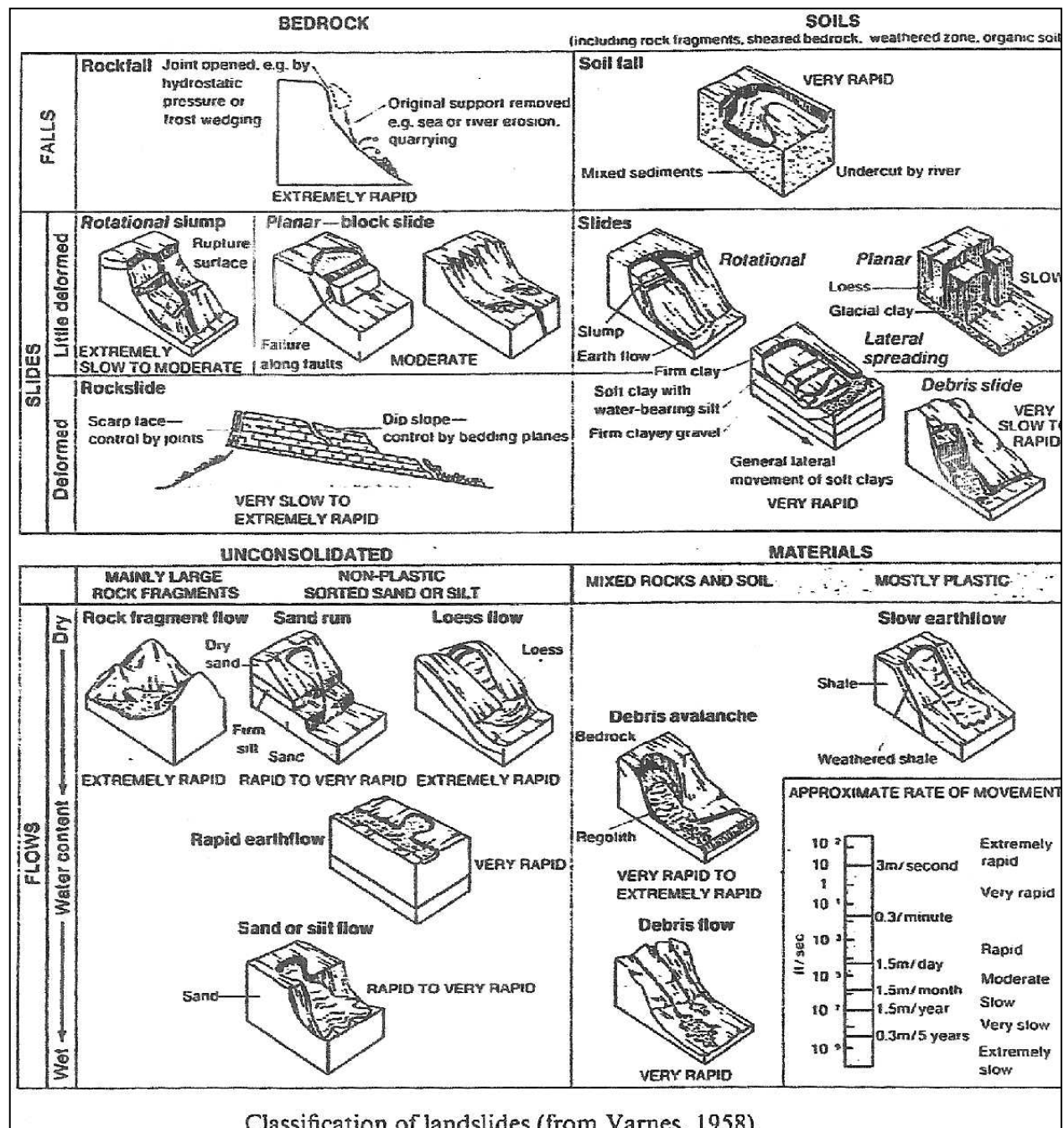


ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

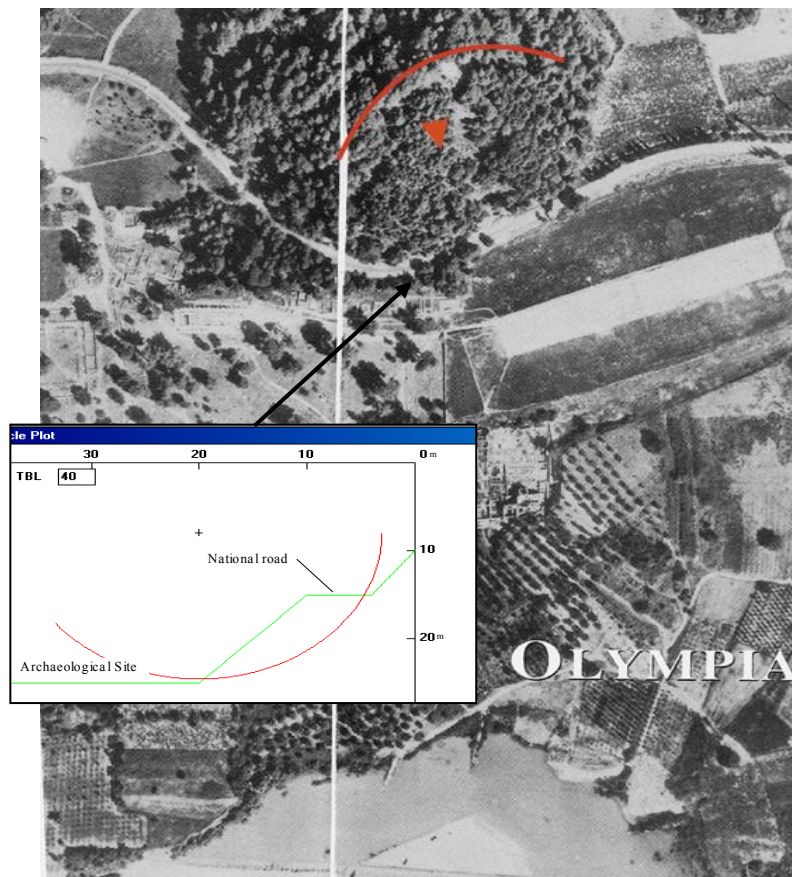
- ΚΑΤΟΛΙΣΘΗΣΕΙΣ
- ΕΥΣΤΑΘΕΙΑ ΤΕΧΝΗΤΩΝ ΠΡΑΝΩΝ

Ήδη καταλογοθέτων



Classification of landslides (from Varnes, 1958).

Διάφορες κατολισθήσεις



(Christaras et al., 2002)



(Christaras et al., 1997)

Διάφορες κατολισθήσεις (2)



Lesvos 1998



Sarno - 1998

The landslide continues downward



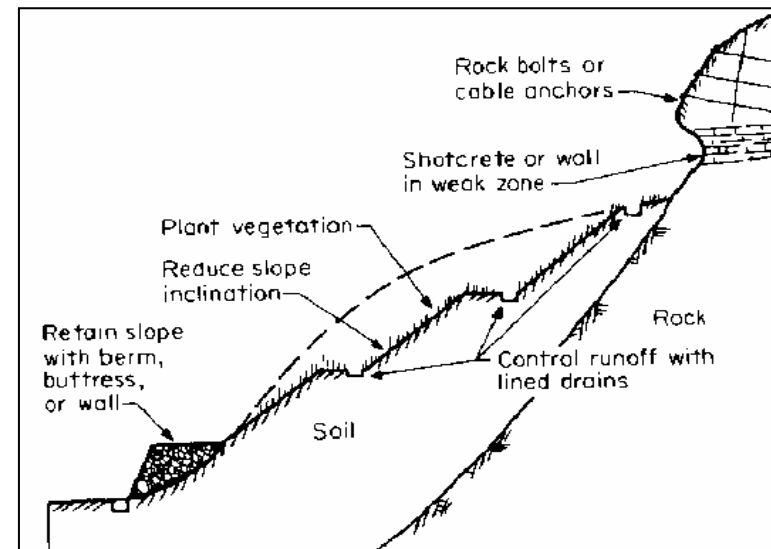
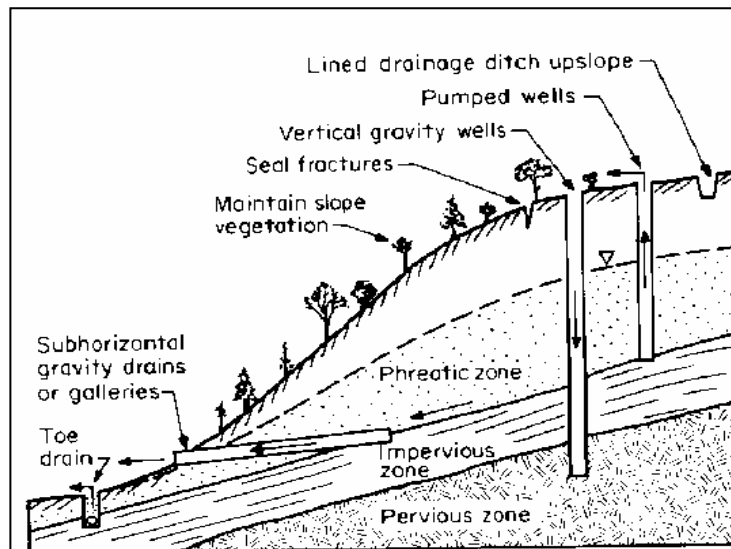
(Christaras, 2000)

Lesvos 1998



Lesvos 1998

Μέθοδοι σταθεροποίησης



- Έλεγχος των δυνάμεων που προκαλεί η παρουσία υπόγειου νερού
- Μείωση των δυνάμεων ολίσθησης και αύξηση των δυνάμεων συγκράτησης

Αύξηση της ευστάθειας πρανών

Μέθοδοι αποστράγγισης

- Βαθιές γεωτρήσεις,
- Κατακόρυφα στραγγιστήρια,
- Υπο-οριζόντια (πλάγια) στραγγιστήρια,
- Αποστραγγιστικές σήραγγες,
- Αποστραγγιστικές τάφροι
- Διαμόρφωση ανάγλυφου.

Σταθεροποίηση πρανών

- **Μεταβολή της γεωμετρίας του πρανού:** Για μείωση των δυνάμεων ολίσθησης και αύξηση των δυνάμεων συγκράτησης.
- **Έλεγχος του επιφανειακού νερού:** Παροχέτευση του επιφανειακού νερού για μείωση των δυνάμεων αστάθειας λόγω επιφανειακής απορροής.
- **Έλεγχος του υπόγειου νερού:** για μείωση της αστάθειας λόγω πίεσης πόρων και αύξηση της αντοχής του υλικού.
- Αντιστήριξη του πρανού, για αύξηση δυνάμεων συγκράτησης.

Μεταβολή της κλίσης του πρανούς (1)

- **Φυσικά πρανή:**
- **Σκληρά μαζώδη πετρώματα:** Η μέγιστη γωνία κλίσης και ύψος ενός πρανούς εξαρτώνται από την πυκνότητα και τη διεύθυνση των ασυνεχειών. Η οριακή γωνία κλίσης υψηλών πρανών, σε σκληρό μαζώδη βράχο, με αραιό και τυχαίου προσανατολισμού κατατμητικό σύστημα και χωρίς παρουσία υπόγειου νερού, είναι 70° (Terzaghi, 1962).
- **Στρωσιγενή ιζηματογενή πετρώματα:** Κλίση ποικίλη, εξαρτώμενη από τον πετρολογικό τύπο, τις κλιματικές συνθήκες, το πάχος του στρώματος, τη διεύθυνση και την πυκνότητα των διακλάσεων και τα υδρογεωλογικά στοιχεία. Κατά μήκος κοιλάδων ποταμών, παρατηρείται πλευρική φυσική εκσκαφή που μεταβάλλει το μέγεθος των δυνάμεων ολίσθησης των πρανών.
- **Αργιλοί σχιστόλιθοι:** $8 - 15^\circ$, αλλά τα πρανή είναι συχνά είναι ασταθή. Όταν είναι σε στρώση με ψαμμίτες, η γωνία αυξάνει σε $20-45^\circ$.
- **Υπολειμματικό έδαφος:** $30 - 40^\circ$, εξαρτάται από το μητρικό πέτρωμα και την επιφανειακή απορροή.
- **Κολλούβιο:** $10 - 20^\circ$, αν και συχνά είναι ασταθή.
- **Loess:** Often stands vertical to substantial heights.
- **Άμμος:** Ξηρή, καθαρή είναι ευσταθής για γωνία $\beta \leq f$.
- **Άργιλος:** Το ύψος εξαρτάται από την πλαστικότητα, τις κατατμήσεις και το ύψος.
- **Αργιλο-αμμώδη εδάφη: Sand-clay mixtures:** Συχνά ευσταθή σε γωνίες μεγαλύτερες της «φ», όταν οι δυνάμεις της επιφανειακής απορροής δεν είναι σημαντικές.

Μεταβολή της κλίσης του πρανούς (2)

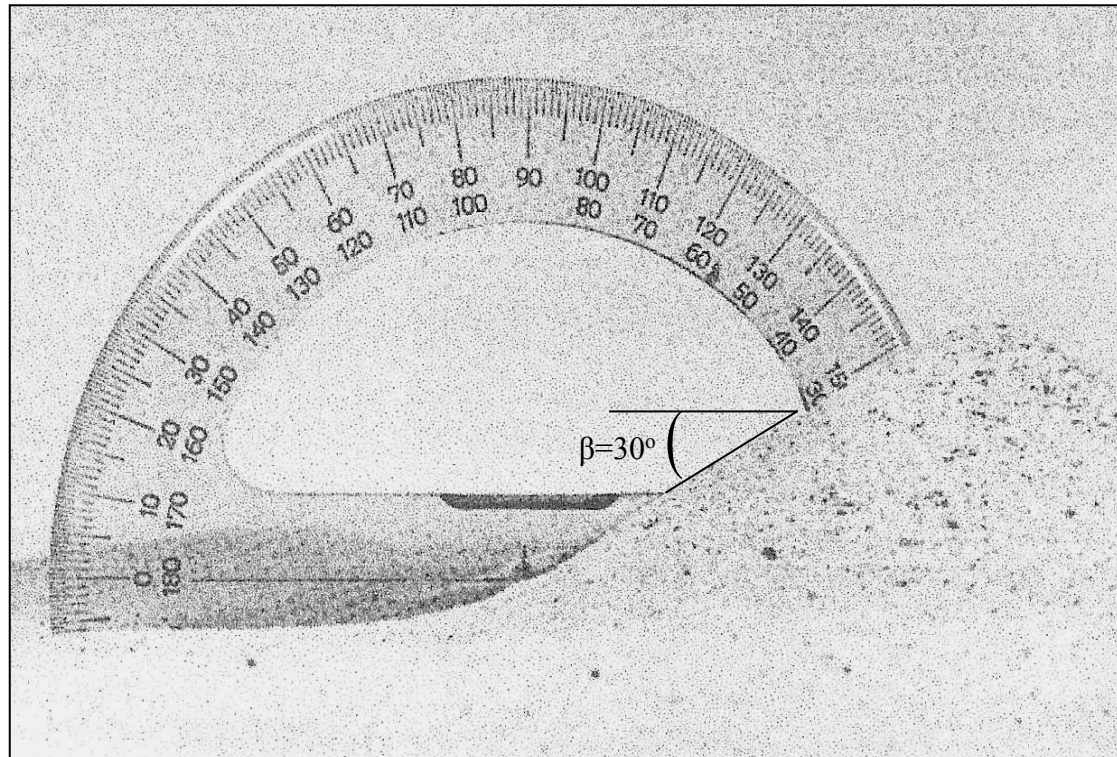
Τεχνητά εδαφικά πρανή:

- **Λεπτό εδαφικός μανδύας επάνω από βράχο:** Το έδαφος πρέπει να απομακρύνεται ή να αντιστηρίζεται γιατί δημιουργούνται ασταθείς συνθήκες.
- **Εναλλαγή εδάφους - βράχου:** (σκληρό υπολειμματικό έδαφος έως αποσαθρωμένο πέτρωμα) κλίση μεταξύ 1H:2V to 1H:1V (63 to 45°) ενώ πρέπει να αναμένονται δυνητικές ολισθήσεις κατά μήκος των ασυνεχειών.
- **Τα περισσότερα εδαφικά τεχνητά πρανή ισορροπούν** σε μέση γωνία 2H:1V (26°) αλλά πρέπει να δίνεται προσοχή στην επιφανειακή και απορροή και την παρουσία υπόγειου νερού καθώς και στις υπόλοιπες φυσικές και περιβαλλοντικές παραμέτρους, ώστε να διαπιστωθεί αν είναι απαραίτητη η αντιστήριξη. Πρανή μεταξύ αναβαθμίδων μπορούν να έχουν μεγαλύτερη κλίση.
- **Τα τεχνητά πρανή συνήθως σχεδιάζονται με αναβαθμίδες:** Ιδίως όταν είναι υψηλότερα των 8-10 m.
- **Στραγγιστήρια** τοποθετούνται, ως συνήθης πρακτική, κατά μήκος (κάθετα) των πρανών και των αναβαθμίδων για διευκόλυνση της αποστράγγισης.

Μεταβολή της κλίσης του πρανούς (3)

- **Τεχνητά πρανή σε βράχο**
- **Πρανή σε σκληρά (υγιή) πυριγενή και μεταμορφωμένα πετρώματα, με αραιό καταταμητικό σύστημα**, συνήθως κατασκευάζονται με κλίση 1H:4V (76°).
- **Σκληρά πετρώματα, με διακλάσεις, ζώνες διάτμησης ή στρώση**, με σημαντικές ασυνέχειες που βυθίζονται ομόρροπα με το πρανές, εκσκάπτονται κατά τη διεύθυνση της κλίσης της ασυνέχειας ενώ όλα τα χαλαρά υλικά πρέπει να απομακρυνθούν μέχρι τον υγιή βράχο. Αν η γωνία κλίσης είναι πολύ μικρή, για οικονομικά συμφέρουσα εκσκαφή, τα πλακώδη τεμάχια του βράχου μπορούν να συγκρατηθούν με αγκύρωση.
- **Σκληρά ιζηματογενή πετρώματα με στρώση που βυθίζονται κάθετα και παράλληλα στο μέτωπο του πρανούς ή μέσα στο πρανές, ή εναλλαγή οριζόντιων σκληρών ψαμμιτών και αργίλων**, εκσκάπτονται συνήθως με γωνία 1H:4V. Στην περίπτωση αυτή όμως οι άργιλοι πρέπει να προστατεύονται από την αποσάθρωση με εκτοξευμένο, ιδίως αν παρατηρούνται φαινόμενα διόγκωσης.
- **Αργιλικόι σχιστόλιθοι** (εκτός της περίπτωσης εναλλαγής με ψαμμίτη) εκσκάπτονται με γωνία κλίσης πρανών 6H:1V (9.5°).
- **Πρανή σε αποσαθρωμένα πετρώματα με πυκνό καταταμητικό σύστημα** (εκτός των αργιλικών σχιστόλιθων και περιπτώσεων ομόρροπης προς το πρανές βύθισης καταταμήσεων, απαιτούν γωνία κλίσης κατασκευής μεταξύ 1H:2V to 1H:1V (63 to 45°) ή χρειάζονται αντιστήριξη.

Γωνία κλίσης πρανούς ξηρής άμμου



Πρανή μεγάλου ύψους με ομοιόμορφη κλίση Χαλαρά εδάφη χωρίς την παρουσία υδροφόρου στρώματος

$$W = \gamma h b \quad N = W \cos \beta = \gamma h b \cos \beta$$

$$T = W \sin \beta = \gamma h b \sin \beta$$

Η κάθετη ενεργός τάση σ , ισούται:

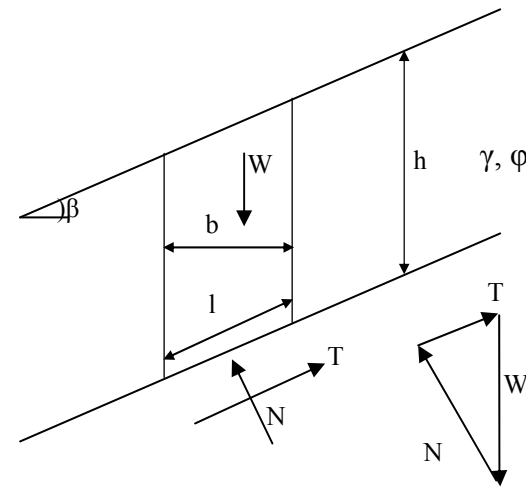
$$\sigma = \frac{N}{l} = \frac{\gamma h b \cos \beta}{b / \cos \beta} = \gamma h \cos^2 \beta$$

Η διατμητική τάση ισούται:

$$\tau = \frac{T}{l} = \gamma \frac{\gamma h b \sin \beta}{b \cos \beta} = \gamma h \sin \beta \cos \beta$$

Η διατμητική αντοχή ισούται:

$$s = \bar{\sigma} \cdot \tan \phi = \gamma h \cos^2 \beta \cdot \tan \phi$$



$$F = \frac{s}{t} = \frac{\bar{\sigma}}{\gamma h \sin \beta \cos \beta} =$$

$$= \frac{\gamma h \cos^2 \beta \tan \beta}{\gamma h \sin \beta \cos \beta} = \frac{\cos \beta \tan \phi}{\sin \beta}$$

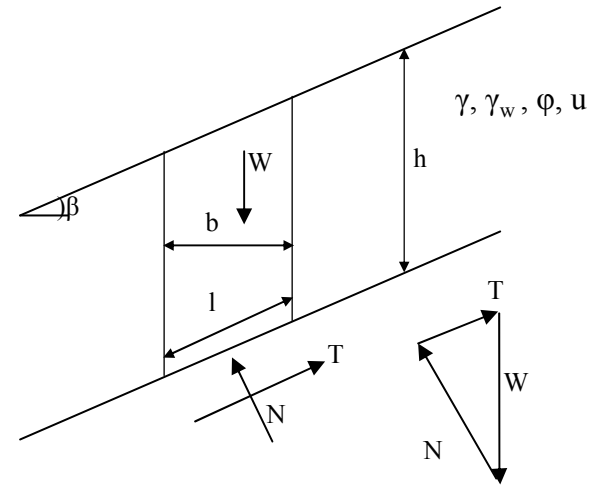
$$\Rightarrow F = \frac{\tan \phi}{\tan \beta}$$

Άρα: για $c=0$, η συνθήκη ευστάθειας είναι $\tan \phi \geq \tan \beta$

Πρανή μεγάλου ύψους με ομοιόμορφη κλίση

Χαλαρά εδάφη με παρουσία υδροφόρου στρώματος

$$\left. \begin{aligned}
 W &= hb \\
 \bar{N} &= N - U \\
 U &= \gamma_w hb \cos \beta \\
 T &= \gamma h b \sin \beta \\
 u &= \gamma_w h \cos^2 \beta
 \end{aligned} \right\} \begin{aligned}
 \bar{N} &= N - U \\
 \bar{N} &= (\gamma - \gamma_w)hb \cos \beta \\
 \alpha\nu \\
 \gamma_\beta &= \gamma - \gamma_w \\
 \text{τότε} \\
 \bar{N} &= \gamma_\beta hb \cos^2 \beta
 \end{aligned}$$



$$\bar{\sigma} = \frac{\bar{N}}{b / \cos \beta} = \gamma_\beta h \cos^2 \beta \quad , \quad \tau = \frac{T}{b / \cos \beta} = \gamma h \cos \beta \sin \beta$$

$$F = \frac{s}{\tau} = \frac{\gamma_\beta h \cos^2 \beta \tan \phi}{\gamma h \cos \beta \sin \beta} = \frac{\gamma_\beta}{\gamma} \cdot \frac{\tan \phi}{\tan \beta} \Rightarrow \alpha\nu \frac{\gamma_\beta}{\gamma} = \frac{1}{2} \Rightarrow F = \frac{1}{2} \cdot \frac{\tan \phi}{\tan \beta}$$

Άρα, για συνήθη εδάφη όπου $\gamma \cong 2 \Rightarrow$ σε συνθήκες κορεσμού το χαλαρό πρανές παραμένει ευσταθές για **$\tan \beta \leq (1/2) \tan \phi$**

Πρανή μεγάλου ύψους με ομοιόμορφη κλίση

Συνεκτικά εδάφη με παρουσία υδροφόρου στρώματος

$$c \neq 0, \varphi \neq 0, u \neq 0$$

$$s = \bar{c} + (\sigma - u) \tan \varphi = \bar{c} + \bar{\sigma} \tan \varphi \quad (\text{Διατμητική αντοχή εδάφους})$$

Άρα, η συνθήκη ευστάθειας του πρανούς θα είναι:

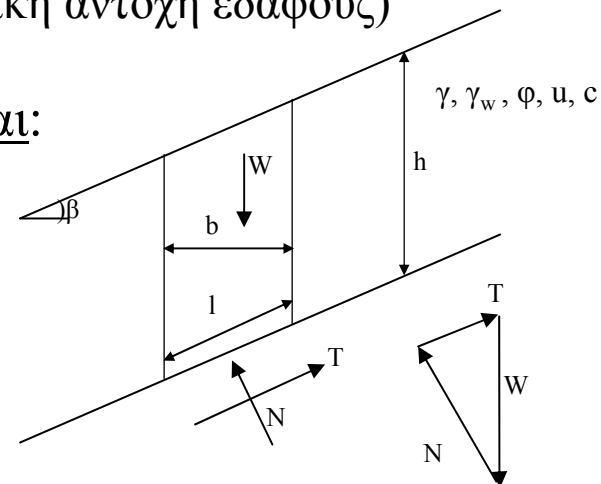
$$F = \frac{s}{\tau} = \frac{\bar{c} + (\sigma - u) \tan \varphi}{\gamma h \sin \beta \cos \beta} = \frac{\bar{l} \bar{c} + l(\sigma - u) \tan \varphi}{l \gamma h \sin \beta \cos \beta} =$$

$$\frac{\bar{l} \bar{c} + (N - ul) \tan \varphi}{W \sin \beta} = \frac{\bar{l} \bar{c} + (N - U) \tan \varphi}{W \sin \beta}$$

ή

$$F = \frac{\bar{c} + \bar{\sigma} \tan \varphi}{\gamma h \sin \beta \cos \beta} = \frac{\bar{c} + \gamma_{\beta} h \cos^2 \beta \tan \varphi}{\gamma h \sin \beta \cos \beta} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow F = \frac{\bar{l} \bar{c}}{W \sin \beta} + \frac{\gamma_{\beta}}{\gamma} \cdot \frac{\tan \varphi}{\tan \beta}$$



Μέγιστο ύψος πρανούς, συνεκτικού εδάφους, χωρίς αντιστήριξη:

$$h = \frac{\bar{c} \sec^2 \beta}{\gamma h \tan \beta - \left(\frac{\gamma_{\beta}}{\gamma} \right) \tan \varphi}$$

Πρανές μεγάλου ύψους με ομοιόμορφη κλίση και υπόγεια υδατική ροή

$$W' = \alpha [z_w \gamma + (z - z_w) \gamma']$$

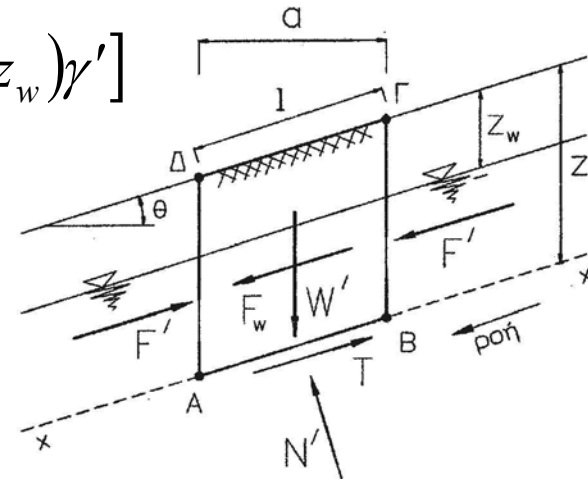
$$F_w = (i \gamma_w) \alpha \cdot z$$

$$T = F_w + W' \sin \vartheta = \alpha (z \gamma + z_w \gamma_w) \sin \vartheta$$

$$\tau = T / l = (z \gamma' + z_w \gamma_w) \cos \vartheta$$

$$\sigma' = N' / l = (z \gamma' + z_w \gamma_w) \cos^2 \vartheta$$

$$\tau = T / l = (z \gamma + z_w \gamma_w) \sin \vartheta \cos \vartheta$$



$$F = \frac{s}{\tau} = \frac{c + \sigma' \tan \varphi}{\tau} = \frac{\frac{c}{\cos^2 \vartheta} + (z \gamma' + z_w \gamma_w) \tan \varphi}{(z \gamma + z_w \gamma_w) \tan \vartheta}$$

Πρανές μεγάλου ύψους με ομοιόμορφη κλίση

1. Πρανές ξηρής άμμου: $F = \frac{\tan \varphi}{\tan \vartheta}$

2. Πρανές άμμου με ελεύθερη επιφάνεια ροής στην επιφάνεια του εδάφους

$$F = \frac{\gamma'}{\gamma} \cdot \frac{\tan \varphi}{\tan \vartheta} \quad \text{Το πρανές αστοχεί για γωνία } \vartheta = \arctan\left(\frac{\gamma'}{\gamma} \tan \varphi\right) < \varphi$$

3. Πρανές άμμου με ροή: (α). Όταν $\tan \vartheta < \frac{\gamma'}{\gamma} \tan \varphi \Rightarrow$ Το πρανές δεν αστοχεί

$$F = \frac{z\gamma' + z_w\gamma_w}{z\gamma + z_w\gamma_w} \cdot \frac{\tan \varphi}{\tan \vartheta} \quad (\beta). \text{ Όταν } \frac{\gamma'}{\gamma} \tan \varphi < \tan \vartheta < \frac{\gamma}{\gamma + \gamma_w} \tan \varphi \Rightarrow$$

\Rightarrow Το πρανές αστοχεί σε βάθη μεγαλύτερα από:

$$z_{cr} = z_w \frac{\gamma_w (\tan \varphi - \tan \vartheta)}{\gamma \tan \vartheta - \gamma' \tan \varphi}$$

4. Πρανές συνεκτικού υλικού σε ροή:

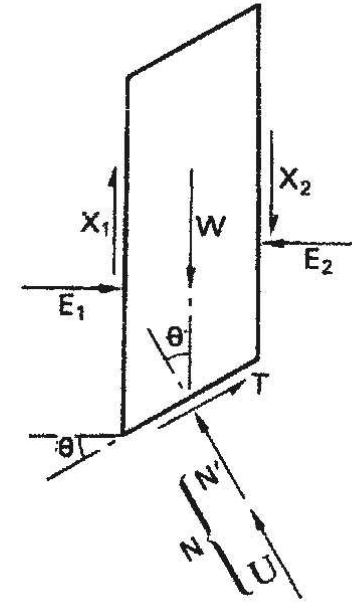
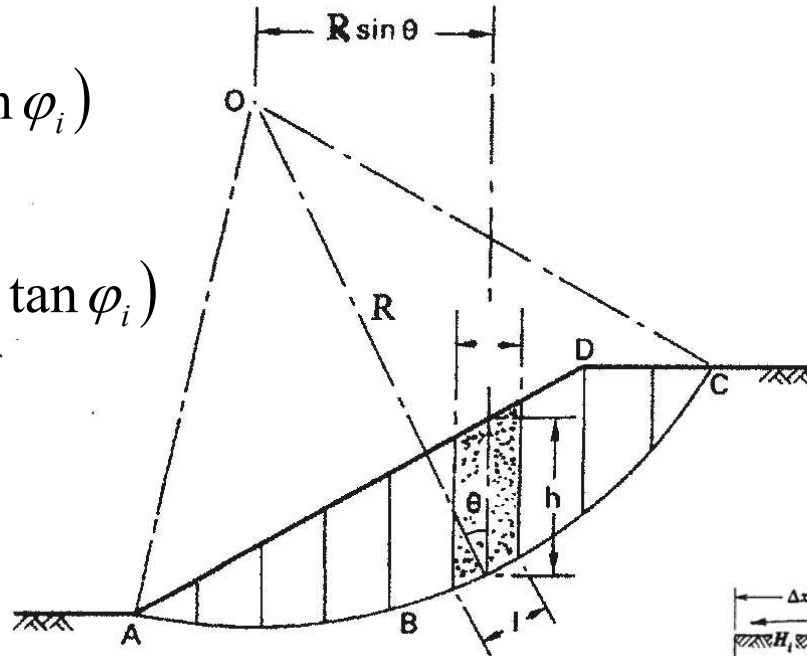
$$z_{cr} = \frac{\frac{c}{\cos^2 \vartheta} + z_w\gamma_w (\tan \varphi - \tan \vartheta)}{\gamma \tan \vartheta - \gamma' \tan \varphi} \quad \text{Το κρίσιμο βάθος και ο συντελεστής ασφάλειας μειώνονται όταν η στάθμη του υδροφόρου ορίζοντα είναι υψηλότερη (δηλαδή όσο μειώνεται το } z_w)$$

Μέθοδοι λωρίδων

$$F = \frac{\text{Ροπή συγκράτησης}}{\text{Ροπή ολίσθησης}}$$

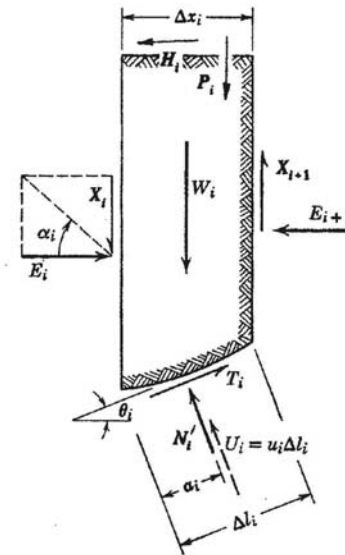
$$\tau_i = \frac{1}{F} (c_i + \sigma'_i \tan \varphi_i)$$

$$T_i = \frac{1}{F} (c_i \Delta l + N' \cdot \tan \varphi_i)$$



$$R \cdot \sum_i T_i = R \sum_i (W_i + P_i) \sin \vartheta_i + \sum_i H_i y_i$$

$$F = \frac{\sum_i (c_i \Delta l_i + N'_i \cdot \tan \varphi_i)}{\sum_i (W_i + P_i) \sin \vartheta_i + \frac{1}{R} \sum_i H_i y_i}$$



Τεχνητά πρανή σε συνεκτικά εδάφη

Σουηδική μέθοδος ή Μέθοδος Fellenius (1927)

$\alpha_i = \theta_i$ στις (n-1) διεπιφάνειες μεταξύ των λωρίδων. Δηλαδή (n-1) παραδοχές αντί των (n-2).

$$N'_i = (W_i + P_i) \cos \vartheta_i - H_i \sin \vartheta_i - u_i \cdot \Delta l_i$$

$$F = \frac{\sum_i (c_i \Delta l_i + N'_i \cdot \tan \varphi_i)}{\sum_i (W_i + P_i) \sin \vartheta_i + \frac{1}{R} \sum_i H_i y_i}$$

Απλοποιημένη μέθοδος Bishop (1955)

$\alpha_i = 0$ στις (n-1) διεπιφάνειες μεταξύ των λωρίδων

$$N'_i = \frac{(W_i + P_i) - u_i \Delta x_i - \frac{1}{F} c_i \Delta x_i \tan \vartheta}{\cos \vartheta \left(1 + \frac{1}{F} \tan \vartheta_i \tan \varphi_i \right)}$$

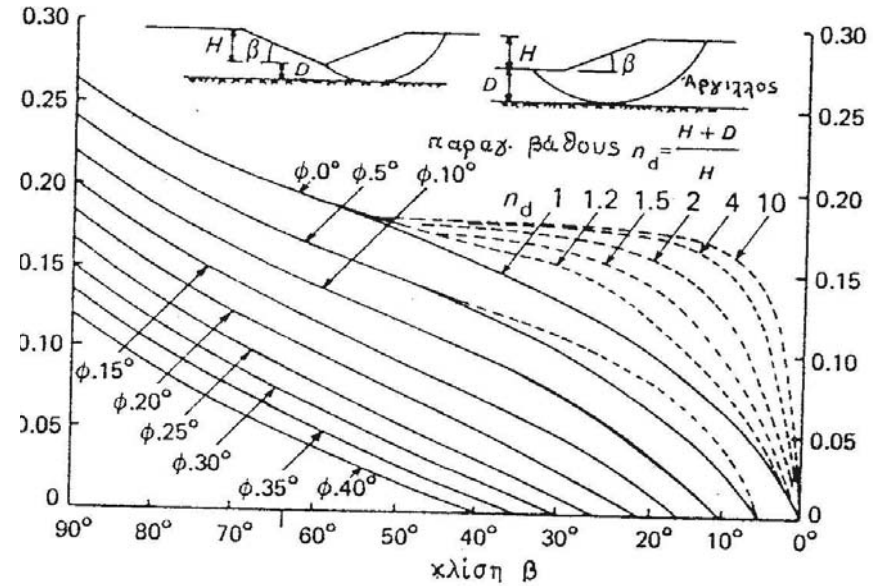
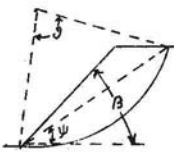
Κατακόρυφη εκσκαφή (σε αργιλικό έδαφος) παραμένει ευσταθής μέχρι βάθος (ή ύψος μετώπου:

$$F = \frac{2c_u}{\gamma \cdot H} \Rightarrow H_{cr} = \frac{2c_u}{\gamma}$$

Τεχνητά πρανή σε συνεκτικά εδάφη

Μέθοδος Taylor (1948)

κλίση β	Γωνία		Γων. προσδ.		Παράγοντας βάθους n_c	Συντελ. ευστάθ. $N = \frac{c}{\gamma H} \left(\frac{1}{F}\right)$
	Εσωτ. τριβής ϕ	ολισθ. ψ	κύκλου θ	ολισθ. ϑ		
90	0	47.6	30.2			0.261
	5	50.0	28.0			0.239
	10	53.0	27.0			0.218
	15	56.0	26.0			0.199
	20	58.0	24.0			0.182
75	25	60.0	22.0			0.166
	0	41.8	51.8			0.219
	5	45.0	50.0			0.195
	10	47.5	47.0			0.173
	15	50.0	46.0			0.152
60	20	53.0	44.0			0.134
	25	56.0	44.0			0.117
	0	35.3	70.8			0.191
	5	38.5	69.0			0.162
	10	41.0	66.0			0.138
45	15	44.0	63.0			0.116
	20	46.5	60.4			0.097
	25	50.0	60.0			0.079
	0	(28.2)	(89.4)	(1.062)		(0.170)
	5	31.2	84.2	1.026		0.136
30	10	34.0	79.4	1.006		0.108
	15	36.1	74.4	1.001		0.083
	20	38.0	69.0	-		0.062
	25	40.0	62.0	-		0.044
	0	(20.0)	(106.8)	(1.301)		(0.156)
15	5	(23.0)	(96.0)	(1.161)		(0.110)
	5	20.0	106.0	1.332		0.110
	10	25.0	88.0	1.092		0.075
	15	27.0	78.0	1.038		0.046
	20	28.0	62.0	1.003		0.025
15	25	29.0	50.0	-		0.009
	0	(10.6)	(121.4)	(2.117)		(0.145)
	5	(12.5)	(94.0)	(1.549)		(0.068)
	5	11.0	95.0	1.697		0.070
10	(14.0)	(68.0)	(1.222)		(0.023)	
10	14.0	68.0	1.222		0.023	



$$N = \frac{c}{\gamma.H} \Rightarrow N = \frac{1}{F} \cdot \frac{c}{\gamma.H}$$

Βιβλιογραφία κεφαλαίου

- Bishop, A.W. (1955). The use of the slip circle in the stability analysis of slopes. *Geotechnique*, Vol. 1, pp. 7-17.
- Christaras, B., Zouros, N., Makedon, Th. & Dimitriou, An. (1997): Adverse geotechnical conditions in road construction. Sections of the new Egnatia highway across Pindos mountain range (N. Greece) Intern. Symp. of IAEG, «Engineering Geology and the Environment», Athens, Balkema Publ. pp. 2639-2646
- Christaras, B., Mariolakos, I., Dimitriou, A., Moraiti E. & Mariolakos, D. (2002), «Slope Instability at Olympia Archaeological Site, in S. Greece» - Int. Symp. UNESCO “Landslides Risk Mitigation and Protection of Cultural and Natural Heritage”, Kyoto, pp. 339-342.
- Christaras, B., Zouros N. & Marinos P. (2000). Heavy rain and mass movements in pyroclastic formations. Examples from Sarno (Italy) and Lesvos Island (Greece). *Geoeng2000, An International Conference on Geotechnical & Geological Engineering, Melbourne, SNES0398.PDF, in CD.*
- Fellenius, W. (1927). *Erdstatische Berechnungen*. W. Ernst und Sohn Berlaq, Berlin, 40p
- Dunn, I. S., Anderson, L. R. & Kiefer, F. W. (1980). *Fundamentals of geotechnical analysis*. John Wiley & Sons, New York, 414p.
- Hunt, R. (1984). *Geotechnical engineering investigation manual*. McGraw-Hill Book Co., New York, 983p.
- Taylor, D. W. (1948). *Fundamentals of Soil Mechanics*. McGraw-Hill Book Co., New York, 700p.