

Πετρολογία Μαγματικών & Μεταμορφωμένων Πετρωμάτων

Μέρος 1^ο: Μαγματικά Πετρώματα

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

Ας συνοψίσουμε...(1)

- Ακόμη και αν η χημική σύσταση του μανδύα από την οροφή προς τη βάση ήταν ομοιογενής, η ορυκτολογία, η πυκνότητα και το ιξώδες θα διαφέρει. Ο απότομος μετασχηματισμός φάσεων (ορυκτών) προκαλεί ασυνέχειες.
- Η κανονική ακολουθία αυξανόμενων θερμοκρασιών και πιέσεων με το βάθος δεν έχουν ως σύνηθες επακόλουθο την σημαντική τήξη του μανδύα

Ας συνοψίσουμε...(2)

- Η αδιαβατική εκτόνωση μπορεί να προκαλέσει σημαντική τήξη του μανδύα (η εφελκυστική τεκτονική ευνοεί την άνοδο του μανδύα, που αν συμβεί πολύ γρήγορα και σε σημαντική έκταση, θα προκαλέσει μερική τήξη).
- Συνήθως ο μανδύας είναι ακόρεστος σε H₂O.
- Το H₂O εντοπίζεται (~ 0.1 - 0.2 wt. %) κυρίως σε ένυδρα πυριτικά ορυκτά (αμφίβολος ή φλογοπίτης) → το πολύ 1% μερική τήξη → δύσκολο να αποχωρισθεί και να ανέλθει, εξηγεί όμως το στρώμα χαμηλών ταχυτήτων

Ας συνοψίσουμε...(3)

- Μια κρίσιμη ποσότητα μάγματος πρέπει πρώτα να δημιουργηθεί ώστε να δημιουργηθεί ένα διασυνδεδεμένο υμένιο ή ικρίωμα πριν να μπορέσει να απομακρυνθεί από την τηκόμενη πηγή.
- ~ 1 έως 7% για τα χαμηλού ιξώδους μαφικά συστήματα και ~15 έως 30% για πιο ιξώδη πυριτικά συστήματα
- Η κλασματική κρυστάλωση, η ανάμιξη μαγμάτων και άλλες *in situ* διεργασίες πιστεύεται σήμερα ότι είναι οι κυρίαρχες κατά τη μαγματική διαφοροποίηση. Ο ρόλος των υπολοίπων είναι λιγότερο σημαντικός.

ΓΕΩΧΗΜΕΙΑ ΤΩΝ ΜΑΓΜΑΤΙΚΩΝ ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ

Χημικές αναλύσεις

- **Κύρια στοιχεία (major):** >1 wt%
(π.χ. SiO_2 , Al_2O_3 , FeO , MgO , CaO , Na_2O , K_2O)
- **Εποουσιώδη στοιχεία (minor):** 0.1-1.0 wt%
(TiO_2 , MnO , P_2O_5 , H_2O , CO_2)
- **Ιχνοστοιχεία (trace):** <0.1 wt%
(εκφράζονται ως στοιχεία, π.χ. Ba, Sr, Cr, Ni, ...)

Χημικές αναλύσεις

TABLE 2 Estimated Relative Abundances of the Major Elements in the Continental Crust

Element	Wt. % Oxide	Atomic %
O		60.8
Si	59.3	21.2
Al	15.3	6.4
Fe	7.5	2.2
Ca	6.9	2.6
Mg	4.5	2.4
Na	2.8	1.9
K	2.2	1.0
Total	98.5	98.5

After Poldervaart (1955) and Ronov and Yaroshevsky (1976).

Κύρια στοιχεία (major)

Που μας βοηθάνε:

- στην ταξινόμηση των μαγματικών πετρωμάτων
- στη μελέτη του χημικού ελέγχου επί των φυσικών ιδιοτήτων των συστημάτων τήγματος/κρυστάλλων
- στη μελέτη της χημικής εξέλιξης των τηγμάτων (και κρυστάλλων) κατά τις διεργασίες της κρυστάλλωσης και της τήξης.

Ιχνοστοιχεία (trace)

Που μας βοηθάνε:

- στη μελέτη της χημικής εξέλιξης των μαγμάτων.
- στην ανίχνευση και τον προσδιορισμό των μαγματικών πηγών,
- στη διάκριση μεταξύ ορισμένων μαγματικών διεργασιών.

Χημικές αναλύσεις

- Πως προσδιορίζεται μια χημική ανάλυση;
- Στην αρχή: υγρή χημεία (ογκομέτρηση-τιτλοδότηση, titration)
- Σήμερα: μέσω πληθώρας αναλυτικών τεχνικών που βασίζονται στην εκπομπή ή απορρόφηση συγκεκριμένου τμήματος του ηλεκτομαγνητικού φάσματος (φασματοσκοπικές μέθοδοι)

Αναλυτικές τεχνικές

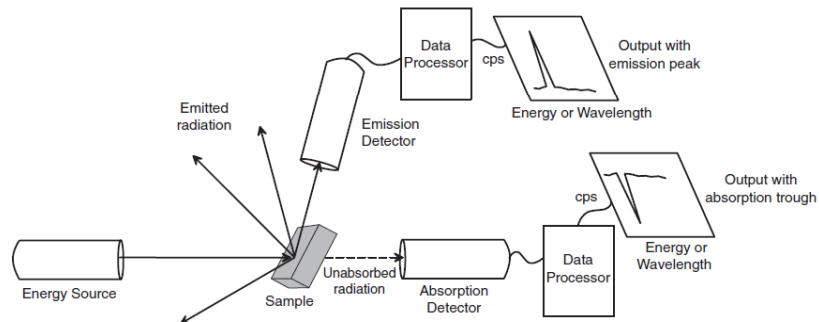


FIGURE 1 Diagram illustrating the geometry of typical spectroscopic instruments. "Data processor" represents possible electronic signal amplifiers, filters, and data analysis electronics. Output is illustrated as a plot of intensity (typically in counts/second [cps]) of the emitted or unabsorbed or absorbed radiation (y-axis) versus energy, frequency, or wavelength (x-axis).

Αναλυτικές τεχνικές

- Οπτική φασματομετρία
- Ατομική απορρόφηση (AA)
- Φθορισμετρία ακτίνων X (XRF/ED-XRF/WD)
- Ιονισμός συζευγμένου επαγωγικά πλάσματος (ICP/OES - ICP/MS)
- Νετρονική ενεργοποίηση (NAA)
- Ηλεκτρονική μικροσκοπία σάρωσης (SEM/ED – SEM/WD)
- Ηλεκτρονική μικροανάλυση (EMP)

Χημική ανάλυση

Μια χημική ανάλυση ενός πετρώματος κλείνει πάντα στο 100 wt%;

Table 2. Major-element compositions (wt%) of Leg 153 gabbros.

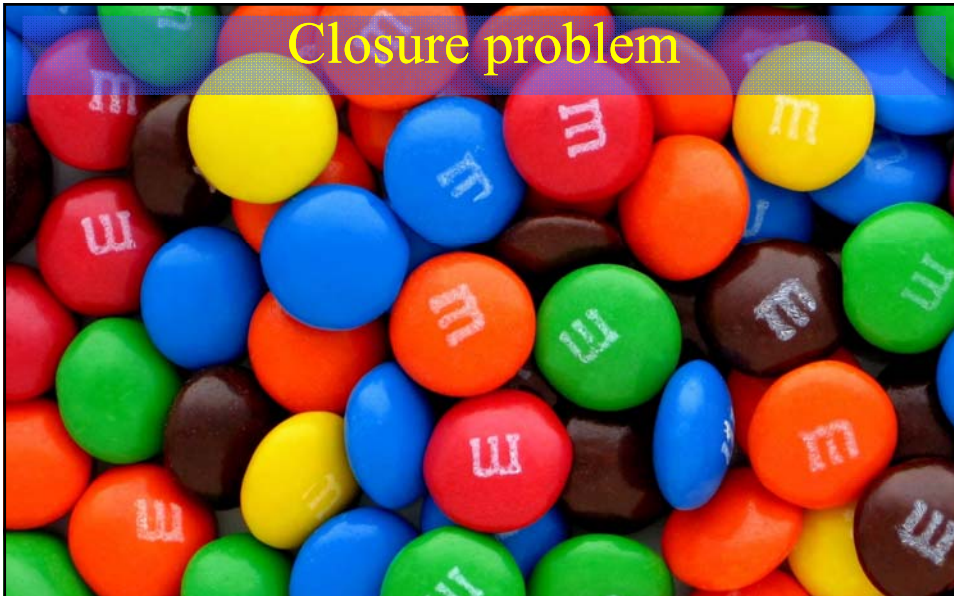
Sample no.:	100	103	104	142	108
Rock name:	GbNo	GbNo	OIGb	OIGN	OIGb
Hole:	921A	921B	921B	921B	921C
Core:	2R	2R	4R	4R	3R
Section, piece:	1, 7	2, 7	1, 4	3, 3	1, 5A
Depth (mbsf):	8.3	16.9	34.4	37.2	20.1
SiO ₂	52.7	50.9	49.1	47.1	48.8
TiO ₂	0.43	0.47	0.38	0.19	0.32
Al ₂ O ₃	16.3	16.5	17.1	19.1	18.3
Cr ₂ O ₃	0.011	0.026	0.14	0.033	0.29
Fe ₂ O ₃	7.18	6.1	6.95	7.5	4.35
MnO	0.157	0.111	0.124	0.116	0.077
MgO	8.15	9.1	10.3	11.9	10.6
NiO	0.009	0.014	0.025	0.038	0.033
CaO	10.8	12.7	12.5	10.2	14.2
Na ₂ O	3.25	2.65	2.3	2.2	1.85
K ₂ O	0.044	0.046	0.041	0.046	0.024
P ₂ O ₅	0.018	0.085	0.026	0.021	0.02
LOI	0.85	1.1	0.8	1.7	1.0
Total	99.90	99.80	99.79	100.14	99.86

Από: Werner, 1997 (Proceedings of the Ocean Drilling Program, Scientific Results)

Table 3. Trace-element compositions (ppm) of Leg 153 gabbros.

Sample no.:	100	103	104	142	108
Rock name:	GbNo	GbNo	OIGb	OIGN	OIGb
B	5	6	5	6	4
Li	5	6	8	7	7
Rb	—	1	2	~1	—
Sr	150	134	125	148	121
Ba	11	6.7	8.6	18	18
Ga	15	14	9	10	10
Pb	—	6	6	8	3
Cu	33	78	94	72	88
Zn	48	39	45	50	24
Y	8	13	8	4	9
Nb	—	~2	—	~1	<1
Zr	16	45	19	14	14
V	180	162	129	53	127
Ni	70	108	195	300	260
Co	36	38	40	52	35
Cr	74	180	965	225	1965
Sc	37	42	29	14	35
S	205	300	425	400	330
As	3.6	3.1	1.5	9.3	2.5
Sb	0.03	0.02	—	0.05	0.15
Cl	<21	<45	1135	<52	<40
F	<86	330	190	—	310

Closure problem



Ποσότητες: Κίτρινο: 4, Κόκκινο: 21, Πράσινο: 9, Μπλε: 16, Καφέ: 9

Ποσοστά (%): Κίτρινο: 7, Κόκκινο: 36, Πράσινο: 15, Μπλε: 27, Καφέ: 15



TABLE 3 Chemical Analyses of Some Representative Igneous Rocks

Oxide	Peridotite	Basalt	Andesite	Rhyolite	Phonolite
SiO ₂	44.8	49.2	57.9	72.8	56.2
TiO ₂	0.19	1.84	0.87	0.28	0.62
Al ₂ O ₃	4.16	15.7	17.0	13.3	19.0
Fe ₂ O ₃	1.36	3.79	3.27	1.48	2.79
FeO	6.85	7.13	4.04	1.11	2.03
MnO	0.11	0.20	0.14	0.06	0.17
MgO	39.2	6.73	3.33	0.39	1.07
CaO	2.42	9.47	6.79	1.14	2.72
Na ₂ O	0.22	2.91	3.48	3.55	7.79
K ₂ O	0.05	1.10	1.62	4.30	5.24
H ₂ O ⁺	0.0	0.95	0.83	1.10	1.57
Total	99.36	99.02	99.27	99.51	99.20

Peridotite: average for Lizard (Green, 1964); other averages from LeMaitre (1976a).

Table 2. Major and trace element compositions of representative rocks from the drill hole.

Zone	Fresh				Altered											
	A	B	C	D	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J		
Sample #	27	39	232	280	80	139	129	145	157	175	187	154	241	277	274	280
depth(m)	135	195	1160	1280	480	695	645	725	785	875	935	770	1205	1385	1370	1400
Major elements (wt %)																
SiO ₂	67.30	64.29	64.33	64.64	65.57	63.94	67.18	65.95	67.05	66.21	66.80	66.88	64.32	65.90	68.29	69.32
TiO ₂	0.76	0.78	0.92	0.98	0.87	0.96	0.73	0.89	0.80	0.69	0.76	0.79	0.71	0.67	0.77	0.71
Al ₂ O ₃	14.93	16.52	15.83	15.67	14.47	15.85	15.00	14.95	14.75	15.95	15.13	15.10	16.96	16.00	14.53	14.01
Fe ₂ O ₃	5.17	5.29	6.03	6.35	6.31	4.62	4.95	5.76	5.13	3.20	4.59	5.09	4.62	4.42	5.07	4.74
MnO	0.09	0.09	0.10	0.09	0.10	0.08	0.08	0.10	0.08	0.06	0.07	0.10	0.08	0.08	0.09	0.09
MgO	1.92	1.98	2.96	2.92	1.89	1.72	1.80	2.06	1.76	1.47	1.67	1.69	1.85	1.73	1.80	1.69
CaO	2.19	2.60	2.42	2.44	0.88	1.70	1.96	2.11	1.68	1.08	1.13	1.07	1.44	1.80	1.66	1.97
Na ₂ O	3.62	3.50	3.23	3.14	3.10	2.98	3.22	3.05	3.09	4.06	4.13	2.75	3.56	3.03	2.94	2.94
K ₂ O	3.39	3.60	3.66	3.43	4.60	6.19	3.55	3.51	3.80	5.64	4.01	5.53	4.78	5.27	3.70	2.99
P ₂ O ₅	0.20	0.29	0.24	0.24	0.23	0.23	0.20	0.23	0.21	0.20	0.21	0.21	0.21	0.20	0.21	0.19
LOI	0.50	0.50	0.60	0.40	1.70	1.00	1.00	1.00	1.50	0.80	0.90	1.30	0.50	0.70	0.60	0.90
Total	100.07	99.44	99.42	99.40	99.72	99.29	99.67	99.01	99.85	99.36	99.40	100.41	99.03	99.80	99.66	99.55
Minor and trace elements (ppm)																
Cr	50	59	70	72	54	41	54	55	55	45	58	37	52	56	60	64
Ni	16	14	24	17	24	20	12	17	14	13	16	13	20	19	15	13
V	71	66	80	86	61	83	67	73	79	68	69	71	60	55	63	38
Cu	15	10	15	13	14	18	18	11	96	8	14	14	10	9	25	14
Zn	71	82	86	96	86	107	75	81	43	37	34	176	73	70	74	148
Rb	134	137	144	143	191	209	136	128	156	203	143	222	136	153	147	117
Ra	752	807	870	781	950	1290	785	858	840	1180	895	1182	1042	1437	764	655
Sr	169	202	196	194	165	210	170	171	183	106	99	173	216	217	183	181
Ga	10	19	18	21	20	22	19	19	16	15	17	20	21	20	19	18
Nb	13	14	15	16	14	15	13	15	12	11	13	13	13	13	13	13
Hf	7.01	7.42	7.44	6.08			6.86	7.73	7.57	5.21	5.88	6.42	5.69	5.84	5.63	
Zr	245	253	283	286	283	345	246	286	271	222	246	281	227	234	252	246
Y	28	34	34	45	32	54	33	36	42	32	30	42	28	27	31	26
Th	11.0	12.0	15.0	13.0	15.0	15.0	11.0	15.0	13.0	10.0	12.0	12.0	11.0	10.0	14.0	15.0
U	2.6	3.5	3.5	9.5	6.6	2.8	5.5	11.0	2.2	1.9	3.3	2.8	2.0	2.0	3.4	2.4
La	38.08	45.46	52.14	40.03			36.18	41.81	50.53	41.42	30.59	39.73	39.46	35.21	36.26	
Ce	83.96	100.00	106.71	89.61			79.36	92.25	109.67	81.62	65.80	89.48	86.18	76.91	80.98	
Pr	9.97	12.02	12.52	10.48			9.64	11.16	13.08	10.12	8.26	10.44	10.23	9.06	9.65	
Nd	39.75	47.10	52.51	41.92			37.42	44.07	50.91	38.74	32.72	41.53	40.52	36.46	37.98	
Sm	8.46	10.31	10.84	8.98			7.95	9.52	11.08	7.91	7.21	8.30	8.43	7.63	7.83	
Eu	1.59	1.52	1.41	1.38			1.49	1.53	1.72	1.65	1.44	1.86	1.82	1.67	1.37	
Gd	8.92	10.39	11.08	9.30			8.47	9.66	11.26	7.90	7.24	8.17	8.60	7.74	7.99	
Tb	1.07	1.20	1.28	1.08			1.05	1.15	1.31	0.87	0.85	0.98	0.94	0.84	0.89	
Dy	6.49	7.25	7.39	6.67			6.39	6.89	7.62	5.21	5.04	5.22	5.49	4.90	5.00	
Ho	1.16	1.30	1.35	1.16			1.18	1.19	1.37	0.91	0.89	0.93	0.90	0.77	0.81	
Er	3.22	3.49	3.66	3.02			3.20	3.14	3.52	2.29	2.22	2.34	2.33	2.00	2.08	
Tm	0.43	0.47	0.49	0.41			0.45	0.43	0.49	0.31	0.29	0.31	0.29	0.25	0.28	
Yb	2.68	2.92	3.06	2.64			2.65	2.57	2.86	1.98	1.77	1.83	1.81	1.44	1.71	
Lu	0.40	0.44	0.44	0.37			0.40	0.41	0.45	0.29	0.28	0.26	0.30	0.25	0.27	

Zones A, B, C and D are lithologic zones of the drill hole (Fig. 2). A, fresh granodiorite; B, weakly altered granodiorite; C, altered granodiorite; D, alternating bands of altered and fresh granodiorite.

Διαγράμματα διαφοροποίησης

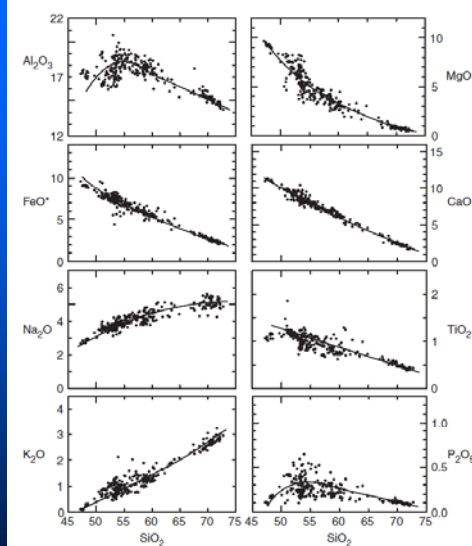


FIGURE 2 Harker variation diagram for 310 analyzed volcanic rocks from Crater Lake (Mt. Mazama), Oregon Cascades. Data compiled by Rick Conrey (personal communication).

Καρτεσιανά διαγράμματα δύο μεταβλητών

(από Winter 2013)

Διαγράμματα διαφοροποίησης

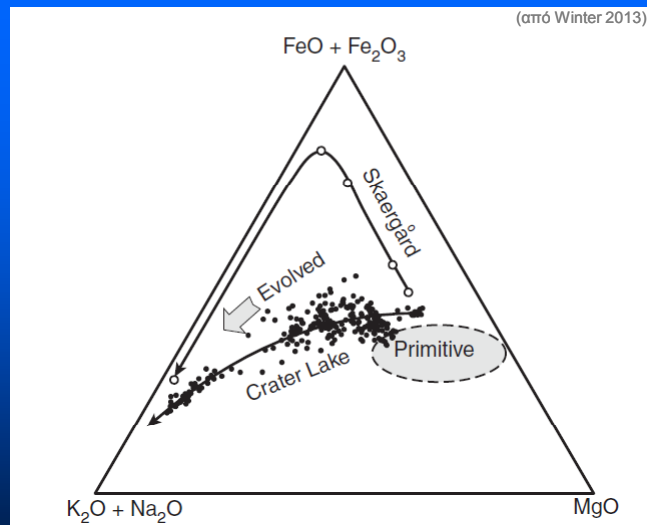


FIGURE 3 AFM diagram for Crater Lake volcanics (data from Figure 2) and the Skaergård intrusion, eastern Greenland.

Τριγωνικά διαγράμματα

Διαγράμματα διαφοροποίησης

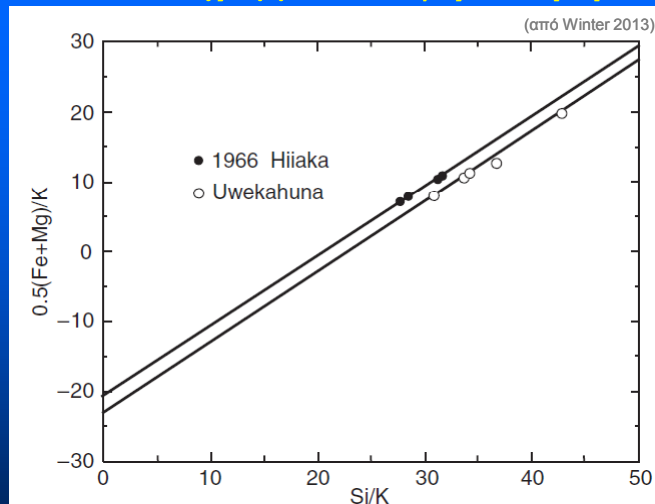
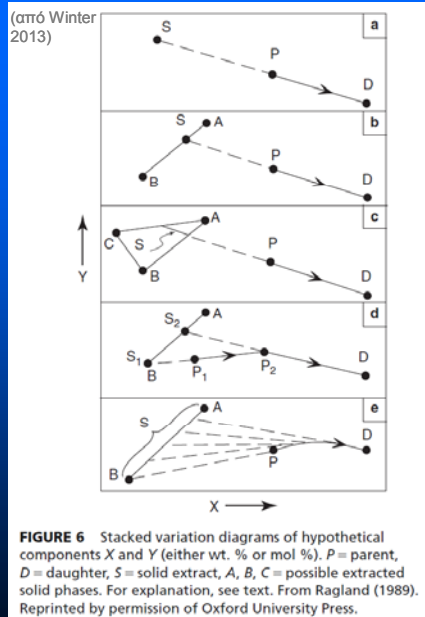


FIGURE 4 Pearce element ratio (PER) diagram of $0.5(\text{Fe} + \text{Mg})/\text{K}$ versus Si/K for two Hawaiian picritic magma suites. From Nicholls and Russell (1990).

Στοιχειακοί λόγοι Pearce

Διαγράμματα διαφοροποίησης



Μαθηματικά και γραφικά μοντέλα μαγματικής εξέλιξης

Ταξινόμηση με Βάση τη Χημική Σύσταση των Πετρωμάτων

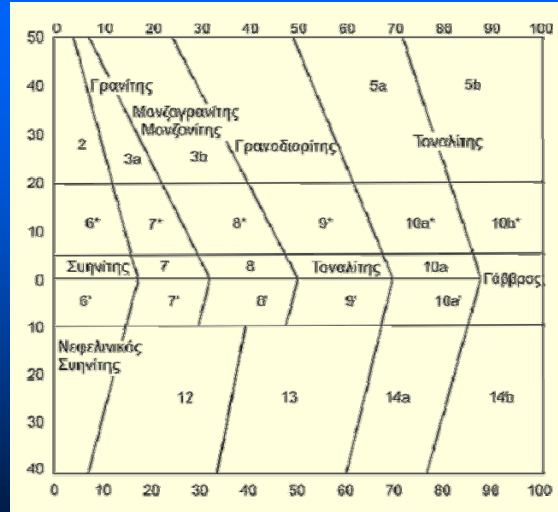
Η CIPW δυνητική (νορμική) σύσταση

- Cross, Iddings, Pirson, Washington (1902)
- Υπολογίζει τη χημική σύσταση ενός πετρώματος σε ένα υποθετικό σύνολο πρότυπων, άνυδρων ορυκτών
- Πλεονέκτημα: ο περιορισμένος αριθμός πρότυπων νορμικών ορυκτών διευκολύνει τη σύγκριση μεταξύ πετρωμάτων
- Αγνοεί επίδραση γεωλογικών διεργασιών και διαφορετικών συνθηκών P-T
- Επικεντρώνεται στη πηγή της ύλης

Η CIPW δυνητική (νορμική) σύσταση

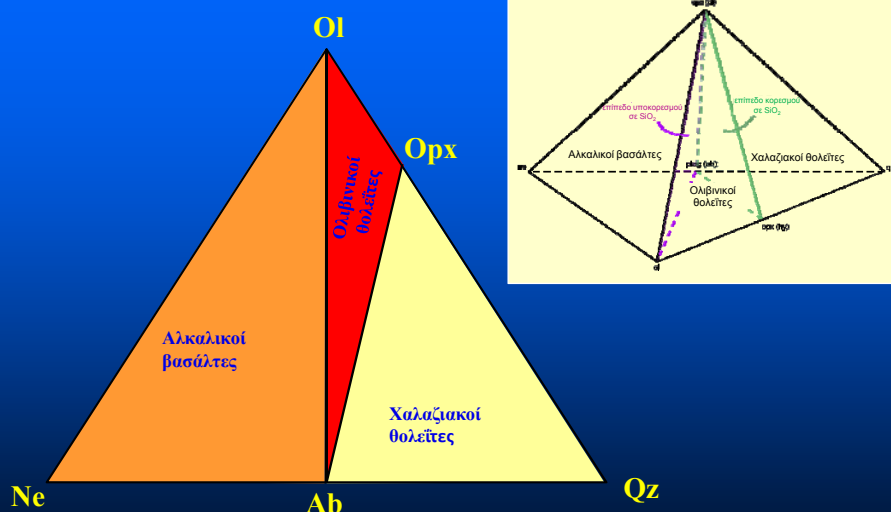
- Πρώτα, κατανέμεται το Si στους αστρίους και μετά στα φεμικά νορμικά ορυκτά.
- Τονίζεται λοιπόν ο βαθμός κορεσμού του πετρώματος σε Si.
- Οι κατηγορίες που προκύπτουν:
 - Πετρώματα υπέρκορα σε Si: νορμικό Q+Hy
 - Πετρώματα κορεσμένα σε Si: νορμικό Hy
 - Πετρώματα ακόρεστα σε Si: νορμικό OI±Ne

Με βάση τη δυνητική τους σύσταση



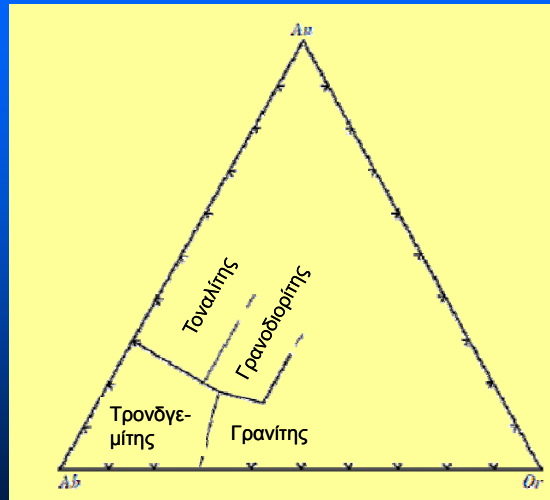
Διάγραμμα ταξινόμησης μαγματικών πετρωμάτων Q'-ANOR'
 $Q' = 100 \times Q / (Q + Or + Ab + An)$, $ANOR' = 100 \times An / (An + Or)$,
 $F' = 100 \times (Ne + Lc + Kp) / (Ne + Lc + Kp + Or + Ab + An)$ (Streckeisen & LeMaitre 1979)

Με βάση τη δυνητική τους σύσταση



Διάγραμμα ταξινόμησης βασάλτικών πετρωμάτων. Το διάγραμμα αποτελεί τη προβολή στη βάση του βασάλτικού τετραέδρου του σχήματος (Yoder and Tilley 1962)

Με βάση τη δυνητική τους σύσταση



Διάγραμμα ταξινόμησης γρανιτικών πετρωμάτων με βάση τα δυνητικά ποσοστά συμμετοχής των αστρίων An: ανορθίτη, Ab: αλβίτη και Or: ορθόκλαστου (Barker 1979)

Με βάση τη χημική τους σύσταση

**ΑΛΚΑΛΙΚΑ
ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ
(ΜΑΓΜΑΤΑ)**

Ακόρεστα

**ΑΣΒΕΣΤΑΛΚΑΛΙΚΕΣ
ΣΕΙΡΕΣ**

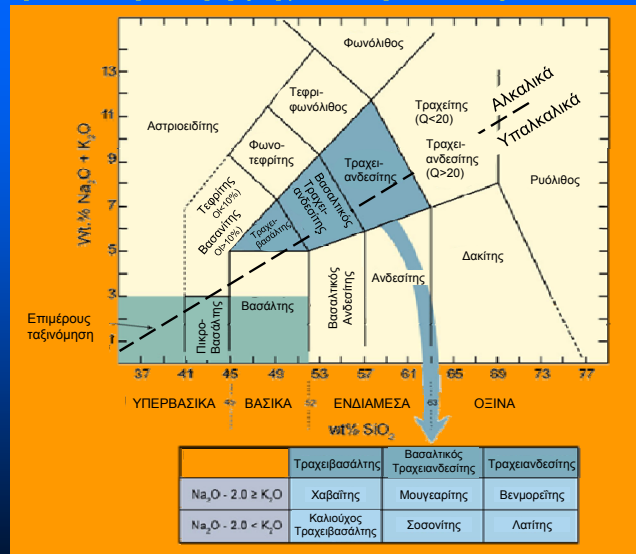
**ΥΠΑΛΚΑΛΙΚΑ
ΠΕΤΡΩΜΑΤΑ
(ΜΑΓΜΑΤΑ)**

ΘΟΛΕΙΤΙΚΕΣ ΣΕΙΡΕΣ

*Κορεσμένα &
Υπέρκορα*

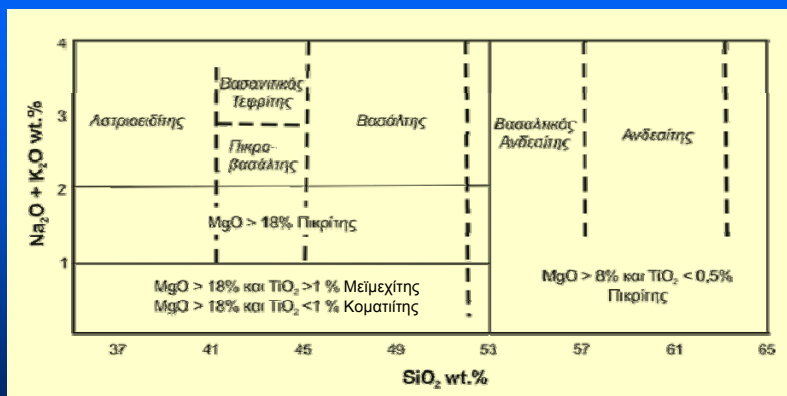
**ΣΟΣΟΝΙΤΙΚΕΣ
ΣΕΙΡΕΣ**

Με βάση τη χημική τους σύσταση



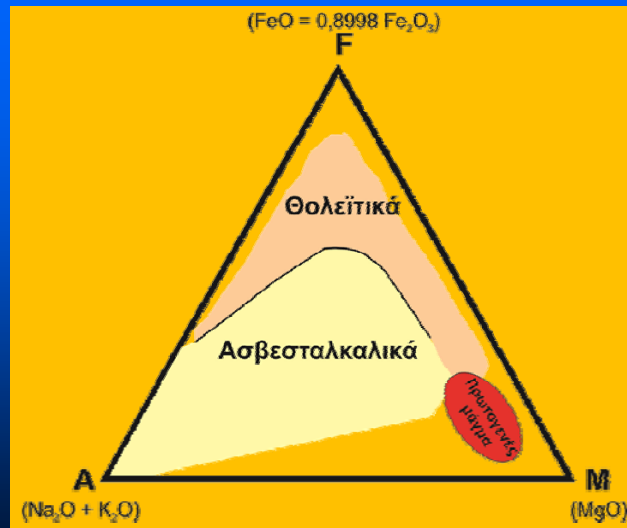
Διάγραμμα ταξινόμησης ηφαιστειακών πετρωμάτων TAS (Total-alkali silica) (από Le Bas *et al.* (1986) *J. Petrol.*, 27, 745-750. Oxford University Press.

Με βάση τη χημική τους σύσταση



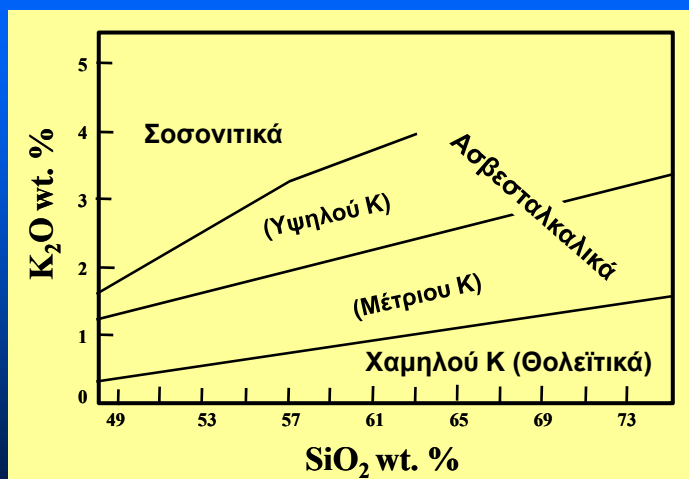
Διάγραμμα ταξινόμησης ηφαιστειακών πετρωμάτων TAS (Total-alkali silica) για πλούσια σε Mg πετρώματα (από Le Bas 2000)

Με βάση τη χημική τους σύσταση



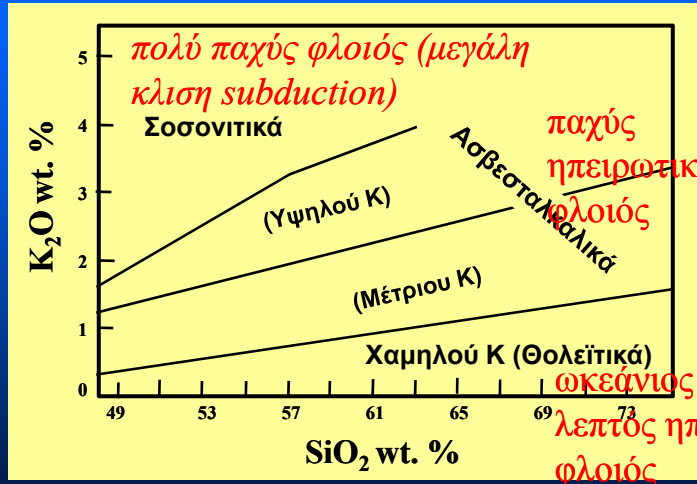
Διάγραμμα AFM ταξινόμησης υπαλκαλικών μαγματικών πετρωμάτων (από Irvine & Baragar 1971)

Με βάση τη χημική τους σύσταση



Διάγραμμα K_2O vs. SiO_2 ταξινόμησης των υπαλκαλικών, μαγματικών πετρωμάτων (από Recserillo & Taylor 1976)

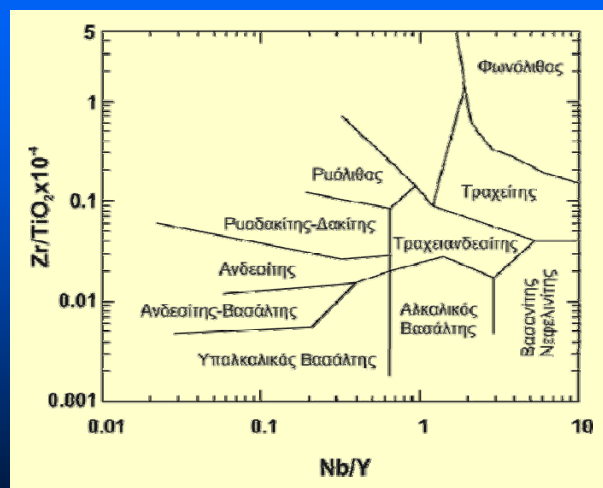
Με βάση τη χημική τους σύσταση



Διάγραμμα K_2O vs. SiO_2 ταξινόμησης των υπαλκαλικών, μαγματικών πετρωμάτων (από Peccerillo & Taylor 1976)

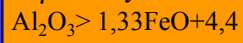
Με βάση τη χημική τους σύσταση

Διάγραμμα Nb/Y vs Zr/TiO_2 , ταξινόμησης ηφαιστειακών πετρωμάτων (από Winchester & Floyd, 1977)

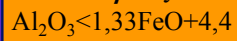


Με βάση τη χημική τους σύσταση

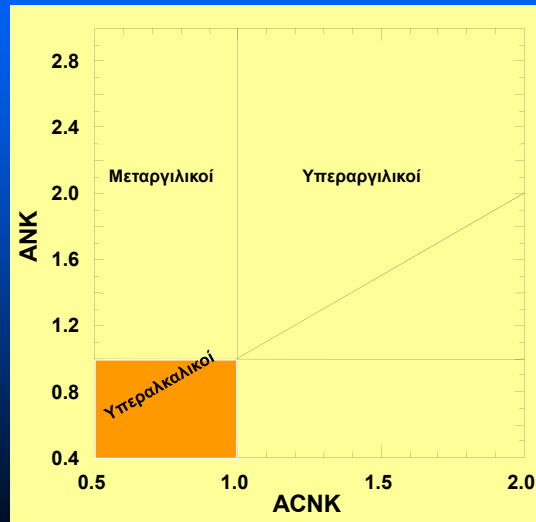
Κομεντίτες:



Παντελλερίτες:



Διάγραμμα ACNK vs ANK
ταξινόμησης γρανιτικών
πετρωμάτων (από Maniar &
Piccoli 1989)



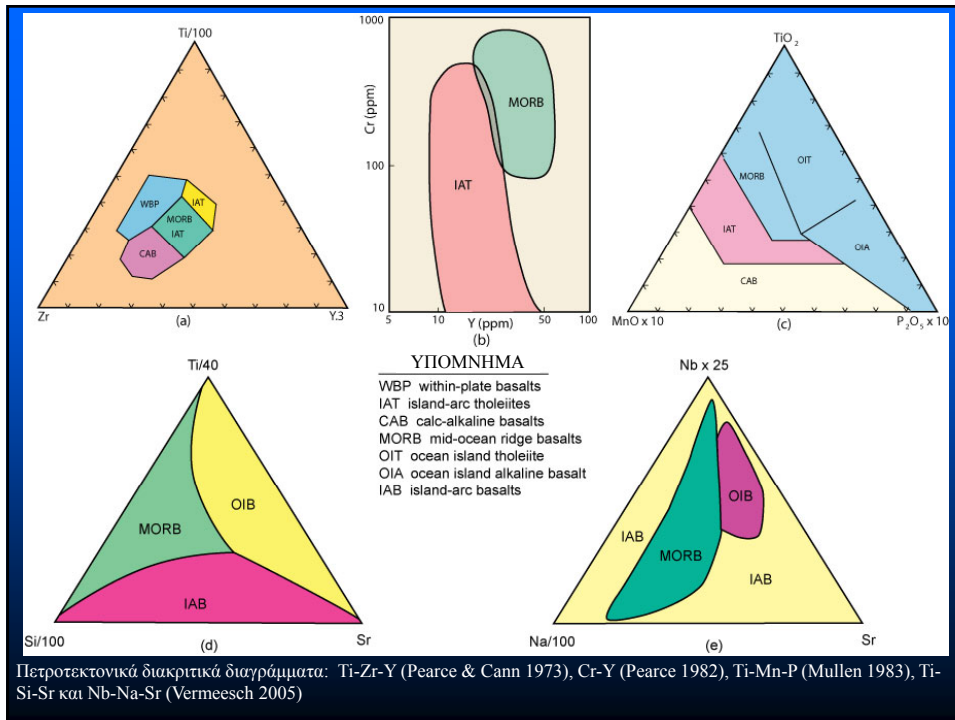
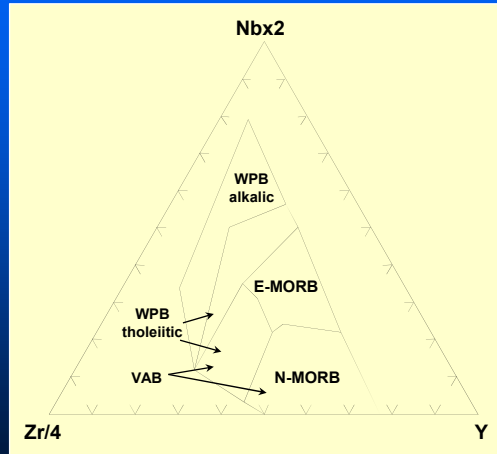
Χρήση Ιχνοστοιχείων ως Εργαλείο για τον Καθορισμό Παλαιοτεκτονικών Περιβαλλόντων

Ιχνοστοιχεία

- Εξαιρετικά χρήσιμα για την αναγνώριση παλαιοτεκτονικών περιβαλλόντων που πλέον δεν είναι αναγνωρίσιμα
- Η προσέγγιση αυτών είναι καθαρά εμπειρική και βασίζεται σε γεωχημικές αναλύσεις πετρωμάτων από σύγχρονα περιβάλλοντα
- Εργαζόμαστε με στοιχεία δυσκίνητα από δευτερογενείς διεργασίες

Με βάση τη χημική τους σύσταση

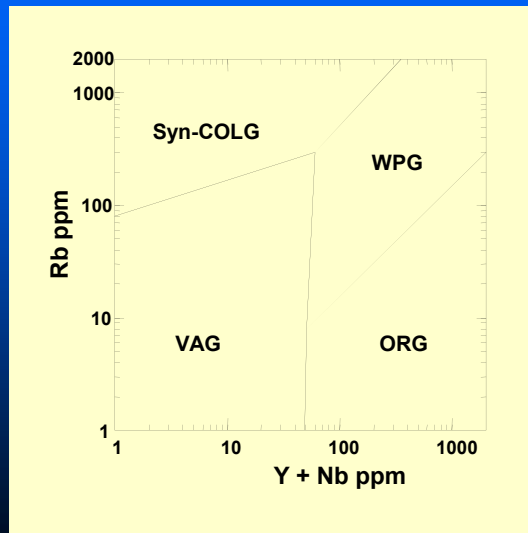
Πετροτεκτονικό
διάγραμμα Nb-Zr-Y,
ταξινόμησης
ηφαιστειακών
πετρωμάτων (από
Meschede 1986)



Πετροτεκτονικά διακριτικά διαγράμματα: Ti-Zr-Y (Pearce & Cann 1973), Cr-Y (Pearce 1982), Ti-Mn-P (Mullen 1983), Ti-Si-Sr και Nb-Na-Sr (Vermeesch 2005)

Με βάση τη χημική τους σύσταση

Πετροτεκτονικό
διάγραμμα Y+Nb vs Rb,
ταξινόμησης γρανιτικών
πετρωμάτων (από Pearce
et al. 1984)



Και μερικές «πετρολογίες» που πρέπει να ξέρουμε

- **CA:** Calc Alkaline
- **CAB:** Calc Alkaline Basalt
- **COLG:** Collision Granite
- **IAT:** Island Arc Tholeiites
- **MORB:** Mid-Ocean Ridge Basalt
- **OIT:** Oceanic Island Tholeiite
- **ORG:** Ocean Ridge Granite
- **VAB:** Volcanic Arc Basalt
- **VAG:** Volcanic Arc Granite
- **WPB:** Within-Plate Basalts Basalt
- **WPG:** Within Plate Granite

Είδη και Σχέσεις Μαγμάτων

Είδη μαγμάτων και περιβάλλοντα λιθοσφαιρικών πλακών

TABLE 7 Magma Series in Specific Plate Tectonic Settings

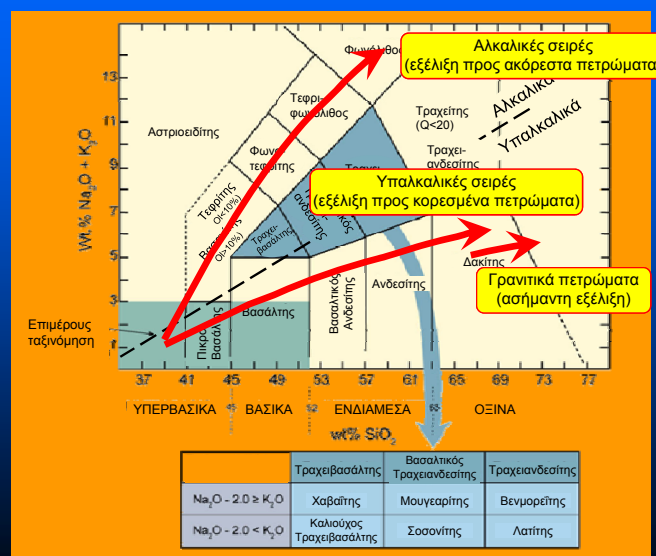
Characteristic Series	<i>Plate Margin</i>		<i>Within Plate</i>	
	Convergent	Divergent	Oceanic	Continental
Alkaline	yes	no	yes	yes
Tholeiitic	yes	yes	yes	yes
Calc-alkaline	yes	no	no	no

After Wilson (1989), p. 11.

Τα Δυο Κύρια Είδη Βασικών Μαγμάτων

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

Μαγματική Εξέλιξη

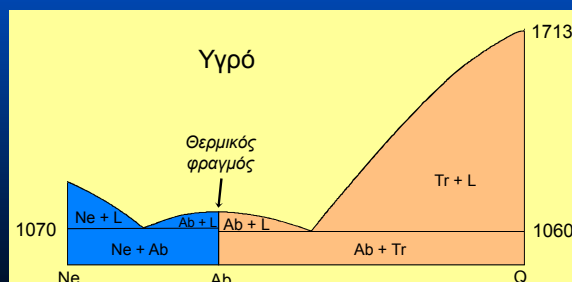


Μαγματική Εξέλιξη

- Τα θολεϊτικά και τα αλκαλικά πετρώματα εξελίσσονται ως ανεξάρτητες σειρές μέσω της μαγματικής διαφοροποίησης, από μια κοινή πηγή (ποια;)
- Θολεΐτες: Μεσωκεάνιες ράχες (σπανιότερα σε ωκεάνια νησιά και ζώνες καταβύθισης)
- Αλκαλικά: Ωκεάνια νησιά και σπανιότερα σε ζώνες καταβύθισης

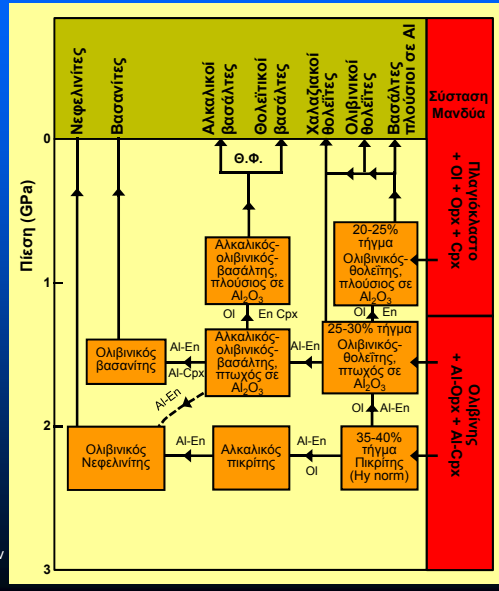
Μαγματική Εξέλιξη

- Δεν μπορεί να προκύψει η μια σειρά από την άλλη με διεργασίες κλασματικής κρυστάλλωσης, σε χαμηλές πιέσεις, λόγω ύπαρξης θερμικού φραγμού



Μαγματική Εξέλιξη

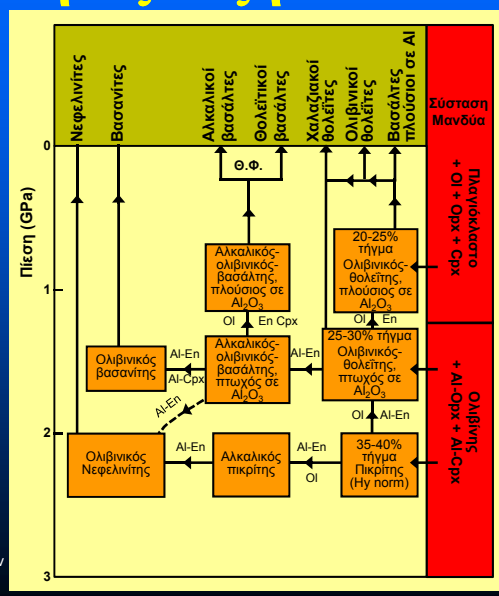
- Η δημιουργία μερικών τμημάτων σε κάποιο βάθος και η κλασματική τους κρυστάλλωση σε μικρότερο μπορεί να οδηγήσει σε ποικιλία μαγμάτων.



Σχηματική απεικόνιση του μοντέλου κλασματικής κρυστάλλωσης των Green & Ringwood (1967) και Green (1969) (από Wyllie 1971: *The Dynamic Earth: Textbook in Geosciences*. John Wiley & Sons.

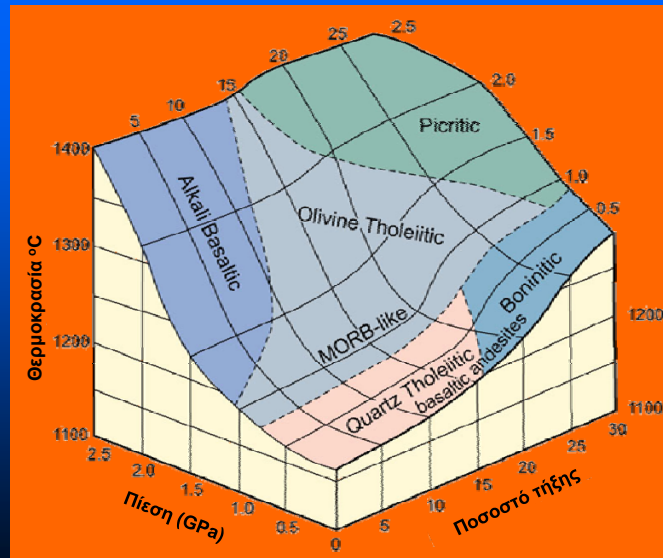
Μαγματική Εξέλιξη

- TH → ALK (μέτριες-υψηλές P)
- Al στον Crx μειώνεται με τη μείωση της P
- Μάγματα μικρού βάθους → πλούσιους σε Al βασάλτες



Σχηματική απεικόνιση του μοντέλου κλασματικής κρυστάλλωσης των Green & Ringwood (1967) και Green (1969) (από Wyllie 1971: *The Dynamic Earth: Textbook in Geosciences*. John Wiley & Sons.

Μαγματική Εξέλιξη



Συσχετισμός των μαγματικών τύπων (από Kushiro 2001)

Ας συνοψίσουμε...(1)

- Η σύσταση «πρωτογενών» βασαλτών εξαρτάται από το βάθος της μερικής τήξης και του υπολειματικού στερεού από τον μανδυακό περιδοτίτη, το βαθμό μερικής τήξης και την ποσότητα και το είδος των πτητικών φάσεων (αν είναι παρούσες).
- Η σύσταση των βασαλτών που φτάνουν στην επιφάνεια της γης ελέγχεται επίσης από την οποιαδήποτε επακόλουθη κλασματική κρυστάλλωση λάβει χώρα κατά την άνοδο

Ας συνοψίσουμε...(2)

- Οι θολεΐτες μπορούν να σχηματιστούν είτε μέσω τήξης σε μικρά βάθη ή μέσω κλασματικής κρυστάλλωσης ολιβίνη από βαθειά ευρισκόμενα πικριτικά τήγματα.
- Οι θολεΐτες ευνοούνται από την παρουσία πλούσιων σε H_2O πτητικών συστατικών.
- Οι φτωχοί σε SiO_2 αλκαλικοί βασάλτες παράγονται μέσω μικρού βαθμού μερική τήξη, πηγών μεγάλου βάθους και πλούσιων σε CO_2 .
- Οι αλκαλικοί βασάλτες μπορούν να προκύψουν και μέσω κλασματώσης Al-rich πυριτικών φάσεων σε μεγάλα βάθη

Συμπεριφορά των Στοιχείων κατά τις Μαγματικές Διεργασίες

Κατανομές των Στοιχείων

■ Κανόνες του Goldschmidt

1. Δυο ιόντα που έχουν τον ίδιο αριθμό οξείδωσης (τυπικό σθένος) και την ίδια ιοντική ακτίνα, μπορούν και ανταλλάσσουν εύκολα θέσεις και εισέρχονται σε στερεά διαλύματα σε ποσότητες ανάλογες με τη συνολική τους περιεκτικότητα

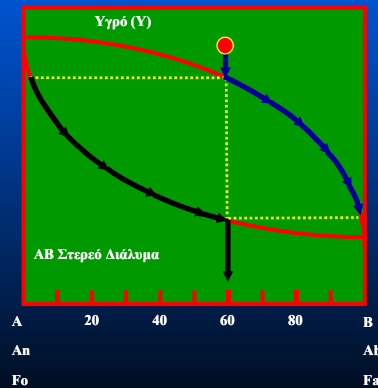
1 H																	2 He																	
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne																	
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar																	
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr																	
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe																	
55 Cs	56 Ba	57 La	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn																	
87 Fr	88 Ra	89 Ac	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg																								
																		58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu			
																		90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No				

- Ποιο στοιχείο θα αντικαθιστά εύκολα τα K και Ca;
- Από ποιο στοιχείο θα αντικαθίσταται εύκολα το Mg;

Κατανομές των Στοιχείων

■ Κανόνες του Goldschmidt

2. Μεταξύ δυο ιόντων με παρόμοια ιοντική ακτίνα και ίδιο αριθμό οξείδωσης, αυτό με τη μικρότερη ακτίνα θα εντάσσεται κατά προτίμηση στη στερεή παρά στην υγρή φάση



Κατανομές των Στοιχείων

■ Κανόνες του Goldschmidt

3. Αν δυο ιόντα έχουν παρόμοια ιοντική ακτίνα και διαφορετικούς αριθμούς οξείδωσης, τότε το ιόν με το μεγαλύτερο Α.Ο. θα εντάσσεται κατά προτίμηση στη στερεή παρά στην υγρή φάση
- Στο εξής θα ονομάζουμε **κλασμάτωση** την άνιση κατανομή ενός ιόντος μεταξύ δυο ανταγωνιστικών (και σε ισορροπία) φάσεων

Κατανομές των Στοιχείων

- Για την κατανομή και την ανταλλαξιμότητα ενός στοιχείου i μεταξύ μιας υγρής (τήγματος) και μιας στερεής φάσης θα ισχύει:



- Η σταθερά K της χημικής ισορροπίας θα είναι:

$$K_D = \frac{X_i^{\text{στερεό}}}{X_i^{\text{υγρό}}}$$

(X = το ποσοστό mol του στοιχείου στο στερεό ή στο υγρό)

Κατανομές των Στοιχείων

- Καθότι τα στοιχεία θεωρούνται πολύ ευδιάλυτα στο τήγμα θα ισχύει:

$$K_D = \frac{C_S}{C_L}$$

C_S και C_L οι συγκεντρώσεις του στοιχείου στο στερεό και στο τήγμα, αντίστοιχα

- Η σταθερά K_D ονομάζεται συντελεστής κατανομής ενός στοιχείου και συμβολίζεται επίσης και ως D

Κατανομές των Στοιχείων

- **Συμβατά** ονομάζονται τα στοιχεία, για τα οποία ισχύει $D \gg 1$ (συγκεντρώνονται κυρίως στο στερεό). Είναι γενικά μικρής ιοντικής ακτίνας και έχουν μικρό A.O. (Fe, Mg, Ni, Cr, Cu, W, Ru, Rh, Pd, Os, Ir, Pt, και Au)
- **Ασύμβατα** ονομάζονται τα στοιχεία, για τα οποία ισχύει $D \ll 1$ (συγκεντρώνονται κυρίως στο τήγμα)

Κατανομές των Στοιχείων

- Τα **ασύμβατα στοιχεία** υποδιαιρούνται επιπλέον σε δυο ομάδες:
- **Υψηλής ισχύος πεδίου** (High Field Strength Elements **HFSE**). Είναι μικρά στοιχεία με μεγάλο φορτίο (REE, Th, U, Ce, Pb^{4+} , Zr, Hf, Ti, Nb, Ta)
- **Λιθόφιλα μεγάλης ιοντικής ακτίνας** (Large Ion Lithophile Elements **LILE**). Έχουν μικρό φορτίο (K, Rb, Cs, Ba, Pb^{2+} , Sr), είναι ευκίνητα, ιδιαίτερα παρουσία ρευστών

Κατανομές των Στοιχείων

- Τα **ασύμβατα στοιχεία** υποδιαιρούνται επιπλέον σε δυο ομάδες:

- Και η τρίτη...

- **Σπάνιες Γαίες** (Rare Earth Elements **REE**).

- Πρακτικά είναι HFSE

- Σχετικά ασύμβατα

- Χαρακτηριστική συμπεριφορά στα ορυκτά

- Σχεδόν ανεπηρέαστες από εξαλλοιωτικές διεργασίες

- Εξαιρετικοί πετρογενετικοί δείκτες!



Δύο δεν είπαμε;;;

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Ac	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg							
		Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu		
		Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No			

Κατανομές των Στοιχείων

- Ο συνολικός συντελεστής κατανομής για ένα πέτρωμα βρίσκεται αν αθροίσουμε αναλογικά τους επιμέρους συντελεστές για τα ορυκτά από τα οποία αποτελείται:

$$D_{i_A} = \sum W_A \cdot D_i$$

- D_{i_A} = συντελεστής κατανομής ενός στοιχείου i στο ορυκτό A
- W_A = εκατοστιαία συμμετοχή του ορυκτού A στο πέτρωμα

Κατανομές των Στοιχείων

- Παράδειγμα: Ο D του Yb γρανατούχο λερζόλιθο (OΙ=65%, Opx=10%, Cpx=20%, Ga=5%)

είναι:

$$D = (0,65 \times 0,049) + (0,10 \times 0,34) + (0,20 \times 0,542) + (0,05 \times 6,167) = 0,483$$

- Η συμβατότητα εξαρτάται από τα ορυκτά και από το είδος του τήγματος

Συντελεστές κατανομής για μερικά κοινά ορυκτά σε βασαλτικά και ανδεσιτικά πετρώματα

	OΙ	Opx	Cpx	Ga	Plg	Amp	ΜΙ
Rb	0.010	0.022	0.031	0.042	0.071	0.29	
Sr	0.014	0.040	0.060	0.012	1.830	0.46	
Ba	0.010	0.013	0.026	0.023	0.23	0.42	
Ni	14	5	7	0.955	0.01	6.8	29
Cr	0.70	10	34	1.345	0.01	2.00	7.4
La	0.007	0.03	0.056	0.001	0.148	0.544	2
Ce	0.006	0.02	0.092	0.007	0.082	0.843	2
Nd	0.006	0.03	0.230	0.026	0.055	1.340	2
Sm	0.007	0.05	0.445	0.102	0.039	1.804	1
Eu	0.007	0.05	0.474	0.243	0.1/1.5*	1.557	1
Dy	0.013	0.15	0.562	1.940	0.023	2.024	1
Er	0.026	0.23	0.583	4.700	0.020	1.740	1.5
Yb	0.049	0.34	0.542	6.167	0.023	1.642	1.4
Lu	0.045	0.42	0.506	6.950	0.019	1.563	

Δεδομένα από Rollinson (1993), *Eu²⁺/Eu³⁺

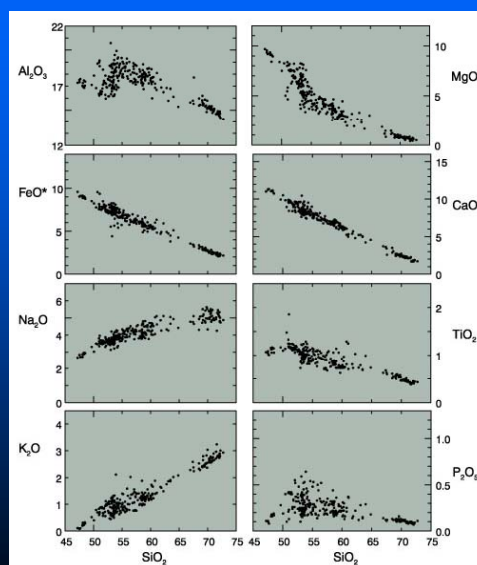
Προβολές σε Διαγράμματα

Διαγράμματα Διαφοροποίησης

- Τα δεδομένα των χημικών αναλύσεων προβάλλονται σε διαγράμματα των οποίων η τετμημένη είναι κάποιο στοιχείο που μεταβάλλεται συστηματικά με τη διαφοροποίηση

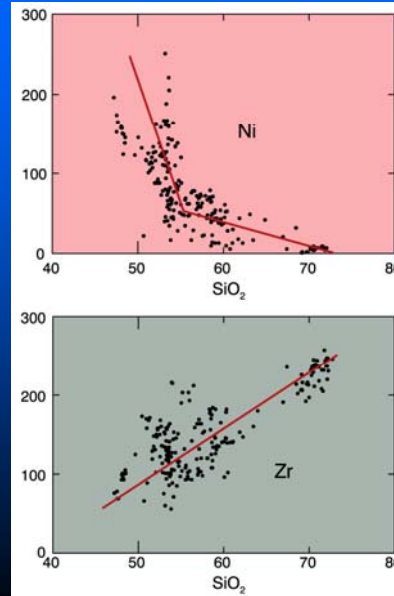
Διαγράμματα Διαφοροποίησης

- Πιο συχνά χρησιμοποιούνται τα SiO_2 (διαγράμματα Harker), MgO , FeO/MgO , Zr κλπ.



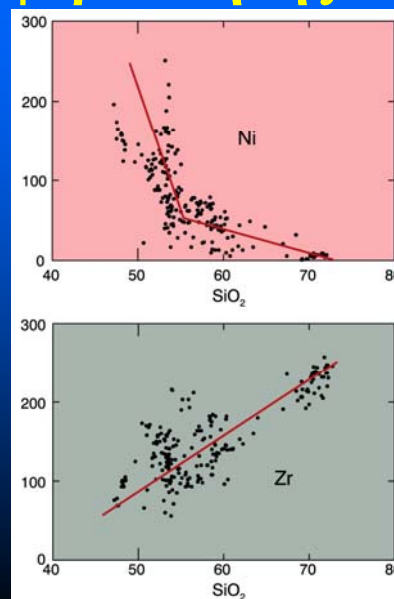
Διαγράμματα Διαφοροποίησης

- Πολλά ιχνοστοιχεία συμμετέχουν σε μια φάση
- Έτσι, η προβολή τους ως πορεία υγρού υποδεικνύει την κρυστάλλωση (ή τήξη) των φάσεων αυτών
- Π.χ. Ni στον ολιβίνη, Zr στο ζirkόνιο, Hf, Nb, K/Rb στην αμφίβολο, K/Ba στον Κ-άστριο, Ca, Sr στα πλαγιόκλαστα, κ.λ.π.



Διαγράμματα Διαφοροποίησης

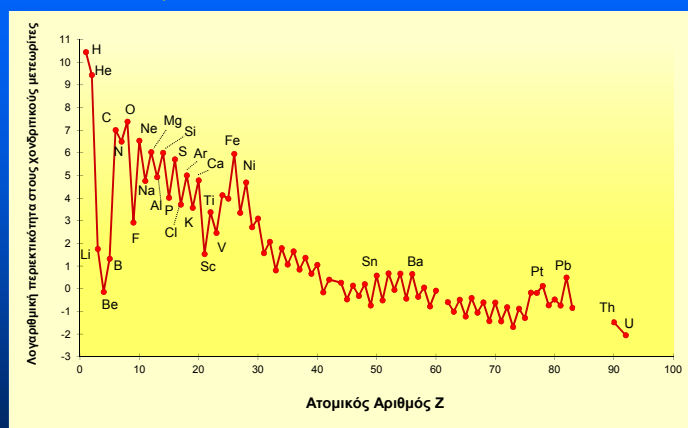
- Τα ασύμβατα ιχνοστοιχεία έχουν την τάση να συγκεντρώνονται στο τήγμα
- Αντικατοπτρίζουν διαρκώς την κατάσταση του τήγματος κατά τη διαδικασία κρυστάλλωσης ή τήξης
- Αποτελούν εξαιρετικούς πετρογενετικούς δείκτες



Σπάνιες Γαίες (REE)

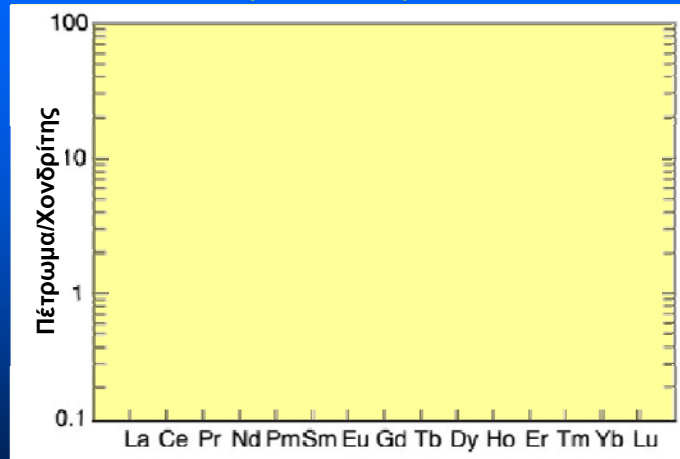
- Αποτελούν εξαιρετικούς πετρογενετικούς δείκτες
- Έχουν παρόμοιες χημικές ιδιότητες και επομένως συμπεριφέρονται όλες με παρόμοιο τρόπο κατά τις μαγματικές διεργασίες
- Συνήθως προβάλλονται σε κανονικοποιημένα αραχνοδιαγράμματα (ως προς χονδρίτες, MORB, πρωτογενή μανδύα κ.λ.π.) προκειμένου να απαλείψουμε το φαινόμενο Oddo-Harkins

Φαινόμενο Oddo-Harkins



- Τα στοιχεία με άρτιους ατομικούς αριθμούς είναι αφθονότερα στη φύση

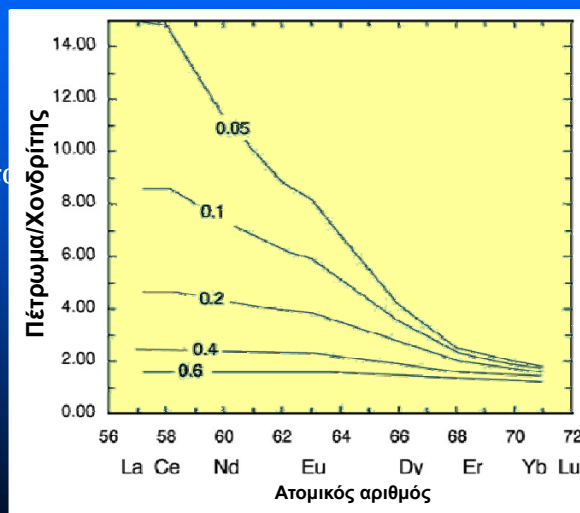
Σπάνιες Γαίες (REE)



Αύξηση ατομικού αριθμού
Μείωση ασυμβατότητας

Σπάνιες Γαίες (REE)

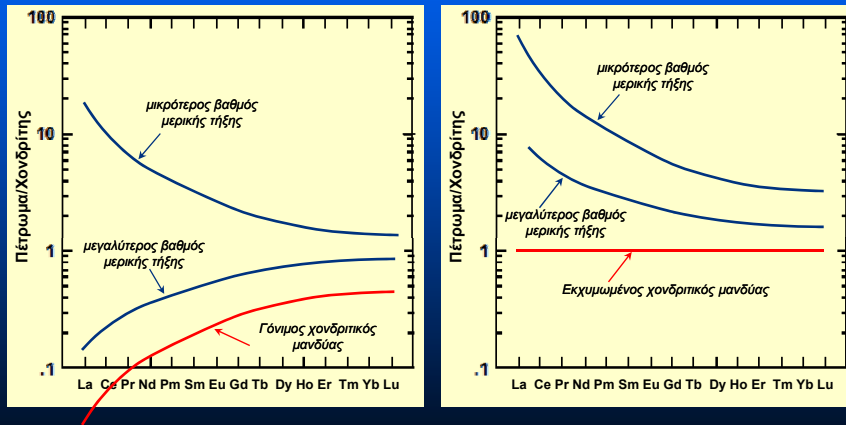
- Σε χαμηλούς βαθμούς μερικής τήξης τα πιο ασύμβατα στοιχεία εμπλουτίζονται στο τήγμα
- Επομένως σε πετρώματα από μικρούς βαθμούς τήξης μεγαλύτερη συγκέντρωση LREE
- Με την αύξηση του τήγματος, η περιεκτικότητα τους «αραιώνει»



Συγκεντρώσεις REE κανονικοποιημένες ως προς χονδρίτη για τήγματα που έχουν προέλθει από διάφορους βαθμούς τήξης (αριθμοί στις καμπύλες) από έναν υποθετικό γρανατώχο λερζόλιθο (από Winter 2001)

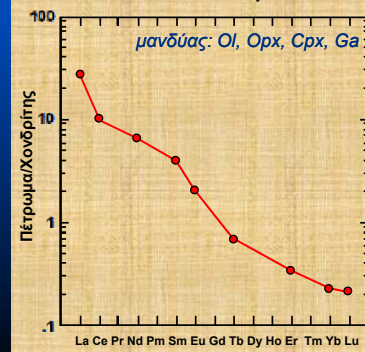
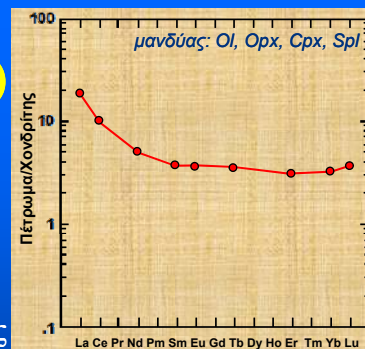
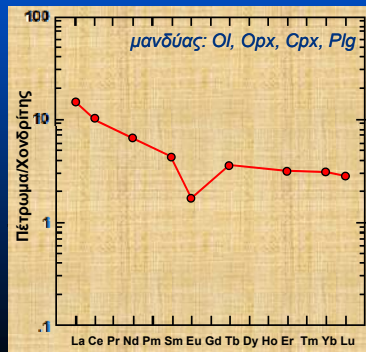
Σπάνιες Γαίες (REE)

- Η μορφή των γραφημάτων μπορεί να υποδείξει τον τύπο της πηγής, χωρίς όμως να είναι αδιαμφισβήτητο



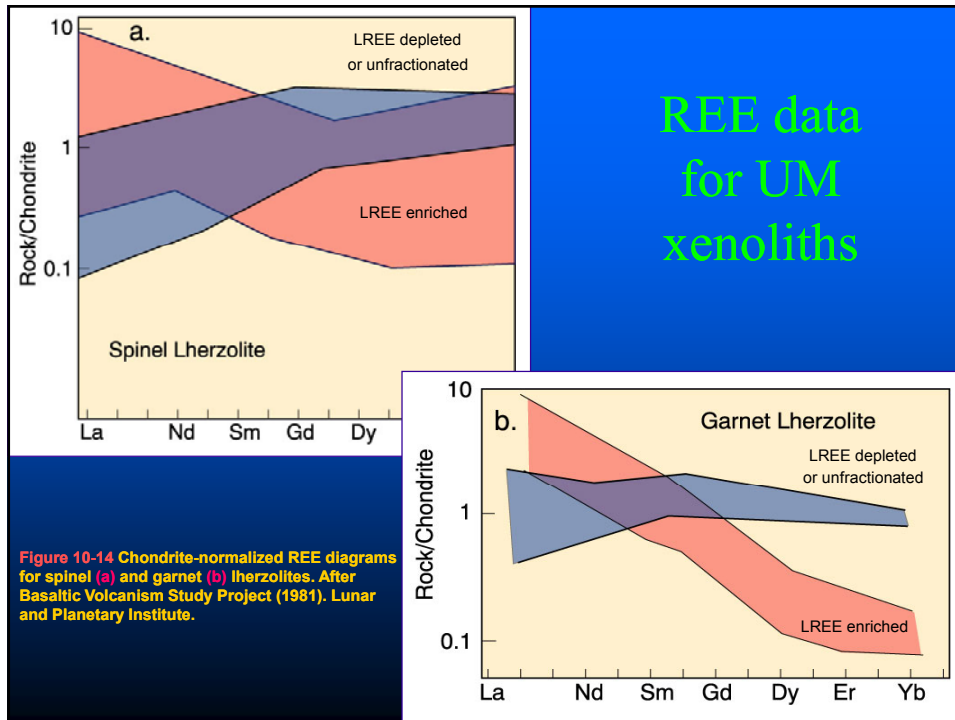
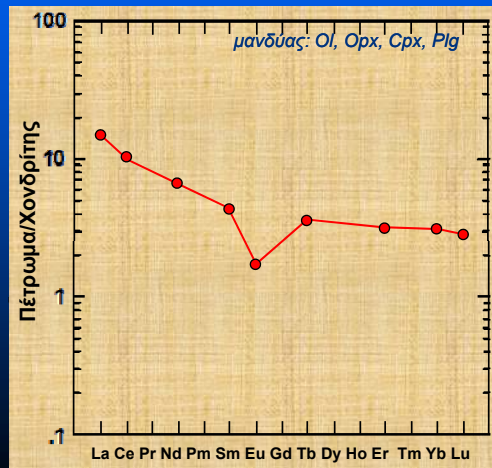
Σπάνιες Γαίες (REE)

- Η παρουσία γρανάτη στην πηγή έχει ως αποτέλεσμα την κλασμάτωση των LREE στο παράγωγο τήγμα
- Η παρουσία πλαγιοκλάστου αντίστοιχα δημιουργεί χαρακτηριστικές αρνητικές ανωμαλίες στο Eu



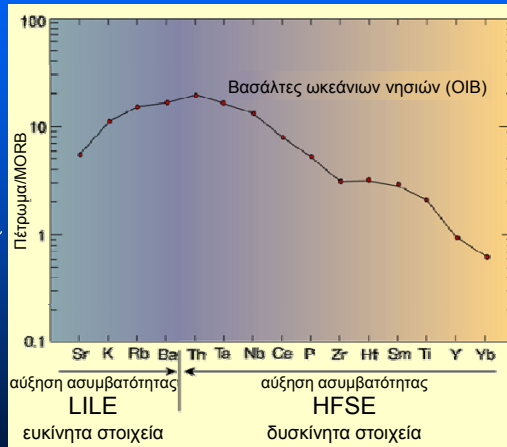
Μια διάσημη ανωμαλία!

- Το Eu κλασματώνεται συχνά στα διαγράμματα REE όταν το πλαγιόκλαστο είναι μια φάση που κρυσταλλώνεται ή όταν το πλαγιόκλαστο είναι υπολειμματική φάση στην πηγή
- Το ευρώπιο παρουσιάζει μεγάλο συντελεστή κατανομής στο πλαγιόκλαστο



Άλλοι τύποι αραχνοδιαγραμμάτων

- Ως επέκταση του αραχνοδιαγράμματος REE μπορούν να χρησιμοποιηθούν και άλλοι τύποι αραχνοδιαγραμμάτων
- Συνήθως διαχωρίζονται τα LILE από τα HFSE και διατάσσονται με σειρά ασυμβατότητας



Μέση σύσταση των βασαλτών ωκεάνιων νησιών στο αραχνοδιάγραμμα ιχνοστοιχείων κανονικοποιημένων ως προς MORB (Pearce 1983). Τα δεδομένα είναι από τους Sun & McDonough (1989) (από Winter 2001).