



## Ενεργά ρήγματα και εκτίμηση γεωκινδύνων κατά μήκος της διαδρομής του TAP

Αλέξανδρος Χατζηπέτρος, Γεώργιος Γεωργιάδης, Σπύρος Παυλίδης  
Τμήμα Γεωλογίας Α.Π.Θ., [ac@geo.auth.gr](mailto:ac@geo.auth.gr)





Αλβανία, 2019

## Ενεργά ρήγματα και επιπτώσεις σε τεχνικά έργα

- Όταν ένα ενεργό ρήγμα δραστηριοποιηθεί, μπορεί να προκαλέσει ένα **σεισμό**.
  - Το μέγεθος του σεισμού εξαρτάται από τις ιδιότητες του ρήγματος (μήκος, κινηματικός χαρακτήρας, σχέση με το ενεργό πεδίο των τάσεων, κλπ).
- Η δραστηριοποίηση του ρήγματος μπορεί να έχει αποτελέσματα:
  - **Άμεσα**. Επιπτώσεις επί του ίχνους του ρήγματος.
    - Επιφανειακές διαρρήξεις, αλλαγή της μορφολογίας.
  - **Έμμεσα**. Επιπτώσεις μακριά από το ρήγμα.
    - Δημιουργία σεισμών.
    - Εδαφικές αστοχίες (κατολισθήσεις, βραχοπτώσεις, κλπ).
    - Ρευστοποιήσεις.
    - κλπ



Πηνειάδα Θεσσαλίας, 2019



# Ζητούμενα σε μία μελέτη γεωλογικής επικινδυνότητας

1

- **Θέση** του ρήγματος.

- Πού ακριβώς είναι το **ίχνος του ρήγματος**;
- Πρόκειται για ένα **μεμονωμένο ρήγμα**, ή μία **σύνθετη ρηξιγενή ζώνη**;

Γεωλογική χαρτογράφηση

2

- **Ποσοτικά** και **γεωμετρικά χαρακτηριστικά** του ρήγματος.

- Ποια είναι τα **τμήματα (segments)** του ρήγματος;
- Ποιο είναι το **μήκος** του; Η **παράταξη** του; Η **γωνία** και η **διεύθυνση κλίσης** του; Η **διεύθυνση ολίσθησης (rake)**;

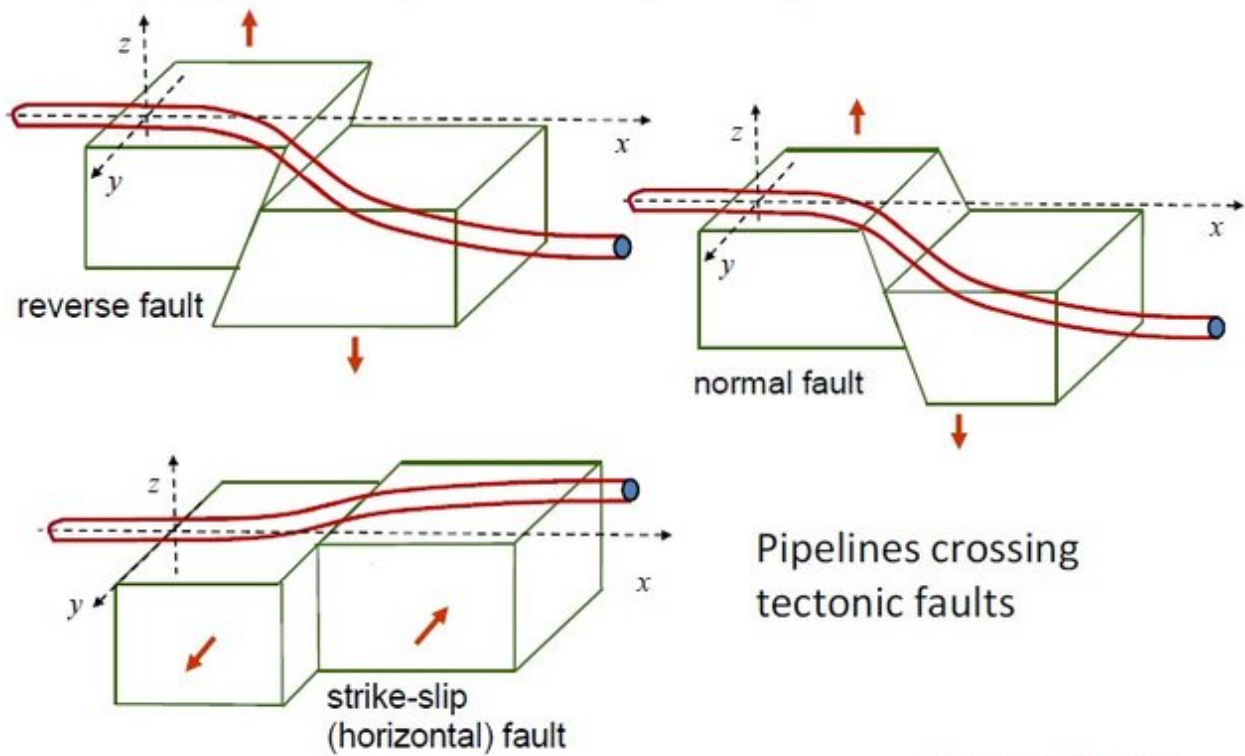
Νεοτεκτονική ανάλυση

3

- Εκτίμηση **επικινδυνότητας**.

- Πόσο είναι το **αναμενόμενο μέγεθος** σεισμού σε περίπτωση δραστηριοποίησης;
- Πόση είναι η αναμενόμενη **επιφανειακή μετατόπιση**;
- Ποια είναι η **διεύθυνση** της αναμενόμενης παραμόρφωσης;
- Ποια είναι η **περίοδος επανάληψης** ισχυρών σεισμών;
- Ποιος είναι ο **ρυθμός ολίσθησης**;

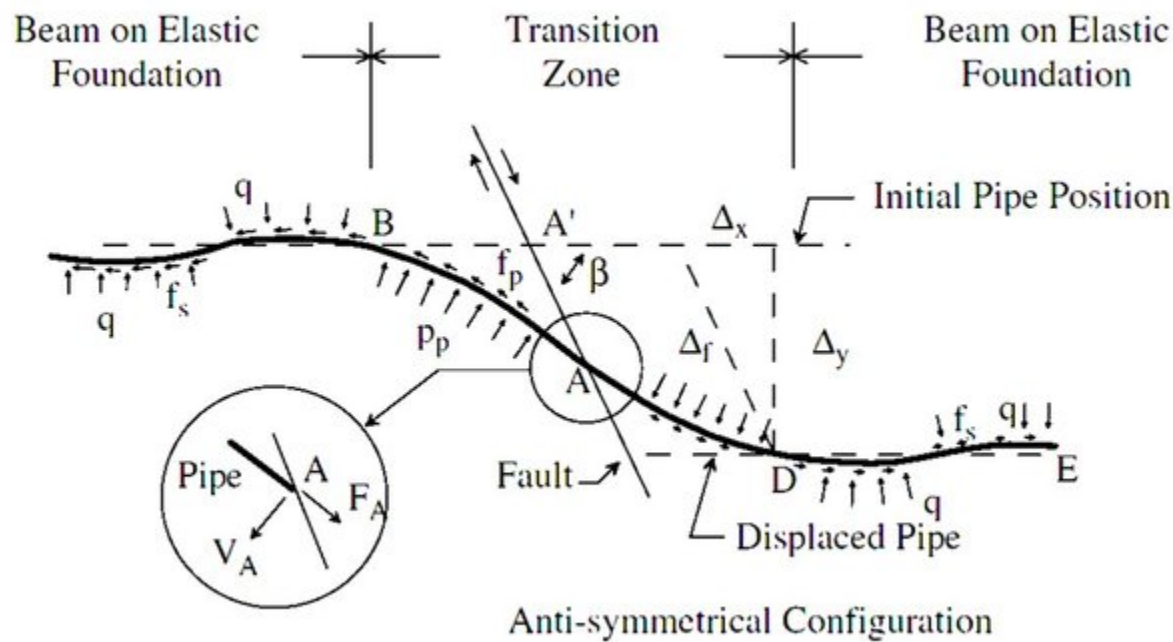
Παλαιοσεισμολογία  
Ντετερμινιστική ανάλυση



Τυπικές παραμορφώσεις αγωγών στα τρία είδη ρηγμάτων (ανάστροφα, κανονικά, οριζόντιας μετατόπισης)

Uçkan et al., 2016

Στις θέσεις των ρηγμάτων (fault crossings) ο αγωγός θα πρέπει να σχεδιαστεί με τέτοιο τρόπο, ώστε να παραλαμβάνει χωρίς αστοχία όλες τις πιθανές παραμορφώσεις.





## Εκτίμηση μεγέθους σεισμού

$M_w = a + b \cdot \log(RA)$ <i>Wells &amp; Coppersmith (1994)</i>	RA = Rupture area (μήκος x πλάτος ρήγματος) a = 3.93 και b = 1.02 για <b>κανονικά</b> ρήγματα a = 4.33 και b = 0.90 για <b>ανάστροφα</b> ρήγματα a = 3.98 και b = 1.02 για ρήγματα <b>οριζόντιας μετατόπισης</b>
$M = 5.08 + 1.16 \cdot \log(L)$	Γενική σχέση μεταξύ του <b>μήκους του ρήγματος</b> και του <b>αναμενόμενου μεγέθους</b> ( <i>Wells &amp; Coppersmith, 1994</i> )
$M = 6.94 + 1.14 \cdot \log(d_{ave})$	Σχέση μεταξύ <b>μεγέθους</b> και <b>μέσης μετατόπισης</b> ( <i>Wells &amp; Coppersmith, 1994</i> )

Έχουν αναπτυχθεί και άλλες εξισώσεις που συνδέουν το μέγεθος της σεισμικής πηγής (ρήγμα) με το μέγεθος του σεισμού και την αναμενόμενη επιφανειακή μετατόπιση, ωστόσο οι εξισώσεις των Wells & Coppersmith (1994) έχουν πλέον καθιερωθεί ως οι πρότυπες συναρτήσεις στις μελέτες τεχνικών έργων.

# Σχέση μεταξύ μήκους ρήγματος και μεγέθους σεισμού

- Wells and Coppersmith (1994)
  - $M=5,08+1,16\log(L)$  (όλα τα ρήγματα).
  - $M=5,16+1,12\log(L)$  (οριζόντιας μετατόπισης).
  - $M=5,00+1,22\log(L)$  (ανάστροφα).
  - $M=4,86+1,32\log(L)$  (κανονικά).
- Pavlides and Caputo (2004)
  - $M_s=0,9\log(SRL)+5,48$
  - $M_s=0,59\log(MVD)+6,75$

*SRL=Surface Rupture Length*

*MVD=Mean Vertical Displacement*

Για μεγάλα τεχνικά έργα, τα τελευταία χρόνια συνηθίζεται στον σχεδιασμό να λαμβάνεται υπόψη τα  $\frac{2}{3}$  της μέγιστης μετατόπισης που υπολογίζεται από τις σχέσεις των Wells & Coppersmith (1994).

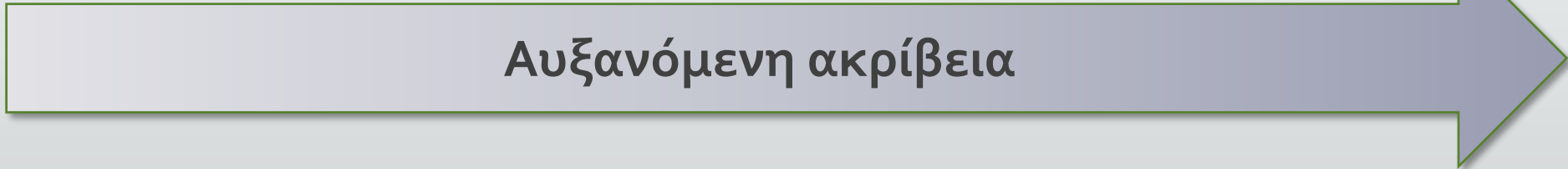




# Εκτίμηση ρυθμού ολίσθησης

	Συνολική ολίσθηση (A)	Μορφοτεκτονικές ενδείξεις		Στρωματογραφικές αποδείξεις, διακριτές μετατοπίσεις (D)
		Υψομετρικά μέγιστα (B)	Τεταρτογενή ρηξιγενή πρανή (C)	
Χρόνος από τη δημιουργία του ρήγματος (1)	A1. (π.χ. 2.000 m μετατόπιση σε 20 Myr = 0,1 mm/yr)			
Ηλικία παραμορφωμένων μορφοδομών (2)		B2	C2 (ύψος πρανούς D διά την ηλικία της μορφοδομής T)	
Ηλικία παλαιοσεισμών (3)				D3 (παλαιοσεισμολογικές τομές, χρονολόγηση γεγονότων)

McCalpin, 2009



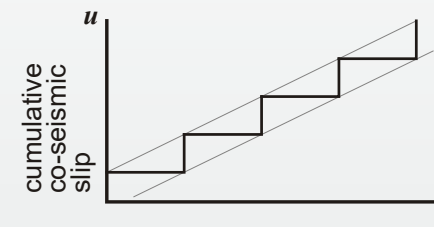
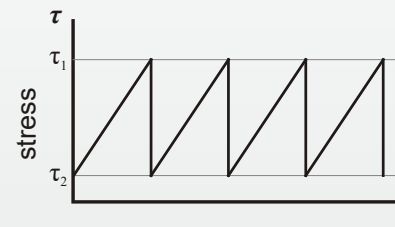
# Εκτίμηση περιόδου επανάληψης

- Εάν υπάρχουν **παλαιοσεισμολογικά δεδομένα**, τότε η περίοδος επανάληψης μπορεί να υπολογιστεί με σχετική ακρίβεια για το πρόσφατο παρελθόν (π.χ. Ολόκαινο).
- Εάν δεν υπάρχουν επαρκή δεδομένα, τότε η περίοδος επανάληψης (RI) μπορεί να υπολογιστεί με την απλή διαίρεση της συνολικής μετατόπισης μίας δομής στο ρήγμα ( $D_{tot}$ ) με το χρόνο δημιουργίας αυτής της δομής (T):

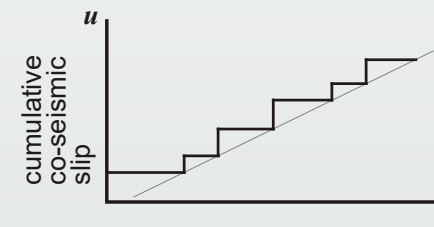
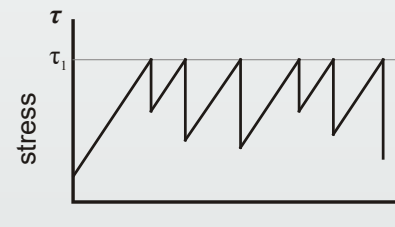
$$RI = \frac{D_{tot}}{T}$$

- Προφανώς, ο δεύτερος τρόπος εμπεριέχει μεγάλο βαθμό αβεβαιότητας, λόγω των σχετικών σφαλμάτων στον υπολογισμό του  $D_{tot}$  και ιδιαίτερα του T.

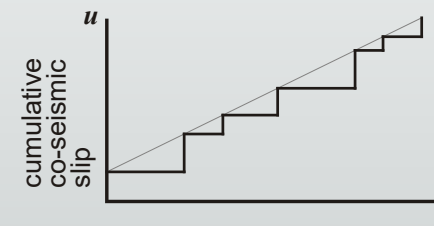
a) strictly periodic model



b) time-predictable model



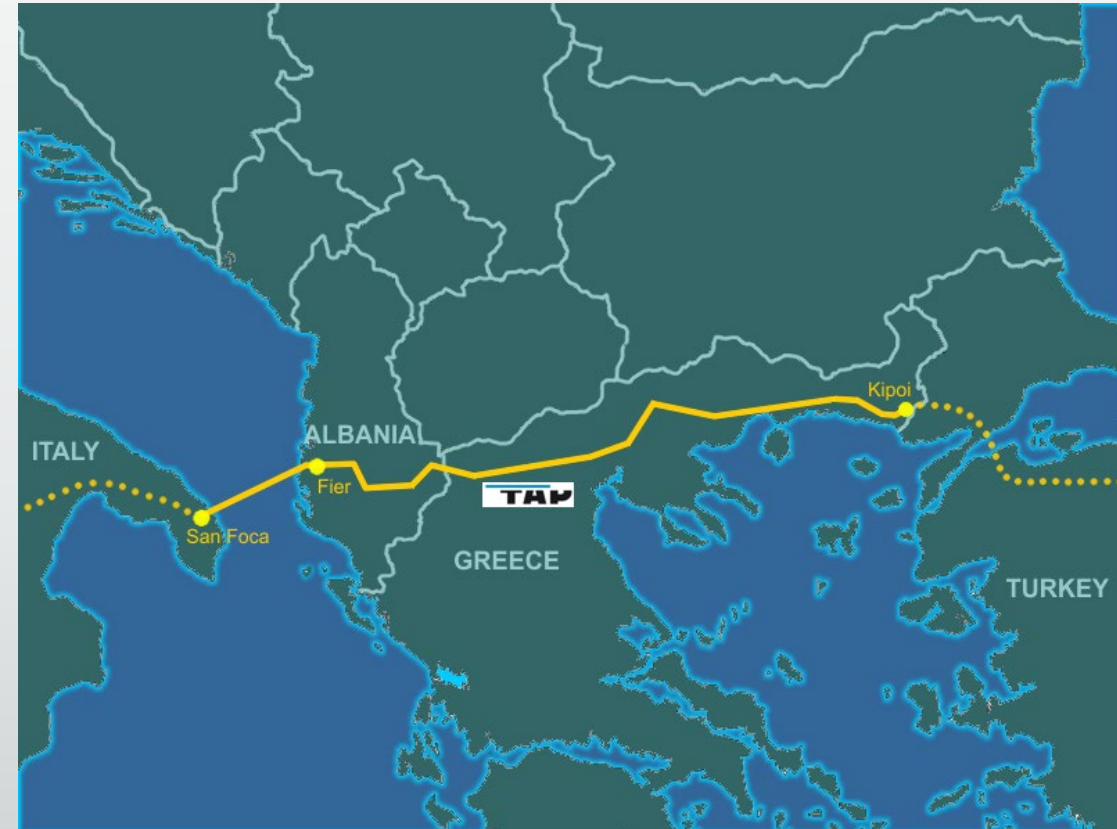
c) slip-predictable model



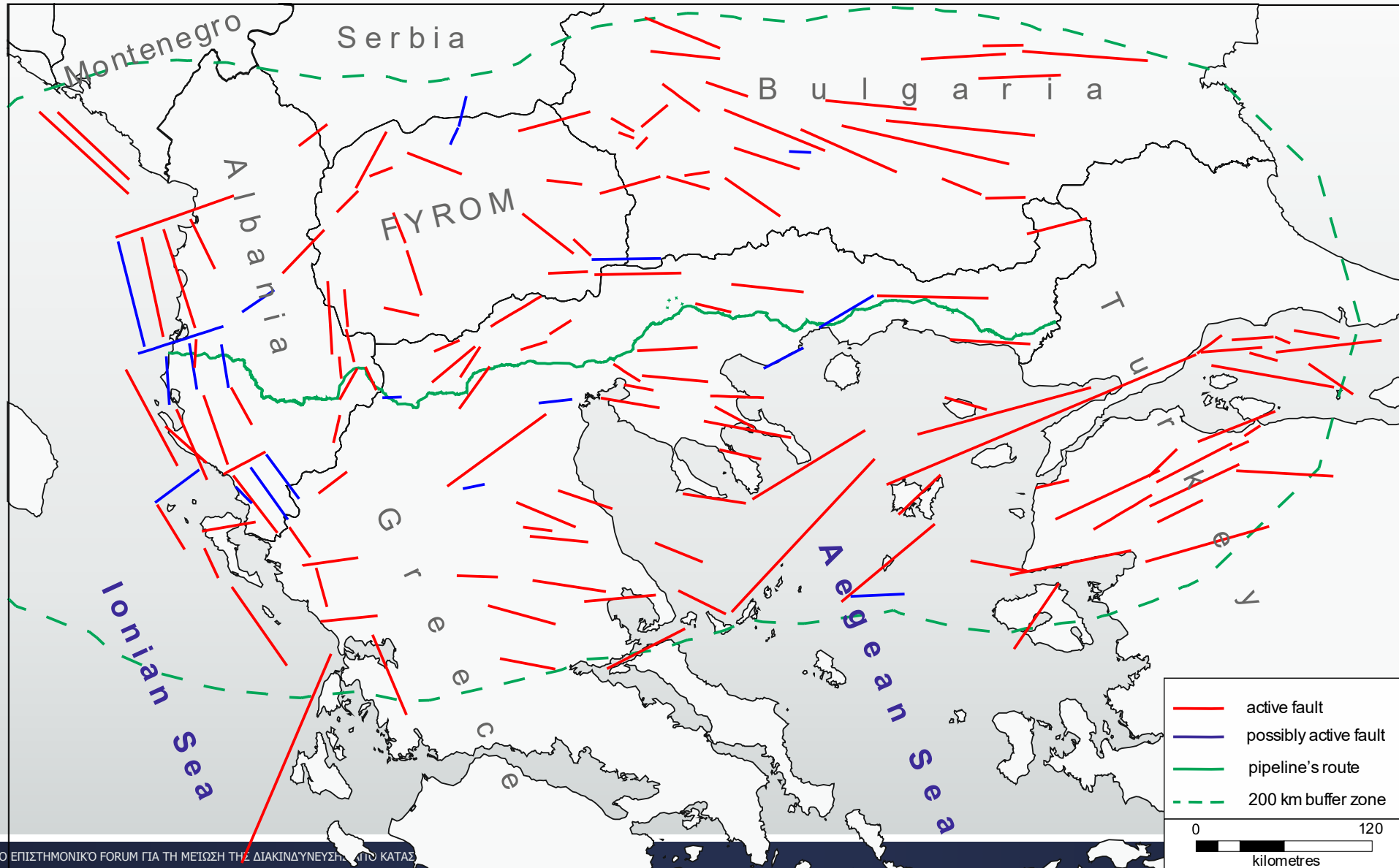


## Το παράδειγμα του TAP

- Αρχική εκτίμηση επικινδυνότητας ρηγμάτων σε απόσταση έως και 200 km από τον αγωγό.
- Εκτίμηση επικινδυνότητας ρηγμάτων που τέμνουν τον αγωγό.
- Προσδιορισμός προβληματικών περιοχών.
- Γεωλογική χαρτογράφηση μεγάλης κλίμακας.
- Προσδιορισμός της ακριβούς θέσης του ρήγματος.
- Μορφοτεκτονική ανάλυση.
- Ντετερμινιστική εκτίμηση επικινδυνότητας.
- Πρόταση επιπρόσθετων μελετών.



# Σεισμογενετικές πηγές σε απόσταση ±200 km από τον αγωγό



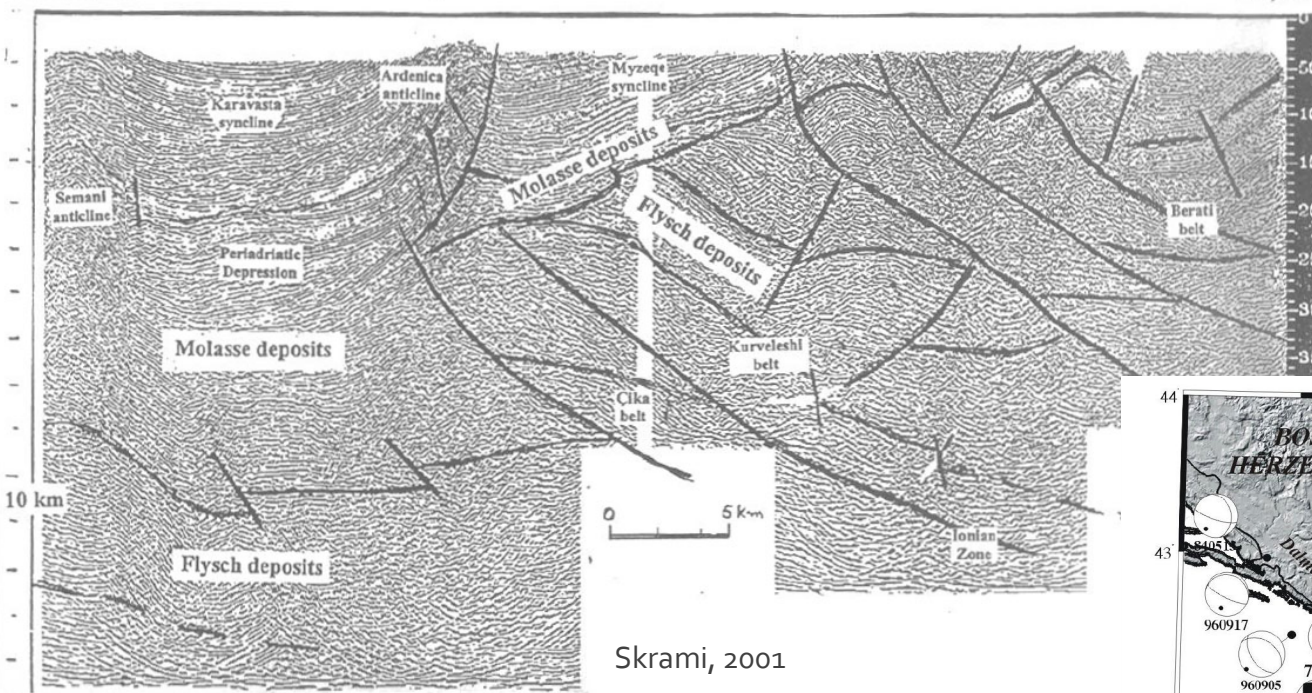


W

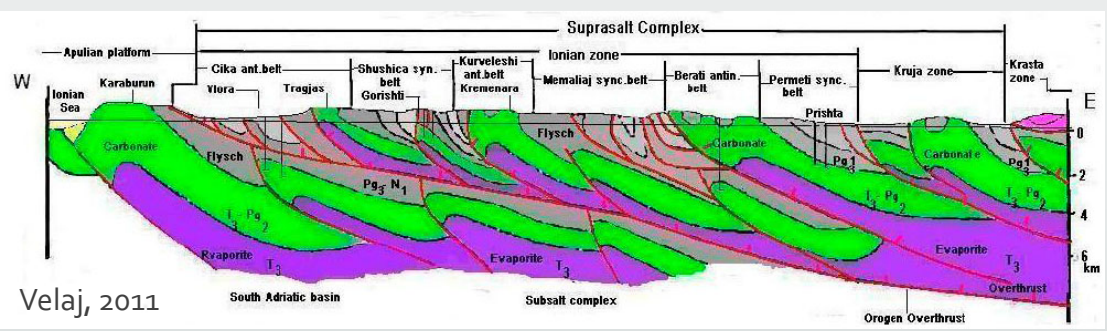
E

Adriatic Sea

Kuçova

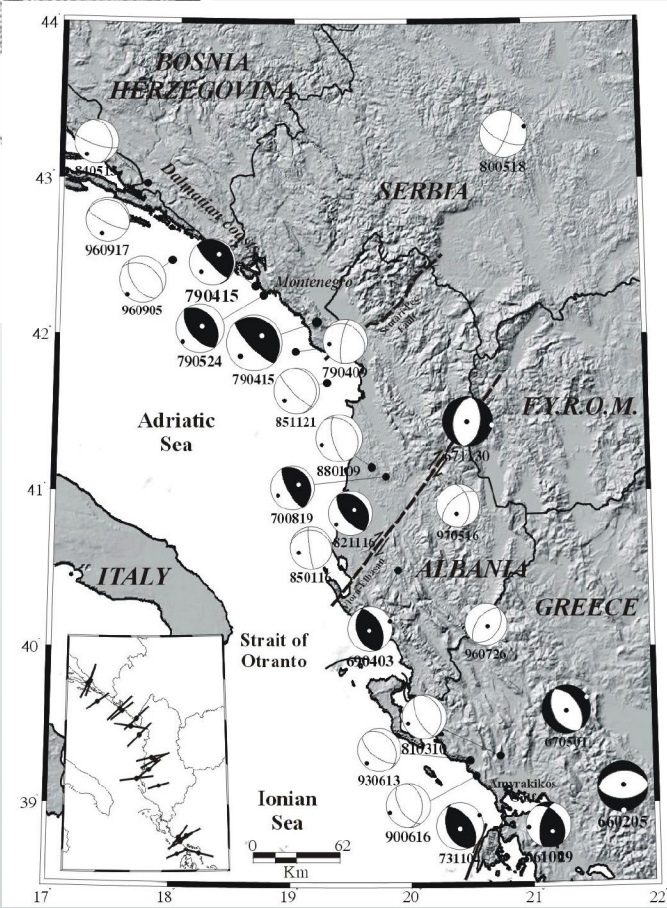


Skrami, 2001

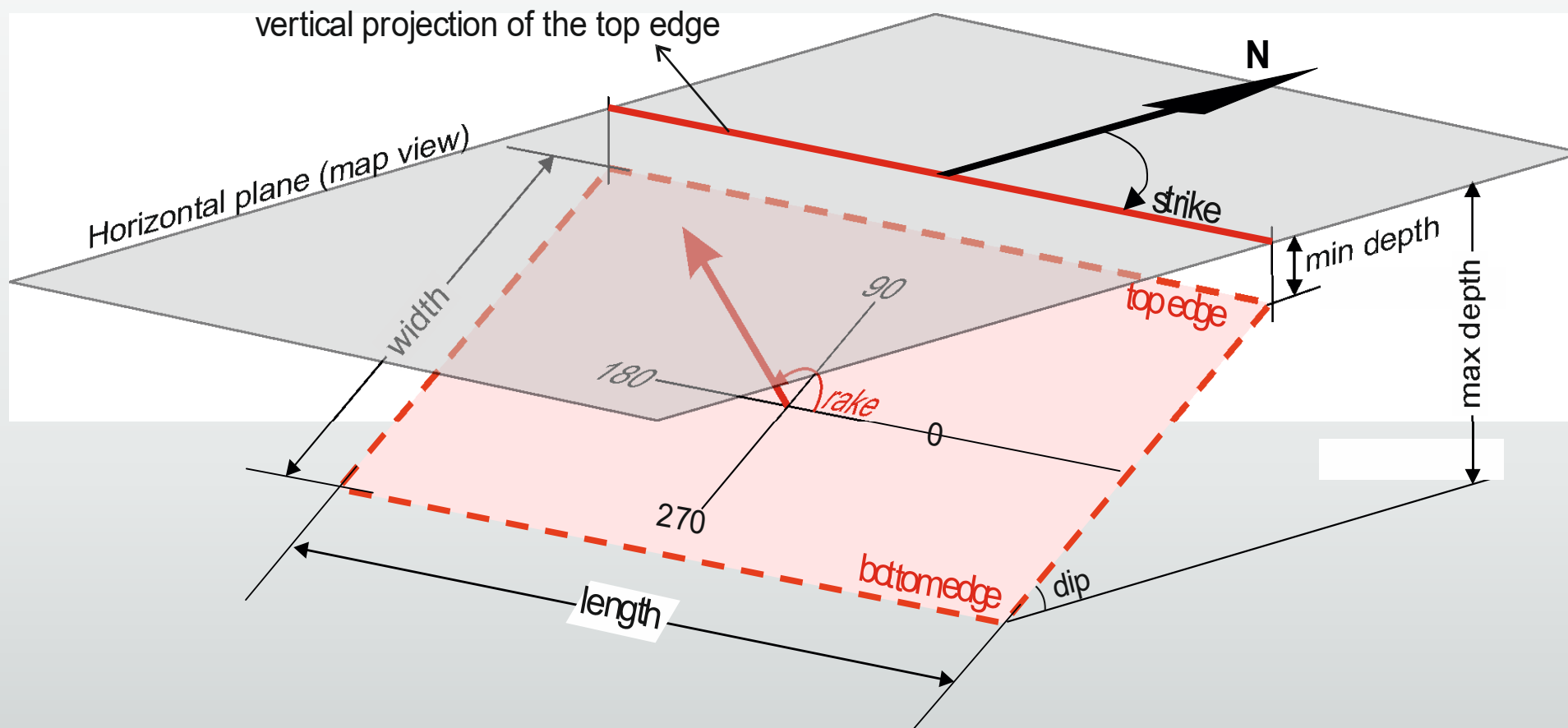


Velaj, 2011

Louvari et al., 2001



# Υπολογισμός παραμέτρων ρηγμάτων



# Παραδείγματα εκτίμησης παραμέτρων στην περιοχή της Αλβανίας

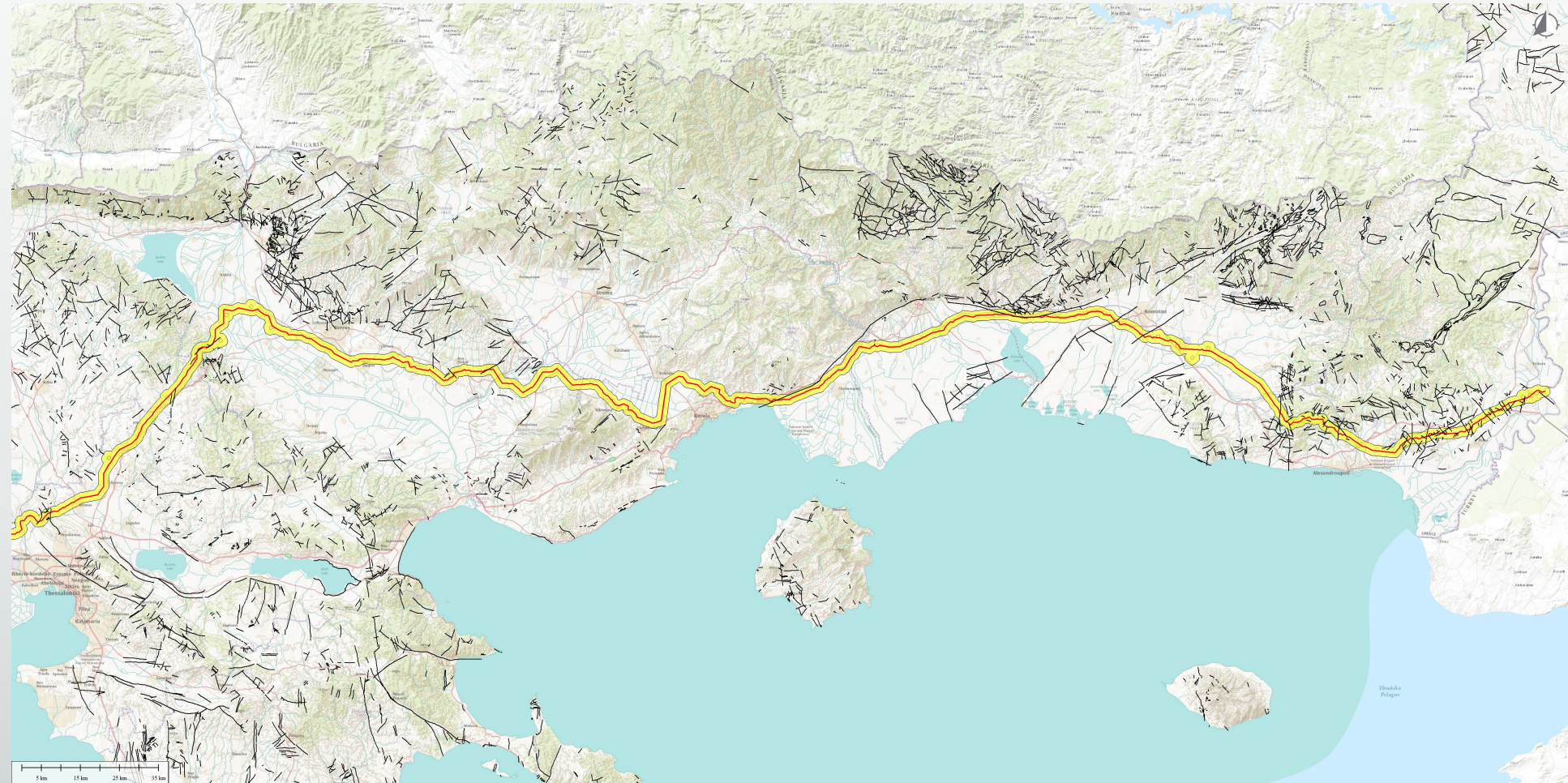


IDSource	SourceName	Q-key	MinDepth	MaxDepth	Strike	Dip	Length [km]	Width [km]	Rake
ALCS001	South Kurveleshi Thrust	A	0.5	13.0	323	30	49.0	25.0	90
ALCS016	Saranda Backthrust	PA	0.0	5.0	137	35	15.8	8.7	85
ALCS020	Delvina Thrust	PA	0.0	12.0	145	30	43.5	24.0	90
ALCS070	Berati Thrust	PA	0.0	12.0	324	30	37.5	24.0	90
ALCS085	Qeparo Transfer Fault	A	0.0	15.0	241	85	32.1	15.1	183

IDSource	SourceName	$M_{cred}$	$M_{abs}$	$\Delta M$	SlipRate [mm/a]	Recurrence Int [yr]
ALCS001	South Kurveleshi Thrust	6.8	7.1	0.3	0.75	623
ALCS016	Saranda Backthrust	6.1	6.3	0.2	0.69	535
ALCS020	Delvina Thrust	6.8	7.0	0.2	0.63	879
ALCS070	Berati Thrust	6.8	7.0	0.2	0.43	1473
ALCS085	Qeparo Transfer Fault	6.7	6.7	0.0	0.67	1263

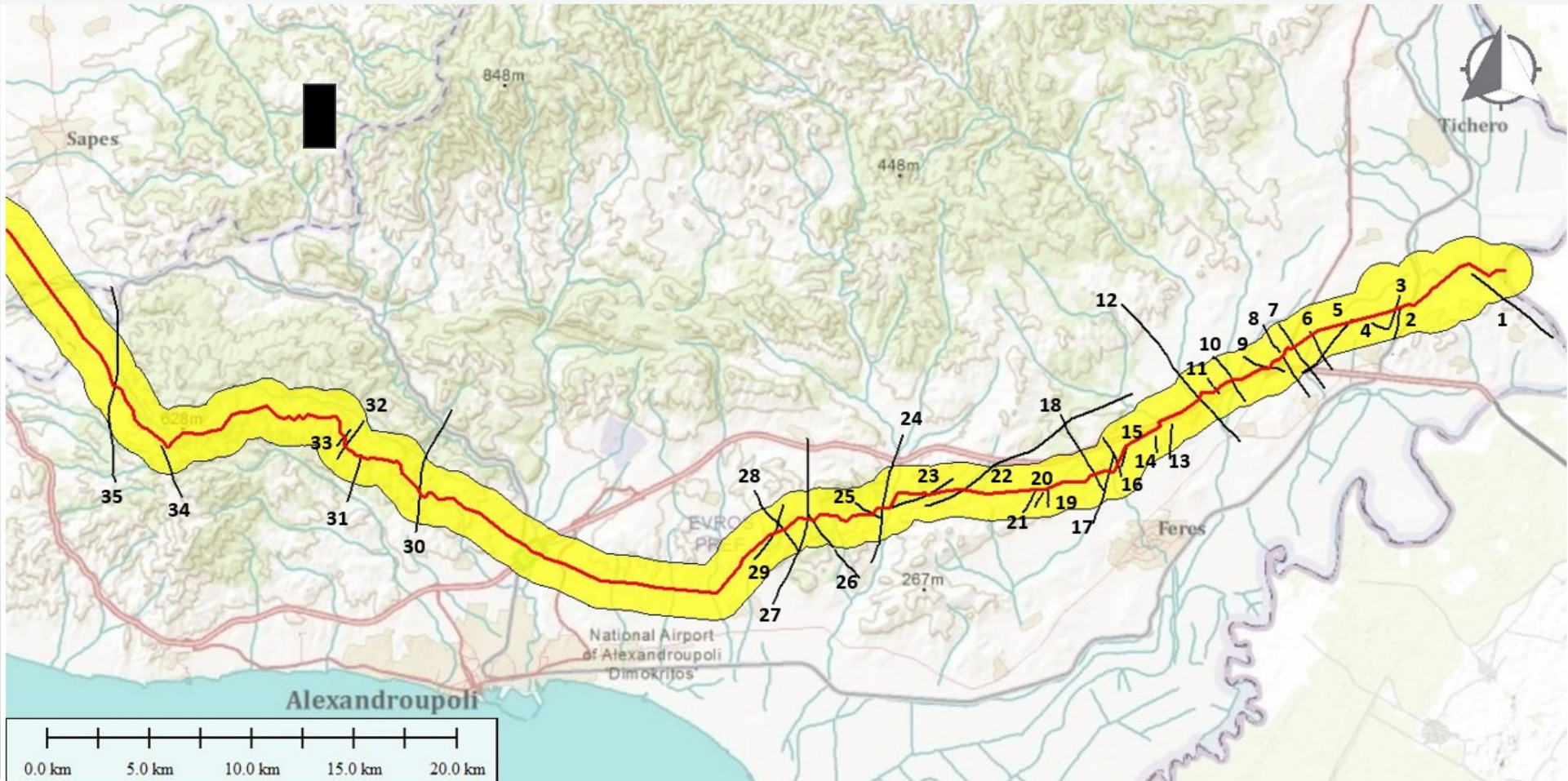


# Ρήγματα από χάρτες 1:50.000

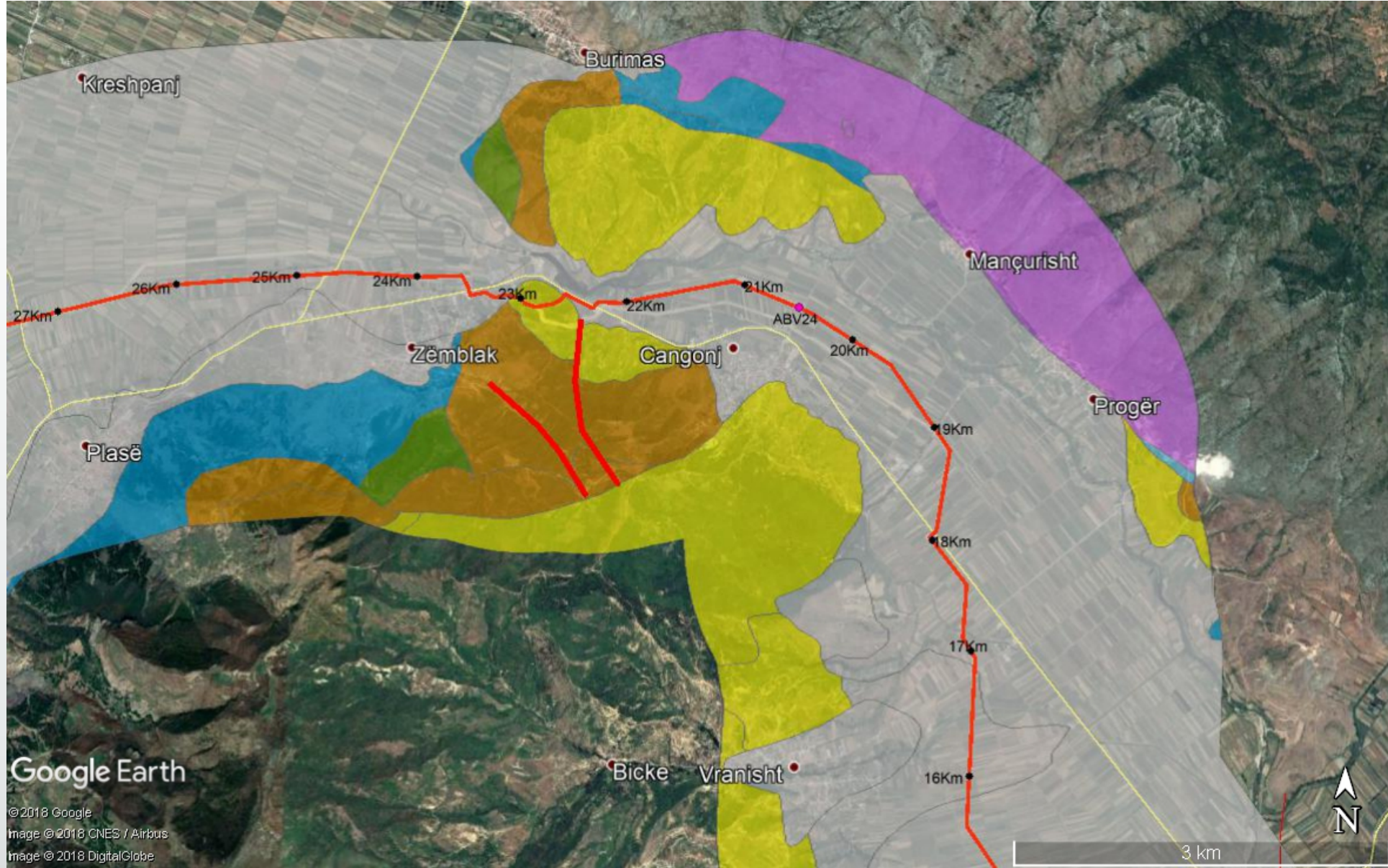




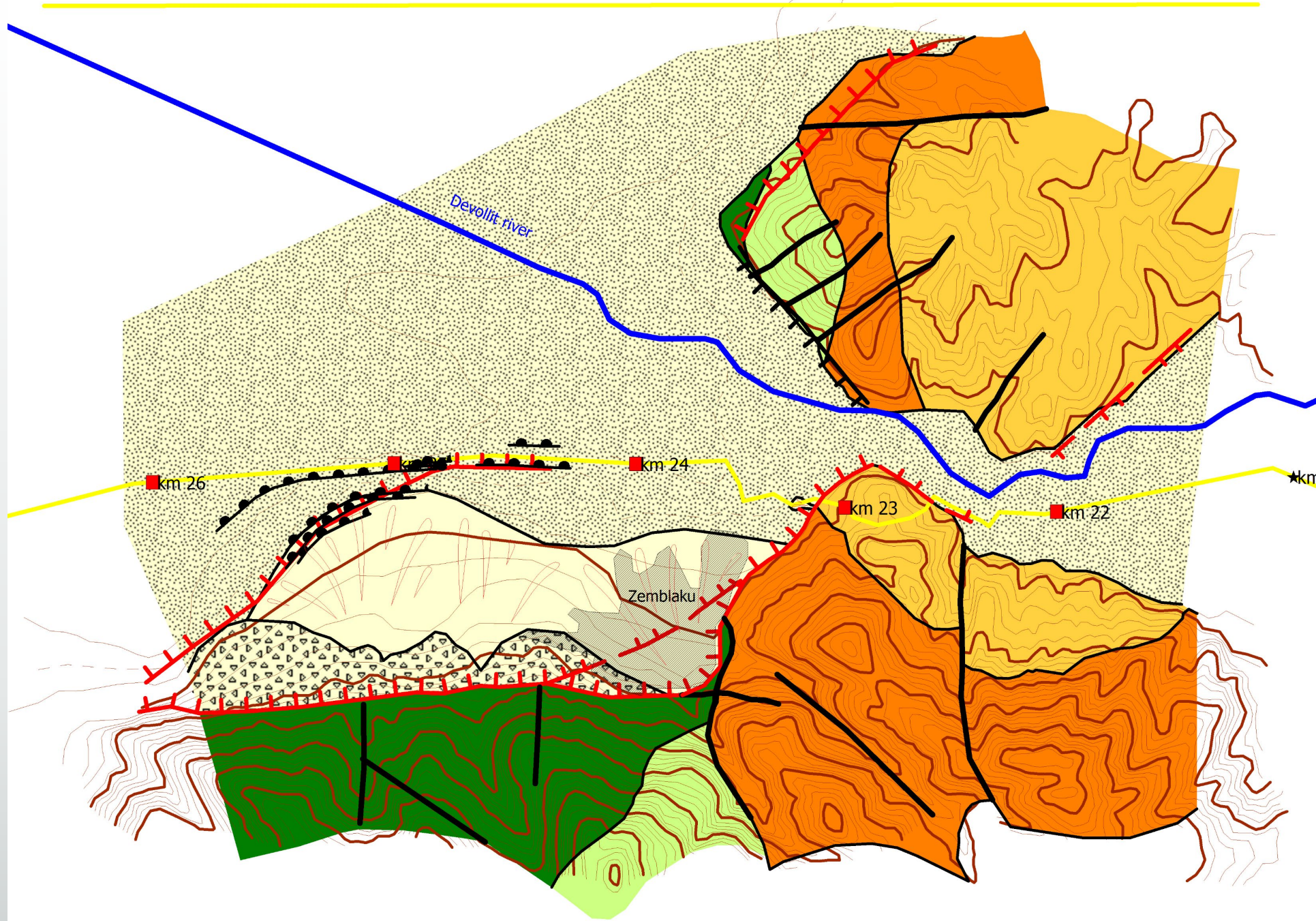
# Ρήγματα που τέμνουν τον αγωγό











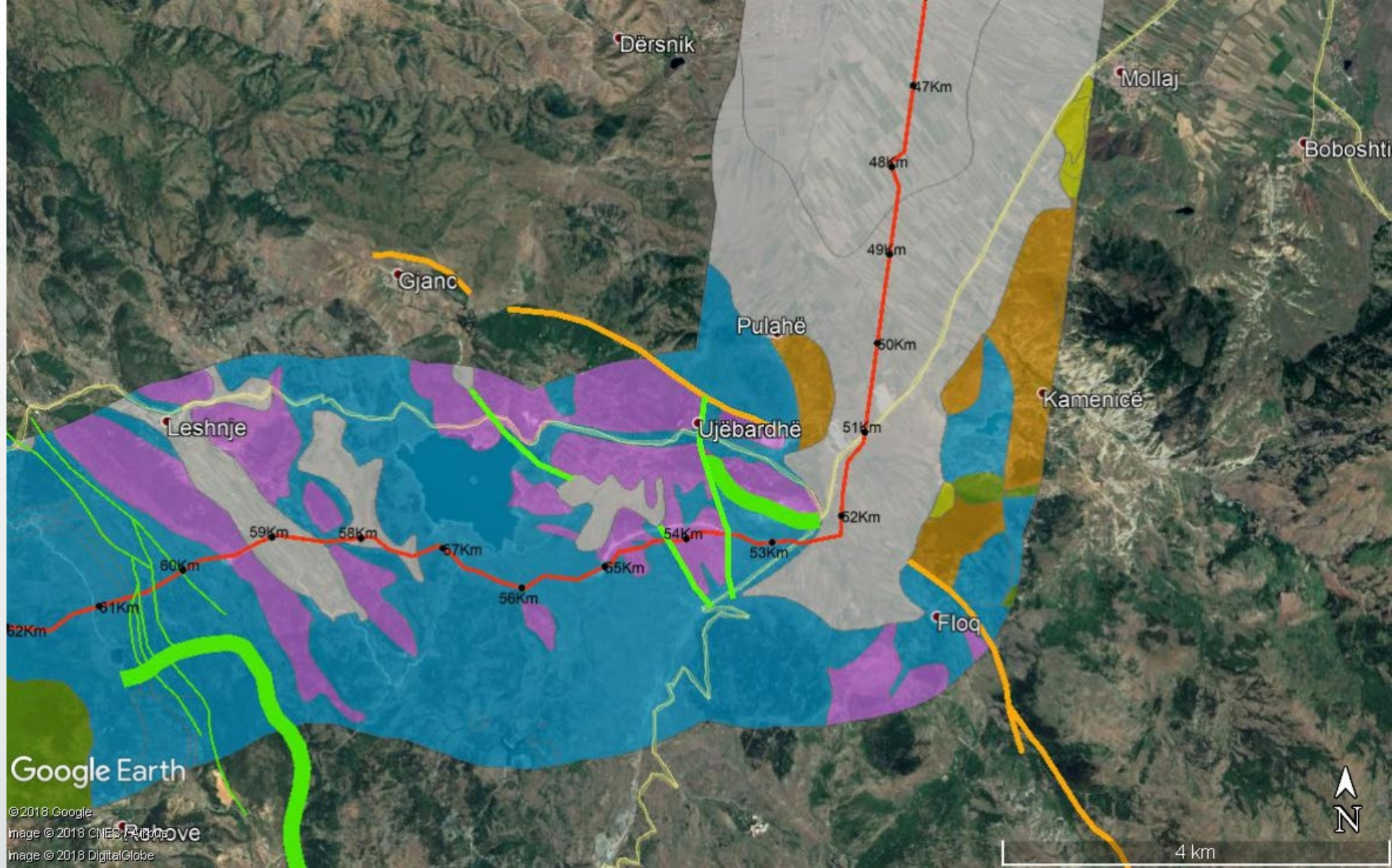




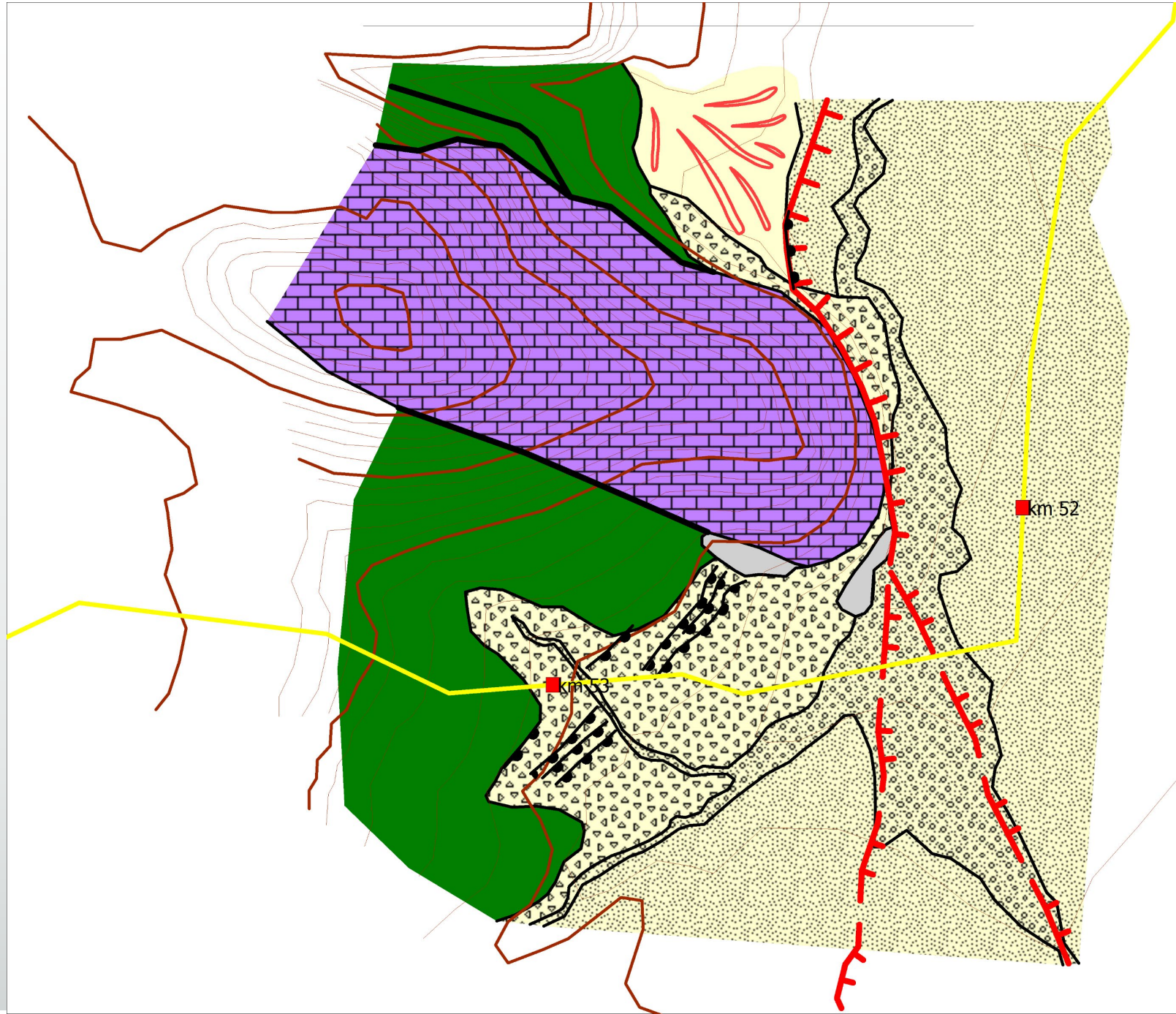








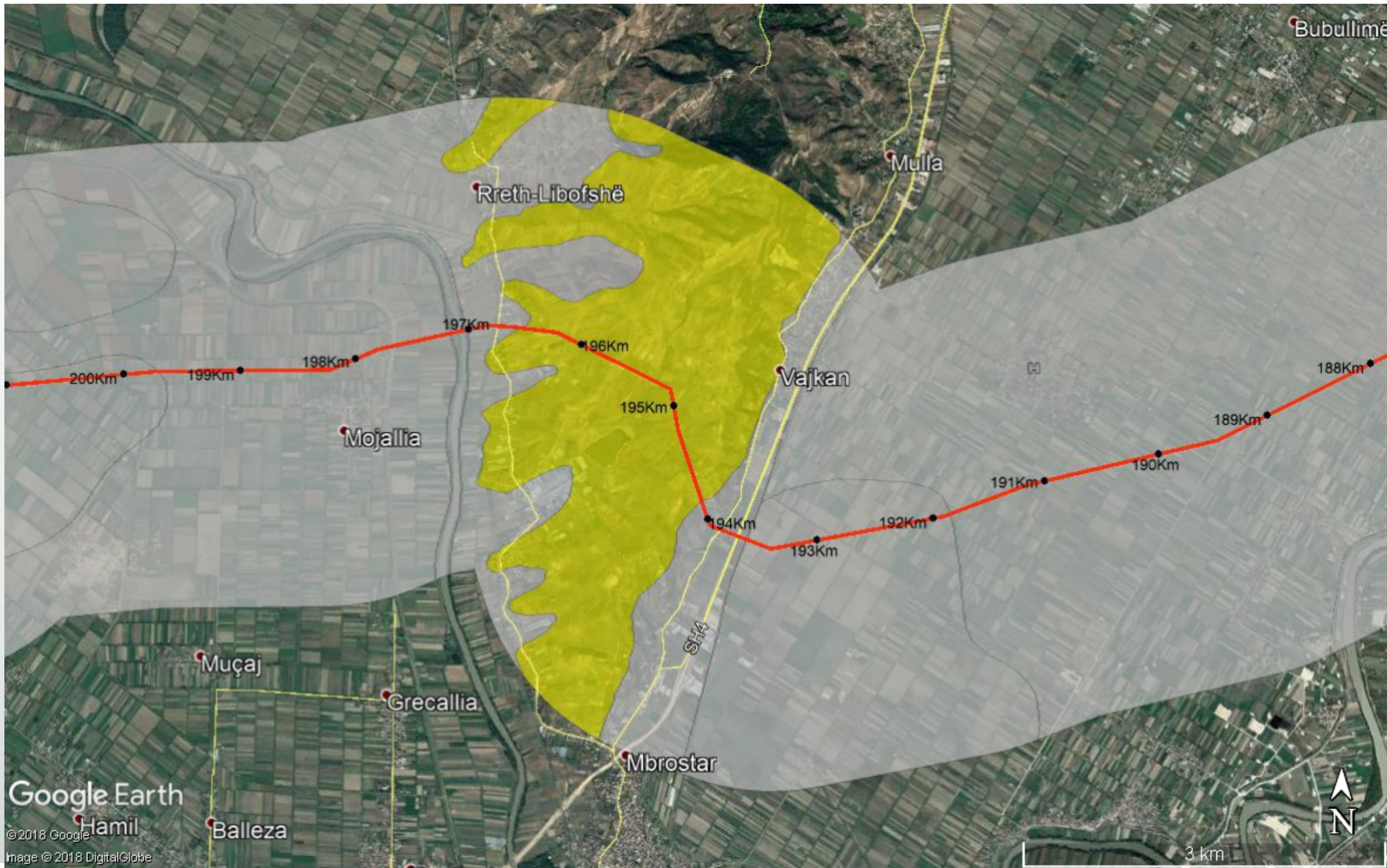












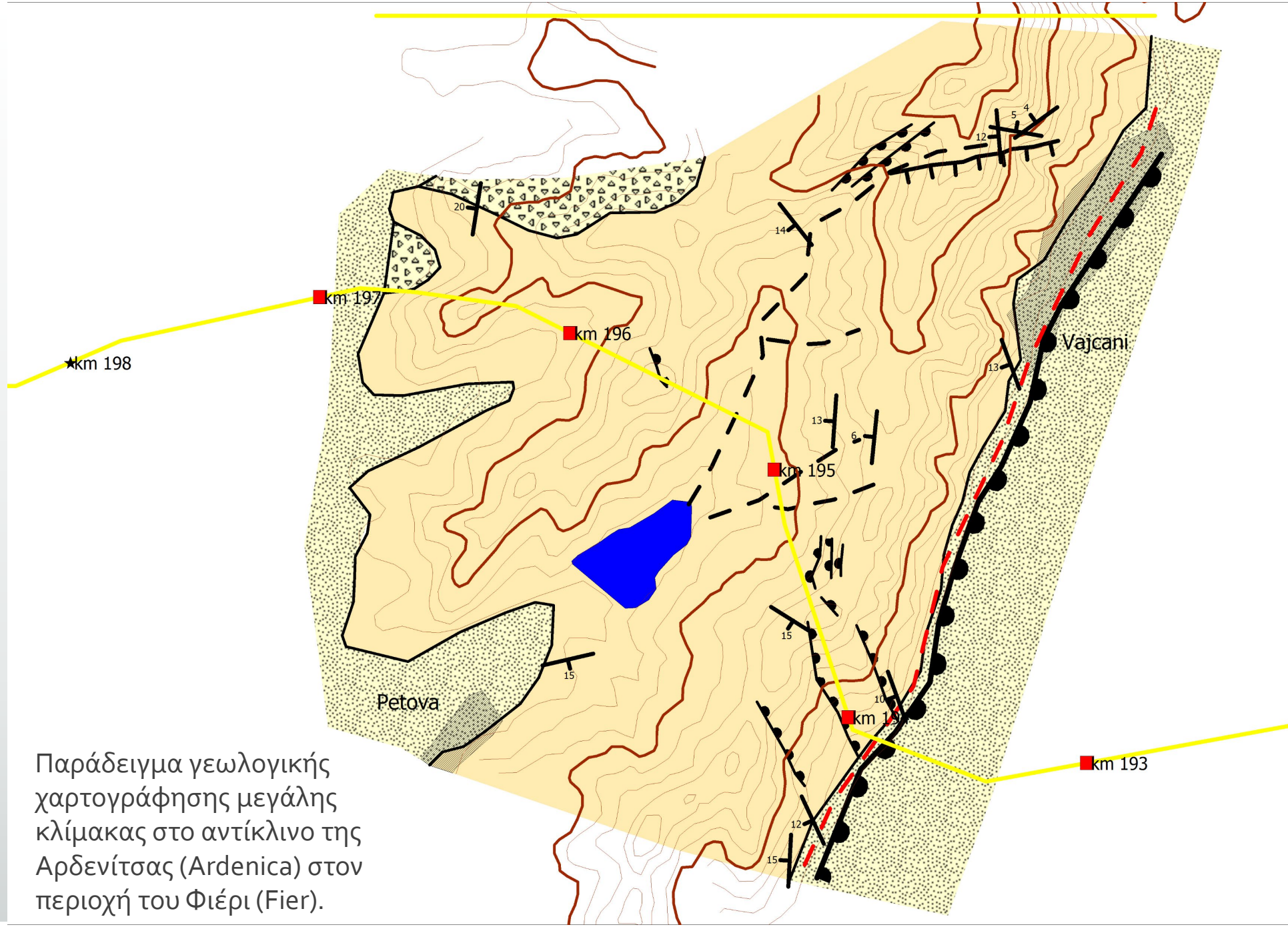
Bubullimë



Google Earth

© 2018 Google  
Image © 2018 DigitalGlobe





Παράδειγμα γεωλογικής χαρτογράφησης μεγάλης κλίμακας στο αντίκλινο της Αρδενίτσας (Ardenica) στον περιοχή του Φιέρι (Fier).

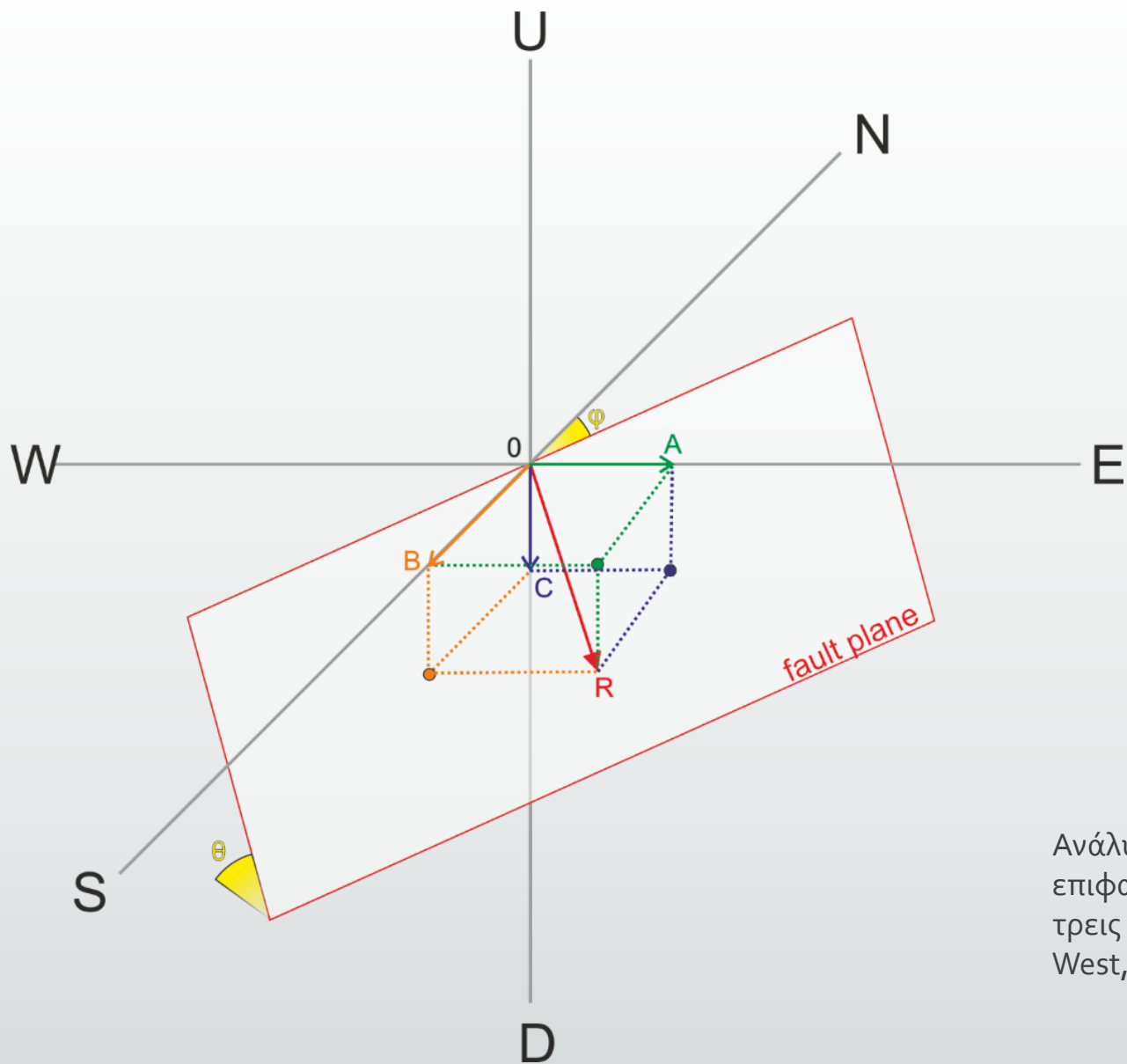










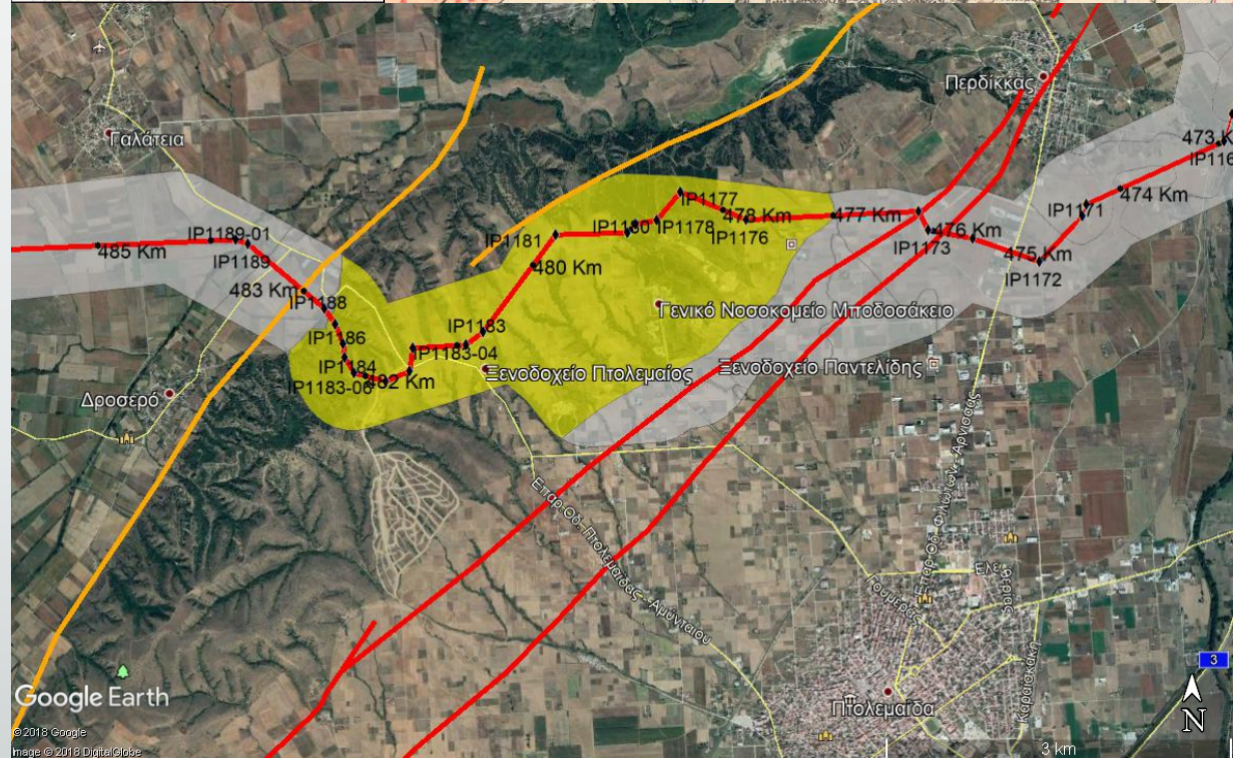
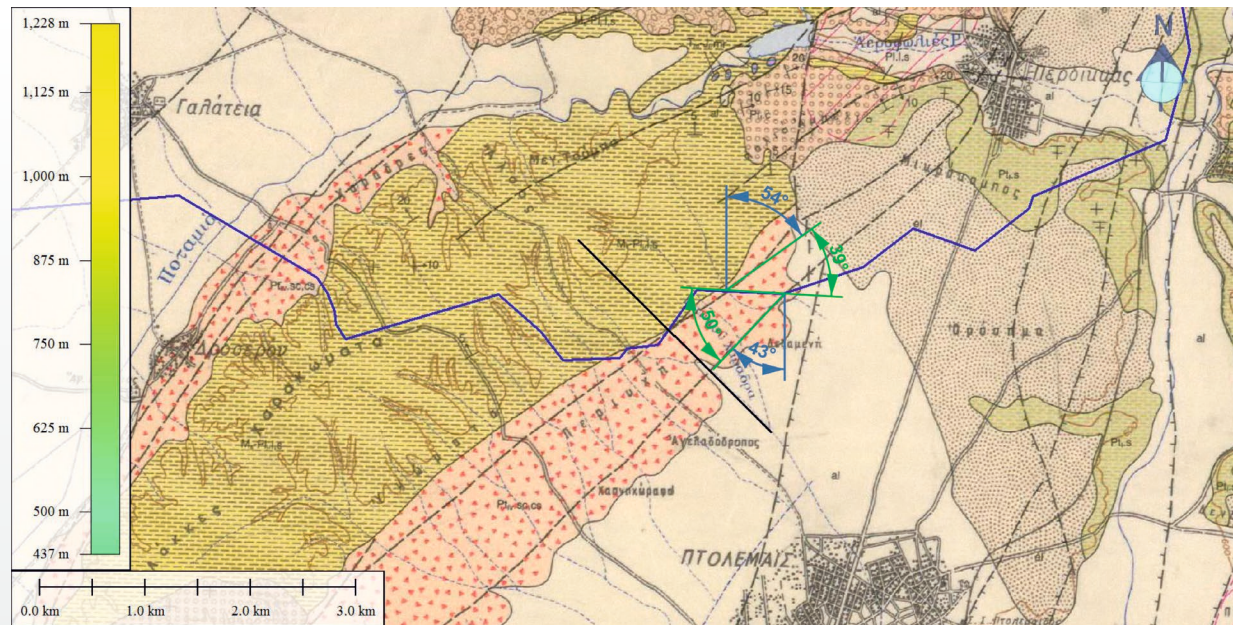
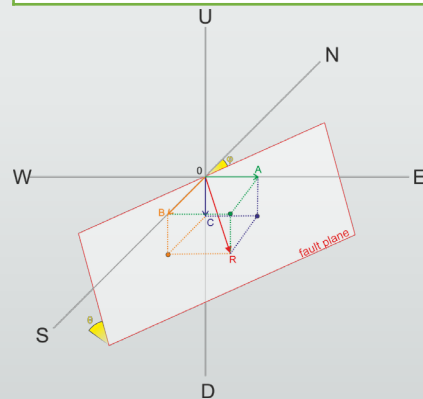


Ανάλυση της αναμενόμενης επιφανειακής μετατόπισης σε τρεις άξονες (North-South, East-West, Up-Down).

# Παράδειγμα: Πτολεμαΐδα

Ρήγμα GR74  
Μήκος: 12 km  
MD: 0,51 m (W&C94)

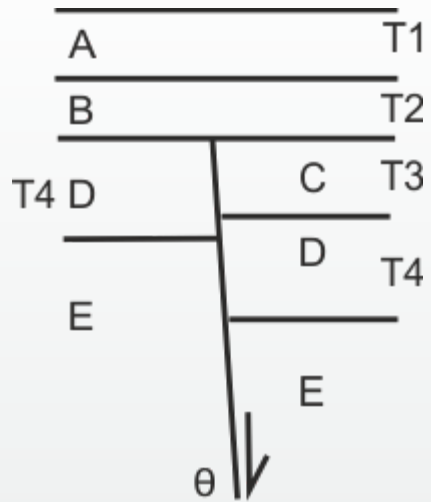
Semi-axis	Displacement (cm)
E	15.8
W	0
N	0
S	14.7
U	0
D	46.2











Angle  $\theta$ :  $65^\circ$  ( $45^\circ$ - $80^\circ$ ).

Thickness T1: 10 m.

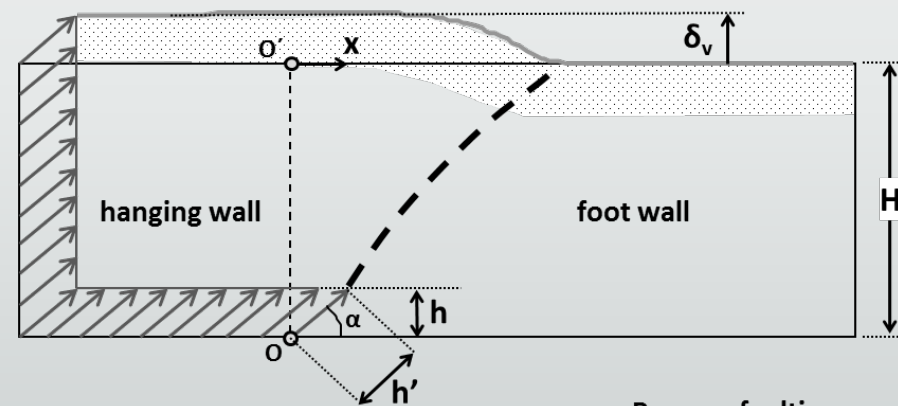
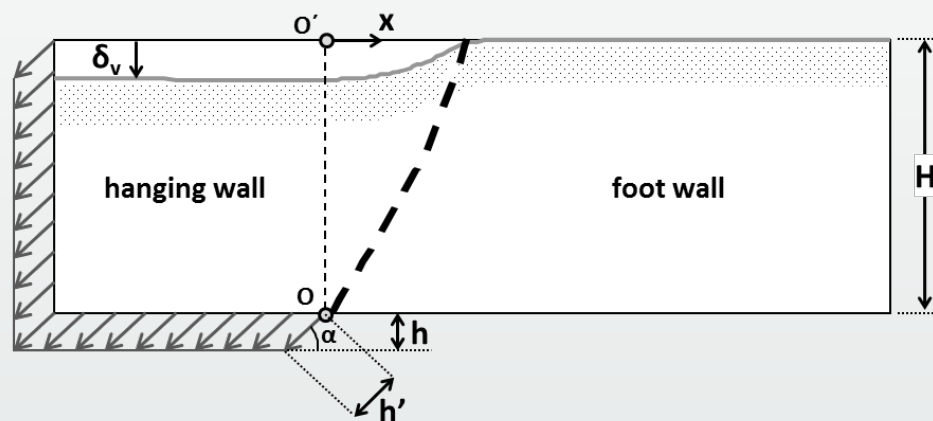
Thickness T2: 40 m.

Thickness T3: 60 m.

Thickness T4: 110 m.

Unit	Symbol	Description	Age
Layer A	al	Alluvial deposits	Holocene
Layer B	Ptiv	Breccia with sandy and clayey matrix	Upper Pleistocene
Layer C	Ptl.s	Sand with clayey layers and marls	Lower Pleistocene
Layer D	Ptl.c	Conglomerates with sandy lenses and layers	Lower Pleistocene
Layer E	M5	Marls	Miocene

Normal faulting

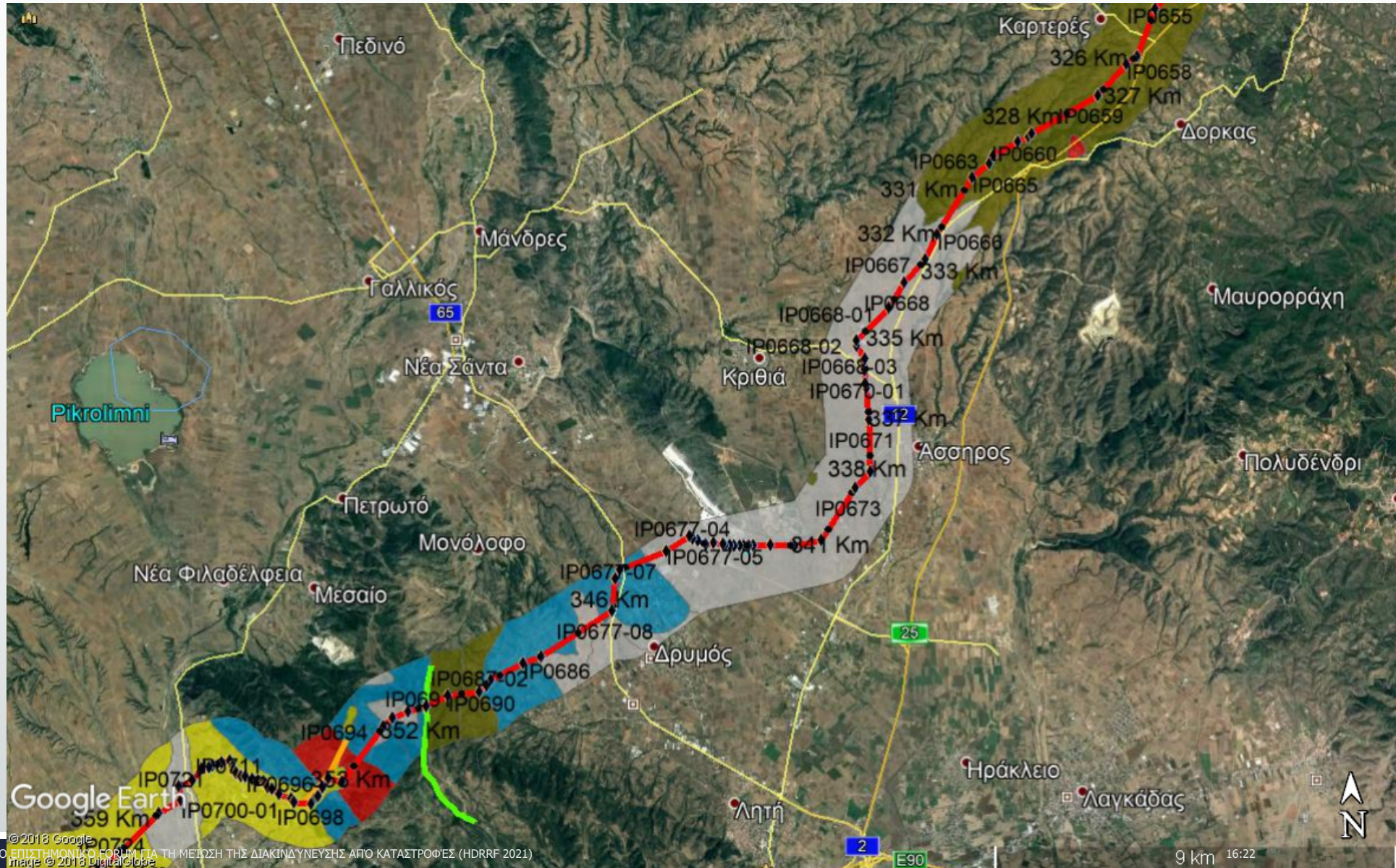


Reverse faulting

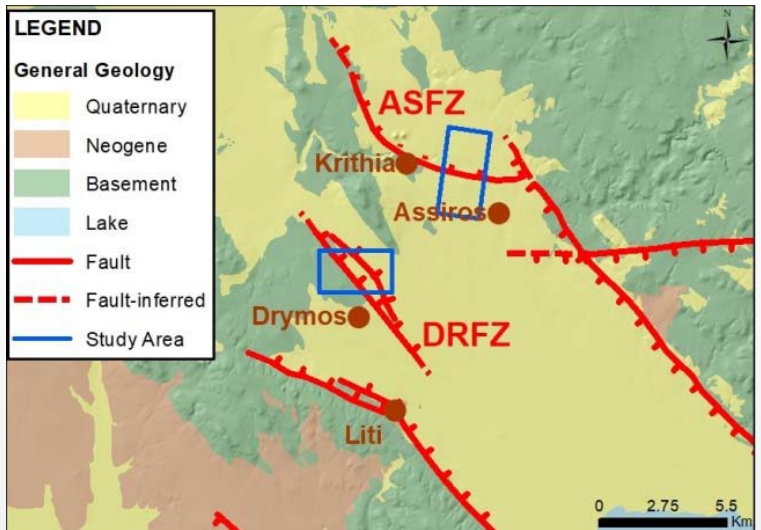




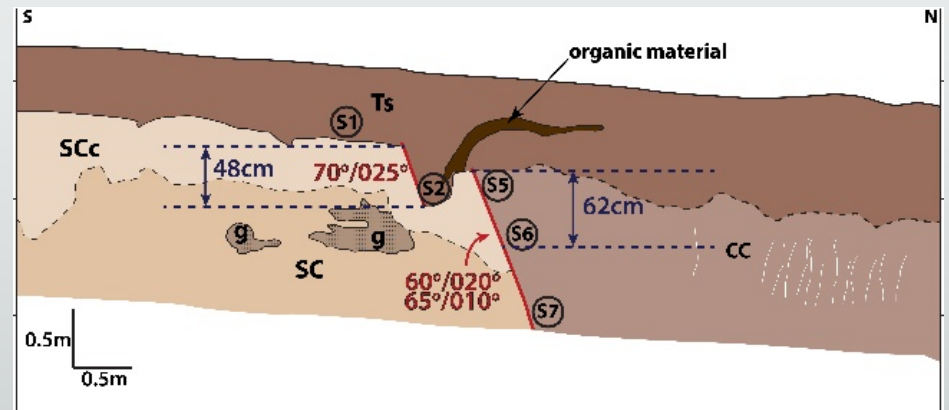
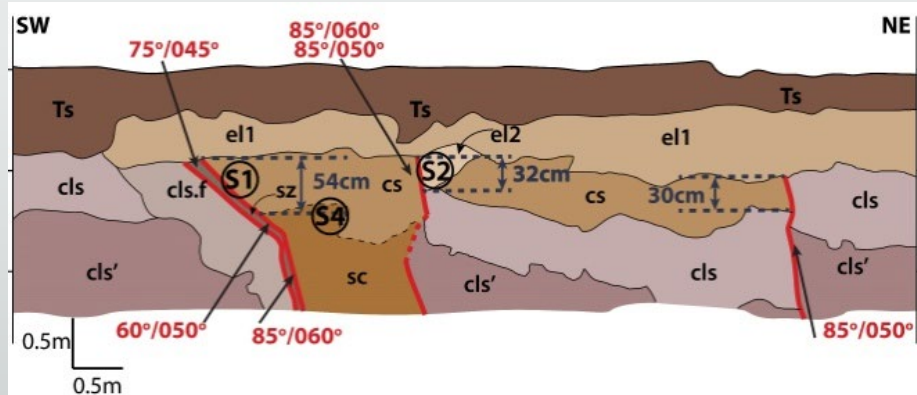
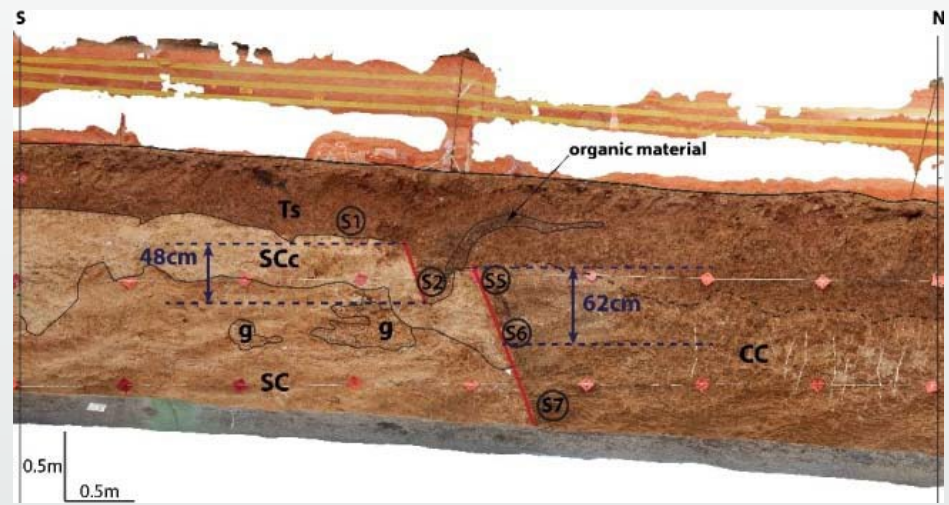
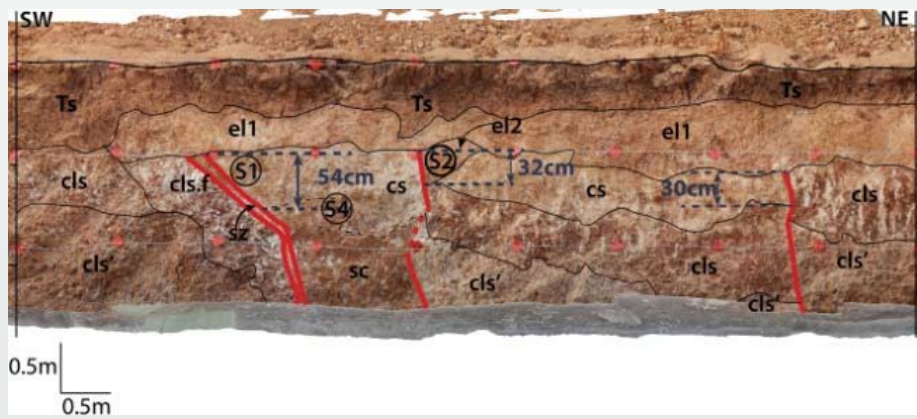
# Μυγδονία λεκάνη







Papanikolaou et al., 2018





## Προτεινόμενες καλές πρακτικές (best practices)

1. Προσδιορισμός **προβληματικών περιοχών** με βάση δημοσιευμένα στοιχεία, γεωλογικούς χάρτες, δορυφορικές εικόνες, αεροφωτογραφίες και οποιαδήποτε άλλη πληροφορία μπορεί να είναι διαθέσιμη (π.χ. δεδομένα LIDAR, μικροτοπογραφικοί χάρτες, κ.ά.).
2. Λεπτομερής **γεωλογική χαρτογράφηση** των προβληματικών περιοχών σε κλίμακα 1:5.000 ή μεγαλύτερη.
3. **Μορφοτεκτονική ανάλυση**, με έμφαση στις γραμμικές δομές σε ιζήματα του Ολοκαίνου και εν γένει του Τεταρτογενούς.
4. **Παλαιοσεισμολογική μελέτη** των πλέον προβληματικών θέσεων. Η παλαιοσεισμολογία είναι **η μόνη μέθοδος** που μπορεί να προσδιορίσει τη θέση ενός ρήγματος με ακρίβεια λίγων εκατοστών. Μπορεί επίσης να δώσει στοιχεία τόσο για την **περίοδο επανάληψης** ισχυρών σεισμών, όσο και για την πραγματική **μετατόπιση ανά γεγονός**.
5. Τέλος, μία **ντετερμινιστική εκτίμηση** παραμέτρων σχεδιασμού με δεδομένα από τα προηγούμενα στάδια. Εάν είναι διαθέσιμα και στοιχεία σχετικά με την περίοδο επανάληψης, μπορεί να συνδυαστεί και με μία **πιθανολογική εκτίμηση**.



# Σας ευχαριστώ!

Αλέξανδρος Χατζηπέτρος  
*ac@geo.auth.gr*