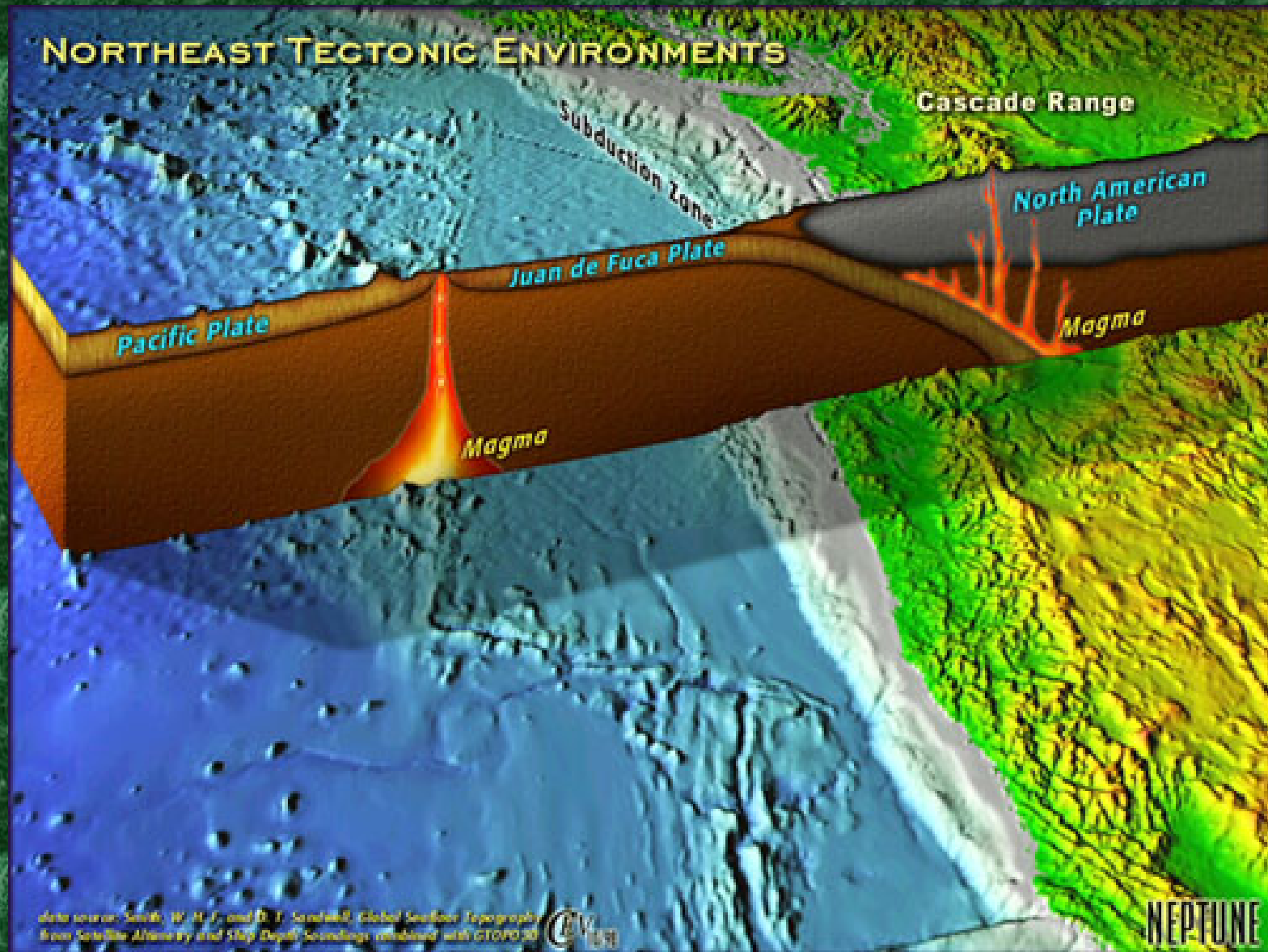


**Magmatske stijene
divergentnih granica ploča**

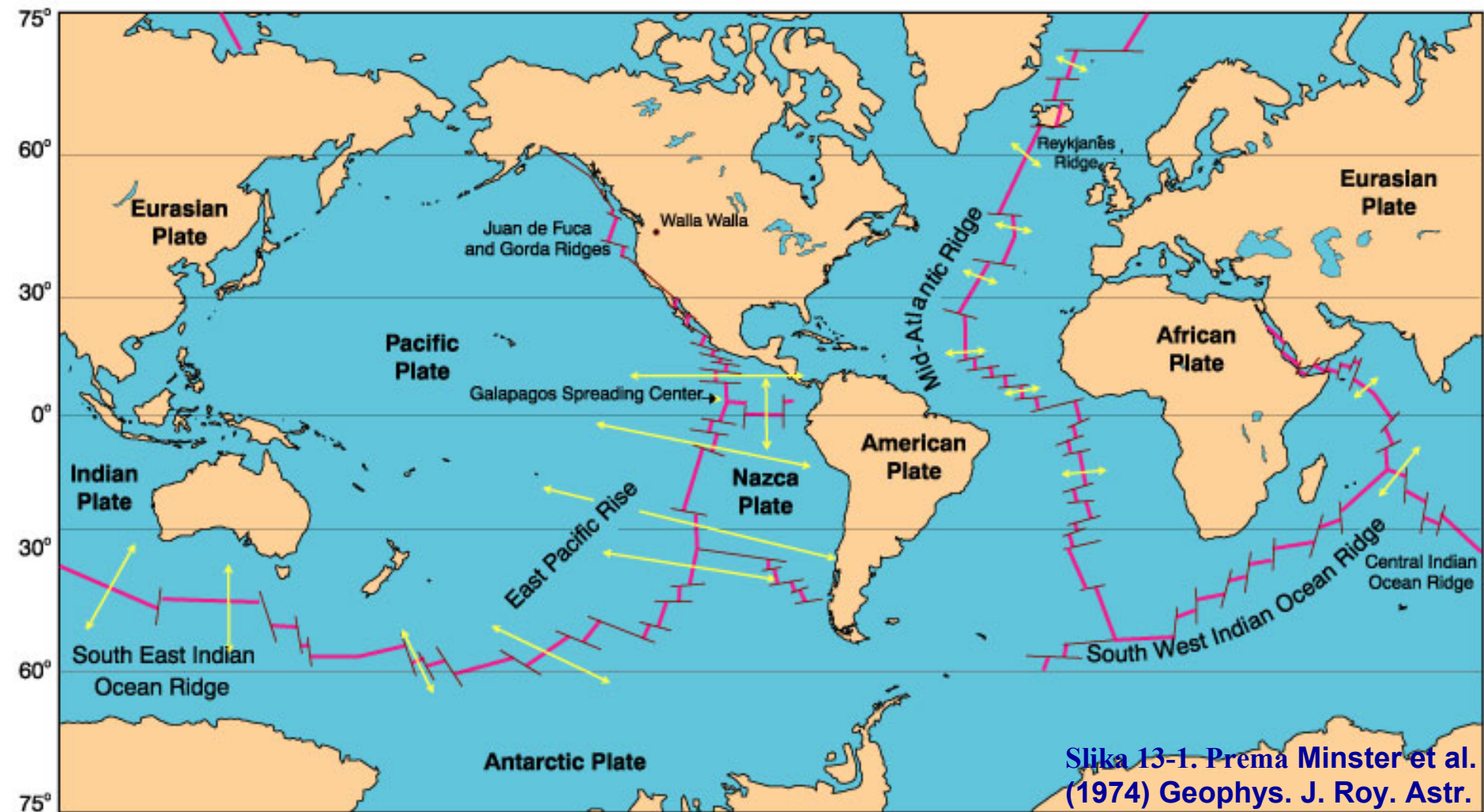
**Magmatske stijene
unutar ploča**

Hrbat / rift (Mid-ocean Ridges)



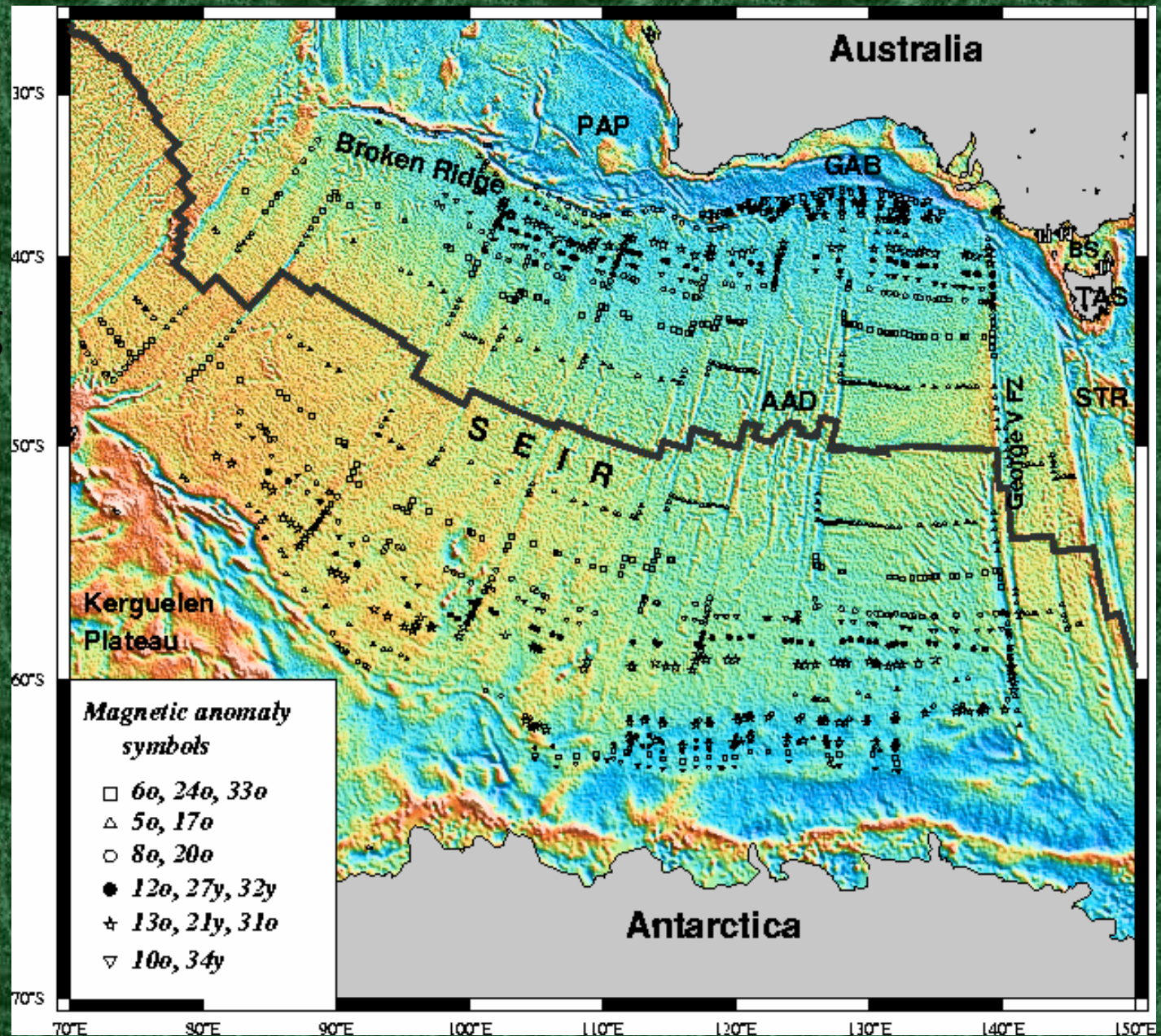
Srednje-oceanski hrbat (Mid-Ocean Ridge)

Mid-Ocean Rift (rift)



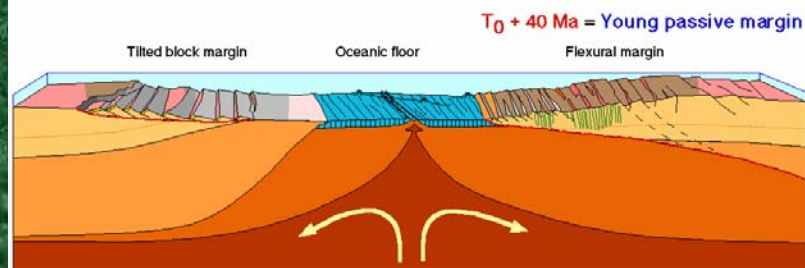
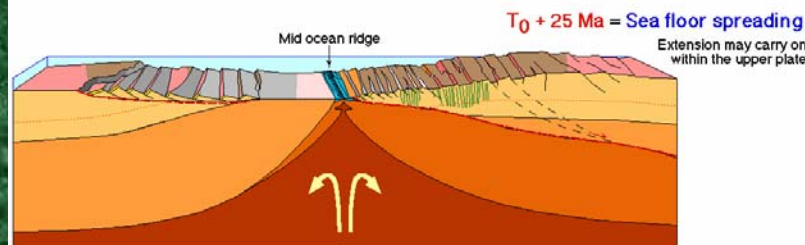
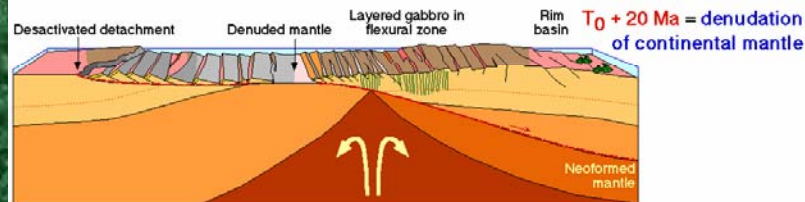
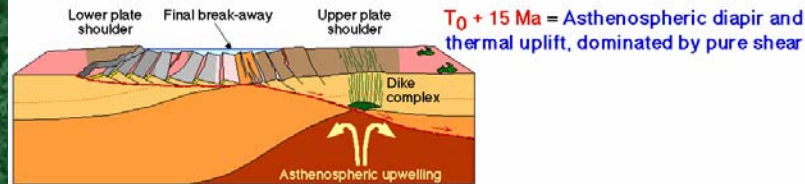
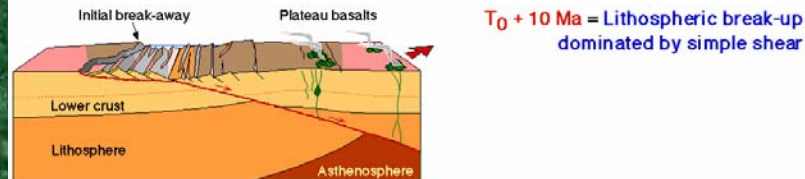
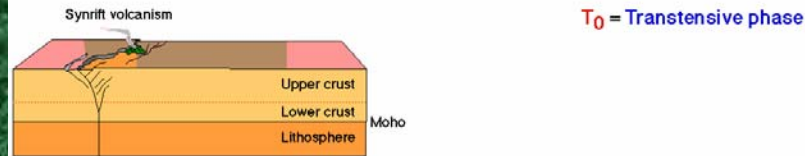
Slika 13-1. Prema Minster et al.
(1974) Geophys. J. Roy. Astr.
Soc., 36, 541-576.

Centri širenja Spreading Centres



GEODYNAMIC EVOLUTION OF A RED-SEA TYPE RIFT

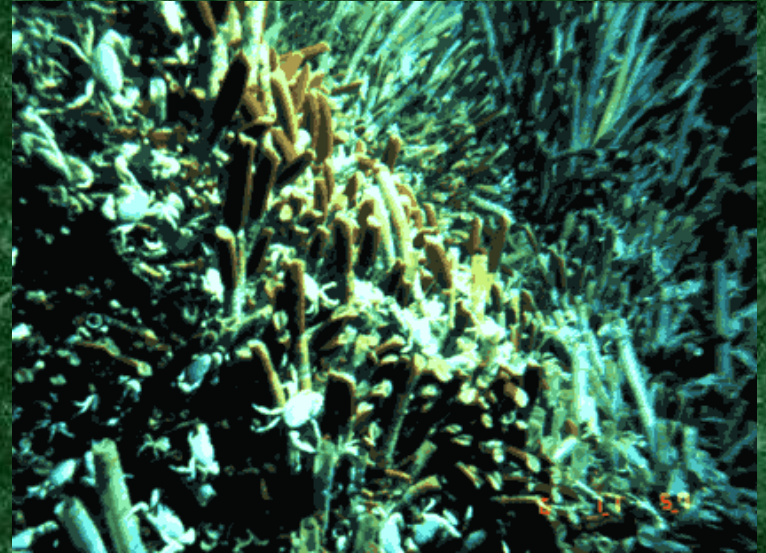
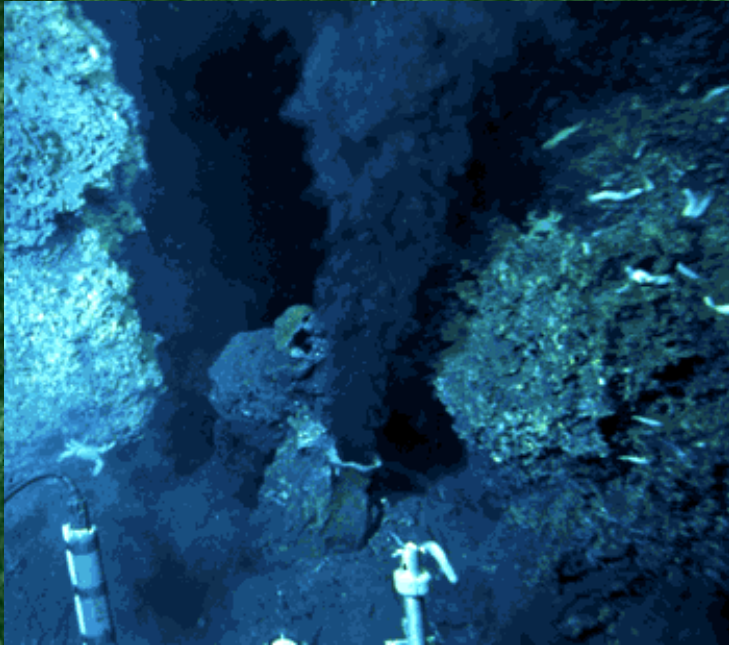
(Stampfli & Marchant 1997)



Geodinamska evolucija rifta
npr. Crveno more

prema:
Stampfli & Marchant, 1997

Black Smokers



Black Smokers

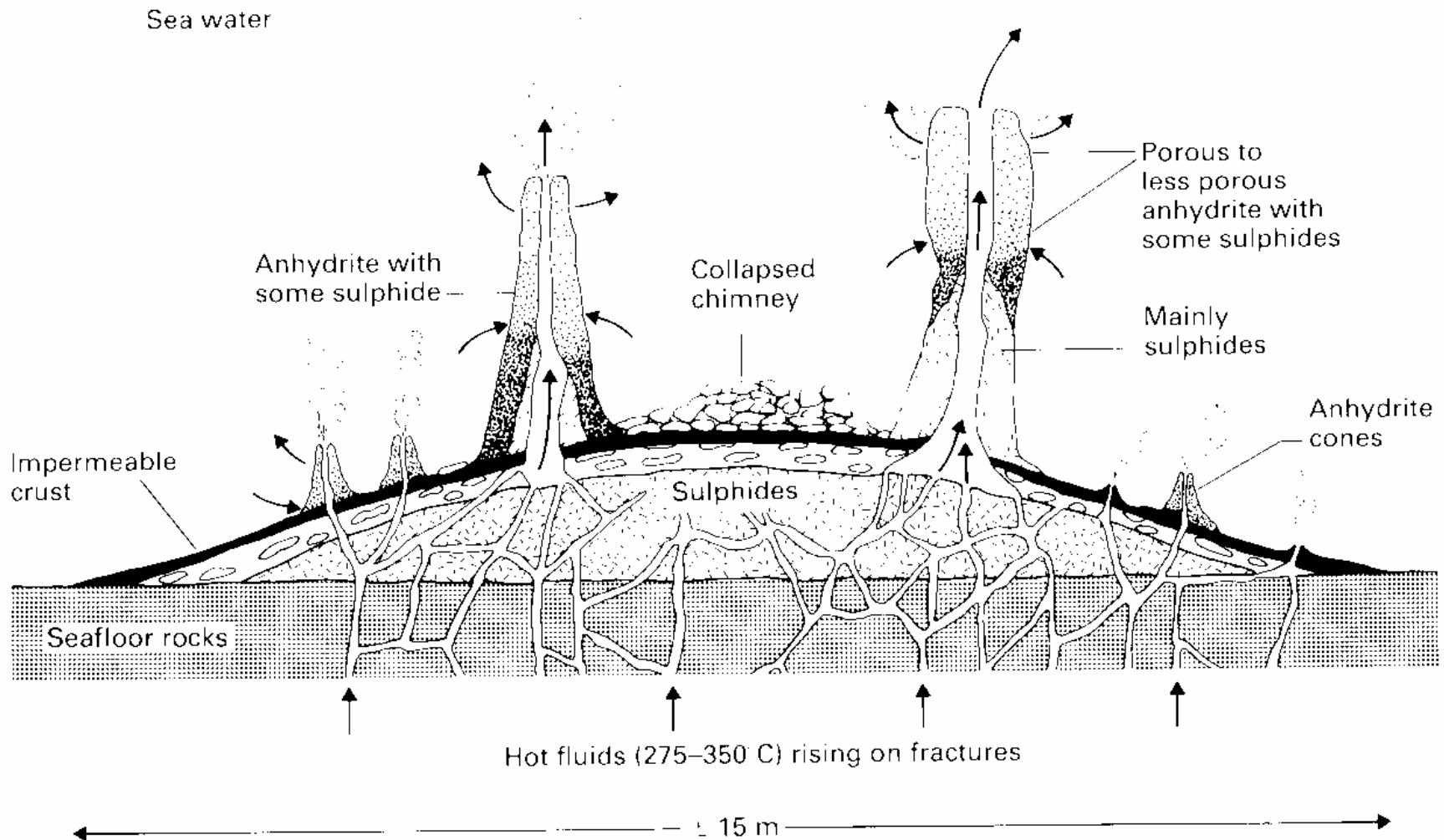


Fig. 6.8 Formation of chimneys and sulphide mounds on the sea floor. (After Barnes, 1988, *Ores and Minerals*, Open University Press, with permission.)

Segmenti hrpta i brzine širenja

- Sporoširući hrptovi:
 $< 3 \text{ cm/god}$

- Brzoširući hrptovi:
 $> 4 \text{ cm/god}$

- 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

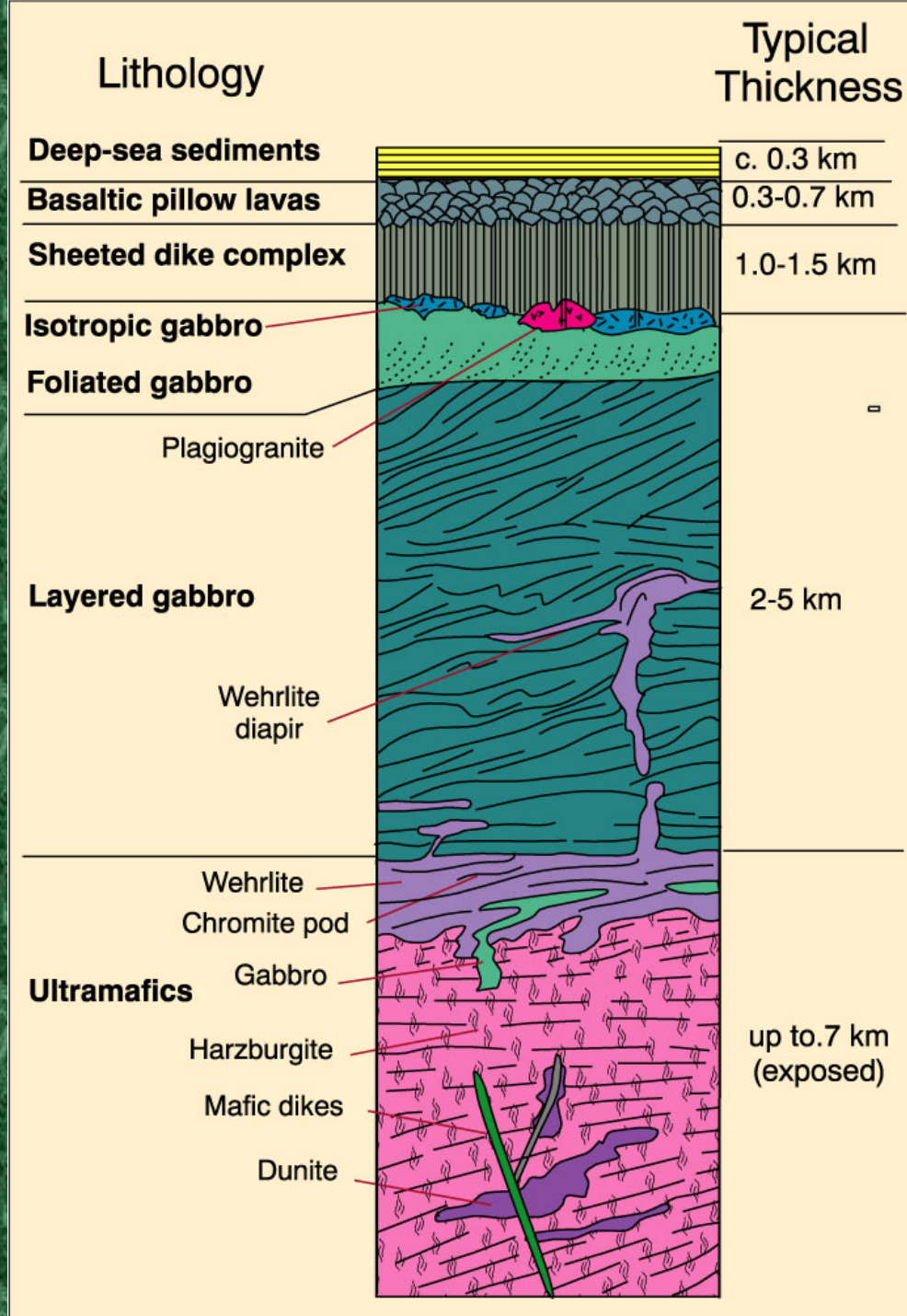
Oceanska kora i struktura gornjeg plašta

- 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.

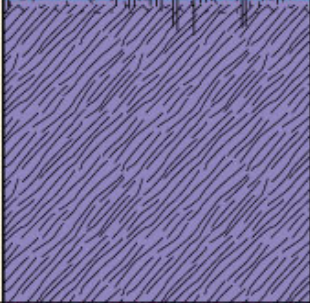


Oceanska kora i struktura gornjeg plašta

Sloj 1

Tanak sloj
pelagičkih
sedimenata

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

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

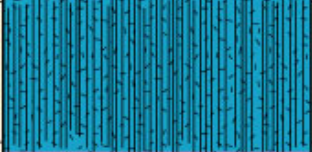
Sloj 2 je bazaltni

podjeljen u dva
“podsloja”

Slojevi 2A & B =
jastučasti (pillow)
bazalti

Sloj 2C = vertikalno
uslojeni dajkovi
(sheeted dikes)

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

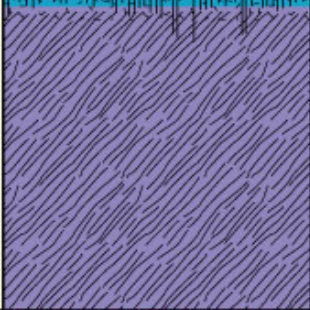
Lithology		Ocean Crustal Layers	Typical Ophiolite	Normal Ocean Crust	
			Thickness (km)	ave.	P wave vel. (km/s)
Deep-Sea Sediment		1	~ 0.3	0.5	1.7 -2.0
Basaltic Pillow Lavas		2A & 2B	0.5	0.5	2.0 - 5.6
Sheeted dike complex		2C	1.0 - 1.5	1.5	6.7
Gabbro		3A	2 - 5	4.7	7.1
Layered Gabbro		3B			
Layered peridotite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

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

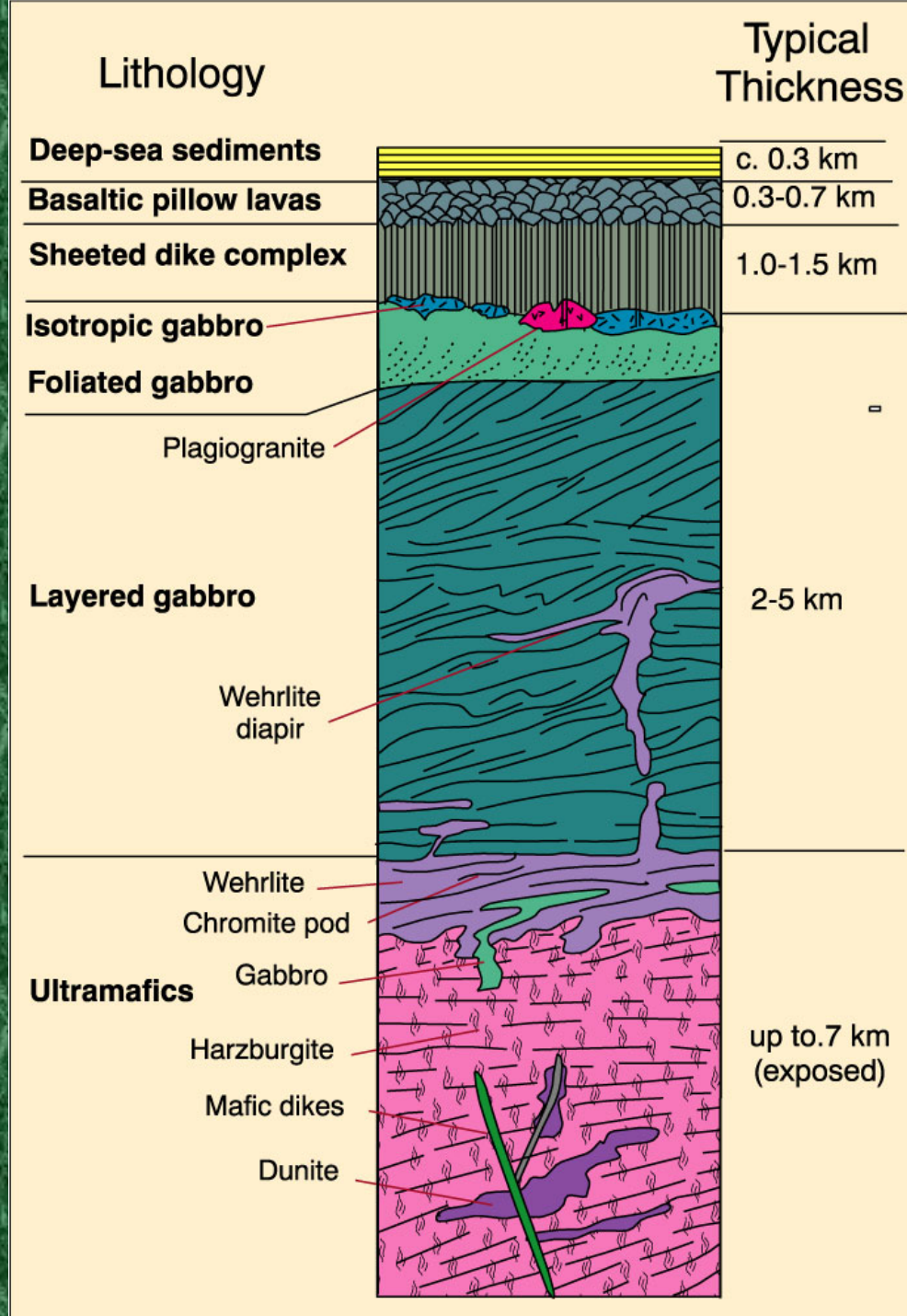
Sloj 3B = uslojeni
gastro s
kumulatnim
strukturama

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

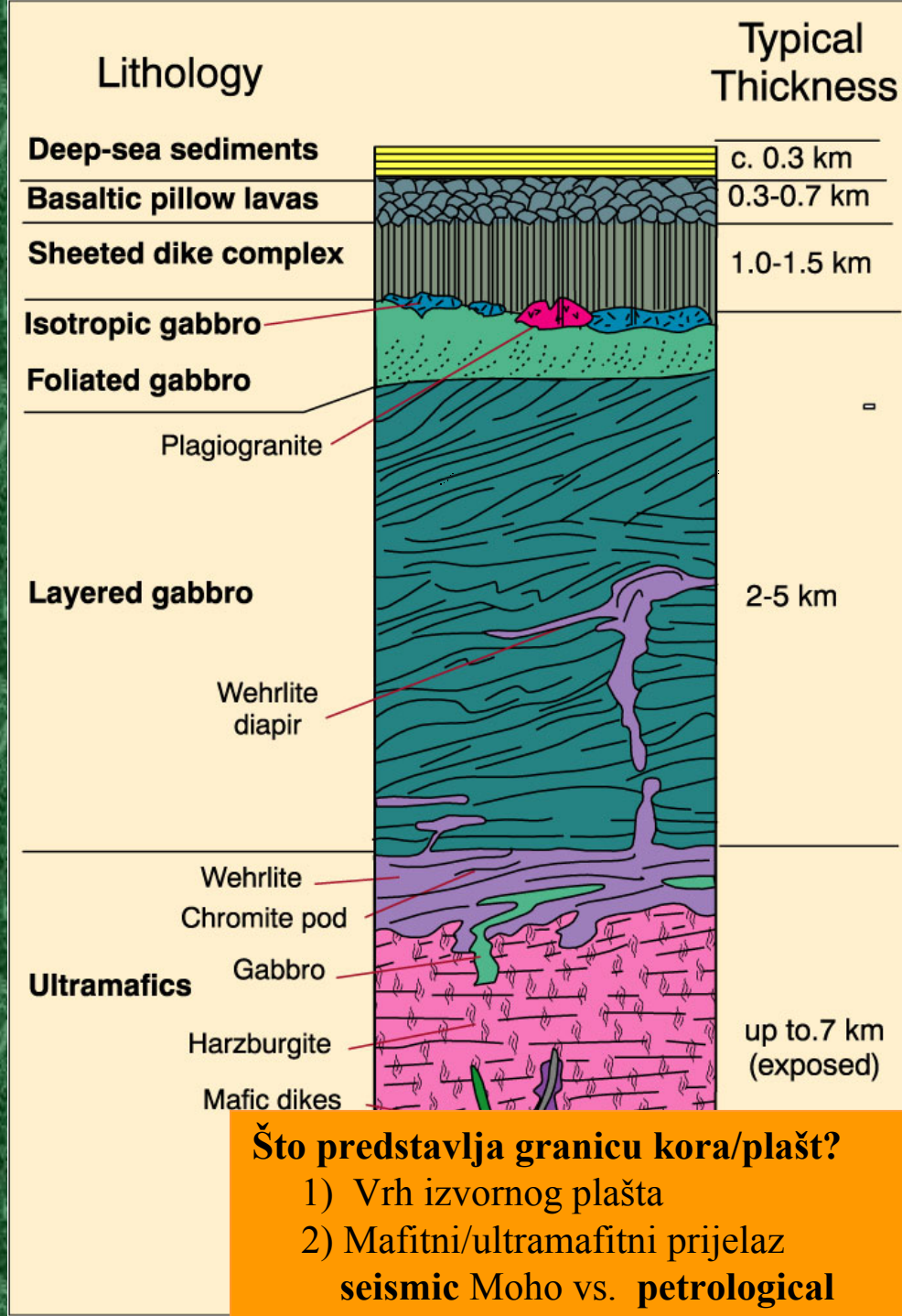
Ofioliti: baza sloja 3B prelazi u uslojene kumulatne verlite (wehrlite) i gabre

Verliti intrudiraju u uslojene gabre

Ispod → kumulatni dunit sa ksenolitima harzburgita

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

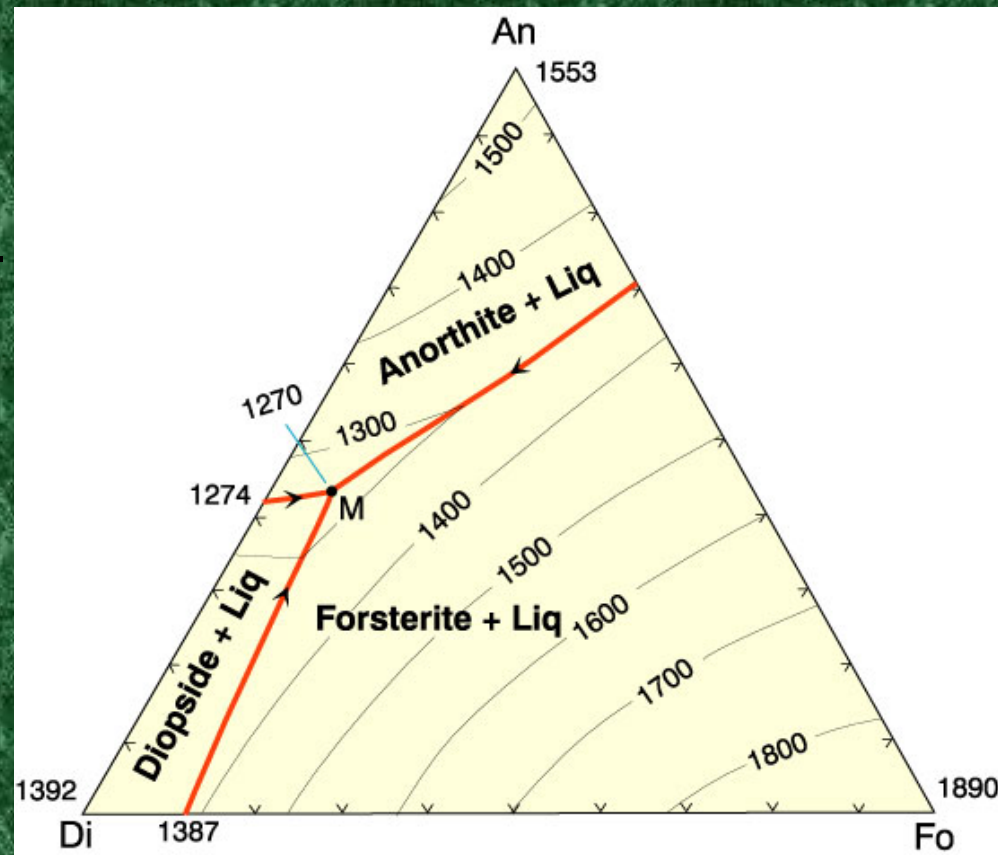
Granica između sloja 3 i 4 je Mohorovičićev diskontinuitet



Petrografija i kemijski sastav

- Tipičan MORB je olivinski toleit s niskim K_2O ($< 0.2\%$) i TiO_2 ($< 2.0\%$) i kemijski je različit od bazalta drugih sredina
- Kristalizacijski slijed:
olivin ($\pm$ Mg-Cr spinel),
olivin + plagioklas ($\pm$ Mg-Cr spinel),
- olivin + plagioklas +
klinopiroksen

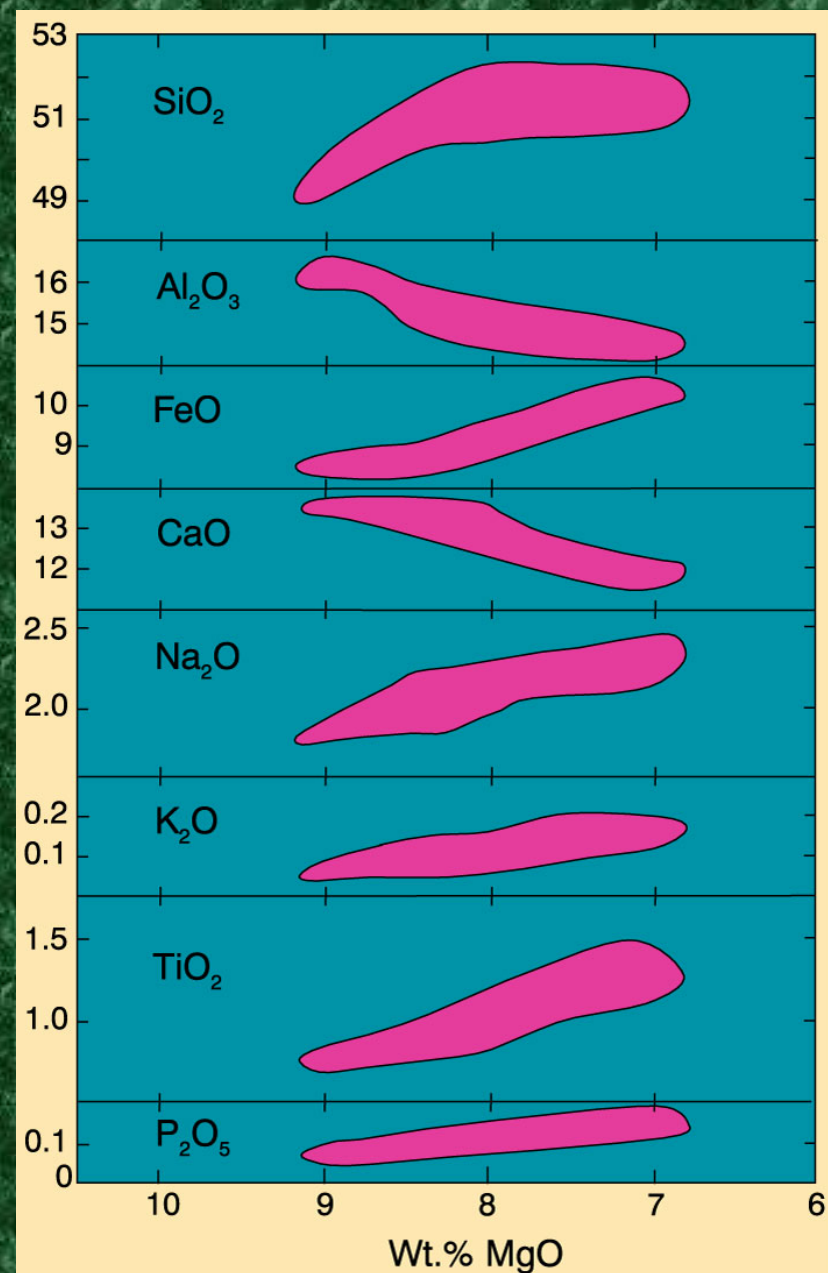
Slika 7-2. Prema Bowen (1915), A. J. Sci., and Morse (1994), Basalts and Phase Diagrams. Krieger Publishers.



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.



Zaključak da plašt ispod oceanskih bazena nije homogen te da ispod hrpta moraju postojati bogate i siromašne regije na inkompatibilnim elementima

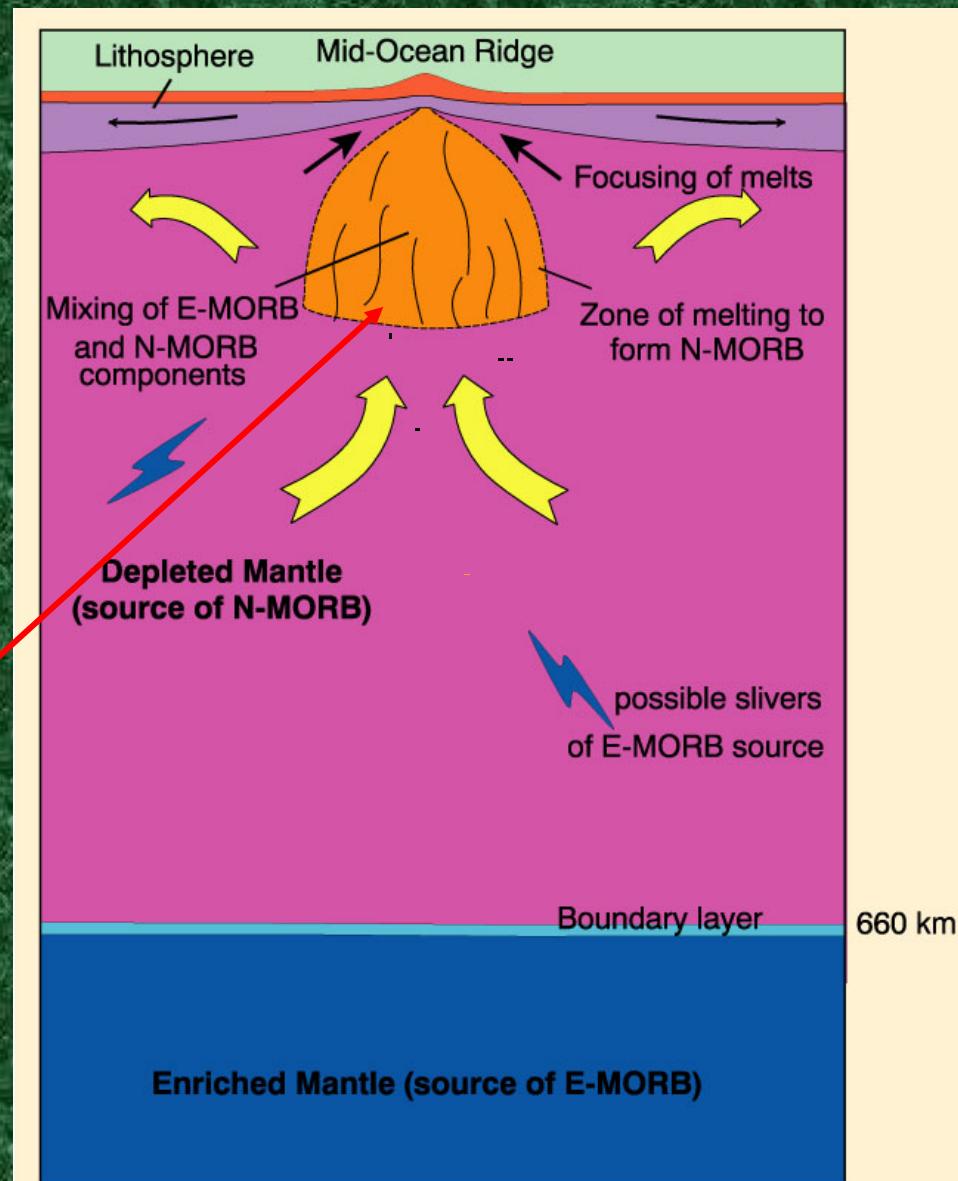
- ➞ **N-MORB** (normal MORB) vezan na osiromašen izvor u gornjem plaštu
 - $\text{Mg\#} > 65$: $\text{K}_2\text{O} < 0.10$ $\text{TiO}_2 < 1.0$
- ➞ **E-MORB** (enriched MORB, također zvan **P-MORB** plume) vezan uz bogatiji dio plašta
 - $\text{Mg\#} > 65$: $\text{K}_2\text{O} > 0.10$ $\text{TiO}_2 > 1.0$

T-MORB (transitional) međuvrijednosti

MORB petrogeneza

Nastanak N-MORB-a

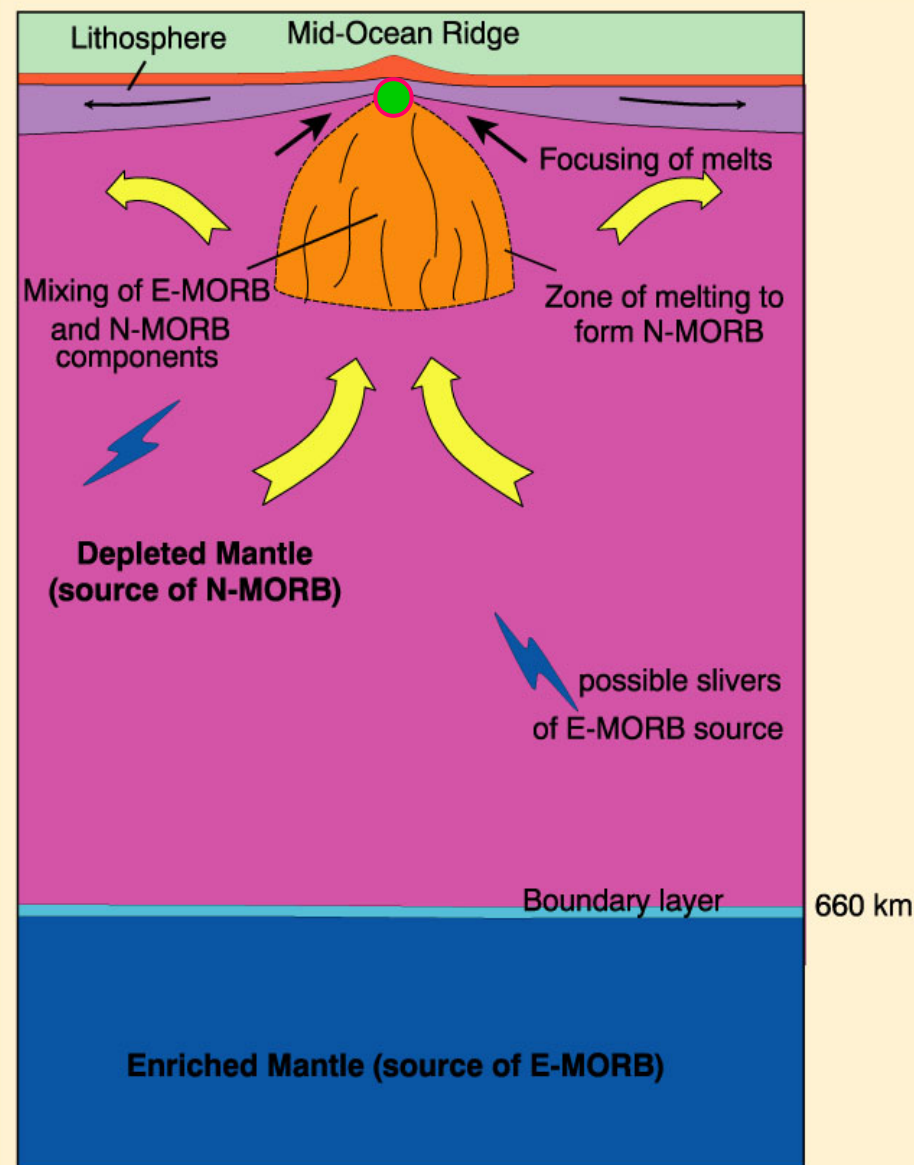
- Razdvajanje ploča
- Kretanje plašta prema gore u zonu razdvajanja
- Parcijalno taljenje vezano uz adijabatsko uzdizanje
- N-MORB taljenje počinje na ~ 60-80 km dubine u gornjem osiromašenom plaštu gdje naslijeđuje osiromašenje na elementima i izotopima



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

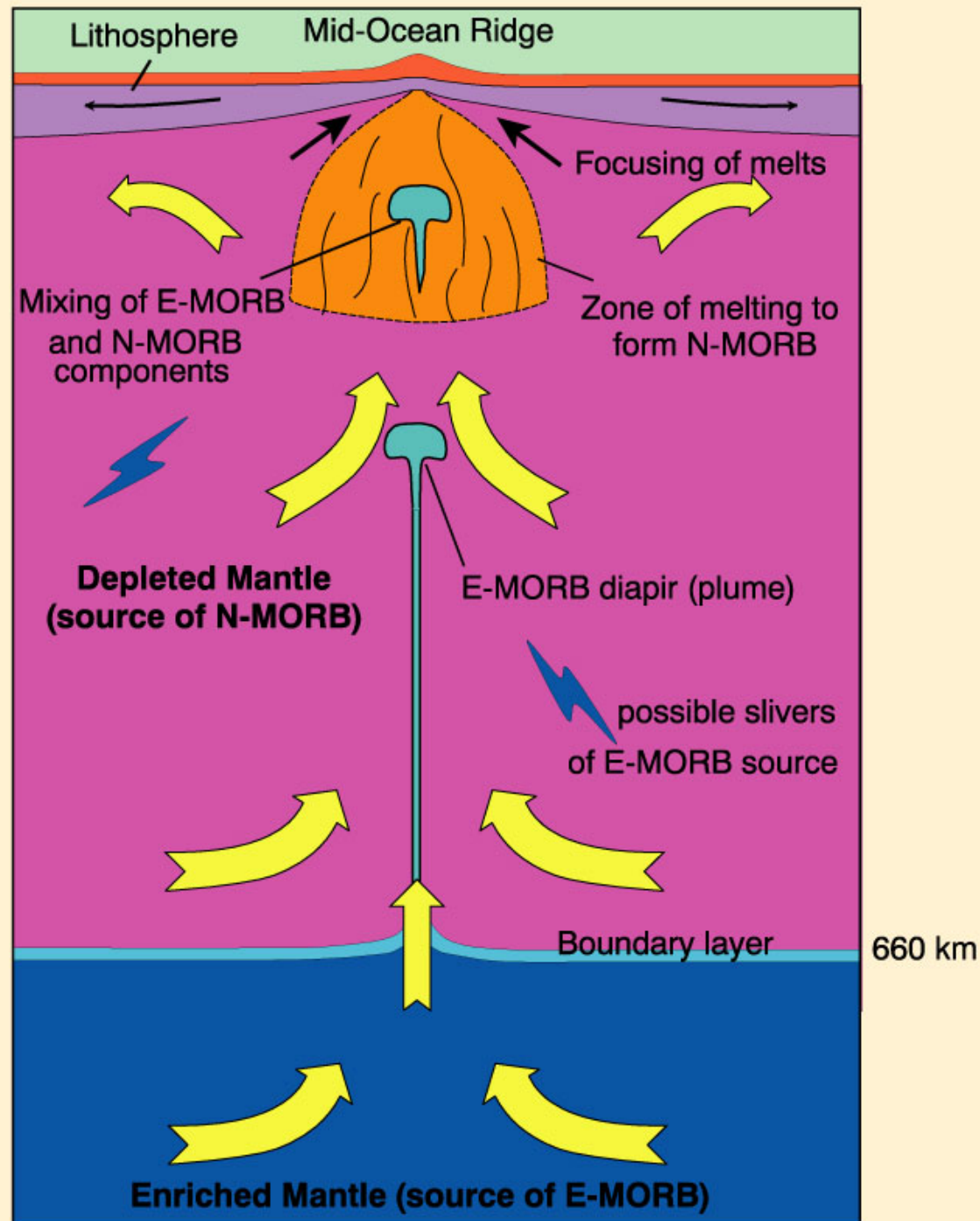
- Područje taljenja je ~ 100 km široko ali se fokusira u 3-8 km zonu ispod hrpta
- “Kapljice” taljevine se odvajaju na 25-35 km gdje su u ravnoteži s harzburgitnim ostatkom i migriraju na dubinu od 1-2 km ispod osi hrpta → osno magmatsko ognjište (axial magma chamber)



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

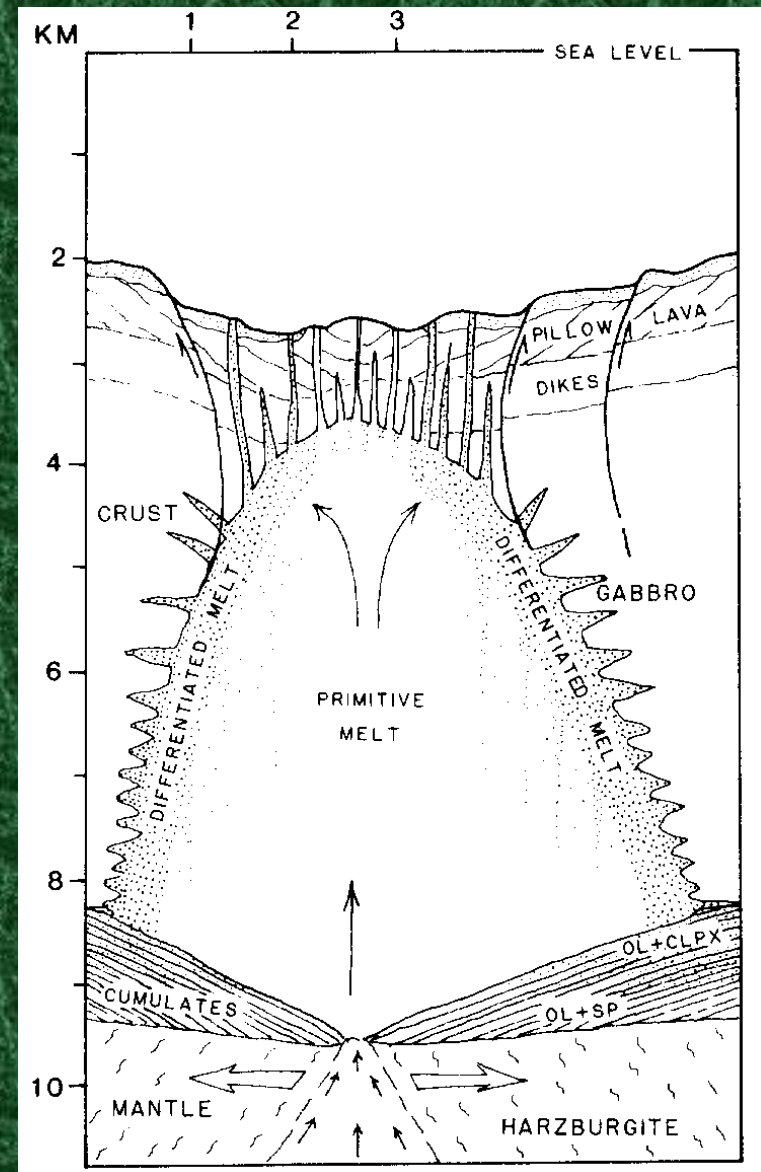
Slika 13-13. Prema Zindler et al. (1984) *Earth Planet. Sci. Lett.*, 70, 175-195. and Wilson (1989) *Igneous Petrogenesis*, Kluwer.



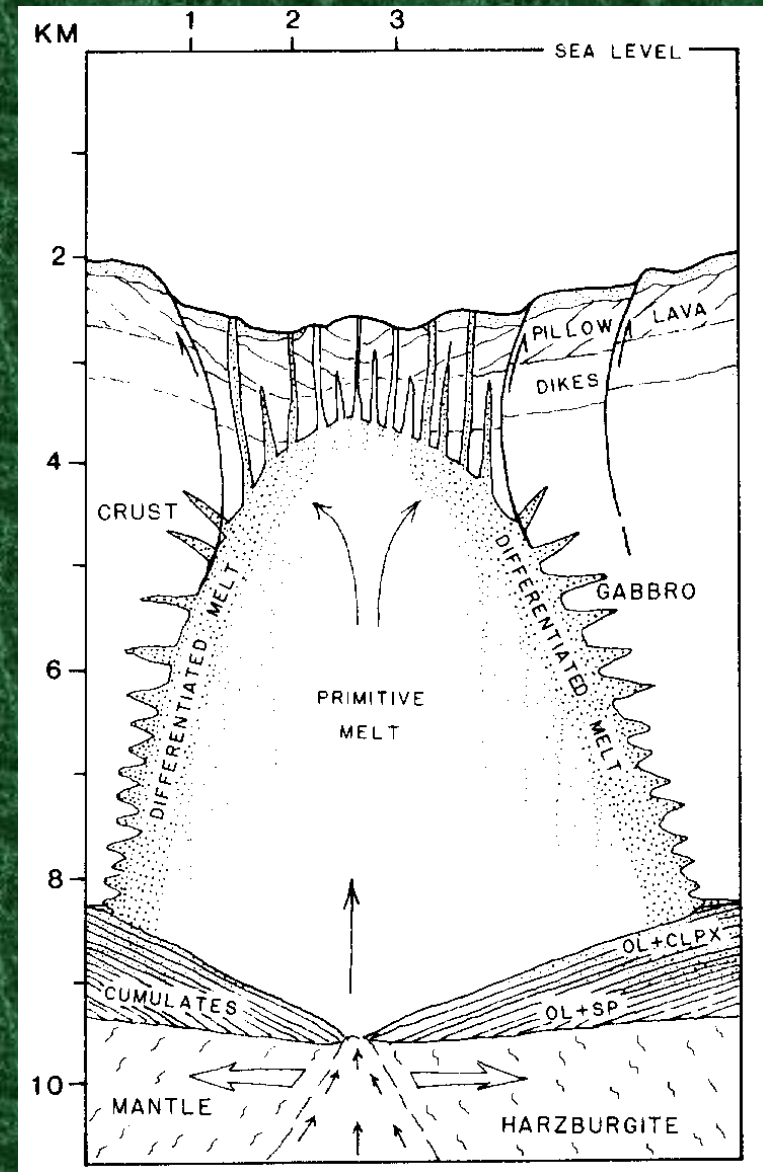
Oсно magmatsko ognjište

Model

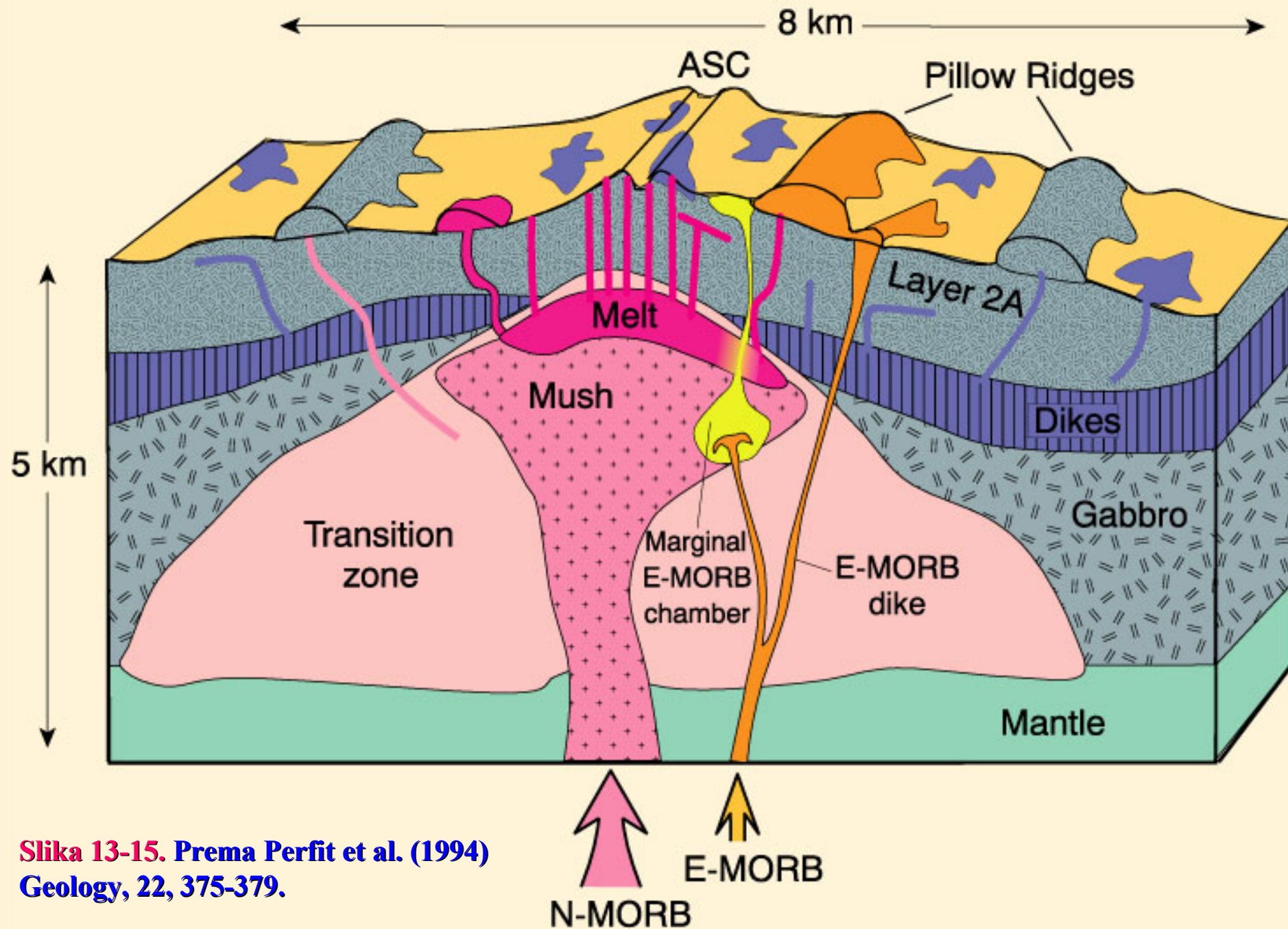
- Frakcijska kristalizacija → promjene MORB magme
- Frakcionacija kontrolirana periodičkim ubrizgavanjem svježije primitivne MORB magme odozdo
- Dajkovi se uzdižu prema gore kroz širuću i rasjedajuću krovinu i nastaju “sheeted dike” kompleksi koji dalje hrane jastučaste lave



- 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?



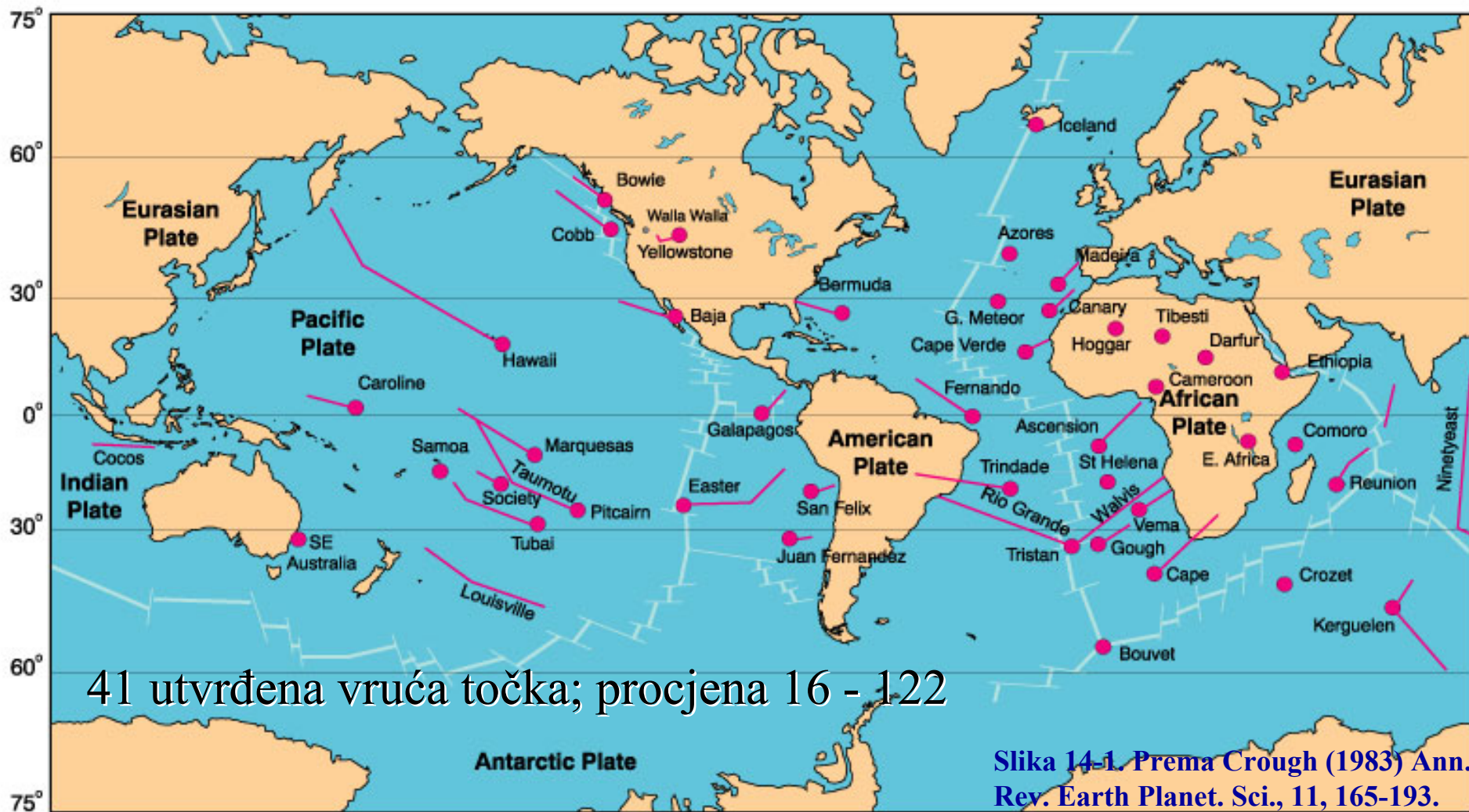
Slika 13-14. Prema Byran and Moore (1977)
 Geol. Soc. Amer. Bull., 88, 556-570.



Slika 13-15. Prema Perfit et al. (1994)
Geology, 22, 375-379.

Oceanski vulkanizam unutar ploča

Oceanski otoci obično asocirani s vrućim točkama (hot spots)



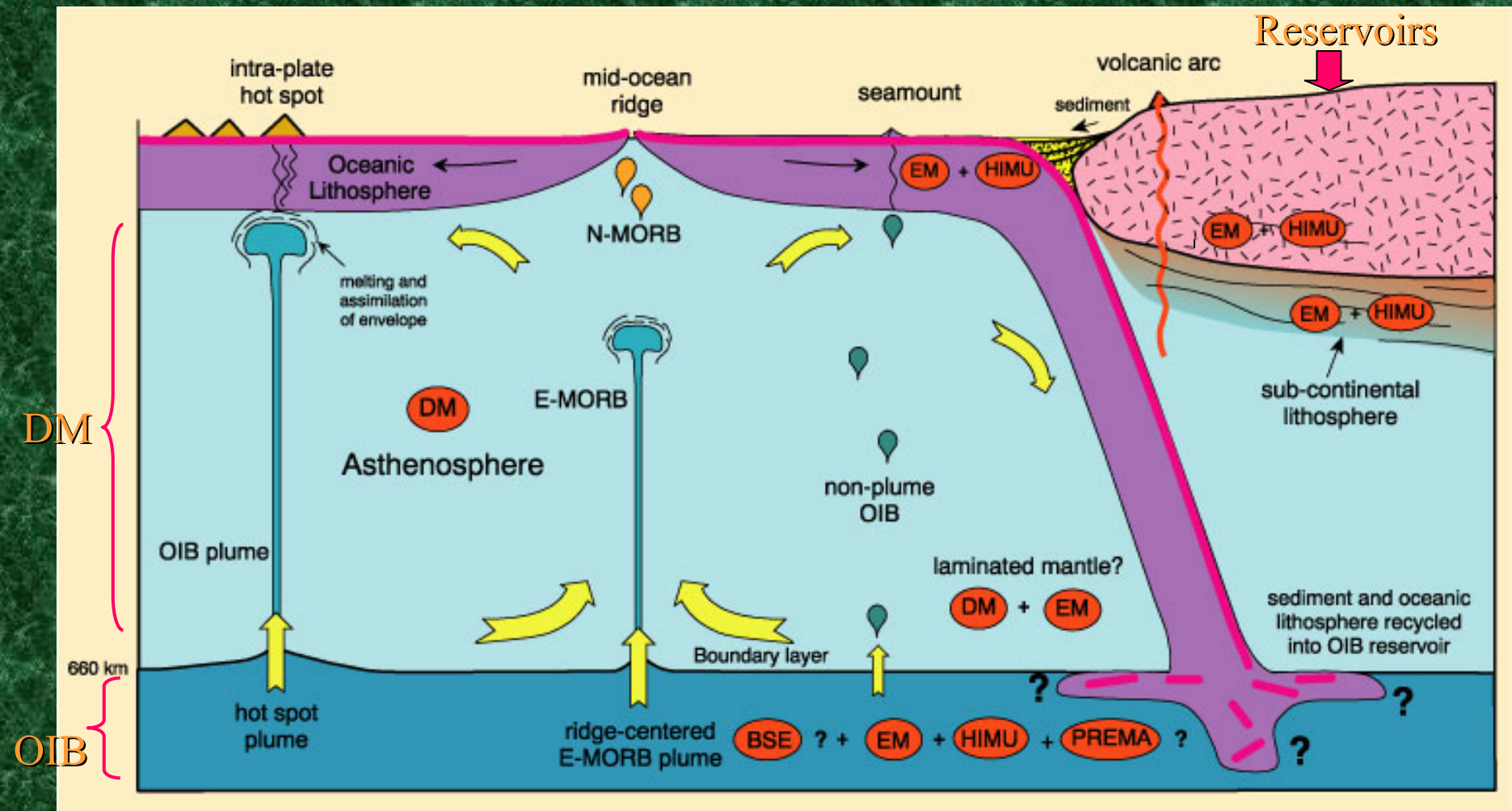
Tipovi OIB magma

Dvije magmatske serije

- Toleitna serija (dominantna)
 - ➡ Toleitni bazalt oceanskih otoka OIT
 - ➡ Sličan MORB-u ali s određenim mineraloškim i kemijskim razlikama
- Alkalna serija (podređena)
 - ➡ Alkalni bazalti oceanskih otoka OIA
- OIB koji dolaze tamo gdje je utjecaj kontaminacije korom minimalan daju dokaze o porijeklu plašta

Model oceanskog magmatizma

Continental
Reservoirs



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
 - ✕ veličini 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

Ritično i isprekidano (povremeno) uslojavanje

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

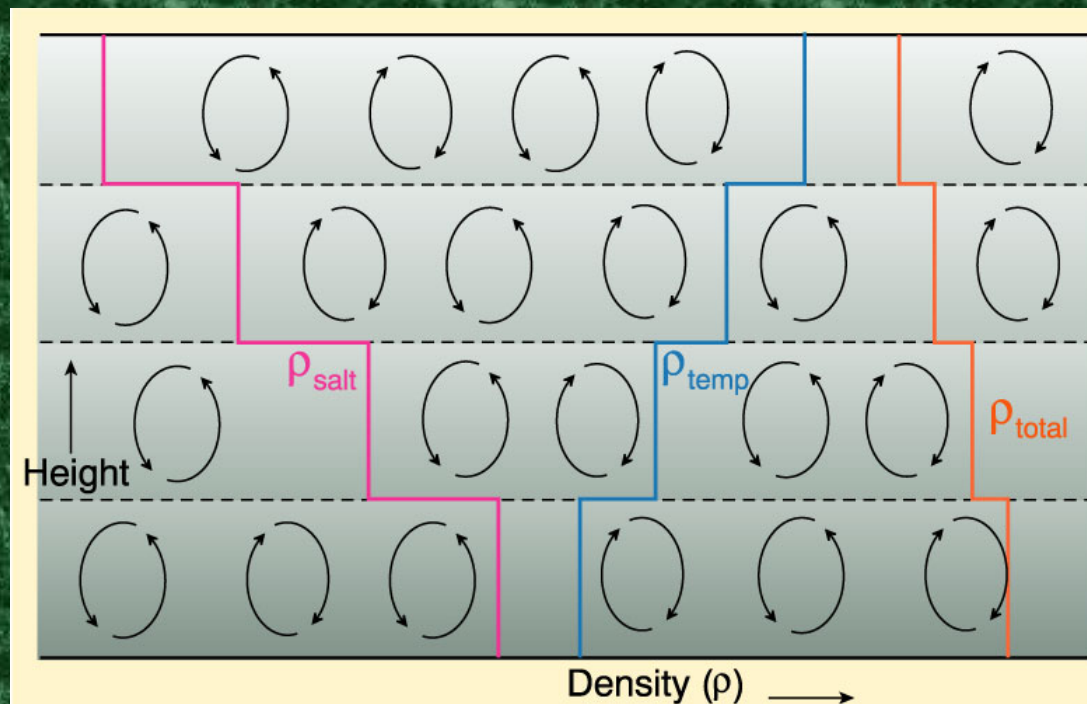


Slika 12-4. Isprekidano uslojavanje,
graduירani slojevi odvojeni gabroidnim
slojevima. Skaergård Intrusion, E.
Greenland. From McBirney (1993)
Igneous Petrology (2nd ed.), Jones and
Bartlett. Boston.

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



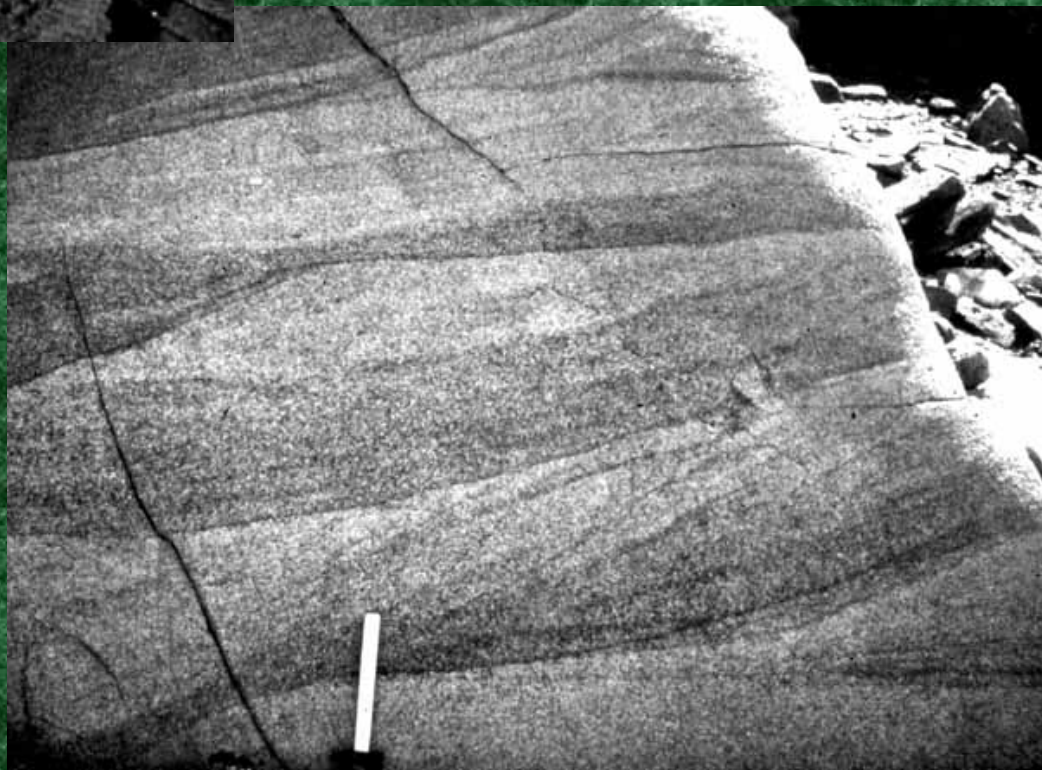
Slika 12-18. Hladne struje tonu iz gornjih dijelova ognjišta. Simulacija pomoću silikonskog ulja. Snimio Claude Jaupart.



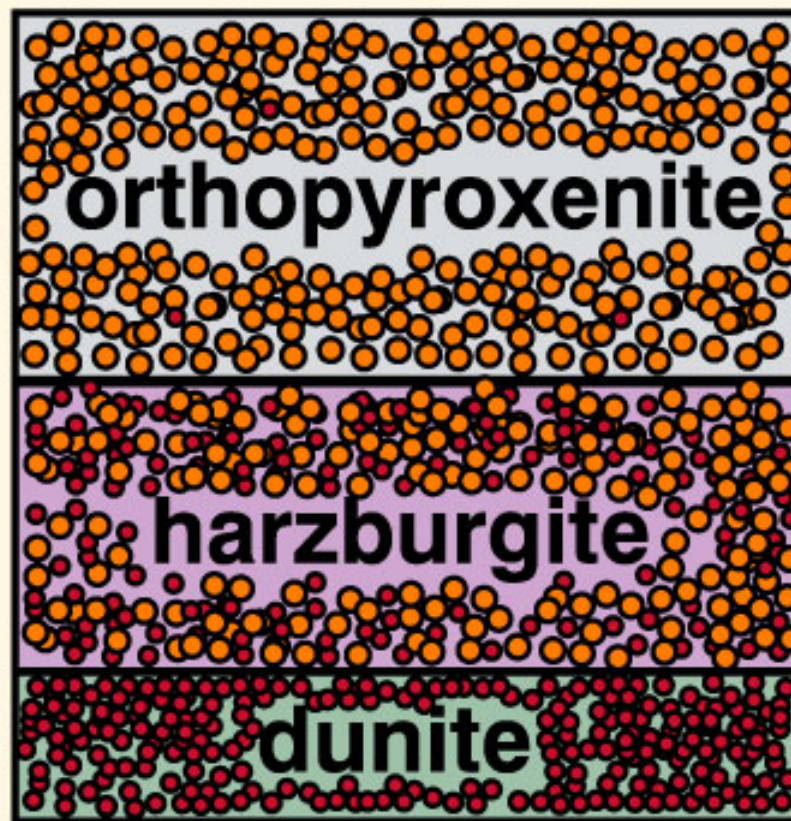
Slika 12-15a. Kosa laminacija u kumulatnim slojevima. Duke Island, Alaska. razlike u veličini i proporciji olivina i piroksena. Iz McBirney (1993) Igneous Petrology. Jones and Bartlett



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.

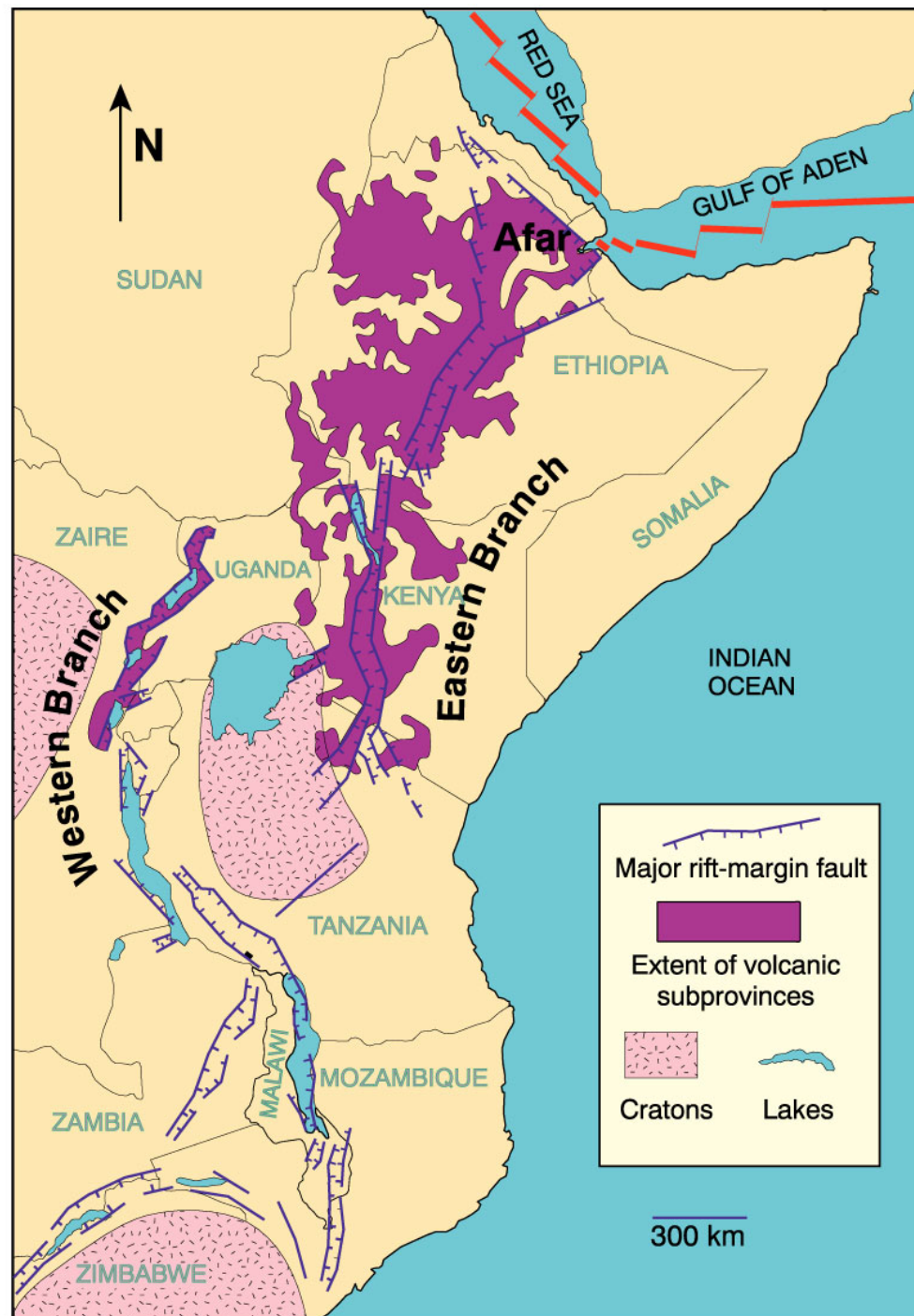
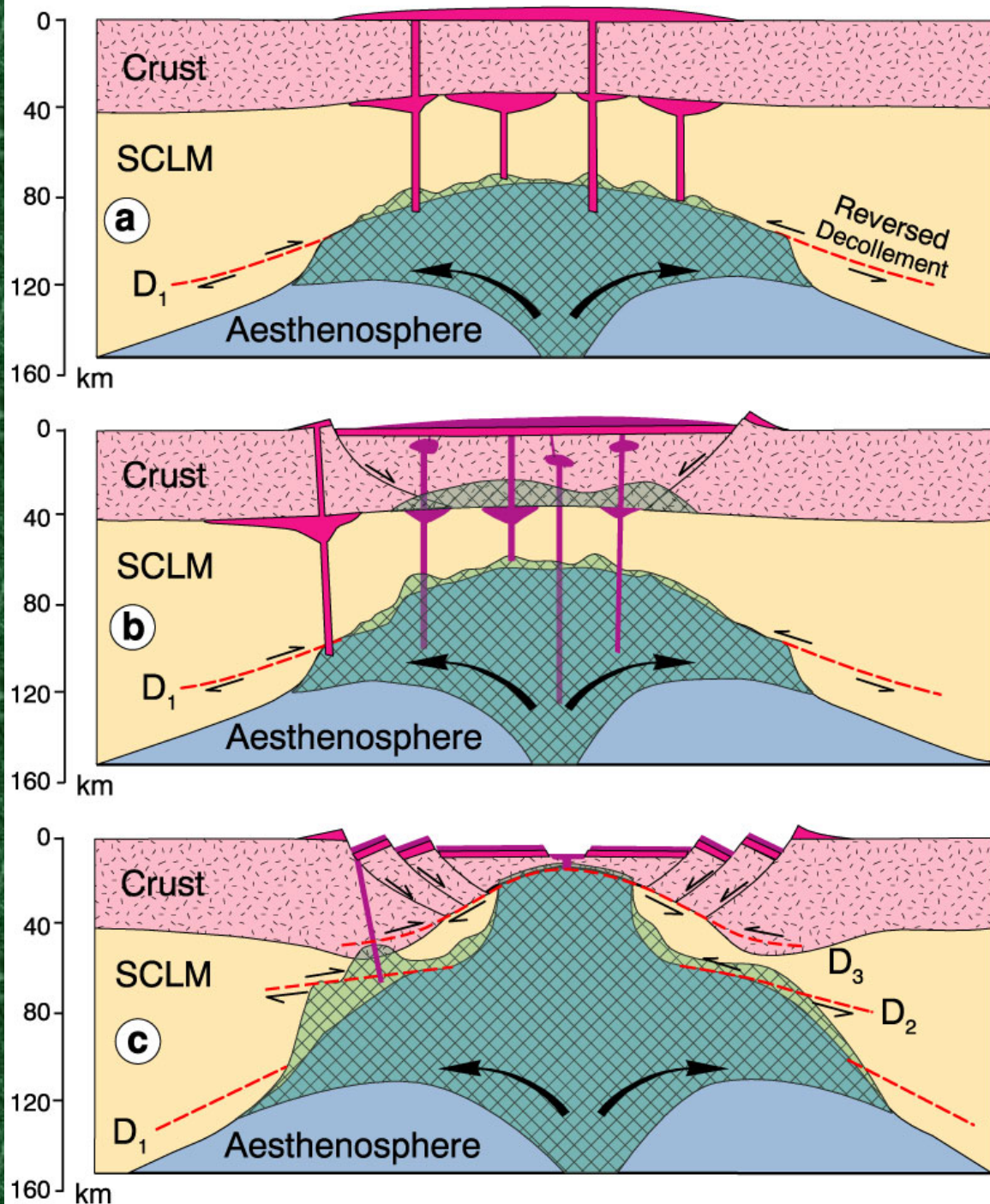
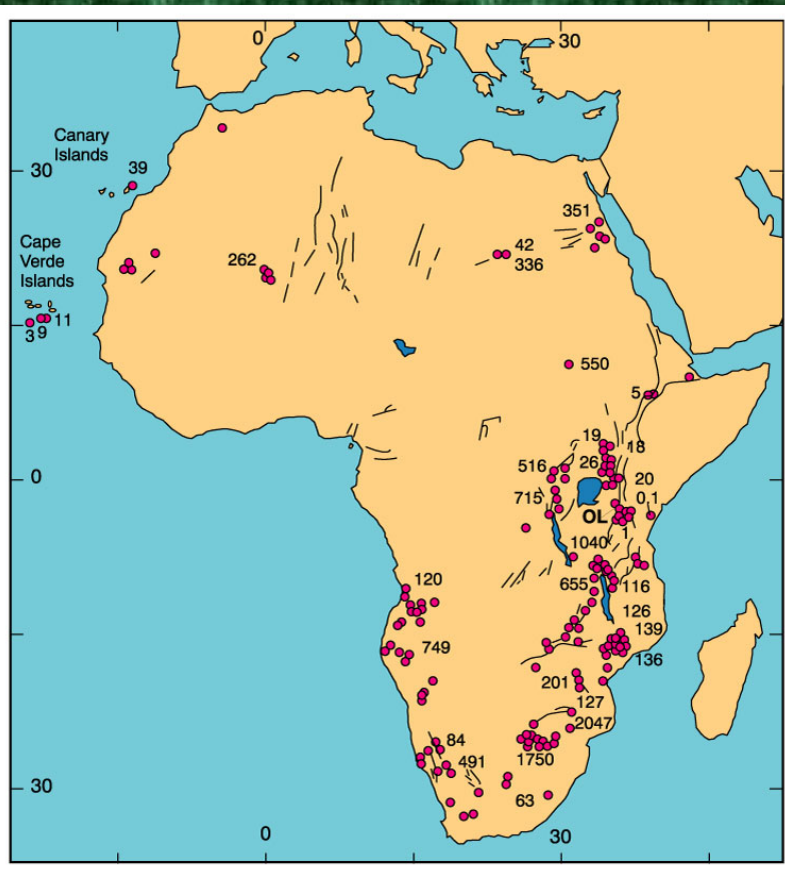


Figure 19-9. Hipotetski presjek pokazuje model za nastanak East African Rift-a. a. Pred-riftna faza, dijabir iz astenosferskog plašta se uzdiže u litosferu. Dekompresijsko taljenje i daje alkalne taljevine. Dijelom se tali i kontinentalna kora - (sub-continental lithospheric mantle - SCLM). Deformacije osiguravaju prostor za dijabir (D_1). b. Riftna faza: razvoj kontinentalnog rifta, erupcija alkalne magme iz astenosfere dodatno inducira anateksis kore. Riftna dolina akumulira vulkanite i vulkanoklastite.. c. Završna faza, u kojoj astenosfera doseže 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 (Ce,La)FCO ₃	Oxides-Hydroxides
* Nyerereite ((Na,K) ₂ Ca(CO ₃) ₂)	Magnetite
* Gregoryite ((Na,K) ₂ CO ₃)	Pyrochlore
	Perovskite
Silicates	Hematite
Pyroxene	Ilmenite
Aegirine-augite	Rutile
Diopside	Baddeleyite
Augite	Pyrolusite
Olivine	Halides
Monticellite	Fluorite
Alkali amphibole	
Allanite	Phosphates
Andradite	Apatite
Phlogopite	Monazite
Zircon	

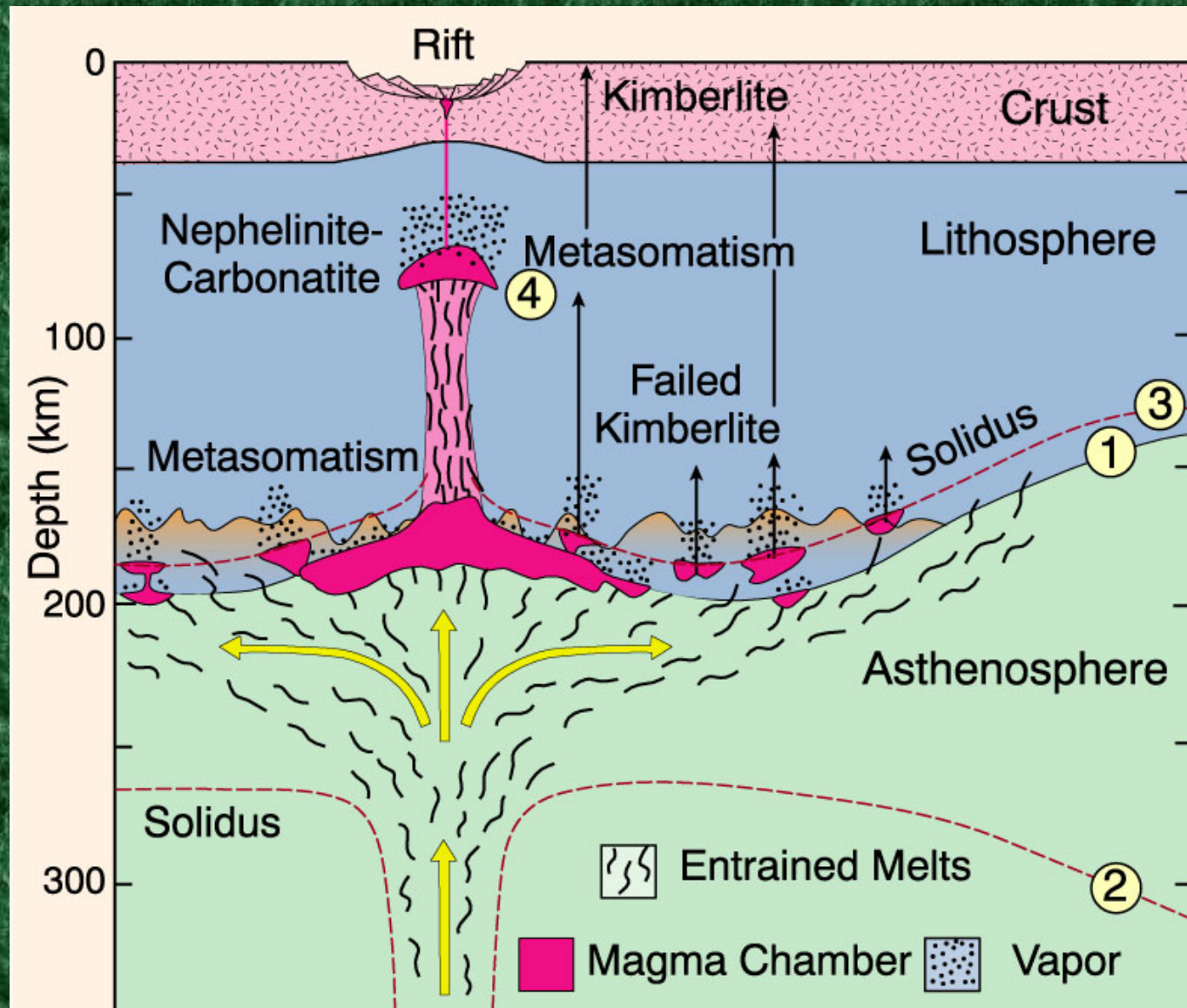
Source: Heinrich (1966), Hogarth (1989)

* 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.

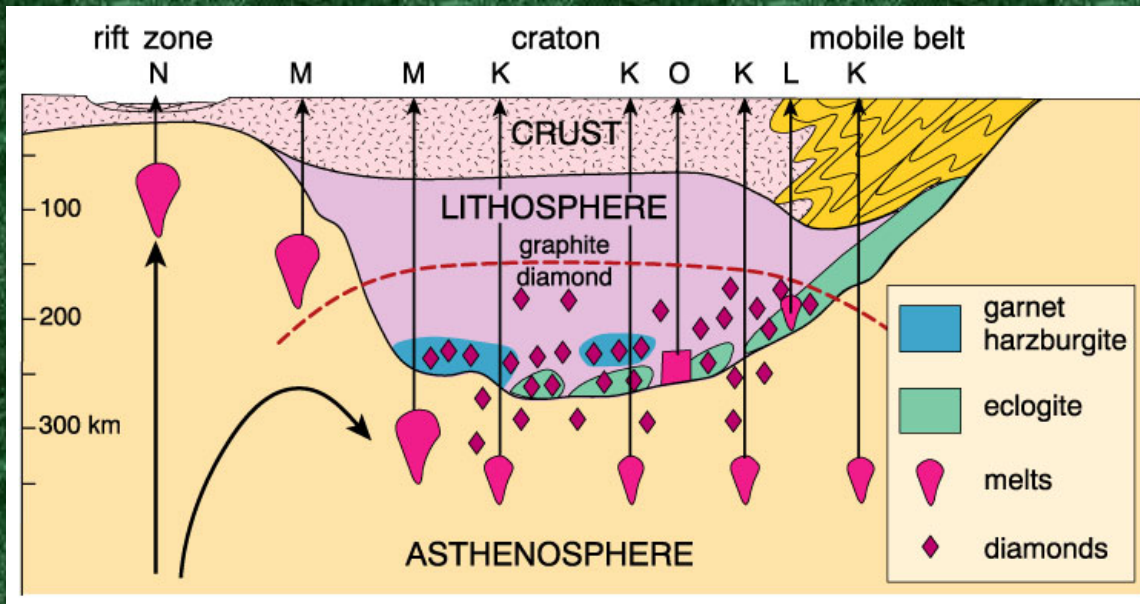


Kontinentalni alkalni magmatizam

Lamproiti - ultramafitna porfirna stijena bogata kalijem, dolazi u manjim tijelima (plitki dajkovi), ne sadrži karbonatne minerale, min. sastav sličan kimberlitima

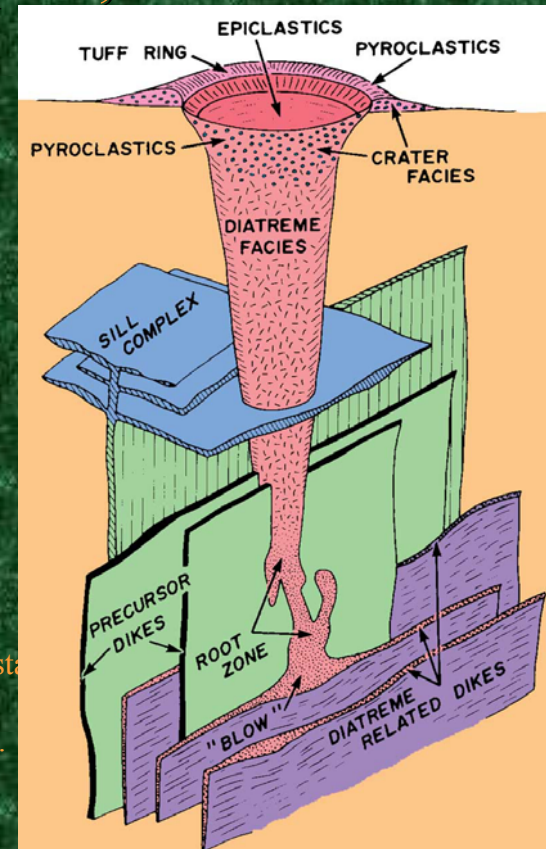
Lamprofiri - žične stijene, sadrže i leukoratske minerale

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.



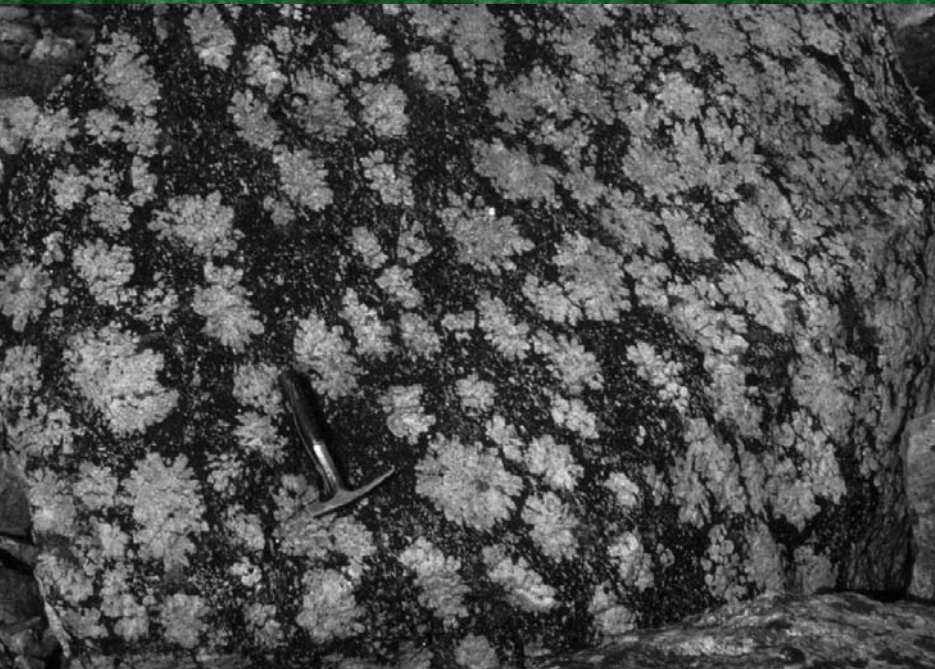
Anortoziti

- 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

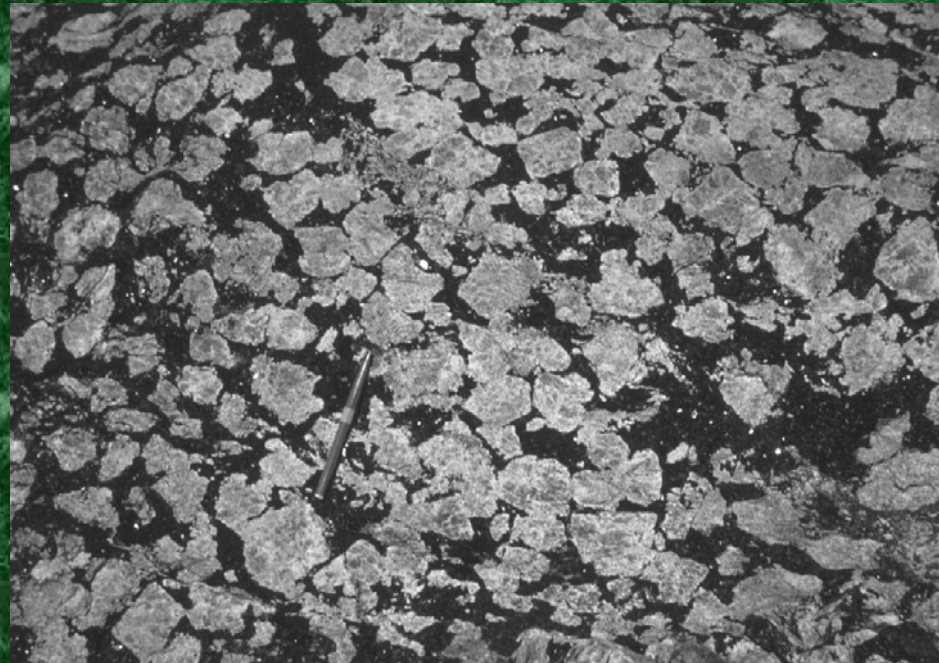
Ashwal (1993) -6 glavnih pojava oblika:

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

