

# **Αξιολόγηση της ευστάθειας πρανών λιγνιτωρυχείων προς αποκατάσταση για τη δημιουργία λιμνών - Η περίπτωση της λίμνης Most στην Τσεχία**

Slope stability assessment of reclaimed lignite mines for the creation of pit-lakes  
- The case of Lake Most, Czech Republic

KONTOΠΙΔΗΣ, Ο.Ν	Γεωλόγος, Ε.Κ.Ε.Τ.Α. / Υπ. Διδάκτωρ, Ε.Μ.Π.
ΘΕΟΧΑΡΗΣ, Α.Ι	Πολιτικός Μηχανικός, Ε.Κ.Ε.Τ.Α.
ΚΟΥΚΟΥΖΑΣ, Ν.Κ	Γεωλόγος, Διευθυντής Ερευνών, Ε.Κ.Ε.Τ.Α.
BURDA, J.	Technical Deputy Director, Brown Coal Research Institute (VUHU)
ΖΕΥΓΩΛΗΣ, Ι.Ε	Μεταλλειολόγος - Μεταλλουργός Μηχανικός, Αν. Καθηγητής, Ε.Μ.Π.

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ:** Η παρούσα εργασία εξετάζει την ευστάθεια πρανών μιας τεχνητής λίμνης, η οποία δημιουργήθηκε προς αποκατάσταση ενός κλειστού επιφανειακού λιγνιτωρυχείου με μέσο βάθος εκσκαφής 100 m. Για τη γεωτεχνική αξιολόγηση αξιοποιήθηκαν 24 δοκιμές CPTu για την εκτίμηση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής ( $c_u$ ) των στείρων υλικών (κυρίως λεπτόκοκκων) περιμετρικά της λίμνης. Υλοποιήθηκαν εκτεταμένες παραμετρικές αναλύσεις λαμβάνοντας υπόψη τη στρωματογραφία και την πιθανή ύπαρξη ασθενούς ζώνης χαμηλής διατμητικής αντοχής στη βάση των στείρων υλικών. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα, ζητήματα ευστάθειας εμφανίζονται μόνο σε πρανή με ασθενή ζώνη υπό δυσμενή (προς την εκσκαφή) κλίση  $3^\circ$  και ύψος μεγαλύτερο από 60 m και σε πρανή με οριζόντια ασθενή ζώνη και ύψος μεγαλύτερο από 120 m.

**ABSTRACT:** The present study examines the stability of an artificial lake, which was created for the reclamation of a 100 m deep surface lignite mine. For the geotechnical evaluation, 24 CPTu tests were utilized to estimate the undrained shear strength ( $c_u$ ) of the surrounding, mainly fine-grained, spoil materials. Comprehensive parametric analyses were conducted, taking into account the stratigraphy and the possible presence of a weak zone (of low shear strength) at the base of the spoil materials. Based on the results, stability issues are observed only in slopes with an inclined weak zone (towards the excavation) of  $3^\circ$  and a height greater than 60 m, as well as in slopes with a horizontal weak zone and a height greater than 120 m.

## **1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Κατά τη διάρκεια των τελευταίων δεκαετιών ο άνθρακας (και στη μορφή του λιγνίτη) αποτέλεσε κύρια πρώτη ύλη για την παραγωγή ηλεκτρικής ενέργειας. Οι κορυφαίες ευρωπαϊκές χώρες παραγωγής περιλαμβάνουν τη Γερμανία, την Τσεχία, την Πολωνία και την Ελλάδα (BGR, 2014, Euracoal, 2017, ΕΥ, 2014). Λόγω της κλιματικής κρίσης τα λιγνιτωρυχεία έχουν πλέον εισέλθει σε μία τελική φάση στην Ευρώπη και παγκοσμίως, οδεύοντας προς την απολιγνιτοποίηση. Καθώς η μετάβαση στη μεταλιγνιτική εποχή βρίσκεται σε εξέλιξη, η επιλογή των χρήσεων γης μετά το κλείσιμο των ορυχείων είναι μια κρίσιμη απόφαση, και πρέπει προφανώς να είναι σύμφωνη με τις προσδοκίες των τοπικών κοινωνιών και με τις αρχές της βιώσιμης ανάπτυξης (Pavlouidakis et al., 2009).

Μία από τις πιο κοινές πρακτικές αποκατάστασης ενός ορυχείου είναι ο σχηματισμός λίμνης εντός της εκσκαφής του. Η δημιουργία των λιμνών μπορεί να γίνει είτε τεχνητά είτε φυσικά

μέσω υδρολογικών διεργασιών, όπως η βροχόπτωση ή η διείσδυση υπόγειων υδάτων. Οι λίμνες προσφέρουν στις τοπικές κοινωνίες κοινωνικά, ψυχαγωγικά, οικολογικά και οικονομικά οφέλη με τον εξωραϊσμό και την εκ νέου βλάστηση, με τη δημιουργία υδρόβιας ζωής και τη διατήρηση της ποιότητας του νερού. Ωστόσο, η δημιουργία λιμνών σε λιγνιτωρυχεία ενδέχεται να προκαλέσει αστάθειες και φαινόμενα κατολισθήσεων, επιφέροντας κοινωνικές και οικονομικές συνέπειες (Zevgolis et al., 2019). Η ανύψωση του υδροφόρου ορίζοντα κατά τη διάρκεια της πλημμύρας επηρεάζει την ευστάθεια των πρανών αυξάνοντας τις πιέσεις του νερού των πόρων του υπό βύθιση εδάφους. Ωστόσο, η αύξηση του υδάτινου σώματος μέσα στην ανοικτή εκσκαφή λειτουργεί επίσης ως υποστηρικτική δύναμη και η δημιουργία λίμνης έχει αναφερθεί ότι βελτιώνει την ευστάθεια των πρανών καθώς αυξάνεται το ύψος της λίμνης (Kontopidis et al., 2022).

Ένα επιπλέον στοιχείο που επηρεάζει την ευστάθεια των πρανών των λιγνιτωρυχείων είναι η ύπαρξη στειρών υλικών από τις εκσκαφές. Η εξόρυξη του λιγνίτη και γενικότερα των ορυκτών ανθράκων είναι δραστηριότητα έντονα συνδεδεμένη με την παραγωγή εξορυκτικών αποβλήτων. Η επιφανειακή εκμετάλλευση λιγνίτη απαιτεί την εξόρυξη, μεταφορά και απόθεση των υπερκείμενων ενδιάμεσων του κοιτάσματος εδαφικών στρώσεων που καλούνται άγονα ή στείρα (spoils) υλικά εξόρυξης. Σύμφωνα με εκτιμήσεις οι σωροί (αναχώματα) από στείρα υλικά φτάνουν τα 1,45 Gt σε ετήσια βάση παγκοσμίως (Bian et al., 2012). Η απόθεση των στειρών γίνεται κυρίως σε περιοχές όπου έχει ολοκληρωθεί η φάση εξόρυξης, ώστε να υπάρχει η δυνατότητα αποκατάστασης των εξοφλημένων περιοχών με στόχο την ελάχιστη δυνατή περιβαλλοντική επίπτωση κατά τη μετάβαση στη μεταλιγνιτική εποχή. Η μεταβλητότητα των χαρακτηριστικών τους και η απουσία ορθών πρακτικών απόθεσης τους, έχουν ως αποτέλεσμα την εμφάνιση γεωτεχνικών προβλημάτων, μεταξύ άλλων και ζητημάτων ευστάθειας πρανών, τα οποία είναι αναγκαίο να διερευνώνται τόσο κατά τη φάση απόθεσης όσο και κατά το στάδιο αποκατάστασης της περιοχής.

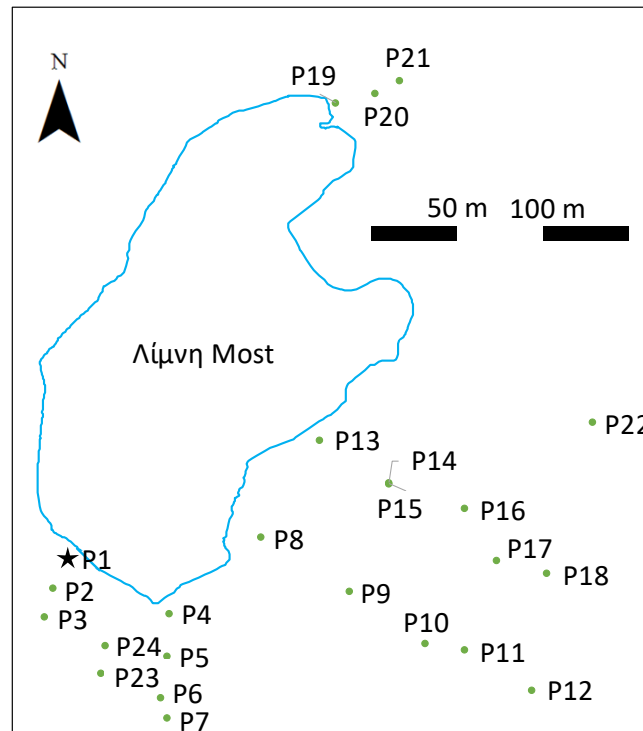
Η παρούσα εργασία πραγματεύεται την αξιολόγηση θεμάτων ευστάθειας στην περιοχή της τεχνητής λίμνης Most στην Τσεχία, η οποία σχηματίστηκε σε ένα πρώην επιφανειακό λιγνιτωρυχείο με μέσο βάθος εκσκαφής 100 m. Στα σημερινά όρια της λίμνης αποτέθηκαν κατά τη λειτουργία του ορυχείου στείρα υλικά σχηματίζοντας τεχνητά πρανή. Λόγω της αβεβαιότητας για τις ιδιότητες των στειρών υλικών, εκτελέστηκαν περιμετρικά της λίμνης 24 δοκιμές διείσδυσης κώνου με μέτρηση της πίεσης των πόρων (CPTu) σε βάθη έως 50 m κυρίως εντός των στειρών υλικών. Τα πρωτογενή δεδομένα των δοκιμών χρησιμοποιήθηκαν για την αξιολόγηση των στειρών υλικών και την εκτίμηση της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής ( $c_u$ ) βάσει εμπειρικών συσχετίσεων. Η ανάλυση ευστάθειας έγινε με τη μέθοδο οριακής ισορροπίας με τη χρήση παραμετρικών αναλύσεων οι οποίες σε μεγάλο βαθμό καλύπτουν το σύνολο των πρανών της λίμνης.

## 2. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ CPTu ΣΤΗ ΛΙΜΝΗ MOST

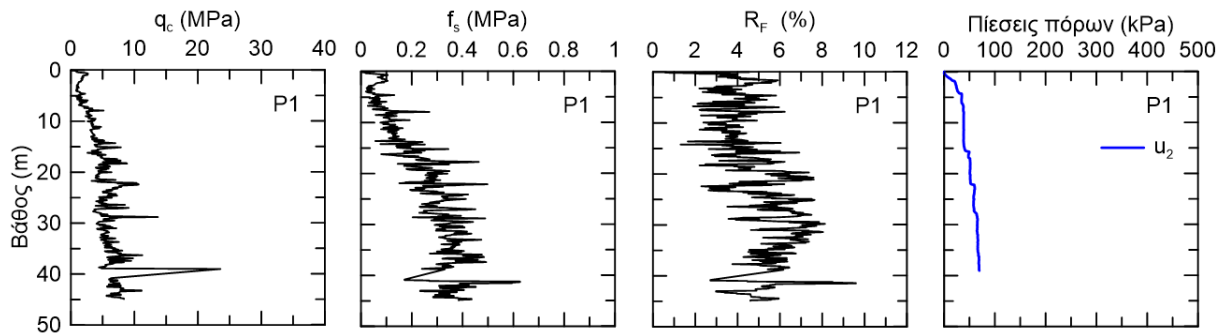
Το 2020, και αφού η τεχνητή λίμνη είχε ολοκληρωθεί πέντε χρόνια νωρίτερα, εκτελέστηκαν περιμετρικά της λίμνης Most 24 επιτόπου δοκιμές διείσδυσης κώνου με μέτρηση των πιέσεων πόρων, CPTu, σε βάθη έως 50 m. Οι δοκιμές αυτές στόχευαν στον καλύτερο χαρακτηρισμό κυρίως των αποθέσεων στειρών υλικών. Στο Σχήμα 1 απεικονίζεται ένα σκαρίφημα της λίμνης Most (κάτοψη) με τις σχετικές θέσεις των δοκιμών CPTu. Με αστέρι επισημαίνεται η δοκιμή P1 της οποίας τα πρωτογενή αποτελέσματα παρατίθενται ενδεικτικά στο Σχήμα 2.

Τα δεδομένα από τις μετρήσεις CPTu αποτελούνται από την αντίσταση αιχμής κώνου ( $q_c$ ), την πλευρική τριβή ( $f_s$ ), τον λόγο τριβών ( $R_F$ ) και την πίεση του νερού των πόρων ( $u_2$ ). Για τα αποτελέσματα που παρουσιάζονται στο Σχήμα 2, η αντίσταση αιχμής του κώνου ( $q_c$ ) παρατηρείται ότι αυξάνει με το βάθος ομαλά από 2 MPa στην επιφάνεια έως κάτω από 10 MPa στο βάθος των 45 m. Τοπικές εξάρσεις, όπως αυτές που εμφανίζονται στα βάθη των 28 m και 40 m, πιθανόν να οφείλονται στη παρουσία μεμονωμένων κροκάλων οι οποίες δυσχεραίνουν στιγμιαία την προώθηση του κώνου. Η πλευρική τριβή ( $f_s$ ) παρουσιάζει παρόμοια αύξηση από 0,1 MPa επιφανειακά έως 0,35 MPa στο βάθος των 45 m. Στα 40 m, δηλαδή στο ίδιο βάθος με την εμφάνιση της μεγαλύτερης τοπικής εξάρσης του  $q_c$ , παρατηρείται μία σχετικά απότομη μείωση της τιμής του  $f_s$  στα 0,15 MPa, γεγονός που ισχυροποιεί την άποψη περί τοπικής

παρουσίας κροκάλων. Ο λόγος τριβής ( $R_F$ ) παρουσιάζει διακύμανση από 2% έως 6%. Στα πρώτα 20 m η μέση τιμή είναι περίπου 3,5% ενώ από τα 20 m έως τα 45 m η μέση τιμή αυξάνεται στο 5%. Η πίεση του νερού των πόρων ( $u_2$ ) εμφανίζει μικρό ρυθμό αύξησης έως τα 70 kPa στο βάθος των 45 m χωρίς να παρατηρούνται τοπικές εξάρσεις.



Σχήμα 1. Σκαρίφημα της λίμνης Most με τις θέσεις των δοκιμών CPTu.  
Figure 1. Overview of the lake Most with the locations of the CPTu tests.



Σχήμα 2. Μετρήσεις των  $q_c$ ,  $f_s$ ,  $R_F$  και  $u_2$  με το βάθος για τη δοκιμή P1.  
Figure 2. Measurements of  $q_c$ ,  $f_s$ ,  $R_F$ , and  $u_2$  with depth for test P1.

Η μέτρηση της πίεσης των πόρων επιτρέπει τη βελτιωμένη ερμηνεία των εδαφικών συνθηκών. Συγκεκριμένα, έχουν προταθεί διάφορα διαγράμματα προσδιορισμού των εδαφικών στρωμάτων μέσω CPTu με τη συνδυασμένη χρήση της διορθωμένης ως προς τις τάσεις των υπερκειμένων ολική αντίσταση αιχμής ( $Q_t$ ), της διορθωμένης ως προς τις τάσεις των υπερκειμένων πλευρική τριβής ( $F_r$ ), και της πίεσης πόρων,  $u_2$ . Στην παρούσα εργασία χρησιμοποιήθηκε ο ακόλουθος δείκτης  $I_c$  (Robertson, 2009, Mayne, 2014):

$$I_c = ((3,47 - \log Q_t)^2 + (\log F_r + 1,22)^2)^{0.5} \quad (1)$$

Το Σχήμα 3 παρουσιάζει τη μεταβολή του δείκτη  $I_c$  συναρτήσει του βάθους για τη δοκιμή P1 που ενδεικτικά παρουσιάστηκε και στο Σχήμα 2. Από 0 m έως 20 m ο  $I_c$  κυμαίνεται από περίπου 2,4 έως 2,95, τιμές που αντιστοιχούν σε αμμώδη και ιλυώδη μίγματα. Από 20 m έως

40 m ο  $I_c$  γίνεται μεγαλύτερος από 2,95 και το έδαφος γίνεται αργιλικό. Γενικώς με βάση τα 24 CPTu, το είδος των εδαφών κινείται κατά κύριο λόγο σε λεπτόκκοκα εδάφη, δηλαδή ιλύες, ιλυώδη αργίλους και αργίλους.

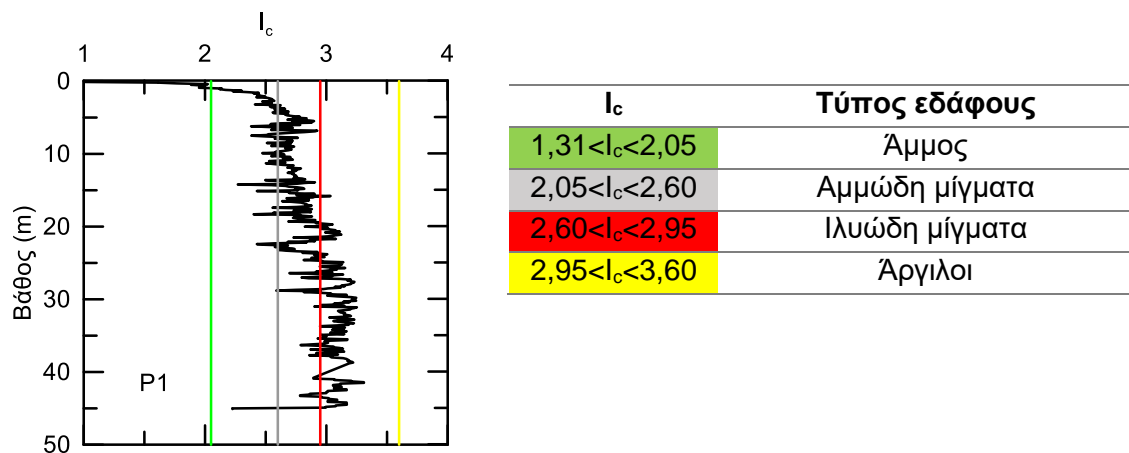
Η αστράγγιστη διατμητική αντοχή ( $c_u$ ) υπολογίζεται βάσει των τιμών της αντίστασης αιχμής κώνου διορθωμένη ως προς τις πιέσεις πόρων ( $q_t$ ):

$$c_u = \frac{q_t - \sigma_{vo}}{N_{kt}} \quad (2)$$

όπου  $N_{kt}$  συντελεστής που λαμβάνει τιμές 10 έως 18. Στο πλαίσιο της παρούσας ανάλυσης χρησιμοποιήθηκε η μέση τιμή  $N_{kt}=14$  (Robertson, 2009). Αρχικά, πραγματοποιήθηκε ανάλυση παλινδρόμησης του πληθυσμού  $q_t$  όπου προέκυψε εξίσωση γραμμής τάσης:

$$q_t = 0,12D + 1,27 \text{ (σε MPa)} \quad (3)$$

όπου D το βάθος.



Σχήμα 3. Δείκτης  $I_c$  συνάρτησης του βάθους για τη δοκιμή P1.

Figure 3. Index  $I_c$  as a function of depth for test P1.

Στη συνέχεια για τον υπολογισμό της συνάρτησης της αστράγγιστης διατμητικής αντοχής ( $c_u$ ) χρησιμοποιήθηκε η Εξίσωση (2). Για τον υπολογισμό των ολικών τάσεων  $\sigma_{vo}$  θεωρήθηκε σταθερή τιμή φαινόμενου βάρους  $\gamma=18,2 \text{ kN/m}^3$  ως η μέση τιμή του πληθυσμού. Συνεπώς, η συνάρτηση μέσης τιμής ( $c_u$ ) προκύπτει:

$$c_u = 7,27D + 90,7 \text{ (} c_u \text{ σε kPa, D σε m)} \quad (4)$$

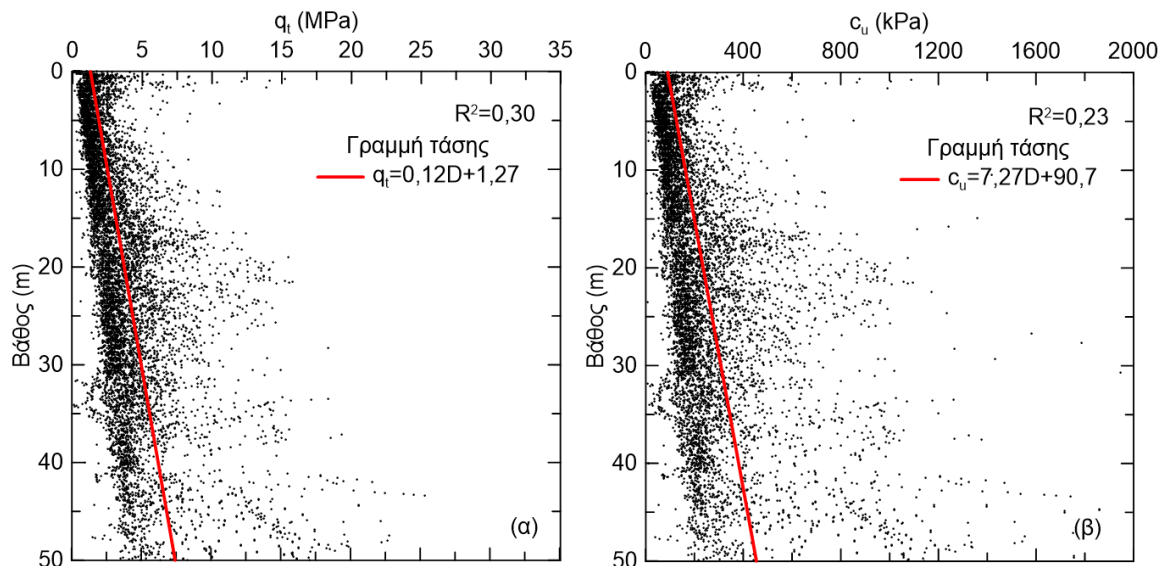
Στο Σχήμα 4 απεικονίζονται τα διαγράμματα και οι εξισώσεις μεταβολής του  $q_t$  και του  $c_u$  με το βάθος. Οι συντελεστές συσχέτισης  $R^2$  έχουν σχετικά μεγάλες τιμές (0,30 και 0,23, αντίστοιχα), αντανakλώντας τη μεγάλη διασπορά των τιμών.

Για να υπολογιστούν τιμές σχεδιασμού για την αστράγγιστη διατμητική αντοχή, εφαρμόστηκε ο Ευρωκώδικας 7 (EC7) για τον υπολογισμό της συνάρτησης σχεδιασμού  $c_{u,d}$ . Αρχικά, υπολογίζεται η συνάρτηση χαρακτηριστικής τιμής ( $c_{u,k}$ ) ως  $c_{u,k} = c_u - 0,5\sigma$ , όπου  $\sigma$  η τυπική απόκλιση με  $\sigma_{cu}=107,9$ . Συνεπώς, η συνάρτηση της χαρακτηριστικής τιμής προκύπτει:

$$c_{u,k} = 7,27D + 32,48 \text{ (σε kPa, D σε m)} \quad (5)$$

Η συνάρτηση της τιμής σχεδιασμού προκύπτει διαιρώντας την εξίσωση  $c_{u,k}=7,27D+32,48$  με τον συντελεστή απομείωσης  $\gamma_M=1,4$  καταλήγοντας:

$$c_{u,d} = 5,71D + 23,2 \text{ (σε kPa, D σε m)} \quad (6)$$



Σχήμα 4. Μεταβολή του (α)  $q_t$  και (β)  $c_u$  συναρτήσει του βάθους.  
Figure 4. Variation of (α)  $q_t$  and (β)  $c_u$  as a function of depth.

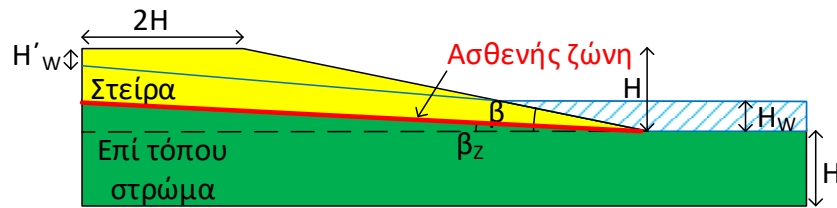
### 3. ΑΝΑΛΥΣΗ ΕΥΣΤΑΘΕΙΑΣ ΠΡΑΝΩΝ ΣΤΗ ΛΙΜΝΗ MOST

Οι αναλύσεις ευστάθειας πρανών πραγματοποιήθηκαν με το λογισμικό Slide2 (Rocscience, 2019). Η αντοχή των στείρων υλικών καθορίζεται από τη συνάρτηση της τιμής σχεδιασμού  $c_{u,d}=5,71D+23,2$  (Εξ. 6). Στο Σχήμα 5 απεικονίζεται ένα τυπικό προσομοίωμα πρανού που σχεδιάστηκε για την ανάλυση ευστάθειας. Συγκεκριμένα, οι αναλύσεις γίνονται σε διστρωματικά πρανή ύψους (H) 25 - 125 m και σταθερής κλίσης (β)  $11^\circ$ , όπου ένα στρώμα αργίλου με ιδιότητες  $\phi'=9,5^\circ$  και  $c'=57$  kPa υπόκειται των στείρων.

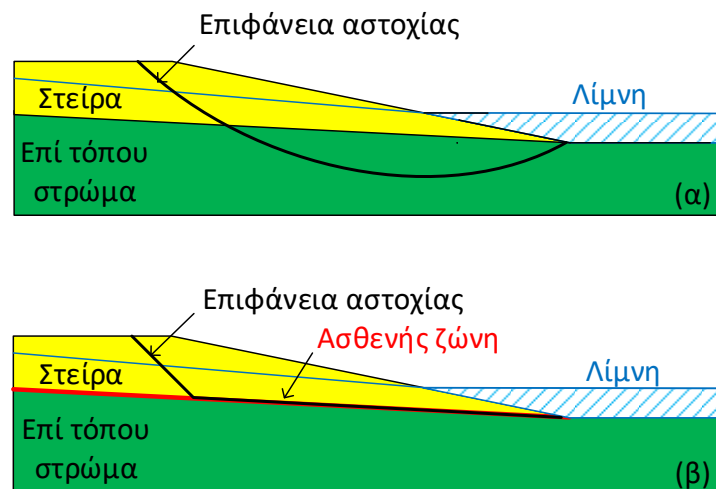
Στη βάση των στείρων δύναται να υπάρχει ένα οριζόντιο ή υπό κλίση  $3^\circ$  στρώμα μικρού πάχους το οποίο χαρακτηρίζεται από χαμηλή αντοχή, το οποίο θα καλείται ασθενής ζώνη (weak zone) ((π.χ.  $\phi'=6^\circ$ ,  $c'=6$  kPa, Mikroutsikos et al., 2021). Αυτή η ασθενής ζώνη προσομοιώθηκε με μια συνθήκη διεπιφάνειας ασθενούς ζώνης (που προτείνεται στην ανάλυση οριακής ισορροπίας για την προσομοίωση στρωμάτων μικρού πάχους ή διεπιφανειών με χαμηλή αντοχή) μέσω εργαλείων του λογισμικού (Rocscience, 2023). Στις αναλύσεις χρησιμοποιήθηκε η προηγμένη μέθοδος αναζήτησης επιφάνειας αστοχίας "cuckoo" για μη κυκλικές επιφάνειες, η οποία δεν απαιτεί τον εξαρχής προσδιορισμό της επιφάνειας, αλλά την προσδιορίζει μέσω γραμμικών τμημάτων και βελτιστοποίησης των λύσεων. Για τον υπολογισμό του συντελεστή ασφάλειας χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος Spencer, η οποία ικανοποιεί τις εξισώσεις ισορροπίας τόσο δυνάμεων όσο και ροπών. Το κριτήριο αστοχίας Mohr-Coulomb χρησιμοποιήθηκε για τον καθορισμό της διατμητικής αντοχής του αργιλικού στρώματος και της ασθενούς ζώνης. Η λίμνη θεωρήθηκε ότι έχει πληρωθεί περίπου κατά το  $1/3$  (οπότε ο λόγος της στάθμης της επιφάνειας της λίμνης ( $H_w$ ) προς το ύψος του πρανού είναι  $H_w/H=0,3$ ) ως η πλέον κρίσιμη κατάσταση για την ευστάθεια όπου και ο συντελεστής ασφαλείας (SF) γίνεται ελάχιστος (Zevgolis et al., 2021). Τέλος, θεωρήθηκαν συνθήκες μόνιμης ροής με τον υδροφόρο ορίζοντα να ορίζεται από  $H'_w=0,1H$  στο αριστερό όριο του πρανού και το ύψος της λίμνης δεξιά.

Στο Σχήμα 6 απεικονίζονται οι δύο μορφές των επιφανειών αστοχίας που προκύπτουν. Η επιφάνεια αστοχίας είναι κυκλική σχεδόν κυκλική σε πρανή χωρίς ασθενή ζώνη και διγραμμική σε πρανή με παρουσία αυτής. Στο Σχήμα 7 απεικονίζεται η μεταβολή του συντελεστή ασφαλείας (SF) συναρτήσει του ύψους του πρανού θεωρώντας ότι η αντοχή των στείρων υλικών αυξάνεται γραμμικά σύμφωνα με τη συνάρτηση σχεδιασμού  $c_{u,d}=5,71D+23,2$ . Έτσι, στην περίπτωση πρανού χωρίς ασθενή ζώνη δεν υφίσταται αστοχία καθώς ο SF λαμβάνει ελάχιστη τιμή 1,15. Παρατηρείται, ωστόσο, απότομη μείωση του SF για  $H>50$  m. Στην περίπτωση παρουσίας ασθενούς ζώνης υπό κλίση  $3^\circ$  ισχύει  $SF<1$  για  $H>60$  m, ενώ για οριζόντια ασθενή ζώνη  $SF=1$  στο όριο του ύψους  $H=125$  m. Η μεταβολή του SF είναι συνολικά

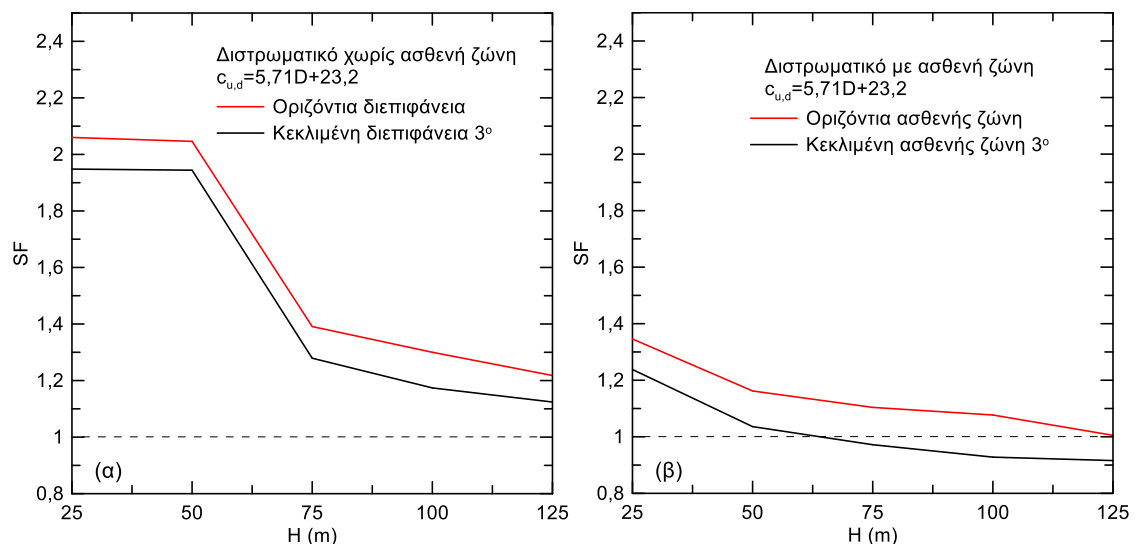
πιο ομαλή σε σχέση με το πρανές χωρίς ασθενή ζώνη με γενικώς πολύ χαμηλότερους συντελεστές, και  $SF < 1,4$  για όλα τα ύψη και  $SF < 1,2$  για πάνω από 50 m.



Σχήμα 5. Διστρωματικό προσομοίωμα πρανού με κεκλιμένη ασθενή ζώνη.  
Figure 5. Two-layered slope model with inclined weak zone.



Σχήμα 6. Επιφάνεια αστοχίας (α) κυκλική σε πρανές με απουσία ασθενούς ζώνης και (β) διγραμμική σε πρανές με ασθενή ζώνη  
Figure 6. Failure surface (a) circular for slope without weak zone and (b) bi-linear for slope with weak zone.



Σχήμα 7. Συντελεστής ασφαλείας SF συναρτήσεως του ύψους του πρανού για διστρωματικό πρανές (α) χωρίς ασθενή ζώνη και (β) με ασθενή ζώνη.  
Figure 7. Safety Factor SF with slope height for a two-layered slope (a) without a weak zone and (b) with a weak zone.

#### 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η παρούσα εργασία πραγματοποιείται την ευστάθεια των πρανών στην περιοχή της τεχνητής λίμνης Most στην Τσεχία, η οποία σχηματίστηκε σε ένα πρώην επιφανειακό λιγνιτωρυχείο με μέσο βάθος εκσκαφής 100 m. Βασικό στοιχείο των πρανών και της ευστάθειας τους είναι η ύπαρξη στείων υλικών από τις εκσκαφές των λιγνιτωρυχείων. Για τη διερεύνηση των χαρακτηριστικών των στείων υλικών περιμετρικά της λίμνης εκτελέστηκαν 24 δοκιμές διείσδυσης κώνου με μέτρηση της πίεσης των πόρων (CPTu) σε βάθη έως 50 m. Η κάθε δοκιμή παρήγαγε διαφορετικά κατά βάθος πρωτογενή αποτελέσματα επιβεβαιώνοντας την αβεβαιότητα και τη χωρική μεταβλητότητα ως κύρια χαρακτηριστικά της φύσης των στείων υλικών. Μέσω του εμπειρικού δείκτη εδάφους τα σείρα χαρακτηρίζονται κυρίως ως λεπτόκοκκα υλικά, ιλύες, ιλυώδη άργιλοι και άργιλοι. Λόγω της παρουσίας αρκετών τύπων εδαφών σε τυχαία χωρικά διάταξη δεν ήταν δυνατός ο εντοπισμός μίας διακριτής στρωματογραφίας. Κατά συνέπεια έγινε η παραδοχή ενός ενιαίου εδαφικού υλικού με σημαντική ετερογένεια.

Από την αξιολόγηση των αποτελεσμάτων των CPTu προέκυψε ότι η αντοχή  $c_u$  αυξάνεται συναρτήσει του βάθους. Η αντοχή  $c_u$  υπολογίστηκε μέσω εμπειρικών συσχετίσεων από την ολική αντίσταση αιχμής κώνου ( $q_t$ ). Ύστερα από ανάλυση παλινδρόμησης του  $q_t$  προέκυψε η συνάρτηση μεταβολής με το βάθος  $D$   $q_t = 0,12D + 1,27$  (σε MPa). Από τη συνάρτηση μεταβολής του  $q_t$  προέκυψε η συνάρτηση μεταβολής του  $c_u = 7,27D + 90,7$  (σε kPa) και κατ' επέκταση η εξίσωση σχεδιασμού  $c_{u,d} = 5,71D + 23,2$  (σε kPa).

Οι αναλύσεις ευστάθειας πραγματοποιήθηκαν σε εξιδανικευμένο προσομοίωμα δύο στρωμάτων με τα σείρα υλικά να βρίσκονται πάνω από το επί τόπου έδαφος. Ανάμεσα στο στρώμα των στείων και τη βάση εξετάστηκε η επίδραση ύπαρξης μιας ασθενούς ζώνης χαμηλής αντοχής που εμφανίζεται στις παρατηρήσεις για την περιοχή. Προκύπτει ότι η επιφάνεια αστοχίας είναι κυκλική σε πρανή χωρίς ασθενή ζώνη και μη κυκλική, κυρίως διγραμμική, σε πρανή με παρουσία αυτής. Σε πρανή χωρίς ασθενή ζώνη η επιφάνεια αστοχίας διαπερνά τη διεπιφάνεια στείων και του υποκείμενου επί τόπου αργιλικού στρώματος, ενώ στη περίπτωση παρουσίας της διέρχεται κατά μήκος της διεπιφάνειας. Ο συντελεστής ασφαλείας συναρτήσει του ύψους του πρανούς μειώνεται σημαντικά με την αύξηση του ύψους. Σημαντικά ζητήματα ευστάθειας εμφανίζονται μόνο σε πρανή όπου υπάρχει η ασθενής ζώνη, με ύψος μεγαλύτερο από 60 m όταν αυτή είναι υπό κλίση  $3^\circ$  και με ύψος μεγαλύτερο από 120 m όταν αυτή είναι οριζόντια.

#### ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Η έρευνα για την παρούσα εργασία έχει χρηματοδοτηθεί από το Research Fund for Coal and Steel (RFCS) της Ευρωπαϊκής Ένωσης, στο πλαίσιο του έργου RAFF με αριθμό G.A. 847299 και του έργου POMHAZ με αριθμό G.A. 101057326.

#### 5. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- BGR 2014. Energy study 2014: reserves, resources and availability of energy resources, Hanover. Federal Institute for Geosciences and Natural Resources (BGR).
- Bian, Z., Miao, X., Lei, S., Chen, S.-E., Wang, W. & Struthers, S. 2012. The challenges of reusing mining and mineral-processing wastes. *Science*, 337, 702-703.
- Euracoal 2017. Annual Report. European Association for Coal and Lignite, Brussels, Belgium.
- EY 2014. European lignite mines benchmarking—sanitized report.
- Kontopidis, O. N., Theocharis, A. I., Koukuzas, N. C. & Zevgolits, I. E. 2022. Stability of open pit lignite excavations during flooding. Comparison of a simplified analytical tool with limit equilibrium computational analysis. *Górnictwo Odkrywkowe*, 63.
- Mayne, P. Interpretation of geotechnical parameters from seismic piezocone tests. *Proceedings, 3rd international symposium on cone penetration testing*, 2014. 47-73.

- Mikroutsikos, A., Theocharis, A., Koukouzas, N. & Zevgolis, I. 2021. Slope stability of deep surface coal mines in the presence of a weak zone. *Geomechanics and Geophysics for Geo-energy and Geo-resources*, 7, 1-17.
- Pavlouidakis, F., Galetakis, M. & Roumpos, C. 2009. A spatial decision support system for the optimal environmental reclamation of open-pit coal mines in Greece. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 291-303.
- Robertson, P. K. 2009. Interpretation of cone penetration tests—a unified approach. *Canadian geotechnical journal*, 46, 1337-1355.
- Rocscience 2019. Slide2 Version 7.0 - 2D Limit Equilibrium Slope Stability Analysis. [www.rocscience.com](http://www.rocscience.com), Toronto, Ontario, Canada.
- Rocscience 2023. Slide2 User Guide. Documentation/Slide model/Boundaries/Weak Layer Overview. <https://www.rocscience.com/help/slide2/documentation/slide-model/boundaries/weak-layer/weak-layer-overview>. Accessed on 2-6-2023. Toronto, Ontario, Canada.
- Zevgolis, I., Mikroutsikos, A., Theocharis A. & Koukouzas, N. 2021. The effect of water filling on slope stability of open pits: A numerical investigation. *The Evolution of Geotech-25 Years of Innovation*. CRC Press.
- Zevgolis, I. E., Deliveris, A. V. & Koukouzas, N. C. 2019. Slope failure incidents and other stability concerns in surface lignite mines in Greece. *Journal of Sustainable Mining*, 18, 182-197.