

# Υδραυλικές Κατασκευές – Φράγματα

## 8ο εξάμηνο Σχολής Πολιτικών Μηχανικών

# Φράγματα βαρύτητας

## Μέρος Β: Φράγματα σκληρού επιχώματος

**Ανδρέας Ευστρατιάδης**

Τομέας Υδατικών Πόρων & Περιβάλλοντος, Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο

Ακαδημαϊκό έτος 2022-23

Στις διαφάνειες έχει χρησιμοποιηθεί φωτογραφικό και άλλο υλικό από εκπαιδευτικές σημειώσεις και διαλέξεις των Ν. Μουτάφη και Π. Παπανικολάου

- ❑ Jérôme Raphaël (1970): Πρώτη αναφορά σε συμμετρικό φράγμα βαρύτητας (The optimum gravity dam, *Proceedings of Conference on Rapid Construction of Concrete Dams*, ASCE, Pacific Grove, 221-244)
- ❑ CVC → RCC → Lean RCC → και μετά;
- ❑ P. Londe & M. Lino, The faced symmetrical hardfill dam: a new concept for RCC, *Water Power and Dam Construction*, 19-24, 1992
- ❑ Αρχές δεκαετίας του '90: Έναρξη εφαρμογής φραγμάτων Αξονοσυμμετρικών Κυλινδρούμενου Σκληρού Επιχώματος (ΑΚΣΕ)
- ❑ Πρώτο φράγμα ΑΚΣΕ παγκοσμίως: Μαραθιά, Μύκονος (24.5 m, 1993)
- ❑ ICOLD Bulletin 117: The gravity dam: A dam for the future – review and recommendations, *International Commission on Large Dams*, Paris, 2000
- ❑ Stevens, M. A., and J. Linard, The safest dam, *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(2), 137-248, 2002: περαιτέρω ώθηση στα φράγματα ΣΕ

## The Safest Dam

Michael A. Stevens  
Consultant, Boulder, CO E-mail: MStevensRivers@cs.com

Jack Linard  
Jack Linard Consulting, Inc., St-Bruno, Quebec, Canada, E-mail:  
jack\_linard@msn.com

Historical dam failures and associated failure modes are well documented (for example, International Commission on Large Dams 1973, Jansen 1980, Leonard 1987). The principal causes of failure are undetected foundation deficiencies and underestimated spillway floods (ASCE Task Committee 1988). The U.S. Bureau of Reclamation (Water and Power Resource Services 1980) has compiled an extensive list of failure modes to assist those charged with assessing the safety of existing dams. "... There are too many failures in dam engineering" (Leonard 1985).

Conventionally, the selection of the dam type for a given site has been based on the determination of the least expensive dam compatible with site conditions and the proposed service. Safety is achieved by meeting established design criteria, which relies on high values of safety factors to compensate for uncertainties in dam and foundation material properties, and in both the magnitudes and the probability of occurrence of the applied loads. Examples of loading uncertainties are the Probable Maximum Flood (PMF) and the maximum credible earthquake (MCE). Wieland (1999) suggests that the error in estimates of design earthquakes can be 30% or more.

Consider the selection of the Safest Dam to be a conceptual exercise, based on the assumption that adequate foundation conditions can be excavated at an acceptable cost. If this is not possible, it may be that no alternative can be considered truly safe, as is highlighted by Addison (1959, p. 128): "As for the Board's [of Consultants] report on the Sadd el Aali project [Aswan] presented to the Egyptian Government in November, 1954, it was restrained in tone. Its essence was contained in the sentence: 'A rockfill dam equipped with a clay core, upstream blanket and grout cutoff, with dimensions proposed by the Consultants, is as safe as the safest among earth and rockfill dams resting on sediments...'"

Simple guidelines for determining the Safest Dam are pro-

use of the American Nuclear Society's standard (1981) for establishing the magnitude of the PMF.

Determination of the PMF is a complex task, often comprised by approximations, estimates, and guesses. There is still no certain procedure to permit the upper-limit flood peak to be estimated with confidence. After only a few decades of designing dams for the PMF, changes are being made—some PMFs are being decreased; others are being made larger (for example, Back 1990a).

PMFs will be influenced by climate change, but in a manner difficult to estimate. The affects of climate changes from greenhouse gases have been continually revised, toward more severe consequences, which may well have an impact on the safety of existing dams and on design parameters for future works; consequences that may soon be felt for dams.

The upper-limit inflow flood (i.e., the true PMF) to a reservoir is the estimated PMF (however established) plus the error in the estimate. Despite the fact that this error is presently indeterminate, it must be considered in the design of any dam claiming to be the "safest."

### Sediment

For design of the Safest Dam, it is assumed that the reservoir ultimately fills with sediment up to the ungated spillway crest, and this is considered to be a part of the normal loading condition.

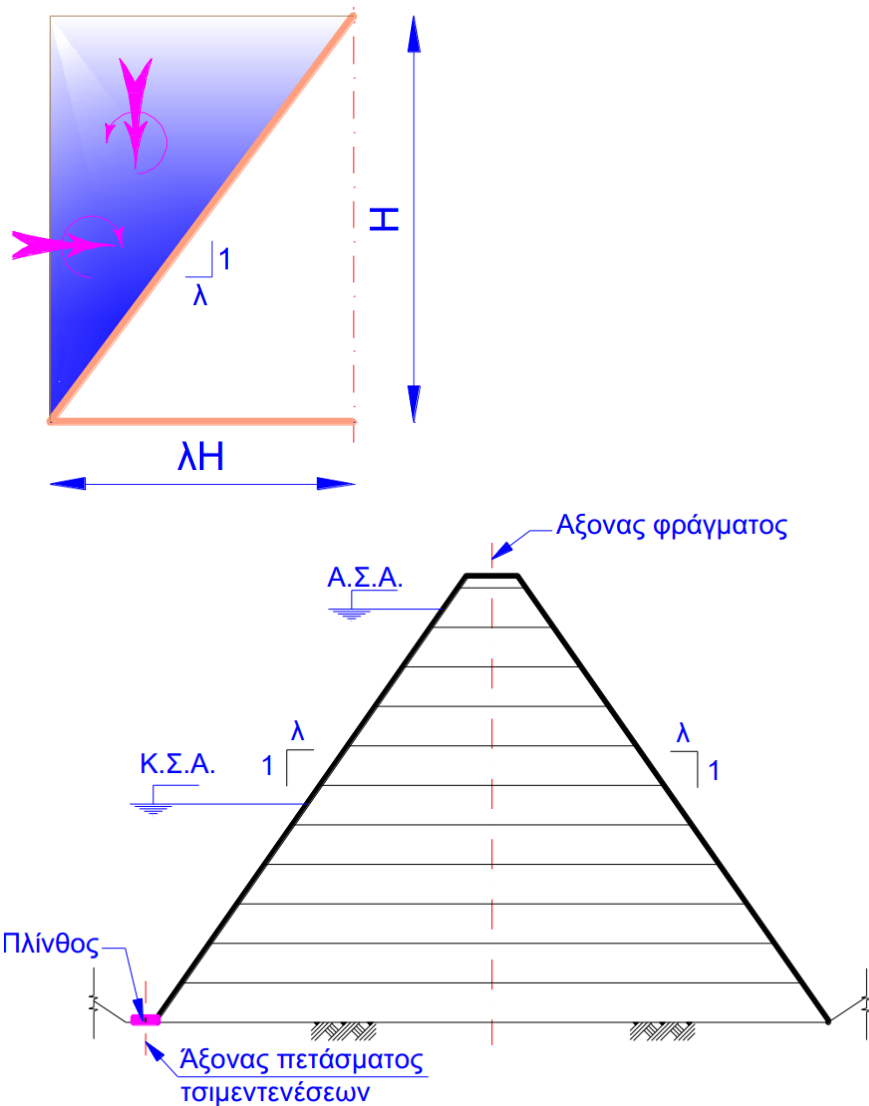
### The Dam

The Safest Dam is a symmetrical trapezoidal-section concrete structure, with upstream and downstream slopes selected to eliminate the need for forming of the faces. Features of conventional-gravity dams not considered essential from a long-term safety viewpoint are eliminated in order to minimize cost.

Fig. 1 illustrates the dam, whose layout essentially was foreseen by Raphaël (1970) and adapted to incorporate roller-compacted-concrete (RCC) construction techniques by Schrader (1977). Londe and Lino (1992) proposed the adoption of symmetrical section RCC dams for weak foundation conditions, particularly in areas subject to strong earthquake ground motions.



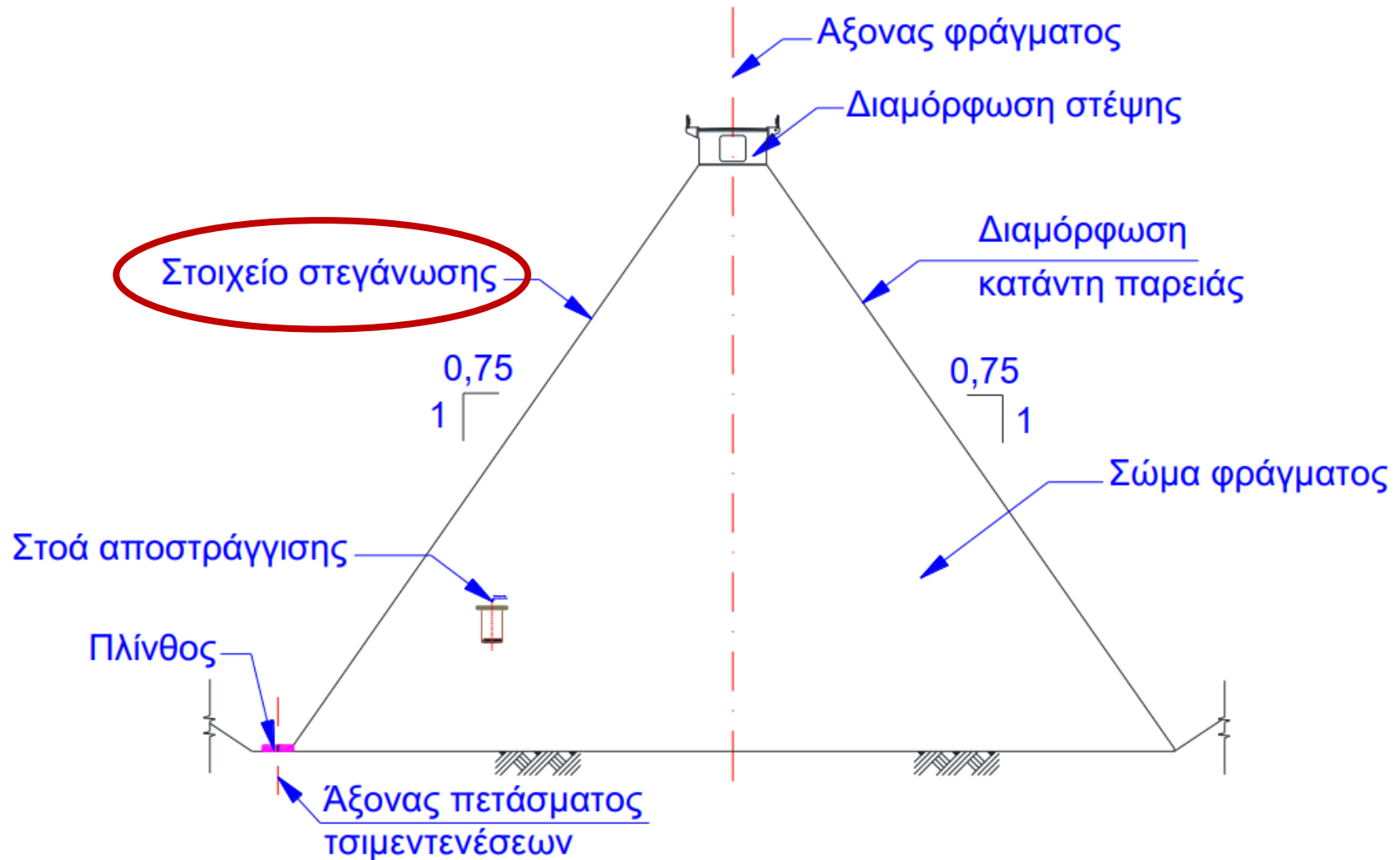
# Βασική αρχή γεωμετρικού σχεδιασμού: Επίτευξη ευστάθειας από το ίδιο βάρος του νερού



Ροπή από πλευρική ώθηση = ροπή από το βάρος του νερού, όταν:

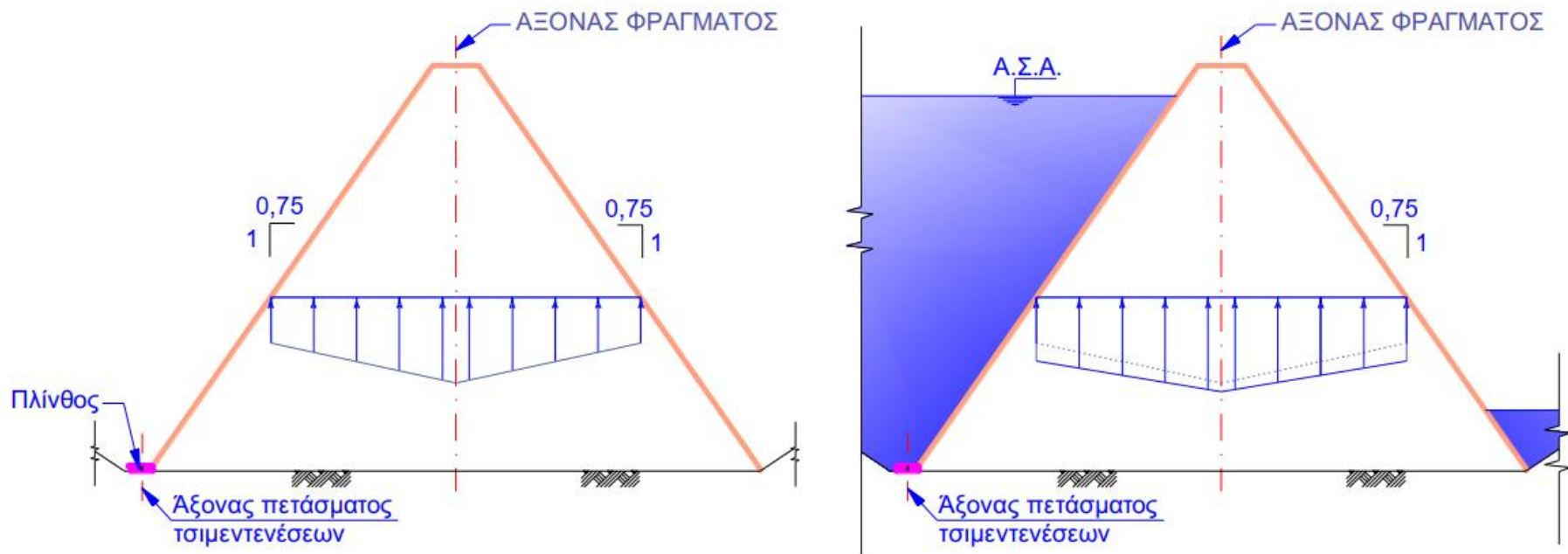
$$\lambda = \sqrt{0.5} \approx 0.70$$

# Τυπική διατομή αξονοσυμμετρικού φράγματος βαρύτητας από κυλινδρούμενο σκληρό επίχωμα



# Ανάλυση ορθών τάσεων και συναφείς απαιτήσεις

- Ορθές τάσεις στην επιφάνεια θεμελίωσης:  $\sigma \sim \gamma h$
- Χαμηλό επίπεδο τάσεων στη θεμελίωση → δεν απαιτείται υψηλή αντοχή πετρώματος θεμελίωσης → **ευελιξία ως προς τις συνθήκες θεμελίωσης**
- Χαμηλό επίπεδο τάσεων στο σώμα → δεν απαιτείται υψηλή αντοχή υλικού φράγματος:
  - Χρήση **αδρανών χαμηλής αντοχής** (όχι αδρανή σκυροδέματος, μειωμένες απαιτήσεις σε δοκιμές εκτριβής, σε αντίθεση με φράγματα ισχνού RCC)
  - **Χαμηλή περιεκτικότητα σε τσιμέντο** (τυπικό εύρος 50-70 kg/m<sup>3</sup>)
- Πολύ δύσκολη η ανάπτυξη εφελκυστικών τάσεων στο σώμα του φράγματος, ακόμη και με σεισμό → κατάλληλα για **σεισμογενείς περιοχές**



# Υλικά κατασκευής φραγμάτων σκληρού επιχώματος

- Υλικά κατασκευής σώματος φράγματος:
  - Μείγμα αδρανών (μέγιστη διάσταση κόκκου 60-75 mm), τσιμέντου ( $50-80 \text{ kg/m}^3$ ) και νερού (10-12%,  $130-150 \text{ kg/m}^3$ )
  - Πρόσμικτα: τέφρα, υδραυλικές κονίες
- Μικρή αναλογία τσιμέντου στο μίγμα → ελαχιστοποίηση αναπτυσσόμενης θερμοκρασίας ενυδάτωσης, προς αποφυγή ρηγμάτωσης
- Μικρή αναλογία νερού στο μίγμα → επίτευξη συνθηκών βέλτιστης υγρασίας για ικανοποιητική συμπύκνωση του μίγματος με κοινά μηχανήματα (οδοστρωτήρες), με ταυτόχρονη εξασφάλιση ικανοποιητικής αντοχής
- Κύριο συστατικό προς ανεύρεση τα **αδρανή** (χωρίς απαιτήσεις αδρανών σκυροδέματος)
- Προέλευση: θραυστά, αμμοχάλικα, κορήματα, αλλούβια, εκσκαφή χαλαρών βράχων



# Διάστρωση και συμπύκνωση σκληρού επιχώματος

- ❑ Διάστρωση **κατά στρώσεις χωρίς διακοπή** και χωρίς απαίτηση επεξεργασίας μεταξύ των στρώσεων, συμπύκνωση με χρήση δονητικού οδοστρωτήρα
- ❑ Ανάγκη **εγκιβωτισμού** υλικού ΣΕ στο εκάστοτε δάπεδο εργασίας για τη συμπύκνωσή του
- ❑ RCC: πάχος στρώσεων 30 cm, μετά τη συμπύκνωση (με τάση για αύξηση)
- ❑ ΣΕ: πάχη στρώσεων 40, 45, 50 cm
- ❑ Εφικτός στόχος **δύο στρώσεις/ημέρα** (κατασκευή φράγματος ύψους 50 m σε 60 ημέρες)
- ❑ Ταχεία ανύψωση φράγματος → **μειωμένες παραδοχές σχεδιασμού του συστήματος εκτροπής** (ακόμα και κατάργησής του, δεδομένου ότι τα φράγματα ΣΕ είναι υπερπηδητά)

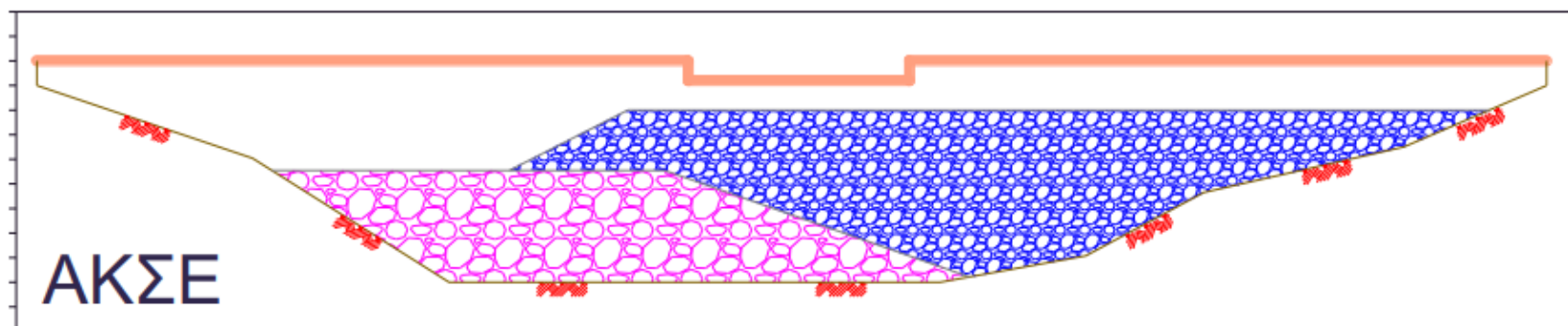
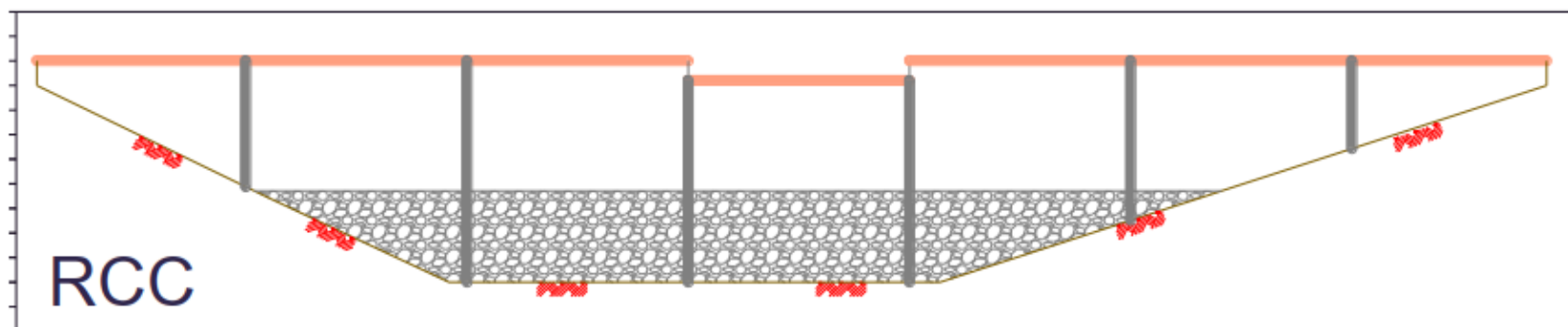
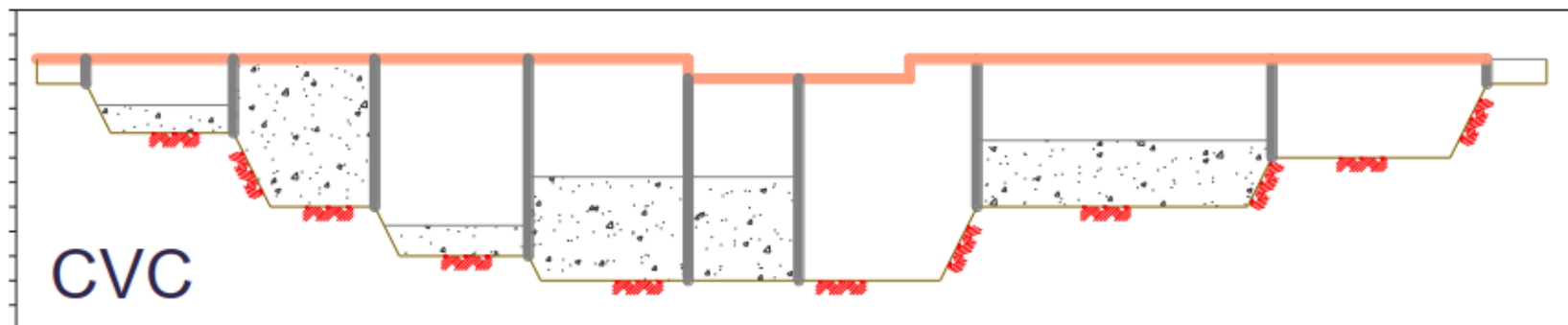


# Διαβροχή, εκφόρτωση, διάστρωση, συμπύκνωση





# Επίπτωση απουσίας αρμών στη μέθοδο κατασκευής



# Διαπερατότητα φραγμάτων σκληρού επιχώματος

- Χαμηλή περιεκτικότητα σε τσιμέντο → πορώδες 15% → **διαπερατό υλικό**
  - Πλεονεκτήματα
    - Φυσική αποστράγγιση σώματος φράγματος
    - Αποφυγή ανάπτυξης πίεσης πόρων στο εσωτερικό του φράγματος
  - Μειονεκτήματα
    - Ανάγκη κατασκευής **στεγανού στοιχείου στην ανάντη παρειά** του φράγματος
      - Πλάκα οπλισμένου σκυροδέματος
      - Μembrάνη (ελαστικότητα, δεν απαιτούνται αρμοί, ελάχιστη υδατοπερατότητα)
      - Εκτοξευόμενο σκυρόδεμα (σε φράγματα μικρού ύψους)
    - Ανάγκη κατασκευής **πλίνθου** (έργο έδρασης του ανάντη στεγανωτικού στοιχείου, με σημαντικές κατασκευαστικές απαιτήσεις)
  - Επίπτωση στεγανοποίησης στην **ανάντη παρειά** του φράγματος:
    - Ανάπτυξη ρωγμών αποδεκτή
    - Δεν επηρεάζεται η ευστάθεια του φράγματος
    - Περιορισμένη διήθηση νερού
- Δεν απαιτούνται αρμοί Σ/Δ στο σώμα του φράγματος**
- Βασική απαίτηση η ουσιαστική **αποστράγγιση κατάντη του στεγανοποιητικού στοιχείου** (λόγω ανάπτυξης πιέσεων κατά τον καταβιβασμό της στάθμης ταμιευτήρα) → σωλήνες αποστράγγισης πάνω στην ανάντη παρειά, στοές αποστράγγισης κοντά στην ανάντη παρειά
  - Ενισχυμένη ζώνη στην κατάντη παρειά → σωλήνες αποστράγγισης

# Παραδείγματα στεγανωτικών στοιχείων φραγμάτων ΣΕ

Φράγμα Κόρης Γεφύρι,  
πλάκα σκυροδέματος



Φράγμα Βαλαμιώτη,  
πλάκα σκυροδέματος



Φράγμα Φιλιατρινό,  
γεωσύνθετο



Φράγμα Στενό Σεριφου,  
πλάκα σκυροδέματος

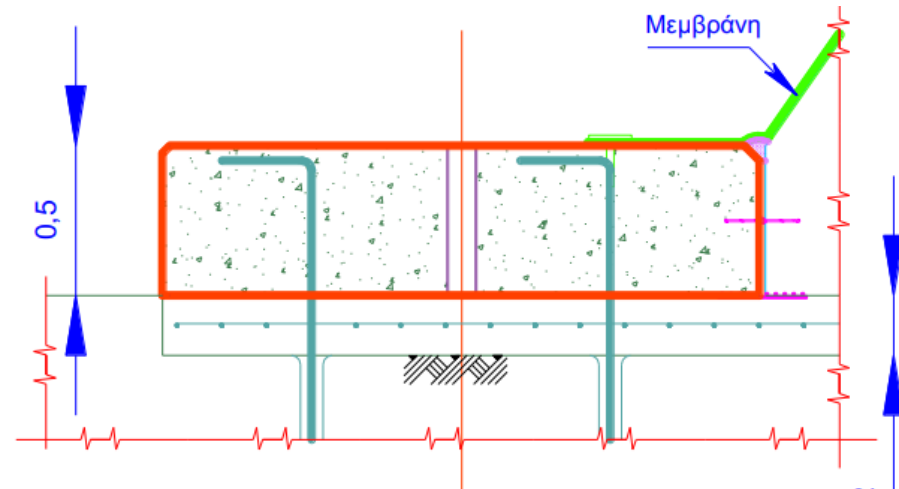
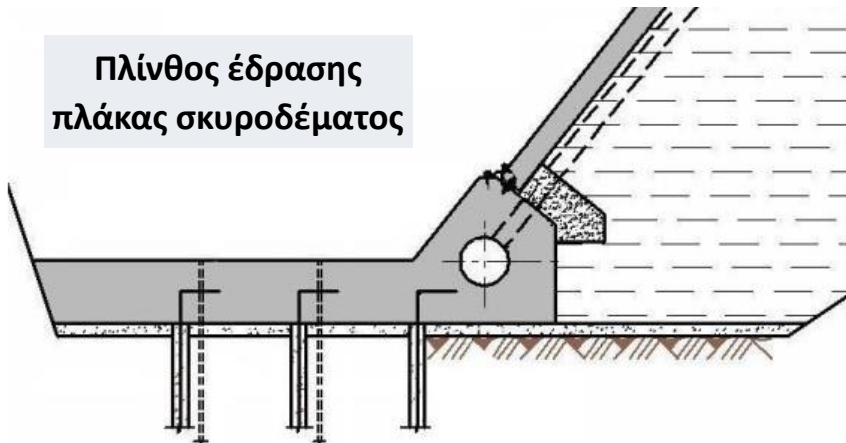


# Πλίνθος έδρασης στεγανωτικού στοιχείου

- ❑ Μονολιθική κατασκευή από οπλισμένο σκυρόδεμα, σε όλο το μήκος της ανάντη παρειάς, επί της οποίας **εδράζεται το στεγανωτικό στοιχείο**
- ❑ Η διαμόρφωση της πλίνθου εξαρτάται από τον **τύπο στεγανοποίησης**
- ❑ Η κατασκευή της πλίνθου **προηγείται του φράγματος**:
  - Διαμόρφωση εκσκαφών θεμελίωσης φράγματος και πλίνθου
  - Αγκυρώσεις, οπλισμός και σκυροδέτηση πλίνθου, χωρίς αρμούς
  - Τσιμεντενέσεις πετάσματος και τάπητα



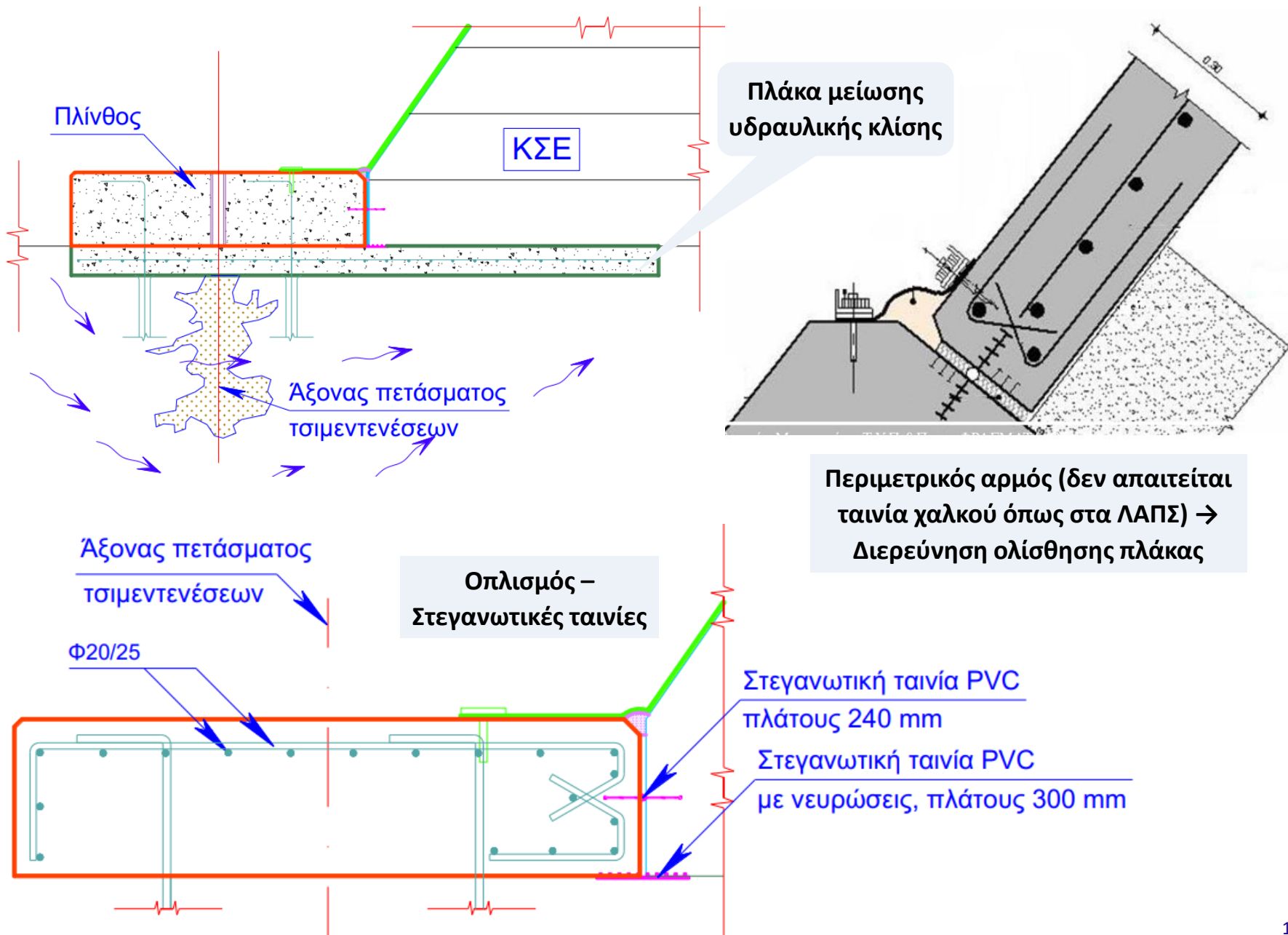
Πλίνθος έδρασης  
πλάκας σκυροδέματος



Πλίνθος έδρασης γεωμεμβράνης



# Κατασκευαστικές λεπτομέρειες πλίνθου



# Διαμόρφωση πλίνθου φράγματος Κόρης Γεφύρι (1)

Εκσκαφή τάφρου –  
διάτρηση οπών  
ράβδων αγκύρωσης



Ράβδοι αγκύρωσης  
Ø25 (1.5×1.5 ή 2×2)



Οπλισμός & σωλήνες  
αποστράγγισης



Λεπτομέρεια  
οπλισμού



# Διαμόρφωση πλίνθου φράγματος Κόρης Γεφύρι (2)

Πλίνθος και  
ανάντη πρανές



Συνέχεια πλίνθου  
στο αντέρεισμα

Ενσωματωμένο  
στραγγιστήριο



Ανάντη παρειά  
πριν την πλάκα





# Διαμόρφωση πλίνθου φράγματος Φιλιατρινού



**Πηγή:** Σιδέρη, Ε., Κατασκευή φράγματος σκληρού επιχώματος. Η μελέτη περίπτωσης του Φιλιατρινού φράγματος στο Ν. Μεσσηνίας, Διπλωματική εργασία, Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Μάρτιος 2020.

# Σωλήνες αποστράγγισης στην ανάντη παρειά



# Διαμόρφωση πλάκας σκυροδέματος

Σκυροδέτηση πλάκας φράγματος Βαλαμιώτη



Τριγωνικά φατνώματα & λωρίδες



Πλάκα φράγματος  
Κόρης Γεφύρι



# Διαμόρφωση γεωσύνθετου φράγματος Φιλιατρινού



Υδατοστεγανή στερέωση  
γεωσύνθετου σε σκυρόδεμα



# Διαμόρφωση ανάντη παρειάς

- ❑ Συνήθως η διαμόρφωση επαφίεται στον κατασκευαστή
- ❑ Διαμόρφωση επίπεδης ή βαθμιδωτής επιφάνειας κατά τη διάστρωση (πλάκα σκυροδέματος ή γεωσύνθετο;)
- ❑ Διαμόρφωση με τοποθέτηση πρόσθετων στοιχείων:
  - προκατασκευασμένα στοιχεία μορφής L
  - λωρίδες τραπεζοειδούς διατομής (επί τόπου ή προκατασκευασμένες)
  - κοίλα στοιχεία από οπλισμένο σκυρόδεμα

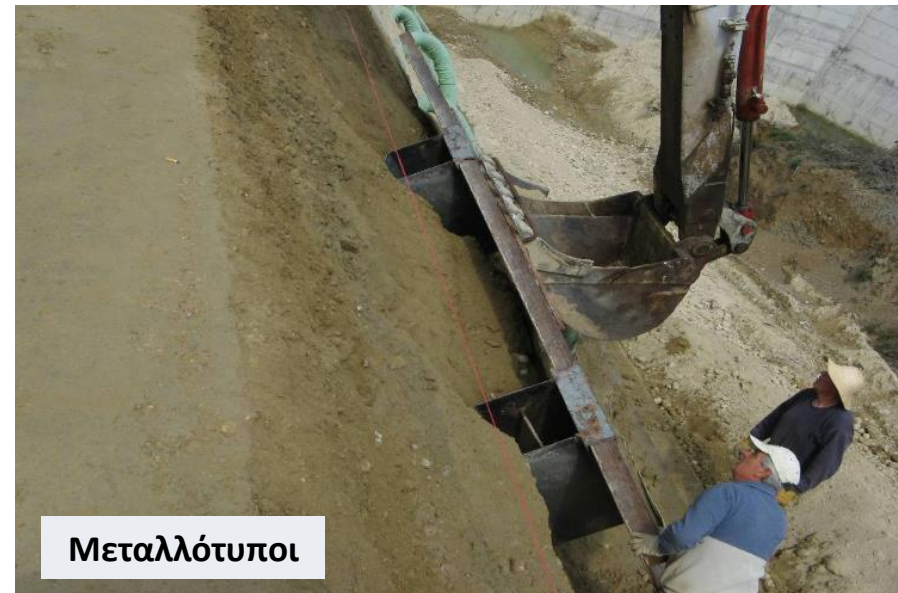


Επίπεδη επιφάνεια  
(φράγμα Κόρης Γεφύρι)



Βαθμιδωτή επιφάνεια  
(φράγμα Βαλσαμιώτη)

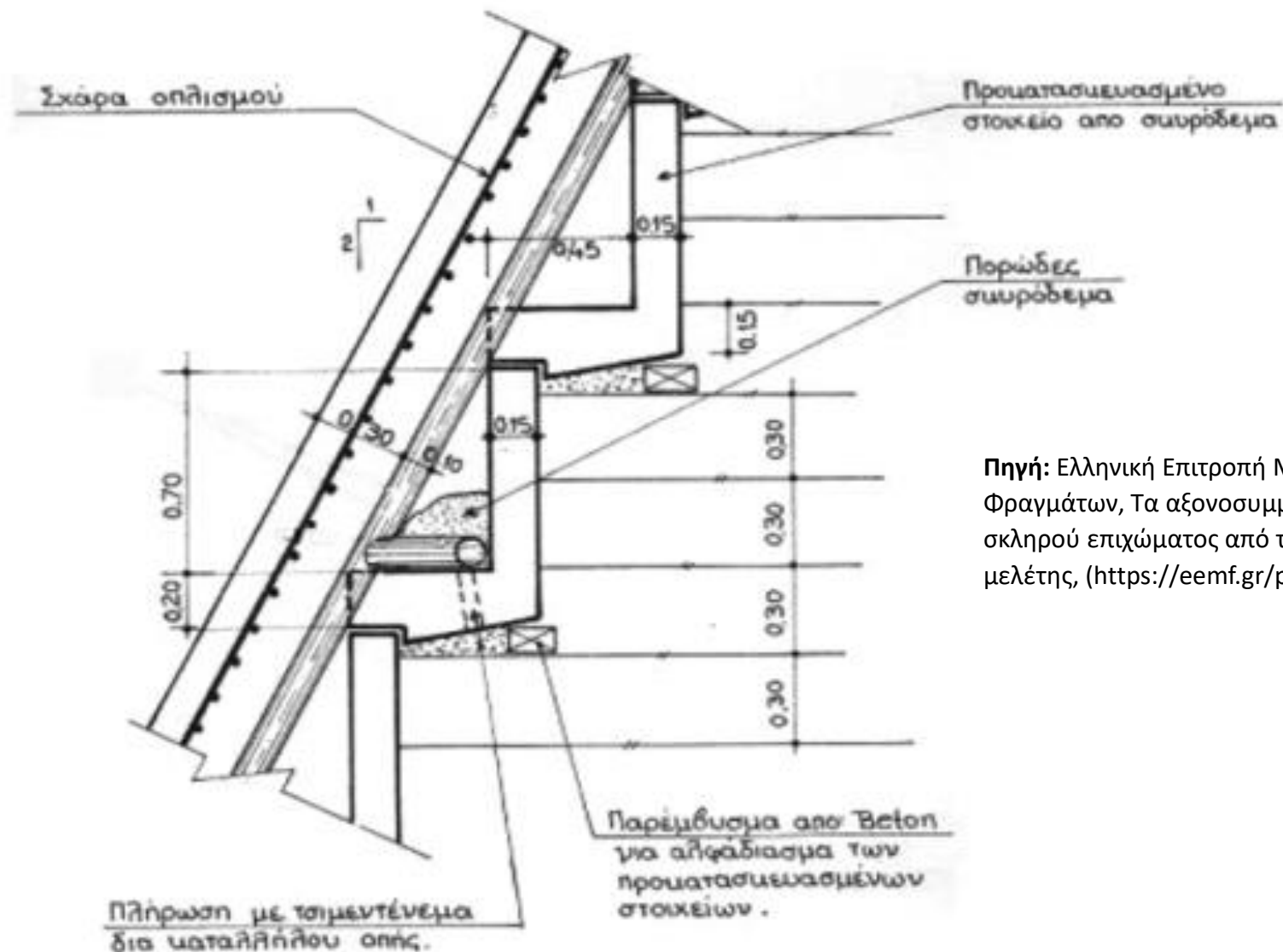
# Τρόποι διαμόρφωσης επίπεδης ανάντη παρειάς



# Διάστρωση και συμπύκνωση περιοχής ανάντη παρειάς



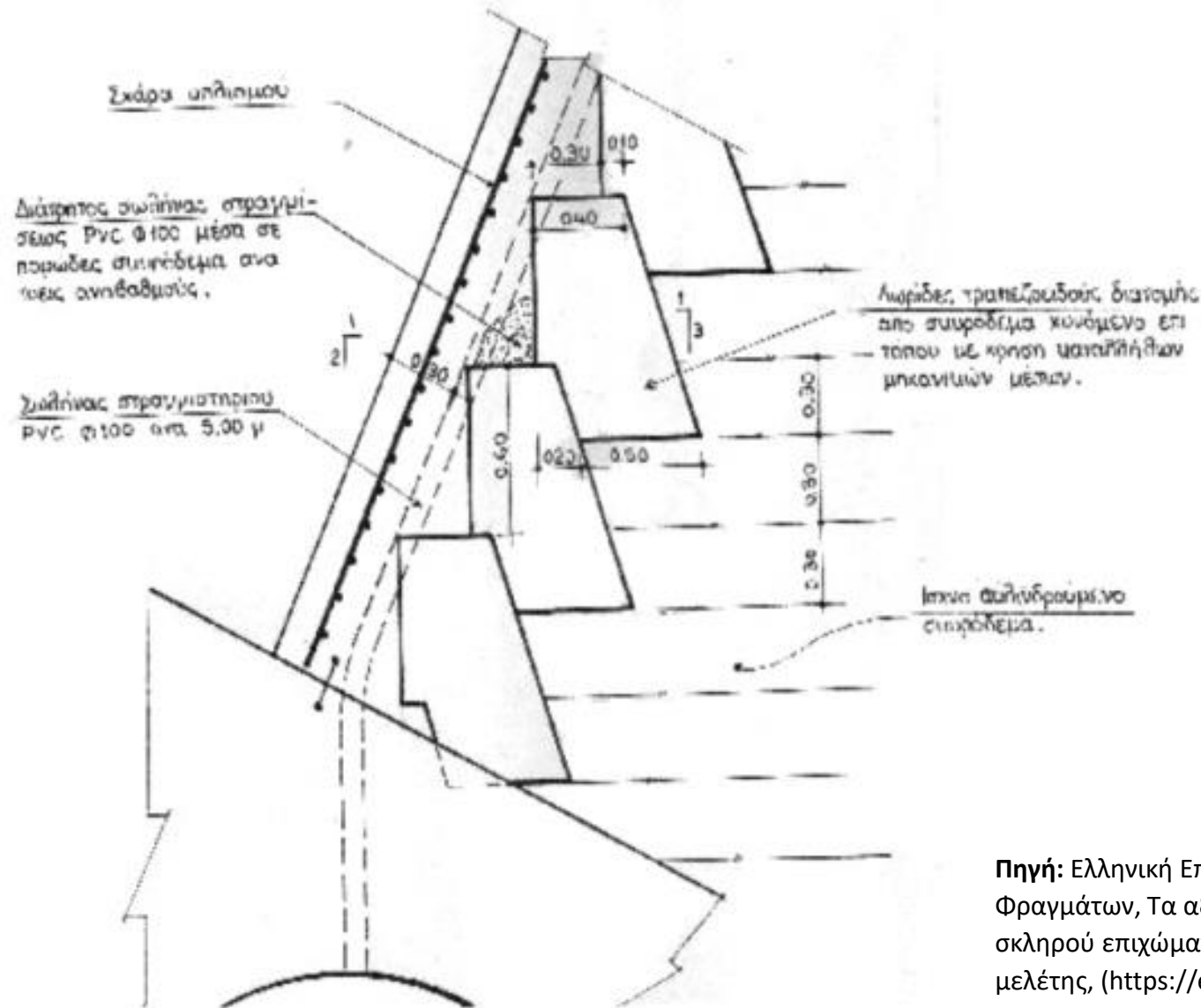
# Διαμόρφωση ανάντη παρειάς με προκατασκευασμένα στοιχεία μορφής L



**Πηγή:** Ελληνική Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων, Τα αξονοσυμμετρικά φράγματα σκληρού επιχώματος από την σκοπιά της μελέτης, (<https://eemf.gr/p2.pdf>).



# Διαμόρφωση ανάντη παρειάς με λωρίδες τραπεζοειδούς διατομής (επί τόπου ή προκατασκευασμένες )

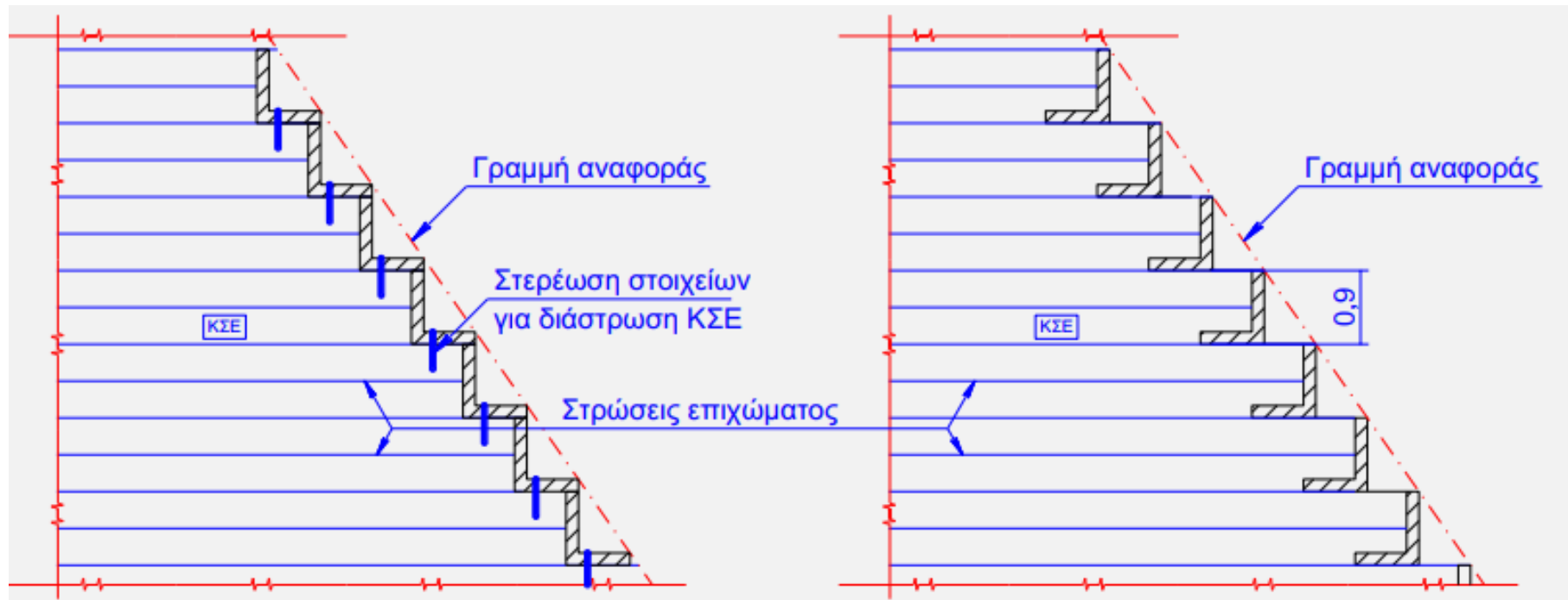


**Πηγή:** Ελληνική Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων, Τα αξονοσυμμετρικά φράγματα σκληρού επιχώματος από την σκοπιά της μελέτης, (<https://eemf.gr/p2.pdf>).



# Διαμόρφωση κατάντη παρειάς

- ❑ Ανάγκη εγκιβωτισμού του σκληρού επιχώματος στο εκάστοτε δάπεδο εργασίας για τη συμπύκνωσή του, με χρήση προκατασκευασμένων στοιχείων
- ❑ Εάν κατασκευάζεται ενισχυμένη ζώνη στην κατάντη παρειά, απαιτείται πρόβλεψη αποστράγγισης (σωλήνες αποστράγγισης)
- ❑ Η διαμόρφωση της κατάντη παρειάς συνήθως συνδυάζεται με την τοποθέτηση βαθμιδωτού υπερχειλιστή
- ❑ Αισθητική έργου



# Παραδείγματα κατάντη παρειάς (διαπερατότητα!)

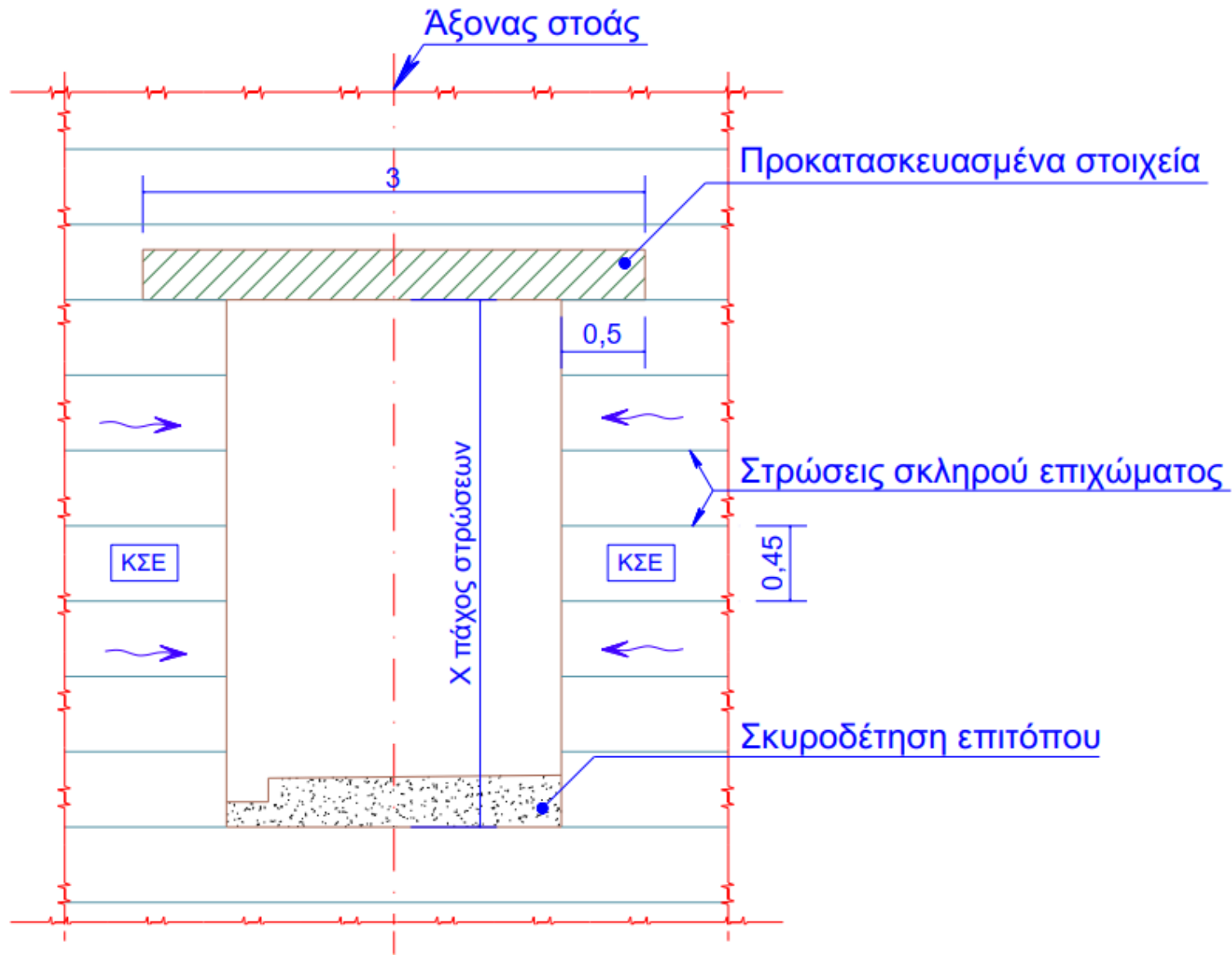


# Λεπτομέρειες διαμόρφωσης κατάντη παρειάς

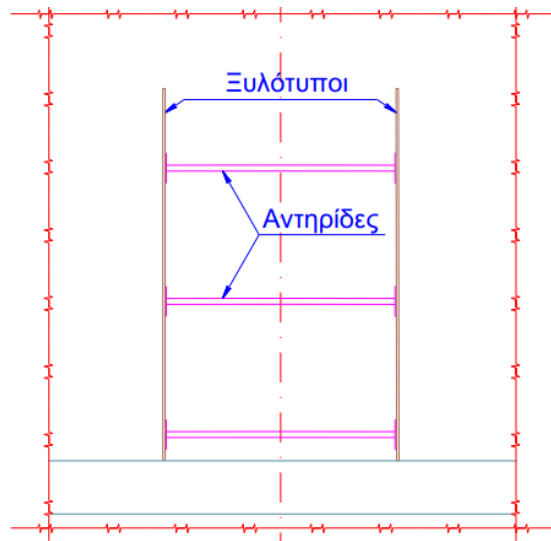




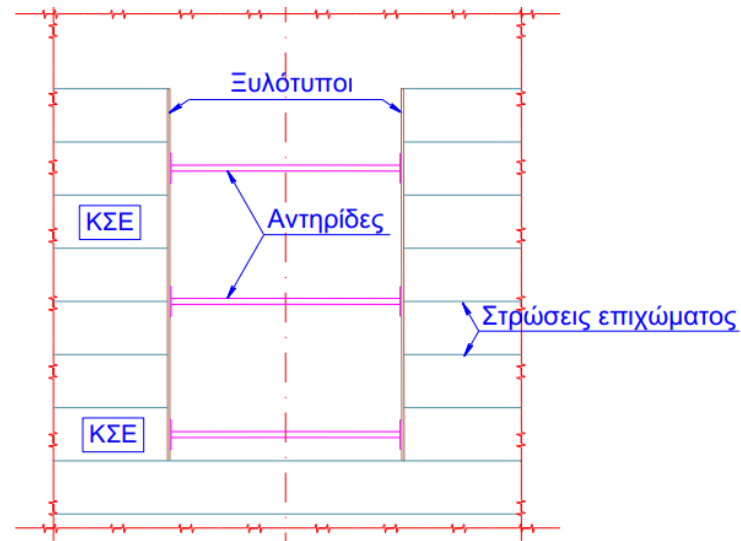
# Στοά αποστράγγισης (κοντά στην ανάντη παρειά)



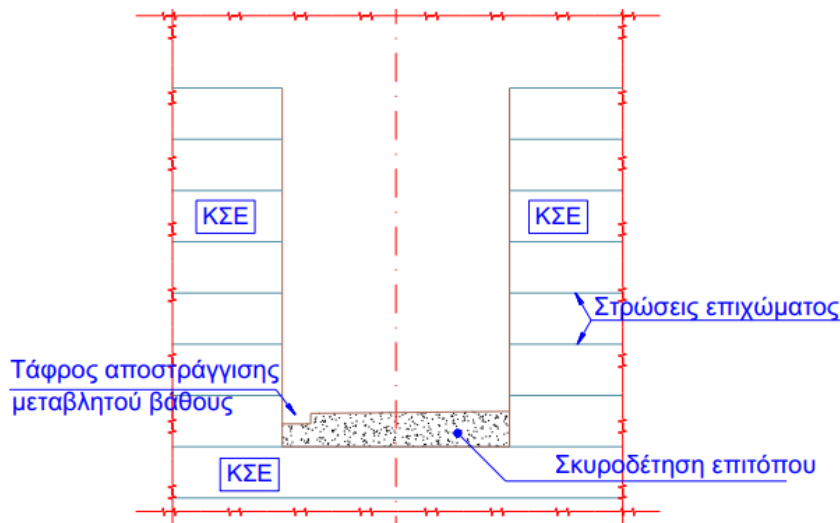
# Στάδια κατασκευής στοάς αποστράγγισης



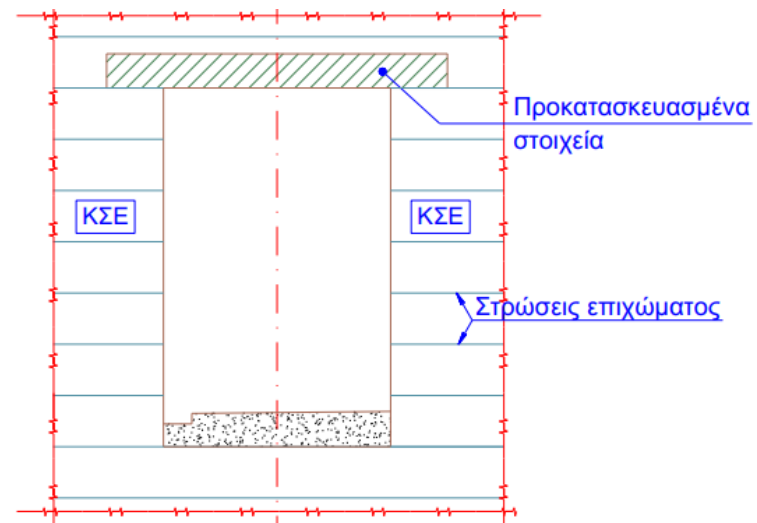
1ο Στάδιο  
Τοποθέτηση ξυλότυπων



2ο Στάδιο  
Διάστρωση σκληρού επιχώματος



3ο Στάδιο  
Σκυροδέτηση δαπέδου



4ο Στάδιο  
Τοποθέτηση προκατασκευασμένων στοιχείων

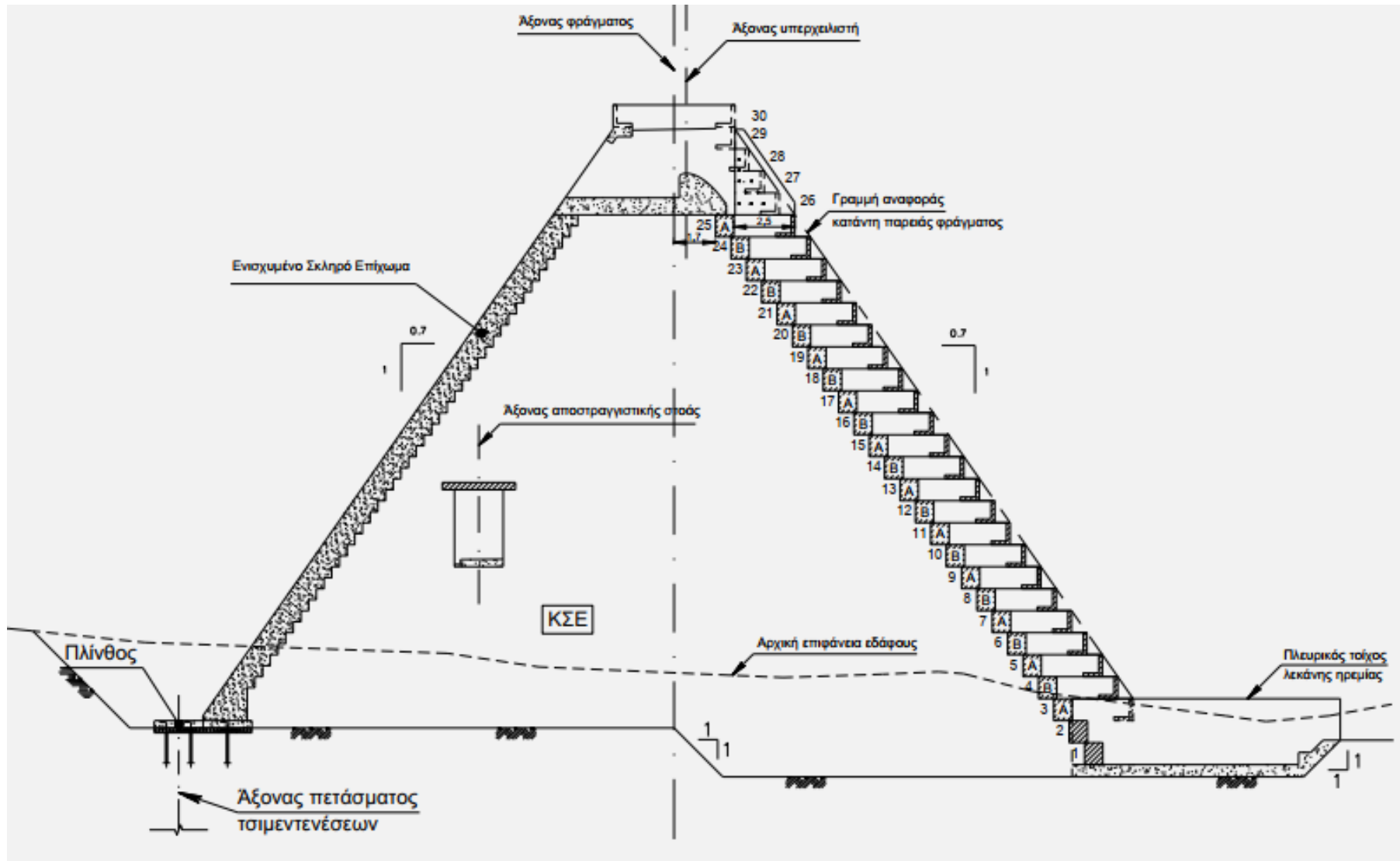


# Διαμόρφωση υπερχειλιστών φραγμάτων ΣΕ

- Σκληρό επίχωμα: φράγμα βαρύτητας → τοποθέτηση υπερχειλιστή πάνω στο σώμα του φράγματος → προσαρμογή στη γεωμετρία της κατάντη παρειάς
- Πλέον πρόσφορη διάταξη: **βαθμιδωτός υπερχειλιστής**
  - Εφαρμογή συνήθως μόνο για μικρές ειδικές παροχές ( $<10 \text{ m}^3/\text{s}/\text{m}$ )
  - Περιορισμός λόγω ύψους βαθμίδων
  - Σημαντική αποτόνωση υδραυλικής ενέργειας στις βαθμίδες
  - Λεκάνη ηρεμίας μικρού μήκους
- Διώρυγα πτώσης:
  - Κλίση διώρυγας ίδια με την κατάντη παρειά φράγματος
  - Τοποθέτηση στο «εσωτερικό» του φράγματος
  - Πλευρικά τοιχία επαρκούς ύψους

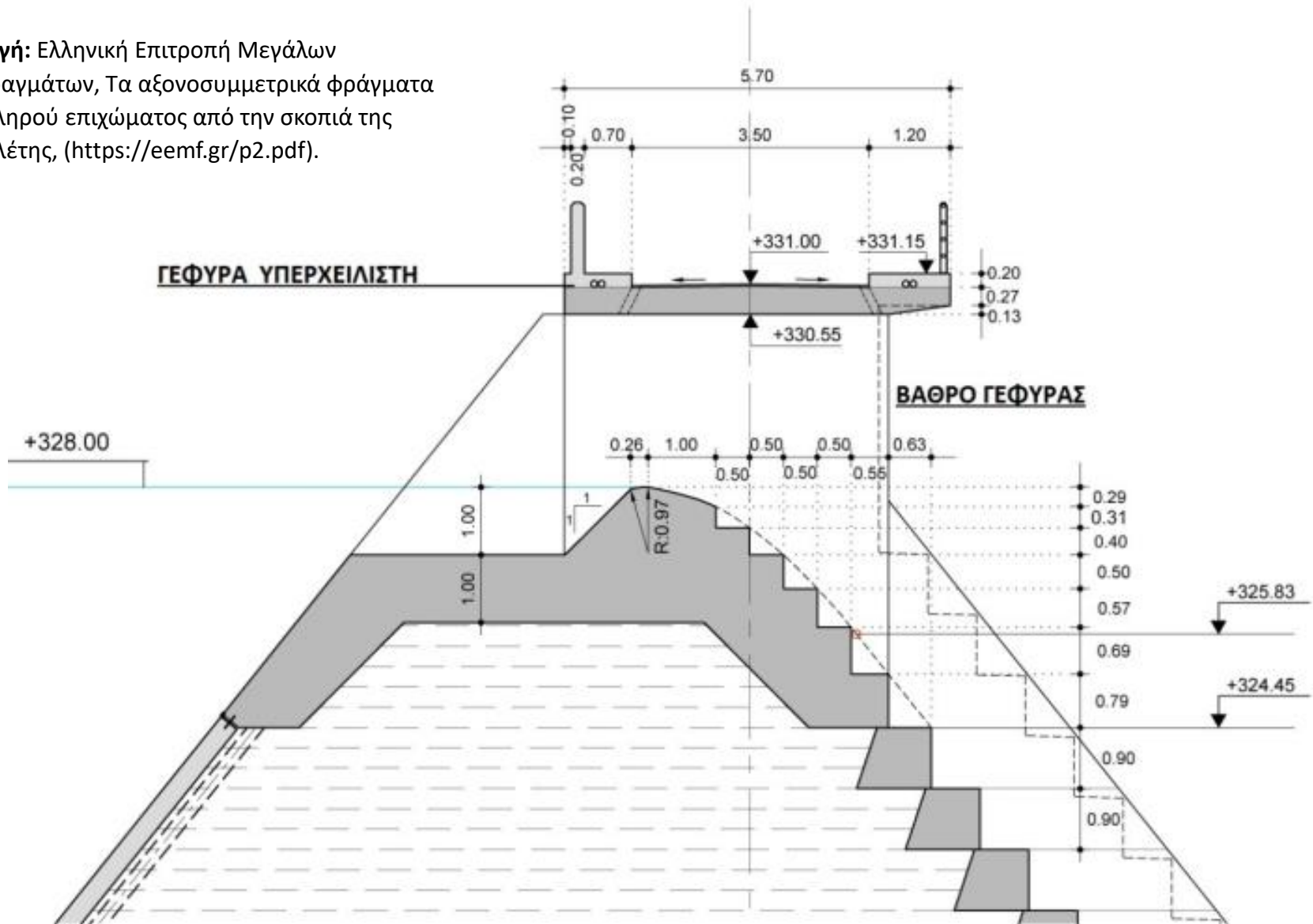


# Τυπική διατομή στη θέση του υπερχειλιστή

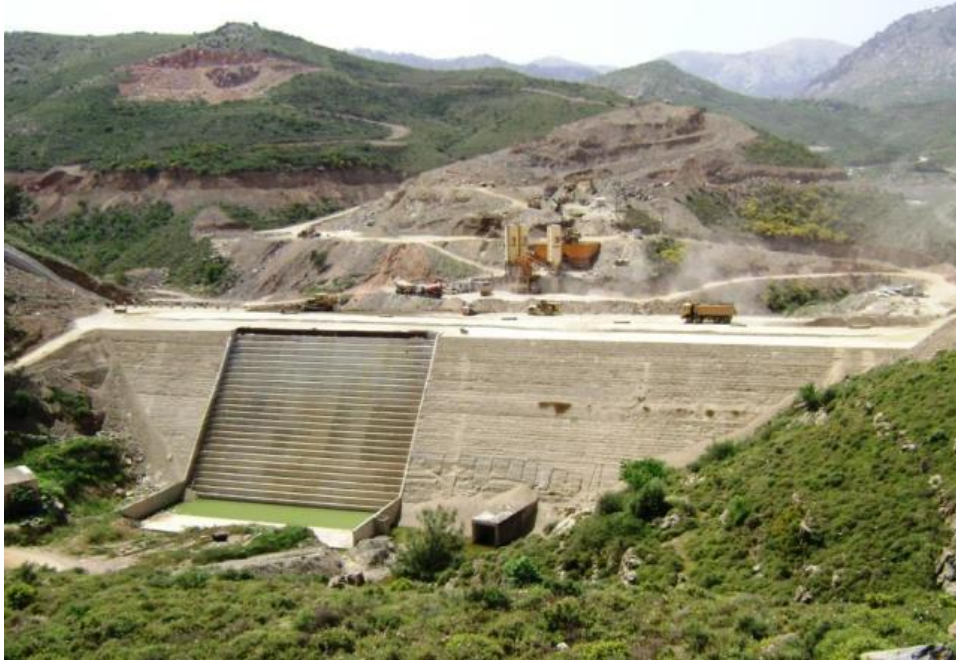


# Λεπτομέρεια διαμόρφωσης στην περιοχή του οgee

**Πηγή:** Ελληνική Επιτροπή Μεγάλων Φραγμάτων, Τα αξονοσυμμετρικά φράγματα σκληρού επιχώματος από την σκοπιά της μελέτης, (<https://eemf.gr/p2.pdf>).



# Παραδείγματα υπερχειλιστών σε φράγματα ΣΕ



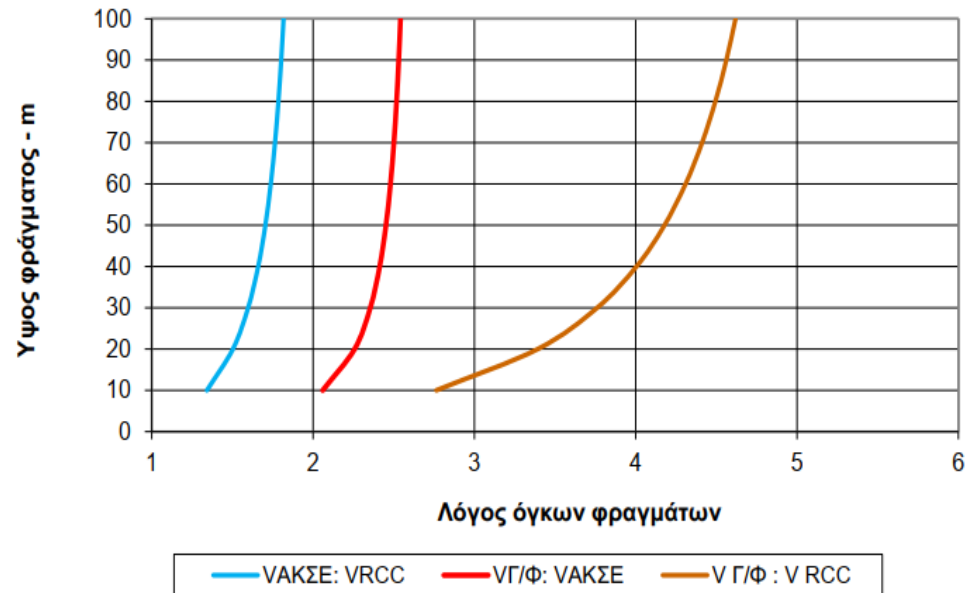
# Γιατί σκληρό επίχωμα;

## □ Παραδείγματα τριών τύπων φραγμάτων:

- RCC (κατάντη 0.75:1)
- ΑΚΣΕ (κλίση 0.75:1)
- Γεώφραγμα (συμμετρικό, κλίση 2:1)

## □ Σύγκριση όγκων φραγμάτων:

- ΑΚΣΕ = 2 RCC
- $\Gamma/\Phi \approx 2.5$  ΑΚΣΕ
- $\Gamma/\Phi \approx 5.5$  RCC



- ## □ Σώμα γεωφράγματος (αν και μεγαλύτερο σε όγκο) πάντα οικονομικότερο από ΣΕ αλλά:
- Σημαντική μείωση κόστους υπερχειλιστή (ΣΕ: υπερχειλιστής στο σώμα του φράγματος)
  - Μείωση κόστους συστήματος εκτροπής (έως πλήρης κατάργησή του)
  - Δραστική μείωση του χρόνου κατασκευής

