

Πετρολογία Μαγματικών & Μεταμορφωμένων Πετρωμάτων

Μέρος 1^ο: Μαγματικά Πετρώματα

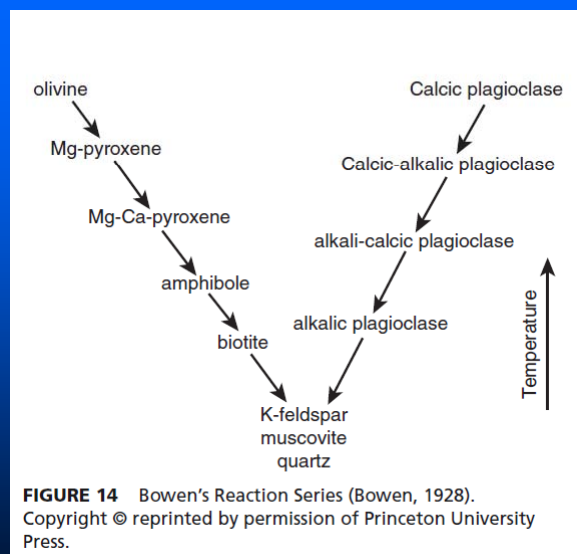
Ιωάννης Ηλιόπουλος
Πανεπιστήμιο Πατρών
Τμήμα Γεωλογίας
Τομέας Ορυκτών Πρώτων Υλών
Μάρτιος 2020

Ας συνοψίσουμε...(1)

- Χρήση **χημιογραφικών** διαγραμμάτων για να προσδιορίσουμε τον τελικό ορυκτολογικό συνδυασμό ισορροπίας που αντιστοιχεί σε κάθε σύσταση πετρώματος
- Πρώτο ορυκτό → όπου και η αρχική σύσταση
- Η σύσταση του υγρού απομακρύνεται από το ορυκτό αυτό
- Τα εξελισσόμενα υγρά κατά την ψύξη τριαδικών ευτηκτικών συστημάτων μετακινούνται από **διμεταβλητά** πεδία σε **μονομεταβλητές** καμπύλες και σε **αμετάβλητα** σημεία καθώς κρυσταλλώνεται κάθε νέο ορυκτό.
- Το αρχικό τήγμα (και το τελικό υγρό) είναι πάντα η **ευτηκτική σύσταση** (όπως και στα δυαδικά!)

Ας συνοψίσουμε...(2)

- Η πορεία του τήγματος κατά την τήξη ισορροπίας σε τριαδικά ευτηκτικά συστήματα ακολουθεί μια συνεχή διαδρομή που είναι η αντίστροφη εκείνης της κρυστάλλωσης
- Η κλασματική τήξη όμως συμβαίνει σε διακριτά στάδια
- Η σειρά του Bowen αποτελεί μια πολύ χρήσιμη γενίκευση, όμως αδυνατεί να εξηγήσει την ποικιλία πετρολογικών ακολουθιών



$$\begin{aligned} \text{mineral}_{(\text{composition A})} + \text{melt}_{(\text{composition X})} \\ = \text{mineral}_{(\text{composition B})} + \text{melt}_{(\text{composition Y})} \end{aligned} \quad (10)$$

or:

$$\text{melt}_{(\text{composition X})} = \text{mineral} + \text{melt}_{(\text{composition Y})} \quad (11)$$

$$\text{melt} = \text{mineral}_1 + \text{mineral}_2 \quad (12)$$

or the peritectic type of reactions:

$$\text{mineral}_1 + \text{melt} = \text{mineral}_2 \quad (13)$$

Bowen (1928)...

An attempt is made to . . . arrange the minerals *of the ordinary sub-alkaline rocks* [author's emphasis] as a reaction series. The matter is really too complex to be presented in such simple form. Nevertheless the simplicity, while somewhat misleading, may prove of service in presenting the subject in concrete form. (p. 60)

ΔΙΕΡΓΑΣΙΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΕΞΕΛΙΞΗΣ ΤΟΥ ΜΑΓΜΑΤΟΣ

Θα ξεκινήσουμε θεωρώντας την γη σα μια μηχανή μάγματος απλοποιώντας το πρόβλημα της διαδικασίας παραγωγής μάγματος στις απλούστερες παραμέτρους του.

Γη: μια μηχανή μάγματος

- Ο φλοιός δημιουργείται από την τήξη του μανδύα
- Ποια είναι η πρώτη χρονικά διεργασία σε μια τέτοια διαδικασία παραγωγής μάγματος; **Μερική τήξη του μανδύα!**
- Και ποιο είναι το πιο σύνηθες προϊόν μια τέτοιας διεργασίας;



THE GEOLOGICAL SOCIETY OF AMERICA®
SCIENCE • STEWARDSHIP • SERVICE

GSA home Log In

Are Ants the Answer to CO₂ Sequestration?
New GEOLOGY articles published online on 14 July 2014

Boulder, Colo., USA – A 25-year-long study published in GEOLOGY on 14 July provides the first quantitative measurement of in situ calcium-magnesium silicate mineral dissolution by ants, termites, tree roots, and bare ground. This study reveals that ants are one of the most powerful biological agents of mineral decay yet observed. It may be that an understanding of the geobiology of ant-mineral interactions might offer a line of research on how to “geoengineer” accelerated CO₂ consumption by Ca-Mg silicates.

Researcher Ronald Dorn of Arizona State University...
dissolution of calcium (Ca) and...
of ants...

livescience
TECH HEALTH PLANET EARTH SPACE STRANGE NEWS ANIMALS HISTORY HUMAN NATURE SHOP

TRENDS: Wearable Tech // Archaeology // Military & Spy Tech // Zika Virus // Our Amazing Planet // Best Fitness Trackers // Human Origins

Can Ants Save the World from Climate Change?
By Becky Oskin, Senior Writer | August 01, 2014 07:56am ET

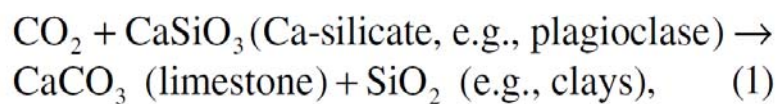
Ants may be some of Earth's most powerful biological climate brokers, a provocative new study claims.

The average ant lives and dies in less than a year, but a long-term experiment tracking the insects'

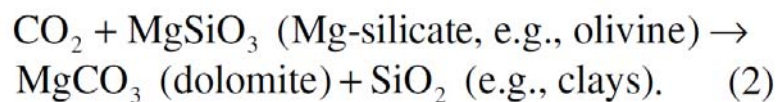
Science Newsletter: Subscribe
enter email here submit

Follow Us
f t in g+

925
153



and



Γη: μια μηχανή μάγματος

- Ο φλοιός δημιουργείται από την τήξη του μανδύα
- Ποια είναι η πρώτη χρονικά διεργασία σε μια τέτοια διαδικασία παραγωγής μάγματος; **Μερική τήξη του μανδύα!**
- Και ποιο είναι το πιο σύνηθες προϊόν μια τέτοιας διεργασίας; **Βασάλτης**

Γη: μια μηχανή μάγματος

- Επιλογή μοντέλου που θα οδηγεί στη δημιουργία των διαφόρων ειδών βασαλτών (θολειτικοί – αλκαλικοί – ασβεσταλκαλικοί)
 - **Αλκαλικοί:** κυρίως εντός των πλακών
 - **Θολειτικοί:** κυρίως στις μεσοωκεάνειες ράχες και σε διάσπαρτα εντός των πλακών ηφαιστειακά κέντρα που δημιουργούν νησιωτικά τόξα

Τα Δύο Κύρια Είδη Βασικών Μαγμάτων

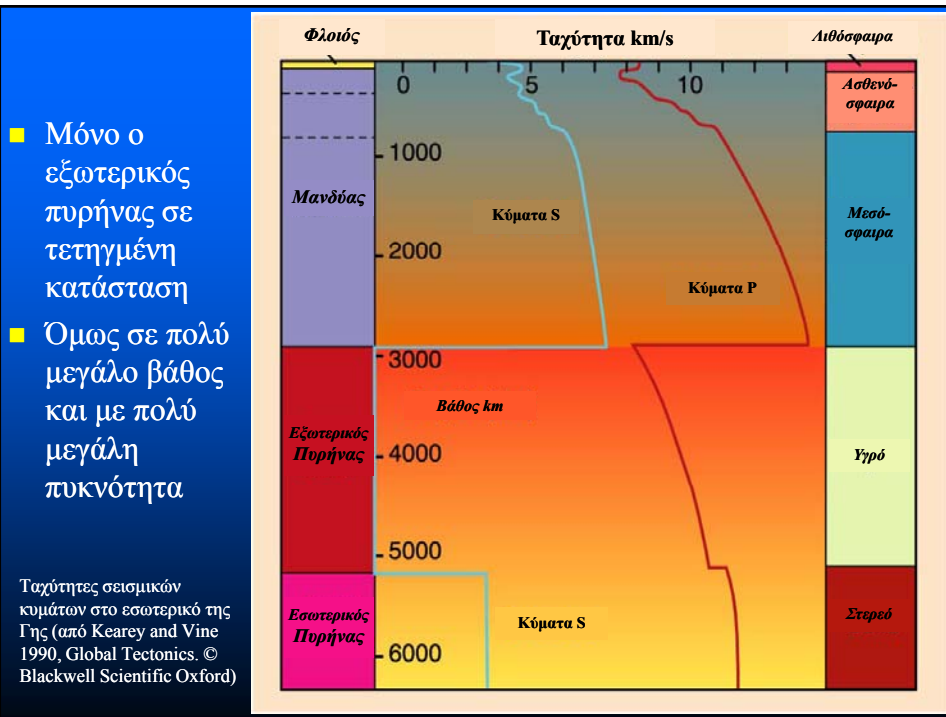
	Θολεϊτικοί Βασάλτες	Αλκαλικοί Βασάλτες
Κύρια Μάζα	Συνήθως μικροκρυσταλλική, ενδοκοκκώδης, απουσία ολιβίνης , κλινοπυρόξενος = αυγίτης, ορθοπυρόξενος = υπερσθενής (συχνά περιθώρια γύρω από ολιβίνη, απουσία αλκαλικού άστριου , συχνή παρουσία γυαλιού και χαλαζία μεταξύ των κρυσταλλιτών	Συχνά πιο αδροκρυσταλλική, συνήθως παρουσία ολιβίνης , παρουσία Ti-ούχου αυγίτη (ανοικτό κόκκινο χρώμα), απουσία ορθοπυρόξενου, πιθανή παρουσία αλκαλικού άστριου ή/και αστριοειδών , σπάνια παρουσία γυαλιού μεταξύ κρυσταλλιτών και απουσία χαλαζία
Φαινοκρύσταλλοι	Σπάνια παρουσία ολιβίνης, συνήθως διαβρωμένου, με σχηματισμούς περιθωρίων ορθοπυρόξενου, σπανιότατα ορθοπυρόξενος, συχνή παρουσία πλαγιόκλαστου (πρώιμη φάση) , κλινοπυρόξενος = αυγίτης	Συχνή παρουσία ολιβίνης με ζώνωση, απουσία ορθοπυρόξενου, σπανιότερη εμφάνιση πλαγιόκλαστου (όψιμη φάση) , Ti-ούχος αυγίτης (ανοικτό-κόκκινα περιθώρια)

Γη: μια μηχανή μάγματος

- Θα πρέπει λοιπόν ένα τέτοιο μοντέλο να είναι ικανό, όχι μόνο να παράγει βασάλτη αλλά και τα δύο αυτά είδη μητρικών βασαλτικών πετρωμάτων

Γη: μια μηχανή μάγματος

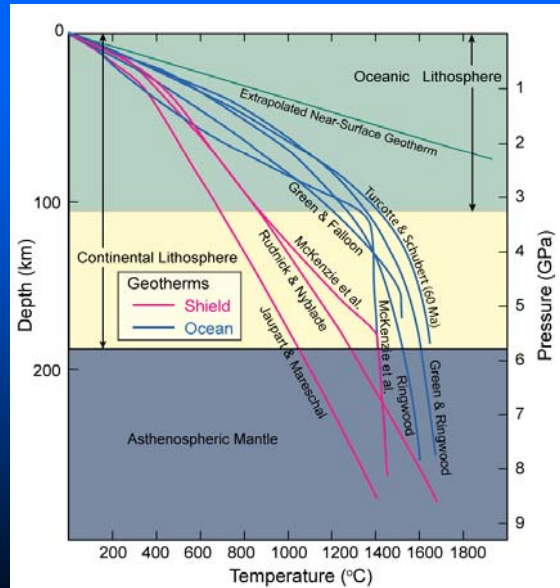
- Αποτελεί η παραγωγή μάγματος από τη μηχανή μάγματος μια κανονική διαδικασία ;
- Δηλαδή:
 - Μπορεί η φυσική γεωθερμική βαθμίδα να οδηγήσει σε αυτήν;
 - Σε τι βάθος, τι τήκεται, τι παράγεται;



Η γεωθερμική βαθμίδα

- Τ βασαλτών κατά την έκχυση: $\sim 1.100 - 1.200 \text{ }^\circ\text{C}$
- Βάθος μανδρακής πηγής: $\sim 100 \text{ km}$ τουλάχιστον

Figure 1.11 Estimates of oceanic (blue curves) and continental shield (red curves) geotherms to a depth of 300 km. The thickness of mature ($> 100\text{Ma}$) oceanic lithosphere is hatched and that of continental shield lithosphere is yellow. Από: Winter 2014 (instruction material)



Μανδύας: η πηγή μάγματος

- Αν ο ανώτερος μανδύας αποτελεί την πηγή των βασαλτών τότε θα πρέπει να δούμε πρώτα από τι αποτελείται
- Ποιες είναι οι μόνες περιπτώσεις στις οποίες μπορούμε να εντοπίσουμε δείγματα μανδρακής προέλευσης στην επιφάνεια της Γης;

Υλικά μανδρακής προέλευσης στην επιφάνεια της Γης

■ **Οφιόλιθοι**

- Τεμάχια ωκεάνιου φλοιού και ανώτερου μανδύα
- Εφιπέυσεις σε ζώνες καταβύθισης στα περιθώρια των ηπείρων (<7 km)

■ **Δείγματα βάθους (κορήματα)** από τον ωκεάνιο φλοιό

■ **Κόνδυλοι και ξενόλιθοι** σε κάποιους βασάλτες

■ **Κιμπερλιτικοί ξενόλιθοι**

- Αδαμαντοφόροι σωλήνες που μεταφέρουν μανδρακό υλικό με πληθώρα ξενολίθων από μεγάλο βάθος (250-350 km)



Πολύκαστρο Ν. Κιλκίς
Οφιολιθικό σύμπλεγμα Γεωγελής
Β. Τσικούρας (προσωπικό αρχείο)



*Πολύκαστρο Ν. Κιλκίς
Οφιολιθικό σύμπλεγμα Γεωγελής
Β. Τσικούρας (προσωπικό αρχείο)*



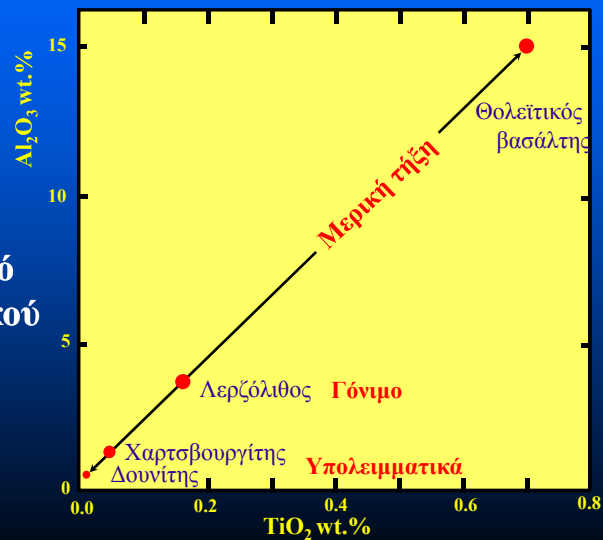
*Πολύκαστρο Ν. Κιλκίς
Οφιολιθικό σύμπλεγμα Γεωγελής
Β. Τσικούρας (προσωπικό αρχείο)*



Μερική τήξη

Ο **Λερζόλιθος** είναι πιθανότατα πρωτογενής (γόνιμος) μανδύας

Ο **Δουνίτης** και ο **Χαρτσβουργίτης** είναι δύστηκτα, υπολειμματικά τμήματα μετά από διαφυγή βασαλτικού τήγματος από μερική τήξη (εκχυμωτής μανδύας)



Λερζόλιθος: Είδος περιδοτίτη με ολιβίνη > Ορχ + Cpx

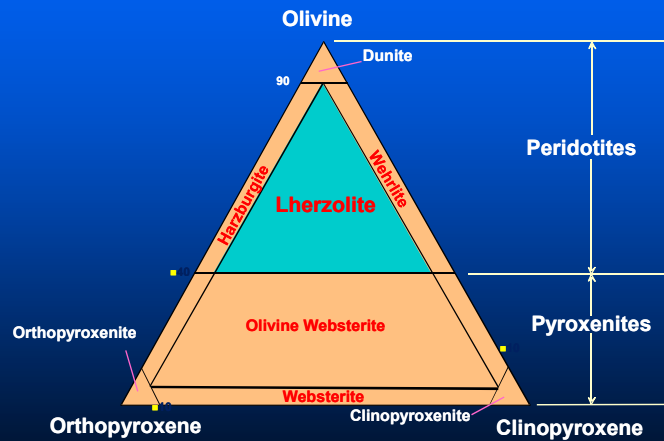


Figure 2.2 C After IUGS

TABLE 2 Mineralogy and Chemical Composition of Spinel and Garnet Lherzolites, "Pyrolite," and Estimates of Primitive Mantle

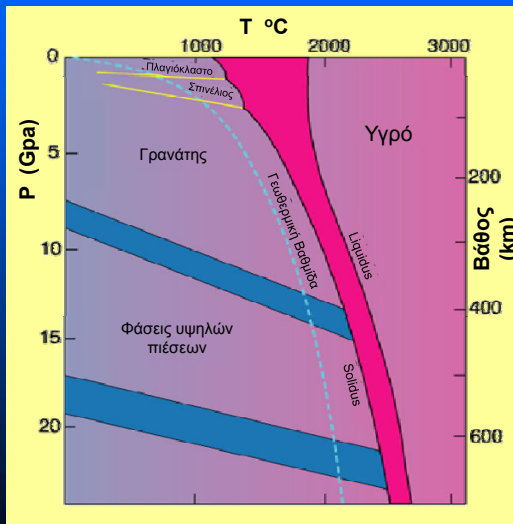
Mode/ Oxide	Spinel Lherzolite		Garnet Lherzolite		Pyrolite	Primitive Mantle			
	Range	Average	Range	Average		H&Z '86	M&S '95	P&O '03	L&K '07
Olivine	55-90	67	55-80	63	56				
Opx	5-35	24	20-40	25	26				
Cpx	3-14	8	0-10	2	16				
Spinel	0.2-3	2							
Garnet			3-15	10					
SiO ₂	42.3-45.3	44.2	43.8-46.6	45.9	42.7	46.0	44.9	45.5	45.0
TiO ₂	0.05-0.18	0.13	0.7-0.18	0.09	0.47	0.18	0.20	0.21	0.16
Al ₂ O ₃	0.43-3.23	2.05	0.82-3.09	1.57	3.3	4.06	4.43	4.51	3.52
Cr ₂ O ₃	0.23-0.45	0.44	0.22-0.44	0.32	0.45	0.47	0.38	0.37	0.39
FeO*	6.52-8.90	8.29	6.44-8.66	6.91	7.92	7.54	8.04	8.12	7.97
MnO	0.09-0.14	0.13	0.11-0.14	0.11	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13
NiO	0.18-0.42	0.28	0.23-0.38	0.29	0.42	0.28	0.25	0.24	0.25
MgO	39.5-48.3	42.2	39.4-44.5	43.5	41.4	37.8	37.8	36.9	39.5
CaO	0.44-2.70	1.92	0.82-3.06	1.16	2.11	3.21	3.53	3.66	2.79
Na ₂ O	0.08-0.35	0.27	0.10-0.24	0.16	0.49	0.33	0.36	0.35	0.30
K ₂ O	0.01-0.06	0.06	0.03-0.14	0.12	0.18	0.03	0.03	0.03	0.02

After Maaloe and Aoki (1977), pyrolite after Green and Ringwood (1967), H&Z: Hart and Zindler (1986), M&S: McDonough and Sun (1995), P&O: Palme and O'Neill (2003), L&K: Lyubetskaya and Korenaga (2007a, b).

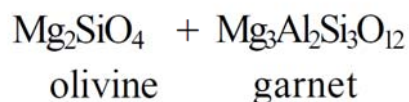
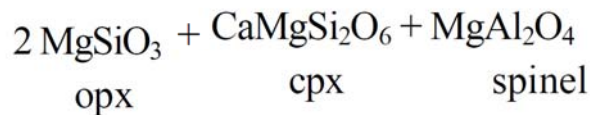
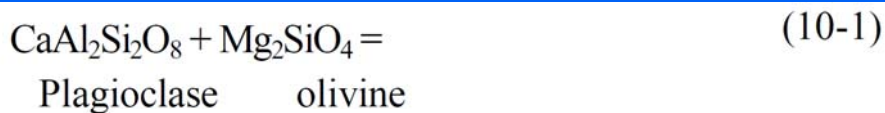
Διάγραμμα Φάσεων του Τετραφασικού Μανδύα

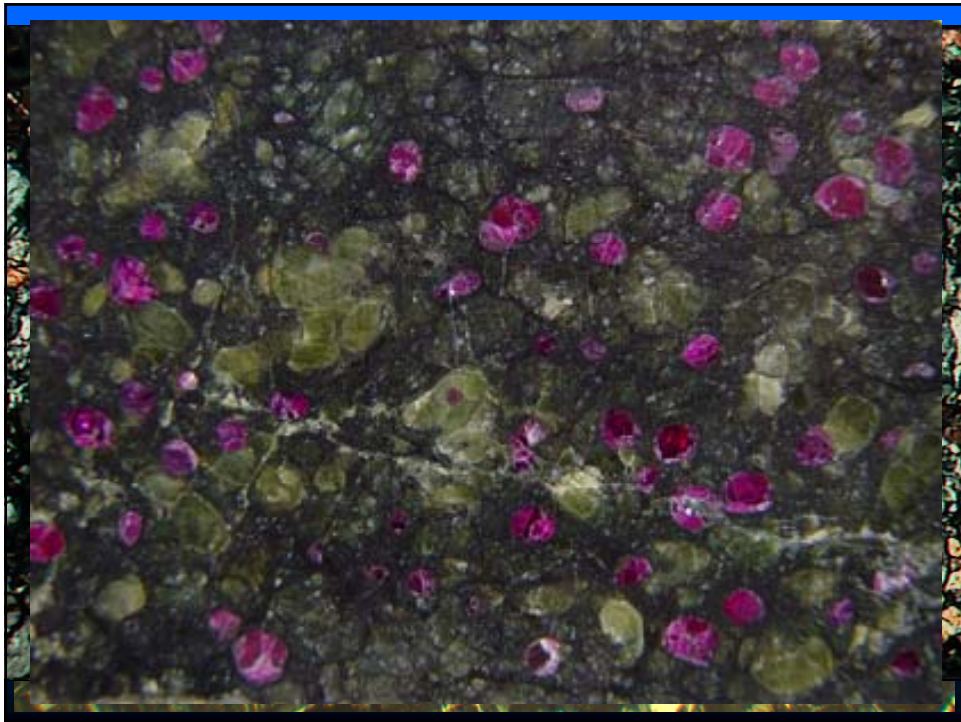
- Πλαγιόκλαστο:
< 50 km
- Σπινέλιος:
50-80 km
- Γρανάτης:
80-400 km
- $\text{Si}^{\text{IV}} \rightarrow \text{Si}^{\text{VI}}$:
> 600 km

Διάγραμμα φάσεων του Al-λερζόλιθου με το διάστημα τήξης και τις υπό-solidus αντιδράσεις. Δείχνεται επίσης η γεωθερμική βαθμίδα (από Wyllie 1981, Geologische Rundschau, 70, 128-153).

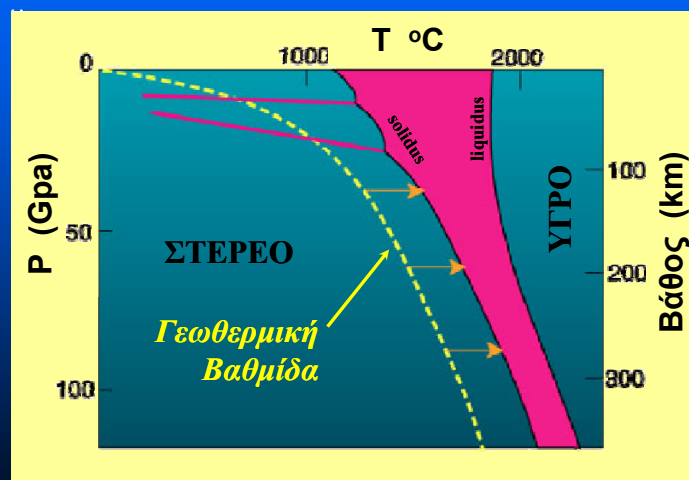


Οι μεταμορφικές αντιδράσεις





Πώς μπορεί να υποστεί μερική τήξη ο Μανδύας;



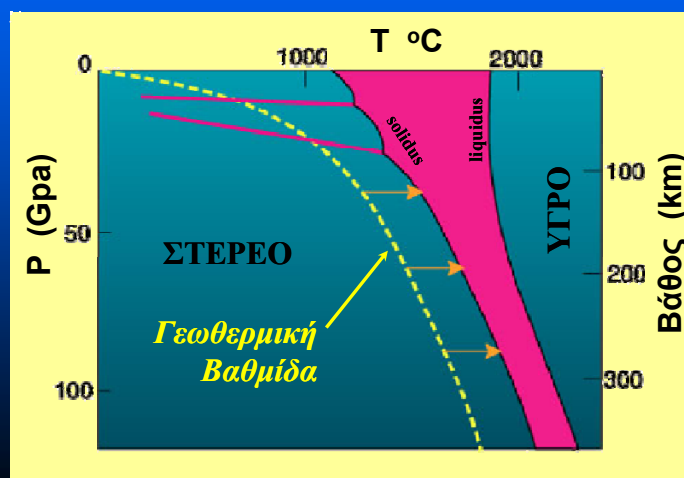
Πώς μπορεί να υποστεί μερική τήξη ο Μανδύας;

- 1. Αύξηση της Θερμοκρασίας
- 2. Μείωση της Πίεσης
- 3. Αύξηση των Πτητικών Συστατικών (ιδιαίτερα H₂O)

Πώς μπορεί να υποστεί μερική τήξη ο Μανδύας;

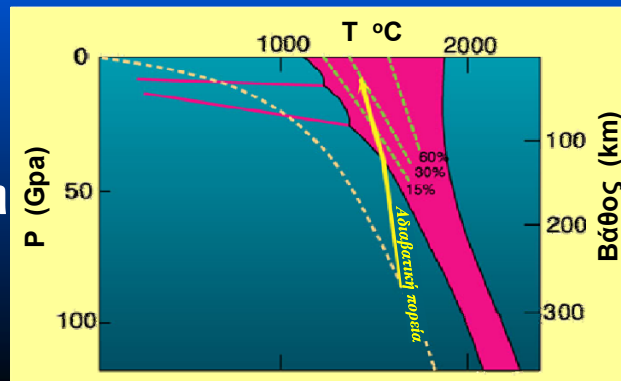
- 1. Αύξηση της Θερμοκρασίας

- ❖ K, U, Th : σπάνια στον μανδύα
- ❖ 10⁷ χρόνια για να αυξήσουν τη T του λερζόλιθου κατά 1° C
- ❖ Μη ρεαλιστικός μηχανισμός εκτός ίσως των hot spots και αυτό σε τοπικό επίπεδο



Πώς μπορεί να υποστεί μερική τήξη ο Μανδύας;

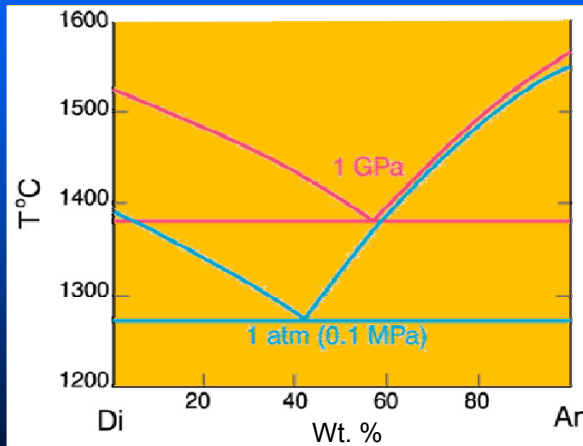
- 2. Μείωση της Πίεσης (αδιαβατική εκτόνωση)
- Αδιαβατική ανύψωση του μανδύα χωρίς απώλεια θερμότητας από αγωγή
- Τήξη με αποσυμπίεση (σε βαθμό τουλάχιστον 30%)



Η Επίδραση της Πίεσης

- Οι διάφορες φάσεις έχουν διαφορετική συμπεριφορά στην αύξηση της πίεσης, λόγω διαφορετικής συμπιεστότητας
- Επομένως ο παράγοντας P θα αλλάξει την ελεύθερη ενέργεια G σε διαφορετικό βαθμό στην κάθε φάση

Η Επίδραση της Πίεσης

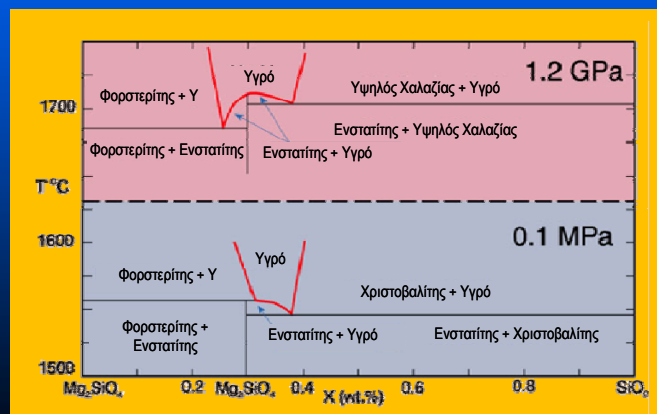


- Ο Ανορθίτης συμπιέζεται λιγότερο με την αύξηση της πίεσης, επομένως το Σ.Τ. του αυξάνει λιγότερο.
- Το ευτηκτικό μετατοπίζεται προς τον An

Η Επίδραση της Πίεσης

- Η αύξηση της πίεσης αυξάνει το Σημείο Τήξης και μετατοπίζει το ευτηκτικό σημείο (επομένως τι άλλο αλλάζει;)

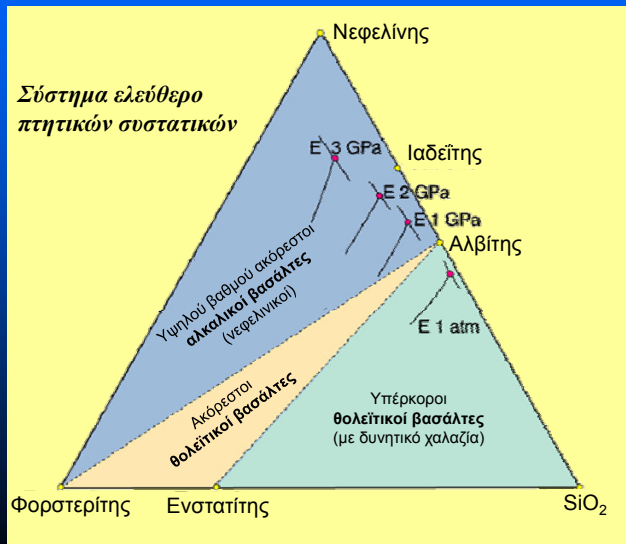
Το σύστημα Fe-SiO_2 σε ατμοσφαιρική πίεση και σε πίεση 1.2 GPa (από Bowen and Schairer (1935), American Journal of Science και Chen and Presnall (1975), American Mineralogist)



Η Επίδραση της Πίεσης

- Αύξηση πίεσης μετακινεί το ευτηκτικό από τα υπέρκορα στα ακόρεστα αλκαλικά
- Επομένως οι αλκαλικοί βασάλτες ευνοούνται σε τήξη μεγάλου βάθους και πίεσης

Αλλαγή της ευτηκτικής σύστασης με την αύξηση της πίεσης από 1 atm έως 3 GPa στη βάση του βασάλτικού τετραέδρου (από Kushiro 1968, *Journal of Geophysical Research*, 73, 619-634).

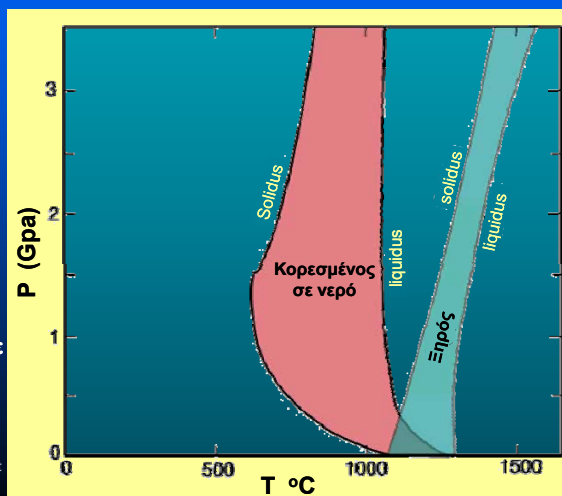


Πώς μπορεί να υποστεί μερική τήξη ο Μανδύας;

■ 3. Αύξηση των Πτητικών Συστατικών

- ❖ Παρουσία ένυδρων ορυκτών σε μανδουκά υλικά: Φλογοπίτης, αμφίβολος, σερπεντίνης
- ❖ Ρευστά εγκλείσματα πλούσια σε H₂O και CO₂
- ❖ Η παρουσία H₂O χαμηλώνει σημαντικά την T της solidus
- ❖ Μόλις 0,1-0,2 % η συνολική περιεκτικότητα του μανδύα σε H₂O

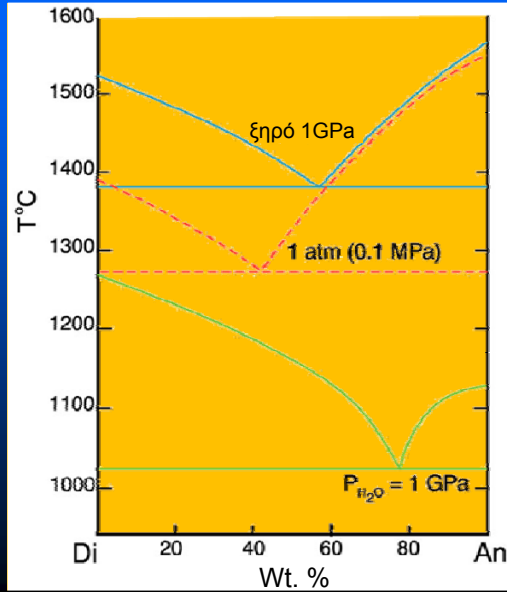
Πειραματικές καμπύλες τήξης ενός περιδότη σε ξηρές και κορεσμένες σε νερό συνθήκες (από Lambert & Wyllie, 1972): *Journal of Geology*, 80, 693-708.



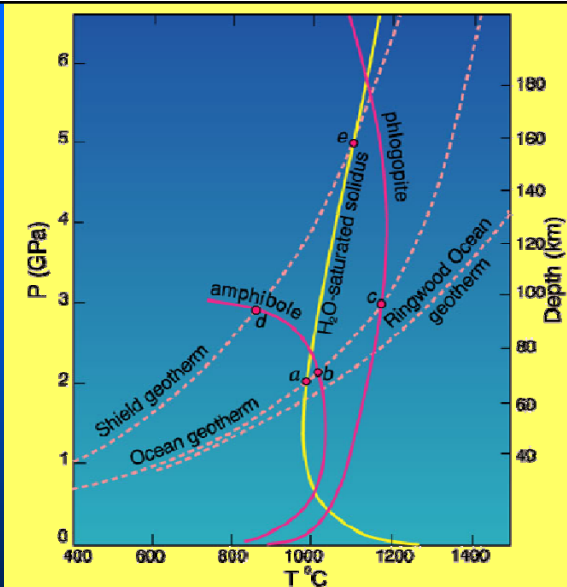
Η Επίδραση του Νερού

- Η διαλυτότητα του νερού στο τήγμα εξαρτάται από τη δομή του τήγματος που αντικατοπτρίζει και την δομή των ορυκτών που παράγονται.
- Το νερό διαλύεται περισσότερο σε πολυμερισμένα τήγματα ($An > Di$) κι έτσι η μείωση του σημείου τήξης είναι μεγαλύτερη στον An παρά στο Di. Επομένως το ευτηκτικό μετακινείται προς τον An

Λαβιακό διάγραμμα An-Di που απεικονίζονται οι καμπύλες liquidus και solidus σε ξηρές συνθήκες και $P = 1 \text{ GPa}$, σε $P = 1 \text{ atm}$ και σε $P_{H_2O} = P_{total} = 1 \text{ GPa}$ (από Yoder 1965).

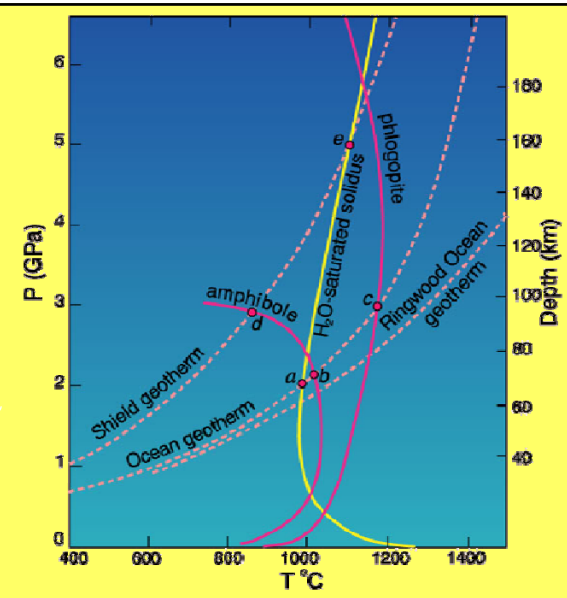


- Προϋποθέσεις για την τήξη:
 - Παρουσία ελεύθερου H_2O
 - P/T συνθήκες ικανές να τήξουν τον λερζόλιθο σε κορεσμένες σε H_2O συνθήκες.



Διάγραμμα φάσεων ενός ένυδρου μαγματικού συστήματος. Διακρίνονται: η solidus του κορεσμένου σε νερό λερζόλιθου (Kushiro et al., 1968), οι καμπύλες αφυδάτωσης-αποσύνθεσης της αμφιβόλου (Millhollen et al., 1974) και του φλογοπίτη (Modreski and Boettcher, 1973), η ωκεάνια και η ηπειρωτική γεωθερμική βαθμίδα (Clark and Ringwood 1964 και Ringwood 1966) (από Wyllie 1979).

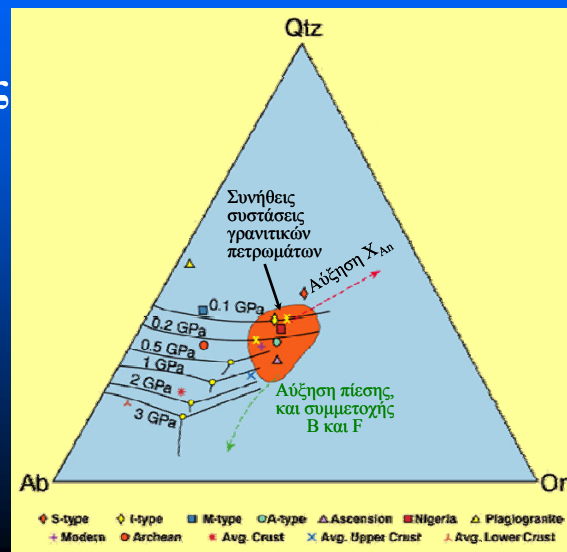
- Θέρμανση ένυδρου μανδύα σε $T >$ της αφυδάτωσης ένυδρων φάσεων και της solidus
- 1-2% τήγμα
- Μικρή ποσότητα, μη ικανή να διαφύγει
- Εξήγηση της παρουσίας του Στρώματος χαμηλών ταχυτήτων (60-220 km)



Διάγραμμα φάσεων ενός ένυδρου μαγματικού συστήματος. Διακρίνονται: η solidus του κορεσμένου σε νερό λερζόλιθου (Kushiro et al., 1968), οι καμπύλες αφυδάτωσης-αποσύνθεσης της αμφιβόλου (Millhollen et al., 1974) και του φλογοπίτη (Modreski and Boettcher, 1973), η ωκεάνια και η ηπειρωτική γεωθερμική βαθμίδα (Clark and Ringwood 1964 και Ringwood 1966) (από Wyllie 1979).

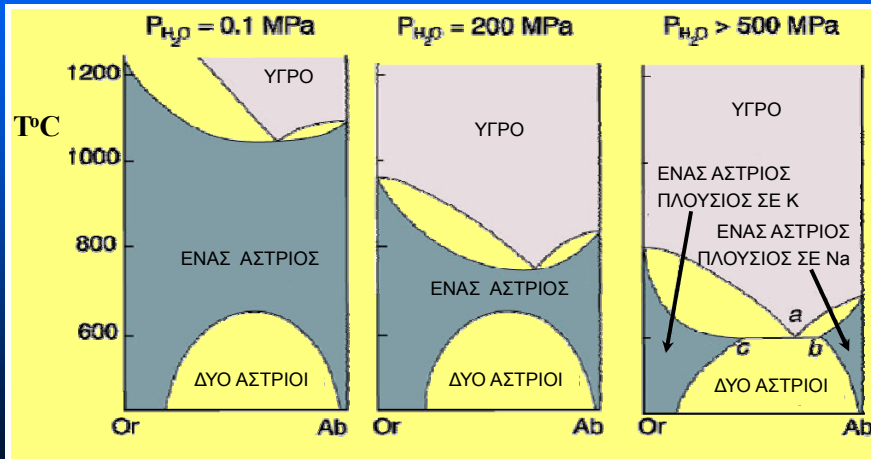
Γρανιτικά Συστήματα

- Φλοιική τήξη: Αύξηση της πίεσης οδηγεί σε εμπλουτισμό των τηγμάτων σε B και F καθώς και στην μείωση της συμμετοχής A_n στο πλαγιόκλαστο

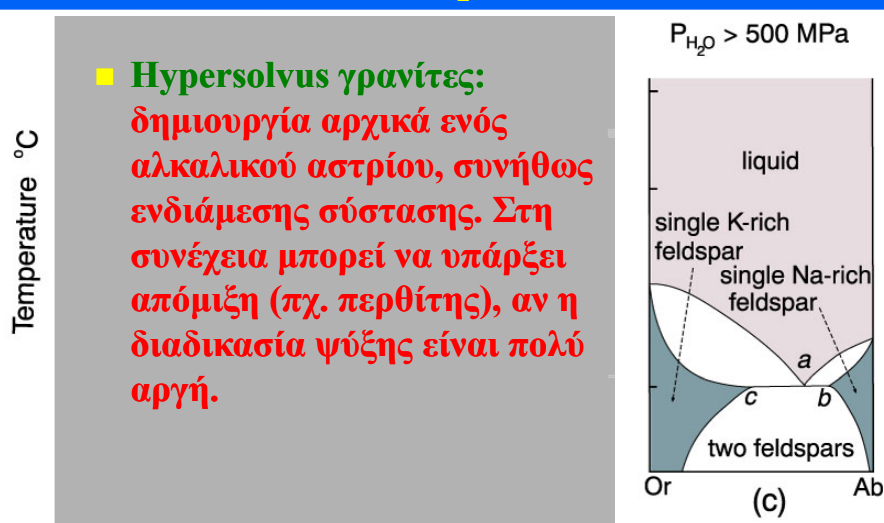


Τριαδικό σύστημα Ab-Or-Qtz, με τη μεταβολή των συστατικών καμπυλών και του ευτηκτικού σε συνάρτηση με την πίεση (από Winter 2001, An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology, Prentice Hall).

Η Επίδραση του Νερού

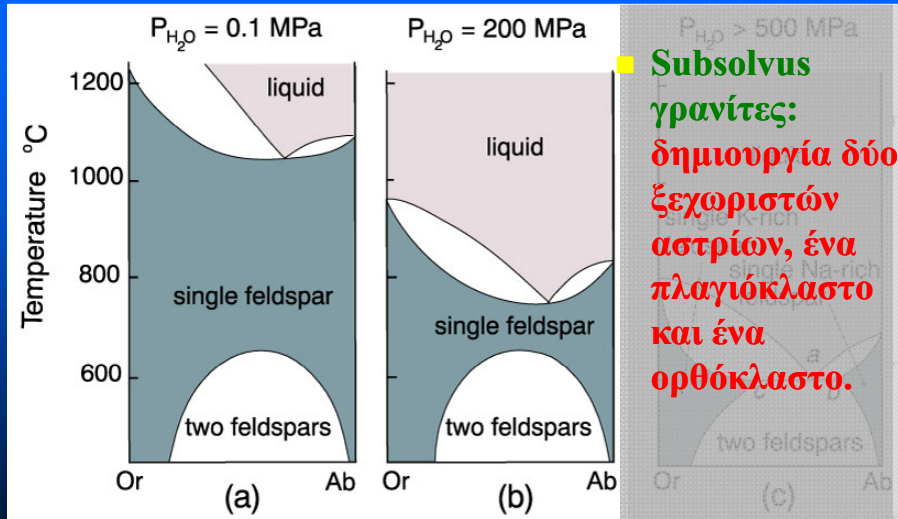


Επίδραση P_{H_2O} στο Ab-Or



■ Figure 6-17. The Albite-K-feldspar system at various H_2O pressures. (a) and (b) after Bowen and Tuttle (1950), J. Geol., (c) after Morse (1970) J. Petrol. Από Winter 2001.

Επίδραση P_{H_2O} στο Ab-Or



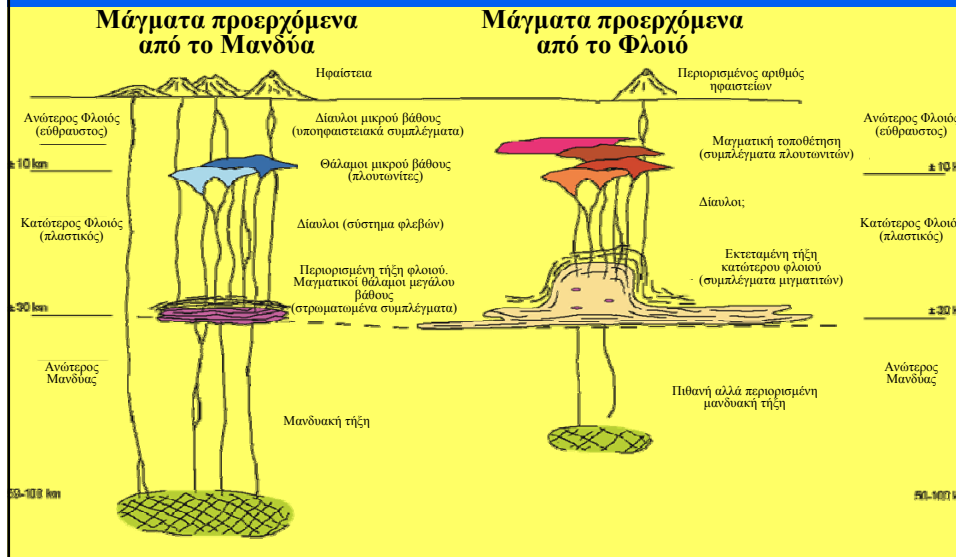
■ Figure 6-17. The Albite-K-feldspar system at various H_2O pressures. (a) and (b) after Bowen and Tuttle (1950), J. Geol, (c) after Morse (1970) J. Petrol. Από Winter 2001.

ΔΥΟ ΠΗΓΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΑΓΜΑΤΩΝ

■ Μερική τήξη του
μανδύα θα δώσει:
ΒΑΣΑΛΤΙΚΟ/
ΑΝΔΕΣΙΤΙΚΟ
ΤΗΓΜΑ

■ Μερική τήξη του
φλοιού θα δώσει:
ΓΡΑΝΙΤΙΚΟ ΤΗΓΜΑ

ΔΥΟ ΠΗΓΕΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΜΑΓΜΑΤΩΝ



Το Ταξίδι προς την Επιφάνεια

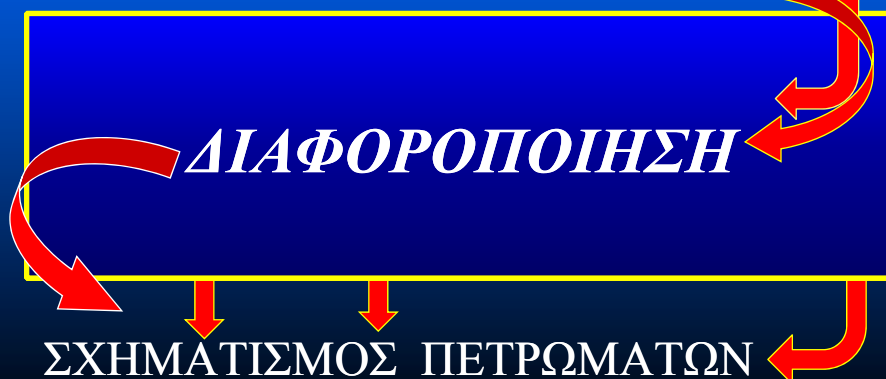
- Το τήγμα που δημιουργείται ενοείται να μετακινηθεί προς τα εξωτερικά μέρη της Γης λόγω της επιπλευστότητας του, που οφείλεται στην:
 - Αύξηση του όγκου του (μετάβαση από τη στερεά στην υγρή κατάσταση)
 - Στη μείωση της πυκνότητας του σε σύγκριση με το στερεό, από το οποίο προήλθε
 - Στην περιστροφική κίνηση της Γης

Μερική τήξη

- Ο αποχωρισμός ενός μερικού τήγματος από το στερεό υπόλειμμα απαιτεί την παραγωγή μιας κρίσιμης ποσότητας τήγματος
- Αυτή η κρίσιμη ποσότητα που θα παραχθεί θα μπορεί να δημιουργήσει μια συνεχή μεμβράνη και θα έχει αρκετό όγκο ώστε να μην απορροφάται από τις επιφάνειες των κρυστάλλων

Η Ζωή και ο Θάνατος ενός Τήγματος. Ή μήπως η Γέννηση ενός Πετρώματος;

ΜΕΡΙΚΗ ΤΗΞΗ (Μανδύα ή Φλοιού)



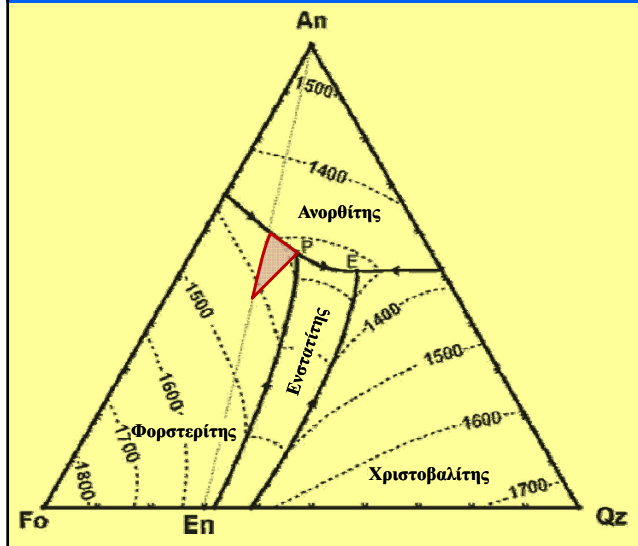
Διαφοροποίηση

- Οι κρύσταλλοι που παράγονται κατά την ψύξη του τήγματος αποχωρίζονται με τις διεργασίες:
 - Κλασματικής Κρυστάλλωσης (Fractional Crystallization)
 - Διήθησης υπό πίεση (Filter Pressing, compaction)
 - Διαχωρισμός λόγω ροής (Flow segregation)

Διαφοροποίηση

- Οδηγεί προς τήγματα με υψηλότερη περιεκτικότητα σε SiO_2
- Ανάλογα με την αρχική σύσταση μπορεί να οδηγήσει σε:
 - Εξέλιξη σε κορεσμένα-υπέρκορα τήγματα (π.χ. γρανίτες/ρυόλιθοι, υπαλκαλικές σειρές)
 - Εξέλιξη σε ακόρεστα τήγματα (πετρώματα με αστριοειδή, π.χ. φωνόλιθος, αλκαλικές σειρές)
 - Καμία ή πολύ μικρή εξέλιξη (πότε;)

Κλασματική κρυστάλλωση Διάγραμμα με Περιτηκτικό Σημείο



Δουνίτης
 ↓
 Τροκτόλιθος
 ↓
 Ολιβινικός νορίτης
 ↓
 Νορίτης
 ↓
 Χαλαζιακός νορίτης

Ο Νόμος του Stokes

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

Ισχύει για Νευτώνεια ρευστά

V = ταχύτητα καθίζησης κρυστάλλων (cm/sec)

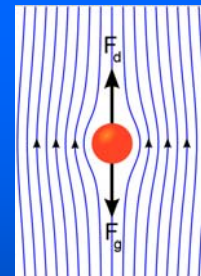
g = επιτάχυνση της βαρύτητας (980 cm/sec²)

r = η ακτίνα σφαιρικού ψήγματος (cm)

ρ_s = πυκνότητα του στερεού σφαιρικού ψήγματος (g/cm³)

ρ_l = πυκνότητα του υγρού (g/cm³)

μ = το ιξώδες του υγρού (1 g/cm.sec = 1 poise)



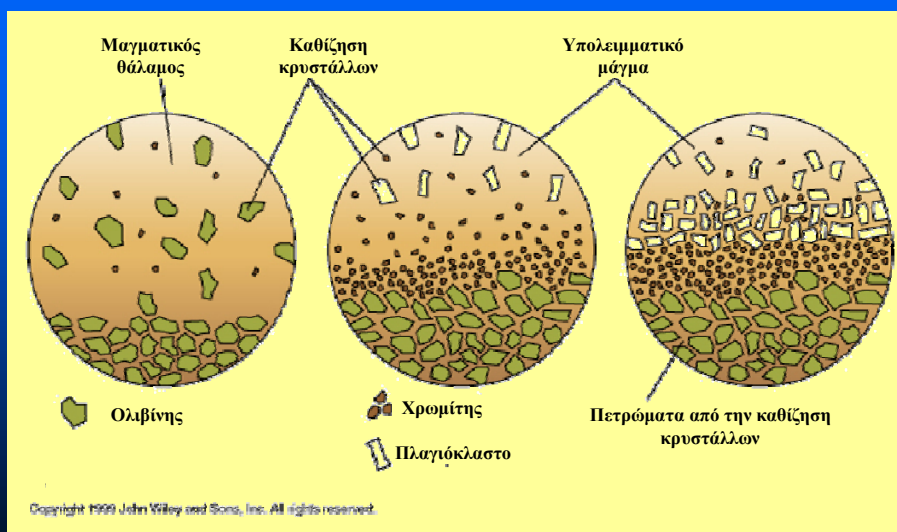
Ο Νόμος του Stokes

■ Ολιβίνης σε βασάλτη:

- Βασαλτικό υγρό ($\rho_l = 2,65 \text{ g/cm}^3$, $\mu = 1000 \text{ poise}$)
- Ολιβίνης ($\rho_s = 3,3 \text{ g/cm}^3$, $r = 0,1 \text{ cm}$)
- $V = 2 \cdot 980 \cdot 0,1^2 (3,3 - 2,65) / (9 \cdot 1000) = 0,0014 \text{ cm/sec}$
(5,1 cm/h ή περίπου 1,22 m/d ή 446m/a)

■ Οι συνήθεις πλουτωνίτες κρυσταλλώνονται σε διάστημα της τάξης 10^4 έως 10^6 χρόνια...

Κλασματική Κρυστάλλωση





Ο Νόμος του Stokes

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

■ Ρυολιθικά τήγματα:

- Ρυολιθικό υγρό ($\rho_l = 2,30 \text{ g/cm}^3$, $\mu = 10^7 \text{ poise}$)
- Κεροστίλβη ($\rho_s = 3,2 \text{ g/cm}^3$, $r = 0,1 \text{ cm}$) $V = 6,2 \text{ cm/a}$
- Αστριοί ($\rho_s = 2,7 \text{ g/cm}^3$, $r = 0,1 \text{ cm}$) $V = 2,7 \text{ cm/a}$

■ Τι θα συμβεί σε πλαγιόκλαστα σε βασαλτικό τήγμα;

- Στα βασικά ή στα όξινα πετρώματα είναι αποτελεσματικότερη η μαγματική στρωμάτωση;

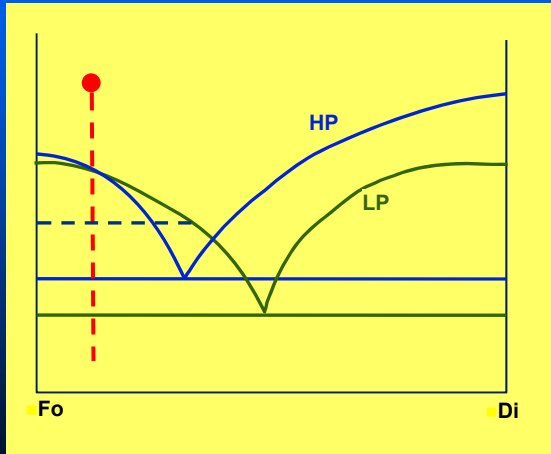
Ο Νόμος του Stokes

- Η εφαρμογή του νόμου του Stokes είναι υπεραπλουστευμένη διαδικασία
- Οι περισσότεροι κρύσταλλοι δεν είναι σφαιρικοί
- Μόνο τα βασάλτικα υγρά και αυτά μόνο κοντά σε θερμοκρασία liquidus, συμπεριφέρονται ως Νευτώνεια υγρά

Πολυβαρής Κλασματική Κρυστάλλωση

- Κρυστάλλωση κάτω από μεταβαλλόμενη πίεση (κατά την άνοδο του μάγματος)
- Αλλάζουν σταδιακά:
 - Η σταθερότητα των φάσεων (πεδία γρανάτη – σπινέλιου – πλαγιόκλαστου)
 - Η θέση του ευτηκτικού σημείου
 - Η σύσταση του αρχικού τήγματος
 - Η ποσότητα του τήγματος

Πολυβαρής Κλασματική Κρυστάλλωση



- Με τη μείωση της πίεσης αυξάνεται το πεδίο σταθερότητας του ολιβίνη
- Έτσι η αναλογία OI/Y αυξάνει (κανόνας του μοχλού)

Ανάμιξη Μαγμάτων

- Διαδικασία κατά την οποία αναμιγνύονται δυο μάγματα, οι συστάσεις των οποίων είναι ακραία μέλη
- Παράγεται νέο μάγμα ενδιάμεσης σύστασης, το οποίο μπορεί να διαφοροποιείται

Παραδείγματα Ανάμιξης Μαγμάτων



Παραδείγματα Ανάμιξης Μαγμάτων



Αφομοίωση

- Ενσωμάτωση τμημάτων των τοιχωμάτων (διάχυση, ξενόλιθοι)
- Η αφομοίωση λόγω τήξης περιορίζεται από τη διαθέσιμη θερμότητα του μάγματος
- Συνοδεύεται από κλασματική κρυστάλλωση
(AFC)



Αφομοίωση

- Τα τοιχώματα πρέπει πρώτα να θερμανθούν έως τη θερμοκρασία τήξης και στη συνέχεια να τηχθούν, τουλάχιστον μερικώς ώστε να αφομοιωθούν
- Θεωρητικά: τήξη τοιχωμάτων ως και 40% του βάρους του μάγματος

Αφομοίωση

- Η δημιουργία φράγματος από κρυσταλλοποιημένο υλικό του μάγματος επάνω στα ψυχρά τοιχώματα αποτρέπει την περαιτέρω διάχυση ύλης
- Επειδή η διάχυση της θερμότητας είναι γρηγορότερη από εκείνη της ύλης, το μάγμα στερεοποιείται πριν λάβει χώρα σημαντική αφομοίωση υλικού των τοιχωμάτων

Ζωνώδης Τήξη

- Διαδικασία τοποθέτησης πλουτωνιτών με σημαντική αφομοίωση των τοιχωμάτων
- Κρυσταλλώνεται ποσότητα μαγματικού υλικού στη βάση του μαγματικού θαλάμου ισοδύναμη με ποσότητα υλικού που τήκεται από την οροφή
- Μεταφορά θερμότητας με μεταγωγή

Αφομοίωση-Ανάμιξη Μαγμάτων

- Διεργασίες που δεν είναι εύκολο να διαχωριστούν μεταξύ τους
- Σπανιότατα υπάρχουν άμεσες ενδείξεις για αφομοίωση
- Η αφομοίωση συνήθως εμπλέκεται στην ερμηνεία της γένεσης μιας πετρολογικής ακολουθίας για την εξήγηση γεωχημικών χαρακτηριστικών, χωρίς υπαίθρια στοιχεία

Πρωτογενή Μάγματα

- Σχηματίστηκαν σε μεγάλο βάθος και δεν τροποποιήθηκαν στη συνέχεια από κλασματική κρυστάλλωση ή αφομοίωση
- Κριτήρια:
 - Η υψηλότετη τιμή $Mg\# = 100 \times \frac{Mg}{Mg + Fe}$
 - Από πειραματικά δεδομένα τήξης λερζόλιθου έχουν προκύψει:
 - $Mg\# = 66-75$
 - $Cr > 1000 \text{ ppm}$
 - $Ni > 400-500 \text{ ppm}$