

# Κεφάλαιο 10

## Διόγκωση των Πετρωμάτων

---

### 1 Γενικά.

Σε ορισμένα ιζηματογενή πετρώματα παρατηρείται, μετά από την επαφή τους με το νερό, παραμόρφωση διόγκωσης. Η παραμόρφωση αυτή είναι μέρος της συνολικής παραμόρφωσης του πετρώματος, που είναι το άθροισμα και άλλων επιμέρους παραμορφώσεων, όπως π.χ. ελαστικών, πλαστικών, ερπυσμού, κ.λ.π. Τα πετρώματα αυτά εφόσον υποβληθούν σε μεταβολές της υγρασίας, υπό ορισμένες συνθήκες δύνανται να χαλαρώσουν σημαντικά και να αποσυντεθούν (Seedsman, 1993). Στο παρελθόν οι παραμορφώσεις διόγκωσης οδήγησαν συχνά σήραγγες σε βαρύτατες αστοχίες κατά την κατασκευή τους, κάτι που έδωσε την αφορμή για βαθύτερη διερεύνηση του φαινομένου (π.χ. Einstein, Bischoff and Hoffmann, 1972; Muller, Krause and Wurm, 1975).

Η διόγκωση του πετρώματος είναι μία χρονικά εξαρτημένη αύξηση του όγκου του που εμπεριέχει φυσικοχημικές αντιδράσεις με νερό. Επομένως η διόγκωση παρουσιάζεται σε πετρώματα των οποίων τα ορυκτά ευνοούν αυτή την αντίδραση. Η διόγκωση της βραχομάζας συμβαίνει είτε λόγω διόγκωσης του άρρηκτου πετρώματος είτε λόγω διόγκωσης του υλικού πλήρωσης των ασυνεχειών είτε λόγω συνδυασμού των παραπάνω. Η παραμόρφωση διόγκωσης εξαρτάται επίσης από το ασκούμενο εντατικό πεδίο και από την αποτόνωσή του.

Ο ρυθμός και η διάρκεια ολοκλήρωσης της διόγκωσης κυμαίνονται σε ένα ευρύ πεδίο. Η ανύψωση της περιοχής του ανάστροφου τόξου μιας σήραγγας μπορεί π.χ. να έχει ρυθμό από μη δυνάμενο να γίνει αντιληπτός μέχρι και 1m/μήνα ή και περισσότερο. Αντίστοιχα, η διάρκεια εξέλιξης της διόγκωσης μπορεί να διαρκεί π.χ. από μερικές μέρες μέχρι και περισσότερο από έναν αιώνα. Παρακάτω δίνεται (ISRM, 1983) μια διάκριση των υπεισερχόμενων μηχανισμών.

#### 1.1 Βασικοί φυσικοχημικοί μηχανισμοί με συμμετοχή νερού

Οι σημαντικότεροι φυσικοχημικοί μηχανισμοί στους οποίους συμμετέχει το νερό είναι:

*Αργιλικά ορυκτά.* Η διόγκωση είναι αποτέλεσμα της προσρόφησης νερού. Η πίεση και η παραμόρφωση διόγκωσης εξαρτώνται από το είδος του αργιλικού ορυκτού. Το μέγεθός τους εξαρτάται από τη δυνατότητα προσρόφησης νερού κύρια στο διαστρωματικό χώρο των διογκούμενων αργιλικών ορυκτών και λιγότερο στην εξωτερική τους επιφάνεια.

*Ανυδρίτης-Γύψος.* Η ενυδάτωση του ανυδρίτη ( $\text{CaSO}_4 + 2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) παράγει γύψο με μέγιστη αύξηση του όγκου περίπου 60%.

*Σιδηροπυρίτης, Μαρκασίτης ( $\text{FeS}_2$ ).* Η οξείδωση παράγει θειικά τα οποία, εφόσον στο περιβάλλον υπάρχουν ανθρακικά ορυκτά, δύνανται να αντιδράσουν με τον ασβεστίτη και εν συνεχεία να κατακρημνισθούν και να παράγουν γύψο. Η οξείδωση του σιδηροπυρίτη, η οποία δεν απαιτεί νερό, προκαλεί διόγκωση. Η αντίδραση με τον ασβεστίτη και η κατακρήμνιση της γύψου προκαλούν δευτερογενή διόγκωση, η οποία εν τούτοις μπορεί να συμβεί μόνον εφόσον εξατμίζεται το νερό.

## 1.2 Άλλοι φυσικοχημικοί μηχανισμοί με συμμετοχή νερού

Αύξηση του όγκου προκύπτει λόγω του παγετού και έμμεσα λόγω της εξασθένησης της σύνδεσης των σωματιδίων λόγω διαγένεσης. Η πήξη του νερού, αν και οδηγεί σε σημαντική χρονικά εξαρτώμενη αύξηση του όγκου, δεν συμπεριλαμβάνεται από μόνη της στους μηχανισμούς διόγκωσης. Όμως, ειδικά στα πετρώματα, ένα σημαντικό τμήμα του μηχανισμού αυτού εμπεριέχει θραύση λόγω παγετού ή επέκταση υπαρχουσών ρωγματώσεων σε κύκλους πήξης-τήξης. Είναι επομένως ένας μηχανισμός που προκαλεί τη θραύση της διαγενετικής σύνδεσης των κόκκων. Την εξασθένηση ή κατάρρευση της σύνδεσης προκαλούν και άλλοι μηχανισμοί, όπως π.χ. η διάλυση του ανθρακικού ασβεστίου. Αυτή η εξασθένηση της σύνδεσης των αργιλικών σωματιδίων μειώνει την παρεμπόδιση διόγκωσής τους.

## 1.3 Έκλυση αερίων σε ασθενώς συνδεδεμένα υλικά.

Δύναται να προκαλέσει αύξηση του όγκου.

## 1.4 Αποτόνωση του εντατικού πεδίου

Οι φυσικοχημικές αντιδράσεις λαμβάνουν χώρα συνήθως σε συνδυασμό με την αποτόνωση του εντατικού πεδίου. Συγκεκριμένα:

Η αποτόνωση δύναται να προκαλέσει αρνητικές πιέσεις πόρων οι οποίες σε συνέχεια δύνανται να οδηγήσουν σε ροή νερού. Εφόσον συμβεί τέτοια ροή νερού, θα προκληθεί αύξηση του όγκου οφειλόμενη σε έναν ή περισσότερους από τους φυσικοχημικούς μηχανισμούς.

Η αποτόνωση δύναται να προκαλέσει ρωγμές οι οποίες σε συνέχεια διευκολύνουν τη ροή του νερού. Μία τέτοια ροή θα προκαλέσει αύξηση του όγκου οφειλόμενη σε έναν ή περισσότερους από τους φυσικοχημικούς μηχανισμούς.

Η αποτόνωση δύναται να προκαλέσει ρήξη της σύνδεσης των κόκκων, η οποία έχει ως αποτέλεσμα τη μείωση της παρεμπόδισης στη διόγκωση με έναν ή περισσότερους από τους φυσικοχημικούς μηχανισμούς.

## 1.5 Έμμεσες επιδράσεις

Διόγκωση σε συνδυασμό με φυσικοχημικές αντιδράσεις προκαλείται από έμμεσες επιδράσεις όπως:

*Διάτμηση και εφελκυσμός.* Διαρρηγνύουν συνήθως τη σύνδεση των κόκκων και προκαλούν ρωγματώσεις που αυξάνουν την επιφάνεια που εκτίθεται στο νερό. Με αυτό τον τρόπο διευκολύνεται η διόγκωση με έναν ή περισσότερους από τους φυσικοχημικούς μηχανισμούς.

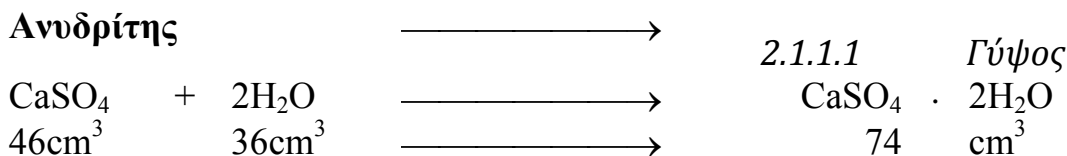
*Αποσάθρωση και εξαλλοίωση.* Από μη διογκούμενα ορυκτά δύναται δημιουργούνται ορυκτά επιδεικτικά σε διόγκωση. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αποτελούν τα γεωυλικά πλήρωσης των ρηγμάτων και των διακλάσεων.

## 2 Μετατροπή του ανυδρίτη σε γύψο

### 2.1 Φυσικοχημική αντίδραση

Το θειικό ασβέστιο βρίσκεται στη φύση σε δύο μορφές, ως ανυδρίτης και ως γύψος. Η ευστάθεια των δύο μορφών εξαρτάται από τη θερμοκρασία, το διαθέσιμο νερό και την πίεση. Για μία πίεση 100kPa, πάνω από τους 58°C υπάρχει μόνον ανυδρίτης και κάτω από τους 38 °C μόνον γύψος. Μεταξύ 38 και 58 °C μπορούν να συνυπάρχουν και οι

δύο μορφές. Επίσης ανυδρίτης δύναται να υπάρχει ως μετασταθής παραλλαγή σε θερμοκρασία κάτω των 38 °C, εφόσον δεν διατίθεται το απαιτούμενο νερό για την μετατροπή σε γύψο. Η φυσικοχημική αντίδραση και οι ειδικοί όγκοι των συμμετεχουσών φάσεων κατά την μετατροπή του ανυδρίτη σε γύψο δίνονται στο Σχήμα 1:



Σχήμα 1. Μετατροπή του ανυδρίτη σε γύψο

## 2.2 Μεταβολή του όγκου

Ο κρυσταλλικός γύψος έχει μεγαλύτερο όγκο από τον ανυδρίτη. Η ποσοστιαία αύξηση του όγκου δίνεται από την σχέση:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{74 - 46}{46} \cdot 100\% = 61\%$$

Αλλά, ο κρυσταλλικός γύψος έχει μικρότερο όγκο από τον ανυδρίτη μαζί με τα δύο μόρια του νερού. Η ποσοστιαία μείωση του όγκου δίνεται από την σχέση:

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{74 - 46 - 36}{74} \cdot 100\% = -11\%$$

Στη φύση διακρίνονται δύο ακραίες περιπτώσεις, ήτοι ένα κλειστό και ένα ανοικτό σύστημα ανυδρίτη-νερού. Σε ένα κλειστό χώρο που περιέχει τον ανυδρίτη και την απαιτούμενη ποσότητα νερού επιτυγχάνεται η μετατροπή του ανυδρίτη σε γύψο με μείωση του όγκου κατά 11%. Αντίθετα, σε ένα όγκο πετρώματος ανυδρίτη που το απαιτούμενο νερό εισρέει μέσα από σχισμές και διακλάσεις, η μετατροπή του ανυδρίτη σε γύψο προκαλεί αύξηση του όγκου κατά 61%. Επομένως, διόγκωση του περιβάλλοντος πετρώματος μίας σήραγγας δύναται να συμβεί μόνον στην περίπτωση ανοικτού συστήματος. Στην πραγματικότητα όμως, λόγω της ροής του νερού ένα μέρος των θεικών συνήθως παρασύρεται, με αποτέλεσμα την μερική ή και ολική αντιστάθμιση της αύξησης του όγκου.

Ο ανυδρίτης δεν μετατρέπεται άμεσα σε γύψο, αλλά διαλύεται στο νερό και εν συνεχεία κατακρημνίζεται από το διάλυμα ως γύψος. Η διαδικασία βασίζεται στη διαφορετική διαλυτότητα των δύο μορφών του θεικού ασβεστίου. Σε 25°C και ατμοσφαιρική πίεση είναι για τον ανυδρίτη 2.7mg CaSO<sub>4</sub>/l H<sub>2</sub>O και για τον γύψο 2.0mg CaSO<sub>4</sub>/l H<sub>2</sub>O. Αυτή η διαφορετική διαλυτότητα οδηγεί στη διάλυση του ανυδρίτη από νερό που είναι σε επαφή με αυτόν, και μόλις η συγκέντρωση ξεπεράσει τα 2.0mg CaSO<sub>4</sub>/l H<sub>2</sub>O, που είναι μικρότερη της τιμής κορεσμού με ανυδρίτη, το θεικό ασβέστιο κατακρημνίζεται ως γύψος. Τη μείωση της συγκέντρωσης του διαλύματος ακολουθεί περαιτέρω διάλυση του ανυδρίτη και κατακρήμνιση γύψου, έως ότου το σύνολο του περιεχομένου στο πέτρωμα ανυδρίτη διαλυθεί και κατακρημνισθεί ως γύψος.

Η ένταση και ταχύτητα της μετατροπής εξαρτάται από το βαθμό επαφής με το νερό και την εντατική κατάσταση. Η κατά 60% μέγιστη διόγκωση συμβαίνει μόνον όταν τελειώς ξηρός ανυδρίτης δίχως κενά εκτίθεται στο νερό. Ο φυσικά απαντώμενος

ανυδρίτης με πόρους επιδεικνύει αντίθετα μικρότερη αύξηση όγκου. Τούτο συμβαίνει και όταν η παροχή νερού είναι περιορισμένη. Η ενυδάτωση του ανυδρίτη λαμβάνει χώρα στις διαβρεχόμενες επιφάνειές του. Επομένως, συμπαγής ανυδρίτης με λίγες μόνο τριχοειδείς ρωγμές πρακτικά δεν διογκώνεται, ενώ λεπτά διαμερισμένος ανυδρίτης διογκώνεται σημαντικά.

### 3 Διόγκωση των αργιλικών πετρωμάτων

Οι αργιικοί σχιστόλιθοι (clay shales, mudrock, clayrock, compaction shale) είναι πετρώματα πλούσια σε αργιλικά ορυκτά που καλύπτουν περίπου το 35% της επιφάνειας της γης. Η έκθεση τους στον ατμοσφαιρικό αέρα τους αποσαθρώνει με αποτέλεσμα τη μείωση των μηχανικών τους χαρακτηριστικών. Σύμφωνα με τη μονοαξονική θλιπτική τους αντοχή κατατάσσονται άλλοτε ως εδάφη και άλλοτε ως βράχοι.

#### 3.1 Δομή των αργιλικών ορυκτών

Τα αργιλικά ορυκτά ανήκουν στα φυλλοπυριτικά ορυκτά, και διακρίνονται σε τρεις ομάδες, ήτοι του καολινίτη, του ιλλίτη και των σμεκτιτών. Τα σημαντικότερα αργιλικά ορυκτά των ομάδων αυτών είναι αντίστοιχα: ο καολινίτης  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ , ο ιλλίτης  $\text{K}_y\text{Al}_4(\text{Si}_{8-y})\text{O}_{20}(\text{OH})_4$ , και ο μοντμοριλλόνιτης  $(\frac{1}{2}\text{Ca,Na})_{0.7}(\text{Al,Mg,Fe})_4[(\text{Si,Al})_8\text{O}_{20}](\text{OH})_4$ . Τα αργιλικά ορυκτά χαρακτηρίζονται από παρόμοια χημική σύσταση και έχουν παρόμοιες φυσικοχημικές ιδιότητες. Οι κρύσταλλοι τους είναι πολύ μικροί, (διαμέτρου  $< 2\mu\text{m}$ ) που μπορούν να παρατηρηθούν μόνο με το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Οι μεμονωμένοι κρύσταλλοι φαίνονται σαν λεπτά πλακίδια, τα οποία από μελέτες περίθλασης ακτινών X φάνηκε ότι αποτελούνται από πολλά φύλλα τα οποία έχουν μία επαναλαμβανόμενη δομή. Βασική δομική μονάδα είναι το τετραέδρο  $[\text{SiO}_4]^{4-}$ .

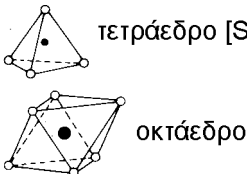



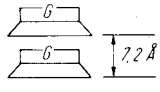
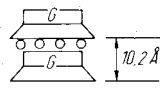
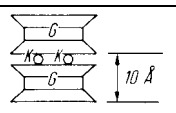
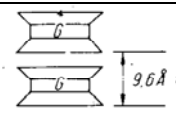
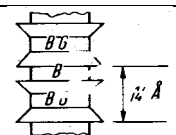
Τα τετραέδρα ενώνονται μεταξύ τους και σχηματίζουν εξαγωνικούς δακτυλίους. Με τη διάταξη αυτή δημιουργούνται οκταεδρικά κενά, το κέντρο των οποίων καταλαμβάνεται συνήθως από  $\text{Al}^{3+}$  (ή  $\text{Mg}^{2+}$  ή  $\text{Fe}^{2+}$ ), ενώ στις κορυφές τους τοποθετούνται οξυγόνα ή υδροξύλια. Έτσι δημιουργούνται φύλλα τετραέδρων και οκταέδρων αντίστοιχα (Περράκη, 1996). Σύμφωνα με τη διάταξη των στρώσεων αυτών τα αργιλικά ορυκτά υποδιαιρούνται σε διμορφικά ορυκτά ή δομής 1:1 και σε τριμορφικά ορυκτά ή δομής 2:1. Η ισόμορφη υποκατάσταση διαφόρων κατιόντων στο οκταεδρικό φύλλο είναι συνήθης και οδηγεί στη δημιουργία διαφορετικών αργιλικών ορυκτών. Στον πίνακα 1 φαίνονται τα κύρια χαρακτηριστικά των πιο σημαντικών από αυτά.

#### 3.2 Συνήθη αργιλικά ορυκτά

Ο καολινίτης αποτελείται βασικά από επαναλαμβανόμενες στρώσεις ενός τετραεδρικού και ενός οκταεδρικού φύλλου (ορυκτό δομής 1:1). Τα δύο φύλλα συνδέονται έτσι ώστε οι κορυφές του τετραεδρικού φύλλου να βρίσκονται σε ένα επίπεδο με τα (OH) του οκταεδρικού φύλλου. Η βασική απόσταση είναι 0.72nm. Ο κρύσταλλος του καολινίτη αποτελείται από πολλές στρώσεις, που συγκρατούνται μεταξύ τους με δεσμούς υδρογόνου μεταξύ των υδροξυλίων του οκταεδρικού φύλλου και των οξυγόνων του τετραεδρικού φύλλου. Επειδή ο δεσμός αυτός είναι σχετικά ισχυρός (σε σχέση με τις δυνάμεις van der Waals), εμποδίζει την προσρόφηση νερού στο διαστρωματικό χώρο και επιτρέπει στα στρώματα να στοιβάζονται και να

δημιουργούν ένα σχετικά μεγάλο κρύσταλλο. Τυπικός κρύσταλλος καολινίτη μπορεί να έχει πάχος 70 έως 100 στρωμάτων.

Πίνακας 1. Δομή των αργιλικών ορυκτών (Smolczyk, 1996; Mitchell, 1976)

Ομοίωμα δομής		Συμβολισμός φύλλου		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si</li> <li>○ O ή (OH)</li> <li>• Al<sup>3+</sup> ή Mg<sup>2+</sup></li> </ul> 		 Τετραεδρικό φύλλο Si  Οκταεδρικό φύλλο με κατιόν ΑΙ  Οκταεδρικό φύλλο με κατιόν Mg		
1	2	3	4	5
Αργιλικό ή χλωριτικό ορυκτό	Συμβολισμός δομής	Σύνδεση	Ιοντοανταλλακτική ή ικανότητα (meq/100g)	Μορφή του ορυκτού
Καολινίτης		O-OH ισχυρή	3 - 15	φυλλώδης εξαγωνική
Αλλοϋσίτης		O-OH	5 - 40	σωληνοειδής
Ιλλίτης		K ισχυρή	10 - 40	φυλλώδης
Μοντμοριλλονίτης		O-O πολύ ασθενής	80 - 150	λεπτά φύλλα
Χλωρίτης		πολύ ισχυρή	10 - 40	όπως του ιλλίτη

Ο μοντμοριλλονίτης ανήκει στην ομάδα των σμεκτιτών. Αποτελείται από δύο τετραεδρικά φύλλα και ένα οκταεδρικό (ορυκτό δομής 2:1). Το οκταεδρικό φύλλο είναι μεταξύ των δύο τετραεδρικών με τις κορυφές των τετραεδρικών συνδυαζόμενες με τα υδροξύλια των οκταεδρικών ώστε να δημιουργούν ένα στρώμα. Η βασική απόσταση είναι περίπου 0.96nm. Η σύνδεση μεταξύ των κορυφών των τετραεδρικών φύλλων είναι με δυνάμεις van der Waals που είναι ασθενείς. Τούτο σε συνδυασμό με ένα έλλειμμα αρνητικού φορτίου στο οκταεδρικό φύλλο, επιτρέπει στο νερό και τα ιόντα υποκατάστασης να εισέλθουν στο διαστρωματικό χώρο και να διαχωρίσουν τα στρώματα. Έτσι οι κρύσταλλοι του μοντμοριλλονίτη μπορούν να είναι πολύ μικροί και να προσροφούν ισχυρά νερό.

Ο ιλλίτης έχει και αυτός δομή 2:1, όπως και ο μοντμοριλλονίτης, αλλά οι στρώσεις συνδέονται μεταξύ τους με άτομα καλίου. Κάθε εξαγωνική οπή που υπάρχει στα τετραεδρικά φύλλα δεσμεύει ακριβώς ένα άτομο καλίου και συνδέει ισχυρά τα στρώματα μεταξύ τους. Εκτός αυτού υπάρχει κάποια ισόμορφη υποκατάσταση

πυριτίου από αργίλιο στο τετραεδρικό φύλλο. Ο ιλλίτης έχει παρόμοια κρυσταλλική δομή με τα ορυκτά του μαρμαρυγία, αλλά με λιγότερο κάλιο και λιγότερη ισόμορφη υποκατάσταση.

Ο χλωρίτης ανήκει επίσης στα φυλλοπυριτικά ορυκτά (κατηγορία των χλωριτών). Στη δομή τετραεδρικών – οκταεδρικών - τετραεδρικών φύλλων (όπως ο μοντμοριλλονίτης) προστίθεται ένα οκταεδρικό με κατιόν είτε Al (γκιμπσίτης) είτε Mg (μπρουσίτης). Σύμφωνα με τη διάταξη των στρώσεων του χαρακτηρίζεται ως τετραμορφικό ορυκτό ή δομής 2:1:1. Ο χλωρίτης δύναται να έχει σημαντική ισόμορφη υποκατάσταση και να του λείπει συχνά μία στρώση μπρουσίτη ή γιμπσίτη. Ως εκ τούτου το νερό δύναται να εισχωρήσει μεταξύ των στρώσεων και να προκαλέσει διόγκωση. Γενικά όμως είναι σημαντικά λιγότερο διογκούμενος από τον μοντμοριλλονίτη.

Ορυκτά μικτής δομής στρώσεων είναι συνήθη. Μπορούν π.χ. να περιλαμβάνουν μοντμοριλλονίτη και χλωρίτη ή ιλλίτη. Ο κορενσίτης είναι ένα αργιλικό ορυκτό μικτής δομής. Σε ένα σωματίδιο του υπάρχουν 10 έως 100 επάλληλες βασικές στρώσεις. Μεταξύ των βασικών στρώσεων μπορεί να εισχωρήσει νερό και να διογκώσει τον κρύσταλλο. Η βασική απόσταση του ξηραμένου σε 200°C ορυκτού είναι 2.4nm. Σε μη αποπλυμένα πετρώματα ο κορενσίτης βρίσκεται συνήθως με μία βασική απόσταση 2.9nm. Μόλις έρθει σε επαφή με το νερό ή την υγρασία του περιβάλλοντος αέρα, η βασική απόστασή του μπορεί να αυξηθεί σε 3.3nm λόγω της προσρόφησης νερού στο κρυσταλλικό πλέγμα. Η αύξηση της βασικής απόστασης από 2.9 σε 3.3nm έχει σαν αποτέλεσμα στην αύξηση του όγκου του κατά  $(3.3-2.9)/2.9=13.8\%$ , που έχει σαν αποτέλεσμα τη διόγκωση του πετρώματος.

## 4 Αποσύνθεση αργιλικού πετρώματος

Στο επόμενο παράδειγμα (Wittke, 1978) περιγράφεται η αποσύνθεση αργιλικού πετρώματος σε συνδυασμό με τη διόγκωσή του.

### 4.1 Το πέτρωμα

Η μη αποπλυμένη αργιλική άνω τριαδική γύψος (Gipskeuper) που βρίσκεται στη νότια Γερμανία συνίσταται μέχρι 30% από θειικό πέτρωμα που περιέχει ανυδρίτη και από 70 έως 100% από αργιλικό πέτρωμα που περιέχει το ορυκτό κορενσίτη. Το αργιλικό πέτρωμα δημιουργήθηκε από την ισχυρή συμπίεση αργίλων που στερεοποιήθηκαν διαγενετικά. Εφόσον το πέτρωμα αυτό, μετά από σημαντική αποτόνωση, έρθει σε επαφή με επαρκή ποσότητα νερού, μπορεί να διογκωθεί. Αυτή η διαδικασία, που στο εργαστήριο εμφανίζεται μέσα σε λίγες ώρες, αρχίζει με το άνοιγμα των ρωγμών παράλληλων στη στρώση και των διακλάσεων και συνεχίζει με την αποσύνθεση του πετρώματος μεταξύ των ρωγματώσεων. Παρατηρείται δηλαδή, η δημιουργία ενός χαλαρού πετρώματος με σημαντικά μεγαλύτερο όγκο.

### 4.2 Μεταβολή του όγκου

Στην αρχική του κατάσταση το αργιλικό πέτρωμα έχει φαινόμενο βάρος  $\gamma_a=25\text{kN/m}^3$  και φυσική υγρασία  $w_a=0.04\div 0.10$ . Στην τελική του κατάσταση το πέτρωμα έχει φαινόμενο βάρος  $\gamma_t=20\text{kN/m}^3$  και φυσική υγρασία  $w_t=0.18\div 0.20$ . Την μεταβολή του όγκου υπολογίζουμε ως εξής:

$$\gamma_{da} = \frac{\gamma_a}{1 + w_a} = \frac{25}{1 + 0.04} \div \frac{25}{1 + 0.10} = 24.0 \div 22.7 \text{ kN/m}^3$$

$$\gamma_{dt} = \frac{\gamma_t}{1 + w_t} = \frac{20}{1 + 0.18} \div \frac{20}{1 + 0.20} = 17.0 \div 16.7 \text{ kN/m}^3$$

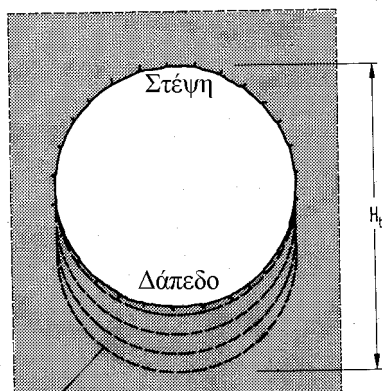
Εξίσωση 1

$$\frac{\Delta V}{V} = \frac{\gamma_{da}}{\gamma_{dt}} - 1 = \frac{22.7}{17.0} - 1 \div \frac{24.0}{16.7} - 1 = 34\% \div 44\%$$

Άρα, εφόσον παρέχεται επαρκής ποσότητα νερού, προκύπτει σαν αποτέλεσμα της αποσύνθεσης αύξηση του όγκου που δύναται να ξεπερνά το 30%.

### 4.3 Κίνδυνος στις σήραγγες

Ουσιαστικά, κατά την αποσύνθεση το μέτρο ελαστικότητας και η αντοχή του αργιλικού πετρώματος μειώνεται. Τέτοια φαινόμενα αποσύνθεσης του πετρώματος δύνανται να παρουσιασθούν στο δάπεδο ανυποστήρικτων σηράγγων, όπου οι κατακόρυφες τάσεις πρακτικά μηδενίζονται. Η λόγω της αποσύνθεσης μείωση του μέτρου ελαστικότητας επιφέρει μείωση και των οριζοντίων τάσεων. Τούτο έχει ως αποτέλεσμα (Wittke, 1978) την αύξηση του στατικά ενεργού ύψους της σήραγγας (Σχήμα 2), και την περαιτέρω χαλάρωση του μη εισέτι χαλαρωμένου πετρώματος που βρίσκεται κάτω από την χαλαρωμένη ζώνη.



Με την αποσύνθεση του πετρώματος χαλαρώνει η βραχομάζα

Σχήμα 2. Αύξηση του στατικά ενεργού ύψους μιας σήραγγας εξαιτίας της αποσύνθεσης του πετρώματος κάτω από το δάπεδο της.

## 5 Καταστατικός νόμος τάσεων-τροπών

Η αύξηση του όγκου με τη διείσδυση του νερού τόσο στον ανυδρίτη όσον και στα αργιλικά πετρώματα εξαρτάται από την εντατική κατάσταση. Ειδικά, για μεγαλύτερη από μία χαρακτηριστική σε κάθε περίπτωση τιμή της θλιπτικής κατάστασης δεν παρατηρείται αύξηση του όγκου.

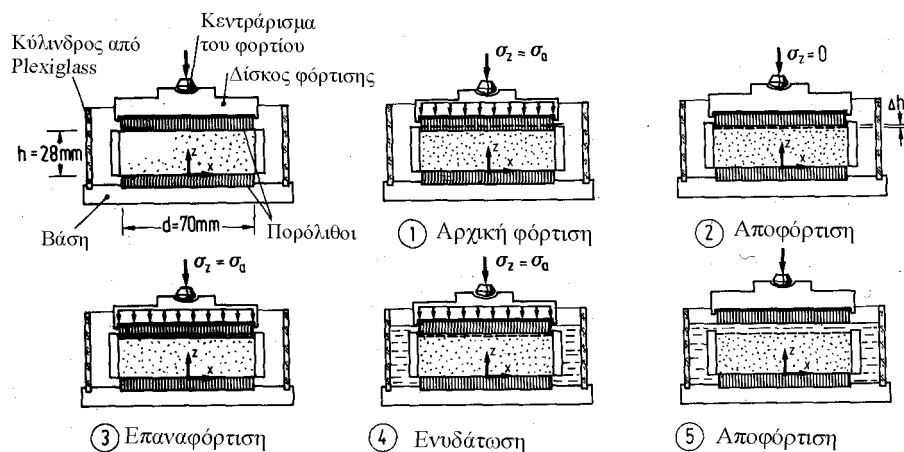
### 5.1 Πείραμα διόγκωσης

Η επίδραση της θλιπτικής κατάστασης στη διόγκωση πετρωμάτων που περιείχαν ανυδρίτη, αργιλικό οπάλιο και μάργα μελετήθηκε από τους Huder and Amberg (1970). Για την εκτέλεση πειράματος από τον Wittke (1981) χρησιμοποιήθηκε κλασική συσκευή στερεοποίησης αργιλικών δοκιμίων. Η διαδικασία εκτέλεσης της δοκιμής

φαίνεται στο Σχήμα 3 και το αντίστοιχο διάγραμμα τάσεων-ολικών παραμορφώσεων φαίνεται στο Σχήμα 4. Πριν αρχίσει η δοκιμή εφαρμόζεται μικρή κατακόρυφη θλίψη  $\sigma_z$  ώστε να κεντραριστεί το φορτίο. Στο πρώτο βήμα (1) της δοκιμής εφαρμόζεται θλίψη  $\sigma_z = \sigma_a$  που στοχεύει στη μερική τουλάχιστον αντιστάθμιση της επίδρασης της χαλάρωσης του δοκιμίου που οφείλεται στην αποτόνωση κατά την πυρηνοληψία. Ακολουθεί αποφόρτιση (2) του δοκιμίου και επαναφόρτισή (3) του με την αυτή θλιπτική πίεση  $\sigma_z = \sigma_a$ . Εν συνεχεία υγραίνεται το δοκίμιο που έχει σαν αποτέλεσμα την έναρξη της διαδικασίας της διόγκωσης (4). Λόγω του ακτινικού περιορισμού του δοκιμίου η διόγκωση εκδηλώνεται μόνο κατά τη διεύθυνση  $z$ . Η παραμόρφωση αυτή εξελίσσεται με το χρόνο και ολοκληρώνεται μετά από την πάροδο συγκεκριμένου χρόνου. Επειδή τεχνικό ενδιαφέρον παρουσιάζει συνήθως η τελική παραμόρφωση διόγκωσης και όχι η χρονική της εξέλιξη, στο διάγραμμα οι τιμές της παραμόρφωσης είναι οι τελικές. Μετά την ολοκλήρωση της χρονικά εξελισσόμενης διόγκωσης  $\varepsilon_{zq}(\sigma_a)$  στη στάθμη θλίψης  $\sigma_a$ , το δοκίμιο αποφορτίζεται σε μικρά βήματα  $\Delta\sigma_z$ . Σε κάθε βήμα καταγράφεται η τελική παραμόρφωση της χρονικά εξελισσόμενης διόγκωσης. Η διαδικασία αυτή οδηγεί στη χάραξη μίας καμπύλης (5) συνάρτησης της τελικής παραμόρφωσης  $\varepsilon_z(\sigma_z)$  σε κάθε στάθμη θλίψης. Η παραμόρφωση αυτή εμπεριέχει την ελαστική παραμόρφωση  $\varepsilon_{ze}(\sigma_z)$  από την παραμόρφωση διόγκωσης  $\varepsilon_{zq}(\sigma_z)$ . Επομένως,

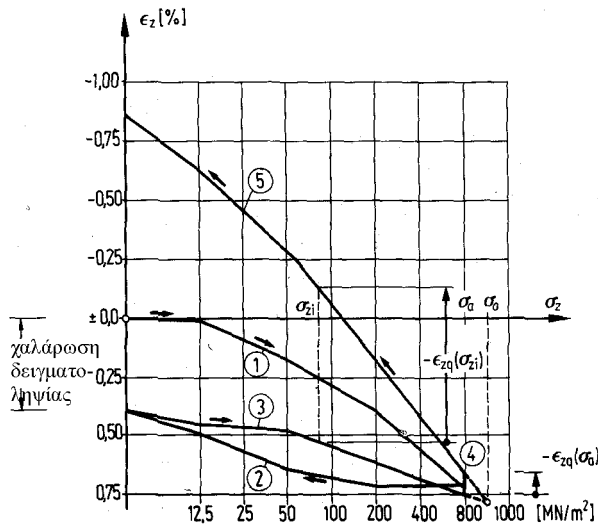
$$\varepsilon_{zq}(\sigma_z) = \varepsilon_z(\sigma_z) - \varepsilon_{ze}(\sigma_z) \quad \text{Εξίσωση 2}$$

Η τομή της επέκτασης των καμπύλων συναρτήσεων (3) και (5) ορίζει την τάση  $\sigma_0$ , για την οποία είτε η διόγκωση έχει επέλθει πριν από την έναρξη της δοκιμής είτε πέραν της οποίας δεν υπαισέρχεται διόγκωση.

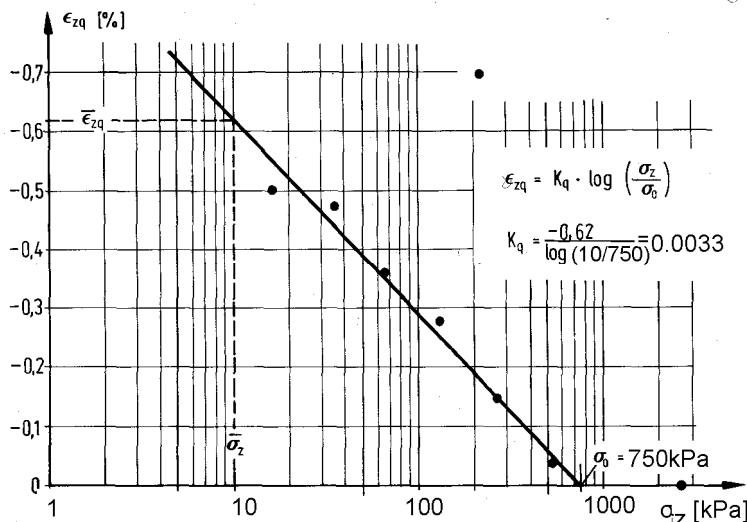


Σχήμα 3. Διαδικασία της δοκιμής διόγκωσης κατά τους Huder και Amberg (1970).





Σχήμα 4. Διάγραμμα τάσεων-παραμορφώσεων της δοκιμής του Wittke (1981) σε θειικά-αργιλικά πετρώματα.



Σχήμα 5. Καταστατικός νόμος αξονικών τάσεων-αξονικών παραμορφώσεων διόγκωσης.

## 5.2 Καταστατικός νόμος

### 5.2.1 Αξονική διόγκωση

Στο Σχήμα 5 σχεδιάζονται σε ημιλογαριθμικό διάγραμμα τα πειραματικά αποτελέσματα της παραμόρφωσης  $\varepsilon_{zq}$  διόγκωσης για τις αντίστοιχες πιέσεις θλίψης  $\sigma_z$ . Τα αποτελέσματα αυτά δύνανται να θεωρηθούν ότι βρίσκονται κοντά σε μία ευθεία γραμμή. Με βάση τις παραπάνω πειραματικές δοκιμές η παραμόρφωση διόγκωσης δύναται να συσχετισθεί (Grob, 1972) με την εφαρμοζόμενη τάση ως:

$$\varepsilon_{zq} = K_q \cdot \log\left(\frac{\sigma_z}{\sigma_0}\right)$$

Εξίσωση 3

$$0 < \sigma_z < \sigma_0$$

όπου  $K_q$  αδιάστατη παράμετρος που περιγράφει την κλίση της ευθείας και  $\sigma_0$  η τάση εκκίνησης κατά την οποία η διόγκωση είτε έχει συμβεί προτού αρχίσει η δοκιμή είτε είναι μηδέν. Η παράμετρος  $K_q$  για γνωστό ζευγάρι τιμών, παραμόρφωσης και τάσης, επί της ευθείας, υπολογίζεται ως:

$$K_q = \frac{\bar{\varepsilon}_{zq}}{\log\left(\frac{\bar{\sigma}_z}{\sigma_0}\right)}$$

Εξίσωση 4

Ο καταστατικός νόμος που συνδέει την αξονική διόγκωση με την αξονική παραμόρφωση φαίνεται στο Σχήμα 5.

### 5.2.2 Τριδιάστατη διόγκωση

Σε φυσικές συνθήκες, η παραμόρφωση λόγω διόγκωσης συνήθως επιτρέπεται προς όλες τις διευθύνσεις. Επομένως, προκειμένου ένας καταστατικός νόμος να είναι κατάλληλος να προσομοιώνει φυσικές καταστάσεις, θα πρέπει να λαμβάνει υπόψη του τις συνιστώσες της τάσης και της παραμόρφωσης στις τρεις διαστάσεις. Στην απλούστερη μορφή του ένας τέτοιος νόμος (Wittke and Rissler, 1976) θα συνδέει τις πρώτες μόνο αναλλοίωτες της παραμόρφωσης ( $I_{1,\varepsilon q}$ ) και της τάσης ( $I_{1,\sigma}$ ) όπως:

$$I_{1,\varepsilon q} = f(I_{1,\sigma})$$

$$I_{1,\varepsilon} = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3$$

Εξίσωση 5

$$I_{1,\sigma} = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$

Για το συγκεκριμένο πείραμα οι αναλλοίωτοι της παραμόρφωσης και της τάσης δύνανται να εκφραστούν ως συναρτήσεις των συνιστωσών τους κατά τη διεύθυνση z μόνο:

$$I_{1,\varepsilon q} = \varepsilon_{xq} + \varepsilon_{yq} + \varepsilon_{zq} = 0 + 0 + \varepsilon_{zq} = \varepsilon_{zq}$$

$$I_{1,\sigma} = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z = \frac{\nu}{1-\nu}\sigma_z + \frac{\nu}{1-\nu}\sigma_z + \sigma_z = \sigma_z \cdot \frac{1+\nu}{1-\nu} \Rightarrow$$

Εξίσωση 6

$$\sigma_z = I_{1,\sigma} \frac{1-\nu}{1+\nu}$$

λόγω του ότι:

$$\varepsilon_{xq} = \varepsilon_{yq} = 0$$

Εξίσωση 7

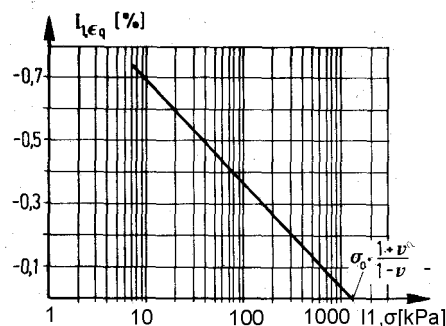
$$\sigma_x = \sigma_y = \frac{\nu}{1-\nu} \cdot \sigma_z$$

Αντικαθιστώντας, από τις παραπάνω σχέσεις, στη σχέση του Grob τις  $\varepsilon_{zq}$ ,  $\sigma_z$  με τις  $I_{1,\varepsilon q}$ ,  $I_{1,\sigma}$ , προκύπτει:

$$I_{1,\varepsilon q} = K_q \cdot \log\left(\frac{I_{1,\sigma}}{\sigma_0} \cdot \frac{1-\nu}{1+\nu}\right)$$

Εξίσωση 8

Ο καταστατικός νόμος της τριδιάστατης διόγκωσης φαίνεται στο Σχήμα 6.



Σχήμα 6. Καταστατικός νόμος τάσεων-παραμορφώσεων διόγκωσης σε τρεις διαστάσεις.

## 6 Προσομοίωση με πεπερασμένα στοιχεία

### 6.1 Τάσεις και τροπές διόγκωσης σε σήραγγα

Ο καταστατικός νόμος τάσεων-τροπών διόγκωσης που αναπτύχθηκε στην προηγούμενη παράγραφο μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό του εντατικού πεδίου και των παραμορφώσεων που αναπτύσσονται γύρω από μία σήραγγα. Στο Σχήμα 7 φαίνεται τομή του υπεδάφους που φορτίζεται από το ίδιο του βάρος και από παραμένουσες τεκτονικές τάσεις. Η εντατική κατάσταση  $\{\sigma_p\}$  που οφείλεται στα φορτία αυτά ονομάζεται φυσική (ή αρχική ή πρωτογενής) και φαίνεται στο στοιχείο e. Χάριν του παραδείγματος επιλέχθηκε η οριζόντια συνιστώσα της τάσης να είναι μικρότερη από την κατακόρυφη ( $K_0 < 1$ ). Η αναλλοίωτος  $I_{1,\sigma p}$  της τάσης τοποθετείται στα διαγράμματα του καταστατικού νόμου των σχημάτων e και f.

Λόγω της εκσκαφής το εντατικό πεδίο μεταβάλλεται. Το νέο πεδίο ονομάζεται δευτερογενές  $\{\sigma_s\}$ . Οι προκύπτουσες παραμορφώσεις  $\{\delta_s\}$  των τοιχωμάτων του ανοίγματος φαίνονται ποιοτικά στο σχήμα b. Το στοιχείο e, λόγω της εκσκαφής, θα αποφορτιστεί κατά την κατακόρυφη διεύθυνση. Εκτός αυτού, στις διαγραμμισμένες περιοχές, πάνω και κάτω από το άνοιγμα, η πρώτη αναλλοίωτη της τάσης λόγω του δευτερογενούς πεδίου ( $I_{1,\sigma s}$ ) είναι μικρότερη από την του πρωτογενούς ( $I_{1,\sigma s} < I_{1,\sigma p}$ ). Λόγω της αποφόρτισης θα προκληθεί διόγκωση των διαγραμμισμένων περιοχών σύμφωνα με τον καταστατικό νόμο της διόγκωσης. Η νέα εντατική κατάσταση  $\{\sigma_{qa}\}$  και η μετακίνηση  $\{\delta_{qa}\}$  των τοιχωμάτων για μη επενδυμένη και επενδυμένη σήραγγα φαίνεται στα σχήματα c και d αντίστοιχα. Η παραμόρφωση διόγκωσης λόγω του πρωτογενούς πεδίου έχει ολοκληρωθεί πριν από την εκσκαφή του ανοίγματος. Επομένως, η παραμόρφωση διόγκωσης που θα συμβεί μετά τη διάνοιξη θα υπολογίζεται από τη μεταβολή της αναλλοίωτης της παραμόρφωσης,  $\Delta I_{1,\epsilon q} = I_{1,\epsilon q} - I_{1,\epsilon qp}$ . Η αναλλοίωτη της τελικής εντατικής κατάστασης μετά την ολοκλήρωση της διόγκωσης, που χαρακτηρίζεται στο σχήμα e από την  $I_{1,\sigma qa}$  θα εξακολουθεί να έχει τιμή μικρότερη από την του πρωτογενούς εντατικού πεδίου. Όμως θα είναι μεγαλύτερη από την του δευτερογενούς εντατικού πεδίου, καθόσον ο υπάρχον οριζόντιος περιορισμός προκαλεί αύξηση της οριζόντιας συνιστώσας της τάσης, και επομένως μείωση της αναλλοίωτης της παραμόρφωσης. Η αναλλοίωτη της τάσης θα βρίσκεται επομένως στο διάστημα:

$$I_{1,\sigma s} < I_{1,\sigma qa} < I_{1,\sigma p}$$

$$\Delta I_{1,\epsilon qs} = I_{1,\epsilon qs} - I_{1,\epsilon qp} > \Delta I_{1,\epsilon qa}$$

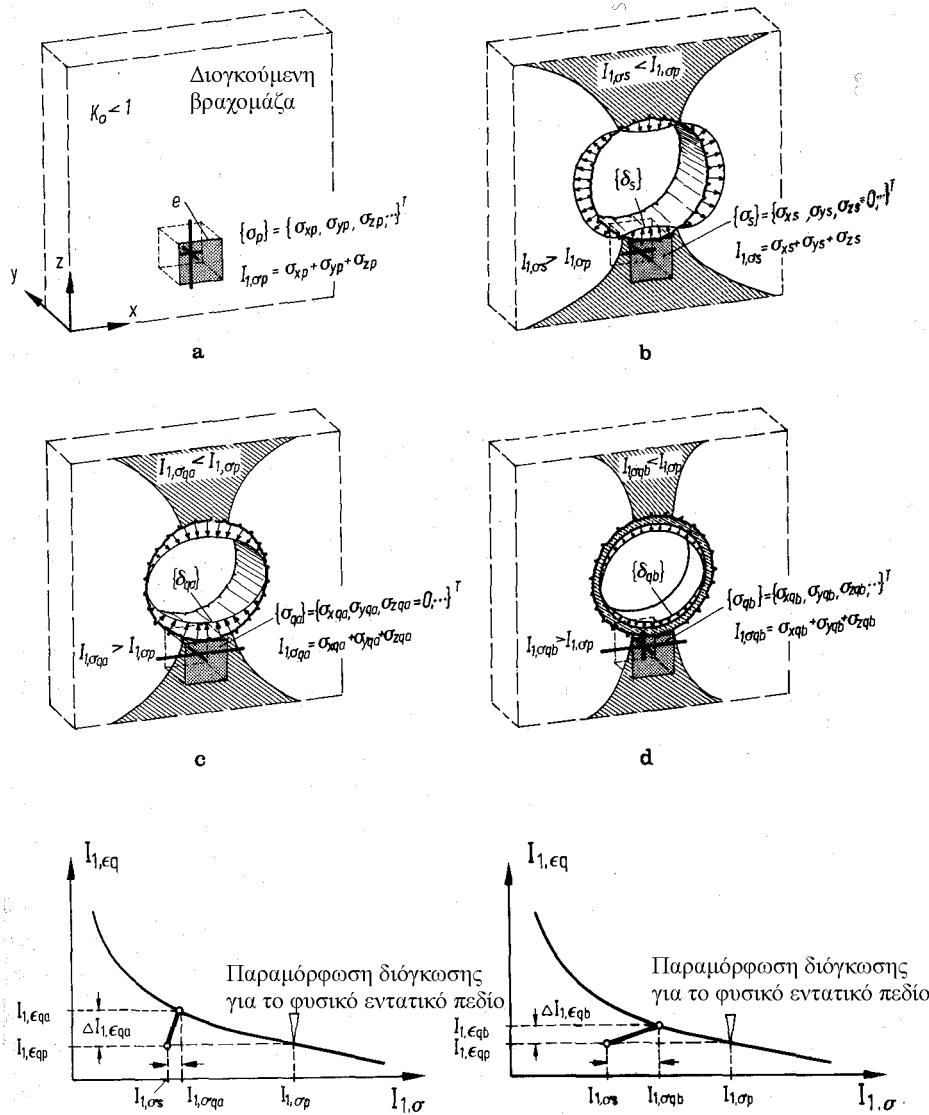
*Εξίσωση 9*

Στην περίπτωση που η σήραγγα είναι επενδυμένη, τότε θα υπάρχει επιπροσθέτως και κατακόρυφος περιορισμός με αποτέλεσμα την περαιτέρω αύξηση της αναλλοίωτης της τάσης και επομένως της περαιτέρω μείωση της αναλλοίωτης της παραμόρφωσης, με αποτέλεσμα την περαιτέρω μείωση της μεταβολής των αναλλοίωτων παραμόρφωσης διόγκωσης και τάσης, έτσι ώστε:

$$I_{1,\sigma s} < I_{1,\sigma qa} < I_{1,\sigma qb} < I_{1,\sigma p}$$

$$\Delta I_{1,\epsilon qs} = I_{1,\epsilon qs} - I_{1,\epsilon qp} > \Delta I_{1,\epsilon qa} > \Delta I_{1,\epsilon qb} > 0$$

*Εξίσωση 10*



Σχήμα 7. Τάσεις και παραμορφώσεις στο δάπεδο σήραγγας που διανοίγεται σε διογκούμενο πέτρωμα.

## 6.2 Παράδειγμα

Τα μηχανικά χαρακτηριστικά αργιλικού κορεσμένου διογκούμενου πετρώματος είναι:  $E=1000\text{MPa}$ ,  $\nu=0$ ,  $k_q=0.0033$ ,  $\Delta I_{1,\epsilon q} = k_q \cdot \log(I_{1,\sigma 2}/I_{1,\sigma 1})$ , όπου  $I_{1,\sigma}$ ,  $I_{1,\epsilon}$  είναι οι αναλλοίωτοι της τάσης και της διόγκωσης αντίστοιχα. Ο δείκτης  $q$  υποδηλώνει παραμόρφωση λόγω διόγκωσης και ο δείκτης  $I$  υποδεικνύει παραμόρφωση της θεμελιώδους μάζας. Το πέτρωμα βρίσκεται υπό αρχική υδροστατική πίεση  $\sigma_0=800\text{kPa}$ .

α. Λόγω αλλαγής συνθηκών η τάση στο πέτρωμα παραμένει υδροστατική αλλά μειώνεται σε  $\sigma_a=400\text{kPa}$ . Να υπολογισθεί η παραμόρφωση  $\Delta \epsilon_a$  του πετρώματος.

Η μεταβολή της τάσης και της παραμόρφωσης δίνεται από τις σχέσεις:

$$\Delta I_{1,\sigma a} = I_{1,\sigma a} - I_{1,\sigma 0} = 3 \cdot 400 - 3 \cdot 800 = -1200\text{kPa}$$

$$\Delta I_{1,\epsilon a} = I_{1,\epsilon a} - I_{1,\epsilon 0}$$

Οι καταστατικοί νόμοι παραμόρφωσης της θεμελιώδους μάζας και της διόγκωσης δίνονται από τις σχέσεις:

$$\Delta I_{1,ea} = \frac{\Delta I_{1,\sigma a}}{E}, \Delta I_{1,eqa} = k_q \cdot \log\left(\frac{I_{1,\sigma a}}{I_{1,\sigma 0}}\right)$$

Η συνολική παραμόρφωση είναι το άθροισμα της παραμόρφωσης της θεμελιώδους μάζας και της παραμόρφωσης διόγκωσης:

$$\Delta I_{1,ea} = \Delta I_{1,eqa} + \Delta I_{1,ea} = \frac{\Delta I_{1,\sigma a}}{E} + k_q \cdot \log\left(\frac{I_{1,\sigma a}}{I_{1,\sigma 0}}\right) =$$

$$\frac{(400 - 800) \cdot 3}{1000 \cdot 10^3} + 0.0033 \cdot \log\left(\frac{400}{800}\right) = -1.2 \cdot 10^{-3} - 1.0 \cdot 10^{-3} = -2.2 \cdot 10^{-3}$$

Λόγω της ισοτροπίας της παραμόρφωσης η τιμή της είναι η ίδια σε όλες τις διευθύνσεις και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$\Delta \varepsilon_{11a} = \Delta \varepsilon_{22a} = \Delta \varepsilon_{33a} = \frac{\Delta I_{1,ea}}{3} = \frac{-2.2 \cdot 10^{-3}}{3} = -0.73 \cdot 10^{-3}$$

β. Σε επόμενη φάση αποτονούνται το πέτρωμα ομοιόμορφα προς όλες τις κατευθύνσεις, με  $\Delta \varepsilon_b = -0.0003$ . Να υπολογισθεί η δρώσα υδροστατική τάση  $\sigma_b$ .

Η μεταβολή της τάσης ορίζεται από τη σχέση:

$$\Delta I_{1,\sigma b} = I_{1,\sigma b} - I_{1,\sigma a} = I_{1,\sigma b} - 3 \cdot 400 \text{ kPa}$$

Η αναλλοίωτη της μεταβολής της ισότροπης παραμόρφωσης δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta I_{1,eb} = 3 \cdot \Delta \varepsilon_b = -0.9 \cdot 10^{-3}$$

Οι καταστατικοί νόμοι παραμόρφωσης της θεμελιώδους μάζας και της διόγκωσης δίνονται από τις σχέσεις:

$$\Delta I_{1,\sigma b} = \Delta I_{1,eb} \cdot E$$

$$\Delta I_{1,eqb} = k_q \cdot \log\left(\frac{I_{1,\sigma b}}{I_{1,\sigma a}}\right)$$

Η συνολική παραμόρφωση είναι το άθροισμα της παραμόρφωσης της θεμελιώδους μάζας και της παραμόρφωσης διόγκωσης, ήτοι:

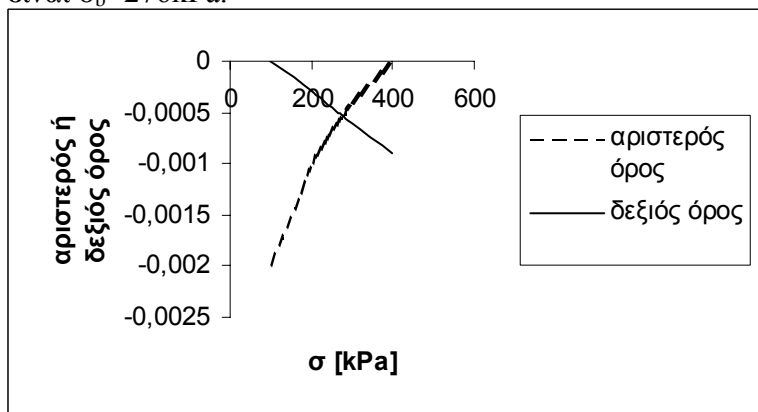
$$\Delta I_{1,eb} = \Delta I_{1,elb} + \Delta I_{1,eqb} \Rightarrow \Delta I_{1,eqb} = \Delta I_{1,\sigma b} - \Delta I_{1,elb}$$

Αντικαθιστώντας τη συνολική διόγκωση με τη γνωστή τιμή της, τις επιμέρους παραμορφώσεις με τις τάσεις σύμφωνα με τους παραπάνω καταστατικούς νόμους, και την αρχική τάση με τη γνωστή τιμή της, καταλήγουμε σε μία εξίσωση με μόνη άγνωστη την τελική τάση, ήτοι:

$$\Delta I_{1,eq}^b = k_q \cdot \log\left(\frac{I_{1,\sigma b}}{I_{1,\sigma a}}\right) = \Delta I_{1,eb} - \Delta I_{1,eb} = 3 \cdot \varepsilon_b - \frac{\Delta I_{1,\sigma b}}{E} \Rightarrow$$

$$0.0033 \cdot \log\left(\frac{I_{1,\sigma b}}{1200}\right) = -0.0009 - \frac{I_{1,\sigma b} - 1200}{1000 \cdot 10^3}$$

Η επίλυση της παραπάνω εξίσωσης γίνεται γραφικά στο Σχήμα 8. Η τελική τάση θα είναι  $\sigma_b = 276 \text{ kPa}$ .



Σχήμα 8. Υπολογισμός της δρώσας τάσης

## 7 Βιβλιογραφία

- Einstein H.H., Bishoff N., and Hofmann E. (1972). “Verhalten von Stollensohlen in quellendem Mergel”, Proc. Int. Symp. fur Untertagebau, Luzern.
- Grob H. (1972). “Schwelldruck in Belchentunnel”, Proc. Int. Symp. fur Untertagebau, Luzern.
- Huder J. und Amberg G. (1970). “Quellung in Mergel, Opalinuston und Anhydrit”, Schweiz. Bayz. 88, 975-980.
- Mitchell J.K. (1976). “Fundamentals of Soil behavior”, John Wiley & Sons Inc., New York, 422pp.
- Muller, Krause und Wurm (1975). “Durchfuhrung eines felsmechanischen Grossversuches in der Nordrohre des Wagenburgtunnels in Stuttgart”, Forschungsbericht aus dem Forschungsprogramm des Bundesverkehrsministeriums und der Forschungsgesellschaft fur das Strassenwesen e.V., Strassenbau und Strassenverkehrstechnik, Heft 184.
- Περράκη Θ. (1996). «Βιομηχανικά ορυκτά και πετρώματα», Σημειώσεις, Ε.Μ.Π.
- Seedsman R. W. (1993). “Characterizing clay shales”, Comprehensive Rock Engineering, vol. 3, pp.151-165, Pergamon Press.
- Smolczyk U. (1996). “Grundbautaschenbuch”, Teil 1, Ernst & Sohn.
- Wittke W. und Rissler P. (1976). “Dimensioning of the lining of underground openings in swelling rock applying the finite element method”. Veroffentlichungen des Institutes fur Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Verkehrswasserbau de RWTH Aachen, Vol. 2.
- Wittke W. (1978). “Fundamentals for the Design and construction of tunnels located in swelling rock and their use during construction of the turning loop of the

subway Stuttgart”, Veröffentlichungen des Institutes für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Verkehrswasserbau der RWTH Aachen, vol. 6.

Wittke W. (1984). “Felsmechanik”, Springer Verlag

Wittke W. (1981). “Some aspects of the design and construction of tunnels in swelling rock”, Proc. Int. Symp. on weak rock, Tokyo.

## ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ Β:

### ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΤΑΣΕΩΝ ΚΑΙ ΠΑΡΑΜΟΡΦΩΣΕΩΝ ΔΙΟΓΚΩΣΗΣ

Η επαναληπτική διαδικασία υπολογισμού της εντατικής κατάστασης (Wittke, 1984) γίνεται για στα σημεία ολοκλήρωσης (Gauss) για τα οποία ισχύει η σχέση:

$$I_{1,\sigma_s} - I_{1,\sigma_p} < 0 \quad \text{Εξίσωση 11}$$

Ο πρώτος υπολογισμός που ακολουθεί γίνεται με βάση τη σχέση:

$$\Delta I_{1,eqs} = I_{1,eqs} - I_{1,exp} = K_q \cdot \left\{ \log \left[ \frac{I_{1,\sigma_s}}{\sigma_0} \cdot \frac{1-\nu}{1+\nu} \right] - \log \left[ \frac{I_{1,\sigma_p}}{\sigma_0} \cdot \frac{1-\nu}{1+\nu} \right] \right\} = K_q \cdot \log \left( \frac{I_{1,\sigma_s}}{I_{1,\sigma_p}} \right)$$

Εξίσωση 12

Η προκύπτουσα μήκυνση κατανέμεται αναλογικά με το μέγεθος  $\{\sigma_s\}$ - $\{\sigma_p\}$  της μεταβολής της τάσης, στις διευθύνσεις των κυρίων τάσεων. Κατ' αυτόν τον τρόπο προκύπτει το διάνυσμα  $\{\varepsilon_{qs}\}$  της παραμόρφωσης διόγκωσης. Λόγω του υπάρχοντος περιορισμού, η παραμόρφωση αυτή δεν είναι δυνατό να επιτευχθεί. Θεωρώντας ότι οι παραμορφώσεις διόγκωσης  $\{\varepsilon_{qs}\}$  αναπτύσσονται πλήρως, τότε οι τάσεις δίνονται από τη σχέση:

$$\{\sigma_1\} = \{\sigma_s\} + [D] \cdot \{\varepsilon_{qs}\} \quad \text{Εξίσωση 13}$$

Η εντατική κατάσταση αυτή στα βήματα των υπολογισμών προσομοιώνεται με ισοδύναμες κομβικές δυνάμεις  $\{F_{q1}\}$ , οι οποίες φορτίζουν τα διογκούμενα στοιχεία:

$$\{F_{q1}\} = \int_V [B]^T \cdot [D] \cdot \{\varepsilon_{qs}\} \cdot dV \quad \text{Εξίσωση 14}$$

Για την προκύπτουσα εντατική κατάσταση  $\{\sigma_1\}$  υπολογίζονται νέες τιμές της παραμόρφωσης διόγκωσης. Από αυτές υπολογίζεται η εντατική κατάσταση  $\{\sigma_2\}$ , και ούτω καθ' εξής:

$$\{\sigma_i\} = \{\sigma_{i-1}\} + [D] \cdot \{\varepsilon_{q(i-1)}\} \quad \text{Εξίσωση 15}$$

$$\{F_{qi}\} = \int_V [B]^T \cdot [D] \cdot \{\varepsilon_{q(i-1)}\} \cdot dV \quad \text{Εξίσωση 16}$$

Η παραπάνω διαδικασία καταλήγει σε μία εντατική κατάσταση  $\{\sigma_m\}$ , που αντιστοιχεί στις καταστάσεις  $\{\sigma_{qa}\}$  ή  $\{\sigma_{qb}\}$  των σχημάτων c, e ή d, f αντίστοιχα. Κατά τη διαδικασία αυτή η διαφορά  $I_{1,\sigma_i} - I_{1,\sigma(i-1)}$  τείνει στο μηδέν.

Η διαδικασία αυτή παρατηρούμε στο σχήμα, ότι προσδιορίζει μετά από κάθε βήμα εντατικές καταστάσεις που μια βρίσκονται αριστερά του  $I_{1,\sigma_m}$  και μία δεξιά του.

Τούτη η εναλλαγή είναι δυνατό να προκαλέσει αστάθεια στην υπολογιστική διαδικασία. Για το σκοπό αυτό γίνεται εισαγωγή ενός συντελεστή απόσβεσης της ταχύτητας μεταβολής των τιμών της εντατικής κατάστασης, ως εξής:

- Πρώτο βήμα επανάληψης ( $i=1$ )

$$\{\sigma_1\} = \{\sigma_s\} + \left(\frac{1}{m+1}\right)^p \cdot [D] \cdot \{\varepsilon_{qs}\} \quad \text{Εξίσωση 17}$$

$$\{F_{q1}\} = \left(\frac{1}{m+1}\right)^p \int_V [B]^T \cdot [D] \cdot \{\varepsilon_{qs}\} \cdot dV \quad \text{Εξίσωση 18}$$

με  $p \geq 0$ , π.χ. 4.

- Ενδιάμεσο βήμα επανάληψης  $i$

$$\{\sigma_i\} = \{\sigma_{i-1}\} + \left(\frac{1+i}{m+1}\right)^p \cdot [D] \cdot \{\varepsilon_{q,i-1}\} \quad \text{Εξίσωση 19}$$

$$\{F_{qi}\} = \left(\frac{1+i}{m+1}\right)^p \int_V [B]^T \cdot [D] \cdot \{\varepsilon_{q,i-1}\} \cdot dV \quad \text{Εξίσωση 20}$$

- Τελευταίο βήμα επανάληψης,  $i=m$

$$\{\sigma_m\} = \{\sigma_{m-1}\} + [D] \cdot \{\varepsilon_{q,m-1}\} \quad \text{Εξίσωση 21}$$

$$\{F_{qm}\} = \int_V [B]^T \cdot [D] \cdot \{\varepsilon_{q,m-1}\} \cdot dV \quad \text{Εξίσωση 22}$$