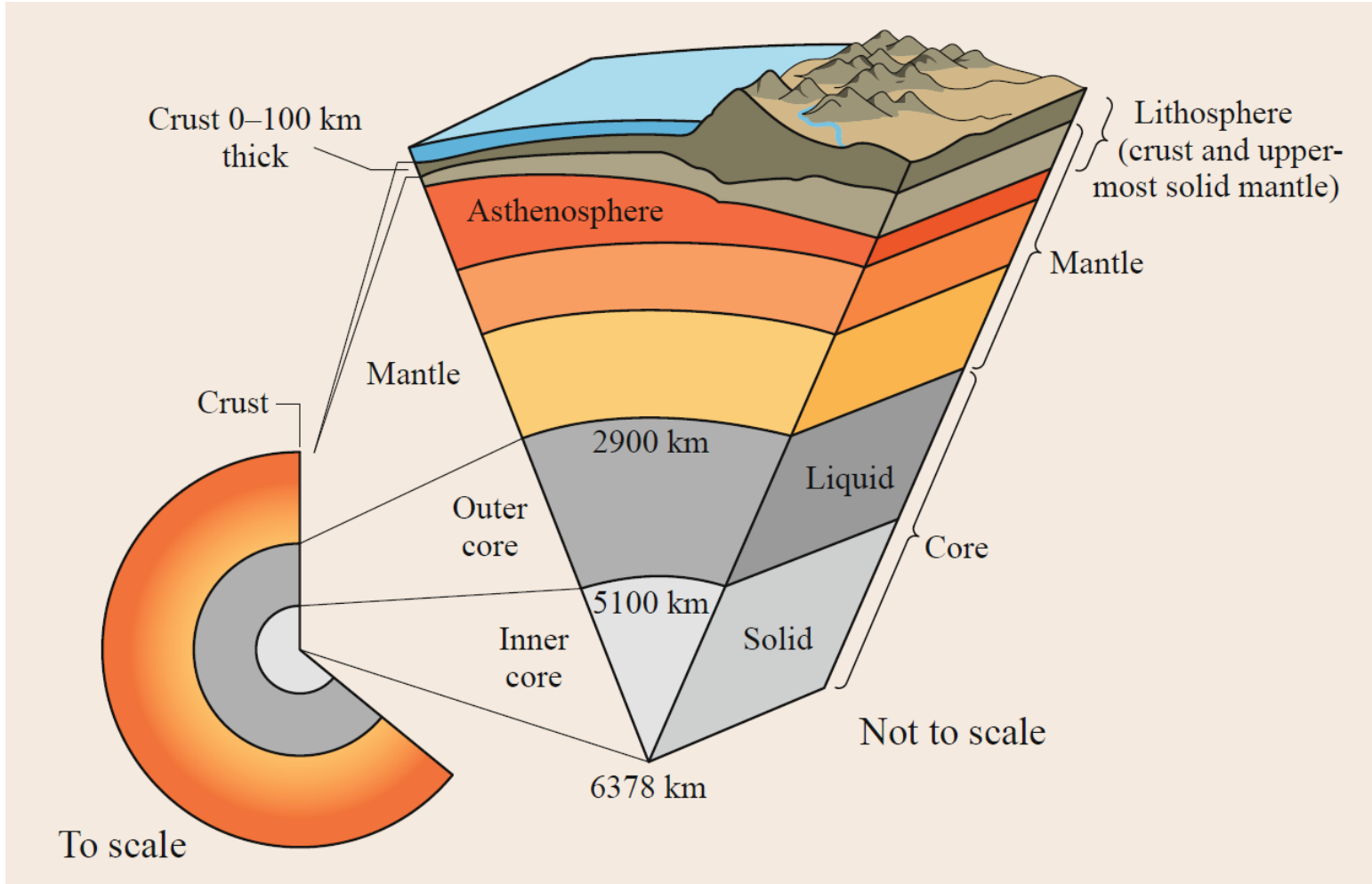


Geodinamika

Zgradba Zemlje



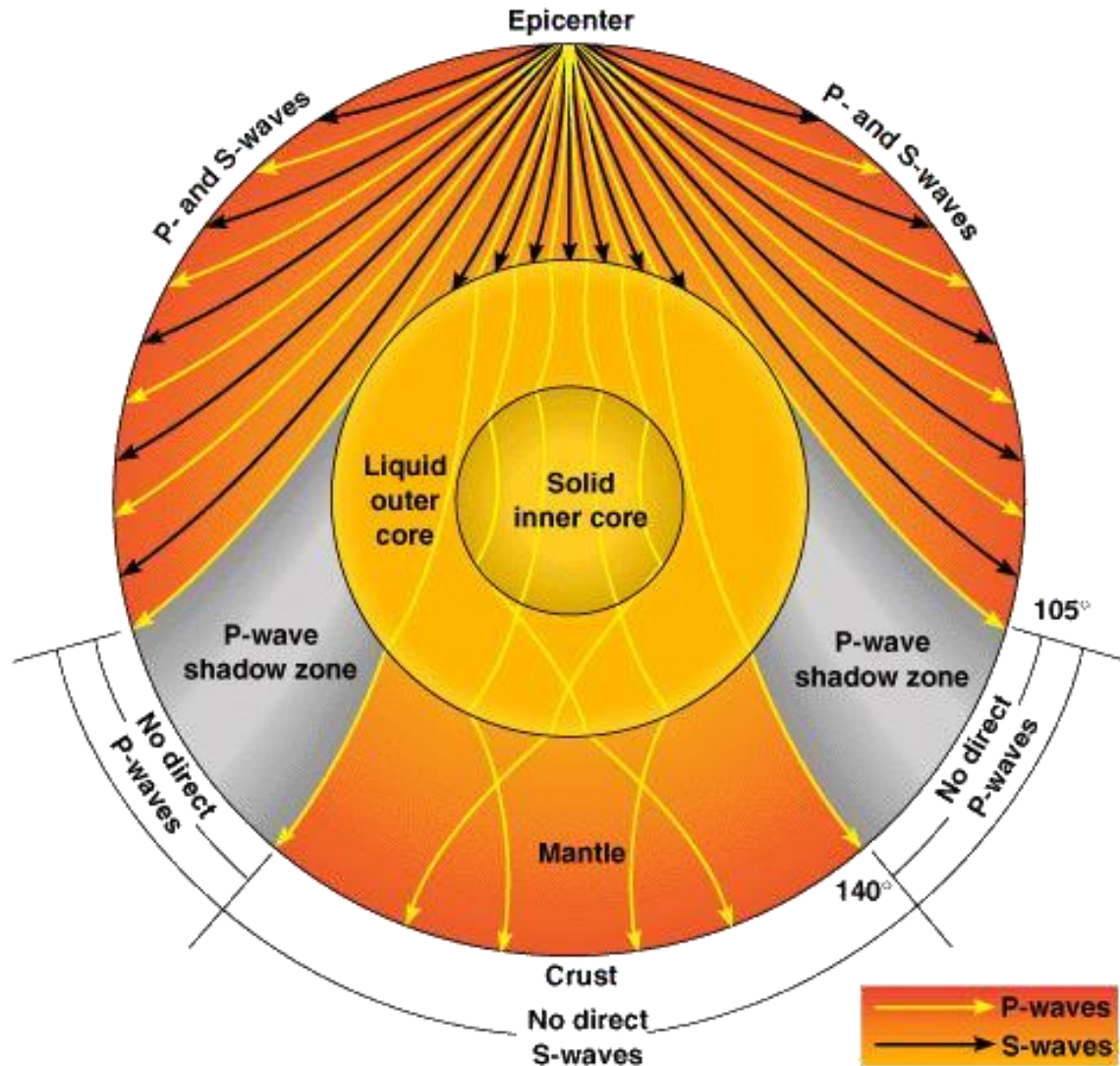
Plasti:

- Skorja (oceani, kopno)
- Plašč (zgornji, spodnji)
- Jedro (zunanje, notranje)

Diskontinuitete (ploskve nezveznosti):

- Conradova (v litosferi sial-sima)
- Mohorovičičeva (Moho) (skorja – plašč)
- Repiti (zgornji – spodnji plašč)
- Gutenbergova (plašč – jedro)
- Lehmanova (zunanje – notranje jedro)

Seizmični dokazi za notranjo zgradbo



Seizmični valovi

- P-valovi (angl. *primary*) – vzdolžni, hitrejši
- S-valovi (angl. *secondary*) – prečni, počasnejši

Lastnosti:

- P-valovi potujejo skozi tekoči del, medtem ko S-valovi ne
- Zaradi razlik v gostoti se valovi ukrivijo – refrakcija
- Območja brez S-valov in območja brez P-valov

Zemlja kot dinamičen sistem

- Spremembe se dogajajo tako v notranjosti, na površju kot tudi nad površjem Zemlje
- Spremembe v notranjosti Zemlje:
 - Konvekcijski tokovi v plašču Zemlje (nekaj cm na leto)
 - Pretakanje mas v jedru Zemlje (nekaj 0,1mm na leto)
- Spremembe na površju Zemlje
 - Globalna, regionalna, lokalna tektonika (premikanje, gubanje, trganje...)
 - Izbruhi vulkanov, preoblikovanje površja
 - Potresi
 - Spremembe površja zaradi vpliva vremena (plazovi, erozija...)
 - Post-glacialno dviganje površja (Skandinavija)
- Spremembe nad površjem Zemlje
 - Dinamika atmosfere, redistribucija vodne pare...

Geodinamika

- Področje geofizike
- Skuša razumeti notranje in zunanje procese/sile in njihov vpliv na spremembe vseh aspektov Zemlje kot celote
- Dinamični procesi:
 - Energetski: porazdelitev energije Zemlje, v večini predstavljeno s toploto in temperaturo (ter sprememb le-teh)
 - Kinematični: spremembe položajev točk na Zemlji, opisani s hitrostjo, deformacijam in spremembami deformacij
 - Dinamični: opis/prestavitev sil in napetosti
- Skušamo odkriti vzroke (dinamični, energetski) in posledice (kinematični) sprememb položajev točk na Zemlji

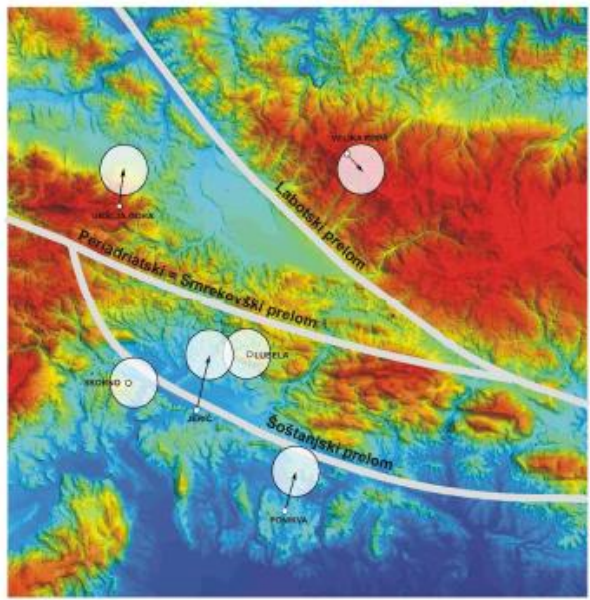
Geodinamika

- Na Zemlji lahko vidimo le POSLEDICE geodinamičnih procesov
- Te posledice lahko tudi merimo:
 - Geodetska opazovanja
 - Gravimetrična opazovanja
 - Seizmična opazovanja
 - Meteorološka opazovanja...
- Geodinamika: poskus razložiti vzroke (geodinamične procese), ki so povzročili posledice (premike, spremembe na Zemlji)
- Vzrok, ki pojasni posledico mora biti SKLADEN z opazovanji (osnovi postulat znanstvene metode!)

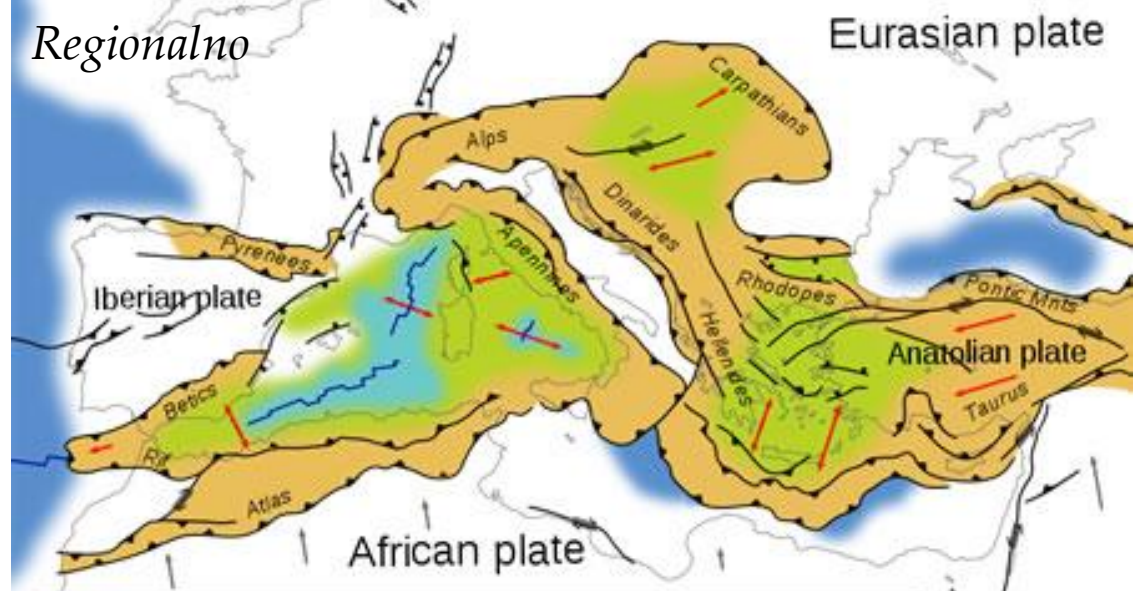
Primeri področij geodinamike

- Tektonika litosferskih plošč (nastanek, gibanje, deformiranje, vzroki)
- Dinamični procesi na mejah tektonskih plošč (načini stikov med ploščami, fizikalni in matematični modeli)
- Seizmologija (potresi, vzroki za nastanek, lokacija in lastnosti potresov)
- Vulkanologija in njene posledice
- Prenos toplote (v notranjosti Zemlje, na površju, v atmosferi...)
- Morfologija in deformacije površja
- Geologija (poznavanje sestave Zemlje, starost kamenin, plasti...)
- Napetosti in deformacije notranjosti in površja Zemlje
- ...

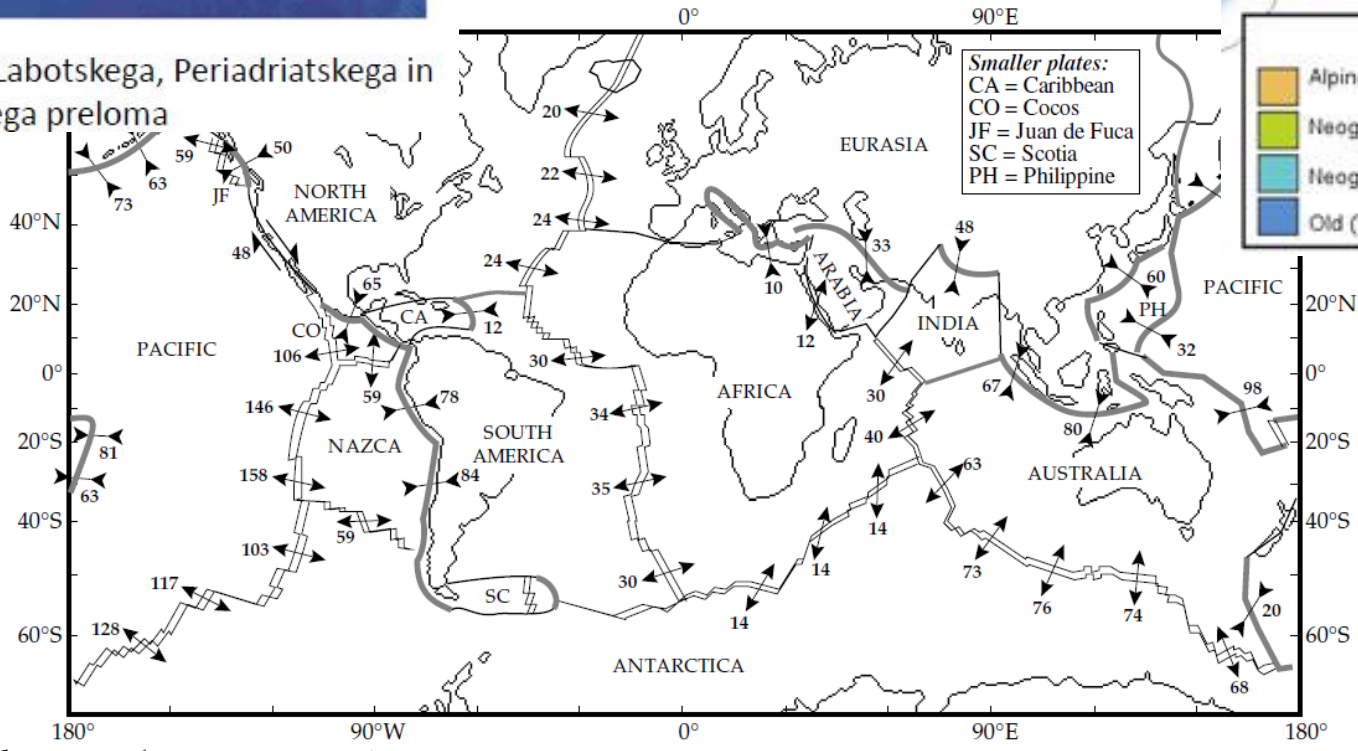
Lokalno



Regionalno



Območje Labotskega, Periadriatskega in Šoštanskega preloma



Smaller plates:
 CA = Caribbean
 CO = Cocos
 JF = Juan de Fuca
 SC = Scotia
 PH = Philippine

Legend

Alpine fold & thrust belt	Major fault	Plate velocity
Neogene extensional basin	Thrust fault	Crustal movement
Neogene oceanic crust	Strike-slip fault	Oceanic spreading ridge
Old (Tethys) oceanic crust	Normal fault	

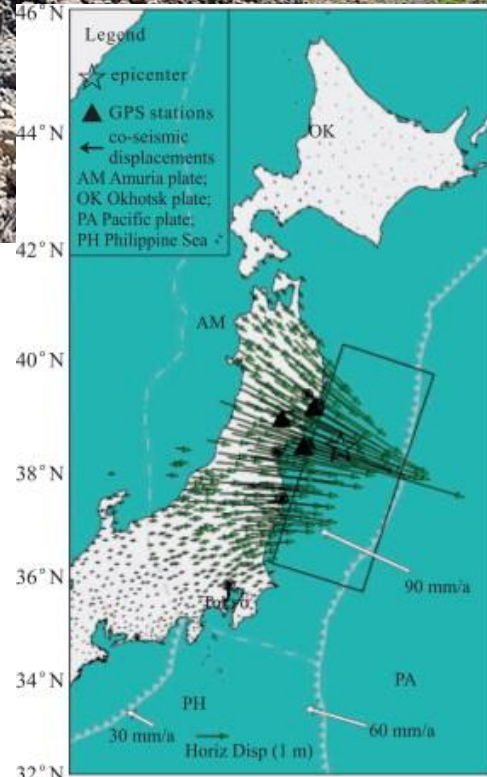
Globalno

spreading boundary
 convergent boundary
 transform boundary
 uncertain boundary
 relative motion (mm/yr)



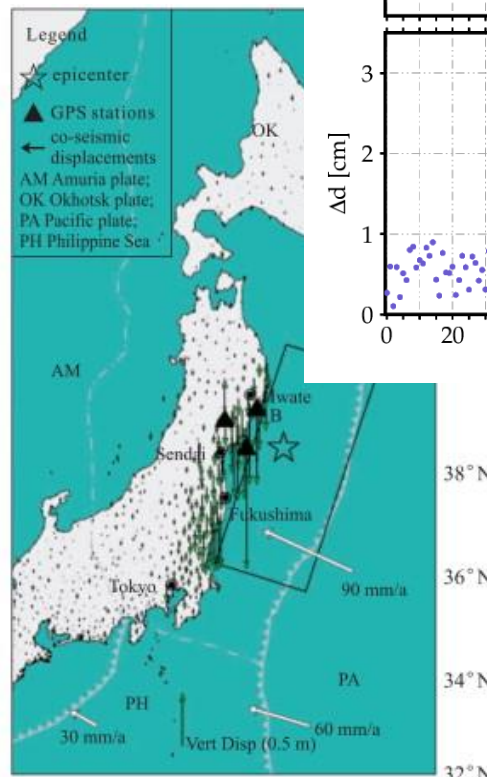
Gaters News Agency

Nova Zelandija

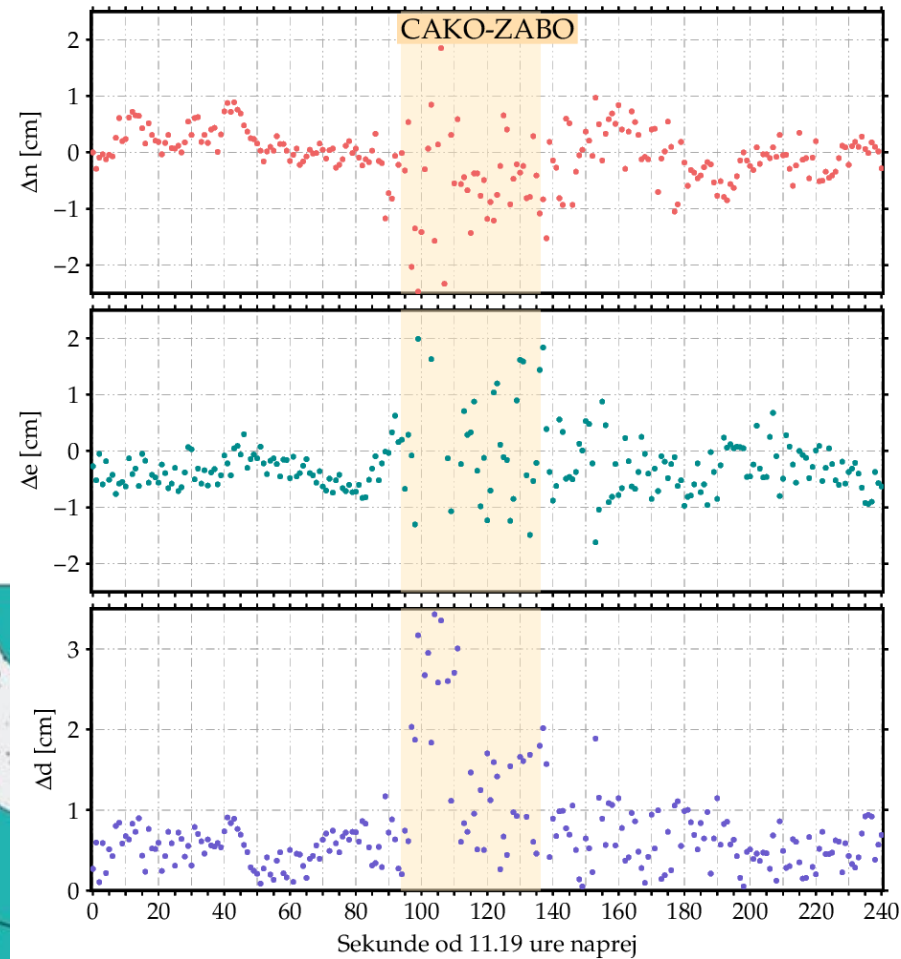


Japonska

(a) Horizontal co-seismic displacements



(b) Vertical co-seismic displacement



Potres v Petrinji, december 2020

Potresi – velikosti premikov



Velikostni red deformiranja

- Tektonika litosferskih plošč – do 15 cm/leto, konstanten vpliv
- Potresi – do nekaj metrov, enkraten dogodek, kompleksna dinamika premikov (pred-potresni, med-potresni, po-potresni)
- Vulkani – enkraten dogodek, raznolike posledice (novo kopno, potopitev kopnega, preoblikovanje površja, večjih ali malih razsežnosti)
- Post-glacialno dviganje površja – okoli cm/leto, konstanten vpliv
- Obremenitev površja – nivo cm, periodičen vpliv

Geodinamika in geodezija

- Geodinamične študije temeljijo na:
 - Zaznanih spremembah na površju in notranjosti Zemlje
 - Izmerjenih spremembah, ki jih lahko opredelimo s premiki, vektorji hitrosti, časovnimi vrstami...
- Geometrične spremembe položaja, oblike, velikosti... pri:
 - Tektoniki litosferskih plošč
 - Potresih in v seizmologiji
 - Deformaciji zaradi delovanja vulkanov
 - Posledic obremenitve površja in post-glacialno dviganje površja
- Geodetska opazovanja
 - Sprememba geometrije: terestrična opazovanja, geometrični nivelman, satelitska geodezija, daljinsko zaznavanje (InSAR)
 - Sprememba težnosti: gravimetrična opazovanja

Uporaba geodetskih opazovanj za geodinamične raziskave

- Lastnost geodinamičnih raziskav – večje/veliko območje
 - Ploščna tektonika – globalni, regionalni, lokalni nivo (nekaj 10 km naprej)
 - Potresi, vulkani – lokalni, regionalni nivo (nekaj 10 km naprej)
 - Post-glacialno dviganje površja – regionalni nivo (nekaj 100 km naprej)
- Relativno male spremembe položajev
- Geodetska opazovanja:
 - Terestrična opazovanja (smeri, dolžine) – do nekaj km, v preteklosti tudi do nekaj km, a slabša natančnost (nekaj cm nivo točnosti)
 - Nivelman – nekaj 10 km – dolgotrajna opazovanja
 - Gravimetrija – nekaj 10 km – dolgotrajna opazovanja, draga oprema
 - Satelitska geodezija – globalno, a le v zadnjih 20-30 let!

Natančnost geodetskih opazovanj

- Iz Izravnalnega računa vemo – premik statistično značilno zaznamo, ko velja:

$$\sigma_d \leq \frac{d}{5 - 10}$$

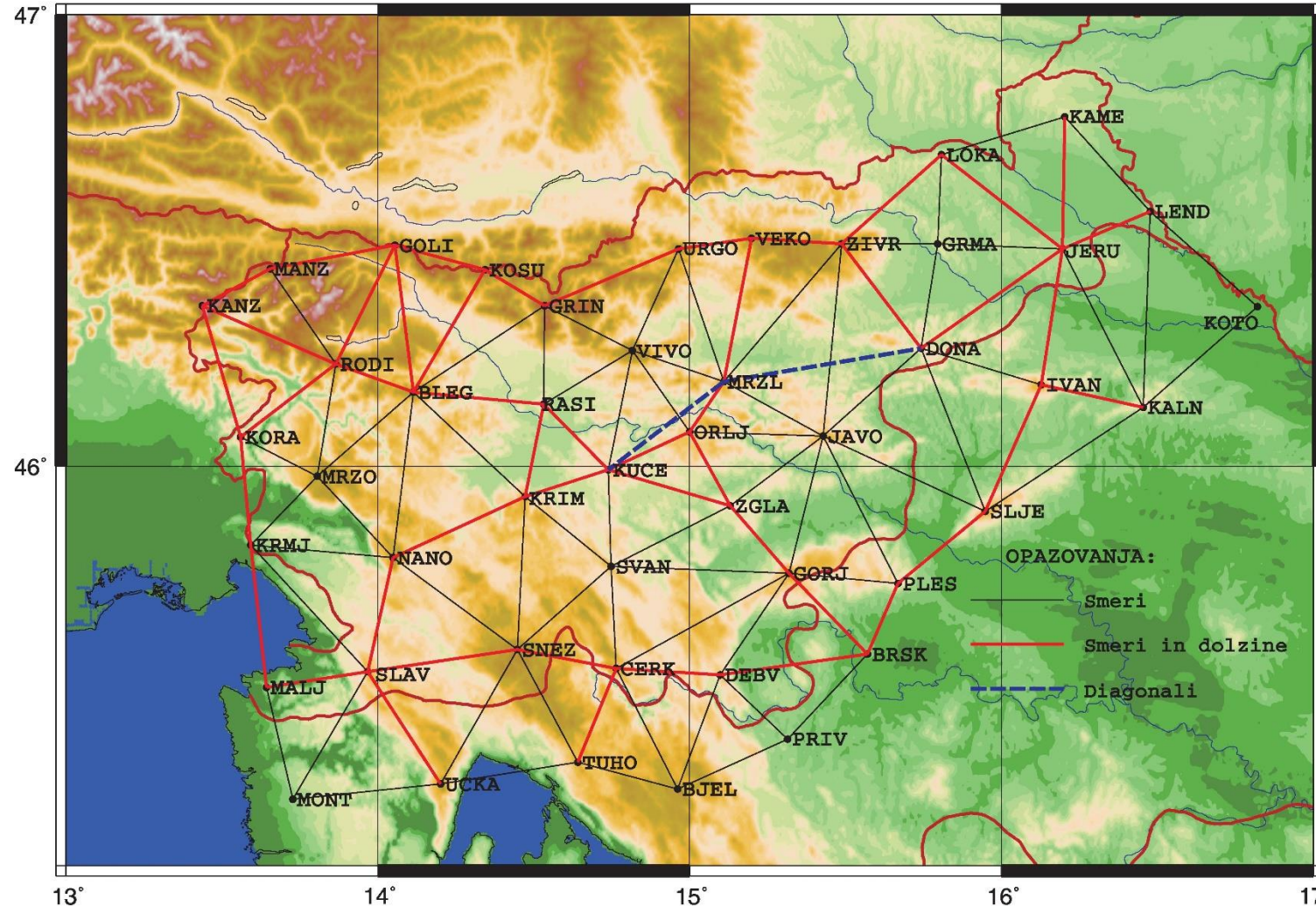
- Torej: natančnost določenega premika mora biti vsaj 5-krat boljša od premika samega
- Geodinamični premiki:
 - Mali, na velikih razdaljah, a konstantni (tektonika, post-glacialno dviganje površja)
 - Veliki, a enkratni (potresi, vulkani)
 - Mali in periodični (obremenitev površja)
- Za določitev premikov v geodinamiki potrebujemo natančna opazovanja v različnih terminskih izmerah

Uporaba terestričnih opazovanj za geodinamične naloge

- Znani so primeri iz preteklosti:
 - Izračunani premiki geodetskih točk po potresu v San Franciscu 1906 leta
 - Ponovljene izmere iz Japonske v začetku 20. stoletja
 - Nivelmanske izmere v nacionalnem parku Josemite v ZDA, kjer so zaznali dviganje površja
- Večina ponovljenih izmer po potresih in na lokalnem območju
- Terestrična opazovanja so
 - preslabe kakovosti ali
 - omejena na premajhno območje

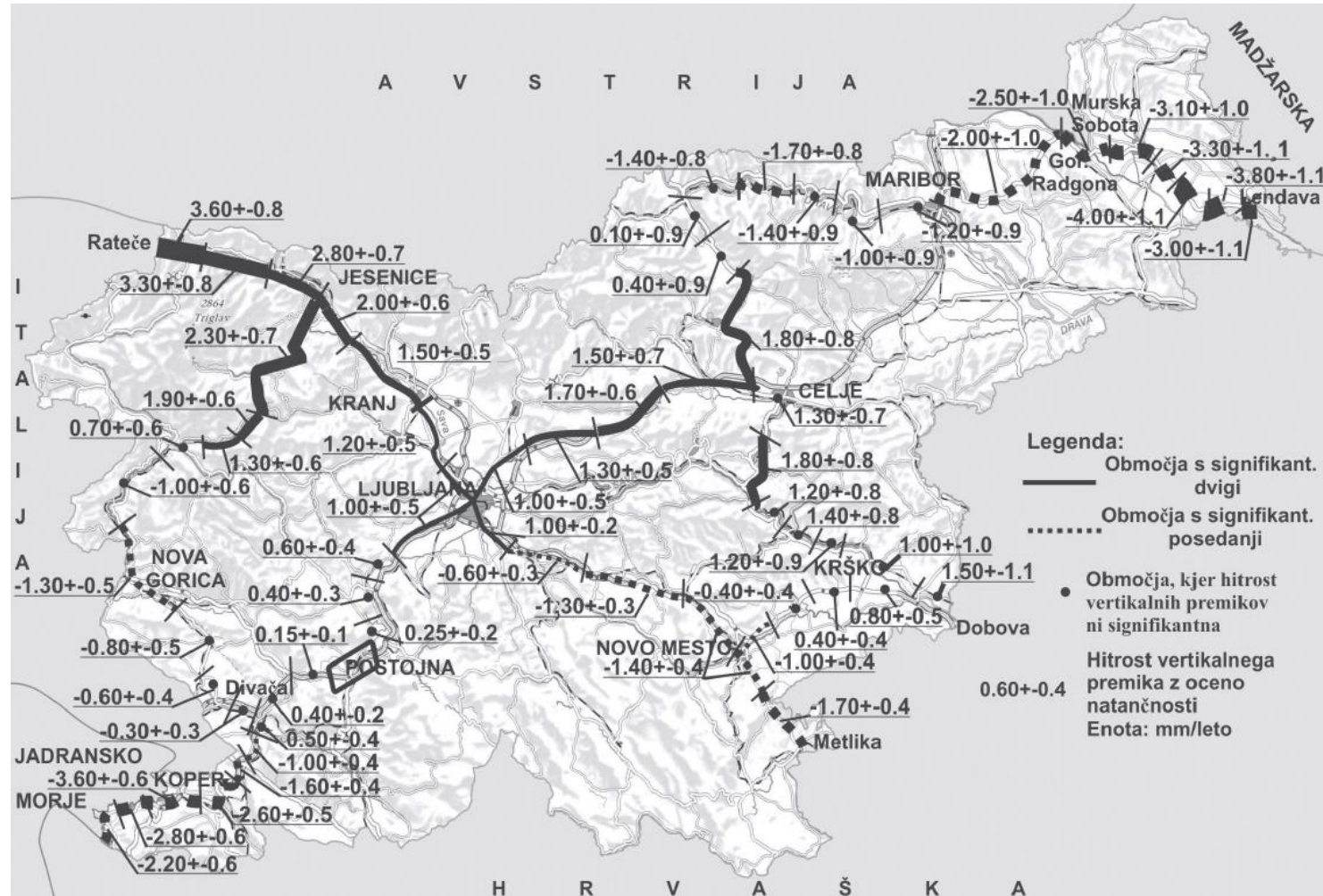
Terestrična opazovanja na AGM

- Kotna opazovanja
 - 1963-1965
 - Natančnost med 0,4'' in 0,7''
- Dolžinska opazovanja
 - 1975-1982:
 - Natančnost do 6 cm
- Razdalje med točkami tudi do 70 km
- Poudarek – najnatančnejši inštrumentarij
- Preslabe kakovosti za geodinamične naloge



Nivelmanska opazovanja v Sloveniji

- A-O izmera
 - 1873-1895
 - Natančnost 4,1mm/km
- 1. Jugoslovanska izmera
 - 1946-1957:
 - Natančnost 1,2mm/km
- 2. Jugoslovanska izmera
 - 1971:
 - Natančnost 0,95mm/km
- Izmera NVN
 - 1989
 - Natančnost okoli 1mm/leto
- *Izmera NVN SLO*
 - 2000-2015
 - Natančnost na nivoju mm/km
- **Opazovanja so visoke natančnosti, večkrat ponovljena in v daljšem časovnem obdobju!**

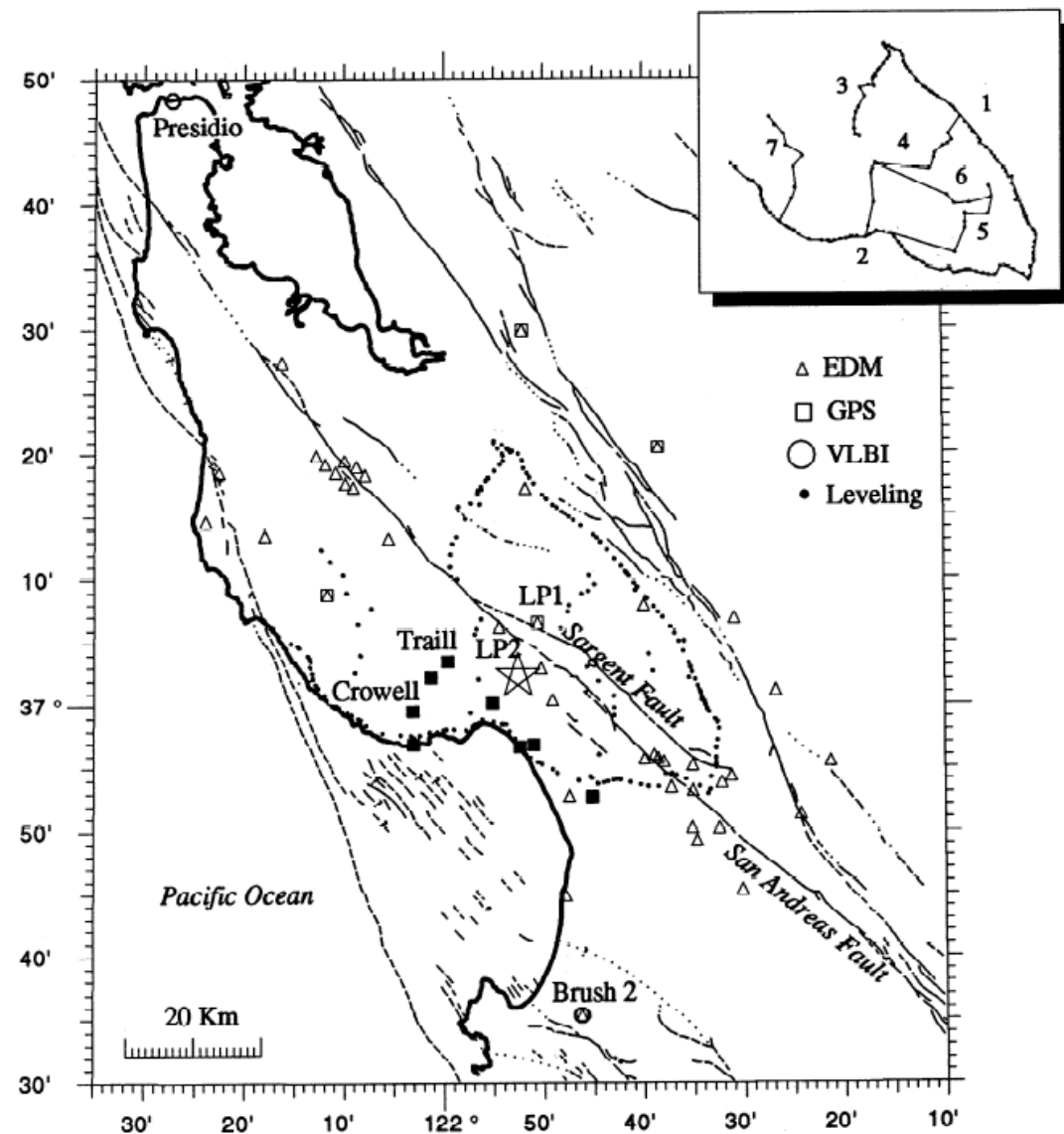


Kombinacija terestričnih opazovanj in opazovanj GNSS

- Pojav tehnologije GNSS (takrat samo GPS) v 80-tih letih 20. stoletja in uporaba v 90-tih letih
- Kampanjske izmere GPS na geodetskih/geodinamičnih točkah
 - Kalifornija, Islandija – geodinamične naloge (določitev premikov točk)
 - EUREF kampanje po Evropi – vzpostavitev novega koordinatnega sistema Evrope
 - Evropska WEGENER kampanja (vzpostavitev geodetske mreže za znanstvene namene)
 - Kampanjske izmere po državah za različne namene (vzpostavitev koordinatnega sistema, geodinamične naloge,...)
- Pojavi se vprašanje ali lahko kombiniramo:
 - Visoko kakovostna opazovanja GPS (koordinate točk) in
 - (zgodovinska/historična) terestrična opazovanja za geodinamične namene?

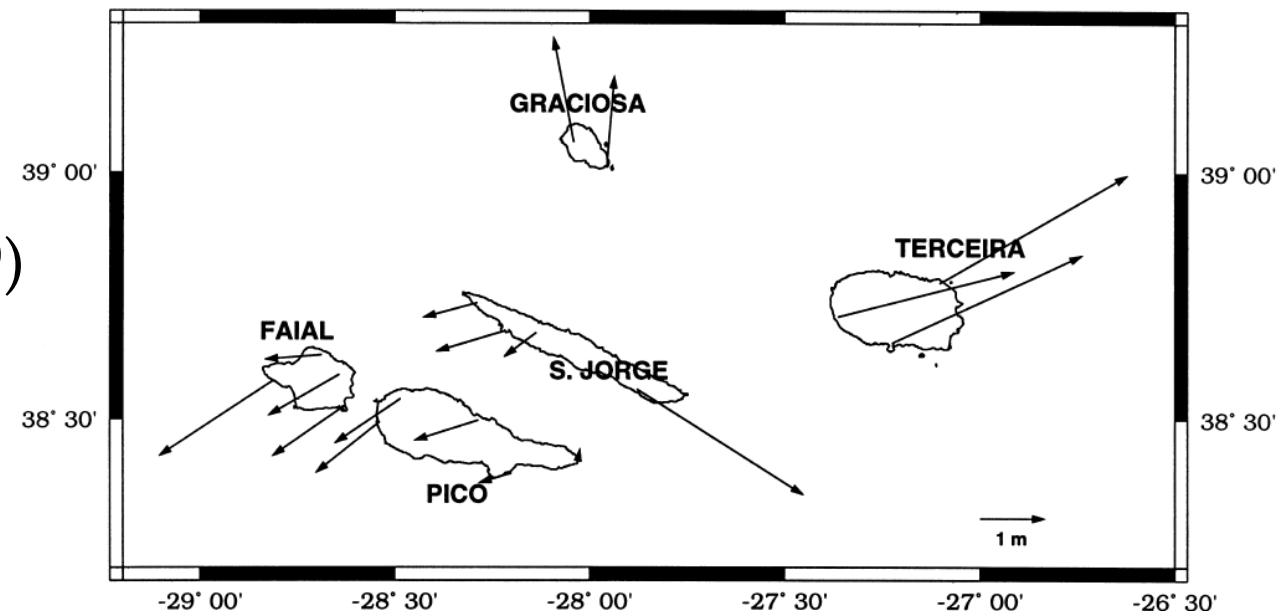
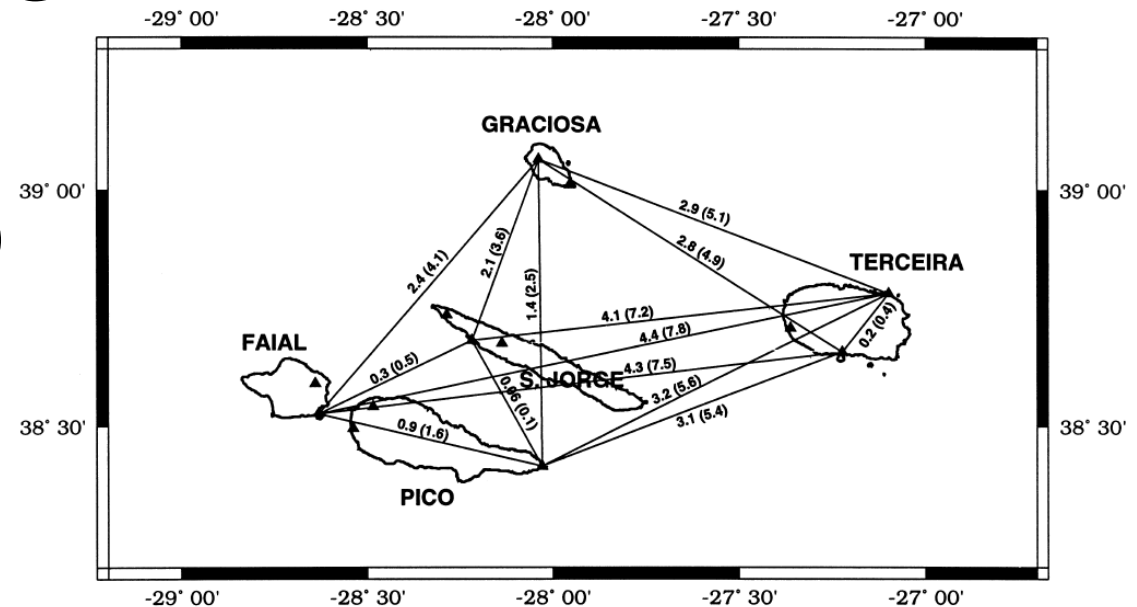
Primer: Loma Prieta (Kalifornija) potres v letu 1989

- Kombinacija 1 (Arnadottir in Segall, 1994):
 - Merjenih dolžin (1984,1986)
 - GPS izmere (1993)
 - Višinska izmera (1948-1953, 1989)
- Kombinacija 2 (Burgmann in sod., 1997)
 - GPS izmere (1989-1994)
 - Višinska izmera (1989, 1992)

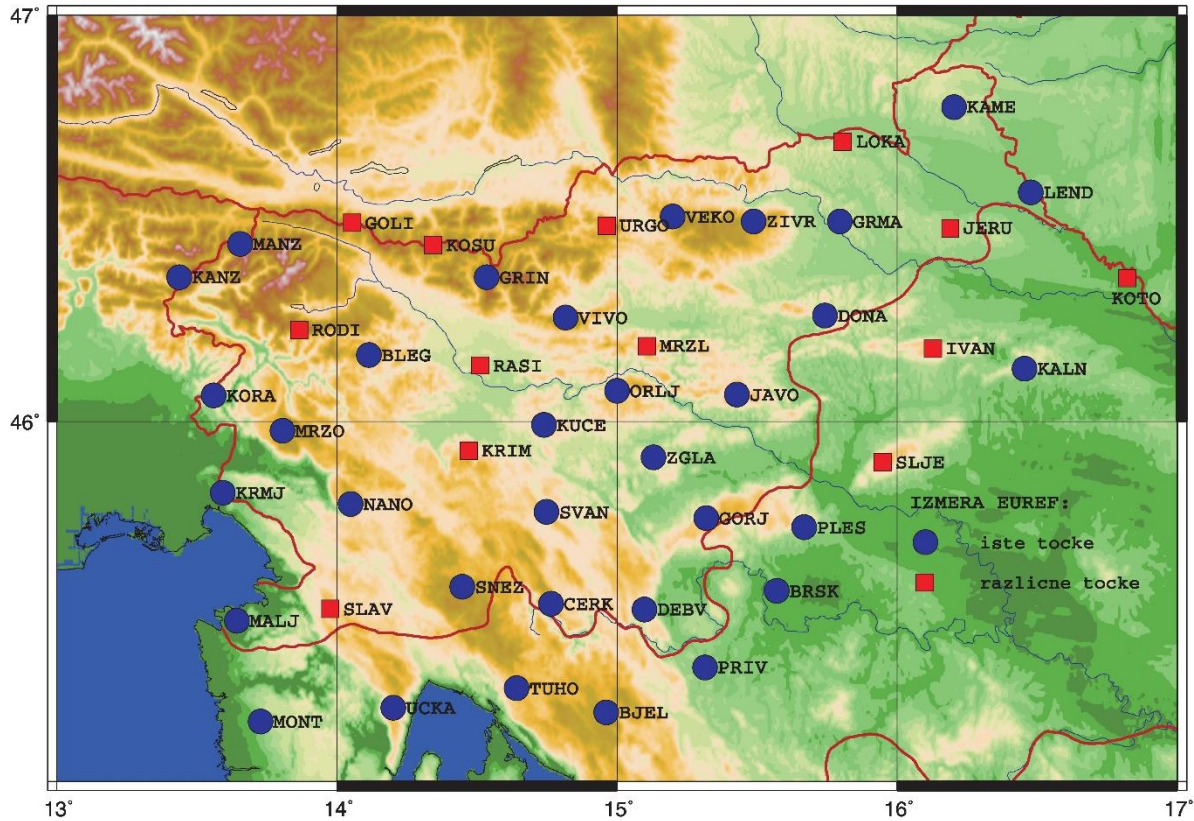


Primer: Azori (arhipelag 9-ih vulkanskih otokov)

- Opazovanja (Pagarete in sod. 1998)
 - Kotna in dolžinska (invar žice) opazovanja (1934-1940)
 - Dolžinska opazovanja s AGA-6A (1980)
 - Kotna opazovanja (1987-1988)
 - Dopler izmera (1979-1980)
 - GPS izmere (1988, 1994, 1995)
 - Višinska izmera (1948-1953, 1989)

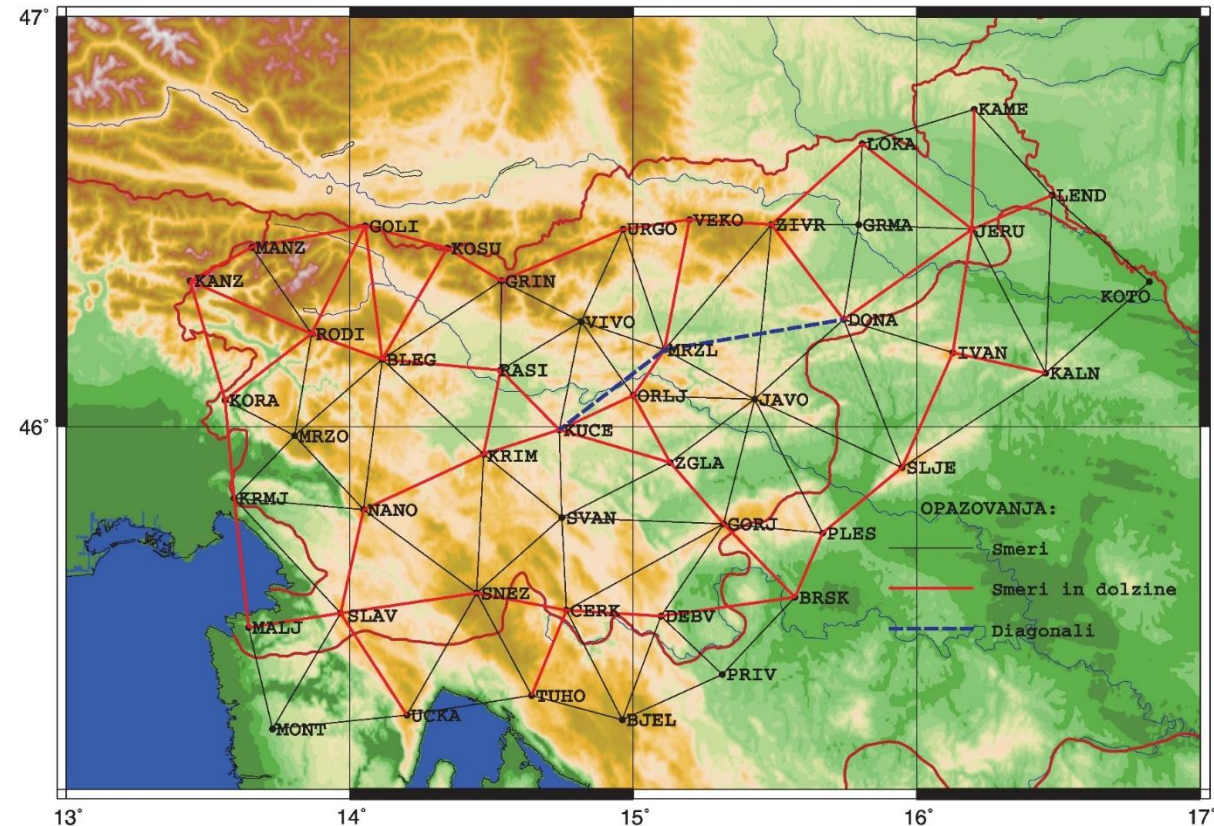


Primer: AGM Slovenije



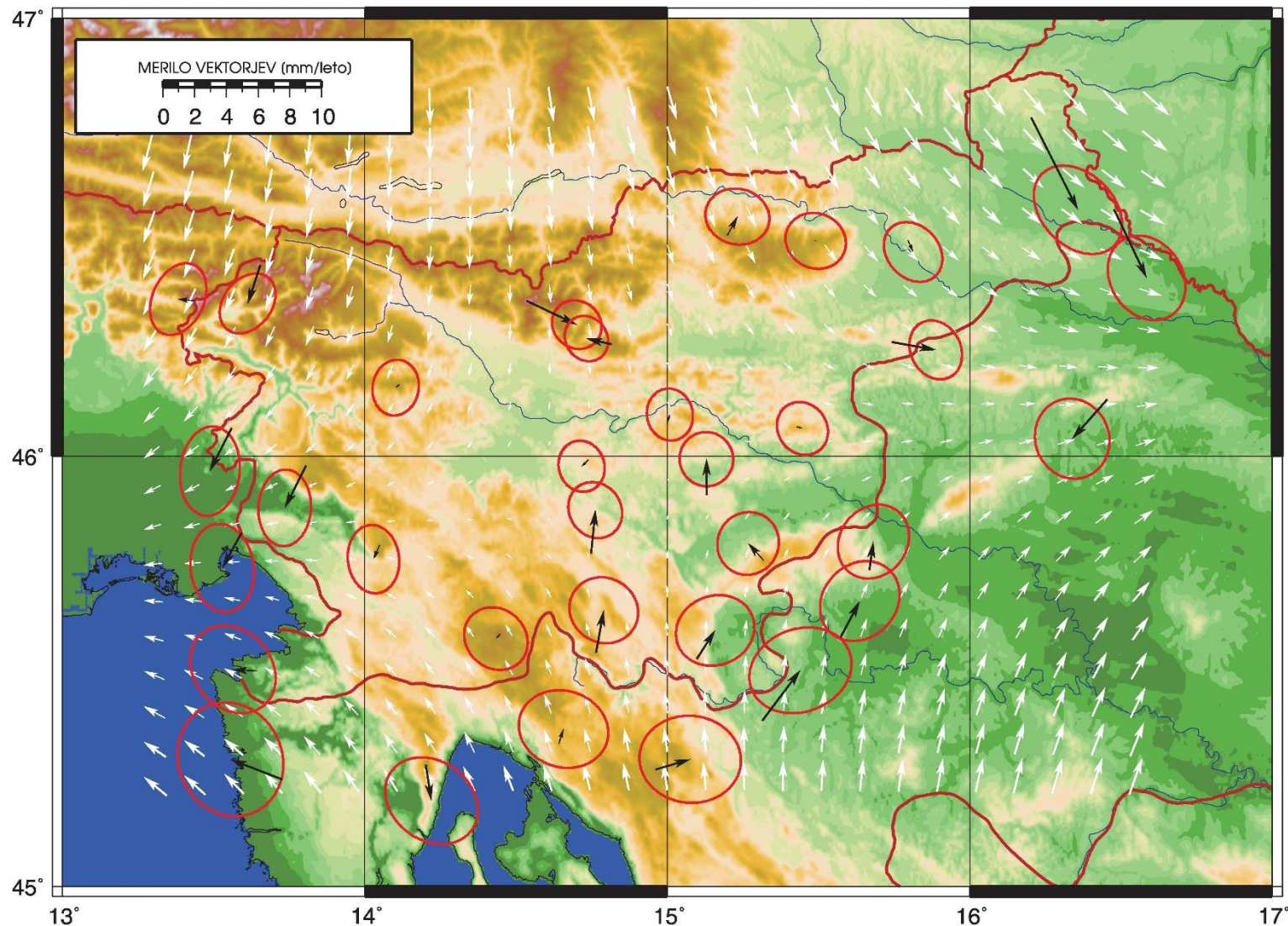
- GPS izmera:
 - 1994-1996
 - Natančnost nekaj mm

- Kotna opazovanja
 - 1963-1965
 - Natančnost med 0,4'' in 0,7''
- Dolžinska opazovanja
 - 1975-1982:
 - Natančnost do 6 cm



Primer: AGM Slovenije

- Ocenjeni vektorji hitrosti v ravnini projekcije z natančnostmi
- Interpolirano vektorsko polje premikov/vektorjev hitrosti



Uporaba opazovanj GNSS pri geodinamičnih nalogah

- Pojav GPS, kasneje GLONASS, kasneje BeiDou in Galileo pomeni revolucijo pri geodinamičnih nalogah
- Pred pojavom GPS so bila satelitska opazovanja vezana na SLR, LLR in VLBI
 - Cenovno zelo draga oprema – geodetski/astronomski observatoriji (fiksna lokacija)
 - Kasneje se razvijejo premične VLBI postaje – še vedno zelo drago
 - Kompleksna izmera in še bolj komplicirana obdelava opazovanj



Uporaba opazovanj GNSS pri geodinamičnih nalogah

- Izmera GNSS:
 - Cenovno veliko enostavneje dostopna
 - Anteno GNSS lahko postavimo praktično kamorkoli
 - Enostavna uporaba
- Kaj zagotavlja pri geodinamičnih nalogah (izmerah)
 - Ocenjene koordinate geodetske točke z milimetrovsko natančnostjo v globalnem koordinatnem sistemu
- Dva načina uporabe:
 - Kampanjske izmere v okviru geodinamičnih geodetskih mrež (t.i. pasivno omrežje)
 - Stalno delujoče postaje GNSS

Zahtevana natančnost

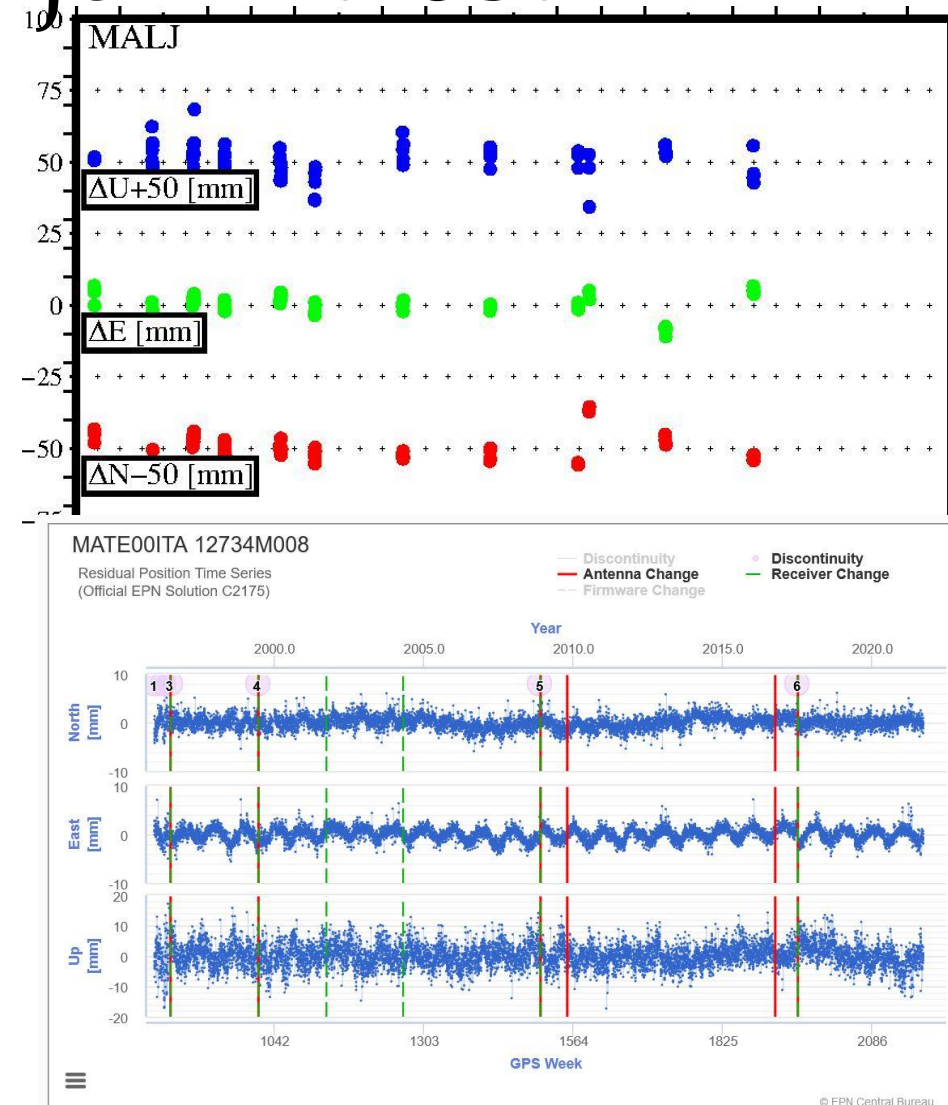
- Odvisna od velikosti premikov (smo ugotovili, da so majhni)
- Je lahko od 0,1 mm pri položaju in 0,1 mm/leto za vektor hitrosti
- Za večino geodinamičnih nalog – relativna natančnost med točkami ključna
 - Npr. točke na obeh straneh tektonske prelomnice
 - Razdalje so tu manjše
- Pri večjih projektih/nalogah – ključen opis v okviru globalnega koordinatnega sistema
 - Kakovost vzpostavljenega koordinatnega sistema skozi čas igra ključno vlogo

Dosežena natančnost v današnjem času

- Pri krajših razdaljah in relativnem načinu je možna natančnost tudi 0,1 mm/leto za vektor hitrosti
- V okviru večjih nalog – v enoličnem globalnem koordinatnem sistemu (npr. ITRS) – na natančnost vpliva:
 - Natančnost izmere – na nivoju pod mm/leto za vektor hitrosti
 - Kakovost in stabilnost ITRS – na nivoju 0,5 mm/leto
 - Kakovost dostopa do ITRS (navezava na bližnje postaje ITRS) – odvisna od lokacije
- Pričakovana/realna natančnost na koncu ~1mm/leto pri vektorjih hitrosti

Časovne vrste koordinat – osnova za izračun koordinat in vektorjev hitrosti

- Vektorje hitrosti lahko izračunamo le iz ponovljenih določitev koordinat postaje
 - Pri kampanjskih izmerah GNSS – manjše število izmer, večji časovni razpon opazovanj
 - Stalno delujoče postaje – koordinate določene na dnevni bazi, časoven razpon odvisen od časa delovanja postaje
- Natančnost odvisna od:
 - Koordinate: število določenih koordinat
 - Vektor hitrosti: časovni razpon določenih koordinat – pri geodinamičnih raziskavah mora biti vsaj 3 leta



Kampanjske izmere GNSS

- Pred pojavom stalno delujočih postaj edina možnost uporabe GNSS
- Nameni v večini dva:
 - Zagotovitev koordinatne osnove nekega območja
 - Geodinamične raziskave
- Velik poudarek na izbiri lokacije geodinamičnih točk – geološke študije
 - Geološko stabilna tla
 - Geološko ustrezna lokacija
 - Geodetsko ustrezna lokacija za izmero GNSS
 - Upanje, da kdo ne bo uničil točko
 - Ustrezen način stabilizacije
- Trajanje ene izmere GNSS
 - 3 – 5 dni
 - 30s interval registracije, 0° višinskega kota

Geodinamične točke GNSS



AGM točka Javornik (Lisca)



Videmska skala pri Krškem



Jelovica –
Vodiška planina



Geodinamične točke GNSS - izmere



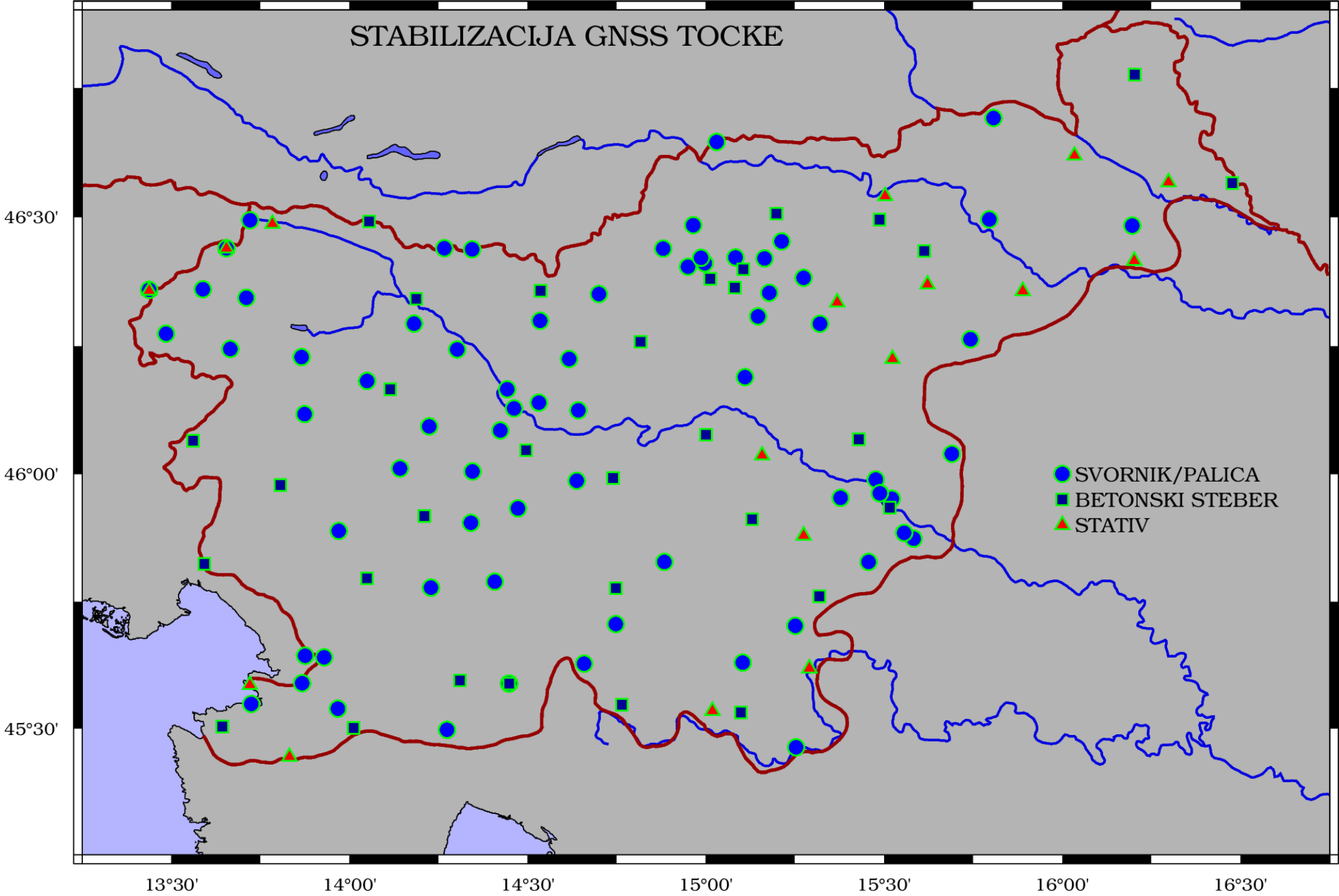
Geodinamične točke GNSS - problemi



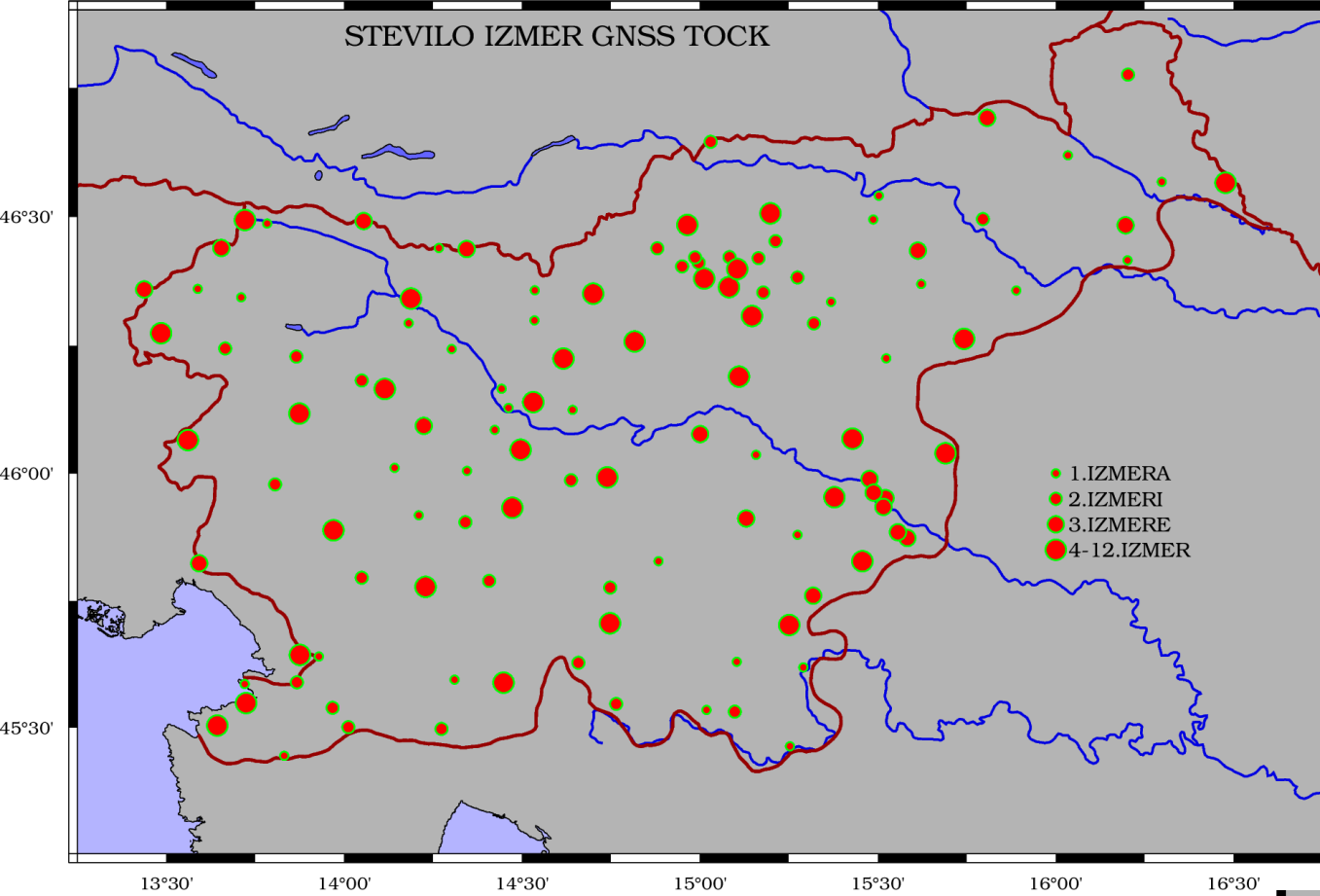
Kampanjske izmere GNSS na območju Slovenije

- Od leta 1994 do 2012
- Številne izmere
- Namen: geodinamične študije, zagotovitev globalnega koordinatnega sistema
- Različno število izmer po različnih točkah
- Različna stabilizacija
- Različen časoven razpon

STABILIZACIJA GNSS TOCKE

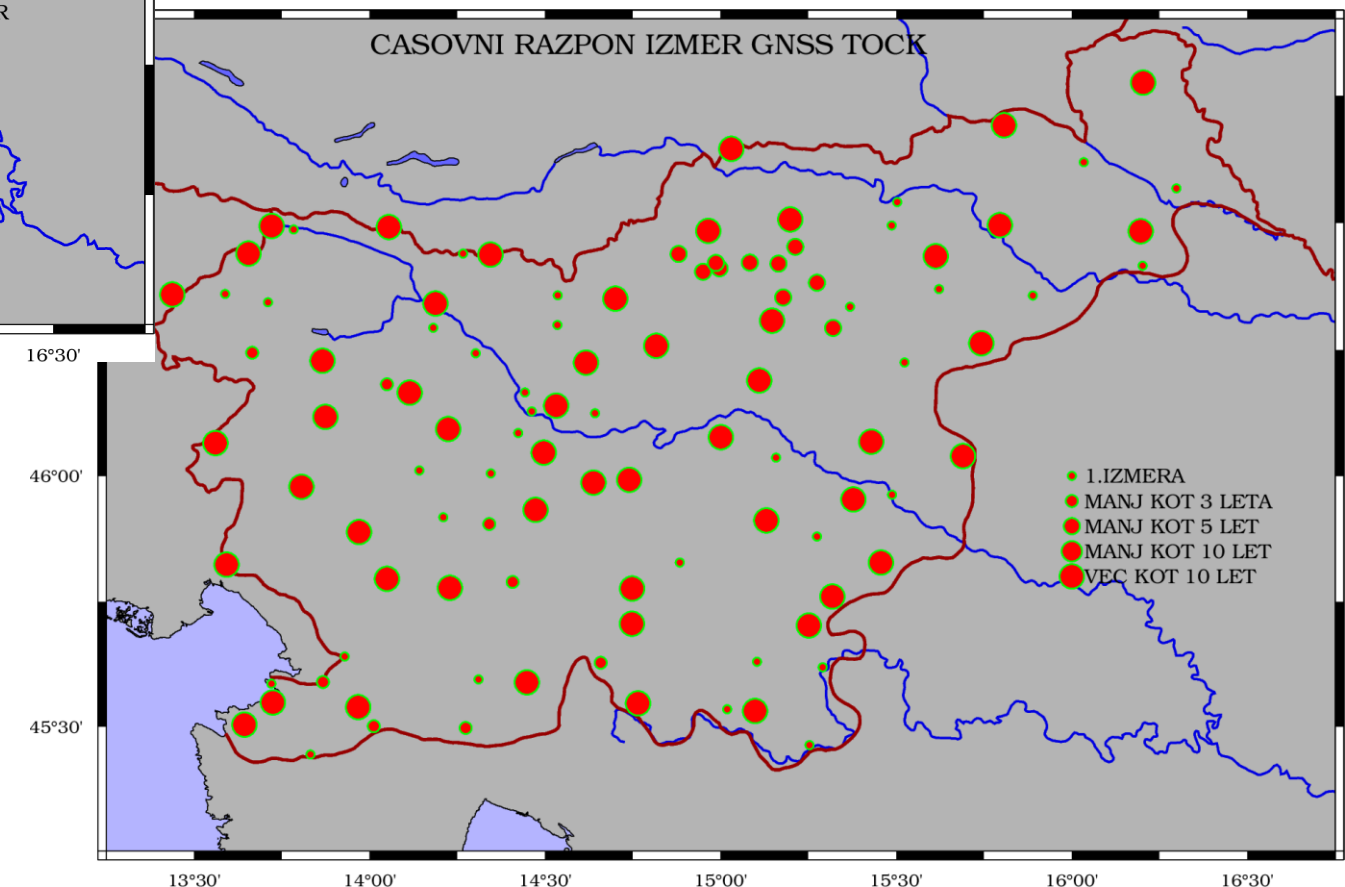


STEVILO IZMER GNSS TOCK



- 1. IZMERA
- 2. IZMERI
- 3. IZMERE
- 4-12. IZMER

CASOVNI RAZPON IZMER GNSS TOCK



- 1. IZMERA
- MANJ KOT 3 LETA
- MANJ KOT 5 LET
- MANJ KOT 10 LET
- VEC KOT 10 LET

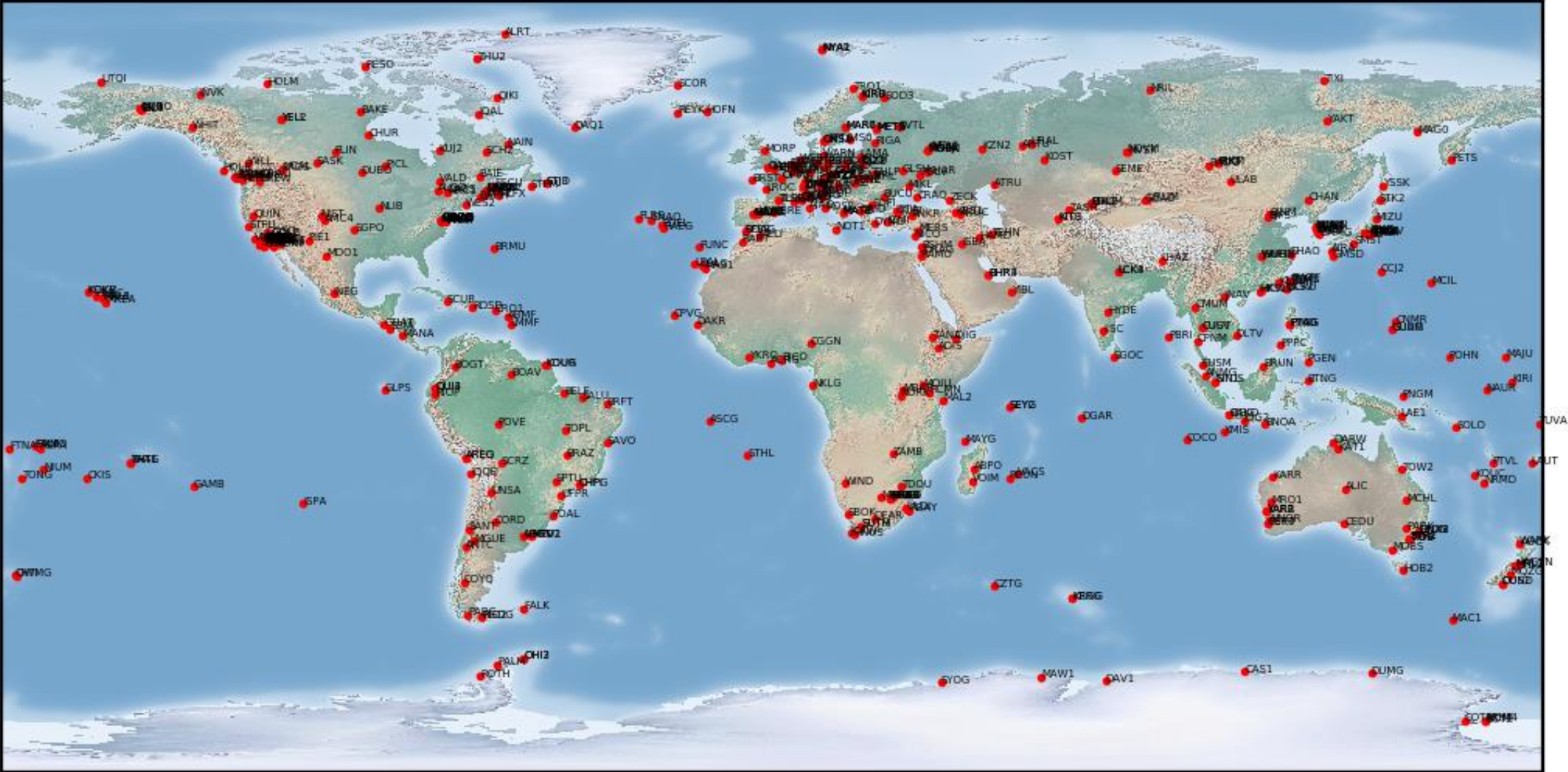
Stalno delujoče postaje GNSS

- Pojav prvih že v 90-ih letih 20. stoletja
- Na začetku – znanstveni motivi / geodinamika
 - Kalifornija – potresi
 - Japonska – potresi
 - Posamezne postaje – znanstveni vidik
- Potres v Landers, Kaliforniji ali Kobe, Japonska pokažeta praktičen doprinos stalnih postaj pri spremljanju potresov – pospešeno vzpostavljanje postaj po celem svetu (na Japonskem okoli 1200 stalno delujočih postaj)
- Ob razvoju tehnologije in informatike – namen bolj za geodetsko izmero kot za geodinamiko (primer omrežja SIGNAL)
 - Izbira lokacije ni primarno za geodinamiko, ampak dostop do spletnega in električnega omrežja

International GNSS Service – pomen globalnega omrežja stalnih postaj GNSS

- IGS je ključna organizacija, ki:
 - Omogoča izmero GNSS
 - Predstavlja hrbtenico globalnega koordinatnega sistema ITRS
- Pomen:
 - Čvrsto ogrodje, na katerega so navezane vse ostale geodetske mreže GNSS
 - Zagotavlja produkte, s katerimi vsak lahko enostavno dostopa do ITRS in do GNSS
- Osnova: omrežje postaj (okoli 500)
- <https://igs.org/>

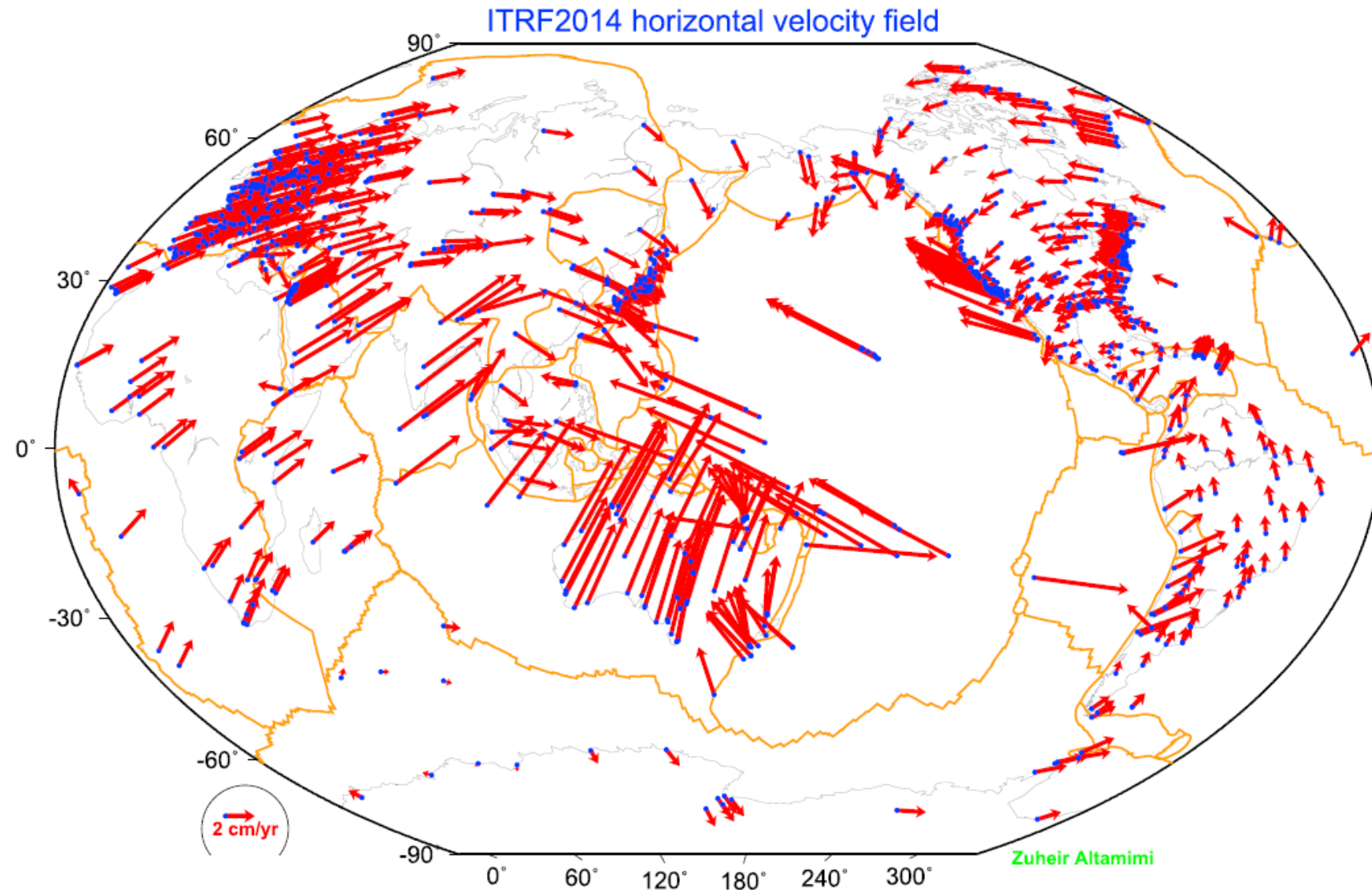
Omrežje postaj GNSS službe IGS



Produkti IGS

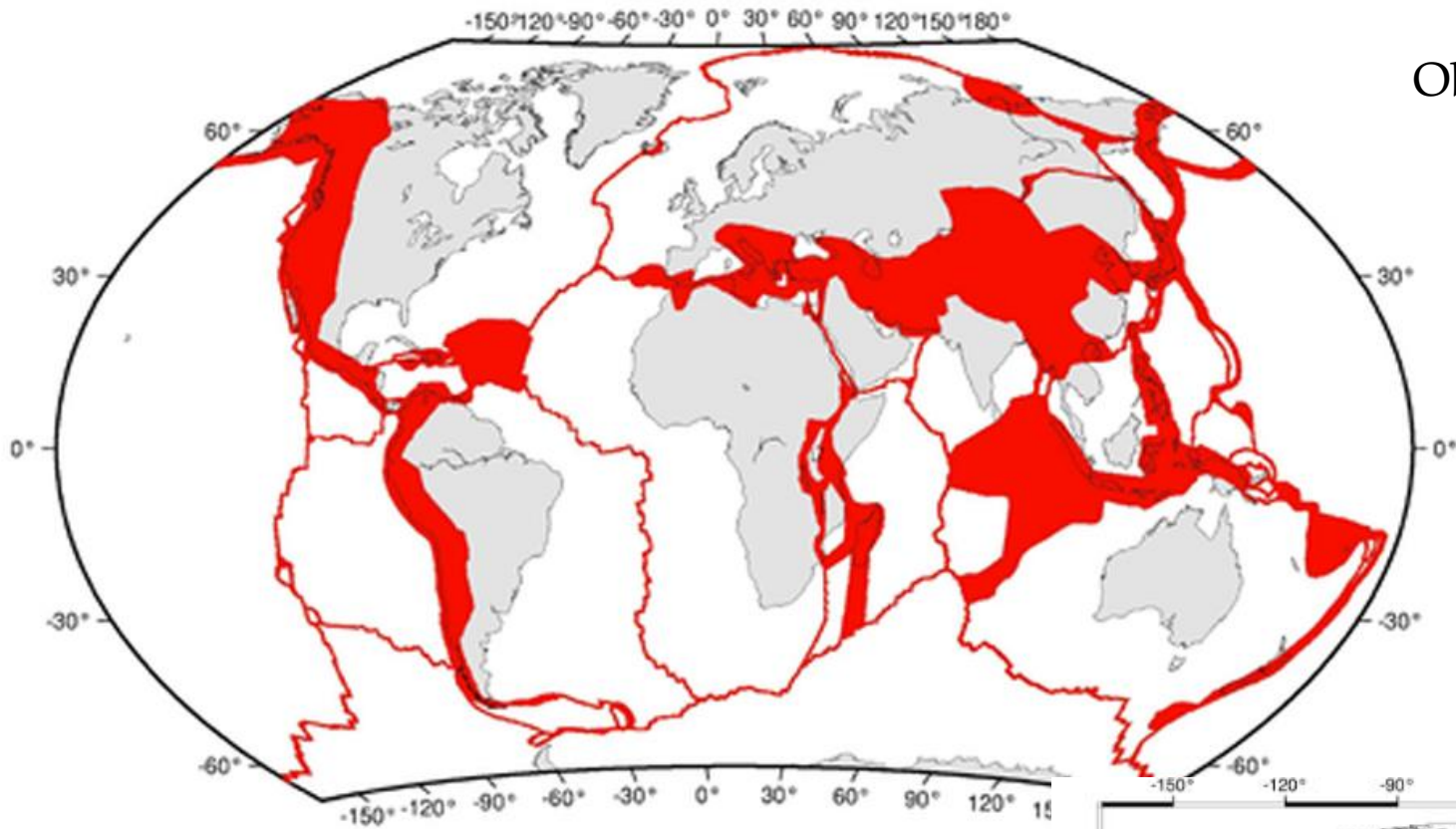
- Precizne efemeride vseh satelitov vseh satelitskih sistemov
- Precizni popravki ur satelitov
- Precizni parametri rotacije Zemlje
- Kakovostne koordinate in vektorje hitrosti postaj GNSS, ki so vključene v IGS
- Modele atmosfere (ionosfera, troposfera)
- Kalibriranje sistema in sistematični pogreški sistemov

Ploščna tektonika in GNSS

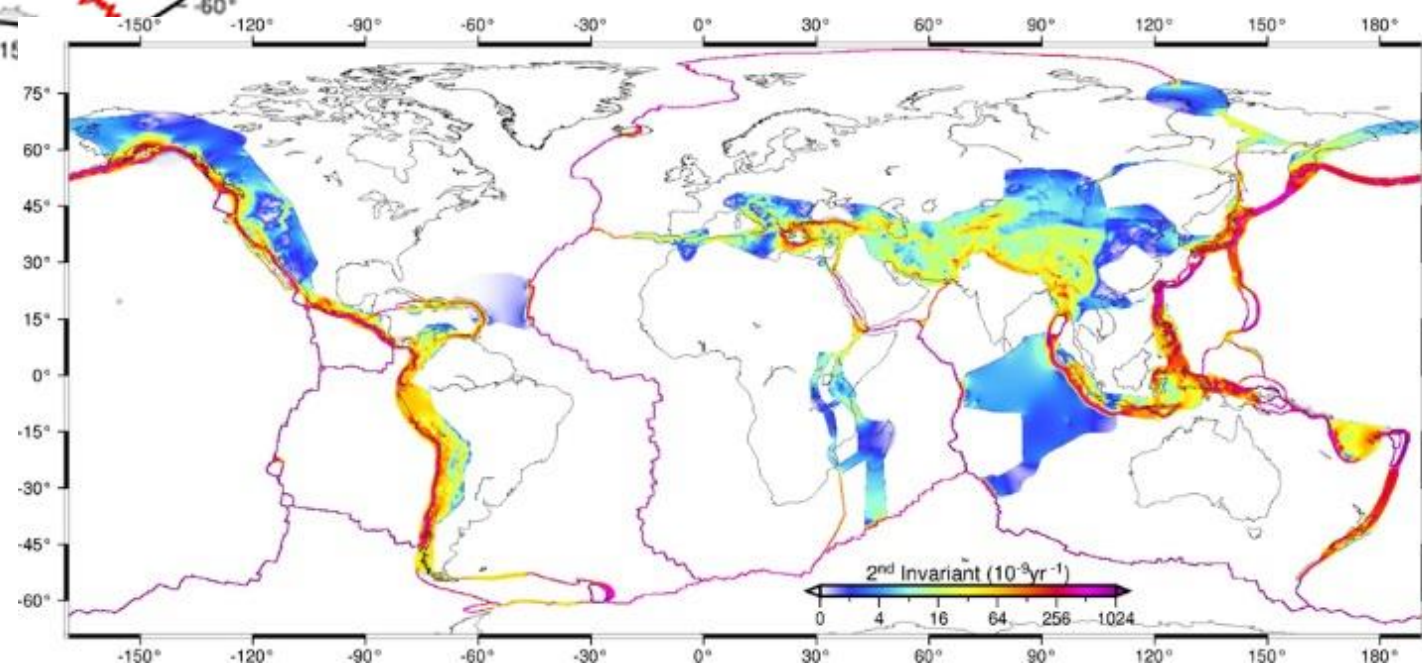


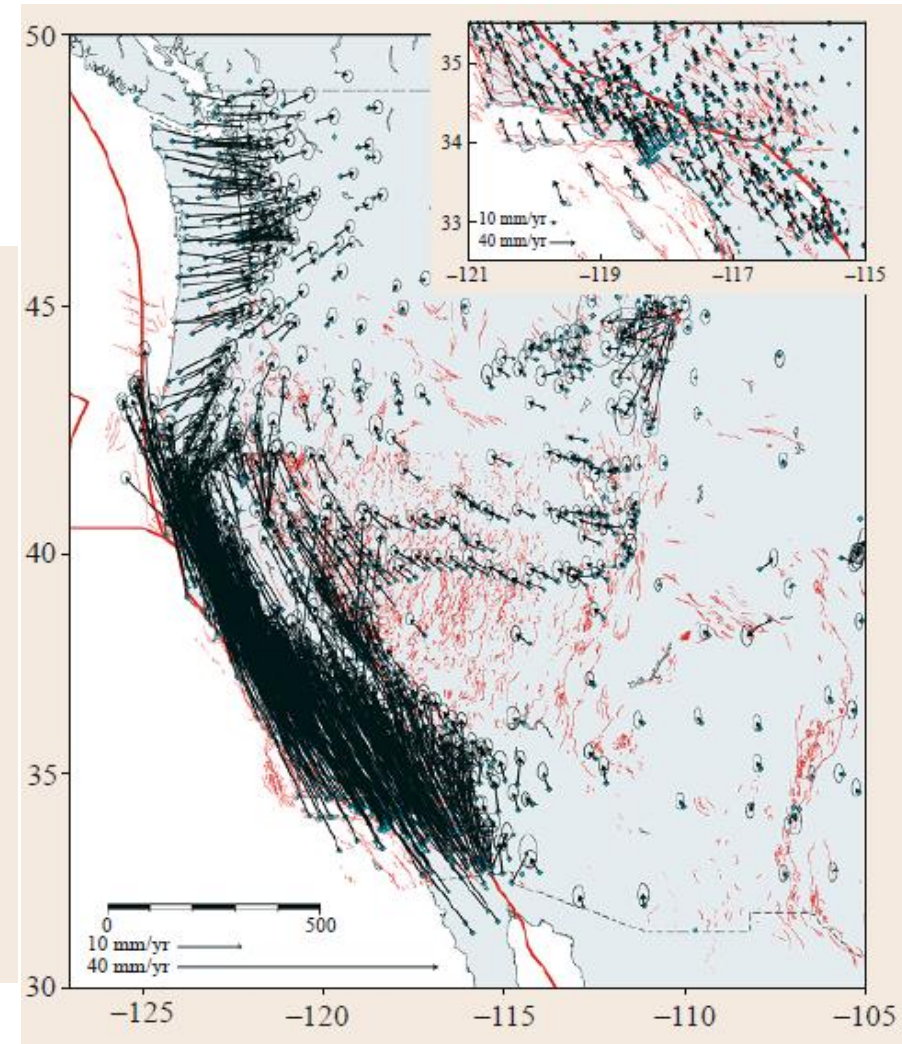
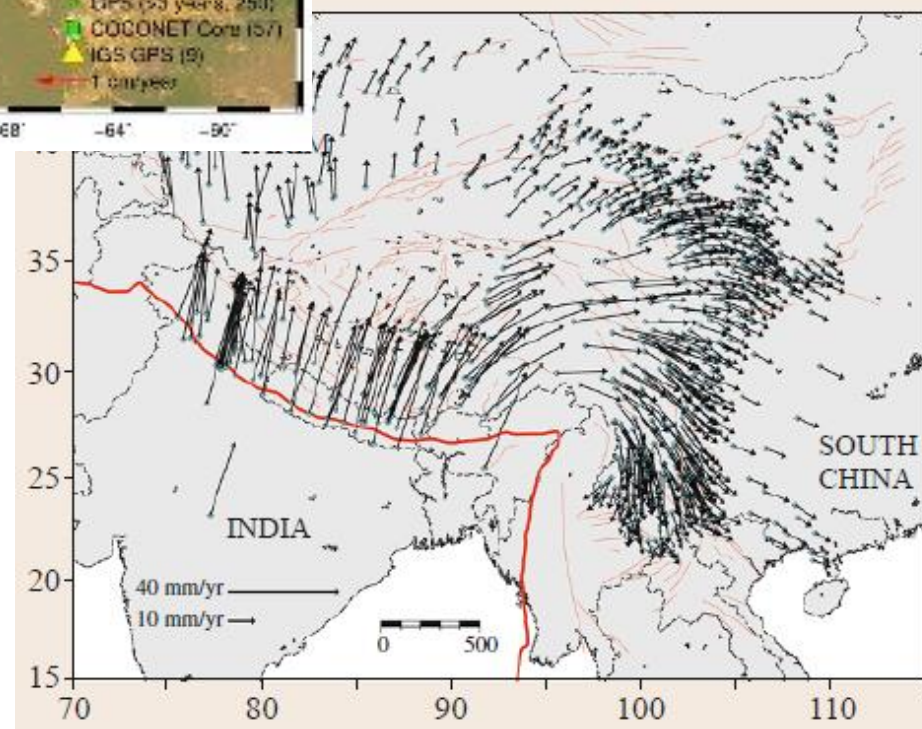
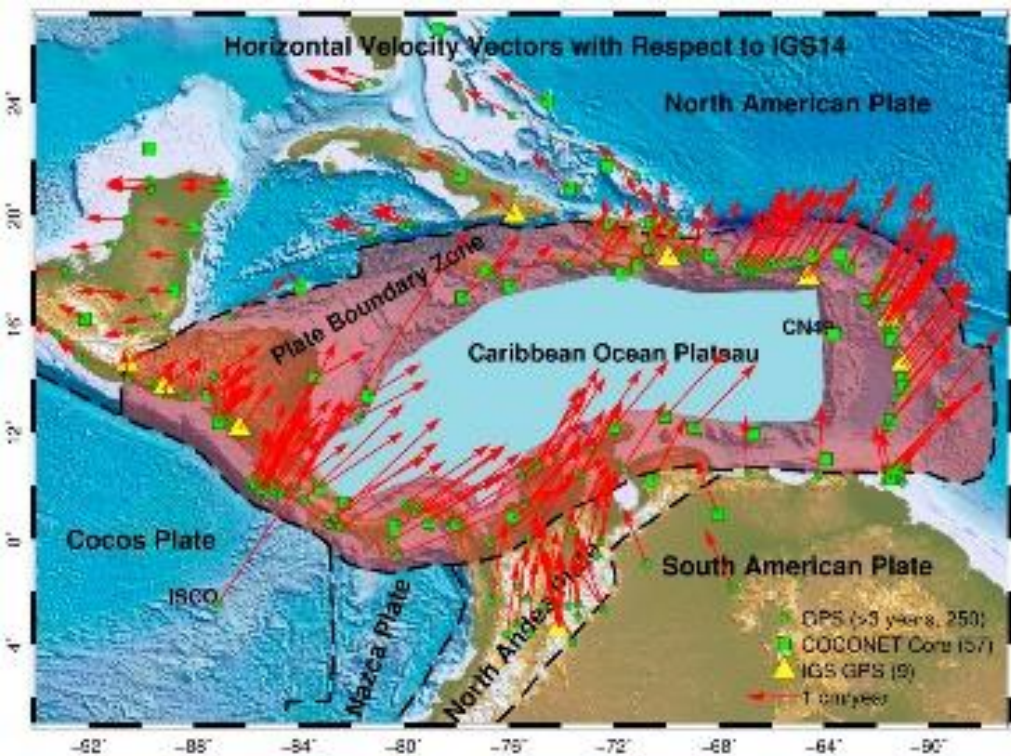
- Določitev vektorjev hitrosti številnih točk/postaj po svetu
- Določitev mej med ploskvami
- Opis gibanja posamezne plošče

Območja deformiranja



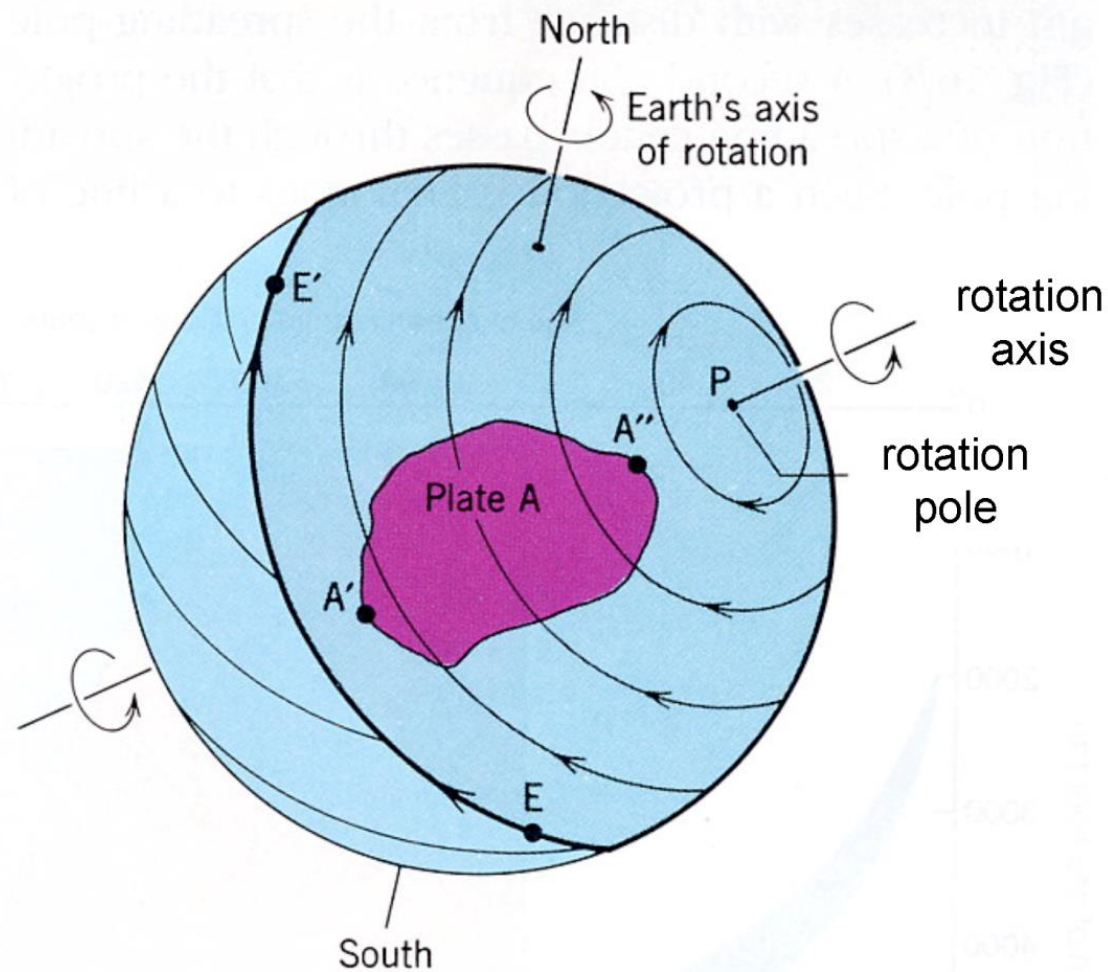
Deformacije območja



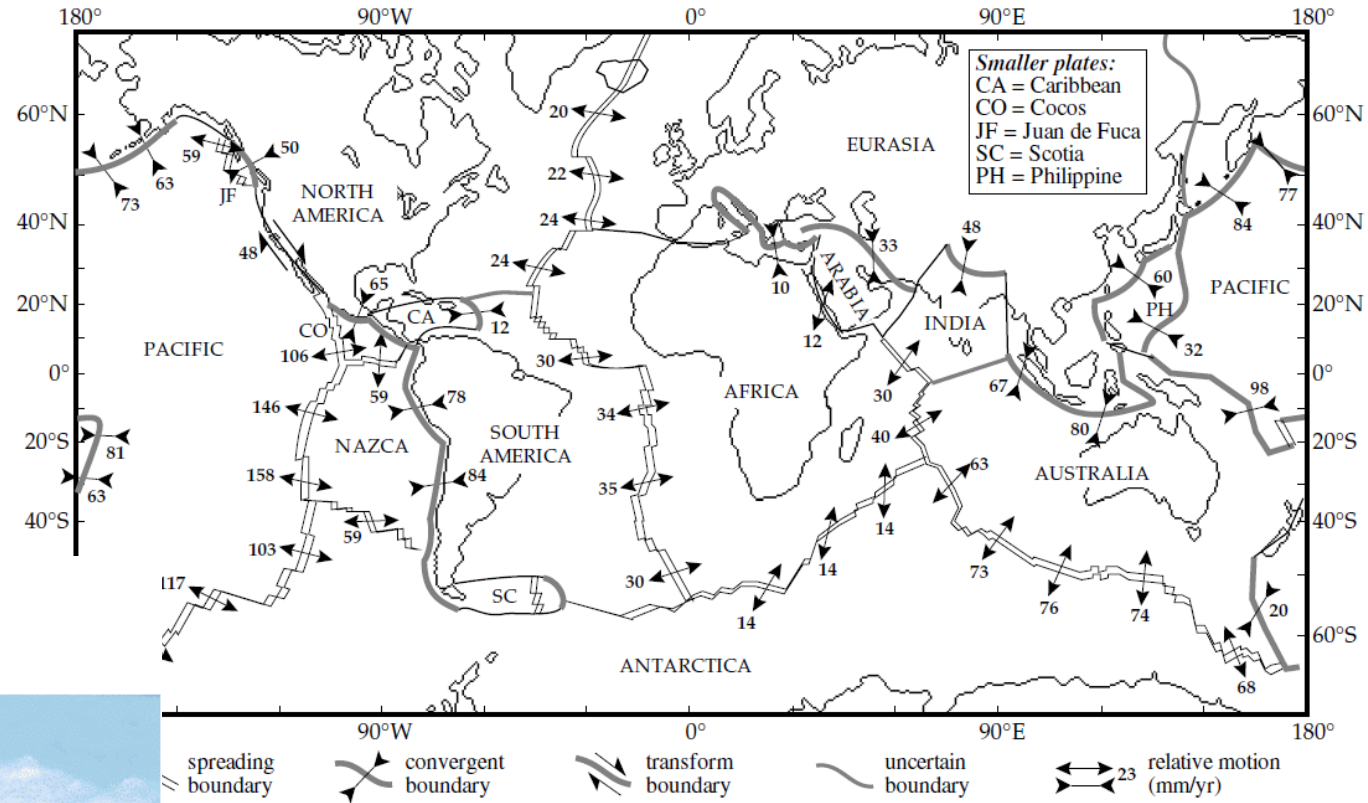
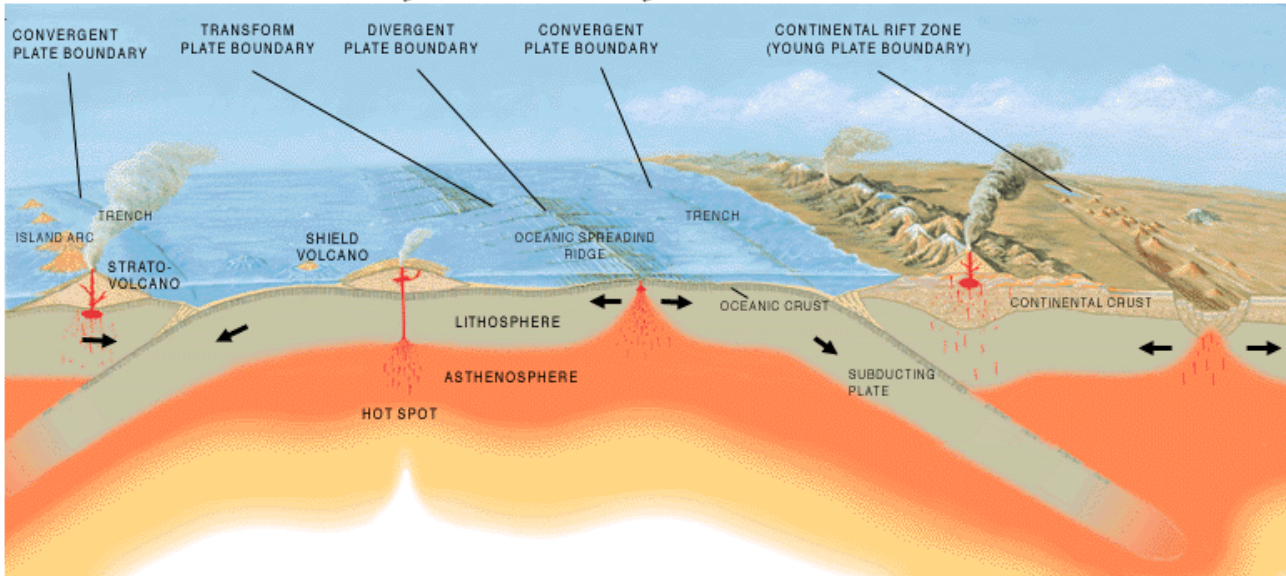
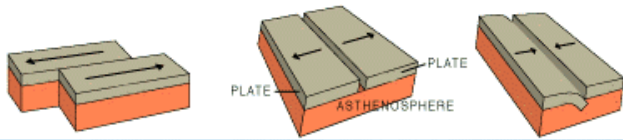


Gibanje tektonskih plošč na Zemlji

Gibanje lahko opišemo z Eulerjevim polom in kotno hitrostjo rotacije plošče okoli pola

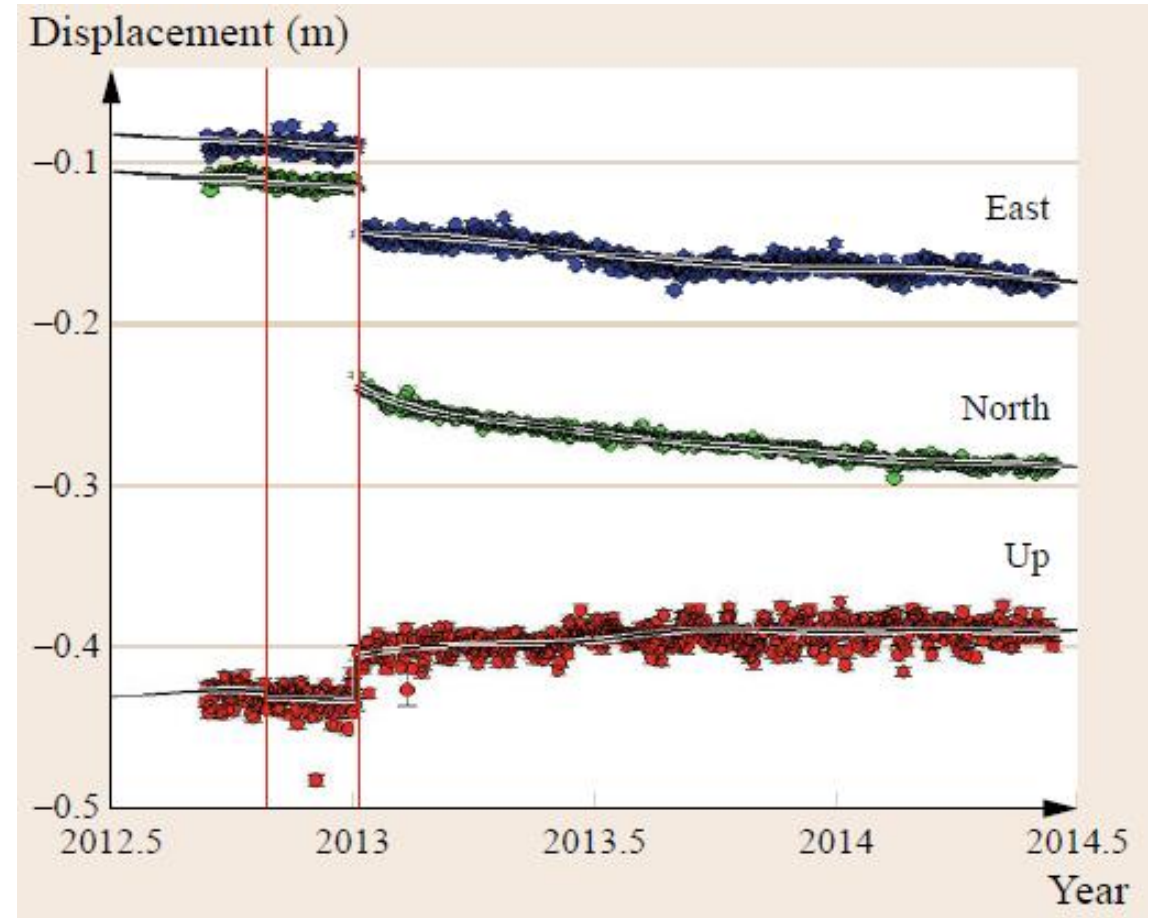


Stiki med ploščami so različni!



Vloga GNSS pri potresih

- Geodeti lahko zagotovimo:
 - Velikost in smer premika
 - Opis gibanja točk:
 - Pred potresom
 - Med potresom
 - Po potresu
- Primer: Potres na Aljaski (Craig) – 5. januar 2013
 - Magnituda 7,5
 - Prikaz premika med potresom in po-potresna relaksacija



Potres v Petrinji, Hrvaška

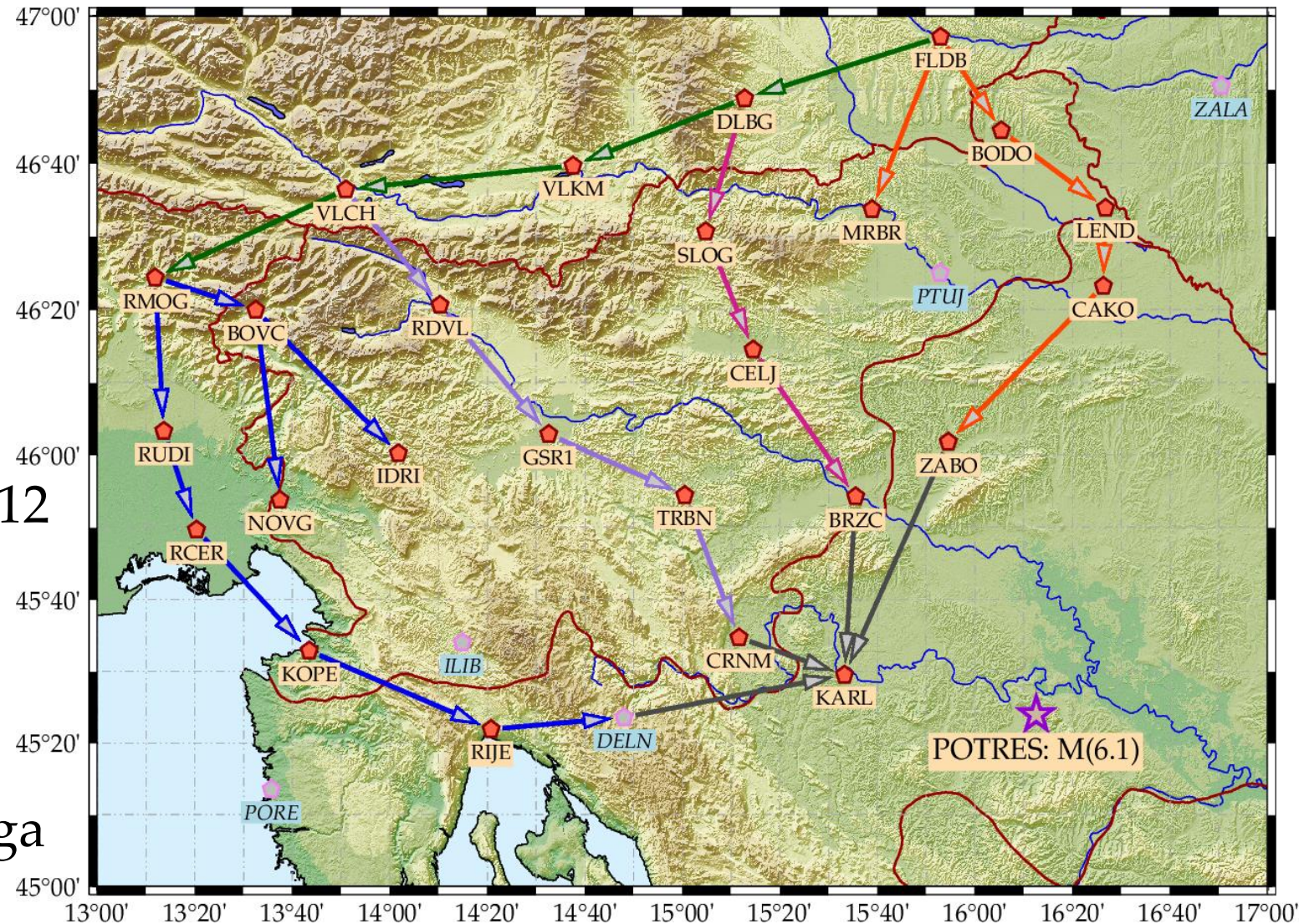
Približno 50 km južneje od Zagreba

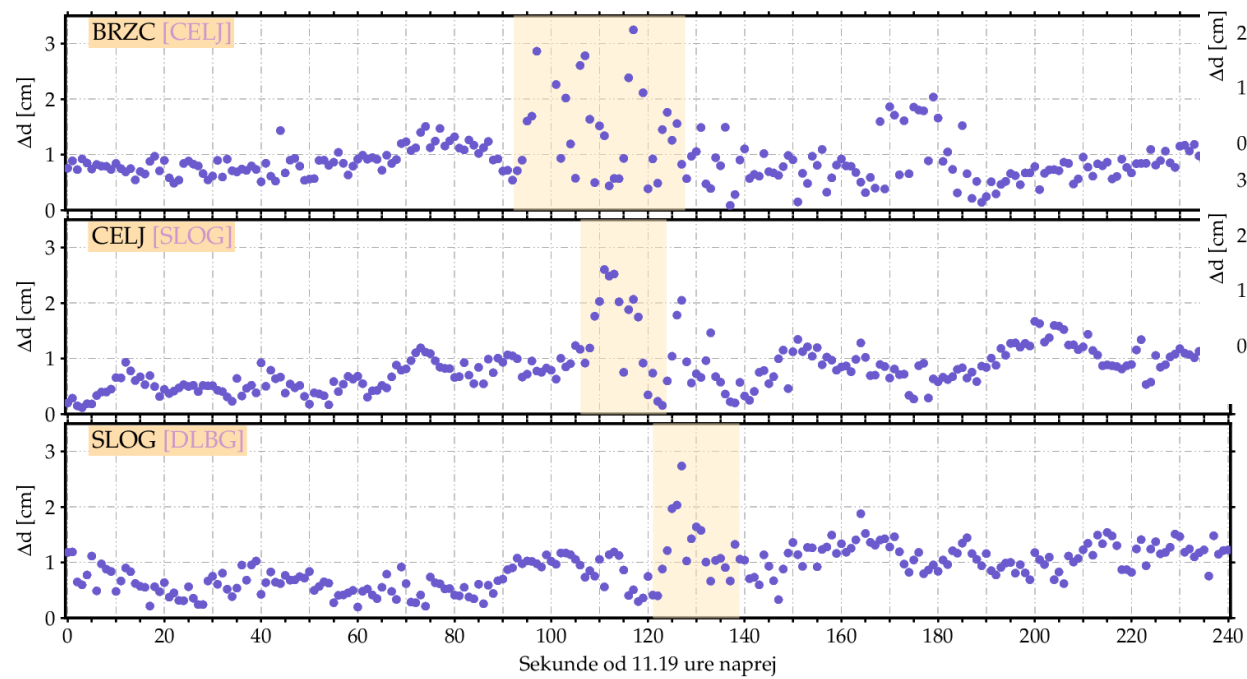
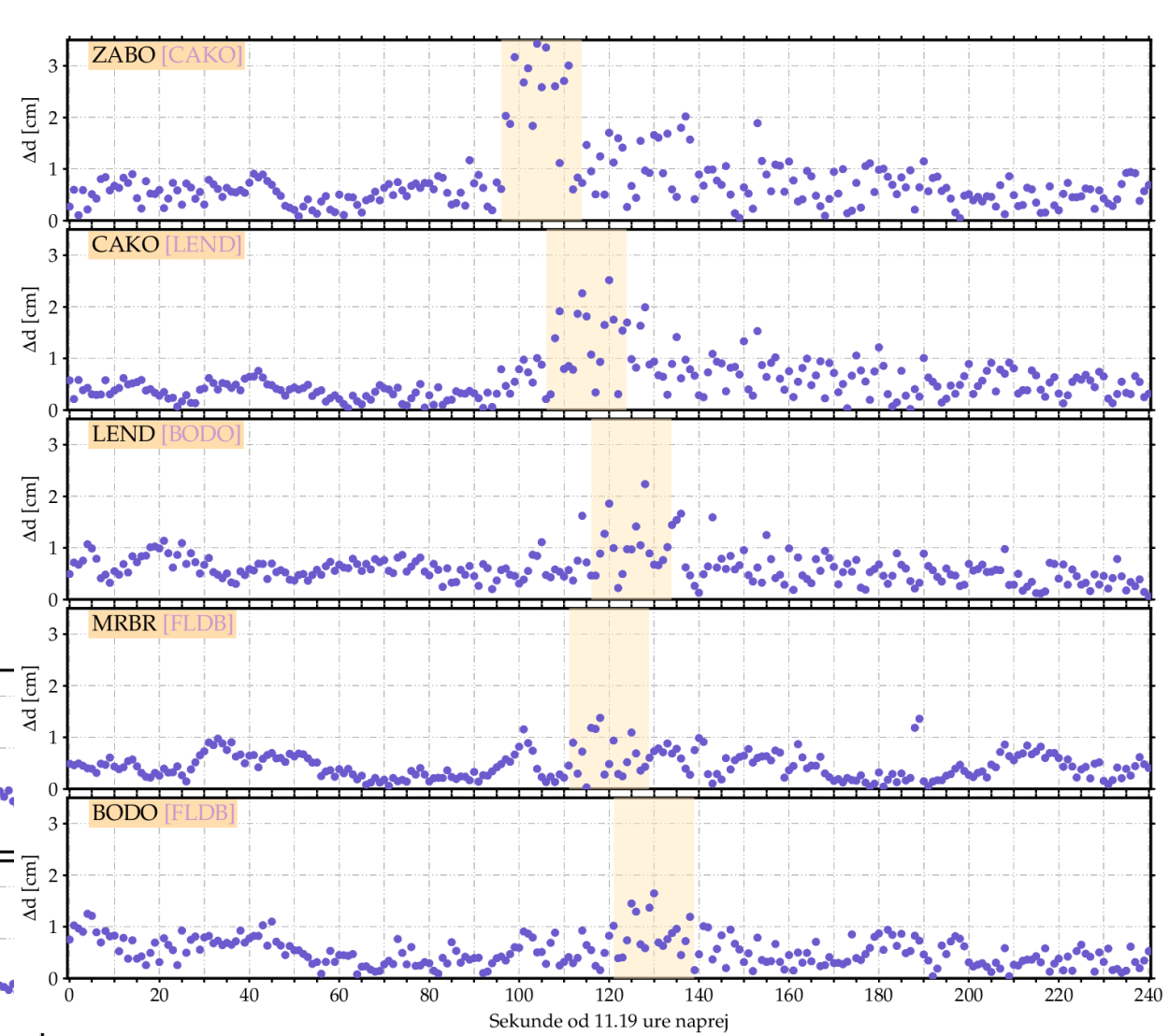
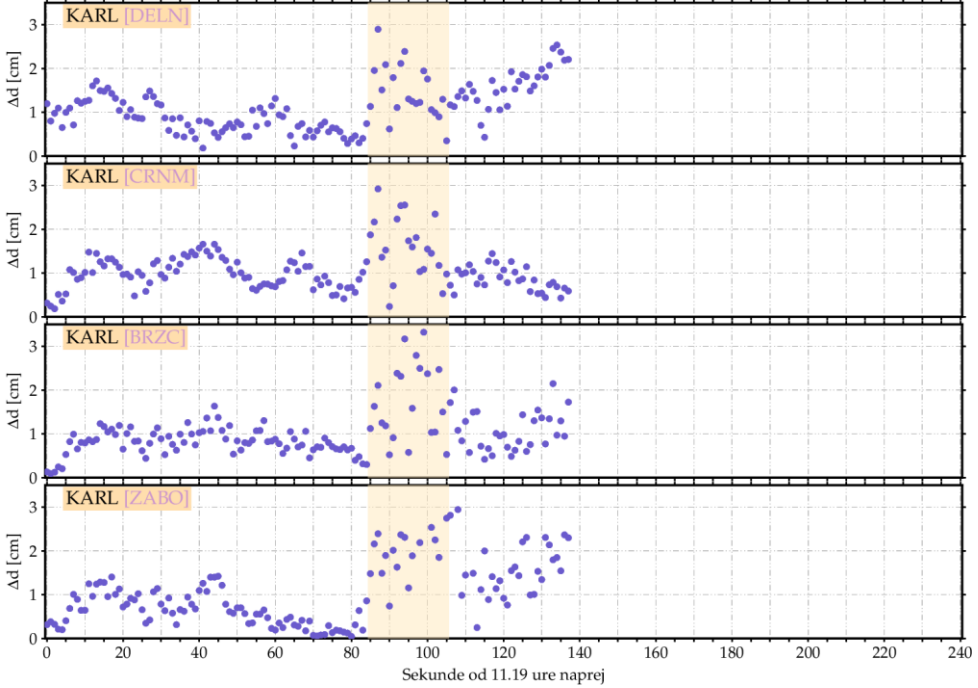
Magnituda 6.1

29. December 2020, malo po 12 uri po lokalnem času

Kaj uporabimo za mero?

Spremembo horizontalne dolžine posameznega baznega vektorja

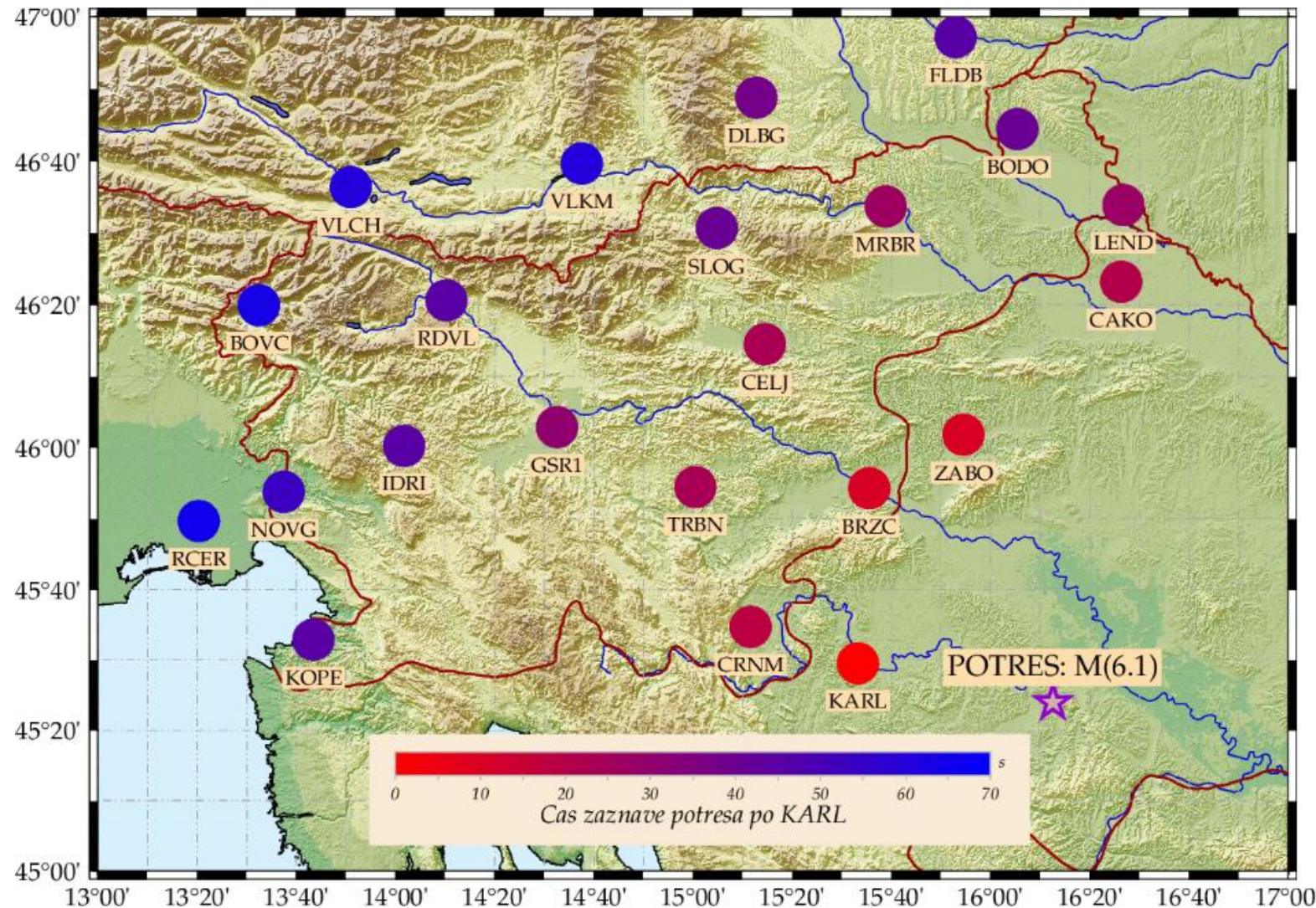




Potres v Petrinji, Hrvaška

Potres smo zaznali praktično na vseh postajah GNSS

Od prve zaznave potresa (KARL) do postaj v Avstriji je minilo okoli 70 sekund



Obremenitev/razbremenitev površja

- Razbremenitev: post-glacialno dviganje površja:
 - Skandinavija, Aljaska
- Obremenitev površja:
 - Vsakoletna sprememba višin zaradi velike količine snega in ledu:
 - Aljaska, Antarktika

