

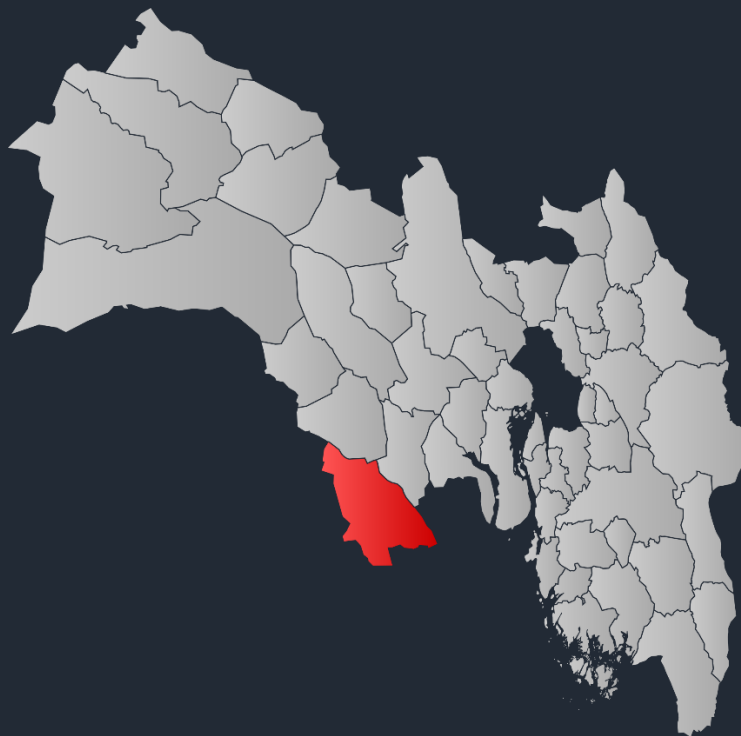
ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ
ΤΜΗΜΑ ΓΕΩΛΟΓΙΑΣ
ΤΟΜΕΑΣ ΓΕΩΦΥΣΙΚΗΣ



ΔΟΥΚΑΣ Ι. ΔΟΥΚΑΣ

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΑΠΟ ΑΕΡΟΣ
ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΓΑΜΜΑ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ KONGSBERG, S.NORWAY

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ



ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ
2022



[Στους γονείς μου]



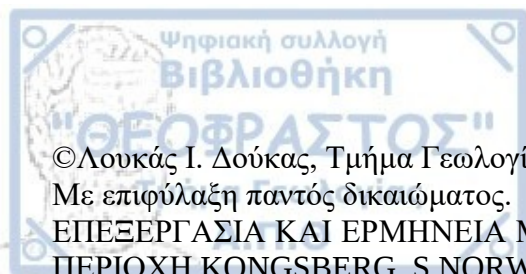
ΔΟΥΚΑΣ Ι. ΛΟΥΚΑΣ
Φοιτητής Τμήματος Γεωλογίας, ΑΕΜ: **5729**

**ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΑΠΟ ΑΕΡΟΣ
ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΓΑΜΜΑ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ KONGSBERG, S.NORWAY**

Υποβλήθηκε στο Τμήμα Γεωλογίας, Τομέα Γεωφυσικής

Επιβλέπων

Σταμπολίδης Αλέξανδρος - ΕΔΙΠ – Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης



©Λουκάς Ι. Δούκας, Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., Τομέας Γεωφυσικής, 2022

Με επιφύλαξη παντός δικαιώματος.

ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΚΑΙ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ ΑΠΟ ΑΕΡΟΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΓΑΜΜΑ ΣΤΗΝ ΠΕΡΙΟΧΗ KONGSBERG, S.NORWAY

-ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

©LOUKAS I. DOUKAS, SCHOOL OF GEOLOGY, DEPT. OF GEOPHYSICS, 2022

ALL RIGHTS RESERVED.

PROCESSING AND INTERPRETATION OF AIRBORNE GAMMA-RAY DATA IN THE KONGSBERG AREA, S.NORWAY

- BACHELOR THESIS

Απαγορεύεται η αντιγραφή, αποθήκευση και διανομή της παρούσας εργασίας, εξ ολοκλήρου ή τμήματος αυτής, για εμπορικό σκοπό. Επιτρέπεται η ανατύπωση, αποθήκευση και διανομή για σκοπό μη κερδοσκοπικό, εκπαιδευτικής ή ερευνητικής φύσης, υπό την προϋπόθεση να αναφέρεται η πηγή προέλευσης και να διατηρείται το παρόν μήνυμα. Ερωτήματα που αφορούν τη χρήση της εργασίας για κερδοσκοπικό σκοπό πρέπει να απευθύνονται προς το συγγραφέα.

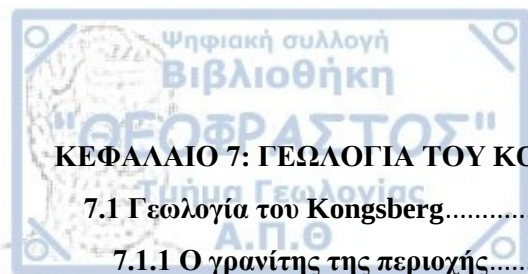
Οι απόψεις και τα συμπεράσματα που περιέχονται σε αυτό το έγγραφο εκφράζουν το συγγραφέα και δεν πρέπει να ερμηνευτεί ότι εκφράζουν τις επίσημες θέσεις του Α.Π.Θ.





Περιεχόμενα

ΠΕΡΙΛΗΨΗ.....	8
ABSTRACT.....	8
ΠΡΟΛΟΓΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ	9
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	10
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ ΕΡΕΥΝΩΝ.....	11
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ-ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ ΟΡΓΑΝΩΝ	12
3.1 Το ελικόπτερο	12
3.2 Τα όργανα καταγραφής του ελικοπτήρου	13
3.3 Ανάλυση των οργάνων καταγραφής της ακτινοβολίας γάμμα.....	13
3.3.1 Η πρώτη γενιά φασματογράφων ακτινών γάμμα	14
3.3.2 Η δεύτερη γενιά φασματογράφων ακτινών γάμμα.....	14
3.3.3 Η τρίτη γενιά φασματογράφων ακτινών γάμμα	15
3.4 Βαθμονόμηση των οργάνων	18
3.5 Τυπικό φάσμα καταγραφών ακτινοβολίας γάμμα.....	18
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΦΥΣΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ	19
4.1 Τα 3 ραδιοϊσότοπα, τα χαρακτηριστικά και οι διασπάσεις τους	19
4.1.1 Το ⁴⁰ K... ..	19
4.1.2 Το U... ..	19
4.1.3 Το Th... ..	22
4.2 Η ανισορροπία των στοιχείων.....	23
4.3 Ακτινοβολία υποβάθρου (background radiation)	24
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΚΑΤΑΓΡΑΦΩΝ.....	25
5.1 Διόρθωση ζωντανού χρόνου (“Live-Time” ή “Dead-Time”).....	25
5.2 Διόρθωση αεροσκάφους και κοσμικού υποβάθρου (“Aircraft and Cosmic background”).....	26
5.3 Διόρθωση Ραδονίου (“Radon correction”)	27
5.4 Απομάκρυνση παραγόντων Compton (Compton “stripping”)	29
5.5 Διόρθωση ύψους (“Height correction”)	30
5.6 Μετατροπή σε πρότυπες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης (συνθήκες STP)	30
5.7 Μετατροπή σε συγκεντρώσεις εδάφους	31
5.8 Διόρθωση Microlevelling.....	31
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΧΑΡΤΩΝ ΚΑΙ ΡΑΔΙΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ..	32
6.1 Γεωλογικός χάρτης του Kongsberg	33
6.2 Χάρτης τεκτονικής δομής του Kongsberg	34
6.3 Ηλικία σχηματισμού του γεωλογικού υποβάθρου του Kongsberg	35
6.4 Ραδιομετρικοί χάρτες της περιοχής του Kongsberg	36



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΟΥ KONGSBERG ΚΑΙ ΓΕΩΧΗΜΕΙΑ ΤΩΝ ΡΑΔΙΟΣΤΟΙΧΕΙΩΝ	50
7.1 Γεωλογία του Kongsberg.....	50
7.1.1 Ο γρανίτης της περιοχής.....	51
7.1.2 Τα διάσημα κοιτάσματα αργύρου.....	52
7.2 Γεωχημεία των ραδιοστοιχείων K, U, Th	53
7.2.1 Το K.....	53
7.2.2 Το U	53
7.2.3 Το Th	54
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΡΑΔΙΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΧΑΡΤΩΝ.....	54
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ.....	56
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ	57



ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Το 1896 ανακαλύφθηκε από τον Becquerel το φαινόμενο της ραδιενέργειας και ακολούθησε η ανάπτυξη μιας καινούργιας κατηγορίας γεωφυσικών μεθόδων, οι ραδιομετρικές μέθοδοι. Ιστορικά υπήρξε σημαντική εξέλιξη στα όργανα καταγραφής, ξεκινώντας από τους φασματογράφους πρώτης μέχρι και τρίτης γενιάς. Οι φασματογράφοι, με την χρήση ελικοπτέρων, μεταφέρονται πάνω από την επιφάνεια διασκόπησης ώστε να καταγραφεί η ακτινοβολία γάμμα. Οι φυσικές πηγές ακτινοβολίας, ανήκουν στα 3 ραδιοϊσότοπα: ουράνιο(U), θόριο(Th) και κάλιο(K), τα οποία μετριοούνται σε παράθυρα, με μονάδες ppm για τα στοιχεία U και Th και % για το στοιχείο K. Το NGU πραγματοποίησε το 2008 μία έρευνα στην ευρύτερη περιοχή του Kongsberg βάση μαγνητικών, ηλεκτρομαγνητικών και ραδιομετρικών μετρήσεων. Στην αρχή έγινε κατάλληλη βαθμονόμηση των οργάνων για την περιοχή μελέτης και αφού λήφθησαν οι μετρήσεις, έλαβε χώρα η επεξεργασία τους. Οι καταγραφές διορθώθηκαν από κρίσιμους παράγοντες όπως η διόρθωση Ραδονίου, η απομάκρυνση Compton, η διόρθωση αεροσκάφους και κοσμικού υποβάθρου, η διόρθωση ζωντανού χρόνου, η διόρθωση ύψους καθώς και η μετατροπή των δεδομένων σε πρότυπες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης. Στην συνέχεια, με την χρήση κατάλληλων προγραμμάτων παρουσιάζονται οι ραδιομετρικοί χάρτες, κατάλληλα γεω-αναφερόμενοι ώστε να υπάρχει η απαραίτητη ακρίβεια ψηφιοποίησης των καταγραφών. Η δημιουργία χαρτών περιλαμβάνει επίσης τριαδικούς χάρτες, δηλαδή χαρτογράφηση και των τριών στοιχείων ταυτόχρονα(ternary maps). Έτσι, ανάλογα με τα αποτελέσματα που μας δίνει η μέθοδος, εξάγουμε συμπεράσματα για την περιοχή μελέτης και τη γεωλογία της, ενώ με την χρήση της δύναται να ανακαλυφθούν δομές οικονομικής σημασίας.

ABSTRACT

In 1896 Becquerel discovered the phenomenon of radioactivity, followed by the development of a new class of geophysical methods, radiometric methods. Historically, there has been a significant development in recording instruments, starting with first to third generation spectrometers. The spectrometers are transported by helicopters over the observation surface to record gamma radiation. The natural sources of radiation are the 3 radioisotopes: uranium (U), thorium (Th) and potassium (K), which are measured in windows, in ppm for the elements U and Th and % for the element K. The NGU carried out the 2008 a survey in the Kongsberg area based on magnetic, electromagnetic and radiometric measurements. At the beginning, the instruments were properly calibrated for the study area and after the measurements were taken, their processing began. The recordings were corrected by critical factors such as radon correction, compton removal, aircraft and cosmic background correction, live time correction, altitude correction and data conversion to standard temperature and pressure conditions. Then, with the use of appropriate programs, the radiometric maps are presented, properly geo-referenced so that there is the necessary accuracy of digitization of the recordings. Creating maps also includes ternary maps, viz mapping all three elements simultaneously (ternary maps). Thus, depending on the results of the method, we draw conclusions about the study area and its geology, while using it, structures of economic importance can be discovered.

ΠΡΟΛΟΓΙΚΟ ΣΗΜΕΙΩΜΑ

Το 2008 ο φορέας γεωλογικών ερευνών της Νορβηγίας, NGU (Norges geologiske undersøkelse), ξεκίνησε μία εντατική έρευνα στην περιοχή του Kongsberg, S.Norway. Το όλο εγχείρημα διήρκεσε περίπου 3 χρόνια, από το φθινόπωρο του 2008 έως το καλοκαίρι του 2011 και οι πληροφορίες που συλλέχθηκαν ήταν εξαιρετικά σημαντικές. Οι μετρήσεις ελήφθησαν από αέρος και οι γεωφυσικές έρευνες έγιναν βάση μαγνητικών, ηλεκτρομαγνητικών και ραδιομετρικών δεδομένων. Η συνολική περιοχή που καλύφθηκε και χαρτογραφήθηκε άγγιζε τα 2797 km² ενώ οι γραμμές που πραγματοποιήθηκαν από το αεροσκάφος ξεπέρασαν τα 13.980 km. Η περιοχή του Kongsberg περιλαμβάνει συνολικά 7 περιοχές: Krøderen, Sokna, Hønefoss, Kongsberg, Vikersund, Hokksund και Hvitvingfoss.

Το επιστημονικό φορτίο του ελικοπτερου έφερε ένα σύστημα ηλεκτρομαγνητικών μετρήσεων το οποίο λειτουργεί με πέντε διαφορετικές συχνότητες, τύπου Hummingbird, τροποποιημένο από το NGU, και ένα μαγνητόμετρο Κεσίου (Cesium) για την ασφαλή λήψη μαγνητικών δεδομένων. Επιπρόσθετα, στο πρώτο μέρος της έρευνας χρησιμοποιήθηκε ένας φασματογράφος ακτινών γάμμα, Exploranium GR 820 των 256 καναλιών, ενώ στο τελευταίο τμήμα των ερευνών χρησιμοποιήθηκε το RSX-5 των 1024 καναλιών για τη λήψη ραδιομετρικών μετρήσεων.

Οι ραδιομετρικές μετρήσεις που είναι και το θέμα της διπλωματικής εργασίας, πραγματοποιούνται βάση τριών ραδιοϊσοτόπων, του Ουρανίου (Uranium), του Θωρίου (Thorium) και του Καλίου (Potassium) τα οποία υπάρχουν στη φύση. Οι μονάδες μέτρησης των U & Th είναι ppm (part of radioactive material per million parts of rock, parts per million) ενώ του K είναι επί της %. Η ανάπτυξη-χρησιμότητα της μεθόδου ήταν αρχικά για την εύρεση πυρηνικών καυσίμων μιας και η ζήτηση ήταν σημαντική και δευτερευόντως για τις γεωλογικές μεγάλης κλίμακας, μιας και τα πετρώματα μπορούν να αναγνωριστούν ευκολότερα από την ραδιενεργή τους υπογραφή.

Η επεξεργασία όλων των μετρήσεων, η κανονικοποίηση και η πλήρη διόρθωση τους από κρίσιμους παράγοντες, έλαβε χώρα από το επιστημονικό προσωπικό που εργάστηκε στα πλαίσια της έρευνας του NGU. Στη συνέχεια θα δούμε αναλυτικά τις διαδικασίες επεξεργασίας των δεδομένων. Η επεξεργασία τους έγινε με το λογισμικό Geosoft Oasis Montaj. Η τελική και πιο σημαντική εικόνα είναι το ternary map, εν ελληνιστί τριαδικός χάρτης με χαρτογράφηση και των 3 στοιχείων ταυτόχρονα. Όπως θα δούμε, παρέχει στον ερευνητή πληθώρα χρήσιμων πληροφοριών.

Σκοπός και στόχος όλων των παραπάνω είναι η γεωλογική και κοιτασματολογική έρευνα της περιοχής μελέτης, καθώς μπορεί μέσω των μετρήσεων να ανακαλυφθεί κάποια δομή οικονομικής σημασίας και εκμετάλλευσης. Κάποια υψηλή περιεκτικότητα σε κάποιο από τα στοιχεία που αναφέραμε μπορεί να μας φανερώσει ένα σημαντικό υπόβαθρο και να λάβει χώρα περεταίρω μελέτη. Οι έρευνες μας δεν θα αρκестούν απλώς στην χαρτογράφηση των 3 αυτών στοιχείων, αλλά και στους λόγους τους ή ακόμη και σε τύπους που συμπεριλαμβάνουν τα στοιχεία, όπως πχ τον radiogenic heat map.

Η συγκεκριμένη διπλωματική εργασία έγινε σε πλήρη συνεργασία με τον επιβλέποντα καθηγητή μου, Δρ. Σταμπολίδη Αλέξανδρο, καθώς επίσης θέλω να ευχαριστήσω όποιον με βοήθησε σε αυτή την προσπάθεια.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Περίπου 85 χιλιόμετρα νοτιοδυτικά του Όσλο, την πρωτεύουσα της Νορβηγίας, βρίσκεται η πόλη του Kongsberg. Ο πληθυσμός της ανέρχεται σε 25 χιλιάδες κατοίκους, σύμφωνα με την τελευταία επίσημη καταγραφή. Η δημιουργία της πόλης κρύβει μία ενδιαφέρουσα ιστορία. Στο μακρινό 1623 εντοπίστηκαν σημαντικές ποσότητες ασημιού στην περιοχή, τα οποία μάλιστα ήταν αξιοποιήσιμα. Έτσι αφού εντοπίστηκε το πρώτο κοίτασμα και τέθηκε σε παραγωγή, ιδρύθηκε σταδιακά η πόλη του Kongsberg, κυρίως από τους εργάτες των ορυχείων. Η παραγωγή ήταν πραγματικά μεγάλη. Παράχθηκαν περίπου 1350 τόνοι αργύρου, σε περίπου 330 χρόνια εξορύξεων (με κάποιες μικρές διακοπές) από 130 ορυχεία. Τα ορυχεία σταμάτησαν την εξόρυξη το 1958. Θεματικά δείγματα ασημιού φιλοξενούνται από πολλά μουσεία παγκοσμίως.

Ο φορέας γεωλογικών ερευνών της Νορβηγίας (Norges geologiske undersøkelse: NGU) αποφασίζει να πραγματοποιήσει μία εκτενή έρευνα στη περιοχή, με τις εργασίες πεδίου να εκκινούν το 2008 και να λαμβάνουν τέλος το 2011. Στόχος του εγχειρήματος είναι να αποκτηθούν μαγνητικά, ηλεκτρομαγνητικά και ραδιομετρικά δεδομένα υψηλής ακρίβειας από την περιοχή μελέτης, τα οποία θα συμβάλουν στην γενική κατανόηση της γεωλογίας, καθώς επίσης θα βοηθήσουν στη χαρτογράφηση γεωλογικών επαφών αλλά και των δομικών χαρακτηριστικών τους. Οι έρευνες θα οδηγήσουν σε περεταίρω γνώση του γεωλογικού υποβάθρου και θα χρησιμοποιηθούν στον εντοπισμό προβλημάτων για την μελλοντική κατασκευή γεφυρών ή άλλων εξίσου σημαντικών έργων, ενώ θα γίνει χαρακτηρισμός και αξιολόγηση των ιζημάτων. Το ποσό που δαπανήθηκε ξεπέρασε τα 7.800.000 NOK (780.000 €). Στόχος ήταν επίσης η δημιουργία ενός γεωλογικού χάρτη αναλογίας 1:100.000, ο οποίος παραδόθηκε με επιτυχία το 2017.

Η τοποθεσία των ερευνών χωρίζεται σε 3 μέρη. Το Kongsberg-I είναι οι περιοχές Krøderen, Sokna, Hønefoss και οι μετρήσεις λήφθηκαν τον φθινόπωρο του 2010. Το Kongsberg- II αποτελείται από τις περιοχές Vikersund, Hokksund και Kongsberg όπου οι μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν από το φθινόπωρο του 2008 έως και το καλοκαίρι του 2009. Τέλος τα συλλεχθέντα δεδομένα από την περιοχή Kongsberg-III όπου περιλαμβάνονται οι περιοχές Nimedalen Valley και Hvittingfoss λήφθηκαν τους μήνες Μάιο και Ιούνιο του έτους 2011.

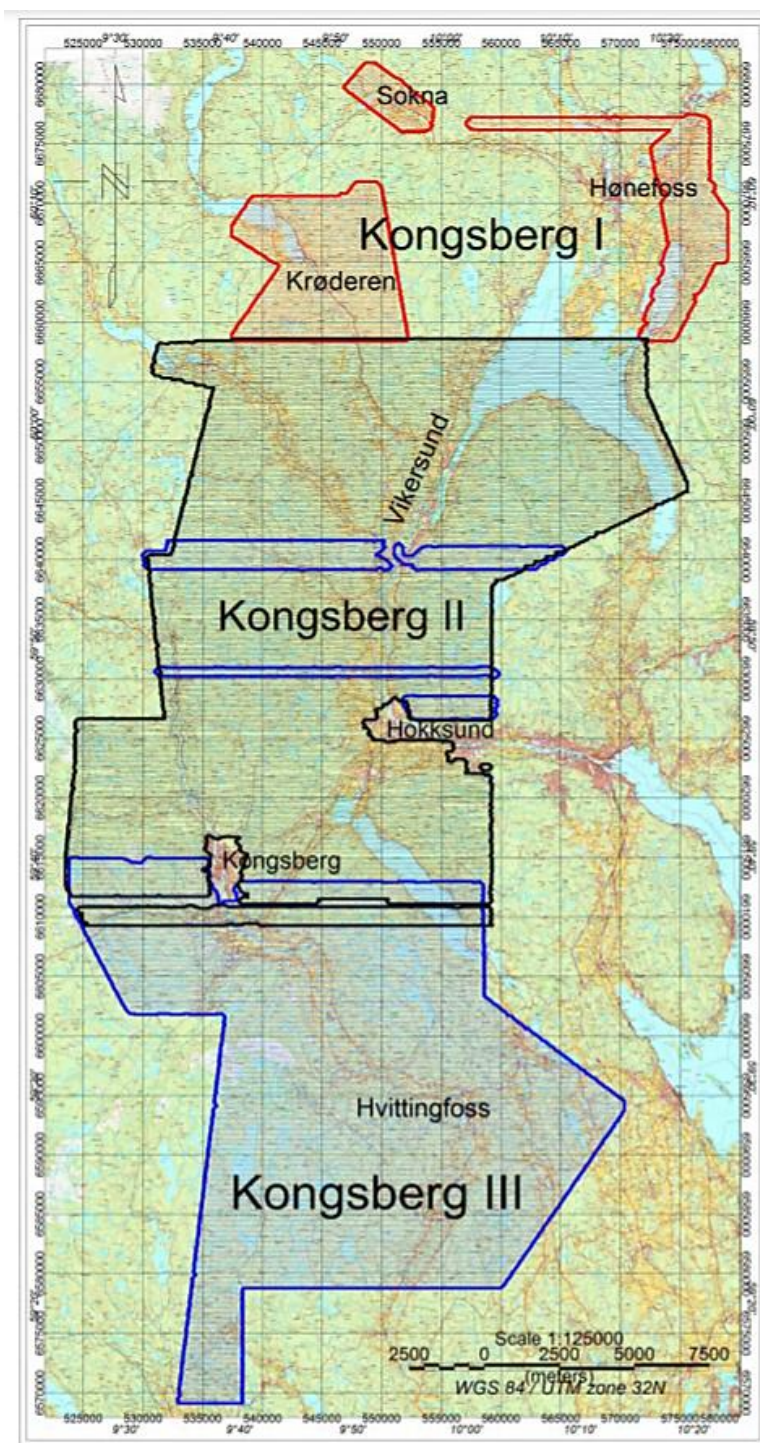
Τα γεωφυσικά δεδομένα που καταγράφηκαν από αέρος με την χρήση ελικοπτέρου ήταν μαγνητικά, ηλεκτρομαγνητικά και ραδιομετρικά. Τα όργανα ήταν ειδικά τροποποιημένα από το NGU, διαμορφωμένα κατάλληλα για την περιοχή μελέτης. Η ακριβή τοποθέτηση των καταγραφών τους έγινε με ένα σύγχρονο GPS (Global Positioning System), με βάση το παγκόσμιο γεωδαιτικό σύστημα του 1984 (World Geodetic System 1984 – WGS84).

Η μέση απόσταση του αεροσκάφους από το έδαφος, καθ' όλη τη διάρκεια των καταγραφών, ήταν περίπου 70-75m. Οι μετρήσεις κατά μήκος των γραμμών πτήσεων ήταν εξαιρετικά πυκνές, ενώ η απόσταση τους ήταν 200μ. Το χρονικό διάστημα ανάμεσα στις ραδιομετρικές καταγραφές ήταν 1 δευτερόλεπτο, με τους ανιχνευτές των ακτινών γάμμα να καταγράφουν φωτόνια από κάθε κατεύθυνση. Τα δεδομένα των τριών ραδιοϊσοτόπων, Καλίου Ουρανίου και Θωρίου, τα οποία προέρχονται από τα ανώτερα 30 με 40 εκατοστά του εδάφους, αναλύονται και επεξεργάζονται.

Στην συνέχεια της εργασίας θα δούμε την τοποθεσία των ερευνών, τα όργανα και τον τρόπο των μετρήσεων, θα ακολουθήσει η επεξεργασία- κανονικοποίηση των δεδομένων μας, βάση διαφόρων μαθηματικών τύπων, που έχουν ως στόχο την διόρθωση τους από κύριους παράγοντες, θα αναλύσουμε τη μέθοδο καταγραφής της ακτινοβολίας γάμμα και θα ερμηνεύσουμε τις μετρήσεις των στοιχείων K, U, Th, θα δούμε ενδελεχώς την γεωλογία της περιοχής του Kongsberg ενώ θα μάθουμε για τον διάσημο γρανίτη του και θα κλείσουμε την εργασία με τους χάρτες που δημιουργήσαμε μέσω του Surfer και τα συμπεράσματα που προκύπτουν.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΤΟΠΟΘΕΣΙΑ ΕΡΕΥΝΩΝ

Βρισκόμαστε στην νότια Νορβηγία και πιο συγκεκριμένα 84 χιλιόμετρα μακριά από το Όσλο. Η περιοχή μελέτης βρίσκεται δυτικά του Oslofjord στο Telemark, στις επαρχίες Buskerud και Vestfold. Ειδικότερα, στην *Εικόνα 1* παρατηρούμε την τοποθεσία των ερευνών, όπου τα 3 πολύγωνα χρωμάτων κόκκινο, μαύρο & μπλε, αντιπροσωπεύουν τις περιοχές Kongsberg-I, Kongsberg-II & Kongsberg-III αντίστοιχα. Στην συγκεκριμένη εργασία θα ασχοληθούμε κυρίως με το Kongsberg-II. Όπως αναφέρθηκε και προηγουμένως, το Kongsberg-II περιλαμβάνει τις περιοχές Vikersund, Hokksund και την πόλη του Kongsberg.



Εικόνα 1: Οι τρεις περιοχές των ερευνών στο Kongsberg της Νορβηγίας. (NGU, 2013)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΜΕΘΟΔΟΛΟΓΙΑ-ΟΝΟΜΑΤΟΛΟΓΙΑ ΟΡΓΑΝΩΝ

Οι έρευνες στην περιοχή μελέτης ξεκίνησαν το φθινόπωρο του 2008. Περιλάμβαναν μαγνητικά, ηλεκτρομαγνητικά καθώς και ραδιομετρικά δεδομένα. Όλες οι μετρήσεις έγιναν από αέρος.

3.1 Το ελικόπτερο

Το αεροσκάφος που χρησιμοποιήθηκε σε όλη τη διάρκεια των μετρήσεων ήταν το Eurocopter AS350-B2. Το συγκεκριμένο ελικόπτερο ήταν υπό συνεχή επίβλεψη. Από το 2008-2009 από την Pegasus As. , το 2010 από την Airlift As. και το 2011 από την Heliscan. Οι αποστάσεις των γραμμών του, ήταν περίπου 200m. και η κατεύθυνση που ακολουθούσε ήταν ως επί το πλείστον από τα ανατολικά προς τα δυτικά (εκτός από μία μικρή περιοχή στη Sokna, στην περιοχή ερευνών Kongsberg-I, όπου κατευθυνόταν με αζιμούθιο 140°). Οι συντεταγμένες δίνονται στο σύστημα UTM32N.

Η μέση ταχύτητα του ελικοπτέρου ήταν τα 108 km/h ενώ η μέση απόσταση του από το έδαφος, ήταν τα κατά μέσο όρο τα 75 μέτρα. Το εύρος των ταχυτήτων του Eurocopter ήταν από 50 έως τα 120 χιλιόμετρα την ώρα, ανάλογα με την τοπογραφία της εκάστοτε περιοχής, την κατεύθυνση και την ταχύτητα του ανέμου. Το συγκεκριμένο ελικόπτερο χαρακτηρίστηκε ιδανικό, λόγω της ικανότητας του να πετάει σε μικρό ύψος, με όχι μεγάλη ταχύτητα. Για την απόσταση του από το έδαφος έπαιζε ρόλο και η ικανότητα του πιλότου, ώστε να διατηρήσει την ασφάλεια της πτήσης αλλά επίσης να βρίσκεται μέσα σε ορισμένα υψομετρικά πλαίσια. Πιο συγκεκριμένα, για τα μαγνητικά και τα ηλεκτρομαγνητικά δεδομένα η απόσταση των οργάνων από το έδαφος πρέπει να είναι τουλάχιστον 35 μέτρα ενώ για τα ραδιομετρικά 65 μέτρα.

Το ελικόπτερο φέρει επίσης σύστημα πλοήγησης χρησιμοποιώντας συστήματα δορυφορικής αναζήτησης GPS/GLONASS, ώστε να παρέχει ακριβή στοιχεία για τη θέση, με βάση το σύστημα συντεταγμένων WGS-84. Μάλιστα, επειδή η ακρίβεια είναι ιδιαίτερα σημαντική, η θέση ανταποκρίνεται σε real time, δηλαδή γνωρίζουμε την τοποθεσία του κάθε 1 δευτερόλεπτο, με απόκλιση μικρότερη από 5 μέτρα στις οριζόντιες κατευθύνσεις.



Εικόνα 2: Στη φωτογραφία απεικονίζεται το Eurocopter AS350-B3 της εταιρίας HeliScan AS, κατάλληλα εξοπλισμένο για τις γεωφυσικές από αέρος έρευνες. (NGU, 2014)

3.2 Τα όργανα καταγραφής του ελικοπτέρου

ΟΡΓΑΝΟ	ΠΑΡΑΓΩΓΟΣ/ MONTELO	ΑΚΡΙΒΕΙΑ	ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΔΕΙΓΜΑΤΟΛΗΨΕΙΑΣ
Μαγνητόμετρο	Scintrex Cs- 2	0,002 nT	5 Hz
Ηλεκτρομαγνητικά	Scintrex EnviMag	1-2 ppm	10 Hz
Ακτινοβολία γάμμα	Exploranium GR 820 Radiation Solutions RSX-5	256/1024 κανάλια, 16 λίτρα κάτω, 4 λίτρα πάνω	1 Hz
Radar υψομέτρου	Bendix/King KRA 405B	3% → 0-500 fot 5% → 500-2500 fot	1 Hz
Πίεση/ Θερμοκρασία	Honeywell PPT	0,03 % FS	1 Hz
Πλοήγηση	Topcon GPS - receiver	5 m.	1 Hz
Σύστημα απόκτησης των δεδομένων	Geotech Ltd και NGU Inhouse software		

(NGU, 2013)

3.3 Ανάλυση των οργάνων καταγραφής της ακτινοβολίας γάμμα

Η αερομεταφερόμενη φασματομετρία των ακτινών γάμμα είναι από τις κύριες μεθόδους που χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της ραδιενέργειας. Το φασματόμετρο των ακτινών γάμμα είναι εγκατεστημένο σε ελικόπτερα ή αεροπλάνα για την μέτρηση της συγκέντρωσης ραδιενεργού ουρανίου, θορίου, καλίου αλλά και άλλων νουκλεϊδίων στο έδαφος. Η εφαρμογή της τεχνολογίας αυτής, διαφέρει από τη γεωλογική χαρτογράφηση ή την εξερεύνηση ορυκτών. Το εύρος της μεθόδου AGRS (Airborne Gamma-Ray Spectrometry) φτάνει μέχρι την ανίχνευση πυρηνικών ατυχημάτων αλλά και την περιβαλλοντική παρακολούθηση.

Σύμφωνα με τους Fei Li et al., 2020, ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του φασματογράφου, όπως η ανάλυση ενέργειας, τα κανάλια, ο τύπος του ανιχνευτή και της μονάδας του ηλεκτρονικού κυκλώματος, το όργανο AGRS μπορεί να χωριστεί σε 3 γενιές:

- Η πρώτη γενιά φασματόμετρων είναι με τη λειτουργία συνολικής μέτρησης ακτινοβολίας γάμμα. Ο ανιχνευτής είναι ο μετρητής Geiger-Muller.
- Στη δεύτερη γενιά τοποθετείται το φασματόμετρο ακτινοβολίας γάμμα τεσσάρων καναλιών με κρύσταλλο ιωδιούχου νατρίου (NaI).
- Ο πολυκάναλος αναλυτής εύρους παλμού, επίσης με κρύσταλλο NaI μεγάλου όγκου και ψηφιακό ενσωματωμένο μικροεπεξεργαστή υψηλής ταχύτητας, είναι το όργανο 3^{ης} γενιάς.

Αξίζει να σημειωθεί πως οι κρύσταλλοι ιωδιούχου νατρίου (NaI) ενεργοποιημένοι με την χρήση θαλίου, χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση ακτινών γάμμα, με απόδοση ανίχνευσης έως και 100% στις χαμηλές ενέργειας ακτίνες γάμμα και με λίγο μικρότερο ποσοστό στις υψηλές ενέργειας. Είναι διαφανείς κρύσταλλοι με μεγάλη πυκνότητα (3.66 g/cm³) και μπορούν να κατασκευαστούν σε μεγάλους όγκους. Φυσικά είναι εύθραυστοι, είναι υγροσκοπικοί και η λειτουργία του φωτοπολλαπλασιαστικού σωλήνα εξαρτάται σημαντικά από την θερμοκρασία.

3.3.1 Η πρώτη γενιά φασματογράφων ακτινών γάμμα

Το 1923 ένας μελετητής της πρώην Σοβιετικής Ένωσης δημοσίευσε μία έρευνα για τη μέτρηση της ραδιενέργειας, επεξηγώντας τις αρχές και τις θεωρίες που χρησιμοποιούνται για την διεξαγωγή ραδιενεργών εξερευνήσεων με βάση τη γεωλογία. Το 1932, για πρώτη φορά, το ραδιόμετρο πεδίου εξοπλισμένο με απαριθμητή Geiger- Muller χρησιμοποιήθηκε για γεωλογική εξερεύνηση στον Καναδά. Το 1944, ξεκίνησε η πειραματική έρευνα ραδιενέργειας στην περιοχή με την χρήση του απαριθμητή και πέτυχε το σκοπό της τέσσερα χρόνια αργότερα, το 1948. Από τον επόμενο χρόνο, οι ΗΠΑ, ο Καναδάς, η Σοβιετική Ένωση καθώς και το Ηνωμένο Βασίλειο ξεκίνησαν να σχεδιάζουν τον κρύσταλλο του αερομεταφερόμενου ραδιομέτρου, ενώ οι Ηνωμένες Πολιτείες κατασκεύασαν με επιτυχία, την ίδια χρονιά, ένα ραδιόμετρο πεδίου για τις μετρήσεις τους. Από το 1950, οι χώρες αυτές ξεκίνησαν τις εκτενείς έρευνες στην αναζήτηση ουρανίου. Τα όργανα που χρησιμοποιούσαν την εποχή εκείνη, περιλάμβαναν τα σοβιετικής παραγωγής CGM-10 και ACGM-25 (το 1^ο αποτελεί σύστημα πλοήγησης ενώ το 2^ο ήταν το αεροπορικό μαγνητόμετρο). Το όργανο ACGM-25 ήταν ένας μετρητής Geiger- Muller με ευαισθησία περίπου 39 CPS/Ur.

Παρατηρούμε λοιπόν ότι η Σοβιετική Ένωση την εποχή εκείνη είναι μία σημαντική δύναμη στο χώρο της γεωφυσικής και ειδικότερα μάλιστα στην αερομεταφερόμενη εξερεύνηση. Όχι μόνο κατέχει το κομμάτι της γεωφυσικής αναζήτησης αλλά είναι εξαιρετικά ικανή και στην επιτόπια εργασία. Κάτι που είναι ιδιαίτερα σημαντικό στην αναζήτηση ορυκτών. Η γεωφυσική ομάδα που απασχολούσε ήταν πολυάριθμη και με πλήθος ειδών και αεροσκαφών για τις έρευνες της. Ωστόσο, το σημείο που υστερούσε η διαδικασία ήταν η ίδια η μέθοδος AGRS. Δεν ήταν ιδιαίτερα ανεπτυγμένη, με αποτέλεσμα τα δεδομένα που συνέλεγαν από το τετρακάναλο φασματόμετρο με τον 6.37 λίτρα κρύσταλλο να είναι σε κακή ανάλυση. Η καλύτερη ανάλυση ήταν 12-14% (AGC-71c).

3.3.2 Η δεύτερη γενιά φασματογράφων ακτινών γάμμα

Συγκριτικά με την πρώτη γενιά φασματογράφων, η κυριότερη αλλαγή είναι ότι η ανάλυση εύρους παλμού τεσσάρων καναλιών πραγματοποιήθηκε με βάση το αναλογικό ηλεκτρονικό σύστημα. Στην δεκαετία του 1960, με βάση το ACGM-25, σε εργοστάσιο εξοπλισμού στο Πεκίνο της Κίνας αναπτύχθηκε ένα φασματόμετρο ακτινοβολίας γάμμα, με τον κρύσταλλο του ανιχνευτή να έχει όγκο 3.14 λίτρα. Η ευαισθησία του έφτασε τα 110 CPS, κάτι που προσδιορίζει την πρόοδο της μεθόδου, μίας και οι προηγούμενοι φασματογράφοι είχαν ακρίβεια τα 30 CPS. Την δεκαετία του '70 η Κίνα ανέπτυξε επίσης το FD-123, το πρώτο ραδιόμετρο τεσσάρων καναλιών με τον όγκο του κρυστάλλου να ανέρχεται σε 6.25 λίτρα. Το φασματόμετρο, μπορεί να πραγματοποιήσει αερομεταφερόμενη έρευνα με σχετική ευκολία ενώ μπορεί να παρέχει δεδομένα για τις συγκεντρώσεις των στοιχείων κάλιο, ουράνιο και θόριο. Παρ' όλα αυτά η ποιότητα των φασματικών παραθύρων είναι ακόμα χαμηλή, λόγω του μικρού όγκου του κρυστάλλου αλλά και της χαμηλής ευαισθησίας του.

Στα τέλη της δεκαετίας του '80, το Beijing's Third Research Institution κατάφερε να αναπτύξει και να κατασκευάσει το AS-200, ένα τετρακάναλο μετρητή ακτινών γάμμα με ενσωματωμένο σύστημα μέτρησης, το οποίο περιλάμβανε ραντάρ υψομέτρου, χρονική καταγραφή, ακριβή αεροπορική θέση, σύστημα εγγραφής κλπ. Το συγκεκριμένο σύστημα μπορεί τόσο να συλλέξει αλλά επίσης και να επεξεργαστεί τα δεδομένα δίνοντας τις συγκεντρώσεις των στοιχείων.

Η σειρά οργάνων FD της Κίνας ανέπτυξε επίσης το FD- 3022 αποτελούμενο από έναν κρύσταλλο ιωδιούχου νατρίου μεγέθους 75×75mm και τον φωτοπολλαπλασιαστή GDB-76F. Το εν λόγω φασματόμετρο πέραν της φορητότητας του, παρέχει τη λειτουργία αυτόματης σταθεροποίησης φάσματος. Η εφαρμογή της λειτουργίας αυτής, βοηθάει στην αποφυγή της μετατόπισης του φάσματος που συμβαίνει λόγω της γρήγορης διακύμανσης της θερμοκρασίας ή/και του ρυθμού μέτρησης ή και άλλων παραγόντων. Το αποτέλεσμα της εφαρμογής αυτής της μεθόδου είναι ότι η ενεργειακή κορυφή δεν θα μετατοπίσει το προκαθορισμένο πλάτος του καναλιού άρα τα

δεδομένα μέτρησης θα είναι πιο αξιόπιστα. Επιπλέον στο όργανο FD-3022, εφαρμόστηκε το ολοκληρωμένο κύκλωμα CMOS, με μεγάλη κλίμακα, υγρό κρύσταλλο και ψηφιακή οθόνη, οδηγώντας σε μικρό συντελεστή κατανάλωσης και θερμοκρασίας. Το συγκεκριμένο όργανο χαρακτηρίζεται επιπροσθέτως ως το πλέον αντιπροσωπευτικό φασματόμετρο ακτινών γάμμα δεύτερης γενιάς λόγω των πολλών χρήσεων και της πρακτικότητας του. Χρησιμοποιείται κυρίως στην γενική έρευνα πεδίου τόσο στον εντοπισμό ραδιενεργών ορυκτών αλλά και στην αναζήτηση μεταλλικών ή ακόμη και μη μεταλλικών εναποθέσεων, όπως ορυχείων χρυσού ή κοιτασμάτων πετρελαίου. Μπορεί τέλος να γίνει χρήσιμο ακόμη και στην αναζήτηση νερού και στην παρακολούθηση του περιβάλλοντος.

Συμπερασματικά, για τη δεύτερη γενιά φασματογράφων, αντιλαμβανόμαστε ότι έγινε σημαντική πρόοδος αλλά και πάλι η ακρίβεια των μετρήσεων δεν ήταν ιδιαίτερα μεγάλη. Οι ελλείψεις των φασματόμετρων είναι εμφανής με κυριότερη την χαμηλή τους ευαισθησία. Σταδιακά ο κρύσταλλος έλαβε κυλινδρικό σχήμα και η δομή του ανιχνευτή απέκτησε εξαιρετικά μικρό όγκο, κάτι που θα βελτιώνει τη μέθοδο AGRS. Ωστόσο, ο ανεπαρκής εξοπλισμός της εποχής περιόριζε πολύ την όλη διαδικασία, καθώς η τεχνολογία των υπολογιστών και του λογισμικού ήταν ιδιαίτερα αργή και η συνεργασία των δύο ήταν υψηλής σημασίας για την ερμηνεία των καταγραφών. Τέλος γνωρίζουμε, πως κατά την διάρκεια των ερευνών μέσω των φασμάτων της ακτινοβολίας γάμμα υπήρχε σοβαρή άγνοια τόσο της βασικής θεωρίας όσο και της πρακτικής έρευνας, κάτι που οδήγησε στο να παραμείνουν λίγα επιστημονικά ινστιτούτα που να ασχολούνται με τις αερομεταφερόμενες μετρήσεις.

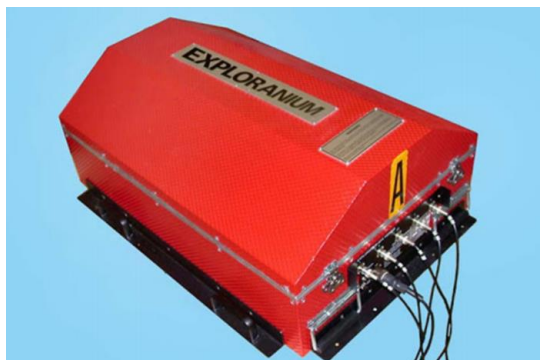
3.3.3 Η τρίτη γενιά φασματογράφων ακτινών γάμμα

Τα χαρακτηριστικά που ξεχωρίζουν τα φασματόμετρα 3^{ης} γενιάς από τα υπόλοιπα είναι κυρίως τρία. Καταρχήν είναι ο μεγαλύτερος όγκος του κρυστάλλου NaI, κατά δεύτερον ο ψηφιακός μικροεπεξεργαστής υψηλής απόδοσης και κατά τρίτον ο πολυκαναλικός αναλυτής εύρους πλάτους (256/ 512/ 1024). Από το 1970 και έπειτα, ο τετράγωνος κρύσταλλος NaI, με όγκο 37.5lt. και υψηλή ανάλυση (πάνω από 9-10%) χρησιμοποιήθηκε από την αμερικανική εταιρία GEOMETRICS. Το αερομεταφερόμενο φασματόμετρο ακτινών γάμμα με υψηλή ευαισθησία, GR- 800D , αναπτύχθηκε με την χρήση μικροεπεξεργαστή και πολυκαναλικού αναλυτή εύρους παλμού (256/ 512/ 1024). Το GR-800D χρησιμοποίησε για πρώτη φορά την νέα σχεδίαση, αποτελούμενο από έναν τετράγωνο ανιχνευτή NaI άνω/ κάτω. Ο κάτω ανιχνευτής χρησιμοποιήθηκε κυρίως για την μέτρηση της ακτινοβολίας γάμμα από το έδαφος ενώ ο άνω ειδικεύτηκε στη μέτρηση του ραδιενεργού συστατικού ²¹⁴Bi στον αέρα. Η ακρίβεια ανίχνευσης αυτού του ραδιονουκλιδίου ήταν αρκετά αποδεκτή. Πιο συγκεκριμένα για το *κάλιο* έχουμε ακρίβεια της τάξης του $1 \pm 0,25\%$, για το *ουράνιο* $(4 \pm 1) \times 10^{-8}$ και για το *θόριο* $(8 \pm 2) \times 10^{-6}$. Τα δεδομένα που συνέλεγε ο άνω ανιχνευτής χρησιμοποιούνταν στην διόρθωση του κάτω, με σκοπό την εξάλειψη της επιρροής του στοιχείου ²¹⁴Bi στον αέρα (Radon Correction).

3.3.3.1 Το όργανο GR-820

Στην δεκαετία του 1990, η εταιρία Exploranium με έδρα τον Καναδά, δημιουργεί το πολυκαναλικό φασματόμετρο ακτινών γάμμα GR-820. Το συγκεκριμένο φασματόμετρο λόγω των υψηλών προδιαγραφών του, χρησιμοποιήθηκε για την αξιολόγηση άλλων τυπικών φασματόμετρων, διεθνώς. Η διαφορική μη γραμμικότητα του είναι μικρότερη από 1% και η ακέραιη μη γραμμικότητα του δεν ξεπερνά το 0,2%. Το διάστημα ανιχνεύσιμης ενέργειας είναι από 20 keV έως 4 MeV και ο «νεκρός» χρόνος του ανιχνευτή είναι μικρότερος από 5 us. Όσον αναφορά τα χαρακτηριστικά του GR-820, ένα από αυτά είναι η τεχνολογία ελέγχου αυτόματης σταθεροποίησης. Επίσης το σήμα κάθε ανιχνευτή λειτουργεί με τη μέθοδο προσαρμογής καμπύλης Gauss, σύμφωνα με την επιλεγμένη σταθερή κορυφή, διασφαλίζοντας έτσι ένα σταθερό φάσμα. Ένα άλλο χαρακτηριστικό του οργάνου είναι ότι η συσσώρευση ζεύγους εφαρμόστηκε με ειδικό ηλεκτρονικό κύκλωμα και λογισμικό, τα οποία μπορούν να ξεχωρίσουν τα επικαλυπτόμενα σήματα. Ο μέγιστος αριθμός κρυστάλλων στο όργανο είναι 16. Στην εκδοχή

των 512 καναλιών, ο μέγιστος αριθμός κρυστάλλων είναι 8. Το όργανο GR-820 διαθέτει επίσης οθόνη ανάλυσης 640×200 και πάνελ 21 πλήκτρων για ευκολότερο χειρισμό. Τέλος το φασματόμετρο GPX-1024/256 φτάνει τα 197 κιλά, οι διαστάσεις του στον χώρο είναι 28.85 x 20 x 12" (73x51x39cm) και η θερμοκρασία λειτουργίας του έχει εύρος από -20°C έως +50°C .



Εικόνα 3: Ο φασματογράφος ακτίνων γάμμα Exploranium GR-820 (μονάδα ανίχνευσης: GPX-1024-256).

3.3.3.2 Το όργανο RS-500

Το 2003 το πολυκαναλικό φασματόμετρο RS-500 κατασκευάστηκε από μία канаδική εταιρία την Radiation Solutions Inc. Η μονάδα ADS αναγνωρίζει ότι κάθε NaI έχει τον δικό του μετατροπέα και επεξεργαστή αναλογικού σε ψηφιακό, υψηλής μάλιστα ταχύτητας (60 MHz). Αυτή η ενότητα μετατρέπει αναλογικά σήματα σε ψηφιακά και έχει ανάλυση ενός εκατομμυρίου καναλιών. Χρησιμοποιώντας την καμπύλη βαθμονόμησης ενέργειας που είναι αποθηκευμένη στην μονάδα ADS, το ενεργειακό φάσμα ευθυγραμμίζεται και συμπίεζεται σε 1024 γραμμές δεδομένων. Η ισχύς επεξεργασίας υψηλής ταχύτητας, DSP, δίνει σε κάθε ανιχνευτή κρυστάλλου απόδοση δεδομένων έως 250.000 cps. Το RS-500 επιτυγχάνει επίσης «μηδενικό νεκρό χρόνο» συγκριτικά με το GR-820, με αποτέλεσμα πολύ υψηλή ακρίβεια και καθαρά δεδομένα φάσματος. Ο συνολικός όγκος των κρυστάλλων φτάνει τα 16-20 L. , η διαφορική μη γραμμικότητα είναι μικρότερη από 0,2% , η ολοκληρωμένη μη γραμμικότητα είναι μικρότερη από 0,01% , το εύρος ανιχνεύσιμης ενέργειας είναι μεταξύ 12 keV και 3 MeV, η φασματική μετατόπιση κορυφής είναι μικρότερη από 0,5% και η ενεργειακή του ανάλυση μικρότερη από 8,5% . Το RS-500 φέρει πάνω του, τον φασματογράφο ακτίνων γάμμα RSX-5, βάρους 114 κιλών και διαστάσεων 690 mm x 573mm x 288mm. Η δυνατότητα δειγματοληψίας του, είναι ανά 0.1-10 sec⁻¹, ενώ η θερμοκρασία λειτουργίας του οργάνου είναι από -30°C έως +45°C.



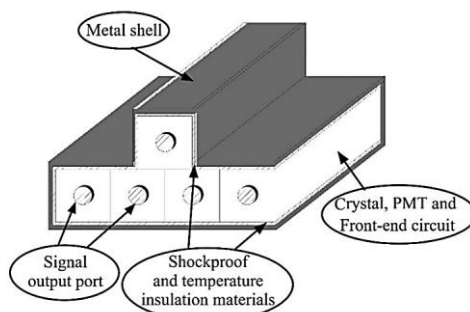
Εικόνα 4: Ο φασματογράφος ακτίνων γάμμα RSX-5, της εταιρίας Radiation Solutions Inc.

3.3.3.3 Έτερα όργανα 3^{ης} γενιάς που αναπτύχθηκαν κατά καιρούς

Η μέθοδος της φασματομετρίας κατέληξε να είναι ένας σταδιακά αναπτυσσόμενος τρόπος έρευνας, με αποτέλεσμα τα όργανα που κατασκευάζονται να φέρουν όλο και καλύτερα αποτελέσματα και δεδομένα από τις καταγραφές τους.

Η εταιρία WGC με έδρα στην Αυστραλία ανέπτυξε το πολυκαναλικό όργανο PGAM-1000, με δυνατότητα self-calibrating. Μπορεί να καταγράψει 256 ενεργειακά φάσματα του διορθωμένου αθροίσματος και 1024 ενεργά φάσματα με την χρήση ενός απλού κρυστάλλου. Η ίδια εταιρία ανέπτυξε μία νέα μέθοδο επεξεργασίας της φασματομετρίας, με όνομα SPECTRAPLUS, η οποία χρησιμοποιεί τα ραδιομετρικά δεδομένα των καταγραφών από τα συνολικά 256 κανάλια, ώστε να υπολογιστούν οι συγκεντρώσεις των στοιχείων ουρανίου, καλίου και θορίου. Κάθε κανάλι προσομοιώνεται σε ένα ορισμένο ύψος για να λάβει την αναμενόμενη απόκριση, η οποία είναι κατάλληλη για δεδομένα με χαμηλό ρυθμό μέτρησης, αυξάνοντας σημαντικά την ευαισθησία και βελτιώνοντας την αναλογία του σήματος προς τον θόρυβο (SNR).

Το 2004, δύο νέα όργανα μέτρησης ενεργειακού φάσματος ξεκίνησε από την εταιρία Pico Envirotec στον Καναδά, με όνομα GRS- 10/16. Αυτά τα 2 όργανα χρησιμοποίησαν το έξυπνο, self-adjusting φασματόμετρο ακτινοβολίας γάμμα που αναπτύχθηκε από τους ανιχνευτές συστοιχιών NaI, αλλά με διαφορετική μορφή εξόδου δεδομένων. Το GRS-10 μπορεί να συνδεθεί με 10 ανιχνευτές και κάθε ανιχνευτής μπορεί να εξάγει δεδομένα, τα οποία μπορούν να συσσωρευτούν σε 256 ή 512 κανάλια. Το GRS-16 μπορεί να συνδεθεί με 16 ανιχνευτές και να καταγράψει έως και 512 γραμμές φασματικών δεδομένων. Τα όργανα GRS-10/16 μειώνουν ακόμη περισσότερο τον «νεκρό χρόνο» και εντείνουν τα γραμμικά χαρακτηριστικά των παλμών, κυρίως λόγω της ψηφιακής ενίσχυσης. Ενώ, λόγω της υψηλής ποιότητας των δεδομένων μπορεί να χρησιμοποιηθεί μία ποικιλία νέων τεχνολογιών για την εξάλειψη των παρεμβολών του ατμοσφαιρικού ραδονίου.



Εικόνα 5: Η εσωτερική δομή του ανιχνευτή, του αερομεταφερόμενου φασματογράφου ακτινοβολίας γάμμα

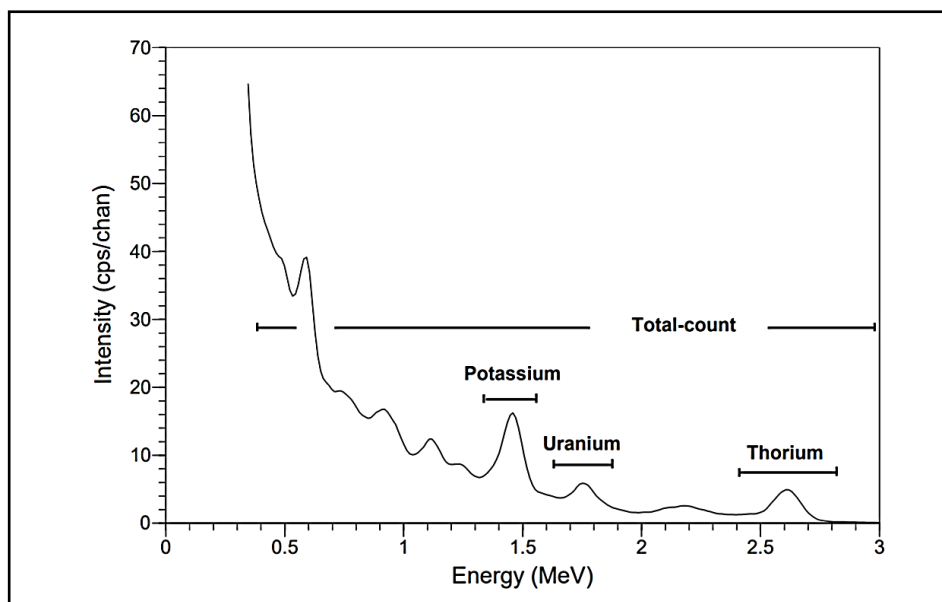
Μεταφερόμαστε στο κοντινό 2010 όπου η Κίνα αναπτύσσει το AGS-863. Το σύστημα μέτρησης μπορεί ταυτόχρονα να συνδεθεί με κρυστάλλους συστοιχίας NaI. Η δομή του φασματόμετρου φαίνεται στην Εικόνα 5. Το εύρος της ενέργειας ανίχνευσης είναι από 0,02-10,0 MeV, με περίοδο δειγματοληψίας 0,5-1 δευτερόλεπτο. Ο μέγιστος ρυθμός μέτρησης είναι μεγαλύτερος από 105 CPS και οι πληροφορίες πλήρους φάσματος υπερβαίνουν τα 1024 κανάλια. Τέσσερα χρόνια αργότερα, και πάλι στην Κίνα, δημιουργείται το AGRSS-15, το οποίο αποτελεί το πλέον κατάλληλο μέσο για αερογεωφυσικής έρευνας. Επιλύει σημαντικά προβλήματα των ερευνητών, καθώς φέρει τεχνολογίες αποθήκευσης και ελέγχου σήματος ενώ αποσβένει τις δονήσεις του ελικοπτέρου στο όργανο καταγραφής. Ο ανιχνευτής του υιοθετεί 3 κουτιά κρυστάλλων NaI. Το εύρος της ανιχνεύσιμης ενέργειας κυμαίνεται από 50 keV έως τα 3 MeV και η συχνότητα δειγματοληψίας του οργάνου είναι 1 Hz. Η φασματική κορυφή είναι μικρότερη από ± 1 κανάλι και η ενεργειακή ανάλυση μικρότερη από 10%.

3.4 Βαθμονόμηση των οργάνων

Από την έναρξη των ερευνών, τα φασματόμετρα ακτινών γάμμα βαθμονομήθηκαν κατάλληλα για την ευαισθησία τους σε K, U, Th από το NGU. Τον Ιούνιο του 2012 στο Borlange της Σουηδίας, σε ειδικές εγκαταστάσεις βαθμονόμησης οργάνων με σκοπό την λήψη ραδιομετρικών μετρήσεων, υπολογίστηκαν οι λόγοι απογύμνωσης (stripping ratios) και οι ευαισθησίες των τριών ραδιενεργών ισοτόπων ενδιαφέροντος. Οι συντελεστές της επίδρασης της κοσμικής ακτινοβολίας (cosmic coefficients), ο συντελεστής διόρθωσης του ύψους του αεροσκάφους από το έδαφος (height attenuation coefficients), καθώς και οι συντελεστές της επίδρασης του ελικοπτέρου (aircraft background), καθορίστηκαν από μία ειδική έρευνα βαθμονόμησης, σύμφωνα με τις συστάσεις του IAEA (International Atomic Energy Agency). Τέλος, οι προς τα πάνω ανιχνευτές (upward detectors) χρησιμοποιήθηκαν για μέτρηση και διόρθωση του ατμοσφαιρικού ραδονίου από τα δεδομένα. (NGU, 2013)

Στη συνέχεια θα δούμε αναλυτικά τις διορθώσεις στα συλλεχθέντα ραδιομετρικά δεδομένα, που πραγματοποιείται κυρίως με την χρήση κατάλληλων μαθηματικών τύπων (International Atomic Energy Agency, 2003).

3.5 Τυπικό φάσμα καταγραφών ακτινοβολίας γάμμα



Διάγραμμα 1: Example of a typical gamma ray spectrum. eV is the measure of an amount of kinetic energy gained by a single electron accelerating from rest through an electric potential difference of one volt in vacuum.

Στο Διάγραμμα 1 (IAEA,2003) παρατηρούμε ένα τυπικό φάσμα, από καταγραφές που έχουν προέλθει από αερομεταφερόμενη φασματομετρία ακτινών γάμμα (AGRS). Οι συνιστώσες είναι, η ενέργεια της ακτινοβολίας γάμμα, στο οριζόντιο άξονα, με μονάδες μέτρησης τα MeV και η ένταση στο κατακόρυφο άξονα με μονάδες προσπίπτων φωτονίων ανά δευτερόλεπτο σε κάθε κανάλι (cps/chan). Η μετρούμενη ενέργεια των σύγχρονων φασματομέτρων, φτάνει μέχρι τα 3MeV, διότι μεγαλύτερες ενέργειες προέρχονται από την κοσμική ακτινοβολία. Στο σχήμα φαίνονται τα φασματικά παράθυρα που καθορίζουν τα όρια στα κυριότερα ραδιενεργά στοιχεία. Για παράδειγμα η κορυφή (peak) στο παράθυρο ενέργειας του ^{40}K είναι στα 1.46 MeV αλλά το παράθυρο του βρίσκεται μεταξύ των 1.370-1.570MeV. Για τα στοιχεία U και Th τα ενεργειακά παράθυρα βασίζονται κυρίως στην αλυσίδα αποσύνθεσης τους, όπως θα δούμε στην συνέχεια, και τα παράθυρα τους βρίσκονται μεταξύ των 1.660-1.860MeV και 2.410-2.810MeV, αντίστοιχα. Το τυπικό φάσμα γ-ακτινοβολίας για το TC (ολική ενέργεια) είναι από 0.4-2.81MeV

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΦΥΣΙΚΕΣ ΠΗΓΕΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Οι πηγές φυσικής ακτινοβολίας γάμμα μπορούν να χωριστούν σε 3 κατηγορίες, ανάλογα με την προέλευση τους (Kogan et. al. 1969). Η πρώτη κατηγορία περιλαμβάνει τα στοιχεία ^{40}K , ^{238}U , ^{235}U , ^{232}Th τα οποία θεωρείται ότι συντέθηκαν κατά την δημιουργία του σύμπαντος και έχουν χρόνους ημιζωής παρόμοιους με την ηλικία της Γης (5×10^9 χρόνια). Η δεύτερη ομάδα περιλαμβάνει ραδιενεργά ισότοπα που είναι θυγατρικά προϊόντα της αποσύνθεσης των ισοτόπων την πρώτης κατηγορίας. Αυτά έχουν χρόνους ημιζωής που κυμαίνονται από μικρούς χρόνους έως και $10^4 - 10^5$ χρόνια. Η τρίτη κατηγορία αποτελείται από ισότοπα που δημιουργούνται από εξωτερικές αιτίες όπως η αλληλεπίδραση των κοσμικών ακτίνων με την Γη και την ατμόσφαιρα της. Σε γενικότερη αναλογία ισχύει πως όσο πιο μικρός είναι ο χρόνος ζωής, τόσο μεγαλύτερη η ακτινοβολία ανά λεπτό.

4.1 Τα 3 ραδιοϊσότοπα, τα χαρακτηριστικά και οι διασπάσεις τους

Το κάλιο, το ουράνιο και το θόριο είναι τα μοναδικά φυσικά στοιχεία με ραδιοϊσότοπα, που παράγουν ακτίνες γάμμα επαρκούς ενέργειας και έντασης, ώστε να μετρηθούν στα ύψη μίας αερομεταφερόμενης έρευνας. Η αφθονία των συγκεκριμένων στοιχείων είναι κατά προσέγγιση K-2%, U-2.7ppm & Th-8.5ppm (πρέπει να αναφέρω ότι 1ppm = 10^{-6} g/g = 1 g/ton). Αυτά τα στοιχεία εξασθενίζουν συνεχώς από την δημιουργία τους και συνεπώς μειώνεται συνεχώς η συγκέντρωσή τους στη Γη. Παρόλα αυτά, ο χρόνος ημιζωής των ισοτόπων τους είναι ιδιαίτερα μεγάλος και ως εκ τούτου παραμένουν σε σχετική αφθονία. Η αποσύνθεση αυτών των ραδιοϊσοτόπων συνοδεύεται καμία φορά από εκπομπές ακτινοβολίας γάμμα. Ο παρακάτω πίνακας αποτελεί δημοσίευση του IAEA(1989) για την μετατροπή των ραδιοστοιχείων από συγκεντρώσεις σε Bq / μονάδα βάρους.

$$1\% \text{ K in rock} = 313 \text{ Bq/kg } ^{40}\text{K} \quad (\text{Bq: Becquerel} = \text{s}^{-1})$$

A special name was introduced for the reciprocal second (s^{-1}) to represent radioactivity.

$$1 \text{ ppm U in rock} = 12.35 \text{ Bq/kg } ^{238}\text{U or } ^{226}\text{Ra}$$

$$1 \text{ ppm Th in rock} = 4.06 \text{ Bq/kg } ^{232}\text{Th}$$

One becquerel is defined as the activity of a quantity of radioactive material in which one nucleus decays per second.

4.1.1 Το ^{40}K ...

Είναι το μόνο ραδιενεργό στοιχείο του K και εμφανίζεται μόνο ως το 0.012% του φυσικού καλίου. Το 89% των πυρήνων αποσύνθεσης του ^{40}K από εκπομπή ηλεκτρονίων (σωματίδιο beta) γίνεται ^{40}Ca , ενώ το υπόλοιπο 11% αποσυντίθεται με δέσμευση ηλεκτρονίων σε ^{40}Ar . Αυτό ακολουθείται από την εκπομπή ενός φωτονίου ακτίνων γάμμα, ενέργειας 1.46 MeV. Δεδομένου επίσης ότι το ^{40}K εμφανίζεται ως σταθερή αναλογία K στο φυσικό περιβάλλον, η ροή ακτίνων γάμμα από ^{40}K μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση της συνολικής ποσότητας του K που υπάρχει. Ο χρόνος ημιζωής του είναι 1.3×10^9 χρόνια. Τέλος, αν και είναι μία πολύ ασθενέστερη πηγή ακτινοβολίας από τη σειρά του ουρανίου ή του θορίου, λόγω της αφθονίας του (2%), θεωρείται ως ισότιμο συνεισφέρων των U και Th στη ροή φυσικής ακτινοβολίας.

4.1.2 Το U...

Στη φύση εμφανίζεται μέσω τα 2 ραδιοϊσοτόπων του ^{238}U και ^{235}U , τα οποία δημιουργούν σειρές αποσύνθεσης που καταλήγουν στα σταθερά ισότοπα ^{206}Pb και ^{207}Pb αντίστοιχα. Οι χρόνοι ημιζωής τους για τα ^{238}U και ^{235}U είναι αντίστοιχα 4.47×10^9 χρόνια και 7.13×10^8 χρόνια. Δεδομένου ότι οι ημιζωές δεν είναι ίδιες προκύπτει ότι ο λόγος $^{238}\text{U} / ^{235}\text{U}$ αλλάζει πολύ αργά με τον χρόνο. Το ^{235}U σχηματίζει μόνο το 0.72% των φυσικών εμφανίσεων ουρανίου και οι ενέργειες των ακτίνων γάμμα στη σειρά διάσπασης του, είναι πολύ χαμηλές για να διαγνωστούν σε αερομεταφερόμενη έρευνα.

Ακολουθούν οι πίνακες διάσπασης των ^{238}U και ^{235}U μέχρι και τη σταθερή δομή των ^{206}Pb και ^{207}Pb αντίστοιχα.

Nuclide	Half-life	Major radiation energies (MeV) and intensities*		
		α	β	γ
^{238}U	4.468x10 ⁹ y	4.15 (23%) 4.19 (77%)	—	—
↓				
^{234}Th	24.1d	—	~0.103 (19%) 0.191 (81%)	0.063 (3.5%) 0.093 (4%)
↓				
^{234}Pa	1.18m	—	2.29 (98%)	0.765 (0.30%) 1.001 (0.60%)
99.86% ↓ 0.14% ↓				
^{234}Pa	6.7h	—	0.53 (66%) 1.13 (13%)	0.10 (50%) 0.70 (24%) 0.90 (70%)
↓				
^{234}U	2.48x10 ⁵ y	4.72 (28%) 4.77 (72%)	—	0.053 (0.2%)
↓				
^{230}Th	7.52x10 ⁴ y	4.62 (24%) 4.68 (76%)	—	0.068 (0.6%) 0.142 (0.07%)
↓				
^{226}Ra	1602y	4.60 (5.5%) 4.78 (94.5%)	—	0.186 (4%)
↓				
^{222}Rn	3.825d	5.49 (~100%)	—	0.510 (0.07%)
↓				
^{218}Po	3.05m	6.11 (100%)	0.33 (100%)	—
99.98% ↓ 0.02% ↓				
^{214}Pb	26.8m	—	1.03 (6%)	0.295 (19%) 0.352 (36%)
↓				
^{214}Bi	19.7m	5.61 (100%)	3.26 (100%)	0.609 (47%) 1.120 (17%) 1.764 (17%)
99.96% ↓ 0.04% ↓				
^{214}Po	164μs	7.83 (100%)	—	0.799 (0.014%)
↓				
^{210}Tl	1.32m	—	2.3 (100%)	0.296 (80%) 0.795 (100%) 1.31 (21%)
↓				
^{210}Pb	~22y	3.7 (1.8 x10 ⁻⁸ %)	0.017 (85%) 0.064 (15%)	0.047 (4%)
↓				
^{210}Bi	5.02d	4.93 (60%) 4.89 (34%) 4.59 (5%)	1.155 (100%)	—
~100% ↓ ~0.00001%				
^{210}Po	138.3d	5.30 (100%)	—	0.803 (0.0011%)
↓				
^{206}Tl	4.19m	—	1.520 (100%)	—
↓				
^{206}Pb	Stable	—	—	—

U PEAK

* Intensities refer to percentage of disintegrations of the nuclide itself, not to the original parent of the series.

Πίνακας Διάσπασης 1 : Παρατηρούμε τη διάσπαση του ^{238}U στη σταθερή δομή του ^{206}Pb . Στην δεύτερη στήλη έχουμε τους χρόνους ημιζωής και στις υπόλοιπες 3 στήλες διακρίνονται οι ενέργειες ακτινοβολίας (MeV) και οι εντάσεις των α , β , γ . Ο πίνακας αποτελεί απλοποίηση μετά τα Radiological Health Handbook (1970) και Ivanovich & Harmon (1982).

*Οι εντάσεις που αναφέρονται, αντιστοιχούν στο ποσοστό αποσύνθεσης του ίδιου του νουκλεϊδίου και όχι στο μητρικό στοιχείο της σειράς. [(IAEA, 2003)]

Nuclide	Half-life	Major radiation energies (MeV) and intensities*		
		α	β	γ
^{235}U	7.13x10 ⁸ y	4.36 (18%) 4.39 (57%) 4.1-4.6 (8%)	—	0.143 (11%) 0.185 (54%) 0.204 (5%)
^{231}Th	25.64h	—	0.300 (~100%)	0.026 (2%) 0.084 (10%)
^{231}Pa	3.43x10 ⁴ y	5.01 (<20%) 4.99 (25.4%) 4.94 (22.8%)	—	0.027 (6%) 0.29 (6%)
^{227}Ac	22y	4.95 (48.7%) 4.94 (36.1%) 4.87 (6.9%)	0.046 (100%)	0.070 (0.08%)
^{227}Th	18.17d	5.76 (21%) 5.98 (24%) 6.04 (23%)	—	0.050 (8%) 0.237 (15%) 0.31 (8%)
^{223}Fr	21m	5.34 (.005%)	1.15 (100%)	0.050 (40%) 0.080 (13%) 0.234 (4%)
^{223}Ra	11.68d	5.61 (26%) 5.71 (53.7%) 5.75 (9.1%)	—	0.149 (10%) 0.270 (10%) 0.33 (6%)
^{219}Rn	3.92s	6.42 (8%) 6.55 (11%) 6.82 (81%)	—	0.272 (9%) 0.401 (5%)
^{215}Po	1.83ms	7.38 (100%)	—	—
^{211}Pb	36.1m	—	0.95 (1.4%) 0.53 (5.5%) 1.36 (92.4%)	0.405 (3.4%) 0.427 (1.8%) 0.832 (3.4%)
^{211}Bi	2.16m	6.28 (17%) 6.62 (83%)	0.60 (0.28%)	0.351 (14%)
^{211}Po	0.52s	7.43 (99%)	—	0.570 (0.5%) 0.90 (0.5%)
^{207}Tl	4.79m	—	1.44 (100%)	0.897 (0.16%)
^{207}Pb	Stable	—	—	—

* Intensities refer to percentage of disintegrations of the nuclide itself, not to the original parent of the series.

Πίνακας Διάσπασης 2: Παρατηρούμε τη διάσπαση του ^{235}U στη σταθερή δομή του ^{207}Pb . Στην δεύτερη στήλη έχουμε τους χρόνους ημιζωής και στις υπόλοιπες 3 στήλες διακρίνονται οι ενέργειες ακτινοβολίας (MeV) και οι εντάσεις των α , β , γ . Ο πίνακας αποτελεί απλοποίηση μετά τα Radiological Health Handbook (1970), και Ivanovich & Harmon (1982).

* Οι εντάσεις που αναφέρονται, αντιστοιχούν στο ποσοστό αποσύνθεσης του ίδιου του νουκλεϊδίου και όχι στο μητρικό στοιχείο της σειράς. [(IAEA, 2003)]

4.1.3 To Th...

Εμφανίζεται γενικότερα ως το ραδιοϊσότοπο ^{232}Th , το οποίο δημιουργεί μία σειρά αποσύνθεσης που καταλήγει στο σταθερό ισότοπο ^{208}Pb . Να σημειωθεί πως κανένα από τα ^{232}Th και ^{238}U δεν εκπέμπει ακτίνες γάμμα και έτσι βασίζομαστε στις εκπομπές ακτίνων γάμμα από τα ραδιενεργά θυγατρικά προϊόντα τους ώστε να εκτιμηθούν οι συγκεντρώσεις τους.

Ακολουθεί η διάσπαση του ^{232}Th στη σταθερή δομή του ^{208}Pb .

Nuclide	Half-life	Major radiation energies (MeV) and intensities*		
		α	β	γ
^{232}Th	$1.39 \times 10^{10}\text{y}$	3.95 (24%) 4.01 (76%)	—	—
$\downarrow$				
^{228}Ra	5.75y	—	0.055 (100%)	—
$\downarrow$				
^{228}Ac	6.13h	—	2.11 (100%)	0.34 (15%) 0.908 (25%) 0.96 (20%)
$\downarrow$				
^{228}Th	1.913y	5.34 (28%) 5.42 (71%)	—	0.084 (1.6%) 0.214 (0.3%)
$\downarrow$				
^{224}Ra	3.64d	5.45 (5.5%) 5.68 (94.5%)	—	0.241 (3.7%)
$\downarrow$				
^{220}Rn	55.6s	6.30 (~100%)	—	0.55 (0.07%)
$\downarrow$				
^{216}Po	0.145s	6.78 (100%)	—	—
$\downarrow$				
^{212}Pb	10.64h	—	0.580	0.239 (47%) 0.300 (3.2%)
$\downarrow$				
^{212}Bi	60.5m	6.05 (70%) 6.09 (30%)	2.25 (100%)	0.040 (2%) 0.727 (7%) 1.620 (1.8%)
$\swarrow$ 64.0% $\searrow$ 36.0%				
^{212}Po	304ns	8.78 (100%)	—	—
$\downarrow$				
^{208}Tl	3.1m	—	1.80 (100%)	0.511 (23%) 0.583 (86%) 0.860 (12%) 2.614 (100%)
$\downarrow$				
^{208}Pb	Stable	—	—	—

* Intensities refer to percentage of disintegrations of the nuclide itself, not to the original parent of the series.

Th PEAK

Πίνακας Διάσπασης 3 : Παρατηρούμε τη διάσπαση του ^{232}Th στη σταθερή δομή του ^{208}Pb . Στην δεύτερη στήλη έχουμε τους χρόνους ημιζωής και στις υπόλοιπες 3 στήλες διακρίνονται οι ενέργειες ακτινοβολίας (MeV) και οι εντάσεις των α , β , γ . Ο πίνακας αποτελεί απλοποίηση μετά τα Radiological Health Handbook (1970) και Ivanovich & Harmon (1982).

* Οι εντάσεις που αναφέρονται, αντιστοιχούν στο ποσοστό αποσύνθεσης του ίδιου του νουκλεϊδίου και όχι στο μητρικό στοιχείο της σειράς. [(IAEA, 2003)]

4.2 Η ανισορροπία των στοιχείων

Η αστάθεια στη σειρά διάσπασης του ουρανίου είναι σοβαρή πηγή σφάλματος στη φασματομετρική έρευνα ακτινών γάμμα. Όταν η ραδιενεργή διάσπαση έχει ως αποτέλεσμα ένα ασταθές θυγατρικό προϊόν με χρόνο ημιζωής μικρότερη από εκείνη του μητρικού, θα επιτευχθεί τελικά μία κατάσταση όπου το θυγατρικό προϊόν εξασθενεί τόσο γρήγορα όσο και η ταχύτητα παραγωγής του. Εάν αυτό ισχύσει για όλα τα θυγατρικά μιας σειράς αποσύνθεσης, τότε λέγεται ότι η σειρά βρίσκεται σε κοσμική ισορροπία και η συνολική δραστηριότητα μειώνεται ανάλογα με αυτή του μητρικού. Επίσης, να διασαφηνιστεί ότι η ίση δραστηριότητα υπό συνθήκες ισορροπίας δεν συνεπάγεται ίση συγκέντρωση, καθώς οι χρόνοι ημιζωής πρέπει να λαμβάνονται υπόψιν στο υπολογισμό της σχετικής συγκέντρωσης των μελών μιας σειράς αποσύνθεσης.

Η ανισορροπία συμβαίνει όταν ένα ή περισσότερα προϊόντα αποσύνθεσης, πλήρως ή εν μέρη, αφαιρούνται ή προστίθενται στο σύστημα, το οποίο μπορεί να χρειαστεί ημέρες, μήνες ή ακόμη και εκατομμύρια χρόνια ώστε να αποκατασταθεί η ισορροπία του, ανάλογα βέβαια με τον χρόνο ημιζωής των εμπλεκόμενων ραδιοϊσοτόπων του. Το θόριο για παράδειγμα σπάνια εμφανίζει προβλήματα ισορροπίας με το Κ, καθώς εμφανίζει μία μόνο κορυφή. Ωστόσο, στη σειρά διάσπασης του ουρανίου, η ανισορροπία είναι ιδιαίτερα συχνή στο φυσικό περιβάλλον, κάτι που μπορεί να οφείλεται τόσο φυσικούς όσο και χημικούς μηχανισμούς. Η ανισορροπία στη σειρά διάσπασης του ^{238}U μπορεί να προκύψει σε τουλάχιστον 5 θέσεις:

- το ^{238}U μπορεί επιλεκτικά, κατόπιν έκπλυσης να καταλήξει σε ^{234}U
- το ^{234}U μπορεί επιλεκτικά να εκπλυθεί σε σχέση με το ^{238}U
- το ^{230}Th μπορεί επιλεκτικά να εκπλυθεί σε σχέση με τα άλλα ισότοπα στην αλυσίδα του
- να διαχωριστεί σε ^{226}Ra
- τέλος το ^{222}Rn (αέριο ραδόνιο), το οποίο είναι πολύ κινητικό και μπορεί εύκολα να διαφεύγει στην ατμόσφαιρα από ρωγμές του εδάφους ή των βράχων

Τόσο το Ra όσο και το U είναι διαλυτά, επομένως μεταφέρονται πολύ εύκολα. Σε ένα οξειδωτικό περιβάλλον, το U αποπλένεται κατά προτίμηση σε σχέση με το Ra, ενώ σε ένα αναγωγικό περιβάλλον το Ra μπορεί κατά προτίμηση να αποπλυθεί συγκριτικά με το U.

Εάν το ^{222}Rn δραπετεύσει, τότε τα μικρής ζωής νουκλεΐδια ^{214}Bi και ^{214}Pb , τα οποία εμφανίζονται κάτω από το ^{222}Rn στη σειρά διάσπασης του ουρανίου και αποτελούν τους κύριους πομπούς ακτινών γάμμα σε αυτή την σειρά, θα διασπαστούν σε ασήμαντες ποσότητες εντός ωρών. Στην παραπάνω περίπτωση, η αποκατάσταση της ισορροπίας γίνεται σε περίπου 38 ημέρες. Συγκεκριμένα, ο χρόνος που απαιτείται για την αποκατάσταση της ισορροπίας στο 99.9% για ένα διαταραγμένο μέλος μιας σειράς ισούται με περίπου 10 φορές του χρόνου ημιζωής του μέλους που έχει διαταραχθεί. Μία άλλη περίπτωση, είναι να συμβεί επιλεκτική απομάκρυνση των ^{238}U και ^{234}U σε σχέση με το Ra, όπου για την αποκατάσταση της ισορροπίας μπορεί να απαιτηθούν ακόμη και ένα εκατομμύριο χρόνια. Σε αυτή την περίπτωση, οι συγκεντρώσεις των ^{214}Bi και ^{214}Pb θα παραμείνουν υψηλές για πολύ καιρό, παρόλο που στοιχεία ^{238}U και ^{234}U μπορεί αν έχουν εξαλειφθεί πλήρως. Αυτό οφείλεται στη μεγάλη ημιζωή του ^{230}Th , το οποίο παρεμβαίνει μεταξύ των ^{234}U και $^{214}\text{Bi} / ^{214}\text{Pb}$, στη σειρά αποσύνθεσης του ουρανίου.

Να σημειωθεί επίσης πως τα ισότοπα του Rn εμφανίζονται επίσης στη σειρά αποσύνθεσης των ^{235}U και ^{232}Th . Αυτές, παρόλα αυτά δεν αποτελούν πηγές, μιας και ο χρόνος ημιζωής τους είναι ιδιαίτερα μικρός.

Οι ακριβείς εκτιμήσεις του ουρανίου από τη φασματομετρία των ακτινών γάμμα, όπου βασίζουμε κυρίως την αφθονία των ισοτόπων όπως τα ^{214}Bi και ^{214}Pb , τα οποία μάλιστα εμφανίζονται πολύ κάτω στη αλυσίδα αποσύνθεσης, απαιτούν συνθήκες ισορροπίας που συχνά δεν υπάρχουν. Οι εκτιμήσεις αυτές, ως εκ τούτου, αναφέρονται ως «**ισοδύναμο ουράνιο**» (eU), που μας υπενθυμίζει πως η ακρίβεια τους βασίζεται στην παρουσία συνθηκών ισορροπίας. Το θόριο επίσης αναφέρεται ως «**ισοδύναμο θόριο**» (eTh), αν και η σειρά διάσπασης του, βρίσκεται σχεδόν πάντα σε ισορροπία. [(B.R.S. Minty 1997)]

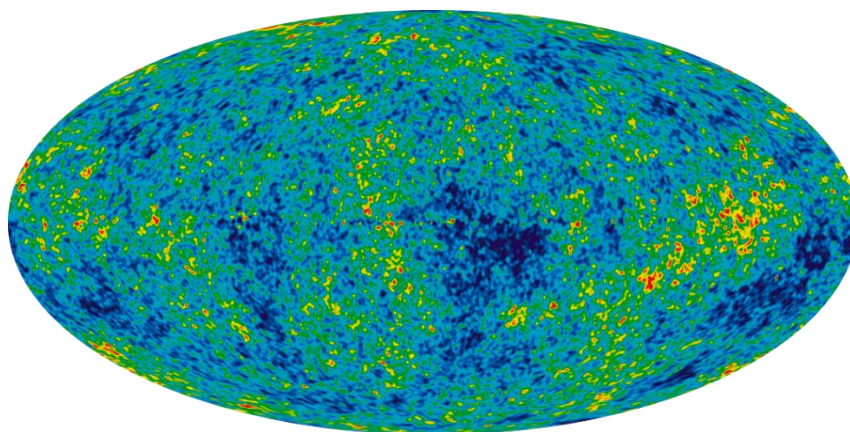
4.3 Ακτινοβολία υποβάθρου (background radiation)

Οποιαδήποτε ακτινοβολία δε προέρχεται από το έδαφος, θεωρείται ως ακτινοβολία υποβάθρου (background radiation), καθώς δεν έχει γεωλογική σημασία και πρέπει να αφαιρεθεί από τα παρατηρούμενα δεδομένα. Υπάρχουν τέσσερις πηγές ακτινοβολίας υποβάθρου και είναι οι εξής: η ροή του ατμοσφαιρικού ραδονίου, το κοσμικό υπόβαθρο, το υπόβαθρο του αεροσκάφους και τέλος τα ραδιενεργά κατάλοιπα από ατομικές εκρήξεις ή από πυρηνικά ατυχήματα.

Το ατμοσφαιρικό ραδόνιο και τα θυγατρικά του προϊόντα, συγκεκριμένα τα ^{214}Bi και ^{214}Pb είναι οι σημαντικότεροι συντελεστές υποβάθρου. Το ^{222}Rn είναι ιδιαίτερα ευκίνητο και μπορεί να διαφύγει στην ατμόσφαιρα από ρωγμές του εδάφους ή των βράχων, ως απόκριση της δράσης πίεσης που ασκεί η μεταβολή σε θερμοκρασία και πίεση. Τα θυγατρικά του προϊόντα που αναφέρθηκαν στην αρχή της παραγράφου, προσκολλώνται στα αερομεταφερόμενα αερολύματα και η διανομή τους καθορίζεται βάση των κινήσεων του αέρα και των μοτίβων του ανέμου. Ο Foote, το 1969, απέδειξε ότι το ατμοσφαιρικό υπόβαθρο αυξάνεται πρώτα και μετά μειώνεται κατά την διάρκεια μιας ημέρας και το απέδωσε στην άνοδο του στρώματος αναστροφής θερμοκρασίας που βρίσκεται κοντά στην επιφάνεια του εδάφους, ενώ το απόγευμα λαμβάνει χώρα η διάσπαση του. Επίσης, όταν ο καιρός είναι ζεστός είναι συνηθισμένο τα ατμοσφαιρικά ^{214}Bi και ^{214}Pb να βρίσκονται στο μέγιστο σημείο, κοντά στο έδαφος, νωρίς το πρωί και να μειώνονται κατά την διάρκεια της ημέρας, καθώς η αυξανόμενη αναταραχή του αέρα αναμιγνύει την χαμηλότερη ατμόσφαιρα. Επιπροσθέτως, τα στρώματα αναστροφής θερμοκρασίας πάνω από τοπογραφικές κοιλότητες ή λίμνες, παγιδεύουν συχνά το Rn κοντά στο έδαφος και υπό συνθήκες ακίνητου αέρα μπορεί να υπάρχουν μετρήσιμες διαφορές στην ατμοσφαιρική ραδιενέργεια, ακόμη και σε τοποθεσίες που βρίσκονται λίγα χιλιόμετρα μακριά (Darnley & Gastry, 1971). Η επίδραση του ραδονίου στα δεδομένα εμφανίζεται ως αύξηση της στάθμης τους σε ορισμένες πτήσεις.

Η πρωτογενής κοσμική ακτινοβολία έξω από το ηλιακό μας σύστημα αντιδρά με άτομα και μόρια στην ανώτερη ατμόσφαιρα και δημιουργεί έτσι μία πολύπλοκη δευτερογενή ακτινοβολία. Αυτή η ακτινοβολία αντιδρά με τον αέρα, το αεροσκάφος και τον ανιχνευτή, για να παράγει το μετρούμενο κοσμικό υπόβαθρο των ακτίνων γάμμα. Στην χαμηλότερη ατμόσφαιρα, αυτή η ακτινοβολία έχει συνεχή κατανομή ενέργειας αλλά μειώνεται σε πλάτος καθώς μειώνεται το υψόμετρο (Anin & Vulcan, 1983). Η επίδραση της κοσμικής αλληλεπίδρασης στους βράχους είναι μικρή (Gregory, 1960) και οι διακυμάνσεις στο κοσμικό υπόβαθρο, σε καθημερινή βάση, λόγω των αλλαγών στην ατμοσφαιρική πίεση είναι ασήμαντες (Gastry & Carson, 1982).

Το υπόβαθρο του αεροσκάφους αναφέρεται στην ποσότητα της ακτινοβολίας σε ίχνη K, U, Th που φέρει το ίδιο το αεροσκάφος και ο εξοπλισμός του, καθώς και στον ίδιο τον ανιχνευτή. Η ακτινοβολία αυτή είναι σε γενικές γραμμές σταθερή, μπορούμε να την μετρήσουμε με κατάλληλες πτήσεις βαθμονόμησης και αφαιρείται άμεσα από τις καταγραφές. Τέλος, η κύρια επίπτωση στην αερομεταφερόμενη φασματομετρία ακτίνων γάμμα, που μπορεί να οφείλεται σε κάποια πυρηνική έκρηξη ή ατύχημα, είναι το ^{137}Cs . Το καίσιο εμφανίζει την μοναδική του κορυφή στα 0.662MeV και ο χρόνος ημιζωής του είναι τα 30 χρόνια.



Εικόνα 6: Η ακτινοβολία υποβάθρου όπως την απεικόνισε το πρόγραμμα WMAP (2001-2010).

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΕΠΕΞΕΡΓΑΣΙΑ ΤΩΝ ΚΑΤΑΓΡΑΦΩΝ

Μέσω της μεθόδου της αερομεταφερόμενης φασματομετρίας των ακτινών γάμμα, υπολογίζουμε την αφθονία των στοιχείων κάλιο (K), ουράνιο (eU) και θόριο (eTh) στο έδαφος ή/και σε βράχους, ανιχνεύοντας τις ακτινοβολίες που εκπέμπουν λόγω της φυσικής διάσπασης τους. Η μέθοδος ανάλυσης των δεδομένων, βασίζεται στην συνιστάμενη από τον Διεθνή Οργανισμό Ατομικής Ενέργειας (International Atomic Energy Agency) IAEA, (2003) μεθοδολογία επεξεργασίας των δεδομένων ακτινοβολίας γάμμα και στην δημοσίευση από τους Minty et al. (1997).

Μετά τον καθορισμό των παραθύρων κάθε ισοτόπου, το πρώτο στάδιο της επεξεργασίας δεδομένων AGRS είναι η διόρθωση του «ζωντανού χρόνου». Στην συνέχεια τα παράθυρα του συνολικού αριθμού μετρήσεων (Total Counts, TC), του ισοδύναμου ουράνιου, του ισοδύναμου θόριου (eTh) και του καλίου (K) διορθώθηκαν ως προς την επίδραση του αεροσκάφους και του κοσμικού υποβάθρου, ενώ βάση του IAEA εφαρμόστηκε η απομάκρυνση της επίδρασης του ατμοσφαιρικού ραδονίου, κάτω και γύρω από το ελικόπτερο. Η τοπογραφία της περιοχής ήταν τραχιά και ο αισθητήρας των καταγραφών, δεν ήταν πάντα σε σταθερό ύψος. Ως εκ τούτου, οι μετρήσεις διορθώθηκαν για τις διακυμάνσεις του ύψους πτήσης, στο σταθερό ύψος των 60 μέτρων. Ακολουθεί η αναλυτική περιγραφή των βημάτων επεξεργασίας, όπως εφαρμόστηκε από το NGU.

Οι διορθώσεις προκύπτουν από τις δημοσιεύσεις των IAEA (2003) & B.R.S. Minty et al. (1997).

5.1 Διόρθωση ζωντανού χρόνου (“Live-Time” ή “Dead-Time”)

Τα δεδομένα διορθώνονται ως προς τον «ζωντανό χρόνο». Ο «ζωντανός χρόνος» είναι μία έκφραση που ερμηνεύεται ως η σχετική χρονική περίοδος, όπου το όργανο μπορεί να καταγράψει νέους παλμούς ανά διάστημα δείγματος. Από την άλλη πλευρά ο «νεκρός χρόνος» είναι επίσης μία έκφραση της σχετικής χρονικής περιόδου όπου το σύστημα δεν μπορεί να κατοχυρώσει νέους παλμούς ανά διάστημα δείγματος, γιατί ήταν απασχολημένο με την επεξεργασία της προηγούμενης καταγραφής. Η σχέση που συνδέει τον «ζωντανό» με τον «νεκρό» χρόνο, δίνεται από την εξίσωση:

$$\text{“Live Time”} = \text{“Real Time”} - \text{“Dead Time”}$$

όπου ο «πραγματικός χρόνος» ή γνωστός ως «χρόνος απόκτησης» είναι ο χρόνος που έχει παρέλθει, κατά τον οποίο συσσωρεύετε το φάσμα.

Η διόρθωση «ζωντανού χρόνου» εφαρμόζεται τόσο στα 3 ραδιοϊσότοπα στοιχεία όσο και στο TC (Total Counts: Συνολικό πλήθος). Ο μαθηματικός τύπος που χρησιμοποιείται για την εφαρμογή της διόρθωσης έχει ως εξής:

$$C_{LT} = C_{RAW} \times \frac{\text{Acquisition Time}}{\text{Live Time}}$$

όπου το C_{LT} είναι το διορθωμένο κανάλι ως προς το “Live Time” σε μετρήσεις ανά δευτερόλεπτο, το C_{RAW} είναι τα δεδομένα πρωτογενούς καναλιού σε μετρήσεις ανά δευτερόλεπτο, το acquisition time είναι σταθερό και ισούται με 10^6 msec (1 sec), ενώ το “Live Time” είναι ο πραγματικός χρόνος και μετράτε σε msec.

Πιο παλιά η διόρθωση που λάμβανε χώρα ήταν ως προς “Dead-Time”, όπου οι μετρήσεις έπρεπε να διορθωθούν και πάλι μέσω μαθηματικών σχέσεων μέσω μίας διαδικασίας βαθμονόμησης από το IAEA (1991). Βέβαια αυτό δεν ίσχυε πάντα, για αυτό το λόγο οι χρήστες του οργάνου, έπρεπε να ανατρέχουν στις προδιαγραφές του κατασκευαστή. Ένα τυπικό εύρος τιμών για το «νεκρό χρόνο», σύμφωνα με τα παλιότερα όργανα μέτρησης, ήταν 5 – 15 μ s ανά παλμό. Το όργανο GR-820, για παράδειγμα, έχει πολύ μικρό «νεκρό χρόνο» ανά παλμό αλλά έχει επιβράδυνση «νεκρού χρόνου» συστήματος στα 10ms ανά διάστημα ολοκλήρωσης. Σε αυτή τη περίπτωση, η διαδικασία βαθμονόμησης όπως περιγράφεται παραπάνω, δεν μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε παλαιότερα συστήματα.

Τα πιο καινούργια φασματομέτρα υπολογίζουν αυτόματα το "Dead Time" και το εξάγουν μαζί με τα υπόλοιπα δεδομένα, για περαιτέρω ανάλυση.

5.2 Διόρθωση αεροσκάφους και κοσμικού υποβάθρου ("Aircraft and Cosmic background")

Η κοσμική ακτινοβολία υποβάθρου είναι η κοσμική ακτινοβολία όλου του φάσματος, που διαχέεται σε ολόκληρο το σύμπαν χωρίς συγκεκριμένη κατευθυντικότητα. Η «μόλυνση» των μετρήσεων από το συγκεκριμένο παράγοντα αλλά και από την λειτουργία του αεροσκάφους, περιορίζονται με τη βοήθεια του παρακάτω τύπου,

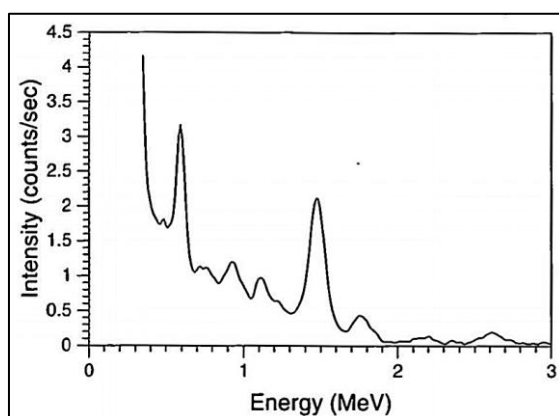
$$C_{CA} = C_{LT} - (a_c + b_c \times C_{COS})$$

όπου το CCA είναι το διορθωμένο παράθυρο τόσο από την κοσμική ακτινοβολία όσο και από την επίδραση του αεροσκάφους, το CLT είναι το διορθωμένο παράθυρο ως προς το "Live Time", το a_c είναι ο συντελεστής του υποβάθρου του αεροσκάφους για αυτό το παράθυρο, b_c είναι ο συντελεστής της κοσμικής ακτινοβολίας, ενώ το CCOS είναι φιλτραρισμένο (low pass) παράθυρο της κοσμικής ακτινοβολίας (το οποίο στο σύστημα Radiation Solution RSX-5 είναι ίσο με το κανάλι 1023). Οι συντελεστές αυτοί υπολογίζονται με κατάλληλες πτήσεις βαθμονόμησης.

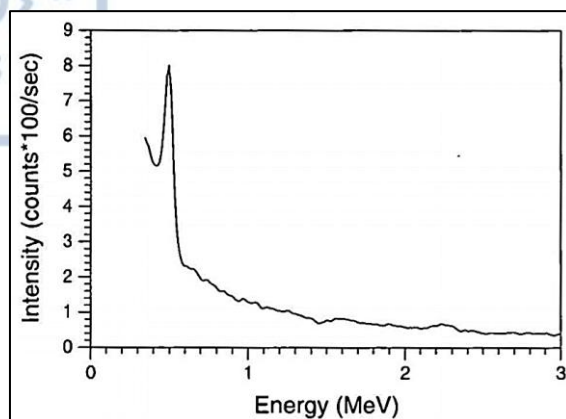
Πιο συγκεκριμένα η ακτινοβολία υποβάθρου του αεροσκάφους οφείλεται στην ραδιενέργεια του ίδιου του αεροσκάφους και του περιεχόμενου του και είναι σταθερή. Το κοσμικό υπόβαθρο, που πρέπει επίσης να διορθωθεί, προκύπτει από την αντίδραση κοσμικής ακτινοβολίας με άτομα και μόρια στην ανώτερη ατμόσφαιρα. Αυτή η αντίδραση παράγει μία σύνθετη δευτερεύουσα ακτινοβολία η οποία αντιδρά με τον αέρα, το αεροσκάφος και τον ανιχνευτή και παράγεται έτσι το μετρούμενο κοσμικό υπόβαθρο.

Η διαδικασία αφαίρεσης των δύο αυτών παραγόντων χρησιμοποιεί το γεγονός ότι στην κατώτερη ατμόσφαιρα το κοσμικό φάσμα έχει σχεδόν σταθερό σχήμα αλλά το πλάτος του μειώνεται με τη μείωση του υψομέτρου. Είναι γεγονός ότι σε ενέργειες μεγαλύτερες από 3 MeV όλη η ακτινοβολία έχει κοσμική προέλευση. Έτσι τα αερομεταφερόμενα φασματομέτρα παρακολουθούν τακτικά ένα κοσμικό παράθυρο από 3 έως 6 MeV για να έχουν εκτίμηση του κοσμικού υποβάθρου. Επομένως η κοσμική συνεισφορά σε οποιοδήποτε κανάλι είναι ανάλογη με τον ρυθμό μέτρησης του κοσμικού παραθύρου. Εάν λοιπόν είναι γνωστός ο ρυθμός μέτρησης του κοσμικού παραθύρου, αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της κοσμικής συνεισφοράς σε οποιοδήποτε παράθυρο.

Η στρατηγική βαθμονόμησης για τις διορθώσεις της κοσμικής ακτινοβολίας και των «μολύνσεων» των μετρήσεων από το αεροσκάφος, απαιτεί την απόκτηση φασμάτων ακτινών γάμμα πάνω από το νερό σε διαφορετικά ύψη (1.0, 2.0, 4.0 km), σε μία περιοχή όπου το ατμοσφαιρικό ραδόνιο (Rn) είναι ελάχιστο. Τυπικά αυτά τα δεδομένα συλλέγονται υπεράκτια, ενώ οι συνθήκες που ευνοούν την περιοχή βαθμονόμησης είναι κατόπιν βροχόπτωσης όπου η ατμοσφαιρική ραδιενέργεια τείνει σε χαμηλά επίπεδα (Fritzsche 1982).



Διάγραμμα 2: Το ενεργειακό φάσμα ακτινών γάμμα του αεροσκάφους



Διάγραμμα 3: Το κανονικοποιημένο φάσμα της κοσμικής ενέργειας

Παραθέτω τα επίσημα στοιχεία για τις συγκεκριμένες διορθώσεις όπως καθορίστηκαν από την έρευνα βαθμονόμησης μεγάλου υψομέτρου, που έγινε τον Αύγουστο του 2011 κοντά στο αεροδρόμιο Navrik και από την δημοσίευση του Rønning et. al. του 2003.

	Kongsberg-I	Kongsberg-II	Kongsberg-III
K window	10	10	9
U window	3	3	3
Th window	3	3	0
Uup window	0	0	0
Total Counts	150	150	150

Πίνακας 1: Διόρθωση των περιοχών από την επίδραση του αεροσκάφους (συντελεστής a_c).

	Kongsberg-I	Kongsberg-II	Kongsberg-III
K window	0,039	0,039	0,061
U window	0,029	0,029	0,0454
Th window	0,034	0,034	0,0626
Uup window	0,008	0,008	0,0237
Total Counts	0,68	0,68	1,0536

Πίνακας 2: Διορθώσεις των περιοχών ως προς την κοσμική ακτινοβολία (συντελεστής b_c).

5.3 Διόρθωση Ραδονίου (“Radon correction”)

Το Ραδόνιο (^{222}Rn) είναι ένα πολύ κινητό στοιχείο, με την ικανότητα να διαφεύγει εύκολα στην ατμόσφαιρα, από το έδαφος ή από ρωγμές σε βράχους, ως απόκριση στην μεταβολή της θερμοκρασίας ή της πίεσης. Το ραδόνιο του υποβάθρου, που θέλουμε να αφαιρέσουμε, αποτελείται από το ^{222}Rn και τα θυγατρικά του. Συγκεκριμένα, μέχρι και 50% του ποσοστού μέτρησης του παραθύρου του ουρανίου, μπορεί να οφείλεται στα θυγατρικά του ραδονίου στην ατμόσφαιρα. Μάλιστα το φάσμα του, έχει πολύ παρόμοιο σχήμα με αυτό του ουρανίου. Αυτό συμβαίνει γιατί ο πιο εμφανής πομπός ακτινών γάμμα είναι το ^{214}Bi και εμφανίζεται κάτω από το ^{222}Rn στην αλυσίδα αποσύνθεσης του ^{238}U και ο πιο χαρακτηριστικός τρόπος διαχωρισμού είναι το σχετικό ύψος των δύο photopeaks (photopeak: η περιοχή μέγιστου ύψους του φάσματος).

Το σοβαρό πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι ερευνητές κατά την διόρθωση του ραδονίου, είναι ότι δεν κατανέμεται ομοιόμορφα στην κατώτερη ατμόσφαιρα. Τις πρωινές ώρες για παράδειγμα, το Rn και τα θυγατρικά

του μπορούν να παγιδευτούν κοντά στο έδαφος σε στρώματα ανεστραμμένης θερμοκρασίας. Για την απομάκρυνση του σφάλματος του Ραδονίου, υπάρχουν δύο τρόποι.

I. Μέθοδος φασματικής αναλογίας

II. Μέθοδος ανιχνευτή με ανοδική κατεύθυνση παρατήρησης

Στην συγκεκριμένη περιοχή μελέτης το NGU χρησιμοποίησε την II μέθοδο, ώστε να ανιχνεύσει και να διορθώσει το ατμοσφαιρικό Ραδόνιο. Η I μέθοδος απαιτεί πληθώρα διορθώσεων στις μετρήσεις συγκριτικά με την II οπότε η επιλογή της μοιάζει ως ο πιο εύκολος και σύντομος δρόμος.

Η μέθοδος του πάνω ανιχνευτή (ενός κρυστάλλου 4 λίτρων) χρησιμοποιήθηκε για τον υπολογισμό της επίδρασης του ραδονίου, όπως προβλέπει το IAEA (1991). Ένας επιπλέον κρύσταλλος είναι τοποθετημένος στο όργανο των μετρήσεων με τη δυνατότητα να διακρίνει μεταξύ της ακτινοβολίας της ατμόσφαιρας και αυτής που προέρχεται από το έδαφος.

Τα χερσαία δεδομένα χρησιμοποιήθηκαν σε συνδυασμό με δεδομένα πάνω από το νερό για τον υπολογισμό των συντελεστών a_1 και a_2 , που χρησιμοποιήθηκαν στην παρακάτω εξίσωση για τον προσδιορισμό του ραδονίου στο παράθυρο του downward U:

$$Radon_U = \frac{U_{upCA} - a_1 \cdot U_{CA} - a_2 \cdot Th_{CA} + a_2 \cdot b_{Th} - b_U}{a_U - a_1 - a_2 \cdot a_{Th}}$$

όπου το RadonU είναι το ραδόνιο στο παράθυρο του ουρανίου (downward U), το U_{upCA} είναι το διορθωμένο upward U (προς τα άνω ουράνιο), το U_{CA} και το Th_{CA} είναι τα διορθωμένα downward παράθυρα του ουρανίου και του θορίου αντίστοιχα, τα a_1 , a_2 , a_U , a_{Th} είναι συντελεστές, ενώ τα b_U και b_{Th} είναι σταθερές που προσδιορίζονται πειραματικά.

Τα αποτελέσματα του ραδονίου στο downward U απαλείφονται μέσω της διαφοράς του RadonU από το U_{CA} , ενώ για την απαλοιφή στα υπόλοιπα παράθυρα χρησιμοποιείται ο ακόλουθος τύπος:

$$C_{RC} = C_{CA} - (a_C \cdot Radon_U + b_C)$$

όπου το C_{RC} είναι το διορθωμένο από ραδόνιο παράθυρο, το C_{CA} είναι το διορθωμένο παράθυρο ως προς το αεροσκάφος και την κοσμική ακτινοβολία, το RadonU είναι η συνιστώσα του ραδονίου στο παράθυρο του downward U (ουράνιο) και τέλος οι συντελεστές a_C και b_C είναι αντίστοιχοι με αυτούς που αναφέραμε παραπάνω.

Στον Πίνακα 3 αναφέρονται οι τιμές των συντελεστών για την κάθε περιοχή έρευνας, όπως υπολογίστηκαν πειραματικά.

	Kongsberg -I	Kongsberg -II	Kongsberg -III
a (u)	0.18	0.26 , 0.46	0.18
b(u)	1.93	0.13 , -0.44	1.93
a(k)	0.94	0.80 , 0.80	0.94
b(k)	7.73	3.10 , 3.94	7.73
a(t)	0.16	0.05 , 0.1	0.16
b(t)	0.98	0.5 , 1.22	0.98
a(tc)	16.84	12.49 , 12.43	16.84
b(tc)	22.18	13.50 , 62.03	22.18
a(1)	0.1	0.066 , 0.293	0.1
a(2)	-0.02	0.003 , 0.016	-0.02

Πίνακας 3: Οι παράγοντες που χρησιμοποιήθηκαν για τις τρεις περιοχές ερευνών, όπως καθορίστηκαν από τα δεδομένα που συλλέχθηκαν πάνω από το νερό και το έδαφος.

5.4 Απομάκρυνση παραγόντων Compton (Compton “stripping”)

Τα στοιχεία ενδιαφέροντος της έρευνας Κάλιο, Ουράνιο και Θόριο υπόκεινται σε διόρθωση φασματικής επικάλυψης. Οι διασκορπισμένες ακτίνες γάμμα, έχοντας τη συνιστώσα Compton στα ενεργά παράθυρα των μεμονωμένων ράδιο-νουκλεϊδίων, διορθώθηκαν με απομάκρυνση των «παραθύρων» (window stripping) χρησιμοποιώντας κατάλληλους συντελεστές για Compton stripping, οι οποίοι προσδιορίστηκαν κατόπιν κατάλληλων ερευνών βαθμονόμησης με μετρήσεις στο χώρο του NGU.

Οι διορθώσεις απομάκρυνσης του παράγοντα Compton δίνονται από τους ακόλουθους τύπους:

$$A_i = 1 - (g \cdot \gamma) - (a \cdot \alpha) + (a \cdot g \cdot \beta) - (b \cdot \beta) + (b \cdot \alpha \cdot \gamma)$$

$$U_{ST} = \frac{Th_{RC} \cdot ((g \cdot \beta) - \alpha) + U_{RC} \cdot (1 - b \cdot \beta) + K_{RC} \cdot ((b \cdot \alpha) - g)}{A_i}$$

$$Th_{ST} = \frac{Th_{RC} \cdot (1 - (g \cdot \gamma)) + U_{RC} \cdot (b \cdot \gamma - a) + K_{RC} \cdot ((a \cdot g) - b)}{A_i}$$

$$K_{ST} = \frac{Th_{RC} \cdot ((\alpha \cdot \gamma) - \beta) + U_{RC} \cdot ((a \cdot \beta) - \gamma) + K_{RC} \cdot (1 - (a \cdot \alpha))}{A_i}$$

όπου το U_{RC} , Th_{RC} , K_{RC} είναι τα διορθωμένα ως προς το ραδόνιο ουράνιο, θόριο και κάλιο αντίστοιχα, τα a , b , g , α , β , γ είναι οι συντελεστές για το Compton stripping ενώ τα U_{ST} , Th_{ST} , K_{ST} είναι διορθωμένες τελικές τιμές.

Η συγκεκριμένη διόρθωση είναι επίσης γνωστή ως διόρθωση αλληλεπίδρασης καναλιού και χρησιμοποιείται για την διόρθωση των ποσοστών των παραθύρων των στοιχείων K , U , Th καθώς οι ακτίνες γάμμα των καταγραφών μπορεί να μην προέρχεται από το συγκεκριμένο στοιχείο αλλά από τα άλλα δύο. Για παράδειγμα, οι ακτίνες γάμμα της σειράς του Θορίου εμφανίζονται στα παράθυρα των καταγραφών του Ουρανίου και του Καλίου ενώ οι ακτίνες γάμμα της σειράς του ουρανίου εμφανίζονται στο παράθυρο του Καλίου. Οι Gastry et. al. (1991) κατασκεύασαν 3 μεταφερόμενες πλάκες διαστάσεων $1m \times 1m \times 30cm$ και βάρους των 700kgf η κάθε μία, αυξημένες κατά τις περιεκτικότητες των 3 στοιχείων αντίστοιχα. Επίσης έφτιαξαν και μια τέταρτη πλάκα ίδιων διαστάσεων αλλά με στόχο να έχει περιεκτικότητα όσο το δυνατόν πιο κοντά σε μία πρόσμειξη των άλλων τριών πλακών και να λειτουργεί ως πλάκα φόντου(ώστε τα φάσματα που θα αποκτηθούν, να αφαιρεθούν από τα παρατηρούμενα φάσματα για κάθε προσομοιωμένο ύψος). Ήταν μία περίπτωση τρικάναλου συστήματος όπου απέδειξε ότι οι αλλαγές στο φασματικό σχήμα λόγω της διαμέτρου της πηγής, σε αυτές τις ενέργειες, δεν είναι ιδιαίτερα σημαντικές.

Η προτιμώμενη μέθοδος για το Compton stripping είναι οι λόγοι απομάκρυνσης να προσδιοριστούν μόνο στο επίπεδο του εδάφους και η διόρθωση που θα ακολουθήσει θα έχει να κάνει μόνο με το ύψος (IAEA, 1991). Να σημειωθεί επίσης ότι το ύψος STP (ύψος σε τυπική θερμοκρασία και πίεση) πρέπει να χρησιμοποιείται για τον υπολογισμό των παραγόντων διόρθωσης του stripping ratio.

Ακολουθεί ο Πίνακας 4 όπου θα δούμε τις ακριβείς τιμές των a , α , β , γ για τις τρεις περιοχές των ερευνών.

	Kongsberg-I	Kongsberg-II	Kongsberg-III
a	0.0482	0.0567	0.0482
α	0.3087	0.3169	0.3087
β	0.4807	0.5175	0.4807
γ	0.7953	0.7377	0.7953

Πίνακας 4: Διόρθωση απομάκρυνσης. Οι παράγοντες καθορίστηκαν έπειτα από μετρήσεις του NGU.

5.5 Διόρθωση ύψους ("Height correction")

Τα φασματικά δεδομένα των ακτινών γάμμα, που συλλέγονται από αέρος, πρέπει να αναχθούν σε συγκεκριμένο ύψος (60μ), ώστε να αφαιρεθεί η διακύμανση του ύψους του ανιχνευτή από το έδαφος. Η εξασθένηση των ακτινών γάμμα εξαρτάται τόσο από την γεωμετρία της πηγής όσο την ίδια την ενέργεια της ακτινοβολίας. Συγκεκριμένα η ακτινοβολία χαμηλής ενέργειας εξασθενεί πιο εύκολα από την ακτινοβολία υψηλής ενέργειας. Οι μεταβολές που προκλήθηκαν από τις αλλαγές του υψομέτρου του ελικοπτέρου από το έδαφος, διορθώθηκαν στο εικονικό ύψος των 60 μέτρων. Τα δεδομένα που καταγράφηκαν σε ύψος άνω των 150 μέτρων θεωρήθηκαν μη αξιόπιστα και αφαιρέθηκαν πλήρως από την επεξεργασία. Το Total Counts καθώς και τα stripped κανάλια των K, U & Th υποβλήθηκαν σε διόρθωση ύψους σύμφωνα με την παρακάτω εξίσωση:

$$C_{60m} = C_{ST} \times e^{Cht \times (60 - Hstp)}$$

όπου το CST είναι το stripped διορθωμένο κανάλι, το Cht είναι ο συντελεστής εξασθένησης ύψους για αυτό το κανάλι και το Hstp είναι το πραγματικό ύψος της μέτρησης από το έδαφος. Να σημειωθεί επίσης ότι οι μετρήσεις του ύψους πτήσης Hstp, όπως προδίδει και το όνομα του, πρέπει να είναι διορθωμένες ως προς τη θερμοκρασία και την πίεση του περιβάλλοντος, καθώς και τα 2 επηρεάζουν την πυκνότητα και συνεπώς τις ιδιότητες του αέρα.

Ο παραπάνω μαθηματικός τύπος αποτελεί τον κατάλληλο αλγόριθμο για περιοχές με ήπια τοπογραφία και ύψη που δεν ξεπερνάνε τα 250 μέτρα. Φυσικά διατίθενται και ακριβέστεροι τύποι, όπως έκαναν οι Schwartz et. al (1992), όπου το έδαφος μοντελοποιείται στις 2 ή ακόμη και στις 3 διαστάσεις ώστε να διορθωθούν οι περιοχές με πιο ανώμαλη τοπογραφία.

	Kongsberg -I	Kongsberg -II	Kongsberg -III
K	0.0082	0.0082	0.0107
U	0.0084	0.0084	0.0067
Th	0.0066	0.0066	0.0062
TC	0.0067	0.0067	0.0076

Πίνακας 5: Διόρθωση εξασθένησης ύψους σε $1/m$, από το μετρημένο και υπολογισμένο ύψος STP. Όλοι οι χρησιμοποιημένοι παράγοντες είναι υπολογισμένοι από πτήσεις βαθμονόμησης κοντά στο αεροδρόμιο Navrik τον Αύγουστο του 2011

5.6 Μετατροπή σε πρότυπες συνθήκες θερμοκρασίας και πίεσης (συνθήκες STP)

Όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, οι συνθήκες που επικρατούν κατά την λήψη των μετρήσεων μεταβάλλονται με αποτέλεσμα τα δεδομένα μας να πρέπει να διορθωθούν σε πρότυπες συνθήκες θερμοκρασία και πίεσης. Οι συνθήκες αναφέρονται ως STP δηλαδή Standard Temperature and Pressure. Τα δεδομένα που αφορά η συγκεκριμένη διόρθωση είναι για τα στοιχεία που καταγράφονται από τα ραντάρ υψομέτρου όπου μετατρέπονται σε πραγματικό ύψος, το Hstp. Ο μαθηματικός τύπος που χρησιμοποιείται από το NGU είναι :

$$Hstp = H \times \frac{273.15}{T+273.15} \times \frac{P}{1013.25}$$

όπου το H είναι το εξομαλυσμένο ύψος του radar altimeter από το έδαφος σε μέτρα, T είναι η μετρούμενη θερμοκρασία αέρα σε βαθμούς Κελσίου και P είναι η μετρούμενη βαρομετρική πίεση. Ο τύπος του STP βρίσκεται στην δημοσίευση του IAEA του 1991.

5.7 Μετατροπή σε συγκεντρώσεις εδάφους

Οι διορθωμένοι ρυθμοί μέτρησης (Counts per Second, cps) μετατράπηκαν σε πραγματικές συγκεντρώσεις εδάφους των νουκλεϊδίων, χρησιμοποιώντας συντελεστές που υπολογίστηκαν σε βαθμονόμηση που έγινε από το NGU σε ειδικά διαμορφωμένες πλάκες (pads calibration). Τα διορθωμένα δεδομένα παρέχουν μία εκτίμηση των συγκεντρώσεων καλίου, ουρανίου και θορίου (K, eU, eTh). Η συγκέντρωση καλίου εμφανίζεται ως ποσοστό (%), ενώ το ισοδύναμο ουράνιο και θόριο ως μέρη ανά εκατομμύριο (ppm). Το ουράνιο και το θόριο χαρακτηρίζονται ως ισοδύναμα, διότι η παρουσία τους συνάγεται από τα θυγατρικά τους στοιχεία. Το ^{214}Bi για το ουράνιο και το ^{208}Tl για το θόριο. Η συγκέντρωση τους υπολογίζεται σύμφωνα με την ακόλουθη μαθηματική σχέση:

$$C_{\text{COCN}} = C_{60\text{m}} / C_{\text{SENS}_{60\text{m}}}$$

όπου $C_{60\text{m}}$ είναι το διορθωμένο κανάλι ως προς το ύψος των 60 μέτρων και το $C_{\text{SENS}_{60\text{m}}}$ είναι παράγοντας που προσδιορίζεται πειραματικά στο εικονικό ύψος των 60 μέτρων.

Ακολουθεί ο Πίνακας 6 με τα επίσημα δεδομένα των ραδιομετρικών στοιχείων ανά περιοχή.

	Kongsberg -I	Kongsberg -II	Kongsberg -III	
K	80.28	83.8	69.1	counts/ %
U	6.97	7.11	7.71	counts/ ppm
Th	4.28	3.95	4.38	counts/ ppm

Πίνακας 6: Οι διορθωμένοι συντελεστές ευαισθησίας ως προς το ύψος των 60 μέτρων για την μετατροπή σε συγκεντρώσεις στο έδαφος.

5.8 Διόρθωση Microlevelling

Η επεξεργασία των δεδομένων ολοκληρώνεται με την διόρθωση του Microlevelling. Πρόκειται για μία διόρθωση του Minty (1991) όπου περιέγραψε μία απλή μέθοδο απομάκρυνσης των levelling σφαλμάτων από αερομαγνητικά δεδομένα, η οποία βρίσκει εφαρμογή και στη μέθοδο του AGRS. Τα σφάλματα αφαιρούνται από το πλέγμα των δεδομένων με μία τεχνική φιλτραρίσματος ("grid filtering") και στη συνέχεια το φιλτραρισμένο πλέγμα χρησιμοποιείται για την διόρθωση των καταγραφών. Η μέθοδος χρησιμοποιείται επιλεκτικά, εάν οι ερευνητές κρίνουν πως απαιτείται για τα γραμμικά σφάλματα των καταγραφών.

Η διόρθωση του Microlevelling κλείνει την διόρθωση και επεξεργασία των μετρήσεων. Σύμφωνα με την δημοσίευση των B. R. S. Minty, A. P. J. Luyendyk & R. C. Brodie με τίτλο « Calibration and data processing for airborne gamma-ray spectrometry» υπάρχουν μερικές ακόμη διορθώσεις κατά την επεξεργασία των ραδιομετρικών δεδομένων (για παράδειγμα Energy calibration, dead time κλπ.). Παρόλα αυτά, στην προκειμένη περιοχή μελέτης, το NGU δεν τις έκανε χρήση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6: ΠΑΡΟΥΣΙΑΣΗ ΓΕΩΛΟΓΙΚΩΝ ΧΑΡΤΩΝ ΚΑΙ ΡΑΔΙΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ

Αφού έχουμε συλλέξει τα ραδιομετρικά δεδομένα και τα έχουμε διορθώσει από τους ανωτέρω κρίσιμους παράγοντες, θα ακολουθήσει η κατάλληλη παρουσίαση τους. Στην επίσημη έρευνα που πραγματοποιήθηκε για το Kongsberg το πρόγραμμα που χρησιμοποιήθηκε ήταν το Geosoft Oasis Montaj. Παρόλα αυτά για την παρουσίαση τους στην συγκεκριμένη διπλωματική εργασία χρησιμοποιήθηκε το Surfer 19. Εξαιρετικής σημασίας για την σωστή παρουσίαση των δεδομένων είναι χρήση των γεωλογικών χαρτών στο υπόβαθρο, ώστε να γίνεται αντιληπτό το που ακριβώς βρισκόμαστε και ως εκ τούτου να ερμηνευτούν κατάλληλα και οι τιμές που έχουμε λάβει από τα όργανα καταγραφής. Οι καταγραφές ακτινοβολίας γάμμα γεωαναφέρονται κατά την διάρκεια συλλογής τους στο προβολικό σύστημα WGS 84 UTM ZONE 32N. Ο γεωλογικός χάρτης που βρίσκεται πίσω από τα δεδομένα ήταν επίσης γεωαναφερόμενος κατάλληλα στο σύστημα WGS 84 UTM ZONE 33N. Η γεωαναφορά όλων των τελικών χαρτών που θα παρουσιαστούν παρακάτω έγινε με το προβολικό σύστημα WGS 84 UTM ZONE 33N.

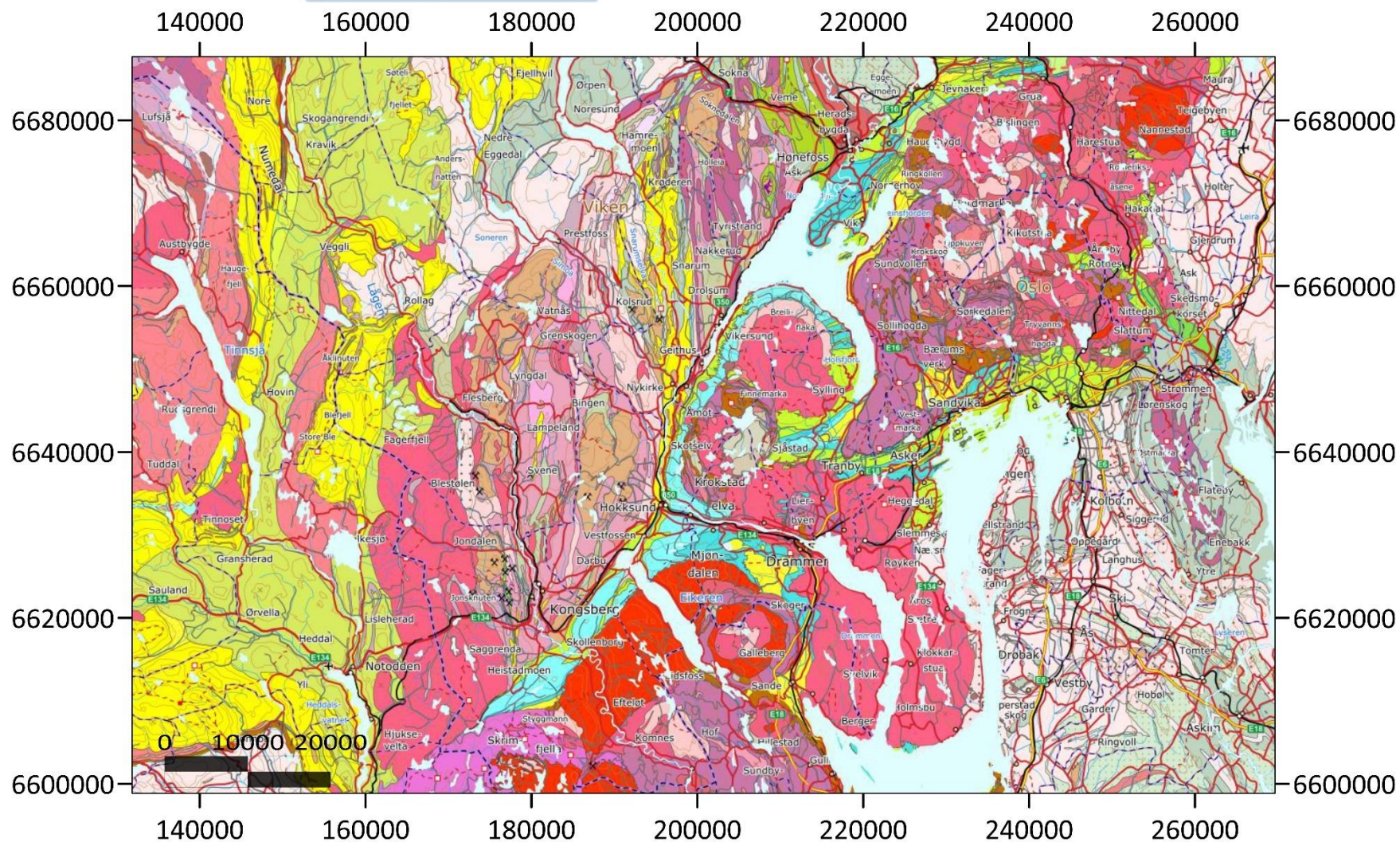
Για να έχουμε όμως μία σωστή εικόνα της περιοχής, πριν δούμε τα δεδομένα gamma ray, θα δούμε πρώτα 3 χαρακτηριστικούς χάρτες:

- 1) [Γεωλογικός χάρτης](#)
- 2) [Τεκτονικός χάρτης](#)
- 3) [Ηλικιακός χάρτης](#)

Στην συνέχεια θα ακολουθήσει η παρουσίαση των ραδιομετρικών δεδομένων με το πρόγραμμα Surfer 19 ενώ όπως προαναφέρθηκε θα υπάρχει στο background ο γεωλογικός χάρτης της περιοχής. Με την σειρά παρουσίασης έχουμε:

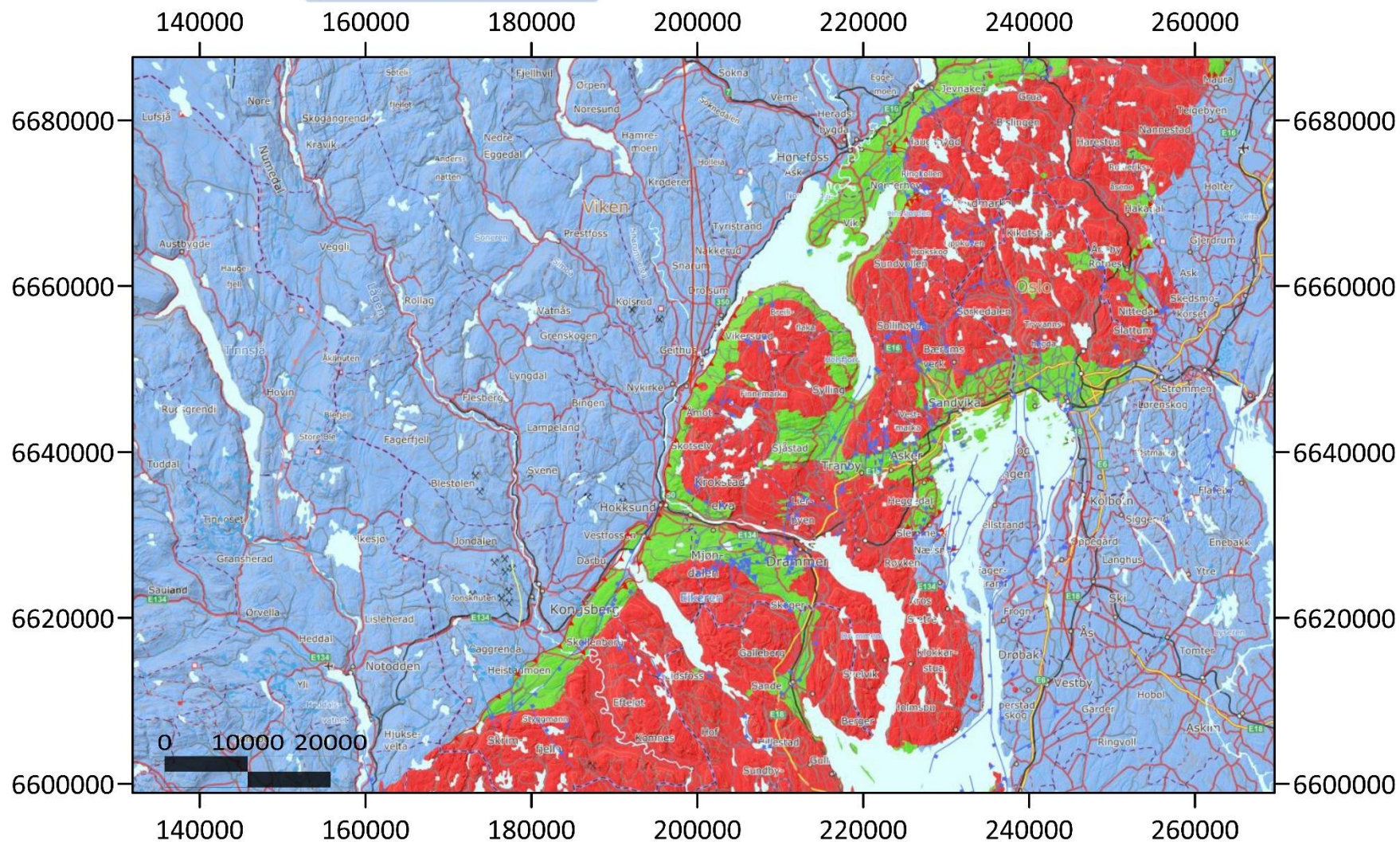
1) Χάρτης Total Counts
2) Χάρτης U ppm (part of radioactive material per million pares of rock.)
3) Χάρτης K perc
4) Χάρτης Th ppm (part of radioactive material per million pares of rock.)
5) Χάρτης Th vs K
6) Χάρτης U vs K
7) Χάρτης U vs Th
8) Χάρτης Radiogenic heat
9) Χάρτης Un
10) Χάρτης Kn
11) Χάρτης Thn
12) Χάρτης ternary με τις συγκεντρώσεις των τριών στοιχείων K, U & Th
13) Χάρτης ternary με τους λόγους των στοιχείων, δηλαδή Th/K, U/K & U/Th
14) Χάρτης ternary με τις συγκεντρώσεις των σχετικών αφθονιών των τριών στοιχείων, δηλαδή Un, Kn & Thn

6.1 Γεωλογικός χάρτης του Kongsberg



Σχήμα 1: Γεωλογικός χάρτης του Kongsberg και της ευρύτερης περιοχής σε διάσταση 1:400.000. Η γεωαναφορά του χάρτη έγινε στο προβολικό σύστημα WGS 84 UTM ZONE 33N και το πλήρες υπόμνημα του βρίσκεται στο σύνδεσμο http://geo.ngu.no/gd_images/wms/berggrunn/BerggrunnWMS2_hovedbergart.png. Η περιοχή αποτελείται κυρίως από πυριγενή πετρώματα με το πιο χαρακτηριστικό να είναι ο γρανίτης.

6.2 Χάρτης τεκτονικής δομής του Kongsberg

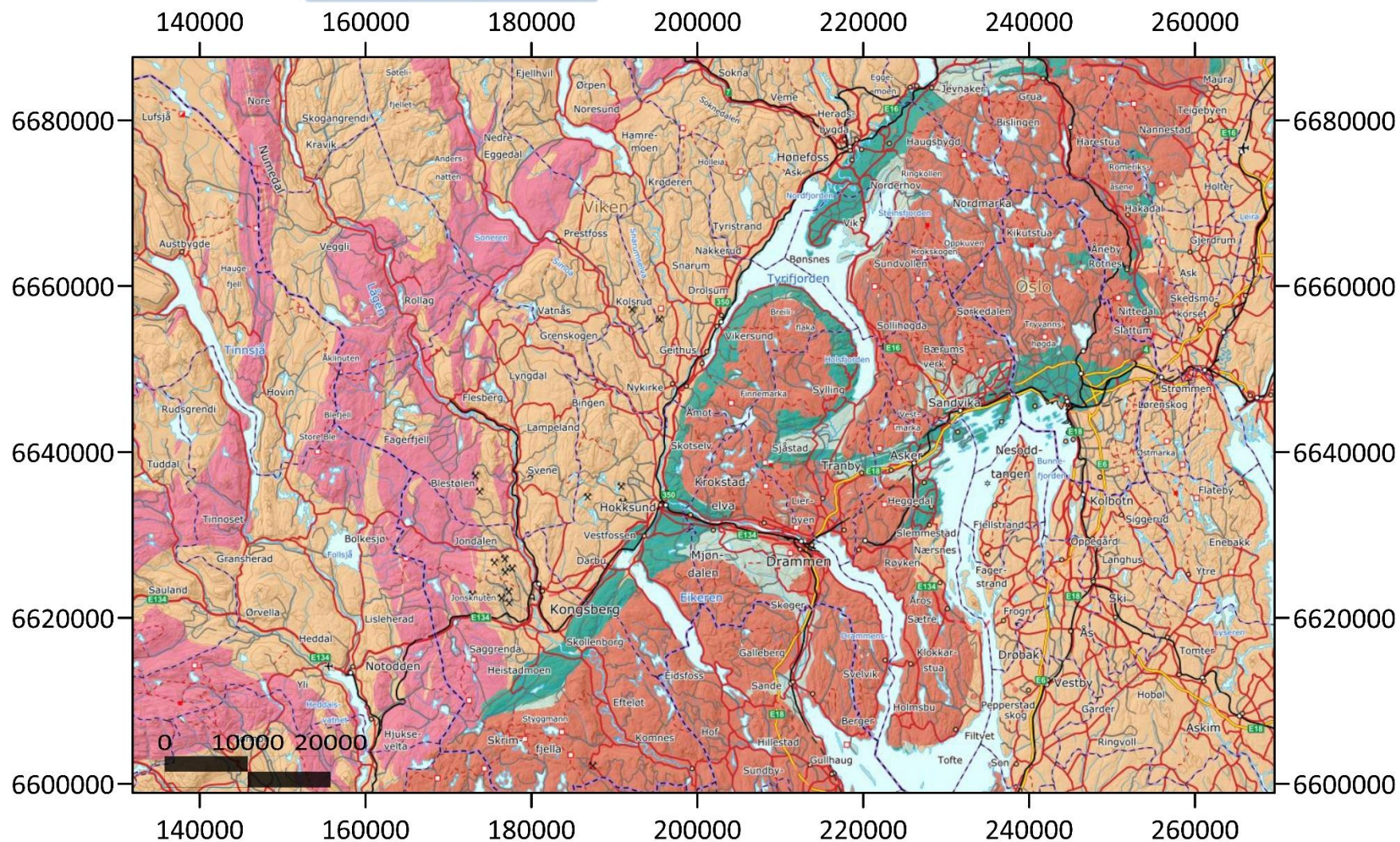


Σχήμα 2: Χάρτης τεκτονικής δομής του Kongsberg σε διάσταση 1:400.000. Αντιλαμβάνομαστε πως η πόλη βρίσκεται στη ζώνη Svekonorwegisk orogen (μπλέ χρώμα). Γίνεται όμως αντιληπτό πως η περιοχή τοποθετείται στο όριο τριών πλακών όπου πιο συγκεκριμένα έχουμε το Kaledonsk orogen με πράσινο χρώμα και το Oslo-Rift bergarter με κόκκινο χρώμα. Στο κέντρο του χάρτη υπάρχει ένα μεγάλο ρήγμα εφφίπτευσης της Svekonorwegisk πάνω στην Kaledonsk ενώ επίσης παρατηρούνται ρήγματα επέκτασης και συμπίεσης. Η γεωαναφορά του χάρτη έγινε στο προβολικό σύστημα WGS

84 UTM ZONE 33N. Στον παρακάτω σύνδεσμο υπάρχει το πλήρες υπόμνημα του χάρτη.

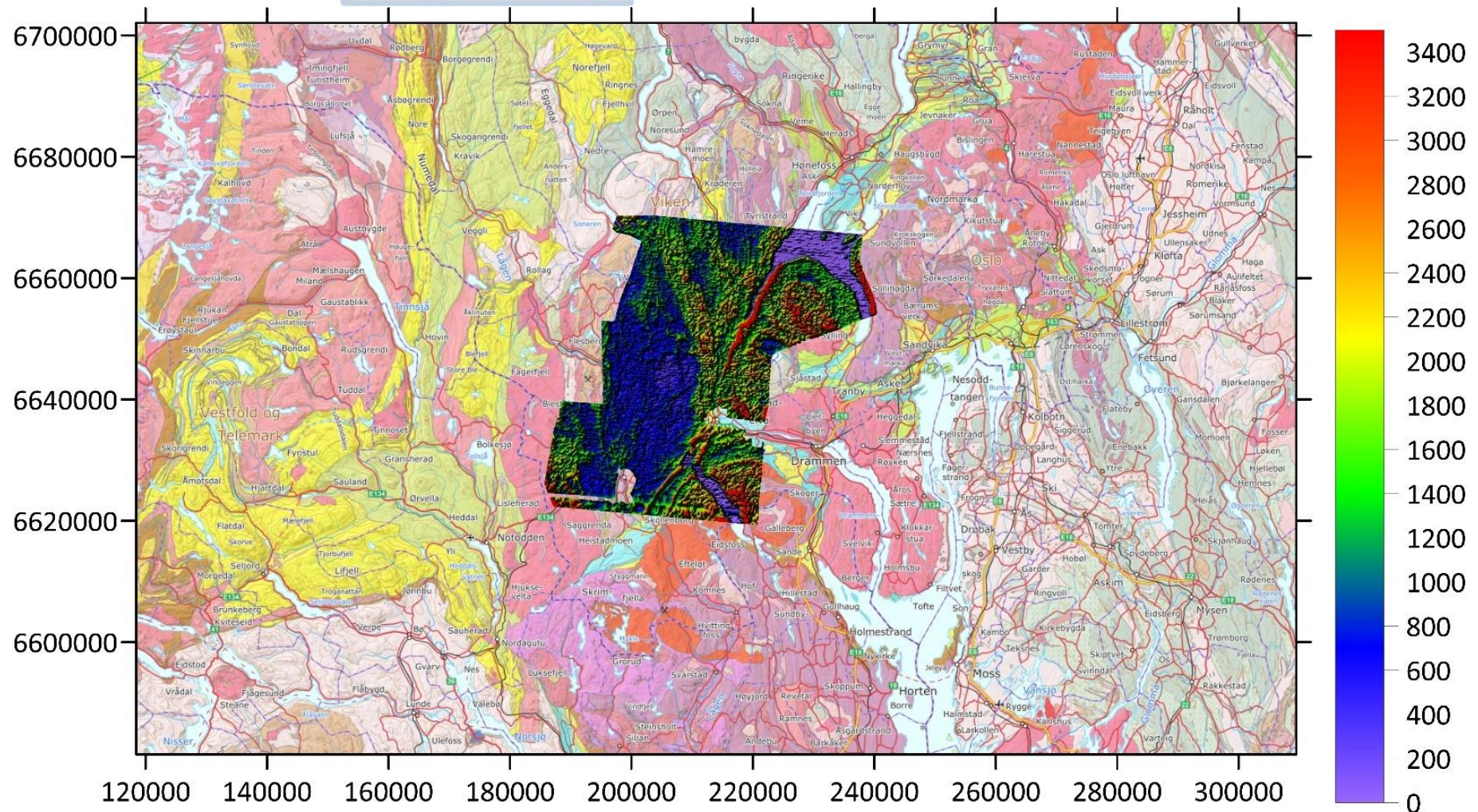
http://geo.nqu.no/qd_images/wms/berggrunn/BerggrunnWMS2_hovedbergart_med_strukturmaalinger.png

6.3 Ηλικία σχηματισμού του γεωλογικού υποβάθρου του Kongsberg

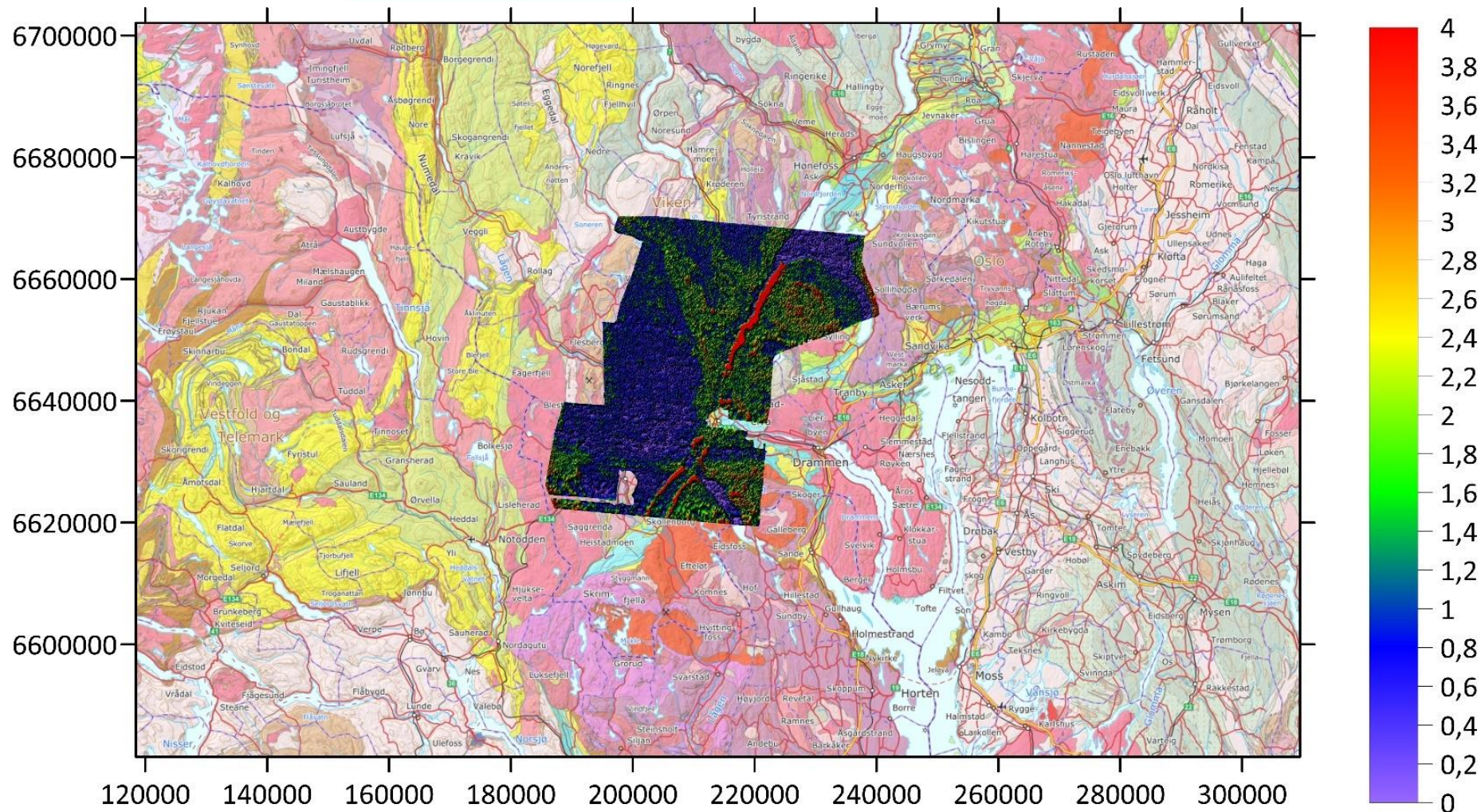


Σχήμα 3: Χάρτης ηλικιών σχηματισμού του γεωλογικού υποβάθρου στην περιοχή του Kongsberg. Η διάσταση του χάρτη είναι 1:400.000 και υπάρχουν 5 χρώματα που διακρίνουν τις επιμέρους ηλικίες. Στο σύνδεσμο που ακολουθεί υπάρχει το πλήρες χρωματικό υπόμνημα http://geo.ngu.no/gd_images/wms/berggrunn/BerggrunnWMS2/Bergart_flate_dannelsesalder.png. Παρατηρούμε πως οι ηλικίες σχηματισμού που αναφέρονται για το συγκεκριμένο τμήμα του χάρτη ξεκινούν από το Προτεροζωϊκό (πάνω από 1 δις χρόνια πριν) και φτάνουν μέχρι και το Πέρμιο (250 έως 270 εκατομμύρια χρόνια πριν). Η γεωαναφορά του χάρτη έγινε στο προβολικό σύστημα WGS 84 UTM ZONE 33N.

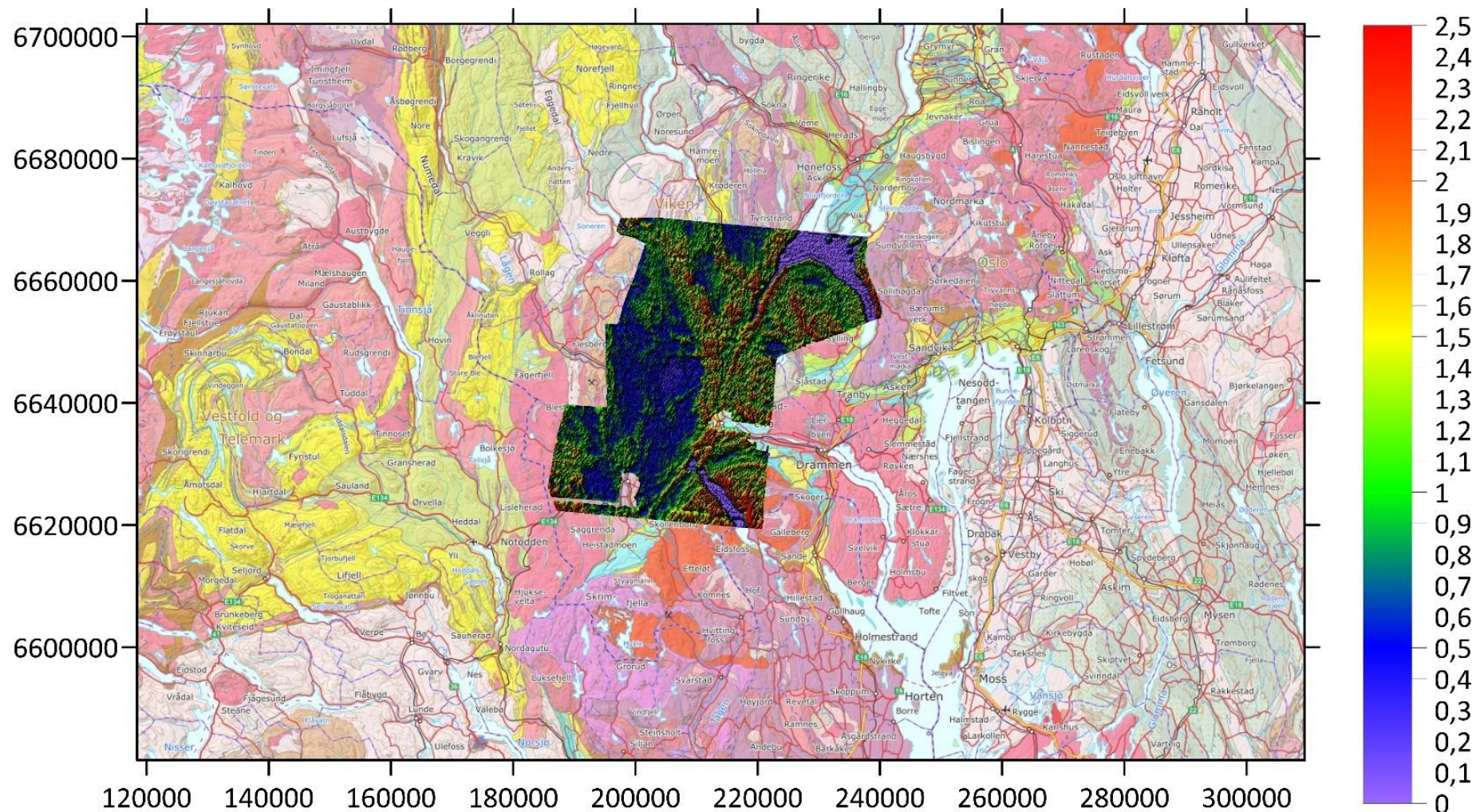
6.4 Ραδιομετρικοί χάρτες της περιοχής του Kongsberg



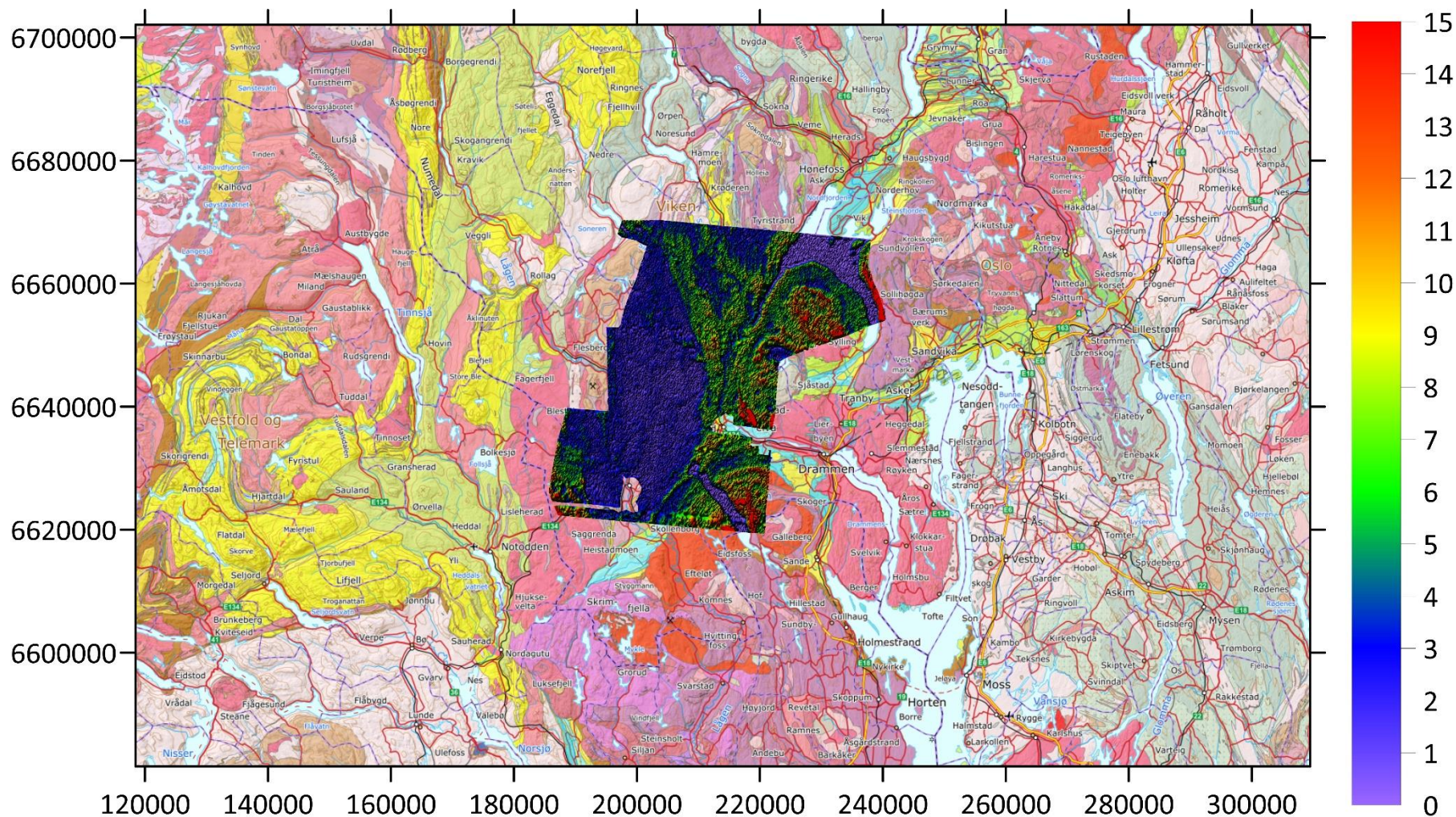
Σχήμα 4: Χάρτης καταμέτρησης της συνολικής ακτινοβολίας (Total Counts, c/s) της περιοχής Kongsberg-II [Channels 34-220 (410-2810 keV)]. Η γεωαναφορά του χάρτη έγινε στο προβολικό σύστημα WGS 84 UTM ZONE 33N. Στο background υπάρχει ο γεωολογικός χάρτης της περιοχής. Η ισοδιάσταση του χάρτη είναι 1:550.000 και η δημιουργία του έγινε μέσω του Surfer 19. Το όργανο των μετρήσεων ήταν το RSX-5, η καταγραφή τους έγινε με ελικόπτερο, το μέσο ύψος του αισθητήρα ήταν τα 65m. ενώ το line spacing είναι στα 200m. Τα δεδομένα των καταγραφών επεξεργάστηκαν ως προς τους παράγοντες που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 5. Η χρωματική κλίμακα, στα δεξιά του σχήματος είναι της μορφής Rainbow.



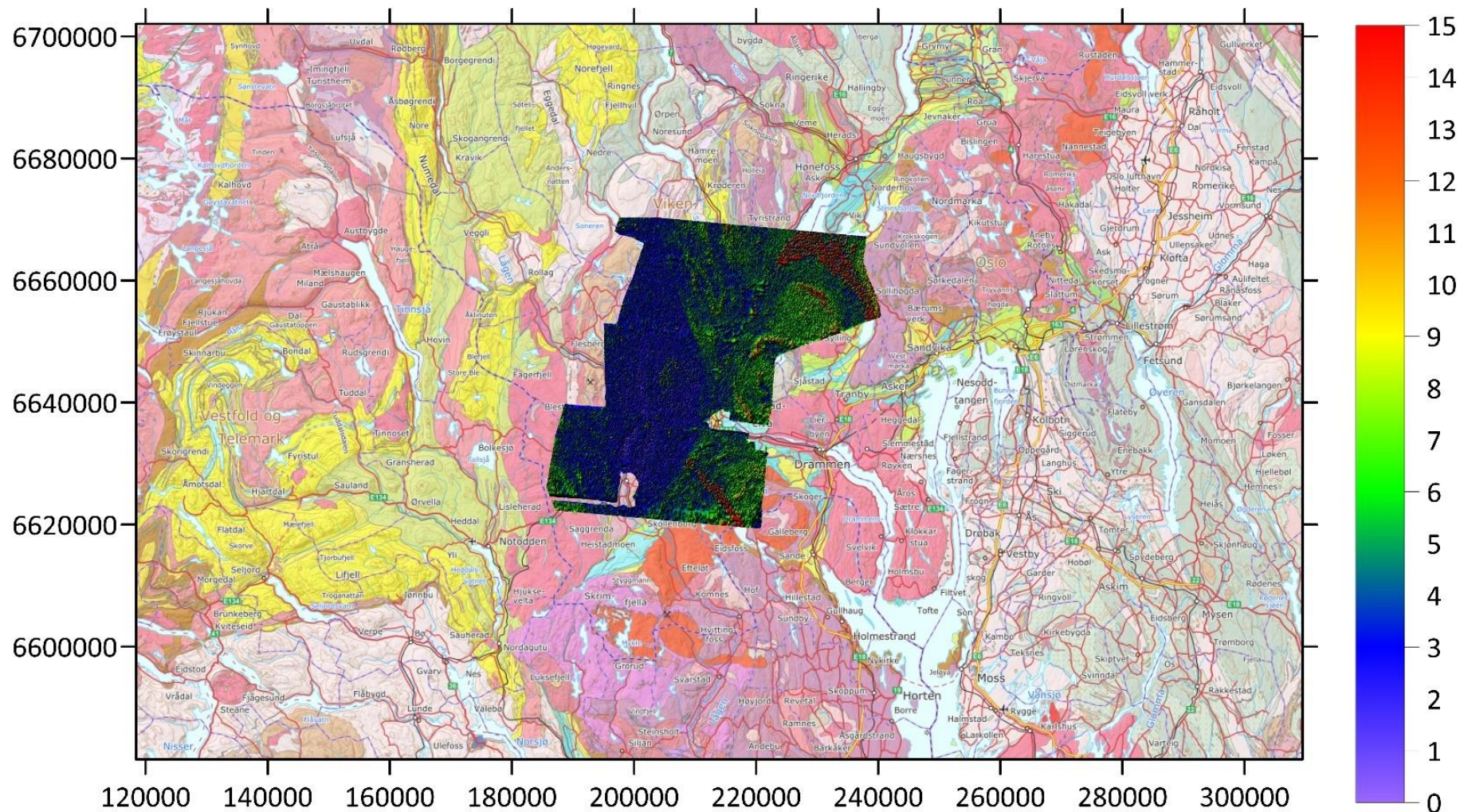
Σχήμα 5: Χάρτης συγκέντρωσης του εδάφους σε ισοδύναμο ουράνιο (eU) σε ppm για την περιοχή Kongsberg-II[Channels 132-148 (1660-1860 keV)]. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, το ουράνιο το συναντούμε κυρίως βάση των θυγατρικών του και βάση αυτών γίνονται οι υπολογισμοί και οι μετρήσεις. Η γεωαναφορά του χάρτη έγινε στο προβολικό σύστημα WGS 84 UTM ZONE 33N. Στο background υπάρχει ο γεωλογικός χάρτης της περιοχής. Η ισοδιάσταση του χάρτη είναι 1:550.000 και η δημιουργία του έγινε μέσω του Surfer 19. Το όργανο των μετρήσεων ήταν το RSX-5, η καταγραφή τους έγινε με ελικόπτερο, το μέσο ύψος του αισθητήρα ήταν τα 65m. ενώ το line spacing είναι στα 200m. Τα δεδομένα των καταγραφών επεξεργάστηκαν ως προς τους παράγοντες που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 5. Η χρωματική κλίμακα, στα δεξιά του σχήματος είναι της μορφής Rainbow.



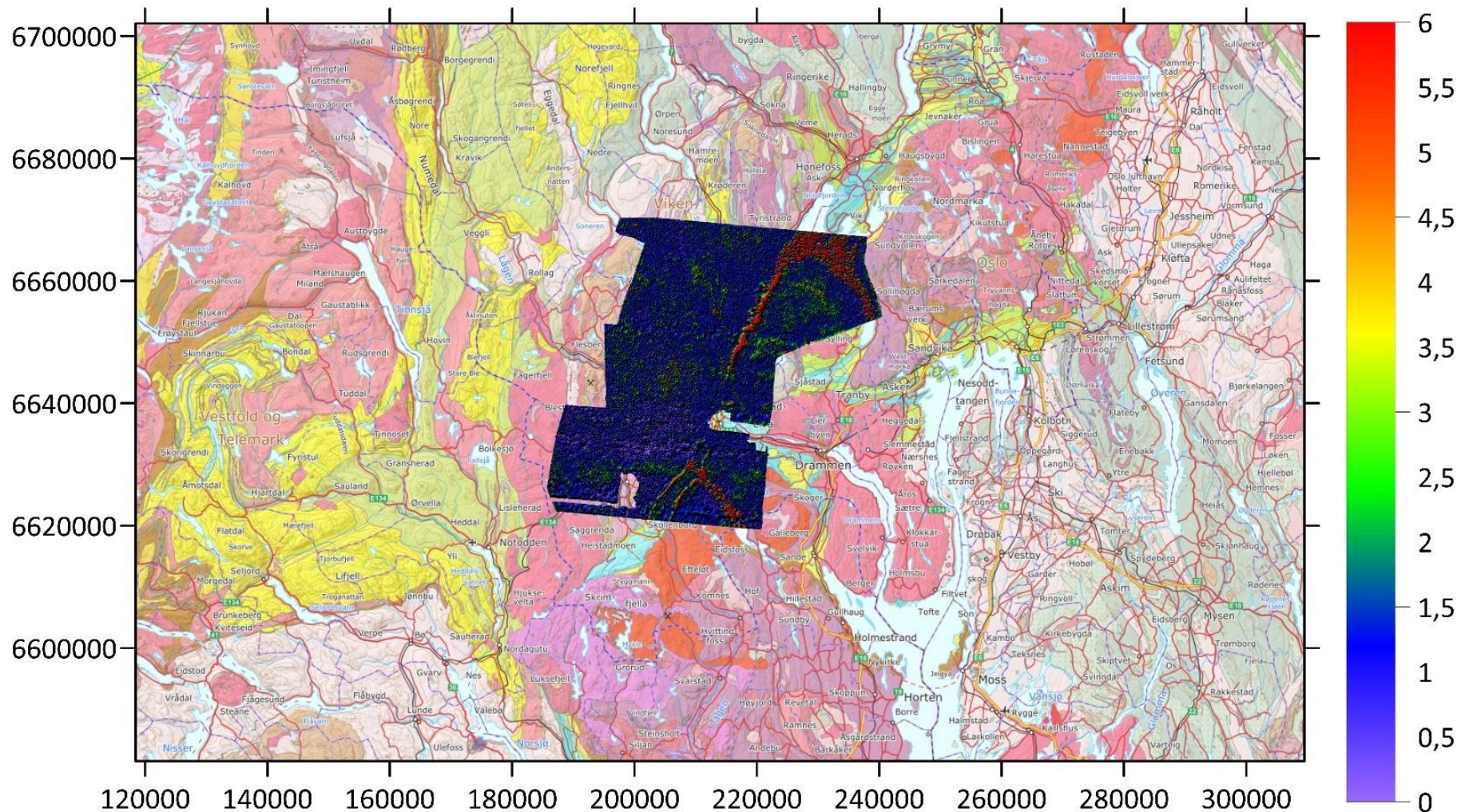
Σχήμα 6: Χάρτης συγκέντρωσης του εδάφους σε κάλιο (%) για την περιοχή ερευνών Kongsberg-II[Channels 109-125 (1370-1570 keV)]. Στην περίπτωση του καλίου υπολογίζεται η x100% περιεκτικότητα του εδάφους. Η γεωαναφορά του χάρτη έγινε στο προβολικό σύστημα WGS 84 UTM ZONE 33N. Στο background υπάρχει ο γεωλογικός χάρτης της περιοχής. Η ισοδιάσταση του χάρτη είναι 1:550.000 και η δημιουργία του έγινε μέσω του Surfer 19. Το όργανο των μετρήσεων ήταν το RSX-5, η καταγραφή τους έγινε με ελικόπτερο, το μέσο ύψος του αισθητήρα ήταν τα 65m. ενώ το line spacing είναι στα 200m. Τα δεδομένα των καταγραφών επεξεργάστηκαν ως προς τους παράγοντες που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 5. Η χρωματική κλίμακα, στα δεξιά του σχήματος είναι της μορφής Rainbow.



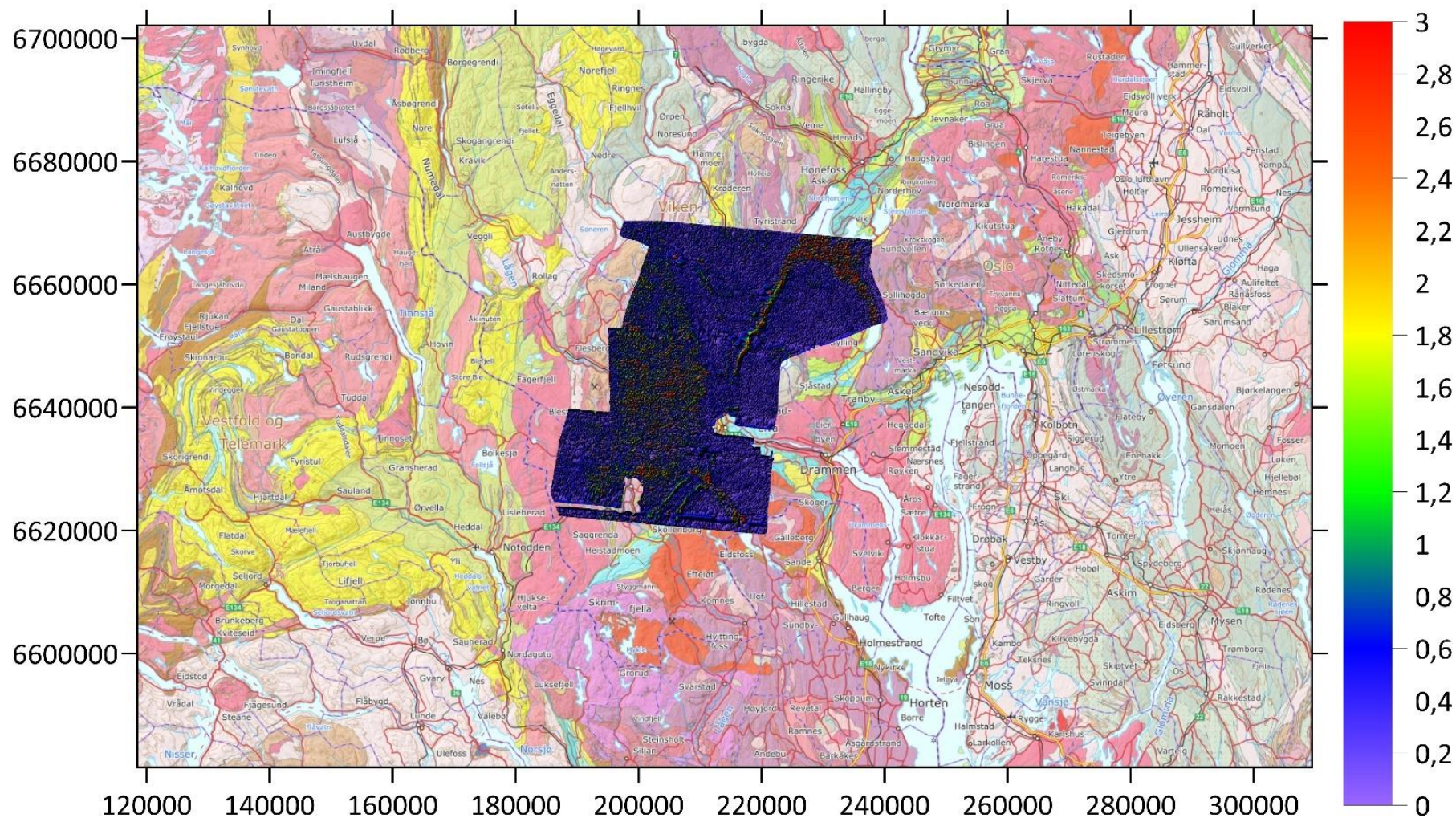
Σχήμα 7: Χάρτης συγκέντρωσης του εδάφους σε ισοδύναμο θόριο (eTh) σε ppm για την περιοχή Kongsberg-II[Channels 189-220 (2410-2810 keV)]. Όπως αναφέρθηκε σε προηγούμενο κεφάλαιο, το θόριο το συναντούμε κυρίως βάση των θυγατρικών του και βάση αυτών γίνονται οι υπολογισμοί και οι μετρήσεις. Η γεωαναφορά του χάρτη έγινε στο προβολικό σύστημα WGS 84 UTM ZONE 33N. Στο background υπάρχει ο γεωλογικός χάρτης της περιοχής. Η ισοδιάσταση του χάρτη είναι 1:550.000 και η δημιουργία του έγινε μέσω του Surfer 19. Το όργανο των μετρήσεων ήταν το RSX-5, η καταγραφή τους έγινε με ελικόπτερο, το μέσο ύψος του αισθητήρα ήταν τα 65m. ενώ το line spacing είναι στα 200m. Τα δεδομένα των καταγραφών επεξεργάστηκαν ως προς τους παράγοντες που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 5. Η χρωματική κλίμακα, στα δεξιά του σχήματος είναι της μορφής Rainbow.



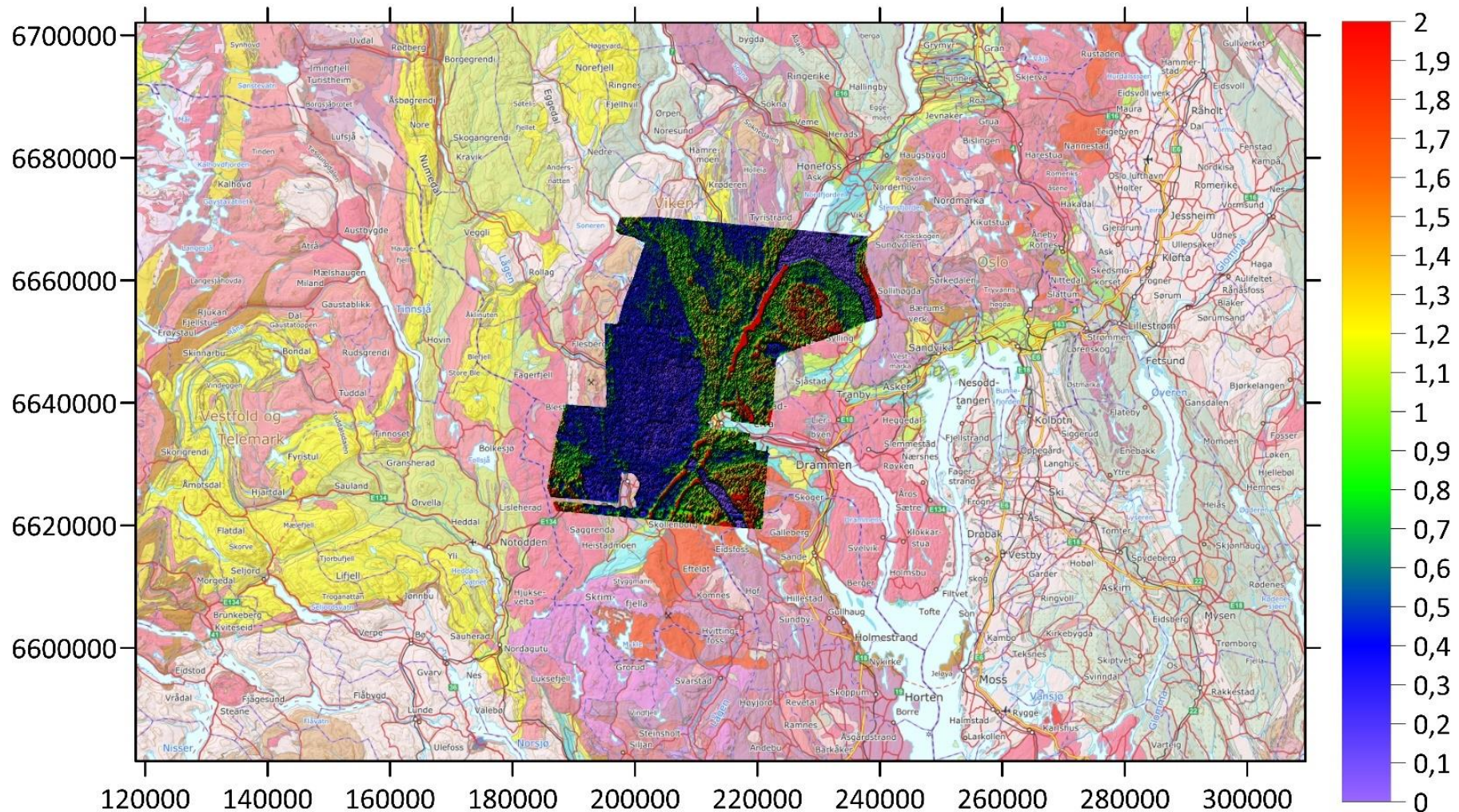
Σχήμα 8: Χάρτης που δημιουργήθηκε βάση των εδαφικών συγκεντρώσεων του Th και του K. Συγκεκριμένα πρόκειται για τον λόγο των δύο στοιχείων, δηλαδή Th/K. Η γεωαναφορά του χάρτη έγινε στο προβολικό σύστημα WGS 84 UTM ZONE 33N. Στο background υπάρχει ο γεωλογικός χάρτης της περιοχής. Η ισοδιάσταση του χάρτη είναι 1:550.000 και η δημιουργία του έγινε μέσω του Surfer 19. Τα δεδομένα των καταγραφών επεξεργάστηκαν ως προς τους παράγοντες που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 5. Η χρωματική κλίμακα, στα δεξιά του σχήματος είναι της μορφής Rainbow.



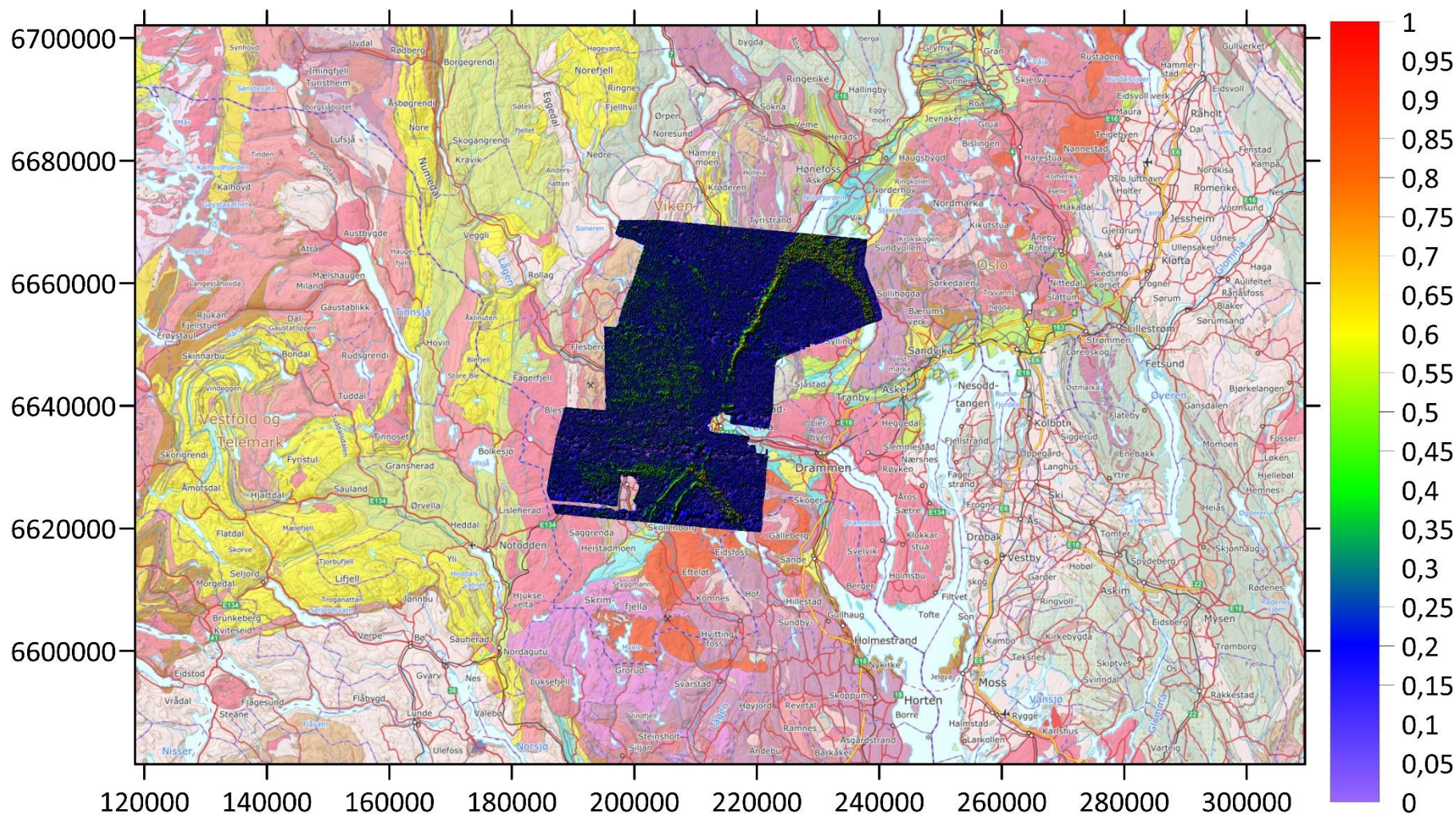
Σχήμα 9: Χάρτης που δημιουργήθηκε βάση των εδαφικών συγκεντρώσεων του U και του K. Συγκεκριμένα πρόκειται για τον λόγο των δύο στοιχείων, δηλαδή U/K. Η γεωαναφορά του χάρτη έγινε στο προβολικό σύστημα WGS 84 UTM ZONE 33N. Στο background υπάρχει ο γεωλογικός χάρτης της περιοχής. Η ισοδιάσταση του χάρτη είναι 1:550.000 και η δημιουργία του έγινε μέσω του Surfer 19. Τα δεδομένα των καταγραφών επεξεργάστηκαν ως προς τους παράγοντες που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 5. Η χρωματική κλίμακα, στα δεξιά του σχήματος είναι της μορφής Rainbow.



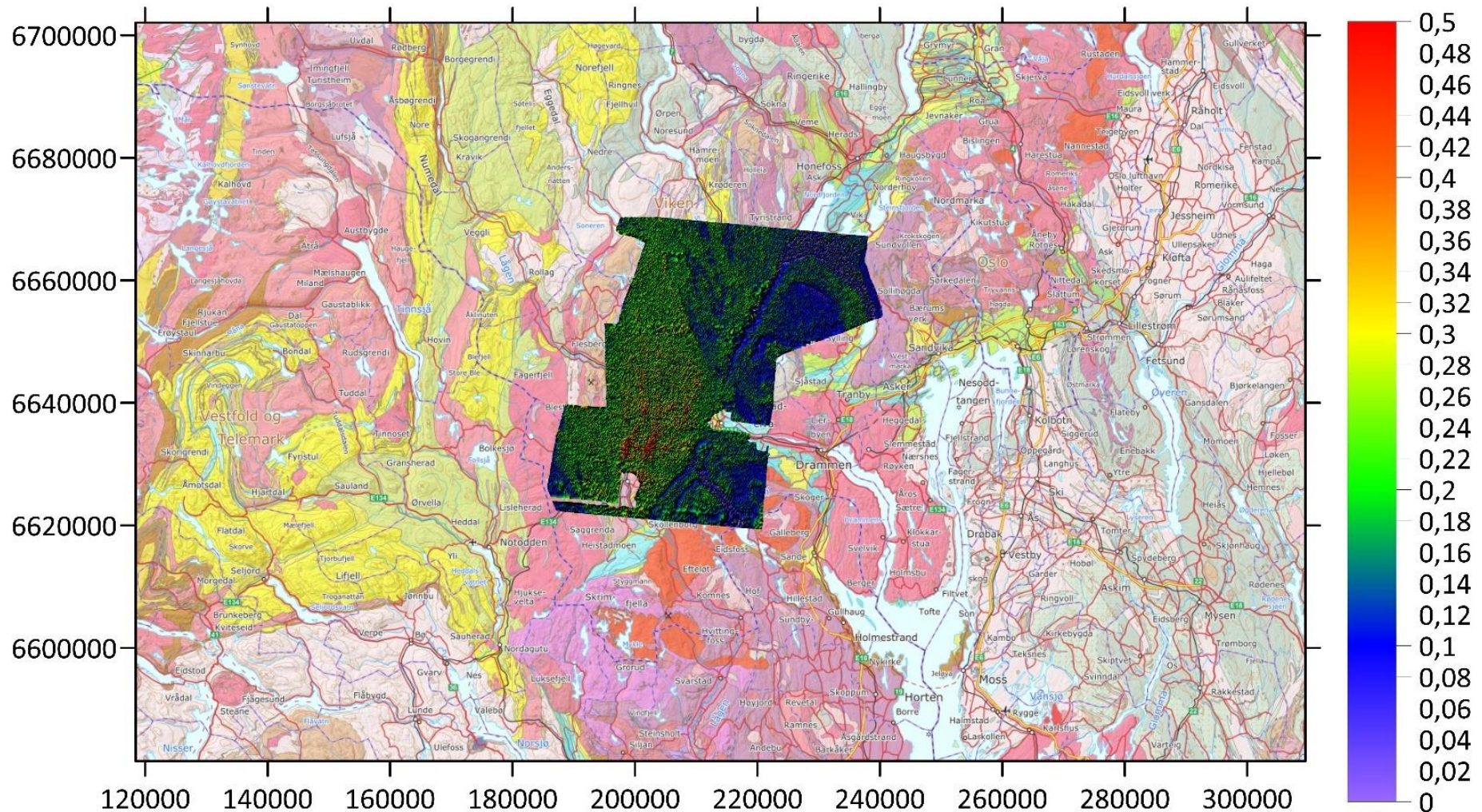
Σχήμα 10: Χάρτης που δημιουργήθηκε βάση των εδαφικών συγκεντρώσεων του U και του Th. Συγκεκριμένα πρόκειται για τον λόγο των δύο στοιχείων, δηλαδή U/Th. Η γεωαναφορά του χάρτη έγινε στο προβολικό σύστημα WGS 84 UTM ZONE 33N. Στο background υπάρχει ο γεωλογικός χάρτης της περιοχής. Η ισοδιάσταση του χάρτη είναι 1:550.000 και η δημιουργία του έγινε μέσω του Surfer 19. Τα δεδομένα των καταγραφών επεξεργάστηκαν ως προς τους παράγοντες που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 5. Η χρωματική κλίμακα, στα δεξιά του σχήματος είναι της μορφής Rainbow.



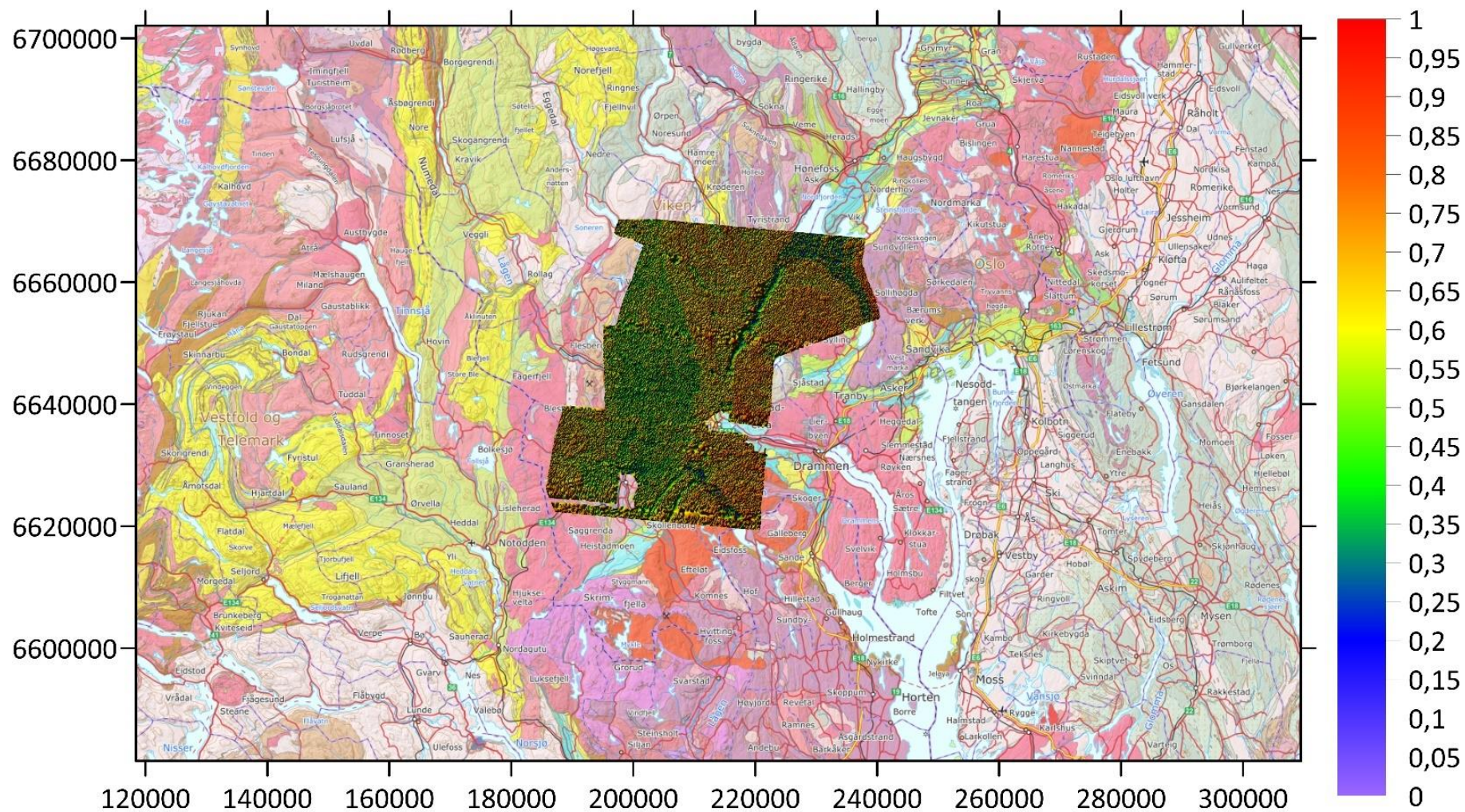
Σχήμα 11: Ο χάρτης του σχήματος είναι βάση και των τριών στοιχείων. Ονομάζεται χάρτης ραδιογενούς παραγωγής θερμότητας και τα δεδομένα που φέρει έχουν προκύψει βάση του παρακάτω τύπου: $A = 0.337(0.74eU + 0.199eTh + 0.26K)$ [van Dam, 2007] όπου οι συγκεντρώσεις των eU και eTh προσμετρούνται σαν ppm και η συγκέντρωση του K σαν μονάδες % και οι μονάδες του A είναι $\mu W/m^3$. Η γεωαναφορά του χάρτη έγινε στο προβολικό σύστημα WGS 84 UTM ZONE 33N. Στο background υπάρχει ο γεωλογικός χάρτης της περιοχής. Η ισοδιάσταση του χάρτη είναι 1:550.000 και η δημιουργία του έγινε μέσω του Surfer 19. Τα δεδομένα των καταγραφών επεξεργάστηκαν ως προς τους παράγοντες που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 5. Η χρωματική κλίμακα, στα δεξιά του σχήματος είναι της μορφής Rainbow.



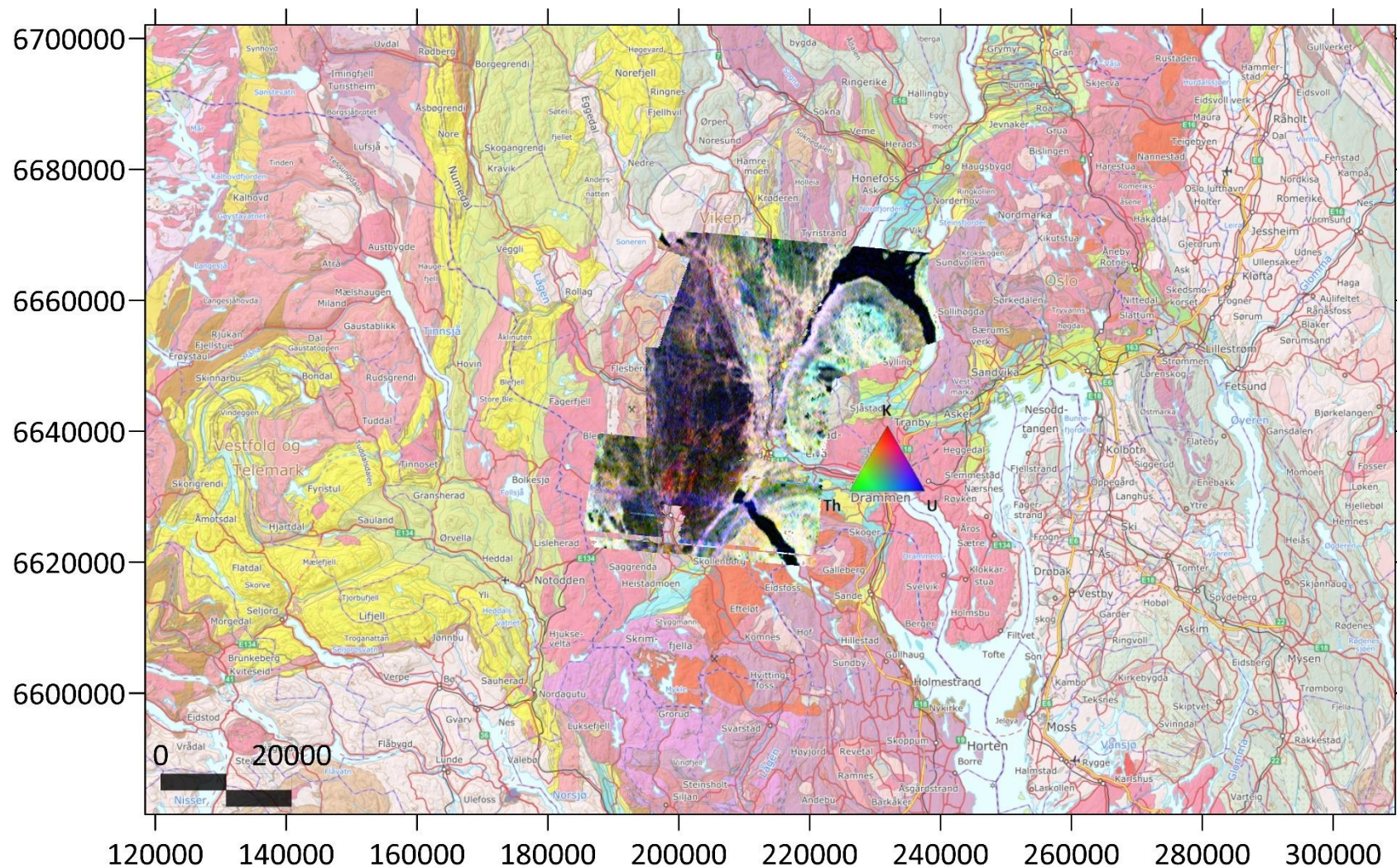
Σχήμα 12: Ο χάρτης του σχήματος ονομάζεται Un και είναι της μορφής Sum-normalized abundance maps. Δηλαδή η συγκέντρωση του εκάστοτε στοιχείου μετατρέπεται σε σχετική αφθονία, σε σχέση με το άθροισμα των υπολοίπων στοιχείων. Ο μαθηματικός τύπος που χρησιμοποιείται για το U είναι $U_n = U / (U + K + Th)$. Η γεωαναφορά του χάρτη έγινε στο προβολικό σύστημα WGS 84 UTM ZONE 33N. Στο background υπάρχει ο γεωλογικός χάρτης της περιοχής. Η ισοδιάσταση του χάρτη είναι 1:550.000 και η δημιουργία του έγινε μέσω του Surfer 19. Τα δεδομένα των καταγραφών επεξεργάστηκαν ως προς τους παράγοντες που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 5. Η χρωματική κλίμακα, στα δεξιά του σχήματος είναι της μορφής Rainbow.



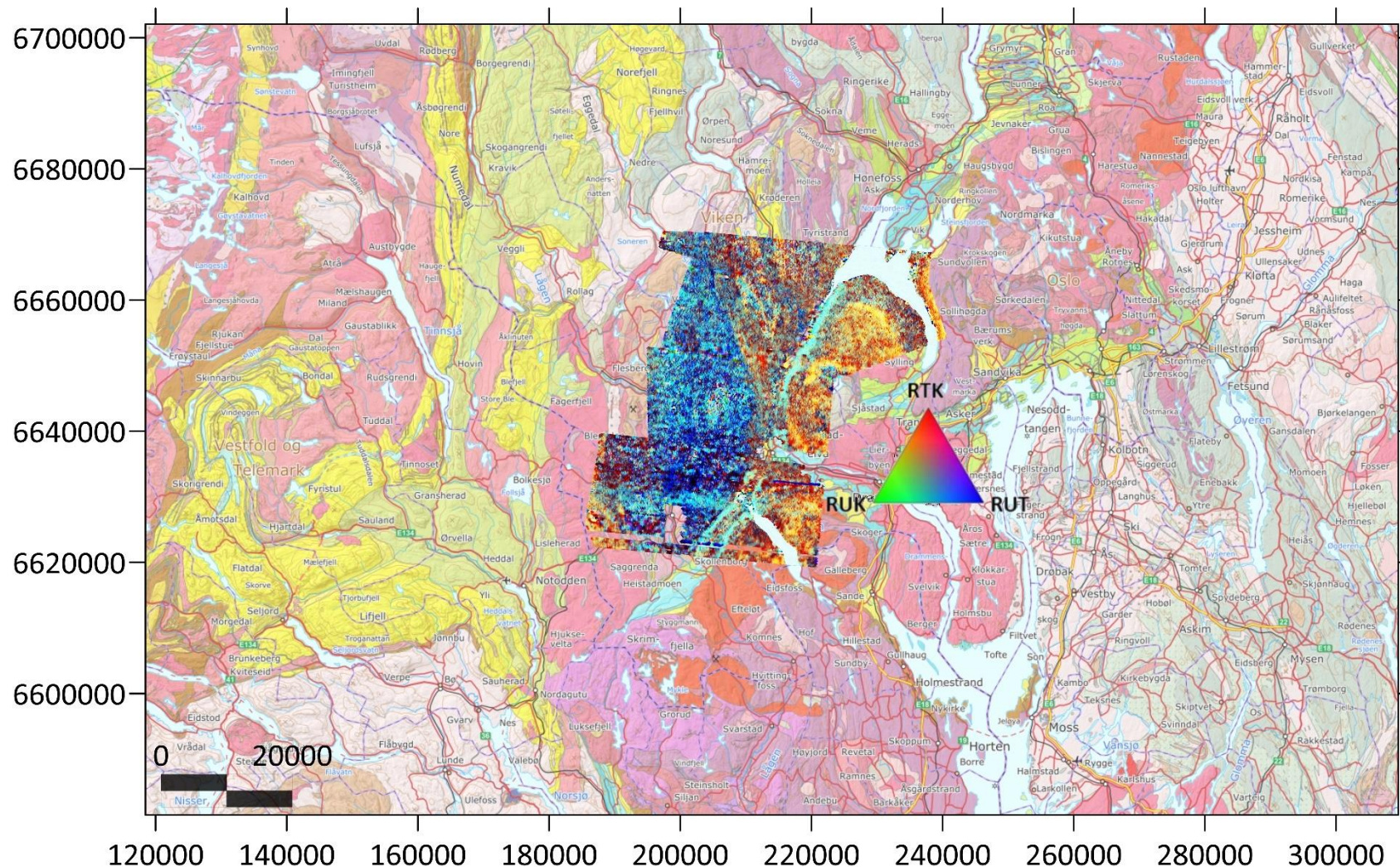
Σχήμα 13: Ο χάρτης του σχήματος ονομάζεται K1 και είναι της μορφής Sum-normalized abundance maps. Δηλαδή η συγκέντρωση του εκάστοτε στοιχείου μετατρέπεται σε σχετική αφθονία, σε σχέση με το άθροισμα των υπολοίπων στοιχείων. Ο μαθηματικός τύπος που χρησιμοποιείται για το K είναι $K = K / (K + U + Th)$. Η γεωαναφορά του χάρτη έγινε στο προβολικό σύστημα WGS 84 UTM ZONE 33N. Στο background υπάρχει ο γεωλογικός χάρτης της περιοχής. Η ισοδιάσταση του χάρτη είναι 1:550.000 και η δημιουργία του έγινε μέσω του Surfer 19. Τα δεδομένα των καταγραφών επεξεργάστηκαν ως προς τους παράγοντες που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 5. Η χρωματική κλίμακα, στα δεξιά του σχήματος είναι της μορφής Rainbow.



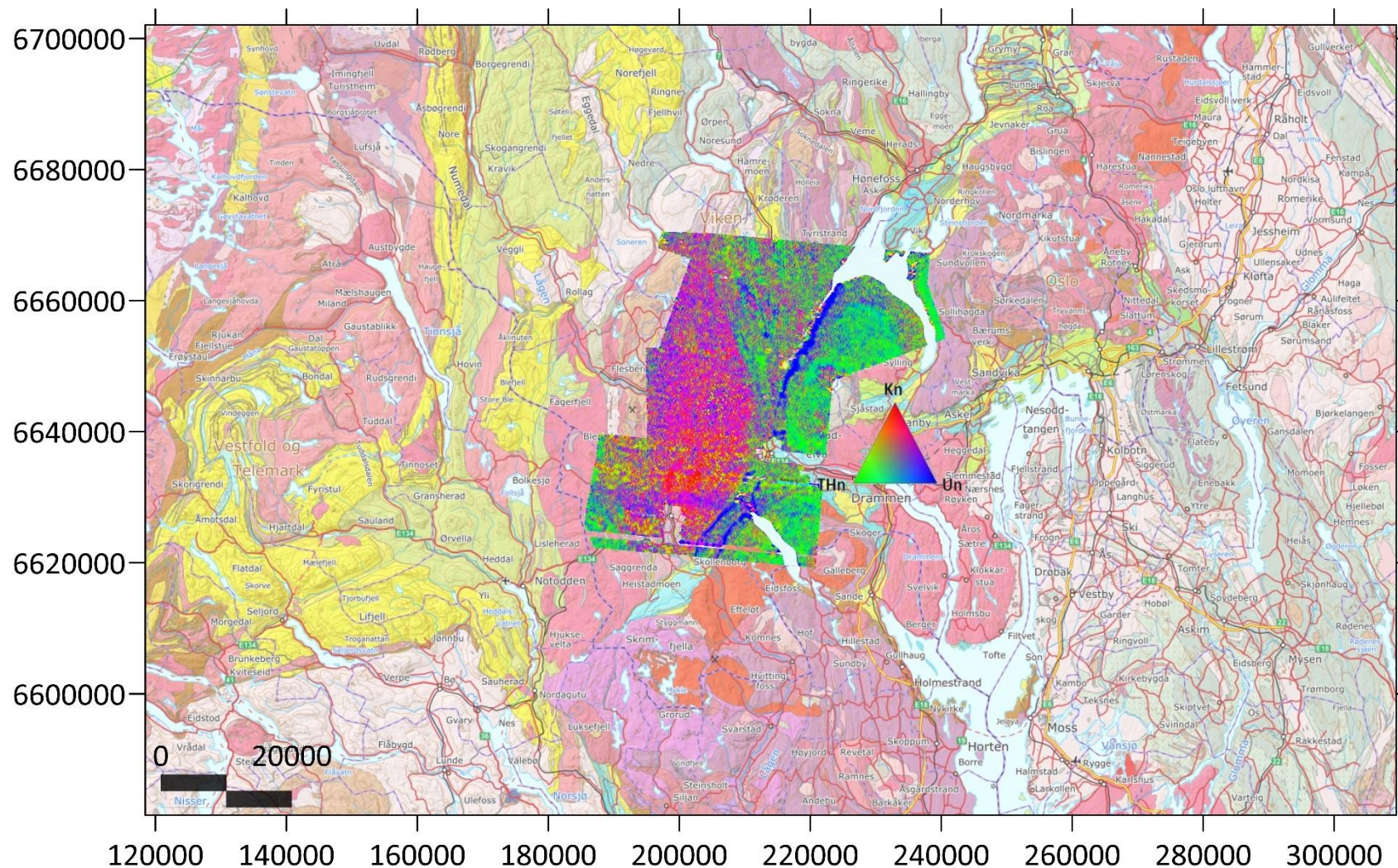
Σχήμα 14: Ο χάρτης του σχήματος ονομάζεται Thn και είναι της μορφής Sum-normalized abundance maps. Δηλαδή η συγκέντρωση του εκάστοτε στοιχείου μετατρέπεται σε σχετική αφθονία, σε σχέση με το άθροισμα των υπολοίπων στοιχείων. Ο μαθηματικός τύπος που χρησιμοποιείται για το Th είναι $Thn = Th / (Th + U + K)$. Η γεωαναφορά του χάρτη έγινε στο προβολικό σύστημα WGS 84 UTM ZONE 33N. Στο background υπάρχει ο γεωλογικός χάρτης της περιοχής. Η ισοδιάσταση του χάρτη είναι 1:550.000 και η δημιουργία του έγινε μέσω του Surfer 19. Τα δεδομένα των καταγραφών επεξεργάστηκαν ως προς τους παράγοντες που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 5. Η χρωματική κλίμακα, στα δεξιά του σχήματος είναι της μορφής Rainbow.



Σχήμα 15: Ο χάρτης του σχήματος είναι της μορφής ternary map και βασίζεται στις περιεκτικότητες του εδάφους και στα 3 στοιχεία, K, U & Th. Η χρωματική κλίμακα που υπάρχει δείχνει πως με κόκκινο επισημαίνεται το Κάλιο, με πράσινο το Θόριο και με μπλέ το Ουράνιο. Η γεωαναφορά του χάρτη έγινε στο προβολικό σύστημα WGS 84 UTM ZONE 33N. Στο background υπάρχει ο γεωλογικός χάρτης της περιοχής. Η ισοδιάσταση του χάρτη είναι 1:550.000 και η δημιουργία του έγινε μέσω του Surfer 19. Τα δεδομένα των καταγραφών επεξεργάστηκαν ως προς τους παράγοντες που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 5.



Σχήμα 16: Ο χάρτης του σχήματος είναι της μορφής ternary map και βασίζεται στους λόγους των συγκεντρώσεων των στοιχείων RTK(Th/K), RUK(U/K) & RUTh(U/Th). Η χρωματική κλίμακα που υπάρχει δείχνει πως με κόκκινο επισημαίνεται το RTK, με πράσινο το RUK και με μπλέ το RUT. Η γεωαναφορά του χάρτη έγινε στο προβολικό σύστημα WGS 84 UTM ZONE 33N. Στο background υπάρχει ο γεωλογικός χάρτης της περιοχής. Η ισοδιάσταση του χάρτη είναι 1:550.000 και η δημιουργία του έγινε μέσω του Surfer 19. Τα δεδομένα των καταγραφών επεξεργάστηκαν ως προς τους παράγοντες που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 5.



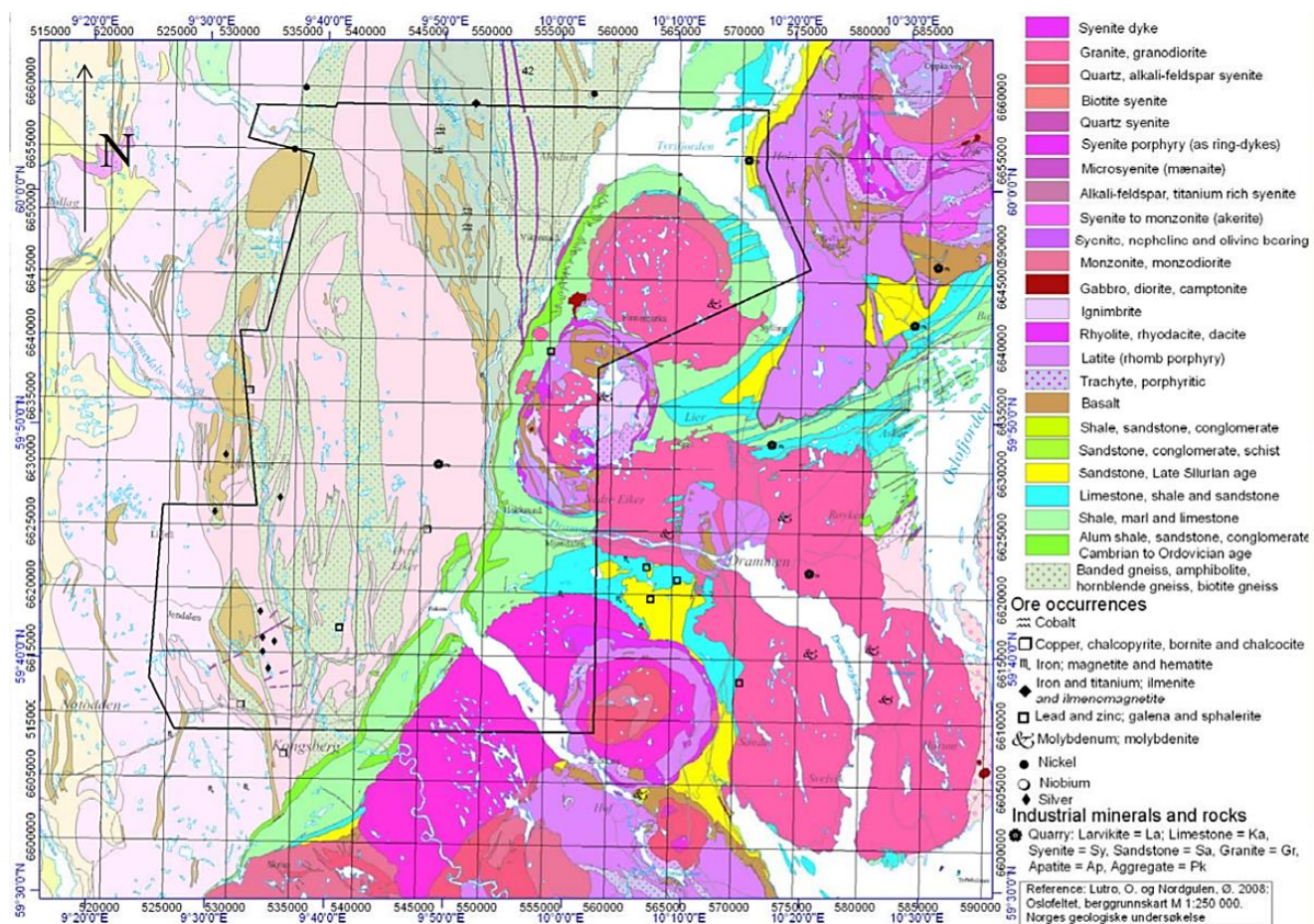
Σχήμα 17: Ο χάρτης του σχήματος είναι της μορφής ternary map και βασίζεται στις συγκεντρώσεις των σχετικών αφθονιών των στοιχείων Kn [$Kn = K / (K+U+Th)$], Thn [$Thn = Th / (Th+U+K)$] & Un [$Un = U / (U+K+Th)$]. Η χρωματική κλίμακα που υπάρχει δείχνει πως με κόκκινο επισημαίνεται το Kn, με πράσινο το Thn και με μπλέ το Un. Η γεωαναφορά του χάρτη έγινε στο προβολικό σύστημα WGS 84 UTM ZONE 33N. Στο background υπάρχει ο γεωολογικός χάρτης της περιοχής. Η ισοδιάσταση του χάρτη είναι 1:550.000 και η δημιουργία του έγινε μέσω του Surfer 19. Τα δεδομένα των καταγραφών επεξεργάστηκαν ως προς τους παράγοντες που αναφέρθηκαν στο κεφάλαιο 5.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7: ΓΕΩΛΟΓΙΑ ΤΟΥ KONGSBERG ΚΑΙ ΓΕΩΧΗΜΕΙΑ ΤΩΝ ΡΑΔΙΟΣΤΟΙΧΕΙΩΝ

Προτού αναλύσουμε τους χάρτες που δημιουργήσαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, θα ανατρέξουμε στην γεωλογία της περιοχής μελέτης, για να αποκτήσουμε πληροφορίες για το γεωλογικό υπόβαθρο, τα τεκτονικά στοιχεία καθώς και τις επί μέρους ηλικίες των πετρωμάτων. Τέλος θα αναφέρουμε λίγες πληροφορίες για τον χαρακτηριστικό γρανίτη της περιοχής και για τα κοιτάσματα ασημιού.

7.1 Γεωλογία του Kongsberg

Όπως βλέπουμε, τόσο στο σχήμα 1 (γεωλογικός χάρτης 1: 400.000) όσο και στο σχήμα 18 (γεωλογικός χάρτης 1: 250.000), δηλαδή στους 2 γεωλογικούς χάρτες της περιοχής, πρόκειται για μέρος με πλούσιο υπόβαθρο. Ως



Σχήμα 18: Ο γεωλογικός χάρτης της περιοχής των ερευνών σε ισοδιάσταση 1:250.000, όπως τροποποιήθηκε από τους Lutro and Nordgulen, 2008. Το μαύρο πλαίσιο στο εσωτερικό του χάρτη είναι η περιοχή μελέτης Kongsberg-II. Το λευκό χρώμα που παρατηρείται εντός του χάρτη είναι οι επιφάνειες του νερού.

επί το πλείστο τα πετρώματα που συναντούμε είναι πυριγενή, ενώ υπάρχουν και ιζηματογενή και μεταμορφωμένα. Παρατηρούμε πως από πυριγενή πετρώματα υπάρχει συνήθως σε διάφορες μορφές (πλούσιος σε χαλαζία, βιοτίτη, τιτάνιο κλπ.), γρανίτης και γρανοδιωρίτης, μονζονίτης και μονζοδιωρίτης, γάββρος, ρυόλιθος και δακίτης καθώς και πρόσμειξη των δύο, λατίτης, τραχείτης και βασάλτης. Από ιζηματογενή βρίσκουμε ψαμμίτη, ασβεστόλιθο, μάργα καθώς και κροκαλοπαγές. Τέλος από μεταμορφωμένα συναντούμε σχιστόλιθο και

γενύσιο (είτε ως αμφιβολιτικό, είτε ως κεροστιλβικό είτε ως βιοτιτικό, με την μορφή μπαντών). Στο σύμπλεγμα πετρωμάτων του Kongsberg παρατηρούμε πως τα παρακάτω πετρώματα συναντώνται έντονα φυλλωμένα: αμφιβολίτη, γενύσιο, διορίτη, γρανίτη καθώς και γρανοδιορίτη. Ο διορίτης αποτελείται σε ποσοστό 40-50% από πλαγιόκλαστα, ο γρανίτης που μετατρέπεται σε μονζονίτη είναι πλούσιος σε αμφιβόλους (10-30%) ενώ ο ζωνώδης διοριτικός γενύσιος αποτελείται από αμφιβολιτικές-βιοτιτικές ζώνες.

Στο σχήμα 2 θα δούμε μάλιστα σε ισοδιάσταση 1:400.000 την τεκτονική δομή του χώρου των ερευνών. Οι 3 εμφανείς χρωματικές αποχρώσεις μπλε, κόκκινο και πράσινο είναι αντίστοιχα το Svekonorwegisk orogen, το Oslo-Rift bergarter και το Kaledonsk orogen. Οι μπλε γραμμές που παρατηρούνται στο σχήμα 2 είναι τα ρήγματα της περιοχής, όπου ερμηνεύονται ως ρήγματα διάτμησης (μπλε γραμμές με τετράγωνο) και ως ρήγματα συμπίεσης (μπλε γραμμές με τρίγωνο). Επιπρόσθετα οι κόκκινες γραμμές αποτελούν διατμητικές ζώνες. Οι κόκκινες γραμμές που φέρουν τετράγωνα ερμηνεύονται ως διατμητικές ζώνες επέκτασης ενώ οι κόκκινες γραμμές που φέρουν τρίγωνα είναι διατμητικές ζώνες συμπίεσης. Η κυριότερη διατμητική ζώνη που παρατηρείται, βρίσκεται περίπου στο κέντρο του χάρτη και θεωρείται ως ζώνη συμπίεσης του Svekonorwegisk orogen πάνω στο Kaledonsk orogen.

Θα ανατρέξουμε επίσης στο σχήμα 3 όπου είναι ο χάρτης των ηλικιών σχηματισμού του γεωλογικού υποβάθρου της περιοχής. Παρατηρούμε πως στην πόλη του Kongsberg συναντούμε τρεις διαφορετικές αποχρώσεις, όπου η κάθε μία ερμηνεύει διαφορετική ηλικία σχηματισμού. Συγκεκριμένα, η κόκκινη περιοχή ερμηνεύεται ως Πέρμιο, η πράσινη ως Ορβοβίσιο και η πορτοκαλί ως Πρωτεροζωϊκός. Οι ροζ αποχρώσεις στα αριστερά του χάρτη έχουν ηλικία ίσως και μεγαλύτερη από 2 δισεκατομμύρια χρόνια ενώ το πολύ ελαφρύ γκρι που υπάρχει σε ορισμένα σημεία στο δεξί μέρος του χάρτη είναι ηλικίας Σιλούριου.

7.1.1 Ο γρανίτης της περιοχής

Ο γρανίτης του Kongsberg ανήκει σε μία σειρά γρανιτικών σωμάτων που ξεχωρίζονται μεταξύ τους βάση της πετρογραφίας και της γεωχημείας τους. Συγκεκριμένα πρόκειται για τους γρανίτες των περιοχών Kongsberg, Helgevatnet και Meheia. Στα ανατολικά ο γρανίτης που συναντούμε είναι λεπτόκοκκος ενώ στα δυτικά είναι χονδρόκοκκος. Ο δυτικός χονδρόκοκκος γρανίτης χωρίζεται σε 2 επιμέρους σώματα, τον γρανίτη Meheia στα δυτικά-νοτιοδυτικά και τον γρανίτη Helgevatnet στα βόρεια. Οι γεωγραφικές εκτιμήσεις και τα περιεχόμενα των ραδιοστοιχείων συγκεκριμένα υποδεικνύουν ότι ο γρανίτης Kongsberg δεν σχετίζεται γενετικά με τους γρανίτες Meheia και Helgevatnet. Σύμφωνα με την εργασία του Ka Yode, A. A. (1974) ο γρανίτης της περιοχής των ερευνών μας, έχει τις εξής τιμές σε ραδιομετρικά στοιχεία:

- Rb.....82 ppm
- U.....0,99 ppm
- Th.....3,78 ppm
- Th/K.....0,80
- U/K.....0,20
- K/Rb.....620

Παρατηρούμε πως βάση των παραπάνω δεδομένων πως οι τιμές των Rb, Th, U είναι χαμηλές ενώ χαμηλοί είναι και οι λόγοι με εξαίρεση τον λόγο K/Rb. Σε όλες τις εμφανίσεις του γρανίτη του Kongsberg εξάγουμε ως συμπέρασμα πως πρόκειται για γρανιτικό γενύσιο. Είναι μεσόκοκκος και αποτελείται από χαλαζία, καλιούχους αστρίους και πλαγιόκλαστα, κεροστίλβη και βιοτίτη και σαν επουσιώδη συναντούμε γρανάτη, FeO, απατίτη, αλλανίτη, τιτανίτη και ζirkόνιο.

7.1.2 Τα διάσημα κοιτάσματα αργύρου

Παραθέτοντας από την εργασία της Nathalie Brandes με τίτλο «The Famous Silver Mines of Kongsberg, Norway», η ανακάλυψη του κοιτάσματος αργύρου στην περιοχή έγινε από τα παιδιά δύο αγροτών το μακρινό 1623. Αποτέλεσε τόσο σημαντική ανακάλυψη όπου ένα μέρος της οικονομίας ολόκληρης της Νορβηγίας στηριζόταν στα κοιτάσματα ασημιού του Kongsberg για τα επόμενα 335 χρόνια. Η περιοχή που φέρει το μέταλλευμα, έχει πλάτος περίπου 15 χιλιόμετρα και μήκος περίπου 30 χιλιόμετρα.

Το παλαιότερο υπόβαθρο που έχει βρεθεί στην περιοχή είναι ηλικίας 1,600 εκατομμύρια χρόνια. Τα γεγονότα παραμόρφωσης και μεταμόρφωσης που επηρέασαν την περιοχή, έλαβαν χώρα πριν από περίπου 1,55 και 1,15 δισεκατομμύρια χρόνια αντίστοιχα. Η ιστορία των πετρωμάτων μπορεί να συνοψιστεί σε τέσσερα στάδια. Τα παλαιότερα πετρώματα ξεκίνησαν σαν ηφαιστειακά, με τη γεωχημεία τους να είναι παρόμοια με αυτή νησιωτικών τόξων. Αυτά τα πετρώματα υπέστησαν διείσδυση από γάββρους και διορίτες και έπειτα ακολούθησε το πρώτο γεγονός παραμόρφωσης-μεταμόρφωσης. Αυτό το επεισόδιο μεταμόρφωσης είχε ως αποτέλεσμα τη δημιουργία χαλαζιακο-αστριακού γνευσίου, διοριτικού γνευσίου και αμφιβολιτών. Αργότερα συνέβη η διείσδυση του γάββρου και του δολερίτη. Οι γρανίτες Meheia και Helgevannet που αναφέρθηκαν παραπάνω, τοποθετήθηκαν πριν το 2^ο επεισόδιο της παραμόρφωσης-μεταμόρφωσης, σε αμφιβολιτικές φάσεις, πριν από 1,1 με 1,2 Ga. Τελικά, αυτά τα γεγονότα δημιούργησαν μία βάση από χαλαζιτικό-πλαγιοκλαστικό-βιοτιτικό γνεύσιο, μαρμαρυγακό-χλωριτικό σχιστόλιθο, αμφιβολίτες και γρανιτικό γνεύσιο.

Τα κοιτάσματα ασημιού του Kongsberg ανήκουν σε ένα σύστημα φλεβών και αποτελούνται από 5 στοιχεία: Co-Ni-As-Ag-Bi. Η ηλικία του υδροθερμικού συστήματος που σχημάτισε τις φλέβες χρονολογείται στο 265 ± 3 Ma. και σχετίζεται γενετικά με το Oslo Rift. Το ασήμι στα κοιτάσματα προέρχεται από τους μαύρους σχιστόλιθους της περιοχής του Όσλο, όπου φαίνεται βάση ερευνών πως περιέχουν αρκετό ασήμι για να προσφέρουν και στα κοιτάσματα του Kongsberg. Το μέταλλευμα σχηματίστηκε σε βάθος τριών με τεσσάρων χιλιομέτρων, από υγρά θερμοκρασίας 200 έως και 300°C με αλατότητα έως 35% σε ισοδύναμο NaCl. Το υπέδαφος της περιοχής περιλαμβάνει ζώνες πλούσιες σε θειούχα που ονομάζονται fahlbands. Όταν τα υδροθερμικά ρευστά συναντούν αυτές τις ζώνες, αντιδρούν χημικά και σχηματίζουν τις περίφημες αποθέσεις αργύρου. Τα ορυκτά που θα συναντήσουμε υδροθερμικές φλέβες περιλαμβάνουν: χαλαζία, σιδηροπυρίτη, ασβεστίτη, γαληνίτη, σφαλερίτη, χαλκοπυρίτη, φυσικό ασήμι κλπ.

Τα ορυχεία ιδρύθηκαν το 1623 από τον βασιλιά, έναν χρόνο αργότερα θεμελιώθηκε η πόλη του Kongsberg όπου κατοικούσαν κυρίως οι μεταλλωρύχοι. Τα ορυχεία έφτασαν να απασχολούν ακόμη και 4000 εργαζομένους. Η μέγιστη ετήσια παραγωγή επετεύχθη από το 1915-1916 όταν παρήχθησαν 13 τόνοι αργύρου. Το 1958, έπειτα από 335 χρόνια λειτουργίας, τα ορυχεία τερμάτισαν την παραγωγή τους έχοντας παράγει συνολικά 1350 τόνους αργύρου.



Εικόνα 7: Ορυχείο αργύρου στο Kongsberg. Είσοδος του King's Mine. (Πηγή: Wikipedia)

7.2 Γεωχημεία των ραδιοστοιχείων K, U, Th

7.2.1 Το K

Σύμφωνα με τις εργασίες των B.L. Dickson & K.M. Scott (1997) και του IAEA (2003), το Κάλιο είναι ένα πτητικό λιθόφιλο στοιχείο και είναι μονοσθενές υπό φυσιολογικές συνθήκες. Αποτελεί σημαντικό στοιχείο του φλοιού της Γης, με περιεκτικότητα 2,35%. Το μεγαλύτερο μέρος του εμφανίζεται στους K-άστριους και στις μαρμαρυγίες σε πετρώματα κυρίως γρανιτοειδή, σε μικρότερες ποσότητες το συναντούμε στους βασάλτες ενώ σε πολύ μικρότερες ποσότητες σε δουνίτες και περιδοτίτες. Το κάλιο ανιχνεύεται σε έρευνες ακτινών γάμμα με μέτρηση στα 1.46 MeV, από την διάσπαση του ^{40}K . Ο ρόλος του καλίου είναι σε γενικές γραμμές αρνητικός, μιας και αποκρύπτει τις ραδιενεργές υπογραφές των ισοτόπων που έχουν οικονομικό ενδιαφέρον, δηλαδή των U και του Th, παίζει δηλαδή τον ρόλο του θορύβου στη διαδικασία της ραδιομετρικής έρευνας. Στον πίνακα 7 (IAEA,2003) θα δούμε τα κοινά ορυκτά όπου το K είναι ουσιαστικό συστατικό.

Potassium Minerals	Chemical Formula	% K
Rock forming silicate minerals		
Feldspars	$(\text{K},\text{Na})\text{AlSi}_3\text{O}_8; (\text{Na}_x, \text{Ca}_{1-x})\text{Al}_2-x\text{Si}_2+x\text{O}_{8(x-0.1)}$	
Alkali-feldspar	$(\text{K},\text{Na})\text{AlSi}_3\text{O}_8$	13
Microcline	KAlSi_3O_8	13
Orthoclase	KAlSi_3O_8	13
Sanidine	KAlSi_3O_8	13
Leucite	KAlSi_2O_6	17
Nepheline	$(\text{Na},\text{K})\text{AlSiO}_4$	23
Biotite	$\text{K}(\text{Mg},\text{Fe})_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	8
Muscovite	$\text{KAl}_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	8
Phlogopite	$\text{KMg}_3\text{AlSi}_3\text{O}_{10}(\text{OH})_2$	8
Hornblende	$(\text{K},\text{Na})_{0.1}(\text{Na},\text{Ca})_2(\text{Fe},\text{Mn},\text{Mg},\text{Ti},\text{Al})_3(\text{Si},\text{Al})_8\text{O}_{22}(\text{OH},\text{F})_2$	1
Other K-minerals		
Alunite	$\text{KAl}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$	
Glauconite	$(\text{K},\text{Ca},\text{Na})_{x-1}(\text{Al},\text{Fe}^{3+},\text{Fe}^{2+},\text{Mg})_2[(\text{OH})_2/\text{Al}_{0.35}\text{Si}_{3.65}\text{O}_{10}]$	
Sylvite	KCl	

Πίνακας 7: Ορυκτά που περιέχουν κάλιο. (IAEA,2003)

7.2.2 Το U

Σύμφωνα με τις εργασίες των B.L. Dickson & K.M. Scott (1997) και του IAEA (2003), το ουράνιο είναι στοιχείο με μέση αφθονία τα 3 ppm, στον φλοιό της Γης. Εμφανίζεται με κατάσταση σθένους U^{4+} και εμφανίζει συνεκτική γεωχημεία με το Th, γι' αυτό και τα συναντούμε κυρίως σε πυριγενή πετρώματα. Στον πίνακα 8 (IAEA, 2003) παρατηρούμε τα ορυκτά με την μεγαλύτερη αφθονία σε ουράνιο. Το συναντούμε στα ορυκτά ζirkόνιο, αλλανίτη, απατίτη κλπ. Ο ουρανίτης, κατεξοχήν προϊόν του ουρανίου, εντοπίζεται κυρίως σε γρανιτικά πετρώματα αλλά και σε πηγματίτες, υδροθερμικές φλέβες καθώς και σε ιζηματογενή πετρώματα. Τέλος, λόγω της μεγάλης του κινητικότητας σαν στοιχείο, μπορεί να σχηματίσει μία μεγάλη ποικιλία από ορυκτά με σθένος U^{+6} .

Uranium Minerals	Chemical Formula	% UO_2 /ppm U
Minerals with U as major constituent		
Uraninite, (Pitchblende)	UO_2	
Betafite	$(\text{U},\text{Ca})(\text{Nb},\text{Ta},\text{Ti})_3\text{O}_9 \cdot n\text{H}_2\text{O}$	
Huttonite	ThSiO_4	100-20000 ppm
Uranospherite	$(\text{BiO})(\text{UO}_2)(\text{OH})_3$	
Thorite, Uranothorite	$\text{ThSiO}_4, (\text{Th},\text{U})\text{SiO}_4$	1-35%
Thorianite, Uranothorianite	$\text{ThO}_2 (\text{Th},\text{U})\text{O}_2$	5%
Common accessory rock forming minerals		
Zircon	ZrSiO_4	5%
Xenotime	YPO_4	5%
Monazite	$(\text{REE},\text{Th})\text{PO}_4$	100-20000 ppm
Allanite	$(\text{Ca},\text{Al},\text{Fe},\text{Mg}) \text{ silicate}$	10-2000 ppm
Apatite	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F},\text{Cl},\text{OH})$	5-200 ppm
Sphene	CaTiSiO_5	10-500 ppm

Πίνακας 8: Ορυκτά που περιέχουν ουράνιο. (IAEA,2003)

7.2.3 To Th

Σύμφωνα με τις εργασίες των B.L. Dickson & K.M. Scott (1997) και του IAEA (2003), το θόριο είναι ένα ακτινιδικό στοιχείο με κατάσταση σθένους Th^{4+} . Η διαλυτότητα των συμπλεγμάτων του Th είναι γενικά χαμηλή εκτός από τα όξινα διαλύματα. Το συναντούμε στα ορυκτά ζirkόνιο, αλλανίτη, απατίτη κλπ. Η αφθονία του στοιχείου στον φλοιό της Γης είναι χαμηλή, με εύρος από ppm έως ppm, με μέση τιμή περίπου τα 12ppm. Στον πίνακα 9 (IAEA,2003), βλέπουμε τόσο ορυκτά όσο και μέταλλα που περιέχουν θόριο ως κύριο συστατικό. Οι παρατηρήσεις του θορίου βάση των ραδιομετρικών ερευνών γίνεται βάση μέτρησης στα 2.62 MeV και η καταγραφή αναφέρεται στα θυγατρικά του.

Αξίζει επίσης να αναφερθεί πως ίχνη ουρανίου και θορίου συναντώνται και σε οξείδια σπάνιων γαιών (rare Earth Oxides, REO) καθώς και σε Trash can Minerals όπως αλλανίτης, ευξενίτης, πυρόχλωρο, σαμαρσκήτη κ.α.

Thorium Minerals	Chemical Formula	% ThO_2
Minerals with Th as major constituent		
Huttonite	ThSiO_4	80
Thorite, Uranothorite	$\text{ThSiO}_4, (\text{Th,U})\text{SiO}_4$	50, < 50
Cheralite	$(\text{Th,Ce,Ca})(\text{SiO}_4\text{PO}_4)$	30
Thorianite, Uranothorianite	$\text{ThO}_2, (\text{Th,U})\text{O}_2$	80, < 80
Common accessory minerals		
Monazite	$(\text{REE,Th})\text{PO}_4$	10
Xenotime	YPO_4	0.4-1
Zircon	ZrSiO_4	0.01-1
Allanite	(Ca,Al,Fe,Mg) silicate	0.1-1
Apatite	$\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_3(\text{F,Cl,OH})$	0.001-0.1
Sphene	CaTiSiO_5	0.001-0.1
Epidote	$\text{CaFe}^{3+}\text{Al}_2\text{O.OH}(\text{Si}_2\text{O}_7)(\text{Si}_2\text{O}_4)$	0.005-0.05

Πίνακας 9: Ορυκτά που περιέχουν θόριο. (IAEA,2003)

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 8: ΣΧΟΛΙΑΣΜΟΣ ΤΩΝ ΡΑΔΙΟΜΕΤΡΙΚΩΝ ΧΑΡΤΩΝ

Οι μετρήσεις των ραδιομετρικών δεδομένων για την περιοχή Kongsberg-II ξεκίνησαν το φθινόπωρο του 2008 και έλαβαν τέλος το καλοκαίρι του 2009. Η τοποθεσία μελέτης αποτελείται από τις περιοχές Vikersund, Hokksund και Kongsberg. Τα δεδομένα των τριών στοιχείων που μελετάμε, προέρχονται από τα ανώτερα 30 με 40 εκατοστά του εδάφους (καθώς οι ακτίνες γάμμα εξασθενούν λόγω της βλάστησης και της ύπαρξης νερού ή ακόμη και της υγρασίας, μέχρι να φθάσουν στον ανιχνευτή), επεξεργάζονται από τους παράγοντες που αναφέραμε και παρουσιάζονται σε χάρτες που έχουν γεωαναφερθεί κατάλληλα. Επειδή σαν μέθοδος θεωρείτο κατάλληλη για χαρτογράφηση, η ερμηνεία των δεδομένων απαιτεί κατανόηση των επιφανειακών διαδικασιών, όπως είναι οι καιρικές συνθήκες και η σχέση που υπάρχει μεταξύ των επιφανειακών υλικών και της γεωλογίας του εδάφους.

Στο κεφάλαιο 6 έγινε η παρουσίαση των δεδομένων σε γεωλογικούς χάρτες ώστε να έχουμε μία πλήρη εικόνα των καταγραφών και του υποβάθρου. Τα σχήματα δημιουργήθηκαν μέσω του προγράμματος Surfer 19 ενώ η παρουσίαση των δεδομένων από το NGU έγινε μέσω του προγράμματος Geosoft Oasis Montaj. Ο γεωλογικός χάρτης που χρησιμοποιήθηκε στα σχήματα 3 έως 17 έχει κλίμακα 1: 550.000 και η γεωαναφορά του, μαζί με τις γεωφυσικές καταγραφές έγινε στο προβολικό σύστημα WGS 84 UTM ZONE 33N.

Βάση λοιπόν των ραδιομετρικών χαρτών της περιοχής, εξάγουμε σημαντικά συμπεράσματα για τον τόπο μελέτης. Ξεκινώντας θα αναφέρουμε το εύρος του κάθε στοιχείου. Ο χάρτης TC έχει εύρος τιμών από 0 έως 3400cps, το U από 0 έως 4ppm, το K από 0 έως 2.5% και το Th από 0-15ppm. Μέσω του χάρτη της συνολικής ακτινοβολίας (TC) παρατηρούμε έντονη συσχέτιση με τα λιθολογικά όρια των γεωλογικών σχηματισμών.

Βάση των εργασιών των Mohamed A. S. Youssef and Shadia T. Elkhodary (2013), V. C. Baranwal and J. S. Rønning (2020) και Reda A. Y. El Qassas et. al. (2020) και ανατρέχοντας στον χάρτη του ισοδύναμου ουρανίου (σχήμα 5), βλέπουμε μια περιοχή σχεδόν στο κέντρο, όπου υπάρχουν ιδιαίτερα υψηλές τιμές ουρανίου συγκριτικά με το υπόλοιπο τμήμα του χάρτη. Οι τιμές είναι σημαντικά μεγάλες, όπου βάση έρευνας (M.A. Smethurst et. al., 2016) ανιχνεύθηκε υψηλό ουράνιο καθώς και ραδόνιο, ικανό να προκαλέσει σοβαρά προβλήματα υγείας στους ανθρώπους της περιοχής. Πρόκειται για μία περιοχή με αργιλικό σχιστόλιθο και εκεί οφείλονται και οι υψηλές τιμές τους. Εάν πάλι συσχετίσουμε αυτές τις παρατηρήσεις μας με την τεκτονική (Σχήμα 2), θα δούμε πως πρόκειται για το σημείο που το Kaledonsk orogen βρίσκεται ανάμεσα από το Svekonorwegisk orogen και το Oslo-Rift bergarter. Σε γενικές γραμμές πάντως, οι υψηλές τιμές ουρανίου σε ραδιομετρικούς χάρτες συνδιάζονται με την ύπαρξη νέων γρανιτών ή μεταμορφωμένων πετρωμάτων. Αντίθετα, εκεί που το ουράνιο είναι χαμηλό, η ερμηνεία αλλάζει. Συγκεκριμένα, το χαμηλό ουράνιο πιθανόν να οφείλεται σε παλιούς γρανίτες και το πολύ χαμηλό ουράνιο σε μεταϊζηματογενή, μεταφαιστειακά ή σε μεταγαββρικά.

Βάση λοιπόν της παρατήρησης μας για υψηλό ουράνιο και την ύπαρξη αργιλικού σχιστολίθου, θα πάρουμε και τους λόγους των στοιχείων όπου ο καθένας μας είναι χρήσιμος για διαφορετικό σκοπό. Ο λόγος U/Th μας «φανερώνει» τις περιοχές πλούσιες σε U, συγκριτικά με το σταθερό θόριο. Οι υψηλές τιμές του λόγου (>2) ερμηνεύονται ως νέοι γρανίτες. Οι χαμηλές τιμές του λόγου U/K ερμηνεύονται ως περιοχές πάνω από μεταφαιστειακά, μεταϊζηματογενή ή μεταγαββρικά ενώ οι υψηλές τιμές οφείλονται σε ιζήματα. Κάτι που πραγματικά καταλαβαίνουμε, κοιτώντας τον γεωλογικό χάρτη και τις μετρήσεις μας. Οι πολύ υψηλές τιμές πάλι (>4), βλέπουμε πως έχουν συνδιαστεί με ιζήματα καθώς και με τις υδάτινες περιοχές με εξαίρεση τον αργιλικό σχιστόλιθο που δικαιολογεί όπως είπαμε τις υψηλές τιμές ουρανίου. Ενώ οι χαμηλές τιμές του, συνδέονται με μεταϊζηματογενή, μεταφαιστειακά, σερπεντινίτες, γαββρικά. Η ερμηνεία του τρίτου λόγου που υπολογίσαμε (σχήμα 8) βάση των Th/K, ερμηνεύεται αντίστοιχα με τον λόγο U/K, με τις μεγάλες τιμές του λόγου να οφείλονται σε ιζήματα ή σε νέους ηλικιακά γρανίτες.

Βάση των εργασιών που αναφέραμε στην τέταρτη παράγραφο της ενότητας καθώς και του IAEA (2003), υπολογίστηκαν και δημιουργήθηκαν χάρτες σχετικής αφθονίας των στοιχείων. Η χρήση τους έγινε για να εντοπίσουμε γεωλογικά χαρακτηριστικά που δεν είναι εμφανή με τους χάρτες των μεμονωμένων στοιχείων. Καταφέρνουμε βάση του εκάστοτε τύπου να μειώσουμε τον παράγοντα της βλάστησης καθώς και της υγρασίας του εδάφους στα δεδομένα μας. Τα 3 σχήματα 12,13,14 είναι τα αντίστοιχα για τα ουράνιο, κάλιο, θόριο. Παρατηρούμε πως η κλίμακα των U και Th είναι από το 0 έως το 1 ενώ για το K είναι μέχρι το 0,5. Για να είμαστε ακριβείς τα 3 σχήματα δεν μας παρέχουν εξαιρετικές λεπτομέρειες αλλά τείνουν να ενισχύουν τα σημεία όπου το εκάστοτε στοιχείο είναι σε σημαντική συγκέντρωση.

Πριν την ερμηνεία των ternary maps, δημιουργήθηκε επίσης ένας χάρτης ραδιογενούς παραγωγής θερμότητας ο οποίος βασίστηκε στον εξής μαθηματικό τύπο $A = 0.337(0.74eU + 0.199eTh + 0.26K)$ όπου λαμβάνονται υπόψιν όλα τα ραδιομετρικά στοιχεία. Οι μονάδες του A είναι $\mu W/m^3$ και το εύρος των τιμών του χάρτη είναι από 0 έως 2. Τα ραδιενεργά στοιχεία εκπέμπουν μία μορφή θερμότητας και ο χάρτης είναι ενδεικτικός της περιεκτικότητας σε αυτά. Η ερμηνεία του χάρτη παραγωγής θερμότητας μπορεί να μας οδηγήσει ακόμη και στο αν μέσω των πετρωμάτων που υπάρχουν, υπάρχει η δυνατότητα να παραχθεί ποσότητα πετρελαίου.

Τέλος, για την γεωλογική και ορυκτολογική εξερεύνηση δημιουργήθηκαν τρεις χάρτες μορφής ternary, δηλαδή χάρτες που να συσχετίζονται 3 στοιχεία κάθε φορά. Ο πρώτος είναι βάση των στοιχείων K,U,Th με τους χρωματισμούς κόκκινο, μπλε, πράσινο αντίστοιχα (Σχήμα 15). Η συσχέτιση του χάρτη με την λιθολογία είναι εξαιρετική ενώ οι μαύρες περιοχές ερμηνεύονται ως περιοχές χαμηλής συγκέντρωσης σε όλα τα στοιχεία και παρατηρούμε πως συνδέονται με τις περιοχές που υπάρχει νερό. Βάση της γεωλογίας, οι πολύ λευκές περιοχές ερμηνεύονται ως περιοχές που υπάρχουν γρανιτικά πετρώματα, ενώ τα σκούρα σημεία στα αριστερά των γεωφυσικών δεδομένων είναι γνευσιακά πετρώματα όπου έχουν μαφικές διεισδύσεις καθώς και γρανιτικές διεισδύσεις, σε ορισμένα σημεία. Τα ιζηματογενή που υπάρχουν είναι χρωματισμένα με πολύ πιο αχνό λευκό που τείνει προς το κόκκινο. Πρόκειται συγκεκριμένα για τα πετρώματα του ορογενούς Kaledonsk όπου τεκτονικά έχουν βρεθεί ανάμεσα από τις άλλες δύο ζώνες (Σχήμα 2).

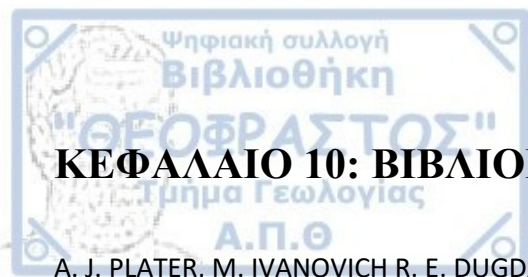
Συνοψίζοντας η χρωματική κλίμακα ερμηνεύεται ως εξής:

- Κόκκινο: Υψηλή παρουσία K, χαμηλή U και Th
- Μπλε: Υψηλή παρουσία U, χαμηλή K και Th
- Πράσινο: Υψηλή παρουσία Th, χαμηλή U και K
- Κυανό: Υψηλή παρουσία Th και U, χαμηλή K
- Ιώδες : Υψηλή παρουσία K και U, χαμηλή Th
- Κίτρινο: Υψηλή παρουσία Th και K, χαμηλή U
- Μαύρο : Χαμηλή παρουσία K, U, Th
- Λευκό: Υψηλή παρουσία K, U, Th

Τα υπόλοιπα 2 ternary maps, των λόγων και των συγκεντρώσεων των σχετικών αφθονιών μας είναι εξίσου σημαντικά καθώς η συσχέτιση τους με την λιθολογία-γεωλογία είναι εξαιρετική και η διάκριση των περιοχών που υπάρχει πλήθος του εκάστοτε ραδιοστοιχείου είναι εμφανής. Στο ternary map των λόγων, εύκολα διακρίνουμε το μπλε χρώμα στο αριστερό μέρος του χάρτη όπου ανήκει στον παράγοντα του λόγου U/Th ενώ στον υπόλοιπο επικρατεί το πορτοκαλί που ερμηνεύεται ότι ανήκει ανάμεσα στους λόγους RUT και RUK. Στο σχήμα 17, στο τελευταίο ternary παρατηρούμε περιοχές υψηλού ουρανίου, όπως τις γνωρίζουμε ήδη από το σχήμα 5, οι πράσινες αποχρώσεις ανήκουν στο θόριο ενώ οι κόκκινες στο K. Το συγκεκριμένο ternary είναι χρήσιμο κατά την ανάγνωση του, καθώς είναι ευδιάκριτες οι περιοχές όπου κυριαρχεί το κάθε στοιχείο συγκριτικά με τα υπόλοιπα δύο. (Tellus Interpretation Guide to Airborne Geophysics, 2020)

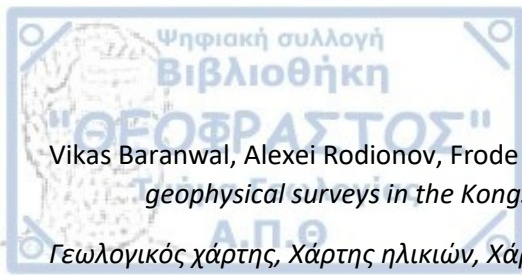
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 9: ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Κλείνοντας την προπτυχιακή μου διπλωματική εργασία θα ήθελα να ευχαριστήσω τον κύριο Αλέξανδρο Σταμπολίδη όπου συνεργαστήκαμε και με βοήθησε να την φέρω εις πέρας. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω τους φίλους-συναδέλφους για τις πολύτιμες συμβουλές τους, χωρίς να αναφέρω τα ονόματά τους. Τέλος, η δημιουργία όλων των ραδιομετρικών χαρτών έγινε βάση των γεωφυσικών δεδομένων του NGU (Geological Survey of Norway).



ΚΕΦΑΛΑΙΟ 10: ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- A. J. PLATER, M. IVANOVICH R. E. DUGDALE ,. «Uranium series disequilibrium in river sediments and waters: the significance of anomalous activity ratios.» Great Britain, 1991-92, 101-110.
- Abiodun Adebowale Ka Yode. «PETROGRAPHY AND GEOCHEMISTRY OF GRANITES IN THE KONGSBERG AREA, SOUTH NORWAY.» SOUTH NORWAY, 1974.
- Alexandros Stampolidis & Frode Ofstad. *Helicopter-borne magnetic and radiometric geophysical survey at Gratangen and Sørreisa*,. Troms: NGU, 2015, 29.
- B.L. Dickson & K.M. Scott. «Interpretation of aerial gamma-ray surveys-adding the geochemical factors .» *Joomal of Ausualian Geology & Grophysics*, 1997.
- B.R.S. Minty, A.P.I. Luyendyk & R.c. Brodie. *Calibration and data processing for airborne gamma-ray spectrometry* . Journal of Australian Geology & Geophysics, 1997.
- Fei Li, Ziyun Cheng, Chengshuai Tian, Hongfei Xiao, Miao Zhang & Liangquan,. «Progress in recent airborne gamma ray spectrometry measurement technology.» *Taylor & Francis*, 25 05 2020: 34.
- Geological Survey Ireland Report 2020. *Tellus Interpretaon Guide to Airborne Geophysics Data*. Geological Survey Ireland is a division of the Department of the Environment, Climate and Communicaons, 2020.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Airborne*. TECHNICAL REPORTS SERIES No. 323, VIENNA: IAEA, 1991.
- INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. *Guidelines for Radioelement Mapping Using Gamma Ray Spectrometry Data*. Vienna: IAEA, 2003.
- Kogan, Robert M., Igor M. Nazarov and Sh. D. Fridman. ,. «Gamma spectrometry of natural environments and formations : theory of the method applications to geology and geophysics.» 1971.
- M.A. Smethurst, R.J. Watson,V.C. Baranwal,A.L. Rudjord ,I. Finne,. «The predictive power of airborne gamma ray survey data on the locations of domestic radon hazards in Norway: A strong case for utilizing airborne data in large-scale radon potential mapping.» *Journal of Environmental Radioactivity*, 04 April 2016: 1-20.
- Mohamed A. S. Youssef and Shadia T. Elkhodary. «Utilization of airborne gamma ray spectrometric data for geological mapping, radioactive mineral exploration and environmental monitoring of southeastern Aswan city, South Eastern Desert, Egypt.» *Geophysical Journal International*, 12 October 2013: 1689–1700.
- Nathalie Brande. *The Famous Silver Mines of Kongsberg, Norway*. 02 11 2019.
- P. B. Grasty, R. L. and Blanchard, Y. B. and Holman,. *Transportable calibration pads for ground and airborne gamma-ray spectrometers*. Ottawa: Energy, Mines, and Resources Canada, 1991.
- Reda A. Y. El Qassasa, M Salaheldin,S.M. Assran Assran,Th. Abdel Fattah, M.A. Rashed,. «Airborne gamma-ray spectrometric data interpretation on Wadi Queih and Wadi Safaga area, Central Eastern Desert, Egypt.» *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*, 13 March 2020: 155-167.
- V. C. Baranwal and J. S. Rønning. «Airborne Geophysical Surveys and Their Integrated Interpretation.» Στο *Springer Nature Switzerland AG 2020*. Trondheim: Springer Geophysics, 2020.



Vikas Baranwal, Alexei Rodionov, Frode Ofstad. *Helicopter-borne magnetic, electromagnetic and radiometric geophysical surveys in the Kongsberg region*. Buskerud, Telemark and Vestfold: NGU, 2013, 53.

Γεωλογικός χάρτης, Χάρτης ηλικιών, Χάρτης τεκτονικής τοποθέτησης, . Kongsberg, Norway, χ.χ.

OPFANO Exploranium GR-820/3. χ.χ. <http://projects.gtk.fi/export/sites/projects/aerogeo/equipment/mca.pdf>.

OPFANO GG24 Surveyor GPS+GLONASS. χ.χ.

<http://projects.gtk.fi/export/sites/projects/aerogeo/equipment/gg24.pdf>.

OPFANO RS-500. χ.χ. http://www.radiationsolutions.ca/wp-content/uploads/2020/08/RS-500_Brochure_Feb2020.pdf.

Τσελέντης, Άκης. *Εφαρμοσμένη Γεωφυσική*. Liberal Books, χ.χ.

(Τσελέντης 2013, 624)

(Βασίλης 1996, 328)

(https://en.wikipedia.org/wiki/Kongsberg#/media/File:NO_3006_Kongsberg.svg n.d.)

