

10. Crustal strain accumulation

Prof. Luigi Ferranti

Università di Napoli 'Federico II'

TECNICHE DI MISURA

- Soluzioni dei meccanismi focali (5-30 km)
- Rotture in pozzo (0-6 km)
- Analisi cinematica delle faglie attive (superficie, oppure esumate)
- Velocità geodetiche (superficie)

LE PRIME TRE CI DANNO
L'ORIENTAZIONE DELLO STRAIN
COSISMICO, LA QUARTA
L'ORIENTAZIONE E IL MODULO DELLO
STRAIN INTERSISMICO

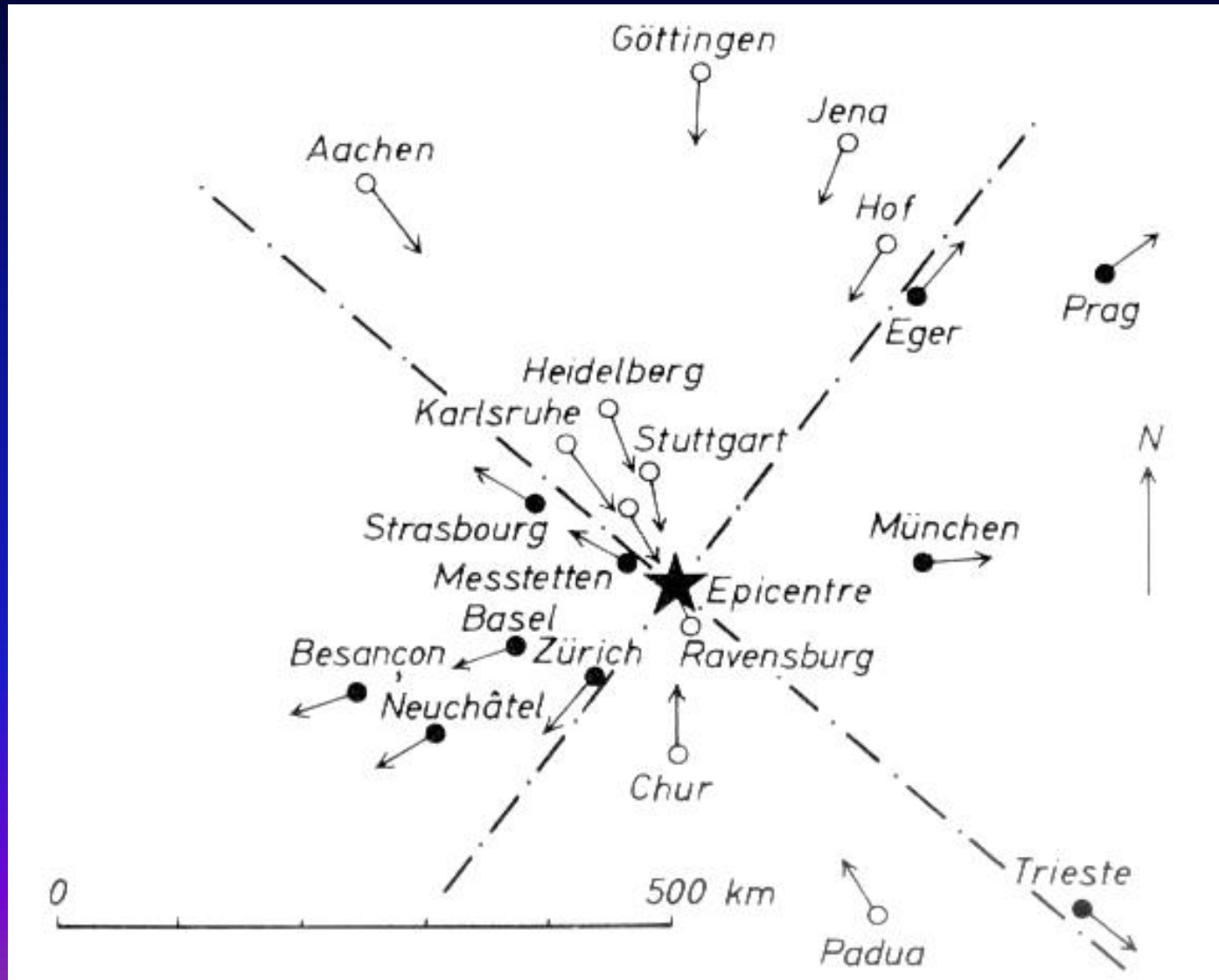
Misure dello strain incrementale attivo

Soluzioni dei meccanismi focali

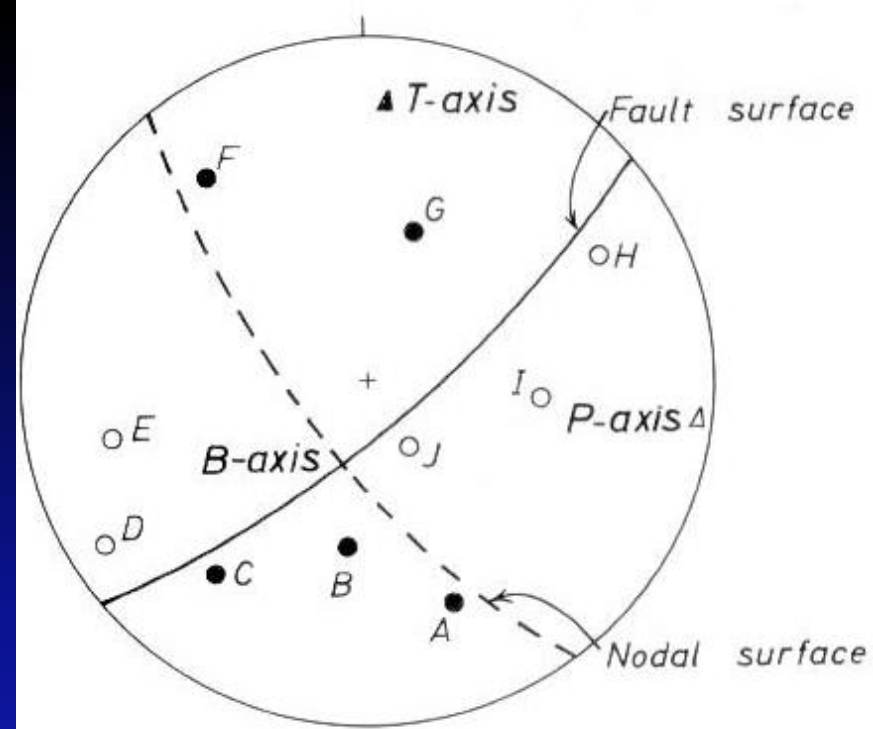
Tipi di impulsi onde P

Pallino pieno=impulsi compressionali

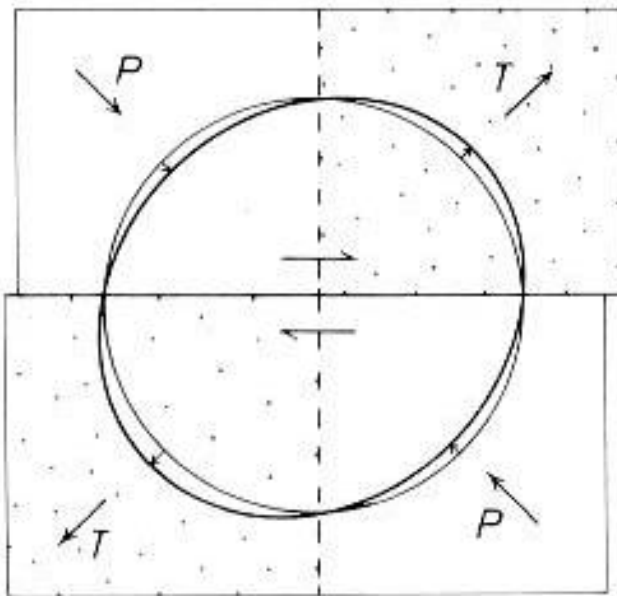
Pallino vuoto=impulsi dilatazionali



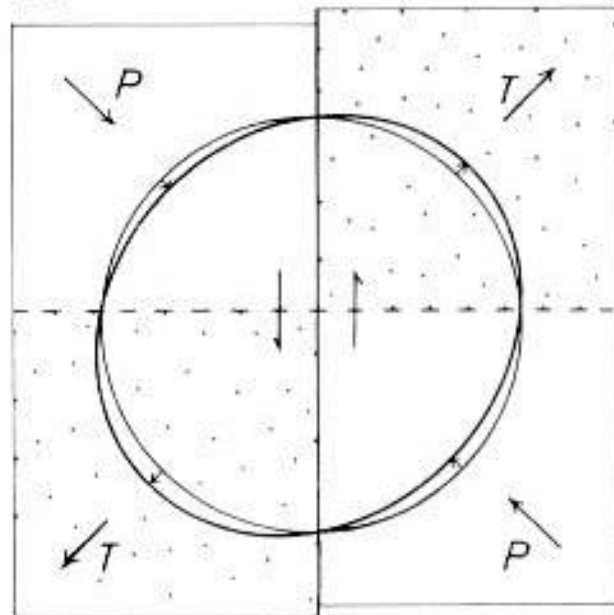
Proiezione equiareale degli impulsi e piani nodali



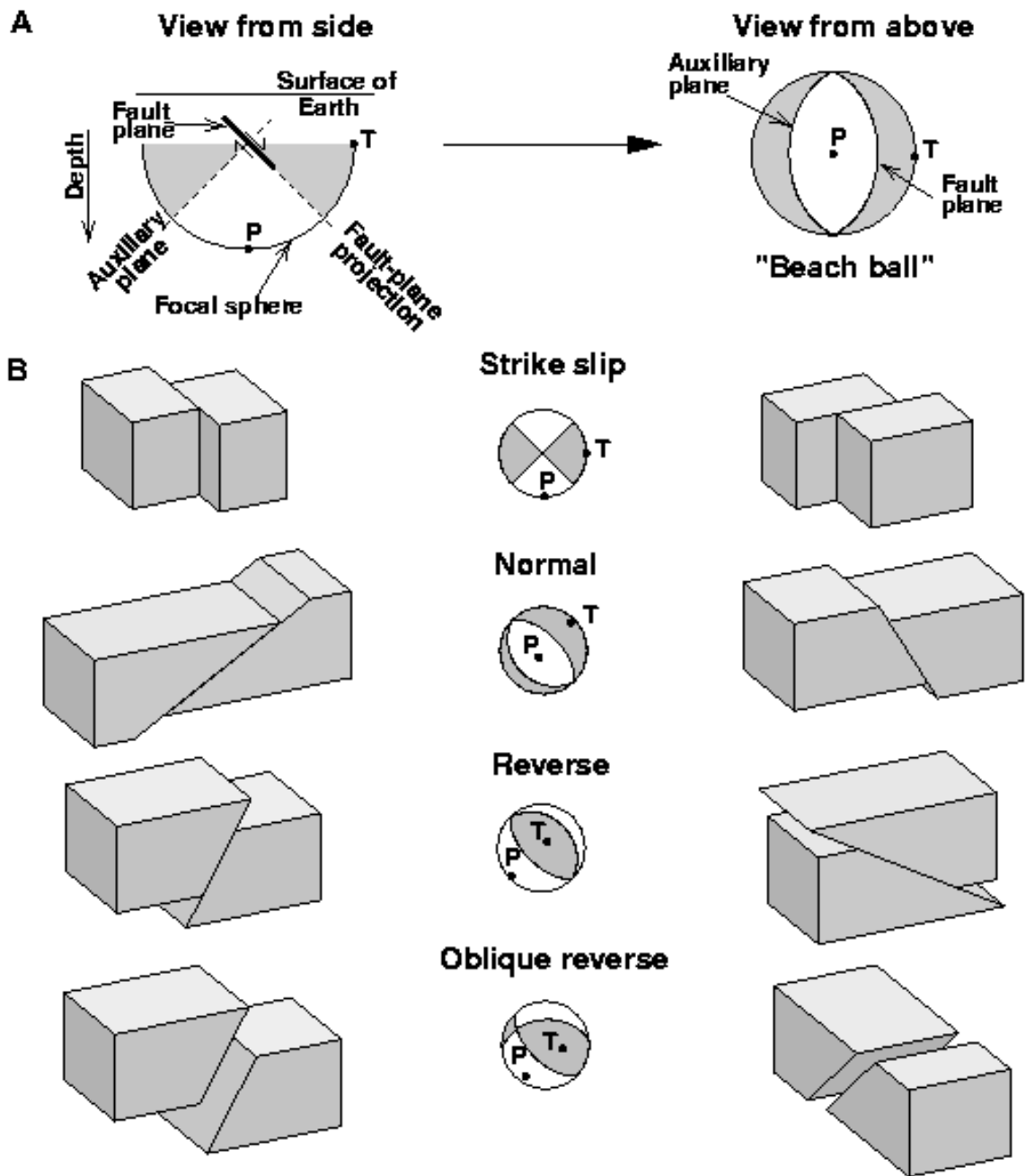
A.



B.



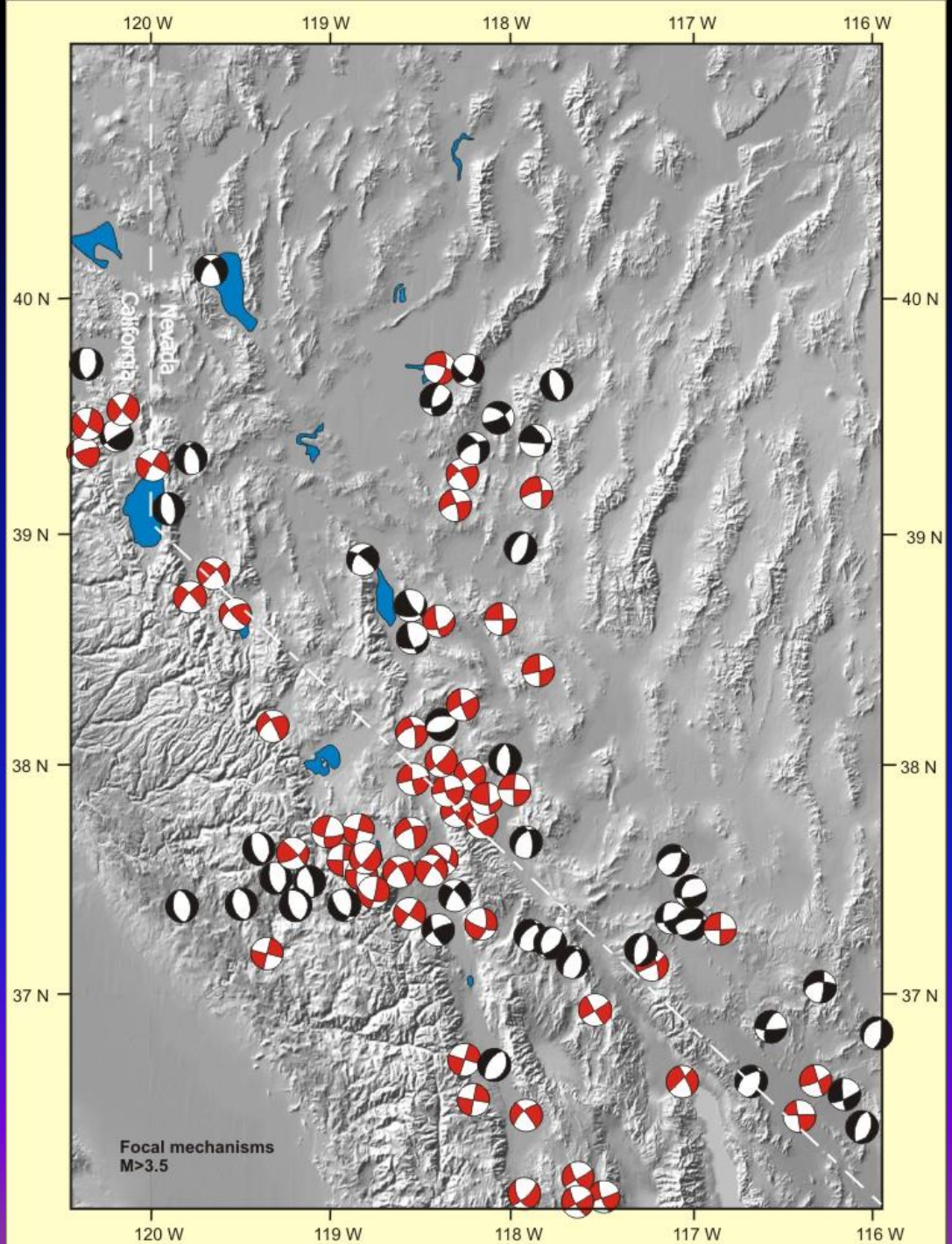
Meccanismi focali (beach-balls) fondamentali



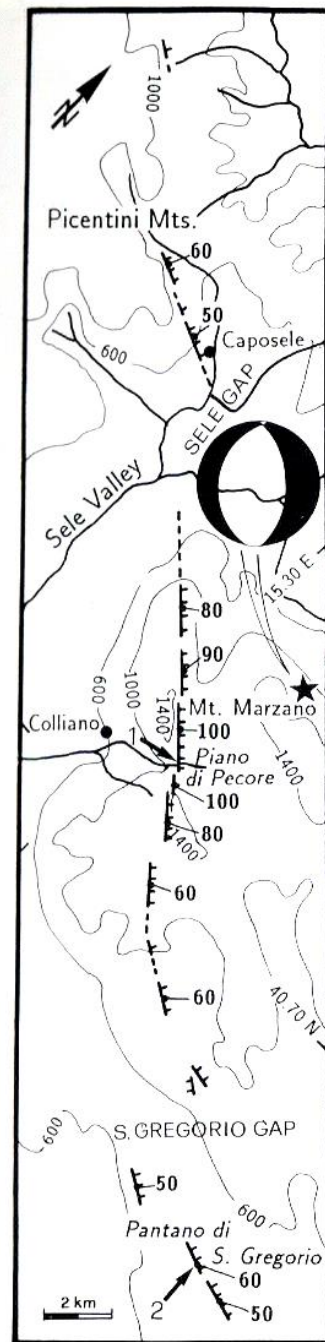
Determinazione del piano nodale dal contesto geologico

Discriminazione fra piani
sinistri e destri,
e tra piani dip-slip a basso o
alto angolo

Walker lane, Nevada occidentale
e California orientale



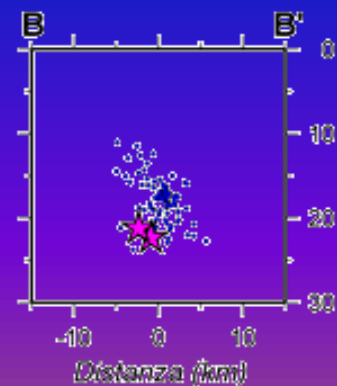
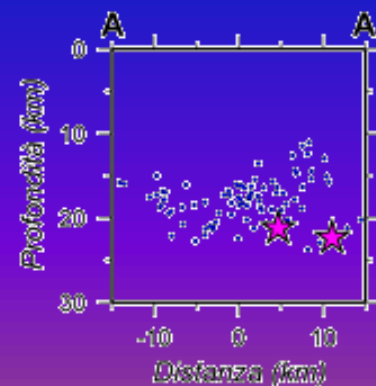
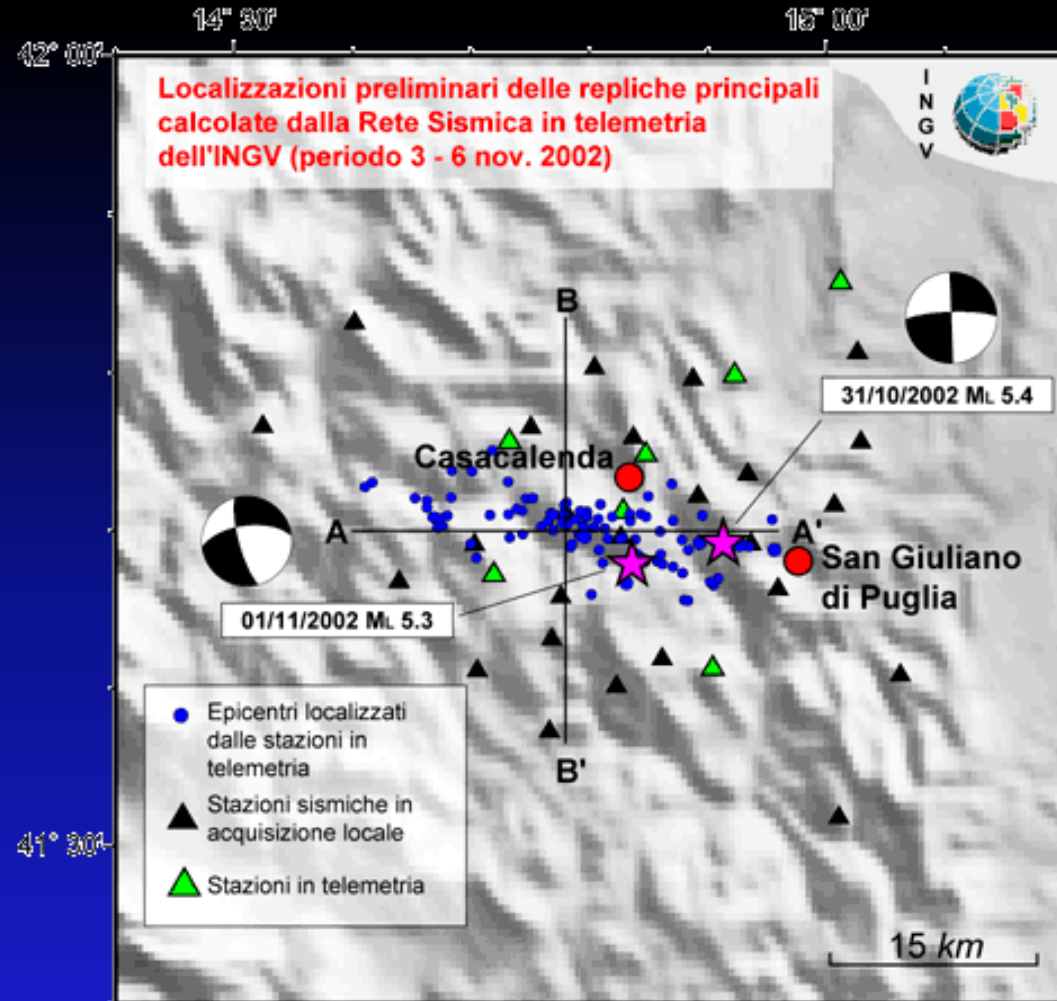
Determinazione del piano nodale da rottura superficiale



Irpinia 1980



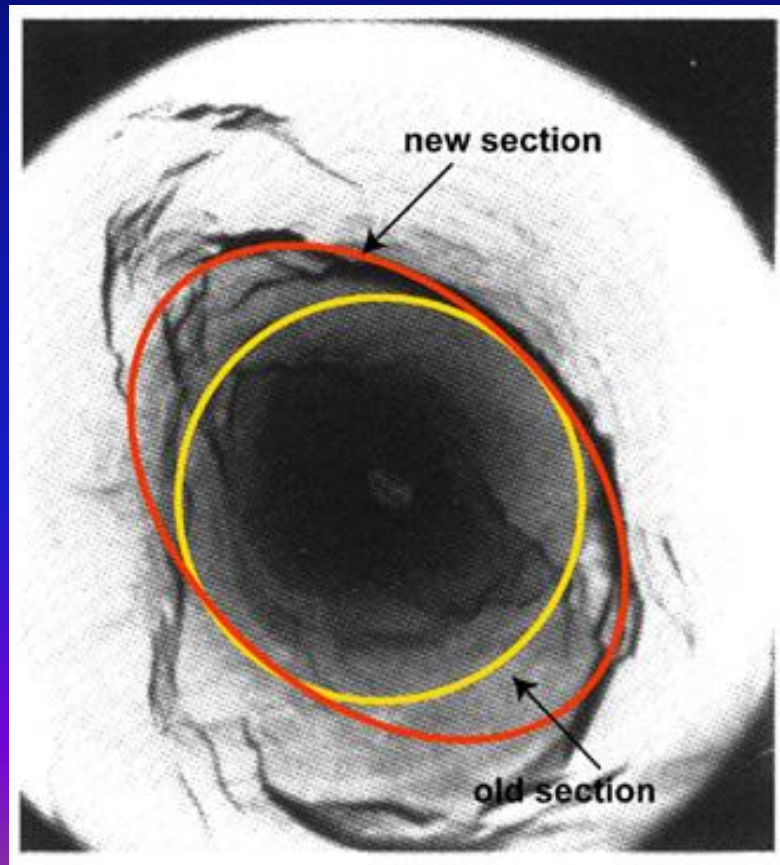
Determinazione del piano nodale dalla distribuzione degli aftershocks (per faglie cieche)



Misure dello strain incrementale attivo

Rotture in pozzo (break-outs)

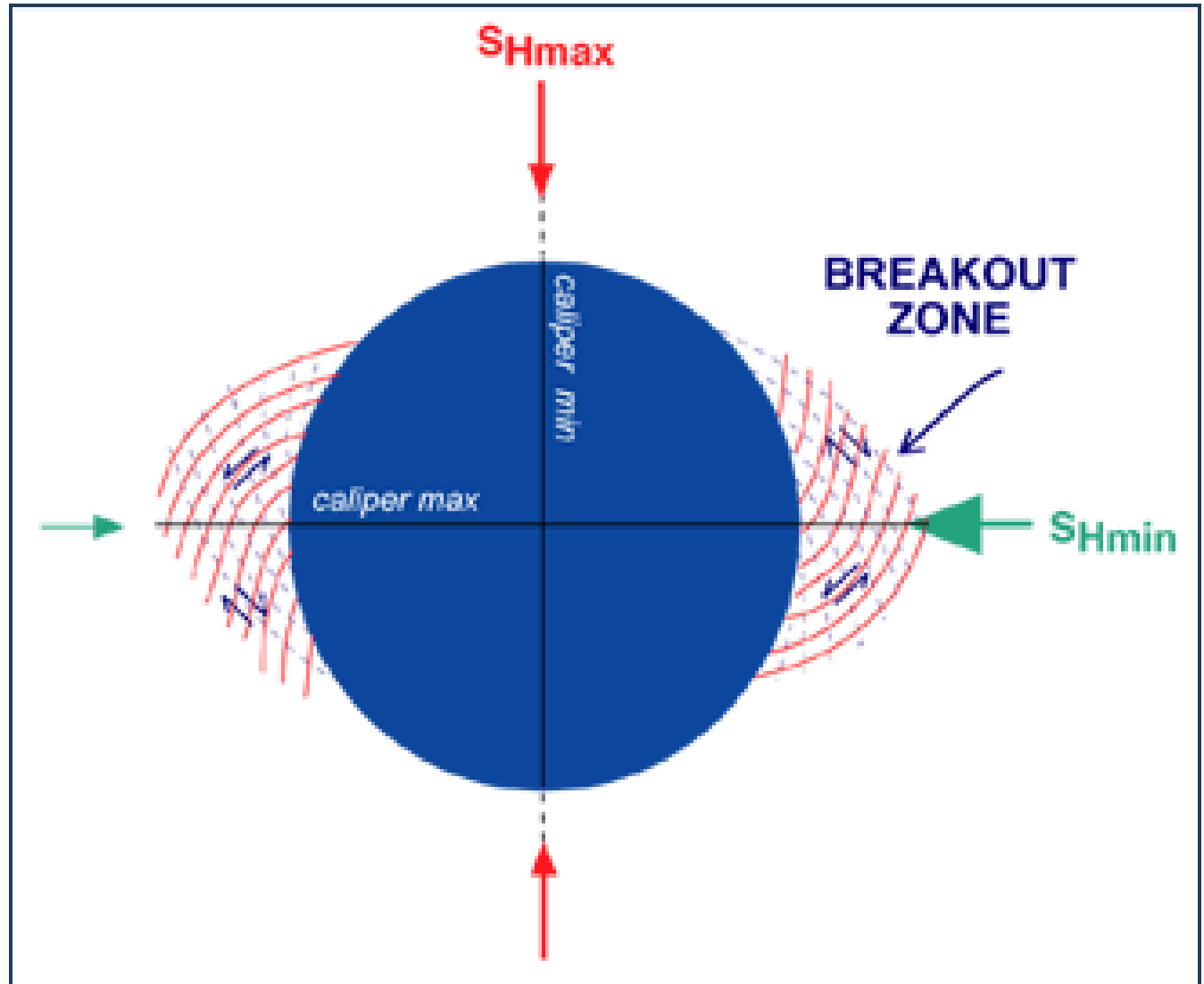
L'analisi di breakout nelle perforazioni profonde consente di definire la direzione delle componenti, sul piano orizzontale, del campo di stress che agisce attualmente nella crosta terrestre. Questo tipo di analisi sfrutta la naturale concentrazione di stress che si genera intorno ad un pozzo, dopo che questo viene perforato.



Effettuando una perforazione in una zona caratterizzata da un campo di stress anisotropo (ossia con i tre assi principali del tensore dello stress di intensità diverse), la sezione in pianta del foro, inizialmente circolare, assume una forma grossomodo ellittica.

Formazione dei breakouts

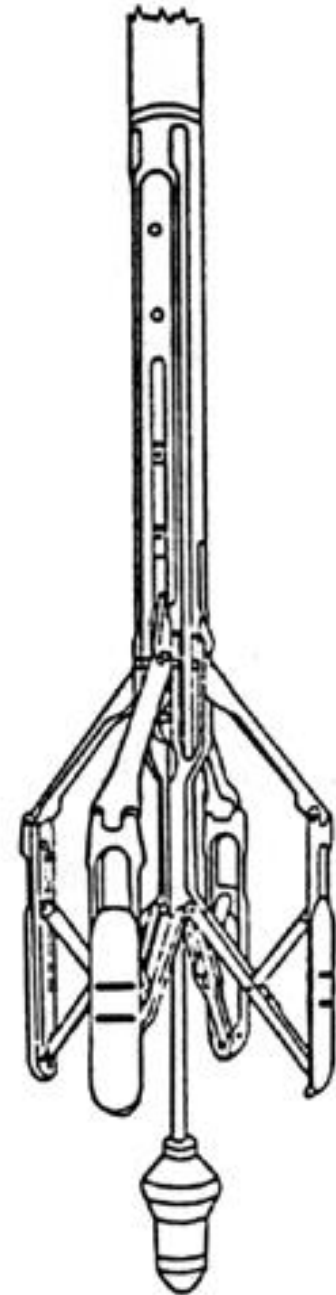
Ciò accade perchè lungo la direzione in cui agisce lo sforzo orizzontale minimo (S_{Hmin}), si formano delle fratture di taglio che causano il franamento (breakout) delle pareti del foro.



Misurazioni

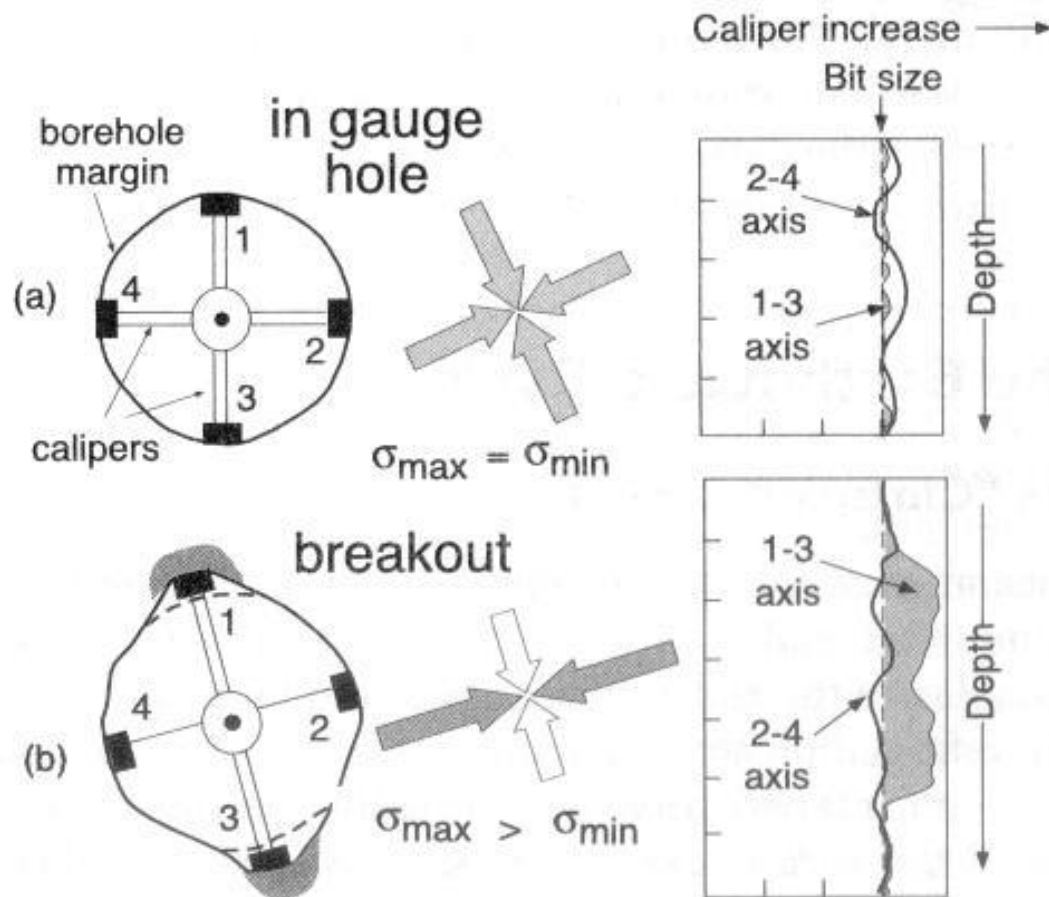
Le misure possono essere effettuate per via meccanica (con il calibro a 4 braccia), per via ottica (tramite il borehole televiewer) o per via acustica (con una telecamera sismoacustica).

Seguendo il primo metodo, si analizzano i dati derivanti dallo strumento (orientato rispetto al nord) che viene calato a fondo pozzo e fatto risalire attraverso una rotazione lenta. Tale strumento è costituito da due bracci a croce, in grado di variare la loro lunghezza in relazione alla geometria della sezione del foro: quando una coppia di bracci incontra una zona di breakout lo strumento si blocca e si incanala lungo la direzione del breakout stesso.



Variazioni sezione e orientazione stress

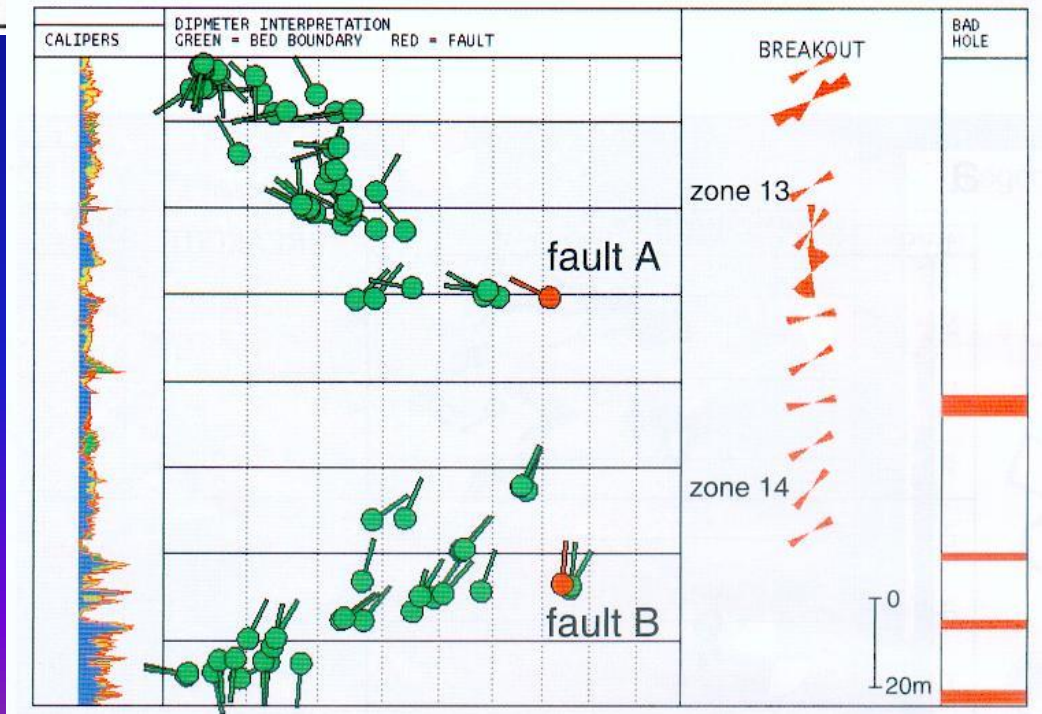
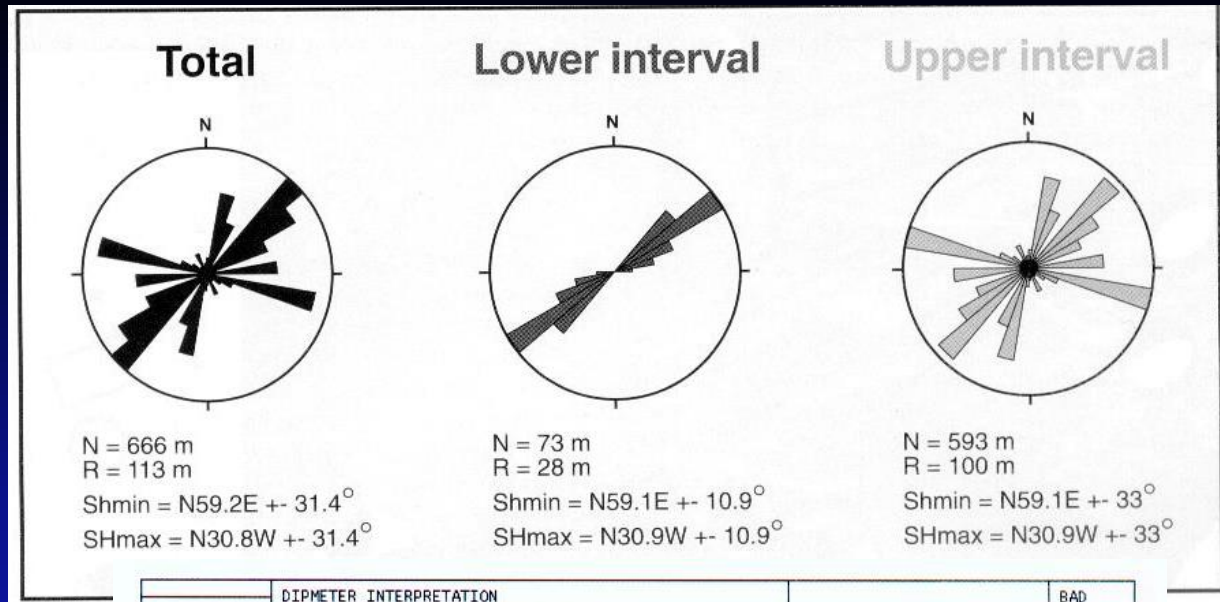
FIGURE 4.2. Dipmeter measurements of changes in lengths of two perpendicular axes in a section of a vertical borehole



Stress
omogeneo
(uniassiale)

Intervallo di
brak-outs

Pozzo Li Foi (Lucania): break-OUT LOG E orientazione assi di stress



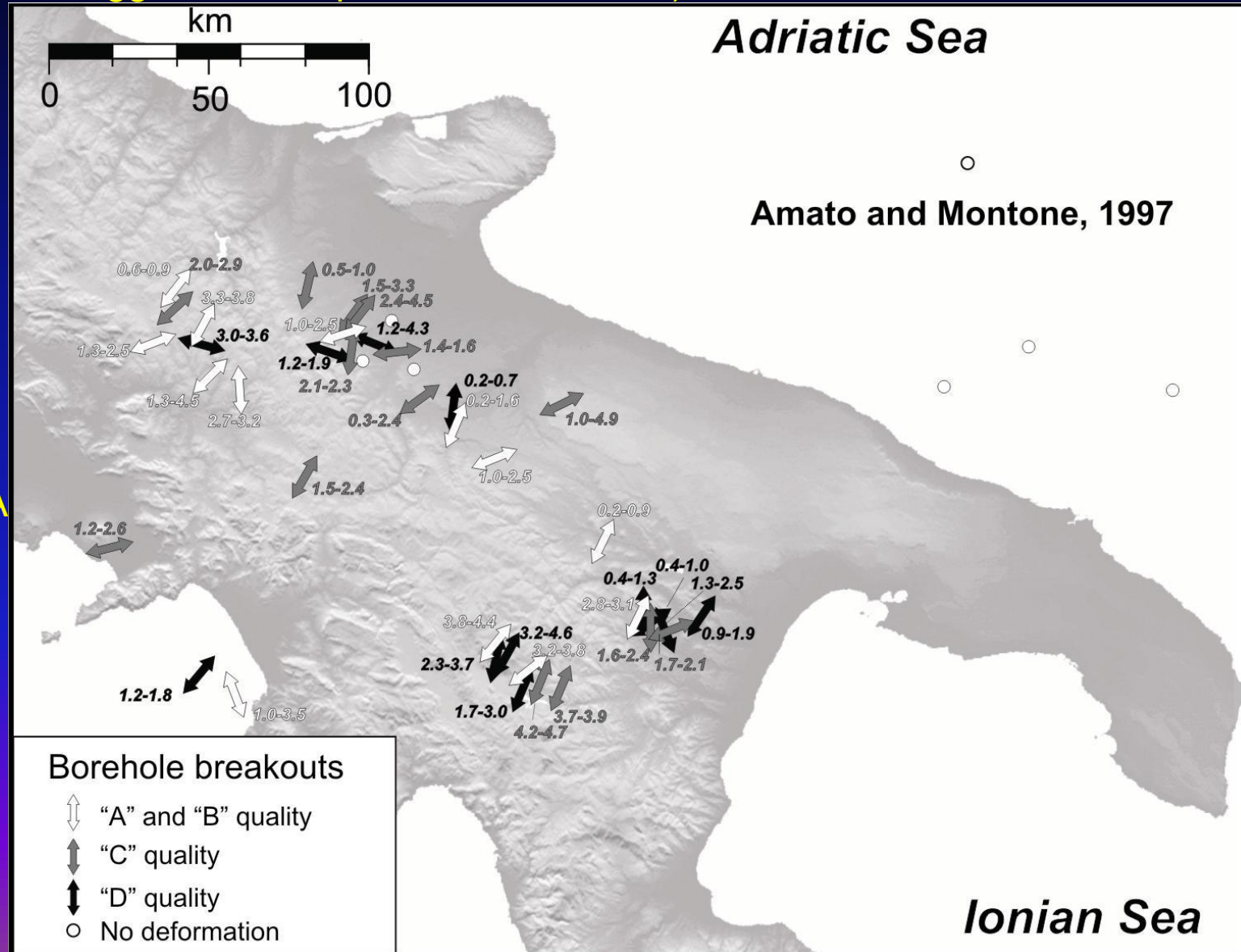
Inclinazione (0°-90°)

Mariucci et al., (2003)

Distribuzione in Italia meridionale

L'intervallo di crosta indagata va dalle prime centinaia di metri sotto la superficie (si considerano indicative solo le misure a profondità maggiori di 500 m) a circa 8 km (profondità massima raggiunta dalle perforazioni in Italia).

Ad ogni pozzo viene assegnato un valore di qualità decrescente da A a D in funzione del valore della deviazione standard e del numero di breakout rilevati lungo il pozzo.



Misure dello strain incrementale attivo

Analisi cinematica di faglie attive

Terremoto della Campania-Basilicata, 23 novembre 1980

FaultKin_4.0

M Marzano Irpinia fault 1980 earthquake

NL A

318 75 29 74 44 30 235 60

NL A

304 54 24 54 30 9 239 80

NL A

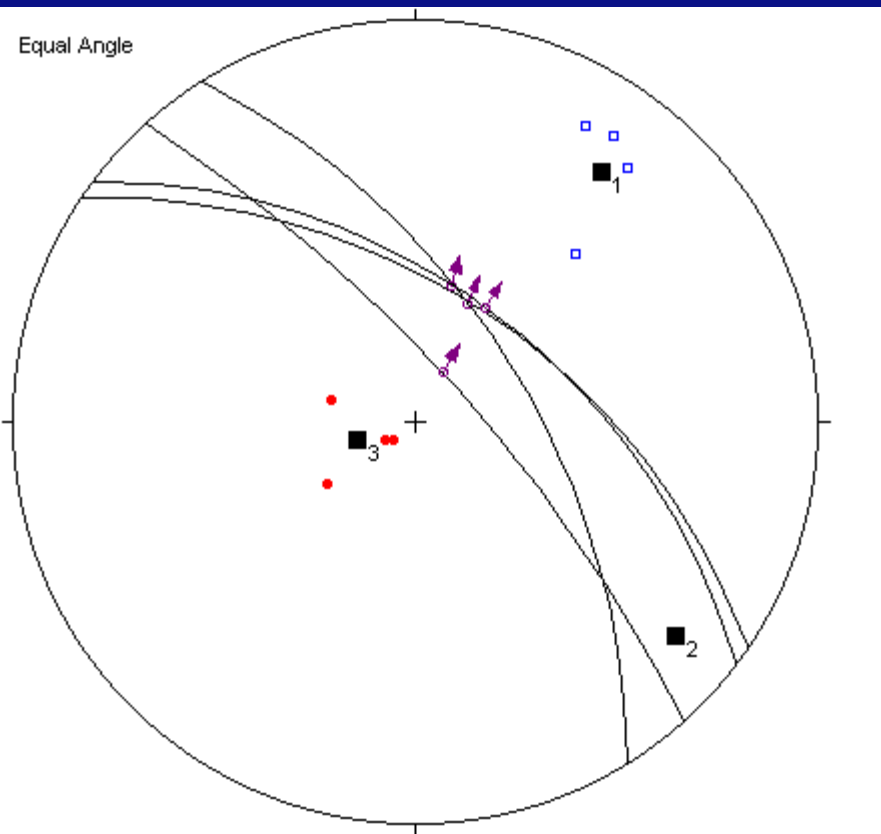
328 59 15 51 40 10 286 66

NL A

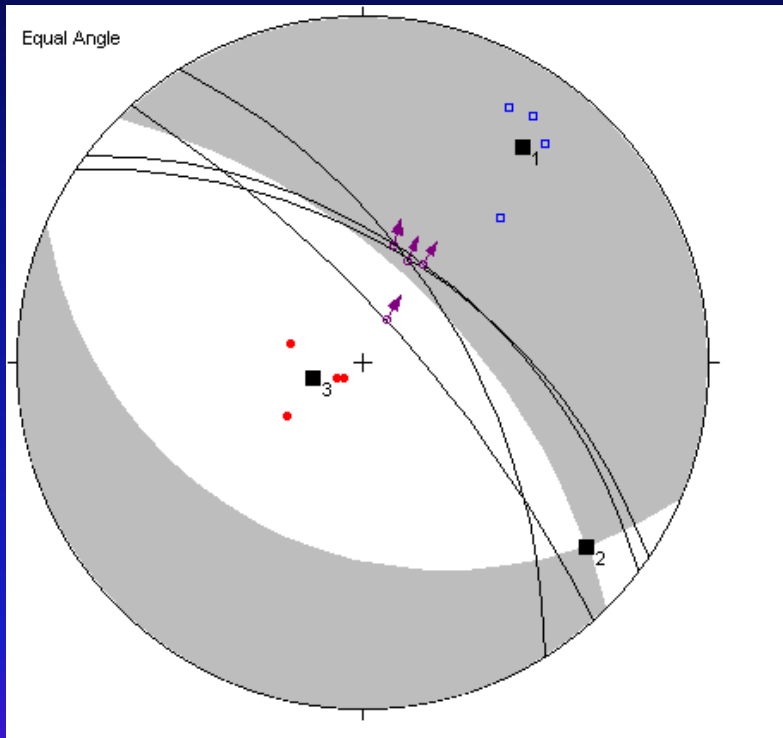
307 53 32 53 35 8 232 82

999 999

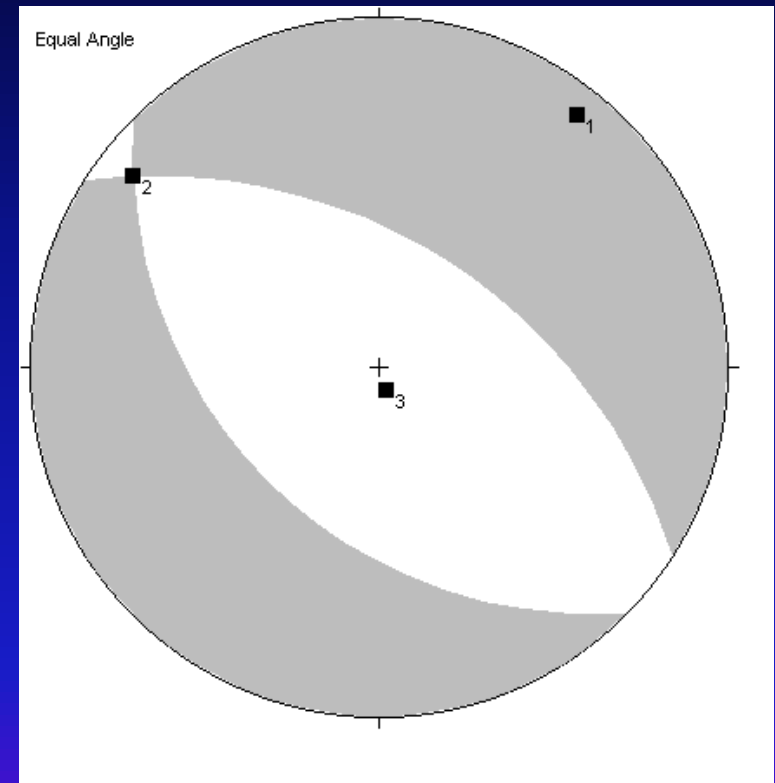
Dati cinematici e calcolo degli assi P,
T e degli assi principali di stress



Confronto tra meccanismi focali



Meccanismo focale derivato
dalla cinematica delle faglie



Meccanismo focale Harvard
CMT

Misure dello strain incrementale attivo

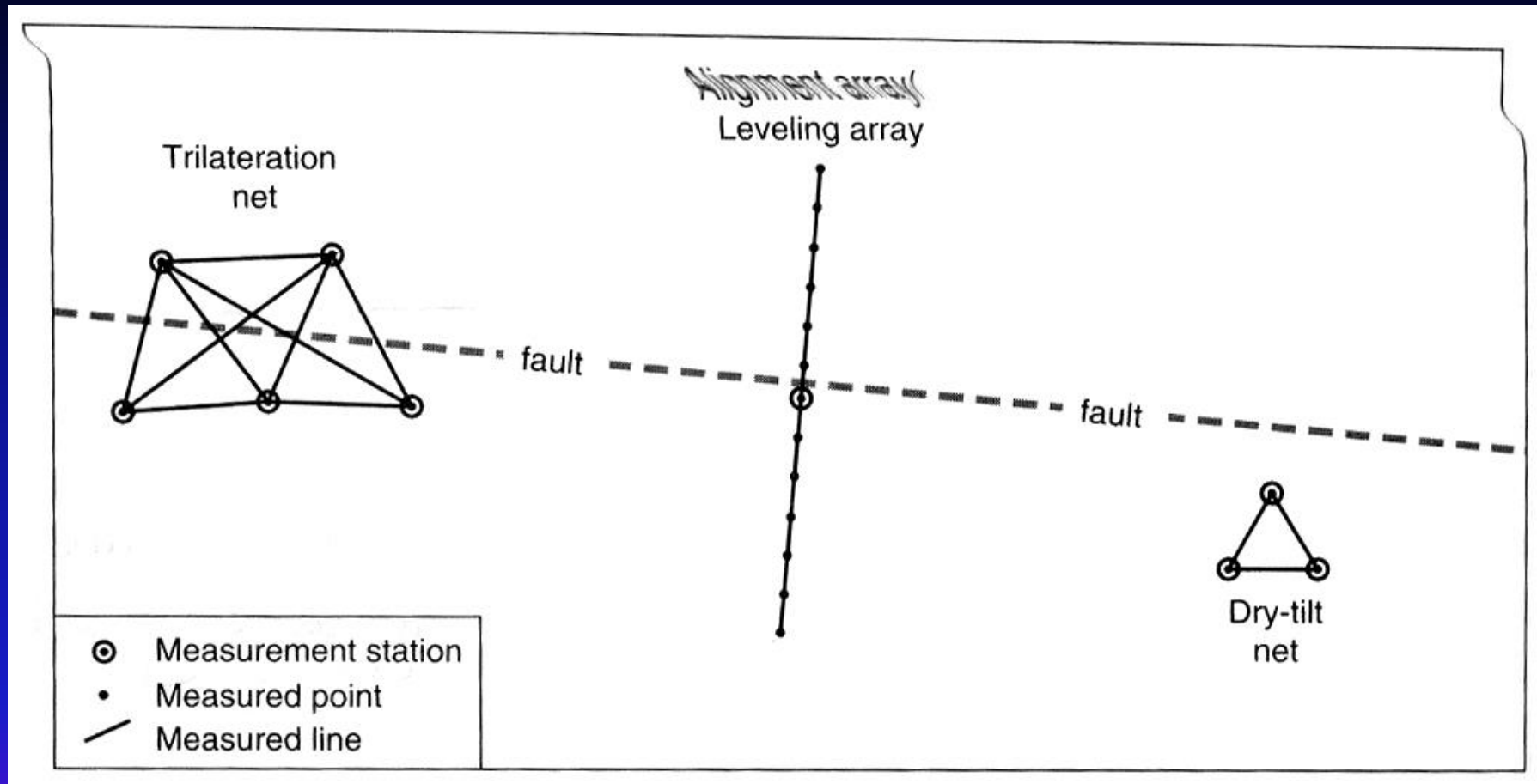
Geodesia Tettonica

Tecniche di geodesia tettonica

Tecniche convenzionali (terrestri): allineamenti,
trilaterazione, livellazione, tilt, mereografi
Analisi della deformazione “near-field”

Tecniche spaziali: VLBI, SLR, GPS, In-SAR
Analisi della deformazione “far-field”

Tecniche “near-field” terrestri



Movimenti verticali
e orizzontali

Movimenti orizzontali (alignment)
Movimenti dip-slip (levelling)

Basculamento

Allineamenti

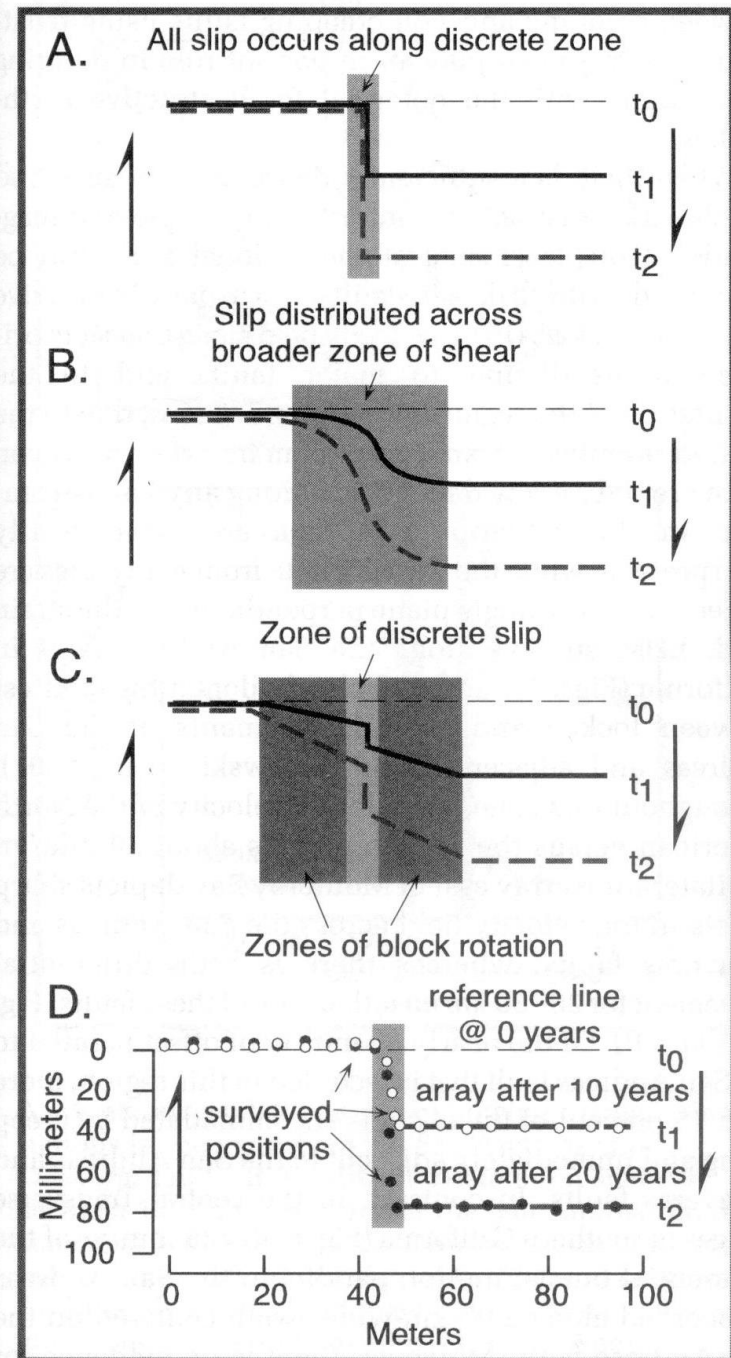
Modello concettuale di deformazione associato a faglia trascorrente

A. Faglia “debole”, assorbe la deformazione

B. Faglia “forte”, deformazione distribuita

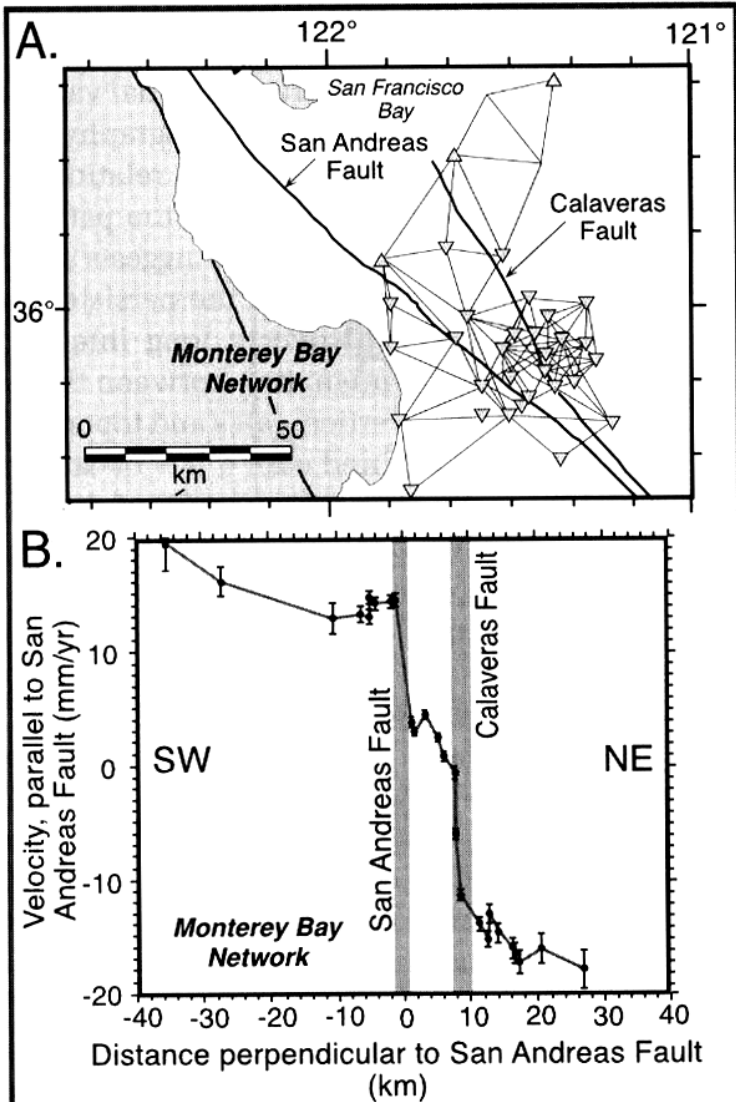
C. Combinazione di deformazione concentrata e distribuita

A. Risultato di misure di allineamento lungo una faglia con creep in momenti diversi



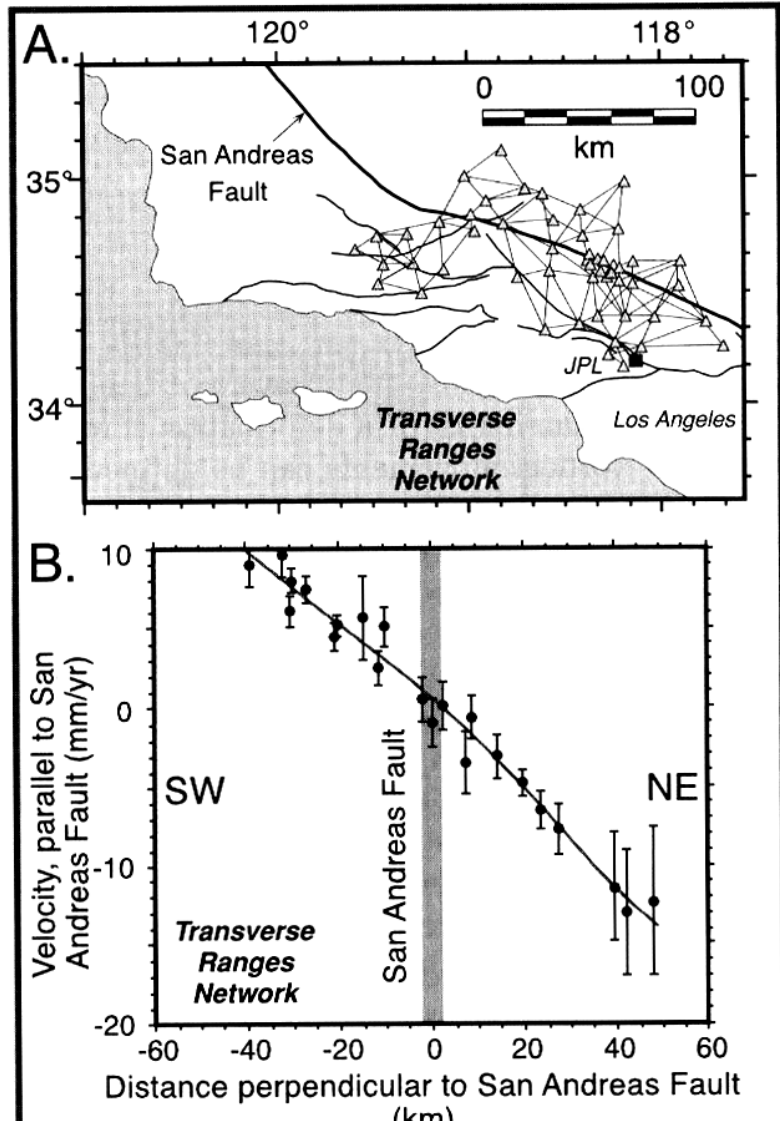
Trilaterazione

FIGURE 5.4. Monterey trilateration array



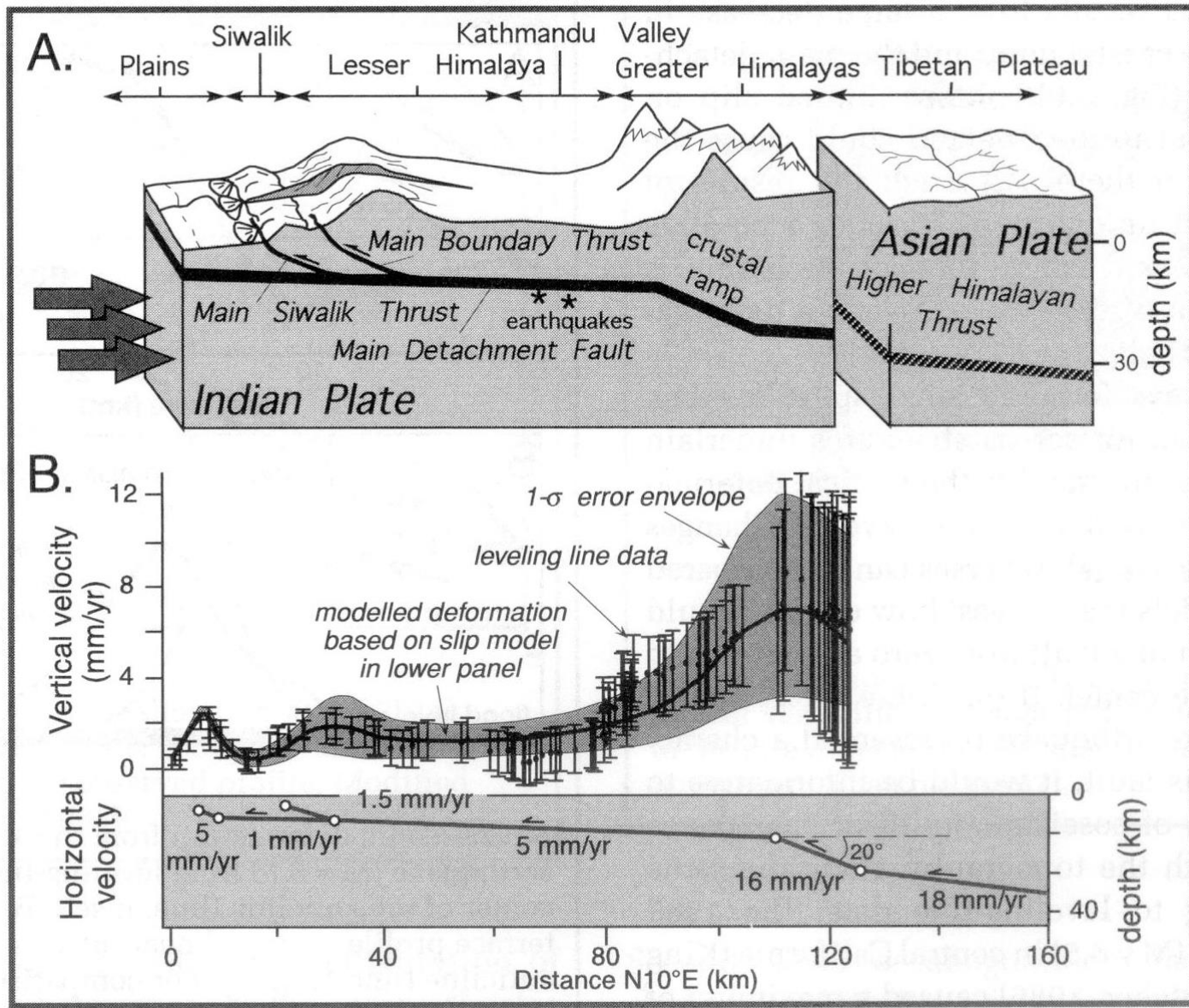
Creeping fault

FIGURE 5.5. Transverse Ranges trilateration array



Locked fault

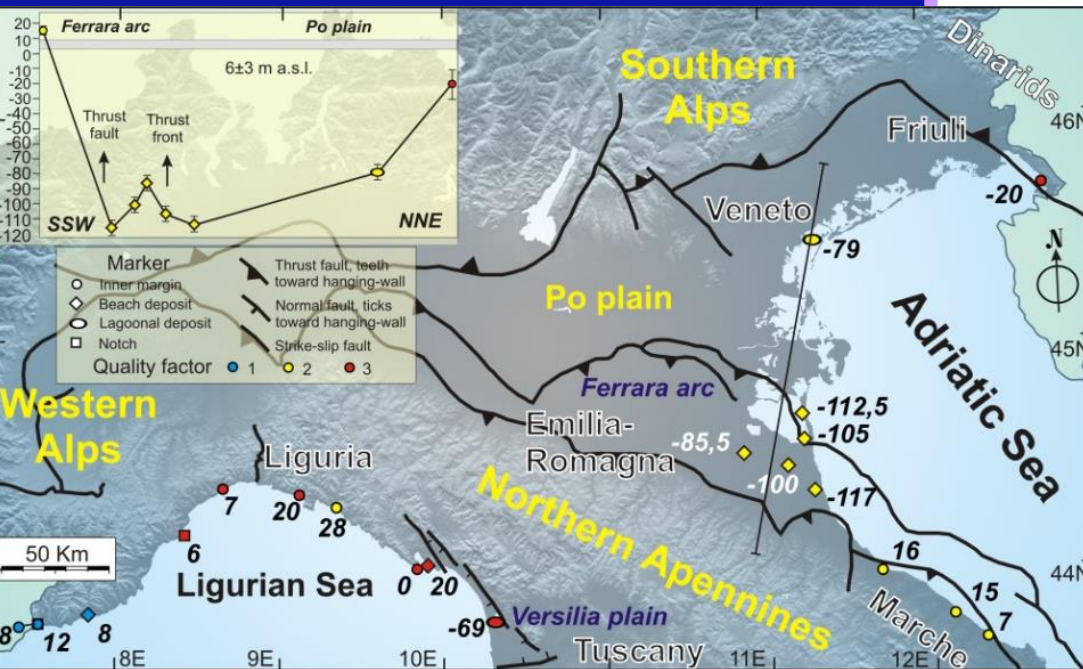
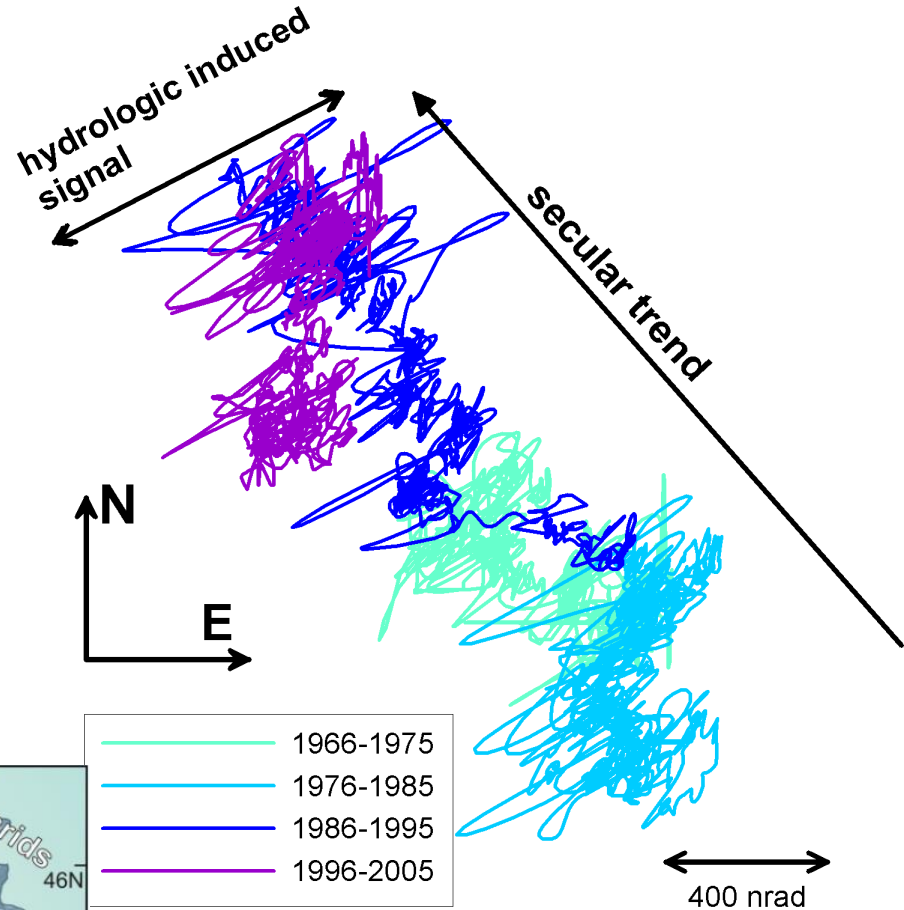
Livellazione regionale (orogenica) attraverso l'Himalaya Nepalese



Comparazione tra la struttura e topografia a larga scala, e i tassi di dislocazione

Tiltmetri

Long base tilt on Trieste karst indicates NW ward tilt, compatible with long term geologic movements



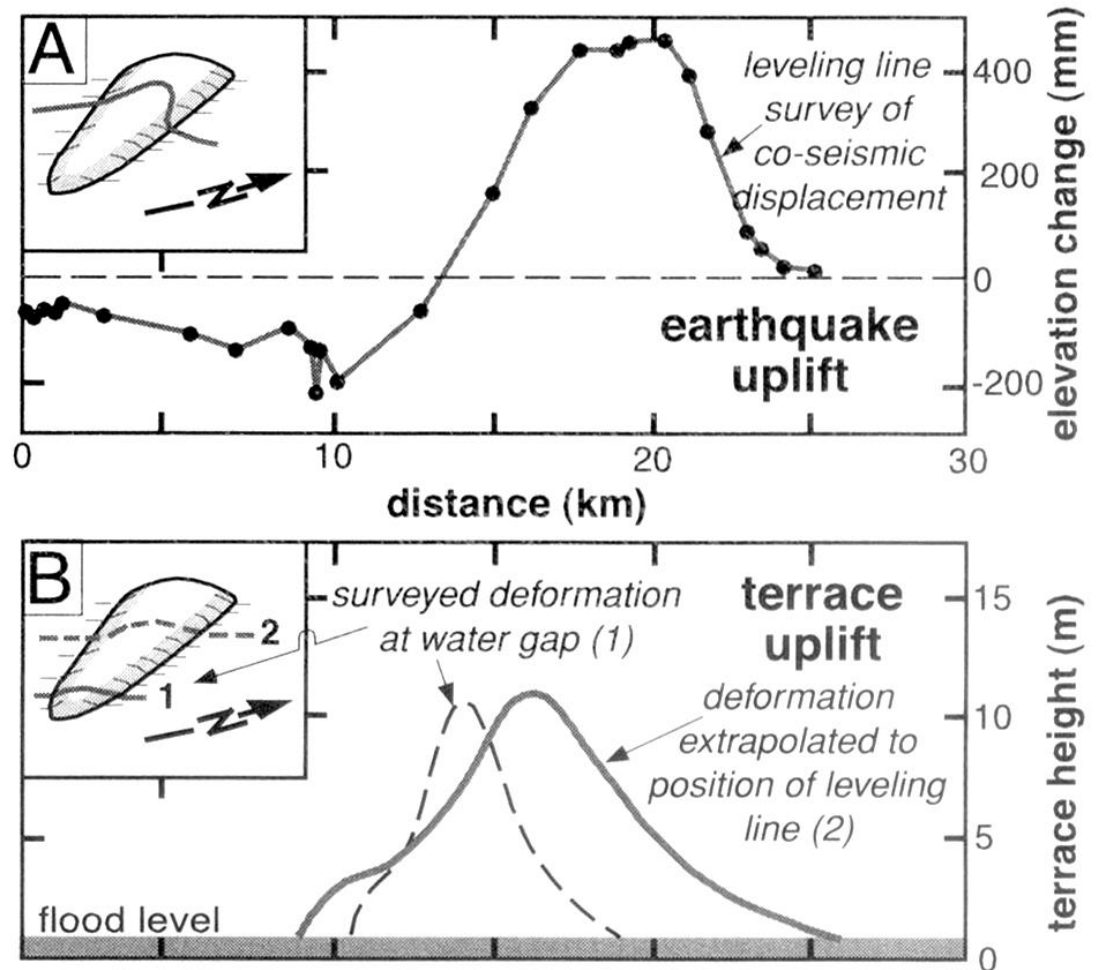
Profondità e tassi di dislocazione del marker di 125 ka (MIS 5.5).
Da Ferranti et al. (2006)

Comparazione di dati di livellazione e terrazzi fluviali deformati attraverso una piega

A) Deformazione co-sismica del terremoto di Coalinga, CA, 1983, M=6.5

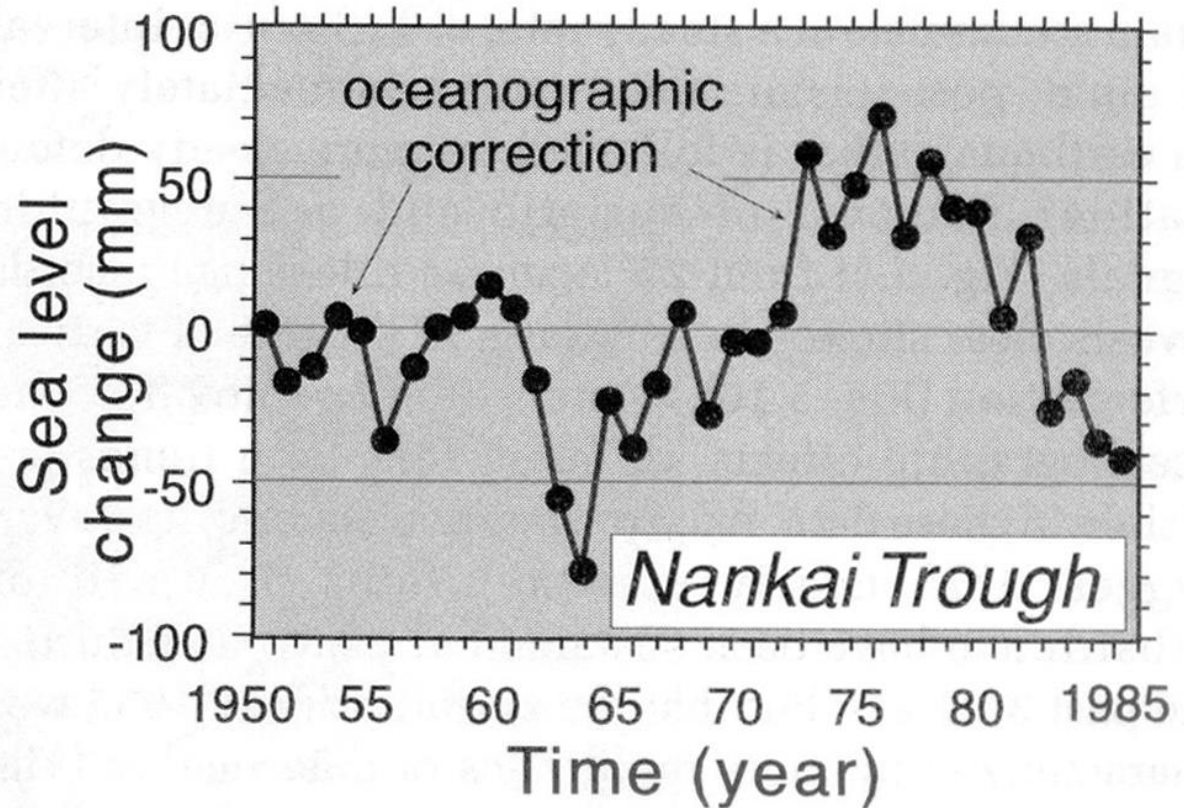
B) Comparazione tra deformazione co-sismica e di lungo termine (terrazzi fluviali), indica accumulo di deformazione co-sismica

FIGURE 5.7. Comparison of leveling-line data and deformed river terraces along a growing fold



Mareografi

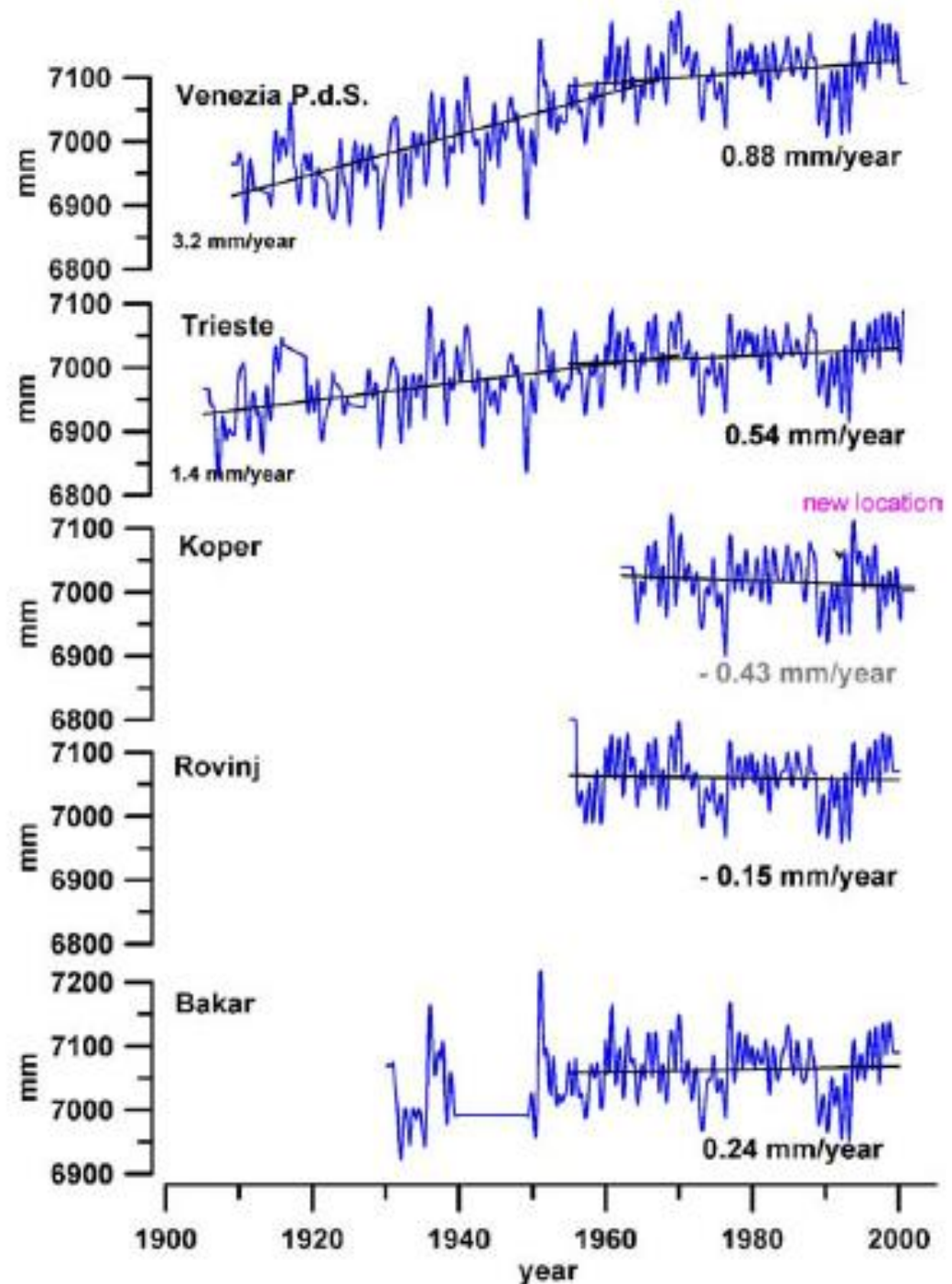
FIGURE 5.9. Oceanographic correction from the southwest coast of Japan



Correzioni
a) Eustatiche (2 mm/a)
b) Effetti oceanografici (salinità, temperatura, pressione, correnti)

Deformazione intersismica in Adriatico settentrionale registrata da mareografi

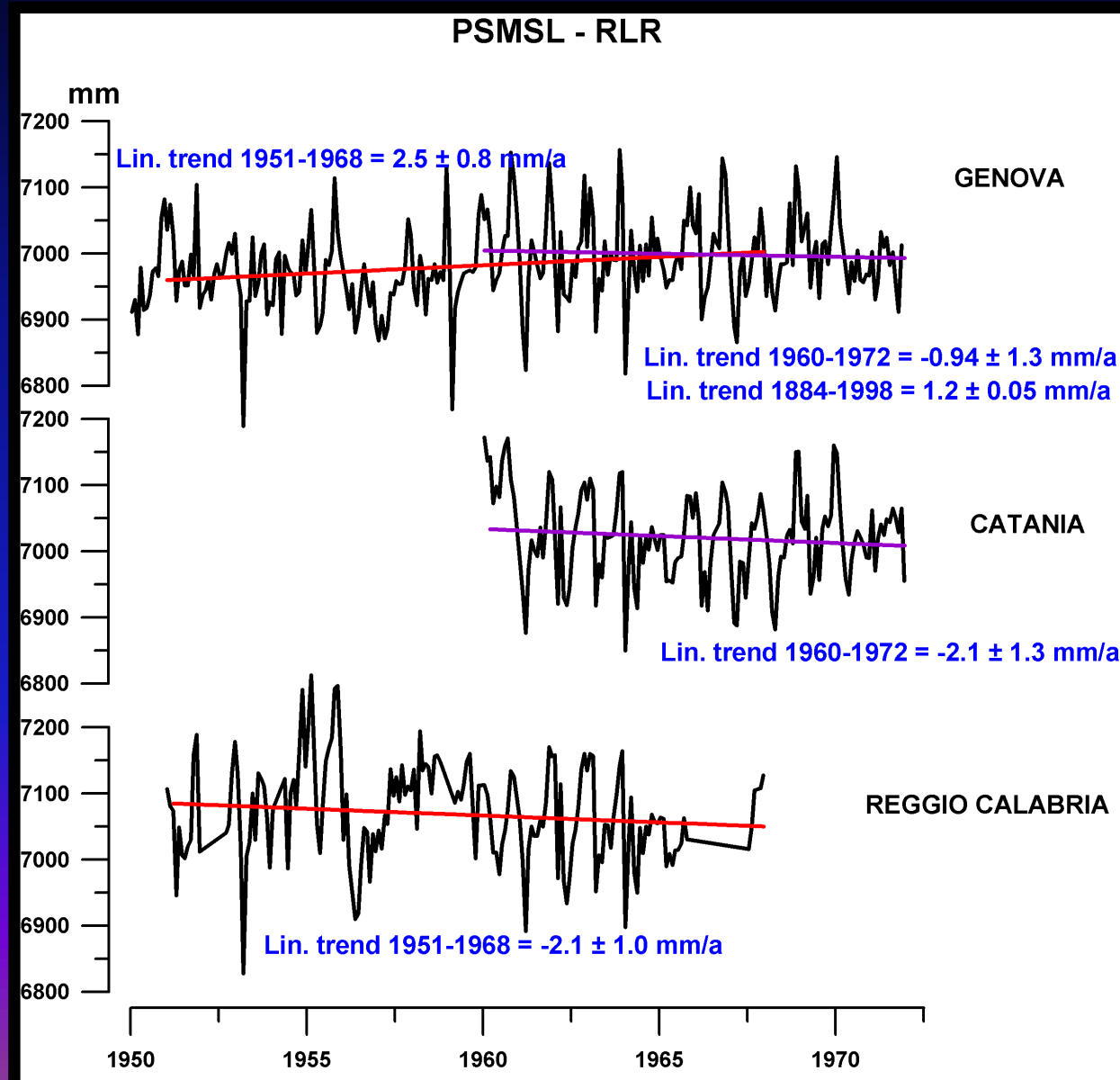
- Il trend decrescente a Venezia e Trieste è dovuto alla interruzione dell'estrazione
- La differenza tra E (uplift) ed W (subsidenza) Adriatico è dovuta a un basculamento regionale verso W



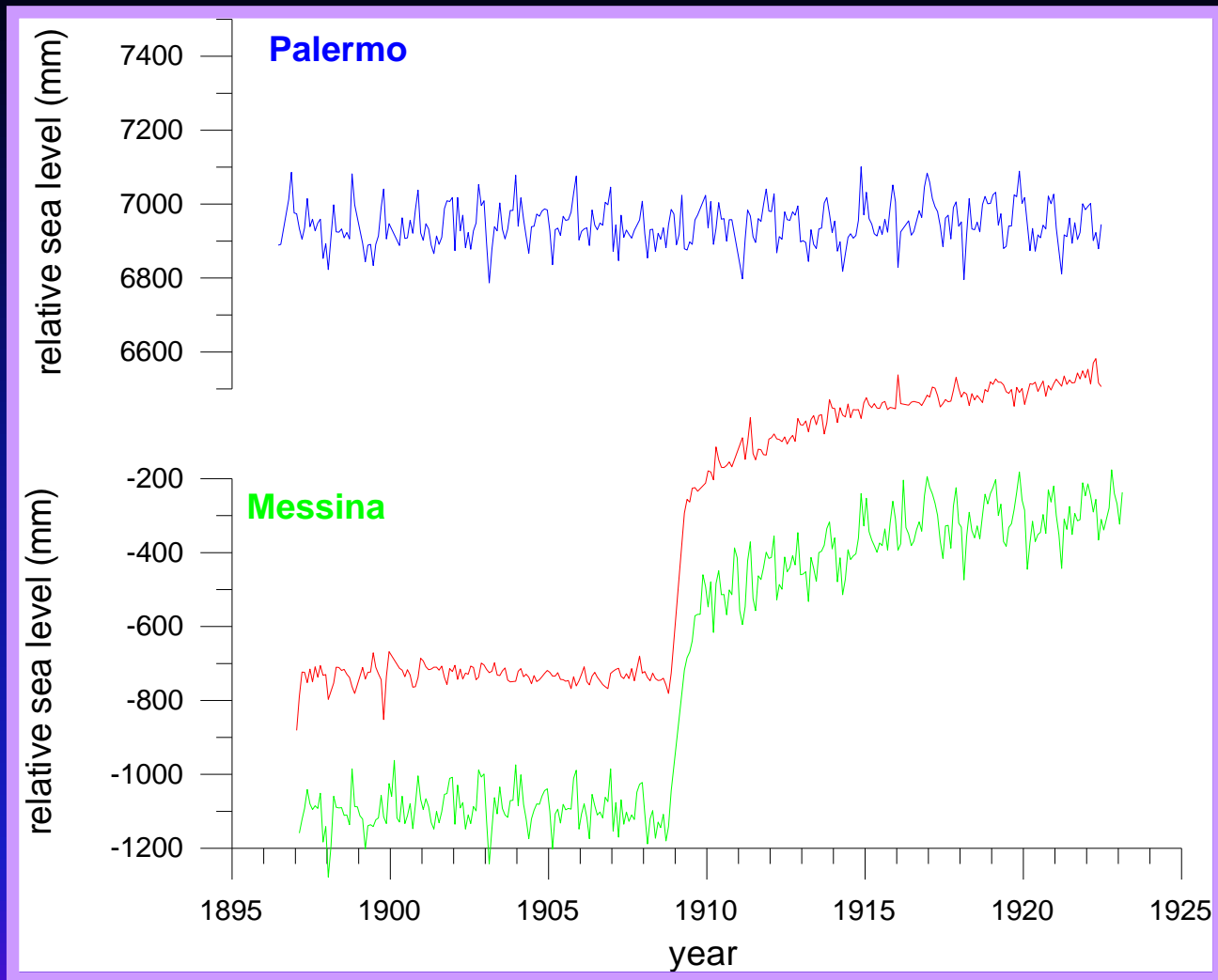
Deformazione intersismica in Tirreno e Ionio registrata da mareografi

Catania e
Reggio Calabria
sono in
sollevamento,
Genova in
subsidenza

PSMSL data
base.



Deformazione co-sismica nello Stretto di Messina



28 December, 1908, I_0 =XI MKS. Presesimic uplift, coseismic and postseismic subsidence.

**Green: Messina tide gauge record Blue: Palermo tide gauge record.
Red: residual Messina relative to Palermo tide gauge**

Geodesia Tettonica

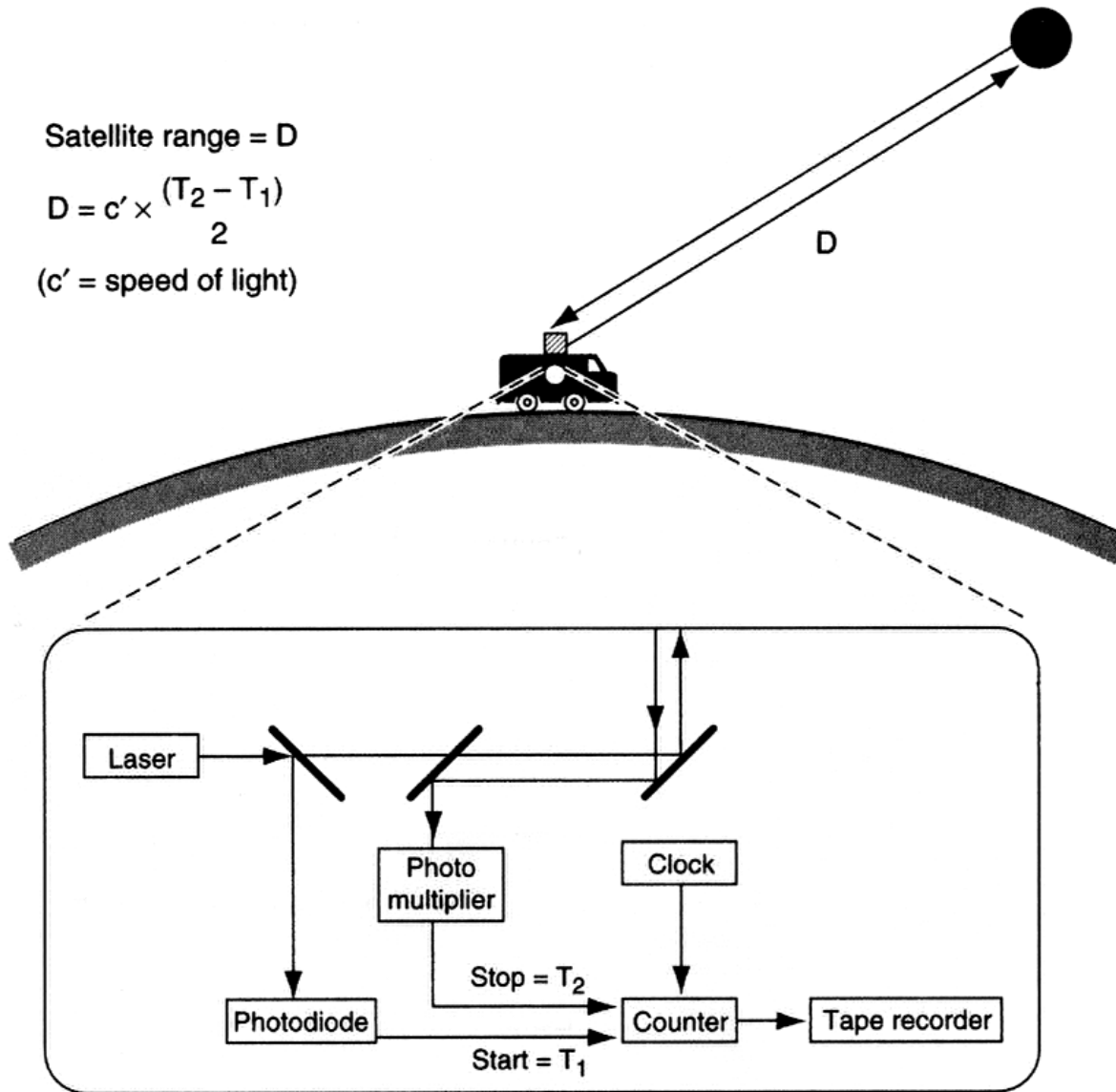
Tecniche spaziali
(deformazione “far-field”)

SLR (Satellite Laser Ranging)

Satellite range = D

$$D = c' \times \frac{(T_2 - T_1)}{2}$$

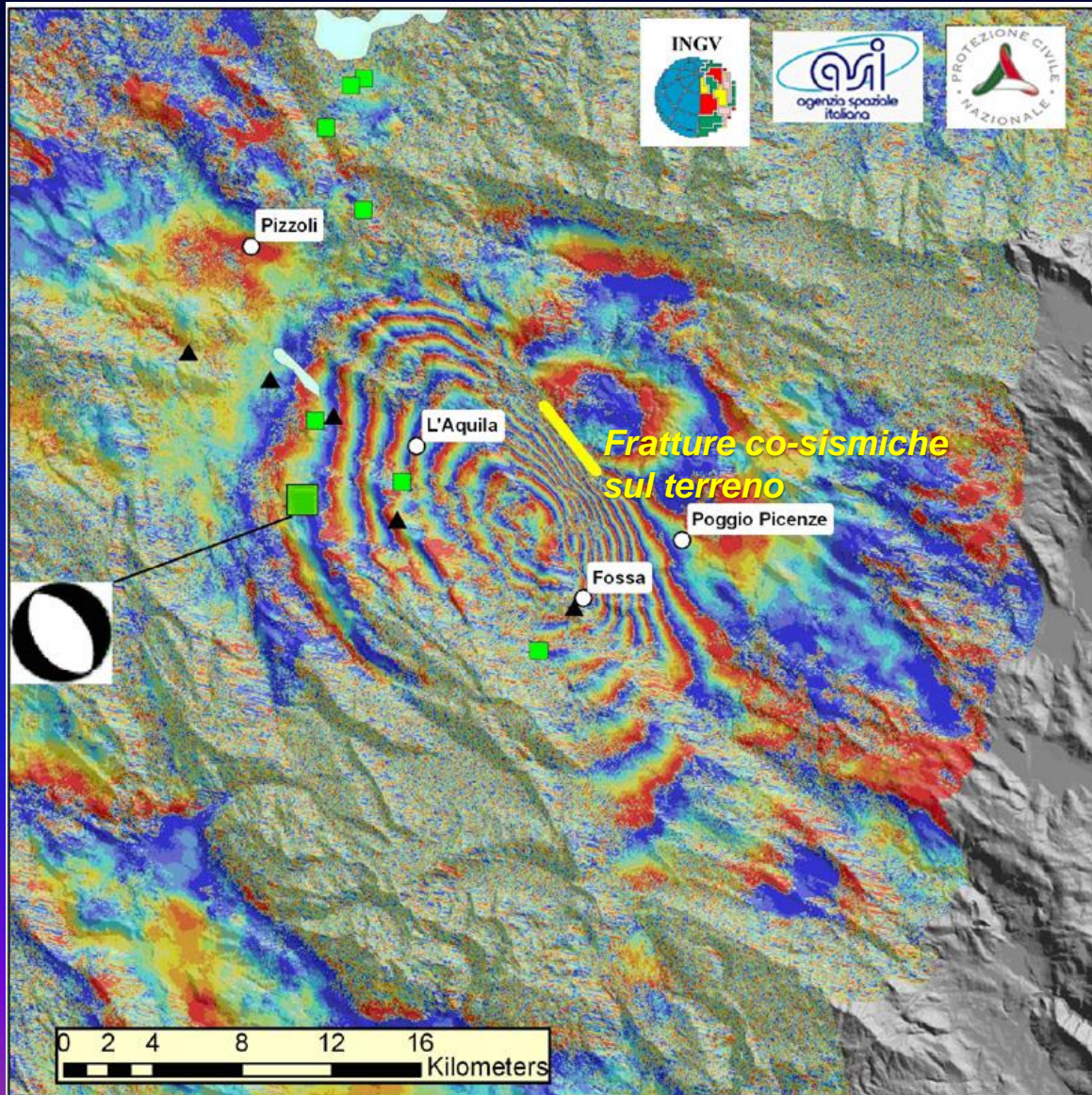
(c' = speed of light)



Un impulso laser è inviato dalla stazione a terra, riflesso dal satellite di nuovo verso terra. Un orologio atomico misura il ritardo tra il segnale originario e la sua riflessione ($T_2 - T_1$). La distanza dal satellite è calcolata da questo ritardo.

Interferometria Radar

Terremoto aquilano 6 aprile 2009



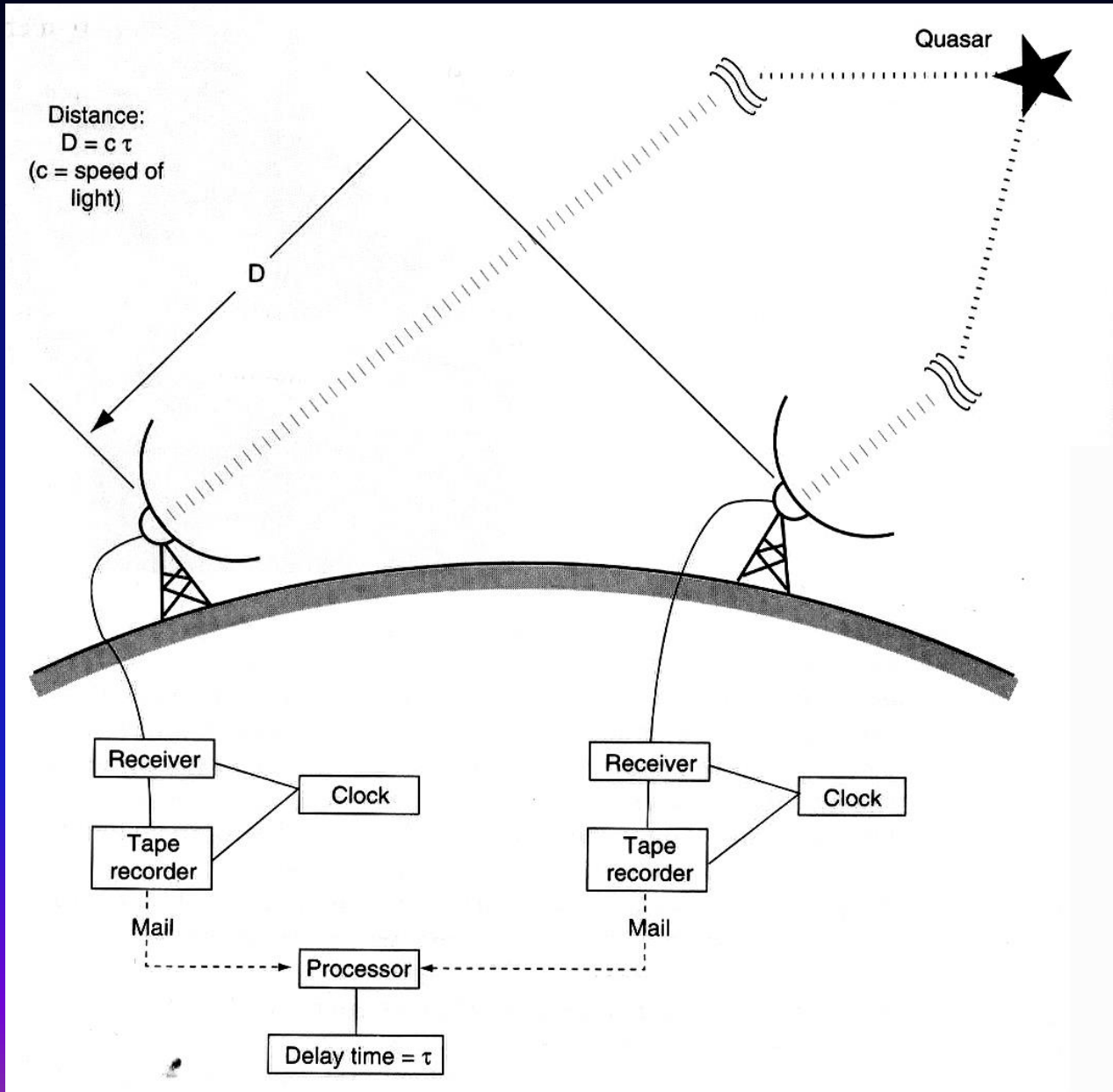
Tecnica DinSAR (Interferometria Differenziale SAR).

L'interferogramma ENVISAT mostra 9 frange concentriche che individuano l'area di massimo spostamento tra L'Aquila e Fossa, dove il terreno si è spostato di circa 25 cm lungo la direzione di vista del satellite (LOS-Line Of Sight) in allontanamento da esso

A NE delle fratture (a letto della faglia) ci sono 3 frange che indicano che il suolo si è mosso di circa 8 cm LOS in avvicinamento al satellite

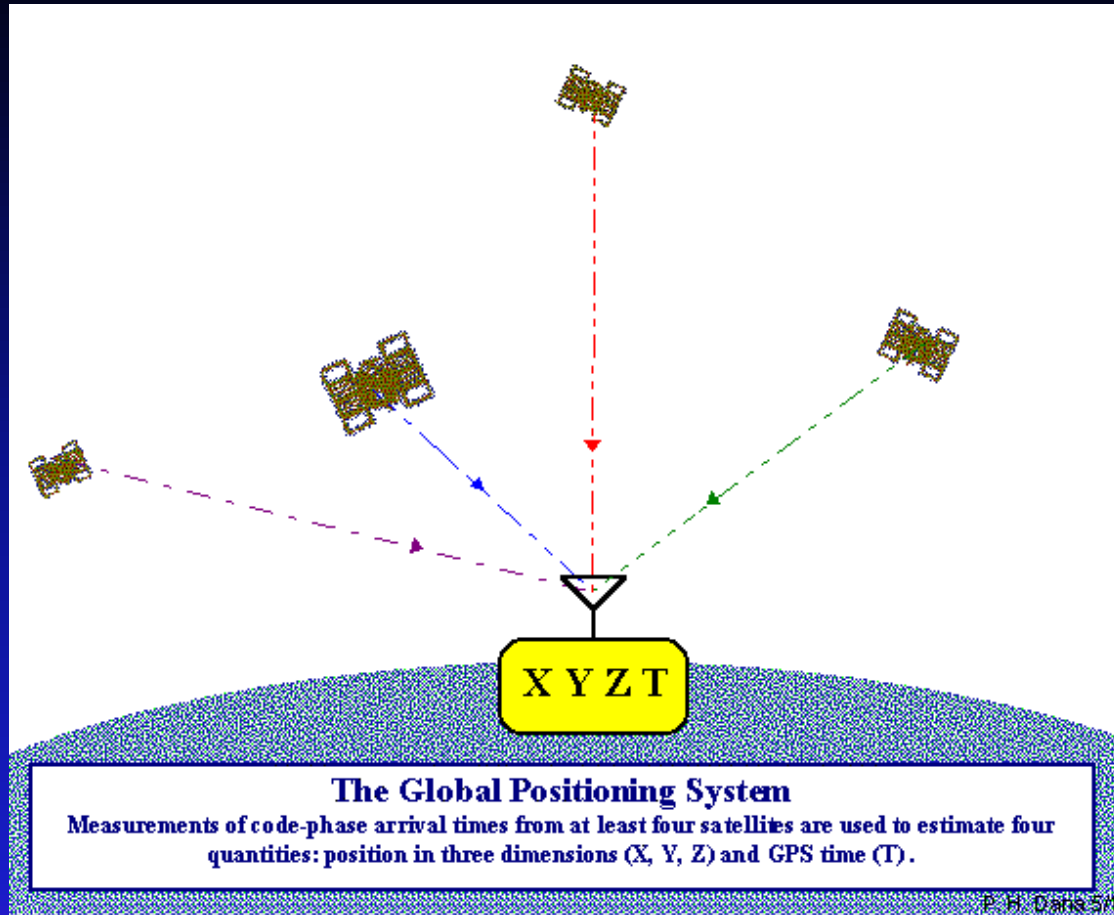
I modelli lineari e non lineari di dislocazione dai dati SAR indicano che lo slip ha raggiunto un massimo di ~90 cm concentrato al centro del piano di faglia

Very Long Baseline Interferometry (VLBI)



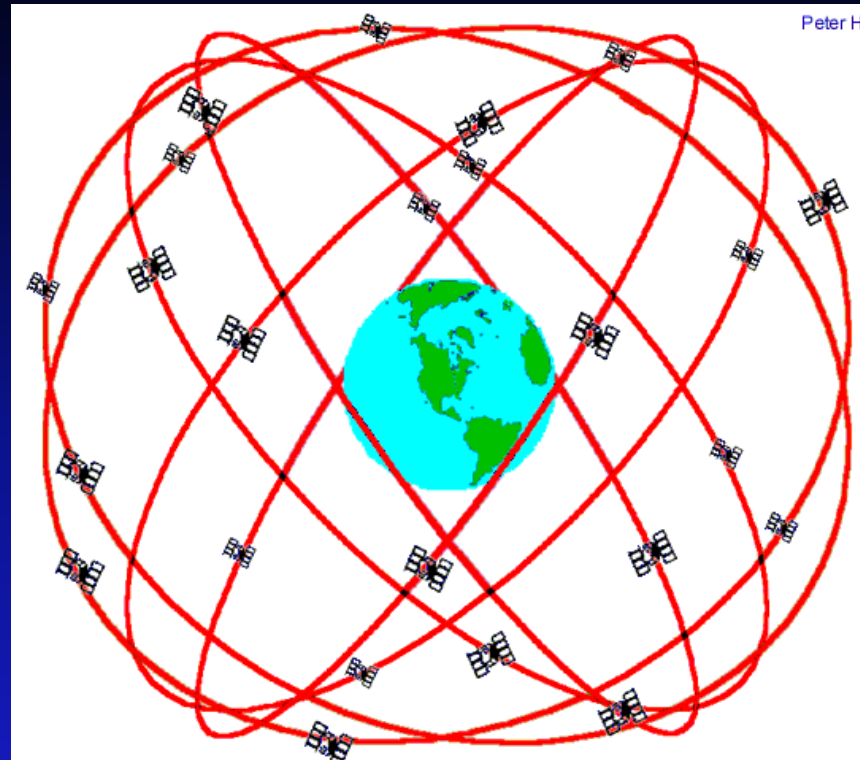
La distanza tra i due radiotelescopi è misurata tramite il segnale ricevuto da un quasar, corretto per gli orologi atomici, e correlato tra i due siti

Global Positioning System



- GPS is funded by and controlled by the U. S. Department of Defense (DOD). While there are many thousands of civil users of GPS world-wide, the system was designed for and is operated by the U. S. military.
- GPS provides specially coded satellite signals that can be processed in a GPS receiver, enabling the receiver to compute position, velocity and time.
- Four GPS satellite signals are used to compute positions in three dimensions and the time offset in the receiver clock

GPS Nominal Constellation



24 satellites in 6 Orbital planes
4 satellites in each orbit plane
20.200 km altitudes,
55° inclination with respect to the equatorial
plane
12 hrs to orbit the earth

Stazioni permanenti



tripode

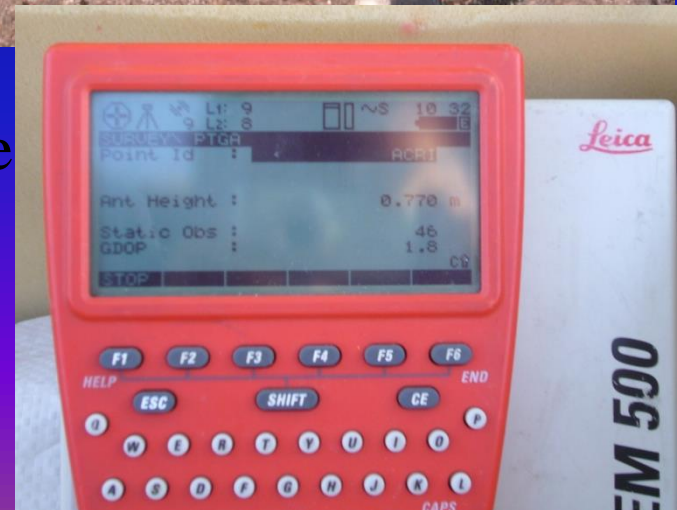


pilastrino

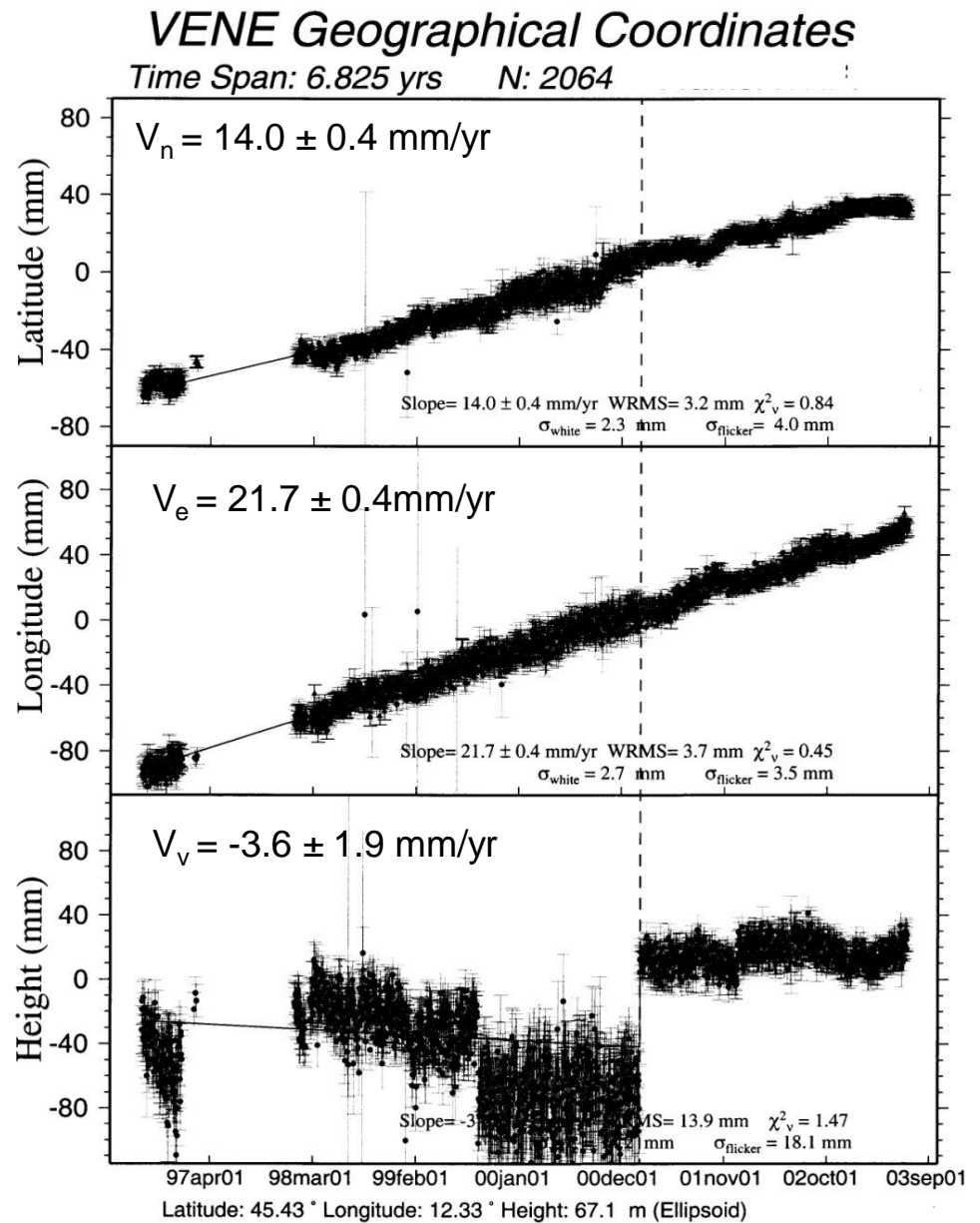
Stazioni non-permanenti



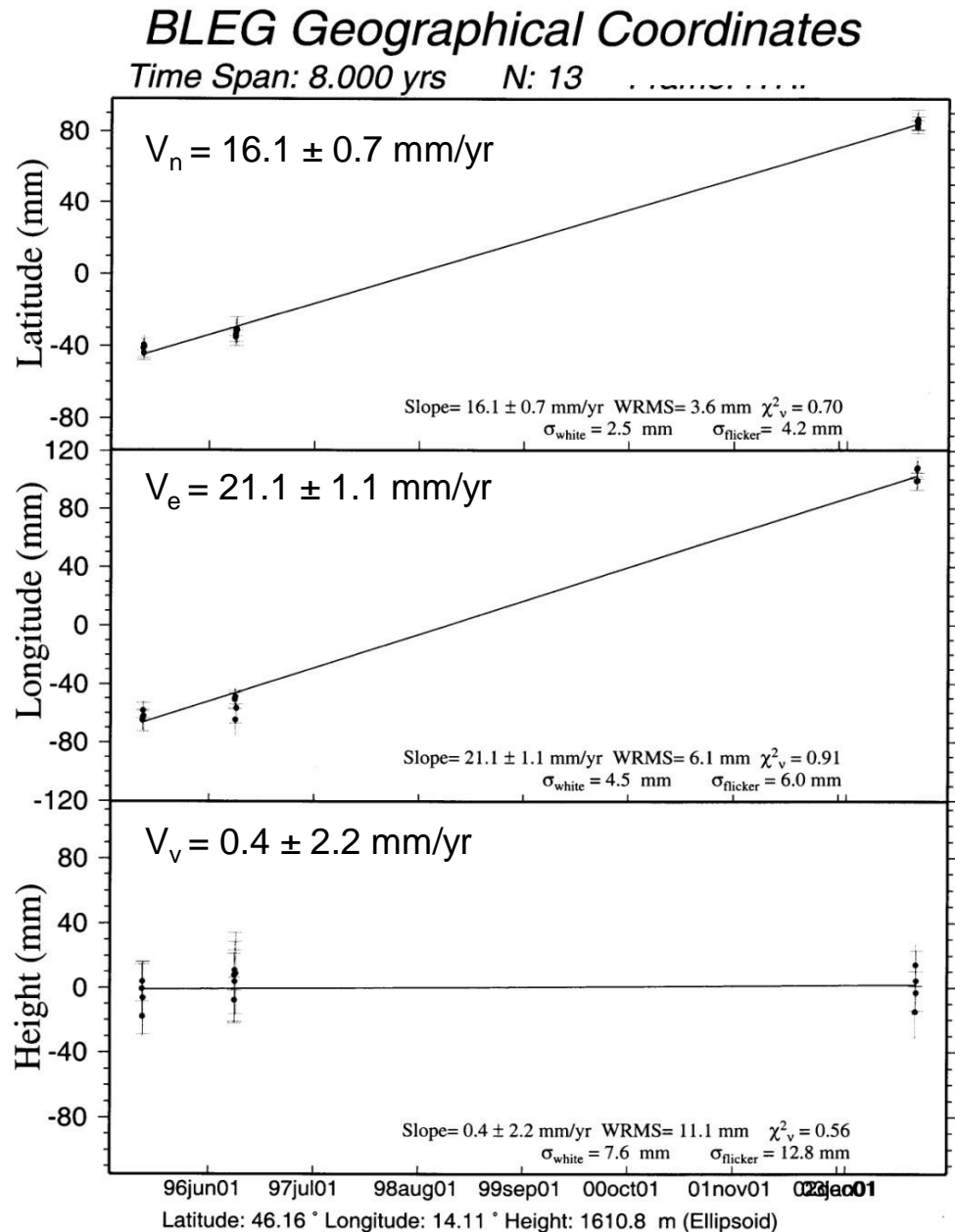
Campagna nelle
Isole Aleutine



Esempio di una serie temporale di stazione permanente in ITRF2000



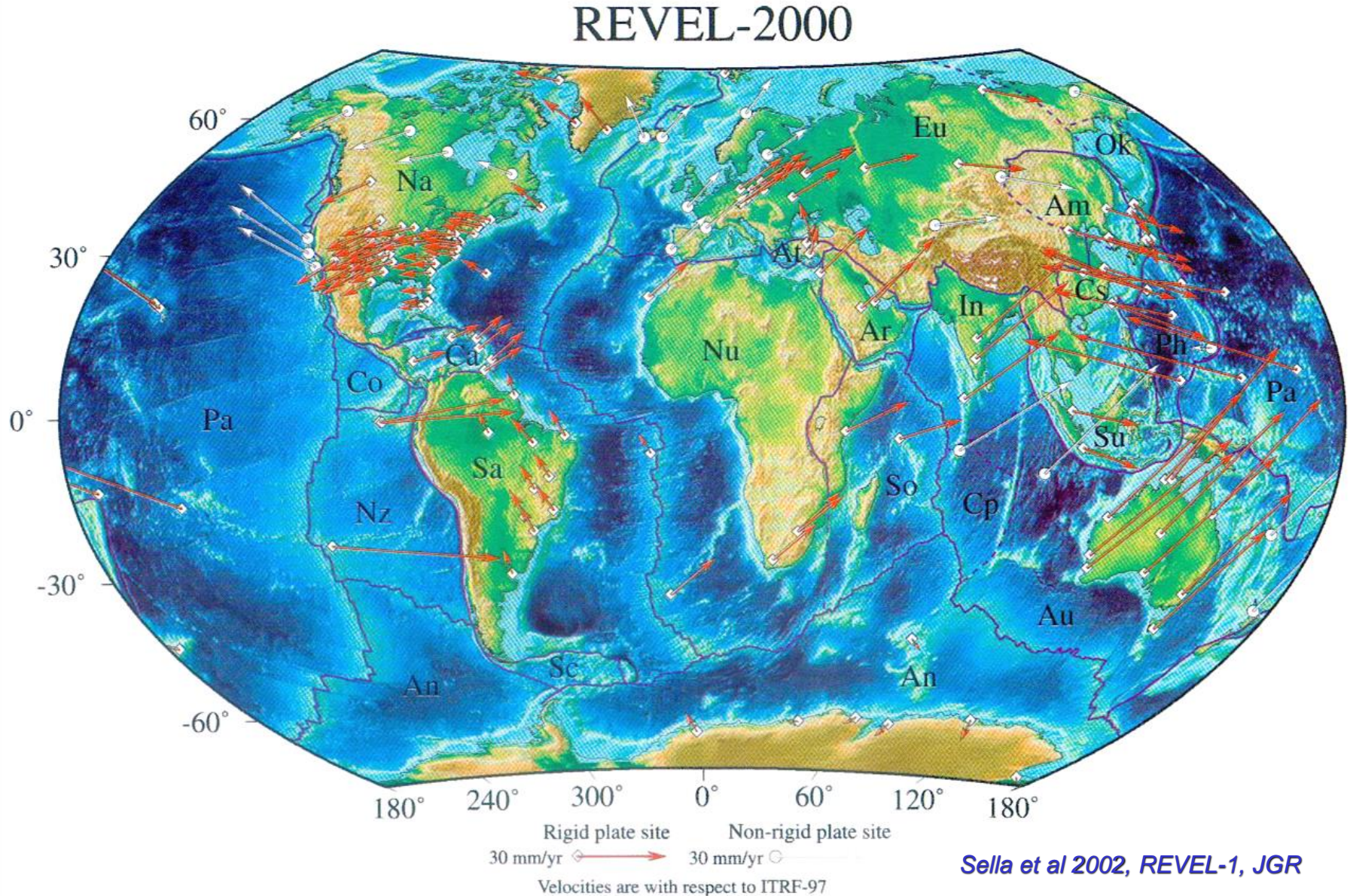
Esempio di una serie
temporale di stazione
non-permanente in
ITRF2000



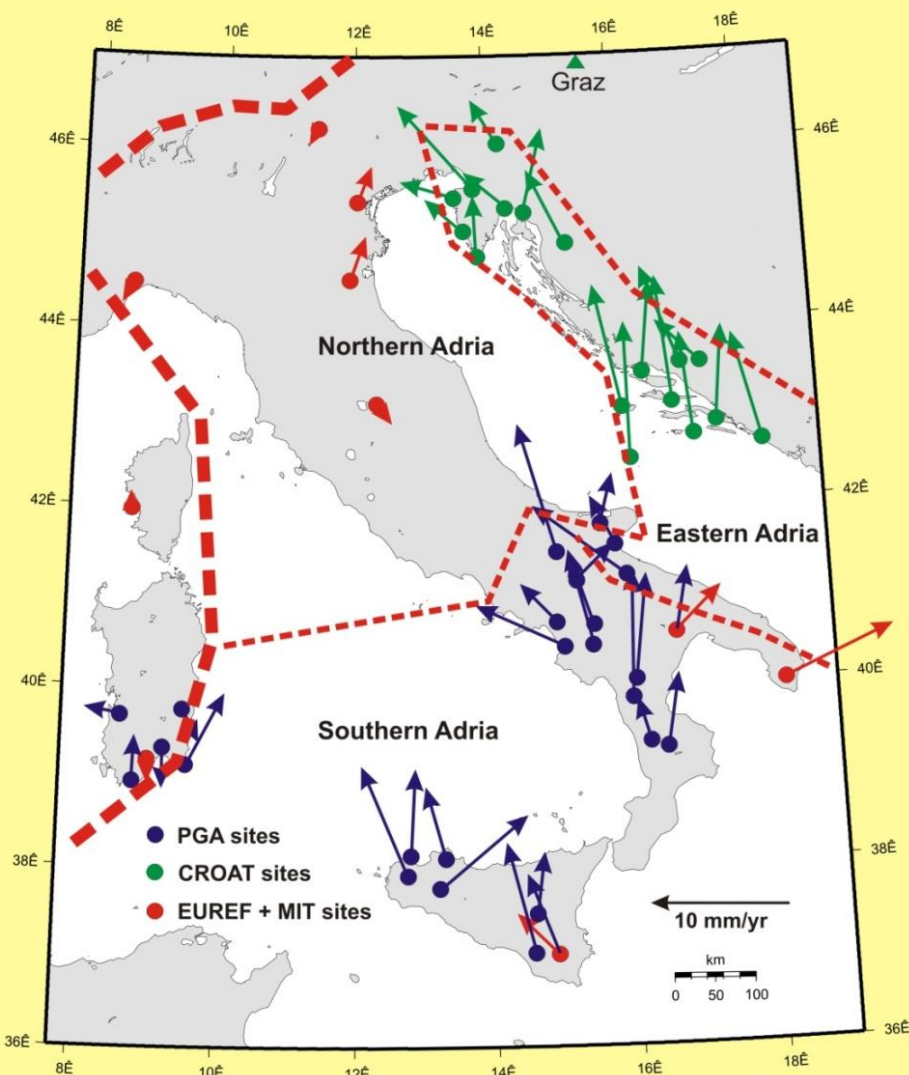
Applicazioni del GPS

1. Moto delle placche
2. Dislocazione co-sismica
3. Strain intersismico

2. Velocità globali delle placche – modello Revel 2000



Cinematica della microplacca adriatica



Sources: EUREF, McClusky et al., 2001, Altiner, 2001, and PGA

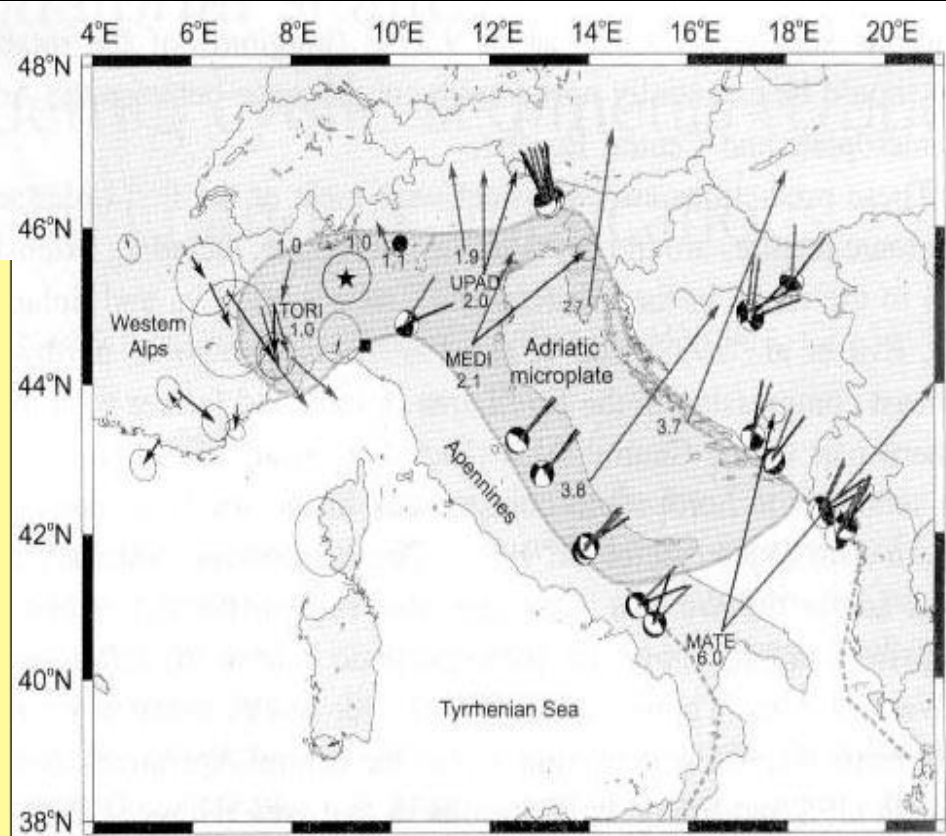


Figure 3. Kinematic model of Adriatic microplate. Solid symbols: star—our rotation pole for Adriatic microplate; circle—Anderson and Jackson's (1987) pole; square—Westaway's (1990). Black arrows—observed Global Positioning System

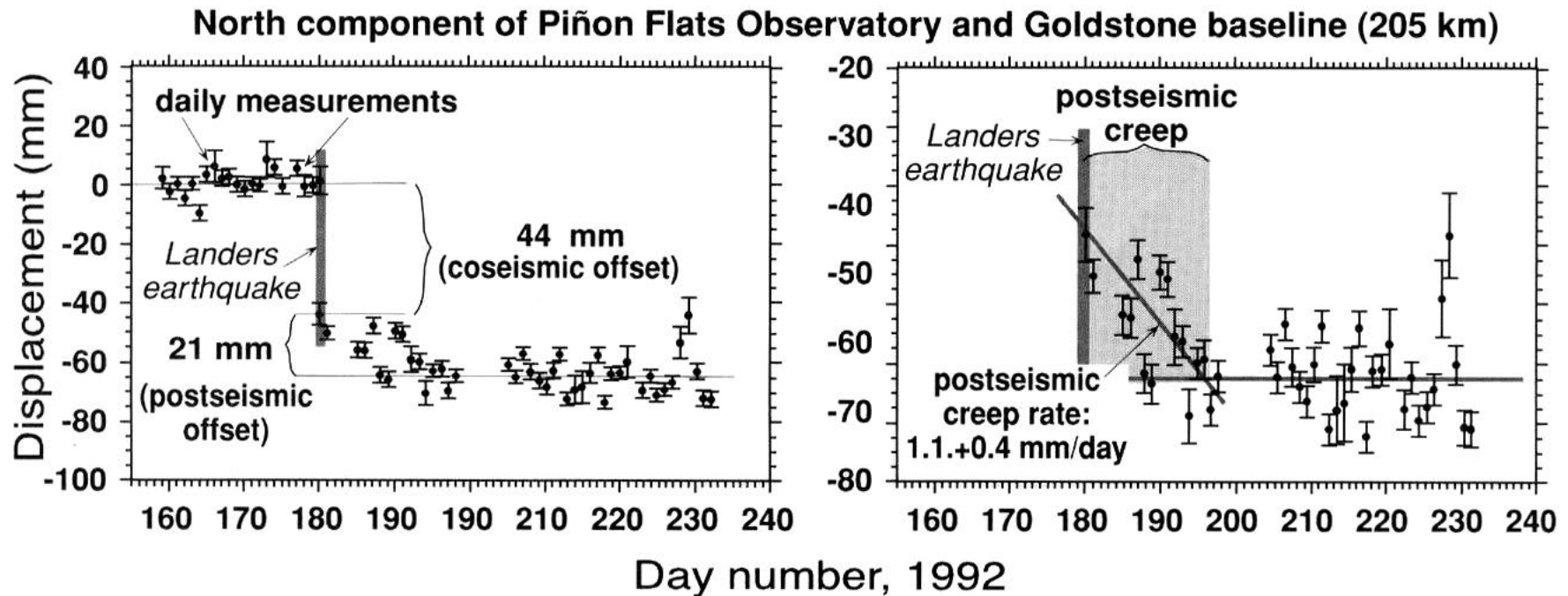
(Calais et al., 2003, *Geology*)

Oldow et alii, 2002, *Geology*

3. Dislocazioni Co-sismiche

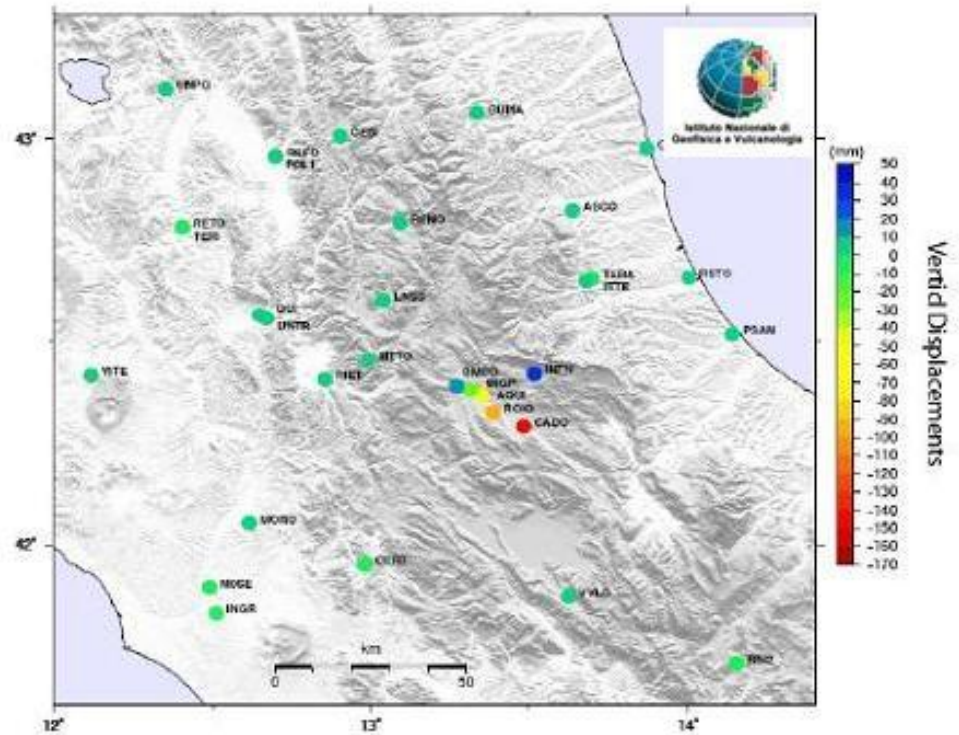
Effetti cosismici (terremoto di Landers) in stazioni GPS permanenti

FIGURE 5.13. Continuous GPS data collected prior to and after the June, 1992 magnitude 7.3 Landers earthquake in southern California



Despite the typical day-to-day variability of 5–15 mm, very precise positions are defined using multiple days of readings. An abrupt coseismic offset of 44 mm occurred during the earthquake. A remarkable aspect of this record is the post-seismic slip of 22 mm that occurred during the few weeks following the quake (right panel). This has never before been documented. Given the background noise in the observations, it is only with continuous GPS readings that this trend (1.1 mm/day) is observable. Modified after Bock et al. (1993).

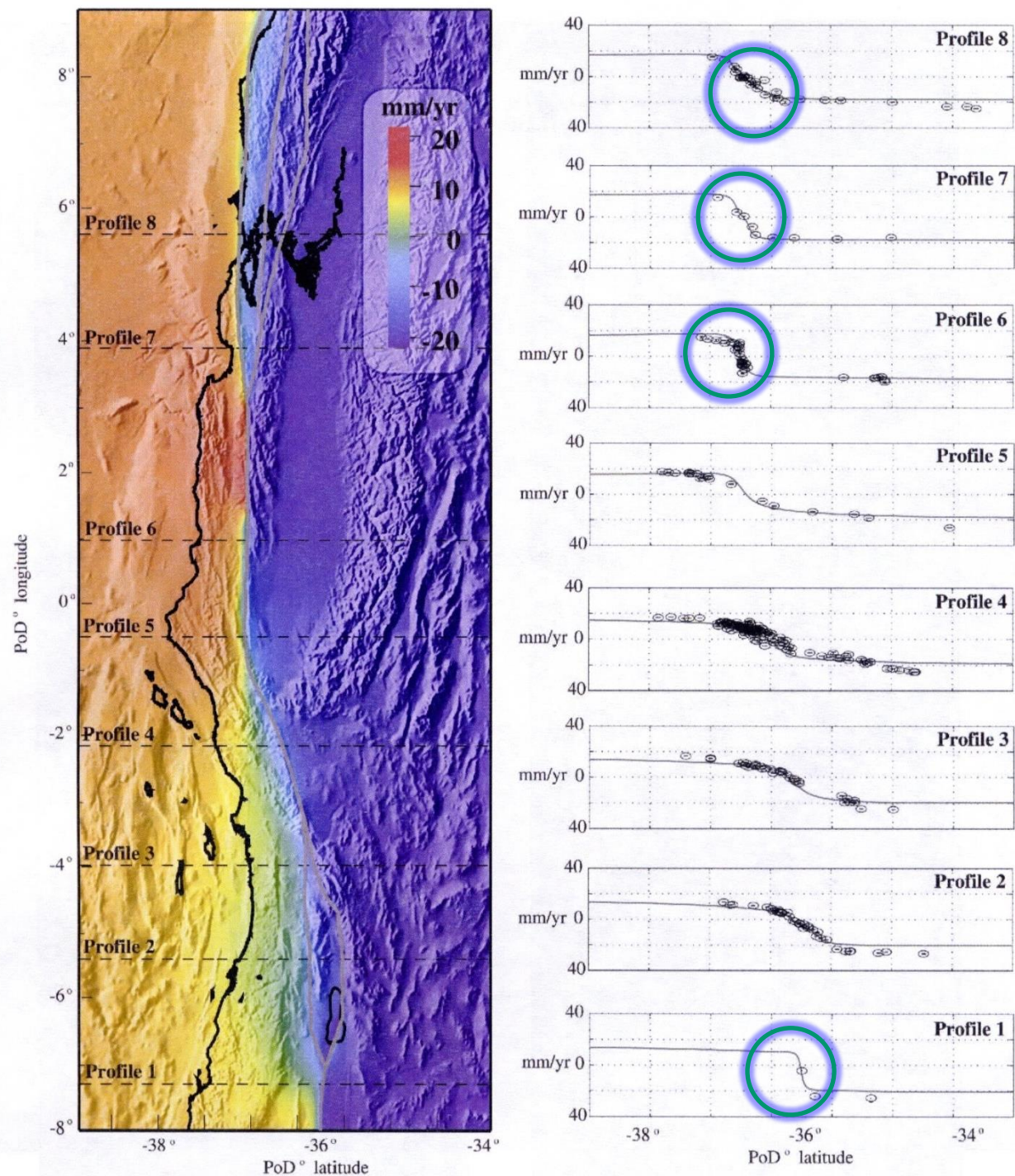
Terremoto aquilano 6 aprile 2009



3. Dislocazioni intersismiche

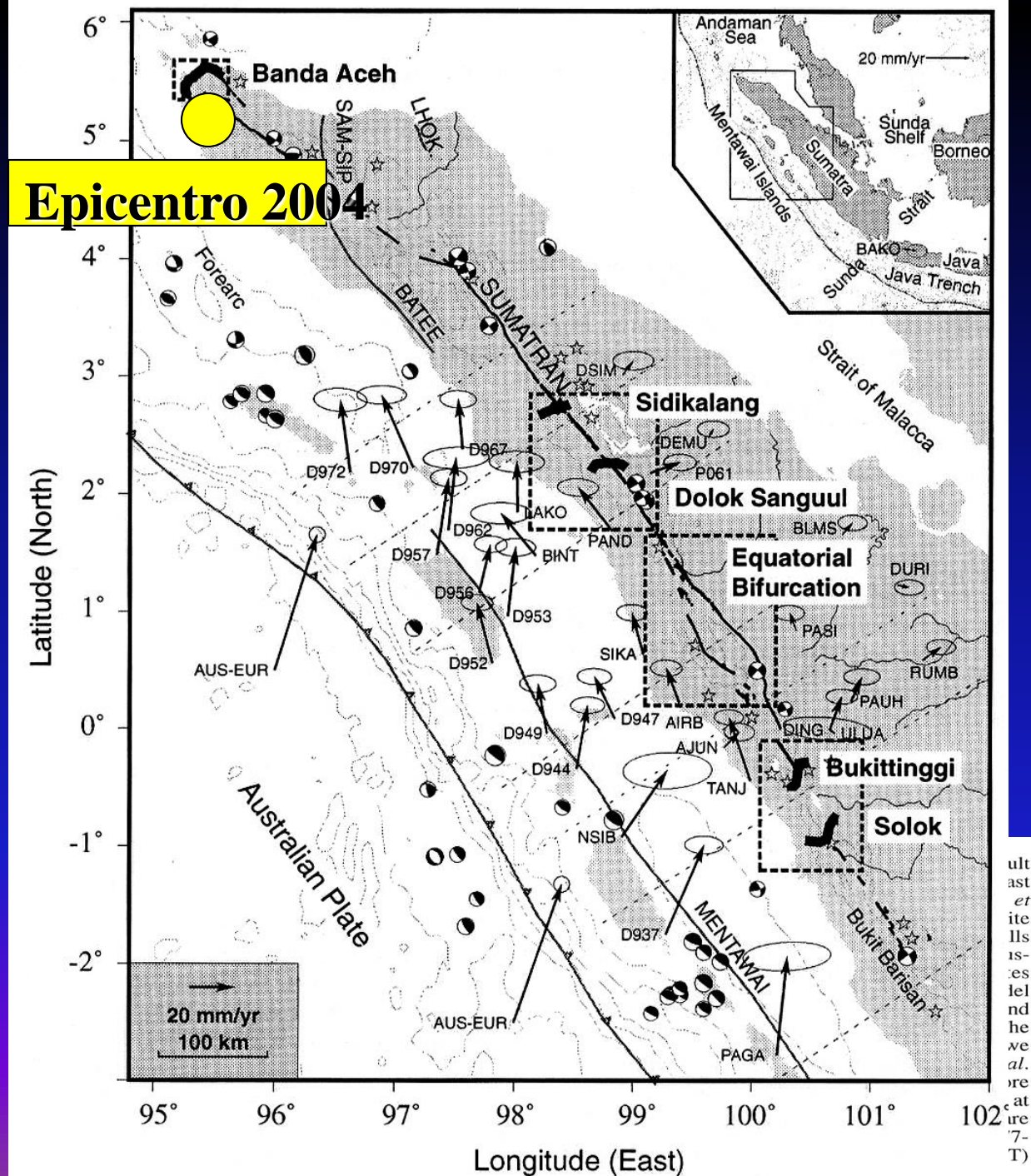
Velocità orizzontali
parallele alla San
Andreas Fault

(Smith & Sandwell, 2005)



*Faglia trascorrente:
Great Sumatran
Fault, e thrust di
subduzione, fossa di
Sumatra, Indonesia*

*Accumulo di strain
intersismico sulla
GSF
(misure GPS relative
a Eurasia) nel 2001*



Faglia trascorrente: Great Sumatran Fault, Indonesia

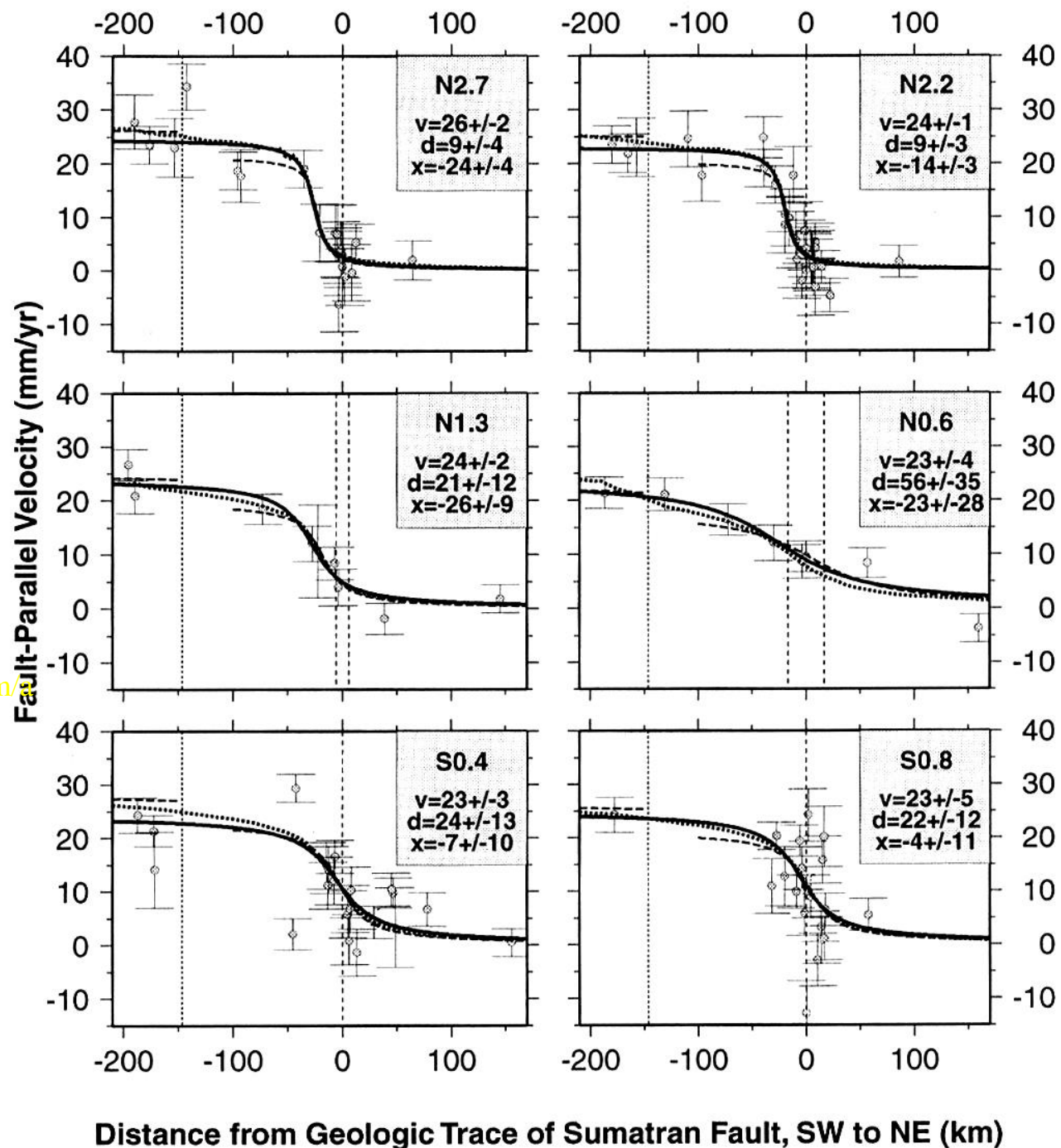
Profili perpendicolari alla faglia delle velocità GPS parallele alla faglia

v =dislocazione regionale (far-field), mm/yr

d =locking depth (km)

x =offset dalla SF (km)

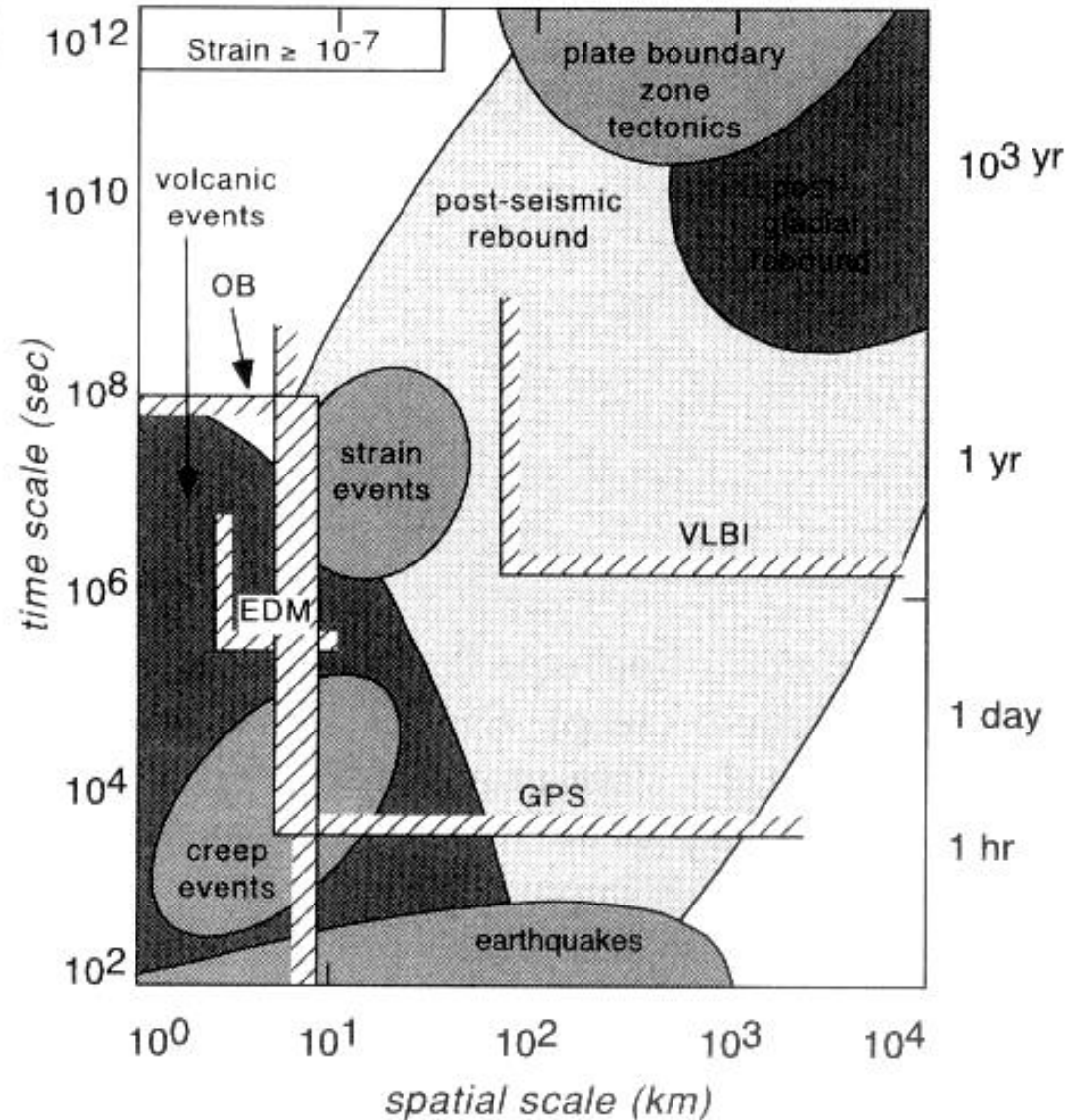
Linee tratteggiate: strands



Scale spaziali e temporali di vari processi geologici e tecniche geodetiche

OB=osservazione diretta
EDM=distanziometro
elettronico

FIGURE 5.1. Spatial and temporal scales of geological processes and of various geodetic techniques



Precisione dei metodi di geodesia tettonica

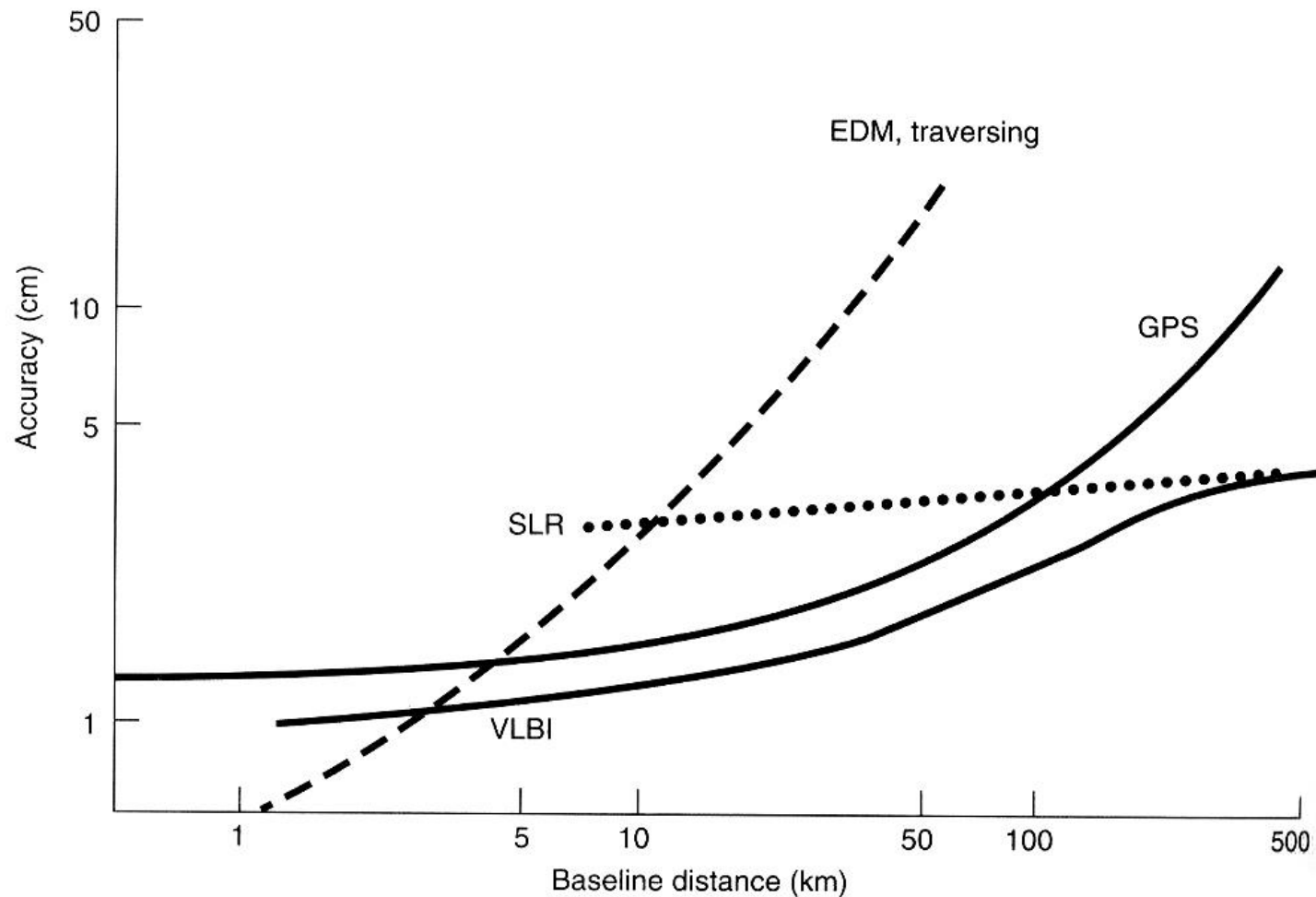


FIGURE 3.13

Accuracy as a function of baseline length for a variety of geodetic techniques. Electronic distance measurement, for example, is most accurate over baselines up to a few kilometers in length, but becomes decreasingly reliable (relative to the other techniques) over longer distances.

(After Wells, 1986. *Guide to GPS Positioning*. Canadian GPS Associates; Fredericton, NB)