

# Εδαφοτεχνική Έρευνα με Γεωχημικό Έλεγχο Ρύπανσης: Εφαρμογή σε Περιοχές Οικιστικής Ανάπτυξης

Geotechnical Research in Addition with a Geochemical Site Assessment in Urban Areas.

ΖΩΤΙΑΔΗΣ ΒΑΣΙΛΗΣ, Δρ. Γεωλόγος\_Γεωχημικός, Εδαφομηχανική Α.Τ.Ε.

ΚΟΛΛΙΟΣ ΑΝΑΣΤΑΣΙΟΣ, Δρ. Πολ. Μηχανικός, Εδαφομηχανική Α.Τ.Ε.

**ΠΕΡΙΛΗΨΗ :** Στα πλαίσια μιας τυπικής εδαφοτεχνικής έρευνας και μελέτης θεμελίωσης συγκροτήματος παραθεριστικών κατοικιών στην περιοχή των Λεγρενών Αττικής, εκτελέστηκε παράλληλα γεωχημική έρευνα για την καταγραφή ενδεχόμενης ρύπανσης από τοξικά μέταλλα. Η έρευνα προσδιόρισε αυξημένη συγκέντρωση μολύβδου και αρσενικού στα εδάφη της περιοχής του έργου, καθώς και άμεσο κίνδυνο ρύπανσης από τοξικά μέταλλα των υπόγειων νερών. Με βάση τα στοιχεία αυτά στη γεωτεχνική μελέτη υποδείχθηκε η τεχνικοοικονομικά βέλτιστη μεθοδολογία αντιμετώπισης του υφιστάμενου επιπέδου εδαφικής ρύπανσης με ειδικά εδαφοβελτιωτικά μέτρα για την ελαχιστοποίηση της τοξικότητας και την ασφαλή διαβίωση των κατοίκων του οικιστικού συγκροτήματος.

**ABSTRACT :** This particular geochemical site assessment was performed in the context of the geotechnical design for the foundation of a holidays housing complex in Legrena area, Attica. Elevated values of lead and arsenic were recorded in soils of the project area, indicating high risk for ground water pollution by toxic metals. Based on that, the final geotechnical study includes the most cost-effective proposal for remediation of polluted soils in order to reduce the environmental hazards for the future residents of the area.

## 1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η γεωχημική έρευνα καταγραφής εδαφικής ρύπανσης εκτελέστηκε παράλληλα με τη γεωτεχνική έρευνα και μελέτη για την κατασκευή κτιριακού συγκροτήματος στη θέση Κούκια των Λεγρενών, που γνωρίζει σημαντική ανάπτυξη παραθεριστικών κατοικιών. Η περιοχή του έργου αποτελεί τμήμα του ευρύτερου μεταλλευτικού χώρου της Λαυρεωτικής, που γνώρισε έντονη μεταλλευτική και μεταλλουργική δραστηριότητα από την εκμετάλλευση των Pb - Zn - Ag θειούχων μεταλλευμάτων από την αρχαιότητα έως το τέλος του εικοστού αιώνα. Η εκμετάλλευση από την αρχαιότητα των πλούσιων κοιτασμάτων για την παραγωγή αργύρου δημιούργησε τεράστιες ποσότητες μεταλλοφόρων αποβλήτων, όπως τις εκβολές και τις σκουριές με υψηλές συγκεντρώσεις τοξικών μετάλλων, όπως Pb, Zn, Cd και As (Κ. Κονοφάγος, 1980).

Η εκ νέου κατά τον 19<sup>ο</sup> αιώνα ακμή της μεταλλευτικής-μεταλλουργικής δραστηριότητας στην περιοχή της Λαυρεωτικής με την εκμετάλλευση κύρια των αρχαίων εκβολάδων, σκουριών και την παραγωγή νέων μεταλλευτικών αποβλήτων υποβάθμισε εκ νέου το χερσαίο (Demetriades A. et al, 1996) και θαλάσσιο περιβάλλον (V. Zotiadis, 2004) στην περιοχή λόγω της ανεξέλεγκτης διασποράς των τοξικών μετάλλων. Οι αυξημένες συγκεντρώσεις των μετάλλων στα εδάφη της περιοχής έχουν σοβαρές επιδημιολογικές επιδράσεις στην ανθρώπινη υγεία και έχουν καταγραφεί ιδιαίτερα στους παιδικούς πληθυσμούς (Stavrakis P. et al, 1994, Tristan et al, 2000). Για το λόγο αυτό η οικιστική ανάπτυξη σε περιοχές ενδεχόμενης ρύπανσης απαιτεί την παράλληλη εκτέλεση γεωχημικής και γεωτεχνικής έρευνας με ειδική αναφορά προτεινόμενων κατάλληλων μέτρων προστασίας, καθώς και

κατάλληλων μεθόδων απορρύπανσης (remediation).

## 2. ΓΕΝΙΚΑ ΓΕΩΛΟΓΙΚΑ ΣΤΟΙΧΕΙΑ

Η γεωλογία της ευρύτερης περιοχής της χερσονήσου της Λαυρεωτικής (Μαρίνος & Petrascheck, 1956) συνίσταται από τη σχετική αυτόχθονη ενότητα της Αττικής, που περιλαμβάνει με στρωματογραφική διάταξη το Κατώτερο Μάρμαρο, τους Σχιστόλιθους Καισαριανής και το Ανώτερο Μάρμαρο. Επωθημένη στα παραπάνω βρίσκεται η αλλόχθονη ενότητα του Λαυρίου με χαρακτηριστικές λιθολογίες τους σερικιτικούς - χλωριτικούς σχιστόλιθους, που περικλείουν μεταβασικά πετρώματα («πρασινίτες») με παραγενέσεις κυανοσχιστολιθικού τύπου.

Η περιοχή του έργου καλύπτεται από την αλλόχθονη ενότητα του Λαυρίου και ο σχιστόλιθος ως λιθολογία εμφανίζεται υγιής και χωρίς ίχνη εξαλλοιώσεων ενώ φέρει μικρού πάχους ελουβιακό μανδύα (έως 50cm).

## 3. ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΙΑ ΚΑΙ ΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ

Από την επί τόπου επίσκεψη στην περιοχή έρευνας έκτασης περίπου 6 στρεμμάτων δεν παρατηρήθηκαν ενδείξεις περιβαλλοντικής υποβάθμισης από μεταλλευτικές και μεταλλουργικές δραστηριότητες. Έτσι, η δειγματοληψία για τον έλεγχο της ανόργανης ρύπανσης από τοξικά στοιχεία πραγματοποιήθηκε με τη συλλογή συνολικά 27 επιφανειακών εδαφικών δειγμάτων και σύμφωνα με τον ακόλουθο σχεδιασμό (EPA/240/R-02/005) :

(α) δύο (2) πλευρικές γεωχημικές τομές με κωδικούς δειγμάτων T1 έως T18

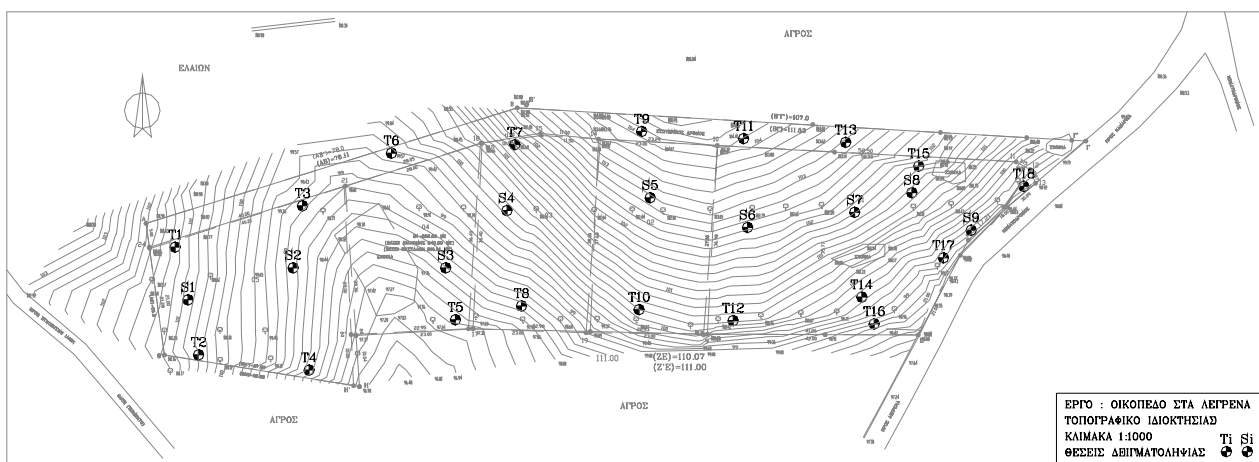
(β) μία (1) γεωχημική τομή ενδιάμεσα των άλλων δύο με κωδικούς δειγμάτων S1 έως S9.

Κατά τη διάρκεια της δειγματοληψίας στο πεδίο δόθηκε ιδιαίτερη έμφαση στην αντιπροσωπευτικότητα του δείγματος με ομογενοποίηση και τετρατομερισμό (USEPA, 1986a). Τα δείγματα μεταφέρθηκαν στο εργαστήριο και ξηράνθηκαν σε θερμοκρασία όχι μεγαλύτερη των 40 - 45°C ώστε να μη καταστραφεί το οργανικό υλικό και να μη «ψηθούν» τα αργιλικά ορυκτά. Μετά την ξήρανση έγινε απόσβλωση και τα δείγματα κοσκινίστηκαν με το κόσκινο Νο 40 επιλέγοντας για το αναλυτικό μέρος το διερχόμενο κλάσμα με μέγεθος έως 0,425 mm.

## 4. ΑΝΑΛΥΤΙΚΟ ΜΕΡΟΣ

### 4.1 Οργανικός Άνθρακας

Το οργανικό υλικό στα εδάφη είναι σημαντικός παράγοντας δέσμευσης των μετάλλων στα εδάφη σε ιδιαίτερα σταθερές οργανομεταλλικές ενώσεις με μείωση της γεωχημικής ευκινησίας τους και κατ' επέκταση της τοξικότητας αυτών στα φυσικά συστήματα. Αναλύθηκαν δειγματοληπτικά εννέα (9) δείγματα εδάφους ως προς την περιεκτικότητά τους σε οργανικό άνθρακα σύμφωνα με τις προδιαγραφές AASHTO T194-80 και ASTM D2974-87. Οι προσδιοριζόμενες συγκεντρώσεις στα εδάφη της περιοχής είναι κανονικές και κυμαίνονται από 1,52 έως 3,02 % με μέση τιμή  $C_{org} (aver) = 2,21 \%$  και τυπική απόκλιση 0,53 %.



Σχήμα 1. Σκαρίφημα της Περιοχής Έρευνας με τις Θέσεις Δειγματοληψίας.  
Figure 1. General Layout of the Project Area with Sample Locations

#### 4.2 Εδαφικό pH

Η τιμή του pH στα εδάφη είναι κρίσιμος παράγοντας για την αξιολόγηση της κινητικότητάς τους για την προστασία του υπόγειου νερού από αντίστοιχη ρύπανση. Τα εδαφικά δείγματα εκχυλίσθηκαν με απεσταγμένο νερό και μετρήθηκε η τιμή του εδαφικού pH με τη χρήση πολύμετρου (Multiparameter Meter) και η οποία προσδιορίστηκε ίση με 6,00 (5,80 έως 6,10).

#### 4.3 Βαρέα μέταλλα – μεταλλοειδή

Οι αναλύσεις των εδαφικών δειγμάτων πραγματοποιήθηκαν στο πιστοποιημένο εργαστήριο ACME Analytical Laboratories Ltd στον Καναδά. Η επαναληψιμότητα των μετρήσεων σε όλα τα αντιδείγματα για όλα τα στοιχεία κρίθηκε ιδιαίτερα ικανοποιητική έως άριστη αφού βρέθηκε κατά πολύ μικρότερη του 5%. Η ακρίβεια της μεθόδου εξασφαλίσθηκε με τη χρήση από το αναλυτικό εργαστήριο πρότυπων δειγμάτων αναφοράς (House Reference Material).

Συνολικά δεκαοκτώ εδαφικά δείγματα με κωδικούς T1 έως T18 αναλύθηκαν για τα μέταλλα Cu, Pb, Zn, Ag, Ni, Co, Cr, Mn, Fe, As, Cd, Sb, Bi και Ba. Η διαλυτοποίηση του δείγματος πραγματοποιήθηκε με διάλυμα βασιλικού οξέος σε ρυθμισμένο έντονα οξειδωτικό περιβάλλον και οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τη μέθοδο ICP - MS.

Προσδιορίστηκαν αυξημένες τιμές για το Pb (320 - 980 mg/kg) και As (42 - 100 mg/kg) ενώ ελαφριά απόκλιση από τις τιμές πλαισίου παρουσίασαν ο Zn (93 - 280 mg/kg), το Cd (1,1 - 2,5 mg/kg) και το Mn (760 - 1400 mg/kg). Τα μέταλλα Co, Sb, Ba και Ag είχαν χαμηλές τιμές, που αντιστοιχούν σε μη ρυπασμένα εδάφη.

Οι τιμές του Ni (102 - 240 mg/kg) και Cr (44 - 135 mg/kg) σχετίζονται στην περιοχή έρευνας με τον πετρολογικό παράγοντα (πρασινίτες) και κρίνονται εντός γεωχημικού υποβάθρου. Σε περιοχές υπερβασικών πετρωμάτων το εύρος των τιμών Ni κυμαίνεται σε εδαφικά δείγματα από 100 έως 5500 ppm (Kabata-Pendias A. et al, 1984).

Επιπροσθέτως, εννέα εδαφικά δείγματα με κωδικούς S1 έως S9 αναλύθηκαν για τα μέταλλα Cu, Pb, Zn, Ag, Ni, Sb, Co, Mn, Fe, As, Cd, και Ba. Η εκχύλιση του δείγματος πραγματοποιήθηκε σε ρυθμιστικό διάλυμα CH<sub>3</sub>COONa - CH<sub>3</sub>COOH σε pH = 5 κατά

αντιστοιχία με την 1311 μέθοδο Toxicity Characteristic Leaching Procedure (EPA, Part 261 - 1990) της EPA και οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν με τη μέθοδο ICP - MS.

Προσδιορίστηκαν αυξημένες τιμές στο βιοδιαθέσιμο κλάσμα για το Pb (999 - 10301 μg/Kg), το Zn (800 - 6900 μg/kg), το As (239 - 800 μg/Kg) και το Cd (156 - 468 mg/kg). Τα υπόλοιπα μέταλλα αποδεσμεύθηκαν σε χαμηλές συγκεντρώσεις, υποδεικνύοντας κατανομή σε σταθερότερες ενεργειακά θέσεις και κατ'επέκταση μειωμένη βιοδιαθεσιμότητα και τοξικότητα.

#### 5. ΓΕΩΧΗΜΙΚΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Από τις τιμές των μετάλλων, που προσδιορίστηκαν από τις χημικές αναλύσεις με διαλυτοποίηση με διάλυμα βασιλικού νερού, υπολογίσθηκαν οι συντελεστές συσχέτισης των μετάλλων μεταξύ τους, προσδιορίζοντας τις ακόλουθες γεωχημικές ομάδες :

- (α) Ομάδα Pb - Zn - Ag - As - Cd - Sb - (Bi - Ba), η οποία εκφράζει τη θειούχα μεταλλοφορία Pb - Zn της Λαυρεωτικής. Ο χαλκός, ο οποίος δεν συμμετέχει στη μεταλλοφορία, παρουσιάζει χαμηλές συγκεντρώσεις και έχει μικρή συσχέτιση με τη συγκεκριμένη γεωχημική ομάδα.
- (β) Ομάδα Ni - Co - Cr - (Fe), η οποία σχετίζεται με τα βασικά πετρώματα της περιοχής και αντιπροσωπεύει τον πετρολογικό παράγοντα.

#### 6. ΑΞΙΟΛΟΓΗΣΗ ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΩΝ

Η αξιολόγηση της ρύπανσης από τοξικά μέταλλα σε εδάφη πραγματοποιήθηκε με γεωχημικά κριτήρια σε συνδυασμό με τις ανώτατες αποδεκτές τιμές, που ορίζουν οι διεθνείς περιβαλλοντικές νομοθεσίες. Τα γεωχημικά κριτήρια χρησιμοποιούν μεθόδους γεωστατιστικής για τον προσδιορισμό της ρύπανσης ως απόκλιση από τις τιμές πλαισίου (κανονικές τιμές), δηλαδή τιμές για τον πληθυσμό ενός ή περισσότερων μετάλλων μεγαλύτερες του γεωχημικού κατωφλίου (ανώμαλος πληθυσμός). Επίσης, υπολογίζεται η συσχέτιση μεταξύ των μετάλλων, καθώς και το ποσοστό κατανομής τους στο αποδεσμεύσιμο κλάσμα για την εκτίμηση της βιοδιαθεσιμότητας και της τοξικότητας. Συνολικά οι ανώτατες αποδεκτές τιμές μετάλλων σε εδάφη προκύπτουν με βάση τοξικολογικά και γεωχημικά κριτήρια, τη χρήση της στην περιοχή και την απαίτηση προστα-

σίας των υπόγειων νερών από ρύπανση. Στον Πίνακα 1, παρουσιάζονται οι επιθυμητές και οι ανώτατες αποδεκτές τιμές για τα μέταλλα σε εδάφη σύμφωνα με την Ολλανδική Dutch List (2000), που χρησιμοποιείται κατά κόρον στην Ευρώπη. Επίσης, στον Πίνακα 2 παρουσιάζονται οι ανώτατες αποδεκτές τιμές μετάλλων σε εδάφη (remediation objectives) της Environmental Protection Agency των ΗΠΑ. Οι τιμές αυτές σε σχέση με του Πίνακα 1 αναφέρονται εξειδικευμένα σε κριτήρια προστασίας της ανθρώπινης υγείας σύμφωνα με τον τρόπο έκθεσης και αφορούν αστικές περιοχές.

Πίνακας 1. Επιθυμητές και Ανώτατες Αποδεκτές Τιμές Μετάλλων σε Εδάφη.  
Table 1. Target and Intervention Values of Metals in Soils.

ΜΕΤΑΛΛΟ	ΕΔΑΦΟΣ / ΙΖΗΜΑ	
	ΕΠΙΘΥΜΗΤΗ ΤΙΜΗ (mg/kg)	ΑΝΩΤΑΤΗ ΑΠΟΔΕΚΤΗ ΤΙΜΗ (mg/kg)
Αντιμόνιο (Sb)	3	15
Αρσενικό (As)	29	55
Βάριο (Ba)	160	625
Κάδμιο (Cd)	0,8	12
Χρώμιο (Cr)	100	380
Κοβάλτιο (Co)	9	240
Χαλκός (Cu)	36	190
Μόλυβδος (Pb)	85	530
Νικέλιο (Ni)	35	210
Ψευδάργυρος (Zn)	140	720
Αργυρος (Ag)	---	15

Dutch List, table 1a, 2a

--- : No data

Σύμφωνα με την Ολλανδική Dutch List και την EPA των ΗΠΑ στην περιοχή του έργου προσδιορίζεται πρόβλημα ρύπανσης στα εδάφη από αυξημένες συγκεντρώσεις μολύβδου και αρσενικού, η οποία αποδίδεται στις μεταλλευτικές και μεταλλουργικές δραστηριότητες, που έλαβαν χώρα τα τελευταία 2500 χρόνια στην ευρύτερη περιοχή της Λαυρεωτικής. Ορισμένες τιμές του Ni, που υπερβαίνουν τις οριακές τιμές της Dutch List, κρίνονται κανονικές και σχετίζονται με πετρολογικούς λόγους. Στα εδάφη της περιοχής έρευνας προσδιορίζεται αύξηση των συγκεντρώσεων ιδιαίτερα για τα μέταλλα Pb και As στο δυτικό τμήμα της ιδιοκτησίας, όπου υπάρχει η παρουσία παλαιού ρέματος, που συνδέεται με το ρέμα της Καμάριζας (Αγ. Κωνσταντίνος), το οποίο μεταφέρει μέσω διάβρωσης αυξημένες συγκεντρώσεις βαρέων μετάλλων. Εποπτικά στο Σχήμα 2 παρουσιάζεται η γεωχημική κατανομή του μολύβδου στο χώρο του έργου.

Επίσης από τα δεδομένα των εκχυλίσεων με ρυθμιστικό διάλυμα διαπιστώνουμε ότι τα μέταλλα Pb, Zn και Cd αποδεσμεύονται σε υψηλές συγκεντρώσεις, προδιαγράφοντας κίνδυνο ρύπανσης των υπόγειων νερών, καθώς και αυξημένης βιοδιαθεσιμότητας και περιβαλλοντικών κινδύνων.

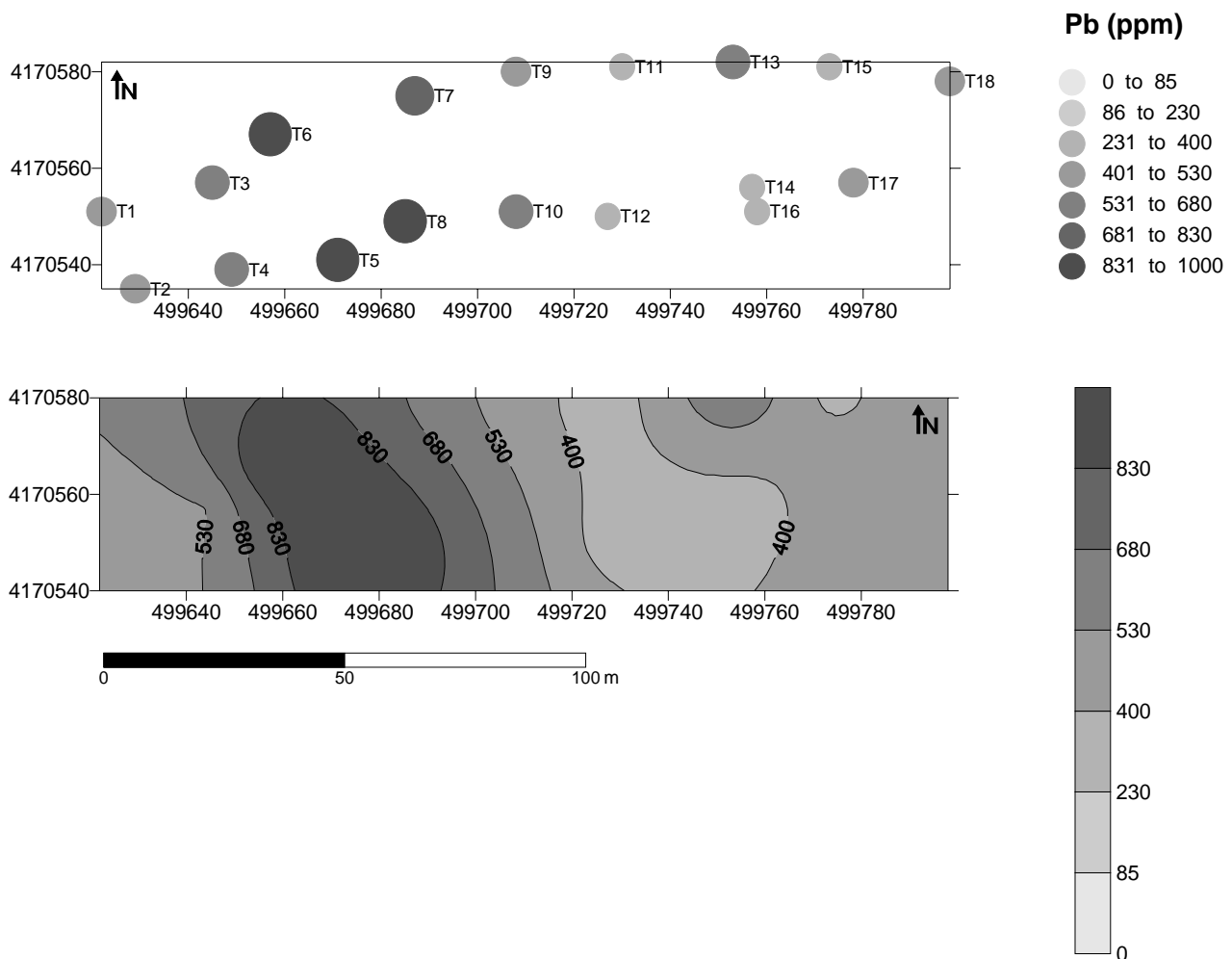
Στον Πίνακα 3 δίνονται τα εύρη τιμών, που προσδιορίστηκαν στην περιοχή έρευνας από εκχύλιση TCLP με τα αντίστοιχα όρια της EPA, για την προστασία των ποιοτικών χαρακτηριστικών των υπόγειων νερών σύμφωνα με την καταλληλότητα χρήσης τους.

Πίνακας 2. Ανώτατες Αποδεκτές Τιμές Μετάλλων σε Εδάφη Αστικών Περιοχών.  
Table 2. Action Values of Metals in Soils of Residential Areas.

ΜΕΤΑΛΛΑ	ΑΝΩΤΑΤΕΣ ΑΠΟΔΕΚΤΕΣ ΤΙΜΕΣ ΣΕ ΕΔΑΦΗ ΜΕ ΒΑΣΗ ΜΟΝΟ ΚΡΙΤΗΡΙΑ ΑΝΘΡΩΠΙΝΗΣ ΥΓΕΙΑΣ ΣΥΜΦΩΝΑ ΜΕ ΤΟΝ ΤΡΟΠΟ ΕΚΘΕΣΗΣ	
	ΔΕΡΜΙΚΗ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ (mg/kg)	ΕΙΣΠΝΟΗ (mg/kg)
Αντιμόνιο (Sb)	31	---
Αρσενικό (As)	---	750
Βάριο (Ba)	5.500	690.000
Κάδμιο (Cd)	78	1.800
Χρώμιο (Cr)	230	270
Κοβάλτιο (Co)	4.700	---
Χαλκός (Cu)	2.900	---
Μόλυβδος (Pb)	400	---
Μαγγάνιο (Mn)	3.700	69.000
Νικέλιο (Ni)	1.600	13.000
Αργυρος (Ag)	390	---
Ψευδάργυρος (Zn)	23.000	---

EPA, TACO, 26 Ill. Reg. 2683, 5 February 2002, Section 742, Appendix B, Table A

--- : No data



Σχήμα 2. Γεωχημικός Χάρτης Κατανομής του Pb στα Εδάφη της Περιοχής Έρευνας.  
Figure 2. Geochemical Distribution of Lead in Soils of the Studied Area.

Πίνακας 3. Εύρη Τιμών από Δοκιμή TCLP σε Σχέση με τα Όρια Προστασίας του Υδροφόρου Ορίζοντα (EPA, TACO, Part 742, 2003).  
Table 3. Values Range from TCLP Compared to the Action Values for Preventing Ground-water Pollution (EPA, TACO, Part 742, 2003).

ΜΕΤΑΛΛΟ	ΕΥΡΟΣ ΤΙΜΩΝ ΑΝΑΛΥΣΕΩΝ	CLASS I	CLASS II
As	238 - 800 ppb	50 ppb	200 ppb
Ba	2,67 - 9,45 ppm	2 ppm	2 ppm
Cd	156 - 468 ppb	5 ppb	50 ppb
Co	8 - 23 ppb	1000 ppb	1000 ppb
Cu	160 - 220 ppb	650 ppb	650 ppb
Pb	999 - 10301 ppb	7,5 ppb	100 ppb
Mn	900 - 2100 ppb	150 ppb	10000 ppb
Ni	220 - 620 ppb	100 ppb	2000 ppb
Ag	2 - 8 ppb	50 ppb	---
Zn	800 - 6900 ppb	5000 ppb	10000 ppb

--- No data

Class I : Υδροφόρος ορίζοντας για πόσιμο νερό

Class II : Υδροφόρος ορίζοντας προς δευτερεύουσες χρήσεις (άρδευση κλπ).

## 7. ΜΕΤΡΑ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ

Στην περιοχή που εκτελέστηκε η γεωχημική έρευνα προσδιορίστηκαν αυξημένες τιμές των μετάλλων Pb και As στα εδάφη. Για το λόγο αυτό απαιτήθηκε η διατύπωση προτάσεων για τη λήψη ειδικών μέτρων ελαχιστοποίησης των περιβαλλοντικών κινδύνων για τους μελλοντικούς κατοίκους της περιοχής.

Τα προταθέντα μέτρα αποκατάστασης αναφέρονται σε τεχνικοοικονομικά αποδεκτές λύσεις ανεκτού οικονομικού κόστους για τους ιδιοκτήτες, που πραγματοποιούνται επί τόπου. Η δέσμη μέτρων, που προτάθηκε και εφαρμόστηκε στο χώρο ανάπτυξης των νέων κατοικιών στα πλαίσια της κατασκευής, περιελάμβανε τα ακόλουθα :

A) Απομάκρυνση τμήματος του εδαφικού μανδύα σε πάχος 10 έως 20 εκ. κατά τις εργασίες εκσκαφής και την τελική διάστρωση μετά την

κατασκευή της ανωδομής καθαρού υλικού τύπου «φυτικής γης» σε πάχος 20 έως 30 εκ. σύμφωνα με τον αρχιτεκτονικό σχεδιασμό του περιβάλλοντα χώρου.

Β) Μετά την κατασκευή της ανωδομής εκτέλεση μικρής κλίμακας αποκατάστασης στους περιβάλλοντες χώρους με τη μέθοδο της “σταθεροποίησης” (stabilization). Σύμφωνα με τη μέθοδο αυτή η εφαρμοσθείσα τεχνική προέβλεπε τη διαβροχή του αρχικού εδάφους μέχρι την επίτευξη συνθηκών κορεσμού με υδαρές πρότυπο μίγμα αποτελούμενο από καθαρές φάσεις συγκεκριμένων αργιλικών ορυκτών υψηλής προσροφητικής ικανότητας με παράλληλη προσθήκη σε μικρή αναλογία και άλλων φυσικών υλικών (π.χ. ασβεστολιθικής παιπάλης) ή παραπροϊόντων (ιπτάμενης τέφρας) για την επιθυμητή ρύθμιση των γεωχημικών συνθηκών του εδάφους στο πεδίο. Παράλληλα με μηχανικά μέσα (φρέζα) πραγματοποιήθηκε η ανάμειξη και η ομογενοποίηση του εδάφους στην περιοχή του έργου. Στα πλαίσια της πιλοτικής εφαρμογής της μεθόδου στο πεδίο επιλέχθηκε ένα τμήμα του έργου, όπου τροποποιήθηκε η εφαρμογή της τεχνικής με τη διάσθρωση του πρότυπου μίγματος σε στερεή μορφή με παράλληλη εκτέλεση της ανάμειξης και ομογενοποίησης του συστήματος εδάφους – πρότυπου μίγματος. Στην περίπτωση αυτή στο πρότυπο μίγμα χρησιμοποιήθηκαν ενεργοποιημένες φάσεις των αργιλικών ορυκτών. Για την ολοκλήρωση των εργασιών και σε αυτή την παραλλαγή της μεθόδου πραγματοποιήθηκε η διαβροχή του εδάφους με νερό μέχρι την επίτευξη πρακτικά συνθηκών κορεσμού. Οι χρησιμοποιούμενες υψηλής προσροφητικής ικανότητας αργιλικές φάσεις κατά την εφαρμογή της τεχνικής σταθεροποίησης εξασφαλίζουν τη δέσμευση των μετάλλων με ιοντοανταλλαγή σε θέσεις προσρόφησης στο πλέγμα τους με αποτέλεσμα τη μείωση της κινητικότητάς τους, της βιοδιαθεσιμότητάς και της τοξικότητάς τους.

Συμπληρωματικά προς την εφαρμοσθείσα τεχνική προτάθηκε η διατήρηση της απρόσκοπτης ροής του υφιστάμενου ρέματος με διαμόρφωση της κοίτης του, ώστε να μην εμφανίζονται φαινόμενα υπερπλήρωσης (π.χ. κατά τη διάρκεια πλημμυρικής απορροής) και να εξασφαλίζονται οι ελεύθεροι χώροι περιμετρικά των κατοικιών με την κατασκευή περιμετρικών στραγγιστηρίων, που επαναφέρουν τη ροή των ομβρίων στο ρέμα στην κατάντη περιοχή. Αυτό κρίθηκε απαραίτητο λόγω της αναμενόμενης υψηλής συγκέντρωσης τοξικών μετάλλων στο μεταφερόμενο

λεπτόκοκκο υλικό από το ρέμα της Καμάριζας (Αγ. Κωνσταντίνος), η οποία χαρακτηρίζεται από εξαιρετικά υψηλή ρύπανση ως μεταλλευτικό κέντρο της Λαυρεωτικής χερσονήσου.

## 8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Σε περιοχή ανάπτυξης παραθεριστικών κατοικιών στα Λεγρενά Αττικής διαπιστώθηκαν αυξημένες συγκεντρώσεις μετάλλων στα εδάφη, οι οποίες οφείλονται στις μεταλλευτικές και μεταλλουργικές δραστηριότητες του ευρύτερου χώρου της Λαυρεωτικής. Ιδιαίτερα υψηλές και σε όρια που απαιτούν περιβαλλοντική αποκατάσταση, βρέθηκαν οι τιμές του Pb και του As. Για το λόγο αυτό απαιτήθηκε η διατύπωση προτάσεων και η λήψη ειδικών μέτρων ελαχιστοποίησης των περιβαλλοντικών κινδύνων για την υγεία των μελλοντικών κατοίκων της περιοχής. Έτσι, σε πιλοτικό στάδιο στην περιοχή του έργου πραγματοποιήθηκε η εφαρμογή της τεχνικής “σταθεροποίησης” με τη χρησιμοποίηση καινοτόμων αργιλικών ορυκτών υψηλής προσροφητικής ικανότητας για τη δραστική μείωση της κινητικότητας, βιοδιαθεσιμότητας και τοξικότητας των μετάλλων .

## 9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- AASHTO T 194: Determination of Organic Matter in Soils by Wet Combustion.
- ASTM D 2974-87: Standard Test Methods for Moisture, Ash and Organic Matter of Peat and Other Organic Soils.
- Demetriades A., Stavrakis P., Vergou – Vichou K. (1996), “Contamination of surface soil of the Lavreotiki Peninsula (Attiki, Greece) by mining and smelting activities”. Mineral Wealth 98/1996.
- EPA, Part 261 - 1990, Appendix II - Method 1311 Toxicity characteristic Leaching Procedure (TCLP), Federal Register, Vol. 55, No 61, Rules and Regulations, pp. 11863 – 11877.
- EPA/240/R-02/005, “Guidance on choosing a Sampling Design for Environmental Data Collection for Use in Developing a Quality Assurance Project Plan, EPA QA/G-5S”. Office of Environmental Information, Washington, DC 20460 (December 2002).
- Ζωτιάδης, Β. (2004), “Ωκεανογραφία και Γεωχημεία των επιφανειακών θαλάσσιων ιζημάτων της Νοτιοανατολικής Αττικής, Ν. Μακρονήσου και Ν. Κέας. Κατανομή της ρύπανσης από βαρέα μέταλλα ως αποτέλεσμα των μεταλλευτικών και

- μεταλλουργικών δραστηριοτήτων της Λαυρεωτικής”. Διδακτορική Διατριβή, Εθνικό και Καποδιστριακό Πανεπιστήμιο Αθηνών (with English summary), σελ. 209.
- Kabata-Pendias, A. and Pendias, H. (1984), "Trace Elements in Soils and Plants". CRC Press, Boca Raton, FL.
- Κονοφάγος, Κ.Η. (1980), "Το αρχαίο Λαύριο και η Ελληνική τεχνική παραγωγή του αργύρου". Αθήνα, ΕΜΠ.
- Marinos, G.P. and Petrascheck, W.E. (1956), "Laurium". Inst. Geol and Subsurface Research, Athens, Greece. Geological and Geophysical Research, Vol. 4, No 1, 247 pp (in Greek with English summary).
- Stavrakis, P., Vergou-Vichou, K., Fosse G., Makropoulos V., Demetriades A., Vlachoyiannis N., (1994), "A multidisciplinary study on the effects of environmental contamination on the human population of the Lavrion urban area". Hellas. In : S.P. Varnavas (ed). Proceedings of the 6<sup>th</sup> International Conference on Environmental Contamination. Delphi, Greece. CEP Consultants, Edinburgh, pp. 20-22.
- TACO \_ Tiered Approach to Corrective action Objectives, Part 742, 2003. Title 35: Environmental Protection, Subtitle G: Waste Disposal, Chapter I: Pollution Control Board, Subchapter f: Risk Based Cleanup Objectives.
- The Dutch List, (4-02-2000), "Circular on target values and intervention values for soil remediation". Ministry of Housing, Spatial Planning and Environment, Netherlands.
- Tristan E., Demetriades A., Ramsey M.H. et al. (2000), "Spatially resolved hazard and exposure assessments : An example of lead in soil at Lavrion, Greece". Environmental Research Action A 82, 33-45.
- USEPA 1986a, "Test Methods for Evaluating Solid Waste, Physical/Chemical Methods, Updates I, II, IIA, IIB, III and IIIA. SW-846". NTIS publication no. PB97-156111 or GPO publication no. 955-001-00000-1. Office of Solid Waste. Washington, DC.