

Πετρολογία Μαγματικών και Μεταμορφωμένων Πετρωμάτων

ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΙΚΗ ΑΠΕΙΚΟΝΙΣΗ

ΟΡΥΚΤΩΝ ΦΑΣΕΩΝ

&

ΟΡΥΚΤΟΛΟΓΙΚΩΝ ΠΑΡΑΓΕΝΕΣΕΩΝ

Διαγραμματική απεικόνιση

- Μια ομάδα πετρωμάτων θα παρουσιάσει διαφορές στην ορυκτολογική σύσταση που θα αντιστοιχούν στις διαφορές των X_{bulk}
- Εφ'όσον τα ορυκτά βρίσκονται σε ισορροπία → καθορισμένη σχέση μεταξύ ορυκτολογικής και χημική σύστασης
- Αυτή η σχέση θα πρέπει να μεταβάλλεται ανάλογα με τις εξωτερικές συνθήκες που επικρατούν
- Κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες ή σε κάποια όρια εξωτερικών συνθηκών πετρώματα με την ίδια χημική σύσταση → ίδια ορυκτολογική σύσταση

Διαγραμματική απεικόνιση

- Η σχέση αυτή ελέγχεται από τον κανόνα των φάσεων

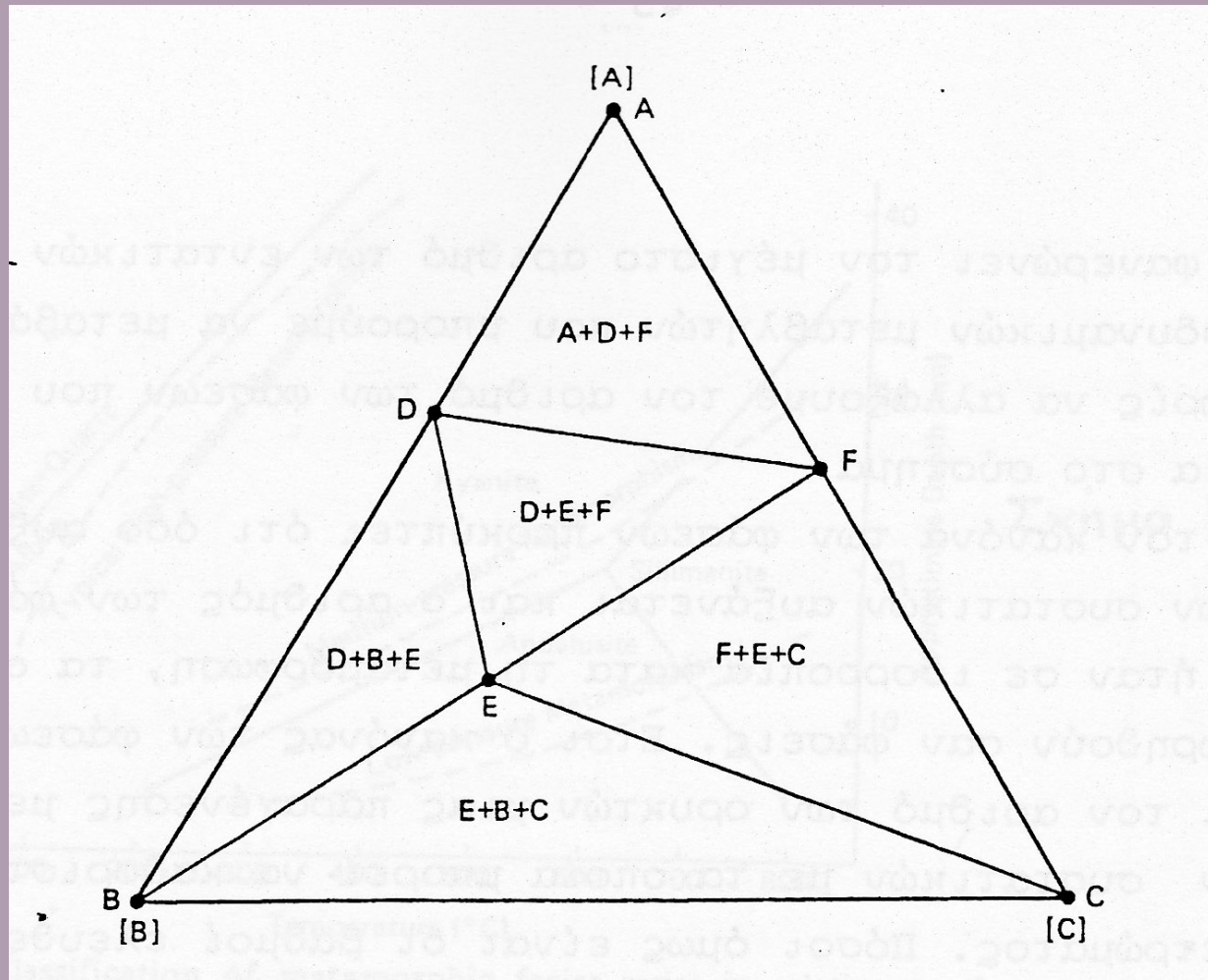
$$F = C + 2 - \varphi \geq 0$$

- $F \rightarrow$ τον μέγιστο αριθμό εντατικών θερμοδυναμικών μεταβλητών που μπορούμε να μεταβάλουμε ανεξάρτητα, χωρίς να αλλάξουμε τον αριθμό των φάσεων που υπάρχουν σε ισορροπία στο σύστημα

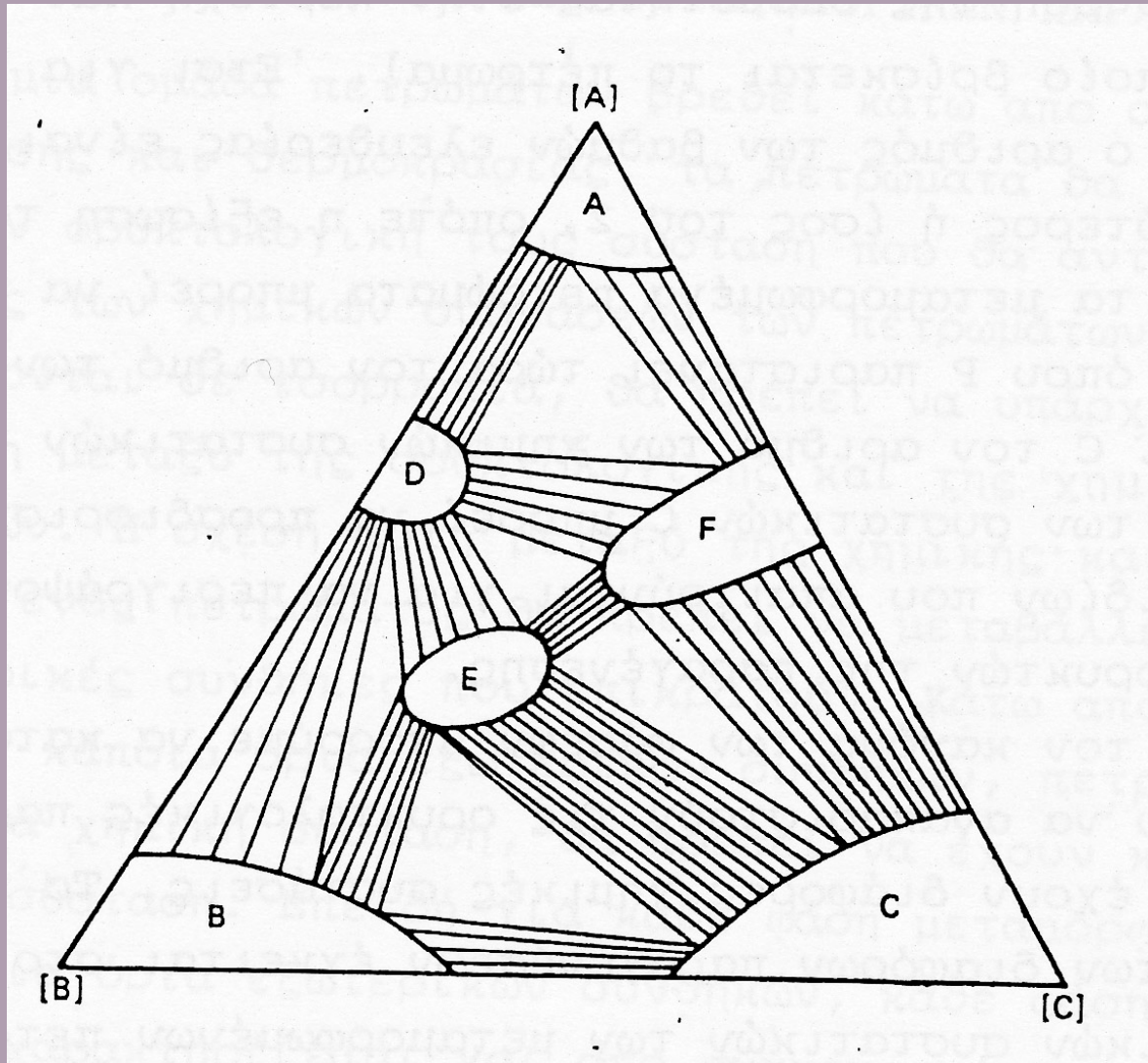
Διαγραμματική απεικόνιση

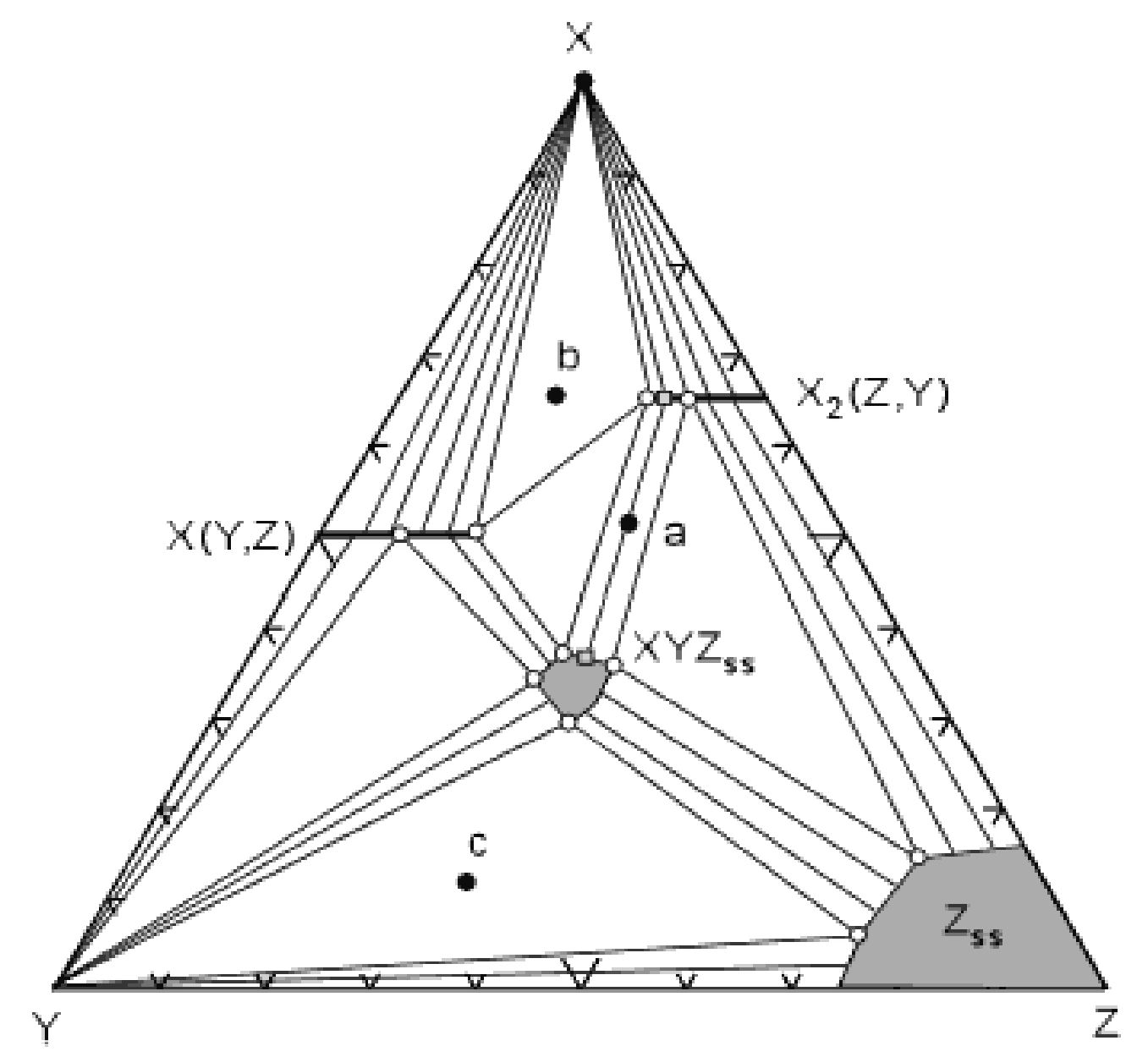
- Όσο αυξάνεται ο αριθμός των συστατικών αυξάνεται και ο αριθμός των φάσεων
- Πόσοι όμως είναι οι βαθμοί ελευθερίας ενός μεταμορφωμένου πετρώματος;
- $F = C + 2 - \varphi \geq 2$ (εφόσον P και T προσδιορίσιμες)
- Άρα $\varphi \leq C$ (**ορυκτολογικός κανόνας των φάσεων**)
- Με βάση τον κανόνα των φάσεων → διαγράμματα
- Πρόβλημα: ο αριθμός των κύριων χημικών συστατικών των μεταμορφωμένων πετρωμάτων είναι πολύ μεγαλύτερος από αυτόν που μπορούμε να θεωρήσουμε σε ένα διάγραμμα δύο διαστάσεων

Διαγραμματική απεικόνιση



Διαγραμματική απεικόνιση

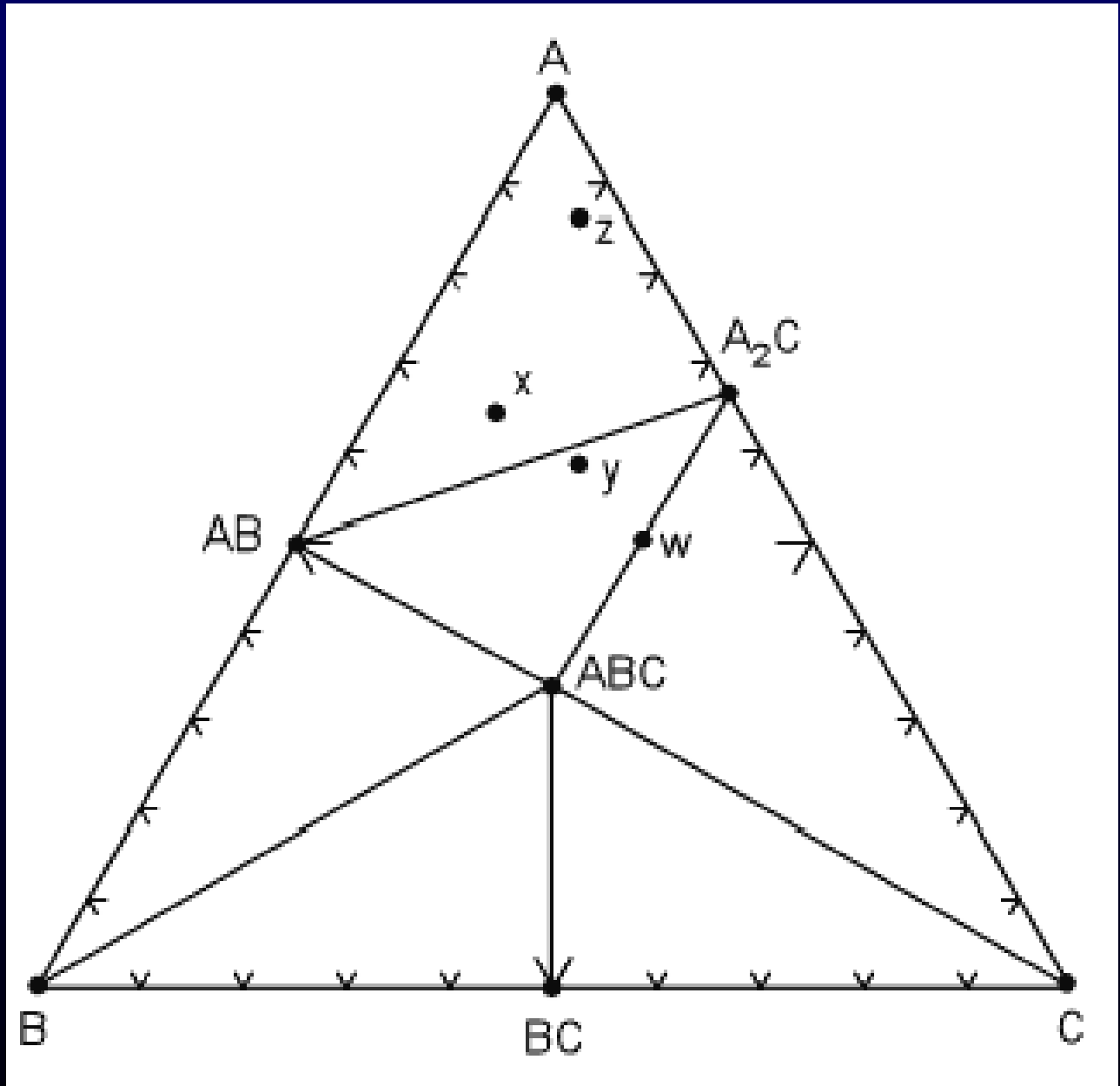




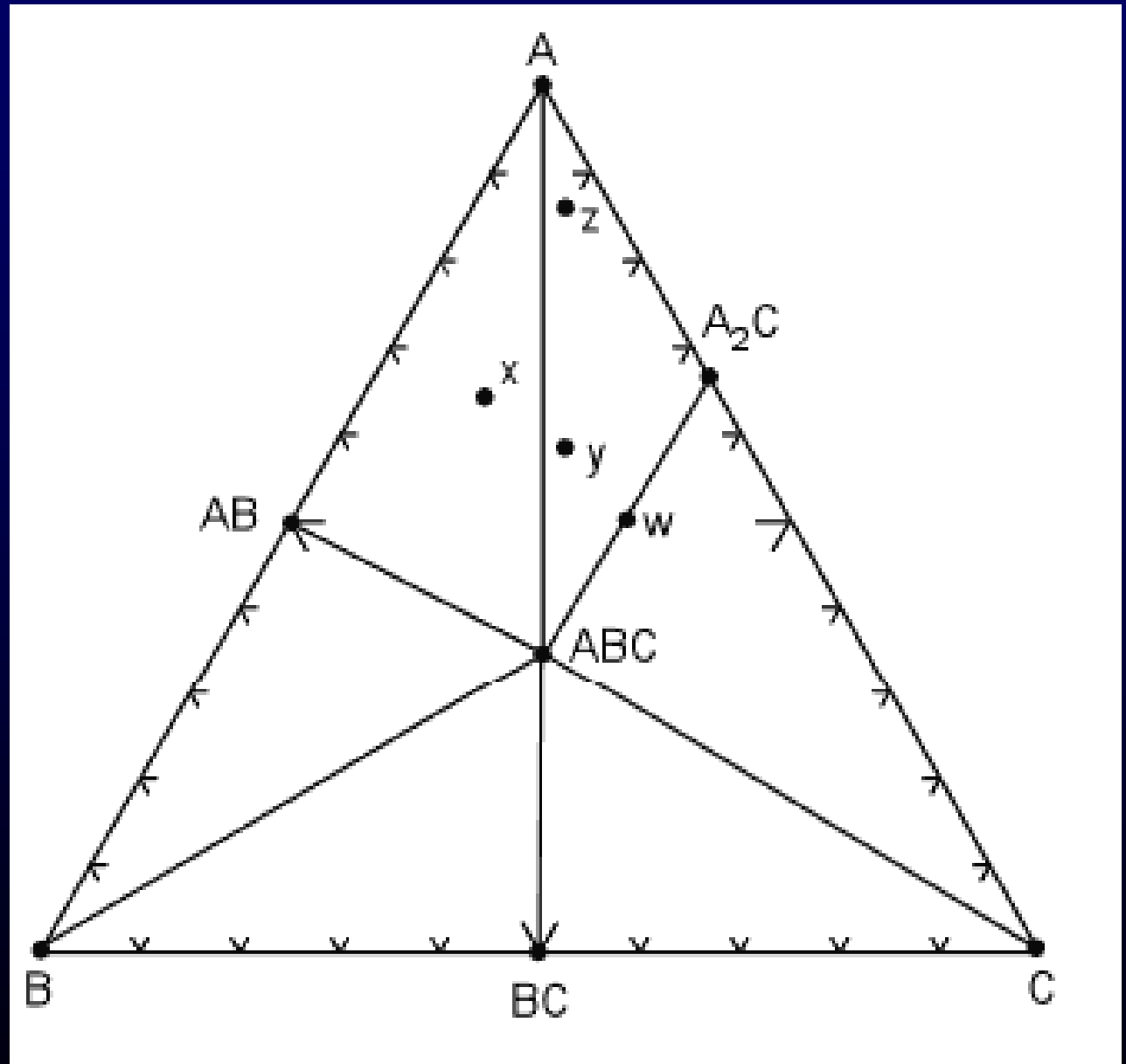
Βασικοί μηχανισμοί λειτουργίας των τριγωνικών διαγραμμάτων

Η τοπολογία των διαγραμμάτων θα μεταβάλλεται με την αλλαγή των μεταμορφικών συνθηκών.

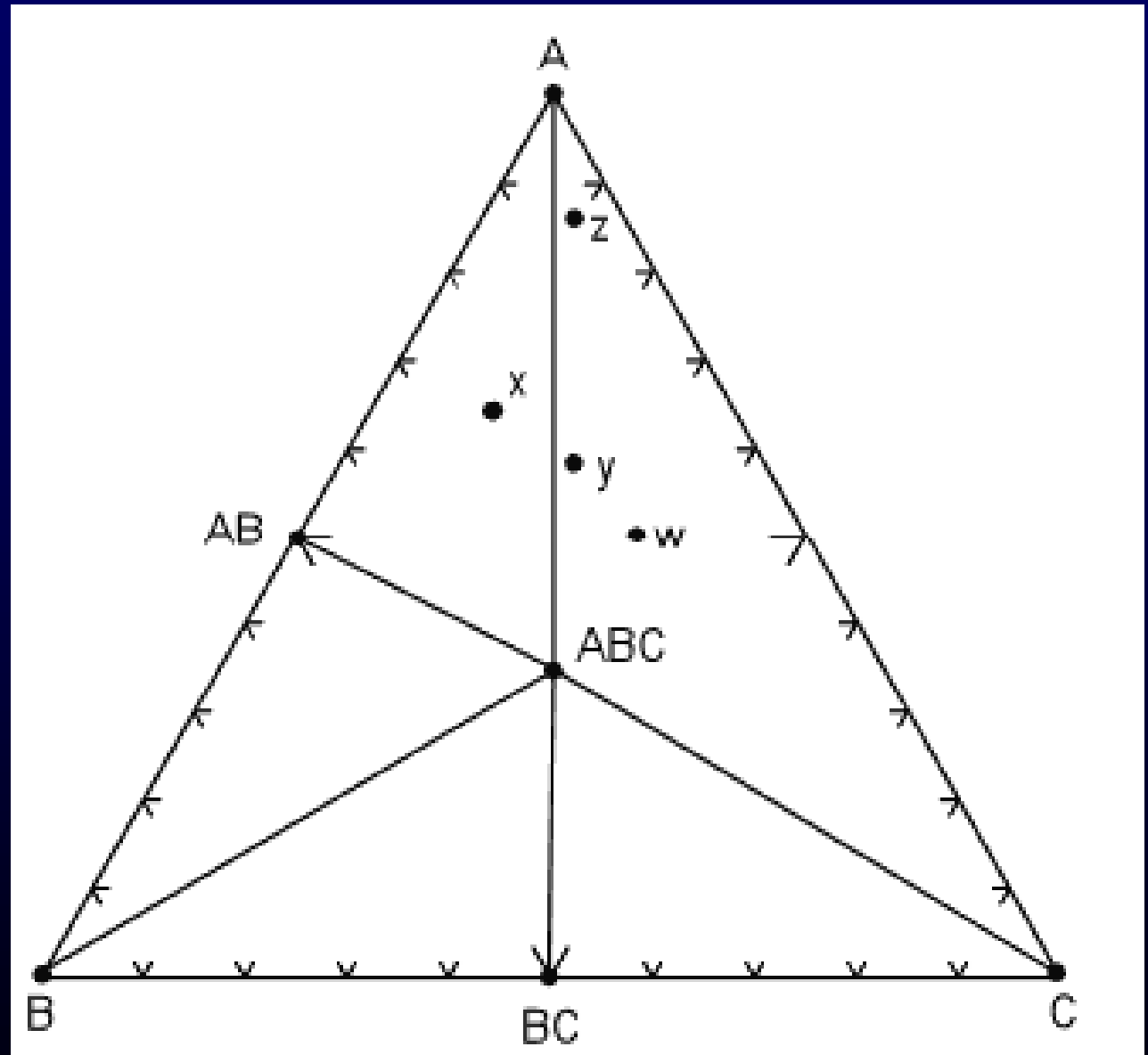
Οι μεταβολές αυτές θα σας βοηθούν τις περισσότερες φορές να αναγνωρίσετε μεταμορφικές αντιδράσεις.



1^η περίπτωση:

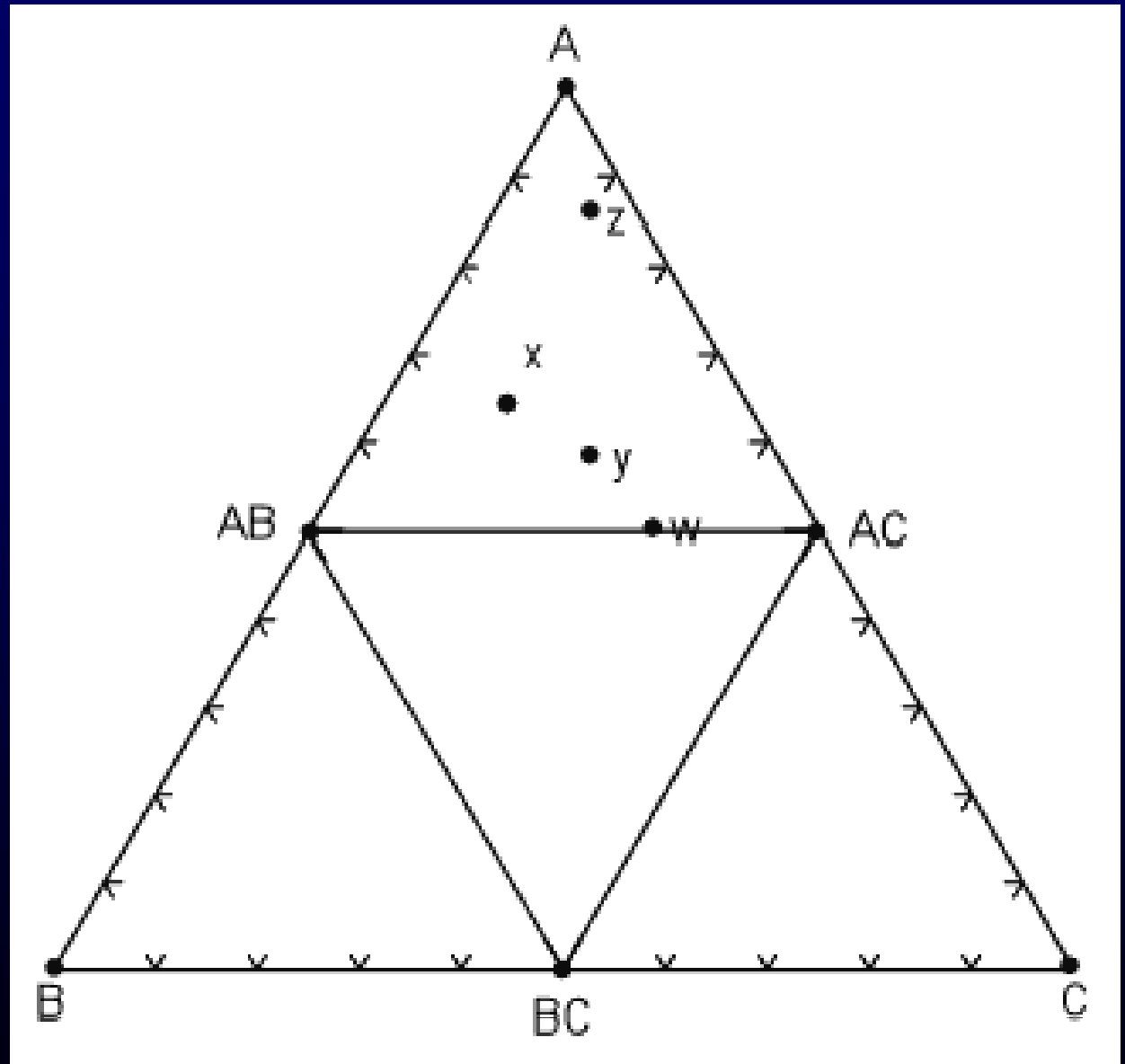


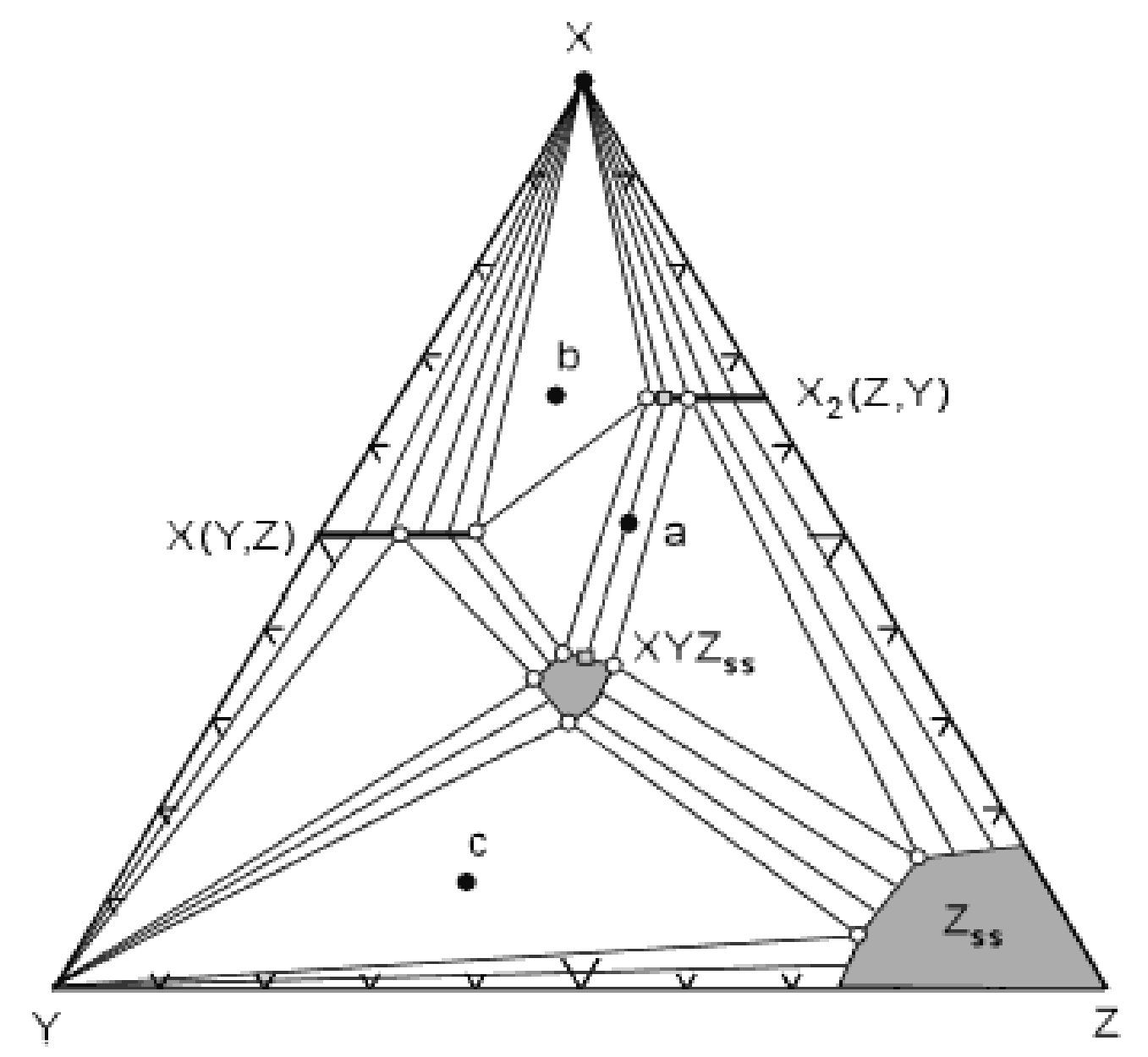
2^η περίπτωση:



3^η περίπτωση:

$$2ABC \rightarrow AB+AC+BC$$





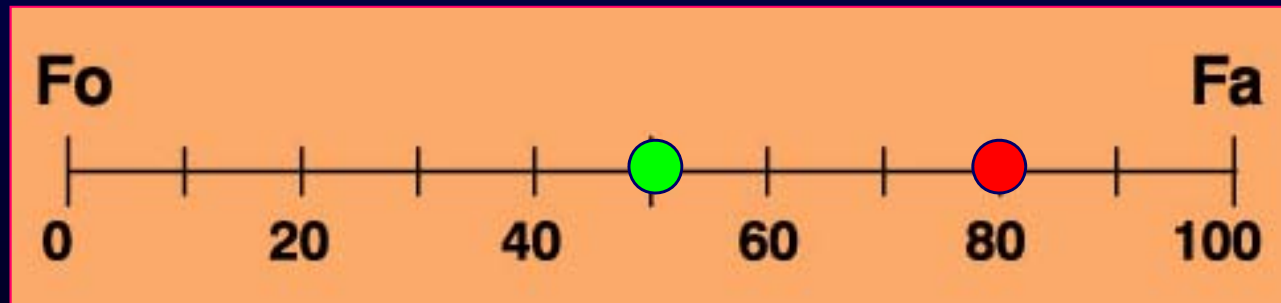
Ευσταθείς Ορυκτολογικοί Συνδυασμοί στα Μεταμορφωμένα Πετρώματα

- Ορυκτολογικοί Συνδυασμοί Ισορροπίας
- Σε κατάσταση ισορροπίας, η ορυκτολογία (και η σύσταση κάθε ορυκτού) καθορίζεται από τα T , P , και X
- Ο όρος “Παραγένεση” αναφέρεται σε ένα τέτοιο ακριβώς ορυκτολογικό συνδυασμό
- Υπολειμματικά ορυκτά ή νέα προϊόντα εξαλλοιώσεων παραλείπονται

Χημειο-γραφικά Διαγράμματα

Γραφική αναπαράσταση της χημείας των ορυκτο-
λογικών συνδυασμών

Ένα απλό παράδειγμα: το σύστημα του ολιβίνη σαν
ένα γραμμικό διάγραμμα δύο συστατικών



$$= \text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$$

Χημειο-γραφικά Διαγράμματα

- Για να ισχύουν τα διαγράμματα πρέπει να αναφέρονται σε ένα συγκεκριμένο εύρος συνθηκών P-T, όπως μία ζώνη σε μία μεταμορφική περιοχή, γιατί τόσο η σταθερότητα όσο και η ομαδοποίησή τους μεταβάλλονται ανάλογα με τη μεταβολή των P-T
- Σε διαφορετικούς βαθμούς μεταμόρφωσης τα διαγράμματα διαφοροποιούνται
 - ↳ Νέα ευσταθή ορυκτά
 - ↳ Διαφορετικές ομαδοποιήσεις ορυκτών → διαφορετικές συνδετικές γραμμές ενώνουν διαφορετικές συνυπάρχουσες φάσεις

Χημειο-γραφικά Διαγράμματα για Μεταμορφωμένα Πετρώματα

- Τα συνήθη πετρώματα περιέχουν τα κύρια στοιχεία: SiO_2 , Al_2O_3 , K_2O , CaO , Na_2O , FeO , MgO , MnO και H_2O άρα $C = 9$
- **Τρία** συστατικά είναι ωστόσο ο μέγιστος αριθμός τον οποίο μπορούμε να χειρισθούμε εύκολα στις δύο διαστάσεις
- Ποια είναι η σωστή επιλογή των συστατικών;
- Χρησιμοποιούμε τις παρακάτω μεθόδους απλούστευσης:

1) «Παραβλέπουμε» απλά κάποια συστατικά

- Ιχνοστοιχεία
- Στοιχεία που μετέχουν σε μία μόνο φάση
(μπορούμε να παραβλέψουμε συστατικό και φάση δίχως παραβίαση του κανόνα των φάσεων)
- Πλήρως ευκίνητα συστατικά

2) Συνδυάζουμε συστατικά

- ☞ Συστατικά που αλληλο-αντικαταστώνται σε στερεά διαλύματα: (π.χ. Fe + Mg)

3) Περιορίζουμε τον τύπο πετρωμάτων τα οποία πρόκειται να προβάλλουμε

4) Χρησιμοποιούμε την μέθοδο της προβολής

Το διάγραμμα ACF

- Προβάλλονται παραγενέσεις **βασικών** πετρωμάτων σε ένα απλουστευμένο τριγωνικό διάγραμμα 3 συστατικών
- Προσέξτε τα ορυκτά που εμφανίζονται ή εξαφανίζονται κατά τη διάρκεια της μεταμόρφωσης → δείκτες βαθμού μεταμόρφωσης

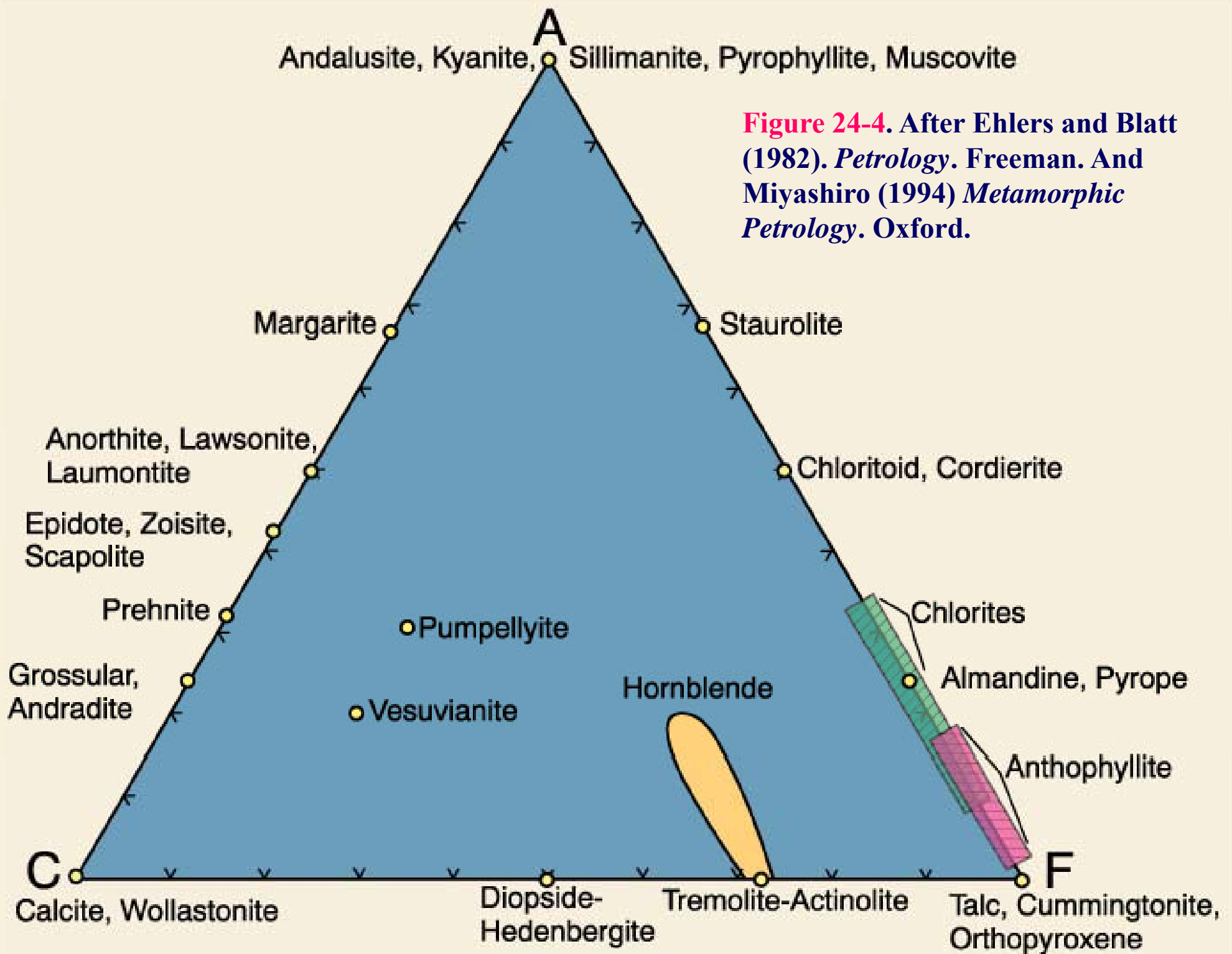


Figure 24-4. After Ehlers and Blatt (1982). *Petrology*. Freeman. And Miyashiro (1994) *Metamorphic Petrology*. Oxford.

Το διάγραμμα ACF

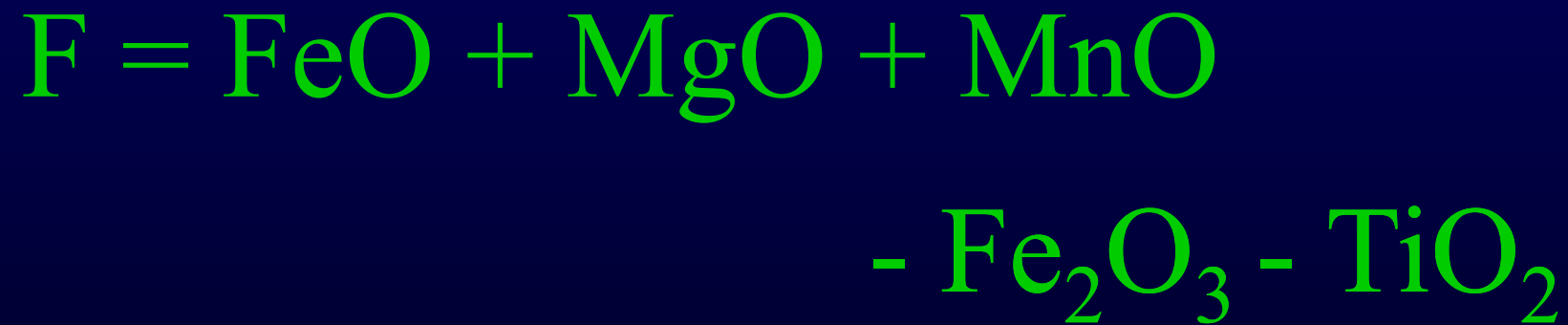
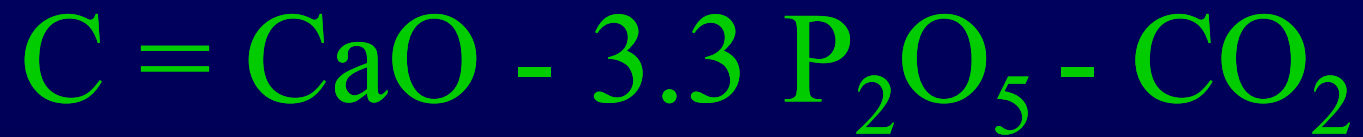
- Τα τρία *ψευδο*-συστατικά υπολογίζονται χρησιμοποιώντας τις μοριακές αναλογίες:



$A = Al_2O_3 + Fe_2O_3 - Na_2O - K_2O$ Γιατί αφαιρούμε?

- Na και K στα συνήθη βασικά πετρώματα συνδυάζονται με το Al \rightarrow K-ούχο άστριο και Αλβίτη
- Στο ACF ενδιαφερόμαστε μόνο για τα άλλα μεταμορφικά ορυκτά που περιέχουν K, και άρα μόνο για την ποσότητα του Al_2O_3 επιπλέον εκείνης που συνδυάζεται με τα Na_2O και K_2O (σε αλβίτη και K-ούχο άστριο)
- Επειδή η αναλογία Al_2O_3 προς Na_2O ή K_2O στους αστρίους είναι 1:1, αφαιρούμε από το Al_2O_3 **μία** ποσότητα ισοδύναμη με τα Na_2O και K_2O στην ίδια αναλογία 1:1

Το διάγραμμα ACF



Το διάγραμμα ACF

Χρησιμοποιώντας αυτά τα 3 ψευδο-συστατικά, ο Eskola κατάφερε να μειώσει τον αριθμό των συστατικών στα βασικά πετρώματα από 8 σε 3

- Το νερό αγνοείται θεωρώντας το σαν τελείως ευκίνητο
- Το SiO_2 απλά παραβλέπεται
 - ☞ Στην ουσία αυτό ισοδυναμεί με προβολή από αυτό
- Για να είναι πραγματικά έγκυρο ένα προβαλλόμενο διάγραμμα φάσεων, πρέπει η φάση από την οποία προβάλλουμε να είναι παρούσα στην παραγένεση που αναφερόμαστε

Το διάγραμμα ACF

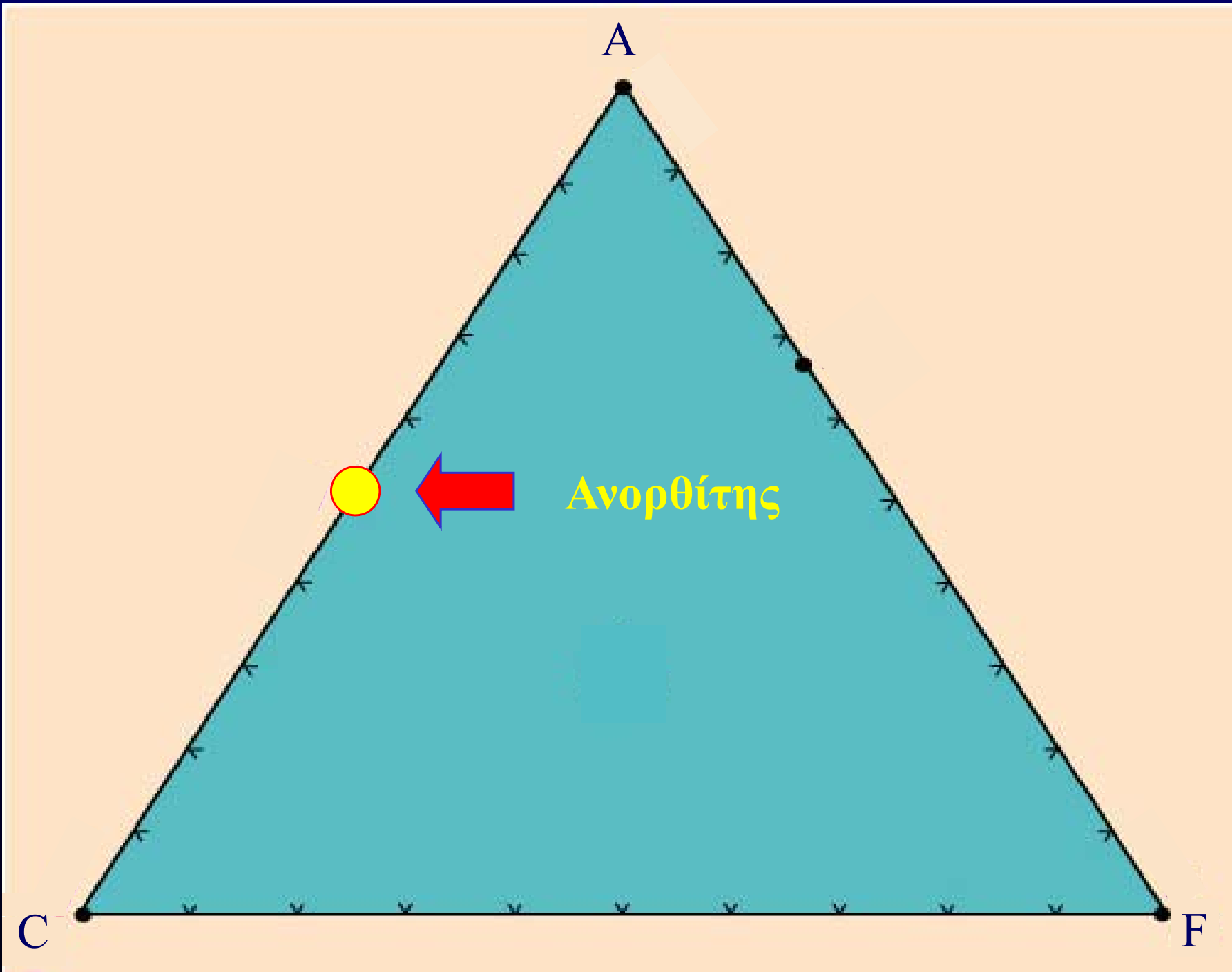
Παράδειγμα:

- Ανορθίτης $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$
- $1 \text{ CaO} \cdot 1 \text{ Al}_2\text{O}_3 \cdot 2 \text{ SiO}_2$
- $A = 1 + 0 - 0 - 0 = 1$, $C = 1 - 0 = 1$, and $F = 0$
- $A+C+F = 2$,
- κανονικοποιούμε ως προς 1.0 πολλαπλασιάζοντας κάθε τιμή με $\frac{1}{2}$, οπότε:

$$A = 0.5$$

$$C = 0.5$$

$$F = 0$$



Τυπικό διάγραμμα ACF, που αναφέρεται σε ένα συγκεκριμένο εύρος P και T (ζώνη κυανίτη στην περιοχή Highlands της Σκωτίας)

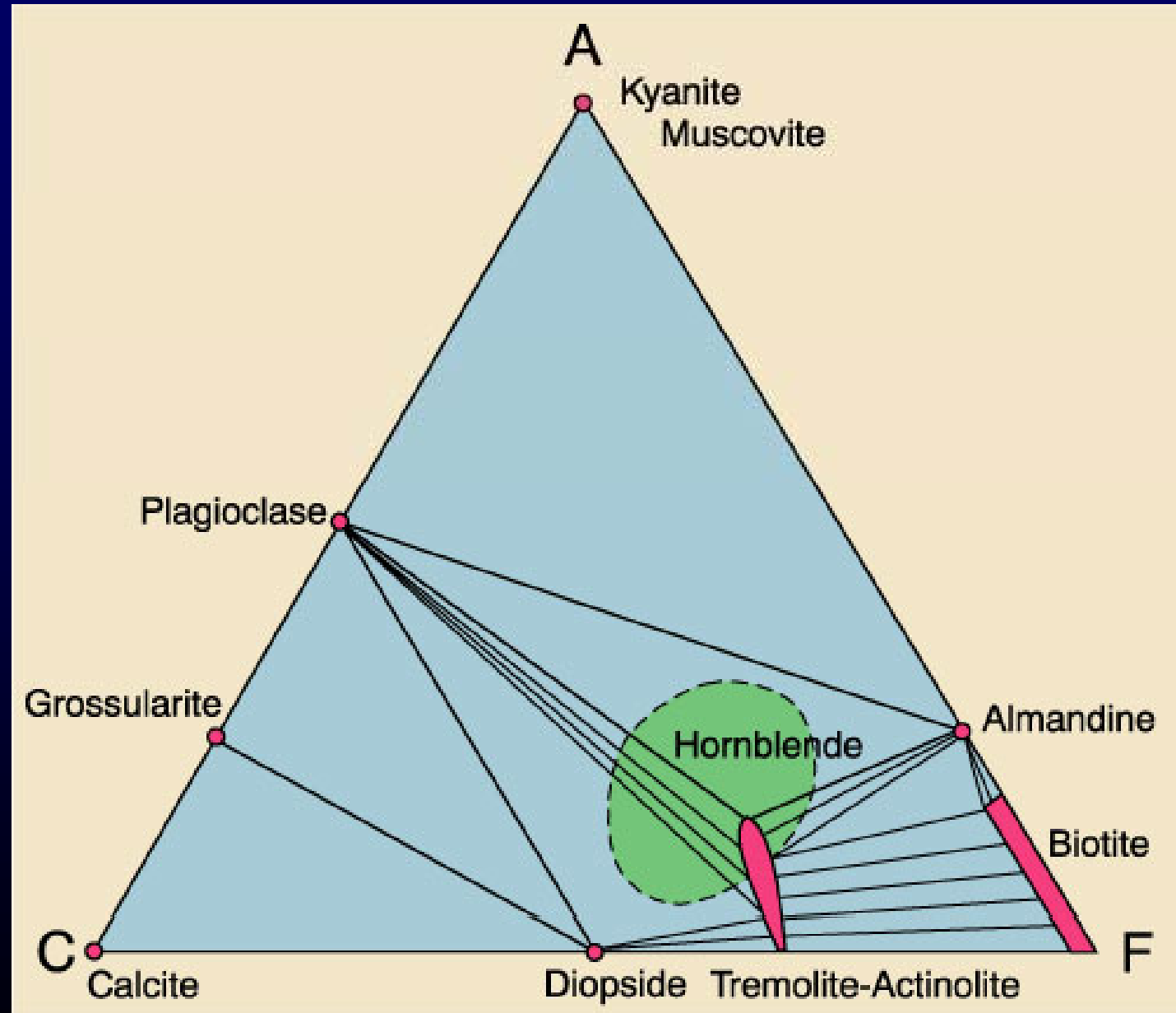
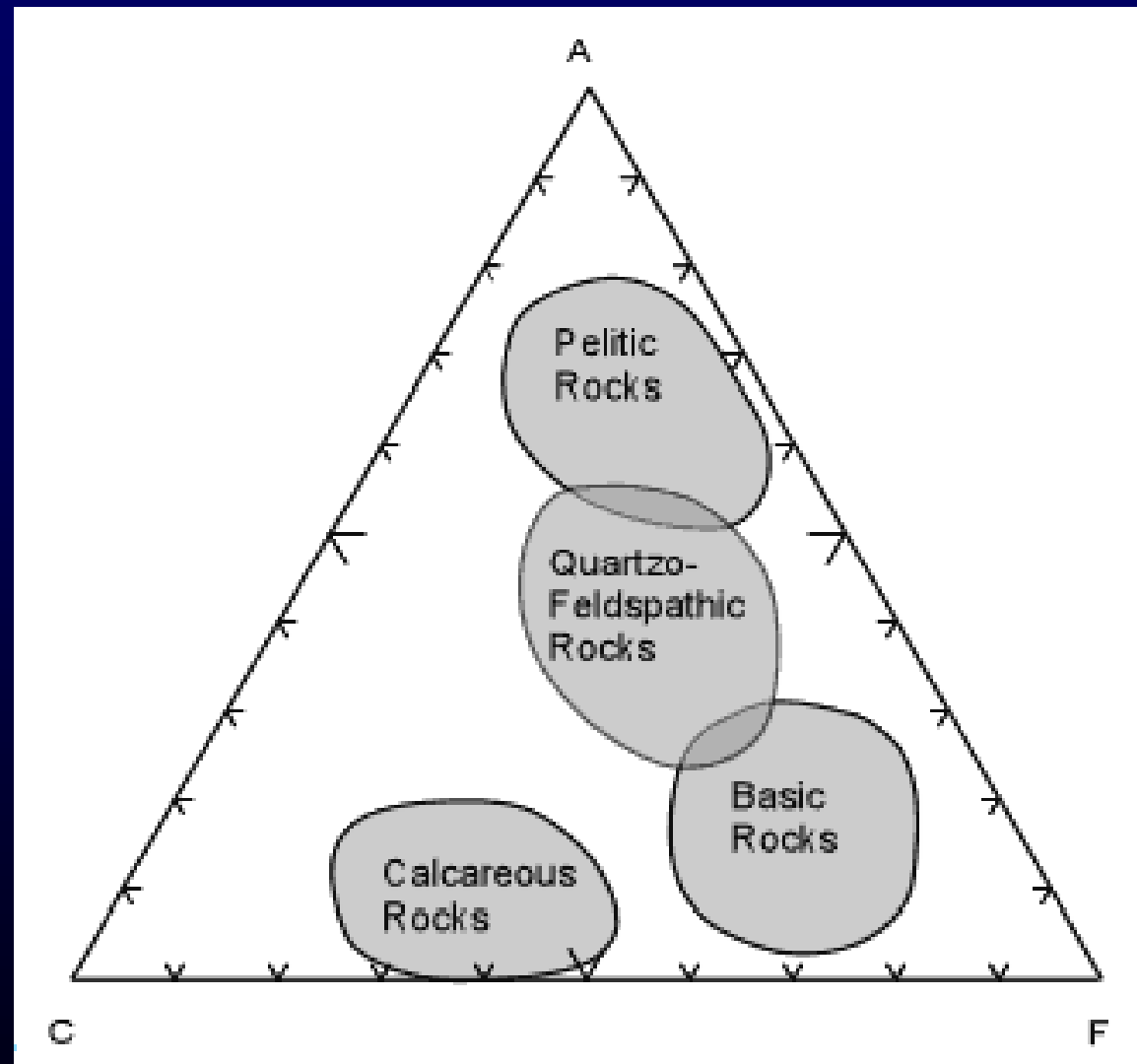


Figure 24-5. Από Turner (1981). *Metamorphic Petrology*. McGraw Hill.

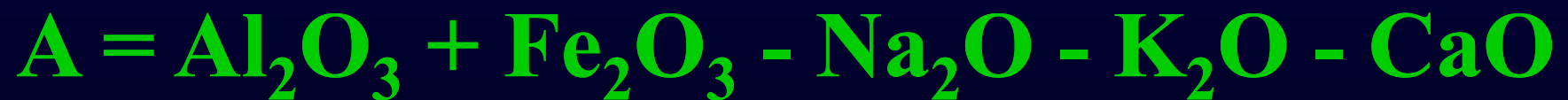
Προβολή των πεδίων των κύριων συστάσεων πετρωμάτων σε ένα διάγραμμα ACF.

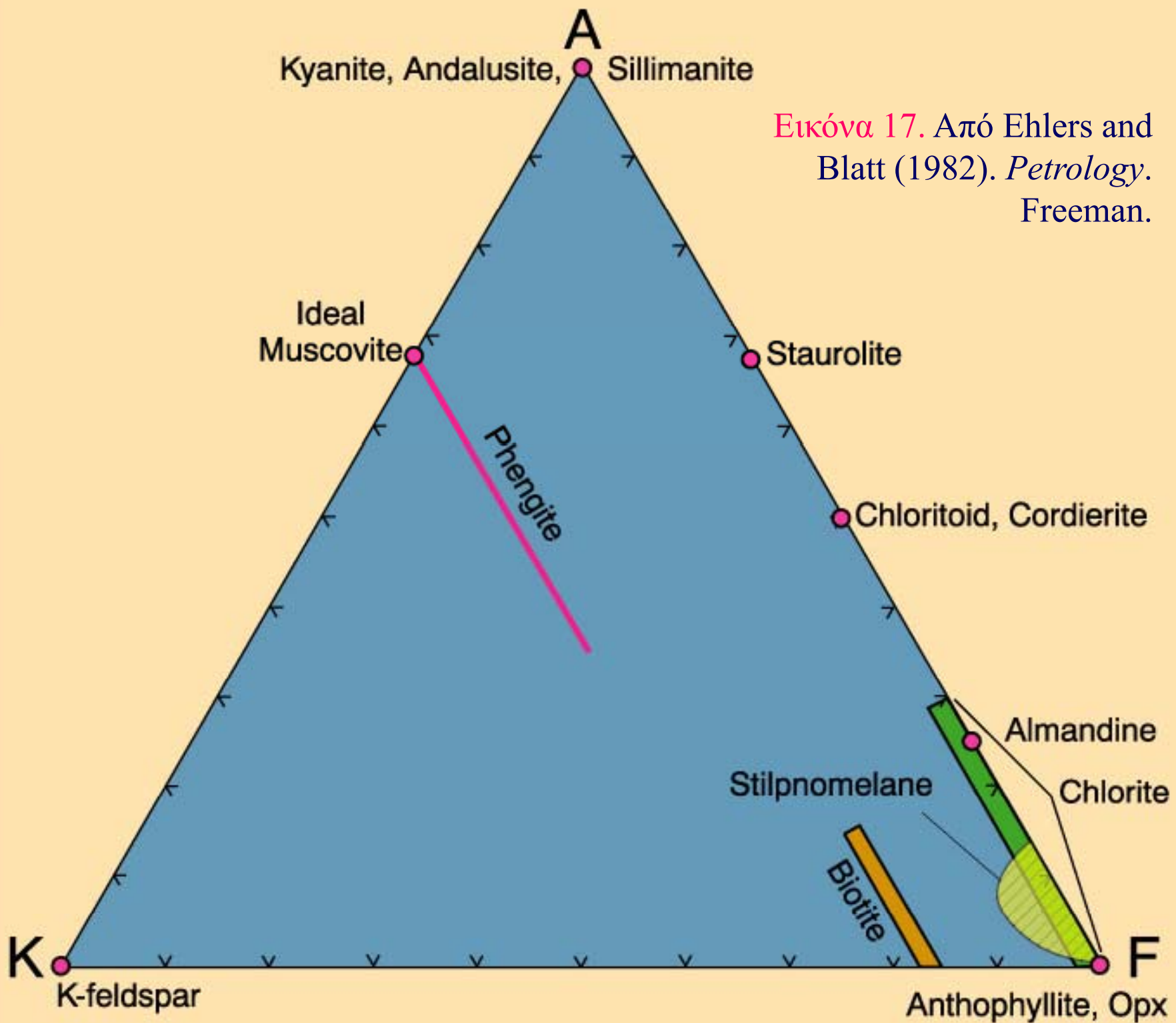


Το διάγραμμα AKF

Επειδή τα **πηλιτικά** ιζήματα είναι πλούσια σε Al_2O_3 και K_2O , και φτωχά σε CaO , ο Eskola πρότεινε ένα διαφορετικό διάγραμμα που να περιλαμβάνει το K_2O ώστε να γίνει εφικτή η απεικόνιση των αντίστοιχων παραγενέσεων

- Στο διάγραμμα **AKF** τα *ψευδοσυστατικά* είναι:

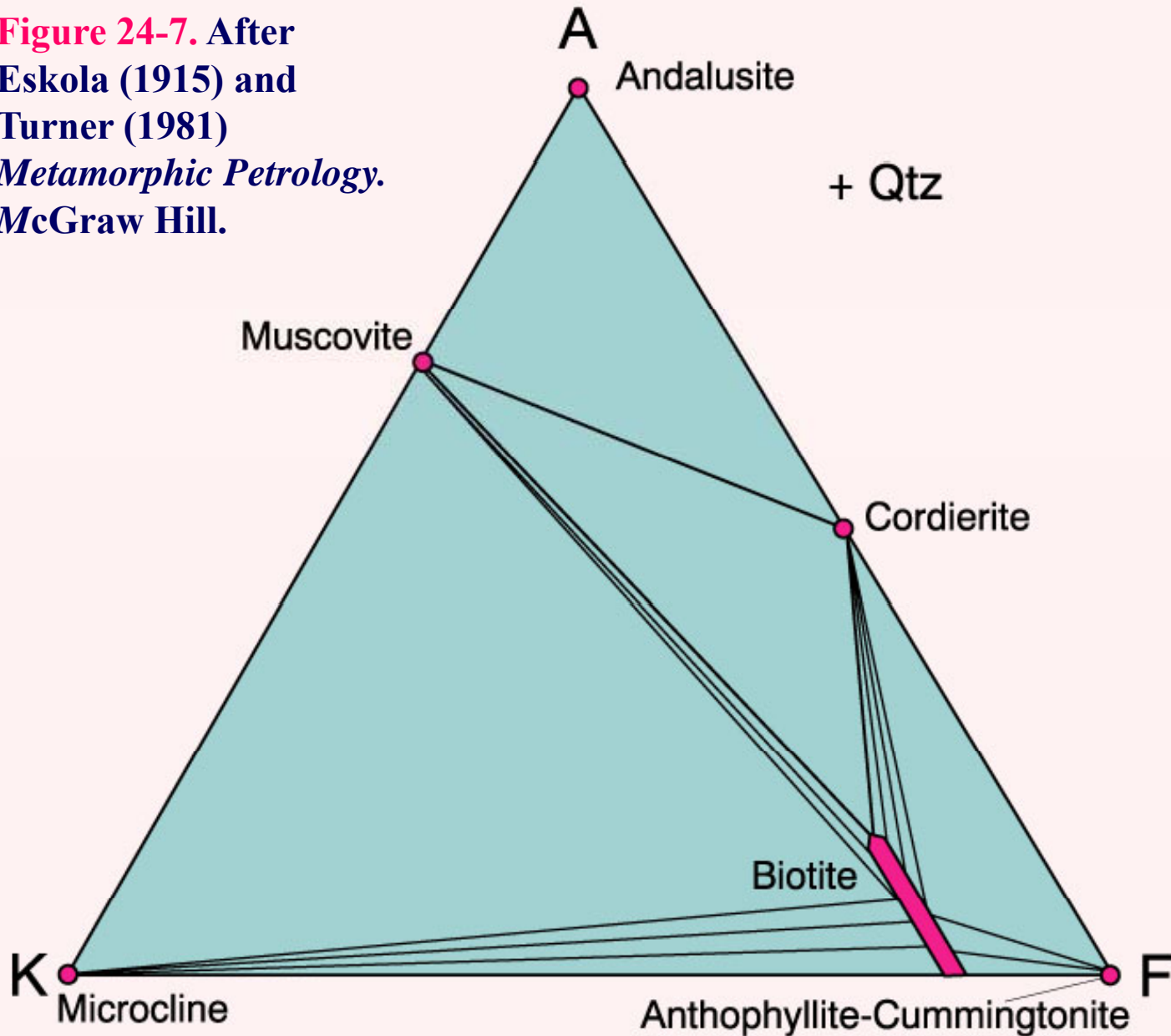




Εικόνα 17. Από Ehlers and Blatt (1982). *Petrology*. Freeman.

Διάγραμμα AKF (Eskola, 1915) που απεικονίζει παραγενέσεις πηλιτικών κερατιτών, περιοχή Orijärvi, Finland

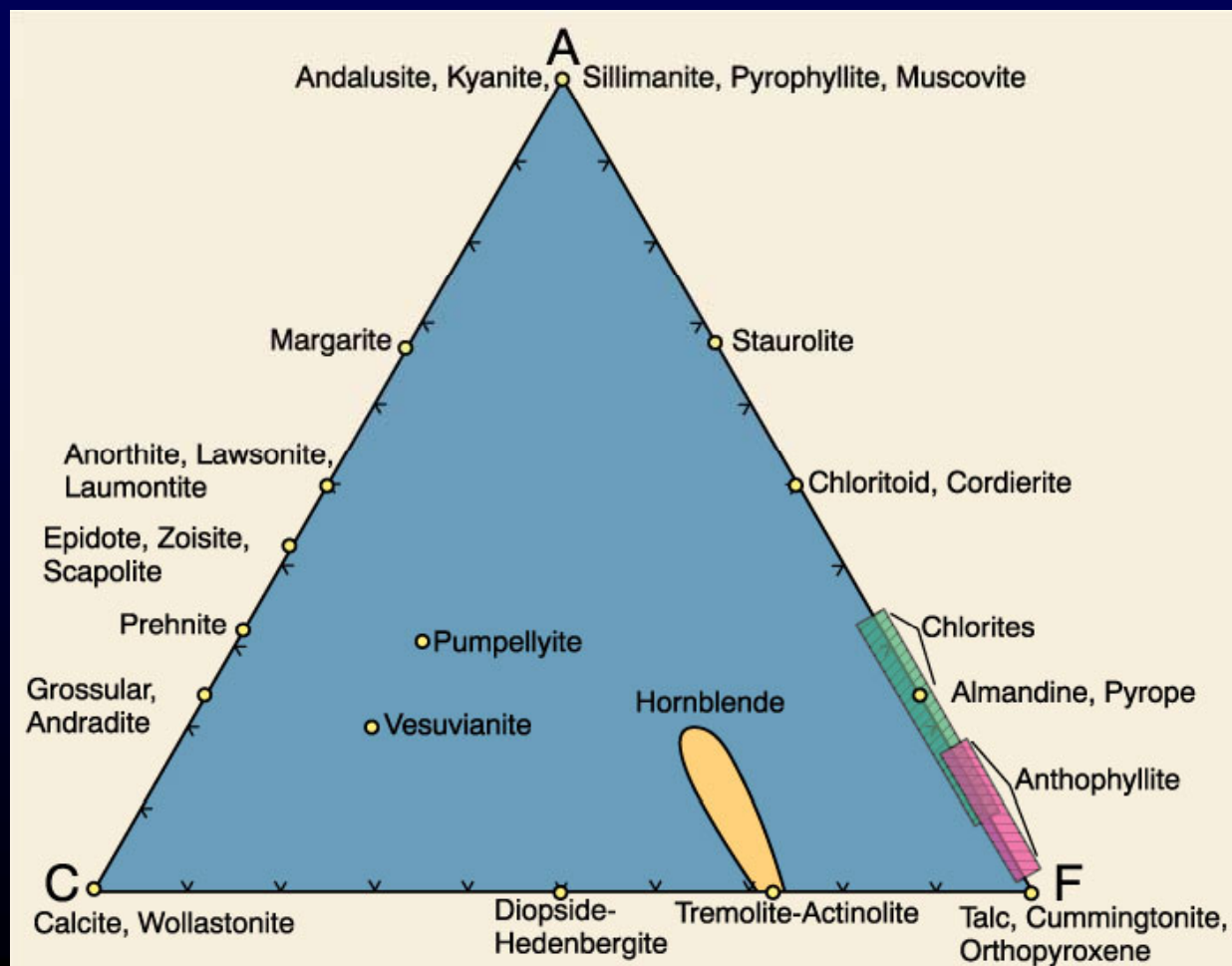
Figure 24-7. After Eskola (1915) and Turner (1981) *Metamorphic Petrology*. McGraw Hill.



Προσέξτε ότι στο ACF διάγραμμα τα τρία πιο συνήθη ορυκτα μεταπηλιτών (ανδαλουσίτης, μοσχοβίτης και μικροκλινής), προβάλλονται όλα σαν ξεχωριστά σημεία.

Εικόνα 18. Από Ehlers and Blatt (1982).
Petrology. Freeman.

- Στο ACF όμως, τα ίδια ορυκτά είτε προβάλλονται στο ίδιο σημείο, είτε δεν προβάλλονται, κάνοντας το διάγραμμα ACF λιγότερο χρήσιμο για φάσεις πλούσιες σε K και Al



Προβολές σε χημειο-γραφικά διαγράμματα

Απορίες ...αναμενόμενες:

- Γιατί αγνοούμε το SiO_2 στα ACF και AKF;
- Τι ήταν όλες αυτές οι αφαιρέσεις για τα A και C;

Προβολή από φάσεις που προβάλλονται στις κορυφές του τριγώνου

- Στα διαγράμματα ACF and AKF απαλείφουμε το SiO_2 γιατί προβάλλουμε από το χαλαζία
- Τα μαθηματικά είναι εύκολα: προβάλλοντας από ένα συστατικό που καταλαμβάνει μία κορυφή ισοδυναμεί με τη παράβλεψή του στους χημικούς τύπους
- Το ...μειονέκτημα \rightarrow Συμπίεση των αληθινών σχέσεων λόγω της απώλειας μιας εκ των διαστάσεων

Το διάγραμμα A(K)FM

Εναλλακτικό διάγραμμα για μεταπηλιτικά πετρώματα

- Ο J.B. Thompson (1957) παρατήρησε ότι στα περισσότερα πετρώματα τα στοιχεία Fe και Mg δεν ισο-κατανέμονται ανάμεσα στα διάφορα φεμικά ορυκτά

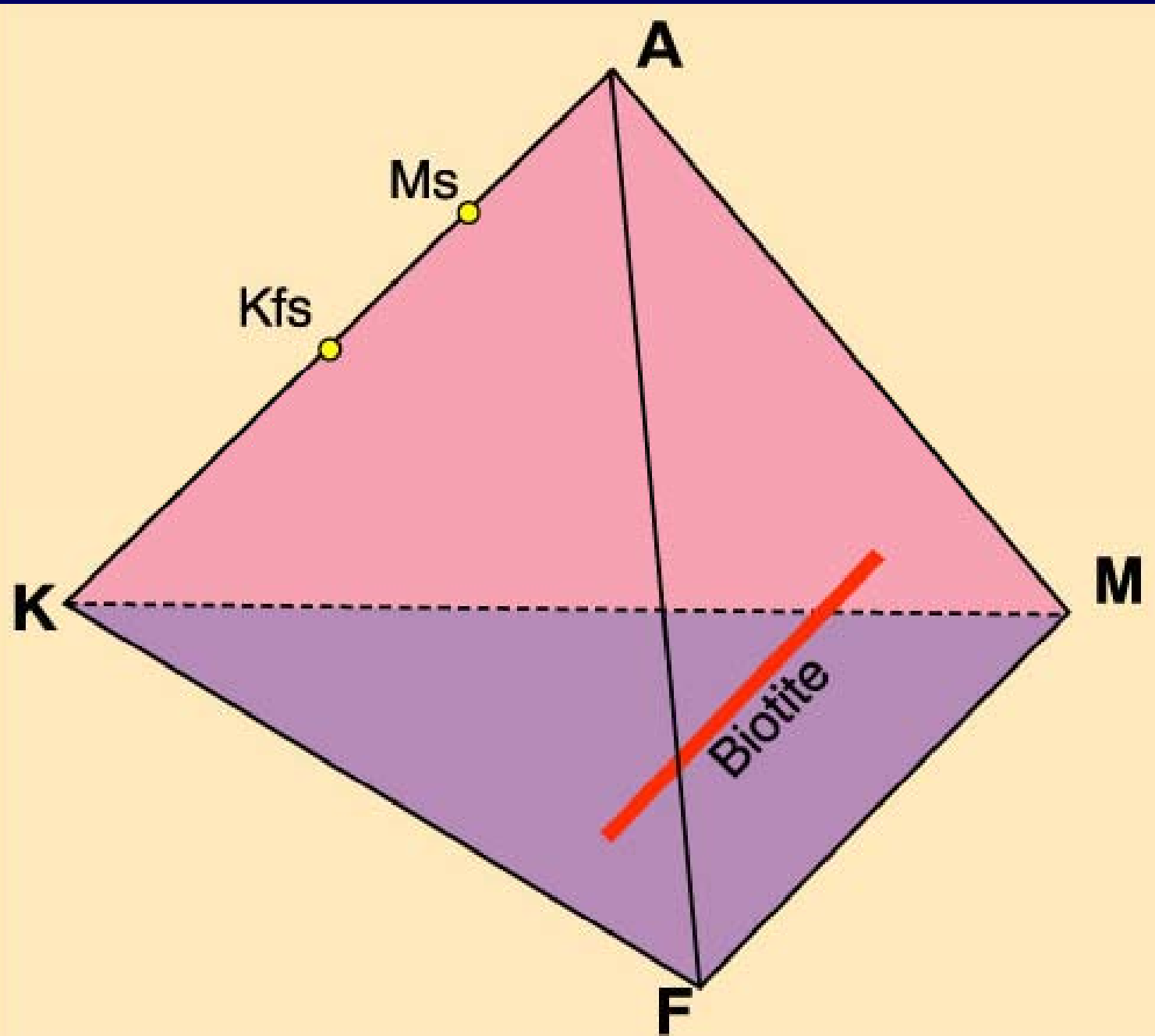
Το διάγραμμα A(K)FM

A = Al_2O_3

K = K_2O

F = FeO

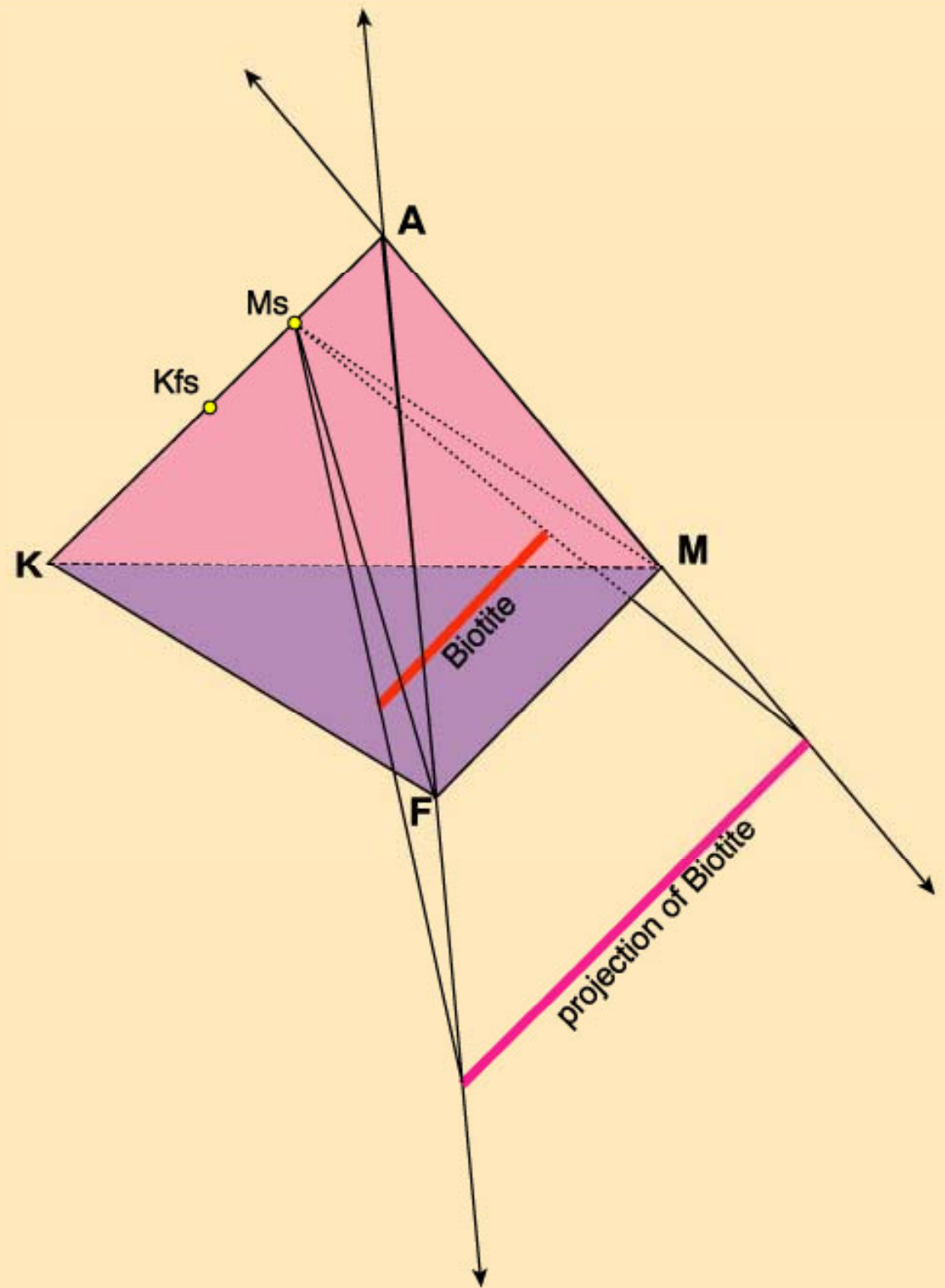
M = MgO



Διάγραμμα A(K)FM (J.B. Thompson)

Προβολή από μια φάση που
είναι παρούσα στην
παραγένεση υπό μελέτη

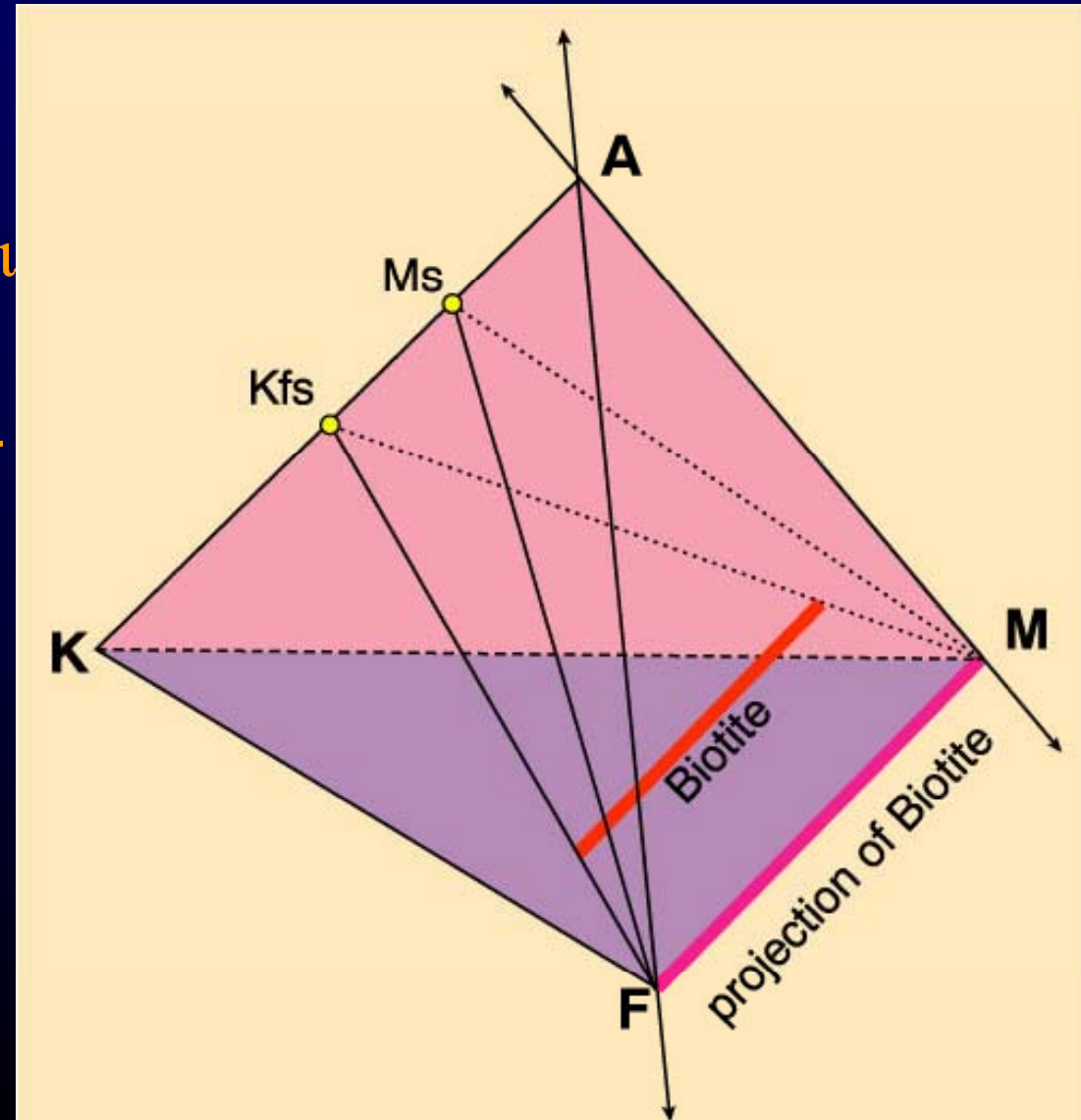
Εικόνα 22. ΑΚFM Προβολή από
τον μοσχοβίτη. Από Thompson
(1957). *Am. Min.* 22, 842-858.



Διάγραμμα A(K)FM (J.B. Thompson)

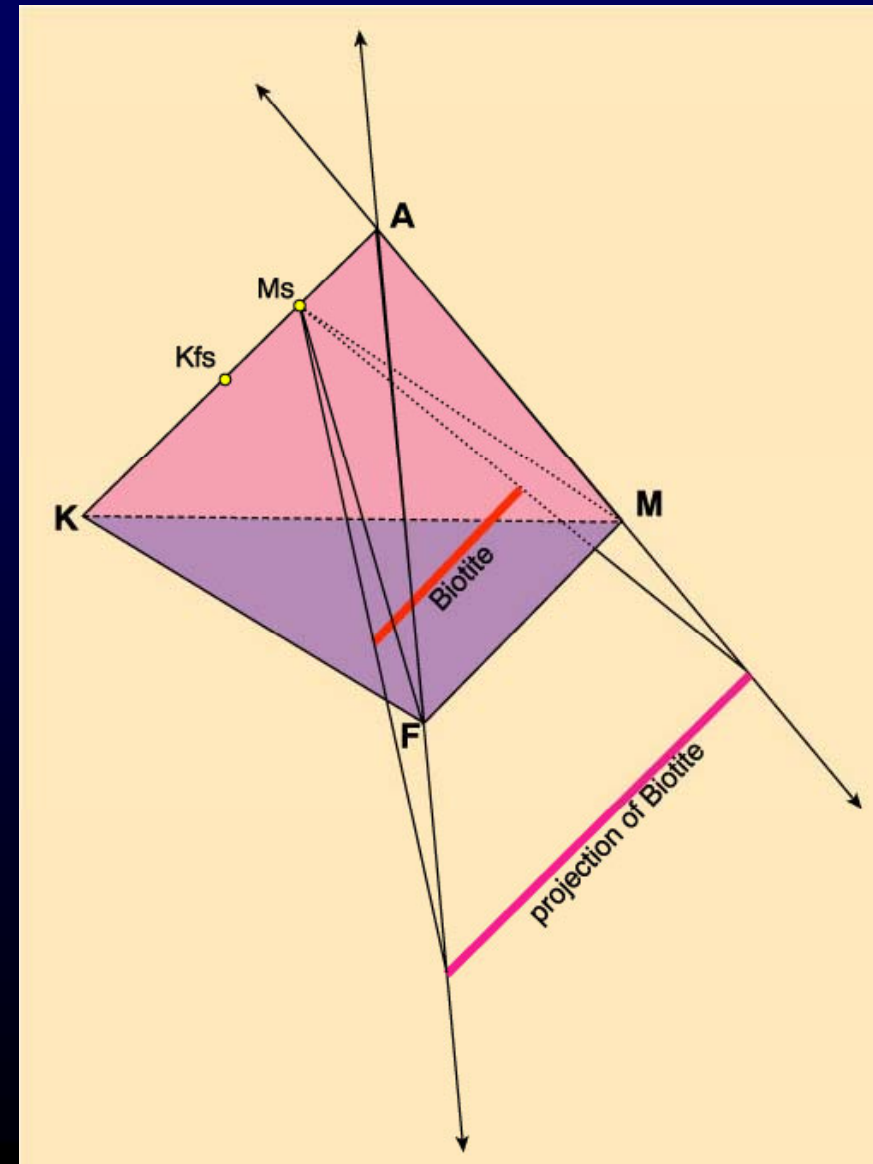
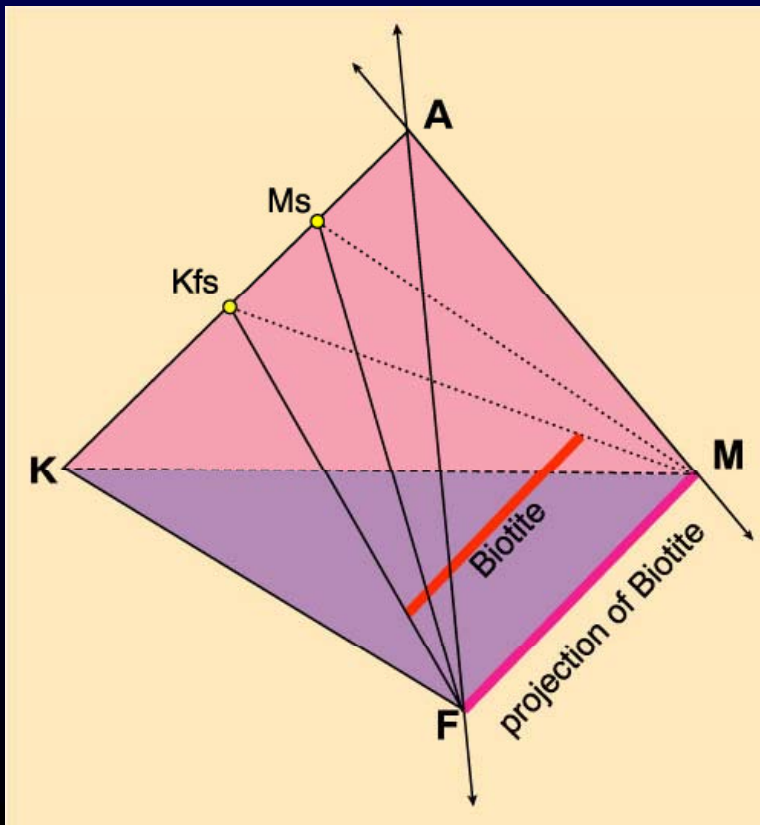
- Σε υψηλότερους βαθμούς μεταμόρφωσης ο μοσχοβίτης αφυδατώνεται σε Κ-ούχο Άστρο
- Έτσι η προβολή πρέπει να γίνει από τον Κ-ούχο Άστρο
- Όταν προβάλλουμε από τον Κ-ούχο Άστρο ο βιοτίτης προβάλλεται **εντός** της βάσης, F-M του τριγώνου AFM

Εικόνα 23. ΑΚFM Προβολή από τον μοσχοβίτη. Από Thompson (1957). *Am. Min.* 22, 842-858.



Διάγραμμα A(K)FM (J.B. Thompson)

- $A = Al_2O_3 - 3K_2O$ (εάν προβάλλουμε από τον Ms)
 $= Al_2O_3 - K_2O$ (εάν προβάλλουμε από τον Kfs)
- $F = FeO$
- $M = MgO$



Διάγραμμα A(K)FM (J.B. Thompson)

Βιοτίτης (από Ms):



$$A = 0.5 - 3(0.5) = -1$$

$$F = 1$$

$$M = 2$$

Κανονικοποιούμε

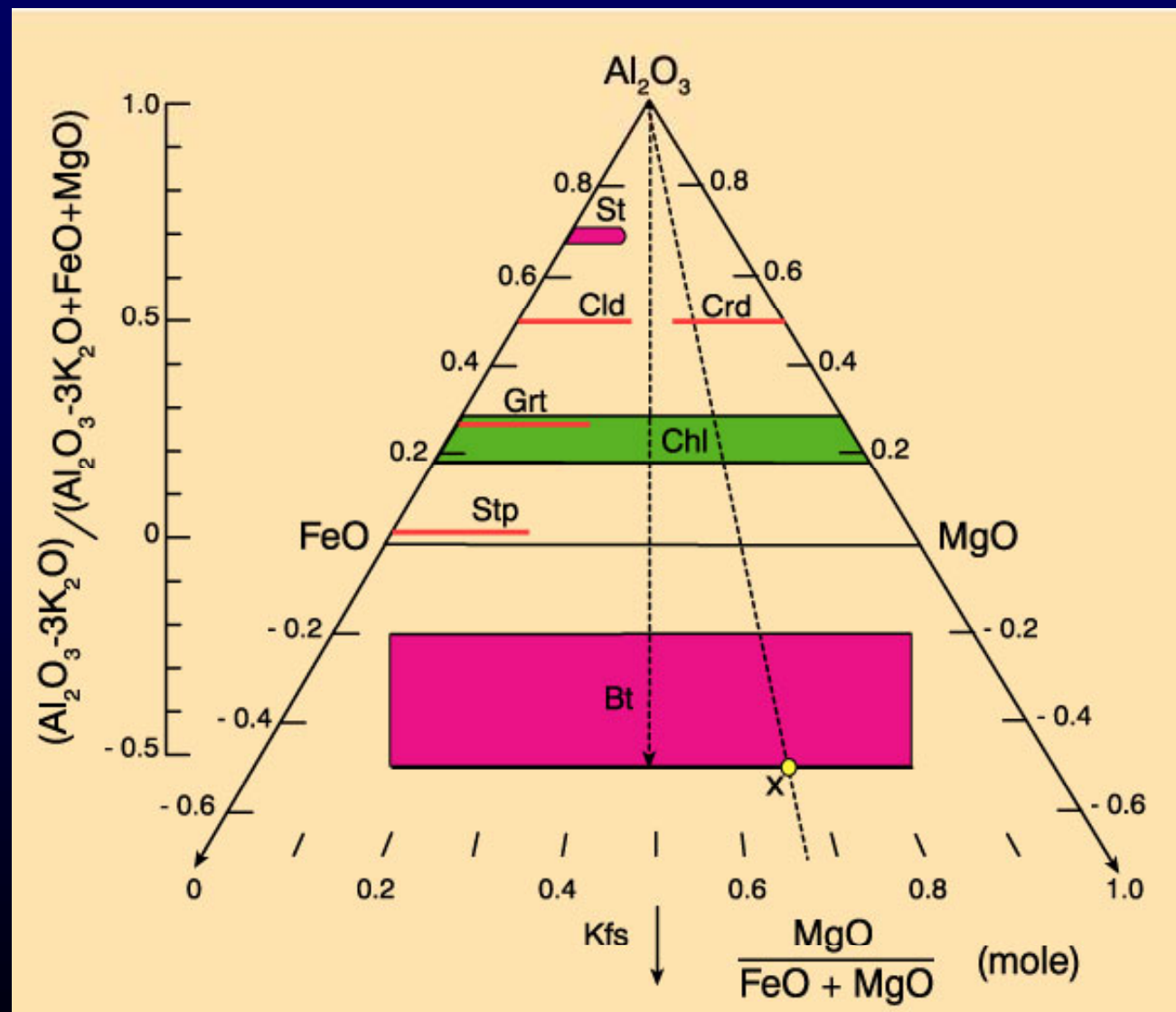
πολλαπλασιάζοντας κάθε
ένα με $1.0/(2 + 1 - 1) =$

$$1.0/2 = 0.5$$

Άρα $A = -0.5$

$$F = 0.5$$

$$M = 1$$

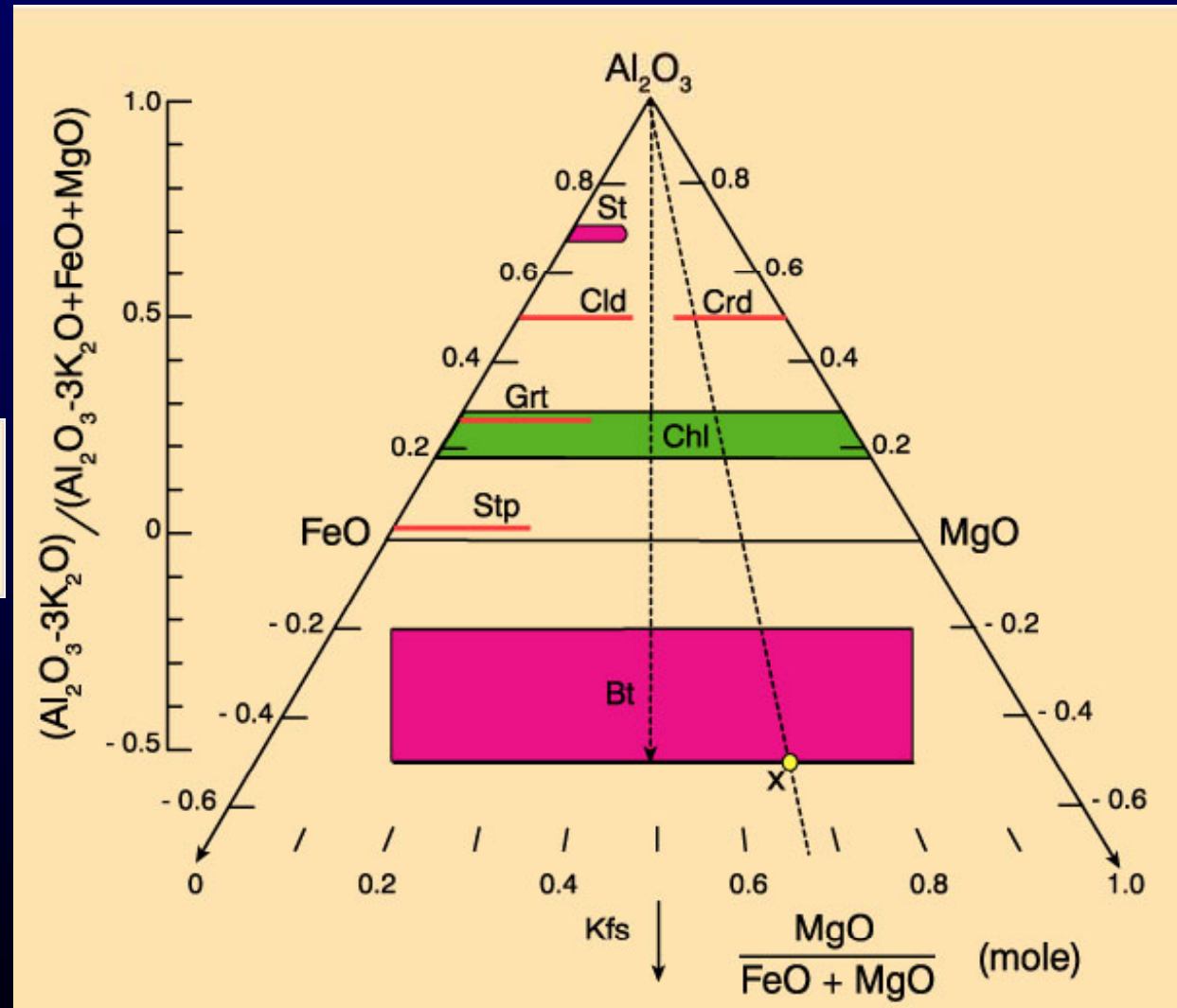


Προβολή σε AFM με χρήση των λόγων A και M

Προτιμήστε να χρησιμοποιήσετε τους παρακάτω λόγους όταν προβάλετε από τον μοσχοβίτη:

$$A = \frac{Al_2O_3 - 3K_2O}{Al_2O_3 - 3K_2O + FeO + MgO}$$

$$M = \frac{MgO}{FeO + MgO}$$



Επιλέγοντας το κατάλληλο διάγραμμα...

- Π.χ., ας υποθέσουμε ότι έχουμε μια σειρά πηλιτικών πετρωμάτων σε μία περιοχή. Το πηλιτικό σύστημα αποτελείται από τα 9 κύρια συστατικά: SiO_2 , Al_2O_3 , FeO , MgO , MnO , CaO , Na_2O , K_2O , and H_2O
- Πώς συμπιέζουμε αυτά τα 9 συστατικά για να πάρουμε ένα χρήσιμο και κατανοητό διάγραμμα;

Επιλέγοντας το κατάλληλο διάγραμμα...

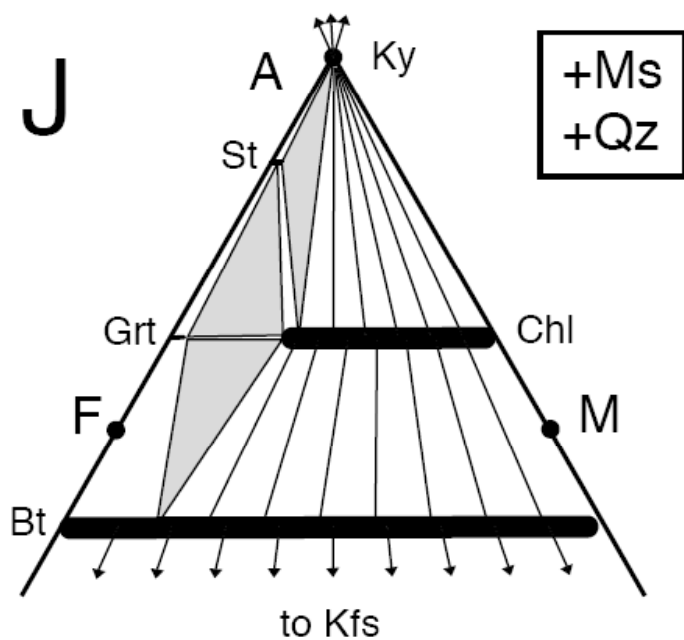
Κάθε βήμα απλοποίησης οδηγεί σε ευκόλως απεικονίσιμα συστήματα, όμως μπορεί να παραβλέπονται κάποια χαρακτηριστικά των πετρωμάτων που μελετούμε

- Το MnO συνήθως συναθροίζεται με $FeO + MgO$
- Στους μεταπηλίτες το Na_2O είναι συνήθως σημαντικό μόνο για το πλαγιόκλαστο, οπότε μπορούμε να προβάλλουμε από τον αλβίτη
- Σαν κανόνας, το H_2O είναι ικανοποιητικά ευκίνητο ώστε μπορεί να παραλειφθεί

Επιλέγοντας το κατάλληλο διάγραμμα...

- Οι μεταβολές των παραγενέσεων που αναπτύσσονται στα μεταμορφωμένα πετρώματα οφείλονται σε:
 - 1) διαφορές στην ολική χημική σύσταση
 - 2) διαφορές στις εντατικές μεταβλητές, όπως είναι οι T , P , P_{H_2O} , κλπ.
- Ένα καλό διάγραμμα επιτρέπει την εύκολη κατανόηση της περίπτωσης (1)
- Η περίπτωση (2) μπορεί να αποδοθεί με μία αντίδραση όπου τα αντιδρώντα αποτελούν την παραγένεση ενός πετρώματος και τα προϊόντα ενός άλλου. Αυτές οι διαφορές μπορούν να παρατηρηθούν δια μέσου της σύγκρισης ξεχωριστών διαγραμμάτων, ενός για κάθε βαθμό μεταμόρφωσης

Επιλέγοντας το κατάλληλο διάγραμμα...



Grt + Chl + Ms
St + Bt

