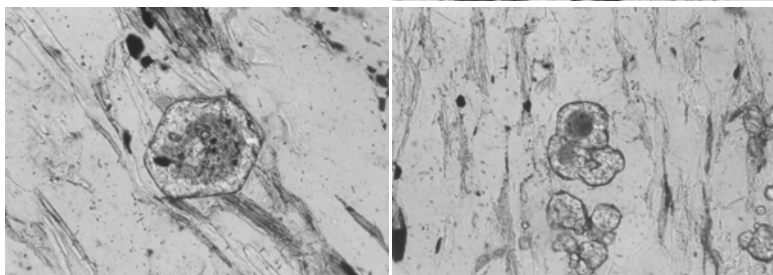


METAMORFNE STIJENE & METAMORFIZAM

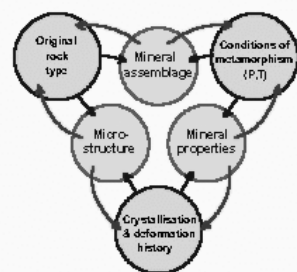


Metamorfizam

Čimbenici i ciljevi:

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

Controlling Factors / Aims of
Metamorphic Study



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

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."

Granice metamorfizma

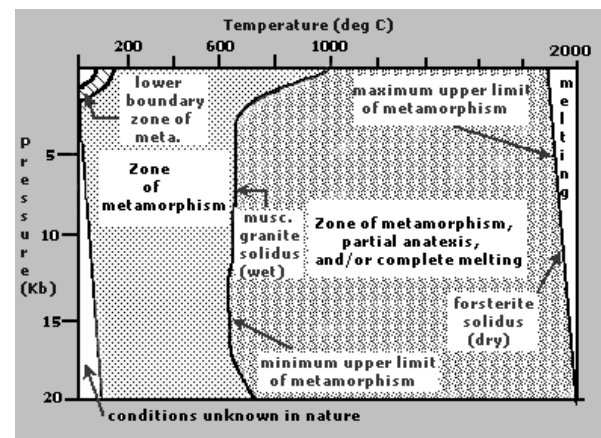
- Donja temperaturna granica prelazi u dijagenezu
 - Granica nije čvrsto određena
 - Proces dijageneze i trošenja se teško razlikuju od metamorfnih procesa vrlo niskog stupnja
 - Metamorfizam počinje u temperaturnom rasponu od 180-200°C za najnestabilnije tipove protolita
 - Neki od zeolita su dijagenetskog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

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

Granice metamorfizma

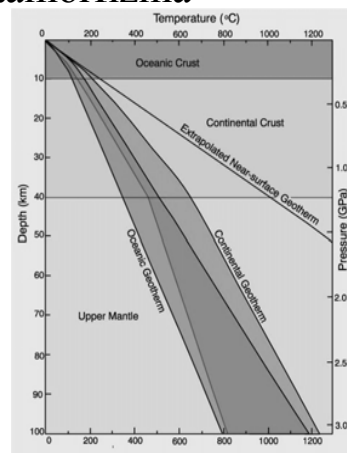
- Gornja temperaturna granica ograničena je taljenjem - u određenom temperaturnom pojasu krutina i taljevina koegzistiraju
- Migmatiti ("mixed rocks") su postupni prijelaz
- Ksenoliti, restiti, anklave spadaju u magmatske procese zbog toga što je taljevina dominantna no razlikovanje je koji puta teško
- 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 Selater *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 prijeći 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

- Stres pogađa strukture i tekture ali ne bitno i ravnotežnu mineralnu zajednicu
- statički $\Rightarrow$ škriljava tekstura
- dinamički $\Rightarrow$ usitnjavanje minerala

Razlikujemo tri vrste stresa:

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

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

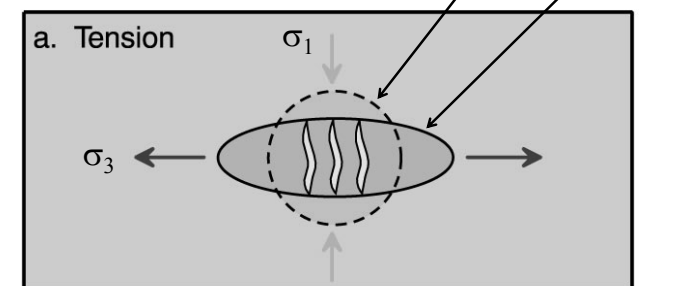
σ_2 je međuvrijednost stresa

σ_3 je minimalna vrijednost stresa

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

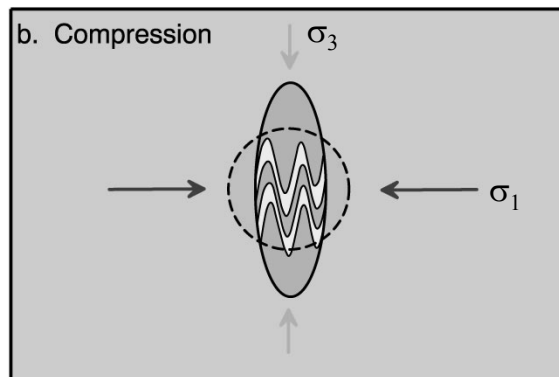
Tenzija: σ_3 je negativan, što ima za posljedicu ekstenziju, ili razvlačenje (pulling apart)

- javlja se u plićim nivoima



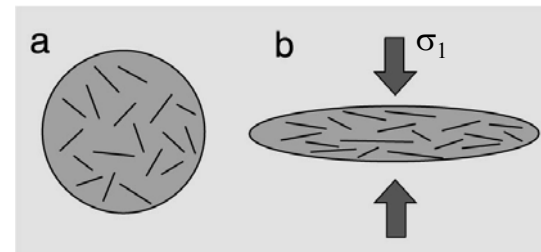
Slika 21-2. Tri osnovna tipa stresa s primjerima mogućih struktura. a. Tenzija, jedan stres je negativan. “Tenzijske pukotine” okomite na ekstenziju i ispunjene sekundarnim mineralima. Winter (2001) An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology. Prentice Hall.

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

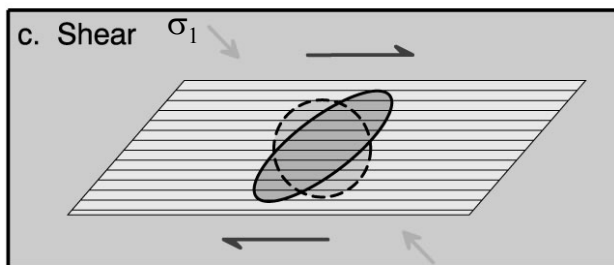


- $\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3 \rightarrow$ folijacija bez lineacije
- $\sigma_1 = \sigma_2 > \sigma_3 \rightarrow$ lineacija bez folijacije
- $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 \rightarrow$ i folijacija i lineacija

Slika 21-3. Spljoštavanje duktilne homogene sfere (a) sadržava slučajno orijentirane spljoštene čestice. U (b) slučaju matrice se kreće tako da s progresivnim spljoštavanjem čestice zauzimaju paralelan položaj okomit na dominantan smjer stresa (skriljavost, 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 komponenata 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**

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)

Metamorfni stupanj

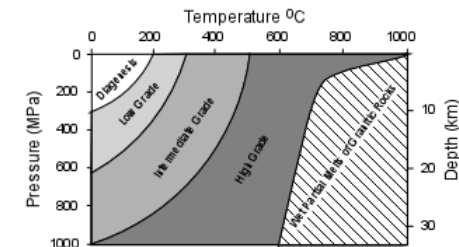
- Metamorfni stupanj (metamorphic grade): opće povećanje u stupnju metamorfizma bez specificiranja točnih odnosa između tlaka i temperature

VLGM - very low grade

LGM - low grade

MGM - medium grade

HGM - high grade



Vrste metamorfizma

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

Kontaktni metamorfizam

- 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

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

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

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 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 = 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
- fino-zrnati 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

- Bengalska lepeza → naslaga sedimenata > 22 km
- Ekstrapolacija → 250-300°C u bazi (P ~ 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

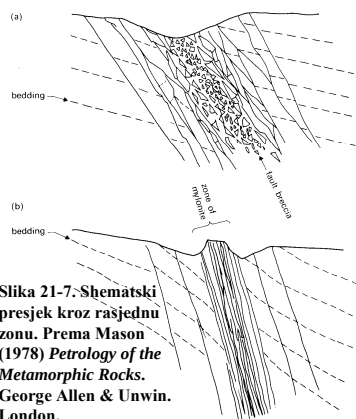
- Širok raspon T na relativno niskim P
- Metamorfne stijene pokazuju značajne metasomatske alteracije gubitak Ca i Si i prinos Mg i Na
- Te promjene se mogu korelirati sa izmjenama kationa između bazalta i vruće morske vode (pillow bazalti)

Vrste metamorfizma

- Coombs (1961) - hidrotermalni metamorfizam, uzrokovan vrućim H₂O 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



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

Gdje su informacije o genezi metamorfnih stijena?

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

Strukture metamorfnih stijena kao pomoć u interpretaciji geoloških događaja

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

Teksture i strukture metamorfnih stijena

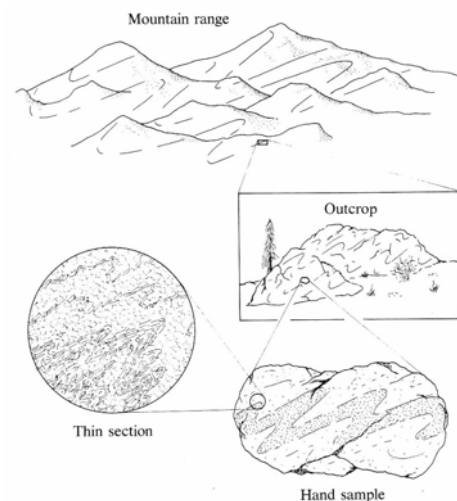
- način na koji minerali zauzimaju prostor u stijeni, njihov međusoban odnos, odnos prema prostoru, uvjetima metamorfizma ... , veličina, oblik zrna, kristalinitet

- 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)

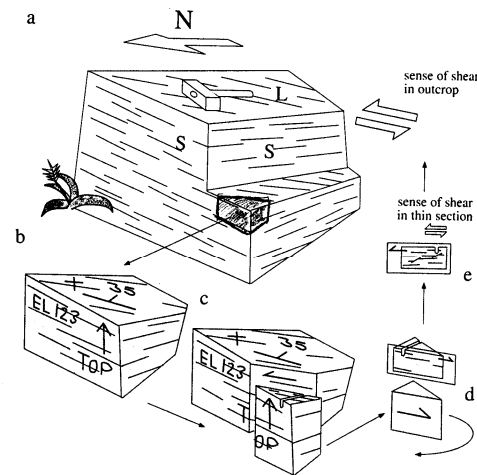


Elementi građe, strukture i tekture su konzistentni u svim mjerilima od planinskih lanaca do mikroskopskog preparata.

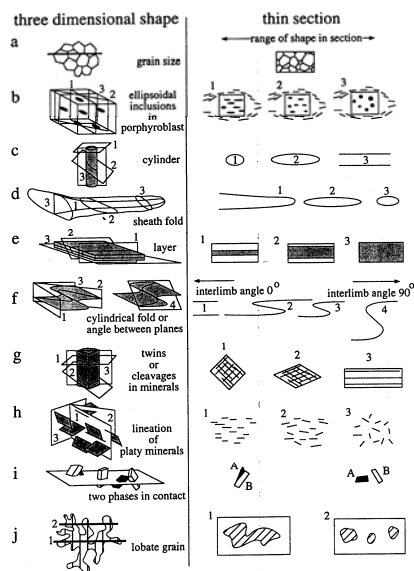
Prema Best (1982). *Igneous and Metamorphic Petrology*. W. H. Freeman. San Francisco.

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

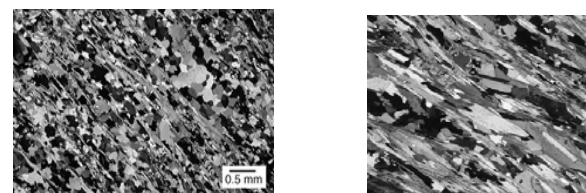
Reakcijama između minerala ili promjenama strukture nastoji se postići ravnoteža u sustavu i nastaje parageneza stabilna u novim P-T uvjetima.



Utjecaj orijentacije uzorka
(izrada mikroskopskih
preparata)



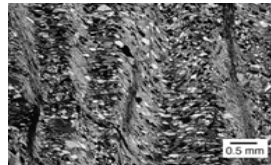
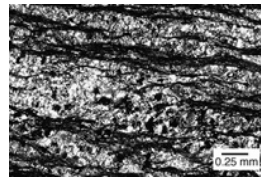
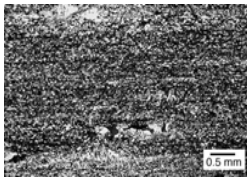
Preferirane orijentacije



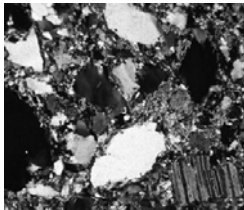
Folijacija - bilo koji vid planarne građe u metamorfnoj stijeni. U ovom slučaju definirana paralelnim razmještajem tinjaca.

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

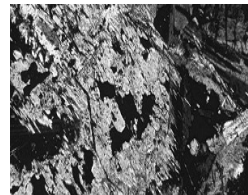
Slojevitost - S_0



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



metapjesčenjak



metagabro

meta - gabro, pjesčenjak ...

orto - prepoznatljiva magmatska stijena kao protolit

para - prepoznatljiva sedimentna stijena kao protolit

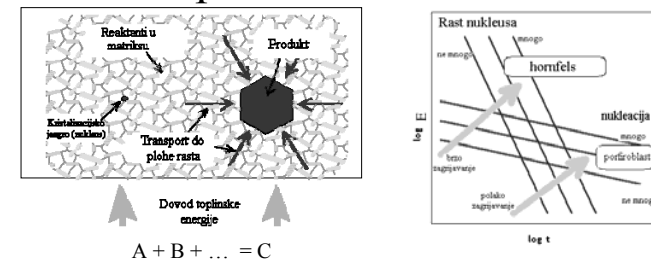
1. Reliktne strukture
2. Tipomorfne strukture
3. Naknadne strukture

1. Reliktne strukture

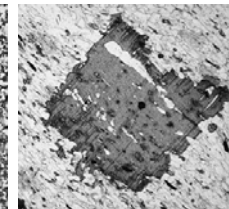
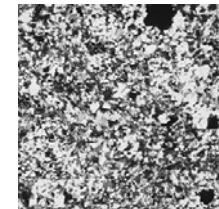
Metamorfizam kao proces mijenja strukture i mineralni sastav stijene, promjene su u fizičkom i kemijskom sastavu ranije postojeće stijene koju nazivamo **protolit**.

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

2. Tipomorfne strukture



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

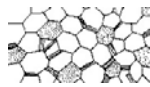


samo neki od minerala imaju dobre uvjete, mali broj kristalizacijskih centara, polagano zagrijavanje,

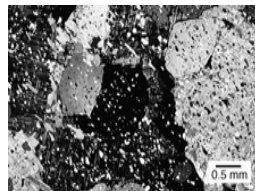
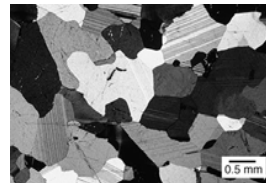
Kristalizacija - nastanak novih minerala, rast u čvrstom stanju (blast-oza)

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



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

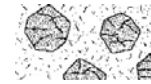


Poikiloblastična - porfiroblast s velikim brojem uklopaka

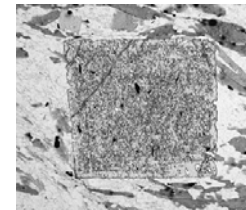


Tipomorfne strukture (2)

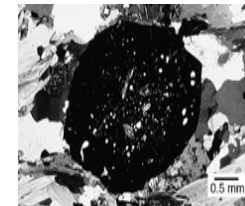
- **Blast** (porfiroblast, idioblast, ksenoblast) - zrno raslo u čvrstom stanju tijekom metamorfizma



Idioblast

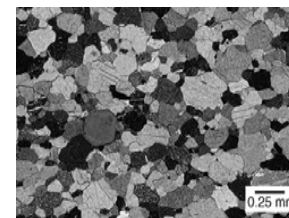


Porfiroblast



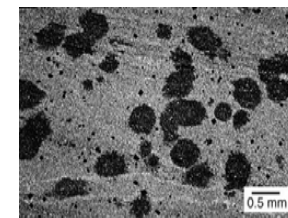
Tipomorfne strukture (3)

Homeoblastične



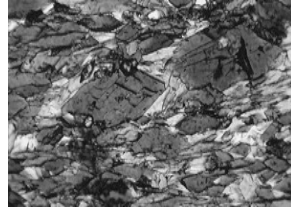
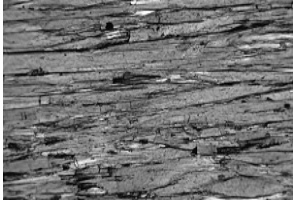
mramor

Heteroblastične



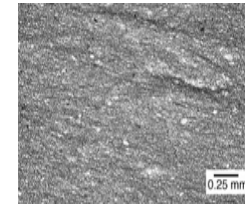
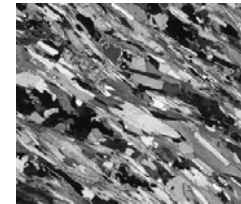
hornfels

Tipomorfne strukture (4)



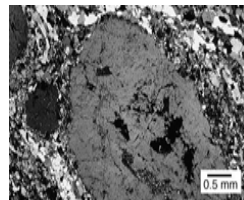
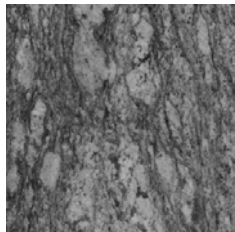
Nematoblastična struktura - istovrsna orijentacija štapićastih minerala

Lineacija - L, kristalografska os c, os izduženja



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

Kataklastične strukture (deformacija i rast)

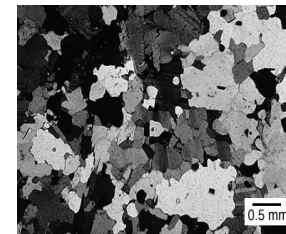


- **Mortar**
- **Brečasta**
- **Okasta (augen)**
- **Milonitna, ultramilonitna**

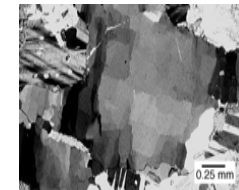
Klast, porfiroklast - relik minerala zaostao iz ishodišne stijene

Kataklastične strukture (deformacija i rast)

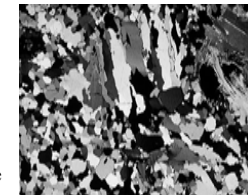
Šivana

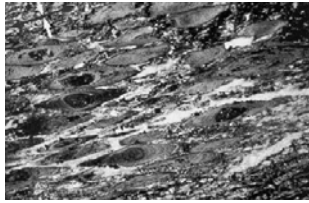


Subgrains

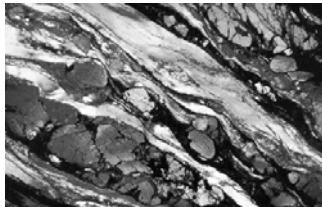


Palisade



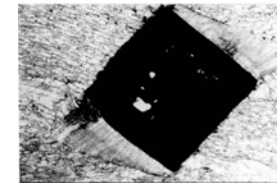
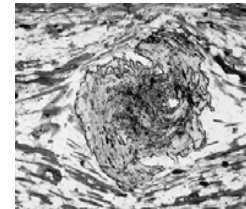
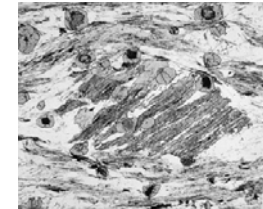
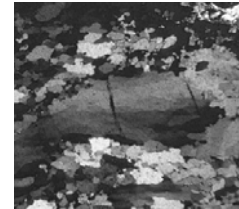


Oolitni vapnenac

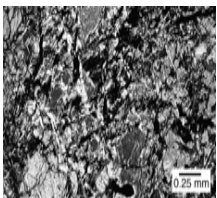


Milonit

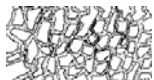
Rotacija (snow-ball), spiralan rast inkluzija, mikrorasjedanja, srastanja zrna ...



3. Naknadne strukture



Nastale procesima nakon glavne faze metamorfizma



Mrežasta struktura -
serpentin okružuje piroksen