



Σχολή Πολιτικών Μηχανικών  
ΔΠΜΣ : Επιστήμη & Τεχνολογία Υδατικών Πόρων

Μάθημα: ΦΡΑΓΜΑΤΑ

ΦΡΑΓΜΑΤΑ ΒΑΡΥΤΗΤΑΣ  
RCC & ΣΚΛΗΡΟΥ ΕΠΙΧΩΜΑΤΟΣ

Ν. Ι. Μουτάφης

Λίμνη Καστρακίου



# Αρχαία φράγματα - Λιθόθετα



Από: N. Smith

**Sennacherib**

**Ιράκ**

**700 π.Χ.**

**Nineveh**

**Ιράκ**

**? π.Χ.**



Από: N. Καζίλη



# Φράγματα λιθόκτιστα (masonry)

~50% των φραγμάτων βαρύτητας πριν το 1930

## Φράγμα Καμαρών Ν. Σίφνου





# Εφεύρεση τσιμέντου τύπου Portland

1892

άλλαξε τις πρακτικές κατασκευής φραγμάτων  
και άρχισε η χρήση σκυροδέματος



1<sup>ο</sup> ήμισυ 20<sup>ου</sup> αιώνα  
τα φράγματα από ‘συμβατικά συμπυκνούμενο’  
σκυρόδεμα  
αντικατέστησαν τα λιθόκτιστα  
στο δυτικό κόσμο.

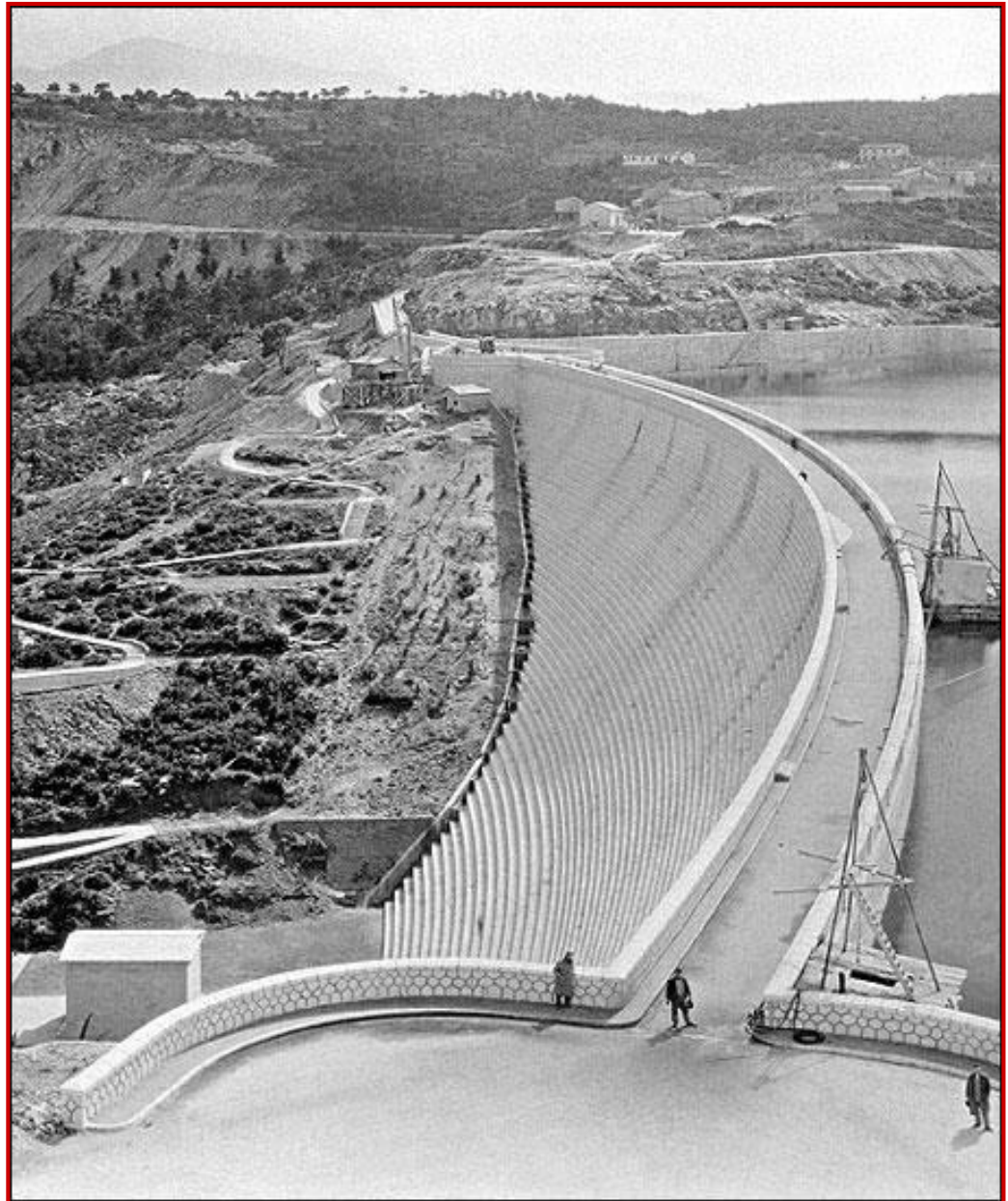
Συνεχίστηκε η κατασκευή κτιστών φραγμάτων  
στις χώρες με φτηνά εργατικά



# Φράγμα Μαραθώνα

Κυκλώπειο  
Σκυρόδεμα  
&  
επένδυση μαρμάρου  
1931

Από: ΕΥΔΑΠ





Αλματώδης ανάπτυξη  
χωματουργικών μηχανημάτων μετά το 1940

Σταδιακή μείωση  
νέων φραγμάτων βαρύτητας  
μεταξύ 1960 και 1980 στο δυτικό κόσμο και  
σταδιακά, κυριαρχία  
των χωμάτινων και λιθόρριπτων φραγμάτων

‘Εκρηξη’ κατασκευής στην Ελλάδα



Χρήση χωματουργικών μηχανημάτων σε  
φράγματα βαρύτητας

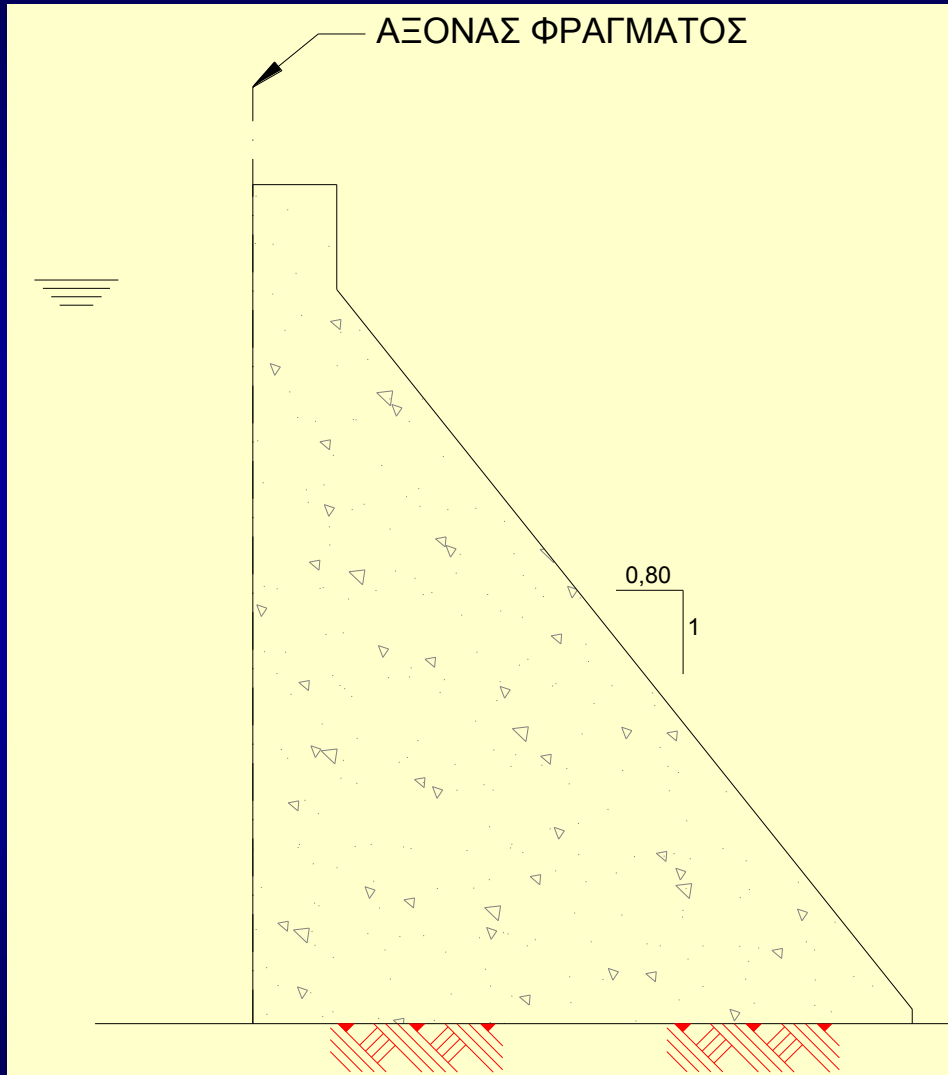
Έναρξη εφαρμογής του  
κυλινδρούμενου σκυροδέματος (RCC)  
και σταδιακή εκτόπιση του  
συμβατικά συμπυκνούμενου σκυροδέματος  
(CVC)

Σήμερα, πρακτικά όλα τα φράγματα βαρύτητας  
κατασκευάζονται από RCC  
(αναγέννηση των φραγμάτων βαρύτητας)





## Τυπική διατομή φράγματος βαρύτητας



Φράγματα που δεν ολισθαίνουν και δεν ανατρέπονται λόγω του ίδιου βάρους

Ανάπτυξη τριβών στο σώμα και στη θεμελίωση.

Ανάπτυξη σταθεροποιητικής ροπής



## Συμπαγή φράγματα

- Συμβατικά δονούμενου σκυροδέματος  
(CVC : Conventionally Vibrated Concrete)
- Κυλινδρούμενου σκυροδέματος  
RCC : Roller Compacted Concrete
  - Υψηλής περιεκτικότητας σε κονίες (High paste)
  - Ισχνού σκυροδέματος (Lean Concrete)
- Σκληρού Επιχώματος - (HardFill)



# Φράγματα συμβατικά συμπυκνούμενου σκυροδέματος



Φράγμα  
Grand  
Dixence

Ελβετία

1961

ΥΗΕ



Ύψος 285m

Μήκος στέψης  
695 m

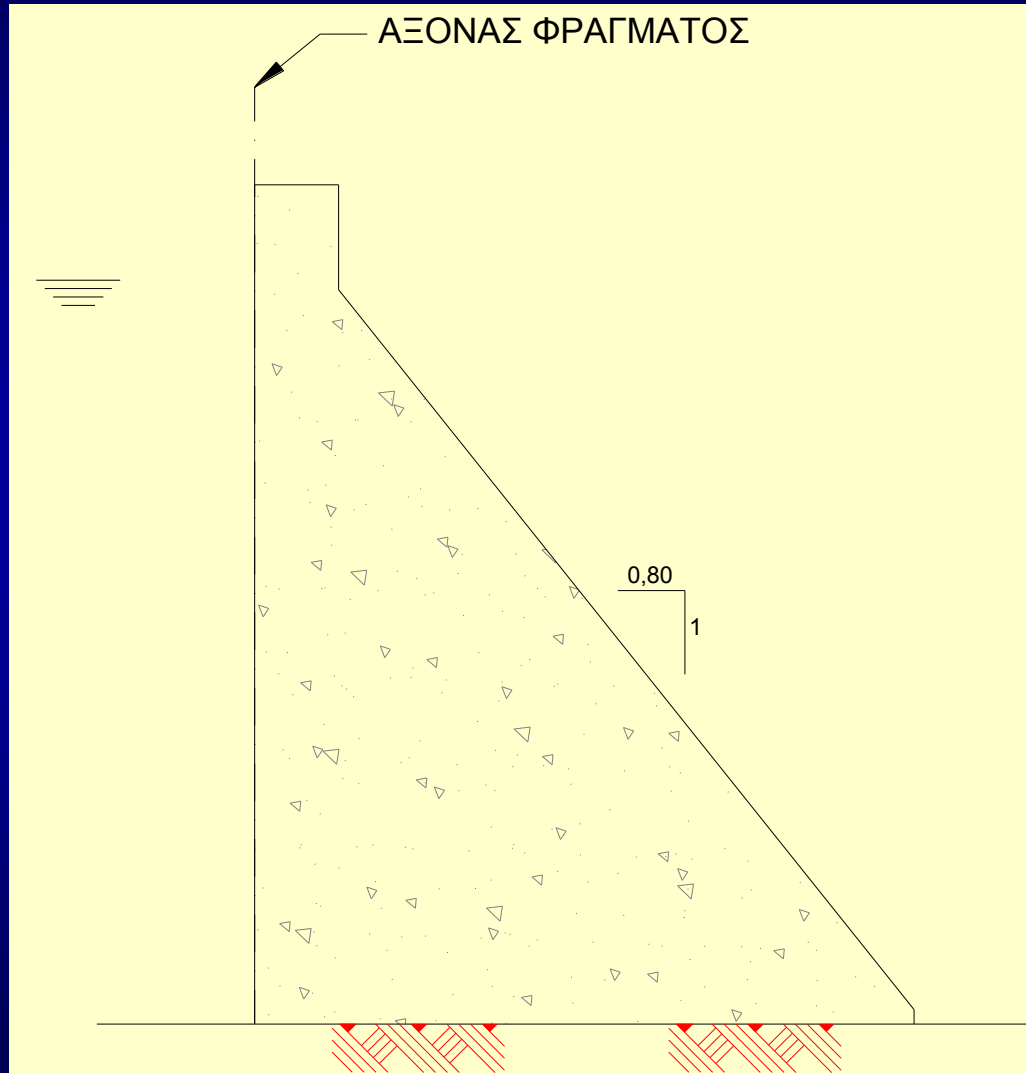
Όγκος  
φράγματος  
 $6 * 10^6 \text{ m}^3$

Όγκος  
ταμιευτήρα  
 $401 * 10^6 \text{ m}^3$

Λεκάνη  
απορροής  
 $43,6 \text{ km}^2$



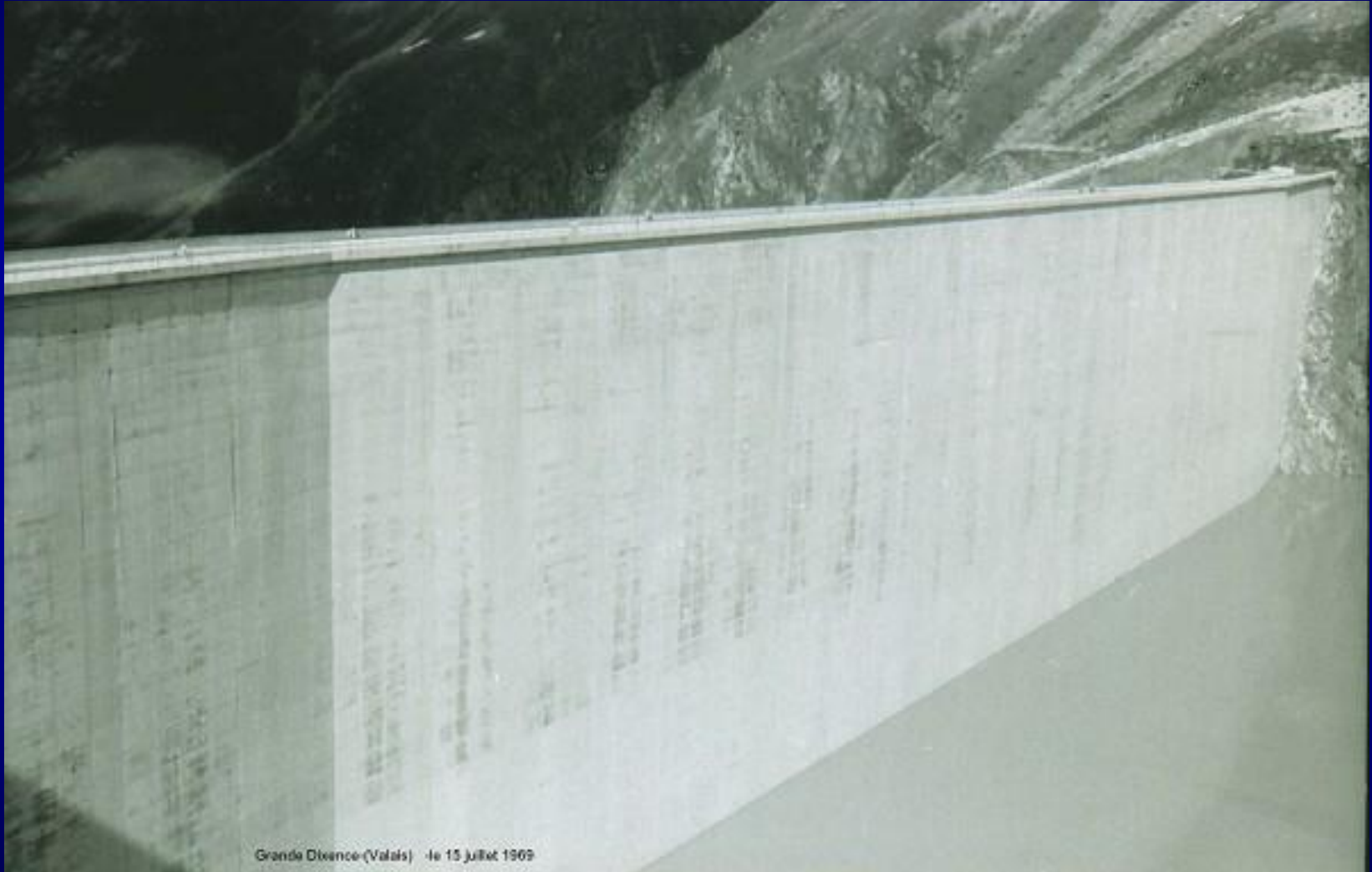
## Τυπική διατομή φράγματος βαρύτητας με κατακόρυφη ανάντη παρειά





# Φράγμα Grand Dixence

## Ανάντη κατακόρυφη παρειά φράγματος



Grand Dixence (Valais) - le 15 juillet 1969



# Φράγμα Ιωαν. Μουτάφη - Στύψη - Λέσβου





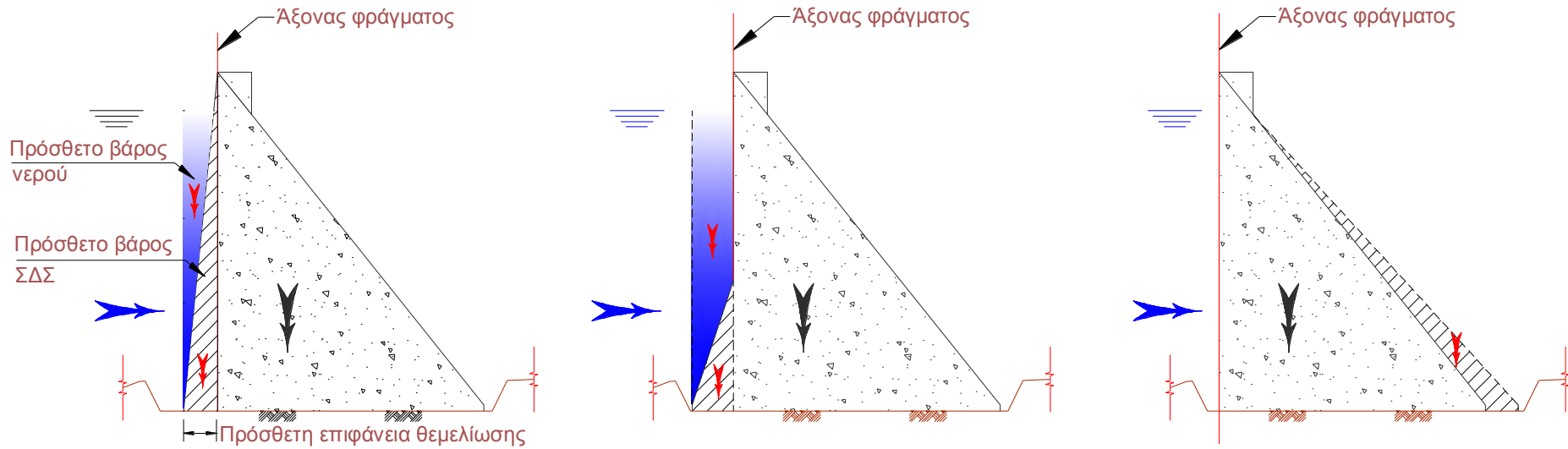
# Φράγμα Γέννας - Κρήτη





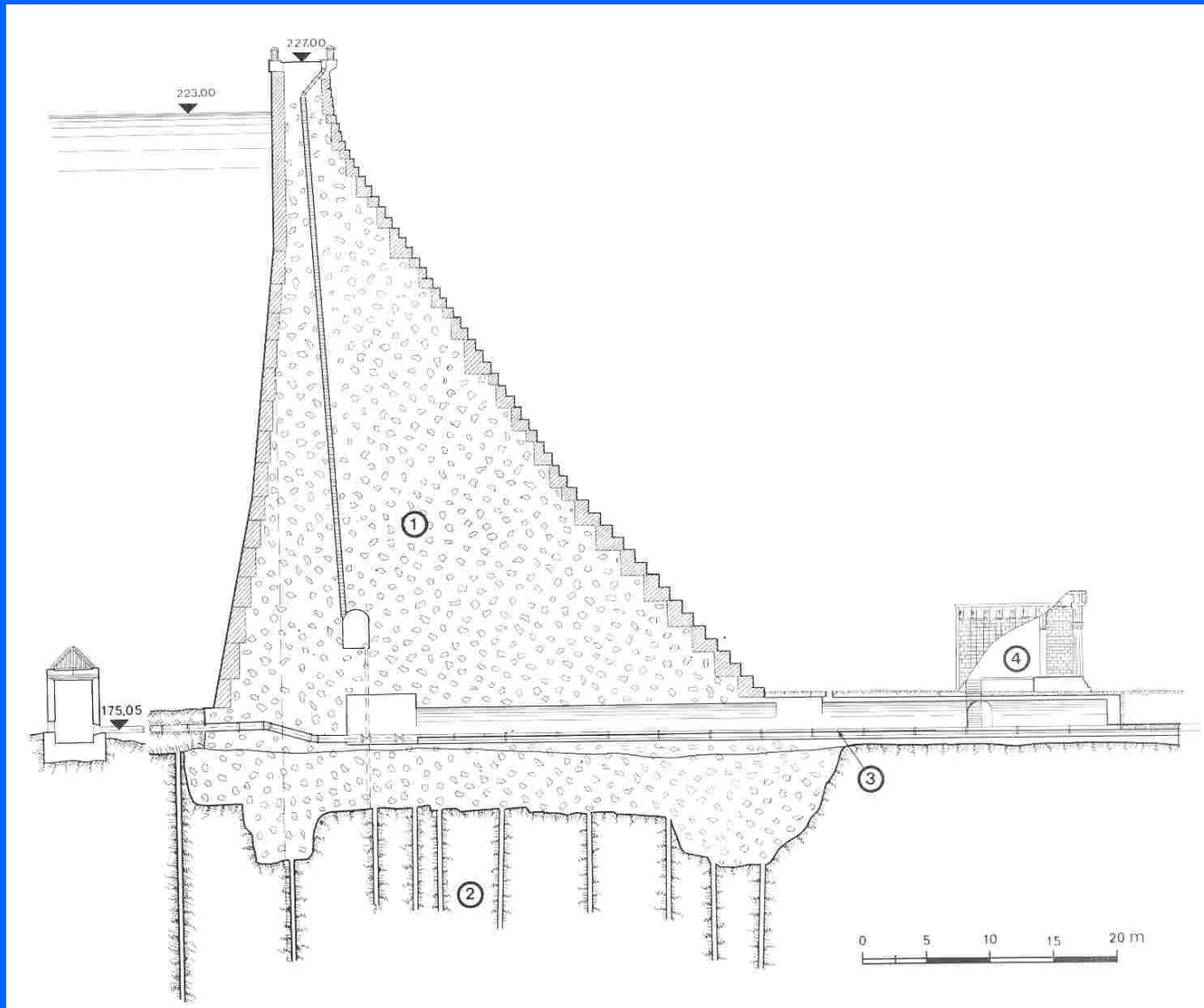


# Βελτίωση συνθηκών ευστάθειας φράγματος βαρύτητας





# Φράγμα Μαραθώνα

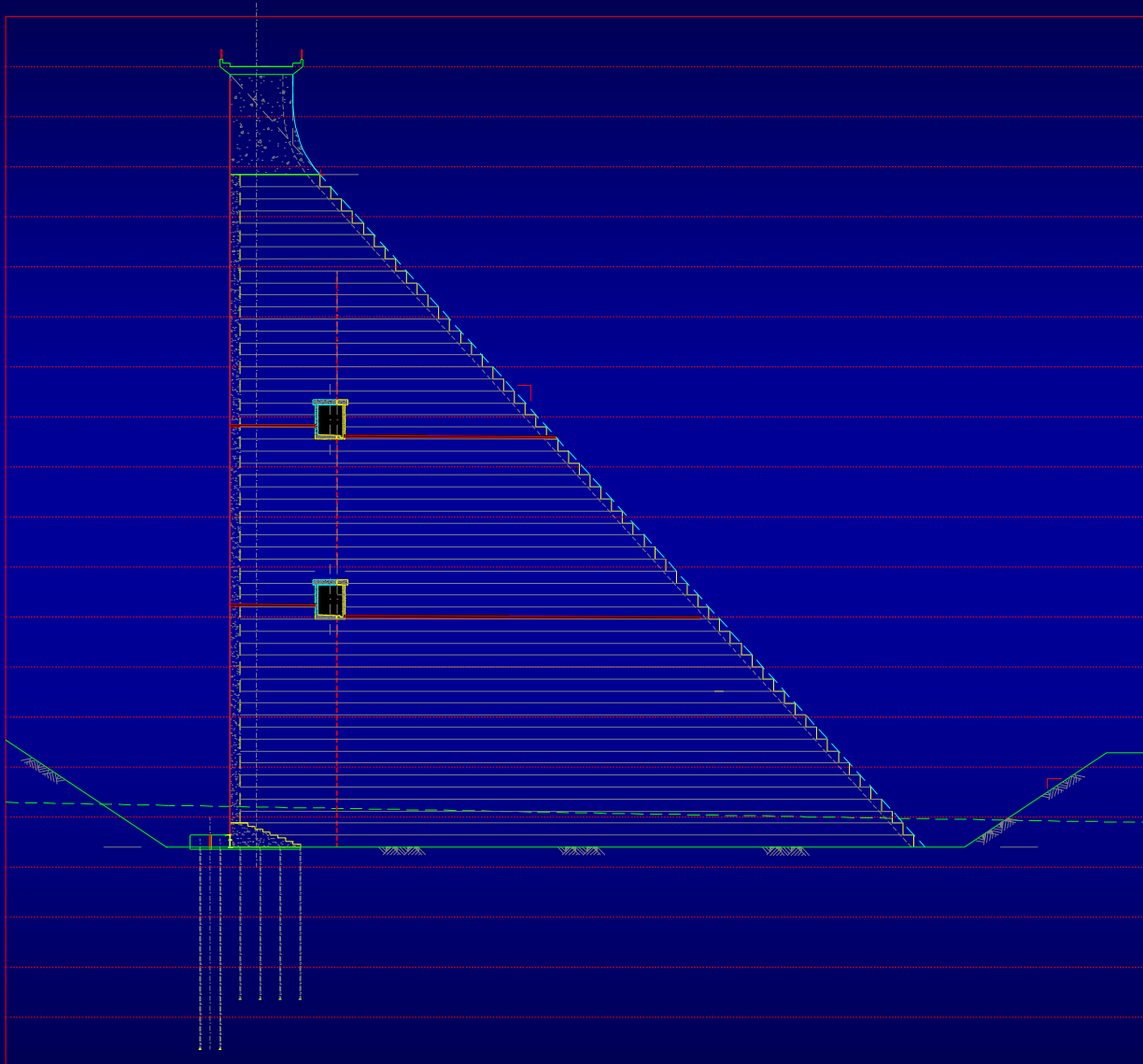




Φράγματα  
κυλινδρούμενου σκυροδέματος  
RCC  
Roller Compacted Concrete

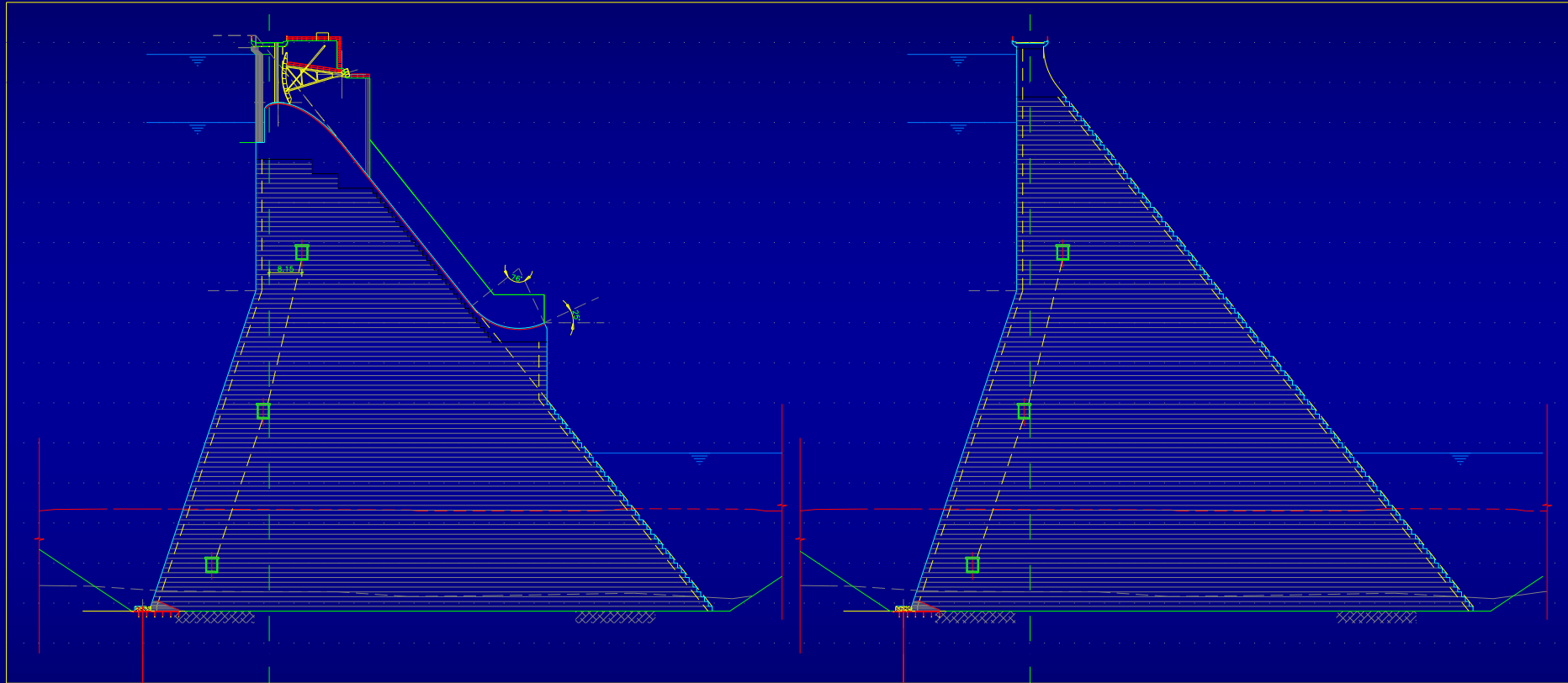


# Βαρύτητας RCC – Κατακόρυφη ανάντη παρειά





# Βαρύτητας RCC – Τεθλασμένη ανάντη παρειά





Φράγματα  
Σκληρού Επιχώματος  
Hardfill  
ενότητα των  
Cemented Material Dams (CMD)



Αρχές δεκαετίας του '90

Londe & Lino: A new concept for RCC (1992)

Έναρξη εφαρμογής φραγμάτων

Αξονοσυμμετρικών Κυλινδρούμενου

Σκληρού Επιχώματος (ΑΚΣΕ)

Stevens & Linard. The Safest Dam, (2002)

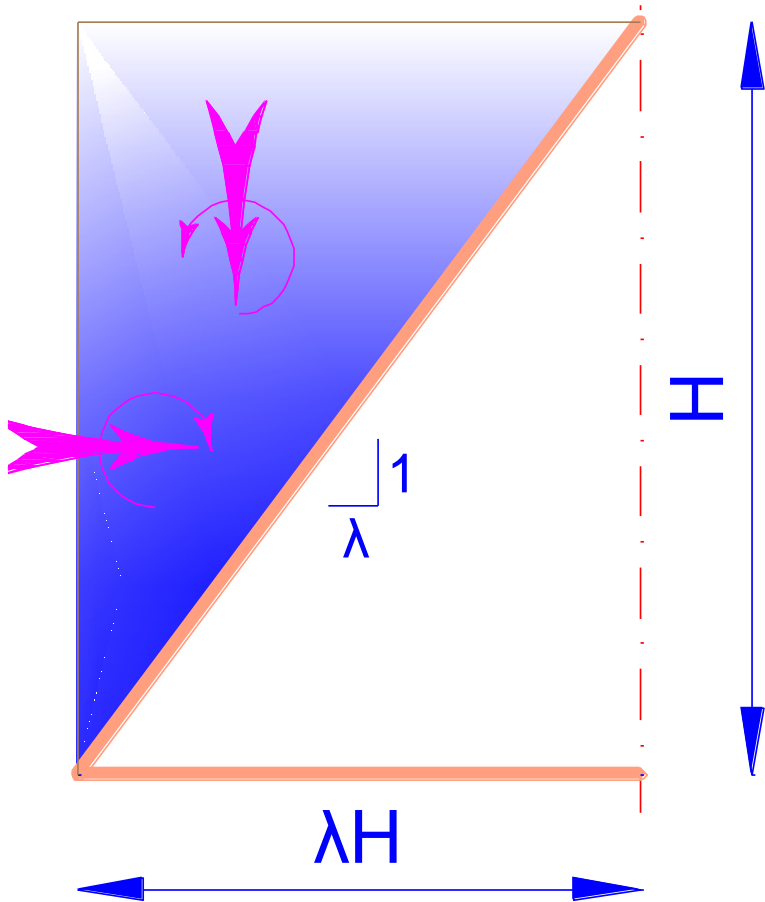
Περαιτέρω ώθηση στα φράγματα ΑΚΣΕ



# Τυπική διατομή φράγματος βαρύτητας από κυλινδρουμενο σκληρό επίχωμα







Ροπή από πλευρική ώθηση  
=  
Ροπή από το βάρος του νερού

όταν

$$\lambda = \sqrt{0,5} \sim 0.7$$



# Διαβροχή, εκφόρτωση διάστρωση και συμπίκνωση υλικού Σ.Ε.





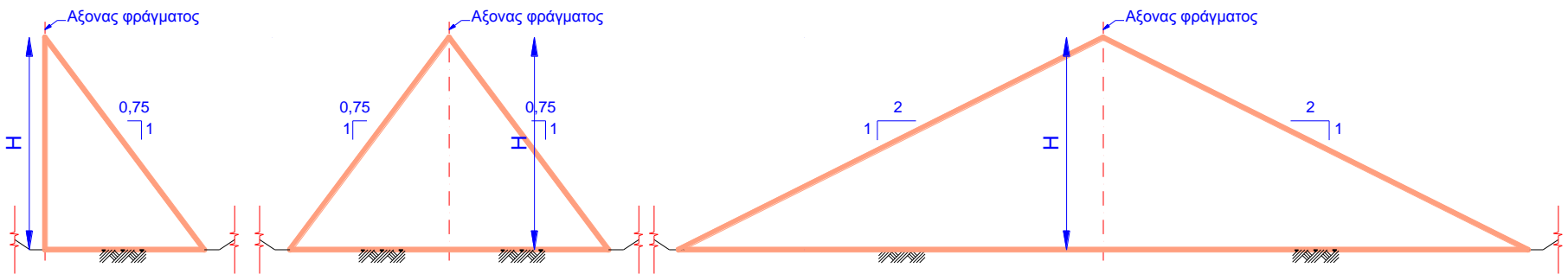
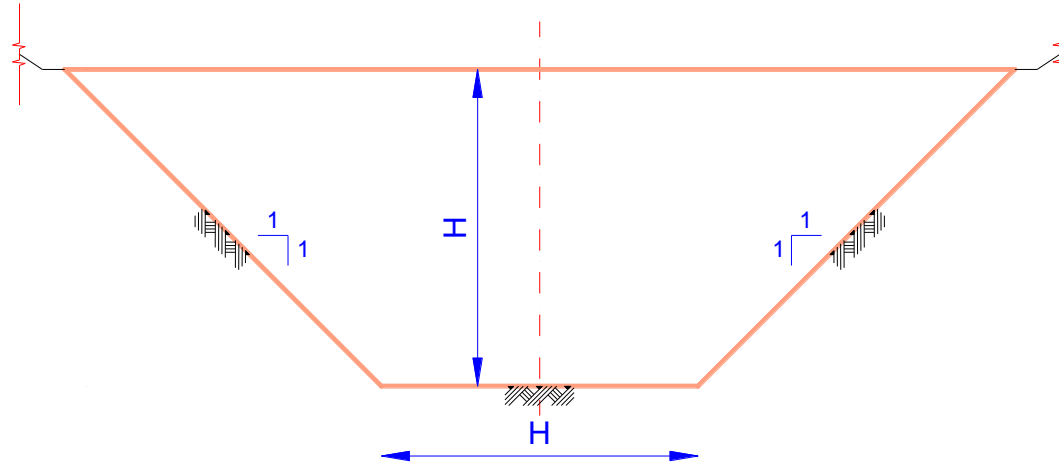
## Δειγματοληψία υλικού ΚΣΕ

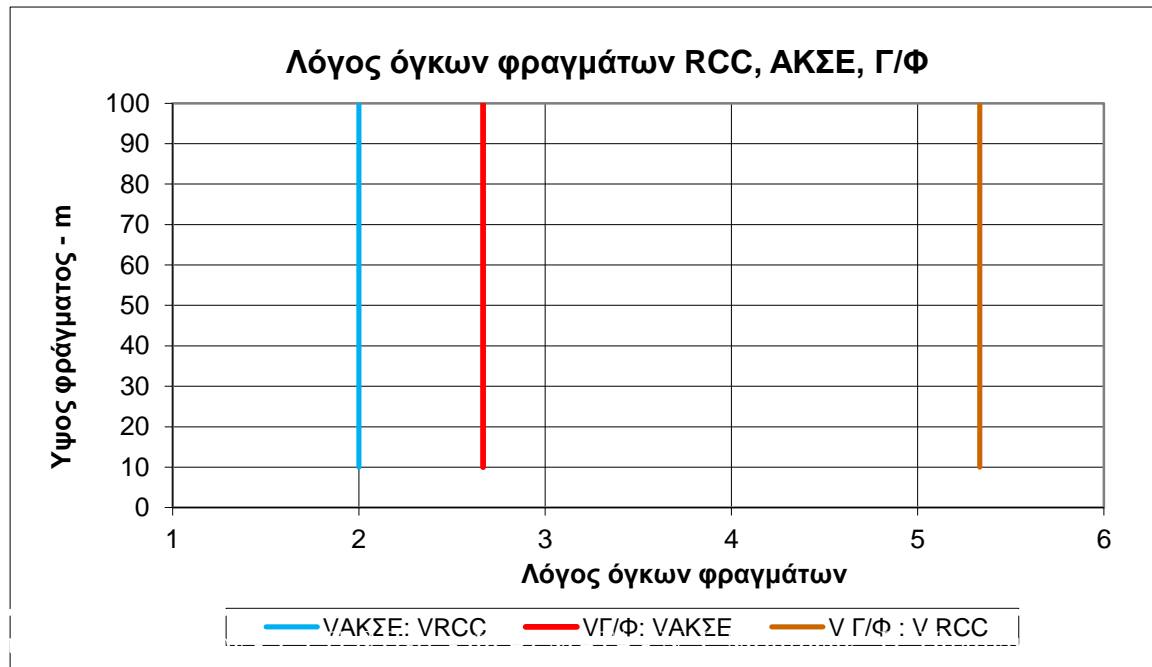
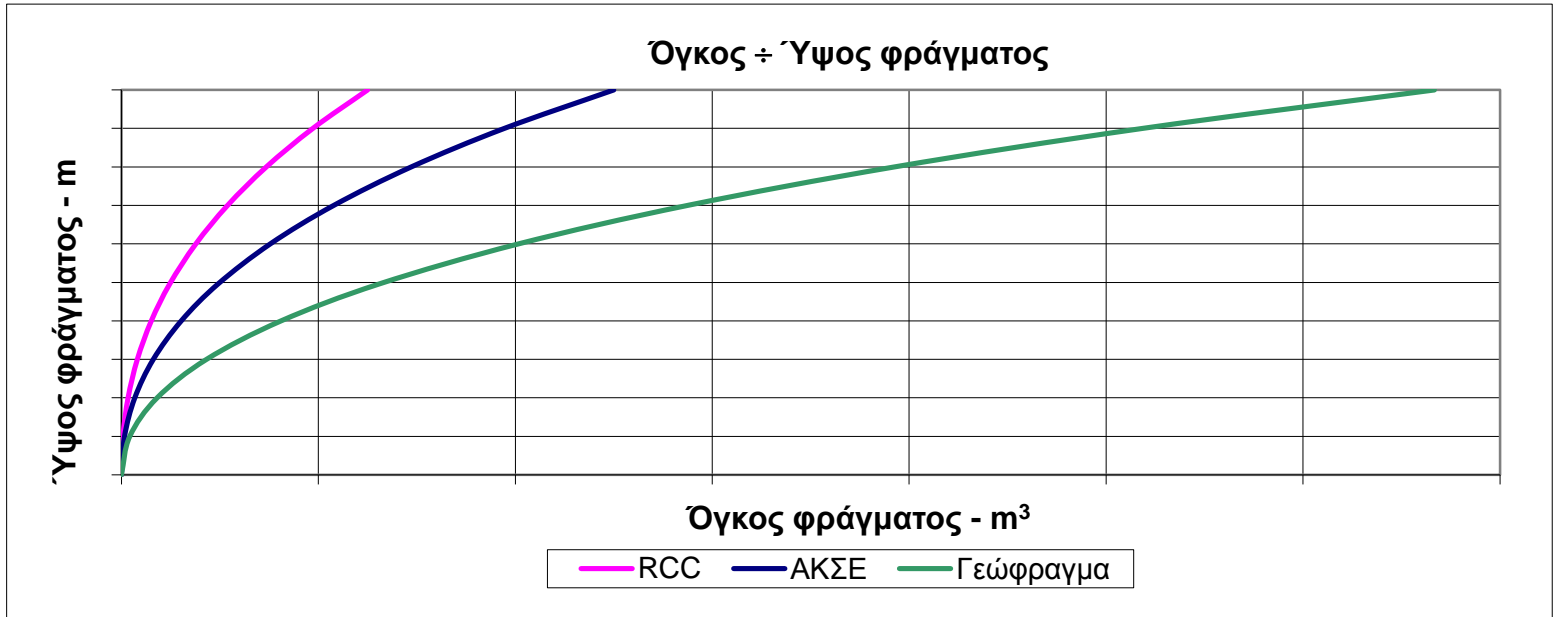


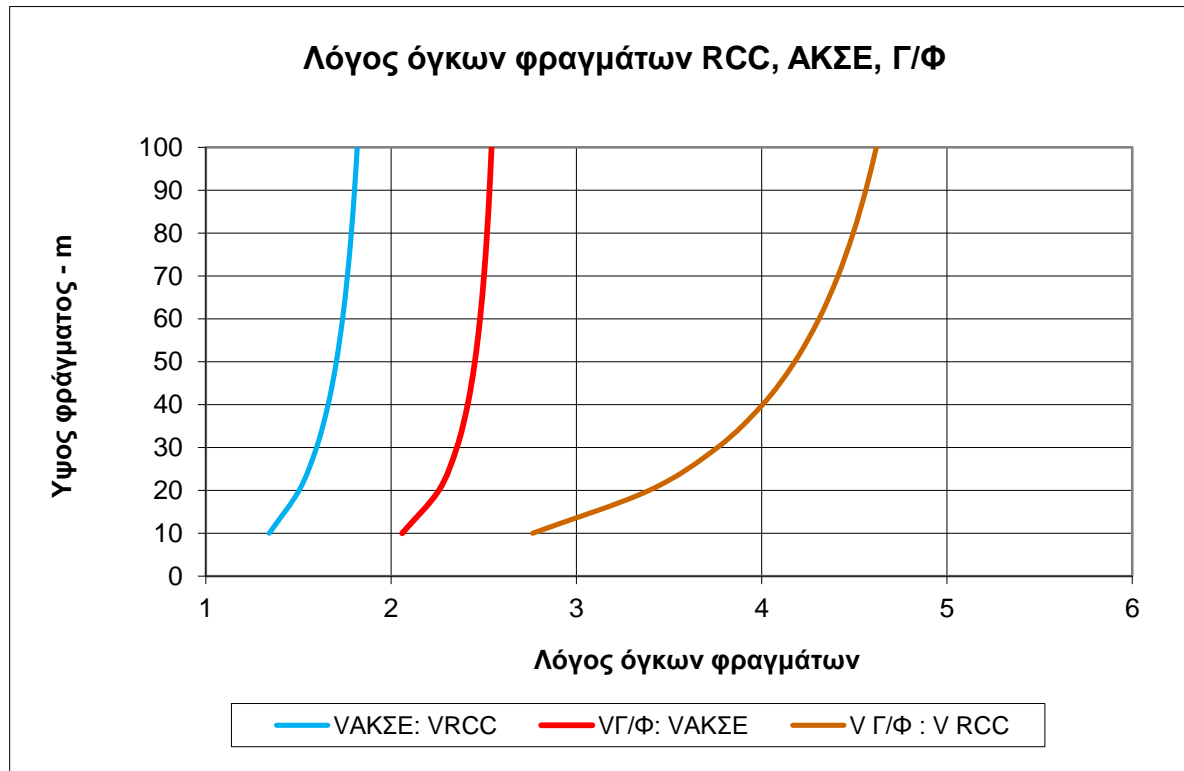
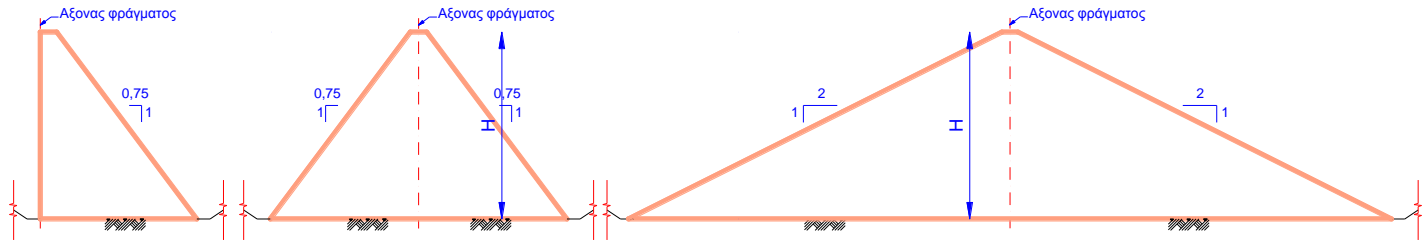


## Στρώσεις σκληρού επιχώματος





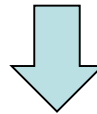






Ο όγκος γεωφράγματος είναι 2,5 φορές ο όγκος  
φράγματος ΣΕ

Κόστος  $m^3$  γεωφράγματος  $\ll$  ΣΕ



Γεώφραγμα πάντα οικονομικότερο από ΣΕ

Τότε γιατί ΣΕ;

Σημαντική μείωση κόστους υπερχειλιστή

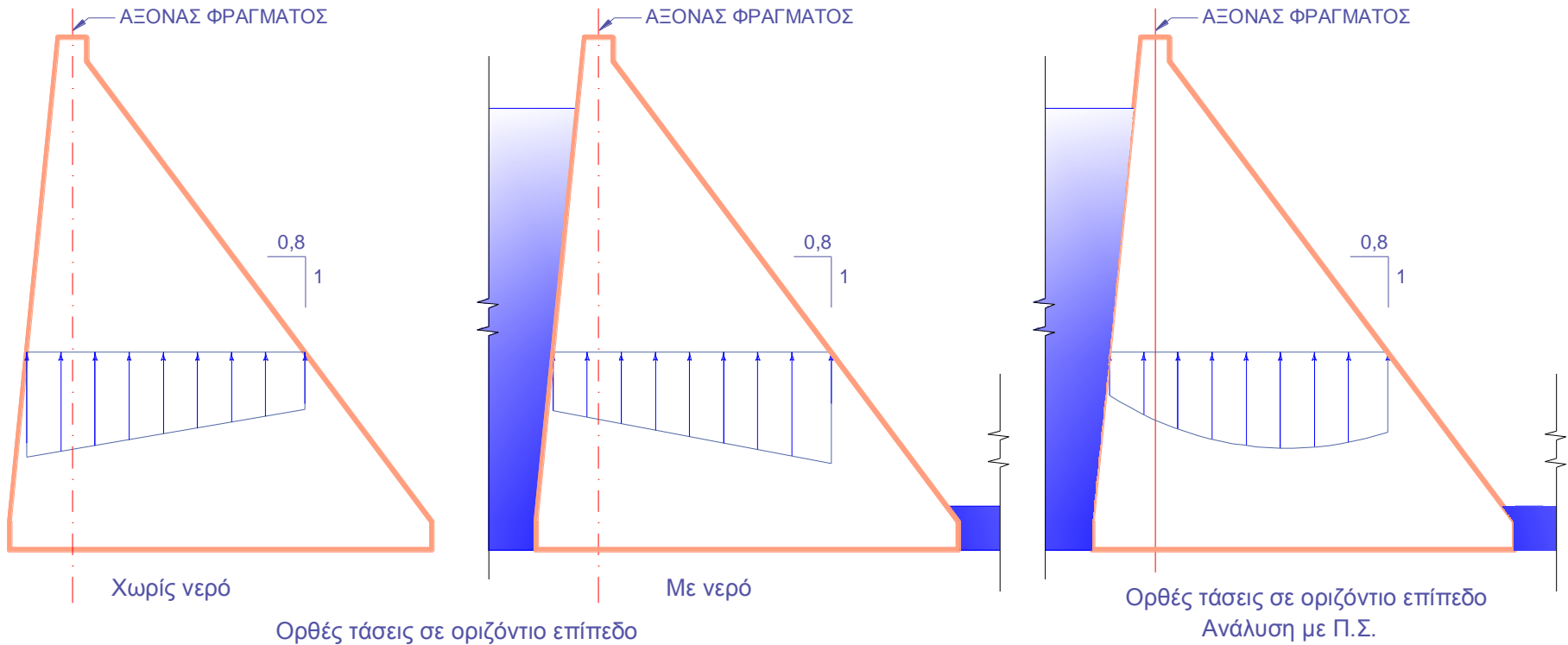
Μείωση κόστους συστήματος εκτροπής

Δραματική μείωση του χρόνου κατασκευής





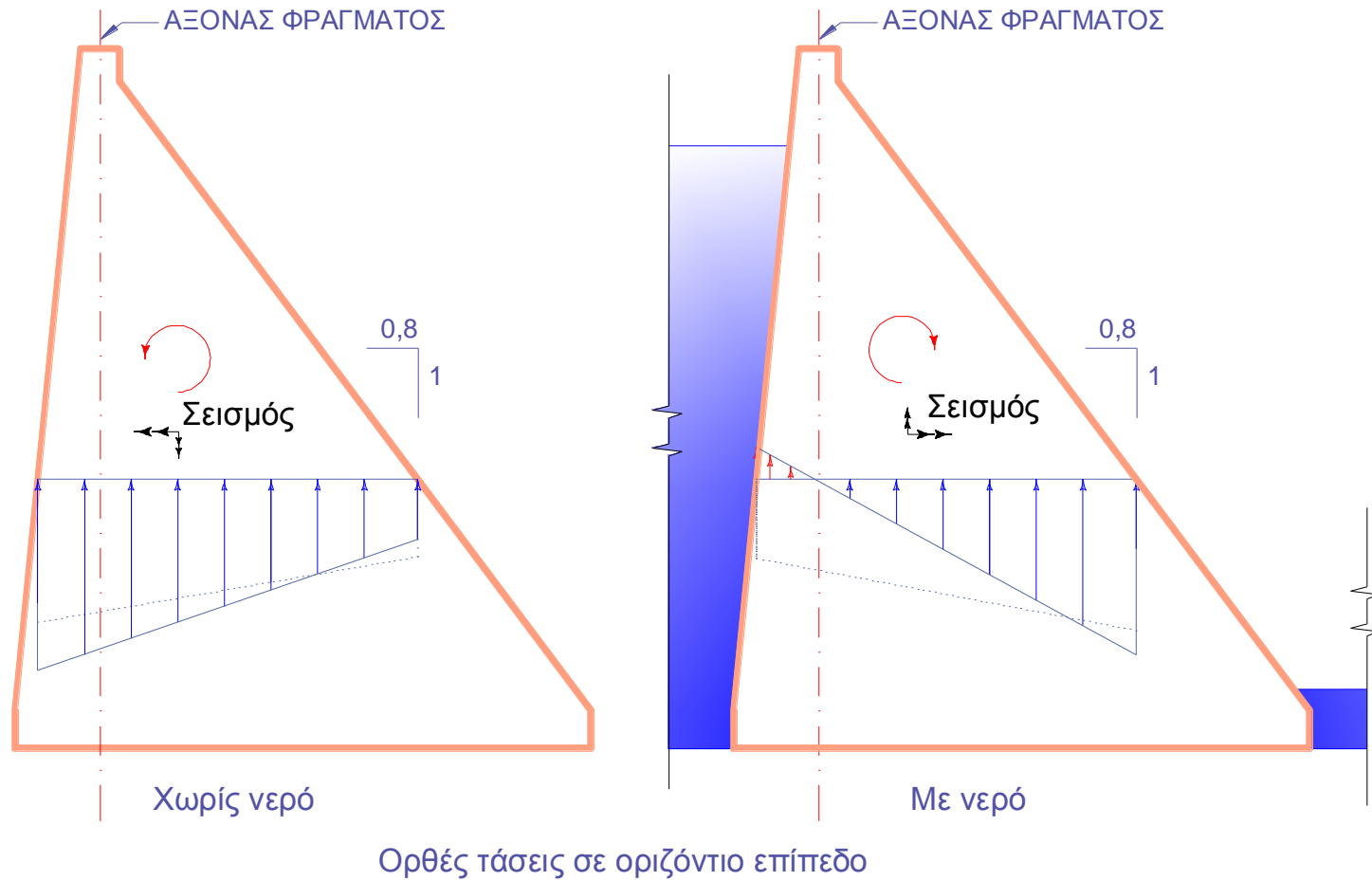
# Κατανομή ορθών τάσεων σε οποιοδήποτε οριζόντιο επίπεδο φράγματος RCC ( ή CVC), χωρίς σεισμό



Εφελκυστικές τάσεις μη επιτρεπτές  
Θλιπτικές τάσεις κατά πολύ μικρότερες από θλιπτική αντοχή



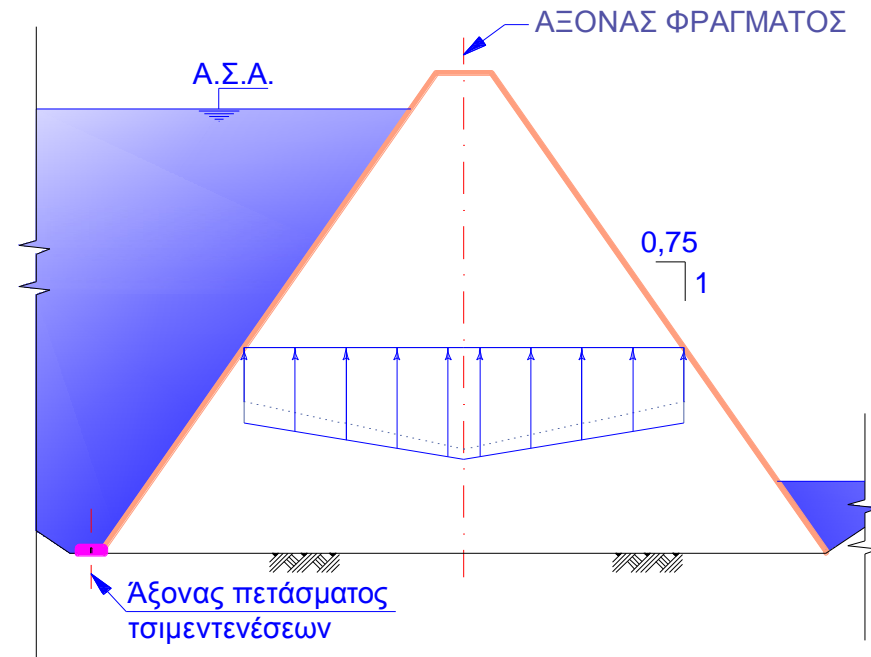
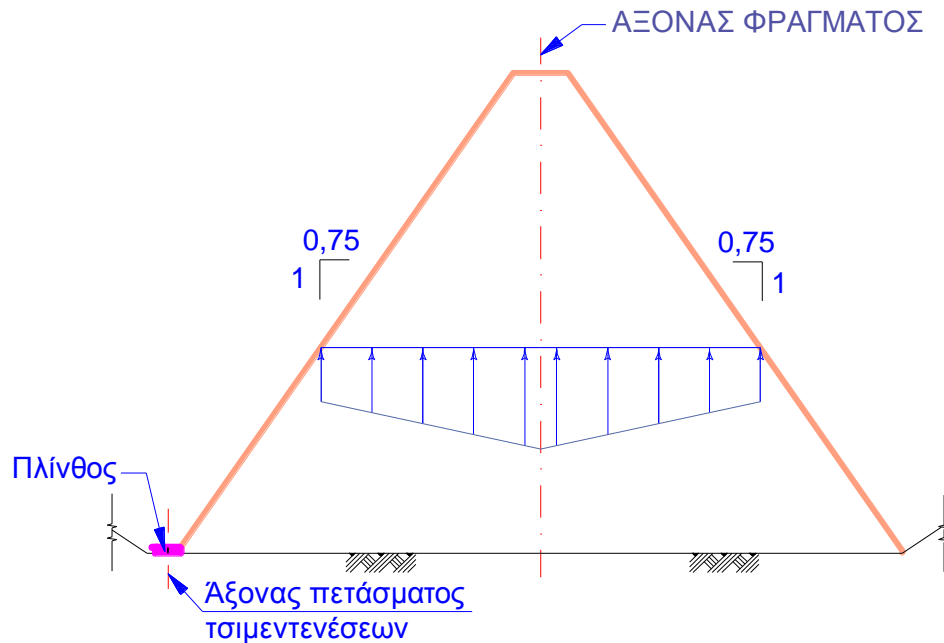
# Κατανομή ορθών τάσεων σε οποιοδήποτε οριζόντιο επίπεδο φράγματος RCC ( ή CVC) με σεισμό





# Φράγμα ΣΕ – Ορθές τάσεις χωρίς σεισμό

## Ορθές τάσεις στην επιφάνεια θεμελίωσης $\sigma \sim \gamma \cdot h$





## Βασικές απαιτήσεις φραγμάτων βαρύτητας

- Ελαχιστοποίηση όγκου (μείωση κόστους) :  
απότομες παρειές φράγματος
- Αντοχή υλικού (σε θλίψη και εφελκυσμό)  
υψηλότερη από τις αναπτυσσόμενες τάσεις
- Στεγανότητα
  - Υλικά χαμηλής διαπερατότητας
  - Απουσία ρωγμών

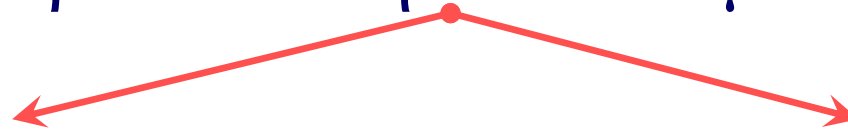


# Επιπτώσεις βασικών απαιτήσεων

Αντοχή σε εφελκυσμό και  
χαμηλή διαπερατότητα υλικού φράγματος



Υψηλή περιεκτικότητα σε τσιμέντο (κονίες)



Υψηλό κόστος ανά  $m^3$

Έκλυση θερμότητας



Μονόλιθοι σε CVC

Αρμοί σε RCC



Κόστος & χρόνος



# Έκλυση θερμότητας



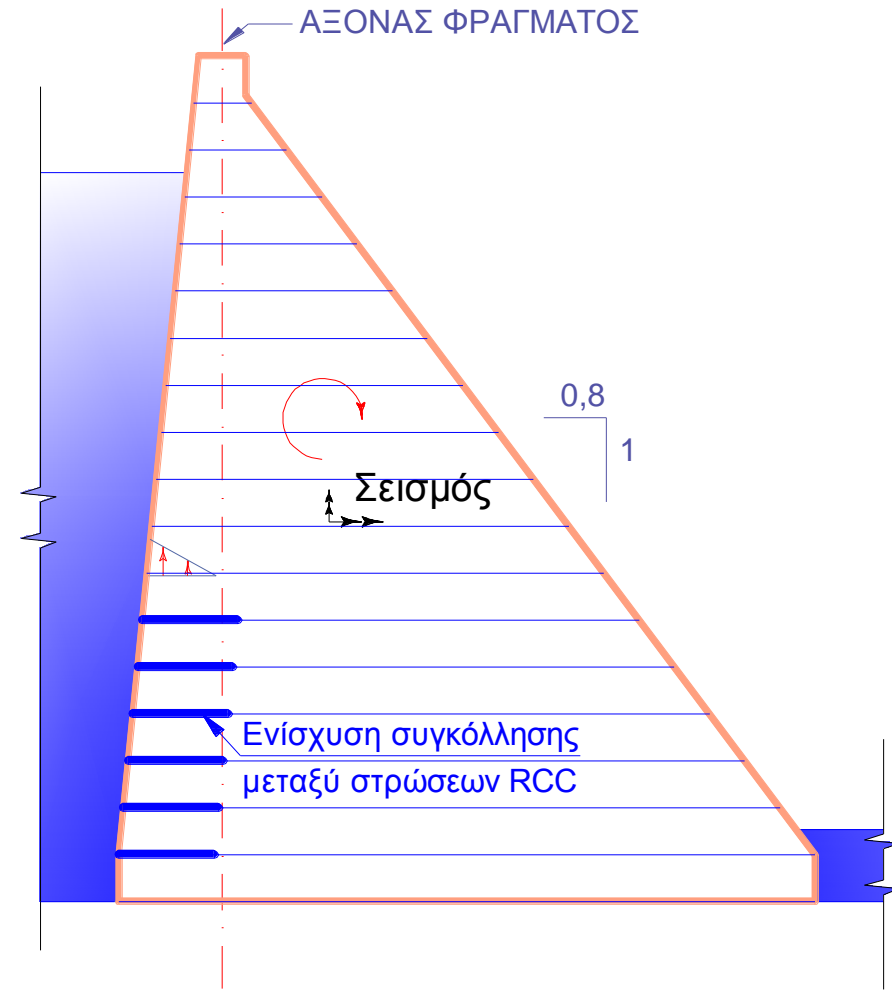
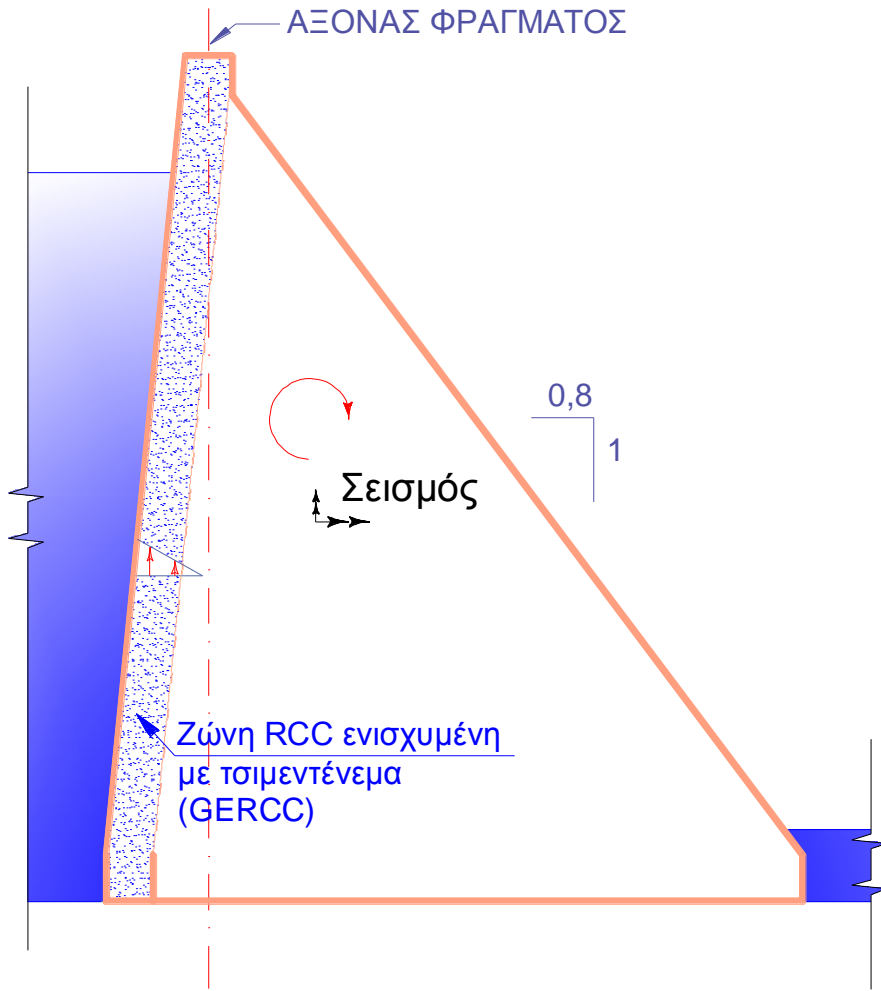
Αρμοί Συστολο/διαστολής  
με μεταλλικές πλάκες  
στα RCC



## Μονόλιθοι στα CVC



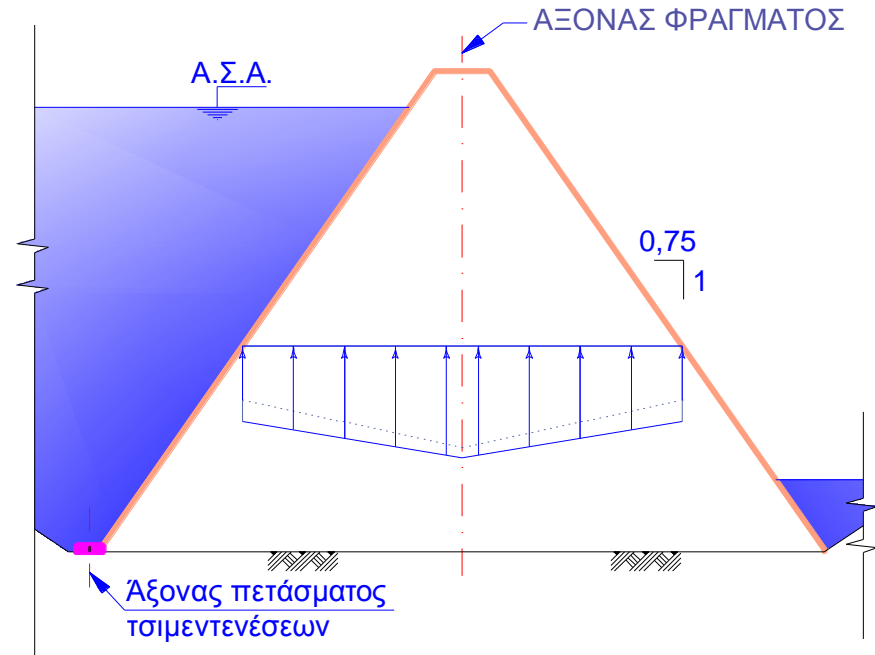
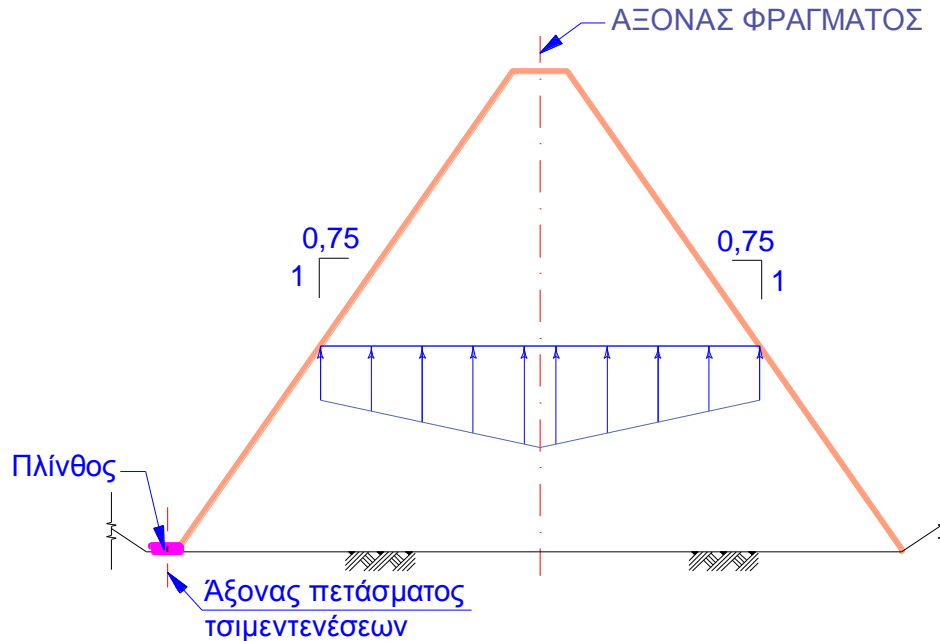
# Αντιμετώπιση εφελκυστικών τάσεων σε φράγμα RCC





# Φράγμα ΣΕ – Ορθές τάσεις χωρίς σεισμό

## Ορθές τάσεις στην επιφάνεια θεμελίωσης $\sigma \sim \gamma * h$

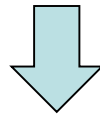


Θλιπτικές τάσεις μικρότερες από θλιπτική αντοχή  
Εφελκυστικές τάσεις ΔΕΝ μπορεί να αναπτυχθούν - ?



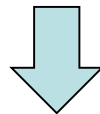


Χαμηλό επίπεδο τάσεων στη θεμελίωση ( $\gamma \cdot h$ )



Δεν απαιτείται

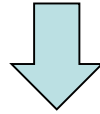
υψηλή αντοχή πετρώματος θεμελίωσης



Δυνατότητα κατασκευής φραγμάτων ΣΕ  
σε ευρύτερο φάσμα πετρωμάτων

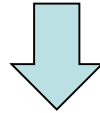


Χαμηλό επίπεδο τάσεων στο σώμα ( $\gamma \cdot h$ )



Δεν απαιτείται

υψηλή αντοχή υλικού φράγματος



Χρήση αδρανών χαμηλής αντοχής

(ΔΕΝ είναι αδρανή σκυροδέματος)

(μειωμένη αντοχή στη δοκιμή εκτριβής)

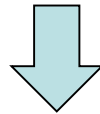
(Σκληρό Επίχωμα και όχι ισχνό RCC)



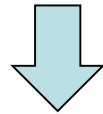
## Παρατήρηση 3

Φράγμα ύψους 100 m,  
μέγιστες θλιπτικές τάσεις στη βάση  $\sim 2,3 \text{ Mpa}$

Με συντελεστή ασφάλειας 3



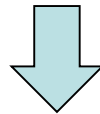
Απαίτηση θλιπτικής αντοχής:  $\sim 7 \text{ Mpa}$



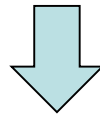
Περιεκτικότητα σκληρού επιχώματος σε  
τσιμέντο  $50 - 70 \text{ kg} / \text{m}^3$



Πολύ δύσκολο να αναπτυχθούν  
στο σώμα του φράγματος εφελκυστικές τάσεις  
(ακόμη και με σεισμό)



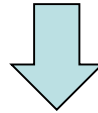
Πρακτικά μηδενική ευαισθησία σε  
σεισμικές καταπονήσεις



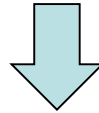
Δυνατότητα κατασκευής ΣΕ σε περιοχές  
υψηλών σεισμικών καταπονήσεων



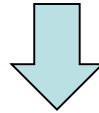
Χαμηλή περιεκτικότητα σε τσιμέντο



Πορώδες υλικού σκληρού επιχώματος: 15%



Υλικό σκληρού επιχώματος: διαπερατό



Θετικές και αρνητικές επιπτώσεις



### Θετικές επιπτώσεις:

- ‘Φυσική’ αποστράγγιση σώματος φράγματος
- Αποφυγή ανάπτυξης πίεσης πόρων στο εσωτερικό του φράγματος

### Αρνητικές επιπτώσεις:

- Ανάγκη κατασκευής στεγανού στοιχείου στην ανάντη παρειά του φράγματος, π.χ.
  - Πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος
  - Μεμβράνη
  - Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (σε φράγματα μικρού ύψους)
- Ανάγκη κατασκευής πλίνθου

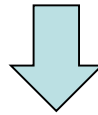


### Επίπτωση στεγανοποίησης στην ανάντη παρειά του φράγματος

Ανάπτυξη ρωγμών αποδεκτή

Δεν επηρεάζεται η ευστάθεια του φράγματος

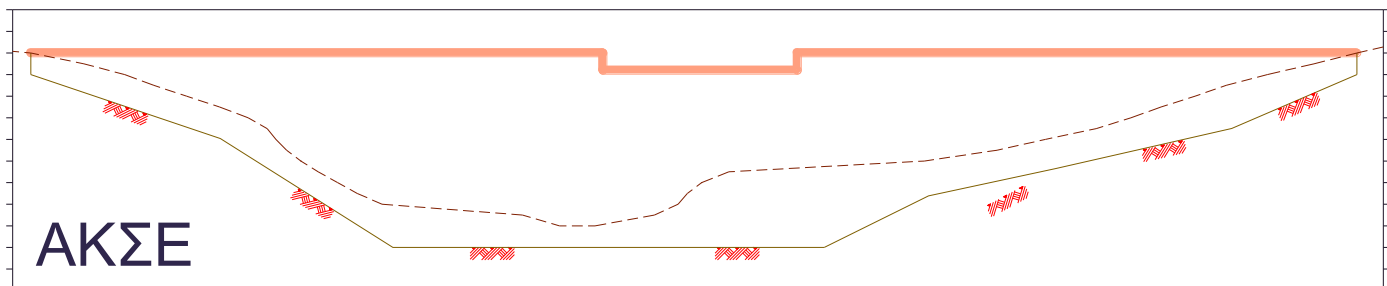
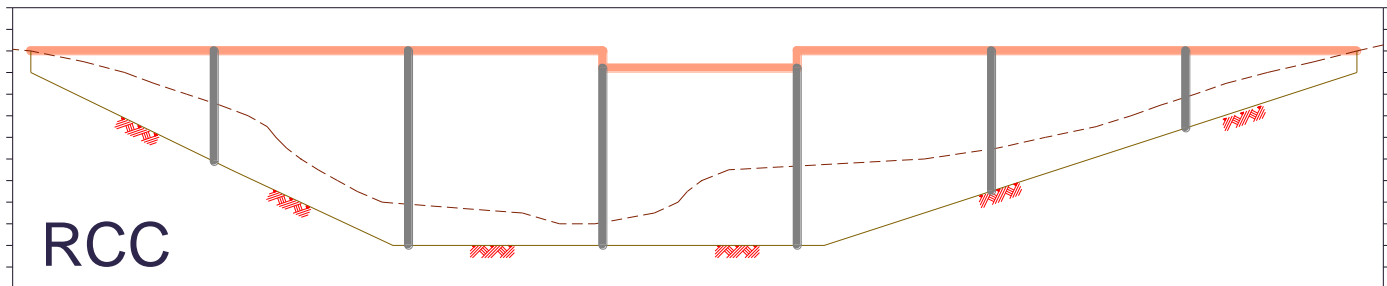
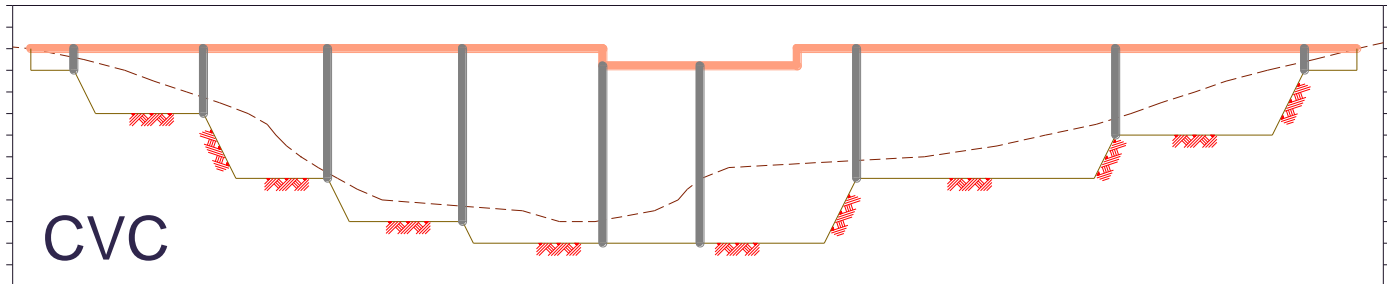
‘Περιορισμένη’ διήθηση νερού



Δεν απαιτείται η διαμόρφωση αρμών  $\Sigma/\Delta$  στο  
σώμα του φράγματος



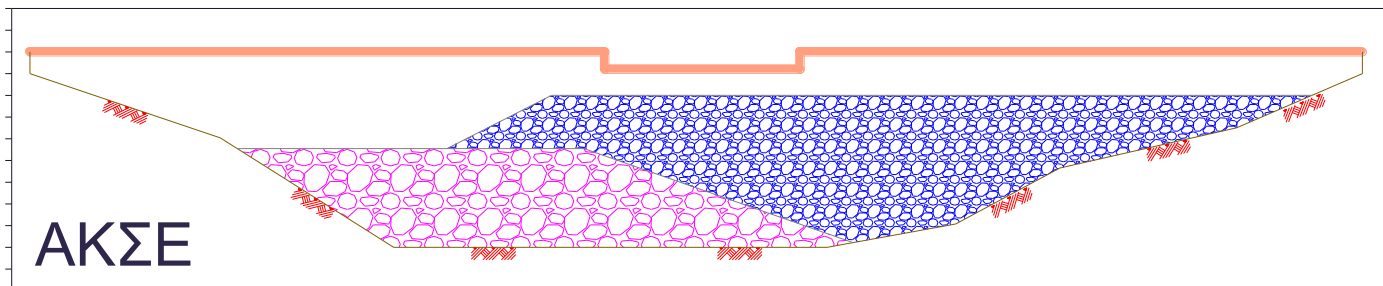
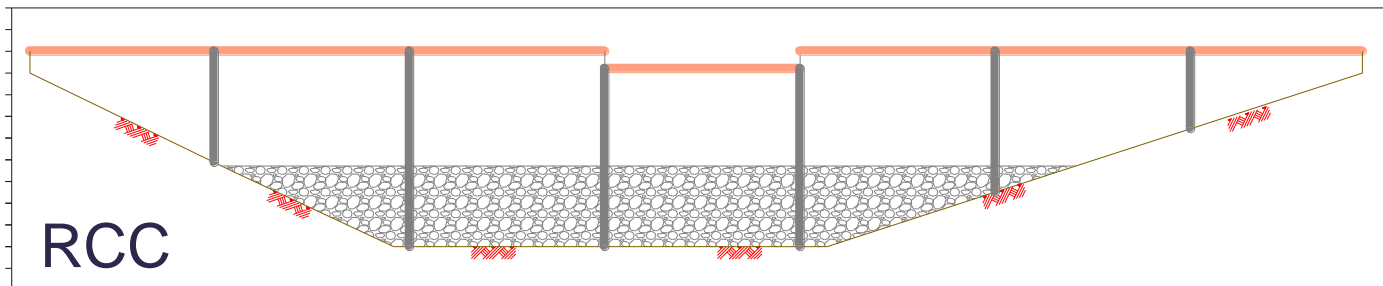
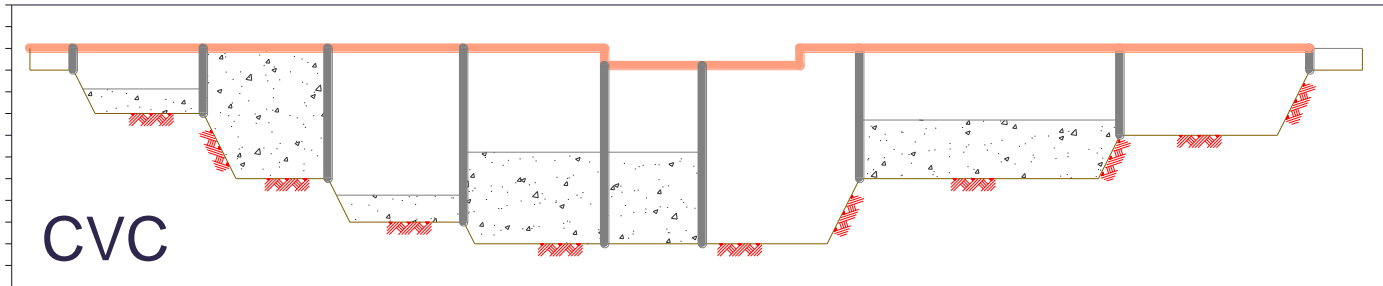
# Επίπτωση απουσίας αρμών στη διαμόρφωση γραμμών εκσκαφής θεμελίωσης φράγματος







# Επίπτωση απουσίας αρμών στη μέθοδο κατασκευής του φράγματος





# Στρώσεις ΣΕ και ταχύτητα ανύψωσης φράγματος

Συνήθης πρακτική σε RCC

Πάχος στρώσης 30 cm μετά τη συμπύκνωση

Τάσεις για αύξηση του πάχους των στρώσεων

Για ΣΕ πάχος στρώσεων 40, 45, 50 cm

Στόχος ‘εφικτός’ 2 στρώσεις / ημέρα

Φράγμα 50 m κατασκευάζεται σε 60 ημέρες!!!



Η ταχεία ανύψωση φράγματος ΣΕ επιτρέπει τον περιορισμό των παραδοχών σχεδιασμού του συστήματος εκτροπής

Δυνατότητα κατάργησης του συστήματος εκτροπής

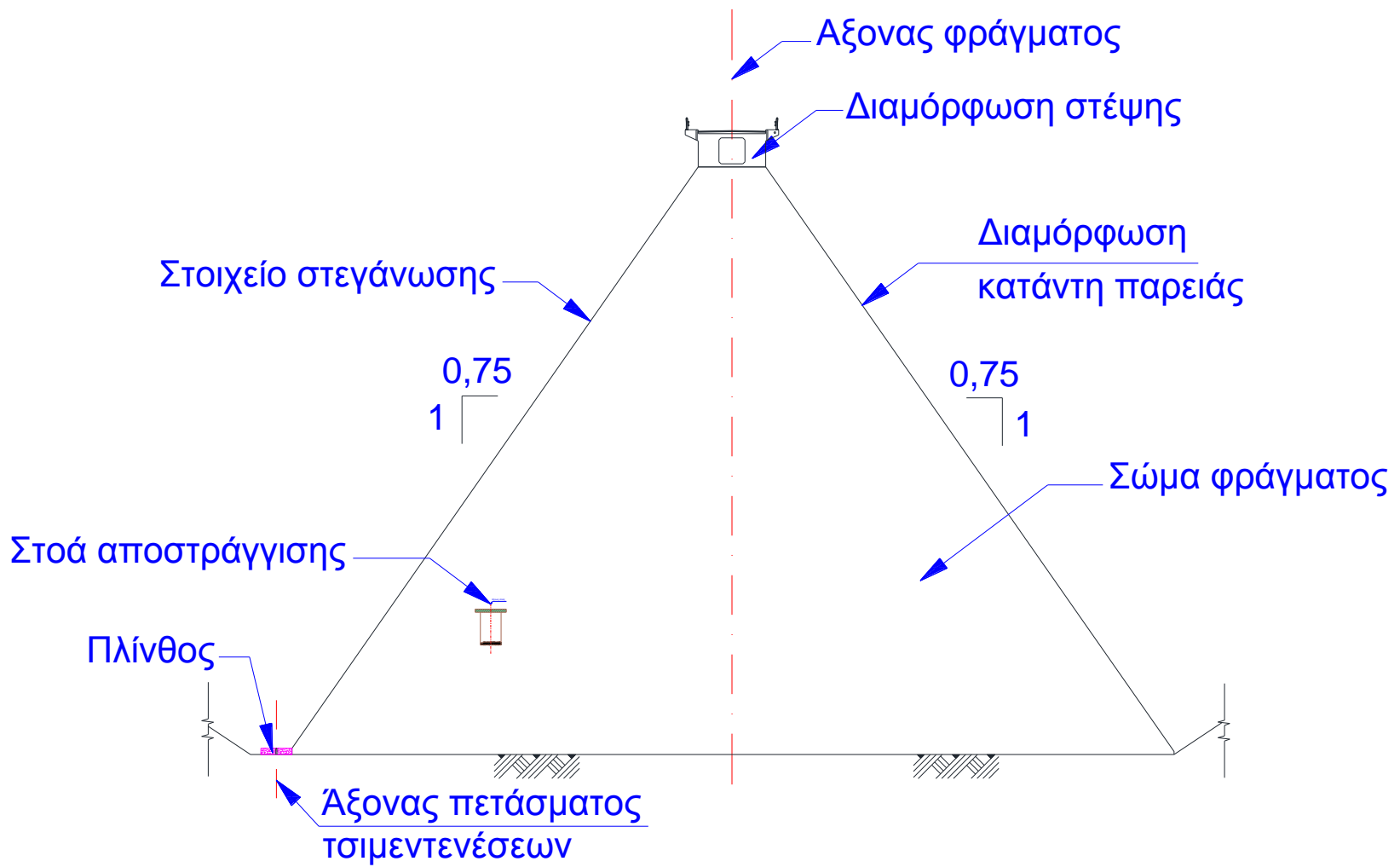
Τα φράγματα ΣΕ είναι υπερπηδητά  
(μείωση των απαιτήσεων σχεδιασμού του συστήματος εκτροπής)



Πηγή: MD&a



# Τυπική διατομή φράγματος





# ΠΛΙΝΘΟΣ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΣΚΛΗΡΟΥ ΕΠΙΧΩΜΑΤΟΣ

Η κατασκευή της πλίνθου  
προηγείται του φράγματος

Διαμόρφωση εκσκαφών θεμελίωσης  
φράγματος και πλίνθου

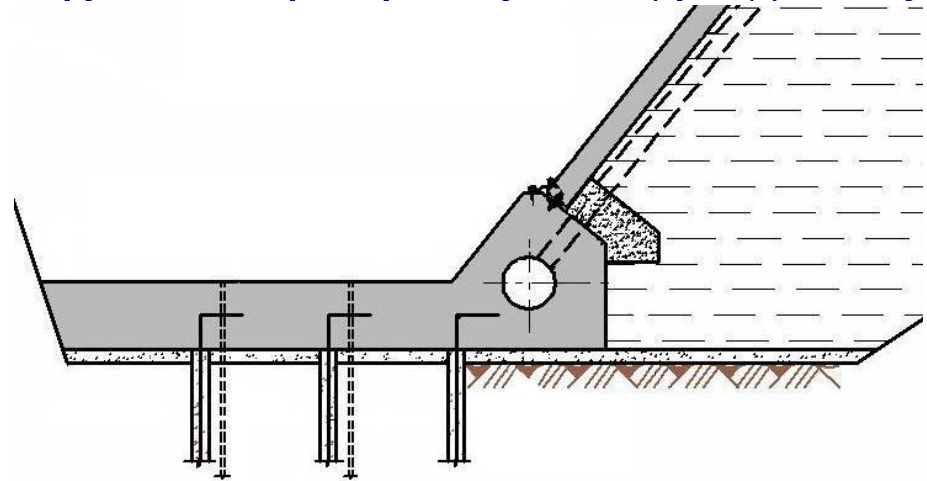
Αγκυρώσεις, οπλισμός και σκυροδέτηση πλίνθου  
χωρίς αρμούς

Τσιμεντενέσεις πετάσματος και τάπητα



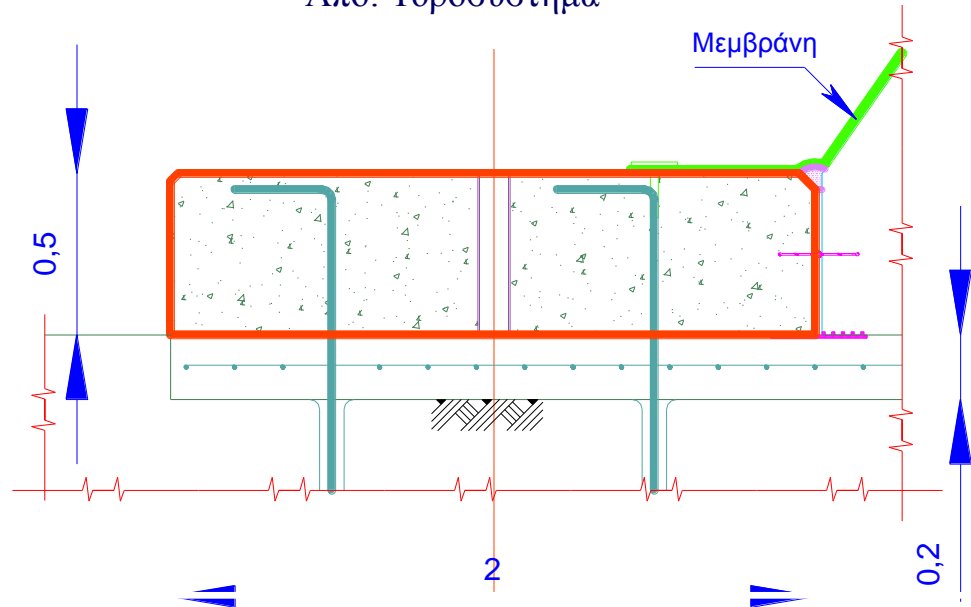
# Διαμόρφωση πλίνθου σύμφωνα με τον τύπο στεγανοποίησης της ανάντη παρειάς του φράγματος

Με πλάκα σκυροδέματος



Από: Υδροσύστημα

Με μεμβράνη





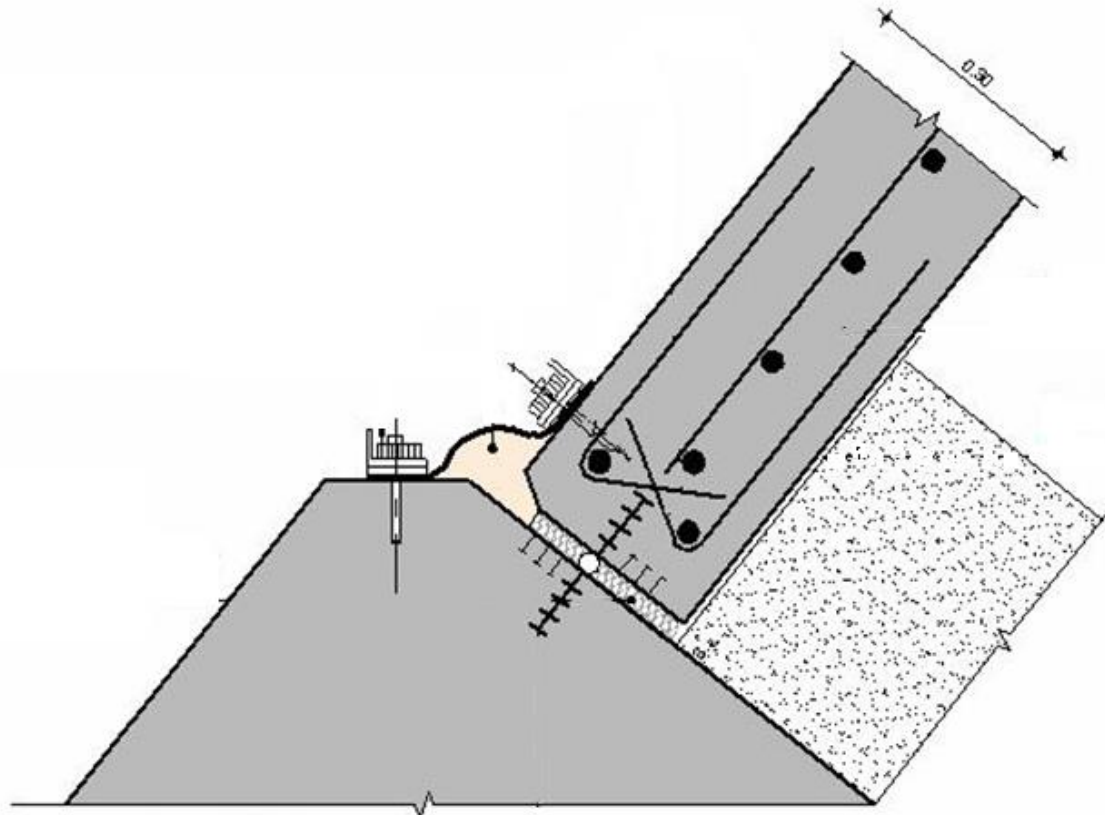
# Πλίνθος φράγματος Κόρης Γεφύρι - Χίου





# Λεπτομέρεια περιμετρικού αρμού με πλάκα σκυροδέματος

Δεν απαιτείται ταινία χαλκού όπως στα ΛΑΠΣ  
Διερεύνηση ολίσθησης πλάκας (!)

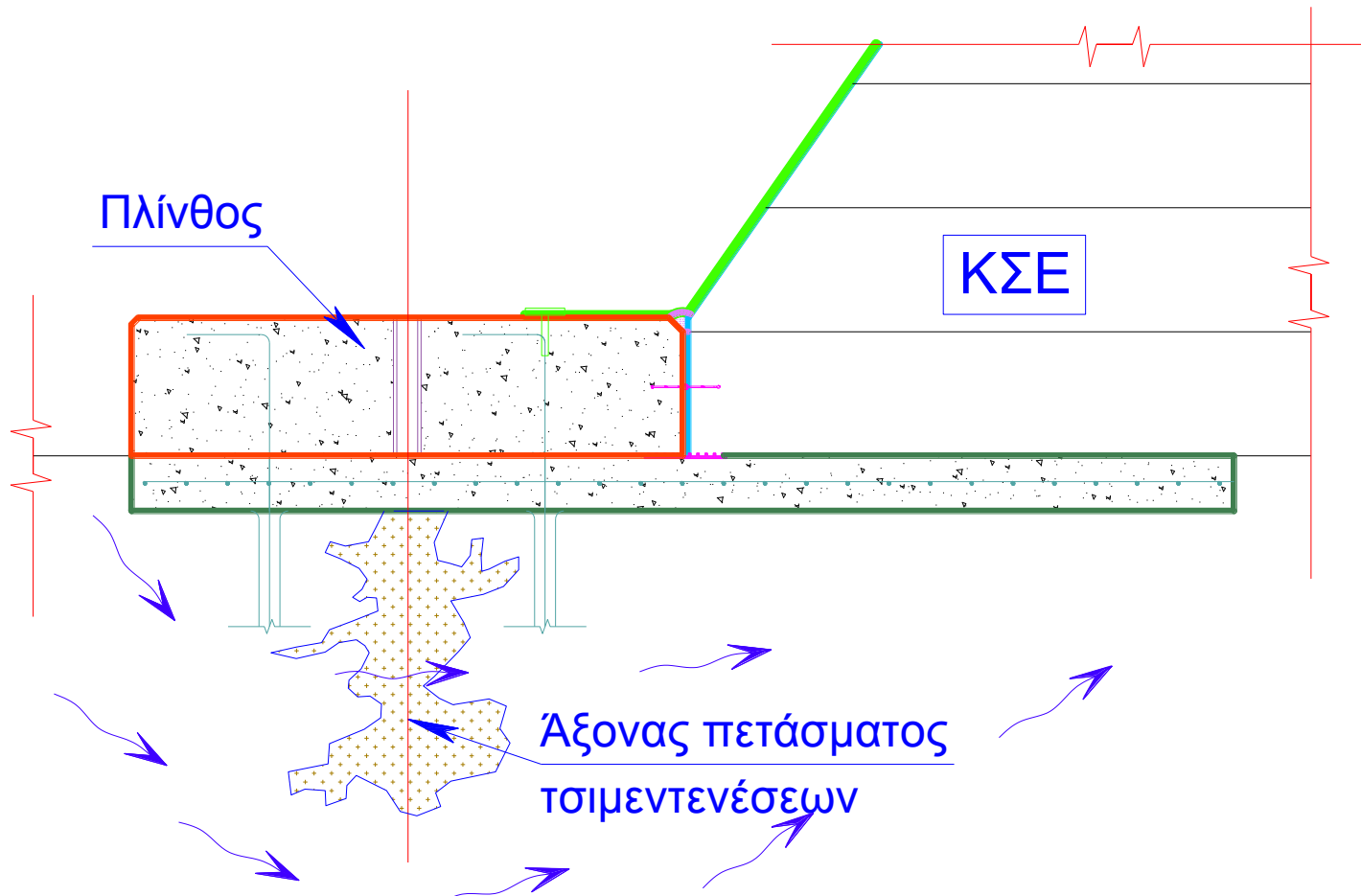






# Πλίνθος

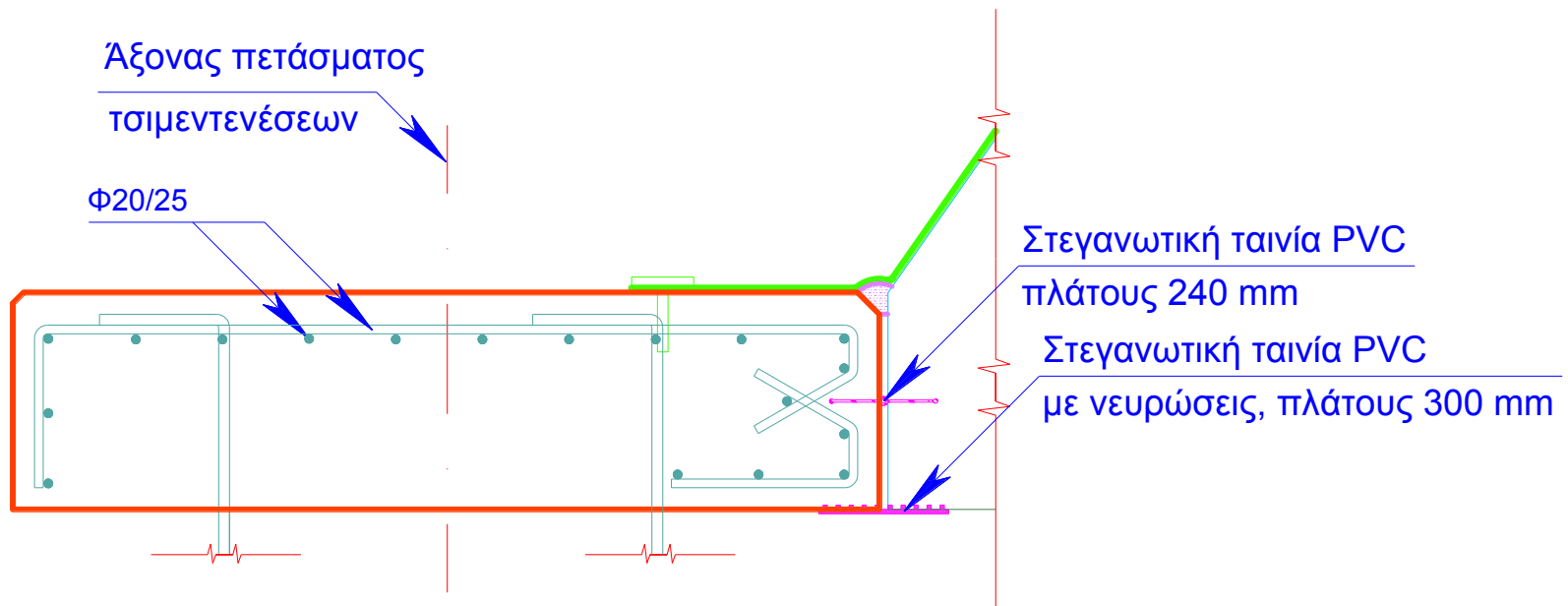
## Ορθογωνικής διατομής Πλάκα μείωσης υδραυλικής κλίσης





# Πλίνθος

## Οπλισμός – Στεγανωτικές ταινίες





# Εκσκαφή τάφρου πλίνθου Διάτρηση οπών ράβδων αγκύρωσης πλίνθου



Πηγή: ΙΝΤΡΑΚΑΤ



## Ράβδοι αγκύρωσης πλίνθου $\Phi 25$ (1,5X1,5 ή 2X2)



Πηγή: INTRAKAT



# Οπλισμός και σωλήνες αποστράγγισης πλίνθου



Πηγή: INTRAKAT



# Σκυροδετημένη πλίνθος



Πηγή: INTRAKAT



# ΣΩΜΑ ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ

Υλικά

Θραυστά, αμμοχάλικα, κορήματα

Χωρίς απαιτήσεις αδρανών σκυροδέματος

Παρασκευαστήριο

Μεταφορά

Διάστρωση - Συμπύκνωση



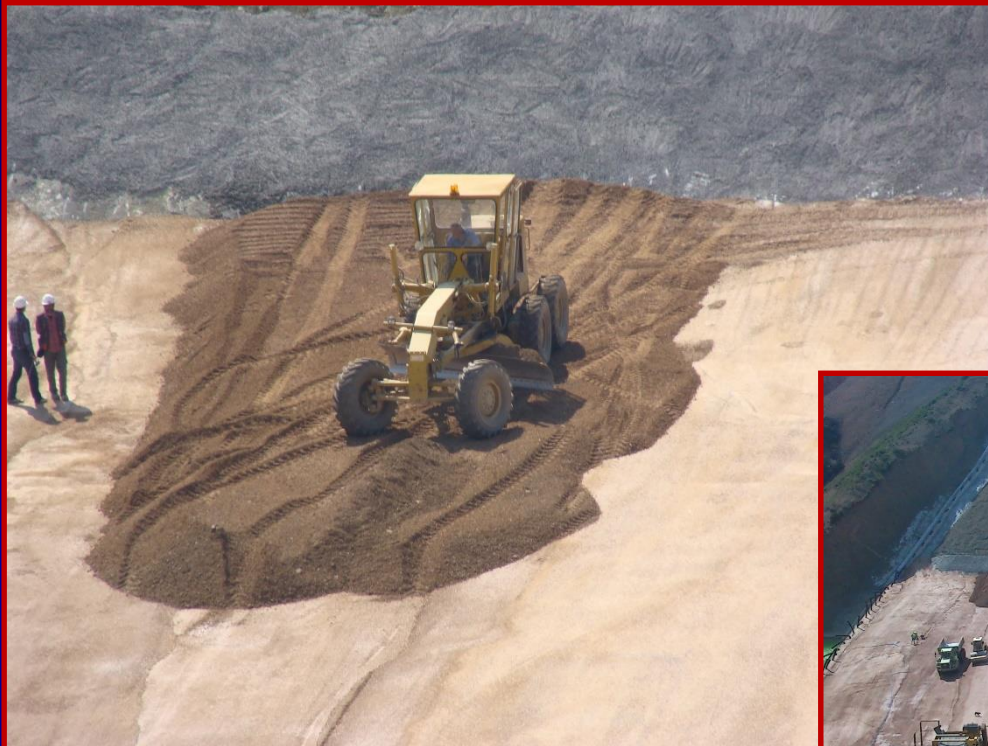
# Φόρτωση και μεταφορά με φορτηγά







# Διάστρωση με προωθητή ή ισοπεδωτή Διάστρωση σε λωρίδες





Ανάγκη εγκιβωτισμού υλικού Σ.Ε.  
στο εκάστοτε δάπεδο εργασίας  
για τη συμπύκνωσή του

ΔΙΑΜΟΡΦΩΣΗ ΑΝΑΝΤΗ ΠΑΡΕΙΑΣ  
ΦΡΑΓΜΑΤΟΣ ΣΚΛΗΡΟΥ ΕΠΙΧΩΜΑΤΟΣ



# Διαμόρφωση ανάντη παρειάς φράγματος

Από τα πλέον ενδιαφέροντα θέματα κατασκευής  
φραγμάτων ΣΕ

Συνήθως η μέθοδος διαμόρφωσης επαφίεται  
στον  
κατασκευαστή του έργου

Επιλογή επίπεδης ή βαθμιδωτής επιφάνειας  
(πλάκα σκυροδέματος ή γεωσύνθετο;)



## Επίπεδη ανάντη παρειά φράγματος Φράγμα Κόρης Γεφύρι - Χίος

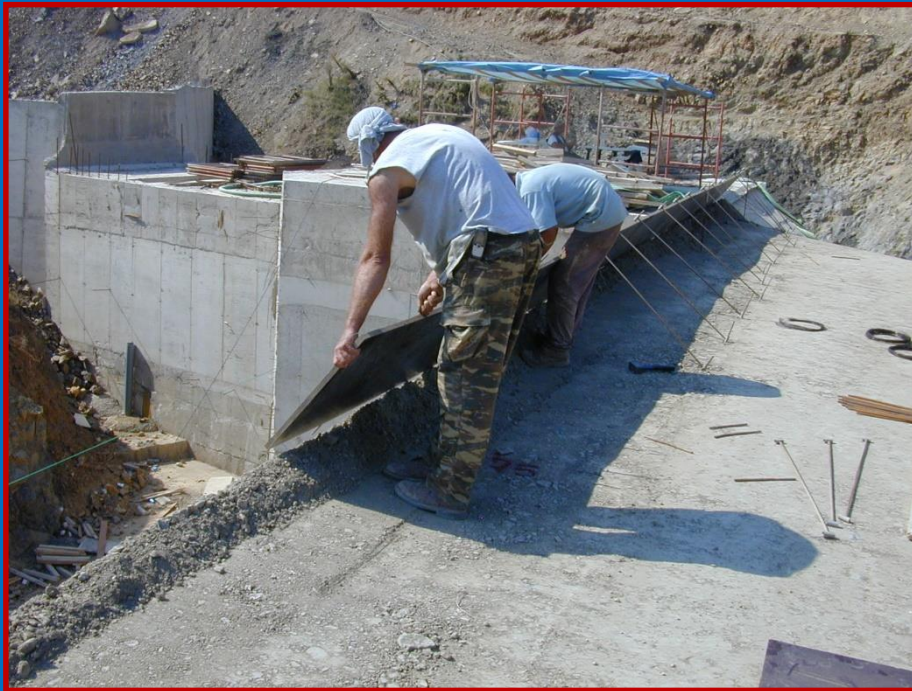


# Βαθμιδωτή ανάντη παρειά φράγματος Φράγμα Βαλσαμιώτη - Κρήτη





## Διαμόρφωση επίπεδης ανάντη παρειάς σκληρού επιχώματος Φράγμα Κόρης Γεφύρι - Χίος





# Διαμόρφωση επίπεδης ανάντη παρειάς σκληρού επιχώματος Φράγμα Κόρης Γεφύρι - Χίος





# Διάστρωση σε επαφή με ανάντη μεταλλότυπο







# Διάστρωση σε επαφή με ανάντη μεταλλότυπο





# Συμπύκνωση με δονητικό μηχανικό κόπανο

