

PROTOLITI

ishodišne stijene

magmatske, sedimentne, metamorfne

Vrste protolita

Uobičajeni tipovi ishodišnih stijena (protolita) su grupirani u 6 kemijski različitih grupa

1. Mafitna - visok sadržaj Fe, Mg, i Ca
2. Pelitna - visok sadržaj Al, K, Si
3. Karbonatna - visok sadržaj Ca, Mg, CO₂
4. Ultramafitna - visok sadržaj Mg, Fe, Ni, Cr
5. Kvarcna - skoro čisti SiO₂.
6. Kvarcno-feldspatska - visok sadržaj Si, Na, K, Al

Metamorfizam mafitnih stijena

Mali broj minerala, reakcija, izograda - zbog čvrstih otopina

- Mineralne promjene i zajednice se razvijaju s porastom metamorfnog stupnja duž P-T gradijenta
 - Minerali koji sadrže vodu nisu uobičajeni u visoko-T mafitnim protolitima, tako da je **hidratizacija** preduvjet za razvoj metamorfnih mineralnih paragenesa koje karakteriziraju većinu facijesa
 - Ako nema vode mafitna magmatska stijena će ostati nemetamorfozirana čak i kad se okolni sedimenti metamorfoziraju
 - Krupnozrnati intruzivi se najmanje propusni (permeabilni) i otporni na metamorfne promjene dok su tufovi i grauvske vrlo podložni promjenama

Metamorfizam mafitnih stijena

Plagioklas:

- "breakdown" dva tipična minerala za bazalte (pl + cpx)
- kako se T snizuje bazičniji plagioklasi postaju nestabilni
- Postoji općenita korelacija između T i maksimalnog sadržaja An komponente stabilnog plagioklasa
 - U niskom metamorfnom stupnju stabilan je **albit** (An_{0-3})
 - U višim djelovima facijesa zelenih škriljavaca **oligoklas** postaje stabilan. An-sadržaj plagioklasa zatim “skače” od An_{1-7} do An_{17-20} (peristeritni solvus) kako metamorfni stupanj raste
 - Andezin i bazičniji plagioklasi su stabilni u višim djelovima amfibolitnog facijesa i granulitnom facijesu
 - Višak Ca i Al se oslobađa → kalcit, epidot (czo), sfen, amfibol, itd ovisno o P-T-X

Metamorfizam mafitnih stijena

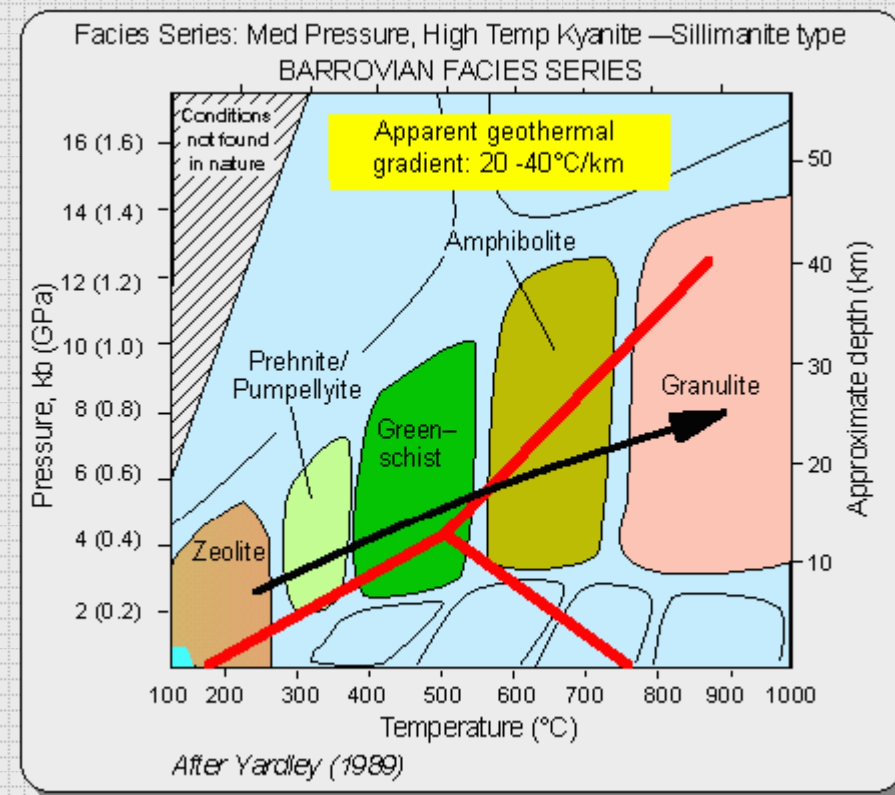
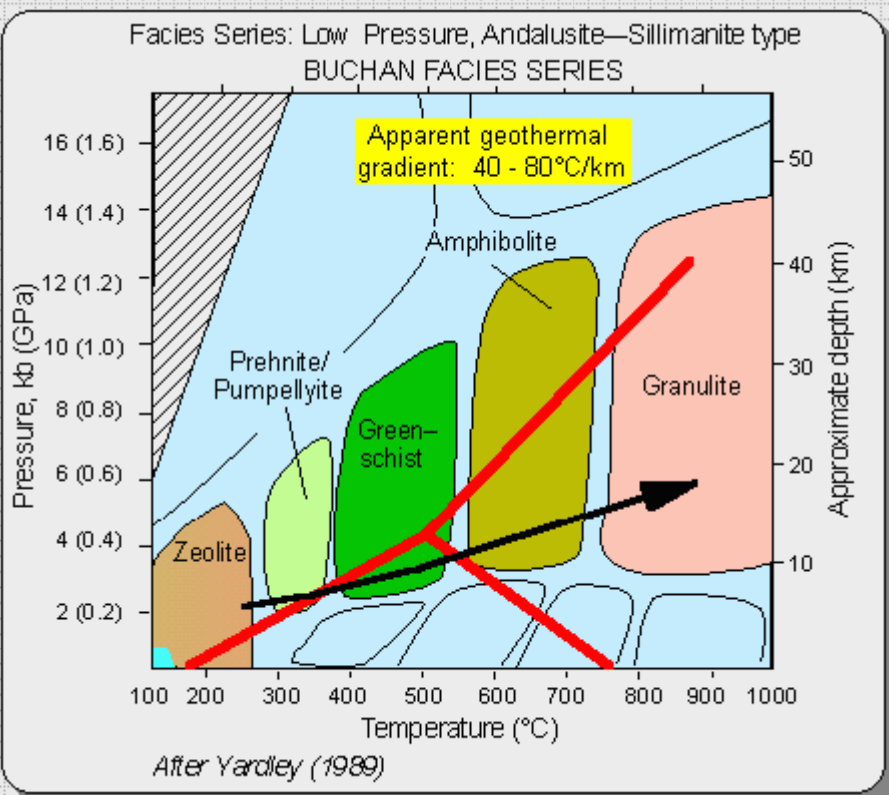
- **Klinopiroksen** se raspada na brojne mafitne minerale ovisno o metamorfnom stupnju. To su klorit, aktinolit, hornblenda, epidot, metamorfni piroksen itd. Oni minerali koji nastanu su dijagnostični za stupanj i facijes.

1. Mafiti: mineralne zajednice niskog stupnja

- Zeolitni i prehnit-pumpeleitni facijes
- Ne javljaju se uvijek - potreban im je nestabilan protolit
- Boles i Coombs (1975) su pokazali da je metamorfizam tufova na Novom Zelandu potpomognut značajnim kemijskim promjenama uslijed cirkulacije fluida. Stoga klasično područje metamorfizma tonjenja ima značajnu komponentu i hidrotermalnog metamorfizma.

2. Mafiti: P/T serije srednjeg stupnja

- Facijes zelenih škriljavaca, amfibolitni i granulitni facijes su najčešći facijesi regionalnog metamorfizma
- Klasična Barovljeva serija pelitnih zona i low-P Buchan-Abukuma serija predstavljaju varijacije istog trenda



2. Mafiti: facijes zelenih škriljavaca

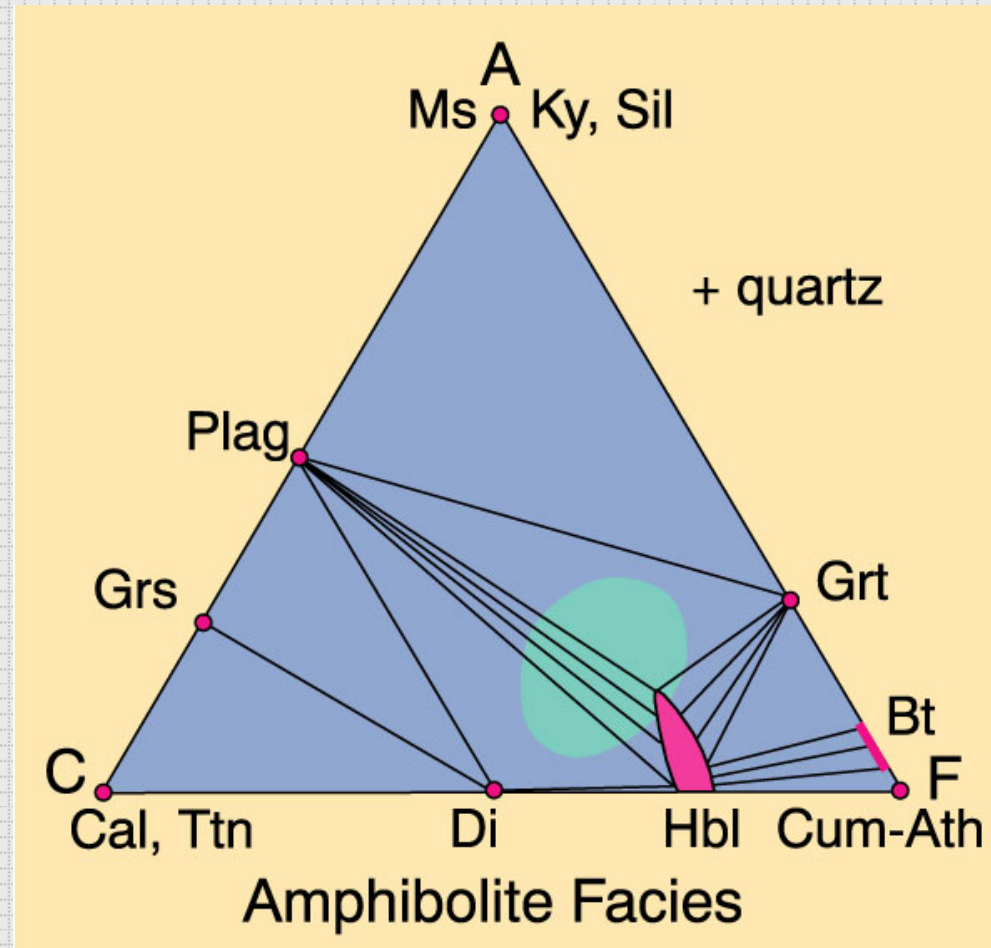
- Zeolitni i prehnit-pumpeleitni facijes nisu prisutni u području Scottish Highlands
- Metamorfizam mafitnih stijena se prvi put javlja u facijesu zelenih škriljavaca, koji odgovara kloritnoj i biotitnoj zoni pridruženih pelitnih stijena
 - Tipični minerali uključuju klorit, albit, aktinolit, epidot, kvarc, i $\pm$ kalcit, biotit ili stilpnomelan
 - Klorit, aktinolit i epidot daju zelenu boju prema kojoj su stijena i facijes dobili ime
- Karakteristična mineralna parageneza za facijes zelenih škriljavaca: **klorit + albit + epidot + aktinolit $\pm$ kvarc**

2. Mafiti: f. zelenih škriljavaca $\Rightarrow$ amfibolitni f.

- Prijelaz iz facijesa zelenih škriljavaca u amfibolitni facijes uključuje dvije značajne mineralne promjene
 1. Prijelaz iz **albita** u **oligoklas** (povišenje Ca-sadržaja stabilnog plagioklasa s porastom T)
 - peristeritni “gap”
 2. Prijelaz iz **aktinolita** u **hornblendu** (amfibol prihvaća Al i alkalije pri višim T)
- Oba prijelaza se odvijaju u istom stupnju ali s različitim P/T nagibima reakcijskih krivulja

2. Mafiti: amfibolitni facijes

- Amfibolitni facijes
- Tipične su dvije faze Hbl-Pl
- Većina amfibolita su crne stijene sa do 30 vol. % plagioklasa
- Granat se javlja u Al-Fe-bogatim i Ca-siromašnim mafitnim stijenama.
- Klinopiroksen se javlja u Al-siromašnim-Ca-bogatim stijenama



Slika 25-7. ACF dijagram pokazuje reprezentativne mineralne parageneze za metabazite u amfibolitnom facijesu. Tipičan sastav mafitnih stijena je osjenčan. Winter (2001) An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology. Prentice Hall.

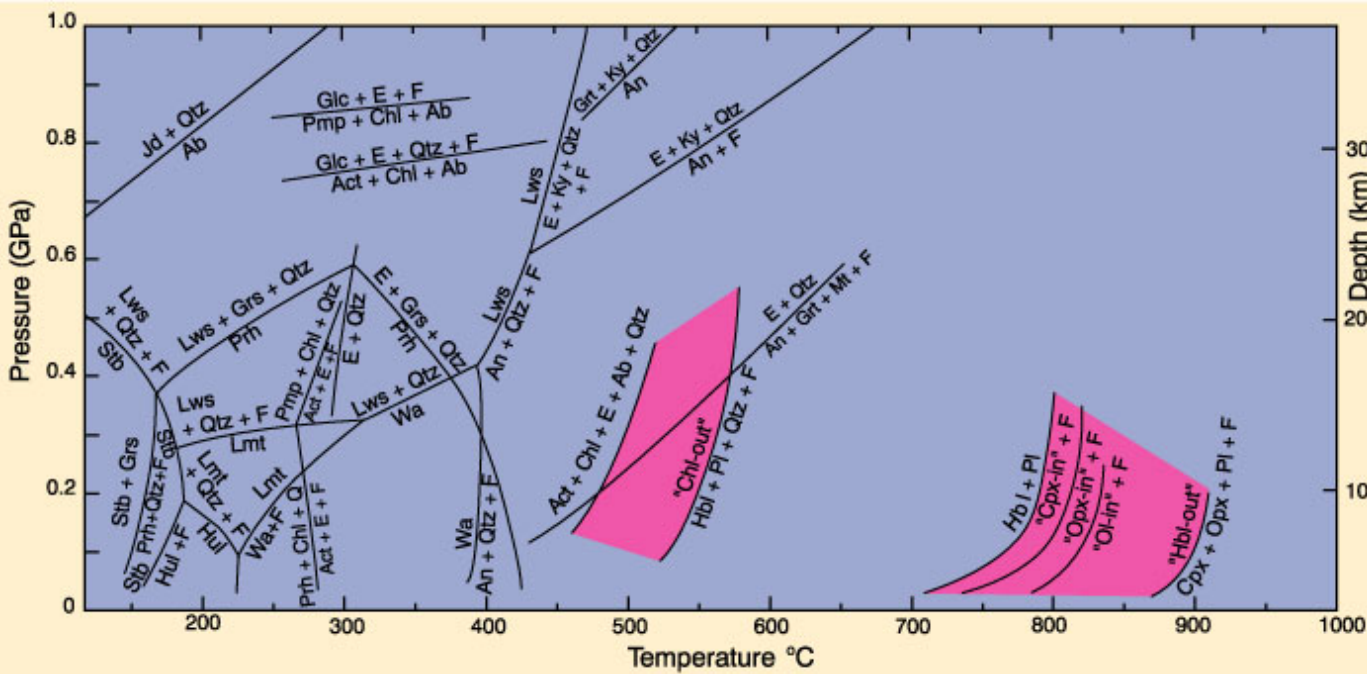
2. Mafiti: amfibolitni $\Rightarrow$ granulitni facijes

- prijelaz iz amfibolitnog u granulitni facijes se odvija u rasponu T od 650-700°C
- U prisutnosti vode (fluida) pridružene pelitne i kvarcnofeldspatske stijene (uključujući granitoide) se počinju taliti (kod niskih do srednjih pritisaka) i nastaju migmatiti
- Posljedica toga je da ne dosižu svi peliti i kvarcnofeldspatski protoliti granulitni facijes

2. Mafiti: granulitni facijes

- Mafitne stijene se tale pri visokim T (ovisno o prisutnosti fluida)
- Ako se voda (fluid) odstrani odlaskom ranih taljevina ($\text{liq} + \text{H}_2\text{O}$) mafitna stijena postaje osiromašena brojem minerala
- Hornblenda se raspada na ortopiroksen + klinopiroksen

2. Mafiti: granulitni facijes



Slika 26-19.
Pojednostavljena
petrogenetska mreža za
metamorfizirane mafitne
stijene pokazuje položaj
nekih od univarijantnih
reakcija u $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-}$
 $\text{SiO}_2\text{-H}_2\text{O-(Na}_2\text{O)}$ sustavu
("C(N)MASH"). Winter
(2001) An Introduction to
Igneous and Metamorphic
Petrology. Prentice Hall.

Granulitni facijes je karakteriziran prisutnošću bezvodnih mineralnih parageneza

U metabazitima:

ortopiroksen + klinopiroksen + plagioklas + kvarc

Granat je također čest mineral u granulitnom facijesu a podređeno se mogu javljati hornblenda i/ili biotit (H₂O!)

2. Mafiti: granulitni facijes

Porijeklo stijena granulitnog facijesa je kontroverzno i kompleksno. Postoji opće slaganje oko dvije točke:

1) Granuliti predstavljaju neobično vruće uvjete

- Temperature $> 700^{\circ}\text{C}$, geotermometrija daje vrlo visoke T čak preko 1000°C
- Prosječne geotermalne temperature za dubine granulitnog facijesa su u blizini 500°C , sugerirajući da su granuliti produkt zadebljanja kore i suviška topline

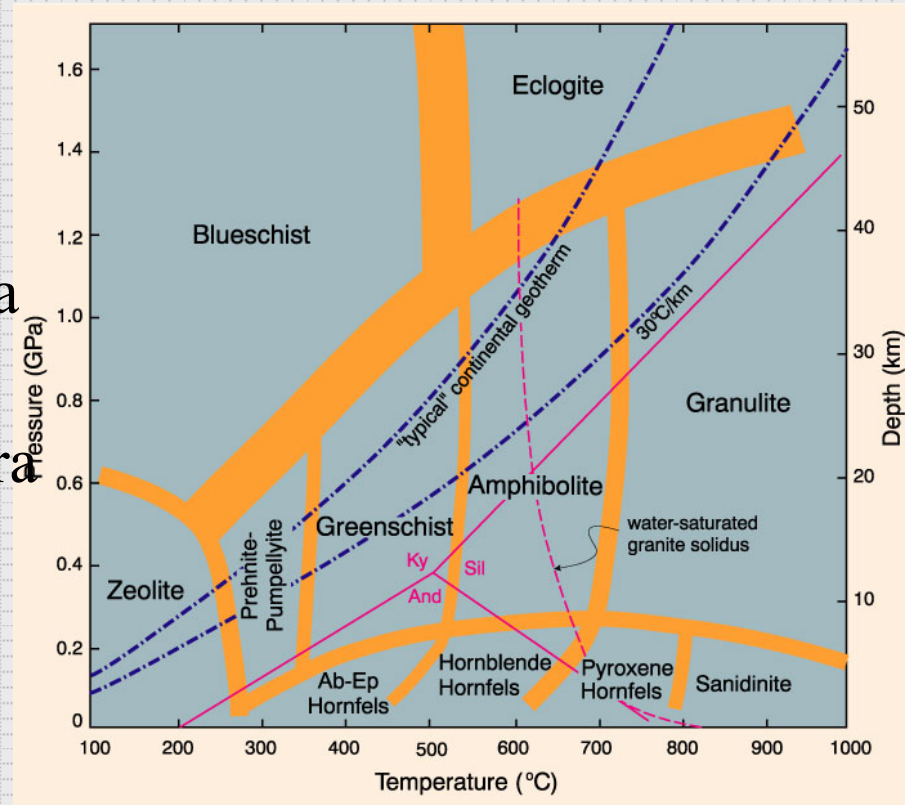
2) Granuliti su "suhi"

- Jedini razlog zašto se nisu rastalili je nedostatak vode
- Područje granulitnog facijesa predstavlja duboke i dehidrirane korijene kontinentalne kore

3. Mafiti: P/T serije "low" gradijenta

Albit-epidot-, hornblenda-, piroksen-hornfels i sanidinitni facijes

- Mineralogija metabazita niskog tlaka ne razlikuje se znatno od medium-P serije facijesa
- **Albit-epidot hornfels** facijes odgovara facijesu zelenih škriljavaca u koji prelazi porastom tlaka
- **Hornblenda hornfels** facijes odgovara amfibolitnom facijesu a **piroksen hornfels i sanidinitni facijes** odgovaraju granulitnom facijesu



Slika 25-2. P-T dijagram pokazuje opće prihvaćene granice facijesa. Granice su približne i postupne. Tipičan ili prosječni kontinentalni geoterm je iz Brown and Mussett (1993). Winter (2001) An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology. Prentice Hall

4. Mafiti: serije "high" P/T gradijenta

Facijes plavih škriljavaca i eklogitni facijes

- Mafitne stijene daju mineralne zajednice pri visokim P/T uvjetima
- Visok P/T geotermalni gradijent vezan je uz **subdukcijske zone**
- Mafitni **plavi škriljavci** su lako prepoznatljivi po boji i indikator su drevnih subdukcijskih zona
- Velika gustoća **eklogita** sugerira da subducirana bazaltna oceanska kora iz koje su nastali postaje gušća od okolnog plašta

"high" P/T gradijent: facijes plavih škrljavaca

- Facijes **plavih škrljavaca** karakterizira prisutnost **Na plavog amfibola** stabilnog samo pri visokim P (glaukofan, čvrste otopine krosita i ribekita)
- Parageneza **glaukofan + lawsonit** je tipična.
- Albit se raspada pri visokom P na jadeitski piroksen + kvarc :



- Parageneza jadeit + kvarc indicira high-P facijes

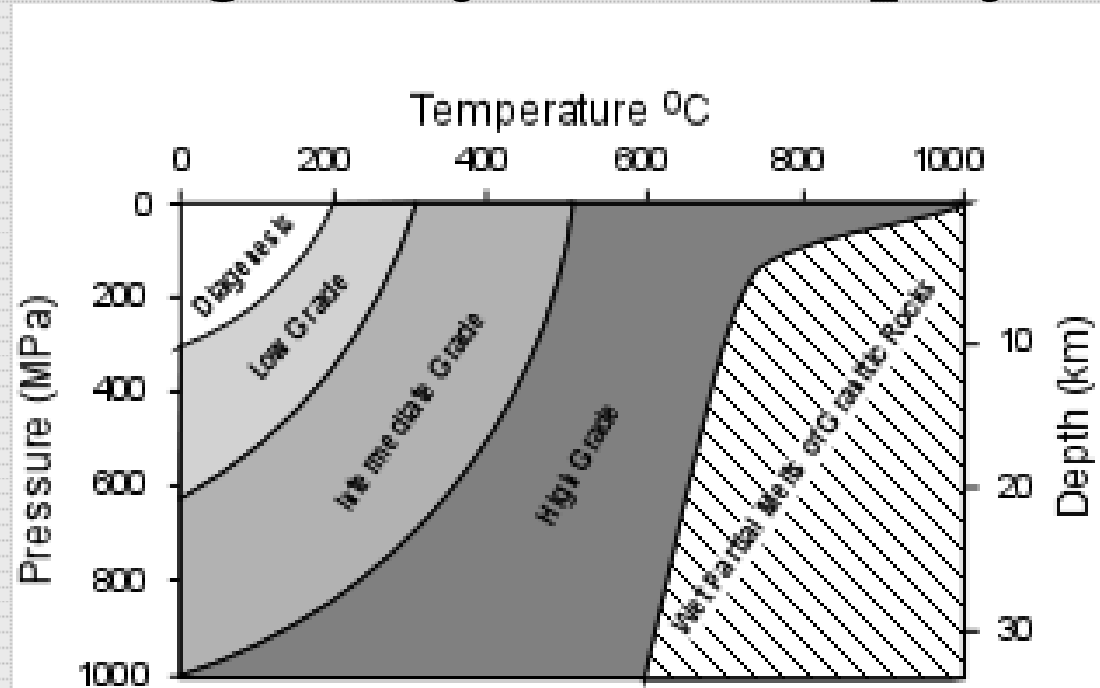
"high" P/T gradijent: eklogitni facijes

- Eklogitni facijes: mafitna parageneza omfacitski piroksen + pirop-grosular granat
- vezan uz visoke P i razne T (ali uglavnom visoke T)
- prateći mineral kijanit (disten)

Odnos metamorfnog facijesa i stupnja

WINKLER -

jednostavnija podjela na
stadije (stupnjeve)
("grade") na temelju
diskontinuiranih reakcija
prepoznatljivih na terenu
kao izograde.



Very Low Grade - ZF, PPF, FPŠ

Medium Grade - AF, HHF

Low Grade - FZŠ, AEHF

High Grade - GF, PHF, SF

Metamorfizam pelitnih protolita

- **Muljnjaci (mudstones) i šejlovi (shales):** sitnozrnati zreli klastični sedimenti
- Akumulirani u udaljenim područjima akrecijske prizme i na kontinentalnoj padini/šelfu
- Prelaze u krupnije grauvske i pjeskovite sedimente prema kontinentu (izvoru materijala)
- Iako svoj razvoj započinju kao “neugledno blato” metapeliti predstavljaju značajnu skupinu metamorfnih stijena zbog toga što su minerali glina vrlo osjetljivi na varijacije u temperaturi i tlaku te prolaze kroz značajne promjene u mineralnom sastavu tijekom progresivnog metamorfizma

Metapeliti

- Mineralnim sastavom pelitnih sedimenata dominiraju sitni Al-K-bogati filosilikati poput minerala glina (montmorilonit, kaolinit, smektit), bijelih tinjaca (sericit, paragonit, fengit) i klorita, a svi oni mogu biti i detritus i autigena zrna
- Filosilikati mogu činiti i više od 50% originalnog sedimenta
- Sitni kvarc 10-30%
- Ostali česti sastojci su feldspati (albit i K-feldspat), Fe-oksidi i hidroksidi, zeoliti, karbonati, sulfidi i organska tvar

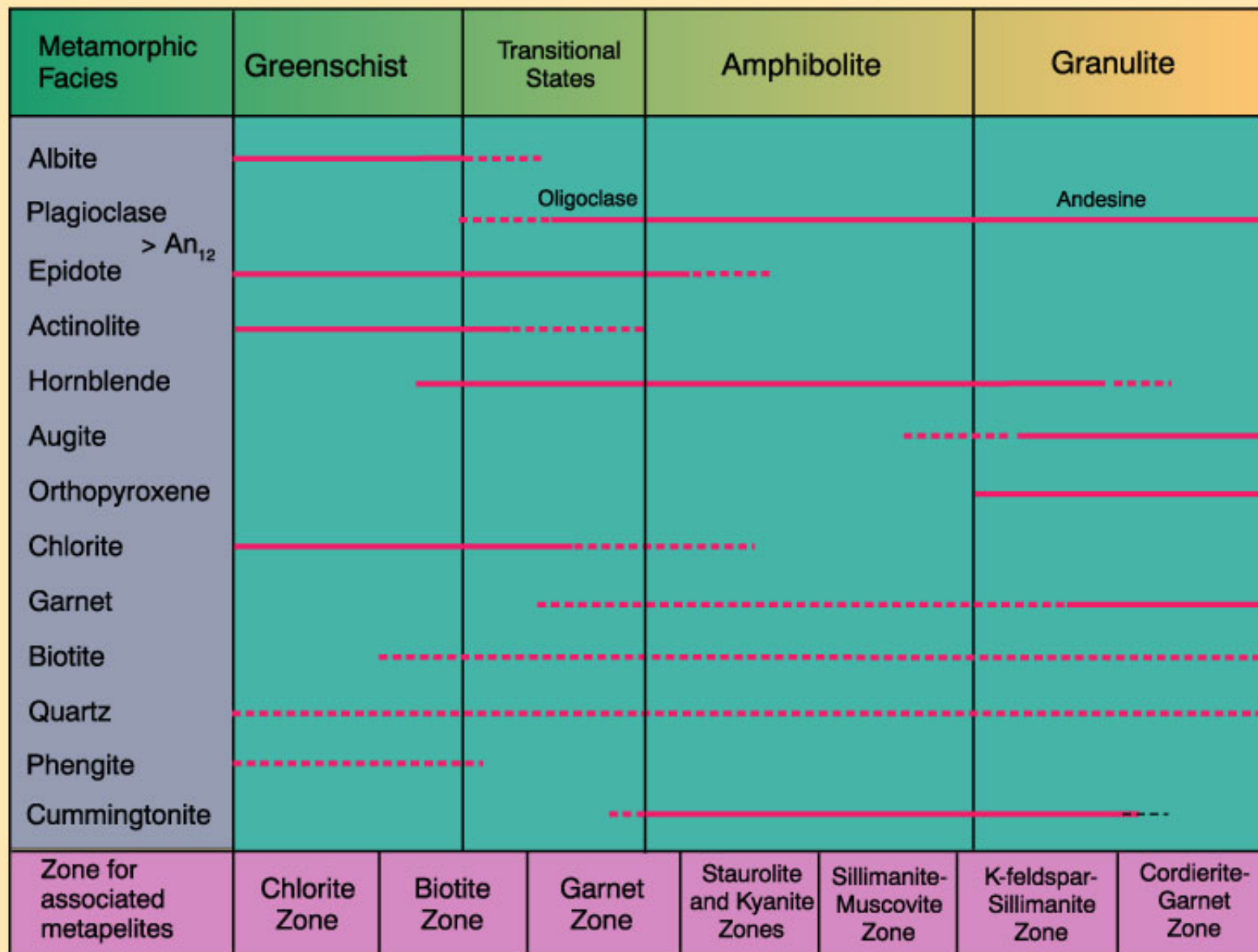
Metapeliti

- Kemijski sastav: visok sadržaj Al_2O_3 i K_2O , nizak CaO
- Otkriva visok sadržaj tinjaca i glina ishodišnog sedimenta i pokazuje dominaciju muskovita i kvarca u širem rasponu metamorfnih uvjeta
- Visok udio tinjaca → razvija se folijacija u stijenama poput slejta, filita i tinjčevog škriljavca

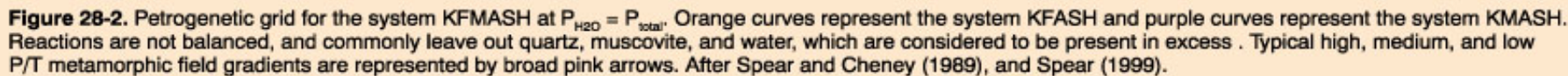
Metapeliti

- **Facijes zelenih škriljavaca** **slejt, filit, t.šk.**
 - kloritna zona
 - biotitna zona
- **Amfibolitni facijes** **tinjčev škriljavac, gnajs**
 - granatna zona (prijelaz fac. zel. šk. ka amfibolitnom fac.)
 - staurolitna zona
 - kijanitna (distenska) zona
 - sillimanitna zona
- **Granulitni facijes (!? P, T, fluid)** **gnajs**
 - K-feldspat-sillimanit zona
 - kordijerit-granat zona
 - **migmatiti** (parcijalno taljenje, prijelaz amf. fac./granulitni fac.)

Metamorphic Grade →

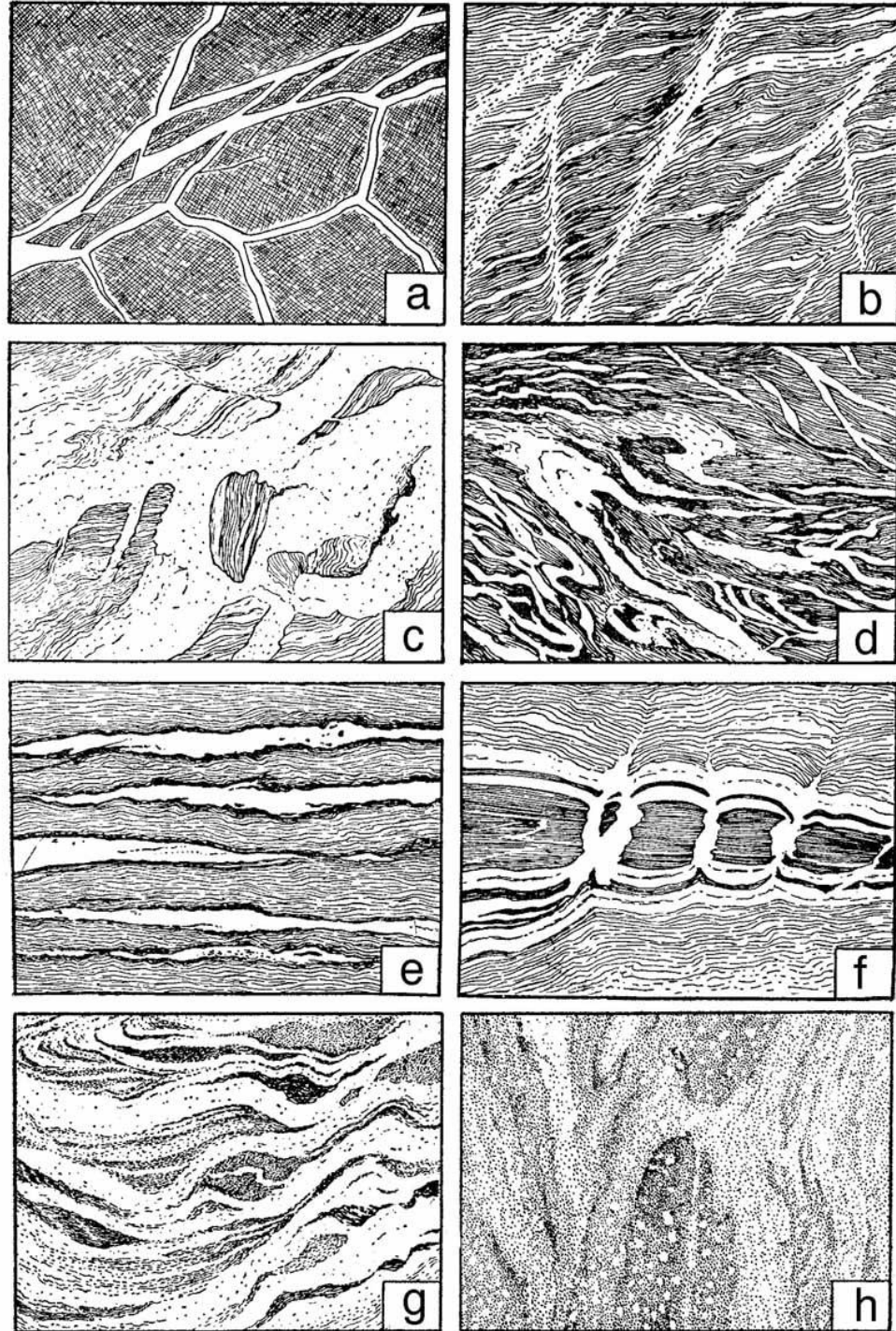


Slika 25-9. Tipične prpmjene u mineralnom sastavu metabazične stijene tijekom progresivnog metamorfizma u P-T seriji facijesa srednjeg stupnja. Za usporedbu dane su i zone u metapelitima Barovljevog metamorfizma. Winter (2001) *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*. Prentice Hall.



Metapeliti

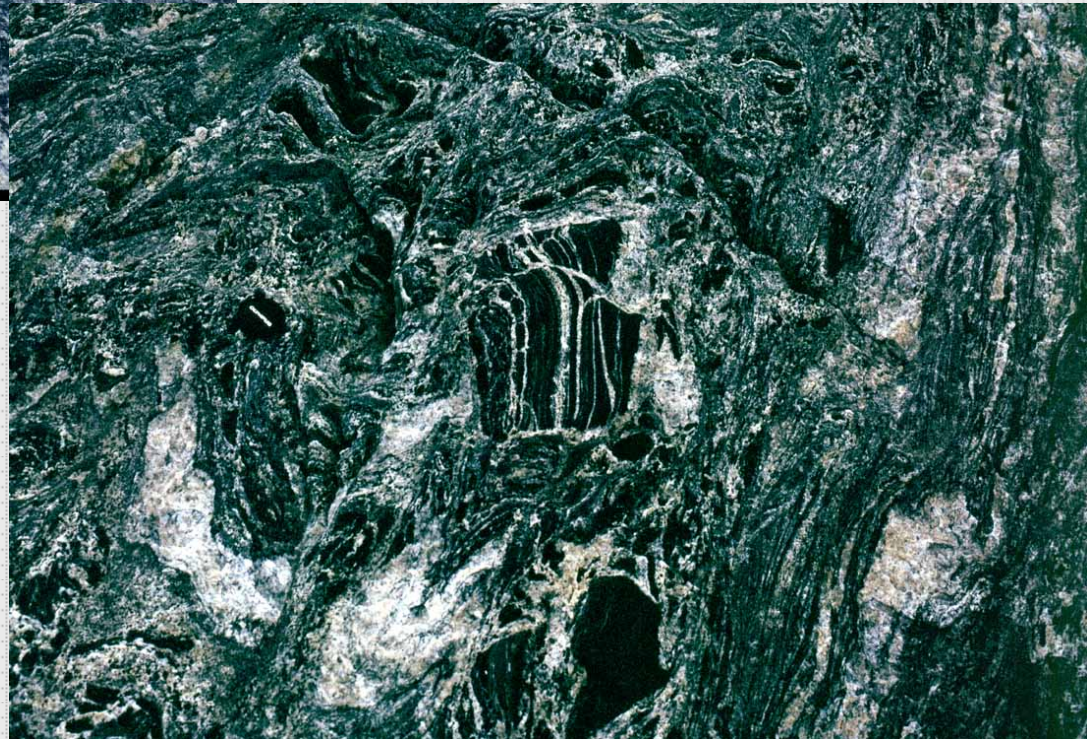
Slika 28-22. Teksture migmatita. a. Brečasta u agmatitu. b. Mrežasta. c. Raft-like. d. Žilna. e. Stromatitna ili uslojena. f. Budinaž. g. Šlirasta. h. Nebulitna. Iz Mehnert (1968) *Migmatites and the Origin of Granitic Rocks*. Elsevier. Winter (2001) *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*. Prentice Hall.



Metapeliti



Kompleksne migmatitne teksture



Metakarbonati

- Karbonatne stijene - vapnenac i dolomit
- Nastale na stabilnom kontinentalnom šelfu duž pasivne granice ploča
- Mogu biti čisti karbonati ili mogu sadržavati precipitate (čert, hematit) ili detritični materijal (pijesak, gline, ...)
- Raspon od čistih karbonata do čistih klastita
- Metamorfoziraju se kada pasivna granica postaje dio orogenog pojasa

Metakarbonati

- **Metakarbonati** su metamorfozirane karbonatne stijene u kojima dominira karbonatna komponenta
- **Mramori** su skoro čisti karbonati
- **Kalcijsko-silikatne stijene:** karbonatna komponenta je podređena, Ca-Mg-Fe-Al silikatni minerali poput diopsida, grosulara, Ca-amfibola, vezuvijanita, epidota, volastonita, itd.
- **Skarn:** kalcijsko-silikatna stijena nastala metasomatozom između karbonata i Si-bogatih fluida
 - Kontakt između sedimentnih slojeva
 - Kontakt između karbonata i intruzije vruće i mokre magme (granitna magma)

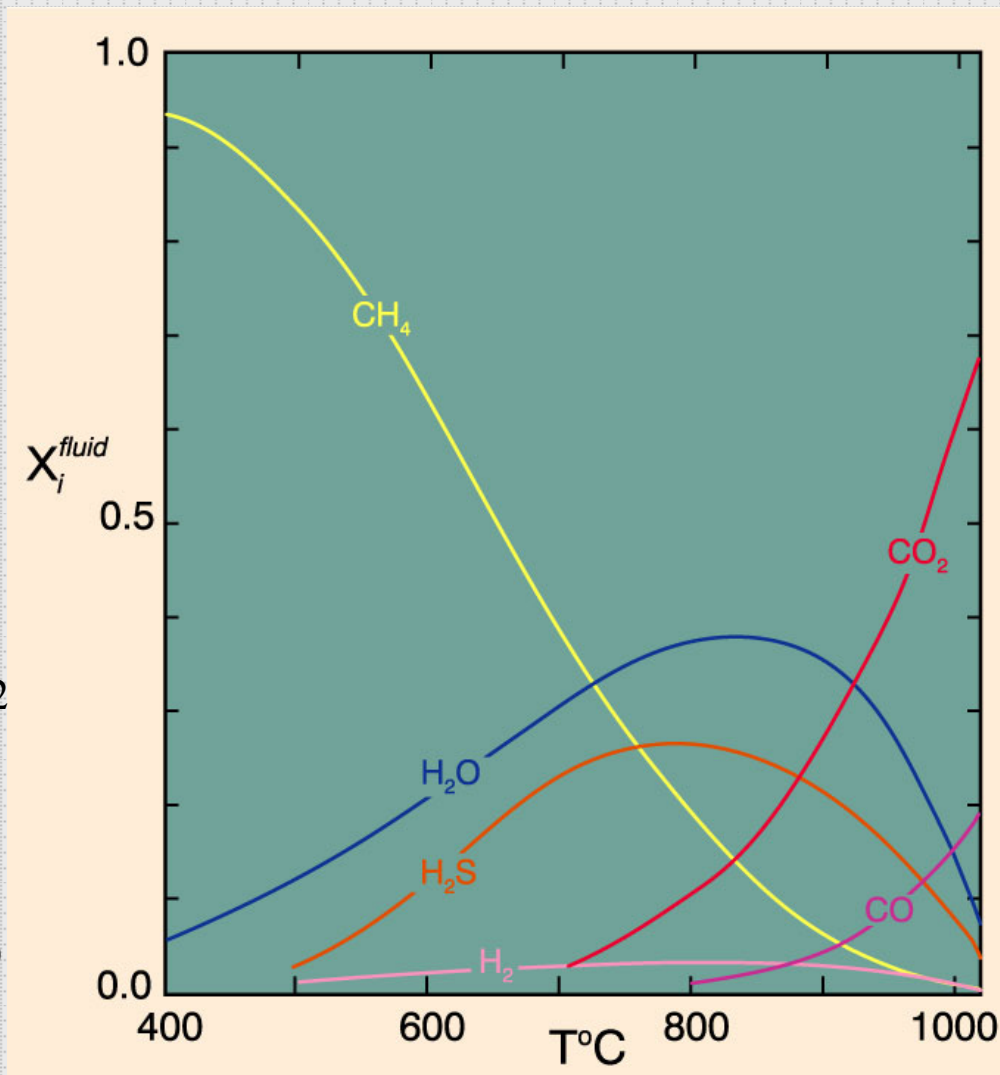
Metamorfizam ultramafita

- **Alpski (alpinotipni) peridotiti**: gornji plašt = baza oceanske litosfere koja se ugrađuje na kontinentalnu koru duž subdukcijske zone
- Razbijeni dijelovi **ofiolita**: dijelovi oceanske kore i plašta koji su ili odvojeni od subducirane ploče i ugrađeni u akrecijsku prizmu subdukcijske zone ili (češće) uhvaćeni između dva bloka tijekom kolizije
- Dijelovi ultramafitnih tijela u orogenu slijede glavne rasjedne zone razdvajajući različite mase stijena
Interpretirane kao ostatak oceanske kore + plašt koji su nekad razdvajali kolizijske terene i zato predstavljaju **suturnu zonu**
- Asocijacija stijena facijesa plavih škriljavaca s ultramafitima podržava porijeklo vezano uz subdukciju

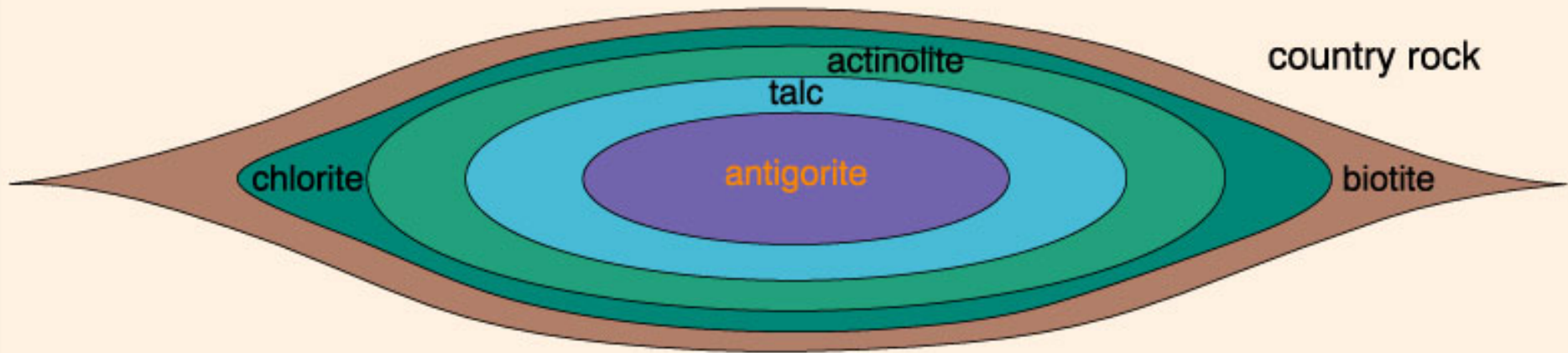
Metamorfni fluidi i metasomatizam

- H_2O
- CO_2
- CO
- H_2S , CH_4 , H_2
- transport iona

Slika 30-1. Vrste fluida u C-O-H-S sustavu pri 0.2 GPa. Iz Holloway (1981) Compositions and volumes of supercritical fluids in the Earth's crust. In L. S. Hollister and M. L. Crawford (1981). *Short Course in Fluid Inclusions: Applications to Petrology*. Mineral. Assoc. Canada. Winter (2001) *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*. Prentice Hall.



Metamorfni fluidi i metasomatizam



Slika 30-15. “Idealno” mineralno zoniranje uslijed metasomatizma u ultramafitnom tijelu (< 3-m dugo) u regionalnom metamorfizmu niskog stupnja (okolna stijena - pelit), Unst, Shetland Islands. Prema Read (1934) *Mineral. Mag.*, 23, 519-540. Winter (2001) *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*. Prentice Hall.

Stabilne mineralne zajednice u metamorfnim stijenama

Prirodni sustavi teže prema stanju minimuma energije

Isti protolit će uvijek dati istu mineralnu zajednicu kad je podvrgnut istoj temperaturi i tlaku tj. mineraloški sastav je određen kemijskim sastavom pri konstantnoj T i P.

Mineralna asocijacija vs. parageneza

Magmatska mineralna parageneza - kristalizacijom magme formira se zajednica minerala u ravnoteži. Svi minerali pripadaju istoj paragenezi jer je magmatska taljevina homogena. Dakle asocijacija = parageneza

Metamorfna mineralna parageneza - minerali mogu biti članovi jedne ili više parageneza. Istoj paragenezi pripadaju minerali koji su u ravnoteži pri istim P i T uvjetima i koji su u međusobnom kontaktu. Pri tome je važno da minerali ne pokazuju teksturne indikacije neravnoteže poput reakcijskih rubova, razlika u kemijskom sastavu, zatim da je parageneza uravnotežena u duljem vremenskom razdoblju, da ne postoje neusklađene faze (Ol + Qtz) te da sadrže mali broj minerala (mineraloško pravilo faza).

Stabilne mineralne zajednice u metamorfnim stijenama

REAKCIJE I RAVNOTEŽE

Mineralna parageneza nije slučajna nakupina minerala već je određena s P, T i C, a do završne parageneze dolazi se preko (pomoću) reakcija (kontinuiranih i diskontinuiranih) kojima se nastoji doseći stanje minimuma slobodne energije.

TERMODINAMIKA

GEOTERMOBAROMETRIJA

Promatraju se kemijski sastavi stijena i minerala, ti zatvoreni ili otvoreni sustavi imaju određena svojstva i reagiraju na određen način s okolinom. U našem slučaju metamorfne stijene. Prirodni sustavi odstupaju od ideala, pitanje mjerila, tekstura, "layering"...

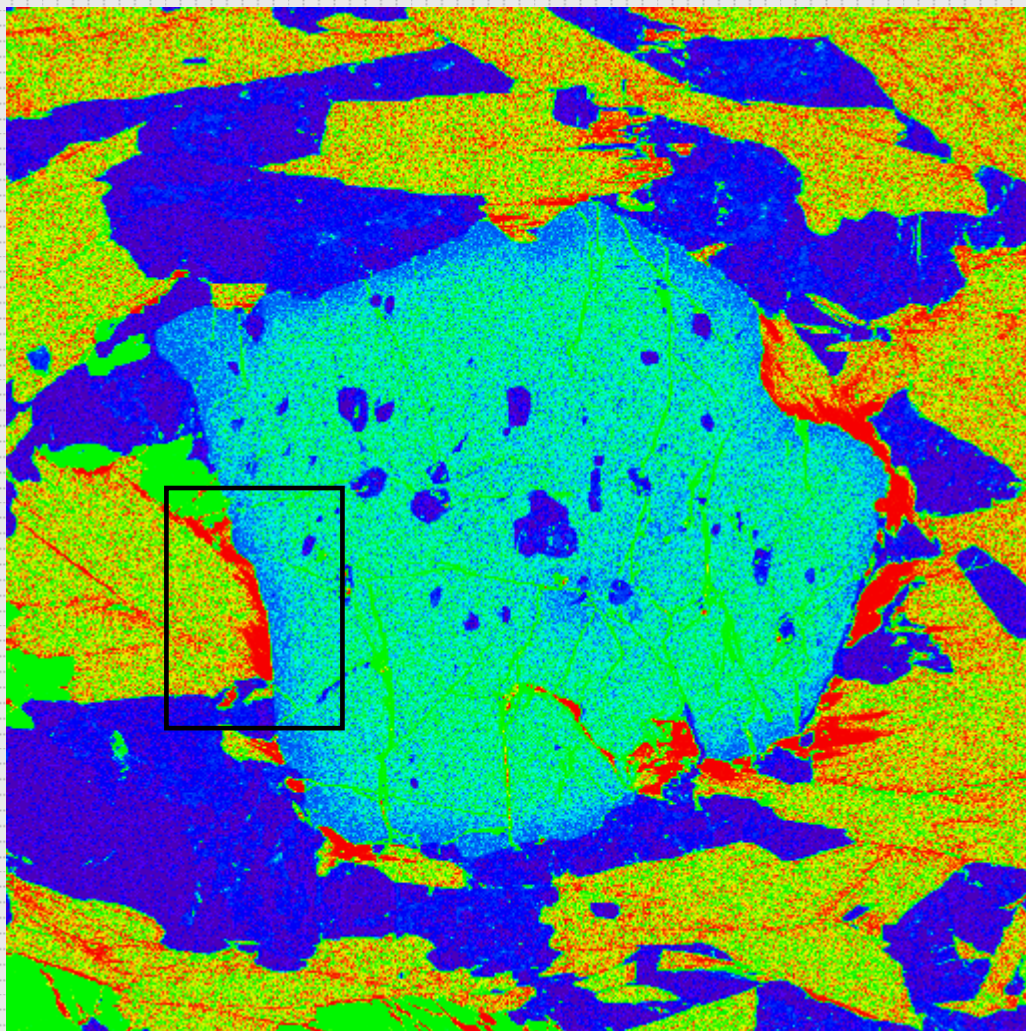
Stabilne mineralne zajednice u metamorfnim stijenama

Niz postupaka i metoda kojima se dovodi u direktnu ili indirektnu vezu kemijski sastav minerala s uvjetima metamorfizma naziva se **GEOTERMOBAROMETRIJA**. Promjena uvjeta metamorfizma u vremenu tijekom orogeneze naziva se **P-T-t reakcijski put**.

Najčešće su to vršni uvjeti ("peak"). Za određivanje P i T potrebno je ustanoviti stanje ravnoteže. Geotermobarometri osim na kemijskom sastavu mogu biti temeljeni i na nekim strukturnim elementima (ćelija, parametri ćelije), pojavom ili nestankom minerala i.t.d. Razvijeni su na pojedinom mineralu, mineralnim parovima i mineralnim paragenezama. Vrlo je usko područje njihove primjene.

Geotermobarometrija

WDS Mg kemijska karta



Lokalno Fe-Mg uravnoteženje između granata i biotita pri 600 °C i 6 kbar vidi se na Mg kemijskoj karti.

Mg se smanjuje na svim rubovima u granatu (plavi rub - retrogradni metamorfizam) i povisuje u biotitu (zeleno). U području kontakta dolazi do novog uravnoteženja ovisno o P i T (crveno). University of Massachusetts at Amherst.

Geothermometrija

Upotreba raspodjele elemenata u koegzistirajućim fazama izmjerenim u eksperimentima pri poznatim P i T da bi se odredili ravnotežni P i T u stvarnim uzorcima.

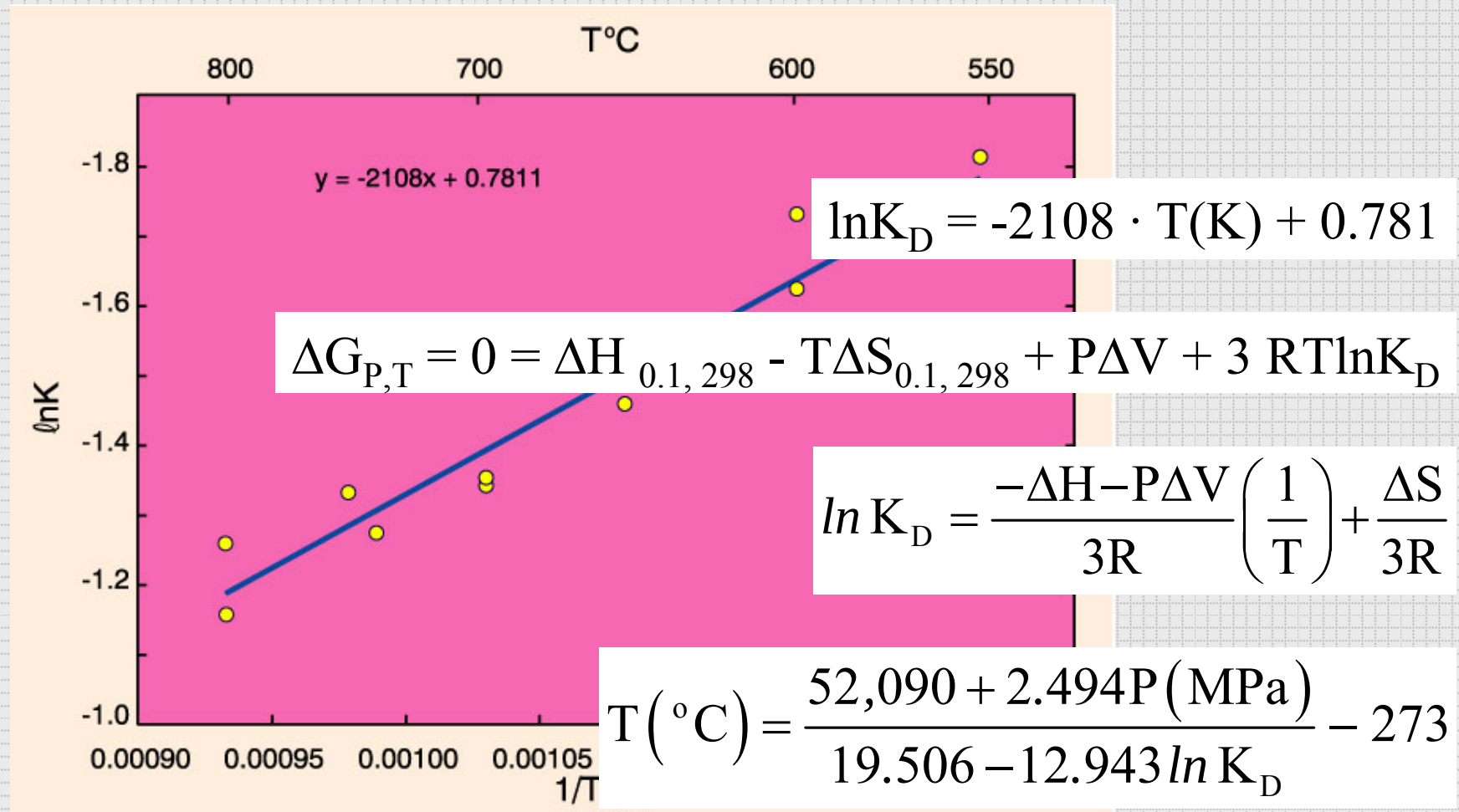
Table 27-2. Experimental results of Ferry and Spear (1978) on a Garnet-Biotite Geothermometer

T °C	Initial X(Fe-Bt)	Final X(Fe-Bt)	Final X(Fe-Grt)	Final (Mg/Fe)Grt	Final (Mg/Fe)Bt	K	T Kelvins	1/T Kelvins	lnK
799	1.00	0.750	0.905	0.105	0.333	0.315	1072	0.00093	-1.155
799	0.50	0.710	0.896	0.116	0.408	0.284	1072	0.00093	-1.258
749	0.50	0.695	0.896	0.116	0.439	0.264	1022	0.00098	-1.330
738	1.00	0.730	0.906	0.104	0.370	0.281	1011	0.00099	-1.271
698	0.75	0.704	0.901	0.110	0.420	0.261	971	0.00103	-1.342
698	0.50	0.690	0.896	0.116	0.449	0.258	971	0.00103	-1.353
651	0.75	0.679	0.901	0.110	0.473	0.232	924	0.00108	-1.459
651	0.50	0.661	0.897	0.115	0.513	0.224	924	0.00108	-1.497
599	0.75	0.645	0.902	0.109	0.550	0.197	872	0.00115	-1.623
599	0.50	0.610	0.898	0.114	0.639	0.178	872	0.00115	-1.728
550	0.75	0.620	0.903	0.107	0.613	0.175	823	0.00122	-1.741
550	0.50	0.590	0.898	0.114	0.695	0.163	823	0.00122	-1.811
601	0.50	0.500	0.800	0.250	1.000	0.250	874	0.00114	-1.386
601	0.25	0.392	0.797	0.255	1.551	0.164	874	0.00114	-1.807
697	0.75	0.574	0.804	0.244	0.742	0.329	970	0.00103	-1.111
697	0.25	0.468	0.796	0.257	1.137	0.226	970	0.00103	-1.487

Granat-biotit
geothermometar

Geotermometrija

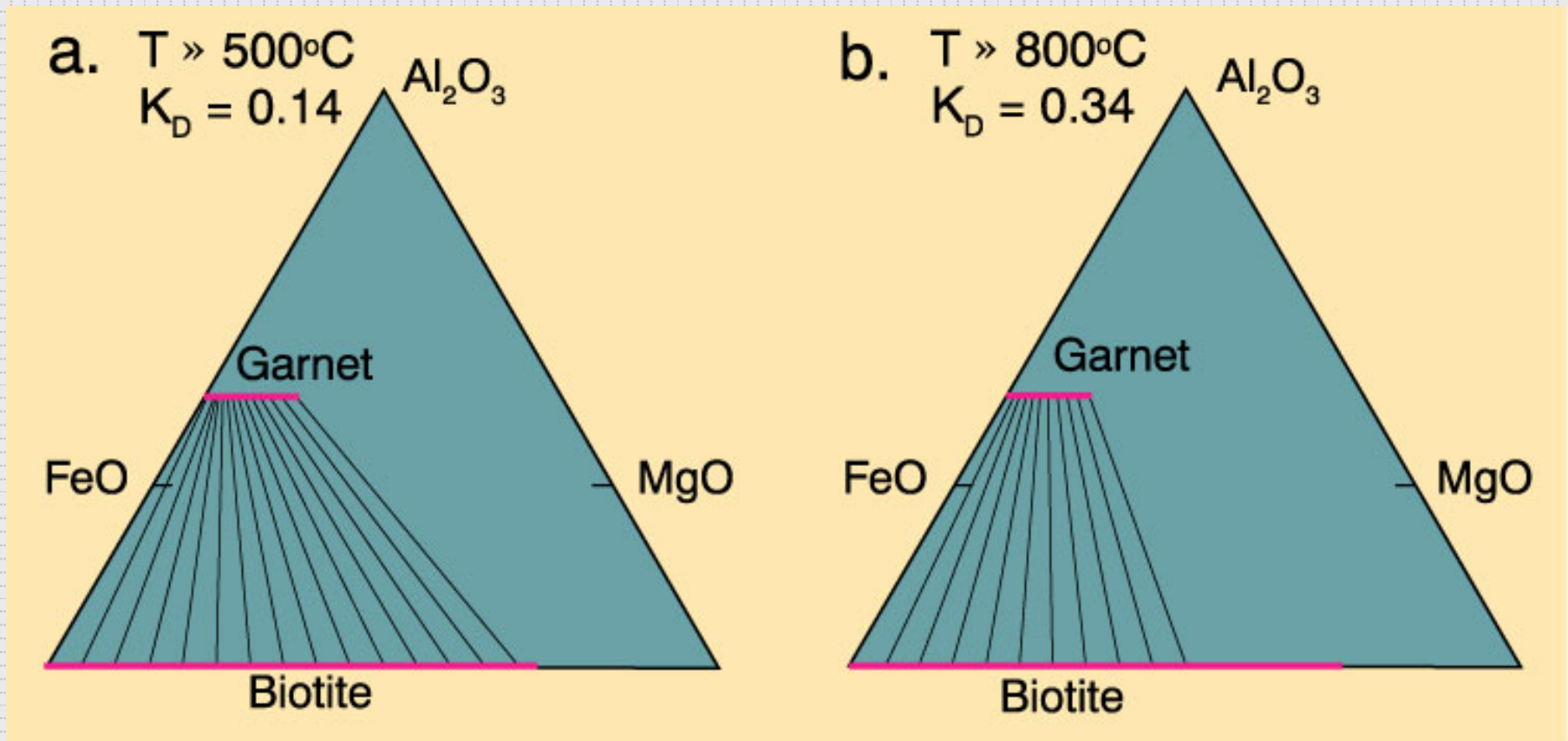
Granat-biotit geotermometar



Slika 27-5. Grafikon $\ln K$ vs. $1/T$ (u K) za granat-biotit geotermometar pri 0.2 GPa prema Ferry and Spear (1978). Winter (2001) An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology. Prentice Hall.

Geotermometrija

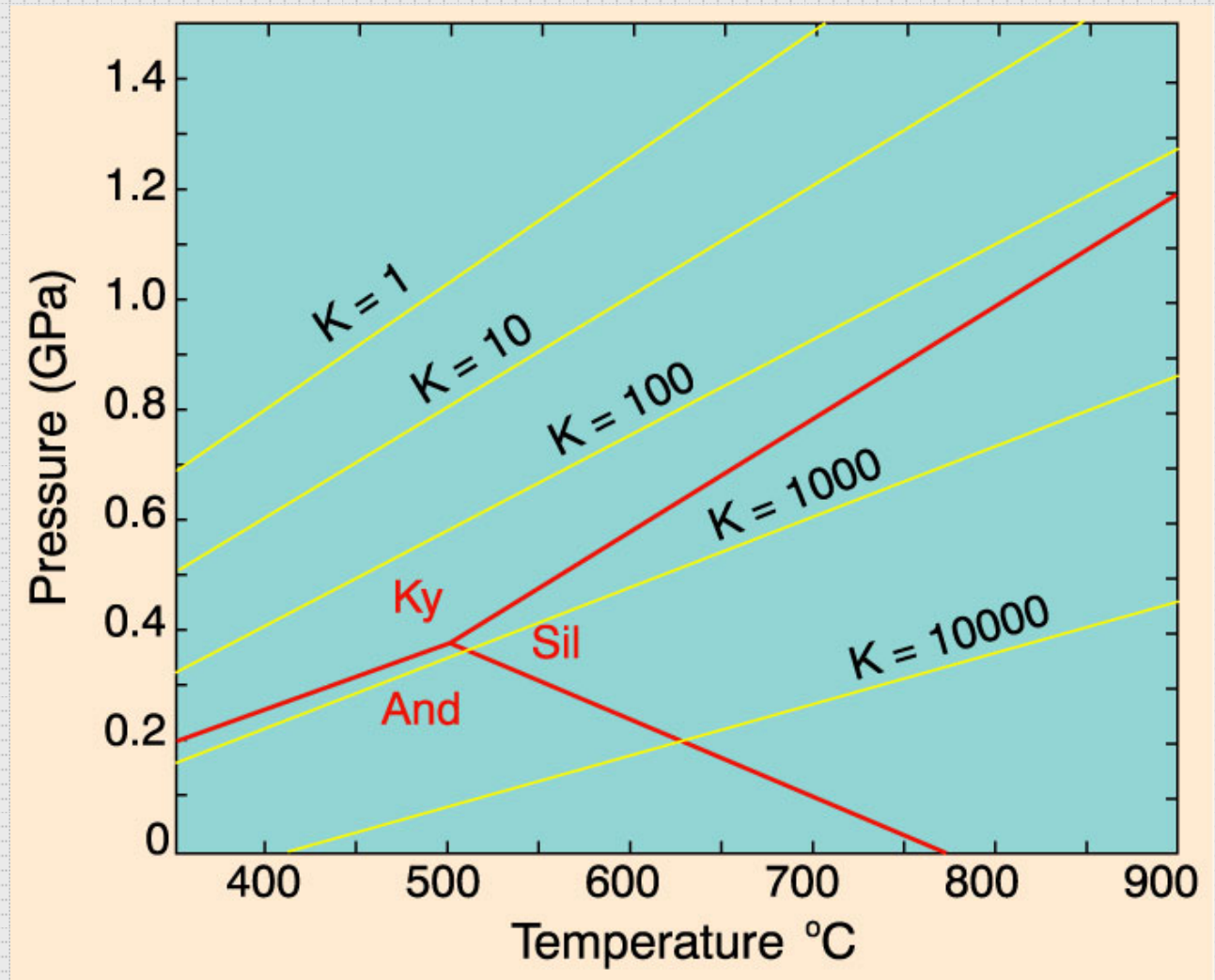
Granat-biotit geotermometar



Slika27-6. AFM projekcija pokazuje relativnu raspodjelu Fe i Mg u granatu i biotitu pri 500°C (a) i 800°C (b). Iz Spear (1993) *Metamorphic Phase Equilibria and Pressure-Temperature-Time Paths*. Mineral. Soc. Amer. Monograph 1.

Geobarometrija

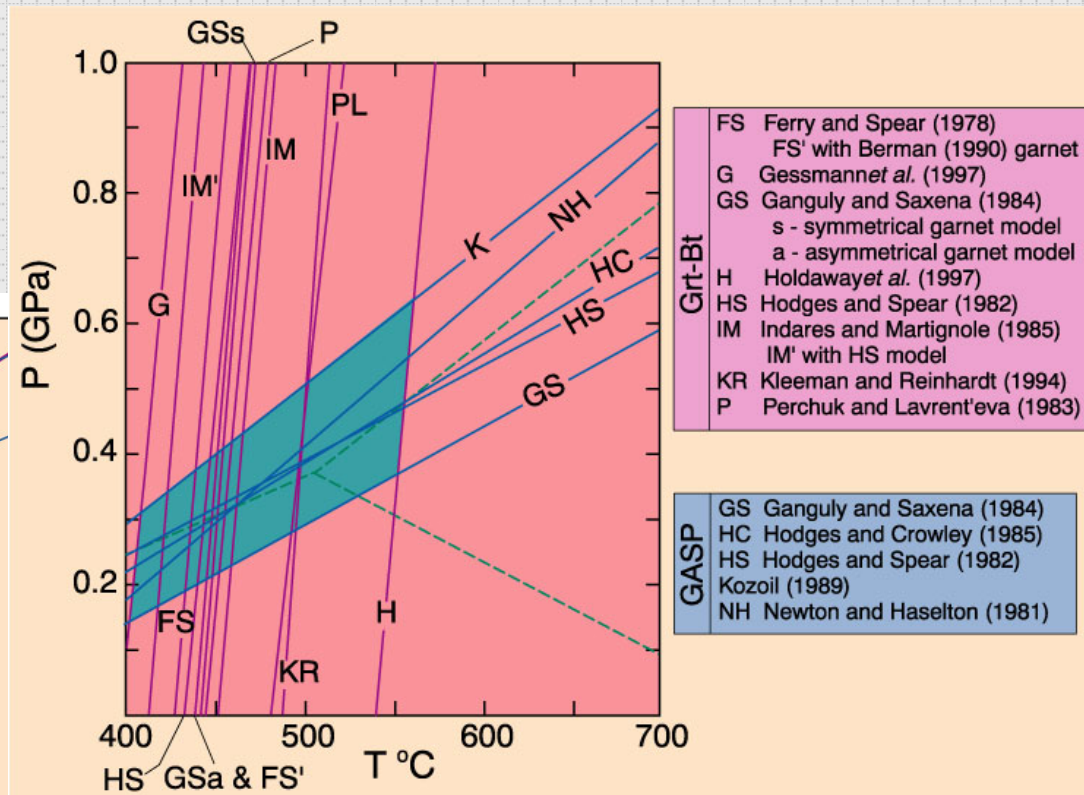
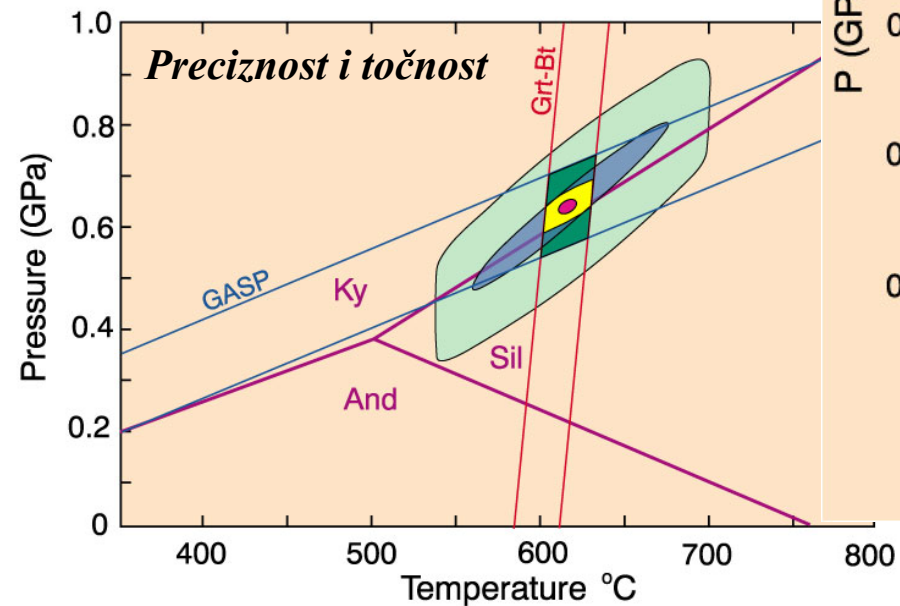
GASP geobarometar



Slika 27-8. P-T dijagram s ravnotežnim krivuljama za različit K kod GASP geobarometra reakcija: $3 \text{ An} = \text{Grs} + 2 \text{ Ky} + \text{Qtz}$. Iz Spear (1993) *Metamorphic Phase Equilibria and Pressure-Temperature-Time Paths*. Mineral. Soc. Amer. Monograph 1.

Geotermobarometrija

Programi:
THERMOBAROMETRY
TWQ
THERMOCALC

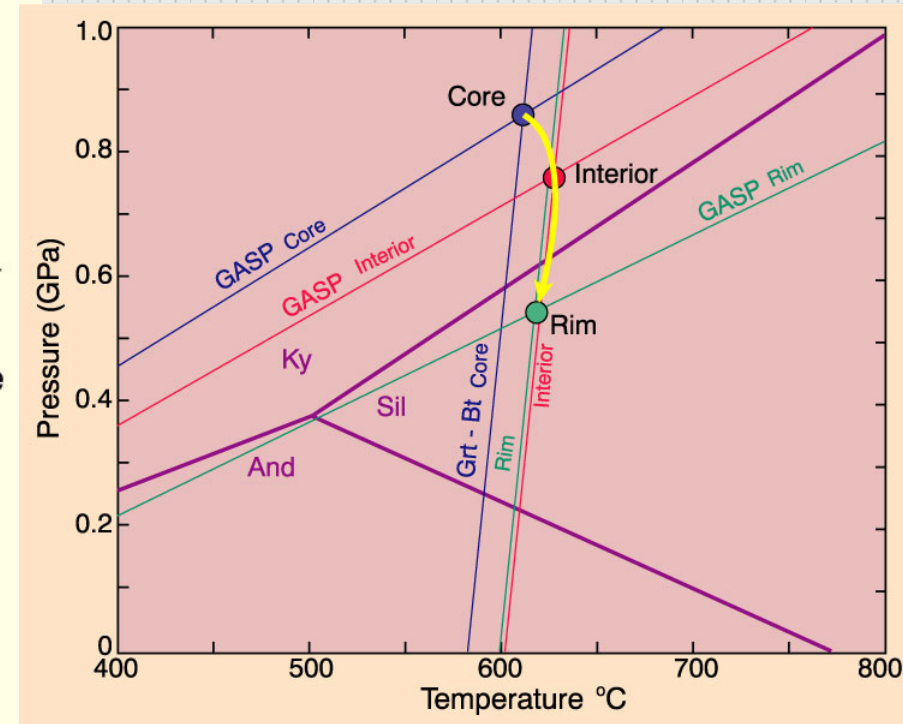
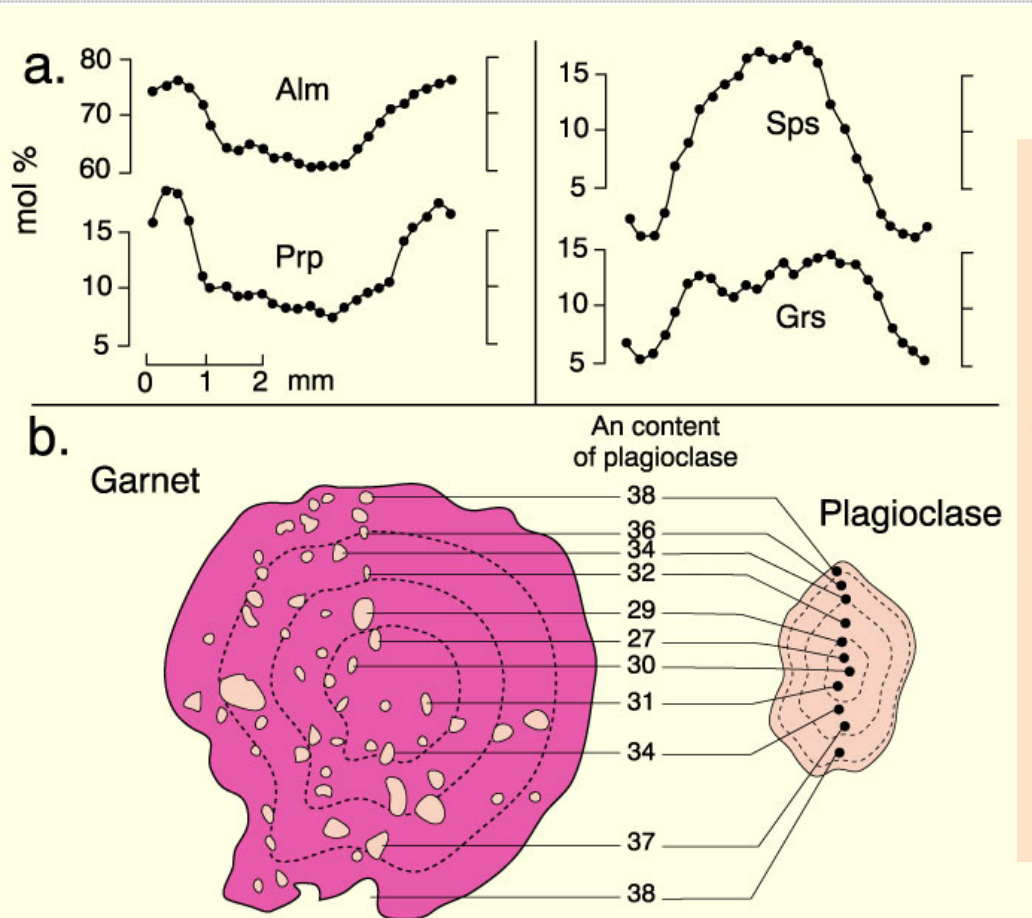


Slika 27-10. P-T dijagram pokazuje rezultate Grt-Bt termometra (crveno) i GASP barometra (plavo). Razne krivulje predstavljaju različite kalibracije. Osjenčano područje je polje procjenjenih P-T uvjeta za uzorak. Al_2SiO_5 invariantna točka je unutar osjenčanog područja.

Slika 27-15. P-T dijagram pokazuje izračunata odstupanja u primjeni različitih kalibracija kod Grt-Bt geotermometra i GASPgeobarometra na pelitniškriljavac iz S Čilea. Prema Kohn and Spear (1991b) *Amer. Mineral.*, 74, 77-84 and Spear (1993) From Spear (1993) *Metamorphic Phase Equilibria and Pressure-Temperature-Time Paths*. Mineral. Soc. Amer. Monograph 1.

Geotermobarometrija: P-T-t reakcijski put

P-T-t Paths



Slika 27-12. Zonalan plagioklas i poikiloblastičan granat, metapelit, Wopmay Orogen, Canada. a. Kemijski profil kroz granat (rim → rim). b. An-sastav plagioklasnih inkluzija u granatu odgovara zonama u susjednom plagioklasu. Prema St-Onge (1987) *J. Petrol.* 28, 1-22.

Slika 27-13. Primjena Grt-Bt geotermometra i GASPgeobarometra na jezgu, zonu i rub minerala. Tri presječnice daju P-T procjenjene uvjete koji definiraju P-T-t reakcijski put za rastuću paragenezu. Put pokazuje izotermalnu dekompresiju. Prema Spear (1993).

P-T-t reakcijski put

- Serije metamorfnih facijesa ukazuju da put kroz metamorfni teren slijedi metamorfni gradijent (metamorphic field gradient) i prolazi kroz slijed (sekvencu) metamorfnih facijesa
- Stijene razvijaju seriju metamorfnih mineralnih zajednica koje se kontinuirano uravnotežavaju prema rastućem metamorfnom stupnju
- Razmatra se kompletan skup P-T uvjeta kroz koje stijena prolazi tijekom metamorfnog ciklusa od tonjenja (subdukcije), metamorfizma, orogeneze do uzdizanja i erozije -> ciklus
- Takav ciklus se naziva P-T-t reakcijski put (pressure-temperature-time path ili P-T-t path)

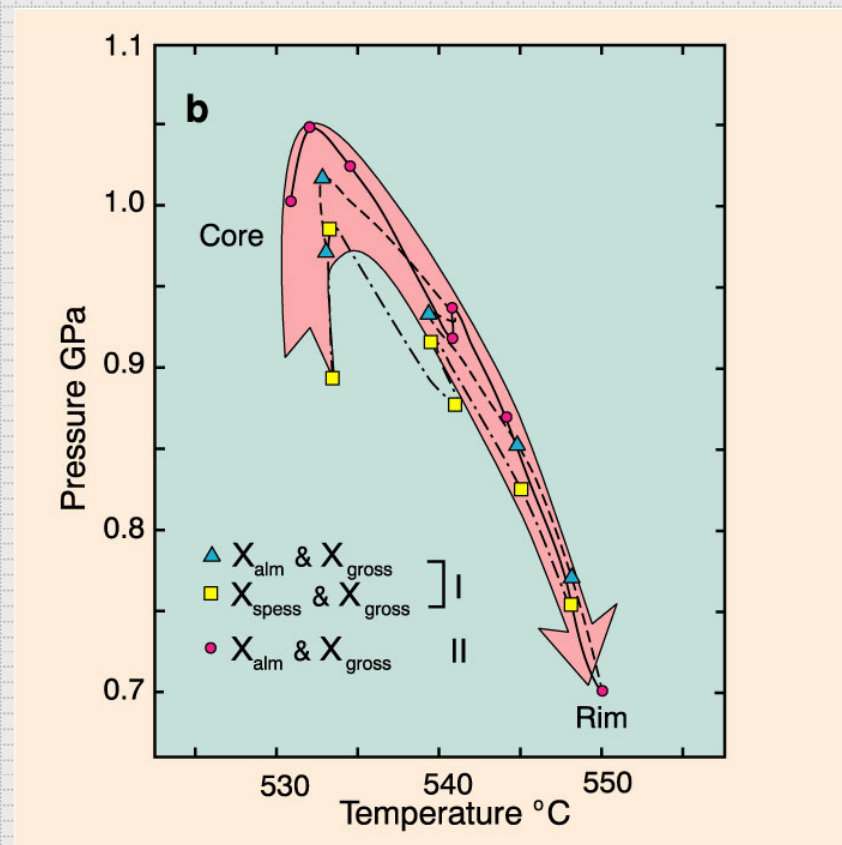
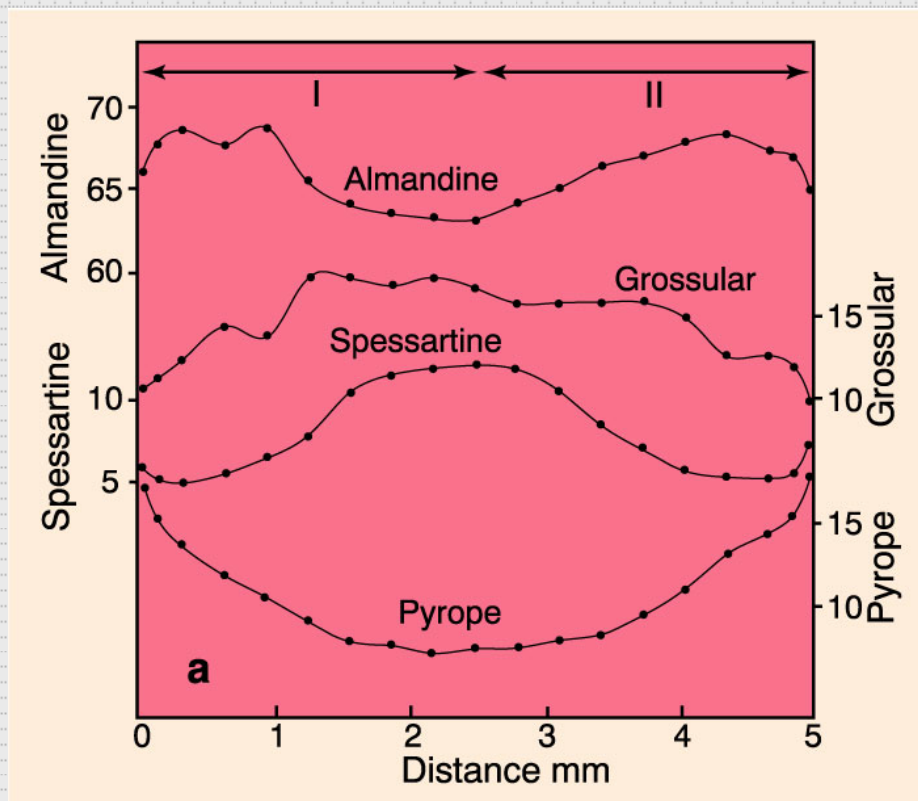
P-T-t reakcijski put

Metamorfni P-T-t reakcijski put prepoznaje se pomoću:

- 1) Opažanja parcijalnih overprint-ova jedne mineralne zajednice na drugu
 - Reliktni minerali ukazuju na dio progradnog ili retrogradnog puta (ili oba) ovisno o uvjetima pod kojima su nastali
- 2) primjenu geotermometra i geobarometra na jezgu i rub kemijski zonalnih minerala da bi se dokumentirala promjena P-T uvjeta tijekom njegovog rasta

Čak i u najboljim okolnostima (1) i (2) mogu dokumentirati samo male djelove P-T-t reakcijskog puta

- 3) Zbog toga ovisimo o modelima npr. toplinskog toka (“forward” heat-flow models) za različite tektonske režime za proračun složenijih P-T-t reakcijskih puteva



Slika 25-13a. Kemijski profili kroz **zonalni granat** iz Tauern Window. Prema Spear (1989)

Kemijski zonalni minerali

Slika 25-13b. Konvencionalni P-T dijagram pokazuje modeliran "clockwise" P-T-t reakcijski put prema profilima koristeći metodu Selverstone *et al.* (1984) *J. Petrol.*, 25, 501-531 and Spear (1989). After Spear (1989) *Metamorphic Phase Equilibria and Pressure-Temperature-Time Paths*. Mineral. Soc. Amer. Monograph 1.

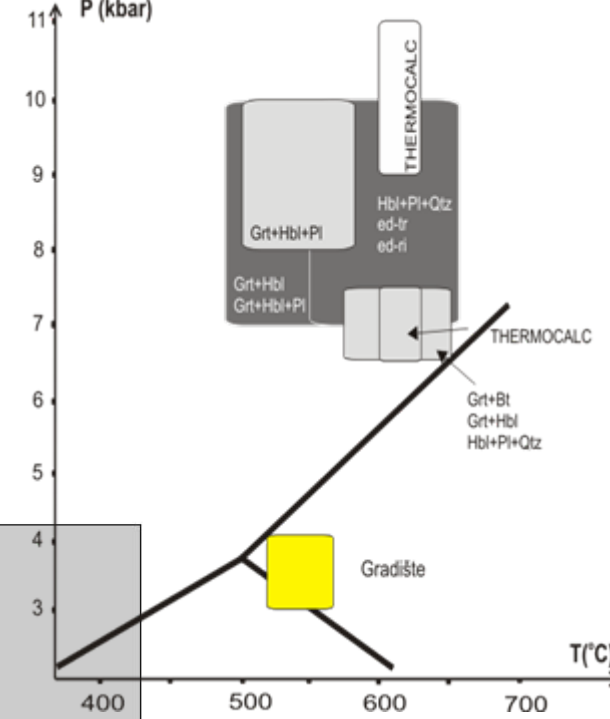
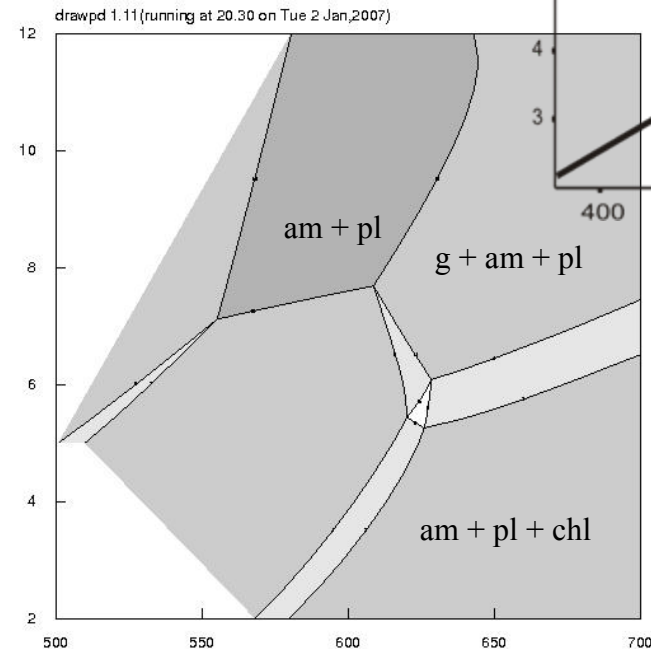
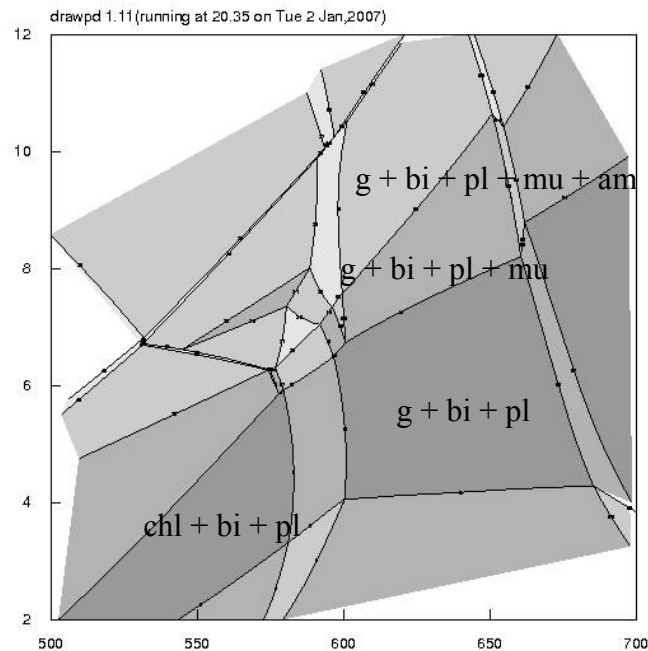
P-T-t reakcijski put

- Klasičan stav: regionalni metamorfizam je posljedica dubokog tonjenja ili intruzije vruće magme
- Tektonika ploča: regionalni metamorfizam rijetko je posljedica samog tonjenja nego i zadebljanja kore i dovoda topline tijekom orogeneze na konvergentnim granicama ploča
- Heat-flow modeli su razvijeni za različite tektonske režime uključujući tonjenje, progresivno navlačenje, zadebljanje kore kontinentalnom kolizijom uz dodatne efekte anateksisa kore i migracije magme
 - Viši dovod od normalnog toplinskog toka je potreban za tipičnu medium P/T seriju facijesa (facijes zelenih škriljavaca-amfibolitni facijes)
 - Uzdizanje i erozija imaju značajan efekt na geoterm i moraju se uzeti u obzir u potpunom modelu metamorfizma



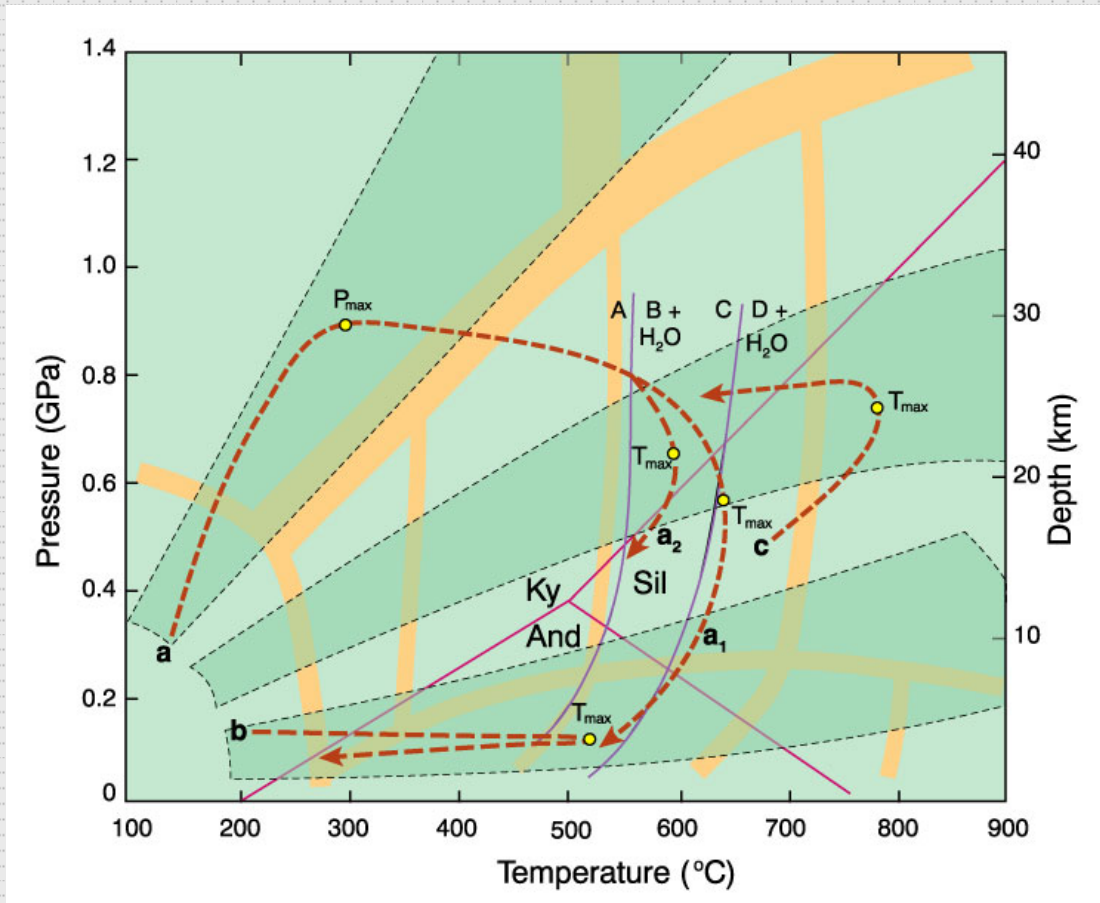
Modeliranje

quantitative phase
diagram calculations



- THERMOCALC "pseudosections" za gnajs i amfibolit (Kutjevo) u rasponu $T=500-700\text{ }^{\circ}\text{C}$ i $P=2-12\text{ kbara}$

P-T-t reakcijski put

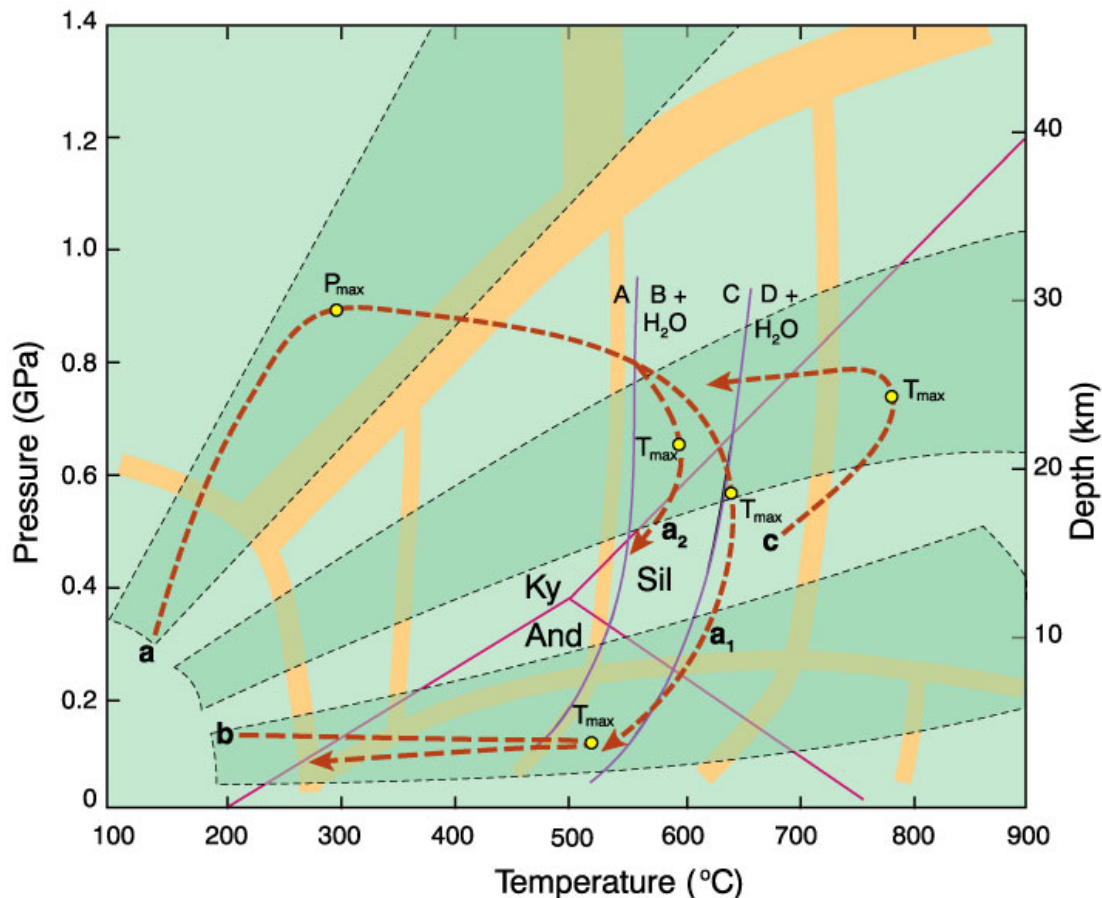


- Iako točan oblik, veličina i položaj orogenog P-T-t reakcijskog puta poput slučaja (a) može varirati s ograničenjima modela, većina primjera zadebljanja kore ima isti oblik
- Put poput (a) slučaja se naziva “clockwise” P-T-t reakcijski put i smatra se obrascem regionalog metamorfizma

Slika 25-12. Shematski P-T-t reakcijski put temeljen na heat-flow modelima. Al_2SiO_5 fazni dijagram, dvije hipotetske dehidratacijske krivulje, granice facijesa i serije metamorfnih facijesa su uključene u sliku. Winter (2001) An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology. Prentice Hall.

P-T-t reakcijski put

Suprotno klasičnom shvaćanju metamorfizma
temperatura i tlak ne rastu jedinstveno u
metamorfnom stupnju!



Njihova relativna
magnituda značajno
varira tijekom procesa
metamorfizma

P-T-t reakcijski put

$P_{\max}$ i $T_{\max}$ se ne javljaju istovremeno

- U uobičajenom “clockwise” P-T-t reakcijskom putu, $P_{\max}$ se javlja ranije nego $T_{\max}$.
- $T_{\max}$ predstavlja maksimalan metamorfni stupanj kod kojeg je kemijska ravnoteža “zamrznuta” i metamorfna mineralna parageneza razvijena
- To se javlja pri znatno nižim tlakovima od $P_{\max}$, pa je određivanje tlaka nesigurno jer mineralni geobarometar bilježi tlak pri $T_{\max}$
- “Metamorfni stupanj” se stoga odnosi na T i P **pri $T_{\max}$** , zbog toga što je stupanj determiniran u odnosu na ravnotežnu mineralnu zajednicu