



ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΓΕΩΤΕΧΝΙΚΗΣ ΣΕ ΔΟΜΟΣΤΑΤΙΚΑ ΕΡΓΑ: *Οπλισμένη γη* & *Εδαφοηλώσεις*

Β.Ν. ΓΕΩΡΓΙΑΝΝΟΥ
Καθηγήτρια Ε.Μ.Π.

Αθήνα, 25/10/2017



Εδαφοηλώσεις

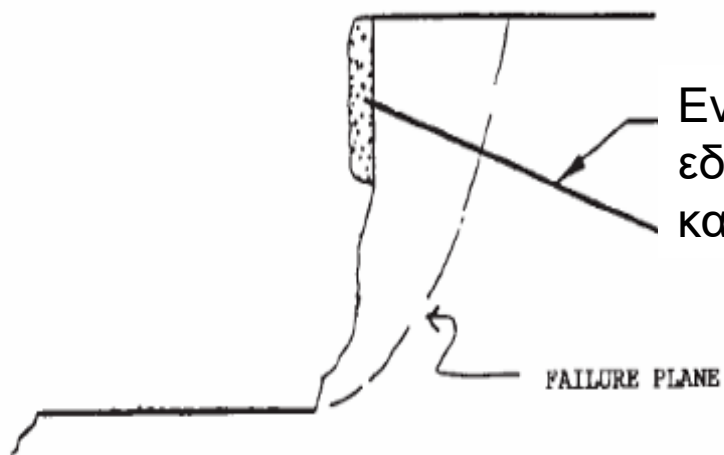
1. Παράδειγμα εφαρμογής:

Σταθεροποίηση σιδηροδρομικού ορύγματος στο σταθμό Versailles-Chantier το 1974.

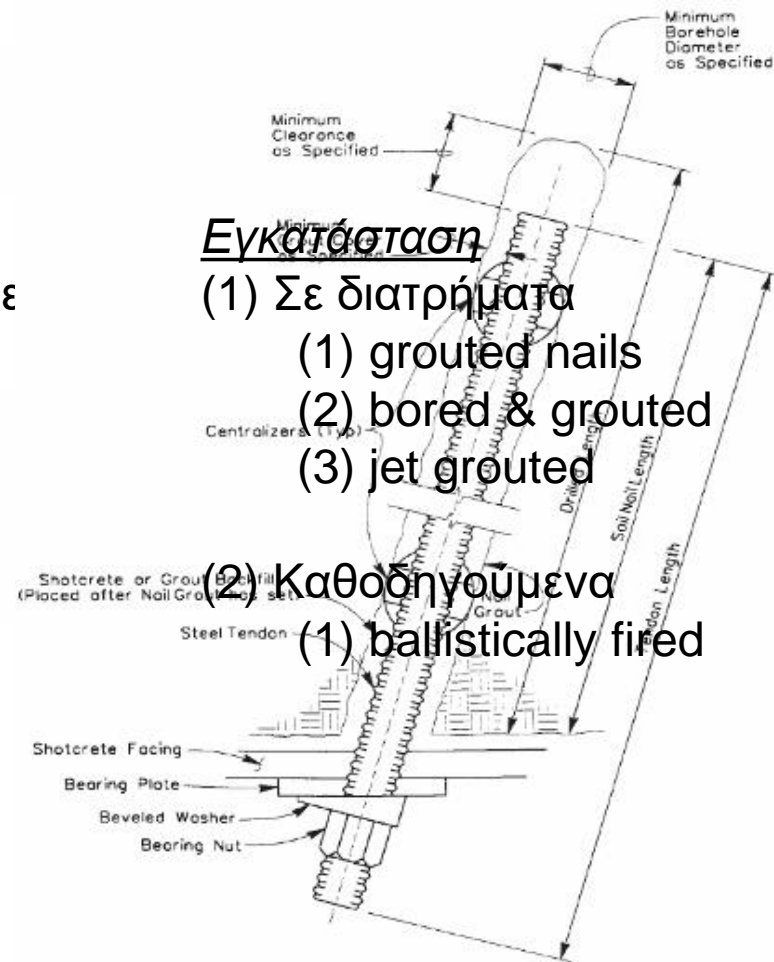
- πρανές 22μ ύψους
- στάδιο εκσκαφής ύψους 1.4μ
- κάνναβος ράβδων οπλισμού κλίσης 70°

- Clouterre (1991). “Soil nailing recommendations for designing, calculating, constructing and inspecting earth support systems using soil nailing”. ***Ecole Nationale des Ponts et Chausseès, Paris.*** English translation (1993), US Department of transportation, FHWA-SA-93-026.

ΕΔΑΦΟΛΩΣΕΙΣ



μεταλλικά στοιχεία
αντίστασης σε
εφελκυσμό και κάμψη



grouted nail

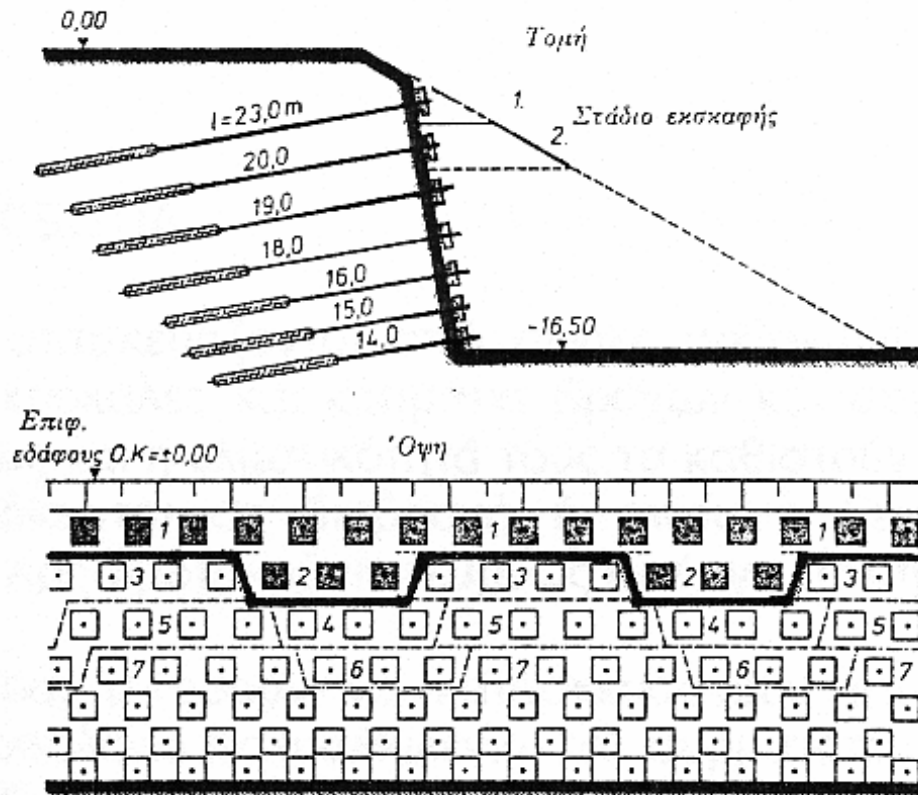
Στάδια κατασκευής εδαφοηλώσεων



- 👷 Εκσκαφή ορύγματος ~2μ
- 👷 Διάτρηση οπής
- 👷 Πλήρωση με ένεμα
- 👷 Αποστράγγιση και οπλισμός
- 👷 Πλάκα έδρασης & επικάλυψη με εκτοξευόμενο σκυρόδεμα
- 👷 Επανάληψη εργασιών
- 👷 Τελική επικάλυψη όψης

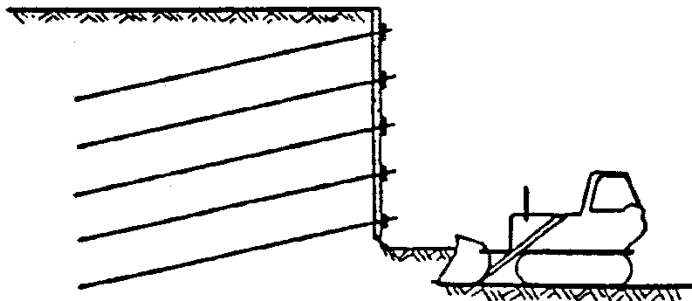
ΤΟΙΧΟΙ ΑΝΤΙΣΤΗΡΙΞΗΣ

- Κατασκευή τοίχων με εδαφοηλώσεις

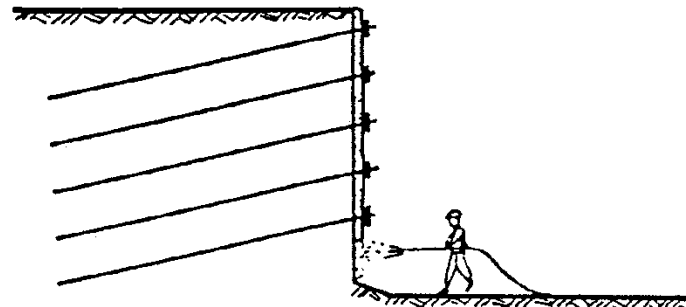


⇒ Προκαταρκτικός σχεδιασμός οπλισμένης γής προς έλεγχο

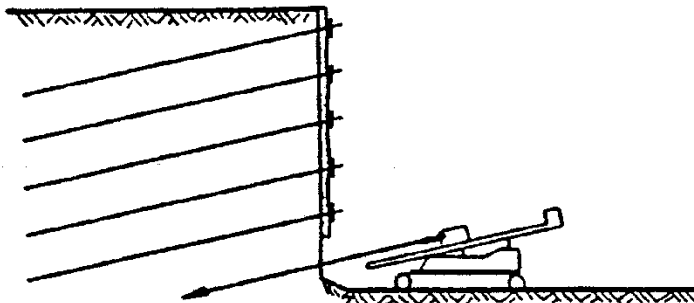
ΚΑΤΑΣΚΕΥΗ ΤΟΙΧΩΝ ΜΕ ΕΛΑΦΟΛΩΣΕΙΣ



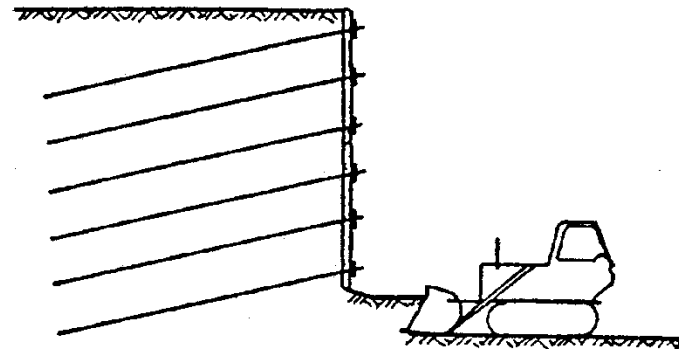
Excavation



Reinforced shotcrete
(or prefabricated facing panels)



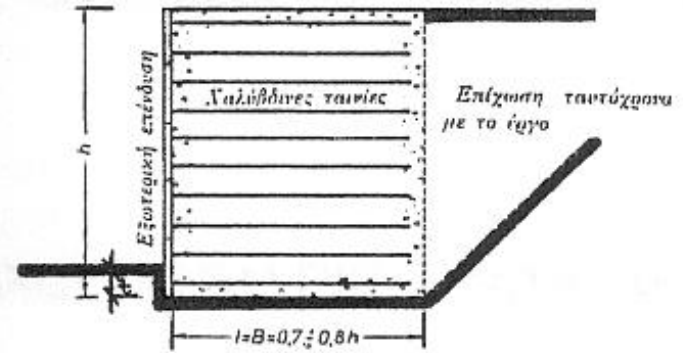
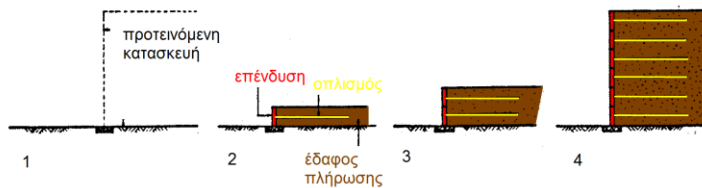
Installing the nails



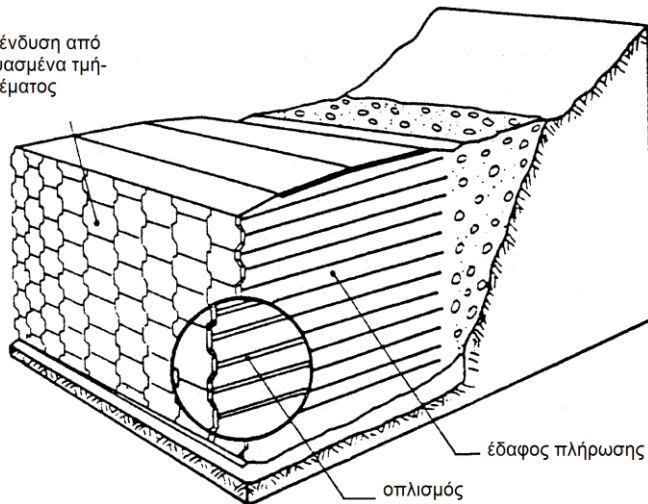
Excavation

ΟΠΛΙΣΜΕΝΗ ΓΗ

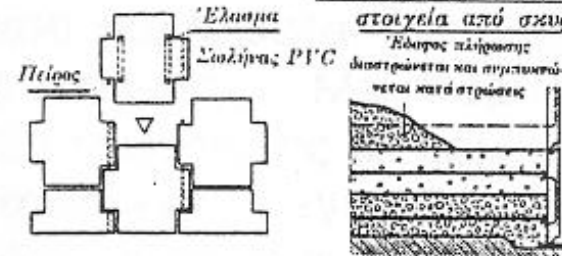
■ Οπλισμένη γη _ Reinforced earthfill wall



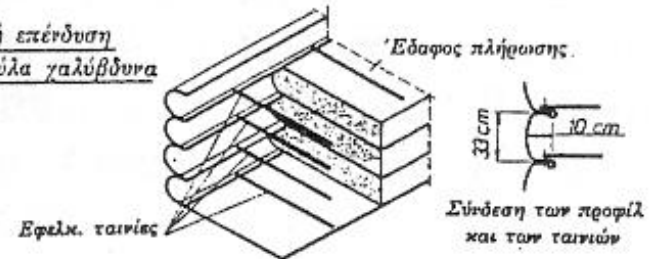
εξωτερική επένδυση από προκατασκευασμένα τμήματα σκυροδέματος



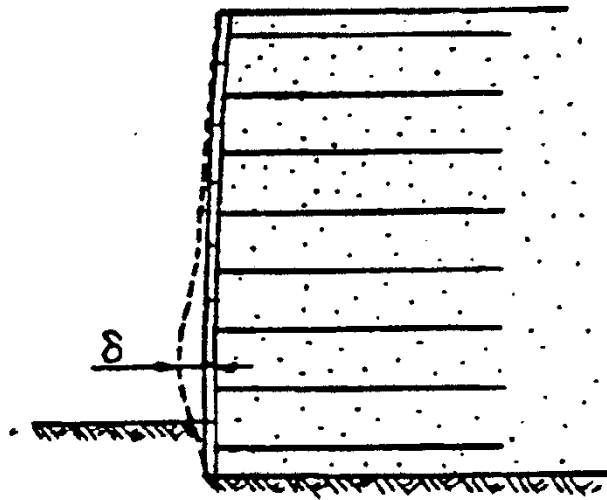
Εξωτερική επένδυση με έτοιμα στοιχεία από σκυροδέμα



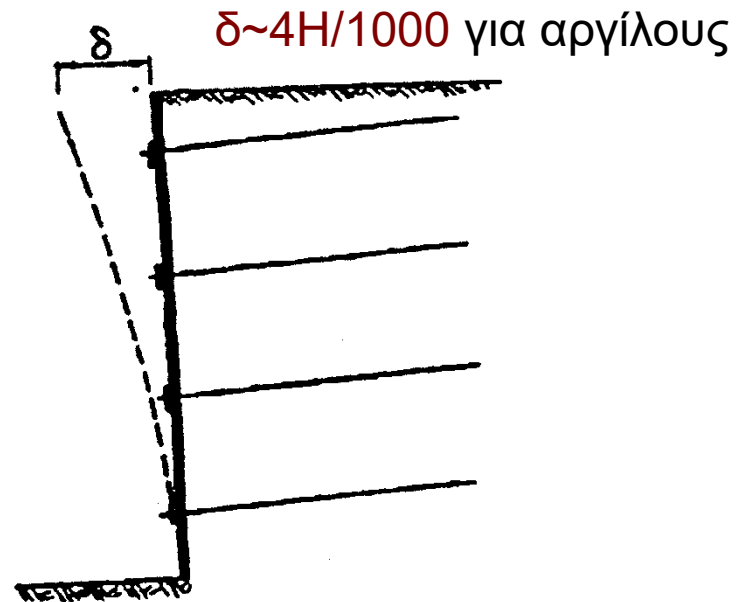
Εξωτερική επένδυση από καμπύλα χαλύβδινα προφίλ



ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΕΙΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ



Reinforced Earth Wall

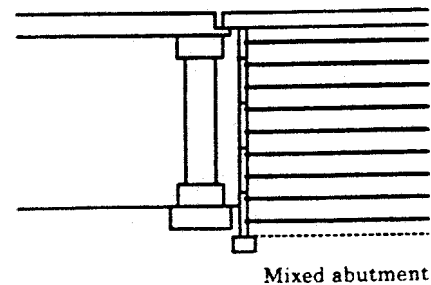
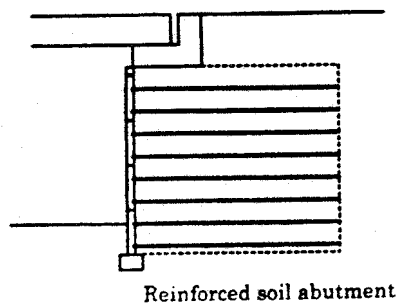
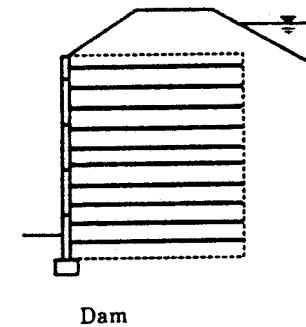
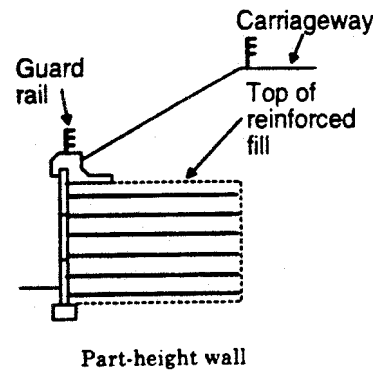
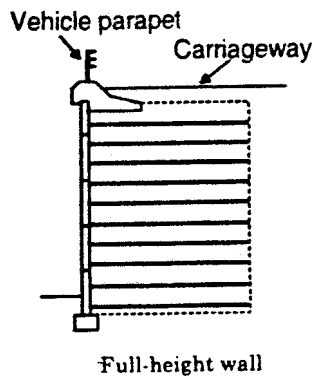
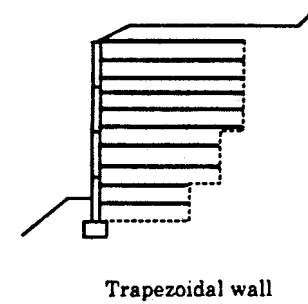
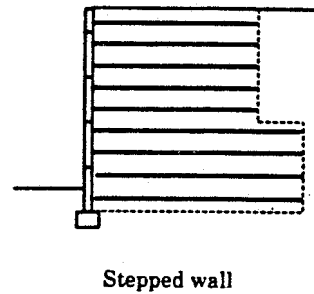
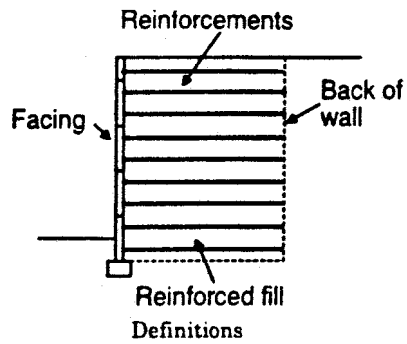


Soil nailed wall

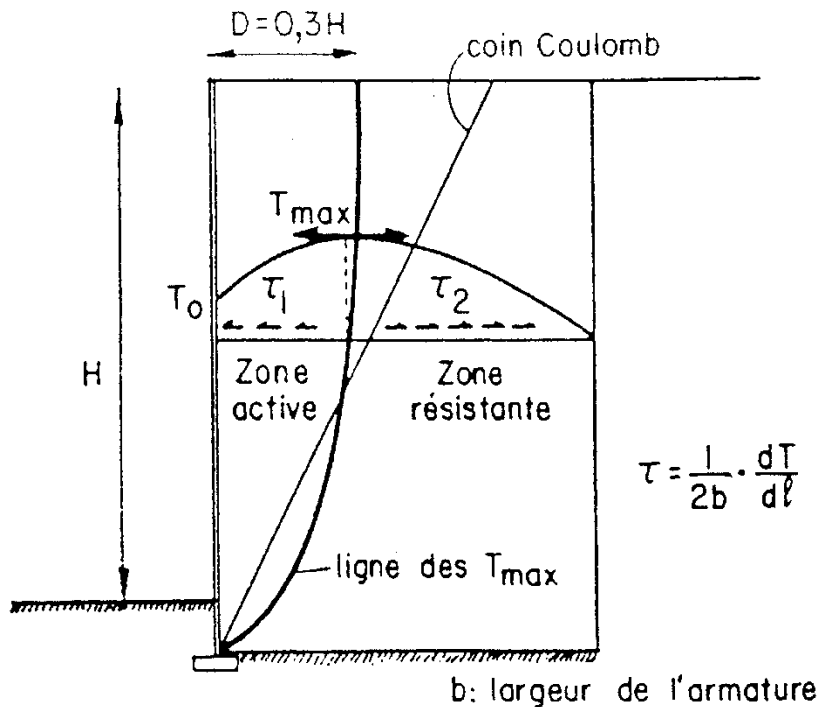
- Οπλισμένη γη: μεγαλύτερες παραμορφώσεις στη βάση καθώς ο οπλισμός επιβαρύνεται με τα φορτία των νέων στρώσεων αλλά και λόγω στερεοποίησης

- Εδαφοηλώσεις: μεγαλύτερες παραμορφώσεις στην κορυφή λόγω αποτόνωσης του εδάφους κατά την εκσκαφή

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ ΟΠΛΙΣΜΕΝΗΣ ΓΗΣ



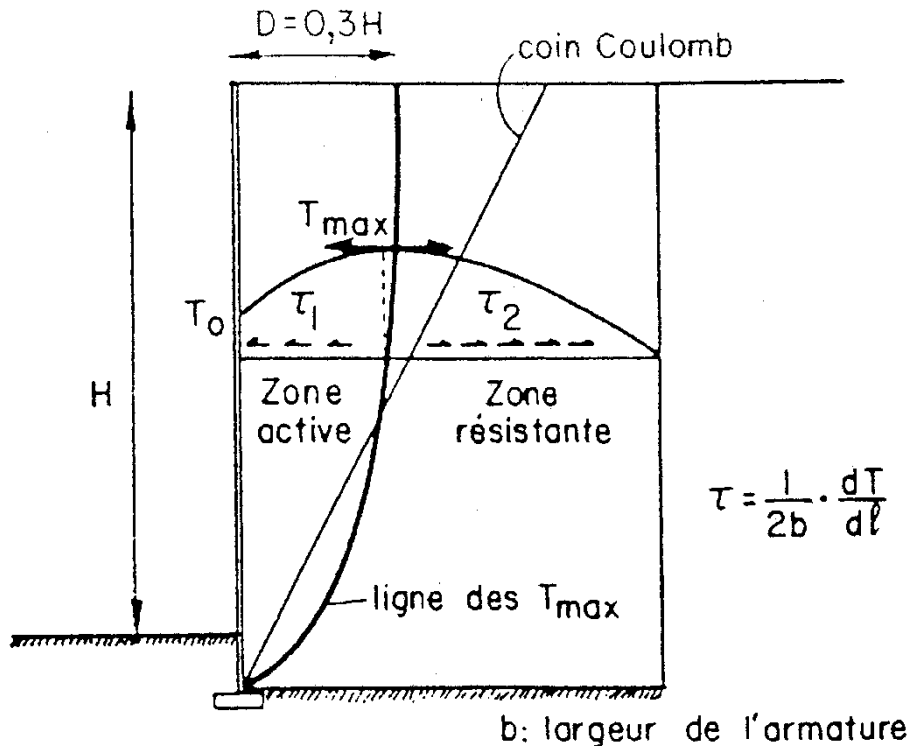
ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΟΠΛΙΣΜΕΝΗΣ ΓΗΣ



- Η μετακίνηση του πρανούς προς τα έξω εμποδίζεται από τα στοιχεία ενίσχυσης που εφελκύνονται καθώς διατμητικές δυνάμεις μεταξύ εδάφους-ράβδων αναπτύσσονται κατά μήκος τους
- Η μέγιστη εφελκυστική δύναμη αναπτύσσεται στο εσωτερικό της γεωμάζας και όχι μπροστά στο μέτωπο

- Τα σημεία μέγιστης εφελκυστικής δύναμης για κάθε σειρά στοιχείων ορίζουν τη γραμμή που χωρίζει τη γεωμάζα σε δύο περιοχές την **ενεργητική ζώνη** και την περιοχή αγκύρωσης ή **ζώνη παθητικής αντίστασης**

ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΟΠΛΙΣΜΕΝΗΣ ΓΗΣ



■ ΕΝΕΡΓΗΤΙΚΗ ΖΩΝΗ

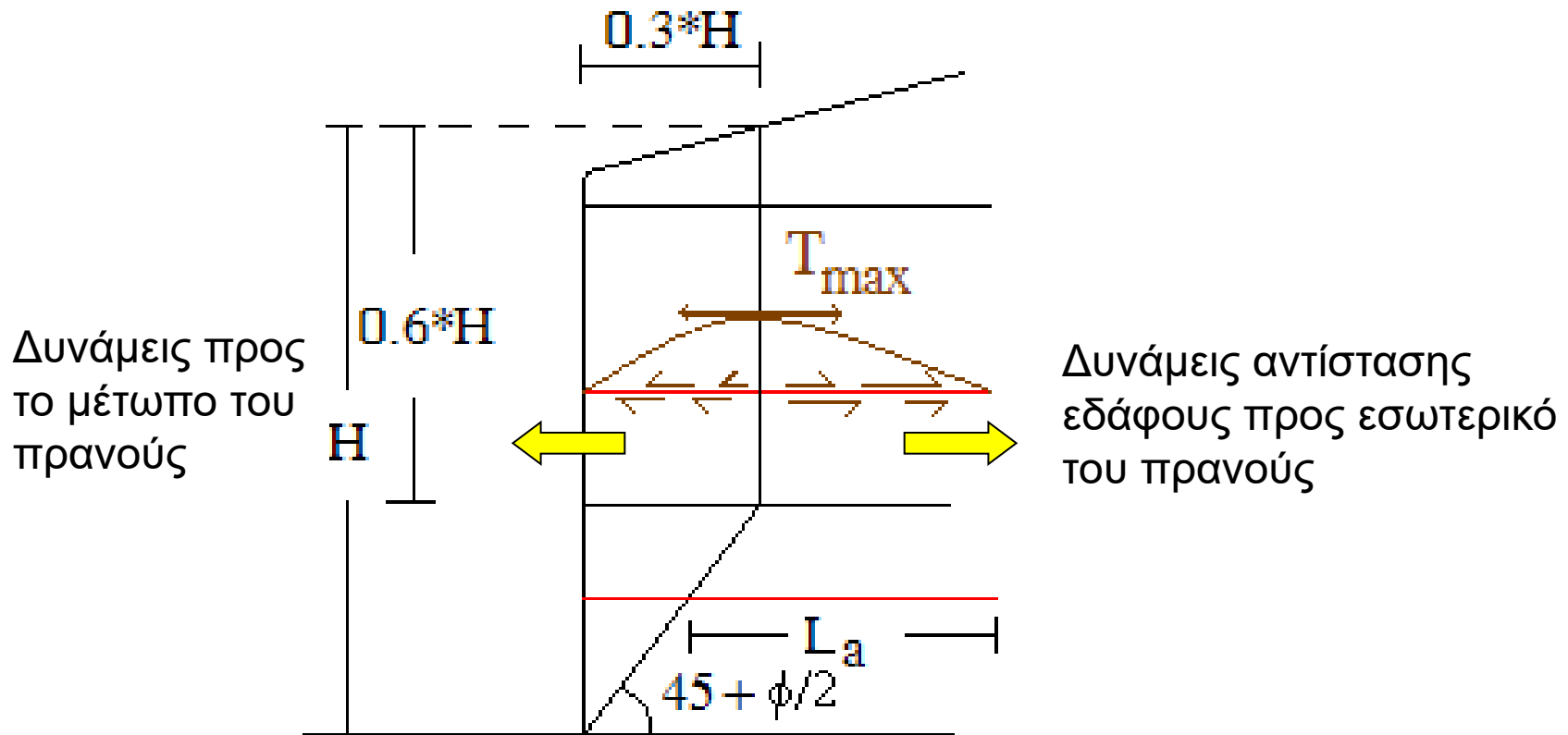
βρίσκεται πλησιέστερα στην όψη του τοίχου, το έδαφος έχει την τάση να τραβήξει προς τα έξω τους οπλισμούς

■ ΠΑΘΗΤΙΚΗ ΖΩΝΗ

οι διατμητικές τάσεις στον οπλισμό κατευθύνονται στο εσωτερικό του τοίχου, όπου το έδαφος έχει την τάση να συγκρατεί τον οπλισμό

- Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται στην περιοχή αγκύρωσης αντιτίθενται σε αυτές που δημιουργούνται στην ενεργητική περιοχή και ορίζουν τη θέση της **μέγιστης εφελκυστικής δύναμης**

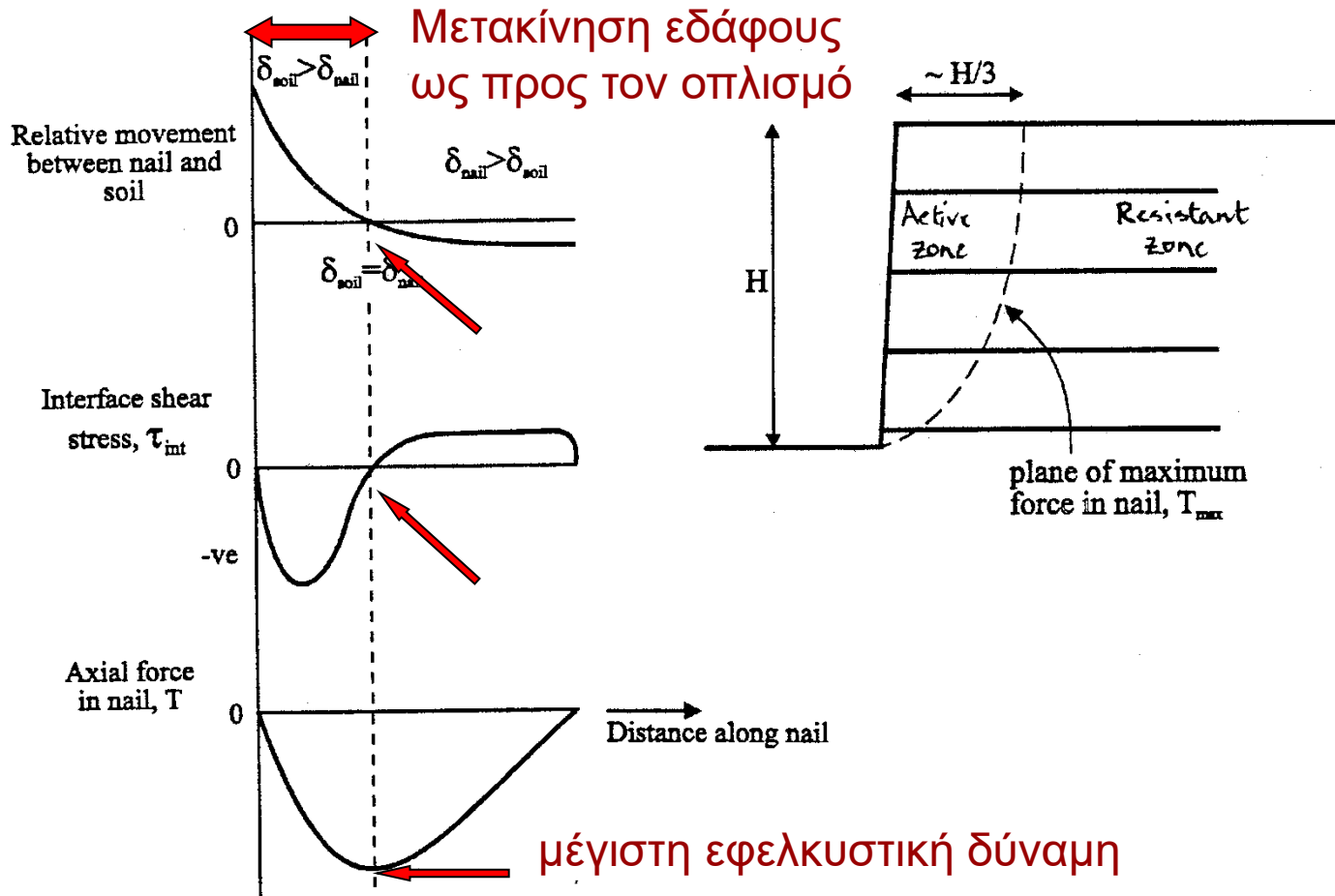
ΛΕΙΤΟΥΡΓΙΑ ΟΠΛΙΣΜΕΝΗΣ ΓΗΣ



■ Απλοποιημένη διγραμμική κατανομή

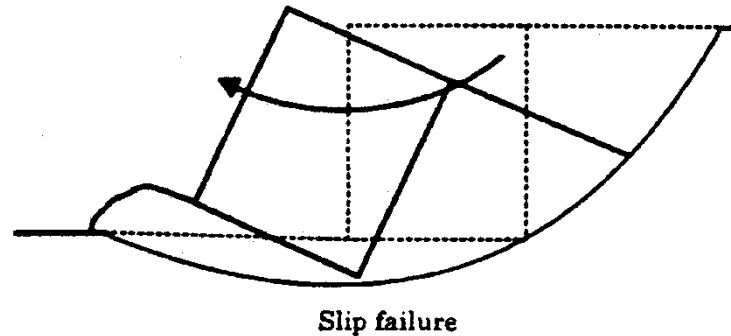
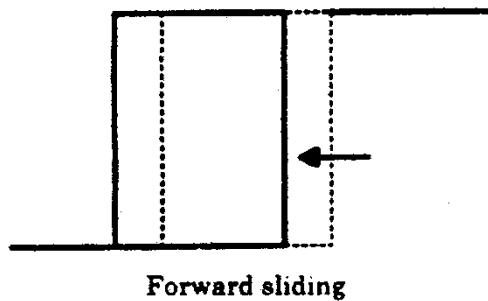
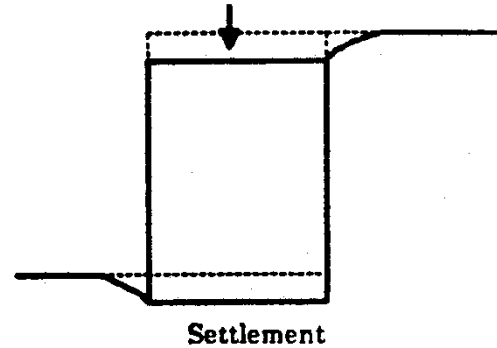
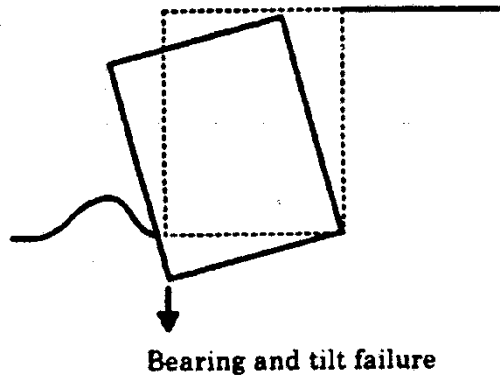
με χρήση επιπέδου αστοχίας κατά Coulomb υπό γωνία $45 + \phi/2$

ΚΑΤΑΝΟΜΗ ΤΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΣΧΕΤΙΚΩΝ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΚΑΤΑ ΜΗΚΟΣ ΤΟΥ ΟΠΛΙΣΜΟΥ



Στην ενεργητική περιοχή το έδαφος ασκεί διατμητικές τάσεις στον οπλισμό προς το μέρος του τοίχου ενώ στην παθητική ζώνη οι διατμητικές τάσεις στη διεπιφάνεια εδάφους-οπλισμού κατευθύνονται προς το εωτερικό του πρανούς.

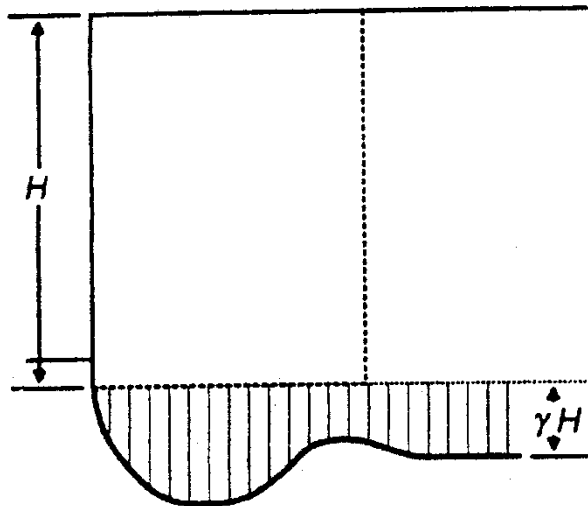
ΜΟΡΦΕΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΟΙΧΟΥ ΟΠΛΙΣΜΕΝΗΣ ΓΗΣ



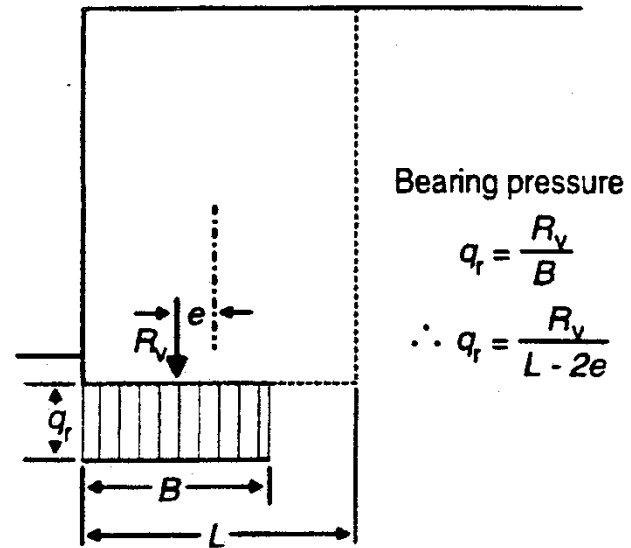
- αστοχία θεμελίωσης
- καθίζηση

- ολίσθηση
- ολίσθηση σε κυκλική επιφάνεια

ΑΣΤΟΧΙΑ ΘΕΜΕΛΙΩΣΗΣ



a) Pressure imposed at base



b) Idealized bearing pressure

Bearing pressure

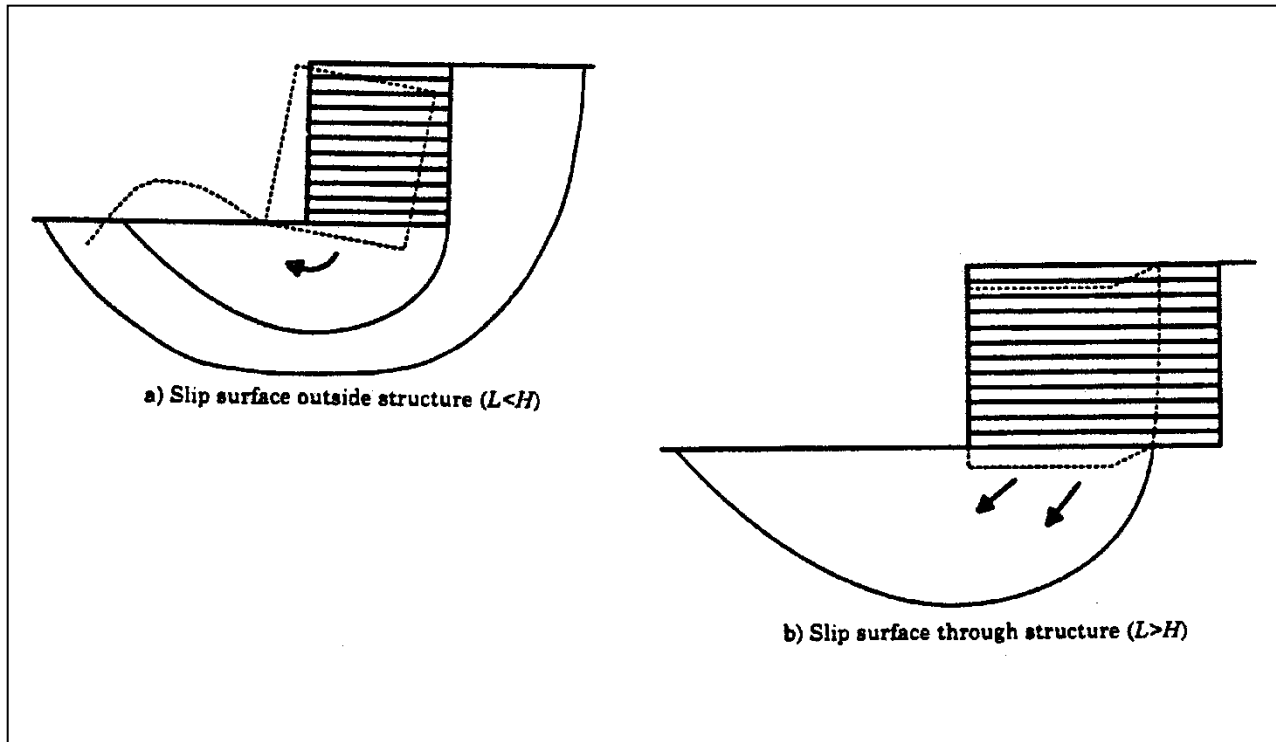
$$q_r = \frac{R_v}{B}$$

$$\therefore q_r = \frac{R_v}{L - 2e}$$

□ κατανομή τάσεων κατά μήκος της βάσης του τοίχου κατά Meyerhof:

$$q_r = \frac{R_v}{B} \therefore q_r = \frac{R_v}{L - 2 \times e} < q_{ult}$$

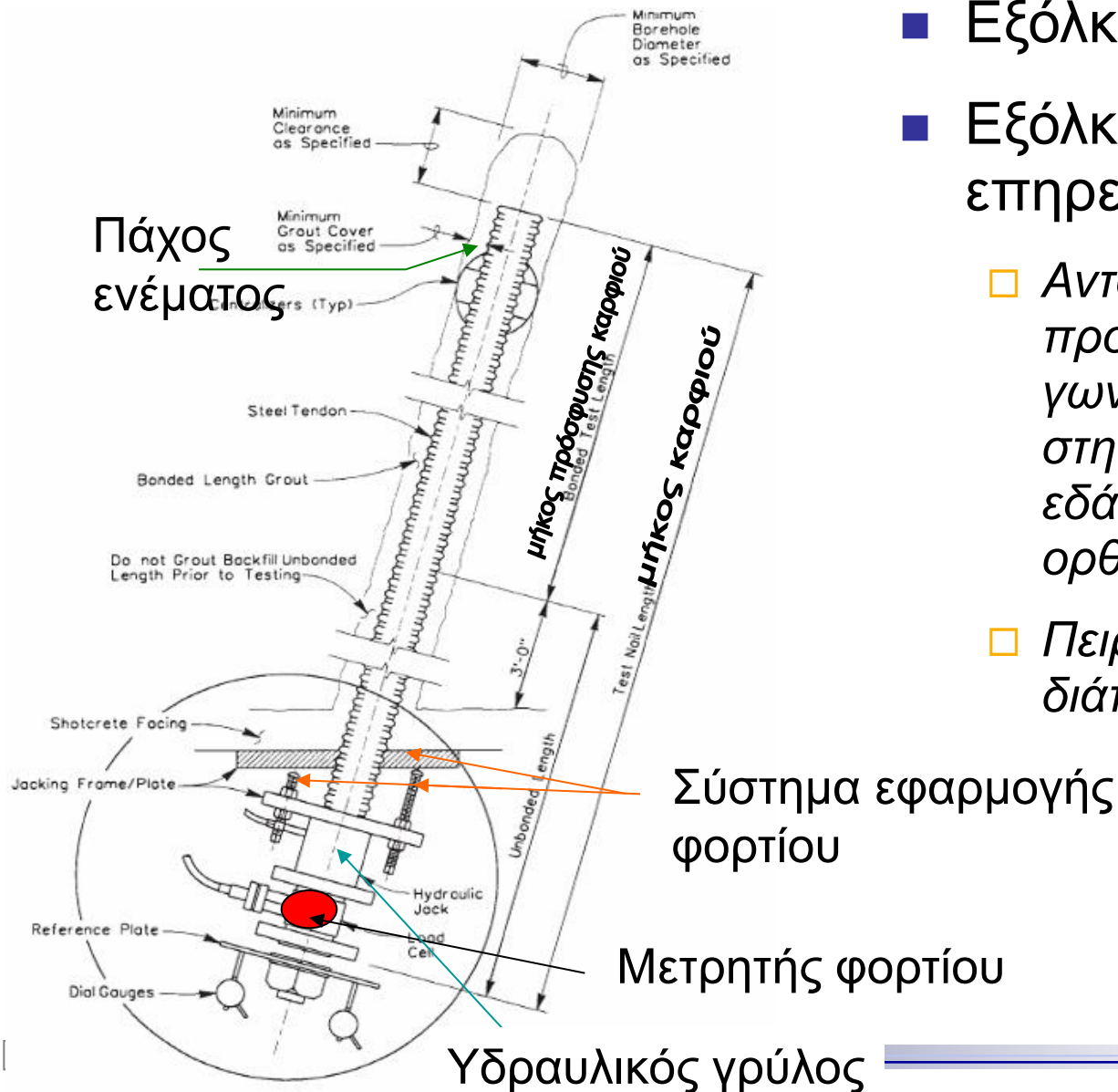
ΟΛΙΣΘΙΣΗ ΣΕ ΚΥΚΛΙΚΗ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑ



- Ολίσθηση έξω από την ενισχυμένη μάζα του πρανούς
- ολίσθηση διά μέσου της ενισχυμένης μάζας πρανούς

- Έλεγχος ευστάθειας τμημάτων διαφόρων σχημάτων και μεγεθών που περιλαμβάνονται μεταξύ των ορίων του τοίχου και επιφανειών ολίσθησης κυκλικής, παραβολικής ή ευθύγραμμης διατομής
- εκτός των δυνάμεων (βάρος, πίεση νερού, διατμητικές, κατανεμημένο φορίο) που δρούν στο κάθε τμήμα συμπεριλαμβάνονται και οι δυνάμεις των στοιχείων του οπλισμού
- Έλεγχος αστοχίας οπλισμού
 - Αστοχία στοιχείου οπλισμού (αντοχή σε εφελκυσμό)
 - Αστοχία στη διεπιφάνεια στοιχείου εδάφους (αντοχή σε εξόλκευση)

ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΕΞΟΛΚΕΥΣΗΣ



- Εξόλκευση καρφιού
- Εξόλκευση λωρίδας επηρεάζει τις γειτονικές
 - Αντοχή εξόλκευσης προσδιορίζεται από τη γωνία διατμητικής αντοχής στη διεπιφάνεια λωρίδας-εδάφους με εκτίμηση της ορθής τάσης
 - Πειράματα απευθείας διάτμησης στον οπλισμό

ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΑΝΤΟΧΗΣ ΣΕ ΕΞΟΛΚΕΥΣΗ

■ Παραδοχές:

- σταθερό μήκος οπλισμού L_a
- Εφελκυστική αντίσταση $T_\eta = q_s * \pi * D * L_a$
 - q_s = αντοχή σε εξόλκευση
 - L_a = μήκος αντίστασης οπλισμού στην παθητική ζώνη
 - D = διάμετρος διατρήματος καρφιού

Βάσει κριτηρίου αστοχίας Mohr-Coulomb: $q_s = c' + \sigma_\eta' * \tan \varphi'$

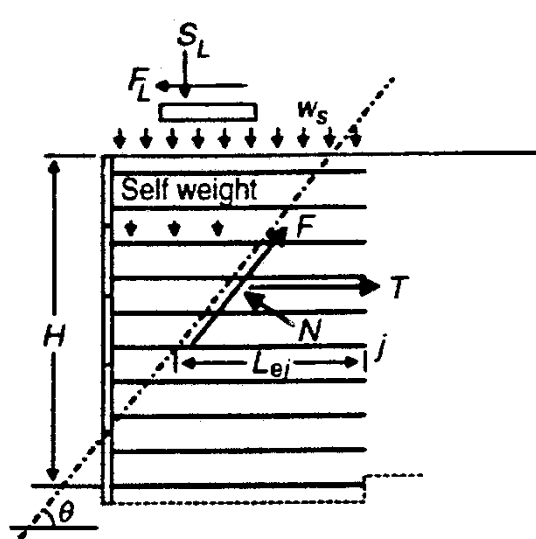
$$\sigma_\eta' = \sigma_v' = \gamma * h - u, u = r_u * \gamma * h \Rightarrow$$

$$q_s = (\sigma_v' + \sigma_h') / 2 * \tan \varphi'$$

$$\sigma_v' = \gamma * h * (1 - r_u) \tan \varphi'$$

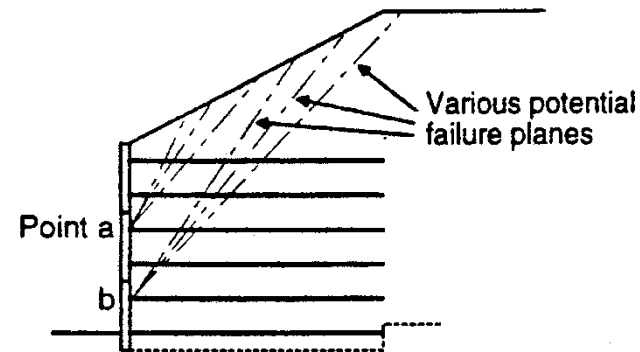
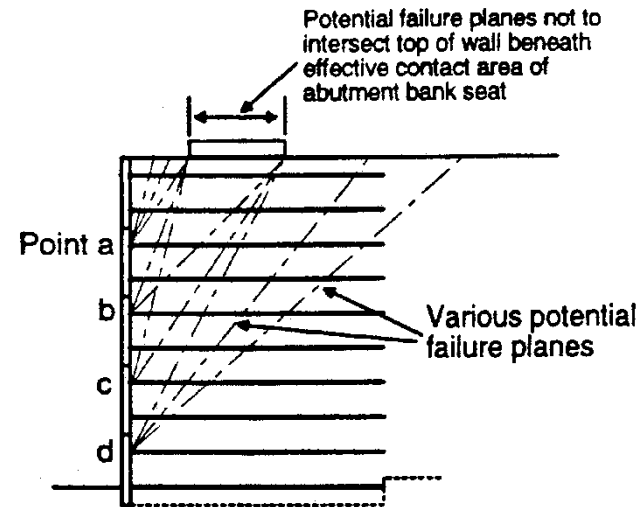
$$q_s = (k_a * (\gamma * h * (1 - r_u))) \tan \varphi' \quad \text{για ενεργητική} \\ \text{ώθηση}$$

ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΟΠΛΙΣΜΕΝΗΣ ΓΗΣ



F = Frictional and cohesive forces
 T = Total tensile force resisted by reinforcement elements
 N = Normal reaction

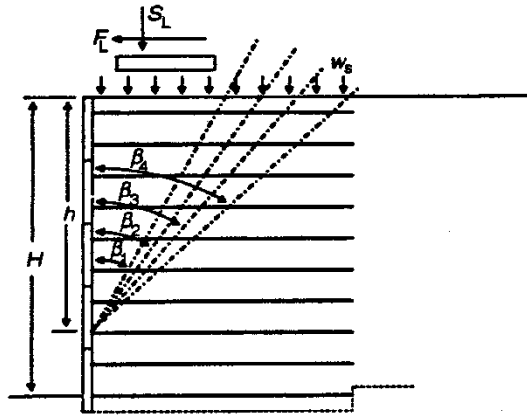
a) Forces to be considered



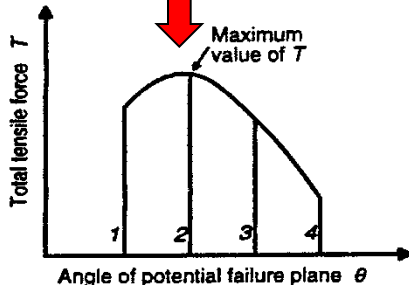
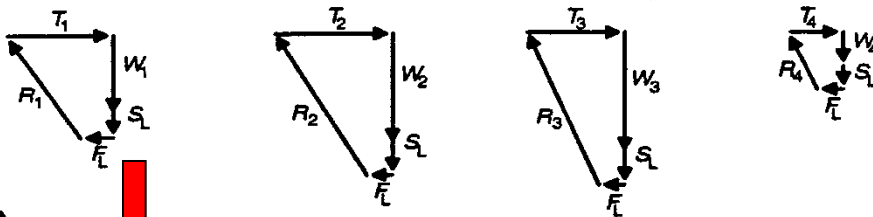
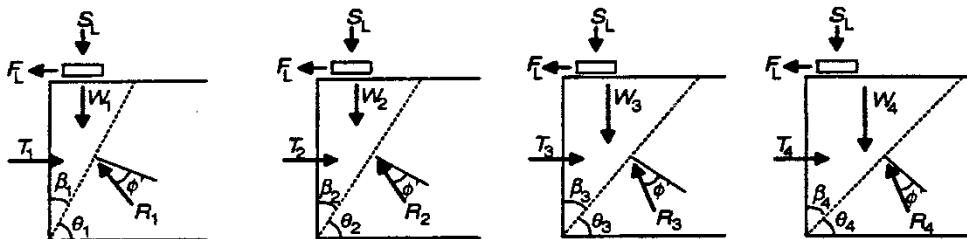
b) Various potential failure planes

- Ευστάθεια τυχαιών τμημάτων (σφηνών) οπλισμένης γης

ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΟΠΛΙΣΜΕΝΗΣ ΓΗΣ



- απλοποιημένη ανάλυση ευστάθειας τυχαίων τμημάτων (σφηνών) οπλισμένης γης



R = Resultant reaction acting on potential failure plane
 T = Total tensile force to be resisted by the elements
 W = Self weight of fill in the wedge plus surcharge

Υπολογισμός ολικής εφελκυστικής δύναμης απαιτούμενης για την ευστάθεια του πρανούς

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΟΥ ΟΠΛΙΣΜΟΥ

- εφελκυστική δύναμη στη στάθμη (j) του οπλισμού

ΕΛΕΓΧΟΙ: $T_j < T_D$ (αντοχή σχεδιασμού=απομειωμένη αντοχή σε εξόλκευση)

$$\sum_{j=1}^m P_i \times L_{ej} \times (c' + \sigma_{vj} \tan \varphi) \geq T_{\max}$$

Όπου P_i =περίμετρος του στοιχείου του οπλισμού (j)
 L_{ej} =μήκος οπλισμού (j) στη ζώνη αντίστασης
 σ_{vj} =ορθή τάση που δρα στον οπλισμό(j) λόγω υπερκειμένων και λοιπών εξωτερικών φορτίων

$$T_j = T_{pj} + T_{sj} + T_{fj} - T_{cj}$$

Όπου T_{pj} =αναπτύσσεται λόγω υπερκειμένων
 T_{sj} =λόγω κατακόρυφου κατανεμημένου λωριδωτού φορτίου
 T_{fj} =λόγω οριζοντίου “
 T_{cj} =λόγω συνοχής του εδάφους (μηδενική για κοκκώδη εδάφη)

ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΤΟΥ ΟΠΛΙΣΜΟΥ

- εφελκυστική δύναμη στη στάθμη (j) του οπλισμού

$$T_j = T_{pj} + T_{sj} + T_{fj} - T_{cj}$$

$$T_{pj} = K_a \times \sigma_{vj} \times S_{vj}$$

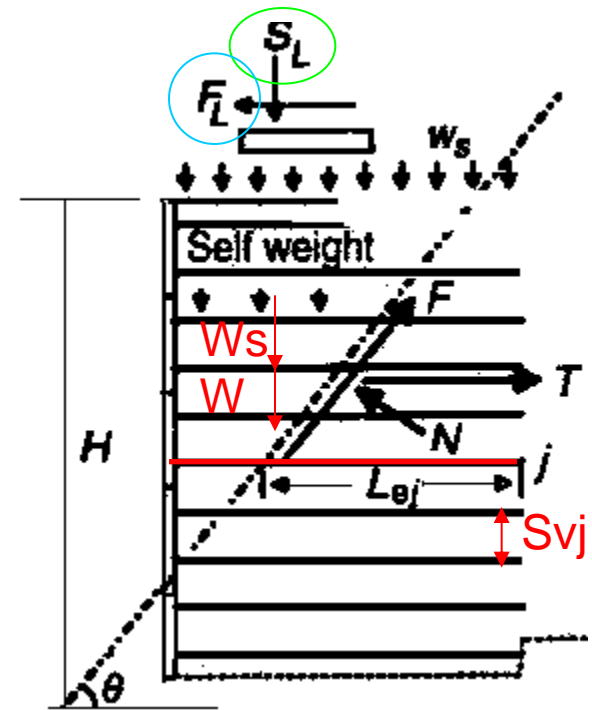
$$T_{sj} = K_a \times S_{vj} \times S_L / D_j,$$

$$D_j = (h_j + b) \rightarrow h_j \leq (2d - b)$$

$$D_j = (h_j + b) / 2 \rightarrow h_j \geq (2d - b)$$

$$T_{fj} = 2 \times S_{vj} \times F_L \times Q \times (1 - h_j \times Q)$$

$$Q = \left\{ \tan(45^\circ - \varphi_p' / 2) \right\} / (d + b / 2)$$



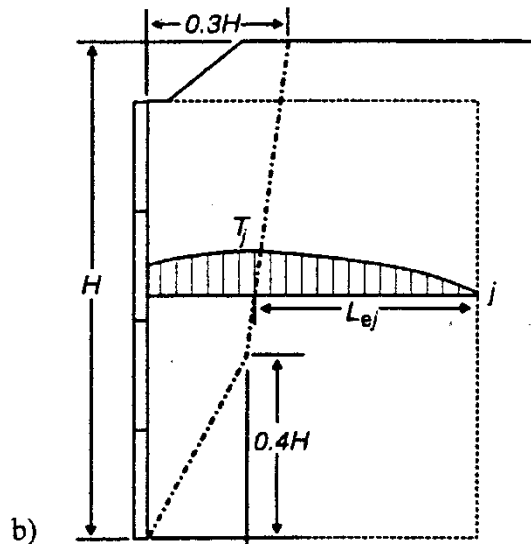
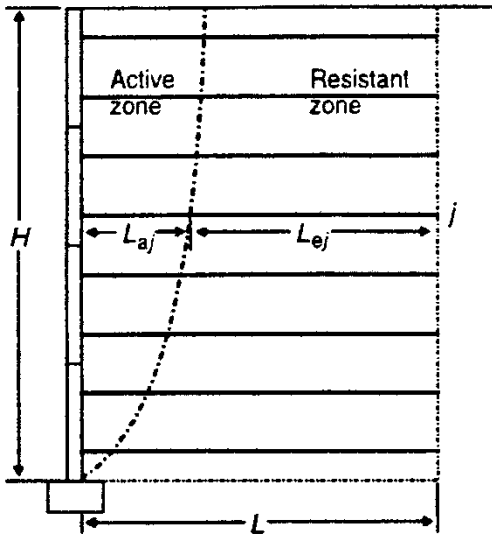
T_{pj} = αναπτύσσεται λόγω υπερκειμένων & φορτίου W_s (κατανομή Meyerhof)

T_{sL} = λόγω κατακόρυφου κατανεμημένου λωριδωτού φορτίου πλάτους b

T_{fj} = λόγω οριζοντίου ". D_j, Q_j απομειώνουν τα φορτία με το βάθος

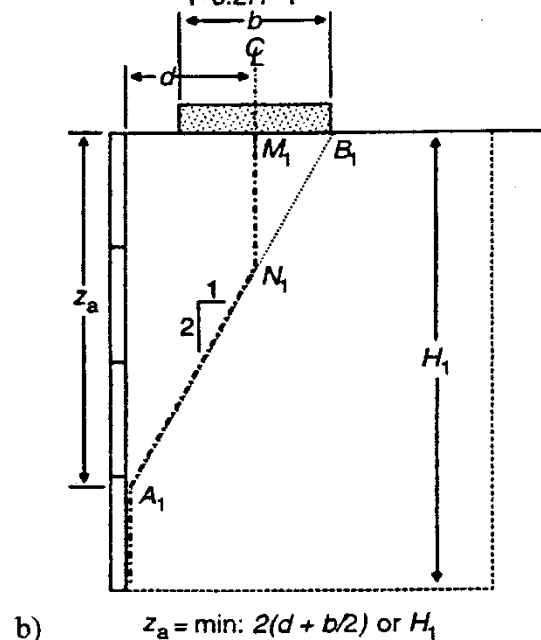
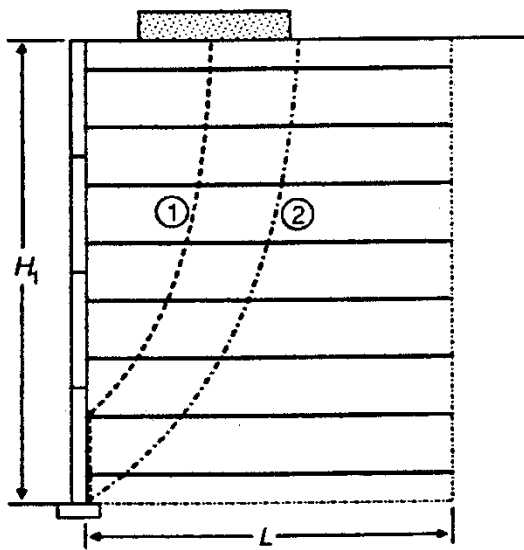
T_{cj} = λόγω συνοχής του εδάφους

ΓΡΑΜΜΗ ΜΕΓΙΣΤΗΣ ΕΦΕΛΚΥΣΤΙΚΗΣ ΔΥΝΑΜΗΣ



Τοίχος σπλ.γης

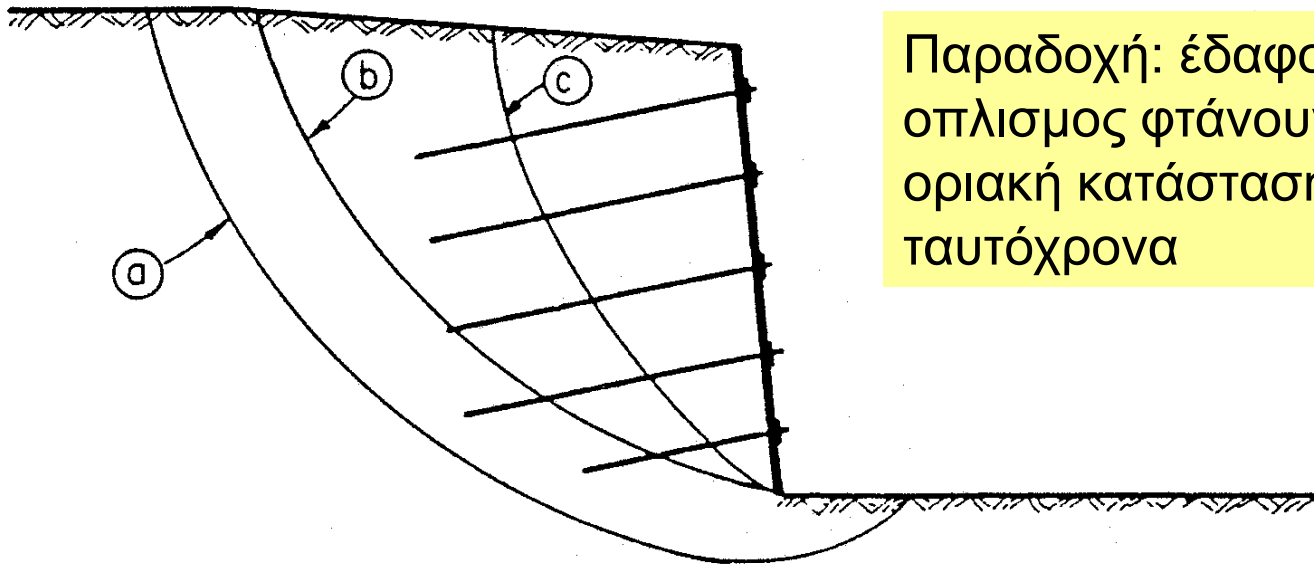
- (α) αναμενόμενη
- (β) προσέγγιση



Τοίχος σπλ.γης με καταναμημένο φορτίο

- (α) αναμενόμενη
- (β) προσέγγιση γραμμής 1

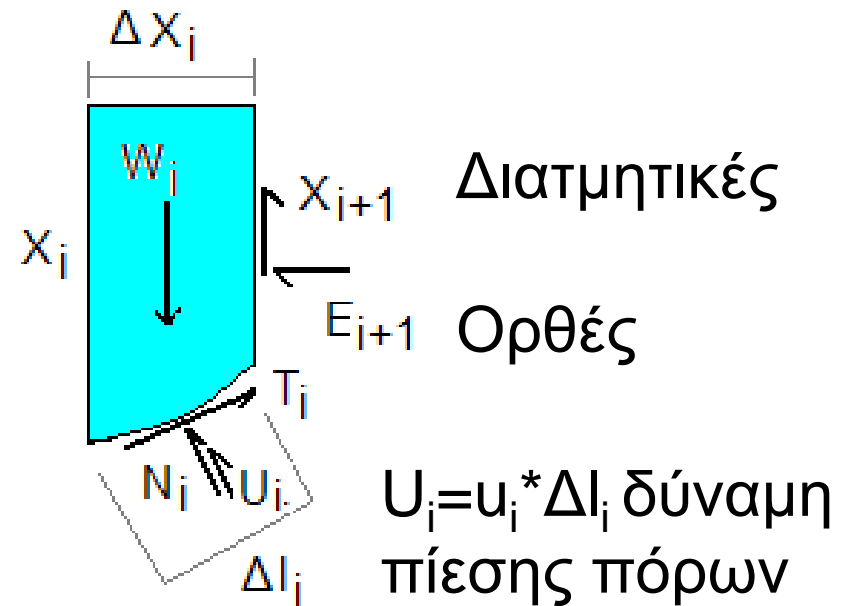
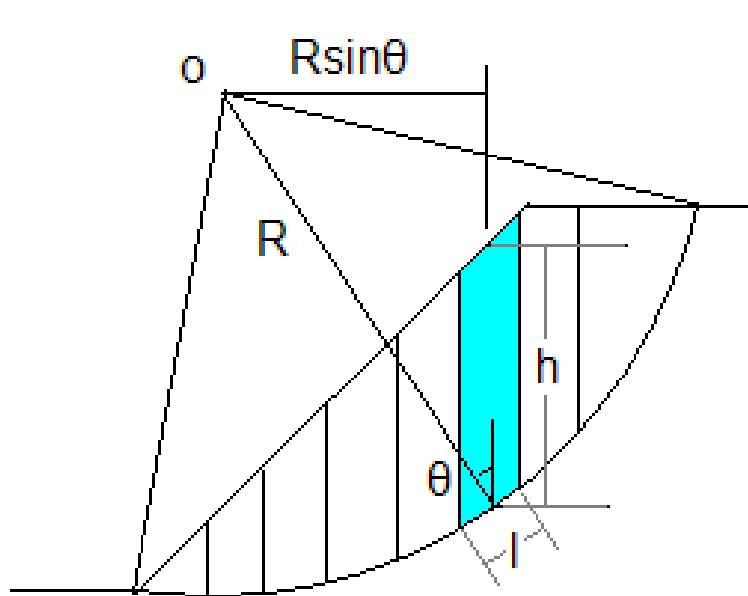
ΕΛΕΓΧΟΙ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ



Παραδοχή: έδαφος και οπλισμος φτάνουν σε οριακή κατάσταση ταυτόχρονα

- ❑ Πιθανοί μηχανισμοί αστοχίας στο εσωτερικό (γ) και έξω από την κατασκευή
- ❑ οριακή ισορροπία δυνάμεων (βάρος, πίεση νερού, εξωτερικά φορτία, διατμητικές δυνάμεις σε πιθανή επιφάνεια ολίσθησης και δυνάμεις οπλισμού)

ΜΕΘΟΔΟΣ BISHOP



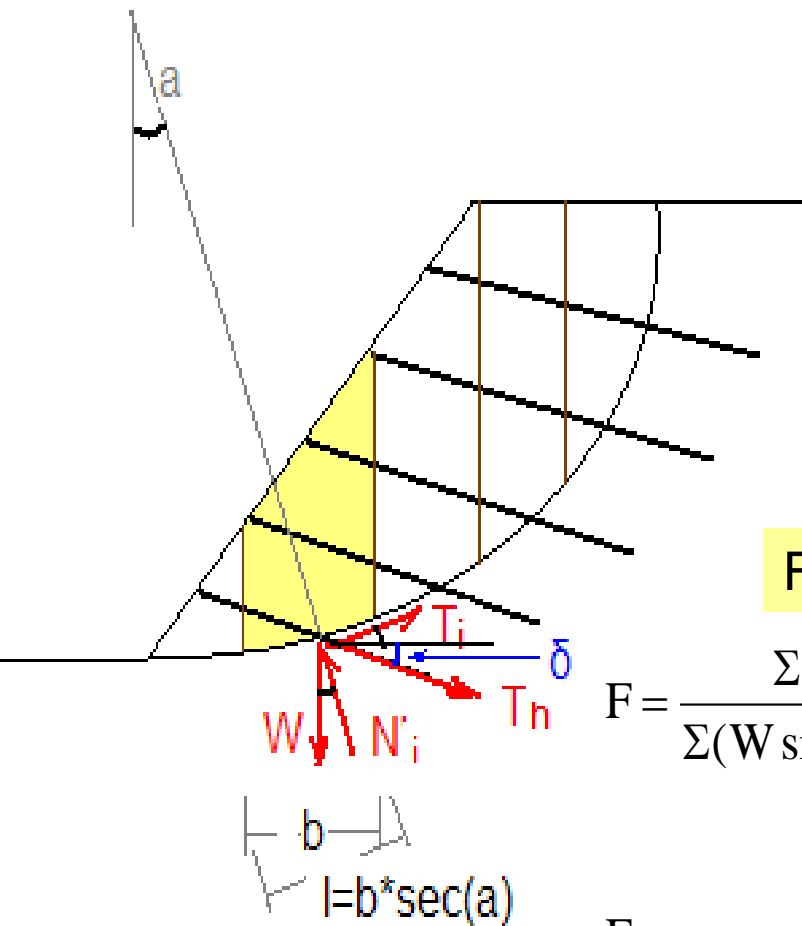
Μέθοδος Λωρίδων

1. Δεν υπάρχει τριβή στις $(n-1)$ διεπιφάνειες μεταξύ των λωρίδων
2. Συντελεστής ασφαλείας σταθερός σε όλες τις λωρίδες

$$T_i = \frac{1}{F} (c_i + \sigma_i' \tan \varphi_i), c_i \ \& \ \varphi_i$$

Παράμετροι διατμητικής αντοχής στη βάση της λωρίδας i

ΠΡΑΝΕΣ ΟΠΛΙΣΜΕΝΟ ΜΕ ΚΑΡΦΙΑ



Ισοροπία δυνάμεων

$$N' = \frac{\frac{W}{\cos a} - ul - \frac{c'l \tan a}{F_m} + T_\eta \frac{\sin \delta}{\cos a}}{1 - \frac{\tan a}{F_m} \tan \varphi}$$

F = (ροπές αντίστασης/ροπές ανατροπής)

$$F = \frac{\Sigma(c'l + N' \tan \varphi)}{\Sigma(W \sin a - T_\eta \cos(a + \delta))} \Rightarrow$$

$$F = \frac{1}{\Sigma\{W \sin a - T_\eta \cos(a + \delta)\}} \Sigma \left\{ \frac{[c'b + (W - ub + T_\eta \sin \delta) \tan \varphi] \sec a}{1 + \frac{\tan a}{F_m} \tan \varphi} \right\}$$

Μέθοδος λωρίδων

Εσωτερική ευστάθεια
οπλισμένου πρανούς με χρήση
της μεθόδου των λωρίδων

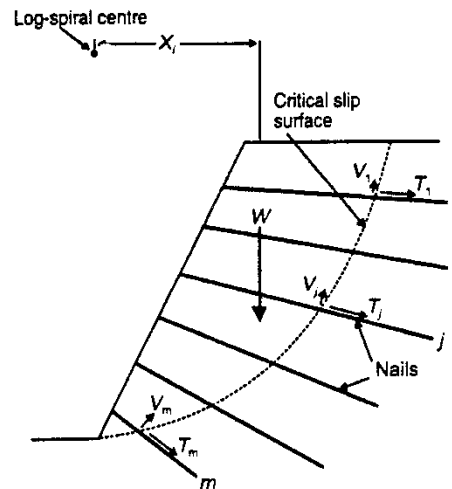
Δράση καρφιού

$$T_j R_{dj} \sin(\theta_j - \omega_j)$$

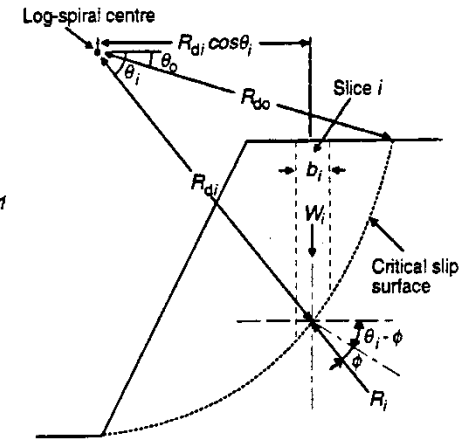
Ροπή αντίστασης λόγω εφελκυσμού καρφιού

$$V_j R_{dj} \cos(\theta_j - \omega_j)$$

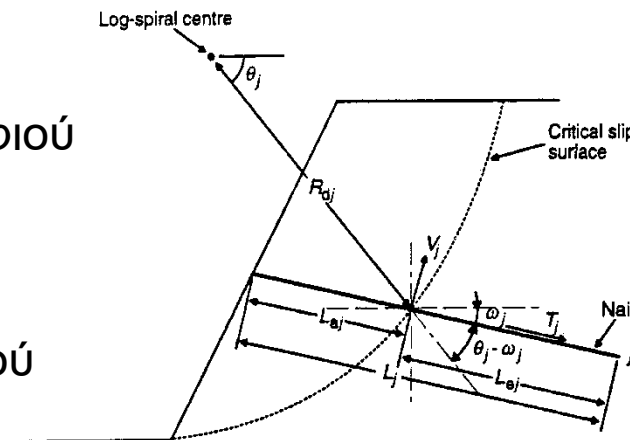
Ροπή αντίστασης λόγω διάτμησης καρφιού



a) Force components in log-spiral analysis



b) Determination of out-of balance-moment



Restoring moment due to tension in nail j :

$$T_j R_{dj} \sin(\theta_j - \omega_j)$$

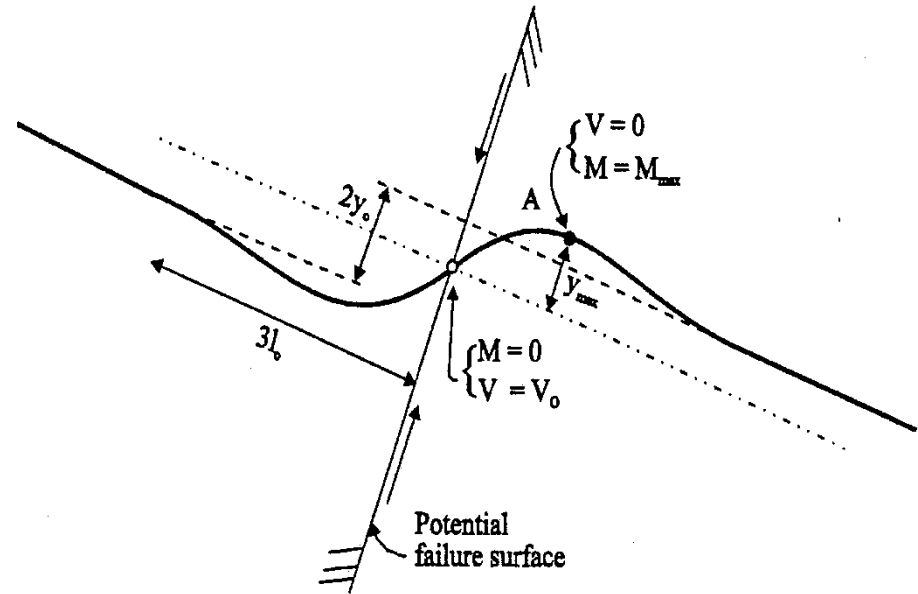
Restoring moment due to shear in nail j :

$$V_j R_{dj} \cos(\theta_j - \omega_j)$$

c) Restoring moments due to tension and shear in nail j

ΔΙΑΤΜΗΤΙΚΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ / ΚΑΜΠΤΙΚΕΣ ΡΟΠΕΣ

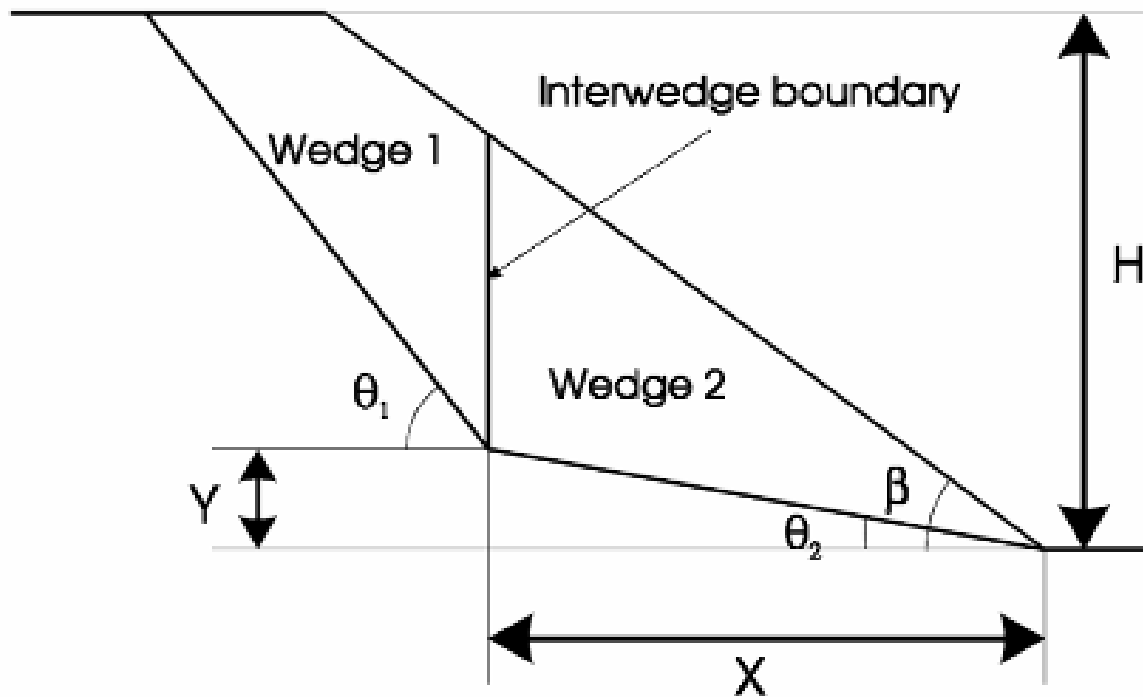
■ Διατμητικές δυνάμεις και ροπές π.χ. λόγω κατακόρυφης μετακίνησης μπορούν να παραληφθούν από τα καρφιά αλλά όχι από την οπλισμένη γη .



- Προϋπόθεση: μεγάλες μετακινήσεις κατα την αστοχία κατα μήκος επιφάνειας ολίσθησης
- Jewell & Pedley (1990). “Soil nailing design-the role of bending stiffness”, Ground Engineering, 30-36. Διατμητικές δυνάμεις και καμπτικές ροπές ενισχύουν την ευστάθεια μέχρι 10%.

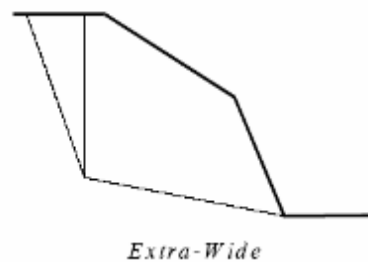
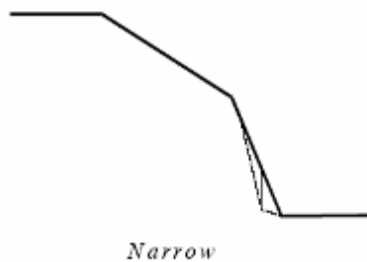
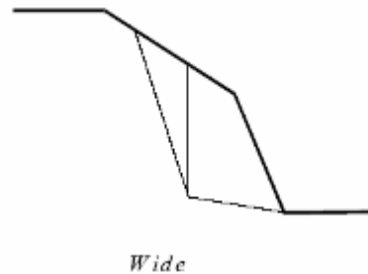
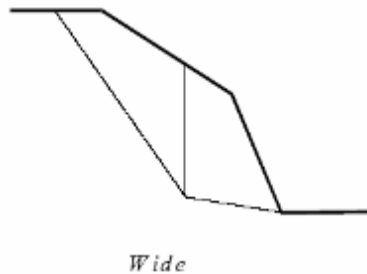
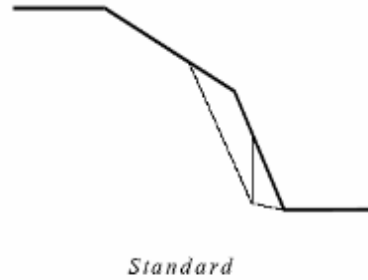
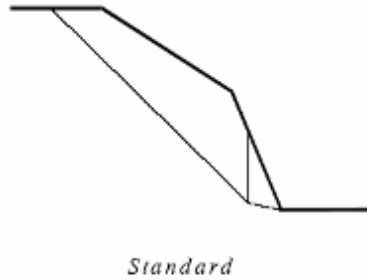


HA68/94, UK Highways Agency (HA): Design methods for the reinforcement of highway slopes by reinforced soil and soil nailing techniques



Οριακή ισορροπία μηχανισμού που χωρίζει το πρανές σε δύο τμήματα (σφήνες)

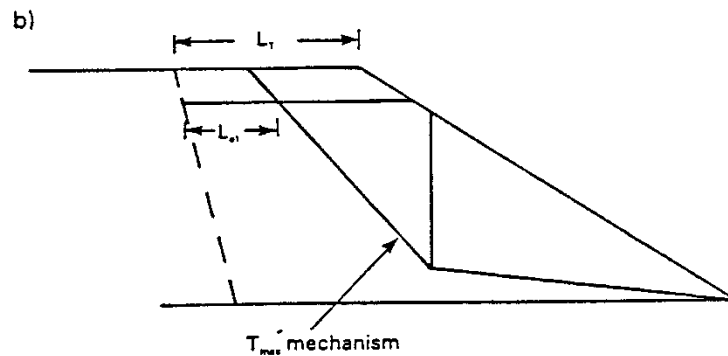
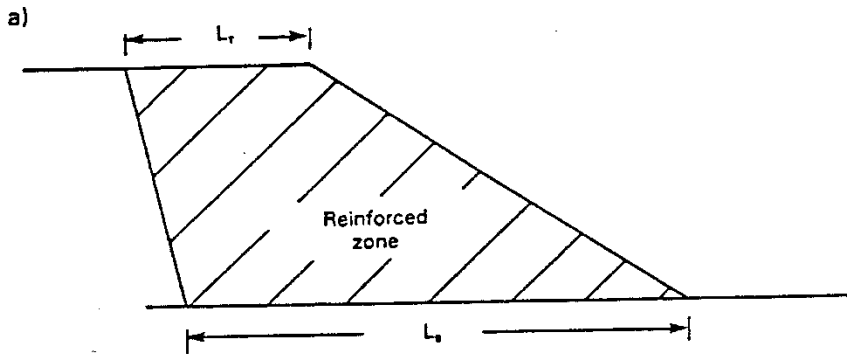
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΠΡΑΝΩΝ_ReActiv



Τύπος μηχανισμού εξαρτάται από τη θέση της επιφάνειας ολίσθησης της πρώτης σφήνας και της διεπιφάνειας

| Mechanism type | Wedge 1 outcrops at... | Interwedge boundary outcrops at... |
|-------------------|------------------------|------------------------------------|
| <i>Standard</i> | Crest or upper slope | Lower slope |
| <i>Narrow</i> | Lower slope | Lower slope |
| <i>Wide</i> | Crest or upper slope | Upper slope |
| <i>Extra-wide</i> | Crest | Crest |

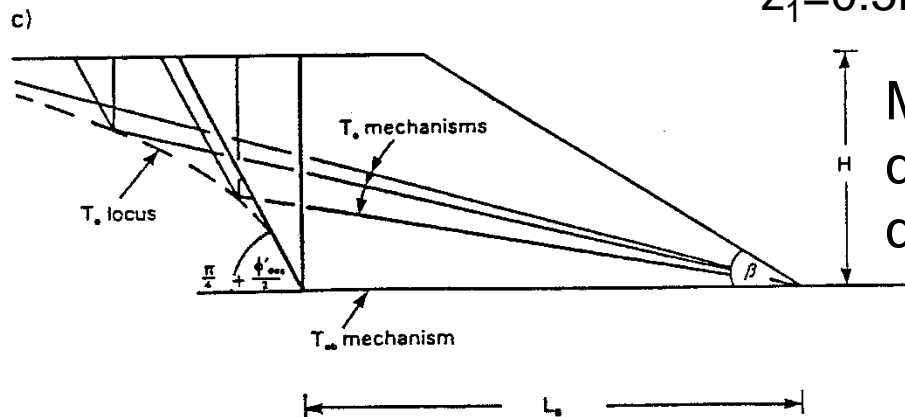
ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΣ ΕΝΙΣΧΥΜΕΝΩΝ ΠΡΑΝΩΝ_ReActiv



Μηχανισμός αστοχίας που απαιτεί τη μέγιστη δύναμη καρφιών T_{max}

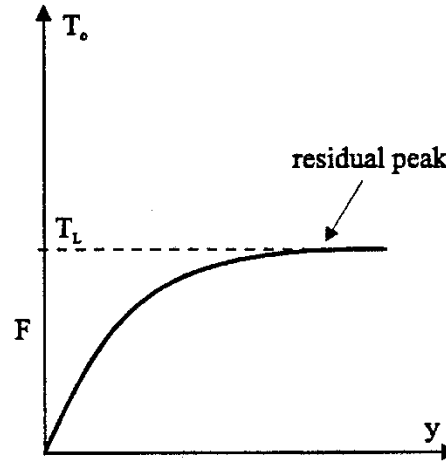
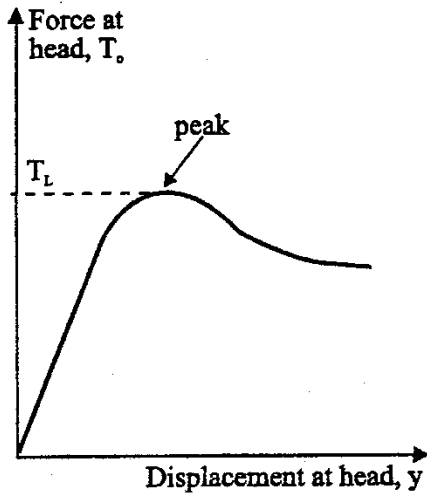
Αριθμός καρφιών = T_{max} / P_{des} (εξόλκευσης)

T (εξόλκευσης) ορίζει το μήκος του άνω καρφιού: $L_{ei} = P_{des} / (2\sigma'_v \tan \varphi_{des})$, $\sigma'_v = z_1(1-r_u)$, $z_1 = 0.5H_{des} / N^{1/2}$



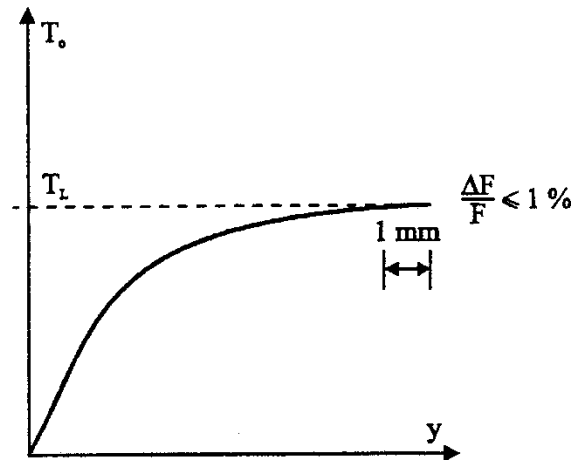
Μηχανισμοί αστοχίας T_0 που δεν απαιτούν οπλισμό. Μηχανισμός T_{ob} αντιστοιχεί στη βάση του πρανούς

ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΣΕ ΔΟΚΙΜΕΣ ΕΞΟΛΚΕΥΣΗΣ



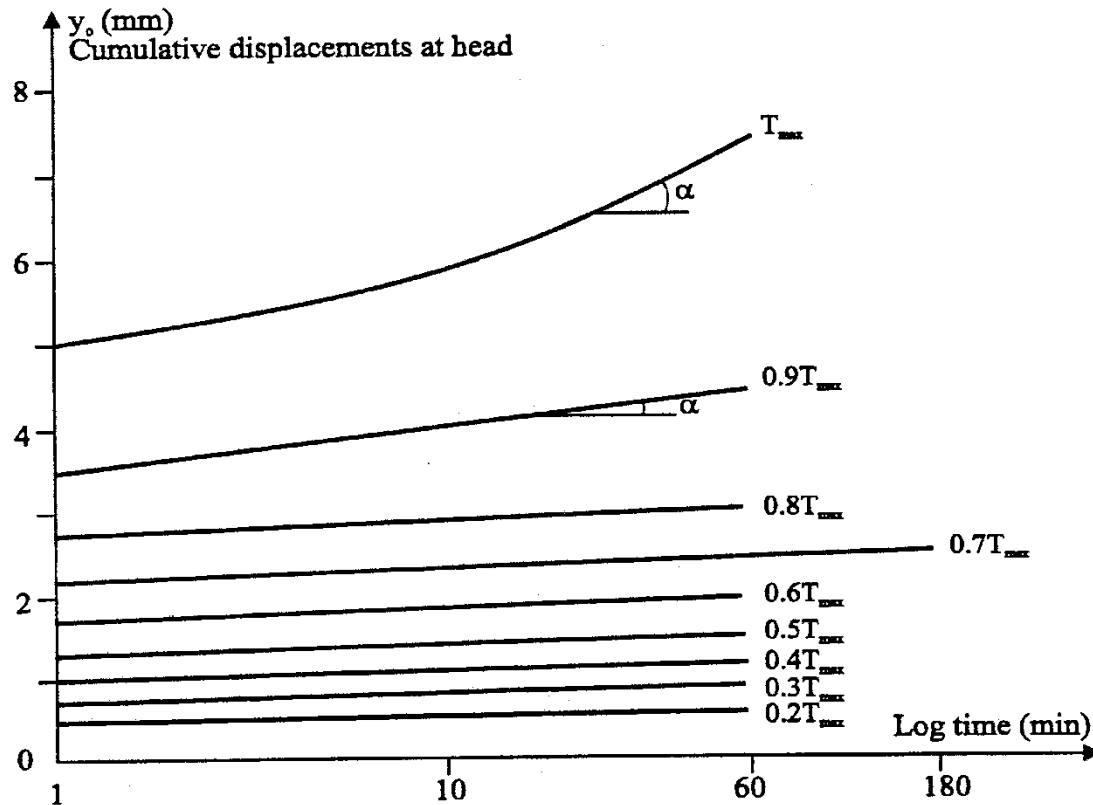
□ $T_L = q_s \cdot \pi \cdot D \cdot L_a$ →

□ q_s
Έλεγχος παραμόρφωσης



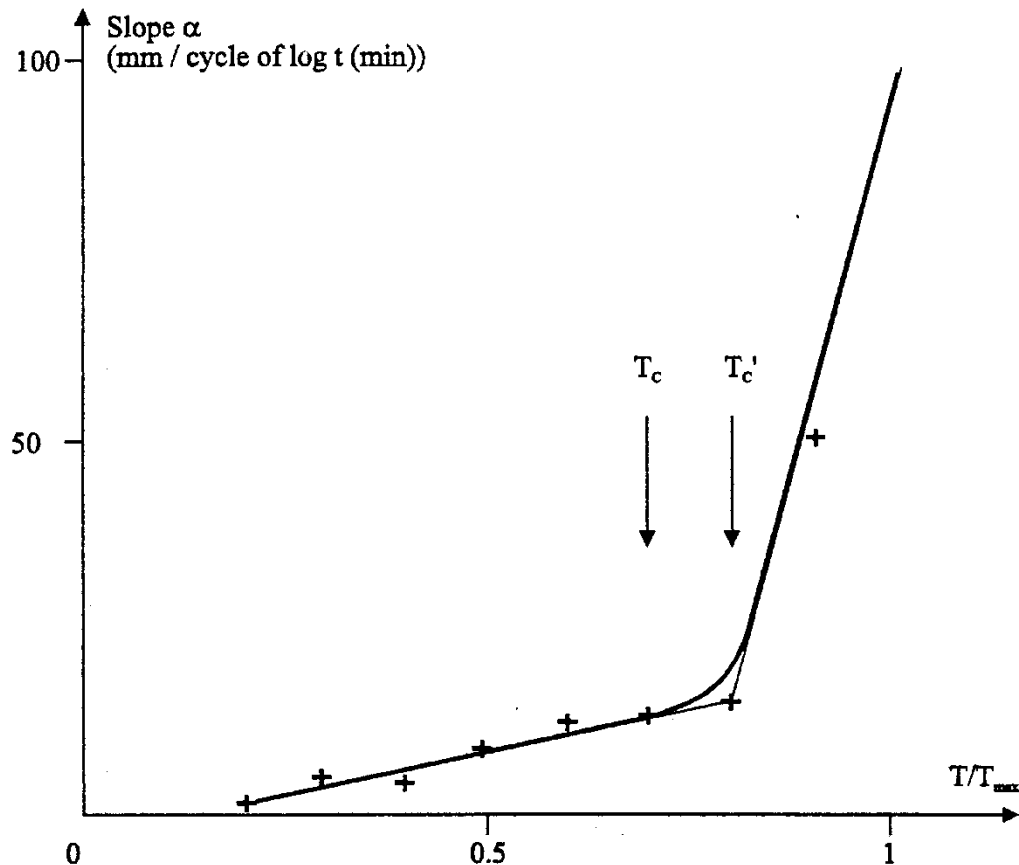
Έλεγχος δύναμης π.χ. στάδια ερπυσμού υπό σταθερό φορτίο με αύξηση επιβαλλόμενου φορτίου ανά $0.1T_L$

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΕΞΟΛΚΕΥΣΗΣ



- Καμπύλες ερπυσμού – ευθείες για χαμηλά φορτία
- γωνία (α) η κλίση της εφαπτόμενης των καμπυλών για $t=1h$

ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ ΔΟΚΙΜΩΝ ΕΞΟΛΚΕΥΣΗΣ



- σχεδιασμός κλίσης (α) προς T/T_{max}
- προσδιορισμός κρίσιμου φορτίου ερπυσμού T_c