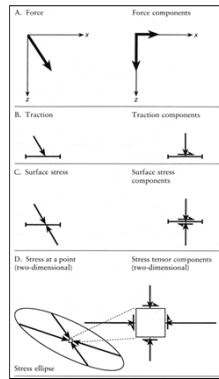


DINAMSKA ANALIZA

Predpregled (v 2D): kaj je sila, tlak, napetost na poskvi, napetostno stanje?



Sila, masa, teža

$$F = ma$$

$$m = \rho V$$

$$F_g = mg$$

Sile v Zemljini skorji so v ravnotežju - pospeški pri geoloških procesih so zanemarljivi, zato lahko smatramo, da so sistemi sil v pod površju uravnoteženi.

V skorji se sile praviloma počasi povečujejo, dokler ni preokročena trdnost materiala, čemur sledi translacija/rotacija/distorcija/dilatacija, ki je lahko reverzibilna ali ireverzibilna.

Telesne sile delujejo na vsako točko telesa, neodvisno od vpliva okoliških teles; njihova jakost je v sorazmerju s količino snovi v telesu.

Površinske sile delujejo na prave ali namišljene ploskve na stiku dveh teles ali znotraj telesa (npr. prelomna poskev). Tipične obremenitve, ki povzročajo površinske sile v skorji: gravitacijska, termalna, deformacijska.

Sila, masa, teža

$$F = ma$$

$$m = \rho V$$

$$F_g = mg$$

Sile v Zemljini skorji so v ravnotežju - pospeški pri geoloških procesih so zanemarljivi, zato lahko smatramo, da so sistemi sil v pod površju uravnoteženi.

V skorji se sile praviloma počasi povečujejo, dokler ni preokročena trdnost materiala, čemur sledi translacija/rotacija/distorcija/dilatacija, ki je lahko reverzibilna ali ireverzibilna.

Telesne sile delujejo na vsako točko telesa, neodvisno od vpliva okoliških teles; njihova jakost je v sorazmerju s količino snovi v telesu.

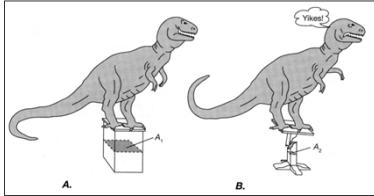
Površinske sile delujejo na prave ali namišljene ploskve na stiku dveh teles ali znotraj telesa (npr. prelomna poskev). Tipične obremenitve, ki povzročajo površinske sile v skorji: gravitacijska, termalna, deformacijska.

→ KURA ALI JAJCE?



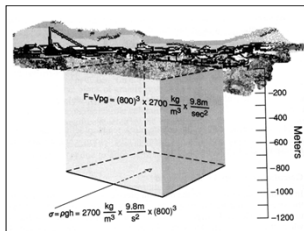
Pritisk

Mera za intenzivnost delovanja sile je "pritisk" (angleško *traction*):
 $P = F/A$



Pritisk

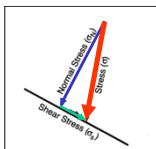
Primer: kakšen je pritisk 1000 m pod površjem?



$$P = mg/A = \rho Vg / A = 2700 \text{ kg/m}^3 \cdot (1000 \text{ m})^2 \cdot 9.8 \text{ ms}^{-2} / (1000 \text{ m})^2 = 26.5 \text{ MPa.}$$

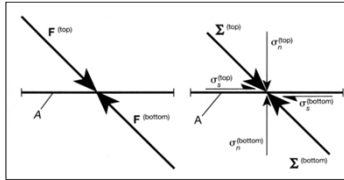
Pritisk

Pritisk je pravzaprav vektorska količina (vektor deljen s skalarjem).
 Vektor pritiska je prikladno razdeliti na **normalno komponento** (ki deluje pravokotno na ploskev) in **strižno komponento** (ki deluje vzdolž ploskve).



Napetost

Če se telo nahaja v ravnotežju, morajo biti uravnoteženi tudi pritiski na ploskev \Rightarrow nasproti vsakemu vektorju pritiska mora delovati enako velik nasprotno usmerjen pritisk \Rightarrow ta par vektorjev predstavlja **napetost na ploskev**.

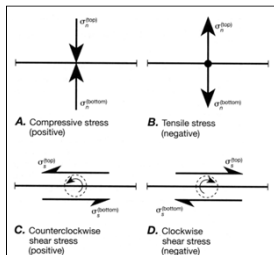


Predavanja iz Tektonike, Iekcija 3: DINAMSKA ANALIZA

9

Napetost

Dogovor: normalna napetost je lahko **tlačna** (pozitivna) ali **natena** (negativna). Predznak strižne napetosti je odvisen od smisla striga, ki ga povzroča.

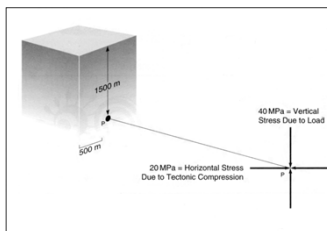


Predavanja iz Tektonike, Iekcija 3: DINAMSKA ANALIZA

10

Napetost

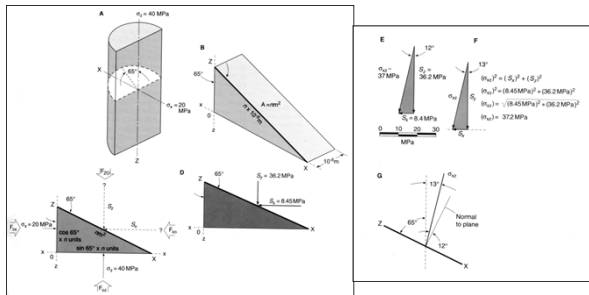
Primer: izračunajmo, kakšna je v globini 1500 m napetost na ploskev, odklonjeno za 65° od vertikale, če na ozemlje deluje "tektonska" horizontalna tlačna napetost velikosti 20 MPa.



Predavanja iz Tektonike, Iekcija 3: DINAMSKA ANALIZA

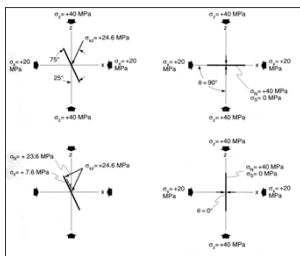
11

Napetost



Napetostno stanje

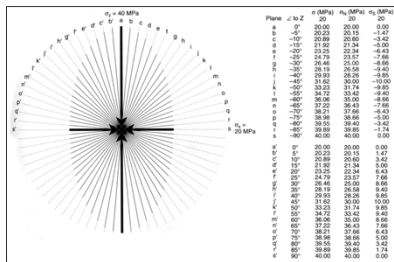
Od česa je odvisna napetost na poljubno orientirano ploskev v točki prostora?



⇒ tudi od orientacije ploskve!

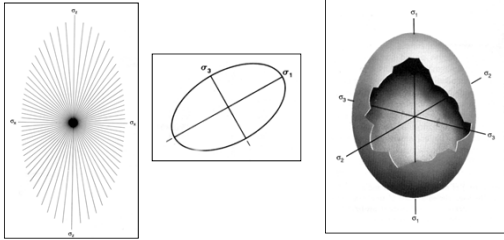
Napetostno stanje

Napetost na poljubno orientirano ploskev v točki prostora nam podaja **napetostni elipsoid** (geometrijski ekvivalent napetostnega tenzorja) ⇒ s tem je podano **napetostno stanje v točki**.



Napetostno stanje

Napetostno stanje je podano že, če **poznamo glavne napetostne osi**:
os maksimalne napetosti σ_1 , os srednje napetosti σ_2 in os minimalne napetosti σ_3 .
V smeri glavnih napetosti so strižne napetosti enake 0.

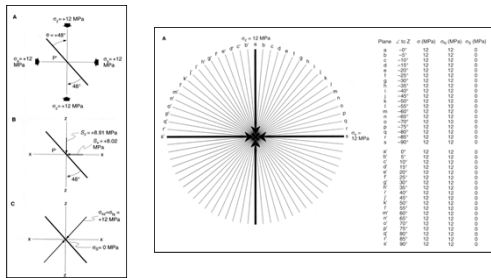


Predavanja iz Tektonike, lekcija 3: DINAMSKA ANALIZA

15

Napetostno stanje

Poseben primer: **hidrostatsko (izotropno) napetostno stanje** - napetosti so enake v vseh smereh. Strižnih napetosti ni.



Predavanja iz Tektonike, lekcija 3: DINAMSKA ANALIZA

16

Mohrov napetostni krog

Izpeljati je mogoče splošen izraz za velikost σ_n in σ_s na poljubni poskvi, orientirani za kot θ glede na smer σ_1 :

$$\sigma_n = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} + \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \cos 2\theta$$

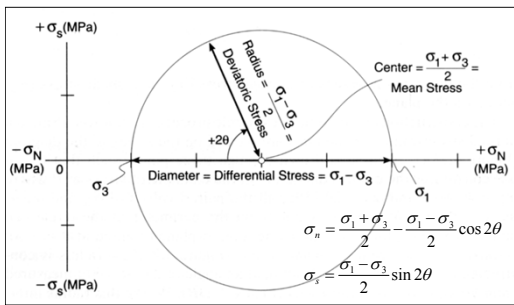
$$\sigma_s = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \sin 2\theta$$

Ti dve enačbi ustrezata enačbi krožnice v prostoru σ_n / σ_s
⇒ **Mohrov napetostni krog.**

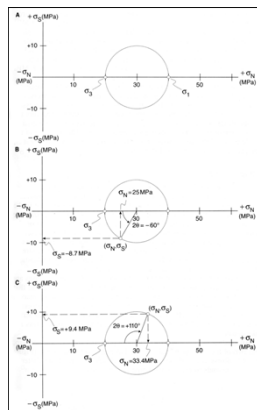
Predavanja iz Tektonike, lekcija 3: DINAMSKA ANALIZA

17

Mohrov napetostni krog



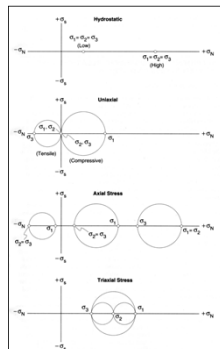
Mohrov napetostni krog



Mohrov napetostni krog

Značilna napetostna stanja

- hidrostatično
- enoosno
- dvoosno
- troosno

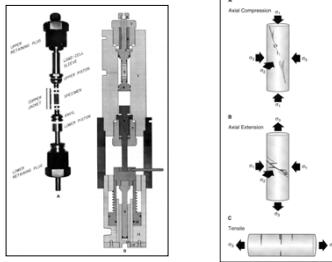


Reologija kamnin - eksperimentalni podatki

Reologija preučuje odziv kamnin na napetosti (**odnose med napetostmi in deformacijami**), pri vseh mogočih pogojih: različnih temperaturah, pomnih tlakih, hitrosti obremenjevanja, itd. Osnovni reološki podatki o kamninah so bili pridobljeni pod kontroliranimi pogoji v laboratorijih.

Reologija kamnin - eksperimentalni podatki

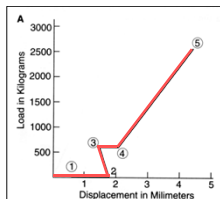
Laboratorijski preizkusi se večinoma izvajajo na valjastih vzorcih kamnine v dvoosnih ali triosnih aparatih. Pri preizkusu običajno merimo linearno deformacijo vzorca e v odvisnosti od diferencialne napetosti $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$. Merimo tudi hitrost deformiranja (de/dt).



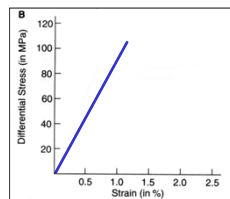
Reologija kamnin - eksperimentalni podatki

Laboratorijski preizkusi se večinoma izvajajo na valjastih vzorcih kamnine v dvoosnih ali triosnih aparatih. Pri preizkusu običajno merimo linearno deformacijo vzorca e v odvisnosti od diferencialne napetosti $\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$. Merimo tudi hitrost deformiranja (de/dt).

Potek eksperimenta (obremenitev/premik)

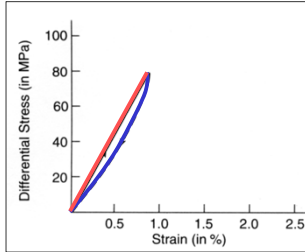


Pretvorba rezultatov (napetost/deformacija)



Reologija kamnin - eksperimentalni podatki

Preizkus apnenca pri nizkem okoliškem pritisku
(28 MPa, razmere plitvo v skorji)



- elastična (povratna) deformacija
- histereza

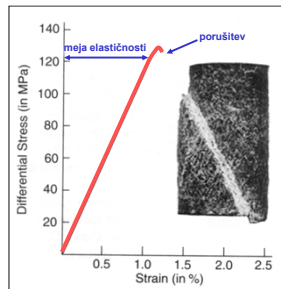


Predavanja iz Tektonike, lekcija 3: DINAMSKA ANALIZA

24

Reologija kamnin - eksperimentalni podatki

Preizkus apnenca pri nizkem okoliškem pritisku
(28 MPa, razmere plitvo v skorji)



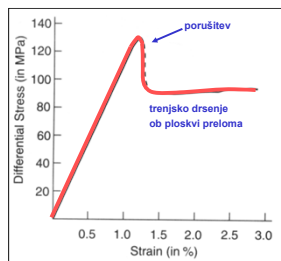
- pri višji napetosti prekoračitev meje elastičnosti - plastična deformacija
- skoraj takoj zatem porušitev vzorca. Deformacija je lomna ("brittle"). Razpoka nastane pod kotom cca 25°.

Predavanja iz Tektonike, lekcija 3: DINAMSKA ANALIZA

25

Reologija kamnin - eksperimentalni podatki

Preizkus apnenca pri nizkem okoliškem pritisku
(28 MPa, razmere plitvo v skorji)



- če z obremenitvijo porušenega vzorca nadaljujemo, deformacija poteka pri manjši obremenitvi zaradi trenjskega drsenja ob ploskvi preloma

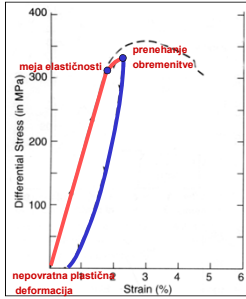
Predavanja iz Tektonike, lekcija 3: DINAMSKA ANALIZA

26

Reologija kamnin - eksperimentalni podatki

Preizkus apnenca pri višjem okoliškem pritisku

(103 MPa)



- meja elastičnosti veliko višja

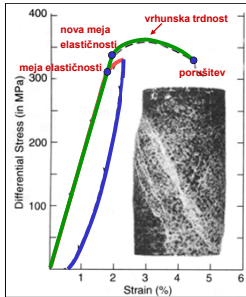
Predavanja iz Tektonike, lekcija 3: DINAMSKA ANALIZA

27

Reologija kamnin - eksperimentalni podatki

Preizkus apnenca pri višjem okoliškem pritisku

(103 MPa)



- meja elastičnosti veliko višja
- "strain hardening" - meja elastičnosti se zviša zaradi plastične reorganizacije mineralnih zrn
- nad mejo elastičnosti kamnina plastično "teče"
- "strain softening" - kamnina postaja z napredujočo plastično deformacijo čedalje šibkejša
- končno se vzorec poruši

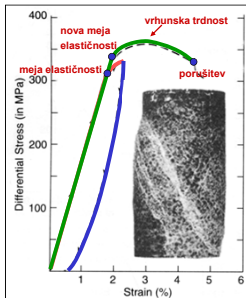
Predavanja iz Tektonike, lekcija 3: DINAMSKA ANALIZA

28

Reologija kamnin - eksperimentalni podatki

Preizkus apnenca pri višjem okoliškem pritisku

(103 MPa)



Kamnina je pri višjem okoliškem pritisku torej trdnješa. Deformacija je porazdeljena vzdolž vzporednih razpok. Kamnina se je deformirala **polomno** ("semibrittle") - 5-10% skrčka pred poružitvijo.

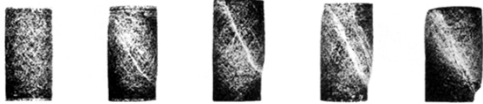
Predavanja iz Tektonike, lekcija 3: DINAMSKA ANALIZA

29

Reologija kamnin - eksperimentalni podatki

Preizkus apnenca pri še višjem okoliškem pritisku

Kamnina se obnaša **duktilno**: krajšemu območju elastičnosti sledi dolgotrajna plastična deformacija s skoraj zvezno krivuljo σ/ϵ .
Porušitev - če do nje sploh pride - se zgodi po najmanj 10% plastičnega skrčka kamnine.



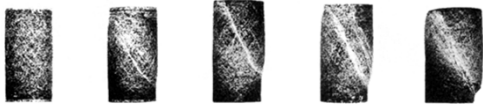
Predavanja iz Tektonike, lekcija 3: DINAMSKA ANALIZA

30

O trdnosti in duktilnosti

Nauk:

Očitno kamnine na napetost pri različnih pogojih različno reagirajo! Vrednosti kot so porušitvena trdnost ali duktilnost so brez pomena, če ne povemo, za katere pogoje veljajo. Vsak od pogojev (temperatura, hitrost deformacije, itd.) vpliva drugače.



Predavanja iz Tektonike, lekcija 3: DINAMSKA ANALIZA

31

O trdnosti in duktilnosti

Vpliv litologije

Različne kamnine so različno "odporne" na deformacije. Poleg same litologije pa ima močan vpliv tudi struktura kamnine oziroma njena anizotropnost. Splošna razvrstitev kamnin po trdnosti (pri sobni temperaturi in nizkem okoliškem pritisku):

kvarcīt
granit
peščenjak s kremenovim vezivom
bazalt
apnec
peščenjak s kalcitnim vezivom
skrilavec
marmor
glinavec / muljevec
anhidrit
sol

Predavanja iz Tektonike, lekcija 3: DINAMSKA ANALIZA

32

O trdnosti in duktilnosti

Vpliv litologije

Po relativni duktilnosti glede na ostale kamnine na nekem ozemlju (v danem stratigrafskem stolpcu...) ločimo:

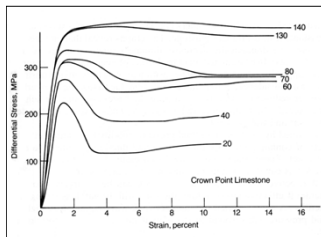
- **nekompetentne** (bolj duktilne) kamnine
- in **kompetentne** (relativno manj duktilne, se deformirajo pretežno lomno) kamnine.

Kompetentnost kamnine se lahko pri spremembi pogojev spremeni!

O trdnosti in duktilnosti

Vpliv okoliškega pritiska

Videli smo že, da se z višanjem okoliškega pritiska višajo meja elastičnosti, porušna trdnost in duktilnost kamnine. Primer: Crown limestone.



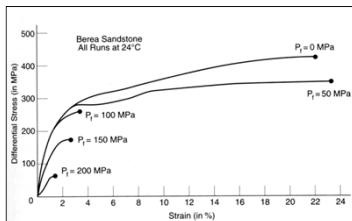
O trdnosti in duktilnosti

Vpliv pornega tlaka

Porni tlak (tlak fluida v porah kamnine) zmanjšuje trdnost in duktilnost kamnine - "kompenzira" učinek okoliškega pritiska:

Efektivni tlak = okoliški pritisk - porni tlak.

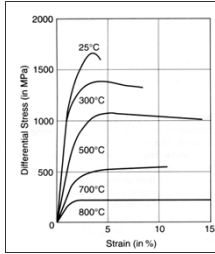
Primer: Berea sandstone



O trdnosti in duktilnosti

Vpliv temperature

Višanje temperature v splošnem zniža mejo elastičnosti, močno poveča duktilnost in zniža porušno trdnost. (Primer: bazalt)

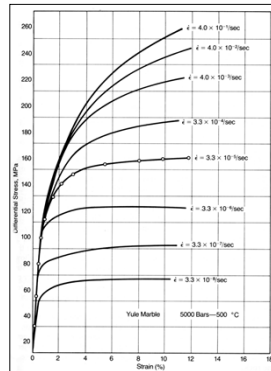


Pri dovolj visoki temperaturi se kamnine lahko deformirajo viskozno: že pri najmanjši diferencialni napetosti se kamnine izredno močno in permanentno deformirajo s tečenjem. Zanimivo: celo v viskozem stanju se večina kamnin obnaša elastično, če je hitrost obremenitve hitra.

O trdnosti in duktilnosti

Vpliv hitrosti deformiranja ("strain rate")

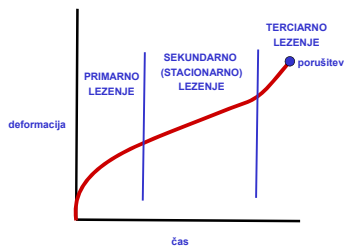
Kamnina se lahko deformira plastično tudi pri majhnih napetostih, kadar je hitrost deformiranja majhna! (Primer: Yule marble)



O trdnosti in duktilnosti

Vpliv hitrosti deformiranja

Časovno odvisen proces deformacij pri majhnih diferencialnih napetostih imenujemo lezenje ("creep").



O trdnosti in duktilnosti

Vpliv časa

So kamnine reidi? (reid je snov, ki se pod temperaturo tališča more deformirati z viskoznim tečenjem vsaj 1000-krat bolj kot z elastično deformacijo). Led se vede kot reid po manj kot dveh tednih deformiranja, sol po 10 letih.



Predavanja iz Tektonike, lekcija 3: DINAMSKA ANALIZA

39

Reološki modeli obnašanja kamnin

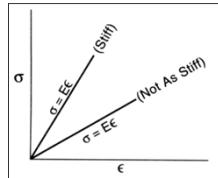
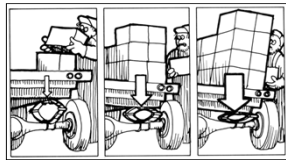
Elastično obnašanje

Deformacija je reverzibilna; deformacija je v linearnem odnosu z napetostjo (Hookov zakon):

$$\sigma = Ee ;$$

E... Youngov modul.

Analogija: raztezanje kovinske vzmeti. Youngov modul (modul elastičnosti) je mera za togost kamnine.



Predavanja iz Tektonike, lekcija 3: DINAMSKA ANALIZA

40

Reološki modeli obnašanja kamnin

Elastično obnašanje

Deformacija je reverzibilna; deformacija je v linearnem odnosu z napetostjo (Hookov zakon):

$$\sigma = Ee ;$$

E... Youngov modul.

Analogija: raztezanje kovinske vzmeti. Youngov modul (modul elastičnosti) je mera za togost kamnine.

Značilne vrednosti Youngovega modula za kamnine

Rock	$E (\times 10^4 \text{ MPa})$
Westerly granite	-5.6
Cheshire quartzite	-7.9
Karoo diabase	-8.4
Tennessee marble	-4.8
Witwatersrand shale	-6.8
Solenhofen limestone	-5.3

Predavanja iz Tektonike, lekcija 3: DINAMSKA ANALIZA

41

Reološki modeli obnašanja kamnin

Elastično obnašanje

Poissonov količnik je razmerje med lateralnim in longitudinalnim skrčkom:

$$\nu = e_{\text{lat}} / e_{\text{long}} ;$$

pove, za koliko se bo kamnina prečno razširila na enoto skrčka.

Poissonov efekt je pojav horizontalnih napetosti zaradi vertikalne obremenitve:

$$\sigma_2 = \sigma_3 = \frac{\nu}{1 - \nu} \sigma_1 = \frac{1}{3} \sigma_1 \quad \text{za } \nu = 0.25.$$

Reološki modeli obnašanja kamnin

Vrednosti
Poissonovega količnika
za značilne kamnine

Limestone, fine grained	0.25
Aplite	0.20
Limestone, porous	0.18
Limestone, oolitic	0.18
Limestone, chalcedonic	0.18
Limestone, medium grained	0.17
Limestone, stylolitic	0.11
Granite	0.11
Shale, quartzose	0.08
Graywacke, coarse grained	0.05
Diorite	0.05
Granite, altered	0.04
Graywacke, fine grained	0.04
Shale, calcareous	0.02
Schist, biotite	0.01

Reološki modeli obnašanja kamnin

Elastično obnašanje

Strižna deformacija:

$$\sigma_s = G\gamma ;$$

G....modul strižne trdnosti.
