



ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ ΚΡΗΤΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ ΟΡΥΚΤΩΝ ΠΟΡΩΝ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**Η ΒΡΑΧΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΤΩΝ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝΤΩΝ
ΠΕΤΡΩΜΑΤΩΝ ΚΑΤΑ ΤΗ ΔΗΜΙΟΥΡΓΙΑ ΜΕΓΑΛΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ
ΑΝΟΙΓΜΑΤΟΣ ΣΕ ΈΝΑ ΟΡΥΧΕΙΟ ΠΟΤΑΣΑΣ**

ΜΠΡΑΟΥΔΑΚΗ Γ. ΕΙΡΗΝΗ

ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ:

Καθηγητής	Ζ. ΑΓΙΟΥΤΑΝΤΗΣ (ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ)
Λέκτορας	Μ. ΓΑΛΕΤΑΚΗΣ
Αν. Καθηγητής	Κ. ΚΟΜΝΙΤΣΑΣ

ΧΑΝΙΑ, ΙΟΥΝΙΟΣ 2004

Πρόλογος

Όταν ο Dr. Henry Rauche, διευθυντής της εταιρίας ERCOSPLAN Geotechnik und Bergbau mbH, μου πρότεινε την εκπόνηση αυτής της διπλωματικής εργασίας, δέχτηκα με μεγάλη χαρά, όχι μόνο για την εμπιστοσύνη που έδειξε στο πρόσωπο μου αλλά κυρίως επειδή επρόκειτο για ένα έργο πρωτότυπο και εξαιρετικά ενδιαφέρον. Ενώ το κέντρο βάρους της εργασίας αφορά στη μηχανική των πετρωμάτων, η γενικότερη ανάπτυξη του θέματος ολοκληρώνεται με ένα ευρύ φάσμα θεωρητικών γνώσεων που συμπληρώνουν το επιστημονικό υπόβαθρο ενός μηχανικού ορυκτών πόρων.

Προσωπικός μου στόχος πέρα από την εκπλήρωση του κυρίου θέματος της εργασίας και της παράθεσης λεπτομερών στοιχείων σχετικά με τα γεωλογικά και ορυκτολογικά χαρακτηριστικά των εβαποριτών, ήταν να προβάλω τις δυνατότητες αποκατάστασης και αξιοποίησης ενός εγκαταλελειμμένου ορυχείου αλάτων.

Σήμερα που η εργασία αυτή ολοκληρώνεται, αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω όλους όσους συνέβαλαν στην αποπεράτωση της. Αρχικά θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Dr. Henry Rauche, για την εμπιστοσύνη που μου έδειξε αλλά και τον καθηγητή μου, Dr. Ζαχαρία Αγιουτάντη, καθηγητή του Πολυτεχνείου Κρήτης, όχι μόνο επειδή δέχτηκε πρόθυμα να αναλάβει την επίβλεψη της διπλωματικής εργασίας αλλά κυρίως για την αμέριστη συμβολή και συμπαράσταση κατά την εκπόνηση της.

Στη συνέχεια θα ήθελα να ευχαριστήσω τον Dr. Axel Stäubert, διευθυντή του τμήματος γεωφυσικής και γεωμηχανικής της εταιρίας K-UTEC και κύριο υπεύθυνο για την εκπόνηση των βραχομηχανικών μετρήσεων στην αίθουσα κονσέρτων, για την ευκαιρία που μου έδωσε δουλεύοντας μαζί του, να κατανοήσω τη μέθοδο της υδραυλικής θραύσης και την συμπεριφορά των πετρωμάτων στο φυσικό τους χώρο. Πολλά ευχαριστώ στον ko Reitzig και στο Ronnie, τεχνικούς του συνεργείου της εταιρίας K-UTEC, για την υπομονή και τη βοήθεια κατά την εκπόνηση των μετρήσεων.

Στον φίλο και συνάδελφο, μηχανικό ορυχείων ko Jörg Martin, οφείλω επίσης πολλά ευχαριστώ για την ευγένεια, την υπομονή, τη συμπαράσταση, την πολύτιμη βοήθεια και τις αμέτρητες γνώσεις που μου παρείχε, τόσο κατά την εκπόνηση της

πρακτικής όσο και της διπλωματικής μου εργασίας, στην εταιρία ERCOSPLAN Geotechnik und Bergbau mbH.

Για τη βοήθεια τους στην κατανόηση των πολύπλοκων γεωλογικών συνθηκών του συγκεκριμένου ορυχείου και της ευρύτερης περιοχής, ευχαριστώ πολύ τον γεωλόγο της εταιρίας GSES GmbH, κο Jochen Schappmann και τον εξαιρετικό επιστήμονα και άνθρωπο Dr. Seifert από την εταιρία K-UTEC.

Τέλος, τα πιο πολλά ευχαριστώ για τη βοήθεια, τη συμπαράσταση και την υπομονή, τα οφείλω στην οικογένεια Lüttkopf, στον καλό μου φίλο Μιχάλη, στον σύντροφο μου Dr. Walter Struhal και κυρίως στην οικογένεια μου.

Ευχαριστώ πολύ.

Χανιά, Ιούνιος 2004

Περίληψη

Το αντικείμενο αυτής της διπλωματικής εργασίας είναι η εξέταση της βραχομηχανικής συμπεριφοράς, όπως αυτή διαμορφώθηκε μετά την δημιουργία ενός μεγάλου υπόγειου ανοίγματος, στα περιβάλλοντα πετρώματα ενός ορυχείου ποτάσας. Η εργασία εκπονήθηκε στο ορυχείο “Glückauf Sondershausen” στο κρατίδιο της Θουρινγκίας στη Γερμανία. Η ηλικία του συγκεκριμένου ορυχείου ξεπερνά τα εκατό έτη, κατά τη διάρκεια των οποίων, η εξόρυξη των αλάτων για την παρασκευή λιπασμάτων βρισκόταν διαρκώς σε άνθηση. Γεωγραφικά, η περιοχή στην οποία βρίσκεται το ορυχείο, ανήκει στην πρώην Ανατολική Γερμανία, η οποία μετά την επανένωση της χώρας δεν κατάφερε να αντιμετωπίσει τον μεγάλο ανταγωνισμό που προέκυψε σε όλους τους τομείς της οικονομίας της. Έτσι, όταν το ένα μετά το άλλο, τα ορυχεία εξόρυξης ποτάσας προέβησαν σε αναστολή της παραγωγής, το “Glückauf Sondershausen” απλά ακολούθησε τις εξελίξεις, ανακοινώνοντας το 1991 την οριστική και αμετάκλητη παύση της λειτουργίας του.

Το 1995, τη διασφάλιση της ευστάθειας του ορυχείου με λιθογόμωση, ανέλαβε η εταιρία GSES mbH, η οποία ταυτόχρονα παρουσίασε το αναπτυξιακό πρόγραμμα “Grubentourismus”, στόχος του οποίου ήταν η προσέλκυση επισκεπτών στους χώρους και τις εγκαταστάσεις γύρω και μέσα στο ορυχείο. Μέρος του προγράμματος αυτού ήταν και η κατασκευή μιας υπόγειας αίθουσας κονσέρτων, σε βάθος 630 m, η οποία θα πληρούσε εξ’ ολοκλήρου τις επίσημες ακουστικές προδιαγραφές οποιασδήποτε αίθουσας μουσικών εκδηλώσεων, ενώ το υλικό κατασκευής της θα ήταν το ίδιο το πέτρωμα, το οποίο, ο επισκέπτης θα μπορούσε να θαυμάσει στη φυσική του θέση.

Μετά από ανοιχτή δημοπρασία, η κατασκευή της αίθουσας κονσέρτων ανατέθηκε στην εταιρία ERCOSPLAN Geotechnik und Bergbau, η οποία με τη σειρά της ανέθεσε την ακουστική μελέτη του χώρου στο ινστιτούτο TÜV της Θουρινγκίας και τη βραχομηχανική επίβλεψη του έργου, στην εταιρία Kali-Umwelttechnik GmbH (K-UTECH). Οι εργαστηριακές δοκιμές των πυρήνων που ελήφθησαν από την περιοχή τοποθέτησης του έργου ανατέθηκαν στην εταιρία IfG Leipzig, την κοπή των πετρωμάτων ανέλαβε η εταιρία PROTTERA TS BAU και τις τοπογραφικές μετρήσεις πραγματοποίησε η εταιρία Glückauf Vermessung. Η γεωλογική μελέτη πραγματοποιήθηκε από το γεωλόγο της εταιρίας GSES mbH, Ko Schappmann .

Λόγω της πρωτοτυπίας της γεωμετρίας της αίθουσας κονσέρτων, σημαντικότερη όλων, κρίθηκε η μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων τα οποία επρόκειτο να φιλοξενήσουν την κατασκευή αυτή. Έτσι η επιβεβαίωση της ευστάθειας των πετρωμάτων για την επιλεγμένη γεωμετρία, μέσω γεωμηχανικής γνωμάτευσης, αποτέλεσε και την τελική έγκριση για την έναρξη της κατασκευής της αίθουσας. Οι μετρήσεις των τάσεων και των παραμορφώσεων των πετρωμάτων, πραγματοποιήθηκαν με τη μέθοδο της υδραυλικής θραύσης.

Στους γονείς μου,
με όλη την ευγνωμοσύνη
που δεν μπορώ να εκφράσω με λόγια

Περιεχόμενα

1. Οι εταιρίες που συμμετείχαν στην κατασκευή του έργου και το ορυχείο τοποθέτησης αυτού.....	1
1.1. Ο όμιλος επιχειρήσεων ERCOSPLAN.....	1
1.1.1. Εισαγωγικά στοιχεία.....	1
1.1.2. Από το παρελθόν στο σήμερα.....	1
1.1.3. Οι εταιρίες του ομίλου. Τα αντικείμενα εργασίας τους.....	3
1.1.4. Η εταιρία ERCOSPLAN Geotechnik und Bergbau mbH.....	4
1.2. Η εταιρία Kali-Umwelttechnik GmbH (K-UTEC).....	5
1.2.1. Εισαγωγικά στοιχεία.....	5
1.2.2. Τα τμήματα της εταιρίας και τα αντικείμενα εργασίας τους.....	6
1.2.3. Το τμήμα γεωφυσικής και γεωτεχνικής επίβλεψης.....	7
1.3. Η εταιρία Glückauf Sondershausen Entwicklungs- und Sicherungsgesellschaft mbH (GSES).....	8
1.3.1. Εισαγωγικά στοιχεία.....	8
1.3.2. Οι τεχνικές λιθογόμωσης του ορυχείου.....	8
1.4. Η εταιρία Erlebnisbergwerk Betreibergesellschaft mbH (EBBG).....	10
1.4.1. Εισαγωγικά στοιχεία.....	10
1.4.2. Οι υπόγειες κατασκευές που πλαισιώνουν την αίθουσα κονσέρτων	11
1.4.3. Αθλητικές διοργανώσεις της εταιρίας.....	13
1.5. Το ορυχείο “Glückauf Sondershausen”.....	13
1.5.1. Εισαγωγικά στοιχεία	13
1.5.2. Ιστορικά στοιχεία.....	14
1.5.3. Ανάπτυξη του ορυχείου.....	15
 2. Γεωλογική και ορυκτολογική δομή των εβαποριτών.....	21
2.1 Η γεωλογία της περιοχής γύρω από το ορυχείο.....	21
2.1.2. Η γεωλογική δομή της Θουρινγκίας	21
2.1.3. Η γεωλογική δομή της περιοχής Südharz.....	23
2.1.3 Η γεωλογική δομή του ορυχείου “Glückauf Sondershausen”.....	29
2.1.4 Η Στρωματογραφική απεικόνιση του φρέατος I.....	34
2.2 Τα ορυκτολογικά χαρακτηριστικά των εβαποριτών.....	35

2.2.1. Ορισμός εβαποριτών.....	35
2.2.2. Γένεση των εβαποριτών.....	37
2.2.3. Συνθήκες καθίζησης των εβαποριτών.....	41
2.2.4. Σειρά καθίζησης και ορυκτολογία των εβαποριτών	42
2.2.5. Δομή των εβαποριτών	44
2.2.6. Υφή των εβαποριτών	47
2.2.7. Ταξινόμηση και ονομασία των εβαποριτών.....	48
2.2.8. Χαρακτηριστικά κοιτάσματα εβαποριτών	51
2.2.9. Τα σημαντικότερα αλατούχα ορυκτά και πετρώματα.....	52
2.2.10. Ορυκτολογικά στοιχεία των σημαντικότερων εβαποριτών.....	56
2.2.11. Χρήσεις των εβαποριτών.....	58
3. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ευστάθεια των αλατωρυχείων.....	60
3.1. Η μηχανική κατάσταση των πετρωμάτων.....	60
3.1.1 Γενικά.....	60
3.1.2. Η σημασία της βραχομηχανικής για τα αλατωρυχεία.....	60
3.1.3. Η σημασία της πραγματοποίησης εργαστηριακών δοκιμών σε αλατούχα πετρώματα.....	62
3.1.4. Η σημασία της διεξαγωγής –επί τόπου- μετρήσεων τάσης – παραμόρφωσης.....	63
3.1.5 Βραχομηχανικές επιδράσεις στα αλατωρυχεία.....	65
3.1.6 Η σημασία του κινδύνου κατακρήμνισης της βραχομάζας για τα ορυχεία ποτάσας.....	66
3.2. Η ύπαρξη υδάτων ή υδατικών διαλυμάτων στα αλατωρυχεία.....	66
3.2.1 Η σημασία και τα γενικότερα αίτια των υδρολογικών κινδύνων στα αλατωρυχεία.....	66
3.2.2. Υδρολογικό υπόβαθρο.....	68
3.2.3 Προέλευση εδαφικού νερού.....	69
3.2.4 Διαλυτοποίηση των αλάτων και σχηματισμός των αλατούχων διαλυμάτων.....	72
3.3. Η ύπαρξη αερίων στα αλατωρυχεία.....	74
3.3.1. Εισαγωγή.....	74

3.3.2. Τα είδη των αερίων που απαντώνται στα αλατωρυχεία.....	74
3.3.3. Η σύνθεση των αερίων.....	76
3.3.4 Μηχανισμοί εξόδου των αερίων στα αλατωρυχεία.....	77
3.3.5 Οι συνέπειες της διαφυγής αερίων στην ασφάλεια, την εκμετάλλευση και το κύκλωμα αερισμού ενός αλατωρυχείου.....	78
3.3.6 Η έκρηξη κατά τις μεταλλευτικές εργασίες.....	80
3.3.7 Τα κοιτάσματα του Südharz.....	82
4. Εργαστηριακές μετρήσεις.....	83
4.1 Εισαγωγή.....	83
4.2. Ο στόχος των βραχομηχανικών εργαστηριακών δοκιμών στα άλατα.....	83
4.3. Ελαστοπλαστική παραμόρφωση και αστοχία.....	85
4.3.1.Αντοχή των αλάτων.....	86
4.3.1α) Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη.....	86
4.3.1β) Αντοχή σε τριαξονική θλίψη.....	88
4.3.1γ) Αντοχή σε εφελκυσμό.....	89
4.3.2. Στοιχειώδης συμπεριφορά των αλάτων.....	89
4.3.2.α) Ελαστικές παράμετροι.....	90
4.3.2β) Χαρακτηρισμός της συμπεριφοράς των αλάτων.....	91
4.3.2γ) Ελαστική συμπεριφορά.....	91
4.3.2δ) Ελαστική και πλαστική συμπεριφορά.....	92
4.3.2ε) Πλαστική συμπεριφορά.....	93
4.3.3.Μεταβατικές παραμορφώσεις των αλάτων.....	94
4.3.3α) Εύθραυστες ελατές παραμορφώσεις.....	94
4.3.3β) Ελαστο-πλαστική παραμόρφωση.....	95
4.3.3γ) Παραμόρφωση λόγω κράτυνσης.....	96
4.3.3δ) Θέρμανση του άλατος.....	97
4.4. Χρονικά εξαρτώμενη αστοχία.....	98
4.4.1) Δομές μικροκατάκλασης.....	99
4.4.2) Η μηχανική της θραύσης.....	100
4.4.3) Προοδευτική αστοχία τοιχώματος.....	101
4.4.4) Αστοχία κατολίσθησης.....	102
4.5 Χρονικά εξαρτώμενες παραμορφώσεις και αστοχίες.....	103
4.5.1 Ρεολογικός χαρακτηρισμός.....	103

4.5.1α) Αρχή της αντιστοιχίας.....	103
4.5.1β) Γενικευμένο μοντέλο Kelvin.....	105
4.5.1γ) Μοντέλο ετερογενούς σώματος.....	106
4.5.2. Ιδιότητες ερπυσμού.....	107
4.5.2α) Η έννοια του ερπυσμού.....	107
4.5.2β) Ερπυσμός σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία.....	109
4.5.2γ) Ερπυσμός γύρω από κυκλικά ανοίγματα.....	110
4.5.3 Μηχανισμός ερπυσμού.....	111
4.5.3α) Διαταραχή ολίσθησης.....	111
4.5.3β) Διαταραχή εφίπλευσης.....	112
4.5.3γ) Ερπυσμός διάχυσης.....	112
4.5.3δ) Ολίσθηση ορίων των κόκκων.....	113
4.5.4 Θραύση ερπυσμού.....	114
4.5.4α) Παραμόρφωση ερπυσμού και θραύσης.....	114
4.5.4β) Πολυαξονική θραύση ερπυσμού.....	116
4.5.4γ) Θραύση ερπυσμού.....	117
4.6. Οι εργαστηριακές δοκιμές σε δείγματα της αίθουσας κονσέρτων.....	118
4.6.1. Βραχομηχανικές εργαστηριακές δοκιμές.....	119
4.6.1α) Λήψη πυρήνων.....	119
4.6.1β) Ορυκτολογικά χαρακτηριστικά των πυρήνων.....	119
4.6.1γ) Φυσικές παράμετροι.....	121
4.6.1δ) Πρόγραμμα δοκιμών.....	121
4.6.1ε) Τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών.....	122
4.6.1ζ) Σύνοψη και συμπεράσματα.....	122
5. Ο σχεδιασμός της αίθουσας κονσέρτων.....	136
5.1. Εισαγωγή.....	136
5.2. Ακουστική μελέτη.....	137
5.2.1. Σκοπός της ακουστικής μελέτης.....	137
5.2.2 Γενικά στοιχεία για την ακουστική.....	137
5.2.2α) Γενικά κριτήρια ακουστικής χώρου (TÜV Thüringen, 1999).....	138
5.2.3 Βασική κατασκευή της αίθουσας κονσέρτων.....	143
5.2.4 Επιφάνεια της αίθουσας και επιστροφή του ήχου.....	144
5.3 Γεωλογική μελέτη.....	145

5.3.1 Αρχικές παρατηρήσεις.....	145
5.3.2 Θέση της περιοχής μελέτης.....	146
5.3.3 Τα αποτελέσματα έρευνας.....	146
5.3.4 Γεωλογική δομή, κατάσταση του πετρώματος, διαστάσεις.....	146
5.3.5 Συμπεράσματα για την προχώρηση.....	147
5.4 Η βραχομηχανική μελέτη της IfG.....	149
5.4.1 Παρατηρήσεις για την ευστάθεια.....	149
5.4.2 Το υπολογιστικό πρόγραμμα που εφαρμόστηκε.....	149
5.4.3.Αριθμητικοί υπολογισμοί.....	150
5.4.3α). Δομή του μοντέλου.....	150
5.4.3β). Ιδιότητες υλικού και οι χρησιμοποιούμενοι νόμοι της ύλης.....	152
5.4.4. Αρχική κατάσταση τάσεων.....	155
5.4.5 Αποτελέσματα υπολογισμών.....	155
5.4.6. Συμπεράσματα.....	161
6. Ανάπτυξη του έργου.....	162
6.1 Τοποθέτηση του έργου.....	162
6.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά.....	162
6.2.1. Τεχνικές λεπτομέρειες του έργου.....	162
6.2.2 Προχώρηση και κοπή.....	163
6.2.3 Η γεωμετρία της αίθουσας.....	166
6.3. Επιμέρους εργασίες διαμόρφωσης του χώρου.....	167
6.4. Ο αερισμός της αίθουσας κονσέρτων.....	169
6.4.1 Υπολογισμός της κατάλληλης ποσότητας αέρα.....	169
6.5 Προστασία από πυρκαγιά.....	170
6.6 Η κοπτική μηχανή που χρησιμοποιήθηκε.....	171
7. Η μέθοδος διεξαγωγής των μετρήσεων.....	175
7.1. Εισαγωγή.....	175
7.2 Η μέθοδος της «υδραυλικής θραύσης».....	175
7.3 Θεωρητικό υπόβαθρο της μεθόδου υδραυλικής θραύσης.....	179
7.4 Τεχνικά στοιχεία της συσκευής που χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις.....	189
7.5 Η πίεση θραύσης p_A και η-επί τόπου- αντοχή σε θραύση, σ_{AZ}	194

8. Καταγραφή και αξιολόγηση των μετρήσεων.....	199
8.1. Εισαγωγή.....	199
8.2 Οι γεωλογικές συνθήκες στην περιοχή των μετρήσεων.....	199
8.3. Η κατάσταση της εξόρυξης στην περιοχή των δοκιμών.....	202
8.4. Καταγραφή των μετρήσεων υδραυλικής θραύσης που πραγματοποιήθηκαν στο ορυχείο Glückauf Sondershausen.....	203
8.4.1. Τα αποτελέσματα των παλιών μετρήσεων (1990).....	203
8.4.2. Επανάληψη των παλιών μετρήσεων, επί του ανατολικού επιπέδου φόρτωσης εκφόρτωσης (F176-GL).....	208
8.4.3. Επανάληψη των παλιών μετρήσεων, ΒΑ του φρέατος I (F177-GL).....	210
8.4.4. Νέες μετρήσεις στην περιοχή της προβλεπόμενης αίθουσας κονσέρτων, <u>πριν</u> από την έναρξη της προχώρησης.....	212
8.4.5. Επαναληπτικές μετρήσεις <u>μετά</u> την κατασκευή της αίθουσας κονσέρτων.....	216
8.4.6 Οι δεύτερες επαναληπτικές μετρήσεις των υπόγειων παραμορφώσεων στην περιοχή γύρω από την υπόγεια αίθουσα κονσέρτων.	222
8.4.7 Μετρήσεις εγκάρσιας παραμόρφωσης των στύλων και μετρήσεις σύγκλισης.....	229
8.4.8 Κατακόρυφες και οριζόντιες παραμορφώσεις στην αίθουσα κονσέρτων.....	232
8.5 Γεωτεχνική εκτίμηση των ανιχνευμένων στατικών τάσεων.....	232
8.6. Η συμπεριφορά της χαλάρωσης σε συνάρτηση με το χρόνο.....	238
8.7. Συνοπτική εκτίμηση της κατάστασης στην περιοχή της κατασκευής της υπόγειας αίθουσας κονσέρτων.....	239
 9. Συμπεράσματα.....	 242
Βιβλιογραφία.....	245
Παράρτημα.....	248

1. Οι εταιρίες που συμμετείχαν στην κατασκευή του έργου και το ορυχείο τοποθέτησης αυτού.

1.1. Ο όμιλος επιχειρήσεων ERCOSPLAN

1.1.1. Εισαγωγικά στοιχεία

Ο όμιλος επιχειρήσεων ERCOSPLAN εδρεύει στην πόλη Erfurt (εικόνα 1.1), πρωτεύουσα του ανεξάρτητου κρατιδίου Thüringen (Θουρινγκία) της κεντρικής Γερμανίας. Ο όμιλος δημιουργήθηκε το 1991, μετά την διάσπαση του προγενέστερου κεντρικού γραφείου βιομηχανικού σχεδιασμού της ποτάσας (Kali-Ingenieurbüro) της πρώην Ανατολικής Γερμανίας.



Εικόνα 1.1: Τα γραφεία του ομίλου ERCOSPLAN στην πόλη Erfurt

Η δραστηριότητα του γραφείου αυτού, είχε ξεκινήσει στην Erfurt από το 1955 κι έκτοτε λειτουργούσε υπό διάφορες ονομασίες. Ο όμιλος είναι 100 % ιδιωτικός, ενώ περισσότερο από το 85 % των μετοχών του, ανήκει στους ίδιους τους διευθυντές των εταιριών από τις οποίες απαρτίζεται. Το συνολικό προσωπικό που απασχολούν σήμερα οι 5 εταιρίες του ομίλου ανέρχεται στους 125 μηχανικούς και τεχνικούς.

1.1.2. Από το παρελθόν στο σήμερα

Κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του '80, η πρώην Ανατολική Γερμανία κατείχε την τρίτη θέση παραγωγής ποτάσας σε παγκόσμιο επίπεδο και η χώρα διένυε την τέταρτη δεκαετία επιτυχούς παραγωγής ορυκτών αλάτων. Εκείνη την εποχή η τεχνική εταιρία Kali-Ingenieurbüro, ήταν η μόνη εταιρία βιομηχανικού σχεδιασμού ποτάσας της χώρας, τη στιγμή που η συνολική αξία των επενδύσεων για την εξόρυξη και τις

υπόλοιπες υπηρεσίες παραγωγής ορυκτών αλάτων, ξεπερνούσε το ποσό των 5.5 δις δολαρίων Αμερικής.

Στα μέσα της δεκαετίας του '70, κι ενώ οι διαθέσιμοι πόροι συλβινίτη στις παραδοσιακές τοποθεσίες ορυκτών αποθεμάτων είχαν ήδη μειωθεί αισθητά, εντοπίστηκαν νέα καρναλινικά κοιτάσματα. Έτσι, τα τελευταία χρόνια λίγο πριν την επανένωση του Γερμανικού κράτους, η παραγωγή ποτάσας καρναλινικής προέλευσης στην πρώην Ανατολική Γερμανία, ανερχόταν σε περισσότερο από το 30% της συνολικής εξόρυξης. Ο ρόλος της ERCOSPLAN εκείνη την εποχή, ήταν να συμβάλλει στη μείωση των μεταλλευτικών απωλειών και στην αύξηση του βαθμού εξόρυξης καρναλινικών κοιτασμάτων, καθώς και στο σχεδιασμό και την εφαρμογή νέας τεχνολογίας στην εξόρυξη (θαλάμων και στύλων) και στη στρατηγική λιθογόμωσης των αλατωρυχείων.

Μεταξύ των καινοτομιών που εισήγαγε η ERCOSPLAN ήταν η ανάπτυξη εξειδικευμένων μεθόδων εξόρυξης, ο στόχος των οποίων ήταν η μείωση των μεταλλευτικών απωλειών καρναλίτη κατά την ανάκτηση του από επικίνδυνα κοιτάσματα (π.χ. αεριοφόροι) αλλά και η κατασκευή εξειδικευμένων φραγμάτων, οι οποίες επέτρεπαν την εξόρυξη καρναλίτη σε ορυχεία που παρουσίαζαν υδρολογικούς κινδύνους (www.ercosplan.de).

Σήμερα, ο ρόλος του γεωτεχνικού τμήματος της ERCOSPLAN, είναι κυρίως η προστασία των υπόγειων ανοιγμάτων και των επιφανειακών εγκαταστάσεων εξασφαλίζοντας την ευστάθεια των εγκαταλειμμένων ορυχείων. Πρόκειται για ορυχεία, τα οποία μην αντέχοντας τον οικονομικό ανταγωνισμό που προέκυψε μετά την πτώση των σοσιαλιστικών καθεστώτων στις χώρες του ανατολικού μπλοκ, ανέστειλαν οριστικά τη λειτουργία τους. Στα ορυχεία, την ευθύνη της επίβλεψης και της συντήρησης των οποίων φέρει σήμερα η ERCOSPLAN, συγκαταλέγονται και εκείνα των Asse, Bischofferode, Unterbreizbach, Teutschenthal, Rosslebe, Bleicherode και Sondershausen.

Η ERCOSPLAN, ως μέλος της Γερμανικής κοινοπραξίας των συμβούλων ορυκτών αλάτων, έχει συμμετάσχει ακόμη σε διεθνή προγράμματα σχετικά με την ποτάσα, σε χώρες όπως η Ισπανία, το Ιράν, το Ουζμπεκιστάν, το Καζακστάν, το Κονγκό, η Αιθιοπία και η Ταϊλάνδη.

1.1.3. Οι εταιρίες του ομίλου και τα αντικείμενα εργασίας τους



Έρευνα και εκτίμηση αλατούχων κοιτασμάτων
Μεταλλευτική Τεχνολογία κι εξοπλισμός
Ασφάλεια Μεταλλείων – Υδρογεωλογία



Ανάκτηση και επεξεργασία αλάτων



Διαχείριση αλατούχων μεταλλευτικών υπολοίπων
Ανάκτηση μεταλλείων



Τεχνικό γραφείο- Κατασκευές
Μελέτες –Επίβλεψη



Τεχνική θεμελιώσεων
Εδαφομηχανική



Βραχομηχανική
Σεισμική παρακολούθηση
Παρακολούθηση παραμορφώσεων



Μεταλλευτική τοπογραφία

Τεχνική γεωδαισία

1.1.4. Η εταιρία ERCOSPLAN Geotechnik und Bergbau mbH

Η εταιρία Geotechnik und Bergbau mbH, μέλος του ομίλου ERCOSPLAN, συμμετέχοντας επιτυχώς στη δημοπράτηση της αίθουσας κονσέρτων το 1988, ανέλαβε τόσο την κατασκευή της, όσο και την ανακαίνιση της αίθουσας εορτών και συνεστιάσεων, την κατασκευή της αίθουσας προβολών και εκδηλώσεων και την τοποθέτηση ενός μικρού τρένου για τη μεταφορά των επισκεπτών.

Τα αντικείμενα μελέτης και έρευνας της εταιρίας αυτής σχετίζονται με την εξόρυξη, τη γεωτεχνική επίβλεψη και την γεωλογία, αλατούχων κυρίως, κοιτασμάτων. Συνοπτικά, η εταιρία εργάζεται γύρω από:

A. Ορυχεία υπό εκμετάλλευση

- ✖ Τεχνική και τεχνολογία εκμετάλλευσης και εξόρυξης.
- ✖ Αποκάλυψη και περιχάραξη κοιτάσματος, καθοδήγηση εξόρυξης.
- ✖ Ασφάλεια των ορυχείων και της εργασίας σε αυτά

B. Υπόγεια αποθήκευση / Απόθεση μεταλλευτικών απορριμμάτων

- ✖ Αναζήτηση θέσεων απόθεσης / αποθήκευσης απορριμμάτων.
- ✖ Ασφάλιση χώρων αποδοχής απορριμμάτων / ρεαλιστική αντιμετώπιση σεναρίων πιθανών κινδύνων.
- ✖ Επιλογή υλικών και ανάπτυξη μειγμάτων.
- ✖ Τεχνική και τεχνολογία μεταφοράς και υποστύλωσης

Γ. Εγκαταλειμμένα ορυχεία

- ✖ Επαναχρησιμοποίηση μεταλλευτικών εγκαταστάσεων

- ✖ Σχεδιασμός εγκατάλειψης επιφανειακών ή/και υπόγειων εγκαταστάσεων εξόρυξης, βάση των μεταλλευτικών και περιβαλλοντικών παραμέτρων
- ✖ Ανάλυση επιφανειακών καταστροφών, εξαιτίας ενός ορυχείου
- ✖ Αξιοποίηση πρώτων υλών, ξένων ως προς το ορυχείο, για λιθογόμωση
- ✖ Εγκατάλειψη φρεάτων, στοών και υπόγειων ανοιγμάτων

Δ. Γεωτεχνία

- ✖ Γόμωση και σφράγισμα οριζόντιων και κατακόρυφων υπόγειων ανοιγμάτων
- ✖ Ασφάλεια βράχων και πρανών, καθώς και στείων υπολειμμάτων
- ✖ Υπόγειες κατασκευές και σήραγγες

Ε. Έρευνα και αξιολόγηση νέων κοιτασμάτων

- ✖ Αναζήτηση κοιτασμάτων ορυκτών πρώτων υλών
- ✖ Γεωλογική και οικονομική εκτίμηση νέων κοιτασμάτων
- ✖ Μοντελοποίηση κοιτασμάτων
- ✖ Μεταλλευτική υδρογεωλογία

1.2. Η εταιρία Kali-Umwelttechnik GmbH (K-UTEC)

1.2.1. Εισαγωγικά στοιχεία

Η εταιρία K-UTEC GmbH έχει την έδρα και τις εγκαταστάσεις της, στην πόλη Sondershausen της Θουρινγκίας (εικόνα 1.2).

Ως τεχνική και ερευνητική εταιρία η K-UTEC, ιδρύθηκε το 1992 αμέσως μετά την ιδιωτικοποίηση του προγενέστερου ινστιτούτου ερευνών ποτάσας (Kali-Forschungsinstituts) της καλιούχου



Εικόνα 1.2: Οι εγκαταστάσεις της εταιρίας K-UTEC στην πόλη Sondershausen

βιομηχανίας της κεντρικής Γερμανίας. Η έδρα της εταιρίας παραμένει εδώ κατ'αντιστοιχία με την ιστορική της προέλευση και εξακολουθεί να είναι μεγάλης επιστημονικής σημασίας για την Βόρεια Θουρινγκία.

Το ανθρώπινο δυναμικό της εταιρίας, ανέρχεται στους 74 περίπου τεχνικούς και επιστήμονες (ηλεκτρολόγοι μηχανικοί, μηχανικοί ορυχείων, φυσικοί, χημικοί, γεωλόγοι, γεωφυσικοί, ορυκτολόγοι, κ.α.), το πεδίο γνώσεων και εμπειριών των οποίων, σχετίζεται με θέματα που αφορούν στις εφαρμογές πάνω και γύρω από τα ορυχεία ποτάσας και στην επεξεργασία καλιούχων πρώτων υλών (www.kutec.de).

Πέρα από τις υπηρεσίες που προσφέρει η εταιρία γύρω από τα ενεργά και τα εγκαταλελειμμένα ορυχεία ποτάσας, οι δραστηριότητες της επεκτείνονται και σε υπόγεια ή επιφανειακά μεταλλεία άλλων πρώτων υλών, καθώς και σε γενικότερα τεχνικά θέματα που αφορούν στο γήινο φλοιό.

1.2.2. Τα τμήματα της εταιρίας και τα αντικείμενα εργασίας τους

Η K-UTEC, αποτελείται από πέντε επιμέρους τμήματα, τα βασικότερα αντικείμενα απασχόλησης των οποίων είναι:

A. Φυσικό-χημικές μέθοδοι τεχνικού ελέγχου

- Παρασκευή μαγειρικών και χημικών αλάτων
- Παρασκευή μειγμάτων λιπασμάτων
- Παρασκευή θεικών αλάτων, χλωριδίων, υδροξειδίων, νιτρικών και φωσφορικών αλάτων
- Ανακύκλωση αλάτων βαρέων μετάλλων

B. Φυσικό-χημική ανάλυση

- Αερίων και στείων υλικών
- Ορυκτών και αλατούχων πρώτων υλών
- Υδατικών απορριμμάτων, εδαφικού και πόσιμου νερού
- Ωφέλιμων και καλλιεργήσιμων εδαφών.

Γ. Μέθοδοι κι εκτέλεση λιθογόμωσης

- Ανάπτυξη τύπων και μεθόδων λιθογόμωσης μέσω βαρύτητας, Big-Bag, απόπλυσης και πολφού.
- Παρασκευή ειδικών συστημάτων συνδετικών υλών για αλατούχες εφαρμογές
- Ανάπτυξη συστημάτων Gel για τη σταθεροποίηση ανοιγμάτων μέσα σε άλατα

Δ. Γεωοικολογία

- Μοντελοποίηση συστημάτων απόσβεσης και εκροής
- Λεπτομερείς γεωλογικές και υδρογεωλογικές έρευνες
- Έρευνα και οικολογική αξιολόγηση βιομηχανικών υπολειμμάτων
- Σχεδιασμός και διαχείριση αλατούχων καταλοίπων.

Ε. Γεωφυσική και γεωτεχνική επίβλεψη

- Γεωφυσική επίβλεψη
- Γεωφυσική ανίχνευση
- Γεωμηχανική (παλαιά ορυχεία, κυρίως αλάτων)

1.2.3 Το τμήμα γεωφυσικής και γεωτεχνικής επίβλεψης

Το τμήμα γεωφυσικής και γεωτεχνικής επίβλεψης της K-UTEC επιφορτίζεται με θέματα που αφορούν στη βραχομηχανική επίβλεψη ορυχείων και λοιπών υπόγειων ανοιγμάτων, καθώς και στην επίλυση προβλημάτων που αφορούν στην ευστάθεια των ορυχείων. Μεταξύ των αντικειμένων πάνω στα οποία εργάζεται, είναι ο προσδιορισμός των υπόγειων παραμορφώσεων με τη μέθοδο της υδραυλικής θραύσης, η ανάκτηση γεωτεχνικών στοιχείων που αφορούν σε απροσπέλαστα ή πληρωμένα υπόγεια ανοίγματα, η αξιολόγηση της ευστάθειας των βράχων κατά την εξόρυξη ή την κατασκευή σηράγγων και λοιπών υπόγειων έργων, η αξιολόγηση και η επίλυση μεταλλευτικών προβλημάτων και υδρολογικών ή αεριοφόρων κινδύνων, η επίβλεψη υπόγειων χώρων, υπό λιθογόμωση, με επί τόπου μετρήσεις ευστάθειας κ.α.

Την ευθύνη της επίβλεψης της ευστάθειας της αίθουσας κονσέρτων, ανέλαβε ο γεωτεχνικός μηχανικός κύριος Dr. Axel Stäubert, διευθυντής του τμήματος αυτού.

1.3. Η εταιρία Glückauf Sondershausen Entwicklungs- und Sicherungsgesellschaft mbH (GSES)

1.3.1. Εισαγωγικά στοιχεία

Η εταιρία GSES κατέχει την κυριότητα του ορυχείου “Glückauf Sondershausen” από το 1995. Η έδρα της εταιρίας βρίσκεται στην πόλη Sondershausen (εικόνα 1.3), δίπλα στην είσοδο του φρέατος I του ίδιου ορυχείου. Στην εταιρία αυτή, περίπου 100 εργαζόμενοι διαφόρων ειδικοτήτων, ασχολούνται με την επίβλεψη της ευστάθειας του ορυχείου και στην περαιτέρω ανάπτυξη του. Τα τελευταία χρόνια, η εταιρία εφαρμόζει τρεις διαφορετικές τεχνικές λιθογόμωσης στα υπόγεια του ορυχείου, ώστε να εξασφαλίζεται η ευστάθεια του και να είναι δυνατή η περαιτέρω ανάπτυξη αυτού.



Εικόνα 1.3: Η έδρα της εταιρίας GSES GmbH στην πόλη Sondershausen

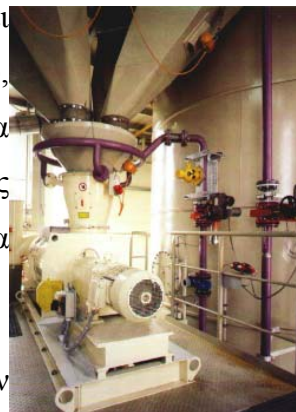
1.3.2. Οι τεχνικές λιθογόμωσης του ορυχείου.

Τα υλικά που χρησιμοποιούνται για τη λιθογόμωση ενός αλατωρυχείου μπορεί, γενικά, να ποικίλουν αλλά η GSES χρησιμοποιεί κυρίως βιομηχανικά κατάλοιπα (σκωρία υψικαμίνου, μεταλλουργικό κοκ και κατάλοιπα χυτηρίων, μεταλλουργική σκωρία, τέφρα και σκόνη από καύσεις, διάφορες στέρεες ορυκτές πρώτες ύλες, στείρα ορυκτά, διάφορα απόβλητα ορυκτής προέλευσης, κ.α.).

Πριν τη λιθογόμωση τα υλικά που πρόκειται να χρησιμοποιηθούν για το σκοπό αυτό, υφίστανται τεχνική επεξεργασία και στη συνέχεια μεταφέρονται στον χώρο εναπόθεσης τους, με μία από τις ακόλουθες τεχνικές (www.gses.de):

α) Υδραυλική λιθογόμωση

Για την υδραυλική λιθογόμωση, παρασκευάζονται μείγματα από υλικά σε μορφή κόνεως, ρευστού ή πολφού, στην αντίστοιχη συσκευή αιωρημάτων της BimSchG (εικόνα 1.4). Τα δομικά υλικά πλήρωσης, τα οποία ικανοποιούν όλες τις παραδοχές της λιθογόμωσης, μεταφέρονται με αντλίες στα υπόγεια, μέσω συστήματος σωληνώσεων.



Σε βάθος 700 m περίπου, το κονίαμα εισέρχεται στον θάλαμο εξόρυξης και αφού στερεοποιηθεί, αναλαμβάνει προστατευτική δράση για τα υπερκείμενα πετρώματα.

Εικόνα 1.4: Αντλία μεταφοράς του υλικού στα υπόγεια

β) Μηχανική λιθογόμωση με μεγάλους σάκους (big bags)

Κατά την εφαρμογή αυτής της μεθόδου, διάφορα απορρίμματα, ανάλογα με τις μηχανικές ιδιότητες που διαθέτουν, τοποθετούνται μέσα σε μεγάλους σάκους (εικόνα 1.5) στις εγκαταστάσεις της εταιρίας και μεταφέρονται μέσα στο ορυχείο. Με την πάροδο του χρόνου, τα υλικά μέσα στους σάκους στερεοποιούνται και παρέχουν στήριξη στα πετρώματα που τη χρειάζονται.

γ) Λιθογόμωση με απορρίμματα

Τα διάφορα ορυκτά ή δομικά απορρίμματα (εικόνα 1.6), τα οποία διαθέτουν τις απαιτούμενες ιδιότητες για την πλήρωση υπογείων ανοιγμάτων (αντοχή σε θλίψη, περιεκτικότητα σε υγρασία κ.α.), μεταφέρονται μέσω ενός συστήματος δεξαμενών στην περιοχή λιθογόμωσης, χωρίς να υποστούν προηγουμένως επεξεργασία. Οι θάλαμοι γομώνονται απευθείας με τα απορρίμματα με τεχνική κυκλικής φόρτισης.

Η εταιρία GSES μαζί με το δήμο του Sondershausen, είναι οι κύριοι χορηγοί της κατασκευής της αίθουσας των κονσέρτων και γι' αυτό συμμετέχει ενεργά στην αποπεράτωση του έργου. Η γεωλογική μελέτη της κατασκευής έγινε από τον γεωλόγο της εταιρίας, κ. Schappmann



Εικόνα 1.5: Μεγάλοι σάκοι, έτοιμοι προς μεταφορά στα υπόγεια, μπρόστα στην είσοδο του ανελκυστήρα



Εικόνα 1.6: Χώροι αποθήκευσης απορριμμάτων, κατάλληλων για τη λιθογόμωση του ορυχείου

1.4. Η εταιρία Erlebnisbergwerk Betreibergesellschaft mbH (EBBG)

1.4.1. Εισαγωγικά στοιχεία

Η εταιρία EBBG είναι θυγατρική της GSES GmbH και ο σκοπός της ίδρυσης της είναι η τουριστική ανάπτυξη του ορυχείου “Glückauf Sondershausen” και η υλοποίηση του αναπτυξιακού προγράμματος “Grubentourismus”. Η EBBG έχει την έδρα της στις εγκαταστάσεις της μητρικής της εταιρίας και έως σήμερα έχει να επιδείξει πολύ σημαντικό έργο αφού έχει καταφέρει να προβεί στην ανακαίνιση και την αξιοποίηση μεγάλου μέρους των υπόγειων του ορυχείου, καθιστώντας τους επισκέψιμους για το ευρύ κοινό.

Στους άδειους θαλάμους του ορυχείου έχουν λάβει χώρα αρκετές μετατροπές και κατασκευές (www.ebbg.de), οι οποίες κατά καιρούς, εξυπηρετούν αθλητικές διοργανώσεις, μουσειακές εκθέσεις παλαιότερων μεταλλευτικών εξοπλισμών και διάφορες άλλες κοινωνικές εκδηλώσεις (βραδιές ποίησης, μουσικής, συνεστιάσεων και γάμοι).

Όταν το ενδιαφέρον της εταιρίας στράφηκε στην κατασκευή ενός νέου πρωτότυπου έργου, το οποίο θα μπορούσε να προσελκύσει περισσότερους επισκέπτες και ταυτόχρονα να αξιοποιήσει τους υπόγειους χώρους του ορυχείου με τον καλύτερο δυνατό τρόπο, γεννήθηκε η ιδέα της κατασκευής μιας υπόγειας αίθουσας κονσέρτων, η οποία αποτελεί και το αντικείμενο της συγκεκριμένης διπλωματικής εργασίας.

Δεδομένου ότι η εταιρία αυτή, φέρει την ευθύνη της τουριστικής ανάπτυξης του ορυχείου, συμμετείχε εξίσου στην αποπεράτωση της κατασκευής της αίθουσας κονσέρτων.

1.4.2. Οι υπόγειες κατασκευές που πλαισιώνουν την αίθουσα κονσέρτων

α) Η τσουλήθρα

Όπως προκύπτει από τα διάφορα ιστορικά στοιχεία, η κάθοδος των μεταλλωρύχων κατά το παρελθόν, από το ένα επίπεδο του ορυχείου στο άλλο, γινόταν με τη βοήθεια κεκλιμένων σηράγγων, που έμοιαζαν με την παιδική τσουλήθρα. Για την αναβίωση αυτού του παραδοσιακού τρόπου μεταφοράς, κατασκευάστηκε μέσα στον αλίτη, ένα κεκλιμένο διάτρημα (40%), μήκους 36m και διαμέτρου 1m, μέσω του οποίου, μπορεί κανείς να τσουλήσει στο επόμενο επίπεδο.

β) Το τρενάκι

Ως τα μέσα της δεκαετίας του '60, το πλέον διαδεδομένο μέσο μεταφοράς της πρώτης ύλης, του εξοπλισμού και του προσωπικού στα υπόγεια, ήταν τα μικρά τρένα. Κατ' αντιστοιχία με το παρελθόν, μέσα στο ορυχείο τοποθετήθηκαν ράγες μήκους 300 m, πάνω στις οποίες κινείται ένα πετρελαιοκίνητο τρενάκι (εικόνα 1.8), με το οποίο οι επισκέπτες μπορούν να περιηγηθούν στις εγκαταστάσεις του ορυχείου.

γ) Το λεμβοδρόμιο.

Το γεγονός ότι τα αλατούχα κοιτάσματα του ορυχείου Glückauf Sondershausen είναι ηλικίας τουλάχιστον 220 εκατομμυρίων ετών και δεν έχουν υποστεί διάλυση, πιστοποιεί την φυσική στεγανότητα του ορυχείου. Παρόλα αυτά, μέσα στο ορυχείο βρίσκονται περίπου 300.000 m³ κορεσμένων αλατούχων διαλυμάτων, τα οποία προέρχονται από την απόπλυση και την επεξεργασία των μεικτών αλάτων (κιζερίτη και καρναλίτη) κατά την εξόρυξη τους στα μέσα της δεκαετίας του '80. Επειδή τα ρευστά αυτά δεν προκαλούν κανενός είδους διάβρωσης των πετρωμάτων, προέκυψε η ιδέα της μετατροπής τους σε λίμνη κατάλληλη για λεμβοδρομίες.

Η λίμνη αυτή που έχει μήκους 130m και βάθος 1 - 1.5 m, συνδέεται με μια λεκάνη μήκους 90 m που χρησιμεύει στο δέσιμο και την αναστροφή των λέμβων, οι οποίες είναι κατασκευασμένες από ξύλο, κινούνται με ηλεκτρικό κινητήρα και έχουν διαστάσεις 7.5 m μήκος και 1.5 m πλάτος.

δ) Η αίθουσα εορτών και συνεστιάσεων

Η αίθουσα εκδηλώσεων κατασκευάστηκε το 1905 μέσα σε αλίτη Stassfurt, και το σχήμα της οροφής της μοιάζει με εκείνο μιας καμπάνας, με αποτέλεσμα να αποδίδει την ανθρώπινη φωνή με μία εντυπωσιακή ακουστική. Μέσα στην αίθουσα υπάρχουν τραπέζια και καρέκλες χωρητικότητας 60 ατόμων, τους τοίχους της διακοσμούν διάφορων ειδών γεωλογικά έγγραφα ενώ στην οροφή της, είναι τοποθετημένος ένας πολυέλαιος διαμέτρου 3 m. Μέσα στην αίθουσα μπορεί κανείς να απολαύσει τα παραδοσιακά φαγητά των μεταλλωρύχων αλλά και να οργανώσει κάθε είδους κοινωνική εκδήλωση.



Εικόνα 1.7: Η τσουλήθρα μέσα στον αλίτη



Εικόνα 1.8: Το τρενάκι μεταφοράς των επισκεπτών



Εικόνα 1.9: Η αίθουσα εορτών και συνεστιάσεων (1905)

ε) Αίθουσα κονσέρτων

Η αίθουσα κονσέρτων μεγάλων διαστάσεων, η οποία αποτελεί το κέντρο βάρους του προγράμματος “Grubentourismus”, είναι χωρητικότητας 300 ατόμων και προσφέρει ακουστική υψηλής ποιότητας. Βρίσκεται σε βάθος 680 m περίπου και πλαισιώνεται από το φουαγιέ, τις ιματιοθήκες, ένα χώρο γαστρονομικής περιποίησης, υγειονομικούς χώρους, ένα μουσείο με εκθέματα αλάτων και μεταλλευτικό εξοπλισμό παλαιότερης τεχνολογίας, το ανακαινισμένο αντλιοστάσιο, μία αίθουσα

προβολών και διαλέξεων, κλπ. Οι επισκέπτες της αίθουσας κονσέρτων μόνο μέσα στο 2002 ανέρχονται σε 33.100.

1.4.3 Αθλητικές διοργανώσεις της εταιρίας.

Το κέντρο βάρους των αθλητικών δραστηριοτήτων που διοργανώνει η εταιρία EBBG, αποτελείται από επαγγελματικούς και ερασιτεχνικούς ποδηλατικούς αγώνες τύπου Mountain bike αλλά και από αγώνες δρόμου που ονομάζονται «ο δρόμος των κρυστάλλων». Η εταιρία έχει κατακτήσει δύο φορές το βραβείο Guinness για την πρωτοτυπία αυτή, ενώ μελλοντικά, προβλέπεται και η διοργάνωση μαραθωνίου.

1.5. Το ορυχείο “Glückauf Sondershausen”

1.5.1. Εισαγωγικά στοιχεία

Το ορυχείο ποτάσας “Glückauf”, βρίσκεται στην πόλη Sondershausen, 60 km βορείως της Erfurt, πρωτεύουσας του ανεξάρτητου κρατιδίου της Θουρινγκίας. Το κρατίδιο βρίσκεται ακριβώς στο κέντρο του Γερμανικού κράτους και με το τέλος του δευτέρου παγκοσμίου πολέμου, όταν η χώρα πέρασε στην κατοχή των μεγάλων δυνάμεων, η Θουρινγκία πέρασε στον έλεγχο των Σοβιετικών κι έμεινε πίσω από τα εδαφικά όρια της πρώην Ανατολικής Γερμανίας.

Κατά τη ΒΔ-ΝΑ παράταξη του, το ορυχείο “Glückauf Sondershausen” έχει μήκος περισσότερο από 13 km και καταλαμβάνει επιφάνεια εμβαδού, περίπου 25 km². Τα καλιούχα στρώματα του κοιτάσματος Stassfurt, βρίσκονται στο ανατολικό τμήμα του ορυχείου σε βάθη μεταξύ 600 και 1000 m. Για την εκμετάλλευση των κοιτασμάτων δημιουργήθηκαν 6 φρέατα εκ των οποίων, σήμερα, παραμένουν ανοιχτά μόνο το I και το V. Η μέθοδος εκμετάλλευσης που επιλέχθηκε και τέθηκε σε εφαρμογή μέχρι και το 1968 ήταν η μέθοδος θαλάμων και στύλων, με επιμήκεις θαλάμους και μεθοδική λιθογόμωση αυτών, με τη μέθοδο της απόπλυσης με υγρά.

Η μέθοδος λιθογόμωσης με απόπλυση εφαρμοζόταν σε όλα τα καλιούχα ορυχεία του Südharz με επιτυχία από το 1908 έως και το 1962, αλλά μετά την άρση της υποχρεωτικής λιθογόμωσης των ορυχείων, η μέθοδος σταμάτησε να εφαρμόζεται. Το 1968 σταμάτησε η εφαρμογή της και στο “Glückauf Sondershausen”, με

αποτέλεσμα ένα σχετικά μεγάλο τμήμα των υπόγειων ανοιγμάτων να παραμείνει αγόμωτο.

Κατά τη διάρκεια της εκμετάλλευσης του ορυχείου από το 1893 έως το 1992, η ποσότητα των ακατέργαστων σιλβινιτικών και καρναλιτικών αλάτων των εβαποριτικών κοιτασμάτων Strassfurt που εξορύχτηκαν, ανέρχεται περίπου στους 110 εκ. τόνους, ενώ ο όγκος των ανοιγμάτων που δημιουργήθηκαν κατά την εξόρυξη αυτή, ήταν 51 εκ. m³.

Η αλλαγή της οικονομικής κατάστασης μετά την επανένωση της Γερμανίας, οδήγησε σε κλείσιμο σχεδόν όλα τα αλατωρυχεία της πρώην Ανατολικής Γερμανίας, και η παραγωγή λιπασμάτων εγκαταλείφθηκε. Το 1991 όταν έλαβε χώρα η αναστολή της παραγωγής και του ορυχείου "Glückauf Sondershausen", ο όγκος υπόγειων ανοιγμάτων που παρέμεναν απλήρωτα, ανερχόταν στα 20*10⁶ m³. Με στόχο να αποφευχθούν επιφανειακές καθιζήσεις ή υπόγειες κατακρημνίσεις εξαιτίας των ανοιγμάτων αυτών, τέθηκε σε εφαρμογή ένα σχέδιο για την πλήρωση τους.

Οι ιδιότητες ευστάθειας των καρναλιτικών πετρωμάτων, επιφέρουν στα αγόμωτα μεταλλευτικά πεδία του καρναλίτη, αξιοσημείωτη επικινδυνότητα, η οποία έχει διαπιστωθεί έπειτα από βραχομηχανικές και γεωλογικές μελέτες. Το αποτέλεσμα αυτών των μελετών, ανάγκασε την αρμόδια, για τα ορυχεία, αρχή να διατάξει την υποχρεωτική λιθογόμωση τους. Οι εργασίες λιθογόμωσης ξεκίνησαν το 1991 και ολοκληρώθηκαν το 1996, αφού ο αρχικός στόχος τους, ήταν η διασφάλιση της ευστάθειας του ανατολικού πεδίου I, σε βάθος 600-650 m, το οποίο βρίσκεται ακριβώς κάτω από την πόλη του Sondershausen.

Το 1995, το ορυχείο αγοράστηκε από την εταιρία GSES mbH, η οποία μέχρι και σήμερα εκπληρώνει την διάταξη της υποχρεωτικής λιθογόμωσης, αξιοποιώντας διάφορα μεταλλευτικά απορρίμματα. Από τότε, περίπου 2.200.000 t ιδίων υλικών και 600.000 t ξένων, ως προς το ορυχείο, έχουν ήδη μεταφερθεί στα υπόγεια ανοίγματα για τη σταθεροποίηση τους.

1.5.2. Ιστορικά στοιχεία

Κατά τη μελέτη και το σχεδιασμό της αίθουσας κονσέρτων, η γνώση των ιστορικών στοιχείων του ορυχείου, με τις λεπτομέρειες που παρατίθενται παρακάτω, δεν ήταν απαραίτητες, αφού συνήθως σημαντικά είναι μόνο τα γεωλογικά και τεχνικά χαρακτηριστικά της εκμετάλλευσης. Το γεγονός όμως ότι το ορυχείο "Glückauf

Sondershausen” είναι το αρχαιότερο, προσπελάσιμο με οχήματα, αλατωρυχείο του κόσμου, καθιστά την ιστορία του ιδιαίτερα ενδιαφέρουσα (www.gses.de).

Κατά τη διάρκεια της, μεγαλύτερης των εκατό ετών, εκμετάλλευσης του ορυχείου “Glückauf Sondershausen”, κρίθηκε αναγκαία η διάνοιξη έξι φρεάτων, από τα οποία σήμερα μόνο δύο διατηρούνται ανοιχτά και σε ασφαλή κατάσταση (Πίνακας 1.1).

Πίνακας 1.1: Η ονομασία και η διάρκεια ζωής των φρεάτων του ορυχείου Glückauf Sondershausen

Αριθμός φρέατος	Ονομασία	Διάνοιξη	Κλείσιμο
Φρέαρ I	Brüggmannschacht	1893-1895	-
Φρέαρ II	Petersenschacht	1907–1910	1994
Φρέαρ III	Mülerschacht	1911-1912	1994
Φρέαρ IV	Raudeschacht	1911-1913	1996
Φρέαρ V	Esserschacht	1912–1913	-
Φρέαρ VI	v. Nesseschacht	1912–1914	1995

1.5.3 Ανάπτυξη του ορυχείου.

1891: Η ιστορία γύρω από τη διάνοιξη του ορυχείου στο Sondershausen, ξεκίνησε το Μάρτη του 1891, όταν ο εργολάβος Heinrich Brüggmann από το Brünninghausen (Dortmund), καταθέτοντας αίτηση στον έπαρχο του πριγκιπάτου του Schwarzburg-Sondershausen, ζήτησε την έκδοση άδειας για την έναρξη μεταλλευτικών ερευνών στην περιοχή. Τον Ιούλιο του ίδιου έτους η άδεια εγκρίθηκε και στη 01.08. ξεκίνησε η διάνοιξη της πρώτης γεώτρησης στο χωριό Jecha. Λίγους μήνες αργότερα, οι πυρήνες που ελήφθησαν από τη γεώτρηση απέδειξαν την ύπαρξη, μεταξύ άλλων, και ορυκτού άλατος (αλίτη) σε βάθος 465,2 m.

1892: Στα 616 m βάθους γεώτρησης απαντήθηκαν και καλιούχα άλατα και η εκσκαφή συνεχίστηκε μέχρι τα 700,75 m, ενώ τον Αύγουστο του ίδιου έτους, το ηγεμονικό υπουργείο, χορήγησε την άδεια για την εκμετάλλευση των αλάτων.

1893: Με την αρχή του νέου έτους και σε συνεργασία με την Bankverein A. Schaafhausen, Berlin ιδρύθηκε το συνδικάτο “Glückauf”, ενώ την άνοιξη ξεκίνησε η

διάνοιξη του φρέατος I, 4 km ΒΔ του Sondershausen, μεταξύ των κοινοτήτων Stockhausen και Großfurra. Τον Οκτώβρη, η διοίκηση του ορυχείου σύναψε συμβόλαιο με το δημόσιο βασιλικό Πρωσικό σιδηροδρομικό ταμείο, για την προσάρτηση του εργοταξίου στην κύρια σιδηροδρομική αρτηρία της γραμμής Nordhausen-Erfurt.

1894: Στις αρχές του καλοκαιριού, το φρέαρ I που είχε φτάσει σε βάθος 120 m στεγανοποιήθηκε με εντοιχισμό υδατοστεγούς επένδυσης από χυτοσίδηρο.

1895: Στα μέσα του Αυγούστου και σε βάθος 634 m, απαντήθηκε το πρώτο καλιούχο στρώμα πάχους 14 m, ενώ μέχρι τα τέλη του Σεπτεμβρη, ολοκληρώθηκε η διάνοιξη του φρέατος I και ξεκίνησε η περιχάραξη και η αποκάλυψη του κοιτάσματος, η οποία στο τέλος του χρόνου είχε προχωρήσει κατά 88 m.

1896: Από την πρώτη μέρα του νέου έτους, το συνδικάτο “Glückauf” εντάχθηκε στην συντεχνία των μεταλλουργών της πόλης Halber και τον επόμενο μήνα ξεκίνησε η αποστολή τεμαχισμένου κιζερίτη ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), εμπορεύσιμου ως λίπασμα, υπό τη γενική ονομασία “Kainit Sondershäuser”. Με την έναρξη του καλοκαιριού άρχισε η διάνοιξη της δεύτερης γεώτρησης, 1500 m ΝΔ του φρέατος I, στο λόφο Frauenberg, η οποία αποκάλυψε στρώσεις καρναλίτη και κιζερίτη σε βάθος 784 m.

1897: Ολοκληρώνεται το επίπεδο φόρτωσης-εκφόρτωσης του φρέατος I και των βοηθητικών στοών.

1898: Άρχισε η λειτουργία του εργοστασίου εμπλουτισμού του χλωριούχου καλίου από κιζερίτη και η προετοιμασία του πρώτου φορτίου χλωριούχου καλίου από το συνδικάτο, προς πώληση.

1901: Το ανακτημένο ακατέργαστο άλας ανέρχεται σε 110.000 t

1907: Την Άνοιξη του νέου έτους, ξεκίνησαν οι εργασίες διάνοιξης του φρέατος II, σε απόσταση 2,2 km από το φρέαρ I, δίπλα στο σιδηροδρομικό σταθμό του Sondershausen, στην τοποθεσία Bebraer.

1908: Η δικαιοδοσία και η ανάληψη της εκμετάλλευσης του ορυχείου διαιρέθηκε σε 6 μέρη και δημιουργήθηκαν 6 νέα συνδικάτα (Glückauf-Sondershausen, Glückauf- Bebra, Glückauf-Berka, Glückauf-Ost, Glückauf-Ebeleben και Glückauf- west).

1909: Το Σεπτέμβρη, εγκαταστάθηκαν στο φρέαρ I, υπόγεια ρυμουλκά με άλογα, ενώ μόλις ένα μήνα αργότερα εγκαταστάθηκαν και ηλεκτροκίνητες ατμομηχανές.

1910: Τον Ιούλιο ξεκίνησε η διάνοιξη της τρίτης γεώτρησης, 7 km νότια του Sondershausen, στην τοποθεσία Oberspier για την επιβεβαίωση της ύπαρξης κοιτασμάτων στις περιοχές Glückauf- Bebra, Glückauf-Ost και Glückauf-Ebeleben. Σε βάθος 762 m, απαντήθηκε καλιούχο στρώμα και στα τέλη του χρόνου ξεκίνησε η εξόρυξη και στο φρέαρ II.

1911: Η συνέλευση του συνδικάτου αποφάσισε την έναρξη των εργασιών σε βάθος στο φρέαρ III του συνδικάτου Glückauf-Berka κοντά στην κοινότητα Hachelbich. Την άνοιξη, η στοά της υπόγειας σύνδεσης των φρεάτων II και III επεκτάθηκε και το φθινόπωρο ξεκίνησαν οι εργασίες για το φρέαρ IV του συνδικάτου Glückauf-Ost μεταξύ των κοινοτήτων Jecha και Berka καθώς και η απόπλυση στο φρέαρ I.

1912: Στα τέλη του Μάρτη, η συνέλευση των συνδικάτων αποφάσισε τη διάνοιξη των φρεάτων IV, V, η οποία ξεκίνησε στα μέσα του Ιούλη στην περιοχή της κοινότητας Großfurra, ενώ σχεδόν ταυτόχρονα ολοκληρώθηκε η διάνοιξη του φρέατος III, στα 665 m, αφού το καλιούχο στρώμα είχε βρεθεί ήδη στα 624 m. Στα τέλη του Σεπτεμβρίου, ιδρύθηκε εταιρία περιορισμένης ευθύνης υπό την ονομασία “Εργοστάσιο χημικών Glückauf Sondershausen”, η οποία ανέλαβε την επεξεργασία του συνόλου του εξορυσσόμενου άλατος στα εργοστάσια I (Stockhausen) και II (Berka).

1913: Το βάθος του φρέατος V, έφτασε στα 746 m ενώ ολοκληρώθηκε η σιδηροδρομική σύνδεση των φρεάτων III και IV με το εργοστάσιο II, το μήκος της οποίας έφτανε στα 2,6 km. Το εργοστάσιο II, ξεκίνησε την παραγωγή χλωριούχου καλίου και λίγο αργότερα την εκμετάλλευση στο φρέαρ IV.

1914: Ξεκίνησε η ηλεκτρική πυροδότηση των εκρηκτικών στο φρέαρ I ενώ λίγο αργότερα ανεστάλη η εξόρυξη στο φρέαρ II. Στη συνέχεια ξεκίνησε η εξόρυξη στο φρέαρ V, ενώ το φρέαρ VI έφτασε σε βάθος τα 696 m, αφού έχει ήδη συναντήσει το καλιούχο στρώμα στα 614,5 m. Το καλοκαίρι ξεκίνησε η παραγωγή θειικού καλίου στο εργοστάσιο II, ενώ η κήρυξη του πολέμου ανέστειλε την εξόρυξη στο φρέαρ III. Στα τέλη του χρόνου ξεκίνησε η παραγωγή και στο φρέαρ VI.

1916: Ανεστάλη η παραγωγή στο εργοστάσιο II.

1917: Ανεστάλη προσωρινά η λειτουργία των φρεάτων V και VI.

1921: Λόγω του εκσυγχρονισμού του εργοστασίου I, οι κάμινοι ξήρανσης αντικαταστάθηκαν από τύμπανα ξήρανσης, ενώ η εταιρία “Kalischacht-Stillegungsverordnung“ είχε αρχίσει να ισχυροποιείται.

1924: Η εξόρυξη στα φρέατα III και IV, ανεστάλη οριστικά, το εργοστάσιο II στη Berka έκλεισε, ενώ η εξόρυξη στο φρέαρ VI ανεστάλη ως το 1954.

1925: Κατά τη διάρκεια του έτους αυτού έλαβε χώρα μια ενδιαφέρουσα συμφωνία, σύμφωνα με την οποία η εταιρία Kaliindustrie AG, σκόπευε στην αναδοχή του συνδικάτου Glückauf Sondershausen. Η απόφαση αυτή πραγματοποιήθηκε μέσα στο επόμενο έτος μετά την εκκαθάριση του συνδικάτου και την εκποίηση της οποιασδήποτε περιουσίας του στην προαναφερθείσα εταιρία.

1927: Πραγματοποιήθηκε η κατασκευή των εγκαταστάσεων για την υδραυλική μεταφορά των υλικών στο φρέαρ V, ενώ το ατμοκίνητο σύστημα ανέλκυσης του φρέατος I, αντικαταστάθηκε από σύστημα ανέλκυσης Koere. Στα τέλη του Οκτώβρη ξεκίνησε στα φρέατα I και V, η εξόρυξη του μεταλλεύματος με χρήση κοπτικών μηχανών.

1928: Εγκαταστάθηκε εργοστάσιο μίξης για την παρασκευή λιπασμάτων, στην περιοχή του φρέατος I.

1929: Η εταιρία Kaliindustrie AG, που είχε ιδρυθεί το 1921, μετονομάστηκε σε Wintershall AG και το ορυχείο του Sondershausen πήρε την ονομασία Wintershall AG, υποκατάστημα Glückauf Sondershausen.

1934: Ξεκίνησε η κυκλοφορία ποδηλάτων στα υπόγεια, για το προσωπικό επίβλεψης, τους εργάτες και τους φύλακες του μεταγωγού.

1937-1938: Τα φρέατα III και IV μετατράπηκαν σε υπόγειες εγκαταστάσεις παρασκευής πυρομαχικών για το στρατό, ενώ επιτράπηκε και η χρήση μοτοσικλέτας στα υπόγεια. Το 1938, τελευταίο έτος πριν τον πόλεμο, παρήχθησαν 171.743 t K₂O.

1945: Ξεκίνησε η παραγωγή στα φρέατα I και V, ενώ στο τέλος του χρόνου συμμετείχε στην εκμετάλλευση του ορυχείου και η Σοβιετική στρατιωτική διοίκηση (SMA) του κρατιδίου της Θουρινγκίας.

1946: Η SMA έδωσε εντολή παράδοσης του εργοστασίου και των 4 φρεάτων Glückauf I, II, III, IV της Wintershall AG, στον γενικό διευθυντή, που είχε διορίσει στην περιοχή η Σοβιετική Ένωση. Το Σεπτέμβρη συστήθηκε η Σοβιετική Ανώνυμη εταιρία λιπασμάτων καλίου Γερμανίας, με έδρα την Erfurt, η οποία και ανέλαβε όλα τα ορυχεία καλίου που βρίσκονταν στις ζώνες Σοβιετικής κατοχής.

1947: Όταν οι Σοβιετικοί παρέδωσαν την κυριότητα του ορυχείου στο κρατίδιο της Θουρινγκίας, πήρε την ονομασία Kaliwerk Glückauf Sondershausen Landeseigener Betrieb και η ετήσια παραγωγή του έφτασε τους 60.246 t K₂O.

1948: Ιδρύθηκαν οι ενωμένες λαϊκές επιχειρήσεις καλίου και ορυκτού άλατος με έδρα το Halle στις οποίες συγκαταλέχθηκε και το ορυχείο του Sondershausen, οπότε ξεκίνησε και πάλι η παραγωγή νιτρικού καλίου στο Glückauf. Την ίδια περίοδο, στο φρέαρ IV, όλες οι εγκαταστάσεις συμπεριλαμβανομένων και των κοπτικών μηχανών, αποσυναρμολογήθηκαν και απομακρύνθηκαν.

1951: Στις 11 Ιουλίου, στο μέτωπο εξόρυξης απαντήθηκε μεγάλη ποσότητα μεθανίου και η έκρηξη που ακολούθησε στο φρέαρ I, προκάλεσε τον τραυματισμό όλων των εργαζομένων και το θάνατο 12 εξ αυτών.

1954: Στο φρέαρ VI ξεκίνησε η εξόρυξη.

1955: Στην περιοχή του φρέατος II, δημιουργήθηκε το «Κέντρο ερευνών για τη βιομηχανία καλίου» (Zentrale Forschungsstelle für die Kaliindustrie).

1956: Στο ορυχείο I ξεκίνησε εκ νέου η εξόρυξη μέσω E-lok και η λειτουργία της πρώτης μεταφορικής ταινίας, μήκους 2 km.

1957: Συναρμολογήθηκε η πρώτη κοπτική μηχανή στο φρέαρ V.

1962: Στην εξόρυξη εισήχθησαν νέες σύγχρονες μηχανές, ενώ δύο χρόνια αργότερα εγκαταστάθηκε και η πρώτη πετρελαιοκίνητη μηχανή εξόρυξης.

1966: Το φρέαρ VI έφτασε σε παραγωγή 2000 τόνους/ μέρα

1968: Στην επιφάνεια, μεταξύ των φρεάτων I και VI, εγκαταστάθηκε σύγχρονο συνεργείο εργασιών συντήρησης και επιδιόρθωσης, ενώ στις αρχές του 1970 ιδρύθηκε η εταιρία VEB Kombinat KALI με έδρα την πόλη Sondershausen

1971: Εγκαταστάθηκαν οχήματα διάνοιξης διατρημάτων.

1978: Εγκαταστάθηκε νέος ξηραντήρας αλάτων.

1980: Εγκαταστάθηκε μεταφορική ταινία, μήκους 15 km.

1986 : Αυτοματισμός της προσπέλασης στο φρέαρ I.

1987: Ανεστάλη η παραγωγή στο εργοστάσιο μίξης λιπασμάτων.

1988: Ανακατασκευάστηκε ο σωλήνας επένδυσης του φρέατος I.

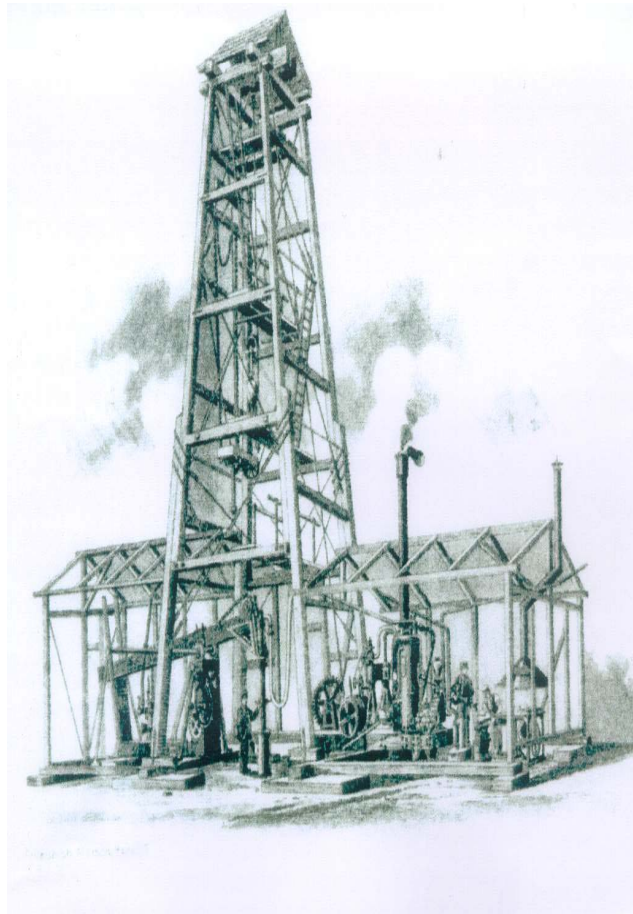
1989: Τελευταίο έτος πλήρους εξόρυξης πρώτης ύλης (2.299,400 t).

1990: Στις αρχές του καλοκαιριού το ορυχείο “Glückauf” απέκτησε την ονομασία: “KALI Südharz AG, εργοτάξιο Glückauf Sondershausen” και στα μέσα του Αυγούστου ανεστάλη η παραγωγή του ορυχείου. Το Σεπτέμβρη, η παραγωγή ξεκίνησε ξανά αλλά με μείωση του προσωπικού από 2.700 εργαζόμενους σε μόλις 700.

1991: Στις αρχές του χρόνου έπαυσε η λειτουργία του Φρέατος V, ενώ το καλοκαίρι έπαυσε οριστικά και η παραγωγή καλίου και βρώμιου. Εν τω μεταξύ, η

συνολική παραγωγή πρώτης ύλης, από την έναρξη της εκμετάλλευσης των φρεάτων I-VI, ανερχόταν σε 110 εκ. τόνους. Η αρμόδια, για τα ορυχεία, αρχή υποχρέωσε τους υπεύθυνους του ορυχείου να προχωρήσουν στη λιθογόμωση των υπόγειων ανοιγμάτων, για λόγους ασφαλείας. Μέχρι το τέλος του χρόνου, είχαν μεταφερθεί για το σκοπό αυτό στα υπόγεια, περίπου 163.876 τόνοι υλικού.

1992: Η διαδικασία λιθογόμωσης του ορυχείου συνεχίστηκε με έμφαση στο τμήμα που βρισκόταν κάτω από την πόλη Sondershausen και μέχρι το τέλος του χρόνου, το υλικό που είχε μεταφερθεί για τη γόμωση, ανερχόταν σε 412.154 τόνους. Η διαδικασία της λιθογόμωσης συνεχίζεται μέχρι και σήμερα.



2. Γεωλογική και ορυκτολογική δομή των εβαποριτών

2.1 Η γεωλογία της περιοχής γύρω από το ορυχείο

2.1.2. Η γεωλογική δομή της Θουρινγκίας

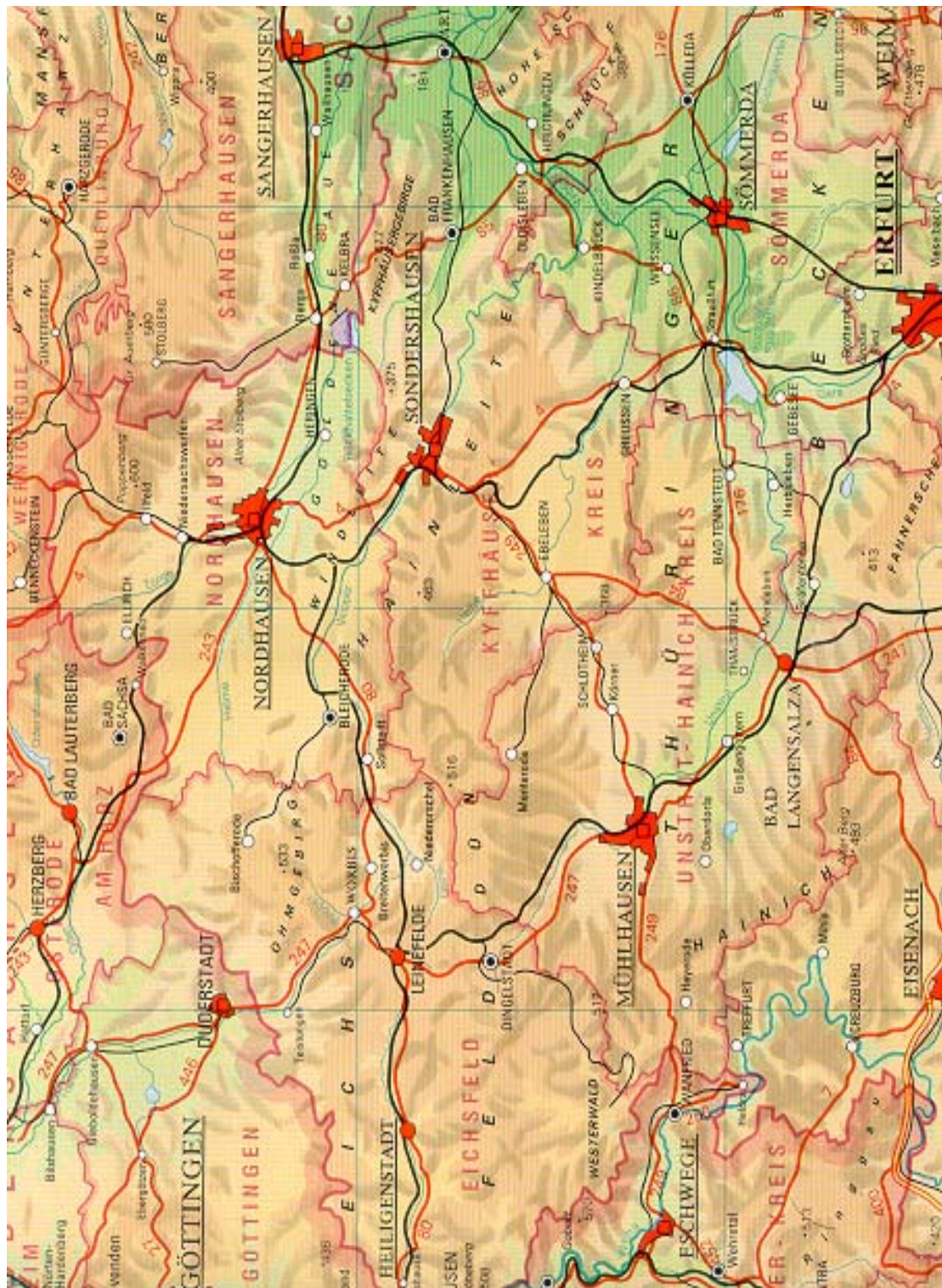
Από γεωγραφικής απόψεως, το κρατίδιο της Θουρινγκίας, συνορεύει με πέντε γερμανικά κρατίδια. Στα ΒΔ του σύνορα βρίσκεται το Niedersachsen (Κάτω Σαξονία), στα ΒΑ το Sachsen-Anhalt, στα δυτικά του σύνορα βρίσκεται το Hessen (Εσση), στα ανατολικά το Sachsen (Σαξονία) και στα νότια το Bayern (Βαυαρία). Στα βόρεια όρια της Θουρινγκίας, εκτείνεται το νότιο τμήμα του δάσους Harz (Südharz), έκτασης πολλών τετραγωνικών χιλιομέτρων και το οποίο έχει δώσει το όνομα του, τόσο στην περιοχή όσο και στα εβαποριτικά κοιτάσματα (καλιούχα κυρίως), που φιλοξενούνται στο εσωτερικό της.

Η γεωλογική δομή της Θουρινγκίας είναι ιδιαίτερος πολύπλοκη αλλά παρουσιάζει εξαιρετικό ενδιαφέρον. Η επιφανειακή γεωλογική της διαμόρφωση οφείλεται στην εξέλιξη του γήινου ανάγλυφου κατά τη διάρκεια της Τριτογενούς και της Τεταρτογενούς γεωλογικής περιόδου. Η μορφογένεση που πραγματοποιήθηκε, εξαιτίας των κλιματολογικών και των γεωτεκτονικών μεταβολών (επίδραση παγετώνων), τροποποίησε τη μορφή του ανάγλυφου κατά τις επόμενες γενεές, μέσω των διαφόρων διαδικασιών καθίζησης και καταβύθισης, κυρίως σε περιοχές, το υπόβαθρο των οποίων αποτελείται από εβαπορίτες.

Γεωλογικά, το κρατίδιο, διακρίνεται σε τέσσερις κύριες γεωλογικές ενότητες (Εικόνα 2.1):

1. Thüringisches Schiefergebirge (Οροσειρά σχιστόλιθων της Θουρινγκίας)
2. Thüringer Wald (Δάσος της Θουρινγκίας)
3. Thüringer Becken (Λεκάνη της Θουρινγκίας)
4. Sudwestthüringisches Triasgebiet (Τριαδικό τμήμα της ΝΔ Θουρινγκίας)

Τα καλιούχα κοιτάσματα Südharz στο εσωτερικό των οποίων, αναπτύσσονται και τα κοιτάσματα “Glückauf” του ομώνυμου ορυχείου, βρίσκονται μέσα στη γεωλογική λεκάνη της Θουρινγκίας.



Εικόνα 2.1: Ο γεωλογικός χάρτης της Θουρινγκίας, στον οποίο διακρίνονται οι τέσσερις γεωλογικές ενότητες

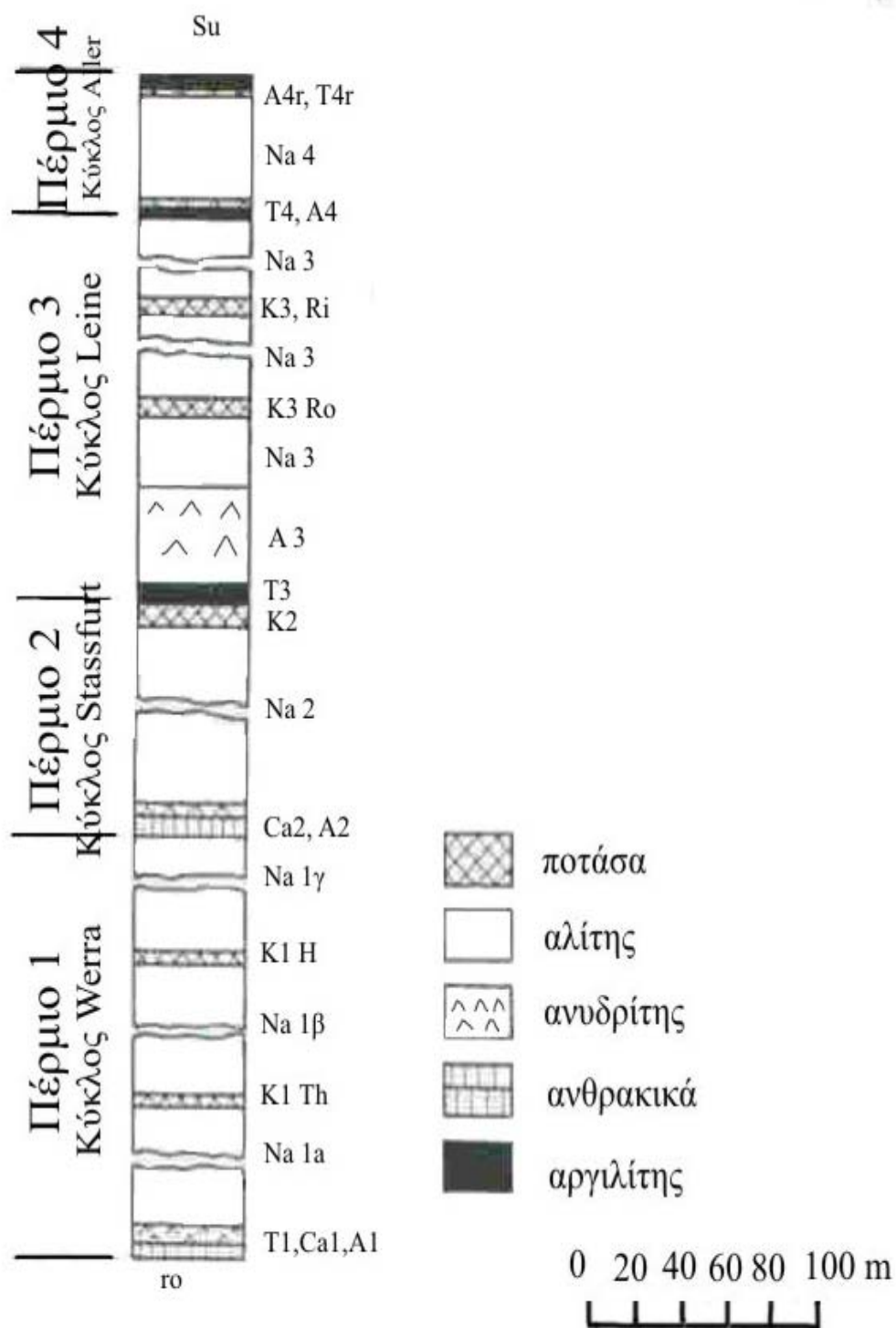
Προς Ανατολάς, τα κοιτάσματα εκτείνονται από τις δυτικές παρυφές της οροσειράς Kyffhäuser (Kyffhäusergebirge) μέχρι τα καλιούχα πεδία στον ποταμό Unstrut, ενώ στα δυτικά φτάνουν ως την πόλη Duderstadt. Στα βόρεια, φυσικό όριο των κοιτασμάτων αποτελεί η ζώνη χημικής αποσάθρωσης που βρίσκεται στα νότια της γεωλογικής λεκάνης του Harz (Harzvorland), ενώ νοτίως, επεκτείνονται έως τη γραμμή που ενώνει, νοητά, τις πόλεις Weimer, Erfurt και Mühlhausen.

Εντός αυτών των τοπικών γεωλογικών πλαισίων, το κοιτάσμα “Glückauf” εκτείνεται γεωγραφικά, μεταξύ των λόφων Windleite (στα ΒΑ) και Hainleite (στα ΝΔ) στην κοιλάδα του ποταμού Wipper. Γεωλογικά, το κοιτάσμα προεκτείνεται εν μέρει, προς τις περιοχές της ερμουνδούριας μετάπτωσης (Hermundurisch Scholle) και τη ζώνη διαταραχής, μεταξύ αυτής και της μετάπτωσης Leisten που έπεται στα νότια. Η ζώνη διαταραχής ονομάζεται «ζώνη διαταραχής της κοιλάδας του Wipper» και αποτελεί τη ΒΔ συνέχεια της διαταραχής Finne. Τα κοιτάσματα “Glückauf” έχουν κατεύθυνση ΒΔ-ΝΑ και το μήκος της κύριας παράταξης τους φτάνει τα 15 km περίπου, ενώ κατά την κλίση τους, ανέρχεται η μεγαλύτερη προέκτασή τους, δηλαδή τα 5.5 km (κατά Schappman).

2.1.3. Η γεωλογική δομή της περιοχής Südharz

Στην περιοχή του Südharz, το τμήμα της λεκάνης της μεσευρωπαϊκής θάλασσας του Περμίου, (νοτίως των καλιούχων στρωμάτων Stassfurt), ήταν ουσιαστικά πιο ρηχό από τις βαθύτερες επιφάνειες της λεκάνης, στις οποίες σχηματίστηκαν τα άλατα των καλιούχων περιοχών Saale/Unstrut και Nordharz. Έτσι, η στρωματική ακολουθία του Περμίου (Εικόνα 2.2) παρουσιάζει σημαντικές διαφορές στο πάχος και τη φασική ανάπτυξη των επιμέρους τμημάτων της (Gimm, 1968):

Α) Ο ορίζοντας της βάσης του περμίου 1 (κύκλος Werra): τα κροκαλοπαγή και η κρητίδα του Περμίου (Ca1), καθώς και ο χλωριούχος σχιστόλιθος (T1), εμφανίζουν δομή, αντίστοιχη με εκείνη της υπόλοιπης περιοχής εξάπλωσης, αφού η καθίζηση συντελείται μέχρι τα όρια του Eichsfeld. Ο χαλκούχος σχιστόλιθος που απαντάται βρίσκεται εν μέρει μέσα σε φάσεις χαλκού (Cu) και εν μέρει μέσα σε φάσεις μόλυβδου (Pb) και ψευδαργύρου (Zn).



Εικόνα 2.2: Στρωματογραφική τομή του Περμίου στη Γερμανία (Gimm, 1968)

Πάνω από την περμιακή κρητίδα, η στρωματική ακολουθία του Περμίου 1 και του Περμίου 2, παρουσιάζει εκτεταμένη φασική διαφοροποίηση, αφού το πάχος του ανυδρίτη Werra (A1) στη ΝΑ πλευρά του Eichsfeld, κυμαίνεται μεταξύ 0 και 50 m, ενώ προχωρώντας προς τα ανατολικά, φτάνει τα 200 m, όπου και εκτείνεται μέχρι το Mühlhausen (από το Nordhausen και μέσω του Sondershausen).

Σε μεμονωμένα κοιτάσματα στην περιοχή των Eichsfeld και Kyffhäuser, παρατηρούνται παρεμβολές ορυκτού άλατος Werra (Na1), το πάχος των οποίων, περιορίζεται γενικά κάτω των 20 m, ενώ στις κεντρικές περιοχές της λεκάνης της Θουρινγκίας, φτάνει σε πάχος από 100 έως 200 m. Στην περιοχή Mühlhausen-Schlotheim μεταβαίνει σχεδόν άμεσα, σε ένα ανυδριτικό ισοδύναμο, ενώ ταυτόχρονα οι ανυδριτικοί ορίζοντες των υπερκειμένων και των υποκειμένων αποκτούν τα μεγάλα πάχη του προαναφερθέντος ανυδριτικού αναχώματος.

Στα νότια της ημιτάφρου Schlotheim (ορυχείο Pöthen), το παχύ ορυκτό άλας Werra συμμετείχε ουσιαστικά στη διαμόρφωση μιας μεγάλης εφίπλευσης, ενώ και σε άλλα τμήματα του Südharz, είναι πιθανό να έχει επιδράσει το ορυκτό άλας Stassfurt, στα ειδικά σχήματα απόθεσης στο κατώτερο τμήμα των αλατούχων βραχομαζών.

B1) Το Πέρμιο 2 (κύκλος Stassfurt): παρεμβάλλεται στην περιοχή Südharz, μετά από τη δημιουργία ιζήματος αργιλικής βάσης και ανθρακικού ιζήματος Stassfurt (15-20 m), το οποίο βρίσκεται αποκλειστικά στις φάσεις του κυρίου δολομίτη. Στις παρυφές του Eichsfeld απαντάται κύριος δολομίτης, ο οποίος όπως αναφέρει ο Gimm (βασισμένος στους Dubel και Gärtner, 1954), υποδιαιρείται σε 5 ζώνες, βάσει της διαφορετικής πετροφασικής του δομής.

Στην πραγματικότητα, οι ζώνες του κρυσταλλικού δολομίτη (Ca 2α) ο οποίος εδώ απαντάται με τη μορφή λεπτών πλακών καθώς και η οστρακοειδής ζώνη (Ca 2β), η οποία αποτελείται από μαύρους μαργαϊκούς δολομίτες, ανήκουν στον κύκλο Werra, αφού η ζώνη των αλγών (Ca 2γ) ισοδυναμεί με τον σχιστόλιθο της ανθρακικής φάσης Stassfurt των βαθύτερων επιφανειών της λεκάνης.

Η ζώνη των αλγών (9-28 m) είναι το μητρικό πέτρωμα που χαρακτηρίζει τον κύριο δολομίτη και συνδέει μέσω σχισμών τις εμφανίσεις πετρελαίου και φυσικού αερίου, που περιέχει. Στο σκούρο κόκκινο-πράσινο, πυκνό πέτρωμα δολομίτη υπάρχουν σε μεγάλες ποσότητες μαύρες άργιλο-βιτουμενιούχες ή ανθρακούχες διακλαδώσεις, με πλούσια υπολείμματα αλγών καθώς και σκούρα κόκκινο-πράσινα υπολείμματα βιτουμενίων, ταξινομημένα σε φυλλάρια. Οι λεγόμενες Volkenrode

φάσεις, χαρακτηρίζονται από μεγάλα πάχη αλλά νοτίως της λεκάνης και των παρυφών του Eichsfeld λεπταίνουν και επικαλύπτονται από παχύτερες ζώνες σκούρου, πυκνού έως λεπτοκρυσταλλικού δολομίτη και ανοιχτόχρωμου, πυκνού και ωολιθικού δολομίτη.

Η τελευταία ζώνη χαρακτηρίζεται από ογκώδεις πόρους και ρωγμές, οι οποίες συνέβαλαν στη συσσώρευση αερίων οικονομικής σημασίας νοτίως του Südharz, ενώ κοντά στην περιοχή καθίζησης των αλάτων, απαντώνται αλκαλικά διαλύματα κυρίου δολομίτη. Στο μίγμα αερίων αζώτου-υδρογονάνθρακα περιέχεται κατά τόπους, και υδρόθειο. Η έντονη πίεση της βραχομάζας επιτρέπει στα αέρια και τα αλκαλικά διαλύματα, να διεισδύουν μέσα από τις λεπτές στρώσεις του ορυκτού άλατος Stassfurt και να εισέρχονται στο ορυχείο. Από την εποχή του Περμίου μάλιστα, κατά τις διάφορες τεκτονικές γενέσεις, αέρια που μετανάστευσαν συνοδεύοντας διαλύματα, επέδρασαν στη μεταμόρφωση των καλιούχων αλάτων.

Στα ΒΑ του Südharz απουσιάζουν οι δύο ανώτερες ζώνες του κυρίου δολομίτη και αναπληρώνονται από φάσεις βασικού ανυδρίτη, πάχους μέχρι 30 m. Τελευταία στα ανώτερα τμήματα του, εμφανίζεται μια φασική αναπλήρωση, της μερικών εκατοντάδων μέτρων πάχους, ανυδριτικής περιοχής του ορυκτού άλατος Stassfurt του κέντρου της λεκάνης. Σε περιοχές μεγάλων παχών κυρίου δολομίτη, ο βασικός ανυδρίτης έχει πάχος μικρότερο των 10 m, και προσφέρει ελάχιστη στεγανότητα στους αεριοφόρους και τα αλκαλικά διαλύματα του κυρίου δολομίτη.

Ο λεπτοκοκκώδης έως πυκνός και συνήθως, σκούρος γκρι ανυδρίτης περιέχει λεπτές αργιλικές και ανθρακικές ραβδώσεις με συχνές μεταβάσεις μαζικής ή διάχυτης κατανομής του άνθρακα. Στο ανώτερο τμήμα, όπου σχεδόν απουσιάζει ο άνθρακας αυξάνονται οι αργιλικές προσμίξεις, ενώ απαντώνται συχνά, φαινοκρύσταλλοι ή θύλακες ορυκτού άλατος αλλά τα όρια του με το υπερκείμενο ορυκτό άλας Stassfurt δεν είναι ευδιάκριτα.

Στο κύριο τμήμα, η φάση του ανυδρίτη φτάνει σε πάχος μερικές εκατοντάδες μέτρα και απαντάται, μόνο εκεί, με το κατώτερο τμήμα του ορυκτού άλατος Stassfurt το οποίο έχει συνολικό πάχος γύρω στα 100 m ή ακόμη περισσότερα. Οι ασυνήθιστες μεταβάσεις των φάσεων του ορυκτού άλατος, το οποίο χαρακτηρίζεται από ανυδριτικές ταινίες μέσα στον όγκο του βασικού ανυδρίτη Südharz, δημιουργεί σε αυτό το επίπεδο σημαντικά προβλήματα κατά την ανάπτυξη των στοών της εκμετάλλευσης. Η δομή του ορυκτού άλατος Stassfurt είναι χαρακτηριστική για το Südharz και δεν παρουσιάζει πολυαλιτικές ή κιζεριτικές προσμίξεις, ενώ απαντώνται

αρκετές ελαφρώς εμπλουτισμένες άργιλο-ανυδριτικές προσμίξεις, κατανεμημένες διάχυτα και οριοθετημένες ασαφώς σε λωρίδες, ταινίες και στρώσεις. Το κυρίαρχο γκρι χρώμα απουσιάζει από τα πρώτα 8 m, όπου η στρώση γίνεται πιο ξεκάθαρη με ένα κόκκινο-κίτρινο χρώμα.

Στην περιοχή των παρυφών του Eichsfeld και στην εγγύτερη περιοχή Volkenroda, ο κόκκινος ως καφέ-κίτρινος χρωματισμός εξασθενεί προς τα κάτω, κοντά στο βασικό ανυδρίτη και ταυτόχρονα μειώνεται ουσιαστικά το πάχος του. Επειδή μάλιστα, στα σημεία όπου τα πάχη του ορυκτού άλατος Stassfurt μειώνονται στα 20 m ή και λιγότερο και το ορυχείο είναι αρκετά εκτεθειμένο στα αλκαλικά διαλύματα και στους αεριοφόρους, έχει αποφευχθεί σκόπιμα η εξόρυξη.

B2) Τα καλιούχα στρώματα Stassfurt (K 2) της περιοχής Unstrut υποδιαιρούνται στην ομάδα των υπερκειμένων και την ομάδα των υποκειμένων (Tinnes, 1928), όπου αρχικά, διακρίνεται ένας αριθμός στρώσεων ορυκτού άλατος, πάχους περίπου από 15 ως 50 cm, από τις οποίες, οι δέκα πρώτες χαρακτηρίζονται ως κύριες στρώσεις. Ο χαρακτηρισμός τους προκύπτει από τη στρωματογραφική τους θέση μέσα στο σύνολο των στρωμάτων, την ομαδοποίησή τους, το πάχος τους, το χρώμα τους, την οριοθέτηση και τη στρώση των ορυκτών τους καθώς και από τη δομή του ενδιάμεσου μέσου υπό τις ιδιαίτερες προϋποθέσεις των συνήθων συνοδευτικών στρώσεων. Η στρωματογραφία των κυρίων στρώσεων σε τεκτονικά διαταραγμένες περιοχές, έχει μεγάλη πρακτική σημασία κατά τις μελέτες γένεσης και κατανομής των διαφόρων τύπων δόμησης των στρωμάτων.

Η ομάδα των υπερκειμένων στρωμάτων εμφανίζει ορισμένες επιπλέον κύριες στρώσεις (9-11) οι οποίες, αν και δεν είναι σημαντικές, οδήγησαν τον Doehner το 1965 (όπως αναφέρει ο Gimm, 1968), στο συμπέρασμα ότι το υπερκείμενο τμήμα του στρώματος Stassfurt στην καμπή του Περμίου 2 και 3, υπέστη απόρριψη εξαιτίας της αραίωσης του διαλύματος της λεκάνης. Το βάθος της απόρριψης εξαρτήθηκε από την εκτόνωση του δαπέδου της λεκάνης εξευγενισμού. Έτσι, σε περιοχές σχετικά επίπεδες κοντά στα άκρα της λεκάνης, τα χλωριούχα άλατα έφτασαν μέχρι τη μέση των υποκειμένων στρωμάτων, στα βαθύτερα τμήματα της λεκάνης η διαδικασία σταμάτησε σε υψηλότερα τμήματα των στρωμάτων, ενώ στο κέντρο της λεκάνης, στα κοιτάσματα του Südharz, το στρώμα Stassfurt αποτελείται πλήρως από χλωριδική δομή.

Με τον ίδιο τρόπο επέδρασαν τοπικές καταβυθίσεις, οι οποίες εμφανίστηκαν λόγω της μείωσης του όγκου του ορυκτού άλατος που δημιουργήσε η μεταμόρφωση,

πάνω από τις περιοχές πτώχευσης του μεταλλεύματος. Η διαδικασία αυτής της πτώχευσης ολοκληρώνεται στην καμπή του Περμίου 2 και 3.

Ο καλυπτικός ανυδρίτης αποτελεί το υπολειμματικό προϊόν αυτής της διαδικασίας αλκαλοποίησης, ενώ το περίβλημα του ορυκτού άλατος και της ανώτερης στρώσης κιζερίτη παρουσιάζουν στάδια μετάβασης σε εντελώς ανεπηρέαστη στρώση καρναλίτη. Κατά μήκος του λόφου Dün και νοτίως του λόφου Hainleite εκτείνεται μια περιοχή καρναλιτίτη και φτάνει μέσω του Volkramshausen, ως το Bleicherode. Στη διαμόρφωση ζωνών εναλλασσόμενου πάχους, μεταξύ της περιοχής ολικής ποιοτικής πτώχευσης και καρναλιτίτη, παρεμβάλλονται περιοχές ανάπτυξης καθαρού κιζερίτη και κιζερίτη-καρναλιτίτη.

Η πετρογραφική δομή των καλιούχων κοιτασμάτων του Südharz χαρακτηρίζεται σε σχέση με τις υπόλοιπες καλιούχες περιοχές από την έντονη παρουσία του ανυδρίτη και την εκτεταμένη μείωση του κιζερίτη. Ο κιζερίτης περιέχει περίπου 55-65% αλίτη, 20-30% συλβίνη, 15-20% ανυδρίτη και λίγη άργιλο με περιεκτικότητα σε K_2O , περίπου 12-20%.

Γ) Το Πέρμιο 3 (κύκλος Leine): υπό αυστηρά κυκλική έννοια, ξεκινάει με καθίζηση λεπτόκοκκων-αμμωδών υλικών, στο επάνω μέρος του γκρίζου αλατούχου αργίλου (15-35 m). Η χαρακτηριστική, για τη γερμανική λεκάνη του Περμίου, τριπλή υποδιαίρεση του γκρίζου αλατούχου αργίλου, σε ένα άργιλο-ανυδριτικό, ένα άργιλο-αμμώδη και ένα άργιλο-ανθρακικό τμήμα, ισχύει και για την περιοχή του Südharz, με μια ακόμη υποδιαίρεση. Ο ταινιώδης ανυδρίτης, ο οποίος ονομάζεται και αργιλούχος ανυδρίτης, στα άκρα της λεκάνης, έχει πάχος 1-2 m, ενώ απουσιάζει σχεδόν, από τις βαθύτερες επιφάνειες της λεκάνης στο τμήμα του Südharz. Πρόκειται για ένα πυκνό, γκρίζο πέτρωμα, με χαρακτηριστικές ζώνες και ραβδώσεις, σκούρων γκριζών νημάτων και κονιαμάτων αργίλου.

Στην αμέσως υπερκείμενη παχιά στρώση, ο ανυδρίτης παρεμβάλλεται στον σκούρο γκρι αργιλίτη, ενώ ο καφέ-κόκκινος αλατούχος άργιλος (1-25 m), σχετίζεται με αλατογενετικές διαδικασίες στις στρώσεις Stassfurt. Στην υπερκείμενη καφέ-γκρι ζώνη στρωμάτωσης, κυριαρχεί αργιλίτης, μικρής περιεκτικότητας σε λεπτή άμμο και ιλύ, με συνολικό πάχος από λίγα dm έως 2 m. Η ζώνη αυτή σχηματίζεται από ένα ανθρακικό τμήμα (2 m), το οποίο υποδιαιρείται σε μια συμπαγή στρώση μαγνησίτη και μια επικρατούσα άργιλο-μαγνητική αλληλουχία.

Στη βάση του κύριου ανυδρίτη, όπου το υλικό απόθεσης εναλλάσσεται σε 9 πετροστρωματογραφικές ζώνες, η υψηλή ανθρακική περιεκτικότητα, αυξάνεται

ακόμη περισσότερο νοτίως των καλιούχων στρωμάτων του Südharz, όπου ο ορίζοντας αυτός, μεταβαίνει σε δολομίτη (Ca3), αντικαθιστώντας στο σημείο αυτό τον κύριο ανυδρίτη.

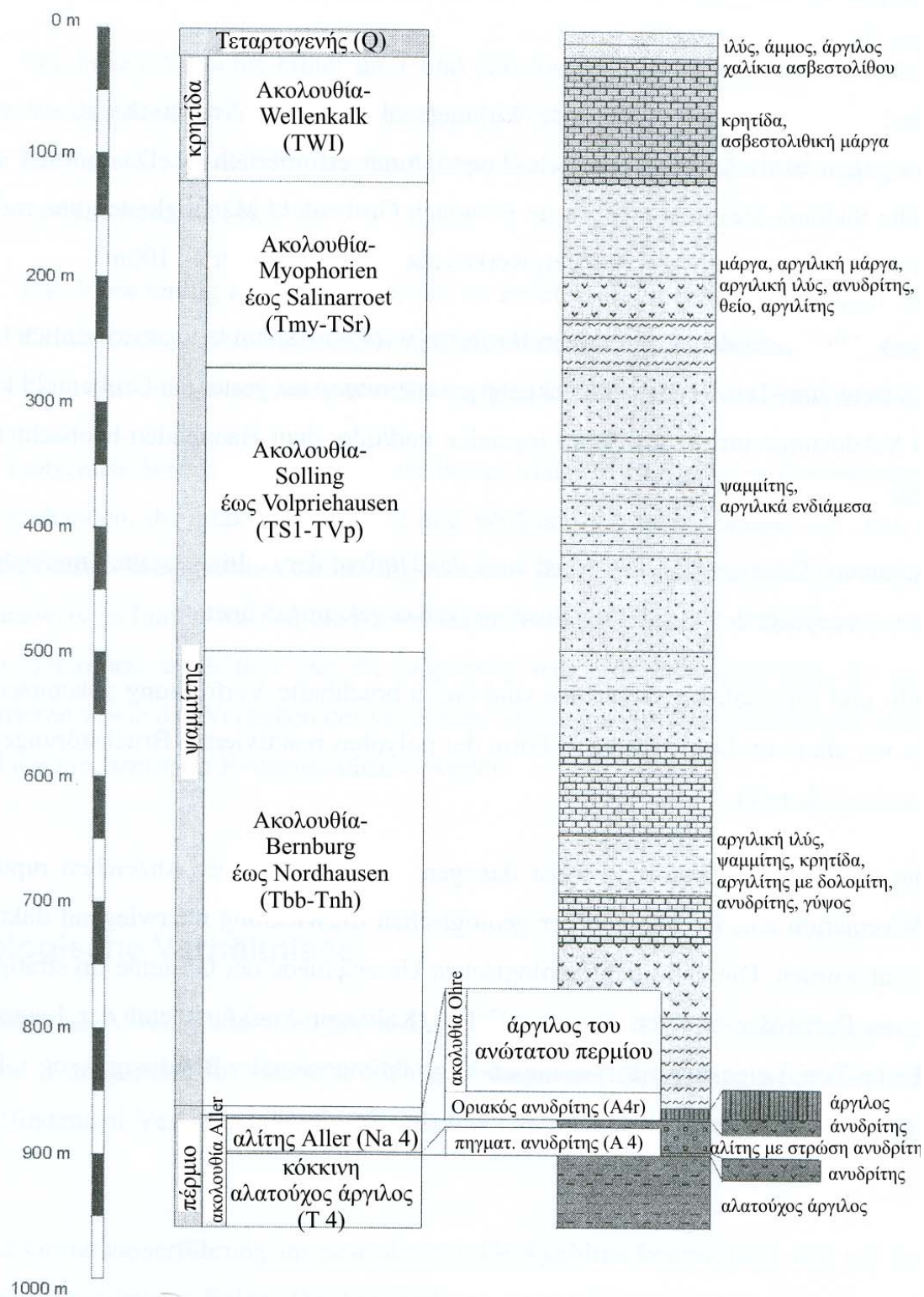
Δ) Το Πέρμιο 4 (κύκλος Aller): ξεκινάει με μία στρώση κόκκινης αλατούχου αργίλου (T4), το πάχος της οποίας ανέρχεται στα 5 m και η οποία εκτείνεται γύρω από το κατώφλι του Kyffhäuser φτάνοντας τα 30 m πάχους. Το μεσαίο κύριο τμήμα, η κόκκινη ακολουθία αργίλου (T4β), συνοδεύεται από μια κατώτερη (T4α) και μία ανώτερη κόκκινο-πράσινη ακολουθία (T4γ) πάχους μερικών μόνο dm κάθε φορά. Στο ανώτερο τμήμα της κόκκινης αργιούχου ακολουθίας, παρεμβάλλεται ορυκτό άλας, χρώματος ροζ, σε στρωσιγενή μορφή ή μορφή θύλακα, ενώ ο πηγματιτικός ανυδρίτης (A4) έχει πάχος μερικών μόνο dm, σε χαρακτηριστικές συμφύσεις με ορυκτό άλας.

Το ορυκτό άλας Aller (Na 4) βρίσκεται πάνω από το βασικό τμήμα που είναι πλούσιο σε ανυδρίτη (Na 4a) κι έχει πάχος από λίγα dm ως μερικά m. Το λευκό-γκρι ως λευκό ορυκτό άλας έχει κατά ζώνες χλωμό ροζ χρώμα και περιέχει, μόνο πολύ αραιά, ανυδριτικά σύνδρομα. Ο οριακός ανυδρίτης (A4r), πάχους 1 έως λίγων dm, εμφανίζεται γενικά λεπτοκοκκώδεις έως πυκνός, τις περισσότερες φορές με ποικιλόχρωμες λωρίδες και ανυδρίτη αναμεμειγμένο με καφέ σύνδρομα και στρώσεις αργίλου.

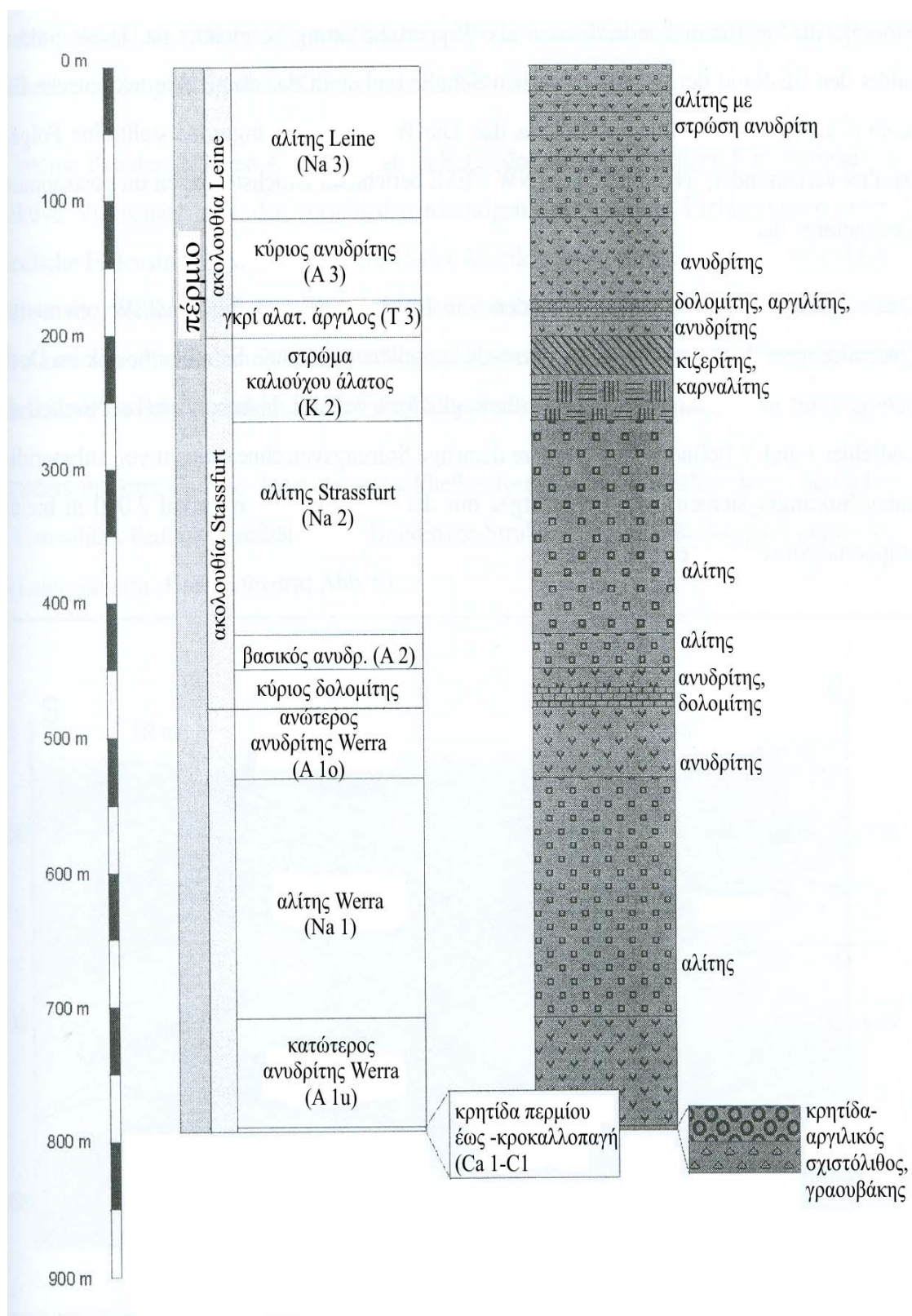
Οι ανώτερες στρώσεις αργίλου του περμίου, συνεχίζουν τις ιζηματογενείς ακολουθίες του Περμίου 4. Οι κόκκινες ακολουθίες αργιλίτη, πάχους πολλών μέτρων, συνοδεύονται τόσο στα υποκείμενα όσο και στα υπερκείμενα από μια γκρίζο-πράσινη ζώνη. Στα κατώτερα, απαντώνται φυλλάρια, ταινίες και νέφη ανυδρίτη. Οι έντονες στρώσεις ψαμμίτη που βρίσκονται πάνω από την άνω ζώνη, ξεκινούν ήδη από τον πρώτο κύκλο καθίζησης, του πάνω από 300 m πάχους, ανώτερου στικτού ψαμμίτη.

2.1.3 Η γεωλογική δομή του ορυχείου “Glückauf Sondershausen”

Στη γεωλογική δομή της περιοχής του Sondershausen (Εικόνα 2.3 και 2.4), συμμετέχουν στρώσεις της τεταρτογενούς περιόδου, του Τριασίου και του Περμίου. Τα αλατούχα στρώματα του περμίου που υπέρκεινται των υπόγειων του «Glückauf Sondershausen», συνοδεύονται από αργιλικά εγκλείσματα στις ακολουθίες Leine και



Εικόνα 2.3: Στρωματογραφική και λιθολογική τομή των μεταγενέστερων αλατούχων υπερκειμένων (postsalinar) στην περιοχή του Sondershausen (Weigert et al, 2001)



Εικόνα 2.4: Στρωματογραφική και λιθολογική τομή των αλάτων του Περμίου και των ανώτερων στρώσεων αντικατάστασης των αλάτων (Subsalinar) στην περιοχή του Sondershausen (Weigert et al, 2001).

Aller, ενώ πάνω από αυτά απαντώνται στρώσεις στικτού ψαμμίτη. Ακόμη ψηλότερα αναπτύσσονται αποθέσεις της τεταρτογενούς περιόδου, ελάχιστου πάχους. Τα στρώματα που υπόκεινται του ορυχείου αποτελούνται από στρώσεις ορυκτού άλατος Stassfurt, βασικού ανυδρίτη, κύριου δολομίτη / σχιστόλιθου και τις στρώσεις της ακολουθίας Werra.

Σε σχέση με την τοπική γεωλογία, τα υπόγεια του ορυχείου Sondershausen ανήκουν στο βόρειο τμήμα της λεκάνης της Τουρινγκίας, η οποία είναι σχετικά ευκρινής λόγω της διαμόρφωσης της ερμουνδούριας μετάπτωσης. Εξαιτίας της μετάπτωσης αυτής, η περιοχή χαρακτηρίζεται από τη γενική ανύψωση των στρωμάτων στην ΒΑ-κατεύθυνση στην περιοχή του Harz.

Στα καλιούχα στρώματα Stassfurt παρατηρείται γενικά μια διαδοχική ερκύνια ακολουθία παρατεταγμένων αντικλίνων και γεωλογικών λεκανών. Σε αυτό το σημείο, απαντάται στο εσωτερικό του ορυχείου μια ζώνη ανύψωσης, πλάτους 600-800 m (ΒΔ-ΝΑ), η οποία χαρακτηρίζεται από φάσεις έντονης τεκτονικής καταπόνησης.

Τα στρώματα της τεταρτογενούς περιόδου αποκαλύπτονται μαζί με λάσπη, άμμο, άργιλο και τραβερτίνη (ίζημα ανθρακικού ασβεστίου), κυρίως σε ποτάμια και κοιλάδες και κατατάσσονται ηλικιακά στο Ολόκαινο και το Πλειστόκαινο. Τα στρώματα που σχηματίστηκαν κατά την περίοδο του Τριασίου και βρίσκονται μέσα στα γεωλογικά όρια του ορυχείου, περιορίζονται σχεδόν αποκλειστικά σε στρώματα στικτού ψαμμίτη. Τα στρώματα των ακολουθιών Solling και Volprieause αποτελούνται από ψαμμίτη με αργιλικά ενδιάμεσα καθώς και λεπτοκοκκώδη άργιλο. Ο κατώτερος στικτός ψαμμίτης αποτελεί τις ακολουθίες Nordhausen και Bernburg, συνολικού πάχους περίπου 300 m και 260 m αντιστοίχως, οι οποίες συντίθενται από ογκώδη λεπτοκοκκώδη ψαμμίτη, ανοικτού γκρι χρώματος, διευθετημένο σε εναλλασσόμενες στρώσεις. Κάτω από τον ψαμμίτη, ακολουθεί η αλατούχος κόκκινη ακολουθία, η οποία έχει πάχος περίπου 30 m κι αποτελείται από πυκνά - αμμώδη και ανυδριτικά κόκκινα και καφέ-κόκκινα αργιλικά και λεπτοκοκκώδη πετρώματα.

Το Πέρμιο βρίσκεται κάτω από το στικτό ψαμμίτη και διακρίνεται σε πέντε ακολουθίες:

1. ακολουθία Ohre: αποτελείται κυρίως από σκούρα καφέ-κόκκινα κι εν μέρει γκρίζο-πράσινα διάστικτα αργιλικά πετρώματα που προήλθαν από γκρίζο-πράσινα αργιλικά πετρώματα.

2. ακολουθία Aller: αποτελείται εξ' ολοκλήρου από οριακό ανυδρίτη, ορυκτό άλας Leine, ανυδριτικό πιγματίτη και κόκκινο ορυκτό άλας.

3. ακολουθία Leine: αποτελείται από ορυκτό άλας Leine, λευκό, γκρι ή κόκκινο αλιτίτη με φυλλάρια αργίλου, στρώσεις αργιλικού πετρώματος και φυλλάρια, ταινίες και στρώσεις ανυδρίτη. Το ορυκτό άλας Leine είναι συμπαγές και ογκώδες, πυκνό και αδιαπέρατο κι εμφανίζει καταπονήσεις έκτασης $>1\%$ λόγω της υδραυλική πίεσης, ενώ κάτω από αυτό ακολουθεί κύριος ανυδρίτης, πάχους κατά κανόνα 30-50 m.

Ο κύριος ανυδρίτης που χαρακτηρίζεται από λεπτούς και μέσους κρυστάλλους με διευρυμένη σφαιρολιθική δομή, γκρίζο-μπλε χρωματισμό, εμφανίζει εκτεταμένες ρωγμές, αλλά αντιστέκεται στην υδραυλική πίεση. Οι ρωγμές είναι πληρωμένες με ορυκτό άλας και εν μέρει με συλβίνη και καρναλιτίτη. Σε περιοχές με εντατική τεκτονική καταπόνηση εμφανίζεται σποραδικά ένας μονωμένος αεριοφόρος.

Στη βάση της ακολουθίας Leine, απαντάται ένα γκρίζο ορυκτό άλας το οποίο αποτελείται από ένα γκρίζο έως γκρίζο-πράσινο, άργιλο-ανθρακικό τμήμα (υπερκείμενο), ένα κόκκινο-καφέ άργιλο-αμμώδες τμήμα με στρώσεις ανυδρίτη, νήματα ψαμμίτη και μαγνησίτη (μεσαίο) κι ένα άργιλο-ανυδριτικό τμήμα (υποκείμενο)

4. Ακολουθία Stassfurt: αποτελείται εξ' ολοκλήρου από καλιούχες στρώσεις, ορυκτό άλας Stassfurt, βασικό ανυδρίτη, κύριο δολομίτη και σχιστόλιθο. Το καλιούχο στρώμα που αναπτύσσεται στην περιοχή του ορυχείου παρουσιάζει μια τριπλή υποδιαίρεση μεγάλων διαστάσεων. Στα βόρεια και τα βορειοανατολικά τμήματα του ορυχείου, αναπτύσσεται ένα κιζεριτικό περιθώριο, που εκτείνεται από το βόρειο πεδίο VI (Nordfeld VI) ως το βόρειο τμήμα του ανατολικού πεδίου I (Ostfeld I). Σε αυτό το κιζεριτικό περιθώριο περιέχεται μια ζώνη κιζερίτη και καρναλιτίτη.

Ο μακροσκοπικός χαρακτήρας του κιζερίτη καθορίζεται από την υφή των διαδοχικών στρώσεων αλίτη, ανυδρίτη, κιζερίτη, και το έντονο κόκκινο χρώμα λόγω της ύπαρξης του συλβίνη. Ο καρναλιτίτης συχνά, περιέχει αέρια (άζωτο, υδρογόνο, μεθάνιο) και απαντάται κυρίως με κατακλαστική δομή, όπου θρύμματα αλίτη και κιζερίτη περιβάλλονται από ένα μητρικό πέτρωμα καρναλίτη. Το ορυκτό άλας Stassfurt, που ακολουθεί κάτω από το καλιούχο στρώμα, υποδιαιρείται σε ανυδριτικό ορυκτό άλας και ορυκτό άλας Südharz.

Τα ορυκτά άλατα Stassfurt έχουν την ικανότητα να προστατεύουν τα υποκείμενα άλατα, αφού σε σχέση με τα ορυκτά άλατα Leine, εμφανίζουν σχεδόν ιδανικές ιδιότητες (είναι συμπαγή, πυκνά και ογκώδη). Κάτω από το ορυκτό άλας Stassfurt ακολουθεί βασικός ανυδρίτης πάχους, κατά κανόνα, από 15 έως 25 m, ο οποίος αποτελείται από ένα λευκό-γκρι έως σκούρο πράσινο πυκνό ανυδριτικό

στρώμα, ενώ στα ανώτερα τμήματα του, εμφανίζεται λεπτή σκόνη αργίλου. Κάτω από τον βασικό ανυδρίτη, ακολουθεί κύριος δολομίτης, πάχους μικρότερου των 30m και ο οποίος μαζί με τον σχιστόλιθο, αποτελούν την αρχή της ακολουθίας Werra.

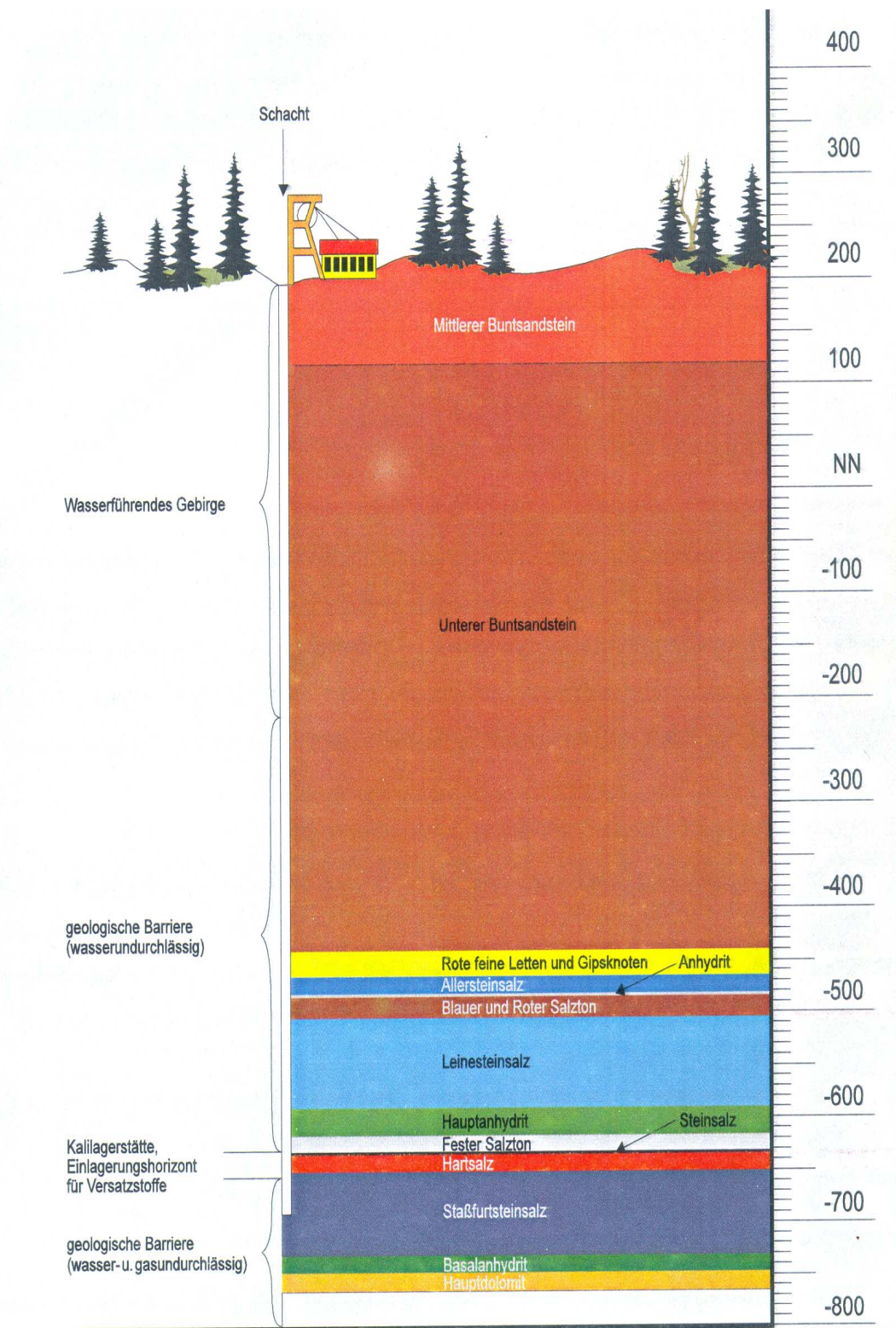
5. Ακολουθία Werra: αποτελείται από ανυδρίτη Werra, καθώς και τοπικά, από ορυκτό άλας Werra. Αυτό το σύμπλεγμα στρωμάτων χαρακτηρίζεται από ασυνήθιστες, για τα καλιούχα κοιτάσματα Südharz, διαφορές πάχους και δομής. Ο ανυδρίτης Werra είναι ένα ανυδριτικό πέτρωμα, το οποίο περιέχει προσμίξεις από λωρίδες και ζώνες δολομίτη και βιτουμενιούχου αργίλου. Το λευκό-γκρίζο ορυκτό άλας Werra περιέχει ανυδριτικά στρώματα και ταινίες ή προσμίξεις από φυλλάρια αργίλου. Το κατώτερο τμήμα της ακολουθίας Werra αποτελείται από κρητίδα του περμίου που ακολουθείται από χαλκούχο σχιστόλιθο και κροκαλοπαγή του περμίου. Η κρητίδα του περμίου παρουσιάζει μια μαύρο-γκρι μαργαϊκή κρητίδα, ενώ χαλκούχος σχιστόλιθος χαρακτηρίζεται από ένα βιτουμενιούχο μαργαϊκό σχιστόλιθο.

Στην περιοχή των υπογείων του ορυχείου πάντως, τα υφιστάμενα ογκώδη άλατα που αποτελούνται από ορυκτό αλάτι Stassfurt και ανυδριτικούς και ασβεστιτικούς ορίζοντες των ακολουθιών Stassfurt και Werra, είναι στεγνά και σχεδόν αδιαπέρατα από το νερό (σύμφωνα με την επίσημη ιστοσελίδα της εταιρίας GSES: www.GSES.de).

2.1.4 Η Στρωματογραφική απεικόνιση του φρέατος I

Η διάνοιξη του φρέατος I (Brüggmannschacht), ξεκίνησε στις αρχές του 1893 και ολοκληρώθηκε στα τέλη του 1895. Το βάθος του φτάνει τα 800 m περίπου και η στρωματογραφική του δομή ποικίλλει έντονα.

Πάνω από τον ορίζοντα στρωμάτωσης των εβαποριτικών στρώσεων βρίσκονται διάφορα ιζηματογενή στρώματα, τα οποία διαδραματίζοντας ρόλο φράγματος, εμποδίζουν το νερό να διεισδύσει μέσα στο ορυχείο. Τα στρώματα αυτά αποτελούνται από ένα απολύτως αδιαπέρατο στρώμα ψαμμίτη, πάχους περίπου 250 m, από διάφορα αργιλικά στρώματα, συνολικού πάχους μεγαλύτερου των 35 m, διάφορα στρώματα ανυδριτικών πετρωμάτων, πάχους 20 m ενώ πάνω από τα άλατα οικονομικού ενδιαφέροντος τα οποία υφίστατο εκμετάλλευση, βρίσκονται και διάφορα αλατούχα πετρώματα συνολικού πάχους μεγαλύτερου από 100 m.



Εικόνα 2.5: Στρωματογραφική τομή του φρέατος I (www.gses.de)

Κάτω από τον ορίζοντα εξόρυξης τα στρώματα που απαντώνται είναι επίσης στεγανά από νερό και αέρια, λόγω της ύπαρξης μεταξύ αυτών και στρωμάτων ορυκτού άλατος και βασικού ανυδρίτη. Αυτά τα φυσικά γεωλογικά φράγματα, εδώ και περίπου 230 εκατομμύρια χρόνια, εμποδίζοντας την εισροή νερού στα εβαποριτικά κοιτάσματα, προσφέρουν πολλαπλάσια ασφάλεια στο ορυχείο από ότι οποιοδήποτε άλλο τεχνητό φράγμα που θα είχε χρειαστεί να κατασκευάσει ο άνθρωπος, για την προστασία ενός τέτοιου ορυχείου.

Αναλυτικά, η στρωματογραφική ακολουθία του φρέατος I (Εικόνα 2.5), (έχει ως εξής (www.gses.de)):

- 78.20 m μέσος στικτός ψαμμίτης
- 559.60 m κατώτερος στικτός ψαμμίτης
- 24.90 m λεπτή ερυθρή άργιλος και σφαίρες γύψου
- 17.70 m ορυκτό άλας Aller
- 1 m ανυδρίτης
- 21.30 m κυανό και ερυθρό ορυκτό άλας
- 81.50 m ορυκτό άλας Leine
- 31 m κύριος ανυδρίτης (A3)
- 15 m συμπαγής αλατούχος άργιλος (T3)
- 2 m ορυκτό άλας (αλίτης)
- 14 m κιζερίτης (K2)
- 82 m ορυκτό άλας Stassfurt (Na₂)
- 15 m βασικός ανυδρίτης (A2)
- 20 m κύριος δολομίτης

2.2 Τα ορυκτολογικά χαρακτηριστικά των εβαποριτών

2.2.1. Ορισμός εβαποριτών

Οι εβαπορίτες είναι ιζηματογενή πετρώματα, αποτελούμενα από ορυκτά, τα οποία σχηματίστηκαν κατά την καθίζηση της συγκεντρωμένης άλμης, μετά από την εκτεταμένη ή ολική εξάτμιση του θαλασσινού ή αλμυρού λιμναίου ύδατος. Οι εβαπορίτες, στην πλειοψηφία τους σχεδόν, προέρχονται από σώματα θαλασσινού

νερού. Υπό ειδικές συνθήκες, όμως, και οι λίμνες μπορεί να αποτελέσουν πηγή συσσωματωμάτων βορικών ορυκτών, ορυκτών ανθρακικού νατρίου και άλλων παρόμοιων τύπων.

2.2.2. Γένεση των εβαποριτών

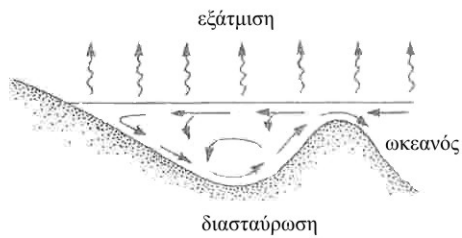
Οι εβαπορίτες μέχρι και πριν από κάποια χρόνια, θεωρούνταν περισσότερο χημικά ιζήματα παρά ιζηματογενή πετρώματα. Σε αυτό συντέλεσε τόσο η απουσία σύγχρονων περιβαλλόντων σχηματισμού εβαποριτών για σύγκριση, όσο και τα μάλλον περιορισμένα διαθέσιμα στοιχεία, σχετικά με τα υπόγεια και τα υποθαλάσσια κοιτάσματα. Εκτός από τα ορυχεία στα οποία εξορύσσονται εβαπορίτες οικονομικής σημασίας, στα υπόλοιπα κοιτάσματα πραγματοποιούνται πολύ σπάνια πυρηνοληψίες.

Για την κατανόηση του μηχανισμού της γένεσης των εβαποριτικών κοιτασμάτων, διατυπώθηκαν κατά καιρούς διάφορες θεωρίες και προτάθηκαν αρκετά πρότυπα λεκανών εξάτμισης (εικόνα 2.6), συνοψίζοντας τα οποία, προκύπτουν οι εξής τέσσερις επικρατέστεροι τρόποι σχηματισμού των εβαποριτών (Χρηστίδης, 1999):

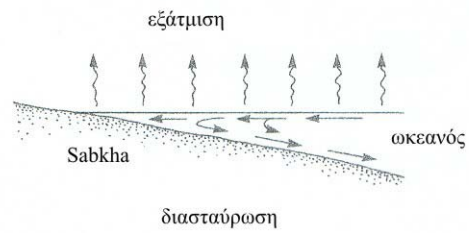
1. Με απόθεση σε ρηχές ή βαθιές παράκτιες θαλάσσιες λεκάνες, οι οποίες διαχωρίζονται από την ανοικτή θάλασσα, με φράγμα.
2. Με καθίζηση σε παράκτιες Sabkhas καθώς και σε δέλτα ποταμών ξηρών περιοχών.
3. Με καθίζηση σε βαθιές, εν μέρει, αποξηραμένες θαλάσσιες λεκάνες σε Sabkhas ή σε μάζες αλατούχου νερού.
4. Με καθίζηση από χερσαία ερημικά περιβάλλοντα.

Παρά το γεγονός ότι κανένα μοντέλο δεν μπορεί από μόνο του να εξηγήσει όλους τους εβαποριτικούς σχηματισμούς που έχουν εντοπιστεί στη Γη, όλα συγκλίνουν στην ίδια προϋπόθεση για τη διαμόρφωσή τους. Εικάζεται ότι για να αρχίσει ο σχηματισμός ορυκτών θα πρέπει να υφίσταται έλλειμμα στο υδατικό ισοζύγιο, δηλαδή οι απώλειες λόγω της εξάτμισης του νερού να υπερβαίνουν, περιοδικά έστω, την εισροή του μέσα στη λεκάνη.

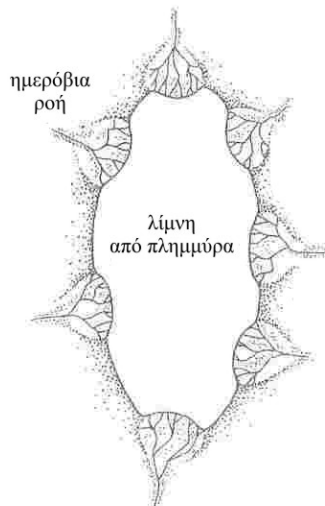
Αυτή η συνθήκη αναπτύσσεται εκεί όπου η είσοδος σε μια λεκάνη είναι τοπογραφικά ή γεωγραφικά περιορισμένη ή εκεί όπου η εξάτμιση υπερβαίνει την εισροή νερού μέσω ενός συνδυασμού τοπογραφικών και κλιματολογικών ή



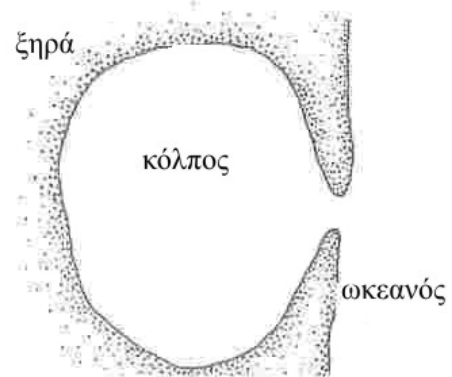
A) : Διασταύρωση μονωμένης λεκάνης
με τοπογραφικό εμπόδιο στην είσοδο αυτής



B): Διασταύρωση ενός Sabkha κατά
μήκος μιας άνυδρης περιοχής



Γ: Λίμνη από πλημμύρα που
εγκλωβίστηκε στην ξηρά, σε άνυδρη
λεκάνη



Δ: Λεκανοειδής κόλπος μονωμένος από τον
ανοικτό ωκεανό μέσω συγκλίνουσας εισόδου

Εικόνα 2.6 : Σχηματική αναπαράσταση χαρακτηριστικών περιπτώσεων δημιουργίας
εβαποριτικών αποθέσεων (Raymond, 1995)

υδρογραφικών συνθηκών. Στην περίπτωση Γ της εικόνας 2.6, η απώλεια μπορεί να υπερβαίνει την εισροή από τον ανοιχτό ωκεανό λόγω υψηλού ρυθμού εξάτμισης. Παρομοίως, όταν η εξάτμιση που ακολουθεί ή συνοδεύει τις καθιζήσεις μέσα ή γύρω από κλειστές, άνυδρες ή ηπειρωτικές λεκάνες, είναι εκτεταμένη, μπορεί να υπερβεί την εισροή του νερού κατά τον ίδιο τρόπο.

Ανεξάρτητα από το σχήμα της λεκάνης, το λιγότερο αλμυρό, χαμηλής πυκνότητας νερό που εισέρχεται σε αυτήν, θα αρχίσει να σκορπίζεται κατά μήκος της επιφάνειας της υδάτινης μάζας της. Επειδή όμως αυτό το φρέσκο νερό είναι εκτεθειμένο στην επιφάνεια, θα υποβληθεί σε εξάτμιση και το αποτέλεσμα θα είναι να αυξηθεί η πυκνότητα μέσα στη λεκάνη. Με αύξηση της πυκνότητας και της αλατότητας το νερό δημιουργεί ιζήματα εβαποριτικών ορυκτών κι όταν η λεκάνη φράσσεται κατάλληλα, εμποδίζεται η απόδραση τους από αυτήν (Raymond, 1995).

Οι εβαπορίτες μπορεί να σχηματιστούν τόσο σε υπόγεια όσο και σε υποθαλάσσια αποθεματικά περιβάλλοντα καθώς και με διαγενετική αντικατάσταση πρόδρομων ιζημάτων, κάτω από την επιφάνεια.

Με εξαίρεση ορισμένα αποσαθρωμένα κοιτάσματα, τα αλατούχα κοιτάσματα των περισσότερων περιοχών της Γης, είναι ωκεάνιας προέλευσης, σε ζώνες ξηρού κλίματος. Το θαλασσινό νερό, που από την εποχή του Καμβρίου δεν έχει υποστεί ουσιαστικές μεταβολές στο χημισμό του, είναι μια ανεξάντλητη δεξαμενή αλατούχων διαλυμάτων. Γενικά, η απόθεση των αλάτων συνδέεται με την αργή πτώση της στάθμης του νερού στις θαλάσσιες λεκάνες και η ορυκτολογία τους αντανακλά τη σύνθεση του, αν και καθώς η διαδικασία προχωρά, η άλμη εκδηλώνει σταδιακά όλο και λιγότερα θαλάσσια χαρακτηριστικά.

Μέσα σε οποιοδήποτε σώμα συγκεντρωμένης άλμης, η κύρια καθίζηση των εβαποριτικών ορυκτών μπορεί να πραγματοποιηθεί στη διεπιφάνεια υγρού-αερίου, μέσα στη στήλη της άλμης, στη διεπιφάνεια ιζήματος-άλμης ή ανάμεσα στους κόκκους των υποκειμένων μαλακών ιζημάτων. Η πλήρης εξάτμιση ενός ρηχού σώματος άλμης οδηγεί στο σχηματισμό εβαποριτών, τόσο στο φλοιό όσο και μέσα στα επιφανειακά ιζήματα.

Οι τριχοειδείς κινήσεις των ρευστών και η υπόγεια εξάτμιση τους, μπορεί να εμπλουτίσουν το ποσοστό των εβαποριτικών ορυκτών που καθιζάνουν. Πάντως πολλοί εβαπορίτες δεν αποτίθενται ως απευθείας ιζήματα αλλά σχηματίζονται σε διάφορα βάθη ταφής, είτε με αντικατάσταση μη-εβαποριτικών ιζημάτων ή με διαγενετική διαφοροποίηση των υφιστάμενων πρωτευόντων εβαποριτών.

Σε μοντέλα που αφορούν Sabkhas ή κλειστές ηπειρωτικές λεκάνες, η μεγάλη αλατότητα του νερού διατηρείται από υψηλούς ρυθμούς εξάτμισης χάρη στην οποία καθιζάνουν τα ορυκτά των εβαποριτών. Στα Sabkhas, η εξάτμιση πραγματοποιείται μακριά από τον ανοιχτό ωκεανό, ενώ στις χερσαίες λεκάνες η εξάτμιση πραγματοποιείται σε τέτοια απόσταση από τις κοίτες των χειμάρρων, ώστε η λεκάνη να μην τροφοδοτείται με μεγάλες ποσότητες αλμυρού νερού.

Στις περιπτώσεις κατά τις οποίες, το θαλασσινό νερό τροφοδοτεί τις λεκάνες εξάτμισης, τα εβαποριτικά στρώματα που σχηματίζονται είναι πλούσια σε θειικό μαγνήσιο. Σε αντίθεση, οι χερσαίες λεκάνες που παράγουν εβαπορίτες ποτάσας, προφανώς σχηματίζονται εκεί όπου υδροθερμικά υγρά που περιέχουν CaCl_2 αναμειγνύονται με λιμναία ύδατα και παράγουν μια άλμη που αποδίδει εβαποριτικά στρώματα, φτωχά σε θειικό μαγνήσιο.

Οι χερσαίοι εβαπορίτες είναι πολύ σπάνιοι στα γεωλογικά δεδομένα, επαληθεύοντας την εφήμερη φύση τους, αφού σε σύγκριση με τους εβαπορίτες άλλων περιβαλλόντων, παρουσιάζουν την μεγαλύτερη επιδεκτικότητα σε πρώιμη διάλυση, ενώ επίσης υπόκεινται σε συνεχή ανακύκλωση κατά τη ροή των υπόγειων υδάτων. Αυτού του είδους οι εβαπορίτες, αποτίθενται τόσο υποθαλάσσια όσο και μέσα σε μαλακά ιζήματα σε λίμνες και τα όρια τους. Σχηματίζονται με εξάτμιση υπόγειων υδάτων και άντληση μέσω εξάτμισης, ή από τα επιφανειακά νερά μετά την τήξη των πάγων ενώ κατά τόπους μπορεί να είναι και εδαφογενετικοί.

Οι χερσαίοι εβαπορίτες είναι συνήθως διαστρωματωμένοι με κόκκινα στρώματα, πλούσια σε άργιλο από τις γειτονικές λασπώδεις επιφάνειες. Τα ορυκτά που περιλαμβάνουν είναι συνήθως αλίτης, μητρικά υγρά αλμολοίπων, γύψος, τρόνα, μιραβελίτης κι άλλα ορυκτά που αντιστοιχούν στα επικρατούντα ιόντα των υπόγειων υδάτων.

Οι υποβρύχιοι, ωκεάνιοι εβαπορίτες, σχηματίζονται τόσο σε ρηχά όσο και σε σχετικά βαθιά νερά. Σε ρηχά περιβάλλοντα (0-10 m) αναπτύσσουν ιζηματογενείς δομές συνήθεις και για άλλα κλαστικά περιβάλλοντα, αν και σε προστατευμένα περιβάλλοντα δραστηριοποιούνται σημαντικά τα φύκια. Κάποιοι κρύσταλλοι γύψου, που έχουν σχηματιστεί στους εβαπορίτες του Μειόκαινου αναπτύχθηκαν σε σχετικά ήσυχα περιβάλλοντα και σχημάτισαν δομές ανάλογες των ανθρακικών υφάλων. Πολλά ιζήματα ρηχών ωκεάνιων εβαποριτών περιέχουν στοιχεία περιοδικής αποκάλυψης, με καρστική διάλυση και των σουλφιδίων και των χλωριδίων.

Άλλα τέτοια ιζήματα περιέχουν στοιχειά εισροών λιγότερο αλατούχου νερού, με διάλυση και χημική προσβολή των κόκκων και των κρυστάλλων. Οι εβαπορίτες των βαθέων υδάτων συγκεντρώνονται πέρα από τη βάση των κυμάτων. Το ακριβές βάθος του νερού στο οποίο σχηματίζονται οι εβαπορίτες των βαθέων υδάτων είναι δύσκολο να καθοριστεί και μπορεί να υπερβαίνει λίγο τα 10 m, ειδικά όπου οι άλμες έχουν υπερβεί τη διαλυτότητα του αλίτη και για αυτό η πυκνότητα τους θεωρείται αξιόλογη σε σύγκριση με τα σύγχρονα ωκεάνια νερά. Τα πιο χαρακτηριστικά εβαποριτικά ιζήματα βαθέων υδάτων είναι λεπτές στρώσεις (1-10 mm) θείου ή/και αλίτη, οι στρώσεις των οποίων, μπορεί να είναι μήκους πολλών εκατοντάδων km.

Αν και αρκετοί εβαπορίτες έχουν σχηματιστεί ήδη από το Προκάμβριο, δεν υπάρχει σχεδόν κανένα μεγάλο σύγχρονο περιβάλλον απόθεσης, συγκρίσιμο με τις αρχαϊκές λεκάνες σχηματισμού εβαποριτών. Επιπλέον, η αφθονία των εβαποριτών έχει διακυμανθεί σημαντικά κατά το γεωλογικό παρελθόν, με ακμή των εβαποριτικών σχηματισμών κατά το πρώιμο Κάμβριο, Πέρμιο και Ιουρασικό-Κρητιδικό και ύφεση της συγκέντρωσης κατά το Τριάσσιο και το Τεταρτογενές.

Εν μέρει αυτό ήταν το αποτέλεσμα, ηπειρωτικών κατανομών και ταπείνωσης της στάθμης του επιπέδου της θάλασσας κατά τη διάρκεια αυτών των περιόδων, με τις κύριες ηπειρωτικές μάζες και τις έγκλειστες ή αρχικά ημι-έγκλειστες λεκάνες, τοποθετημένες κάτω από κλιματικές ζώνες καθοδικού θερμού, ξηρού αέρα. Σήμερα αυτές οι υποτροπικές, υψηλής ατμοσφαιρικής πίεσης, ζώνες κυκλοφορίας, τοποθετούνται περίπου 30° βόρεια και νότια του Ισημερινού, με ακτίνα μεταξύ 10° και 40° (Kearey 1993).

2.2.3. Συνθήκες καθίζησης των εβαποριτών

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, ο κύριος όγκος των αλατούχων πετρωμάτων έχει σχηματιστεί από την κρυστάλλωση αλάτων σε συγκεντρωμένα ένυδρα διαλύματα. Το είδος της υφής και της δομής του τελικού σχηματισμού, εξαρτάται από έναν μεγάλο αριθμό παραγόντων, οι οποίοι συμμετέχουν στο τελικό αποτέλεσμα. Οι παράγοντες αυτοί συμπεριλαμβάνουν και τις φυσικές συνθήκες της περιοχής εναπόθεσης των αλάτων, δηλαδή τις κλιματολογικές, μορφολογικές, τεκτονικές και υδρογραφικές συνθήκες. Ένας ακόμη παράγοντας είναι ο χημισμός των εισερχόμενων διαλυμάτων και η γεωμετρία της λεκάνης.

Συνήθως ο σχηματισμός των εβαποριτών λαμβάνει χώρα σε άνυδρες περιοχές, κατά μήκος θερμών παραλιακών περιοχών ή σε εξαιρετικά περιορισμένες και απομονωμένες θαλάσσιες λεκάνες κατά μήκος ξηρών ακτών. Το ξηρό κλίμα ευνοεί ιδιαίτερα τη διαδικασία συγκέντρωσης των αλάτων σε σημαντικές ποσότητες χωρίς όμως να αποτελεί ανεξάρτητη προϋπόθεση για το σχηματισμό τους.

Στις λεκάνες απόθεσης των αλάτων του γεωλογικού παρελθόντος, μικρές ανυψώσεις και ταπεινώσεις των περισσότερων υποθαλάσσιων διογκώσεων με το ρυθμό του κλίματος, προσδιόριζαν την εκάστοτε εξέλιξη της συγκέντρωσης και της καταβύθισης των ορυκτών.

Τέλος πρέπει να σημειωθεί ότι και η θερμοκρασία κατά την οποία λαμβάνει χώρα η κρυστάλλωση και η συγκέντρωση των διαφόρων ιόντων που παρίστανται, ελέγχει τη φύση των πραγματικών ουσιών που εναποτίθενται. Για παράδειγμα, καθαρά διαλύματα που περιέχουν ιόντα ασβεστίου και θείου, θα εναποθέσουν γύψο ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) κάτω από τους 47°C και ανυδρίτη (CaSO_4) πάνω από αυτήν την θερμοκρασία.

2.2.4. Σειρά καθίζησης και ορυκτολογία των εβαποριτών

Όταν το θαλασσινό νερό εξατμίζεται, τα διαλυμένα άλατα καθιζάνουν με σειρά από το λιγότερο, προς το περισσότερο διαλυτό, με αποτέλεσμα τα ορυκτά να σχηματίζονται με σειρά αντίστροφη της διαλυτότητας τους, δηλαδή το λιγότερο διαλυτό, σχηματίζεται πρώτο (Mc Leish, 1986).

Επειδή το κύριο μέρος των εβαποριτικών κοιτασμάτων έχει προέλθει από θαλασσινό νερό και τα πιο άφθονα ανιόντα στο θαλασσινό νερό είναι το Cl^- (94,5% μοριακότητα κατ' όγκον) και το SO_4^{2-} (4,9 % μοριακότητα κατ' όγκον), τα περισσότερα εβαποριτικά ορυκτά είναι χλωρίδια (αλίτης) και σουλφίδια (γύψος κι ανυδρίτης). Παρόλα αυτά υπάρχουν κι εβαπορίτες οι οποίοι έχουν σχηματιστεί από ασυνήθιστα έως σπάνια χλωρίδια, σουλφίδια και εστέρες του βορικού οξέος.

Ανάλογα με το χημισμό του θαλασσινού νερού, τα ορυκτά άλατα ωκεάνιας προέλευσης σχηματίζονται με βάση τα κατιόντα Na^+ , K^+ , Mg^{++} , Ca^{++} , καθώς και τα ανιόντα Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , και Br^- . Από αυτά, κατά κανόνα, ενώνονται τα αλκάλια Na^+ και K^+ με το Cl^- , και οι αλκαλικές γαίες Mg^{++} και Ca^{++} με το SO_4^{2-} (Gimm, 1968).

Αντίθετα, οι εβαπορίτες που σχηματίστηκαν από την εξάτμιση υδάτων αλατούχων λιμνών και πλημμυρισμένων περιοχών (μη ωκεάνιοι εβαπορίτες) κι έχουν αρχική σύνθεση που διαφέρει σημαντικά από τη σύνθεση του θαλασσινού νερού, σχηματίζουν κοιτάσματα τα οποία περιέχουν συχνά, μεγάλες ποσότητες ορυκτών εξαιρετικά σπάνια σχηματιζόμενων από θαλασσινό νερό, όπως π.χ. τα ορυκτά τρόνα $[\text{Na}_3\text{H}(\text{CO}_3)_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}]$, μινραβελίτης $[\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}]$, γκλαουμπερίτης $[\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2]$ και βοράνος $[\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_5(\text{OH})_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}]$ (Blatt, 1982).

Όταν ένα σώμα θαλασσινού νερού απομονώνεται και το νερό αρχίζει να εξατμίζεται, το αλάτι που περιέχεται στη σύσταση του, κρυσταλλώνεται. Το πρώτο άλας που εναποτίθεται κατά την εξάτμιση είναι η γύψος ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), ο σχηματισμός της οποίας ξεκινάει όταν έχει εξατμιστεί το 37% του νερού, κι ακολουθεί ο ανυδρίτης (CaSO_4). Συμβαίνει πάντως, αρκετή από τη γύψο και τον ανυδρίτη που σχηματίζονται σε φυσικά ιζήματα να έχουν προέλθει από διαγενετικές μεταβολές, ήδη αποθετιμένων, ασβεστιτικών ιζημάτων, ρηχών νερών.

Η συνέχιση της εξάτμισης οδηγεί στην καθίζηση των αλογονιδίων και συγκεκριμένα του αλίτη (NaCl). Τελευταία, σχηματίζονται τα άλατα του μαγνησίου και του καλίου, όπως είναι ο πολυαλίτης ($\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 2\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), ο κιζερίτης ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), ο καρναλίτης ($\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) και ο συλβίνης (KCl) (Blyth, 1984).

Αν ήταν δυνατή η πλήρης εξάτμιση του θαλασσινού νερού, η αλληλουχία και η αναλογία που θα προέκυπτε είναι αυτή που φαίνεται στον Πίνακα 2.1 (Mc Leish, 1986).

Πίνακας 2.1: Η σειρά και η αναλογία με την οποία θα εμφανίζονταν μια χαρακτηριστική εβαποριτική ακολουθία, εάν ήταν δυνατή η πλήρης εξάτμιση του θαλασσινού νερού.

Αλάτι	Αναλογία (%)
NaCl	78,04
MgCl ₂	9,21
MgSO ₄	6,53
CaSO ₄	3,48
KCl	2,11
CaCO ₃	0,33
MgBr ₂	0,25

Στην πραγματικότητα, δεν συμβαίνει ποτέ πλήρης εξάτμιση, με αποτέλεσμα η αλληλουχία των εβαποριτών να περιέχει συχνά περισσότερο ανθρακικό (CaCO_3) και θεικό ασβέστιο (CaSO_4) και λιγότερο χλωριούχο νάτριο (NaCl) από το αναμενόμενο ή μπορεί και να απουσιάζουν εντελώς τα άλατα μαγνησίου (Mg) και καλίου (K), (Mc Leish, 1986).

Ένα φαινόμενο που παρατηρείται πολύ συχνά στους ωκεάνιους εβαπορίτες παρά την ενιαία προέλευση τους, είναι ότι υφίστανται βασικές διαφορές στους γεωχημικούς τους τύπους. Ιδιαίτερα στα κοιτάσματα καλιούχων στρώσεων, πολλών περιοχών της Γης, κυριαρχεί μια εκτεταμένη πτώχευση σε θείο και συχνά παρατηρείται ταυτόχρονα και σε μαγνήσιο. Το φαινόμενο αυτό αποδίδεται στις συρροές εδαφικού νερού πλούσιου σε ασβέστιο, στο σχηματισμό ογκωδέστερων οριζόντων θεικού ασβεστίου και ανθρακικού μαγνησίου στα υποκείμενα ή ίσως ακόμη και σε κάποια βακτηριακή μετατροπή προς θειικά.

Συχνά ο αρχικός χαρακτήρας των περισσοτέρων εβαποριτικών κοιτασμάτων καταστρέφεται με αντικατάσταση, μετά από την επίδραση των κυκλοφορούντων υγρών. Για παράδειγμα, ο πολυαλίτης ($\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 2\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) δεν είναι πρωτεύων εβαπορίτης επειδή σχηματίζεται με την αντίδραση κατάλληλων διαλυμάτων με ορυκτά θεικού ασβεστίου.

2.2.5. Δομή των εβαποριτών

Σε μια προοδευτική εξάτμιση, η οποία πραγματοποιείται κανονικά, ένας πλήρης κύκλος καθίζησης, χαρακτηρίζεται από αλληλοδιαδοχή λεπτόκοκκων αργιλικών βασικών ιζημάτων, ανθρακικού ασβεστίου και ανθρακικού μαγνησίου, θεικού ασβεστίου, αλίτη και ποτάσας. Οι μεμονωμένοι ορίζοντες εμφανίζουν συχνά ρυθμικές παρεμβολές από ορυκτά των αμέσως κατώτερων ή/και σπάνια, των αμέσως ανώτερων, φάσεων απόθεσης. Έχουν παρατηρηθεί και μικρής κλίμακας εμφανίσεις εβαποριτικών ορυκτών μέσα σε φλέβες, κοιλότητες ή ακόμη και απότομες οροφές ατόλλων, οι πληρώσεις των οποίων πραγματοποιούνται από διάφορα διαλύματα εδαφικών υδάτων, διαγενετικά ή υδροθερμικά.

Επειδή το θαλασσινό νερό γενικά, περιέχει μόνο 3.1% διαλυμένα υλικά, η εξάτμιση ακόμη και πολύ μεγάλων απομονωμένων μαζών θαλασσινού νερού, αποδίδει μόνο λεπτά στρώματα εβαποριτών. Έτσι, για να εξασφαλιστούν οι εκατοντάδες των μέτρων που επιτυγχάνουν κάποιες ρυθμικές μονάδες, πρέπει να

διεξάγεται κάποιο είδος συστήματος συνεχούς εξάτμισης-αναπλήρωσης. Οι παχιές αλληλουχίες εβαποριτών δεν σχηματίζονται από την εξάτμιση θαλασσινού νερού μεγάλου βάθους. Μάλλον σχηματίζονται υπό άνυδρες συνθήκες, σε ρηχές βοηθητικές λεκάνες, μερικώς απομονωμένες από τη θάλασσα με φράγματα, τα οποία επιτρέπουν συχνή εισροή θαλασσινού νερού προς εξάτμιση. Η καθίζηση διαλυμένων ουσιών μπορεί να λάβει χώρα και με διαδικασίες διαφορετικές της εξατμίσεως.

Συνήθως, τα εβαποριτικά ορυκτά είναι διαστρωμένα με δολομίτη, ασβεστόλιθο και λεπτόκοκκα κλαστικά πετρώματα, ειδικά λεπτό κόκκινο σχιστόλιθο. Η συνύπαρξη με δολομίτη δείχνει την προέλευση Sabkha πολλών εβαποριτικών κοιτασμάτων και τη γενετική συνύπαρξη του δολομίτη με γύψο σε περιβάλλοντα Sabkha. Οι ασβεστόλιθοι, οι οποίοι είναι πολύ λιγότερο συνηθισμένοι από τους δολομίτες σε αλληλουχίες εβαποριτών, είναι τα υπολειμματικά μητρικά πετρώματα των δολομιτών. Τα λεπτόκοκκα κόκκινα κλαστικά στρώματα εμφανίζουν μικρά ποσά ιλύος, παρασυρμένης μέσα στη λεκάνη εξάτμισης από τις γύρω, χαμηλού ύψους, άνυδρες περιοχές. Το κόκκινο χρώμα υποδεικνύει τη γενική παραγωγή κόκκινου χρωστικού υλικού σε άνυδρα κλίματα μέσω αποσάθρωσης σιδηρομαγνησιούχων ορυκτών στην υδάτινη ζώνη, ενώ η σχιστότητα των αργιλικών πετρωμάτων αντανακλά την απουσία υπόγειων οργανισμών στα υψηλής αλατότητας ύδατα από τα οποία καθιζάνουν οι εβαπορίτες (Blatt, 1982).

Στους εβαπορίτες η παρουσία απολιθωμάτων οστρακοειδών είναι ιδιαίτερος σπάνια επειδή πολύ λίγα απ' αυτά, είναι ικανά να αντέξουν την υπεραλατότητα για εκτεταμένα χρονικά διαστήματα. Έτσι, τα σπάνια απολιθώματα που εμφανίζονται στα εβαποριτικά στρώματα είναι πλαγκτονικοί σχηματισμοί που βρέθηκαν μέσα στη λεκάνη εξάτμισης από λιγότερο αλατούχες λιμναίες περιοχές ή περιοχές ανοιχτής θάλασσας, παρακείμενες στη λεκάνη.

Οι αρχικές ιζηματογενείς δομές που περιγράφουν εβαποριτικά συγκροτήματα, τόσο στους παλιρροιακούς όσο και στους υπόγειους σχηματισμούς περιλαμβάνουν διάστρωση σε λεπτά στρώματα, διαστρωμάτωση, ρωγμές λόγω ξηρασίας και μια ποικιλία από συμπλέγματα κλαστικών ή/και χημικών δομών. Η πλέον συνηθισμένη δομή είναι η διάστρωση σε λεπτά στρώματα.

Μια χαρακτηριστική αλληλουχία ανυδρίτη ή γύψου, αποτελείται από εναλλασσόμενες στρώσεις λευκού, σχεδόν καθαρού ορυκτού θειικού ασβεστίου και μαύρο-γκρίζες λεπτές στρώσεις, πλούσιες σε δολομίτη και οργανικό άνθρακα. Ένα ζεύγος λεπτών στρωμάτων έχει τυπικό πάχος 0,2-2 mm αλλά μπορεί να έχει πάχος ως

και 10 mm ενώ η σκούρα στρώση μπορεί να είναι από το 1/5 ως το 1/10 του πάχους του συνόλου.

Συχνά, στις ακολουθίες, οι στρώσεις της γύψου ή/και του ανυδρίτη είναι εξαιρετικά ομοιόμορφες. Οι μεμονωμένες στρώσεις έχουν απότομες επαφές, είναι τέλεια επίπεδες κι είναι συνεχείς κατά μήκος του πυρήνα, του μετώπου ή της επιφανειακής εμφάνισης. Η κατακόρυφη αλληλουχία της στρώσης μοιάζει να είναι κυκλική ενώ λεπτομερείς στατιστικές παρατηρήσεις του πάχους των στρώσεων σε διάφορες περιοχές έχουν αποκαλύψει ένα κυκλικό υπόδειγμα δεκάδων ή ακόμη κι εκατοντάδων km κατά μήκος ιζηματογενών λεκανών. Σε αυτές τις λεκάνες, οι ακολουθίες λεπτών στρώσεων του θειικού ασβεστίου υπόκεινται λεπτών στρωμάτων ανθρακικών ή κλαστικών πετρωμάτων και υπέρκεινται κονδυλώδους ανυδρίτη και ταινιωτού αλίτη.

Αυτά τα χαρακτηριστικά οδήγησαν στο συμπέρασμα ότι οι λεπτές αυτές στρώσεις των πετρωμάτων, είχαν καθιζάνει σε πολύ ήρεμα νερά, θαλάσσιου περιβάλλοντος, είτε σε ρηχά ύδατα προστατευμένα από κάποιου είδους ράχες ή σε «βαθιά ύδατα» πέρα από τη βάση των κυμάτων. Η θεωρία για τα ήσυχα νερά επιβεβαιώνεται και από την αξιοσημείωτη ομοιομορφία των στρώσεων των εβαποριτών, η οποία μπορεί να επιτευχθεί μόνο σε ρηχά νερά. Σύμφωνα με τον Holser (1979) οι οξείες στρώσεις της άλμης μέσα σε μια λεκάνη εξάτμισης, μπορεί να μετρίασαν την κίνηση των κυμάτων σε βάθη, μικρότερα από τα φυσιολογικά σε μια πιο ομοιόμορφη στήλη ύδατος, όπως του κανονικού θαλασσινού νερού.

Η απόλυτη πλειοψηφία των ιζηματογενών δομών που βρέθηκαν σε επιφανειακές εμφανίσεις εβαποριτικών στρωμάτων είναι διαγενετικής προέλευσης, κάτι που ήταν αναμενόμενο εξ' αιτίας της εξαιρετικής διαλυτότητας των εβαποριτικών ορυκτών. Ακόμη και ο αραγωνίτης είναι σπάνιος σε πετρώματα προ-πλειστοκαινίου και είναι 140 φορές λιγότερο διαλυτός από τον ανυδρίτη που είναι 160 φορές λιγότερο διαλυτός από τη γύψο και 24.000 φορές από τον αλίτη (Blatt, 1982).

Μια τυπική αλληλουχία εβαποριτικών κοιτασμάτων είναι η εξής (Morisson, 1985):

4. Ποτάσα και μαγνησιούχα άλατα (καϊνίτης, καρναλίτης, συλβίνης, κιζερίτης)
3. Ορυκτό άλας (αλίτης)
2. Γύψος ή ανυδρίτης
1. Ασβεστίτης και δολομίτης

2.2.6. Υφή των εβαποριτών

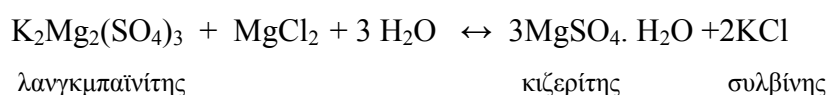
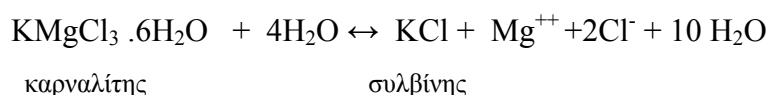
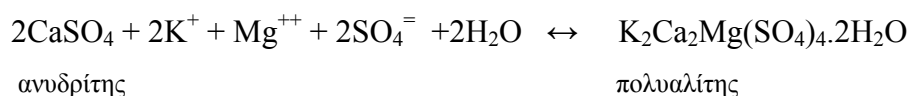
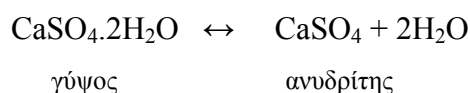
Πολλές ασυνήθιστες δομές και υφές που απαντώνται στους εβαπορίτες, θεωρείται ότι είναι αποτέλεσμα αντιδράσεων αφυδάτωσης-ενυδάτωσης μεταξύ των εβαποριτικών ορυκτών. Οι εβαπορίτες και οι άλμες μπορεί να έχουν υφή μικροκρυσταλλικής συνένωσης ή υπιδιόμορφη-κοκκώδη υφή αλλά συχνά απαντώνται και υφές άλλου τύπου, όπως είναι η σφαιρουλιτική, η κομπώδης, η πορφυροβλαστική, η ποικιλοτροπική, η αλλοτριόμορφη-κοκκώδης, η κλαστική και διάφορες άλλες υφές αντικατάστασης (Raymond, 1995).

Όπως έχει επισημάνει ο Holiday (1970), σύμφωνα με αρκετά ενδεικτικά στοιχεία που αφορούν στην υφή κάποιων εβαποριτικών στρωμάτων, αυτές οι αντικαταστάσεις ορυκτών μπορούν να εμφανιστούν χωρίς μεταβολή του όγκου. Οι παρατηρήσεις που χρησιμοποιούνται για τη στήριξη αυτής της άποψης είναι ότι οι στρωσιγενείς δομές σε μη αντικατεστημένα τμήματα των πετρωμάτων διέρχονται χωρίς εκτροπή μέσα από τα αντικατεστημένα τμήματα, ότι οι ανυδριτικοί σχηματισμοί διέρχονται ανεμπόδιστα μέσα από δευτερεύουσα γύψο, ότι διαβρωμένα υπολείμματα κρυστάλλων ανυδρίτη, ενώ είναι αποκομμένα από τη δευτερεύουσα γύψο παραμένουν τέλεια στοιχισμένα και με τον ίδιο προσανατολισμό, κ.α.

Μάλιστα, η γύψος μπορεί να αντικαταστήσει τον ανυδρίτη χωρίς μεταβολή όγκου ενώ η περίσσεια του θείου απομακρύνεται με τις ροές των υδάτων. Υπάρχουν ακόμη στοιχεία ότι το θείο μπορεί να απομακρυνθεί μέσω διαφόρων διαλυμάτων έχοντας ως αποτέλεσμα τη μείωση του καθαρού όγκου, με γυψοποίηση. Ο Holiday παρατήρησε ακόμα ότι τα πετρώματα της δευτερεύουσας γύψου είναι συνήθως πιο πορώδη από το μητρικό ανυδρίτη.

Τα στοιχεία σχετικά με την αντικατάσταση της υφής στα εβαποριτικά πετρώματα είναι συνήθη. Οι ψευδομορφές είναι εκτεταμένες και οι αντιδράσεις στα όρια των πετρωμάτων είναι συχνές καθώς είναι κατάλοιπα ενός προϋπάρχοντος εβαποριτικού ορυκτού, έγκλειστου μέσα σε ένα ορυκτό που το αντικατέστησε.

Γνωστά παραδείγματα είναι οι ψευδομορφές του ανυδρίτη μετά από διχαλωτά δίδυμα γύψου, αντιδράσεις στα άκρα του πολυαλίτη γύρω από προϋπάρχον ανυδρίτη, κατάλοιπα καρναλίτη σε δευτερεύον συλβίνη, ψευδομορφές συλβίνη συν κιζερίτη μετά από προϋπάρχον λανγκμπαϊνίτη και πολλά άλλα. Οι παρακάτω αντιδράσεις περιγράφουν αυτούς τους τύπους μετατροπής (Blatt, 1982):



2.2.7. Ταξινόμηση και ονομασία των εβαποριτών

Ένας τρόπος να ταξινομηθούν οι εβαπορίτες και τα συγγενικά τους πετρώματα, είναι ο διαχωρισμός τους σε δύο κύριες χημικές ομάδες. Η μία ομάδα είναι πλούσια σε θειικό μαγνήσιο (MgSO_4) και η άλλη ομάδα φτωχή σε θειικό μαγνήσιο (MgSO_4). Στην πρώτη ομάδα ανήκουν ορυκτές ακολουθίες που περιλαμβάνουν γύψο, ανυδρίτη, αλίτη και καϊνίτη, ενώ στη δεύτερη ομάδα ανήκουν ορυκτές ακολουθίες που χαρακτηρίζονται από ορυκτά όπως ο αλίτης, ο σελβίνης και ο καρναλίτης.

Ένας άλλος τρόπος ταξινόμησης των εβαποριτικών ορυκτών είναι: α) σε ορυκτά του ανθρακικού ασβεστίου, όπως είναι ο δολομίτης και ο μαγνησίτης, β) σε χλωρίδια, όπως είναι ο αλίτης, ο σελβίνης και ο καρναλίτης και γ) σε σουλφίδια όπως είναι ο ανυδρίτης, η γύψος, ο πολυαλίτης, ο καϊνίτης και ο λανγκμπαϊνίτης. Αυτός ο τρόπος ταξινόμησης είναι και ο επικρατέστερος στη διεθνή βιβλιογραφία.

Γενικά δεν χρησιμοποιούνται όροι που αναφέρονται στην υφή των εβαποριτών, αλλά στην ορυκτή τους σύνθεση. Για παράδειγμα, ο Schrock (1948), αναφέρεται σε όλα τα πετρώματα, που έχουν σχηματιστεί από αλατούχα ορυκτά, με τον όρο αλατούχα πετρώματα. Ο όρος δεν έχει υιοθετηθεί, ευρέως, από τους γεωλόγους αλλά ως γενικός όρος, είναι χρήσιμος στο χαρακτηρισμό ιζηματογενών πετρωμάτων που αποτελούνται από αλογονίδια, σουλφίδια, εστέρες βορικού οξέος και συγγενικά ορυκτά.

Στην πράξη τα πετρώματα που είναι πλούσια σε αλίτη ονομάζονται «ορυκτά άλατα» ενώ τα περισσότερα άλλα αλατούχα πετρώματα ονοματίζονται από το όνομα

του επικρατέστερου ορυκτού (π.χ. ανυδρίτη ή γύψου). Μάλιστα ορισμένοι γεωλόγοι, χρησιμοποιούν όρους, όπως ορυκτός ανυδρίτης, γυψίτης, ορυκτή γύψος κλπ.

Ο Raymond (1984) επισυνάπτει ονόματα ορυκτών στο αρχικό όνομα εβαπορίτης. Γι' αυτό το λόγο όπου είναι γνωστή η προέλευση του εβαπορίτη, τα γενετικά ονόματα των εβαποριτών είναι για παράδειγμα ανυδρίτης εβαπορίτης, αλίτης εβαπορίτης, ουλεξίτης εβαπορίτης ή ανυδρίτης-γύψος εβαπορίτης. Όταν τα πλούσια σε άλατα πετρώματα δεν σχηματίζονται ως αποτέλεσμα εξάτμισης, τα ισοδύναμα ονόματα είναι αλατούχος ανυδρίτης, αλατούχος ανυδρογύψος, ή αλατούχος αλίτης. Τα ονόματα και οι χημικοί τύποι των διαφόρων εβαποριτικών ορυκτών παρατίθενται στον Πίνακα 2.2.

Πίνακας 2.2: Τα ονόματα και οι χημικοί τύποι διαφόρων εβαποριτικών ορυκτών (Raymond, 1995)

Ανθρακικά και όξινα ανθρακικά	
Ναχολίτης	NaHCO_3
Αραγωνίτης	CaCO_3
Ασβεστίτης	CaCO_3
Μαγνησίτης	MgCO_3
Δολομίτης	$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
Ανκερίτης	$(\text{Ca,Mg,Fe})\text{CO}_3$
Τρόνα	$\text{NaCO}_3(\text{HCO}_3) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Πιρσονίτης	$\text{CaCO}_3 \cdot \text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Δοσονίτης	$\text{Na}_2\text{AlCO}_3(\text{OH})_2$
Χλωρίδια	
Συλβίνης	KCl
Αλίτης	NaCl
Μπισοφίτης	$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Καρναλίτης	$\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Ταχυδρίτης	$\text{CaMg}_2\text{Cl}_6 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$
Σουλφίδια	
Πικρομερίτης	$\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Θεναρδίτης	Na_2SO_4
Μιραβελίτης	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
Γκλαουμπερίτης	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{CaSO}_4$
Ανυδρίτης	CaSO_4
Γύψος	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Κιζερίτης	$\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Εξαυδρίτης	$\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Εψομίτης	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$
Σελεστίνης	SrSO_4
Αφθιταλίτης	$\text{K}_3\text{Na}(\text{SO}_4)_2$
Γκλαουμπερίτης	$\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2$
Μπλεδίτης	$\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2$
Σονίτης	$\text{K}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2$
Λανγκμπαϊνίτης	$\text{K}_2\text{Mg}_2(\text{SO}_4)_2$
Πολυαλίτης	$\text{K}_2\text{MgCa}_2(\text{SO}_4)_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
Καϊνίτης	$\text{KMg}(\text{SO}_4)\text{Cl} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
Βορικά	
Κερνίτης	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Τινκαλκονίτης	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Βοράνος	$\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$
Κολεμανίτης	$\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Ουλεξίτης	$\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$
Άλλα (με συνδυασμούς ανιόντων)	
Μπουρκεϊτης	$2\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{Na}_2\text{CO}_3$
Γαλεϊτης	$\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{Na}(\text{F}, \text{Cl})$
Χανκσίτης	$9\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{KCl}$
Νορθουπίτης	$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{MgCO}_3 \cdot \text{NaCl}$
Τεπλεϊτης	$\text{Na}_2\text{B}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{NaCl} \cdot 4\text{H}_2\text{O}$
Πυρίτης	FeS_2
Ερυθρά σανδαράχη	AsS
Αρσеноπυρίτης	As_2S_3
Πυριτίου με αυτογενή προέλευση	
Χαλαζίας	SiO_2
Αντουλαρία	KAlSi_3O_8
Αλβίτης	$\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$
Αναλσίτης	$\text{NaAlSi}_2\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Σιαρλεσίτης	$\text{NaBSi}_2\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$
Μαγαδιίτης	$\text{NaSi}_7\text{O}_{13}(\text{OH})_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$
Φιλλιψίτης	$\text{KCaAl}_3\text{Si}_5\text{O}_{16} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
Ολανδίτης	$\text{CaAl}_2\text{Si}_6\text{O}_{16} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$
Ιλλίτης	$\text{KAl}_4\text{Fe}_4\text{Mg}_{10}(\text{Si}, \text{Al})_8\text{O}_{20} \cdot (\text{OH})_4$
Σμεκτίτης	$(\text{K}, \text{Na}, \text{Ca}, \text{Mg})_{0,33}\text{Al}_2\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$

2.2.8. Χαρακτηριστικά κοιτάσματα εβαποριτών

Παρά το γεγονός ότι τα ορυκτά των εβαποριτών είναι εξαιρετικά διαλυτά έχουν εντοπιστεί σε πετρώματα ηλικίας ακόμη και 3,5 δις χρόνων. Μάλιστα, σε συγκεκριμένες περιόδους της ιστορίας της Γης, φαίνεται να κυριάρχησε ταυτόχρονα σε πολλές ηπείρους, μια ευνοϊκή παλαιογεωγραφική διάταξη κατά τη γένεση των αλατούχων ακολουθιών μεγάλου όγκου. Σε αυτές τις κύριες αλατούχες περιόδους ανήκουν για παράδειγμα το Δεβόνιο, το Πέρμιο και το Τριτογενές, κοιτάσματα των οποίων έχουν βρεθεί αντίστοιχα στο Νέο Μεξικό και το Τέξας, στην Ευρώπη και τη βόρεια Αφρική (Goodman, 1993).

Ένα πολύ γνωστό παράδειγμα λεκάνης καθίζησης αλάτων αποτελεί η νεκρά θάλασσα, τα ύδατα της οποίας δεν βρίσκουν διεξόδους, με αποτέλεσμα τη συνεχή αύξηση της αλατότητας της. Χαρακτηριστικό παράδειγμα αποτελεί επίσης και ο ρηχός κόλπος Karabugas της Κασπίας θάλασσας, στον οποίο το θαλασσινό νερό ανέρχεται σε υψηλές παλίρροιες χωρίς όμως να δύναται να εκρυσταλλώσει. Έτσι παρατηρείται σχηματισμός αλατούχων αποθέσεων, ουσιαστικά, μέσα σε μια μεγάλη λεκάνη εξάτμισης, η οποία συνεχώς ανανεώνεται (Blyth, 1984).

Γενικά πάντως, η εμφάνιση εβαποριτικών κοιτασμάτων στην επιφάνεια της Γης είναι εξαιρετικά σπάνια, ενώ αντίθετα, η ανάπτυξη τους κάτω από αυτήν, είναι ιδιαίτερα συνηθισμένη. Γεωτρήσεις μεγάλου βάθους που πραγματοποιήθηκαν σε διάφορες περιοχές της Μεσογείου, αποκάλυψαν κοιτάσματα πάχους μεγαλύτερου από 1500 m, τα οποία φαίνεται ότι σχηματίστηκαν κατά τη διάρκεια του Μειόκαινου, όταν εκείνη αποτελούσε ακόμη μια εσωτερική λεκάνη καθίζησης. Οι γεωτρήσεις που πραγματοποιήθηκαν όμως, κατά καιρούς και στις Η.Π.Α προς αναζήτηση πετρελαίου και φυσικού αερίου, αποκάλυψαν ότι τμήμα μεγαλύτερο από το 1/3 της επιφάνειας της χώρας, υπέρκειται τεράστιων εβαποριτικών κοιτασμάτων. Πολύ σημαντικά κοιτάσματα, όμως, αλατούχων αποθέσεων έχουν βρεθεί και στη Γερμανία, τα γνωστά και ως «αλατούχα κοιτάσματα Stassfurt», το πάχος των οποίων ξεπερνά τα 1200 m, και η ύπαρξη τους προστατεύεται από τη διάλυση, από ένα υπερκείμενο στρώμα αργίλου, όπως αναφέρθηκε άλλωστε και παραπάνω.

Σε άλλες περιοχές της Γης, υπάρχουν τμήματα κάτω από την επιφάνεια της, όπου το πάχος των εβαποριτών αγγίζει ή και ξεπερνά τα 3 km, όπως συμβαίνει

χαρακτηριστικά στις περιοχές Red Sea και Danakil Depression της Αιθιοπίας (Blyth, 1984).

Πολλά κοιτάσματα εβαποριτών (κυρίως γύψου), έχουν εμφανιστεί πάντως και ως αποτέλεσμα χημικής αποσάθρωσης πυριγενών και μεταμορφωμένων πετρωμάτων, σε περιοχές όπως στην Αλάσκα, στην Αυστραλία, στη Νότια Αφρική, και τη Σιβηρία.

Από τα τέλη της δεκαετίας του '80, οι εβαπορίτες θεωρούνται η σημαντικότερη προοπτική απόρριψης ραδιενεργών αποβλήτων. Υπάρχουν περιοχές εβαποριτικών κοιτασμάτων, των οποίων η καταλληλότητα για την παραπάνω εφαρμογή έχει ήδη διαπιστωθεί, ενώ για άλλους εβαποριτικούς σχηματισμούς, οι μελέτες συνεχίζονται.

2.2.9. Τα σημαντικότερα αλατούχα ορυκτά και πετρώματα

Η ποικιλία και η αφθονία των ορυκτών που παράγονται από ένα, υπό εξάτμιση, σώμα νερού, εξαρτάται μεταξύ άλλων και από την αρχική του σύνθεση. Συχνά ένα στρώμα εβαποριτών μπορεί να έχει συντεθεί από περισσότερα του ενός ορυκτά, ειδικά όταν το κοίτασμα αποτελείται από λιγότερο συνηθισμένα αλλά περισσότερο διαλυτά ορυκτά. Άλλες φορές πάλι, μπορεί να έχουν σχηματιστεί και από ασυνήθιστα έως σπάνια χλωρίδια, σουλφίδια και εστέρες του βορικού οξέος. Στα πιο συνηθισμένα εβαποριτικά ορυκτά, περιλαμβάνονται εκείνα του ανθρακικού ασβεστίου: δολομίτης και μαγνησίτης, τα χλωρίδια: αλίτης, συλβίνης και καρναλίτης και τα σουλφίδια: ανυδρίτης, γύψος, πολυαλίτης, καϊνίτης και λανγκμπαϊνίτης.

Μέχρι σήμερα έχουν ταυτοποιηθεί περισσότερα από 70 εβαποριτικά ορυκτά εκ των οποίων 27 είναι θειούχα, 27 είναι βορικά και 13 είναι αλογονίδια, ενώ συμπεριλαμβάνονται και ορισμένα εξαιρετικά σπάνια. Τα σημαντικότερα από αυτά, εκείνα δηλαδή που παρουσιάζουν οικονομικό ενδιαφέρον, καθώς συμμετέχουν στο σχηματισμό εβαποριτικών κοιτασμάτων είναι (Gimm, 1968):

α) Αλίτης (NaCl): είναι το πιο συνηθισμένο αλατούχο ορυκτό αφού απαντάται σχεδόν σε όλους τους γεωλογικούς σχηματισμούς, είτε με τη μορφή στρωσιγενούς ορίζοντα, μεγάλων ή μικρών διαστάσεων, είτε σε άλλα αλατούχα στρώματα, κυρίως καλιούχων πετρωμάτων.

β) Συλβίνης (KCl): είναι το πιο πολύτιμο ορυκτό του καλίου κι αποτελεί το σημαντικότερο συστατικό του κιζερίτη και του συλβινίτη, ενώ απαντάται σχεδόν σε όλα τα καλιούχα στρώματα των αλάτων. Παρουσιάζει ιδιαίτερα ευνοϊκή

φυσικοχημική συμπεριφορά κατά τον εμπλουτισμό του άλατος, ενώ η περιεκτικότητα του σε K_2O φτάνει το 63%.

γ) Καρναλίτης ($KCl \cdot MgCl_2 \cdot 6H_2O$): δεν θεωρείται τόσο πολύτιμος, όσο ο συλβίνης, κυρίως λόγω της περιεκτικότητας του σε $MgCl_2$, ενδέχεται όμως μελλοντικά να καταστεί εξαιρετικά σημαντικός, αντικαθιστώντας την πρώτη ύλη παρασκευής ενώσεων Mg. Σε πολλά κοιτάσματα εμφανίζεται ως αφετήριο ορυκτό δευτερογενούς συλβίνης. Απαντάται σχεδόν σε όλες τις περιοχές καλιούχων κοιτασμάτων, ενώ η περιεκτικότητα του σε K_2O φτάνει το 17 %.

δ) Καϊνίτης ($KCl \cdot MgSO_4 \cdot 3H_2O$): αποτελεί καλιούχο ορυκτό υψηλής αξίας. Στα καλιούχα στρώματα του Περμίου, γνωστός κυρίως από τη διαμόρφωση Hutsalz υπό την επίδραση μετεωρικού εδαφικού νερού. Μπορεί να απαντηθεί σε άλατα του τεταρτογενούς ως ελαφρώς μεταμορφωμένο πρωτεύον ορυκτό. Η περιεκτικότητα του σε K_2O φτάνει το 19 %.

ε) Κιζερίτης ($MgSO_4 \cdot H_2O$): χρησιμοποιείται ως πρώτη ύλη παρασκευής θειούχων λιπασμάτων και λιπασμάτων θειικού νατρίου από άλατα, ενώ αποτελεί σημαντικό σύνδρομο συστατικό σε στρώματα κιζερίτη (πέτρωμα) και καρναλιτίτη σε πετρώματα του περμίου. Στα στρώματα του Stassfurt, στο τμήμα της λεκάνης του Südhartz, τις περισσότερες φορές απουσιάζει από τα κιζεριτικά πετρώματα, λόγω του μετασχηματισμού του σε ανυδρίτη κατά το Πέρμιο. Επίσης μπορεί να απουσιάζει από ορισμένα κοιτάσματα, ως συνέπεια της μεταβολής του θαλασσινού νερού.

στ) Πολυαλίτης ($2CaSO_4 \cdot K_2SO_4 \cdot MgSO_4 \cdot 2H_2O$): μπορεί να παρουσιαστεί στον κιζερίτη ως δευτερεύον, ως τυχαίο ή ως κύριο συστατικό του. Κατά τη διάλυση του κιζεριτικού πετρώματος μπορεί να συνεισφέρει στο σχηματισμό ιλύος. Η περιεκτικότητα του σε K_2O φτάνει το 16 %.

ζ) Λανγκμπαϊνίτης ($K_2SO_4 \cdot 2MgSO_4$): αποτελεί δευτερεύον συστατικό του κιζερίτη, ενώ κάποτε αποτελούσε και κύριο συστατικό του. Σπάνια σχηματίζει στρωσιγενείς ή στρωματοειδείς συγκεντρώσεις. Η περιεκτικότητα του σε K_2O φτάνει το 23 %.

ε) Σονίτης ($K_2SO_4 \cdot MgSO_4 \cdot 6H_2O$): χαρακτηριστικό Hutsalz πάνω από τον Καϊνίτη. Η περιεκτικότητα του σε K_2O φτάνει το 23 %.

Στη φύση απαντώνται ακόμη ορυκτά άλατα, τα οποία επιδρούν αρνητικά κατά τον εμπλουτισμό των αλάτων. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν:

α) Ταχυδρίτης ($2MgCl_2 \cdot CaCl_2 \cdot 12H_2O$): σε ορισμένες καλιούχες περιοχές απαντάται ευρέως ως δευτερεύον συστατικό του Καρναλίτη. Συχνά διαταράσσει τη

διαδικασία διάλυσης σχηματίζοντας λεπτοκρυσταλλική ιλύ γύψου, ενώ συμβάλλει στην αύξηση της συγκέντρωσης του MgCl_2 στο διάλυμα όπως και ο εξαιρετικά σπάνιος Μπισσοφίτης ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$).

β) Γκλασερίτης ($3\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{Na}_2\text{SO}_4$): εμφανίζεται, στα αλατούχα κοιτάσματα, σποραδικά ως μονοσήμαντο προϊόν μετασχηματισμού άλατος. Λόγω έντονης διαλυτότητας οδηγεί σε αύξηση του MgSO_4 του διαλύματος ($\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{K}_2\text{SO}_4 + 2\text{MgCl}_2 = \text{Na}_2\text{Cl}_2 + \text{K}_2\text{Cl}_2 + 2\text{MgSO}_4$) και έτσι μπορεί να είναι η αιτία σχηματισμού λάσπης. Η περιεκτικότητα του σε K_2O φτάνει το 42 %.

γ) Συνγκενίτης ($\text{K}_2\text{SO}_4 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$): είναι εξαιρετικά σπάνιος κι αποτελεί προϊόν μεταμόρφωσης άλατος. Συχνά σχηματίζεται δευτερογενώς κατά την εργοστασιακή του χρήση, ιδιαίτερα σε πιο κρύες ζώνες της διαλυτοποίησης, όπως στις σωληνώσεις, στο διαχωριστήρα και τις δεξαμενές. Η περιεκτικότητα του σε K_2O φτάνει το 29 %.

Τέλος στα αλατούχα ορυκτά υπάρχουν και ορισμένα σύνδρομα ορυκτά που κατά καιρούς μπορεί να έχουν κάποια οικονομική σημασία, όπως για παράδειγμα:

α) το βρώμιο ως ισόμορφο υποκατάστατο του χλωρίου σε χλωριούχα ορυκτά, β) το βόριο ως βορικό οξύ στον βορακίτη ($\text{M}_6\text{Cl}_2/\text{B}_{14}\text{O}_{26}$), γ) το ρουβίδιο ως RbCl στον καρναλίτη, δ) το καίσιο ως CsCl στον καρναλίτη, αλλά και κάποια σύνδρομα ορυκτά χωρίς οικονομική σημασία όπως είναι το στρόντιο (συνήθως σε ανυδρίτη, σπάνια ως σελεστίνης και σε ίχνη, σε ορυκτά άλατα χωρίς ασβέστιο) και ο σίδηρος (ευρέως διαδεδομένος ως αιματίτης (Fe_2O_3) και γκαιτίτης ($\alpha\text{-FeO} \cdot \text{OH}$)), που είναι και η αιτία του κόκκινου χρώματος διαφόρων αλατούχων πετρωμάτων.

Τα αλατούχα ορυκτά σχηματίζουν εξαιρετικά σπάνια μονοορυκτά άλατα. Αντιθέτως, τις περισσότερες φορές, τα αλατούχα πετρώματα αποτελούνται από χαρακτηριστικές ομάδες αλατούχων ορυκτών. Στα οικονομικώς σημαντικά αλατούχα πετρώματα ανήκουν (Gimm, 1968):

α) Ορυκτό άλας: αλίτης με στρωματοειδή ή φυλλαροειδή εγκλείσματα ανυδρίτη ή αργίλου και σπανιότερα επίσης κιζερίτη ή πολυαλίτη. Σε κάποια κοιτάσματα που βρίσκονται υπό απόληψη, πρέπει ανάλογα με τον εκάστοτε σκοπό εφαρμογής, να ελέγχεται ο αντίστοιχος βαθμός καθαρότητας (μέγιστη περιεκτικότητα σε θείο, άργιλο ή χλωριούχο μαγνήσιο).

β) Καρναλιτίτης: καρναλίτης, αλίτης, κιζερίτης και /ή ανυδρίτης, δηλαδή ταχυδρίτης. Η περιεκτικότητα του σε K_2O , φτάνει γενικά γύρω στο 8-10%. Συνήθως εμφανίζει δομή κλαστικού πετρώματος.

γ) Καρναλιτίτης του μεταλλοφόρου στρώματος Stassfurt (περιοχή Nordharz): η περιεκτικότητα του σε καρναλίτη φτάνει το 56 % (9,5 % σε K_2O), σε κιζερίτη φτάνει το 14 %, σε ανυδρίτη το 2,5 %, σε συλβίνη το 1%, ενώ σε αλίτη φτάνει το 26,5%.

δ) Καρναλιτίτης του μεταλλοφόρου στρώματος Thüringen (περιοχή Werra): η περιεκτικότητα του σε καρναλίτη είναι 50 % (8,5 % σε K_2O), σε κιζερίτη 3 %, σε ανυδρίτη 1 %, σε συλβίνη 6% (3,8 % σε K_2O), ενώ σε αλίτη 40 %.

ε) Συλβινίτης: συλβίνης και αλίτης με μόνο λίγα ορυκτά κιζεριτικά ή άλλα σύνδρομα. Συχνά σε στρωματοειδείς ως στρωσιγενείς διαστρωματώσεις, το σύνολο του ορίζοντα σχηματίζεται από αλίτη. Τυχαία μόνο, απαντάται και σε υδρομεταμορφικά μετασχηματισμένες ζώνες, που είχαν αρχικά αναπτυχθεί από καρναλίτη. Η περιεκτικότητα του σε καθαρό κάλιο ποικίλει έντονα, λόγω της εναλλασσόμενης στρωμάτωσης του συλβινίτη με στρώματα και στρώσεις διαφορετικών παχών ορυκτού άλατος. Περιεκτικότητα σε K_2O , σε πολλά στρώματα (εκτός της Γερμανίας) πάνω από 20 %.

στ) Κιζερίτης: συλβίνης, αλίτης, ανυδρίτης και/ή διπλά θειικά άλατα. Πότε απαντάται στους σχηματισμούς ως μεμονωμένο στρώμα και πότε με κατά τόπους πτώχευση της περιεκτικότητας του ή ομαδοποιημένος με στρώματα καρναλιτικών σχηματισμών. Σε μεγάλο τμήμα του στρώματος Stassfurt έχει προέλθει από διαστρωματωμένο καρναλίτη με δευτερεύουσα γένεση.

ζ) Κιζεριτικός κιζερίτης (στρώμα Thüringen (περιοχή Werra): 19% συλβίνης (12 % σε K_2O), 18,5 % κιζερίτης, 1,5 % ανυδρίτης, 0,5% πολυαλίτης, 60,5% αλίτης.

η) Κιζεριτικός κιζερίτης (στρώμα Hessen (περιοχή Werra): 17% συλβίνης (10,8 % σε K_2O), 22 % κιζερίτης, 1 % ανυδρίτης, 60% αλίτης.

θ) Κιζεριτικός κιζερίτης (στρώμα Stassfurt, περιοχή Nordharz): 24 % συλβίνης (15,2 % σε K_2O), 25 % κιζερίτης, 2 % ανυδρίτης, 4 % πολυαλίτης, 35 % αλίτης.

ι) Κιζερίτης με διπλό θείο (στρώμα Stassfurt, περιοχή Nordharz): 10 % συλβίνης (6,3 % σε K_2O), 25 % Λανγκμπαϊνίτης, (5,7 % σε K_2O), 4 % πολυαλίτης, 5 % κιζερίτης, 55 % αλίτης.

κ) Ανυδριτικός κιζερίτης (στρώμα Stassfurt, περιοχή Nordharz): 21 % συλβίνης (13,3 % σε K_2O), 20 % ανυδρίτης, 59 % αλίτης.

λ) Καϊνίτης : Καϊνίτης και αλίτης. Περιεκτικότητα σε K_2O περίπου 12-16 %.

μ) Σονιτίτης : αλίτης και σονίτης

Για τον πετρογραφικό χαρακτηρισμό των αλατούχων πετρωμάτων, εκτός από την ορυκτή τους σύσταση λαμβάνεται υπόψη και η μακροσκοπική τους υφή, αφού ταυτόχρονα αποτελεί ένα ουσιαστικό υπόβαθρο για μια λεπτομερή στρωματογραφική υποδιαίρεση των αλατούχων ακολουθιών.

2.2.10. Ορυκτολογικά στοιχεία των σημαντικότερων εβαποριτών.

Ο **αλίτης (NaCl)** ανήκει στο κυβικό κρυσταλλικό σύστημα, έχει σκληρότητα 2 και πυκνότητα 2,1-2,2 g/cm³. Τις περισσότερες φορές απαντάται στη φύση σε λευκό, πορτοκαλί, γκρι, κόκκινο, καφέ, μαύρο χρώμα ή και ημιδιάφανος έως διάφανος (εικόνα 2.7). Δίνει λευκή γραμμή κόνεως και εμφανίζει τέλεια σχιστότητα, υαλώδη λάμψη και ανώμαλη έως κογχυλώδη θραύση. Σε ότι αφορά την κρυσταλλογραφική του όψη, συνήθως σχηματίζει κυβικούς κρυστάλλους με στρογγυλεμένες επιφάνειες και οι συνηθέστερες συνθήκες σχηματισμού του είναι με εξάτμιση θαλάσσιων λεκανών. Το κυριότερο χαρακτηριστικό του είναι η αλμυρή του γεύση.

Ο **σολβίνης (KCl)** ανήκει επίσης στο κυβικό κρυσταλλικό σύστημα, έχει σκληρότητα 2 και πυκνότητα 1,99 g/cm³. Στη φύση απαντάται κιτρινωπός, γκρίζος, κόκκινος, γαλάζιος ή και διάφανος (εικόνα 2.8). Δίνει λευκή γραμμή κόνεως και εμφανίζει τέλεια σχιστότητα, υαλώδη λάμψη και ανώμαλη θραύση. Σε ότι αφορά την κρυσταλλογραφική του όψη, συνήθως σχηματίζει κύβους και σπανιότερα οκτάεδρα, άμορφα, κοκκώδη ή ογκώδη και σχηματίζεται επίσης με την εξάτμιση θαλάσσιων λεκανών.

Ο **Καρναλίτης (KMgCl₃ · 6H₂O)** ανήκει στο ορθορομβικό κρυσταλλικό σύστημα, έχει σκληρότητα 1-2 και πυκνότητα 1,6 g/cm³. Στη φύση απαντάται συνήθως κόκκινος και σπάνια λευκός ή άχρωμος (εικόνα 2.9). Δίνει λευκή γραμμή κόνεως, δεν παρουσιάζει καμία σχιστότητα, έχει ρητινώδη λάμψη και κογχυλώδη θραύση. Σε ότι αφορά την κρυσταλλογραφική του όψη, σχηματίζει σπάνια ψευδοεξαγωνικούς κρυστάλλους, συνήθως συμπαγείς, κοκκώδης μάζες. Και ο καρναλίτης σχηματίζεται με την εξάτμιση θαλάσσιων λεκανών, ενώ το κυριότερο χαρακτηριστικό του είναι η πικρή του γεύση, εξαιτίας της παρουσίας του μαγνησίου στο χημικό του τύπο.



Εικόνα 2.7: Κρύσταλλος αλίτη, (Salton Sea, USA), (Naturführer, 1998)



Εικόνα 2.8: Σουλβίνης (Herringer, Werra Γερμανία), (Jedicke, 1999).

Ο **ανυδρίτης** (CaSO_4) ανήκει επίσης στο ορθορομβικό κρυσταλλικό σύστημα, έχει σκληρότητα 3 και πυκνότητα $2,9 \text{ g/cm}^3$. Στη φύση απαντάται συνήθως άχρωμος έως υπόλευκος (εικόνα 2.10). Δίνει λευκή γραμμή κόνεως, παρουσιάζει τέλεια σχιστότητα, έχει περλιτική έως υαλώδη λάμψη και ανώμαλη έως σχιστώδη θραύση. Σε ότι αφορά την κρυσταλλογραφική του όψη, σχηματίζει σπάνια πινακοειδείς ή πρισματικούς κρυστάλλους, ενώ συνήθως αποχωρίζεται ως συμπαγές πέτρωμα ανυδρίτη με κοκκώδη ή πυκνή υφή.

Η **γύψος** ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ανήκει στο μονοκλινές κρυσταλλικό σύστημα, έχει σκληρότητα 1,5-2 και πυκνότητα $2,2\text{-}2,4 \text{ g/cm}^3$. Στη φύση απαντάται συνήθως άχρωμη, κιτρινωπή, γκρίζα έως καφέ και κοκκινωπή. Δίνει λευκή γραμμή κόνεως, παρουσιάζει τέλεια σχιστότητα, έχει περλιτική, υαλώδη έως μεταξωτή λάμψη και σχιστώδη θραύση. Σε ότι αφορά την κρυσταλλογραφική του όψη, σχηματίζει συχνά μεγάλους πινακοειδείς κρυστάλλους, συμπαγείς μάζες, κοκκώδεις έως σχιστώδεις.

Ο **πολυαλίτης** ($\text{K}_2 \text{ MgCa}_2 (\text{SO}_4)_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ανήκει στο τρικλινές κρυσταλλικό σύστημα, έχει σκληρότητα 3 και πυκνότητα $2,77 \text{ g/cm}^3$. Στη φύση απαντάται συνήθως λευκός, γκρίζος ή συχνά κόκκινος. Δίνει λευκή γραμμή κόνεως, παρουσιάζει τέλεια σχιστότητα, έχει ρητινώδη λάμψη και ανώμαλη θραύση. Σε ότι

αφορά την κρυσταλλογραφική του όψη, σχηματίζει νηματώδεις έως διασπάσιμες μάζες με χαρακτηριστικές πολυσυνθετικές διδυμίες (Jedicke, 1999).



Εικόνα 2.9:

Καρναλίτης (Mulhouse, Elsass Γερμανία), (Jedicke, 1999).



Εικόνα 2.10:

Ανυδρίτης (Bad Winsheim, Γερμανία), (Jedicke, 1999).

2.2.11. Χρήσεις των εβαποριτών

Η εξόρυξη των εβαποριτών και ιδιαίτερα του ορυκτού άλατος (αλίτης), έχει διαδραματίσει σημαντικό ρόλο στην εξέλιξη της ανθρωπότητας, αφού αποτελεί απαραίτητο συστατικό της διατροφής του ανθρώπου. Εν τούτοις, οι ανάγκες της βιομηχανίας τροφίμων, καλύπτονται μόλις από το 6 % της συνολικής παραγωγής ορυκτού άλατος, ενώ το υπόλοιπο ποσοστό μαγειρικού άλατος, καλύπτεται από τις αλυκές.

Ο αλίτης, που είναι το πλέον συνηθισμένο αλάτι, όταν ανακτάται μεταλλευτικά περιέχει ως και 98 % χλωριούχο νάτριο (NaCl). Τόσο ο βαθμός καθαρότητας αυτός, όσο και η χαμηλή τιμή του, σε σχέση με το μαγειρικό αλάτι, αποτελούν την αιτία για την οποία η χημική βιομηχανία, χρησιμοποιεί σχεδόν αποκλειστικά μεταλλευτικά ανακτημένο άλας.

Η χημική βιομηχανία είναι άλλωστε και ο σημαντικότερος χρήστης του αλίτη, αφού πάνω στην ύπαρξη του, βασίζεται ένας μεγάλος αριθμός χημικών διεργασιών που οδηγούν στην παρασκευή πρώτων υλών, όπως για παράδειγμα ανθρακικού νατρίου, θειικού νατρίου, καυστικού νατρίου, ελεύθερου μεταλλικού νατρίου, χλωρίου και υδροχλωρίου. Ένα μεγάλο τμήμα του εξορυσσόμενου αλίτη, τέλος,

μετατρέπεται σε σόδα, η οποία χρησιμοποιείται στην παρασκευή απορρυπαντικών, στην κατασκευή γυαλιού και σαπουνιού και ως αφετηρία για την παρασκευή νιτρικού νατρίου.

Τα άλατα καλίου, απ' την άλλη, είναι η σημαντικότερη πρώτη ύλη για την παρασκευή απλών, μεικτών και πλήρων λιπασμάτων (K, N, P) γι' αυτό και κατέχουν πολύ σημαντική θέση στην ανάπτυξη της γεωργικής οικονομίας. Από το σύνολο των εξορυσσόμενων καλιούχων αλάτων μόνο το 5-10 %, χρησιμοποιείται για την παρασκευή λιπασμάτων, αποτελεί όμως την πρώτη ύλη για την παρασκευή ανθρακικού καλίου, νιτρικού καλίου και καυστικού καλίου. Ακόμη τα καλιούχα άλατα, σε συνδυασμό με το ορυκτό άλας, συμβάλλουν σημαντικά στη φωτοχημική βιομηχανία, τη βιομηχανία γυαλιού, χρωμάτων και εκρηκτικών υλών.

Ο αμέσως σημαντικότερος παραλήπτης των αλάτων, μετά τη βιομηχανία, είναι οι τεχνικές επιχειρήσεις που χρησιμοποιούν τον αλίτη στην αναγωγή των μετάλλων, στη σκλήρυνση του χάλυβα, στην παρασκευή τεχνητού πάγου και κρύων μειγμάτων καθώς και στην εφύαλωση κεραμικών προϊόντων. Σημαντικές ποσότητες ορυκτού άλατος χρειάζονται και για τη συντήρηση τροφίμων, τη βυρσοδεψία κ.α.

3. Οι παράγοντες που επηρεάζουν την ευστάθεια των αλατωρυχείων.

3.1. Η μηχανική κατάσταση των πετρωμάτων.

3.1.1 Γενικά

Παρά το γεγονός ότι ο άνθρωπος εμφανίζεται να έχει αντιληφθεί την διαφορά στην αντοχή μεταξύ των διαφόρων πετρωμάτων από την προϊστορική εποχή, εντούτοις ως έτος έναρξης της συστηματικής μελέτης και διδασκαλίας της μηχανικής των πετρωμάτων, θεωρείται το 1950. Με τον όρο μηχανική πετρωμάτων ή βραχομηχανική, περιγράφεται η θεωρητική κι εφαρμοσμένη επιστήμη που μελετά τη μηχανική συμπεριφορά των πετρωμάτων, τόσο στο φυσικό τους περιβάλλον, όσο και στο εργαστήριο κάτω από διάφορες εντατικές καταστάσεις (Αγιουτάντης, 2002).

Η εφαρμογή της βραχομηχανικής στην εξόρυξη των αλάτων, βρίσκεται ακόμη σε σχετικά αρχικό στάδιο αφού η ερμηνεία των συνολικών βραχομηχανικών διαδικασιών που λαμβάνουν χώρα σε ένα ορυχείο δεν είναι πάντα εφικτή. Σε κάθε περίπτωση πάντως, η συμβολή της βραχομηχανικής τόσο στην επίτευξη της μακροχρόνιας ευστάθειας των αλατούχων βραχομαζών, όσο και στην αποπεράτωση μιας ασφαλούς και ταυτόχρονα οικονομικά συμφέρουσας εκμετάλλευσης ενός αλατωρυχείου, είναι πολύ σημαντική.

3.1.2. Η σημασία της βραχομηχανικής για τα αλατωρυχεία

Επειδή κάθε γεωλογικό σώμα χαρακτηρίζεται από συγκεκριμένες φυσικές και μηχανικές ιδιότητες, δεδομένης δομής και αρχικής κατάστασης τάσεων, το κύριο αντικείμενο της βραχομηχανικής είναι ο υπολογισμός και ο έλεγχος των τάσεων και των παραμορφώσεων που διαμορφώνονται κατά τη διάρκεια ή/και μετά από την δημιουργία των μεταλλευτικών ανοιγμάτων. Το σχήμα, η θέση και η διαστασιοποίηση του ορυχείου επιλέγεται έτσι ώστε να ταιριάζει, όσο το δυνατόν πιο ευνοϊκά στο χαρακτήρα της βραχομάζας, δηλαδή να εξασφαλίζεται η λειτουργικότητα και η κατάσταση ασφαλείας για την προβλεπόμενη χρονική διάρκεια της εξόρυξης ή του υπόγειου έργου.

Στα άλατα, περισσότερο απ' ότι σε άλλες βραχομάζες, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή στην επίδραση του χρόνου πάνω στις μεταβολές της κατάστασης των τάσεων (παραμορφώσεις) και κυρίως στην έναρξη και στο είδος της καταπόνησης που έχουν υποστεί. Δεδομένου μάλιστα ότι ανεξάρτητα από το στάδιο στο οποίο βρίσκεται μια μεταλλευτική εργασία, οι χώροι που την περιβάλλουν πρέπει να διατηρούνται σε καλή κατάσταση, τόσο για τεχνικούς λόγους όσο και λόγους ασφαλείας, τότε η εξέλιξη των βραχομηχανικών γνώσεων και η εφαρμογή τους είναι απαραίτητες

Η μηχανική των πετρωμάτων και η γεωλογία αποτελούν τις δύο θεμελιώδεις επιστήμες του μεταλλευτικού κλάδου αλλά φαίνεται ότι η φύση συχνά τις προλαβαίνει ή τις διαψεύδει. Μία λανθασμένη εκτίμηση των πιθανών βραχομηχανικών επιπτώσεων, εκθέτει το ορυχείο σε διάφορους κινδύνους, οι οποίοι απειλούν τόσο την οικονομικότητα όσο και την ασφάλεια του ορυχείου ή ορισμένων μόνο μεταλλευτικών πεδίων. Τα ατυχήματα και οι καταστροφές, βραχομηχανικής φύσης, που έχουν μέχρι σήμερα καταγραφεί αλλά και η προσέγγιση όσων ενδέχεται μελλοντικά να συμβούν σε πολύ μεγάλα βάθη ή σε ασύμφορες γεωλογικές συνθήκες, καθιστούν την επιστημονική έρευνα, τέτοιου είδους προβλημάτων, πολύ σημαντική.

Κατά την εκμετάλλευση ενός ορυχείου ή την κατασκευή ενός υπόγειου έργου, είναι απαραίτητο, μεταξύ άλλων, να λαμβάνονται υπόψη παράμετροι όπως για παράδειγμα, η διάρκεια ζωής του έργου. Έτσι, επιδιώκοντας τη μέγιστη δυνατή διάρκεια ζωής με την ελάχιστη δυνατή καταπόνηση, η τοποθέτηση και η διαστασιοποίηση ή η επέκταση και η διάταξη των έργων προσπέλασης προς το μέτωπο εξόρυξης ή το υπόγειο έργο (π.χ. αίθουσα κονσέρτων), πραγματοποιούνται λαμβανομένου υπόψη, ότι φαινόμενα όπως η σύγκλιση της διατομής των φρεάτων και των στοών, η πτώση της οροφής, η ανύψωση του δαπέδου και ο σχηματισμός φλοιού στις παρειές, είναι εντελώς ανεπιθύμητα. Αστοχίες αυτού του είδους, είναι άλλωστε, εξαιρετικά συνηθισμένες στις εκμεταλλεύσεις των αλάτων.

Μία πολύ βασική παράμετρος που συμβάλλει καθοριστικά στην εξέλιξη της εκμετάλλευσης είναι η σωστή επιλογή της μεθόδου εξόρυξης που θα εφαρμοστεί. Ο στόχος της μεθόδου που εφαρμόζεται κάθε φορά είναι η εξασφάλιση της ευστάθειας και της οικονομικότητας της εκμετάλλευσης ή του υπόγειου έργου. Στα γερμανικά ορυχεία ποτάσας μάλιστα, υπάρχουν ήδη αρκετά παραδείγματα ατυχών επιλογών μεθόδου εξόρυξης που προκάλεσαν σημαντικές καταστροφές κατά την προχώρηση.

Σε κάθε περίπτωση, η εφαρμοζόμενη μέθοδος οφείλει να παρέχει εκτεταμένη στήριξη των υπερκείμενων και υποκείμενων πετρωμάτων, ώστε να επιτύχει πλήρη απουσία αιφνίδιων καταστροφών των στύλων, των δαπέδων και των οροφών αλλά ταυτόχρονα να επιφέρει την ελάχιστη δυνατή επιτρεπτή απώλεια μεταλλεύματος (Gimm,1968).

3.1.3. Η σημασία της πραγματοποίησης εργαστηριακών δοκιμών σε αλατούχα πετρώματα

Σύμφωνα με τον ορισμό της, η βραχομάζα αποτελείται εν μέρει από βράχο και εν μέρει από ακέραιο πέτρωμα, τα οποία συχνά παρουσιάζουν βασικές διαφορές στις ιδιότητες τους. Σε σχετικά ομογενή και ισότροπα αλατούχα πετρώματα όμως, η διαφορά στην συμπεριφορά της παραμόρφωσης και της θραύσης μεταξύ βράχου και πετρώματος δεν είναι πολύ μεγάλη. Έτσι, χρησιμοποιώντας κανείς εργαστηριακά δοκίμια αλάτων, μπορεί να επιτύχει μια σχετικά καλή προσέγγιση της επί τόπου συμπεριφοράς τους. Αναμφίβολα, η πραγματοποίηση εργαστηριακών δοκιμών είναι μόνο ένα βοηθητικό μέσο στην ερμηνεία των βραχομηχανικών φαινομένων που απαντώνται επί τόπου. Εν τούτοις, οι δοκιμές αυτές είναι απαραίτητες κι εν μέρει προσφέρουν καλύτερες δυνατότητες έρευνας από ότι η ίδια η βραχομάζα. Ακόμη, φαίνεται ότι τα τελευταία έτη, γίνονται ουσιαστικά βήματα στο δρόμο για καλύτερη διαχείριση των μεταλλευτικών μεθόδων και τη διεύρυνση των γνώσεων γύρω από τη συμπεριφορά της παραμόρφωσης και της αστοχίας των αλάτων.

Η καθυστέρηση στην έναρξη της συστηματικής έρευνας της μηχανικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων των ορυχείων ποτάσας, είχε ως αποτέλεσμα την καθυστέρηση και της ανάπτυξης της εκμετάλλευσης όταν μια σειρά δυσχερειών, κάνει την εμφάνιση της. Αυτό υποχρεώνει τον μεταλλειολόγο κάθε φορά να τοποθετεί τις υπόγειες κατασκευές του σ' ένα υλικό, τις ιδιότητες του οποίου δεν μπορεί να επιλέξει και το οποίο ήδη βρίσκεται κάτω από κάποιες τάσεις. Οι τάσεις αυτές στο σχηματισμό ενός νέου, κάθε φορά, υπόγειου ανοίγματος (φρέαρ, στοά, μέτωπο εξόρυξης) υφίστανται μια τρέχουσα αλλαγή.

Το πρόβλημα που παρουσιάζεται τελικά στην πράξη, είναι ότι συχνά αναγκάζεται κανείς να υπολογίζει εκ των υστέρων τις ιδιότητες του υλικού πάνω στο οποίο εργάζεται, αφού παρά το γεγονός ότι υπάρχει η δυνατότητα συλλογής και

σύγκρισης δεδομένων που έχουν προκύψει από προγενέστερα υπόγεια έργα, τα δεδομένα αυτά συχνά αλληλοαναιρούνται. Η εξήγηση βρίσκεται στα πολυάριθμα, μεταβαλλόμενα και καμιά φορά άγνωστα φυσικά μεγέθη επιρροής που εξαρτώνται, με τη σειρά τους, από τις πετρογραφικές ιδιότητες του αλατούχου μεταλλευτικού πεδίου, οι οποίες μπορεί να ποικίλουν τόσο έντονα ώστε να μεταβάλλονται αποφασιστικά οι συνθήκες παραμορφώσεων και θραύσεων με τη διεύρυνση του ορυχείου.

Τέλος, οι απόλυτες τάσεις των φερόντων στοιχείων των υπόγειων κατασκευών είναι άγνωστες και η μόνη δυνατότητα που παρέχεται, είναι η μέτρηση των παραμορφώσεων, από τις οποίες μπορεί κανείς να έχει ελάχιστα μόνο συμπεράσματα για τη σχετική αλλαγή των τάσεων γύρω από τα υπόγεια ανοίγματα. Έτσι για να συμπληρωθούν οι γνώσεις και τα συμπεράσματα γύρω από τις τάσεις και τις παραμορφώσεις των αλάτων, είναι απαραίτητη η διεξαγωγή πετρομηχανικών εργαστηριακών δοκιμών, οι οποίες συμβάλλουν στη διευκρίνιση της σχέσης μεταξύ τάσης, χρόνου, παραμόρφωσης και θραύσης (Gimm, 1968).

Μετρήσεις αυτού του είδους, πραγματοποιήθηκαν μάλιστα και πριν την έναρξη της κατασκευής της υπόγειας αίθουσας κονσέρτων, πάνω σε δοκίμια από πυρήνες που λήφθηκαν από την περιοχή κατασκευής του έργου.

3.1.4. Η σημασία της διεξαγωγής –επί τόπου- μετρήσεων τάσης – παραμόρφωσης

Η ανίχνευση των τάσεων μέσα σε ένα αλατωρυχείο είναι πολύ πιο δύσκολη από ότι σε ένα ορυχείο οποιουδήποτε άλλου μεταλλεύματος, εξ' αιτίας κυρίως της έντονα ανελαστικής συμπεριφοράς των αλάτων. Γενικότερα οι τάσεις μπορούν να υπολογιστούν μόνο έμμεσα, μέσω της μέτρησης των παραμορφώσεων.

Οι μετρήσεις των παραμορφώσεων των πετρωμάτων είναι οι σημαντικότερες από όλες τις μετρήσεις που πραγματοποιούνται σ' ένα αλατωρυχείο. Για την ανίχνευση των σχετικών ή απόλυτων τιμών των μεταβολών των παραμορφώσεων με το χρόνο, μετά την αποπεράτωση του ανοίγματος πραγματοποιούνται μετρήσεις, όπως, απόλυτη μέτρηση της καθίζησης στην επιφάνεια του εδάφους σε όλη την ακτίνα επιρροής των μεταλλευτικών πεδίων, σχετική ή απόλυτη μέτρηση των καθιζήσεων μέσα στα υπόγεια, μέτρηση της οριζόντιας μετατόπισης, μέτρηση της εγκάρσιας μεταβολής των στύλων, μέτρηση της απολέπισης των υπερκειμένων

στρωμάτων, μέτρηση των μετατοπίσεων των κοιλωμάτων στην οροφή των θαλάμων, κλπ.

Για τις μετρήσεις αυτές χρησιμοποιούνται τοπογραφικά όργανα ακριβείας, μηχανικές συσκευές (μετρητής αρχικής διαστολής, εκτασιομέτρο, μικρόμετρο), επαγωγικό δρομόμετρο (κοντέρ), επιμηκυνσιόμετρο ηλεκτρικής αντίστασης, μορφοτροπέας παλλόμενου έγχορδου συστήματος για τηλεμετάδοση και ειδικός μετρητής μεταβολών, μηχανικής ή ηλεκτρικής βάσης. Ουσιαστικά για την εγκατάσταση αυτών των συσκευών, απαιτείται με το ελάχιστο κόστος να λαμβάνονται επαρκής πληροφορίες για τις μεταβολές των παραμορφώσεων και των μετατοπίσεων μέσα και γύρω από τα ανοίγματα.

Στα αλατωρυχεία, οι περισσότερες μετρήσεις απαιτούν διάρκεια, πολύ μεγάλων χρονικών διαστημάτων, ώστε να μπορούν να εξαχθούν ασφαλή συμπεράσματα καθώς και μεγάλο αριθμό σημείων μέτρησης, κατανεμημένα σε όλο το εύρος των μεταλλευτικών πεδίων. Υπάρχουν περιπτώσεις κατά τις οποίες, εκτός των τοπογραφικών μετρήσεων απαιτούνται και ορισμένα επιπρόσθετα στοιχεία, τα οποία παρέχονται από τις μετρήσεις των παραμορφώσεων και τις γεωφυσικές μετρήσεις. Γενικά πάντως, είναι σημαντικό να παρέχεται η δυνατότητα εφαρμογής, υπό τις ίδιες γεωλογικές και τεκτονικές συνθήκες, διαφόρων μεθόδων μέτρησης, ώστε να είναι συγκρίσιμα τα αποτελέσματα.

Από επιστημονικής άποψης, για την ερμηνεία των επί τόπου μετρήσεων σε ένα αλατωρυχείο, τα σημεία μέτρησης και η χρονική στιγμή εγκατάστασης των συσκευών μέτρησης θα πρέπει να καθορίζονται αμέσως μετά την αποπεράτωση του ανοίγματος, ώστε να συμπεριλαμβάνονται και οι σχετικά, έντονες αρχικές παραμορφώσεις και να προκύπτει μια ορθή εικόνα των δεδομένων σε σχέση με το χρόνο. Για την επίτευξη αυτού του στόχου, όταν είναι δυνατόν, οι συσκευές μέτρησης τοποθετούνται μέσα στα διατρήματα, πριν από την ολοκλήρωση του ανοίγματος.

Εκτός από τις συνηθισμένες επιπτώσεις, σημαντική είναι και η χρονική μεταβολή της συμπεριφοράς της παραμόρφωσης. Στη μέθοδο θαλάμων και στύλων, παρατηρείται στους στύλους το φαινόμενο του ερπυσμού. Όταν ένα μεταλλευτικό πεδίο δεν είναι μεμονωμένο, αλλά βρίσκεται στην ζώνη επιρροής των γειτονικών μεταλλευτικών πεδίων, λόγω των αυξημένων εντάσεων που οδηγούν συχνά σε εντονότερες και γρηγορότερες παραμορφώσεις, αυτά τα φαινόμενα ερπυσμού με το χρόνο επικαλύπτονται. Σε αυτές τις περιπτώσεις, πρέπει να γίνεται συχνότερη λήψη τιμών και να λαμβάνεται υπόψη ο κρίσιμος χρόνος.

Αυτές οι δυναμικές επιπρόσθετες φορτίσεις των ανοιγμάτων μπορούν να απαντηθούν ακόμη και σε πολύ παλιά ή ανενεργά ορυχεία (π.χ. "Glückauf Sondershausen"), οι οποίες επιφέρουν αρχικά μία νέα επαρκή κατάσταση ισορροπίας. Αυτό το φαινόμενο, μπορεί να ενεργοποιήσει ξανά κάποια από τα τμήματα του μεταλλευτικού πεδίου και να το φέρει μπροστά στον κίνδυνο της κατακρήμνισης (Gimm,1968).

3.1.5 Βραχομηχανικές επιδράσεις στα αλατωρυχεία

Όπως σε κάθε εκμετάλλευση αλατούχων κοιτασμάτων έτσι και στην κατασκευή υπογείων έργων μέσα σε αυτά, υπάρχουν συγκεκριμένες βραχομηχανικές επιδράσεις των οποίων οι διαστάσεις και οι μορφές εμφάνισης εξαρτώνται από πολυάριθμους γεωλογικούς και μεταλλευτικούς παράγοντες. Ως υπόβαθρο για την εκτίμηση αυτών των επιδράσεων, χρησιμοποιούνται τα αποτελέσματα των παρατηρήσεων και των μετρήσεων, τα οποία λαμβάνονται με την εφαρμογή των διαφόρων μεθόδων.

Στους βασικούς παράγοντες επιρροής, συγκαταλέγεται το βάθος, το οποίο στα αλατωρυχεία ανέρχεται συνήθως έως τα 1200 m, οι συνθήκες αποθήκευσης, οι παράμετροι, η καθοδήγηση και η μέθοδος εξόρυξης, η συνολική συμπεριφορά της βραχομάζας που περιβάλλει την εκσκαφή (ειδικά σε ότι αφορά τον κίνδυνο πτώσης της οροφής, διαταραχών των προστατευτικών στρωμάτων και των επενδύσεων υποστήριξης καθώς και αιφνίδιων ή βαθμιαίων κατακρημνίσεων) και η επίδραση της λιθογόμωσης.

Συχνά δεν είναι σκόπιμη η λεπτομερής διερεύνηση της επιρροής όλων των γνωστών παραγόντων πάνω στις βραχομηχανικές διαδικασίες, αφού τις περισσότερες φορές τα δεδομένα γύρω από ένα σύστημα επιρροής δεν είναι γενικά, αλλά αφορούν σε συγκεκριμένα παραδείγματα. Στα αλατωρυχεία πάντως οι έννοιες των βραχομηχανικών διαδικασιών, οδηγούν στην κατανόηση και την καλύτερη αντιμετώπιση των κατακρημνίσεων των βραχομαζών και των καταρρεύσεων των μεταλλευτικών πεδίων των ορυχείων αυτού του τύπου (Gimm,1968).

3.1.6 Η σημασία του κινδύνου κατακρήμνισης της βραχομάζας για τα ορυχεία ποτάσας.

Στα ορυχεία καλίου και ορυκτού άλατος, όπου η προχώρηση γίνεται με τη μέθοδο των θαλάμων με εγκατάλειψη στύλων, μπορεί να προκύψει αιφνίδια ή βαθμιαία κατάρρευση ολόκληρου του ορυχείου ή ορισμένων μεταλλευτικών πεδίων. Οι κατακρημνίσεις των βραχών σε σύγκριση με τις υπόλοιπες παραμέτρους ενός ορυχείου, καταλαμβάνουν μια ιδιαίτερη θέση σε ότι αφορά το μέγεθος και την ένταση τους. Μάλιστα, οι μεγαλύτερες κατακρημνίσεις των βραχομαζών στα αλατωρυχεία είναι οι σφοδρότερες κατακρημνίσεις των βραχομαζών των ορυχείων γενικότερα, αφού η επίδραση που έχουν στην γήινη επιφάνεια μπορεί να συγκριθεί με εκείνη των μικρών ή των μεγαλύτερων σεισμών.

Ο σημαντικότερος κίνδυνος είναι ίσως η κατακρήμνιση της βραχομάζας, αφού οι καταστροφές αυτού του είδους είναι αιφνίδιες και οι προαναγγελίες τους δεν αναγνωρίζονται πάντα. Έτσι, εκτός από τις μεγάλες απώλειες σε ανθρώπινες ζωές σημειώνονται μεγάλες απώλειες εξορυσσόμενου υλικού αλλά και ακριβού μεταλλευτικού εξοπλισμού.

Είναι μια από τις πιο συνηθισμένες και ταυτόχρονα πιο δύσκολες αποστολές της βραχομηχανικής να ανιχνεύσει τους παράγοντες που συμμετέχουν στην κατακρήμνιση της βραχομάζας, με στόχο να βελτιώσει τη δυνατότητα πρόγνωσης ή και αποφυγής της κατακρήμνισης (Gimm,1968).

3.2. Η ύπαρξη υδάτων ή υδατικών διαλυμάτων στα αλατωρυχεία.

3.2.1 Η σημασία και τα γενικότερα αίτια των υδρολογικών κινδύνων στα αλατωρυχεία.

Ανάμεσα στους κινδύνους που απειλούν την ασφάλεια και την ευστάθεια ενός αλατωρυχείου, οι υδρολογικοί κίνδυνοι κατέχουν μια εξίσου σημαντική θέση. Η επικινδυνότητα αυτή, έγκειται στην υψηλή διαλυτότητα των περισσότερων εβαποριτικών αλάτων από το νερό, η οποία είναι κατά πολλές φορές μεγαλύτερη από ότι για τα υπόλοιπα ορυκτά. Αυτό οφείλεται στη διαλυτική επίδραση του νερού, η

οποία δύναται να διαταράξει τα οριακά επίπεδα μεταξύ των στοών και των φρεάτων που υφίστανται μέσα σε εβαποριτικές βραχομάζες (ή ακόμη και τις βραχομάζες, οι οποίες αφέθηκαν άθικτες κατά την εκσκαφή) και να οδηγήσει στην κατάρρευση ολόκληρης της εκμετάλλευσης.

Έτσι, όταν η διάλυση αφορά σε μεγάλο αριθμό υπόγειων ανοιγμάτων ή ακόμη και σ' ένα ολόκληρο μεταλλευτικό τετράγωνο, είναι πιθανό να συντελούνται ισχυρές καθιζήσεις και να σχηματίζονται μεγάλες ρωγμές στα υπόγεια, με αποτέλεσμα, για δεδομένες γεωλογικές συνθήκες, να δημιουργούν στο νερό τις κατάλληλες προϋποθέσεις εύρεσης νέων διόδων κυκλοφορίας. Η δίοδος του νερού μέσα από αυτές τις ρωγμές οδηγεί όμως στην ακόμη μεγαλύτερη διεύρυνση τους.

Η αλληλεπίδραση μεταξύ των μετατοπίσεων και των διαταραχών που προκαλούνται μηχανικά και της διαλυτοποίησης των αλάτων, μπορεί τελικά να επιφέρει έντονη αύξηση στην ποσότητα του εισερχόμενου νερού και να οδηγήσει στην κατάρρευση του ορυχείου, αφού τότε όλα τα μέτρα ασφαλείας που έχουν ληφθεί καθίστανται αναποτελεσματικά και το ορυχείο πλημμυρίζει. Αυτό συνήθως σημαίνει και την οριστική αναστολή της λειτουργίας του, αφού η υψηλή διαλυτότητα των αλάτων καθιστά πολύ δύσκολη τη στεγανοποίηση του και η επαναλειτουργία του είναι εφικτή, μόνο σε εξαιρετικά σπάνιες περιπτώσεις.

Η εισροή υδάτων σε ένα αλατωρυχείο δεν παρουσιάζει κανένα άμεσο κίνδυνο για το προσωπικό, αφού η ποσότητα του νερού που εισέρχεται σε αυτό είναι αρχικά πολύ μικρή σε σύγκριση με τα υφιστάμενα υπόγεια ανοίγματα και αυξάνεται βαθμιαία. Συνήθως, ανάμεσα στη χρονική στιγμή της πρώτης παρατήρησης εισροής υδάτων και της εγκατάλειψης του ορυχείου, μεσολαβούν ορισμένα χρόνια ή ακόμη πιο σπάνια μερικοί μήνες.

Η πλημμύρα ενός αλατωρυχείου δεν σημαίνει μόνο μείωση της παραγωγής και απώλεια της οικονομικής επένδυσης και των λειτουργικών μέσων, αλλά τις περισσότερες φορές σημαίνει και απώλεια μεγάλων εκτάσεων κοιτασμάτων. Οι τεκτονικές κινήσεις οδηγούν επιπλέον στο σχηματισμό λεκανών καθίζησης και ρωγμών στην επιφάνεια του εδάφους με αποτέλεσμα να υφίστανται ζημιές τα κτιριακά και τα βιομηχανικά συγκροτήματα καθώς και τα οδικά δίκτυα ή τα δίκτυα ύδρευσης και άρδευσης της περιοχής. Η αντιμετώπιση τέτοιων επιφανειακών ζημιών απαιτεί υψηλό κόστος ενώ σε μη ευνοϊκές περιπτώσεις, η κατακρήμνιση είναι μη αποφευκτέα.

Κατά την εξόρυξη άνθρακα ή μετάλλων, η εισροή του νερού στα υπόγεια μπορεί με συστηματικές εργασίες και άντληση να τεθεί υπό έλεγχο. Σ' ένα αλατωρυχείο όμως το νερό πρέπει να κρατηθεί μακριά από το εσωτερικό του, με στεγανοποίηση των φρεάτων και των περιβαλλόντων πετρωμάτων εμποδίζοντας την επαφή τους με τους υδροφόρους ορίζοντες που βρίσκονται στην περιοχή (Gimm,1968).

3.2.2. Υδρολογικό υπόβαθρο

Το νερό βρίσκεται στη φύση σε ένα συνεχή κύκλο. Από την επιφάνεια του εδάφους εξατμίζεται και ανέρχεται στην ατμόσφαιρα με τη μορφή υδρατμών, οι οποίοι σχηματίζουν σύννεφα κι όταν ψυχθούν επιστρέφουν στη Γη, με τη μορφή σταγόνων νερού (βροχή, χιόνι, χαλάζι). Ένα μέρος του νερού αυτού διεισδύει στο έδαφος κι ένα μέρος ρέει στην επιφάνεια του εδάφους με τη μορφή ρυακιών, ποταμών, λιμνών ή ωκεανών. Η σχέση μεταξύ της εξάτμισης, της ροής και της διείσδυσης εξαρτάται στην ουσία από το κλίμα, τη μορφολογία, τη βλάστηση και τη γεωλογική δομή της περιοχής.

Το ποσό του νερού που θα εισέλθει στο εσωτερικό της γης εξαρτάται από την ένταση των βροχοπτώσεων στην περιοχή, από το βαθμό κορεσμού της ατμόσφαιρας και της θερμοκρασίας και από την ταχύτητα του ανέμου. Επιπλέον η μορφολογία του εδάφους μπορεί να επηρεάσει τη σχέση μεταξύ της ροής του νερού και της ποσότητας που θα εισέλθει στο εσωτερικό της Γης, αφού σε μια επίπεδη επιφάνεια, το νερό των βροχοπτώσεων, διεισδύει ευκολότερα από ότι σε μια περιοχή με έντονα κεκλιμένο ανάγλυφο, όπως είναι οι ορεινές περιοχές. Ακόμη, η βλάστηση της περιοχής μπορεί να επιδράσει στο βαθμό διείσδυσης του νερού, αφού για παράδειγμα, τα δάση μπορούν να αποθηκεύσουν ένα μεγάλο μέρος των βροχοπτώσεων. Από το νερό αυτό, ένα μέρος θα παραμείνει κοντά στην επιφάνεια του εδάφους (εδαφικό νερό), και το υπόλοιπο θα διεισδύσει βαθύτερα έως τη ζώνη κορεσμού.

Για τον μεταλλειολόγο μηχανικό όμως, ο σημαντικότερος παράγοντας, ο οποίος επιδρά αξιωματικά στην διείσδυση και την επιφανειακή εκροή των βρόχινων υδάτων είναι η γεωλογική δομή της περιοχής, αφού η ποσότητα του νερού που θα εισέλθει μέσα στο ορυχείο εξαρτάται κυρίως από τη διαπερατότητα των υπερκειμένων πετρωμάτων, τη θέση και την κλίση των στρώσεων και την τεκτονική δομή τους.

Η διαπερατότητα εξαρτάται εν μέρει από το πορώδες και εν μέρει από τις ρωγμές του πετρώματος. Το πορώδες των πετρωμάτων εξαρτάται από το μέγεθος και τη δομή των κόκκων, καθώς και την ομαδοποίηση τους και την ύπαρξη, ενδεχομένως, συνδετικού υλικού. Έτσι, τα χονδροκοκκώδη πετρώματα είναι περισσότερο διαπερατά από τα λεπτοκοκκώδη, ενώ σε ασυνήθιστες δομές με ασυνήθιστη διάταξη παρουσιάζεται μεγαλύτερο πορώδες και διαπερατότητα στο πέτρωμα από ότι σε, κανονικά διαμορφωμένων κόκκων, πετρώματα. Χαρακτηριστικά παραδείγματα αδιαπέρατων πετρωμάτων είναι η άργιλος, ο πηλίτης, ο αργιλικός σχιστόλιθος, ο κρυσταλλικός σχιστόλιθος και τα ηφαιστειακά πετρώματα. Διαπερατά πετρώματα είναι τα χαλαρά ψαθυρά πετρώματα, όπως οι προσχωσιγενείς αποθέσεις, καθώς επίσης τα χαλαρά λατυποπαγή πετρώματα, τα χαλίκια, η άμμος, ο λος (ασβεστιτικός πηλός αιολικής απόθεσης), ο πηλός (με περιεκτικότητα σε φυσική άργιλο μικρότερη του 25%) και ο ψαμμίτης.

Εκτός από τη διαπερατότητα των πετρωμάτων, καθοριστικός παράγοντας για το βαθμό διείσδυσης του νερού στο εσωτερικό τους, είναι και το είδος της στρωμάτωσης τους και κυρίως η ρωγμάτωση τους. Έτσι, οι όρθιες στρώσεις αντιμετωπίζουν μεν ευνοϊκότερα την προσπάθεια διείσδυσης του νερού στο εσωτερικό τους από ότι οι στρώσεις μετρίων κλίσεων, αλλά το σύστημα ρωγμάτωσης αυτών, έχει καθοριστικό ρόλο. Οι ρωγμές, είτε δημιουργήθηκαν αρχικά, λόγω του διαχωρισμού, είτε στη συνέχεια λόγω των τεκτονικών δυνάμεων, κοντά στην επιφάνεια του εδάφους είναι περισσότερο διευρυμένες. Έτσι, ενώ τα πετρώματα στα σημεία αυτά διαβρώνονται και γίνονται περισσότερο υδατοδιαπερατά, όσο αυξάνεται το βάθος και το νερό απομακρύνεται από η ζώνη διάβρωσης του πετρώματος, οι ρωγμές στενεύουν και η ικανότητα διείσδυσης του νερού, περιορίζεται. Στην πραγματικότητα, το νερό δύναται να προσεγγίσει μεγαλύτερα βάθη, μόνο κοντά στις ζώνες διαταραχών και κατακλάσεων, σε πετρώματα σχετικά εύθρυπτα όπως είναι ο ψαμμίτης, οι ηφαιστειακοί τόφφοι, ο ανυδρίτης, ο ασβεστόλιθος και ο δολομίτης (Gimm,1968).

3.3.3 Προέλευση εδαφικού νερού.

1. Μετεωρικό νερό: προέρχεται από την ατμόσφαιρα. Είναι το προϊόν ρεόντων υδάτων τα οποία βρίσκονται στην επιφάνεια του εδάφους λόγω των βροχοπτώσεων

και των χιονοπτώσεων και διεισδύουν στο υπέδαφος τροφοδοτώντας τους υδροφόρους ορίζοντες με φρέσκο νερό.

Το μετεωρικό νερό μπορεί να παρίσταται σε δύο διαφορετικές γεωλογικές δομές: σε επιφανειακούς ταμιευτήρες (τετραδικής ηλικίας) και σε υπόγεια στρώματα, στα οποία διεισδύει από την επιφάνεια μέσω των διάλυτων διαπερατότητας των πετρωμάτων. Τα επιφανειακά αποθέματα είτε είναι ακόρεστα λόγω της εκροής του νερού, είτε είναι κορεσμένα σε κλειστά αμμώδη σώματα, οπότε θα μπορούσαν να εισέλθουν στο φρέαρ κατά την κατερχόμενη εξόρυξη.

Οι υδροφόροι ορίζοντες που αποτελούνται από φρέσκο νερό, μπορούν να διασταυρωθούν με ρωγμές στην επιφάνεια του εδάφους και να αναδυθούν ως πηγή ή υγρασία. Μπορεί επίσης να αναδυθούν από μια ζώνη ρωγμών και να έρθουν σε επαφή με στάσιμα νερά. Στην τεχνολογία κατερχόμενης εξόρυξης, λαμβάνεται οπωσδήποτε υπόψη η περίπτωση υδροφόρου που έχει σχηματιστεί από κορεσμένη άμμο σε υψηλή υδροστατική πίεση.

2 Στάσιμα ύδατα: μπορεί να προέρχεται από ωκεάνια ή ηπειρωτικά νερά και συμβάλλουν στην παγίδευση του νερού στα διάκενα μιας ιζηματογενούς στρώσης κατά τη στιγμή της απόθεσης του. Τα στάσιμα ύδατα που δύνανται να ταυτοποιηθούν από την υψηλή τους περιεκτικότητα σε $MgCl_2$, αναπαριστούν ένα υδροστατικό ορίζοντα αλμυρού νερού, η πίεση του οποίου εξαρτάται από το βάθος του.

Αν αυτά τα ύδατα έρθουν σε φυσική επαφή με τα αλατούχα αποθέματα και αν βρίσκεται σε εξέλιξη διάλυση των αλάτων, θα γίνουν άλμες. Στην περίπτωση της διασταύρωσης τους με την επιφάνεια του εδάφους αναδύονται ως αλμυρές πηγές και πηγάδια που μπορεί να χρησιμοποιηθούν για υδροχημικές προοπτικές και έρευνες. Οι αλμυροί υδροφόροι ορίζοντες μπορεί να επηρεάσουν την εισροή υδάτων στα ορυχεία είτε μέσω φυσικών ζωνών ρωγμών είτε μέσω ρωγμών που δημιουργήθηκαν κατά την εξόρυξη. Οι υδροφόροι των στάσιμων υδάτων μπορούν να σχηματίσουν ένα αρτεσιανό σύστημα. Το νερό που βρίσκεται περιορισμένο σε επικλινή απροσπέλαστα στρώματα ή υδροφόρους ορίζοντες, απορρέει προς την επιφάνεια του εδάφους, σχηματίζοντας πηγάδια ελεύθερης ροής φρέσκου ή αλμυρού νερού αντιστοίχως.

3 Παγιδευμένο νερό σε αλατούχα σώματα: το παγιδευμένο νερό μέσα σε αλατούχα σώματα μπορεί να διακριθεί όπως παρακάτω σε τρεις κατηγορίες:

α) Ρευστά εγκλείσματα: προήλθαν από φυσαλίδες άλμης ή αέριες φυσαλίδες κι έχουν σχηματιστεί και κατά την ιζηματοποίηση και κατά τη διάρκεια μεταμορφικών διαδικασιών των αλατούχων κοιτασμάτων. Οι φυσαλίδες είναι εγκλωβισμένες σε

αλατούχα ορυκτά μέχρι και μετά τη θραύση του πετρώματος. Τα ρευστά εγκλείσματα δεν έχουν καμιά επιρροή στην εισροή του νερού στα ορυχεία.

β) Πρωτογενές παγιδευμένο νερό: πληρώνει πόρους και κενά σε κάποιες κοιλότητες στα αλατούχα σώματα. Αυτό είναι ένα απολιθωμένο νερό το οποίο αντιστοιχεί σε κάποιο υπόλειμμα ωκεάνιου νερού που εγκλωβίστηκε κατά τη διαδικασία εξάτμισης και σχηματισμού των κοιτασμάτων. Το παγιδευμένο νερό συνδέεται με αεροθύλακες. Η κατάσταση των ρευστών χαρακτηρίζεται από την συνύπαρξη μιας υγρής φάσης με μια απειροελάχιστη ποσότητα αέριας φάσης σε ισορροπία. Τη στιγμή που αυτή η ισορροπία δεν υφίσταται, υφίσταται ο κίνδυνος έκρηξης του αερίου. Από τις ιστορικές περιπτώσεις μικρής διαρροής άλμης σε αλατούχους δόμους, παρατηρήθηκε ότι τείνει να περιοριστεί με το χρόνο, υποδεικνύοντας ότι το απολιθωμένο νερό είναι πιθανό να στραγγίζεται από μονωμένους θύλακες άλμης στο άλας. Το πρωτογενώς παγιδευμένο νερό στα άλατα μπορεί να ταυτοποιηθεί με το συντελεστή Cl/Br.

γ) Δευτερεύον παγιδευμένο νερό: πληρώνει μονωμένες κοιλότητες εντός του αλατούχου πετρώματος. Αυτό το νερό συνήθως προέρχεται από διαδικασίες μεταμόρφωσης. Για παράδειγμα, τα επιμήκη κάθετα δομικά χαρακτηριστικά που σχηματίστηκαν κατά τη διάρκεια της ανάπτυξης των δόμων, μπορεί να περιλαμβάνουν ζώνες με ιζήματα, αέρια ή/και νερό. Ο όγκος του δευτερογενώς παγιδευμένου νερού ποικίλει από πολύ μικρός, όπως π.χ. στα εγκλείσματα, μέχρι πολύ μεγάλος, όπως στις κοιλότητες που είναι πληρωμένες με νερό. Στην τελευταία περίπτωση ο κίνδυνος εισροής νερού μέσα στο ορυχείο είναι πολύ σημαντικός. Αν οι κοιλότητες είναι γεμάτες με νερό και αέριο, τότε η εισροή υδάτων στο ορυχείο θα μπορούσε να ακολουθηθεί από ξαφνική εκτόνωση του αερίου και έκρηξη. Η ανακούφιση των κοιλοτήτων από το νερό και το αέριο διευκολύνεται από την εξάπλωση των ρωγμών που οφείλονται στις εργασίες εξόρυξης ή την αποδυνάμωση μιας υπάρχουσας ζώνης ρωγμών. Το δευτερεύον παγιδευμένο νερό ταυτοποιείται από την υψηλή περιεκτικότητα σε NaCl ή CaCl₂. Από τις αναλύσεις της ισοτοπικής χημείας των αλμών έχει καθιερωθεί ότι προέρχονται από σχηματισμένα νερά παγιδευμένα σε άλατα κατά την παρείσδυση.

4. Υπόγειες άλμες: μπορεί να έχουν προέλθει από ύδατα, διαφόρων τύπων γένεσης, τα οποία ήλθαν σε επαφή με τα αλατούχα κοιτάσματα κι υπέστησαν τη διαδικασία διάλυσης του άλατος. Οι υπόγειες άλμες μπορεί να είναι κλειστά ημικυκλοφορούντα, κυκλοφορούντα ή διηθημένα ύδατα. Ο μηχανισμός μετανάστευσης

των υπογείων αλμών εκπληρώνεται μέσω των διαύλων διαπερατότητας με μετανάστευση φυσαλίδων ή μεταφορά φυσαλίδων κατά το διαπυρισμό του άλατος.

Από πλευράς χημικής σύστασης, η άλμη μπορεί να περιέχει κύρια αλατούχα στοιχεία, ιχνοστοιχεία και ισότοπα. Η άλμη μπορεί να υποδείξει την τοποθεσία διαφυγής του νερού στα υπόγεια ορυχεία αφού είναι συχνά αναγνωρίσιμη από την ευκρινή δημιουργία κρούστας άλατος στα τοιχώματα των ανοιγμάτων.

Η κυκλοφορία της άλμης μέσω των διαύλων διαπερατότητας, οι οποίες βρίσκονται σε φυσική επαφή με τα αλατούχα σώματα, αποτελεί μεγαλύτερο κίνδυνο για διείσδυση του νερού στα ορυχεία, αφού στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, οι πλημμύρες των αλατωρυχείων, συνδέονται με την κυκλοφορία άλμης σε αυτά. Η διαλυτοποίηση των αλατούχων στρωμάτων από κυκλοφορούσες άλμες είναι προοδευτική και μπορεί να οδηγήσει στο σχηματισμό σημαντικού αριθμού, μικρών ή μεγάλων σπηλαίων. Τα σπήλαια αυτά, συνήθως είναι γεμάτα από νερό κι αποτελούν τον μεγαλύτερο κίνδυνο για τα αλατωρυχεία, αφού μια πιθανή υπερχειλίση των υπογείων του, θα οδηγούσε σε σταδιακή διάλυση και των αλάτων που περικλείουν τα σπήλαια.

Οι κυκλοφορούσες άλμες σε κάποιες αλατούχες λεκάνες απαιτούν εκμετάλλευση με διαλυτοποίηση του μεταλλεύματος. Η στεγνή εκμετάλλευση περιορίζεται στα περιβάλλοντα πετρώματα με στύλους που έχουν το ρόλο φράγματος μεταξύ των δύο εκμεταλλεύσεων. Σε κάποιες περιπτώσεις οι αρνητικές επιδράσεις των κυκλοφορούντων αλμών είναι τέτοιες, που μια στεγνή εκμετάλλευση πρέπει να μετατραπεί σε εκμετάλλευση με διαλυτοποίηση του μεταλλεύματος. Οι κυκλοφορούσες άλμες σε μια εκμετάλλευση πάντα αντισταθμίζουν, από το μετεωρικό νερό, τον όγκο των αλμών που αντλούνται στην επιφάνεια. Το φαινόμενο αυτό υποδεικνύει, ότι οι κυκλοφορούσες άλμες βρίσκονται ταυτόχρονα σε επαφή με τα αλατούχα κοιτάσματα και με τους υδροφόρους ορίζοντες του μετεωρικού νερού (Jeremic, 1994).

3.3.4 Διαλυτοποίηση των αλάτων και σχηματισμός των αλατούχων διαλυμάτων.

Η διαλυτική δράση του νερού ενισχύεται από την περιεκτικότητα του σε ανθρακικό οξύ. Αυτό σημαίνει ότι η χημική σύσταση των υδάτων τα οποία κινούνται υπογείως, εξαρτάται πλήρως από την περιεκτικότητα των πετρωμάτων, τα οποία διαρρέει, σε περισσότερο ή λιγότερο ευδιάλυτα υλικά. Επειδή όμως, η διαλυτική

δράση του νερού, αυξάνεται τόσο με τη θερμοκρασία όσο και με το χρόνο κατά τον οποίο ήρθε σε επαφή με το πέτρωμα, μπορεί να πει κανείς γενικά, ότι όσο πλουσιότερο είναι το πέτρωμα σε διαλυτά συστατικά, όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία, την οποία είχε το νερό και όσο περισσότερο χρόνο διήρκτησε η επαφή του με το πέτρωμα, τόσο πλουσιότερο θα είναι το νερό σε διαλυτά άλατα.

Η χημική σύσταση των υπογείων υδάτων, υποδεικνύει τα υλικά από τα οποία συνίστανται τα πετρώματα τα οποία διαρρέουν, και τα οποία υλικά, μπορούν να αντισταθούν ελάχιστα στη διαλυτική δράση του νερού. Ένα πολύ γενικό συμπέρασμα θα μπορούσε να είναι ότι τα άλατα έχουν πολύ υψηλή διαλυτότητα σε σχέση με τα υπόλοιπα πετρώματα. Ιδιαίτερα ευδιάλυτα άλατα είναι ο ταχυδρίτης ($\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{MgCl}_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$), ο μπισοφίτης ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) και ο καρναλίτης ($\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Αντιθέτως η διαλυτότητα του ανυδρίτη (CaSO_4), του δολομίτη ($\text{CaMg}[\text{CO}_3]_2$) και της αλατούχου αργίλου, είναι μικρή. Μια ταξινόμηση των αλάτων, ανάλογα με το βαθμό διαλυτοποίησής τους θα είχε ως εξής: Ορυκτή άργιλος, δολομίτης, κιμωλία, ανυδρίτης, γύψος, κιζερίτης, λανγκμπαϊνίτης, αλίτης, συλβίνης, καρναλίτης, μπισοφίτης, ταχυδρίτης.

Στην περιοχή δράσης του νερού, σχηματίζονται αλατούχα διαλύματα. Η διαδικασία διάσπασης, με την επαφή του νερού με το αλατούχο πέτρωμα, προοδεύει συνεχώς μέχρι το σχηματιζόμενο αλατούχο διάλυμα, να κορεστεί πλήρως, δηλαδή να επέλθει φυσικοχημική ισορροπία. Όταν τα κορεσμένα διαλύματα μπορούν να ρέουν σε σημαντικές ποσότητες και να υποκαθίστανται συνεχώς από γλυκό νερό ή ακόρεστα αλατούχα διαλύματα, τότε η διάλυση της αλατούχου βραχομάζας, προοδεύει χωρίς να διακόπτεται. Το κάθε είδος άλατος, συγκεντρώνεται στην ποσότητα που αντιστοιχεί στη διαλυτότητα του. Τα πιο ευδιάλυτα, όπως αναφέρθηκε, είναι ο ταχυδρίτης και ο μπισοφίτης, τα οποία εν τούτοις, απαντώνται σπάνια σε αρκετή ποσότητα. Αντιθέτως, ο καρναλίτης, ως κύριο συστατικό του καρναλίτη, εξαπλώνεται μακριά. Ο καρναλίτης δεν διασπάται μόνο από το γλυκό νερό και τα ακόρεστα αλατούχα διαλύματα αλλά και από κορεσμένα διαλύματα NaCl ή KCl . Αυτό σημαίνει ότι τα ορυχεία καρναλίτη, από υδρολογικής απόψεως, είναι πολύ πιο εύαλτα από εκείνα του κιζερίτη ή του αλίτη.

Για παράδειγμα, ο καρναλίτης των στρωμάτων “Stassfurt” των καλιούχων κοιτασμάτων της κεντρικής Γερμανίας, αποτελείται κατά μέσο όρο από 55% καρναλίτη, 26% αλίτη, 17% κιζερίτη και 2% ανυδρίτη και ψήγματα αργίλου. Έτσι, αν ο καρναλίτης ενός ορυχείου σε αυτή την περιοχή, έρθει σε επαφή με γλυκό νερό, το

νερό θα τον διασπάσει αφού από τα συστατικά του θα διαλύσει κυρίως το $MgCl_2$. Από τα υπόλοιπα συστατικά του καρναλιτίτη, το νερό θα διαλύσει μόνο μικρές ποσότητες μέχρι να επέλθει η φυσικοχημική ισορροπία στο διάλυμα (Gimm, 1968).

3.3. Η ύπαρξη αερίων στα αλατωρυχεία

3.3.1. Εισαγωγή

Η εμφάνιση φυσικών αερίων κατά την εκμετάλλευση ενός αλατωρυχείου αποτελεί ένα πολύ συνηθισμένο φαινόμενο, αφού στην πραγματικότητα, αέρια απαντώνται σε όλα τα αλατούχα κοιτάσματα ανεξαρτήτως είδους και στρωματογραφικής θέσης. Στους εβαπορίτες γενικά, η παρουσία ενός ή περισσοτέρων αερίων, ελλοχεύει τον κίνδυνο της πυρκαγιάς, της αιφνίδιας έκλυσης του αερίου ή ακόμη και της έκρηξης αυτού. Κίνδυνοι όπως αυτοί, είναι δυνατόν να εκδηλωθούν, τόσο κατά την έναρξη των μεταλλευτικών εργασιών σε παρθένα πετρώματα, όσο και αργότερα κατά την ανάπτυξη τους, ανεξάρτητα αν πρόκειται για στεγνή εκμετάλλευση ή για εκμετάλλευση με -επί τόπου- διαλυτοποίηση του μεταλλεύματος (Jeremic, 1994).

Ο τρόπος που τα αέρια, επιδρούν στην εκμετάλλευση είναι πολύ διαφορετικός για κάθε περιοχή κι εξαρτάται από την ποσότητα και το είδος τους. Στις περιοχές, όπου η ύπαρξη φυσικών αερίων είναι έντονη, τα αλατωρυχεία έχουν να αντιμετωπίσουν σοβαρά προβλήματα ασφαλείας αφού μετά από την έκρηξη ή την αιφνίδια έκλυση ενός αερίου, ακολουθεί απότομη και βίαιη αποκόλληση του άλατος που το περιείχε, με αποτέλεσμα την κατακρήμνιση του πετρώματος ή τη διαμόρφωση κοιλοτήτων στο μέτωπο της εξόρυξης ή στις υπερκείμενες στρώσεις.

3.3.2. Τα είδη των αερίων που απαντώνται στα αλατωρυχεία

Τα αέρια, είτε υφίστανται στα αλατούχα πετρώματα, είτε στα πετρώματα των στρώσεων που τα περιβάλλουν, διακρίνονται σε 3 κατηγορίες:

Α) Προσροφημένο αέριο: ο όρος «προσροφημένο αέριο» αναφέρεται στο μηχανισμό προσρόφησης και εκρόφησης, όπου μόρια αερίου μπορεί να βρίσκονται διασκορπισμένα ανάμεσα στα μόρια των αλάτων. Η ποσότητα του προσροφημένου

αερίου εξαρτάται από την πίεση, τη θερμοκρασία, την εσωτερική επιφάνεια και τη φύση της εβαποριτικής στρώσης. Οι εβαπορίτες υψηλού πορώδους, μικρής ακτίνας, απαιτούν πίεση μεγαλύτερη από 500 atm για να κορεστούν από αέριο αλλά στην περίπτωση που το πορώδες είναι χαμηλό, ο κορεσμός επέρχεται στις 200 atm. Το υψηλό πορώδες διευκολύνει την αιφνίδια έκλυση του αερίου αλλά ελαττώνει την εκπομπή του.

Ένα προσροφημένο αέριο εμφανίζεται συνήθως με τη μορφή ενδοκρυσταλλικών φυσαλίδων, κυρίως σε μικρές ποσότητες ανάμεσα στα άλατα πολλών δόμων. Η, κατά τόπους, συγκέντρωση του αερίου θα μπορούσε να αποτελέσει πηγή βίαιης ή βαθμιαίας απελευθέρωσης αυτού. Οι θύλακες συγκέντρωσης αερίου είναι συνήθως διαμορφωμένοι εντός γεωλογικών ζωνών που παρουσιάζουν δομικές ανωμαλίες.

Η εκρόφιση του αερίου είναι αντιστρεπτό φαινόμενο, αφού οποιαδήποτε αλλαγή στην ισορροπία της συγκέντρωσης προσροφημένου αερίου (πίεση, θερμοκρασία, δομή των πόρων κατά τη ρωγμάτωση), θα τείνει να αναστρέψει αυτήν την κατάσταση. Η κατάσταση της εκρόφησης του αερίου, είναι ανάλογη του ρυθμού μεταβολών της ευστάθειας και μάλιστα με αργό ρυθμό, οδηγεί σε εκπομπή αερίου στις μεταλλευτικές εργασίες. Κάτι τέτοιο μπορεί να προκαλέσει φωτιά (μεθάνιο) ή έκρηξη (μίξη αέρα-μεθανίου), ενώ με γρήγορο ρυθμό μπορεί να προκαλέσει αιφνίδια έκλυση του αερίου. Οι μεταβολές στο ρυθμό της εκρόφησης συνήθως οδηγούν αρχικά σε αιφνίδια έκλυση αερίου και μετά σε εκπομπή αερίου και πιθανώς σε έκρηξη.

B) Ελεύθερο αέριο: οι εμφανίσεις ελευθέρου αερίου στις εβαποριτικές στρώσεις θα μπορούσαν να ταξινομηθούν σε δύο ομάδες:

α) Το αέριο συγκεντρώνεται εντός της στρώσης ενός πετρώματος και πληρώνει τις σχισμές, τις κοιλότητες ή τις ρωγμές που πιθανόν να έχει. Συνήθως πρόκειται για ιζηματογενείς στρώσεις, οι οποίες βρίσκονται πάνω από τα αλατούχα κοιτάσματα. Σε αυτά τα ιζήματα, μπορούν να σχηματιστούν θύλακες αερίων και υπό συνθήκες υψηλής πίεσης να λάβει χώρα βίαιη εκτόνωση αυτών, εκτός από την περίπτωση που η απελευθέρωση των αερίων πραγματοποιείται ανάμεσα σε ρωγμές και η εκτόνωση τους είναι σταδιακή και υπό χαμηλή πίεση.

β) Το αέριο συγκεντρώνεται μέσα στα ίδια τα αλατούχα σώματα και βρίσκεται περιορισμένο στις ζώνες των σχισμών, των ρωγμών και των κοιλοτήτων που σχηματίστηκαν κατά τις διάφορες τεκτονικές διαταραχές.

Γ) Αέριο μέσα σε σπήλαια: ένα αέριο δύναται να συγκεντρωθεί μέσα σε ένα σπήλαιο μόνο του ή μαζί με άλμες. Η εμφάνιση σπηλαίων με παγιδευμένες άλμες και ύπαρξη αερίου πάνω από αυτές, υπό υψηλή πίεση, είναι πολύ συνηθισμένη. Οι μεταλλευτικές εργασίες, προξενούν στο πέτρωμα ρωγμές και σχισμές και εξασθενούν σημαντικά το φυσικό περίβλημα και τον προστατευτικό φλοιό των σπηλαίων. Έτσι, η εκτόνωση του αερίου που βρίσκεται μέσα σε αυτά, μπορεί να είναι είτε αιφνίδια με έκλυση αυτού ή σταδιακή, με εκρήξεις. Πάντως, εξασθένηση των πετρωμάτων που προστατεύουν φυσικά ένα σπήλαιο, δύναται να πραγματοποιηθεί και εξαιτίας της καθίζησης της επιφάνειας του εδάφους, κατά τη διάρκεια μιας ρηχής εκμετάλλευσης με επί τόπου διαλυτοποίηση του μεταλλεύματος (Jeremic, 1994).

3.3.3. Η σύνθεση των αερίων

Τα αέρια που απαντώνται στα εβαποριτικά κοιτάσματα, με βάση τη σύνθεση τους μπορούν να διακριθούν σε αέριο σύμπλοκο (μείγμα υδρογονάνθρακων, όπως για παράδειγμα, μεθανίου, αιθανίου, αιθυλενίου, κανονικού βουτανίου, κανονικού προπανίου, πεντανίου κ.α.) και σε αέριο μεθάνιο. Το μεθάνιο εμφανίζεται κυρίως ως ελεύθερο αέριο στους θύλακες αερίου ή στις κοιλότητες των αλατούχων πετρωμάτων και η απελευθέρωση του με εκρήξεις, θα μπορούσε να ακολουθείται από ανάφλεξη μεθανίου και πυρκαγιά (Jeremic, 1994).

Ένας άλλος τρόπος να μελετηθεί η εμφάνιση των φυσικών αερίων στα αλατωρυχεία είναι σε σχέση με το είδος τους. Στην πραγματικότητα, πάντα απαντώνται μείγματα αερίων στα οποία τα μεμονωμένα αέρια βρίσκονται σε διαφορετική αναλογία. Με βάση την ποσότητα στην οποία απαντώνται, τα σημαντικότερα αέρια είναι: το διοξείδιο του άνθρακα (CO_2), το άζωτο (N_2), το μεθάνιο (CH_4) και το υδρογόνο (H_2). Δευτερεύοντα συστατικά του μείγματος μπορεί να είναι ανώτεροι υδρογονάνθρακες ($\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$, C_nH_{2n} ή κυκλικοί υδρογονάνθρακες) και υδρόθειο (H_2S). Σε ίχνη απαντώνται ακόμη, οξυγόνο (O_2), ευγενή αέρια (Ar, He) και μονοξείδιο του άνθρακα (CO).

Τα αεριούχα μείγματα που απαντώνται στην πράξη, αποτελούνται είτε από εύφλεκτα αέρια, είτε περιέχουν διοξείδιο του άνθρακα ως κύριο συστατικό. Με εξαίρεση ορισμένων αερίων σε ίχνη, πρόκειται για αλατούχα εγκλείσματα σε δευτερογενείς δομές. Η προέλευση των αερίων τότε, είναι είτε μαγματική ενδογενετική, είτε οργανογενής. Ο εγκλεισμός των αερίων που είναι ενωμένα με τα ορυκτά προήλθε από τη μεταμόρφωση των αλατούχων στρωμάτων, προτιμώντας τα καλιούχα στρώματα μέσω ανερχόμενου νερού που περιείχε αέριο. Τα ελεύθερα αέρια είναι συχνά υπολείμματα «απολίθωσης» αυτών των διαδικασιών αλλά μπορούν να απαντηθούν και ανεξάρτητα από τη μεταμόρφωση του κοιτάσματος (Gimm, 1968).

3.3.4 Μηχανισμοί εξόδου των αερίων στα αλατωρυχεία

Γενικά, στα αλατωρυχεία η αιφνίδια έκλυση αερίου συνδέεται κυρίως με την ύπαρξη ελεύθερου αερίου και όχι απορροφητικού, όπως συμβαίνει συνήθως στα ανθρακωρυχεία. Όπως προαναφέρθηκε, τα ελεύθερα αέρια επικάθονται σε σχισμές, κοιλότητες και άλλα ανοίγματα, και η απελευθέρωση τους εξαρτάται από την πίεση του εγκλείσματος και των γεωμετρικών παραμέτρων της εκτόνωσης. Στην περίπτωση που τα αέρια είναι συνδεδεμένα μέσα από μικροσκοπικά ανοίγματα με τους κρυστάλλους των ορυκτών ή βρίσκονται ανάμεσα σε αυτούς, οι δεσμοί τους είναι σχετικά ισχυροί και στα παρθένα πετρώματα συμπεριφέρονται, ουσιαστικά, αδιάφορα έναντι στις διεργασίες εξόρυξης. Όταν όμως υπό συγκεκριμένες συνθήκες οι συνδέσεις τους αίρονται, τότε ακολουθεί η βίαιη απελευθέρωση τους.

Από απόψεως μηχανισμού της εξόδου του αερίου από τη συμπαγή βραχομάζα, υπάρχουν δύο μορφές πραγματοποίησης αυτής: η έκρηξη του αερίου και η αιφνίδια διαφυγή του αερίου και του άλατος.

Μετά την έκρηξη ακολουθεί εκπομπή ελεύθερου αερίου χωρίς να καταστρέφεται ο ιστός του ορυκτού. Κατά τις λεγόμενες πρωτογενείς εκρήξεις, το αέριο προέρχεται από σχισμές ή κοιλότητες και απελευθερώθηκε από αυτές κατά την εκμετάλλευση του ορυχείου π.χ. κατά τη διάτρηση, την ανατίναξη ή την εξόρυξη. Οι λεγόμενες δευτερογενείς εκρήξεις πραγματοποιούνται μετά την εκμετάλλευση, όταν οι σχισμές και οι κοιλότητες επηρεαστούν εξαιτίας της επίδρασης των διαφόρων τάσεων. Αυτές οι εξοδοί, γενικά, παρατηρούνται σε μεγάλα πεδία εξόρυξης, όπου συνήθως επιδρούν μεγάλες τάσεις στη βραχομάζα. Λόγω των δευτερευόντων

εκρήξεων, μπορούν να εμφανιστούν αιφνίδια ή σταδιακά, μεγάλες ποσότητες αερίου χωρίς προειδοποίηση, ακόμη και σε υπόγεια που έχουν ανοιχτεί πριν από χρόνια και να οδηγήσουν σε καταστροφές.

Οι αιφνίδιες εκλύσεις αερίου και άλατος μπορεί να είναι διάρκειας λίγων δευτερολέπτων έως και μερικών λεπτών, και να αποκολλήσουν μεγάλες ποσότητες ορυκτών από τη συμπαγή βραχομάζα, αφού το αλατούχο πέτρωμα θρυμματίζεται και πέφτει. Αυτό οφείλεται σε μια δυναμική διεργασία, η οποία καθορίζεται μέσω βραχομηχανικών και τεχνικών παραγόντων και συνδέεται με τη μετατόπιση των τάσεων κατά την εκμετάλλευση.

Εκτός από τις εκρήξεις και τις αιφνίδιες εκλύσεις αερίων, περιστασιακά, πραγματοποιείται και βαθμιαία εκτόνωση αυτών, προς τις ελεύθερες επιφάνειες της συμπαγούς βραχομάζας. Αυτό οφείλεται στη δευτερεύουσα δράση της τάσης του βράχου, όταν απουσιάζει η δυνατότητα μετανάστευσης των αερίων που είναι συνδεδεμένα με τα ορυκτά. Τέτοιες εμφανίσεις απαντώνται π.χ. μετά από αιφνίδιες μεγάλες εκλύσεις αερίου, στο μέτωπο του ανοίγματος που πραγματοποιήθηκε η έκλυση.

Κατά κανόνα, εν τούτοις, οι ποσότητες αερίου που απελευθερώνονται σε συνθήκες διαφυγής αερίου κατά την έκλυση, είναι πολύ μικρές και δεν έχουν καμία πρακτική σημασία. Σε περιπτώσεις βαθμιαίας εκτόνωσης σημαντικής έντασης, η οποία παρατηρείται, σχεδόν μόνο, στα άλατα μειωμένης αντοχής (π.χ. καρναλίτης), πρόκειται για δευτερεύουσα έκρηξη, της οποίας τα αίτια δεν είναι σαφώς εξακριβωμένα, λόγω της ελάχιστης χρονικής έντασης της διαφυγής.

3.3.5 Οι συνέπειες της διαφυγής αερίων στην ασφάλεια, την εκμετάλλευση και το κύκλωμα αερισμού ενός αλατωρυχείου.

Η επιβάρυνση της λειτουργίας ενός ορυχείου μετά από την εμφάνιση αερίων μπορεί να είναι συχνά πολύ σημαντική. Όταν τα κατάλληλα μέτρα ασφαλείας απουσιάζουν, μετά από εκρήξεις αερίων ή/και αιφνίδιες εκλύσεις αυτών, είναι δυνατόν να προκληθούν ατυχήματα και μείωση της παραγωγής, λόγω καταστροφής των σημείων εργασιών (έμφραξη αυτών μετά από πτώση σορών μεταλλεύματος και στείρων) και του εξοπλισμού του ορυχείου. Ακόμη, μια έκρηξη αερίων μπορεί να προκαλέσει διαταραχή στις οροφές των στοών και των θαλάμων και να διαμορφώσει

στα υπόγεια, μεγαλύτερα ανοίγματα από αυτά που προβλέπει ο σχεδιασμός της εκμετάλλευσης, οδηγώντας έτσι στην αναστολή της εξόρυξης.

Πολύ σημαντική όμως είναι και η μεταβολή που μπορεί να προκαλέσει η ανεξέλεγκτη έξοδος αερίου, στο κύκλωμα αερισμού του ορυχείου. Συχνά, η διαφυγή αερίου στα υπόγεια προβαίνει στο σχηματισμό εκρηκτικής, μεικτής ή δηλητηριώδους ατμόσφαιρας, η οποία, υπό συγκεκριμένες προϋποθέσεις μπορεί να οδηγήσει σε εκρήξεις των εύφλεκτων αερίων, σε ασφυξία ή ακόμη και σε δηλητηρίαση. Ο εκρηκτικός αερισμός μπορεί να περιέχει υδρογονάνθρακες, υδρογόνο ή μείγμα αυτών ή συχνότερα αέριο μεθάνιο.

Το αέριο μεθάνιο, είναι σημαντικά ελαφρύτερο από τον αέρα ($\rho=0,717 \text{ kg/m}^3$) και γι' αυτό συγκεντρώνεται στο πάνω μέρος των ανοιγμάτων, ακριβώς κάτω από την οροφή και σε ανηφορικά σημεία εργασιών που δεν διασταυρώνονται. Έτσι, πρέπει κανείς να αποφεύγει να διασχίζει μόνος του και με ανοιχτό φωτισμό, τέτοια σημεία εργασιών.

Επειδή το μεθάνιο είναι άοσμο, άχρωμο και άγευστο, δεν γίνεται αντιληπτό από τις ανθρώπινες αισθήσεις. Μάλιστα, ενώ δεν είναι δηλητηριώδες αέριο, σε μεγάλες συγκεντρώσεις στην ατμόσφαιρα, εμπεριέχει τον κίνδυνο της ασφυξίας. Είναι εύφλεκτο και η ανάμιξη του με τον αέρα (CH_4 :5-14%) είναι εκρηκτική. Μετά την έκρηξη σχηματίζονται διοξείδιο του άνθρακα και υδρατμοί, ενώ εξαιτίας της υψηλής θερμοκρασίας της έκρηξης, ακολουθεί εκτόνωση με τη μορφή κρότου και μετά από αυτόν, λόγω της επαφής του μετώπου με τον μη εκρηκτικό αερισμό του ορυχείου, ακολουθεί ψύχρανση και συμύκνωση των υδρατμών. Έτσι, λαμβάνει χώρα συστολή των αερίων της έκρηξης με τη μορφή κρότων. Το εκρηκτικό μείγμα του αέρα με το μεθάνιο θα μπορούσε να ελεγχθεί με αύξηση της εισαγωγής φρέσκου αέρα στα υπόγεια.

Όταν στο μείγμα των αερίων συμμετέχουν ανώτεροι υδρογονάνθρακες ή υδρογόνο, αυξάνεται ο κίνδυνος έκρηξης, αφού οι ανώτεροι υδρογονάνθρακες κυρίως το αιθάνιο και το προπάνιο, είναι πιο εύφλεκτα απ' το μεθάνιο και δίνουν ισχυρότερες εκρήξεις. Επειδή είναι βαρύτεροι από τον αέρα, συγκεντρώνονται στο δάπεδο του ορυχείου και μπορούν να γίνουν αντιληπτοί, χάρη στη χαρακτηριστική οσμή της βενζίνης. Τότε πρέπει να αναζητηθούν άμεσα τρόποι περιφρούρησης του φρέσκου αέρα, αφού η εισπνοή ελάχιστης ποσότητας ανώτερων υδρογονανθράκων δεν είναι επιβλαβής, αλλά η μακροχρόνια εισπνοή τους, οδηγεί σε κατάσταση οιστηρηλασίας και τελικά σε αναισθησία και ασφυξία.

Το υδρογόνο είναι το ελαφρύτερο αέριο ($\rho=0,090 \text{ kg/m}^3$) από αυτά που απαντώνται στα υπόγεια, ενώ η ανάμιξη του με το οξυγόνο είναι πολύ εκρηκτική και σε μείγματα εκρηκτικών αερίων με υδρογονάνθρακες, αυξάνει την ευφλεκτότητα τους. Το υδρογόνο δεν γίνεται αντιληπτό από τις ανθρώπινες αισθήσεις.

Ο μεικτός αέρας περιέχει κυρίως διοξείδιο του άνθρακα, το οποίο είναι βαρύτερο από τον αέρα ($\rho=1,977 \text{ kg/m}^3$) και γι' αυτό συγκεντρώνεται στο δάπεδο και σε κεκλιμένες μεταλλευτικές εργασίες. Εκτός από την ασθενή στυφή γεύση του, δεν μπορεί να γίνει αντιληπτό από τον άνθρωπο με άλλο τρόπο, αλλά συχνά εμφανίζεται μαζί με ίχνη άλλων αερίων που έχουν έντονη οσμή.

Ένα ακόμη σημαντικό συστατικό και πολύ εύφλεκτο μέσα στα μείγματα των φυσικών αερίων είναι το άζωτο, του οποίου η περιεκτικότητα συχνά είναι μεγάλη. Ο δηλητηριώδης αέρας όμως στα αλατωρυχεία, διαμορφώνεται κυρίως από την ύπαρξη υδρόθειου, που είναι το πιο δηλητηριώδες από τα αέρια που απαντώνται στα υπόγεια. Ακόμη και σε πολύ μικρή περιεκτικότητα του αέρα σε υδρόθειο (0,007% κ.ο.) ελλοχεύει ο κίνδυνος της αναισθησίας και του θανάτου. Το υδρόθειο δεν διαχωρίζεται από τον αέρα ($\rho=1,529 \text{ kg/m}^3$), αλλά ακόμη και σε αβλαβείς συγκεντρώσεις, η παρουσία του γίνεται αντιληπτή εξαιτίας της έντονης και χαρακτηριστικής οσμής χαλασμένων αβγών.

Το μονοξείδιο του άνθρακα που αποτελεί ένα ακόμη πολύ δηλητηριώδες αέριο, δεν παίζει κανένα ρόλο στις φυσικές εμφανίσεις στα αλατωρυχεία, αλλά μπορεί μέσα στην τύρφη των εκρήξεων, των φλογωδών καύσεων και των αναφλέξεων των φυσικών αερίων, να σχηματιστεί σε πολύ επικίνδυνες συγκεντρώσεις.

Τελικά, καταλήγει κανείς στο συμπέρασμα ότι η παρουσία φυσικών αερίων στα αλατωρυχεία, αποτελεί σημαντική πηγή κινδύνου, τόσο για τη ζωή και την υγεία των ανθρακωρύχων όσο και για την ομαλή λειτουργία της εκμετάλλευσης (Gimm, 1968).

3.3.6 Η έκρηξη κατά τις μεταλλευτικές εργασίες.

Συνήθως, μια έκρηξη αερίου πραγματοποιείται όταν η εκσκαφή προσεγγίζει σ' ένα θύλακα υπό πίεση, ο οποίος περιέχει ετερογενή και ανισοτροπικά υλικά. Αυτό οδηγεί στην προνομιούχο μετατόπιση της μεταλλευτικής τάσης, αυξάνοντας το επίπεδο και την ανισοτροπία των τάσεων στα πετρώματα που τις υφίστανται. Επιπλέον, στο θύλακα, αυξάνεται η αποθηκευμένη ενέργεια τάσης σε σχέση με αυτή των περιβαλλόντων πετρωμάτων, αφού αυξάνει η ειδική ικανότητα του προς έκρηξη.

Γενικά, η έκρηξη μπορεί να εμφανιστεί τόσο κατά τη φάση της ανάπτυξης των αλατούχων κοιτασμάτων μέσω θραύσης του παρθένου εδάφους, όσο και κατά τη φάση της εκμετάλλευσης, κατά τη διάρκεια εκσκαφής των θαλάμων. Για παράδειγμα, σε μια εξόρυξη που πραγματοποιείται σε στρωσιγενή κοιτάσματα με τη μέθοδο των θαλάμων και στύλων, εγκαταλείποντας ένα προστατευτικό στρώμα αλατούχου πετρώματος πάνω από την οροφή και κάτω από το δάπεδο της εκσκαφής, μπορεί να λάβει χώρα έκρηξη κατά την ανάπτυξη των αλατούχων στρωμάτων. Η έκρηξη αυτή θα σχετίζεται με την έκλυση αερίου από τους θύλακες, εξαιτίας της μικρής απόστασης των εκτελούμενων εργασιών στην επιφάνεια του εδάφους και των, υπό πίεση, θυλάκων που βρίσκονται στους σχιστολιθικούς σχηματισμούς πάνω από τα αλατούχα πετρώματα.

Η έκρηξη αερίου κατά τη φάση της εκσκαφής έχει παρατηρηθεί συχνά στους αλατούχους δόμους της Κεντρικής Ευρώπης (κοιτάσματα περμίου) και της Βόρειας Αμερικής, όταν ένας θάλαμος με αρκετά μεγάλο ελεύθερο μέτωπο, προσεγγίζει έναν ορίζοντα ή μία ζώνη επιρρεπή σε έκρηξη. Σε αυτή την απόσταση, η κατάσταση τάσεων του αλατούχου πετρώματος δίπλα στο μέτωπο, μεταβάλλεται από τριαξονική σε διαξονική ή μονοαξονική, οπότε λαμβάνει χώρα ξαφνική αστοχία και βίαιη έκλυση αερίων και ρευστών από το μέτωπο του αλατούχου πετρώματος. Υπό αυτές τις συνθήκες, η τεχνολογία της εξόρυξης του άλατος δε σχετίζεται με την έκρηξη.

Ένα κοινό χαρακτηριστικό του φαινομένου της έκρηξης, είναι ο σχηματισμός μεγάλων κοιλοτήτων στην οροφή και τα τοιχώματα των θαλάμων, λόγω της αποκόλλησης σημαντικού όγκου πετρώματος (50-500 τόνοι). Μερικές φορές τα θραύσματα των εκρήξεων γομώνουν μεταλλευτικές εργασίες, μήκους έως και 100 m. Κάποιες φορές μάλιστα, οι εκρήξεις των αερίων παίρνουν τη μορφή αλυσιδωτής αντίδρασης, στην οποία επιδρούν καθοριστικά τα χαρακτηριστικά των αεριοφόρων αλατούχων πετρωμάτων (π.χ. τεκτονικές διαταραχές). Στους αλατούχους δόμους, οι εκρήξεις αερίων παρατηρούνται, συνήθως, στο ανώτερο τμήμα των θαλάμων ή στην οροφή τους και ποτέ στο κατώτερο τμήμα ή το δάπεδο ενός θαλάμου.

Υπόγειες έρευνες απέδειξαν, ότι όταν η μεταλλευτική εκσκαφή προσεγγίζει την αλατούχο ζώνη που είναι επιρρεπής στην έκρηξη, η τάση στον, υπό πίεση, θύλακα αυξάνεται σε βαθμό κατά πολλές φορές μεγαλύτερο από τη λιθοστατική πίεση. Η έκρηξη διευκολύνεται με τη συγκέντρωση τάσεων που προκαλείται από τη μεταλλευτική γεωμετρία και την αύξηση των τάσεων στα σκληρά ιζήματα. Η έκρηξη

αερίων συνήθως προκαλείται, όταν η κλαστική ζώνη γύρω από μια εκσκαφή σ' ένα ορυχείο διασταυρώνεται με ένα θύλακα με αυξημένη συγκέντρωση τάσεων λόγω των μεταλλευτικών εργασιών (Jeremic, 1994).

3.3.7 Τα κοιτάσματα του Südharz

Τα κύρια εύφλεκτα συστατικά των μειγμάτων των φυσικών αερίων που εμφανίστηκαν στα αλατούχα κοιτάσματα του Südharz κατά την μακροχρόνια εκμετάλλευσή τους, ήταν το μεθάνιο μαζί με άλλους υδρογονάνθρακες και σπάνια ακόμη και το υδρογόνο. Κάποιες φορές απαντήθηκε ακόμη άζωτο και διοξείδιο του άνθρακα, ενώ στα αέρια που ήταν ενωμένα με τα ορυκτά των αλάτων καθώς και στα ρευστά αλατούχα διαλύματα, παρατηρήθηκε, κατά τόπους, και υδρόθειο.

Στο ορυχείο “Glückauf Sondershausen” μάλιστα, τον Ιούλιο του 1951, η μεγάλη ποσότητα μεθανίου που απαντήθηκε στο μέτωπο της εξόρυξης, προκάλεσε έκρηξη στο φρέαρ I, τραυματίζοντας και τους 34 εργαζόμενους σε αυτό, εκ των οποίων 12 υπέκυψαν στα τραύματά τους. Το ατύχημα αυτό, οδήγησε στη λήψη μέτρων ασφαλείας, μεταξύ των οποίων ήταν και η ηλεκτρική πυροδότηση της ανατίναξης αλλά και η απαγόρευση του καπνίσματος και της χρήσης των ανοιχτών φανών (Gimm, 1968).

4. Εργαστηριακές μετρήσεις

4.1 Εισαγωγή

Κατά την ανοιχτή ή κλειστή εκμετάλλευση ενός κοιτάσματος ή την κατασκευή ενός υπόγειου έργου, ο κύριος στόχος της συστηματικής επίβλεψης, είναι τόσο η επίτευξη της ευστάθειας των ανοιγμάτων, όσο και η ασφάλεια του προσωπικού και του τεχνικού εξοπλισμού. Ο στόχος αυτός δύναται να επιτευχθεί, βάσει των αποτελεσμάτων των διαφόρων μετρήσεων που πραγματοποιούνται κατά την ανάπτυξη της εκμετάλλευσης ή του τεχνικού έργου.

Όπως αναφέρθηκε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, οι σημαντικότερες από όλες τις μετρήσεις που πραγματοποιούνται στα αλατωρυχεία, είναι οι –επί τόπου– μετρήσεις των τάσεων και των παραμορφώσεων των πετρωμάτων. Για να είναι τα αποτελέσματα αυτών των μετρήσεων περισσότερο αξιόπιστα και ολοκληρωμένα, συνήθως συνοδεύονται από τα αποτελέσματα και μιας σειράς αντίστοιχων εργαστηριακών δοκιμών.

4.2. Ο στόχος των βραχομηχανικών εργαστηριακών δοκιμών στα άλατα

Οι βραχομηχανικές εργαστηριακές δοκιμές γενικά, έχουν ως στόχο τον υπολογισμό των παραμέτρων, βάσει των οποίων θα χαρακτηριστεί η συμπεριφορά παραμόρφωσης και αστοχίας του εκάστοτε πετρώματος. Στα αλατούχα πετρώματα για την επίτευξη αυτού του στόχου ακολουθούνται συνήθως συγκεκριμένα βήματα.

Αρχικά, υπολογίζονται οι παράμετροι αντοχής και παραμόρφωσης του πετρώματος με την διεξαγωγή δοκιμών θλίψης, εφελκυσμού, κάμψης και διάτμησης, υπό αυστηρά καθορισμένες ενιαίες συνθήκες και συντάσσεται ένας κατάλογος με τις τιμές της αντοχής τους. Με τη βοήθεια αυτού του καταλόγου γίνεται αρχικά μια ταξινόμηση και μια σχετική σύγκριση των υπό έρευνα πετρωμάτων.

Στη συνέχεια, οι μετρήσεις επαναλαμβάνονται με συστηματική μεταβολή των εξωτερικών συνθηκών (θερμοκρασία, γεωμετρία των δοκιμίων, είδος φόρτισης) και ανιχνεύεται η φυσική αντοχή του πετρώματος στην παραμόρφωση και την αστοχία, ώστε να κατανοηθεί όσο το δυνατόν καλύτερα, η μηχανική συμπεριφορά του, υπό αυτές τις μεταβολές. Έτσι, μετά από σύγκριση των αποτελεσμάτων των εργαστηριακών δοκιμών και των αποτελεσμάτων των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν επί τόπου, προκύπτουν τα τελικά συμπεράσματα γύρω από τη συμπεριφορά του πετρώματος στην παραμόρφωση. Τέλος, η μελέτη της ορυκτολογικής και πετρογραφικής δομής του πετρώματος είναι επίσης απαραίτητη και έχει στόχο τη μεταφορά των μηχανικών παραμέτρων ενός, υπό έρευνα, τμήματος με παρόμοια δομή στο συνολικό τμήμα του βράχου.

Η σωστή επιλογή των συνθηκών και των μεθόδων των δοκιμών, είναι πολύ σημαντικές, αφού αυτές θα πρέπει να είναι απολύτως αντικειμενικές. Γενικά, επιδιώκεται η επιλογή μεθόδων που είναι ευνοϊκές, και από τεχνικής και από οικονομικής απόψεως, εξαιτίας του υψηλού κόστους που απαιτείται για την ανάκτηση και την επεξεργασία των δοκιμών, καθώς και για τη διεκπεραίωση των δοκιμών.

Για την κατανόηση του χαρακτήρα της φόρτισης του βράχου στην περιοχή γύρω από τα μεταλλευτικά ανοίγματα, αρχικά διεξάγονται βραχομηχανικές δοκιμές με μονοαξονική, διαξονική, ή τριαξονική φόρτιση. Σχετικά με τη διαξονική και την τριαξονική φόρτιση δοκιμίου, στη βιβλιογραφία συναντά κανείς μάλλον λίγα ερευνητικά αποτελέσματα, αφού κατά κύριο λόγο διεκπεραιώνονται μονοαξονικές δοκιμές, από τις οποίες οι σημαντικότερες είναι η δοκιμή σε θλίψη, εφελκυσμό, κάμψη και διάτμηση. Αυτό που καταγράφεται στο εργαστήριο, είναι τόσο οι παράμετροι αστοχίας όσο και οι παράμετροι παραμόρφωσης του δοκιμίου, ώστε να ανακτηθούν οι σχέσεις τάσης-παραμόρφωσης. Για παράδειγμα, κατά τη δοκιμή σε θλίψη καταγράφεται το μήκος της παραμόρφωσης και η εγκάρσια επιμήκυνση και με τη βοήθεια αυτών των μεγεθών προκύπτουν ο συντελεστής και ο βαθμός ελαστικότητας, ο λόγος του Poisson και οι καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης.

Το σημαντικότερο κριτήριο κατά τη διεκπεραίωση και την ερμηνεία των αποτελεσμάτων μιας δοκιμής, είναι η συμπεριφορά του άλατος σε συνάρτηση με το χρόνο. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων των εργαστηριακών δοκιμών και των

δεδομένων της βισκοελαστικής θεωρίας, οδηγεί στη δημιουργία προτύπων γύρω από τη χρονικά εξαρτώμενη συμπεριφορά παραμόρφωσης του πετρώματος.

Στα αλατούχα πετρώματα, ένα τέτοιο πρότυπο εκφράζει τα τμήματα της παραμόρφωσης που είναι: α) αντιστρεπτά και δεν εξαρτώνται από το χρόνο, β) μόνιμα και γ) αντιστρεπτά και εξαρτώνται από το χρόνο. Με συγκεκριμένη προσέγγιση τα τμήματα της παραμένουσας παραμόρφωσης, μπορούν να εκφραστούν μέσω του ιξώδους του σώματος του προτύπου.

Η συμπεριφορά των πετρωμάτων στην παραμόρφωση και την ευστάθεια, εξαρτάται βασικά από το πετροδομικό υλικό, την προϊστορία του συνόλου του βράχου και από τις επιδράσεις της μηχανικής επεξεργασίας κατά τη λήψη των πυρήνων. Στη βραχομηχανική συμπεριφορά του συνόλου του βράχου, υφίστανται αυθεντικές διεπειφάνειες, η επίδραση των οποίων είναι σχετικά μικρή αλλά με τις κατάλληλες εργαστηριακές δοκιμές παρέχουν τη δυνατότητα ανίχνευσης της μηχανικής συμπεριφοράς του συνόλου του βράχου άρα και τμημάτων του κοιτάσματος.

Σε κάθε πέτρωμα, μπορεί να αποδώσει κανείς συγκεκριμένες ή απόλυτες ιδιότητες, οι οποίες είναι υποθετικές, λόγω του δεδομένου πετρογραφικού χαρακτήρα. Η συμπεριφορά παραμόρφωσης και αστοχίας που αποδίδουν αυτές οι απόλυτες ιδιότητες, για ορισμένα πετρώματα βρίσκεται μεταξύ πλαστικού και ελαστικού, ανάλογα με τις εξωτερικές συνθήκες στις οποίες υποβάλλεται το πέτρωμα (Gimm, 1968).

4.3. Ελαστοπλαστική παραμόρφωση και αστοχία

Οι συμβατικές μηχανικές ιδιότητες και η συμπεριφορά των αλάτων είναι πολύπλοκες και είναι δύσκολο να οριστούν σωστά εξαιτίας της πλαστικής φύσης τους. Ωστόσο, κάποια άλατα, ανάλογα με το μέγεθος της τάσης, τις συνθήκες και τη χρονική κλίμακα της φόρτισης, δύναται να εκδηλώσουν τόσο ελαστική όσο και ανελαστική συμπεριφορά.

Σε περίπτωση αστοχίας μετά από αυξανόμενη φόρτιση, τα άλατα εμφανίζουν ένα συγκεκριμένο χαρακτηριστικό σημείο, το οποίο θα μπορούσε να εξηγηθεί με την κατακλαστική παραμόρφωση. Η διατμητική μετατόπιση κατά μήκος προνομιούχων

δομών, έχει μελετηθεί περισσότερο σε σχέση με την πλαστικότητα των αλάτων παρά με την ελαστικότητα τους, αν και οι μηχανικές τους ιδιότητες θα πρέπει να μελετώνται και βάση των τεχνικών κατασκευών.

4.3.1. Αντοχή των αλάτων

Για τον καθορισμό της αντοχής των αλατούχων πετρωμάτων, πραγματοποιούνται δοκιμές αντοχής σε μη περιορισμένη θλίψη, σε τριαξονική θλίψη και σε εφελκυσμό, ενώ υπολογίζεται και η σταθερά του Young. Οι δοκιμές διεξάγονται σε θερμοκρασία δωματίου με μικρή διάρκεια φόρτισης, γνωστή ως ημιστατική (Jeremic, 1994).

4.3.1α) Αντοχή σε μονοαξονική θλίψη

Η πλέον συνηθισμένη μέθοδος για τον προσδιορισμό της αντοχής ενός άλατος είναι η δοκιμή αντοχής σε μονοαξονική θλίψη, η οποία πραγματοποιείται με τη βοήθεια κυλινδρικού ή πρισματικού δοκιμίου. Το δοκίμιο υπόκειται σε μονοαξονική φόρτιση προς αστοχία, όπου συνήθως αστοχεί στη διάτμηση, όπως αποδεικνύει και το χαρακτηριστικό κωνικό σχήμα στο συζυγές επίπεδο αστοχίας. Η αντοχή των αλάτων σε θλίψη, εξαρτάται μεταξύ άλλων και από έναν αριθμό διαφόρων παραγόντων, όπως είναι για παράδειγμα το σχήμα, το μέγεθος, το πορώδες, η υγρασία, η ορυκτή σύνθεση του δείγματος.

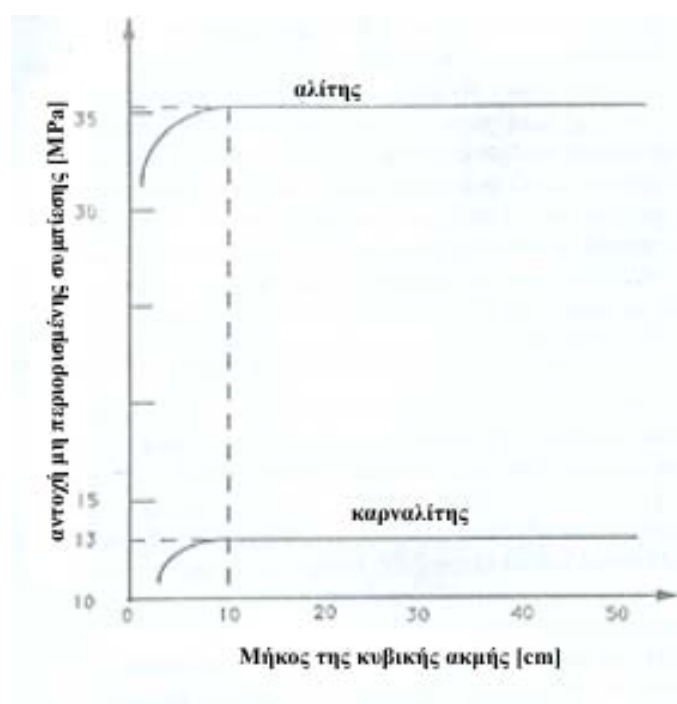
Για λεπτομερέστερη μελέτη, της αντοχής του άλατος σε μονοαξονική θλίψη, λαμβάνονται υπ' όψη οι εξής 3 παράμετροι:

1. Η επίδραση του μεγέθους του δοκιμίου στην αντοχή του και η μεταξύ τους σχέση. Μετά από διεξοδική μελέτη γύρω από αυτό το θέμα, έχει προκύψει ένας αριθμός, φαινομενικά διαφορετικών, εξισώσεων πρόβλεψης. Τα αλατούχα κοιτάσματα της Ευρώπης παρουσιάζουν διαφορετική αύξηση της αντοχής του δοκιμίου με την αύξηση του μήκους της κυβικής ακμής, ενώ τα διαγράμματα που δίνουν, υποδεικνύουν ότι για ένα συγκεκριμένο μέγεθος δοκιμίου, η αντοχή των αλάτων σταθεροποιείται και μάλιστα το οριακό σημείο επίδρασης του μεγέθους στην αύξηση της αντοχής, προσδιορίζεται μεταξύ των τιμών 10 cm και 25 cm του μήκους της κυβικής ακμής (σχήμα 4.1), δηλαδή πολύ χαμηλότερο από την περίπτωση άλλων ορυκτών συνθέσεων (35-50cm). Στα άλατα γενικά, ισχύει ότι η αντοχή τους σε μη

περιορισμένη θλίψη διαφοροποιείται όχι μόνο από κοίτασμα σε κοίτασμα, λόγω διαφορετικού τύπου και διαφορετικής δομής ορυκτών συστατικών αλλά και μέσα στο ίδιο κοίτασμα, όπως συμβαίνει στους δόμους του Περμίου ή σε αρχαιότερα και νεότερα αλατούχα κοιτάσματα.

2. Η σχέση μεταξύ του πορώδους του αλατούχου πετρώματος και της αντοχής του, σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα είναι αντιστρόφως ανάλογη. Δηλαδή, όσο το πορώδες του πετρώματος αυξάνεται, τόσο η αντοχή του σε μη περιορισμένη θλίψη μειώνεται και μάλιστα σχεδόν γραμμικά. Έτσι, συμβαίνει αρκετά συχνά, σε κάποια ορυχεία να απαντώνται πολύ εύθραυστα άλατα, λόγω του υψηλού πορώδους τους. Πάντως, θεωρητικά η ευθραυστότητα αυτή θα μπορούσε να οφείλεται και στην κρυσταλλική δομή, που μπορεί να εμφανίζουν τα ανακρυσταλλωμένα άλατα.

3. Η διαφοροποίηση της αντοχής των ορυκτών αλάτων τέλος, μπορεί να οφείλεται κατά πάσα πιθανότητα, στις φυσικές τους ιδιότητες και τη χημική τους σύσταση. Στα κοιτάσματα ποτάσας, για παράδειγμα, όταν το κύριο ορυκτό συστατικό είναι ο συλβινίτης, η παρουσία του καρναλίτη περιορίζει την αντοχή του. Έχει αποδειχτεί πειραματικά ότι σε κάποια κοιτάσματα ποτάσας (Saskatchewan), η παρουσία από 5 έως 9 % καρναλίτη στο κοίτασμα, μετατρέπει την αντοχή τους σε μονοαξονική θλίψη, σε λιγότερο από 50 % της αντοχής του μονοορυκτού άλατος.



Σχήμα 4.1: Η αντοχή του αλίτη και του καρναλίτη στη θλίψη, σε συνάρτηση με το μήκος της κυβικής ακμής (Jeremic, 1994).

Αυτό σημαίνει ότι η μέση μονοαξονική αντοχή σε θλίψη της ορυκτής ποτάσας, κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 16 MPa και 19 MPa, όταν η μέση περιεκτικότητα του καρναλίτη στο κοίτασμα είναι περίπου 2-4%.

Στο σχήμα 4.1 φαίνεται η συγκριτική ανάλυση της αντοχής σε θλίψη μεταξύ αλίτη και καρναλίτη από αλατωρυχεία της Γερμανίας, σε συνάρτηση του μήκους της ακμής τους. Όπως προκύπτει ο

καρναλίτης έχει 3 φορές μικρότερη αντοχή από τον αλίτη, αλλά ως άλας, έχει την ίδια συναρτησιακή σχέση μεταξύ επίδρασης μεγέθους κι αντοχής.

4.3.1β) Αντοχή σε τριαξονική θλίψη.

Ο Jeremic (1994) αναφερόμενος στις δοκιμές αντοχής σε τριαξονική θλίψη που πραγματοποίησαν οι Hansen et al. (1984) σε δείγματα αλάτων δέκα διαφορετικών περιοχών των Η.Π.Α, παρατηρεί ότι η συμπεριφορά τάσης- παραμόρφωσης των δέκα δειγμάτων είναι, ποιοτικά, παρόμοια. Οι καμπύλες τάσης – παραμόρφωσης αυτών των δοκιμών, υποδεικνύουν ότι όταν αυξάνεται η πλευρική τάση, αυξάνονται και η οριακή αντοχή και η ολκιμότητα του δοκιμίου. Για παράδειγμα, για πλευρική τάση 17 MPa, η οριακή αντοχή ενός δοκιμίου αυξήθηκε κατά 65% σε σχέση με την μονοαξονική, ενώ για πλευρική τάση 20.7 MPa, η οριακή αντοχή αυξήθηκε επιπλέον κατά 53%. Τέλος, για τάση 20.7 MPa, το δοκίμιο υπέστη 25% συρρίκνωση πριν αστοχήσει στο σταθερά αυξανόμενο φορτίο, οπότε είναι προφανής η αύξηση της ολκιμότητας του δοκιμίου.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό των αλάτων είναι ότι η αντοχή τους στη διαρροή είναι χαρακτηριστικά μηδέν ενώ η παραμόρφωση τους δεν είναι γραμμικά ελαστική. Ακόμη και για πολύ χαμηλές τιμές τάσης και εφελκυσμού, η παραμόρφωση τους εξαρτάται από το χρόνο. Για επιμήκυνση 0,1 %, η παραμόρφωση είναι σχεδόν γραμμική, κατά το μισό περίπου ελαστική και κατά το υπόλοιπο μισό, χρονικά-εξαρτώμενη. Για χρονικά εξαρτώμενους κύκλους φόρτισης – αποφόρτισης, σε σταθερή τάση και σε θερμοκρασία δωματίου, τα δείγματα δεν εμφάνισαν ούτε ανάκαμψη, ούτε ερπυσμό. Σε υψηλότερες θερμοκρασίες εμφανίστηκε πλαστική ροή, η οποία προόδευε με τη μείωση της αντοχής και την αύξηση της ολκιμότητας.

Οι τιμές της οριακής αντοχής σε διάτμηση που προέκυψαν από τις καμπύλες τάσης-παραμόρφωσης του κάθε δοκιμίου και από τους κύκλους Mohr που κατασκευάστηκαν για τάσεις σε αστοχία, προέκυψε ότι αυξήθηκαν στα 30 MPa περίπου, για υψηλότερες πλευρικές τάσεις. Οι τιμές που καθορίστηκαν για την μονοαξονική τάση σ_c και την έμμεση τάση εφελκυσμού T_0 , χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή του φακέλου αστοχίας Mohr-Coulomb και του παραβολικού φακέλου αστοχίας Mohr. Κανένα από τα δύο κριτήρια δεν είναι κατάλληλο για όλες τις περιπτώσεις, αλλά αποτελούν μια αξιόλογη μέθοδο σύγκρισης των δέκα δοκιμίων.

Δεδομένου ότι δεν μπορεί να γίνει συμπερασματικός συσχετισμός ανάμεσα στον χαρακτηρισμό του άλατος βάσει των πετρογραφικών μελετών και την διαφοροποίηση των αντοχών του, κατά μέσο όρο η σ_c είναι περίπου 20% υψηλότερη και η σ_t 10% υψηλότερη για στρωσιγενή άλατα από ότι για αλατούχους δόμους.

Συμπερασματικά παρατηρείται ότι οι τιμές των οριακών διατμητικών αντοχών αυξάνονται όταν αυξάνεται και η πλευρική τάση. Τιμές γύρω στα 30 MPa εμφανίζονται κοινές μόνο για υψηλότερες πλευρικές τάσεις. Η αντοχή σε μονοαξονική θλίψη σ_c και έμμεση τάση εφελκυσμού σ_t χρησιμοποιήθηκαν για τον φάκελο αστοχίας της γραμμικής και παραβολικής αστοχίας και για την κατασκευή των κύκλων του Mohr για τάση και αστοχία, για κάθε περιοχή.

4.3.1γ) Αντοχή σε εφελκυσμό

Η αντοχή σε εφελκυσμό συνήθως πραγματοποιείται με μια δοκιμή γνωστή ως Brazilian test, η οποία καθορίζει έμμεσα την αντοχή σε εφελκυσμό. Αυτή είναι μια έμμεση μέθοδος δοκιμής στην οποία εφαρμόζεται ένα διαμετρικό γραμμικό φορτίο κατά μήκος ενός κυλινδρικού δοκιμίου. Ο ρυθμός φόρτισης του αλατούχου δίσκου κυμαίνεται μεταξύ 0,005 και 0,007 MPa /sec, οπότε είναι σχετικά εύκολη η παρατήρηση της έναρξης και της εξάπλωσης της ρωγμής που δημιουργείται στο δοκίμιο.

Η αντοχή σε εφελκυσμό ενός άλατος κυμαίνεται συνήθως από 0,2 MPa, έως πάνω από 3 MPa, ενώ μια χαρακτηριστική τιμή είναι το 1 MPa. Στα άλατα, ο λόγος της αντοχής σε θλίψη, προς την αντοχή σε εφελκυσμό είναι συνήθως πάνω από 20, ενώ για ορισμένα εύθραυστα άλατα η χαρακτηριστική τιμή είναι γύρω στο 10.

Συμπερασματικά, προκύπτει ότι τα άλατα έχουν μικρότερη αντοχή σε εφελκυσμό από τα ψαθυρά πετρώματα, επειδή διαφέρει η μηχανική συμπεριφορά τους.

4.3.2. Στοιχειώδης συμπεριφορά των αλάτων

Η συμπεριφορά των αλάτων εξαρτάται από πολλούς παράγοντες όπως είναι η σύνθεση του, ο μηχανισμός φόρτισης, ο τύπος της ενεργούσας τάσης, οι διαφορές της τάσης και η θερμοκρασία (Jeremic, 1994).

4.3.2α) Χαρακτηρισμός της συμπεριφοράς των αλάτων

Τα άλατα, για τάσεις άνω των 7,0 MPa εκδηλώνουν ελαστική συμπεριφορά, το όριο της οποίας επηρεάζεται από την ορυκτολογική του σύνθεση και από το ρυθμό της αυξανόμενης φόρτισης και μάλιστα όταν η οριακή επαφή μεταξύ των κρυστάλλων των κόκκων εξασθενεί, λαμβάνει χώρα ελαστική αστοχία. Τα περισσότερα άλατα όταν υπόκεινται σε μονοαξονική θλίψη μέχρι ορίου της ελαστικής τάσεως, εκδηλώνουν ψαθυρή συμπεριφορά, ενώ όταν η φόρτιση υπερβαίνει το ελαστικό όριο, εκδηλώνεται πλαστική συμπεριφορά με παραμόρφωση ροής. Η ένταση της παραμόρφωσης ροής εξαρτάται από το μέγεθος της διατμητικής τάσης.

Η πλαστική συμπεριφορά σχετίζεται με την ολκιμότητα και την ολίσθηση μεταξύ των ιόντων των κρυστάλλων, ενώ όταν εμφανίζεται η πλαστικότητα, πραγματοποιούνται ταυτόχρονα και οι δύο τύποι παραμόρφωσης και το αλάτι εμφανίζει ελαστο-πλαστική συμπεριφορά. Η παραμόρφωση που θα επικρατήσει, εξαρτάται κυρίως από το μέγεθος της τάσης φόρτισης. Γενικά, ισχύει πάντως, ότι η πλειοψηφία των αλάτων εκδηλώνει ελαστο-πλαστική συμπεριφορά για τιμές τάσεων μέχρι 14 MPa, ενώ για μεγαλύτερες τιμές γίνεται σχεδόν πλαστική.

Πάντως, εξαιτίας της αύξησης του μεγέθους της φόρτισης, με την αύξηση του βάθους του ορυχείου, τα βαθύτερα τμήματα των αλατούχων κοιτασμάτων βρίσκονται σε κατάσταση όλκιμης ή πλαστικής παραμόρφωσης. Αντίθετα από τις πλαστικές παραμορφώσεις, οι ελαστικές είναι αναστρέψιμες και ο βαθμός ανάκτησης τους μετά την απομάκρυνση του επιβαλλόμενου φορτίου εξαρτάται από την αναλογία μεταξύ των ελαστικών και των πλαστικών συστατικών που παρίστανται.

Οι ανακτήσεις ορισμένων παραμορφώσεων λόγω εκτόνωσης της διατμητικής τάσης, πραγματοποιούνται σε μέτρια μεγέθη φόρτισης, ενώ οι μεγάλες μόνιμες παραμορφώσεις εμφανίζονται μόνο σε μεγάλα φορτία (μεγάλη συγκέντρωση διατμητικής τάσης). Η φόρτιση και η αποφόρτιση των δοκιμών των αλάτων κατά τις διαδικασίες των δοκιμών, επηρεάζουν την συγκεκριμένη συμπεριφορά τους κατά την παραμόρφωση και την αστοχία. Για παράδειγμα, αν η τάση μονοαξονικής φόρτισης μειώνεται κάτω από τα 7 MPa, το αλάτι γίνεται βαθμιαία εύθραυστο και τείνει να αστοχήσει πιο γρήγορα με ψαθυρή αστοχία, υπό μικρή σχετικά, τάση. Υπό αυτές τις συνθήκες το αλάτι αστοχεί και παραμορφώνεται σχεδόν πλήρως με ψαθυρή θραύση.

Αν και αυτό υποδεικνύει ότι η αντοχή των αλατούχων υλικών μειώνεται στην ψαθυρή περιοχή, ο ρυθμός παραμόρφωσης της ψαθυρής θραύσης αυξάνεται.

4.3.2β) Ελαστικές παράμετροι

Βασιζόμενος πάντα στις δοκιμές των Hansen et al. (1984), ο Jeremic, αναφέρει ότι οι ελαστικές σταθερές δεν διαφέρουν ουσιαστικά ανάμεσα στα δέκα δοκίμια. Η μελέτη των ελαστικών παραμέτρων έγινε βάση ενός συνόλου ημι-στατικών δοκιμών τριαξονικής θλίψης, με σταθερή φόρτιση. Η σταθερά του Young και ο λόγος του Poisson προσδιορίστηκαν από τους κύκλους φόρτισης / αποφόρτισης, ενώ παρατηρήθηκε ότι η αύξηση της πλευρικής τάσης έτεινε να αυξήσει τη σταθερά του Young και να μειώσει το λόγο του Poisson. Η μέση τιμή της ελαστικής σταθεράς προέκυψε μεταξύ 26.6 GPa και 31.5 GPa (μέση τιμή: 30 GPa), ενώ ο λόγος του Poisson κυμάνθηκε από 0,29 έως 0,38 (μέση τιμή: 0,35). Πάντως, οι ελαστικές παράμετροι δεν φάνηκε να επηρεάζονται ιδιαίτερα από τις πετρογραφικές διαφοροποιήσεις.

Συμπερασματικά, προκύπτει ότι ενώ οι ελαστικές παράμετροι των δέκα δοκιμών δεν διαφέρουν σημαντικά μεταξύ τους, η τιμή της αντοχής παρουσίασε μεγάλες διαφοροποιήσεις, ειδικά για χαμηλή τιμή της πλευρικής τάσης. Από τα πειράματα αυτά αποδεικνύεται πάντως, ότι η εσωτερική δομή του κρυστάλλου επηρεάζει την αντοχή του περισσότερο από την πετρογραφική του σύνθεση.

4.3.2γ) Ελαστική συμπεριφορά

Η ελαστική συμπεριφορά των αλάτων έχει μελετηθεί βάση των εβαποριτικών ακολουθιών της Ευρώπης και της Βόρειας Αμερικής. Το πρότυπο ελαστικής συμπεριφοράς, ανακτάται από το διάγραμμα τάσης-παραμόρφωσης (σχήμα 4.2), ενώ σχετικά με την



Σχήμα 4.2: Πρότυπο ελαστικής – ψαθυρής συμπεριφοράς (Jeremic, 1994).

ελαστική συμπεριφορά τους, διακρίνονται δύο βασικοί τύποι άλατος:

1. Όταν η αναλογία της ελαστικής προς τη συνολική παραμόρφωση του άλατος είναι μεταξύ 86% και 100% σε θερμοκρασία δωματίου, το άλας θεωρείται γραμμικά ελαστικό με ψαθυρή αστοχία (σχήμα 4.3), όπως συμβαίνει με τα άλατα των δόμων, οι οποίοι έχουν υποστεί εντατικές μεταμορφικές μεταβολές. Τα ελαστικά άλατα αποτελούν πηγή εκρήξεων αερίων, όπως συμβαίνει συχνά στα γερμανικά αλατωρυχεία.

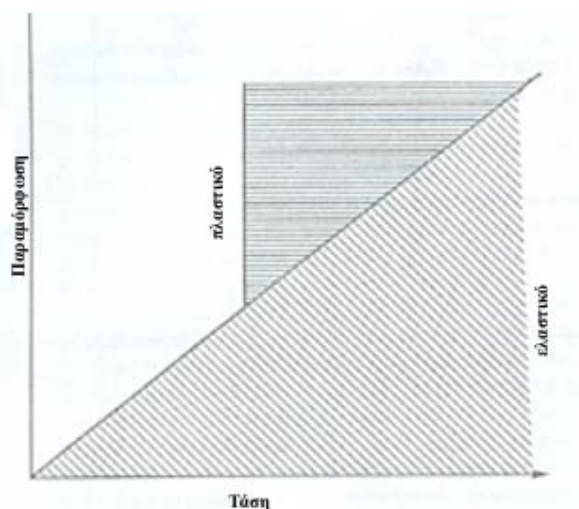
2. Όταν η αναλογία της ελαστικής προς τη συνολική παραμόρφωση του άλατος είναι μεταξύ 10% και 35% σε θερμοκρασία δωματίου, το άλας θεωρείται γραμμικά ελαστικό μόνο για χαμηλές τιμές φόρτισης (π.χ. ως 3 MPa) για την πλειοψηφία των αλάτων.

Σύμφωνα πάντα με τους Hansen et al. (1984) ο μεταλλευτικός σχεδιασμός κι η ανάλυση μιας αλατούχου δομής που βασίστηκαν στη γραμμική ελαστικότητα και το φάκελο αστοχίας, ισχύουν μόνο για άλατα πολύ υψηλής ελαστικής σύνθεσης ή για περιορισμένες συνθήκες φόρτισης. Οι τάσεις από την ελαστική ανάλυση γύρω από ανοίγματα, για την αποτίμηση της πιθανότητας θραύσης του άλατος, υποκαθίστανται από την παρατήρηση αστοχίας.

Συχνά πάντως, όταν οι τάσεις και η θερμοκρασία είναι χαμηλές, αρκεί μια απλή ανάλυση βασισμένη στη γραμμική ελαστικότητα και τα κριτήρια αστοχίας για να αποδειχτεί ότι οι μη-γραμμικές παραμορφώσεις που αναπτύσσονται με το χρόνο δεν είναι σημαντικές.

4.3.2δ) Ελαστική και πλαστική συμπεριφορά

Η ελαστική και η πλαστική συμπεριφορά περιγράφεται από ένα απλό πρότυπο (σχήμα 4.3), σύμφωνα με το οποίο, αρχικά η φόρτιση προκαλεί στο δοκίμιο του άλατος ελαστική παραμόρφωση αλλά όταν το φορτίο αυξάνεται, εμφανίζει



Σχήμα 4.3: Πρότυπο ελαστικής και πλαστικής παραμόρφωσης (Jeremic, 1994).

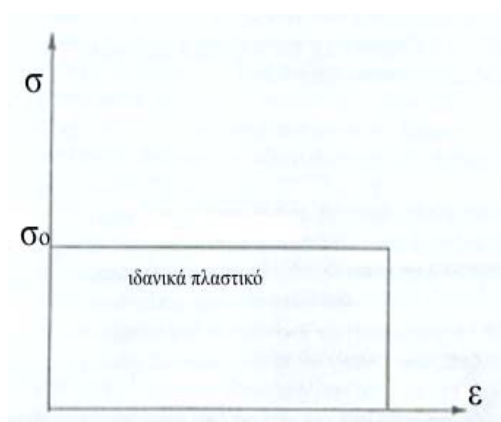
πλαστική συμπεριφορά, μέχρι αστοχίας.

Ενώ η ελαστική παραμόρφωση διαφέρει κατά πολύ από την πλαστική, εν τούτοις στην πλειοψηφία των περιπτώσεων, ένα αλατούχο υλικό μπορεί να εμφανίζει, ταυτόχρονα, και ελαστική και πλαστική συμπεριφορά.

Η βασική διαφορά μεταξύ των δύο αυτών τύπων παραμόρφωσης είναι ότι η ελαστική παραμόρφωση είναι προσωρινή, ενώ η πλαστική είναι μόνιμη. Ο βαθμός της μόνιμης παραμόρφωσης εξαρτάται από το λόγο της πλαστικής προς την συνολική παραμόρφωση. Όταν το φορτίο αυξηθεί (θερμοκρασία δωματίου), το άλας από την ελαστική κατάσταση θα περάσει σε πλαστική διαρροή που είναι μια μη ανακτήσιμη παραμόρφωση, ανεξάρτητη από οποιαδήποτε ιξώδη παραμόρφωση ή παραμόρφωση ερπυσμού. Οι ελαστικές και πλαστικές παραμορφώσεις εμφανίζονται και μετά από φόρτιση σύντομης χρονικής διάρκειας αλλά μεγάλου φορτίου.

4.3.2ε) Πλαστική συμπεριφορά

Από τα διάφορα πειραματικά δεδομένα, έχει προκύψει ότι όταν σε ένα ιδανικά πλαστικό υλικό, εφαρμόζεται τάση σ , δεν παρουσιάζει παραμόρφωση για τιμές τάσεως μικρότερες από σ_0 , ενώ όταν η τάση είναι ίση με σ_0 , παρουσιάζει μόνιμη παραμόρφωση (σχήμα 4.4). Αυτό σημαίνει ότι ένα ιδανικά πλαστικό υλικό, δεν μπορεί να φέρει τάση, μεγαλύτερη από σ_0 .



Σχήμα 4.4: Πρότυπο ιδανικά πλαστικής παραμόρφωσης (Jeremic, 1994).

Με αύξηση της θλιπτικής τάσης ή της θερμοκρασίας ή και των δύο, εμφανίζεται πλαστική ή όλκιμη συμπεριφορά. Όπως τα περισσότερα πετρώματα, έτσι και τα άλατα, στην πλαστική περιοχή εμφανίζουν όλκιμη συμπεριφορά, παρόμοια με εκείνη των μετάλλων. Η όλκιμότητα των αλάτων είναι ιδιαίτερα σημαντική, τόσο λόγω της γεωλογικής και μεταλλευτικής της σημασίας, όσο και για την ενδεχόμενη μελλοντική χρήση των εβαποριτών ως αποθήκες πυρηνικών αποβλήτων. Το ενδεχόμενο αυτό οφείλεται στην υψηλή

πλαστικότητα των αλάτων, η οποία μπορεί να αποτρέψει το σχηματισμό ρωγμών και την ενδεχόμενη απόδραση των ραδιονουκλεϊδίων από την αποθήκη στη βιόσφαιρα.

1. Εν τούτοις, κατά καιρούς παρατηρήθηκαν ρωγμές και σε ανέπαφα κοιτάσματα αλάτων. Το φαινόμενο αυτό, βάση της πλαστικής και της όλκιμης παραμόρφωσης τους σε υπόγεια ανοίγματα, μπορεί να αποδοθεί είτε στη βαρυτική δύναμη και τη γεωθερμική βαθμίδα που αυξάνονται με το βάθος και προκαλούν μόνιμη παραμόρφωση στα πετρώματα (η υπόγεια εκμετάλλευση των αλάτων περιορίζεται στα 1200-1300 m), είτε στην αύξηση της θερμοκρασίας που συμβάλλει στη μετατροπή του ψαθυρού άλατος σε όλκιμο ή την αύξηση της πλαστικότητας των ήδη όλκιμων αλάτων.

4.3.3.Μεταβατικές παραμορφώσεις των αλάτων

Η μελέτη της μεταβατικής συμπεριφοράς των αλάτων γίνεται με φόρτιση μικρής διάρκειας. Η μεταβατική μηχανική των αλάτων, ελέγχεται από τις μεταβολές της ταχύτητας παραμόρφωσης, οι οποίες επιφέρονται με την αύξηση του φορτίου και της θερμοκρασίας. Τα 4 είδη μεταβατικής συμπεριφοράς των αλάτων είναι (Jeremic, 1994):.

4.3.3α) Εύθραυστες ελατές παραμορφώσεις

Όταν ένα δοκίμιο αλίτη υφίσταται παραμόρφωση λόγω εφελκυσμού, μεταβαίνει απότομα από την εύθραυστη στην ελατή συμπεριφορά, για συγκεκριμένη ταχύτητα παραμόρφωσης, η οποία εξαρτάται από την αντίστοιχη θερμοκρασία. Σύμφωνα με τις μελέτες του Skrotzki (Jeremic, 1994), η παραμόρφωση των αλάτων σε μια συγκεκριμένη θερμοκρασία (T_{bd}), εκδηλώνει μεταβατικές στρώσεις εύθραυστης και ελατής συμπεριφοράς. Αυτό το φαινόμενο αποδίδεται τόσο στην ικανότητα του εύθραυστου άλατος να αντιστέκεται στη φόρτιση, αυξάνοντας την παραμόρφωσή του, όσο και στην ικανότητα του όλκιμου άλατος, να διατηρεί μόνιμη την παραμόρφωσή του, διατηρώντας ταυτόχρονα την αντίστασή του σε ένα κρίσιμο φορτίο. Για

θερμοκρασίες μικρότερες από την T_{bd} , οι παραμορφώσεις στη θραύση είναι πολύ μικρές για να παράγουν βήματα ολίσθησης αλλά σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από αυτήν, είναι αρκετά μεγάλες για να παράγουν μια κυματώδη ολίσθηση.

Το επίπεδο θραύσης παύει να είναι επίπεδο, όταν εμφανίζεται ο διαχωρισμός των κόκκων. Οι αλλαγές από επίπεδη σε κυματοειδή θραύση λαμβάνουν χώρα σε θερμοκρασία T_{bd} , όταν η ελικοειδής διαταραχή μπορεί να μετατοπιστεί εγκάρσια. Η κυματοειδής ολίσθηση είναι το αποτέλεσμα της εγκάρσιας μετατόπισης της ελικοειδούς διαταραχής. Η συγκέντρωση των τάσεων που απαιτείται για την έναρξη της ενδοκοκκικής ρωγμάτωσης, εκτονώνεται και καταστέλλεται με την εξάπλωση της θραύσης.

Οι ρυθμοί παραμόρφωσης κατά τη διάρκεια του διαφυρισμού των αλατούχων δόμων θεωρείται ότι βρίσκονται εκτός του ψαθυρού πεδίου σε θερμοκρασία μεγαλύτερη από τη θερμοκρασία δωματίου. Έτσι, αν οι υπάρχουσες ρωγμές δημιουργούνταν εξαιτίας του μηχανισμού ολίσθησης, η τεκτονική κίνηση θα διαρκούσε πολύ λίγο. Οι σχηματισμοί των θραύσεων περιορίζονται στις αδύναμες ζώνες καθώς και στα στρώματα υψηλής περιεκτικότητας σε ανυδρίτη, όπου το ψαθυρό πεδίο μπορεί να είναι πολύ πιο ευρύ.

4.3.3β) Ελαστο-πλαστική παραμόρφωση.

Η ελαστοπλαστική συμπεριφορά στα άλατα προκαλεί τόσο ελαστική όσο και πλαστική παραμόρφωση οπότε και οι δύο μαζί προκαλούν μια συνολική παραμόρφωση στο πέτρωμα. Η παρουσία είτε της μίας είτε της άλλης παραμόρφωσης, μπορεί να ποικίλει κατά ένα εύρος τιμών από 1% ως 99% κι ανάλογα με τη σύνθεση της παραμόρφωσης το αλάτι συμπεριφέρεται ως ελαστικό ή πλαστικό σώμα. Στο σχήμα 4.5 φαίνεται το πρότυπο της ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς, στο οποίο διακρίνεται καθαρά η επανάκτηση της ελαστικής παραμόρφωσης και η μονιμότητα της πλαστικής. Χαρακτηριστικό παράδειγμα ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς αποτελεί η ποτάσα.

Κατά τη θλιπτική φόρτιση αλατούχων δοκιμίων, παρουσιάζονται 4 περιοχές παραμόρφωσης και θραύσης: Η ελαστική παραμόρφωση που δεν είναι ορατή με γυμνό μάτι (περιοχή I), η πλαστική παραμόρφωση που είναι ορατή με το μάτι, με πλευρικές επεκτάσεις στο κεντρικό τμήμα του δείγματος (περιοχή II), η αντίδραση

στις παραμορφώσεις πέρα από την κρίσιμη αντοχή, λόγω αντίστασης στη διάτμηση κατά μήκος του επιπέδου ρωγμάτωσης με μερική απολέπιση (περιοχή III) και η αστοχία σε διάτμηση με σχηματισμό κλεψύδρας (περιοχή IV).

Ο Jeremics

βασίζόμενος τώρα στις μελέτες του Dryer (1973) παρατηρεί την ελαστοπλαστική παραμόρφωση των αλάτων υπό πλευρική τάση και συμπεραίνει ότι για τάσεις

μεγαλύτερες των 3 MPa, Σχήμα 4.5: Πρότυπο ελαστοπλαστικής συμπεριφοράς όταν εμποδίζεται η πλευρική (Jeremic, 1994).

επέκταση το αλάτι αντιδρά πλαστικά. Από τα διαγράμματα που προέκυψαν από τις εργαστηριακές δοκιμές φαίνεται ότι η ελαστοπλαστική συμπεριφορά διαφέρει και από την ελαστική και από την πλαστική αλλά προσεγγίζει περισσότερο την πλαστική από ότι την ελαστική συμπεριφορά.



4.3.3γ) Παραμόρφωση λόγω κράτυνσης

Για την ερμηνεία του φαινομένου της αντοχής στη διαρροή έχουν αναπτυχθεί πολυάριθμες υποθέσεις, οι οποίες αρχικά ανέφεραν ότι κατά τη σταδιακή φόρτιση, οι κρύσταλλοι μετατρέπονται βαθμιαία σε μια άμορφη μάζα, η οποία ευθύνεται για την παραμόρφωση λόγω κράτυνσης. Ο Seeger (Jeremic, 1994) χαρακτηρίζει την παραμόρφωση των κρυσταλλικών στερεών πλαστική, λόγω βαθμιαίας φόρτισης ενώ εκείνη της άμορφης μάζας, ιξώδη. Συνολικά η πλαστική και η ιξώδης παραμόρφωση των αλάτων, μπορεί να χαρακτηριστεί ως αντοχή κράτυνσης κατά τη διαρροή.

Το κύριο στοιχείο στο μηχανισμό της κράτυνσης είναι ο παράγοντας της κατανομής των ελαττωματικών μικροδομών των κρυστάλλων που δημιουργήθηκαν εξ' αιτίας της ανώμαλης ανάπτυξης τους και των παραμορφώσεων της φόρτισης. Ο Dryer (Jeremic, 1994) αναφέρει μάλιστα ότι στα πολυκρυσταλλικά πετρώματα δεν είναι εύκολη η πρόβλεψη του μεγέθους της κράτυνσης, μόνο από τη γνώση των

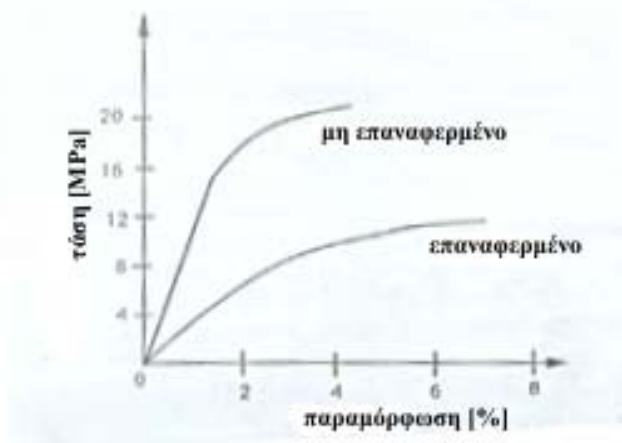
εσωτερικών τάσεων κατά της πλαστικές παραμορφώσεις. Τα όρια των κόκκων συνθέτουν από μόνα τους, μια επίπεδη διαταραχή και η επίδραση της παραμόρφωσης στην κράτυνση επηρεάζεται από την παρουσία προσμίξεων.

Για τον χαρακτηρισμό της κράτυνσης είναι απαραίτητος ο προσδιορισμός της ελαστικής σταθεράς (E) και της ελαστοπλαστικής σταθεράς (E_T). Ο προσδιορισμός των σταθερών βασίζεται στις μεταβολές του μεγέθους της ελάχιστης κύριας τάσης και την αύξηση της αξονικής τάσης.

Κατά τη βραχομηχανική ανάλυση υπόγειων μεταλλείων, η παραμόρφωση λόγω κράτυνσης αποτελεί ένα σημαντικό παράγοντα πρόβλεψης της συμπεριφοράς και της φέρουσας ικανότητας των δομών των αλατούχων πετρωμάτων. Έτσι, τα φαινόμενα κράτυνσης μπορούν να αξιοποιηθούν τόσο στο μεταλλευτικό σχεδιασμό όσο και στη μεταλλευτική διάταξη. Για παράδειγμα η κράτυνση της ορυκτής ποτάσας είναι ιδιαίτερα σημαντική και η αντοχή της θα μπορούσε να αξιοποιηθεί για την αύξηση της φέρουσας ικανότητας των μεταλλευτικών στύλων.

4.3.3δ) Θέρμανση του άλατος

Ο Dryer (Jeremic, 1994) μελέτησε τις ιδιότητες θέρμανσης του άλατος τόσο στο φυσικό κρυσταλλικό αλάτι όσο και σε κρυσταλλική μάζα άλατος και παρατήρησε ότι οι κρύσταλλοι των αλάτων κάτω από μονοαξονική θλίψη σε θερμοκρασία δωματίου, συμπεριφέρονται εύθραυστα, ενώ μετά από εκτεταμένη θέρμανση στους 600° C περίπου, χάνουν την ευθραυστότητα τους και εκδηλώνουν κρίσιμη διατμητική τάση, μεγέθους 1 MPa.



Σχήμα 4.6: Σχέση τάσης-παραμόρφωσης αλάτων πριν και μετά τη θέρμανση τους (Jeremic, 1994).

Κατά τις δοκιμές μελετήθηκαν η ολίσθηση κι η παράλληλη μετατόπιση κατά μήκος των διαταραχών των κρυστάλλων, οι οποίες προήλθαν από μη παραμορφωμένους κρυστάλλους, κατά την ανώμαλη ανάπτυξη τους. Τα θερμικά

κατεργασμένα μονοκρυσταλλικά δείγματα του άλατος, παρουσίασαν σημαντικά μειωμένη αντοχή. Αυτό το φαινόμενο περιγράφεται ως κρυσταλλική απώλεια μνήμης της επί τόπου ιστορίας της τάσης, ενώ η επίδραση της εργασίας εξασθένησης, οφείλεται κυρίως στη μείωση της πυκνότητας διαταραχής στο πλέγμα του κρυστάλλου. λόγω υψηλότερης θερμοκρασίας.

Η σχέση μεταξύ τάσης και παραμόρφωσης (σχήμα 4.6) αντιστοιχεί στην συμπεριφορά θερμασμένων και μη θερμασμένων αλάτων. Τα δοκίμια των αλάτων έχουν φορτιστεί με ρυθμό 0,1 MPa ανά βαθμίδα ως το μέγιστο 20 MPa. Η θέρμανση οδηγεί στην πλήρη ανακρυστάλλωση του άλατος, το οποίο εμφανίζει μηχανικές ιδιότητες όμοιες με εκείνες του ιδανικού κρυστάλλου επειδή εξαλείφεται η επίδραση της κράτυνσης λόγω της γεωλογικής φόρτισης.

Οι Vouille et al. (Jeremic, 1994) μελέτησαν πάνω σε 8 αλατούχα δείγματα της Tersanne τον τρόπο που η θερμοκρασία επιδρά στην μείωση της αντοχής σε παραμόρφωση φόρτισης / αποφόρτισης 2 κύκλων, έναν σε θερμοκρασία δωματίου και έναν στους 80° C. Οι αυξήσεις της πλευρικής τάσης κυμαίνονταν κατά μέσο όρο με ρυθμό 0,1 MPa/min από 0 ως 30 MPa (το κριτήριο διαρροής ορίζεται από μηδενική γωνία εσωτερικής τριβής ανεξάρτητα από τη θερμοκρασία). Προέκυψε ότι η θερμοκρασία επιδρά στη συνοχή του κρυστάλλου, επειδή όταν αυξάνεται από τους 30° στους 80° C, η μέση συνοχή μειώνεται από 2,8 σε 1,9 MPa. Η δοκιμή εκτόνωσης της φόρτισης έδειξε ότι το ιξώδες του άλατος μειώνεται όσο αυξάνεται η θερμοκρασία. Αυτό σημαίνει ότι η κατάσταση ισορροπίας επιτυγχάνεται πιο γρήγορα, σε υψηλές θερμοκρασίες από ότι σε χαμηλές.

Η εξασθένηση του άλατος λόγω της αύξησης της θερμοκρασίας του, επιδρά σημαντικά στη συμπεριφορά και τις ιδιότητες του. Αυτό το φαινόμενο της φθοράς της αντοχής του υλικού έχει ενδιαφέρον στις μεγάλες υπόγειες εκσκαφές μέσα σε αλατούχα κοιτάσματα, όταν αυτά περιέχουν υλικά, τα οποία μπορεί να αυξήσουν τη θερμοκρασία και να προκαλέσουν θέρμανση των γύρω πετρωμάτων. Υπό αυτές τις συνθήκες η εξασθένηση της αντοχής του άλατος και η μεταβολή των ιδιοτήτων του, θα μπορούσαν να προκαλέσουν αστοχία στη δομή του.

4.4. Χρονικά εξαρτώμενη αστοχία

Γενικά υπάρχει η άποψη ότι το ορυκτό άλας και η ποτάσα συμπεριφέρονται πάντα μόνο πλαστικά με μόνιμη παραμόρφωση, χωρίς θραύση και χωρίς αύξηση του

όγκου. Οι παρατηρήσεις όμως στα υπόγεια έδειξαν καθαρά, ότι δε συμβαίνει κάτι τέτοιο αφού οι αστοχίες που παρατηρήθηκαν αφορούν διάφορους μηχανισμούς τάσης εφελκυσμού και ειδικά σε πολύ μεγάλα βάθη. Σίγουρα πάντως ισχύει ότι τα άλατα έχουν ημι-εύθραυστες ιδιότητες με τις οποίες σχετίζονται οι κατακλαστικές παραμορφώσεις.

4.4.1) Δομές μικροκατάκλασης

Οι μηχανισμοί μικροκατάκλασης γύρω από ανοίγματα μεταλλείων γενικεύονται από τις τάσεις που αναπτύσσονται κατά την εκμετάλλευση, περιορισμένες στα πολύ μικρά επαγόμενα «πεδία μικρό-τάσεων λεπτού». Οι μικροκατακλάσεις γύρω από τα ανοίγματα των μεταλλείων, μπορεί να δημιουργηθούν λόγω της αύξησης του όγκου, η οποία προκαλεί αντίστοιχη αύξηση της σύγκλισης. Η ανάπτυξη των μικροκατακλάσεων πιθανότατα ανήκει σε ένα μηχανισμό ημι-πλαστικής ροής σε συνάρτηση με το πορώδες και τη διαπερατότητα.

Η μηχανική του σχηματισμού των ρωγμών θα μπορούσε να συσχετιστεί με έμμεσο εφελκυσμό, όπως στην περίπτωση αξονικής ρωγμάτωσης λόγω θλίψης, όπου η συγκέντρωση των τάσεων εμφανίζεται μέσα στο πεδίο της επιφερόμενης τάσης εφελκυσμού. Αυτά τα πεδία της επιφερόμενης τάσης εφελκυσμού, μπορεί να εμφανιστούν στα άκρα των ορίων μιας «ροής Griffith», η οποία θα σχηματίσει μια ακριανή ρωγμή στην πλάγια θέση. Κανονικά, ο σχηματισμός των ρωγμών θα έπρεπε να είναι συστηματικός, αλλά μέσα στα ανοίγματα των πετρωμάτων, είναι εμφανής η έλλειψη του μικροκατακλαστικού συστήματος. Οι ανωμαλίες στο σύστημα, είναι πιθανόν να εμφανίζονται λόγω της παρουσίας προηγούμενων ρωγμών, που σχηματίστηκαν στο πέτρωμα από ενδογενείς κι εξωγενείς διαδικασίες.

Ένα συγκεκριμένο μέρος των ρωγμών γεωλογικής προέλευσης και των ρωγμών που δημιουργούνται κατά την εκμετάλλευση του κοιτάσματος ή λόγω των θερμικών επιδράσεων, συνήθως επουλώνονται και δεν είναι δυνατή η ανίχνευση τους μέσω των μεταβολών της ακουστικής ταχύτητας. Η μικροκατακλαστική δομή των κλειστών ρωγμών των αλάτων, εκδηλώνει μια κατακλαστική -πλαστική-ελαστική ισορροπία, η οποία τους επιτρέπει σταθερή συμπεριφορά της δομής τους. Αυτό σημαίνει ότι η μεταλλευτική δομή διαθέτει ικανότητα αυτοϋποστήριξης.

Το μήκος των ρωγμών μπορεί να ποικίλει από λίγα μm ως λίγα mm και είναι πιθανόν ενώ έχουν επουλωθεί να εμφανιστούν ξανά, εξαιτίας των μεταβολών των τάσεων και να οδηγήσουν σε αύξηση του πορώδους και της σχετικής διαπερατότητας του άλατος. Αυτό σημαίνει ότι οι αλατούχες δομές, διαθέτουν φέρουσα ικανότητα, ειδικά όταν υπάρχει υγρασία.

Οι συνθήκες που οδηγούν στο σχηματισμό του επιπέδου τάσεων στα ανοίγματα των ρωγμών δεν είναι γνωστές, αλλά είναι γνωστό ότι σε επίπεδα χαμηλών τάσεων, παρά την αφθονία τους, οι ρωγμές είναι στεγανές, ειδικά όταν δεν βρίσκονται σε επαφή μεταξύ τους. Τέλος για μικρές τάσεις, οι καθαρά πλαστικές ιδιότητες του πετρώματος συμβάλλουν στην διατήρηση της ενότητας της μικροκατακλαστικής μάζας. Εξάλλου, όπως συμβαίνει με τη δομή και άλλων πετρωμάτων, τα άλατα μεταβάλλουν τις ιδιότητες τους όταν αυξάνεται η τάση και λαμβάνει χώρα αστοχία.

4.4.2) Η μηχανική της θραύσης

Η θραύση των αλατούχων δομών αφορά κυρίως στη μηχανική αστοχίας του διαχωρισμού. Οι αστοχίες αυτές παράγονται υπό την επίδραση έμμεσης τάσης εφελκυσμού, η οποία μπορεί να έχει επέλθει μετά από μονοαξονική θλίψη. Τα άλατα αστοχούν λόγω ημι-ψαθυρής θραύσης εφελκυσμού υπό τις ακόλουθες συνθήκες:

1. Όταν η δομή των αλάτων βρίσκεται σε κατάσταση κλαστική -ελαστική λόγω μικροκατακλάσεων, με ανοιχτές ρωγμές, οι οποίες ανιχνεύονται με τη βοήθεια των ακουστικών ταχυτήτων.
2. Όταν η ενεργή πλάγια τάση, γνωστή και ως δευτερεύουσα κύρια τάση, είναι ίση προς ή υπερβαίνει την αντοχή σε εφελκυσμό της μικροκλαστικής δομής του πετρώματος.
3. Όταν το αλατούχο πέτρωμα αποχωρίζεται παράλληλα στη διεύθυνση της κύριας τάσης και κάθετα στη διεύθυνση της μέγιστης τάσης εφελκυσμού.
4. Όταν η μικροκατακλαστική περιστροφή των κόκκων, που είναι διαγώνια ως προς τη βαρυτική δύναμη, μεταφέρεται με επιπλέον περιστροφή των κόκκων, σε διεύθυνση παράλληλη στην αξονική αστοχία.

Η αξονική μικροκατάκλαση μπορεί να παρατηρηθεί, για παράδειγμα, σε ένα αλατωρυχείο μεγάλου βάθους, όταν οι στύλοι έχουν σχεδιαστεί λάθος. Οι αστοχίες των σχισμών λαμβάνουν χώρα πολύ κοντά στο φλοιό των στύλων των πετρωμάτων κι επειδή οι διαδικασίες της παραμόρφωσης είναι γρήγορες, μπορεί κανείς να το

παρατηρήσει οπτικά. Ο μηχανισμός των αξονικών σχισμών αναγνωρίζεται εύκολα από το επίπεδο και τα σχήματα της θραύσης, τα οποία εμφανίζονται συνήθως συστηματικά, σχηματίζοντας ένα χαρακτηριστικό δομικό στοιχείο μακροκατάκλασης.

Προς το παρόν, ο μηχανισμός αυτός στα άλατα, δεν είναι ιδιαίτερα κατανοητός και ειδικά οι συνθήκες που συμβάλουν στην παραγωγή και την εξάπλωση των ρωμών.

4.4.3) Προοδευτική αστοχία τοιχώματος

Τη μηχανική της μακροκατάκλασης της αστοχίας πλακών ή τεμαχίων των τοιχωμάτων των υπόγειων αλατωρυχείων μπορεί κανείς να την κατανοήσει καλύτερα μελετώντας την κατ' αντιστοιχία με τον ίδιο τύπο αστοχίας π.χ. στα ανθρακωρυχεία.

Η αποκόλληση τεμαχίων, στις αλατούχες δομές είναι παρόμοια με τις παραμορφώσεις διαρροής στο μαλακό κάρβουνο, οι οποίες αναλύονται βάσει της ανάλυσης της ελαστοπλαστικής τάσης. Η αστοχία με αποκόλληση των πλακών στα άλατα παράγεται και λόγω έμμεσης τάσης εφελκυσμού, η οποία επιφέρεται από κατακόρυφη θλιπτική τάση ως εξής:

1. Όταν η πλαστική - ελαστική κατάσταση βρίσκεται στην άμεση εσωτερική ζώνη της δομής του άλατος επηρεάζεται η εκκίνηση και η εξάπλωση της αστοχίας. Η θέση της αστοχίας ανταποκρίνεται στη δράση της μέγιστης κατακόρυφης τάσης της δομής του πετρώματος, $\sigma_{V(max)}$.

2. Όταν η επιφερόμενη τάση εφελκυσμού είναι κάθετη στο εγκάρσιο προφίλ, η τιμή της ποικίλει. Μπορεί να λάβει τη μέγιστη στο κέντρο ($\sigma_{T(max)}$) και να εκλείπει στις επαφές μεταξύ της οροφής και του δαπέδου του ορυχείου, ($\sigma_T=0$).

3. Όταν η παραμόρφωση διαρροής της μικροκρυσταλλικής ζώνης οφείλεται σε ημι-πλαστική ροή και προοδεύει αργά με το χρόνο, η αποκόλληση κατά πλάκες των στύλων του πετρώματος, οδηγεί στο σχηματισμό κλεψύδρας.

Η μακροκλαστική αστοχία της αποκόλλησης κατά πλάκες, εκδηλώνεται κυρίως στα τοιχώματα των διατηρημάτων αλατωρυχείων μεγάλου βάθους, το εγκάρσιο προφίλ των οποίων, μπορεί να ληφθεί με ακουστικές μετρήσεις.

Η αστοχία αποκόλλησης κατά τεμάχια της αλατούχου δομής είναι μια συνεχής διαδικασία, η οποία φαίνεται καθαρά με την εκκίνηση και την εξάπλωση μικρών αστοχιών, πίσω από μια κύρια αστοχία κατά πλάκες. Είναι πιθανόν, η εκκίνηση της κύριας αστοχίας να ξεκινάει μετά τη μετατροπή των αλατούχων πετρωμάτων από την

εύθραυστη ελαστική κατάσταση στην πλαστικό-ελαστική, δηλαδή κατά τις μικροκατακλαστικές διαδικασίες.

Για την αποφυγή των συνεχών αποκολλήσεων κατά πλάκες και τη διεύρυνση των διατρημάτων ή τη συρρίκνωση των στύλων, αρκεί ο περιορισμός των ελεύθερων επιφανειών των μεταλλευτικών δομών, ο οποίος εξισορροπεί σε μεγάλο βαθμό την πλάγια τάση εφελκυσμού.

4.4.4) Αστοχία κατολίσθησης

Κάποιες φορές κατά τις μεταλλευτικές δραστηριότητες σε ορισμένα αλατωρυχεία παρατηρείται κατολίσθηση της οροφής του ορυχείου και συγκεκριμένα της οροφής του μετώπου, στο οποίο λαμβάνει χώρα η εξόρυξη. Η μηχανική της μακροκατάκλασης που σχετίζεται με την πτώση της οροφής, βασίζεται στη δράση της τάσης εφελκυσμού σε ημι-εύθραυστα υλικά, ενώ η μηχανική της θραύσης του αλατούχου πετρώματος και η πτώση του, πραγματοποιείται σε δύο στάδια:

1. Αρχικά παρουσιάζεται ο διαχωρισμός του αλατούχου πετρώματος κατά μήκος των συνεχειών της δομής (επιφάνεια καθίζησης) ή των ασυνεχειών της. Η αστοχία του διαχωρισμού παράγεται από την κατακόρυφη δύναμη έλξης, η οποία ισούται με τη βαρύτητα της τάσης επαγωγής, δηλαδή νεκρό φορτίο του όγκου του αλατούχου πετρώματος. Σε αυτή την περίπτωση, ανυψώνεται η δοκός ή η πλάκα άλατος και αργότερα παραμορφώνεται.

2. Στη συνέχεια, η κάμψη της αλατούχου δομής πραγματοποιείται κάτω από το ίδιο της το βάρος. Σε αυτήν την περίπτωση η αστοχία παράγεται από την πλευρική δύναμη έλξης, συνοδευόμενη από προοδευτικό άνοιγμα και θραύση μέχρι την τελική πτώση του πετρώματος. Ο μηχανισμός της σύγκλισης και της θραύσης του μετώπου, θα μπορούσε να συσχετιστεί με τα κριτήρια αστοχίας μιας δοκού με περιορισμένα άκρα. Η διάρκεια της εκτροπής της δοκού του πετρώματος πριν πέσει, εξαρτάται από το πάχος και το μήκος της, καθώς και από τις ιδιότητες της αντοχής της.

Η πλειοψηφία των πτώσεων των βραχομαζών που έχουν παρατηρηθεί σε υπόγειους μεταλλευτικούς χώρους, υποδεικνύει περισσότερο τοπική μικροκατάκλαση και πτώση της οροφής και όχι κατάρρευση του μετώπου. Αυτό το φαινόμενο δηλώνει ότι η κλαστική – πλαστική ισορροπία της οροφής του άλατος, διακόπτεται μόνο τοπικά και πιθανότατα εξαιτίας της μέγιστης τάσης εφελκυσμού και της παρουσίας μιας πυκνότερης δομής μικροκατάκλασης. Υπό αυτές τις συνθήκες η ικανότητα

αυτοϋποστήριξης της οροφής του μετώπου ενεργεί μόνο τοπικά, με λεπτό διαχωρισμό κατά πλάκες και όχι κατά μεγάλους δοκούς του πετρώματος. Η επίτευξη αυτοϋποστήριξης της οροφής του μετώπου, είναι πολύ σημαντική γιατί δεν περιορίζει την τεχνολογία εξόρυξης στα μεταλλεία.

Πάντως, η πλειοψηφία των κατακλαστικών παραμορφώσεων των δομών των αλατωρυχείων, έχει λάβει χώρα κατά την αξονική διεύθυνση και όχι κατά την πλάγια. Αυτό το φαινόμενο θα μπορούσε να σχετιστεί με την προδιάθεση της μικροκατάκλασης μέσα στο αλατούχο κοίτασμα, με το χαρακτήρα της ρωγμάτωσης κατά τις μεταλλευτικές δραστηριότητες και πιθανόν με τις ειδικές ιδιότητες και τη συμπεριφορά της ίδιας της βραχομάζας.

4.5 Χρονικά εξαρτώμενες παραμορφώσεις και αστοχίες

Οι παραμορφώσεις και οι αντοχές των πετρωμάτων, υπό συνεχή τάση ή/και αυξανόμενη θερμοκρασία, εξαρτώνται από τη συμπεριφορά τους κατά την πάροδο του χρόνου. Οι εβαπορίτες συγκαταλέγονται μεταξύ των πετρωμάτων, οι μηχανικές ιδιότητες των οποίων, είναι χρονικά εξαρτώμενες. Αυτό σημαίνει ότι στα αλατωρυχεία, μετά από την πάροδο ενός χρονικού διαστήματος, μπορούν να εμφανιστούν προβλήματα ευστάθειας των πετρωμάτων .

4.5.1 Ρεολογικός χαρακτηρισμός

Η ρεολογία είναι ένας από τους κλάδους της μηχανικής των παραμορφωσίμων σωμάτων, ο οποίος προσπαθεί να προσεγγίσει τις πραγματικές παραμορφώσεις των υλικών, σε συνάρτηση με το χρόνο και τη θερμοκρασία.

4.5.1α) Αρχή της αντιστοιχίας

Ο da Gamma (Jeremic, 1994) υποστήριξε ότι ένας μεγάλος αριθμός προβλημάτων ανάλυσης τάσεων της γραμμικής βισκοελαστικότητας, μπορεί να λυθεί με τη βοήθεια της λεγόμενης «αρχής της αντιστοιχίας». Η αρχή αυτή βασίζεται στην

αξιοποίηση ελαστικών επιλύσεων, παρόμοιων προβλημάτων, σύμφωνα με την εφαρμογή ανάλυσης του Laplace.

Η σχέση τάσης-παραμόρφωσης για ισότροπα ελαστικά υλικά (νόμος του Hooke σε τρεις διαστάσεις) μπορεί να γραφεί ως εξής:

$$\sigma = 3B \varepsilon, \quad \sigma_{ij} = 2G \varepsilon_{ij} \quad (i,j=1,2,3)$$

όπου:

σ : η μέση τάση,

ε : η γραμμική παραμόρφωση

σ_{ij} , ο τανυστής της αποκλίνουσας τάσης

ε_{ij} : ο τανυστής της γραμμικής παραμόρφωσης

B : η σταθερά όγκου του υλικού και

G : το μέτρο διάτμησης του υλικού.

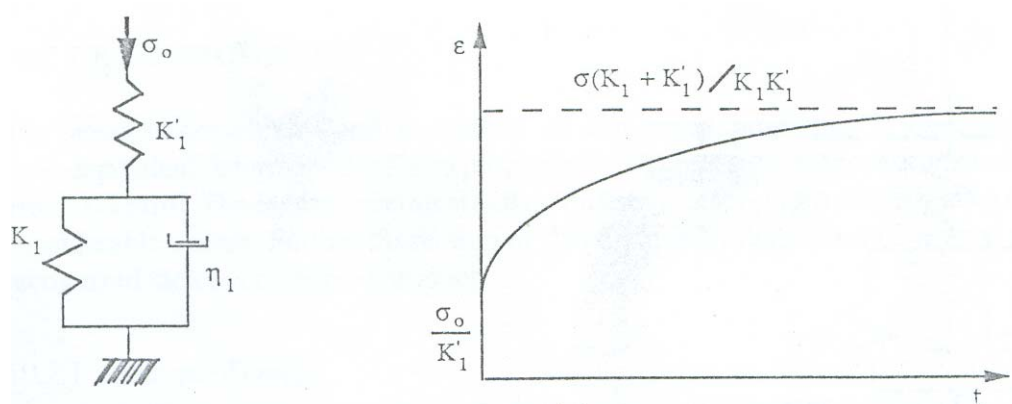
Η πρώτη εξίσωση βρίσκει εφαρμογή στη διαστολή ή την υδροστατική καταπόνηση, ενώ η δεύτερη, στη στρέβλωση και τη διάτμηση, έτσι ώστε και οι δύο εξισώσεις μαζί, να ορίζουν πλήρως τη σχέση τάσης-παραμόρφωσης. Στα περισσότερα βισκοελαστικά υλικά, οι σχέσεις τάσης-παραμόρφωσης μπορούν να γραφτούν με τη μορφή κανονικών γραμμικών διαφορικών εξισώσεων, με διαφόριση ως προς το χρόνο και στη συνέχεια να λυθεί το σύστημα σε σχέση με τις εξισώσεις των τάσεων εξισορρόπησης και των οριακών συνθηκών.

Ο da Gamma υποστήριξε ακόμη ότι προβλήματα που αφορούν στην ανάλυση των τάσεων βισκοελαστικών υλικών μπορούν να επιλυθούν με τη βοήθεια του αντίστροφου μετασχηματισμού του Laplace της ελαστικής επίλυσης του ίδιου προβλήματος, υπό την προϋπόθεση ότι το υλικό εκτρέπεται από τις αδιατάρακτες συνθήκες τη χρονική στιγμή μηδέν.

Γενικά πάντως τα πετρώματα που συμπεριφέρονται βισκοελαστικά παραμένουν ελαστικά σε υδροστατική καταπόνηση με σταθερό λόγο Poisson ενώ η αναπαράσταση της μηχανικής τους συμπεριφοράς στη διάτμηση, δίδεται ικανοποιητικά από το γενικευμένο μοντέλο Kelvin.

4.5.1β) Γενικευμένο μοντέλο Kelvin

Το γενικευμένο ρεολογικό μοντέλο Kelvin ερμηνεύει ικανοποιητικά τη ρεολογική συμπεριφορά και των αλάτων αφού βάσει αυτής, θεωρούνται βισκοελαστικές ουσίες. Το μοντέλο αυτό αποτελείται από ένα στοιχείο Kelvin, δηλαδή ένα ελατήριο K_1 παράλληλα τοποθετημένο ως προς ένα αποσβεστήρα μηχανικών κινήσεων η_1 , που προσεγγίζει αντιστοίχως τα υλικά Hooke και Newton κι ένα ελατήριο K'_1 σε σειρά με το K_1 (σχήμα 4.7).



Σχήμα 4.7: Γενικευμένο ρεολογικό μοντέλο Kelvin (Jeremic, 1994)

Κατά την εφαρμογή σταθερής τάσης σ_0 , τη χρονική στιγμή $t=0$ κι ενώ η γραμμική παραμόρφωση είναι επίσης μηδέν, η ακαριαία ελαστική γραμμική παραμόρφωση είναι: $\varepsilon_0 = \sigma_0 / K_1$. Η τιμή της ιξώδους γραμμικής παραμόρφωσης αυξάνεται διαδοχικά και δίνεται από τη σχέση:

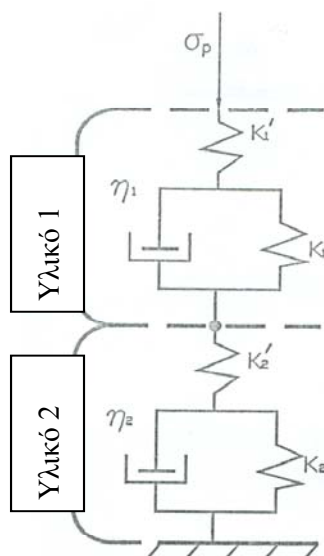
$$\varepsilon = \sigma_0 \left[\frac{1}{K'_1} + \frac{1}{K_1} (1 - e^{-t/t_1}) \right], \quad \text{όπου } t_1 = \eta_1 / K_1.$$

Μετά από αρκετό χρόνο, η ιξώδης παραμόρφωση φτάνει ασυμπτωτικά στην τιμή:

$$\sigma_0 \left[\frac{K_1 + K'_1}{K_1 K'_1} \right].$$

Αυτό το μοντέλο της ακαριαίας γραμμικής παραμόρφωσης και με την χρονικά εξαρτώμενη καμπύλη, εξομοιώνει την πρωτογενή ή μεταβατική και τη δευτερογενή ή σταθερή κατάσταση ερπυσμού. Ο τριτογενής ή επιταχυνόμενος ερπυσμός, δεν αναπαρίσταται ικανοποιητικά από κανένα από τα κλασσικά ρεολογικά μοντέλα.

4.5.1γ) Μοντέλο ετερογενούς σώματος



Σχήμα 4.8: Γενικευμένο ρεολογικό μοντέλο Kelvin ετερογενούς άλατος (Jeremic, 1994)

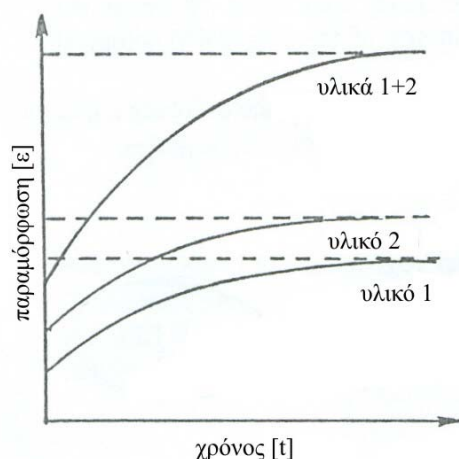
Η πιο απλή υπόθεση βισκοελαστικής συμπεριφοράς ετερογενούς άλατος, δίνεται από δύο βισκοελαστικά μοντέλα στη σειρά. Σε αυτή την περίπτωση κάθε ουσία καταλαμβάνει μια σταθερά ελατηρίου K' , δεμένου σε σειρά με ένα ελατήριο σταθεράς K κι έναν αποσβεστήρα μηχανικών κινήσεων με σταθερά η (σχήμα 4.8).

Η αντίστοιχη ρεολογική εξίσωση του μοντέλου σε σχέση με μια σταθερή τάση σ_0 , είναι: $\sigma_0 = (n_1 d\varepsilon_1/dt) + K_1 \varepsilon_1 = K'_1 \varepsilon'_1 = K'_2 \varepsilon'_2 = n_2 = (d\varepsilon_2/dt) + K_2 \varepsilon_2$,

όπου τα ε_1 και ε_2 είναι οι γραμμικές παραμορφώσεις που αναπτύχθηκαν στα παράλληλα ελατήρια, αντιστοίχως. Έτσι, η συνολική γραμμική παραμόρφωση είναι:

$$\varepsilon = \varepsilon'_1 + \varepsilon_1 + \varepsilon'_2 + \varepsilon_2, \text{ δηλαδή } \varepsilon = \frac{\sigma_0}{K'_1} + \frac{\sigma_0}{K_1} \left(1 - e^{-\frac{K_1 t}{n_1}} \right) + \frac{\sigma_0}{K'_2} + \frac{\sigma_0}{K_2} \left(1 - e^{-\frac{K_2 t}{n_2}} \right)$$

ενώ γενικότερα για n στοιχεία, η συνολική γραμμική παραμόρφωση δίνεται από τη σχέση: $\varepsilon = \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_0}{K'_i} + \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_0}{K_i} \left(1 - e^{-\frac{K_i t}{n_i}} \right)$.



Σχήμα 4.9: Διάφορες παραμορφώσεις σε συνάρτηση με το χρόνο για κάθε υλικό και για το σύνθετο σώμα (Jeremic, 1994)

Στο σχήμα 4.9 φαίνονται οι διαφορές των γραμμικών παραμορφώσεων με την πάροδο του χρόνου για κάθε υλικό και για τον, εν σειρά, συνδυασμό (μονοαξονική παραμόρφωση). Οι δύο καμπύλες υποδεικνύουν ότι η συμπεριφορά των μεμονωμένων βισκοελαστικών υλικών είναι διαφορετική, όταν το ένα είναι ανώτερο από το άλλο.

Θα έπρεπε να σημειωθεί ότι στην τρισδιάστατη περίπτωση αυτή η προσέγγιση

δεν ισχύει και πρέπει να εφαρμοστεί η αρχή της αντιστοιχίας.

Ο ρεολογικός χαρακτηρισμός του αλίτη και της ορυκτής ποτάσας είναι σημαντικός για τον ορθό μεταλλευτικό σχεδιασμό και στα αλατωρυχεία, αφού όταν τα βισκοελαστικά πετρώματα αποτελούν στύλους στήριξης ή/και μέτωπα εξόρυξης, είναι αναγκαίος ο καθορισμός της ρεολογικής τους συμπεριφοράς.

4.5.2. Ιδιότητες ερπυσμού

Στις χρονικά εξαρτώμενες παραμορφώσεις παρατηρείται μεγάλη πολυπλοκότητα και διακύμανση στις ιδιότητες του ερπυσμού, οι οποίες είναι πολύ σημαντικές στο μεταλλευτικό σχεδιασμό και τον εδαφικό έλεγχο.

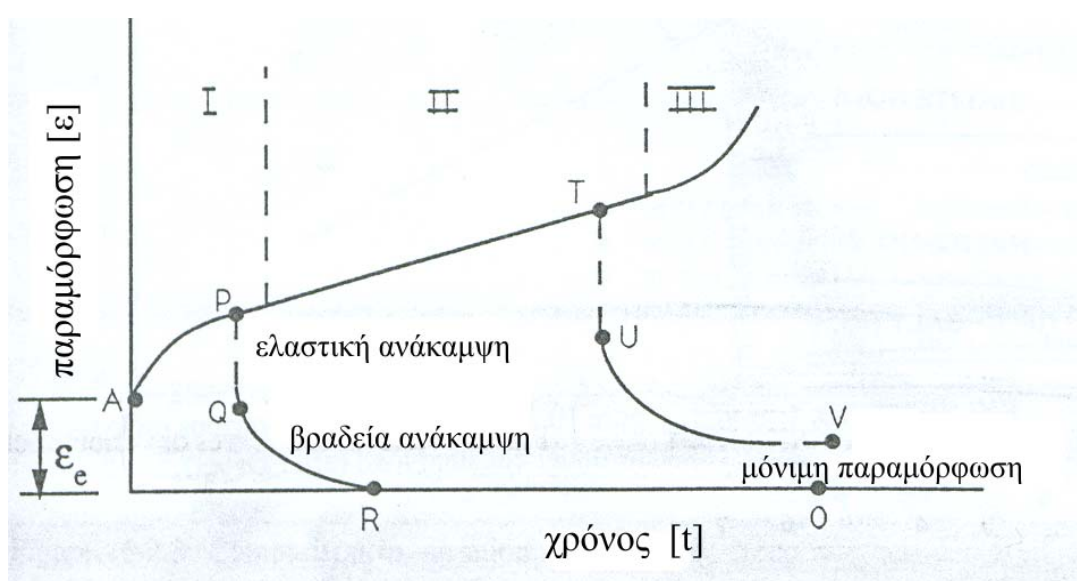
4.5.2α) Η έννοια του ερπυσμού

Ερπυσμός ενός υλικού, καλείται η - χρονικά εξαρτώμενη- παραμόρφωση του, υπό σταθερό φορτίο. Όταν πάνω σ' αυτό το υλικό ασκείται σταθερή δύναμη, του επιφέρει ακαριαία ελαστική παραμόρφωση ϵ_e .

Στο σχήμα 4.10 φαίνεται ένα πέτρωμα, το οποίο υφίσταται σταθερή φόρτιση και εμφανίζει παραμορφώσεις ερπυσμού σε τρεις διαφορετικές φάσεις. Στην περιοχή I, παρουσιάζεται η ελαστική παραμόρφωση που ακολουθείται από μια μεταβατική γραμμική παραμόρφωση (πρωτογενής ερπυσμός). Η περιοχή II, που χαρακτηρίζεται από μια σχεδόν σταθερή κλίση στο διάγραμμα, αντιστοιχεί σε σταθερή κατάσταση ερπυσμού (δευτερογενής), ενώ στην περιοχή III παρουσιάζεται επιταχυνόμενος ερπυσμός (τριτογενής) που οδηγεί σε μάλλον απότομη αστοχία.

Οι εργαστηριακές δοκιμές έδειξαν ότι αν το φορτίο απομακρυνθεί στην περιοχή I (P), η παραμόρφωση θα είναι ελαστική (ϵ_e) ενώ αν το φορτίο απομακρυνθεί στην περιοχή II (T), η παραμόρφωση θα είναι μόνιμη. Οι παραμορφώσεις των αλάτων μετά την απομάκρυνση του φορτίου, έχουν μόνο ακαδημαϊκή σημασία, τόσο επειδή οι υπόγειες τάσεις που εκδηλώνονται κατά τις μεταλλευτικές εργασίες είναι αμετάκλητες όσο κι επειδή ο ερπυσμός κάθε άλατος επηρεάζεται πολύ από την παρουσία σκληρών ή μαλακών ορυκτών προσμίξεων.

Η θραύση και η ροή εμφανίζονται στο σάγμα γύρω από τις κορυφές και τέτοια φαινόμενα δεν παρατηρούνται κοντά στα επίπεδα κοιτάσματα. Με την πάροδο των γεωλογικών περιόδων όμως, η διόγκωση του σάγματος θα μπορούσε να οδηγήσει στη θραύση των αλάτων (π.χ.: ανυδρίτης) και άλλων νεότερων πετρωμάτων. Η πραγματοποίηση δοκιμών ερπυσμού σε διάφορα άλατα, οδήγησε στο συμπέρασμα ότι, υπό σταθερή αξονική φόρτιση, τα αρχαιότερα άλατα έχουν μεγαλύτερη αντοχή λόγω της παραμόρφωσης κράτυνσης και υψηλότερη περιεκτικότητα σε ανυδρίτη, ενώ η χονδρόκοκκη κρυσταλλική δομή και η μικρότερη περιεκτικότητα σε παραγενέσεις σκληρών ορυκτών εκδηλώνουν μεγαλύτερη ολκιμότητα.



Σχήμα 4.10: Πρότυπο παραμόρφωσης ερπυσμού σε συνάρτηση με το χρόνο (Jeremic, 1994)

Η χρονικά εξαρτώμενη παραμόρφωση των αλάτων, υπό σταθερό φορτίο, είναι βισκοελαστικό φαινόμενο και κατά τη εκμετάλλευσή τους, τα κριτήρια παραμόρφωσης προέχουν των κριτηρίων αντοχής, επειδή συνήθως η αστοχία των περισσοτέρων αλατούχων στύλων, εμφανίζεται κατά την τριτογενή φάση ερπυσμού, εξ' αιτίας, του σταθερού εφαρμοζόμενου φορτίου.

Οι εργαστηριακές δοκιμές που έχουν, κατά καιρούς, πραγματοποιηθεί, έχουν οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι ο ερπυσμός, διαφέρει πολύ μεταξύ των αλάτων ακόμη και αν ανήκουν σε κοιτάσματα της ίδιας, πολύ ευρείας, ζώνης. Οι λόγοι στους οποίους οφείλεται αυτή η απόκλιση δεν είναι σαφείς αν και θεωρείται αρκετά πιθανό να αφορά στις φυσικές διαφορές μεταξύ των δειγμάτων, χωρίς όμως να έχει συσχετιστεί σαφώς με παράγοντες όπως η υφή, η φύση ή ο βαθμός των προσμίξεων.

Αυτή η μεταβλητότητα του ερπυσμού πάντως είναι ιδιαίτερα σημαντική στο μακροπρόθεσμο μεταλλευτικό σχεδιασμό αφού συχνά δοκιμές ερπυσμού, λίγων ημερών, χρησιμοποιούνται στη πρόβλεψη του ρυθμού των παραμορφώσεων για περιόδους εκατοντάδων ετών.

4.5.2β) Ερπυσμός σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία

Πολλά από τα πειράματα που αφορούν στον ερπυσμό των αλάτων σε σχέση με τη θερμοκρασία, πραγματοποιήθηκαν υπό συνθήκες σταθερής τάσης και θερμοκρασίας κι έδειξαν ότι για υψηλές τάσεις, η διαταραχή ολίσθησης μπορεί να επιφέρει παραμόρφωση, ενώ για υψηλές θερμοκρασίες, εμφανίζεται διαταραχή εφίπνευσης. Τα όρια μεταξύ των μηχανισμών είναι εκεί όπου οι δύο διαδικασίες συμβάλλουν ισοδύναμα στην παραμόρφωση.

Οι δοκιμές που πραγματοποίησαν οι Vouille et al. (1984) σε αλατούχα πετρώματα (Jeremic, 1994), σε σχέση με την επίδραση της θερμοκρασίας, της πλευρικής και της αποκλίνουσας τάσης, κατέληξαν ότι ο ρυθμός ερπυσμού μειώνεται με το χρόνο και ότι η αρχική του τιμή είναι πρακτικά απεριόριστη. Ακόμη έδειξαν ότι για δεδομένη θερμοκρασία και πλευρική τάση, οι παραμορφώσεις ερπυσμού και οι ρυθμοί του αυξάνονται με την αποκλίνουσα τάση, ενώ για δεδομένη τάση, αυξάνονται με τη θερμοκρασία.

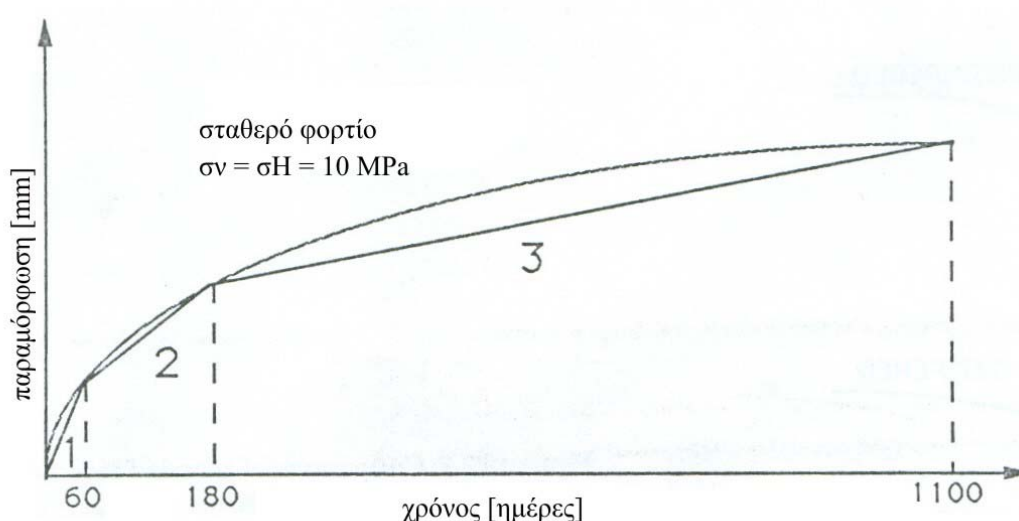
Τέλος, η επίδραση της πλευρικής τάσης είναι περισσότερο πολύπλοκη αφού σε χαμηλές θερμοκρασίες και για δεδομένη αποκλίνουσα τάση, οι παραμορφώσεις ερπυσμού και οι ρυθμοί του στις μονοαξονικές δοκιμές, είναι μεγαλύτεροι από τις τριαξονικές δοκιμές. Σε μεγαλύτερες θερμοκρασίες παρατηρείται το αντίθετο, ενώ για ακόμη μεγαλύτερες εξαρτάται από την τάση.

Η επίδραση της θερμοκρασίας στις ιδιότητες του ερπυσμού και τη συμπεριφορά του, είναι σημαντική και δεν μπορεί να αγνοηθεί σε συνθήκες μεταλλευτικού σχεδιασμού κι εδαφικού ελέγχου, ειδικά στην περίπτωση αλάτων που βρίσκονται σε μεγάλο βάθος και πρόκειται να χρησιμοποιηθούν ως αποθήκες χημικών κι πυρηνικών αποβλήτων.

4.5.2γ) Ερπυσμός γύρω από κυκλικά ανοίγματα

Η ταχύτητα των χρονικά, εξαρτώμενων παραμορφώσεων των αλάτων γύρω από κυκλικά ανοίγματα, τα όποια είχαν ανοιχθεί χωρίς ανατίναξη και οι επιφάνειες τους ήταν λείες και βρίσκονταν υπό υδροστατική πίεση, υπολογίστηκε με γραμμική παρεμβολή (σχήμα 4.11), μετά από διασκόπηση διατρημάτων ακτινωτής διάταξης σε βάθος 500 m (Jeremic, 1994). Ο υπολογισμός αυτός έδειξε έναν πολύπλοκο μηχανισμό μετατόπισης του εδάφους, η οποία με το χρόνο μετατράπηκε σε παραμόρφωση ερπυσμού.

Κατά την πρώτη φάση της παρατήρησης, (0-60 μέρες), η μέγιστη παραμόρφωση έλαβε χώρα στο δάπεδο του μεταλλευτικού ανοίγματος. Αυτό σημαίνει ότι αμέσως μετά την εκσκαφή, ο ερπυσμός ολοκληρώνεται με παραμορφώσεις εκτόνωσης, κατευθυνόμενες από τις δομικές ιδιαιτερότητες της μάζας του πετρώματος. Κατά τη δεύτερη φάση της παρατήρησης (60-180 μέρες), εκδηλώθηκε ερπυσμός γύρω από τα ανοίγματα, έως ένα βαθμό, λόγω των υπολοίπων δομικών τάσεων που ενήργησαν πολύ έντονα στην πρώτη φάση της παραμόρφωσης. Κατά την τρίτη φάση της παρατήρησης (180-1100 μέρες) που είχε πολύ μεγάλη διάρκεια, η συμμετρική κατανομή των παραμορφώσεων υπέδειξε ότι η εξάρθρωση λόγω των δομικών τάσεων και της ετερογένειας της μάζας του πετρώματος, έχει αφομοιωθεί από τον ερπυσμό.



Σχήμα 4.11: Γενική καμπύλη ερπυσμού αλάτων με γραμμική παρεμβολή (Jeremic, 1994)

Η μέγιστη παραμόρφωση ερπυσμού ήταν στην οροφή του ανοίγματος του μεταλλείου και η ελάχιστη στο δάπεδο του, συμπέρασμα πολύ σημαντικό για τη σταθερότητα του μεταλλείου.

Τα πτυχωμένα εβαποριτικά κοιτάσματα, η ετερογένεια, η πολυπλοκότητα των πρωτογενών τάσεων και οι δομικές ιδιαιτερότητες είναι τελικά σημαντικοί παράγοντες για την ευστάθεια ανοιγμάτων, μικρής διάρκειας (πάνω από 6 μήνες) ενώ για μεγάλης διάρκειας, ανοίγματα, είναι πολύ σημαντικές οι ιδιότητες ερπυσμού του άλατος.

4.5.3 Μηχανισμός ερπυσμού

Το αλάτι είναι το ιδανικότερο υλικό για τη μελέτη του φαινομένου του ερπυσμού, επειδή η δομή των κρυστάλλων και των κόκκων τους, είναι σχετικά απλές και ο ερπυσμός και η πλαστικότητα αποδίδονται πολύ καλά. Ο μηχανισμός παραμόρφωσης των αλάτων, κατευθύνεται από τις μετατοπίσεις μέσα στα όρια του κρυστάλλου και του κόκκου και θα μπορούσε να εμφανιστεί με διαταραχή ολίσθησης, διαταραχή εφίπλευσης, διάχυση ερπυσμού (αργός ερπυσμός) και ολίσθηση των ορίων των κόκκων.

4.5.3α) Διαταραχή ολίσθησης

Η διαταραχή ολίσθησης κυριαρχεί σε υψηλές τάσεις και σχετικά χαμηλές θερμοκρασίες. Η παραμόρφωση είναι το αποτέλεσμα των μετατοπίσεων που επιδρούν στους κόκκους των κρυστάλλων, εμποδίζοντας ο ένας τον άλλο, έτσι ώστε, να αυξάνει η κρυστάλλωση, η αντοχή αλλά και η πυκνότητα της διαταραχής. Η μείωση της παραμορφωσιμότητας αντιστοιχεί στον πρωτογενή ερπυσμό. Η παραμόρφωση δεν σταματά εντελώς με την ανάκαμψη, η οποία διακρίνεται σε δύο κατηγορίες:

1. Η στατική ανάκαμψη που εξαρτάται από την εσωτερική τάση ανάλογα με τον αριθμό των παραμορφώσεων και τη θερμοκρασία.
2. Η δυναμική ανάκτηση που εξαρτάται από την εξωτερική τάση και τη θερμοκρασία και είναι πιο σημαντική.

4.5.3β) Διαταραχή εφίπλευσης

Η διαταραχή εφίπλευσης αποτελεί έναν πιο σημαντικό μηχανισμό παραμόρφωσης. Όταν η περιοχή διαταραχής ολίσθησης έχει σταθερή θερμοκρασία και η τάση μειώνεται κάτω από τα 16 MPa, τότε κυριαρχούν οι διαταραχές εφίπλευσης, οι οποίες είναι θερμικά ενεργοποιημένες έξω από τα επίπεδα ολίσθησης και μπορούν περαιτέρω να επιδράσουν.

Τα στάδια διαταραχής ευθυγραμμίζονται στη βάση της αλληλεπίδρασης τους (έλξη των δίπολων) και σχηματίζουν όρια κόκκων, μικρών γωνιών. Με αυτόν τον τρόπο οι υποκόκκοι μεγέθους από 10-100 μm θα αυξηθούν. Οι υποκόκκοι που αυξάνονται κατά το δευτερογενή ερπυσμό, παρουσιάζουν πολύ μικρή ή καθόλου τάση να παραμορφώσουν ή να αλλάξουν το μέγεθος τους, άσχετα από το μέγεθος της παραμόρφωσης. Για αυτό υπάρχει μια δυναμική εξισορρόπηση μεταξύ σχηματισμού και καταστροφής των ορίων των υποκόκκων. Η βαθμιαία εξισορρόπηση της στατικής πυκνότητας των υποκόκκων ή του μέσου όρου της στατικής πυκνότητας των διαταραχών, αντιστοιχεί στο πρωτεύον εύρος της καμπύλης ερπυσμού.

Ο μηχανισμός της διαταραχής εφίπλευσης εξαρτάται πάρα πολύ από τη θερμοκρασία αν και εικάζεται ότι για θερμοκρασίες κάτω των 100° C, ο μηχανισμός δεν επηρεάζεται.

4.5.3γ) Ερπυσμός διάχυσης

Όταν ο ρυθμός παραμόρφωσης μειώνεται, κυριαρχεί ο ερπυσμός διάχυσης, ο οποίος κατά κάποιους ερευνητές δεν εμφανίζεται για υψηλές θερμοκρασίες. Σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα, ο ερπυσμός διάχυσης, σε συνάρτηση με τη θερμοκρασία, θα μπορούσε να εμφανιστεί για τιμές τάσεως μεταξύ 0.1 και 0.5 MPa.

Η άποψη των Nabaro-Herring (Jeremic, 1994), η οποία αφορά μεταφορά κι εναπόθεση ατόμου στο ελεύθερο διάστημα των μονών κρυστάλλων ή των κρυσταλλικών ορίων, ο ερπυσμός διάχυσης, δίνεται από τον παρακάτω νόμο:

$$\dot{\epsilon} = (D_s \Omega \sigma / k T) L_k^{-2}$$

όπου:

D_s = συντελεστής αυτό-διάχυσης

Ω = ατομικός όγκος

K = σταθερά του Boltzmann

L_k = διάμετρος κόκκου

Τα χαρακτηριστικά του ερπυσμού διάχυσης είναι:

- εξαρτάται άμεσα από τη διάμετρο του κόκκου (L_k)
- Η σχέση $\dot{\epsilon}$ -σ δίνει ιξώδη συμπεριφορά
- Η σχέση $\dot{\epsilon}$ - D/T , εξαρτάται άμεσα από τη θερμοκρασία,
- ο παροδικός ερπυσμός δεν εμφανίζεται.

4.5.3δ) Ολίσθηση ορίων των κόκκων

Όταν η μέση διάμετρος του κόκκου είναι σημαντικά μεγαλύτερη από τη μέση απόσταση που διανύεται από τις διαταραχές, τα όρια των κόκκων δεν επηρεάζουν την παραμόρφωση κατά τον ερπυσμό διάχυσης και εφίπλευσης. Κατά την διαταραχή εφίπλευσης οι συνθήκες ικανοποιούνται όταν η διάμετρος των κόκκων είναι μεγαλύτερη από τη διάμετρο των υποκόκκων, τουλάχιστον κατά 0.3 mm.

Σε φυσικά άλατα η διάμετρος του κόκκου είναι συνήθως γύρω στο 1 cm, οπότε η παραπάνω προϋπόθεση ικανοποιείται πλήρως. Κατά τον ερπυσμό διαταραχής, η μέση διανυμένη απόσταση διαταραχής είναι ακόμη σημαντικά μικρότερη κι έτσι, τα όρια των κόκκων δεν επηρεάζονται καθόλου.

Σε θερμοκρασίες πολύ υψηλές, ο νόμος παραμόρφωσης μοιάζει πολύ με εκείνον του ερπυσμού διάχυσης:

$$\dot{\epsilon} = D_v * \sigma / L_k.$$

Επίσης ο συντελεστής διάχυσης, παίζει σημαντικό ρόλο επειδή δεν είναι δυνατή η αποφυγή των ογκομετρικών αλλαγών εξ' αιτίας παραγόντων, συμβατών με την ολίσθηση των κόκκων.

Η δομή των κόκκων των παραμορφωμένων και μη παραμορφωμένων αλάτων εξετάστηκε από το περιθλασίμετρο ακτίνων-X, με σκοπό την κατανόηση των αλλαγών της δομής και του μηχανισμού παραμόρφωσης (Jeremic, 1994). Η εξέταση έδειξε μια ξεκάθαρη διάταξη των επιφανειών, οι οποίες σχετίζονται στενά και είναι συμμετρικές στη συμμετρία των επιφανειών της εξωτερικής τάσης. Ακόμη αποδείχθηκε ότι οι πλαστικές παραμορφώσεις στο εύρος μεταξύ 20° C και 200° C, εμφανίζονται κυρίως με την ολίσθηση μετατόπισης για τα επίπεδα 110 και ελάχιστα για τα επίπεδα 100.

Η μελέτη του μηχανισμού ερπυσμού δίδεται από ακαδημαϊκής απόψεως, η οποία μπορεί να βοηθήσει στην καλύτερη κατανόηση της μηχανικής συμπεριφοράς των αλάτων, τα οποία εξαρτώνται έντονα από το χρόνο και το μοντέλο τους.

4.5.4 Ερπυσμός θραύσης

Η συμπεριφορά της φόρτισης, μεγάλης χρονικής διάρκειας της αλατούχου δομής, έχει ιδιαίτερη σημασία, επειδή οι ιδιότητες των διαδικασιών των αλατούχων υλικών, είναι έντονα χρονικά εξαρτώμενες. Η μεγάλης διάρκειας σταθερότητα της αλατούχου δομής, υπαγορεύεται από ειδικές συνθήκες εκμετάλλευσης ή από εκτεταμένη χρήση των υπογείων ως αποθήκη.

Τις τελευταίες 2-3 δεκαετίες έχουν καταβληθεί σημαντικές προσπάθειες για κατανόηση της συμπεριφοράς των αλάτων υπό μηχανικά και θερμικά φορτία, ως ιξώδους υλικού, καθώς και για τον ποσοτικό προσδιορισμό της μακροχρόνιας συμπεριφοράς της αλατούχου δομής και της πιθανότητας θραύσης.

4.5.4α) Παραμόρφωση ερπυσμού και θραύσης

Ο Langer (Jeremic,1994) περιγράφει ένα μοντέλο παραμόρφωσης ερπυσμού και θραύσης με βάση εργαστηριακές δοκιμές και φαινομενολογικές παρατηρήσεις:

Παραμόρφωση ερπυσμού: η μη αναστρέψιμη αλλαγή του σχήματος μοντελοποιείται ως εξής:

Η διαφοροποίηση στην τάση οδηγεί αρχικά σε μεταβατικό ερπυσμό (πρωτογενής ερπυσμός), δηλαδή αλλαγή του σχήματος με το ρυθμό παραμόρφωσης να μειώνεται με το χρόνο. Με σταθερή αποκλίνουσα τάση και σταθερή θερμοκρασία επιτυγχάνεται μια στατική κατάσταση ταχύτητας παραμόρφωσης(δευτερογενής ερπυσμός), σε μια ευκρινώς μεγάλη διαφορά τάσης. Ο ρυθμός ερπυσμού είναι μια ποσοστιαία λειτουργία της αποκλίνουσας τάσης και θερμοκρασίας.

Σε σταθερή θερμοκρασία επιτυγχάνεται μια αντίστροφη σχέση μεταξύ τάσης και παραμόρφωσης. Μια συγκεκριμένη σταθερή κατάσταση αποκλίνουσας τάσης, οδηγεί σε στατικό ρυθμό παραμόρφωσης και αντίστροφα, ένας σταθερός ρυθμός συνθηκών παραμόρφωσης θα προκαλέσει το αντίστοιχο επίπεδο αποκλίνουσας τάσης. Το μέγεθος του ρυθμού παραμόρφωσης του σχήματος, εξαρτάται γενικά από

το υλικό ή τη δομή της παραμέτρου και από το μέγεθος της αποκλίνουσας τάσης και της θερμοκρασίας των μεταβολών τους με το χρόνο.

Οι συνθήκες ιστροπικής τάσης δεν ασκούν καμία επίδραση στις παραμορφώσεις ερπυσμού. Με κάθε μεταβολή στην τάση και τη θερμοκρασία, εμφανίζονται οι αναστρέψιμες (ελαστικές) παραμορφώσεις, οι οποίες φαίνεται να είναι ανεξάρτητες από τη συγκεκριμένη τάση και το επίπεδο θερμοκρασίας.

Παραμόρφωση θραύσης: οι μη αναστρέψιμες αλλαγές του μεγέθους ανεξάρτητα από την ταχύτητα με διακριτικά κατανεμημένα επίπεδα θραύσης και διαστολής. Υπό μονότονη τάση, η θραύση εμφανίζεται όταν οι μεταβλητές της κατάστασης τάσης, ο ρυθμός ερπυσμού και η θερμοκρασία φτάνουν σε μια συγκεκριμένη μορφή, ανεξάρτητα από το είδος της τάσης, ή μια συγκεκριμένη ακολουθία τάσεων.

Η αντίσταση στη θραύση αυξάνει με την αύξηση της ιστροπικής πίεσης και φτάνει υψηλότερες τιμές ακόμη και με αύξηση του ρυθμού της τάσης. Η αντοχή μειώνεται σε υψηλότερες θερμοκρασίες ενώ οι τάσεις εφελκυσμού και θλίψης οδηγούν σε διαφορετικές τιμές αντοχής.

Υπό μονοαξονική φόρτιση, το αλάτι έχει σαφώς ανισότροπη αντοχή και η αύξηση της ιστροπικής πίεσης μειώνει κατά πολύ την ανισοτροπία της αντοχής, δεδομένου ότι αν και περιορισμένη, διατηρείται στην παραμόρφωση της θραύσης. Υπό μόνιμη ιστροπική πίεση και θερμοκρασία η αντίσταση στη θραύση εξαρτάται από το πεδίο τάσεων (μέση κύρια κανονική τάση). Η επίδραση της διαδρομής της τάσης και της ιστροπικής τάσης εξαφανίζεται σε υψηλότερες θερμοκρασίες.

Σύμφωνα με αυτές τις φαινομενολογικές παρατηρήσεις, διατυπώνεται το ακόλουθο μοντέλο που βασίζεται στην κατανομή της συνολικής παραμόρφωσης σε 3 μέρη:

$$\varepsilon = \varepsilon_e + \varepsilon_{cr} + \varepsilon_f ,$$

όπου:

ε = συνολική παραμόρφωση

ε_e = αναστρέψιμη (ελαστική) παραμόρφωση

ε_{cr} = μη αναστρέψιμη παραμόρφωση ερπυσμού (βισκοελαστική)

ε_f = παραμόρφωση μη αναστρέψιμης θραύσης (πλαστική)

Αυτά τα κριτήρια παραμόρφωσης ερπυσμού και παραμόρφωσης θραύσης επηρεάζονται από έναν αριθμό φυσικών και τεχνητών παραγόντων και θα έπρεπε να μελετηθούν σε συνδυασμό με παράγοντες γεωλογικής δομής και παράγοντες βραχομηχανικής και εκμετάλλευσης.

4.5.4β) Πολυαξονική θραύση ερπυσμού

Η πολυαξονική θραύση ερπυσμού ερευνήθηκε και εκτιμήθηκε για πρώτη φορά από τους Nair και Singh (Jeremic,1994), οι οποίοι υπέθεσαν πως η διαφορά της μέγιστης κύριας τάσης είναι η ελεγχόμενη τάση και ότι η έναρξη της θραύσης ερπυσμού σχετίζεται κυρίως με την εμφάνιση τάσης εφελκυσμού. Τέτοιες συνθήκες παραμόρφωσης δεν σχετίζονται απαραίτητα με την τάση εφελκυσμού, αλλά σε συνδυασμό με τις επί τόπου συνθήκες μπορούν να εμφανιστούν και υπό καταπόνηση τριαξονικής φόρτισης.

Οι δοκιμές θραύσης ερπυσμού υπέδειξαν γραμμική σχέση μεταξύ της διαφοράς τάσης ($\sigma_1 - \sigma_3$) και του χρόνου αστοχίας. Η καμπύλη που προέκυψε από το πείραμα αφορά χρονική διάρκεια από 7 - 1000 h, που σημαίνει ότι μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για πολύ μικρές δοκιμές, όπου κατά πάσα πιθανότητα δεν λαμβάνει χώρα τριτογενείς ερπυσμός. Η ενεργή τάση κυμαίνεται μεταξύ 36.5 Mpa και 66.9 Mpa.

Οι Nair και Singh θεωρούν ότι η επίδραση της μέσης τάσης δεν είναι σημαντική ενώ οι Rokahr και Standmeister (Jeremic,1994) με βάση τα αποτελέσματα των δικών τους δοκιμών, συμπέραναν ότι ο χρόνος θραύσης ερπυσμού μπορεί να διαφέρει για ίδια διαφορά κύριας τάσης αλλά διαφορετικά συστατικά ισοτροπικής τάσης.

Αυτό το φαινόμενο είναι ιδιαίτερα σημαντικό στην περίπτωση της μελέτης της βραχομηχανικής, εξ' αιτίας της γειτνίασης των υπόγειων ανοιγμάτων, όπου οι συνθήκες τρισδιάστατης τάσης, μπορούν να εμφανιστούν με διάφορα ισοτοπικά και αποκλίνοντα συστατικά. Αυτό σημαίνει πως αν αγνοηθεί η επίδραση των συστατικών της ισοτροπικής τάσης στην συμπεριφορά του ερπυσμού, ο χρόνος αστοχίας μπορεί να υποτιμηθεί.

Στα πλαίσια των εργασιών των θεωρητικών και πειραματικών ερευνών, οι Menzel και Schreiner (Jeremic,1994) διατύπωσαν ένα κριτήριο θραύσης ερπυσμού που βασίζεται στη μελέτη της ενέργειας που εμπλέκεται. Βασίζεται στην υπόθεση ότι

η συνολική ενέργεια που απαιτείται σε μια σύντομη δοκιμή ως το σημείο του χρόνου στον οποίο το δείγμα αστοχεί, είναι ίδια με την απαιτούμενη ενέργεια για την πλαστική παραμόρφωση σε μια δοκιμή ερπυσμού ως το χρονικό σημείο έναρξης αστοχίας του ερπυσμού.

Ενώ σε δοκιμές σύντομης διάρκειας με αύξηση του σταθερού φορτίου, η ενεργή τάση σ_{eff} , αυξάνεται σταθερά μέχρι το σημείο αστοχίας, σε δοκιμές ερπυσμού εφαρμόζεται σταθερή ενεργή τάση, για όλη τη διάρκεια της δοκιμής. Το κριτήριο θραύσης ερπυσμού κατά τους Menzel και Schreiner εκφράζεται από την εξίσωση νόμου του υλικού:

$$\varepsilon_v = K n \sigma_{\text{eff}} t^{m-1},$$

όπου:

ε_v = ιξώδης παραμόρφωση

$K = 2.31 \cdot 10^{-6} \text{ MPa}^{-25} \text{ d}^{0.258}$

$n = 2.5$

$m = 0,258$

Η ιξώδης παραμόρφωση κι ο ρυθμός παραμόρφωσης καταγράφονται κατά την εργαστηριακή δοκιμή και τα αποτελέσματα από το νόμο των υλικών θα μπορούσαν να παρουσιαστούν με μια κατάλληλη καμπύλη.

4.5.4γ) Θραύση ερπυσμού

Οι Rokahr και Standmeister (Jeremic,1994) πραγματοποίησαν δοκιμές ερπυσμού για τα αλατούχα κοιτάσματα Asse και Erslev, σε συνθήκες τριαξονικής επέκτασης και χρονική διάρκεια από λίγες ώρες ως περίπου 500 ώρες.

Από τα αποτελέσματα των δοκιμών κατασκεύασαν γραφικές παραστάσεις στις οποίες είναι αξιοσημείωτες οι πολύ μεγάλες παραμορφώσεις αστοχίας. Ακόμη και υπό συνθήκες έμμεσης τάσης εφελκυσμού, εμφάνισαν τιμές περισσότερο από 20% της φυσικής λογαριθμικής παραμόρφωσης. Ορατή είναι επίσης και η αξιολογή επίδραση των συστατικών της ισοτροπικής τάσης στο χρόνο αστοχίας (t_B) καθώς και η αντίστοιχη μέγιστη παραμόρφωση.

Οι μελετητές παρουσίασαν την εξέλιξη των λίγων αποτελεσμάτων των θραύσεων ερπυσμού σε διπλή λογαριθμική κλίμακα υποδεικνύοντας τη σχέση μεταξύ του χρόνου αστοχίας (t_B) και του λόγου σ_3 / σ_1 και τη διαφορά τάσεων $\Delta\sigma = |\sigma_1 - \sigma_3|$. Τα σχήματα αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν μόνο ως ένδειξη της φαινομενολογικής περιγραφής της συμπεριφοράς της θραύσης ερπυσμού του άλατος.

Στην πραγματικότητα, είναι απαραίτητες περισσότερες δοκιμές, ειδικά σε ότι αφορά στην εξάρτηση του χρόνου αστοχίας και της διαφοράς τάσης $|\sigma_1 - \sigma_3|$ και των μικρότερων τιμών $\Delta\sigma$, αλλά και επιπλέον έρευνα των ορίων ισχύος των ορίων αυτών των διαγραμμάτων. Στην πράξη, ικανοποιητική περιγραφή της συμπεριφοράς της θραύσης ερπυσμού του άλατος για κάποια συγκεκριμένη τοποθεσία γίνεται με 9-12 δοκιμές θραύσης ερπυσμού, για διάφορες τάσεις και αναλογίες σ_3 / σ_1 .

Τα διαγράμματα θραύσης ερπυσμού επιτρέπουν την κατασκευή μοντέλου Mohr το οποίο περιγράφει την αντοχή του υλικού με βάση το χρόνο. Ο φάκελος Mohr για αλατούχα δείγματα των κοιτασμάτων Asse έδειξε ότι το επίπεδο τάσης πάνω από αυτό το χρονικό διάστημα δεν υπερβαίνει κατά προσέγγιση το 40-50% της αντοχής μικρής διάρκειας.

4.6. Οι εργαστηριακές δοκιμές σε δείγματα της αίθουσας κονσέρτων

Όταν η εταιρία ERCOSPLAN Ingenieurgesellschaft, Geotechnik und Bergbau mbH, ανέλαβε το σχεδιασμό και την κατασκευή της αίθουσας κονσέρτων, ανέθεσε στην εταιρία IfG GmbH, τη διεκπεραίωση της βραχομηχανικής μελέτης για την εκτίμηση της κατάστασης του χώρου στον οποίο επρόκειτο να τοποθετηθεί το έργο. Για τη διεκπεραίωση της μελέτης αυτής, πραγματοποιήθηκε λήψη πυρήνων από την περιοχή στην οποία επρόκειτο να κατασκευαστεί το έργο και στη συνέχεια ακολούθησε μια σειρά εργαστηριακών δοκιμών πάνω στα δοκίμια που παρασκευάστηκαν από τους πυρήνες αυτούς.

4.6.1. Βραχομηχανικές εργαστηριακές δοκιμές

4.6.1α) Λήψη πυρήνων

Οι πυρήνες που χρησιμοποιήθηκαν για την εκτέλεση των δοκιμών, ήταν διαμέτρου 96 mm και ανακτήθηκαν από το συνεργείο της εταιρίας GSES. Η διάτρηση έγινε επί της διεθυντικής στοάς 13, στο σημείο όπου αργότερα τοποθετήθηκε η πλαϊνή είσοδος της αίθουσας κονσέρτων. Η ακριβής θέση διάτρησης φαίνεται στο σχήμα 4.18.

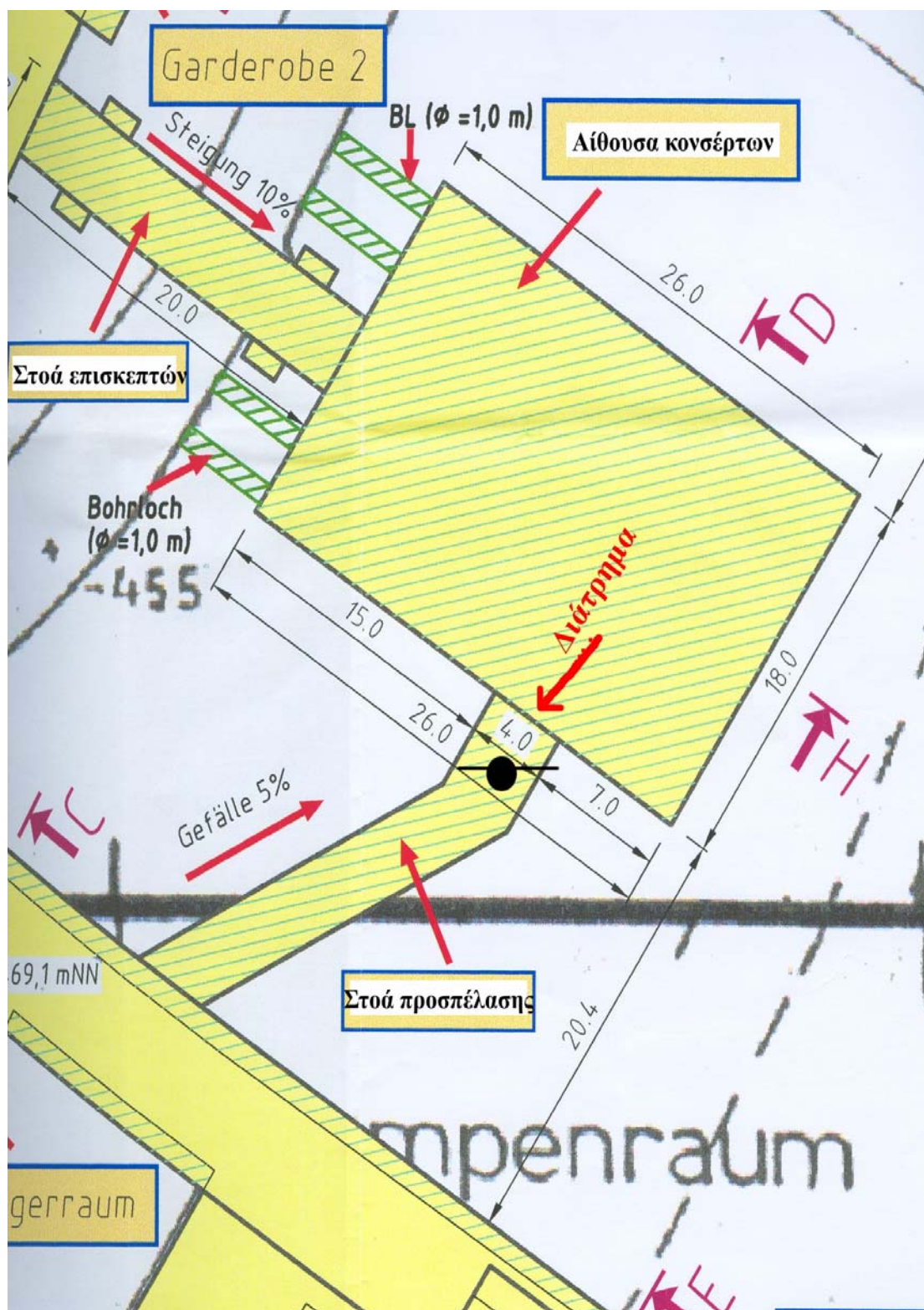
Από τους πυρήνες που ελήφθησαν από βάθος διάτρησης μεταξύ 3m και 7m (περίπου από την οροφή της αίθουσας κονσέρτων), το συνεργείο παρασκευής δοκιμών της IfG, παρασκεύασε δοκίμια διαμέτρου 90 mm και ύψους 180 mm.

4.6.1β) Ορυκτολογικά χαρακτηριστικά των πυρήνων

Οι πυρήνες είχαν χρώμα σκούρο λευκογκρί και η ανάλυση τους από την εταιρία KUTEC, έδειξε περιεκτικότητα 99,1% σε NaCl. Πετρογενετικά, οι κόκκοι του αλίτη είχαν μέγεθος, κατά πλειοψηφία, από 1 έως 5 mm, ενώ δεν απαντήθηκαν κόκκοι μεγαλύτεροι των 10 mm. Η σχέση ύψους - πλάτους των κόκκων του αλίτη, στις περισσότερες περιπτώσεις ήταν από 2:1 ως 3:1, χωρίς να παρατηρηθούν σχεδόν καθόλου μεγαλύτερες τιμές.

Το κυριότερο σύνδρομο ορυκτό ήταν ο ανυδρίτης, που εμφανίστηκε τόσο διακρυσταλλικός όσο και ενδοκρυσταλλικός, ενώ τα μεγέθη των κόκκων του επικρατούντος επίπεδου πινακοειδούς ανυδρίτη, κυμαίνονταν κυρίως σε επίπεδα τιμών κάτω των 300μm. Αυτές οι στρώσεις καθώς και οι διαμήκεις άξονες των κόκκων του αλίτη, είχαν γωνία κλίσης, ως προς τον άξονα των δοκιμίων, περίπου 60°.

Εκτός από τον ανυδρίτη, ανιχνεύτηκε κι ένας μεγάλος αριθμός σκούρων χρωστικών υλικών. Αυτά τα υλικά ήταν κυρίως διακρυσταλλικά σαν χονδρόκοκκα συσσωματώματα στις -πλούσιες σε ανυδρίτη- στρώσεις, ενώ σπάνια περιέχονταν λεπτόκοκκα, ενδοκρυσταλλικά συσσωματώματα στον αλίτη και τον ανυδρίτη. Στην ύπαρξη αυτών των υλικών οφείλεται, άλλωστε, και το γεγονός ότι στο διαμπερές φως, τα δοκίμια εμφανίζονται κιτρινωπά έως αδιαπέρατα (Εικόνες 4.1, 4.2, 4.3, 4.4).



Σχήμα 4.18: Η ακριβής θέση λήψης των πυρήνων από τη στοά προσπέλασης της αίθουσας κονσέρτων. Κλίμακα 1:250 (GSES, 2000)

4.6.1γ) Φυσικές παράμετροι

Τα δοκίμια φωτογραφήθηκαν και μετρήθηκαν για τον καθορισμό της πυκνότητας του (πίνακας 4.1), η οποία κυμαίνονταν μεταξύ 2.159 g/cm^3 και 2.178 g/cm^3 . Όπου η πυκνότητα του αλίτη ήταν γύρω στα 2.163 g/cm^3 , οφειλόταν στις ανοιχτές σχισμές στα όρια των κόκκων, καθώς επίσης και στην ελάχιστη περιεκτικότητα σε ανυδρίτη.

Ο βαθμός χαλάρωσης των δοκιμίων ελέγχθηκε μέσω διάδοσης υπερήχων. Η διάδοση υπερήχων στα κυλινδρικά δοκίμια, φέρει στην αξονική διεύθυνση, εμφανώς αυξημένους χρόνους διαδρομής σε σύγκριση με τις 2 κάθετες μεταξύ τους ακτινικές διευθύνσεις (πίνακας 4.2). Αυτό σημαίνει ότι κατά την πυρηνοληψία, προκλήθηκε μια σημαντική χαλάρωση του υλικού κατά την αξονική διεύθυνση. Έτσι, οι δυναμικές ελαστικές σταθερές του ακέραιου υλικού, δεν ήταν δυνατόν να υπολογιστούν, ενώ κατά τον υπολογισμό της μέσης τιμής των ταχυτήτων των κυμάτων, δεν ελήφθησαν υπόψη οι τιμές που θεωρούνται ασυνήθιστες για το ορυκτό άλας.

Με τη βοήθεια των αποτελεσμάτων των συγκεκριμένων δοκιμών, κατέστη δυνατός ο πλήρης έλεγχος των πετρομηχανικών παραμέτρων του αλίτη Stassfurt μέσα στο οποίο τοποθετήθηκε η κατασκευή του έργου.

4.6.1δ) Πρόγραμμα δοκιμών

Οι δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν σύμφωνα με το ερευνητικό πρόγραμμα ήταν οι εξής:

1. Δύο μονοαξονικές δοκιμές θλίψης, ως το σημείο αστοχίας, με ενδιάμεση αποφόρτιση, υπολογισμός του συντελεστή E , του συντελεστή καταπόνησης, του λόγου του Poisson και της διαστολής.

2. Τέσσερις τριαξονικές δοκιμές θλίψης μέχρι το σημείο αστοχίας με ενδιάμεση αποφόρτιση, υπολογισμός του συντελεστή E , του συντελεστή καταπόνησης, του λόγου του Poisson και της διαστολής για τις τάσεις μανδύα $\sigma_3 = 1, 2, 5, 10$ και 10.0 MPa .

Επιπροσθέτως, πραγματοποιήθηκε και μια τριαξονική δοκιμή εφελκυσμού στην περιοχή ελάχιστης τάσης ($\sigma_3 = 0.2 \text{ MPa}$), η οποία αντιστοιχεί καλύτερα στην

εκτόνωση της οροφής της αίθουσας κονσέρτων, από ότι οι δοκιμές σε τριαξονική θλίψη. Όλες οι δοκιμές έλαβαν χώρα σε θερμοκρασία δωματίου (22°C) από την υδραυλική συσκευή δοκιμής RBA 2500, προσαρμοσμένη στην παραμόρφωση, με ταχύτητα παραμόρφωσης $\dot{\epsilon}=2,5 \cdot 10^{-5} \text{ S}^{-1}$.

4.6.1ε) Τα αποτελέσματα των εργαστηριακών δοκιμών

Οι ημι-στατικές ελαστικές παράμετροι που ερευνήθηκαν, παρουσιάζονται συγκεντρωμένες στον πίνακα 4.3.

Το σχήμα 4.19, εμφανίζει τη γενική εικόνα των αποτελεσμάτων όλων των δοκιμών αντοχής σε μονοαξονική και τριαξονική θλίψη, με τη μορφή καμπύλης ογκομετρικής παραμόρφωσης -αξονικής παραμόρφωσης του δοκιμίου για τις διάφορες τάσης μανδύα. Οι καμπύλες της ενεργής τάσης και της ογκομετρικής παραμόρφωσης σε συνάρτηση με την αξονική παραμόρφωση του δοκιμίου που προέκυψαν από μονοαξονική και τριαξονική δοκιμή εφελκυσμού παρουσιάζονται στα σχήματα 4.20 και 4.21 αντίστοιχα.

Από αυτή τη συνάθροιση των καμπυλών, αποδίδεται τόσο η εξάρτηση της ευστάθειας (μέγιστη τιμή ενεργής τάσης $\sigma_{\text{eff, M}}$) όσο και τα όρια της διαστολής (ενεργή τάση στο ελάχιστο της ογκομετρικής παραμόρφωσης $\sigma_{\text{eff, Dil}}$) της τάσης του μανδύα. Στο σχήμα 4.22, γίνεται απευθείας σύγκριση των τιμών της ευστάθειας και των ορίων διαστολής που προέκυψαν από τις δοκιμές και εκείνων που υπολογίστηκαν στη γνωμοδότηση (IfG, 1999) της κατάστασης ασφαλείας. Ειδικά για την περιοχή τιμών μεγαλύτερων του 1 MPa, των τάσεων του μανδύα, προκύπτει πολύ καλή σύγκλιση των τιμών. Στον πίνακα 4.4 συνοψίζονται τα σημαντικότερα αποτελέσματα των δοκιμών.

4.6.1ζ) Σύνοψη και συμπεράσματα

Τα αποτελέσματα των δοκιμών για τιμές της τάσεως του μανδύα μεγαλύτερες του 1 MPa, επαληθεύουν σε ικανοποιητικό βαθμό τις υποθέσεις της γνωμοδότησης της κατάστασης ασφαλείας της αίθουσας κονσέρτων, σχετικά με την συμπεριφορά της ευστάθειας και τα όρια της διαστολής. Στην κατώτερη περιοχή των τιμών της τάσης

του μανδύα βρίσκονται οι ευστάθειες μέχρι 20 % κάτω από τις αποδεκτές τιμές. Επειδή η επαλήθευση της ασφάλειας της αίθουσας κονσέρτων με ακριβείς υπολογισμούς ακόμη και στην περιοχή της οροφής, δεν προκύπτει ότι αυτές οι κάπως χαμηλές τιμές οφείλονται στη φθορά του υλικού κατά τη δειγματοληψία.

Η τριαξονική δοκιμή επιμήκυνσης, η οποία αντικατοπτρίζει ρεαλιστικά την κατεύθυνση των τάσεων κατά την απελευθέρωση της οροφής της αίθουσας κονσέρτων, φέρει ξεκάθαρα υψηλότερες ευστάθειες από τις αποδεκτές, έτσι ώστε οι εξηγήσεις που δόθηκαν στη γνωμοδότηση, μπορούν να επαληθευτούν με τις δοκιμές που πραγματοποιήθηκαν.

--

Nr.	Ύψος h (mm)	Διάμετρος d (mm)	Μάζα m (g)	Ποκνότητα ρ (g/cm ³)	Είδος δοκιμής
SDH237/1	180,468	90,195	2492,0	2,161	UC
SDH237/2	180,510	90,375	2500,5	2,159	TC
SDH237/3	180,445	90,295	2500,0	2,164	TC
SDH237/4	180,505	90,258	2498,5	2,163	UC
SDH237/5	180,213	90,362	2501,7	2,165	TC
SDH237/6	180,063	90,233	2495,7	2,167	TC
SDH237/7	180,158	90,320	2491,9	2,159	TC
SDH237/8	164,292	90,243	2288,0	2,177	TE

Πίνακας 4.2: Οι ταχύτητες των υπερήχων όπως προέκυψαν κατά την ανίχνευση του βαθμού χαλάρωσης των δοκιμίων (IfG, 2000).

Nr.	Ποκνότητα ρ (g/cm ³)	VPL [km/s]	VPQ [km/s]	vs [km/s]
SDH237/1	2,161	2,5704	4,1194	1,5748
SDH237/2	2,159	2,5564	4,2221	1,6003
SDH237/3	2,164	2,5555	4,0987	1,5529
SDH237/4	2,163	1,8760	4,1441	1,0368
SDH237/5	2,165	1,9086	3,9237*	1,1523
SDH237/6	2,167	2,2010	4,2403	1,288
SDH237/7	2,159	2,2802	2,7345*	1,2687
SDH237/8	2,177	3,5248	4,4653	1,9721
Μέση τιμή	2,164	2,4341	4,2150	1,4307

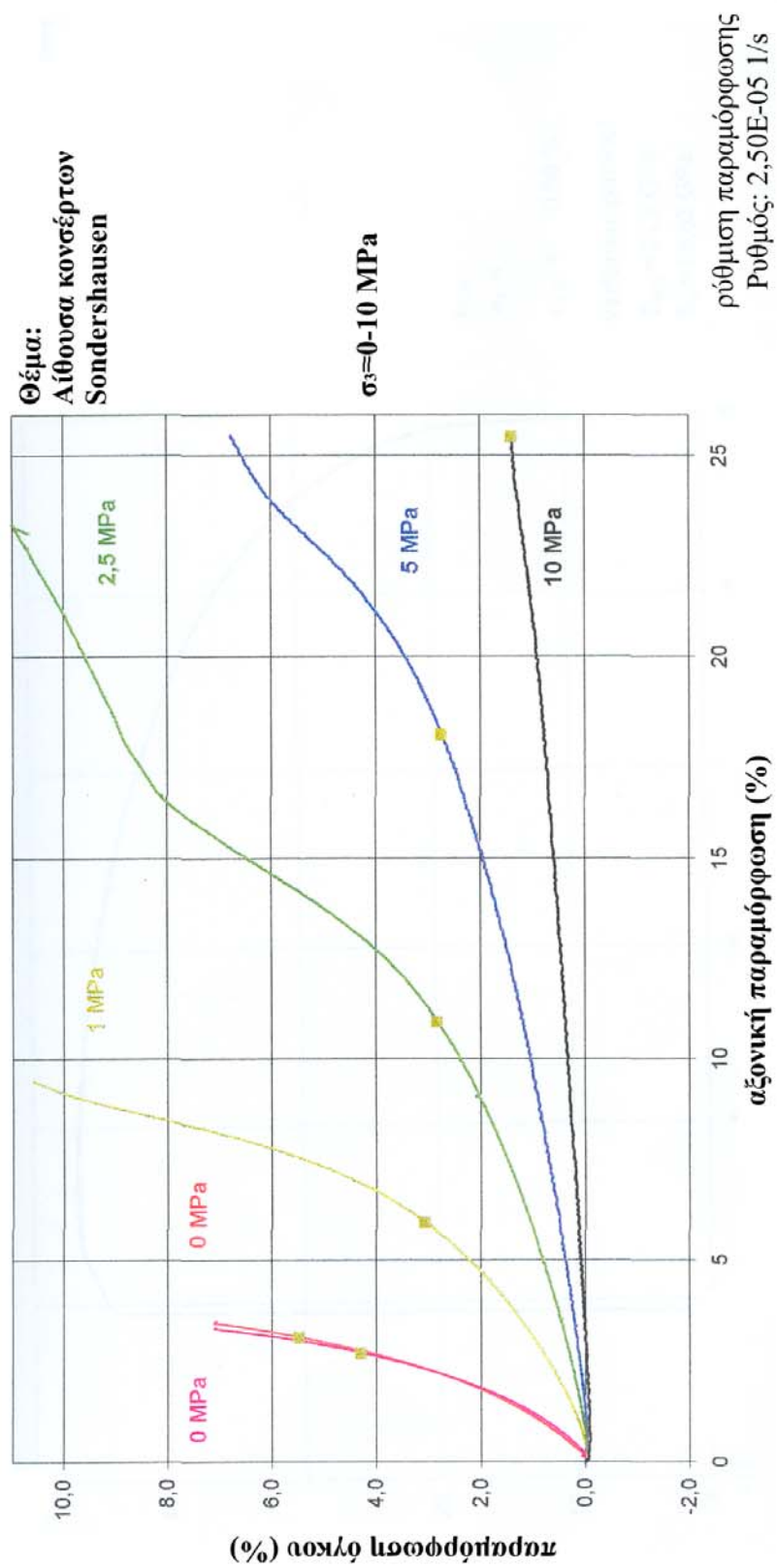
Πίνακας 4.3: Οι τιμές που προέκυψαν από τον υπολογισμό των ελαστικών παραμέτρων (IfG, 2000).

Nr.	K [GPa]	E [GPa]	ν	G [GPa]	E_{ν} [GPa]
SDH237/1	22.9	23.80	0.31	9.1	13.2
SDH237/2	15.8	25.53	0.22	10.3	12.7
SDH237/3	16.9	28.68	0.22	11.8	24.3
SDH237/4	17.6	24.28	0.27	9.6	14.1
SDH237/5	16.3	29.47	0.20	12.3	27.8
SDH237/6	16.2	28.99	0.20	12.1	18.5
SDH237/7	16.0	29.36	0.19	12.3	27.3
SDH237/8	15.4	28.00	0.19	11.8	28.6
Μέση τιμή	17.1	27.26	0.22	11.2	20.8
συν/πλυν	2.4	2.35	0.04	1.3	6.9

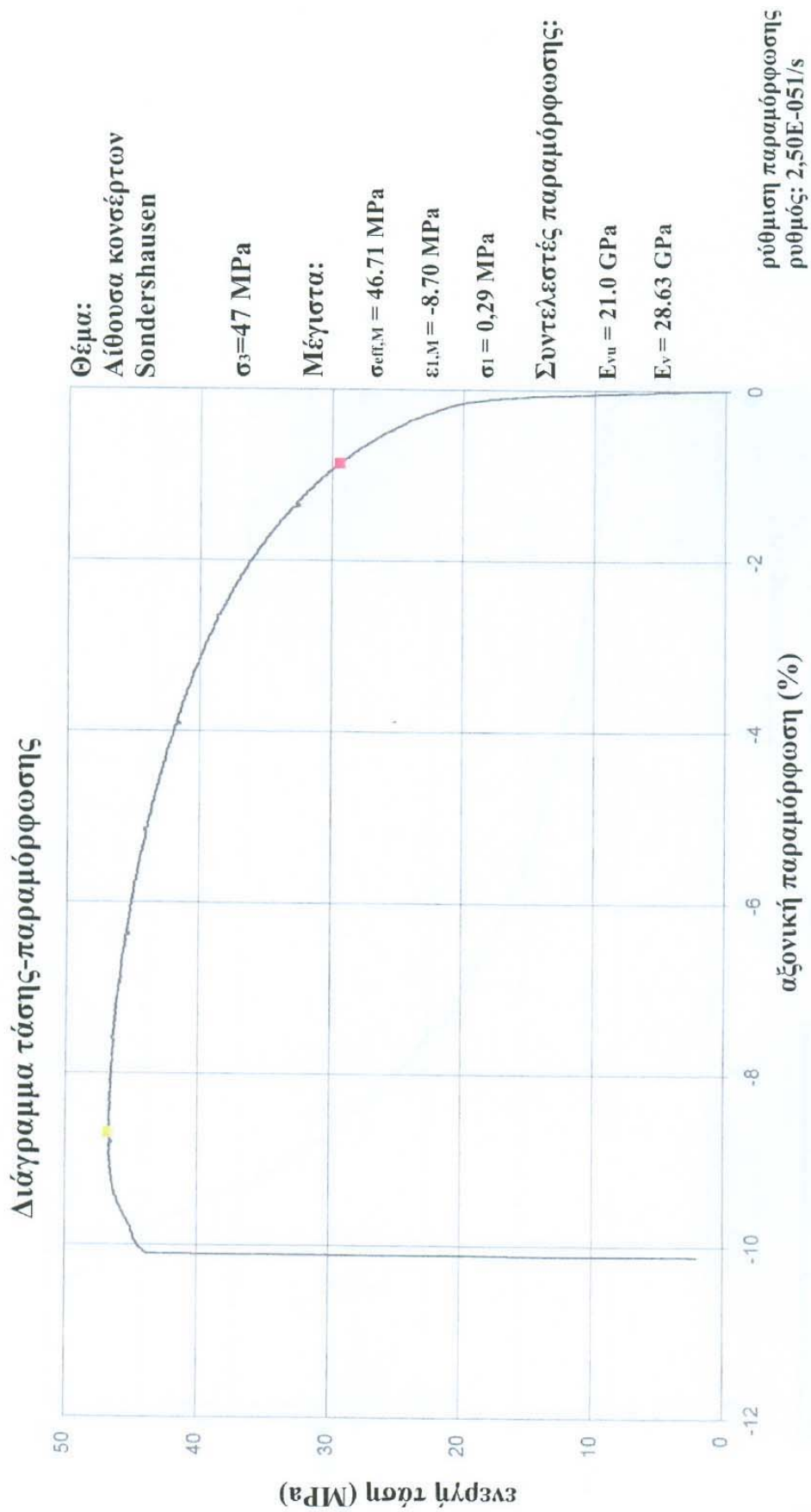
Πίνακας 4.4: Τα αποτελέσματα των δοκιμών θλίψης: ενεργή τάση, παραμόρφωση (IfG, 2000).

Nr.	σ_3 [MPa]	σ_{eff}, M [MPa]	ε_1, M [MPa]	$(\Delta V/V)$ Min	ε_{Min} [%]	$\sigma_{\text{eff}, \text{Min}}$ [MPa]	ε_1 για $(\Delta V/V)=0$ [%]
SDH237/ 1	0,0	26,91	3,10	-0,057	0,094	11,75	0,19
SDH237/ 2	1,0	33,39	5,95	-0,059	0,144	13,55	-
SDH237/ 3	1,0	34,95	5,95	-0,051	0,136	14,58	0,50
SDH237/ 4	0,0	26,67	2,71	-0,051	0,103	13,42	0,20
SDH237/ 5	5,0	53,42	18,07	-0,064	0,356	21,52	1,31
SDH237/ 6	2,5	44,99	10,94	-0,067	0,142	16,84	0,86
SDH237/ 7	10,0	61,26	25,47	-0,092	0,554	24,07	3,10
SDH237/ 8	46,7	46,71	-8,70			29,24	

Διαγράμματα διαστολής

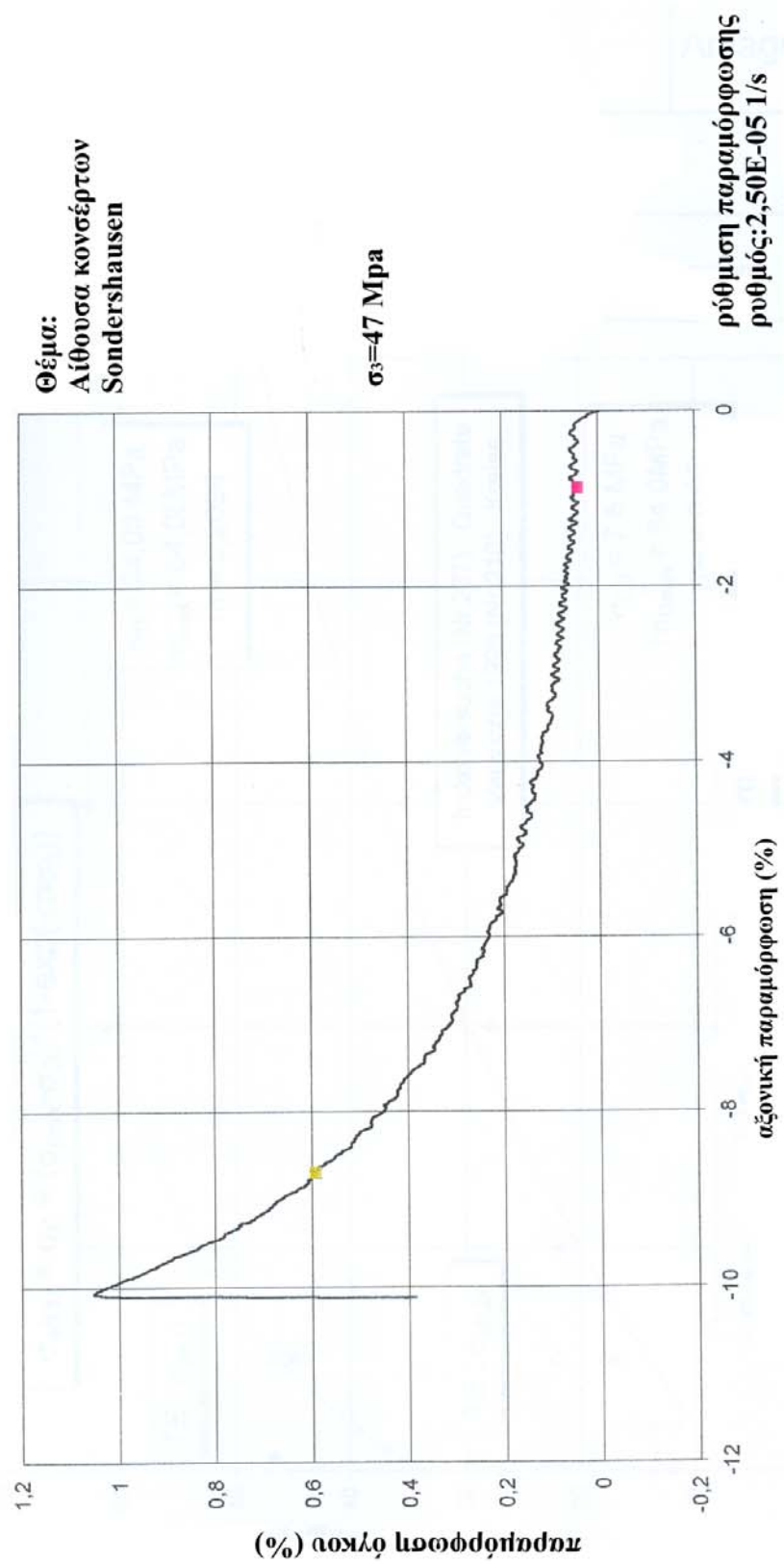


Σχήμα 4.19: Δοκιμές τριαξονικής θλίψης πάνω σε δοκίμια αλίτη Stassfurt, σε θερμοκρασία δοματίου (IfG, 2000)

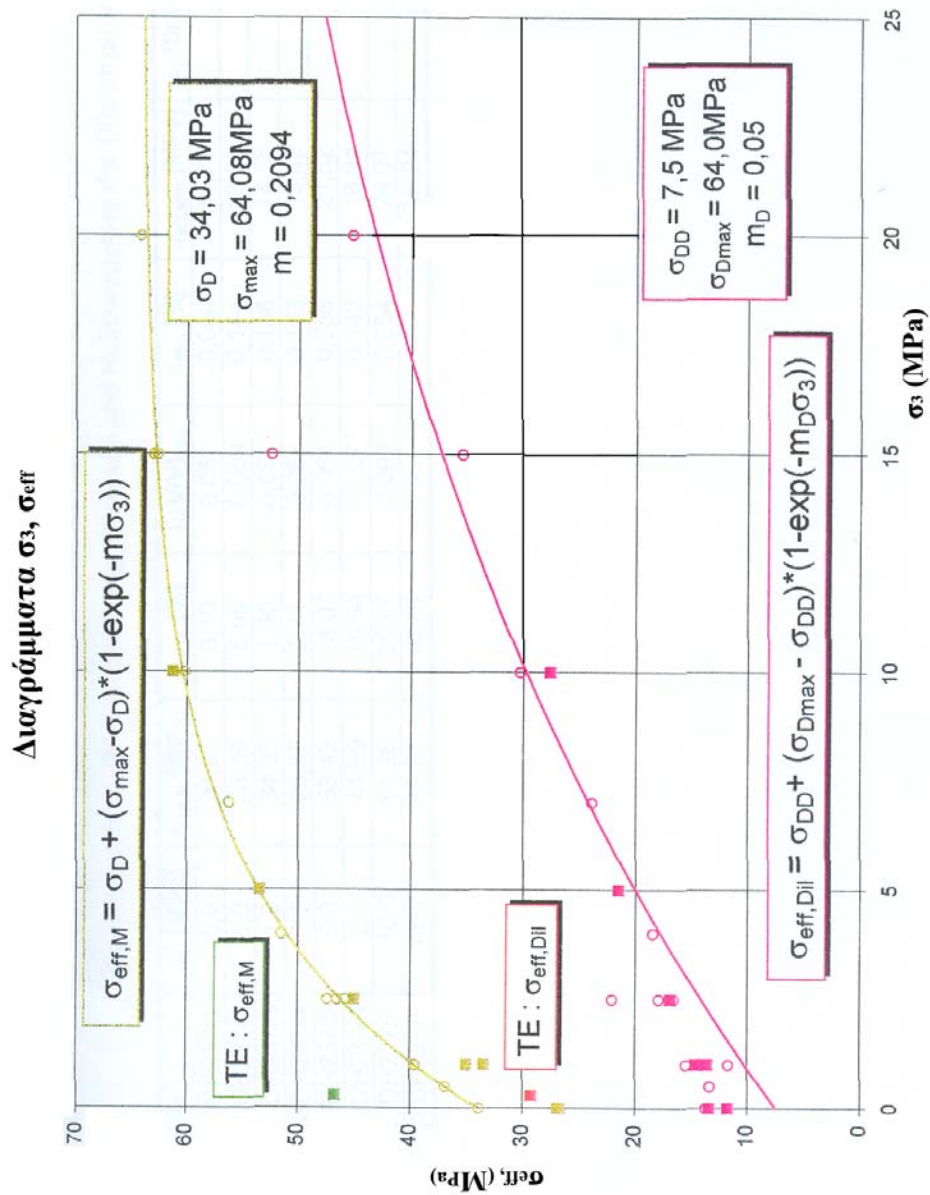


Σχήμα 4.20 Τριαξονικές δοκιμές πάνω σε δοκίμια αλίτη Stassfurt, σε θερμοκρασία δωματίου, (HfG, 2000)

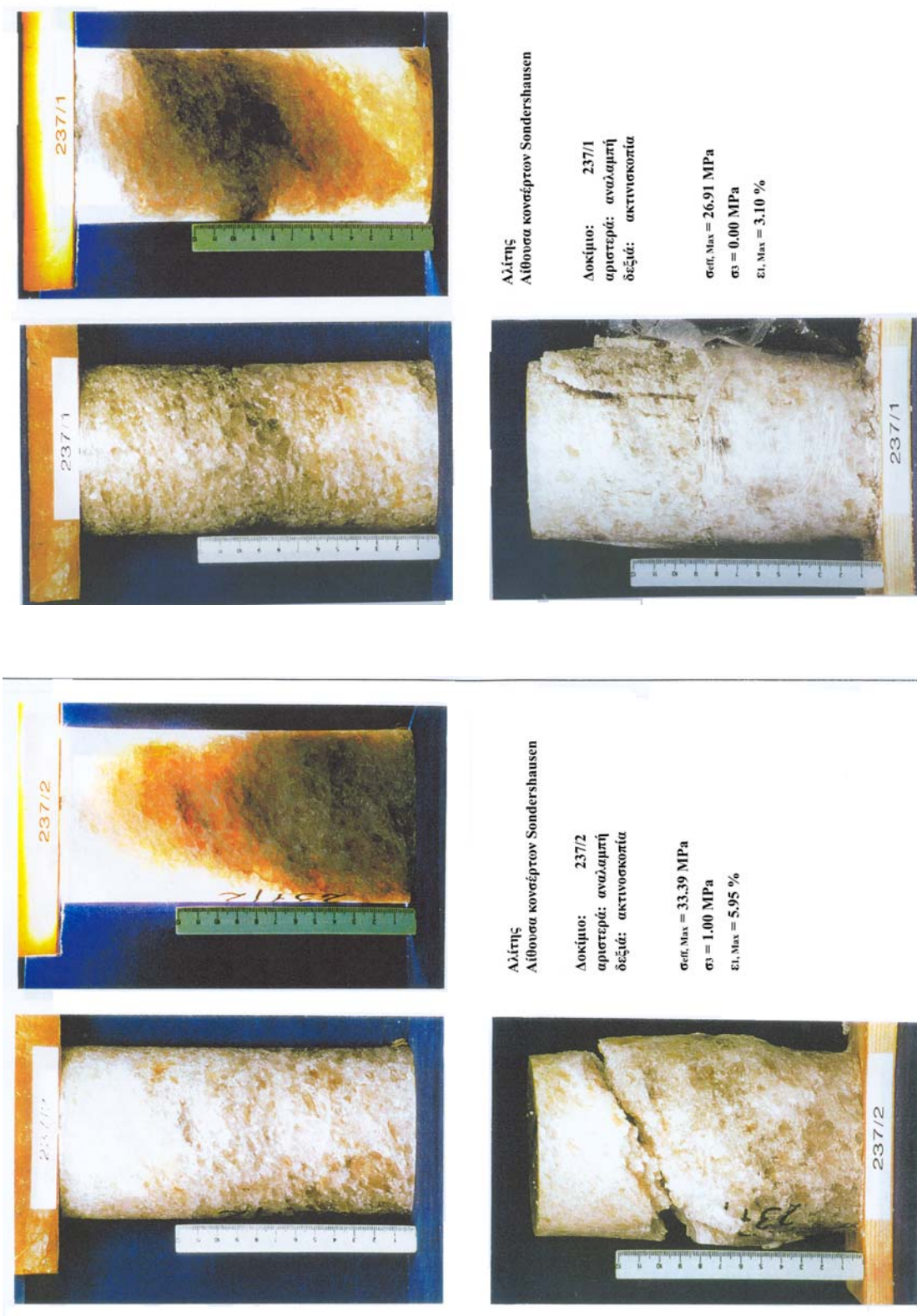
Διάγραμμα διαστολής



Σχήμα 4.21: Τριαξονικές δοκιμές πάνω σε δοκίμια αλίτη Stassfurt, σε θερμοκρασία δωματίου (IfG, 2000)



Σχήμα 4.22: Τα όρια αντοχής και παραμόρφωσης των δοκιμών σε τριαξονική καταπόνηση (IfG, 2000)



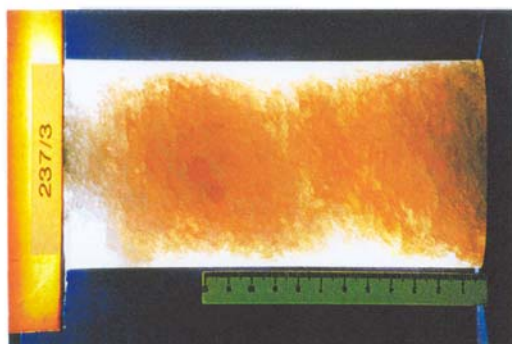
Εικόνα 4.1: Τα δοκίμια 237/1 και 237/2 πριν και μετά τις εργαστηριακές δοκιμές στις οποίες υπεβλήθησαν (IfG, 2000).



Αλίτης
Λίθουσα κονσέρπρον Sondershausen

Δοκίμιο: 237/4
αριστερά: αναλαμπή
δεξιά: ακτινισκότητα

$\sigma_{eff, Max} = 26.67 \text{ MPa}$
 $\sigma_3 = 0.00 \text{ MPa}$
 $\epsilon_1, Max = 2.71 \%$



Αλίτης
Λίθουσα κονσέρπρον Sondershausen

Δοκίμιο: 237/3
αριστερά: αναλαμπή
δεξιά: ακτινισκότητα

$\sigma_{eff, Max} = 34.95 \text{ MPa}$
 $\sigma_3 = 1.00 \text{ MPa}$
 $\epsilon_1, Max = 5.95 \%$



Εικόνα 4.2: Τα δοκίμια 237/3 και 237/4 πριν και μετά τις εργαστηριακές δοκιμές στις οποίες υπεβλήθησαν (IfG, 2000).



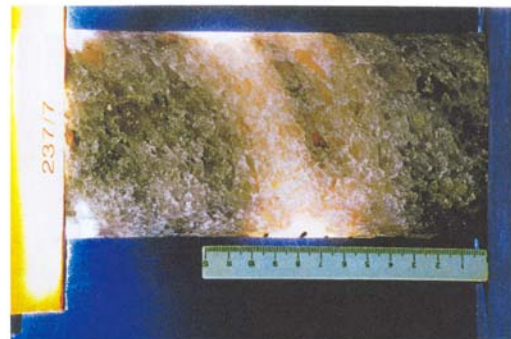
Εικόνα 4.3: Τα δοκίμια 237/5 και 237/6 πριν και μετά τις εργαστηριακές δοκιμές στις οποίες υπεβλήθησαν (IfG, 2000).



Αλίτης
Αίθουσα κονσέρπτον Sondershausen

Δοκίμιο: 237/8
αριστερά: αναλόμπη
δεξιά: ακτινισκοπία

$\sigma_{eff, Max} = 46.71 \text{ MPa}$
 $\sigma_3 = 47.00 \text{ MPa}$
 $\epsilon_1, Max = -8.70 \%$



Αλίτης
Αίθουσα κονσέρπτον Sondershausen

Δοκίμιο: 237/7
αριστερά: αναλόμπη
δεξιά: ακτινισκοπία

$\sigma_{eff, Max} = 61.26 \text{ MPa}$
 $\sigma_3 = 10.00 \text{ MPa}$
 $\epsilon_1, Max = 25.47 \%$



Εικόνα 4.4: Τα δοκίμια 237/7 και 237/8 πριν και μετά τις εργαστηριακές δοκιμές στις οποίες υπεβλήθησαν (IfG, 2000).

5. Ο σχεδιασμός της αίθουσας κονσέρτων

5.1. Εισαγωγή

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η κατασκευή της υπόγειας αίθουσας κονσέρτων απαιτούσε πολλές ιδιαιτερότητες και παρουσίασε αρκετές δυσκολίες, όχι μόνο λόγω της πολυπλοκότητας της γεωμετρίας της αλλά και λόγω της πρωτοτυπίας της κατασκευής γενικότερα.

Όταν ο αριθμός των επισκεπτών που επρόκειτο να φιλοξενεί η αίθουσα κονσέρτων καθορίστηκε στους 300, ο συντελεστής δυσκολίας της κατασκευής αυξήθηκε ακόμη περισσότερο αφού θα επρόκειτο για μια αίθουσα, εξαιρετικά μεγάλων διαστάσεων για τα συνήθη δεδομένα των υπόγειων ανοιγμάτων. Η βασική προϋπόθεση που δικαιολογούσε την κατασκευή ενός τέτοιου έργου, ήταν ότι δεν επρόκειτο για μία ακόμη υπόγεια αίθουσα μεγάλων διαστάσεων αλλά για ένα έργο που θα πληρούσε τις καλύτερες δυνατές προδιαγραφές ακουστικής.

Το πρώτο βήμα στο σχεδιασμό του έργου, ήταν η πραγματοποίηση μιας ακουστικής μελέτης, τη διεκπεραίωση της οποίας ανέλαβε το ινστιτούτο TÜV της Θουρινγκίας (TÜV Thüringen, Anlagentechnik GmbH). Οι συνεργάτες του ινστιτούτου αφού πραγματοποίησαν ορισμένες ακουστικές μετρήσεις στους υπόγειους χώρους του ορυχείου, κατέθεσαν τη μελέτη με την προτεινόμενη γεωμετρία και τις καταλληλότερες διαστάσεις, από ακουστικής άποψης, της αίθουσας.

Στη συνέχεια, έλαβε χώρα η γεωλογική μελέτη που αποσκοπούσε στην εύρεση του καταλληλότερου χώρου, εντός του ορυχείου. Ο χώρος αναζητήθηκε στην περιοχή γύρω από το φρέαρ I, όχι μόνο λόγω της εύκολης προσπέλασης προς την αίθουσα κονσέρτων που παρέχει αλλά και επειδή η συγκεκριμένη περιοχή εξασφάλισε αλίτη, ικανής ποιότητας και διαστάσεων, ώστε να φιλοξενήσει μια τέτοια κατασκευή. Ως καταλληλότερος για την εκπόνηση της μελέτης θεωρήθηκε ο γεωλόγος της εταιρίας GSES mbH, κος J. Schappmann .

Τέλος και βάση των δύο μελετών που είχαν προηγηθεί, εκπονήθηκε και η μελέτη της μηχανικής συμπεριφοράς των πετρωμάτων, τα οποία φιλοξένησαν την κατασκευή, ώστε να επιβεβαιωθεί η ευστάθειας της προτεινόμενης γεωμετρίας. Η

συγκεκριμένη μελέτη δεν υπέδειξε κανένα λόγο για τον οποίο η κατασκευή δεν μπορούσε να πραγματοποιηθεί.

5.2. Ακουστική μελέτη

5.2.1. Σκοπός της ακουστικής μελέτης

Η εκπόνηση της ακουστικής μελέτης, που πραγματοποιήθηκε από το ινστιτούτο TÜV Thüringen, Anlagentechnik GmbH, είχε ως βασική επιδίωξη την μελέτη της ακουστικής του χώρου, ώστε η αίθουσα να παρέχει την καλύτερη δυνατή απόδοση του ήχου. Βασιζόμενοι, οι επιστήμονες της εταιρίας, σε γνωστούς τύπους της φυσικής και συγκεκριμένα της ακουστικής, εξήγαγαν ορισμένα συμπεράσματα για την ακουστική ποιότητα της αίθουσας, με τη βοήθεια των οποίων πραγματοποιήθηκε ο τελικός σχεδιασμός της.

5.2.2 Γενικά στοιχεία για την ακουστική

Ο ήχος είναι διαμήκεις κυμάνσεις του αέρα. Ένα ηχητικό κύμα μπορεί να περιγραφεί συναρτήσει των μετατοπίσεων των μορίων του αέρα ή συναρτήσει των διακυμάνσεων της πίεσης. Ένα ημιτονοειδές ηχητικό κύμα χαρακτηρίζεται από τη συχνότητα του f , το μήκος κύματος λ (ή την κυκλική συχνότητα ω), τον κυματαριθμό k και το πλάτος A . Το πλάτος σχετίζεται επίσης και με το πλάτος πίεσης P_{\max} , σύμφωνα με τη σχέση : $P_{\max} = BkA$

Οι ταχύτητες διάδοσης των κυμάτων όμως, καθορίζονται από τις μηχανικές ιδιότητες του μέσου, μέσα στο οποίο διαδίδονται. Στην περίπτωση της αίθουσας κονσέρτων, η μελέτη αφορά τη διάδοση των ηχητικών κυμάτων σε αλατούχα πετρώματα (αλίτη). Στη συγκεκριμένη περίπτωση μάλιστα, περισσότερο σημαντική είναι η διάδοση του μουσικού ήχου, καθώς αυτός θα εκπέμπεται μέσα στην αίθουσα.

Είναι γνωστό ότι οι μουσικοί τόνοι περιέχουν πολλές συχνότητες αλλά το ανθρώπινο αυτί είναι ευαίσθητο σε ηχητικά κύματα περιορισμένης περιοχής συχνοτήτων. Επειδή μερικές ιδιότητες του μουσικού ήχου σχετίζονται άμεσα με τα φυσικά χαρακτηριστικά των ηχητικών κυμάτων, οι μουσικοί τόνοι μπορούν να περιγραφούν με τα φυσικά χαρακτηριστικά τους (Young, 1994).

5.2.2α) Γενικά κριτήρια ακουστικής χώρου (TÜV Thüringen, 1999).

1. Η επιστροφή του ήχου

Ο χρόνος επιστροφής του ήχου T , είναι ο χρόνος μέσα στον οποίο, μετά το τέλος της εκπομπής του ήχου σε ένα χώρο, η πίεση του ελαττώνεται στο ένα χιλιοστό της αρχικής τιμής της (60 dB). Για χώρους οι οποίοι δεν παρουσιάζουν πολύ μεγάλη απορρόφηση ήχου ($\alpha_{\text{χώρου}} < 0,3$), μια καλή προσέγγιση για τον υπολογισμό του χρόνου επιστροφής του ήχου, θα ήταν με την εξίσωση επιστροφής ήχου κατά Sabine:

$$T = 0,163 V/A \quad [\text{S}], \quad (1)$$

όπου:

A : ισοδύναμη επιφάνεια απορρόφησης σε m^2 .

V : όγκος του χώρου σε m^3 .

Οι ισοδύναμες επιφάνειες απορρόφησης του ήχου στην αίθουσα κονσέρτων μπορούν να διακριθούν ως εξής:

$$A = \sum \alpha_i S_i + \sum A_j + A_L \quad (2)$$

Ισχύει:

S_i = i τμήματα της επιφάνειας του χώρου σε m^2

$S_{\text{ges}} = \sum S_i$ συνολική επιφάνεια των ορίων της αίθουσας σε m^2

α_i = βαθμός απορρόφησης του ήχου των i τμημάτων της επιφάνειας.

A_j = βαθμός απορρόφησης του ήχου από κάθε άτομο σε m^2

A_L = 4 m^2 ισοδύναμη επιφάνεια απορρόφησης του αέρα σε m^{-1} .

m = αποδέκτης της έντασης της σταθερής ενεργειακής αναχαιτίσης.

Οι ευνοϊκοί μέσοι χρόνοι επιστροφής του ήχου στο χώρο, είναι για την ομιλία το 1 s και για τη μουσική τα 2 s. Σε αίθουσες διαλέξεων υπερτερεί η ευθύγραμμη περιοχή συχνοτήτων, ενώ αντίθετα σε μουσικές αίθουσες προτιμάται υψηλότερη επιστροφή ήχου σε περιοχές χαμηλής συχνότητας. Αυτό αποδίδει τον ήχο: «Ζέστη». Ο στόχος σχετικά με την επιστροφή ήχου στην αίθουσα κονσέρτων ήταν: $T_m = 1,65$ s για 500 ως 1000 Hz.

Με βάση τη συνάρτηση του με τη συχνότητα, επιδιώχτηκε ελαφριά αύξηση της επιστροφής του ήχου κάτω από τα 250 Hz. Έτσι, υπάρχει πλεονεκτική μουσική

απόδοση, η οποία αντισταθμίζει την ελάχιστη εμβέλεια της ακοής σε βαθύτερες συχνότητες και διευκολύνει τον ήχο «Ζέστη».

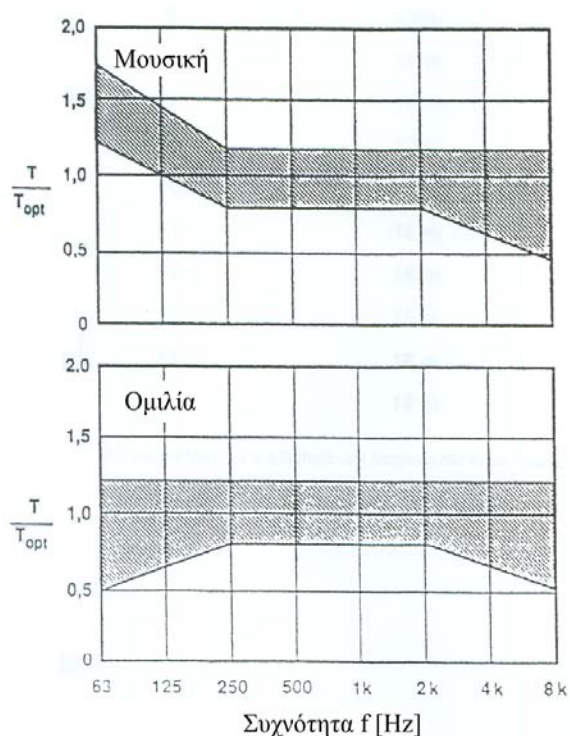
Γι' αυτό το λόγο χρησιμοποιήθηκε το κριτήριο το σχετικό με το μπάσο:

$$BR = (T_{125\text{Hz}} + T_{250\text{Hz}}) / (T_{500\text{Hz}} + T_{1000\text{Hz}}) \quad (3)$$

Το εύρος του μπάσου θα πρέπει να βρίσκεται μεταξύ 1,1 και 1,3, αφού για τιμές μεγαλύτερες του 1,3, η απόδοση του ήχου είναι «τρεμάμενη», ενώ για τιμές μικρότερες του 1,1 λείπει από τη μουσική η «Ζέστη».

Εξαιτίας αναπόφευκτων απορροφήσεων από το ακροατήριο, όπως προκύπτει από τις εξισώσεις (1) και (2), ήταν απαραίτητος ένας ελάχιστος όγκος χώρου, ώστε να επιτυγχάνεται η επιθυμητή τιμή της επιστροφής του ήχου. Στη βιβλιογραφία υπάρχουν δεδομένα που αφορούν στην αλληλεξάρτηση της λειτουργίας του χώρου ανά άτομο. Ευνοϊκές τιμές για αυτή τη χαρακτηριστική τιμή όγκου K είναι:

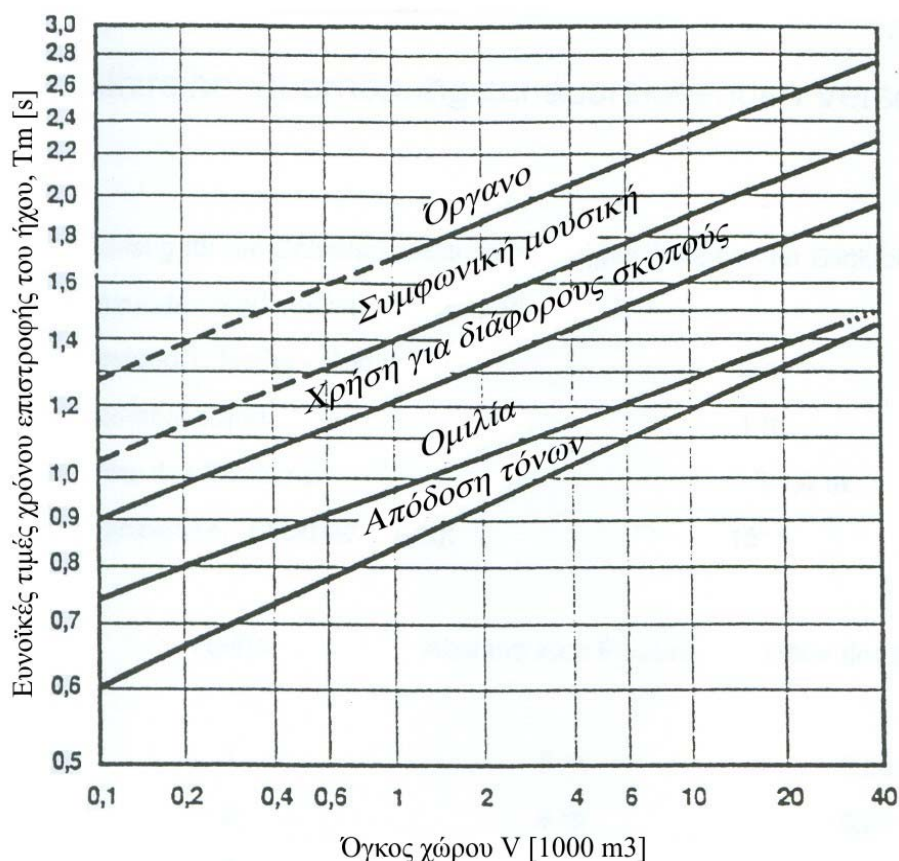
-Αίθουσες πολλαπλών σκοπών για μουσική και ομιλία:	$K = 4 \dots 7 \text{ m}^3 / \text{θέση}$
-Μουσικά θέατρα (όπερα και οπερέτα)	$K = 5 \dots 8 \text{ m}^3 / \text{θέση}$
-Αίθουσες μουσικής δωματίου	$K = 6 \dots 10 \text{ m}^3 / \text{θέση}$
-Αίθουσες κονσέρτων για συμφωνική μουσική	$K = 8 \dots 12 \text{ m}^3 / \text{θέση}$



Σχήμα 5.1: Ο χρόνος επιστροφής του ήχου T σε συνάρτηση με την ευνοϊκή τιμή του μέσου χρόνου επιστροφής του ήχου T_{opt} (TÜV Thüringen, 1999).

Βασική προϋπόθεση για την ισχύ των παραπάνω δεδομένων, είναι οι επιφάνειες που περιβάλλουν τις αίθουσες, να είναι κατασκευασμένες από υλικά συνήθη σε τέτοιου είδους κατασκευές. Η συγκεκριμένη μελέτη όμως, που αφορούσε στις συνθήκες απορρόφησης του αλτίη, ο οποίος αφέθηκε επί τόπου χωρίς κάλυψη των τοιχωμάτων του, έδειξε ότι αυτό το υλικό απορροφά κατά 6 φορές περίπου περισσότερο ήχο από ότι για παράδειγμα οι λείοι επιχρισμένοι τοίχοι, που έχουν κατασκευαστεί από τούβλα ή μπετόν.

Έτσι, δεν ήταν πολύ λογικό, ο υπολογισμός του ευνοϊκού όγκου να γίνει με βάση τη χαρακτηριστική τιμή όγκου K . Σε αυτό το συμπέρασμα καταλήγει κανείς, αν σκεφτεί πως μια χαρακτηριστική τιμή του όγκου K , γύρω στο 7 ή το 8, η οποία αντιστοιχεί σε όγκο περίπου από 2100 έως 2400 m^3 , δεν είναι αρκετή, ώστε να ικανοποιήσει την επιδιωκόμενη τιμή επιστροφής του ήχου.



Σχήμα 5.2: Οι ευνοϊκοί μέσοι χρόνοι επιστροφής του ήχου T_m , για συχνότητα από 500 έως 1000 Hz, σε αίθουσες διάφορων χρήσεων, σε συνάρτηση με τον όγκο V (TÜV Thüringen,

2. Απευθείας άφιξη του ήχου σε κάθε ακροατή.

Σε αυτή την έκφραση εμπεριέχεται και η προϋπόθεση, ότι κάθε θεατής έπρεπε να έχει και ανεμπόδιση θέα προς τη σκηνή. Η προϋπόθεση αυτή εκπληρώθηκε με κλιμακωτή τοποθέτηση καθισμάτων και ανάλογη διαμόρφωση της σκηνής. Ακουστικά, ευνοϊκό κρίθηκε ένα οπτικό πεδίο κλίσης 15° που παρέμεινε σταθερό για όλα τα καθίσματα. Αν η κατασκευή είχε γίνει με βάση μικρότερες γωνίες τότε θα επιτυγχάνονταν υπερβολικά έντονη απορρόφηση του ήχου, λόγω της ευθύγραμμης διαπλάτυνσης του πάνω από το κοινό.

3. Εξασφάλιση επαρκούς έντασης ήχου για κάθε θέση

Η ένταση αυτή έπρεπε να είναι εξασφαλισμένη τόσο για τις μουσικές εκδηλώσεις, όσο και για τις ομιλίες, ενώ η ελάττωση της έντασης από την πρώτη έως και την τελευταία σειρά καθισμάτων, δεν έπρεπε να ανέρχεται σε πάνω από 5 dB. Για την εκπλήρωση αυτών των απαιτήσεων, κατά την κατασκευή της αίθουσας, ελήφθησαν υπόψη τα εξής:

- Η παραγωγή εντονότερων αρχικών ανακλάσεων στα όρια της αίθουσας στα μπροστινά τμήματα (τοίχοι, οροφή, δάπεδο, περιοχή μεταξύ σκηνής και 1ης σειράς καθισμάτων).
- Η καθοδήγηση ενός μέρους των ανακλάσεων του ήχου, ειδικά στο μπροστινό τμήμα της οροφής και του τοίχου, στις μεσαίες και πίσω σειρές.
- Η απόσταση μεταξύ της σκηνής και του κοινού δεν υπερβαίνει τα 40m.
- Η πραγματοποίηση ενός επαρκούς χρόνου επιστροφής ειδικά σε μεγάλους χώρους

4. Προϋπόθεση για καλή εντύπωση του χώρου σε μουσικές παραστάσεις.

Η εντύπωση του χώρου, την οποία αποκομίζει κανείς ακούγοντας μουσική, δημιουργείται από τη μία μέσω της επιστροφής του ήχου κι από την άλλη μέσω της έντασης και της κατεύθυνσης του, η οποία φτάνει στο αυτί ανεμπόδιστα, μετά τον απευθείας ήχο (έως 80 ms). Για την καλή κατασκευή του χώρου, σε ότι αφορά στο

«εύρος της πηγής του ήχου», λαμβάνονται υπόψη οι έντονες πλευρικές ηχητικές ανακλάσεις, οι οποίες συναντούν απευθείας τους ακροατές μετά τον απευθείας ήχο. Αυτό σημαίνει ότι οι αίθουσες κονσέρτων σχεδιάζονται έτσι ώστε οι πλευρικές ανακλάσεις να μην αποδυναμώνονται και να φτάνουν πριν τις ανακλάσεις της οροφής. Αυτή την προϋπόθεση την πληρούν οι κλασικές αίθουσες κονσέρτων με το γνωστό και ως «σχήμα κούτας παπουτσιού», πλάτους γύρω στα 20 m και ύψους από 15 ως 18 m.

5. Επαρκής αμοιβαία ακουστική και για το μουσικό

Στα όργανα μιας ορχήστρας υπάρχει πάνω απ' όλα σε υψηλότερες συχνότητες ένα χαρακτηριστικό της εκφρασμένης εκπομπής. Για να ακούγονται, όμως ταυτόχρονα όλοι οι μουσικοί της ορχήστρας, είναι απαραίτητες οι επιφάνειες ανάκλασης της ορχήστρας, οι οποίες φροντίζουν για την ανάμιξη του ήχου. Απαραίτητες είναι επίσης και οι ανακλάσεις από την περιοχή της οροφής. Από εκεί, επιτρέπεται να φθάνει στο μεσαίο και πίσω μέρος της αίθουσας, μόνο ένα τμήμα των ανακλάσεων της οροφής. Ακόμη, στην περιοχή της σκηνής, το ύψος του ανώτερου ανακλαστήρα δεν πρέπει να υπερβαίνει τα 10 m.

6. Αποφυγή της θεατρικής ηχούς

Η άφιξη ορισμένων δεύτερων ανακλάσεων μέσω της οροφής και του πίσω τοίχου, καθυστερούν απ' τους ακροατές σημαντικά τον απευθείας ήχο, με αποτέλεσμα εκείνοι να αντιλαμβάνονται αυτόν τον αργοπορημένο ήχο, ως ηχώ (θεατρική ηχώ). Στην ομιλία, ο κρίσιμος χρόνος καθυστέρησης ανέρχεται στα 75 ms, που αντιστοιχεί σε διαφορά δρόμου 25 m, ανάμεσα στον απευθείας ήχο και την ανάκλαση, ενώ στη μουσική ανέρχεται στα 80 ms που αντιστοιχεί σε διαφορά δρόμου 28 m. Το πρόβλημα αφορά ειδικά στις μπροστινές θέσεις, αλλά η θεατρική ηχώ μπορεί να αποφευχθεί, για παράδειγμα, αν στο πίσω μέρος της αίθουσας, η οροφή είναι κεκλιμένη. Σχεδιαστικά είναι δυνατή η αναθεώρηση μέσω ελλειπτικής κατασκευής.

7. Αποφυγή της επίπεδης ηχούς

Οι καλά ανακλώμενες επιφάνειες, μπορούν να οδηγήσουν σε μία μακρά ταλάντωση της ενέργειας του ήχου (επίπεδη ηχώ). Ιδιαίτερη προσοχή ως προς αυτό χρειάστηκε στο μπροστινό τμήμα της αίθουσας. Το φαινόμενο αυτό μετριάζεται με επικλινή τοποθέτηση των επιφανειών που επηρεάζονται ($>5^\circ$) ή με κατάλληλα μέτρα απορρόφησης ή διάχυσης.

8. Αποφυγή ανεπιθύμητων συγκεντρώσεων του ήχου

Κατά την εφαρμογή γραφικών μεθόδων σχεδιασμού στη διαχάραξη του σχήματος της αίθουσας, έπρεπε να αποφευχθούν οι ανεπιθύμητες συγκεντρώσεις των ήχων. Γι' αυτό, απαιτείται ιδιαίτερη προσοχή σε κοίλες και καμπυλωτές επιφάνειες. Έτσι, σε θόλους ή τόξα, προϋποτίθεται, μια ακτίνα καμπής, η οποία, είτε είναι μικρότερη από το μισό του ύψους του τοίχου, είτε ουσιαστικά διπλάσια από το ύψος του τοίχου.

5.2.3 Βασική κατασκευή της αίθουσας κονσέρτων

Για μια, όσο το δυνατόν, ευνοϊκότερη διαστασιοποίηση της αίθουσας κονσέρτων, τέθηκαν ως βάση, τα συμπεράσματα που εξήχθησαν από την ανάλυση των γενικών κριτηρίων ακουστικής του χώρου. Έτσι, για το σχεδιασμό της αίθουσας, δόθηκαν οι εξής παράμετροι :

- Το ύψος της αίθουσας έπρεπε να είναι μικρότερο από 10 m.
- Η διατομή της οροφής έπρεπε να έχει σχήμα τόξου, η καμπυλότητα στο κέντρο του οποίου, έπρεπε να είναι τουλάχιστον 1 m.
- Κατά μήκος της, η οροφή, έπρεπε να έχει σχήμα οδοντωτού πριονιού. Το μέγιστο δυνατό ύψος βαθμίδας να ανέρχεται στα 30 cm, ενώ η ελάχιστη απόσταση της κατασκευής να είναι 2 m.

5.2.4 Επιφάνεια της αίθουσας και επιστροφή του ήχου.

Για να προκύψουν οι γνώσεις, σχετικά με την απορρόφηση του ήχου από τον αλίτη, οι επιφάνειες του οποίου παρέμειναν φυσικές, τραχιές, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις στην υπάρχουσα αίθουσα εκδηλώσεων του ορυχείου “Glückauf Sondershausen”. Η επιστροφή του ήχου προέκυψε ότι ανέρχεται στα 500 Hz σε 2 s. Για την αξιοποίηση της επιστροφής του ήχου, η οποία εξαρτάται από τη συχνότητα, από τις σχέσεις (1) και (2) με αντικατάσταση, προέκυψαν οι ακόλουθοι βαθμοί απορρόφησης α , σε συνάρτηση με τη συχνότητα:

-Μέση συχνότητα όγδων σε Hz:	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
-Από επιφάνεια τραχύ αλίτη:	0,08	0,13	0,13	0,17	0,18	0,21	0,24	0,25
-Από μάρμαρο ή κλίνκερ:	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,04

Εξαιτίας της, έντονα, μεγαλύτερης απορρόφησης του τραχύ αλίτη, η απορρόφηση του ήχου με παρουσία κοινού, ανέρχεται στα 1,4 s μόνο στα 500 Hz, για τις προτεινόμενες διαστάσεις της αίθουσας. Για να επιτευχθεί μεγαλύτερη επιστροφή του ήχου στον ίδιο χώρο, θα έπρεπε να λειανθούν οι επιφάνειες του αλίτη και ιδιαίτερα οι τοίχοι και το τμήμα της οροφής πάνω από τη σκηνή, στο μπροστινό μέρος της αίθουσας. Μερικές ακόμη παρατηρήσεις για πιο συγκεκριμένες κατασκευές ήταν:

- Ο τοίχος πίσω από τη σκηνή να είναι συμπαγής, τουλάχιστον 40 kg/m². Για διακοσμητικούς λόγους θα μπορούσαν να κατασκευαστούν 3 ημικυκλικές κολώνες, οι οποίες θα χρησίμευαν ταυτόχρονα και ως διαχυτές. Οι κολώνες αυτές τελικά δεν κατασκευάστηκαν.

- Ο τοίχος πίσω από τη σκηνή και μέχρι το σημείο που βρίσκεται το πρώτο άνοιγμα (θύρα εξόδου), και για όλο το ύψος της αίθουσας, έπρεπε να λειανθεί, ενώ οι υπόλοιπες επιφάνειες μπορούσαν να παραμείνουν τραχιές για διακοσμητικούς λόγους.

- Ο τοίχος στο πίσω μέρος της αίθουσας δεν χρειαζόταν να λειανθεί αλλά ήταν κατάλληλος για 2 ανοίγματα.

- Το δάπεδο της σκηνής μπορούσε να είναι από ξύλο με κολλημένο παρκέ, ενώ το ύψος ύψους της εξέδρας της σκηνής έπρεπε να κλιμακώνεται σταδιακά, από 80cm έως 100 cm προς τα πίσω.

- Στο δάπεδο ανάμεσα στο κοινό και τη σκηνή έπρεπε να τοποθετηθεί σκληρό δάπεδο, από κλίνκερ ή πλακάκι και όχι ξύλο για να μην απορροφάει τον ήχο.

- Στην περιοχή τοποθέτησης του κοινού, έπρεπε να ληφθεί υπόψη ακόμη και οι περίπτωση να υπάρχουν άδεια καθίσματα. Έτσι, το υλικό επένδυσης των καθισμάτων έπρεπε να έχει ικανότητα καλής απορρόφησης του ήχου (π.χ. πορώδες αφρολέξ), αντικαθιστώντας τον ακροατή που απουσιάζει. Επίσης, συστήθηκε τα ίδια τα καθίσματα να είναι ξύλινα και να τοποθετηθούν χωρίς να αφεθεί κενός χώρος μεταξύ τους.

- Τέλος, υπόψη ελήφθη και η απορρόφηση του ήχου από την ατμόσφαιρα, η οποία είναι ανάλογη της έντασης της υγρασίας (π.χ. από τα ανθρώπινα χνώτα). Οι μετρήσεις που έγιναν για διάφορες μουσικές συχνότητες, απέδειξαν ότι η απορρόφηση του ήχου αυξάνεται δραστικά όσο ελαττώνεται η υγρασία στην ατμόσφαιρα. Έτσι, για την περίπτωση μουσικών εκδηλώσεων, ως καταλληλότερη υγρασία, για την ατμόσφαιρα μέσα στην αίθουσα κονσέρτων, θεωρήθηκε το 70%.

5.3 Γεωλογική μελέτη

5.3.1 Αρχικές παρατηρήσεις

Η γεωλογική μελέτη, είχε σκοπό τόσο την ορθή περιγραφή της στρωματογραφικής δομής του κοιτάσματος, όσο και την εύρεση του χώρου τοποθέτησης του έργου, μέσα στα υπόγεια. Ο χώρος αυτός, έπρεπε να πληροί ορισμένες προϋποθέσεις και να έχει τις απαιτούμενες διαστάσεις για την τοποθέτηση του έργου. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των ακουστικών μετρήσεων στους αλατούχους ορίζοντες του μεταλλευτικού πεδίου, ο χώρος κατασκευής της αίθουσας κονσέρτων, έπρεπε να βρίσκεται μέσα σε ομογενή αλατούχο δομή, και οι διαστάσεις της να είναι περίπου 26 m μήκος, 18 m πλάτος και 10 m ύψος. Υπό αυτές τις προϋποθέσεις, καταλληλότερη θέση για την τοποθέτηση του έργου θεωρήθηκε η περιοχή γύρω από το φρέαρ I, όχι μόνο επειδή ικανοποιούσε τις παραπάνω προϋποθέσεις αλλά κι επειδή διάθετε ήδη τα απαιτούμενα έργα προσπέλασης, αερισμού, και λοιπών βοηθητικών χώρων. Έτσι, επιλέχθηκε η περιοχή ανατολικά του φρέατος I, στο τμήμα των στύλων στήριξης του φρέατος.

5.3.2 Θέση της περιοχής μελέτης

Η λεπτομερής γεωλογική μελέτη αφορά στην περιοχή ανατολικά του φρέατος I, στο τμήμα των στύλων στήριξης του φρέατος και στην περιοχή γύρω από αυτό. Συγκεκριμένα, η μελέτη επικεντρώνεται μεταξύ της ερευνητικής στοάς (Aufschlußstrecke) σε διεύθυνση ΒΔ και της διευθυντικής στοάς 13 (Streichende Strecke 13) με διεύθυνση ΒΝ, ενώ σε διεύθυνση ΔΑ το υπό μελέτη τμήμα του ορυχείου προεκτείνεται μεταξύ της στοάς ΜΟ και της στοάς 22.

5.3.3 Τα αποτελέσματα έρευνας.

Τα μοναδικά γεωλογικά αποτελέσματα που υφίστατο έως την έναρξη της μελέτης για την κατασκευή του έργου, προέρχονταν από τη δειγματοληψία που είχε πραγματοποιηθεί το έτος 1925 επί της διευθυντικής στοάς 13 και της στοάς 22. Για τη στοά εξόρυξης (Abbausrecke) στα δυτικά, βάθους 632 m, τη στοά Autobahn Nord και τη στοά 638 U που διέρχονται περιμετρικά της προβλεπόμενης θέσης κατασκευής του έργου, δεν υπήρχαν καθόλου δειγματοληπτικά στοιχεία.

Έτσι, για να συμπληρωθεί το υπάρχον γεωλογικό υπόβαθρο κρίθηκε απαραίτητη η διάνοιξη 4 ακόμη ερευνητικών γεωτρήσεων για τη μελέτη της κατάστασης των υπερκειμένων, καθώς και για έλεγχο ενδεχόμενης εισχώρησης αλκαλικών διαλυμάτων (υπολείμματα αλκαλικών διαλυμάτων απόπλυσης) στα υπερκείμενα.

5.3.4 Γεωλογική δομή, κατάσταση του πετρώματος, διαστάσεις.

Όπως αναφέρθηκε εκτενώς στο 2^ο κεφάλαιο, το μεταλλευτικό πεδίο στο οποίο τοποθετήθηκε η αίθουσα, χαρακτηρίζεται από την επίδραση της ζώνης διαταραχής Wippertal, πλάτους 600-800 m, ΒΔ- ΝΑ διεύθυνσης. Η, υπό μελέτη περιοχή, χαρακτηριζόταν από μια πολύπλοκη στρωματική δομή στα βόρεια, καθώς και από την μετάβαση του κιζερίτη σε φάση μεικτού άλατος ΝΑ της διευθυντικής στοάς 13.

Μέσω μιας ερκύνιας παρατεταγμένης δομής αντικλίνου, περίπου 250 m Β της ίδιας περιοχής, φτάνει σε μια υπερκείμενη πτύχωση, η βόρεια πλευρά της οποίας,

είναι έντονα αντεστραμμένη. Στη νότια πλευρά του αντικλίνου, υπάρχουν πάνω στην κορυφή του, ιδιαίτερα απότομες συνθήκες στρωμάτωσης, οι οποίες μάλιστα είχαν οδηγήσει στην αναστολή της εξόρυξη του κιζερίτη στην περιοχή της στοάς 22. Μεταξύ του δαπέδου της στοάς 638 U και της διευθυντικής στοάς 13 προσέρχεται σε ένα πιο επίπεδο στρώμα σκαφοειδούς σχήματος.

Στο σύνολο των υπερκειμένων καλιούχων στρωμάτων, στην περιοχή του αντικλίνου, επικρατεί ο κιζερίτης, με πάχος από 1-8 m. Σε ΝΑ διεύθυνση απαντάται μέσω μιας ενδιάμεσης στρώσης αλίτη, ένα υπερκείμενο κι ένα υποκείμενο στρώμα κιζερίτη. Τα υποκείμενα στρώματα, όταν η γεωλογική δομή είναι κανονική, διακρίνονται λόγω του χαρακτηριστικού πορτοκαλί χρώματος των στρώσεων του αλίτη και των έντονων αργιλικών διαλυμάτων. Λόγω της τεκτονικής καταπόνησης, τα υποκείμενα είναι έντονα λεπτοστρωματωμένα (2 -4 m) κι έχουν υποστεί μερική διάτμηση.

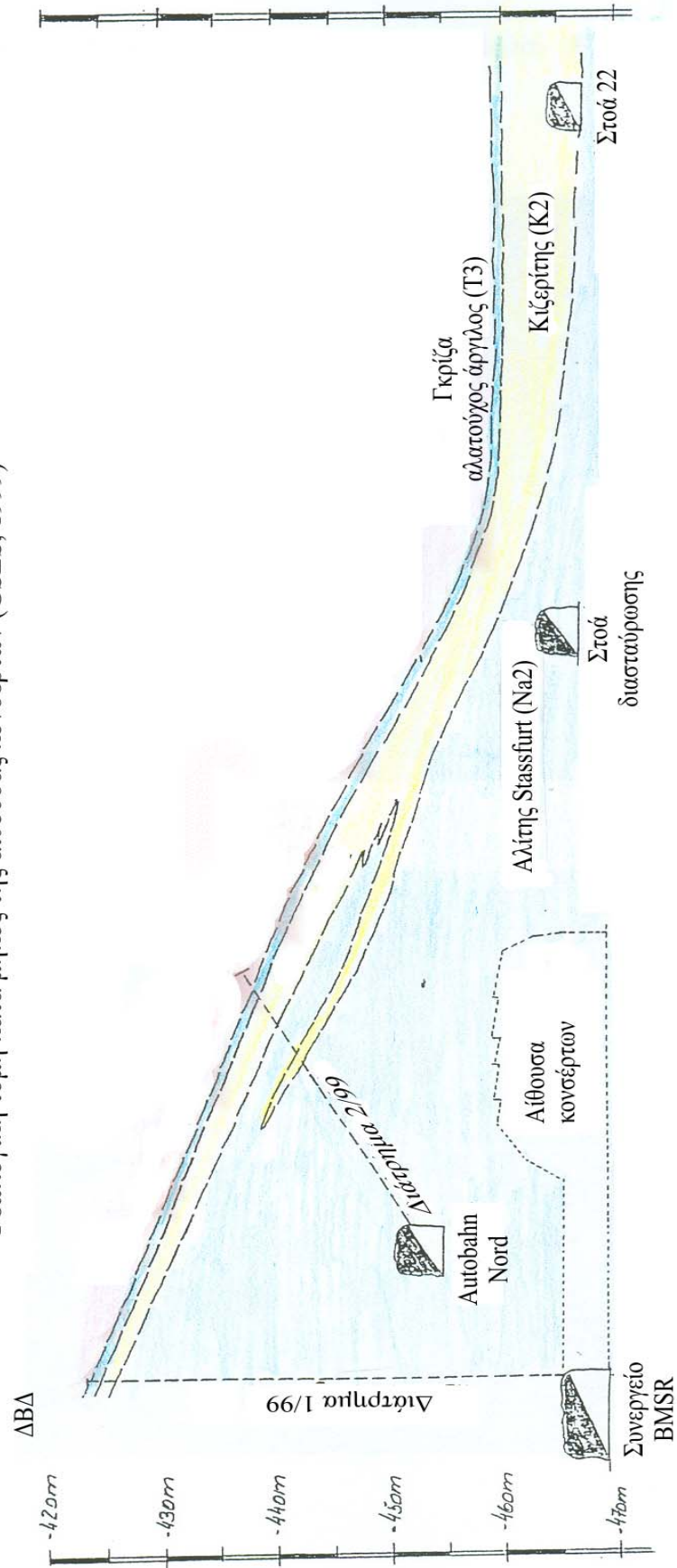
Στην υφιστάμενη στοά είναι αναγνωρίσιμη η επίδραση του υπερκείμενου στρώματος αλίτη Stassfurt, ενώ μόνο κατά τόπους, φαίνεται μια στρωμάτωση υπό φυσιολογικό σχηματισμό, αργίλου-ανυδρίτη. Επικρατέστερος είναι ένας ομογενής αλίτης, κρυσταλλωμένος μέσω τεκτονικής καταπόνησης, χωρίς άργιλο-ανυδριτικές επιφάνειες διάλυσης. Η αναπαράσταση του προφίλ της διευθυντικής στοάς 13, παρουσιάζει απόσταση, μεγαλύτερη των 20 m από το υπερκείμενο στρώμα καλίου, στην περιοχή της στοάς Autobahn Nord (σχήμα 5.3).

5.3.5 Συμπεράσματα για την προχώρηση

Από γεωλογικής απόψεως, η τοποθεσία για την κατασκευή της αίθουσας κονσέρτων στον χώρο ανατολικά του συνεργείου-BMSR είναι κατάλληλος. Σε οριζόντια διεύθυνση βρίσκεται ένας διαθέσιμος ομογενής ορίζοντας αλίτη, με πάχος μεγαλύτερο από 20 m.

Σ' αυτό τον ορίζοντα παρεμβάλλονται προϋπάρχοντα ανοίγματα μεγάλων διαστάσεων (αντλιοστάσιο, αίθουσα εκδηλώσεων), που αποδεικνύουν ότι παρά τις διαστάσεις τους, δεν αντιμετώπισαν κανένα πρόβλημα στήριξης για μεγάλο χρονικό διάστημα (100 περίπου χρόνια). Αν ληφθεί υπόψη ο χώρος αποθήκευσης που βρίσκεται ανατολικά και την υπάρχουσα στοά, η αίθουσα κονσέρτων θα έπρεπε να τοποθετηθεί 20-40 m ανατολικά του BMSR-συνεργείου.

Γεωλογική τομή κατά μήκος της αίθουσας κονσέρτων (GSES, 1999)



ΚΑΙΜΑΚΑ 1:500

Σχήμα 5.3: Γεωλογική τομή κατά μήκος της αίθουσας κονσέρτων (GSES, 1999)

Είναι πάντως απαραίτητη η τήρηση μιας απόστασης ασφαλείας τουλάχιστον 10m από το υπερκείμενο στρώμα καλίου επειδή σε αυτήν την περιοχή υπάρχει παρεμβολή στρωσιγενούς αλίτη και εμφάνιση αργίλου.

5.4 Η βραχομηχανική μελέτη της IfG.

Μετά την ολοκλήρωση της ακουστικής και της γεωλογικής μελέτης, σειρά είχε η μελέτη της κατάστασης των πετρωμάτων της περιοχής που επιλέχθηκε για την κατασκευή του έργου. Τη διεκπεραίωση της γεωμηχανικής μελέτης ανέλαβε η εταιρία IfG, στοχεύοντας την επιβεβαίωση της ευστάθειας της προβλεπόμενης κατασκευής και την υπόδειξη των απαραίτητων αλλαγών στη γεωμετρία της.

5.4.1 Παρατηρήσεις για την ευστάθεια

Η περιοχή του ορυχείου που επιλέχθηκε για την κατασκευή του έργου βρίσκεται μέσα σε ένα ορίζοντα ομογενούς αλίτη, πάχους, μεγαλύτερου των 20 m. Η περιοχή αυτή χαρακτηρίζεται από ευνοϊκές βραχομηχανικές ιδιότητες, αφού η συμπεριφορά των περισσότερων ανοιγμάτων μεγάλων διαστάσεων που φιλοξενεί τα τελευταία εκατό χρόνια, δεν υποδεικνύει κανένα κίνδυνο.

Λαμβάνοντας υπόψη, τα στρώματα που απαντώνται ανατολικά του προβλεπόμενου έργου και την υφιστάμενη στοά (Autobahn Nord), που διέρχεται πάνω από αυτό, η IfG συμπέρανε ότι η μεταλλευτική κατασκευή θα έπρεπε να τοποθετηθεί σε απόσταση 20-40 m ανατολικά του πρώην θαλάμου BMSR. Με τον τρόπο αυτό εξασφαλίζεται ότι η οροφή της αίθουσας θα βρίσκεται σε απόσταση τουλάχιστον 10 m από το υπερκείμενο καλιούχο στρώμα που παρεμβάλλεται σε αυτό το σημείο μέσα στον αλίτη. Το μέτωπο του ανιόντος κεκλιμένου στρώματος αλίτη, μεταξύ του κατώτερου σημείου του δαπέδου της αίθουσας και της βάσης του αλίτη Stassfurt (Na₂) ανέρχεται σε 50 περίπου m (σχήμα 5.3).

5.4.2 Το υπολογιστικό πρόγραμμα που εφαρμόστηκε:

Η έρευνα της ευστάθειας, της αίθουσας κονσέρτων πραγματοποιήθηκε με το πρόγραμμα FLAC^{3D} (version 2.0), της εταιρίας ITASCA Consulting Group, Inc. Minneapolis USA. Οι λογιστικοί κώδικες FLAC (ITASCA, 1995) και FLAC^{3D}

(ITASCA, 1997) χρησιμοποιούνται παγκοσμίως για παρόμοια γεωτεχνικά προβλήματα. Το πρόγραμμα FLAC (Fast Lagrangian Analysis of Continua) βασίζεται στην ταυτότητα επίλυσης του LAGRANGE και μπορεί να εφαρμοστεί και σε μεγάλες παραμορφώσεις. Το πρόγραμμα λειτουργεί σύμφωνα με την μέθοδο της πεπερασμένης διαφόρησης και χρησιμοποιεί έναν σαφή αλγόριθμο χρονικών σταδίων, ο οποίος πλεονεκτεί στην επίλυση των προβλημάτων που τίθενται, με μη γραμμικούς νόμους των υλικών.

Αυτό το σύστημα επιτρέπει στο πρόγραμμα να κατανοεί τόσο την διαδικασία ψαθυρής θραύσης στα πλαίσια των ελαστο-πλαστικών μοντέλων, όσο και τις παραμορφώσεις δίχως θραύση λόγω διαφόρων μοντέλων ερπυσμού. Και για τις δύο διαδικασίες παραμόρφωσης, η IfG σε συνεργασία με την ITASCA, προχώρησε σε περαιτέρω ανάπτυξη των μοντέλων του υλικού εφαρμόζοντας τους λογιστικούς κώδικες FLAC και $FLAC^{3D}$. Οι κώδικες FLAC και $FLAC^{3D}$, χρησιμοποιούνται ήδη από το 1992 από διάφορα ιδρύματα βραχομηχανικής, ενώ από το 1995 επιλύουν επιτυχώς διάφορα γεωτεχνικά προβλήματα ευστάθειας και μακροχρόνιας στήριξης.

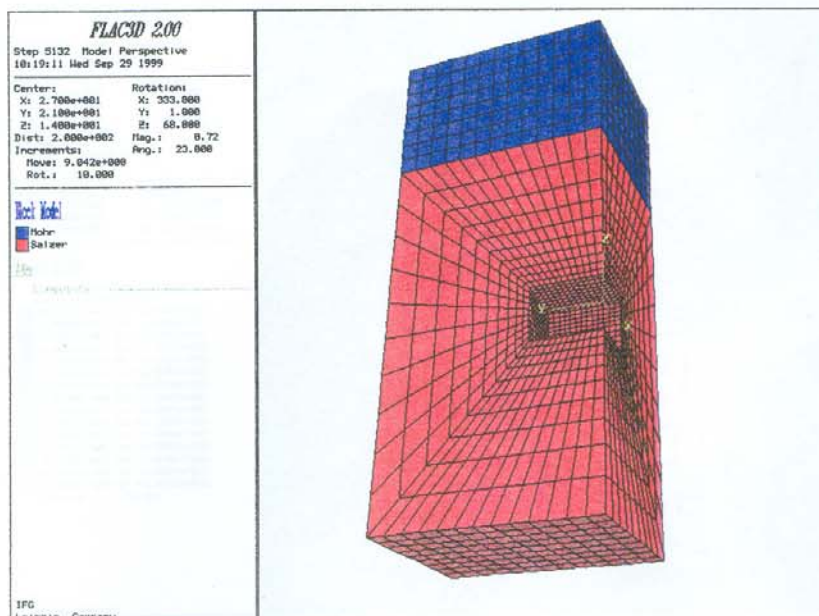
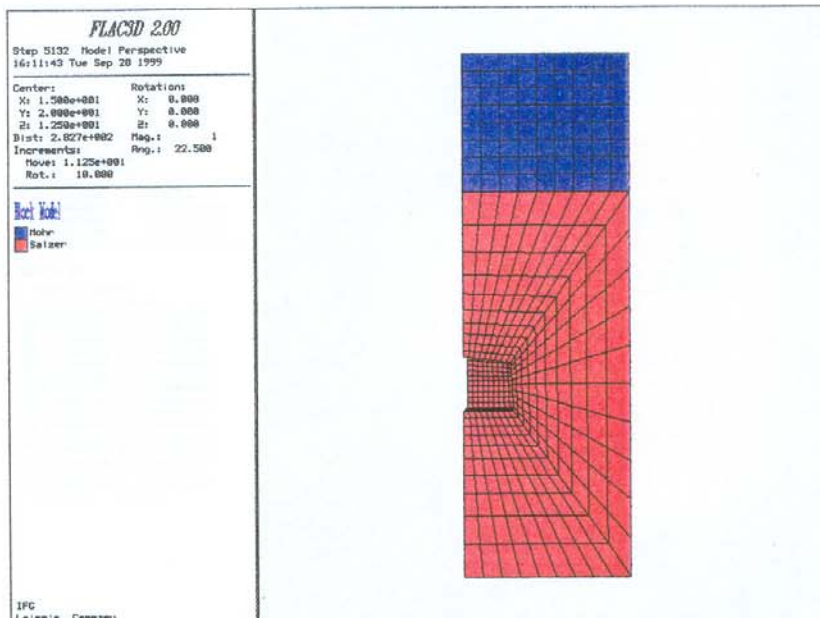
5.4.3.Αριθμητικοί υπολογισμοί.

5.4.3α). Δομή του μοντέλου

Το βραχομηχανικό υπολογιστικό μοντέλο (σχήμα 5.4) αντιστοιχεί στο τμήμα του πετρώματος που περικλείεται μεταξύ της διεθυντικής στοάς 13 και της δυτικής στοάς εξόρυξης (Abbaustrecke nach W), καθώς και του πρώην συνεργείου BMSR και της εγκάρσιας στοάς (Durchschlagsstrecke).

Ο άξονας-y του μοντέλου αντιστοιχεί στη διεύθυνση της διεθυντικής στοάς 13, ο άξονας-x τέμνει οριζόντια και κάθετα αυτή τη διεύθυνση και ο άξονας-z είναι προσανατολισμένος κατακόρυφα. Για τον περιορισμό της αριθμητικής εισαγωγής, χρησιμοποιήθηκε η συμμετρία του χώρου και στο μοντέλο απεικονίστηκε μόνο το ένα τέταρτο της τομής του βράχου και η κατακόρυφη συμμετρία του μοντέλου ($x=0$, $y=0$) τοποθετήθηκε στη μέση του υπό εξόρυξη χώρου.

Δομή του μοντέλου και θέση των αξόνων



Κατά τη διεύθυνση του άξονα- x , δόθηκε στο μοντέλο μήκος έως 30 m και κατά τη διεύθυνση του y , 40 m. Το συνολικό ύψος του μοντέλου ήταν 95 m και αντιστοιχούσε στο βάθος από τα 600 m μέχρι τα 695 m. Η αίθουσα κονσέρτων τοποθετήθηκε σε βάθος μεταξύ 655 m και 665 m και αναπαραστάθηκε ως ένα πρίσμα με μέγιστου ύψους 10 m και μέγιστου πλάτους 18 m. Η διατομή στο x - z -επίπεδο αντιστοιχούσε στη μέγιστη διατομή της προβλεπόμενης περιμέτρου του ανοίγματος, ενώ το κλιμακωτό τμήμα της οροφής στον άξονα y δεν ελήφθη υπόψη.

Η μοντελοποιημένη τομή του βράχου αντιστοιχούσε στα στρώματα γκρι αλίτη και κυρίου ανυδρίτη, σε περιοχές βάθους από 600 ως 630 m. Ο κιζερίτης και ο αλίτης πάνω από αυτόν δεν διαφοροποιήθηκαν από τον αλίτη Stassfurt επειδή βρίσκονταν σε αρκετή απόσταση από την περιφέρεια της προβλεπόμενης αίθουσας κονσέρτων και παρουσίαζαν παρόμοιες βραχομηχανικές ιδιότητες. Η βάση του μοντέλου τοποθετήθηκε 30 m κάτω από την αίθουσα σε κατώτερο ορίζοντα αλίτη Stassfurt. Οι συνολικοί υπολογισμοί του βραχομηχανικού μοντέλου έφτασαν στις 6646 ζώνες (στοιχεία) και τα 7530 κομβικά σημεία.

5.4.3β). Ιδιότητες υλικού και οι χρησιμοποιούμενοι νόμοι της ύλης.

Τα πετρώματα που συμμετείχαν στη δομή του βράχου (ανυδρίτης, άργιλος, αλίτης και κιζερίτης) ταξινομήθηκαν στο υπολογιστικό μοντέλο ανάλογα με τις μηχανικές τους ιδιότητες, τους νόμους της ύλης και τις παραμέτρους των υλικών. Τη βάση αυτής της ταξινόμησης αποτέλεσαν τα αποτελέσματα των πετρομηχανικών δοκιμών, οι -επί τόπου- μετρήσεις και παρατηρήσεις καθώς και οι γνώσεις και οι εμπειρίες που είχαν ανακτηθεί κατά καιρούς γύρω από την, υπό μελέτη βραχομάζα, με διάφορα βραχομηχανικά μοντέλα.

Ως δοκιμή για το μοντέλο της ύλης, για το σύνολο του αλίτη (συμπεριλαμβανομένου του καλιούχου στρώματος), εφαρμόστηκε η δοκιμή του συνδυασμένου ερπυσμού (παραμόρφωση-σταθεροποίηση με ανάκτηση). Με βάση τις πετρομηχανικές έρευνες για τον αλίτη Stassfurt, του κοιτάσματος του Sondershausen, από την περιοχή της κατασκευής του έργου, προέκυψαν για τη δοκιμή ερπυσμού, οι παρακάτω παράμετροι:

$$A^I = 2,3 \cdot 10^{-19}, \quad \beta^I = 7,5, \quad \mu = 1,5,$$

Όπου σ : [MPa], t : [h] και ε : [-].

Ο χαρακτηριστικός χρόνος t_0 για την ανάκτηση της σταθεροποίησης, ανέρχεται σε 10 περίπου, χρόνια. Για την περιγραφή της βραχυπρόθεσμης αντοχής των αλατούχων πετρωμάτων έχει αποδειχθεί η παρακάτω σχέση:

$$\sigma_{eff,M} = \sigma_D + (\sigma_{max} - \sigma_D) * (1 - e^{(-mD * \sigma_3^3)}), \quad (1)$$

όπου: $\sigma_{eff,M}$: μέγιστη ενεργή τάση όταν $\varepsilon = 2,5 * 10^{-5} s^{-1}$

Για την προβολή των ορίων διαστολής, μπορεί να επιλεγεί ένας ανάλογος τύπος. Υπό ενεργά φορτία κάτω των ορίων διαστολής, επιτυγχάνονται οι παραμορφώσεις ερπυσμού χωρίς φθορές ή μικρορωγμές, δηλαδή εξασφαλίζεται η διαρκής ευστάθεια:

$$\sigma_{eff,Dil} = \sigma_{DD} + (\sigma_{Dmax} - \sigma_{DD}) * (1 - e^{(-mD * \sigma_3^3)}) \quad (2)$$

Πίνακας 5.1: Χαρακτηριστικές τιμές για την περιγραφή της βραχυπρόθεσμης αντοχής και των ορίων διαστολής του αλίτη.

Πέτρωμα	Αντοχή			όρια διαστολής		
	σ_D [MPa]	σ_{max} [MPa]	m [-]	σ_{DD} [MPa]	σ_{dmax} [MPa]	mD [-]
Na2 (IfG)	34	64	0,21	7,5	64	0,05

Για την εκτίμηση της ευστάθειας, με βάση την βραχυπρόθεσμη αντοχή, ισχύει το κριτήριο SIK (IfG, 1995a):

$$SIK = \frac{\sigma_{eff,M}}{\sigma_{eff,W}} = \frac{\sigma_{1-M} - \sigma_3}{\sigma_{eff,W}} \quad (3)$$

Όπου με $\sigma_{eff,W}$, συμβολίζεται η ενεργή τάση, που επιδρά στο πέτρωμα σύμφωνα με το αποτέλεσμα της μοντελοποίησης ενώ με $\sigma_{eff,M}$, συμβολίζεται η αντοχή μικρής διάρκειας, όπως προκύπτει σύμφωνα με τη σχέση (1), από την ελάχιστη πλευρική τάση σ_3 . Για τριαξονική φόρτιση τμημάτων της βραχομάζας, προκύπτουν οι ακόλουθες τιμές SIK, για τους απαιτούμενους χρόνους ευστάθειας:

$SIK \geq 2.0$	Χρονικές διάρκειες έως και μερικά χρόνια
$SIK \geq 2.5$	Χρονικές διάρκειες έως πολλές δεκαετίες
$SIK \geq 3.3$	Διαρκής ευστάθεια

Έτσι, για τα πετρώματα που μελετήθηκαν, προέκυψε ότι όταν αυτά βρίσκονται υπό τριαξονική φόρτιση το $SIK = 3.3$, μία τιμή που δεν προβλέπει οποιαδήποτε καταστροφή και εξασφαλίζει παραμορφώσεις που αντέχουν για μεγάλο χρονικό διάστημα. Όταν το τμήμα του βράχου βρίσκεται υπό μονοαξονική φόρτιση, η τιμή αυτή αυξάνεται κατά 50% έτσι ώστε να επιτυγχάνεται τιμή για το SIK μέχρι και 5 και να εξασφαλίζει διαρκή ευστάθεια στην περιμετρική περιοχή.

Ένα ανάλογο κριτήριο με αυτό, μπορεί να καθορίσει τα όρια της διαστολής:

$$DSIK = \frac{\sigma_{eff,Dil}}{\sigma_{eff,w}} = \frac{\sigma_{1,Dil} - \sigma_3}{\sigma_{eff,w}} \quad (4)$$

Από τις δοκιμές σύντομης διάρκειας με $\dot{\varepsilon} = 2.5 \cdot 10^{-5} s^{-1}$ προέκυψε, από την επιδρούσα θλίψη, η ακόλουθη σχέση για τον καθορισμό των επιτρεπτών ανηγμένων παραμορφώσεων:

$$\varepsilon_{krit} = \varepsilon_{krit,max} \cdot \left(1 - e^{-\frac{(\sigma_{z,\varepsilon} + \sigma_3)}{\sigma_{o,\varepsilon}}} \right) \quad (5)$$

Πίνακας 5.2 : παράμετροι για την περιγραφή της παραμόρφωσης θραύσης σε δοκιμή σύντομης διάρκειας

		Παραμόρφωση θραύσης	
Πέτρωμα	$\varepsilon_{krit,max}$ [%]	$\sigma_{Z,s}$ [MPa]	$\sigma_{o,s}$ [MPa]
Αλίτης	13	0,4	6

Από την ακόλουθη σχέση, είναι δυνατός ο υπολογισμός του βαθμού του εφελκυσμού:

$$ESIK = \frac{\varepsilon_{krit,max}}{\varepsilon_{eff,w}}$$

Οι βραχομηχανικές παράμετροι που εισήχθησαν στη δοκιμή στο υπολογιστικό μοντέλο για το σύμπλεγμα των πετρωμάτων (κύριος ανυδρίτης και γκρι αλατούχος άργιλος) εκτιμήθηκαν στα πλαίσια ενός εκτεταμένου ερευνητικού προγράμματος της IfG (1995b), ανεξάρτητου από την τοποθεσία.

Πίνακας 5.3: Χρησιμοποιούμενες βραχομηχανικές παράμετροι.

Στρώμα πετρώματος	Μοντέλο	Παράμετροι υλικού				
		E [GPa]	ν	σ_z [MPa]	ϕ [°]	C [MPa]
Κύριος Ανυδρίτης (A3)	Ελαστο-πλαστικό	60	0,26	6,3	17	41,5
Γκρι αλατ. άργιλος (T3) Αλίτης Stassfurt (Na2)	Πρωτεύον και δευτερεύον ερπυσμός, $t_0=10a$	25	0,25	M 1,5	β 7,5	A_1/h^{-1} $2,3 \cdot 10^{-19}$

E = σταθερά ελαστικότητας, ν = σταθερά του Poisson, σ_z = αντοχή σε εφελκυσμό, C=δύναμη συνοχής

5.4.4. Αρχική κατάσταση τάσεων

Η αρχική κατάσταση των τάσεων του μοντέλου προκύπτει, μέσω πολυάριθμων μετρήσεων θραύσης, από το ρυθμό μεταβολής πίεσης-βάθους: $D_G = \rho g = 0,025 \text{ MPa/m}$, με μέση πυκνότητα: $\rho = 2,548 \text{ g/cm}^3$ κι επιτάχυνση της βαρύτητας $g = 9,81 \text{ m/s}^2$.

Στα πετρώματα χαρακτηριστικής συμπεριφοράς ερπυσμού και εκτόνωσης, όπως είναι τα άλατα, τα αποτελέσματα των μετρήσεων αντιστοιχούν στην λιθοστατική πίεση των υπερκειμένων. Για παράδειγμα, η δομή μιας ισοτροπικής κατάστασης τάσεως με ίδια πίεση από όλες τις πλευρές, θα έχει δείκτη πλευρικής πίεσης $\lambda=1$.

5.4.5 Αποτελέσματα υπολογισμών

Για την περιοχή γύρω από την αίθουσα των κονσέρτων, τέθηκε ως βάση η κατάσταση του εντατικού πεδίου, στα χρονικά σημεία 1, 20 και 100 χρόνων μετά την εξόρυξη και ο συνυπολογισμός τόσο του κριτηρίου SIK όσο και του κριτηρίου DSIK. Πέρα από αυτά, για το ίδιο χρονικό διάστημα, δίνεται και μία περίληψη σχετικά με την κατάσταση παραμορφώσεων.

Για επιλεγμένα περιμετρικά σημεία (ιστορικά σημεία) προβλέπεται μια διηνεκής σχεδίαση των παραμορφώσεων αυτού του σημείου μέσα στην αίθουσα κονσέρτων. Όλες οι τάσεις δίνονται σε MPa, οι παραμορφώσεις σε m, ενώ ο χρόνος ερπυσμού σε χρόνια. Οι τιμές DSIK και SIK συμβολίζουν διαστάσεις μεγεθών.

α) Μετατοπίσεις

Στο σχήμα 5-5, στο επάνω μέρος, παρουσιάζονται οι κατακόρυφες μετατοπίσεις στο χώρο γύρω από την αίθουσα κονσέρτων, για το χρονικό σημείο 20 χρόνια μετά την κατασκευή του έργου. Στο κάτω μέρος, συνοψίζεται η ανάπτυξη των περιμετρικών μετατοπίσεων μέσα στο ανοίγμα, για τα τέσσερα ιστορικά σημεία (4-οροφή, 5-δάπεδο, 6-μέτωπο κάθετο στον άξονα χ και 7-μέτωπο κάθετο στον άξονα γ έως την παρούσα χρονική στιγμή (9/99). Μετά από αυτό η καταβύθιση (χωρίς θραύση) της οροφής, φτάνει στα 7,4 cm, ενώ η ανύψωση του δαπέδου, φτάνει στα 6,9 cm. Τα μέτωπα τότε, προβλέπεται να έχουν κινηθεί προς τα μέσα, κατά 6,00 cm και 5,7 cm αντίστοιχα.

Στη φάση του μεταβατικού ερπυσμού, η οποία διαρκεί έως και 5 χρόνια μετά την εκσκαφή, επιβεβαιώνεται ήδη, το μισό αυτών των τιμών των μετατοπίσεων. Στην αμέσως επόμενη φάση, αυτή του σταθερού ερπυσμού, προβλέπεται ακόμη για την περιμετρική μετατόπιση, ρυθμός σύγκλισης περίπου 2 mm/χρόνο. Από αυτό προκύπτει ότι η σύγκλιση του ανοίγματος, είναι περίπου 1% κάθε χρόνο.

Σε μια ανάλογη παρατήρηση για την κατάσταση της αίθουσας κονσέρτων 100 χρόνια μετά την έναρξη της κατασκευής της, υπολογίστηκε ότι η κατακόρυφη σύγκλιση θα είναι περίπου 0,4-0,45 m, ενώ η οριζόντια σύγκλιση θα είναι 0,35 m

β) Η κατάσταση των τάσεων

Από την παρατήρηση της εξέλιξης της κατανομής των τάσεων ένα χρόνο μετά την εκσκαφή (σχήμα 5.6), 20 χρόνια μετά την εκσκαφή και 100 χρόνια μετά την εκσκαφή) είναι εμφανές, ότι μετά από ένα χρόνο η κατάσταση της τάσης έχει αλλάξει ελάχιστα. Τα ταυτοποιημένα φορτία των τάσεων στην περίμετρο του ανοίγματος, βρίσκονται, υπό την αρχική τάση της βραχομάζας (16-17 MPa), στα 6 MPa (δάπεδο) και φτάνουν έτσι, μόνο 20-30% της ταυτοποιημένης μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη του υφιστάμενου άλατος.

γ) Τα κριτήρια αστοχίας

- Τάση

Ως συνέπεια της μακροχρόνιας διαρκούς εκτόνωσης των τάσεων, στην περιοχή γύρω από το άνοιγμα προκύπτουν υπολογιστικά, με αυξανόμενους χρόνους, ευνοϊκότερες τιμές για αυτά τα δύο κριτήρια αξιολόγησης. Για την τρέχουσα εκτίμηση των επόμενων χρόνων, μπορεί να τεθεί ως βάση, συντηρητικά, η κατάσταση 1 χρόνο μετά την εκσκαφή. Στην άμεση περιμετρική περιοχή, επιτυγχάνονται μόνο ελάχιστες τιμές για το SIK για 3 χρόνια, έτσι ώστε η κατάσταση της ευστάθειας της περιμέτρου της αίθουσας κονσέρτων να μπορεί να προβλεφθεί για πολλές δεκαετίες. Περιοχές πάνω από τα όρια διαστολής, απαντώνται μόνο μέχρι μία απόσταση μερικών δεκάμετρων στην περίμετρο του ανοίγματος, ειδικά στο δάπεδο και τα μέτωπα. Συγκριτικοί υπολογισμοί με επίπεδη οροφή, έδειξαν ότι η κοίλη οροφή, επιδρά θετικά στην ευστάθεια της αίθουσας.

Η επεξεργασία των τιμών SIK στα φέροντα στοιχεία (στύλοι, υπερκείμενα στρώματα) της αίθουσας κονσέρτων τεκμηριώνει ότι για το φέρον σύστημα της αίθουσας κονσέρτων, μπορεί να ταυτοποιηθεί ευστάθεια, η οποία για άνοιγμα σε αλίτη όπως συνίσταται από την DGEG, 1985, ανέρχεται σε πάνω από 100 %. Έτσι, μπορεί να αποκλειστεί η υποχώρηση της αίθουσας κονσέρτων με το χρόνο, ή η κατάρρευση του ανοίγματος με την επίδραση της τάσης της βραχομάζας.

-Παραμόρφωση

Οι υπολογισμοί που εξαρτώνται από το χρόνο τεκμηριώνουν ότι μέσα σε λίγες δεκαετίες, δεν επιτυγχάνονται κρίσιμες παραμορφώσεις. Σύμφωνα με τις υφιστάμενες παρατηρήσεις που έγιναν επί τόπου, εμφανίζονται αρχικά με σύγκλιση όγκου >5%. Με τη βοήθεια του συγκεκριμένου υπολογιστικού προγράμματος, παρατηρήθηκε ότι οι ενεργές παραμορφώσεις και οι παραμορφώσεις διαστολής, οι τιμές ESIK με τη σχέση (8) για την κατάσταση 100 χρόνια μετά την εκσκαφή (ως αδιάστατο μέγεθος). Οι ενεργές παραμορφώσεις, σ' αυτό το σημείο αγγίζουν τη μέγιστη τιμή 4%.

Η ζώνη μη αποδεκτής διαστολής ($ESIK < 1$), περιορίζεται στην περιμετρική περιοχή, όπου στη μέση του επίπεδου δαπέδου, το μέγιστο πλάτος αυτής της ζώνης

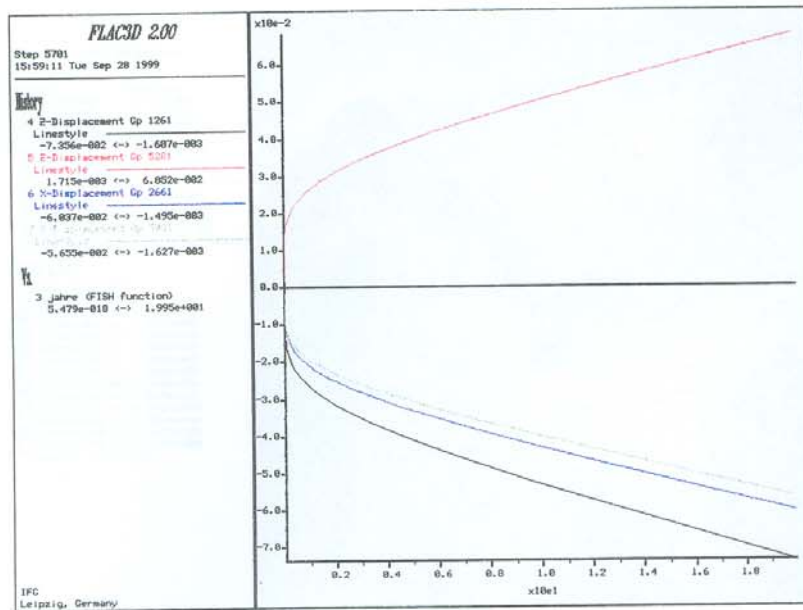
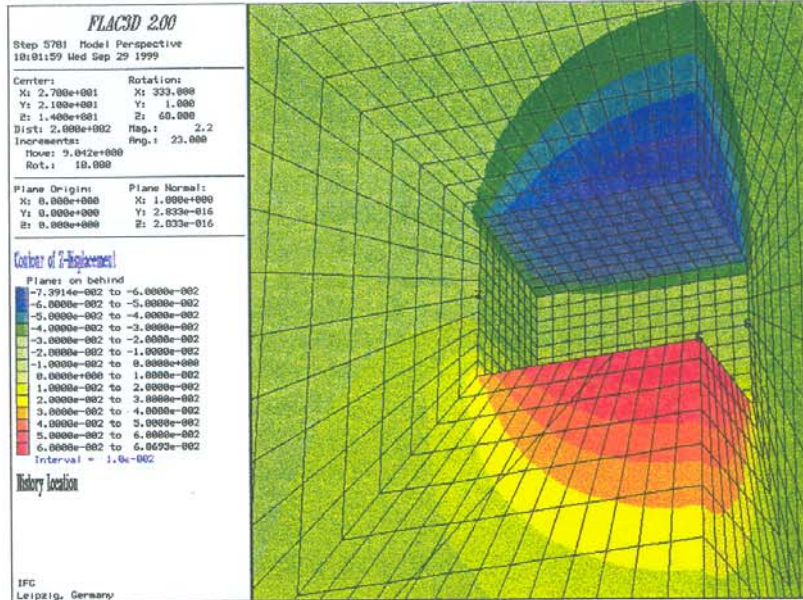
φτάνει στο 1,5 m. Εξαιτίας του τόξου της οροφής, εκεί προβλέπονται πλάτη προφανώς μόνο κάτω του 1 m. Στα μέτωπα, το πλάτος αυτής της ζώνης αγγίζει μια τιμή περίπου 1 m. Στη θέση που κατασκευάστηκε η αίθουσα κονσέρτων, η κατάσταση της ευστάθειας από τις παραδοχές που επιτεύχθηκαν, είναι δεδομένη για μια χρονική περίοδο μερικών δεκαετιών.

Οι τοπικές ανομοιογένειες στη βραχομάζα όμως, οι οποίες δεν μπορούν να συμπεριληφθούν στο υπολογιστικό μοντέλο, και οι οποίες μπορεί να προκλήθηκαν στη γεωλογική δομή εξαιτίας των μεταλλευτικών εργασιών, μπορούν να οδηγήσουν σε τοπικές εμφανίσεις αποσταθεροποίησης και απολέπισης. Για την αποφυγή τέτοιων φαινομένων, απαιτείται η εφαρμογή ορισμένων δομικών μέτρων, όπως για παράδειγμα, με την αγκύρωση. Από βραχομηχανικής άποψης, κάτι τέτοιο δεν είναι απαραίτητο εφόσον η συμπεριφορά της οροφής και των μετώπων είναι ευνοϊκή.

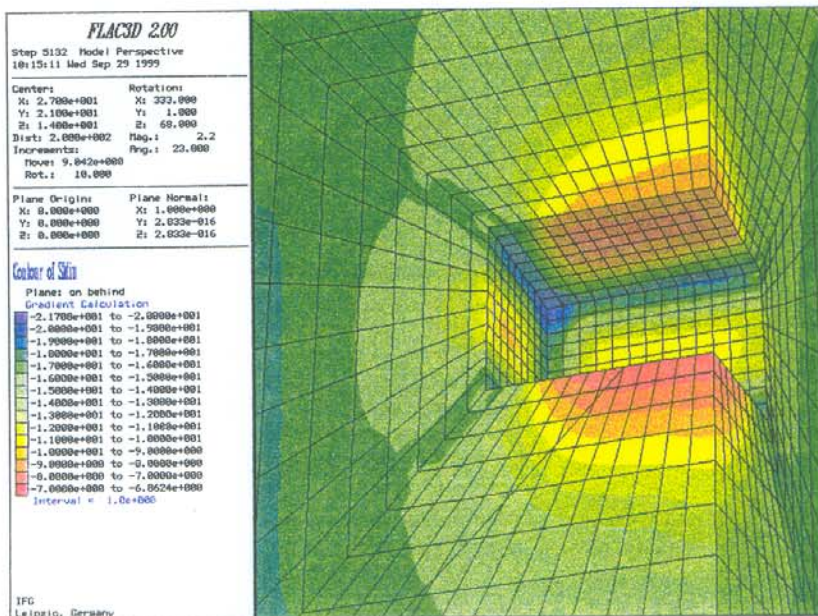
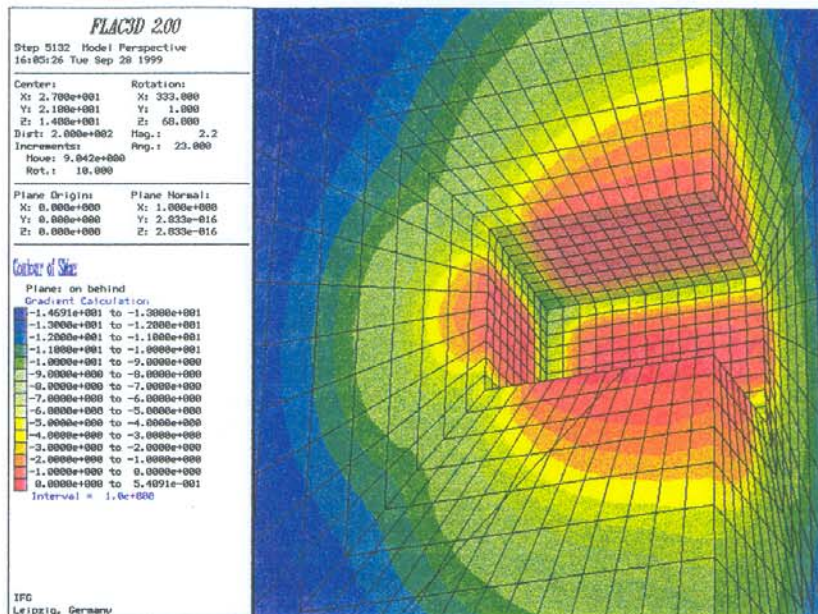
Ένας επαναληπτικός, εντατικός, οπτικός έλεγχος της περιμέτρου του ανοίγματος, καθώς και μία τεκμηρίωση με τεχνικές μετρήσεις για την ευστάθεια της περιμέτρου, σε τακτικούς κύκλους, είναι άκρως απαραίτητος. Ανάλογα με τα αποτελέσματα αυτών των μετρήσεων, αυτοί οι κύκλοι έλεγχοι μπορούν να αραιώσουν.

Από τα παραπάνω συμπεράσματα προκύπτει ότι η τεχνολογία εξόρυξης που θα χρησιμοποιηθεί θα πρέπει να αφήνει όσο το δυνατόν πιο λείες επιφάνειες, ώστε να εξυπηρετεί και το σκοπό δημιουργίας του ανοίγματος, δηλαδή ως αίθουσα μουσικής.

Οι μετατοπίσεις γύρω από το άνοιγμα, 20 χρόνια μετά την εκσκαφή



Η κατανομή των τάσεων γύρω από το άνοιγμα, 1 χρόνο μετά την εκσκαφή.
(πάνω: οι ελάχιστες τάσεις, κάτω: οι μέγιστες τάσεις)



5.4.6. Συμπεράσματα:

Σύμφωνα με τις αριθμητικές αναλύσεις που έγιναν με βάση ένα γενικευμένο βραχομηχανικό δομικό μοντέλο στο χώρο και τις παρατηρήσεις στα γειτονικά υπόγεια μεγάλα ανοίγματα, που παραμένουν ευσταθή και βρίσκονται στον ίδιο ορίζοντα εξόρυξης, μπορεί κανείς να καταλήξει σε ένα ασφαλές συμπέρασμα: η ευστάθεια της αίθουσας κονσέρτων είναι δεδομένη για ένα χρονικό διάστημα μερικών δεκαετιών. Το ίδιο ισχύει και για τους διάφορους βοηθητικούς χώρους στο εσωτερικό του πρώην συνεργείου BMSR.

Για ακόμη ασφαλέστερη τεκμηρίωση των παραπάνω συμπερασμάτων, χρήσιμη θα ήταν η διάνοιξη επιπλέον διατηρημάτων στα υπερκείμενα και υποκείμενα στρώματα, κυρίως για την αναζήτηση των ορίων του καλιούχου στρώματος και την ανίχνευση ενδεχόμενης ύπαρξης αλκαλικών διαλυμάτων.

Πάντως βασισμένη στην έκθεση της αλλά και στη γεωμηχανική της εμπειρία, η εταιρία IfG, πρότεινε μεταξύ άλλων τα εξής:

1. Η απόσταση μεταξύ του ανώτερου σημείου της οροφής της αίθουσας κονσέρτων και του υπερκείμενου στρώματος καλίου, να είναι τουλάχιστον 10 m.
2. Το δάπεδο στην περιοχή των θεατών, να κοπεί λοξά για λόγους σταθερότητας και μείωσης του κόστους εξοπλισμού της αίθουσας.
3. Η εκτέλεση του έργου να γίνει με κοπτικό μηχάνημα.
4. Η μετάβαση από το ένα επίπεδο στο άλλο στις περιοχές κλιμάκωσης της οροφής καθώς επίσης μεταξύ οροφής και μετώπου, να είναι κοίλη και όχι τριγωνική.
5. Αν η ευστάθεια της περιμέτρου δεν εξασφαλίζεται, να χρησιμοποιηθούν αγκύρια στην οροφή και στο μέτωπο.
6. Να υπάρχει ταυτόχρονη γεωτεχνική επίβλεψη, η οποία θα επιβεβαιώνει την ευστάθεια της κατασκευής.
7. Να γίνονται ετήσιες τοπογραφικές μετρήσεις της περιμέτρου της αίθουσας.

6. Ανάπτυξη του έργου

6.1 Τοποθέτηση του έργου

Μετά την ολοκλήρωση της γεωμηχανικής μελέτης από την IfG, επιβεβαιώθηκε οριστικά η καταλληλότητα της περιοχής στην οποία επρόκειτο να κατασκευαστεί η αίθουσα κονσέρτων και οι βοηθητικοί χώροι. Η συγκεκριμένη περιοχή διέθετε ήδη τα απαραίτητα έργα προσπέλασης (απέχει λιγότερο από 150m από το φρέαρ I) και κατάλληλες διαστάσεις για την τοποθέτηση του έργου (αποτελείται από στρώσεις ομογενούς αλίτη, μεγάλων διαστάσεων) και όπως προέκυψε από τη γεωμηχανική μελέτη, η κατάσταση των πετρωμάτων της, επέτρεπε με ασφάλεια μία τέτοια κατασκευή.

Η περιοχή αυτή βρίσκεται στα υπόγεια του ορυχείου “Glückauf Sondershausen”, στους στύλους στήριξης ανατολικά του φρέατος I, σε βάθος περίπου 630 m από την επιφάνεια της Γης (-469,1 m). Τα υπόγεια ανοίγματα, συμπεριλαμβανομένης και της αίθουσας κονσέρτων, τοποθετήθηκαν μεταξύ της διευθυντικής στοάς 13 (Streichende Strecke 13) και της δυτικής στοάς εξόρυξης (Abbaustrecke nach Westen). Οι δύο στοές είναι μεταξύ τους παράλληλες κι απέχουν περίπου 60 m, η μία από την άλλη.

Συγκεκριμένα, η αίθουσα κονσέρτων, τοποθετήθηκε 24 m βορείως της διευθυντικής στοάς 13 (Streichende Strecke 13), 17,5 m νοτίως της στοάς εξόρυξης W (Abbaustrecke W), 25 m δυτικά της εγκάρσιας στοάς (Durchschlagsstrecke) με την οποία διασταυρώνεται η διευθυντική στοά 13, και 20 m ανατολικά του πρώην συνεργείου BMSR. Πάνω από την αίθουσα και σε απόσταση 10 m, διέρχεται η στοά Autobahn Nord (Παράρτημα 1).

6.2 Τεχνικά χαρακτηριστικά

6.2.1. Τεχνικές λεπτομέρειες του έργου

Πριν από την έναρξη των εργασιών της κατασκευής της αίθουσας κονσέρτων και των υπολοίπων βοηθητικών χώρων, χρειάστηκε να διεξαχθούν ορισμένες

εργασίες, απαραίτητες για τη διαρρύθμιση του εργοταξίου μεταξύ της διευθυντικής στοάς 13 και του πρώην συνεργείου BMSR, αφού από την χρονική στιγμή της αναστολής της λειτουργίας του ορυχείου και λίγο πριν την έναρξη των εργασιών, η συγκεκριμένη περιοχή δεν είχε χρησιμοποιηθεί για κάποιο σκοπό.

Μετά τη διαρρύθμιση του σταθμού εργασίας, σειρά είχε η εγκατάσταση και η εξάπλωση του εξοπλισμού, καθώς και ο καθαρισμός των δαπέδων του εργοταξίου. Για την άνετη προσπέλαση του προσωπικού και του εξοπλισμού στο χώρο εργασίας, αρχικά έπρεπε να απομακρυνθούν διάφορα κατάλοιπα από την παλιότερη εκμετάλλευση του ορυχείου (μπάζα, μηχανήματα, ανταλλακτικά, καλώδια, μικροαντικείμενα, κ.α.) που είχαν εγκαταλειφθεί στο εργοτάξιο.

6.2.2 Προχώρηση και κοπή

Η σημαντικότερη εργασία, μεταξύ των προκαταρκτικών εργασιών που έλαβαν χώρα στο σημείο κατασκευής των υπόγειων έργων, ήταν η διεύρυνση της διευθυντικής στοάς 13, η οποία, αφορούσε στο συνολικό της μήκος (132 m). Αρχικά, το πλάτος της στοάς, έφτανε κατά μέσο όρο τα 4,5 m και το ύψος της τα 2,5 m, ενώ μετά τη διαπλάτυνση της, έχει πλάτος 7 m και ύψος 3,5 m.

Το πρώην συνεργείο BMSR, ο χώρος δηλαδή που κατά την περίοδο της λειτουργίας του ορυχείου φιλοξενούσε τις ηλεκτρικές εγκαταστάσεις κι αποτελούσε το σημείο του κεντρικού ελέγχου της εκμετάλλευσης, με βάση το σχεδιασμό διαιρέθηκε σε περισσότερες λειτουργικές ενότητες. Το μπροστινό τμήμα που έχει πρόσβαση από τη διευθυντική στοά 13, διαρρυθμίστηκε ώστε να εξυπηρετεί τις ανάγκες του φουαγιέ. Για τη γαστρονομική εξυπηρέτηση των επισκεπτών, δημιουργήθηκε στο ΒΔ μέτωπο, ένα άνοιγμα βάθους 5,20 m, μήκους 5 m και ύψους 2,5 m. Στο πίσω μέρος, τόσο στο ΒΔ μέτωπο όσο και στο ΝΑ διαμορφώθηκαν δύο χώροι, μήκους 10 m, βάθους 2 m και ύψους 2,5m, στους οποίους τοποθετήθηκαν οι ιματιοθήκες.

Για τη δημιουργία των υγειονομικών χώρων και την τοποθέτηση των ηλεκτροτεχνικών εγκαταστάσεων, το πίσω τμήμα του δαπέδου του πρώην συνεργείου BMSR, κόπηκε στο ίδιο επίπεδο με το μπροστινό τμήμα (περίπου κατά 0,5 m). Ο χώρος των ηλεκτροτεχνικών εγκαταστάσεων βρίσκεται πίσω από τον υγειονομικό χώρο και έχει βάθος 8,2 m και πλάτος 10 m, ακολουθεί δηλαδή τις διαστάσεις του

φουαγιέ. Ο υγειονομικός χώρος έχει το ίδιο πλάτος αλλά το βάθος του ανέρχεται στα 7m. Το ύψος και των δύο χώρων είναι 2,5 m.

Για τη δημιουργία των αποθηκευτικών χώρων, απλώς διευρύνθηκε η προϋπάρχουσα αποθήκη, τόσο κατά μέτωπο όσο και σε ύψος. Η αποθήκη βρίσκεται στο νότιο μέτωπο της διευθυντικής στοάς 13, 65 m από την αφετηρία της, απέναντι περίπου από τη στοά προσπέλασης. Για την αναδιαμόρφωση της χρειάστηκε να επεκταθεί κατά 2,1 m το βάθος της και να φτάσει συνολικά τα 12,10 m, το μήκος της παρέμεινε στα 7,9 m, ενώ το ύψος της αυξήθηκε κατά 1 m, φτάνοντας έτσι συνολικά στα 3 m.

Στο ίδιο μέτωπο της διευθυντικής στοάς 13, περίπου 13 m ανατολικά της αποθήκης, βρίσκεται ο χώρος στον οποίο κάποτε, λειτουργούσε το αντλιοστάσιο του ορυχείου. Η αίθουσα αυτή ανακαινίστηκε και διαμορφώθηκε, ώστε να λειτουργεί ως αίθουσα αναμονής, ενώ οι αντλίες παραμένουν στο χώρο ως μουσειακό έκθεμα. Το δάπεδο του αντλιοστασίου, ήταν εντελώς ανώμαλο και βρισκόταν περίπου 0,6 m ψηλότερα από το δάπεδο της στοάς. Το πρόβλημα αυτό, θα μπορούσε εύκολα να διορθωθεί με ομαλοποίηση και ανύψωση του δαπέδου με επιτσιμέντωση αλλά αυτό θα κατέστρεφε εντελώς τη φυσική όψη του χώρου. Για να αποφευχθούν οι μεγάλες υψομετρικές διαφορές ανάμεσα στο χώρο αναμονής και το τρενάκι Kegelbahn, όπως προαναφέρθηκε, όλη η περιοχή κόπηκε στο επίπεδο της διευθυντικής στοάς 13, δηλαδή το δάπεδο βυθίστηκε κατά 0,6 m.

Για την επιβεβαίωση της απόστασης της οροφής της αίθουσας από το υπερκείμενο στρώμα του καλίου και της πρώτης ζώνης χαλάρωσης, αλλά και για την ανίχνευση εισχώρησης αλκαλικών διαλυμάτων, πραγματοποιήθηκαν ορισμένες γεωλογικές γεωτρήσεις. Οι ερευνητικές εργασίες ξεκίνησαν με τη διάνοιξη μιας ερευνητικής στοάς, η οποία είχε τη μικρότερη δυνατή διατομή. Η επιλογή αυτής της διατομής έγινε έχοντας ως βασικό κριτήριο τη βέλτιστη ανάκτηση γεωλογικών δεδομένων με το ελάχιστο δυνατό κόστος. Η ερευνητική στοά ουσιαστικά, ακολούθησε την διεύθυνση που είχε προβλεφθεί για τη δημιουργία του διαδρόμου που οδηγεί στην κύρια είσοδο της αίθουσας κονσέρτων (στοά επισκεπτών). Έτσι, και η ερευνητική στοά ακολούθησε ανοδική πορεία κατά 10%, έως το σημείο που επρόκειτο να τοποθετηθεί η είσοδος της αίθουσας, οπότε και επεκτάθηκε σε οριζόντια πλέον διεύθυνση.

Μετά την ολοκλήρωση της ερευνητικής στοάς, ανοίχθηκαν τα απαραίτητα γεωλογικά διατρήματα, ελήφθησαν τα αντίστοιχα δείγματα και στη συνέχεια, όπου η

οπή της διάτρησης, δεν επρόκειτο να εξαφανιστεί με τη μελλοντική εκσκαφή της αίθουσας κονσέρτων, φράχθηκε ξανά, ώστε να μην είναι εμφανής.

Μετά την οριστική διαχάραξη των βοηθητικών χώρων, ξεκίνησε η κατασκευή και της αίθουσας κονσέρτων, η οποία πραγματοποιήθηκε με κοπή του πετρώματος, με κοπτικό μηχάνημα (Alpine Miner 50). Σύμφωνα με τον τελικό σχεδιασμό της αίθουσας κονσέρτων, το δάπεδο της έπρεπε να τοποθετηθεί περίπου 1 m, κάτω από το επίπεδο της διευθυντικής στοάς 13. Η τοποθέτηση αυτή, προέκυψε μετά από τον υπολογισμό της μέγιστης δυνατής, σε βάθος, μεταφοράς του δαπέδου μέσα στον υποκείμενο αλίτη, σύμφωνα με τις συστάσεις της γεωμηχανικής έκθεσης.

Για την προσπέλαση των επισκεπτών στην αίθουσα, δημιουργήθηκαν δύο είσοδοι, μεγάλων διαστάσεων, στις οποίες οδηγούν η στοά επισκεπτών (Besucherstrecke) και η στοά προσπέλασης (Zufahrtsstrecke) όπως ονομάζονται. Η στοά των επισκεπτών, η οποία επειδή δημιουργήθηκε με ανοδική κλίση 10%, επικάλυψε την ερευνητική στοά που είχε ήδη διανοιχτεί. Η στοά αυτή έχει μήκος 20 m, πλάτος 4m και το ύψος της φτάνει στα 3,0 m. Σε τέσσερα διαφορετικά σημεία της στοάς των επισκεπτών (δύο σε κάθε μέτωπο), τοποθετήθηκαν μικρά ανοίγματα (πλάτος 1m, ύψος 1,5 m, βάθος 0,5 m), τα οποία χρησιμοποιούνται ως βιτρίνες για την έκθεση εντυπωσιακών αλατούχων πετρωμάτων. Ο σκοπός της δημιουργίας αυτής της στοάς ήταν να οδηγεί τον επισκέπτη από το φουαγιέ απευθείας μέσα στην αίθουσα κονσέρτων. Το κατώφλι της εισόδου της αίθουσας κονσέρτων απέχει 2,84 m από το δάπεδό της, ενώ και η ίδια η είσοδος, έχει πλάτος 4 m και ύψος 3 m. Η είσοδος βρίσκεται ακριβώς στο μέσο του οπίσθιου μετώπου της αίθουσας, αφού απέχει κατά 7 m και από τα δύο πλευρικά της μέτωπα.

Στη δεύτερη είσοδο οδηγεί η στοά προσπέλασης, η οποία ξεκινάει από το βόρειο μέτωπο της διευθυντικής στοάς 13, περίπου 75 m από την αφετηρία της. Η στοά προσπέλασης, έχει μήκος 22 m, πλάτος 4 m, ύψος 3,5 m και η κλίση της, καθ' όλο το μήκος της είναι ανοδική κατά 5%. Το άνοιγμα στο τέρμα της στοάς προσπέλασης, έχει ύψος 4,5 m και πλάτος 4 m, ενώ το κατώφλι της βρίσκεται στο ίδιο επίπεδο με το επίπεδο του δαπέδου της αίθουσας. Η απόσταση της από το εμπρόσθιο μέτωπο της αίθουσας φτάνει στα 7 m, όσο δηλαδή είναι και το πλάτος της εξέδρας της σκηνης, ενώ από το οπίσθιο μέτωπο απέχει 15 m, όσος δηλαδή είναι ο χώρος των καθισμάτων των επισκεπτών.

Η ολοκλήρωση της κατασκευής της αίθουσας κονσέρτων πραγματοποιήθηκε σε τρεις φάσεις αφού η κοπή του αλίτη έγινε σε τρία στάδια. Αρχικά, η κοπτική μηχανή

διευρύνοντας την ερευνητική στοά, έκοψε ένα τμήμα του βράχου, πλάτους περίπου 18 m, όσο δηλαδή επρόκειτο να είναι το πλάτος της αίθουσας κονσέρτων και ύψους περίπου 2 m, ώστε να έχει χώρο να εργαστεί. Στη συνέχεια, ξεκίνησε η διαμόρφωση της οροφής με μεγαλύτερη λεπτομέρεια στην κοπή και άρχισαν να σχηματίζονται οι βαθμίδες της. Η διαμόρφωση ξεκίνησε με το σχηματισμό της χαμηλότερης βαθμίδας, που βρίσκεται πάνω από την είσοδο της οροφής και το ύψος της οποίας, στο σημείο αυτό έφτανε λίγο πάνω από τα 3 m.

Το στάδιο διαμόρφωσης της οροφής, ήταν ιδιαίτερα χρονοβόρο αφού η κοπή του διήρκησε από τις 04.08.00 έως και τις 10.10. 00. Με το πέρας αυτού του σταδίου, είχε ήδη διαμορφωθεί το τμήμα της αίθουσας, από το κατώφλι της κεντρικής εισόδου έως και την υψηλότερη βαθμίδα της οροφής. Το άνοιγμα, δηλαδή, που είχε διαμορφωθεί, έως αυτό το χρονικό σημείο, είχε πλάτος 18 m και ύψος από 3 m περίπου έως και 7 m.

Όταν ολοκληρώθηκε αυτή η φάση, η κοπτική μηχανή, τοποθετήθηκε σε θέση, προς τα κάτω κοπής, κι έκοψε τον αλίτη κατά 1,5 m περίπου, διαμορφώνοντας το μεσαίο τμήμα της αίθουσας. Η αποπεράτωση αυτού του επιπέδου είχε τη μικρότερη χρονική διάρκεια αφού η κοπή του ξεκίνησε στις 25.10.00 και ολοκληρώθηκε στις 17.11 του ίδιου έτους. Το τρίτο και τελευταίο στάδιο κοπής, περιελάμβανε τη διαμόρφωση του δαπέδου της αίθουσας και διεκπεραιώθηκε με προς τα κάτω κοπή του αλίτη, κατά 1,5 m περίπου ακόμη. Το στάδιο αυτό ολοκληρώθηκε σε λιγότερο από ένα μήνα (17.11.00-15.12.00).

6.2.3 Η γεωμετρία της αίθουσας

Η γεωμετρία της αίθουσας κονσέρτων, όπως προέκυψε από την ακουστική μελέτη και τη γεωμηχανική επιβεβαίωση της ευστάθειας της, αποτέλεσε ιδιαίτερη πρόκληση για τους μηχανικούς και τους τεχνικούς που ανέλαβαν να την πραγματοποιήσουν. Οι μέγιστες διαστάσεις της αίθουσας κονσέρτων, είναι 26 m μήκος, 18 m πλάτος και 10 m ύψος.

Το πλάτος της αίθουσας, στο επίπεδο του δαπέδου αγγίζει τα 18 m, αλλά επειδή η γωνία που σχηματίζουν τα πλευρικά τοιχώματα με το δάπεδο είναι $86,8^\circ$, όσο το ύψος της αίθουσας αυξάνει, τόσο το πλάτος της μειώνεται. Έτσι, σε απόσταση 4 m από το δάπεδο, το πλάτος της αίθουσας ανέρχεται στα 17,7 m, ενώ στο σημείο που το μέτωπο αγγίζει την οροφή, το πλάτος της είναι στα 17 m.

Το ύψος της οροφής κυμαίνεται από τα 6,3 m έως και τα 10 m. Από το οπίσθιο μέτωπο, όπου το ύψος της αίθουσας είναι 6,30 m και προς το εμπρόσθιο μέτωπο, όπου το ύψος της αίθουσας είναι 10m, το ύψος της οροφής κλιμακώνεται ως εξής: σε απόσταση 2,1 m, το ύψος της οροφής είναι 7,3 m, σε απόσταση 4 m, το ύψος της οροφής είναι 8,3 m, σε απόσταση 6,1 m, το ύψος της οροφής είναι 9,1 m, σε απόσταση 8,6 m, το ύψος της οροφής είναι 9,4 m, σε απόσταση 11,5 m, το ύψος της οροφής είναι 9,6 m, σε απόσταση 14,9 m, το ύψος της οροφής είναι 10 m, σε απόσταση 18,9 m, το ύψος της οροφής είναι 9,9 m, σε απόσταση 23,7 m, το ύψος της οροφής είναι 9,3 m και τέλος σε απόσταση 25,9 m, το ύψος της οροφής είναι 10 m, που είναι ουσιαστικά το ύψος του εμπρόσθιου μετώπου.

6.3. Επιμέρους εργασίες διαμόρφωσης του χώρου.

Πάνω από τη συνολική περιοχή της σκηνής της αίθουσας κονσέρτων, κατασκευάστηκε για τη στήριξη της εξέδρας, ένα τοίχιο από ογκόλιθο, πάχους 24 cm και ύψους 4,0 m, το οποίο «κρύφτηκε» μέσα στη βραχομάζα και στηρίχτηκε με βραχέα αγκύρια και αγκύρια σύρματος. Επίσης κατά μήκος των 18 m, του πλάτους της σκηνής, διατάχτηκαν συμμετρικά τρεις στύλοι, πλάτος 75 cm έκαστος και προεξοχής 49 cm.

Για το διαχωρισμό των λειτουργικών χώρων (φουαγιέ, περιοχή υγιεινής και ηλεκτρικών εγκαταστάσεων) ανεγέρθησαν δύο διαχωριστικοί τοίχοι από κλίνκερ, ύψους 2,25 m και πάχους 24 cm. Στη μέση των τοίχων τοποθετήθηκε από μία δίφυλλη πόρτα με αποσπώμενα πλευρικά τμήματα, η οποία στηρίζεται πάνω σε στύλους.

Κατά την εγκατάσταση της τοιχοδομής τοποθετήθηκαν στο μέτωπο του άλατος, επωθημένα σίδερα αντίστασης στη διάτμηση (μήκους 1m και διαμέτρου 10), σε κατακόρυφη απόσταση 1 m. Για την τοποθέτηση τους ανοίχτηκαν με διάτρηση, οπές διαμέτρου 20 mm και μήκους 0,8 m, τα σίδερα βυθίστηκαν μέσα στα διατρήματα μέχρι βάθους 10 cm και αγκυρώθηκαν στην τοιχοδομή. Οι επιφάνειες αντίστασης των τοιχοδομών λειάνθηκαν και όλες οι ορατές επιφάνειες διαμορφώθηκαν με ομαλούς γραμμικούς αρμούς.

Ως υπόβαθρο για την κατασκευή του πατώματος της αίθουσας κονσέρτου χρησιμοποιήθηκε ένα στρώμα φίνου άλατος, πάχους 20 cm, το οποίο τοποθετήθηκε

συμπυκνωμένο. Πάνω σε αυτό, ως πλαίσιο στήριξης της ξυλόστρωσης, τοποθετήθηκαν ξύλινοι πρισματικοί δοκοί. Τα ξύλα τοποθετήθηκαν το ένα δίπλα στο άλλο με τη μέγιστη δυνατή απόσταση και τα ενδιάμεσα κενά, πληρώθηκαν με φίνο αλάτι και συμπυκνώθηκαν ξανά, ώστε η επιφάνεια των πρισματικών δοκών να συμπίπτει με την επιφάνεια του φίνου αλατος. Η επιφάνεια αυτή καθαρίστηκε και στη συνέχεια τοποθετήθηκε η ξυλόστρωση, η οποία αποτελείται από σανίδια πάχους 35,5 mm που βιδώθηκαν πάνω στους πρισματικούς δοκούς.

Για τη λείανση τους, τα δάπεδα των περισσότερων βοηθητικών χώρων (διευθυντική στοά 13, συνεργείο BMSR, χώροι αποθήκευσης, στοά προσπέλασης και στοά επισκεπτών), επιστρώθηκαν με μπετόν μαγνησίας (MB 225), πάχους περίπου 10 cm. Η ονομαστική αντοχή έπρεπε να είναι μεγαλύτερη από 20 N/mm^2 , ενώ ανά 6 m τοποθετήθηκαν αρμοί διαστολής. Η τοποθέτηση του μπετόν, παρέχει σταθερό και καθαρό υπόβαθρο με σημαντική φέρουσα ικανότητα.

Στις εισόδους της αίθουσας κονσέρτων τοποθετήθηκαν θύρες προστασίας από τον καπνό, εκ των οποίων, η θύρα της εισόδου από τη στοά των επισκεπτών είναι δίφυλλη με δύο σταθερά πλευρικά τμήματα που ανοίγουν προς τα έξω, ενώ η θύρα της εισόδου από τη στοά προσπέλασης, είναι τετράφυλλη με δυνατότητα απόσπασης των πλευρικών τμημάτων. Για τον εντοιχισμό των θυρών διευρύνθηκαν οι σταθερές διατομές των στοών, ενώ κατά την τοποθέτηση τους πραγματοποιήθηκε συμπαγής στεγανοποίηση (αφρός, ορυκτό μαλλί, κ.α.) στην περιοχή της οροφής, ώστε να εμποδίζεται η εκτόνωση της βραχομάζας. Το πλαίσιο της κατασκευής σταθεροποιήθηκε στη βραχομάζα με αγκύρια, ενώ τα ενδιάμεσα κενά, πληρώθηκαν με δομικά υλικά (στόκος, σιλικόνη, κ.α.).

Για την απομόνωση των αποθηκευτικών χώρων τοποθετήθηκε ένας καγκελωτός φράχτης με ενσωματωμένη πόρτα που κλειδώνει, ενώ ένας ίδιος φράχτης τοποθετήθηκε και στην περιοχή διασταύρωσης των στοών πίσω από το μικρό τρένο. Τέλος, για την περίπτωση που οι επισκέπτες θα επιχειρήσουν να εισέλθουν και σε άλλους υπόγειους χώρους, πέραν των προβλεπόμενων, τοποθετήθηκαν περισσότερες λυόμενες καγκελόπορτες ίδιου τύπου.

6.4. Ο αερισμός της αίθουσας κονσέρτων

Η κυκλοφορία του αέρα μέσα στην αίθουσα κονσέρτων πραγματοποιείται από τη διευθυντική στοά 13, μέσω της στοάς προσπέλασης, των δύο κυκλικών ανοιγμάτων που βρίσκονται στην οροφή της αίθουσας κονσέρτων, τα οποία επικοινωνούν απευθείας με τη στοά "Autobahn Nord" και των δύο κυκλικών ανοιγμάτων που την ενώνουν το φουαγιέ.

6.4.1 Υπολογισμός της κατάλληλης ποσότητας αέρα

Με βάση τον κανονισμό που ισχύει για όλα τα ορυχεία, πλην των ανθρακωρυχείων, ο απαιτούμενος όγκος του φρέσκου αέρα ανά άτομο στα υπόγεια, ανέρχεται στα $2 \text{ m}^3/\text{min}$. Σύμφωνα με το DIN 1946, ο μέσος όγκος εξωτερικού αέρα ανά άτομο στους κινηματογράφους, τις αίθουσες κονσέρτων, τα αναγνωστήρια, τις αίθουσες εκθέσεων, τα καταστήματα, τα μουσεία, τα γυμναστήρια και τα κλειστά γήπεδα, ανέρχεται σε $20 \text{ m}^3/\text{h}$, που σημαίνει ότι απαιτείται ανακύκλωση του αέρα 4 έως 5 φορές μέσα σε μία ώρα.

Με την προϋπόθεση ότι, η αίθουσα κονσέρτων έχει όγκο $V_R=3895 \text{ m}^3$, τότε απαιτείται ανακύκλωση του αέρα πέντε φορές την ώρα, δηλαδή απαιτούνται περίπου $20000 \text{ m}^3/\text{h}$ ή $333 \text{ m}^3/\text{min}$ καθαρού αέρα. Ο μέγιστος αριθμός ατόμων για τον οποίο είναι κατασκευασμένη η αίθουσα κονσέρτων ανέρχεται στους 350 (300 θεατές + 50 μουσικοί).

Για το σχεδιασμό επιπρόσθετων εγκαταστάσεων, ώστε να παρέχεται και τεχνικός αερισμός στην αίθουσα, τέθηκε ως βάση, ότι για κάθε άτομο απαιτούνται $2 \text{ m}^3/\text{min}$ φρέσκου αέρα. Η είσοδος του φρέσκου αέρα πραγματοποιείται από τις εισόδους της αίθουσας και από τα διατρήματα στην οροφή της, στα οποία τοποθετήθηκαν αεριστήρες με μεγάλο αριθμό περιστροφών και μέγιστη ταχύτητα αερισμού περίπου 4 m/s .

Επειδή κατά τη διάρκεια των κονσέρτων και των λοιπών εκδηλώσεων, οι πόρτες παραμένουν κλειστές για λόγους ακουστικής, ο ρυθμός περιστροφής των αεριστήρων μειώνεται ώστε να περιορίζεται ο ενοχλητικός τους θόρυβος. Έτσι, εκτός από τη διάρκεια των διαλειμμάτων που η αίθουσα αερίζεται πλήρως, κατά τη

διάρκεια των μουσικών εκδηλώσεων, θεωρήθηκε ότι αρκεί $1,0 \text{ m}^3/\text{min}$ φρέσκου αέρα για κάθε άτομο. Έτσι η ταχύτητα αερισμού περιορίστηκε στα 2 m/s .

Οι αεριστήρες που εγκαταστάθηκαν επί της στοάς "Autobahn Nord" συνδέονται με τα διατήρηματα μεγάλης διατομής που βρίσκονται στην οροφή της αίθουσας κονσέρτων, μέσω αγωγού διοχέτευσης του αέρα, διατομής 1 m . Το μήκος των συρμάτων κάθε αγωγού είναι 25 m , ενώ οι απώλειες της τριβής λόγω των σχετικά κοντών καλωδίων ($< 50 \text{ m}$, συμπεριλαμβανομένου του διατηρήματος) και της σταθερής διατομής δεν λαμβάνονται υπόψη. Υπό την παραδοχή μέγιστης ποσότητας αέρα $700 \text{ m}^3/\text{min}$ και μέγιστης ταχύτητας αέρα 8 m/s (μόνο στον αγωγό διοχέτευσης), οι εγκατεστημένοι αεριστήρες πρέπει να έχουν τις εξής ιδιότητες:

- μέγιστο όγκο ρεύματος $= 15 \text{ m}^3/\text{s}$
- ρύθμιση ταχύτητας χωρίς διαβαθμίσεις
- χαμηλή ταχύτητα, ήσυχη περιστροφή
- διατομή 1.0 m
- προστασία από έκρηξη

Οι εγκαταστάσεις τεχνητού αερισμού είναι συνάρτηση των μέτρων προστασίας από πυρκαγιά.

6.5 Προστασία από πυρκαγιά

Για την περίπτωση πυρκαγιάς κατά τη διάρκεια κάποιας εκδήλωσης μέσα στην αίθουσα κονσέρτων, οι δύο έξοδοι διαθέτουν σήμανση εξόδου κινδύνου, οδηγώντας τους παρευρισκόμενους σε στοές με φρέσκο αέρα. Για να αποκλειστεί όμως το ενδεχόμενο μιας τέτοιας ανεπιθύμητης εξέλιξης ή έστω να περιοριστεί, χρησιμοποιήθηκαν στην κατασκευή του έργου μη εύφλεκτα υλικά. Με τη βοήθεια ενός πραγματογνώμονα προτάθηκαν κάποια μέτρα αντίστοιχα των προδιαγραφών του ορυχείου και αφορούσαν στην έγκαιρη αναγνώριση της πυρκαγιάς και της αναγγελίας της, καθώς και την παρεμπόδιση και την καταπολέμηση της και τη διάσωση του κόσμου. Στο σημείο εγκαταστάθηκαν και πυροσβεστήρες χειρός, βάρους 6 kg και 50 kg .

Τέλος ελέγχθηκε ακόμη και το ενδεχόμενο της απόφραξης των στοών σε περίπτωση πυρκαγιάς και τον περιορισμό του φρέσκου αέρα και της δυνατότητας

διάσωσης των παρευρισκομένων στην αίθουσα κονσέρτων ή σε κάποιο άλλο σημείο του ορυχείου.

6.6 Η κοπτική μηχανή που χρησιμοποιήθηκε

Η πρώτη κοπτική μηχανή τύπου ALPINE MINER 50 (AM 50), κατασκευάστηκε το 1970 κι από τότε έως σήμερα, έχουν παραδοθεί προς χρήση, ανά τον κόσμο, περισσότερα από 900 μηχανήματα μερικής κοπής, αυτού του τύπου. Ο AM 50, είναι μηχανήμα μερικής κοπής και σχεδιάστηκε για εξόρυξη με κοπή, πετρωμάτων μέσης σκληρότητας, μονοαξονικής αντοχής σε θλίψη μέχρι 100 MPa. Όταν σε ένα πέτρωμα χαμηλής αντοχής, απαντώνται ενδιάμεσες στρώσεις πετρωμάτων υψηλότερης αντοχής, η κοπή προχωρεί κανονικά, αφού δεν απαιτείται η αντικατάσταση του από άλλη κοπτική μηχανή.

Ο AM 50 (εικόνα 6.1, 6.2) μπορεί να χρησιμοποιηθεί, σ' ένα ορυχείο, τόσο για τη δημιουργία των έργων προσπέλασης όσο και για την εκμετάλλευση ενός κοιτάσματος. Οι δυνατότητες παραλλαγής του ποικίλλουν. Κινείται πάνω σε ερπύστριες, η κίνηση μεταδίδεται στις οποίες, μέσω ηλεκτροκινητήρα και μπορεί να δουλεύει και σε κεκλιμένα, μέχρι και 18 gon. Είναι ένα όχημα, το οποίο, αποσυναρμολογείται πολύ εύκολα, έχει χαμηλό ύψος κι ελάχιστο βάρος, για αυτό και μπορεί εύκολα να εργαστεί ακόμη και σε πολύ στενούς υπόγειους χώρους. Ο βραχίονας του οχήματος μπορεί α στραφεί προς όλες τις κατευθύνσεις και του επιτρέπει να κόψει κάθε επιθυμητό σχήμα τραπεζίου ή τόξου, μέγιστης διατομής ύψους 4 m και πλάτους 4.8 m. Με τη χρησιμοποίηση ορισμένων ακόμη, επιπρόσθετων λειτουργιών μπορεί να επιτευχθεί κοπή σε ύψος μεγαλύτερο από τα 4m. Τέλος, το πλάτος κοπής, το οποίο μπορεί να επιτύχει, λόγω της ταχείας αλλαγής της θέσης του, είναι πρακτικά απεριόριστο. Οι παραπάνω λόγοι, οδηγούν στο συμπέρασμα ότι ο AM 50, ήταν η καταλληλότερη επιλογή για το συγκεκριμένο έργο.



Εικόνα 6.1: Ο AM 50, επί της στοάς προσπέλασης προς την αίθουσα κονσέρτων



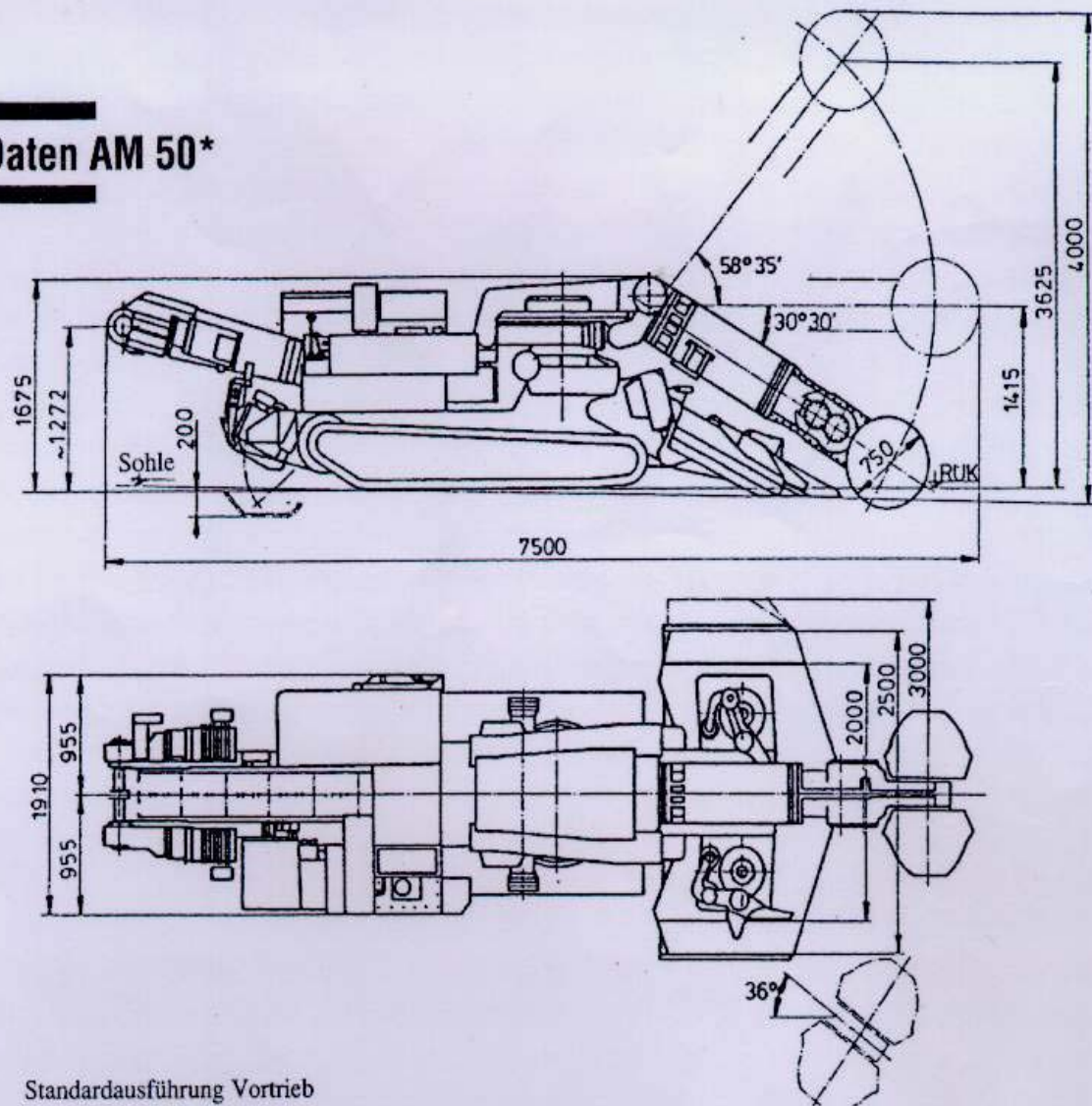
Εικόνα 6.2.: Ο AM 50, κατά τη χάραξη της οροφής της αίθουσας κονσέρτων.

Τα τεχνικά χαρακτηριστικά του Alpine Miner AM-50 (εικόνα 6.3):

-Συνολικό ύψος	1645 mm
-Συνολικό μήκος	7500 mm
-Συνολικό πλάτος χωρίς την πλάνη	1910 mm
-Συνολικό βάρος	ca. 24 t
-Πλάτος της εγκατάστασης της ερπύστριας	1580 mm
-Πλάτος της αλυσίδας της ερπύστριας	370 mm
-Τάση δαπέδου κάτω από την ερπύστρια	13 N/cm ²
-Πλάτος πλάνης κατ' επιλογήν	2 m, 2,5 m, 3m
-Μέγιστη θέση της πλάνης πάνω από το κάτω άκρο της ερπύστριας	350 mm
-Μέγιστη θέση της πλάνης κάτω από το κάτω άκρο της ερπύστριας	80 mm
-Μέγιστη δυνατότητα εξόρυξης υπό το δάπεδο	100 mm
-Μέγιστο ύψος της διατομής της κοπής	4000 mm
-Μέγιστο πλάτος διατομής της κοπής, από σταθερή θέση	4800 mm
-Μέγιστο προσπελάσιμο κεκλιμένο	18 gon
-Ταχύτητα οδήγησης	στα 50 Hz 5m/min στα 60 Hz 6m/min
-Ταχύτητα μεταφοράς δι' ατέρμονου αλυσου	στα 50 Hz 0,9m/sec στα 60 Hz 1,08 m/sec

Ο ηλεκτρικός εξοπλισμός δύναται να περιέχει ή όχι, προφυλακτήρα εκρήξεων αερίων, αφού σε χώρες όπως, η Γερμανία, η Γαλλία, η Αυστραλία, η Ισπανία, η Γιουγκοσλαβία, η Ινδία, η Πολωνία και οι Η.Π.Α, ο προφυλακτήρας των εκρήξεων αποτελεί υποχρεωτικό τμήμα του μηχανήματος σύμφωνα με τις αντίστοιχες διατάξεις.

Daten AM 50*



Σχήμα 6.3: Πλάγια όψη και κάτοψη ενός ALPINE MINER 50

7. Η μέθοδος διεξαγωγής των μετρήσεων

7.1. Εισαγωγή

Όταν η εταιρία Kali-Umwelttechnik Sondershausen GmbH (K-UTEC), ανέλαβε τον Ιούνιο του 2000 την διεκπεραίωση της γεωτεχνικής έρευνας και τη σύνταξη μιας βραχομηχανικής έκθεσης για την προβλεπόμενη υπόγεια αίθουσα κονσέρτων, κρίθηκε ότι η καταλληλότερη μέθοδος πραγματοποίησης των μετρήσεων, ήταν η μέθοδος της υδραυλικής θραύσης. Η ίδια εταιρία, από το 1979 έως και τις αρχές του Ιουνίου του 2000, είχε πραγματοποιήσει συνολικά 7.122 μετρήσεις υδραυλικής θραύσης σε 586 υπόγεια διατρήματα, 1.948 εκ των οποίων είχαν πραγματοποιηθεί στο ορυχείο Glückauf Sondershausen (179 διατρήματα). Ήδη από τα έτη 1986 και 1987, η εφαρμογή της μεθόδου αυτής, έχει εξελιχθεί σε μία αξιόπιστη και αναντικατάστατη μέθοδο για τη γεωτεχνική εκτίμηση της -επί τόπου- κατάστασης των τάσεων των αλατωρυχείων της κεντρικής Γερμανίας.

Η μέθοδος αυτή έχει το πλεονέκτημα ότι μπορεί να υπολογίσει αποτελεσματικά την τιμή της μικρότερης κύριας τάσης στην εκάστοτε περιοχή έρευνας και για αυτό συνίσταται τόσο κατά τη φάση της εκμετάλλευσης ή τη φάση σχεδιασμού επαναλειτουργίας ενός κλειστού ορυχείου, όσο και κατά το σχεδιασμό της εγκατάλειψής του. Κατά την εκμετάλλευση των κοιτασμάτων αποτελεί σημαντική βοήθεια στη διαστασιοποίηση, την καθοδήγηση και την ευνοϊκότητα της εκσκαφής καθώς και στον υπολογισμό της επέκτασης αυτής, εξασφαλίζοντας την ευστάθεια της.

Στην ουσία, η μέθοδος αυτή παρέχει, επιστημονικώς εδραιωμένα κριτήρια αξιολόγησης της εκσκαφής, της εξυγίανσης, της φύλαξης και της αξιοποίησης των υπόγειων ανοιγμάτων των ορυχείων σε αλατούχα πετρώματα.

7.2 Η μέθοδος της «υδραυλικής θραύσης»

Οι πρώτες μετρήσεις των τάσεων, με τη μέθοδο της «υδραυλικής θραύσης» πραγματοποιήθηκαν το 1957 από τους Hubbert και Willis. Οι δύο ερευνητές εκμεταλλευόμενοι μια μέθοδο που ήταν ήδη καθιερωμένη στην πετρελαϊκή βιομηχανία για την αύξηση της διαπερατότητας των πετρωμάτων, διατύπωσαν μια

νέα θεωρία για τα αδιαπέρατα, ομογενή-ισότροπα πετρώματα. Η θεωρία αυτή επέτρεπε την περιγραφή του παρατηρούμενου φαινομένου του σχηματισμού ρωγμής και τον προσδιορισμό των κυρίων τάσεων, υπό την προϋπόθεση ότι η μία από τις 3 κύριες τάσεις, διέρχεται παράλληλα ή σχεδόν παράλληλα από το διάτρημα στο οποίο πραγματοποιείται η μέτρηση.

Κατά την εφαρμογή της μεθόδου της υδραυλικής θραύσης, το διάτρημα αποφράσσεται αρχικά στο επιθυμητό βάθος, τόσο προς τα πάνω όσο και προς τα κάτω (ή τόσο προς τα μέσα όσο και προς τα έξω, εάν το διάτρημα είναι οριζόντιο) με δύο ελαστικά Packer (σχήμα 7.1). Στη συνέχεια, στο χώρο μεταξύ των δύο Packer, μήκους 900 mm, εγχύεται τόσο υγρό, όσο απαιτείται για το σχηματισμό ρωγμής στο τοίχωμα του διατρήματος, και το οποίο υγρό μετά την πτώση της πίεσης που λαμβάνει χώρα, εισχωρεί στο πέτρωμα. Η τάση κατά την έναρξη της ρωγμής ονομάζεται τάση έναρξης ρωγμής και συμβολίζεται με P_{cl} (σχήμα 7.2).

Η ρωγμή στα τοιχώματα του διατρήματος παύει να διευρύνεται, όταν παύει και η εισπίεση του υγρού, οπότε εμφανίζεται μια δεύτερη τάση (P_{sil}), η οποία ίσα που επαρκεί, για να κρατήσει τη ρωγμή ανοιχτή. Μετά την πλήρη αποσυμπίεση της διαδρομής της δοκιμής με μια δεύτερη δοκιμή, προσδιορίζεται η τάση διάνοιξης της ρωγμής που δημιουργήθηκε στο τοίχωμα του διατρήματος. Από αυτές τις τάσεις κι από τον προσανατολισμό της σχηματισμένης ρωγμής μπορεί να προσδιοριστεί το μέγεθος και η διεύθυνση των κυρίων τάσεων.

Όπως αναφέρει ο Stäubert (2000) οι θεωρητικές και πειραματικές έρευνες των Rummel & Alheid (1980) έχουν αποδείξει, ότι η ρωγμή αρχικά διέρχεται παράλληλα στον άξονα του διατρήματος και μάλιστα ορθή ως προς την ελάχιστη οριζόντια κύρια τάση σ_{Hmin} . Όταν η τάση έχει την μικρότερη τιμή μεταξύ των τριών κυρίων τάσεων, παράλληλη ως προς τον άξονα του διατρήματος, τότε το επίπεδο της ρωγμής στρέφεται κατά τη διεύρυνση του και σε κάποια απόσταση από το διάτρημα, διέρχεται κάθετα ως προς αυτή την τάση. Σε όλες τις άλλες περιπτώσεις το επίπεδο της διεύρυνσης της ρωγμής παραμένει παράλληλο ως προς τον άξονα και ισχύει (για ένα κατακόρυφο διάτρημα): $\sigma_{Hmin} = P_{sil}$

Η κατακόρυφη κύρια τάση υπολογίζεται από το ύψος h των υπερκειμένων και τη μέση πυκνότητα ρ της υπερκείμενης βραχομάζας: $\sigma_v = \rho g h$.

Στην περίπτωση που η σ_v είναι η μικρότερη από τις 3 κύριες τάσεις, μετά τη δημιουργία της κατακόρυφης αρχικής ρωγμής, πρώτα καταγράφεται μια τιμή τάσης P_{sil} . Όταν η στρέψη του επιπέδου ρωγμής πραγματοποιείται στην οριζόντια

διεύθυνση, εμφανίζεται μια δεύτερη μικρότερη τιμή τάσης P_{si2} . Σε αυτή την περίπτωση προκύπτει ότι :

$$\sigma_{Hmin} = P_{si1} \quad \text{και} \quad \sigma_v = P_{si2}$$

Η τιμή για τη μέγιστη οριζόντια κύρια τάση σ_{Hmax} υπολογίζεται από τη σχέση:

$$p_{cl} - p_o = \frac{\beta_z + 3\sigma_{Hmin} - \sigma_{Hmax} - 2p_o}{k} \quad \text{ή}$$

$$\sigma_{Hmax} = 3\sigma_{Hmin} + \beta_z - 2p_o - k(p_{cl} - p_o)$$

όπου:

β_z = η αντοχή σε εφελκυσμό, του πετρώματος

p_o = το υδροστατικό ύψος των πόρων στο σημείο της μέτρησης

k = ποροελαστικές παράμετροι ($1 \leq K \leq 2$)

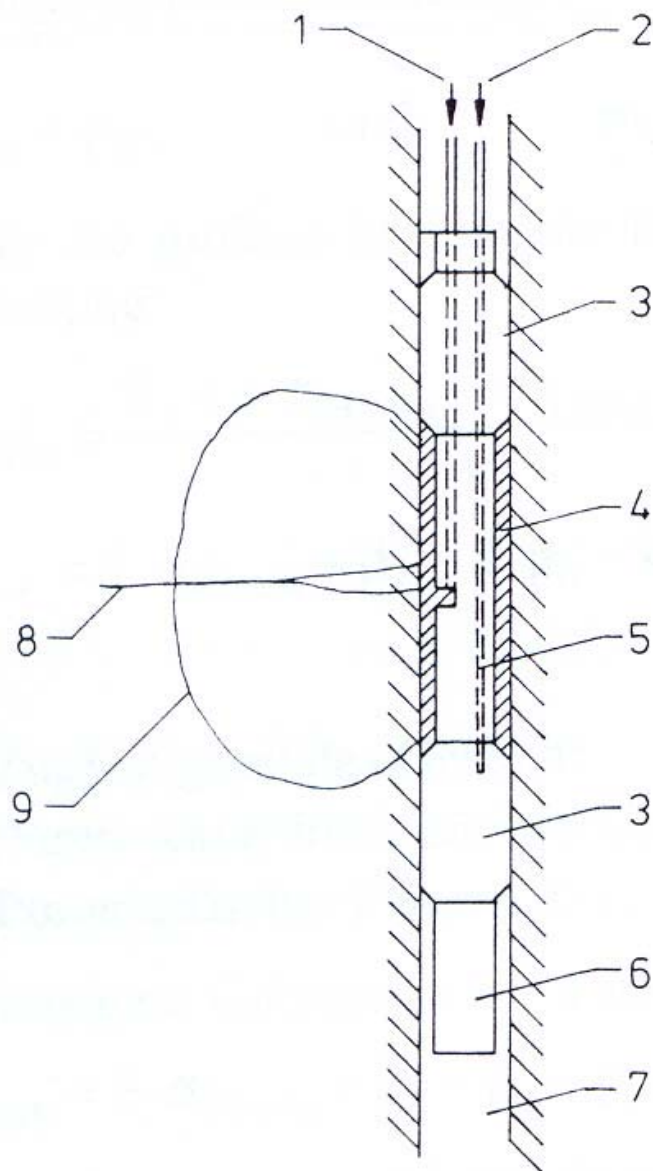
Για μη διαπερατές βραχομάζες το $k=1$ οπότε ισχύει: $\sigma_{Hmax} = 3\sigma_{Hmin} + \beta_z - p_o - p_{cl}$

Η διεύθυνση της νεοδημιουργηθείσας ρωγμής και η διεύθυνση των κυρίων τάσεων προσδιορίζονται από τα Packer, τα οποία εισάγονται στο διάτρημα και πιέζονται υδραυλικά κόντρα στο τοίχωμα, οπότε προκαλείται ένα αποτύπωμα της αρχικής ρωγμής. Ο υπολογισμός της θέσης του ίχνους της ρωγμής στο χώρο, δύναται να πραγματοποιηθεί με τη βοήθεια των γεωφυσικών σαρωτών διατρημάτων, οι οποίοι προσανατολίζουν το ίχνος της ρωγμής, μέσω της διαφοράς της ηλεκτρικής αγωγιμότητας στα τοιχώματα του διατρήματος.

Τα τελευταία χρόνια έχει αποδειχθεί ότι αυτή η μέθοδος δύναται να εφαρμοστεί και σε μη ελαστικές, ρωγματωμένες βραχομάζες και ότι το διάτρημα δεν πρέπει οπωσδήποτε να βρίσκεται παράλληλα στη διεύθυνση μίας εκ των κυρίων τάσεων.

Η αξίωση της κλασσικής θεωρίας της υδραυλικής θραύσης, να επιλέγει όσο το δυνατόν ομογενείς και ισότροπες διατομές διατρημάτων, στις οποίες μπορεί να παραχθεί μια ορθή παραταγμένη ακτινωτή ρωγμή ως προς τη μικρότερη κύρια τάση, με αντίστοιχες καταστάσεις τάσεων, επεφύλασσε στην πράξη, σημαντικές δυσκολίες και παρουσίαζε ένα μεγάλο μειονέκτημα στη μέθοδο υδραυλικής θραύσης.

Σύμφωνα με τους νέους υπολογισμούς του Baumgärtner (1987) απαιτείτο να



1: Αγωγός υπό πίεση για το σχηματισμό της ρωγμής

2: Αγωγός υπό πίεση για τα Packer

3: Ελαστικά Packer

4: Ρευστό υδραυλικού συστήματος

5: Ζώνη υδραυλικής πίεσης

6: Δέκτης υδραυλικής πίεσης.

7: Διάτρημα, διατομής 101 mm

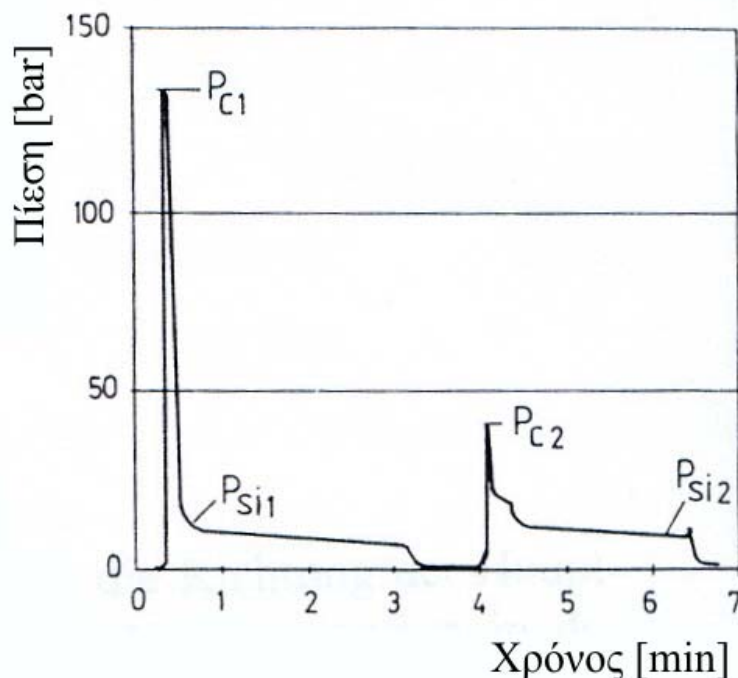
8: Υδραυλικά σχηματιζόμενη ρωγμή
(εγκάρσια)

9: Υδραυλικά σχηματιζόμενη ρωγμή
(αξονική)

Σχήμα 7.1: Σχηματική αναπαράσταση του συστήματος υδραυλικής θραύσης (κατά Fecker και Reik, 1996) σε διάτρημα και θέση των πιθανών επιπέδων θραύσης (εγκάρσια, αξονική).

ποικίλλει η τεχνική της δοκιμής και να ανιχνεύεται η καλούμενη ως τάση διάθλασης (Refrac) με περισσότερα ανοίγματα και διευρύνσεις προηγούμενων ρωγμών, ώστε να προσδιορίζεται η ορθή τάση στην ρωγμή που ενεργοποιήθηκε υδραυλικά.

Η μέθοδος υδραυλικής θραύσης ενδείκνυται έτσι, ειδικά για το λόγο ότι επιδέχεται τη σχεδόν διαρκή μέτρηση των τάσεων σε μεγάλα βάθη (5000 m) στα υφιστάμενα διατρήματα, κάτι που με τις υπόλοιπες μεθόδους δεν έχει έως σήμερα επιτευχθεί για τεχνικούς λόγους.



Σχήμα 7.2: Καμπύλη πίεσης-χρόνου κατά τη δοκιμή της υδραυλικής θραύσης (κατά Fecker και Reik, 1996)

7.3 Θεωρητικό υπόβαθρο της μεθόδου υδραυλικής θραύσης

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω κατά την εφαρμογή της μεθόδου της υδραυλικής θραύσης, σε ένα αποφραγμένο τμήμα ενός διατρήματος, ασκείται υδραυλική πίεση με σκοπό να προκληθεί ρωγμή στο τοίχωμα του. Παρά την αντίσταση του πετρώματος

και την αντοχή του σε εφελκυσμό, η ρωγμή θα δημιουργηθεί στο σημείο εκείνο που η αντίσταση αυτή είναι χαλαρή.

Η κλασική θεωρία της ρωγμάτωσης βασίζεται σε ένα νόμο ελαστικού υλικού για ομογενή και ισότροπα μέσα. Λόγω των ρεολογικών υλικών ιδιοτήτων των αλάτων όμως, οι αντίστοιχες μαθηματικές σχέσεις δεν είναι εφαρμόσιμες στην περίπτωση τους. Έτσι, χρησιμοποιούνται οι απλοποιημένες μορφές τους.

Η προϋπόθεση που θα πρέπει να πληρείται είναι ότι μία από τις ορθές κύριες τάσεις δρα παράλληλα στον άξονα του διατρήματος. Αυτή η ορθή κύρια τάση συμβολίζεται με S_3 , ενώ οι δύο ορθές κύριες τάσεις που δρουν σε επίπεδο κάθετο ως προς τον άξονα του διατρήματος, συμβολίζονται με S_1 και S_2 , όπου $S_1 \geq S_2$ (Stäubert, 2000).

Η κατανομή των τάσεων σε ένα κυλινδρικό άνοιγμα σε άπειρο χώρο περιγράφεται από την επίλυση του KIRSCH (σχήμα 7.3.). Για τις δευτερεύουσες τάσεις ισχύουν οι παρακάτω μαθηματικές σχέσεις:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \frac{S_1 + S_2}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{S_1 - S_2}{2} \left(1 + 3\frac{a^4}{r^4} - 4\frac{a^2}{r^2}\right) \cos 2\varphi \\ \sigma_\varphi &= \frac{S_1 + S_2}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{S_1 - S_2}{2} \left(1 + 3\frac{a^4}{r^4}\right) \cos 2\varphi \\ \sigma_z &= S_3 - 2\nu(S_1 - S_2) \frac{a^2}{r^2} \cos 2\varphi \\ \tau_{r\varphi} &= \frac{S_2 - S_1}{2} \left(1 - 3\frac{a^4}{r^4} + 2\frac{a^2}{r^2}\right) \sin 2\varphi\end{aligned}\quad (1)$$

Όπου (σχήμα 7.3):

a = ακτίνα διατρήματος

r = ακτινική απόσταση από το μέσο του διατρήματος στο πέτρωμα, με $r \geq a$

φ = γωνία μεταξύ της διεύθυνσης της και της ακτίνας

σ_r = ακτινική ορθή τάση

σ_φ = εφαπτομενική ορθή τάση

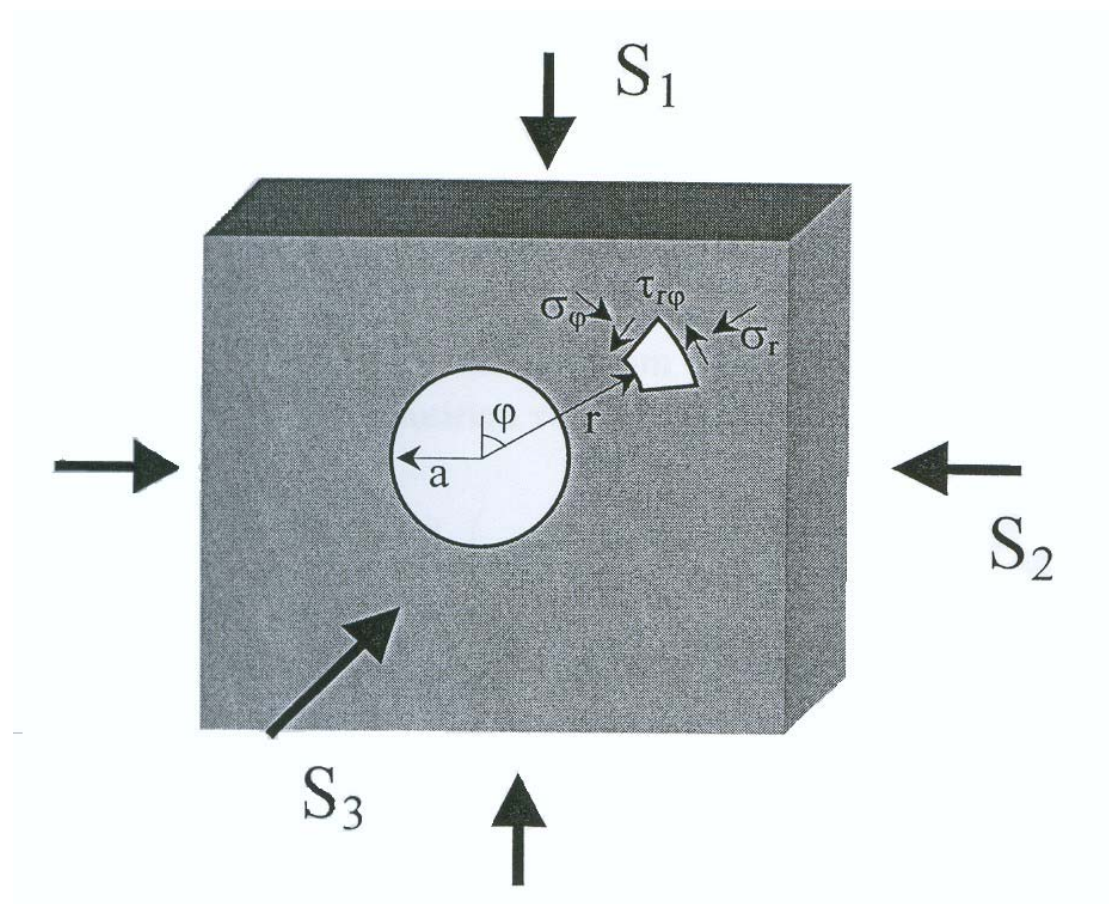
σ_z = ορθή τάση παράλληλη στον άξονα του διατρήματος

$\tau_{r\varphi}$ = διατμητική τάση

S_1, S_2 = κύριες τάσεις σε επίπεδο κάθετο στον άξονα του διατρήματος, όπου $S_1 \geq S_2$

S_3 = ορθή τάση παράλληλη στον άξονα του διατρήματος

ν = σταθερά του Poisson.



Σχήμα 7.3. Αναπαράσταση του μοντέλου για την επίλυση του KIRSCH (Stäubert, 2000)

Όταν στο διάτρημα επιδράσει μια εσωτερική τάση, παράγεται ένα δεύτερο πεδίο τάσεων, το οποίο επικαλύπτεται από το πεδίο τάσεων της βραχομάζας. Το πεδίο τάσεων που προκαλείται από την εσωτερική τάση, για ένα κυλινδρικό άνοιγμα, χονδρών τοιχωμάτων και απείρου μήκους, μπορεί να περιγραφεί από την εξίσωση του Lamé (Stäubert, 2000) :

$$\sigma_r = + \frac{b^2 a^2 q}{(b^2 - a^2) r^2} - \frac{q a^2}{b^2 - a^2}$$

$$\sigma_{\varphi} = -\frac{b^2 a^2 q}{(b^2 - a^2)r^2} - \frac{qa^2}{b^2 - a^2} \quad (2)$$

$$\sigma_z = \tau_{r\varphi} = 0$$

όπου:

a = εσωτερική ακτίνα

b = εξωτερική ακτίνα

q = εσωτερική τάση

Έστω ένα διάτρημα στο πέτρωμα, με $b \gg a$, τότε προκύπτει από την (2):

$$\sigma_r = \frac{a^2}{r^2} q$$

$$\sigma_{\varphi} = -\frac{a^2}{r^2} q$$

$$\sigma_z = \tau_{r\varphi} = 0$$

Η συνολική κατανομή των τάσεων, σε ένα διάτρημα στο οποίο δρα εσωτερική τάση προκύπτει από τις (1) και (3) με επαλληλία:

$$\sigma_r = \frac{S_1 + S_2}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) + \frac{S_1 - S_2}{2} \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4} - 4 \frac{a^2}{r^2} \right) \cos 2\varphi + \frac{a^2}{r^2} q$$

$$\sigma_{\varphi} = \frac{S_1 + S_2}{2} \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) - \frac{S_1 - S_2}{2} \left(1 + 3 \frac{a^4}{r^4} \right) \cos 2\varphi - \frac{a^2}{r^2} q$$

$$\sigma_z = S_3 - 2\nu(S_1 - S_2) \frac{a^2}{r^2} \cos 2\varphi \quad (4)$$

$$\tau_{r\varphi} = \frac{S_2 - S_1}{2} \left(1 - 3 \frac{a^4}{r^4} + 2 \frac{a^2}{r^2} \right) \sin 2\varphi$$

Για την κατανομή των τάσεων στο τοίχωμα του διατρήματος ($r = a$), προκύπτει από την (4) ότι (Stäubert, 2000):

$$\sigma_r = q$$

$$\sigma_{\varphi} = S_1 + S_2 - 2(S_1 - S_2) \cos 2\varphi$$

$$\sigma_z = S_3 - 2\nu(S_1 - S_2)\cos 2\varphi \quad (5)$$

$$\tau_{r\varphi} = 0$$

Η ρωγμάτωση στο τοίχωμα ενός υπό πίεση διατρήματος, προκύπτει όταν το επικαλυμμένο πεδίο τάσεων, από την τάση της βραχομάζας και της εσωτερικής τάσης, υπερβαίνει την αντοχή σε εφελκυσμό σε εφαπτομενική ή αξονική διεύθυνση στην περίμετρο του διατρήματος.

7.3α) Παραγωγή αξονικής ρωγμής (επίπεδο ρωγμής παράλληλο ως προς τον άξονα του διατρήματος)

Για τον σχηματισμό της ρωγμής, η πίεση του υδραυλικού ρευστού πρέπει να υπερβεί την αντοχή σε εφελκυσμό του πετρώματος και την τάση της βραχομάζας στην περιφέρεια του διατρήματος κάθετα στο επίπεδο της ρωγμής. Στο υποθετικό επίπεδο που είναι κάθετο στο επίπεδο της ρωγμής, δρουν οι κύριες ορθές τάσεις S_1 και S_2 ($S_1 \geq S_2$). Η εφαπτομενική τάση σ_φ στην περιφέρεια του διατρήματος δίδεται σύμφωνα με την (5):

$$\sigma_\varphi = S_1 + S_2 - 2(S_1 - S_2)\cos 2\varphi - q$$

Η ρωγμή θα δημιουργηθεί εκεί όπου η εφαπτομενική τάση σ_φ παρουσιάζει ελάχιστο στην περίμετρο του διατρήματος. Αναζητούνται τα ακρότατα της σ_φ :

$$\frac{\partial \sigma_\varphi}{\partial \varphi} = 4(S_1 - S_2)\sin 2\varphi = 0,$$

Ακρότατα για $\varphi=0$ και 180° και αντιστοίχως για $\varphi = 90^\circ$ και $\varphi = 270^\circ$

Αναζητείται το ελάχιστο:

$$\frac{\partial^2 \sigma_\varphi}{\partial \varphi^2} = 8(S_1 - S_2)\cos 2\varphi$$

για $\varphi=0$ και $\varphi = 180^\circ$:

$$\frac{\partial^2 \sigma_\varphi}{\partial \varphi^2} > 0 \rightarrow \text{ελάχιστο}$$

για $\varphi = 90^\circ$ και $\varphi = 270^\circ$:

$$\frac{\partial^2 \sigma_\varphi}{\partial \varphi^2} < 0 \rightarrow \text{μέγιστο}$$

Η εφαπτομενική τάση σ_φ στην περίμετρο του διατρήματος, έχει ελάχιστο για $\varphi=0$ και 180° . Έτσι: $\sigma_\varphi = 3S_2 - S_1 - q$

Η ρωγμή περνάει παράλληλα στην μεγαλύτερη κύρια τάση S_1 στο επίπεδο της διαμέτρου του διατρήματος. Κάθετα στο επίπεδο της ρωγμής δρα η μικρότερη κύρια τάση S_2 . Συμβολίζεται με σ_\perp , την αντοχή σε εφελκυσμό του πετρώματος κάθετα στον άξονα του διατρήματος, και με q_A , την εσωτερική τάση τη στιγμή της ρωγμάτωσης, οπότε το χρονικό σημείο της ρωγμάτωσης ισχύει (Stäubert, 2000):

$$\sigma_\varphi(\varphi = 0^\circ; 180^\circ) = -\sigma_\perp = 3S_2 - S_1 - q_A \quad (7)$$

$$q_A = \sigma_\perp + 3S_2 - S_1$$

Έστω ότι η εμφανιζόμενη στατική τάση του ρευστού q_R , λόγω της οποίας η ρωγμή απλώς διατηρείται ανοιχτή, αντιστοιχεί στην μικρότερη κύρια ορθή τάση (S_2). Με αυτή την υπόθεση μπορεί κανείς από την (7) όταν είναι γνωστή η αντοχή σε εφελκυσμό σ_\perp , να βρει την κύρια ορθή τάση S_1 :

$$S_1 = \sigma_\perp + 3q_R - q_A$$

7.3.β) Παραγωγή ορθής ρωγμής (επίπεδο ρωγμής ορθό προς τον άξονα του διατρήματος)

Από την ισότητα (5) προκύπτει για την σ_z , ότι δεν είναι δυνατός ο σχηματισμός μιας ρωγμής, ορθής ως προς τον άξονα του διατρήματος για ένα διάτρημα απείρου μήκους, επειδή η ισότητα για την σ_z , δεν περιέχει την εσωτερική τάση q . Για ένα τμήμα του διατρήματος που είναι στεγανοποιημένο με Packer, στο οποίο δρα μια εσωτερική τάση q , είναι δεδομένη η προϋπόθεση για μια ρωγμή ορθή ως προς τον άξονα του διατρήματος στην περίμετρο του διατρήματος, στη μετάβαση Packer-διάστημα τάσης. Εκεί η σ_z είναι περίπου ίση με $-q$. Στη πράξη κατά τον υπολογισμό, η έκφραση $-2\nu(S_1 - S_2)\cos 2\varphi$, στη σχέση για την σ_z , μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα, επειδή μια ορθή, σε σχέση με τον άξονα του διατρήματος, προσανατολισμένη ρωγμή,

αντιστοιχεί στο σύνολο της περιμέτρου του διατρήματος και η έκφραση με πρόσθεση όλων των περιφερειών του διατρήματος, τείνει στο μηδέν.

Όπως αναφέρει στη συνέχεια ο Stäubert (2000), βασισμένος στους Hüls, Menzel, Weber και Kamlot, σε μια ρωγμάτωση ορθή ως προς τον άξονα του διατρήματος για την τάση ρωγμής ισχύει η σχέση:

$$q_A = (\sigma_{\parallel} + S_3) / 0.94,$$

όπου με σ_{\parallel} , συμβολίζεται η αντοχή σε εφελκυσμό του πετρώματος η παράλληλη ως προς τον άξονα του διατρήματος.

Με σύγκριση των ισοτήτων (7) και (9) προκύπτει θεωρητικά ότι:

$$3S_2 - S_1 + \sigma_{\perp} < (\sigma_{\parallel} + S_3) / 0.94$$

- Διαμόρφωση ορθής ρωγμής όταν: $3S_2 - S_1 + \sigma_{\perp} < (\sigma_{\parallel} + S_3) / 0.94$

Για την ανίχνευση των διευθύνσεων της κύριας τάσης είναι απαραίτητη η γνώση του προσανατολισμού της ρωγμής, κάτι που δεν είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την εκτίμηση της ευστάθειας των στύλων, της οροφής, των υπολοίπων χώρων και των μεταλλευτικών πεδίων ενός ορυχείου.

Αρχικά, ξεκινάει κανείς από το ότι μέσω των δοκιμών υδραυλικής θραύσης, μπορεί να προσδιοριστεί η κατάσταση της θεμελιώδους τάσεως σε ένα σχηματισμό πετρωμάτων. Εδώ υπάρχουν ουσιαστικά διάφορες δυνατότητες της ρωγμάτωσης:

α) Η ρωγμάτωση να επιτευχθεί αξονικά.

Σε αυτή την περίπτωση η S_1 και η S_2 , μπορούν να προσδιορισθούν μονοσήμαντα. Η διεύθυνση των S_1 και S_2 μπορεί να προκύψει μόνο όταν είναι γνωστή η θέση της ρωγμής. Όταν το διάτρημα είναι οριζόντιο, μπορεί να υπολογιστεί και η S_3 , υπό το βάρος των υπερκειμένων. Σε περίπτωση που ο σχηματισμός των πετρωμάτων είναι αποκαλυμμένος λόγω υπόγειας μεταλλευτικής δραστηριότητας, υπάρχει η δυνατότητα να τεκμηριωθεί η τιμή της S_2 και να υπολογιστεί η τάση ρωγμάτωσης και η S_3 , με ένα επιπρόσθετο οριζόντιο διάτρημα κατά τη διεύθυνση της S_1 .

β) Η ρωγμάτωση να επιτευχθεί ορθά αξονικά ως προς τον άξονα του διατρήματος.

Σε αυτή την περίπτωση μπορεί να υπολογιστεί μόνο η S_3 , αλλά ταυτόχρονα είναι γνωστό ότι η S_3 είναι η μικρότερη τάση θλίψης. Αν το διάτρημα είναι κατακόρυφο, τότε οι S_1 και S_2 βρίσκονται σε οριζόντιο επίπεδο. Τρεις επιπρόσθετες δοκιμές θραύσης σε οριζόντιο επίπεδο, μετακινημένων διατρημάτων κατά 45° και 60° προσδίδουν τα μεγέθη και τις διευθύνσεις των S_1 και S_2 . Εν τούτοις, οι δοκιμές του Haimson έδειξαν ότι σε διατρήσεις βάθους, με εφαρμογή των Packer, παρατηρείται πολύ σπάνια θραύση σε επίπεδο ορθό ως προς τον άξονα του διατρήματος.

γ) Όταν η έναρξη της θραύσης είναι αξονική η διάδοση είναι ορθή.

Αυτή η περίπτωση είναι συχνή όταν η S_3 , είναι η μικρότερη κύρια τάση. Αυτό το είδος σχηματισμού ρωγμής, μπορεί να επέλθει όταν το διάτρημα είναι επίπεδο και αδιατάραχτο και εφαρμόζονται τέτοια Packer, ώστε στο τέρμα του διατρήματος να μην επέρχεται καμία συγκέντρωση τάσεων στη διεύθυνση του άξονα. Στα κατακόρυφα διατρήματα, αν θεωρήσουμε ότι $S_1 = S_2$, είναι δυνατός ο υπολογισμός των κυρίων τάσεων στο οριζόντιο επίπεδο, με τη βοήθεια της εξίσωσης (7). Η μετρούμενη στατική τάση του υγρού αντιστοιχεί στην τάση S_3 , η οποία παρουσιάζει τη μικρότερη κύρια τάση θλίψης.

Η διεύθυνση των S_1 και S_2 πρέπει να ανιχνευθεί από τη θέση τη ρωγμής. Όταν το διάτρημα εξόδου είναι κατακόρυφο, τότε μέσω ενός επιπρόσθετου οριζόντιου διαμετρήματος στη διεύθυνση της S_1 μπορούν να υπολογιστούν όλες οι κύριες τάσεις και οι διευθύνσεις τους.

Αυτό το είδος σχηματισμού ρωγμής και διεύρυνσης είναι εν τούτοις δυνατό και σε διατρήματα ανοιγμένα για μεταλλευτικές εργασίες. Σε ικανοποιητική απόσταση από θαλάμους μπορεί η ορθή έναρξη θραύσης να μεταβληθεί σε αξονική έναρξη θραύσης. Η διεύρυνση της ρωγμής γίνεται εκτός της περιοχής επίδρασης του διατρήματος αλλά παρόλα αυτά ορθά. Η στατική τάση φέρει τότε την κύρια τάση S_3 . Με την ισότητα (7) είναι δυνατή η εκτίμηση και των άλλων δύο κύριων τάσεων, αν θεωρηθεί ότι $S_1 = S_2$. Ένα επιπλέον διάτρημα σε κατακόρυφη διεύθυνση μπορεί να εξακριβώσει την εξήγηση.

Θεωρητικά, για τον υπολογισμό των τάσεων με τη βοήθεια δοκιμών υδραυλικής θραύσης, όταν είναι δυνατόν, το εκάστοτε ερευνητικό πρόγραμμα θα πρέπει να ξεκινά με ένα κατακόρυφο διάτρημα. Σε συνάρτηση των αποτελεσμάτων του κατακόρυφου διατρήματος, για την τελειοποίηση των εκτιμήσεων, απαιτούνται κανένα, ένα ή τρία επιπρόσθετα διατρήματα. Οι δοκιμές θραύσης σε διατρήματα ανοιγμένα για την εκμετάλλευση του ορυχείου, μεταφέρουν στην περιοχή επιρροής αυτής της εκμετάλλευσης, μόνο το μέγεθος της ελάχιστης κύριας τάσης σε συνάρτηση με την απόσταση από την εκμετάλλευση («επιρροή περιμέτρου», ανάλογα με το είδος της εκμετάλλευσης, ο χρόνος ευστάθειας εξαρτάται από τις διαδικασίες αποσταθεροποίησης). Μόνο σε μεγαλύτερη απόσταση από την εκμετάλλευση, είναι δυνατές επιπλέον πληροφορίες πιο συγκροτημένων εκτιμήσεων για την κατάσταση των τάσεων, ειδικά στα αλατούχα πετρώματα.

Όπως φάνηκε από τις έρευνες που είχαν πραγματοποιηθεί έως τις αρχές της δεκαετίας του 80, στα διατρήματα που είχαν ανοιχτεί για μεταλλευτικούς σκοπούς κι εφαρμόστηκε η υδραυλική θραύση, κυριαρχεί η ορθή ρωγμάτωση, επειδή αυτά τα διατρήματα διέρχονται πλειοψηφικά στη διεύθυνση της ελάχιστης κύριας τάσης. Τα επίπεδα ρωγμάτωσης της έναρξης και της διεύρυνσης της θραύσης είναι τότε ορθά στη διεύθυνση του διατρήματος και σχεδόν ιδεατά. Τόσο από την τάση της θραύσης όσο και από τη στατική τάση μπορεί να υπολογιστεί μόνο μία και μάλιστα η ελάχιστη συνισταμένη της κύριας τάσης. Η τάση θραύσης κι οι τάσεις διάθλασης (δευτερεύουσες τάσεις μιας υπάρχουσας ρωγμής) διαφέρουν μέσω μιας συνισταμένης συγκεκριμένης για το πέτρωμα, της επί τόπου τάσης εφελκυσμού της θραύσης, που εδώ συμβολίζεται με σ_{AZ} .

Το θεωρητικό υπόβαθρο της μεθόδου, παρατίθεται παραπάνω όπως αναφέρεται από τον Dr. Stäubert (2000), σύμφωνα με τον οποίο, οι πιο πρόσφατες έρευνες που αφορούν στην επίδραση της στατικής τάσης δημιουργημένων κυρίων τάσεων και τη μοντελοποίηση της θέσης της θραύσης, πραγματοποιήθηκαν από τον Kamlot (1987) ο οποίος με τη σειρά του, βασίζει τις έρευνες του στα συμπεράσματα του Schlüter.

«Μέσα στο διάτρημα, σχηματίζεται μια ζώνη εξαιτίας της διείσδυσης του ρευστού, για το σχηματισμό της οποίας επαρκεί μια διαφορά της εσωτερικής τάσης από την εξωτερική τάση, μεγαλύτερη του 1 MPa. Σε αυτή τη ζώνη η δύναμη που επιφέρεται μέσω της εσωτερικής τάσης, κατανέμεται πάνω στο σύνολο της δομής, και τα μέρη που τη φέρουν, φορτίζονται ταυτόχρονα και συμμετρικά. Η σταθερότητα των δεσμών είναι μια λειτουργία της κατασκευής και της υφής, παράλληλη στην

ένθεση και ορθή ως προς τη ζώνη διείσδυσης και έχει ρεολογικό χαρακτήρα. Μόνο όταν οι δυνάμεις συνοχής των κόκκων υπερπηδούνται έχουμε θραύση».

Ο Schlüter συγκρίνει την εσωτερική τάση των πόρων, θεωρώντας μια τρισδιάστατη αναπαράσταση, αφού δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί η ελαστική δυσδιάστατη μοντελοποίηση. Πάντως η ύπαρξη στο διάτρημα, ζώνης διαταραχής πριν την ουσιαστική θραύση, αναφέρεται και από άλλους συγγραφείς.

Αποφασιστικός παράγοντας για την πρόκληση της θραύσης, μπορεί να θεωρηθεί, όχι η υπερπήδηση των εφαπτομενικών τάσεων στο διάτρημα αλλά η υπέρβαση της συνοχής της δομής σε ένα τμήμα που έχει διεισδύσει ρευστό.

Έτσι, η ζώνη επιρροής σε τρισδιάστατο πεδίο τάσεων, παρουσιάζεται ως άνοιγμα, πληρωμένο με ρευστό, ενώ οι τρεις επιδρούσες κύριες τάσεις που επιδρούν, έχουν διαφορετικό μέγεθος. Κατ' αντιστοιχία με την ελαστική θεωρία, κάθε τανυστής τάσης αναλύεται σε έναν αποκλίνοντα και έναν ογκομετρικό, όπου ο αποκλίνων τανυστής, συντελεί στις μεταβολές του σχήματος και ο ογκομετρικός στις μεταβολές του όγκου του υλικού. Ο ογκομετρικός τανυστής που δρα υδροστατικά και στις τρεις διευθύνσεις των κυρίων τάσεων, θεωρείται η αντίσταση της βραχομάζας στην πίεση που ασκεί το ρευστό.

Επειδή το σύστημα προσπαθεί να επιτύχει μια κατάσταση ισορροπίας, η εσωτερική πίεση του ρευστού θα πρέπει να μειωθεί, κάτι που μπορεί να συμβεί μόνο όταν ο όγκος της ζώνης αυξηθεί τόσο, ώστε η εσωτερική πίεση να μην αρκεί πια να υπερβεί τη συνοχή των κόκκων. Σύμφωνα με πειραματικά δεδομένα, το μέσο θραύσης ως συνέπεια της μικρής υπερπίεσης, παραμένει σε θέση να μεταναστεύει μέσα στο αλάτι. Σε ελάχιστες ποσότητες προκύπτει μια επιπλέον πτώση της πίεσης, η οποία παρατηρείται συχνά επί τόπου. Η πραγματική σταθερά της πίεσης για πολλές ώρες, εξαρτάται από την υφή της βραχομάζας, δηλαδή τη διαπερατότητα και την ένθεση αυτής, αφού αυτή σηματοδοτεί τελικά την κατάσταση ισορροπίας μεταξύ της εσωτερικής πίεσης και του ογκομετρικού τανυστή.

Εδώ, πρέπει όμως να ληφθεί υπόψη, ότι όταν το πορώδες του πετρώματος είναι πάνω από το μέσο όρο (λανθασμένη στεγανοποίηση των Packer), οδηγεί σε μόνιμη απώλεια όγκου και πίεσης, και δεν επιτυγχάνεται σταθερά πίεσης.

Συνοψίζοντας τις παρατηρήσεις του Kamlot, οδηγείται κανείς στο συμπέρασμα ότι κατά την πίεση διάνοιξης του τμήματος του διατρήματος που έχει στεγανοποιηθεί με τα Packer, το ρευστό μέσο θραύσης διεισδύει κατά μήκος των ορίων των κόκκων μέσα στο πέτρωμα, ήδη πριν το σχηματισμό της ρωγμής. Στο χώρο σχηματίζεται μια

ζώνη διείσδυσης, στην οποία η συνοχή των δεσμών εξαρτάται από την δομή και την υφή των κρυστάλλων και από την ένθεση και μόνο όταν υπερνικηθούν οι δυνάμεις συνοχής των κόκκων, επέρχεται πραγματικά η θραύση. Η –επί τόπου– αντοχή στη θραύση σ_{AZ} δεν είναι μόνο αντοχή σε εφελκυσμό στην περίμετρο αλλά αναπαριστά και τις δυνάμεις συνοχής των κόκκων. Η αντοχή στη θραύση έχει εκτός αυτού ρεολογικό χαρακτήρα. Τέλος συμπεραίνει κανείς και ότι στους στύλους και στα παρθένα μεταλλευτικά πεδία στα υπόγεια αλατωρυχεία της Κεντρικής Γερμανίας, μέχρι τη στιγμή που είχαν πραγματοποιηθεί οι παραπάνω έρευνες, είχε παρατηρηθεί σχεδόν αποκλειστικά, σχηματισμός ορθής ρωγμής.

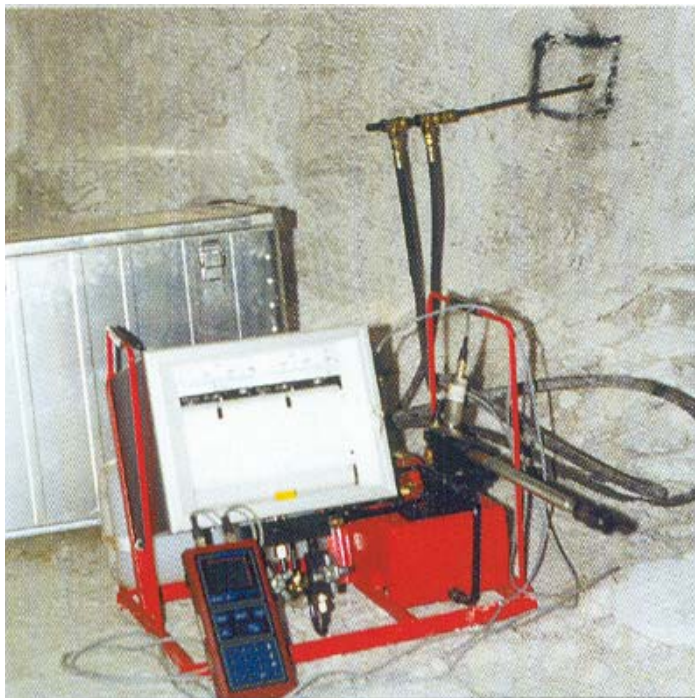
7.4 Τεχνικά στοιχεία της συσκευής που χρησιμοποιήθηκε στις μετρήσεις

Οι συσκευές και ο εξοπλισμός που χρησιμοποιήθηκαν στη συστηματική έρευνα, με τη μέθοδο της υδραυλικής θραύσης, στο ορυχείο Glückauf Sondershausen (εικόνα 7.1), καθώς και η τεχνική των μετρήσεων και των δοκιμών, όπως περιγράφεται παρακάτω, αναπτύχθηκε από τα μέσα του 1993 έως και τις αρχές του 1994 από την εταιρία Kali-Umwelttechnik Sondershausen GmbH, ως εσωτερικό προϊόν της εταιρίας. Μέχρι σήμερα έχει εφαρμοστεί για μεταλλευτικούς σκοπούς στα αλατωρυχεία “Glückauf Sondershausen”, Bleicherode GVV mbH, GTS Theutschenthal GmbH & Co. KG καθώς και στο Solvay Salz GmbH, στο Borth.

Το όργανο θραύσης της K-UTEC (σχήμα 7.4), έχει μετεξελιχθεί πολλές φορές και μετά από τις αποφασιστικές βελτιώσεις που υπέστη κατά τα έτη 1987/88 και 1993/94, αποτελείται πλέον από τα εξής βασικά δομικά τμήματα:

- Από ένα μανόμετρο ή από μία διπλή ταινία καταγραφής με μηχανική ώθηση, διαστήματος μέτρησης από 0 έως 60 MPa και τροφοδοσία χαρτιού 120 mm/h, ώστε να επιτυγχάνεται παρακολούθηση των μετρήσεων και μηχανικά για επιπλέον διασφάλιση των δεδομένων.
- Από αισθητήρες υψηλής απόδοσης για μέτρηση της πίεσης, του όγκου και της θερμοκρασίας με την επισυναπτόμενη συσκευή χειρός, PC/AT, η οποία διαθέτει υπολογιστικό πρόγραμμα συστηματικής καταγραφής των δεδομένων με ψηφιακές ενδείξεις.

- Από μία αμφίδρομη αντλία χειρός HPS-2/0,7 με μέγιστη πίεση λειτουργίας 70 MPa και όγκο λειτουργίας τα $11,0 \text{ cm}^3$ ανά διαδρομή παλινδρομικής κίνησης, στο πρώτο στάδιο και τα $2,2 \text{ cm}^3$ ανά διαδρομή παλινδρομικής κίνησης, στο δεύτερο στάδιο.
- Από ένα δοχείο που περιέχει $11,0 \text{ dm}^3$ υδραυλικού λαδιού, εκ του οποίου καταναλώνονται κατά μέσο όρο 25 cm^3 , ανά δοκιμή θραύσης.
- Ένα πλαίσιο, μια βαλβίδα αποκοπής της ροής, χωριστούς σωλήνες διοχέτευσης λαδιού στο χώρο των Packer και το χώρο της θραύσης, οι οποίοι φτάνουν έως το στόμιο του διατρήματος.
- Ξεχωριστή διπλή σωλήνωση (μήκος σωλήνα από 1,5 m έως 2,0 m) για το χώρο των Packer και το χώρο της θραύσης, με τελείωμα.
- Όργανο διασκόπησης της θραύσης διπλού Packer για εισαγωγή ονομαστικής πίεσης τα 40 MPa, κι ελαστικά Packer ιδιοκατασκευής, με καθιερωμένη διάμετρο διατρήματος τα 46 mm.



Εικόνα 7.1: Η συσκευή που διαθέτει η εταιρία K-UTEC για τη διεξαγωγή των μετρήσεων των τάσεων, με τη μέθοδο της υδραυλικής θραύσης.

Για το σύστημα των συσκευών που περιγράφεται, δεν απαιτείται τροφοδοσία ηλεκτρικής ενέργειας στο σημείο του ορυχείου, όπου πραγματοποιείται η εκάστοτε μέτρηση. Αυτό το πλεονέκτημα έχει αποδειχτεί εξαιρετικό στα περίπου 18 χρόνια συστηματικής συλλογής εμπειριών και γνώσεων με εφαρμογή της συγκεκριμένης μεθόδου.

Πάντως τόσο οι αισθητήρες, όσο και η συσκευή χειρός του συστήματος μέτρησης δύνανται να λειτουργούν και με σύνδεση δικτύου 230 V.

Όταν πρόκειται για ορυχεία στα οποία ελλοχεύει ο κίνδυνος έκρηξης λόγω ύπαρξης αερίων, τότε μεταξύ των προκαθορισμένων εργασιών της εταιρίας, συμπεριλαμβάνεται και η ανίχνευση της ελευθερίας των αερίων μέσα στο διάτρημα. Αυτή η εργασία πραγματοποιείται στο σημείο μέτρησης, είτε με ελεύθερη μέτρηση μέσω συσκευής χειρός, είτε με μόνιμη επίβλεψη με συσκευές AUER-Ex-TRANS και αυτόματη απενεργοποίηση με την επίτευξη μιας δεδομένης τιμής υπέρβασης για εύφλεκτα αέρια.

Το όργανο διασκόπησης της θραύσης της K-UTEC GmbH, έχει συνολικό μήκος 690 mm και διάμετρο 46 mm, ενώ το μήκος των Packer ανέρχεται στα 120 mm. Η ανοχή του διατρήματος για μία κανονική δοκιμή θραύσης ανέρχεται στο ± 1 mm. Η διάμετρος του διατρήματος μπορεί να ελεγχθεί με ένα όργανο διασκόπησης θραύσης και κατάλληλους ατσάλινους δακτυλίους διαμέτρου 45.5, 46.0, 47.0, και 48.0 mm. Ο χώρος θραύσης μεταξύ των δύο Packer έχει μήκος 230 mm (επιφάνεια μανδύα $A_M = 33.238 \text{ mm}^2$). Μηχανικά, είναι δυνατή η μέτρηση οριζοντίων διατρημάτων μήκους έως και 60 m, διατρημάτων κάθετων ως προς την οροφή έως και 30 m και διατρημάτων κάθετων ως προς το δάπεδο, έως 25 m.

Εκτός από τη μηχανική παρατήρηση και καταγραφή της πίεσης των Packer και της θραύσης μέσω της διπλής ταινίας καταγραφής, τελείται και ψηφιακή σύνοψη, καταγραφή και επεξεργασία των μετρούμενων τιμών των πιέσεων Packer και θραύσης, καθώς και της θερμοκρασίας, δηλαδή του όγκου της ροής μέσα στο χώρο θραύσης. Τέλος, ανάλογα με τις ειδικές απαιτήσεις ορισμένων ορυχείων, κατά την εφαρμογή της μεθόδου της υδραυλικής θραύσης, δύναται η προσαρμογή νέων στοιχείων, αφού τα τελευταία χρόνια, παρέχεται η δυνατότητα εγκατάστασης νεοαναπτυγμένων στοιχείων επί του συστήματος σύνοψης των δεδομένων, όπως για παράδειγμα μεγαλύτερη αποθήκευση και χορήγηση των μετρούμενων τιμών.

Για τη σύνοψη, την αποθήκευση και την επεξεργασία των δεδομένων, απαιτούνται τα ακόλουθα τεχνικά μέρη:

- Η συσκευή μέτρησης χειρός Multi-system 5000, η οποία έχει υποστεί ειδική ρύθμιση για την ευνοϊκή μέτρηση του όγκου (GFM 0.005...1 lit/min) και η οποία διαθέτει κανάλια εισόδου για την πίεση των Packer και της θραύσης καθώς και για τη θερμοκρασία και τον όγκο έγχυσης στο χώρο διαστολής. Με ειδικές

μετατροπές στο Software παρέχονται υψηλής ακρίβειας μετρήσεις του όγκου, σε περιοχή $<5 \text{ cm}^3$, ενώ η δυνατότητα αποθήκευσης μετρούμενων τιμών της συσκευής φτάνει στις 120.000 τιμές. Ο ρυθμός σάρωσης των μετρούμενων μεγεθών είναι ελεύθερης επιλογής και ποικίλει από 1 ms μέχρι 999 min. Η συσκευή διαθέτει μετασχηματιστή AD με ανάλυση 12-bit, αποκρουστήρα μπαταρίας 128 kByte-RAM για την αποθήκευση των δεδομένων και σειριακές θέσεις τομής RS 232 για σύνδεση PC / AT. Η συσκευή υποστηρίζεται από το Software HYDROcomsys για την καταγραφή των δεδομένων, λειτουργεί σε θερμοκρασίες από 0-50 °C και η ελάχιστη επιτρεπτή σχετική υγρασία πρέπει να είναι $< 80\%$. Η τροφοδοσία της συσκευής με ρεύμα γίνεται είτε με πρίζα (230V), είτε εσωτερικά με μπαταρία NiCd (14,4 V) και το συνολικό της βάρος ανέρχεται στα 0,95 kg. Οι αισθητήρες της πίεσης (PR 15) συνδέονται απευθείας στο σύστημα μέτρησης μέσω ενός MINIMESS-βιδωτού συμπλέκτη. Η περιοχή μέτρησης είναι από 0 έως 40 MPa, η δυνατότητα υπερφόρτωσης είναι έως 1,5 φορά της ονομαστικής πίεσης και η γνωστή ονομαστική τιμή είναι 20 mA στα 40 MPa. Το σήμα εξόδου είναι από 0 έως 20 mA ή από 4 έως 20 mA. Τα όρια σφάλματος χωρίς διόρθωση είναι περίπου $\pm 0,5\%$ της τελικής τιμής. Οι αισθητήρες ελέγχονται ξεχωριστά με εικονική διόρθωση και η διορθωμένη περιοχή μέτρησης είναι από 0 έως 40 MPa, με όρια σφάλματος μετά την ευθυγράμμιση περίπου $\pm 0,1 \%$ της τελικής τιμής.

- ο Ο μετρητής ταχύτητας παροχής οδοντωτού τροχού GFM-1 για τον όγκο, μετράει το ρυθμό και την ποσότητα έγχυσης στο χώρο διαστολής. Η περιοχή μέτρησης κυμαίνεται από $0,005\text{-}1 \text{ dm}^3 / \text{min}$. Ο γεωμετρικός όγκος δοντιού είναι $0,0189 \text{ cm}^3 / \text{πνοή}$ ενώ η μέγιστη μετρούμενη πίεση είναι 40 MPa.

- ο Το σύστημα μπορεί να διαθέτει αισθητήρες θερμοκρασίας Pt 1000 με απευθείας σύνδεση MINIMESS για τον έλεγχο της θερμοκρασίας της βραχομάζας ή/και του υδραυλικού συστήματος, ενώ μπορεί ακόμη να διαθέτει και βιδωτό αισθητήρα για το χώρο διαστολής, με περιοχή μέτρησης από -50 έως +200 °C.

- ο Το πακέτο Software είναι το HYDROcomsys (έκδοση 5.0 (1996/97)) για την αποθήκευση των δεδομένων, καθώς και την παρουσίαση και την αξιολόγηση των μετρούμενων τιμών σε PC /AT Laptop.

7.5 Η πίεση θραύσης p_A και η-επί τόπου- αντοχή σε θραύση, σ_{AZ}

Όπως έχει ήδη αναφερθεί ο σκοπός της διεξαγωγής των μετρήσεων με τη μέθοδο της υδραυλικής θραύσης, συνίστατο στον καθορισμό της –επί τόπου- κατάστασης των τάσεων και της ευστάθειας συγκεκριμένων στύλων στην περιοχή γύρω από την αίθουσα κονσέρτων, πριν και μετά την κατασκευή της. Τα στοιχεία κάθε διατρήματος και τα αποτελέσματα που προέκυψαν από αυτά μετά τις δοκιμές, παρουσιάζονται λεπτομερώς στο παράρτημα σε ενιαία δελτία καταγραφής της μεταλλευτικής, γεωλογικής, τεκτονικής και βραχομηχανικής κατάστασης αυτών. Τα σημεία στα οποία βρίσκονται τα διατρήματα μέσα στο ορυχείο, φαίνονται στο σχήμα 8.1.

Στα διατρήματα όπου η μέθοδος της υδραυλικής θραύσης είχε ήδη εφαρμοστεί και οι ζητούμενες τιμές είχαν ήδη ανακτηθεί, εγκαταστάθηκαν στη συνέχεια συσκευές μέτρησης της εγκάρσιας επέκτασης των στύλων και της σύγκλισης. Τα επίπεδα μέτρησης βρίσκονταν σε βάθος 8,0 m, 4,0 m, και 1,5 m μέσα στο στύλο.

Κατά τη διεξαγωγή μιας δοκιμής υδραυλικής θραύσης, σκοπός είναι ουσιαστικά η ανάκτηση δύο, ποιοτικά διαφορετικών, τιμών μέτρησης:

A) Η πίεση θραύσης p_A , που καθορίζεται από τη ρωγμή που προκαλείται σε ένα σημείο της βραχομάζας μέσα στο διάτρημα, το οποίο έχει αποφραχτεί με ελαστικά Packer, εξαιτίας της μεγάλης πίεσης που ασκείται στο χώρο διαστολής του οργάνου διασκόπησης.

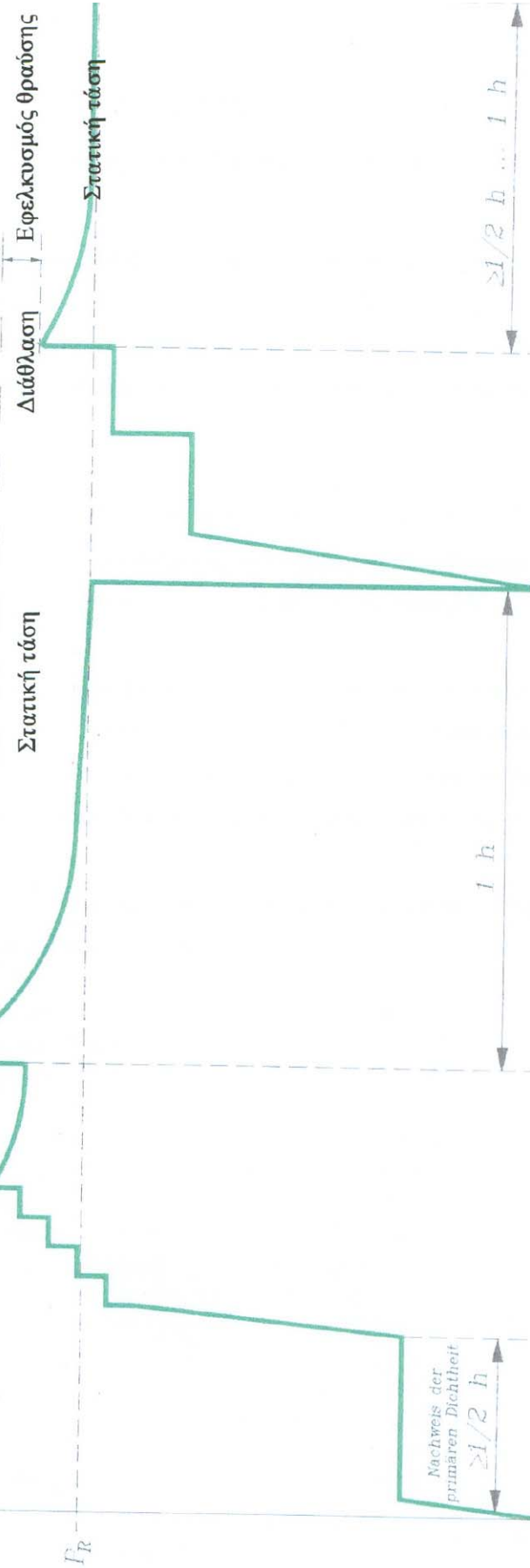
Η διαδικασία της δημιουργίας ρωγμής (θραύση) χαρακτηρίζεται από μια γρήγορη, έντονα αισθητή πτώση της πίεσης του υδραυλικού συστήματος. Για τη διεύρυνση της ρωγμής, ακολουθεί εισπίεση μέσα στο διάτρημα μιας αρκετά μεγάλης ποσότητας ρευστού (συνήθως υδραυλικό λάδι) ώστε να εξασφαλιστεί μια ευνοϊκή αλληλεπίδραση μεταξύ του πετρώματος και του ρευστού, στη ρωγμή. Τότε στο σύστημα σημειώνεται ασυμπτωτική πτώση της τάσης, στο χώρο διαστολής (σχήμα 7.5).

Η τάση p_R που εμφανίζεται τότε, απαιτεί μια χρονική απόσταση από το τέλος της έγχυσης για τον ακριβή χαρακτηρισμό της τιμής της. Σύμφωνα με όσα είναι έως τώρα γνωστά, από τα θεωρητικά δεδομένα και τις πρακτικές εμπειρίες που έχουν συγκεντρωθεί, η στατική τάση μετά από 60 min, σ' ένα οριζόντιο διάτρημα αντιστοιχεί στην ελάχιστη οριζόντια κύρια τάση σ_{Hmin} .

Τάση [MPa]

Τάση διεύρυνσης της ρωγμής
(Εισπίεση καθορισμένης ποσότητας λαδιού)

Τάση θραύσης



Σχήμα 7.5: Σχηματική διαδρομή της διαδικασίας μέτρησης των τάσεων με τη μέθοδο της υδραυλικής θραύσης

Κατά τη δοκιμή διάθλασης, η ρωγμή που είχε προηγουμένως επιτευχθεί και εξαιτίας της ανακούφισης της τάσης στο χώρο διαστολής έχει ήδη κλείσει, διευρύνεται ξανά με άσκηση νέας πίεσης. Τότε, μπορεί να σημειωθεί εκ νέου εμφάνιση της στατικής τάσης όπως μετά την αρχική θραύση. Αυτή η διαδικασία μπορεί να επαναλαμβάνεται συχνά, κατά βούληση.

Τα στοιχεία κάθε διατρήματος που όπως αναφέρθηκε συνοψίζονται σε ένα δελτίο καταγραφής των διασκοπήσεων των τάσεων, μέσω υδραυλικής θραύσης, αναφέρονται ως εξής:

- Αρχικά, αναφέρεται η εταιρία εκμετάλλευσης του ορυχείου και η περιοχή στην οποία βρίσκεται, ο αριθμός και η θέση του διατρήματος από το οποίο προέκυψαν τα στοιχεία που παρατίθενται.

- Ακολουθεί ακριβής περιγραφή του σημείου μέτρησης, το χρονικό διάστημα διεξαγωγής των μετρήσεων και ο υπεύθυνος της εκτέλεσης των δοκιμών.

- Στη συνέχεια παρατίθενται τα στοιχεία που αφορούν στις γεωλογικές συνθήκες που επικρατούν στο σημείο του διατρήματος αλλά και του βάθους στο οποίο βρίσκεται.

- Ακολουθεί η περιγραφή της κατάστασης των κυρίων τάσεων που ανιχνεύθηκαν αριθμητικά και τα τεχνικά στοιχεία του διατρήματος. Είναι σημαντικό να γνωρίζει κανείς τη διάμετρο, τη θέση, τη διεύθυνση, την κλίση και το βάθος του διατρήματος καθώς και την τεχνική που χρησιμοποιήθηκε για τη διάτρηση.

- Στη συνέχεια γίνεται αναφορά στην κατάσταση στην οποία βρίσκεται η εκμετάλλευση και στις παραμέτρους της, καθώς και στη θεωρητική φόρτιση των στύλων στήριξης, στη θέση τους στις κατασκευές του ορυχείου και στην κατάσταση των πεδίων εργασίας. Στην περίπτωση που υπάρχουν μεταλλευτικής φύσης ή άλλης φύσεως ιδιαιτερότητες ή επιπλέον μετρήσεις και έρευνες στο σημείο της μέτρησης, συνήθως αναφέρονται.

- Τέλος παρατίθενται τα αποτελέσματα της μέτρησης. Δηλαδή η στατική τάση και η πίεση θραύσης, η –επί τόπου- αντοχή σε θραύση σ_{AZ} , οι τεχνικές μετρήσεις σχετικά με το ρυθμό εισπίεσης του ρευστού, ενδεχομένως η θερμοκρασία κατά τις μετρήσεις υδραυλικής θραύσης και οπωσδήποτε οι πίνακες με τις αναλυτικές μετρήσεις και τα διαγράμματα αξιοποίησης της μέτρησης των τάσεων.

Αυτή η καταγραφή των συνθηκών γύρω από την τοποθεσία της μέτρησης και τα συγκεκριμένα στοιχεία που προκύπτουν από το εκάστοτε διάτρημα, αποτελούν το υπόβαθρο για τη γεωτεχνική εκτίμηση των αποτελεσμάτων.

B) Η -επί τόπου- αντοχή σε θραύση, σ_{AZ}

Κατά τη διεξαγωγή μιας μέτρησης μέσα σε διάτρημα με τη μέθοδο της υδραυλικής θραύσης, μπορεί με τη βοήθεια πολλαπλών δοκιμών διάθλασης να καθοριστεί και η -επί τόπου- αντοχή σε θραύσης σ_{AZ} , του υφιστάμενου αλατούχου πετρώματος σε συνάρτηση με το υλικό και το χρόνο παραμονής. Αυτό που μπορεί δηλαδή να καθοριστεί είναι οι συνθήκες χαλάρωσης που επικρατούν στο πέτρωμα. Με τη διάθλαση αποδεικνύεται κάθε φορά και η δευτερεύουσα στεγανότητα του πετρώματος.

Η -επί τόπου- αντοχή σε θραύση σ_{AZ} περιλαμβάνει την αντοχή σε εφελκυσμό στην περίμετρο του διατρήματος και αντιπροσωπεύει επίσης τις δυνάμεις συνοχής των κόκκων. Μέσω της υδραυλικής θραύσης μπορεί να καθοριστεί, ως η διαφορά της αρχικής ρωγμής θραύσης και της εκ νέου διάνοιξης της ίδιας ρωγμής, που προέκυψε από την αρχική θραύση.

Από τις διάφορες δοκιμές διάθλασης που έχουν πραγματοποιηθεί σε διάφορα αλατούχα πετρώματα και διάφορες περιοχές των ορυχείων έχουν καταγραφεί οι παρακάτω μέσες τιμές αντοχής σε θραύση:

«Κανονικός» καρναλιτίτης Südharz	$\sigma_{AZ} = 3 \dots 4 \text{ MPa}$
Στρωσιγενής καρναλιτίτης Teutschenthal	$\sigma_{AZ} = 3,5 \dots 4,5 \text{ MPa}$
Ταχυδριτικός καρναλιτίτης Teutschenthal	$\sigma_{AZ} = 1,5 \dots 2,5 \text{ MPa}$
Χαλαρός καρναλιτίτης	$\sigma_{AZ} = 2 \text{ MPa}$
«Κανονικός», συλβινιτικός κιζερίτης	$\sigma_{AZ} = 3,5 \dots 6 \text{ MPa}$
Ανυδριτικός κιζερίτης	$\sigma_{AZ} = 5 \dots 8 \text{ MPa}$
Χαλαρός κιζερίτης	$\sigma_{AZ} = 1 \dots 2 \text{ MPa}$
Ανυδριτική πτώχευση στρώσης	$\sigma_{AZ} = 6 \dots 12 \text{ MPa}$
Σύνδρομο στρώμα Hessen (καρναλιτίτης / αλίτης)	$\sigma_{AZ} = 3 \dots 4 \text{ MPa}$
Σύνδρομο στρώμα Hessen, χαλαρό	$\sigma_{AZ} = 1 \dots 2,5 \text{ MPa}$
Αλίτης Werra, ανέπαφος	$\sigma_{AZ} = 3 \dots 5 \text{ MPa}$
Αλίτης Stassfurt, έντονα κρυσταλλικός	$\sigma_{AZ} = 3 \dots 4 \text{ MPa}$
Αλίτης Stassfurt, συμπαγής	$\sigma_{AZ} = 4 \dots 5 \text{ MPa}$
Κύριος ανυδρίτης	$\sigma_{AZ} = 8 \dots 14 \text{ MPa}$
Αλίτης Leine, κρυσταλλώδες άλας	$\sigma_{AZ} = 3 \dots 3,5 \text{ MPa}$
Αλίτης Leine, λεπτοκρυσταλλώδης έως συμπαγής	$\sigma_{AZ} = 3 \dots 6 \text{ MPa}$
Χαλαρός αλίτης	$\sigma_{AZ} = 0,5 \dots 2,5 \text{ MPa}$

7.6 Διαδικασία εφαρμογής της μεθόδου της υδραυλικής θραύσης

Για την πραγματοποίηση μιας συνηθισμένης δοκιμής υδραυλικής θραύσης, το όργανο διασκόπησης, αρχικά τοποθετείται μέσα στο διάτρημα και στη συνέχεια λαμβάνει χώρα η πλήρωση του συστήματος με το ρευστό, τόσο στο χώρο των Packer όσο και στο χώρο της θραύσης και ακολουθεί εξαέρωση. Πριν ξεκινήσει η μέτρηση, πραγματοποιείται ανίχνευση της στεγανότητας του διατρήματος, σε υδροστατική πίεση ορισμένου βάθους, είτε σε ελάχιστη προεπιλεγμένη πίεση δοκιμής (για παράδειγμα 50 bar πίεση έγχυσης και 70 bar πίεση Packer). Η ανίχνευση αυτή διαρκεί περίπου 30 min και με την ολοκλήρωση της ακολουθεί νέα πλήρωση και συμπίεση της πρωταρχικής δοκιμαστικής πίεσης για την ανίχνευση της διαπερατότητας του αλατούχου πετρώματος.

Στη συνέχεια ακολουθεί η αρχική ρωγμάτωση, με έγχυση περίπου $20\text{-}30\text{ cm}^3$ λαδιού για τη διεύρυνση της ρωγμής. Η σταθερά της εφαρμοζόμενης πίεσης, καταγράφεται για πάνω από 60 min, αφού η τάση ηρεμίας για 1h αποτελεί το σταθερό μέγεθος της μέτρησης. Μετά το πέρας της 1 h, ακολουθούν μία ή δύο δευτερεύουσες θραύσεις (πρώτη ή δεύτερη δοκιμή διάθλασης) με περίπου $10\text{-}15\text{ cm}^3$ λαδιού και καταγραφή της σταθεράς της εφαρμοζόμενης πίεσης για πάνω από 30-60 min.

8. Καταγραφή και αξιολόγηση των μετρήσεων

8.1. Εισαγωγή

Τον Ιούνιο του 2000, η εταιρία Kali-Umwelttechnik Sondershausen GmbH (K-UTEC), ανέλαβε τη διεξαγωγή των μετρήσεων των τάσεων των πετρωμάτων στην περιοχή του φρέατος I του ορυχείου Glückauf Sondershausen, με τη μέθοδο της υδραυλικής θραύσης. Ο γενικότερος στόχος αυτής της έρευνας, ήταν η σύνταξη μιας γεωτεχνικής έκθεσης, σχετικά με την κατάσταση των εντατικών πεδίων της περιοχής στην οποία επρόκειτο να τοποθετηθεί η υπόγεια αίθουσα κονσέρτων. Για την επίτευξη του στόχου αυτού, η πραγματοποίηση των μετρήσεων κρίθηκε απαραίτητη τόσο πριν (06/2000), όσο και μετά (02/2001) την κατασκευή της αίθουσας, ενώ ως καταλληλότερα σημεία για την πραγματοποίηση των μετρήσεων, επιλέχθηκαν τα σημεία επί του πρώην θαλάμου BMSR και επί της διευθυντικής στοάς 13.

Επειδή όμως για την περιοχή που προβλεπόταν η κατασκευή της αίθουσας κονσέρτων δεν υφίσταντο δεδομένα από παλαιότερες μετρήσεις, κατ' εντολή της αρμόδιας για τα ορυχεία, Αρχής, κρίθηκε απαραίτητη η πραγματοποίηση επαναληπτικών μετρήσεων στα σημεία όπου είχαν πραγματοποιηθεί μετρήσεις το 1990. Η απόφαση αυτή είχε σκοπό να καταστήσει δυνατή την εκτίμηση των συνθηκών που κυριαρχούσαν στους στύλους στήριξης του φρέατος I, δεδομένου ότι οι μεταλλευτικές, γεωλογικές και τεκτονικές συνθήκες της περιοχής είναι ιδιαίτερα πολύπλοκες. Ως καταλληλότερα για την πραγματοποίηση των συγκριτικών μετρήσεων επιλέχθηκαν τα διατρήματα που βρίσκονταν στα σημεία F63-GL (επίπεδο φόρτωσης-εκφόρτωσης) και F64-GL (πρώην βόρεια θέση χειρισμού).

Ήδη από τον αρχικό σχεδιασμό επίβλεψης της υπόγειας αίθουσας κονσέρτων, είχε προγραμματιστεί η διεξαγωγή νέων επαναληπτικών μετρήσεων ελέγχου, περίπου 1 ½ χρόνο μετά την αποπεράτωση της κατασκευής. Τα σημεία μέτρησης φαίνονται στο σχήμα 8.1.

8.2 Οι γεωλογικές συνθήκες στην περιοχή των μετρήσεων

Η παρακολούθηση της κατασκευής της προβλεπόμενης αίθουσας κονσέρτων με τη βοήθεια των τεχνικών μετρήσεων, αφορούσε κυρίως στην περιοχή μεταξύ της

διευθυντικής στοάς 13 και του πρώην θαλάμου BMSR. Τα διατρήματα στα οποία πραγματοποιήθηκαν οι μετρήσεις βρίσκονται στην περιοχή γύρω από το φρέαρ I, μέσα σε μία μεταλλοφόρο δομή παραταγμένου αντικλίνου, το οποίο από τη βόρεια πλευρά του φρέατος, μεταβαίνει σε μια τεκτονική λεκάνη καλιούχου στρώματος Stassfurt, ερκύνιας παράταξης. Οι συνθήκες στρωμάτωσης των πετρωμάτων στην περιοχή είναι έντονα εναλλασσόμενες. Περίπου 300 m BA του φρέατος υφίσταται μια διαταραχή μεγάλης έντασης με εισπίεση του άλατος Leine στο καλιούχο στρώμα.

Η εξαιρετικά πολύπλοκη τεκτονική προκύπτει από τη θέση του φρέατος I εντός του πυρήνα της ζώνης διαταραχής Wippertal, η οποία έχει εύρος μεταξύ 600-800 m, ως μεταφορά της ζώνης διαταραχής Finne με επίπεδη ερκύνια παράταξη.

Το προφίλ του φρέατος σχηματίζεται από τα ακόλουθα στρώματα και πάχη αυτών:

- 504-586 m, αλίτης Leine (Na3),
- 586-617 m, κύριος ανυδρίτης (A3)
- 617-632 m, γκρι αλατούχος άργιλος (T3)
- 632-634 m, καλυπτικός αλίτης (Na2r)*
- 634-648 m, καλιούχο στρώμα Stassfurt σε φάση κιζερίτη (K2 H)
- 648 m κι εξής, αλίτης Stassfurt (Na2)
- 704.2 m, τελικό βάθος του φρέατος σε αλίτη Stassfurt (Na2).

Όλα τα διατρήματα στα οποία πραγματοποιήθηκαν οι δοκιμές, βρίσκονται σε βάθος περίπου 660 m, μέσα σε αλίτη Stassfurt, ο οποίος στην περιοχή του φρέατος εναλλάσσεται έντονα. Στην περιοχή που γειτνιάζει άμεσα με το φρέαρ κυριαρχεί χονδροειδής και ως επί το πλείστον, έντονα ανυδριτικός αλίτης της ανυδριτικής περιοχής του αλίτη Stassfurt, με περιεκτικότητα σε ανυδρίτη από 15 έως 22%.

Στην περιοχή της αίθουσας κονσέρτων, προέκυψε από την πυρηνοληψία, κρυσταλλικός αλίτης, υψηλής καθαρότητας. Τα τρίμματα από τα δείγματα της διάτρησης που ελήφθησαν, έδωσαν τα παρακάτω αποτελέσματα:

<u>Αποτέλεσμα [%]</u>	<u>F178-GL</u>	<u>F179-GL</u>
CaSO ₄	0,44	0,34
MgCl ₂	0,10	0,10
NaCl	99,01	99,05

H ₂ O	0.04	-
H ₂ O _{αδιάλυτο}	0.44	0.34

8.3. Η κατάσταση της εξόρυξης στην περιοχή των δοκιμών

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, οι εργασίες όρυξης του φρέατος I, ξεκίνησαν το 1893 και ολοκληρώθηκαν το 1895, μετά τη διάνοιξη και των στοών έρευνας και διάταξης. Στις αρχές του 1897 ξεκίνησαν και οι συστηματικές εργασίες εξόρυξης του κιζερίτη, σε διεύθυνση βόρεια και ανατολικά του φρέατος και διήρκεσαν περίπου έως το 1902. Το 1904 η εκμετάλλευση του μεταλλεύματος προχώρησε σε διεύθυνση δυτικά έως και νοτιοδυτικά του φρέατος I και οι συνήθεις παράμετροι εξόρυξης της εποχής, για την εγκατάλειψη στύλων ασφαλείας του φρέατος, ακτίνας R=75 m, ήταν:

- $b_k = 9-10$ m (πλάτος θαλάμου),
- $2a = 4-5$ m (πλάτος στύλου),
- $2b = 25-40$ m (μήκος στύλου),
- $b_D = 3-4$ m (πλάτος εγκάρσιας στοάς) και
- $h = 4-6$ m (μέσο ύψος κατασκευής).

Από το 1900 στο μεγαλύτερο τμήμα εξόρυξης του κιζερίτη είχε ξεκινήσει χειρονακτική λιθογόμωση των θαλάμων από υγρά εργοστασιακά υπολείμματα και αποπλύματα που μεταφέρθηκαν μέσα στο ορυχείο. Το 1912 όλα τα πεδία εξόρυξης κοντά στο φρέαρ είχαν ήδη πληρωθεί. Στο διάστημα που ακολούθησε δεν έλαβε χώρα καμία εργασία εξόρυξης γύρω από το φρέαρ, εκτός από ένα πεδίο εξόρυξης γύρω στα 200 m βορείως του φρέατος, το οποίο όμως λιθογομώθηκε αμέσως.

Έτσι, παρατηρεί κανείς ότι για πολλές δεκαετίες στην περιοχή των στύλων στήριξης του φρέατος I, υπήρχαν σχετικά λίγα ανοίγματα (π.χ. αίθουσα εκδηλώσεων) και ορισμένες στοές όπως ήταν η διευθυντική στοά 13, η στοά αερισμού, η νότια κύρια εγκάρσια στοά, οι στοές 14, 17, V και 7, καθώς και η κεντρική στοά για την κυκλοφορία των οχημάτων.

Αρκετά χρόνια αργότερα, το 1967, ανοίχθηκε από τα νότια, μια νέα στοά απορροής, ενώ στα μέσα της δεκαετίας του '70 μετά τη μετατροπή του συστήματος ανέλκυσης του φρέατος, από βαγόνι ανέλκυσης σε κάδο ανέλκυσης, δημιουργήθηκαν

αρκετά νέα ανοίγματα στους στύλους στήριξης του φρέατος (στοά εκκένωσης μεταλλεύματος, στοά-K, στα εκχύλισης μεταλλεύματος, στοά μεταφορικής ταινίας ΜΟ) αλλά και ορισμένα ακόμη βορείως του φρέατος Ι. Κατά τα έτη 1983/84, πραγματοποιήθηκαν ορισμένα ακόμη έργα στην περιοχή (στοά 638 U, 7 U, πρώην θάλαμος χειρισμού, κ.α.).

Το τελικό αποτέλεσμα αυτών των εργασιών ανακατασκευής πολλών γενεών, ήταν ασυνήθιστα υψηλού βαθμού διατομής, τόσο των προηγούμενων στύλων στήριξης του φρέατος, ακτίνας 75 m, όσο και των νεότερων (1957) στύλων, ακτίνας 210 m. Οι νέες αυτές κατασκευές στο διάστημα που ακολούθησε, επέφεραν μια ουσιαστική δραστηριοποίηση των υπόγειων και επιφανειακών παραμορφώσεων, κάτι που όμως αντιμετωπίστηκε το 1991, με τις οι εργασίες εξυγίανσης που έλαβαν χώρα.

Μέρος των εργασιών αυτών, ήταν κι ένα πρόγραμμα μετρήσεων (υδραυλική θραύση), με τα οποίο αξιολογήθηκε η κατάσταση των τάσεων και των παραμορφώσεων στους στύλους στήριξης του φρέατος. Η αξιοσημείωτη ηρεμία των παραμορφώσεων που προέκυψε, επιτεύχθηκε με την πλήρωση, των περιττών υπόγειων ανοιγμάτων γύρω από το φρέαρ, μέσω λιθογόμωσης LTF και πνευματικής λιθογόμωσης από υγρό αλίτη και τεμάχια από μπετόν μαγνησίας.

Το βάθος στην περιοχή των μετρήσεων βρίσκεται, κατά μέσο όρο, στα -468m BB, δηλαδή στα 660 m, όπου η τιμή της κύριας τάσης είναι $\sigma=15,2$ MPa.

8.4. Καταγραφή των μετρήσεων υδραυλικής θραύσης που πραγματοποιήθηκαν στο ορυχείο Glückauf Sondershausen.

8.4.1. Τα αποτελέσματα των παλιών μετρήσεων (1990)

Η διεξαγωγή των συστηματικών μετρήσεων ελέγχου τον Απρίλιο του 1990 οδήγησε στο συμπέρασμα, ότι η κατάσταση της δομής των τάσεων στους στύλους προστασίας του φρέατος Ι είναι εξαιρετικά ανομοιογενής. Η ανομοιογένεια αυτή αποδόθηκε τόσο στις πολύπλοκες γεωλογικές και τεκτονικές συνθήκες της συγκεκριμένης περιοχής του ορυχείου, όσο και στην υπερβολική εκμετάλλευση του κοιτάσματος, με τη μέθοδο θαλάμων με εγκατάλειψη στύλων.

Οι μετρήσεις στατικής τάσης που πραγματοποιήθηκαν στο διάτρημα **F60-GL** (Πίνακας 8.1), υπέδειξαν συνήθεις συνθήκες αποφόρτισης του φρέατος Ι. Εν τούτοις

ενώ η στατική τάση στο σημείο μέτρησης ήταν περίπου στα 6 MPa, η περιοχή του φρέατος I εμφανίστηκε κατά πολύ λιγότερο αποφορτισμένη από την περιοχή του επιπέδου φόρτωσης-εκφόρτωσης των φρεάτων V και VI. Οι ίδιες μετρήσεις αποκάλυψαν και αποσταθεροποίηση των ρωγμών στα 12,0 m στα 16,5 m και στα 18,0 m, οι οποίες σχετίζονταν με τις χαρακτηριστικές επιφάνειες του στρωσιγενούς ανυδρίτη. Το διάτρημα F60-GL βρισκόταν ακριβώς πάνω στη βόρεια πλευρά του αντικλίνου, Δ-Α παράταξης.

Πίνακας 8.1: Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της στατικής τάσης στο διάτρημα F60-GL

Βάθος διατρήματος [m]	Τάση ρωγμάτωσης [MPa]	P _R (1h) [MPa]	P _R (3h) [MPa]	P _R (10h) [MPa]	P _R (20h) [MPa]
19,5	12,6	7,8	6,4	-	-
18,0	10,2	5,6	4,3	2,6	-
16,5	10,2	5,6	4,3	-	-
15,0	10,8	7,2	6,6	-	-
13,5	10,8	7,6	6,6	-	-
12,0	8,4	5,5	3,6	1,3	-
10,5	14,4	8,8	7,2	-	-
9,0	13,8	9,7	8,3	-	-
7,5	16,0	12,1	10,8	-	-
6,0	16,2	13,2	11,5	9,0	-
4,5	-	14,0	12,6	-	-
3,0	-	12,2	11,8	-	-
1,5	-	-	-	-	-

Το διάτρημα **F62-GL** (Πίνακας 8.2) βρισκόταν στη διασταύρωση των στοών K και KD στην πλευρά του παλιού μεταλλευτικού πεδίου κιζερίτη, το οποίο έχει πληρωθεί χειρονακτικά. Όπως αναμενόταν, η περιοχή διάβασης προς το παλιό πεδίο απόπλυσης ήταν αποφορτισμένη, κάτι που είχε ως αποτέλεσμα τη μετατόπιση της μέγιστης στατικής τάσης στην στοά K, η οποία χρησιμοποιείται ακόμη.

Το βόρειο τμήμα των στύλων προστασίας του φρέατος (τότε R=75 m), ουσιαστικά είχε υποστεί μεγαλύτερη εκμετάλλευση από ότι το νότιο τμήμα και δεδομένου ότι ο στόχος του 1990 ήταν η μέτρηση των στύλων εκείνων οι οποίοι βρίσκονταν υπό τη μεγαλύτερη φόρτιση, τα διατρήματα F61-GL και F64-GL

τοποθετήθηκαν στους δύο μεγαλύτερους, γειτονικούς του φρέατος, στύλους στήριξης.

Πίνακας 8.2: Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της στατικής τάσης στο διάτρημα F61-GL

Βάθος ρωγμάτωσης [m]	Τάση ρωγμάτωσης [MPa]	P _R (1h) [MPa]	P _R (3h) [MPa]	P _R (10h) [MPa]	P _R (20h) [MPa]
7.0	20.4	15.8	15.0	-	-
6.0	21.6	16.3	15.3	13.9	13.0
5.0	16.8	12.6	11.8	-	-
4.0	13.2	5.7	3.1	-	-
3.0	12.0	4.9	2.3	-	-
2.5	10.8	4.7	2.0		-
2.0	3.6	0.2	0.1	-	-

Το διάτρημα **F61-GL** (Πίνακας 8.3), που βρισκόταν στη διασταύρωση των στοών Κ και V, μόλις 9 ημέρες μετά τη διάτρηση του δεν ήταν μετρήσιμο πέρα από τα 7 m βάθους, κάτι που αποδόθηκε είτε στην υψηλή φόρτιση του στύλου που είχε ως αποτέλεσμα την αυξημένη παραμόρφωση του διατρήματος, είτε στην έντονη χαλάρωση της περιμέτρου του διατρήματος, έως μέσα στον πυρήνα του.

Πίνακας 8.3: Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της στατικής τάσης στο διάτρημα F62-GL

Βάθος διατρήματος [m]	Τάση ρωγμάτωσης [MPa]	P _R (1h) [MPa]	P _R (3h) [MPa]	P _R (10h) [MPa]	P _R (20h) [MPa]
13,5	15,0	10,2	9,8	9,6	9,5
12,0	16,8	13,2	12,4	-	-
10,5	20,4	15,8	15,0	-	-
9,0		18,7	17,8	16,8	16,2
7,5		19,4	18,6	-	-
6,0	25,8	24,4	20,8	-	-
4,5		23,9	23,4	-	-
3,0	27,0	22,2	21,7	21,3	21,1
1,5		18,7	17,7	-	-

Στο διάτρημα **F64-GL** (Πίνακας 8.4) απαντήθηκαν ακόμη πιο έντονες παραμορφώσεις, αφού το όργανο διασκόπησης κατάφερε να εισχωρήσει μόνο μέχρι τα 4 m και μάλιστα μόλις 12 μέρες μετά τη διάτρηση του. Οι 3 μετρήσεις θραύσης που ήταν δυνατόν να πραγματοποιηθούν μεταξύ των 3 m και 3,8 m ανίχνευσαν στατικές τάσεις που κυμαίνονταν από 18,6 MPa έως 21,6 MPa. Δεδομένης όμως της μικρής απόστασης από την περίμετρο, οι τιμές αυτές, της στατικής τάσης χαρακτηρίστηκαν πολύ υψηλές, ενώ η στατική τάση στον πυρήνα των στύλων εκτιμήθηκε γύρω στα 27 MPa.

Πίνακας 8.4: Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της στατικής τάσης στο διάτρημα F64-GL

Βάθος διατρήματος [m]	Τάση ρωγμάτωσης [MPa]	P _R (1h) [MPa]	P _R (3h) [MPa]	P _R (10h) [MPa]	P _R (20h) [MPa]
3,8	28,8	21,6	20,9	-	-
3,5	26,4	19,2	17,4	-	-
3,0	25,8	18,6	18,1	-	-

Μεταξύ των αποτελεσμάτων που προέκυψαν από αυτές τις μετρήσεις ήταν και η εκτεταμένη φόρτιση των στύλων γύρω από τους, ελάχιστης επιφάνειας, στύλους στήριξης του φρέατος. Το ΝΑ τμήμα των στύλων προστασίας του φρέατος κατέχει μεγαλύτερες συναφείς επιφάνειες στήριξης, οι οποίοι δεν έχουν υποστεί εκμετάλλευση. Για την καταγραφή της κατάστασης των τάσεων σε αυτό το τμήμα, το διάτρημα **F63-GL** (Πίνακας 8.5) ανοίχτηκε επί της κύριας στοάς της μεταφορικής ταινίας με ΝΔ διεύθυνση. Κατά μήκος μίας χαλαρής στρώσης της περιμέτρου του διατρήματος σε βάθος 6-8 m, μετρήθηκαν στον πυρήνα του στύλου κανονικές στατικές τάσεις, μέσης τιμής γύρω στα $20,3 \pm 1,4$ MPa.

Η κατάσταση των τάσεων και των παραμορφώσεων των στύλων στήριξης του φρέατος I, το οποίο ανοίχθηκε μεταξύ του 1893 και του 1895, στην κύρια στοά της μεταφορικής ταινίας, θεωρήθηκε ιδιαίτερα πολύπλοκη. Λόγω των εκτεθειμένων τεκτονικών γεωλογικών συνθηκών που τον χαρακτηρίζουν, ο στύλος στήριξης του φρέατος I (R=210 m), είχε υποστεί υπερβολική εκσκαφή αφού είχαν πραγματοποιηθεί δύο φορές εργασίες ανακατασκευής κοντά του. Μεγαλύτερο πρόβλημα αντιμετώπιζε το νότιο τμήμα της περιοχής κοντά στο φρέαρ I.

Πίνακας 8.5: Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της στατικής τάσης στο διάτρημα F63-GL

Βάθος διατρήματος [m]	Τάση ρωγμάτωσης [MPa]	P _R (1h) [MPa]	P _R (3h) [MPa]	P _R (10h) [MPa]	P _R (20h) [MPa]
14,5	27,0	22,9	22,1	-	-
13,0		22,0	21,2	-	-
12,0		22,1	21,3	-	-
11,0		21,8	21,0	-	-
10,0	26,4	21,3	20,5	-	-
9,0	26,4	20,7	19,8	19,0	-
8,0		19,2	18,9	-	-
7,0		18,0	17,7	-	-
6,0	20,4	16,5	16,2	-	-
5,0		15,6	15,3	-	-
4,0	21,0	15,6	15,3	-	-
3,5	20,4	13,6	13,2	-	-
3,0	16,2	12,8	12,6	12,2	-
2,5	13,8	9,6	9,3	-	-
2,0		7,7	6,0	-	-
1,5		6,6	5,0	-	-
1,0		4,8	3,1	1,4	1,0
0,5		1,3	0,3	-	-

Εξαιτίας της νέας προχώρησης που έλαβε χώρα στα μέσα της δεκαετίας του '70 αλλά και κατά τα έτη 1983/84, στα τέλη της δεκαετίας του '80 προς αρχές της δεκαετίας του '90, προέκυψε μια νέα δραστηριοποίηση των παραμορφώσεων τόσο υπόγεια όσο και επιφανειακά. Για την αντιμετώπιση αυτού του φαινομένου απαιτήθηκαν εκτεταμένες εργασίες εξυγίανσης (λιθογόμωση). Κατά τις εργασίες αυτές, τα έτη 1990/91, πληρώθηκαν και τα περιττά υπόγεια ανοίγματα στους στύλους προστασίας του φρέατος, οι οποίοι ως τότε είχαν ακτίνα R= 75 m. Εκτός από την εμφύσηση υγρού αλίτη στα παλιά ανοίγματα κοντά στο φρέαρ, πληρώθηκαν και τα υπόλοιπα, μη απαραίτητα ανοίγματα με στεγνό αλίτη.

8.4.2. Επανάληψη των παλιών μετρήσεων, επί του ανατολικού επιπέδου φόρτωσης εκφόρτωσης (F176-GL).

Από τις 23 Ιουνίου έως τις 4 Ιουλίου 2000 στα πλαίσια του προγράμματος των βραχομηχανικών μετρήσεων στους στύλους στήριξης του φρέατος I, ανοίχθηκαν 4 οριζόντια διατρήματα κι ελήφθησαν 95 μετρήσεις των τάσεων των πετρωμάτων, με τη μέθοδο της υδραυλικής θραύσης.

Ο στόχος των μετρήσεων υδραυλικής θραύσης ήταν η εκτίμηση της – επί τόπου- κατάστασης των τάσεων και του βαθμού χαλάρωσης επιλεγμένων στύλων γύρω από την περιοχή που επρόκειτο να κατασκευαστεί η αίθουσα κονσέρτων.

Επειδή για την περιοχή αυτή δεν υπήρχαν καθόλου παλιότερες μετρήσεις, για την εκτίμηση των συνθηκών που κυριαρχούσαν εκεί, διενεργήθηκαν επαναληπτικές μετρήσεις σε δύο από τα παλαιότερα διατρήματα. Έτσι πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις ελέγχου στην περιοχή των παλιότερων διατρημάτων **F63-GL** (επίπεδο φόρτωσης-εκφόρτωσης) και **F64-GL** (βόρεια θέση χειρισμού), τα οποία είχαν ήδη ερευνηθεί το 1990.

Αρχικά, μέσω του νέου διατρήματος **F176-GL** (06/2000), ερευνήθηκε το ΝΑ τμήμα των στύλων στήριξης του φρέατος I, το οποίο είχε υποστεί μικρή σχετικά εκμετάλλευση. Το παλιό διάτρημα και το νέο γειτνιάζουν απευθείας, ενώ στις νέες μετρήσεις εκτός από τη στατική τάση (P_R) (Πίνακας 8.6) αναζητείται και η επί τόπου αντοχή σε εφελκυσμό (σ_{AZ}) μέχρι τη θραύση (Πίνακας 8.7).

Από τη σύγκριση και την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των διατρημάτων F63-GL (04/90) και F176-GL (06/2000) προέκυψαν τα εξής συμπεράσματα:

- Παρατηρήθηκε εντελώς ξεκάθαρη βαθμιαία αύξηση της χαλάρωσης του υφιστάμενου ανυδριτικού αλίτη στον πυρήνα των στύλων, η οποία σχετιζόταν με την πάροδο του χρόνου. Η μέση τιμή της στατικής τάσης στον πυρήνα των στύλων μετά από μία ώρα αναμονής, ήταν:

$$P_R (1h) = 20.3 \pm 1.4 \text{ MPa για το διάτρημα F63-GL (04/1990)}$$

$$P_R (1h) = 18.1 \pm 1.2 \text{ MPa για το διάτρημα F176-GL (06/2000).}$$

Γενικά οι συνθήκες φόρτισης και για τα δύο διατρήματα χαρακτηρίζονται **κανονικές** παρά τις υφιστάμενες επιδράσεις των στύλων υποστήριξης.

- Στην περίμετρο, η χαλάρωση που είχε σημειωθεί κατά τα 10 τελευταία έτη, ήταν ελάχιστη και μπορεί να αποδοθεί στην συντήρηση της περιοχής φόρτωσης-εκφόρτωσης και στον, μεγαλύτερης συνοχής, ανυδρικό αλίτη.
- Η μέση τιμή της -επί τόπου- αντοχής σε εφελκυσμό μέχρι τη θραύση (σ_{AZ}) που ανιχνεύθηκε με τις δοκιμές διάθλασης, κυμαινόταν στα $2,16 \pm 0,55$ MPa και σε σύγκριση με την αντίστοιχη τιμή, η οποία κατά το 1990 ανερχόταν στα 6-8 MPa, υποδεικνύουν τα αποτελέσματα της αποφόρτισης σε συνάρτηση με το χρόνο.
- Συνολικά η διάγνωση των επαναληπτικών μετρήσεων F176-GL (06/2000), τεκμηριώνει τη σκοπιμότητα και τις συνέπειες των εργασιών εξυγίανσης που διεξήχθησαν το 1990/91.

Πίνακας 8.6: Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της στατικής τάσης στο διάτρημα F176-GL

Βάθος διατρήματος [m]	Τάση ρωγμάτωσης [MPa]	P _R (1/2h) [MPa]	P _R (1h) F176 (06/00) [MPa]	P _R (1h) F63 (04/90) [MPa]
0,5	-			1,3
1,0	10,29	7,00	6,14	4,8
1,5	-			6,6
2,0	10,95	6,61	6,54	7,7
2,5	-			9,6
3,0	14,98	10,47	10,41	12,6
3,5				13,6
4,0	19,84	14,64	14,35	15,6
5,0	18,80	14,33	13,89	15,6
6,0	20,14	15,46	14,50	16,5
7,0	-			18,0
7,5	21,58	17,31	16,56	-
8,0	-			19,2
9,0	21,89	17,33	16,79	20,7
10,0	-			21,3
10,5	21,33	18,23	17,89	-
11,0	-			21,8
12,0	22,25	19,12	18,90	22,1
13,0	-			22,0
13,5	22,78	19,62	19,33	-
14,5	-			22,9
15,0	23,77	19,63	19,15	-

Η μέση τιμή της στατικής τάσης στους πυρήνες των στύλων:

$$\underline{P_R(1\text{ h}) = 18.1 \pm 1.2\text{ MPa}}$$

Πίνακας 8.7: Η-επί τόπου- αντοχή σε εφελκυσμού μέχρι τη θραύση (σ_{AZ}) στο διάτρημα F176:

Βάθος διατρήματος [m]	Τάση ρωγμάτωσης p_A [MPa]	Τάση διάθλασης p_{A^*} [MPa]	Αντοχή θραύσης σ_{AZ} [Mpa]
1,0	10,29	8,30	1,99
2,0	10,95	7,73	3,22
3,0	14,98	13,17	1,81
4,0	19,84	17,64	2,20
5,0	18,80	17,15	1,65
6,0	20,14	17,05	3,09
7,5	21,58	19,30	2,28
9,0	21,89	19,66	2,23
10,5	21,33	19,00	2,33
12,0	22,25	20,29	1,96
13,5	22,78	21,19	1,59
15,0	23,77	22,30	1,47

Η μέση τιμή στην περίμετρο: $\sigma_{AZ} = 2,16 \pm 0,55\text{ MPa}$ (n=12)

8.4.3. Επανάληψη των παλιών μετρήσεων, ΒΑ του φρέατος I (F177-GL).

Στο στύλο βορειοανατολικά του φρέατος I, ο οποίος έχει επιφάνεια γύρω στα 840 m², εκτός από το παλιό διάτρημα F64-GL (04/90), για τις ανάγκες της επίβλεψης ανοίχθηκε και το διάτρημα ελέγχου **F177-GL**, στο οποίο πραγματοποιήθηκαν νέες μετρήσεις με τη μέθοδο της υδραυλικής θραύσης (Πίνακας 8.8 και 8.9).

Όπως αναμενόταν, οι στύλοι οι οποίοι σύμφωνα με τις μετρήσεις του 1990, βρίσκονταν υπό υψηλή φόρτιση, με την πάροδο του χρόνου εμφάνισαν την αντίστοιχη αποφόρτιση. Ενώ το 1990, το διάτρημα **F64-GL** δεν επιδεχόταν συστηματικές μετρήσεις λόγω των έντονων παραμορφώσεων που είχε υποστεί, τον Ιούνιο του 2000 οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν χωρίς προβλήματα.

Από την αξιολόγηση των μετρήσεων προέκυψε ότι:

- Η μέση στατική τάση στον πυρήνα του στύλου μειώθηκε από 26-27 MPa που ήταν το 1990 σε $P_R (1h) = 20.8 \pm 2,1$ MPa τον Ιούνιο του 2000. Αυτό, εκτός από τις διαδικασίες χαλάρωσης που σχετίζονται με την πάροδο του χρόνου, αποδίδεται και στην ανακατανομή των τάσεων που έλαβε χώρα στην περιοχή βορείως του φρέατος, η οποία είχε πληρωθεί το 1990/91.

- Στην βαθύτερη περιοχή της περιμέτρου ελαττώθηκε η στατική τάση από 18,6-21,6 MPa το 1990 σε περίπου 10 MPa, το έτος 2000. Σε βάθος γύρω στα 2m, η περιφέρεια έμοιαζε να έχει υποστεί σχεδόν πλήρη χαλάρωση, κάτι που θεωρείται όμως φυσιολογικό.

- Οι -επί τόπου- αντοχές θραύσης που ανιχνεύθηκαν, $\sigma_{AZ} = 4,22 \pm 0,89$ MPa, μάλλον οφείλονται στη γειννίαση με τον ανέπαφο ανυδριτικό αλίτη.

- Η επίδραση της λιθογόμωσης που διεκπεραιώθηκε το 1990/91, αποδεικνύεται και εδώ θετική. Στο βόρειο τμήμα των στύλων στήριξης του φρέατος είχαν πληρωθεί πολλά περιττά υπόγεια ανοίγματα, με αποτέλεσμα οι υπόγειες παραμορφώσεις να μειωθούν σχεδόν στο μισό τους.

Πίνακας 8.8: Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της στατικής τάσης στο διάτρημα F177-GL

Βάθος διατρήματος [m]	Τάση ρωγμάτωσης [MPa]	$P_R (1/2 h)$ [MPa]	$P_R (1h) F177 (06/00)$ [MPa]	$P_R (1h) F64 (04/90)$ [MPa]
1,0	6,10	0,58	0,37 ¹⁾	-
2,0	9,09	3,26	2,29	-
3,0	16,73	11,54	10,46 ²⁾	18,6
3,5	-			19,2
3,8	-			21,6
4,0	17,17	12,01	10,36 ²⁾	-
5,0	20,67	15,60	14,57	-
6,0	23,27	17,75	16,41	-
7,5	26,69	21,81	21,43	-
9,0	26,62	19,75	18,36	-
10,5	28,52	23,90	22,90 ³⁾	-
12,0	28,13	22,95	22,20	-
13,5	29,30	22,19	21,64	-
15,0	24,47	19,22	17,97	-

1) Διακοπή της μέτρησης μετά από 54 min.

2) Ήδη αξιόλογη επίδραση από την αρχική περίμετρο της αίθουσας BMSR

3) Στατική τάση μετά από 59 min.

Η μέση τιμή της στατικής τάσης στους πυρήνες των στύλων:

$$\underline{P_R(1\text{ h}) = 20,8 \pm 2,1\text{ MPa}}$$

Πίνακας 8.9: Η-επί τόπου- αντοχή σε εφελκυσμού μέχρι τη θραύση (σ_{AZ}) στο διάτρημα F177:

Βάθος διατρήματος [m]	Τάση ρωγμάτωσης p_A [MPa]	Τάση διάθλασης p_{A^*} [MPa]	Αντοχή θραύσης σ_{AZ} [Mpa]
1,0	6,10	-	-
2,0	9,09	6,28	2,81
3,0	16,73	-	-
4,0	17,17	13,53	3,64
5,0	20,67	17,88	2,79
6,0	23,27	18,39	4,88
7,5	26,96	22,95	4,01
9,0	26,62	21,32	5,30
10,5	28,52	24,61	3,91
12,0	28,13	23,93	4,20
13,5	29,30	23,70	5,60
15,0	24,47	20,84	3,63

Η μέση τιμή στην περίμετρο: $\sigma_{AZ} = 4,22 \pm 0,89\text{ MPa}$ (n=9)

8.4.4. Νέες μετρήσεις στην περιοχή της προβλεπόμενης αίθουσας κονσέρτων, πριν από την έναρξη της προχώρησης.

Η υπόγεια αίθουσα κονσέρτων επρόκειτο να τοποθετηθεί περίπου 180 m ANA του φρέατος μέσα στους στύλους στήριξης αυτού ($R = 210\text{ m}$). Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο ο στύλος στήριξης αυτός βρίσκεται μεταξύ της διευθυντικής στοάς 13 στα νότια, της εξόρυξης του αλίτη (βόρειο πεδίο) στα ανατολικά, της στοάς εξόρυξης (στοά W) στα βόρεια καθώς και του πρώην θάλαμο BMSR στα δυτικά. Από τα δυτικά του στύλου στήριξης και γύρω στα 12 m πάνω από τη διευθυντική στοά 13, διερχόταν η στοά Autobahn Nord, που παραμένει ακόμη ανοιχτή.

Τη χρονική στιγμή της διεξαγωγής των μετρήσεων στην περιοχή αυτή, στο ANA τμήμα της διευθυντικής στοάς 13, λάμβαναν χώρα εργασίες κοπής με κοπτική μηχανή που είχαν ως στόχο τη διεύρυνση της στοάς. Το ΔΒΔ τμήμα ήταν ήδη

διευρυμένο και στον πρώην θάλαμο BMSR είχε ήδη δημιουργηθεί η εγκοπή για την τοποθέτηση του χώρου γαστρονομικής περιποίησης. Όπως αποδείχθηκε πάντως, αυτές οι μεταλλευτικές εργασίες δεν επέδρασαν με κανένα τρόπο στις μετρήσεις των τάσεων.

Στη συγκεκριμένη περιοχή για την τοποθέτηση των νέων διατρημάτων επιλέχθηκαν τα σημεία **F178-GL** (Πίνακας 8.10 και 8.11) και **F179-GL** (Πίνακας 8.12 και 8.13). Το σημείο F178-GL βρίσκεται επί της διευθυντικής στοάς 13, σε διεύθυνση ANA της πρώην αίθουσας BMSR. Το σημείο διάτρησης βρίσκεται γύρω στα 175 m ANA του φρέατος μέσα στο στύλο στήριξης, η επιφάνεια του οποίου είναι περίπου 4.400 m² (η στοά Autobahn Nord διέρχεται περίπου 12 m δυτικά παράλληλα προς το διάτρημα και περίπου 12 m πάνω από αυτό). Το σημείο F179-GL βρίσκεται στον πρώην θάλαμο BMSR, μέσα στην νέα εγκοπή που είχε ήδη δημιουργηθεί για τη γαστρονομική περιποίηση των επισκεπτών. Το σημείο διάτρησης βρίσκεται γύρω στα 140 m ANA του φρέατος με κατεύθυνση του διατρήματος προς το φρέαρ (ΔΒΔ). Ο στύλος στήριξης στον οποίο βρίσκεται το διάτρημα έχει εμβαδόν γύρω στα 1.300 m² και ακουμπά στη στοά 638 U, δηλαδή στις παλιές εκσκαφές που είχαν πραγματοποιηθεί από το 1897-1912 και είχαν πληρωθεί έως το 1912.

Πίνακας 8.10: Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της στατικής τάσης στο διάτρημα F178-GL

Βάθος διατρήματος [m]	Τάση ρωγμάτωσης [MPa]	P _R (1/2 h) [MPa]	P _R (1 h) F178 (06/00) [MPa]
1,0	32,46	26,89	25,36
2,0	24,73	17,49	16,67
3,0	21,18	18,23	17,98
4,0	23,77	18,58	18,04
5,0	23,54	18,19	17,86
6,0	22,70	18,58	18,22
7,5	24,39	18,77	18,34
9,0	23,45	17,93	17,28
10,5	24,32	17,83	17,29
12,0	23,93	18,51	18,05
13,5	24,86	17,79	17,18
15,0	24,63	17,60	16,84
15,5	22,50	17,29	16,87

Η μέση τιμή της στατικής τάσης στους πυρήνες των στύλων:

$$P_R(1\text{ h}) = 17,6 \pm 0,6 \text{ MPa}$$

Πίνακας 8.11: Η-επί τόπου- τάση θραύσης εφελκυσμού σ_{AZ} που ανιχνεύθηκε στο F178:

Βάθος διατρήματος [m]	Τάση ρωγμάτωσης p_A [MPa]	Τάση διάθλασης p_{A^*} [MPa]	Αντοχή θραύσης σ_{AZ} [Mpa]
1,0	32,46	29,58	2,88
2,0	24,73	21,71	3,02
3,0	21,18	19,74	1,44
4,0	23,77	22,23	1,54
5,0	23,54	20,72	2,82
6,0	22,70	-	-
7,5	24,39	20,71	3,68
9,0	23,45	21,51	1,94
10,5	24,32	20,49	3,83
12,0	23,93	20,95	2,98
13,5	24,86	19,78	5,08
15,0	24,63	20,61	4,02
15,5	22,50	19,44	3,06

Η μέση τιμή στην περίμετρο: $\sigma_{AZ} = 3,02 \pm 1,06 \text{ MPa}$ (n=12)

Πίνακας 8.12: Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της στατικής τάσης στο διάτρημα F179-GL

Βάθος διατρήματος [m]	Τάση ρωγμάτωσης [MPa]	$P_R(1/2h)$ [MPa]	$P_R(1\text{ h})$ F179 (06/00) [MPa]
1,0	17,60	12,97	12,70
2,0	23,04	17,07	16,72
3,0	24,94	19,60	19,14
4,0	26,56	20,47	19,74
5,0	26,52	21,19	20,80
6,0	25,66	21,34	20,59
7,5	28,16	22,05	21,49
9,0	27,28	22,13	21,45
10,5	26,14	21,19	20,80
12,0	26,58	20,81	20,28
13,5	27,07	19,72	19,29
15,0	24,83	19,12	18,78

Η μέση τιμή της στατικής τάσης στους πυρήνες των στύλων:

$$P_R (1 \text{ h}) = 20,2 \pm 1,0 \text{ MPa}$$

Πίνακας 8.13: Η-επί τόπου- τάση θραύσης εφελκυσμού σ_{AZ} που ανιχνεύθηκε στο F179:

Βάθος διατρήματος [m]	Τάση ρωγμάτωσης p_A [MPa]	Τάση διάθλασης p_{A^*} [MPa]	Αντοχή θραύσης σ_{AZ} [Mpa]
1,0	17,60	15,75	1,85
2,0	23,04	20,06	2,98
3,0	24,94	21,80	3,14
4,0	26,56	21,76	4,80
5,0	26,52	21,78	4,74
6,0	25,66	21,53	4,13
7,5	28,16	24,15	4,01
9,0	27,28	23,96	3,32
10,5	26,14	21,81	4,33
12,0	26,58	21,94	4,64
13,5	27,07	21,67	5,40
15,0	24,83	20,84	3,99

Η μέση τιμή στην περίμετρο: $\sigma_{AZ} = 4,25 \pm 0,69 \text{ MPa}$ (n=10)

Από την αξιολόγηση των μετρήσεων πριν την εκσκαφή της αίθουσας κονσέρτων (F178-GL), προέκυψε ότι στον πυρήνα του στύλου στήριξης επικρατούν ενιαίες συνθήκες φόρτισης, με στατική τάση γύρω στα 17-18 MPa. Με μια απλή εκτίμηση, η φόρτιση του στύλου στην επιφάνεια στήριξης ανερχόταν γύρω στα 25-27 MPa. Τη δεδομένη χρονική στιγμή, οι τιμές αυτές, δεν προκαλούσαν καμία ανησυχία.

Εν τούτοις δεν αποκλείστηκε το ενδεχόμενο, μετά τη δημιουργία της αίθουσας κονσέρτων, να παρατηρηθεί αύξηση των τάσεων της επιφάνειας στήριξης, της οποίας το εμβαδόν θα μειωθεί σημαντικά. Έτσι, είτε βραχυπρόθεσμα, είτε μακροπρόθεσμα, ήταν δυνατό να προκύψει δραστηριοποίηση και μάλιστα επιτάχυνση των διαδικασιών χαλάρωσης, δεδομένου ότι πρόκειται για διαδικασίες χρονικά εξαρτώμενες. Για το λόγο αυτό κρίθηκαν απαραίτητες και νέες επαναληπτικές μετρήσεις μετά την κατασκευή της αίθουσας κονσέρτων.

Από τις μετρήσεις δεν προέκυψε χαλάρωση στην περίμετρο της διευρυμένης πλέον, διευθυντικής στοάς 13 ούτε και στην νέα εγκοπή στον πρώην θάλαμο BMSR αλλά σε απόσταση 1 m πίσω από τη νέα περίμετρο της διευθυντικής στοάς 13, εμφανίστηκε μια ασυνήθιστη ζώνη υψηλής τάσης, με στατική τάση 25,4 MPa, δηλαδή περίπου 38 MPa κατακόρυφη τάση. Η τιμή αυτή αφορά σε μετρήσεις 10 μέρες μόλις μετά τη νέα διαρρύθμιση της περιμέτρου με κοπτική μηχανή. Είναι πιθανό, η τιμή αυτή να σχετιζόταν με τον υφιστάμενο αλίτη, ασυνήθιστης καθαρότητας (99 % NaCl).

Στο διάτρημα F179-GL, η στατική τάση του πυρήνα ανιχνεύθηκε γύρω στα $20,2 \pm 1,0$ MPa που ήταν μια, μάλλον αναμενόμενη τιμή για ένα τέτοιο βάθος (660 m) και για μια τέτοιου είδους εξόρυξη. Με μια απλή εκτίμηση η φόρτιση των στύλων, ανερχόταν γύρω στα 30 MPa. Η δομή των τάσεων στο στύλο, ο οποίος αποτελείτο από υψηλής καθαρότητας αλίτη Stassfurt εμφανίστηκε εντελώς αρμονική ενώ δεν παρουσιάστηκαν καθόλου αρνητικές επιδράσεις επικάλυψης από την παλιά εξόρυξη του 1902.

Τα αποτελέσματα των τεχνικών μετρήσεων, από τη μία τεκμηρίωσαν τις, μάλλον, ανέπαφες συνθήκες στην περιοχή γύρω από την αίθουσα κονσέρτων με ανεπαίσθητες επιδράσεις των στύλων στήριξης, από την άλλη όμως επέτρεπαν την αναμονή κάποιας ανακατανομής των τάσεων λόγω της νέας κατασκευής με πιθανή ενεργοποίηση των υπόγειων παραμορφώσεων.

Η τεχνική επίβλεψη της προχώρησης της υπόγειας αίθουσας κονσέρτων, η οποία εκτός από τις μετρήσεις της υδραυλικής θραύσης τεκμηριώνεται πάντα και με τη βοήθεια του συστήματος της εγκάρσιας επέκτασης των στύλων στα διατρήματα υδραυλικής θραύσης, αλλά και τις μετρήσεις σύγκλισης (K-UTEC), χαρακτήρισε τη συνολική περιοχή γύρω από το φρέαρ I, εντελώς σεισμική.

8.4.5. Επαναληπτικές μετρήσεις μετά την κατασκευή της αίθουσας κονσέρτων.

Οι επαναληπτικές μετρήσεις στην περιοχή κατασκευής της αίθουσας κονσέρτων πραγματοποιήθηκαν κατά τη χρονική περίοδο από τις 13 έως τις 16 Φεβρουαρίου 2001. Η κοπή της αίθουσας, η οποία έγινε με κοπτική μηχανή (Alpine Miner 50) είχε ήδη ολοκληρωθεί στα τέλη του Δεκεμβρίου του 2000. Για την διεξαγωγή των μετρήσεων επιλέχθηκαν τα διατρήματα **F186-GL** (επαναληπτική μέτρηση στο F178-GL), και **F187-GL** (επαναληπτική μέτρηση στο F179-GL). Στους πίνακες που

ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων, τόσο τις στατικής τάσης (Πίνακας 8.14 και 8.16), όσο και της αντοχής σε εφελκυσμό (Πίνακας 8.15 και 8.17).

Πίνακας 8.14: Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της στατικής τάσης στο διάτρημα F186-GL

Βάθος διατρήματος [m]	Τάση ρωγμάτωσης [MPa]	P _R (1/2h) [MPa]	P _R (1h) F186 (02/01) [MPa]	P _R (1 h) F178 (06/00) [MPa]
1,0	17,19	11,66	11,28	25,36
2,0	21,97	15,60	15,17	16,67
3,0	22,65	18,26	18,03	17,98
4,0	24,25	19,56	19,37 ¹⁾	18,04
5,0	23,65	20,19	19,78	17,86
6,0	23,77	20,61	20,15	18,22
7,5	24,41	21,01	20,56	18,34
9,0	23,30	21,29	20,73	17,28
10,5	26,28	21,27	20,61	17,29
12,0	25,56	21,91	21,33	18,05
13,5	28,06	22,63	21,55	17,18
14,0	24,57	20,16	19,07	-
15,0	25,08	20,58	19,46	16,84
15,5	-			16,87

Η μέση τιμή της στατικής τάσης στους πυρήνες των στύλων:

$$P_R (1 h) = 20,1 \pm 1,0 \text{ MPa}$$

Πίνακας 8.15: Η-επί τόπου- αντοχή σε εφελκυσμό σ_{AZ} που ανιχνεύθηκε στο F186-GL:

Βάθος διατρήματος [m]	Όγκος cm ³		Τάση ρωγμάτωσης p _A [MPa]	Τάση διάθλασης p _A * [MPa]	Αντοχή θραύσης σ _{AZ} [Mpa]
	θραύση	διάθλαση			
1,0	18,79	4,96	17,19	15,41	1,78
2,0	22,93	4,88	21,97	19,85	2,12
3,0	19,81	4,16	22,65	20,01	2,64
4,0	23,84	-	24,25	-	-
5,0	25,04	4,69	23,65	21,47	2,18
6,0	20,40	4,47	23,77	21,69	2,08

7,5	23,80	4,94	24,41	22,02	2,39
9,0	19,11	4,75	23,30	21,52	1,78
10,5	24,51	5,35	26,28	23,60	2,68
12,0	27,96	5,21	25,56	21,97	3,59
13,5	29,07	4,44	28,06	23,41	4,65
14,0	18,24	4,00	24,57	20,65	3,92
15,0	16,75	3,92	25,08	20,60	4,48

Η μέση τιμή στην περίμετρο: $\sigma_{AZ} = 2,96 \pm 1,02$ MPa (n=11)

Πίνακας 8.16: Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της στατικής τάσης στο διάτρημα F187-GL

Βάθος διατρήματος	Τάση ρωγμάτωσης	P_R (1/2 h)	P_R (1h) F187 (02/01)	P_R (1h) F179 (06/00)
[m]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
1,0	18,17	11,93	11,52	12,70
2,0	22,40	18,16	17,65	16,72
3,0	26,80	21,01	20,39	19,14
4,0	29,51	23,47	22,29	19,74
5,0	27,34	23,66	22,66	20,80
6,0	29,43	23,38	22,61	20,59
7,5	29,79	23,08	22,12	21,49
9,0	28,26	23,91	23,05	21,45
10,5	28,93	23,16	22,59	20,80
12,0	27,98	22,17	21,71	20,28
13,5	27,89	21,90	21,32	19,29
15,0	-			18,78

Η μέση τιμή της στατικής τάσης στους πυρήνες των στύλων:

$$\underline{P_R (1 h) = 22,1 \pm 0,8 \text{ Mpa}}$$

Πίνακας 8.17: Η-επί τόπου- αντοχή σε εφελκυσμό σ_{AZ} που ανιχνεύθηκε στο F187-GL:

Βάθος διατρήματος [m]	Όγκος cm ³		Τάση ρωγμάτωσης p_A [MPa]	Τάση διάθλασης p_{A^*} [MPa]	Αντοχή θραύσης σ_{AZ} [MPa]
	θραύση	διάθλαση			
1,0	14.66	-	18.17	-	-
2,0	14.03	5.01	22.40	18.87	3.53
3,0	15.22	5.44	26.80	24.08	2.72
4,0	16.06	4.64	29.51	25.61	3.90
5,0	14.47	4.05	27.34	24.42	2.92
6,0	15.03	4.12	29.43	25.07	4.36
7,5	14.17	4.09	29.79	23.66	6.13
9,0	11.76	4.43	28.26	24.14	4.12
10,5	16.44	3.61	28.93	23.32	5.61
12,0	15.39	6.32	27.98	22.02	5.96
13,5	15.07	4.89	27.89	22.49	5.40

Η μέση τιμή στην περίμετρο: $\sigma_{AZ} = 4,46 \pm 1.24$ MPa (n=10)

A) Για την επιφάνεια στήριξης της προβλεπόμενης αίθουσας κονσέρτων:

-Στους στύλους της αίθουσας κονσέρτων οι επαναληπτικές μετρήσεις που διεξήχθησαν στο διάτρημα **F186-GL**, έδωσαν τιμές για τις στατικές τάσεις στον πυρήνα των στύλων που κυμαίνονται μεταξύ των 19 MPa και των 21 MPa. Με μια απλή εκτίμηση θα έλεγε κανείς ότι η φόρτιση του στύλου βρίσκεται μεταξύ των 28 MPa και των 32 MPa. Αυτές οι τιμές δεν υποδεικνύουν κανένα λόγο ανησυχίας για την ασφάλεια της κατασκευής.

-Με τις νέες μετρήσεις επιβεβαιώθηκε η αναμενόμενη αύξηση των τάσεων στην μειωμένη πλέον επιφάνεια στήριξης μετά τη νέα εκσκαφή:

- **F178-GL** (06/2000) **πριν** την εκσκαφή: $17,6 \pm 0,6$ MPa
- **F186-GL** (02/2001) **μετά** την εκσκαφή: 20.1 ± 1.0 MPa

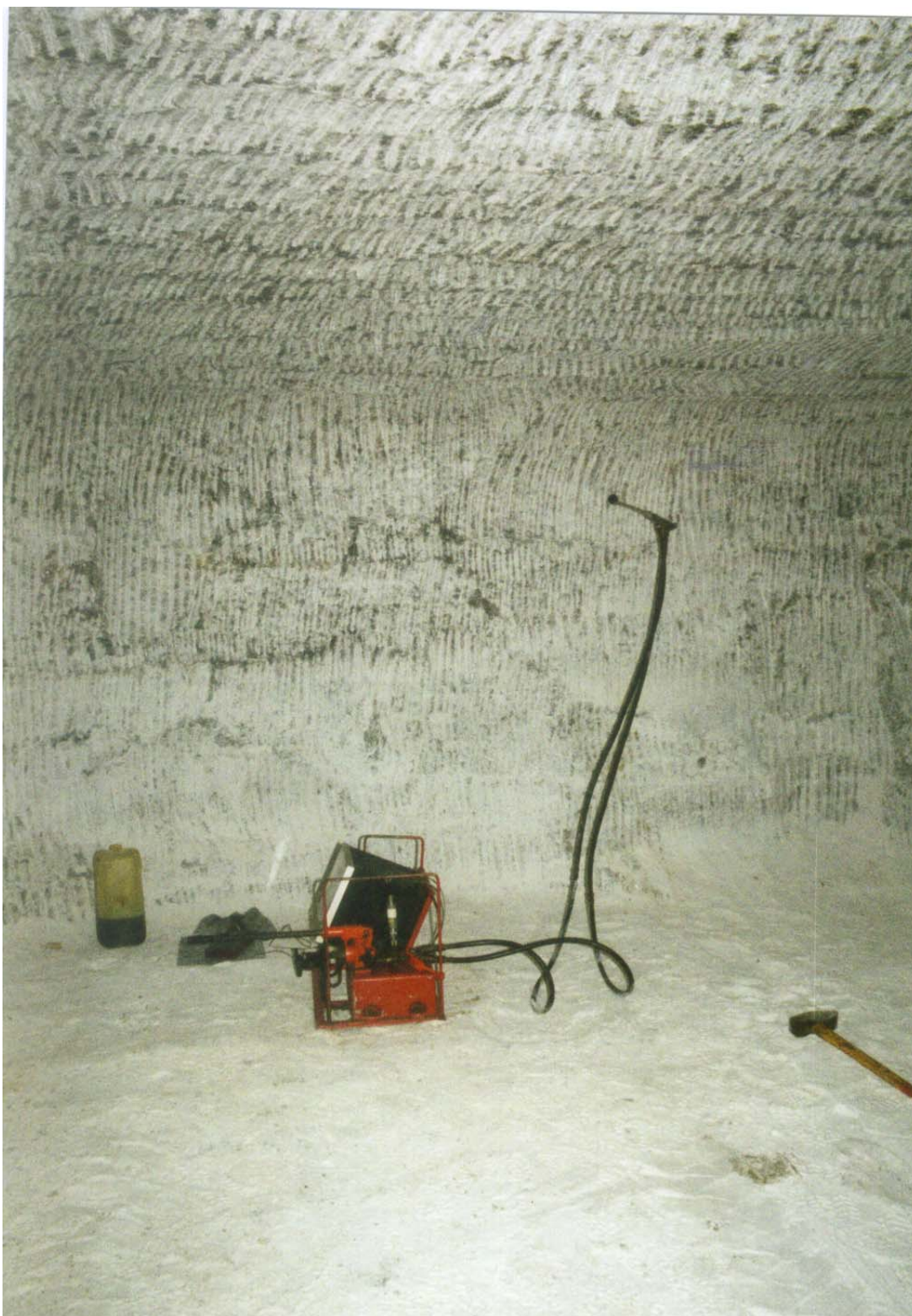
Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των μετρήσεων αυτών, δεν μπορούσε να αποκλειστεί μια βραχυπρόθεσμη ή μακροπρόθεσμη δραστηριοποίηση όπως μια επιταχυνόμενη διαδικασία παραμόρφωσης με την πάροδο του χρόνου, από την οποία θα προέκυπτε στη συνέχεια μεγαλύτερες δυσκολίες. Πάντως, η χαλάρωση της περιμέτρου στην διευθυντική στοά 13, μετά τη διεύρυνση που υπέστη, δεν παρουσίασε αύξηση σύμφωνα με τις συγκεκριμένες μετρήσεις, λόγω της νέας εκσκαφής. Η υφιστάμενη ζώνη υψηλής πίεσης που είχε ανιχνευτεί 1 m πίσω από την περίμετρο της διευθυντικής στοάς 13, τον Ιούνιο του 2000 με στατική τάση 25,4 MPa, δηλαδή κατακόρυφη φόρτιση 38 MPa περίπου 10 μέρες μετά τη διεύρυνση της στοάς, είχε «εξαφανιστεί» και τώρα στους στύλους παρατηρήθηκε μια αρμονική κατανομή των τάσεων. Τον Ιούλιο του 2000 σε αυτό το σημείο είχε μετρηθεί ο μέγιστος ρυθμός εγκάρσιας επέκτασης 18 mm/ έτος.

Η δομή των τάσεων στον στύλο στο παλιό πεδίο του φρέατος είναι πλήρως αρμονική και αποκλείονται οριστικά επιδράσεις επικάλυψης από την παλιά εξόρυξη του 1902. Η στατική τάση των πυρήνων αυξήθηκε μετά την εκσκαφή της αίθουσας κατά περίπου 2 MPa:

- **F179-GL (06/2000) πριν** την εκσκαφή: $20,2 \pm 1,0$ MPa
- **F187-GL (02/2001) μετά** την εκσκαφή: $22,1 \pm 0,8$ MPa

Οι τιμές αυτές αντιστοιχούν στις αναμενόμενες τιμές για μία τέτοια εκσκαφή σε ένα τέτοιο βάθος. Με μια απλοποιημένη προσέγγιση θα έλεγε κανείς ότι η φόρτιση του στύλου ανέρχεται στα 30-34 MPa. Η μέγιστη στατική τάξη έχει αυξηθεί μόνο από τα 21,5 MPa στα 23 MPa.

Τα αποτελέσματα των τεχνικών μετρήσεων τεκμηριώνουν επιπλέον ανέπαφες συνθήκες γύρω από την αίθουσα κονσέρτων με ανεπαίσθητες επιδράσεις των στύλων, αλλά επιτρέπουν να αναμένεται μια νέα ανακατανομή των τάσεων μετά τη νέα εκσκαφή με πιθανή ενεργοποίηση των υπόγειων παραμορφώσεων.



Εικόνα 8.2: Η συσκευή εγκατεστημένη στη θέση μέτρησης F187-GL, στην εγκοπή του πρώην θαλάμου BMSR

8.4.6 Οι δεύτερες επαναληπτικές μετρήσεις των υπόγειων παραμορφώσεων στην περιοχή γύρω από την υπόγεια αίθουσα κονσέρτων.

Οι δεύτερες επαναληπτικές μετρήσεις στην περιοχή γύρω από την αίθουσα κονσέρτων διεξήχθησαν από τις 5 έως τις 12 Αυγούστου 2002. Τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή η εγκατάσταση και η διαρρύθμιση των βοηθητικών χώρων γύρω από την αίθουσα είχε ήδη ολοκληρωθεί με αποτέλεσμα το σημείο μέτρησης στον πρώην θάλαμο BMSR, να μην είναι πλέον διαθέσιμο. Έτσι, το αντίστοιχο νέο διάτρημα μέτρησης τοποθετήθηκε στη στοά Autobahn Nord, περίπου 14 m πάνω από το δάπεδο της αίθουσας κονσέρτων, βόρεια των εγκαταστάσεων του εξαεριστήρα.

Το διάτρημα **F216-GL** (επανάληψη των F178-GL και F186-GL) βρίσκεται όπως έχει ήδη αναφερθεί επί της διευθυντικής στοάς 13 ενώ το νέο διάτρημα **F217-GL** (επανάληψη των F179-GL και F187-GL) βρίσκεται επί του βόρειου αυτοκινητόδρομου, με είσοδο από τη στοά 638 U, πάνω από την αίθουσα κονσέρτων και τον πρώην BMSR-θάλαμο. Το διάτρημα, που βρίσκεται περίπου 170 m ANA του φρέατος I με ΝΑ κατεύθυνση, ανοίχτηκε σε επιφάνεια εμβαδού περίπου 2.750 m², σε μια περιοχή που έχει υποστεί επιδράσεις επικάλυψης από την εξόρυξη του 1897-1902 και της λιθογόμωσης της περιοχής του φρέατος που πραγματοποιήθηκε το 1902.

Μετά την ολοκλήρωση των μετρήσεων στο διάτρημα F217-GL, με τη μέθοδο της υδραυλικής θραύσης, στο ίδιο διάτρημα εγκαταστάθηκε και σύστημα συσκευών για την παρακολούθηση της εγκάρσιας παραμόρφωσης του στύλου. Τα επίπεδα μέτρησης βρίσκονται σε βάθος 8,0 m, 4,0 m και 1,5m, μέσα στο στύλο. Στη διευθυντική στοά 13, εξακολουθεί να βρίσκεται υπό παρακολούθηση και η εγκάρσια παραμόρφωση στο διάτρημα F178-GL, οπότε δεν κρίθηκε απαραίτητη η παρακολούθηση και του διατρήματος F216-GL.

Στους πίνακες που ακολουθούν παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των μετρήσεων, τόσο τις στατικής τάσης (Πίνακας 8.18 και 8.20), όσο και της αντοχής σε εφελκυσμό (Πίνακας 8.19 και 8.21).

Πίνακας 8.18: Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της στατικής τάσης στο διάτρημα F216-GL

Βάθος διατρήματος [m]	Τάση ρωγμάτωσης [MPa]	P _R (1/2 h) [MPa]	P _R (1h) F216 (08/02) [MPa]	P _R (1h) F186 (02/01) [MPa]	P _R (1h) F178 (06/00) [MPa]
1,0	19,25	7,24	7,05	11,28	25,36

2,0	20,39	14,54	14,30	15,17	16,67
3,0	22,98	17,78	17,34	18,03	17,98
4,0	25,06	18,36	17,82	19,37 ¹⁾	18,04
5,0	23,23	20,30	19,48	19,78	17,86
6,0	23,98	21,07	20,34	20,15	18,22
7,5	25,13	23,81	22,49	20,56	18,34
9,0	24,79	21,49	20,63	20,73	17,28
10,5	24,15	19,86	19,24	20,61	17,29
12,0	22,32	18,10	17,31	21,33	18,05
13,5	22,01	17,68	17,28	21,55	17,18
14,0	-			19,07	-
15,0	18,75	15,88	15,30	19,46	16,84
15,5	-				16,87

¹⁾ Στατική τάση μετά από 49 ½ λεπτά : 7,16 MPa , 1-ώρας τιμή συμπίεσματος.

Η μέση τιμή της στατικής τάσης στους πυρήνες των στύλων:

$$P_R (1 \text{ h}) = 19,1 \pm 1,8 \text{ MPa}$$

Πίνακας 8.19: Η-επί τόπου- αντοχή σε εφελκυσμό σ_{AZ} που ανιχνεύθηκε στο 216GL:

Βάθος διατρήματος [m]	Τάση ρωγμάτωσης p_A [MPa]	Τάση διάθλασης p_A^* [MPa]	Αντοχή σ' εφελκυσμό σ_{AZ} [MPa]
1,0	19,25	-	-
2,0	20,39	16,77	3,62
3,0	22,98	19,46	3,52
4,0	25,06	21,17	3,89
5,0	23,23	21,8	1,43
6,0	23,98	22,06	1,92
7,5	25,13	23,06	2,07
9,0	24,79	22,18	2,61
10,5	24,15	20,67	3,48
12,0	22,32	20,69	1,63
13,5	22,01	20,72	1,29
15,0	18,75	16,82	1,93

Η μέση τιμή στην περίμετρο: $\sigma_{AZ} = 2,49 \pm 0,97 \text{ MPa}$ (n=11)

Πίνακας 8.20: Τα αποτελέσματα των μετρήσεων της στατικής τάσης στο διάτρημα F217-GL

Βάθος διατρήματος [m]	Τάση ρωγμάτωσης [MPa]	P _R (1/2 h) [MPa]	P _R (1 h) F217 08/02 [MPa]	P _R (1 h) F187 02/01 [MPa]	P _R (1 h) F179 06/00 [MPa]
1,0	17,50	13,38	13,03	11,52	12,70
2,0	19,68	14,89	14,47	17,65	16,72
3,0	22,34	16,80	16,36	20,39	19,14
4,0	24,62	18,43	18,03	22,29	19,74
5,0	25,83	19,87	19,15	22,66	20,80
6,0	24,28	20,93	20,27 ¹⁾	22,61	20,59
7,5	25,32	21,62	20,94	22,12	21,49
9,0	26,04	21,08	20,43	23,05	21,45
10,5	26,95	21,08	20,60	22,59	20,80
12,0	23,43	18,99	18,28	21,71	20,28
13,5	-			21,32	19,29
14,0	25,42	18,41	17,59	-	
15,0	-			-	18,78
16,0	25,70	19,96	18,86	-	-
18,0	26,38	20,57	20,09	-	-
20,0	23,76	18,00	16,84	-	-

¹⁾ Τέλος της μέτρησης μετά από 36 λεπτά : P_R=20,66 MPa , 1-ώρας τιμή συμπίεσματος.

Η μέση τιμή της στατικής τάσης στους πυρήνες των στύλων:

$$\underline{P_R (1 h) = 19,4 \pm 1,2 \text{ MPa}}$$

Πίνακας 8.21: Η-επί τόπου- τάση θραύσης εφελκυσμού σ_{AZ} που ανιχνεύθηκε στο F217:

Βάθος διατρήματος [m]	Τάση ρωγμάτωσης p _A [MPa]	Τάση διάθλασης p _A * [MPa]	Αντοχή σ' εφελκυσμό σ _{AZ} [MPa]
1,0	17,5	15,74	1,76
2,0	19,68	16,56	3,12
3,0	22,34	18,83	3,51
4,0	24,62	20,81	3,81
5,0	25,83	22,39	3,44
6,0	24,28		
7,5	25,32	23,01	2,31
9,0	26,04	23,09	2,95
10,5	26,95	22,63	4,32

12,0	23,43	20,65	2,78
14,0	25,42	20,84	4,58
16,0	25,7	21,08	4,62
18,0	26,38	22,25	4,13
20,0	23,76	19,32	4,44

Η μέση τιμή στην περίμετρο: $\sigma_{AZ}=3,67 \pm 0,77$ MPa (n=12).

Στον πίνακα 8.22 φαίνονται συγκεντρωμένες για συγκριτικούς λόγους, οι συνολικές μετρήσεις στους στύλους ασφαλείας του φρέατος I, ενώ στη γραφική παράσταση του σχήματος 8.2 και 8.3, φαίνεται η καμπύλη της στατικής τάσης των αρχικών και των επαναληπτικών μετρήσεων στην περιοχή της υπόγειας αίθουσας κονσέρτων.

Πίνακας 8.22: Συνολική παρουσίαση των διατρημάτων για τις μετρήσεις των τάσεων μέσω υδραυλικής θραύσης στους στύλους ασφαλείας του φρέατος I, του ορυχείου Glückauf Sondershausen GSES GmbH (12.08.2002).

Διάτρημα	Περιοχή μέτρησης	Είδος άλατος	Χρονικό διάστημα	n ²⁾	Μέση στατική τάση ³⁾ (max.) [MPa]
F60-GL	Στοά K	Ανυδρ. αλίτης St ¹⁾	04/1990	13	10,4 ± 2,1 (12,6)
F61-GL	Στοές K / V	Ανυδρ. αλίτης St	04/1990	7	14,0 ± 1,9 (15,3)
F62-GL	Στοές K / KD	Ανυδρ. αλίτης St	04/1990	9	20,5 ± 2,3 (23,4)
F63-GL	Διευθυντική στοά 13	Ανυδρ. αλίτης St	04/1990	18	20,3 ± 1,4 (22,1)
F64-GL	Βόρεια θέση χειρισμού	Ανυδρ. αλίτης St	04/1990	3	18,8 ± 1,8 (20,9)
F176-GL	Διευθυντική στοά 13 ⁴⁾	Ανυδρ. αλίτης St	06/2000	24	18,1 ± 1,2 (19,3)
F177-GL	Βόρεια θέση χειρισμού ⁵⁾	Ανυδρ. αλίτης St	06/2000	22	20,8 ± 2,1 (22,9)
F178-GL	Διευθυντική στοά 13 ⁴⁾	αλίτης	06/2000	25	17,6 ± 0,6 (25,4)
F179-GL	BMSR-θάλαμος ⁴⁾	αλίτης	06/2000	24	20,2 ± 1,0 (21,5)
F186-GL	Διευθυντική στοά 13 ⁵⁾	αλίτης	02/2001	25	20,1 ± 1,0 (21,5)
F187-GL	BMSR-θάλαμος ⁵⁾	αλίτης	02/2001	21	22,1 ± 0,8 (23,0)
F216-GL	Διευθυντική στοά 13 ⁶⁾	αλίτης	08/2002	23	19,1 ± 1,8 (22,5)
F217-GL	Βόρειος αυτοκιν/μος ⁶⁾	αλίτης	08/2002	27	19,4 ± 1,2 (20,9)

1) Ανυδριτικός αλίτης Stassfurt (Stassfurtsteinsalz)

2) Αριθμός των δοκιμών θραύσης σε κάθε διάτρημα

- 3) Μέση στατική τάση στους πυρήνες των στύλων, στην παρένθεση η μέγιστη στατική τάση που μετρήθηκε στο διάτρημα
- 4) Μετρήσεις πριν την κατασκευή της αίθουσας κονσέρτων στην περιοχή της διευθυντικής στοάς 13 / πρώην BMSR-θαλάμου.
- 5) Μετρήσεις μετά την αποπεράτωση της αίθουσας κονσέρτων στην περιοχή της διευθυντικής στοάς 13 / πρώην BMSR-θαλάμου.
- 6) 2^{ες} επαναληπτικές μετρήσεις μετά την αποπεράτωση της αίθουσας κονσέρτων στην περιοχή της διευθυντικής στοάς 13 / βόρειου αυτοκινητόδρομου.

Μετά την ολοκλήρωση των μετρήσεων προέκυψαν ορισμένα συμπεράσματα σχετικά με τις αξιοσημείωτες διαφοροποιήσεις που παρατηρήθηκαν. Στους στύλους της αίθουσας κονσέρτων, με το επαναληπτικό διάτρημα F216-GL στα δοκίμια του στύλου, καταμετρήθηκε στατική τάση από 17-22 MPa. Σε μια απλή εκτίμηση, η φόρτιση του στύλου στην αίθουσα κονσέρτων, ανερχόταν σε 25-33 MPa. Σε κάθε περίπτωση πάντως, δεν παρατηρήθηκε υπερφόρτωση που να εγκυμονεί κινδύνους.

Η αναμενομένη αύξηση των τάσεων στην μειωμένη πλέον επιφάνεια στήριξης μετά την κατασκευή της αίθουσας κονσέρτων, επαληθεύεται με τις μετρήσεις στο διάτρημα F186-GL. Μετά από αναμονή μεγαλύτερη του 1 ½ χρόνου από την αποπεράτωση της κατασκευής της αίθουσας, προέκυψε μία βαθμιαία δομή των συμπληρωματικών τάσεων, που σχετίζονται με την κατασκευή:

F178-GL (06/2000) (πριν την προχώρηση)	17,6 ± 0,6 MPa
F186-GL (02/2001) 3 μήνες μετά την προχώρηση	20,1 ± 1,0 MPa
F216-GL (08/2002) > 1 ½ χρόνο μετά την προχώρηση	19,1 ± 1,8 MPa

Η χαλάρωση της περιφέρειας στη διευρυμένη πλέον διευθυντική στοά 13, που σύμφωνα με τις τελευταίες μετρήσεις εμφανίστηκε πολύ έντονη, αποδόθηκε στις μεταλλευτικές εργασίες που έλαβαν χώρα. Η ζώνη υψηλής τάσης, με στατική τάση ίση με 25,4 MPa, δηλαδή περίπου 38 MPa κατακόρυφη τάση, που είχε ανιχνευθεί τον Ιούνιο του 2000, 1m πίσω από την περιφέρεια της διευθυντικής στοάς 13, 10 μέρες μετά την διαμόρφωση της περιφέρειας της στοάς με κοπτική μηχανή, έχει μετατοπιστεί έτσι, ώστε τώρα, στην περιφέρεια του στύλου να υφίσταται μια αρμονική κατανομή των τάσεων. Εν τούτοις, η στατική τάση 1 m πίσω από την περιφέρεια έχει ελαττωθεί από 11,3 MPa, που ήταν τον Ιούνιο του 2001, σε περίπου 7 MPa τον Αύγουστο του 2002. Ακόμη, ως τα μέσα του 2001 παρατηρήθηκαν, οι

Glückauf Sondershausen GSES mbH. Grubentourismus / Konzertsaal Schacht I

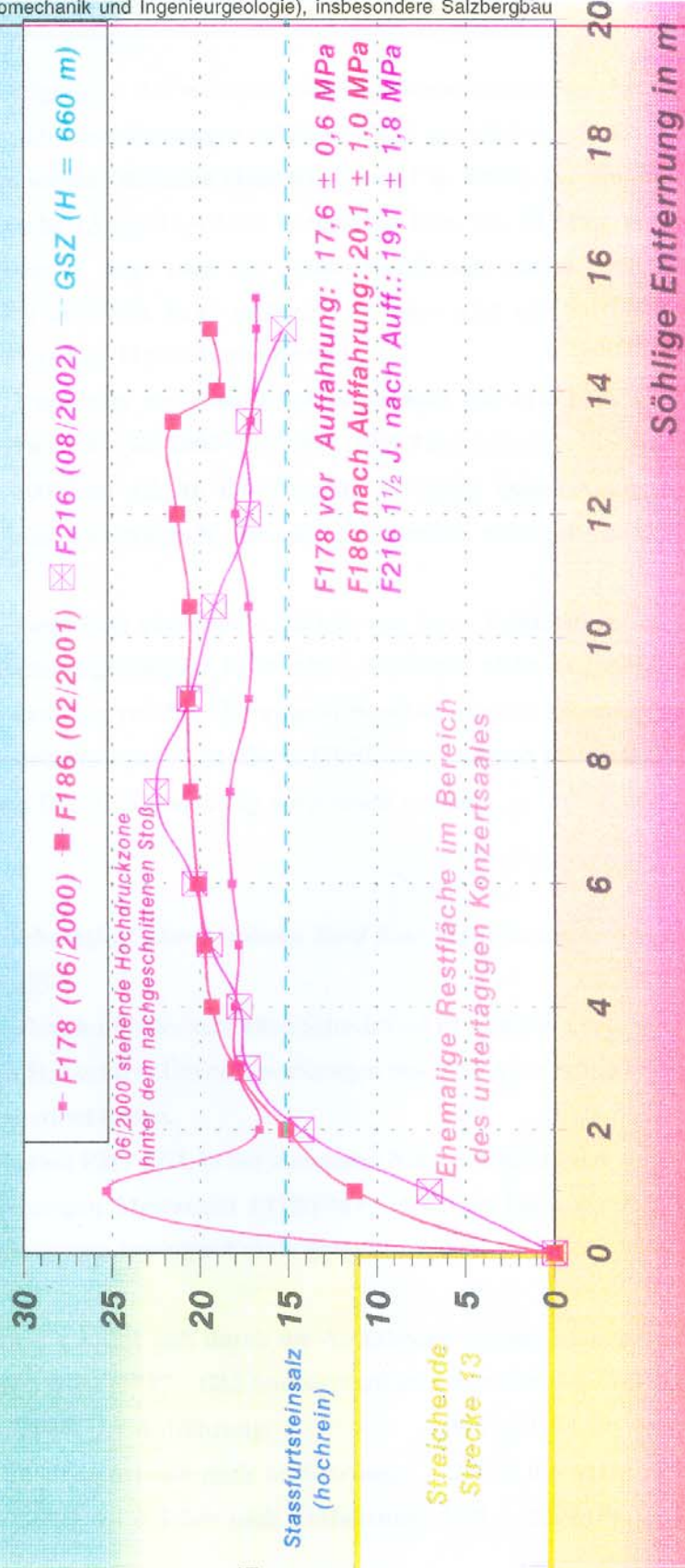
Hydraulic Fracturing Tests 2000 / 2001 / 2002

F178 (06/2000) / F186 (02/2001) / F216 (08/2002) - Streich. Strecke 13 in Höhe Konzertsaal

SW

NE

Ruhedruck nach einer Stunde in MPa



Dr. Stäubert c/o K-UTEC 08/2002 [Datensatz: "F216GL02.CH3"]

Bild 7

Σχήμα 8.2: Η στατική τάση (P_R) σε συνάρτηση με την οριζόντια απόσταση, όπως προκύπτει από τις μετρήσεις στα διατρήματα F178-GL (06/2000), F186-GL (02/2001) και F216-GL (08/2002) επί της διεθνικτικής στοάς 13 στο ύψος της αίθουσας κονοέρτων

Glückauf Sondershausen GSES mbH. Grubentourismus / Konzertsaal Schacht I

Hydraulic Fracturing Tests 2000 / 2001 / 2002

F179 (06/2000) / F187 (02/2001) / F217 (08/2002) - Ehem. BMSR-Raum / Autobahn Nord

ESE

WNW

Ruhedruck nach einer Stunde in MPa

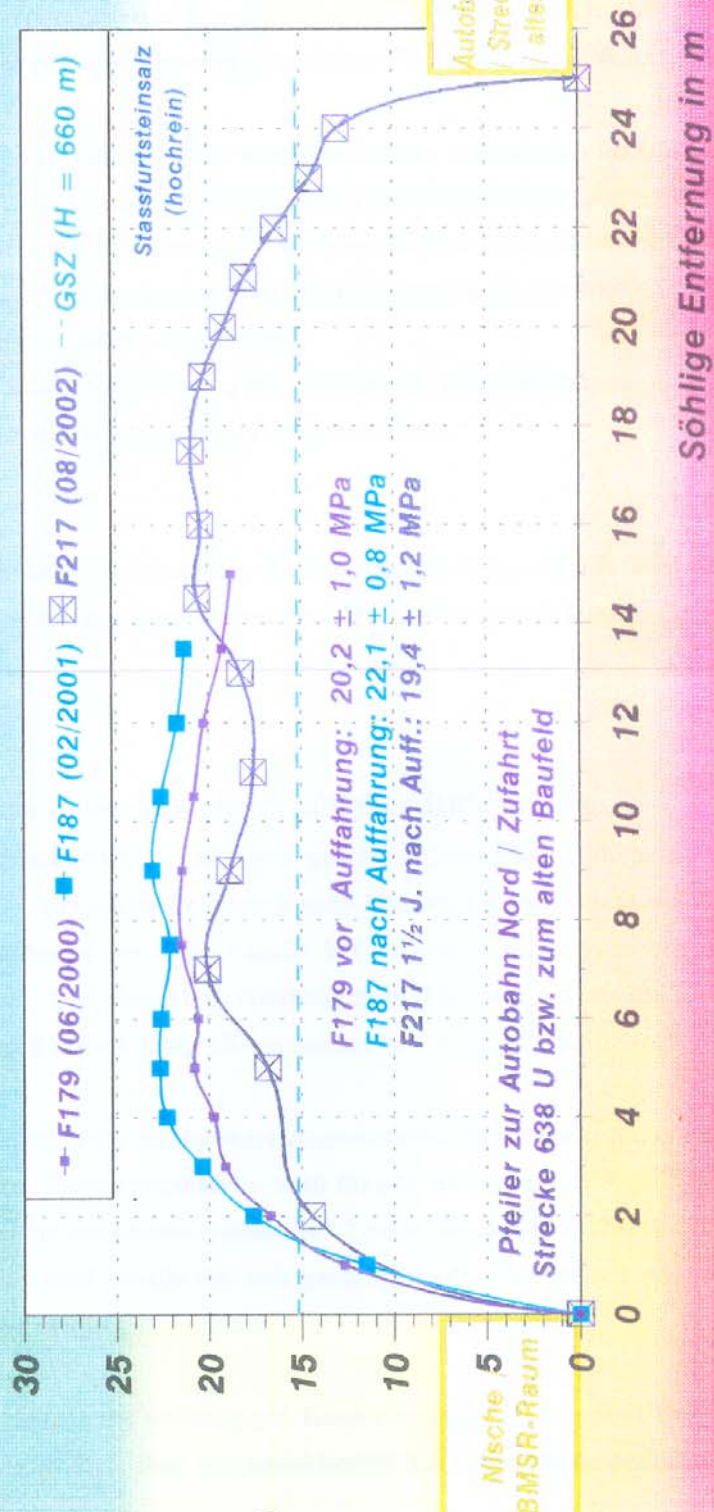


Bild 8

Σχήμα 8.3: Η στατική τάση (P_R) σε συνάρτηση με την οριζόντια απόσταση, όπως προκύπτει από τις μετρήσεις στα διατρήματα F179-GL (06/2000), F187-GL (02/2001) και F217-GL (08/2002) επί του πρώην θαλάμου BMSR και της στοάς

υψηλότερες τιμές εγκάρσιας παραμόρφωσης με περίπου 16 mm/ έτος, η οποία φάνηκε να επαναφέρεται. Πάντως δεν αποκλείστηκε μία νέα βραχυπρόθεσμη ή μακροπρόθεσμη επιτάχυνση -χρονικά εξαρτώμενη- των διαδικασιών χαλάρωσης.

Η σύνθεση των τάσεων στους στύλους του φρέατος ήταν εντελώς αρμονική, οπότε αποκλείστηκαν οριστικά οποιεσδήποτε αρνητικές συνέπειες επικάλυψης από την παλαιότερη εκμετάλλευση (1902). Η νέα θέση μετρήσεων F217-GL στη στοά Autobahn Nord αντιστοιχεί στην κατάσταση των προηγούμενων μετρήσεων F179 / F187-GL και μπορεί να χρησιμοποιηθεί απεριόριστα για τις επαναληπτικές μετρήσεις που θα ακολουθήσουν.

Η στατική τάση των πυρήνων, λόγω της κατασκευής της αίθουσας κονσέρτων, αυξήθηκε για περίπου 2 MPa και ομαλοποιήθηκε ξανά:

F179-GL (06/2000) (πριν την προχώρηση)	20,2 ± 1,0 MPa
F187-GL (02/2001) 3 μήνες μετά την προχώρηση	22,1 ± 0,8 MPa
F217-GL (08/2002) > 1 ½ χρόνο μετά την προχώρηση	19,4 ± 1,2 MPa

Η μέγιστη στατική τάση ελαττώνεται από τα 23 MPa στα 21 MPa. Συνεπώς αντιστοιχεί στις αναμενόμενες τιμές για μια τέτοια εκμετάλλευση, σε ένα τέτοιο βάθος. Με μια απλοποιημένη προσέγγιση η μέση φόρτιση των στύλων ανέρχεται στα 28-31 MPa. Τα αποτελέσματα των τεχνικών μετρήσεων αποδεικνύουν επιπλέον την ανέπαφη συμπεριφορά στην περιοχή της αίθουσας κονσέρτων με ανεπαίσθητες επιδράσεις των στύλων στήριξης. Μετά την κατασκευή της αίθουσας κονσέρτων και των βοηθητικών χώρων, απαντάται προφανώς μια πολύ γρήγορη ανακατανομή των τάσεων, που συνδέεται με την εναρμόνιση της κατάστασης των τάσεων στην περιοχή στήριξης των στύλων.

8.4.7 Μετρήσεις εγκάρσιας παραμόρφωσης των στύλων και μετρήσεις σύγκλισης.

Στα πλαίσια των εργασιών εξυγίανσης, που διεξήχθησαν κατά τα έτη 1990/91, συνοψίστηκαν κι αξιολογήθηκαν μ' ένα πρόγραμμα μετρήσεως, οι τάσεις και οι παραμορφώσεις, στην περιοχή των στύλων στήριξης του φρέατος I (K-UTEC). Ενώ από το 1990 ως το 1996, είχαν πραγματοποιηθεί υπόγειες μετρήσεις των εγκάρσιων παραμορφώσεων των στύλων στην περιοχή κοντά στο φρέαρ, εν τούτοις για την

περιοχή γύρω από την υπόγεια αίθουσα κονσέρτων, δεν υπήρχαν κανενός είδους μετρήσεις ως τα μέσα του 2000.

Ταυτόχρονα με τις πρώτες μετρήσεις για την εκτίμηση της κατάστασης των τάσεων και του εφελκυσμού στην περιοχή γύρω από την, υπό κατασκευήν, αίθουσα κονσέρτων, εγκαταστάθηκαν (06/07-2000) και συσκευές μέτρησης των εγκάρσιων παραμορφώσεων των στύλων όσο και των συγκλίσεων. Έκτοτε λαμβάνονται μηνιαίως οι αντίστοιχες τιμές.

Ο Πίνακας 8.23 παρουσιάζει τόσο παλαιότερες μετρήσεις όσο και τα αποτελέσματα των μετρήσεων από τον Ιούνιο του 2000 ως το Μάιο του 2001. Αξιοσημείωτη είναι μία (ακίνδυνη) δραστηριοποίηση της εγκάρσιας παραμόρφωσης στην περιοχή κοντά στην αίθουσα κονσέρτων, επί της διευθυντικής στοάς 13, η οποία σχετίζεται με τις εργασίες εκσκαφής (PQ F178-GL).

Πίνακας 8.23: Ταχύτητες υπόγειων παραμορφώσεων στην περιοχή του φρέατος I του ορυχείου Glückauf Sondershausen GSES GmbH (μέχρι το Μάιο του 2001)

Μετρήσεις		Σύγκλιση / Διάτρημα με PQ*	Ρυθμός PQ/KV*	
Θέση	Χρονικό διάστημα		mm/ημέρα	mm/χρόνο
Ανατολικό επίπεδο φόρτωσης εκφόρτωσης του φρέατος I	06/2000-05/2001	F176-GL	0,013	4,75
Στοά εκκένωσης δεξαμενής μεταλλεύματος		KV 132/1	0,022	8,03
Στοά K/ Δάπεδο πρώτης ύλης		KV 132/2	0,007	2,56
Πίσω απ' την πρώην θέση χειρισμού	06/2000-05/2001	F177-GL	0,016	5,84
		KV 133	0,021	7,67
Διευθυντική στοά 13	06/2000-05/2001	F178-GL	0,044	16,06
Διευθυντική στοά 13/ χώρος αποθήκευσης		KV 135	0,018	6,57
Πρώην θάλαμος BMSR/ Εγκοπή	06/2000-05/2001	F179-GL	0,016	5,84
Διευθυντική στοά 13		KV 134	0,022	8,03
Στοά 7 U/ αίθουσα εκδηλώσεων UT	08/2000-05/2001	KV 136	0,026	9,49

Στην ανάπτυξη των παραμορφώσεων, από το Μάιο του 2001 ως τον Ιούλιο του 2002, παρατηρείται μια βαθμιαία εξομάλυνση στην περιοχή γύρω από την αίθουσα κονσέρτων. Ταυτόχρονα παρουσιάζεται μια ελαφριά αύξηση του ρυθμού των παραμορφώσεων στους κύριους στύλους στήριξης του φρέατος (Πίνακας 8.25).

Πίνακας 8.25: Ταχύτητες υπόγειων παραμορφώσεων στην περιοχή του φρέατος I του ορυχείου Glückauf Sondershausen GSES GmbH (14/05/ 2001 09/07/ 2002)

Μετρήσεις		Σύγκλιση/ Διάτρημα με PQ	Ρυθμός PQ/KV		
Θέση	Χρονικό Διάστημα		mm	Mm/μέρα	mm/χρόνο
Ανατολικό επίπεδο φόρτωσης, εκφόρτωσης του φρέατος I	05/2001- 07/2002	F176-GL	9	0,021	7,67
Στοά εκκένωσης δεξαμενής μεταλλεύματος		KV 132/1	12	0,029	10,59
Στοά K/ Δάπεδο πρώτης ύλης		KV 132/2	12	0,029	10,59
Πίσω απ' την πρώην θέση χειρισμού	05/2001- 07/2002	F177-GL	10	0,024	8,76
		KV 133	12	0,029	10,59
Διευθυντική στοά 13	05/2001- 07/2002	F178-GL	7	0,017	6,21
Διευθυντική στοά 13/Χώρος αποθήκευσης		KV 135	16	0,038	13,87
Πρώην θάλαμος BMSR / Εγκοπή	05/2001- 07/2002	F179-GL	8	0,019	6,94
Διευθυντική στοά 13		KV 134	7	0,017	6,21
Στοά 7 U/ αίθουσα εκδηλώσεων UT	05/2001- 07/2002	KV 136	13	0,031	11,32

Η χρονική ανάπτυξη των παραμορφώσεων συνοψίζεται παρακάτω:

Χρονικό διάστημα	Φρέαρ I	Αίθουσα κονσέρτων
1964-1992:	$9,5 \pm 1,5$ mm/χρόνο	-
1990-1996:	$6,9 \pm 2,0$ mm/χρόνο	-
2000-2001	$6,4 \pm 2,3$ mm/χρόνο	$9,2 \pm 4,1$ mm/χρόνο
2001-2002:	$9,9 \pm 1,3$ mm/χρόνο	$8,9 \pm 3,5$ mm/χρόνο

Παρατηρεί κανείς δηλαδή, ότι όλες οι τιμές των μετρήσεων βρίσκονται στις συνηθισμένες τάξεις μεγέθους. Οι εγκάρσιες παραμορφώσεις των στύλων και οι κατακόρυφες συγκλίσεις που μετρήθηκαν έξω από την αίθουσα κονσέρτων, συμφωνούν σε ικανοποιητικό βαθμό με τα αποτελέσματα των τοπογραφικών μετρήσεων μέσα στην αίθουσα κονσέρτων (κατά μέσο όρο 10-11 mm/χρόνο, κατακόρυφη παραμόρφωση σε σχέση με την οριζόντια).

8.4.8 Κατακόρυφες και οριζόντιες παραμορφώσεις στην αίθουσα κονσέρτων

Η εταιρία Glückaufvermessung GmbH Sondershausen διεξήγαγε μέσα στην αίθουσα κονσέρτων τοπογραφικές μετρήσεις ακριβείας, για την καταγραφή των κατακόρυφων και οριζόντιων μετακινήσεων. Μετά την επιλογή των σταθερών σημείων και τη μέτρηση στις 11 Σεπτεμβρίου 2001 ακολούθησαν επαναληπτικές μετρήσεις στις 9 Ιανουαρίου 2002 και στις 25 Ιουνίου 2002.

Όπως ήταν αναμενόμενο η κατακόρυφη παραμόρφωση στην αίθουσα κονσέρτων ήταν μεγαλύτερη στο μέσο. Η μέγιστη τιμή ανιχνεύθηκε στο σημείο μέτρησης 12 με 10 mm από της 11/9/2001, δηλαδή 12,7 mm/χρόνο. Η μέση τιμή του συνόλου των σημείων της οροφής ανέρχεται σε $11,5 \pm 0,9$ mm/χρόνο. Εκτός αυτού διαπιστώθηκε οριζόντια παραμόρφωση κατά τη διεύθυνση προς τα δεξιά με μέγιστο 15mm σε 287 μέρες. Οι συμβατικές βραχομηχανικές μετρήσεις και οι τοπογραφικές μετρήσεις ακριβείας αλληλοσυμπληρώνονται αρκετά ικανοποιητικά σύμφωνα με τα υπάρχοντα δεδομένα. Οι τεχνικές μετρήσεις των καταγεγραμμένων παραμορφώσεων ερμηνεύονται από έναν πολύ αργά φθίνον ερπυσμό. Η μέγιστη τιμή μετατόπισης (10-15 mm /χρόνο) είναι προφανώς ελάχιστη αν ληφθεί υπόψη ο υφιστάμενος λεπτοκρυσταλλικός αλίτης και η υφιστάμενη κατάσταση των στύλων.

8.5 Γεωτεχνική εκτίμηση των ανιχνευμένων στατικών τάσεων.

Όπως παρατηρήθηκε μετά τη διεξαγωγή όλων των μετρήσεων, το υπό μελέτη πέτρωμα (αλίτης Stassfurt) ήταν κάθε φορά στεγανό, ακόμη και στην περιφέρεια, τόσο κατά τις δοκιμές θραύσης όσο και διάθλασης.

Για τη γενική ταξινόμηση των στατικών τάσεων του πετρώματος που προέκυψαν από τις μετρήσεις σε κάθε διάτρημα, χρησιμοποιήθηκαν ως βάση, οι τάξεις ταξινόμησης όπως αυτές έχουν διαμορφωθεί από τον Dr. Stäubert, μετά τη συλλογή διαφόρων εμπειρικών δεδομένων (Πίνακας 8.26).

Οι τάξεις αξιολόγησης αυτές, έχουν υποστεί επεξεργασία για βάθη από 500 έως 700 m και η σύγκριση αφορά στη στατική τάση που καταγράφεται κάθε φορά μετά από αναμονή μίας ώρας ($\approx \sigma_{Hmin}$).

Γενικά, όλα τα αποτελέσματα των μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν στην περιοχή του φρέατος Ι και γύρω από την αίθουσα κονσέρτων, χαρακτηρίζονταν κάθε φορά από κανονικές συνθήκες φόρτισης, χωρίς ιδιαιτερότητες που να απειλούν την ασφάλεια της εξόρυξης.

Πίνακας 8.26: Κατανομή της στατικής τάσης μετά από μία ώρα, κατά τις τάξεις ταξινόμησης του Stäubert

Τάξη αξιολόγησης	Γεωτεχνική αξιολόγηση	Εύρος τάξεων [MPa]	n	%
0	Καμία στατική τάση, προϋπάρχουσες ρωγμές	0	0	0
1	Σημαντική αποφόρτιση/ χαλάρωση (περίμετρος)	>0-<5	3	3,16
		>5-<10	4	4,21
2a	Κατάσταση αρχικών τάσεων / αποφόρτιση	>10-<15	15	15,79
				53,68
2b	Κανονικές συνθήκες εκτόνωσης	>15-<20	51	21,05
		>20-<25	20	
3	Ελαφριά αύξηση	>25-<30	2	2,11
4	Υπεραύξηση, απαραίτητη λεπτομερής έρευνα	>30	0	0,00
		Σύνολο:	95	100,00

Στον Πίνακα 8.27 παρουσιάζονται οι τάξεις ταξινόμησης όπως αυτές διαμορφώθηκαν μετά την ολοκλήρωση όλων των μετρήσεων

Πίνακας 8.27: Κατανομή της στατικής τάσης μετά από μία ώρα, κατά τις τάξεις ταξινόμησης του Stäubert, όλων των διατηρημάτων:

Bewertungs- klasse	Geotechnische Bewertung	Klassen- breite [MPa]	F176 bis F179 (06-07/2000)		F186/F187 (02/2001)		F216/F217 (08/2002)	
			n	%	n	%	n	%
"0"	Kein Ruhedruck, vorhandene Risse	0	0	0,00	0	0,00	0	0,00
1	Erhebliche Entlastung / Entfestigung; Kontur	> 0 - ≤ 5	3	3,16	0	0,00	0	0,00
		> 5 - ≤ 10	4	4,21	0	0,00	1	2,00
2a	Grundspannungszustand / Entlastung Baufeldzentrum	> 10- ≤ 15	15	15,79	3	6,52	6	12,00
2b	Normale Abbauverhältnisse	> 15- ≤ 20	51	53,68	13	28,26	28	56,00
		> 20- ≤ 25	20	21,05	30	65,22	15	30,00
3	Leichte Erhöhung	> 25- ≤ 30	2	2,11	0	0,00	0	0,00
4	Überhöhung, Detail- untersuchung erforderlich	> 30	0	0,00	0	0,00	0	0,00
		Summe:	95	100,00	46	100,00	50,00	100,00

Υπό ίδιες συνθήκες δοκιμών, ίδια περίπου βάθη και συγκρίσιμες συνθήκες μεταλλευτικών πεδίων υφίστανται **σημαντικές διαφορές στην κατάσταση των τάσεων στους πυρήνες των στύλων καθώς και της χαλάρωσης της περιμέτρου, σε συνάρτηση με το υλικό και το χρόνο**, όπως καθορίστηκαν μέσω της μέτρησης της «στατικής τάσης» σε διάφορες καλιούχες περιοχές του Südharz.

Στο σχήμα 8.4 παρουσιάζονται οι αθροιστικές καμπύλες της κατανομής της στατικής τάσης στο φρέαρ I και για συγκριτικούς λόγους και κάποιων άλλων περιοχών του Südharz.

Κατά τη φάση της λειτουργίας των ορυχείων, οι μετρήσεις υδραυλικής θραύσης τεκμηρίωσαν τις σημαντικές μειώσεις της στατικής τάσης, σε σχέση με τη χαλάρωση που εξαρτάται από το χρόνο και το υλικό, κάτι που μεταξύ άλλων οφείλετε στην σχετικά ελάχιστη διαστασιοποίηση. Η διαφύλαξη της ευστάθειας του ορυχείου που ξεκίνησε ήδη από το 1990, έχει περιορίσει την επικινδυνότητα των διαδικασιών χαλάρωσης, που όπως είναι γνωστό, προοδεύουν με την πάροδο του χρόνου.

Η συνολική καμπύλη που προέκυψε από την ποσοστιαία κατανομή της στατικής τάσης στους στύλους στήριξης του φρέατος για τάξεις αξιολόγησης συγκεκριμένου βάθους (πράσινη καμπύλη στο σχήμα 8.4) υποδεικνύει ακόμη την απουσία της χαλάρωσης του υφιστάμενου αλίτη και ταυτόχρονα τεκμηριώνει υψηλότερες τάξεις εκτίμησης λόγω των επιδράσεων των στύλων στήριξης στην περιοχή των ερευνών.

- Ήδη κατά τη φάση της λειτουργίας με μετρήσεις υδραυλικής θραύσης επιβεβαιώθηκαν σημαντικές μειώσεις της στατικής τάσης, σε σχέση με τη χαλάρωση που εξαρτάται από το χρόνο και το υλικό, κάτι που μεταξύ άλλων οφείλετε στα σχετικά ελάχιστα αποθέματα διαστασιοποίησης.
- Η συντήρηση του ορυχείου που ξεκίνησε στις αρχές του 1990 είχε σκοπό τον περιορισμό των κινδύνων των διαδικασιών χαλάρωσης που πάντα προοδεύουν με το χρόνο.

Οι επαναληπτικές μετρήσεις το Φεβρουάριο του 2001, ανέφεραν μια ελαφριά αύξηση της χαλάρωσης ως συνέπεια της ανακατανομής των τάσεων μετά την προχώρηση της υπόγειας αίθουσας κονσέρτων, σε μία «παλιά» κατάσταση στύλων στήριξης κοντά σε μια επιπλέον ανέπαφη περιφέρεια (κόκκινη καμπύλη, Σχήμα 8.4).

Μια εκτίμηση της τρέχουσας συμπεριφοράς φόρτισης και της εντατικότητας της εμφάνισης του εφελκυσμού στους στύλους στήριξης του φρέατος I και ειδικά στην

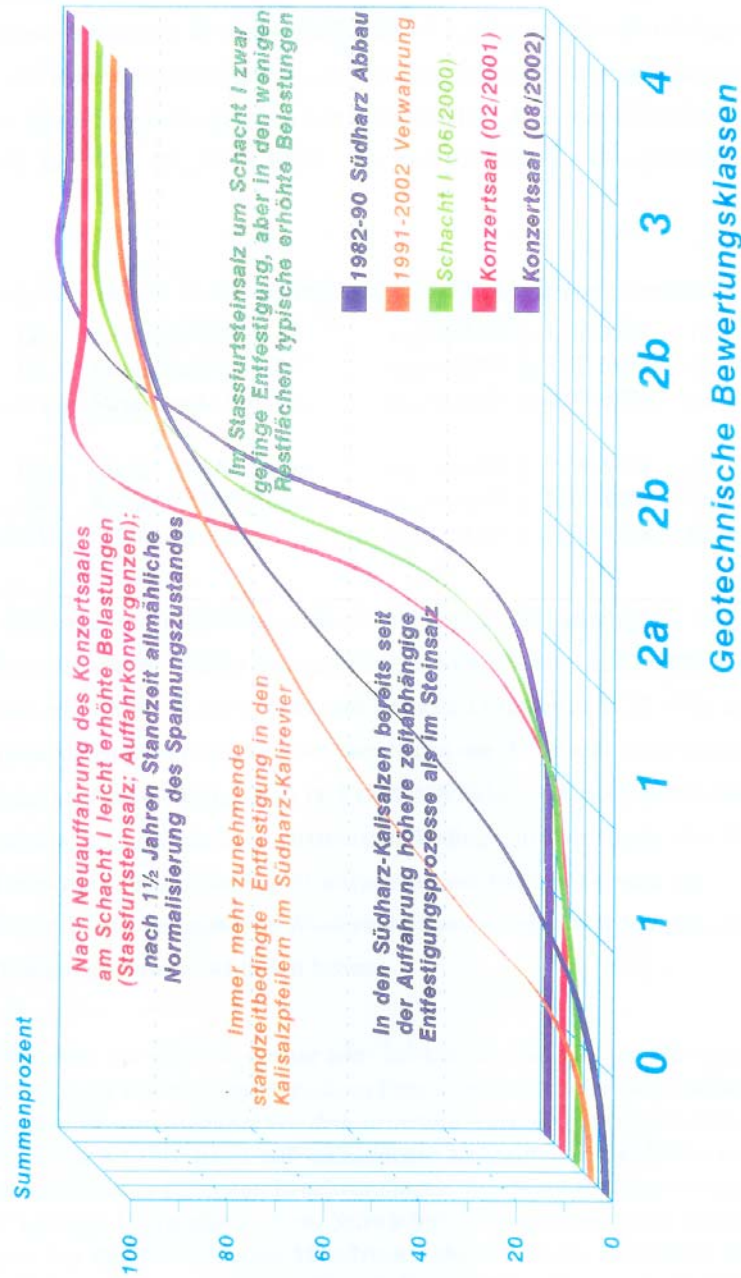
περιοχή της υπόγειας αίθουσας κονσέρτων, μαζί με τις αθροιστικές καμπύλες της κατανομής της στατικής τάσης, φαίνεται στο σχήμα 8.4. Το σχήμα αυτό δείχνει εκτός από τις αθροιστικές καμπύλες της κατανομής της στατικής τάσης στην περιοχή του φρέατος πριν την προχώρηση της αίθουσας κονσέρτων (Ιούνιο 2000) και μετά την αποπεράτωση της το Φεβρουάριο του 2001 και τον Αύγουστο του 2002, για σύγκριση των συνοψισμένων καμπύλων από την καλιούχο περιοχή του νοτίου Harz.

Η καμπύλη που ελήφθη στα μέσα του 2000, η σχετική με την εκατοστιαία κατανομή της στατικής τάσης ανά τάξεις εκτίμησης συγκεκριμένων βαθμών στους στύλους προστασίας του φρέατος I, (πράσινη καμπύλη, σχήμα 8.4) δείχνει την σχεδόν παντελή έλλειψη της χαλάρωσης του υφιστάμενου αλίτη αλλά και τεκμηριώνει υψηλότερες τάξεις εκτίμησης λόγω επιδράσεων των στύλων στήριξης στην περιοχή των ερευνών.

Οι επαναληπτικές μετρήσεις το Φεβρουάριο του 2001, ανέφεραν μια ελαφριά αύξηση ως συνέπεια της ανακατανομής των τάσεων μετά την προχώρηση της υπόγειας αίθουσας κονσέρτων, σε μία «παλιά» κατάσταση στύλων στήριξης κοντά σε μια επιπλέον ανέπαφη περιφέρεια (κόκκινη καμπύλη, σχήμα 4.8).

Τον Αύγουστο του 2002 πάνω από 1 ½ χρόνο μετά την αποπεράτωση των τεχνικών εργασιών αναγνωρίζεται μια χαρακτηριστική «εξομάλυνση» της κατάστασης των τάσεων > 20 MPa.

Spannungsmessungen mittels Hydraulic Fracturing
Summenkurven der Ruhedruckverteilung am Schacht I der GSES GmbH (06/2000-08/2002)
und im Südharz (Betriebsphase bis 31.12.1990 bzw. Versatzbergbau/Verwahrung 1991-2002)



Datensatz: 6.877 Hydrofractmessungen im Südharz / 191 HF-Tests am Schacht I
Dr. Stäubert c/o K-UTEC 08/2002 [Datensatz: "PRSUMMGL.CH3"]

d 9

Σχήμα 8.4: Οι αθροιστικές καμπύλες της κατανομής της στατικής τάσης στο φρέαρ I του ορυχείου Glückauf Sondershausen (06/2000 – 08/2002) και στην περιοχή του Südharz ως το 1990.

8.6. Η συμπεριφορά της χαλάρωσης σε συνάρτηση με το χρόνο

Με τη βοήθεια των πολλαπλών δοκιμών διάθλασης, παράλληλα με την τιμή της στατικής τάσης, δύναται κάθε φορά να προκύψει και η τιμή της συγκεκριμένης **-επί τόπου- αντοχής θραύσης**, σ_{AZ} του υφιστάμενου άλατος, σε συνάρτηση με το χρόνο αναμονής και το υλικό. Πρόκειται για ένα μέγεθος, που συνδέεται με την χαλάρωση των πετρωμάτων και μπορεί να συμβάλλει σημαντικά στη βραχομηχανική εκτίμηση τους.

Οι τιμές αυτές ελήφθησαν κατά τη διάρκεια όλων των δοκιμών σε όλα τα διατρήματα και οι μέσες τιμές της **-επί τόπου- αντοχής σε θραύση** που ανιχνεύθηκαν σε απόσταση από την περίμετρο είναι οι ακόλουθες (n= ο αριθμός των μετρήσεων που ελήφθησαν):

- | | |
|---|--|
| • F176-GL Ανατολικό πεδίο φόρτωσης εκφόρτωσης | $\sigma_{AZ} = 2,16 \pm 0,55 \text{ MPa (n=12)}$ |
| • F177-GL Βόρεια θέση χειρισμού | $\sigma_{AZ} = 4,22 \pm 0,89 \text{ MPa (n=9)}$ |
| • F178-GL Διευθυντική στοά 13 | $\sigma_{AZ} = 3,02 \pm 1,06 \text{ MPa (n=12)}$ |
| • F179-GL Εγκοπή στον πρώην θάλαμο BMSR | $\sigma_{AZ} = 4,25 \pm 0,69 \text{ MPa (n=10)}$ |
| • F186-GL Διευθυντική στοά 13 | $\sigma_{AZ} = 2,96 \pm 1,02 \text{ MPa (n=11)}$ |
| • F187-GL Εγκοπή στον πρώην θάλαμο BMSR | $\sigma_{AZ} = 4,46 \pm 1,24 \text{ MPa (n=10)}$ |
| • F216-GL Διευθυντική στοά 13 | $\sigma_{AZ} = 2,49 \pm 0,97 \text{ MPa (n=12)}$ |
| • F217-GL Βόρειος Αυτοκινητόδρομος | $\sigma_{AZ} = 3,67 \pm 0,77 \text{ MPa (n=12)}$ |

Κατά τη διεξαγωγή των πρώτων μετρήσεων στα διατρήματα F176-GL, F177-GL, F178-GL και F179-GL, στον αλίτη της ανυδριτικής περιοχής του αλίτη Stassfurt (χονδροκρυσταλλικός έως συμπαγής) σε σχεδόν ανέπαφο υλικό, ανιχνεύθηκε **-επί τόπου- αντοχή σε θραύση** σ_{AZ} , που κυμαινόταν μεταξύ των 2,8 MPa και των 5,6 MPa. Οι τιμές αυτές συνδέονται με την, ως επί το πλείστον, υψηλή περιεκτικότητα του πετρώματος σε ανυδρίτη.

Στο ανατολικό πεδίο φόρτωσης εκφόρτωσης με τις μετρήσεις στο διάτρημα F176-GL, ανιχνεύθηκαν σημαντικές διαδικασίες χαλάρωσης κατά τη διάρκεια των τελευταίων 10 ετών. Η τιμή της **-επί τόπου- αντοχής σε θραύση** ανερχόταν σε μόλις $\sigma_{AZ}=1,5-3,2 \text{ MPa}$.

Στον, υψηλής καθαρότητας, αλίτη Stassfurt, στην περιοχή γύρω από την προβλεπόμενη αίθουσα κονσέρτων, με τις μετρήσεις απλά επιβεβαιώθηκαν οι εντελώς ανέπαφες συνθήκες που αναμενόταν, χωρίς εμφάνιση χαλάρωσης με την πάροδο του χρόνου. Η τιμή της -επί τόπου- αντοχής σε θραύση, $\sigma_{AZ} = 3-5$ MPa. Αντίθετα, κοντά στο μέτωπο και όπως επίσης αναμενόταν, παρατηρήθηκε η ύπαρξη μιας μικρής χαλάρωσης σε συνάρτηση με το χρόνο (F178 / F179-GL).

Οι ελάχιστες αντοχές σε θραύση που καταμετρήθηκαν στα διατρήματα F178-GL και F186-GL, σχετίζονται με τον υφιστάμενο, έντονα κρυσταλλικό, αλίτη Stassfurt. Στην εγκοπή στον πρώην θάλαμο BMSR (F179-GL και F187-GL) και στον βόρειο αυτοκινητόδρομο (F217-GL) υφίσταται ανυδριτικός αλίτης, μεγάλης αντοχής. Με βάση αυτές τις τιμές αλλά και τις τιμές που προέκυψαν αργότερα από τις επαναληπτικές μετρήσεις αποκλείστηκε το ενδεχόμενο χαλάρωσης.

Καλό θα ήταν ίσως να σημειωθούν οι χαρακτηριστικοί για τον αλίτη, κυρίως συμπαγούς ή κρυσταλλικής δομής, έντονοι σχηματισμοί ρωγμών, που υπήρχαν ήδη πριν την εισαγωγή του οργάνου θραύσης ή διάθλασης. Σε πολλές μετρήσεις μάλιστα, παρατηρήθηκαν, πριν την αρχική θραύση σημαντικές μικρορωγμές, οι οποίες οφείλονται στις διαδικασίες θραύσης των κρυσταλλικών επιφανειών. Το φαινόμενο αυτό έχει τη μορφή διαδικασιών θραύσης, κατά τις οποίες, οι ήδη υφιστάμενες κρυσταλλικές, ασταθείς ή αδύναμες επιφάνειες, διευρύνονται ή θραύονται, πριν από την εφαρμογή της υδραυλικής θραύσης.

8.7. Συνοπτική εκτίμηση της κατάστασης στην περιοχή της κατασκευής της υπόγειας αίθουσας κονσέρτων.

Το φρέαρ I και οι στύλοι προστασίας του φρέατος I ($R = 210$ m), χαρακτηρίζονται, όπως ήδη αναφέρθηκε, από τις πολύπλοκες γεωλογικές και τεκτονικές συνθήκες που επικρατούν στην περιοχή αυτή. Οι συνθήκες αυτές οφείλονται στο γεγονός ότι αυτό το τμήμα του ορυχείου βρίσκεται μέσα στον πυρήνα της ζώνης διαταραχής Wippertal, εύρους μεταξύ 600-800 m, σε δομή αντικλίνου και τεκτονικής λεκάνης.

Από όλες τις μετρήσεις ελέγχου που πραγματοποιήθηκαν κοντά στο φρέαρ και μετά από σύγκριση με τις παλαιότερες (1990) προκύπτει ότι οι εργασίες εξυγίανσης

και λιθογόμωσης που έλαβαν χώρα κατά τα έτη 1990 και 1991 συνέβαλλαν ουσιαστικά στην επίτευξη μιας σημαντικής επιβράδυνσης των διαδικασιών χαλάρωσης στους στύλους στήριξης του φρέατος I. Αυτό το δεδομένο, αποτέλεσε μια πολύ ευνοϊκή παράμετρο για το σχεδιασμό και την κατασκευή της υπόγειας αίθουσας κονσέρτων.

Μεταξύ των συμπερασμάτων που προέκυψαν από την γεωτεχνική επίβλεψη, μετά τις πρώτες μετρήσεις (2000) και τα οποία έπρεπε να ληφθούν υπόψη, πριν την κατασκευή της αίθουσας, συνοψίζονται και τα εξής:

- Στις μεγάλες επιφάνειες στήριξης, στις οποίες επρόκειτο να τοποθετηθεί η αίθουσα κονσέρτων, ανιχνεύθηκαν σχεδόν ανέπαφες συνθήκες με ανεπαίσθητες επιδράσεις των στύλων στήριξης.
- Το πέτρωμα που βρισκόταν στη συγκεκριμένη περιοχή, ήταν αλίτης Stassfurt υψηλής καθαρότητας (99 % NaCl), στον οποίο έως τη δεδομένη χρονική στιγμή, οι -χρονικά εξαρτώμενες- διαδικασίες χαλάρωσης ήταν μάλλον ανεπαίσθητες. Τα αποτελέσματα των μετρήσεων στο φρέαρ I και στην περιοχή γύρω από την προβλεπόμενη αίθουσα, χαρακτηρίζουν τις συνθήκες φόρτισης γενικά ως **κανονικές**, χωρίς ιδιαιτερότητες σχετικές με την ασφάλεια της εκσκαφής.
- Τα ίδια αποτελέσματα όμως επέτρεπαν να αναμένονται επιδράσεις επικάλυψης, δηλαδή ανακατανομές των τάσεων εξαιτίας της νέας εκσκαφής, με πιθανή ενεργοποίηση των υπόγειων διαδικασιών παραμόρφωσης, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι ενδέχεται να προκύψει οποιοσδήποτε κίνδυνος σχετικά με την ασφάλεια της εκσκαφής.
- Οι πιθανές αρνητικές επιδράσεις επικάλυψης από την παλιά εξόρυξη μεταλλεύματος (1902), η οποία είχε λιθογομωθεί έως το 1912, αποκλείονται οριστικά, με βάση τα αποτελέσματα των μετρήσεων.
- Με την ολοκλήρωση της επίβλεψης με το σύστημα μέτρησης της εγκάρσιας επέκτασης των στύλων στα διατρήματα υδραυλικής θραύσης και τις μετρήσεις των συγκλίσεων (08/2000), ήταν πιθανή η παρατήρηση νέων βραχύχρονων παραμορφώσεων μετά τη νέα κατασκευή. Έως τη δεδομένη χρονική στιγμή, οι υπόγειες παραμορφώσεις στην περιοχή της προβλεπόμενης αίθουσας κονσέρτων ήταν περίπου 4-6 mm / έτος. Οι υπόγειες παραμορφώσεις αυτές, με βάση τη συνολική επίβλεψη της περιοχής γύρω από

το φρέαρ και τις επιφανειακές καθιζήσεις, χαρακτηρίζονταν μάλλον πολύ μικρές.

- Μετά την κατασκευή της αίθουσας κονσέρτων θα είναι απαραίτητες νέες επαναληπτικές μετρήσεις ελέγχου, με τη μέθοδο της υδραυλικής θραύσης.

9. Συμπεράσματα -Προτάσεις

Από τις μετρήσεις που διεξήχθησαν μετά την κατασκευή της υπόγειας αίθουσας κονσέρτων και λαμβανομένων υπόψη όλων των υφιστάμενων δεδομένων των προηγούμενων μετρήσεων, προέκυψαν τα ακόλουθα συμπεράσματα, που έχρηζαν προσοχής:

- Στις μεγάλες επιφάνειες στήριξης, στις οποίες τοποθετήθηκε η αίθουσα κονσέρτων, ανιχνεύθηκαν όπως συνήθως σχεδόν ανέπαφες συνθήκες με μικρή αύξηση της επίδρασης των στύλων στήριξης. Μετά την κατασκευή της αίθουσας κονσέρτων, αυξήθηκαν και οι στατικές τάσεις στην μειωμένη πλέον επιφάνεια στήριξης, κατά 2,5 MPa.
- Τα αποτελέσματα των μετρήσεων στην περιοχή γύρω από την αίθουσα κονσέρτων απέδειξαν πως οι συνθήκες φόρτισης εξακολουθούσαν να χαρακτηρίζονται **κανονικές** χωρίς ιδιαιτερότητες σχετικές με την ασφάλεια της εκσκαφής.
- Η στατική τάση κυμαινόταν από 19-23 MPa.
- Ο, υψηλής καθαρότητας, αλίτης Stassfurt που υφίστατο στην περιοχή της αίθουσας κονσέρτων, έως τη δεδομένη χρονική στιγμή, είχε υποστεί διαδικασίες χαλάρωσης πολύ περιορισμένης έκτασης.
- Όπως και κατά τις προηγούμενες μετρήσεις, τα νέα αποτελέσματα επέτρεπαν την αναμονή ανακατανομής των τάσεων, λόγω της νέας εκσκαφής, με πιθανή ενεργοποίηση των υπόγειων διαδικασιών παραμόρφωσης. Αυτό όμως δεν σήμαινε ότι συνέτρεχε λόγος ανησυχίας για οποιοδήποτε κίνδυνο σχετικό με την ασφάλεια της εκσκαφής.
- Γενικά δεν ήταν δυνατό να αποκλειστεί μια βραχυπρόθεσμη ή μακροπρόθεσμη δραστηριοποίηση, δηλαδή μια επιτάχυνση των διαδικασιών χαλάρωσης.
- Οι πιθανές αρνητικές επιδράσεις επικάλυψης από την παλιά εξόρυξη μεταλλεύματος (1902), η οποία είχε λιθογομωθεί έως το 1912, αποκλίστηκαν οριστικά.
- Η τεχνική επίβλεψη της προχώρησης της υπόγειας αίθουσας κονσέρτων, τεκμηριώθηκε με το σύστημα μέτρησης της εγκάρσιας επέκτασης των στύλων στα διατρήματα υδραυλικής θραύσης και τις μετρήσεις της σύγκλισης. Οι έως

τότε υπόγειες παραμορφώσεις στην περιοχή της αίθουσας κονσέρτων ήταν μάλλον μικρές με 4..7 mm / έτος. Αξιοσημείωτες ήταν οι σημαντικές παραμορφώσεις που παρατηρήθηκαν λόγω της νέας εκσκαφής στη διευθυντική στοά 13, με 18 mm/έτος.

Οι δεύτερες επαναληπτικές μετρήσεις που πραγματοποιήθηκαν περίπου 1 ½ χρόνο μετά την κατασκευή της αίθουσας κονσέρτων (08/2002) για την καταγραφή της κατάστασης των τάσεων και των παραμορφώσεων στην περιοχή γύρω από αυτό το μεγάλο άνοιγμα (αίθουσα κονσέρτων), οδήγησαν στα εξής συμπεράσματα:

- Όπως έχει ήδη αναφερθεί στις μεγάλες επιφάνειες στήριξης, στις οποίες τοποθετήθηκε η αίθουσα κονσέρτων, είχαν ανιχνευθεί σχεδόν ανέπαφες συνθήκες με ανεπαίσθητες επιδράσεις των στύλων στήριξης. Στην αρχή του 2001, οι μετρήσεις είχαν δείξει αύξηση στις στατικές τάσεις κατά 2,5 MPa. Με τις μετρήσεις που διεξήχθησαν τον Αύγουστο του 2002, παρατηρήθηκε ότι είχε ήδη λάβει χώρα μια συγκεκριμένη εναρμόνιση των τάσεων που προέκυψαν μετά την εκσκαφή.
- Τα αποτελέσματα των μετρήσεων από την περιοχή γύρω από την αίθουσα κονσέρτων εξακολουθούσαν να επιτρέπουν στις συνθήκες φόρτισης των χαρακτηρισμό: κανονικές χωρίς ιδιαιτερότητες σχετικές με την ασφάλεια της εκσκαφής (στατική τάση από 17-22 MPa).
- Οι πιθανές αρνητικές επιδράσεις επικάλυψης από την παλιά εξόρυξη μεταλλεύματος (1902), η οποία είχε λιθογομωθεί έως το 1912, μπορούσαν και πάλι να αποκλειστούν
- Ο, υψηλής καθαρότητας, αλίτης Stassfurt που υφίστατο στην περιοχή της αίθουσας κονσέρτων, και ο οποίος σύμφωνα με τις προηγούμενες μετρήσεις είχε υποστεί διαδικασίες χαλάρωσης πολύ περιορισμένης έκτασης, εξακολουθούσε να εμφανίζει διαδικασίες χαλάρωσης σε πολύ χαμηλό επίπεδο τόσο κατά τις μετρήσεις υδραυλικής θραύσης όσο και κατά τις τοπογραφικές και γεωτεχνικές μετρήσεις παραμόρφωσης που πραγματοποιήθηκαν στο σημείο.
- Τα αποτελέσματα των μετρήσεων υπέδειξαν μία ταχεία «εναρμόνιση» των τάσεων που προέκυψαν από την εκσκαφή. Το ίδιο ισχύει και για τις υπόγειες

παραμορφώσεις που καταγράφηκαν στα 6-14 mm/έτος (μέσος όρος 9mm/έτος). Οι σημαντικές παραμορφώσεις της εκσκαφής στη διευθυντική στοά 13 ανέρχονταν στη μέγιστη τιμή των 18 mm/έτος. Οι εγκάρσιες παραμορφώσεις των στύλων και οι κατακόρυφες συγκλίσεις συμφωνούσαν απόλυτα με τα αποτελέσματα των τοπογραφικών μετρήσεων στην αίθουσα κονσέρτων (κατά μέσο όρο 10...11 mm/ έτος).

- Παρόλα αυτά και πάλι δεν ήταν δυνατός ο αποκλεισμός μιας βραχυπρόθεσμης ή μακροπρόθεσμης δραστηριοποίησης, δηλαδή μιας επιτάχυνσης των διαδικασιών χαλάρωσης.
- Η τεχνική επίβλεψη της υπόγειας αίθουσας κονσέρτων, τεκμηριώθηκε με το σύστημα μέτρησης της εγκάρσιας επέκτασης των στύλων στα διατρήματα υδραυλικής θραύσης, και με περισσότερες θέσεις μέτρησης της σύγκλισης καθώς και με τοπογραφικές μετρήσεις μέσα στην αίθουσα ανά μισό χρόνο.

Βιβλιογραφία

Διεθνής βιβλιογραφία:

1. Blatt, H. (1982). Sedimentary petrology, W.H. Freeman and company, U.S.A.
2. Blyth F.G.H. and M.H. de Freitas (1984). A geology for Engineers, 7th Edition, Edward Arnold Ltd, London
3. GIMM, W (1982). Kali- und Steinsalz-Bergbau, Band II, Technologie des Kali – und Steinsalz Bergbaus. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig
4. Gimm, W. (1968): Kali- und Steinsalz-Bergbau, Band I, Aufschluss und Abbau von Kali- und Steinsalzlagerstätten, VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig
5. Goodman, E. R. (1993). Engineering Geology, Rock engineering construction, 1993, John Wiley & Sons, inc, U.S.A.
6. Jedicke, L. (1999) Mineralien und Gesteine, Kennen lernen -Bestimmen-Sammeln, Natur Buch Verlag, Augsburg
7. Jendersie, H. (1969) Kali- und Steinsalz- Bergbau, Band II. Technologie des Kali- und Steinsalz- Bergbaus. VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, Leipzig
8. Kearvey, P. (1993). Editor-in-Chief, The encyclopedia of solid Earth sciences, Blackwell science Ltd, England
9. Mc Leish, A.(1986). Geological science, Blackie and son Limited, London
10. Morisson W.G. (1985). A dictionary of geology, CBS Publishers & distributors & Authors, Delhi, India
11. Naturführer, der große (1998). Mineralien und Edelsteine, Neuer Kaiser Verlag, Klagenfurt
12. Raymond, A. L. (1995). Petrology: The study of igneous sedimentary metamorphic rocks, W. C. Brown Communications, inc, U.S.A.
13. Salzer, K. (1999). Geomechanische Bewertung der Standsicherheit des Konzertsaaes in der Grube Sondershausen, Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig

14. Salzer, K., Böhnel, H. (1999). Gesteinsmechanische Indexversuche zur Beweissicherung bei der Neuauffahrung des Konzertsaaes in der Grube Sondershausen, Institut für Gebirgsmechanik GmbH, Leipzig
15. Schäfer, T. (1999). Raumakustische Planung für einen Konzertsaal im Bergwerk „Glückauf“ Sondershausen, TÜV Thüringen, Erfurt
16. Schappmann, J. (2000). Auffahrung Konzertsaal im Grubenbetrieb des Bergwerkes Sondershausen, Auswertung durchgeführter Erkundungsbohrungen, GSES GmbH, Sondershausen
17. Stäubert, A. (1998). Spannungsmessungen mittels Hydraulic Fracturing zum Nachweis zeitabhängiger Entfestigungsprozesse im Salzbergbau, Glückauf – Forschungsheft 59, Nr.4, Verlag Glückauf GmbH, Essen
18. Stäubert, A. (1990). Spannungssondierungen mittels Hydraulic Fracturing zur geomechanischen Überwachung des Kalibergbaus im Südharz- Kaligebiet der DDR. Neue Bergbautechnik, 20.Jahr, Heft 9, Germany
19. Stäubert, A., Thoma, H. (1997). Komplexe gebirgsmechanische und seismische Überwachung von Bergbaugebieten, *XLVIII. Berg- und Hüttenmännischen Tag*, Freiberg, 19-20.06.
20. Stäubert, A., Lehmann, W.(1998). Markscheiderische und gebirgsmechanische Überwachung von Verwahrungsarbeiten in stillgelegten Südharz- Kaliwerken, *Geoforschung, Geotechnik und Geoinformatik aus markscheiderisch-geodätischer Sicht, zum 49. Berg- und Hüttenmännischen Tag*, Freiberg
21. Stäubert, A. (2000). Spannungsmessungen mittels Hydraulic Fracturing im Schachtsicherheitspfeiler des Brüßman-Schachtes vor der Auffahrung eines untertägigen Konzertsaaes im Bereich Streichende Strecke 13, Kali-Umwelttechnik GmbH, Sondershausen
22. Stäubert, A. (2001). Wiederholungsmessungen mittels Hydraulic Fracturing im Schachtsicherheitspfeiler des Brüßman-Schachtes nach der Auffahrung des untertägigen Konzertsaaes im Bereich Streichende Strecke 13, Kali-Umwelttechnik GmbH, Sondershausen
23. Stäubert, A. (2002). 2. Wiederholungsmessungen mittels Hydraulic Fracturing im Schachtsicherheitspfeiler des Brüßman-Schachtes nach der Auffahrung des untertägigen Konzertsaaes im Bereich Streichende Strecke 13, Kali-Umwelttechnik GmbH, Sondershausen

24. Weigert, H., Schappmann, J., Rauche, H., Stäubert, A, (2001). Kalilagerstätte Sondershausen, Exkursion I, *Aspekte der Langzeitsicherheit bei der Nachnutzung und Stilllegung von Kali- und Steinsalzbergwerken*, Sondershausen, Germany, 30-31 März, Seite 8-10 und 8-11.

Ελληνική βιβλιογραφία

1. Αγιουτάντης, Ζ. (2002). Στοιχεία γεωμηχανικής, Μηχανική πετρωμάτων, Εκδόσεις Ίων, Αθήνα
2. Young, H. (1994). Πανεπιστημιακή φυσική, Τόμος Α΄. Μετάφραση από ομάδα πανεπιστημιακών, Εκδόσεις Παπαζήση, Αθήνα.
3. Χρηστίδης, Γ. (1999). Σημειώσεις του μαθήματος Κοιτασματολογία II, Χανιά

Άρθρα ηλεκτρονικής βιβλιοθήκης:

1. www.ebbg.de
2. www.ercosplan.de
3. www.gses.de
4. www.kutec.de