

Ομιλία Ε.Ε.Σ.Υ.Ε., 30. Νοεμβρίου 2006

Η επίδραση του νερού στις παραμορφώσεις και στην ευστάθεια σηράγγων

Γιώργος Χ. Αναγνώστου

ETH Zurich

1

Προβλήματα με νερά



Δυσχέρωση
εργασιών

Λειτουργικότητα

Περιβάλλον

2

Προβλήματα ευστάθειας και παραμορφώσεων

Ανύψωση πυθμένα σε διογκούμενα πετρώματα

Καθιζήσεις επιφανείας εδάφους

Μεγάλες παραμορφώσεις (συνθήκες σύνθλιψης)

Ρηξιγενείς ζώνες με μεγάλη υδατική πίεση

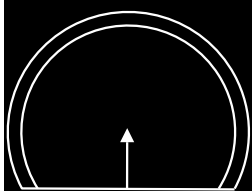
Ευστάθεια μετώπου διάνοιξης



3

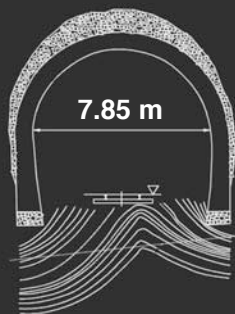
Διογκούμενα πετρώματα

Αύξηση όγκου λόγω προσρόφησης νερού



Ανύψωση πυθμένα

Σιδηροσκάκι Kappelisberg (D, 1878)

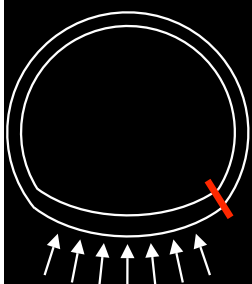


1878 - 1926:
16 αποκαταστάσεις διατομής
Ανύψωση (αθροιστικά): 4.70 m

4

Διογκούμενα πετρώματα

Αύξηση όγκου λόγω προσρόφησης νερού



Ανάπτυξη φορτίου

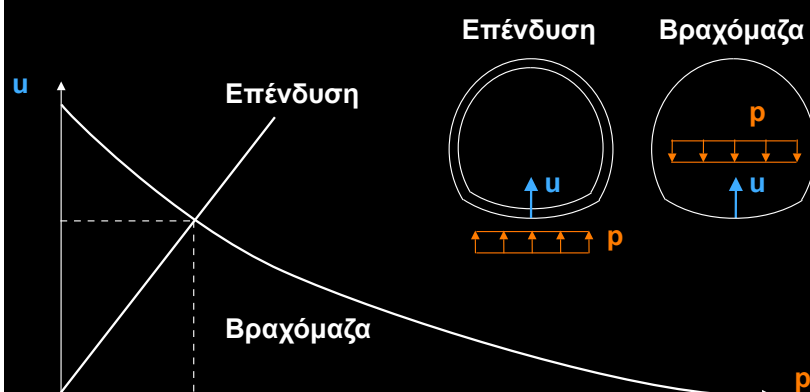
Οδοσκάκι Belchen (CH, 1970)



5

Σχέση μεταξύ πίεσης διογκωσης και ανύψωσης

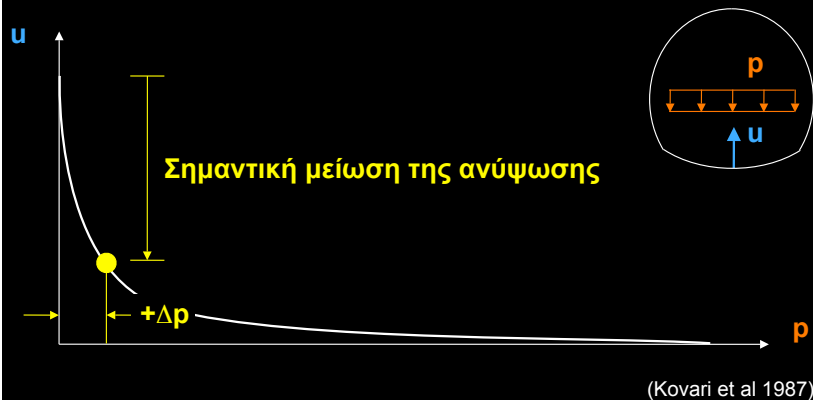
- Μεγάλη σημασία για τον σχεδιασμό
(Αλληλεπίδραση επένδυσης - βραχόμαζας)



6

Σχέση μεταξύ πίεσης διόγκωσης και ανύψωσης

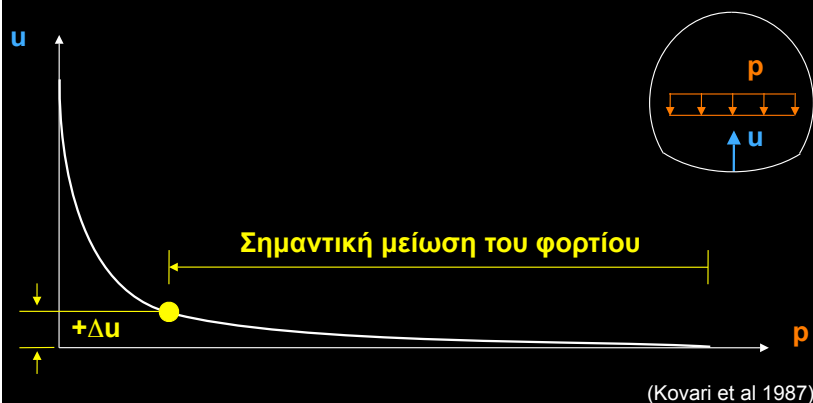
- Μεγάλη σημασία για τον σχεδιασμό
- Αργιλικά πετρώματα: **ισχυρά μη γραμμική σχέση**



7

Σχέση μεταξύ πίεσης διόγκωσης και ανύψωσης

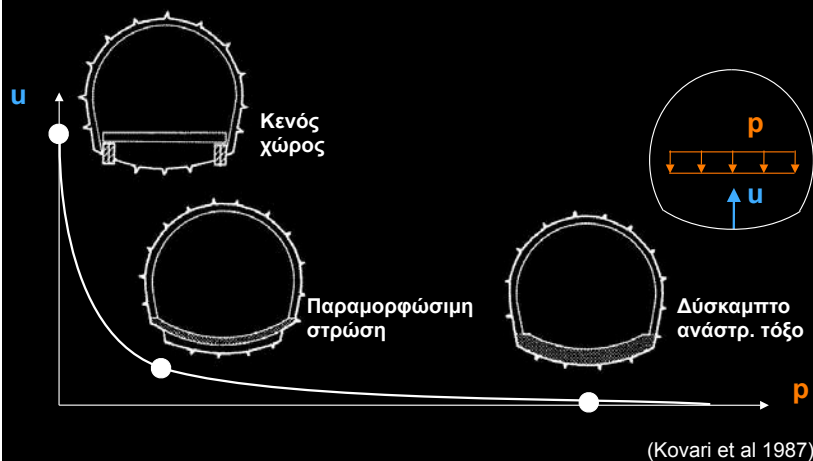
- Μεγάλη σημασία για τον σχεδιασμό
- Αργιλικά πετρώματα: **ισχυρά μη γραμμική σχέση**



8

Σχέση μεταξύ πίεσης διόγκωσης και ανύψωσης

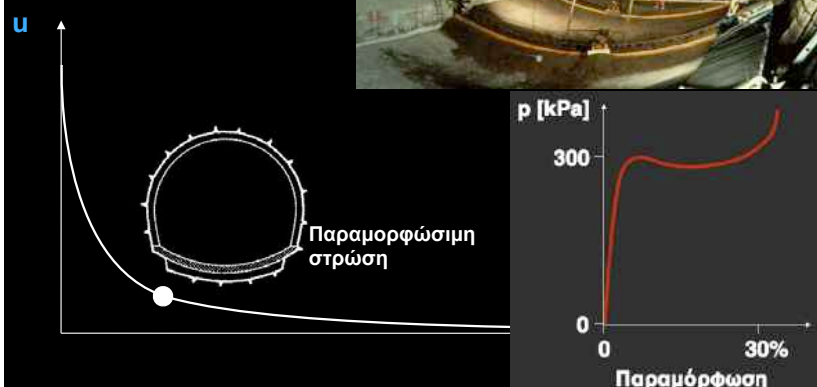
- Μεγάλη σημασία για τον σχεδιασμό
- Αργιλικά πετρώματα: **ισχυρά μη γραμμική σχέση**



9

Σχέση μεταξύ πίεσης διόγκωσης

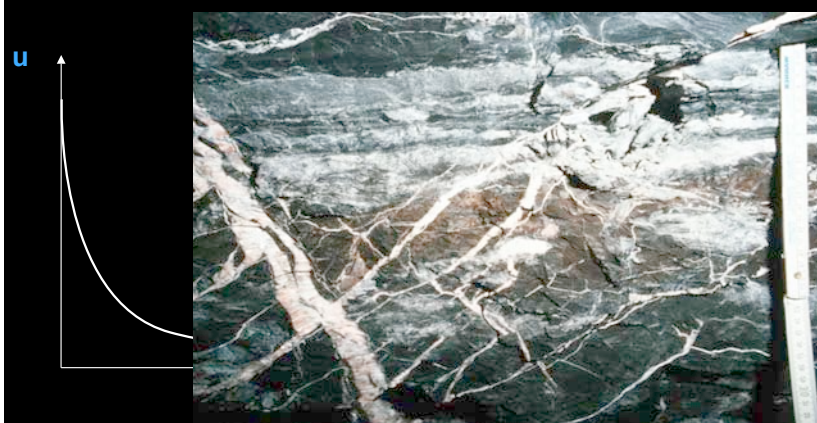
- Μεγάλη σημασία για τον
- Αργιλικά πετρώματα: ισχυρή



10

Σχέση μεταξύ πίεσης διόγκωσης και ανύψωσης

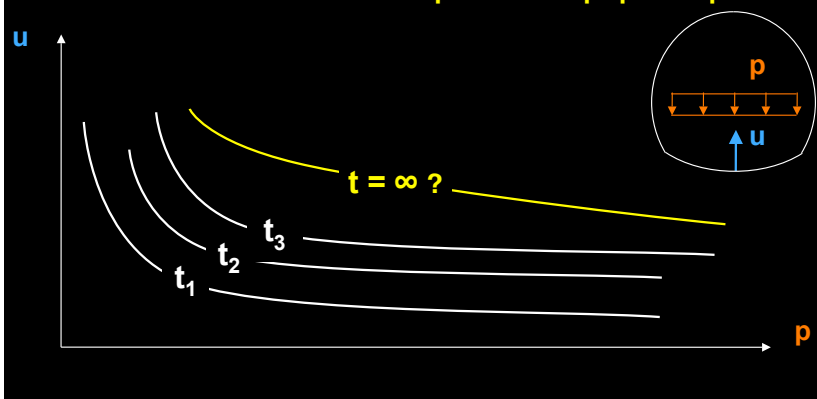
- Μεγάλη σημασία για τον σχεδιασμό
- Αργιλικά πετρώματα: ισχυρά μη γραμμική σχέση
- Πετρώματα με ανυδρίτη



11

Σχέση μεταξύ πίεσης διόγκωσης και ανύψωσης

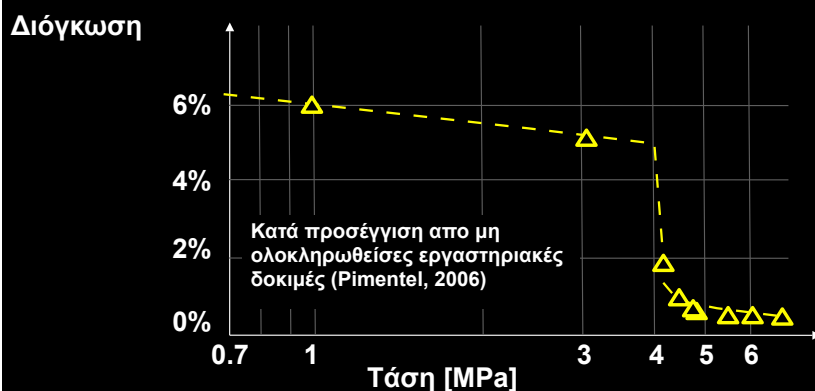
- Μεγάλη σημασία για τον σχεδιασμό
 - Αργιλικά πετρώματα: ισχυρά μη γραμμική σχέση
 - Πετρώματα με ανυδρίτη: Πίεση μειώνει ταχύτητα ανύψωσης
- Τελική κατάσταση άγνωστη



12

Σχέση μεταξύ πίεσης διόγκωσης και ανύψωσης

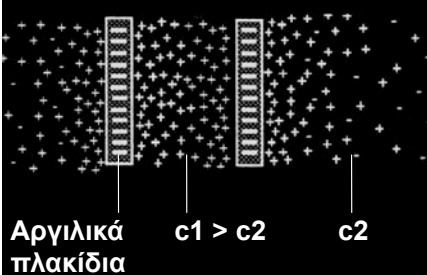
- Μεγάλη σημασία για τον σχεδιασμό
 - Αργιλικά πετρώματα: ισχυρά μη γραμμική σχέση
 - Πετρώματα με ανυδρίτη: Πίεση μειώνει ταχύτητα ανύψωσης
- Τελική κατάσταση άγνωστη



13

Φυσικοχημικοί μηχανισμοί διόγκωσης

- Αργιλικά ορυκτά: προσρόφηση νερού μέσω όσμωσης



14

Φυσικοχημικοί μηχανισμοί διόγκωσης

- Αργιλικά ορυκτά: Προσρόφηση νερού μέσω όσμωσης
- Πετρώματα με ανυδρίτη: Ανάπτυξη κρυστάλλων γύψου



Διάλυση του ανυδρίτη
 $\text{CaSO}_4 \rightarrow \text{Ca}^{++} + \text{SO}_4^{=}$

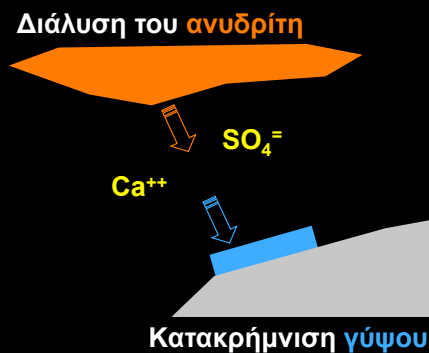


Κατακρήμνιση γύψου
 $\text{Ca}^{++} + \text{SO}_4^{=} + 2 \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$

15

Φυσικοχημικοί μηχανισμοί διόγκωσης

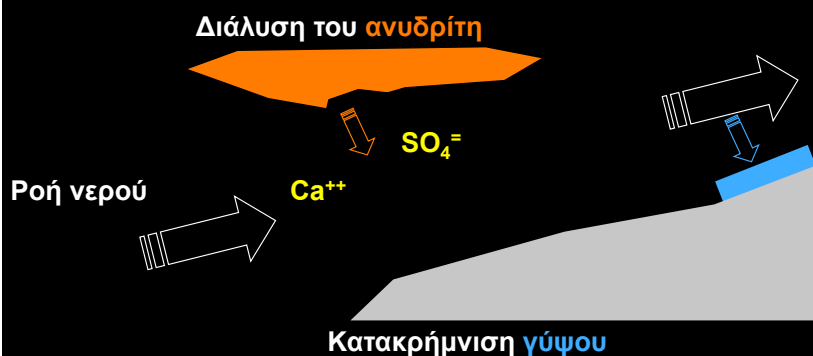
- Αργιλικά ορυκτά: Προσρόφηση νερού μέσω όσμωσης
- Πετρώματα με ανυδρίτη: Ανάπτυξη κρυστάλλων γύψου



16

Φυσικοχημικοί μηχανισμοί διόγκωσης

- Αργιλικά ορυκτά: Προσρόφηση νερού μέσω όσμωσης
- Πετρώματα με ανυδρίτη: Ανάπτυξη κρυστάλλων γύψου



17

Φυσικοχημικοί μηχανισμοί διόγκωσης

- Αργιλικά ορυκτά: Προσρόφηση νερού μέσω όσμωσης
- Πετρώματα με ανυδρίτη: Ανάπτυξη κρυστάλλων γύψου

Σύνθετη διεργασία μεταφοράς
και χημικών αντιδράσεων

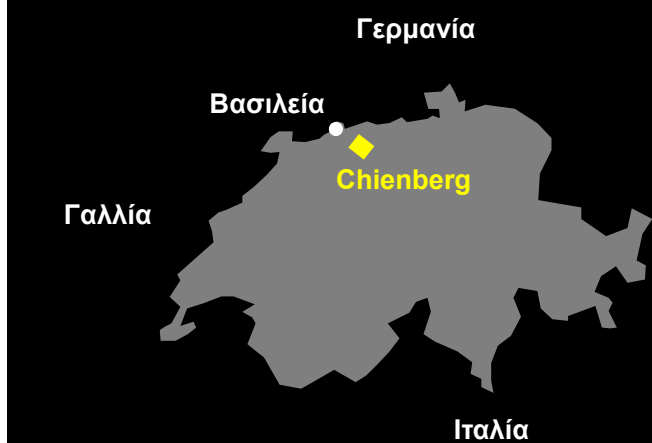
- Διαπερατότητα βραχόμαζας
- Υδραυλικές συνοριακές συνθήκες
- Χωροκατανομή ανυδρίτη
- Κινητική αντιδράσεων

Έρευνα:

- Αριθμητική προσομοίωση φυσικοχημικών διεργασιών
- Υδρογεωλογική προσομοίωση σε μεγάλη κλίμακα
- Μακροχρόνιο πρόγραμμα εργαστηριακών δοκιμών

18

Οδοσήραγγα Chienberg



19

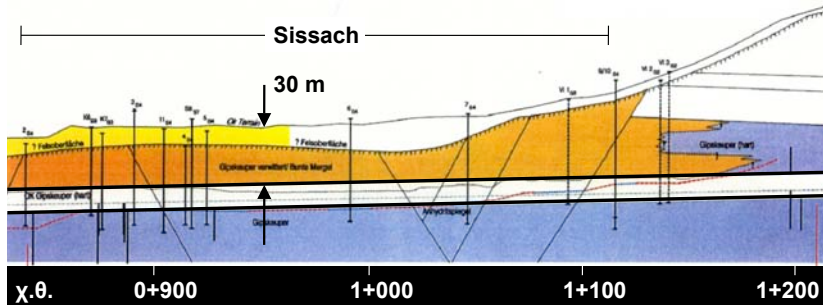
Οδοσήραγγα Chienberg (δυτικό τμήμα)

Πρόσφατες αποθέσεις

Εντελώς αποσαθρωμένες μάργες

Gypsum-Keuper (Αργιόλιθοι με γύψο $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$)

Gypsum-Keuper (Αργιόλιθοι με ανυδρίτη CaSO_4)



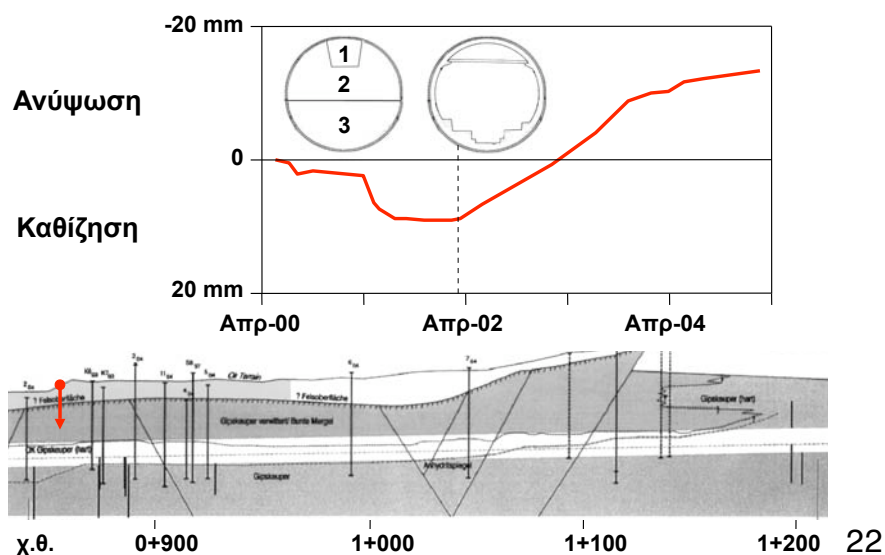
20

Οδοσήραγγα Chienberg

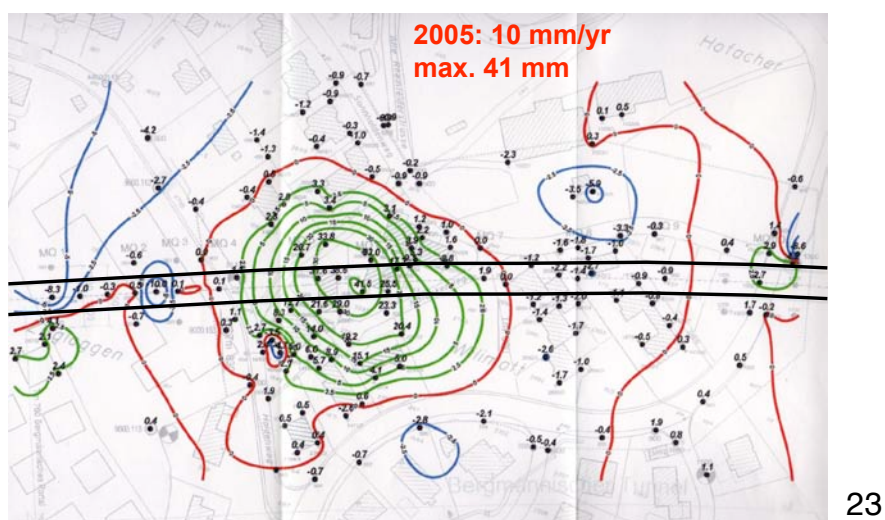


21

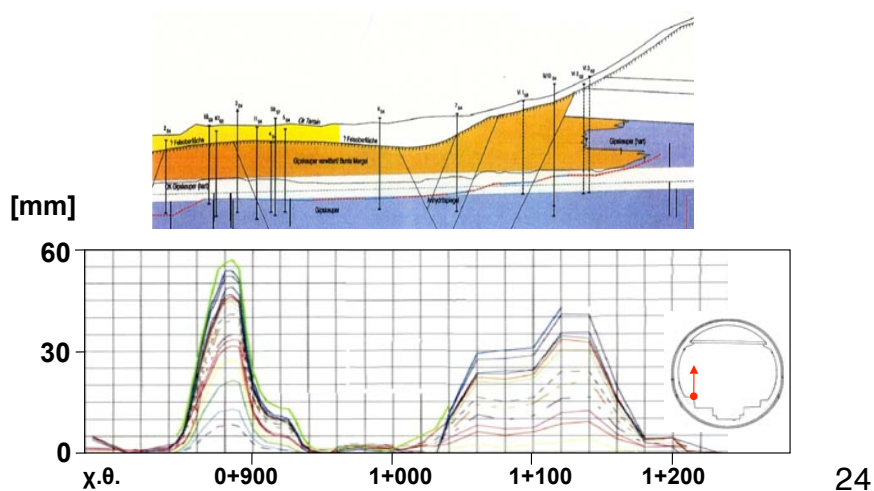
Ανύψωση επιφανείας μετά την μόνιμη επένδυση



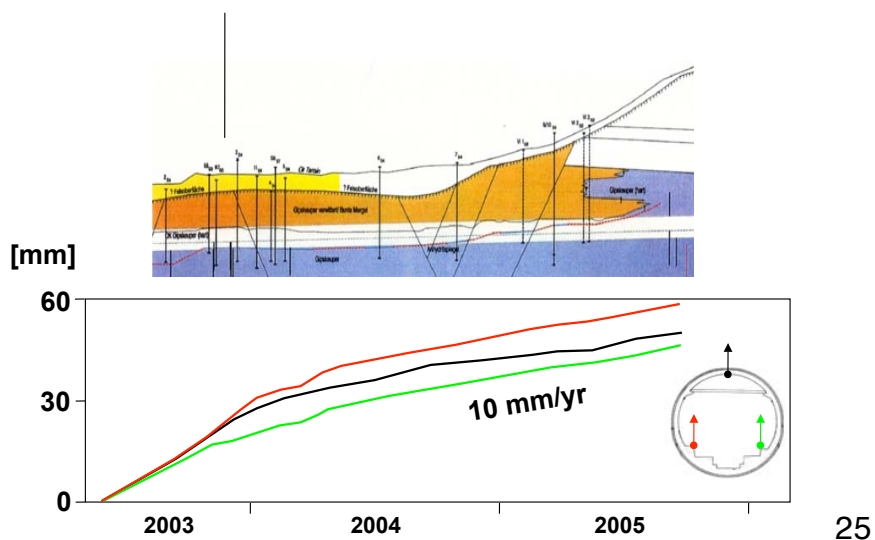
Ισοϋψείς ανύψωσης επιφανείας εδάφους (2 χρόνια)



Ανύψωση ανάστροφου τόξου (Απρ. 03 - Σεπτ. 05)

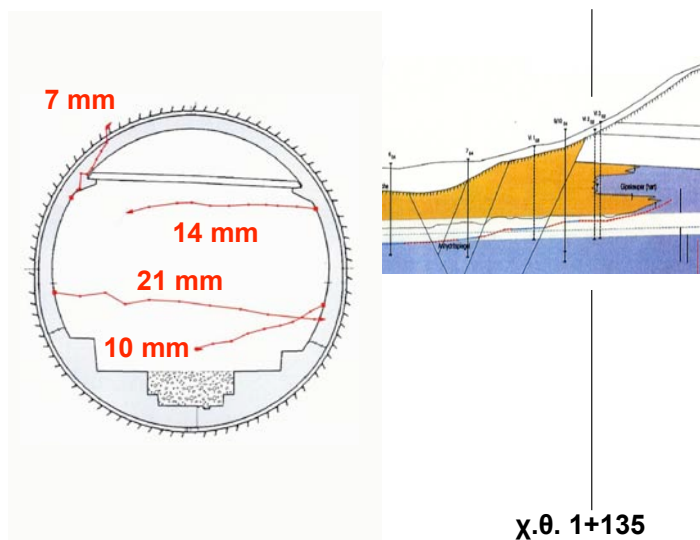


Ανύψωση ανάστροφου τόξου (Απρ. 03 - Σεπτ. 05)



25

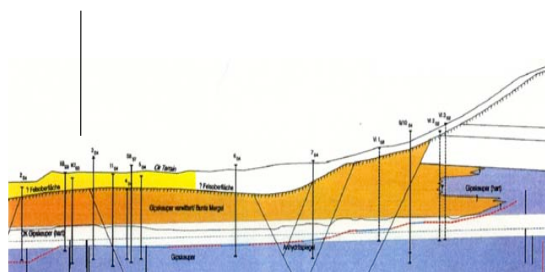
Σύγκλιση μόνιμης επένδυσης (16 μήνες)



χ.θ. 1+135

26

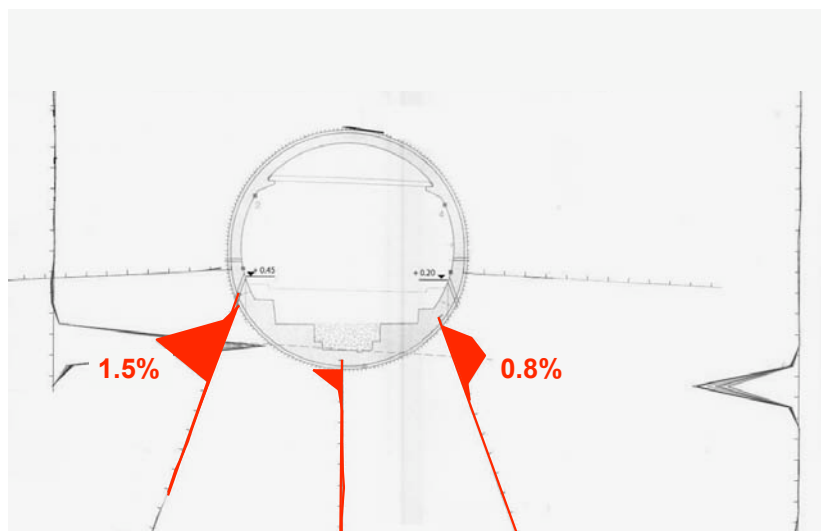
Κατανομή παραμορφώσεων εδάφους



χ.θ. 0+873

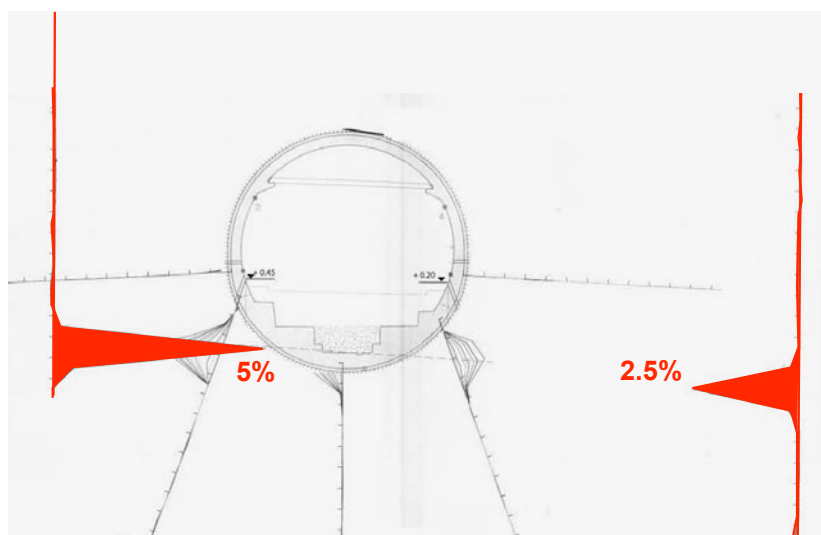
27

Κατανομή παραμορφώσεων εδάφους (16 μήνες)



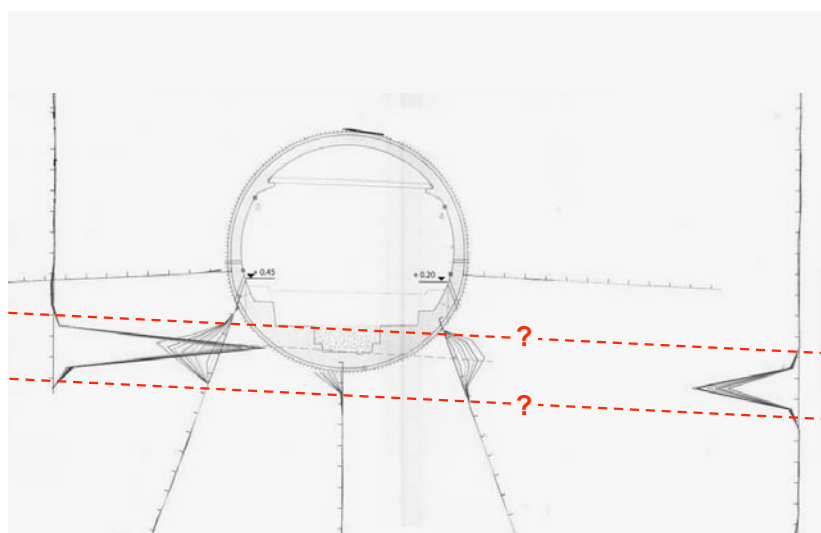
28

Κατανομή παραμορφώσεων εδάφους (16 μήνες)



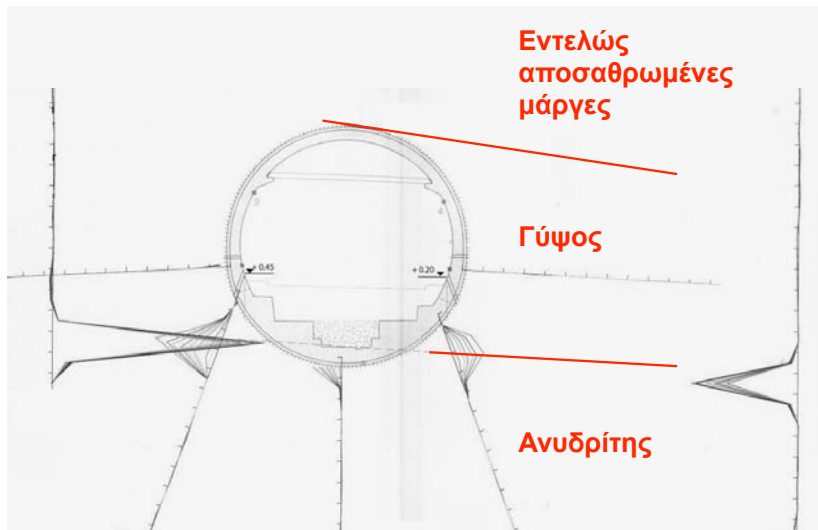
29

Κατανομή παραμορφώσεων εδάφους (16 μήνες)



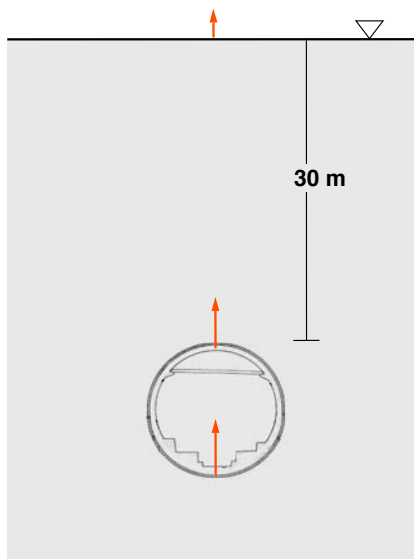
30

Κατανομή παραμορφώσεων εδάφους (16 μήνες)



31

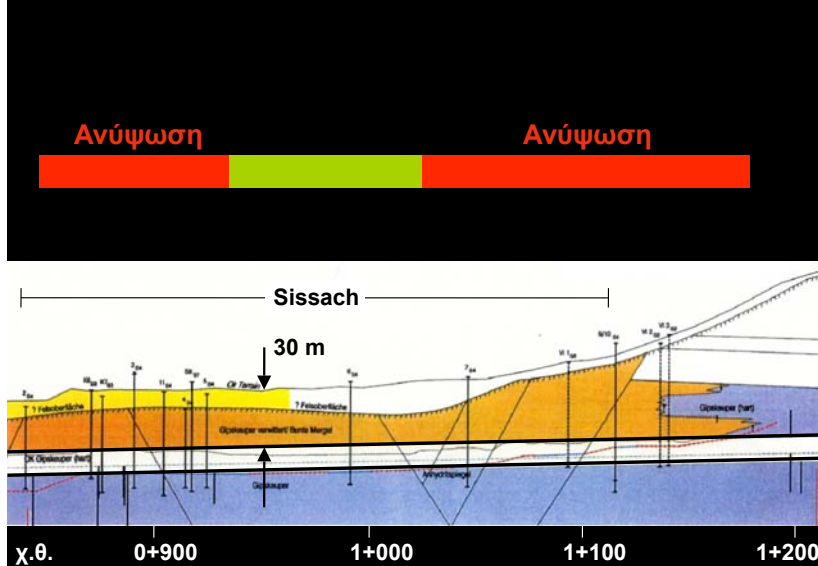
Ανύψωση επιφανείας μετά την μόνιμη επένδυση



- Μικρό υπερκείμενο
- Πτωχή ποιότητα υλικών
- Δύσκαμπτη επένδυση
- Ανυδρίτης
- Νερό

32

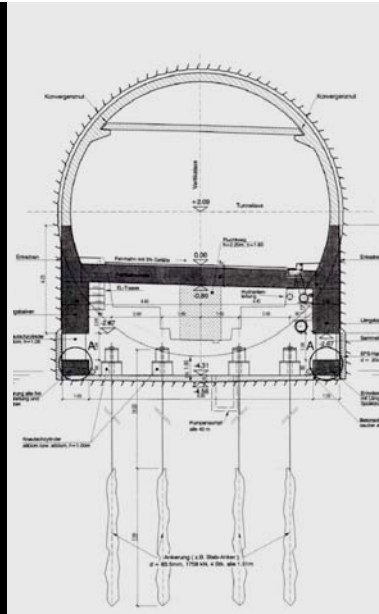
Οδοσήραγga Chienberg (δυτικό τμήμα)



33

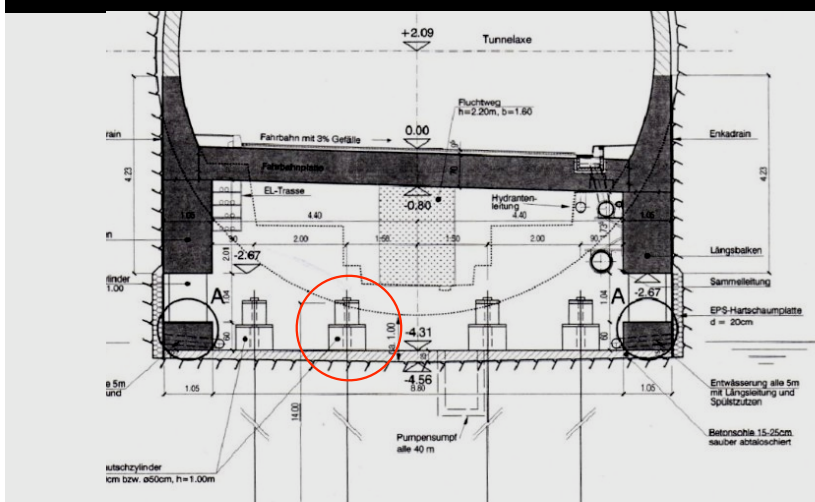
Επιλεγείσα λύση

Μεμονωμένα
παραμορφώσιμα στοιχεία



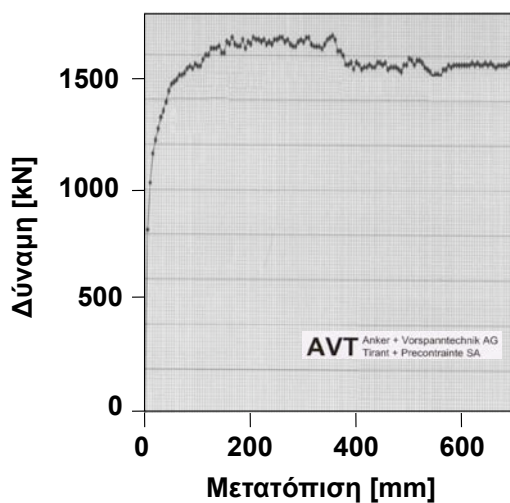
37

Επιλεγείσα λύση



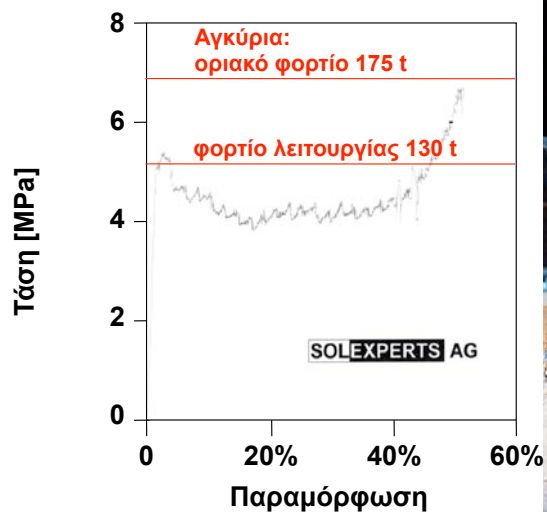
38

Ενδοτικές κεφαλές αγκυρώσεων



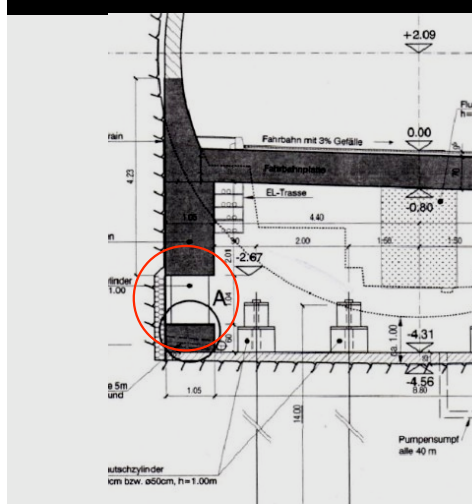
39

Ενδοτικές κεφαλές αγκυρώσεων



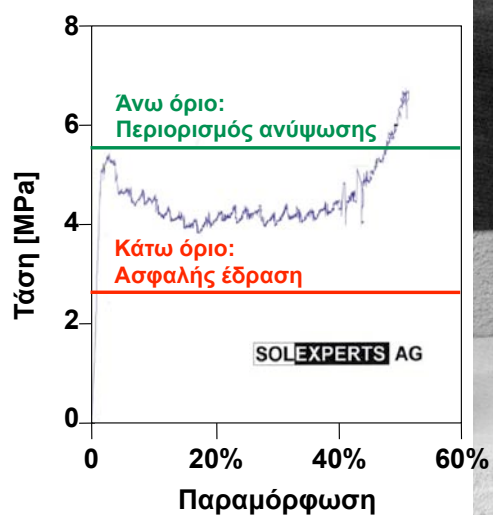
40

Παραμορφώσιμα στοιχεία έδρασης



41

Παραμορφώσιμα στοιχεία έδρασης



42



43



44



45



46



47



48



49



50



51

Προβλήματα ευστάθειας και παραμορφώσεων

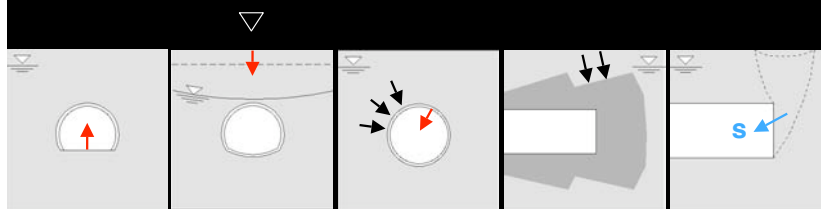
Ανύψωση πυθμένα σε διογκούμενα πετρώματα

Καθιζήσεις επιφανείας εδάφους

Μεγάλες παραμορφώσεις (συνθήκες σύνθλιψης)

Ρηξιγενείς ζώνες με μεγάλη υδατική πίεση

Ευστάθεια μετώπου διάνοιξης

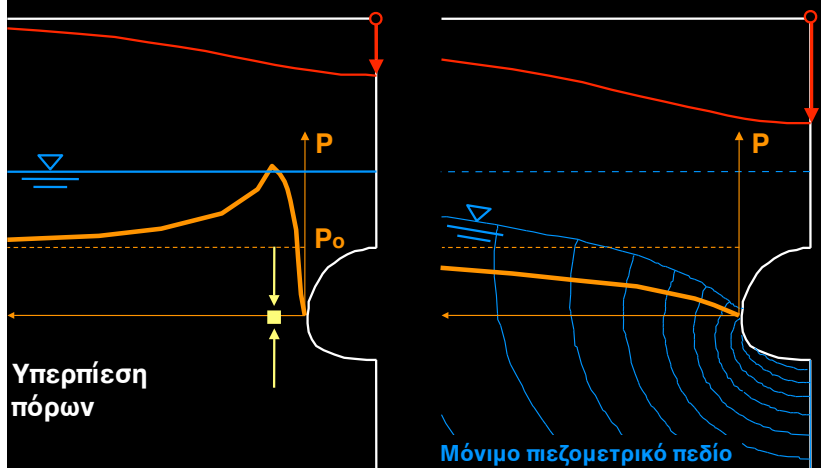


52

Επίδραση του νερού

Βραχυπρόθεσμα

Μακροπρόθεσμα



53

Προβλήματα ευστάθειας και παραμορφώσεων

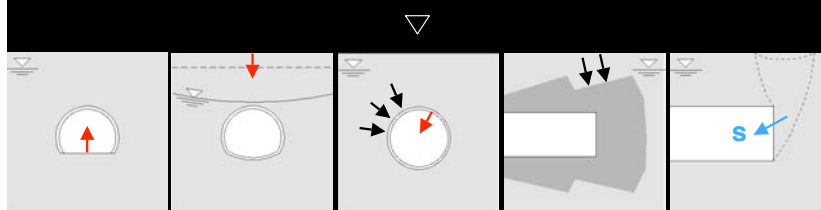
Ανύψωση πυθμένα σε διογκούμενα πετρώματα

Καθιζήσεις επιφανείας εδάφους

Μεγάλες παραμορφώσεις (συνθήκες σύνθλιψης)

Ρηξιγενείς ζώνες με μεγάλη υδατική πίεση

Ευστάθεια μετώπου διάνοιξης



54

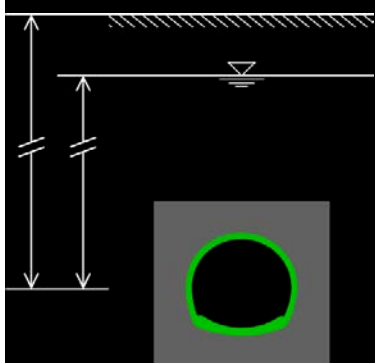
Συνθήκες σύνθλιψης



πριν
μετά
αποκατάσταση
διατομής

55

Γεωτεχνικοί παράγοντες



Αντοχή και παραμορφωσιμότητας
Υπερκείμενο
Υδατική πίεση

56

Επίδραση νερού

- Υδατική πίεση πόρων: Μείωση ορθών ενεργών τάσεων
Μείωση διατμητικής αντοχής

σήραγγα υπηρεσίας
(διανοίχθηκε πρώτη)

κύρια σήραγγα
(αργότερα)



συνθήκες
σύνθλιψης

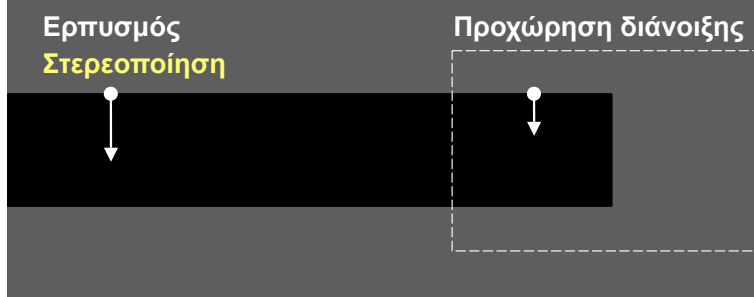
ασήμαντες
συγκλίσεις

57

Επίδραση νερού

- Υδατική πίεση πόρων: Μείωση ορθών ενεργών τάσεων
Μείωση διατμητικής αντοχής
- Χρονική εξέλιξη συγκλίσεων

ενδεχομένως ταυτόχρονα



58

Στερεοποίηση

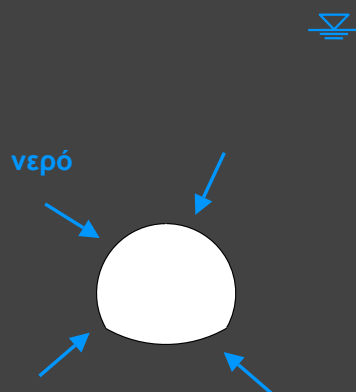
υπόγεια ροή προς
την σήραγγα



μεταβολή:
υδατικών πιέσεων πόρων
ενεργών τάσεων



αύξηση παραμορφώσεων

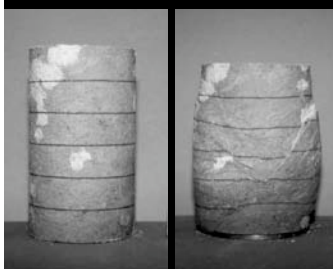


59

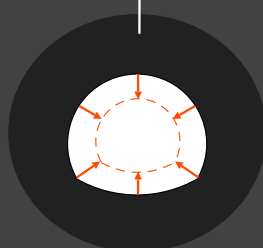
“Στεγνό” έδαφος

πριν την
δοκιμή

μετά την
δοκιμή



πλαστική ζώνη:
αύξηση όγκου
("διασταλτικότητα")



60

Κορεσμένο έδαφος

ταχύτερα ή βραδύτερα
ανάλογα με την
διαπερατότητα

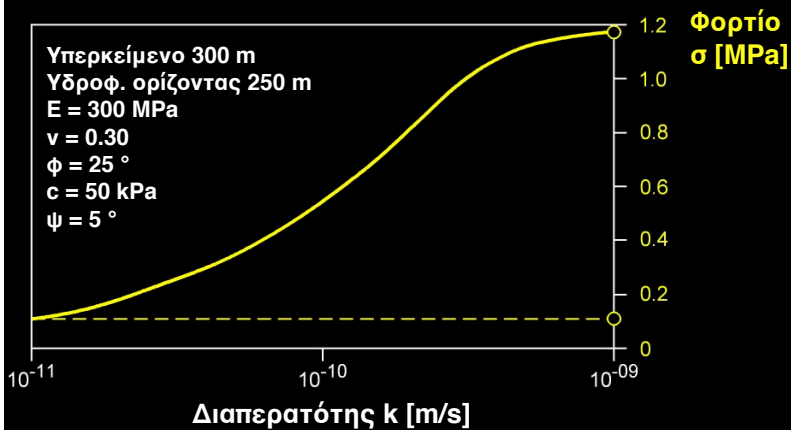
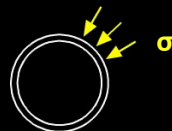
βραχυπρόθεσμα ($t = 0$):
σταθερό ποσοστό υγρασίας,
σταθερός όγκος πετρώματος



61

Επίδραση διαπερατότητας (παράδειγμα)

$t = 15$ μέρες



62

Επίδραση διαπερατότητας (παράδειγμα)

Διάνοιξη με TBM υπο
συνθήκες σύνθλιψης



Μεγάλες συγκλίσεις
στα μετόπισθεν

63

Επίδραση διαπερατότητας (παράδειγμα)

Διάνοιξη με TBM υπο
συνθήκες σύνθλιψης

Καταστροφή
της επένδυσης



64

Επίδραση διαπερατότητας (παράδειγμα)



65

Επίδραση διαπερατότητας (παράδειγμα)

Διάνοιξη με TBM υπο
συνθήκες σύνθλιψης

Ταχύτητα διάνοιξης V

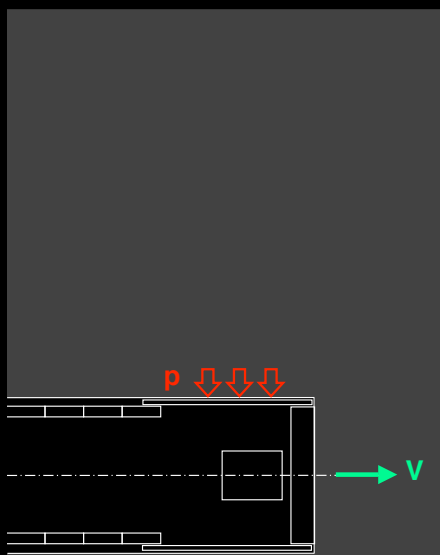


Ταχύτητα συγκλίσεων

Ρεολογικές ιδιότητες

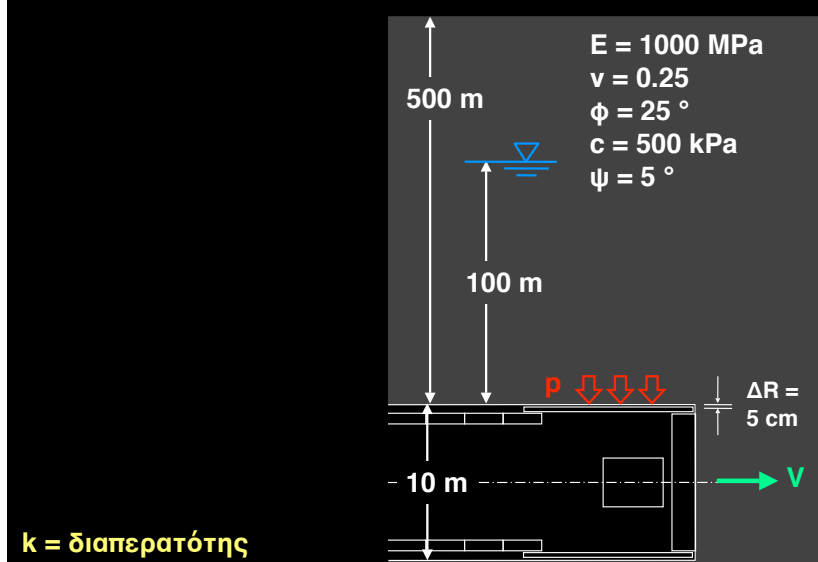
Διαπερατότης k

Μπλοκάρισμα ασπίδας



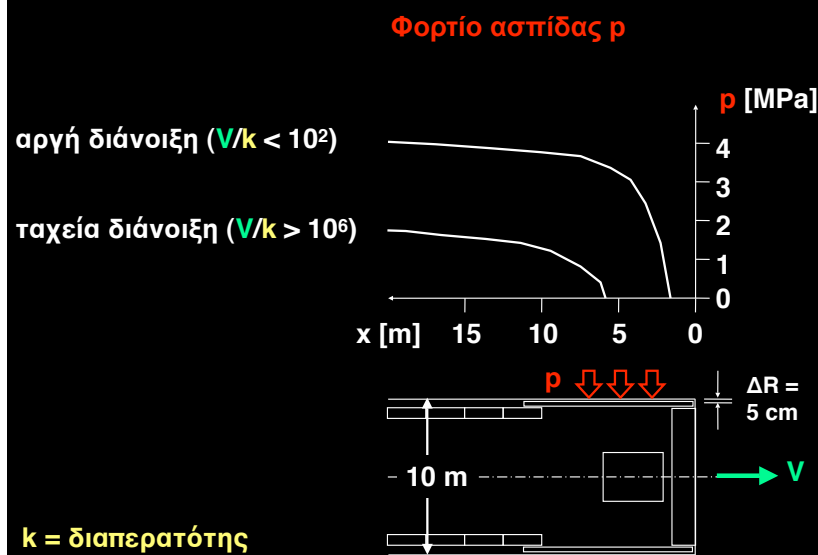
66

Επίδραση διαπερατότητας (παράδειγμα)



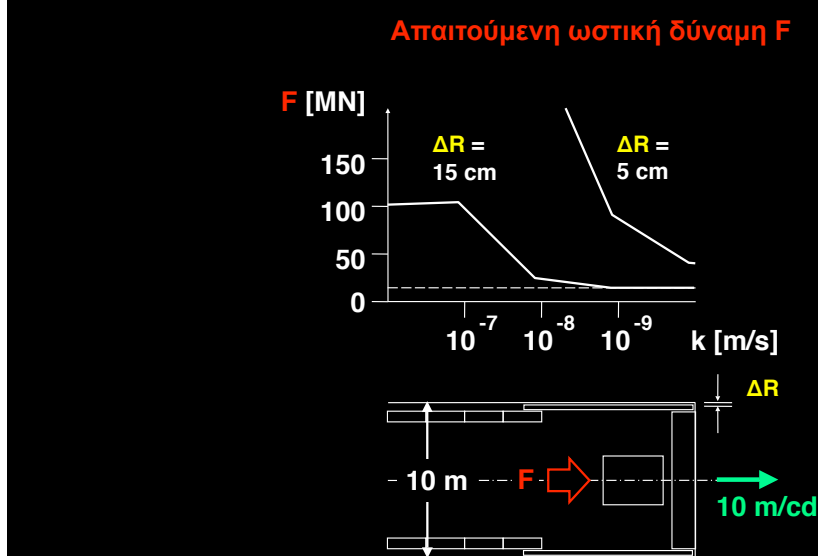
67

Επίδραση διαπερατότητας (παράδειγμα)



68

Επίδραση διαπερατότητας (παράδειγμα)



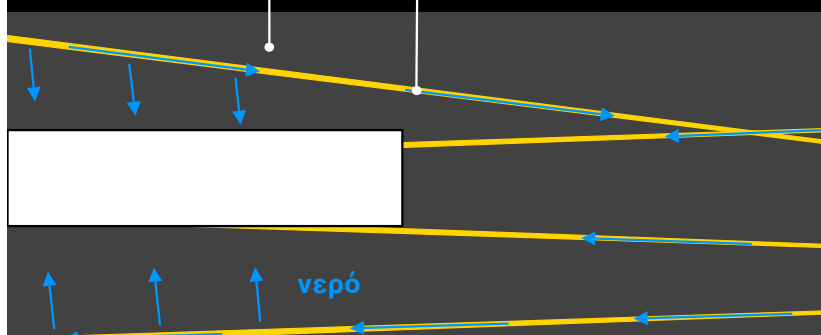
69

Επίδραση διαπερατότητας

Τυχηματικές, λεπτές, διαπερατές ενστρώσεις

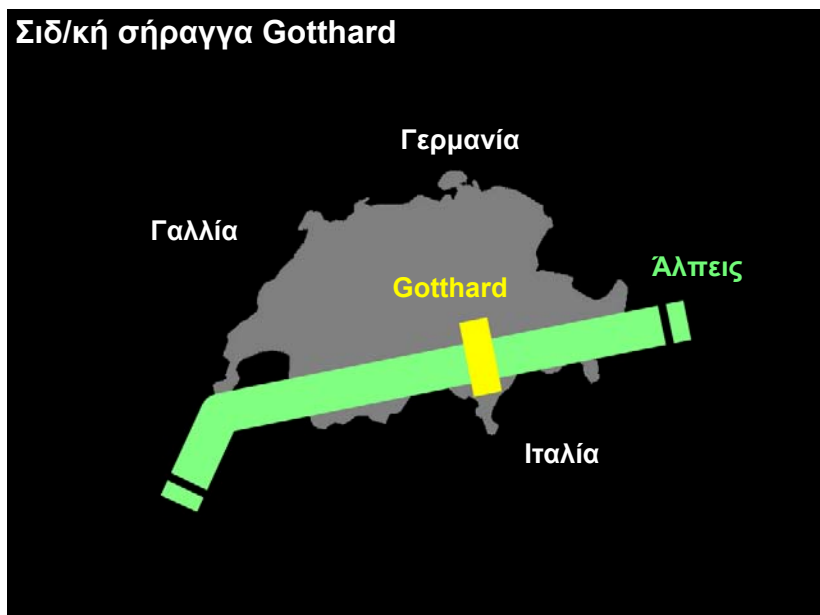
- ⇒ μικρότερες αποστάσεις στράγγισης
- ⇒ επιτάχυνση στερεοποίησης και φαινομένων σύνθλιψης

διαπερατότης: χαμηλή ψηλή



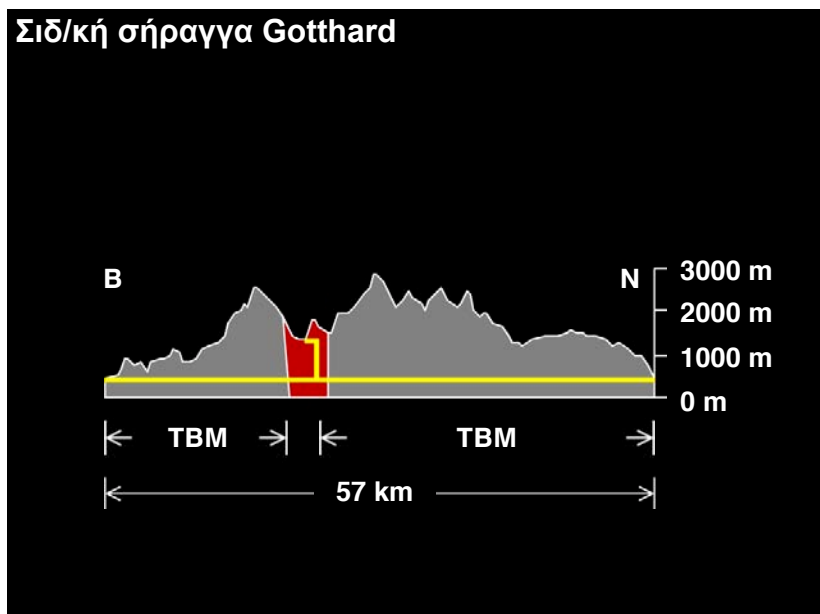
70

Σιδ/κή σήραγγα Gotthard



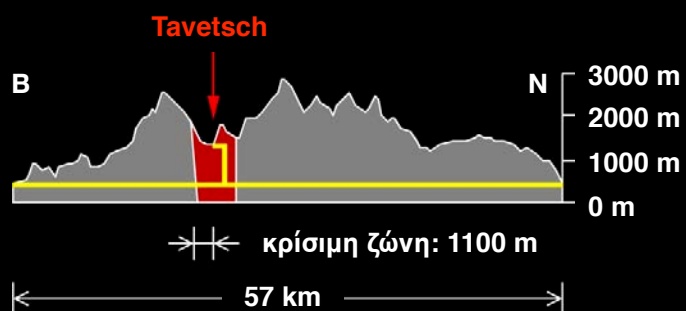
71

Σιδ/κή σήραγγα Gotthard



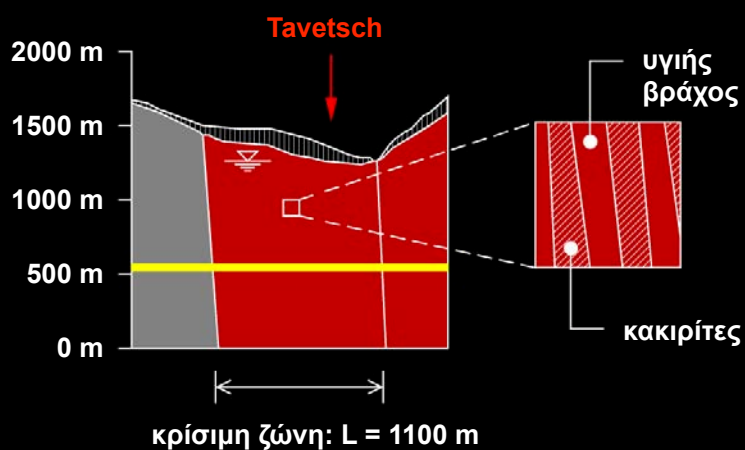
72

Σιδ/κή σήραγγα Gotthard



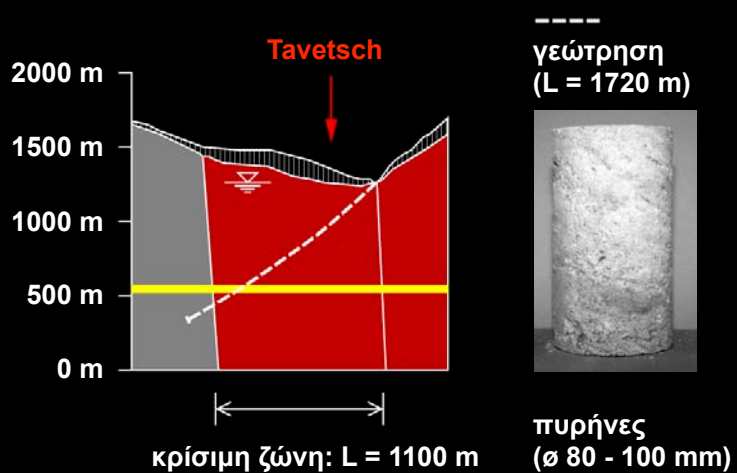
73

Σιδ/κή σήραγγα Gotthard



74

Σιδ/κή σήραγγα Gotthard



75

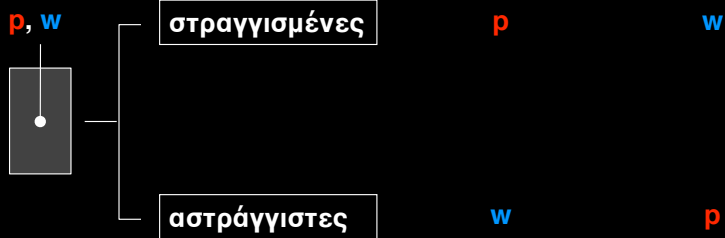
Τριαξονικές δοκιμές θλίψης με έλεγχο

- υδατικής πίεσης πόρων p
- ποσοστού υγρασίας δοκιμίου w

συνθήκες:

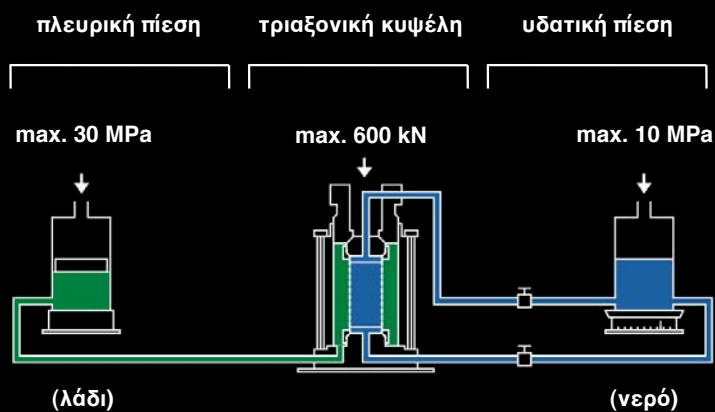
προδιαγραφή:

μέτρηση:



76

Τριαξονικές δοκιμές θλίψης



(Vogelhuber 2005)

77

Τριαξονικές δοκιμές θλίψης

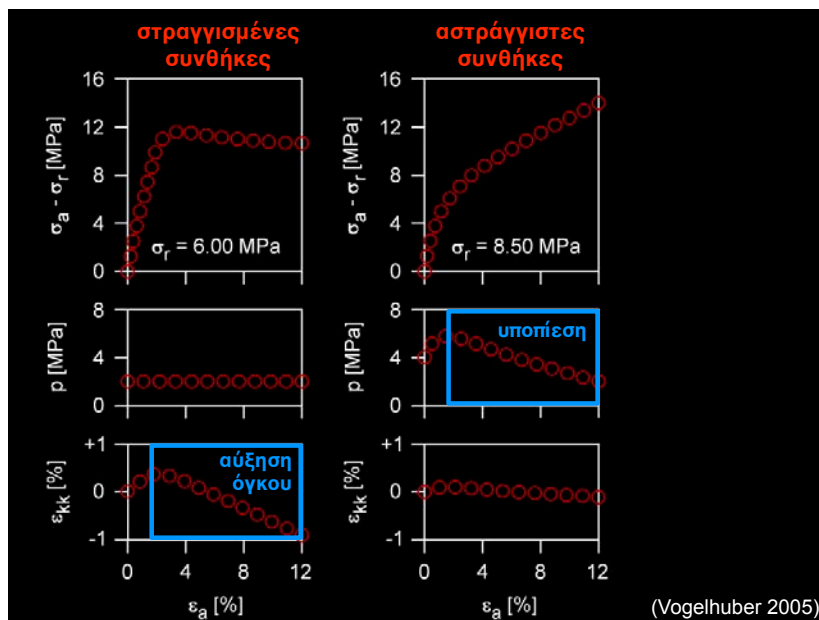


78

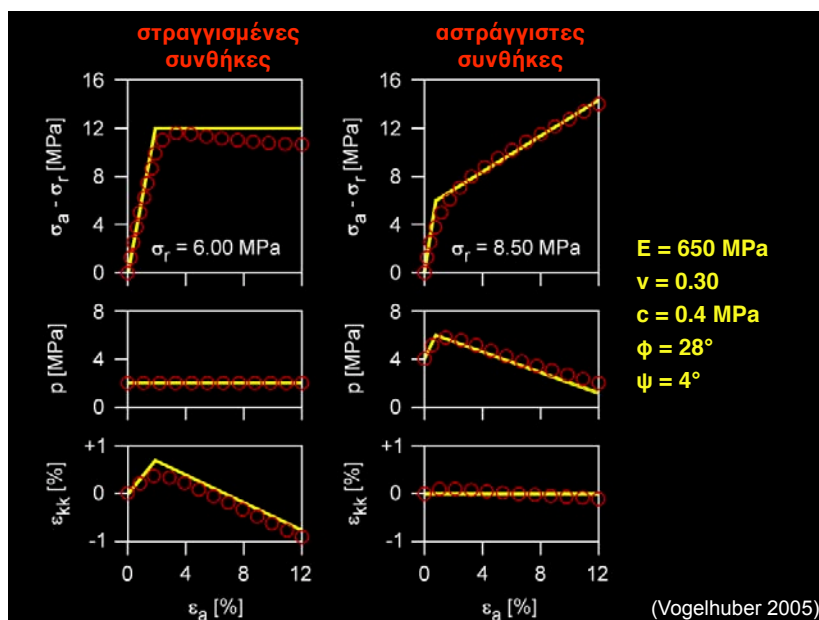
Τριαξονικές δοκιμές θλίψης



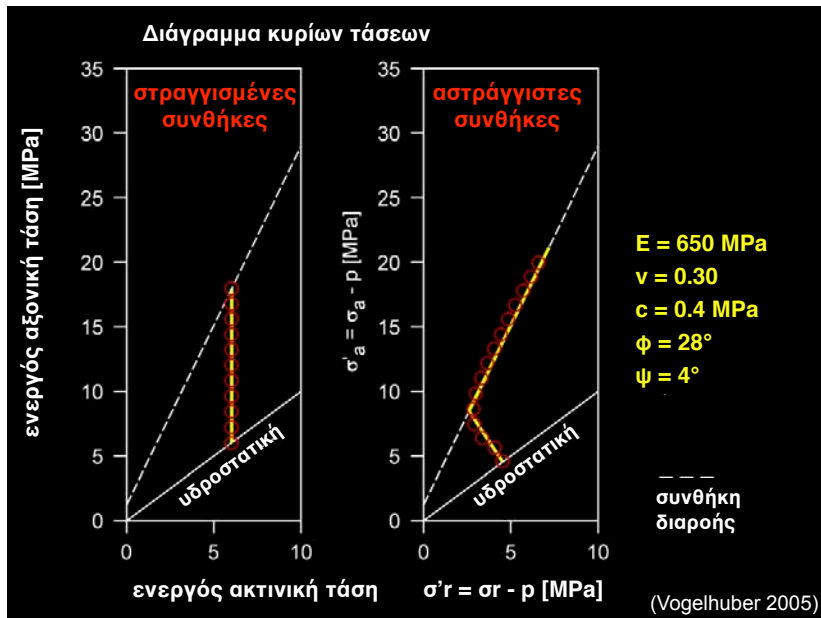
79



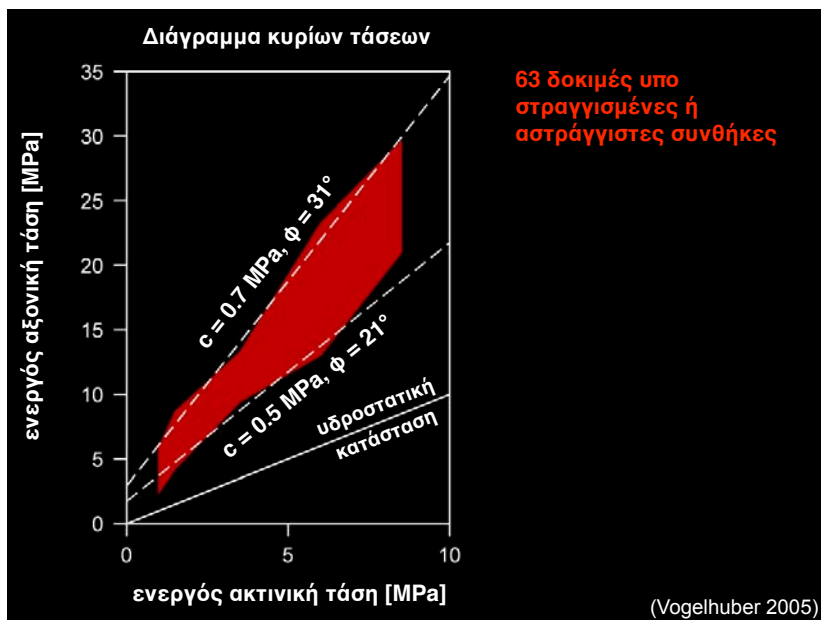
80



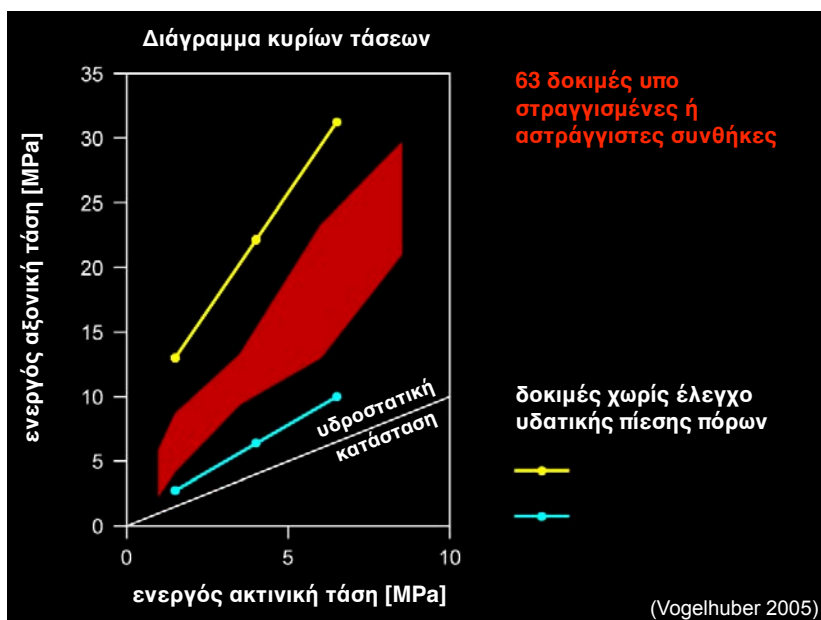
81



82



83



84

Σιδ/κή σήραγγα Gotthard - Επιλογή τυπ. διατομής



85

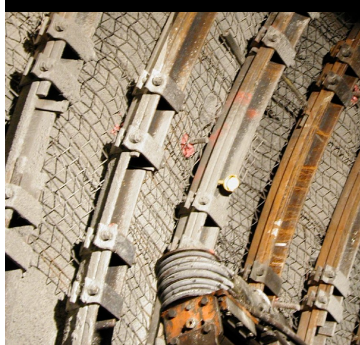
Σιδ/κή σήραγγα Gotthard - Επιλογή τυπ. διατομής

Γεωτρήσεις προπορείας

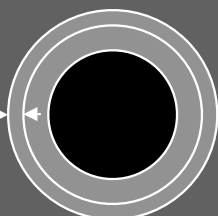
Μακροσκοπική αξιολόγηση πυρήνων

Εργαστηριακές δοκιμές

Μετρήσεις πεδίου



Περιθώριο
σύγκλισης:
max. 70 cm



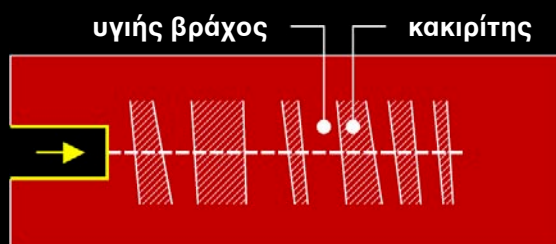
← max.13 m →

86

Σιδ/κή σήραγγα Gotthard - Επιλογή τυπ. διατομής

Γεωτρήσεις προπορείας

Σχηματισμός Tavetsch



← L = 50 - 100 m →

87

Σιδ/κή σήραγγα Gotthard - Επιλογή τυπ. διατομής

Γεωτρήσεις προπορείας



88

Σιδ/κή σήραγγα Gotthard - Επιλογή τυπ. διατομής

Γεωτρήση προπορείας

χαρτογράφηση εκσκαφής



(AlpTransit AG)

89

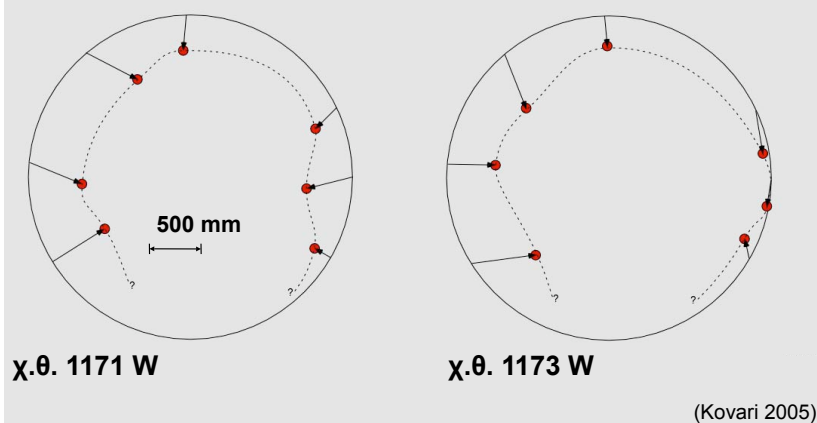
Σιδ/κή σήραγγα Gotthard - Επιλογή τυπ. διατομής



90

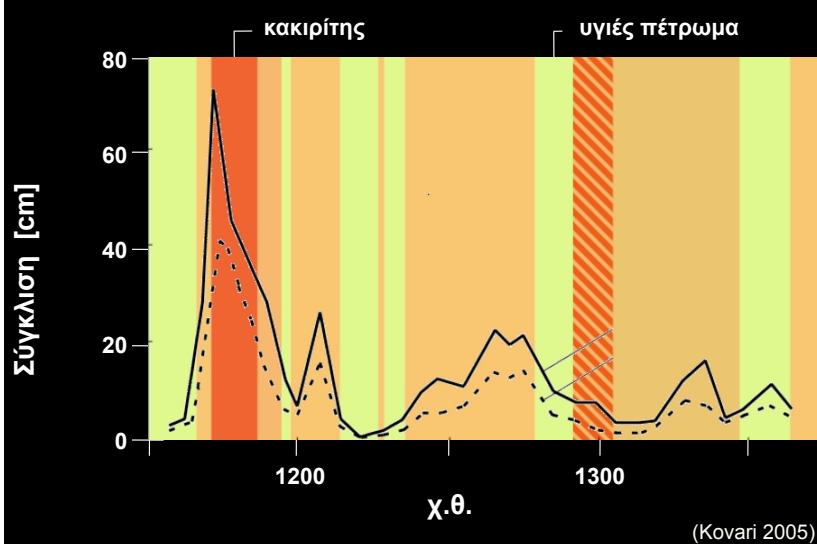
Σιδ/κή σήραγγα Gotthard - Επιλογή τυπ. διατομής

Συγκλίση



91

Σιδ/κή σήραγγα Gotthard - Επιλογή τυπ. διατομής



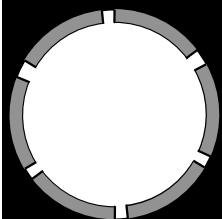
92

Σιδ/κή σήραγγα Gotthard

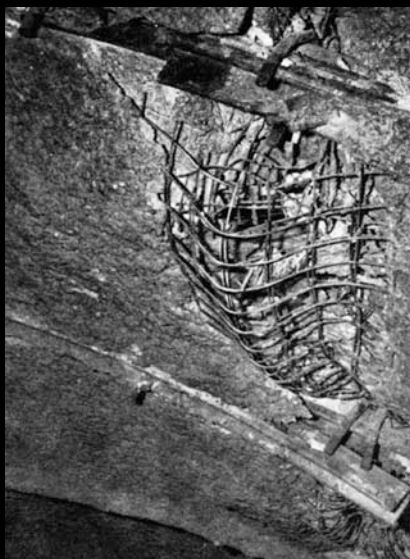


93

Ενδοτική αντιστήριξη

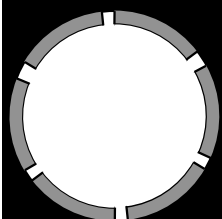


Κέλυφος εκτοξ.
σκυροδέματος
με κενά

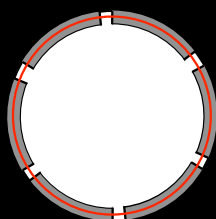


94

Ενδοτική αντιστήριξη



Κέλυφος εκτοξ.
σκυροδέματος
με κενά

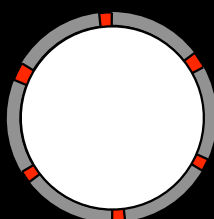


Χαλ. πλαίσια με
ολισθαίνουσες
συνδέσεις



95

Ενδοτική αντιστήριξη



Κέλυφος με
παραμορφώσιμα
στοιχεία

96

Σιδ/κή σήραγγα Lötschberg



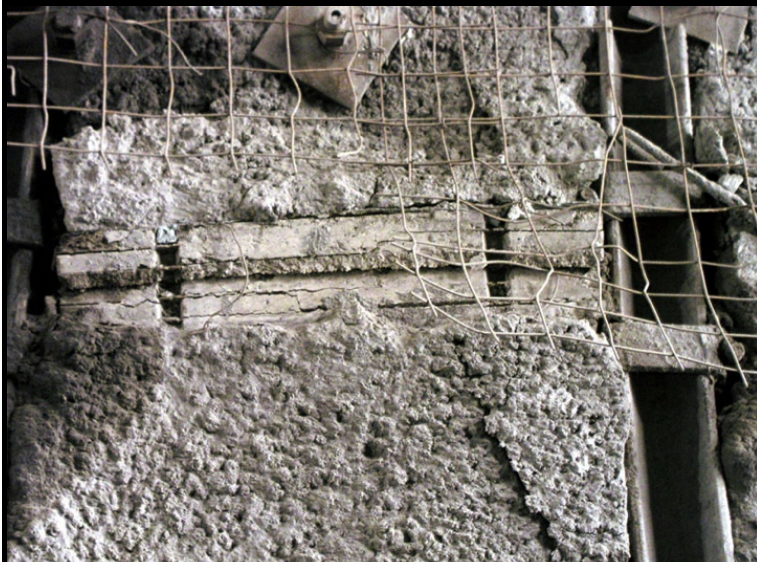
97

Σιδ/κή σήραγγα Lötschberg



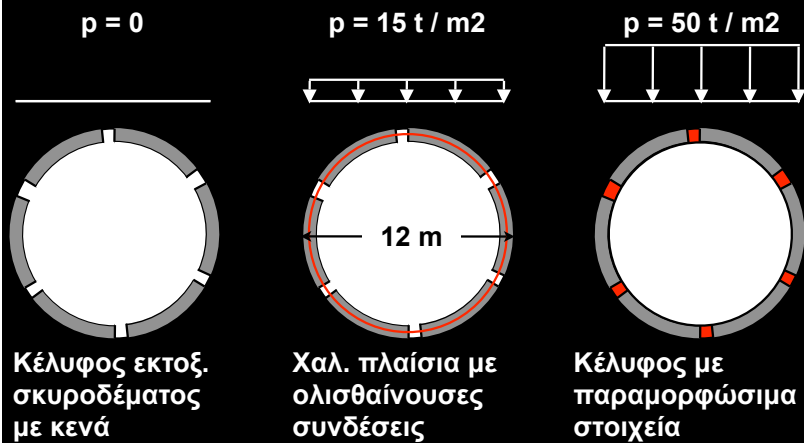
98

Σιδ/κή σήραγγα Lötschberg



99

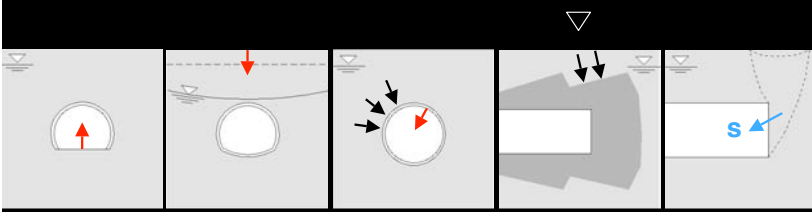
Ενδοτική αντιστήριξη



100

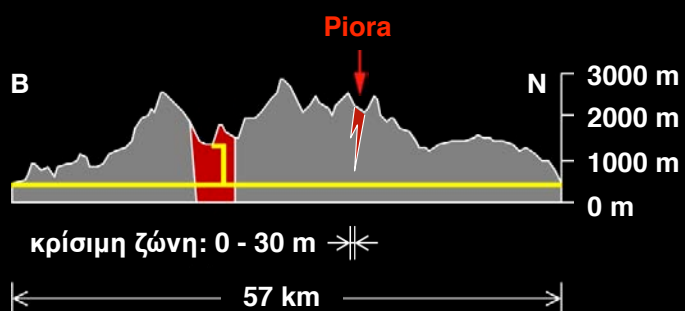
Προβλήματα ευστάθειας και παραμορφώσεων

Ανύψωση πυθμένα σε διογκούμενα πετρώματα
 Καθιζήσεις επιφανείας εδάφους
 Μεγάλες παραμορφώσεις (συνθήκες σύνθλιψης)
 Ρηξιγενείς ζώνες με μεγάλη υδατική πίεση
 Ευστάθεια μετώπου διάνοιξης



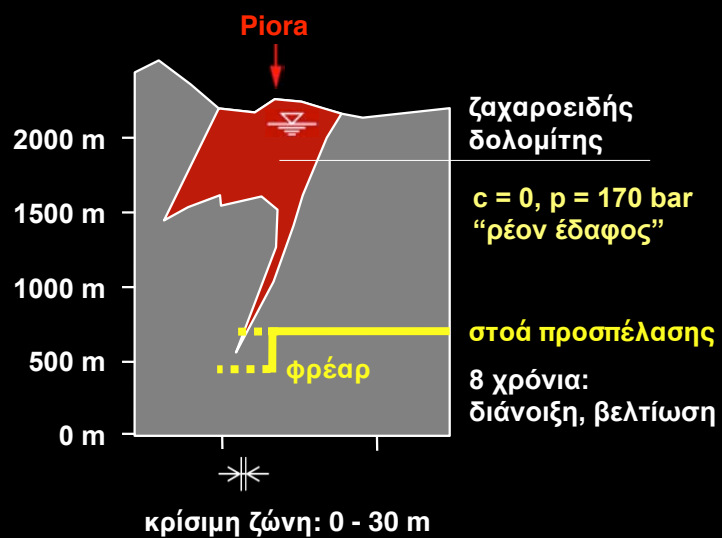
101

Σιδ/κή σήραγγα Gotthard



102

Σιδ/κή σήραγγα Gotthard



103

Σιδ/κή σήραγγα Gotthard



104

Σιδ/κή σήραγγα Gotthard



105

Σιδ/κή σήραγγα Gotthard



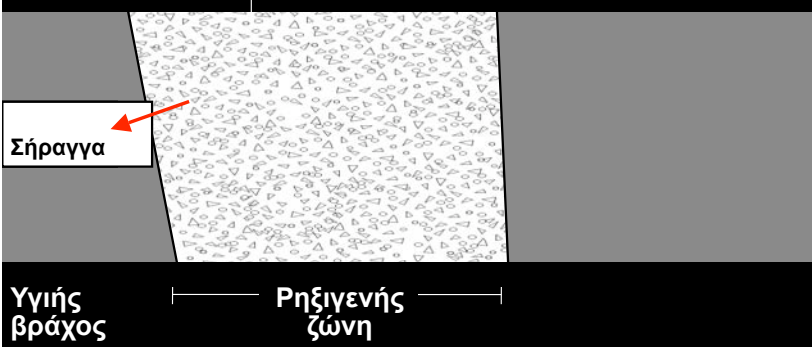
106

“Ρέον έδαφος”

Μεγάλη υδατική πίεση



Εδαφικό υλικό



107

“Ρέον έδαφος”



108

“Ρέον έδαφος”



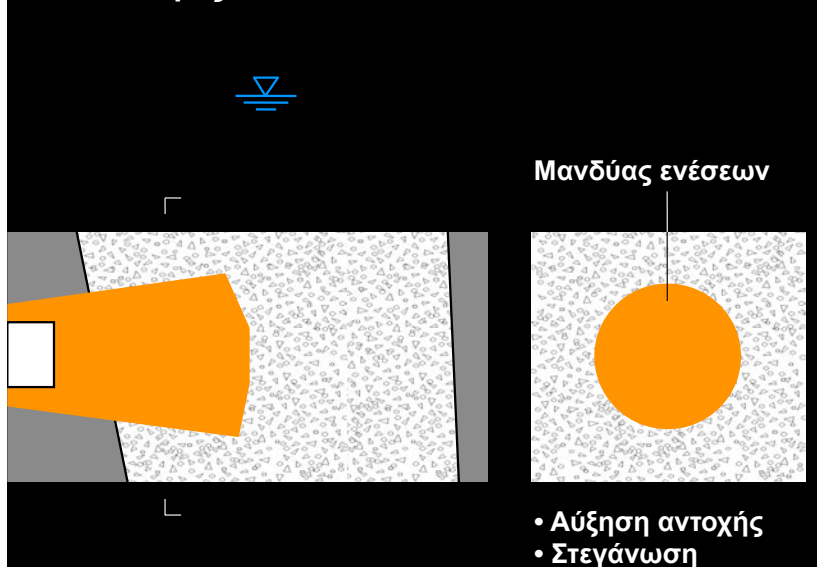
109

“Ρέον έδαφος”



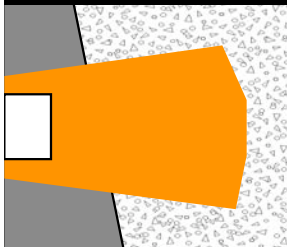
110

“Ρέον έδαφος”



111

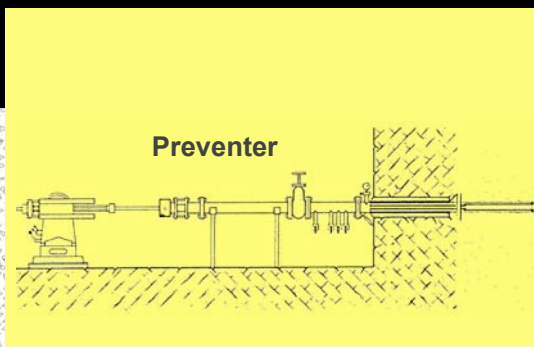
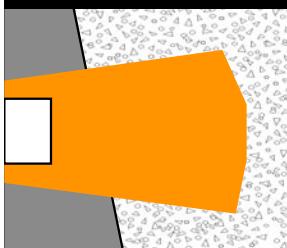
“Ρέον έδαφος”



- Αύξηση αντοχής
- Στεγάνωση

112

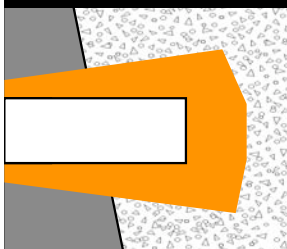
“Ρέον έδαφος”



- Αύξηση αντοχής
- Στεγάνωση

113

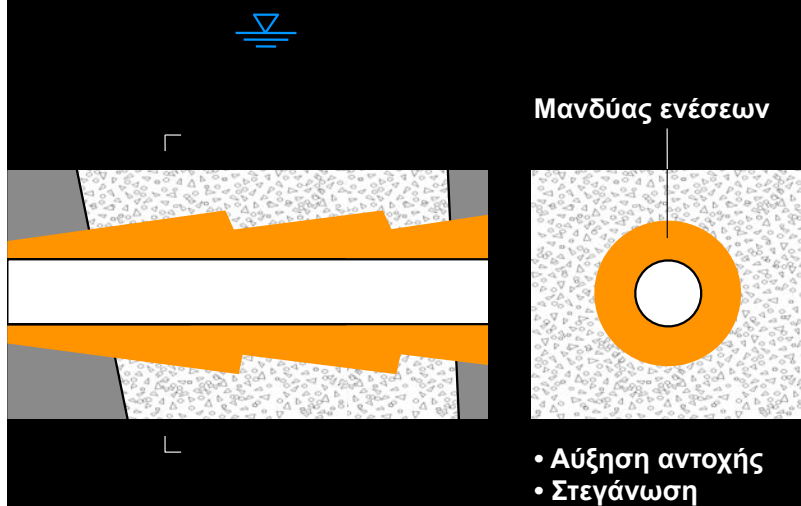
“Ρέον έδαφος”



- Αύξηση αντοχής
- Στεγάνωση

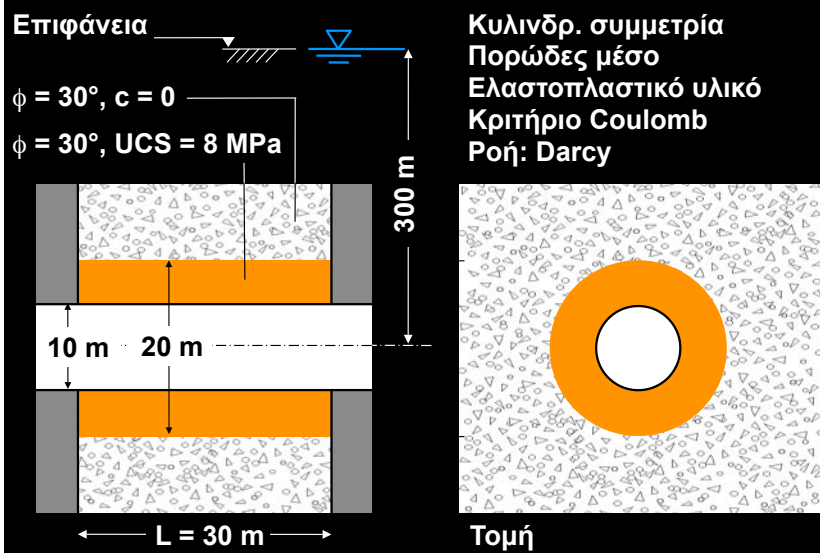
114

“Ρέον έδαφος”



115

Εντατική κατάσταση μανδύα ενέσεων (παράδειγμα)

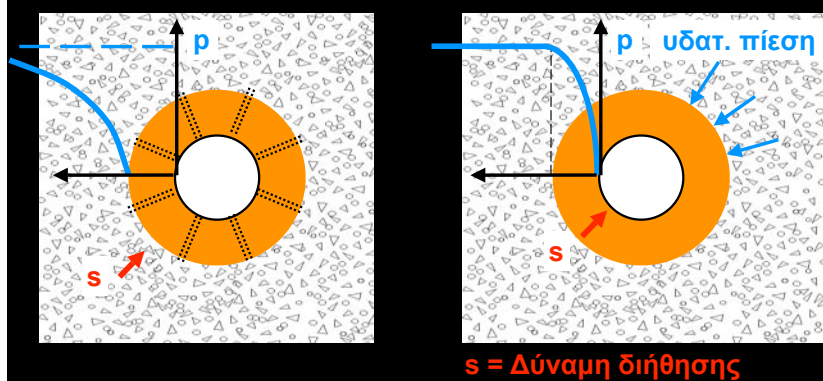


116

Εντατική κατάσταση μανδύα ενέσεων (παράδειγμα)

Μανδύας με αποστράγγιση

Μανδύας στεγανός



$s = \text{Δύναμη διήθησης}$

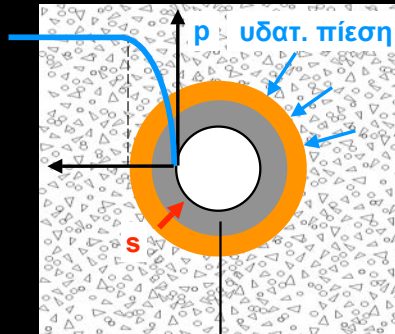
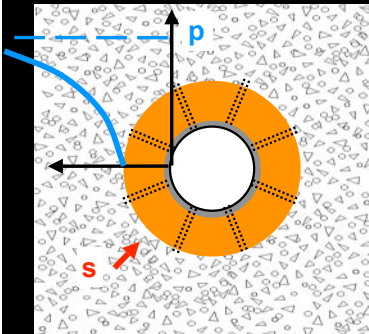
117

Εντατική κατάσταση μανδύα ενέσεων (παράδειγμα)

Μανδύας με αποστράγγιση

Μανδύας στεγανός

- χαλάρωση
- εσωτερική διάβρωση
- απώλεια στεγανότητας



Θραύση

118

Προβλήματα ευστάθειας και παραμορφώσεων

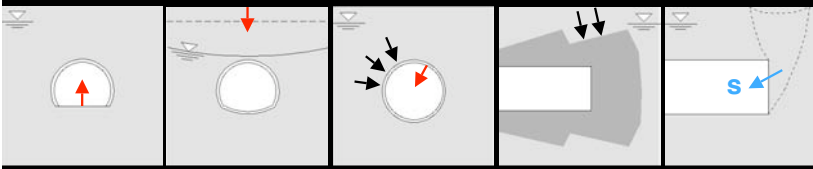
Ανύψωση πυθμένα σε διογκούμενα πετρώματα

Καθιζήσεις επιφανείας εδάφους

Μεγάλες παραμορφώσεις (συνθήκες σύνθλιψης)

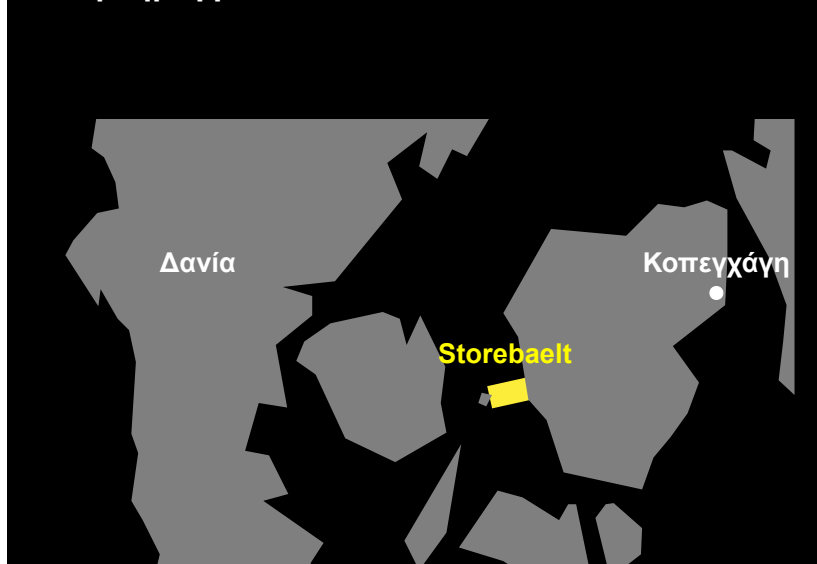
Ρηξιγενείς ζώνες με μεγάλη υδατική πίεση

Ευστάθεια μετώπου διάνοιξης



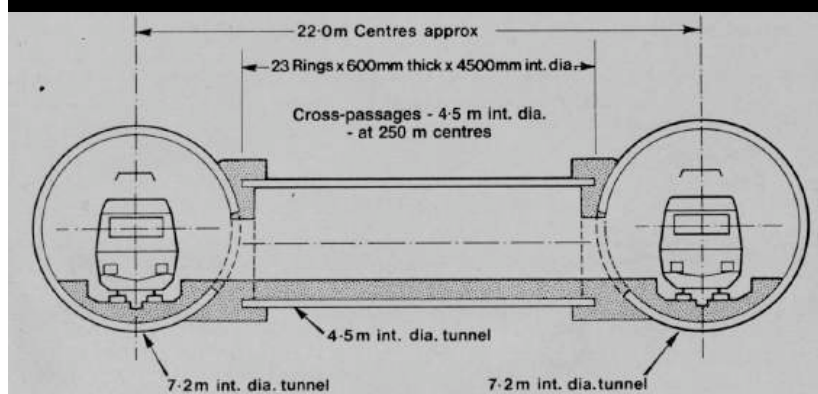
119

Σιδ/κή σήραγγα Storebaelt



120

Σιδ/κή σήραγγα Storebaelt (Τυπική διατομή)



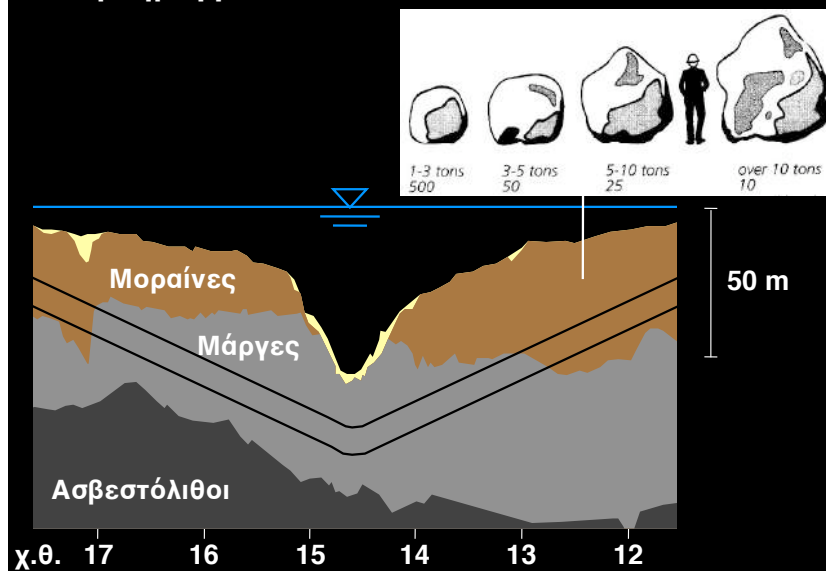
121

Σιδ/κή σήραγγα Storebaelt



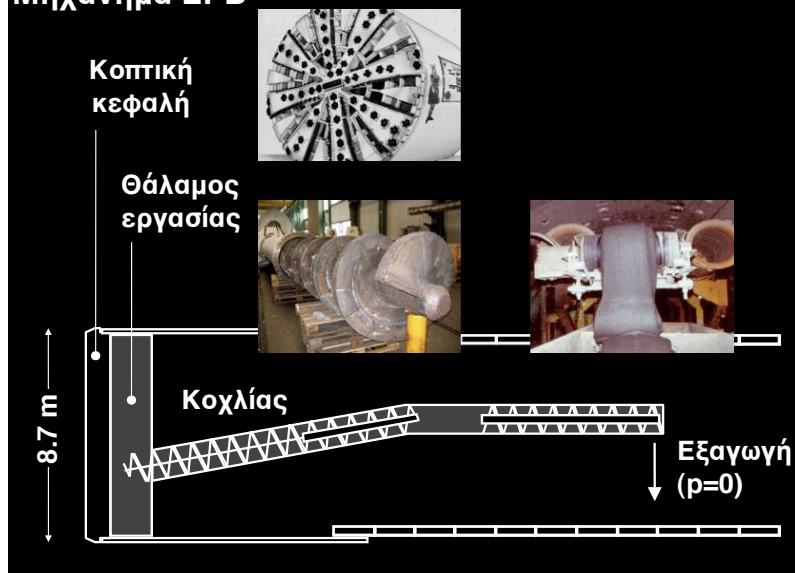
122

Σιδ/κή σήραγγα Storebaelt



123

Μηχάνημα ΕΡΒ

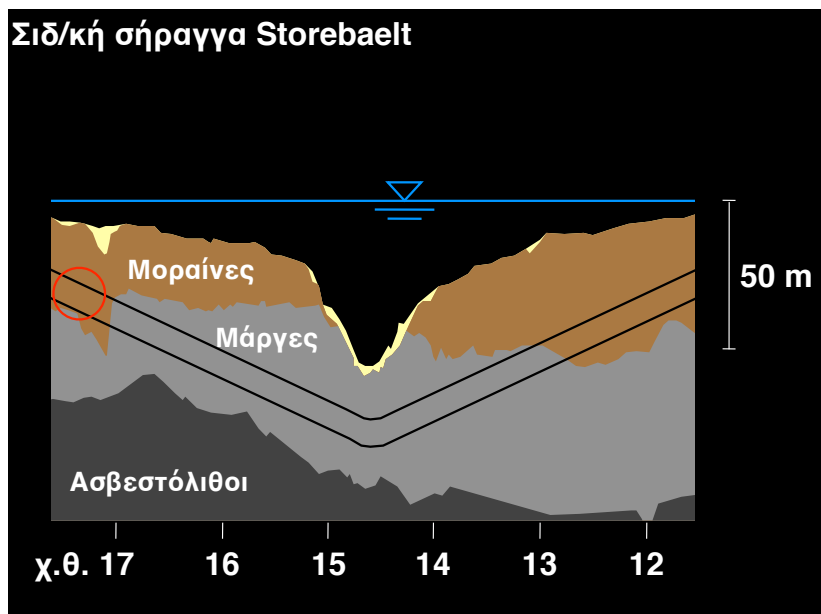


124



125

Σιδ/κή σήραγγα Storebaelt



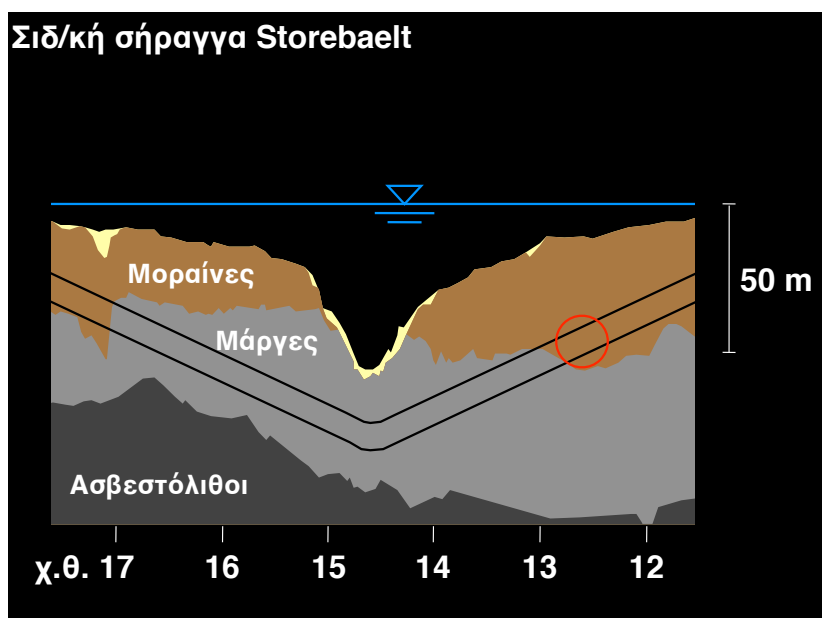
126

Σιδ/κή σήραγγα Storebaelt



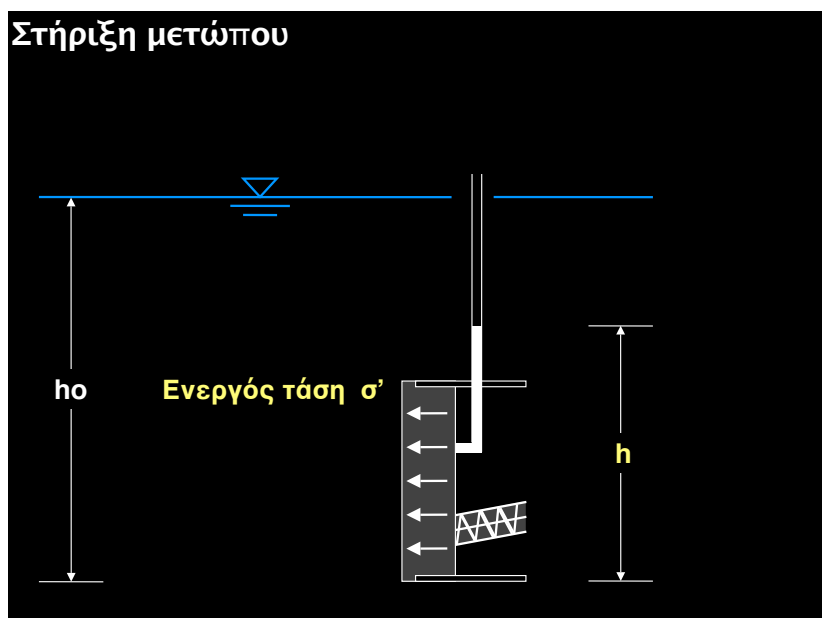
127

Σιδ/κή σήραγγα Storebaelt



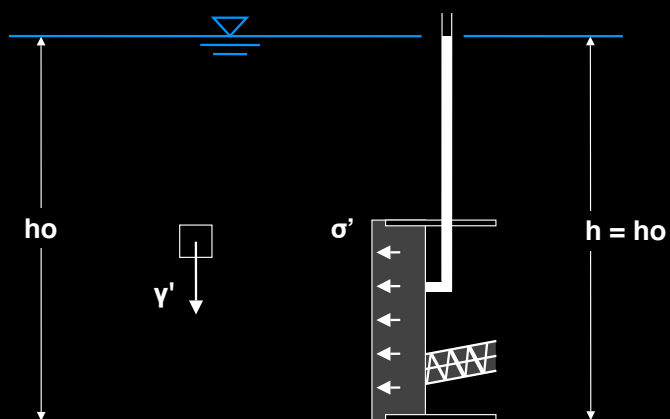
128

Στήριξη μετώπου



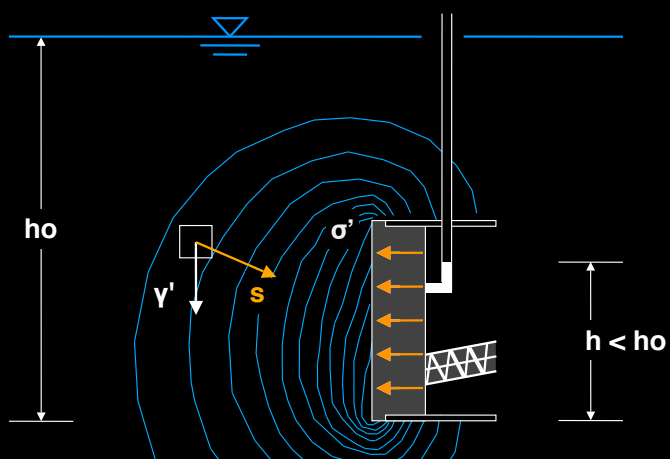
129

Στήριξη μετώπου



130

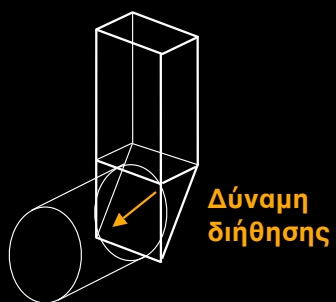
Στήριξη μετώπου



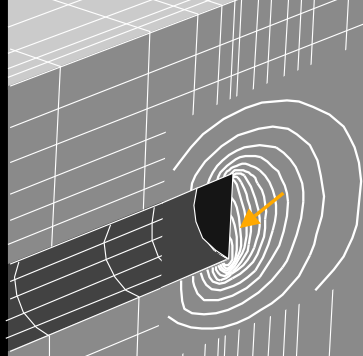
131

Ανάλυση ευστάθειας μετώπου

Μηχανισμός αστοχίας

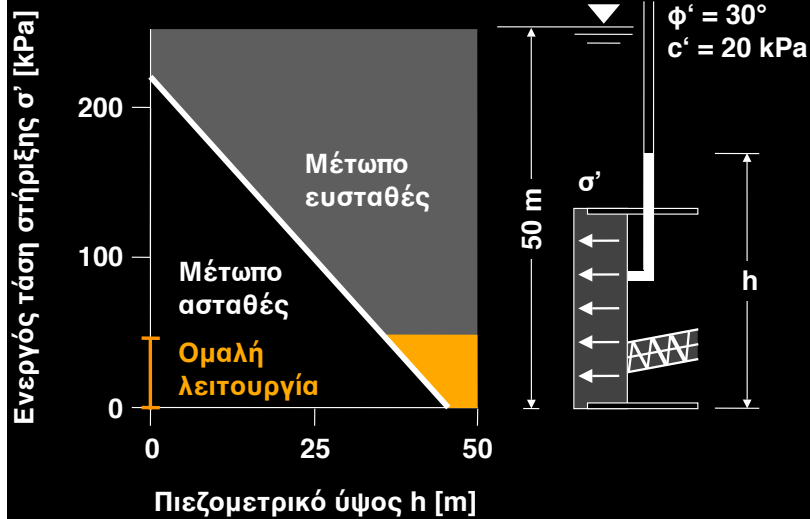


Υπολογισμός δύναμης διήθησης



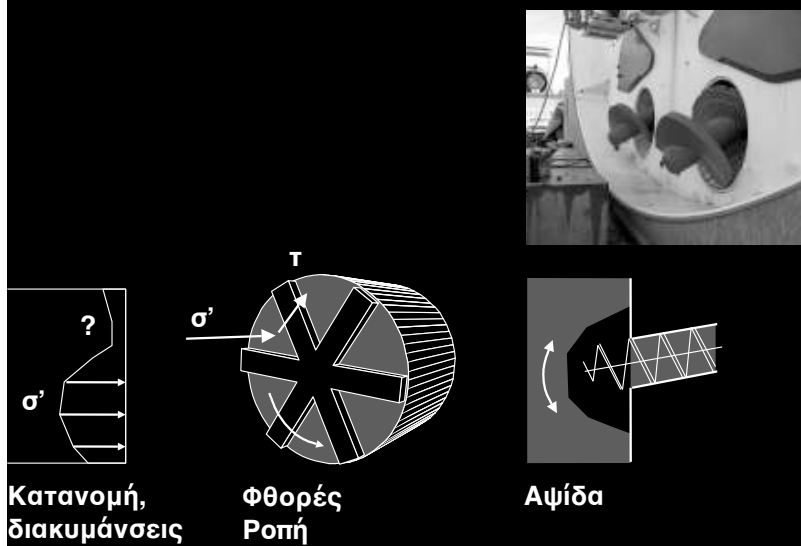
132

Συνθήκη ευστάθειας



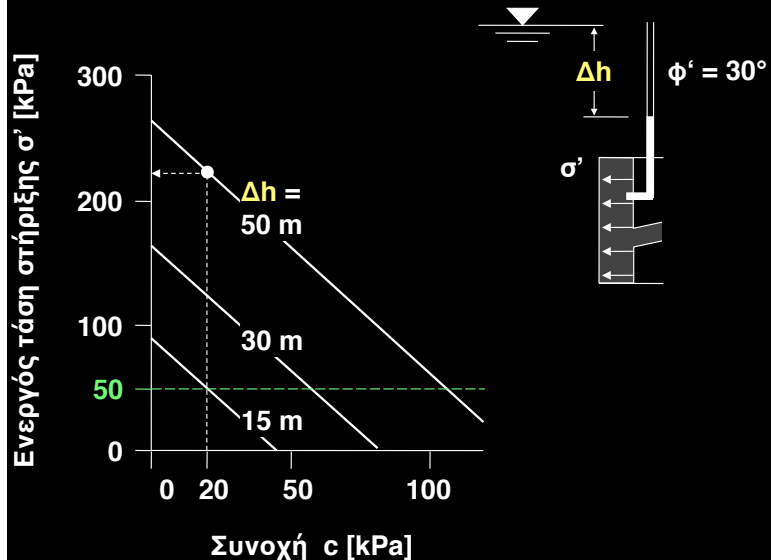
133

Συνέπειες μιας υψηλής ενεργού τάσης σ'



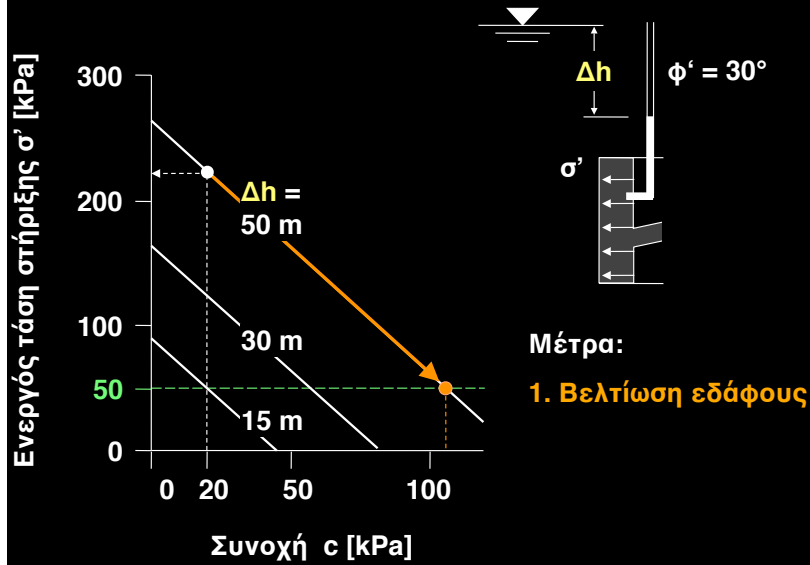
134

Οριακή ισορροπία

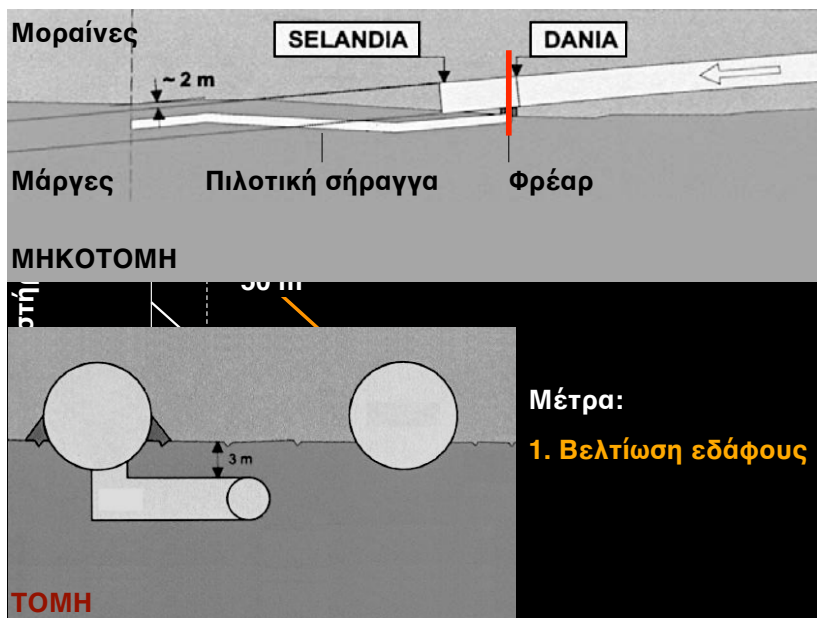


135

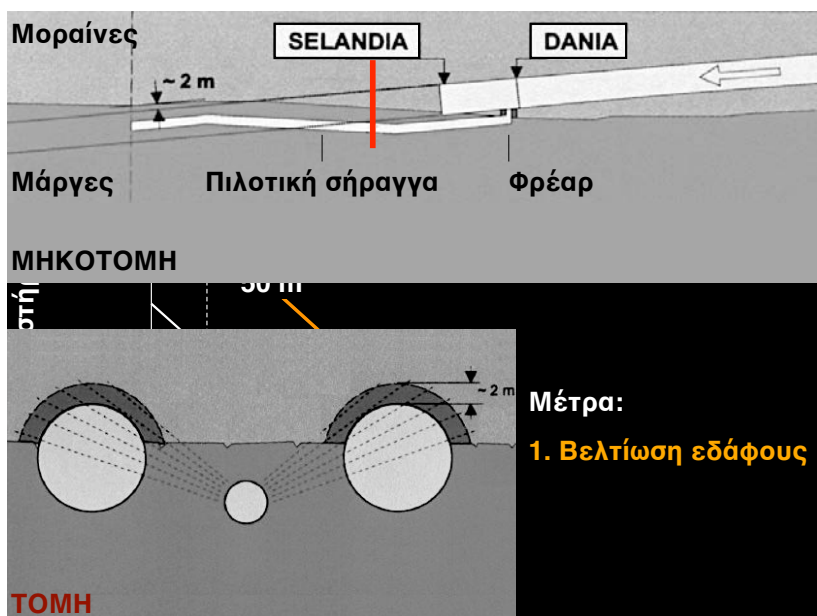
Οριακή ισορροπία



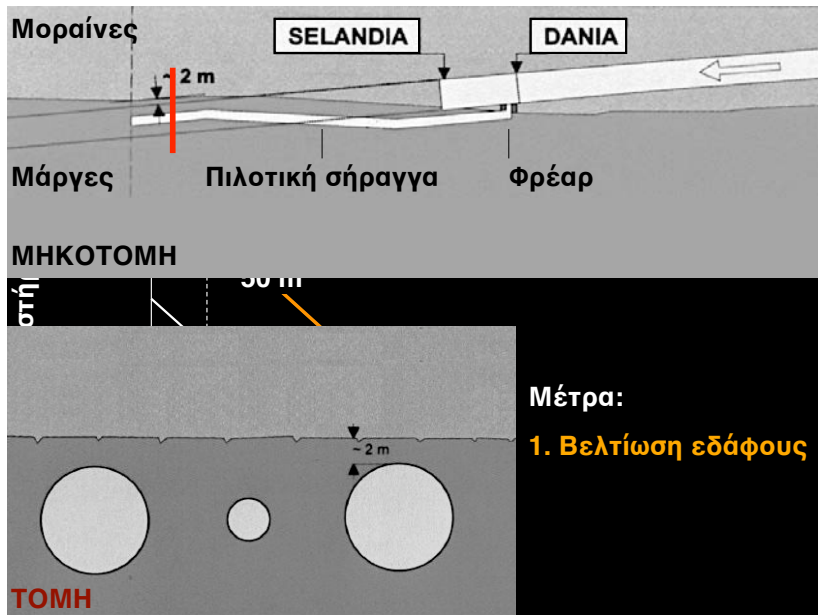
136



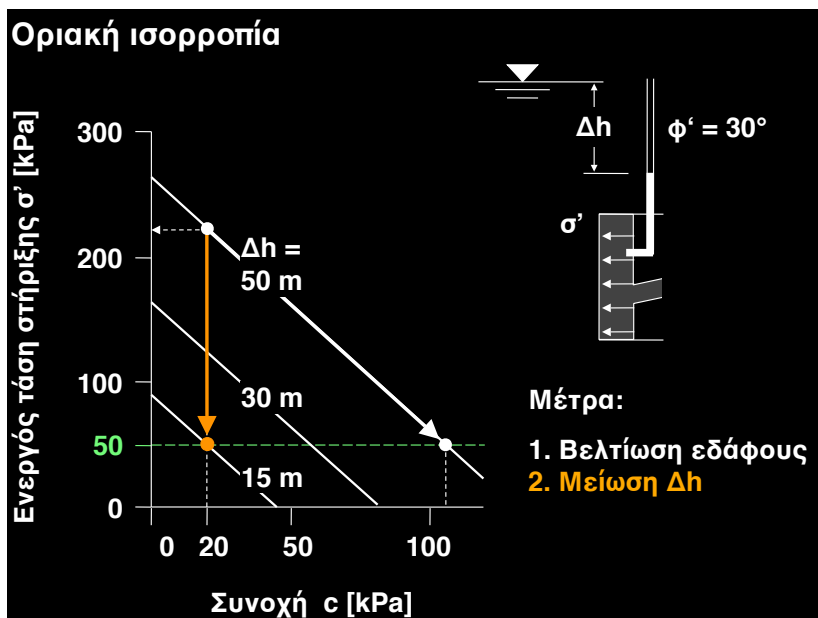
137



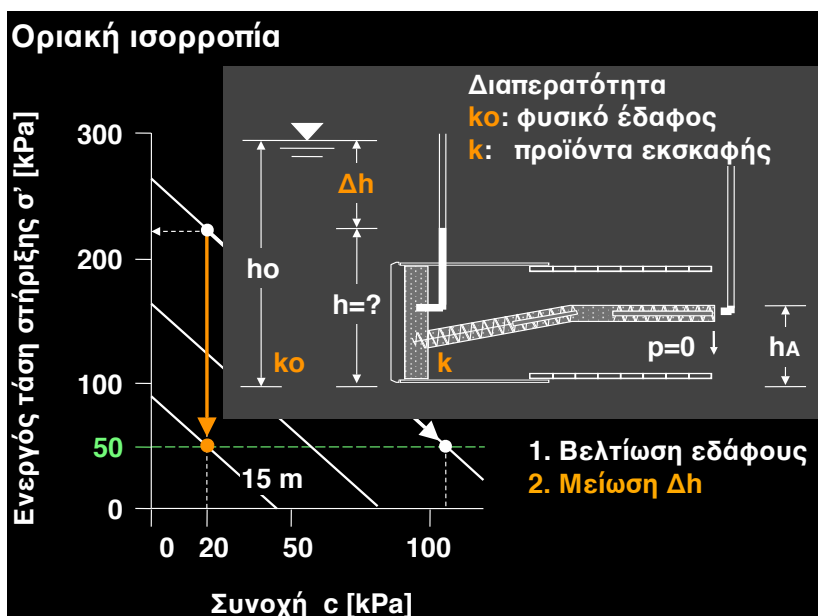
138



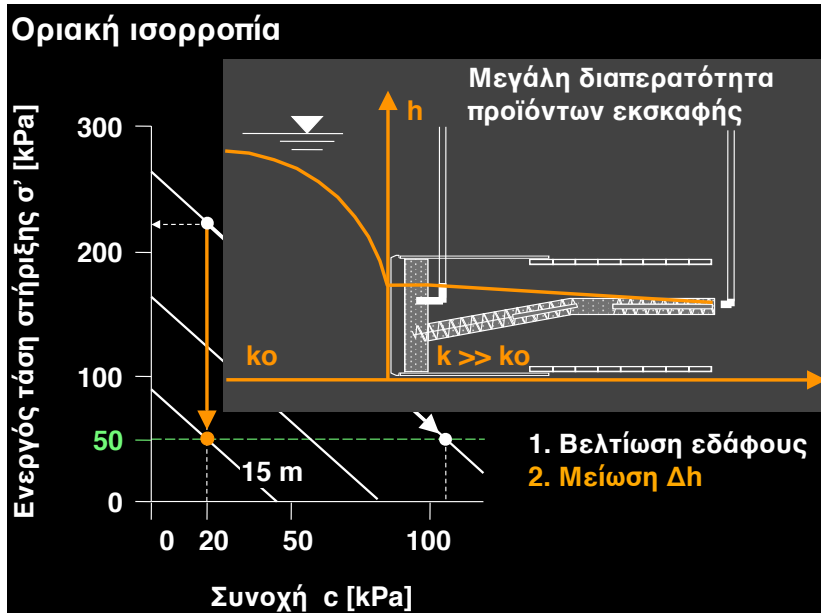
139



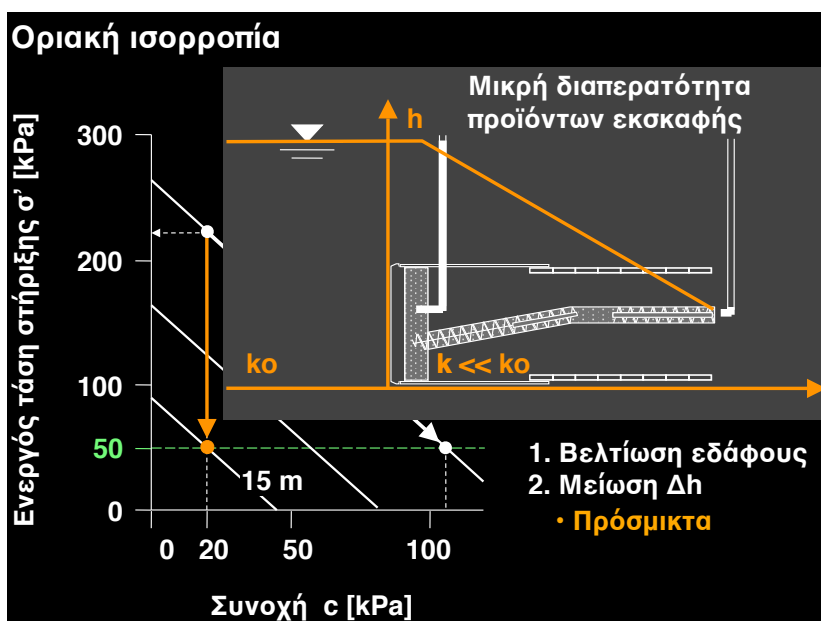
140



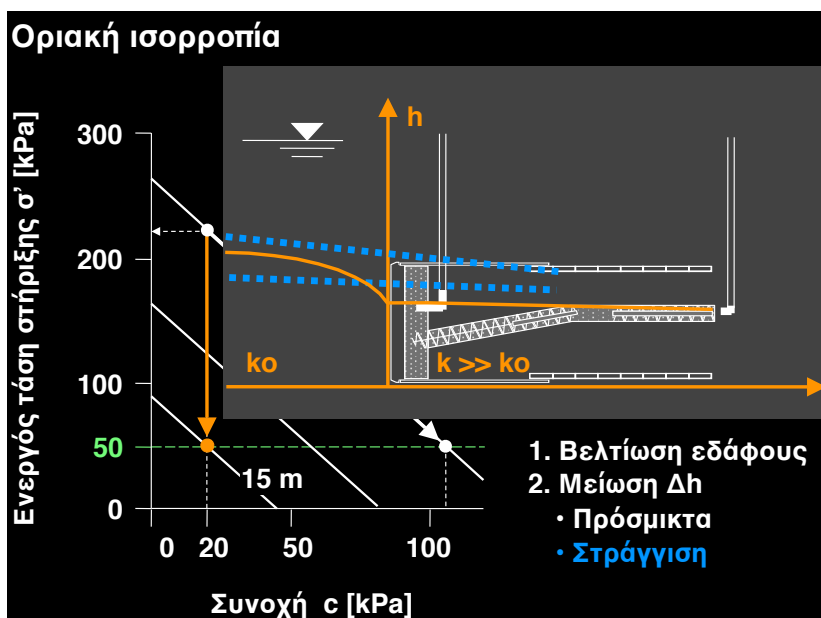
141



142



143



144

