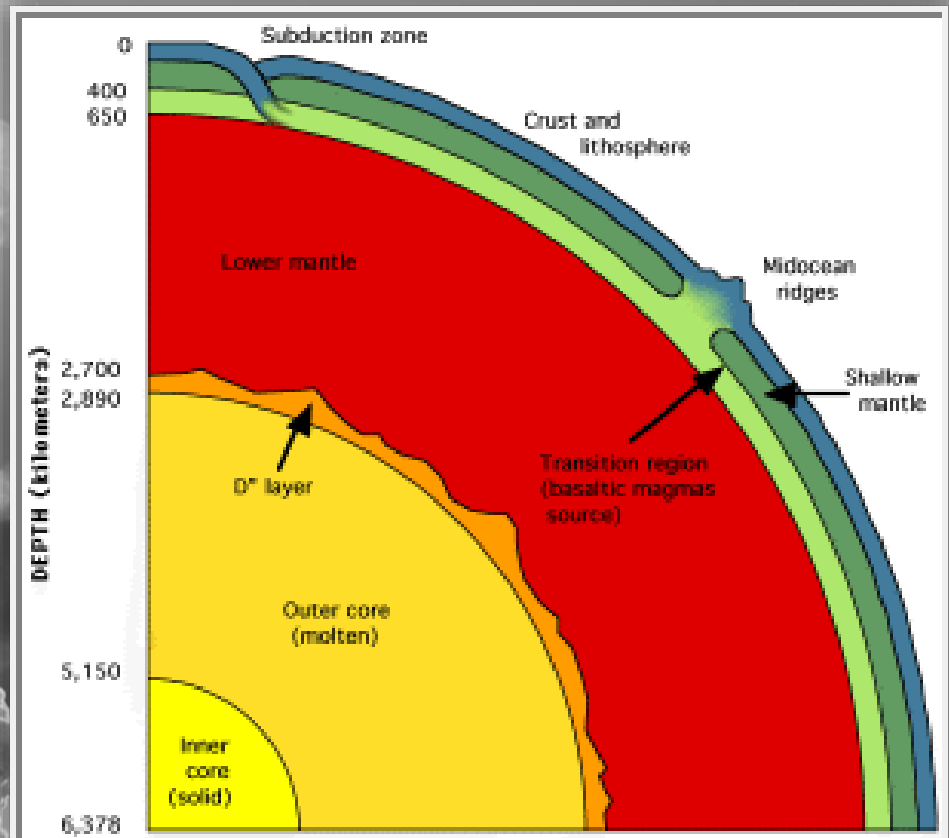


Porijeklo magme

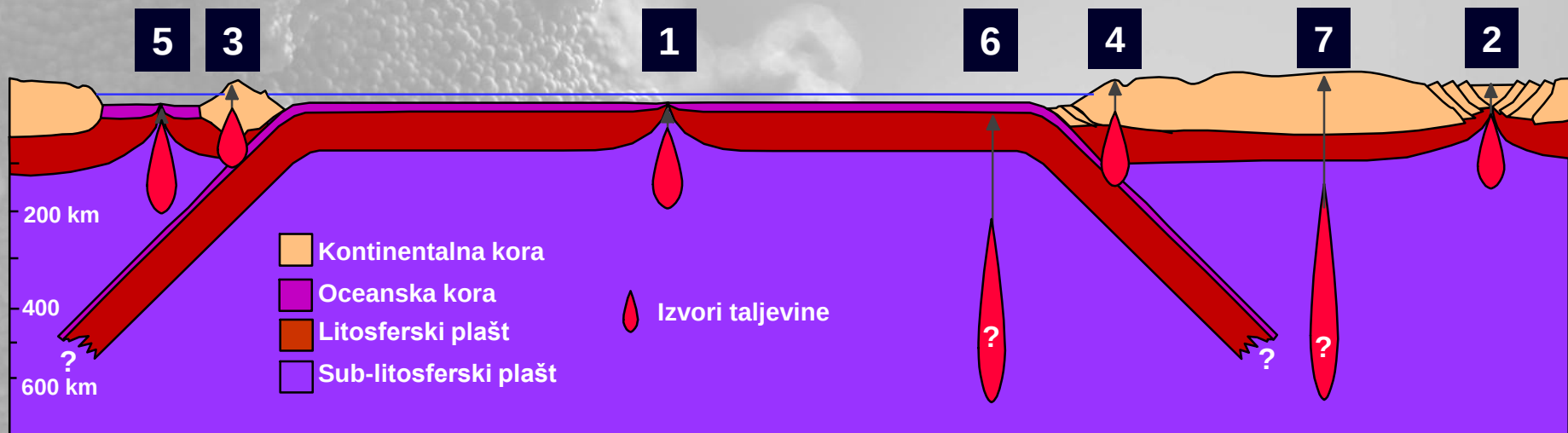
sredine, okoliši, procesi



Tektonika ploča - geneza magme

1. Srednje oceanski hrbat
2. Intrakontinentalni rift
3. Otočni luk
4. Aktivni kontinentalni rub

5. Zalučni bazen
 6. Oceanski otoci
 7. Razne intra-kontinentalne zone
- ◆ kimberliti, karbonatiti, anortoziti...

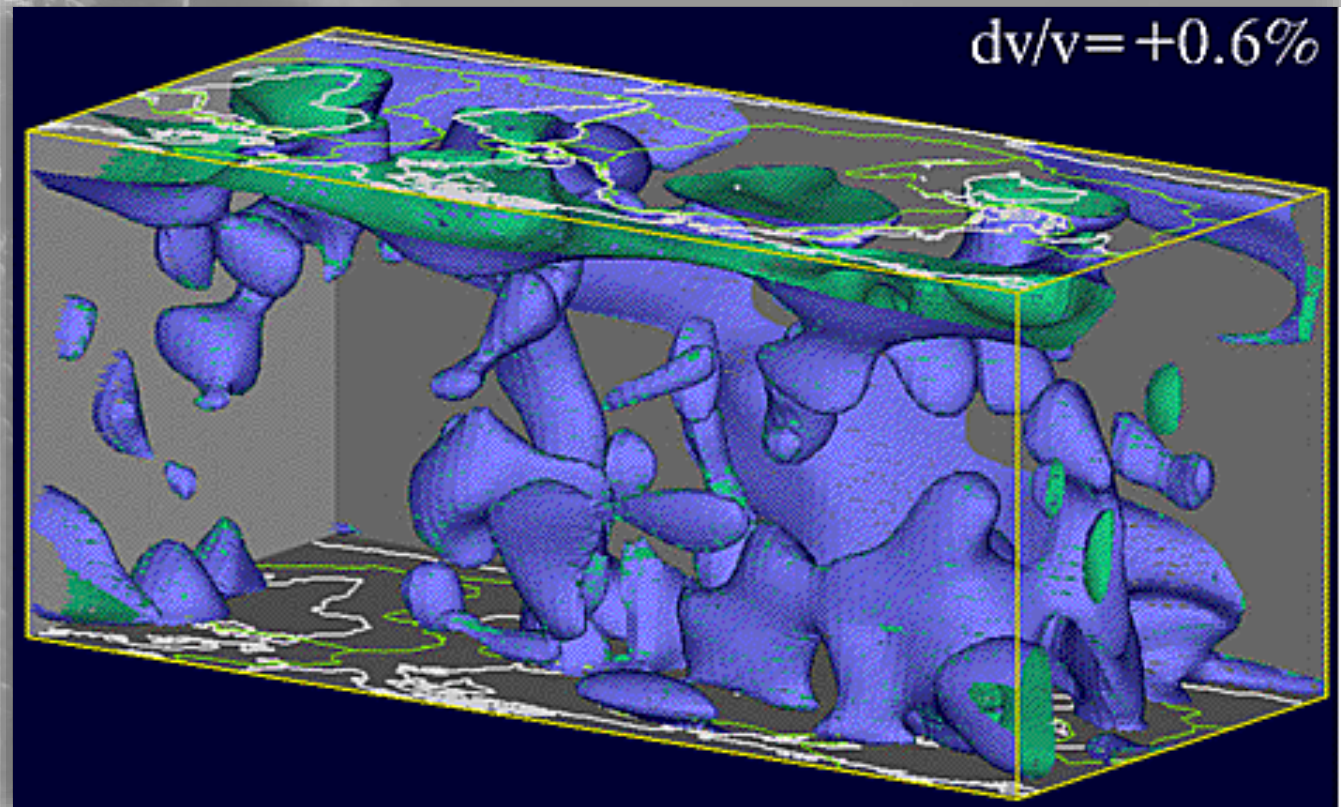


Plašt

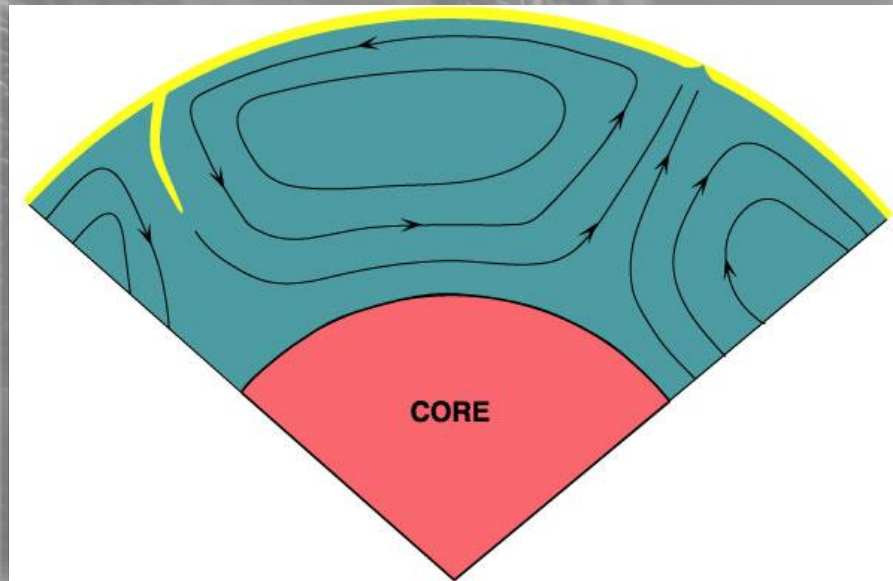
- heterogenost plašta
 - ◆ Seizmička tomografija

<http://www.seismo.unr.edu/ftp/pub/louie/class/100/interior.html>

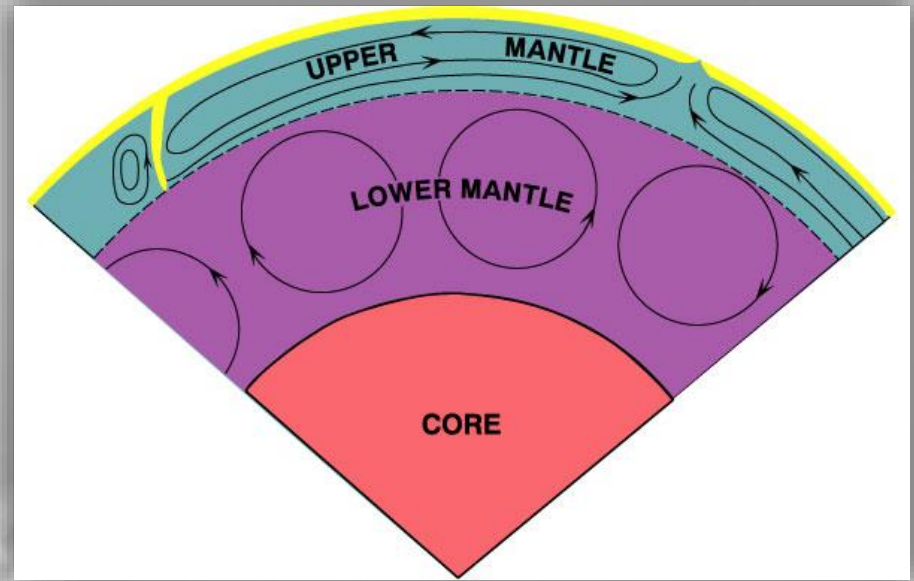
<http://www.uiggm.nsc.ru/homepages/geophysics/ris/>



Plaštni model 1975



Novi plaštni model



- Gornji plašt = MORB izvor
- Donji plašt = OIB izvor

Zemljina unutrašnjost

Kora:

Oceanska kora

Tanka: 10 km

Relativno jednoličan sastav = ofiolitni kompleks:

- sedimenti
- pillow bazalti
- dajkovi dijabaza
- masivni gabro
- ultramafiti (plašt)

Kontinentalna kora

Deblja: 20-90 km; u prosjeku ~35 km

Varijabilan sastav

- ◆ U prosjeku ~ granodiorit

Zemljina unutrašnjost

Plašt:

Peridotit (ultramafiti)

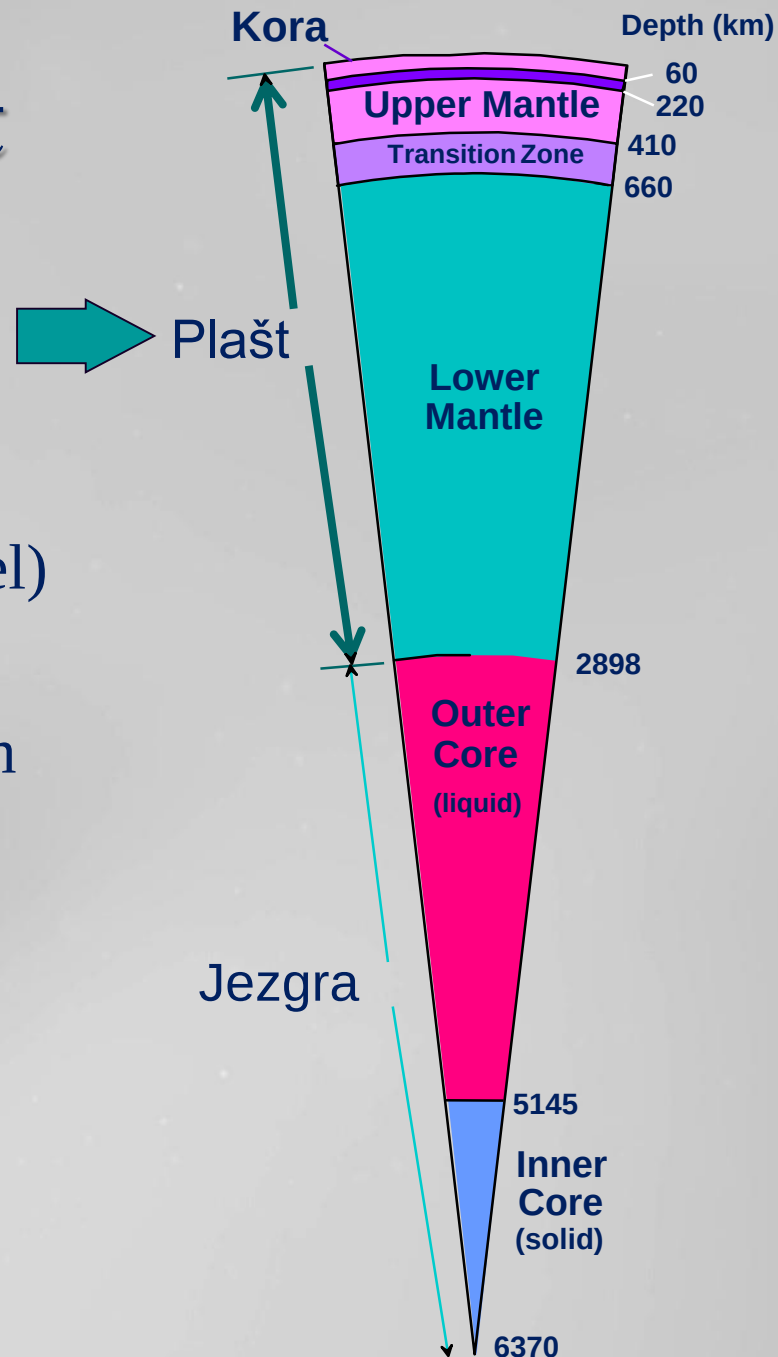
Gornji plašt do 410 km (olivin → spinel)

- ◆ Zona sniženih brzina
- ◆ “Low Velocity Layer” 60-220 km

Transition Zone porast brzine ~ nagli

- ◆ 660 spinel → perovskit-type
 $\text{Si}^{\text{IV}} \rightarrow \text{Si}^{\text{VI}}$

Donji plašt porast brzine



Zemljina unutrašnjost

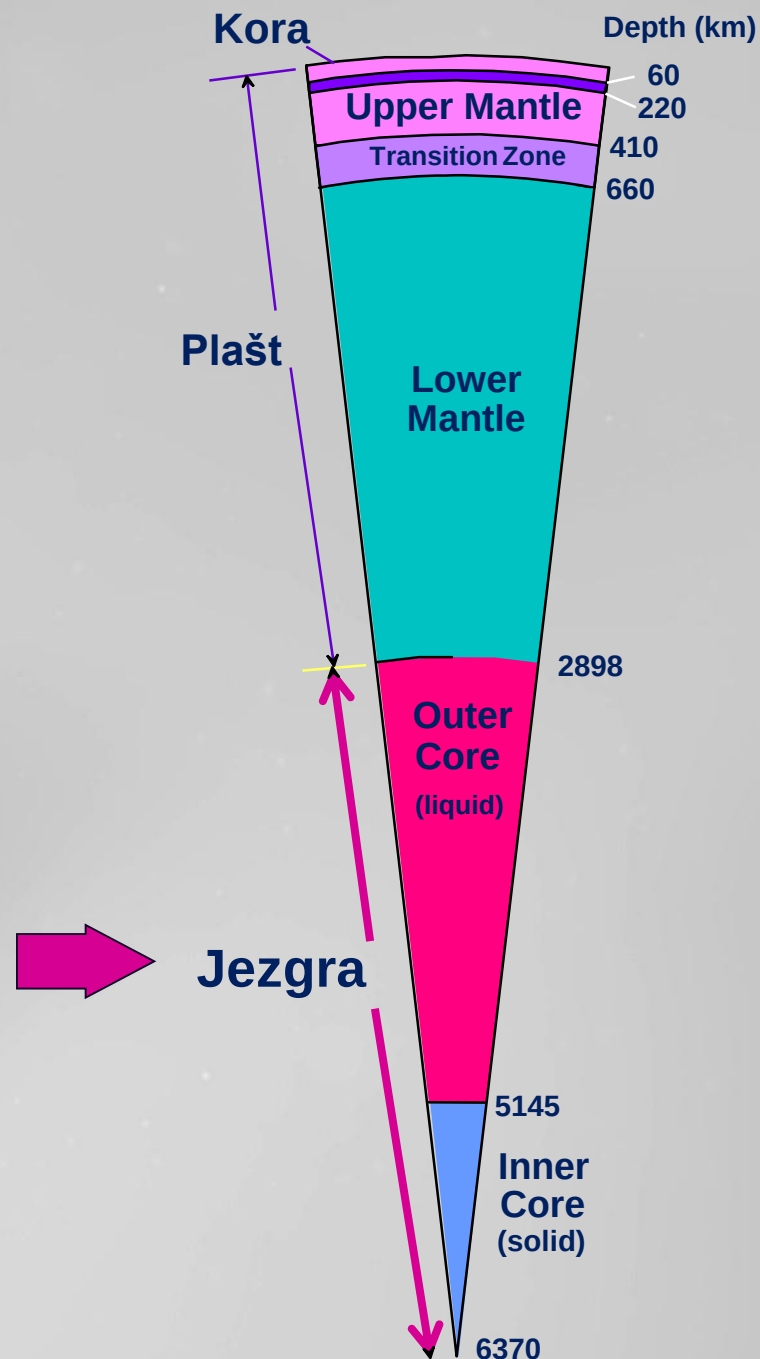
Jezgra:

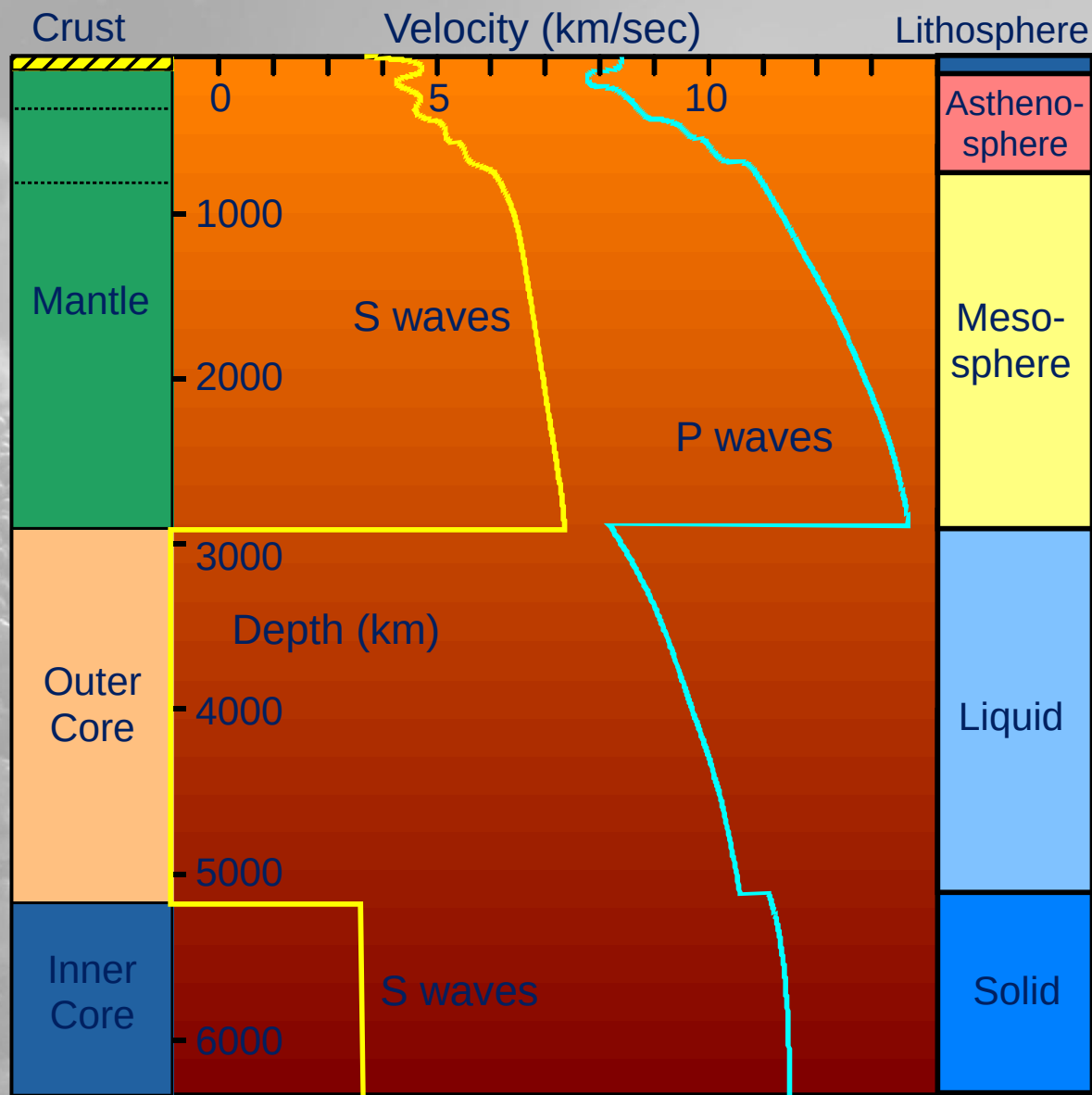
Fe-Ni legura

Vanjska jezgra je tekuća

◆ Nema S-valova

Unutarnja jezgra je kruta





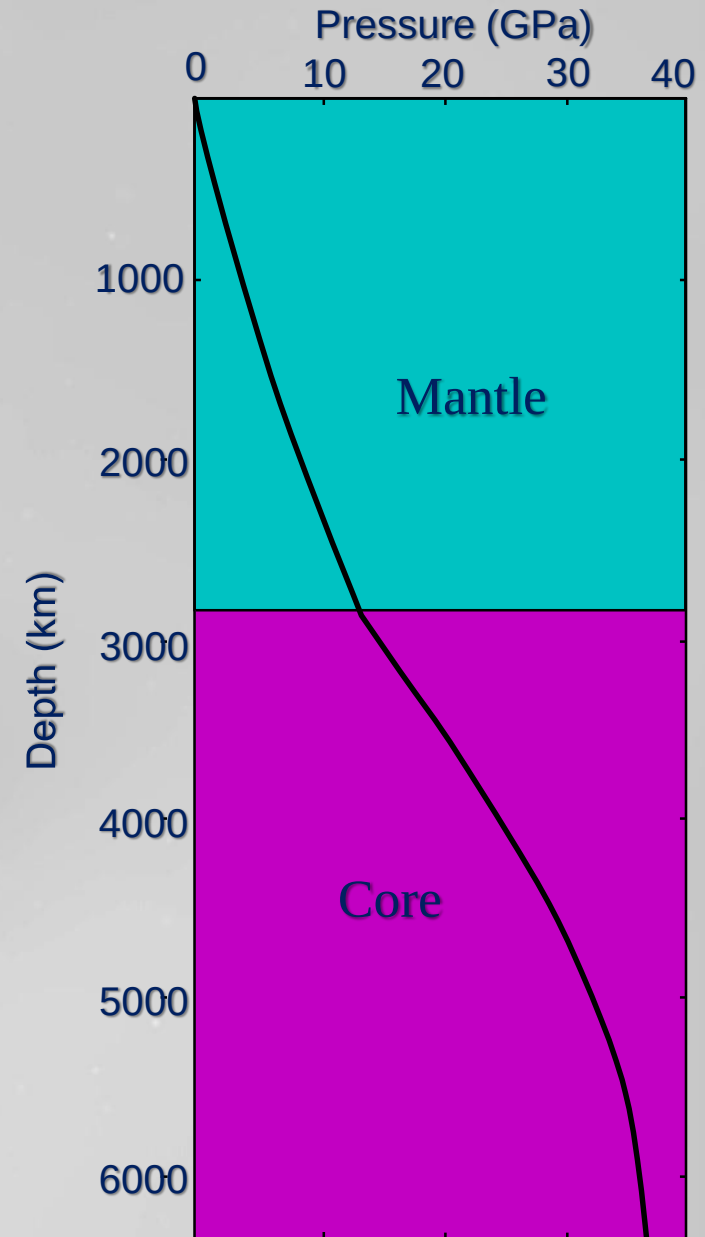
Slika II-15. Varijacije u brzini P i S valova s dubinom.

Prema Kearey and Vine (1990), *Global Tectonics*. © Blackwell Scientific. Oxford.

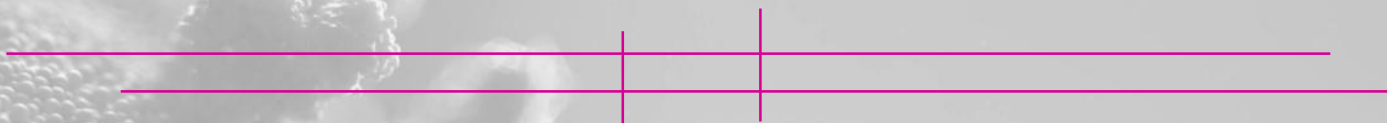
Gradijent tlaka

- P raste = $rg h$
- Približno linearno kroz plašt
 - ◆ $\sim 30 \text{ MPa/km}$
 - ◆ $\gg 1 \text{ GPa}$ u dnu prosječne kore
- Jezgra: P raste naglije jer su veće gustoće

Slika II-16. Varijacije tlaka s dubinom. Prema Dziewonski and Anderson (1981). *Phys. Earth Planet. Int.*, 25, 297-356. © Elsevier Science.



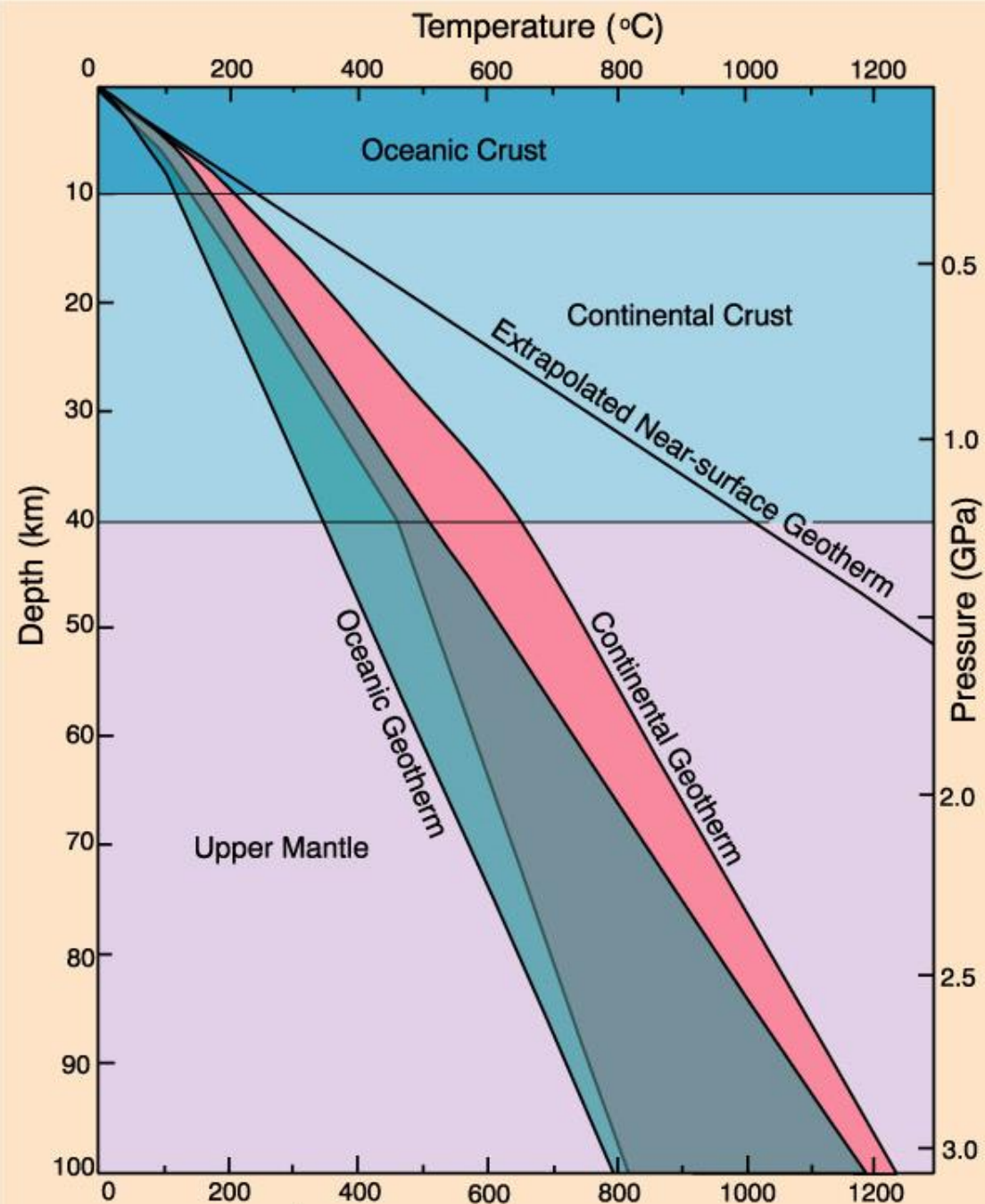
Izvori topline u Zemlji



1. Toplina od akrecije i rane diferencijacije Zemlje
 - polako dosiže površinu
2. Toplina oslobođena radioaktivnim raspadom
 - frikcijsko zagrijavanje
 - udar meteorita

Geotermalni gradijent

Slika II-18. Rasponi kontinentalnog i oceanskog geotermalnog gradijenta u stabilnom stanju do dubine od 100 km. Prema Sclater *et al.* (1980), *Earth. Rev. Geophys. Space Sci.*, **18**, 269-311.

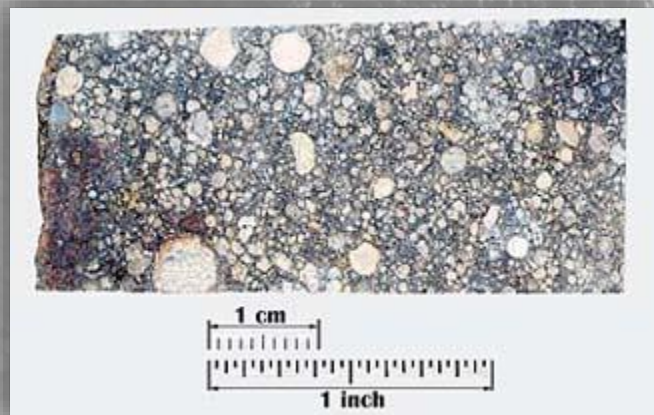


Izvori podataka o plaštu

- Ofioliti
 - ◆ Ploča od oceanske kore i plašta
 - ◆ Navučene u subdukcijskim zonama na rub kontinenta
- Grabilicama iz oceanskih zona na lomovima
- Nodule i ksenoliti u nekim bazaltima
- Kimberlitni ksenoliti
 - ◆ Dijamantske “cijevi” (pipes) porijeklom iz plašta s brojnim ksenolitima

Meteoriti

- analogni materijalima iz dubine
- fragmenti terestričkih planeta
- istovremeni (4.5×10^9 god.)
- asteroidni pojas + Mjesec + Mars (24)
- kameni m. iz plašta
- željezni m. iz jezgre

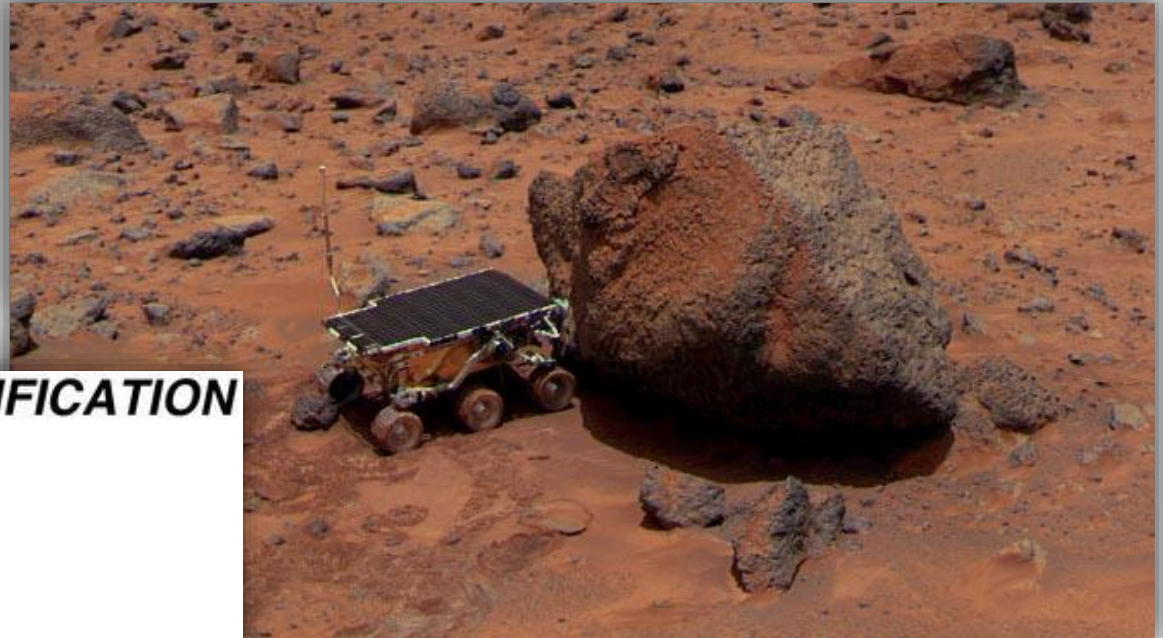


Hondrit

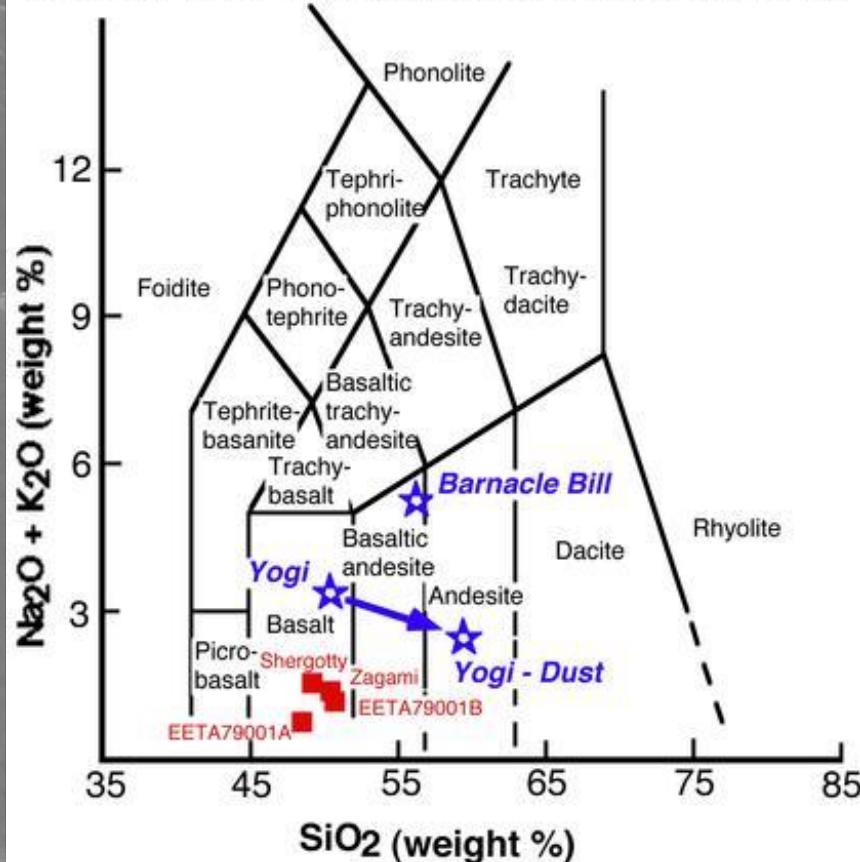
Meteorit	Sastav
Željezni meteorit	Fe-Ni legure
Kameno-željezni Hondriti	Fe-Ni + silikati kameni meteorit hondrule, hondre – sfere do 1mm ranije rastaljenog materijala opx+ol±pl
Ugljikovi met.	C, slični sastavu zvijezde – volatili
Ahondriti	slični bazaltima porijeklom s Mjeseca i Marsa

Omjer pronađenih meteorita
odgovara omjeru volumena
plašta i jezgre

Mars



VOLCANIC ROCK CLASSIFICATION



Mars Pathfinder 97

Sojourner rover

Mars Exploration Rover

Mission 2004 -

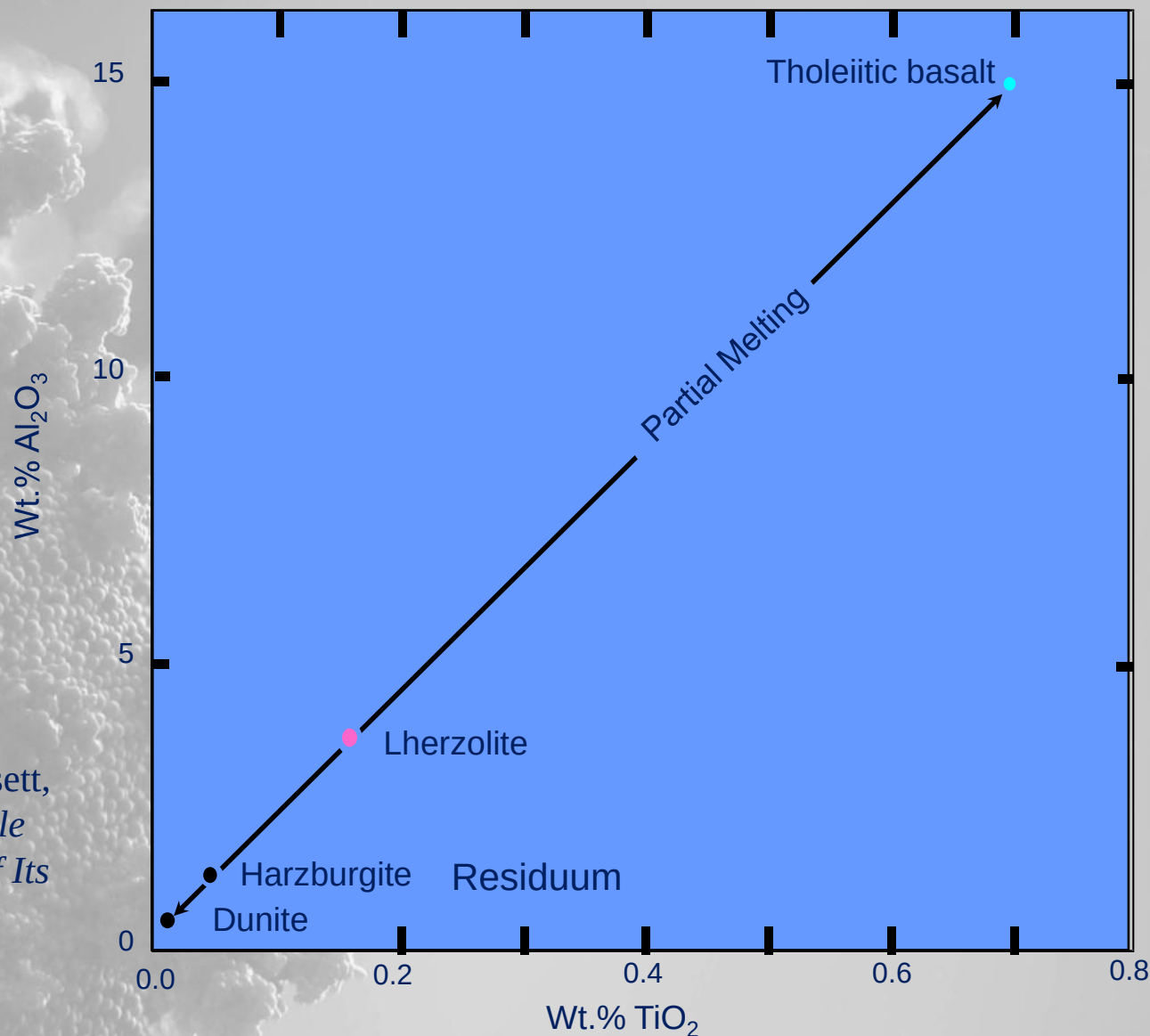
Spirit & Opportunity

kiseliji nego što se očekivalo,
različit sastav od SNC
meteorita

Lercolit odgovara neizmjenjenom plaštu

Dunit i **harzburgit** ostatak nakon što je izdvojen bazalt parcijalnim taljenjem

pirolit

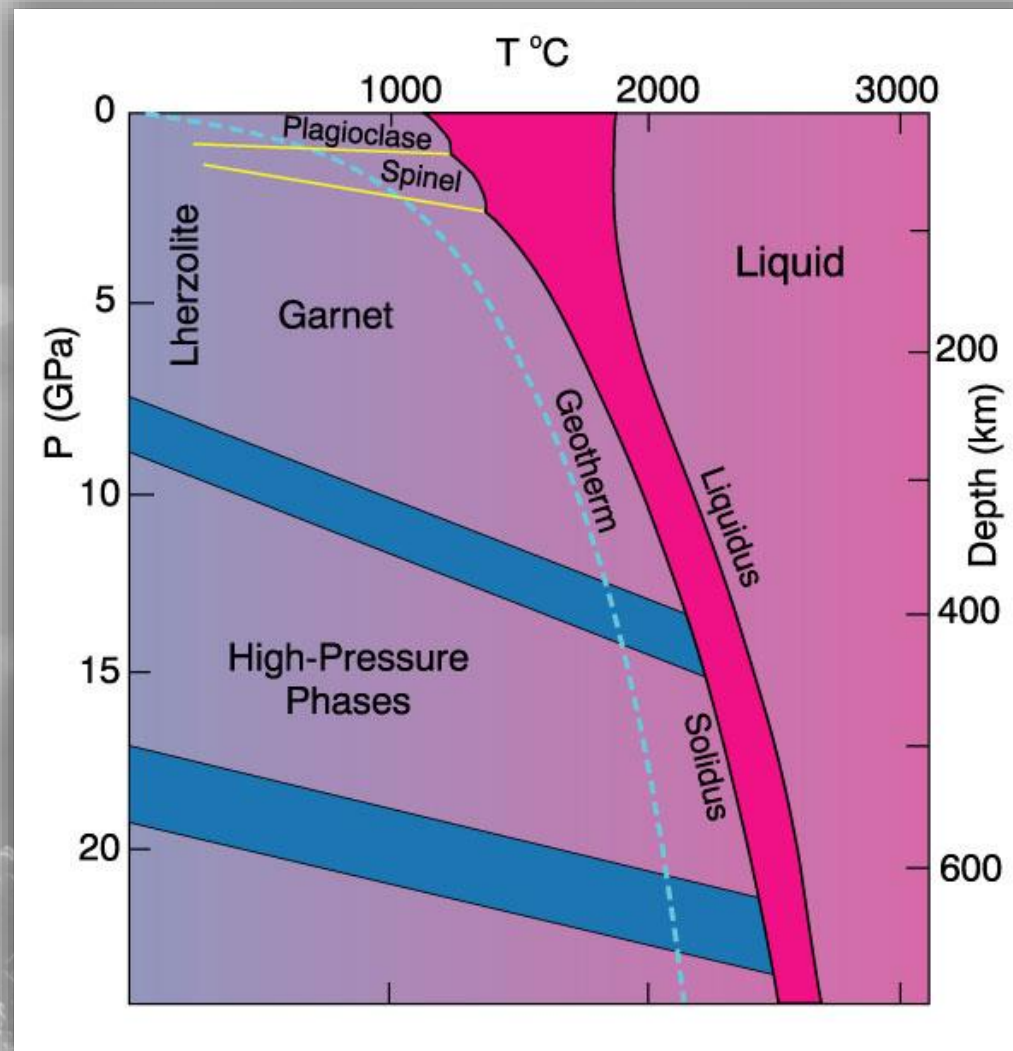


Slika II-22 Brown and Mussett, A. E. (1993), *The Inaccessible Earth: An Integrated View of Its Structure and Composition*. Chapman & Hall/Kluwer.

Fazni dijagram za Al 4-fazni lercolit:

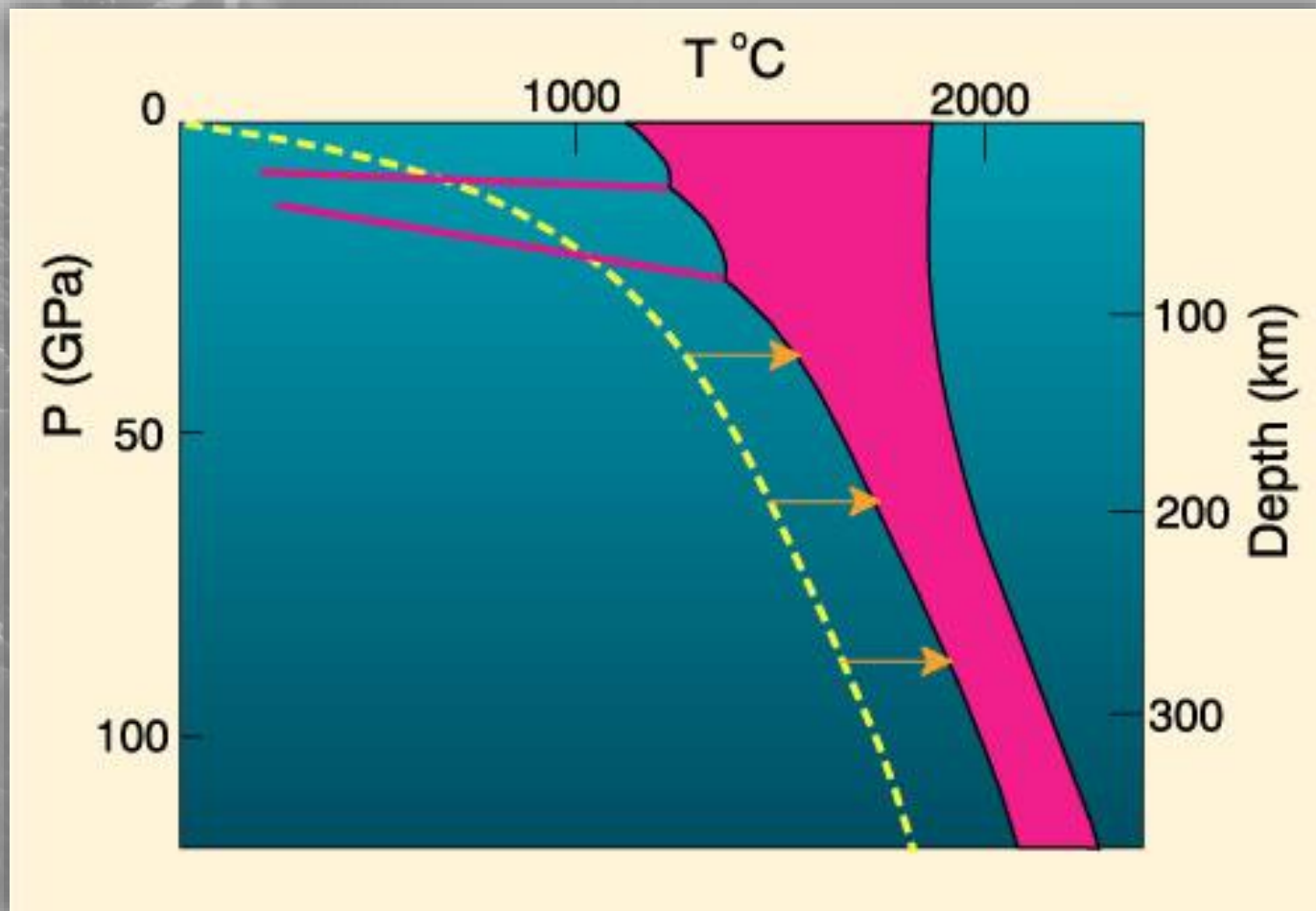
Al faza =

- Plagioklas
plitko (< 50 km)
- Spinel
50–80 km
- Granat
80–400 km
- Si → VI koord.
> 400 km



Kako se tali plašt??

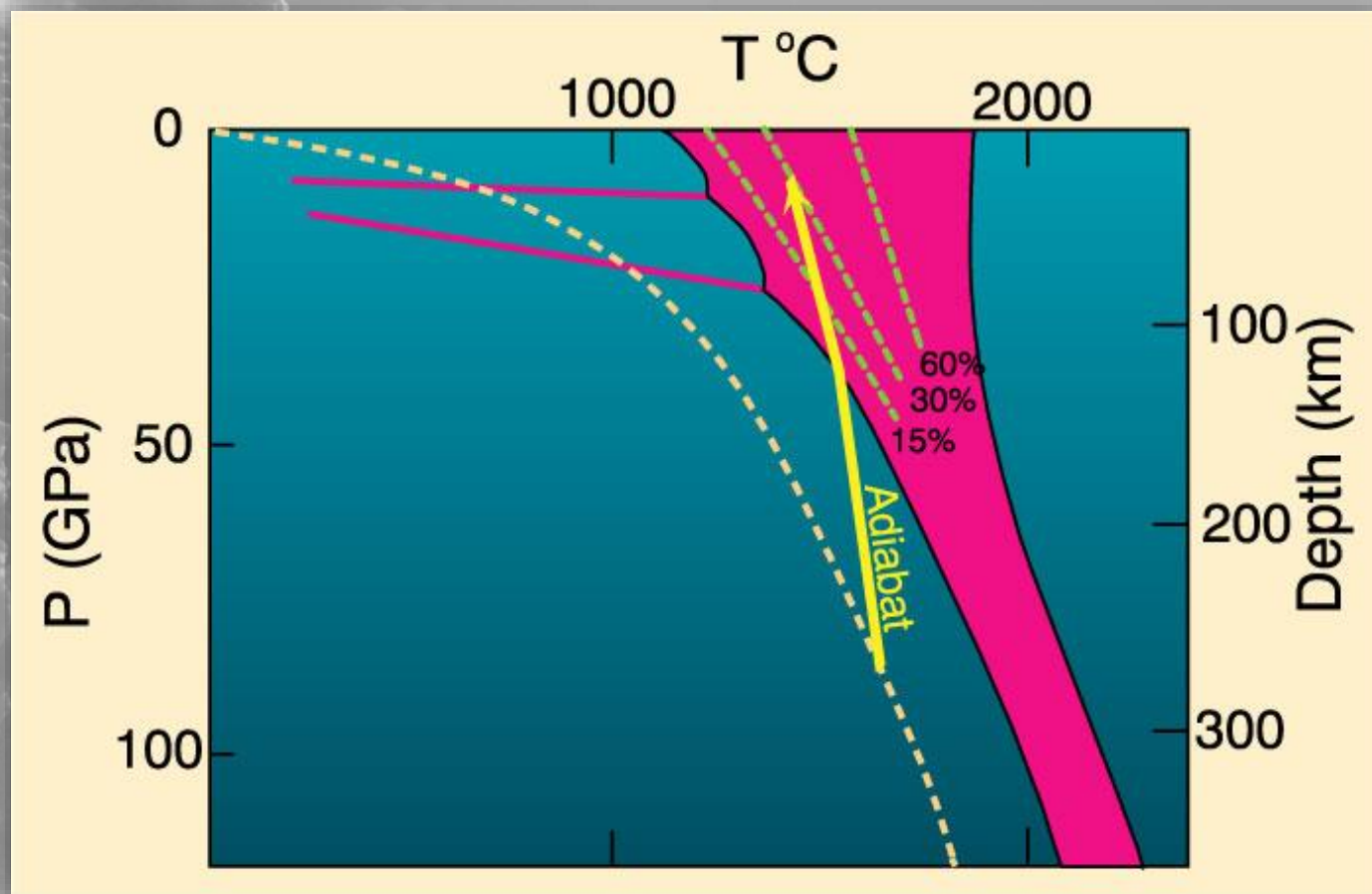
1) Porastom temperature



Slika II-24

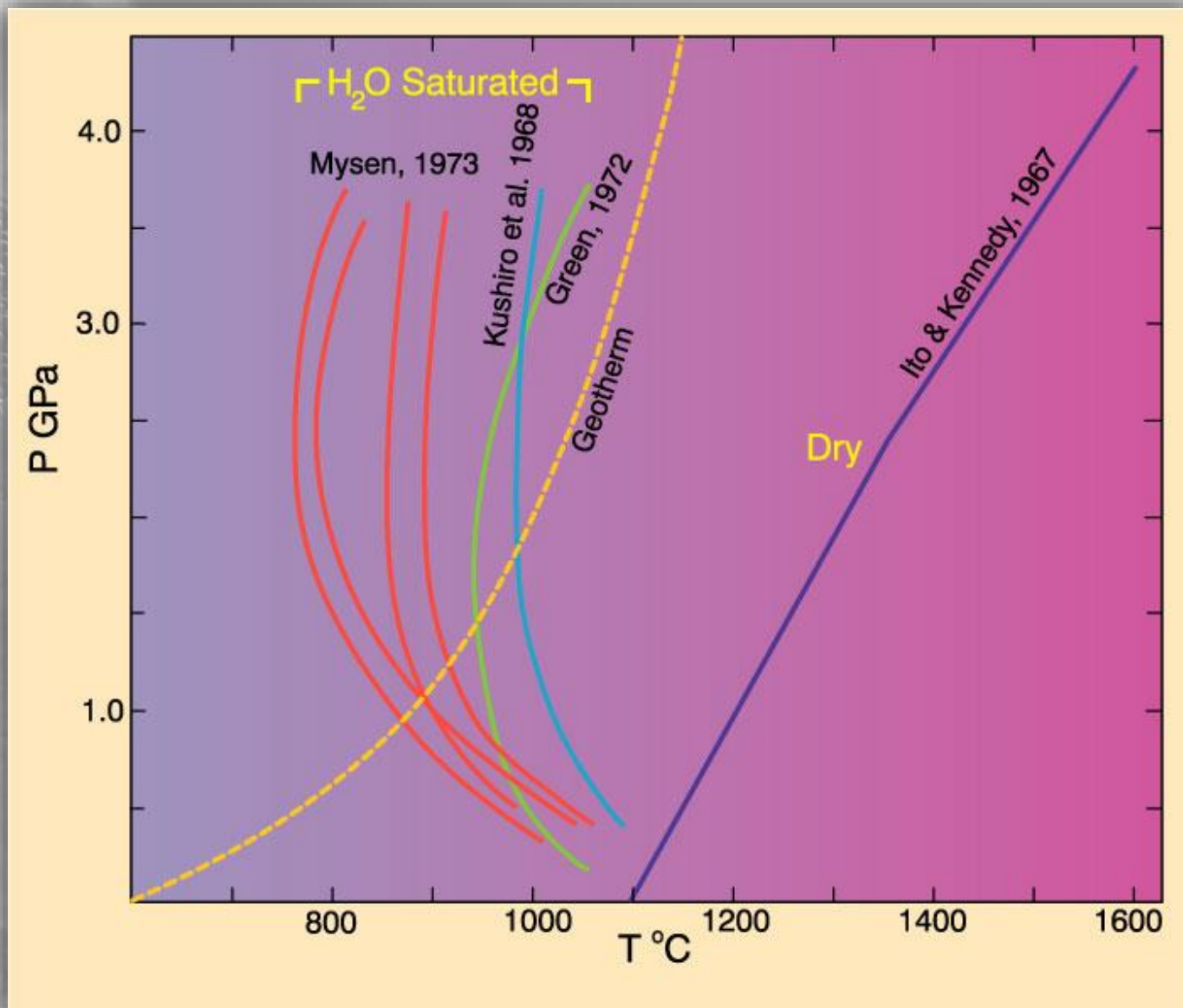
2) Snižavanjem tlaka

- ◆ Adijabatsko uzdizanje plašta bez gubitka topline
- ◆ Taljenje dekompresijom može dati bar 30% taljevine



Slika II-25

3) Dodavanje volatila (naročito H₂O)



Slika II-26

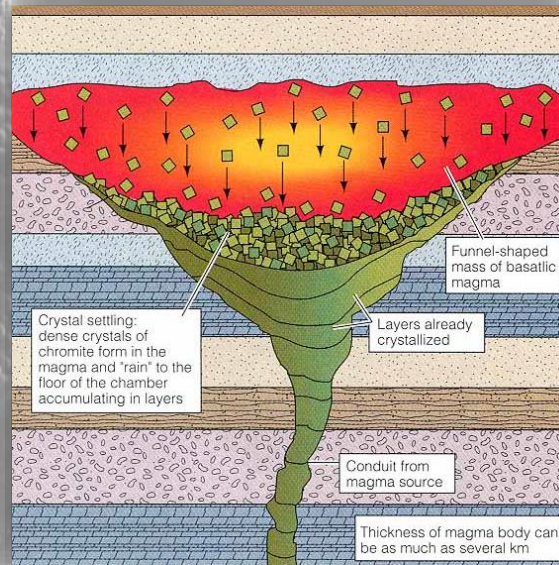
Koje su to geološke sredine koje bi odgovarale navedenim dijagramima?

- Ploče se razdvajaju i plašt se uzdiže na srednjeoceanskim hrptovima (mid-ocean ridges)
 - ◆ Adijabatsko uzdizanje → dekompresijsko taljenje
- Hot spots (Vruće točke) → lokalizirane “kapljice” taljevine
- Mješanje fluida također daje taljevine
 - ◆ Važno u subdukcijskim zonama i drugim sredinama

Primarne magme

- Nastale u dubini i nisu značajno izmijenjene
- Kriteriji
 - ♦ Visok Mg# $100\text{Mg}/(\text{Mg}+\text{Fe}) \rightarrow$ primarna (parental) magma
 - ♦ Eksperimentalno lercolitne magme
 - Mg# = 66–75
 - Cr > 1000 ppm
 - Ni > 400–500 ppm
 - višestruko zasićene

Evolucija magme



Evolucija magme

- **Kristalizacijska diferencijacija**

- Bowen - frakcijska kristalizacija, dva niza
- Zonalna kristalizacija
- Gravitacijska diferencijacija - stratiformni kompleksi, kumulus, layering
- Kristalna filtracija

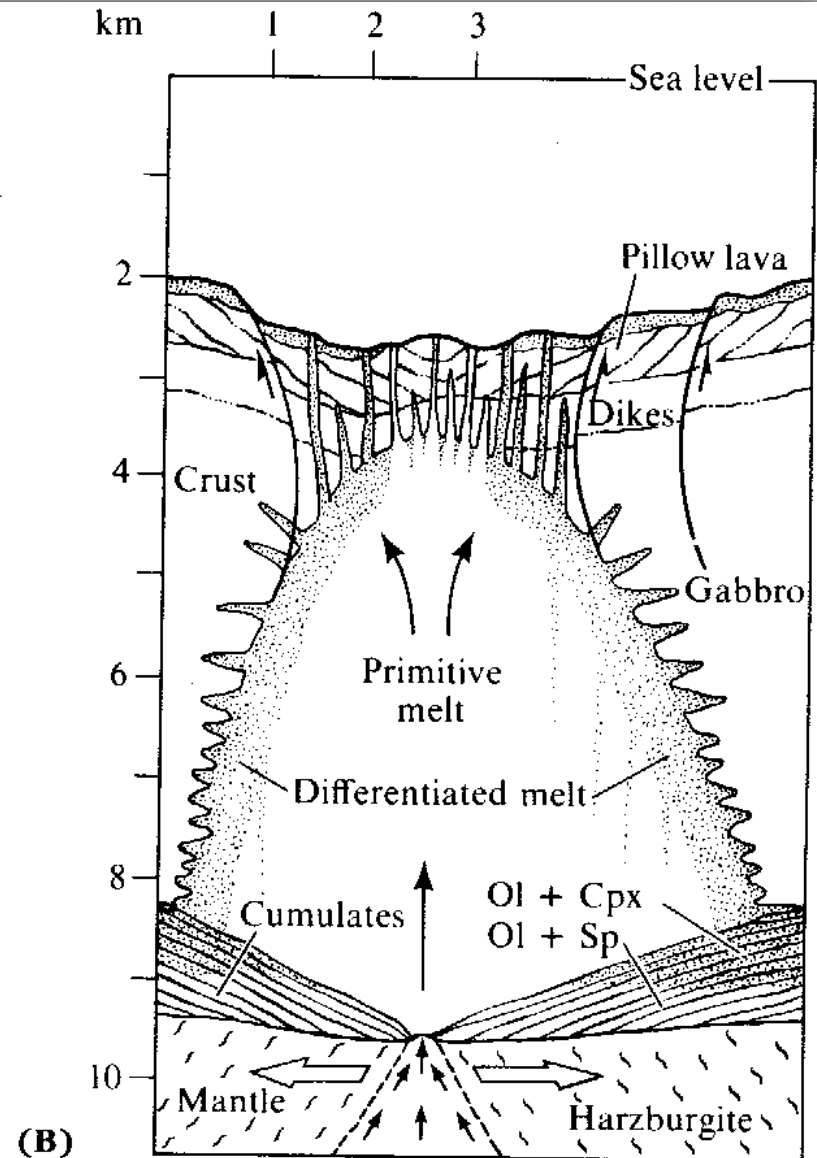
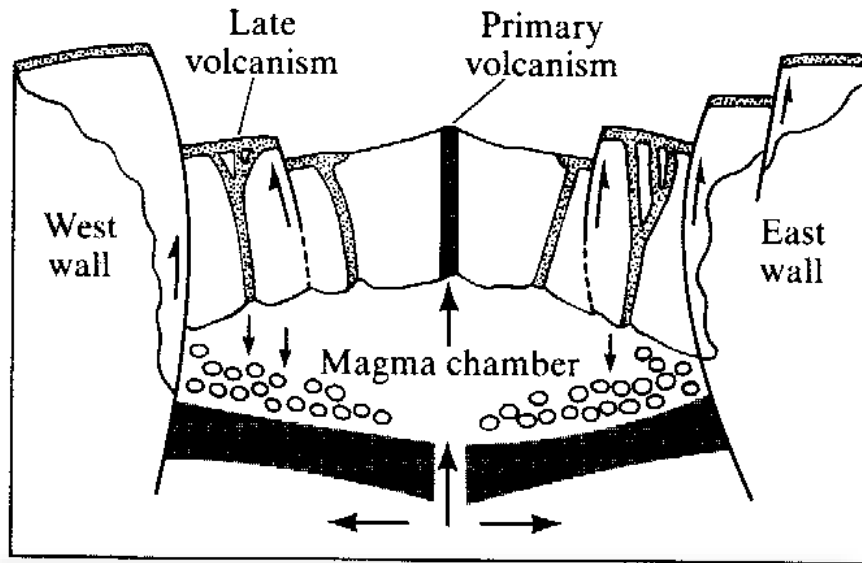
- **Magmatska diferencijacija u likvidnom stanju**

- Termodifuzija
- Likvacija

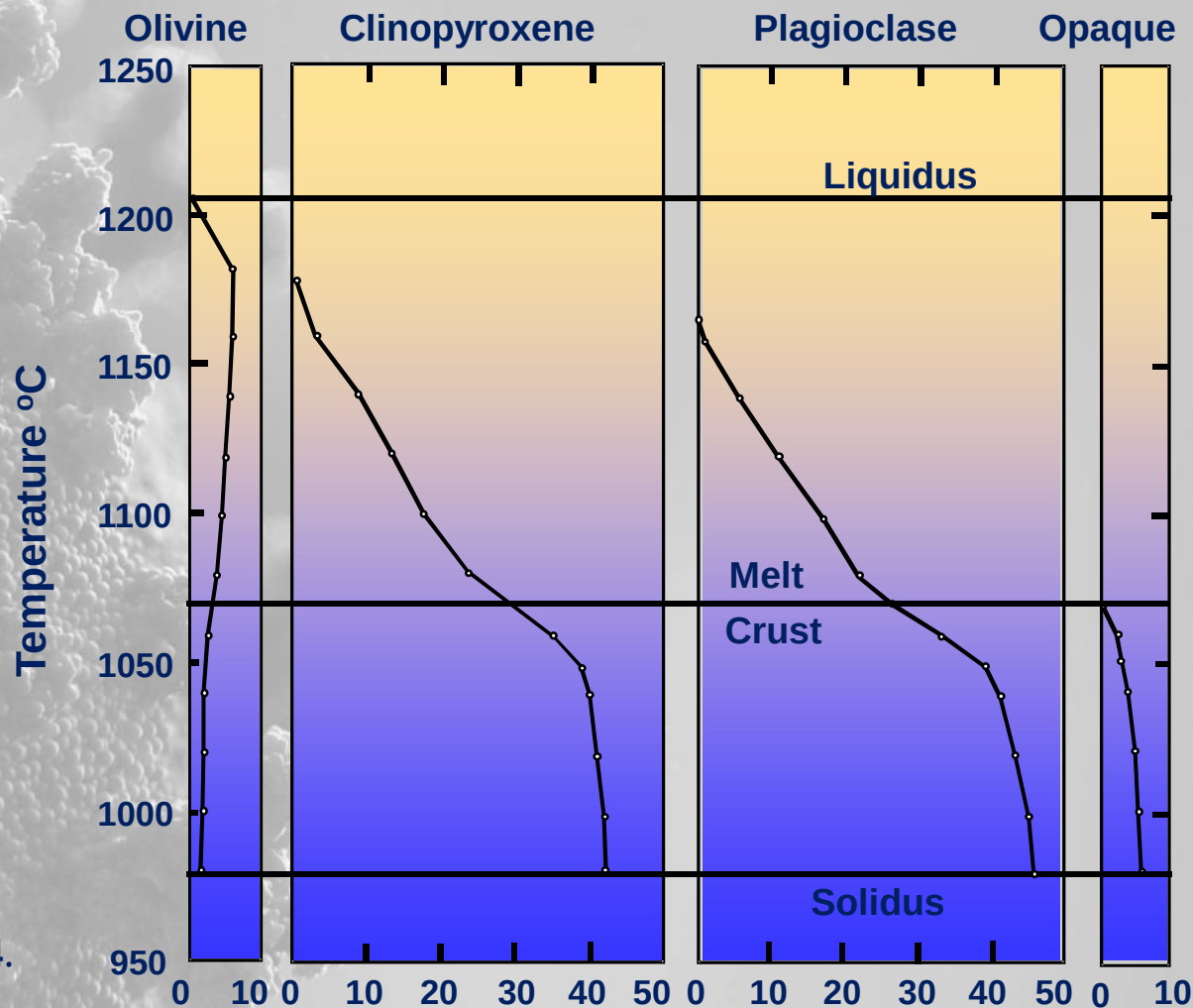
- **Volatilna diferencijacija**

- **Asimilacija**

Kristalizacijska diferencijacija magme

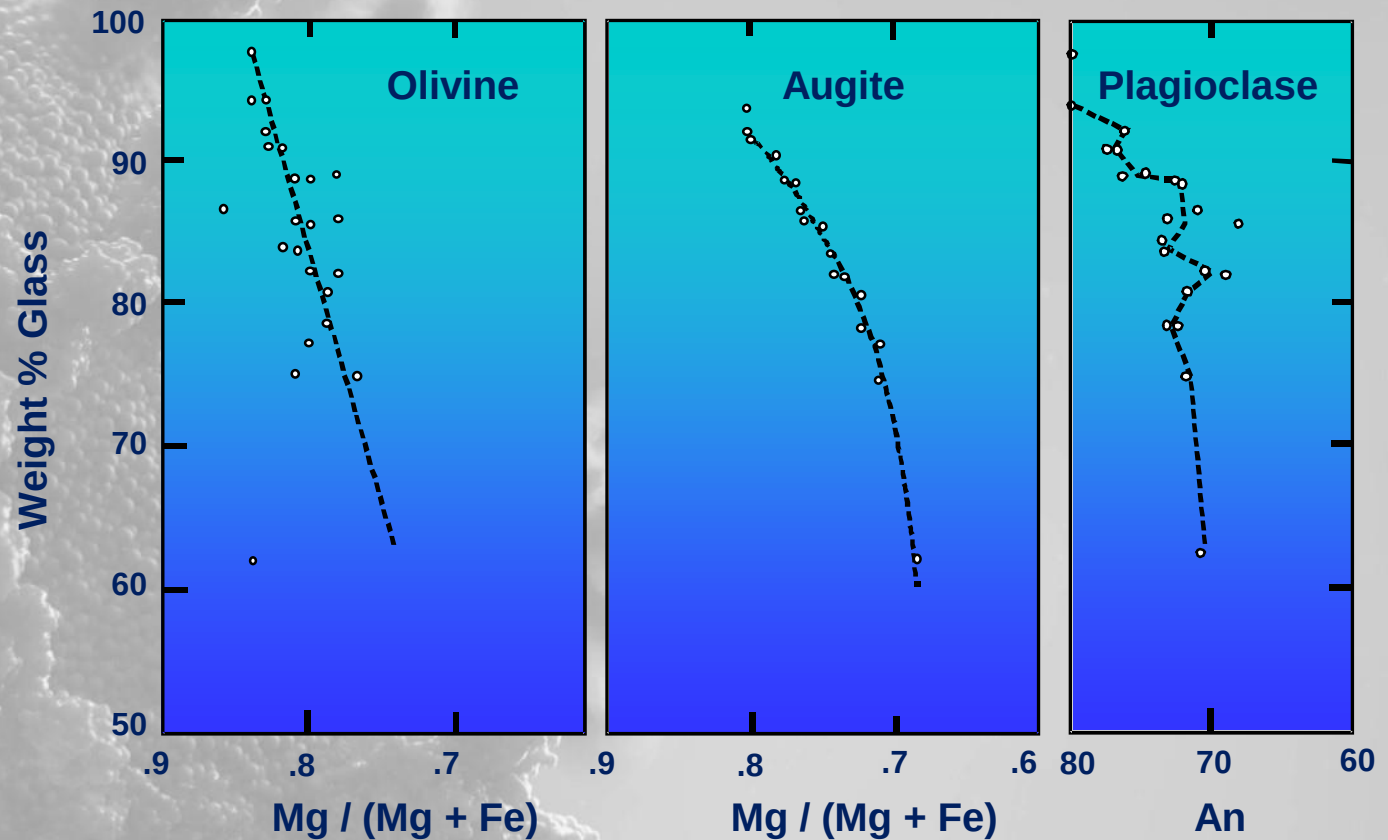


1. Hlađenjem taljevina kristalizira u rasponu temperatura (i tlakova)
2. Nekoliko minerala kristalizira u istom rasponu T i broj minerala raste s padom T
3. Nastanak pojedinih minerala se preklapa
4. Kristalizacija minerala ovisi o T i X taljevine



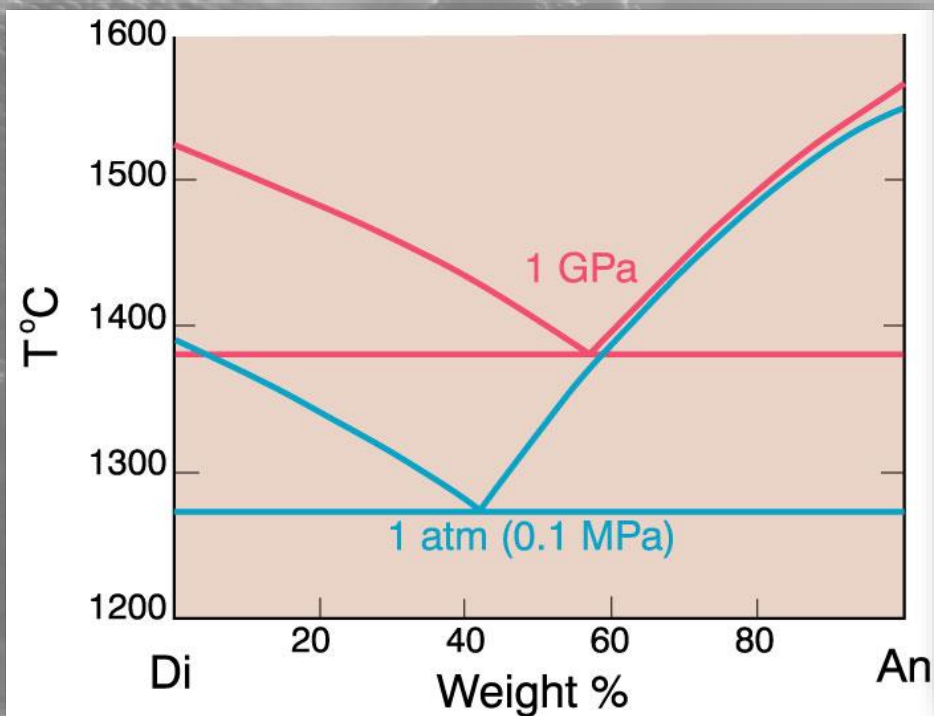
Slika II 33 Wright i Okamura,
(1977) *USGS Prof. Paper, 1004*.

5. Minerali mješanci mijenjaju svoj sastav tijekom procesa kristalizacije
6. Sastav taljevine je također podložan promjeni tijekom kristalizacije

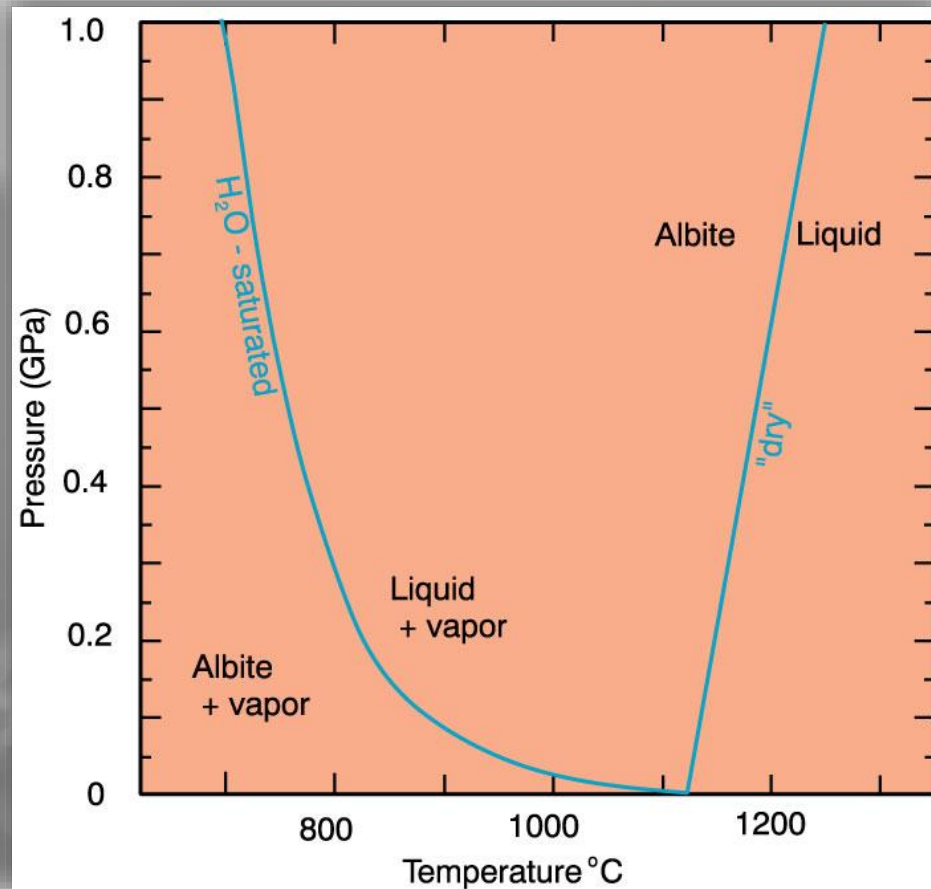


Slika II 34: Wright and Okamura, (1977) *USGS Prof. Paper, 1004*.

7. Tlak može utjecati na slijed minerala koji se formiraju
8. Vrsta i pristisak fluida također može utjecati na kristalizaciju

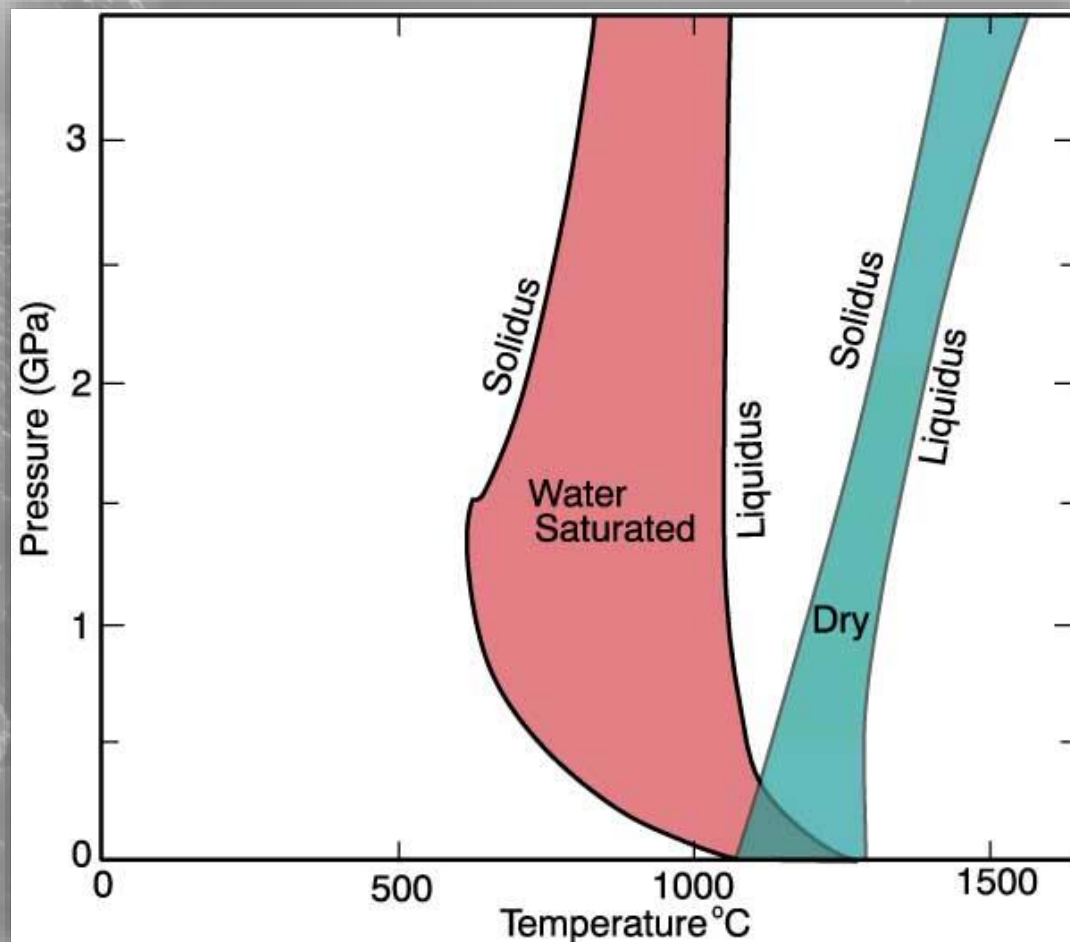


Slika II-35. Efekt litostatskog pritiska na likvidus i eutektički sastav u sustavu Di-An. 1 GPa podaci iz Presnall *et al.* (1978). Contr. Min. Pet., 66, 203-220.



Slika II-36. Efekt zasićenja H₂O na albitsu taljevinu prema eksperimentalnim podacima Burnham and Davis (1974). A J Sci 274, 902-940. Krivulja suhe taljevine je prema Boyd and England (1963). JGR 68, 311-323.

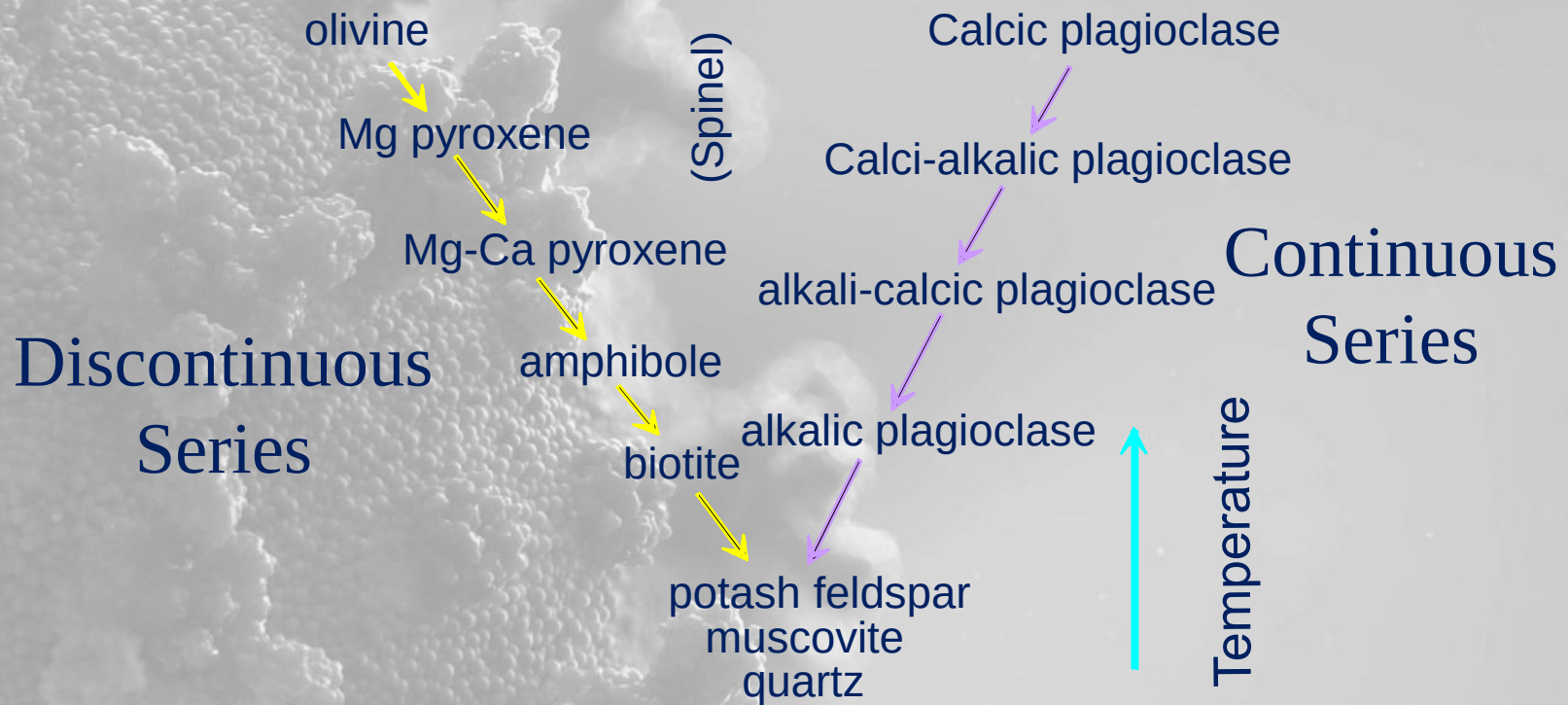
Efekt vode na kristalizaciju



Slika II-36b. Intervali taljenja suhog i vodom zasićenog gabra.
Prema Lambert and Wyllie (1972). J. Geol., 80, 693-708.

Kristalizacijska diferencijacija

Bowen-ova reakcijska serija (niz)



Gibbs-ovo pravilo faza

$$P + F = C + 2$$

F = # stupnjeva slobode (degrees of freedom)

Broj parametara koji mora biti specificiran i koji određuje sustav

P = # faza

Faze su mehanički odjeljivi konstituenti sustava

C = minimalni # komponenata (kemijskih konstituenata koji moraju biti prisutni za definiranje svih faza)

$2 = 2$ parametra

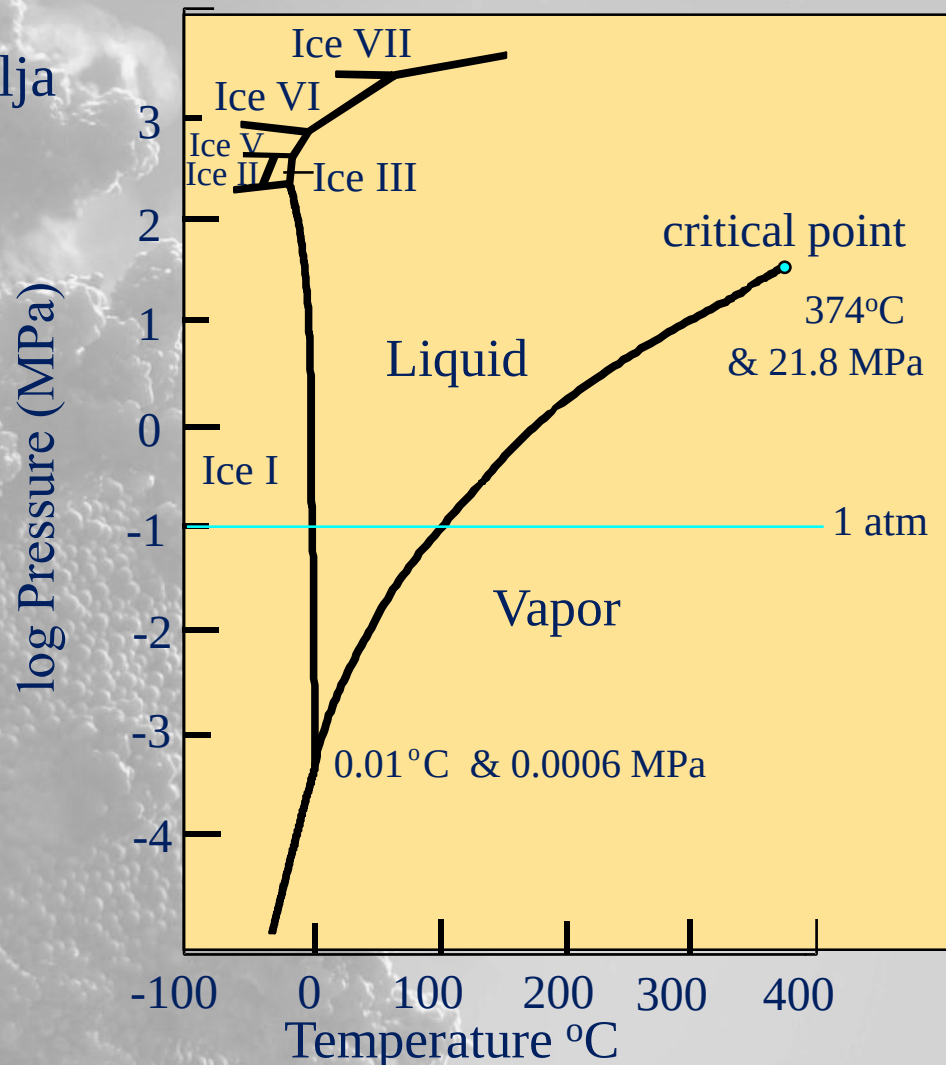
Obično = temperatura i tlak za potrebe geologa

1 – komponentni sustav



Invarijantna točka
Univarijantna krivulja
Divarijantno polje

$$P + F = C + 2$$



Prema: Bridgman
(1911, *Proc. Amer. Acad. Arts and Sci.*, 5, 441-513; 1936, *J. Chem. Phys.*, 3, 597-605; 1937, *J. Chem. Phys.*, 5, 964-966.

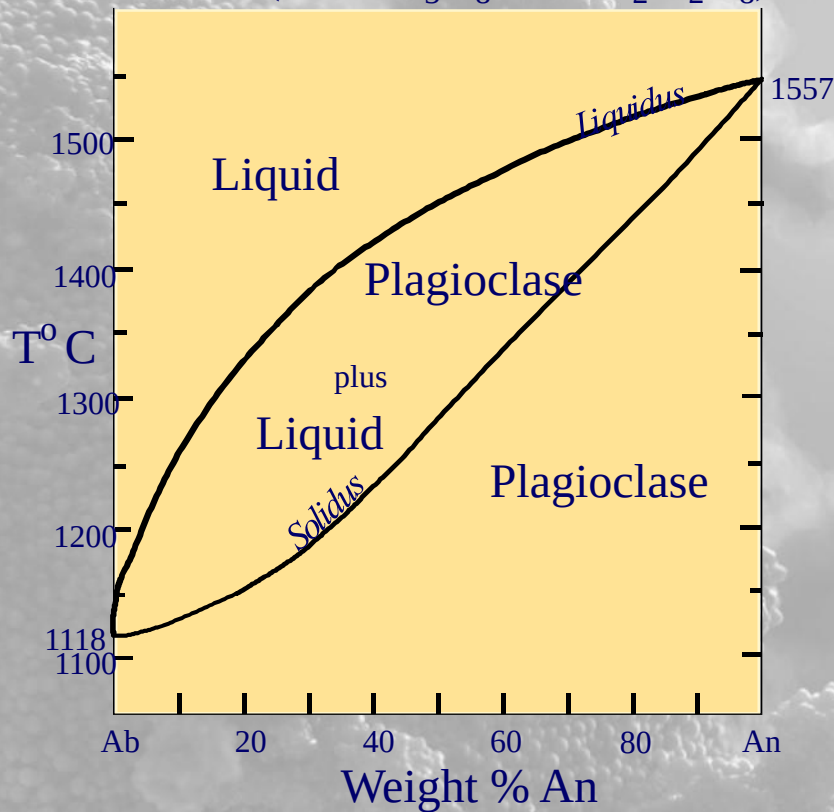
Osnovni pojmovi za daljnja razmatranja:

- **Eutektik** - zajednička točka kristalizacije, najniža T, kristalizacija do posljednje kapi taljevine
- **Likvidus** - linija ili krivulja na faznom dijagramu koja predstavlja početak kristalizacije određenog minerala (faze)
- **Solidus** - linija ili krivulja na faznom dijagramu koja pokazuje najnižu temperaturu na kojoj je taljevina stabilna za dani kemijski sastav
- **Peritektik** - točka na faznom dijagramu koja ukazuje na inkongruentno ponašanje taljevine (krutina + taljevina drugačijeg sastava, postoji međuspoj)
- **Kotektička linija** - linija presjeka dvije likvidus površine na ternarnom faznom dijagramu

2 – komponentni sustav

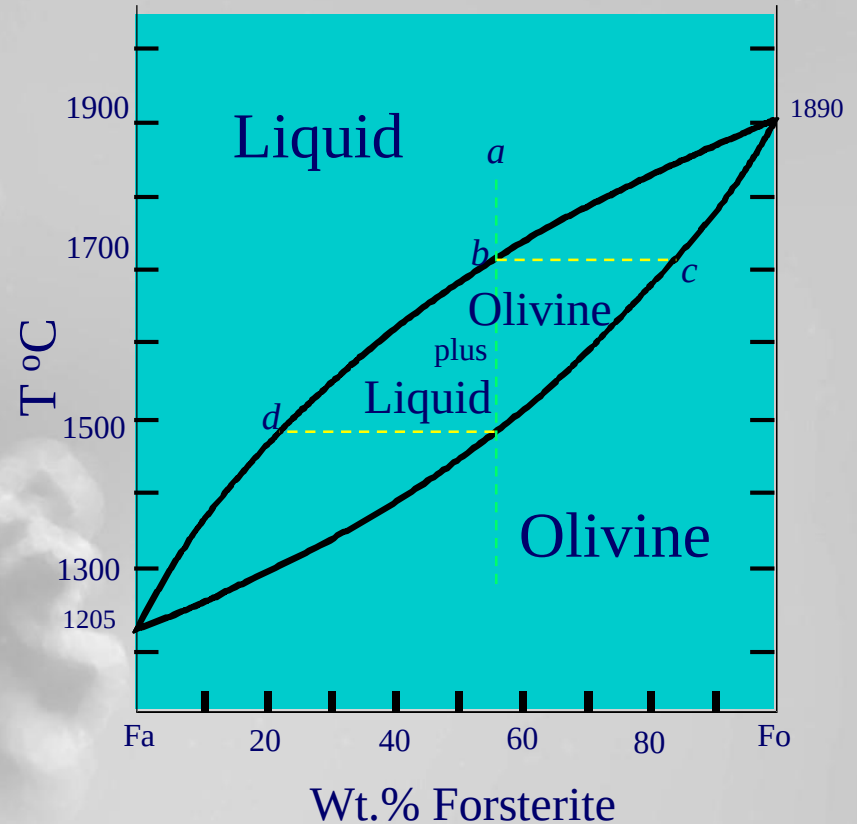
A. Sustav minerala mješanaca (“cigara”) Complete Solid Solution

1. Plagioklas Ab-An ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ - $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$)



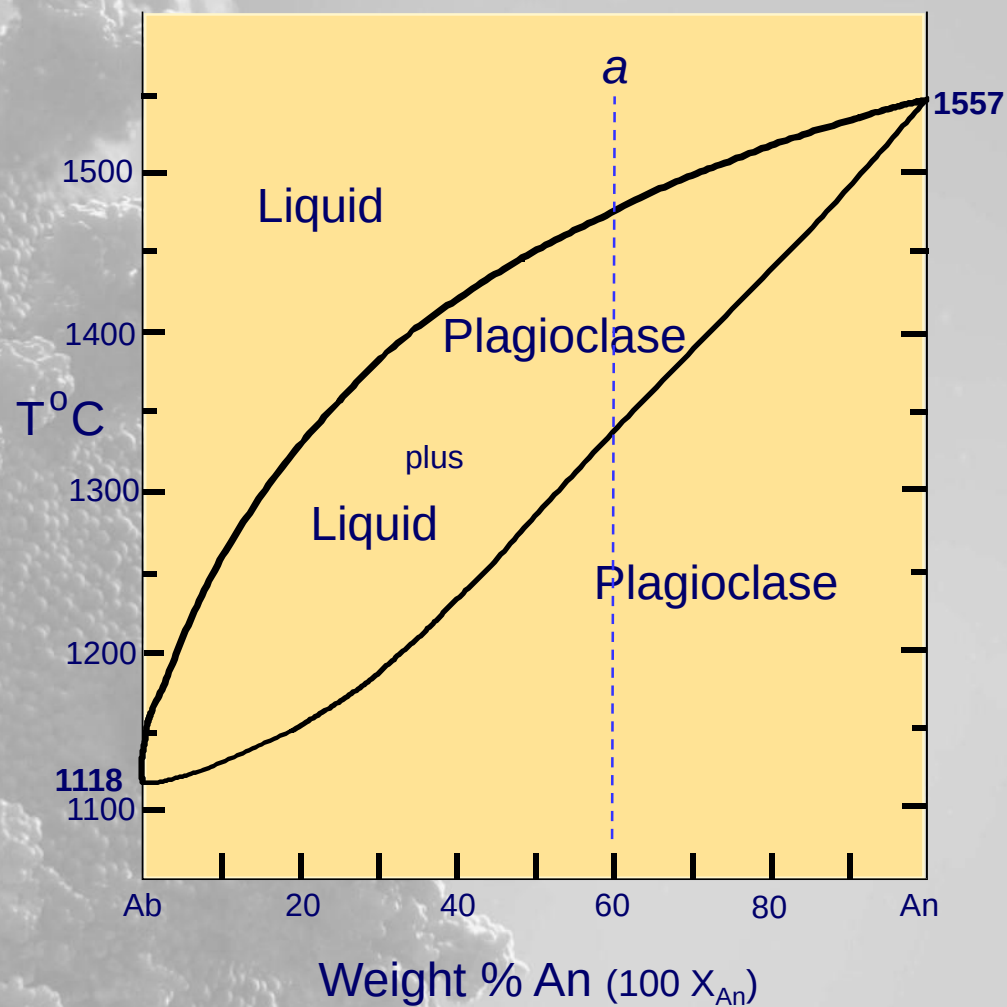
Izobarni T-X fazni dijagram pri atmosferskom tlaku (prema Bowen 1913, Amer. J. Sci., 35, 577-599).

2. Olivin Fo - Fa (Mg_2SiO_4 - Fe_2SiO_4)



Izobarni T-X fazni dijagram pri atmosferskom tlaku (Prema Bowen and Shairer (1932), Amer. J. Sci. 5th Ser., 24, 177-213).

Sastav taljevine a = An₆₀

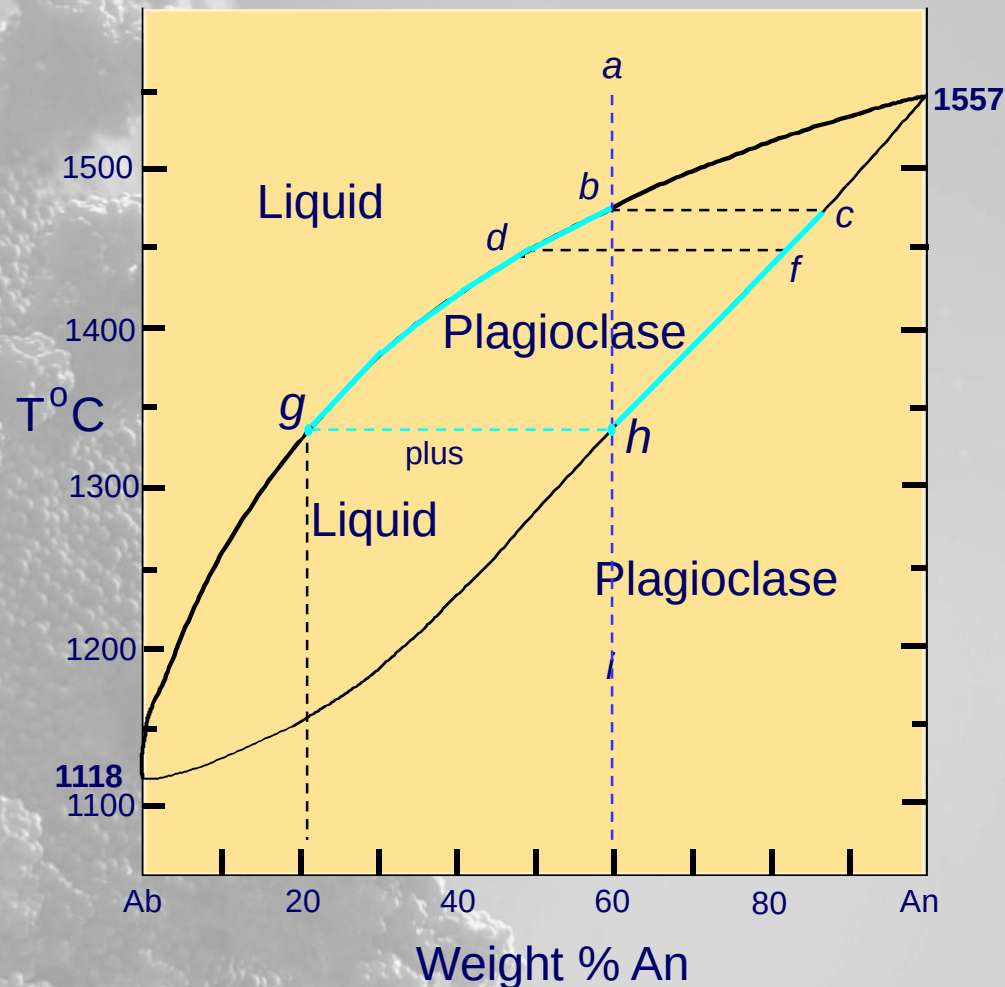
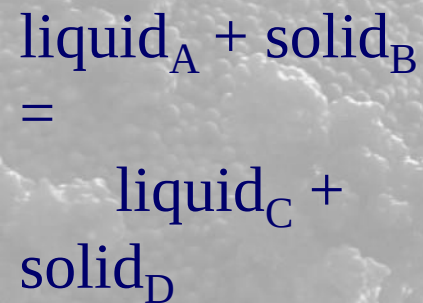


Na 1450°C, taljevina b (d, g) i plagioklas c (f, h) koegzistiraju u ravnoteži

Kada je $X_{\text{plag}} \rightarrow h$, tada $X_{\text{plag}} = X_{\text{bulk}}$ i količina taljevine $\rightarrow 0$

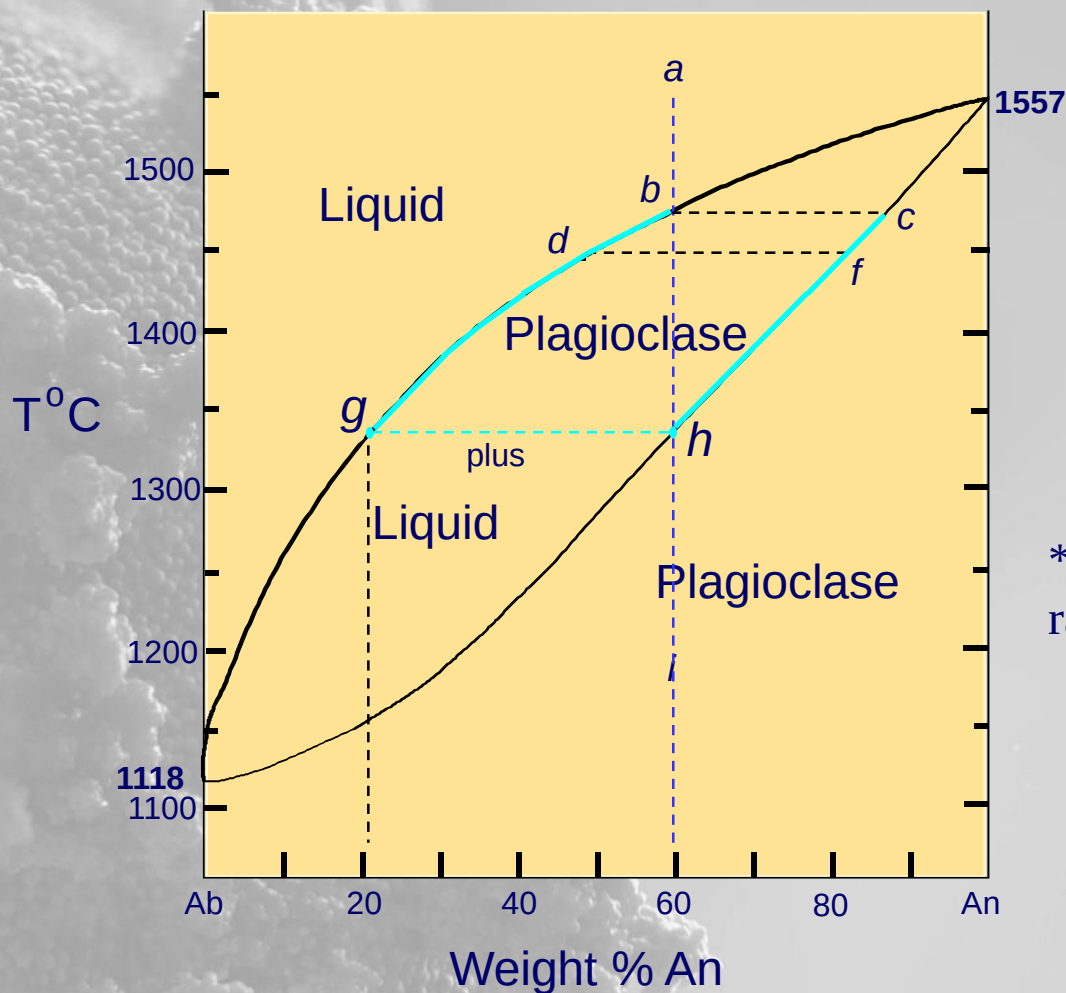
Zbog toga g je sastav zadnje taljevine koja kristalizira pri 1340°C za ukupan sastav $X = 0.60$

Kontinuirana
reakcija:



Bitno:

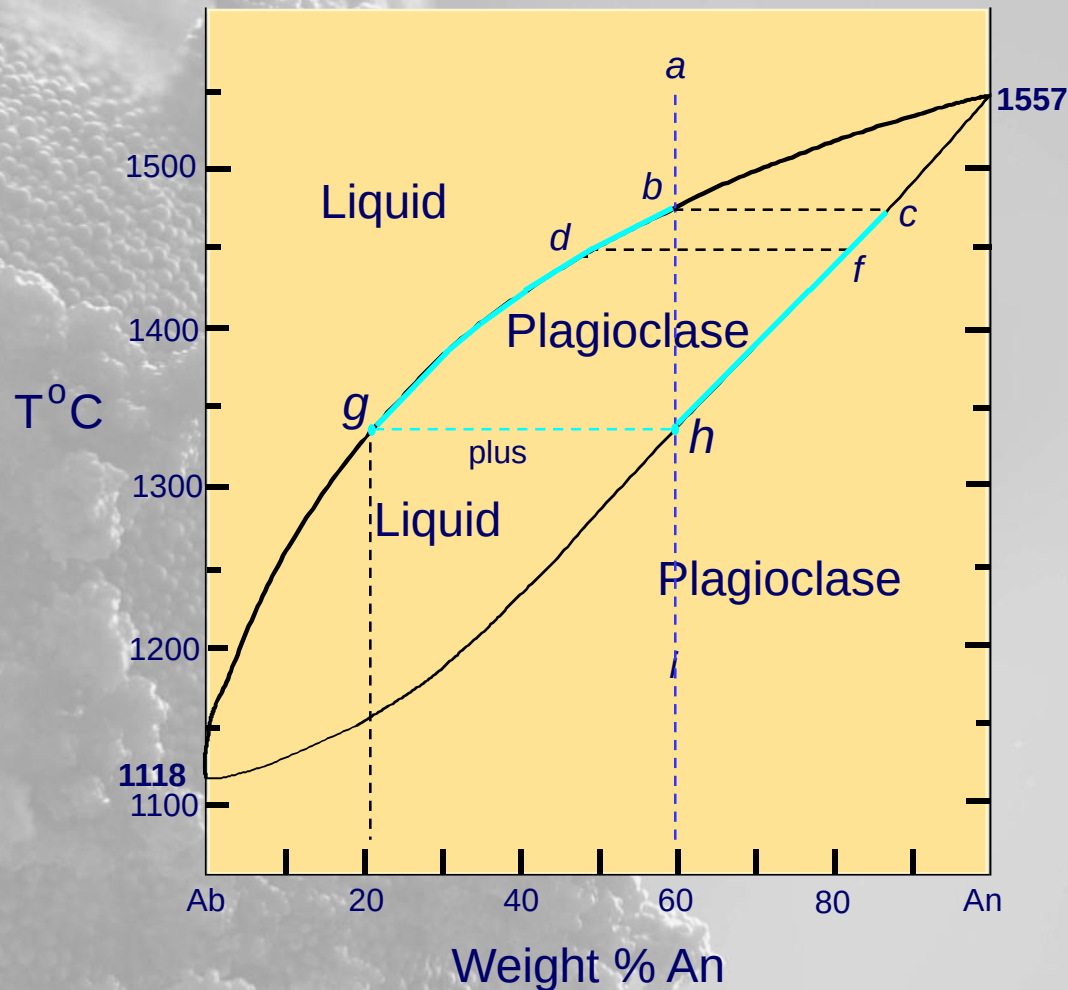
1. Taljevina kristalizira u T rasponu od 135°C *
2. Sastav taljevine se mjenja od b do g
3. Sastav krutine se mjenja od c do h



* Stvarni temperaturni raspon ovisi o sastavu

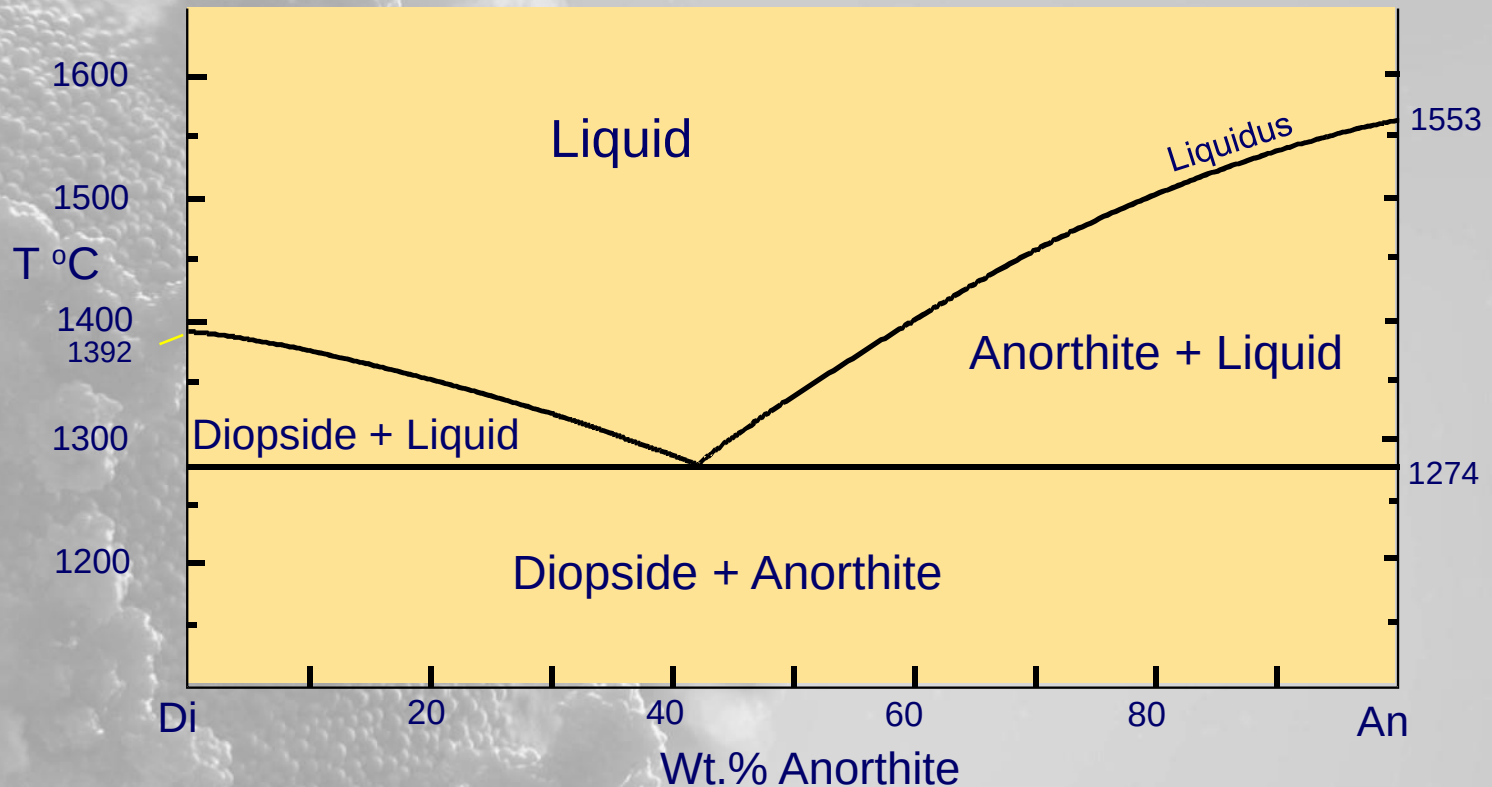
Ravnatežno taljenje idu u točno suprotnom smjeru

- Zagrijavanjem An_{60} prva taljevina g pri An_{20} i $1340^{\circ}C$
- Daljnjim zagrijavanjem: taljevina i plagioklas mijenjaju X
- Zadnji plagioklas koji se tali je c (An_{87}) pri $1475^{\circ}C$



2-komponentni sustav s eutektikom

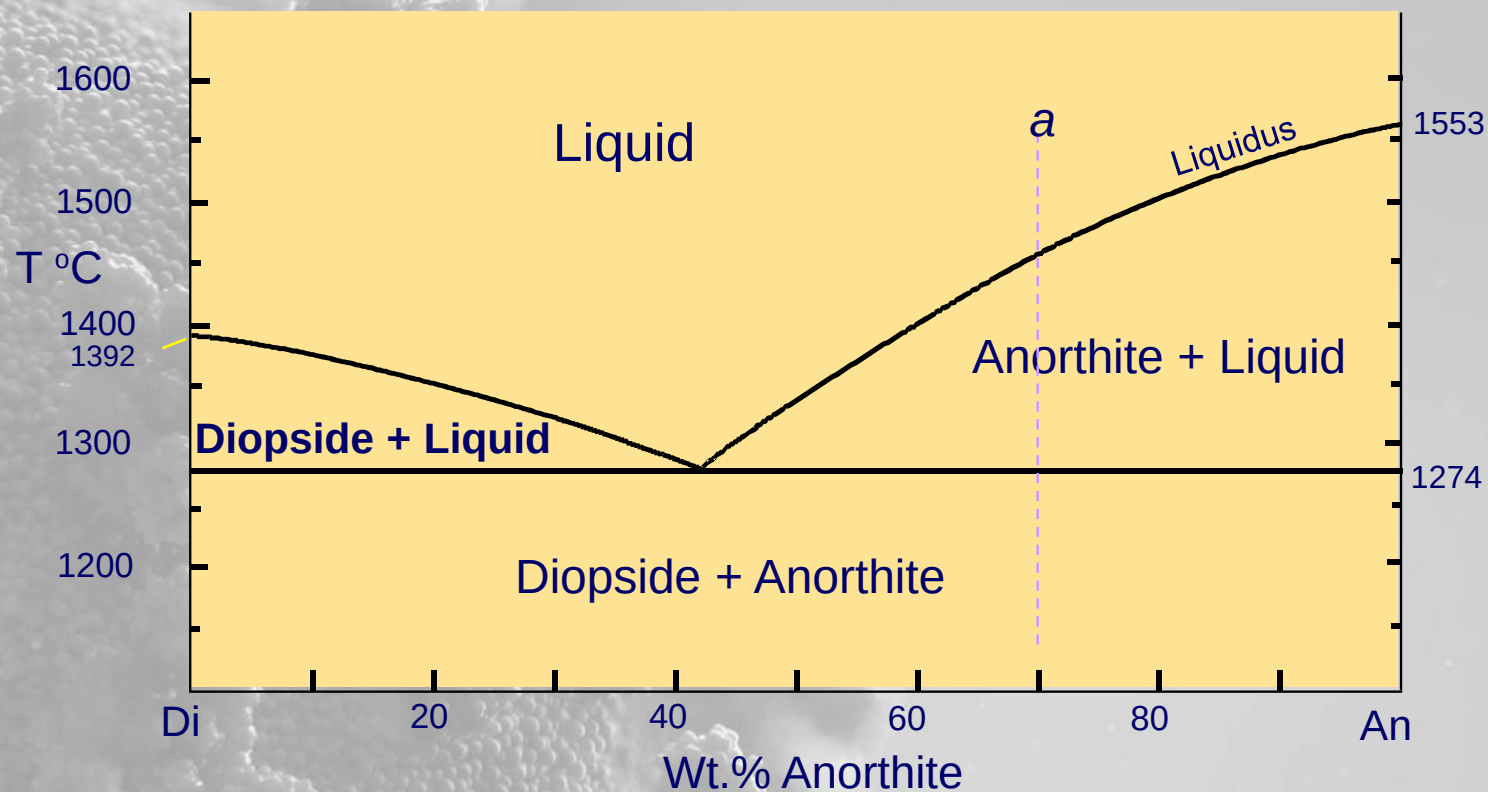
B. Diopsid - Anortit



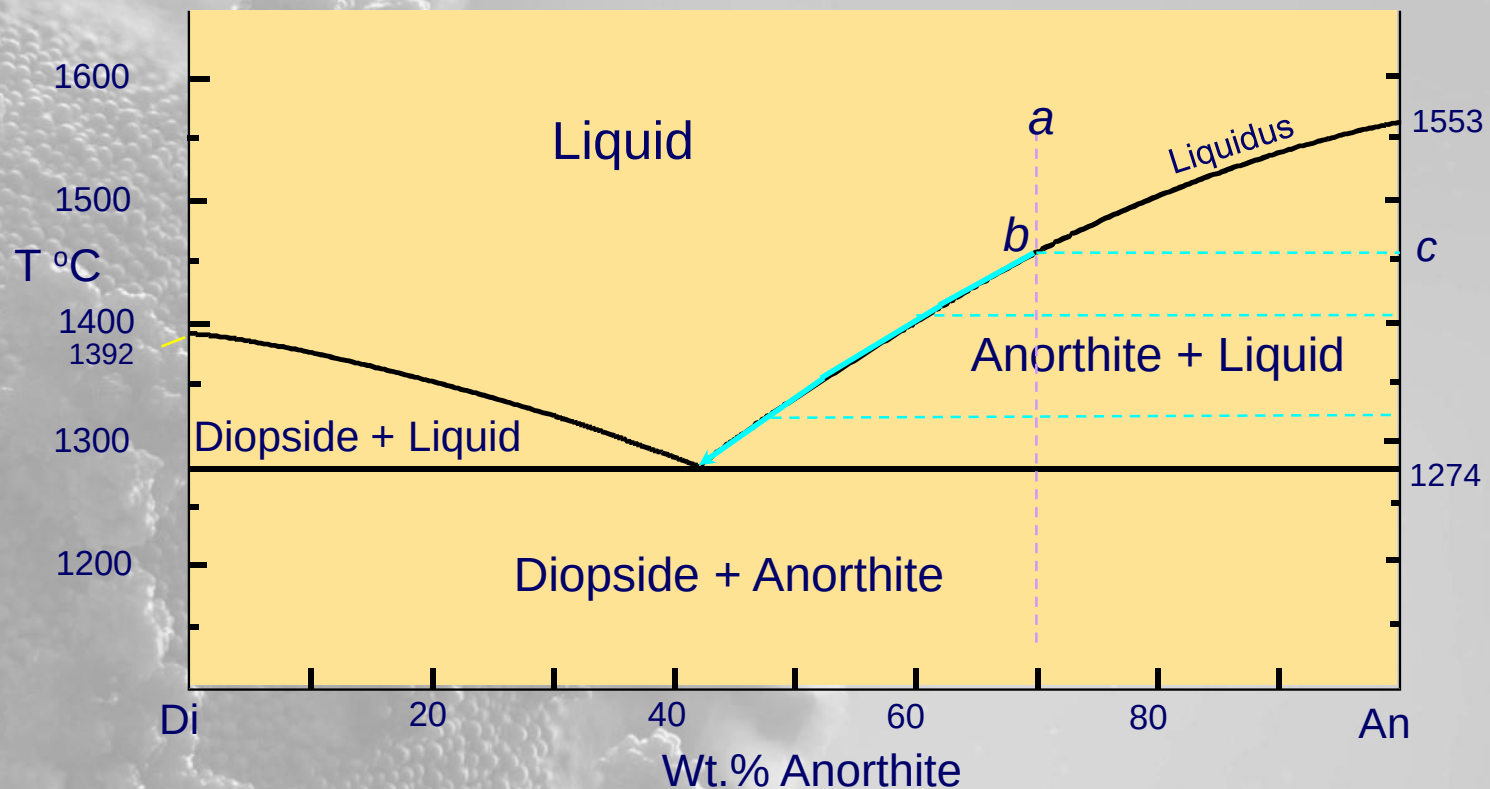
Izobarni T-X fazni dijagram pri atmosferskom tlaku (Prema Bowen (1915), *Amer. J. Sci.* 40, 161-185).

Hlađenje sastava a:

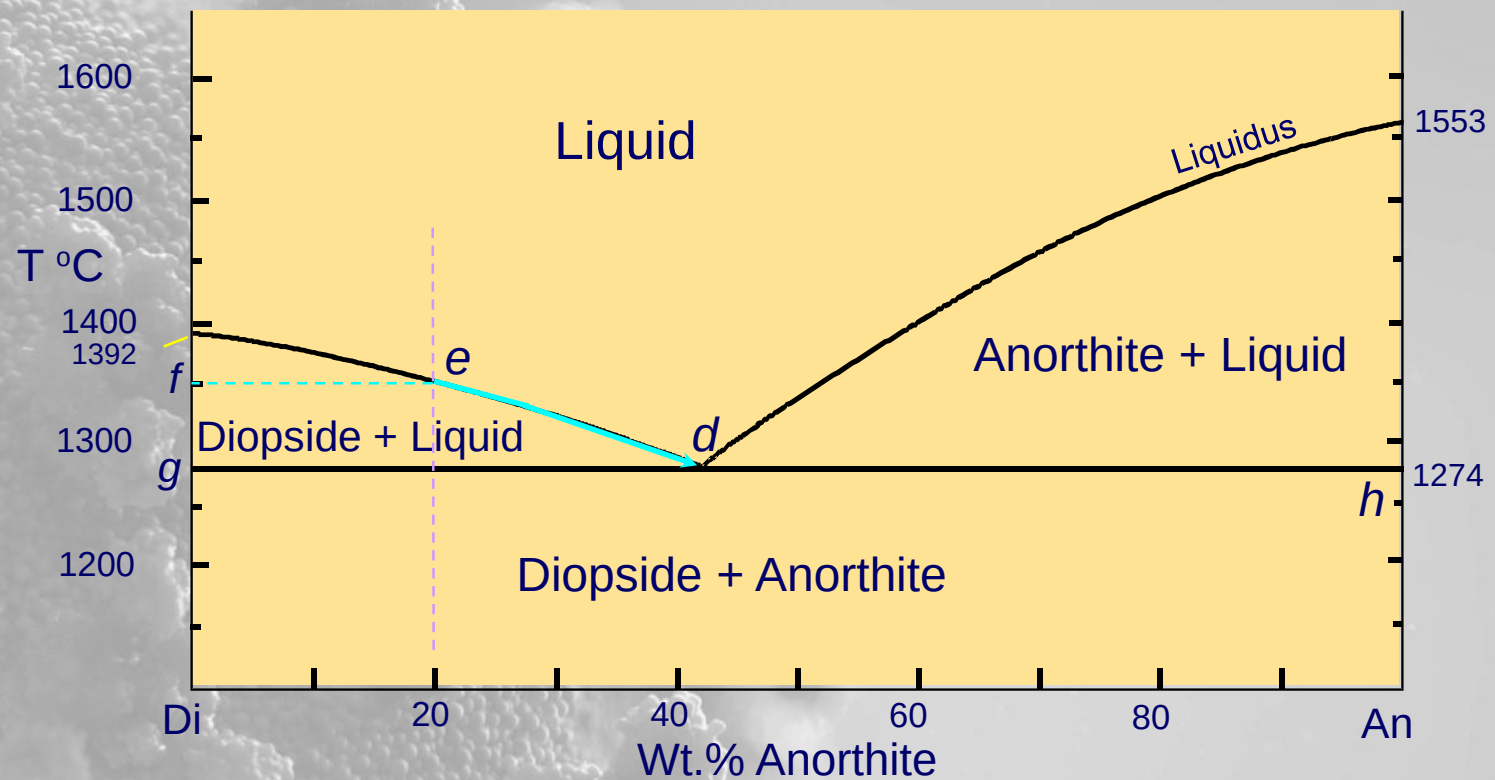
Ukupni sastav = An_{70}



- Kontinuirano hlađenje kako se X_{liq} mijenja duž likvidusa
- Kontinuirana reakcija: $\text{liq}_A \rightarrow \text{anortit} + \text{liq}_B$

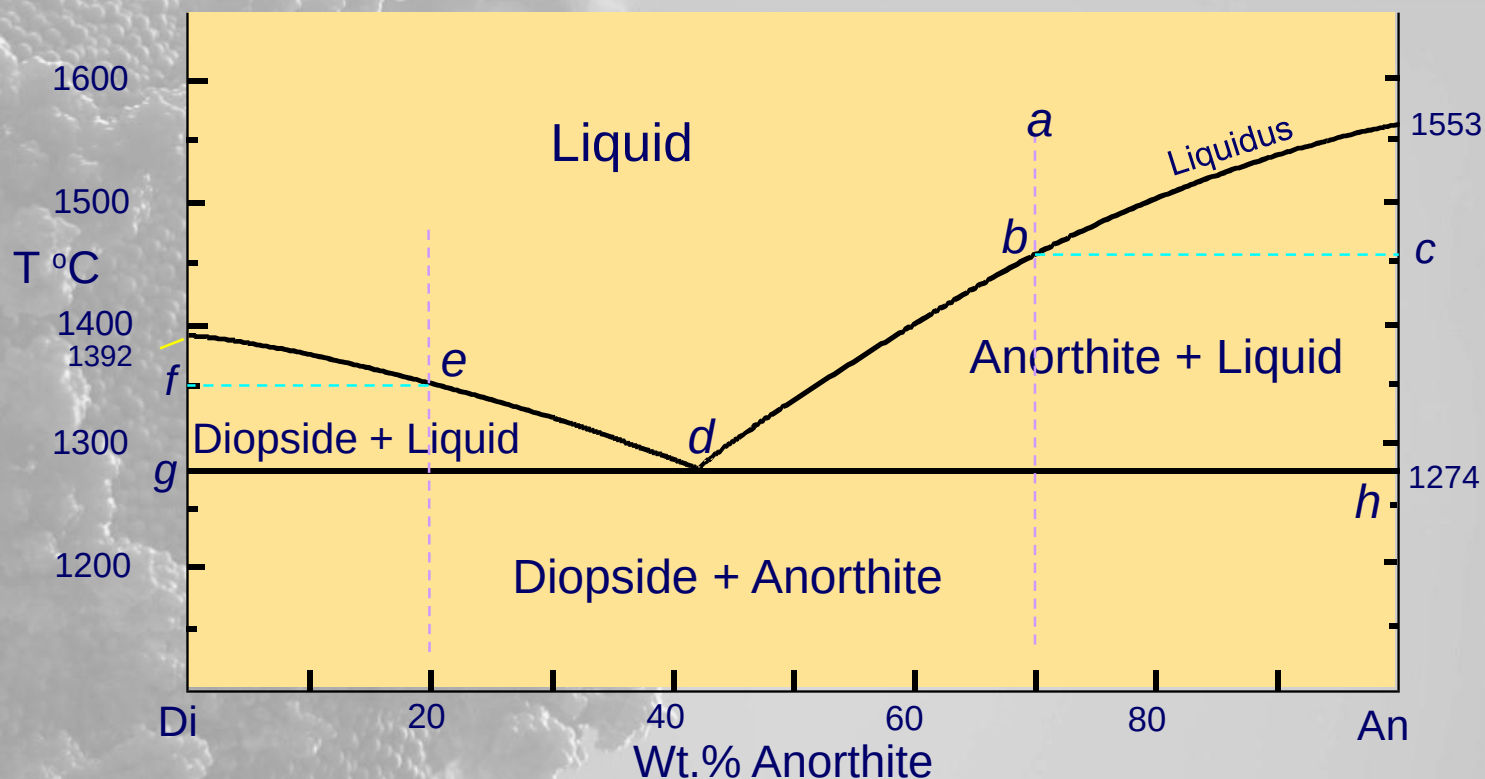


S lijeve strane eutektika slična situacija

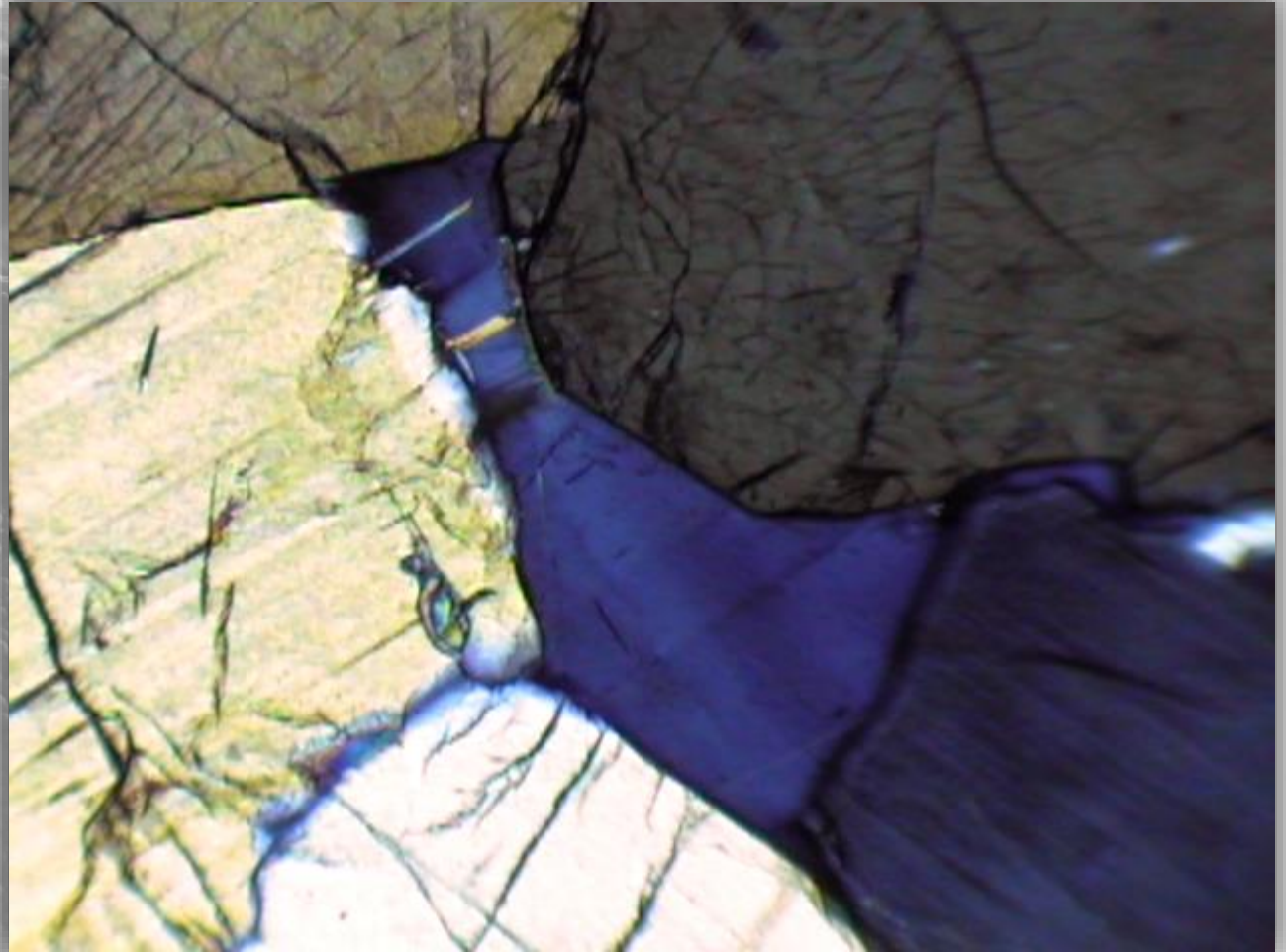


Bitno:

1. Taljevina kristalizira duž T raspona $\sim 280^\circ\text{C}$
2. Slijed minerala nastaje duž tog intervala
 - Broj minerala se povećava kako pada T
3. Mineral koji će kristalizirati ovisi o T
 - Slijed se mijenja s ukupnim sastavom



Augit nastaje prije plagioklasa

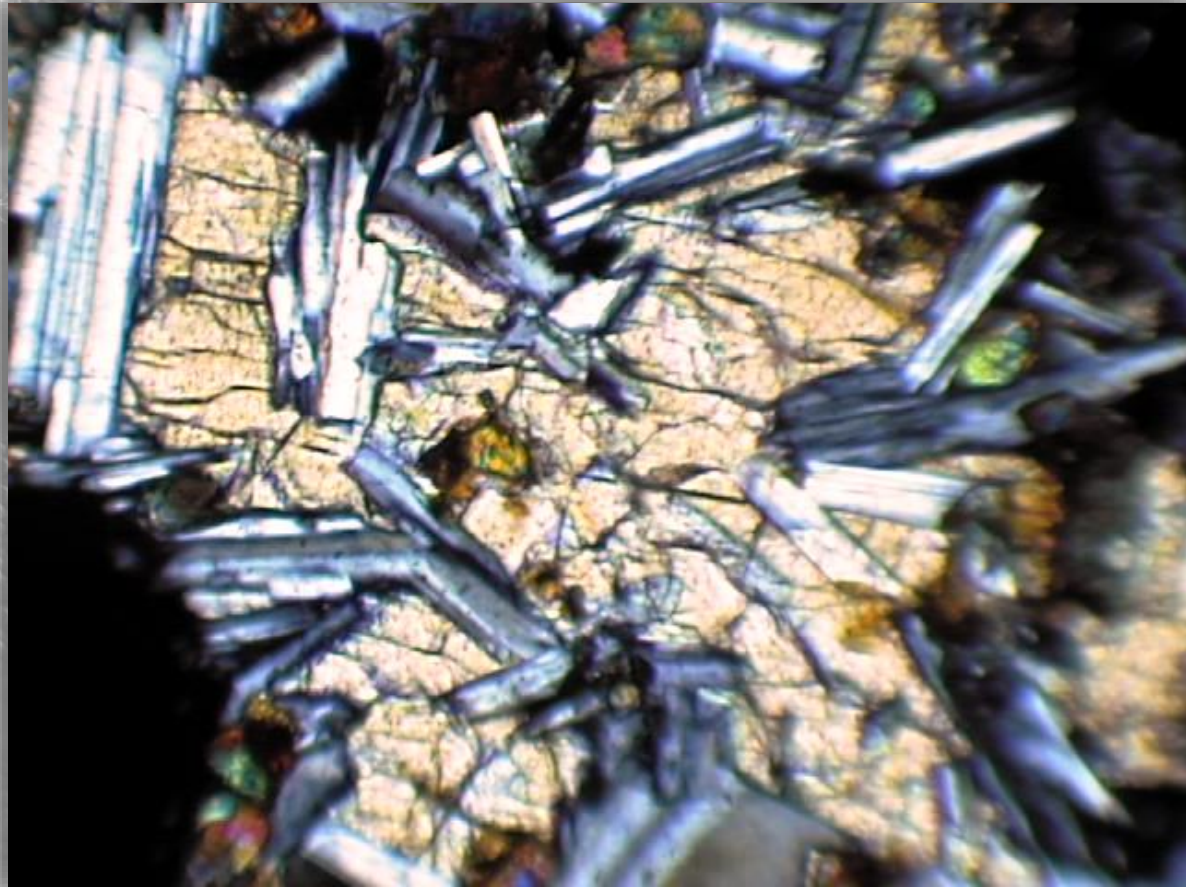


Gabro (Stillwater
Complex, Montana)

Nastaje s lijeve strane eutektika

Plagioklas nastaje prije augita

Ofitska struktura

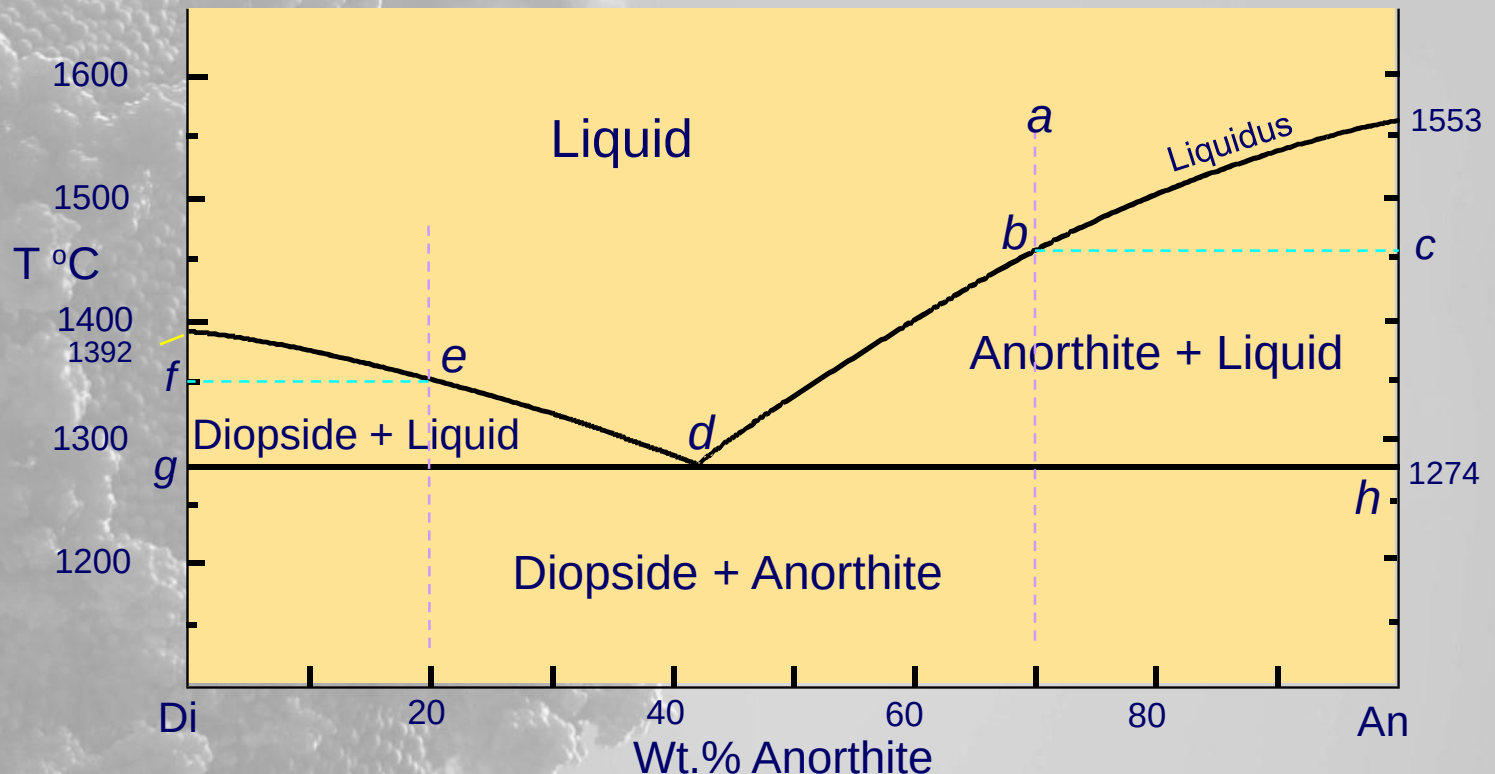


Dijabaz

Nastaje na desnoj strani od eutektika

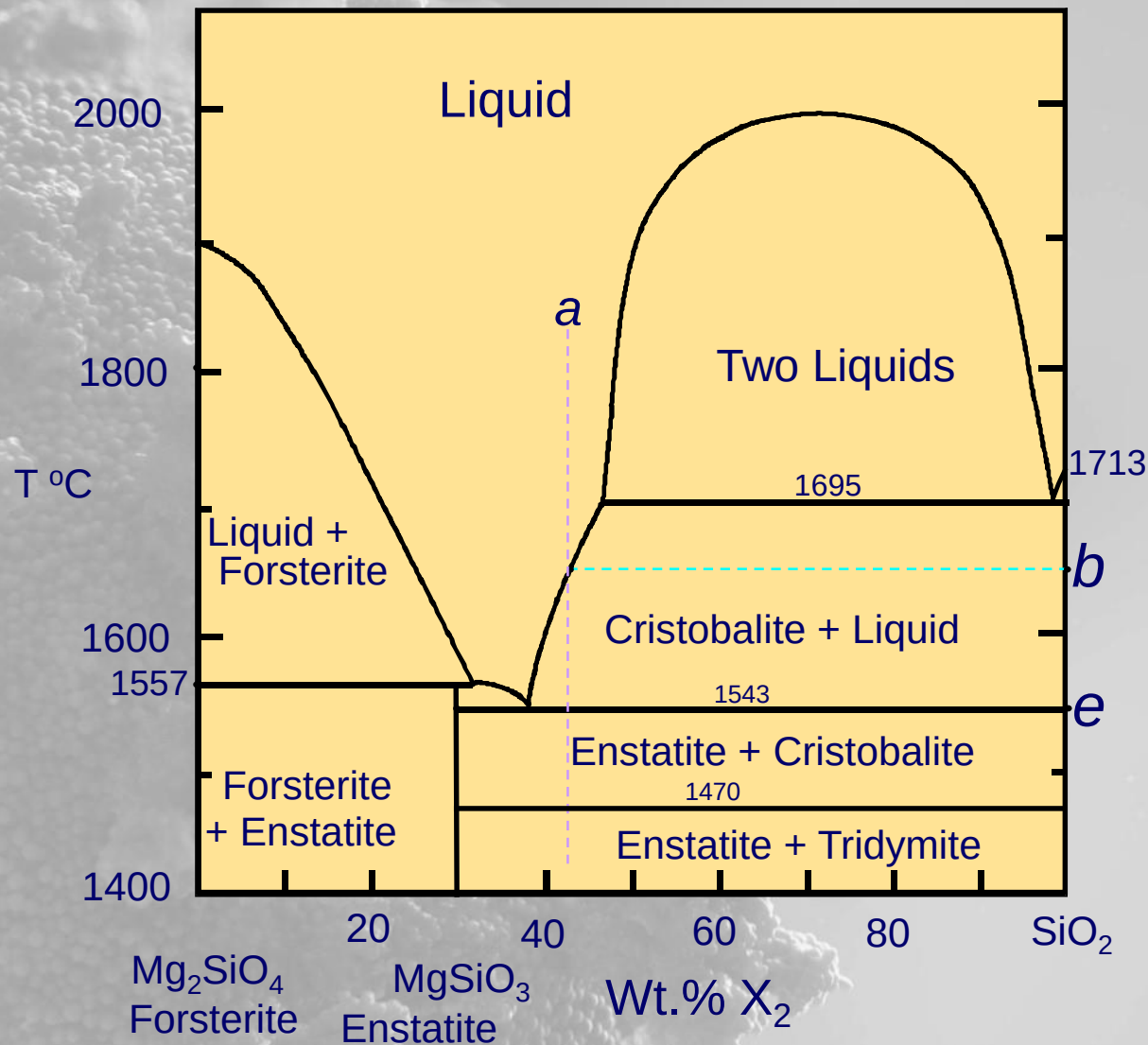
Bitno:

- Zadnja taljevina koja kristalizira u binarnom eutektiku je sastava koji ima eutektik
- Ravnotežno taljenje je suprotan proces ravnotežnoj kristalizaciji
- Zbog toga prva taljevina bilo kojeg sastava smjese Di i An mora također biti eutektičkog sastava



C. Binarni sustav s peritektikom

Tri faze enstatit = forsterit + SiO_2



Ukupan sastav a (42 %)

Pri a

Na 1625°C

Kristobalit T= b

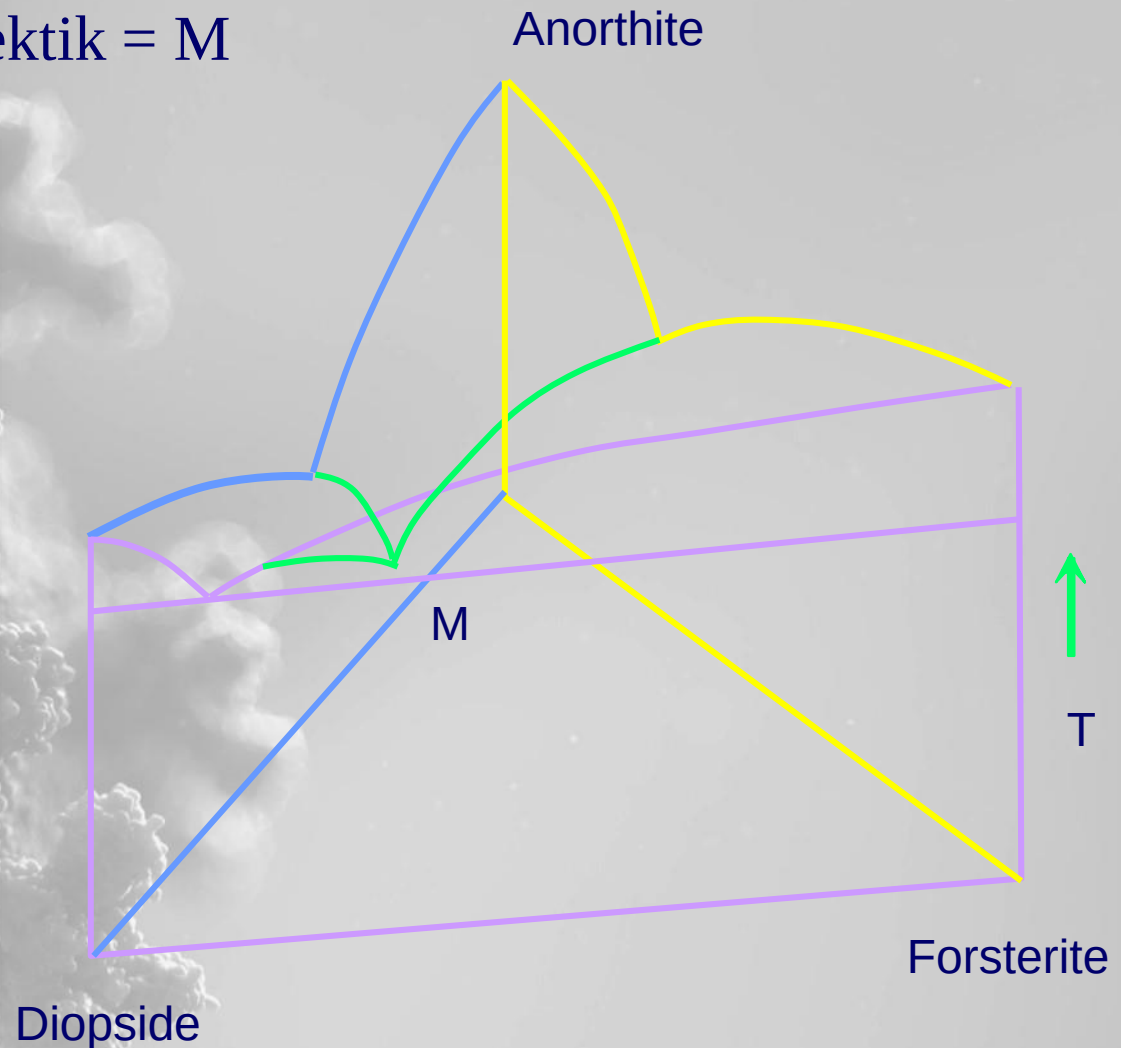
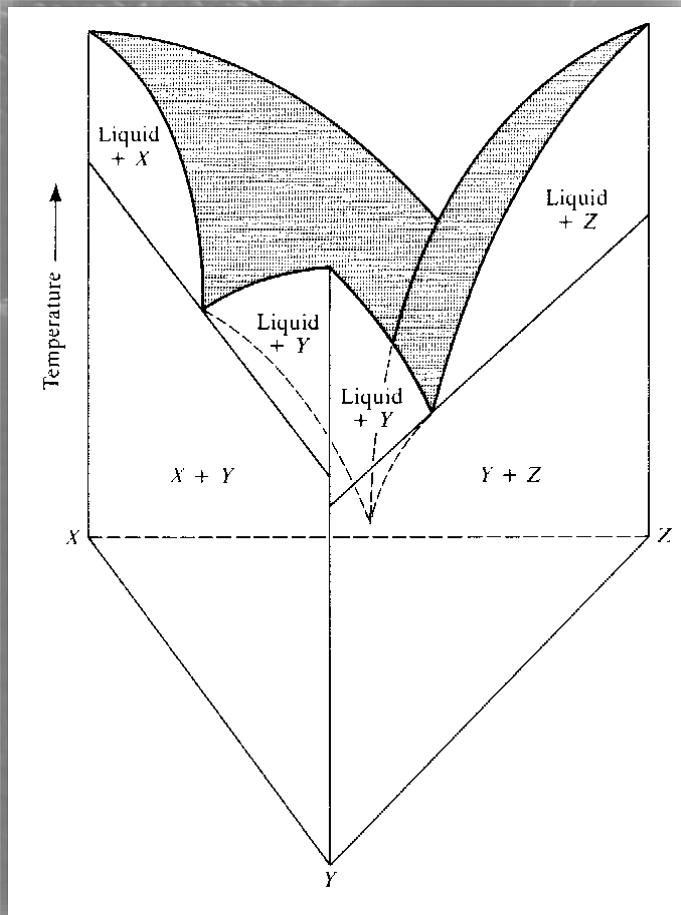
Slika III-12. Izobarni T-X fazni dijagram u sustavu Fo- SiO_2 pri 0.1 MPa. Prema Bowen and Anderson (1914) and Grieg (1927). Amer. J. Sci.

Ternarni sustavi Di - An - Fo

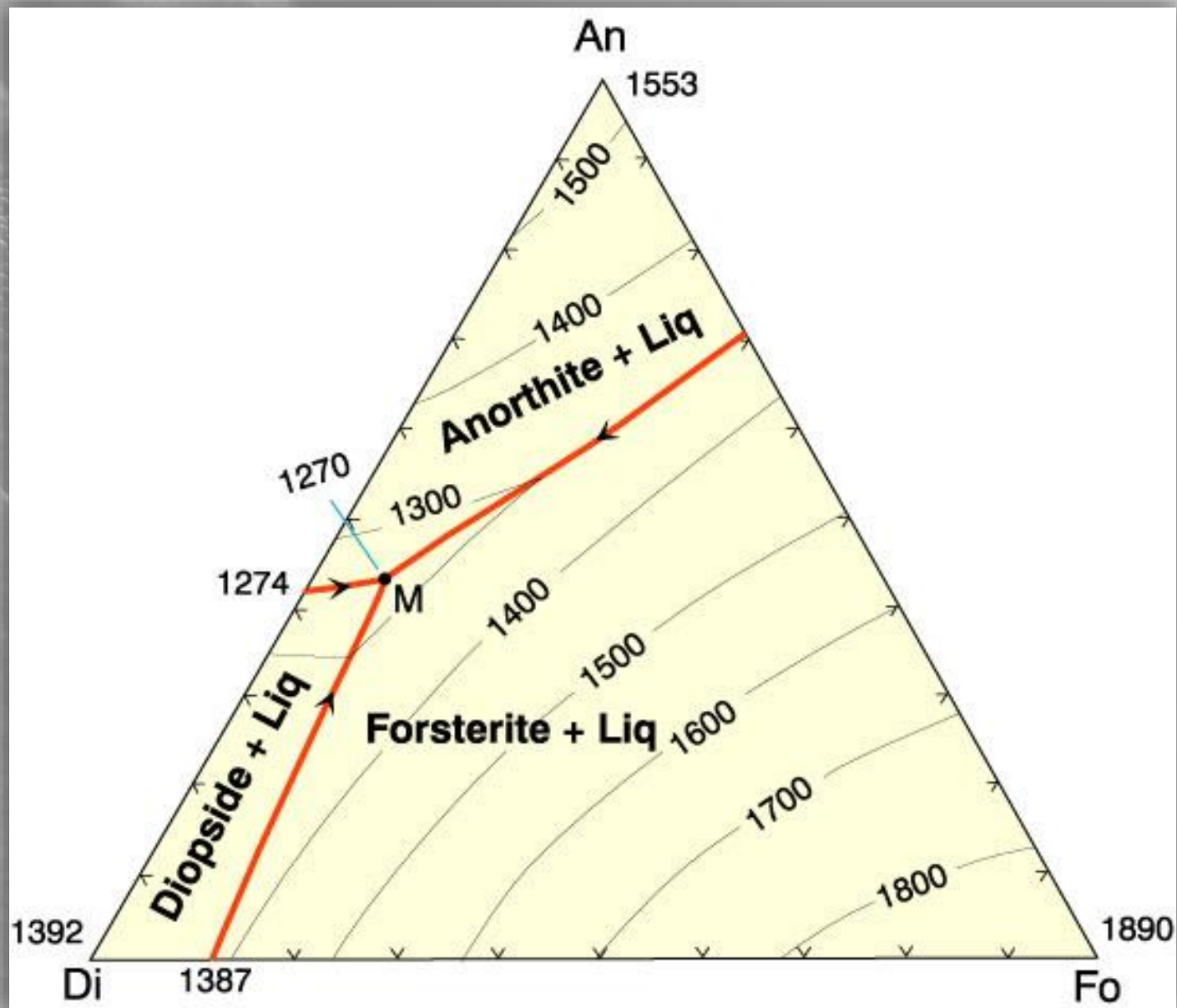
3 binarna eutektika

Nema čvrstih otopina

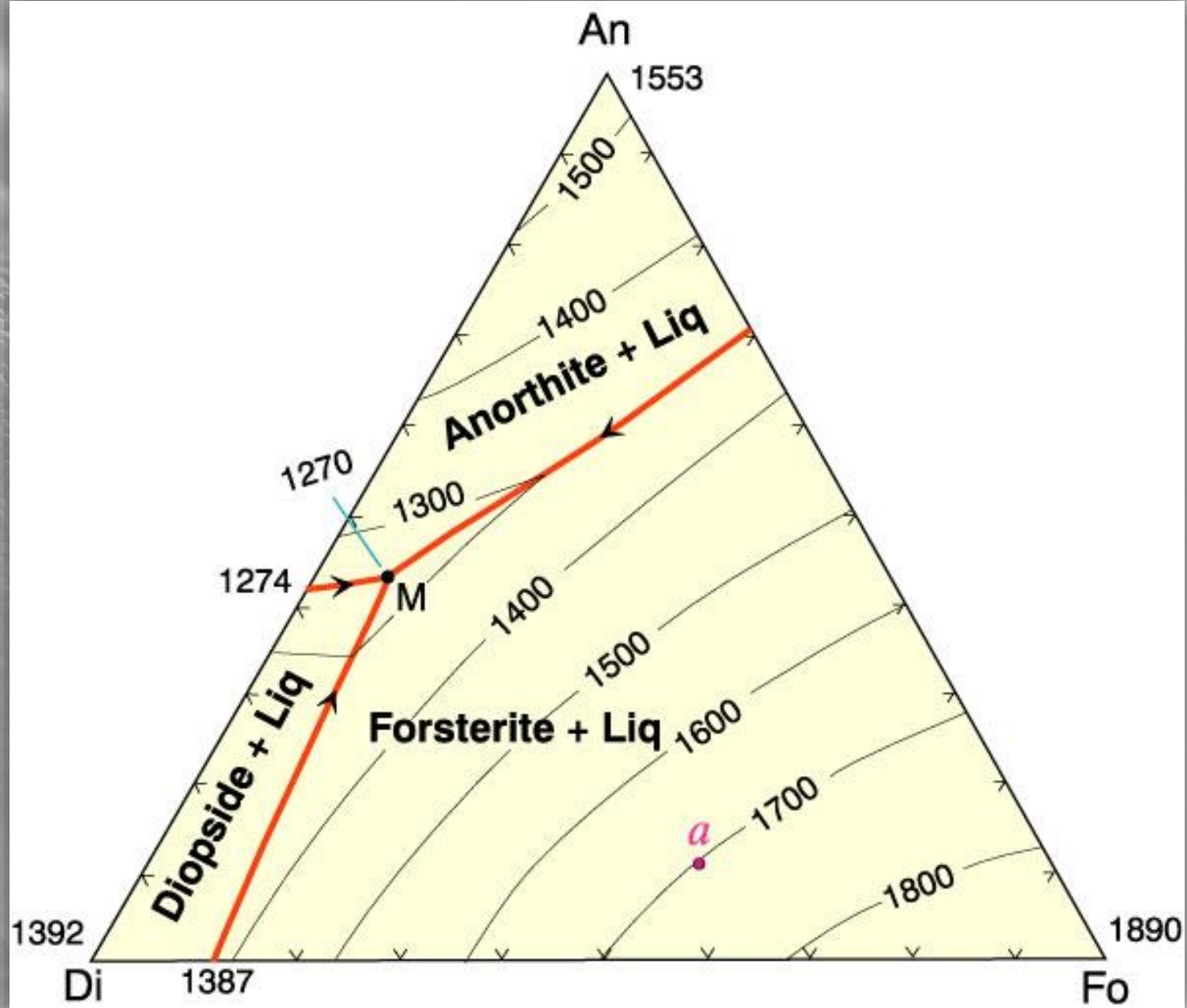
Ternarni eutektik = M

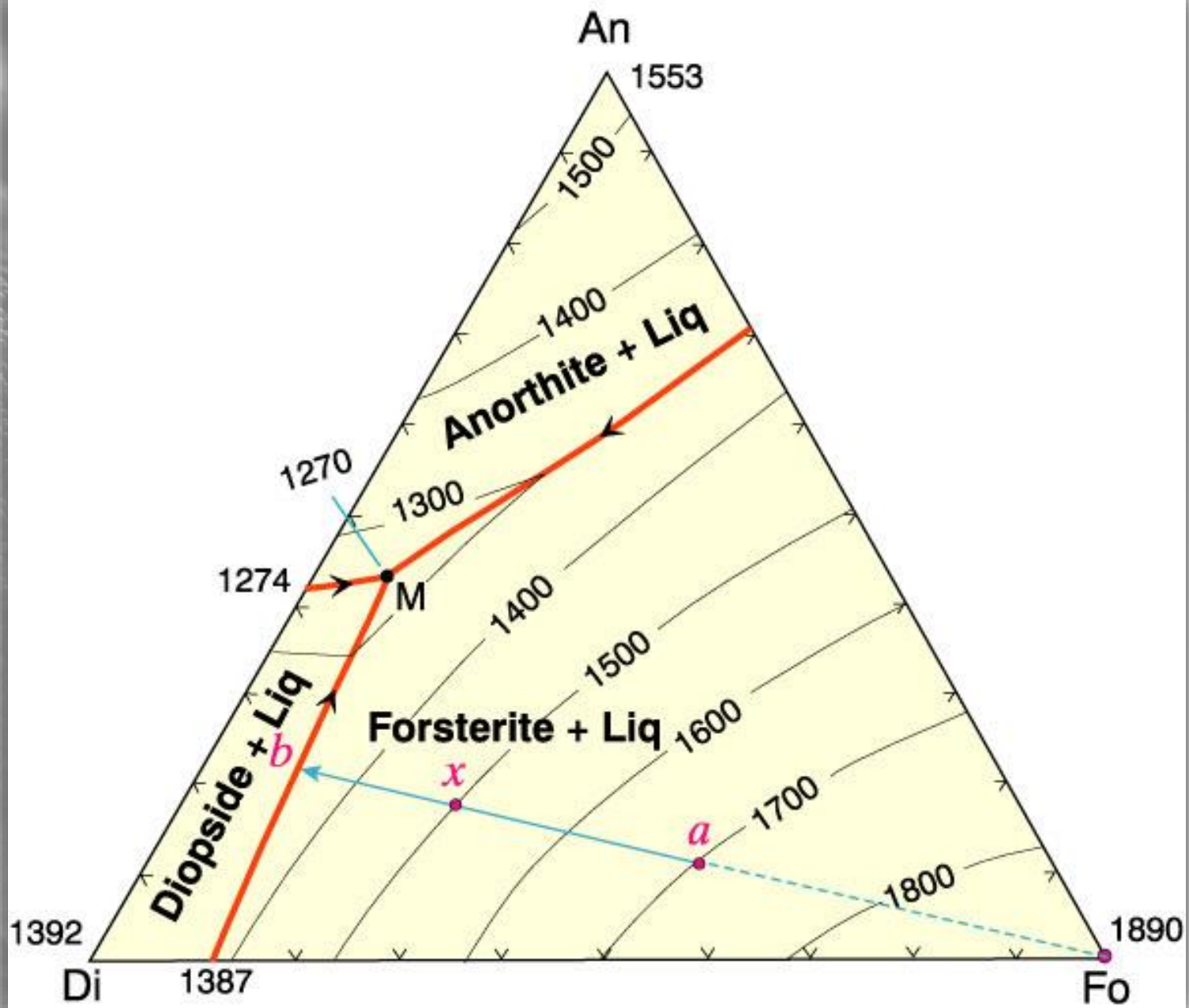


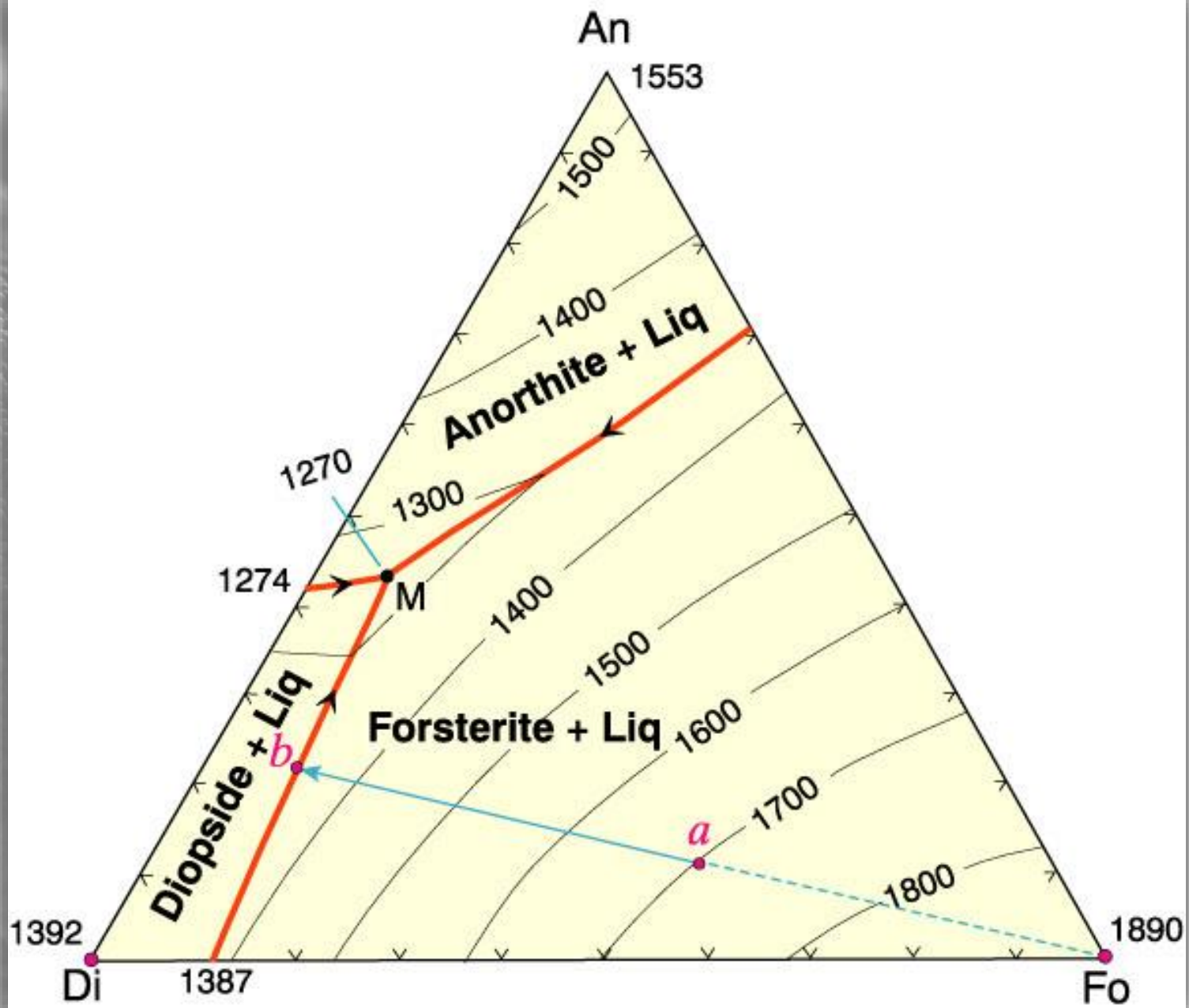
T - X projekcija Di - An - Fo



Slika II-57. Izobarni dijagram pokazuje likvidusne temperature u sustavu Di-An-Fo pri atmosferskom tlaku (0.1 MPa). Prema Bowen (1915), A. J. Sci., and Morse (1994), Basalts and Phase Diagrams. Krieger Publishers.



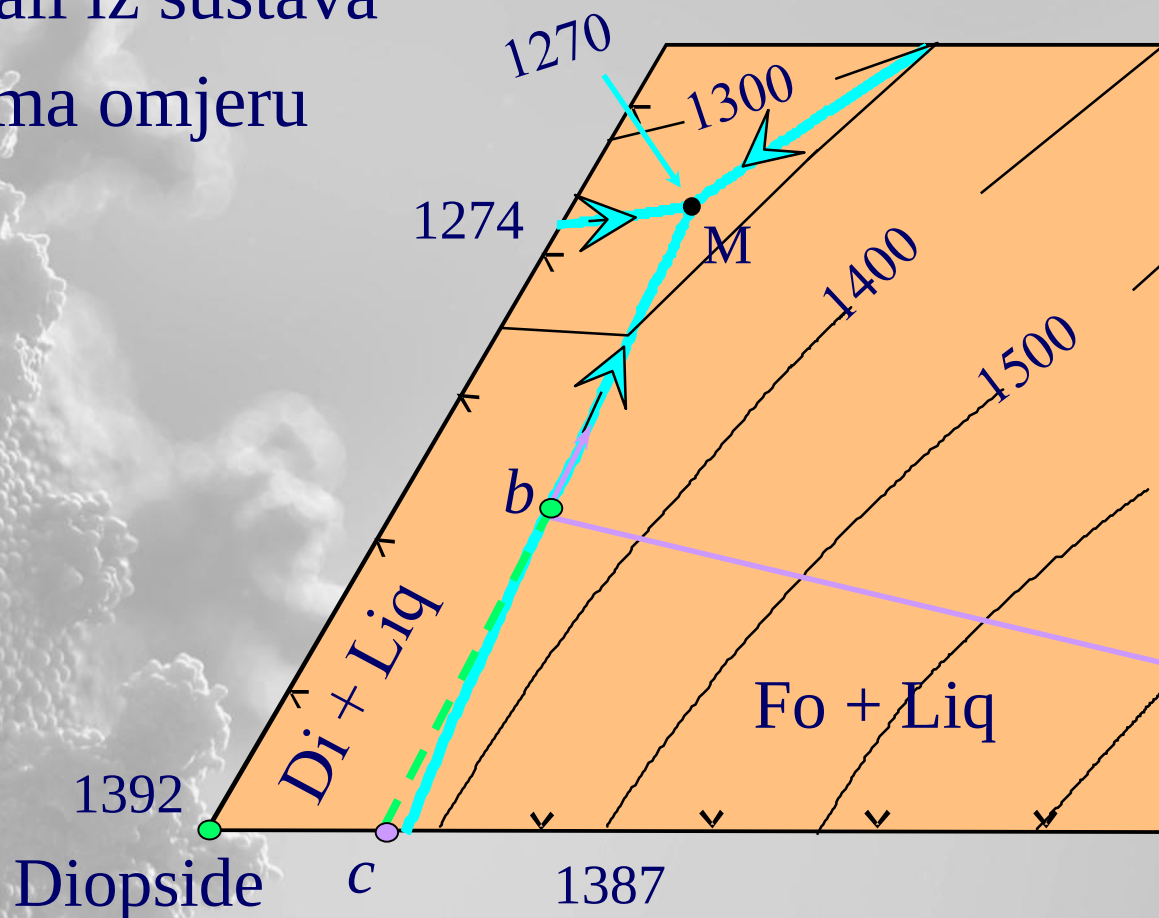


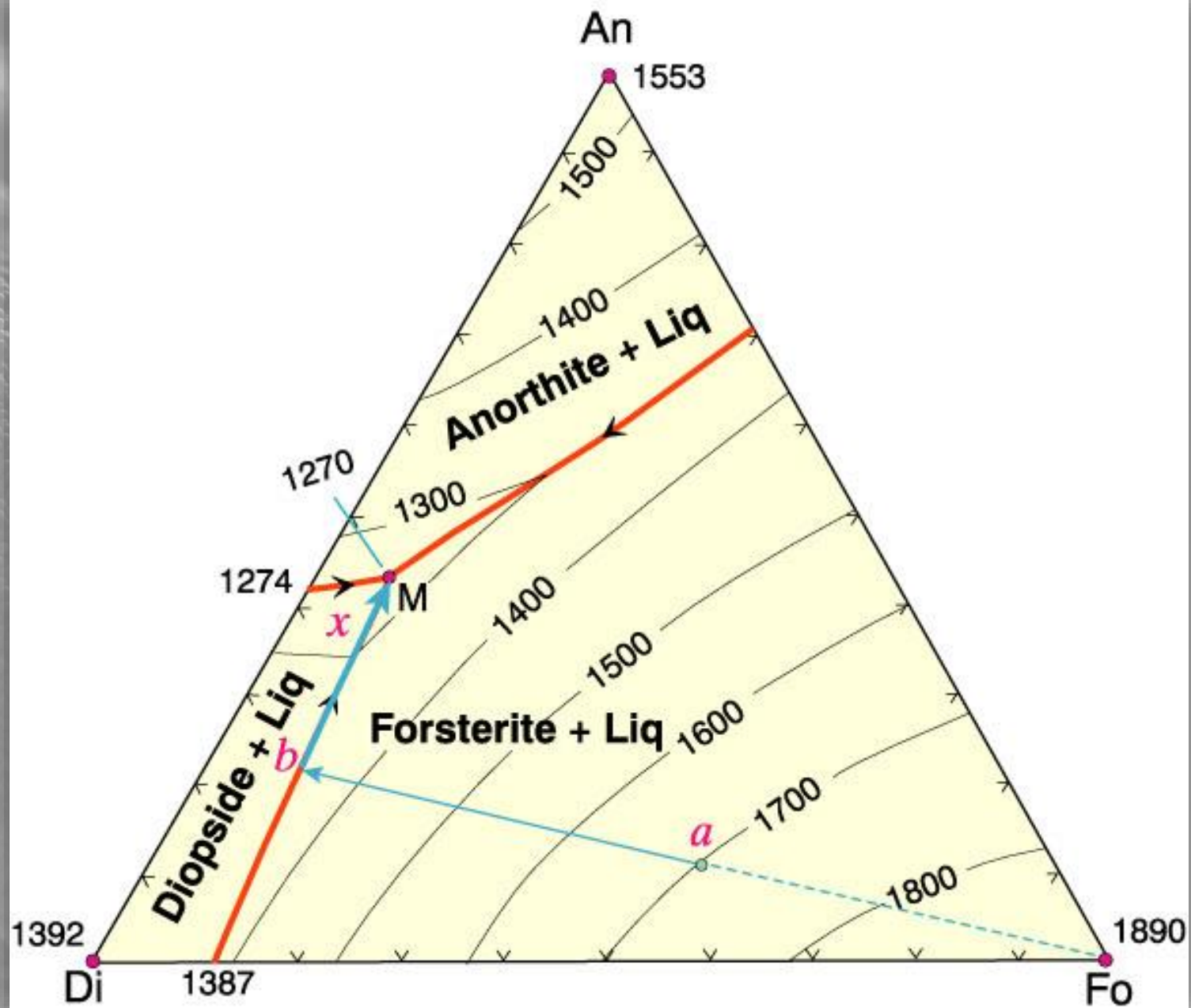


- Nova kontinuirana reakcija kako taljevina slijedi kotektičku liniju:



- Izdvajaju se kristali iz sustava
- Di/Fo odnos prema omjeru





Gravitacijska diferencijacija Stoke-sov zakon

$$V = \frac{2gr^2(r_s - r_l)}{9h}$$

V = brzina tonjenja (cm/sec)

g = ubrzanje uslijed gravitacije (980 cm/sec²)

r = *radius* sferične čestice (cm)

r_s = gustoća krute sferične čestice (g/cm³)

r_l = gustoća taljevine (g/cm³)

h = viskozitet taljevine (1 c/cm sec = 1 poise)

Stokes-ov zakon je jako pojednostavljen

1. Kristali nisu sferični
2. Samo se bazaltne magme blizu T likvidusa ponašaju kao fluidi po Newton-ovom zakonu

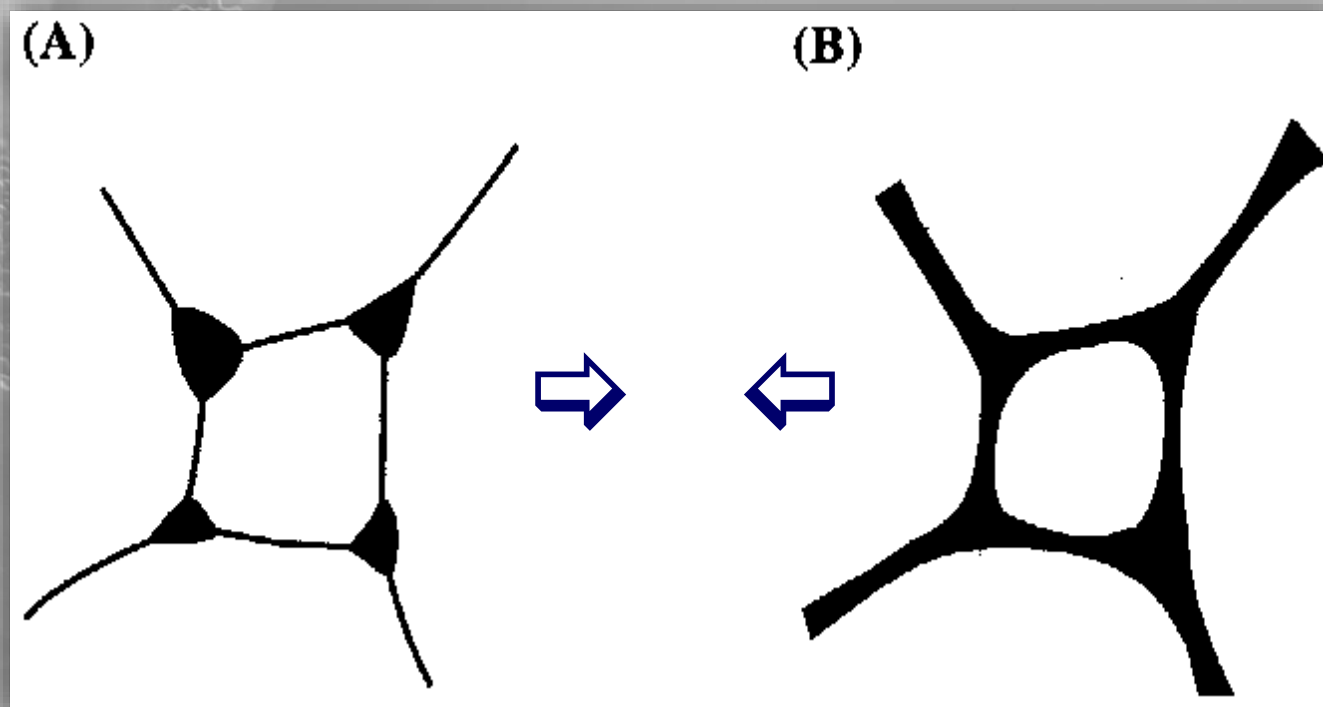
Bazaltna taljevina

- ◆ Olivin ($\rho_s = 3.3 \text{ g/cm}^3$, $r = 0.1 \text{ cm}$)
- ◆ ($\rho_l = 2.65 \text{ g/cm}^3$, $\eta = 1000 \text{ poise}$)
- ◆ $V = 2 \cdot 980 \cdot 0.1^2 (3.3 - 2.65) / 9 \cdot 1000 = 0.0013 \text{ cm/sec}$

Riolitna taljevina

- ◆ $\eta = 10^7 \text{ poise}$ i $\rho_l = 2.3 \text{ g/cm}^3$
- ◆ kristal hornblende ($\rho_s = 3.2 \text{ g/cm}^3$, $r = 0.1 \text{ cm}$)
 - ☞ $V = 2 \times 10^{-7} \text{ cm/sec}$, ili 6 cm/god
- ◆ kristal feldspata ($\rho_l = 2.7 \text{ g/cm}^3$)
 - ☞ $V = 2 \text{ cm/god}$
 - ☞ $= 200 \text{ m u } 10^4 \text{ god.}$ koliko traje hlađenje štoka

Kristalna filtracija



Sastav filtrirane magme je drugačiji

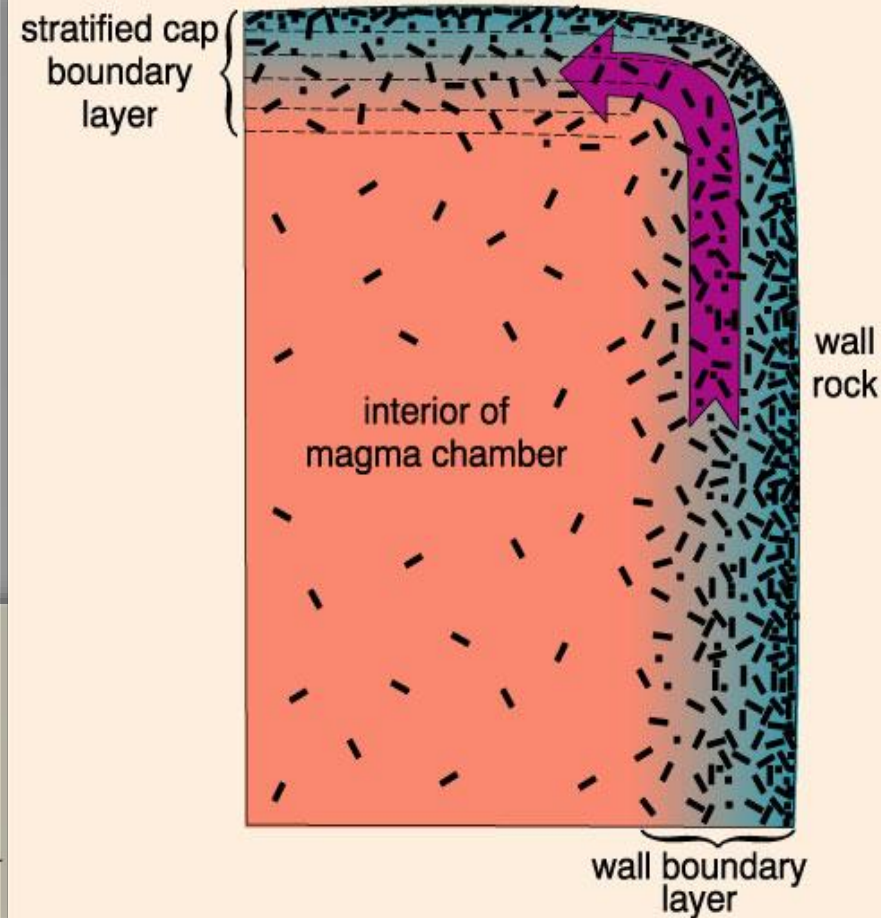
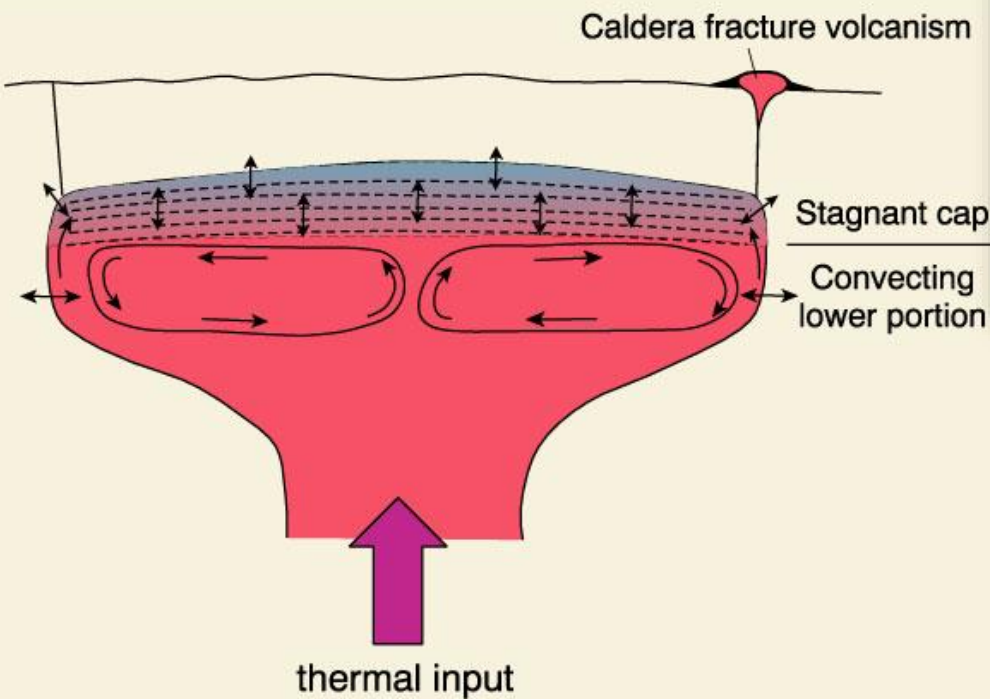
Dva mehanizma koji imaju utjecaj na odvajanje kristala od taljevine

1. Kompakcija

2. Segregacija taljevine

Diferencijacija magme u likvidnom stanju

a. Termogravitacijska difuzija



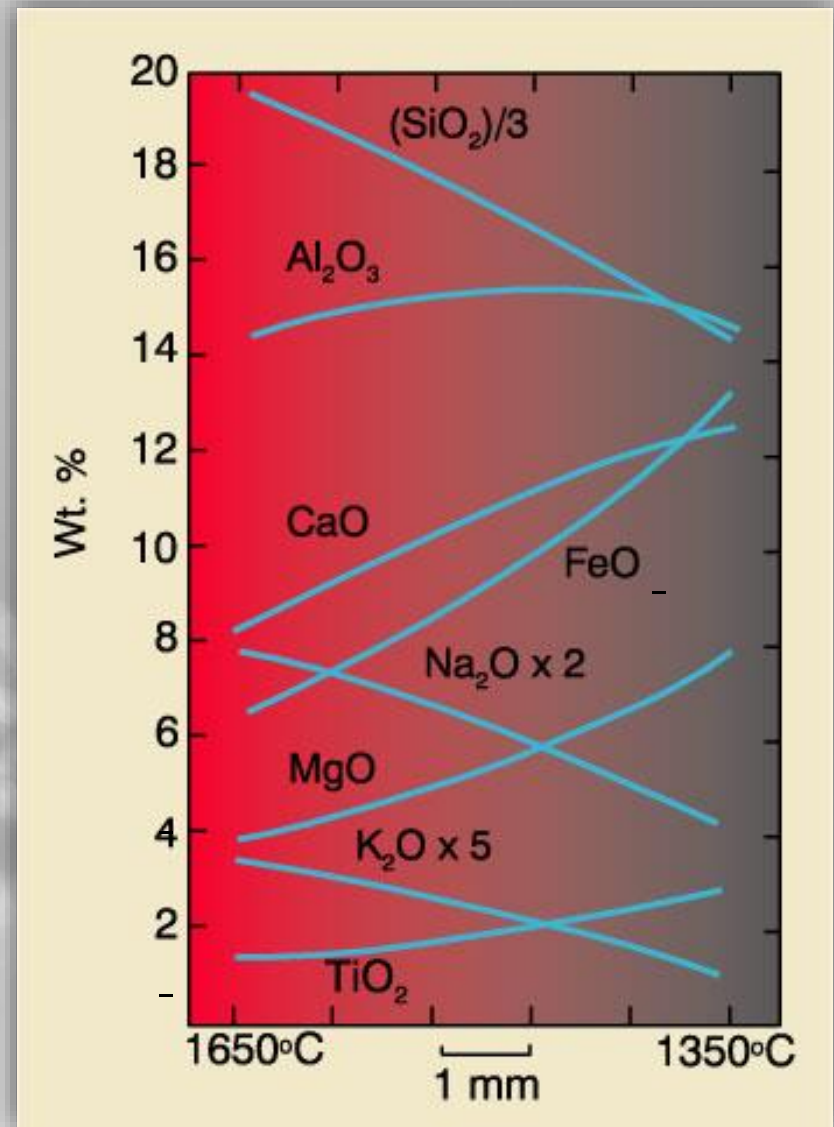
Slika II-66b Prema Winter (2001) An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology. Prentice Hall

Walker i DeLong (1982) podvrgnuli su 2 bazalta termalnom gradijentu od skoro 50°C/mm (!)

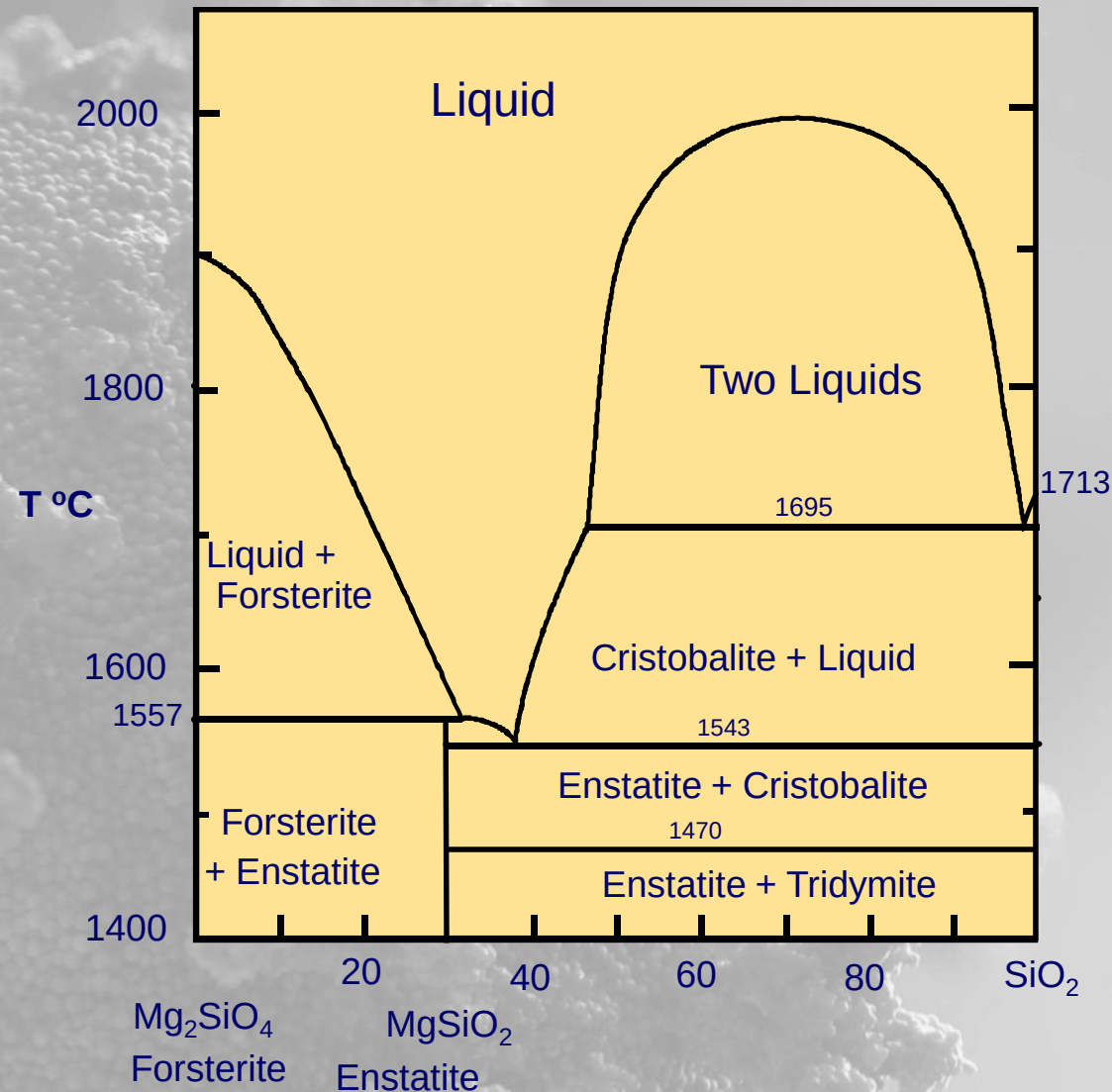
Uzorci dosižu stabilno stanje u nekoliko dana

- Termalna difuzija ili Soret-ov efekat
- Teži elementi → hladniji kraj, a lakši → topliji kraj
- Teški element/molekule migriraju prema hladnijim dijelovima magme a lakši prema toplijim

Slika II-67. Prema Walker, D. C. and S. E. DeLong (1982). Contrib. Mineral. Petrol., 79, 231-240.



b. Nemiješanje taljevina u Fo-SiO₂ sustavu



Likvacija
ulje + voda

- Si kapljice u Fe-bogatim toleitnim bazaltima
- Sulfid-silikat nemiješanje (masivna sulfidna rudna ležišta)
- Karbonatit-nefelinit sustav

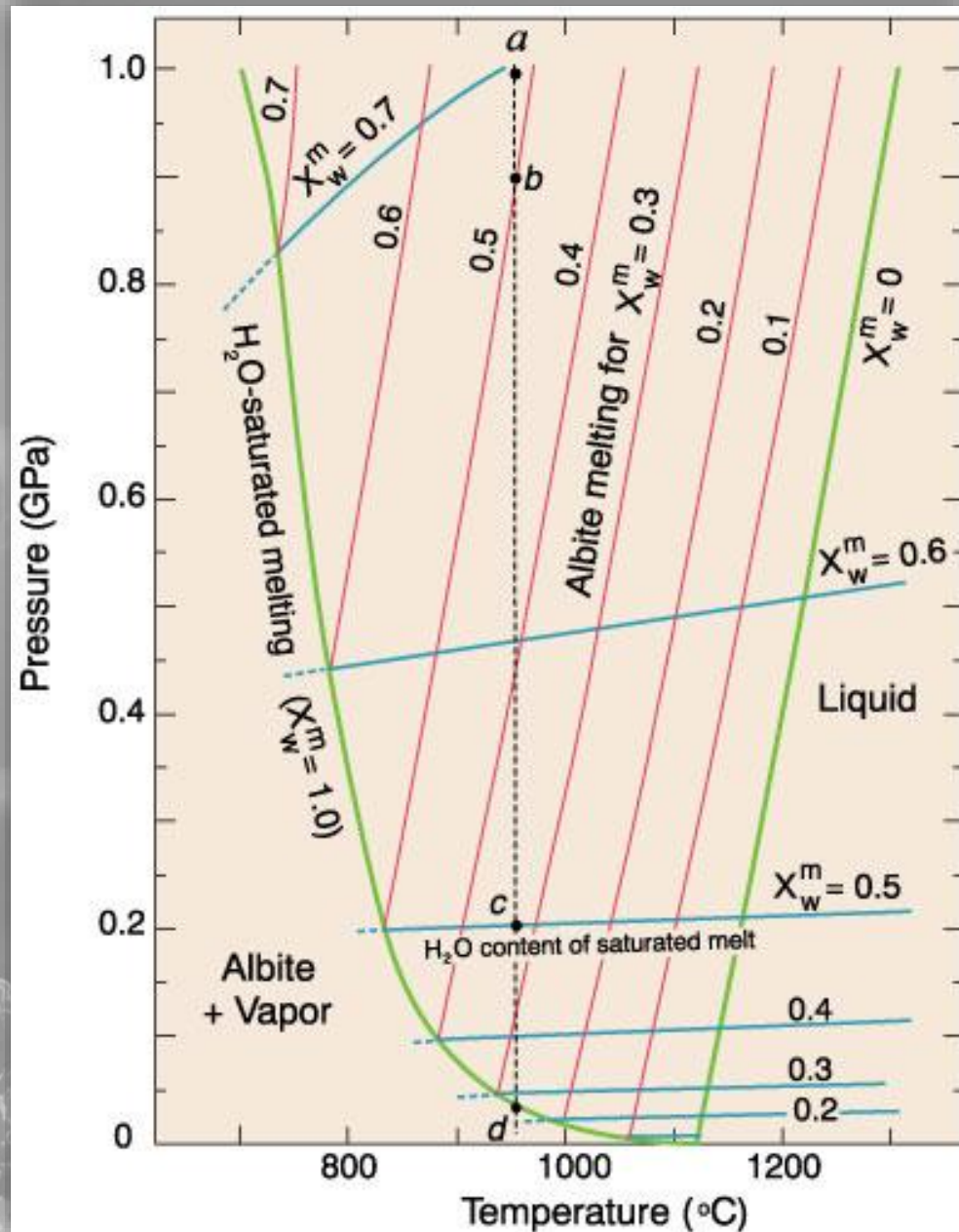
Volatilna diferencijacija

Transport volatilima

Volatili oslobođeni
zagrijavanjem minerala s
vodom ili stijena u
kontakta s magmom

Kako se magma s volatilima
(ali još uvijek
podzasićena) uzdiže, pada
pritisak, i magma postaje
zasićena parama te se
tada oslobađa slobodna
faza u obliku pare

Slika II-69. Prema Burnham and Davis (1974).
A J Sci., 274, 902-940.



Magmatski stadiji

- zadnje nastale taljevine obogaćene inkompatibilnim, LIL i nelitofilnim elementima
- Mnogi se koncentriraju u “pari”
- Dobije se zasićena Si taljevina
- magmatski procesi
- pneumatolitski procesi
- pegmatiti
- hidroterme

Asimilacija

- Ugradnja stijena iz kontaktnog ruba (difuzija, ksenoliti)
- Asimilacija taljenjem je ograničena ukupnom količinom topline u magmi

Magma Mixing

- Miješanje krajnih članova (end member mixing) za seriju stijena
- Kombinirani procesi
- dva procesa mogu djelovati zajedno
 - ◆ AFC: FX daje potrebnu toplinu za asimilaciju
 - ◆ FX + nova primarna magma