

Φράγματα – Υδραυλικές κατασκευές

9ο εξάμηνο Σχολής Πολιτικών Μηχανικών



Διάλεξη 4^η: Γεωφράγματα (Β' μέρος)

Σπύρος Μίχας, Δημήτρης Δερματάς, Ανδρέας Ευστρατιάδης

Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Ακαδημαϊκό έτος 2015-16

Φίλτρα και στραγγιστήρια

Στοιχεία σχεδιασμού και κατασκευής



Υλικά Κατασκευής Γεωφραγμάτων

■ Φίλτρα και Στραγγιστήρια

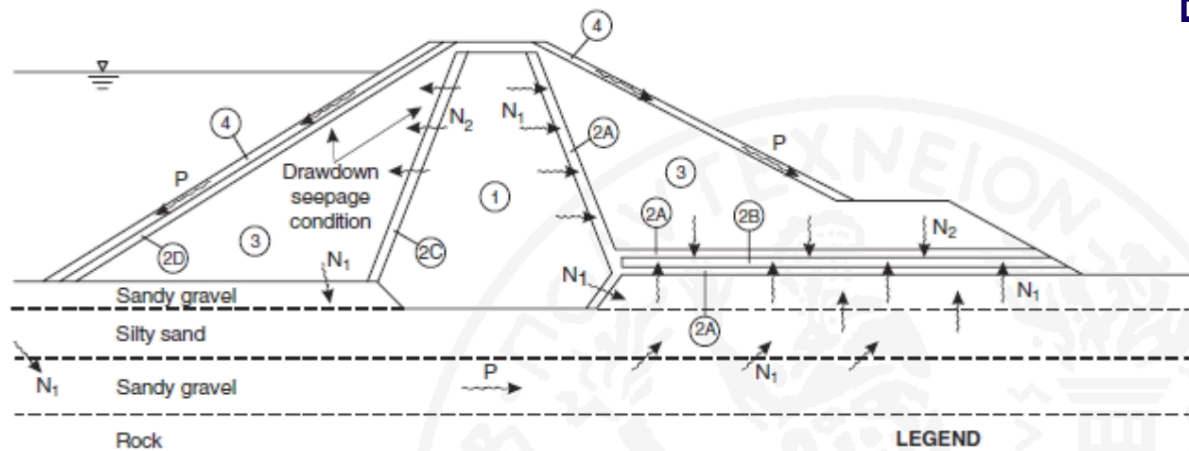
A.Λειτουργία φίλτρων

- ❑ **Στρώση κατάντη κατακόρυφου λεπτόκοκκου φίλτρου** τοποθετείται για την αποφυγή, κατά την κίνηση του νερού, υδραυλικής διάβρωσης (έκπλυση πυρήνα στο κατάντη σώμα στήριξης όταν αυτό αποτελείται από αρκετά μεγαλύτερα τεμάχια, συνήθης περίπτωση λιθόρριπτων φραγμάτων).
- ❑ **Στρώση ανάντη κατακόρυφου λεπτόκοκκου φίλτρου** τοποθετείται για την έμφραξη τυχόν αναπτυσσόμενων ρωγμών και την αποφυγή ροής νερού, καθώς και για την αντίστροφη λειτουργία του φίλτρου στον ταχύ καταβιβασμό της στάθμης (περίπτωση που μοιάζει στην πρώτη)

B.Κρίσιμα φίλτρα

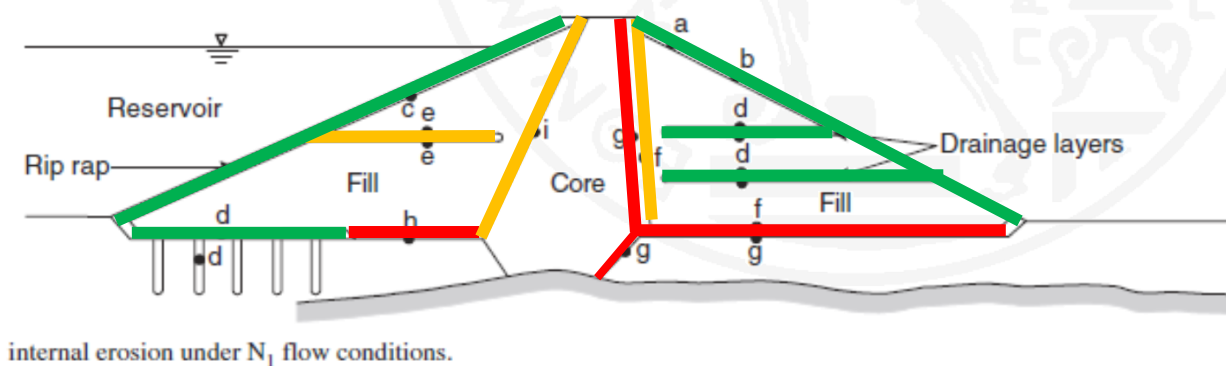
- ❑ **Κρίσιμα φίλτρα:** αυτά που η τυχόν ελλιπής ή εκτός προδιαγραφών λειτουργία τους επηρεάζει την ευστάθεια και αυξάνει την πιθανότητα αστοχίας του φράγματος.
- ❑ Πιθανώς κρίσιμα φίλτρα: αυτά που μπορεί να είναι κρίσιμα υπό ορισμένες συνθήκες.
- ❑ Μη κρίσιμα: αυτά που γενικά δεν μπορούν να επηρεάσουν σημαντικά την ασφάλεια του φράγματος, αφορούν τη φάση κατασκευής ή επιδέχονται επισκευή.

Κρίσιμα φίλτρα



Zone	Description
①	Earthfill
②A ②B ②C ②D	Filter/drains
③	Earth or rockfill
④	Rip rap

- Συνθήκες ροής:
 - N1: ροή μεταξύ εδάφους και φράγματος
 - N2: ροή μεταξύ ζωνών φράγματος
 - P: ροή παράλληλη με τις ζώνες



- κρίσιμο
- πιθανά κρίσιμο
- μη κρίσιμο

Προσοχή: Σχεδιασμός και κατασκευή με την ίδια επιμέλεια!

Figure 9.2. Filter functions (adapted from ICOLD, 1986).

Υλικά Κατασκευής Γεωφραγμάτων

■ Φίλτρα και Στραγγιστήρια

Γ. Σχεδιασμός και επιλογή ζωνών

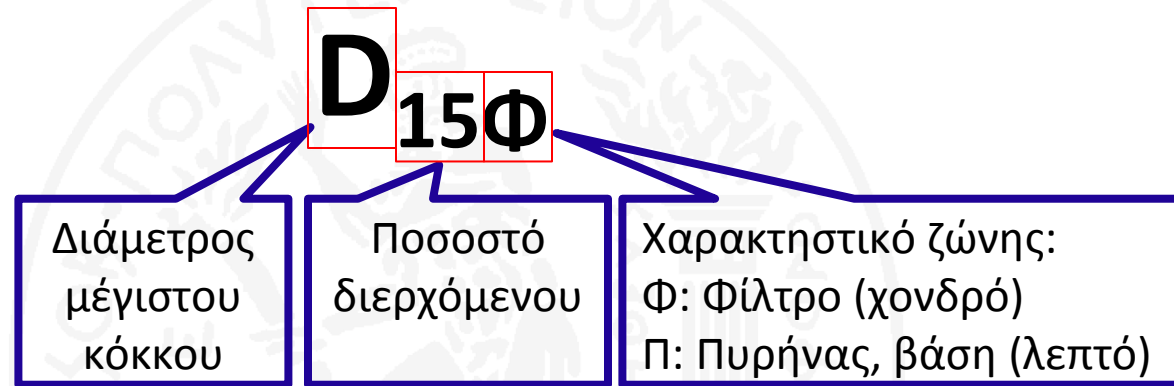
- ❑ Σε πολλές περιπτώσεις για τη διευκόλυνση της στράγγισης του νερού προς τα κατάντη, τοποθετείται σε επαφή με το κατάντη κατακόρυφο φίλτρο, μια οριζόντια διάταξη φίλτρου – στραγγιστηρίου (για λόγους διαβάθμισης)
- ❑ Εφόσον απαιτείται για λόγους διαβάθμισης, ανάμεσα στο κατάντη φίλτρο και το σώμα στήριξης, μπορεί να παρεμβάλλεται στρώση χονδρόκοκκου φίλτρου και στραγγιστηρίου
- ❑ Για λόγους διευκόλυνσης της στράγγισης (εφόσον κρίνεται απαραίτητη), στην περίπτωση απότομου καταβιβασμού της στάθμης, τοποθετούνται οριζόντιες στραγγιστικές στρώσεις στο ανάντη σώμα στήριξης ή στο ανώτερο τμήμα κάτω από το rip-rap.
- ❑ Οριζόντιες στραγγιστικές στρώσεις μπορούν να τοποθετηθούν και στο κατάντη σώμα στήριξης (εφόσον κριθεί απαραίτητο λόγω της φύσης του αναχώματος), για την εκτόνωση του επιφανειακού νερού κατά και μετά το πέρας κατασκευής.
- ❑ Τα φίλτρα που προδιαγράφονται αυστηρά για την ευστάθεια του αναχώματος ονομάζονται «κρίσιμα» και περιλαμβάνουν συνήθως το κατάντη κατακόρυφο και το οριζόντιο στην επαφή του κατάντη σώματος με τη στάθμη θεμελίωσης (στην περίπτωση ανεστραμμένου πυρήνα στη βάση, κρίσιμο είναι και το φίλτρο σε επαφή με τη ζώνη 1).

Υλικά Κατασκευής Γεωφραγμάτων

■ Φίλτρα και Στραγγιστήρια

Δ. Προδιαγραφές φίλτρου

□ Συμβολισμοί:



- $D_{15\Phi}$: Διάμετρος μέγιστου κόκκου από το 15% διερχόμενου χονδρού υλικού
- $D_{85\Pi}$: Διάμετρος μέγιστου κόκκου από το 85% διερχόμενου λεπτού υλικού

Υλικά Κατασκευής Γεωφραγμάτων

■ Φίλτρα και Στραγγιστήρια

Δ1. Προδιαγραφές φίλτρου: Κριτήρια συγκράτησης

- Για να ελεγχθεί η ανάγκη τοποθέτησης κατάντη κατακόρυφου φίλτρου – στραγγιστηρίου ανάμεσα στον πυρήνα και το σώμα στήριξης, θα πρέπει να πληρούνται τα παρακάτω κριτήρια (USBR, Terzaghi, Sherard, κλπ):

- Απαίτηση για ικανοποιητική συγκράτηση υλικού πυρήνα:

$$D_{15\Phi} \leq 5D_{85\Pi}$$

$$D_{15\Phi} \leq 40D_{15\Pi}$$

με την προϋπόθεση ότι τα λεπτόκοκκα (διερχόμενα από το Νο200) είναι λιγότερα από 15% και μη πλαστικά (χωρίς συνοχή).

- Άλλα κριτήρια, όταν το διαθέσιμο υλικό έχει περισσότερα από 15% λεπτόκοκκα

- Για $A=15\sim 40\%$ λεπτόκοκκα, $D_{15\Phi} = \frac{40-A}{40-15} (4D_{85\Pi} - 0.70) + 0.70$

- Για $A=40\sim 85\%$ λεπτόκοκκα, $D_{15\Phi} \leq 0.70 \text{ mm}$

- Για $A>85\%$ λεπτόκοκκα, $D_{15\Phi} \leq 9D_{85\Pi}$

Υλικά Κατασκευής Γεωφραγμάτων

■ Φίλτρα και Στραγγιστήρια

Δ2. Προδιαγραφές φίλτρου: Κριτήριο διαπερατότητας

- Εξασφάλιση επαρκούς διαπερατότητας ώστε η ροή της διήθησης να γίνεται χωρίς ανάπτυξη σημαντικών πιέσεων:
 - Απαίτηση για ικανοποιητική διαπερατότητα φίλτρου:

$$D_{15\phi} > 4 \sim 5D_{15\pi}$$

Εφαρμογή στην χονδρόκοκκη περιβάλλουσα του φίλτρου

Υλικά Κατασκευής Γεωφραγμάτων

■ Φίλτρα και Στραγγιστήρια

Δ3. Προδιαγραφές φίλτρου: Κριτήριο διαχωρισμού

- Εξασφάλιση κοκκομετρίας τέτοιας που να αποτρέπει το διαχωρισμό των υλικών του φίλτρου κατά τις φάσεις φορτοεκφόρτωσης, μεταφοράς, διάστρωσης:

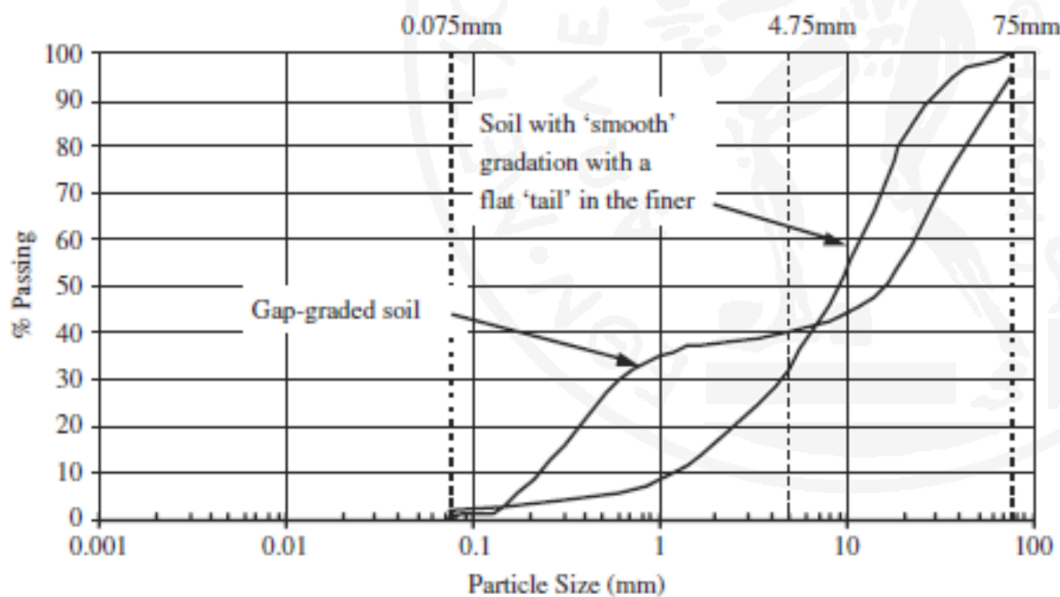
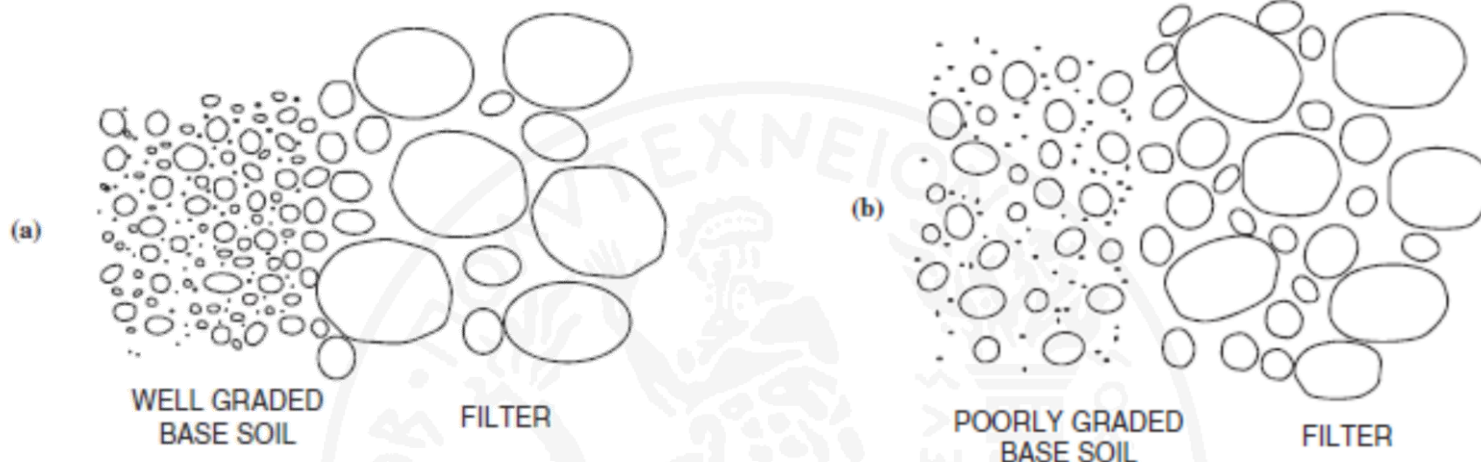
$D_{10\Phi}$	$D_{90\Phi}$
<0.5	20
0~0.5	25
1.0~2.0	30
2.0~5.0	40
5.0~10.0	50
>10	60

- Ομαλότητα και ομοιομορφία κοκκομετρικής καμπύλης
 - Συντελεστής ομοιομορφίας

$$D_{60\Phi}/D_{10\Phi} \leq 6$$

Υλικά Κατασκευής Γεωφραγμάτων

■ Φίλτρα και Στραγγιστήρια



□ Ομοιομορφία και ομαλότητα της κοκκομετρικής καμπύλης (εξασφάλιση συγκράτησης και διαχωρισμού)

CLAY TO SILT	SAND	GRAVEL
--------------	------	--------

Υλικά Κατασκευής Γεωφραγμάτων

■ Φίλτρα και Στραγγιστήρια

Δ4. Προδιαγραφές φίλτρου. Κριτήριο κατάρρευσης.

- ❑ Τα φίλτρα θα πρέπει να είναι «καταρρεύσιμα», δηλαδή η σύσταση τους θα πρέπει να τους επιτρέπει να ακολουθούν (εάν χρειαστεί) τη συνίζηση του πυρήνα και την πλήρωση ρωγμών εάν προκύψουν.
- ❑ Η δυνατότητά τους αυτή επιτυγχάνεται:
 - ❑ με ελαχιστοποίηση των λεπτόκοκκων κλασμάτων (λεπτόκοκκα λιγότερα από 5%)
 - ❑ Με εξασφάλιση μηδενικής πλαστιμότητας και συνοχής
- ❑ Ο έλεγχος καταρρευσιμότητας μπορεί να γίνει με τη βύθιση δειγμάτων σε νερό.

Υλικά Κατασκευής Γεωφραγμάτων

■ Φίλτρα και Στραγγιστήρια

Δ5. Προδιαγραφές φίλτρου. Κριτήριο αλλοιώσεων

- Δεν είναι αποδεκτές αλλαγές της κοκκομετρικής διαβάθμισης των φίλτρων
- Ως φίλτρα μπορούν να χρησιμοποιηθούν διαβαθμισμένα αμμοχάλικα ποταμού (στρογγυλοποιημένα) ή και θραυστά υλικά λατομείου. Στη δεύτερη κυρίως περίπτωση, τίθενται απαιτήσεις για τη διασφάλιση/διατήρηση της κοκκομετρίας του υλικού χωρίς την μετάπτωση/μεταβολή του είτε:
 - με περαιτέρω θραύση κατά τη διάστρωση
 - με συγκόλληση του σε μεγαλύτερα τεμάχια
 - φαινόμενο διαγένεσης – συγκόλληση σε χαμηλές πιέσεις και θερμοκρασίες,
 - γωνιώδεις κόκκοι που συγκολλούνται,
 - παραγωγή παιπάλης στα ασβεστολιθικά/τσιμεντοποίηση φίλτρου
- Για την αποφυγή των παραπάνω, οι ελάχιστες προδιαγραφές περιλαμβάνουν:
 - Δοκιμή Εκτριβής αδρανών (Los Angeles) για την τάση θραύσης των αδρανών κάτω από τη μηχανική πίεση διάστρωσης : αποδεκτή απώλεια <40%
 - Δοκιμή υγείας αδρανών για την τάση θραύσης των αδρανών κατά τον εμποτισμό και την ξήρανση τους (sodium sulphate soundness test): αποδεκτή απώλεια <14%

Υλικά Κατασκευής Γεωφραγμάτων

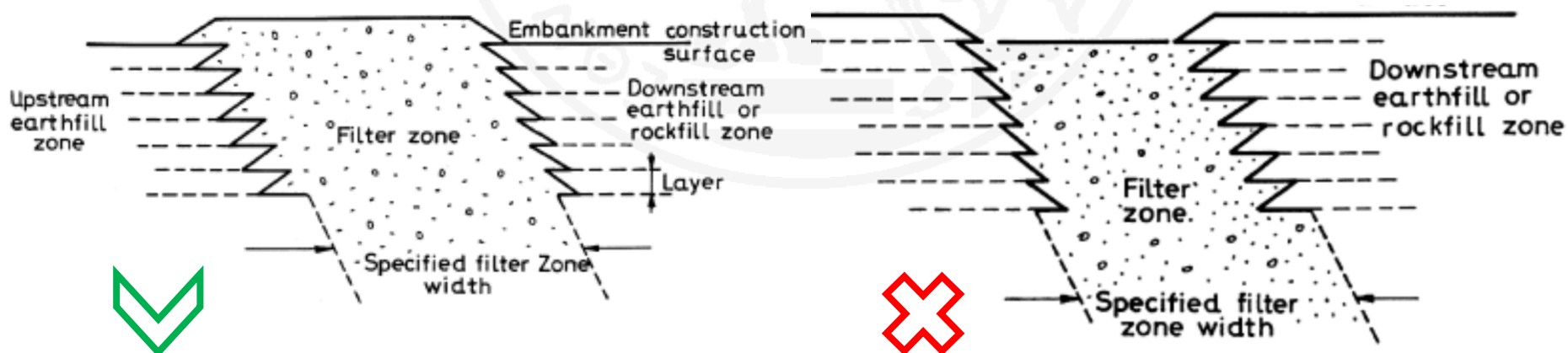
■ Φίλτρα και Στραγγιστήρια

Πλάτος ζωνών φίλτρου - διάστρωση

- Για κατασκευαστικούς λόγους, το ελάχιστο πλάτος είναι 2,5-3,0μ. Συνήθως τοποθετούνται στρώσεις φίλτρου 3,0-4,0μ.
- Διαστρώνεται σε στρώσεις πάχους 40-50εκ.

Βασικές αρχές διάστρωσης

- Το φίλτρο δεν χρειάζεται ιδιαίτερη συμπύκνωση για την αποφυγή μείωσης της διαπερατότητας του.
- Κατά την κατασκευή, για την αποφυγή του κινδύνου ανάμιξης με λεπτόκοκκα υλικά πυρήνα, το φίλτρο διατηρείται σε υψηλότερη στάθμη.

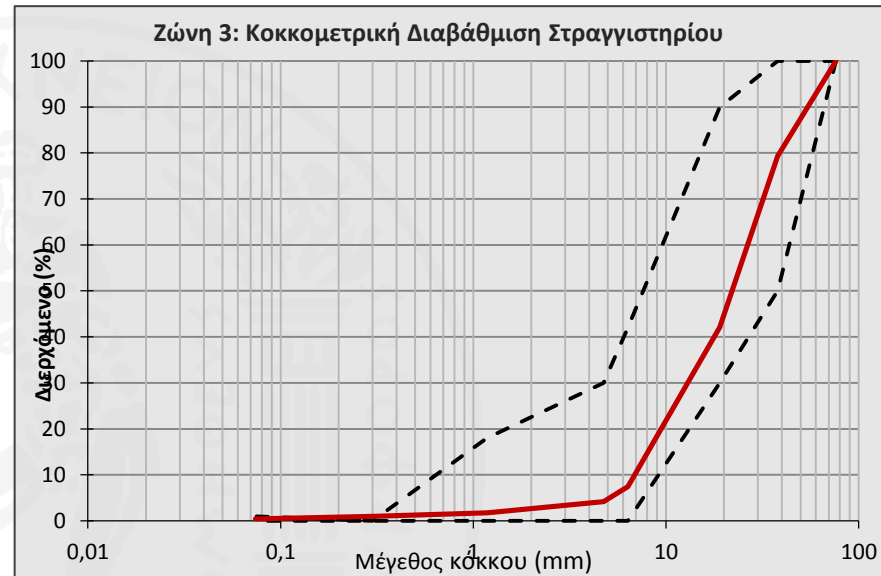
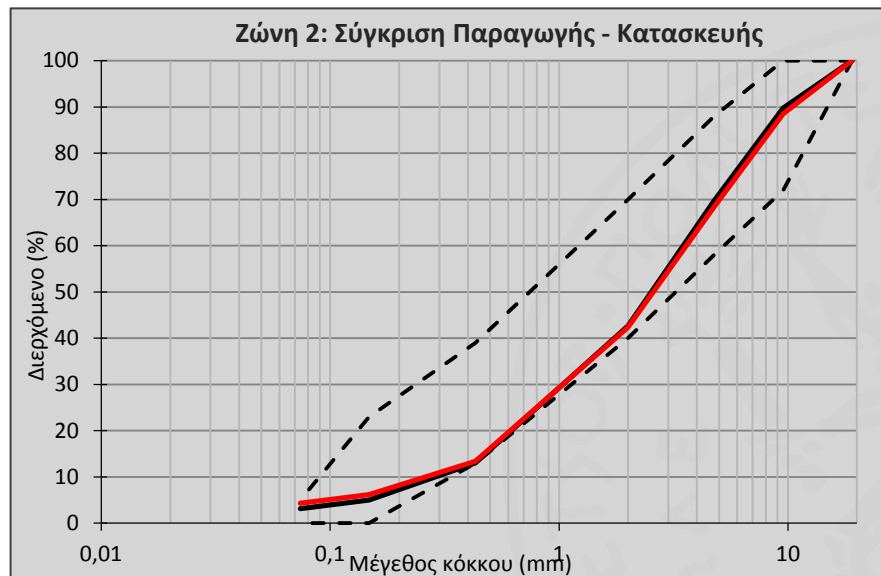


Πηγή: Geotechnical engineering of dams, R.Fell, P.MacGregor etc

Υλικά Κατασκευής Γεωφραγμάτων

■ Φίλτρα και Στραγγιστήρια

Προδιαγραφή και κοκκομετρία – Φράγμα Αποσελέμη



Λεπτόκοκκο Φίλτρο - Ζώνη 2		
Πρότυπο κόσκινο	Ποσοστό (%κ.β.) διερχόμενο	
	Απαίτηση Προδιαγραφών (εύρος)	Μέση τιμή δειγμάτων ελέγχου μετά τη διάστρωση
3/4"	100	100
3/8"	72-100	89
No.4	58-88	68
No.10	40-70	42
No.40	13-39	13
No.100	0-23	6,2
No.200	<5	4,3

Χονδρόκοκκο Φίλτρο / Στραγγιστήριο - Ζώνη 3		
Πρότυπο κόσκινο	Ποσοστό (%κ.β.) διερχόμενο	
	Απαίτηση Προδιαγραφών (εύρος)	Μέση τιμή δειγμάτων ελέγχου μετά τη διάστρωση
3"	100	100
1 - 1/2"	50-100	80
3/4"	30-90	42
1/4"	0-42	7
No.4	0-30	4
No.16	0-18	2
No.50	0	1

Υλικά Κατασκευής Γεωφραγμάτων



Φράγμα Γαδουρά: διάστρωση φίλτρων και στραγγιστηρίων

Υλικά Κατασκευής Γεωφραγμάτων



- **Φράγμα Αποσελέμη Κρήτης: Διάστρωση υλικών**

Σώματα στήριξης

Στοιχεία σχεδιασμού και κατασκευής



Υλικά Κατασκευής Γεωφραγμάτων

□ Σώματα στήριξης

- Είναι οι «ισχυρές» (αντοχή) ζώνες του φράγματος, που στηρίζουν τον πυρήνα και τα φίλτρα.
- Αποτελούν το βασικό παράγοντα ευστάθειας της κατασκευής.
 - Διατμητική αντοχή κελύφους
 - Διατμητική αντοχή θεμελίωσης
- Αποτελούν τον κυριότερο όγκο υλικών του γεωφράγματος και ο σχεδιασμός τους επηρεάζει σημαντικά το κόστος.

Υλικά Κατασκευής Γεωφραγμάτων

■ Σώματα Στήριξης

Υλικά

- ❑ Γαιώδη (αμμοχάλικα ποταμού, υλικά παλαιών αναβαθμίδων, πλευρικά κορήματα, αποσαθρωμένος βράχος)
- ❑ Βραχώδη (προϊόντα εκσκαφής, προϊόντα λατομείου)
- ❑ Σε κάθε περίπτωση θέλουμε, για την εύκολη στράγγιση του αναχώματος η περιεκτικότητα σε λεπτόκοκκα να είναι περιορισμένη
- ❑ Αν δεν υπάρχει επάρκεια, μπορούν να χρησιμοποιηθούν ημιπερατά υλικά (με λεπτόκοκκα έως 15-20%κ.β) τα οποία αν είναι δυνατό να περιοριστούν σε κάποιες ζώνες του αναχώματος.
- ❑ Σε αντίθετη περίπτωση ο σχεδιασμός (διαζώνιση – φίλτρα) να διασφαλίζει την εύκολη στράγγιση κατά την και το πέρας της κατασκευής (κατάντη πρανές) και γρήγορη ταπείνωση της στάθμης (ανάντη πρανές)
- ❑ Γίνονται αναλυτικές μελέτες ευστάθειας σε όλα τα στάδια (πέρας κατασκευής, κανονική λειτουργία, καταβιβασμός στάθμης) και διερευνάται η ευστάθεια του κρίσιμου πρανούς (ανάντη & κατάντη, κατάντη, ανάντη αντίστοιχα)

Διάστρωση (μετά τη συμπύκνωση)

- ❑ Αμμοχάλικα: 0,40-0,60μ
- ❑ Λιθορριπή: 0,70-2,00μ.

Υλικά Κατασκευής Γεωφραγμάτων

■ Σώματα Στήριξης

Κλίση πρανών

- Ανάλογα με τα χαρακτηριστικά των υλικών κατασκευής και συνθηκών θεμελίωσης.
Ενδεικτικές κλίσεις:

- Αργιλικό (λεπτότερα υλικά): 3,5:1 (ο:κ)
- Αμμοχάλικα: 2:1 (ο:κ)
- Λιθορριπή: 1,7:1 (ο:κ)

■ Ανάντη Σώμα

- Λιθορριπή προστασίας για προστασία από τους κυματισμούς.
- Κατασκευάζεται από σκληρά, ανθεκτικά, συμπαγή τεμάχια υγιούς βράχου (περιοχής των έργων ή λατομείου) με λιγότερο από 5% κ.β. προσμίξεις ιλύος – αργίλου.
- Ενδεικτικά, τα υλικά θα πρέπει να περιέχουν κατά 50% τεμάχια βάρους 750kg και άνω, ενώ τα κενά θα πληρώνονται με κατάλληλα διαβαθμισμένα υλικά.

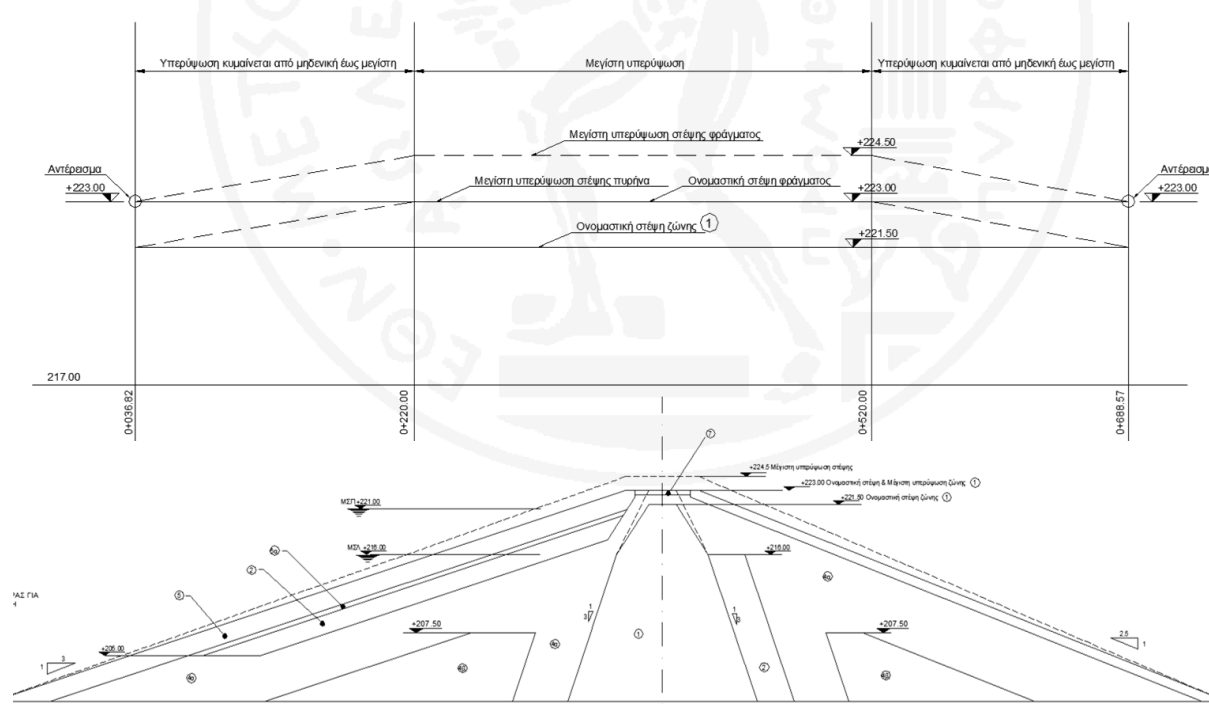
■ Κατάντη Σώμα

- Προστασία κατάντη πρανούς από καιρικές συνθήκες.
- Κατασκευάζεται κατά προτίμηση από στρογγυλοποιημένα αμμοχάλικα ή διαβαθμισμένα υλικά λατομείου.
- Ενδεικτικά, το υλικό θα είναι καλά διαβαθμισμένο με μέγιστη διάσταση τεμαχίων 50cm και ελάχιστη 76mm.

Υλικά Κατασκευής Γεωφραγμάτων

Υπερύψωση στέψης φράγματος – Camber

- Εφόσον κατά και μετά την κατασκευή, προβλέπεται η εκδήλωση καθιζήσεων του υπεδάφους θεμελίωσης (υπό το βάρος του αναχώματος) αλλά και συνίζηση του πυρήνα, η στέψη ανυψώνεται κατάλληλα έτσι ώστε μακροχρόνια το ύψος του αναχώματος να είναι στην προβλεπόμενη, από τη μελέτη, στάθμη.
- Η υπερύψωση γίνεται στα ανώτερα τμήματα του κελύφους και του πυρήνα. Κατά μήκος του άξονα η μέγιστη υπερύψωση εφαρμόζεται στο κεντρικό τμήμα, στη συνέχεια μειώνεται και μηδενίζεται στα αντερείσματα.



Υλικά Κατασκευής Γεωφραγμάτων

Ζώνες προστασίας ανάντη και κατάντη πρηνών

□ Ανάντη Ζώνη προστασίας κελύφους

- προστασία κυρίως από διάβρωση λόγω κυματισμών με λιθορριπή
 - Μέγεθος ικανό να απορροφήσει την ενέργεια θραύσης κυμάτων
 - Ανθεκτική έτσι ώστε να μην θραύεται σε μικρότερα τεμάχια
 - Ικανή για σταθερή μακροχρόνια ικανοποιητική συμπεριφορά
- Καθορισμός ελεύθερου περιθωρίου με βάση την αναμενόμενη αναρρίχηση του κύματος σχεδιασμού, που προκύπτει από τα χαρακτηριστικά του ταμιευτήρα και τις μετεωρολογικές συνθήκες της περιοχής.
- Υπολογισμός μεγέθους λθορριπής με κάποιον κατάλληλο τύπο διαστασιολόγησης λιθορριπής. Πχ:

$$W_{50} = \frac{\gamma_r H^3}{K_{RR} (S_r - 1)^3 \cot \theta}$$

W_{50} : το μέγιστο βάρος του 50% της λιθορριπής Πηγή: Geotechnical engineering of dams, R.Fell, P.MacGregor etc

γ_r : το ειδικό βάρος των λίθων

H: το ύψος του κύματος σχεδιασμού

S_r : ο λόγος ειδικών βαρών λίθων νερού γ_r/γ_w

θ : η γωνία του πρηνούς του φράγματος με το οριζόντιο επίπεδο

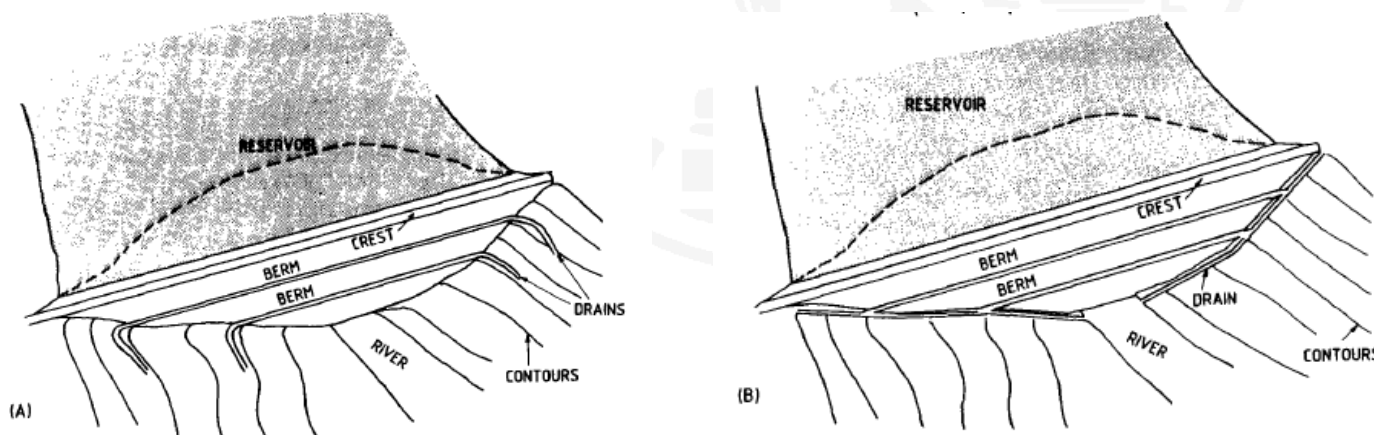
K_{RR} : συντελεστής ίσος με 2,50

Υλικά Κατασκευής Γεωφραγμάτων

Ζώνες προστασίας ανάντη και κατόντη πρανών

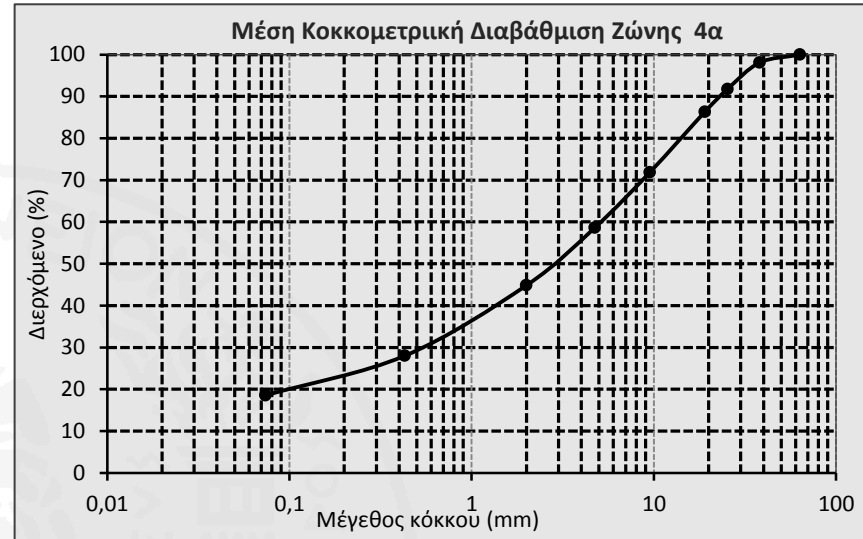
□ Κατόντη Ζώνη προστασίας κελύφους

- Προστασία από διάβρωση λόγω βροχής και απορροής, καθώς και ανέμου (σαφώς μικρότερες απαιτήσεις σε σχέση με το ανάντη πρανές).
- Προστασία με λιθορριπή (μικρότερου μεγέθους) ή φυτοκάλυψη.
- Επιλέγουμε μια σειρά μέτρων ανάλογα με τις ανάγκες:
 - Κάλυψη του πρανούς με μια στρώση κατάλληλων χαρακτηριστικών
 - Κατασκευή αναβαθμών για τον περιορισμό της επιφανειακής απορροής
 - Κατασκευή οριζόντιων αποχετευτικών διαδρομών για την εκτόνωση της απορροής στα αντερείσματα
 - Κατασκευή οδών αποχέτευσης στα αντερείσματα



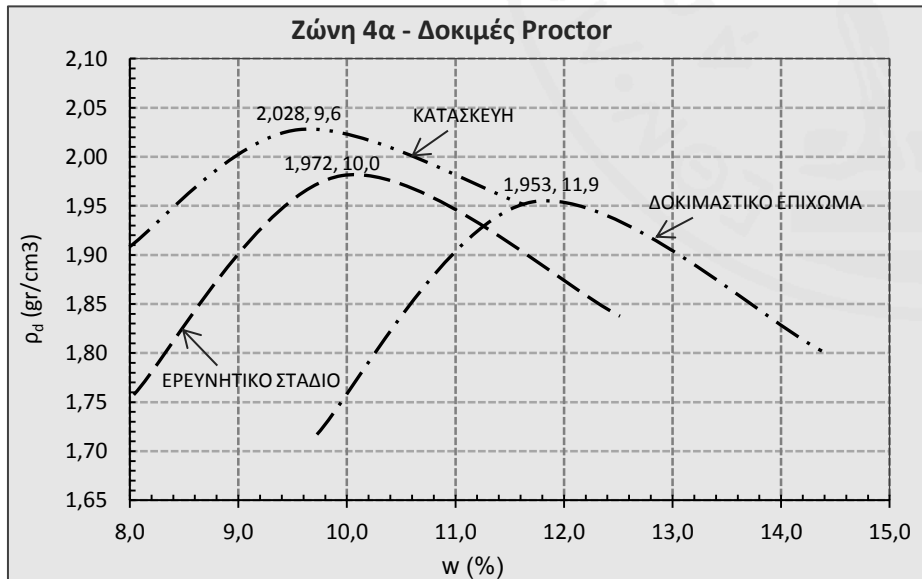
Πηγή: *Geotechnical engineering of dams, R.Fell, P.MacGregor etc*

Υλικά Κατασκευής Γεωφραγμάτων



Σώμα στήριξης - Ζώνη 4α

Δανειοθάλαμος (περιοχή ταμιευτήρα)	%κ.β. διερχόμενο από το κόσκινο		Standard Proctor	
	No.4	No.200	ρ_{dmax3} Mg/m	W_{opt} %
Μέση τιμή	59	16	2,028	9,6
Εύρος τιμών	34-86	8-19	1,854-2,230	6-13
k (cm/sec)		$5,9 \times 10^{-4}$		



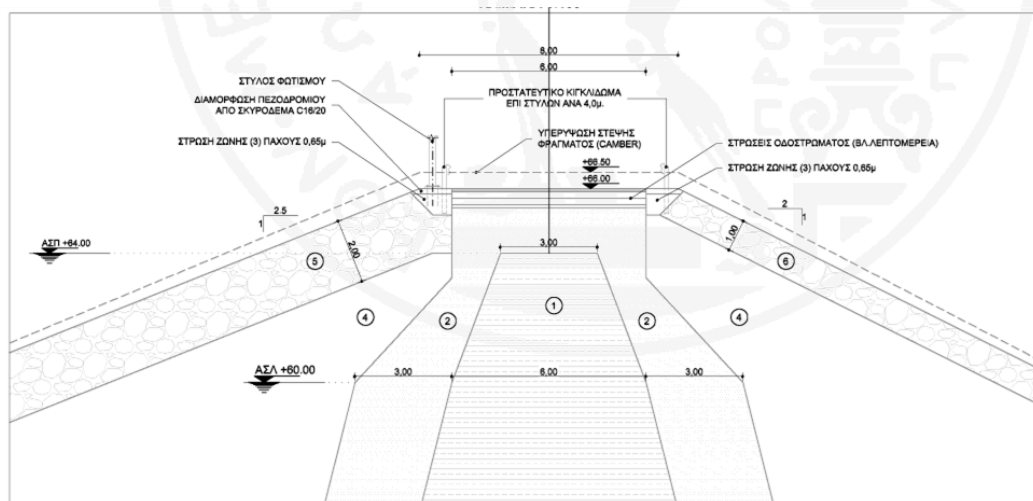
Σώμα στήριξης - Ζώνη 4β

Δανειοθάλαμος (απαιτούμενες εκσκαφές)	%κ.β. διερχόμενο από το κόσκινο	
	3''	No.200
Μέση τιμή	69	6,2
Φαινόμενο ειδικό βάρος (t/m ³)	2,291	
k (cm/sec)	$4,75 \times 10^{-2}$	

Υλικά Κατασκευής Γεωφραγμάτων

Λεπτομέρειες στέψης

- Προστασία ζωνών φίλτρων και πυρήνα
 - Γεωμετρία «κλεισίματος»
 - Μεταβατικές ιδιότητες στα υλικά
- Αντιδιαβρωτική προστασία
- Πρόβλεψη εξυπηρέτησης λειτουργίας (διελεύσεις ανθρώπων, οχημάτων)
 - Επαρκές πλάτος
 - Στρώσεις κυκλοφορίας (με άσφαλτο ή αμμοχάλικο οδοστρωσίας)
 - Κιγκλιδώματα και πεζοδρόμια
 - Γενικά: αποφυγή άκαμπτων κατασκευών



Λεπτομέρεια στέψης φράγματος Αγιοκάμπου Λάρισσας

Υλικά Κατασκευής Γεωφραγμάτων



- ❑ Διάστρωση υλικών σώματος με ερπυστριοφόρο προωθητή
- ❑ Ν.Μουτάφης

Υλικά Κατασκευής Γεωφραγμάτων



- Διάστρωση υλικών σώματος, φίλτρου και πυρήνα
- Ν.Μουτάφης

Υλικά Κατασκευής Γεωφραγμάτων



- ❑ Κατασκευή προστατευτικής ζώνης κατάντη πρανούς
- ❑ Ν.Μουτάφης

Υλικά Κατασκευής Γεωφραγμάτων



- ❑ Κατάντη προστατευτική ζώνη
- ❑ Φράγμα Γαδουρά

Υλικά Κατασκευής Γεωφραγμάτων



- ❑ Κατάντη προστατευτική ζώνη
- ❑ Φράγμα Γαδουρά

Υλικά Κατασκευής Γεωφραγμάτων



- ❑ Ανάντη προστατευτική ζώνη (κατασκευή)
- ❑ Φράγμα Γαδουρά

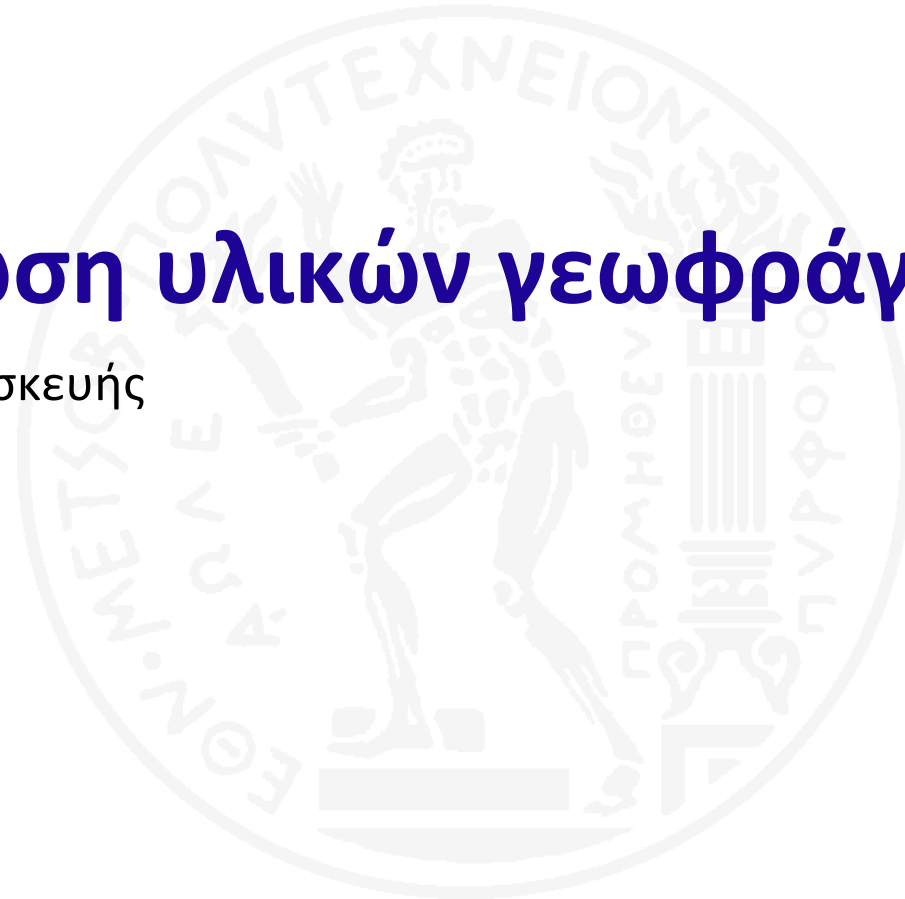
Υλικά Κατασκευής Γεωφραγμάτων



- ❑ Ανάντη προστατευτική ζώνη (σε λειτουργία)
- ❑ Φράγμα Γαδουρά

Διάστρωση υλικών γεωφράγματος

Διαδικασία κατασκευής

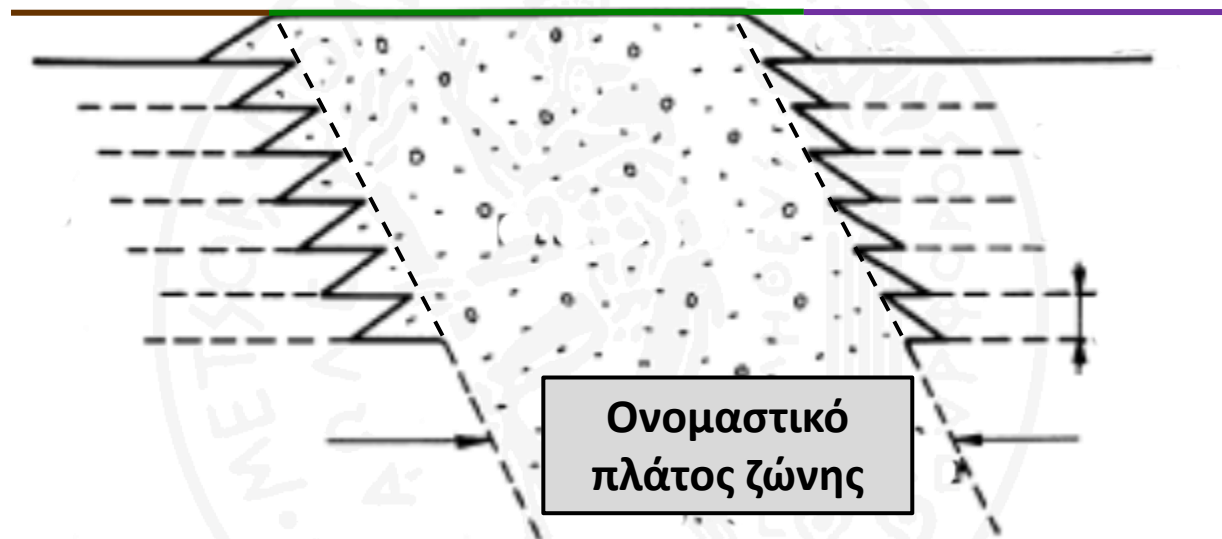


Διάστρωση και συμπύκνωση διαφορετικών ζωνών

Πυρήνας

Φίλτρο

Σώμα



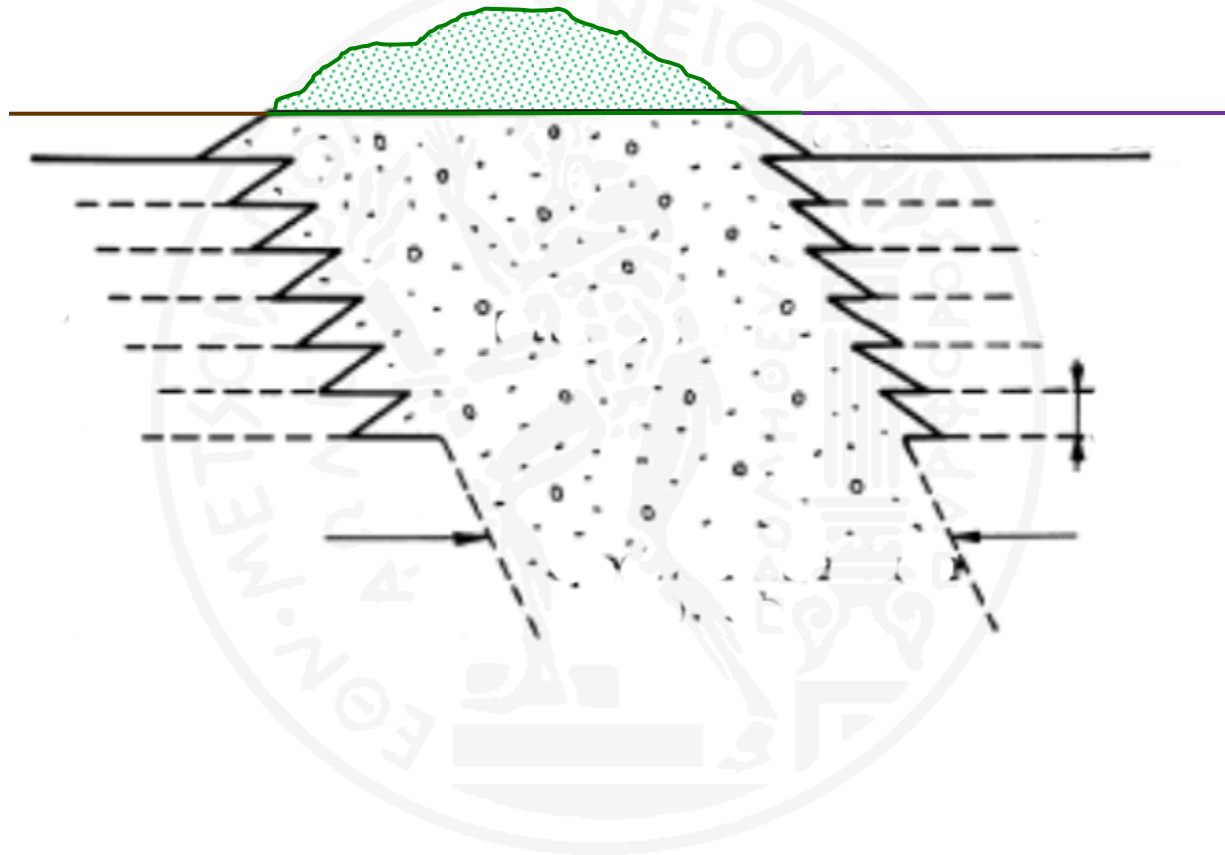
- ❑ Περιοχή πυρήνα, φίλτρου και σώματος στήριξης
- ❑ Κατασκευή φίλτρου σε στρώσεις (πχ $\sim 0,60\mu$) και σώματος σε ίσες ή μεγαλύτερες
- ❑ Κατασκευή πυρήνα σε στρώσεις (πχ $\sim 0,20\mu$, δηλαδή τρεις στρώσεις πυρήνα για κάθε στρώση φίλτρου)
- ❑ Πάχη στρώσεων μετά τη συμπύκνωση!

Διάστρωση και συμπύκνωση διαφορετικών ζωνών

Πυρήνας

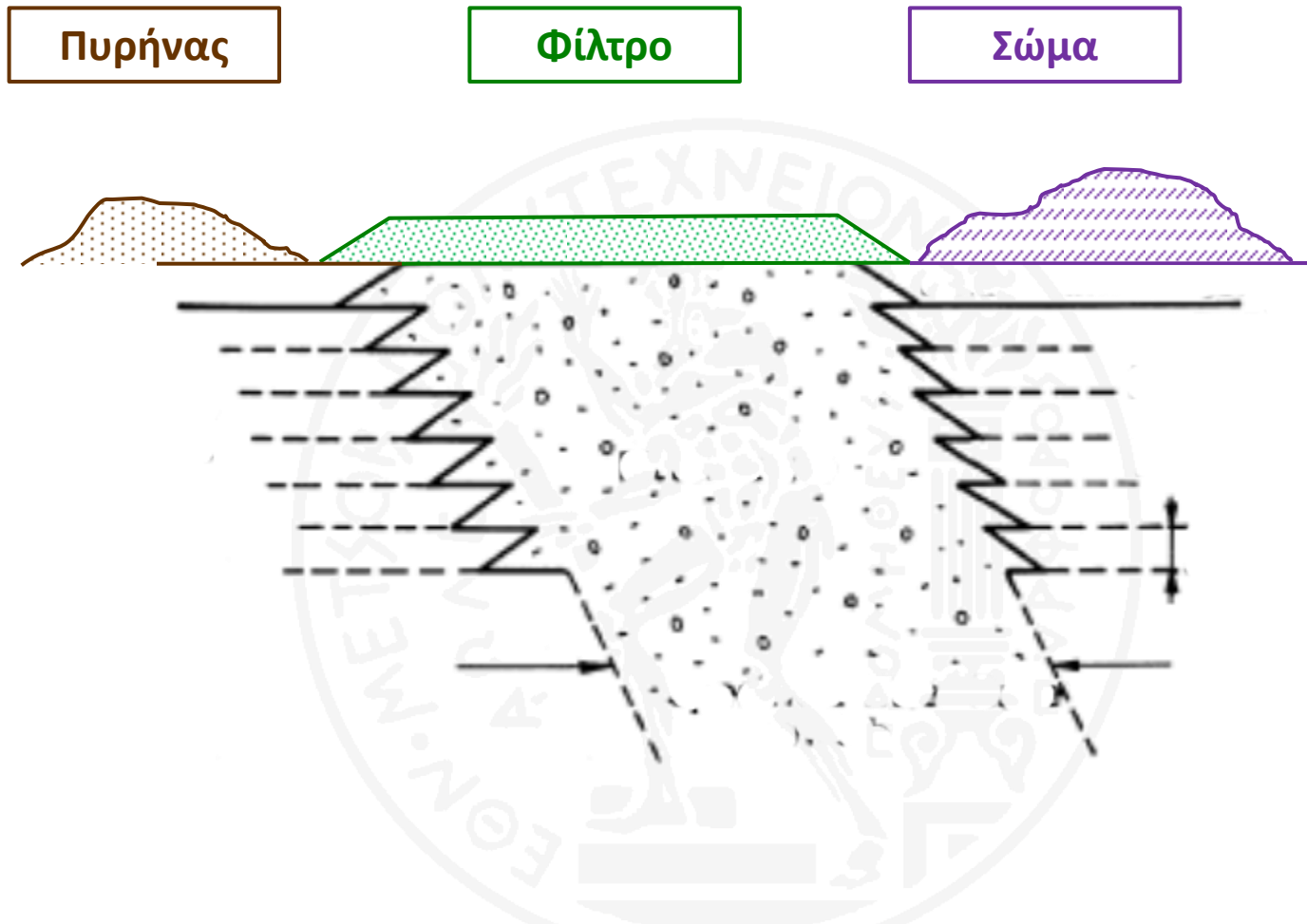
Φίλτρο

Σώμα



- Μεταφορά και απόθεση υλικού φίλτρου (σε σωρό)

Διάστρωση και συμπύκνωση διαφορετικών ζωνών



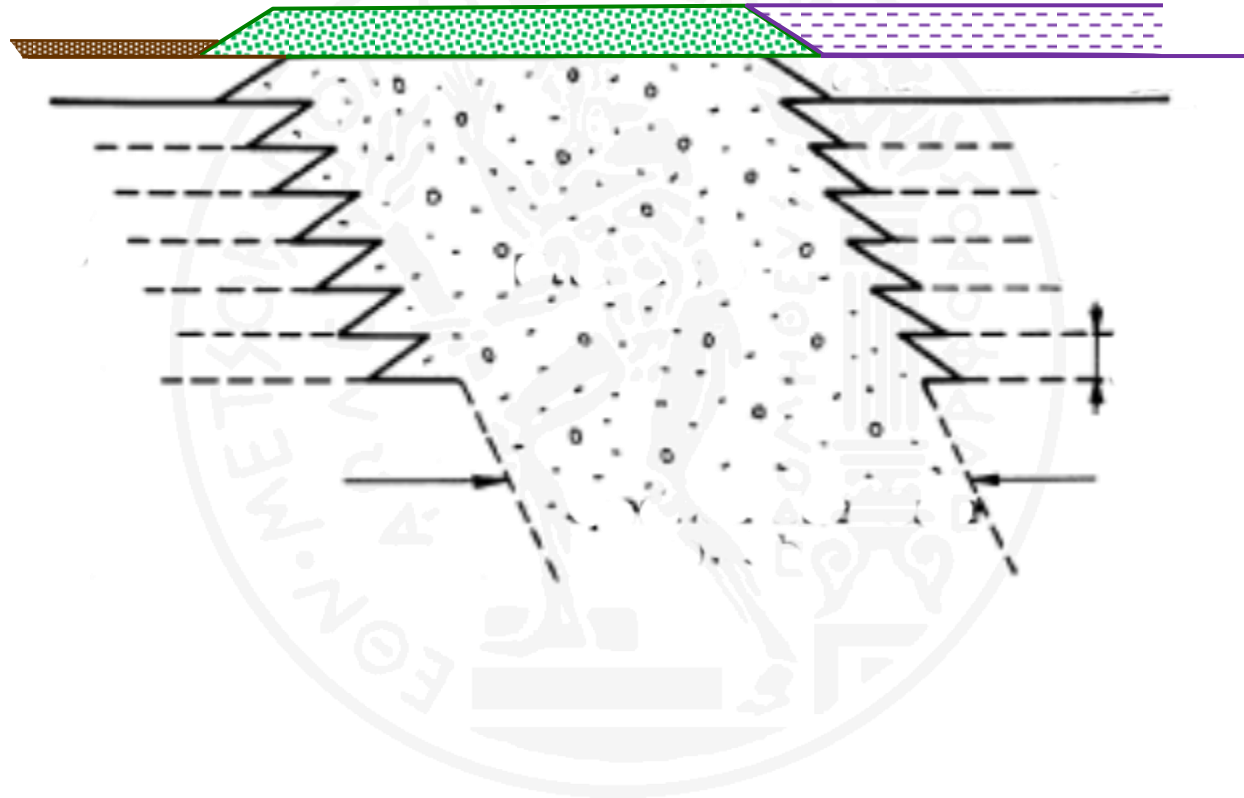
- ❑ Διάστρωση υλικού φίλτρου χωρίς συμπύκνωση
- ❑ Μεταφορά και απόθεση υλικού πυρήνα
- ❑ Μεταφορά και απόθεση υλικού σώματος

Διάστρωση και συμπύκνωση διαφορετικών ζωνών

Πυρήνας

Φίλτρο

Σώμα



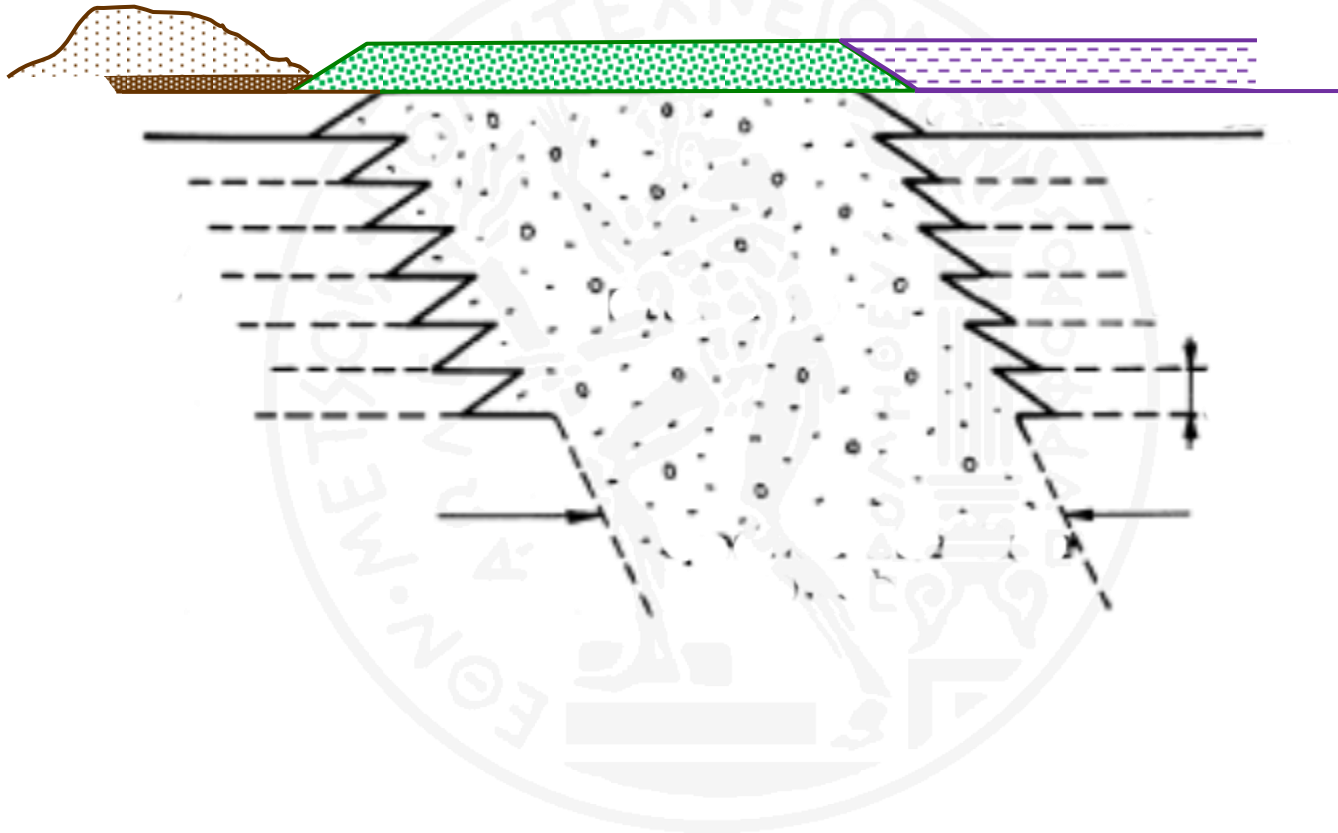
- Διάστρωση υλικού πυρήνα και συμπύκνωση
- Διάστρωση υλικού σώματος

Διάστρωση και συμπύκνωση διαφορετικών ζωνών

Πυρήνας

Φίλτρο

Σώμα



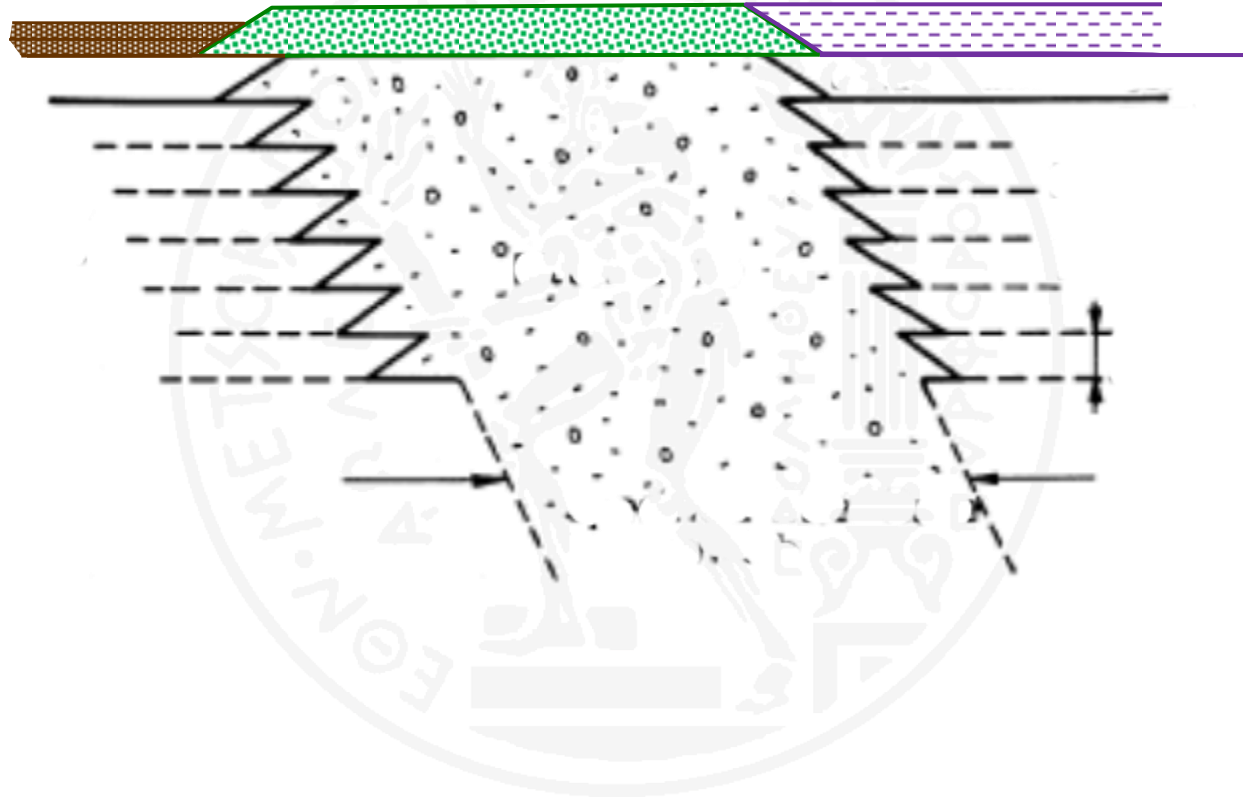
- Απόθεση επόμενης στρώσης πυρήνα

Διάστρωση και συμπύκνωση διαφορετικών ζωνών

Πυρήνας

Φίλτρο

Σώμα



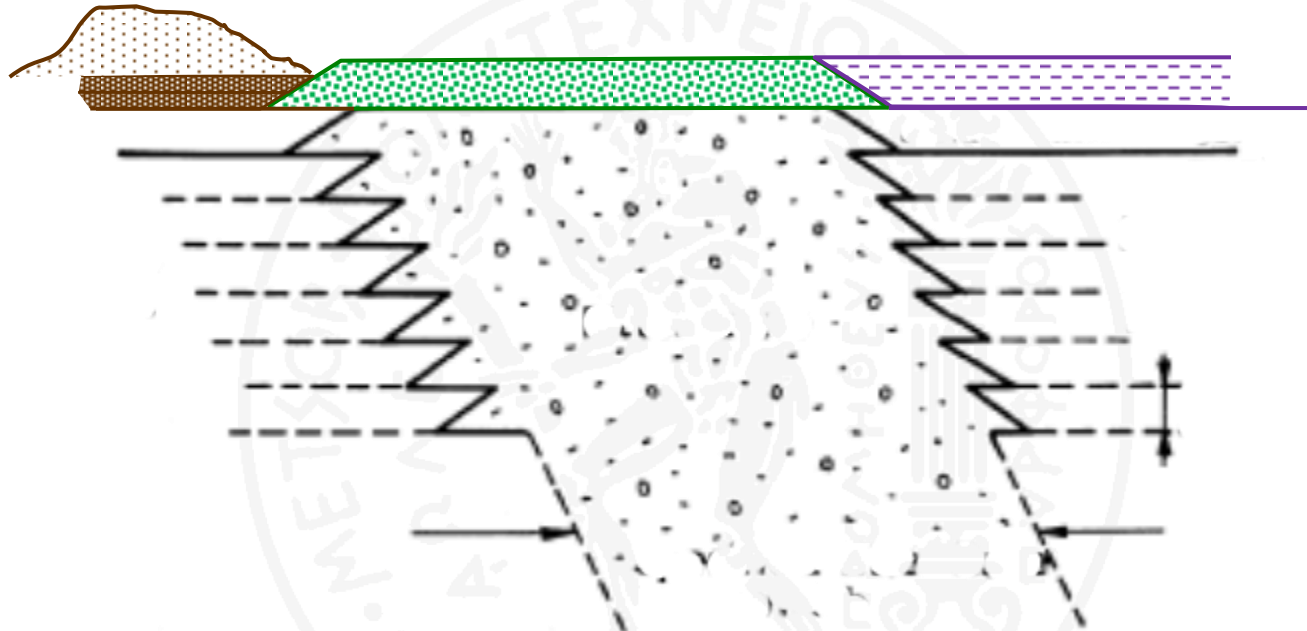
- Διάστρωση και συμπύκνωση επόμενη στρώσης πυρήνα

Διάστρωση και συμπύκνωση διαφορετικών ζωνών

Πυρήνας

Φίλτρο

Σώμα



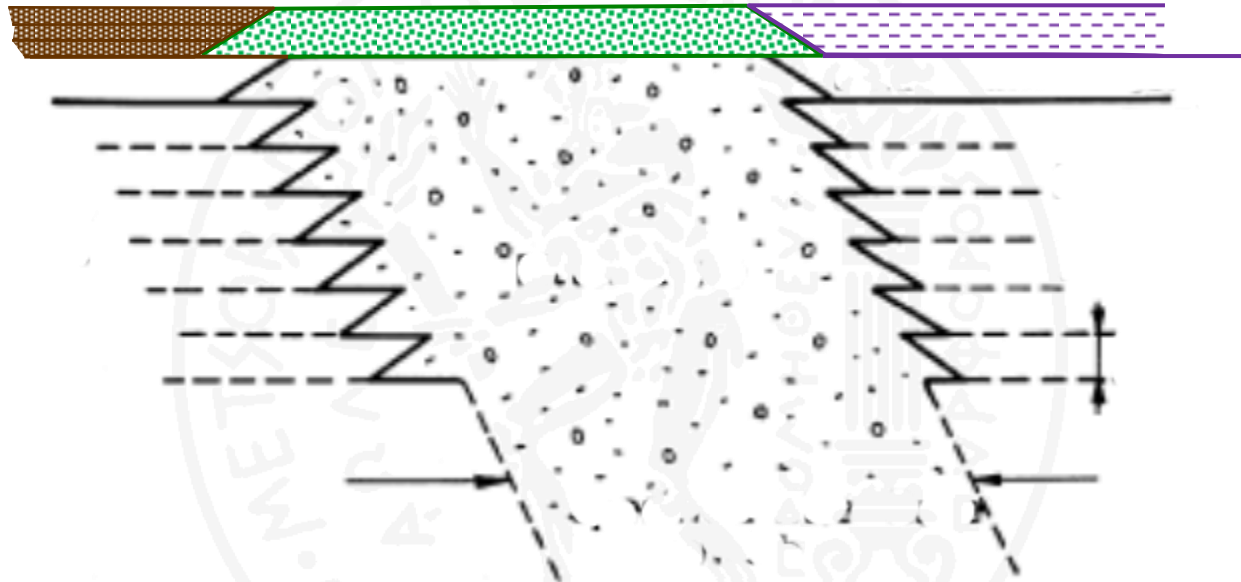
- Απόθεση επόμενης στρώσης πυρήνα

Διάστρωση και συμπύκνωση διαφορετικών ζωνών

Πυρήνας

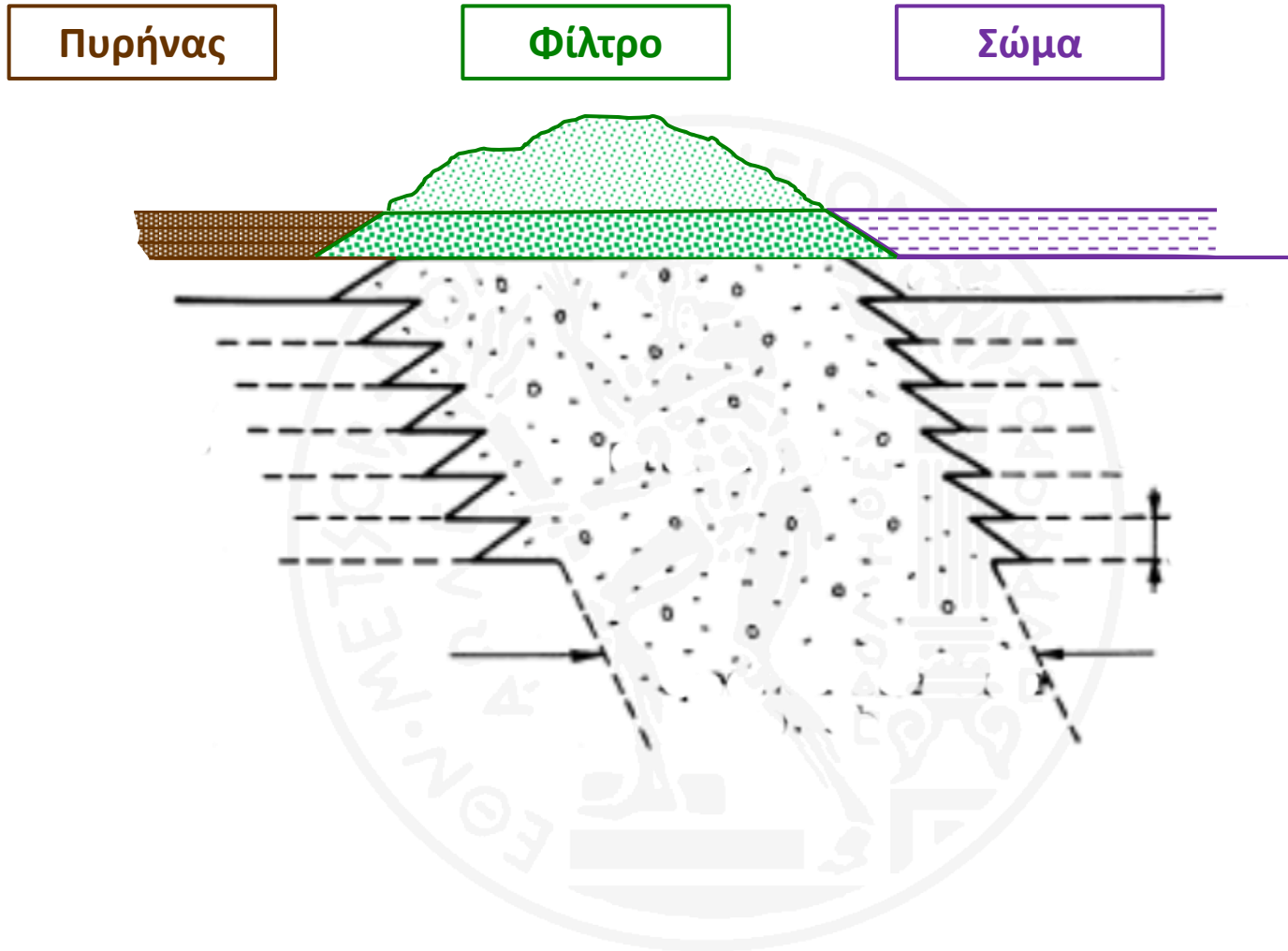
Φίλτρο

Σώμα



- ❑ Διάστρωση και συμπύκνωση επόμενη στρώσης πυρήνα
- ❑ Επανάληψη μέχρι την στάθμη των φίλτρων (και σώματος)
- ❑ Συμπύκνωση φίλτρων (και σώματος)

Διάστρωση και συμπύκνωση διαφορετικών ζωνών



- Επανάληψη της διαδικασίας

Αστοχία γεωφραγμάτων

Πιθανοί μηχανισμοί, σχεδιασμός και έγκαιρη διάγνωση

Έλεγχοι γεωφραγμάτων

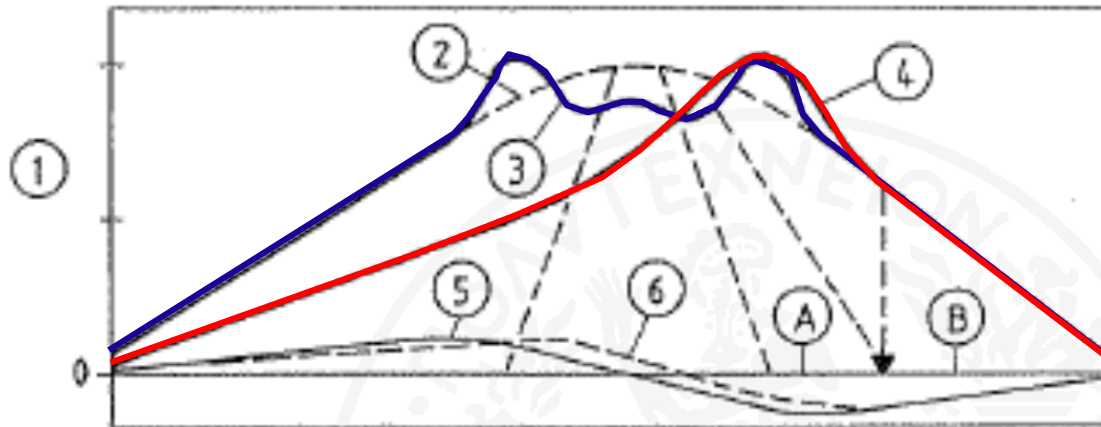


Figure 6.3. Rockfill dam with vertical earth core on incompressible rock. Stress distribution at the bottom of the structure.

1 Stresses

2 Vertical stresses at end of construction, equal unit weights and moduli of shell and core materials

3 Vertical stresses at end of construction, weak core

4 Vertical stresses after impounding

5 Shear stresses at end of construction

6 Shear stresses after impounding

A Foundation area with increased stresses after impounding

B Foundation area with unchanged stresses after impounding

□ Ανάπτυξη και εξέλιξη των τάσεων σε ένα γεώφραγμα

Αστοχία γεωφραγμάτων

■ Πιθανοί λόγοι

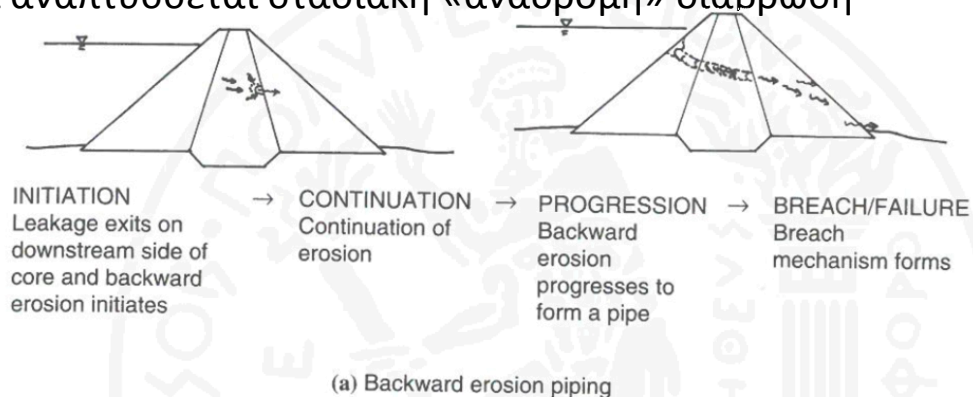
- Υπερπήδηση φράγματος.
 - ✓ αδυναμία παροχέτευσης της πλημμυρικής παροχής από τον υπερχειλιστή
 - ✓ κακή διαχείριση ταμιευτήρα (διατήρηση υψηλής στάθμης την περίοδο υψηλών βροχοπτώσεων)
 - ✓ μη έγκαιρο άνοιγμα θυροφραγμάτων (εφόσον υπάρχουν)
 - ✓ σχεδιαστικά λάθη/παραλείψεις (υποεκτίμηση ή μη εφαρμογή camber, μη πρόβλεψη freeboard)
- Διάβρωση του φράγματος ή των αντερείσμάτων ή της κατάντη κοίτης λόγω της διήθησης του νερού (ripping). Πιθανοί λόγοι:
 - ✓ πτωχή κατασκευή των φίλτρων (κοκκομετρία, καταρρευσιμότητα κλπ)
 - ✓ μεγάλη παραμόρφωση του πυρήνα (διαφορικές καθιζήσεις) και ρηγματώσεις
 - ✓ πλημμελής συμπύκνωση στην επαφή πυρήνα με αντερείσματα και συναφή έργα (υπερχειλιστής, αγωγό εκτροπής κλπ)
 - ✓ ανεξέλεγκτες διηθήσεις στη θεμελίωση ή τα αντερείσματα προς τα κατάντη
- Διατμητική αστοχία κατάντη πρηνούς κατά τη λειτουργία του φράγματος (πλήρης ταμιευτήρας)
- Ολίσθηση του κατάντη πρηνούς (πιο απότομο) κατά την κατασκευή λόγω ανάπτυξης υπερπίεσεων πόρων (με κενό ταμιευτήρα). Στην περίπτωση κεκλιμένου πυρήνα απαιτείται ο έλεγχος και του ανάντη πρηνούς.
- Αστοχία ανάντη πρηνούς (αβαθής) κατά τον απότομο καταβιβασμό της στάθμης. Απότομος καταβιβασμός θεωρείται η πτώση της στάθμης με ρυθμό ακόμα και 30cm/ημέρα.

Αστοχία γεωφραγμάτων

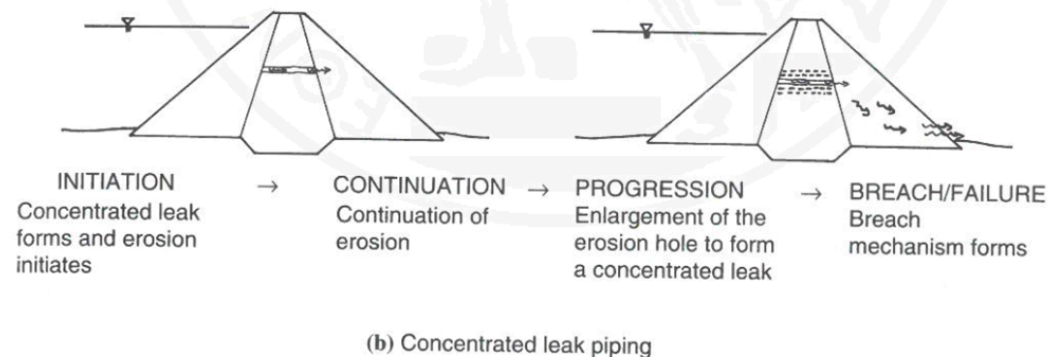
Γραφική απεικόνιση μηχανισμών αστοχίας

□ Περιπτώσεις διασωλήνωσης στο σώμα του φράγματος:

- ✓ Αρχικά η έπλυση / μεταφορά λεπτόκοκκων εκδηλώνεται στο κατάντη πρηνές του πυρήνα και στη συνέχεια αναπτύσσεται σταδιακή «ανάδρομη» διάβρωση



- ✓ Αρχικά δημιουργείται ρηγμάτωση ή συγκεντρωμένη διαρροή κατά μήκος της διαδρομής του νερού η οποία στη συνέχεια διευρύνεται



Αστοχία γεωφραγμάτων

Γραφική απεικόνιση μηχανισμών αστοχίας

- Περιπτώσεις διασωλήνωσης στη θεμελίωση:
 - ✓ Αρχικά εκδηλώνεται διαρροή στον κατόντη πόδα και στη συνέχεια αναπτύσσεται διασωλήνωση όλης της βάσης

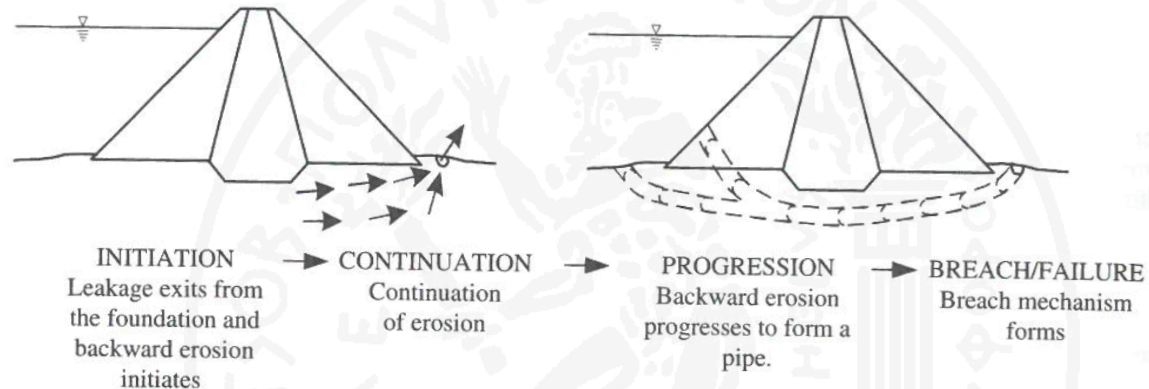


Figure 10.33. Model for development of failure by piping in the foundation (Foster, 1999).

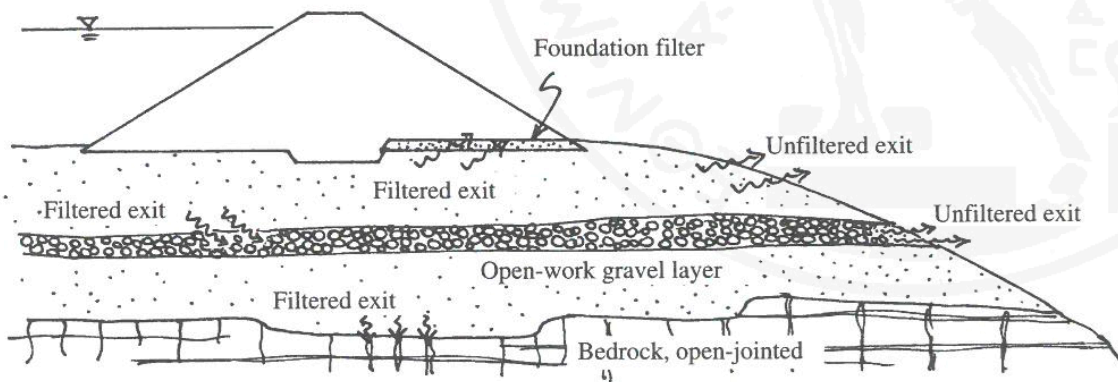


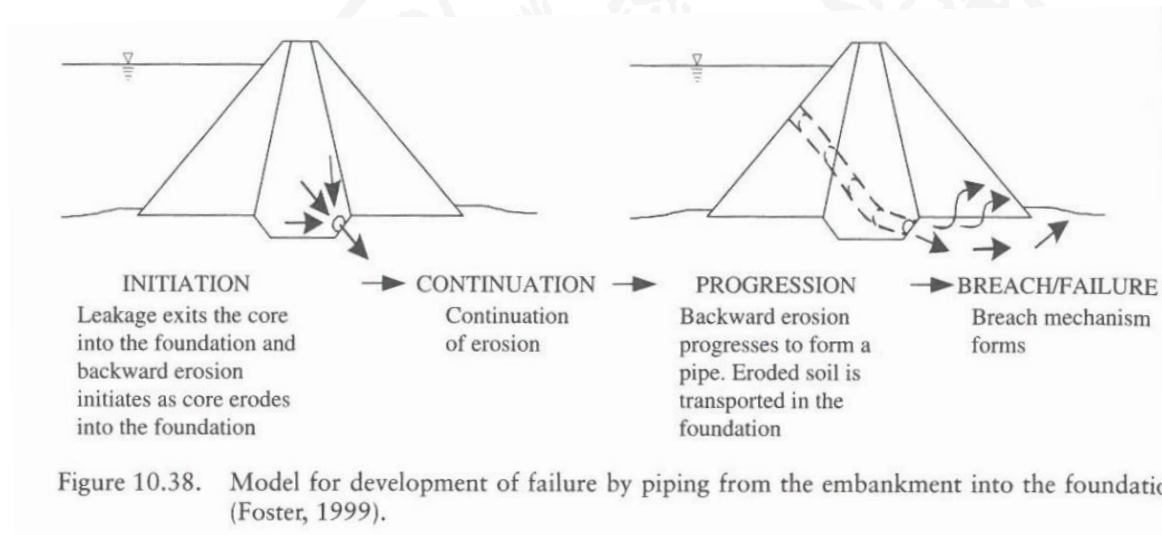
Figure 10.37. Examples of filtered and free exit points for piping through the foundation (Foster, 1999).

- Απομάκρυνση υπόγειας ροής προς τα κατόντη – παράδειγμα αποτόνωσης στο υπέδαφος αλλά και μέσω στρώσεων φίλτρου.

Αστοχία γεωφραγμάτων

Γραφική απεικόνιση μηχανισμών αστοχίας

- Περιπτώσεις διασωλήνωσης από το σώμα του φράγματος στη θεμελίωση:
 - ✓ Αρχικά η έπλυση / μεταφορά λεπτόκοκκων εκδηλώνεται από το κατάντη άκρο του πυρήνα στη θεμελίωση και στη συνέχεια αναπτύσσεται σταδιακή «ανάδρομη» διάβρωση



Αστοχία γεωφραγμάτων

□ Ανάπτυξη ρωγμών λόγω διαφορικών καθιζήσεων

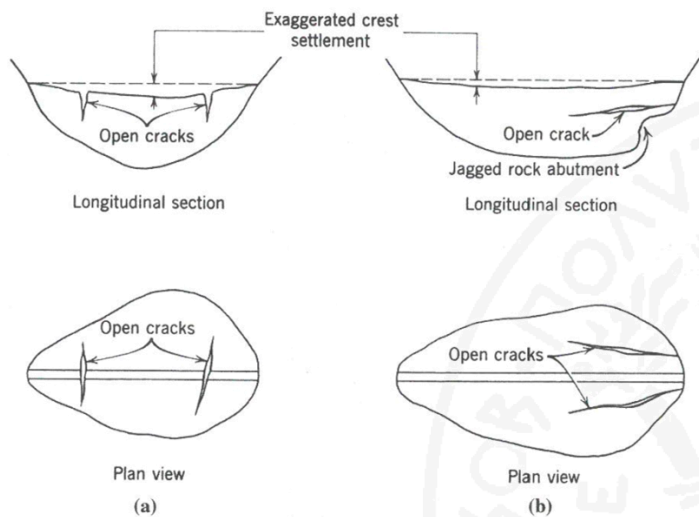


Figure 10.41. Typical transverse differential settlement cracks (Sherard et al., 1963).

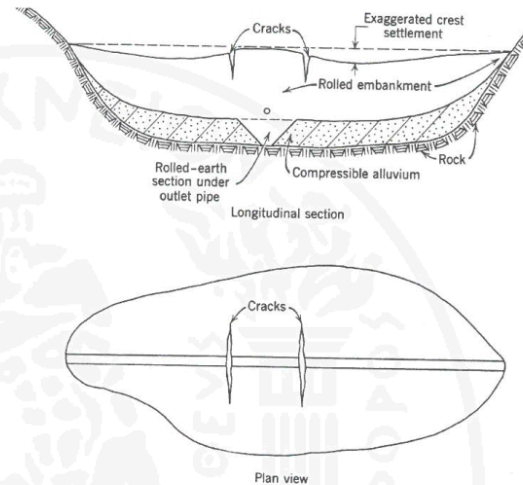


Figure 10.42. Transverse cracking due to differential settlements over embankment discontinuities (Sherard et al., 1963).

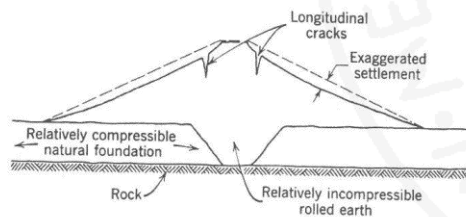


Figure 10.43. Longitudinal cracking due to differential settlements over foundation discontinuities (Sherard et al., 1963).

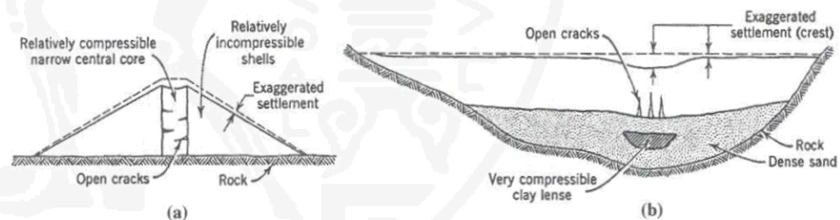


Figure 10.45. Internal cracking in embankments due to differential settlements (Sherard et al., 1963).

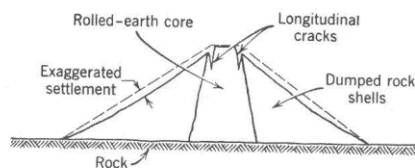
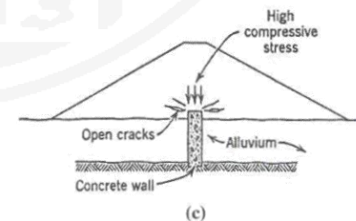


Figure 10.44. Longitudinal cracking due to differential settlements between embankment zones (Sherard et al., 1963).



Πηγή: *Geotechnical engineering of dams*, R.Fell, P.MacGregor etc

Αστοχία γεωφραγμάτων

Γραφική απεικόνιση μηχανισμών αστοχίας

- ❑ Πιθανοί λόγοι ανάπτυξης διαφορικών καθιζήσεων
 - ✓ Μεταβλητό πάχος συμπιεστών στρώσεων υπεδάφους θεμελίωσης κατά μήκος
 - ✓ Υπαρξη συμπιεστών στρώσεων με διαφορετικές ιδιότητες – συμπιεστότητα
 - ✓ Παλαιές κοίτες σε μεγαλύτερα βάθη

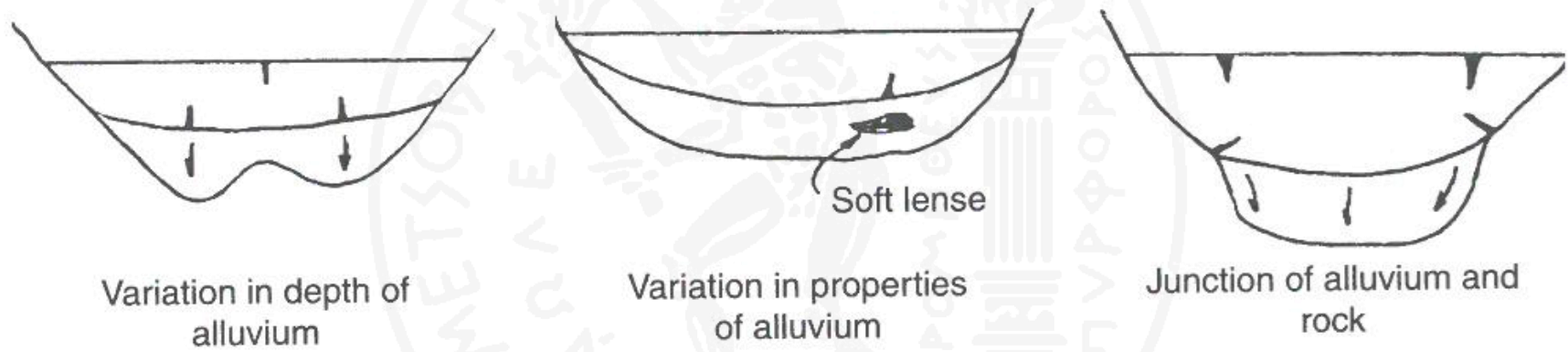


Figure 10.48. Sources of differential foundation settlements (Truscott 1977).

Αστοχία γεωφραγμάτων

Γραφική απεικόνιση μηχανισμών αστοχίας

- Rapid drawdown– δίκτυο ροής / ισοδυναμικές γραμμές με διάφορες διατάξεις φίλτρου

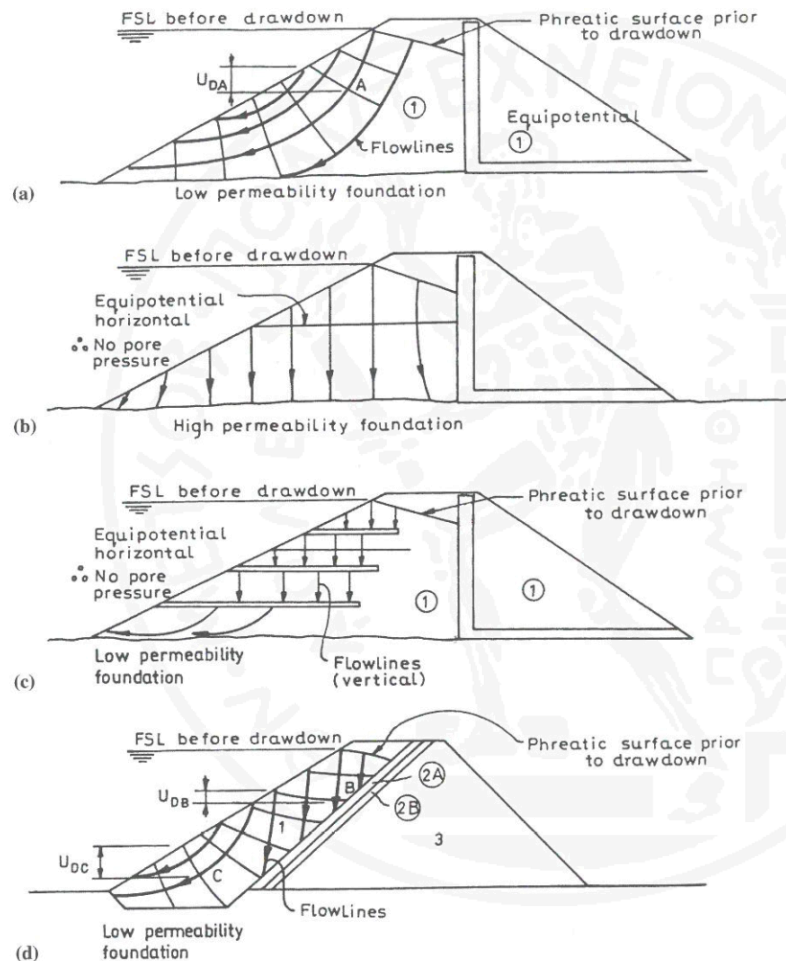


Figure 11.20. Drawdown flownets (a) earthfill with chimney drain, low permeability foundation; (b) earthfill with chimney drain, high permeability foundation; (c) earthfill with horizontal drainage blankets; (d) sloping upstream core, low permeability foundation. Note that flownets assume isotropic permeability and $k_H = k_V$ and the reservoir is completely drawn down.

Πηγή: Geotechnical engineering of dams, R.Fell, P.MacGregor etc

Αστοχία γεωφραγμάτων



- ❑ Αστοχία από διασωλήνωση δια μέσω του σώματος

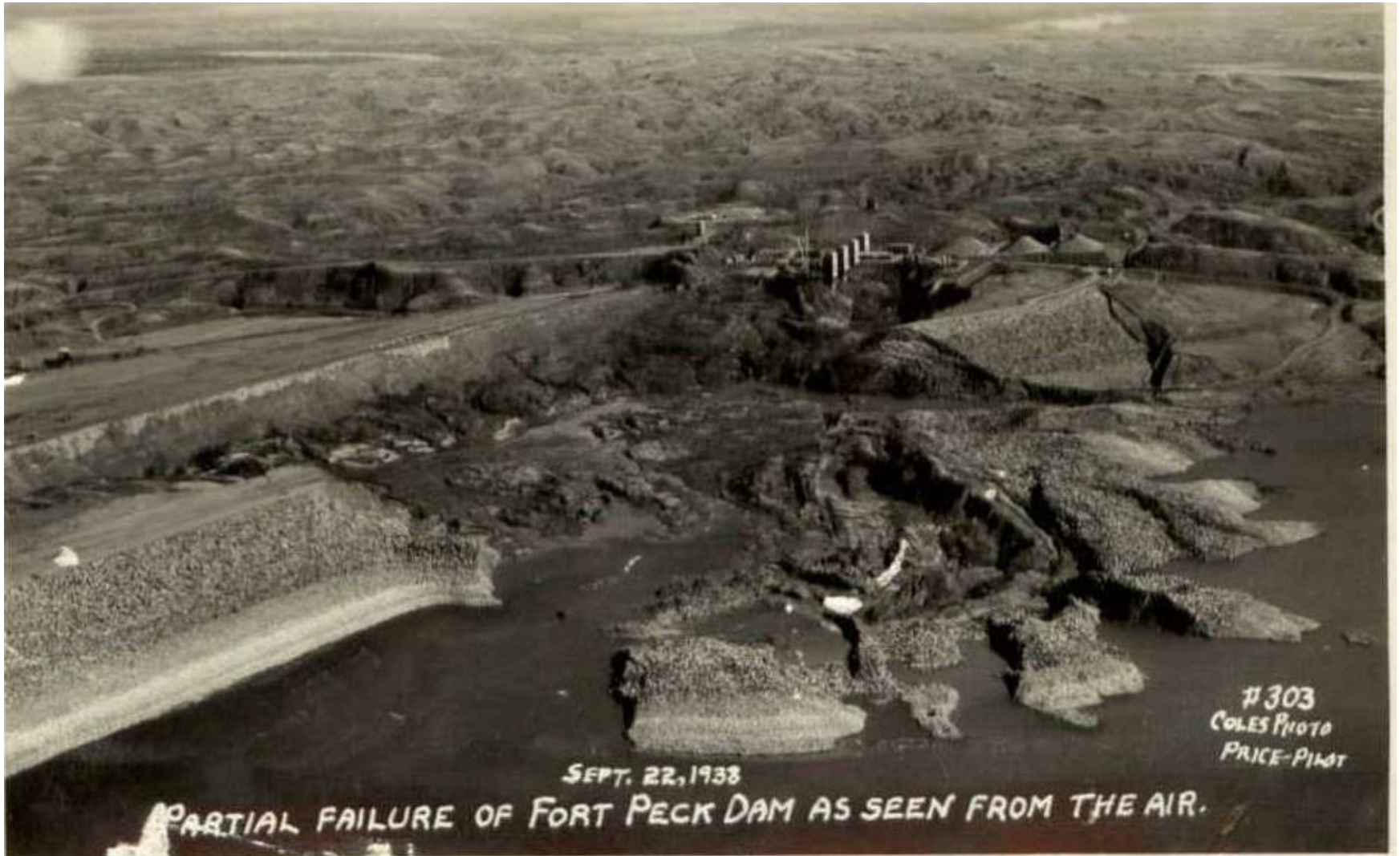
Αστοχία γεωφραγμάτων



❑ Αστοχία από διασωλήνωση

❑ FEMA

Αστοχία γεωφραγμάτων



- ❑ Αστοχία ανάντη πρανούς
- ❑ Φράγμα Fort Peck, ΗΠΑ (κατασκευασμένο με υδραυλική πλήρωση)

Αστοχία γεωφραγμάτων



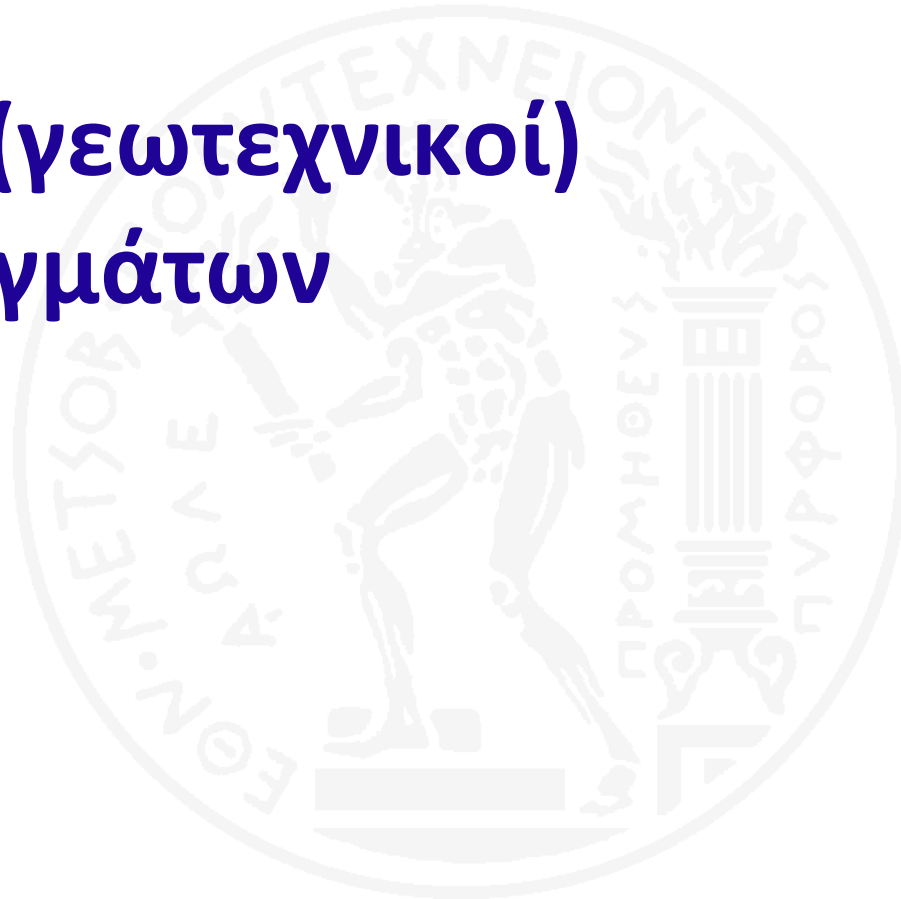
- ❑ Αστοχία ανάντη πρανούς
- ❑ Φράγμα Lower San Fernando, ΗΠΑ

Αστοχία γεωφραγμάτων



- ❑ Αστοχία κατάντη πρανούς (;)
- ❑ Φράγμα Κολχικής, Φλώρινα

Έλεγχοι (γεωτεχνικοί) γεωφραγμάτων



Έλεγχοι γεωφραγμάτων

Κρίσιμες καταστάσεις ευστάθειας γεωφραγμάτων και δυσμενέστερα πρηνή

- ❑ Πέρασ Κατασκευής
 - ✓ Ανάντη Πρανές
 - ✓ Κατάντη Πρανές
- ❑ Κανονική λειτουργία (ανάπτυξη κατάστασης μόνιμης διήθησης διαμέσου του φράγματος)
 - ✓ Κατάντη Πρανές
- ❑ Απότομος καταβιβασμός της στάθμης (rapid drawdown)
 - ✓ Ανάντη Πρανές

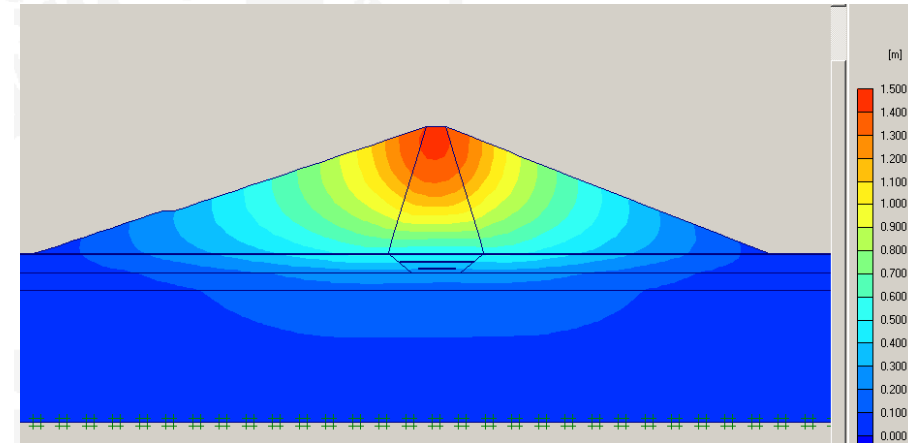
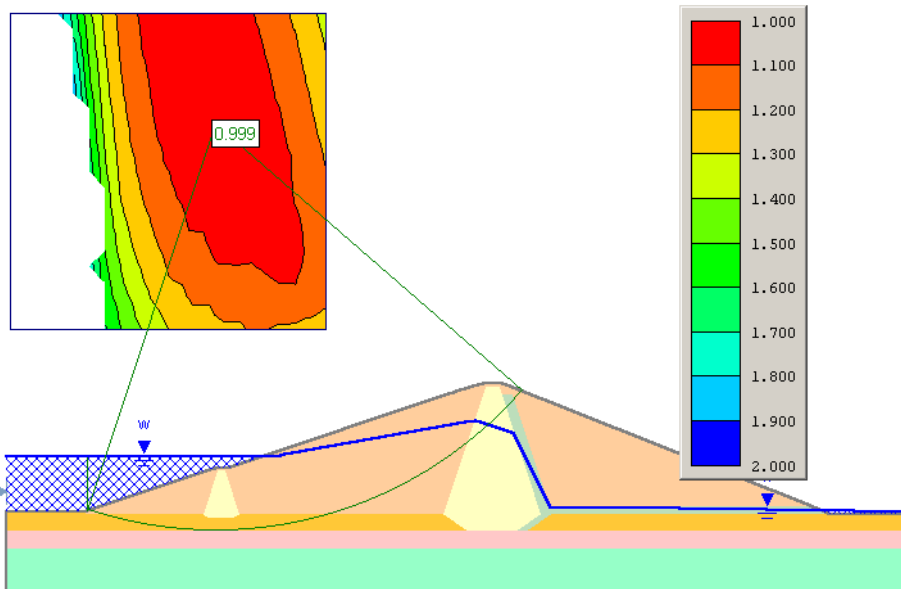
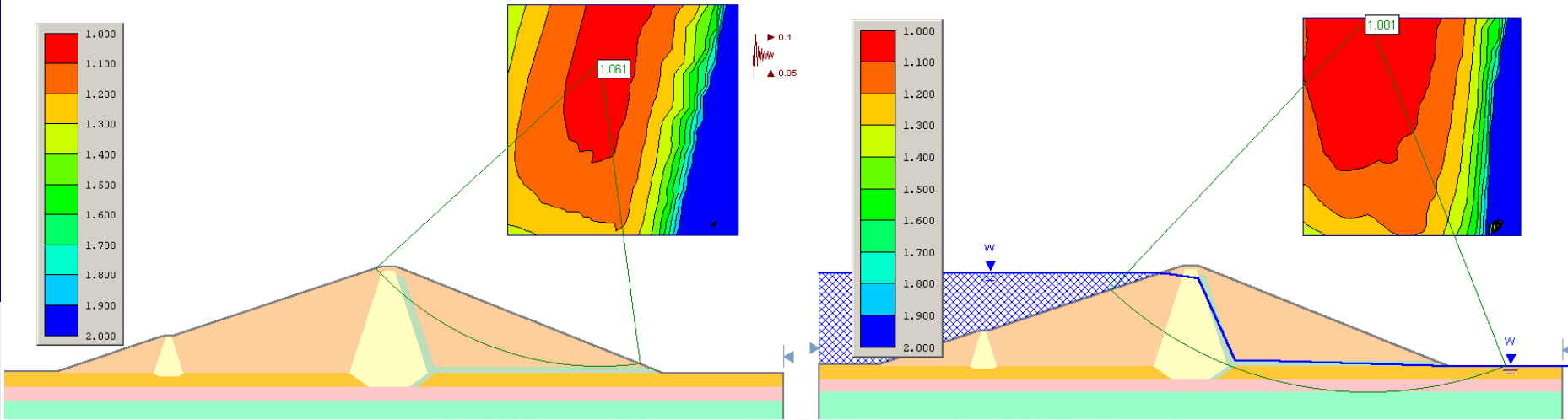
Παρατήρηση: οι αναπτυσσόμενες πιέσεις πόρων στο σώμα του φράγματος και τη θεμελίωση παρακολουθούνται με την εγκατάσταση πιεζομέτρων. Με τον τρόπο αυτό μπορούν να συγκριθούν οι πραγματικές πιέσεις με τις θεωρητικές (που λήφθηκαν για τη μελέτη ευστάθειας του αναχώματος).

Παρακολούθηση συμπεριφοράς φράγματος

Συνθήκη	Ελάχιστος Σ.Α. (χωρίς σεισμό)	Ελάχιστος Σ.Α. (με σεισμό)
Πέρασ Κατασκευής	1.30	1.00
Λειτουργία Ταμιευτήρα	1.50	1.00
Απότομος Καταβιβασμός Στάθμης	1.20	-

- ❑ Πέρασ Κατασκευής: οι συνέπειες μιας αστοχίας είναι μικρές
- ❑ Λειτουργία Ταμιευτήρα: οι συνέπειες μιας αστοχίας είναι μεγάλες
- ❑ Απότομος Καταβιβασμός Στάθμης: οι συνέπειες μιας αστοχίας δεν είναι πολύ σημαντικές (αβαθείς)
- ❑ Οι αναλύσεις με σεισμό μπορούν να γίνουν με την:
 - ✓ ψευδοστατική μέθοδο (απλοποιητική μέθοδος εφαρμογής οριζόντιου ισοδύναμου σεισμικού φορτίου στο κέντρο βάρους της κρίσιμης μάζας)
 - ✓ δυναμική μέθοδο (αναλυτική μέθοδος που λαμβάνει υπόψη με μεγαλύτερη ακρίβεια την πολυπλοκότητα του φαινομένου αλλά απαιτεί τον προσδιορισμό των δυναμικών χαρακτηριστικών των υλικών).

Έλεγχοι γεωφραγμάτων



Ανάλυση με κενό τον ταμιευτήρα, μετά το πέρας της στερεοποίησης. Μέγιστη καθίζηση της στέψης = 143 cm. Καθίζηση στη βάση του φράγματος (κέντρο) = 53 cm. Συνεπώς, η συνίζηση του αναχώματος είναι = $143 - 53 = 90$ cm.

❑ Μερικά παραδείγματα τυπικών στατικών και ψευδοστατικών ελέγχων ευστάθειας