

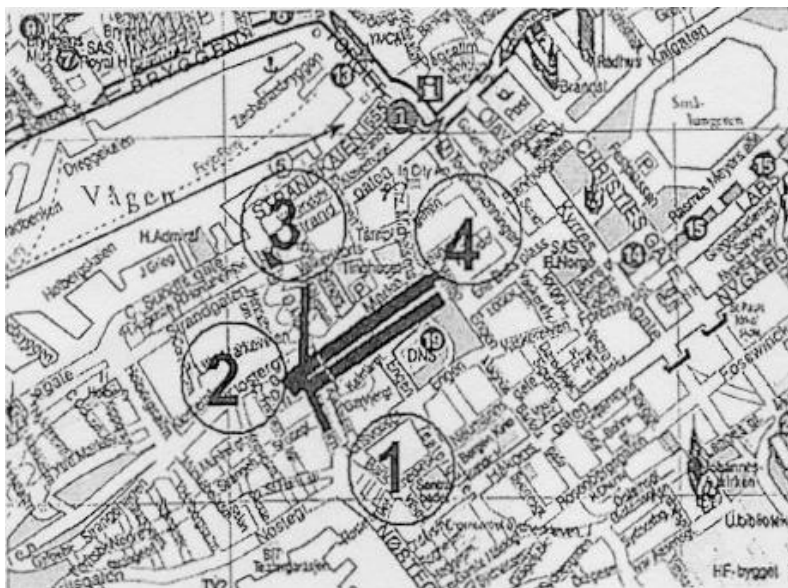
## **Πρωτοποριακή χρήση εκρηκτικών υλών: Εκσκαφή με χρήση εκρηκτικών υλών υπόγειου χώρου στάθμευσης στο ιστορικό κέντρο του Bergen (Νορβηγία)**

αποσπάσματα από την παρουσίαση του A. Fauske της Dyno Nobel

Τον Αύγουστο του 2003 ξεκίνησαν στο Bergen της Νορβηγίας οι εργασίες κατασκευής για την κύρια σήραγγα πρόσβασης σε ένα υπόγειο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτων. Η είσοδος της κύριας σήραγγας βρίσκεται μεταξύ κτιριακών συγκροτημάτων στο ιστορικό κέντρο της πόλης. Η πρόκληση σε αυτό το έργο ήταν η προσπάθεια να ελαχιστοποιηθούν τα τυχόν προβλήματα από τις ανατινάξεις, το θόρυβο, καθώς επίσης να μπορέσουν να εξομαλυνθούν τα προβλήματα στην κυκλοφορία τόσο γύρω από το εργοτάξιο αλλά και στην ευρύτερη περιοχή ώστε να μπορέσει να δημιουργηθεί μια καλή σχέση με τους κατοίκους της περιοχής. Ο υπόγειος χώρος στάθμευσης αποτελείται από δυο επιμέρους χώρους. Για να μπορέσει να υπάρξει συμμόρφωση με τα αυστηρά όρια για τις δονήσεις χρησιμοποιήθηκαν υβριδικά συστήματα πυροδότησης Nonel καθώς και εκρηκτικά γαλακτώματα.

Ο δήμος του Bergen αποφάσισε πως ο χώρος στάθμευσης που θα εξυπηρετεί το κέντρο της πόλης θα μπορούσε να γίνει στο παλιό μοναστήρι (Klostergarasjen). Τα κύρια κριτήρια που θα έπαιζαν καθοριστικό ρόλο για τον υπόγειο χώρο είναι η τοποθεσία του, η αποτελεσματικότητα του αλλά και το πόσο φιλικός προς το χρήστη είναι. Αυτό σημαίνει ένα «ανοικτό» και «απλό» χώρο στάθμευσης αυτοκινήτων με αρκετό χώρο τόσο για τους οδηγούς όσο και για τους πεζούς. Επιπλέον, έπρεπε να δημιουργηθεί ένα καλά αναπτυγμένο οδικό δίκτυο, μικρές αποστάσεις ιδιαίτερα για τους πεζούς και εύκολα προσβάσιμες εξόδους.

Για την κατασκευή του έργου σχηματίστηκε κοινοπραξία μεταξύ του δήμου του Bergen και ιδιωτικών εταιριών. Το συνολικό κόστος του έργου ανήλθε στα 22 εκατομμύρια δολάρια. Οι εργασίες κατασκευής άρχισαν τον Αύγουστο του 2003 και διήρκεσαν για 2 χρόνια.



**Εικόνα 1** Ο υπόγειος χώρος στάθμευσης στο κέντρο του Bergen (Klostergarasjen) 1. σημεία πρόσβασης για οχήματα 1- 4. σημεία πρόσβασης για πεζούς.

Ο αρχικός στόχος καθ' όλη τη διάρκεια της περιόδου κατασκευής ήταν να ελαχιστοποιηθούν τα προβλήματα για τους κατοίκους. Για την προστασία τόσο του κατασκευαστή όσο και των κατοίκων, επιθεωρήθηκαν και καταγράφηκαν όλα τα κτίρια και οι εγκαταστάσεις στην περιοχή πριν από την έναρξη της κατασκευής. Η κοινοπραξία ζήτησε κατανόηση από τους κατοίκους για τα αναπόφευκτα προβλήματα στα οποία θα εκτίθονταν όπως το κυκλοφοριακό, οι δυσκολίες στάθμευσης κατά τη διάρκεια της περιόδου κατασκευής καθώς και οι οχλήσεις από τις ανατινάξεις.

Μελετώντας τους παράγοντες που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε αστοχίες λόγω των ανατινάξεων, ελέγχθηκαν οι δονήσεις του εδάφους και ο θόρυβος. Επίσης έπρεπε να ληφθούν μέτρα για να ελαχιστοποιηθεί η παραγωγή καπνού και τοξικών αερίων, ενώ έπρεπε να αποφευχθούν οποιαδήποτε φαινόμενα εκτόξευσης τεμαχίων πετρώματος .

Υπάρχουν τρεις σημαντικοί παράγοντες από τους οποίους μπορεί να προκληθούν ζημιές από την ανατίναξη: το εύρος, η συχνότητα και η διάρκεια της δόνησης. Το εύρος της δόνησης, που μπορεί να μετρηθεί ως μετατόπιση (mm), μέγιστη ταχύτητα σωματιδίων (mm/s) ή επιτάχυνση (mm/s<sup>2</sup>), καθορίζεται κυρίως από την ποσότητα εκρηκτικής ύλης που εκρήγνυται ταυτόχρονα, το μήκος της γόμωσης, τα χαρακτηριστικά απόσβεσης του

εδάφους και από την απόσταση μεταξύ του ελεγχόμενου αντικειμένου και της ανατίναξης. Φυσικά, ένας σημαντικός παράγοντας είναι η ανταπόκριση των εγκαταστάσεων στο εύρος της δόνησης. Δεδομένου ότι υπάρχουν πολύ λίγα που μπορούν να γίνουν για να μειωθούν οι δονήσεις μετά από την ανατίναξη, δίνετε μεγάλη έμφαση στα προληπτικά μέτρα. Επομένως είναι αρκετά σημαντικοί οι ακόλουθοι ελέγξιμοι παράγοντες, οι οποίοι είναι καθοριστικοί για την πρόκληση ζημιών από τις ανατινάξεις:

- Γόμωση ανά διάτρημα
- Καθυστέρηση ανά διάτρημα
- Ειδική γόμωση
- Σχέδιο διάτρησης
- Διάμετρος διατρημάτων
- Απόσταση από το αντικείμενο ελέγχου

Κατά την ανάλυση των δονήσεων από την ανατίναξη, η σημασία των συχνοτήτων είναι σημαντική. Γενικά, οι προκληθείσες συχνότητες από ανατίναξη ποικίλλουν από 10 έως 100 Hz. Σε κοντινές αποστάσεις, υπερτερούν οι τιμές 60-100 Hz, αν και μπορούν να εμφανιστούν τιμές μέχρι 400 Hz. Σε αποστάσεις μεγαλύτερες από 100 μέτρα, οι συχνότητες είναι συνήθως 15-30 Hz. Στις πολύ μεγάλες αποστάσεις (μέχρι 5000 μέτρα), οι συχνότητες είναι συνήθως 5-10 Hz, η οποίες δεν είναι αντιληπτές από τον άνθρωπο και δεν επηρεάζουν τις κατασκευές.

Ο τύπος που χρησιμοποιήθηκε στη Νορβηγία για να υπολογιστεί η προσκληθείσα δόνηση από την ανατίναξη είναι:

$$v = K \sqrt{Q/d} \quad \text{mm/s}$$

v = μέγιστη ταχύτητα σωματιδίων, (mm/s)

K = σταθερά βράχου, 200-400

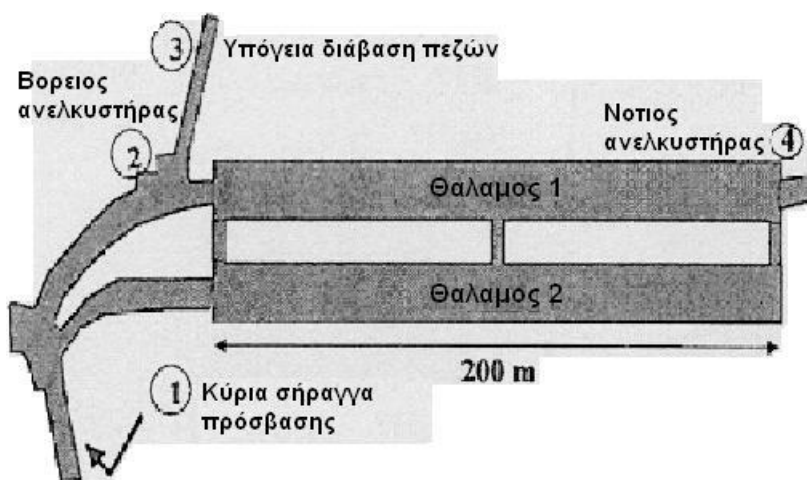
Q = ποσότητα εκρηκτικής ύλης που εκρήγνυνται ταυτόχρονα

d = απόσταση σε μέτρα

Το έργο αποτελείται από δύο παράλληλες σήραγγες μήκους 200 μέτρων, 12 μέτρων ύψος και 17 μέτρα πλάτος, καθώς επίσης και μια κύρια σήραγγα πρόσβασης, δύο ανελκυστήρες και μια υπόγεια διάβαση για τους πεζούς. Οι

χώροι στάθμευσης (θάλαμος 1 και θάλαμος 2) έχουν διατομές 195 m<sup>2</sup> και κάθε ένας έχει 3 πατώματα και 3 εγκάρσιες κεκλιμένες ράμπες. Η συνολική χωρητικότητα είναι για 950 αυτοκίνητα.

Περίπου 100.000 κυβικά μέτρα πετρώματος έπρεπε να αφαιρεθούν από το χώρο και να μεταφερθούν, αυτό ισοδυναμεί με περίπου 13.500 δρομολόγια φορτηγών που κινήθηκαν από το εργοτάξιο μέσα από την πόλη και πάλι πίσω. Κάποια ποσότητα των υλικών αυτών οδηγήθηκαν προς απόρριψη ενώ τα υπόλοιπα χρησιμοποιήθηκαν ως αδρανή υλικά στην ευρύτερη περιοχή της πόλης.



**Εικόνα 2.** 1.Κύρια σήραγγα πρόσβασης, 2.βόρειος ανεγκυστήρας, 3.υπόγεια διάβαση πεζών, 4.νότιος ανεγκυστήρας.

Η είσοδος της κύριας σήραγγας πρόσβασης τοποθετήθηκε ανάμεσα σε δυο σειρές κτιριακών συγκροτημάτων στο ιστορικό κέντρο της πόλης με διατηρητέα κτίρια. Η πιο κοντινή απόσταση από την άκρη της σήραγγας στα κτίρια είναι μόλις 7 μέτρα! Αυτό ήταν καθοριστικό για τους περιορισμούς που θα προέκυπταν για τις δονήσεις από τις εργασίες ανατίναξης. Τα γενικά όρια των δονήσεων καθορίσθηκαν ως εξής, για την κάθετη μέγιστη ταχύτητα σωματιδίων (PPV) τα 20 mm/s για τις κατασκευές που εδράζουν σε χαλαρά επιφανειακά υλικά, και στα 40 mm/s για κατασκευές που εδράζουν σε συμπαγή βράχο. Η κύρια σήραγγα πρόσβασης εισχωρεί στο βράχο μέσω μιας εγκάρσια κεκλιμένης σήραγγας με κλίση 1:6 έως ότου γίνεται επίπεδη, περίπου 60 μέτρα από την είσοδο. Μια κεκλιμένη ράμπα που θα συνδεθεί με τη βόρεια σήραγγα θα κατασκευαστεί μπροστά από τους θαλάμους των χώρων στάθμευσης.

Στην άλλη πλευρά του λόφου, στο βόρειο άκρο του χώρου στάθμευσης η πρόσβαση για τους πεζούς γίνεται μέσω ενός ανελκυστήρα, βάθους 35 μέτρων. Στο ίδιο σημείο, μια υπόγεια διάβαση θα οδηγεί τους πεζούς στον ανελκυστήρα. Στο νότιο άκρο του χώρου στάθμευσης και ακόμα πιο κοντά στο κέντρο της πόλης, θα βρίσκεται ένας δεύτερος ανελκυστήρας. Η είσοδος του νότιου ανελκυστήρα τοποθετήθηκε μέσα σε ένα κτίριο, γεγονός που έκανε ιδιαίτερες τις συνθήκες διάνοιξης του.

Εκτός από την είσοδο του νότιου ανελκυστήρα, όλες οι εκσκαφές ήταν μέσα σε πέτρωμα. Τα υπερκείμενα πάνω από τις εκσκαφές είναι σχετικά μικρού πάχους. Επάνω από τους θαλάμους των χώρων στάθμευσης ποικίλλουν από 4 έως 20 μέτρα. Με τόσο μικρό πάχος υπερκειμένων και αυστηρούς περιορισμούς για τις δονήσεις, προκειμένου να εξασφαλιστεί ασφαλής και αποδοτική εκσκαφή έπρεπε να εφαρμοστούν προηγμένες μέθοδοι ανατίναξης.

Η κύρια σήραγγα έχει διατομή 42 m<sup>2</sup>. Η διάμετρος των διατηρημάτων ήταν 48 mm, και στην προεκσκαφή υπήρχαν 4 διατηρήματα ανακούφισης 102 mm. Το μήκος προχώρησης αρχικά ήταν 2,5 μέτρα. Η διαδικασία ανατίναξης διαιρέθηκε σε 3 στάδια. Αρχικά γινότανε η διάνοιξη και η ανατίναξη στο κέντρο του μετώπου στο επόμενο στάδιο τα πλαϊνά και στο τελευταίο το κάτω μέρος. Με αυτό τον τρόπο υπήρχε καλύτερος έλεγχος των δονήσεων.

Μετά από κάποιες ανατινάξεις που ακολούθησαν το ανώτερο σχέδιο ξεκίνησαν κύκλοι ολομέτωπων ανατινάξεων, αυξάνοντας το μήκος προχώρησης σταδιακά, εφόσον πλέον η σήραγγα μπήκε σε βάθη με μεγαλύτερο ύψος υπερκειμένων και απομακρύνθηκε από τα σημεία μέτρησης.

Κατά τις τρεις πρώτες ανατινάξεις, οι μετρήσεις των δονήσεων ήταν πολύ κοντά στις υπολογισμένες θεωρητικές τιμές και κάτω από τα όρια των 20 και 40 mm/s.

Ο προγραμματισμός του έργου προέβλεπε να χρησιμοποιηθεί από την αρχή του έργου εκρηκτικό γαλάκτωμα. Το γαλάκτωμα εκτός του ότι είναι φτηνότερο από τη ζελατινοδυναμίτιδα, είναι και φιλικότερο προς το περιβάλλον και το χρήστη. Το γαλάκτωμα αποτελεί μια αποτελεσματική εκρηκτική ύλη που

χαρακτηρίζεται από υψηλή ταχύτητα έκρηξης και θραυστικότητα, ενώ δεν παράγει καπνό και τοξικά αέρια και δεν είναι καρκινογόνο.

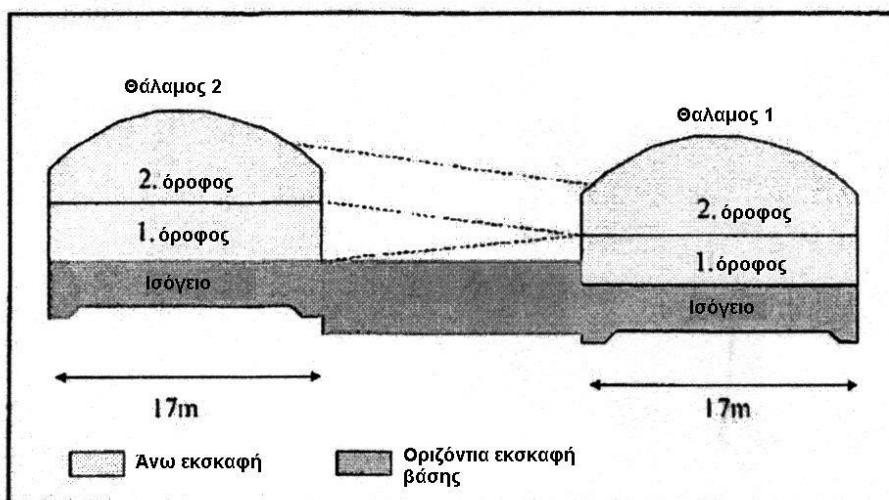
Στο εργοτάξιο του Klostergarasjen, οι ιδιότητες αυτές του γαλακτώματος ταίριαξαν απόλυτα με τις αστικές τοπικές συνθήκες. Με τη χρησιμοποίηση του γαλακτώματος πολύ σημαντική ήταν η μείωση παραγωγής καπνού και τοξικών αέριων από τις ανατινάξεις, κάτι που επηρέασε όχι μόνο τους εργαζομένους αλλά και τους κατοίκους της περιοχής. Εντούτοις, αυτό το σύστημα δεν χρησιμοποιήθηκε έως ότου η κύρια σήραγγα πρόσβασης είχε φτάσει περίπου τα 50 μέτρα μήκος. Τα υπερκείμενα ήταν περίπου 15 μέτρα, το οποίο σήμαινε ότι το γαλάκτωμα θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί κανονικά δηλαδή η γόμωση στα διατρήματα να είναι 100%, εκτός από τα περιμετρικά, στα οποία η γόμωση είναι 75% για τα περιμετρικά διατρήματα και 50% για τα εσωτερικά περιμετρικά διατρήματα. Το βήμα προχώρησης (μήκος διατρημάτων) προσαρμόστηκε σύμφωνα με τα επιτρεπτά όρια δονήσεων.

Αρχικά χρησιμοποιήθηκαν νιτρογλυκερινούχα εκρηκτικά, κυρίως ζελατινοδυναμιτιδες. Οι ζελατινοδυναμίτιδες έχουν μερικά μειονεκτήματα (εκτός από την ασφάλεια), όπως είναι η παραγωγή περισσότερου καπνού και τοξικών αερίων κατά την ανατίναξη. Αυτό αποτελεί πρόβλημα κατά την ανατίναξη σε αστικές περιοχές όπως το Bergen. Πράγματι, οι πρώτες ανατινάξεις παρήγαγαν τοξικά αέρια, τα οποία ενόχλησαν τους κάτοικους στην γύρω περιοχή. Για αυτόν τον λόγο, έπρεπε να γίνει η αλλαγή των εκρηκτικών υλών σε εκρηκτικό γαλάκτωμα το συντομότερο δυνατόν.

Γενικά, οι φυσίγγιοποιημένες εκρηκτικές ύλες προκαλούν λιγότερες δονήσεις, λόγω των χαμηλότερων φαινομένων επικάλυψης. Επιτρέπουν επίσης τον καλύτερο έλεγχο της ανατίναξης.

Οι ολομέτωπες ανατινάξεις χρειάζονται ένα σχέδιο ανατίναξης με ιδιαίτερη έμφαση στους χρόνους καθυστέρησης. Εφαρμόστηκε το υβριδικό σύστημα Nonel στο οποίο η έναυση δίνεται μέσα σε κάθε διάτρημα ξεχωριστά, με χρόνο καθυστέρησης 25ms μεταξύ των διατρημάτων. Αυτό επιτεύχθηκε χρησιμοποιώντας συνδέσμους επιφάνειας σε συνδυασμό και με καψύλλια που χρησιμοποιούνται σε υπόγεια έργα (καψύλλια Nonel LP).

Ο κάθε θάλαμος για τη δημιουργία των χώρων στάθμευσης διανοίχτηκε αρχικά με μια πιλοτική σήραγγα με διάμετρο 40 m<sup>2</sup> που στη συνέχεια διευρύνθηκε για να διαμορφωθεί η άνω εκσκαφή του θαλάμου.

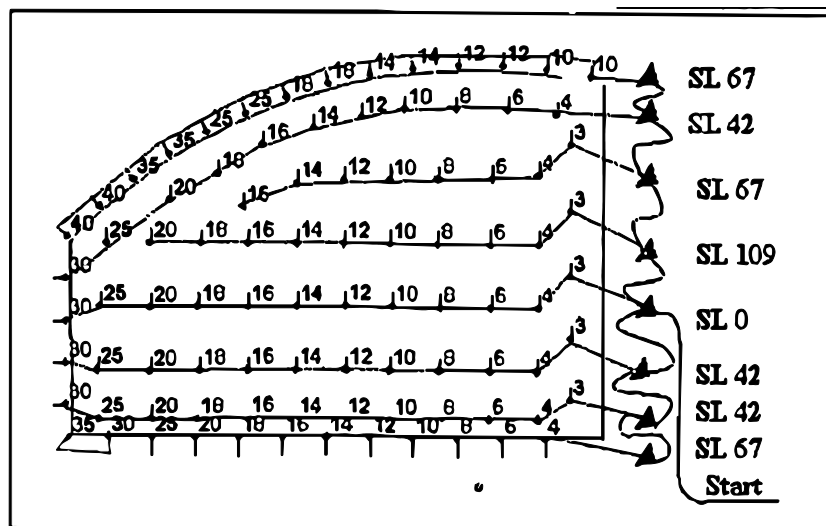


**Εικόνα 3** Οι δυο τριώροφοι θάλαμοι του χώρου στάθμευσης, διατομή του κάθε θαλάμου:  $195 \text{ m}^2$ , άνω εκσκαφή θαλάμου:  $115 \text{ m}^2$

Το νότιο άκρο του θαλάμου 2 έχει υπερκείμενα που δεν ξεπερνούν τα 3-4 μέτρα. Τα υπερκείμενα αυξάνονται σταδιακά, μέχρι περίπου τα 20 μέτρα, προς το βόρειο άκρο. Ο θάλαμος 2 βρίσκεται πιο κοντά στην επιφάνεια από ότι ο θάλαμος 1. Επομένως απαιτήθηκε μεγαλύτερη προσοχή στις προκληθήσες δονήσεις από το θάλαμο 2. Ως κύρια εκρηκτική ύλη στους θαλάμους χρησιμοποιήθηκε το εκρηκτικό γαλάκτωμα. Λόγω των αυστηρών ορίων στις δονήσεις, χρησιμοποιήθηκε το υβριδικό σύστημα Nonel και διακεκομμένη γόμωση με πολύ καλά αποτελέσματα.

Ο σκοπός της διακεκομμένης γόμωσης στις σήραγγες είναι να μειωθεί η γόμωση ανά διάτρημα, έτσι ώστε να υπάρξει συμμόρφωση με τα όρια των δονήσεων και, συγχρόνως, να βελτιστοποιηθεί η προχώρηση ανά κύκλο. Η μέθοδος αυτή έχει δοκιμαστεί σε διάφορα εργοτάξια σηράγγων στη Σουηδία και τη Νορβηγία με καλά αποτελέσματα. Πρέπει να υπολογιστούν η ειδική γόμωση, η διάτρηση αλλά και τα σχέδια διάτρησης και ανατίναξης.

Εξετάστηκαν μια σειρά διαφορετικών σχεδίων διάτρησης, γόμωσης και πυροδότησης. Η ευελιξία του συστήματος διακεκομμένης γόμωσης και το υβριδικό σύστημα Nonel επέτρεψαν ένα υψηλό ποσοστό παραγωγής κατά τη διάρκεια της εκσκαφής των κύριων θαλάμων στάθμευσης, παρά τα αυστηρά όρια δονήσεων. Το πλήρες βήμα προχώρησης πραγματοποιήθηκε στους περισσότερους κύκλους.



**Εικόνα 4** το υβριδικό σύστημα έναυσης Nonel, καψύλλια βάθους σε συνδυασμό με συνδέσμους επιφανείας

Οι εργασίες ανατίναξης για τον υπόγειο χώρο στάθμευσης αυτοκινήτων στο Klostergarasjen πραγματοποιήθηκαν εντατικά από διάφορα σημεία πρόσβασης σε μια πυκνά κατοικημένη περιοχή, χωρίς οποιαδήποτε σημαντική ζημία σε κτίρια ή σε εγκαταστάσεις και ολοκληρώθηκαν τον Αύγουστο του 2004, σύμφωνα με το πρόγραμμα. Παρόλο που κατά τη διάρκεια των εργασιών ανατίναξης στην επιφάνεια, η απόσταση από τα κοντινότερα κτίρια ήταν πολύ μικρές και οι σήραγγες πρόσβασης καθώς και οι κύριοι χώροι στάθμευσης δημιουργήθηκαν κάτω από πολύ λίγα υπερκείμενα, με μόνο μερικές εξαιρέσεις, τα όρια για τις επιτρεπτές τιμές των δονήσεων δεν ξεπεράστηκαν κατά τη διάρκεια του χρόνου κατασκευής. Οι εργασίες συνεχίστηκαν μέχρι τον προγραμματισμένο χρόνο ολοκλήρωσης, τον Ιούνιο του 2005. Οι κάτοικοι του Bergen έχουν στη διάθεσή τους δύο τριώροφους χώρους στάθμευσης για 950 αυτοκίνητα, ακριβώς στο ιστορικό κέντρο της πόλης.