



Sveučilište u Zagrebu  
RUDARSKO  
GEOLOŠKO  
NAFTNI FAKULTET



# STRUKTURNA GEOMORFOLOGIJA

**Bruno Tomljenović**

**Mjerenje tektonskih  
pomaka geodetskim  
metodama**

# Mjerenje tektonskih pomaka geodetskim metodama

Točnost mjerenja tektonskih pomaka u Zemljinoj kori najčešće zavise o:

- 1) Preciznosti geodetskih mjernih instrumenata, odnosno izboru metoda mjerenja
- 2) Režimu (brzini) tektonskih pomaka
- 3) Vremenskom trajanju geodetskih mjerenja

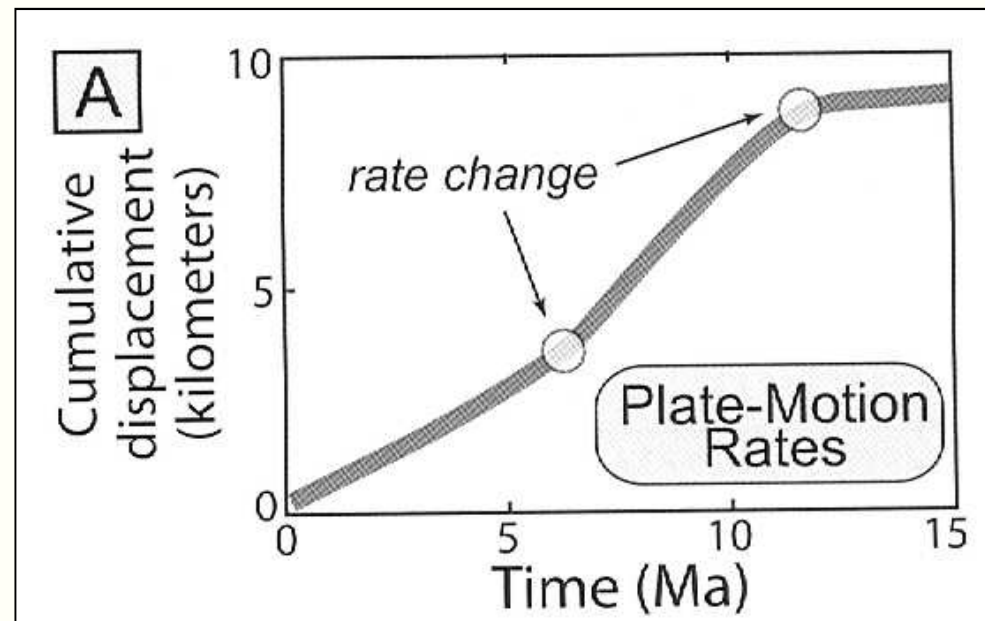
Npr. da bismo metodom čija je točnost u rasponu  $\pm 5$  cm pouzdano dokumentirali pomak po rasjedu koji iznosi **1 cm/god.**, potrebno je obavljati mjerenja u periodu od barem **5-10 godina**, odnosno po mogućnosti kroz period od **20 ili 30 godina** !

Metodom čija je točnost u rasponu  $\pm$  par mm, pomak po istom rasjedu moguće je pouzdano odrediti i nakon **2 godine** !



S obzirom na **tip tektonskih pomaka i njihovo vremensko trajanje** možemo pretpostaviti barem 3 moguća slučaja za koje će **vjerodostojnost trenutno izmjerenih tektonskih pomaka** pomoću geodetskih metoda biti različita:

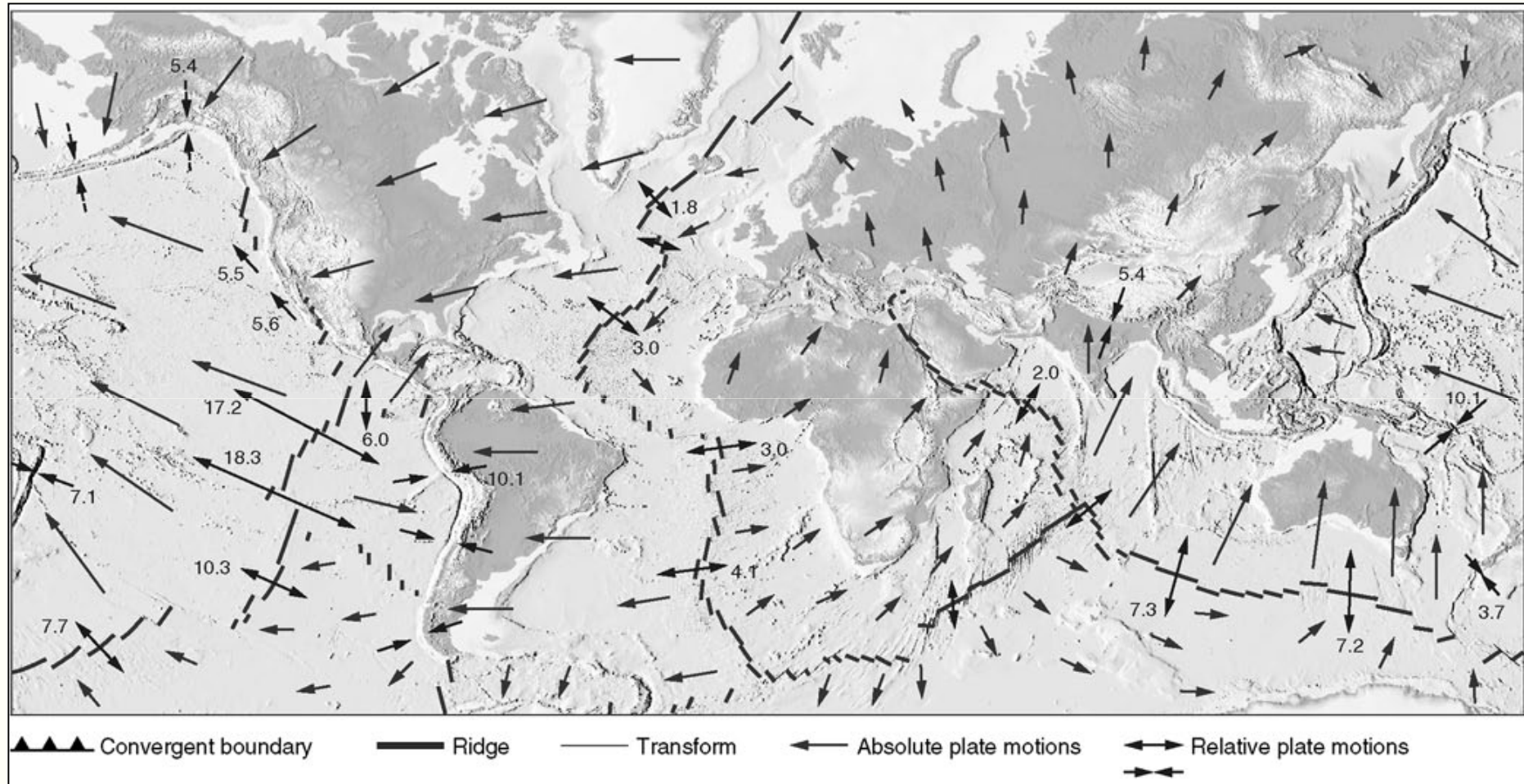
1) U slučaju geodetski izmjerenih trenutnih **pomaka tektonskih ploča** dobivene vrijednosti mogu se pouzdano ekstrapolirati kroz dugi vremenski period i to stoga jer su ti **pomaci postojani kroz dugi vremenski period.**



(Iz Burbank & Anderson, 2012)

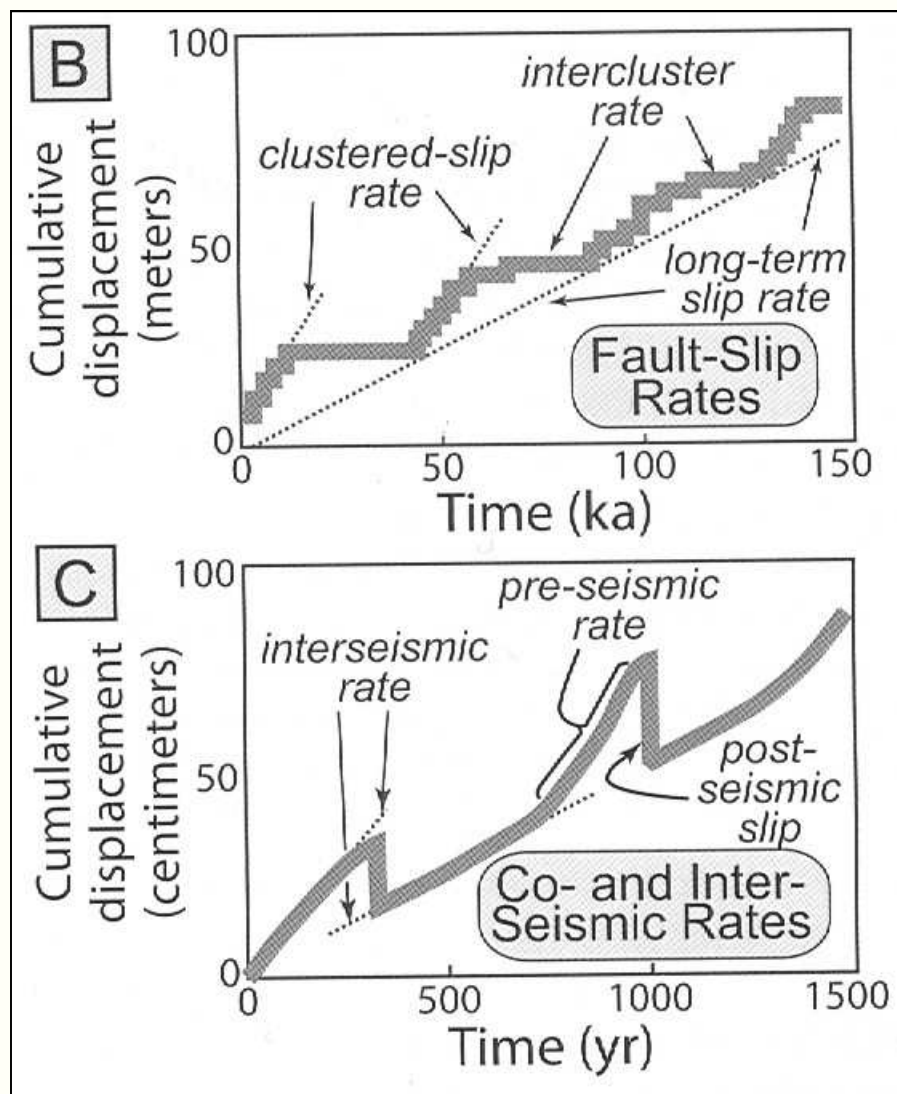


## Vektori pomaka glavnih tektonskih ploča u cm/god.



(Iz van der Pluijm & Marshak, 2004)





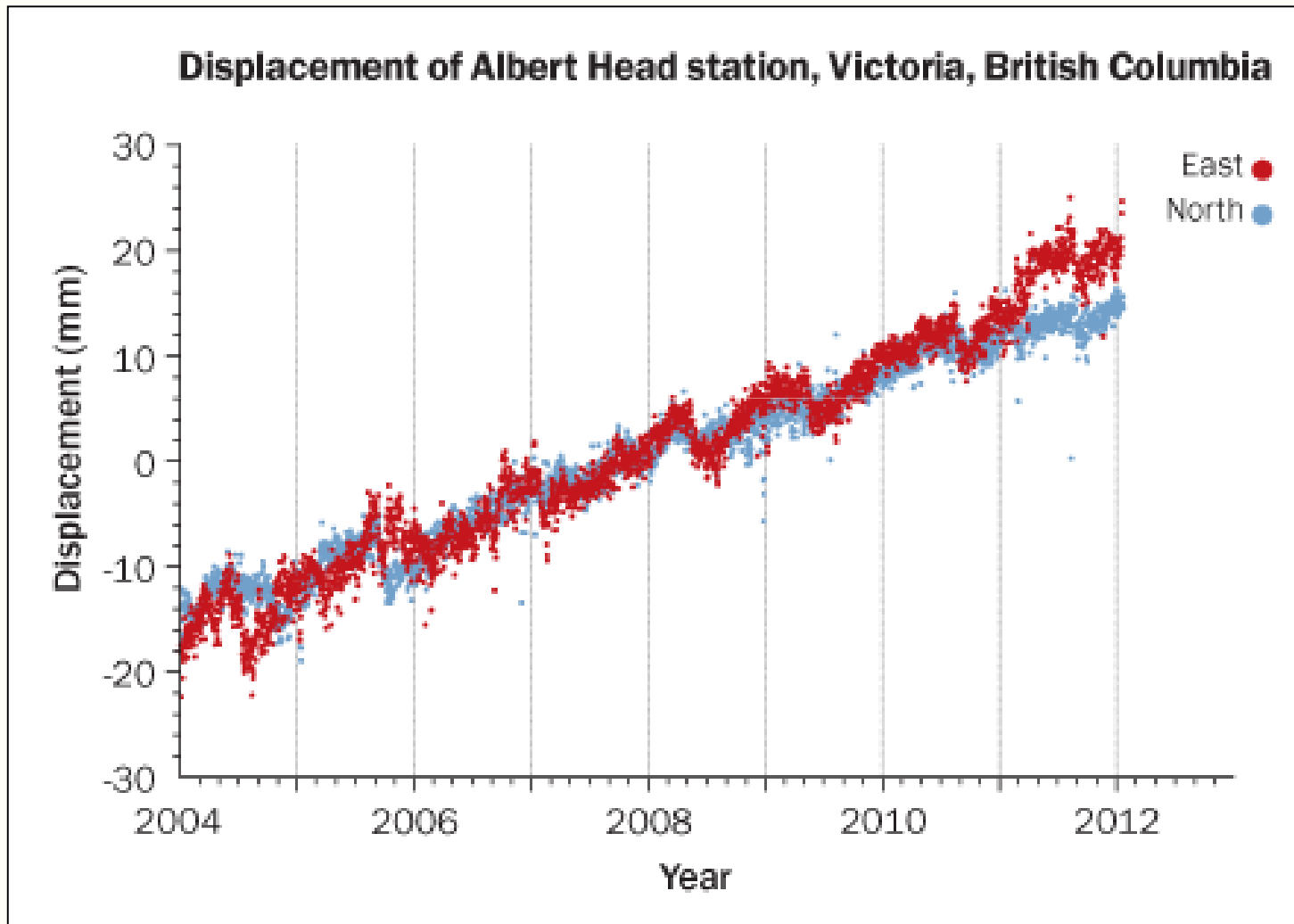
2) U slučaju tektonskih pomaka po rasjedima čija aktivnost najčešće nije vremenski postojana, trenutno izmjerene brzine pomaka u pravilu su veće ili manje od prosječne brzine pomaka tijekom duljeg vremenskog perioda.

3) Geodetski izmjereni pomaci na lokacijama koje su u neposrednoj blizini seizmički aktivnih rasjeda mogu značajno varirati (pokazujući čak i suprotan smjer pomaka) ovisno o pojedinim fazama aktivnosti i pomaka tijekom seizmičkog ciklusa rasjeda.

(Iz Burbank & Anderson, 2012)

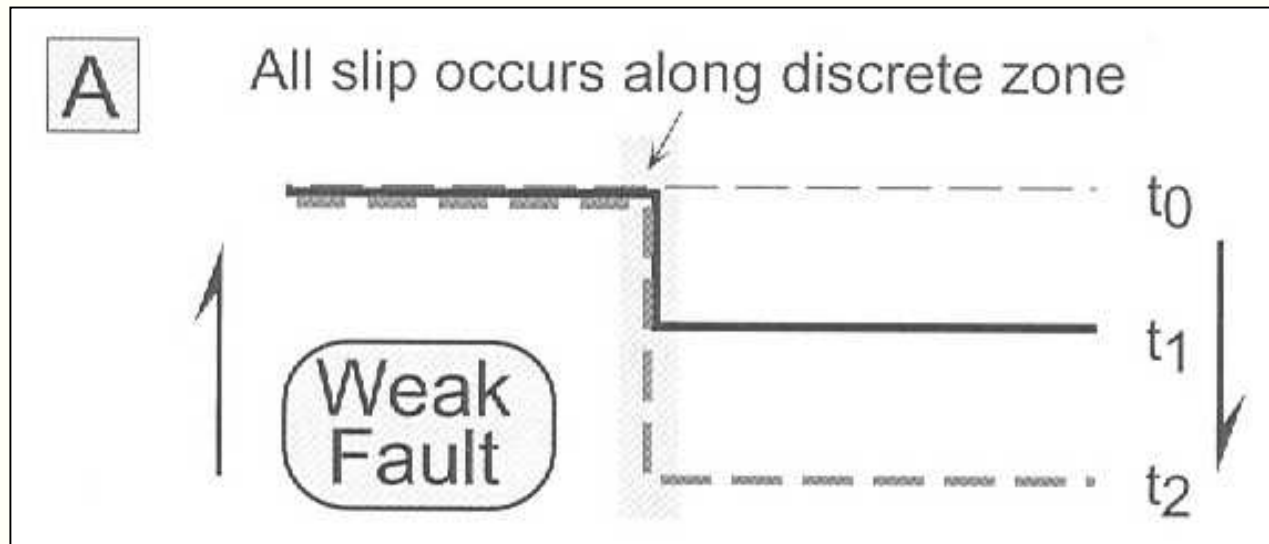


Primjer opetovane promjene smjera pomaka u zoni rasjeda na pacifičkoj obali sjeverne Amerike izmjerene na Albert Head GPS postaji na području British Columbijе (iz Witze, 2013).



# Konceptualni modeli deformacije i pomaka po rasjedima i rasjednim zonama

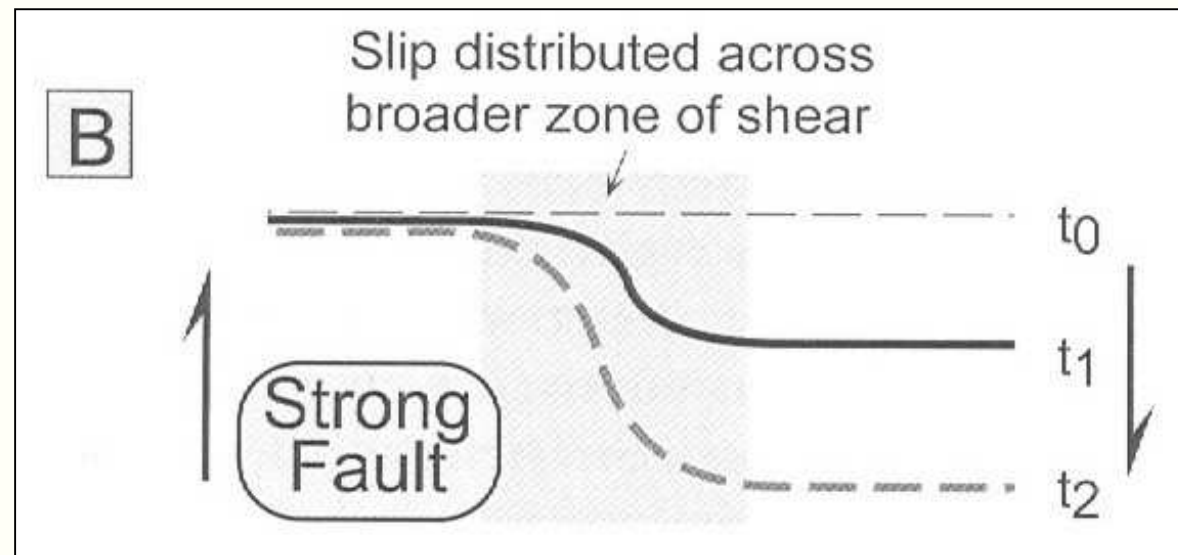
Idealizirani prikaz pomaka po desnom rasjedu kroz 3 vremenska intervala ( $t_0$ ,  $t_1$  i  $t_2$ ) u slučaju kad je pomak isključivo po rasjednoj plohi.



(Iz Burbank & Anderson, 2012)

## Konceptualni modeli deformacije i pomaka po rasjedima i rasjednim zonama

Idealizirani prikaz pomaka po desnom rasjedu kroz 3 vremenska intervala ( $t_0$ ,  $t_1$  i  $t_2$ ) u slučaju kad je pomak raspodijeljen u rasjednoj zoni.

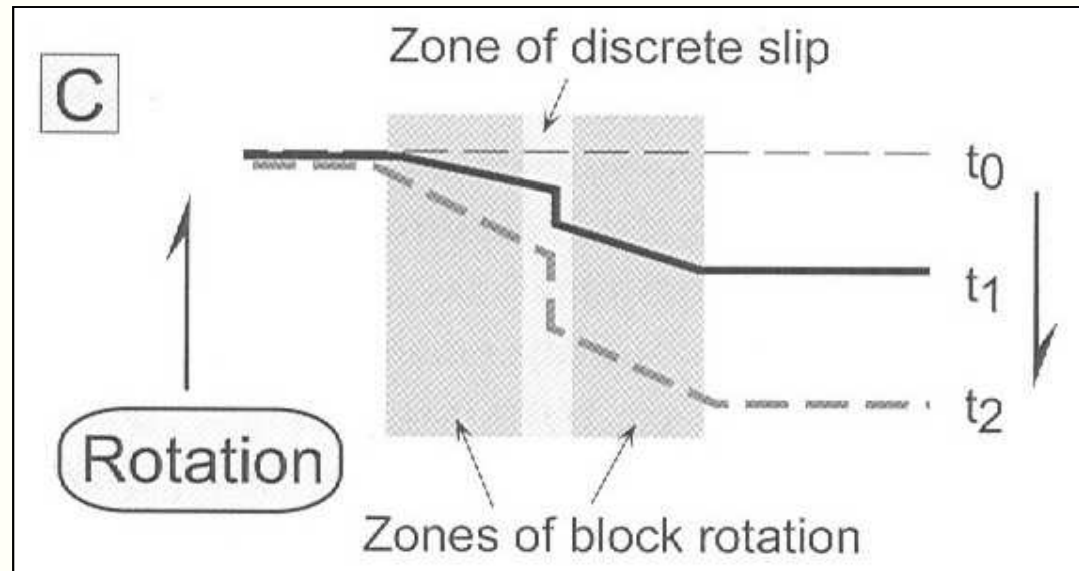


(Iz Burbank & Anderson, 2012)



# Konceptualni modeli deformacije i pomaka po rasjedima i rasjednim zonama

Idealizirani prikaz pomaka po desnom rasjedu kroz 3 vremenska intervala ( $t_0$ ,  $t_1$  i  $t_2$ ) u slučaju kad je pomak raspodijeljen dijelom po rasjednoj plohi, a dijelom i u rasjednoj zoni rotacijom rasjednih krila.



(Iz Burbank & Anderson, 2012)

Moderne metode mjerenja tektonskih u pravilu se dijele na:

### **# Terestričke (zemaljske)**

- 1) Triangulacijska / trilateracijska mjerenja
- 2) Precizno niveliranje

### **#) Izvanterestričke (izvanzemaljske)**

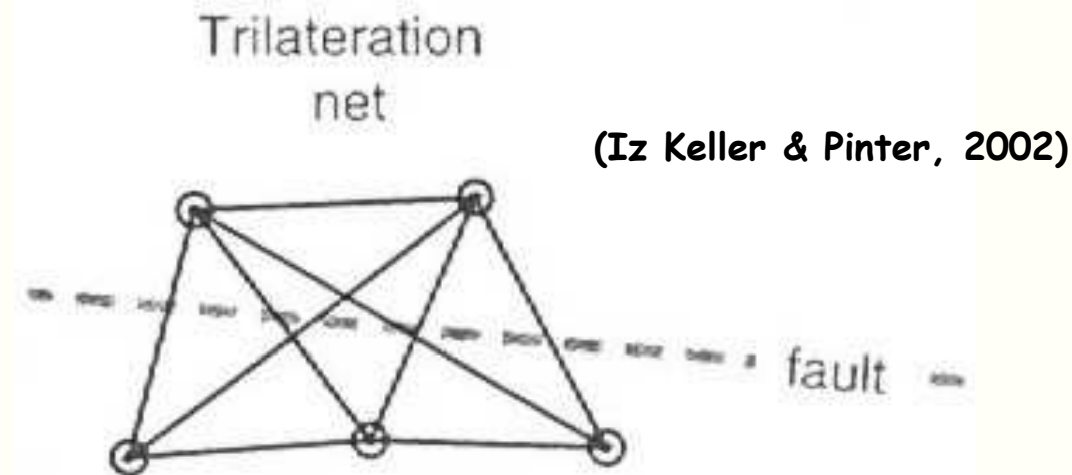
- 3) VLB interferometrija (Very Long Base Interferometry - VLBI)
- 4) Sustav globalnog pozicioniranja (Global Positioning Syst.- GPS)

Uz ove metode, radi prepoznavanja aktivnih rasjeda i njihovog preciznijeg lociranja u čestoj su uporabi i .....



## 1) Triangulacijska / trilateracijska mjerenja

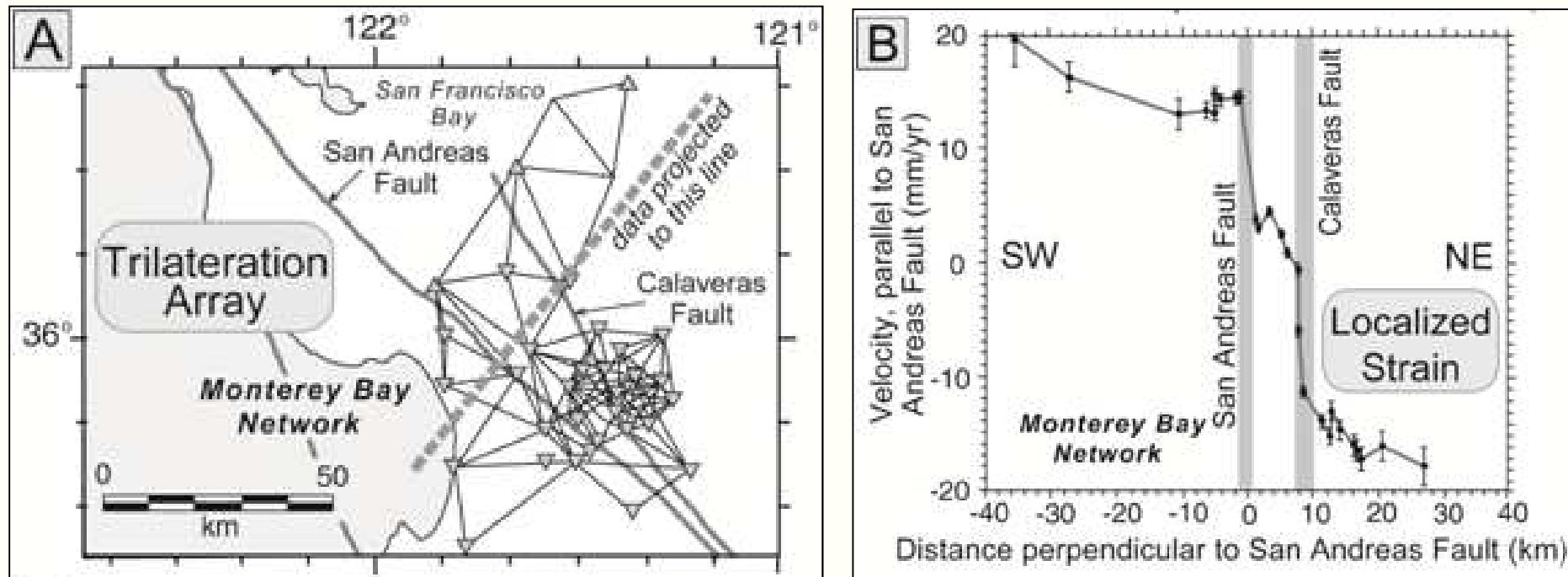
Provode se geodetskim mjerenjem položaja točaka u poligonskoj mreži na međusobnom razmaku od nekoliko kilometara, raspoređenih na oba krila rasjeda.



Opetovanim mjerenjem kutova i razmaka između točaka pomoću **teodolita** dobivaju se podaci o relativnim pomacima među točkama, u pravilu s točnošću od 3-6 cm na razmaku od 10 km, u novije vrijeme i pomoću laserskog mjerača čija je točnost oko 1 cm na 10 km.

Na ovaj način uglavnom se utvrđuje **horizontalna komponenta vektora pomaka po rasjedima !!**

## Primjer triangulacijske mreže preko rasjeda San Andreas u sjevernom dijelu Californije južno od San Francisca

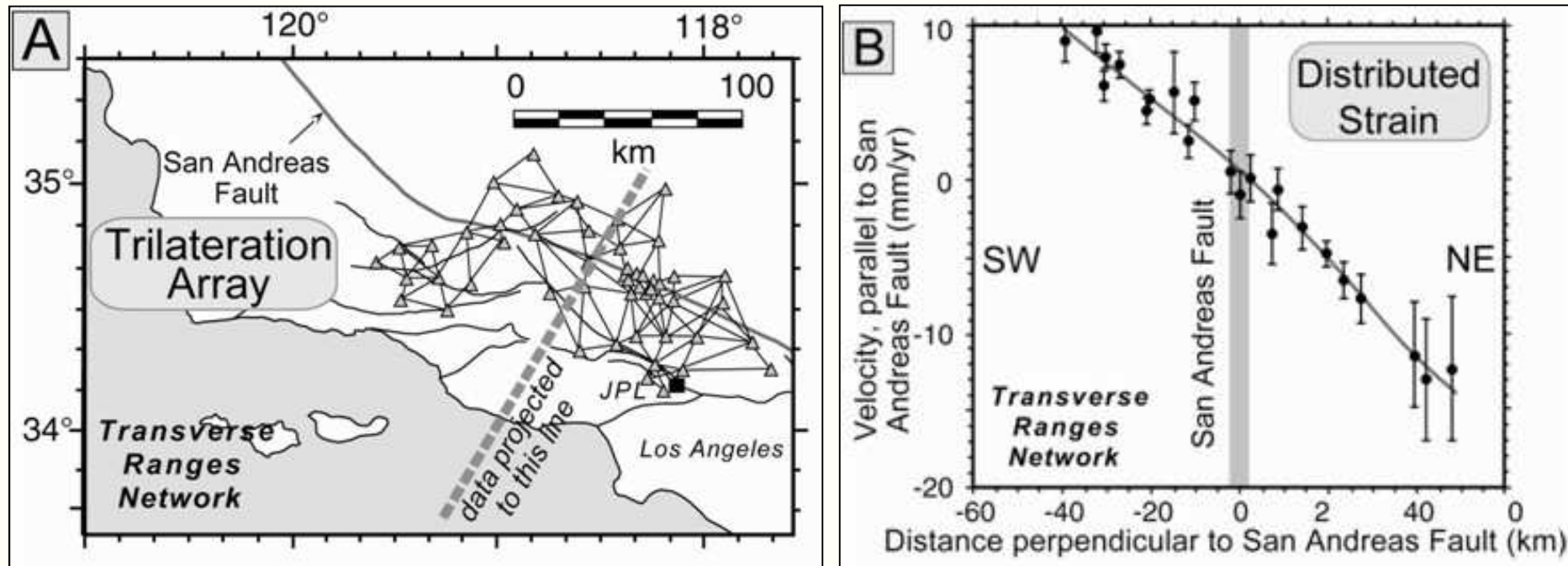


(Iz Burbank & Anderson, 2012; preuređeno prema Lisowski et al., 1991)

Rezultat opetovanih geodetskih mjerenja (1973-1989 g.) prikazan je na desnoj slici. Nagle promjene relativne brzine kretanja između točaka u triangulacijskoj mreži ukazuju na položaj San Andreas i Calaveras rasjeda koji predstavljaju lokalne zone deformacije i tektonskih pomaka.



## Primjer trilateracijskih mreža preko rasjeda San Andreas u južnom dijelu Californije sjeverno od Los Angelesa



(Iz Burbank & Anderson, 2012; preuređeno prema Lisowski et al., 1991)

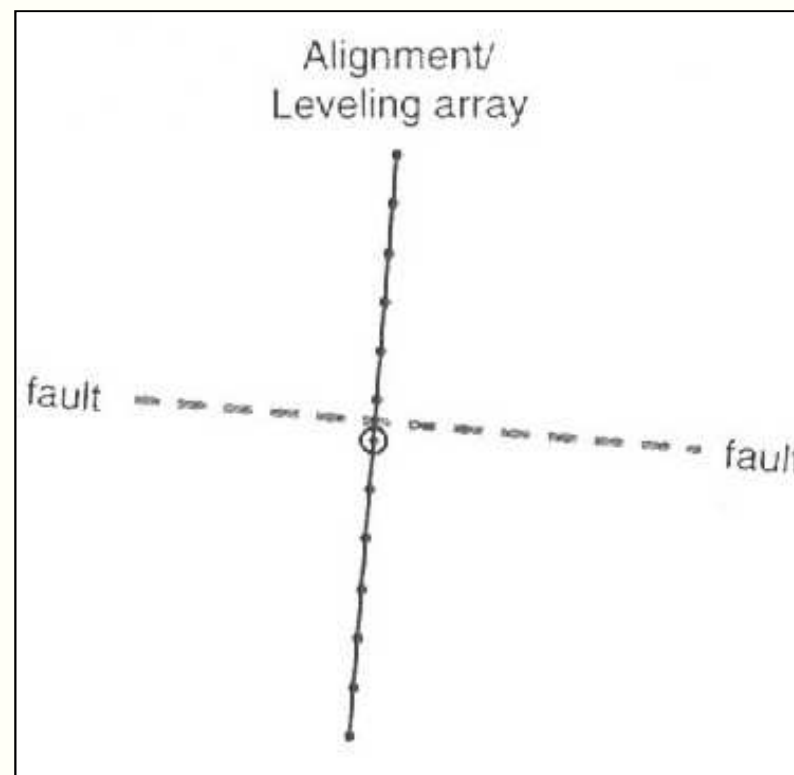
Iz rezultata opetovanih mjerenja prikazanih na desnoj slici vidljivo je da u ovom području ne postoji izrazit pomak po San Andreas rasjedu. Oko 25 mm/god. pomaka između krajnjih točaka vjerojatno se ostvaruje aseizmičkim pomacima po nizu manjih rasjeda.

## 2) Precizno niveliranje (Precise leveling)

Provodi se pomoću niza mjernih točaka raspoređenih po pravcu čije je pružanje okomito na pružanje rasjeda.

Pomoću teodolita ili laserskog mjerača vrši se opetovano mjerenje položaja točaka po profilu čime se određuje njihov relativan pomak u odnosu na jednu referentnu točku.

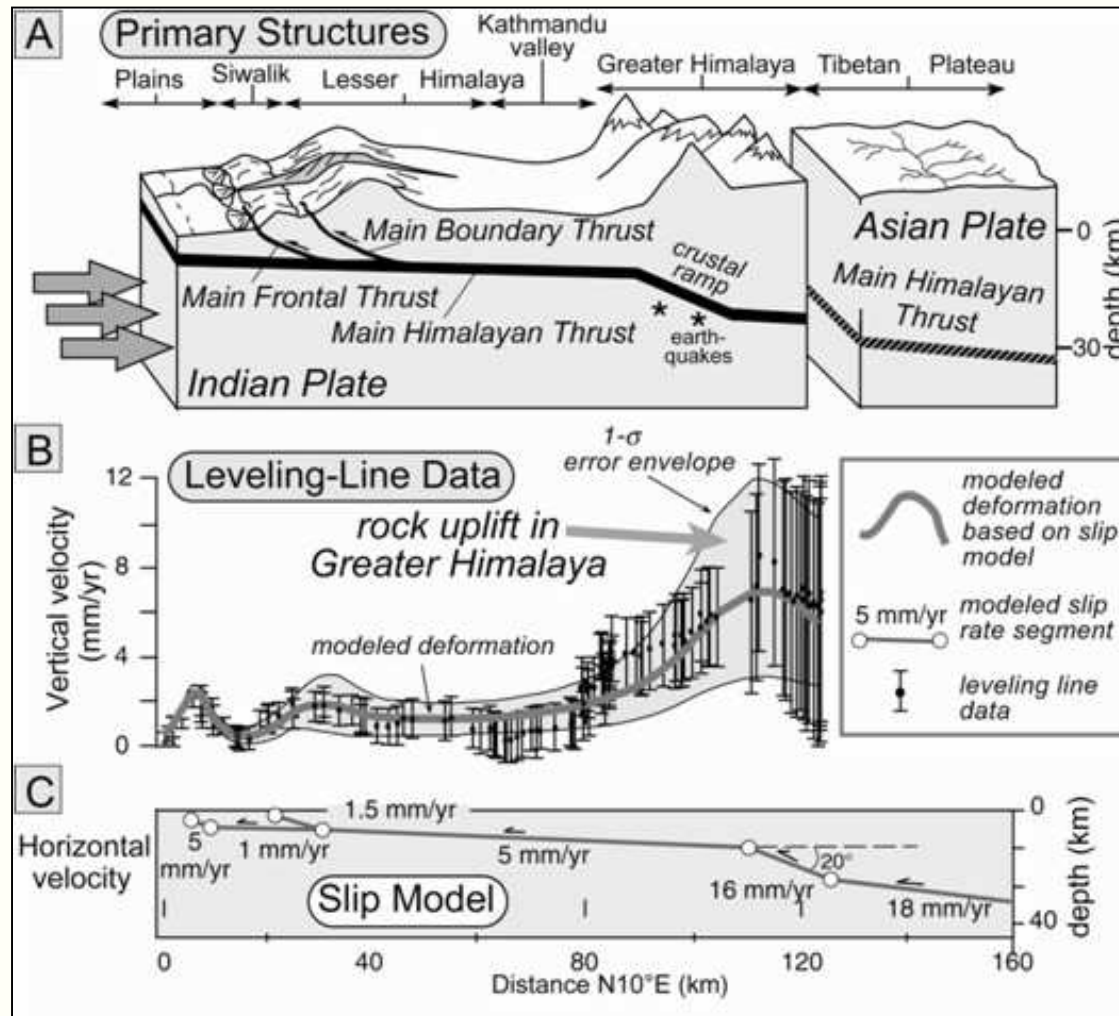
Na ovaj način utvrđuje se **horizontalna i vertikalna komponenta vektora pomaka po rasjedima !!**



(Iz Keller & Pinter, 2002)



## Primjer preciznog niveliranja okomito na pružanje Himalaja u središnjem Nepalu



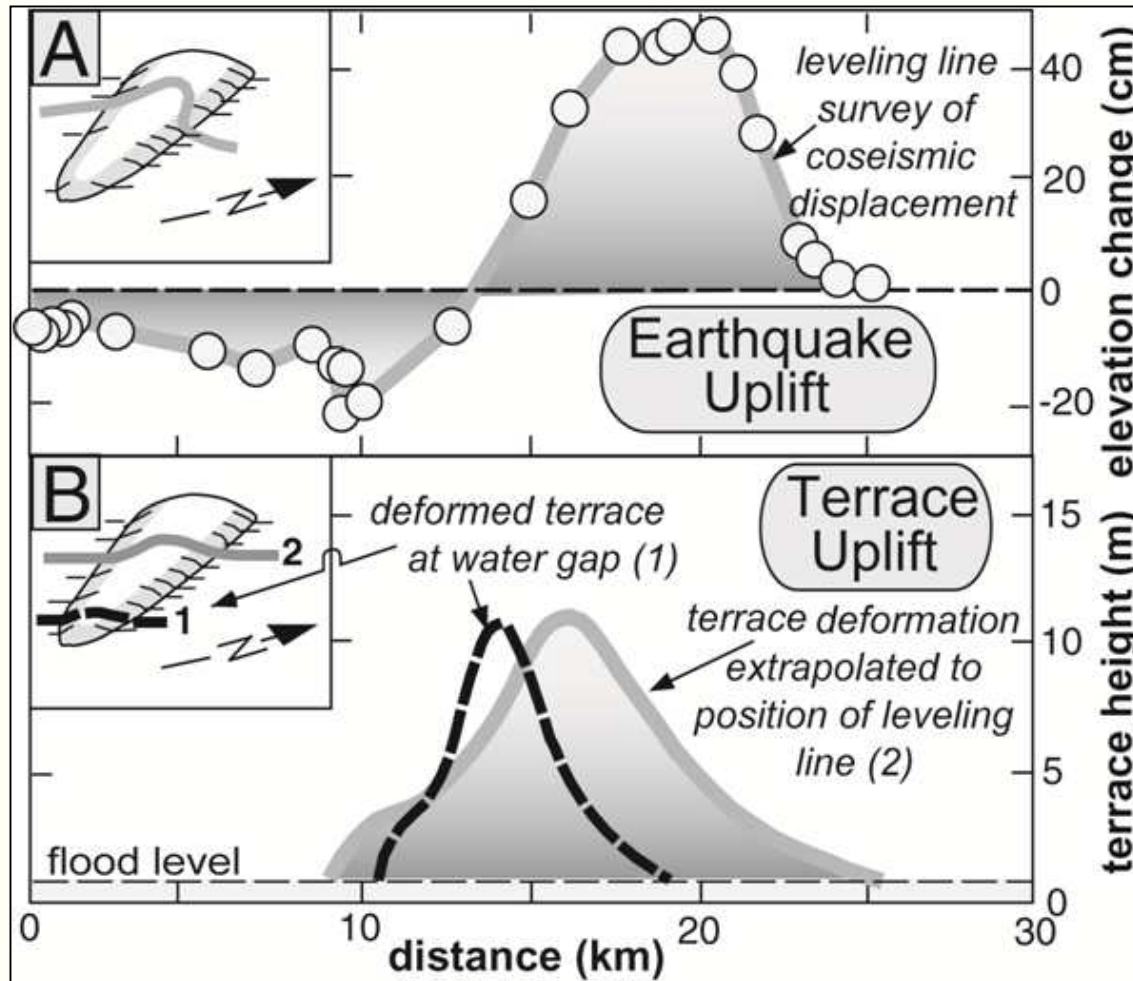
Usporedba A) strukturnog profila i topografije s B) geodetski izmjerenim vertikalnim pomacima i C) izrađenim modelom tektonskih pomaka.

Uočava se pretežito dobra podudarnost između topografije i izmjerenih vrijednosti vertikalnih pomaka, osim na krajnjem južnom dijelu profila.

(Iz Burbank & Anderson, 2012; preuređeno prema Jackson & Bilham, 1994)



## Primjer preciznog niveliranja nakon potresa u Californiji 1983.g.



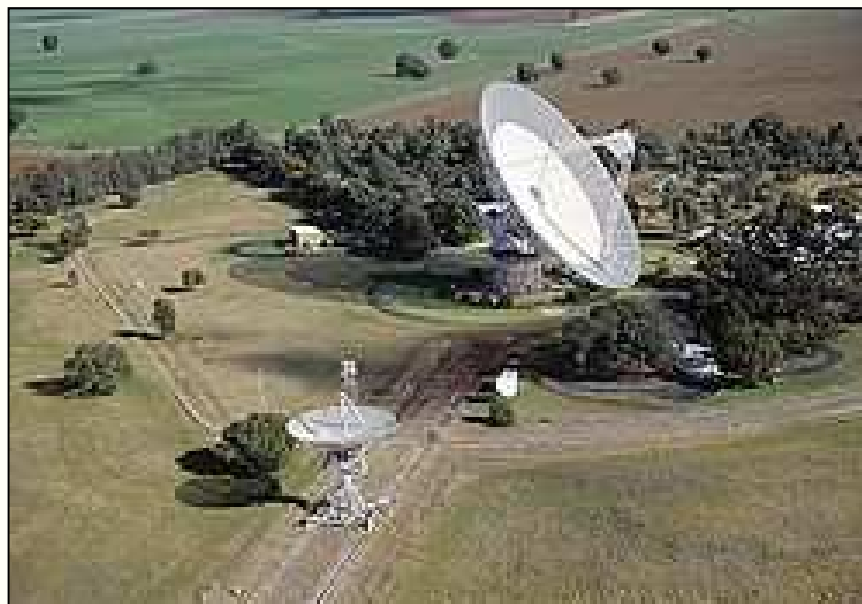
(Iz Burbank & Anderson, 2012; preuređeno prema King & Stein, 1983)

- A) Dijagram vertikalnih pomaka izmjerenih tijekom Coalinga potresa (M=6.5) metodom preciznog niveliranja.
- B) Profil deformirane riječne terase na čelu antiklinale. Izrazita podudarnost između dviju krivulja ukazuje na vjerojatnu povezanost između deformacije riječne terase i niza potresnih događaja kakav je zabilježen 1983. g.



### 3) VLB interferometrija (Very Long Base Interferometry - VLBI)

Ovom metodom određuju se **pomaci tektonskih ploča** i to pomoću radioteleskopa razvijenih krajem 60-tih godina prošlog stoljeća. Za mjerenje pomaka koriste se dva ili više radioteleskopa, međusobno udaljeni više stotina ili tisuća kilometara, koji bilježe signal vangalaktičkih radio izvora (najčešće kvazara). S obzirom na njihovu veliku udaljenost ti izvori predstavljaju fikse, referentne točke mjerenja, pa je svaka zabilježena promjena udaljenosti između radioteleskopa i radio izvora posljedica pomaka mjernih stanica na Zemlji.



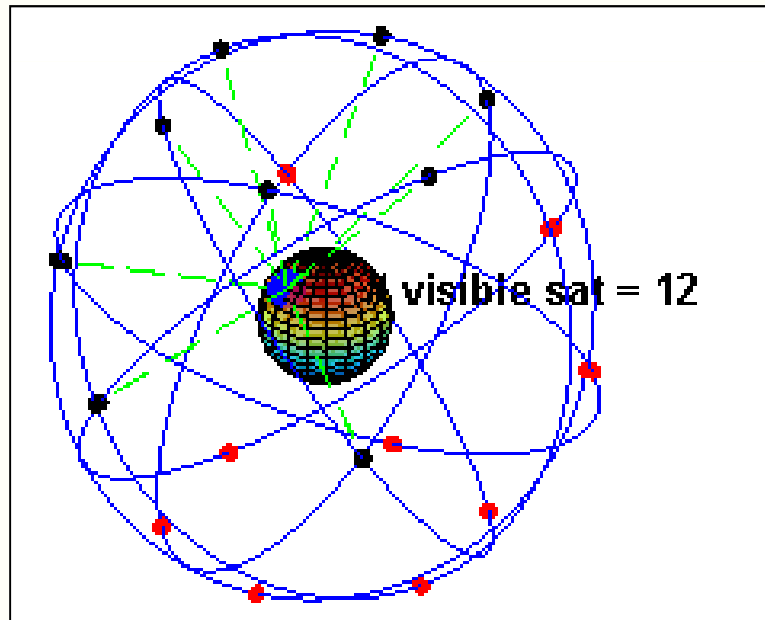
Za sustavno mjerenje apsolutnih pomaka tektonskih ploča ovom metodom danas se koristi oko 40 VLBI stanica diljem svijeta, s preciznošću mjerenja od oko  $\pm 1$  mm/god. po horizontalnoj i oko  $\pm 2-3$  mm/god. po vertikalnoj osi.



#### 4) GPS mjerenje (Global Positioning System)

Ovom geodetskom metodom određuje se položaj točke za Zemlji pomoću kodiranih radio signala s oko 30 satelita Ministarstva obrane SAD-a koji kruže oko Zemlje (vidi detaljan opis metode u Lapaine et al. "GPS za početnike").

Točnost odredbe položaja pomoću GPS mjerenja ovisi o kvaliteti prijamnika, a kod preciznih instrumenata je u rasponu od **par mm do 1 cm po horizontalnoj osi** te **par cm po vertikalnoj osi**.



Prikaz konstelacije GPS satelita sa Zemljom u središtu. Broj satelita koje registriira GPS prijamnik na Zemlji se mijenja tijekom vremena (preuzeto s [http://hr.wikipedia.org/wiki/Global\\_Positioning\\_System](http://hr.wikipedia.org/wiki/Global_Positioning_System))

Mjerenje tektonskih pomaka GPS metodom u pravilu se provodi na dva načina:

**1) Permanentnim mjerenjem položaja u mreži stalnih geodetskih točaka:**

Omogućava vrlo precizna i kontinuirana mjerenja pomaka (npr. u periodu prije, za vrijeme i nakon potresnog događaja), ali zahtijevaju i znatna financijska sredstva zbog skupe opreme koja je "zarobljena" na jednom mjestu". Ovaj tip mreža instaliran je u Japanu, na Taiwanu i duž zapadne obale Amerike s preko 1000 stalnih geodetskih točaka čiji su podaci javno dostupni na adresama:

<http://www.unavco.org/> ; <http://pbo.unavco.org/data>

**2) Povremenim (kampanjskim) mjerenjem položaja u mreži geodetskih točaka:**

Češća je metoda mjerenja, jer omogućuje da se manji broj dostupnih GPS prijamnika seli s točke na točku nakon određenog vremena mjerenja. Na geodetskim točkama, koje su valjano izabrane da bi se izbjegao utjecaj slijeganja, puzanja ili klizanja tla i podloge, u pravilu se načini betonski stup na koji se postavlja mjerni uređaj.



Izgled stupa nadzemne stabilizacije geodetske mjerne točke u okolici Zagreba (iz Pribičević et al., 2007).



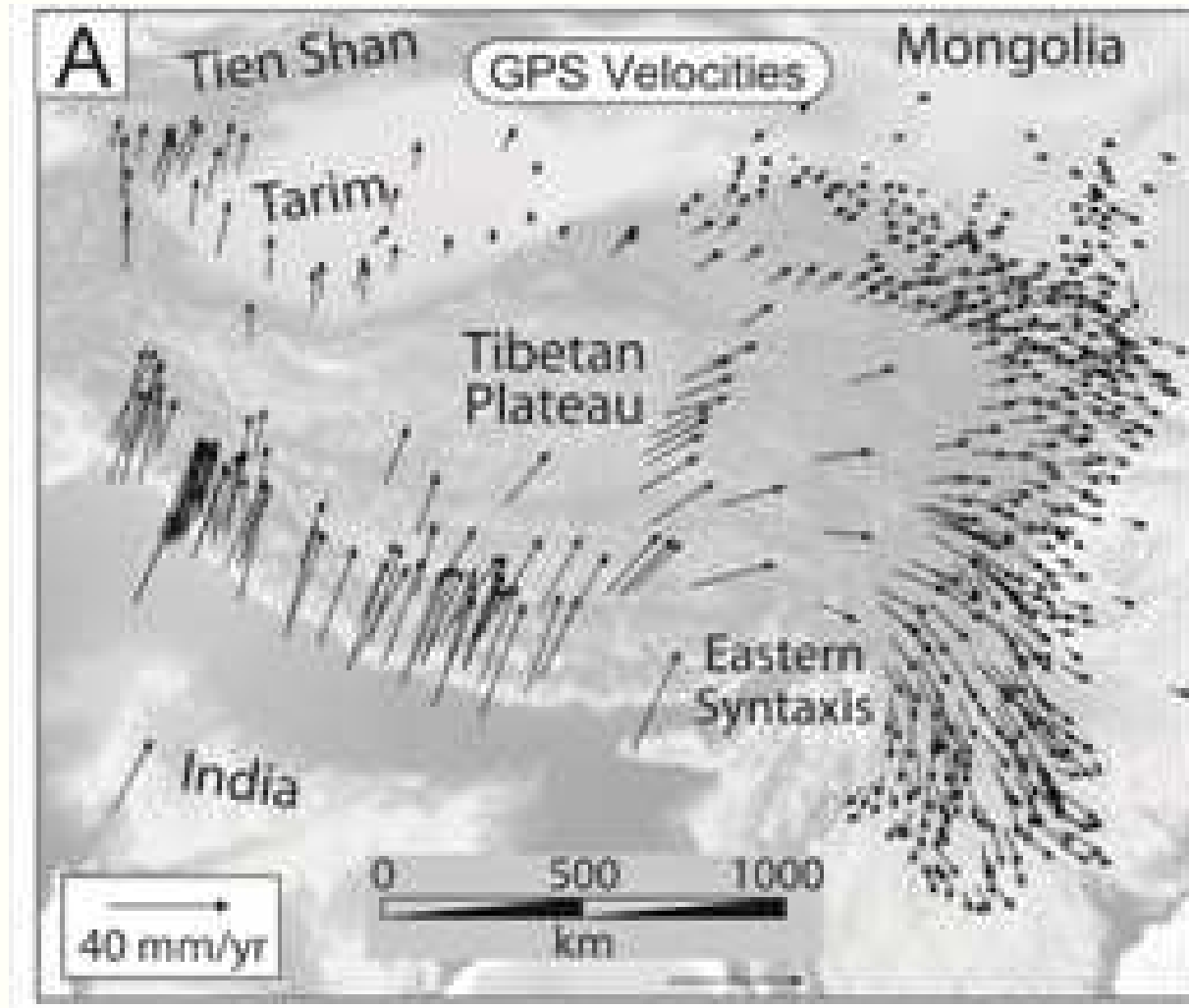
**Preciznost podataka o tektonskim pomacima GPS metodom** osim o kvaliteti instrumenta i kvaliteti geodetske mjerne točke (postolja i podloge) ovisi i o vremenskom trajanju mjerenja - u pravilu što je dulje vrijeme mjerenja na istim točkama (permanentno ili povremeno) to su i podaci precizniji. Npr. pouzdani podaci GPS mjerenja u trajanju od 24 sata mogu varirati u **rasponu od 4-5 mm**, što se može smanjiti ukoliko se mjerenja nastave kroz više dana, a svakako i tijekom duljeg vremenskog perioda.

Nadalje, 4 važna čimbenika utječu na izmjerene položaje GPS metodom:

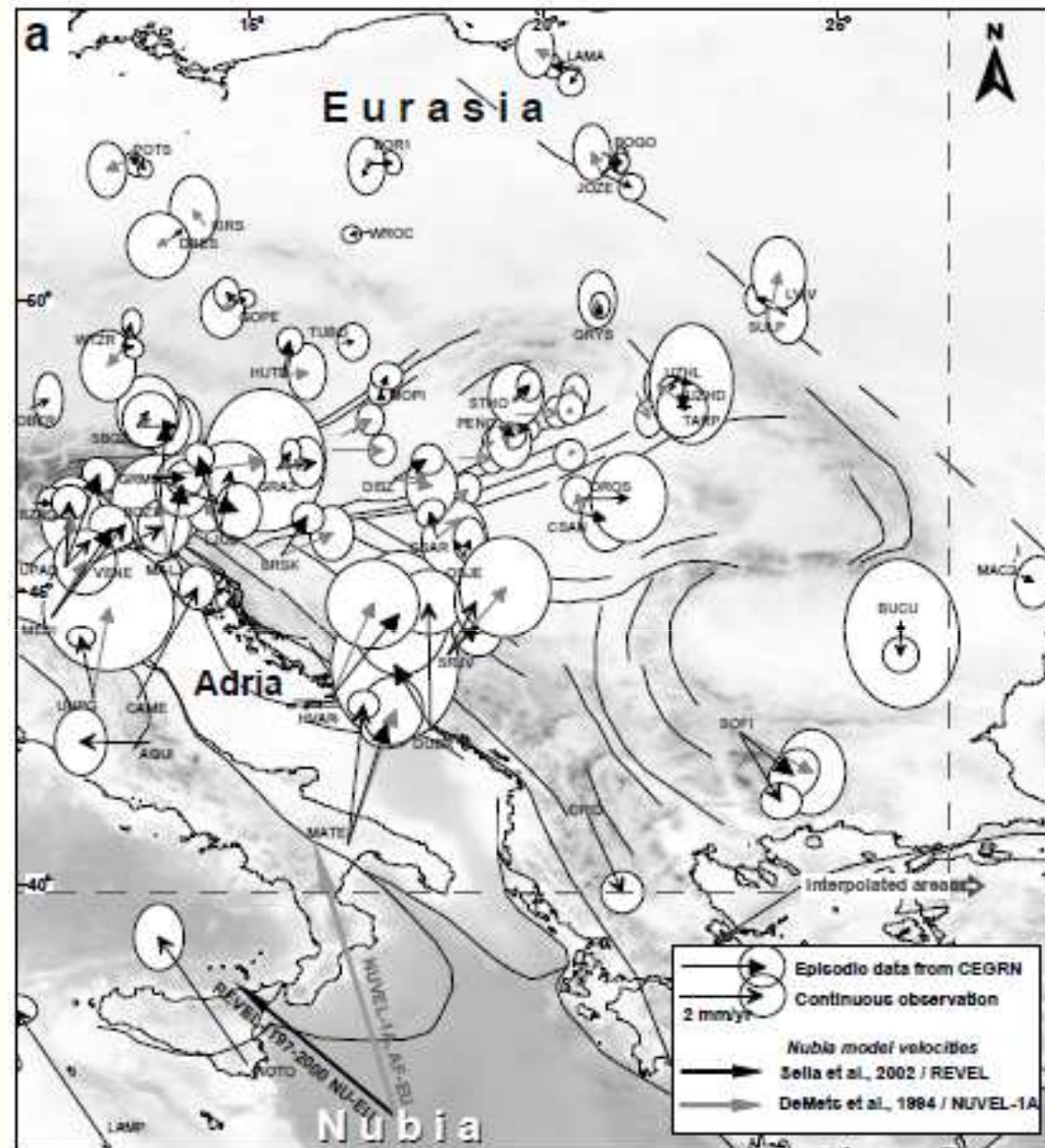
- 1) Relativni pomak među tektonskim pločama, deformacije i pomaci regionalnog karaktera;
- 2) Lokalni seizmički i aseizmički pomaci po rasjedima;
- 3) Sezonska promjena razine vodnog lica koja utječe na dizanje i spuštanje Zemljine površine, i
- 4) Greške u mjerenjima zbog oscilacija atmosferskih uvjeta, prijenosa i prijama GPS signala.



Primjer: Vektori pomaka određeni GPS metodom u području kolizije između Indijske i Euro-azijske ploče u odnosu na referentnu točku u sjevernom dijelu Azije (prema Meade, 2007)

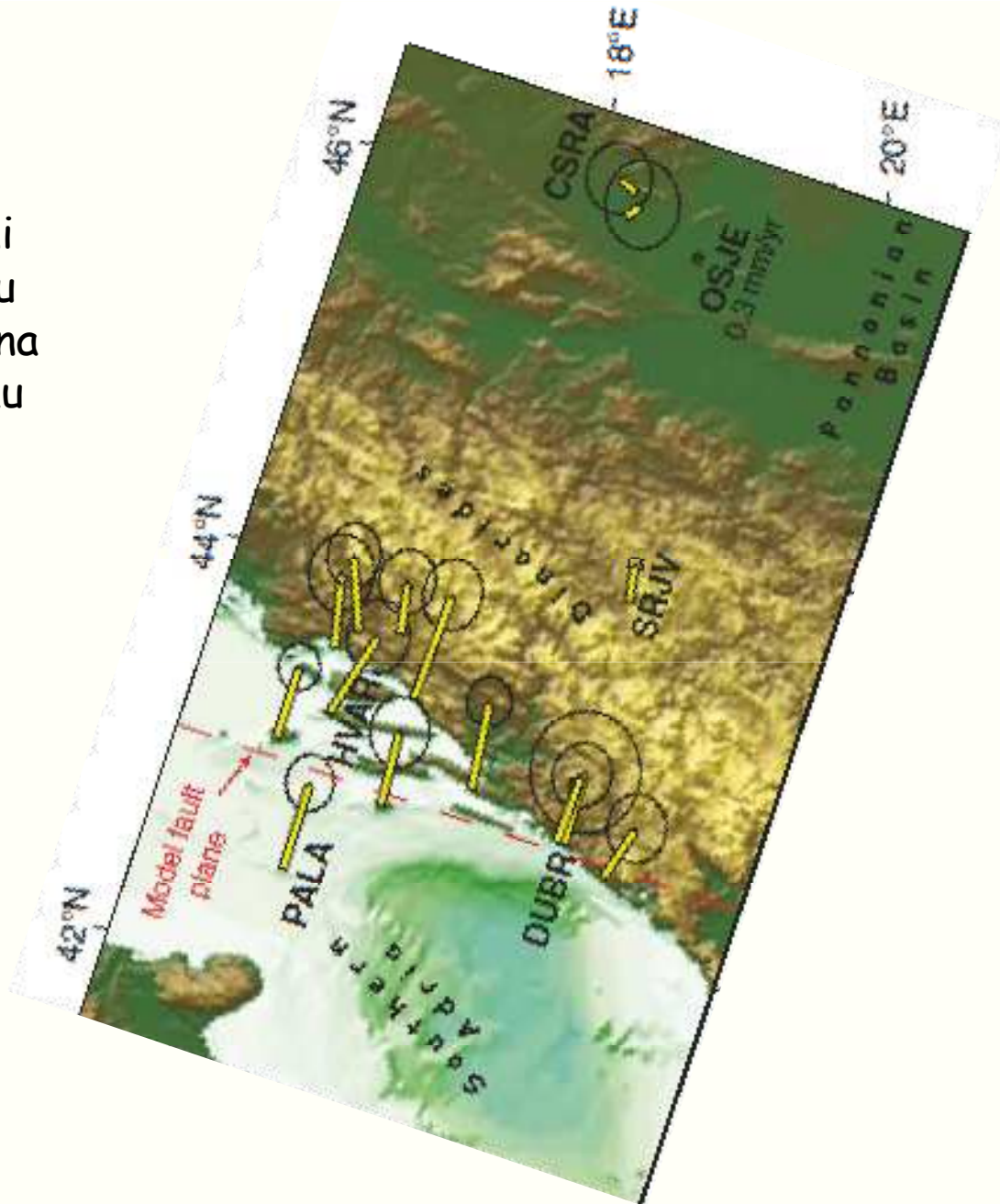


Primjer:  
 Vektori pomaka određeni  
 GPS metodom u okolnom  
 području Jadrana u odnosu  
 na stabilnu referentnu  
 točku u sjevernoj Europi  
 (prema Grenerczy et al.,  
 2005)



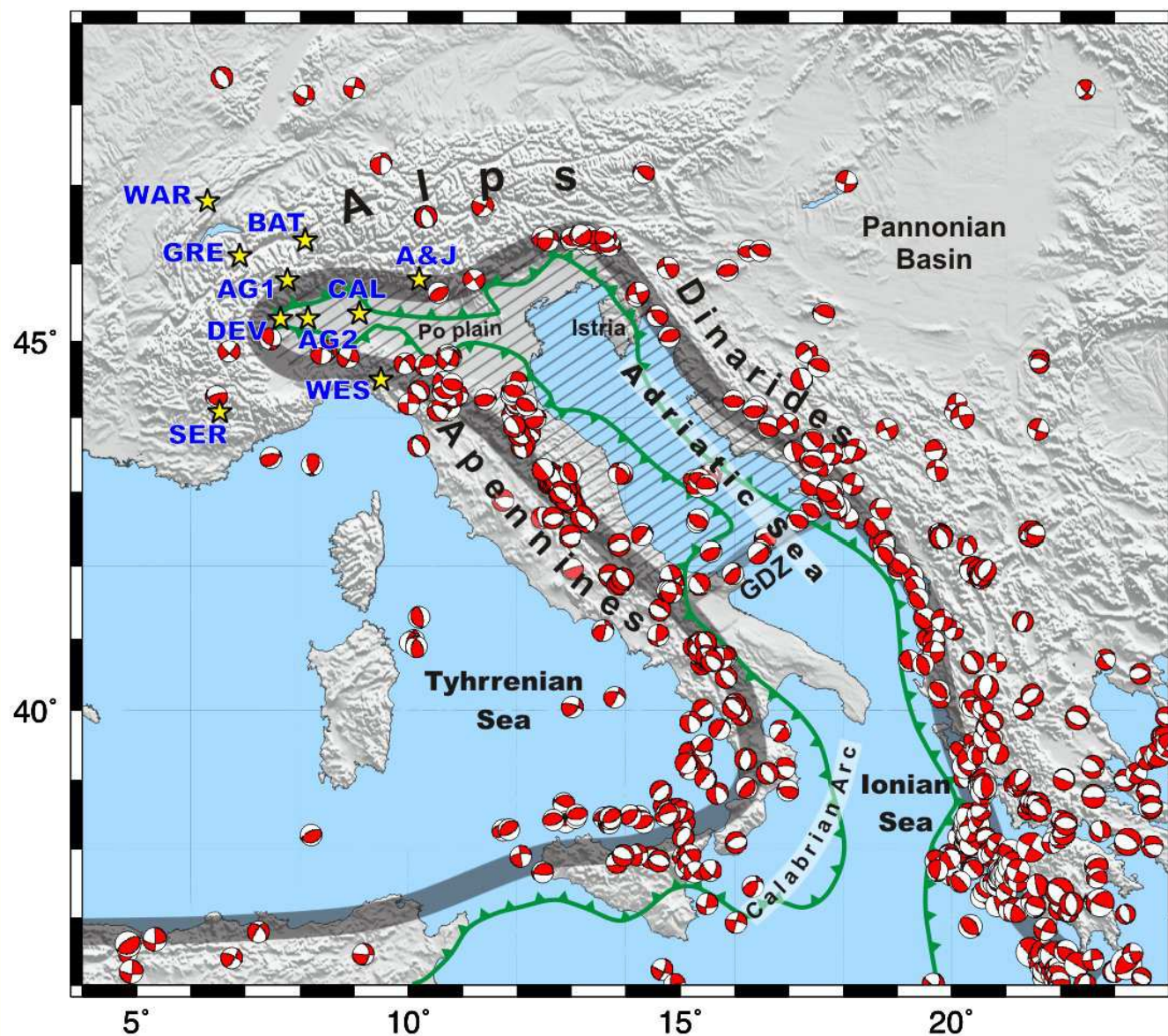


Primjer:  
Vektori pomaka određeni  
GPS metodom u području  
Hrvatske i BIH u odnosu na  
stabilnu referentnu točku  
u sjevernoj Europi  
(prema Bennett et al.,  
2008)



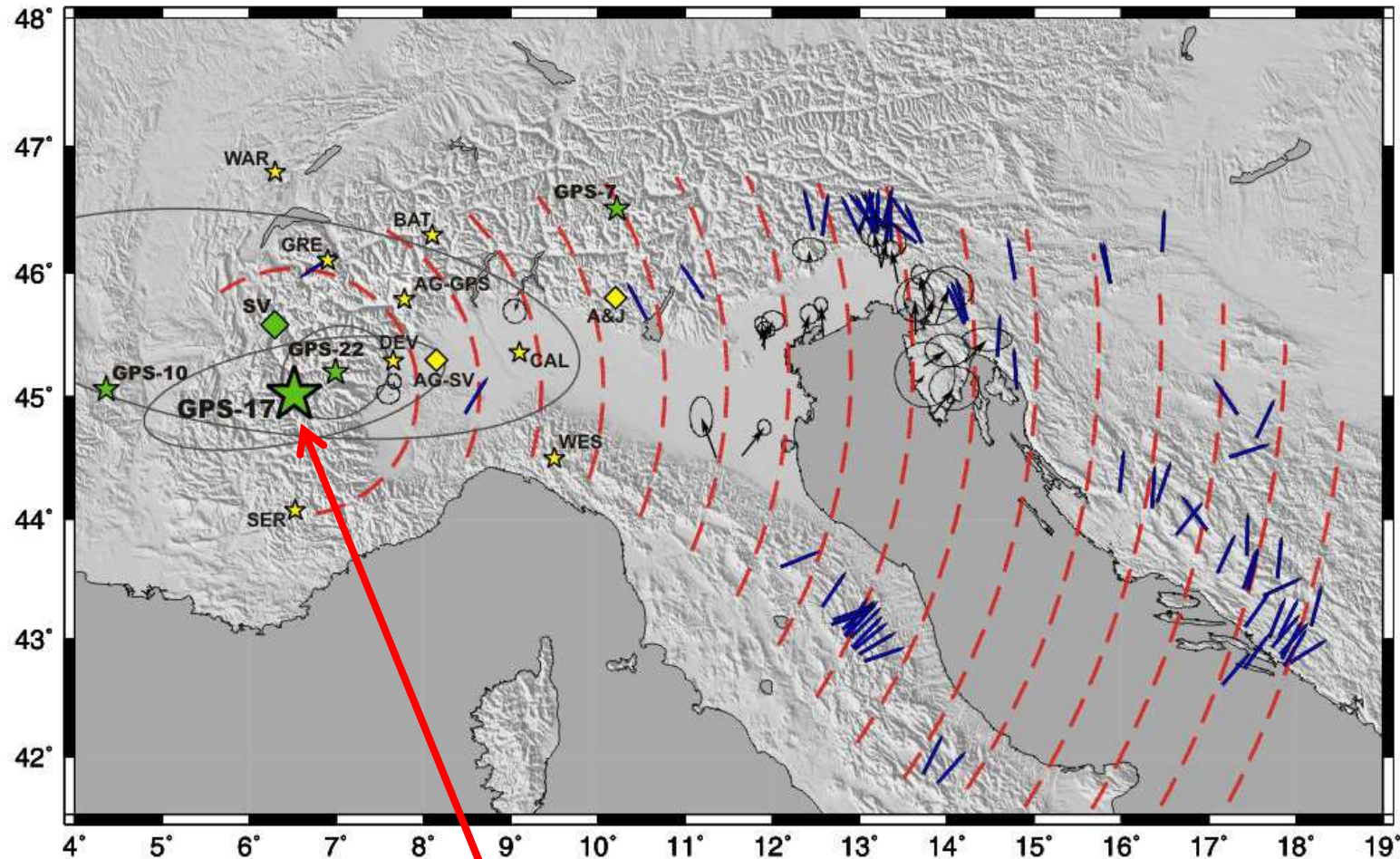


Granice Jadranske  
mikroploče  
(iz Vrabcet al.,  
2010)



# Odredba Eulerovog pola rotacije Jadranske mikroploče

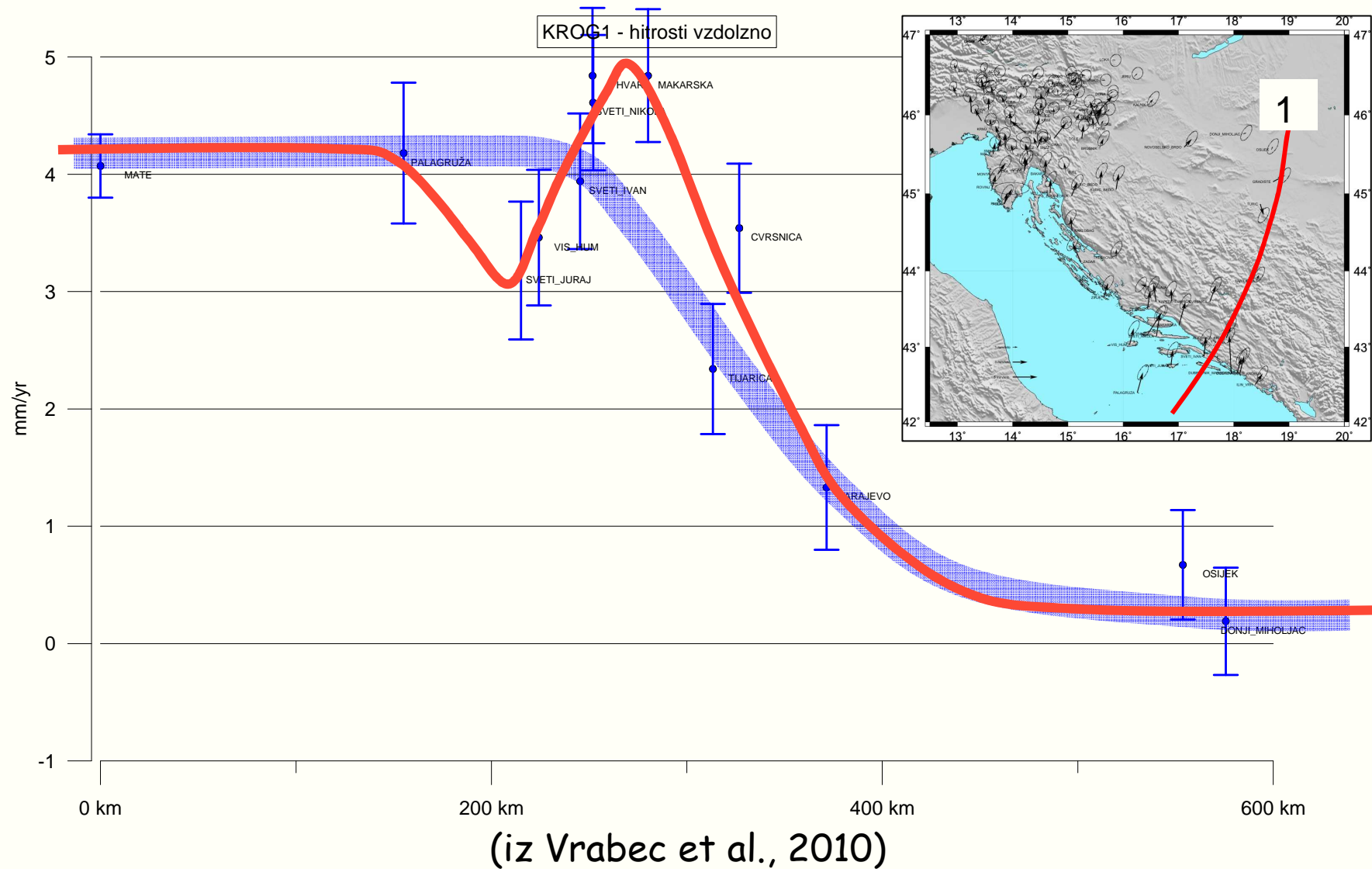
pol @ 45.03°N, 6.52°E, brzina rotacije  $0.2971 \pm 0.11$  57°Ma (CCW)



(prema Weber et al., 2010)



# Komponente brzine pomaka po profilu 1



# IZVORI SLIKA, TABLICA, CRTEŽA I LITERATURNI NAVODI:

- Bennet, R., Hreinsdottir, S., Buble, G., Bašić, T., Bačić, Ž., Marjanović, M., Casale, G., Gendaszek, A. & Cowan, D. (2008): Eocene to present subduction of southern Adria mantle lithosphere beneath the Dinarides.- *Geology*, 36/1, 3-6.
- Burbank, D.W. & Anderson, R.S. (2001): *Tectonic Geomorphology*.- Blackwell Science Pub., Oxford, 274 str.
- Grenerczy, G., Kenyeres, A., Sella, G. & Stein, S. (2005): Tectonic implications of the GPS velocity field in the northern Adriatic region.- *Geophys. res. Lett.*, 32, L16311.
- Keller, E.A. & Pinter, N. (2002): *Active Tectonics: Earthquake, Uplift, and Landscape*, 2nd ed.- Prentice Hall, New Jersey, 362 str.
- Lisowski, M., Savage, J.C. & Prescott, W.H. (1991): The velocity field along the San Andreas Fault in central and southern California.- *Journal of Geophysical Research*, 96, 8369-8389.
- Meade, B.J. (2007): Present-day kinematics at the India-Asia collision zone.- *Geology*, 35, 81-84.



# IZVORI SLIKA, TABLICA, CRTEŽA I LITERATURNI NAVODI:

- Pribičević, B., Medak, D., Prelogović, E. & Đapo, A. (2007): *Geodinamika prostora grada Zagreba.*- Sveučilište u Zagrebu, Geodetski fakultet, 156 str.
- van der Pluijm, B.A. & Marshak, S. (2004): *Earth Structure*, 2nd ed.- W.W. Northon & Co., London, 656 str.
- Vrabc, M., Tomljenović, B., Sterle, O., Bačić, Ž., Bašić, T., Marjanović, M. & Stopar, B. (2010): *GPS meritve gibanja Jadranske mikroplošče in aktivnih tektonskih deformacij v Dinaridih.*- 4. hrvatski geološki kongres, Šibenik.
- Weber, J., Vrabc, M., Pavlovčić-Prešern, P., Dixon, T., Jiang, Y. & Stopar, B. (2010): *GPS-derived motion of the Adriatic microplate from Istria Peninsula and Po Plain sites, and geodynamic implications.*- *Tectonophysics*, 483, 214-222.

