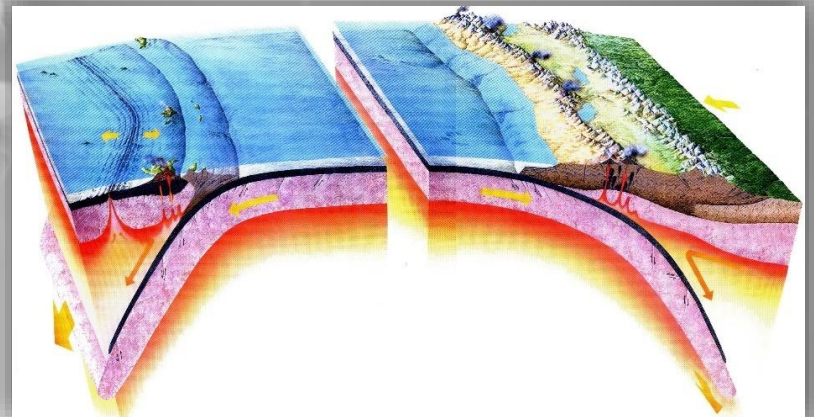


**Magmatske stijene
divergentnih granica ploča**

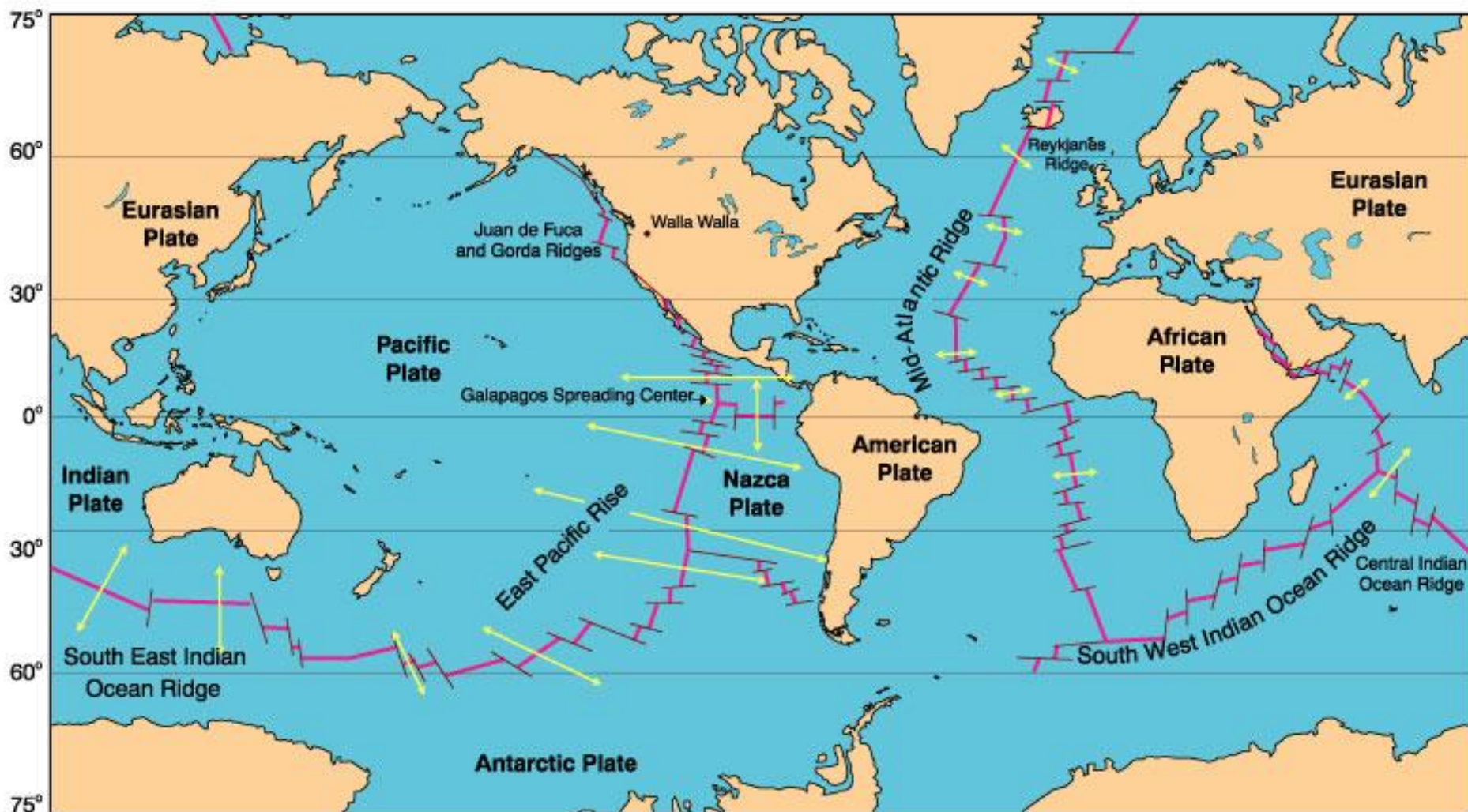
**Magmatske stijene
unutar ploča**

**Magmatske stijene
konvergentnih granica ploča**



Magmatske stijene divergentnih granica ploča

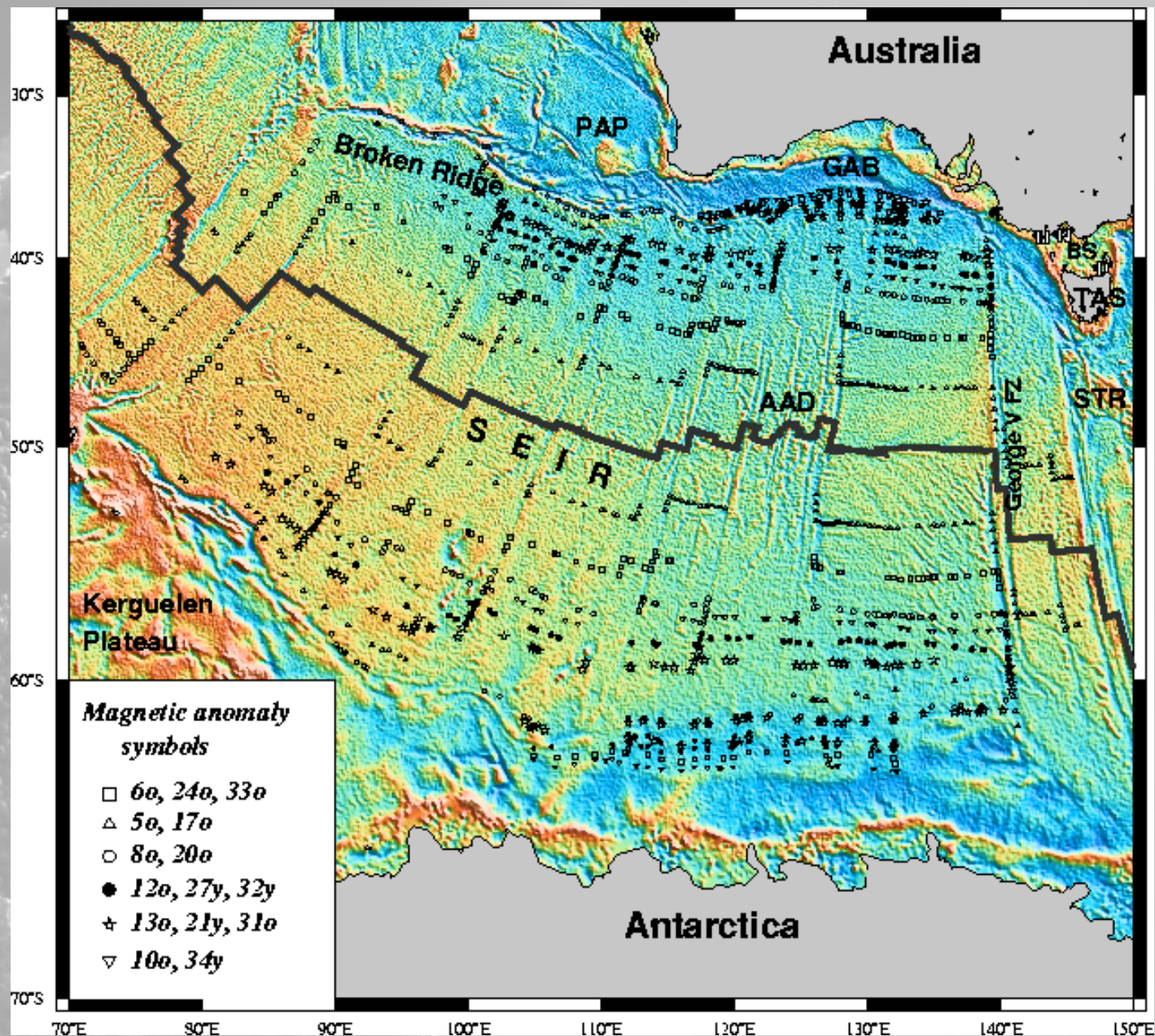
Srednje-oceanski hrbat (Mid-Ocean Ridge; Rift)



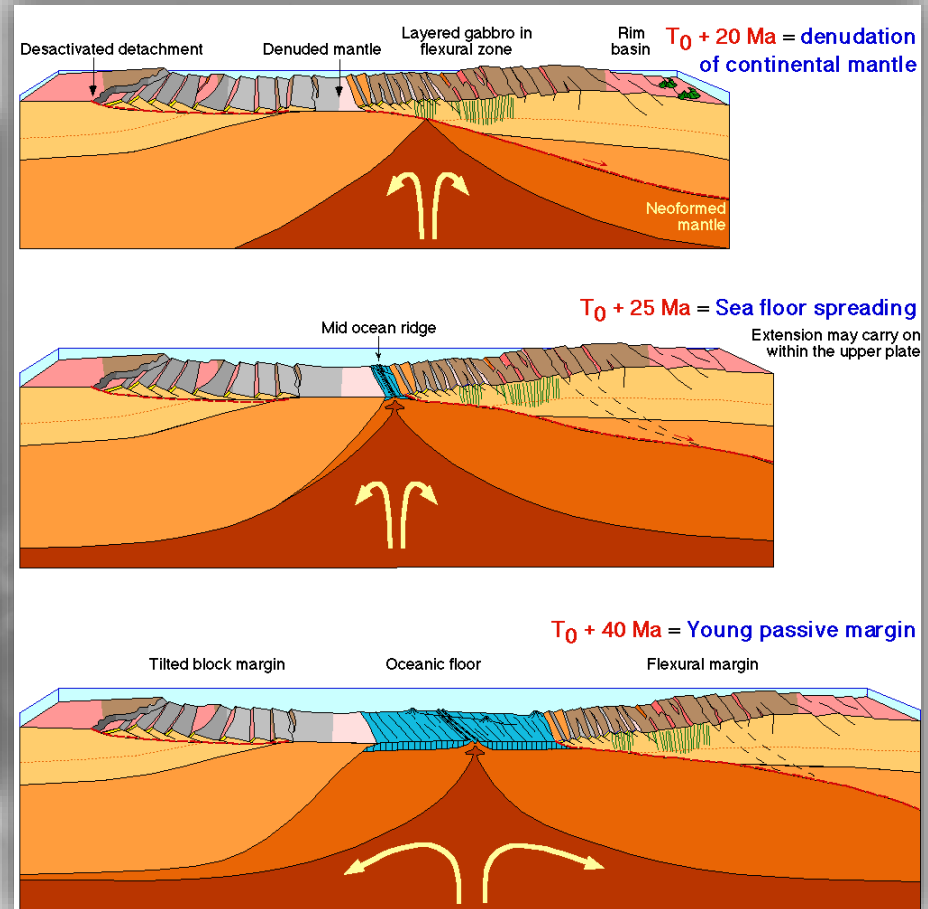
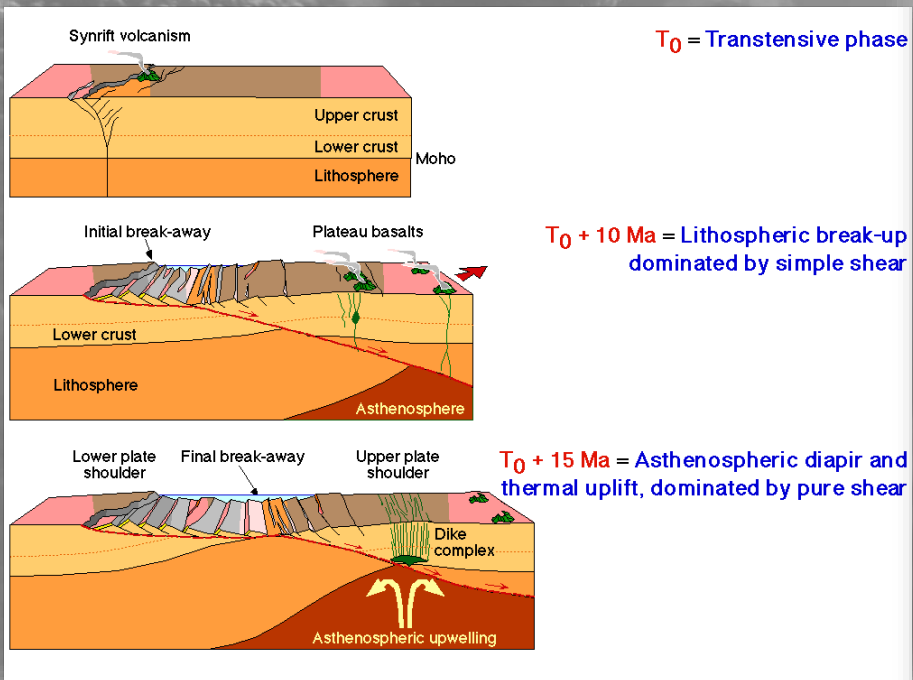
Slika 13-1. Prema Minster et al. (1974) Geophys. J. Roy. Astr. Soc., 36, 541-576.

Centri
širenja

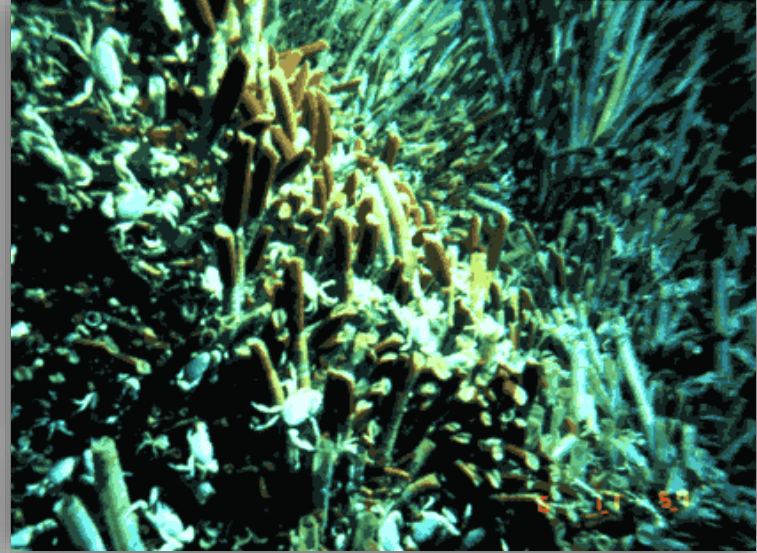
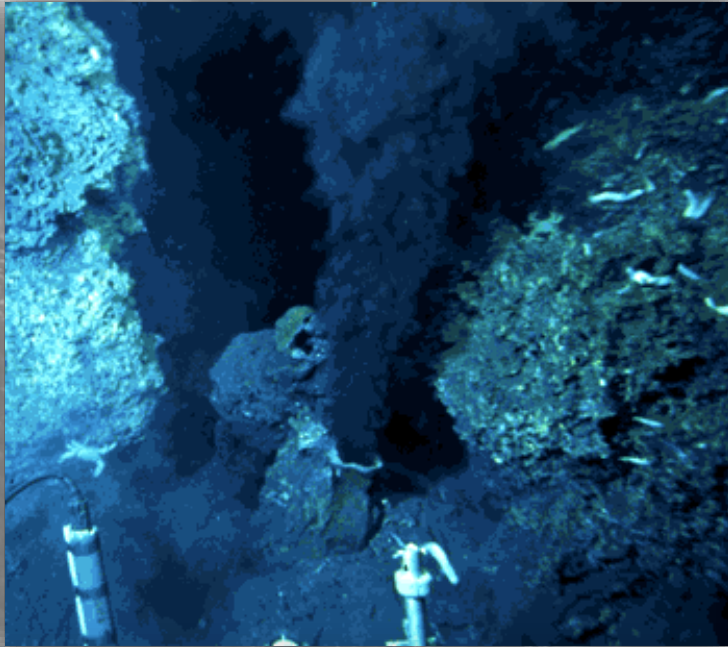
Spreading
Centres



Geodinamska evolucija rifta npr. Crveno more prema: Stampfli & Marchant, 1997



Black Smokers



Black Smokers

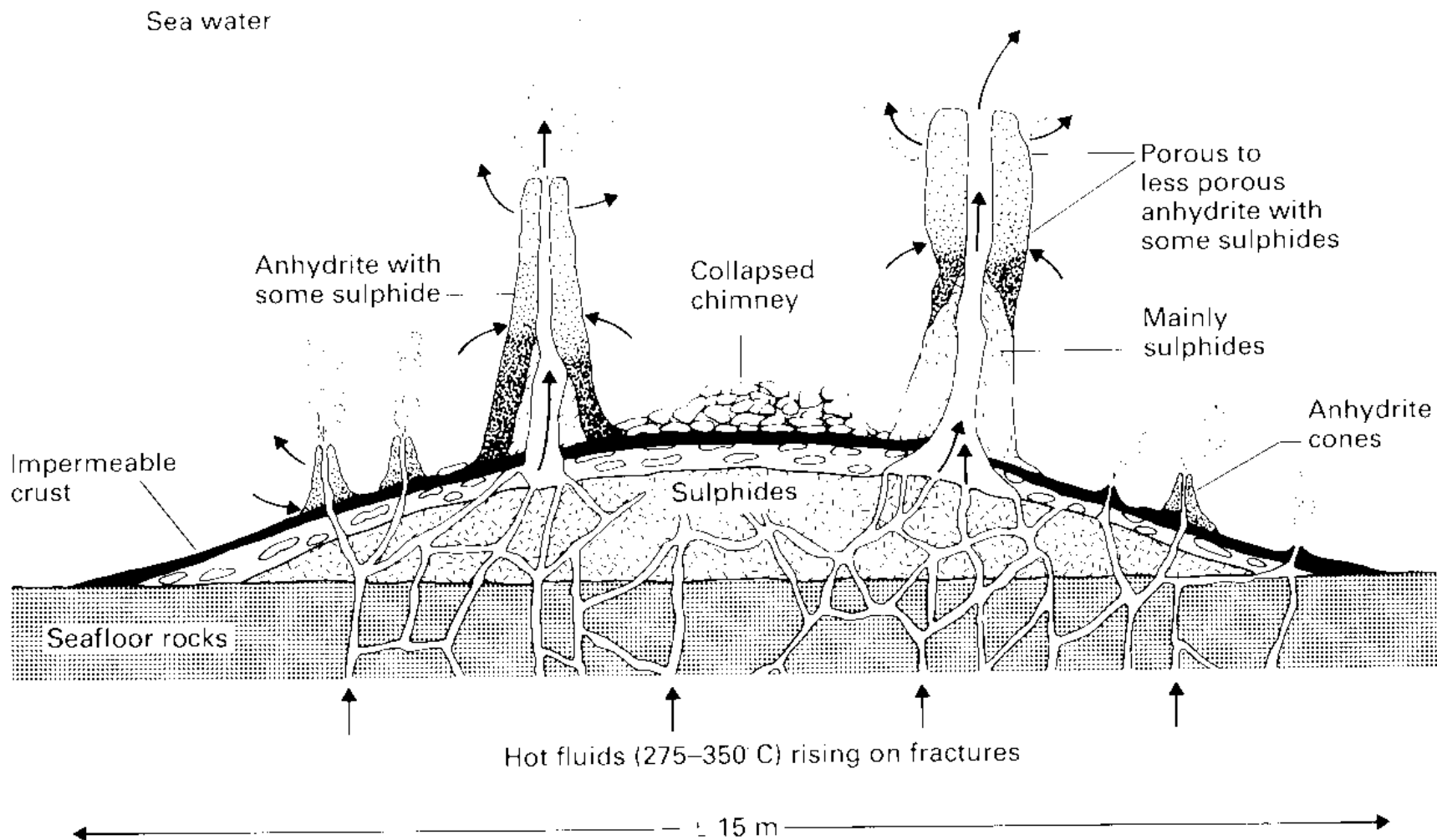


Fig. 6.8 Formation of chimneys and sulphide mounds on the sea floor. (After Barnes, 1988, *Ores and Minerals*, Open University Press, with permission.)

Segmenti hrpta i brzine širenja

- Sporoširući hrptovi:
< 3 cm/god

- Brzoširući hrptovi:
> 4 cm/god

- Postoje i varijacije u brzini

Table 13-1. Spreading rates of some mid-ocean ridge segments.

Category	Ridge	Latitude	Rate (cm/a)*
Fast	East Pacific Rise	21-23°N	3
		13°N	5.3
		11°N	5.6
		8-9°N	6
		2°N	6.3
		20-21°S	8
		33°S	5.5
		54°S	4
		56°S	4.6
Slow	Indian Ocean	SW	1
		SE	3-3.7
		Central	0.9
	Mid-Atlantic Ridge	85°N	0.6
		45°N	1-3
		36°N	2.2
		23°N	1.3
		48°S	1.8

From Wilson (1989). Data from Hekinian (1982), Sclater et al .
(1976), Jackson and Reid (1983). *half spreading

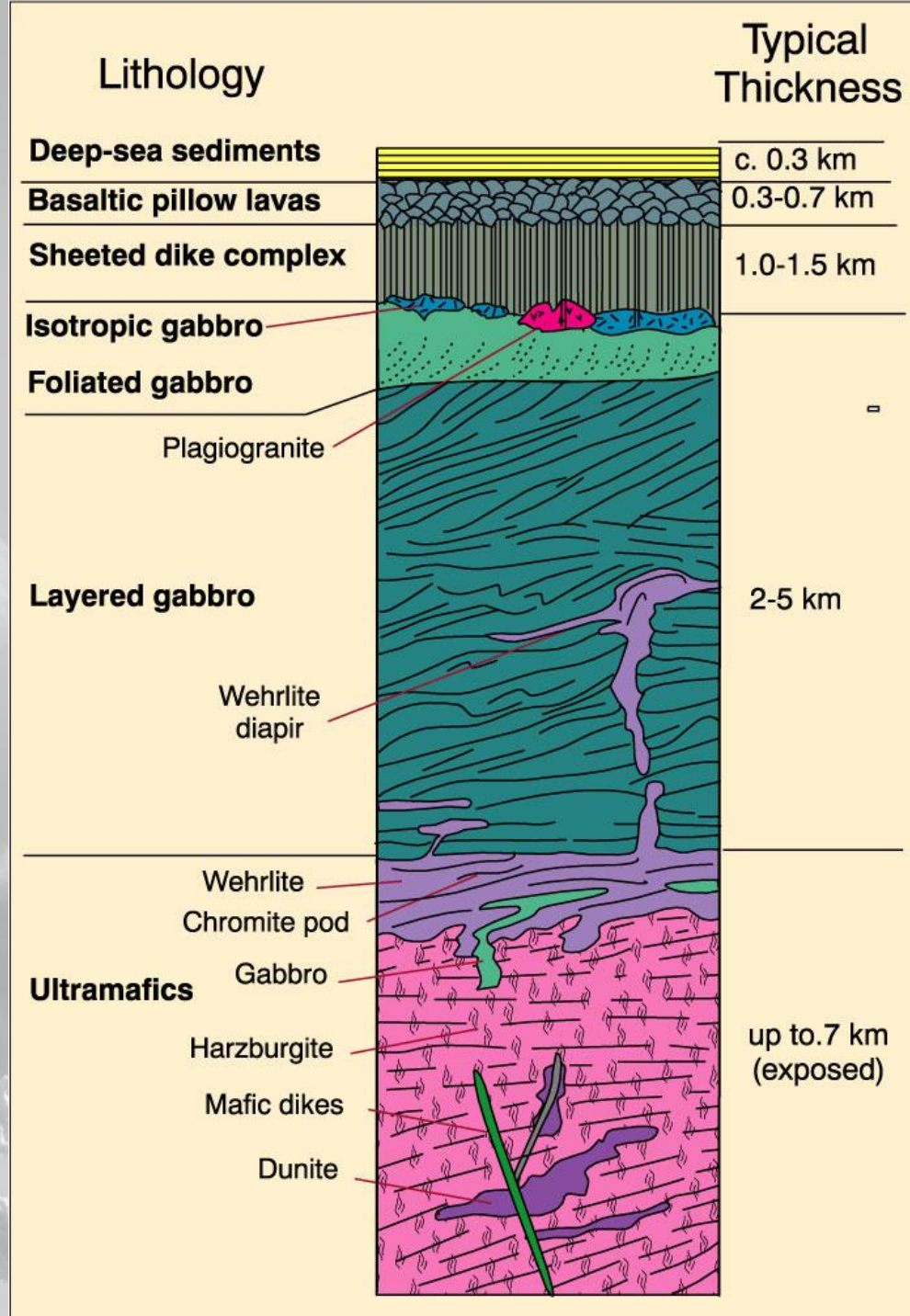
Oceanska kora i struktura gornjeg plašta

- 4 sloja koji se razlikuju po seizmičkim brzinama
- Deep Sea Drilling Program (<http://www-odp.tamu.edu/>)
- “Grebanje” (dredging) frakturnih zona
- Ofioliti

Oceanska kora i struktura gornjeg plašta

- Presjek kroz tipičan ofiolit odnosno oceansku koru, npr. Dinaridi

Slika 13-3. Litologija i debljina tipične ofiolitne sekvence načinjena prema Samial ofiolitu u Omanu. Prema Boudier and Nicolas (1985) Earth Planet. Sci. Lett., 76, 84-92.



Oceanska kora i struktura gornjeg plašta

Sloj 1

**Tanak sloj
pelagičkih
sedimenata**



Lithology	Ocean Crustal Layers	Typical Ophiolite	Normal Ocean Crust	
		Thickness (km)	ave.	P wave vel. (km/s)
Deep-Sea Sediment	1	~ 0.3	0.5	1.7 - 2.0
Basaltic Pillow Lavas	2A & 2B	0.5	0.5	2.0 - 5.6
Sheeted dike complex	2C	1.0 - 1.5	1.5	6.7
Gabbro	3A	2 - 5	4.7	7.1
Layered Gabbro	3B			
Layered peridotite	4	up to 7		8.1
Unlayered tectonite peridotite				

Slika 13-4. Prema Brown and Mussett (1993) The Inaccessible Earth: An Integrated View of Its Structure and Composition. Chapman & Hall. London.

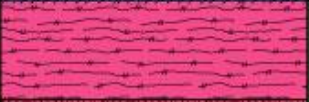
Oceanska kora i struktura gornjeg plašta

Sloj 2 je bazaltni

**podjeljen u dva
“podsloja”**

**Slojevi 2A & B =
jastučasti (pillow)
bazalti**

**Sloj 2C = vertikalno
uslojeni dajkovi
(sheeted dikes)**

Lithology		Ocean Crustal Layers	Typical Ophiolite	Normal Ocean Crust	
			Thickness (km)	ave.	P wave vel. (km/s)
Deep-Sea Sediment		1	~ 0.3	0.5	1.7 -2.0
Basaltic Pillow Lavas		2A & 2B	0.5	0.5	2.0 - 5.6
Sheeted dike complex		2C	1.0 - 1.5	1.5	6.7
Gabbro		3A	2 - 5	4.7	7.1
Layered Gabbro		3B			
Layered peridotite		4	up to 7		8.1
Unlayered tectonite peridotite					

**Slika 13-4. Prema Brown and
Mussett (1993) The Inaccessible
Earth: An Integrated View of
Its Structure and Composition.
Chapman & Hall. London.**

Sloj 3 je kompleksan

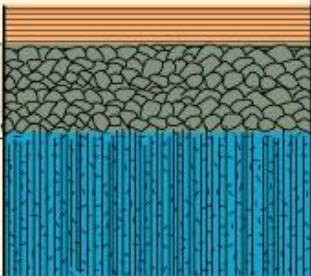
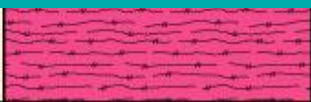
uglavnom od gabra, kristaliziranog iz plitkih “osnih magmatskih ognjišta” (axial magma chambers) koji “hrane” dajkove i bazalte

Sloj 3A

gornji izotropni i donji već dijelom uslojeni (prijelazni) gabro

Sloj 3B

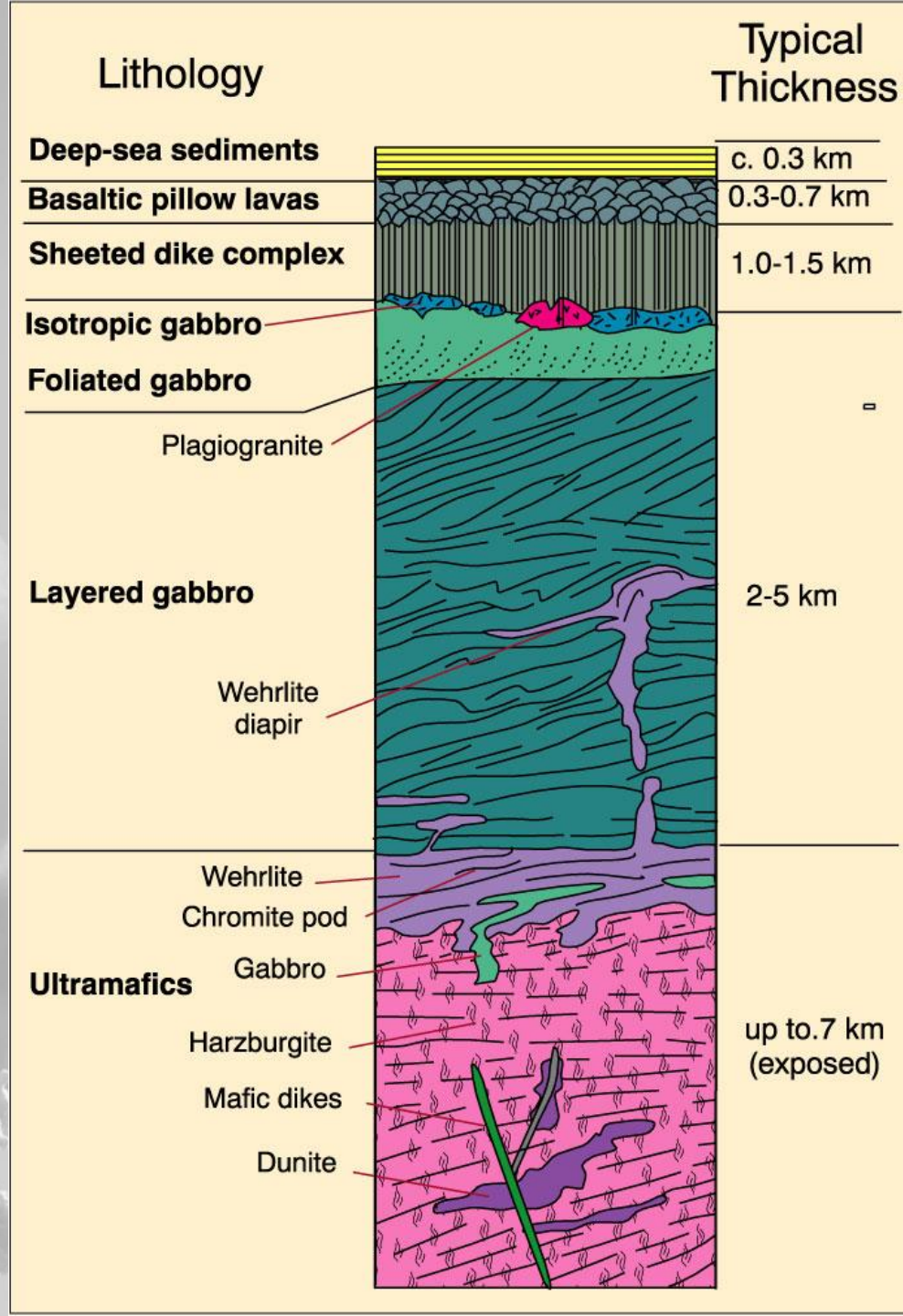
uslojeni gabro s kumulatnim strukturama

Lithology		Ocean Crustal Layers	Typical Ophiolite	Normal Ocean Crust	
			Thickness (km)	ave.	P wave vel. (km/s)
Deep-Sea Sediment		1	~ 0.3	0.5	1.7 -2.0
Basaltic Pillow Lavas		2A & 2B	0.5	0.5	2.0 - 5.6
Sheeted dike complex		2C	1.0 - 1.5	1.5	6.7
Gabbro		3A	2 - 5	4.7	7.1
Layered Gabbro		3B			
Layered peridotite		4	up to 7		8.1
Unlayered tectonite peridotite					

Oceanska kora i struktura gornjeg plašta

Diskontinuirani
dioriti i tonaliti
("plagiogranite") =
kasno diferencirane
taljevine

Slika 13-3. Litologija i debljina tipične ofiolitne sekvence načinjena prema ofiolitu u Omanu. Prema Boudier and Nicolas (1985) Earth Planet. Sci. Lett., 76, 84-92.



Sloj 4 = ultramafitne stijene

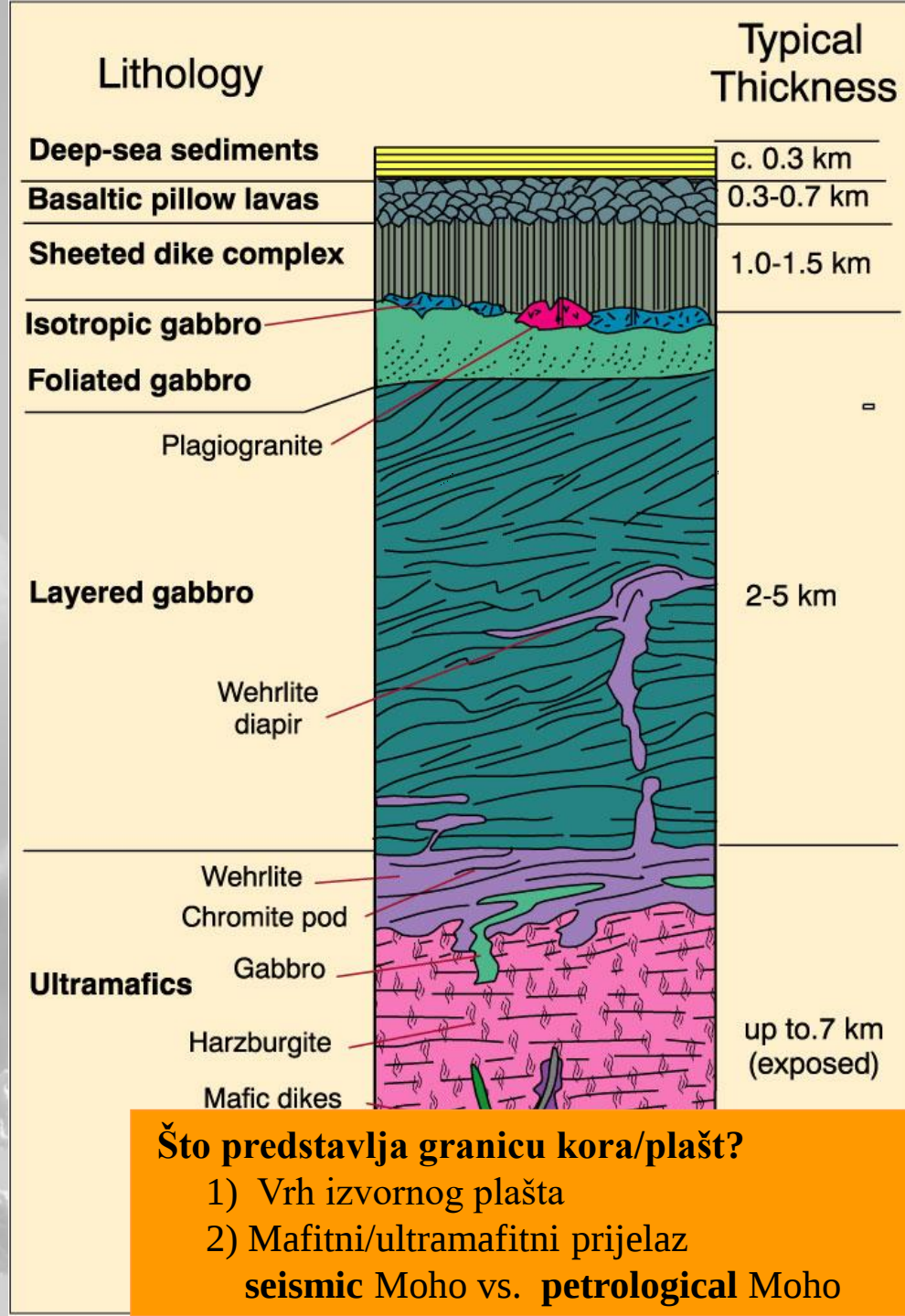
Ofioliti: baza sloja 3B prelazi u uslojene kumulatne verlite (wehrlite) i gabre

Verliti intrudiraju u uslojene gabre

Ispod → kumulatni dunit sa ksenolitima harzburgita

Ispod toga su tektonitni harzburgiti i duniti (nerastaljeni ostatak originalnog plašta)

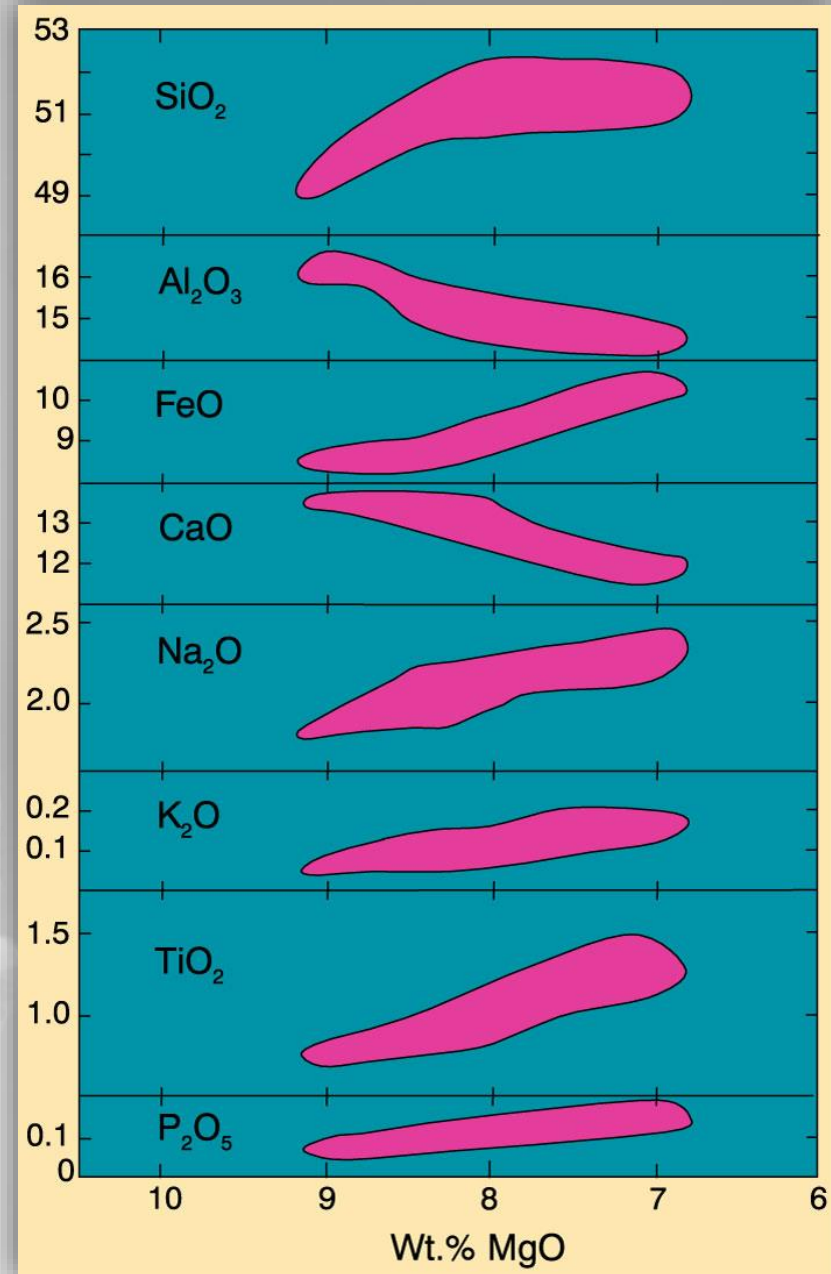
Granica između sloja 3 i 4 je Mohorovičićev diskontinuitet



Kemijski sastav MORB-a

- Smatralo se da je jednoličan (jednostavna petrogeneza), ali je intenzivnije uzorkovanje pokazalo raspon sastava i kemijske trendove u skladu s frakcijskom kristalizacijom što ukazuje na to da MORB nije primarna magma

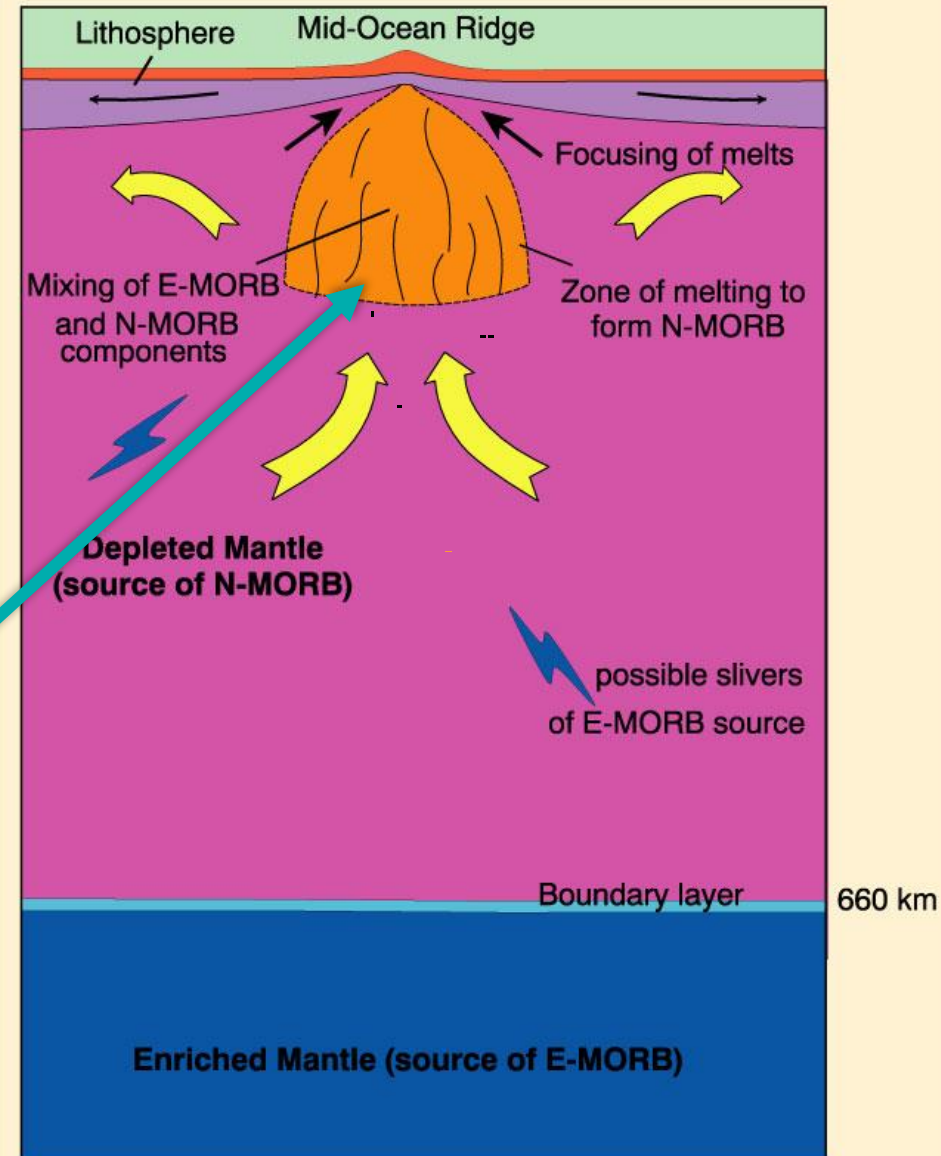
Slika 13-5. "Fenner" varijacijski dijagram za bazaltna stakla iz Afar regije MAR. Prema Stakes et al. (1984) J. Geophys. Res., 89, 6995-7028.



MORB petrogeneza

Nastanak N-MORB-a

- Razdvajanje ploča
- Kretanje plašta prema gore u zonu razdvajanja
- **Parcijalno taljenje** vezano uz adijabatsko uzdizanje
- **N-MORB** taljenje počinje na ~ 60-80 km dubine u gornjem osiromašenom plaštu gdje naslijeđuje osiromašenje na elementima i izotopima

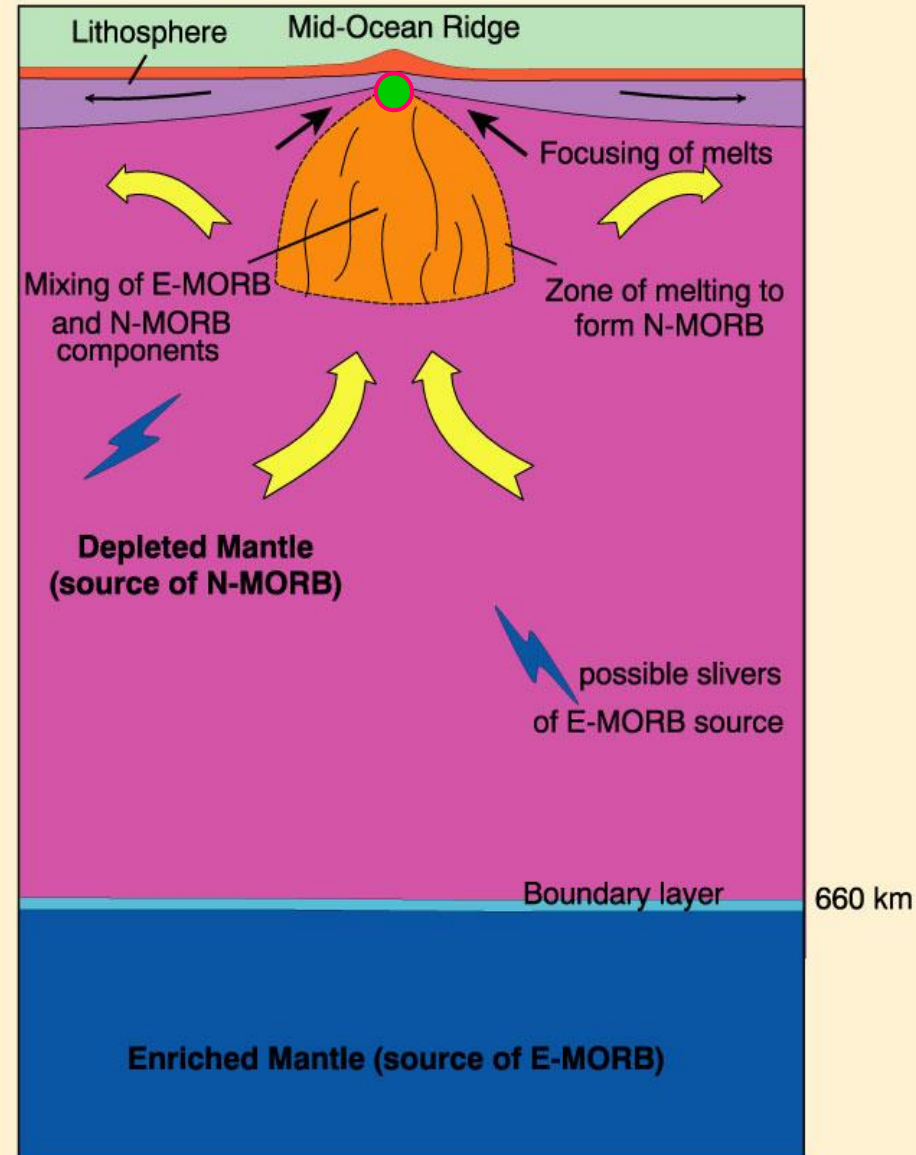


Slika 13-13. Prema Zindler et al. (1984) *Earth Planet. Sci. Lett.*, 70, 175-195. and Wilson (1989) *Igneous Petrogenesis*, Kluwer.

Nastanak N-MORB-a

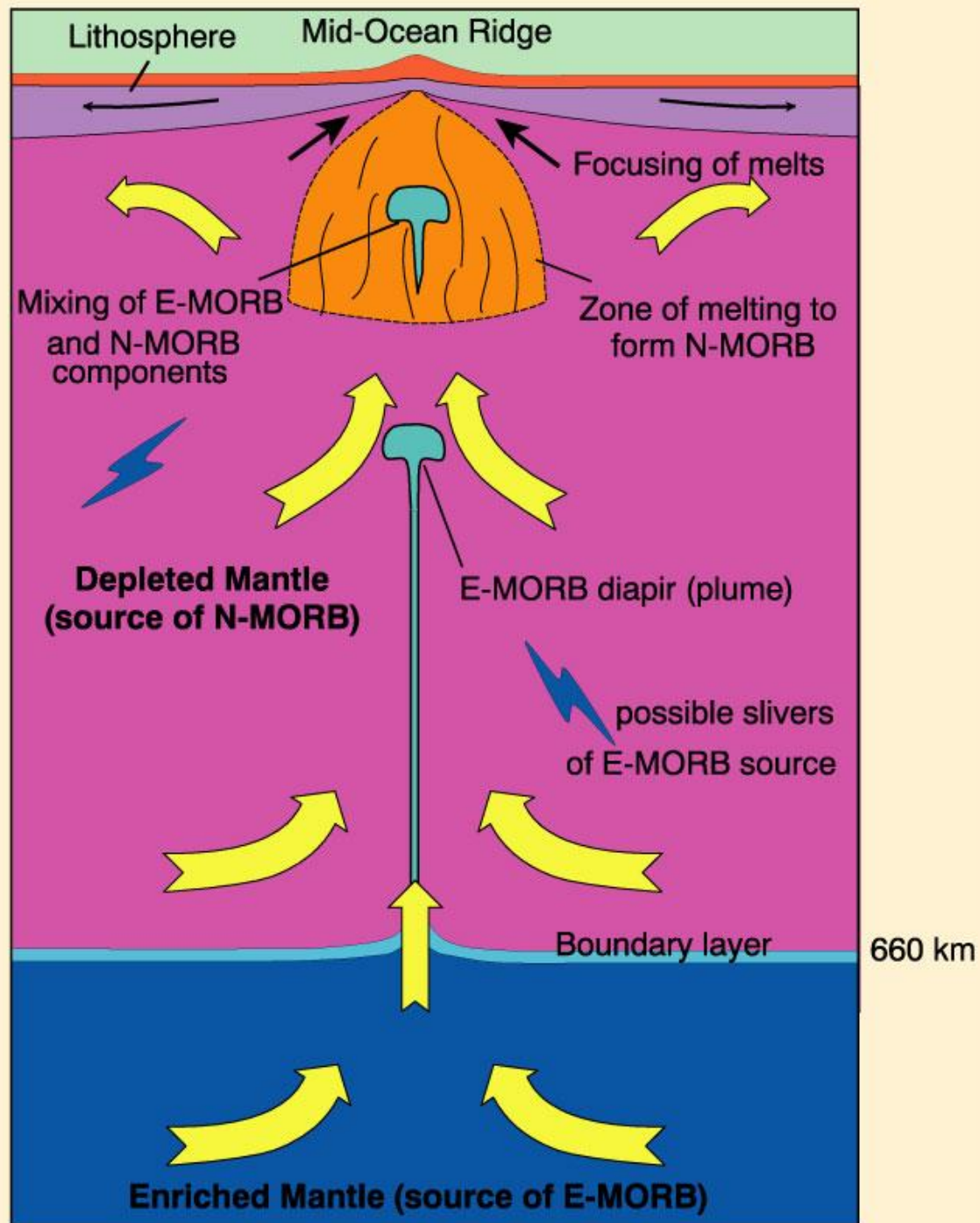
- Područje taljenja je ≈ 100 km široko ali se fokusira u 3-8 km zonu ispod hrpta
- “Kapljice” taljevine se **odvajaju** na 25-35 km gdje su u ravnoteži s harzburgitnim ostatkom i migriraju na dubinu od 1-2 km ispod osi hrpta → osno magmatsko ognjište (**axial magma chamber**)

Slika 13-13. Prema Zindler et al. (1984) Earth Planet. Sci. Lett., 70, 175-195. and Wilson (1989) Igneous Petrogenesis, Kluwer.



- Donji obogaćeni rezervoar u plaštu može također krenuti prema gore i inicirati dijapir E-MORB-a

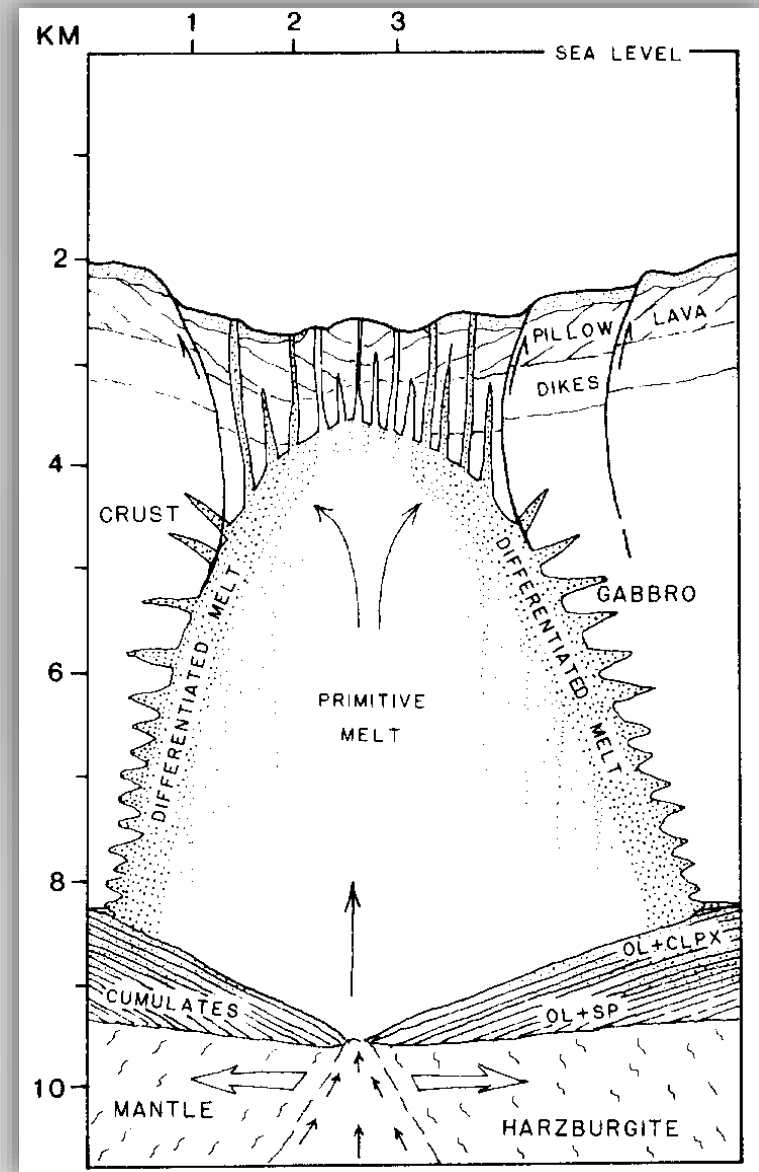
Slika 13-13. Prema Zindler et al. (1984) Earth Planet. Sci. Lett., 70, 175-195. and Wilson (1989) Igneous Petrogenesis, Kluwer.



Oсно magmatsko ognjište

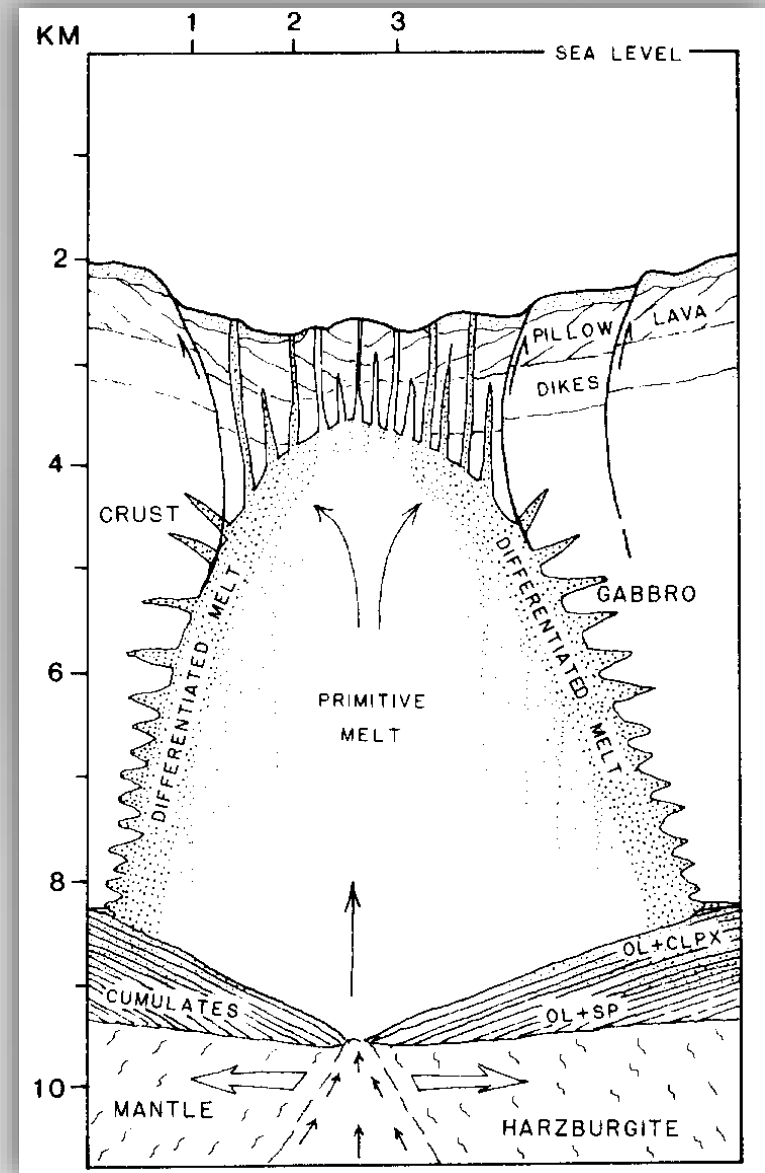
Model

- **Frakcijska kristalizacija → promjene MORB magme**
- **Frakcionacija kontrolirana periodičkim ubrizgavanjem svježije primitivne MORB magme odozdo**
- **Dajkovi se uzdižu prema gore kroz širuću i rasjedajuću krovinu i nastaju “sheeted dike” kompleksi koji dalje hrane jastučaste lave**



**Slika 13-14. Prema Byran and Moore (1977)
Geol. Soc. Amer. Bull., 88, 556-570.**

- Kristalizacija se odvija pri vrhu i uzduž stranica → sukcesivni slojevi gabra (sloj 3)
- Teški kristali olivina i piroksena → dno ognjišta → ultramaftni kumulati (sloj 4)
- Uslojavanje u donjim gabrima (sloj 3B) od gustih struja kristala koji klize sa zidova?



Slika 13-14. Prema Byran and Moore (1977)
 Geol. Soc. Amer. Bull., 88, 556-570.

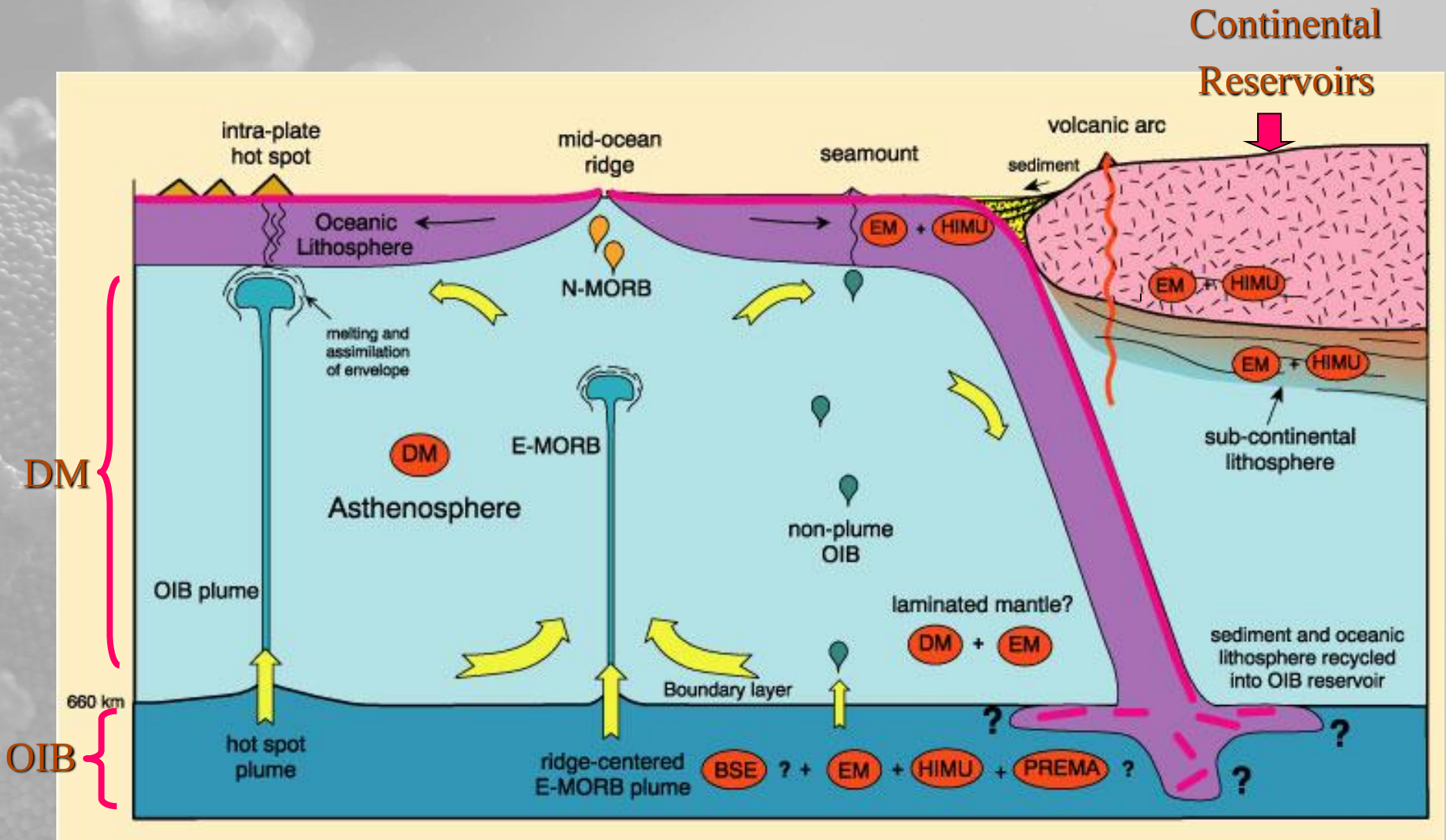
Oceanski vulkanizam unutar ploča

Oceanski otoci obično asocirani s vrućim točkama (hot spots)



Slika 14-1. Prema Crough (1983) Ann. Rev. Earth Planet. Sci., 11, 165-193.

Model oceanskog magmatizma



Slika 14-10. Prema Wilson (1989) and Rollinson (1993).

Uslojene mafitne intruzije

Tablica 12-1 Neke od uslojenih mafitnih intruzija

Ime	Starost	Lokacija	Povr. (km ²)
Bushveld	Precambrian	S. Africa	66,000
Dufek	Jurassic	Antarctica	50,000
Duluth	Precambrian	Minnesota, USA	4,700
Stillwater	Precambrian	Montana, USA	4,400
Muskox	Precambrian	NW Terr. Canada	3,500
Great Dike	Precambrian	Zimbabwe	3,300
Kiglapait	Precambrian	Labrador	560
Skaergård	Eocene	East Greenland	100

Dolaze na kontinentima (uglavnom uz slijevove bazalta)

Vruće, niskog viskoziteta, polagano se hlade

Pogodne za studij frakcionacije

“Uslojavanje” (layering)

sloj: bilo koja pločasta kumulatna jedinica koja se razlikuje svojim sastavom i/ili strukturnim/teksturnim značajkama

- ☞ **uniforman** mineraloški ili strukturno homogen

Uniformno uslojavanje

Slika 12-3b. Uniformni kromitni slojevi koji se izmjenjuju s plagioklasnim slojevima, Bushveld Complex, S. Africa. Iz McBirney and Noyes (1979) J. Petrol., 20, 487-554.



Layering

sloj: bilo koja pločasta kumulatna jedinica koja se razlikuje svojim sastavom i/ili strukturnim/teksturnim značajkama

- ☞ **uniforman** mineraloški ili strukturno homogen
- ☞ **ne-uniforman** varijacije ili duž ili poprijeko slojeva

prijelaz (graded) = postupne varijacije ili u

- ✧ **mineralnom sastavu**
- ✧ **veliĉini zrna**

Graded Layers

Slika 12-2. Zastupljenost i veličina se mijenjaju. Iz McBirney and Noyes (1979) J. Petrol., 20, 487-554.



Layering (uslojavanje, stratifikacija)

Odnosi se na strukturu i sklop sekvenci višestrukih slojeva

- 1) Modalno uslojavanje (layering): karakterizirano varijacijom u relativnim proporcijama minerala
 - može sadržavati uniformne, graduirane ili kombinirane slojeve

Layering

- 2) Fazno uslojavanje: pojava ili nestanak minerala iz kristalizacijske sekvence razvijene u modalnim slojevima
- 3) Kriptično uslojavanje (nevidljivo oku)
 - ☞ Sistematske varijacije u kemijskom sastavu određenih minerala ovisno o položaju unutar uslojene sekvence

Pravilnost uslojavanja

- Ritmično: slojevi se sistematski ponavljaju
 - ↳ Makroritmično: nekoliko m debeo
 - ↳ Mikroritmično: samo par cm debeo
- Isprekidano: manje pravilan obrazac
 - ↳ Obično se sastoji od ritmičnih graduiranih slojeva prekinutih povremenim jednoličnim slojevima

Ritmično i isprekidano (povremeno) uslojavanje

Slika 12-3a. Vertikalno cm-sko uslojavanje plagioklasa i piroksena, Stillwater Complex, Montana.

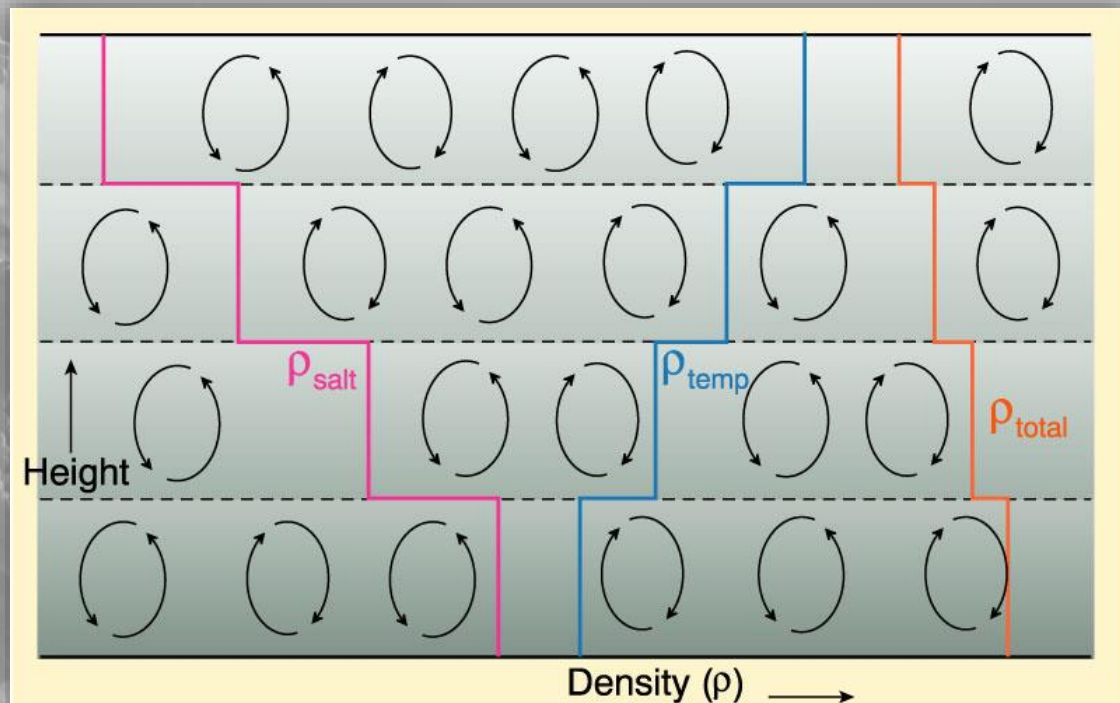


Slika 12-4. Isprekidano uslojavanje, graduirani slojevi odvojeni gabroidnim slojevima. Skaergård Intrusion, E. Greenland. From McBirney (1993) Igneous Petrology (2nd ed.), Jones and Bartlett. Boston.

Kako objašnjavamo takve pojave npr. razvoj ritmičnog uslojavanja sa oštro definiranim granicama?

- Procesi kristalizacije i diferencijacije
- In-situ procesi
- Ponovnim ubacivanjem primitivne magme može se objasniti promjene u sastavu i pojave kriptičnog uslojavanja

Serije konvekcijskih struja unutar slojeva



Slika 12-14. Prema Turner and Campbell (1986) Earth-Sci. Rev., 23, 255-352.

Guste struje (razlika u gustoći, T)

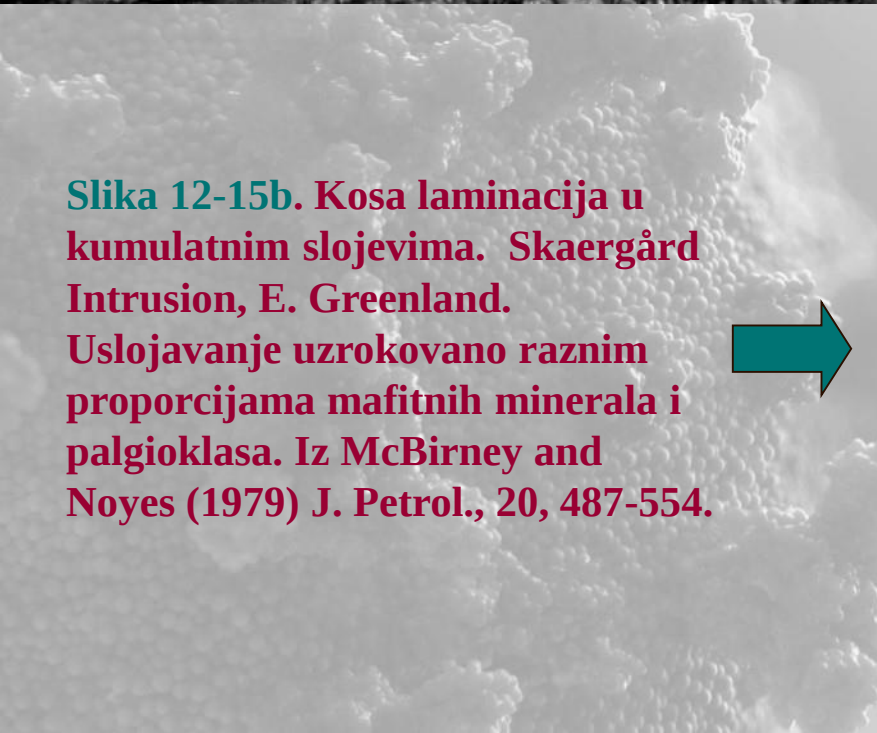
- Hladnije teškim elementima obogaćene taljevine tonu i kreću se duž dna magmatskog ognjišta
 - ☞ Gusti kristali u suspenziji
 - ☞ Laki također mogu biti zahvaćeni i poneseni prema dole



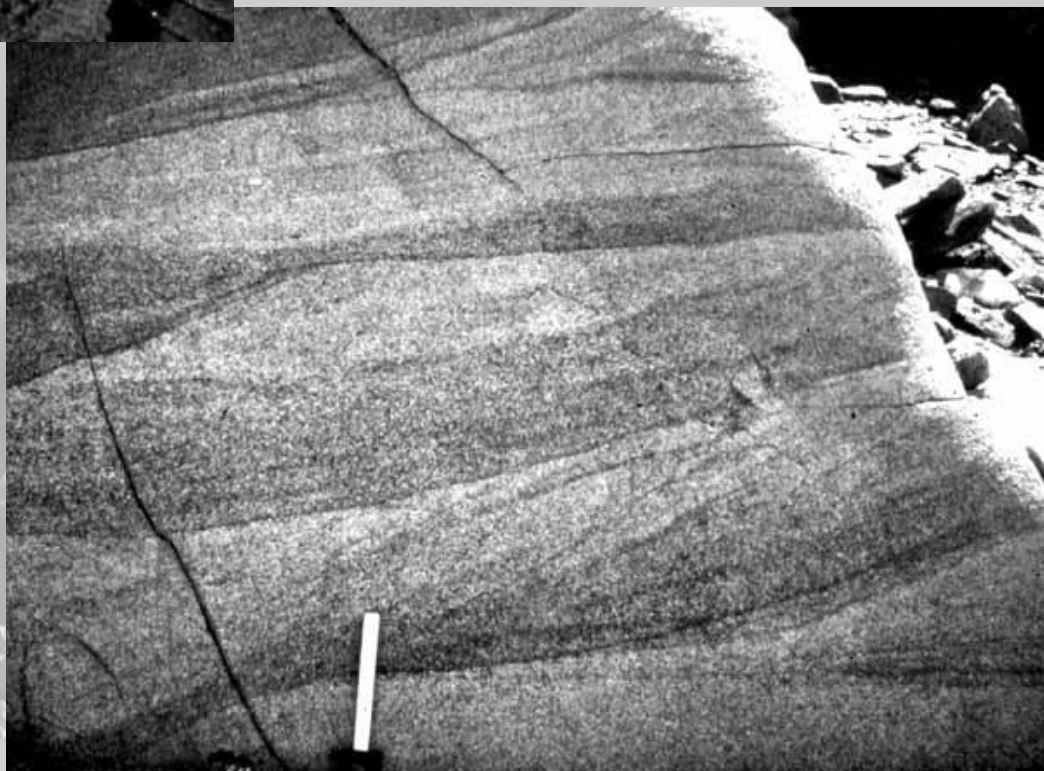
Slika 12-18. Hladne struje tonu iz gornjih dijelova ognjišta. Simulacija pomoću silikonskog ulja. Snimio Claude Jaupart.



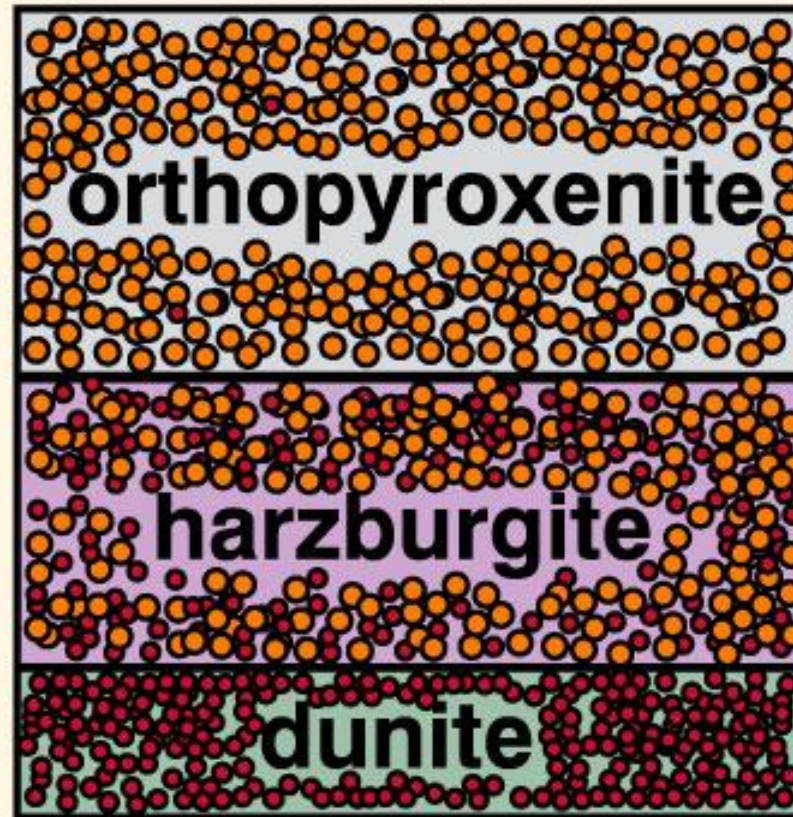
Slika 12-15a. Kosa laminacija u kumulatnim slojevima. Duke Island, Alaska. razlike u veličini i proporciji olivina i piroksena. Iz McBirney (1993) Igneous Petrology. Jones and Bartlett



Slika 12-15b. Kosa laminacija u kumulatnim slojevima. Skaergård Intrusion, E. Greenland. Uslojavanje uzrokovano raznim proporcijama mafitnih minerala i palgioklasa. Iz McBirney and Noyes (1979) J. Petrol., 20, 487-554.



e



Slika 12-20. Model razvoja ultramafitne zone Stillwater Complex intruzijama vruće primitivne magme u hladniju evolviranu magmu. Iz: Raedeke and McCallum (1984) J. Petrol., 25, 395-420.

Kontinentalni alkalni magmatizam

Alkalne stijene dolaze u svim tektonskim okolišima uključivši i oceanske bazene

Alkalne stijene sadrže više alkalija nego što ih ima u feldspatima. Višak alkalija dolazi u feldspatoidima, Na-px, Na-amph ...

- alkalne stijene su siromašne na SiO_2 u odnosu na Na_2O , K_2O i CaO
- “critically undersaturated” na SiO_2 -> *nefelin i akmit*
- može biti i manjak na Al_2O_3

Kontinentalni alkalni magmatizam

East African Rift

Slika 19-2. Karta East African Rift sustava (prema Kampunzu and Mohr, 1991), Magmatic evolution and petrogenesis in the East African Rift system. In A. B. Kampunzu and R. T. Lubala (eds.), *Magmatism in Extensional Settings, the Phanerozoic African Plate*. Springer-Verlag, Berlin, pp. 85-136. Winter (2001) *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*. Prentice Hall.

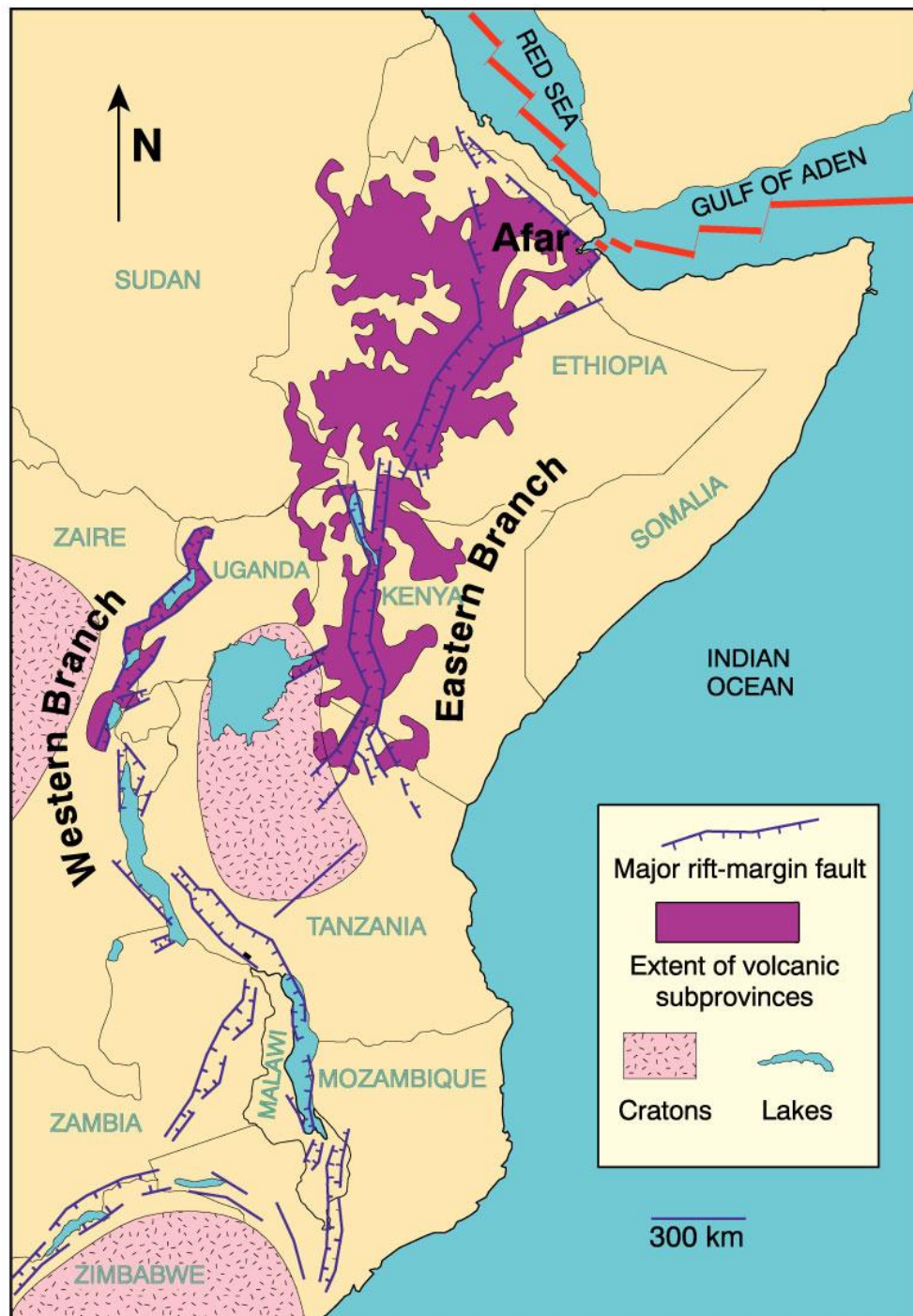
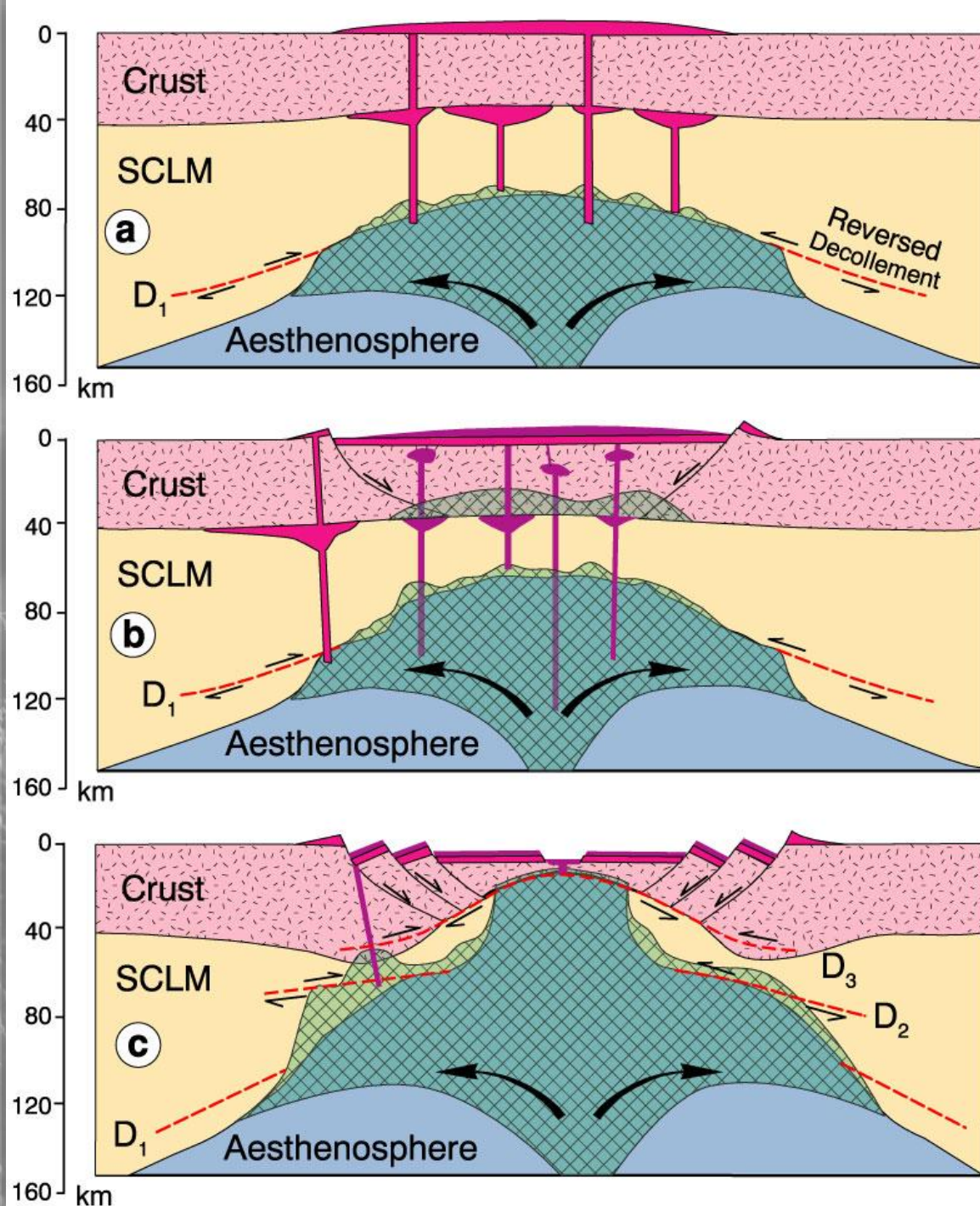


Figure 19-9. Hipotetski presjek pokazuje model za nastanak East African Rift-a.

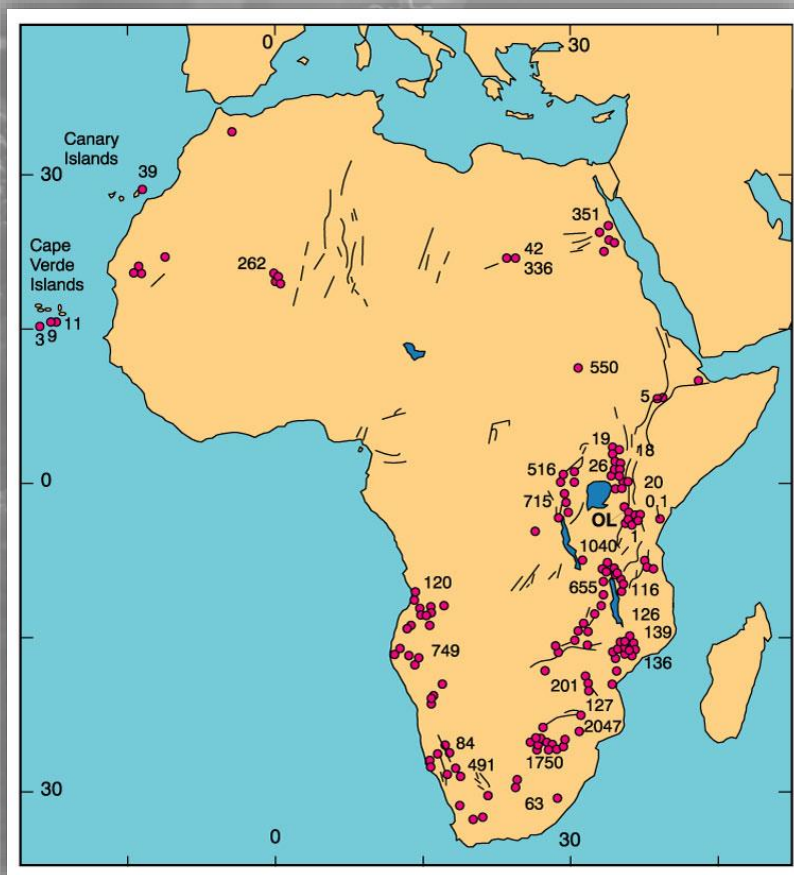
- Pred-riftna faza**, dijapir iz astenosferskog plašta se uzdiže u litosferu. Dekompresijsko taljenje i daje alkalne taljevine. Dijelom se tali i kontinentalna kora - (sub-continental lithospheric mantle - SCLM). Deformacije osiguravaju prostor za dijapir (D_1).
- Riftna faza**: razvoj kontinentalnog rifta, erupcija alkalne magme iz astenosfere dodatno inducira anateksis kore. Riftna dolina akumulira vulkanite i vulkanoklastite..
- Završna faza**, u kojoj astenosfera dosiže površinu. To je prijelaz prema razvoju oceanske kore. Prema Kampunzu and Mohr (1991), Magmatic evolution and petrogenesis in the East African Rift system.

In A. B. Kampunzu and R. T. Lubala (eds.), *Magmatism in Extensional Settings, the Phanerozoic African Plate*. Springer-Verlag, Berlin, pp. 85-136 and P. Mohr (personal communication). Winter (2001) *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*. Prentice Hall.



Kontinentalni alkalni magmatizam

Karbonatiti



Slika 19-10. Afrički karbonatiti i njihova starost u Ma. OL = Oldoinyo Lengai natrocarbonatite volcano. After Woolley (1989) The spatial and temporal distribution of carbonatites. In K. Bell (ed.), *Carbonatites: Genesis and Evolution*. Unwin Hyman, London, pp. 15-37. Winter (2001) *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*. Prentice Hall.

Table 19-4. Some Minerals in Carbonatites.

Carbonates	Sulfides
Calcite	Pyrrhotite
Dolomite	Pyrite
Ankerite	Galena
Siderite	Sphalerite
Strontanite	
Bastnäsite ($(\text{Ce}, \text{La})\text{FCO}_3$)	Oxides-Hydroxides
* Nyerereite ($(\text{Na}, \text{K})_2\text{Ca}(\text{CO}_3)_2$)	Magnetite
* Gregoryite ($(\text{Na}, \text{K})_2\text{CO}_3$)	Pyrochlore
	Perovskite
Silicates	Hematite
Pyroxene	Ilmenite
Aegirine-augite	Rutile
Diopside	Baddeleyite
Augite	Pyrolusite
Olivine	Halides
Monticellite	Fluorite
Alkali amphibole	Phosphates
Allanite	Apatite
Andradite	Monazite
Phlogopite	
Zircon	

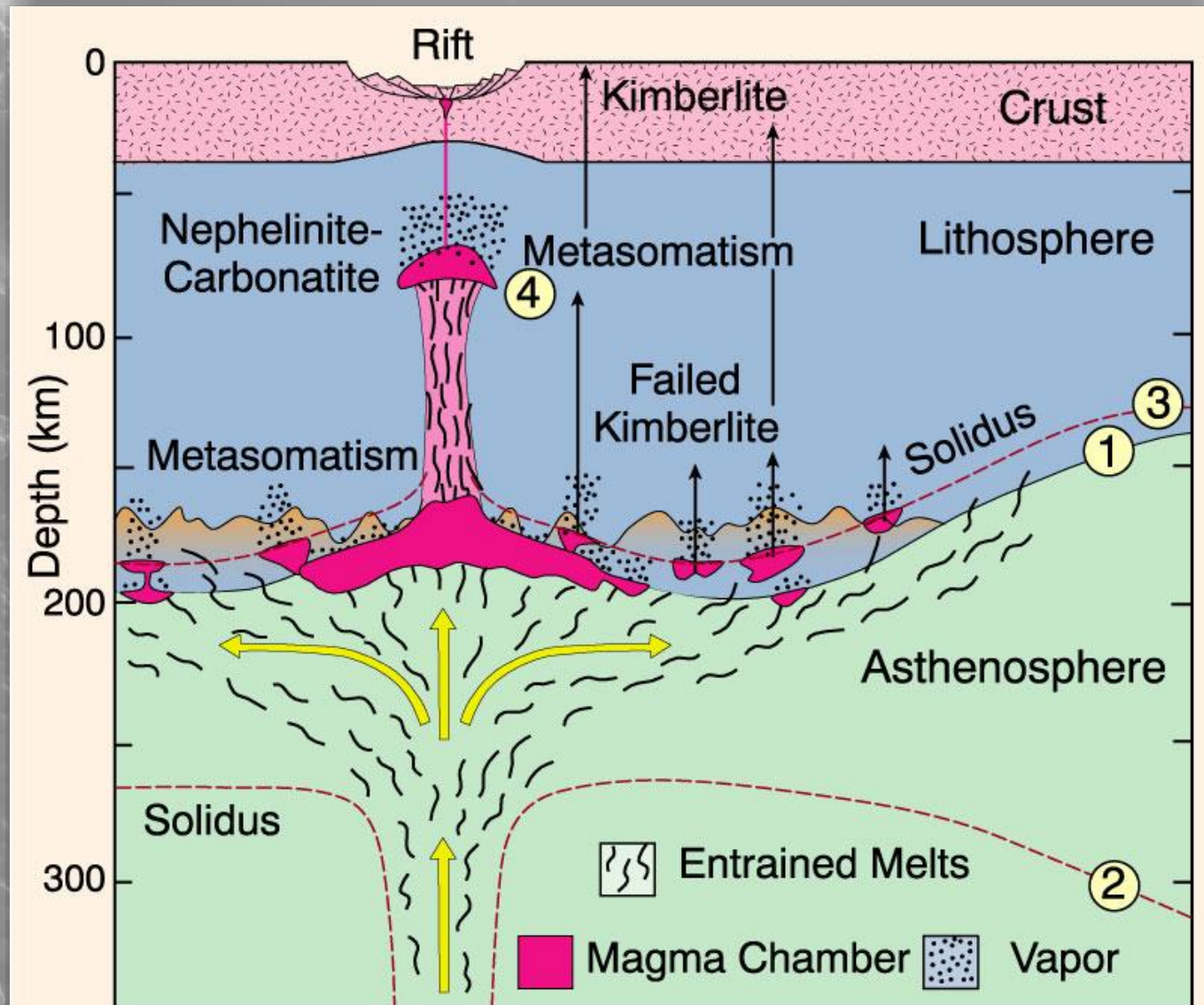
Source: Heinrich (1966), Hogarth (1989)

* only in natrocarbonatite

Kontinentalni alkalni magmatizam

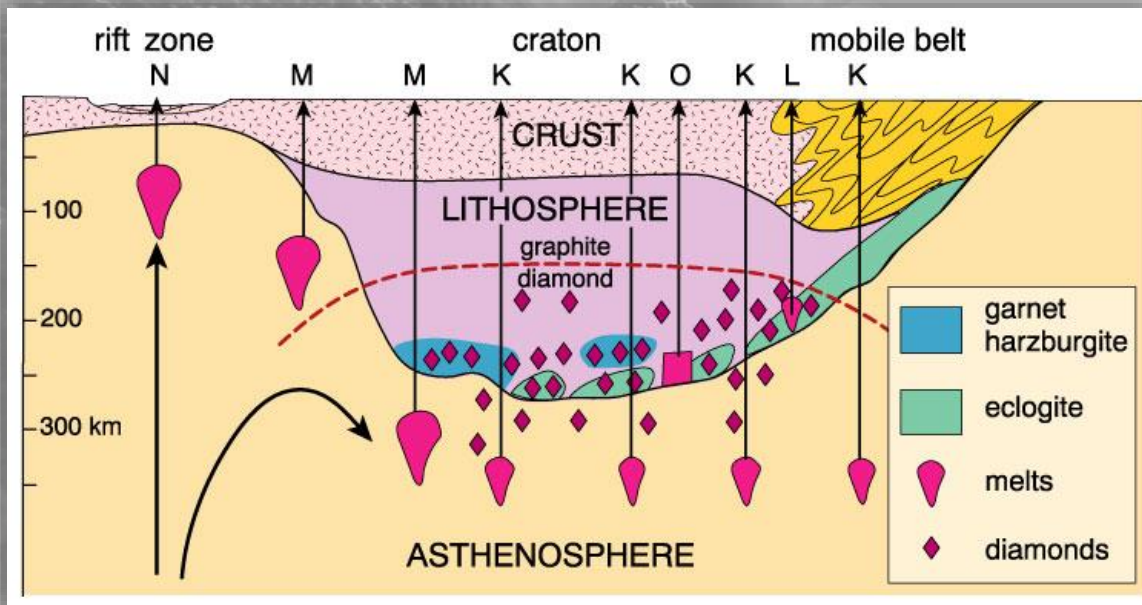
Karbonatiti

Slika 19-15. Shematski prikaz astenosferskog uzdizanja ispod kontinentalnog rifta i nastanak karbonatita. Prema Wyllie (1989, *Origin of carbonatites: Evidence from phase equilibrium studies*. In K. Bell (ed.), *Carbonatites: Genesis and Evolution*. Unwin Hyman, London. pp. 500-545) and Wyllie *et al.*, (1990, *Lithos*, 26, 3-19). Winter (2001) *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*. Prentice Hall.

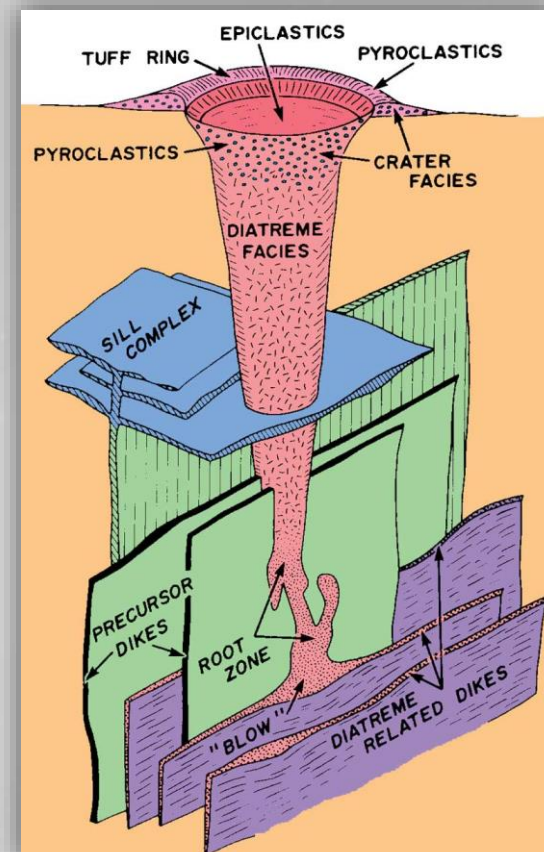


Kontinentalni alkalni magmatizam

- **Lamproiti** - ultramafitna porfirna stijena bogata kalijem, dolazi u manjim tijelima (plitki dajkovi), ne sadrži karbonatne minerale, min. sastav sličan kimberlitima
- **Lamprofiri** - žične stijene, sadrže i leukoratske minerale
- **Kimberliti** - ultramafitne stijene bogate kalijem, “pipes”, visok P



Slika 19-20b. Presjek kroz zonu kontinentalnog alkalnog magmatizma - Grafit-dijamant prijelazna zona. Prema Mitchell (1995) *Kimberlites, Orangeites, and Related Rocks*. Plenum. New York. Winter (2001) *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*. Prentice Hall.



Slika 19-19. Model idealiziranog kimberlitnog sustava. Prema Mitchell (1986) *Kimberlites: Mineralogy, Geochemistry, and Petrology*. Plenum. New York. Winter (2001) *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*. Prentice Hall.

Anortoziti

- **Plutonske stijene koje sadrže više od 90% plagioklasa**
 - ☞ **Nema poznatih efuzivnih ekvivalenata**
- **Felsičnost i položaj u kontinentalnoj kori im je zajednički sa granitoidima**
- **Leukokratski mineral je Ca-plagioklas koji zajedno s mafitnim mineralima sugerira veću kemijsku sličnost s bazaltnim stijenama**

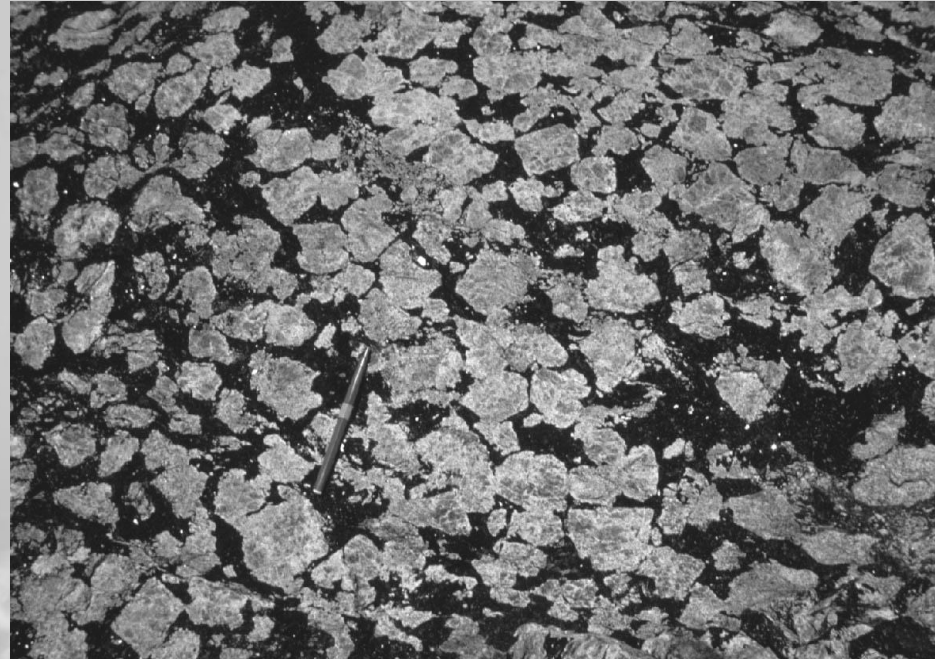
Ashwal (1993) -6 glavnih pojava oblika:

- 1. Arhajski anortozitni plutoni**
- 2. Proterozojski masivni anortozitni plutoni**
- 3. Centimetarski do 100m debeli slojevi u uslojenim mafitnim intruzijama**
- 4. Tanki kumulatni slojevi u ofiolitima/oceanskoj kori**
- 5. Uklopci u drugim tipovima stijena (ksenoliti)**
- 6. Lunarni anortoziti**

Anortoziti



Slika 20-1a. a. “Snowflake” nakupine plagioklasa, W. Greenland. Myers (1985) Stratigraphy and structure of the Fiskenæsset complex, West Greenland. *Grønl. Geol. Unders. Bull* 150. Photograph courtesy John Myers. Winter (2001) An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology. Prentice Hall.



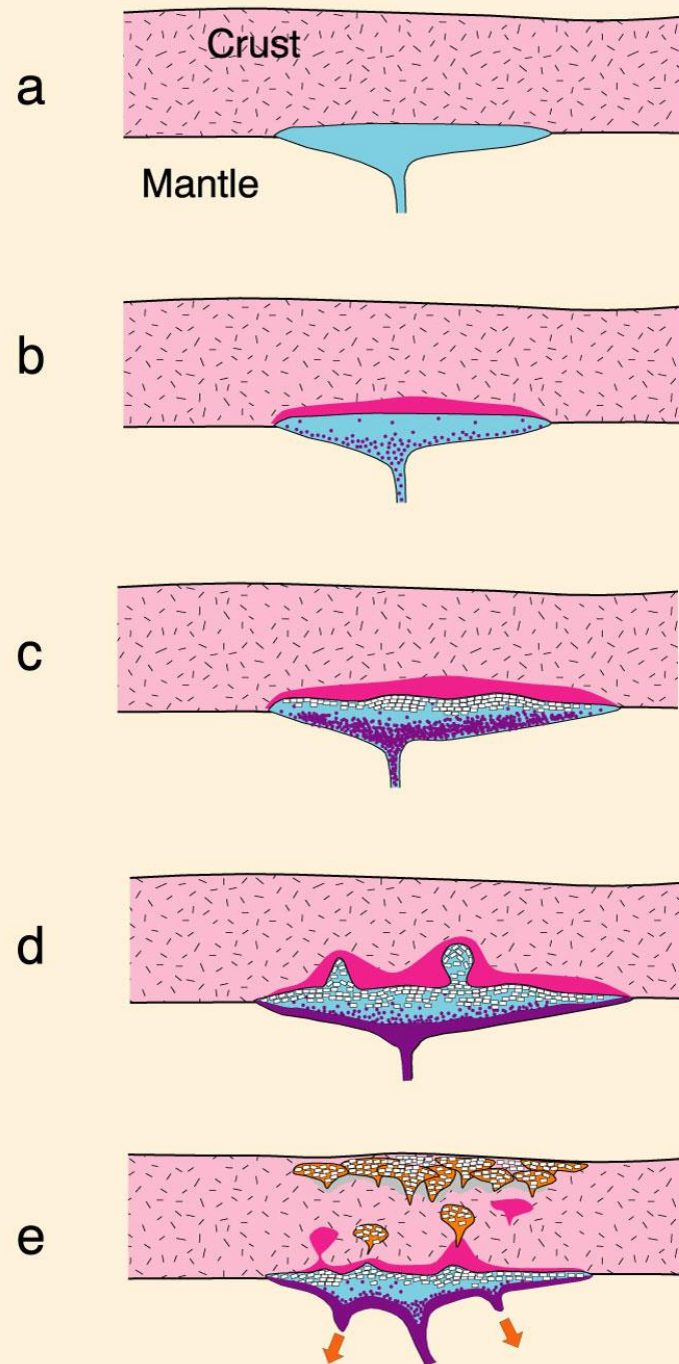
Slika 20-1a. a. Tipična tekstura arhajskih anortozita, Fiskenæsset complex, W. Greenland. Myers (1985) Stratigraphy and structure of the Fiskenæsset complex, West Greenland. *Grønl. Geol. Unders. Bull* 150. Photograph courtesy John Myers. Winter (2001) An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology. Prentice Hall.

Anortoziti

Slika 20-2. Model nastanka masivnog tipa anortozita:

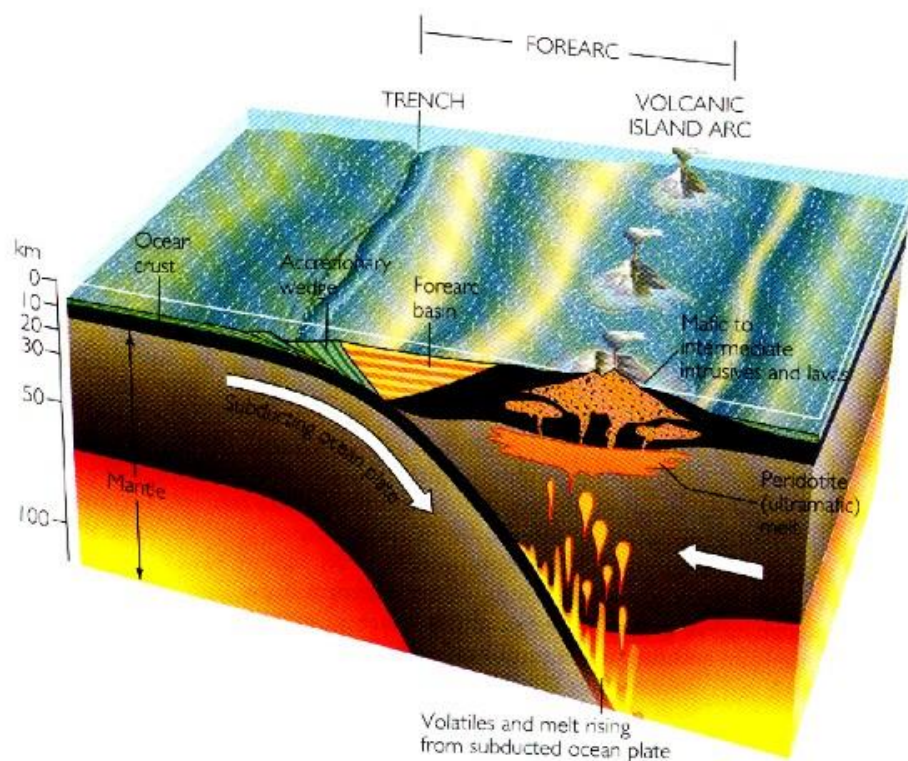
- Magma iz plašta dolazi na kontakt s korom i ne prodire dalje zbog razlika u gustoći.
- Kristalizacija mafitnih faza (koje tonu) i parcijalno taljenje kore iznad magme. Taljevina postaje bogata Al i Fe/Mg.
- Plagioklas nastaje kada je taljevina dovoljno obogaćena. Plagioklas se uzdiže na vrh ognjišta dok mafitni minerali tonu.
- Plagioklasna akumulacija postaje manje gusta od kore iznad nje i uzdiže se u vidu gljivastog plutona kaše kristala i taljevine.
- Plagioklasni plutoni formiraju masivne anortozite, dok se granitoidne taljevine kore uzdižu u pliće nivoe. Mafitni kumulati zaostaju u dubini ili tonu u plašt.

Prema Ashwall (1993) *Anorthosites*. Springer-Verlag. Berlin. Winter (2001) *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*. Prentice Hall.

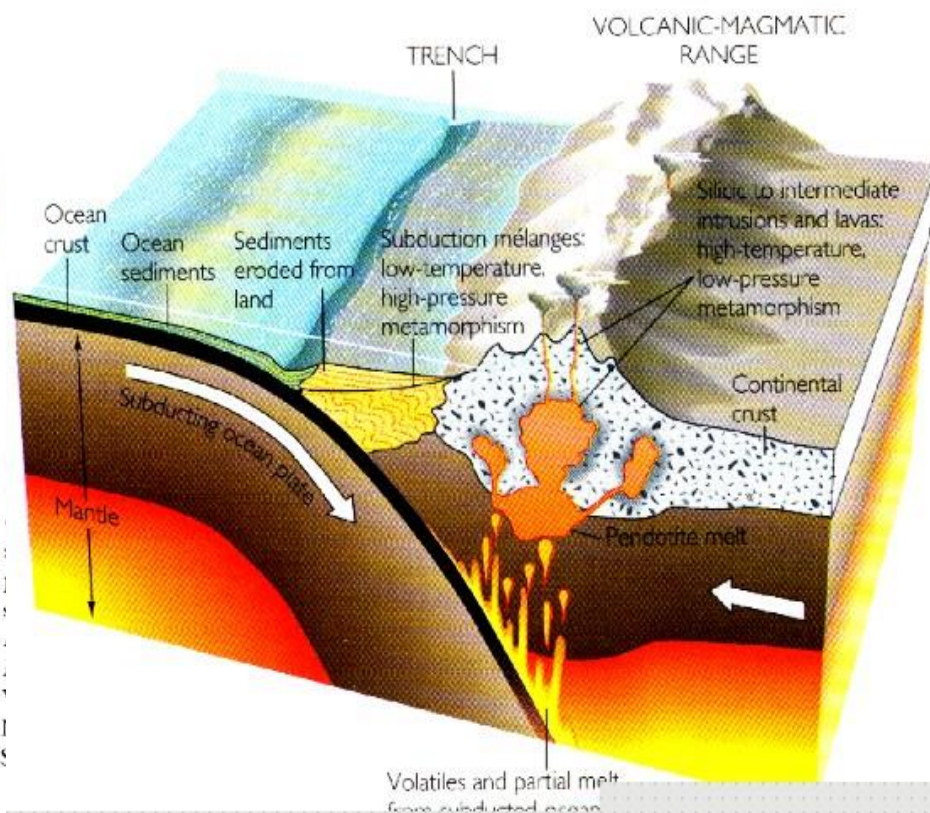


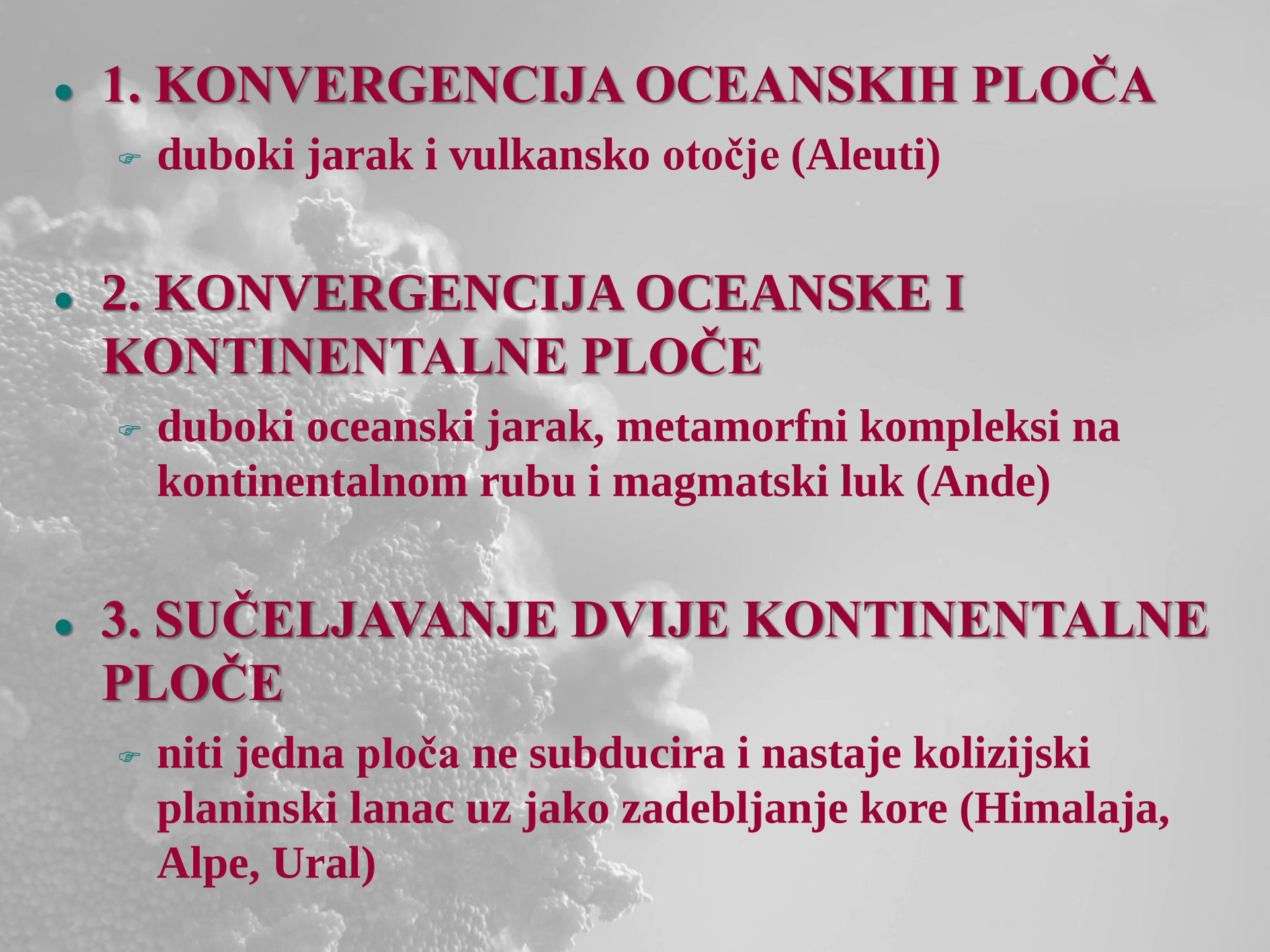
MAGMATSKE STIJENE KONVERGENTNIH GRANICA PLOČA

Podvlačenje oceanske ploče
pod drugu oceansku ploču



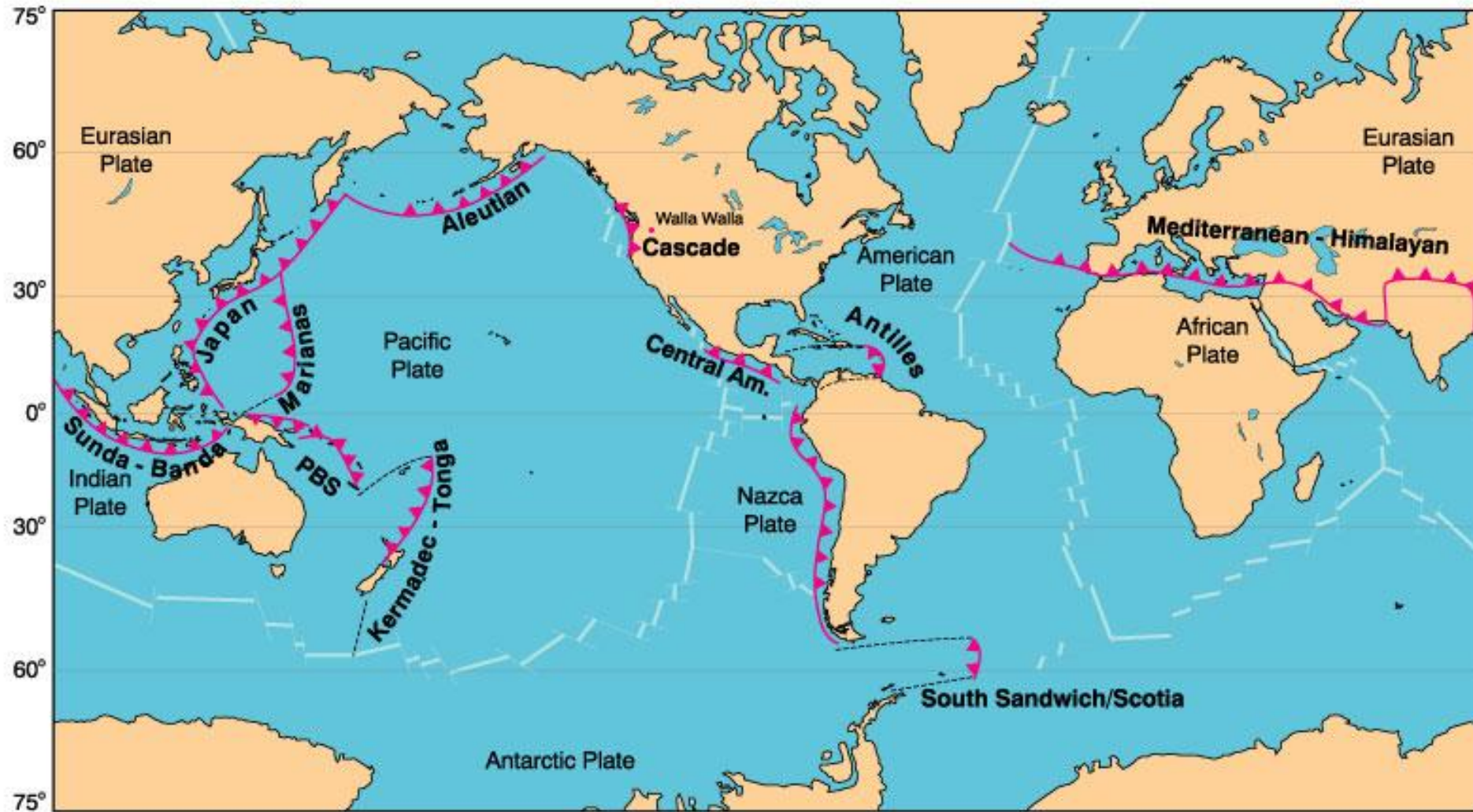
Podvlačenje oceanske ploče
pod kontinentalnu ploču



- 
- **1. KONVERGENCIJA OCEANSKIH PLOČA**
 - ☞ duboki jarak i vulkansko otočje (Aleuti)
 - **2. KONVERGENCIJA OCEANSKE I KONTINENTALNE PLOČE**
 - ☞ duboki oceanski jarak, metamorfni kompleksi na kontinentalnom rubu i magmatski luk (Ande)
 - **3. SUČELJAVANJE DVIJE KONTINENTALNE PLOČE**
 - ☞ niti jedna ploča ne subducira i nastaje kolizijski planinski lanac uz jako zadebljanje kore (Himalaja, Alpe, Ural)

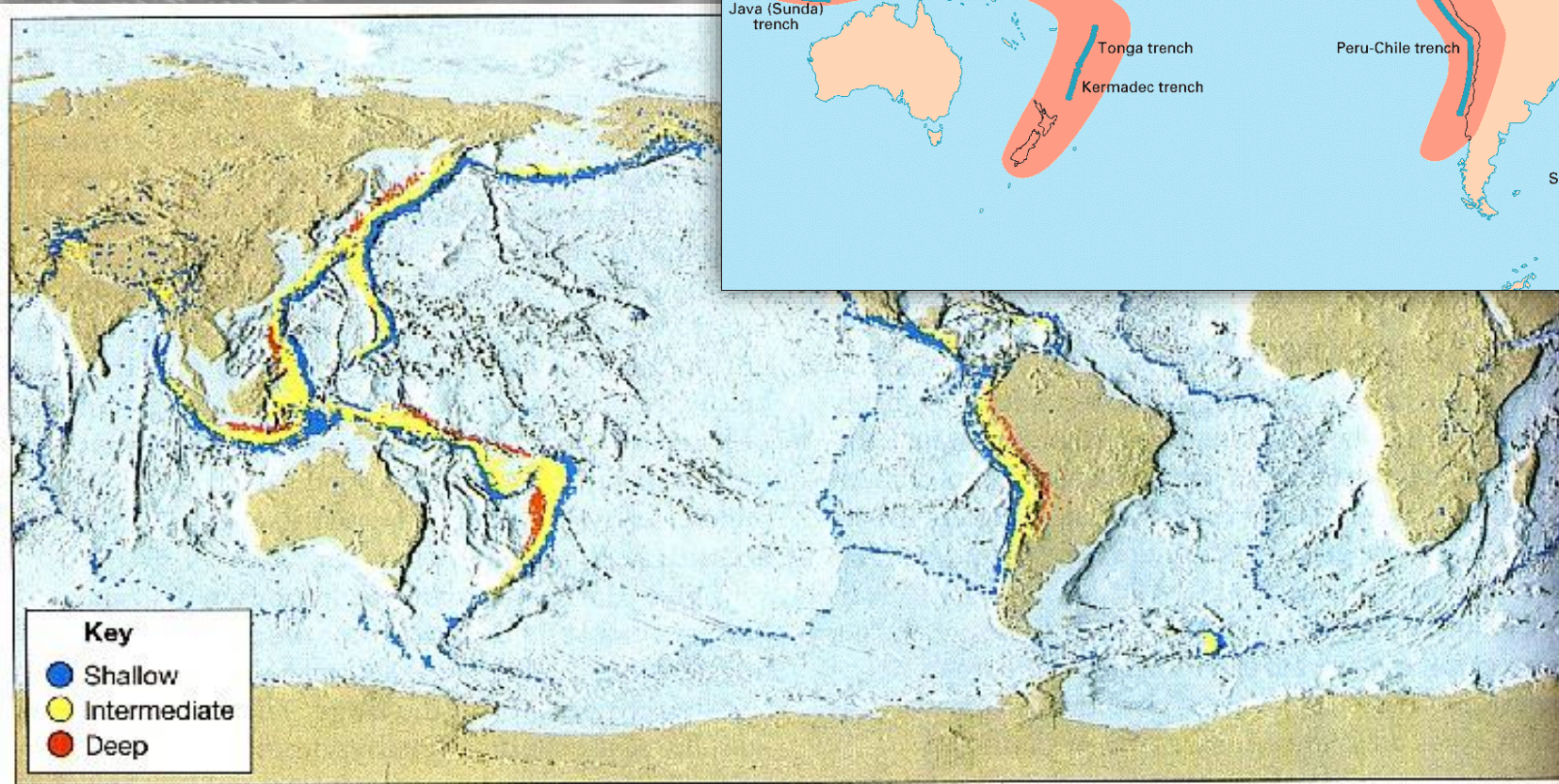
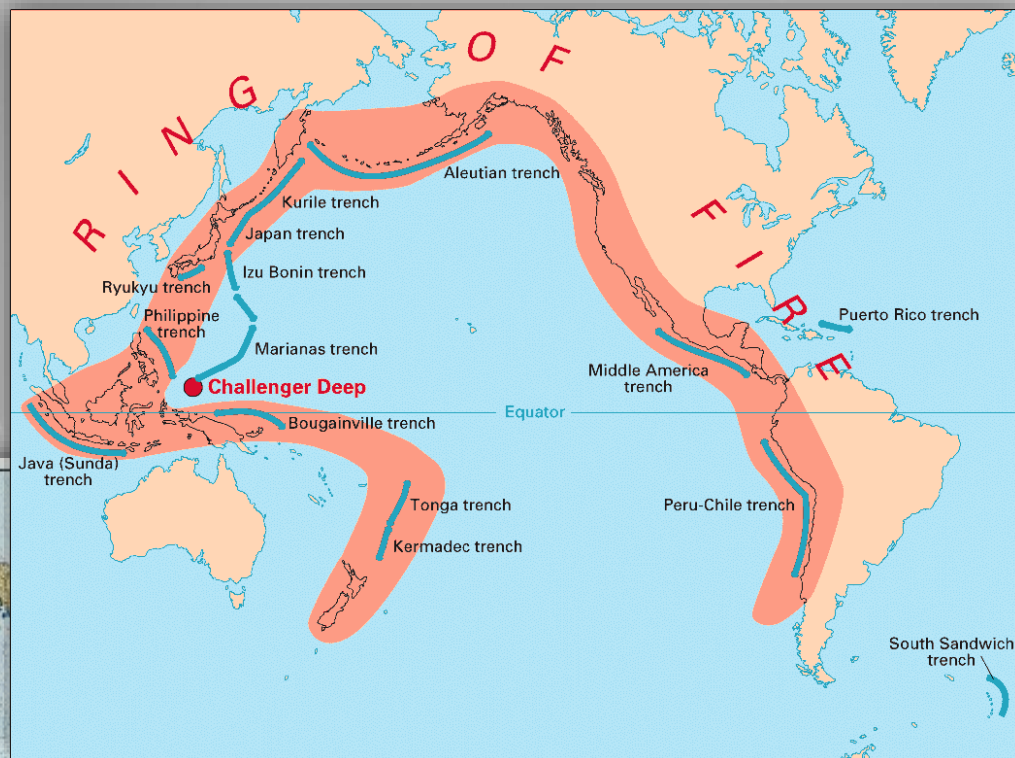
- tektonski najaktivnija područja na Zemlji
- svako od ta tri područja ima svoj karakterističan način nastanka magme, plutonizam i vulkanizam
- za područje 1. i 2. tipično je generiranje velikog volumena andezitne magme
- koliziji prethode jedan ili oba tipa sučeljavanja ploča stoga je to područje izuzetno kompleksno i obuhvaća širok spektar magmatskih, metamorfnih i sedimentnih stijena

1. Konvergencija oceanske i oceanske ploče



Slika VI-2. Glavne zone subdukcije, vulkanizma i plutonizma. Trokuti su na navučenoj ploči. PBS = Papuan-Bismarck-Solomon-New Hebrides luk. Preneseno iz Wilson (1989) *Igneous Petrogenesis*, Allen Unwin/Kluwer.

Pacifički “Ring of Fire”

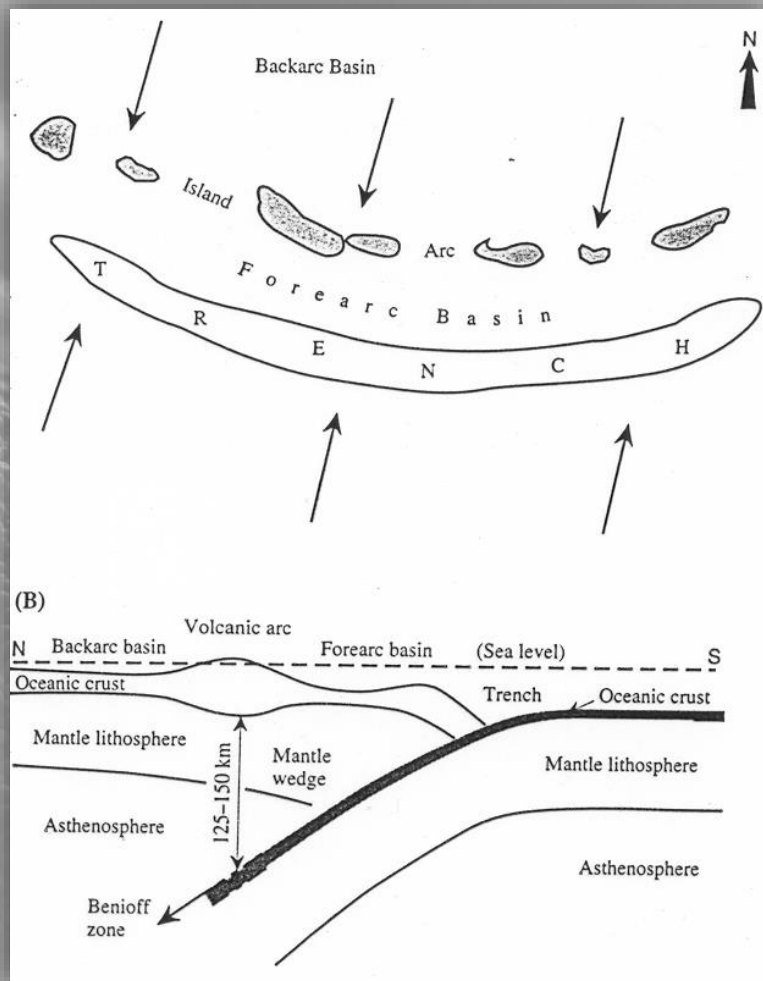


- vulkanska aktivnost se odvija duž zakrivljenog (luk) otočnog niza koji prati subdukcijsku zonu

Ocean-ocean → Island Arc (IA)

Ocean-kontinent → Continental Arc ili Active Continental Margin (ACM)

- nastanak vulkanskih otočnih lukova
- W i SW Pacifik, **ring of fire**, andezitni lukovi
- luk-jarak asocijacija - nekoliko 1000 km dug, 200-300 km širok
- jarak predstavlja najdublji dio oceana Marjanska brazda ~10 km
- izvor magmatizma je u plaštu
- kut subdukcije varira, na njega ukazuje raspored potresa unutar Benioff-Wadati zone (i do 700 km)
- o kutu ovisi udaljenost jarka od luka



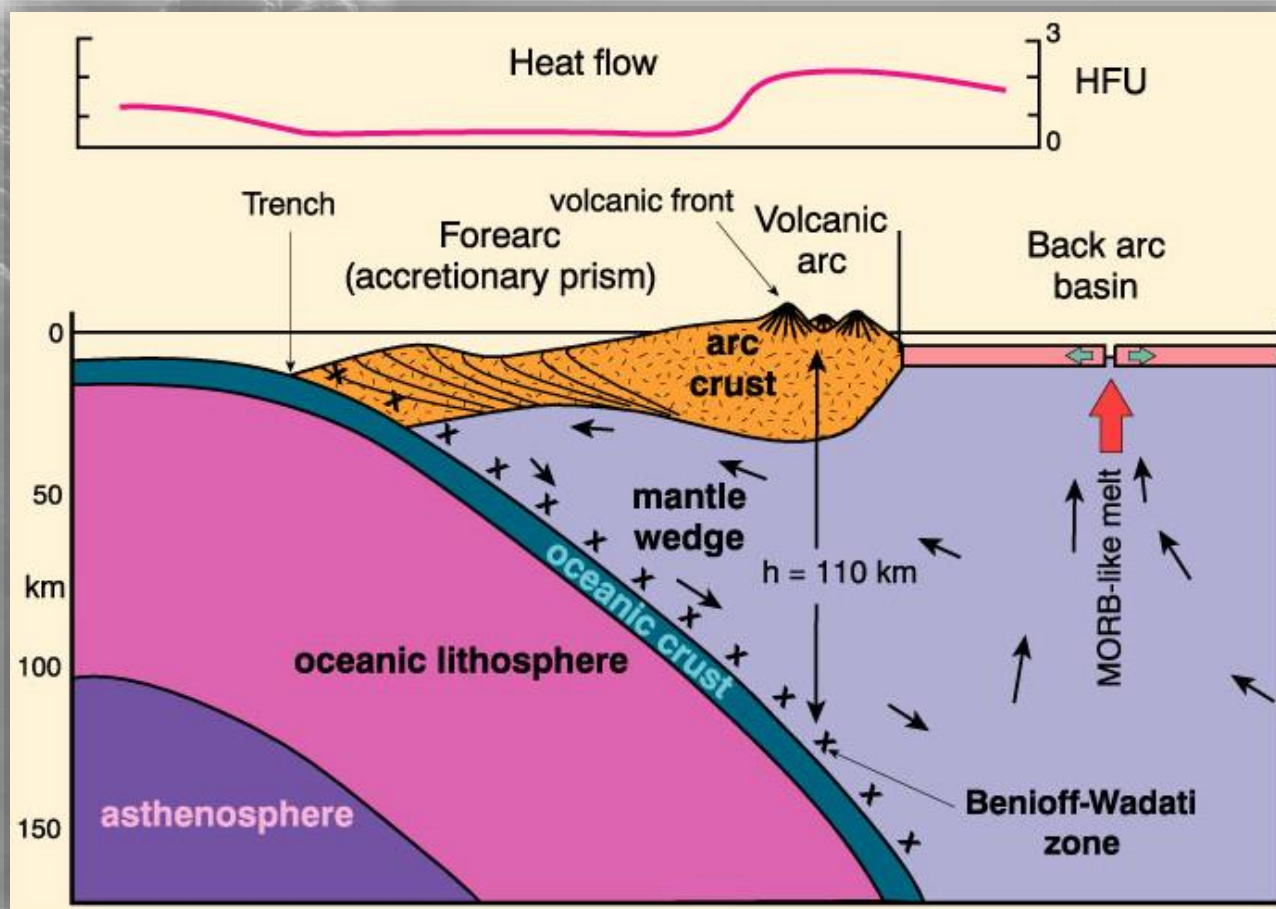
Slika VI-3. Shematski prikaz otočnog luka

Forearc basin, prednji bazen → vulkanske stijene i sedimenti nastali erozijom luka

Backarc basin, stražnji bazen → bazalti, moguć razvoj sekundarnog centra širenja, ekstenzija

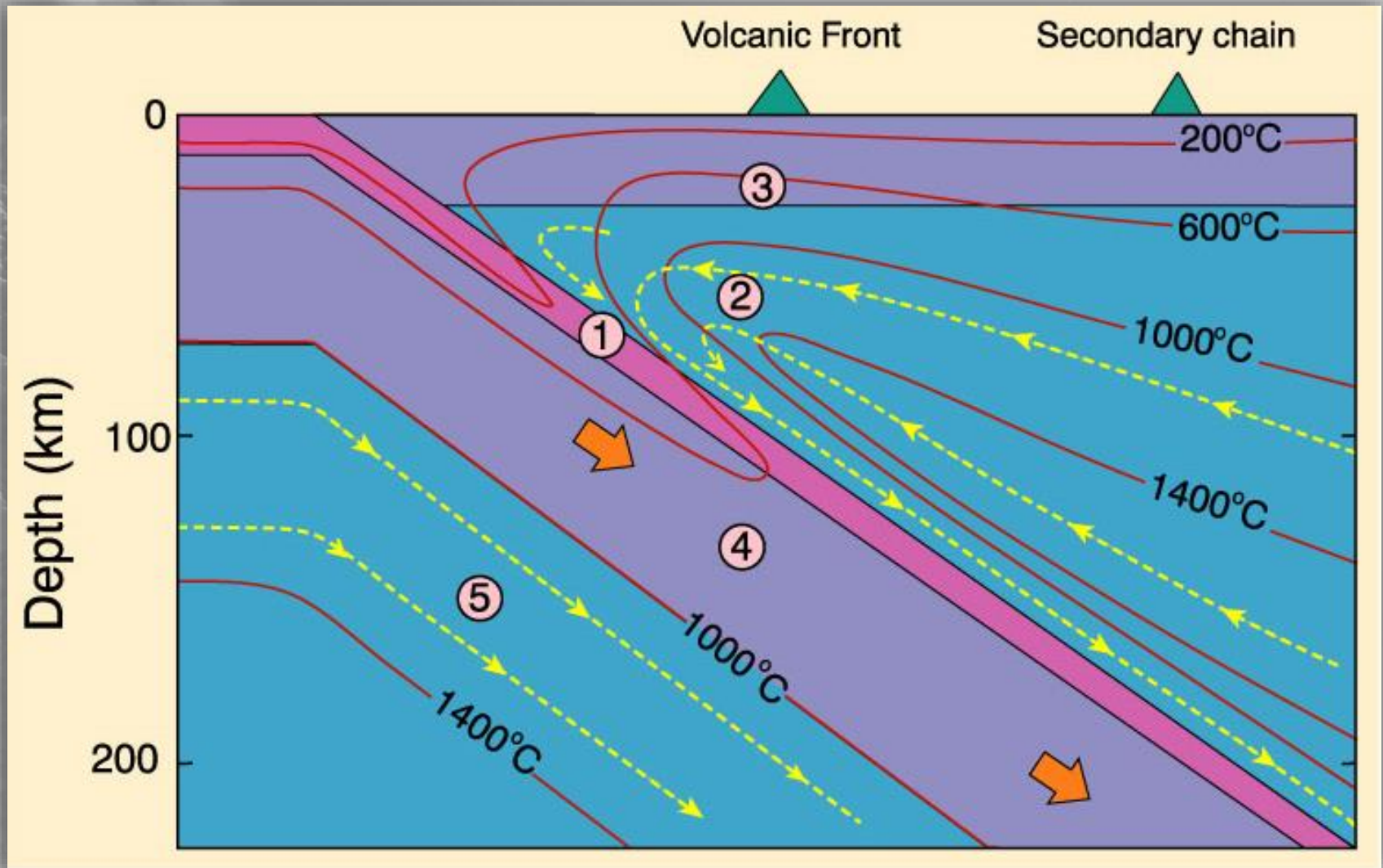
Struktura otočnog luka

- jarak i **forearc** imaju anomalno nizak tok topline zbog toga što hladna tonuća ploča upija svu toplinsku energiju
- luk i **backarc** imaju visok toplinski tok zbog uzdizanja u omotaču



Slika VI-4. Shematski prikaz presjeka kroz tipičan otočni luk, prikaz prema Gill (1981), *Orogenic Andesites and Plate Tectonics*, Springer-Verlag. HFU= heat flow unit (4.2×10^{-6} joules/cm²/sec)

Tipičan termalni model subdukcijske zone



Slika VI-5. Presjek kroz subdukcijsku zonu pokazuje izoterme (crveno prema Furukawa, 1993, *J. Geophys. Res.*, 98, 8309-8319) i strujnice kretanja u plaštu (žuto prema Tatsumi i Eggins, 1995, *Subduction Zone Magmatism*. Blackwell. Oxford).

Osnovne komponente za IA magme

1. Dijelovi kore subducirane ploče:

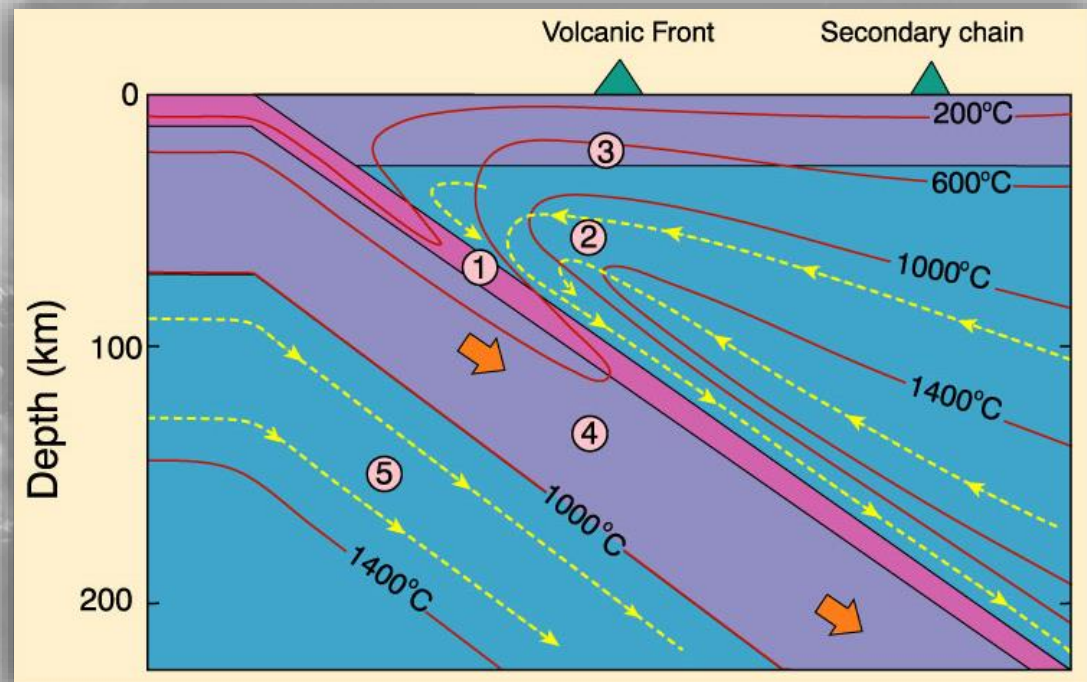
- 1a) alterirana oceanska kora (cirkulacija morske vode, metamorfozirana do facijesa zelenih škriljavaca)
- 1b) subducirani oceanski i forearc sedimenti
- 1c) morska voda zarobljena u porama

2. Plaštni klin između ploče i kore luka

3. Kora luka

4. Litosferski plašt subducirane ploče

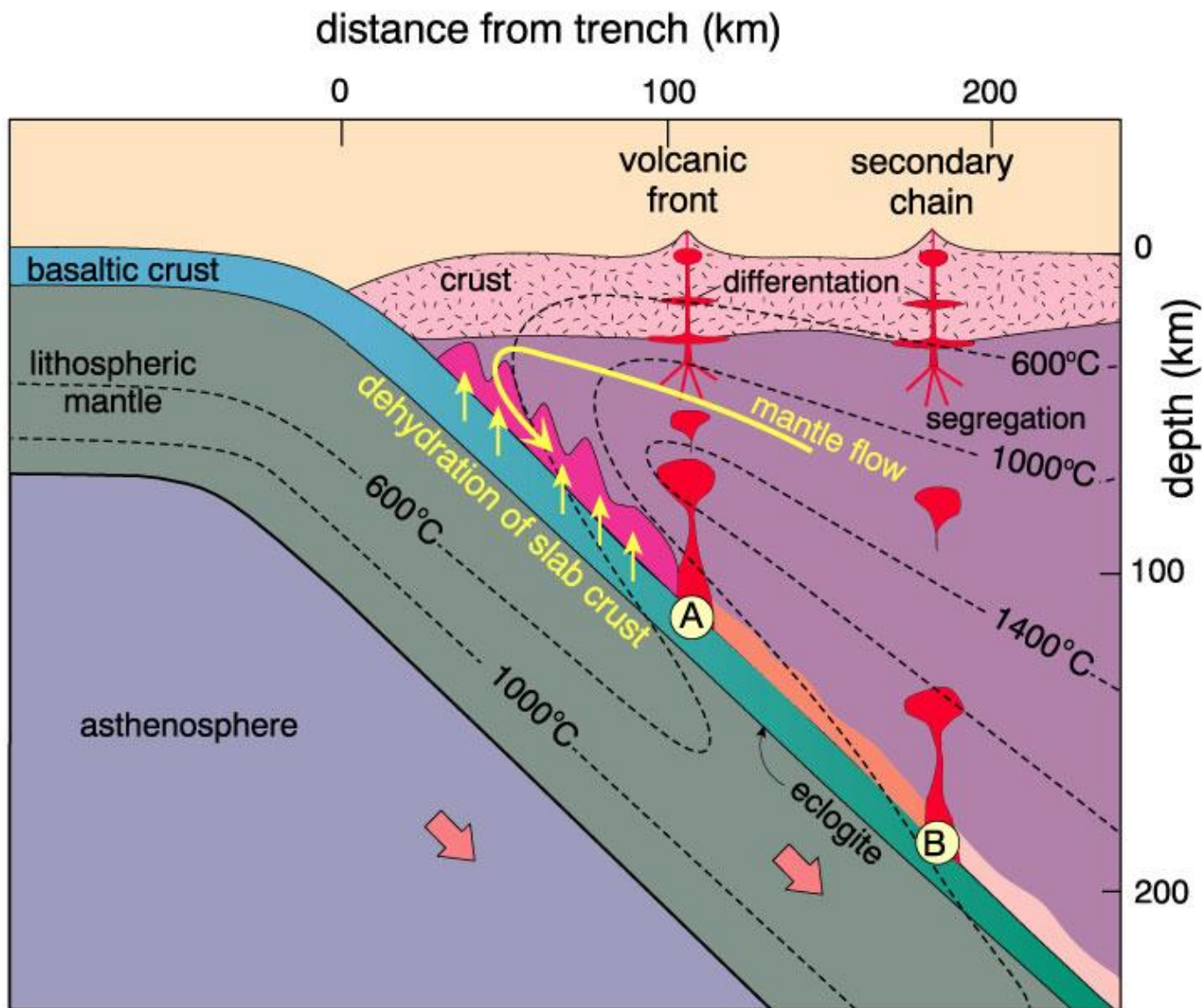
5. Astenosfera ispod ploče



Petrogeneza otočnog luka

Frakcijska kristalizacija se odvija na više nivoa!

Figure VI-6. Predloženi model za magmatizam subdukcijske zone otočnih lukova. Dehidratizacija ploče uzrokuje dovod volatila u plašt što omogućuje parcijalno taljenje plašta (plašnog klina) kako **amfibol (A)** i **flogopit (B)** gube vodu. Prema Tatsumi (1989), *J. Geophys. Res.*, 94, 4697-4707 i Tatsumi and Eggins (1995). *Subduction Zone Magmatism*. Blackwell. Oxford.



Produkti subdukcijske aktivnosti

Table 16-1. Relative proportions of Quaternary volcanic island arc rock types.

Locality	B	B-A	A	D	R
Talasea, Papua	9	23	55	9	4
Little Sitkin, Aleutians	0	78	4	18	0
Mt. Misery, Antilles (lavas)	17	22	49	0	0
Ave. Antilles	17	42		39	2
Ave. Japan (lava, ash falls)	14	85		2	0

after Gill (1981, Table 4.4) B = basalt B-A = basaltic andesite

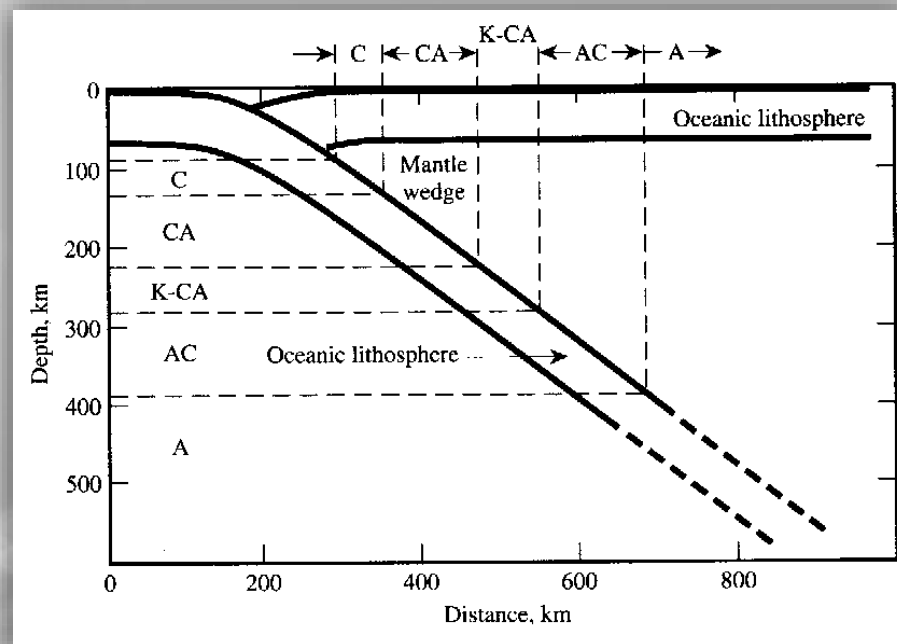
A = andesite, D = dacite, R = rhyolite

- visokoalumijski bazalti (**high alumina basalt**), tip bazalta koji je uglavnom ograničen na subdukcijske zone

- magmatske stijene vulkanskih lukova su raznolike i zajedničkim imenom se nazivaju **BAR** asocijacija
- bazalti
- andeziti su tipične stijene
- rioliti

- **izraženi su metasomatski procesi uslijed infiltracije fluida u dio plašta (mantle wedge)**

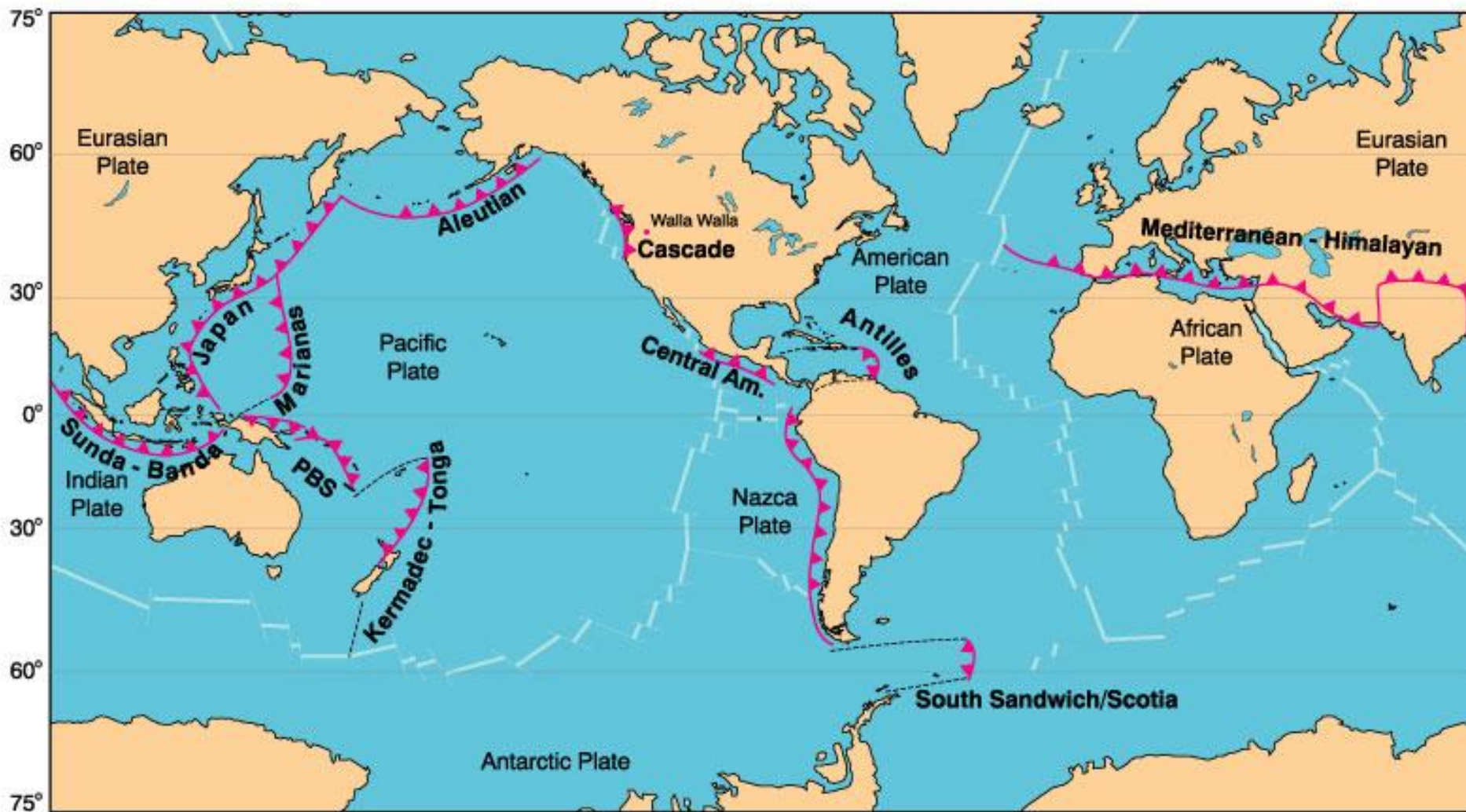
Sa starenjem luka smanjuje se stupanj parcijalnog taljenja i zbog toga magma postaje bogatija na H_2O , alkalijama i inkompatibilnim elementima. Unutar luka uočava se i zonalnost u rasporedu stijena koja je u vezi s dubinom subdukcijske zone (udaljenost) i sa starosti (zrelosti) luka
bazalt $\Rightarrow$ andezit $\Rightarrow$ riolit



Boninit - vrlo primitivan andezit, magnezijem bogata stijena koja sadrži ortopiroksene

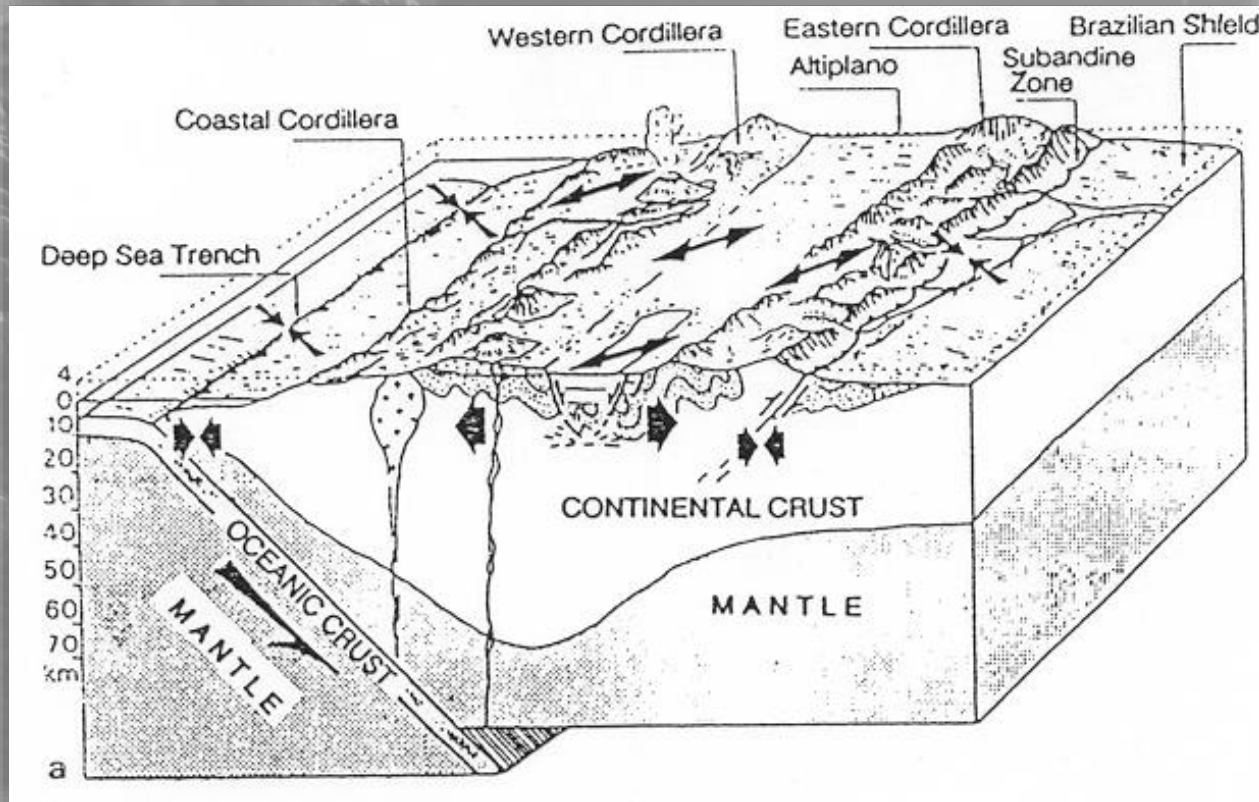
2. Konvergencija oceanske i kontinentalne ploče

- područje akumulacije velike količine sedimenata
- pasivne granice (E Atlantik)
- aktivne granice $\Rightarrow$ jarak (Pacifik)
 - $\Rightarrow$ transformni rasjedi (Kalifornija)
- vrlo značajna magmatska aktivnost
- metamorfizam



Slika VI-2. Glavne zone subdukcije, vulkanizma i plutonizma. Trokuti su na navučenoj ploči. PBS = Papuan-Bismarck-Solomon-New Hebrides luk. Preneseno iz Wilson (1989) *Igneous Petrogenesis*, Allen Unwin/Kluwer.

Kontinentalni magmatski lukovi



Slika VI-7. Sučeljavanje
oceanske i kontinentalne
ploče

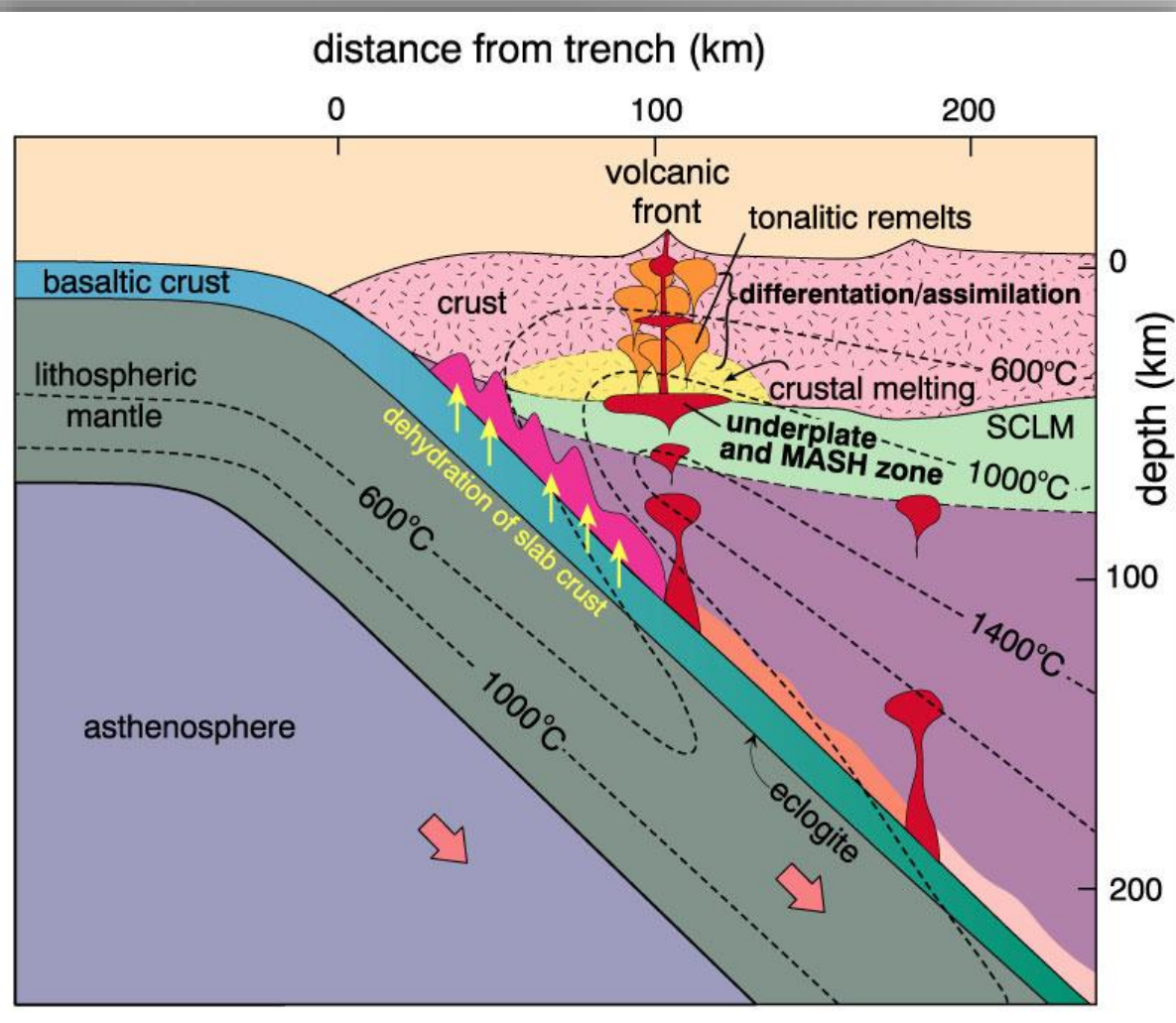
- velike batolitne provincije ⇒ granitoidi

- procesi slični otočnim vulkanskim lukovima
- bitna razlika uslijed interakcije s debelom kontinentalnom korom (tanji plaštni klin - **mantle wedge**)
- ploča koja subducira nije ravna tj. ponekad nema konstantan nagib, ispočetka je nagib blag a zatim ploča naglo subducira
- direktan rezultat interakcije magme s kontinentalnom korom → **bimodalni magmatizam**

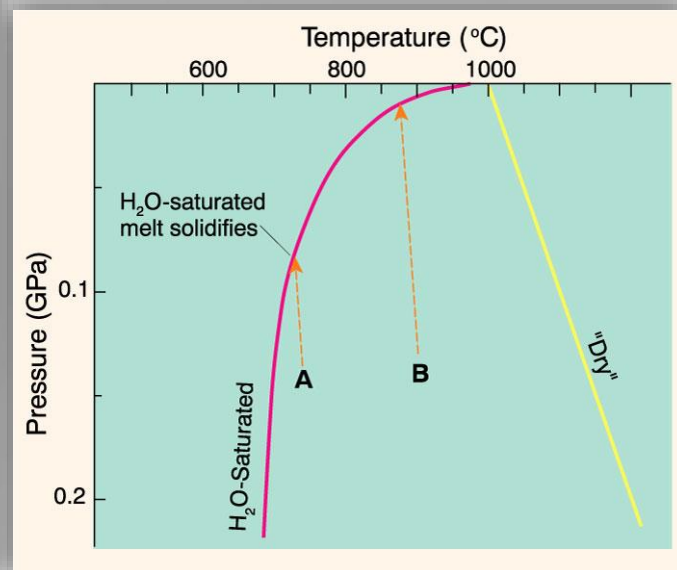
Potencijalne razlike u odnosu na otočni luk (**Island Arc**):

- Debela sial kora se bitno razlikuje od plaštnih parcijalnih taljevina → značajniji su efekti kontaminacije
- Manja gustoća kore može usporiti uzdizanje → mirovanje magme što ju čini podložnijom diferencijaciji
- Niža točka taljenja kore omogućava nastanak parcijalnih taljevina i taljevina nastalih iz kore

Petrogeneza



Slika VI-14. P-T fazni dijagram pokazuje solidusne linije za “mokri” i “suhi” granit. “Mokri” granit (-oid) iznad točke A će presijeći solidus i litificirati će se. Vrući “suhi” granit (-oid) će se dalje uzdizati prije nego li očvrсне. Winter (2001) *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*. Prentice Hall.



Slika VI-13. Shematski presjek aktivnog kontinentalnog ruba subdukcijske zone, pokazuje dehidratizaciju subducirajuće ploče, hidratizaciju i taljenje heterogenog plašnog klina (uključujući obogaćeni subkontinentalni litosferski plašt), što omogućuje djelovanje procesa diferencijacije magme (MASH) i kristalizacije. Ponovo taljenje donje ploče daje tonalitne magme i parcijalno taljenje kore (anateksis). Kako magma ide kroz kontinentalnu koru može se dalje diferencirati i asimilirati kontinentalnu koru. Winter (2001) *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*. Prentice Hall.

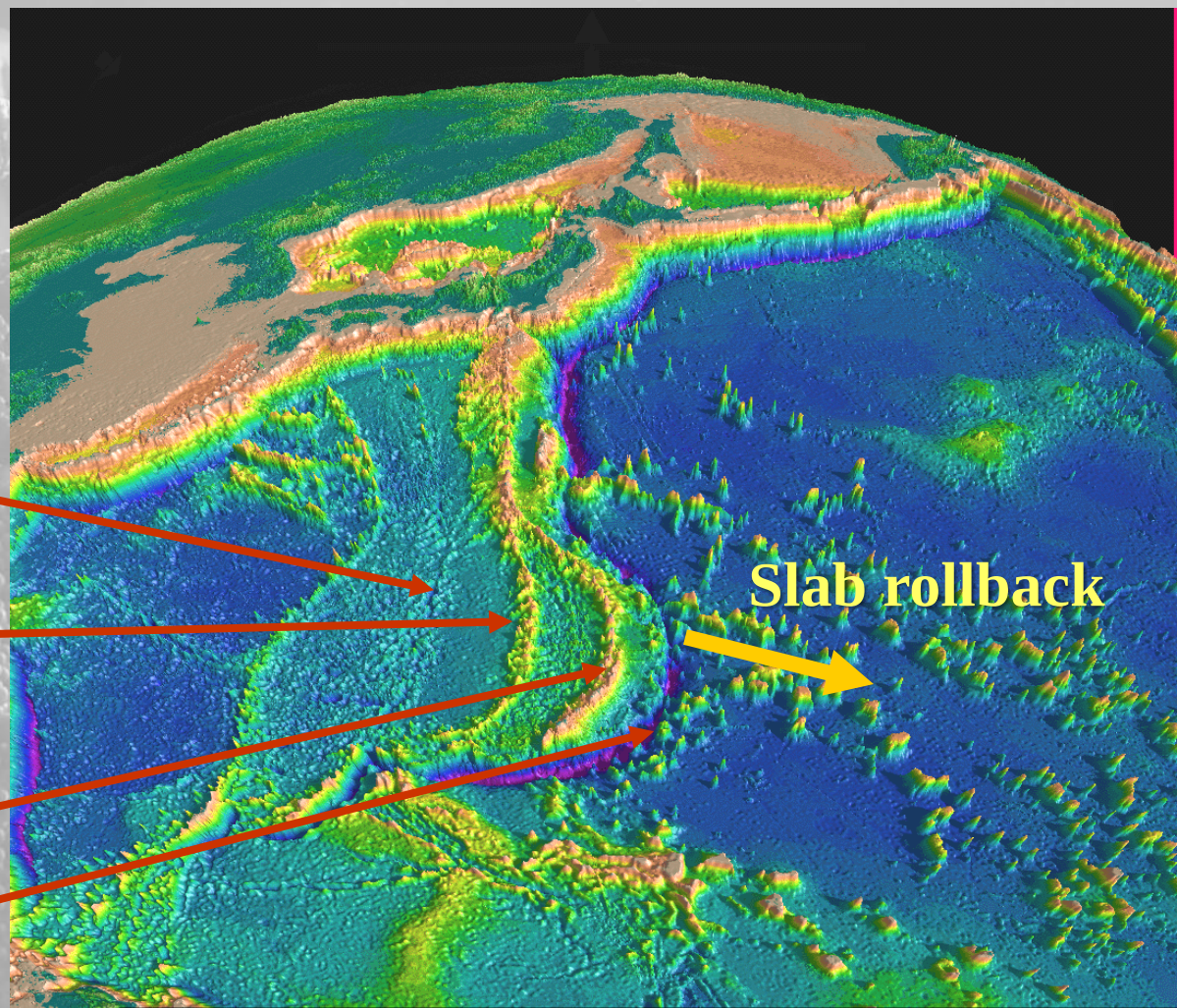
Slab Rollback

Backarc centar
širenja

Stari vulkanski luk

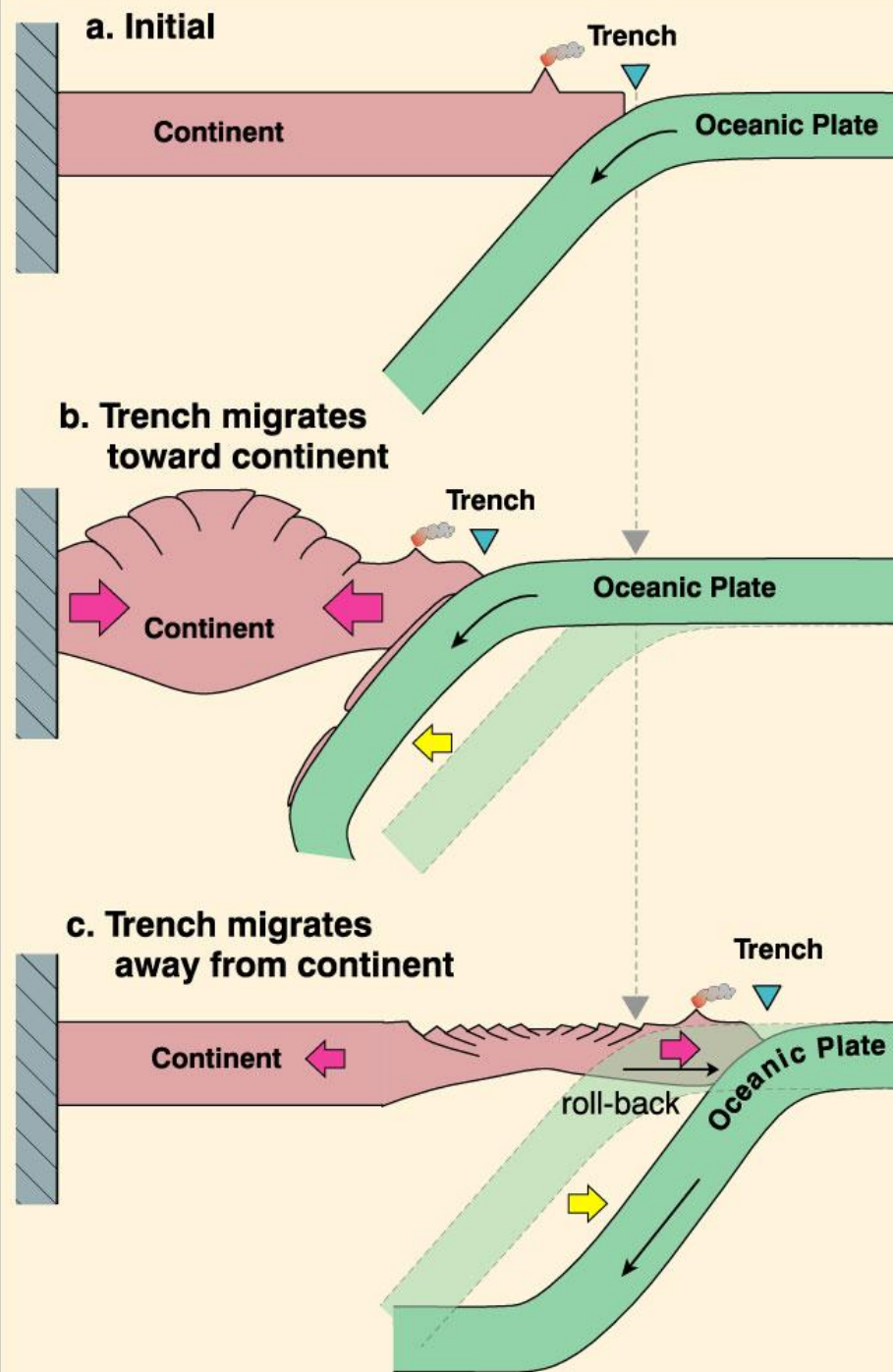
Aktivan vulkanski luk

Jarak



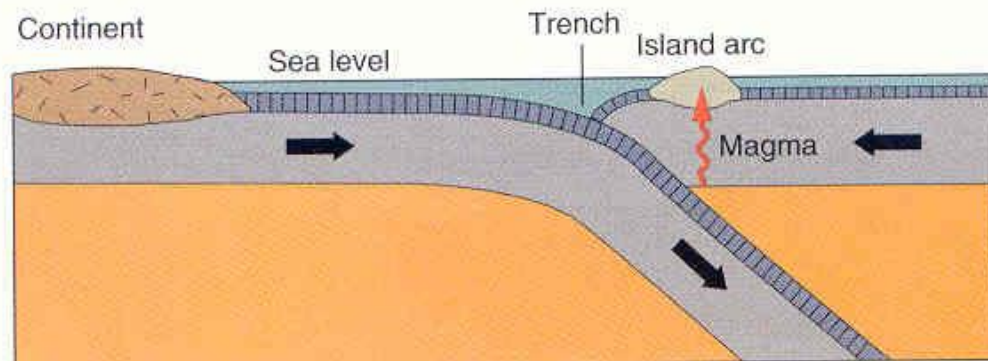
Slab rollback

Slika VI-11. Shematski presjek kroz vulkanski luk pokazuje početno stanje (a) koje slijedi migracija jarka prema kontinentu (b), što rezultira destruktivnom granicom i subdukcijskom erozijom naležeće kore. Jarak može migrirati od kontinenta (c) što ima za posljedicu ekstenziju i nastanak konstruktivne granice. U tom slučaju ekstenzija je postignuta (c) “roll-back” -om subducirane ploče. Alternativni put uključuje odvajanje subdukcijske zone od kontinenta ostavljajući segment oceanske kore s lijeve strane novonastalog jarka. Winter (2001) *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*. Prentice Hall.

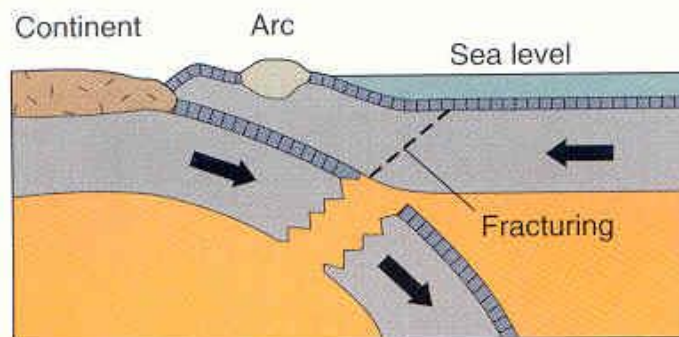


Promjena smjera subdukcije

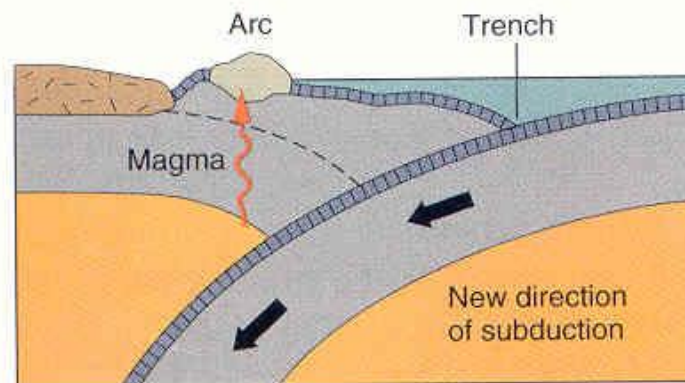
Sučeljavanje luka i kontinenta može “stopiti” otočni luk s kontinentom. Tada se otvara mogućnost za promjenu smjera subdukcije. Prema: Plummer i dr. (2003): Physical geology, McGraw-Hill, 574 str.



A

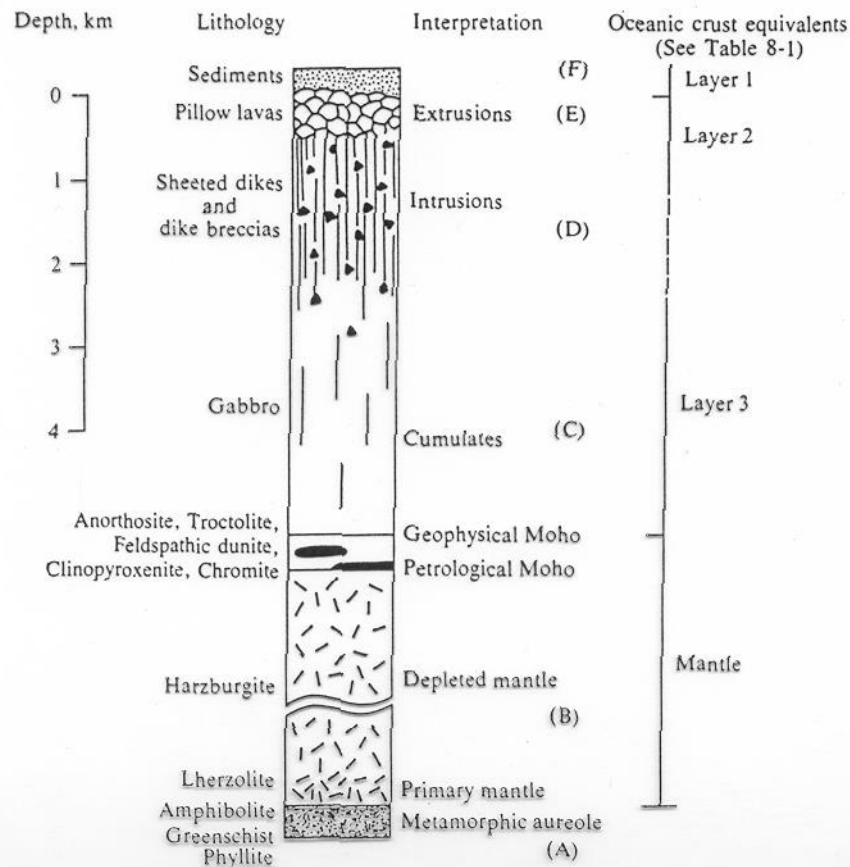


B

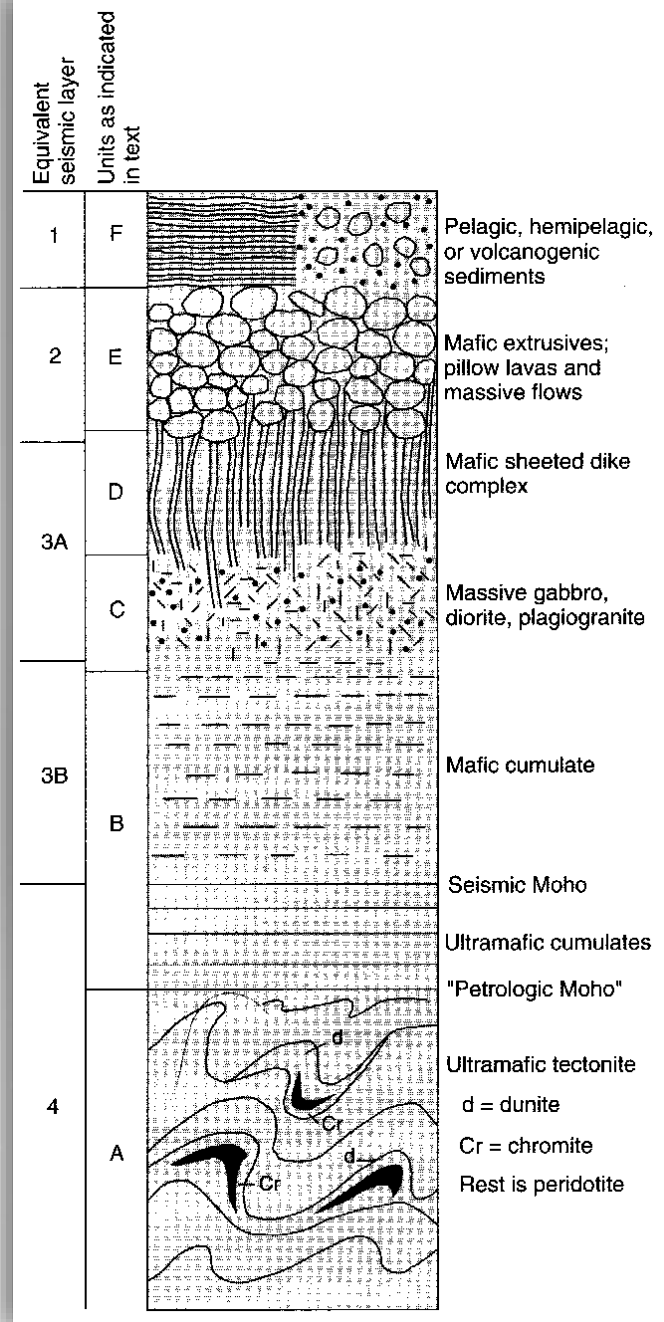


Ofioliti

- zajednica ultramafitnih, gabroidnih i bazaltnih stijena uz tanak sloj dubokomorskih pelagičkih sedimenata
- odgovara oceanskoj kori i gornjem dijelu plašta
- “obducirani” na kontinentalan rub (ekshumirani)

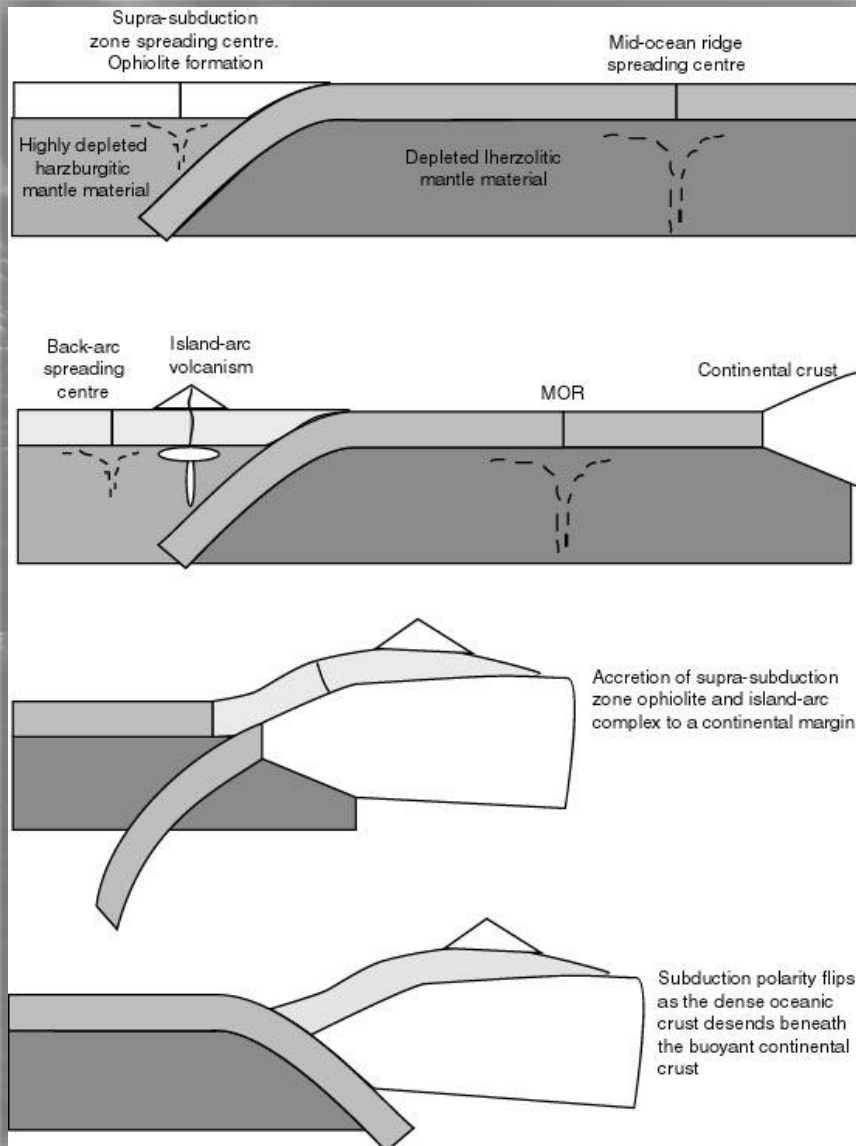


- **tektonski melanž (mélange)** - kontakt između kontinentalne litosfere i blokova oceanske kore
- **Dinaridi, Newfoundland, Troodos (Cipar), Semail (Oman)**

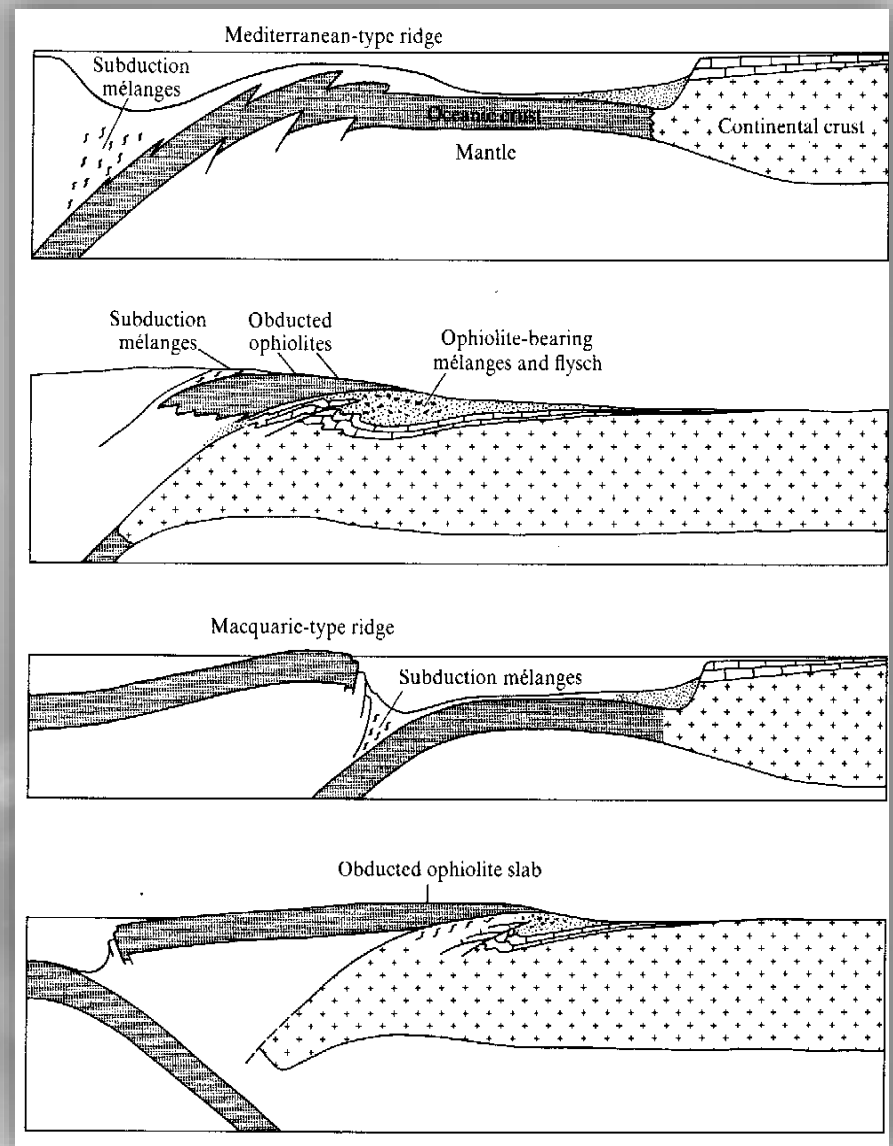


Slika VI-15: Profil kroz ofiolit

Ofioliti



Priraštanje zalučne ili predlučne litosfere procesima vezanim za subdukciju



Obdukcija MOR litosfere

Serpentinizacija

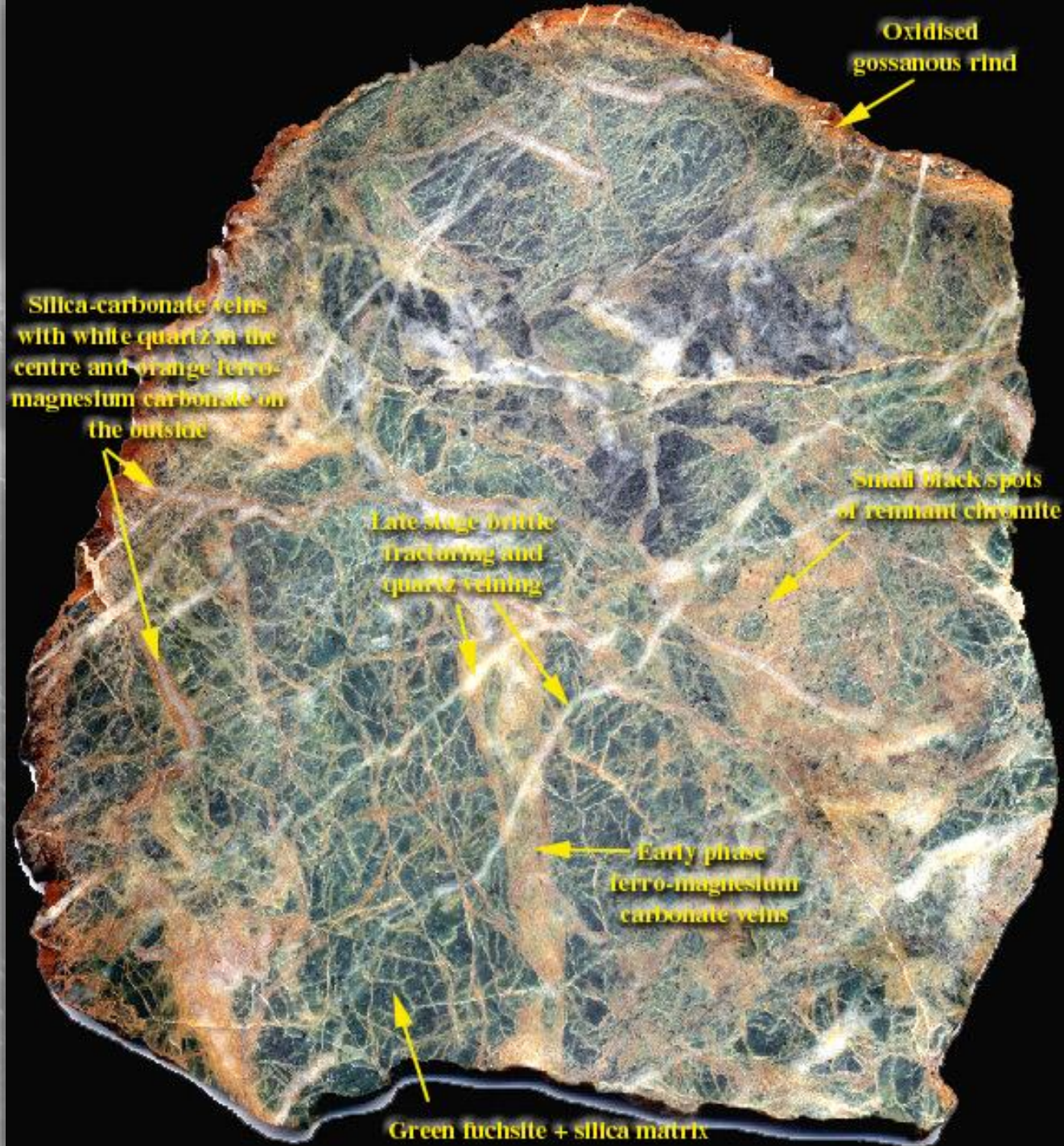
Tablica 1.1 Kemijske reakcije uključene u proces serpentinizacije

	<i>olivine</i>		<i>water</i>		<i>serpentine</i>		<i>brucite</i>
1)	$2\text{Mg}_2\text{SiO}_4$	+	$3\text{H}_2\text{O}$	→	$\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$	+	$\text{Mg}(\text{OH})_2$
2)	$3\text{Mg}_2\text{SiO}_4$	+	$4\text{H}_2\text{O} + \text{SiO}_2$	→	$2\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$		
3)	<i>olivine</i> $3\text{Mg}_2\text{SiO}_4$	+	<i>orthopyroxene</i> $\text{MgSiO}_3 + \text{H}_2\text{O}$	→	<i>serpentine</i> $\text{Mg}_3\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$		

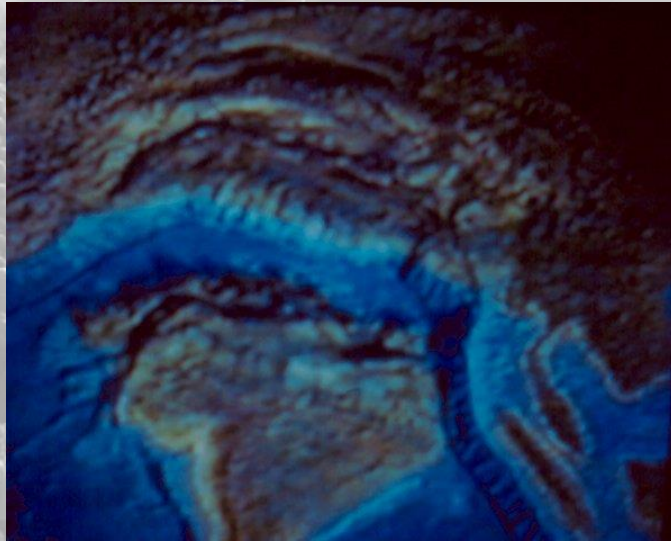


Nastanak listvenita

Silicijsko-
karbonatna
stijena nastala u
zonama loma
bogata žilicama
i produktima
alteracija

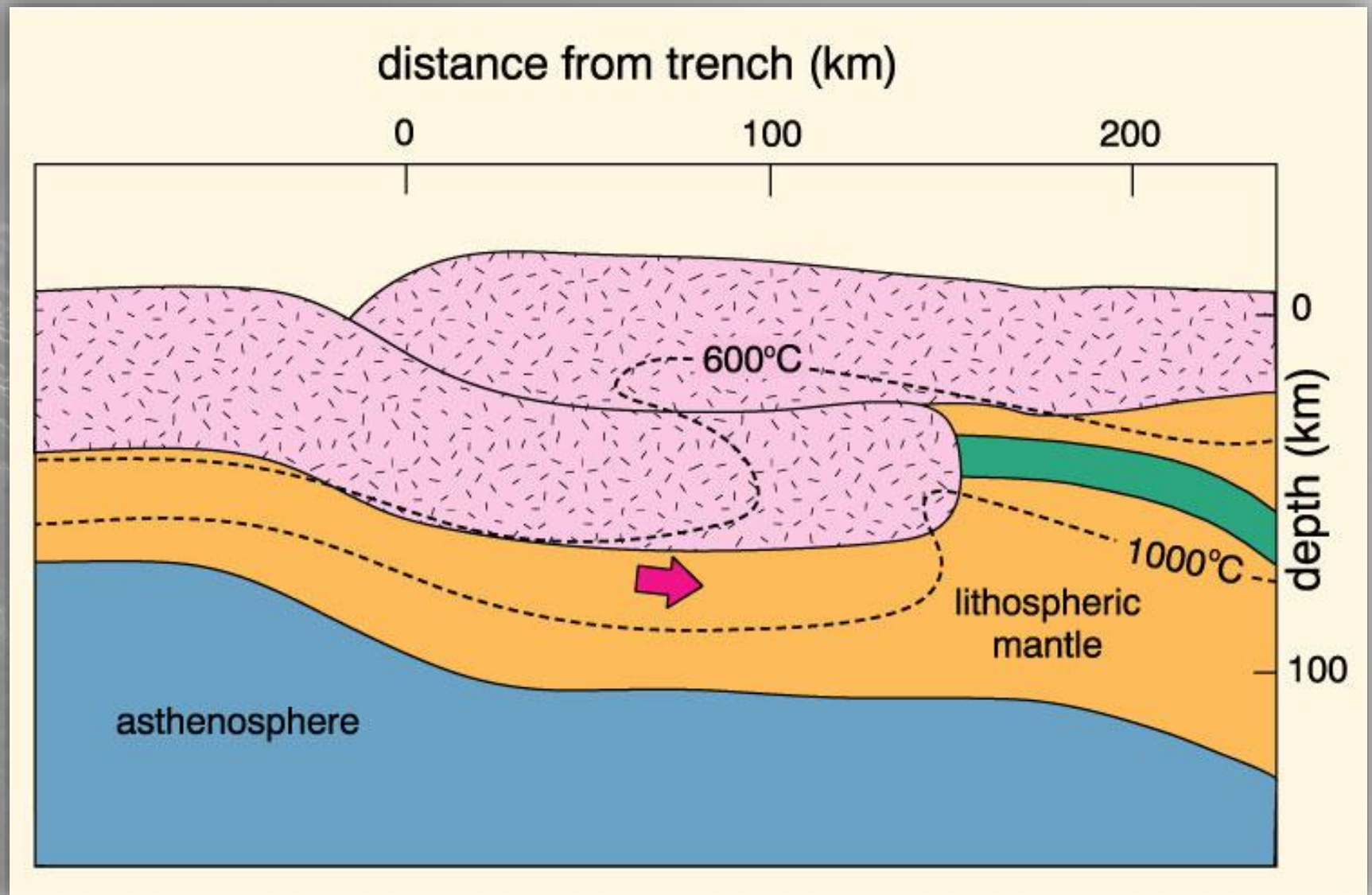


3. Kolizija kontinentalnih ploča

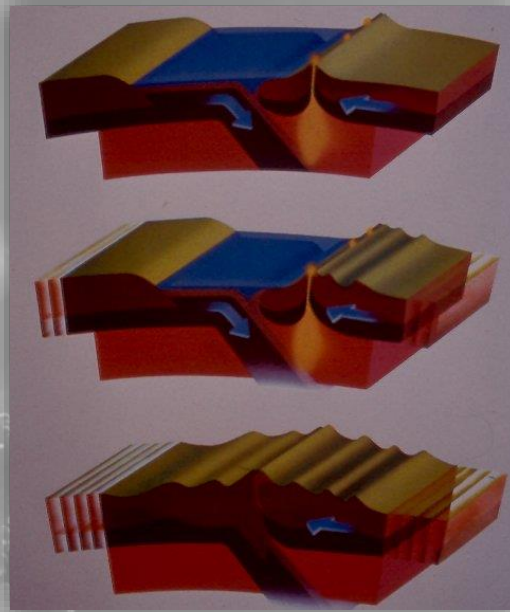


Slika VI-16. Kolizija Indije i Azije

- miješane magmatske stijene iz drugih područja



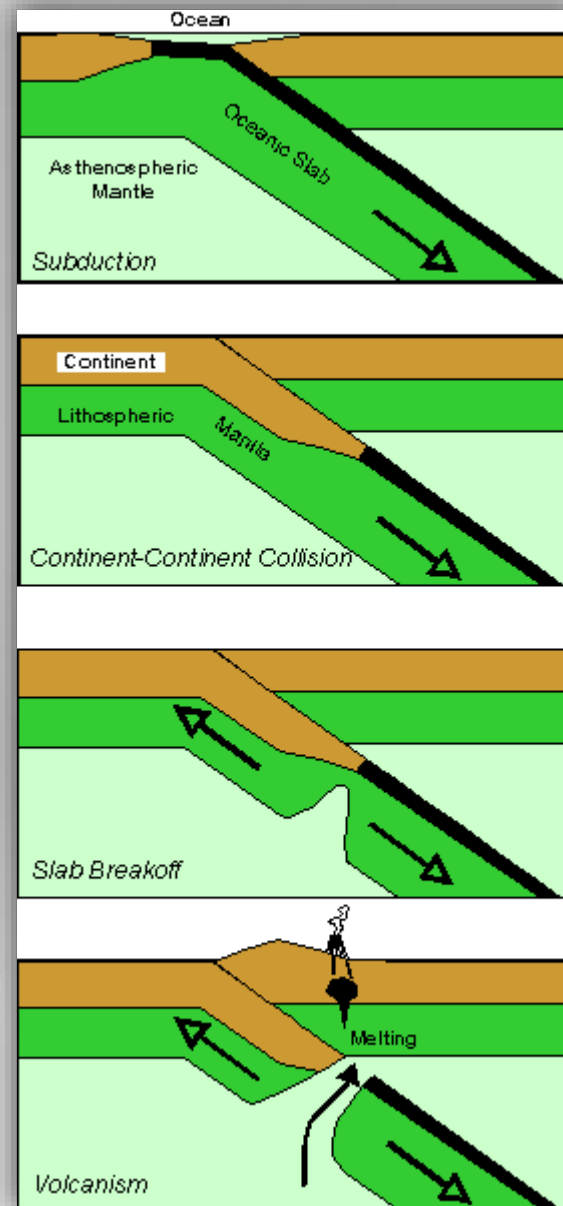
Slika VI-17. Subdukcija kontinentalne kore uzrokuje zadebljanje i dovodi Sial koru na dubinu i temperaturu dovoljnu za uzrokovanje parcijalnog taljenja. Winter (2001) *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*. Prentice Hall.



- zadebljanje kore u velikim razmjerima
- nastanak planinskog lanca i debelog “kontinentalnog korijena”
- S-tip granita, kvarc dioriti, kvarc monzoniti

Slab breakoff

Model “**slab breakoff**” se pojavio sredinom 90-ih i objašnjava nastanak magmi u post-kolizijskim sredinama (Alpe). Magmatizam se objašnjava pucanjem subducirane ploče (koje više nema na površini) i uzdizanjem dijelova plašta kroz nastalu pukotinu. Na magmatizam ima utjecaj i kretanje ostatka nerastaljene ploče (Vrancea).



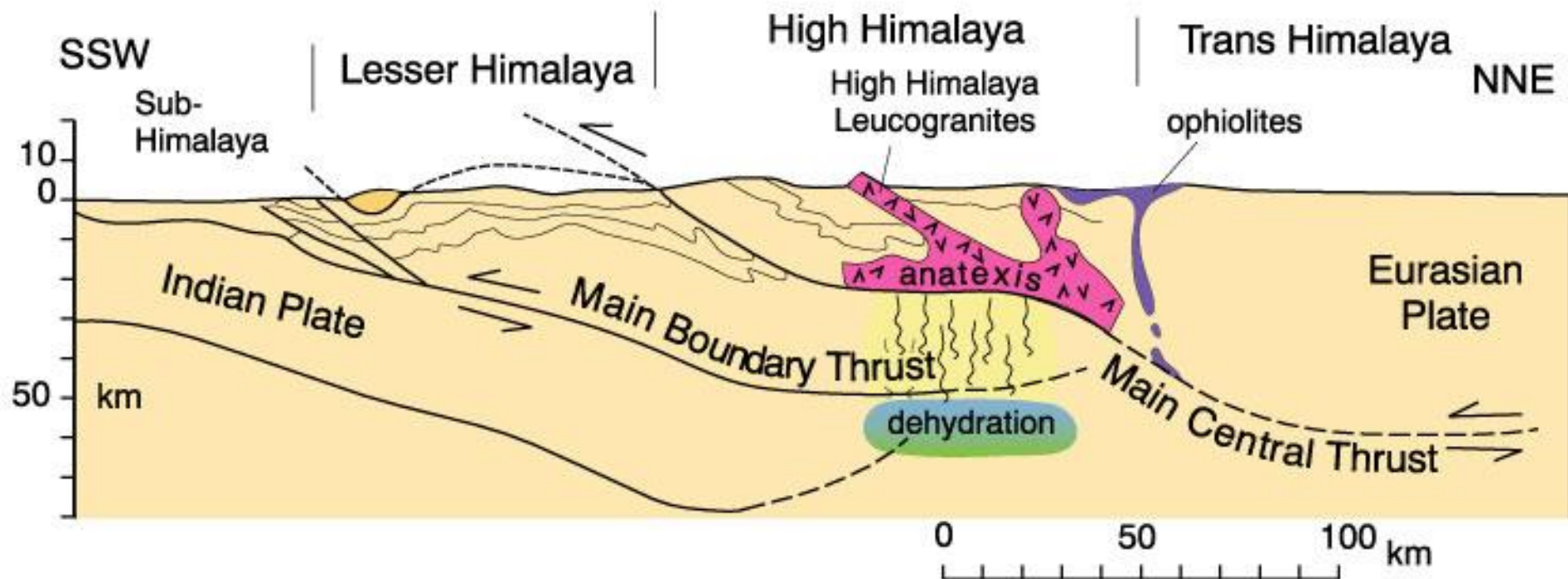
Slika VI-18

GRANITI

- preklapanje magmatskih i metamorfnih procesa

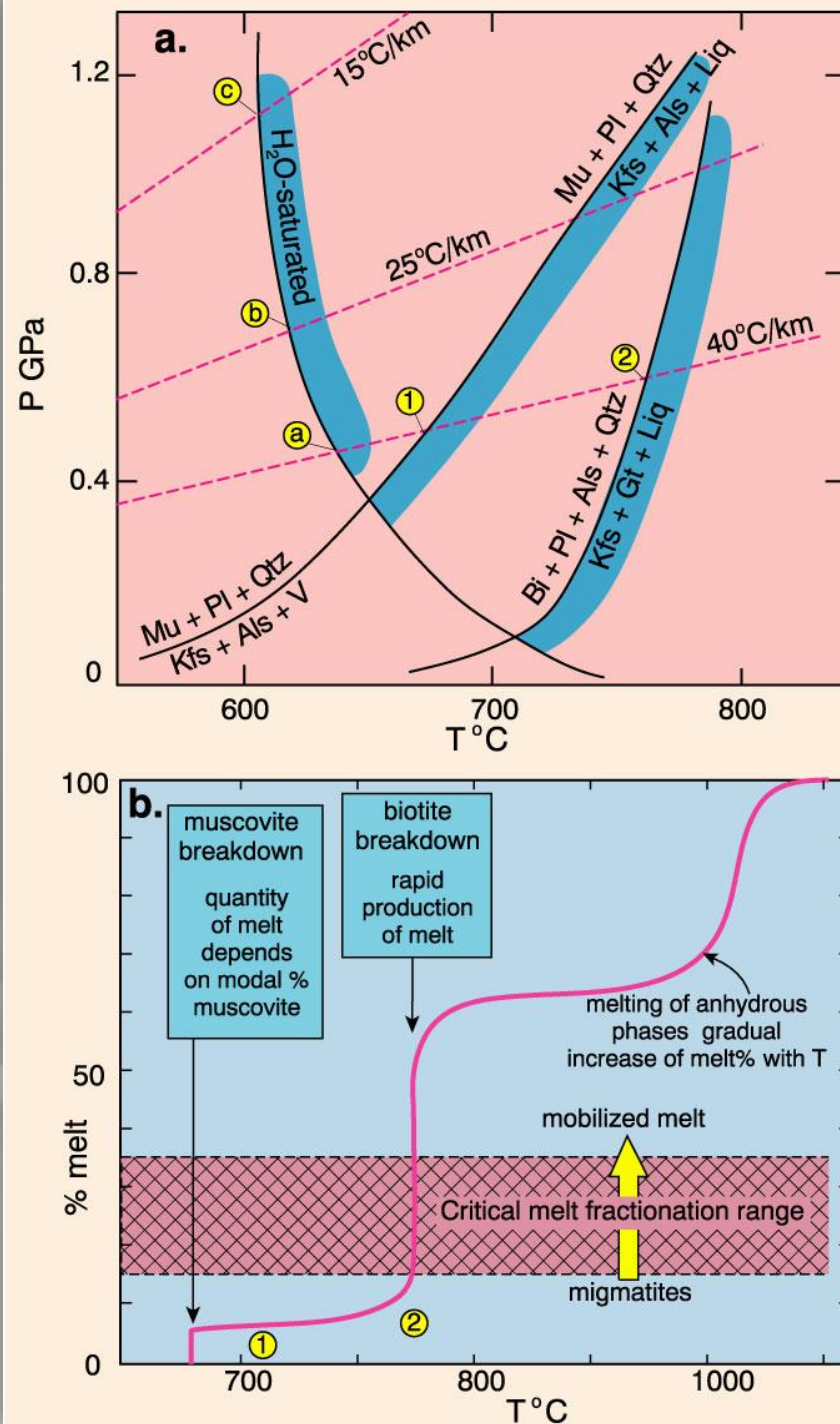
GENEZA

- **anateksis**, parcijalno taljenje sedimentnih i vulkanskih stijena, ovisno o P_{H_2O}
- **diferencijacija** iz bazične magme
- **granitizacija**, metasomatizam, difuzija fluida



Slika VI-19. Shematski presjek kroz Himalaje pokazuje zone dehidratizacije i parcijalnog taljenja koje produciraju leukogranite. Prema France-Lanord and Le Fort (1988) *Trans. Roy. Soc. Edinburgh*, 79, 183-195. Winter (2001) *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*. Prentice Hall.

Slika VI-20. a. Pojednostavljeni P-T fazni dijagram i b. količina taljevine nastala tijekom taljenja muskovit-biotitne ishodišne stijene, prema Clarke (1992) *Granitoid Rocks*. Chapman Hall, London; and Vielzeuf and Holloway (1988) *Contrib. Mineral. Petrol.*, 98, 257-276. Osjenčana polja (a) ukazuju na nastanak magme. Winter (2001) *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*. Prentice Hall.



- **Klasifikacija granita na temelju makroelemenata**

peralkalni



peraluminozni



metaluminozni



subaluminozni



- **Tektonska klasifikacija**

sintektonski

ASI parametar

kasnotektonski

A/CNK

posttektonski

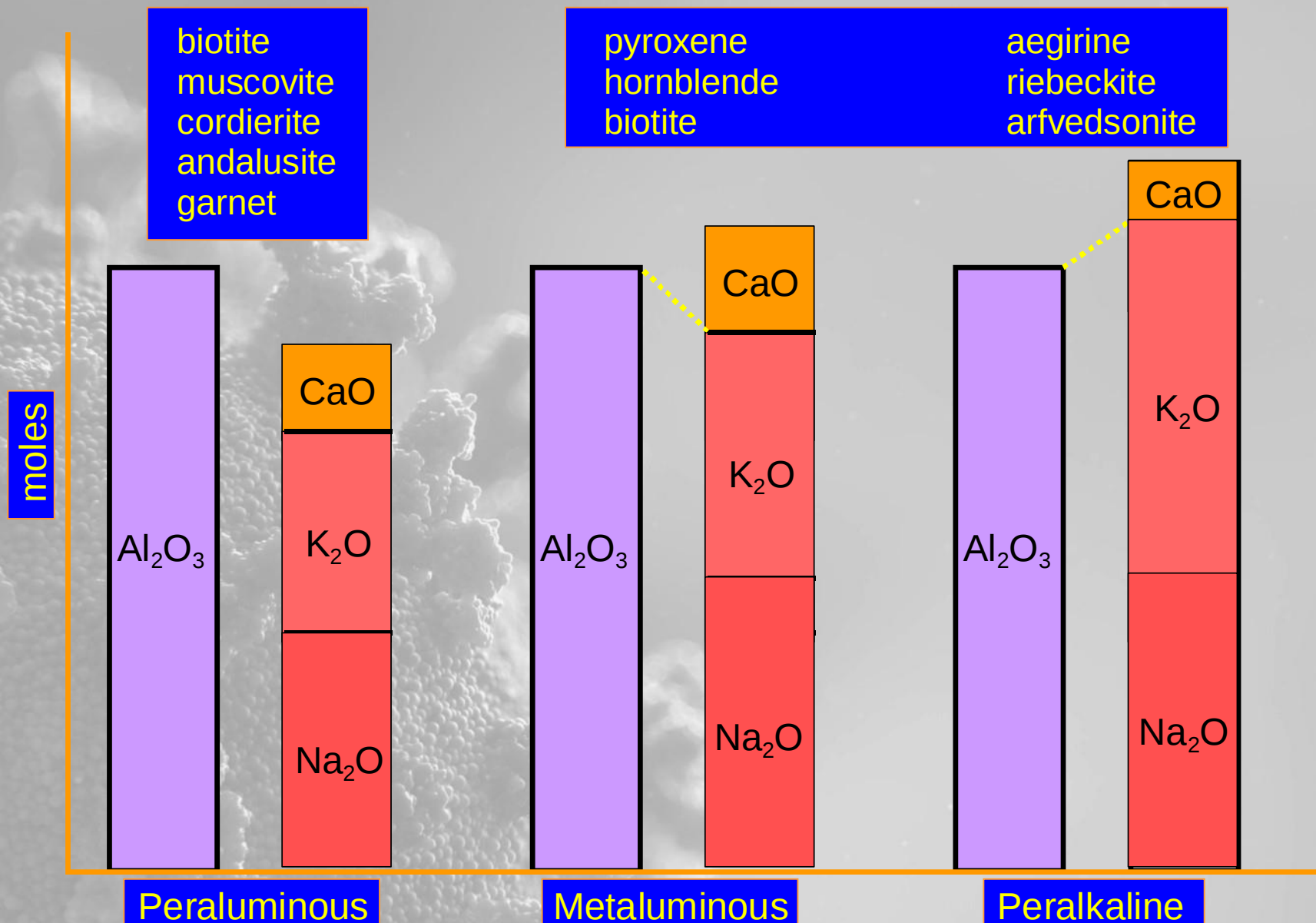
$= \text{mol. Al}_2\text{O}_3 / \text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$

- **Prema dubini utiskivanja**

epizona (10 km)

mezozona (20 km)

katazona (30 km)



Slika VI-21. Zasićenje aluminijem temelji se na *molarnim* proporcijama $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ (“A/CNK”) prema Shand (1927). Za svaki tip su navedeni česti minerali. After Clarke (1992). Granitoid Rocks. Chapman Hall.

- Genetska klasifikacija

S graniti - nastali iz sedimentnih stijena parcijalnim taljenjem (anateksis)

I graniti - pretaljivanje magmatskih stijena, ultrametamorfizam

A graniti - anorogeni graniti tipični za riftne zone, pretaljivanje materijala koji su ostatak ranijih epizoda pretaljivanja

TABLE 9-2 Characteristics of S-type, I-type, and A-type granites

Granite type	Tectonic environment	Chemical signature	Typical accessory minerals
S-type	Orogenic	Metaluminous to strongly peraluminous, high $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	Muscovite, garnet, cordierite, tourmaline
I-type	Orogenic	Metaluminous	Biotite, hornblende
A-type	Anorogenic, rift-related	Metaluminous to mildly peralkaline, Fe-enriched	Fe-biotite, Na-amphibole, Na-pyroxene, hedenbergite, fayalite, titanite

Table 18-3. The S-I-A-M Classification of Granitoids

Type	SiO ₂	K ₂ O/Na ₂ O	Ca, Sr	Al/(C+N+K)*	Fe ³⁺ /Fe ²⁺	Cr, Ni	δ ¹⁸ O	⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	Misc	Petrogenesis
M	46-70%	low	high	low	low	low	< 9‰	< 0.705	Low Rb, Th, U Low LIL and HFS	Subduction zone or ocean-intraplate Mantle-derived
I	53-76%	low	high in mafic rocks	low: metal- uminous to peraluminous	moderate	low	< 9‰	< 0.705	high LIL/HFS med. Rb, Th, U hornblende magnetite	Subduction zone Intracrustal Mafic to intermed. igneous source
S	65-74%	high	low	high metaluminous	low	high	> 9‰	> 0.707	variable LIL/HFS high Rb, Th, U biotite, cordierite Als, Grt, Ilmenite	Subduction zone Supracrustal sedimentary source
A	high → 77%	Na ₂ O high	low	var peralkaline	var	low	var	var	low LIL/HFS high Fe/Mg high Ga/Al High REE, Zr High F, Cl	Anorogenic Stable craton Rift zone

* molar Al₂O₃/(CaO+Na₂O+K₂O)

Data from White and Chappell (1983), Clarke (1992), Whalen (1985)

Uklopci u granitima

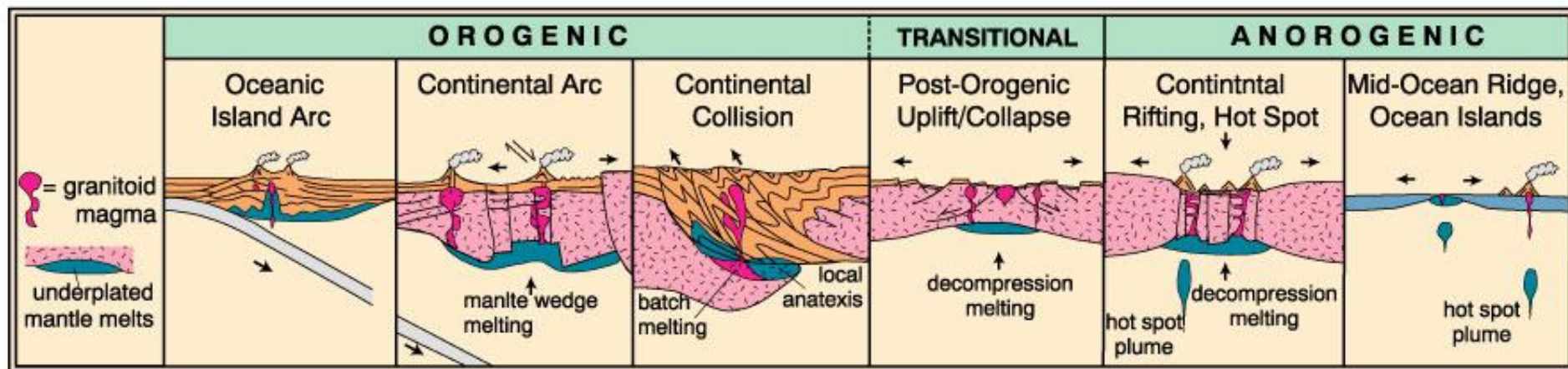
Table 18-1. The Various Types of Enclaves

Name	Nature	Margin	Shape	Features
Xenolith	piece of country rocks	sharp to gradual	angular to ovoid	contact metamorphic texture and minerals
Xenocryst	isolated foreign crystal	sharp	angular	corroded reaction rim
Surmicaceous Enclave	residue of melting (restite)	sharp, biotite rim	lenticular	metamorphic texture micas, Al-rich minerals
Schlieren	disrupted enclave	gradual	oblate	coplanar orientation
Felsic Micro-granular Enclave	disrupted fine-grained margin	sharp to gradual	ovoid	fine-grained igneous texture
Mafic Micro-granular Enclave	Blob of coeval mafic magma	mostly sharp	ovoid	fine-grained igneous texture
Cumulate Enclave (Autolith)	disrupted cumulate	mostly gradual	ovoid	coarse-grained cumulate texture

After Didier and Barbarin (1991, p. 20).

Tablica 18-1. Didier, J. i Barbarin (1991) The different type of enclaves in granites: Nomenclature. In J. Didier and B. Barbarin (1991) (eds.), *Enclaves in Granite Petrology*. Elsevier. Amsterdam, pp. 19-23.

Table 18-4. A classification of granitoid rocks based on tectonic setting



Tablica VI-3. Klasifikacija granitoidnih stijena temeljena na tektonskom smještaju. Prema Pitcher (1983) in K. J. Hsü (ed.), *Mountain Building Processes*, Academic Press, London; Pitcher (1993), *The Nature and Origin of Granite*, Blackie, London; and Barbarin (1990) *Geol. Journal*, 25, 227-238. Winter (2001) *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*. Prentice Hall.