

# Αρχές Σχεδιασμού Βαθιών Ορυγμάτων Κάλυψης και Εκσκαφής Σύμφωνα με τον Ευρωκώδικα EC7 και Γερμανικές Συστάσεις

## Design Principles for Top-Down Deep Excavations According to Eurocode EC7 and German Recommendations

ΒΡΕΤΤΟΣ, Χ.

ΒΑΣΙΛΑΚΟΠΟΥΛΟΥ, Γ.

ΡΙΖΟΣ, Δ.

Δρ. Πολ. Μηχανικός, Καθηγητής, Πολυτεχνείο Kaiserslautern, Γερμανία

Πολ. Μηχανικός, M.Sc., ΟΜΕΤΕ Α.Ε., Αθήνα

Πολ. Μηχανικός, M.Sc., ΟΜΕΤΕ ΕΔΑΦΟΣΤΑΤΙΚΗ Ε.Π.Ε., Αθήνα

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ :** Η αντιστήριξη ορυγμάτων με τη μέθοδο κάλυψης και εκσκαφής χρησιμοποιείται συχνά για υπόγειες κατασκευές μεγάλου βάθους σε αστικό περιβάλλον, όπου επιδιώκεται ελαχιστοποίηση των καθιζήσεων. Για αυτόν τον τύπο κατασκευής, στην παρούσα εργασία παρουσιάζονται οι διάφοροι ελέγχοι οριακής κατάστασης αστοχίας με βάση κατάλληλα προσομοίωμα σύμφωνα με τις αρχές σχεδιασμού του Ευρωκώδικα EC7, τον αντίστοιχο γερμανικό κανονισμό DIN 1054 και τις γερμανικές συστάσεις για εκσκαφές και αντιστήριξεις (EAB).

**ABSTRACT :** The construction of deep excavations using the top-down (cover and cut) method is often adopted for deep underground structures in urban areas, where minimisation of settlement is required. For this type of construction, the paper outlines the several checks of ultimate limit state based on appropriate models following the design principles of the Eurocode EC7, the respective German code DIN 1054, and the German recommendations for deep excavations (EAB).

### 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η μέθοδος κάλυψης και εκσκαφής αποτελεί μια εναλλακτική κατασκευαστική μέθοδο αντιστήριξης βαθιών ορυγμάτων, όπου οι πλάκες οροφής των υπογείων κατασκευάζονται κατά την πρόοδο της εκσκαφής, Baldhauf & Timm (1988). Η στήριξη στις ενδιάμεσες πλάκες περιορίζει το μέγεθος των παραμορφώσεων. Η μέθοδος επιλέγεται συχνά για την κατασκευή έργων μετρό σε πυκνοδομημένες αστικές περιοχές, όπου επιδιώκεται ελαχιστοποίηση των καθιζήσεων. Η άμεση κατασκευή της πλάκας οροφής εξασφαλίζει τη ταχεία αποκατάσταση της κυκλοφορίας και ελαχιστοποιεί την όχληση στην επιφάνεια.

Η μελέτη αυτού του τύπου βαθιάς εκσκαφής/αντιστήριξης γίνεται με βάση τις μεθόδους γεωτεχνικού σχεδιασμού όπως αυτές περιγράφονται στον EN 1997-1 (Ευρωκώδικας 7) σε συνδυασμό με ειδικές συστάσεις.

Η εφαρμογή του EN 1997-1 θα είναι υποχρεωτική σε όλες τις χώρες της Ευρωπαϊκής Ένωσης μετά το Μάρτιο του 2010

όπου λήγει η περίοδος συνύπαρξης με Εθνικούς Κανονισμούς κατά τη διάρκεια της οποίας επιτρέπεται η εναλλακτική εφαρμογή. Κάθε κράτος αναμένεται να έχει εκδόσει το Μάρτιο του 2010 το αντίστοιχο Εθνικό Προσάρτημα, που θα περιλαμβάνει: α) τιμές των επιμέρους συντελεστών ανάλογα με τον επιθυμητό βαθμό ασφάλειας των έργων και β) σειρά κειμένων υποστήριξης, που περιγράφουν τις αποδεκτές μεθόδους υπολογισμού όπως και λοιπές ειδικές απαιτήσεις σχεδιασμού γεωτεχνικών έργων. Το Σχέδιο Εθνικού Προσαρτήματος για την Ελλάδα παρουσιάζεται στις γενικές αρχές του από τον Καββαδά (2006).

Το Εθνικό Προσάρτημα για τη Γερμανία θα εκδοθεί προσεχώς. Οι αποδεκτές μέθοδοι υπολογισμού ορίζονται εκεί στους αντίστοιχους κανονισμούς DIN και σε συστάσεις σχεδιασμού έργων αντιστήριξεων, αγκυρώσεων και βαθιών θεμελιώσεων. Μέχρι την έκδοσή του, ο γεωτεχνικός σχεδιασμός βασίζεται στον κανονισμό DIN 1054:2005-01 που ακολουθεί τις αρχές του EN 1997-1.

Στα επόμενα κεφάλαια παρουσιάζονται οι μέθοδοι υπολογισμού και οι απαιτούμενοι έλεγχοι έναντι των δύο τύπων οριακών καταστάσεων α) οριακές καταστάσεις αστοχίας (ULS) και β) οριακές καταστάσεις λειτουργικότητας (SLS).

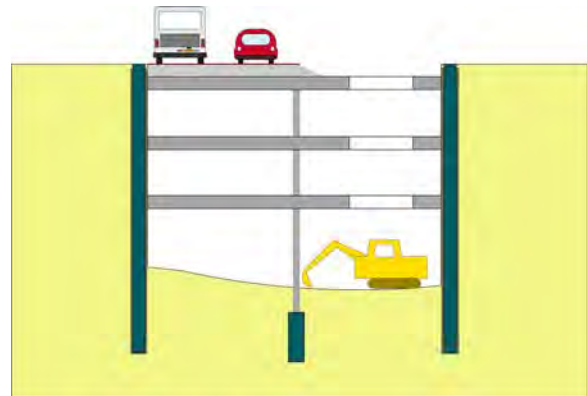
## 2. ΜΕΘΟΔΟΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΗΣ

Σε πρώτη φάση γίνεται η κατασκευή διαφραγματικών τοίχων ή πασσαλοτοίχων από την επιφάνεια. Εν συνεχεία γίνεται εκσκαφή ως τη στάθμη σκυροδέτησης της πλάκας οροφής με αντιστήριξη των παρειών όπου απαιτείται. Ακολουθεί επιτόπου σκυροδέτηση της πλάκας οροφής με τα αναγκαία ανοίγματα πρόσβασης και σύνδεσή της στα περιμετρικά διαφράγματα, επανεπίχωση και πλήρης κυκλοφοριακή αποκατάσταση. Στη συνέχεια πραγματοποιείται σταδιακά η υπόγεια εκσκαφή του σταθμού με την κατασκευή των ενδιάμεσων πλακών και της πλάκας θεμελίωσης. Για τους τοίχους αντιστήριξης είθισται να επιλέγονται διαφραγματικά πετάσματα, που μπορούν να ενσωματωθούν στη μόνιμη κατασκευή σε συνθήκες απουσίας υδροφόρου ορίζοντα. Σε διαφορετική περίπτωση υιοθετείται ως επί το πλείστον σύστημα διπλού κελύφους, όπου η στεγανότητα εξασφαλίζεται από το εσωτερικό κέλυφος. Ωστόσο, υψηλής ποιότητας κατασκευές καθώς και σύγχρονοι μέθοδοι επισκευής ατελειών επιτρέπουν σήμερα την εφαρμογή και συστημάτων ενός κελύφους και σε περιοχές κάτω από τον υδροφόρο ορίζοντα, Bär & Bernardi (1996). Σε αυτές τις περιπτώσεις οι ενδιάμεσες πλάκες και η πλάκα θεμελίωσης συνδέονται με τα διαφράγματα μέσω συνδέσμων επέκτασης οπλισμού. Ενδεικτική φάση εργασιών παρουσιάζεται στο Σχήμα 1.

Ανάλογα με τις διαστάσεις του ορύγματος εφαρμόζονται διάφορες παραλλαγές της μεθόδου, Coßmann et al. (2009). Ένα παράδειγμα εφαρμογής δίνεται στη Φωτογραφία 1 (φωτογραφικό υλικό Bilfinger & Berger AG).

Για μεγάλα πλάτη εκσκαφής τοποθετείται μια ή και περισσότερες σειρές κύριων υποστυλωμάτων ενδιάμεσα των τοίχων αντιστήριξης που δρουν σαν στηρίξεις των οριζόντιων μελών, εξασφαλίζοντας την μεταφορά των φορτίων της ανωδομής στο έδαφος. Αυτά τα υποστυλώματα θεμελιώνονται είτε σε μεμονομένα στοιχεία διαφραγματικών τοίχων (barrettes) ή σε πασσάλους, Baldhauf & Timm (1988), Janke et al. (2006). Στην περίπτωση χαμηλών φορτίων ιδίου βάρους και

υψηλών φορτίων άνωσης στην πλάκα θεμελίωσης μερικά από αυτά τα στοιχεία ενδεχομένως να καταπονούνται σε εφελκυσμό.



Σχήμα 1. Μέθοδος κάλυψης και εκσκαφής  
Figure 1. Top-down construction method



Φωτογραφία 1. Παράδειγμα κατασκευής με τη μέθοδο κάλυψης και εκσκαφής με αντιστήριξη μέσω δακτυλιοειδών-περιμετρικών πλακών

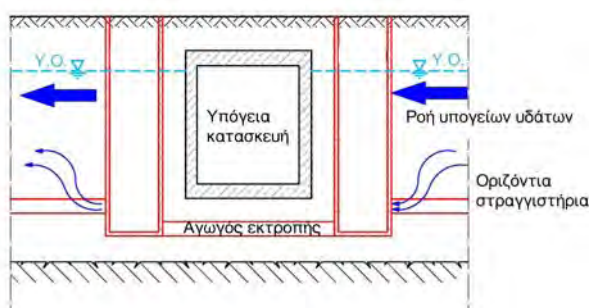
Photograph 1. Example of top-down construction with multi-level excavation support by annular slabs

## 3. ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΤΟΥ ΥΠΟΓΕΙΟΥ ΝΕΡΟΥ

Οι μέθοδοι για την αντιμετώπιση της επίδρασης των υπογείων υδάτων εξαρτώνται από τις εδαφικές συνθήκες. Εάν οι περιμετρικοί τοίχοι είναι πακτωμένοι σε αδιαπέρατη στρώση η αναγκαία αποστράγγιση περιορίζεται στο εσωτερικό του ορύγματος. Σε κάθε άλλη περίπτωση η ταπείνωση του υδροφόρου ορίζοντα επηρεάζει την ευρύτερη περιοχή και αναπόφευκτα προκαλεί καθιζήσεις στα γειτονικά κτίρια. Το πρόβλημα αντιμετωπίζεται είτε με την κατασκευή αδιαπέρατης

στρώσης ενέματος σε κατάλληλο βάθος είτε με την εκτέλεση των εργασιών εκσκαφής υπό πίεση αέρα για την αντιστάθμιση της υδατικής πίεσης, Schwarz & Floss (2000).

Σε περιοχές με υδραυλική κλίση του φυσικού υδροφόρου ορίζοντα, η κατασκευή του κιβωτίου της βαθιάς εκσκαφής παρεμποδίζει την ελεύθερη ροή με αποτέλεσμα την ανεπιθύμητη ανύψωση του νερού στα ανάντη και την ταπείνωση στα κατόντη. Ειδικές κατασκευές μονίμων διόδων εξασφάλισης επικοινωνίας ενδείκνυνται σε αυτές τις περιπτώσεις, που έχουν βέβαια υψηλό αρχικό, αλλά χαμηλό λειτουργικό κόστος, Glitsch & Spang (2008). Παράδειγμα αντιμετώπισης δίνεται στο Σχήμα 2.



Σχήμα 2. Παράδειγμα κατασκευής διόδου για την μόνιμη επικοινωνία υπογείων υδάτων

Figure 2. Example of bypass construction for permanent groundwater communication

Για μεγάλα βάθη εκσκαφής οι δυνάμεις άνωσης είναι σημαντικές, έτσι ώστε για την αποφυγή αστοχίας σε ανύψωση να απαιτείται η αγκύρωση της κατασκευής στα υποκείμενα εδαφικά στρώματα. Μικροπάσσαλοι αποτελούν την πλέον ενδεδειγμένη λύση, καθώς λόγω της μικρής διαμέτρου η ενεργοποίησή τους σε εφελκυσμό αρχίζει από μικρές τιμές παραμόρφωσης ενώ ταυτόχρονα εξασφαλίζουν μία ομοιόμορφη κατανομή / απομείωση των εντατικών μεγεθών της πλάκας θεμελίωσης.

#### 4. ΑΡΧΕΣ ΣΧΕΔΙΑΣΜΟΥ / ΕΛΕΓΧΟΙ

Ο σχεδιασμός έργων αντιστήριξης περιγράφεται στο κεφαλαίο 10 του DIN 1054:2005. Η ταξινόμηση σε Γεωτεχνικές Κατηγορίες, όπως αυτές ορίζονται στο DIN 4020, περιγράφεται στην §10.2. Η ύπαρξη κτιρίων μέσα στη περιοχή του πρίσματος των ενεργητικών ωθήσεων γαιών όπως και η

γεινίαση με κτίρια ευαίσθητα σε παραμορφώσεις / καθιζήσεις απαιτούν την ταξινόμηση στην ανώτατη τάξη, Γεωτεχνική Κατηγορία 3.

Αντιστήριξεις ορυγμάτων αποτελούν προσωρινές κατασκευές και αντιστοιχούν στην Κατηγορία Ασφάλειας SK2 του DIN 1054:2005. Σε συνδυασμό με τις μόνιμες ή τακτικά εμφανιζόμενες μεταβλητές δράσεις EK1 αντιστοιχούν στην προσωρινή κατάσταση σχεδιασμού LF2 (περίπτωση φόρτισης 2). Εξαιρείται ο έλεγχος αντοχής των αντηρίδων που υπολογίζονται με τους επιμέρους συντελεστές της κατάσταση σχεδιασμού LF1. Στην νέα έκδοση του DIN 1054 (που κατά το χρόνο συγγραφής του παρόντος άρθρου βρίσκεται σε μορφή σχεδίου) στην θέση των καταστάσεων σχεδιασμού (περιπτώσεις φόρτισης) LF1 (μόνιμες), LF2 (παροδικές), LF3 (ασυνήθεις) ορίζονται αντίστοιχα οι καταστάσεις σχεδιασμού BS-P (μόνιμες), BS-T (παροδικές), BS-A (τυχηματικές), BS-E (σεισμικές) με τους επιμέρους συντελεστές ασφαλείας για τις διάφορες πιθανές οριακές καταστάσεις αστοχίας.

Τύποι πιθανής αστοχίας αντιστήριξης βαθιάς εκσκαφής κατά EN 1997-1 αφορούν: α) αστοχία στο έδαφος (GEO), β) αστοχία δομικών στοιχείων (STR), γ) απώλεια ισορροπίας λόγω υδραυλικής ανύψωσης (UPL), δ) αστοχία λόγω υδραυλικής κλίσης (HYD). Ο έλεγχος γίνεται μέσω της γενικής σχέσης

$$E_d \leq R_d \quad (1)$$

όπου  $E_d$  και  $R_d$  είναι οι τιμές σχεδιασμού των εντάσεων και αντιδράσεων, αντίστοιχα. Από τους τρεις εναλλακτικούς τρόπους ανάλυσης (design approach - DA) που επιτρέπει ο EN 1997-1 για τον τύπο GEO επιλέχθηκαν στα Εθνικά Προσαρτήματα τόσο της Ελλάδας όσο και της Γερμανίας οι τρόποι ανάλυσης DA-2 (παραλλαγή DA-2\*) και DA-3.

Ο τρόπος DA-2\* αντιστοιχεί στην οριακή κατάσταση GZ 1B του DIN 1054:2005 και GEO-2 του νέου σχεδίου του DIN 1054. Περιλαμβάνει υπολογισμό των χαρακτηριστικών τιμών της έντασης και της αντίστασης με ακόλουθη επιβολή των επιμέρους συντελεστών στο αποτέλεσμα. Στην εξεταζόμενη σε αυτή την εργασία περίπτωση κατασκευής με την μέθοδο κάλυψης και εκσκαφής ο τρόπος ανάλυσης DA-2\* εφαρμόζεται στους ελέγχους:

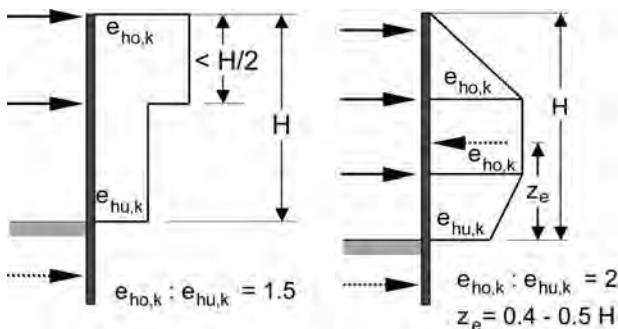
α) προσδιορισμού βάθους έμπηξης, β) επαρκούς παθητικής αντίστασης στον πόδα του τοίχου αντιστήριξης, γ) φέρουσας

ικανότητας των διαφραγματικών τοίχων σε κατακόρυφη φόρτιση, δ) αποφυγής αστοχίας εδάφους στον πυθμένα της εκσκαφής, ε) φέρουσας ικανότητας μεμονωμένων μικρο-πασσάλων αγκύρωσης της πλάκας θεμελίωσης, στ) ανύψωσης πυθμένα.

Ο τρόπος ανάλυσης DA-3 αντιστοιχεί στην οριακή κατάσταση GZ 1C του DIN 1054:2005 και GEO-3 του νέου σχεδίου του DIN 1054 και εφαρμόζεται σε αναλύσεις ολικής ευστάθειας του συστήματος με έλεγχο διατμητικής αστοχίας.

Οι επιμέρους συντελεστές ορίζονται στους αντίστοιχους πίνακες του DIN 1054 και δίδονται στα παρακάτω κεφάλαια κατά την παρουσίαση των ελέγχων.

Για τον υπολογισμό των δράσεων εφαρμόζονται δόκιμες μέθοδοι σε συνδυασμό με συμβατούς κανονισμούς και άλλες υποστηρικτικές συστάσεις. Ειδικά για αντιστηρίξεις βαθιών εκσκαφών εφαρμόζεται για τον υπολογισμό των ωθήσεων γαιών το DIN 4085:2007-10, ενώ για τον καθορισμό ενός ρεαλιστικού αναλυτικού προσομοιώματος με αναδιανομή ωθήσεων λόγω ενδοσιμότητας του πετάσματος ακολουθούνται οι γερμανικές συστάσεις για βαθιές εκσκαφές και αντιστηρίξεις (EAB). Αντιπροσωπευτικά παραδείγματα συμβατών διαγραμμάτων ωθήσεων για συστήματα πολλαπλών στηρίξεων δίνονται στο Σχήμα 3.



Σχήμα 3. Παραδείγματα κατανομής ενεργητικών ωθήσεων γαιών, EAB (2006)  
Figure 3. Examples of active earth pressure distribution, EAB (2006)

Το μέγεθος της ώθησης γαιών εξαρτάται από την πλευρική μετακίνηση, δηλαδή τη ενδοσιμότητα της αντιστήριξης. Η ανάπτυξη ενεργητικών ωθήσεων δεν είναι δυνατή λόγω της δυσκαμψίας των αντηρίδων. Κατά το DIN 4085:2007 αντηρίδες χαρακτηρίζονται σαν “ανυποχώρητα” μέχρι “μερικώς ανυποχώρητα” δομικά στοιχεία. Οι ενεργές ωθήσεις  $E'_{ah}$  επί

του τοίχου υπολογίζονται σαν σταθμισμένος μέσος όρος των ενεργητικών και ουδετέρων ωθήσεων,  $E_a$  και  $E_0$ :

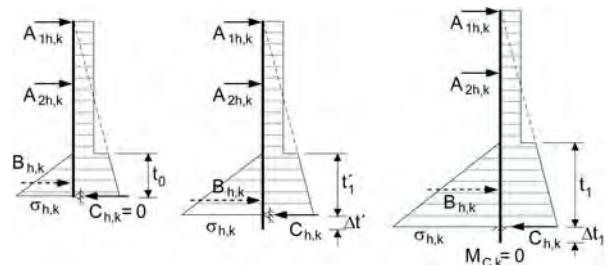
$$E'_{ah} = 0.5 E_{ah} + 0.5 E_0 \quad (2\alpha)$$

$$\text{έως } E'_{ah} = 0.25 E_{ah} + 0.75 E_0 \quad (2\beta)$$

Λεπτομέρειες για τον υπολογισμό των ωθήσεων γαιών δίνονται στο EAB (2006). Για πολύπλοκα συστήματα αντιστήριξης βαθιών εκσκαφών εφαρμόζονται εναλλακτικά αριθμητικές μέθοδοι, π.χ. με πεπερασμένα στοιχεία και κατάλληλες καταστατικές εξισώσεις για το έδαφος, από τα αποτελέσματα των οποίων εκτιμώνται οι αντίστοιχες κατανομές των ωθήσεων γαιών για τις διάφορες φάσεις κατασκευής.

## 5. ΠΡΟΣΔΙΟΡΙΣΜΟΣ ΒΑΘΟΥΣ ΕΜΠΗΞΗΣ

Μετά τον υπολογισμό των κατανομών των ενεργητικών / παθητικών ωθήσεων γαιών επιλέγεται το στατικό σύστημα υπολογισμού με την μορφή στήριξης στον πόδα του τοίχου: άρθρωση / μερική πάκτωση / πλήρης πάκτωση, Σχήμα 4. Στην περίπτωση άρθρωσης ο πόδας του τοίχου στηρίζεται από το έδαφος στην περιοχή παθητικών αντιστάσεων, και η υποκατάστατη δύναμη  $C_{h,k} = 0$ . Για μερική πάκτωση δημιουργείται μέσω της δύναμης  $C_{h,k}$  μια αντίστροφη ροπή που μειώνει την κλίση της γραμμής κάμψης. Όταν με αύξηση του βάθους έμπηξης η ροπή μεγαλώσει αρκετά έτσι ώστε στο θεωρητικό σημείο εφαρμογής της δύναμης  $C_{h,k}$  να προκύπτει κατακόρυφη επαπτομένη, τότε έχουμε πλήρη εδαφομηχανική πάκτωση. Η ιδιαιτερότητά της είναι, ότι από την ανάλυση πρέπει να προκύπτει για τη ροπή πάκτωσης  $M_{C,k} = 0$  (Σχήμα 4).



Σχήμα 4. Συνθήκες στήριξης στον πόδα  
Figure 4. Support conditions at the toe

Η συνήθης διαδικασία ανάλυσης είναι επαναληπτική: Επιλέγεται το βάθος έμπηξης, υπολογίζονται οι χαρακτηριστικές τιμές της δύναμης  $B_{h,k}$  λόγω μόνιμων και προσκαιρών



δράσεων  $B_{Gh,k}$  και  $B_{Qh,k}$  και ακολουθεί ο έλεγχος επαρκούς παθητικής αντίστασης

$$\gamma_G \cdot B_{Gh,k} + \gamma_Q \cdot B_{Qh,k} \leq E_{ph,k} \cdot \gamma_{Ep} \quad (3)$$

όπου  $E_{ph,k}$  η χαρακτηριστική τιμή της συνισταμένης των παθητικών ωθήσεων γαιών, και  $\gamma_G = 1.20$ ,  $\gamma_Q = 1.30$ ,  $\gamma_{Ep} = 1.30$  οι τιμές των επιμέρους συντελεστών των Πινάκων 2 και 3 του DIN 1054:2005 για προσωρινές κατασκευές. Στο νέο σχέδιο του DIN 1054 για παροδικές καταστάσεις σχεδιασμού BS-T ο συντελεστής αντίστασης γαιών  $\gamma_{Ep}$  διατηρεί την τιμή του και μετονομάζεται σε συμφωνία με τον EN 1997-1 σε  $\gamma_{R,e}$ .

Ακολουθώντας την παραπάνω ανάλυση για τις δύο ακραίες περιπτώσεις άρθρωσης ή πλήρους πάκτωσης το ελάχιστο βάθος έμπηξης  $t_0$  ή  $t_1$  στο Σχήμα 5 αντιστοιχεί σε βαθμό εκμετάλλευσης  $\mu = B_{h,d} / E_{ph,d} = 100\%$ .

Εκτός από τον έλεγχο των οριζοντίων δυνάμεων πρέπει να εξασφαλισθεί ότι η παθητική ώθηση γαιών μπορεί να ενεργοποιηθεί στο βαθμό που απαιτείται. Ο αντίστοιχος έλεγχος ορίζεται στο DIN 1054:2005

$$\sum V_{k,i} \geq B_{v,k} = B_{h,k} \cdot \tan \delta_p \quad (4)$$

όπου  $V_{k,i}$  οι χαρακτηριστικές τιμές των κατακόρυφων δράσεων στον φορέα / τοίχο και  $\delta_p$  η γωνία τριβής της διεπιφάνειας μεταξύ δομικής κατασκευής-εδάφους που λαμβάνεται υπόψη στον υπολογισμό των παθητικών ωθήσεων γαιών. Αν ο έλεγχος δεν ικανοποιείται, η γωνία τριβής μειώνεται έτσι ώστε να ισχύει η ισότητα στη σχέση (4).

Περισσότερες λεπτομέρειες δίνονται στο EAB (2006), για παραδείγματα υπολογισμού βλέπε Ziegler (2006).

## 6. ΕΛΕΓΧΟΣ ΒΥΘΙΣΗΣ ΔΙΑΦΡΑΓΜΑΤΙΚΟΥ ΤΟΙΧΟΥ ΣΤΟ ΕΔΑΦΟΣ

Ελέγχεται η δυνατότητα του εδάφους να παραλάβει τα κατακόρυφα φορτία που μεταφέρονται από τα διαφράγματα σε αυτό για την αποφυγή βύθισης του τοίχου. Ο έλεγχος αντιστοιχεί στην οριακή κατάσταση αστοχίας GZ 1B του DIN 1054:2005 ή GEO-2 του νέου σχεδίου DIN 1054. Ο έλεγχος απαιτεί:

$$V_d = \sum V_{d,i} \leq R_d \quad (5)$$

όπου  $V_{d,i}$  οι τιμές σχεδιασμού των κατακόρυφων δράσεων στον τοίχο και  $R_d$  η

τιμή σχεδιασμού της αξονικής αντίστασης του τοίχου. Η  $R_d$  υπολογίζεται με εφαρμογή επιμέρους συντελεστή ασφαλείας  $\gamma_R$  (π.χ. 1.40 για φάση κατασκευής) στην χαρακτηριστική τιμή της αντοχής  $R_k$

$$R_d = R_k / \gamma_R \quad (6)$$

Για τον υπολογισμό του  $R_k$  παρέχονται από τον DIN 1054 δύο δυνατότητες:

$$R_k = R_{b,k} + R_{s,k} = q_{b,k} \cdot A_b + q_{s,k} \cdot A_s \quad (7a)$$

$$R_k = R_{b,k} + R_{s,k} = q_{b,k} \cdot A_b + B_{h,k} \cdot \tan \delta_p \quad (7b)$$

όπου  $A_b$  η διατομή αιχμής,  $q_{b,k}$  η χαρακτηριστική αντοχή στην αιχμή,  $A_s$  η παράπλευρη επιφάνεια και  $q_{s,k}$  η χαρακτηριστική τιμή της πλευρικής τριβής στη εδαφική στρώση.

Όταν η δυνατότητα οριζόντιας μετακίνησης είναι περιορισμένη (π.χ. δύσκαμπτο, πολλαπλό σύστημα αντηρίδων) ο έλεγχος γίνεται κατά αναλογία με την συμπεριφορά πασσάλου (εξίσ. 7β). Οι χαρακτηριστικές τιμές αντοχής  $q_{b,k}$ ,  $q_{s,k}$  εκτιμώνται από τις εμπειρικές σχέσεις του DIN 1054:2005 ή των γερμανικών συστάσεων για πασσάλους EAP (2007).

Για τον υπολογισμό του αξονικού φορτίου λαμβάνονται υπόψη όλα τα μόνιμα και κινητά φορτία της κατασκευής μέχρι τη στιγμή πριν τη σκυροδέτηση της πλάκας θεμελίωσης.

## 7. ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ ΣΕ ΑΝΩΣΗ

Ο έλεγχος αφορά τη συνολική ευστάθεια της βαθιάς εκσκαφής με τα δομικά της στοιχεία έναντι των δυνάμεων άνωσης. Απαιτείται στην περίπτωση μονού κελύφους κατασκευής για την μόνιμη κατάσταση, δηλαδή μετά την σύνδεση της πλάκας θεμελίωσης με τους διαφραγματικούς τοίχους και διακοπή κάθε παρέμβασης στην στάθμη των υπογείων υδάτων. Ο έλεγχος καθορίζεται στο DIN 1054:2005, §11.3, οριακή κατάσταση αστοχίας GZ 1A και αντιστοιχεί στη οριακή κατάσταση UPL του EN 1997-1 και του σχεδίου του νέου DIN 1054. Κατά τον έλεγχο αυτό οι ευνοϊκές δράσεις είναι το σύνολο του βάρους της κατασκευής, συμπεριλαμβανομένου και του ιδίου βάρους των διαφραγματικών τοίχων σε μονολιθικές κατασκευές. Πρέπει να ικανοποιείται η σχέση:

$$A_k \cdot \gamma_{G,dst} \leq G_{k,stab} \cdot \gamma_{G,stab} \quad (8)$$

όπου  $A_k$  η δύναμη άνωσης,  $G_k$  η ευνοϊκή

κατακόρυφη δύναμη (ίδιο βάρος της κατασκευής) και  $\gamma_{G,dst}$  και  $\gamma_{G,stab}$  οι συντελεστές ασφαλείας των αντίστοιχων δράσεων. Για μόνιμες δράσεις  $\gamma_{G,dst} = 1.05$  και  $\gamma_{G,stab} = 0.95$ , βλέπε πίνακα 2, DIN 1054:2005.

Ευνοϊκές πλευρικές τριβές, λόγω της κατακόρυφης συνισταμένης των ενεργητικών ωθήσεων, λαμβάνονται υπόψη αφού πολλαπλασιαστούν με έναν συντελεστή προσομοίωσης (ίσο με 0.8 για μόνιμες καταστάσεις) για κάλυψη αβεβαιοτήτων, μια και η ενεργοποίηση τους απαιτεί ένα βαθμό παραμόρφωσης.

Για να μην είναι δυσανάλογη η συνεισφορά των δυνάμεων τριβής στην εξασφάλιση της ισορροπίας απαιτείται για μόνιμες καταστάσεις ένας επιπλέον έλεγχος, όπου οι δυνάμεις αυτές δεν αγνοούνται αλλά εφαρμόζονται οι μικρότεροι συντελεστές ασφαλείας της κατάστασης σχεδιασμού LF3 (§11.3.2.(3), DIN 1054:2005).

Αν ο παραπάνω έλεγχος στατικής ισορροπίας δεν ικανοποιείται, απαιτείται μόνιμη αγκύρωση της πλάκας θεμελίωσης, συνήθως μέσω μικροπασσάλων.

## 8. ΕΛΕΓΧΟΣ ΣΕ ΑΝΩΣΗ ΣΕ ΠΕΡΙΠΤΩΣΗ ΑΓΚΥΡΩΜΕΝΟΥ ΣΥΣΤΗΜΑΤΟΣ

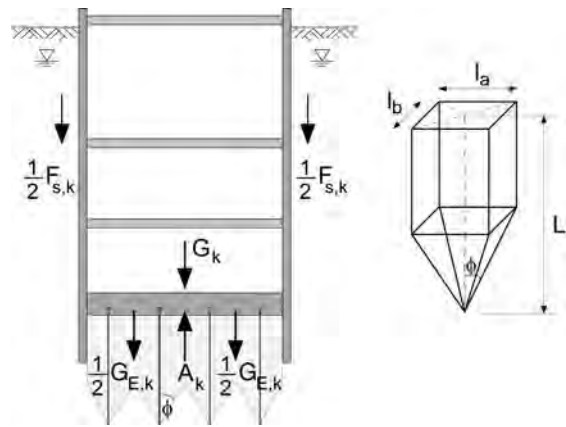
Είθισται η αγκύρωση να γίνεται στην πλάκα θεμελίωσης με μικροπασσάλους. Το σύστημα υπολογίζεται κατά EN 1997-1 και DIN 1054:2005 §11.4 έτσι ώστε να ικανοποιούνται οι έλεγχοι: α) έναντι ανύψωσης του συνολικού συστήματος συμπεριλαμβανομένης της εδαφικής μάζας η οποία περικλείεται μεταξύ των πασσάλων (GZ 1A) και β) αντοχής μεμονωμένου μικροπασσάλου, δηλαδή εξόλκευση και εσωτερική αντοχή (GZ 1B). Από τους δύο αυτούς ελέγχους προκύπτουν το μήκος και οι διαστάσεις του καννάβου των μικροπασσάλων καθώς και η διατομή τους, EAB (2006), Hettler & Morgen (2008).

### 8.1 Έλεγχος συνολικού συστήματος

Ο έλεγχος (α) γίνεται σύμφωνα με το προηγούμενο κεφάλαιο όπως ορίζεται στην § 8.5.4 του DIN 1054:2005, βλέπε Σχήμα 5. Πρέπει να ικανοποιείται η παρακάτω σχέση:

$$A_k \gamma_{G,dst} \leq G_{k,stab} \gamma_{G,stab} + G_{E,k} \gamma_{G,stab} + F_{S,k} \gamma_{G,stab} \quad (9)$$

όπου  $A_k$  η δύναμη άνωσης,  $G_{k,stab}$  η ευνοϊκή κατακόρυφη δύναμη από το ίδιο βάρος της



Σχήμα 5. Εδαφικό πρίσμα αγκύρωσης της πλάκας θεμελίωσης σε ομάδα πασσάλων κατά DIN 1054:2005

Figure 5. Soil wedge of pile-anchored foundation slab according to DIN 1054:2005

κατασκευής,  $G_{E,k}$  το βάρος του εδάφους μεταξύ των μικροπασσάλων που ισούται με:

$$G_{E,k} = \eta \left[ l_a l_b \left( L - \frac{1}{3} \sqrt{l_a^2 + l_b^2} \cot \varphi \right) \right] \eta \cdot \gamma'_k \quad (10)$$

όπου  $\eta$  ο αριθμός των μικροπασσάλων,  $l_a$  και  $l_b$  οι διαστάσεις του καννάβου,  $\varphi$  η γωνία εσωτερικής τριβής του εδάφους,  $\eta$  συντελεστής προσομοίωσης ίσος με 0.80,  $\gamma'$  το υπό άνωση ειδικό βάρος του εδάφους και  $F_{S,k}$  η ευνοϊκές δυνάμεις τριβής στην διεπιφάνεια εδάφους - διαφραγματικών τοίχων. Οι επιμέρους συντελεστές  $\gamma_{G,dst}$  και  $\gamma_{G,stab}$  λαμβάνονται από τον πίνακα 2 του DIN 1054:2005.

Και σε αυτή την περίπτωση απαιτείται ο έλεγχος δυσανάλογης συνεισφοράς των δυνάμεων τριβής όπως περιγράφεται παραπάνω.

### 8.2 Έλεγχος μεμονωμένου πασσάλου

Ο έλεγχος απαιτεί:

$$E_{1Z,d} = E_{1,d} \leq R_{1,d} \quad (11)$$

όπου  $E_{1,d}$  η τιμή σχεδιασμού της εφελκυστικής δύναμης του μικροπασσάλου και  $R_{1,d}$  η τιμή σχεδιασμού της εξωτερικής φέρουσας ικανότητας του πασσάλου για την κατάσταση GZ 1B (GEO-2) ή η αντοχή της διατομής του πασσάλου για την κατάσταση GZ 1B (STR).

Η οριακή εφελκυστική αντίσταση του μεμονωμένου μικροπασσάλου εκτιμάται είτε απευθείας από δοκιμαστικές φορτίσεις, είτε

μέσω εμπειρικών σχέσεων από αποτελέσματα δοκιμών σε εδαφικά δείγματα, π.χ. από τους πίνακες του DIN 1054:2005 ή του ΕΑΡ (2007).

Ο υπολογισμός των εσωτερικών δυνάμεων των μικροπασσάλων μέσα στην ομάδα απαιτεί εκτίμηση της δυσκαμψίας τους. Κρίσιμη σε αυτή την περίπτωση είναι η αλληλεπίδραση του συστήματος μικροπασσάλων - εδάφους - αντιστήριξης που απαιτεί, λόγω της πολυπλοκότητας του συστήματος, κατάλληλα προσομοιώματα και παραμετρικές αναλύσεις ευαισθησίας. Σημαντική για κατασκευές μονού κελύφους είναι η μορφή σύνδεσης μεταξύ πλάκας θεμελίωσης και διαφράγματος.

## 9. ΕΛΕΓΧΟΣ ΑΝΥΨΩΣΗΣ ΠΥΘΜΕΝΑ

Ο έλεγχος τύπου αστοχίας GZ 1B (GEO-2) αφορά την αποφυγή ανύψωσης του πυθμένα εξαιτίας του μηχανισμού αστοχίας που δίδεται στο Σχήμα 6, και είναι κρίσιμος για μαλακά εδάφη. Απαιτείται κατά ΕΑΒ (2006):

$$G_d + P_d \leq R_{v,d} + R_{gr,d} \quad (12)$$

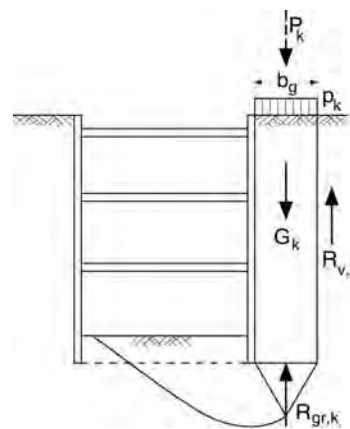
όπου  $G_d$  και  $P_d$  οι τιμές σχεδιασμού του ίδιου βάρους και των εξωτερικών δυνάμεων (επιμέρους συντελεστές  $\gamma_G$  και  $\gamma_Q$ ),  $R_{v,d} = R_{v,k} / \gamma_{Gr}$  η τιμή σχεδιασμού της πλευρικής αντίστασης τριβής και  $R_{gr,d} = R_{gr,k} / \gamma_{Gr}$  η τιμή σχεδιασμού της αντίστασης (φέρουσα ικανότητα) του ιδεατού πεδίου κατά DIN 4017:2006. Το πλάτος της λωρίδας  $b_g$  μεταβάλλεται μέχρι να επιτευχθεί η μέγιστη τιμή του βαθμού εκμετάλλευσης  $\mu = (G_d + P_d) / (R_{v,d} + R_{gr,d})$ . Κατά DIN 1054 για LF2:  $\gamma_G = 1.20$ ,  $\gamma_Q = 1.30$ ,  $\gamma_{Gr} = 1.30$  ( $\gamma_{R,v}$  στο νέο σχέδιο του DIN 1054). Λεπτομέρειες δίδονται στο ΕΑΒ.

## 10. ΕΛΕΓΧΟΣ ΥΔΡΑΥΛΙΚΗΣ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΠΥΘΜΕΝΑ ΕΚΣΚΑΦΗΣ

Σύμφωνα με το DIN 1054:2005 λαμβάνεται υπόψη μία στήλη εδάφους από τη στάθμη εκσκαφής έως τον πόδα του τοίχου αντιστήριξης και πλάτους ίσο με το ήμισυ του ύψους. Γι' αυτό το εδαφικό πρίσμα απαιτείται ισορροπία του ίδιου βάρους  $G_k$  και των δυνάμεων διήθησης  $S_k$ :

$$S'_k \cdot \gamma_H \leq G'_k \cdot \gamma_{G,stab} \quad (13)$$

με τους κατάλληλους συντελεστές ασφαλείας:  $\gamma_{G,stab} = 0.95$ , και  $\gamma_H = 1.30$  για ευνοϊκές και  $\gamma_H = 1.60$  για μη ευνοϊκές συνθήκες εδάφους.



Σχήμα 6. Αστοχία λόγω ανύψωσης πυθμένα  
Figure 6. Failure due to basal heave

Η δυσκολία έγκειται στον υπολογισμό των δυνάμεων διήθησης που μπορεί να γίνει με αριθμητικές μεθόδους ή με προσεγγιστικές σχέσεις. Η παραδοχή μιας μέσης τιμής υδραυλικής κλίσης ανάντη και κατόντη του τοίχου δεν επιτρέπεται. Μια προσεγγιστική λύση εκτίμησης της υδραυλικής κλίσης κατόντη του τοίχου δίνεται από το ΕΑΥ (2004) § E114:

$$i_p = -0.7 \cdot \Delta h / (h_p + \sqrt{h_a \cdot h_p}) \quad (14)$$

όπου  $h_a$  και  $h_p$  το μήκος διήθησης ανάντη και κατόντη του τοίχου και  $\Delta h$  η διαφορά στάθμης ύδατος εντός και εκτός σκάμματος. Η σχέση αυτή προϋποθέτει μεγάλο πλάτος σκάμματος σε σχέση με το ύψος  $\Delta h$ . Η περίπτωση στενών σκαμμάτων απαιτεί ακριβέστερη ανάλυση.

Ακριβείς προσομοιώσεις απαιτούνται και στις γωνίες των ορυγμάτων (τριδιάστατη προσομοίωση) στις οποίες οι δυνάμεις διήθησης αυξάνονται σημαντικά (μέχρι και υπερδιπλασιασμού).

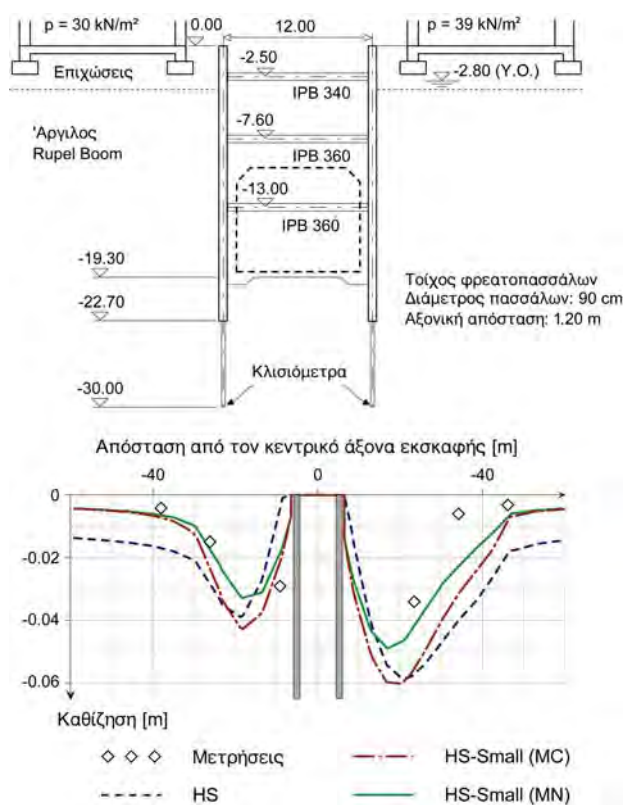
Σε περίπτωση εδαφικού προφίλ με εναλλαγές στρώσεων διαφορετικής διαπερατότητας απαιτείται αναλυτική προσομοίωση για τον καθορισμό των δυνάμεων διήθησης. Ομοίως και σε περιπτώσεις ανισοτροπίας, που οδηγεί γενικώς σε αύξηση του κινδύνου αστοχίας.

## 11. ΕΦΑΡΜΟΓΗ ΑΡΙΘΜΗΤΙΚΩΝ ΜΕΘΟΔΩΝ

Για πολύπλοκα συστήματα αντιστήριξης, μεγάλα βάθη εκσκαφής, γεινίαση κτιρίων ευαίσθητα σε καθιζήσεις ο έλεγχος λειτουργικότητας γίνεται με εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων με κατάλληλα καταστατικά μοντέλα εδάφους. Με τη χρήση καταλλήλων λογισμικών (π.χ. πεπερασμένων στοιχείων) είναι εφικτή η προσομοίωση της αλληλεπί-

δρασης του σκάμματος με το περιβάλλον έδαφος και τις κατασκευές. Η εφαρμογή αριθμητικών μεθόδων επιτρέπει την προσομοίωση των διαφόρων φάσεων κατασκευής και των δυσκαμψιών των επιμέρους δομικών στοιχείων που μετέχουν στο σύστημα. Ανάλογα με την περίπτωση μπορούν να χρησιμοποιηθούν τα προκύπτοντα εντατικά μεγέθη για τη διαστασιολόγηση των δομικών στοιχείων.

Στο Σχήμα 7 δίνεται ένα αντιπροσωπευτικό παράδειγμα ανάστροφης ανάλυσης βαθιάς εκσκαφής με διάφορα καταστατικά μοντέλα και σύγκριση με επιτόπου μετρήσεις, Benz (2007).



Σχήμα 7: Ανάλυση βαθιάς εκσκαφής με πεπερασμένα στοιχεία, Benz (2007)

Figure 7. Finite element analysis of deep excavation, Benz (2007)

## 12. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Οι μέθοδοι υπολογισμού, που περιγράφονται στους κανονισμούς DIN και στις υποστηρικτικές συστάσεις και βασίζονται στη φιλοσοφία του EC-7, καλύπτουν το σύνολο των απαιτούμενων ελέγχων για εξασφάλιση έναντι οριακών καταστάσεων αστοχίας. Για τον έλεγχο οριακής κατάστασης λειτουργικότητας συνιστάται χρήση αριθμητικών προσομοιωμάτων. Η επίδραση του νερού είναι σημαντική και για τους δύο τύπους οριακών καταστάσεων.

## 13. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Bär, H. und Bernardi, W. (1996), "Tiefe Baugrube in Deckelbauweise", Schweizer Ingenieur und Architekt, Nr. 19, S. 385-390.
- Baldauf, H. und Timm, U. (1988), "Betonkonstruktionen im Tiefbau", Ernst & Sohn, Berlin.
- Benz, T. (2007) "Small-strain stiffness of soils and its numerical consequences", Dissertation, Institut für Geotechnik, Universität Stuttgart
- Coßmann, R., Hartmann-Linden, R., Maurischat, U. und Veith, N. (2009). "Düsseldorfer Deckel - eine elegante Baugrubenaussteifung", Bautechnik, 86, S. 75-83.
- Empfehlungen des Arbeitskreises Baugruben EAB, 4. Auflage, Ernst & Sohn, Berlin, 2006
- Empfehlungen des Arbeitskreises Pfähle EA-Pfähle, Ernst & Sohn, Berlin, 2007.
- Empfehlungen des Arbeitsausschusses Ufereinfassungen (EAU), 10. Auflage, Ernst & Sohn, 2004.
- Glitsch, W. und Spang, C. (2008), "City-Tunnel Leipzig – Grundwasserkommunikationsanlagen", Taschenbuch für den Tunnelbau, 2009, S. 39-92.
- Hettler, A. und Morgen, K. (2008), "Nachweis der Sicherheit gegen Aufschwimmen bei Baugruben mit verankerten Betonsohlen", Bautechnik 85, H. 6, S. 374-380.
- Janke, O., Barth, U. und Braun, M. (2006), "FrankfurtHochVier, Spezialtiefbau für die größte innerstädtische Baumaßnahme Deutschlands", Vorträge der Baugrundtagung 2006 in Bremen, DGGT, S. 97-104.
- Καβαδάς, Μ. (2006), "Εφαρμογή στην Ελλάδα των τρόπων ανάλυσης του Ευρωκώδικα 7", 5<sup>ο</sup> Πανελλήνιο Συνέδριο Γεωτεχνικής και Γεωπεριβαλλοντικής Μηχανικής, Ξάνθη, 4, σελ.143-149.
- Schwarz, J. und Floss, R. (2000), "AUDI-Tunnel in Ingolstadt - Deckelbauweise unter Druckluft", Vorträge der Baugrundtagung 2000 in Hannover, DGGT, S. 337-344.
- Ziegler, M. (2006), "Geotechnische Nachweise nach DIN 1054: Einführung mit Beispielen", 2. Auflage, Ernst & Sohn, Berlin.