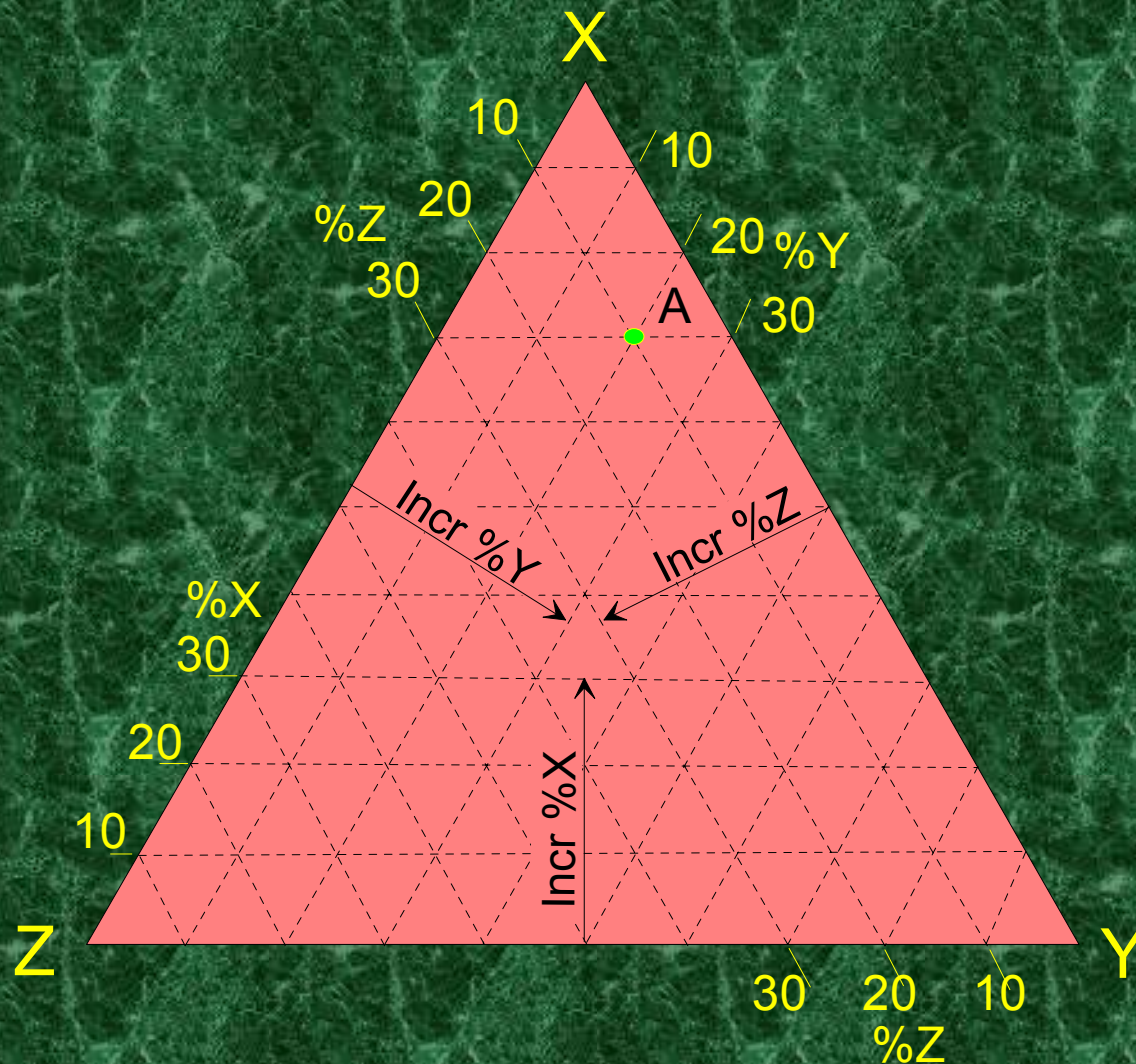


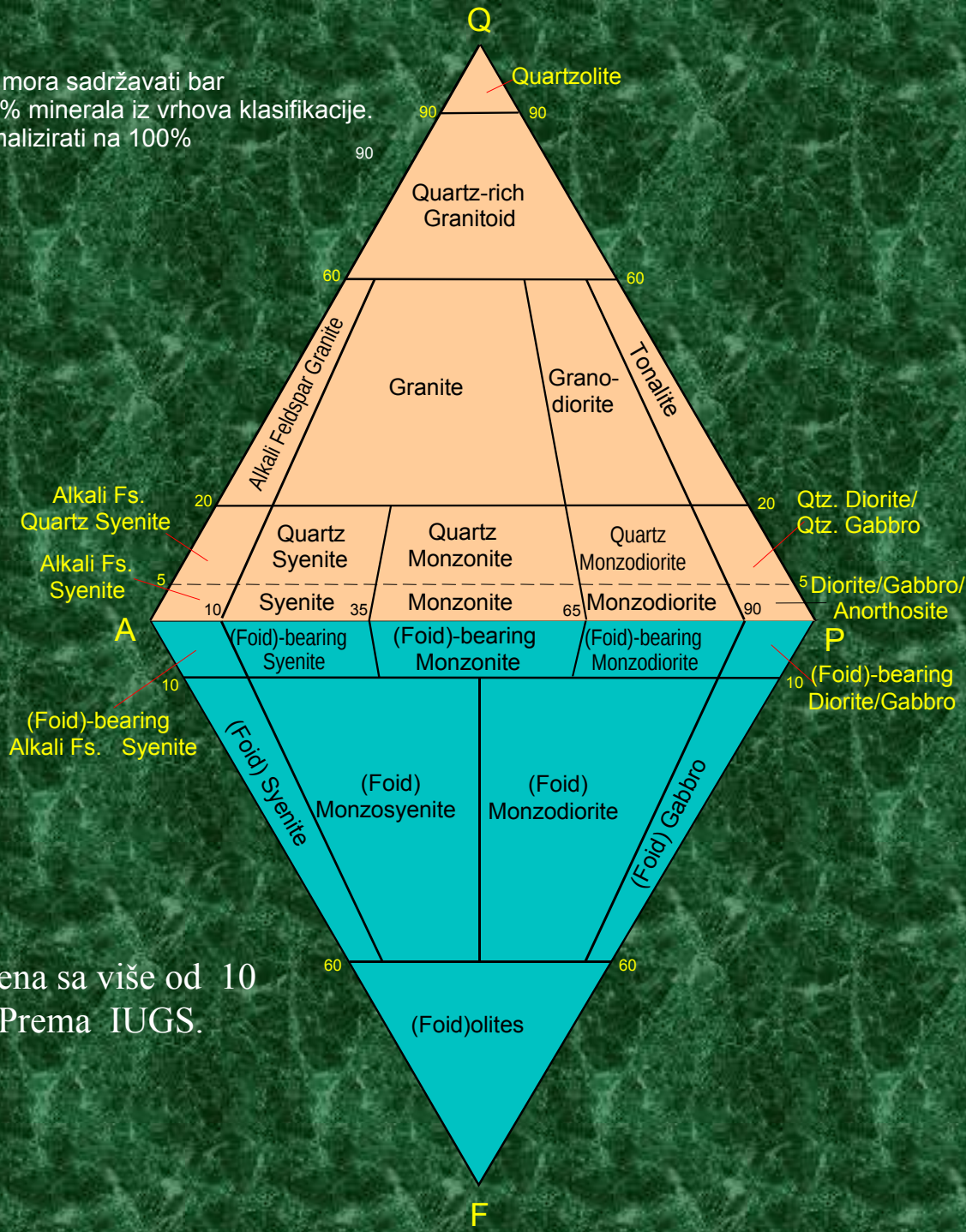
Klasifikacija magmatskih stijena



Slika II-1. Unos točaka u trokomponentni dijagram: 70% X, 20% Y, and 10% Z. An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology, John Winter, Prentice Hall.

Klasifikacija magmatskih stijena

(a) Stijena mora sadržavati bar 10 vol. % minerala iz vrhova klasifikacije. Renormalizirati na 100%



Slika II-2. Klasifikacija magmatskih stijena sa više od 10 vol. % (kvarc+ feldspati + feldspatoidi). Prema IUGS.

Klasifikacija magmatskih stijena

Plagioclase

Anorthosite

90

Gabbro

Troctolite

Olivine gabbro

Plagioclase-bearing ultramafic rocks

Pyroxene

Olivine

(b)

Gabro - cpx
Norit - opx
Gabronorit

(c)

Slika II-3. Klasifikacija magmatskih stijena .
b. Gabroidne stijene. c. Ultramafitne stijene.
Prema IUGS.

Olivine

Dunite

90

Harzburgite

Wehrhite

Lherzolite

40

Olivine Websterite

10

Websterite

Orthopyroxene

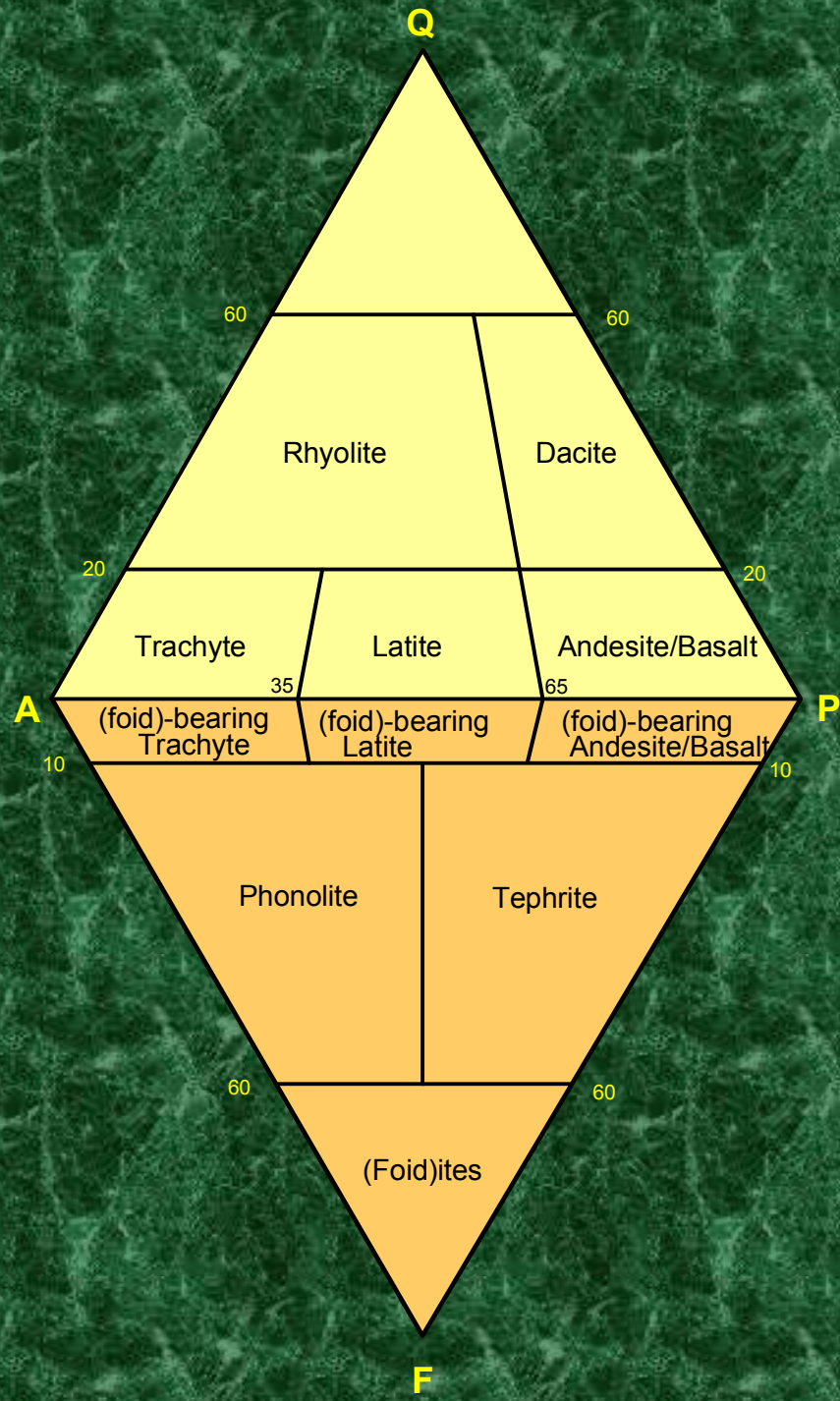
Clinopyroxenite

Clinopyroxene

Peridotites

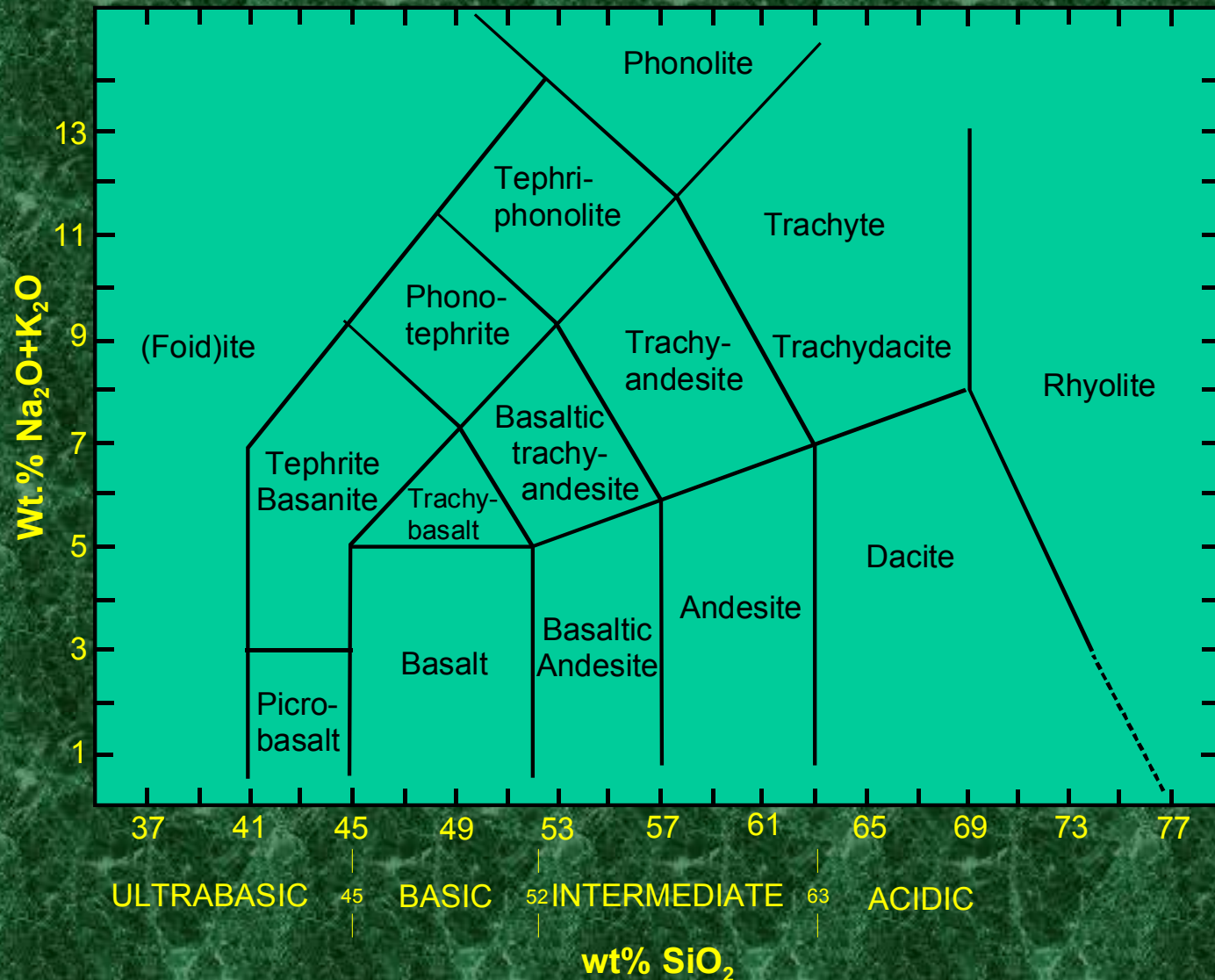
Pyroxenites

Klasifikacija magmatskih stijena



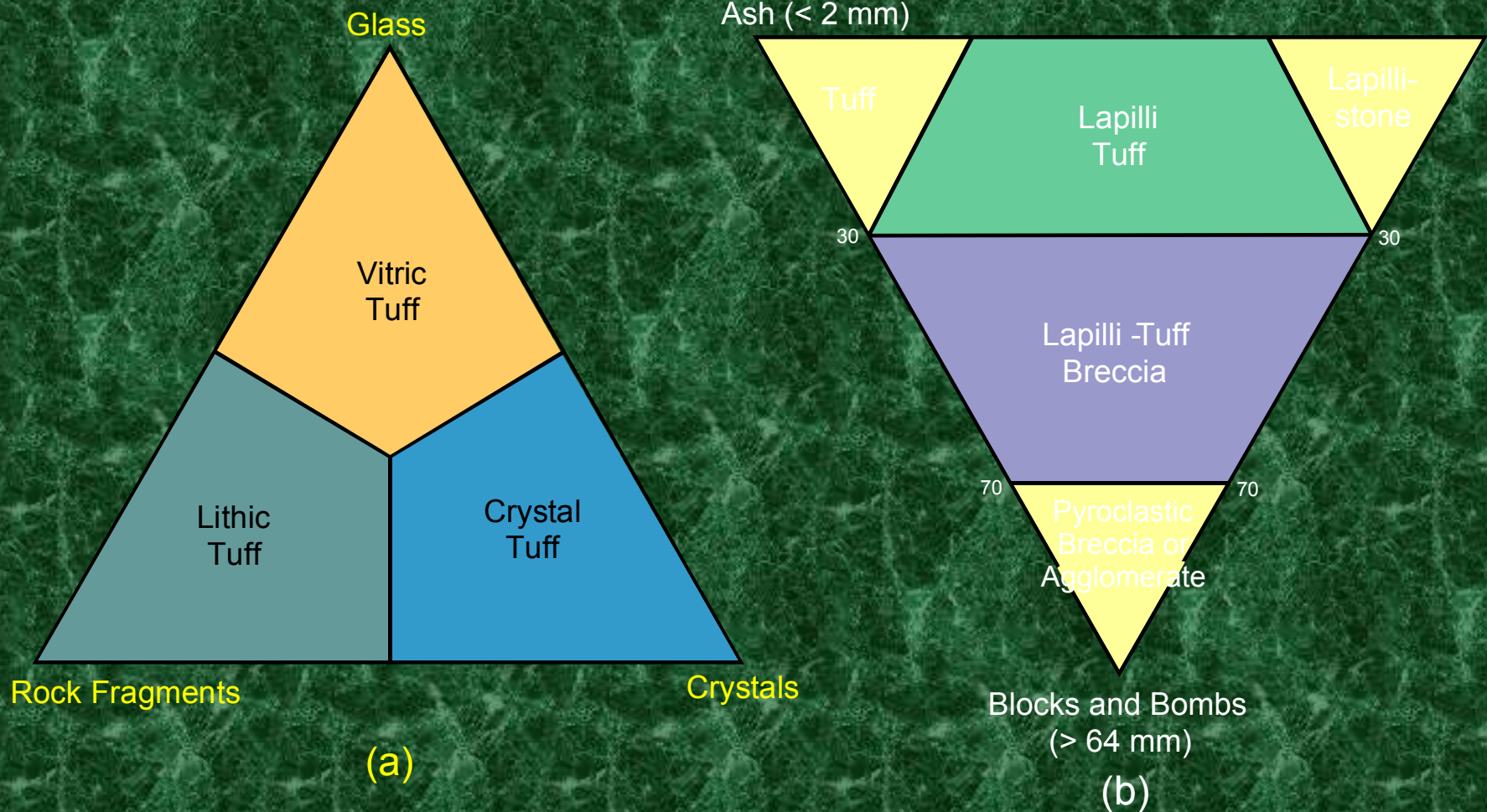
Slika II-4. Klasifikacija magmatskih stijena (efuzivi). Prema IUGS.

Klasifikacija magmatskih stijena



Slika II-5. Kemijska klasifikacija efuzivnih stijena temeljena na sadržaju SiO₂ i ukupnih alkalnih oksida (tež. %). Prema Le Bas *et al.* (1986) *J. Petrol.*, **27**, 745-750. Oxford University Press.

Klasifikacija magmatskih stijena



Slika II-6. Klasifikacija piroklastičnih stijena. **a.** Temeljena na vrsti materijala. Prema Pettijohn (1975) *Sedimentary Rocks*, Harper & Row, and Schmid (1981) *Geology*, **9**, 40-43. **b.** Temeljena na veličini čestica. Prema Fisher (1966) *Earth Sci. Rev.*, **1**, 287-298.

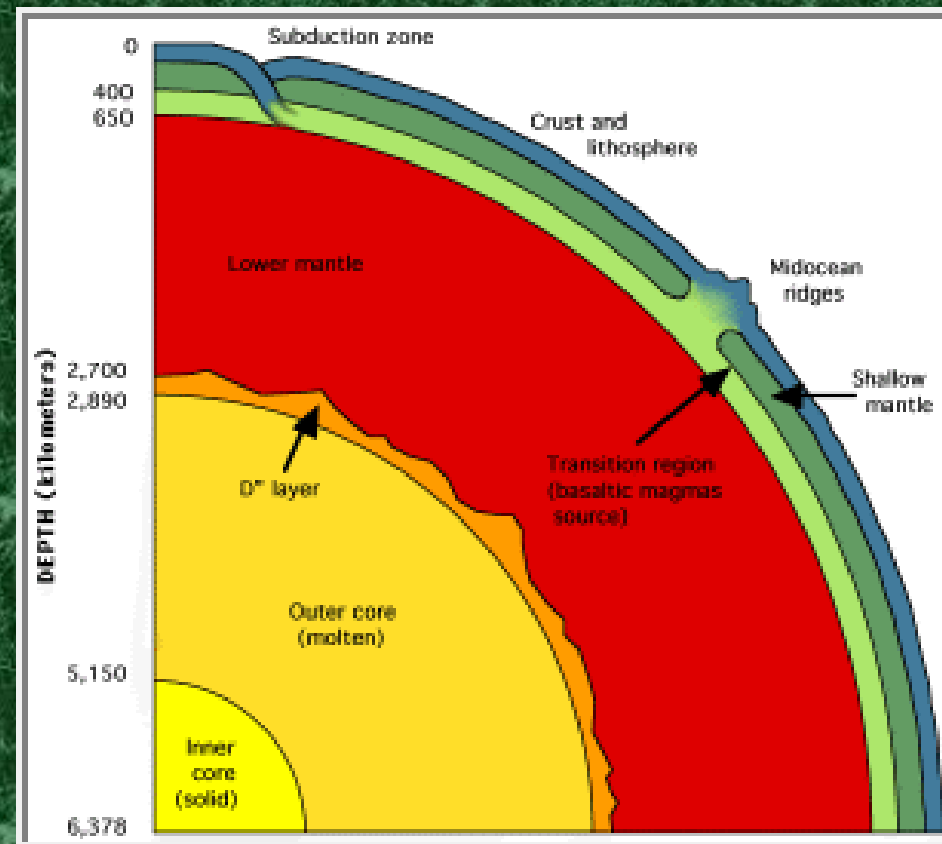
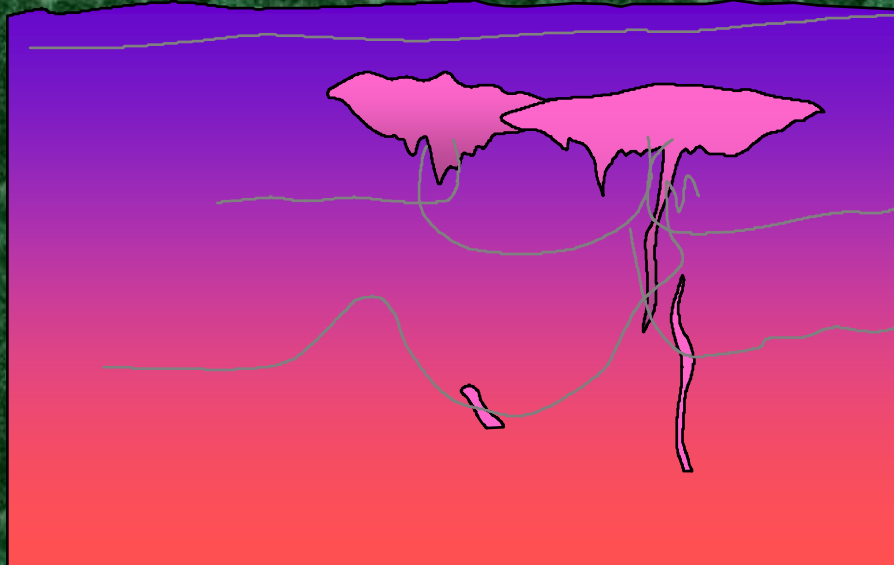
Klasifikacija magmatskih stijena

	Serijska alkalijska	Serijska monzonitska	Serijska kalcijsko- -alkalijska	
Mineralni sastav	K-feldspati ± feldspatoidi	K-feldspati + plagioklasi	Plagioklasi	Mineralni sastav
intruziv efuziv	granit riolit	adamelit delenit	granodiorit dacit	kvarc + biotit (amfibol)
intruziv efuziv	sljenit trahit	monzonit trahi-andezit	diorit andezit	amfibol ± biotit (piroksen)
intruziv efuziv	alk. gabra alk. bazalt	kentalenit trahi-bazalt	gabra bazalt	piroksen, ± olivin
				olivin piroksen dunit peridotiti pirokseniti

Slika II-7. Terenska klasifikacija magmatskih stijena.

Porijeklo magme

sredine, okoliši, procesi

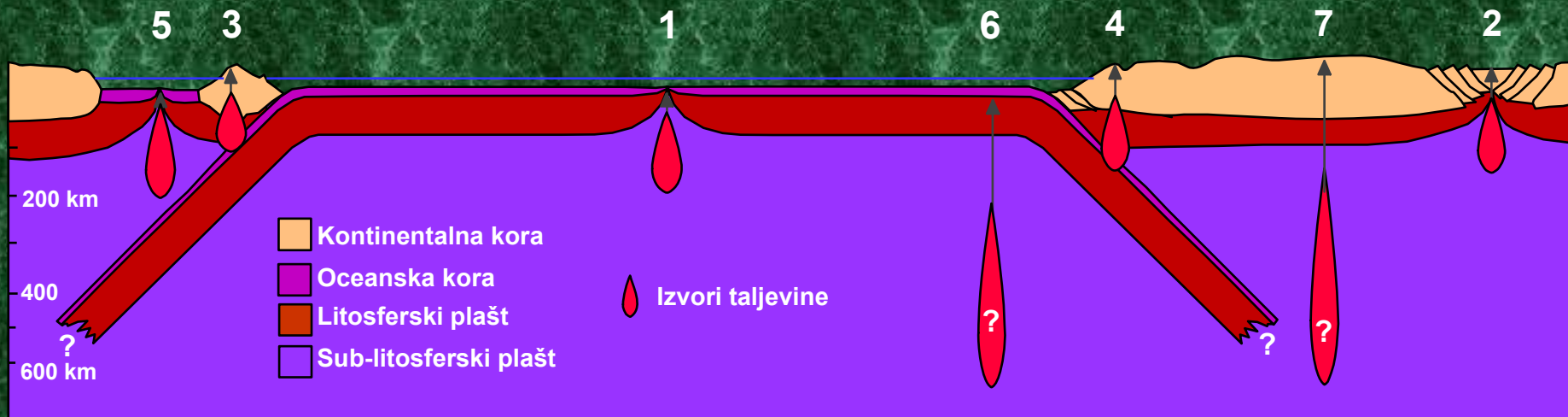


Tektonika ploča - geneza magme

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...



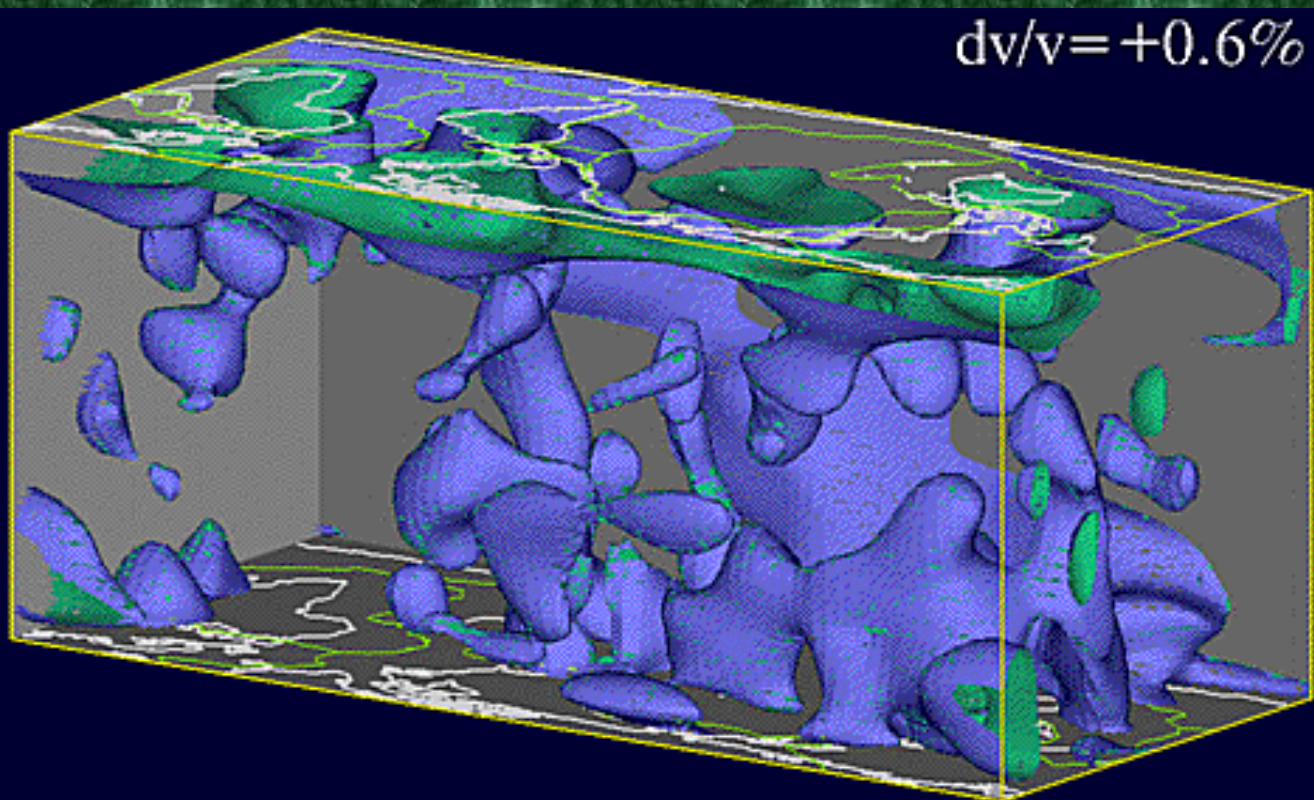
Plašt

- heterogenost plašta

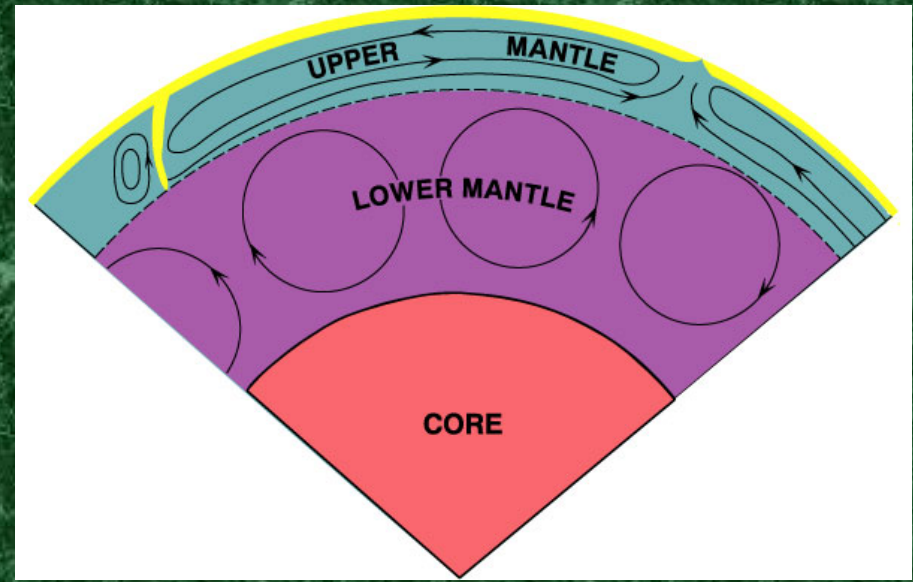
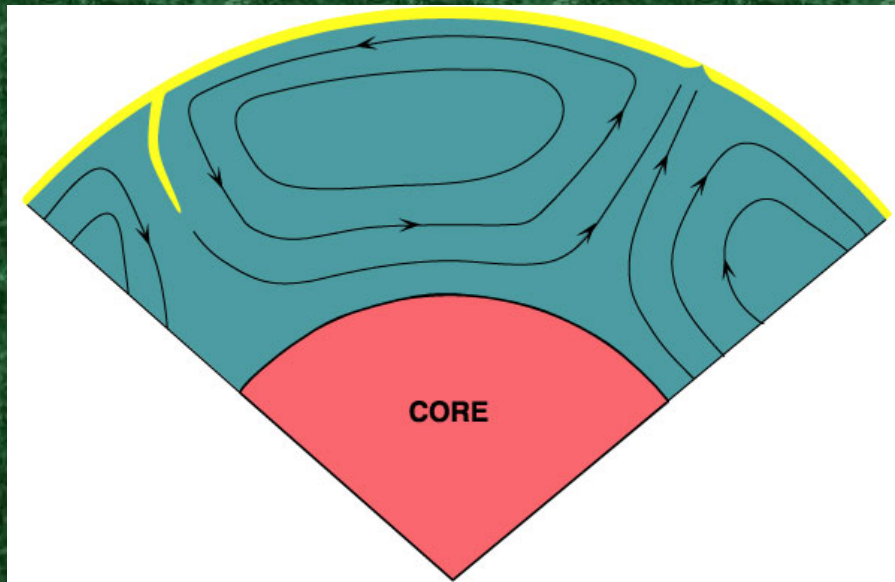
- ◆ Seizmička tomografija

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

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



Plasni model 1975 Novi plasni model



- ➡ Gornji plasni = MORB izvor
- ➡ Donji plasni = 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)

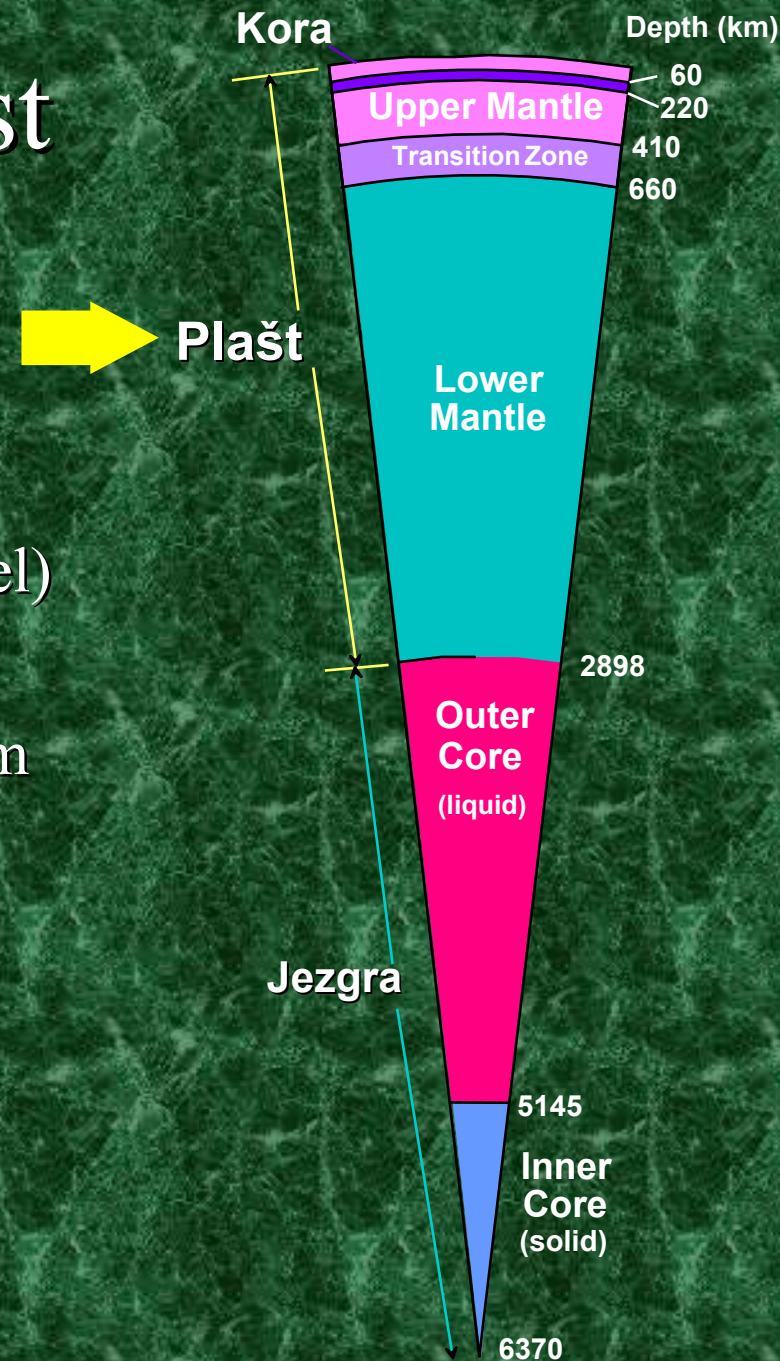
Gornji plašt do 410 km (olivin → spinel)

- ◆ 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

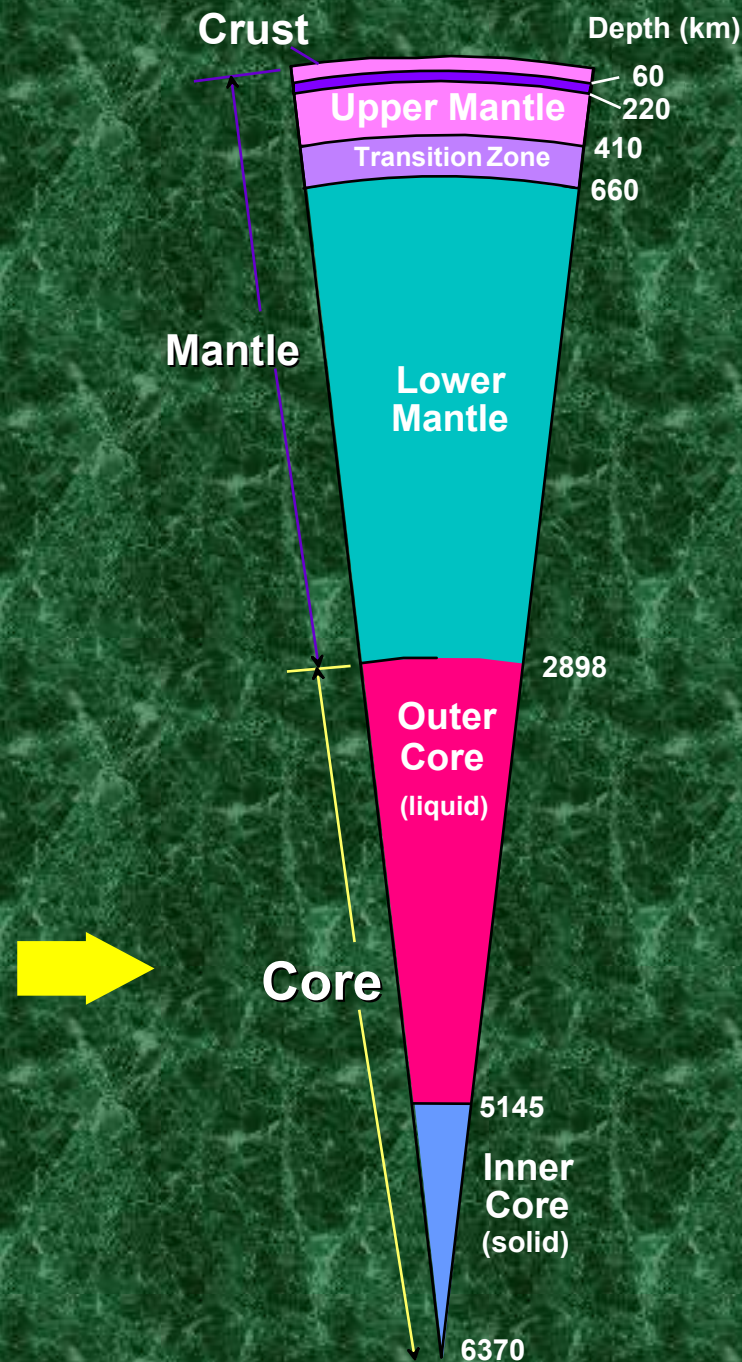
Jezgra:

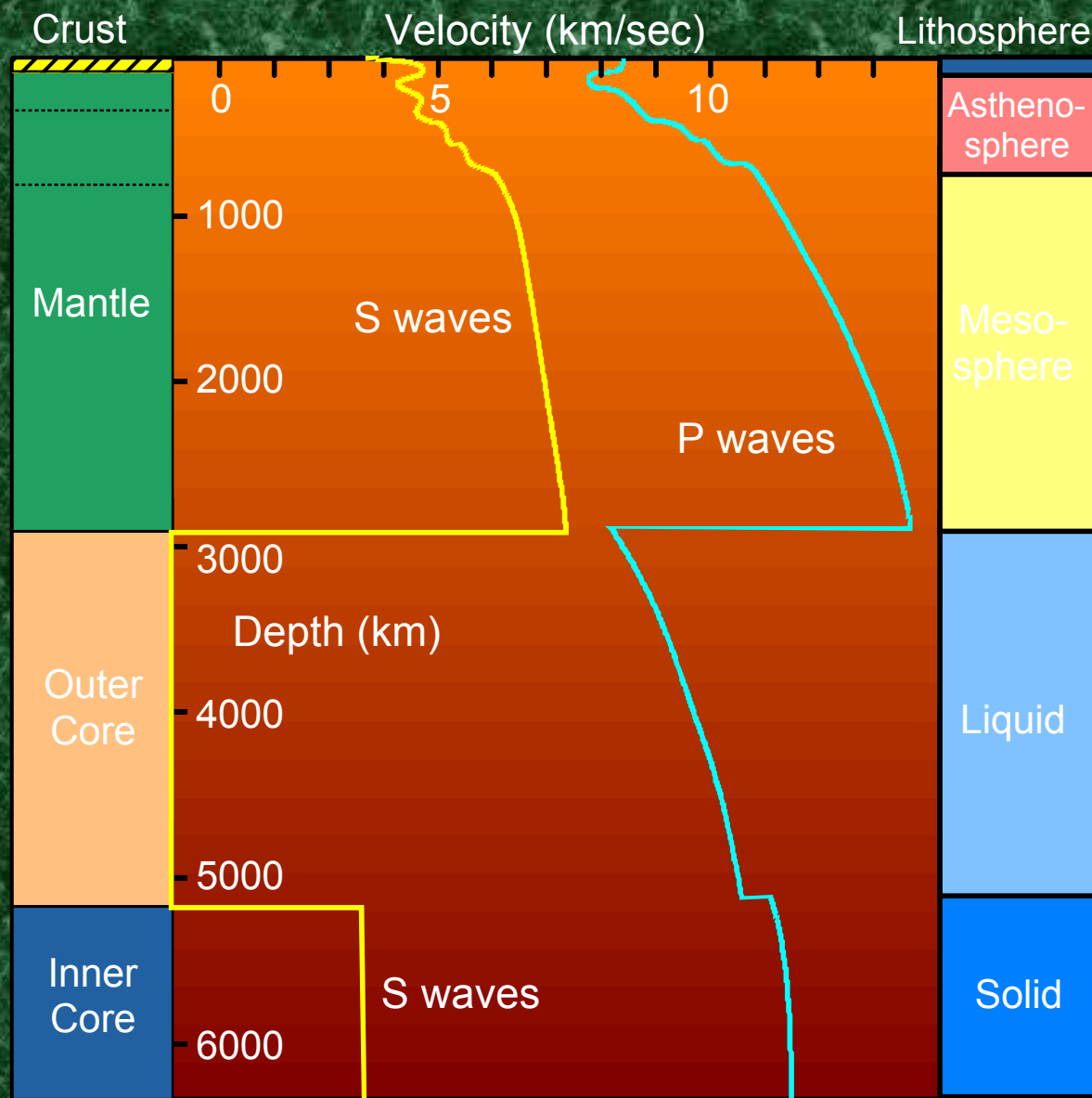
Fe-Ni legura

Vanjska jezgra je tekuća

◆ Nema S-valova

Unutarnja jezgra je kruta



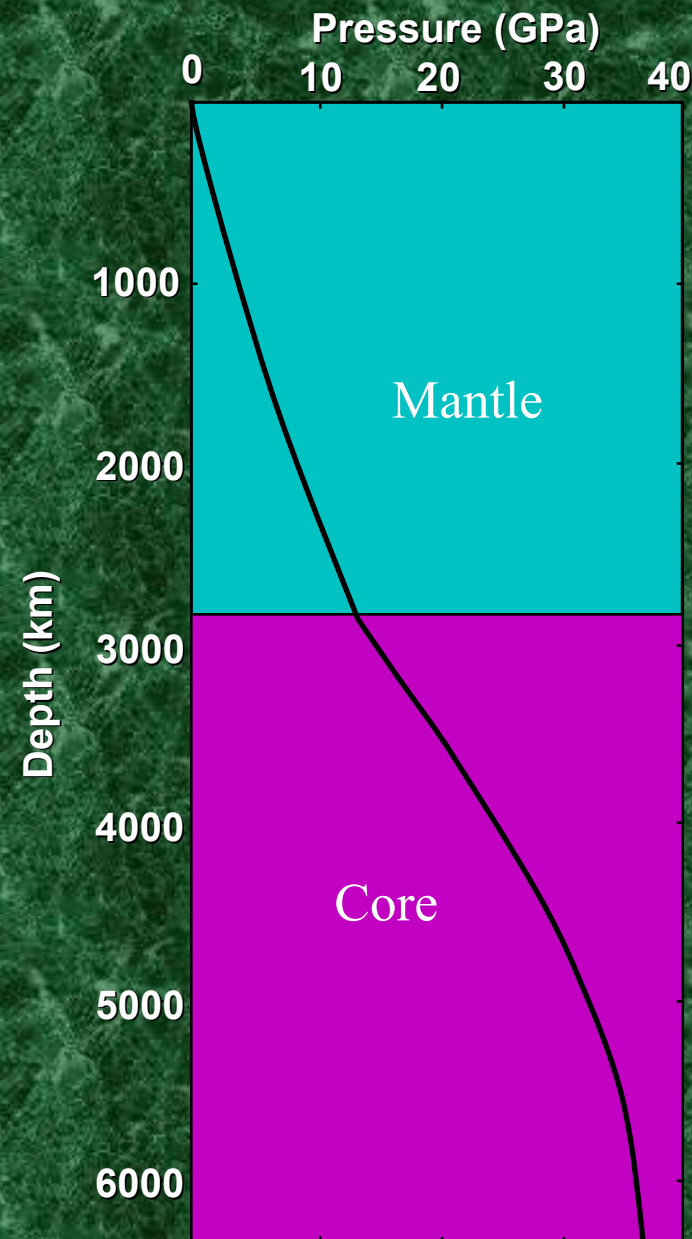


Slika II-15. Varijacije u brzini P i S valova s dubinom. Prema Kearey and Vine (1990), *Global Tectonics*. © Blackwell Scientific. Oxford.

Gradijent tlaka

- $P \text{ raste} = \rho gh$
- Približno linearno kroz plašt
 - ◆ $\sim 30 \text{ MPa/km}$
 - ◆ $\approx 1 \text{ GPa}$ 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.

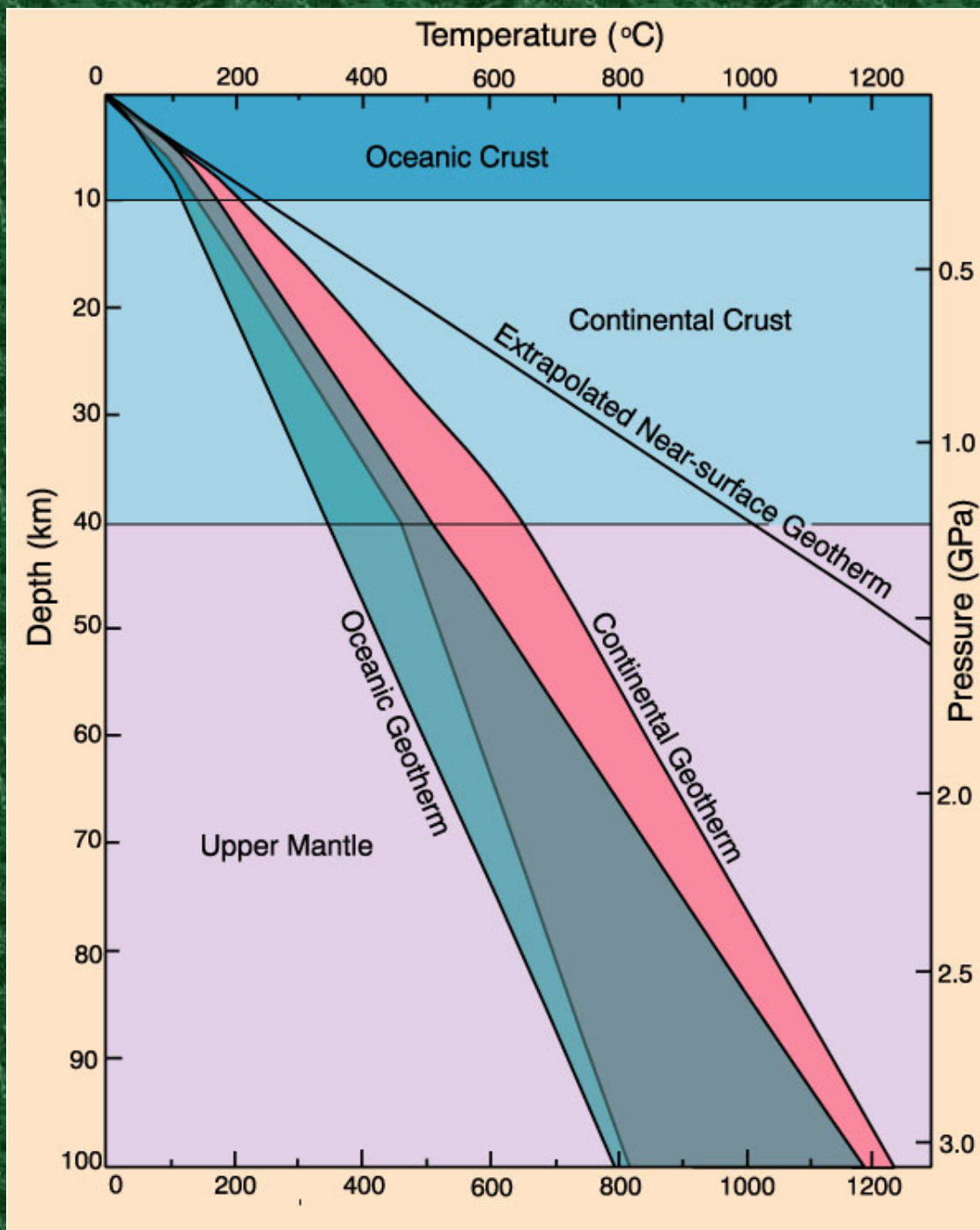


Izvori topline u Zemlji

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

Geotermalni gradijent

Slikall-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

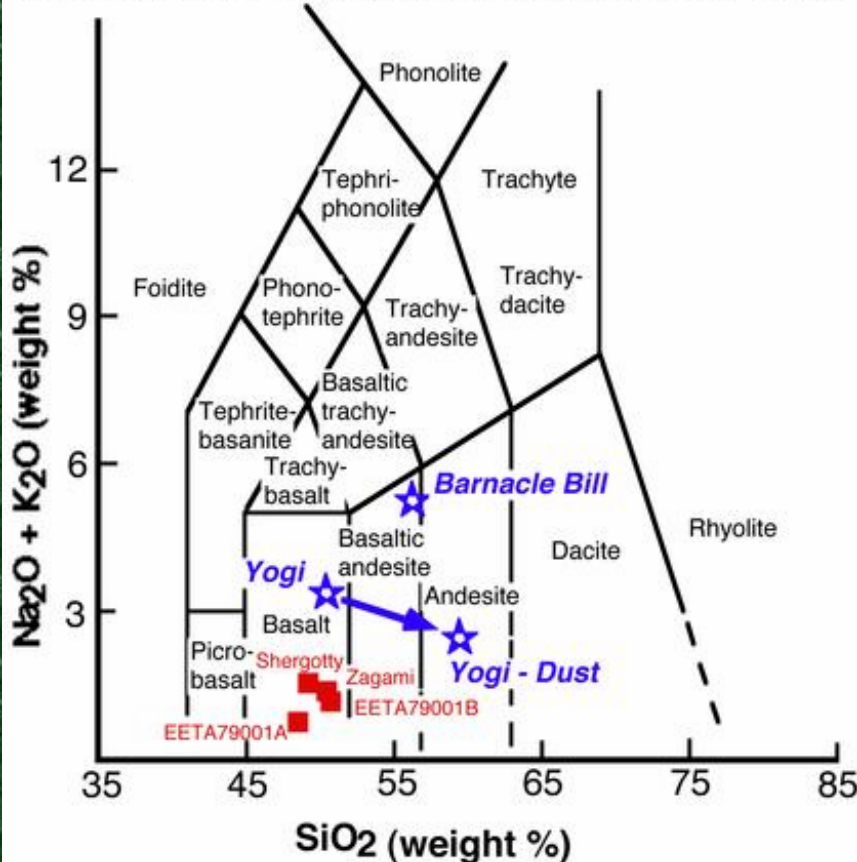
Meteorit	Sastav
Željezni meteorit	Fe-Ni legure
Kameno-željezni	Fe-Ni + silikati
Hondriti	kameni meteorit hondrule, hondre – sfere do 1mm ranije rastaljenog materijala opx+ol±pl
Ugljikovi met.	C, slični sastavu zvijezde – volatili
Ahondriti	slični bazaltima porijeklom s Mjeseca i Marsa

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

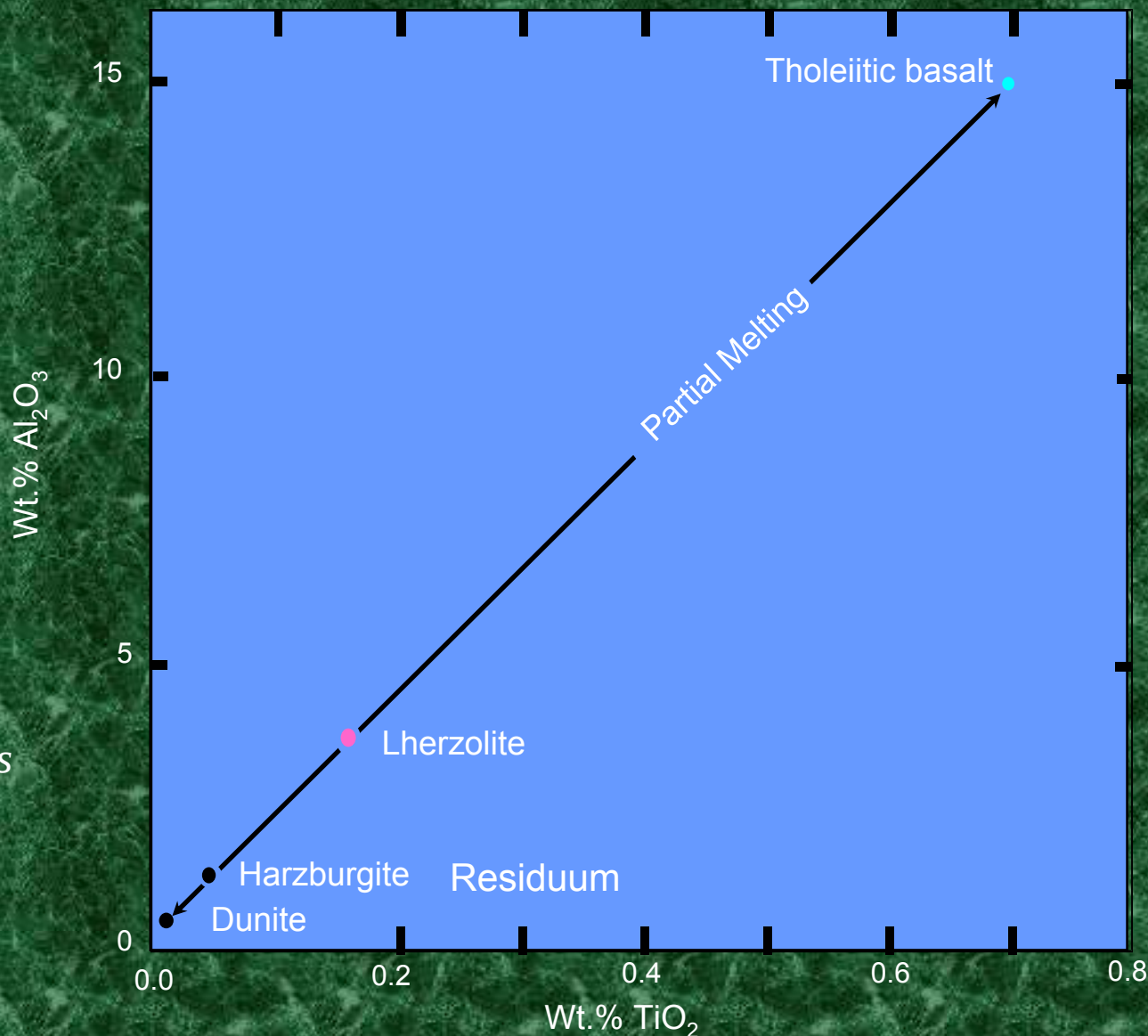
kiseliji nego što se očekivalo,
različit sastav od SNC
meteorita

Lercolit odgovara neizmjenjenom plaštu

Dunit i harzburgit ostatak nakon što je izdvojen bazalt parcijalnim taljenjem

pirolit

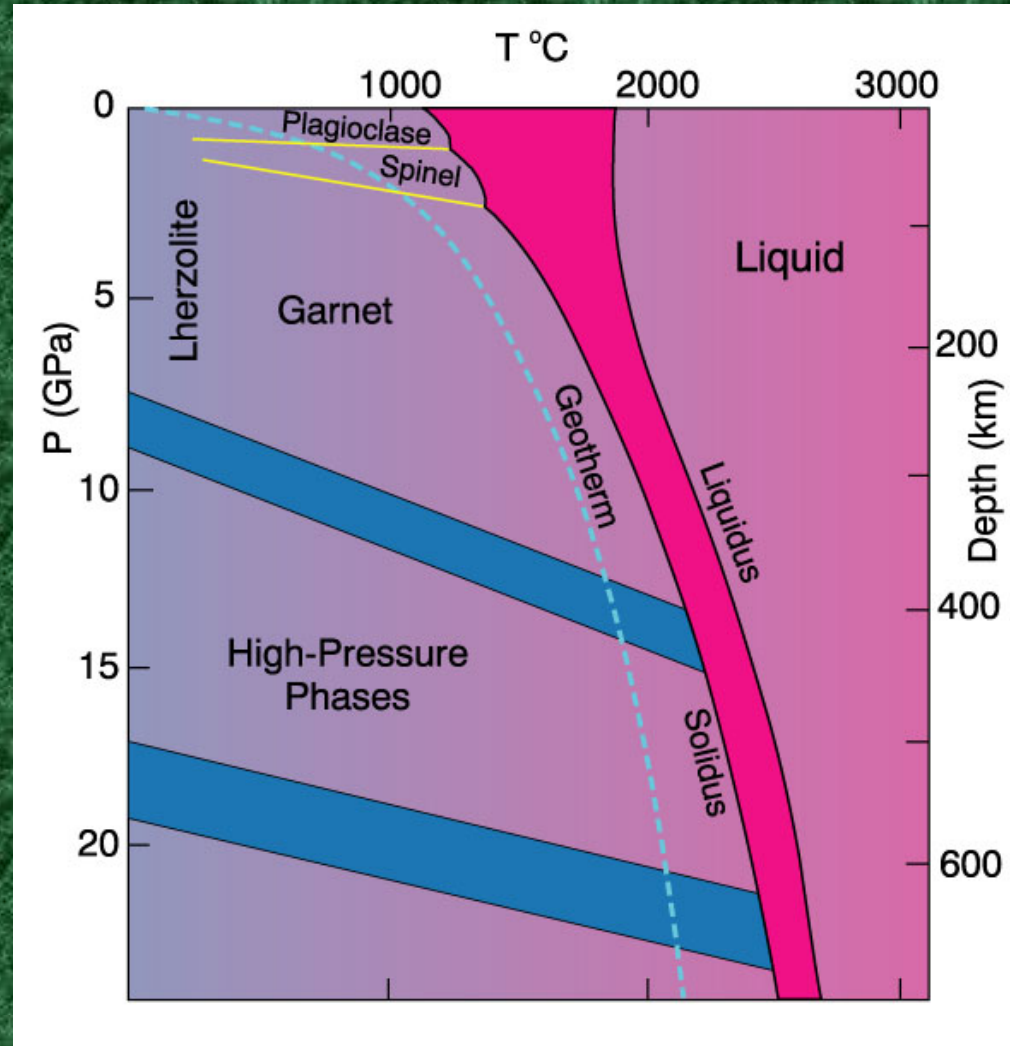
Slika II-22 Brown and Mussett, A. E. (1993), *The Inaccessible Earth: An Integrated View of Its Structure and Composition*. Chapman & Hall/Kluwer.



Fazni dijagram za Al 4-fazni lercolit:

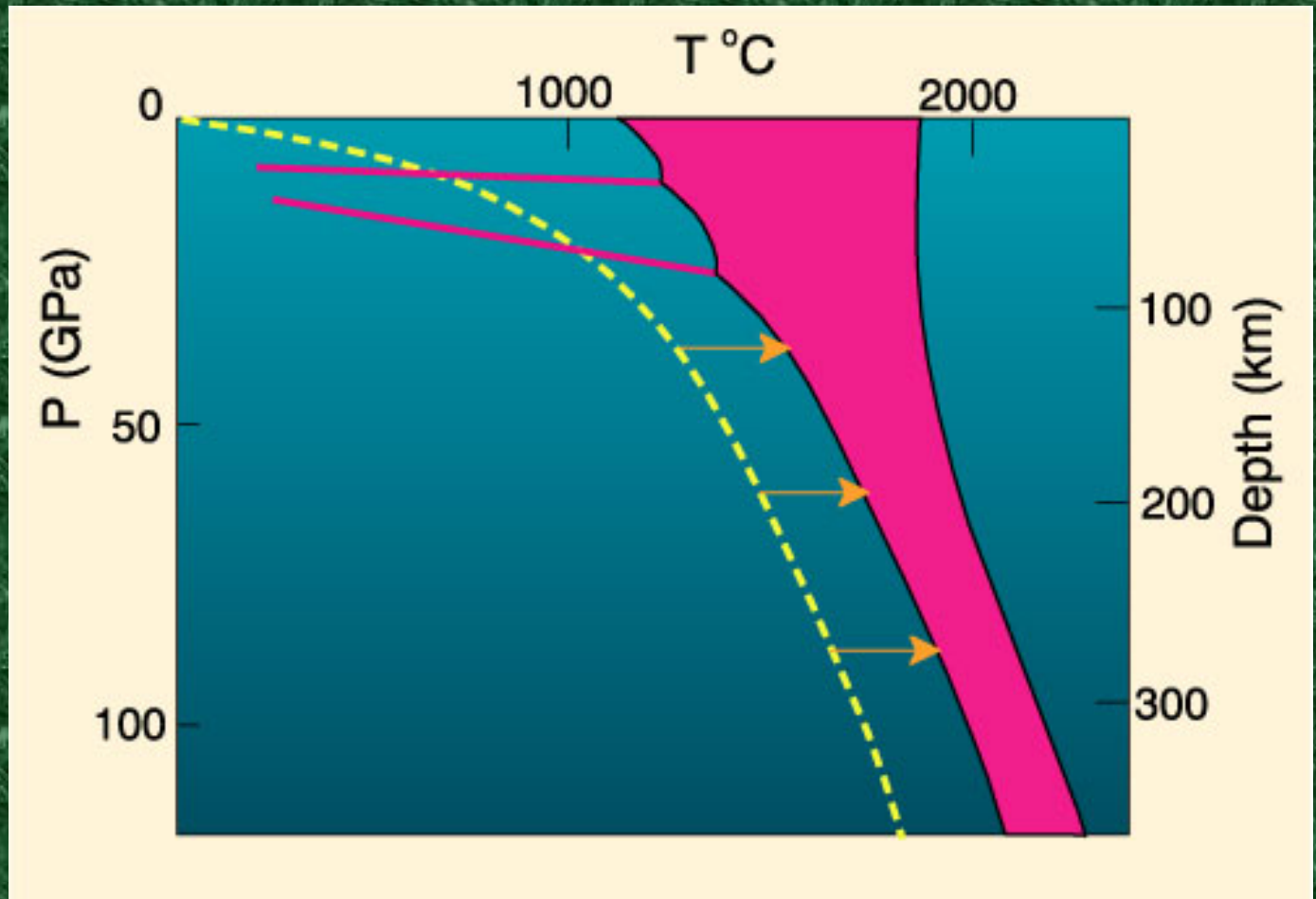
Al faza =

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



Kako se tali plašt??

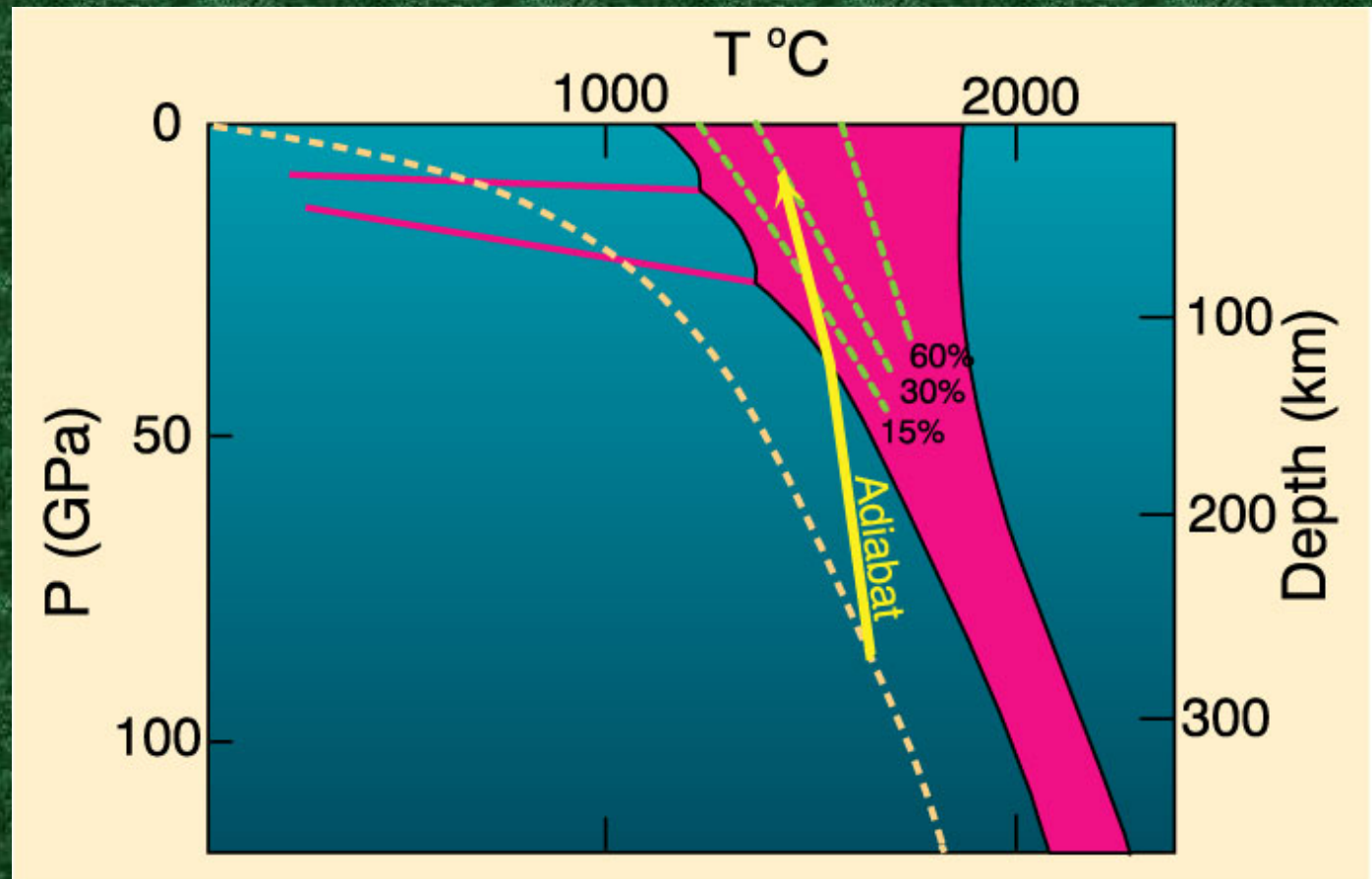
1) Porastom temperature



Slika II-24

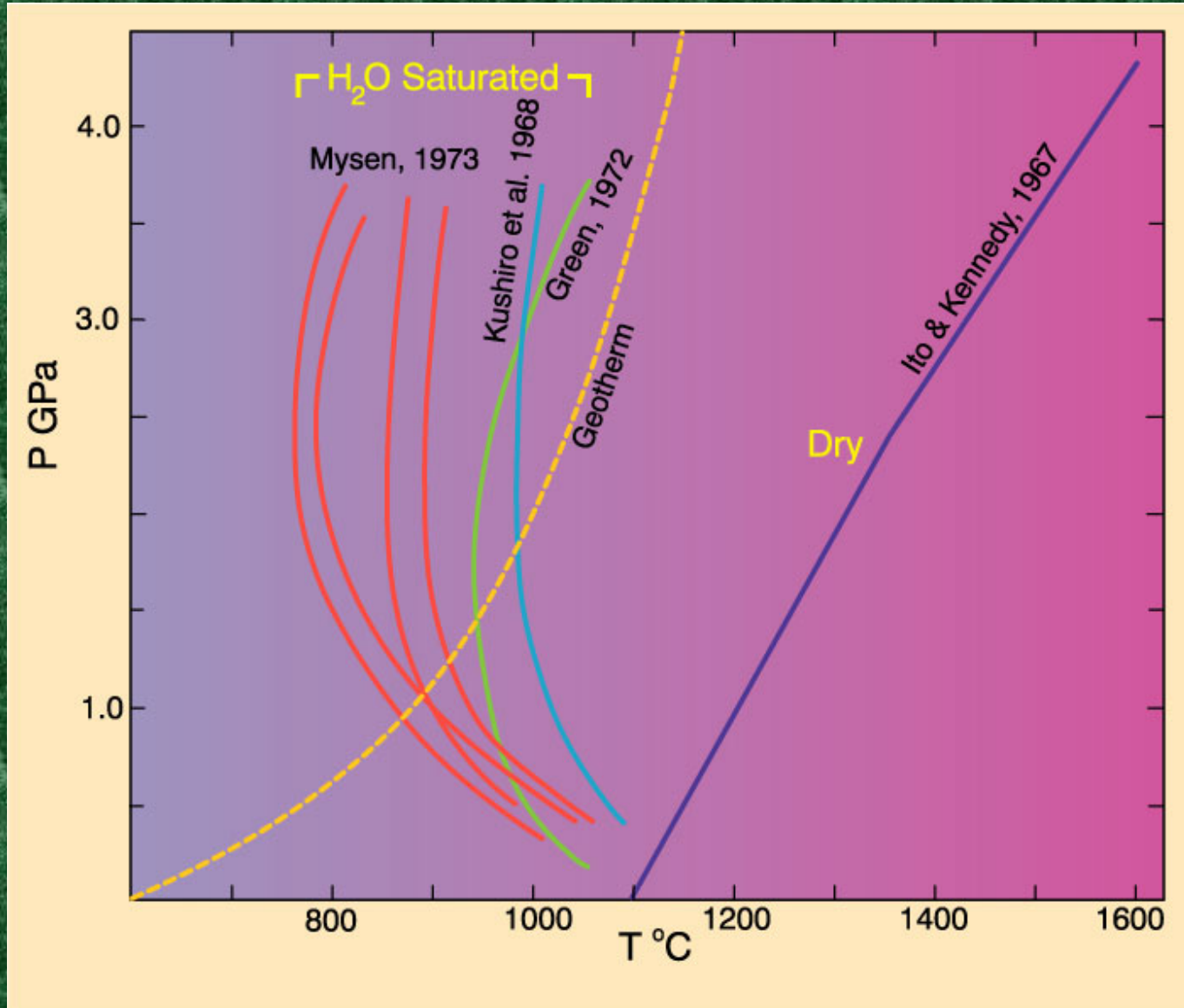
2) Snižavanjem tlaka

- ◆ 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 srednjoceanskim 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

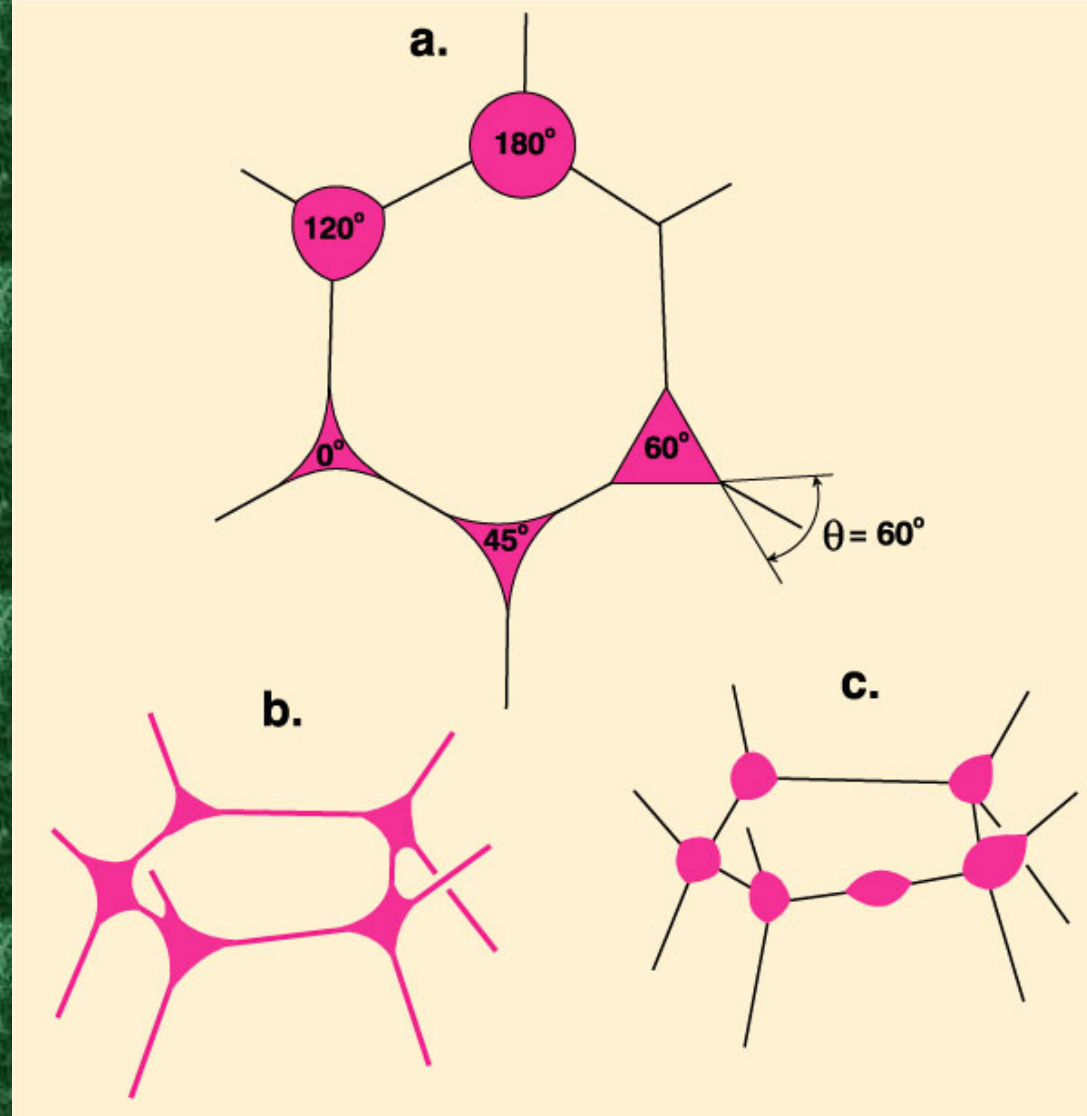
Primarne magme

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

Sposobnost nastanka
povezanog filma (sloja)
je ovisna o kutu θ
(dihedral angle) koji je
svojstvo taljevine

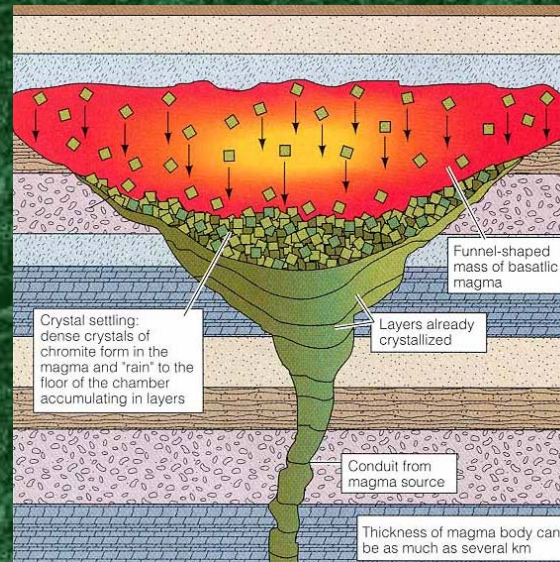
Gravitacijski efekti
(uzdizanje taljevine)
“Filter pressing”
filtriranje ili kompakcija,
kristalne rešetke/mreže
(crystal mush)

Smicanje, tektonika
Varijacije ovisne o:
T, viskozitetu, X



Slika II-29 Prema Hunter (1987)
In I. Parsons (ed.), *Origins of
Igneous Layering*. Reidel,
Dordrecht, pp. 473-504.

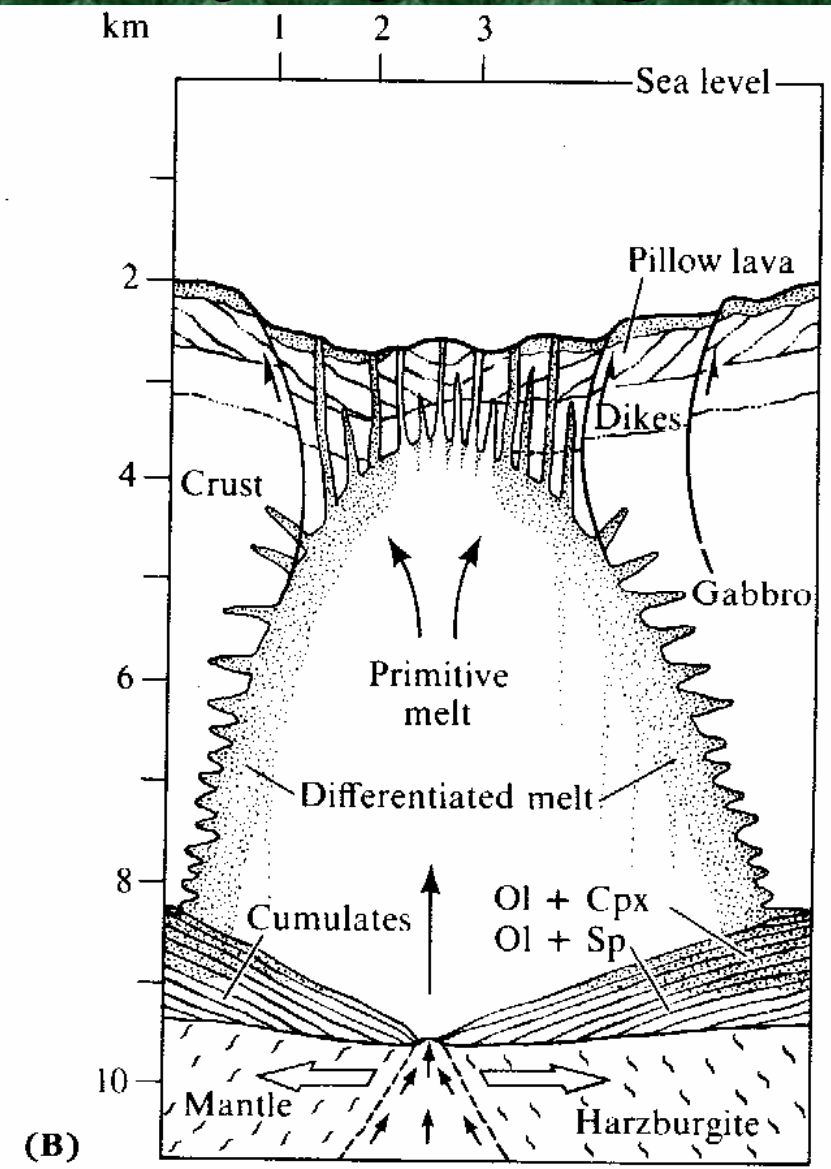
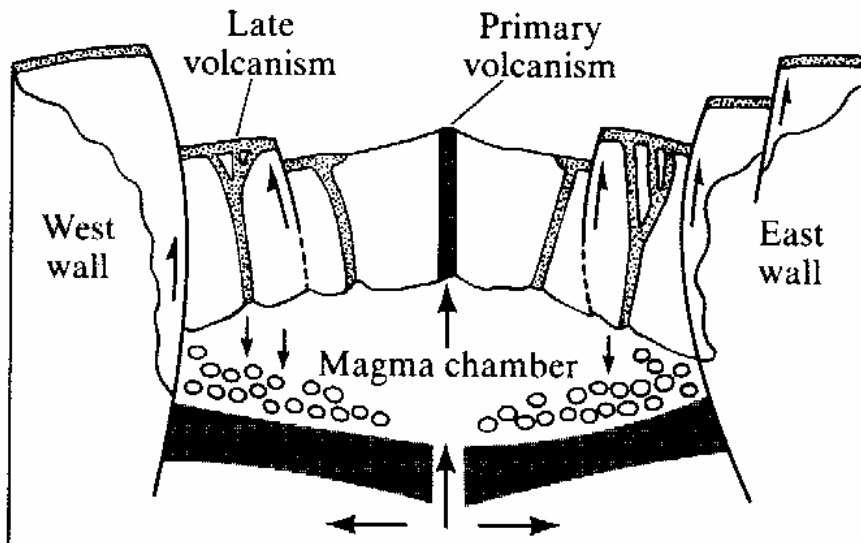
Evolucija magme



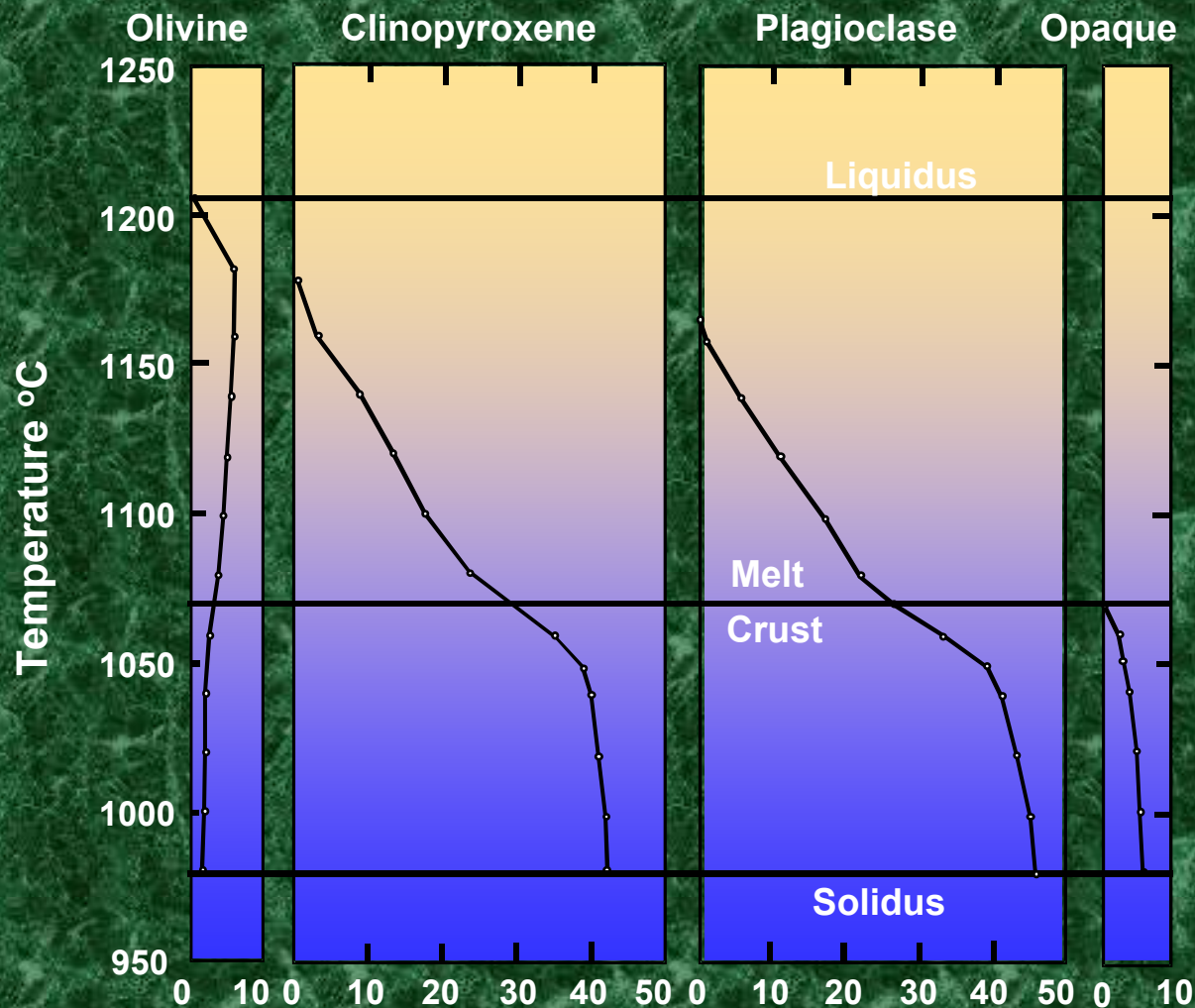
Evolucija magme

- **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

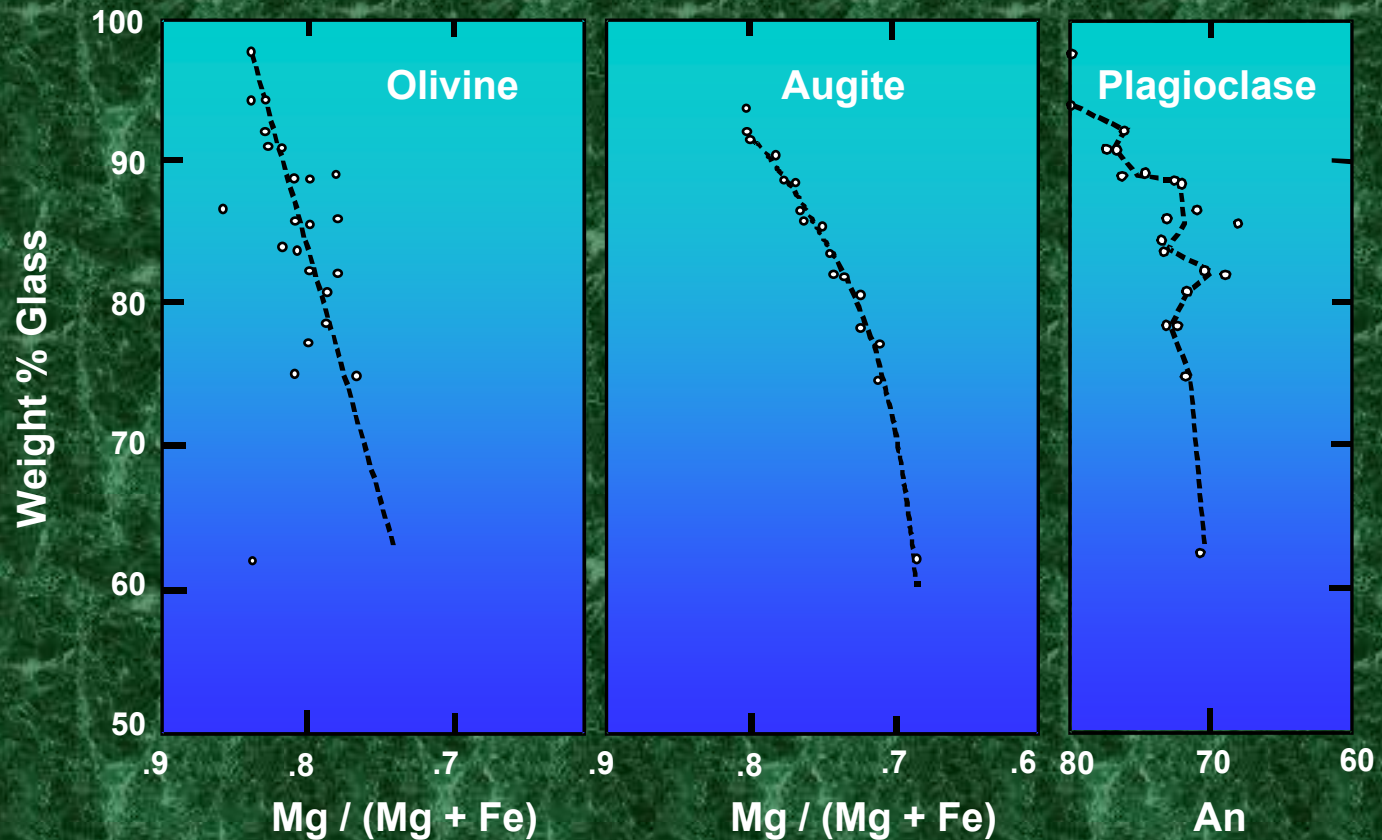


1. Hlađenjem taljevina kristalizira u rasponu temperatura (i tlakova)
2. Nekoliko minerala kristalizira u istom rasponu T i broj minerala raste s padom T
3. Nastanak pojedinih minerala se preklapa
4. Kristalizacija minerala ovisi o T i X taljevine



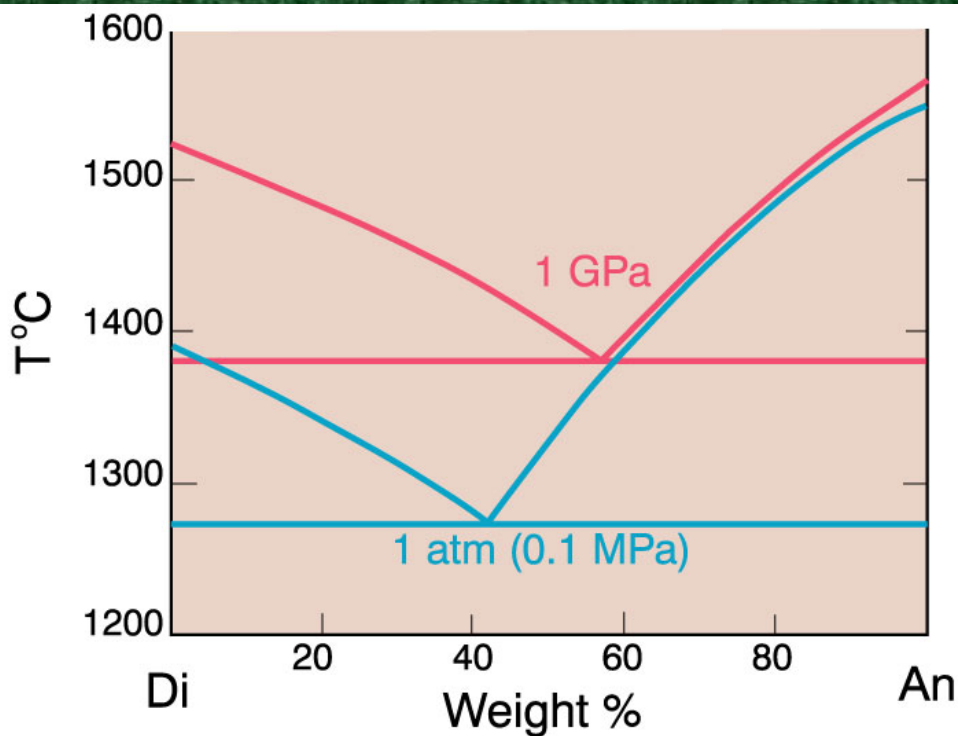
Slika II 33 Wright i Okamura,
(1977) *USGS Prof. Paper*,
1004.

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

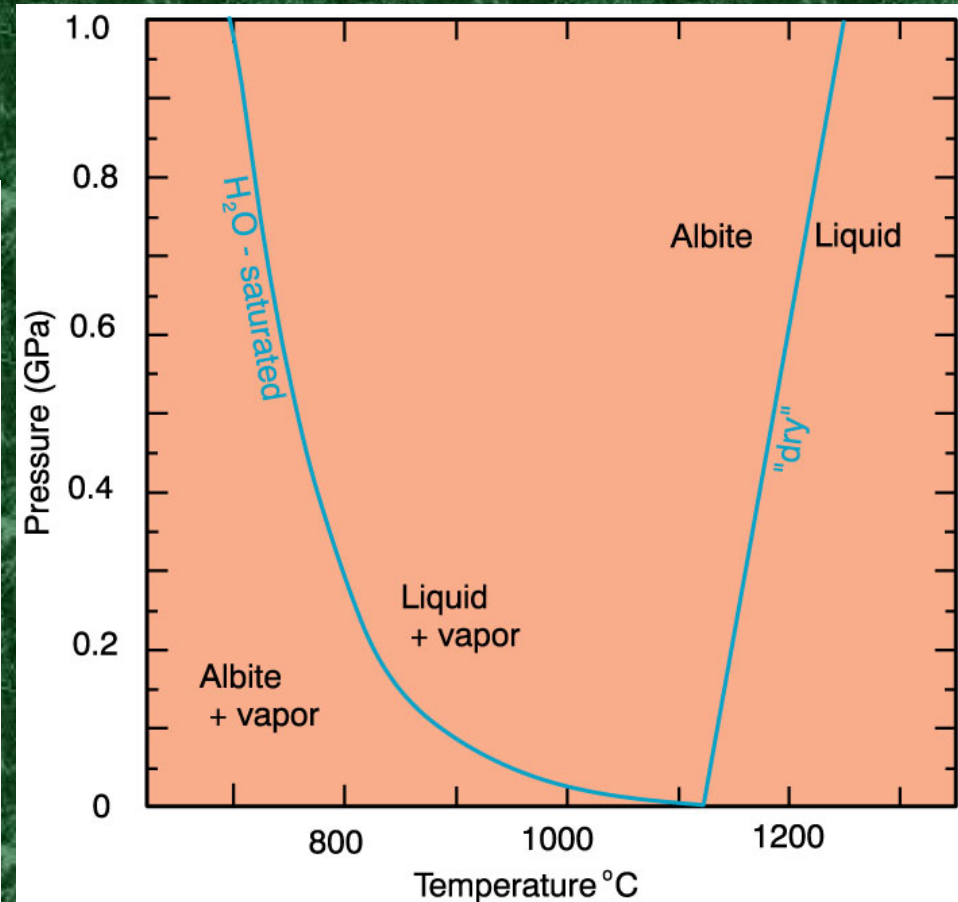


Slika II 34: Wright and Okamura, (1977) *USGS Prof. Paper*, 1004.

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

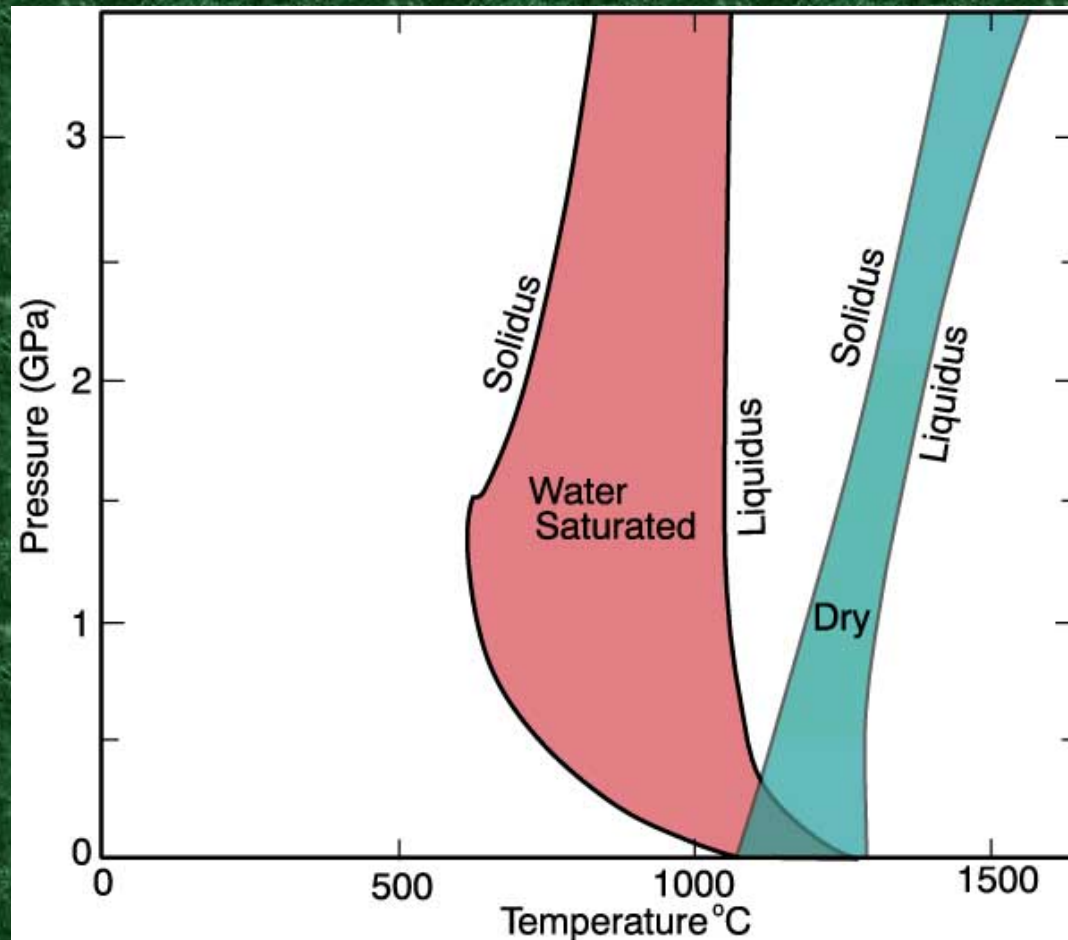


Slika II-35. Efekt litostatskog pritiska na likvidus i eutektički sastav u sustavu Di-An. 1 GPa podaci iz Presnall *et al.* (1978). *Contr. Min. Pet.*, 66, 203-220.



Slika II-36. Efekt zasićenja H₂O na albitsku 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.

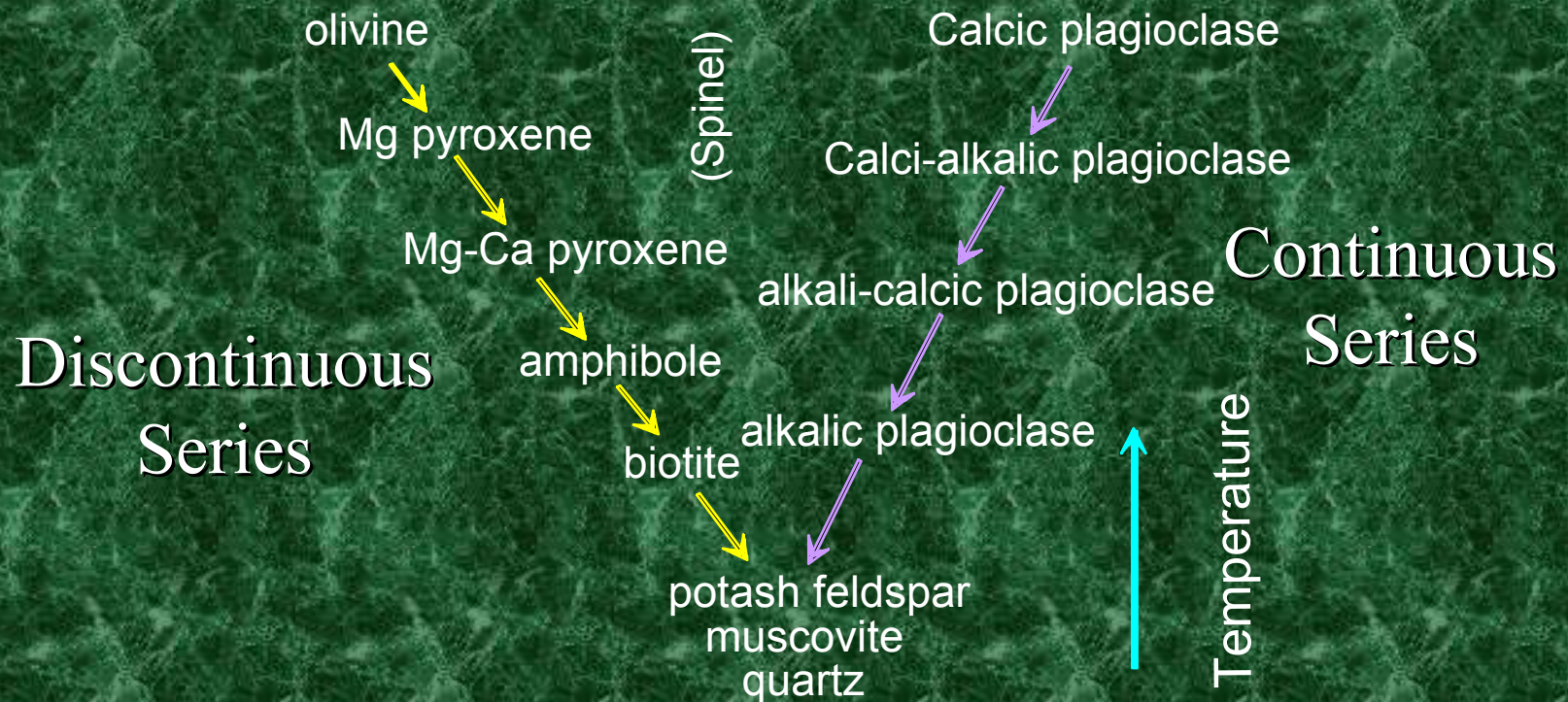
Efekt vode na kristalizaciju



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

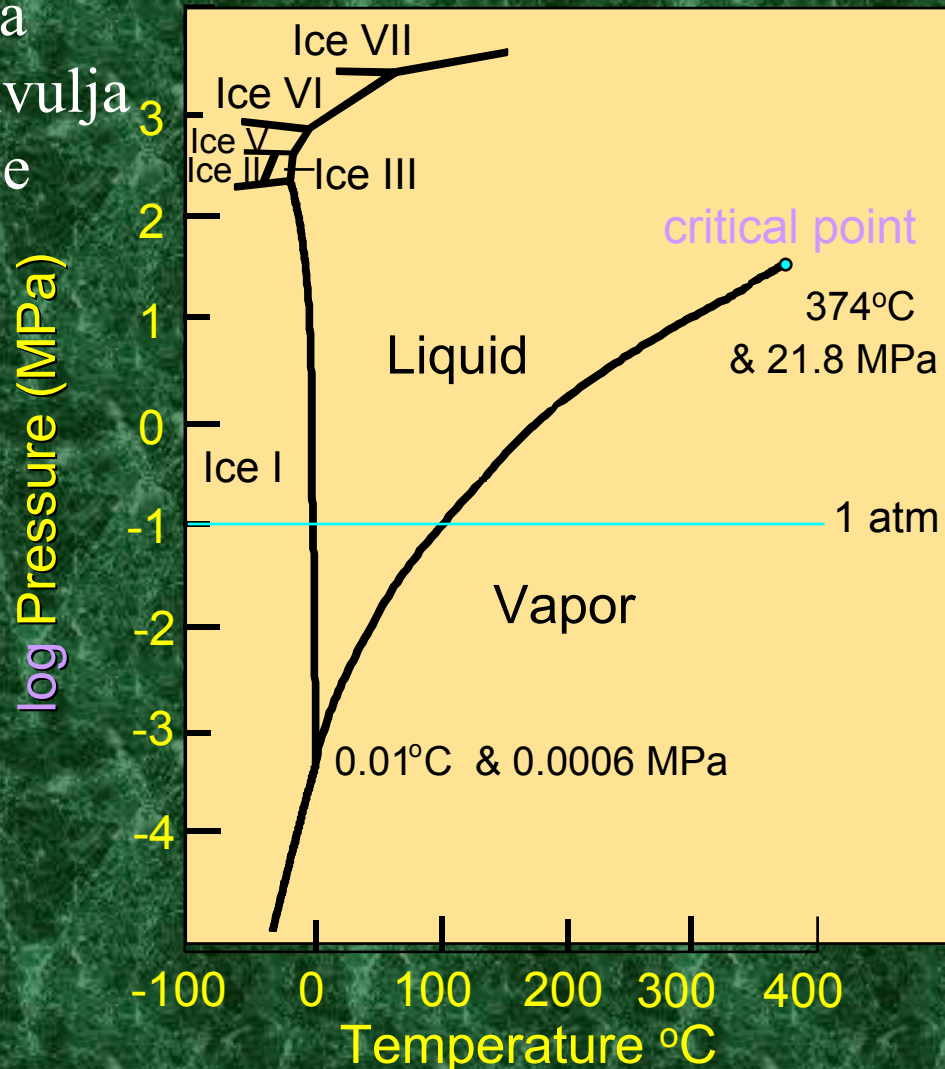
Obično = temperatura i tlak za potrebe geologa

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:

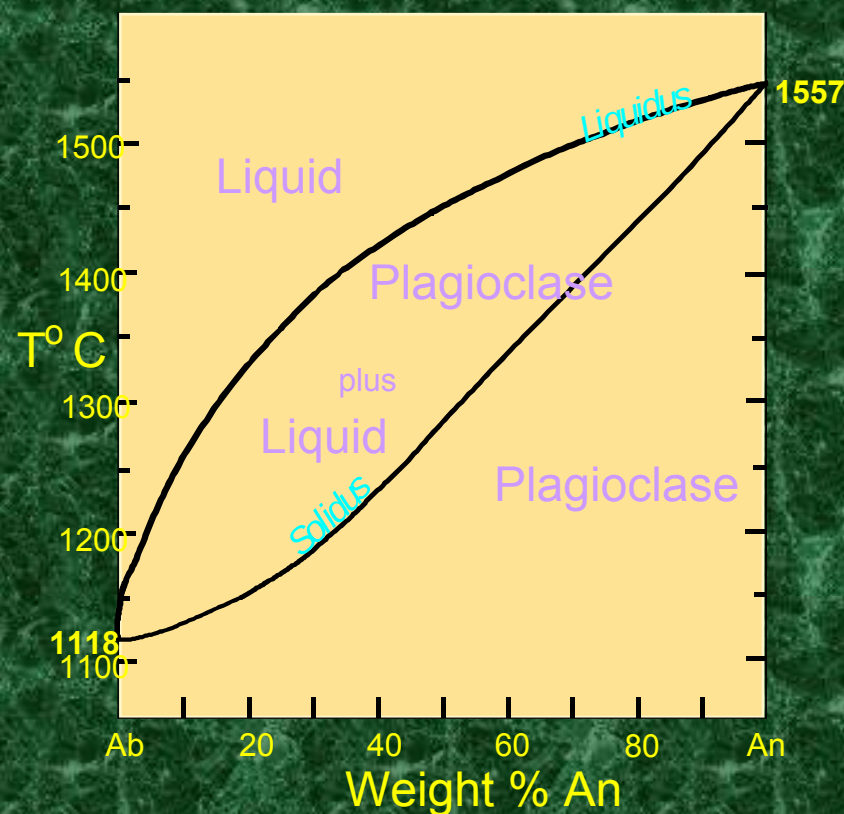
- Eutektik - zajednička točka kristalizacije, najniža T, kristalizacija do posljednje kapi taljevine
- Likvidus - linija ili krivulja na faznom dijagramu koja predstavlja početak kristalizacije određenog minerala (faze)
- Solidus - linija ili krivulja na faznom dijagramu koja pokazuje najnižu temperaturu 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

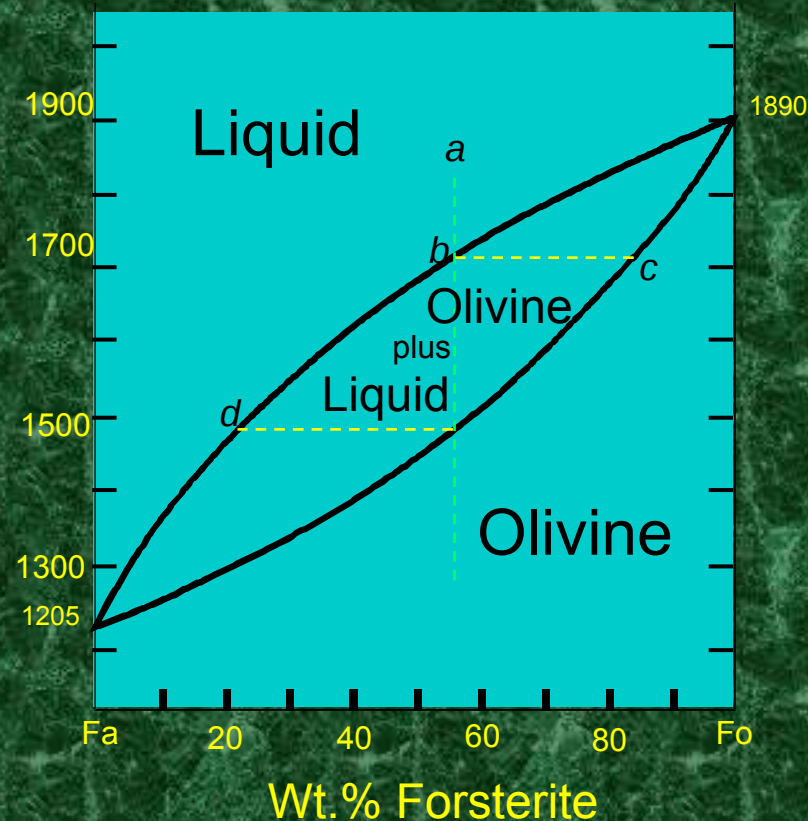
A. Sustav minerala mješanaca (“cigara”) Complete Solid Solution

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

2. **Olivin** Fo - Fa (Mg_2SiO_4 - Fe_2SiO_4)

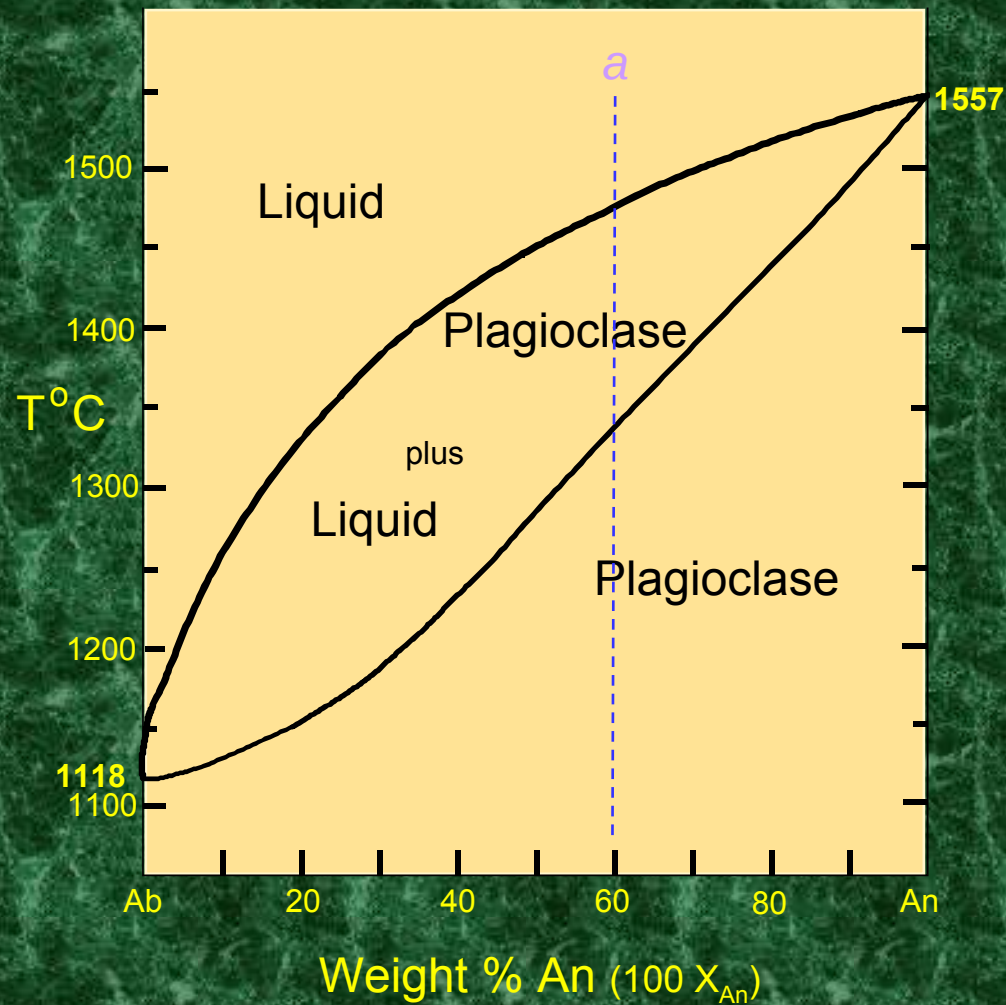


Izobarni T-X fazni dijagram pri atmosferskom tlaku (prema Bowen 1913, Amer. J. Sci., **35**, 577-599).



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

Sastav taljevine $a = \text{An}_{60}$

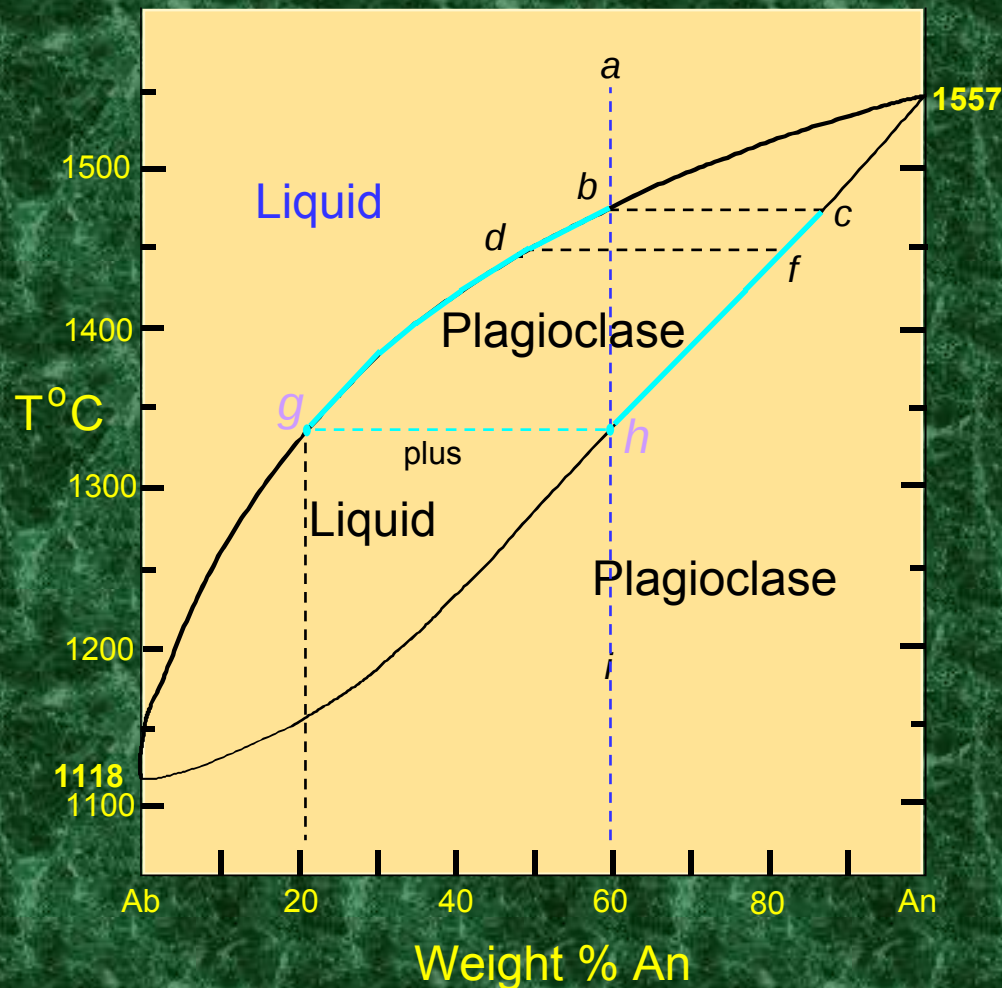
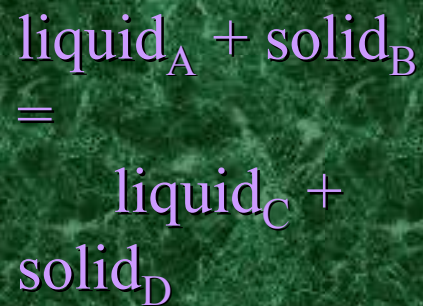


Na 1450°C, taljevina b (d, g) i plagioklas c (f, h) koegzistiraju u ravnoteži

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

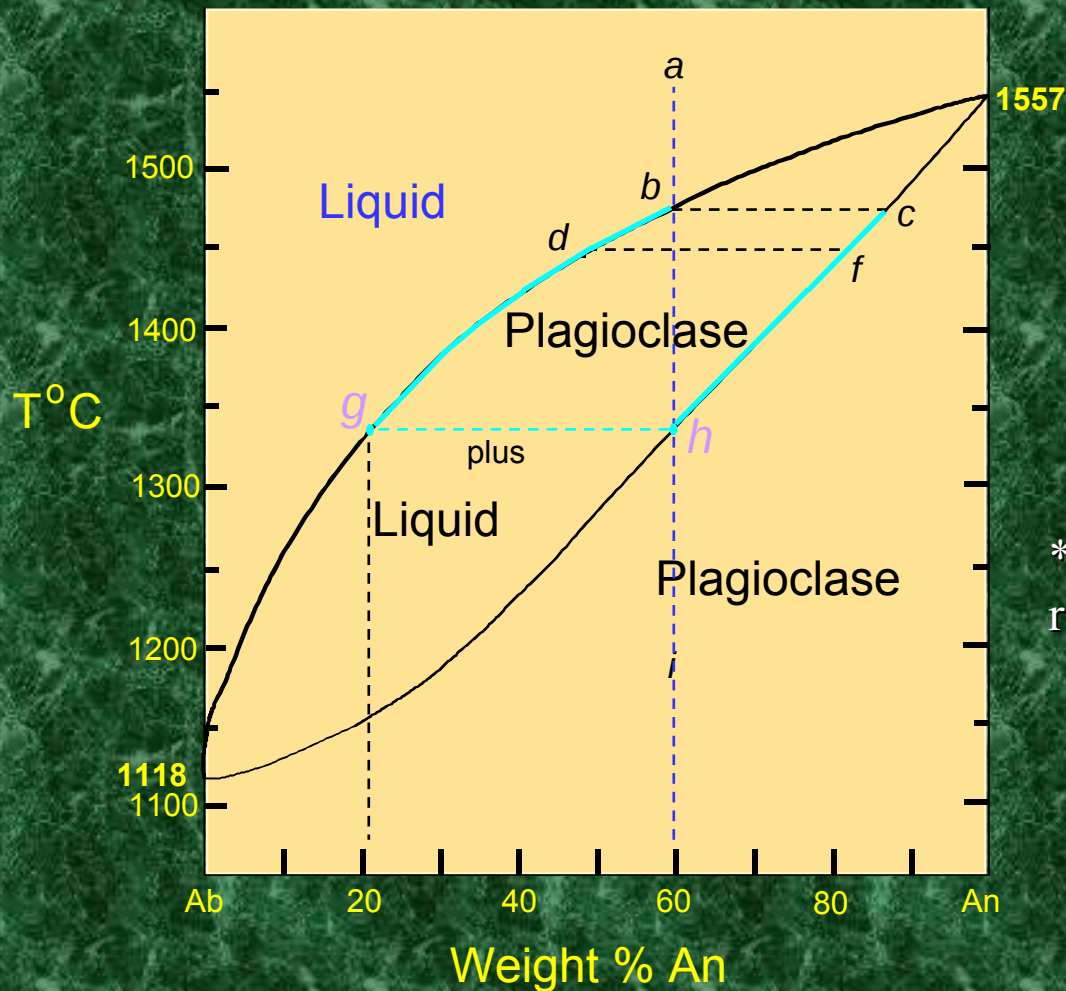
Zbog toga g je sastav zadnje taljevine koja kristalizira pri 1340°C za ukupan sastav $X = 0.60$

Kontinuirana
reakcija:



Bitno:

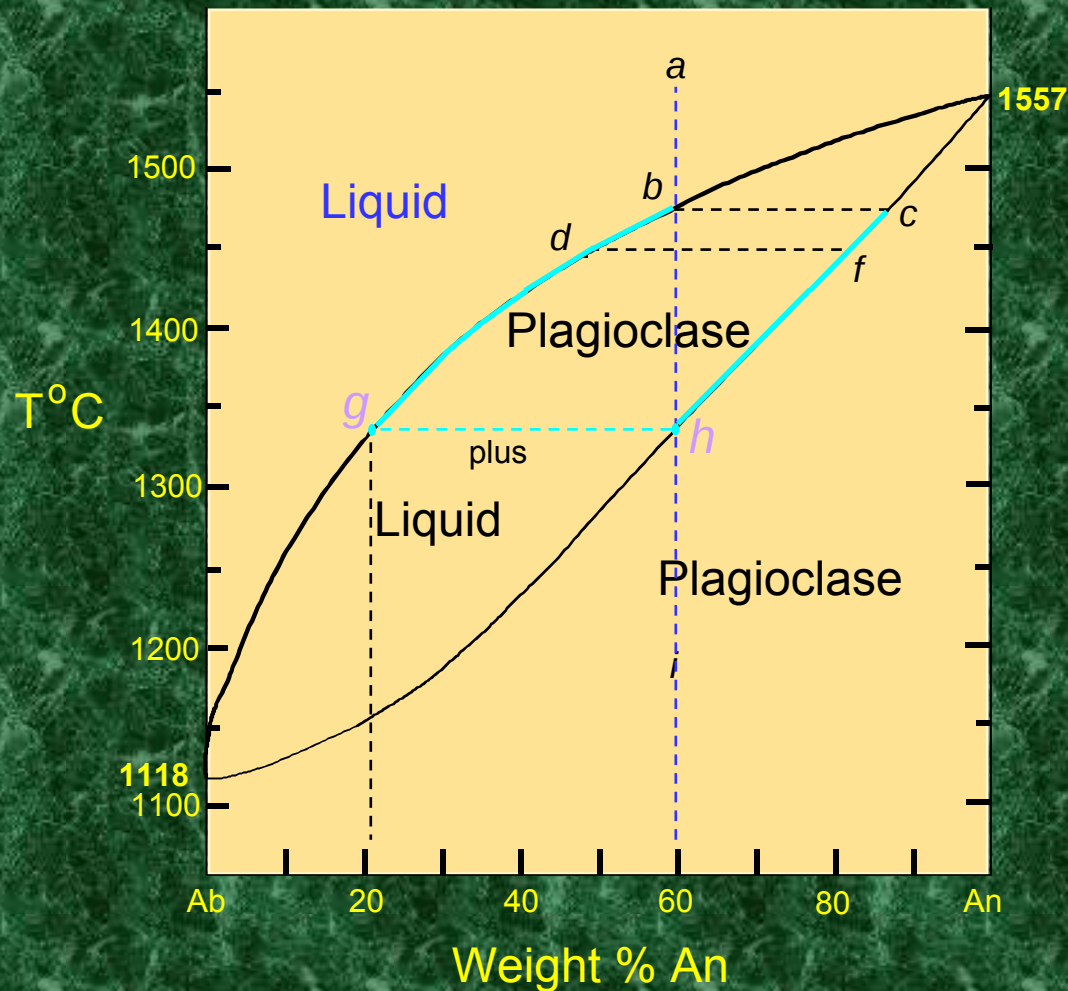
1. Taljevina kristalizira u T rasponu od 135°C *
2. Sastav taljevine se mjenja od **b** do **g**
3. Sastav krutine se mjenja od **c** do **h**



* Stvarni temperaturni raspon ovisi o sastavu

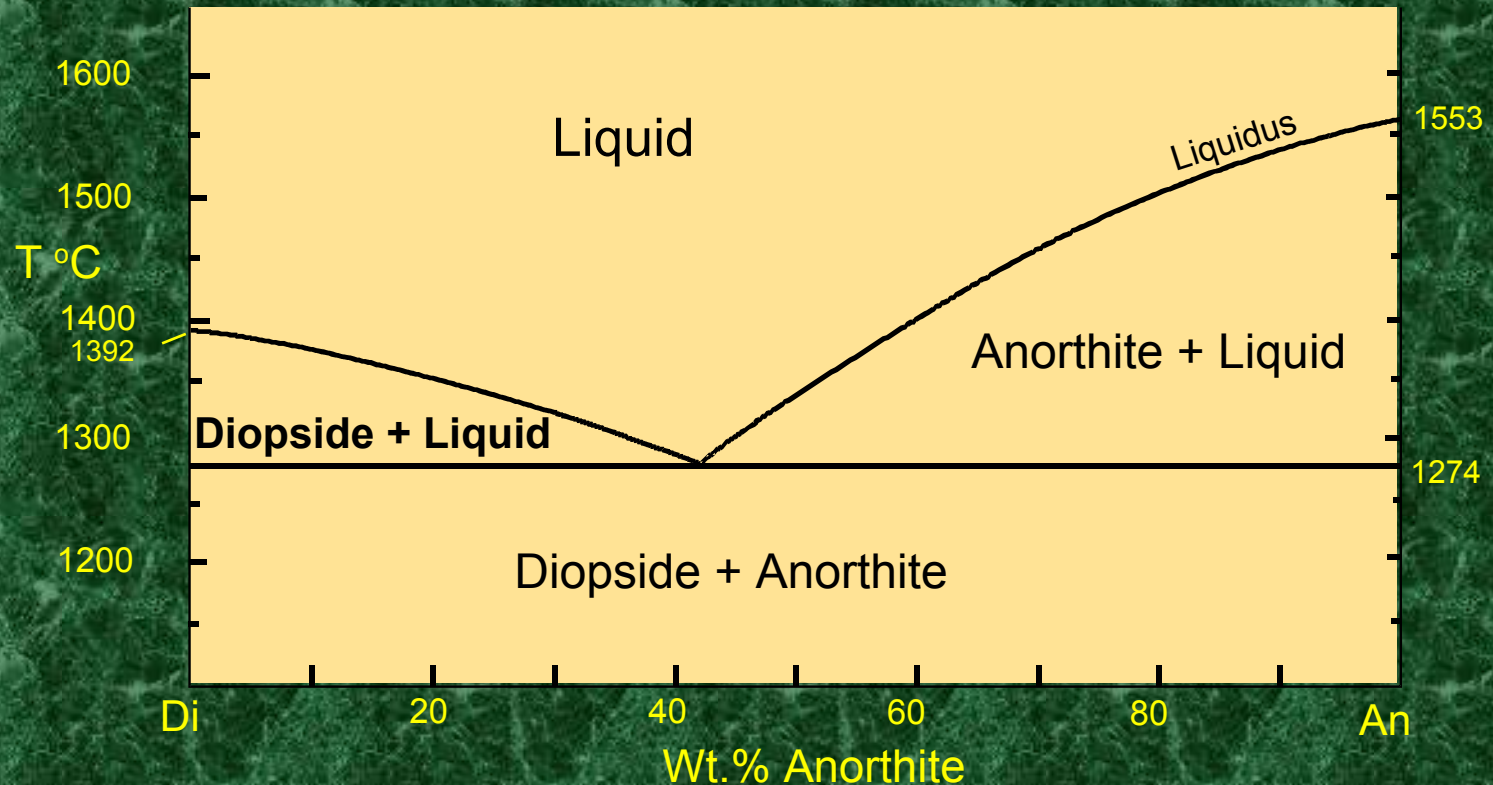
Ravnotežno **taljenje** idu u točno suprotnom smjeru

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



2-komponentni sustav s eutektikom

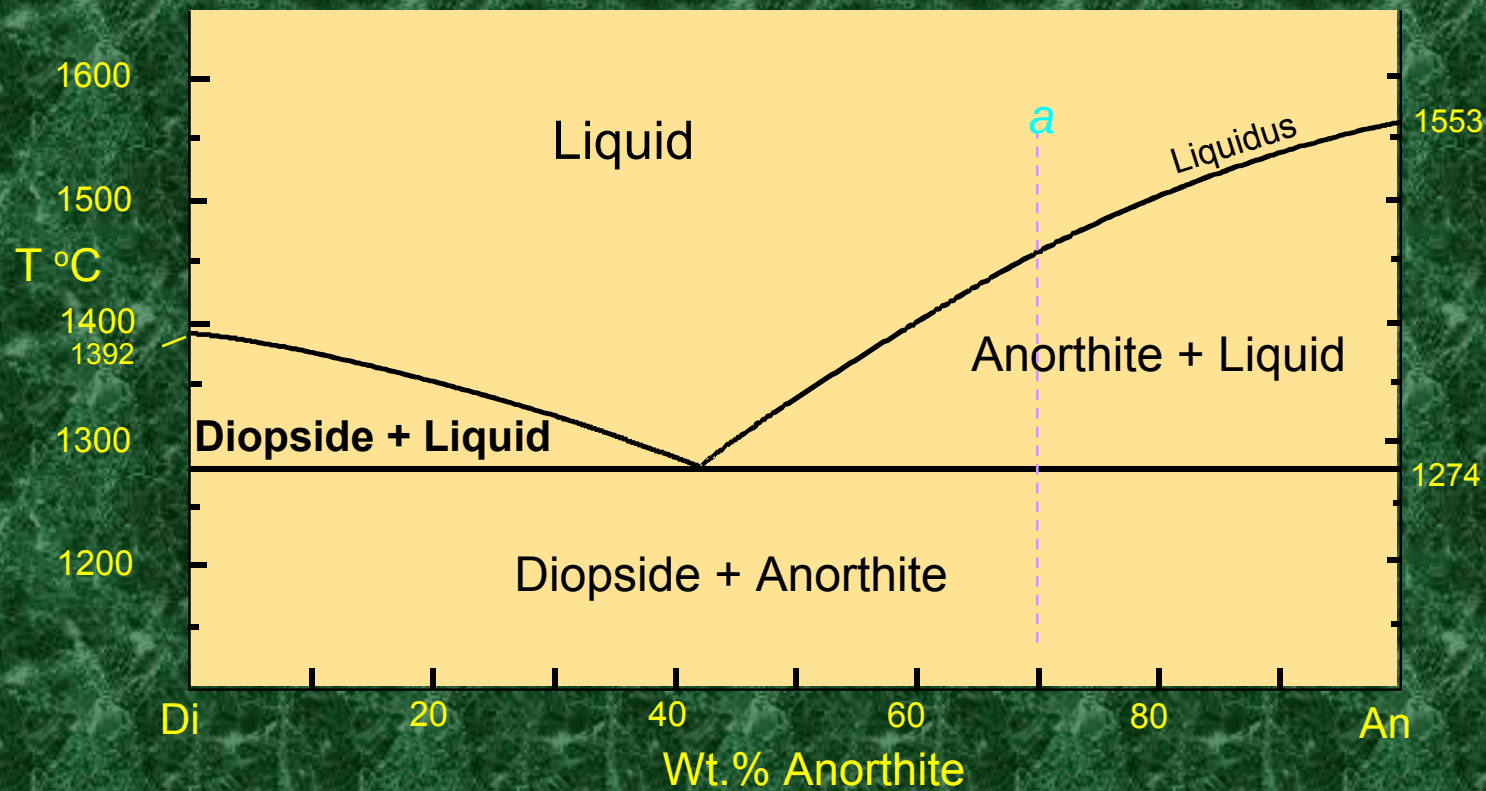
B. Diopsid - Anortit



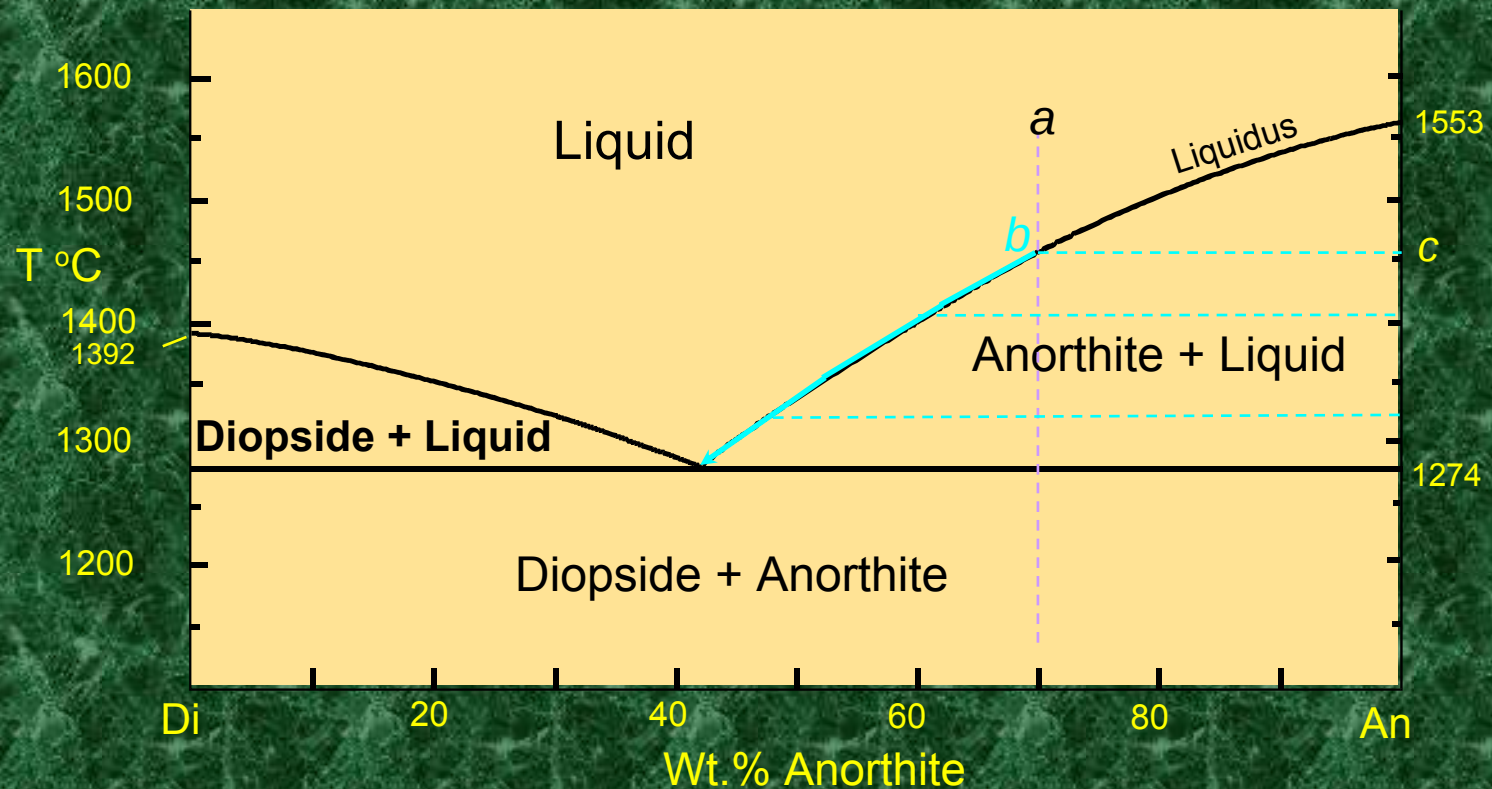
Izobarni T-X fazni dijagram pri atmosferskom tlaku (Prema Bowen (1915), *Amer. J. Sci.* **40**, 161-185).

Hlađenje sastava **a**:

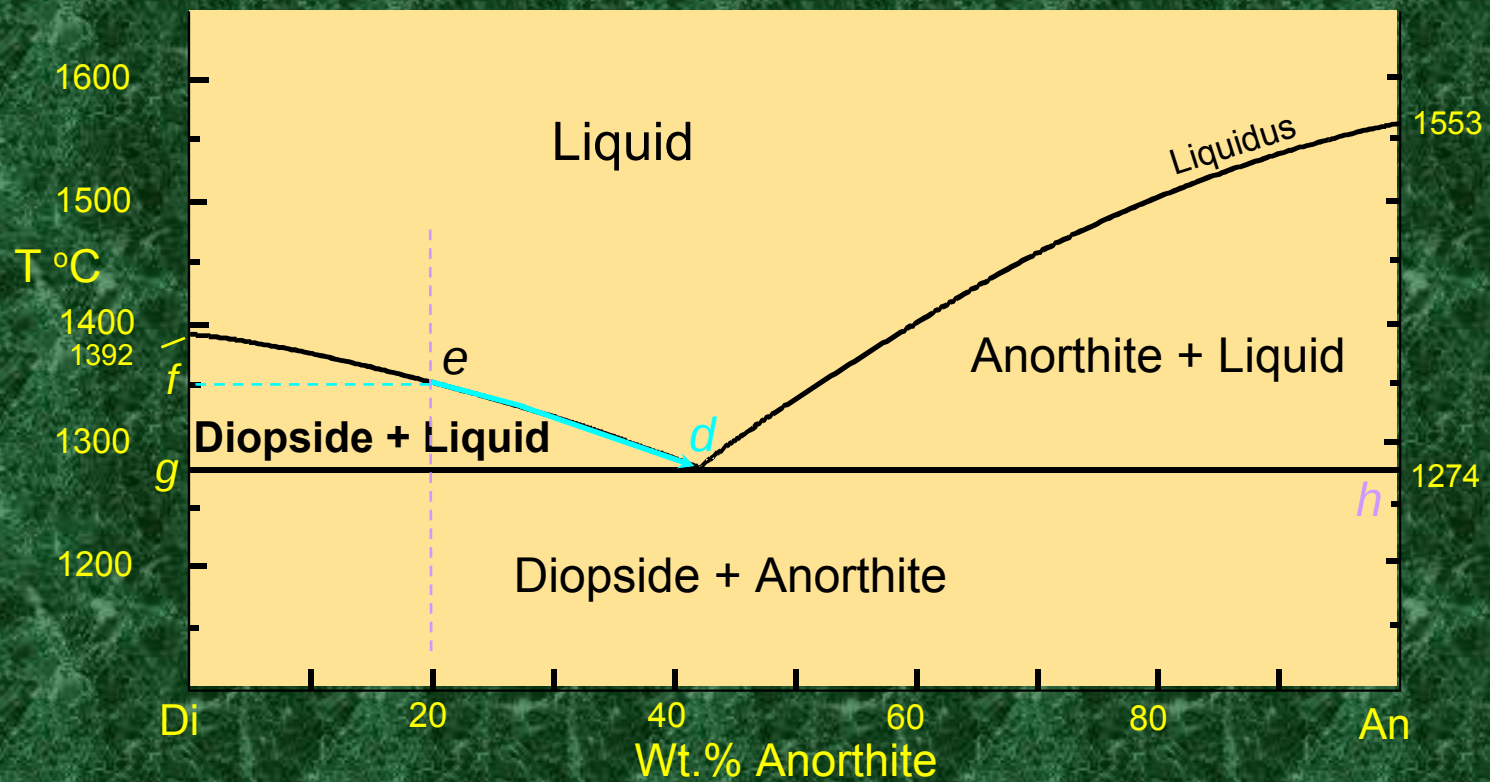
Ukupni sastav = **An**₇₀



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

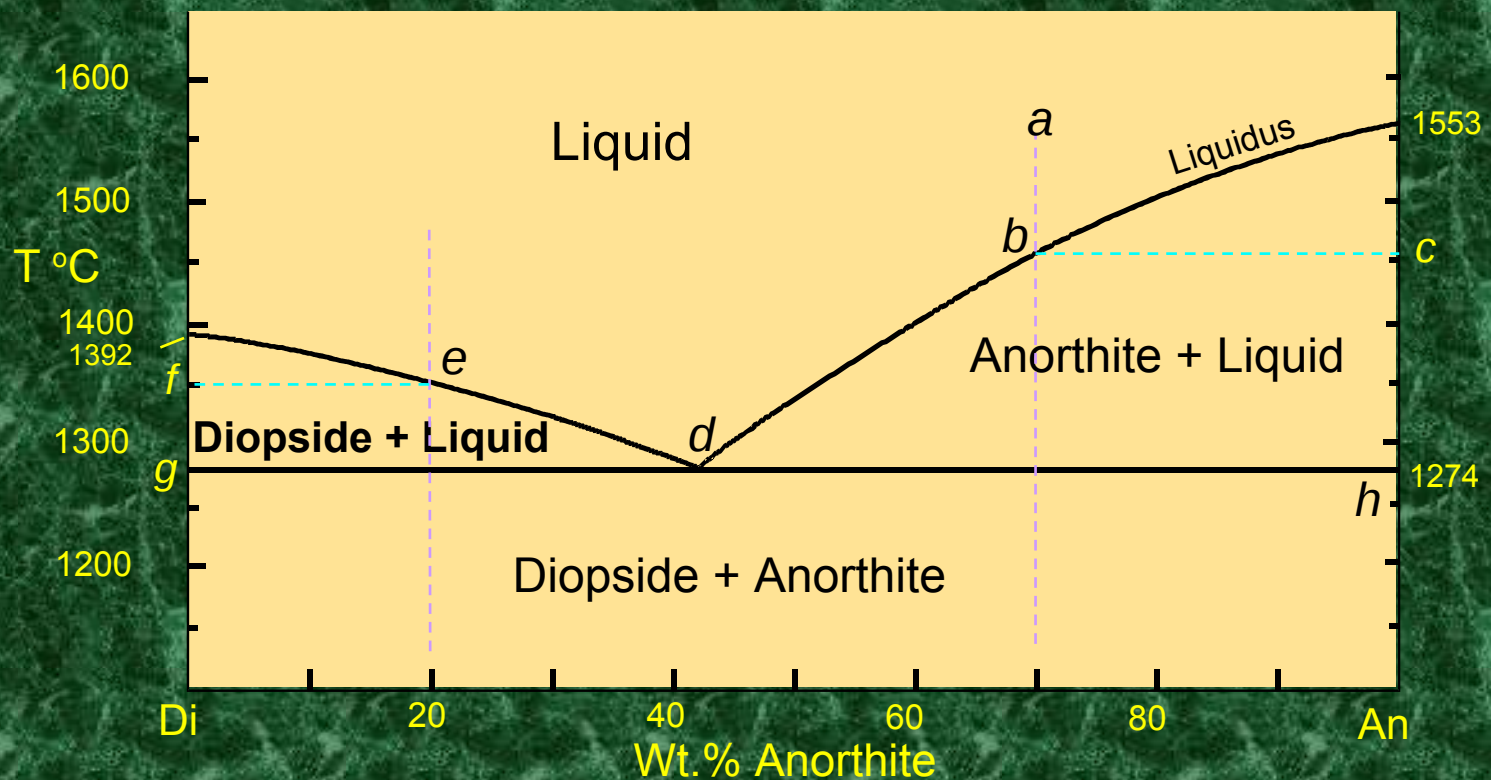


S lijeve strane eutektika slična situacija

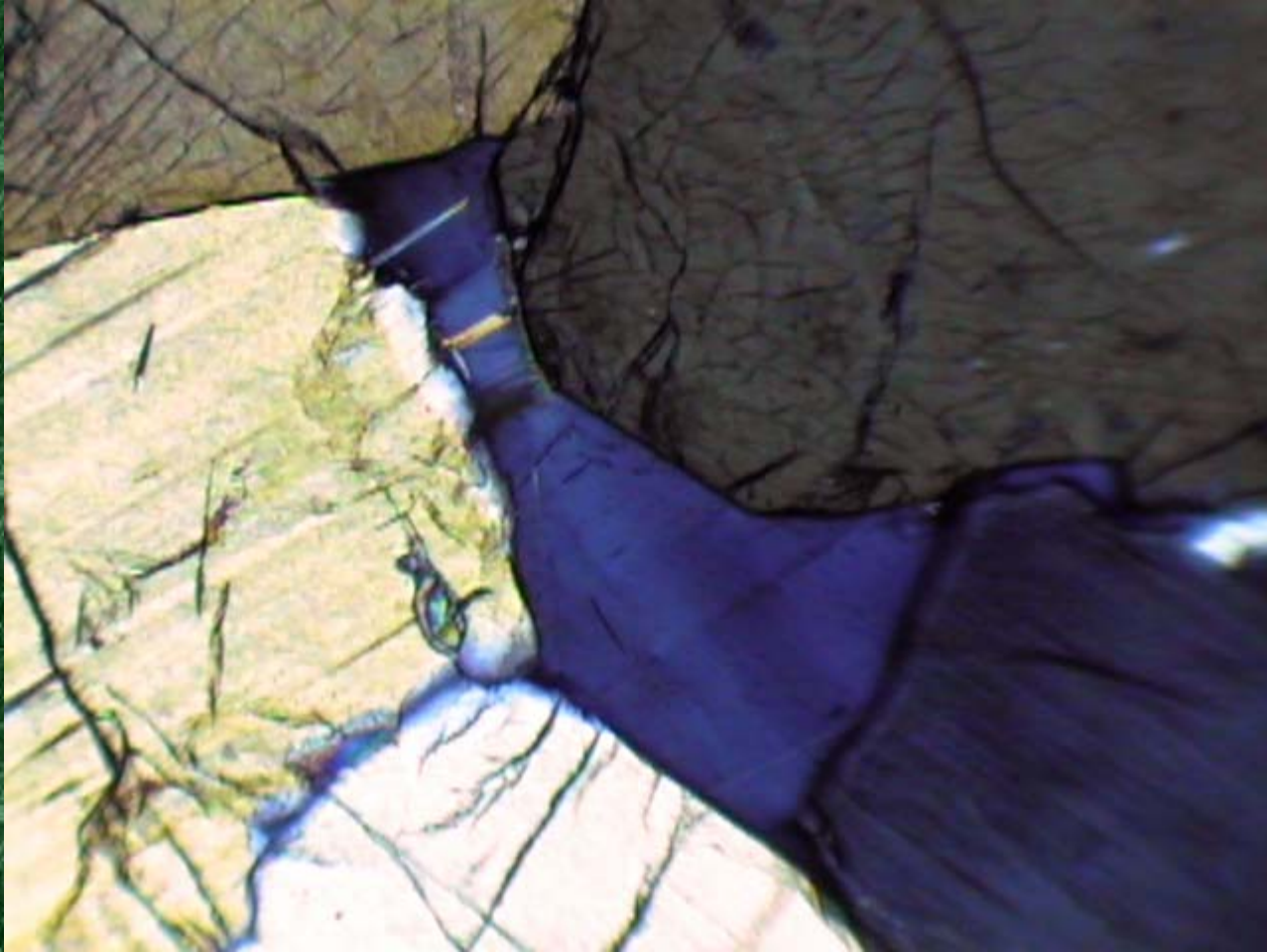


Bitno:

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

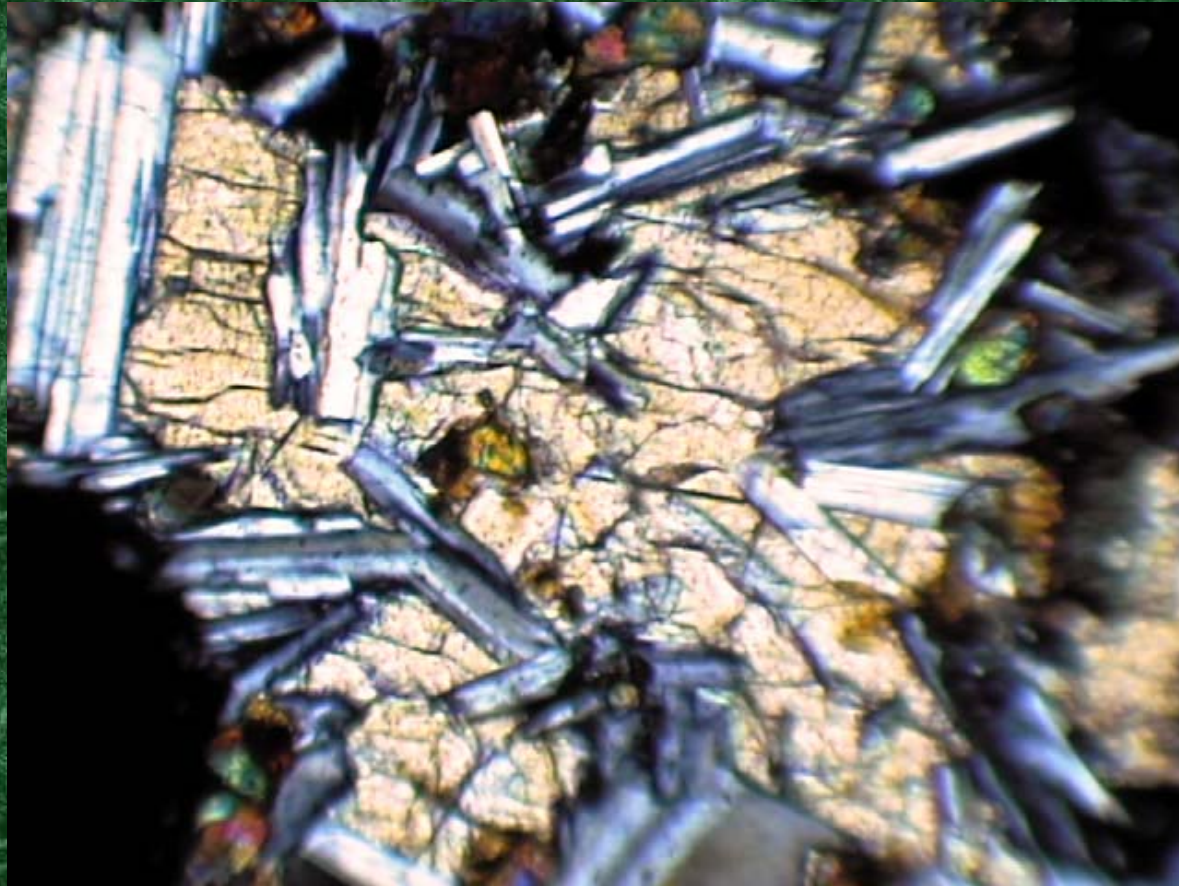


Gabro
(Stillwater
Complex,
Montana)

Nastaje s lijeve strane eutektika

Plagioklas nastaje prije augita

Ofitska struktura

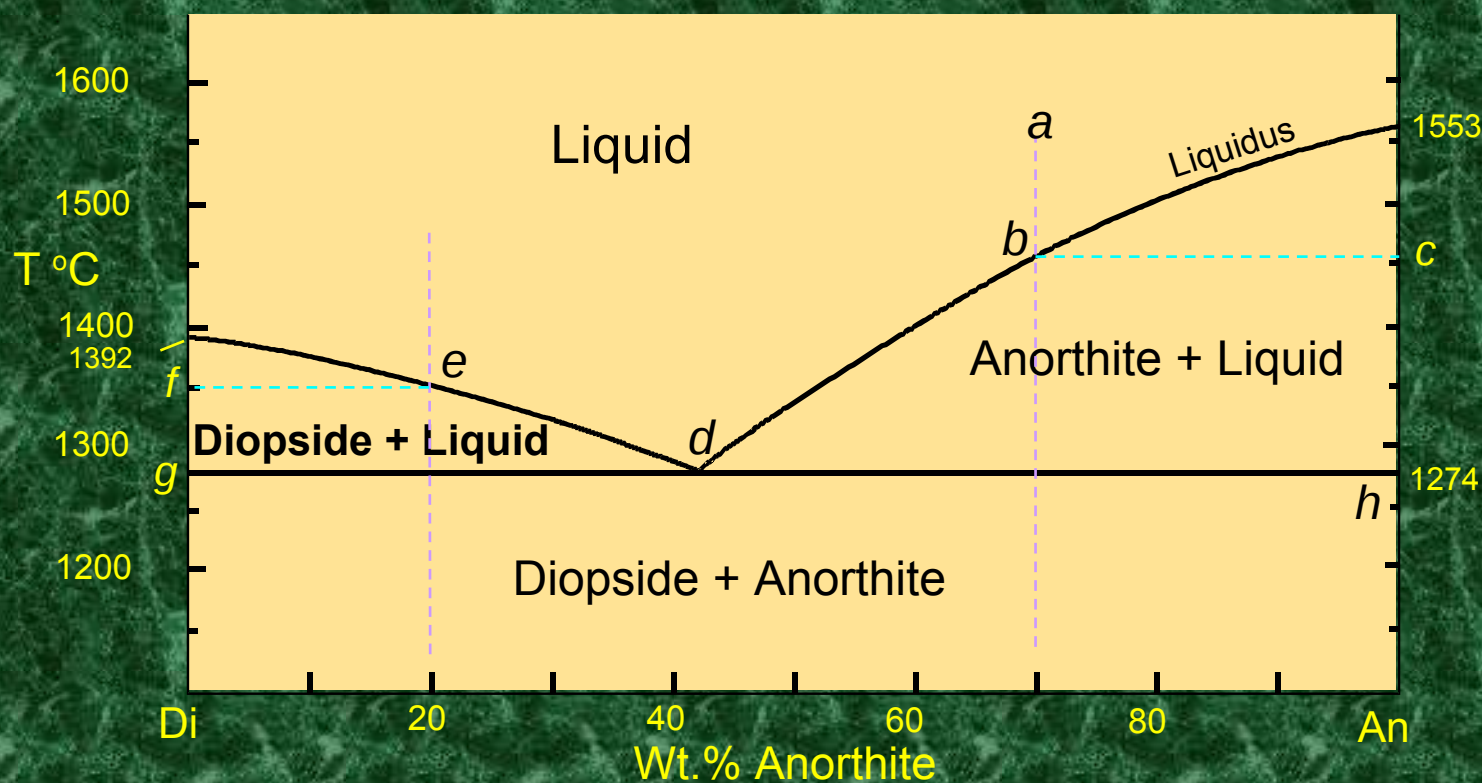


Dijabaz

Nastaje na desnoj strani od eutektika

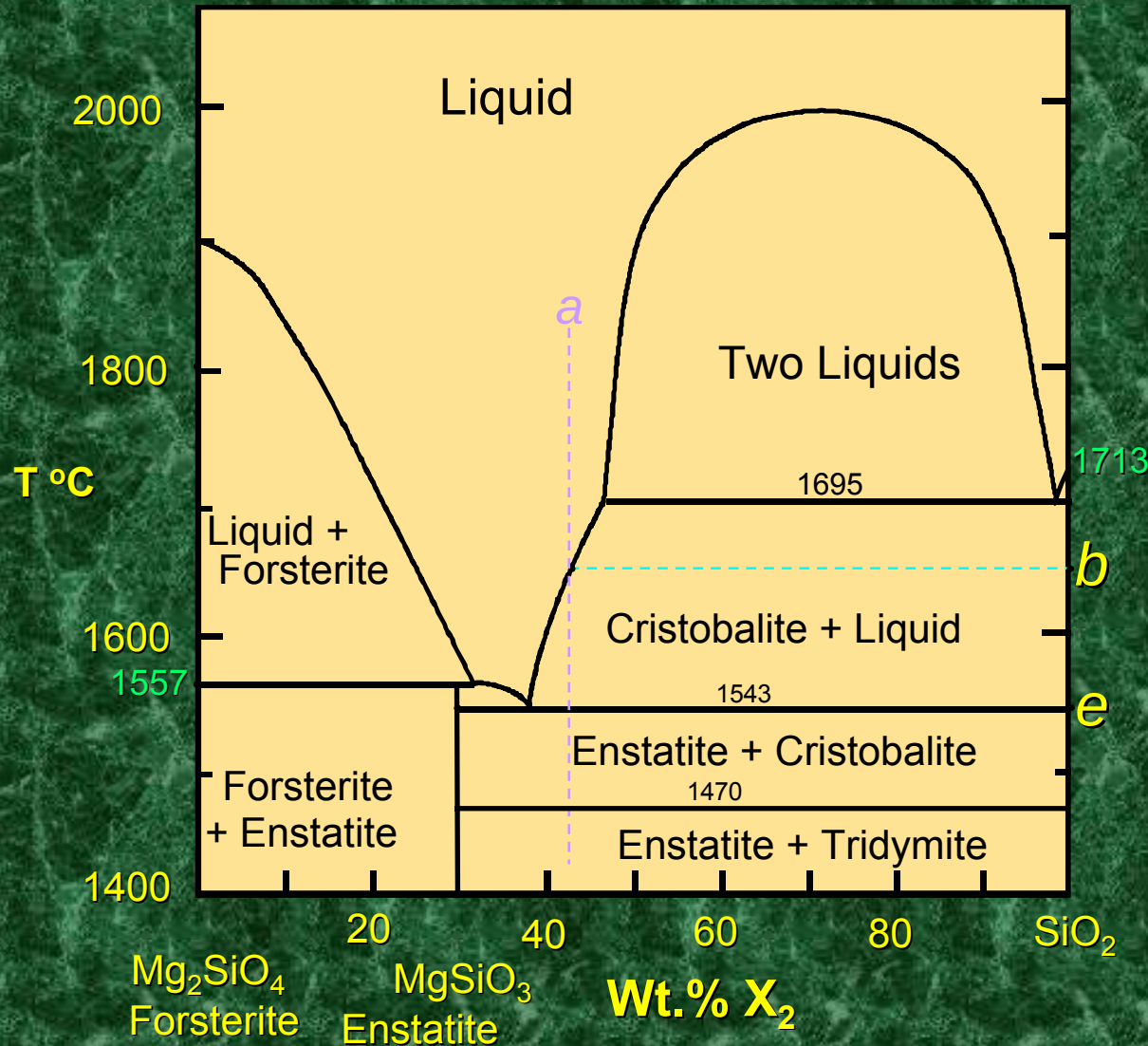
Bitno:

- 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

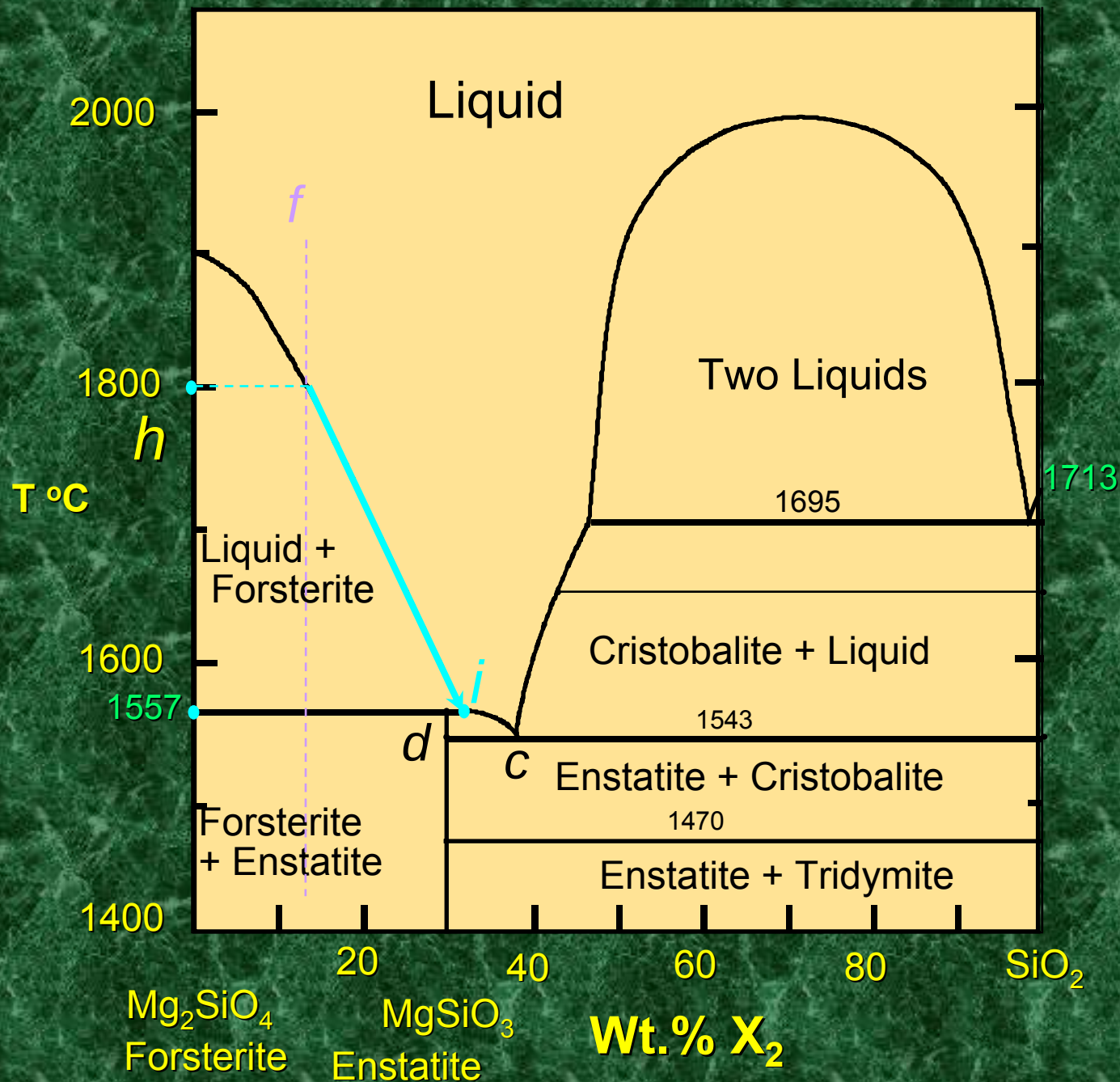
Na 1625°C

Kristobalit T= b

Slika III-12. Izobarni T-X fazni dijagram u sustavu Fo-SiO₂ pri 0.1 MPa. Prema Bowen and Anderson (1914) and Grieg (1927). Amer. J. Sci.

$f = 13 \text{ wt. \%}$
pri 1800°C nastaje
olivin (Fo)

Na 1557°C nastaje opx
(En)

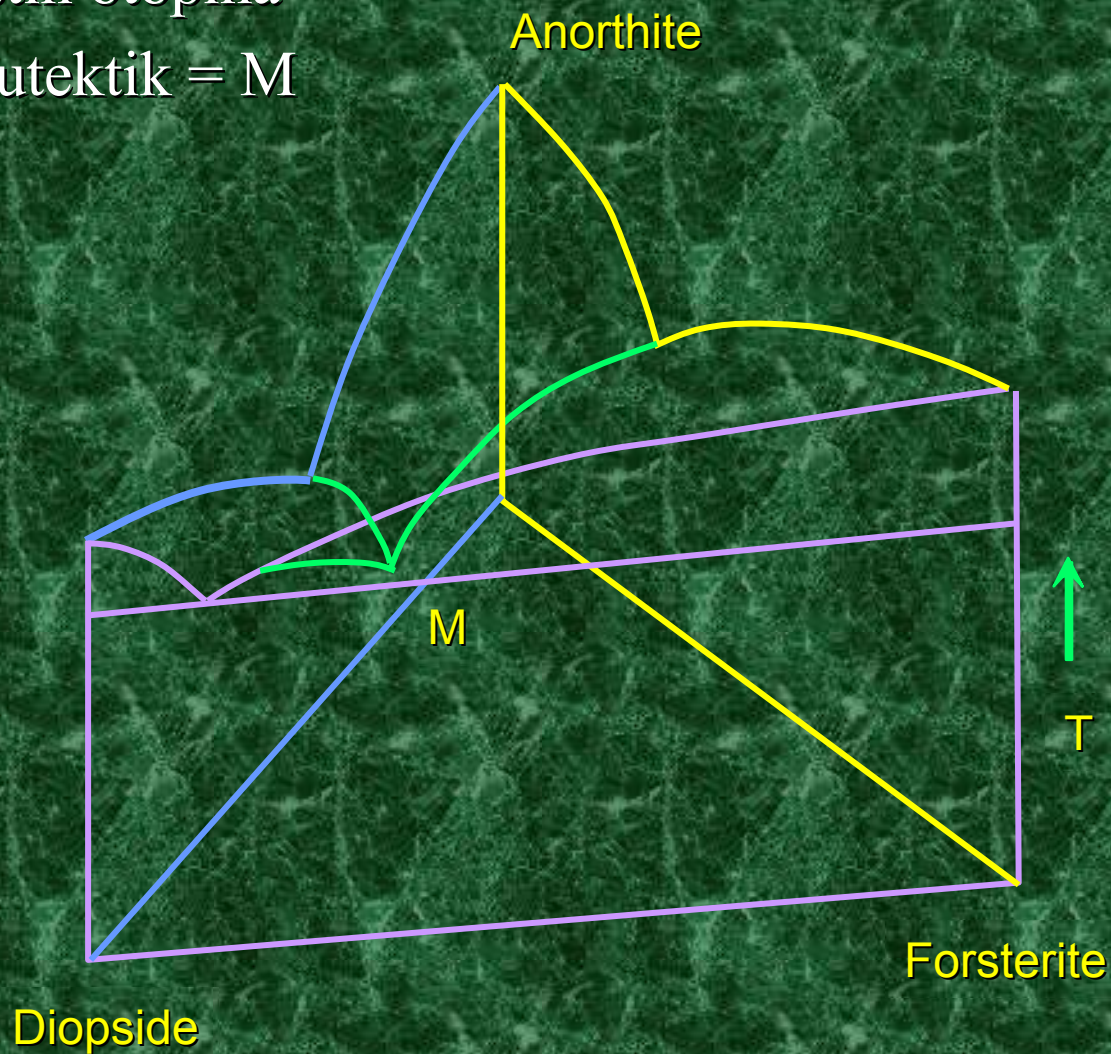
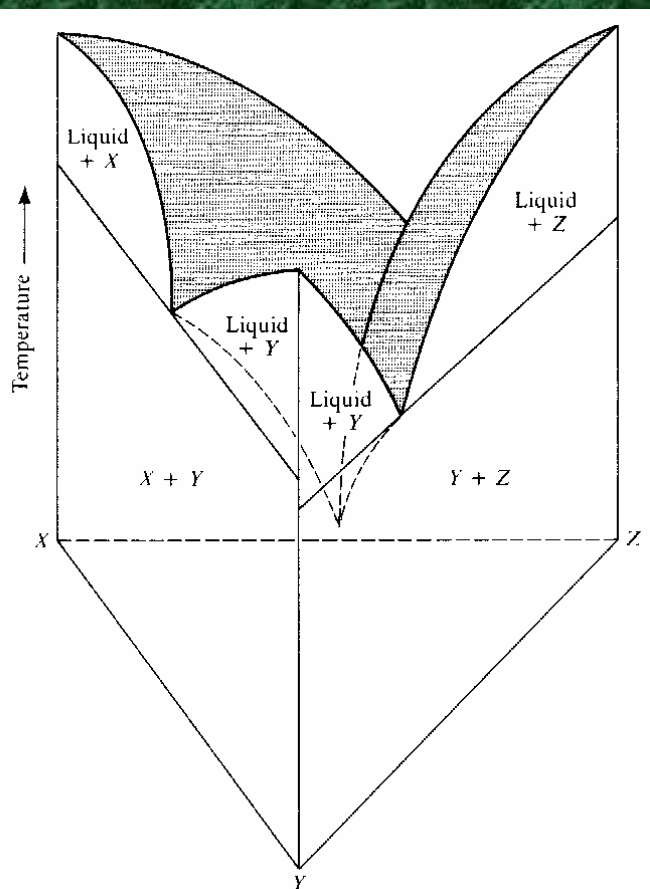


Ternarni sustavi Di - An - Fo

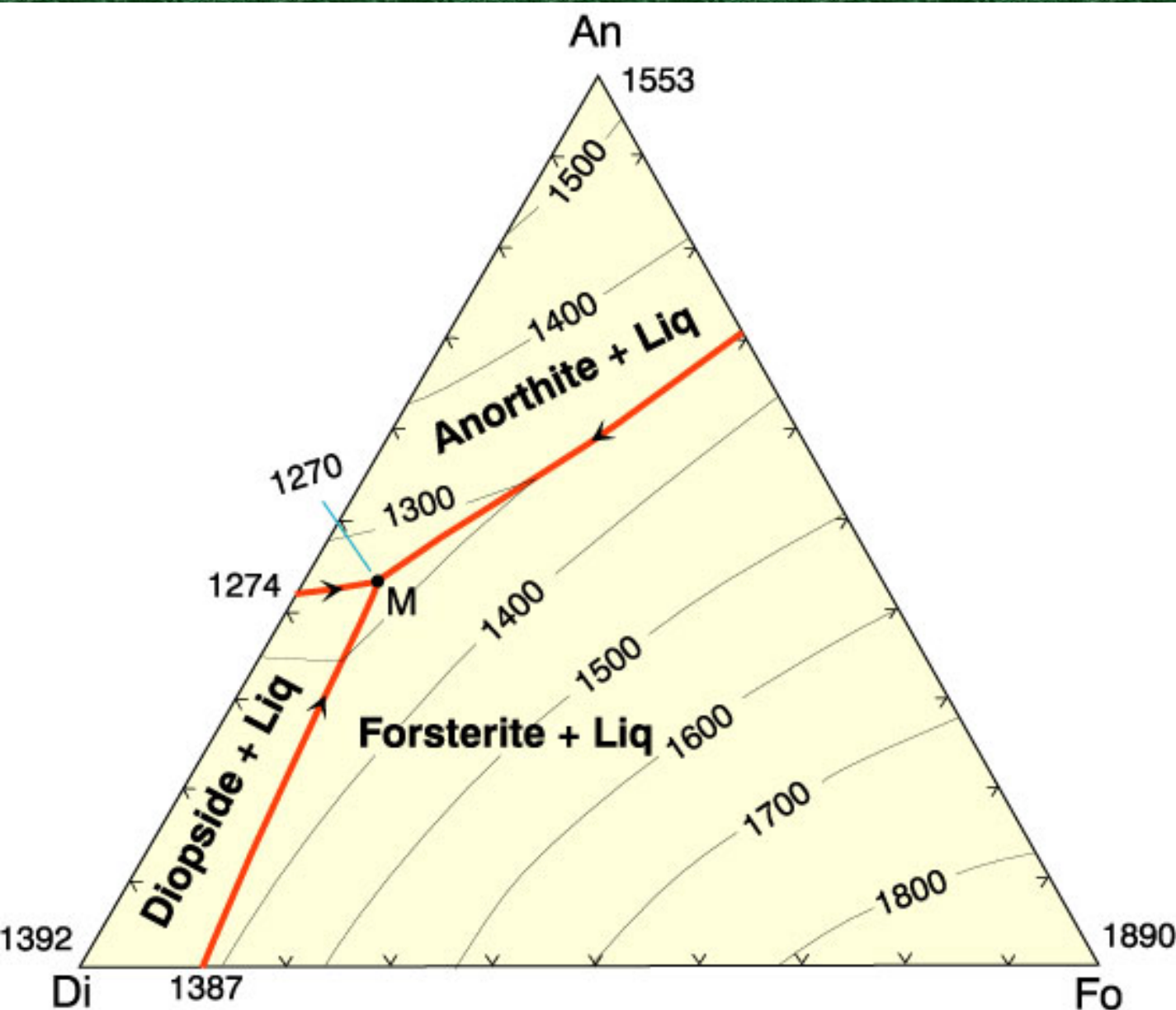
3 binarna eutektika

Nema čvrstih otopina

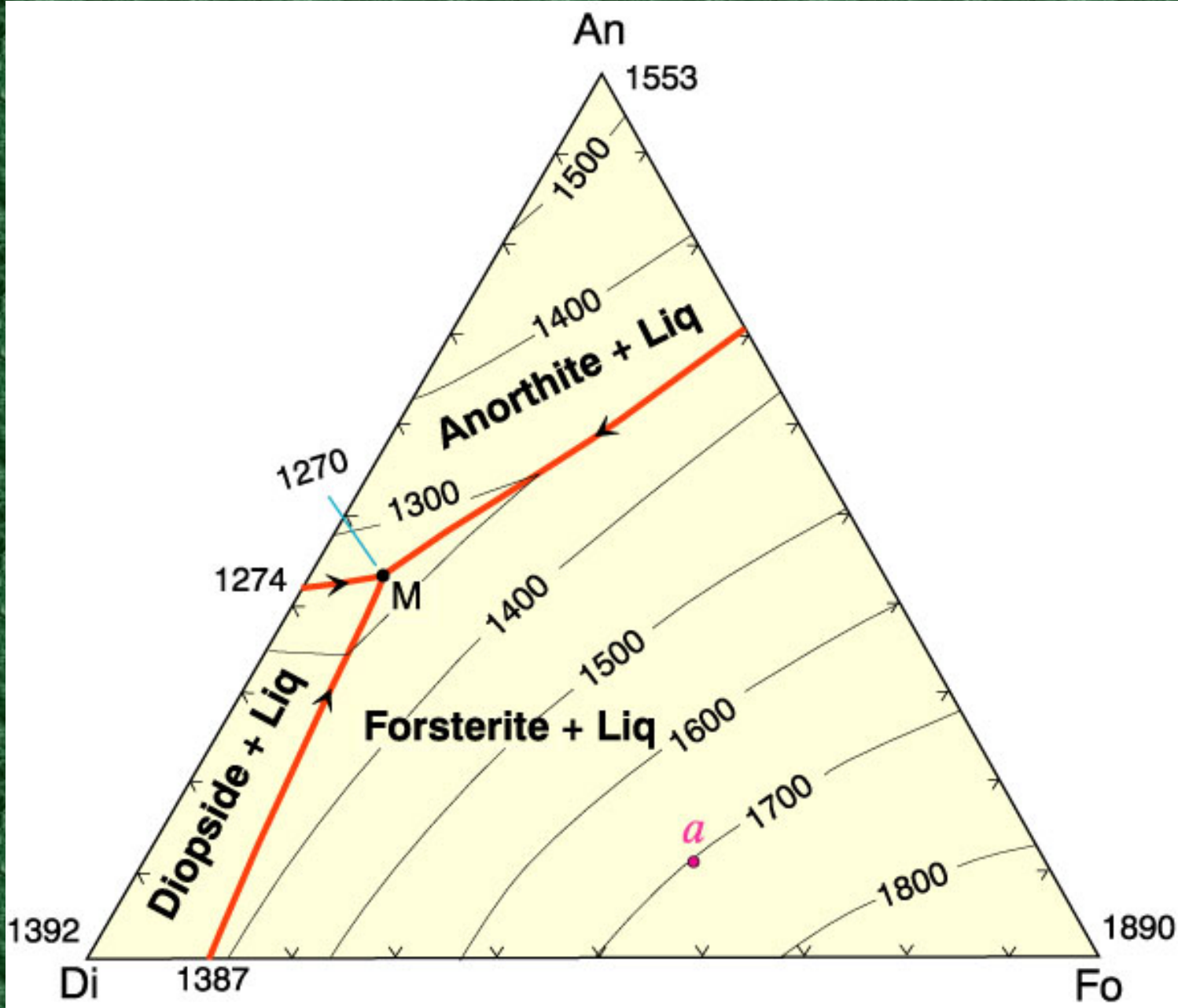
Ternarni eutektik = M

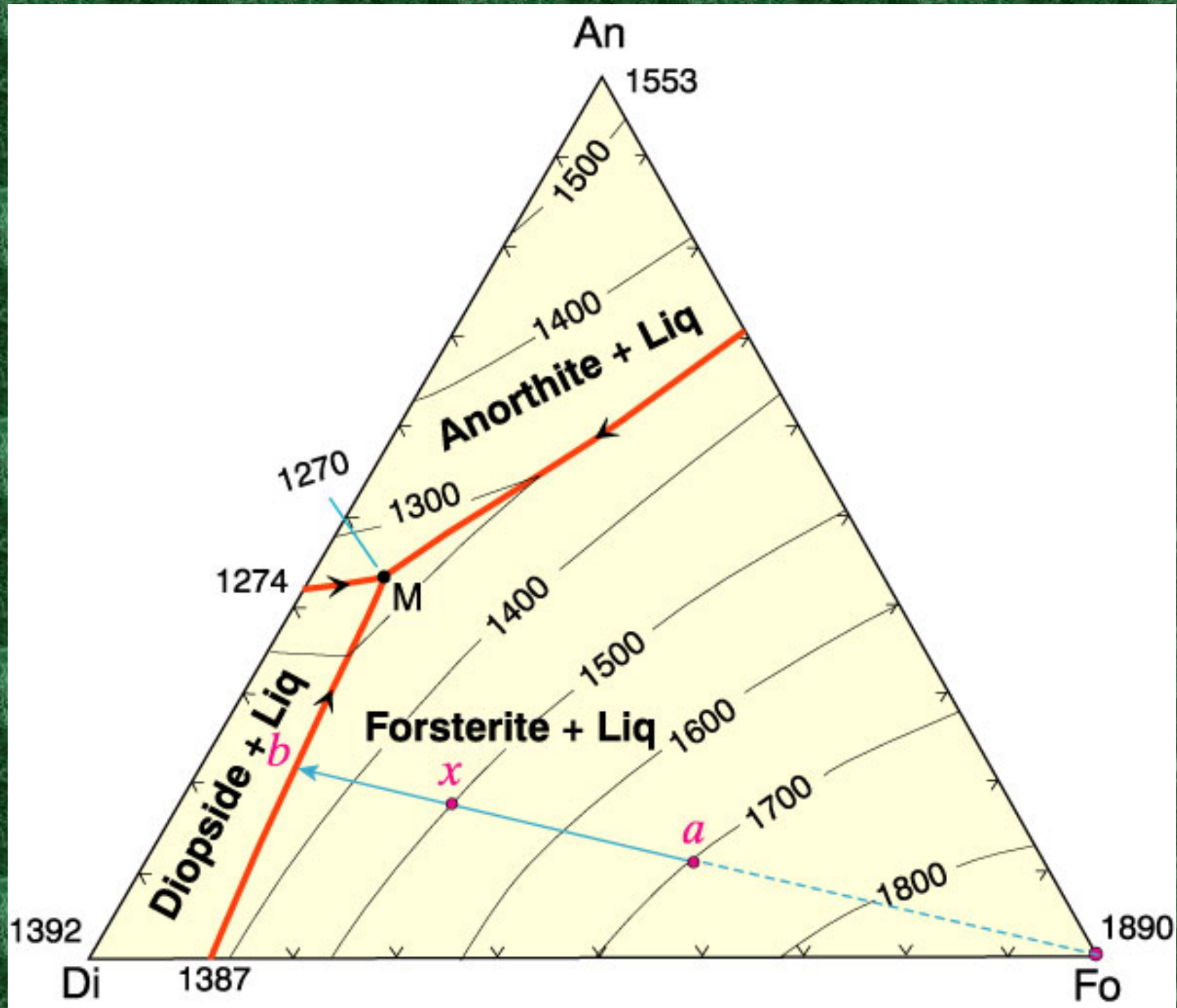


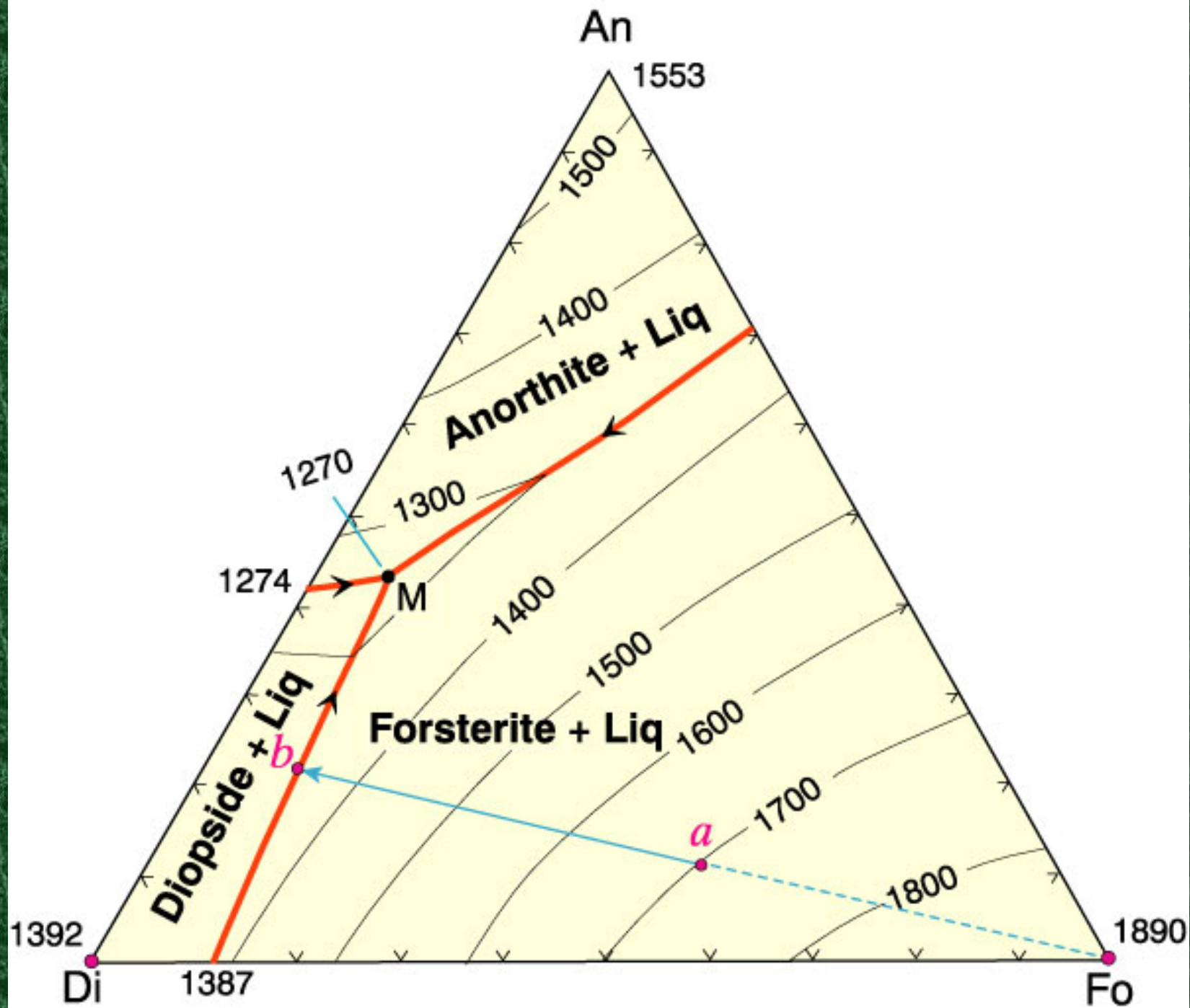
T - X projekcija Di - An - Fo



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.



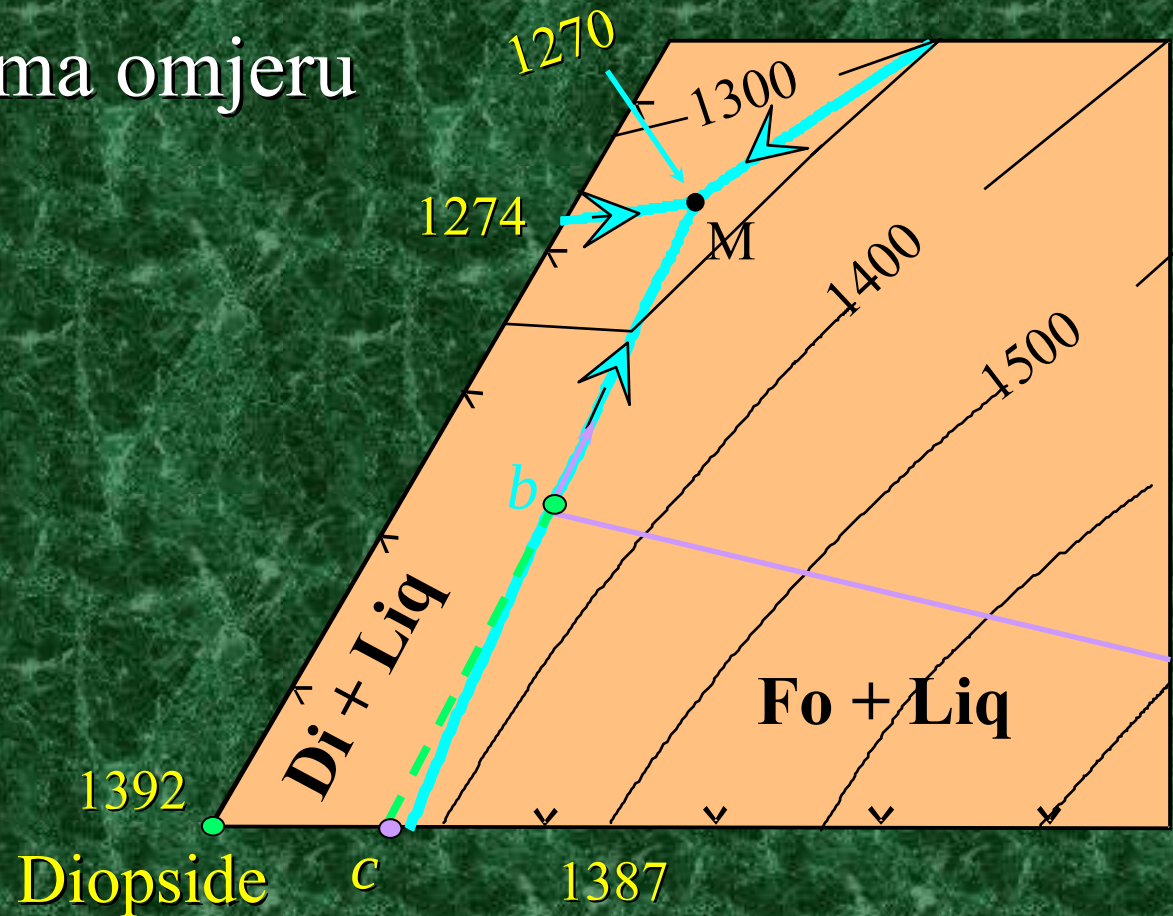


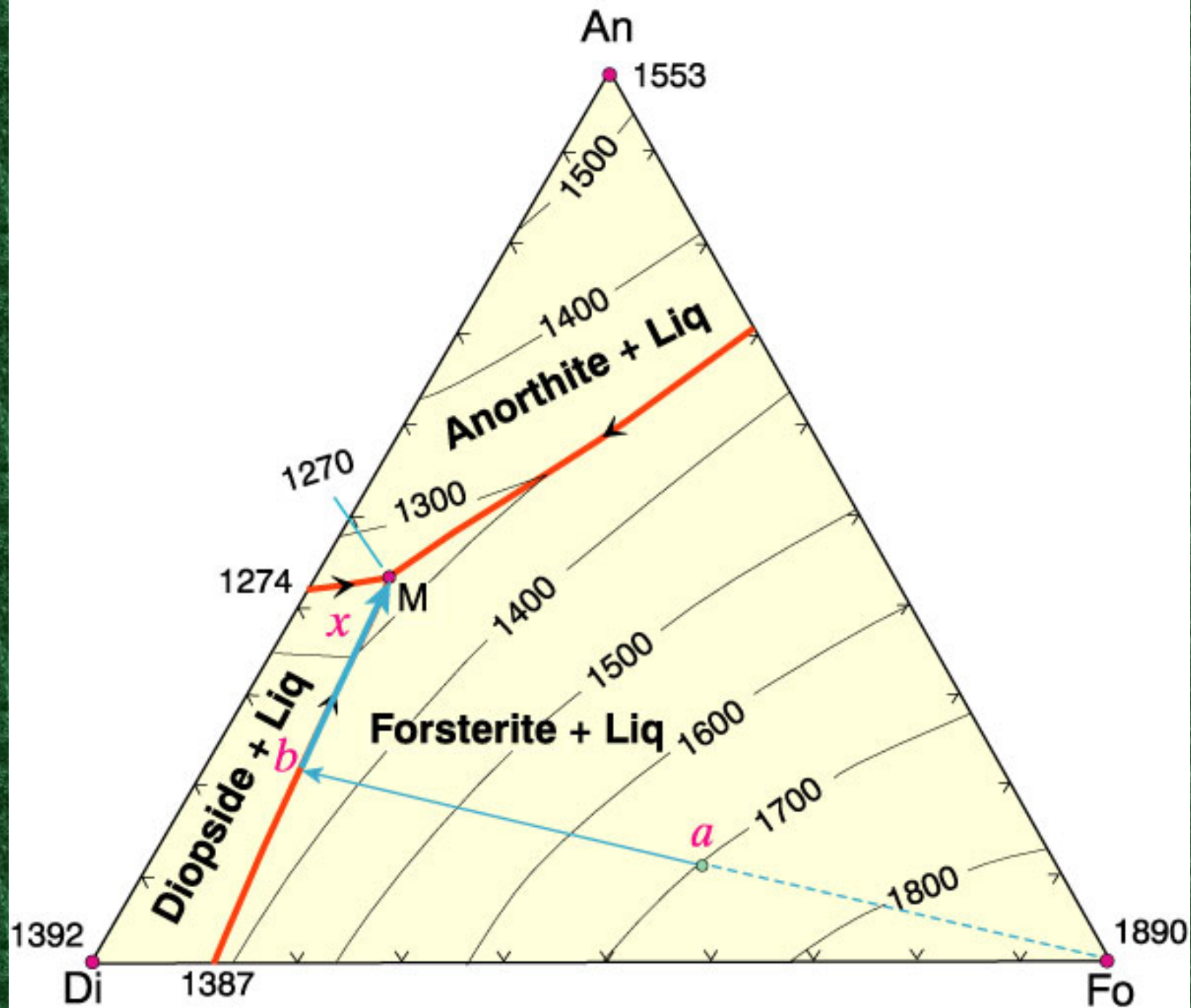


- Nova kontinuirana reakcija kako taljevina slijedi kotektičku liniju:



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





Gravitacijska diferencijacija Stoke-sov zakon

$$V = \frac{2gr^2(\rho_s - \rho_l)}{9\eta}$$

V = brzina tonjenja (cm/sec)

g = ubrzanje uslijed gravitacije (980 cm/sec²)

r = *radius* sferične čestice (cm)

ρ_s = gustoća krute sferične čestice (g/cm³)

ρ_l = gustoća taljevine (g/cm³)

η = 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

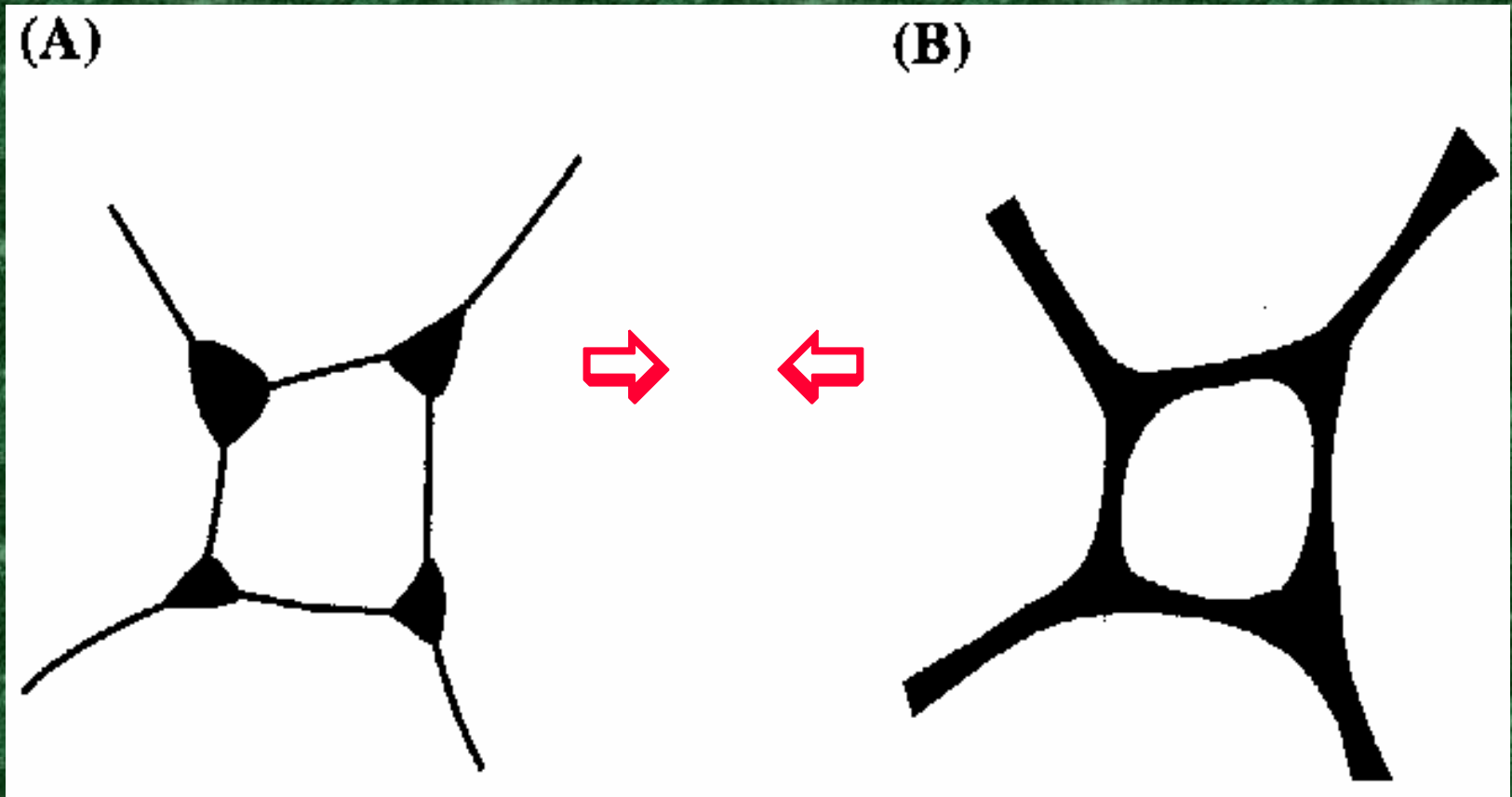
Bazaltna taljevina

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

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

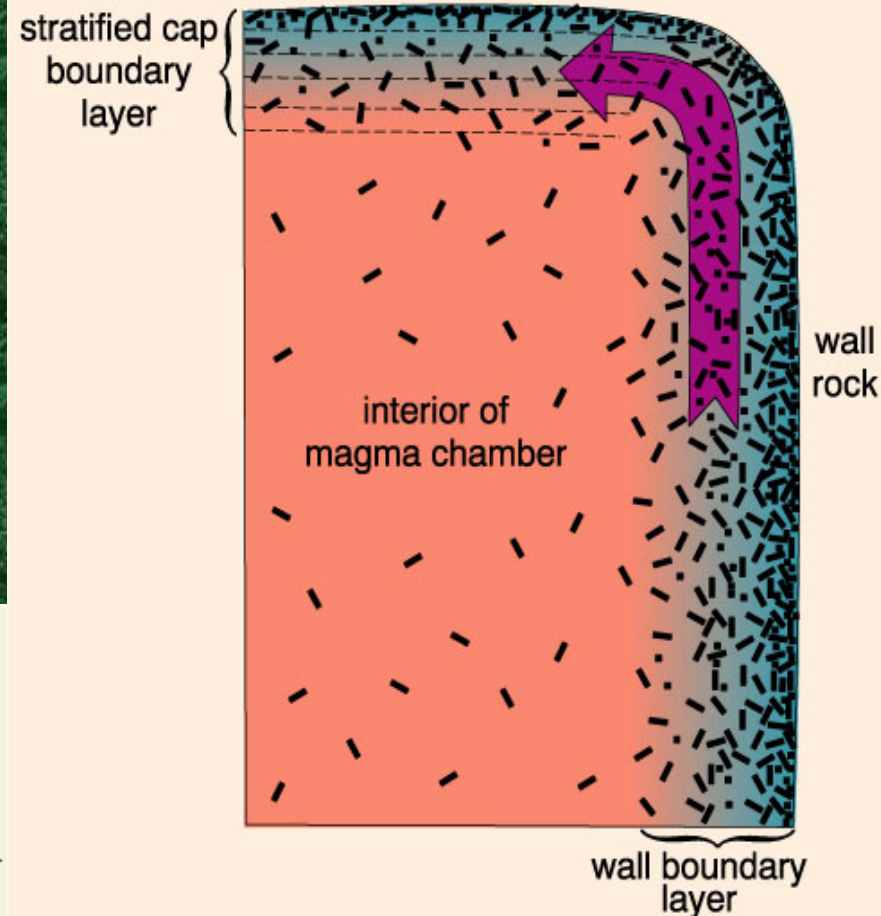
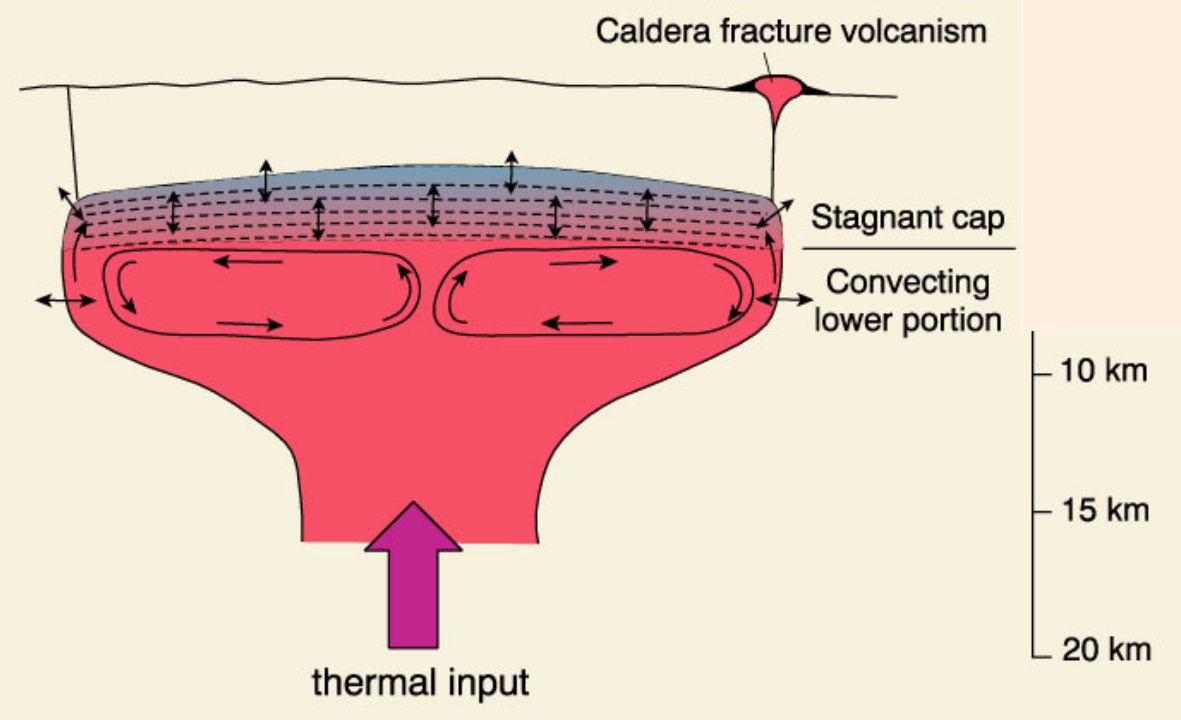


Sastav filtrirane magme je drugačiji
Dva mehanizma koji imaju utjecaj na odvajanje kristala od taljevine

1. Kompakcija
2. Segregacija taljevine

Diferencijacija magme u likvidnom stanju

a. Termogravitacijska difuzija



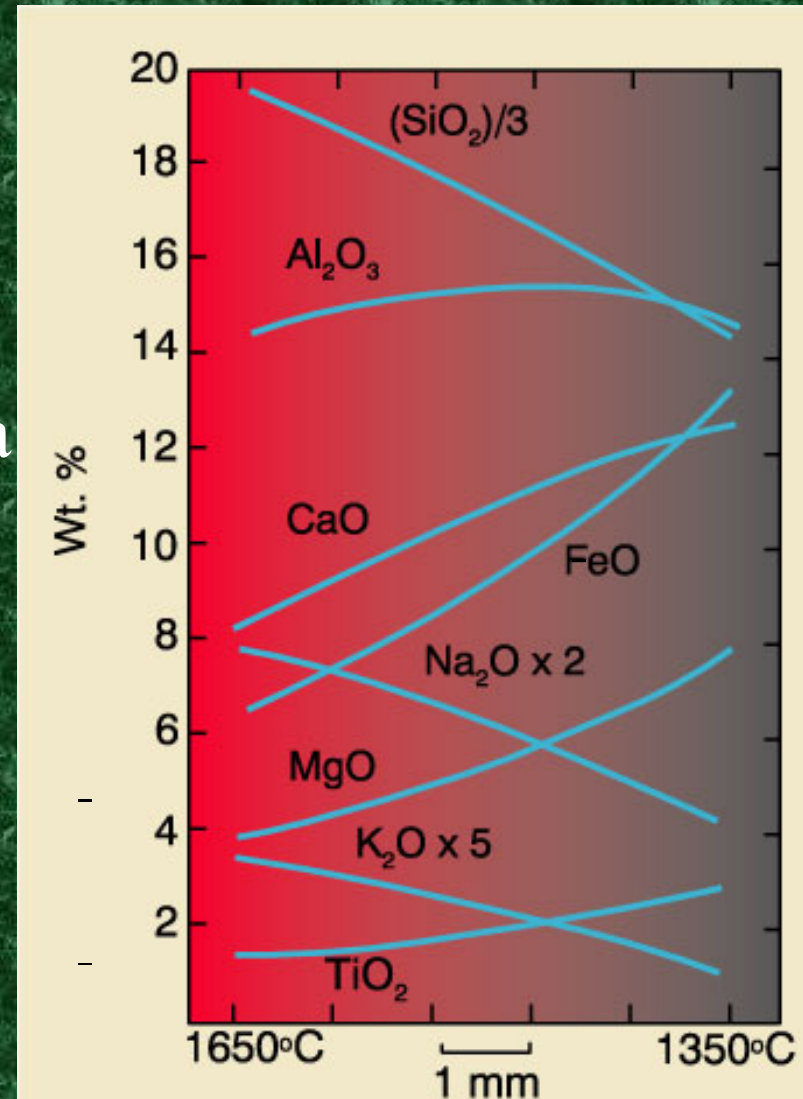
Slika II-66b Prema Winter (2001) An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology. Prentice Hall

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

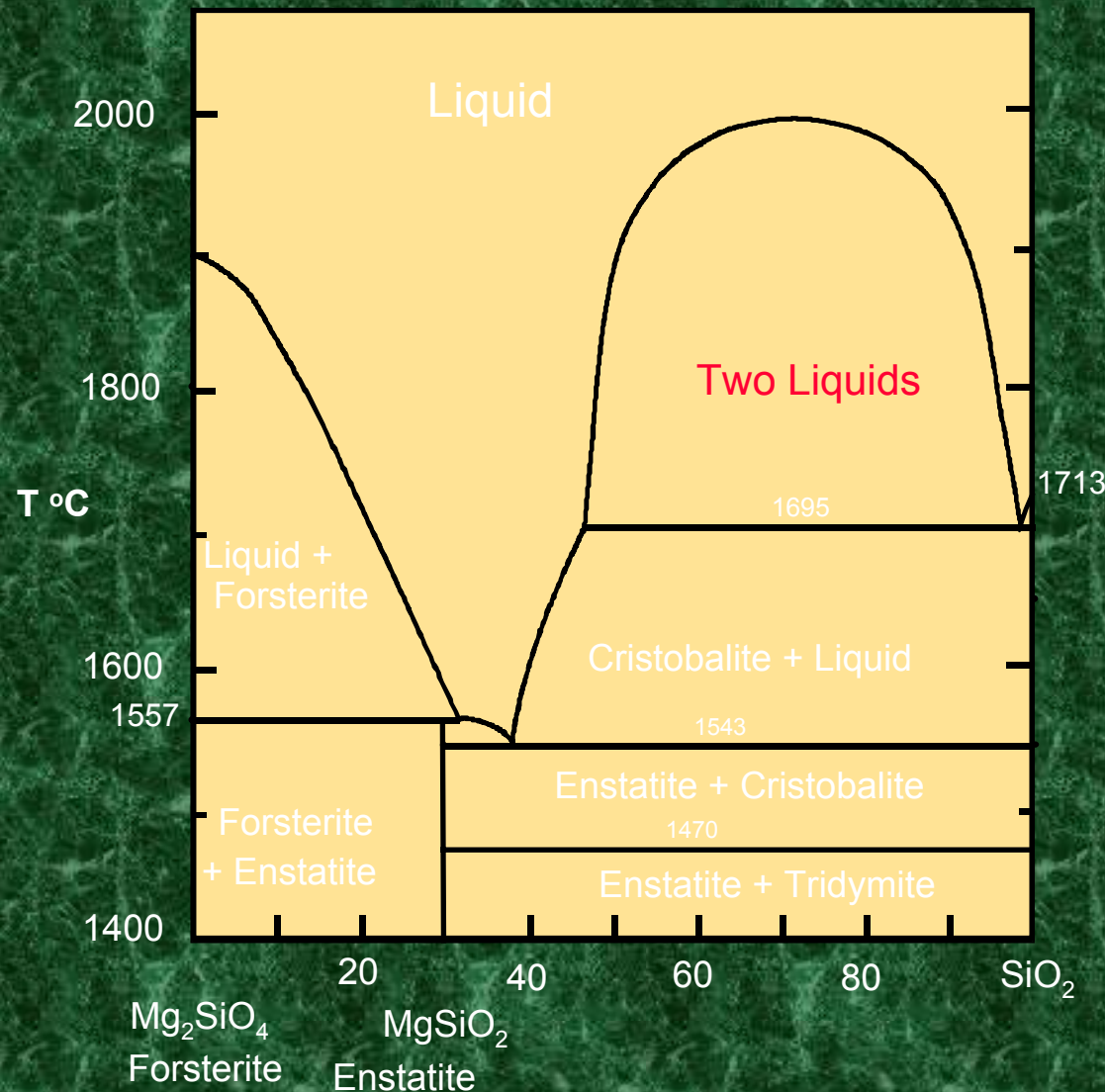
Uzorci dosižu stabilno stanje u nekoliko dana

- 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

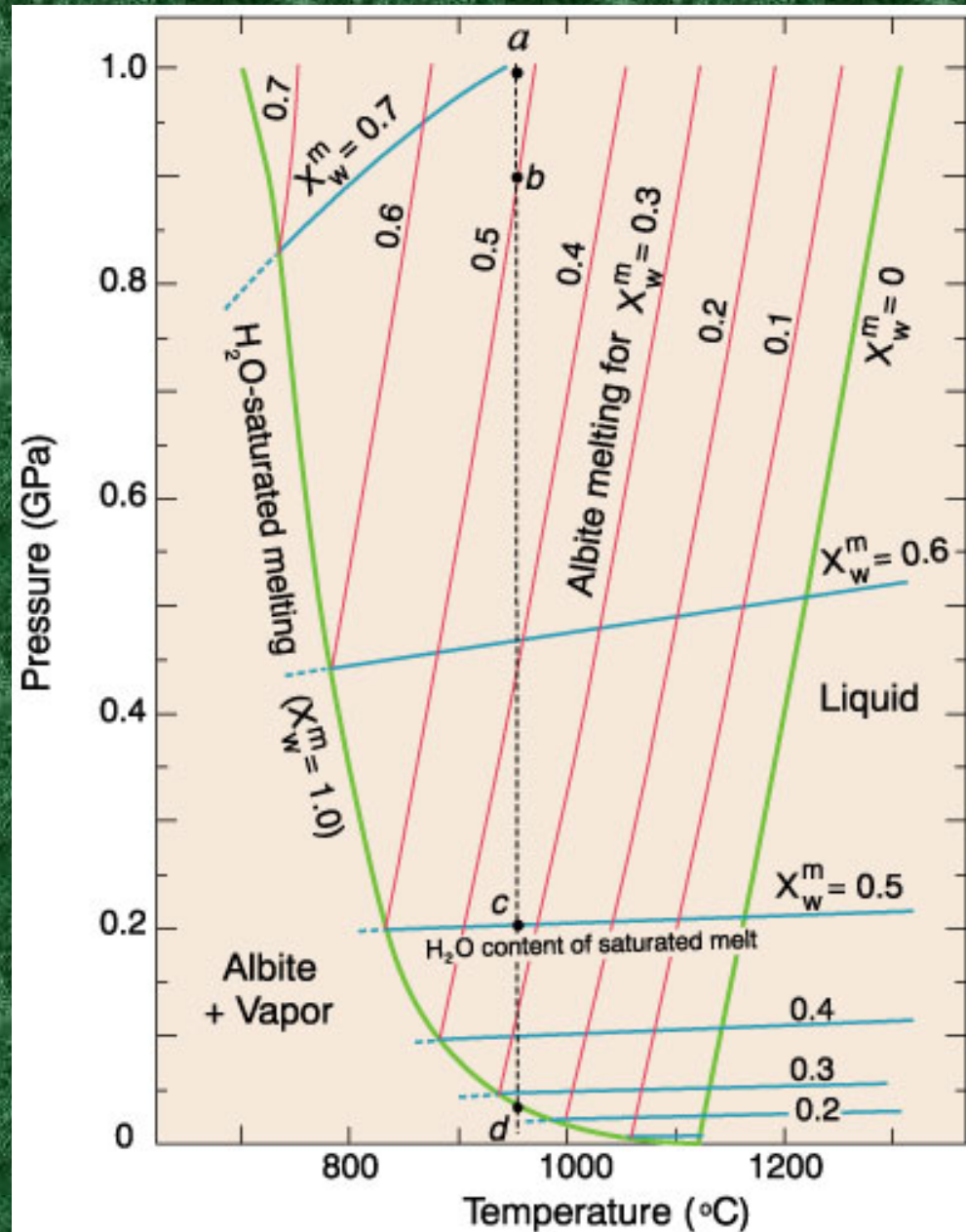
Volatilna diferencijacija

Transport volatilima

Volatili oslobođeni zagrijavanjem
minerala s vodom ili stijena
u kontaktu 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