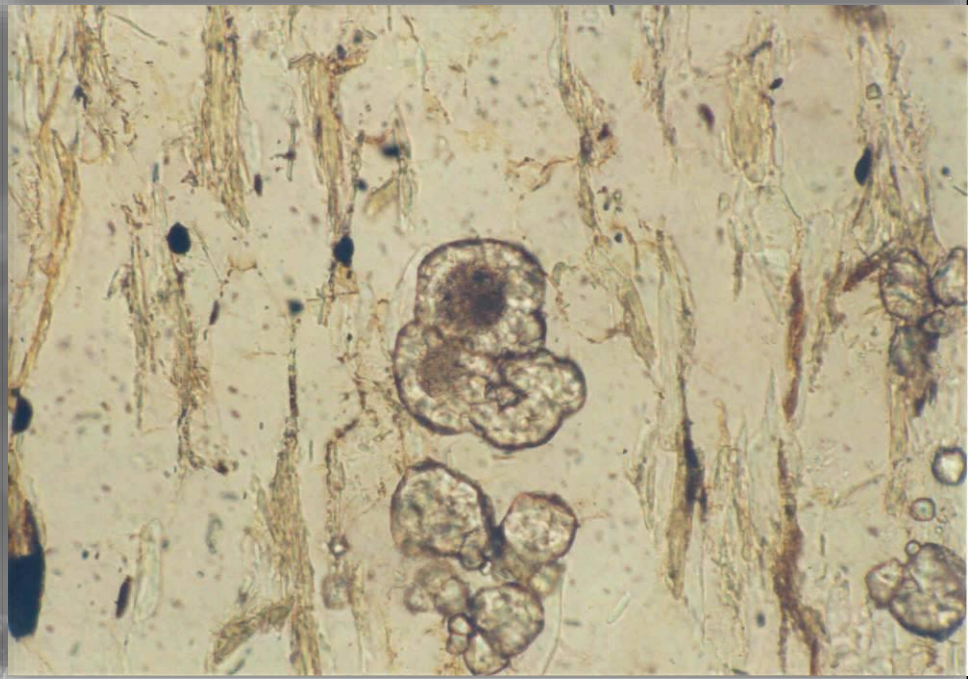
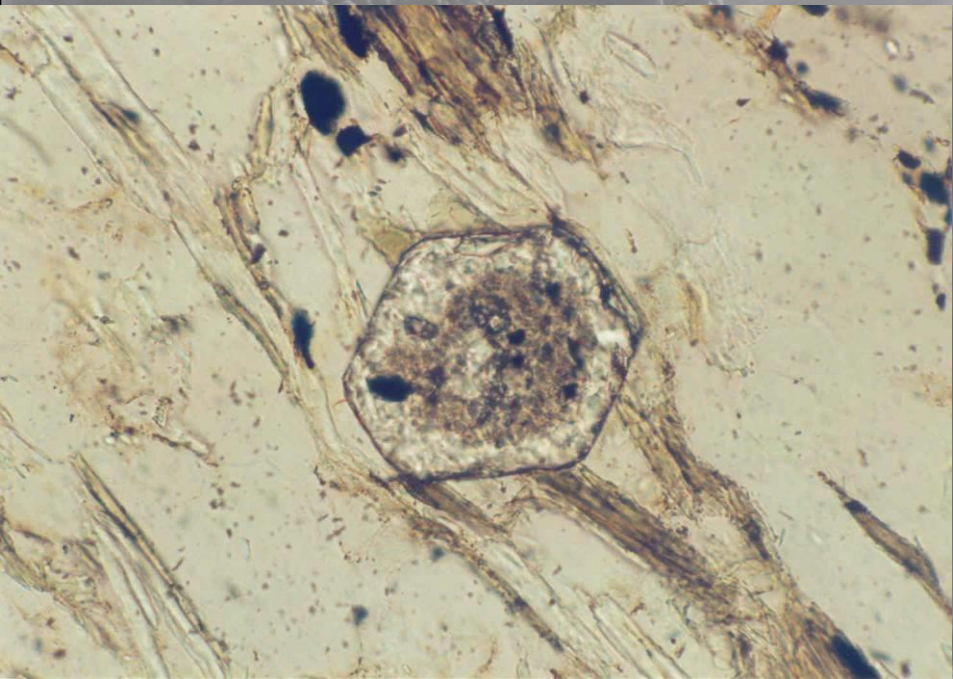


METAMORFNE STIJENE & METAMORFIZAM



Metamorfizam

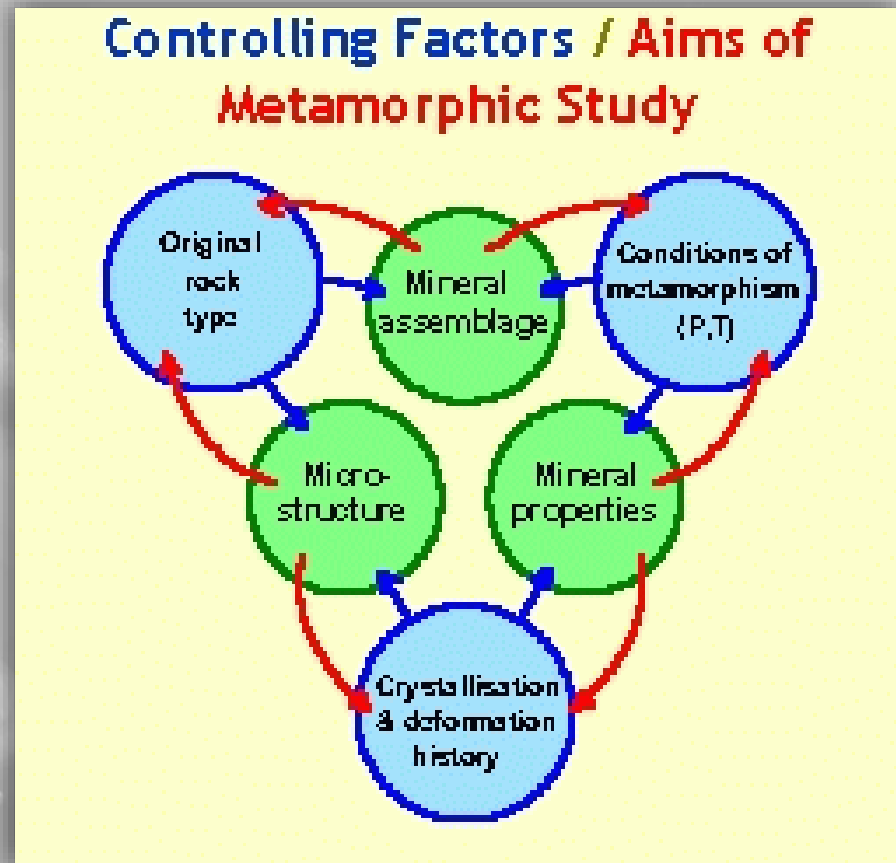
Skup svih procesa koji dovode do strukturnih, mineralnih ili kemijskih promjena u primarnoj stijeni (protolitu) a odvijaju se u čvrstom stanju

- IUGS-SCMR predlaže sljedeću definiciju metamorfizma: “Metamorfizam je **subsolidusni** proces koji vodi do promjene mineralnog sastava i/ili promjene strukture stijene (npr. veličina zrna) i/ili promjene kemijskog sastava stijene. Te promjene su odgovor sustava na fizičke i/ili kemijske uvjete koji se razlikuju od onih koji se javljaju na površini planeta i u zonama cementacije i dijageneze ispod površine. Ti procesi mogu koegzistirati s parcijalnim taljenjem.”

Metamorfizam

Čimbenici i ciljevi:

- izvorna stijena
- uvjeti metamorfizma
- deformacijska povijest
- mineralna zajednica
- svojstva minerala
- sklop stijene



Protolit (edukt, prekursor) - ishodna stijena čijom metamorfozom nastaje metamorfna stijena; može biti magmatska, sedimentna ili starija metamorfna stijena ⇒ **para-** **orto-**

Granice metamorfizma

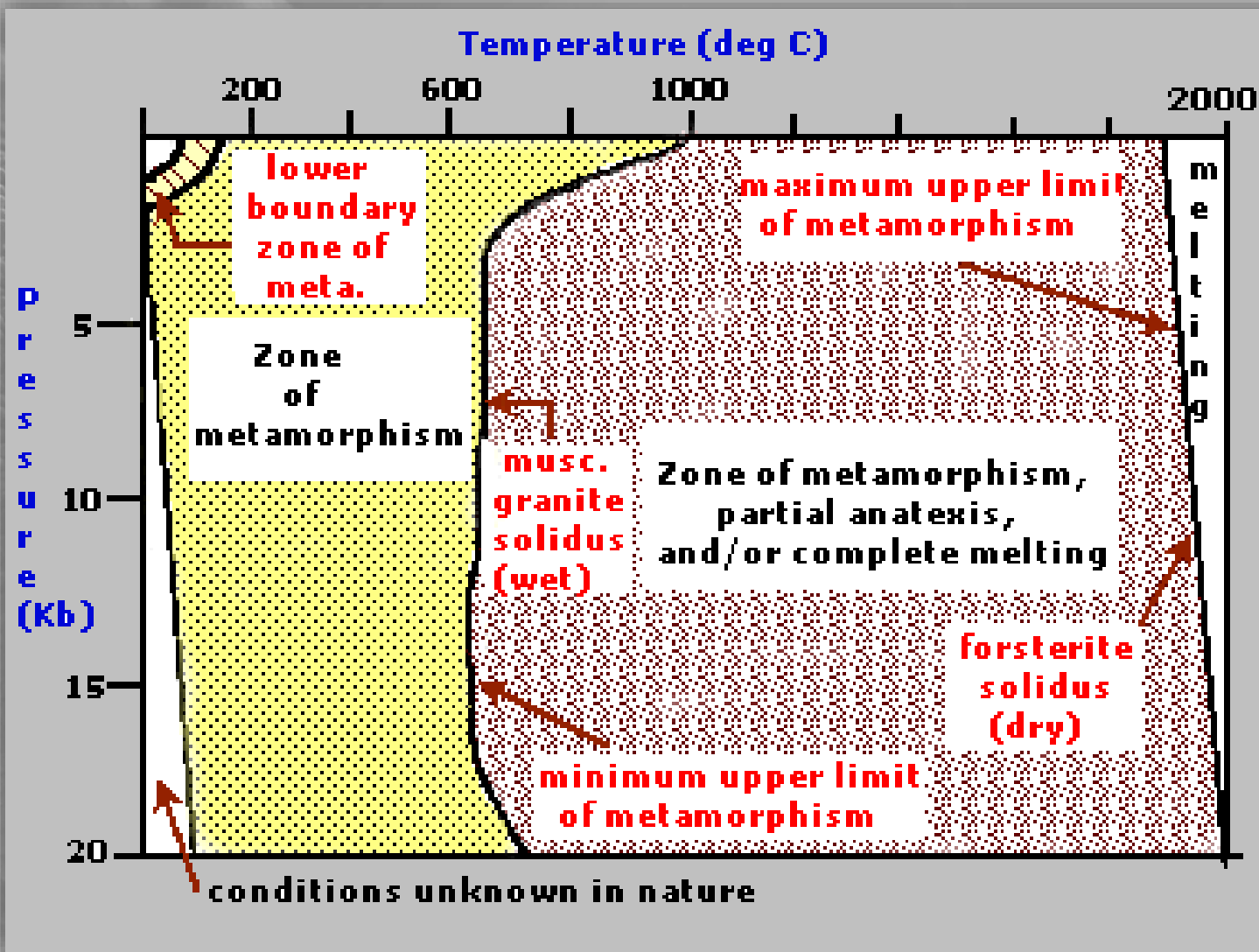
- **Donja temperaturna** granica prelazi u **dijagenezu**
 - Granica nije čvrsto određena
 - Procesi dijageneze i trošenja se teško razlikuju od metamorfnih procesa vrlo niskog stupnja
 - Metamorfizam počinje u temperaturnom rasponu od 180-200°C za najnestabilnije tipove **protolita**
 - Neki od zeolita su dijagenetskog porijekla a neki metamorfnog - granica je nejasna

*laumontit, analcim, heulandit, paragonit, prehnit,
pumpelleit, lawsonit, glaukofan ili stilpnomelan*

Granice metamorfizma

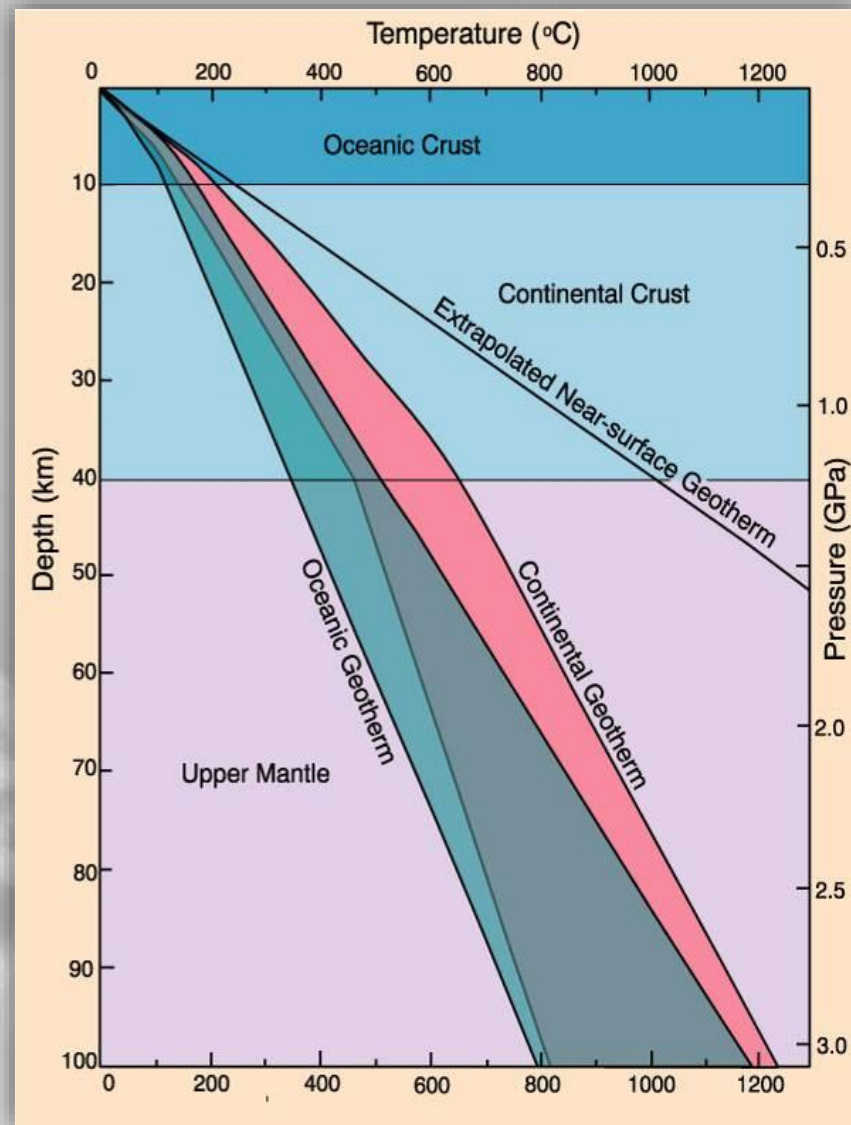
- **Gornja temperaturna granica ograničena je taljenjem** - u određenom temperaturnom pojasu krutina i taljevina koegzistiraju
- **Migmatiti** (“mixed rocks”) su postupni prijelaz
- Ksenoliti, restiti, anklave spadaju u magmatske procese zbog toga što je taljevina dominantna no razlikovanje je koji puta teško
- Ukoliko grijemo metamorfnu stijenu do područja taljenja - kada ona postaje “magnatska” ?
- Koja količina taljevine označava magmatski proces? ("silicate-saturated aqueous fluid and a fluid-saturated silicate melt")

Granice metamorfizma



Čimbenici metamorfizma

- **Temperatura:** obično najvažniji metamorfni faktor
- $T / ^\circ\text{C}$
- * geotermalni gradijent
(kontinentalni je viši od oceanskog zbog veće koncentracije radioaktivnih (LIL) elemenata)
- * raspad radioaktivnih minerala
- * blizina magmatskog tijela
- * trenje (frikcijsko taljenje)
- * udar meteorita



Slika: Procjena raspona oceanskih i kontinentalnih geotermalnih gradijenata (steady-state geotherms) do dubine od 100 km. Prema Sclater *et al.* (1980), *Earth. Rev. Geophys. Space Sci.*, 18, 269-311.

Čimbenici metamorfizma

Povišenje temperature ima nekoliko efekata:

1) **Pokreće rekristalizaciju**

⇒ povećana veličina zrna

Veća površina/volumen minerala ⇒ manja stabilnost

Povišenje temperature prevladava kinetičku barijeru kod rekristalizacije

2) **Pokreće reakcije** koje dovode do nestanka netabilnih minerala i daju nove minerale koji su stabilni u tim uvjetima

3) **Prevladava kinetičku barijeru** koja može priječiti dosizanje ravnoteže

Čimbenici metamorfizma

- **Tlak (pritisak)**
- **P / Pa, MPa**
- **u upotrebi kbar, 1 bar= 10^5 Pa, 1 kbar=100 MPa**

“Normalni” gradijenti mogu biti poremećeni:

- Visok T/P geotermalni gradijent u područjima plutonske aktivnosti ili riftinga
- Nizak T/P geotermalni gradijent u subdukcijskim zonama

Čimbenici metamorfizma

- **Litostatski tlak** = jednolik tlak (**hidrostatski**)
- **Stres** = nejednak tlak s različitih strana (usmjeren)
- Opisuje se s 3 međusobno okomite komponente (σ):

σ_1 je maksimalni stres

σ_2 je međuvrijednost stresa

σ_3 je minimalna vrijednost stresa

- U litostatskom (**hidrostatskom**) slučaju sve tri vrijednosti σ su jednake

Čimbenici metamorfizma

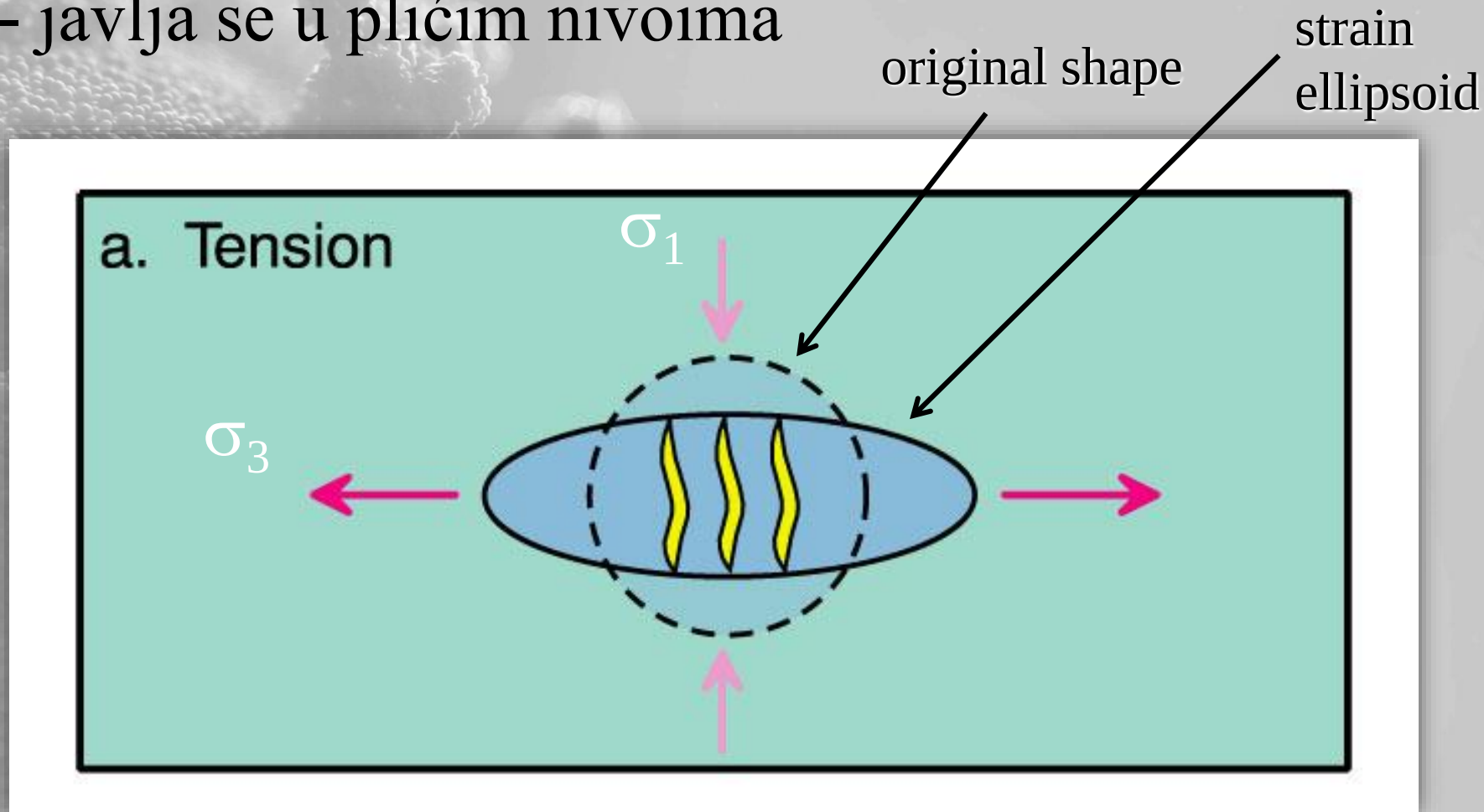
- **Stres** pogađa strukture i teksture ali **ne bitno i ravnotežnu mineralnu zajednicu**
- **statički** ⇒ **škriljava tekstura**
- **dinamički** ⇒ **usitnjavanje minerala**

Razlikujemo tri vrste stresa:

- Tenziju (tension)
- Kompresiju (compression)
- Smicanje (shear)

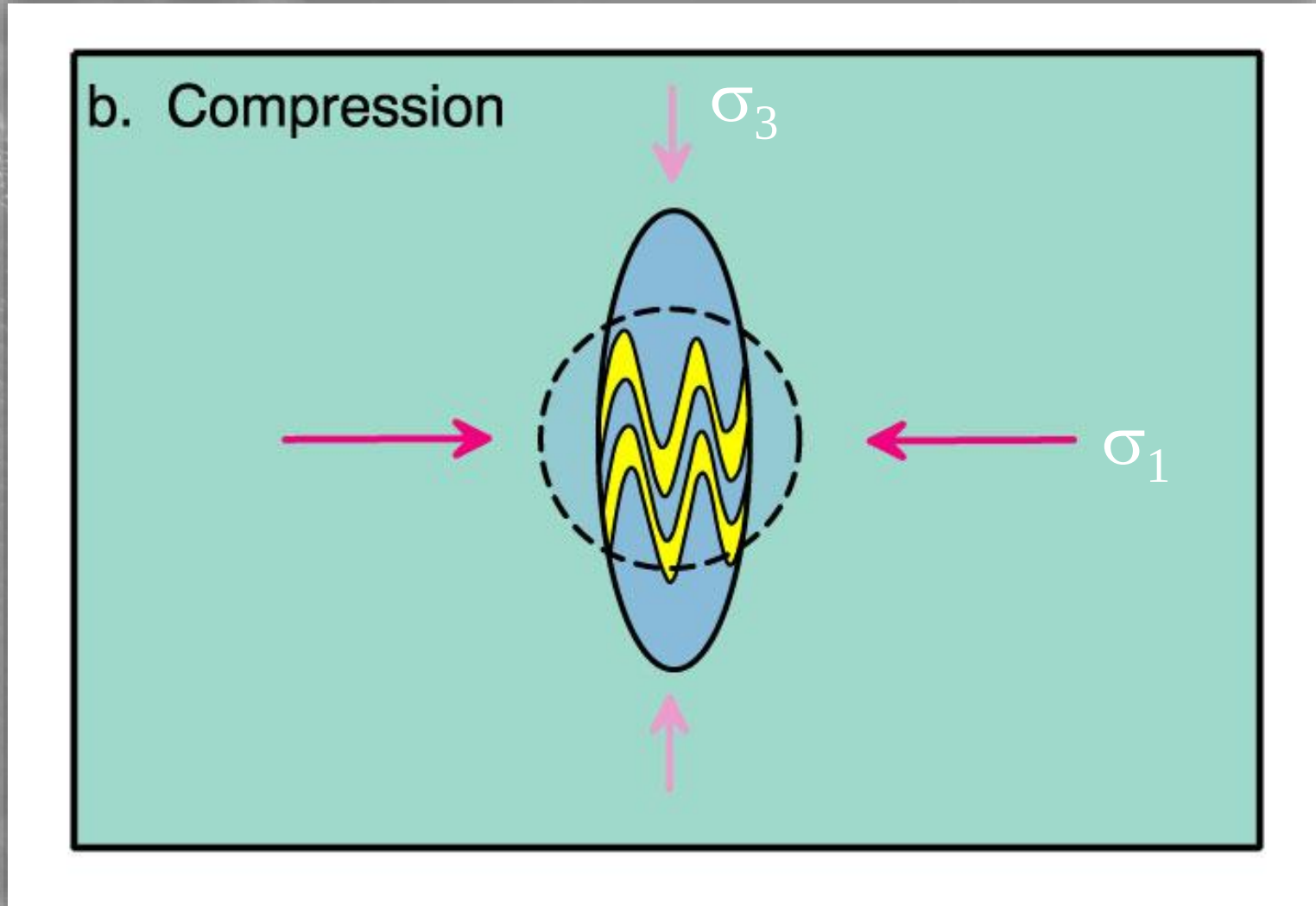
Tenzija: σ_3 je negativan, što ima za posljedicu **ekstenziju**, ili razvlačenje (**pulling apart**)

- javlja se u plćim nivoima



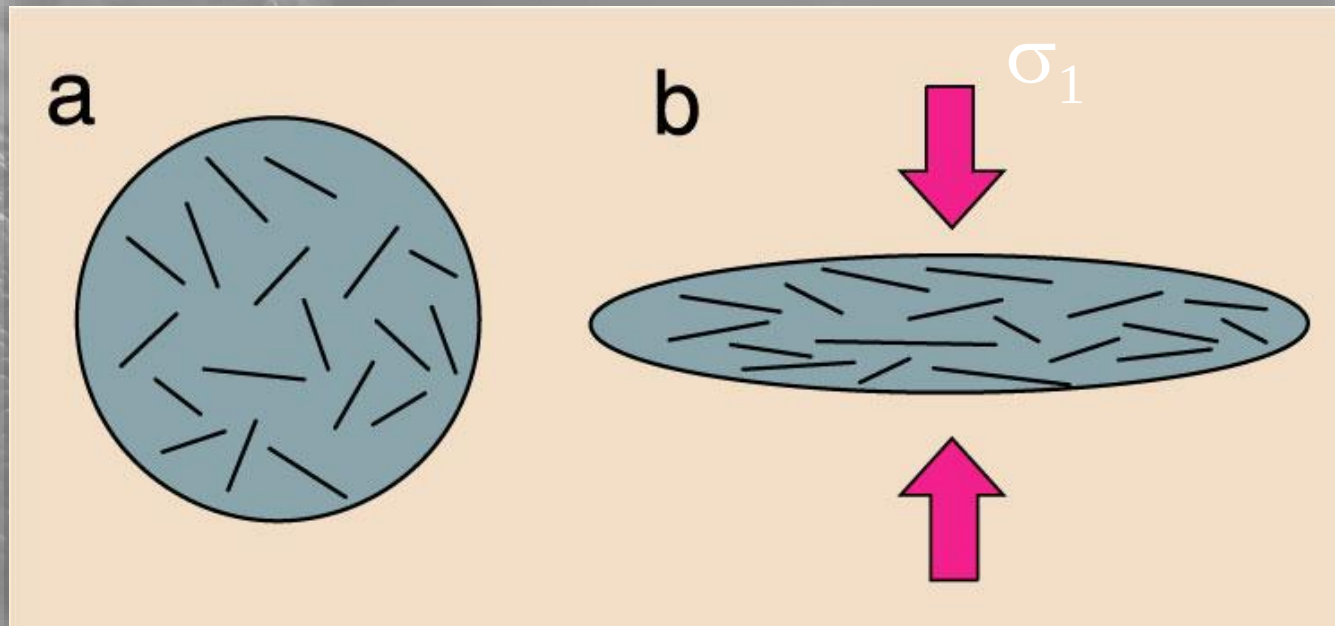
Slika 21-2. Tri osnovna tipa stresa s primjerima mogućih struktura. a. Tenzija, jedan stres je negativan. “Tenzijske pukotine” okomite na ekstenziju i ispunjene sekundarnim mineralima. Winter (2001) An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology. Prentice Hall.

Kompresija: σ_1 je dominantna, $\rightarrow$ boranje (**folding**)
ili kod homogenih tijela spljoštavanje (**flattening**)



Slika 21-2. Tri osnovna tipa stresa s primjerima mogućih struktura. b. Kompresija, uzrokuje spljoštavanje ili boranje. Winter (2001) An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology. Prentice Hall.

- **Folijacija** je uobičajen rezultat kompresije i omogućava određivanje orijentacije σ_1

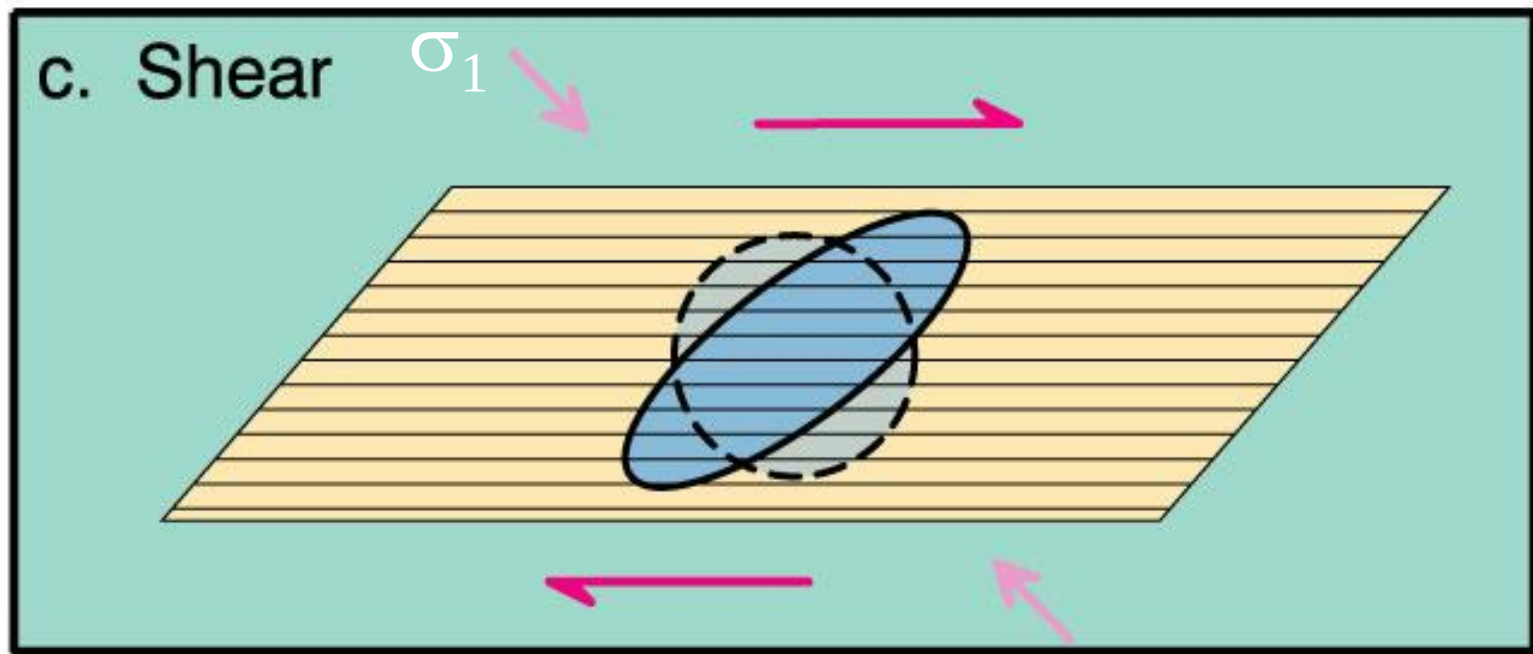


- $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 \rightarrow$ folijacija bez lineacije
- $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3 \rightarrow$ lineacija bez folijacije
- $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 \rightarrow$ i folijacija i lineacija

Slika 21-3. Spljoštavanje duktilne homogene sfere (a) sadržava slučajno orijentirane spljoštene čestice. U (b) slučaju matriks se kreće tako da s progresivnim spljoštavanjem čestice zauzimaju paralelan položaj okomit na dominantan smjer stresa (škriljavost, folijacija). Winter (2001) An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology. Prentice Hall.

Čimbenici metamorfizma

Smicanje (shear) kretanje duž ravnina koje su pod kutem na σ_1



Slika 21-2. Tri osnovna tipa stresa s primjerima mogućih struktura. c. Smicanje, uzrokuje klizanje duž paralelnih ravnina i rotaciju. Winter (2001) An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology. Prentice Hall.

Čimbenici metamorfizma

Fluidi

Dokazi za prisutnost metamorfnih fluida:

- Fluidne inkluzije (FI)
- Fluidi su potrebni za nastanak minerala s vodom (OH - klorit, amfibol, tinjci, ...)
- Reakcije koje uključuju fluide se javljaju na “nižim” tlakovima i temperaturama a ovisni su i o vrsti te svojstvima fluida

Čimbenici metamorfizma

- P_{fluid} uključuje ukupan tlak fluida koji je suma **parcijalnih tlakova** za svaku od komponenta
($P_{\text{fluid}} = p_{\text{H}_2\text{O}} + p_{\text{CO}_2} + \dots$)
- Može se također razmatrati i kao **molarni udjeli** komponentata čija je krajnja suma 1

$$(X_{\text{H}_2\text{O}} + X_{\text{CO}_2} + \dots = 1.0)$$

H₂O

CO₂ u stijenama sa značajnim udjelom karbonata, CH₄, S, N₂

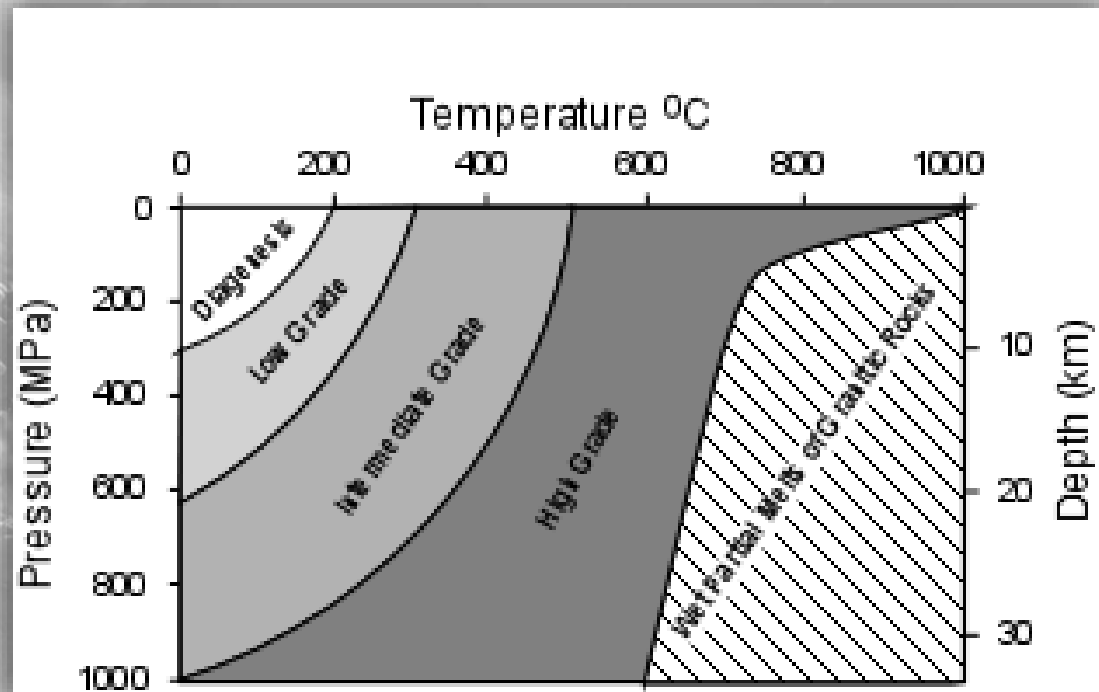
Porijeklo i izvor fluida? meteorske, juvenilne - magmatske vode, subducirani materijal, sedimenti, "degassing of the mantle"

Pomoću fluida transportiraju se različiti kemijski elementi na značajne udaljenosti - **metasomatizam**

Metamorfni stupanj

- **Metamorfni stupanj** (metamorphic grade):
opće povećanje u stupnju metamorfizma bez
specificiranja točnih odnosa između tlaka i
temperature

VLGM - very low grade
LGM - low grade
MGM - medium grade
HGM - high grade



Vrste metamorfizma

Različiti pristupi klasifikaciji

1. Temeljeni na glavnom procesu ili varijabli (P, T)

- **Dinamski metamorfizam (P)**
- **Termalni metamorfizam (T)**
- **Dinamo-termalni metamorfizam (P, T)**

Vrste metamorfizma

2. Temeljeni na smještaju ili procesu

– **Kontaktni metamorfizam**

- Pirometamorfizam

– **Regionalni metamorfizam**

- Orogeni metamorfizam
- Metamorfizam tonjenja
- Metamorfizam oceanskog dna

– **Hidrotermalni metamorfizam**

– **Metamorfizam rasjednih zona**

– **Impaktni ili šok metamorfizam**

Kontaktne metamorfizme

- U blizini magmatskih intruzija
- Rezultat termalnih (i metasomatskih) efekata intruzije vruće magme u hladnije stijene
- Javljaju se u širokom rasponu tlakova uključujući i vrlo niske
- Kontaktne **aureole**

Kontaktni metamorfizam

Veličina i oblik aureole je ovisan o:

- Karakteristikama plutona

- ♦ Veličini
- ♦ Obliku
- ♦ Orijentaciji
- ♦ Temperaturi
- ♦ Sastavu

- Karakteristikama ishodišne stijene (protolita)

- ♦ Sastavu
- ♦ Dubini i metamorfnom stupnju prije intruzije
- ♦ Propusnosti

Kontaktni metamorfizam

Najizraženiji kad pluton intrudira u statičnu sredinu blizu površine (niski tlakovi)

- Stijene su obično visokog stupnja metamorfizma i izotropne građe: **hornfelsi** (ili granofelsi) u kojima su reliktna struktura često puta sačuvane
točkasti filit (**spotted**) ili slejt - rezultat overprint-a

Pirometamorfizam

Vrlo visoke temperature pri niskim tlakovima

Razvija se u ksenolitima

Regionalni metamorfizam

Metamorfizam koji se odvija na regionalnoj skali
(veliki volumen i površine) stijena

Tri osnovna tipa:

- **Orogeni** metamorfizam
- Metamorfizam **tonjenja**
- Metamorfizam **oceanskog dna**

Orogeni metamorfizam

- tip metamorfizma asociran s **konvergentnim rubovima ploča**

- orogeni (dinamotermalni) metamorfizam uključuje jednu ili više epizoda orogeneze s kombinacijom povišenih geotermalnih gradijenata i deformacija
- uzdizanje i erozija
- pokazuje povišenje metamorfnog stupnja prema centralnom području
- orogeni pojasevi pokazuju nekoliko epizoda deformacije i metamorfizma kreirajući složen polimetamorfni obrazac
- npr. kontinentalna kolizija

Metamorfizam tonjenja

Metamorfizam tonjenja = vrlo niski stupanj metamorfizma nastao u sedimentacijskim bazenima uslijed tonjenja i gomilanja naslaga

- npr. New Zealand: debele naslage (> 10 km) Mz vulkanoklastita
- bez deformacija i magmatskih intruzija
- finožrnati agregati, staklo, visoke T -> pogodni za metamorfnu alteraciju
- metamorfni efekti pripisani povišenju P i T tijekom tonjenja / zatrpavanja
- Slijed od dijageneze do formiranja zeolita, prehnita, pumpeleita, laumontita, itd.

Metamorfizam tonjenja

Metamorfizam tonjenja se javlja u područjima koja nisu prošla značajnije deformacije ili orogenezu

- Ograničena na velike relativno neporemećene naslage sedimenata smještene dalje od aktivnih kontinentalnih rubova
 - Meksički zaljev
 - Bengal

Metamorfizam tonjenja

Metamorfizam tonjenja

- Bengalska lepeza → naslaga sedimenata > 22 km
- Ekstrapolacija → $250-300^{\circ}\text{C}$ u bazi ($P \sim 0.6$ GPa)
- To je unutar područja metamorfizma i težina krovinskih sedimenata je dovoljna za nastanak folijacije
- Pasivne granice postaju aktivne
- Stoga područja metamorfizma tonjenja postaju područja orogenog metamorfizma

Metamorfizam oceanskog dna

Metamorfizam oceanskog dna djeluje na oceansku koru na hrptovima

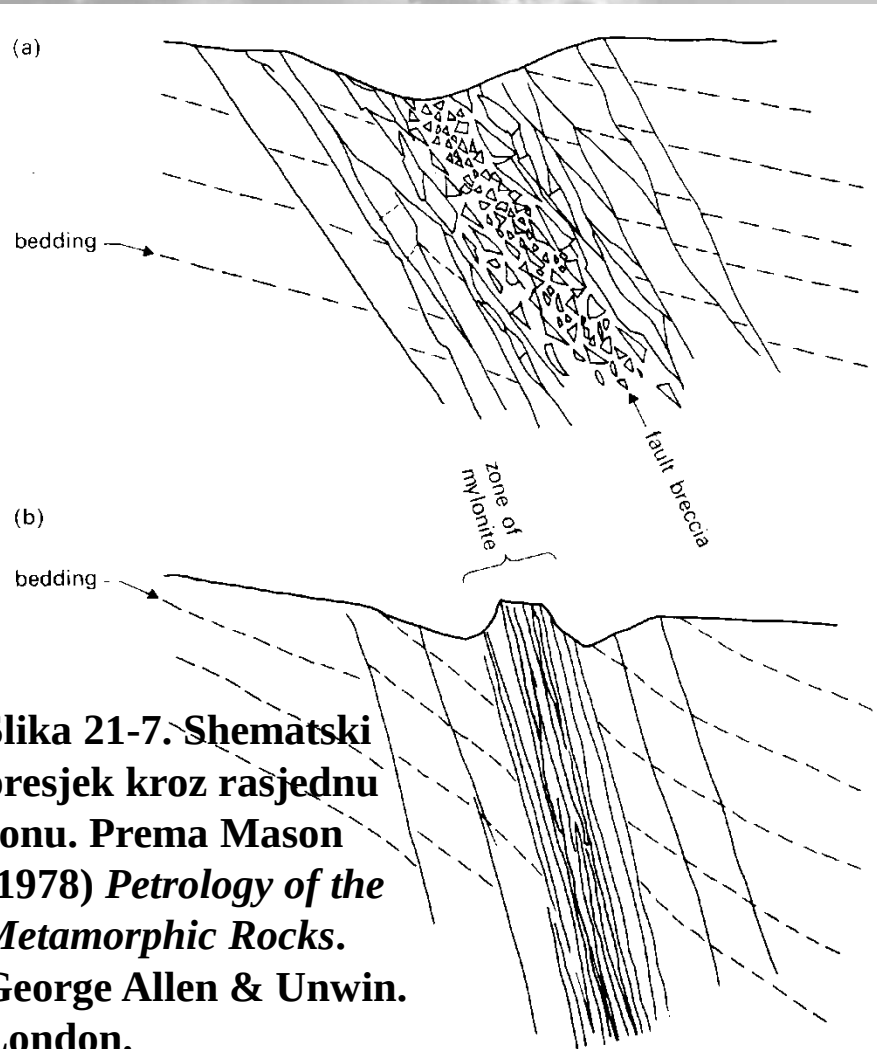
- Širok raspon T na relativno niskim P
- Metamorfne stijene pokazuju značajne metasomatske alteracije gubitak Ca i Si i prinos Mg i Na
- Te promjene se mogu korelirati sa izmjenama kationa između bazalta i vruće morske vode (**pillow bazalti**)

Vrste metamorfizma

- Coombs (1961) - **hidrotermalni metamorfizam**, uzrokovan vrućim H_2O fluidima; uključuje i metasomatizam
- Teško ga je u potpunosti odijeliti od istih efekata koji hidroterme imaju u drugim tipovima metamorfizma (metamorfizam oceanskog dna, ...)

Vrste metamorfizma

Metamorfizam rasjednih zona i impaktni metamorfizam



Slika 21-7. Shematski presjek kroz rasjednu zonu. Prema Mason (1978) *Petrology of the Metamorphic Rocks*. George Allen & Unwin. London.

javljaju se u područjima koja su podvrgnuta jakom deformacijom i slabom rekristalizacijom

- krta deformacija
- duktilna ("ductile") def.
- Impaktni metamorfizam ("shock metamorphism") javlja se kod meteoritskih udarnih kratera

Progradni i retrogradni metamorfizam

- **Progradni** metamorfizam: povišenje u metamorfnom stupnju s vremenom kako stijena dolazi pod više metamorfne uvjete
 - promjene u stijeni prate povišenje metamorfnih uvjeta
- **Retrogradni** metamorfizam: smanjenje stupnja kako se stijene hlade i “oporavljaju” od metamorfnog ili magmatskog događaja

Progradni i retrogradni metamorfizam

- Stijena visokog metamorfnog stupnja **progradira** kroz slijed mineralnih parageneza **(zajednica koje su istovremene i u kontaktu)** a ne prelazi direktno iz nemetamorfne stijene u visoko metamorfnu stijenu

Progradni i retrogradni metamorfizam

Sve stijene koje danas imamo na površini morale su se ohladiti na površinske uvjete

U kojoj točki na njihovom **P-T-t putu** su se njihovi minerali zadnji puta uravnotežili?

- brzina uravnoteženja?

- sačuvana zonalna distribucija metamorfnih stijena sugerira da stijene sačuvaju uvjete **maksimalnog metamorfnog stupnja (temperature)**
- Geotermometrija ukazuje da mineralni sastav obično pokazuje maksimalne T

Gdje su informacije o genezi metamorfnih stijena?

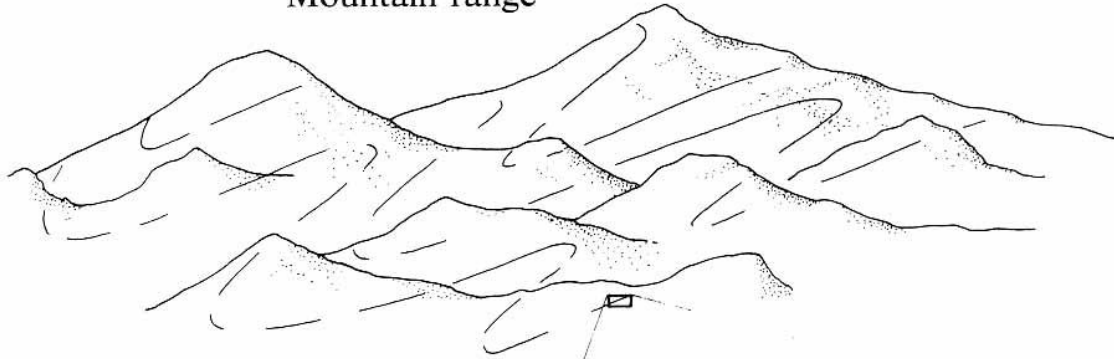
- struktura
- tekstura
- sklop
- minerali
- mineralne zajednice ...

Strukture metamorfnih stijena kao pomoć u interpretaciji geoloških događaja

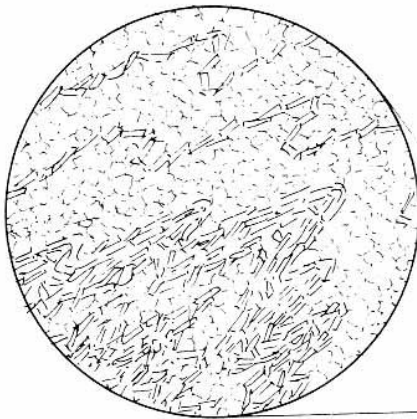
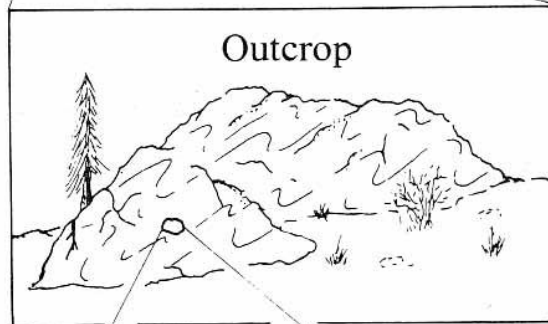
Teksture i strukture metamorfnih stijena

- način na koji minerali zauzimaju prostor u stijeni, njihov međusoban odnos, odnos prema prostoru, uvjetima metamorfizma ... , veličina, oblik zrna, kristalinitet
- važni za razmatranja slijeda zbivanja u geološkoj prošlosti
- metamorfizam je skup svih procesa koji dovode do strukturnih, mineralnih ili kemijskih promjena u primarnoj stijeni (protolitu), **a odvijaju se u čvrstom stanju**
- T utječe na mineralni sastav P (litostatski i stres) na teksture i strukture
- uz P i T važne su varijable metamorfizma koncentracija (aktivitet, fugacitet) i voda (katalizator i prijenosnik tvari)

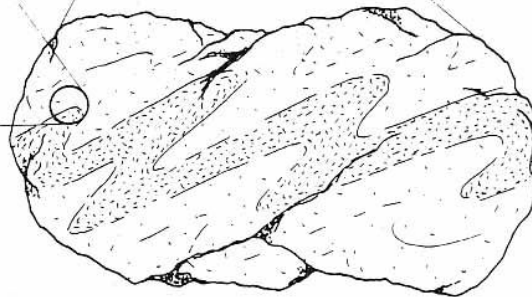
Mountain range



Outcrop



Thin section



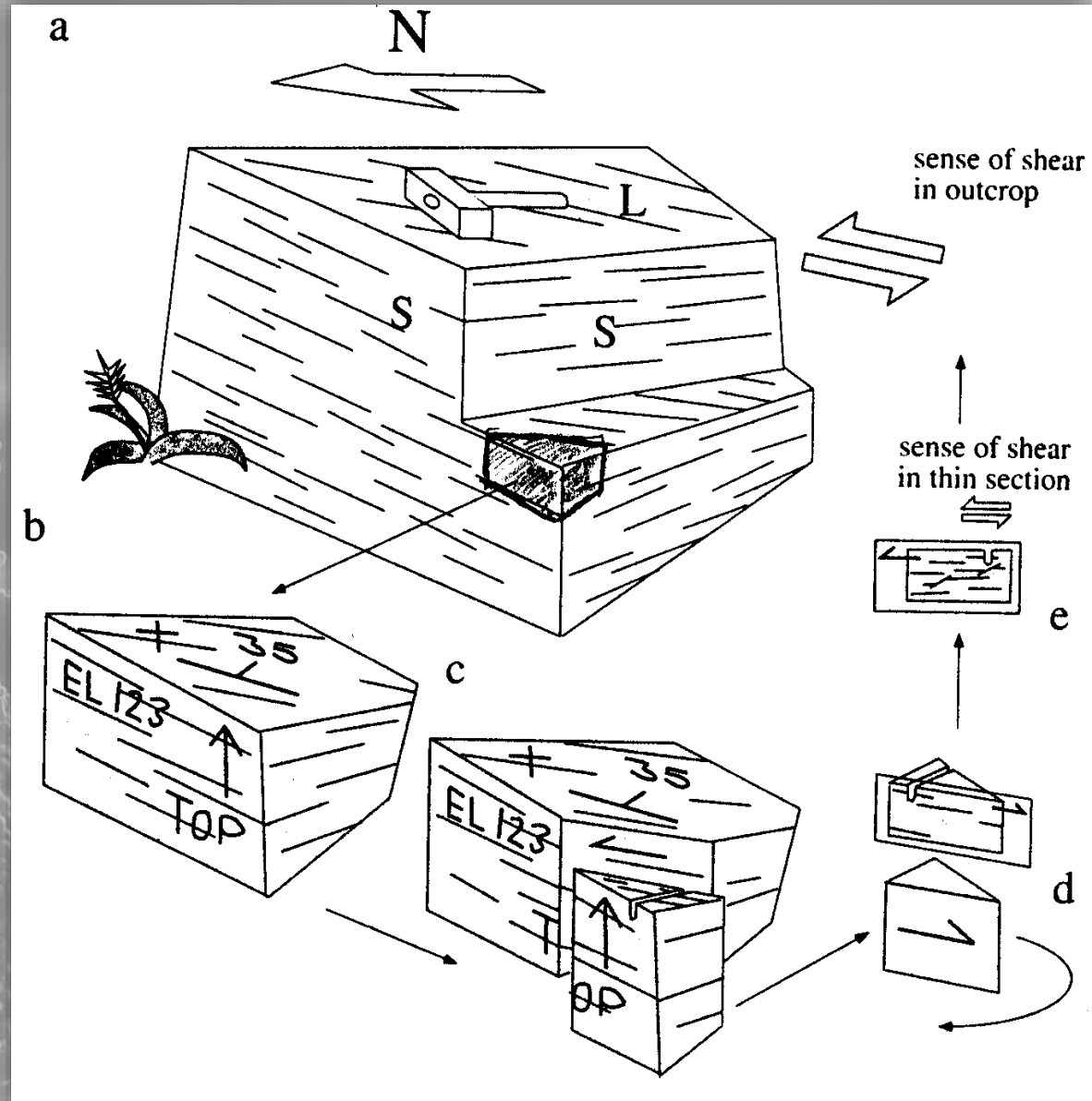
Hand sample

Elementi građe, strukture i teksture su konzistentni u svim mjerilima od planinskih lanaca do mikroskopskog preparata.

Prema Best (1982). *Igneous and Metamorphic Petrology*. W. H. Freeman. San Francisco.

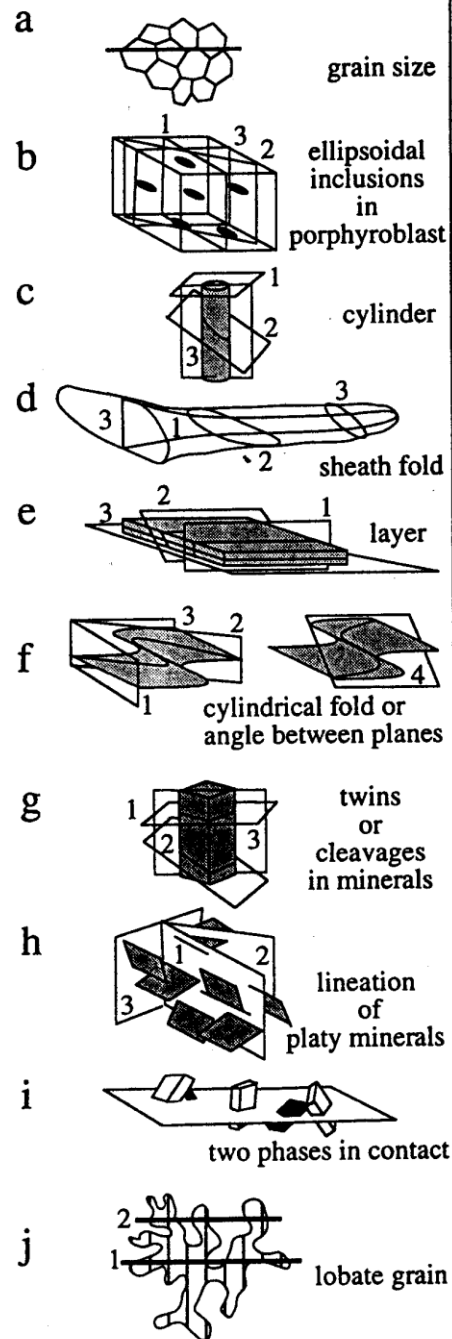
S porastom dubine odnosno porastom metamorfnih uvjeta mineralne parageneze (zajednice) karakteristične za niže P i T uvjete prestaju biti stabilne.

Reakcijama između minerala ili promjenama strukture nastoji se postići ravnoteža u sustavu i nastaje parageneza stabilna u novim P-T uvjetima.

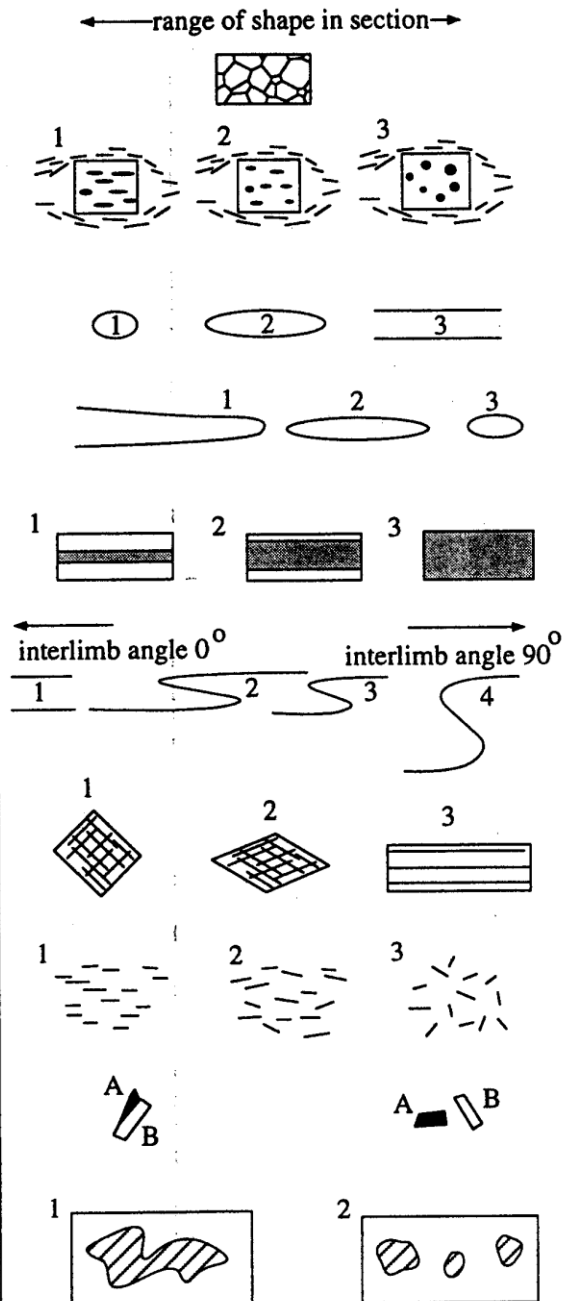


Utjecaj orijentacije uzorka (izrada mikroskopskih preparata)

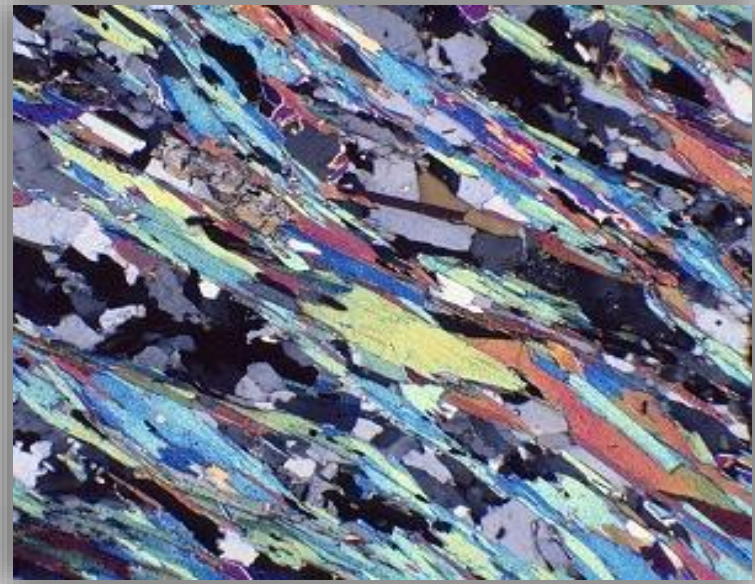
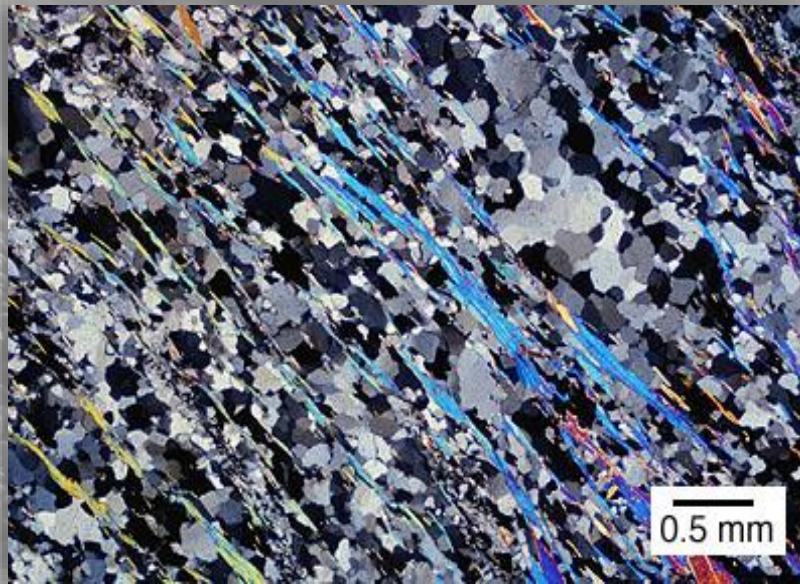
three dimensional shape



thin section



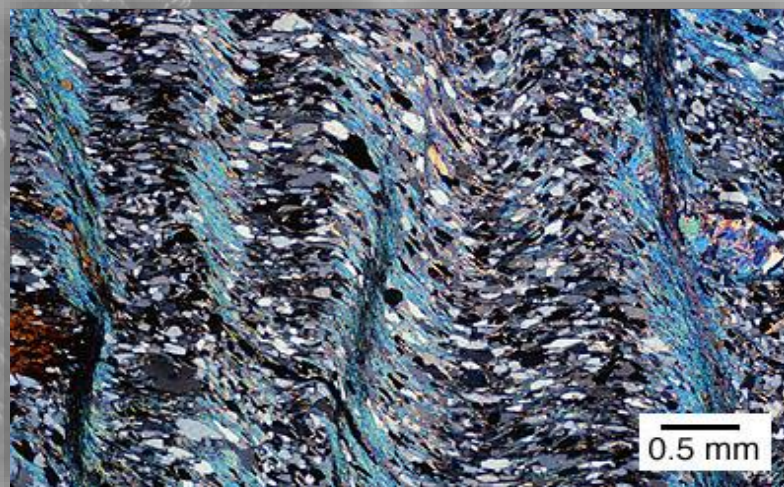
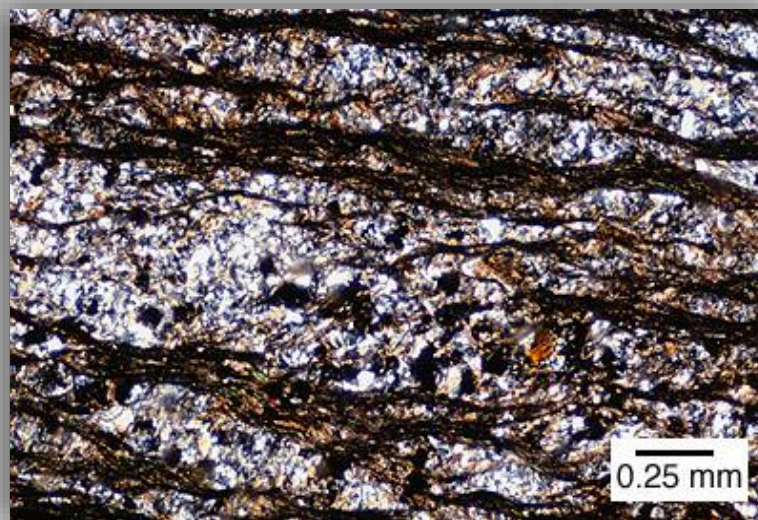
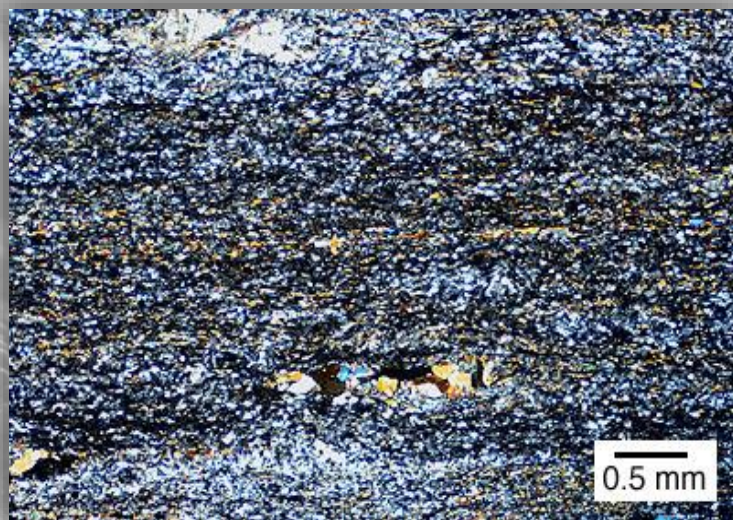
Preferirane orijentacije



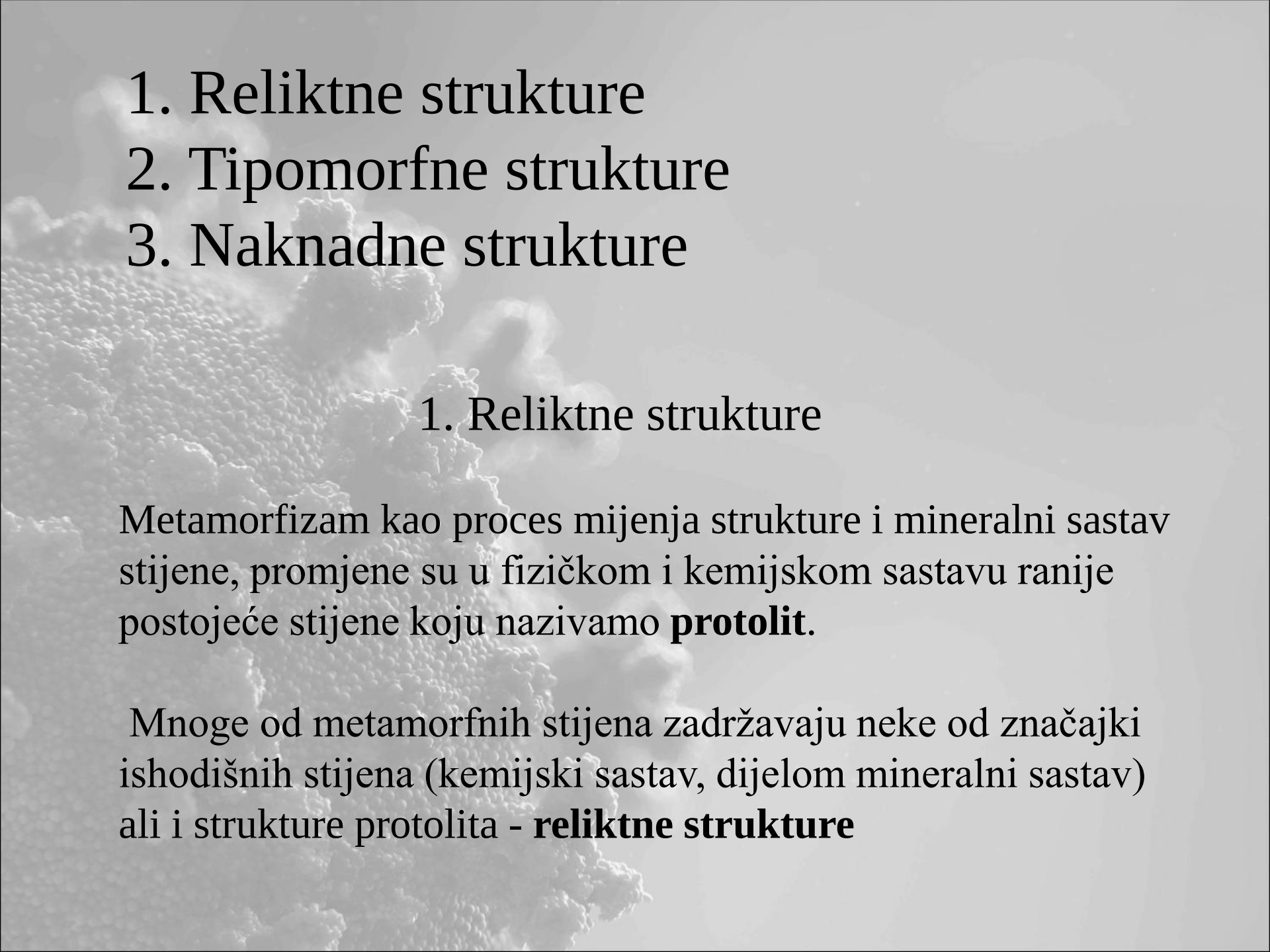
Folijacija - bilo koji vid planarne građe u metamorfnoj stijeni. U ovom slučaju definirana paralelnim razmještajem tinjaca.

Škriljavost - paralelno redanje minerala (listićavih i izduženih) u ravnini koja je okomita na smjer pritiska (stres)

Slojevitost - S_0



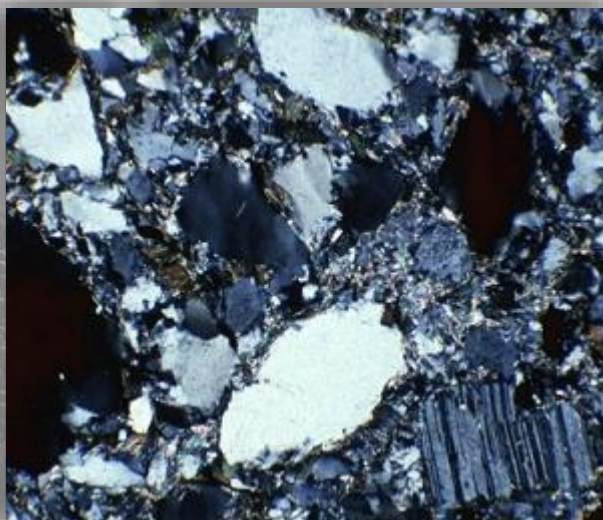
Krenulacijski klivaž - vertikalna folijacija (S_2) je razvijena nakon horizontalne (S_1)

- 
1. Reliktne strukture
 2. Tipomorfne strukture
 3. Naknadne strukture

1. Reliktne strukture

Metamorfizam kao proces mijenja strukture i mineralni sastav stijene, promjene su u fizičkom i kemijskom sastavu ranije postojeće stijene koju nazivamo **protolit**.

Mnoge od metamorfnih stijena zadržavaju neke od značajki ishodišnih stijena (kemijski sastav, dijelom mineralni sastav) ali i strukture protolita - **reliktne strukture**



metapjesčenjak



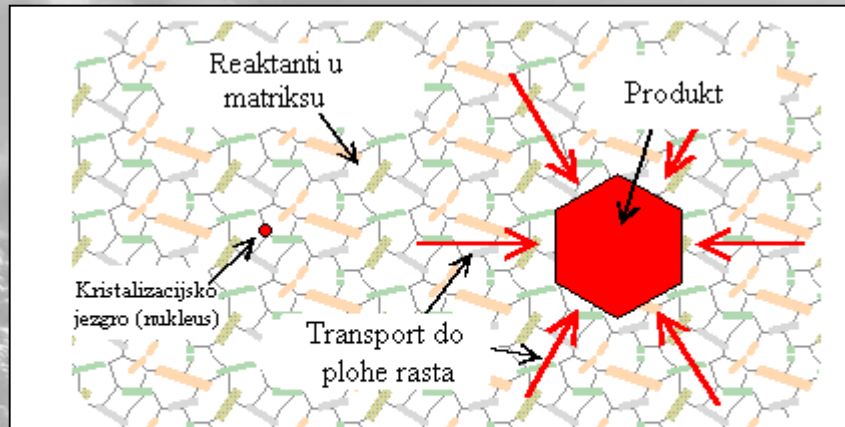
metagabro

meta - gablo, pješčenjak ...

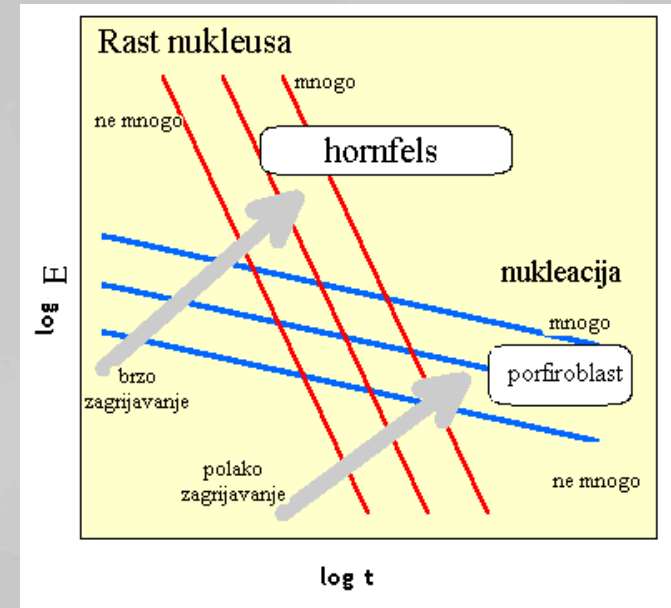
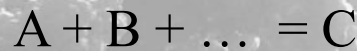
orto - prepoznatljiva magmatska stijena kao protolit

para - prepoznatljiva sedimentna stijena kao protolit

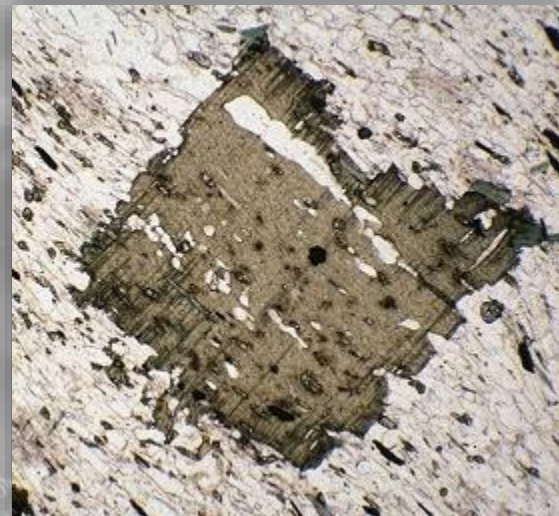
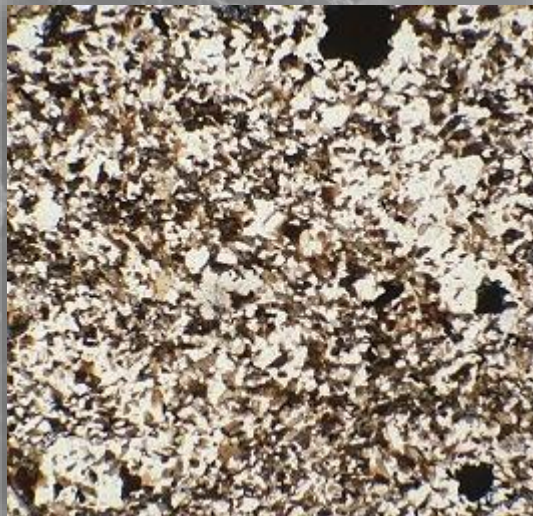
2. Tipomorfne strukture



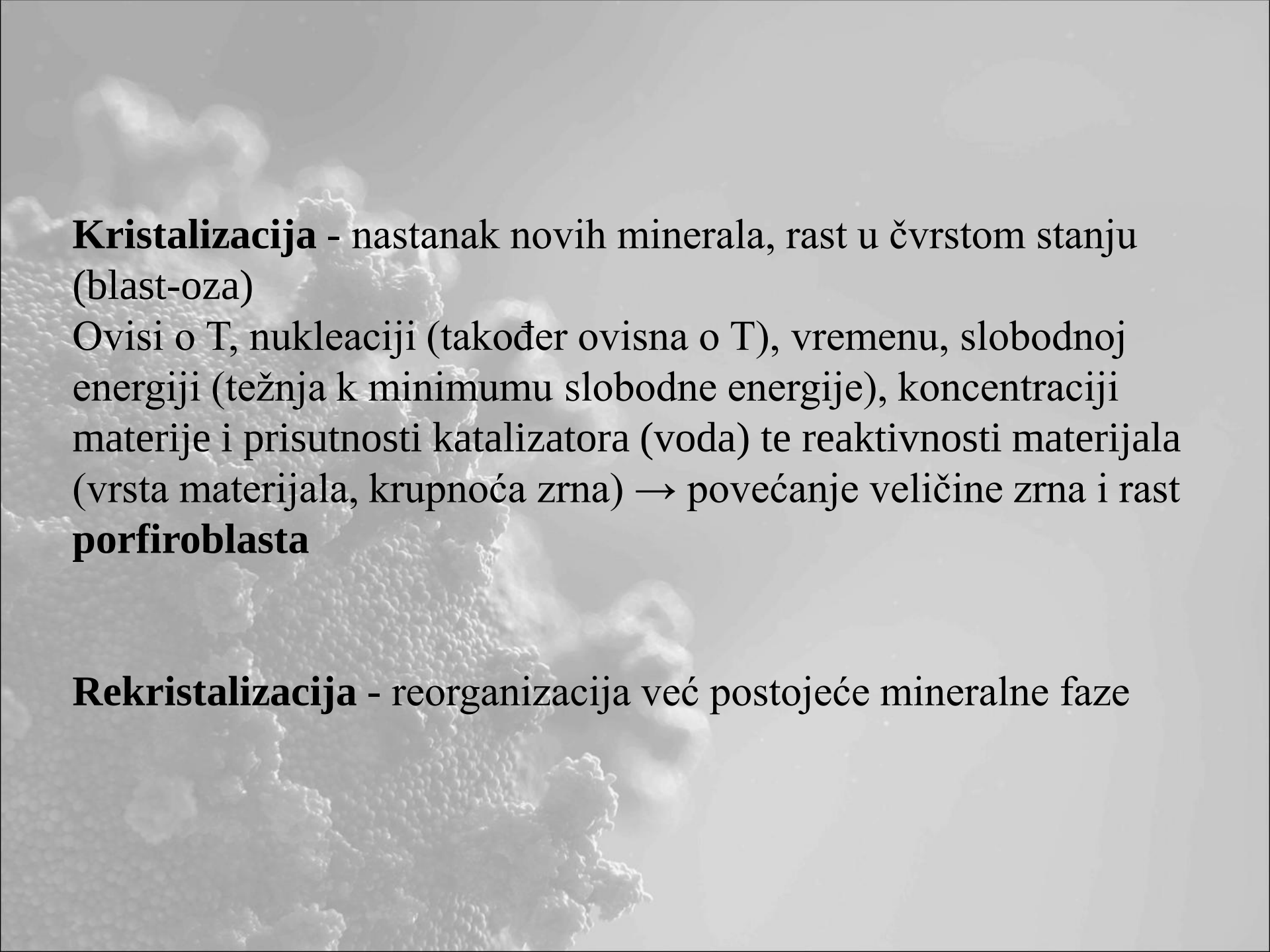
Dovod toplinske energije



puno
kristalizacijskih
centara,
brzo
zagrijavanje,
polagan i
jednolik rast
minerala



samo neki od
minerala imaju
dobre uvjete,
mali broj
kristalizacijskih
centara,
polagano
zagrijavanje,



Kristalizacija - nastanak novih minerala, rast u čvrstom stanju (blast-oza)

Ovisi o T, nukleaciji (također ovisna o T), vremenu, slobodnoj energiji (težnja k minimumu slobodne energije), koncentraciji materije i prisutnosti katalizatora (voda) te reaktivnosti materijala (vrsta materijala, krupnoća zrna) → povećanje veličine zrna i rast **porfiroblasta**

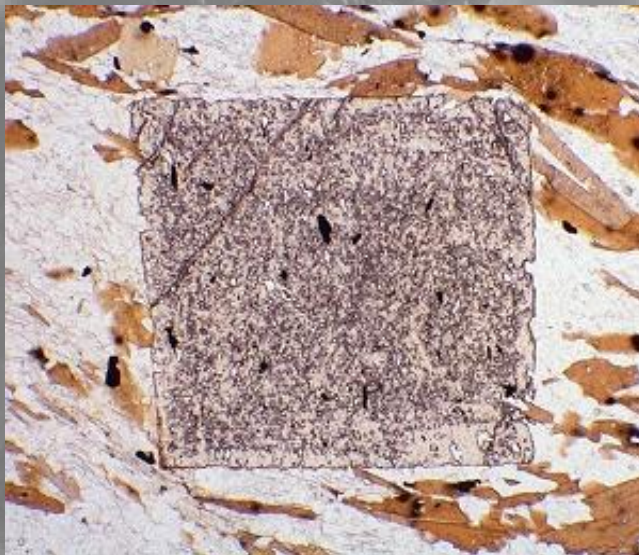
Rekristalizacija - reorganizacija već postojeće mineralne faze

Tipomorfne strukture (2)

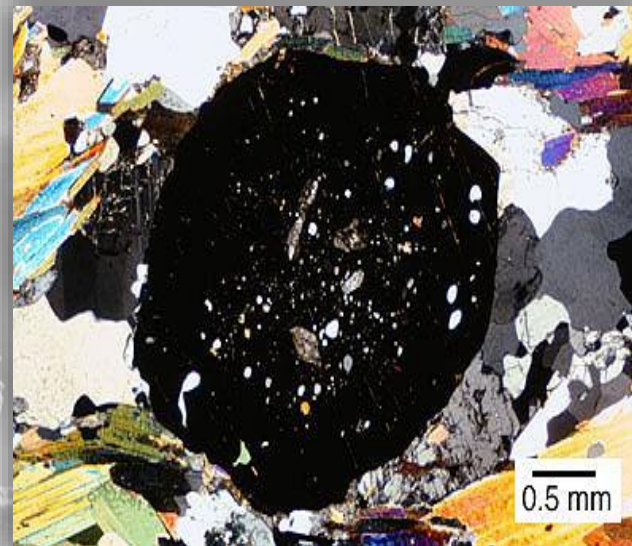


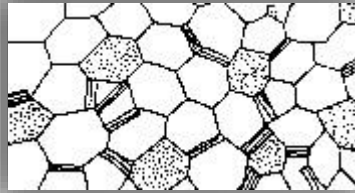
- **Blast** (porfiroblast, idioblast, ksenoblast) - zrno raslo u čvrstom stanju tijekom metamorfizma

Idioblast

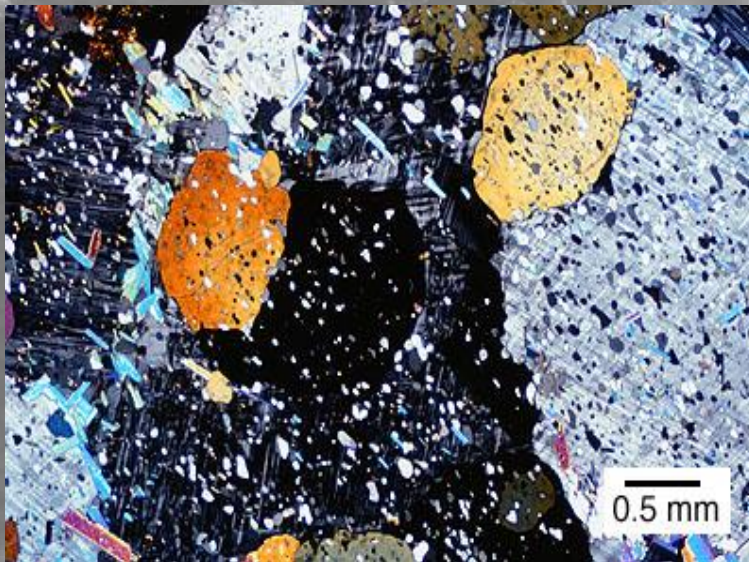
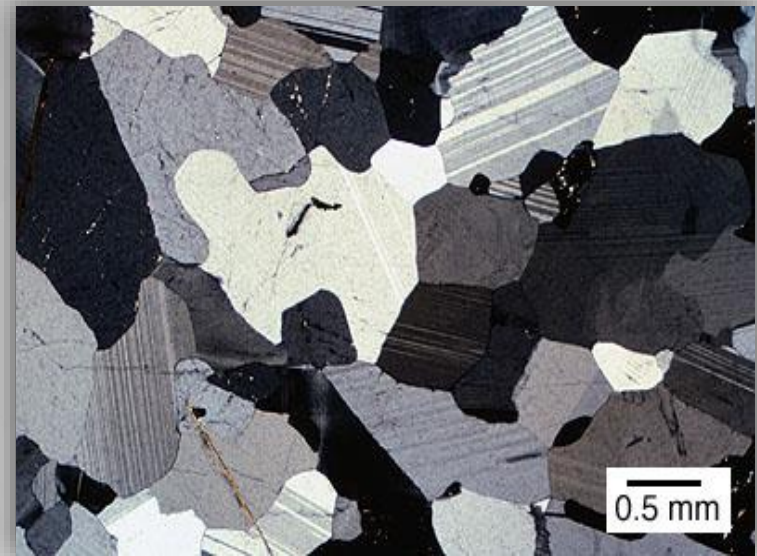


Porfiroblast





Granoblastična struktura -
sastavljena od podjednakih zrna, **G. poligonalna** - bridovi zatvaraju kut od 120° , ukazuje na ravnotežne uvjete

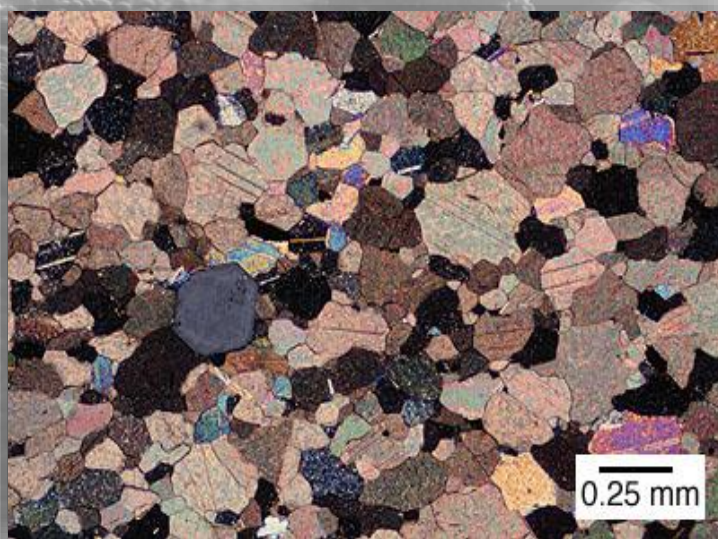


Poikiloblastična - porfiroblast s velikim brojem uklopaka



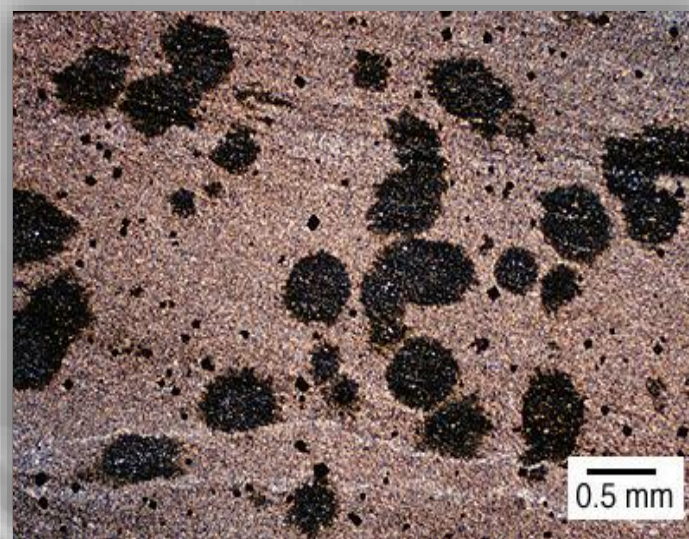
Tipomorfne strukture (3)

Homeoblastične



mramor

Heteroblastične



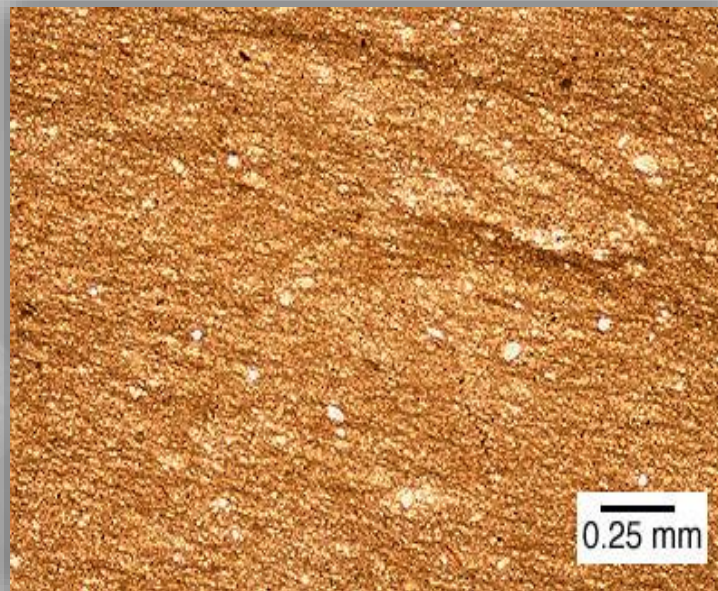
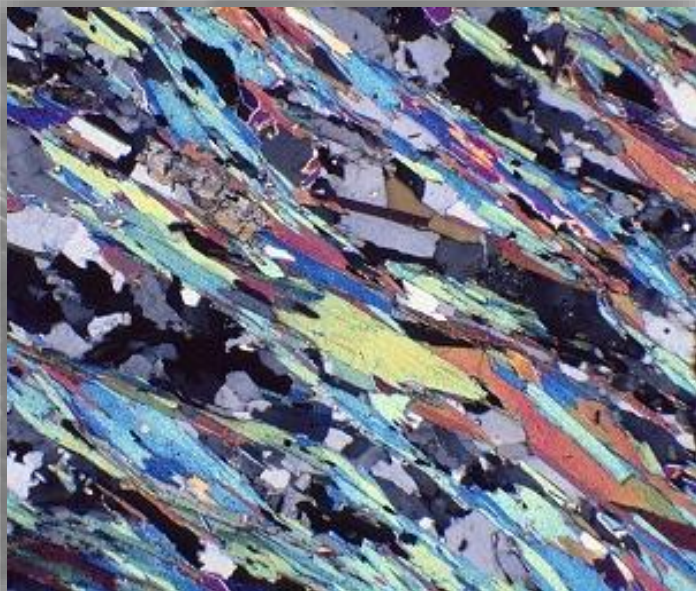
hornfels

Tipomorfne strukture (4)



Nematoblastična struktura - istovrsna orijentacija štapićastih minerala

Lineacija - L, kristalografska os c, os izduženja



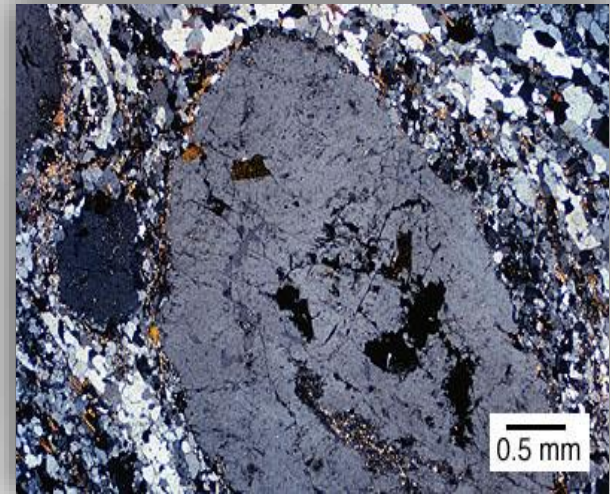
0.25 mm

Lepidoblastična struktura - orijentacija listićavih minerala u ravnini okomitoj na smjer pritiska

Kataklastične strukture (deformacija i rast)

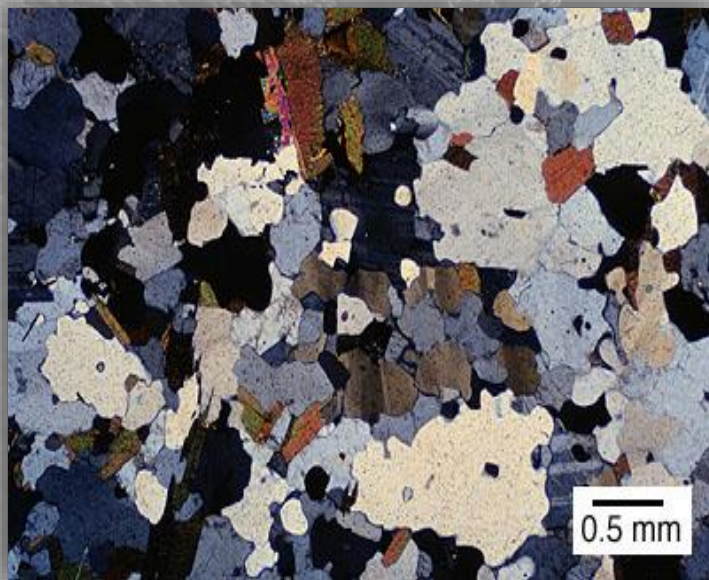


- **Mortar**
- **Brečasta**
- **Okasta (augen)**
- **Milonitna, ultramilonitna**

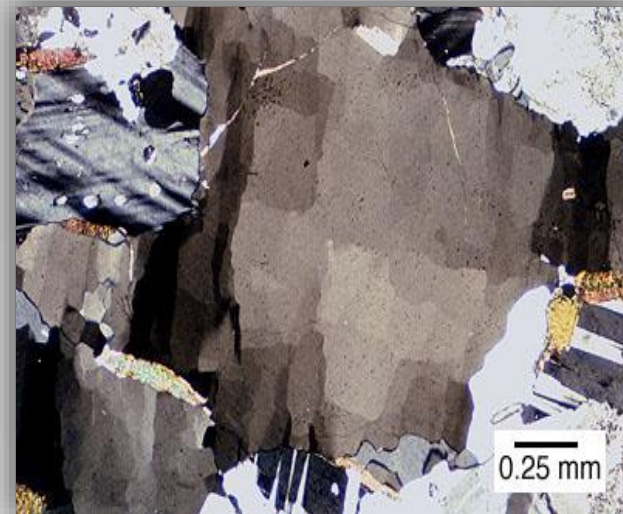


Klast, porfiroklast - reliktni minerali preostali iz izvorne stijene

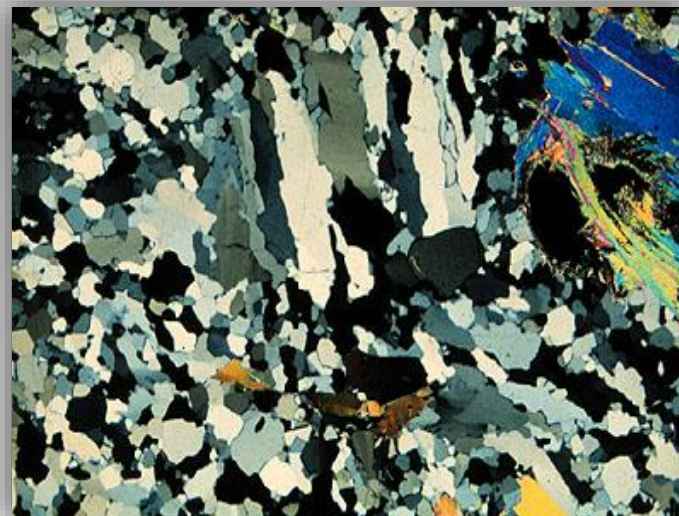
Kataklastične strukture (deformacija i rast)



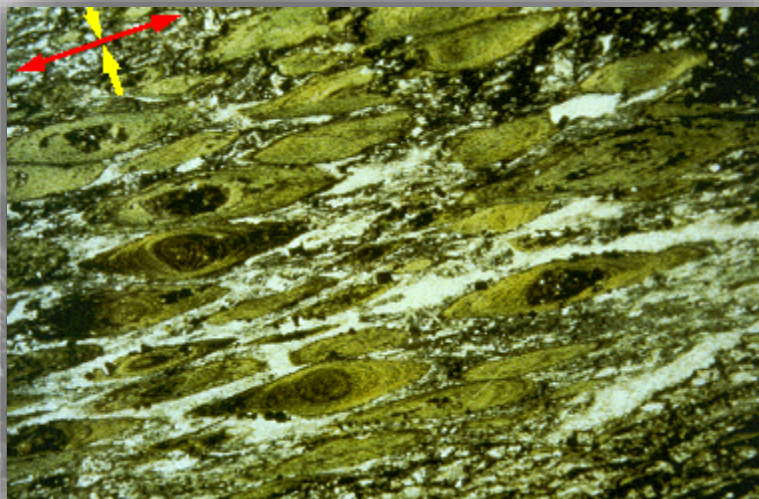
Šivana



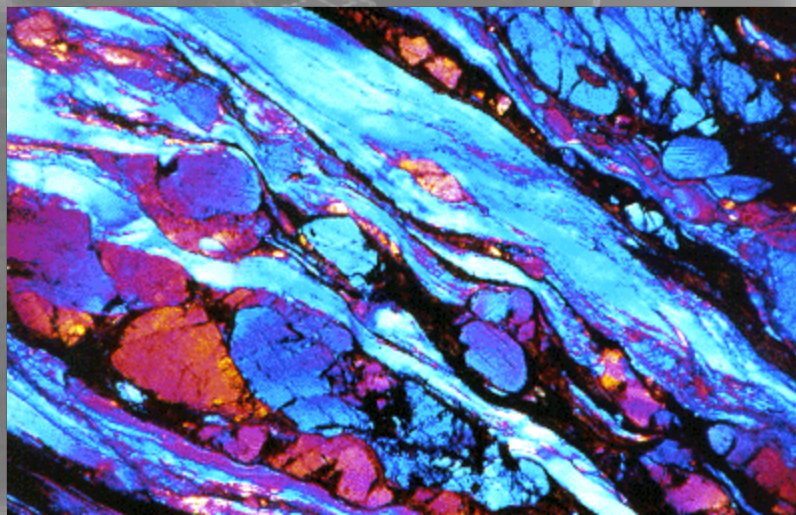
Subgrains



Palisade

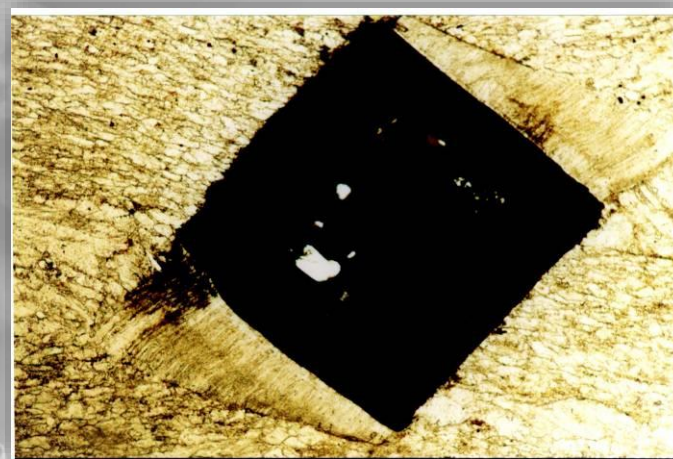
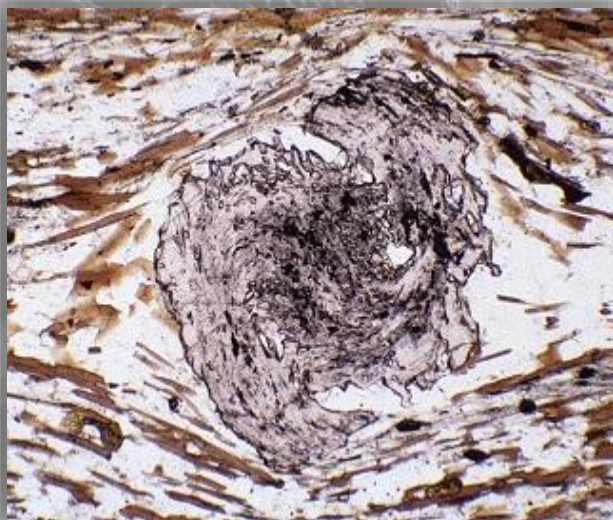
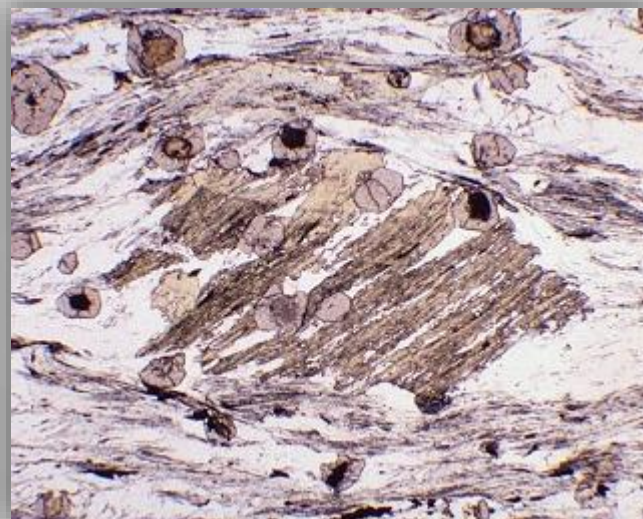
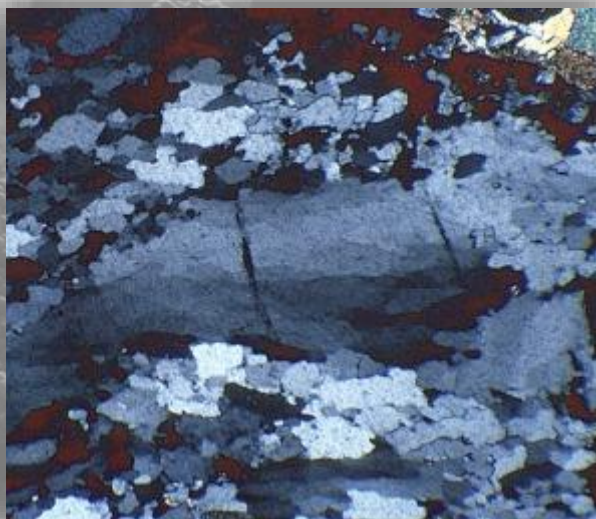


Oolitni vapnenac

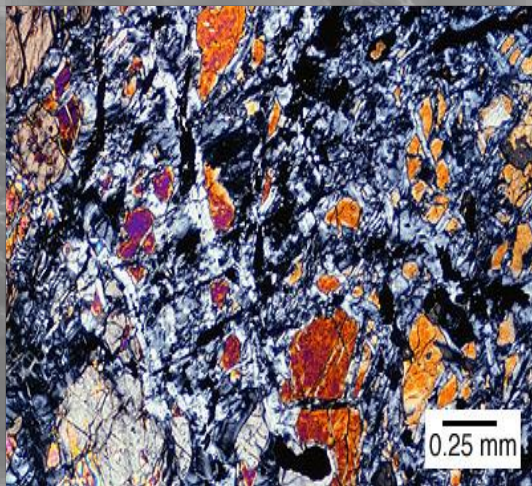


Milonit

Rotacija (snow-ball), spiralan rast inkluzija, mikrorasjedanja, srastanja zrna ...



3. Naknadne strukture



Nastale procesima nakon glavne faze metamorfizma



Mrežasta struktura -
serpentin okružuje piroksen