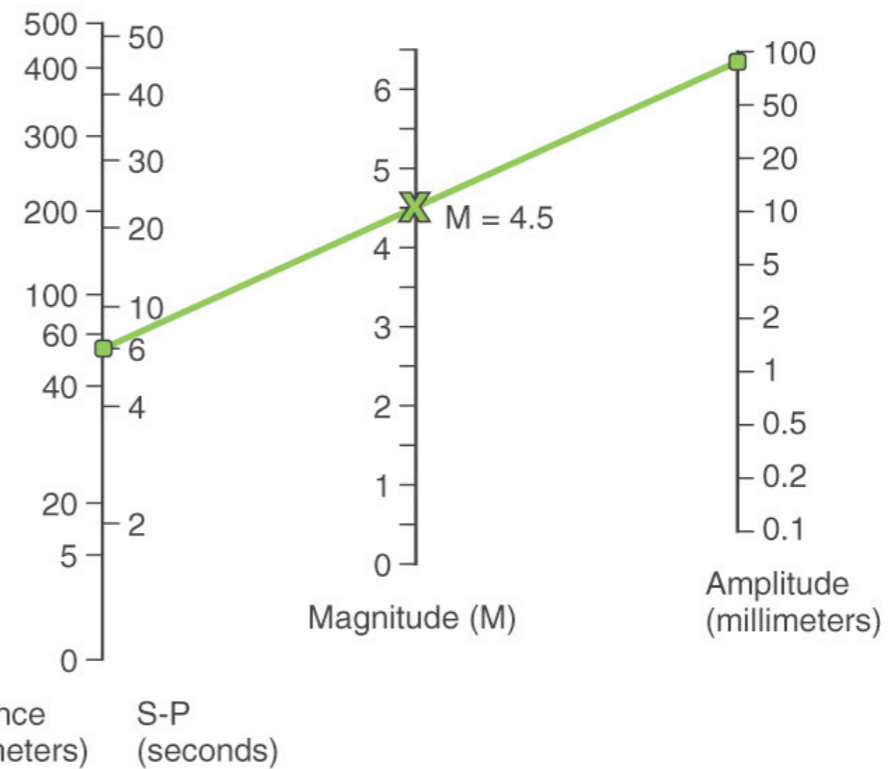
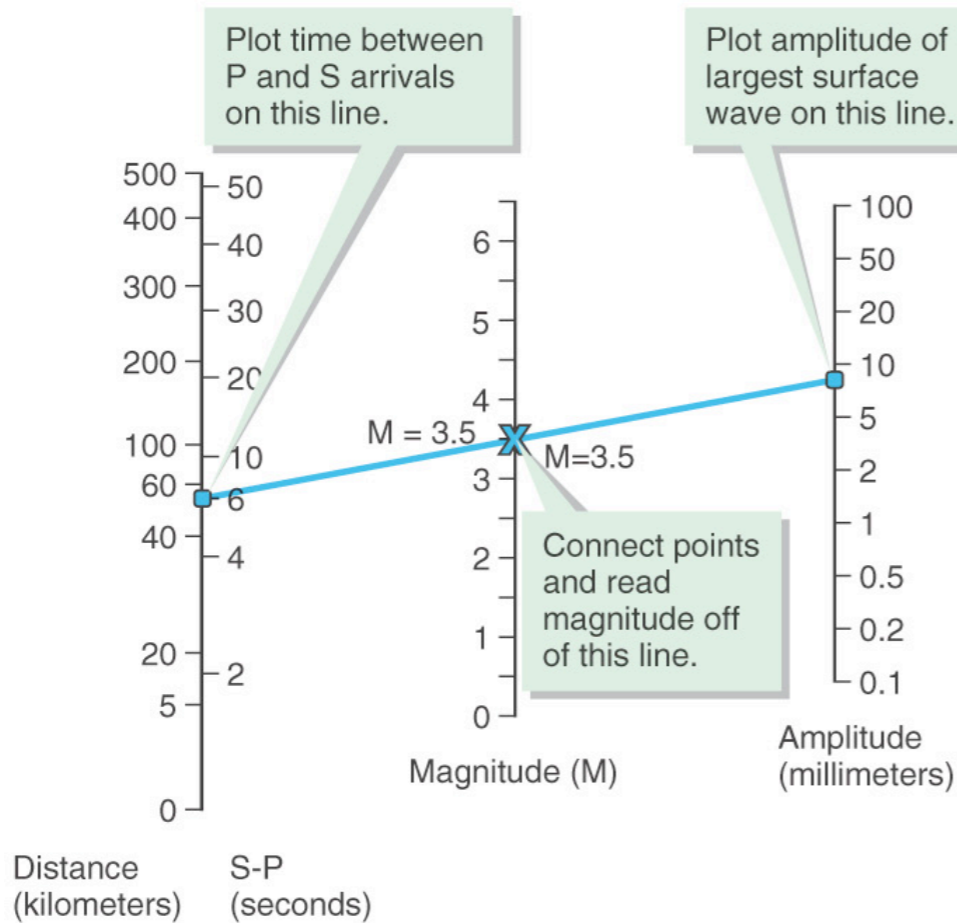


Time between arrival of first P and first S wave is 6 seconds.

Earthquake B

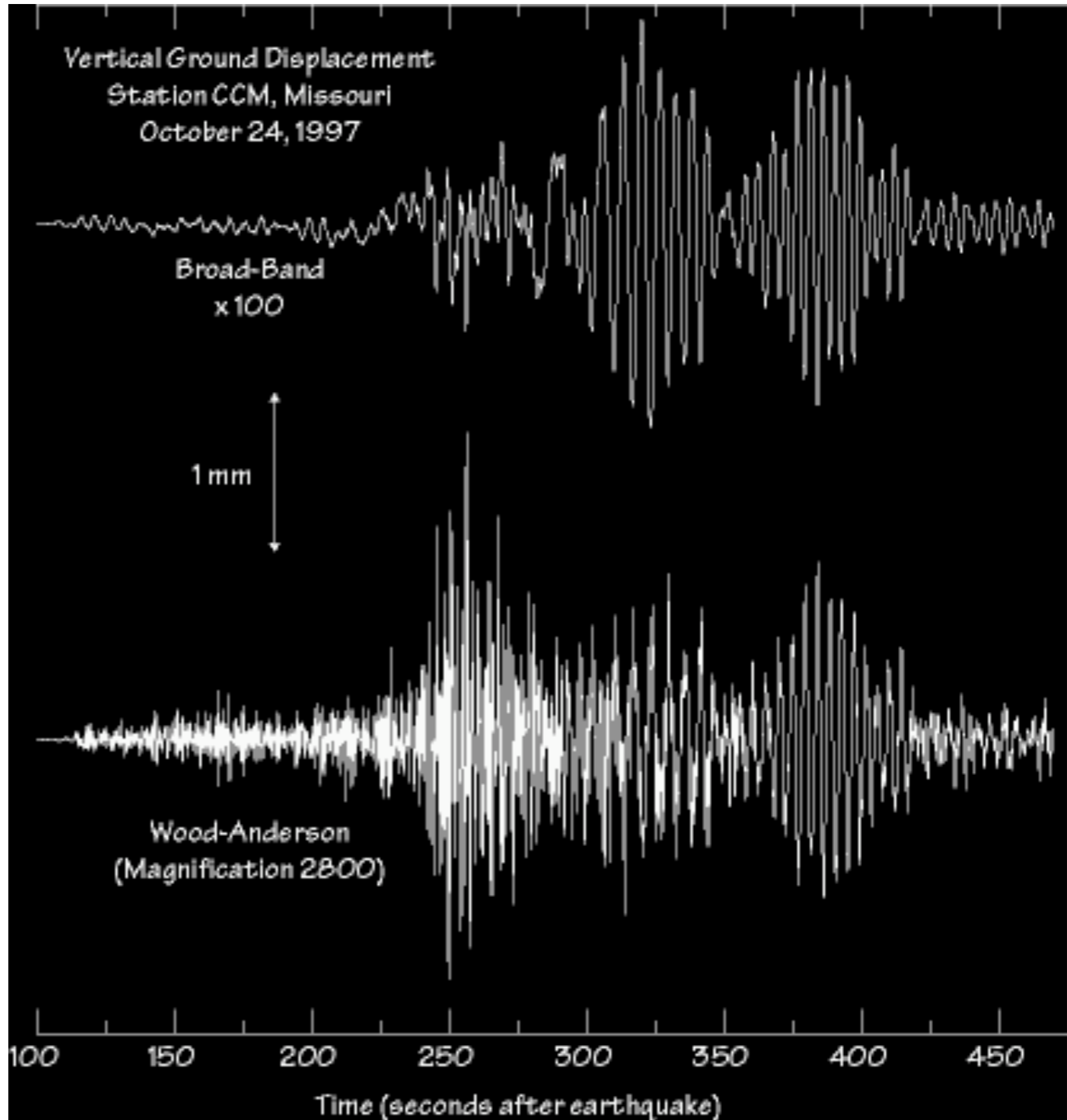


Time between arrival of first P and first S wave is 6 seconds.



Wood-Anderson Seismometer

Richter also tied his formula to a specific seismic instrument.



Magnitude Scales

The original M_L is suitable for the classification of local shocks in Southern California only since it used data from the standardized short-period Wood-Anderson seismometer network. The magnitude concept has then been extended so as to be applicable also to ground motion measurements from medium- and long-period seismographic recordings of both surface waves (M_s) and different types of body waves (m_b) in the teleseismic distance range.

The general form of all magnitude scales based on measurements of ground displacement amplitudes A and periods T is:

$$M = \log \left(\frac{A}{T} \right) + f(\Delta, h) + C_r + C_s$$

M seismic magnitude

A amplitude

T period

f correction for distance and depth

C_s correction for site

C_r correction for source region

M_L **Local magnitude**

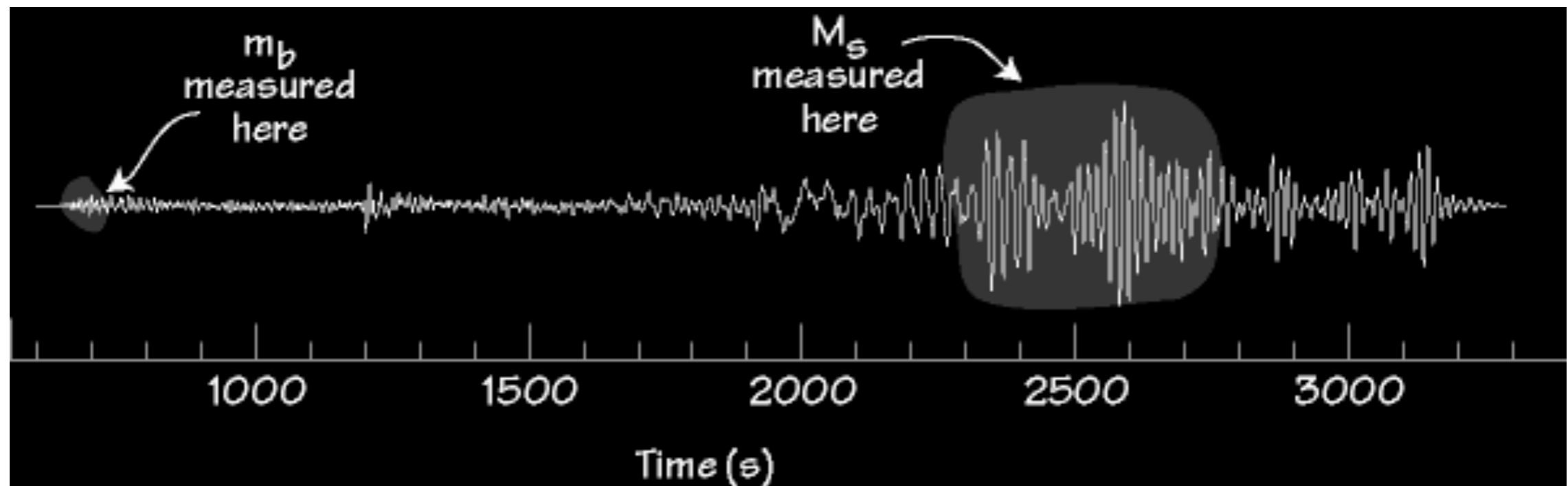
m_b **body-wave magnitude (1s)**

M_s **surface wave magnitude (20s)**

Telesismic M_S and m_b

The two most common modern magnitude scales are:

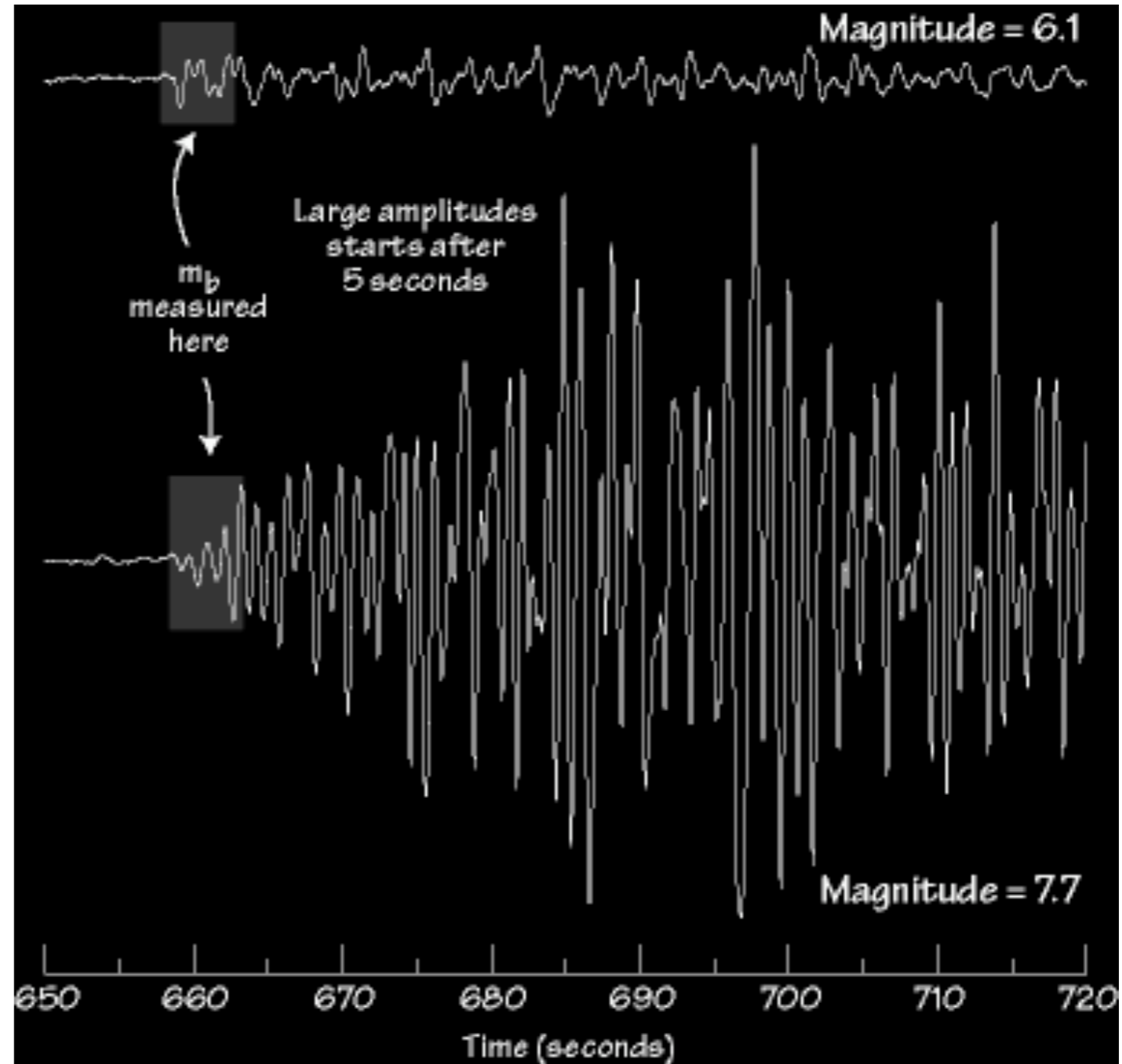
- M_S , Surface-wave magnitude (Rayleigh Wave, 20s)
- m_b , Body-wave magnitude (P-wave)



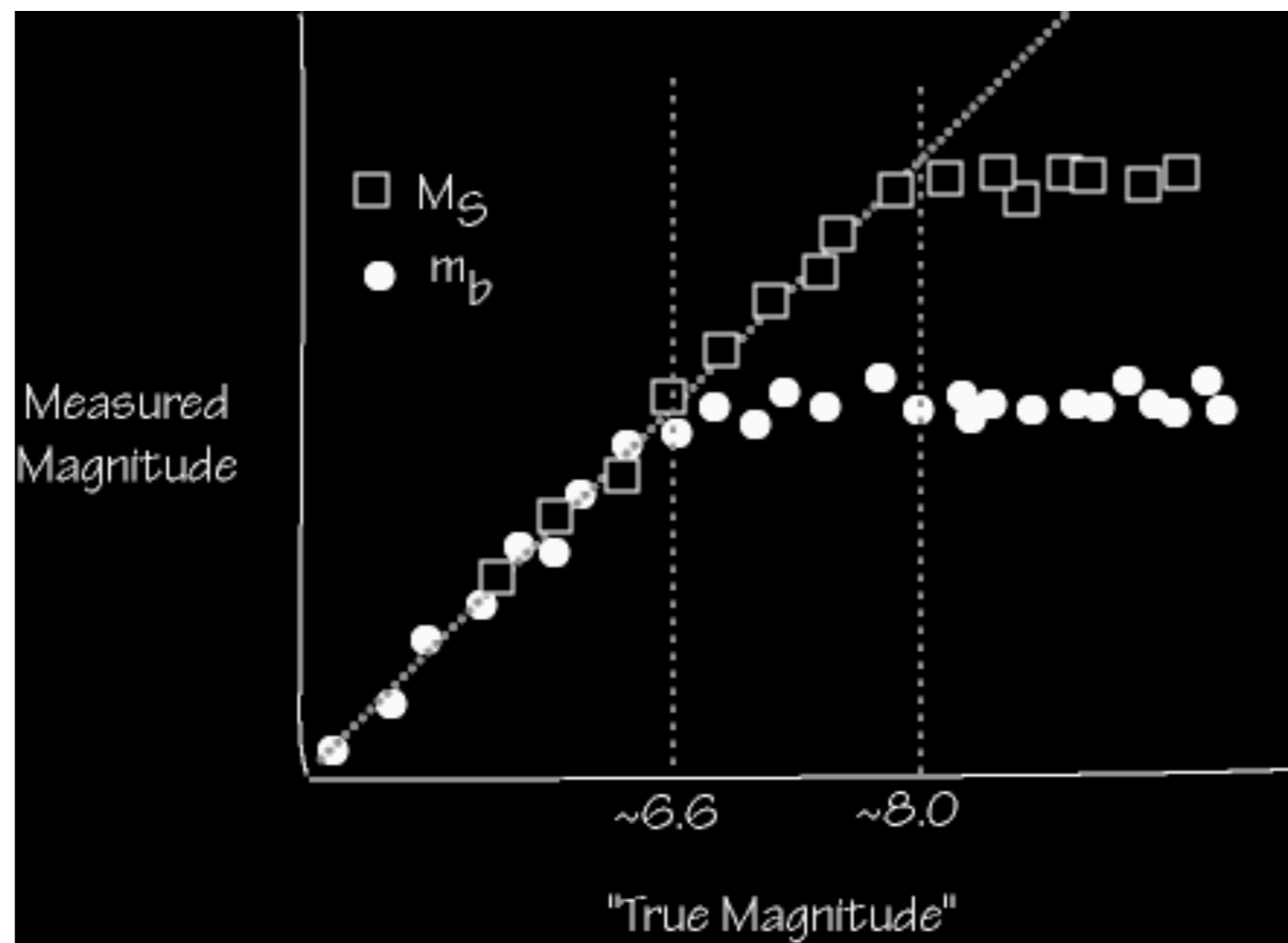
Example: m_b “Saturation”

m_b seldom gives values above 6.7 - it “saturates”.

m_b must be measured in the first 5 seconds - that’s the rule.

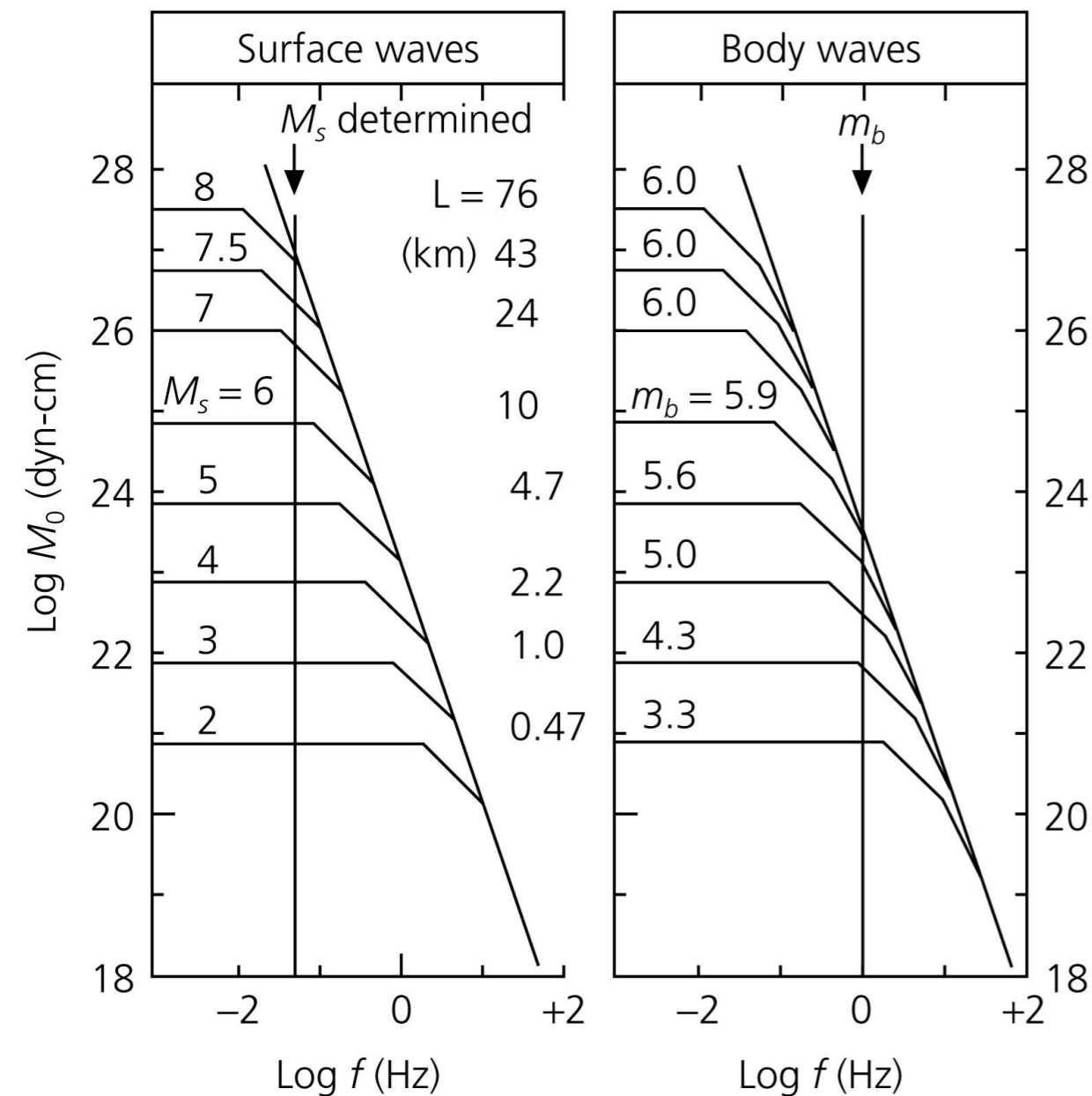


Saturation



Magnitude saturation

Nature limits the maximum size of tectonic earthquakes which is controlled by the maximum size of a brittle fracture in the lithosphere. A simple seismic shear source with linear rupture propagation has a typical "source spectrum".



M_s is not linearly scaled with M_0 for $M_s > 6$ due to the beginning of the so-called saturation effect for spectral amplitudes with frequencies $f > f_c$. This saturation occurs already much earlier for m_b which are determined from amplitude measurements around 1 Hz.

Moment magnitude

Empirical studies (Gutenberg & Richter, 1956; Kanamori & Anderson, 1975) lead to a formula for the released seismic energy (in Joule), and for moment, with magnitude:

$$\log E = 4.8 + 1.5M_s \quad \log M_0 = 9.1 + 1.5M_s$$

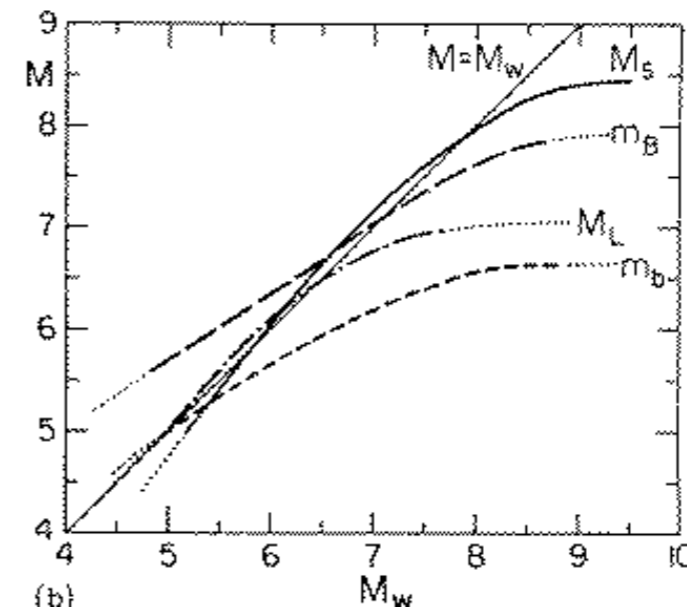
resulting in

$$u(x, t) = A \cos\left(\frac{2\pi t}{T}\right) \Rightarrow v(x, t) \propto \frac{A}{T} u$$

$$\Rightarrow e \propto v^2 \propto \left(\frac{A}{T}\right)^2 \Rightarrow \log E = C + 2 \log\left(\frac{A}{T}\right)$$

$$M_w = 2/3 \log M_0 - 6.07$$

when the Moment is measured in N·m (otherwise the intercept becomes 10.73); it is related to the final static displacement after an earthquake and consequently to the tectonic effects of an earthquake.



Earthquake	Body wave magnitude m_b	Surface wave magnitude M_s	Fault area (km ²) length × width	Average dislocation (m)	Moment (dyn-cm) M_0	Moment magnitude M_w
Truckee, 1966	5.4	5.9	10 × 10	0.3	8.3×10^{24}	5.8
San Fernando, 1971	6.2	6.6	20 × 14	1.4	1.2×10^{26}	6.7
Loma Prieta, 1989	6.2	7.1	40 × 15	1.7	3.0×10^{26}	6.9
San Francisco, 1906		8.2	320 × 15	4	6.0×10^{27}	7.8
Alaska, 1964	6.2	8.4	500 × 300	7	5.2×10^{29}	9.1
Chile, 1960		8.3	800 × 200	21	2.4×10^{30}	9.5

Strong motion seismology

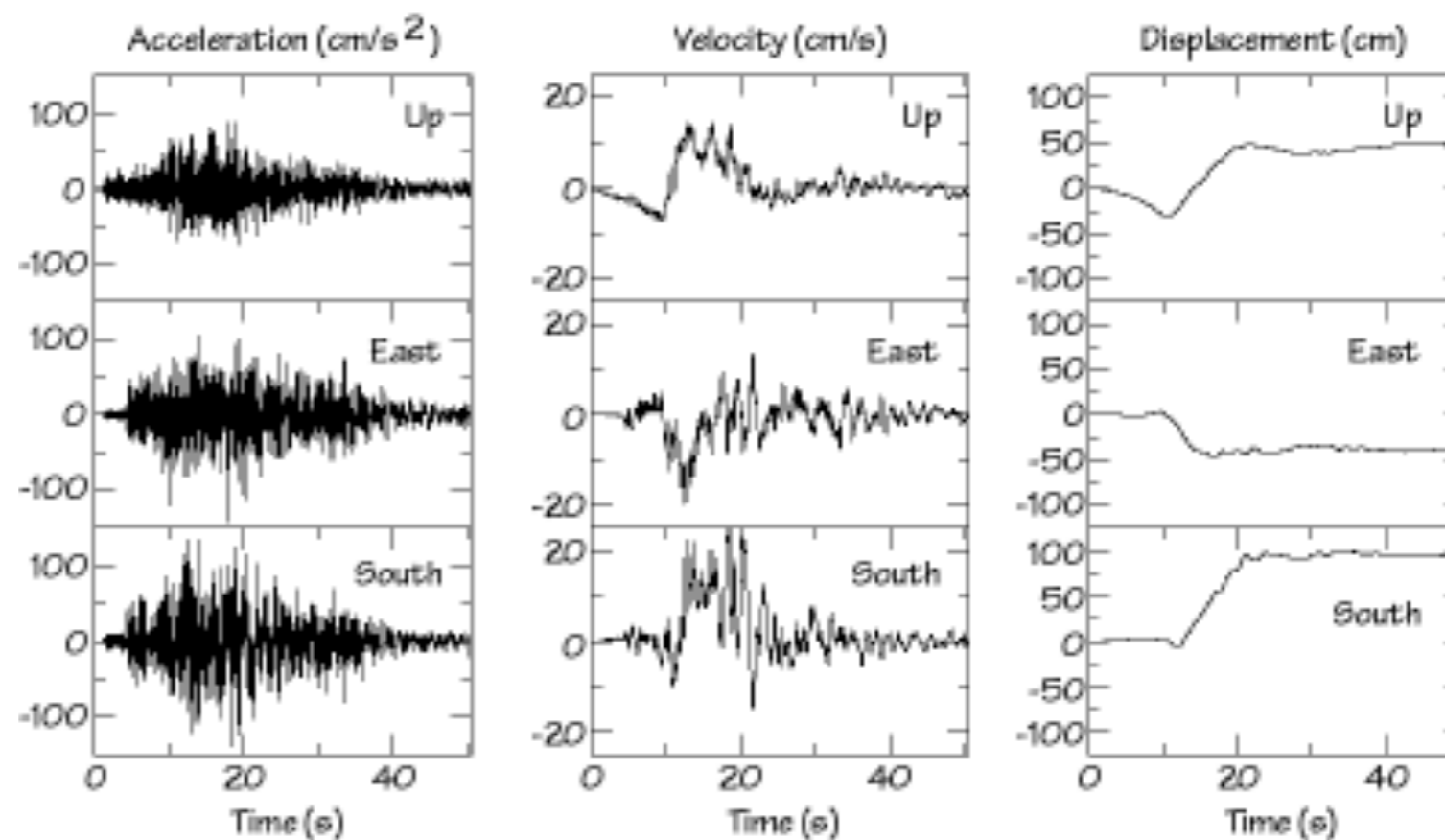
- Strong ground motion is an event in which an earthquake cause the ground to shake at least strongly enough for people to feel the motion or to damage or destroy man-made structures.
- The goal of strong motion seismology is to be able to understand and predict seismic motions sufficiently well that the predictions can be used for engineering applications
- The field of strong-motion seismology could initially be identified with a type of instrument, designed to remain on-scale and record the ground motion with fidelity under the conditions of the strongest ground motions experienced in earthquakes.

Strong motion seismology

- Early instruments were typically designed so that ground motions up to the acceleration of gravity (1g) would be on-scale.
- The lower limit of ground motion considered by the early strong motion seismology studies was roughly defined by the thickness of the light beam read until the edge of a recorded film. The minimum acceleration resolved is somewhat less than 0.01g, that approximately coincided with minimum ground motions that humans are able to feel.
- Since much smaller ground motions can be recorded on modern instruments, the distinction between strong-motion seismology and traditional seismology is blurred.

Example of Recordings

Ground acceleration, velocity and displacement, recorded at a strong-motion seismometer that was located directly above the part of a fault that ruptured during the 1985 Mw = 8.1, Michoacan, Mexico earthquake.



The left panel is a plot of the three components of acceleration: strong, high-frequency shaking lasted almost a minute and the peak acceleration was about 150 cm/s² (or about 0.15g). The middle panel shows the velocity of ground movement: the peak velocity for this site during that earthquake was about 20-25 cm/sec. Integrating the velocity, we can compute the displacement, which is shown in the right-most panel: the permanent offsets near the seismometer were up, west, and south, for a total distance of about 125 centimeters.