



Sveučilište u Zagrebu
RUDARSKO
GEOLOŠKO
NAFTNI FAKULTET



STRUKTURNΑ GEOLOGIJA

Bruno Tomljenović

Koncept moderne
strukturne analize

- **DESKRIPTIVNA STRUKTURNΑ ANALIZA:**
analiza u okviru koje se određuju vrste primarnih i naročito sekundarnih, deformacijskih struktura u stijenama i/ili stijenskim tijelima, njihove morfološke značajke (oblik, veličina), orientacija i prostorni raspored.

Provodi se kroz sljedeće postupke:

- a) Prepoznavanje i definiranje struktura i stukturnih elemenata,
- b) Mjerjenje orientacije i veličine što je moguće većeg broja stukturnih elemenata,
- c) Prikaz izmjerениh stukturnih elemenata na kartama i/ili na stukturnim dijagramima.

Time se omogućava:

- d) Prostorna analiza rasporeda i orientacije stukturnih elemenata,
- e) Procjena geometrijskog reda (pravilnosti) sastavnih elemenata u promatranoj stijeni, stijenskom tijelu i/ili području istraživanja.



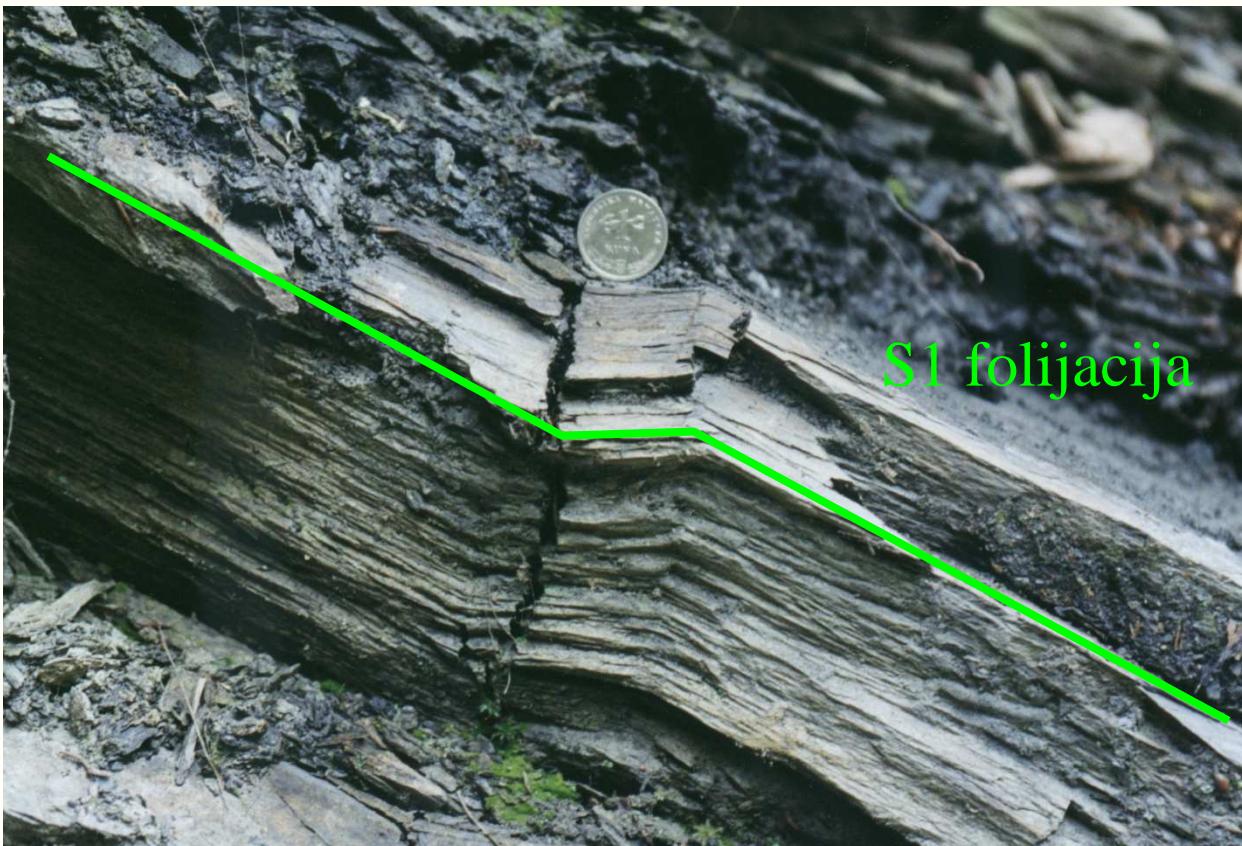
a) Strukturni elementi

čine fizičke i geometrijske komponente strukture, stijene i/ili stijenskog tijela. S obzirom na veliku raznolikost primarnih i deformacijskih struktura, postoji brojni i po tipu vrlo različiti strukturni elementi, karakteristični za odgovarajući tip deformacijskih struktura. Općenito, međutim, razlikuju se:

- **Fizički strukturni elementi, i**
- **Geometrijski strukturni elementi.**

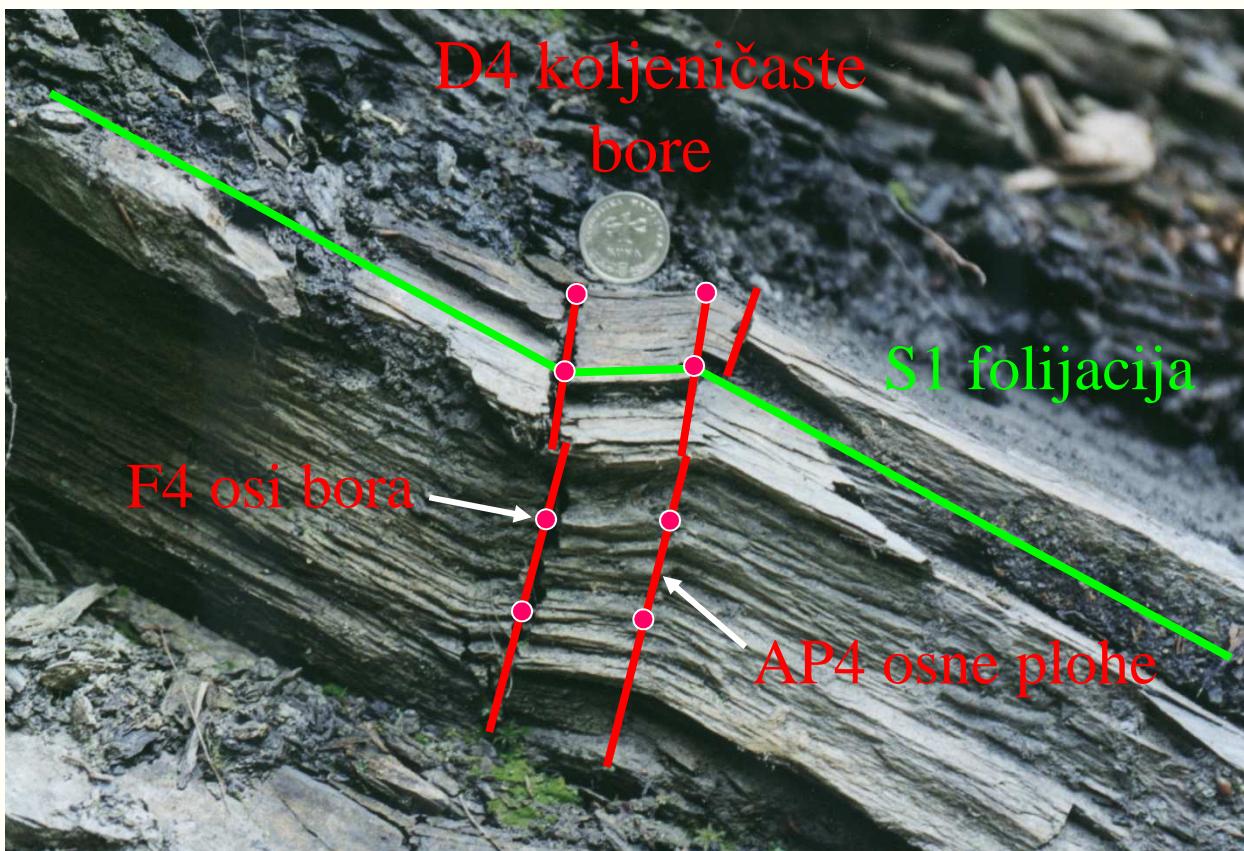


- **Fizički strukturni elementi** predstavljaju **stvarne, materijalne elemente** neke strukture, stijene i/ili stijenskog tijela, čija se orijentacija i veličina može direktno izmjeriti na izdanku (npr. slojevitost, klivaž, folijacija, lineacija i dr.)



S1 folijacija u slejtu s Medvednice - fizički strukturni element koji ukazuje na boranje slejta nakon formiranja S1 folijacije (iz Tomljenović, 2002).

- Geometrijski strukturalni elementi predstavljaju **zamišljene geometrijske elemente** (pravce i/ili ravnine) neke strukture, koji nam pomažu u opisu njenih mofroloških značajki (npr. osi i osne plohe bora i dr.). Orientacija i veličina ovih elemenata može se također izmjeriti na izdanku, ali obično uz pomoć pomagala kojim predočavamo taj element (npr. pomoću olovke, terenske bilježnice i dr.)



b) Mjerenje orijentacije i veličine struktturnih elemenata

na terenu se provodi pomoću **geološkog kompasa** i **mjerne vrpce**. Ova mjerenja ponekad obavljamo i naknadno u kabinetu, mjeranjem struktturnih elemenata na orijentiranim uzorcima, petrografske preparatima, satelitskim i aerofotosnimkama, te fotografijama s terena na kojima postoje označene geografske koordinate ili azimuti i mjerilo.



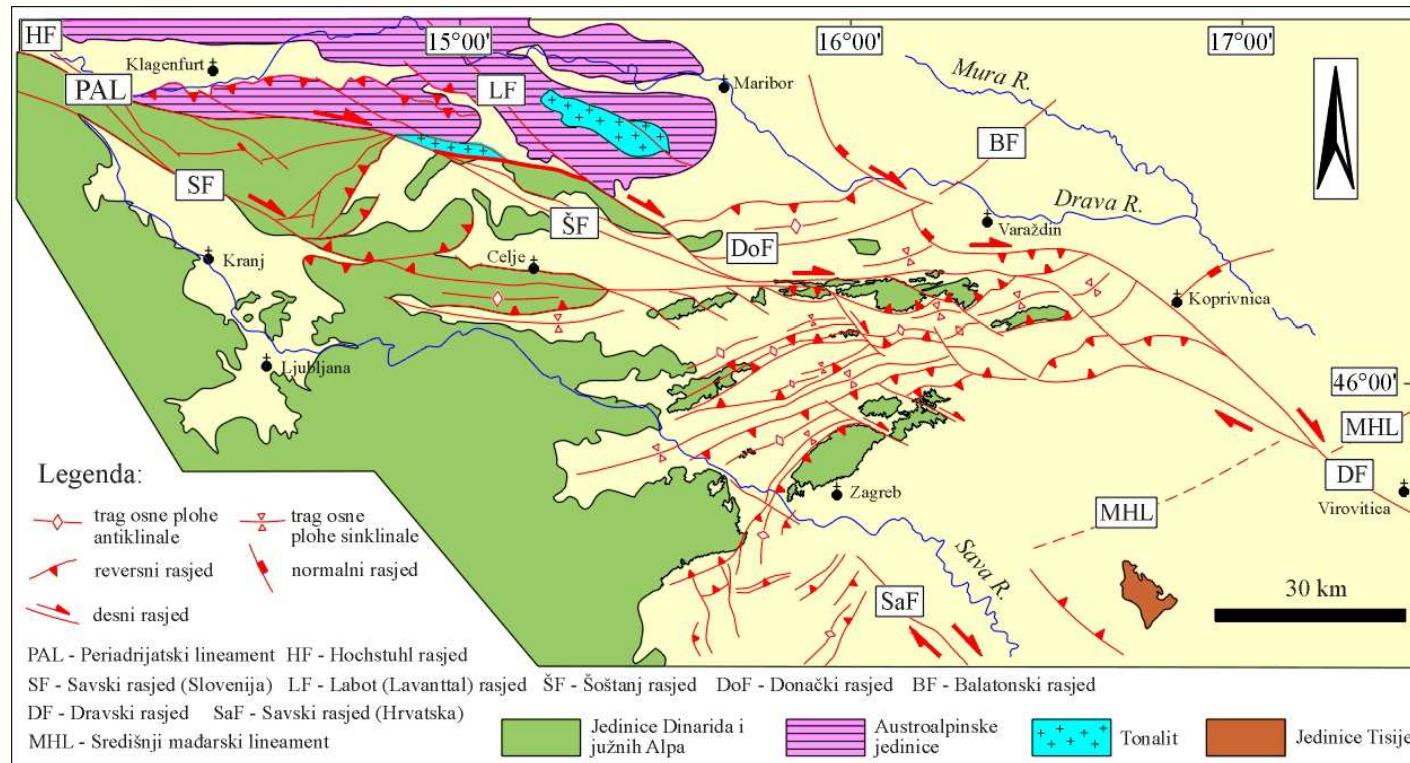
Geološki kompas GEKOM tvrtke
Beithaupt/Kassel (<http://www.breithaupt.de>)

Pri tom je, naravno, potrebno **znati i zabilježiti točnu lokaciju** na kojoj su izmjereni strukturalni elementi, prikupljeni uzorci ili na koju se odnose snimke koje se koriste za kabinetsku analizu i mjerjenje.

Za precizno bilježenje lokacija mjerjenja u novije vrijeme koriste se **GPS uređaji**, odnosno **terenska računala** u kojima je ugrađen GPS uređaj.

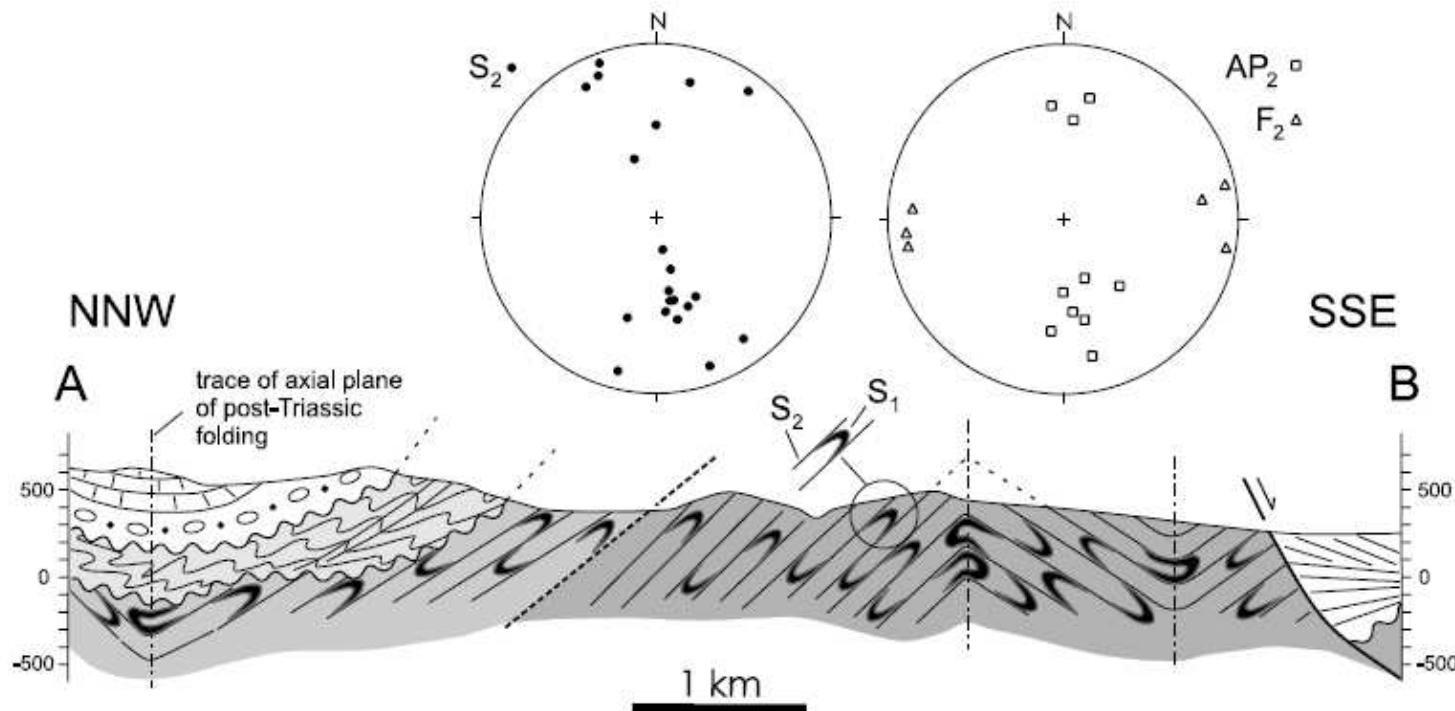
c) Prikaz izmjerenih strukturalnih elemenata

provodi se njihovim projiciranjem na **topografske karte**, čime nastaju **strukturne i tektonske karte**, odnosno **geološke karte**, kada se uz strukturne elemente prikažu i svi ostali, relevantni geološki podaci.



Tektonská mapa za područje sjeverne Hrvatske i istočne Slovenije (prema Tomljenović & Csontos, 2001).

Osim na kartama, strukturne elemente prikazujemo i u formi **profila**, **blok dijagrama**, **shematskih crteža** i **skica**.

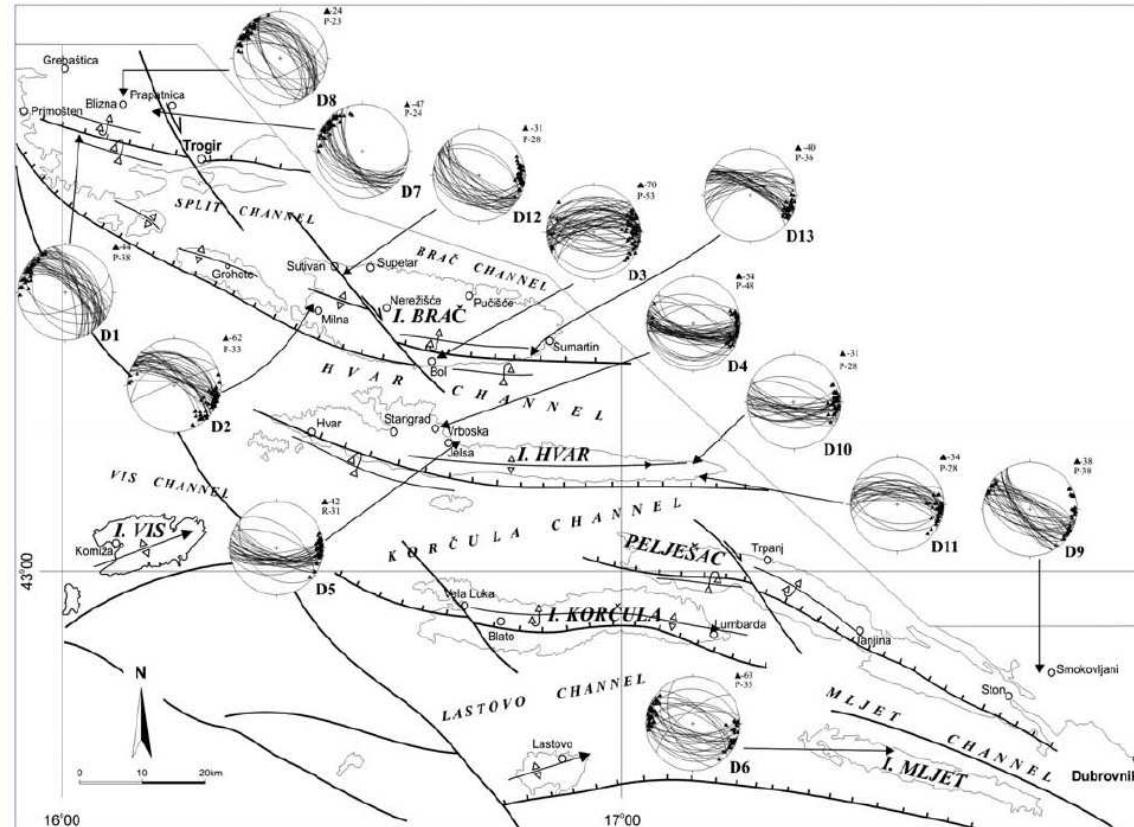


Strukturni profil u području Kutjevačke rijeke u istočnom dijelu Papuka (iz Balen et al., 2006). S₁ i S₂ označavaju dvije generacije folijacija, F₂ osi i AP₂ osne plohe bora prikazane na profilu i projecirane na stereogramima.

U slučaju kad na pojedinim lokacijama ili u nekom dijelu područja istraživanja izmjerimo veći broj strukturalnih podataka, koje zbog formata i mjerila karte, profila ili crteža nije moguće sve prikazati, koristimo se različitim vrstama dijagrama kao što su **dijagrami u stereografskoj projekciji** (ili kraće **stereogrami**), **rozeta-dijagrami**, **istogrami** i sl.

Ovi dijagrami često se koriste u kombinaciji s kartama, profilima i crtežima kao dodatna informacija o orijentaciji strukturalnih elemenata u pojedinim domenama područja istraživanja.

Tektonska karta za područje srednjodalmatinskih otoka (iz Prtoljan et al., 2008). Stereogrami prikazuju orijentaciju osi (trokuti) i osnih ploha slamp-bora (tragovi) na pojedinim lokacijama.



d) Prostorna analiza rasporeda i orijentacije strukturnih elemenata - procjena geometrijskog reda u promatranoj stijeni ili području istraživanja

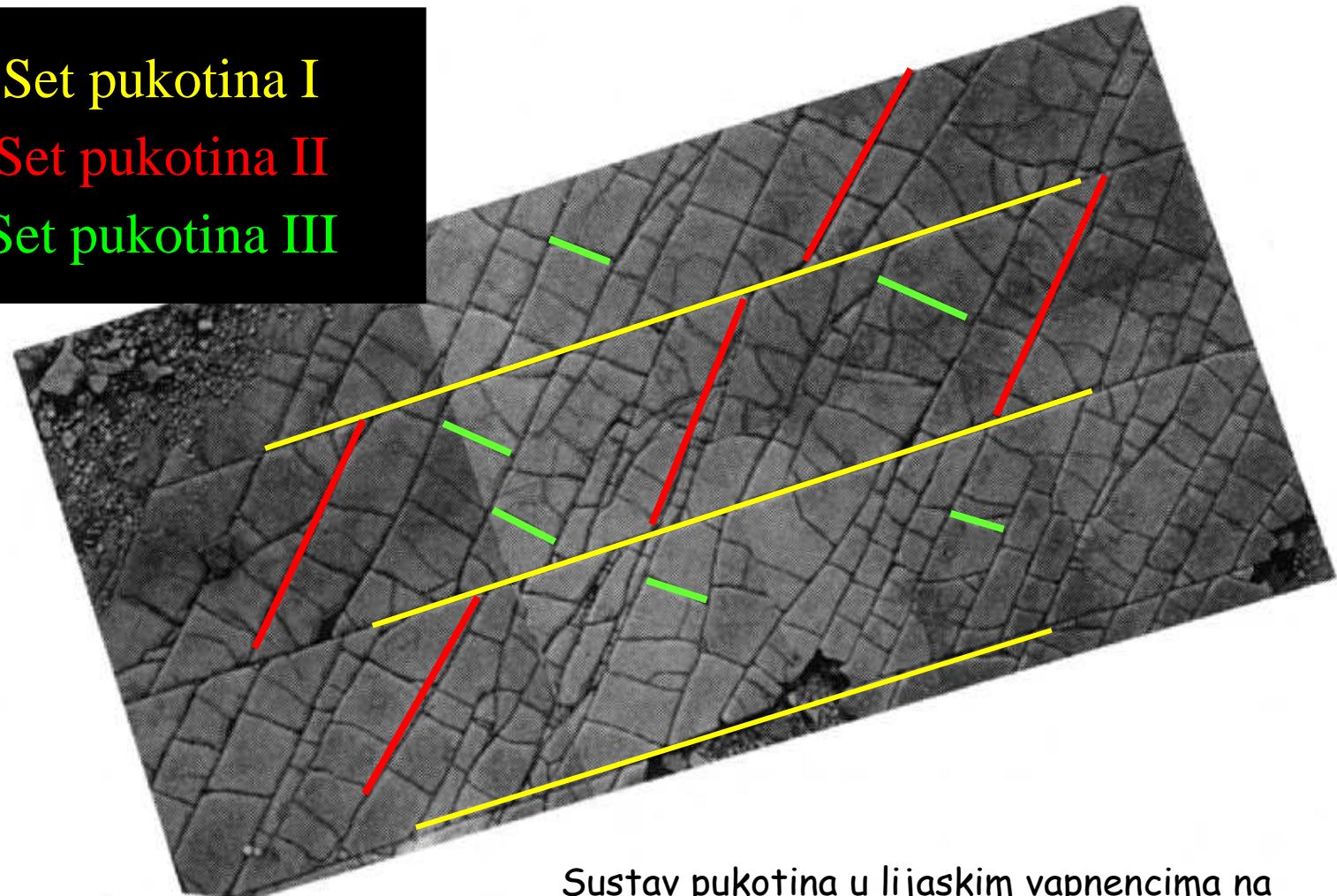
Strukture i strukturne elemente koje smo prepoznali i definirali u stijeni, stijenskom tijelu ili području istraživanja, nastojimo pridružiti odgovarajućem "skupu", odnosno setu struktura ili strukturalnih elemenata.

Set struktura, odnosno set strukturalnih elemenata čine strukture, odnosno strukturni elementi istih ili vrlo sličnih morfoloških značajki, pretežito međusobno paralelno orijentirani na cjelokupnom području promatranja ili u njegovim pojedinim domenama (npr. set pukotina, rasjeda, bora i dr.)

Više korelativnih setova struktura i/ili strukturalnih elemenata čini **sustav struktura, odnosno sustav strukturalnih elemenata** (npr. sustav bora, rasjeda, pukotina, folijacija i dr.).



Set pukotina I
Set pukotina II
Set pukotina III



Sustav pukotina u lijaskim vapnencima na lokalitetu Lavernock Point na jugu Engleske (iz Rawnsley et al., 1998)

U deskriptivnoj strukturnoj analizi koju provodimo u nekom mjerilu opažanja (npr. u mikroskopskom mjerilu, odnosno u mjerilu mikroskopskog preparata; u mezoskopskom mjerilu, odnosno u mjerilu uzorka i/ili izdanka; te u megaskopskom mjerilu, odnosno u mjerilu nekog područja), naročitu pažnju treba posvetiti tzv. penetrativnim strukturama i strukturalnim elementima, tj. onim koji su izrazito učestali i praktički svuda prisutni u tom mjerilu opažanja.

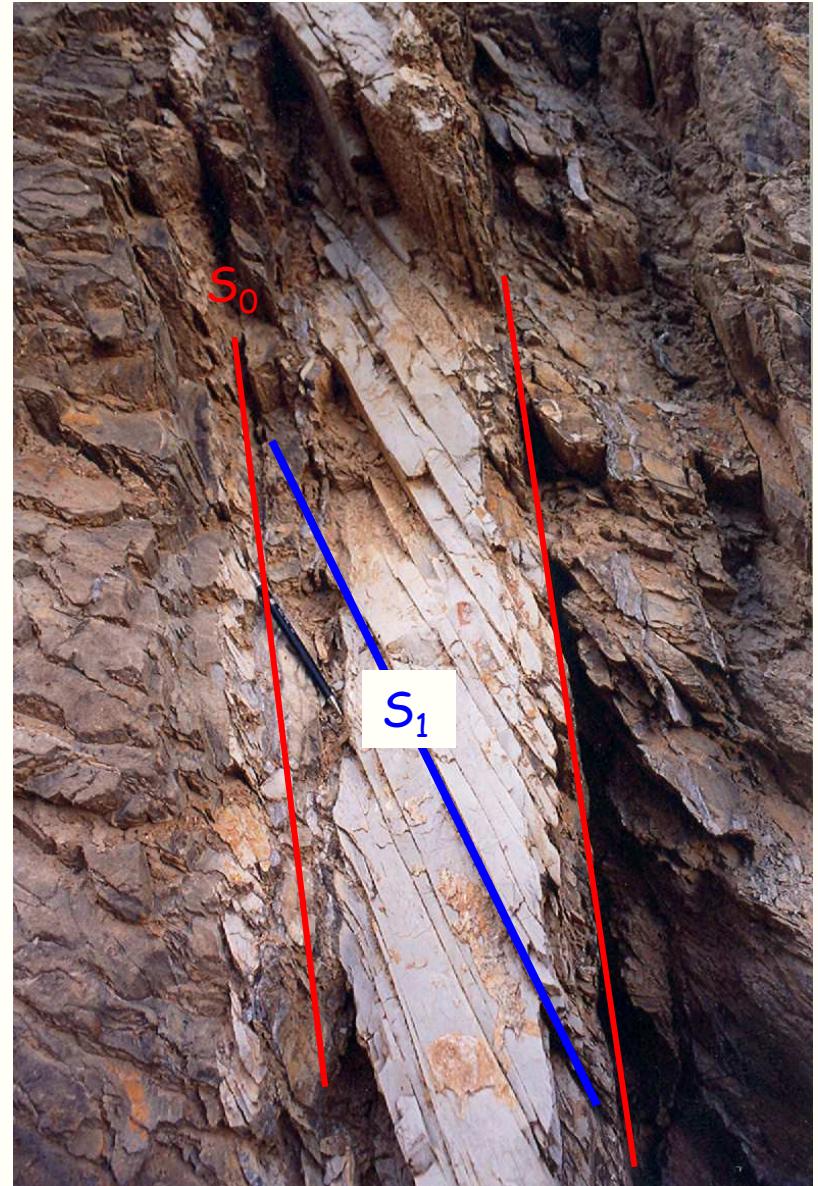


Slojevitost (S_0) je penetrativni strukturalni element u gornjokrednim vapnencima u mezoskopskom mjerilu opažanja (dolina Morače, Crna Gora).

Međutim, promjenom mjerila opažanja, mijenja se i penetrativni karakter pojedinih struktura i strukturnih elemenata !!!

Naime, promatramo li unutar svakog pojedinog sloja na istom izdanku s prethodne slike, **penetrativni strukturni element u gornjokrednim vapnencima je klivaž (S_1) !!!**

Radi potpunije spoznaje o strukturnim začajkama stijena, stijenskih tijela ili nekog područja istraživanja, poželjno je provesti deskriptivnu strukturu analizu u različitim mjerilima opažanja!



□ KINEMATIČKA STRUKTURNΑ ANALIZΑ:

analiza u okviru koje se nastoje prepoznati i rekonstruirati **pokreti i deformacijski mehanizmi** kojim su stijene i/ili stijenska tijela tijekom tektonskog događaja promijenila svoj prvotni položaj, orijentaciju, oblik i veličinu (*analiza deformacije* = engl. *strain analysis*)

Pri toj analizi najprije nastojimo prepoznati je su li se stijene i/ili stijenska tijela tijekom tektonskog događaja ponašala kao:

krta, rigidna tijela, ili kao

podatna, deformabilna tijela.

Drugim riječima, nastojimo najprije prepoznati **kako su se ponašale promatrane stijene u postojećim uvjetima naprezanja, temperature i dr.**

Da li kao: # kompetentne (rigidne), ili

nekompetentne (podatne) stijene?

O ponašanju stijena u različitim uvjetima naprezanja, temperature i dr., vidi u poglavlju **01-Uvod-Deformacijske stukture !!!**

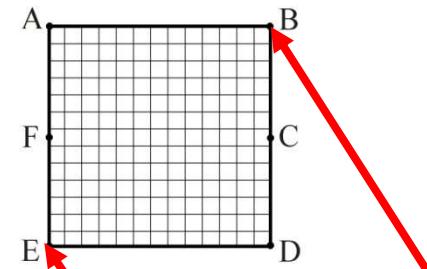


Ukoliko se nakon tektonskog događaja u stijenama i/ili stijenskim tijelima nije promijenio prvotni prostorni raspored među sastavnim "česticama", smatramo da su se tijekom tog događaja ponašala kao **krta, rigidna ili kompetentna tijela, koja nisu pretrpjela internu deformaciju!!!**

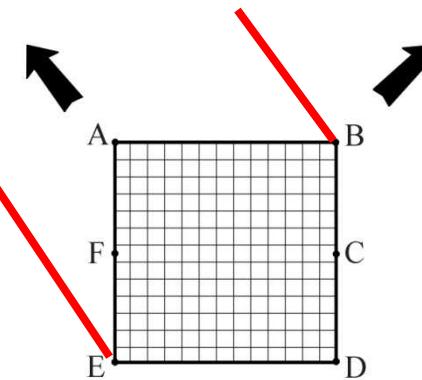
Promjenu prvotnog položaja i/ili orientacije takvih tijela opisujemo putem **translacije i/ili rotacije rigidnog tijela.**

Pri translaciji, tijelo mijenja prvotni položaj na taj način da se sve promatrane točke u tom tijelu kreću duž paralelnih pravaca (najčešće po ploham diskontinuiteta – plohma rasjeda, pukotina, slojeva i sl.)

TRANSLACIJA
RIGIDNOG TIJELA



BEZ INTERNE DEFORMACIJE



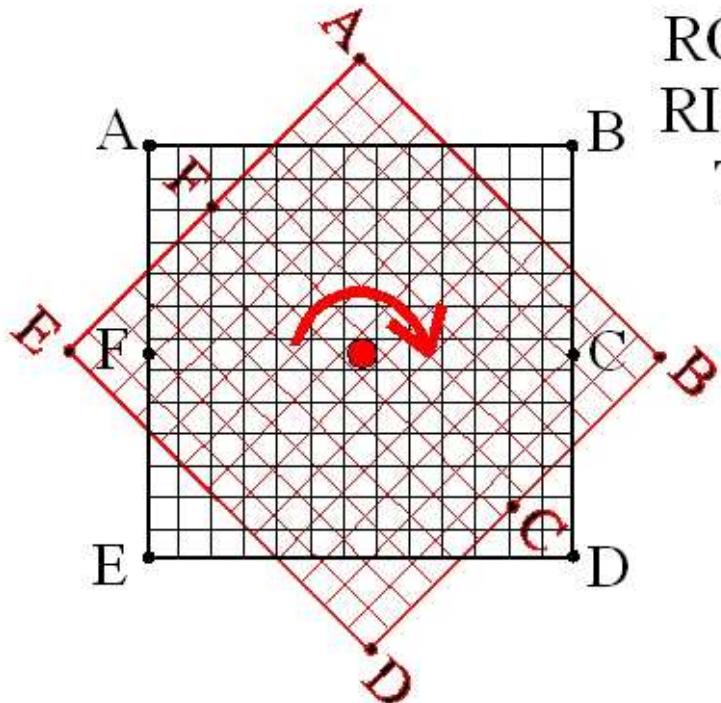
Vektor pomaka:
- pravac pomaka
- smjer pomaka
- veličina pomaka

Translacijske pokrete redovito susrećemo kod rasjeda - po rasjednim ploham dolazi do translacije ili pomaka rasjednih krila, duž pravca koji je paralelan sa strijama na rasjedu.

Primjer translacijskih pokreta:
Pomak rasjednih krila po pravcu paralelno sa strijama na rasjedu u gornjokrednim vapnencima (na cesti G. Brat - Komolac u okolini Dubrovnika).



Pri rotaciji, tijelo mijenja prvočinu orijentaciju na taj način da se sve točke toga tijela rotiraju u prostoru oko jedinstvene osi - osi rotacije!



ROTACIJA RIGIDNOG TIJELA

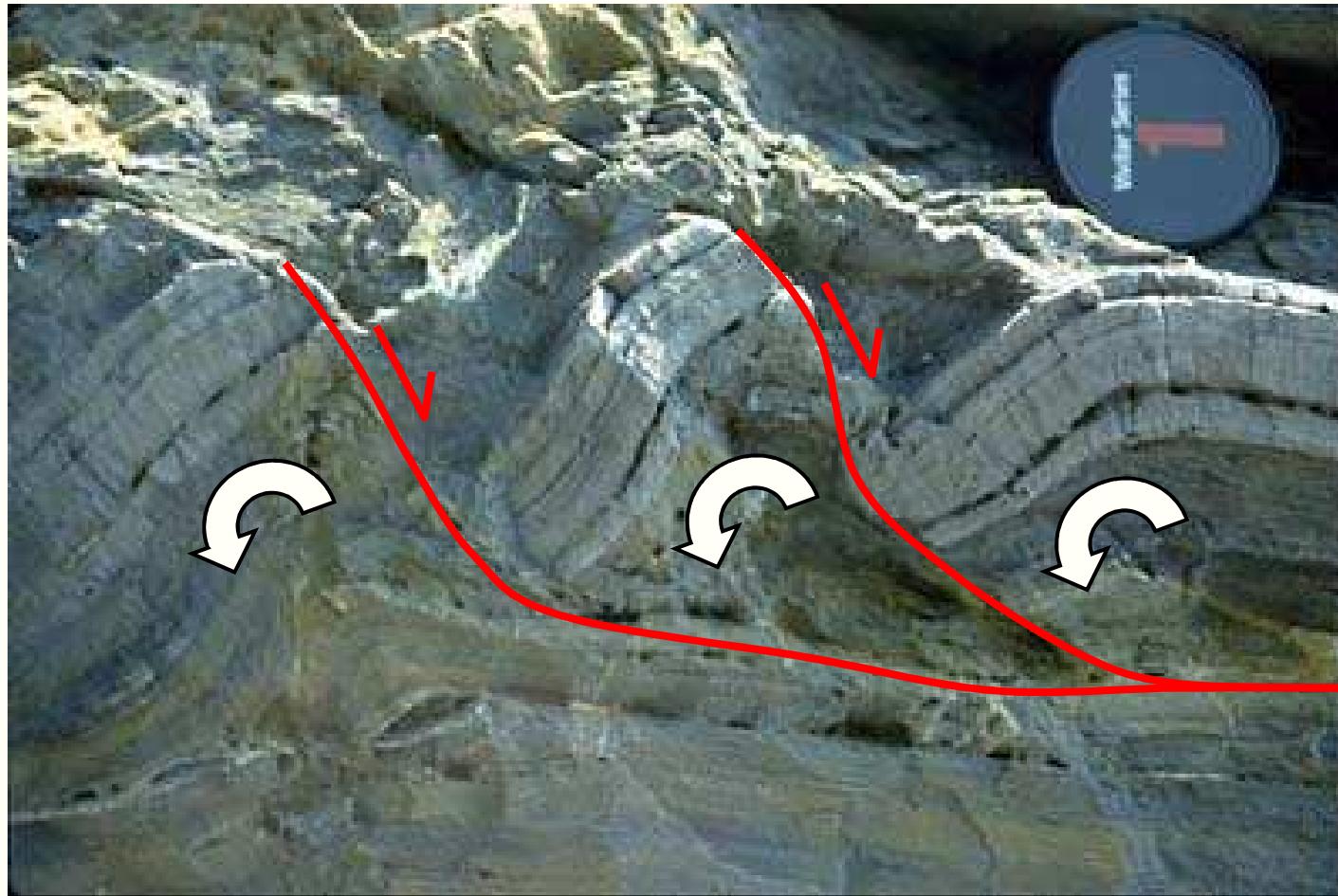
Parametri rotacije:

- orijentacija osi rotacije
- smjer rotacije
- kut rotacije

BEZ INTERNE DEFORMACIJE

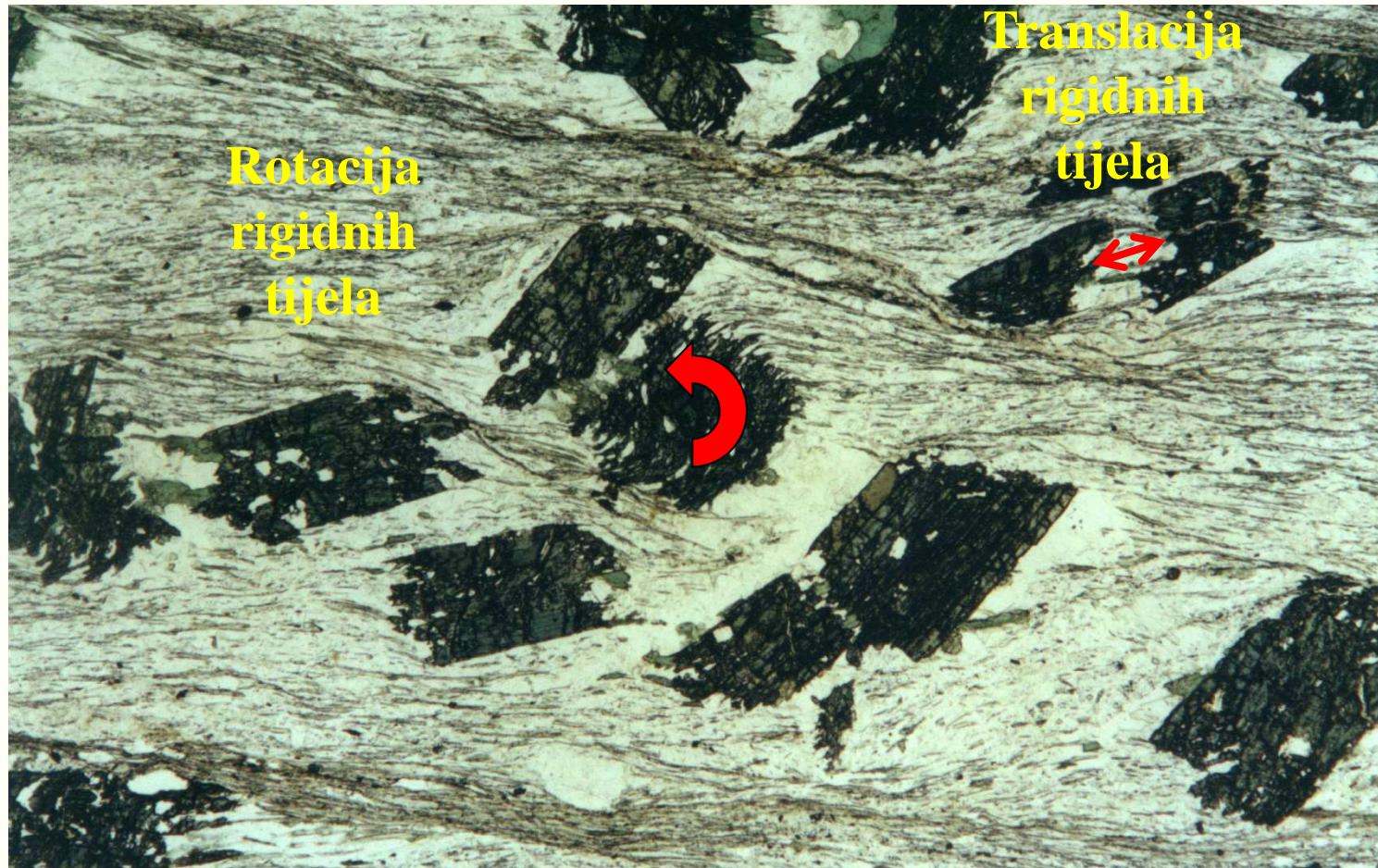


Rotacija krovinskih krila listričkih normalnih rasjeda !!!



Set normalnih, listričkih rasjeda zabilježenih u području sjevernih Apenina u Italiji (lokalitet: Portovenere, autor: David Bice, Carleton College).

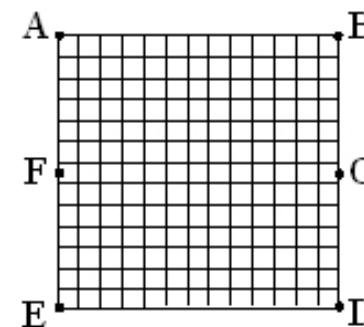
Translacije i rotacije rigidnih mineralnih zrna u podatnom matriksu !!!



Mikroskopski preparat kloritoidnog škriljavca s Medvednice. Rigidna zrna kloritoida translatirana su i rotirana u podatnom matriksu koji čine plastično deformirana zrna kvarca (iz Tomljenović, 2002).

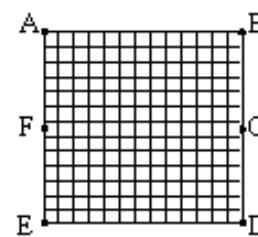
Ukoliko su nakon tektonskog događaja stijene i/ili stijenska tijela promijenila svoj prvotni oblik i/ili veličinu, što općenito znači da se promijenio prvotni, međusobni prostorni raspored njihovih sastavnih "čestica", smatramo da su tijekom tektonskog događaja **pretrpjela određeni stupanj interne, plastične deformacije**.

Drugim riječima, u postojećim uvjetima naprezanja, temperature i dr., stijene su se ponašale kao **plastična, nekompetentna materija**. U tom slučaju nastojat ćemo prepoznati je su li stijene i/ili stijenska tijena pretrpjela određeni stupanj **dilatacije** (t.j. promjenu prvotne veličine) i/ili **distorzije** (t.j. promjenu prvotnog oblika).

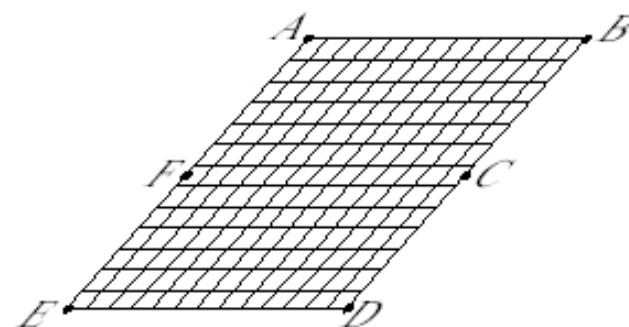


S INTERNOM DEFORMACIJOM

DILATACIJA (-)

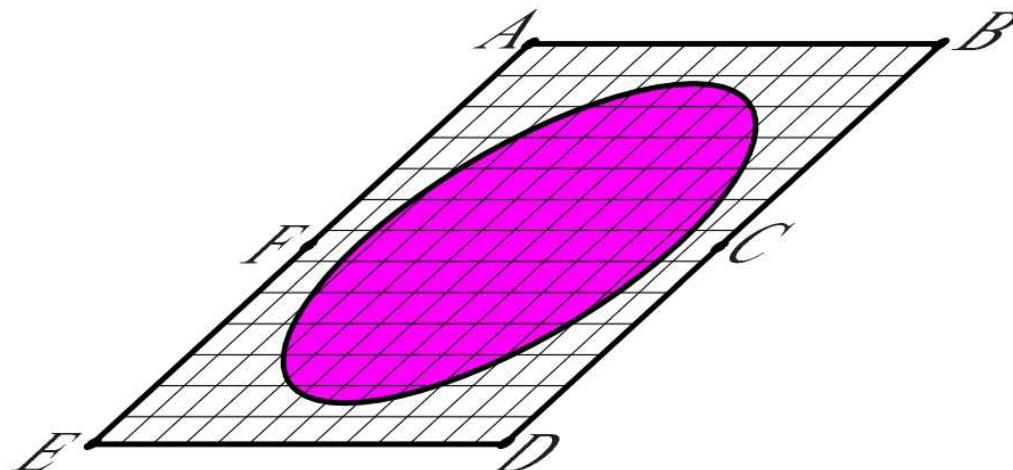
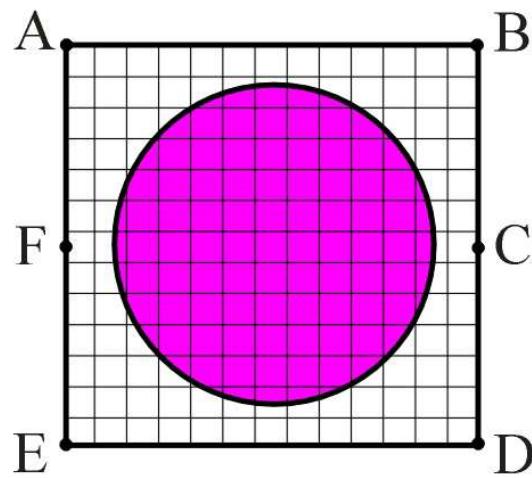


DISTORZIJA



Nadalje, pri tom čemo nastojati prepoznati je su li stijene i/ili stijenska tijela pretrpjela **homogenu deformaciju**...

HOMOGENA DEFORMACIJA (eng. *homogeneous strain*)



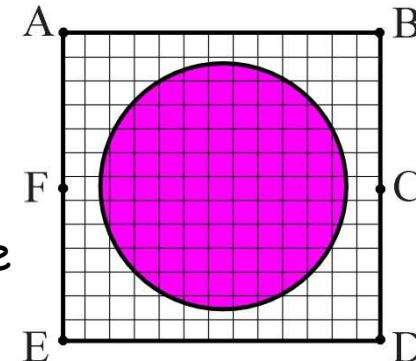
pri čemu vrijedi da:

- 1) svi pravci u promatranom tijelu prije deformacije, ostaju pravci i nakon deformacije tijela, odnosno da
- 2) svi međusobno paralelni pravci u promatranom tijelu prije deformacije, ostaju paralelni i nakon deformacije tijela!

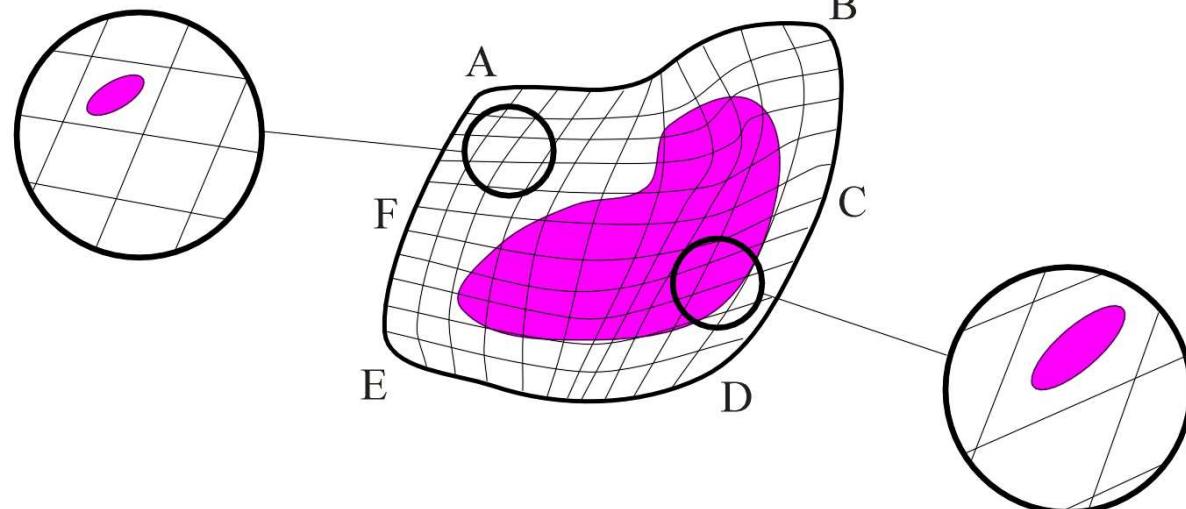
... odnosno **nehomogenu (heterogenu) deformaciju!**

U tom slučaju vrijedi da:

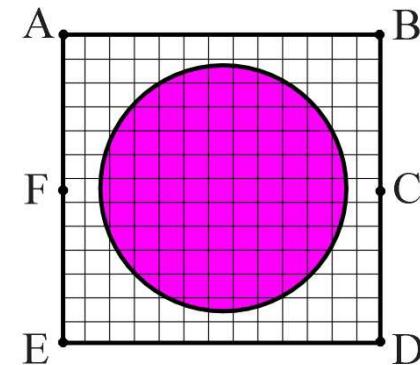
- 1) svi pravci u promatranom tijelu prije deformacije, tijekom deformacije prelaze u krivulje, odnosno da
- 2) prvotno paralelni pravci u promatranom tijelu nakon deformacije više nisu paralelni.



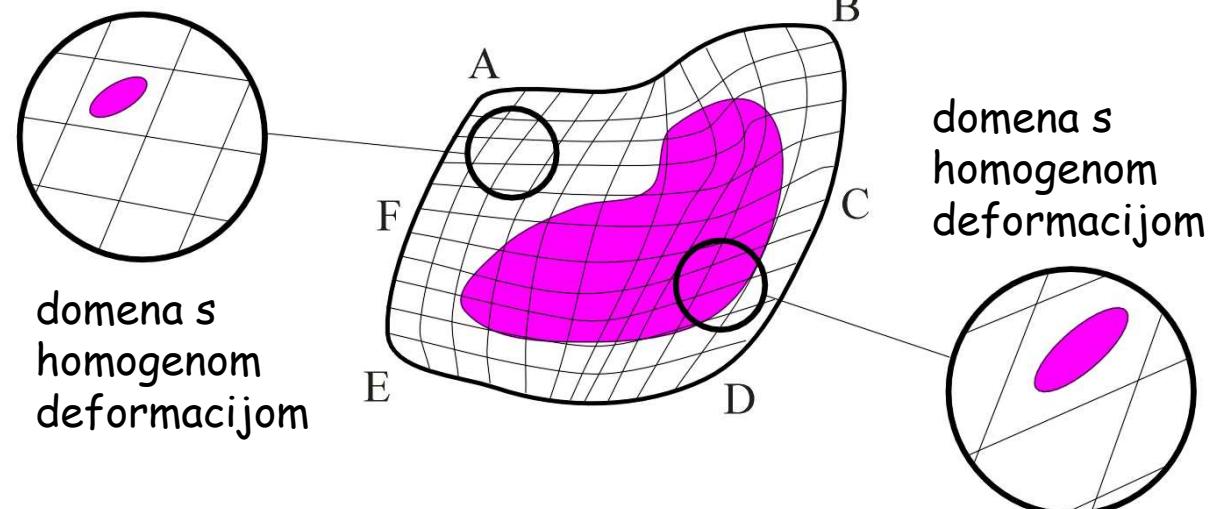
NEHOMOGENA DEFORMACIJA
(eng. *inhomogeneous strain*)



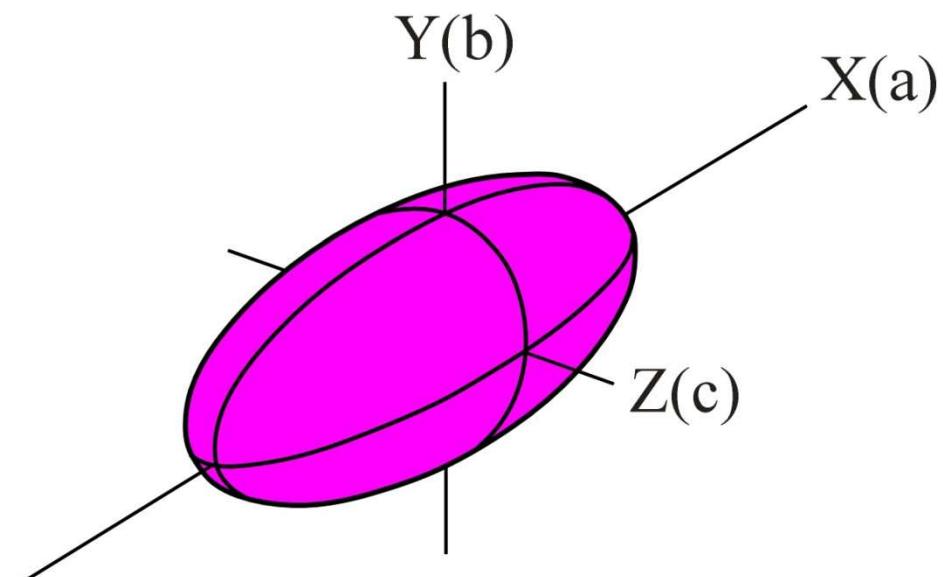
U tom slučaju, kinematičku analizu ili analizu deformacije tijela, provodimo **analizom u pojedinim domenama** toga tijela, koje promatrane odvojeno (odnosno u tom odgovarajućem mjerilu opažanja) pokazuju **značajke homogene deformacije !!!**



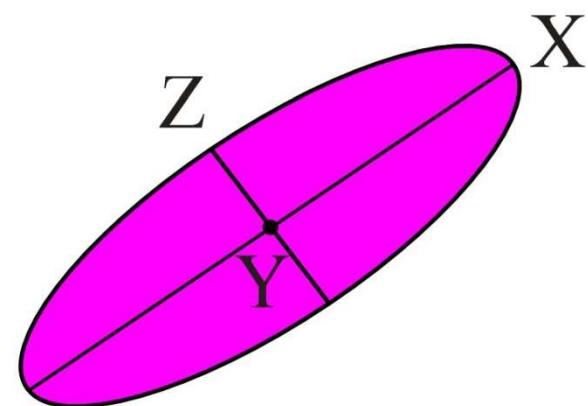
NEHOMOGENA DEFORMACIJA (eng. *inhomogeneous strain*)



Analiza homogene deformacije praktično se provodi proračunom parametara deformacije i konstrukcijom **elipsoida deformacije** za prostornu, 3D analizu, odnosno proračunom parametara deformacije i konstrukcijom **elipse deformacije** za 2D analizu, odnosno analizu deformacije u ravnini !!!



ELIPSOID DEFORMACIJE
(eng. *strain ellipsoid*)



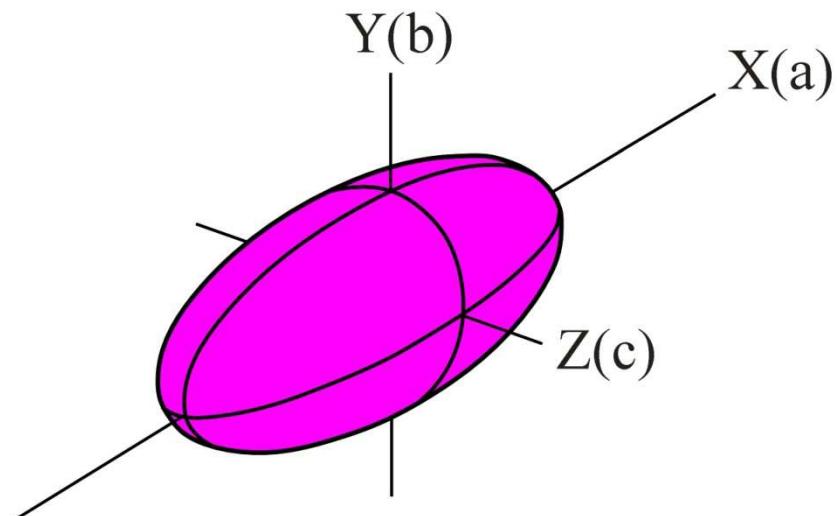
ELIPSA DEFORMACIJE
(eng. *strain ellipse*)

Elipsoid, odnosno elipsu deformacije definiraju tri glavne osi deformacije:

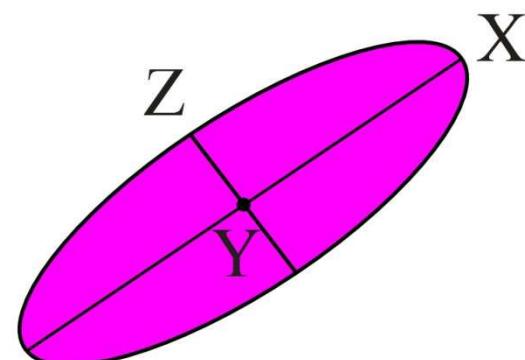
X - najdulja os elipsoida/elipse deformacije
os najvećeg izduženja ili ekstenzije: $1+e_1$; $e_1 = (l_1 - l_0) / l_0$

Y - srednja os elipsoida deformacije: $1+e_2$

Z - najkraća os elipsoida/elipse deformacije: $1+e_3$



ELIPSOID DEFORMACIJE
(eng. *strain ellipsoid*)

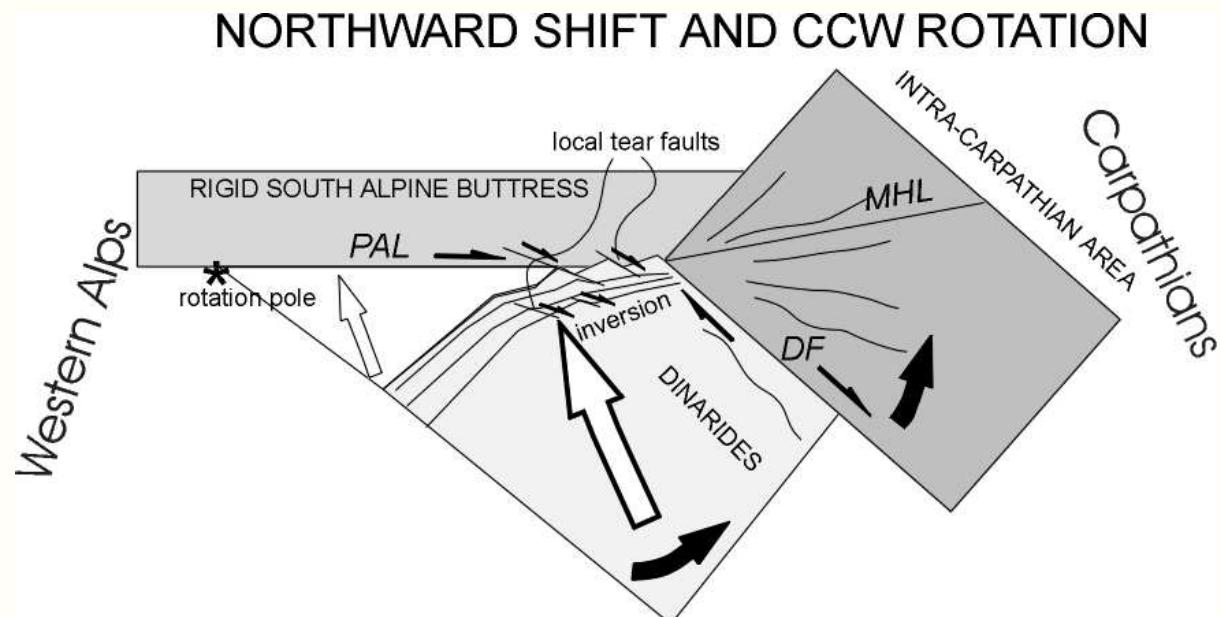


ELIPSA DEFORMACIJE
(eng. *strain ellipse*)

Potrebno je na kraju naglasiti da procjena o tome je su li se stijene i/ili stijenska tijela tijekom tektonskog događaja ponašala kao rigidna, kompetentna tijela bez interne deformacije ili kao podatna, interna deformatirana tijela također ovisi i o mjerilu opažanja !!!

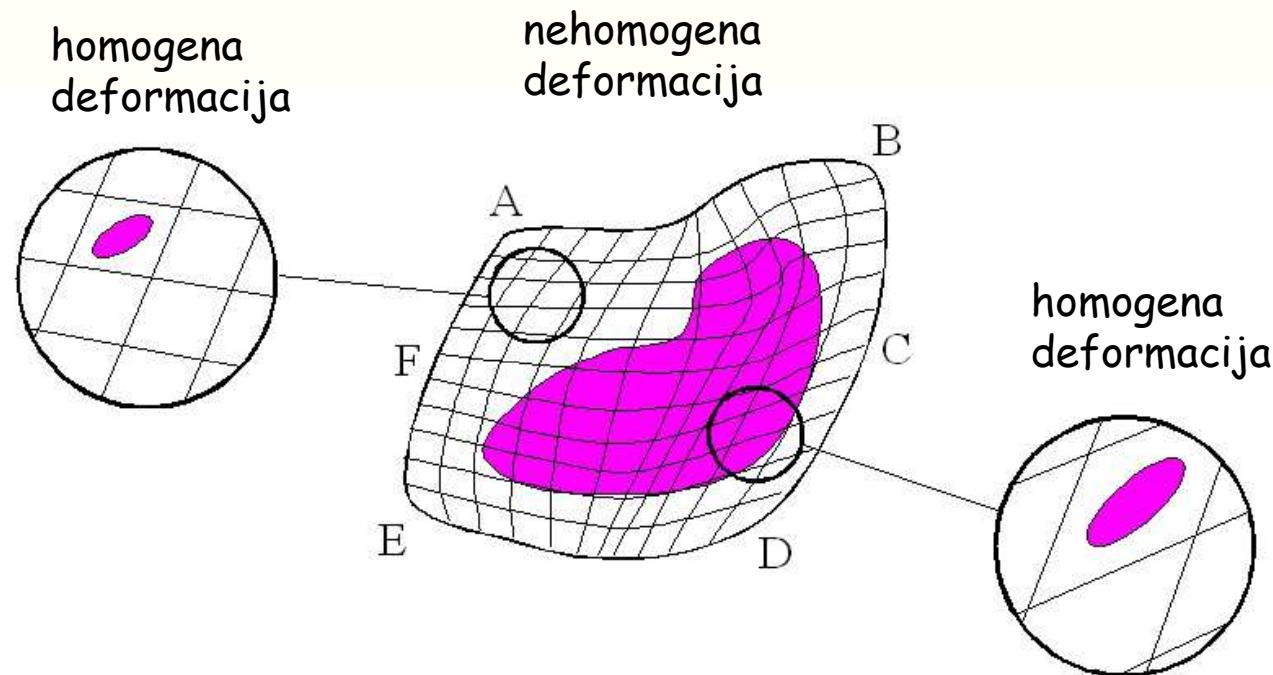
Isto vrijedi i kod procjene da li je stijena i/ili stijensko tijelo pretrpjelo homogenu ili nehomogenu deformaciju !!!

Primjer: Kad ih se promatra u regionalnom i globalnom mjerilu, kretanja tektonskih ploča (pa i regionalnih tektonskih blokova), opisujemo translacijom i rotacijom rigidnih tijela. Međutim, gledamo li u lokalnom mjerilu, npr. u području rubova ploča, to su tijela s izraženom internom deformacijom.



Kinematski model koji opisuje translaciju i rotaciju Jadranske ploče (prema Tomljenović & Csontos, 2001).

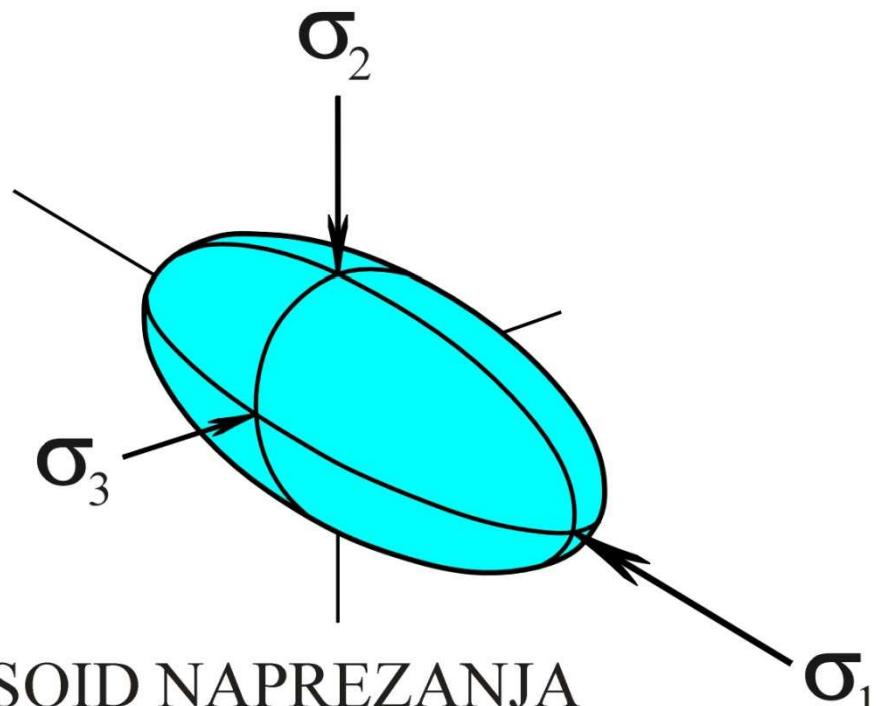
Isto vrijedi i kod procjene da li je stijena i/ili stijensko tijelo pretrpjelo homogenu ili nehomogenu deformaciju,
što također ovisi i o mjerilu opažanja !!!



Promatrano u regionalnom mjerilu tijelo je pretrpjelo nehomogenu deformaciju, no pomatrano u lokalnom mjerilu pojedine domene istog tijela pokazuju značajke homogene deformacije.

□ DINAMIČKA STRUKTURNΑ ANALIZA:

analiza u okviru koje se nastoji rekonstruirati orijentacija glavnih osi elipsoida naprezanja, odnosno vektori naprezanja koji su prouzročili lom ili plastičnu deformaciju u stijenama i stijenskim tijelima (*analiza naprezanja = stress analysis*)



ELIPSOID NAPREZANJA
(eng. *stress ellipsoid*)

Temeljni principi dinamičke strukturne analize i postupci proračuna orijentacije glavnih osi elipsoida naprezanja na temelju rasjeda i smičnih pukotina opisuju se u zasebnom poglavlju ovog predmeta pod naslovom "Mehanika stijena u struktурnoj geologiji".

SRETNO !!!



IZVORI SLIKA I CRTEŽA:

- Balen, D., Horvath, P., Tomljenović, B. Finger, F., Humer, B., Pamić, J. & Arkai, P. (2006): A record of pre-Variscan Barrovian regional metamorphism in the eastern part of the Slavonian Mountains (NE Croatia).- *Mineralogy and Petrology*, 87, 143-162.
- Prtoljan, B., Jamičić, D., Cvetko-Tešović, B., Kratković, I. & Markulin, Ž. (2008): The influence of Late Cretaceous synsedimentary deformation on the Cenozoic structuration of the middle Adriatic, Croatia.- *Geodynamica Acta*, 20/5, 287-300.
- Rawnsley, K.D., Peacock, D.C.P., Rives, T. & Petit, J-P. (1998): Joints in the Mesozoic sediments around the Bristol Channel Basin.- *Journal of Structural Geology*, 20/12, 1641-1661.
- Tomljenović, B. (2002): Strukturne značajke Medvednice i Samoborskog gorja.- *Disertacija*, Sveučilište u Zagrebu, 208. str.
- Tomljenović, B. & Csontos, L. (2001): Neogene-Quaternary structures in the border zone between Alps, Dinarides and Pannonian Basin (Hrvatsko zagorje and Karlovac Basins, Croatia).- *International Journal of Earth Sciences*, 90, 560-578.

