



# Ανιχνεύοντας το Υπέδαφος: Η Χρήση Διανεμημένης Οπτικής Ανίχνευσης για Παρακολούθηση του Υπεδάφους και της Υποστήριξης Υπόγειων Εκσκαφών

**Dr. Nicholas Vlachopoulos, PhD, CD, PEng, PE<sub>Gr</sub>**

Associate Professor

Department of Civil Engineering, Royal Military College of Canada

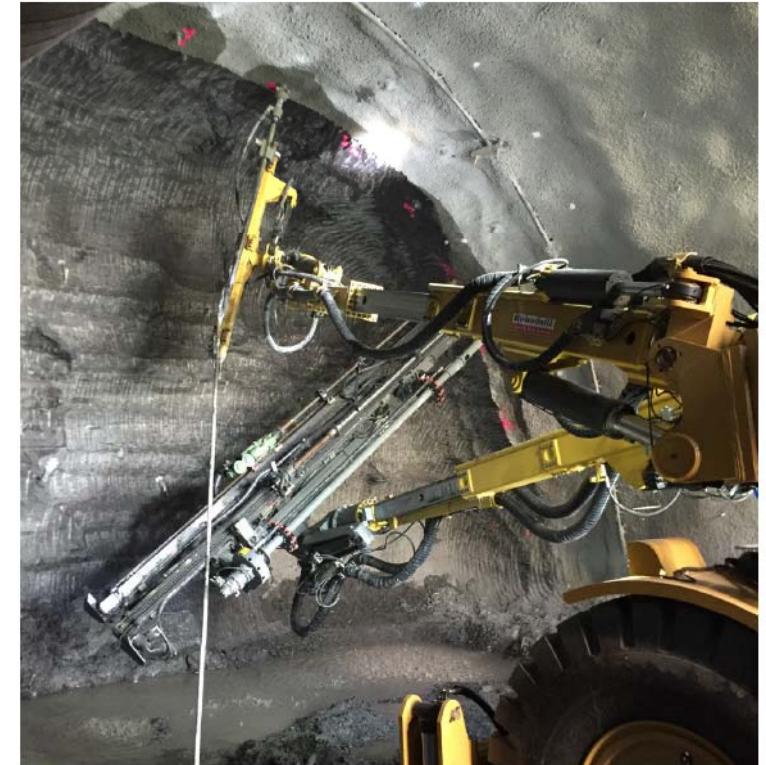
Geomechanics Group, Queen's University

National Chair, IAEG Canada & Engineering Geology Division, Canadian Geotechnical Society  
Kingston, ON, Canada



# Δομή Παρουσίασης

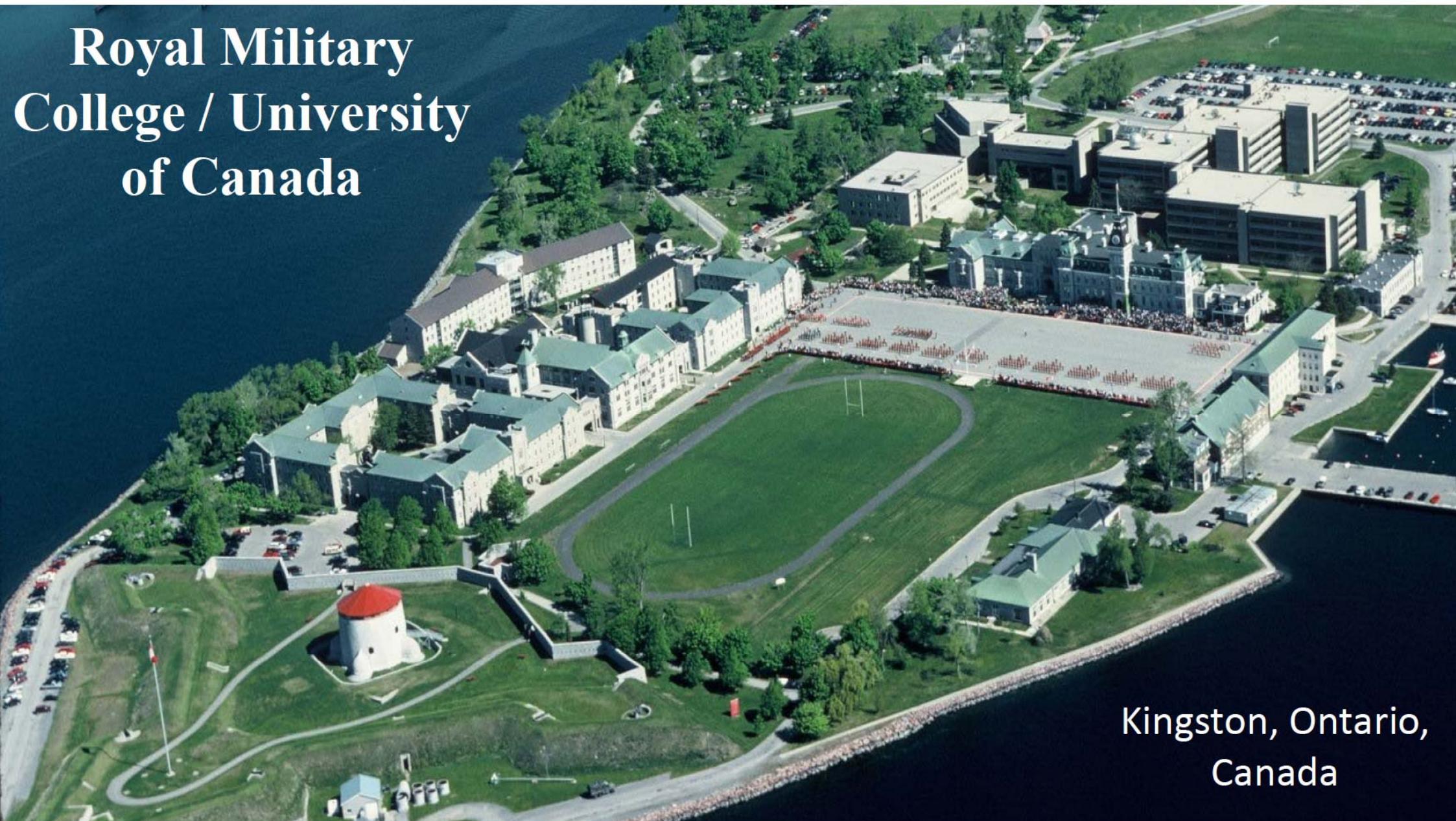
- Εισαγωγή
- Ανασκόπηση
- Μέθοδοι διερεύνησης μετατόπισης
- Διανεμημένη Οπτική Ανίχνευση (DOS)
  - Ανάπτυξη της Τεχνολογίας
  - Επιλεγμένα Αποτελέσματα
    - Εργαστηριακές Δοκιμές
    - Επιτόπου Δοκιμές
- Σύνοψη / Ερωτήσεις





# Κίνγκστον Οντάριο Καναδάς

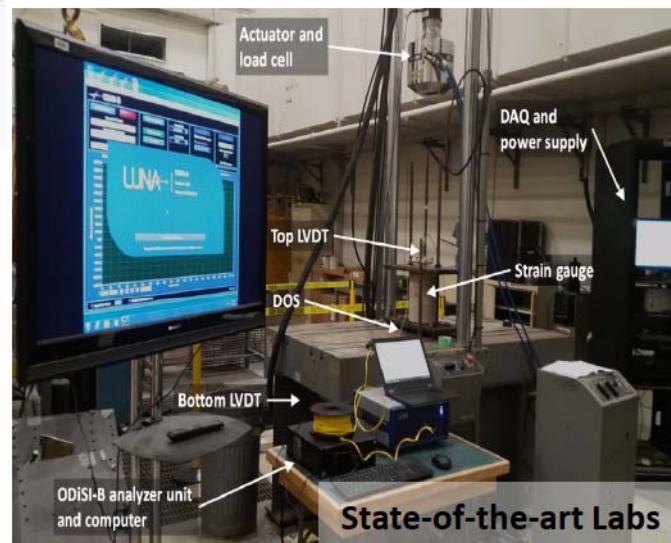
# Royal Military College / University of Canada



Kingston, Ontario,  
Canada

# RMC

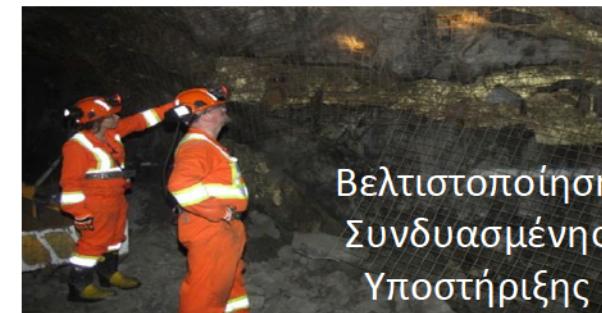
- Κρατικώς διαπιστευμένο Πανεπιστήμιο
- Αξιωματικοί των Καναδικών Ενόπλων Δυνάμεων
- Ίδρυμα Κρατικών Ερευνών Καναδά



# Εξειδίκευση / Έρευνα ΣΗΡΑΓΓΟΠΟΙΙΑ, ΥΠΟΓΕΙΕΣ ΕΚΣΚΑΦΕΣ



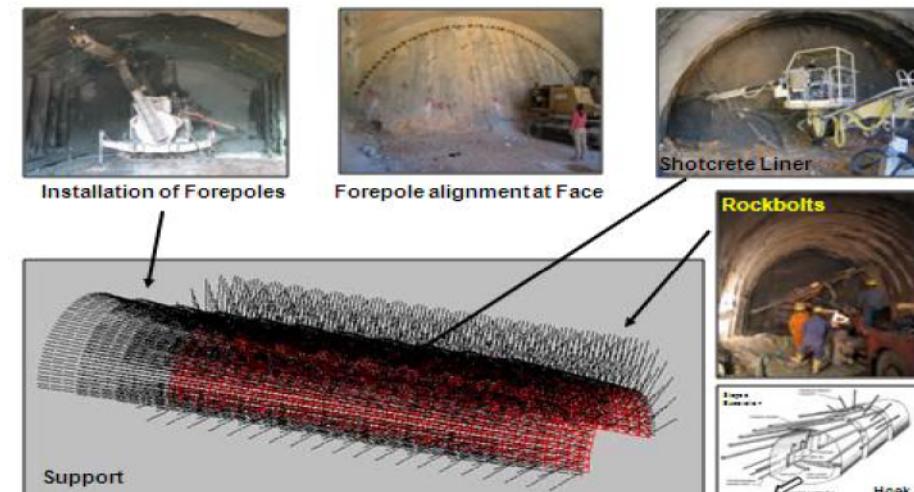
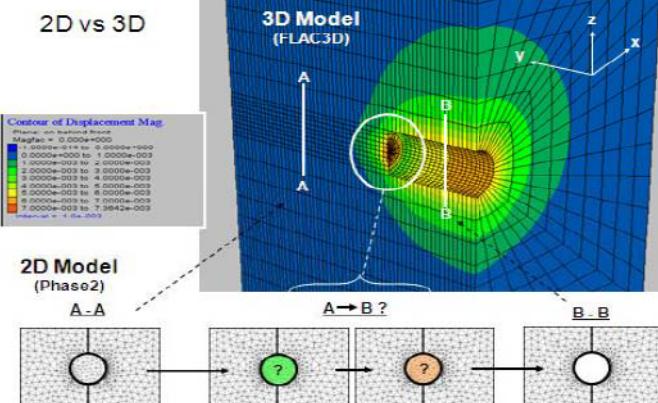
- Ευστάθεια Υπόγειων Εκσκαφών και Αριθμητικός Σχεδιασμός Υποστήριξης  
Απόκριση υπόγειων εκσκαφών κοντά στο μέτωπο
- **Φυσικές Δοκιμές της Υποστήριξης Σηράγγων (Αλληλεπίδραση Υποστήριξης/Εδάφους)**
- Ενόργανη Παρακολούθηση Γεωτεχνικών Έργων (Οπτικές Ίνες)
- Discrete Fracture Networks
- Ενσωμάτωση Γεωμηχανικής και Γεωπληροφορικής
- Εκτίμηση Επικινδυνότητας και Διακινδύνευσης σε Γεωτεχνικά Έργα



## Σηραγγοποιία / Υπόγειες Εκσκαφές



## Βελτιωμένες Μέθοδοι Προσομοίωσης: 2D vs 3D

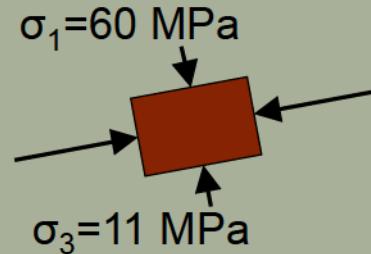
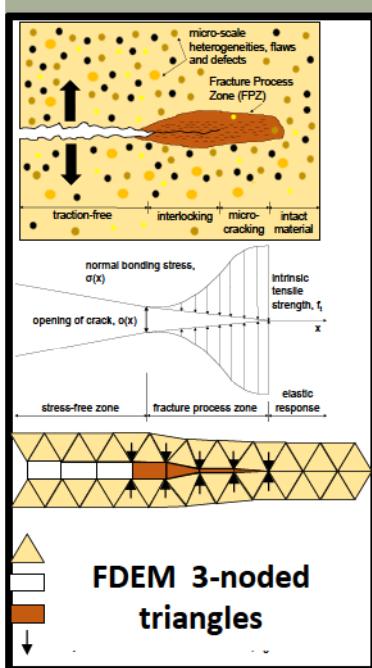


Υποστήριξη Εδάφους:  
Προσομοίωση και Φυσικές Δοκιμές

Driskos 3D Numerical Model



# Numerical Simulation



Failure is occurring due  
to extensile fracturing  
under the high  
compressive stresses

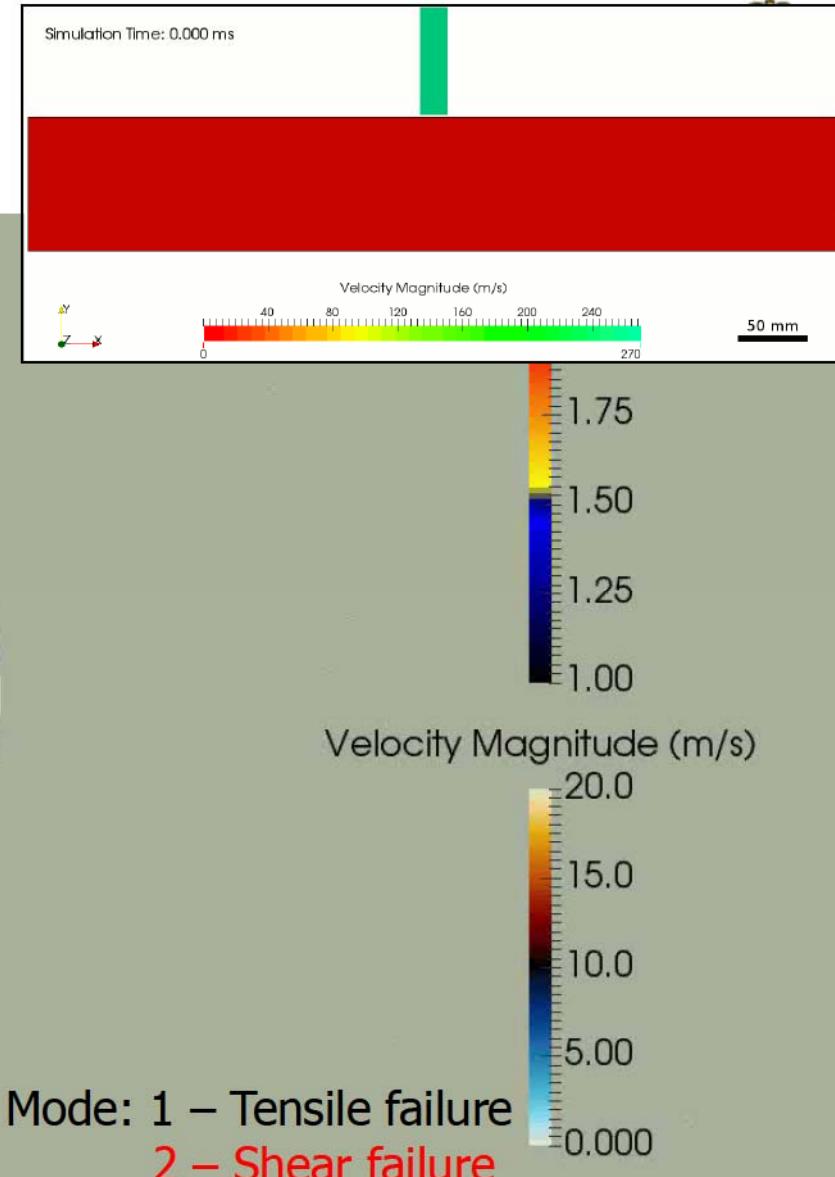
Massive rockmass



Step: 110.0

0      1.75      3.50  
[m]

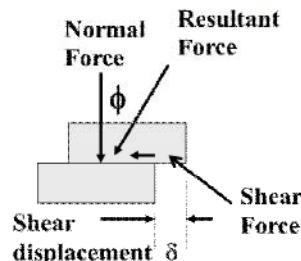
Failure Mode: 1 – Tensile failure  
2 – Shear failure



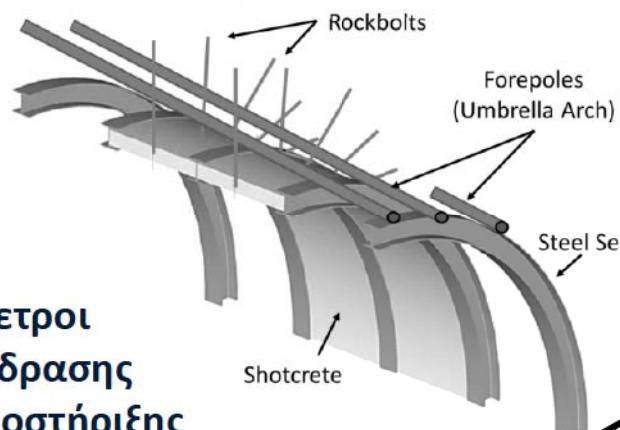
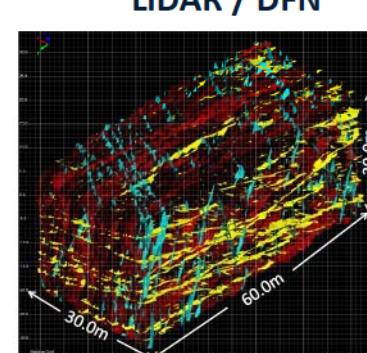
# Κλίμακα Ερευνητικού Προγράμματος



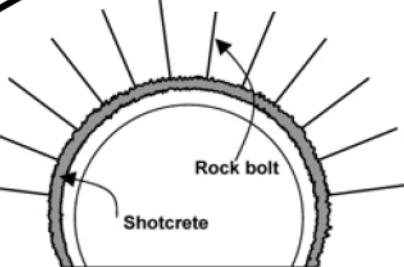
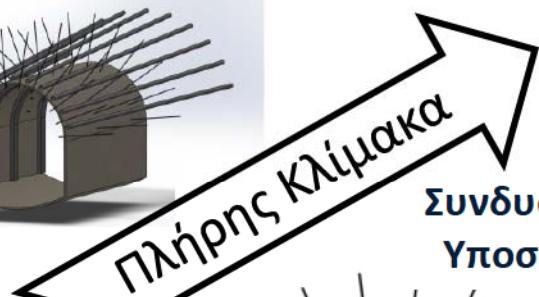
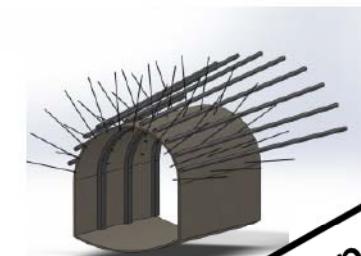
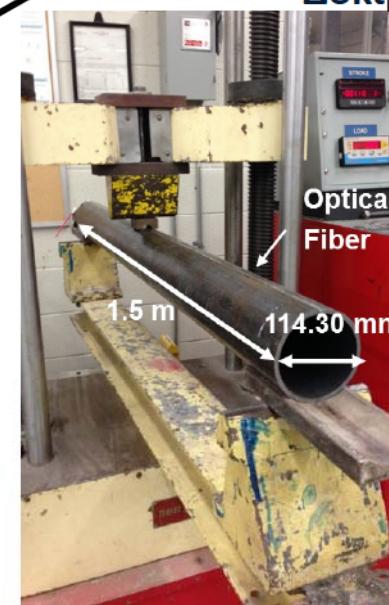
Παράμετροι  
Αλληλεπίδρασης  
Εδάφους-Υποστήριξης



Κλίμακα μι.



Κλίμακα τη  
Εργαστηριακές  
Δοκιμές

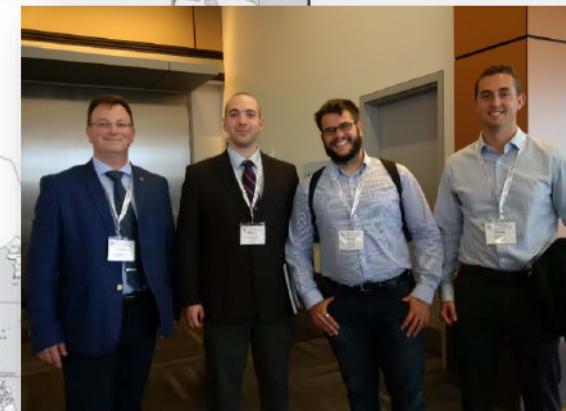
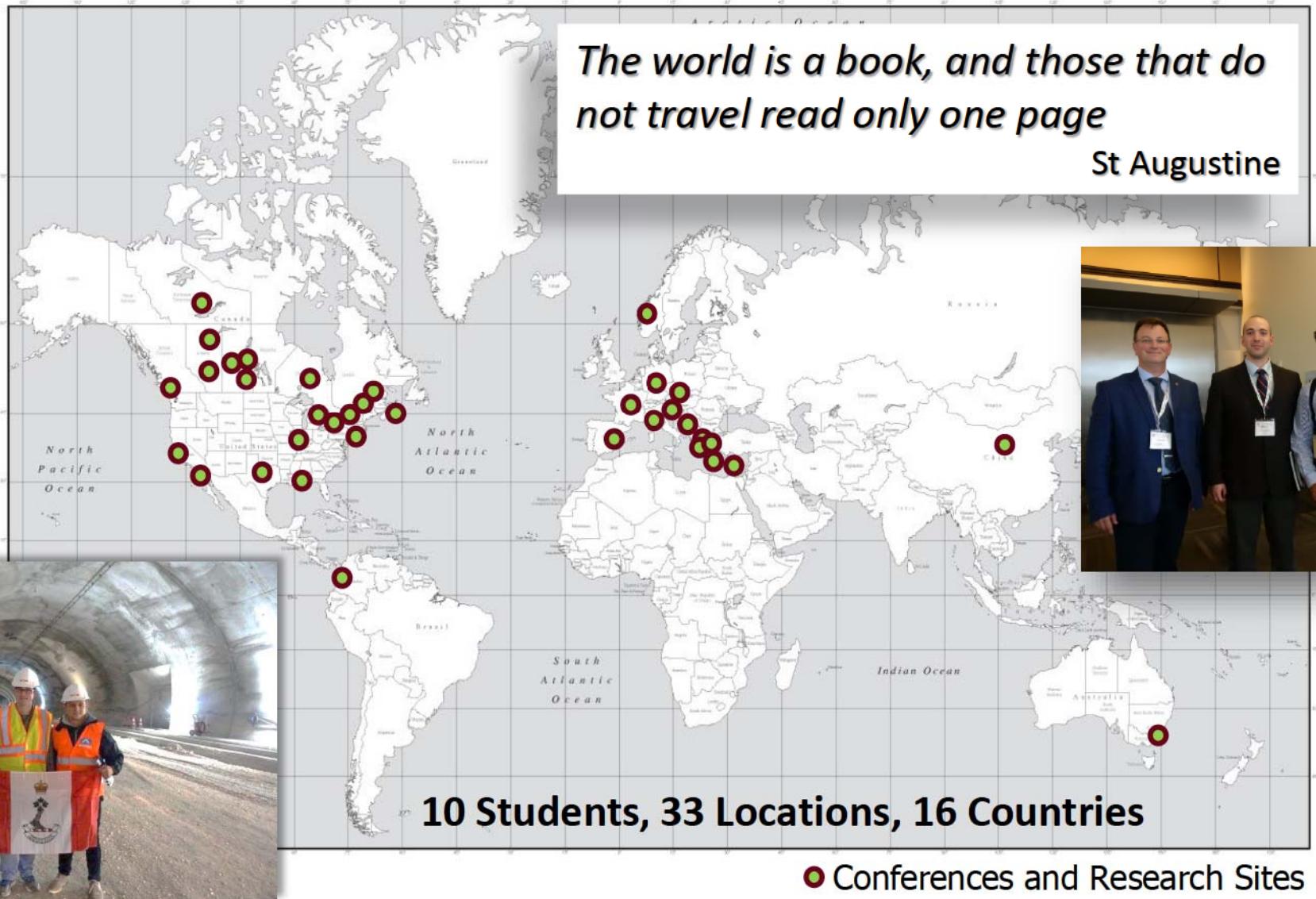


Επί τόπου Δοκιμές

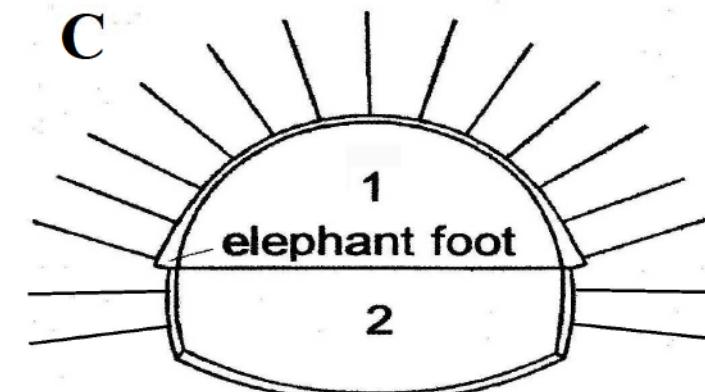
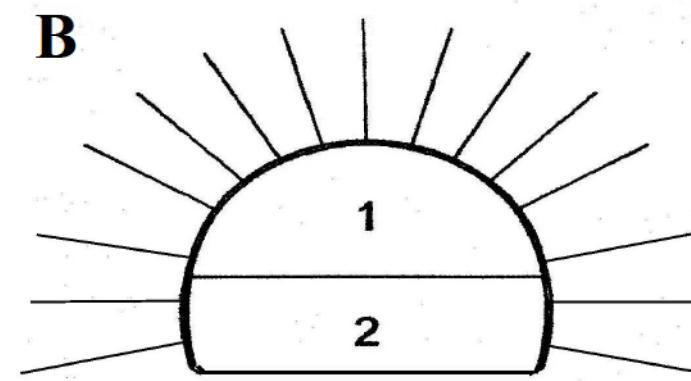
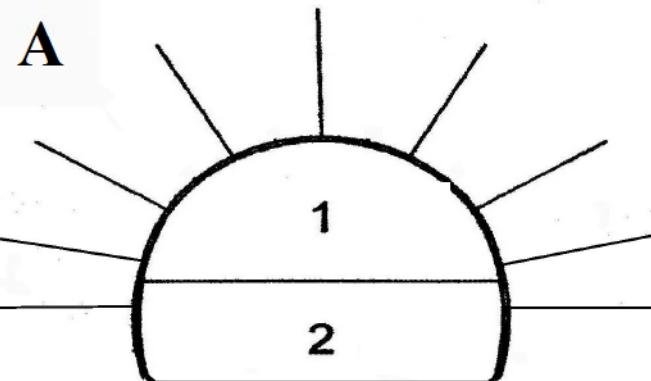


Vlachopoulos (2015)

# Travel supported for Students in the past 4 years



# Μέθοδοι Σχεδιασμού Σηράγγων- Κατηγορίες Υποστήριξης

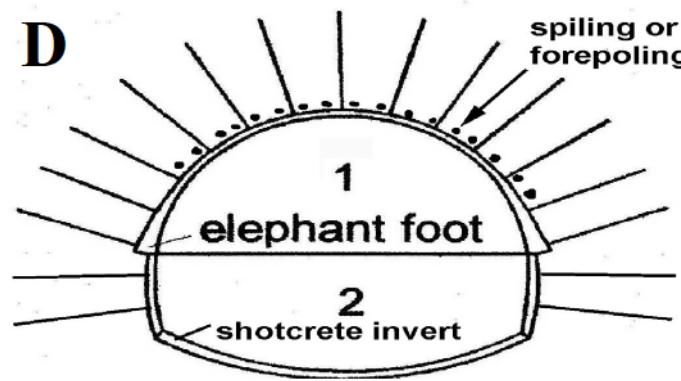


Αραιά αγκύρια + εκτ. σκυρόδρομα

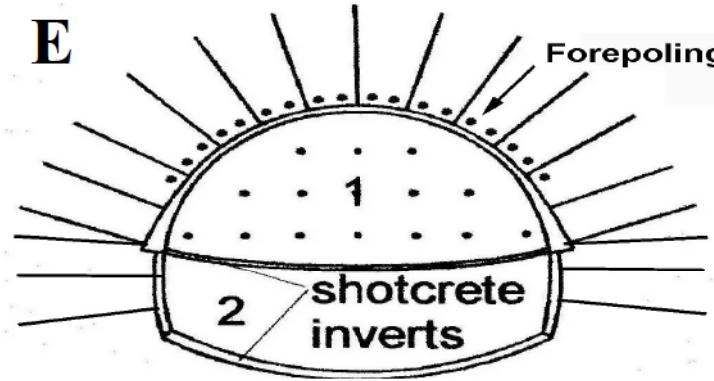
Συστηματικά αγκύρια +  
εκτοξευμένο σκυρόδεμα

... + μεταλλικά πλάισια

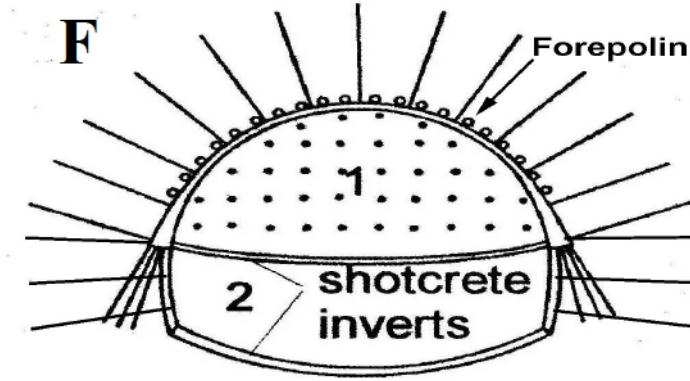
(Τροποποιημένο από: Hoek, 2000)



... + βλήτρα / δοκοί προπορείας



... + ύλωση μετώπου

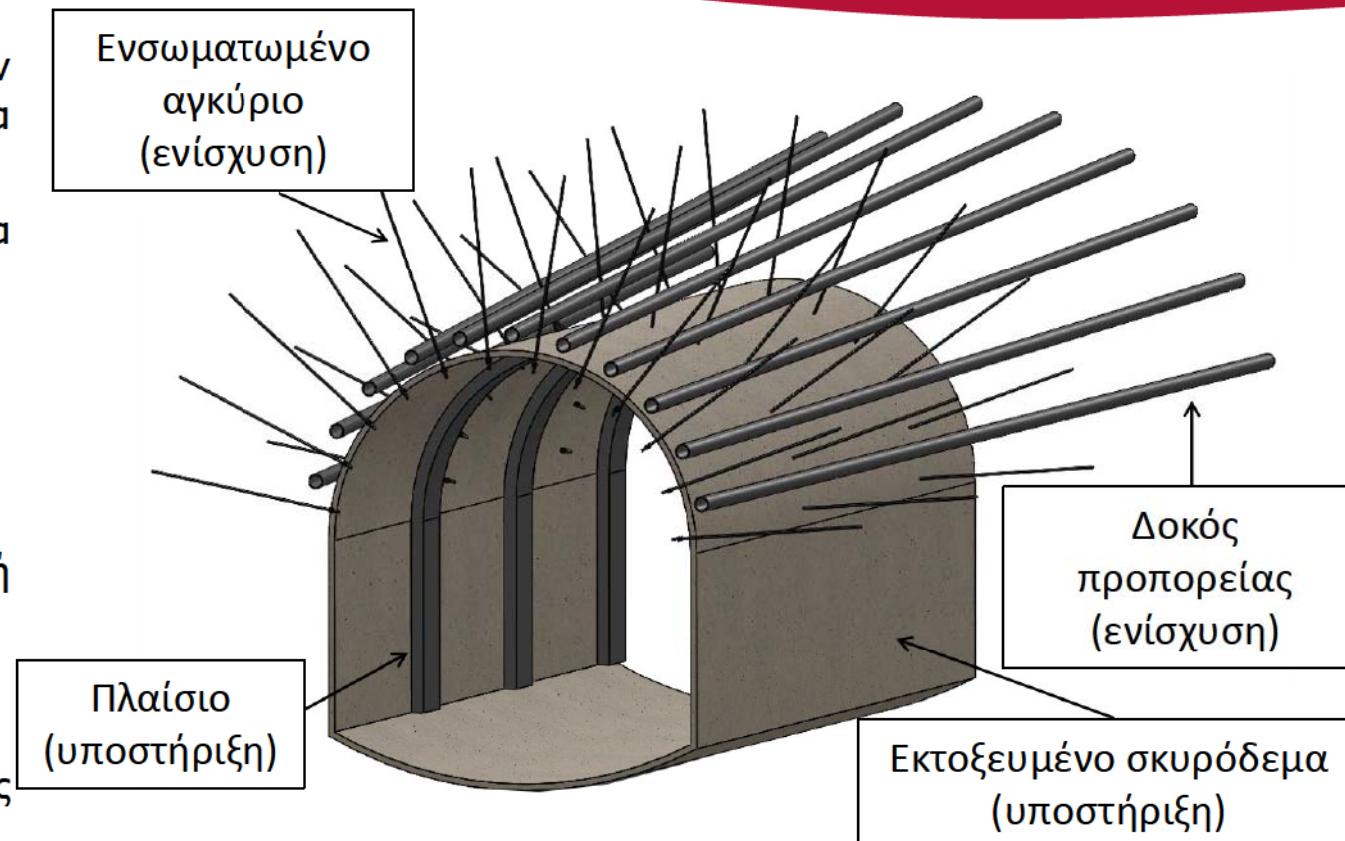


... + μικροπάσσαλοι



# Υποστήριξη Βραχομάζας–Βελτιστοποίηση

- Η υποστήριξη βραχομάζας περιγράφει την χρήση εύρους διαδικασιών και υλικών για την εξασφάλιση της ευστάθειας
- Χωρίζεται σε επιμέρους κατηγορίες ανάλογα με συνθήκες όπως:
  - θέση στην εκσκαφή,
  - χρονική στιγμή εγκατάστασης,
  - προσδοκώμενη διάρκεια ζωής, και
  - ενεργητική ή παθητική φόρτιση
- Συνήθως διαχωρίζεται ως ενίσχυση ή υποστήριξη:
  - Ενίσχυση, εσωτερικά της βραχομάζας (π.χ. ενεματωμένο αγκύριο)
  - Υποστήριξη, εξωτερικά της βραχομάζας (π.χ. στρώση εκτοξευμένου σκυροδέματος)



# Κόστος – Επιλογή Κατηγορίας Υποστήριξης

Κόστος [\$1000/m]	Βήμα προχώρησης [m/day]	Αγκύρα [#]	Εκτοξευμένο σκυρόδεμα (με πλέγμα)	Μεταλλικά πλαίσια	Προ- Υποστήριξη
<b>1.6 - 2.5</b>	5-15	4-7			
<b>2.5 - 3.5</b>	5-15	9-11/1.5m	Απλό		
<b>3.5 - 5.0</b>	3-5	15-19/1.5m	Απλό		
<b>6.0 - 10</b>	1-3	>20/1.0m	Ινοπλισμένο	Δικτυωτό	
<b>8.0 - 12</b>	1-3	>20/1.0m	Ινοπλισμένο	HEB	Βλήτρα/Δοκοί Ομπρέλας προπορείας
<b>10 - 35</b>	<1	>20/1.0m	Ινοπλισμένο	Με ανάστροφο τόξο	Βλήτρα/Δοκοί/Ενσωμάτωση Ομπρέλας προπορείας
<b>15 - 35</b>	<0.5	>20/1.0m Yielding	Ινοπλισμένο	Ενδίδοντα	Βλήτρα/Δοκοί/Ενσωμάτωση Ομπρέλας προπορείας

Βασισμένο σε μέση διάμετρο εκσκαφής 10m (Τροποποιημένο από: Yuen, 2013)



# Σχεδιασμός Υποστήριξης Σηράγγων

Ο Σχεδιασμός Υποστήριξης Σηράγγων  
είναι περίπλοκος λόγω:

- 3D γεωμετρία μετώπου,
- Συμμετοχής μεγάλου αριθμού παραμέτρων;
- Επίδρασης του μετώπου – ευστάθεια;
- 3D ανάλυσης λαμβάνοντας υπόψη την θέση του μετώπου;
- Αλληλεπικάλυψης / Επίδρασης λοιπών στοιχείων υποστήριξης;
- Διεπιφάνειας Εδάφους / Υποστήριξης;
- Παραμέτρων των υλικών.

The design of tunnel support is complex due to:

- 3D geometry of tunnel face;
- high number of parameters involved;
- Influence of tunnel face – stability;
- 3D analysis to take into account face position;
- Overlapping / Influence of other support elements;
- Ground / Support interface;
- Material Properties.



# Κατανόηση της Γεω-Μηχανικής

“Η ραγδαία αύξηση της χρήσης [των συστημάτων υποστήριξης] δεν συνοδεύτηκε από περαιτέρω κατανόηση των άλληλεπιδράσεων μεταξύ της υποστήριξης και της περιβάλλοντας βραχομάζας”

“The rapid increase in use [of support systems] has not been followed by an increased understanding of the interactions between the support system and the surrounding rock mass”

“Στον σχεδιασμό σηράγγων, αλλά και στο πεδίο, οι παράμετροι του συστήματος [υποστήριξης]... προσδιορίζονται με βάση εμπειρικές μεθόδους”

“Currently during tunnel design, as well as on site, parameters for the [support] system... are fixed by experience or an empirical approach”

Volkmann (2003)

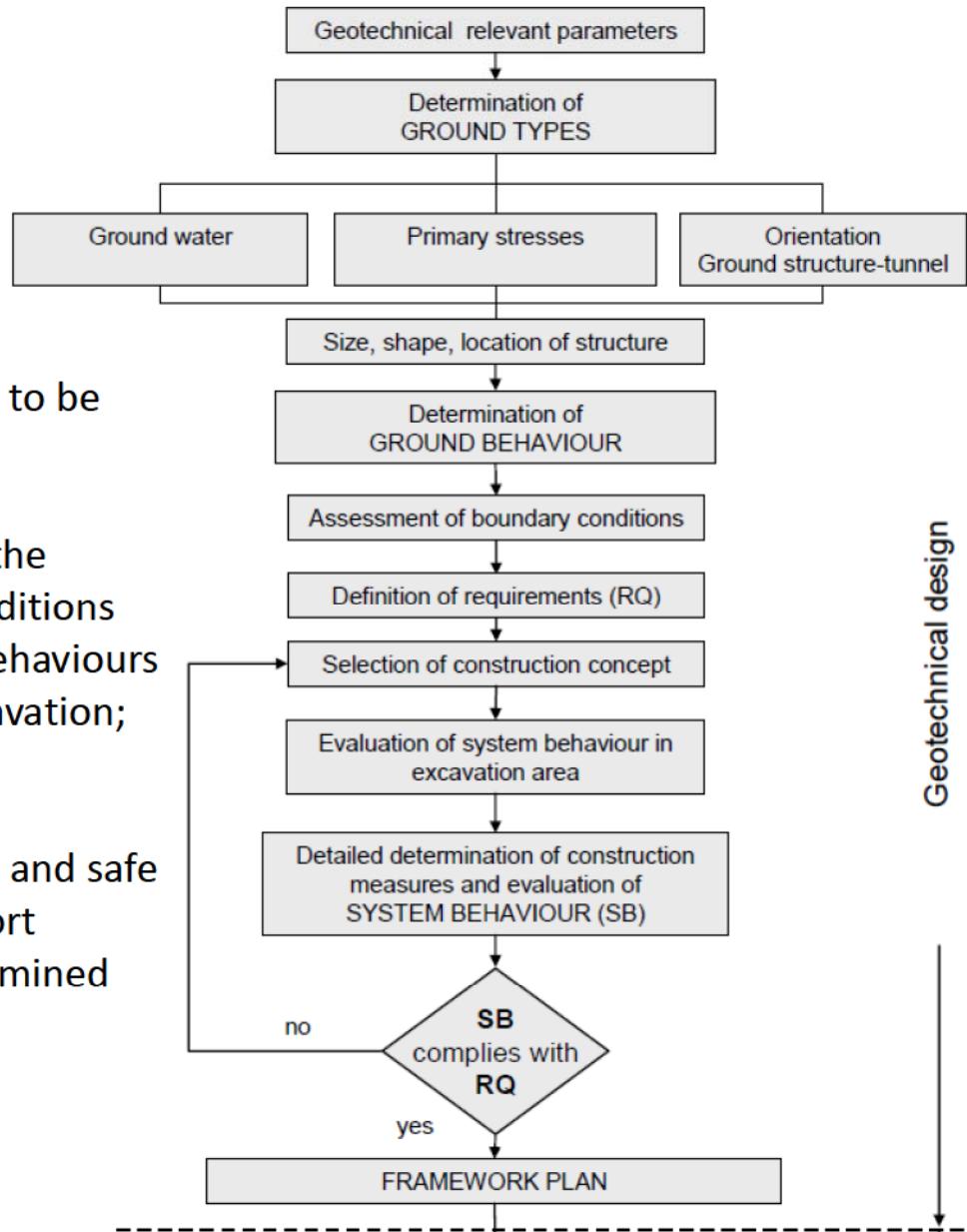
# Μηχανικός Σχεδιασμός

Κύρια θέματα που πρέπει να εξεταστούν:

- Ρεαλιστική εκτίμηση των αναμενόμενων εδαφικών συνθηκών και της πιθανής συμπεριφοράς λόγω της εκσκαφής, και,
- Σχεδιασμός οικονομικής και ασφαλούς εκσκαφής και μεθόδων υποστήριξης για τις αναμενόμενες εδαφικές συμπεριφορές.

Two major aspects need to be addressed:

- Realistic estimate of the expected ground conditions and their potential behaviours as a result of the excavation; and,
- Design and economic and safe excavation and support method for the determined ground behaviours.

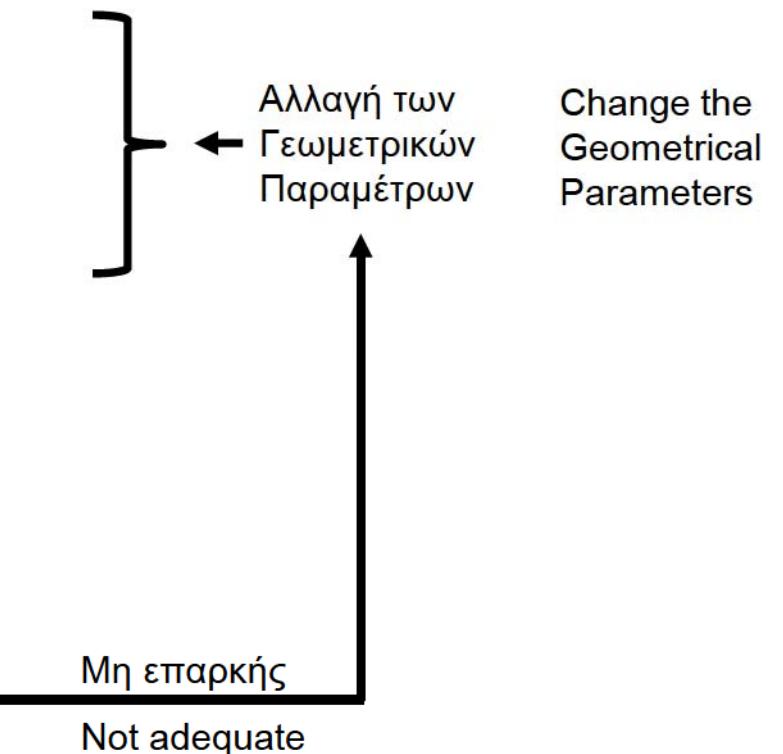


Austrian Society for Geomechanics (2010)

# Αναλυτικές Προσεγγίσεις Σχεδιασμού

## Σχεδιασμός

1. Επιλογή αρχικής διάταξης της υποστήριξης
2. Επιλογή αρχική διαμέτρου και πάχους υποστήριξης
3. Επιλογή αρχικής διάταξης μεταλλικών πλαισίων
4. Επιλογή στοιχείων υποστήριξης
5. Εκτίμηση του μήκους υποστήριξης
6. Επιλογή του Δομικού Σχήματος
7. Υπολογισμός των Περιπτώσεων Κάμψης
8. Υπολογισμός των Τάσεων στην Υποστήριξη
9. Σύγκριση δυσμενών για την ευστάθεια τάσεων και φερούσας ικανότητας των μετάλλων
10. Καθορισμός του Μήκους Υποστήριξης (διαθέσιμα μηχανήματα)
11. Καθορισμός του Μήκους Εκσκαφής
12. Σχεδιασμός της εγκατάστασης υποστήριξης και μεταλλικών πλαισίων



Τροποποιημένο από: Peila, 2013

# Εξοπλισμός και Παρακολούθηση

Σκοπός:

- Απόκτηση πληροφοριών για την απόκριση του εδάφους στη σηραγγοποιία
- Παροχή ελέγχου της κατασκευής
- Επιβεβαίωση των παραμέτρων σχεδιασμού και των προσομοιώσεων
- Μετρήσεις της απόδοσης της επένδυσης κατά τη διάρκεια και μετά την κατασκευή
- Παρακολούθηση της επίδρασης στα γειτονικά περιβάλλοντα
- **Βελτιστοποίηση του σχεδιασμού και έκτελεση ασφαλών έργων σηραγγοποιίας**

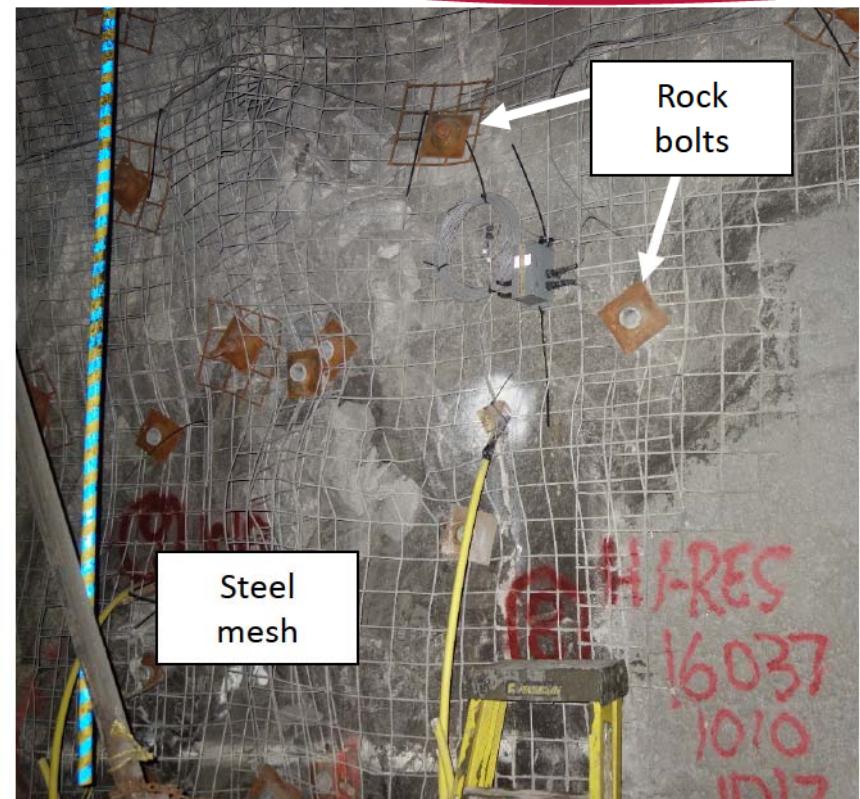
Objective:

- Obtain information on ground response to tunnelling
- Provide construction control
- Verify design parameters and models
- Measure performance of the lining during and after construction
- Monitor impact on the surrounding environments
- **Optimization of the design and execution of safe tunnelling works**



# Ground Support In Underground Projects

*Procedures and materials used to improve the stability and to maintain the load bearing capacity of ground near the excavation boundaries*



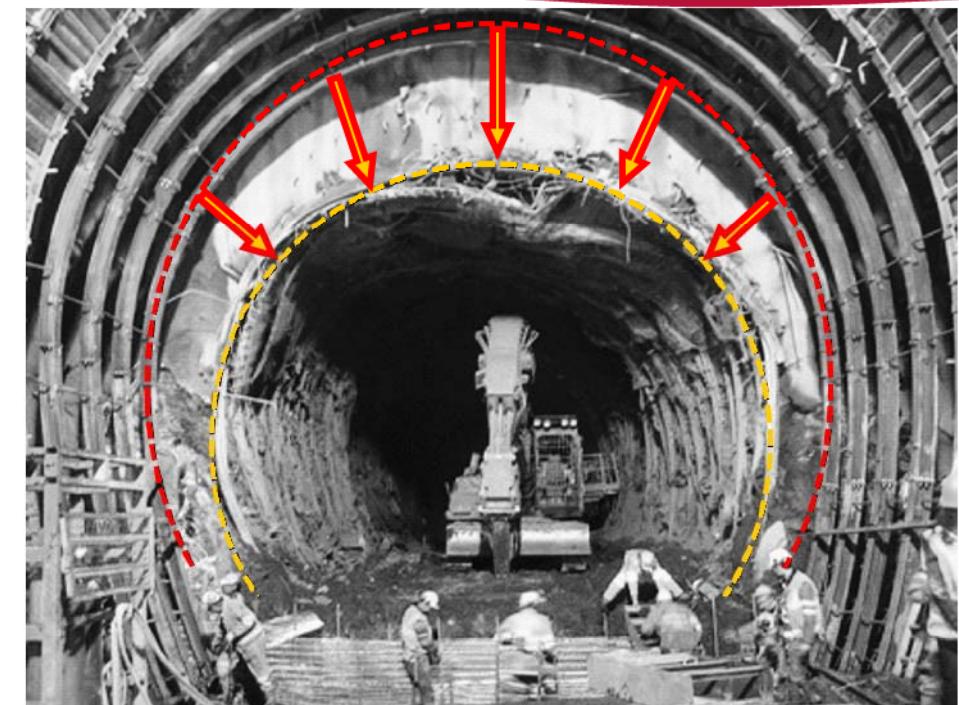


Queen's  
UNIVERSITY

## Αστοχίες και Μετατοπίσεις λόγω Εκσκαφής



Significant roof failure in a metalliferous mine  
(Courtesy of Li 2017)

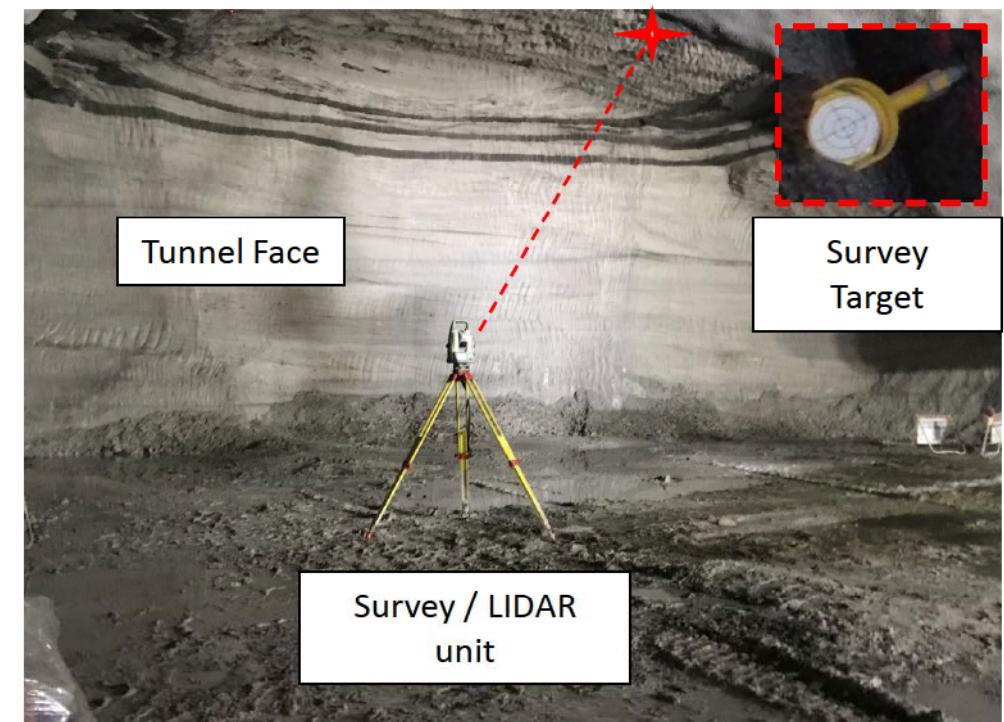
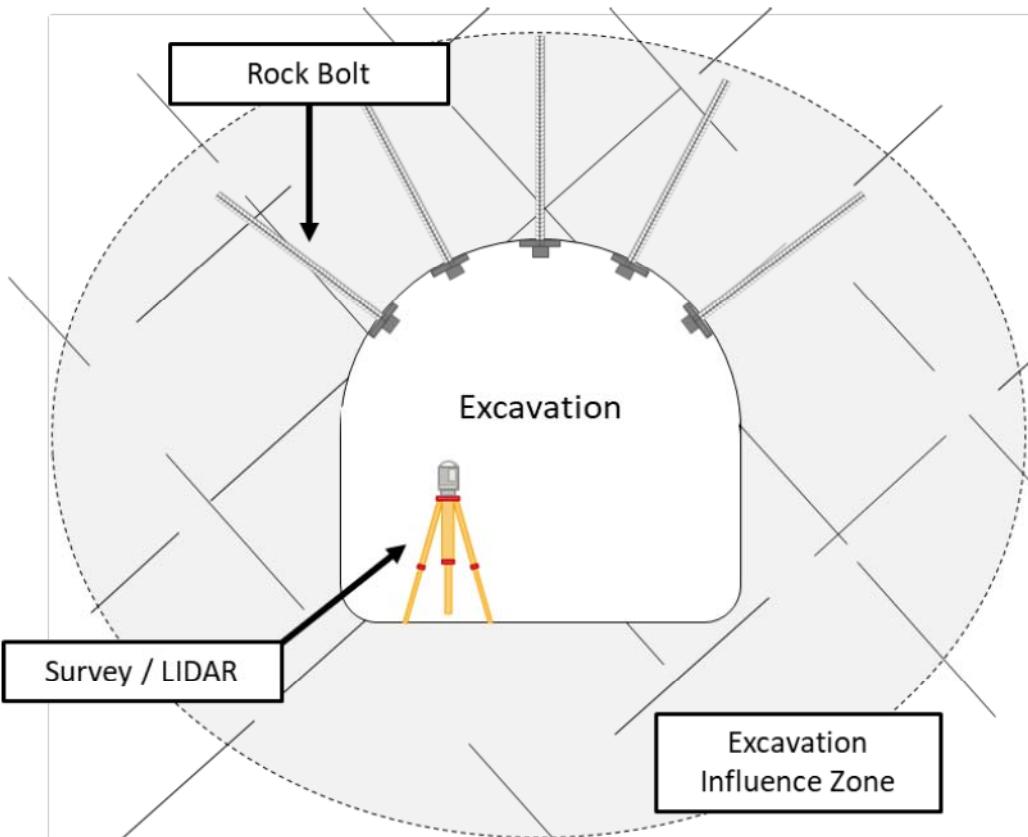


Squeezing deformations necessitating reprofiling  
(Courtesy of Barla et al. 2012)



Queen's  
UNIVERSITY

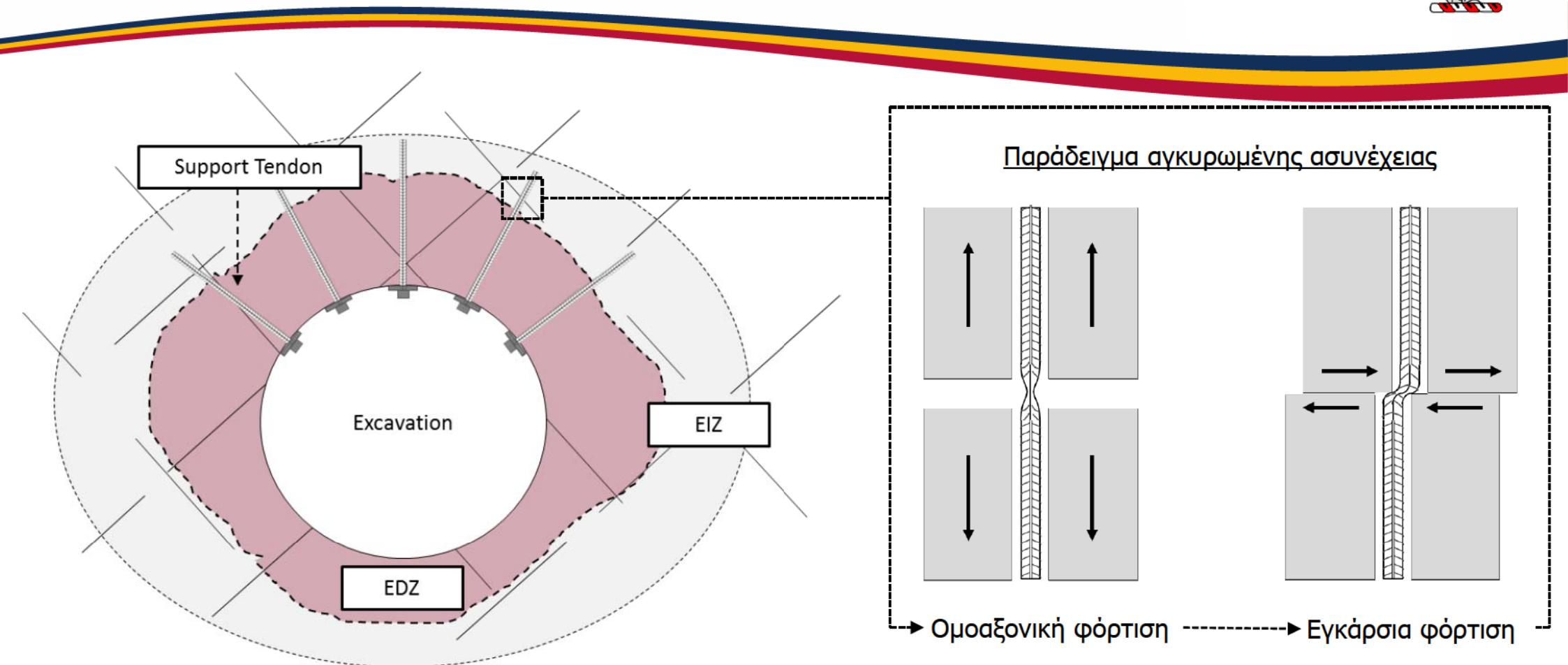
# Monitoring In Underground Projects



Forbes, 2018

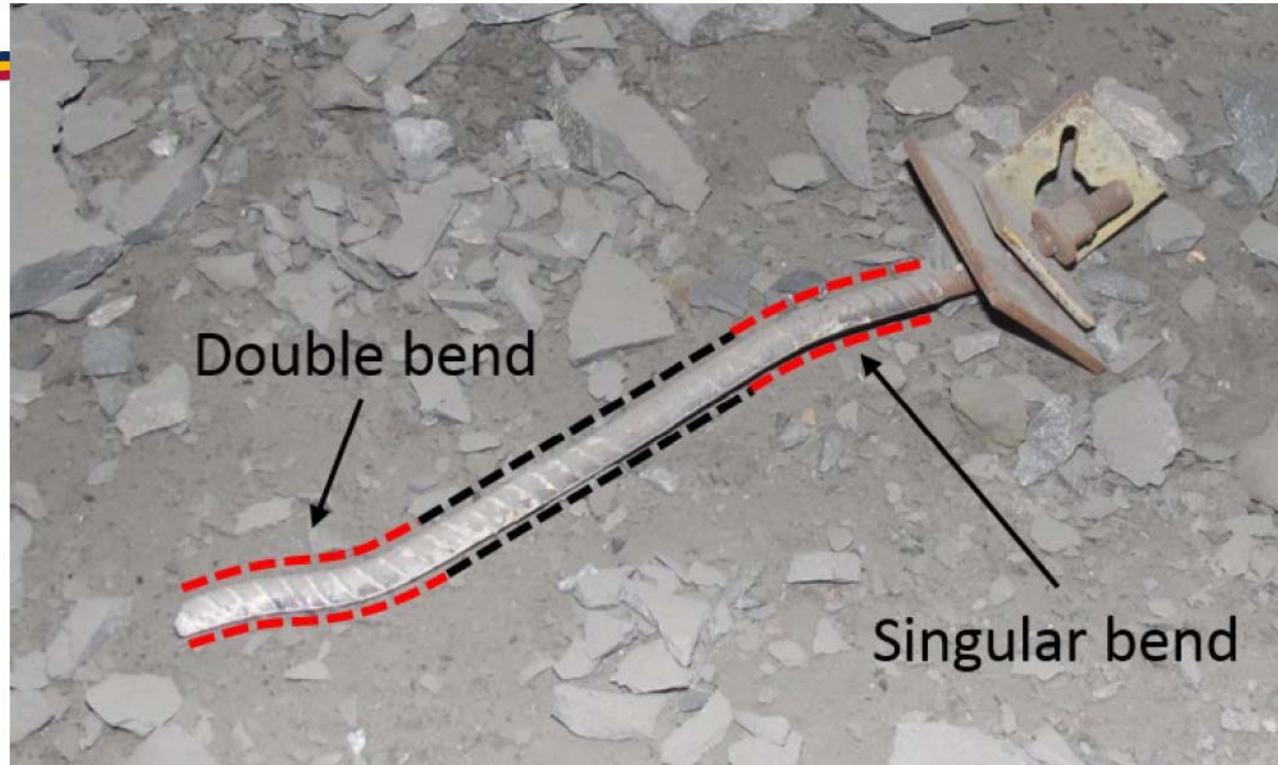


# Αστοχίες και Μετατοπίσεις λόγω Εκσκαφής





# Συμπεριφορά Αγκυρίου στο Πεδίο

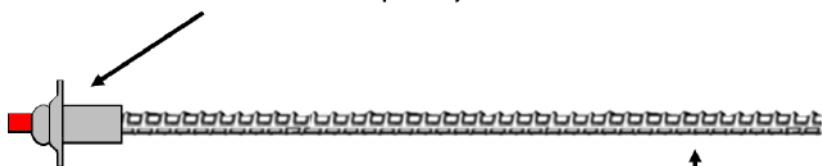


Τμήμα αστοχούντος αγκυρίου. Μόνιμη πλευρική μετατόπιση υπό μορφή μονής κάμψης στην κεφαλή και διπλής κάμψης στο σημείο της αστοχίας (Από το προσωπικό αρχείο Brad Simser, Glencore).



# Τενχικές Ανίχνευσης Μετατόπισης

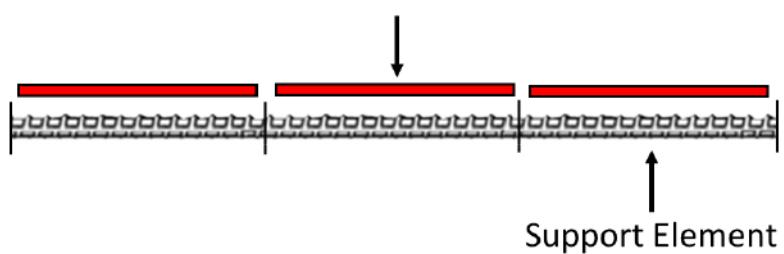
Discrete Measurement at Periphery



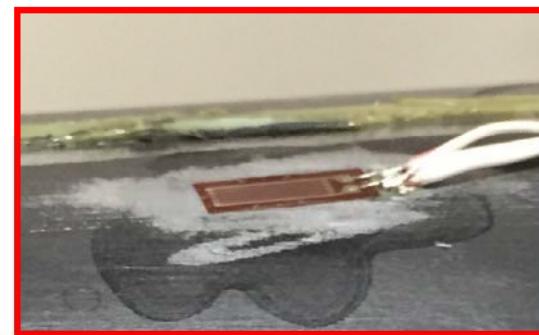
Discrete Measurement Points



Discrete Measurement Zones



- Συμβατικά προσεγγίζεται με χρήση διακριτών οργάνων
- Παραδείγματα: Αντιολισθητικοί μετρητές καταπόνησης (strain gauges), κυψέλες φορτίου, LVDTs
- Περιορισμένη χωρική ανάλυση κατά μήκος του στοιχείου
- Πιθανή παρερμηνεία, υποεκτίμηση, και πιθανώς απώλεια της απόκρισης της υποστήριξης

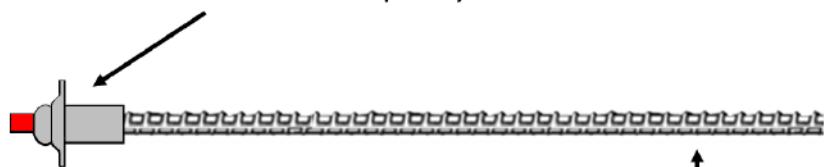


Μετρητής Καταπόνησης  
(strain gauge) επί<sup>1</sup>  
επιφανείας



# Τενχικές Ανίχνευσης Μετατόπισης

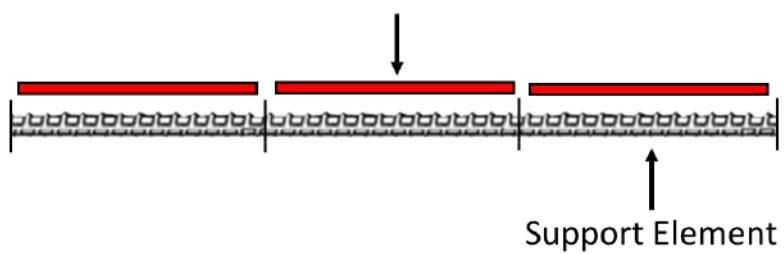
Discrete Measurement at Periphery



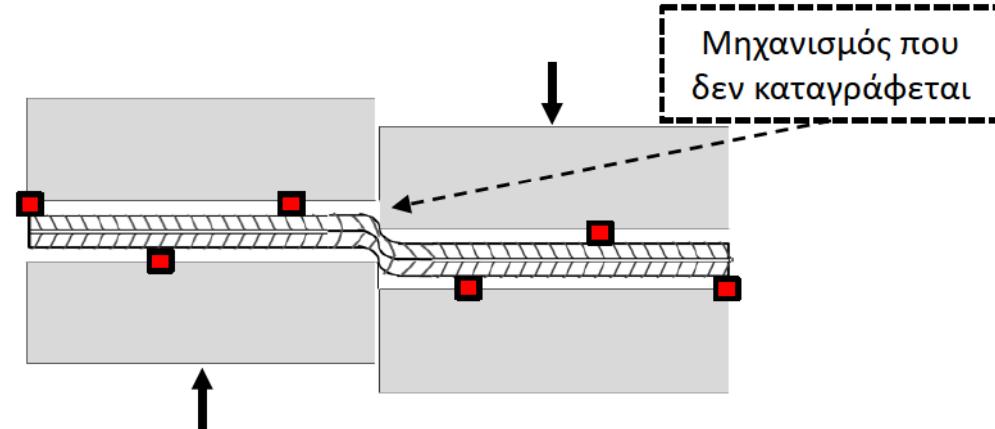
Discrete Measurement Points



Discrete Measurement Zones



- Συμβατικά προσεγγίζεται με χρήση διακριτών οργάνων
- Παραδείγματα: Αντιολισθητικοί μετρητές καταπόνησης (strain gauges), κυψέλες φορτίου, LVDTs
- Περιορισμένη χωρική ανάλυση κατά μήκος του στοιχείου
- Πιθανή παρερμηνεία, υποεκτίμηση, και πιθανώς απώλεια της απόκρισης της υποστήριξης

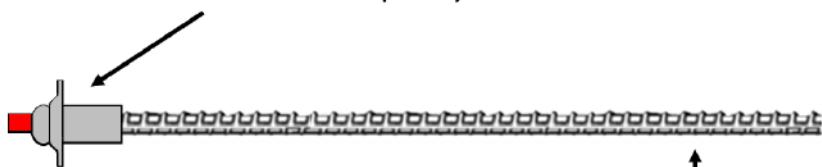




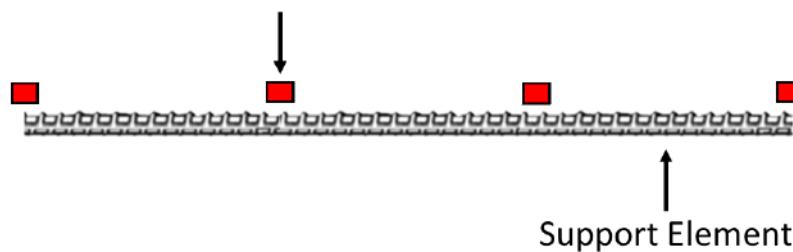
# Τενχικές Ανίχνευσης Μετατόπισης



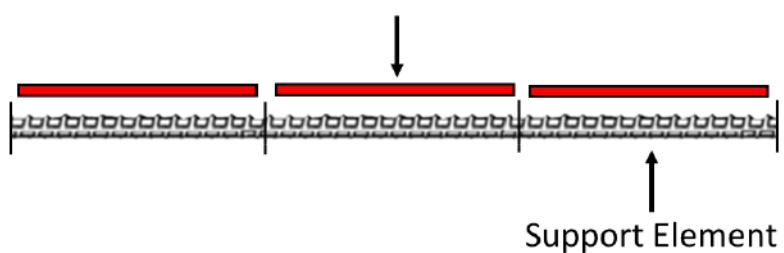
Discrete Measurement at Periphery



Discrete Measurement Points

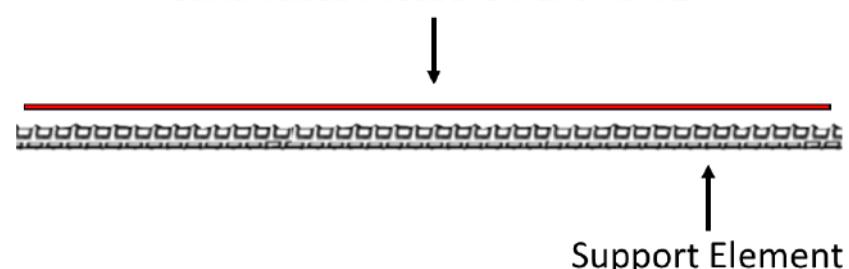


Discrete Measurement Zones



- Συμβατικά προσεγγίζεται με χρήση διακριτών οργάνων
- Παραδείγματα: Αντιολισθητικοί μετρητές καταπόνησης (strain gauges), κυψέλες φορτίου, LVDTs
- Περιορισμένη χωρική ανάλυση κατά μήκος του στοιχείου
- Πιθανή παρερμηνεία, υποεκτίμηση, και πιθανώς απώλεια της απόκρισης της υποστήριξης

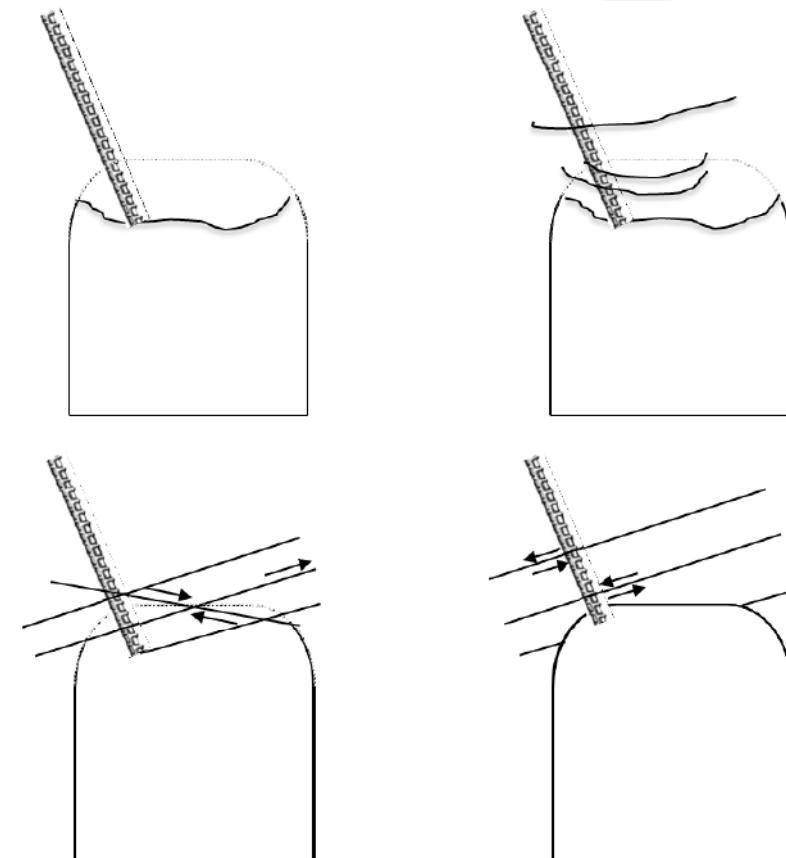
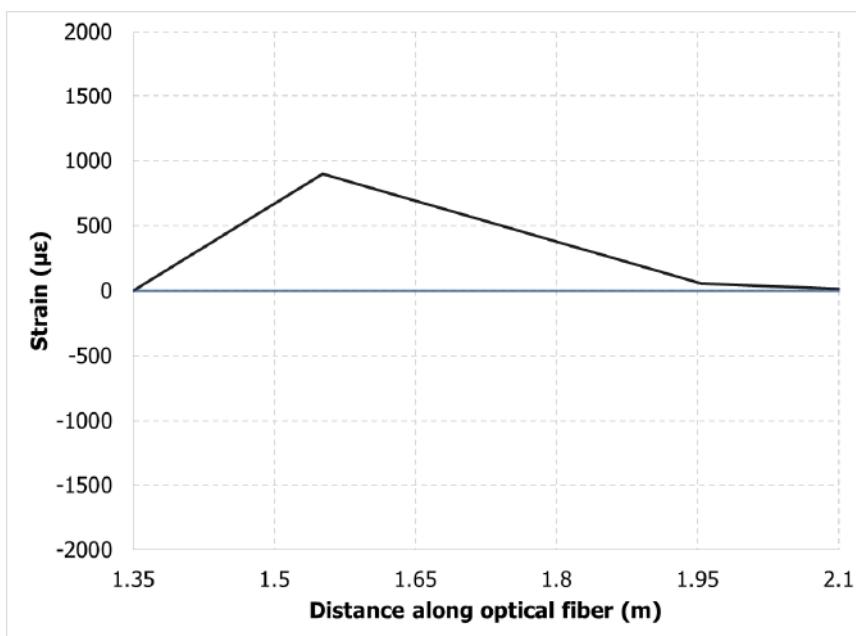
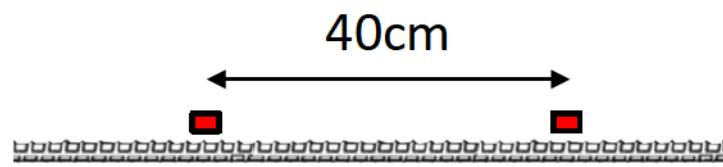
Continuous Measurement Points





Queen's  
UNIVERSITY

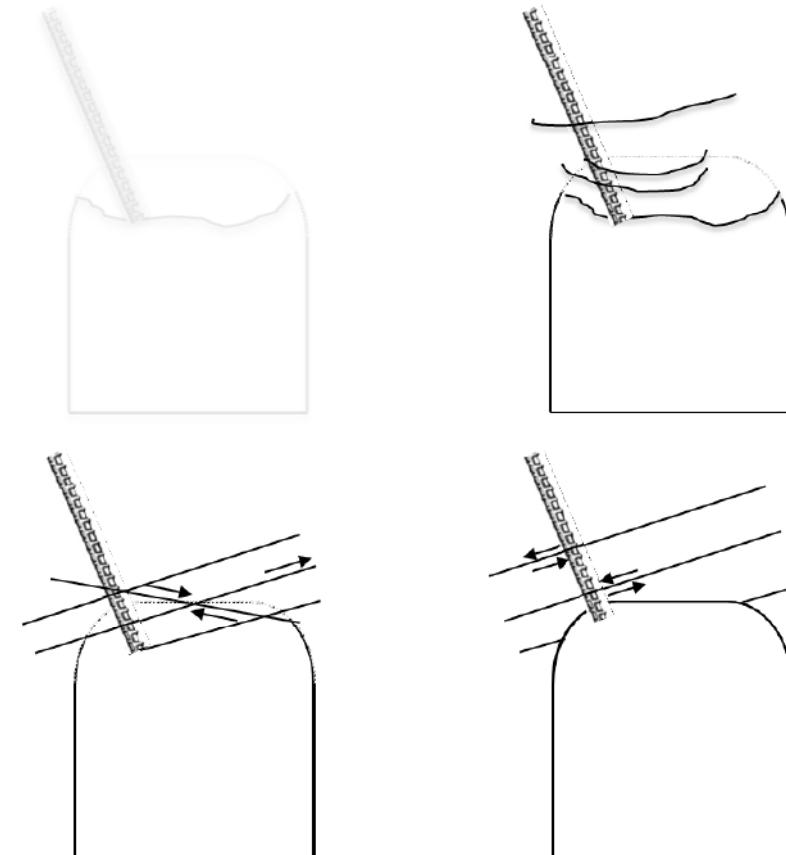
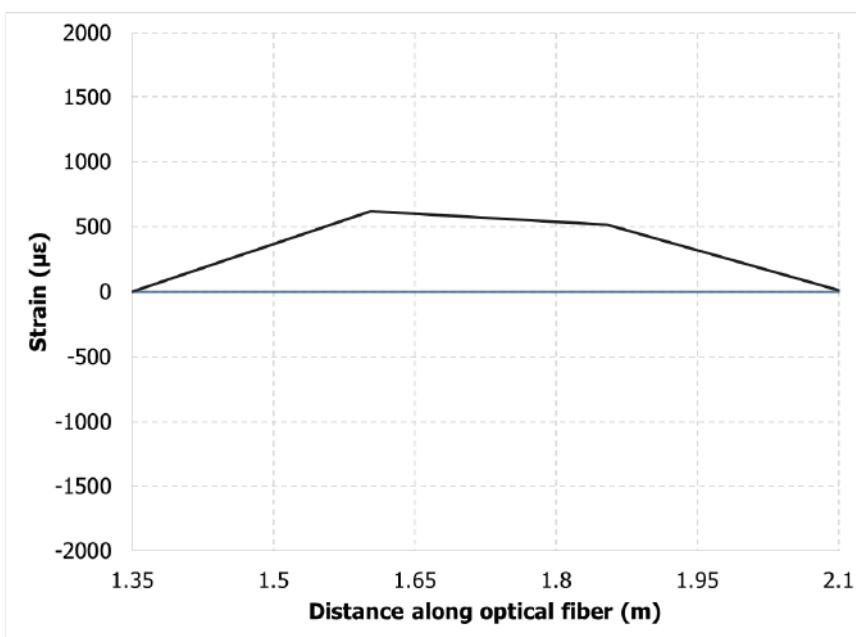
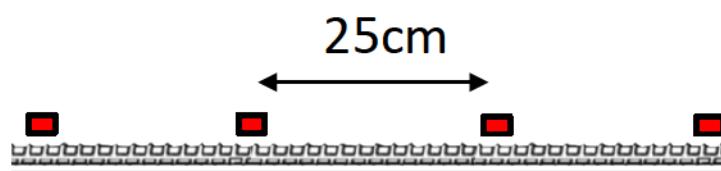
# Ανάγκη για Διανεμημένες Μετρήσεις?





Queen's  
UNIVERSITY

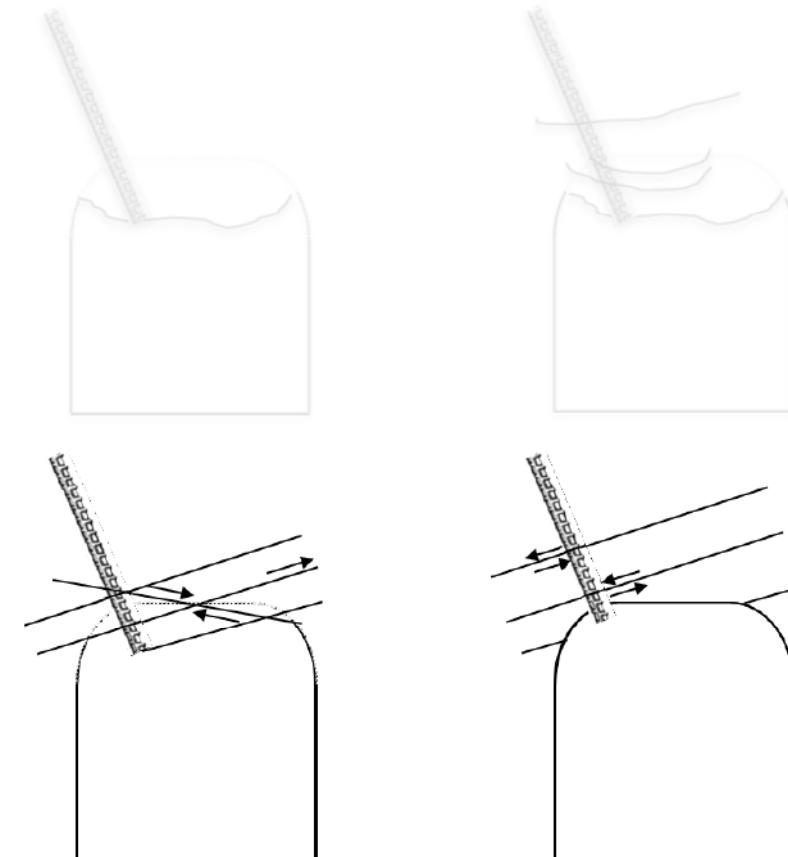
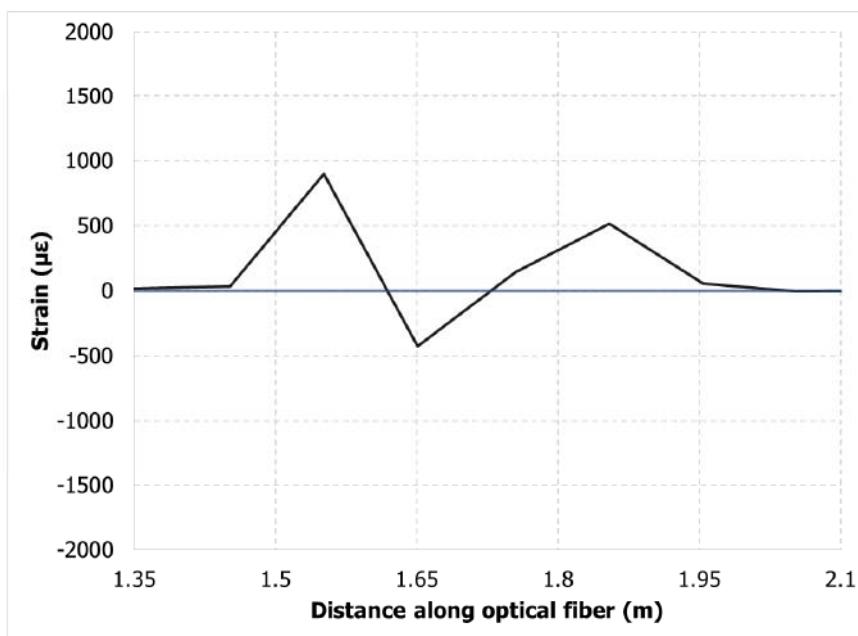
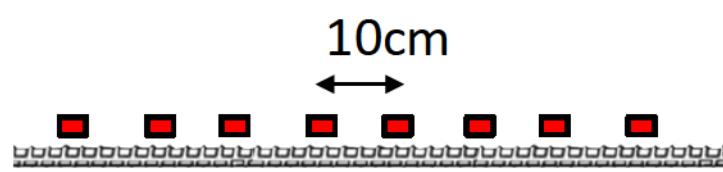
# Ανάγκη για Διανεμημένες Μετρήσεις?





Queen's  
UNIVERSITY

# Ανάγκη για Διανεμημένες Μετρήσεις?



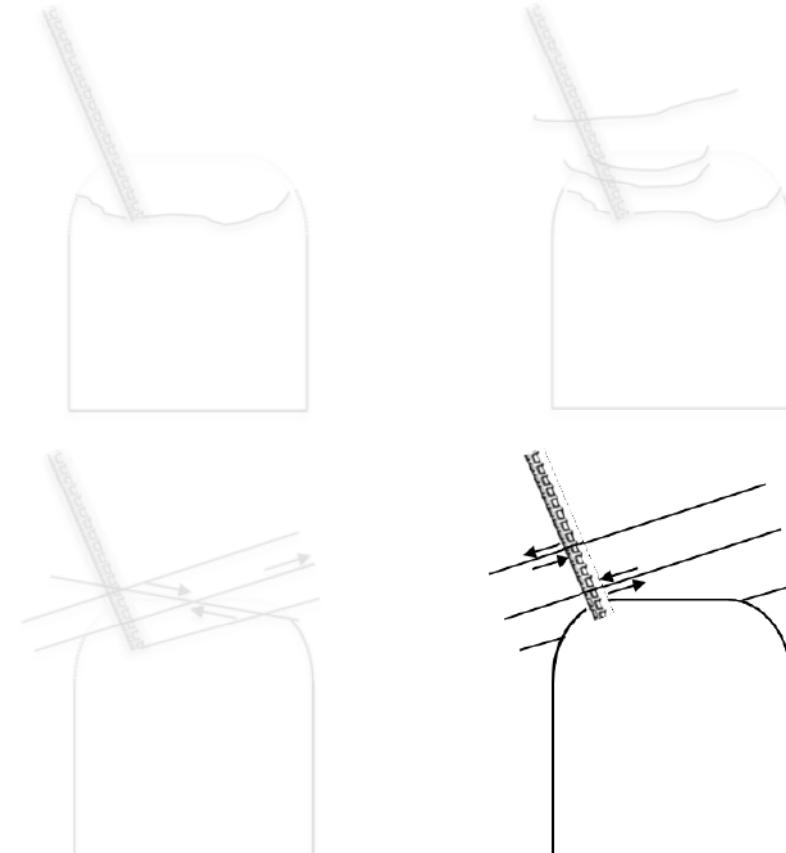
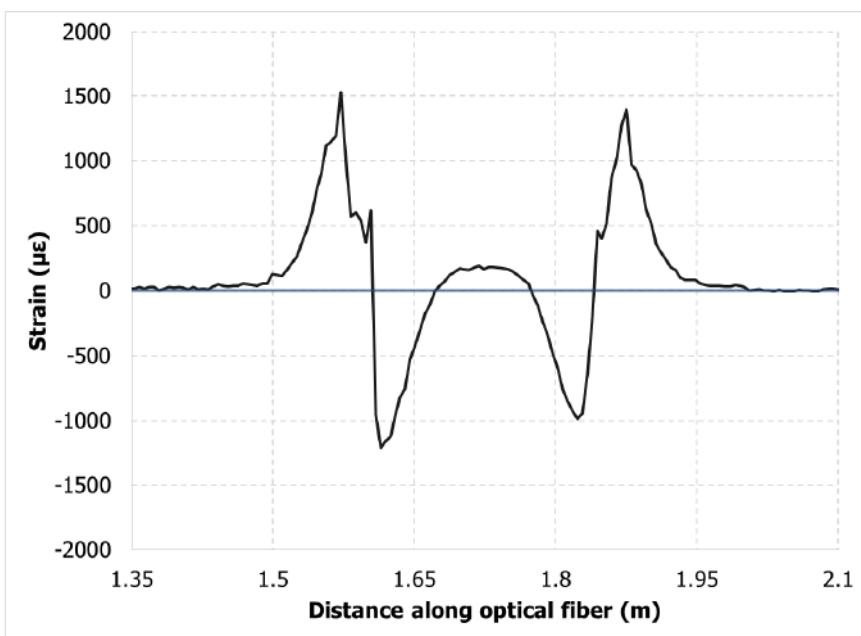


Queen's  
UNIVERSITY

# Ανάγκη για Διανεμημένες Μετρήσεις?



0.65mm



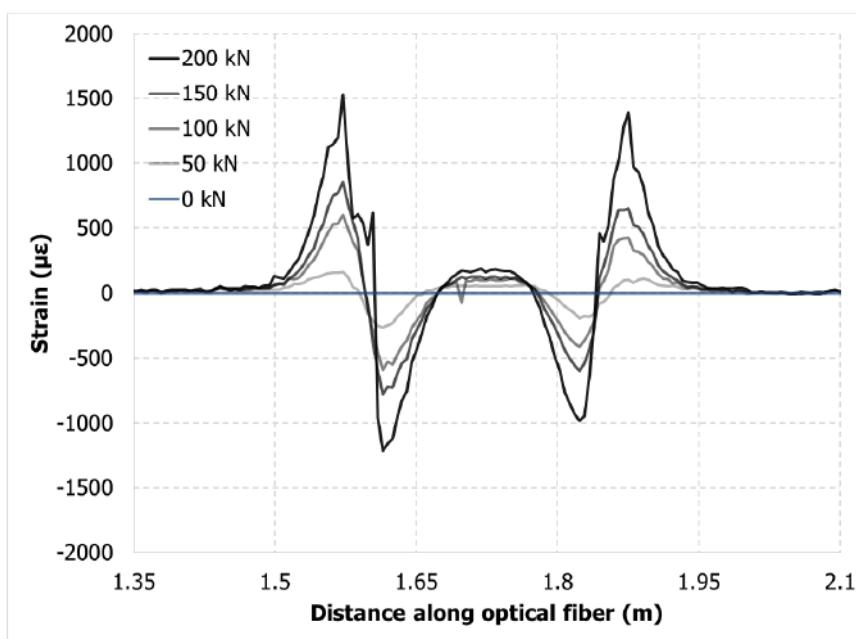


Queen's  
UNIVERSITY

# Ανάγκη για Διανεμημένες Μετρήσεις?



0.65mm

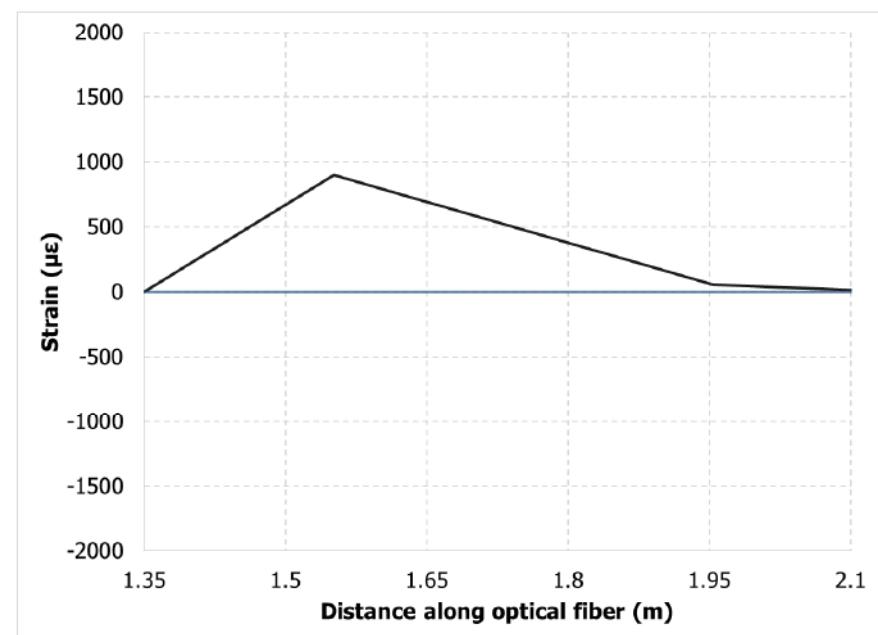
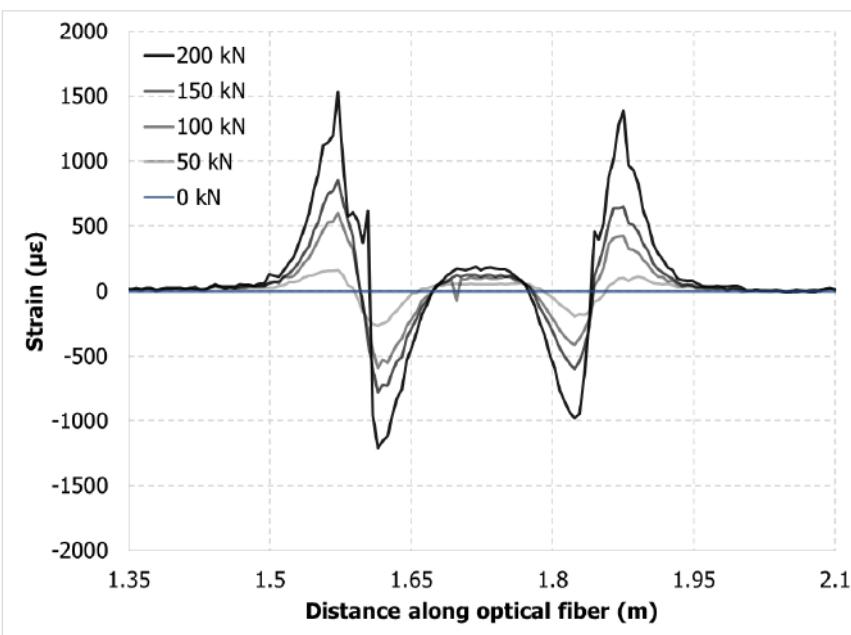
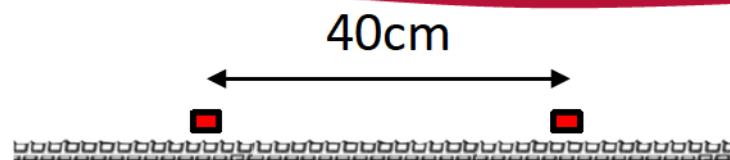


Διπλή δοκιμή διάτμησης





# Ανάγκη για Διανεμημένες Μετρήσεις?





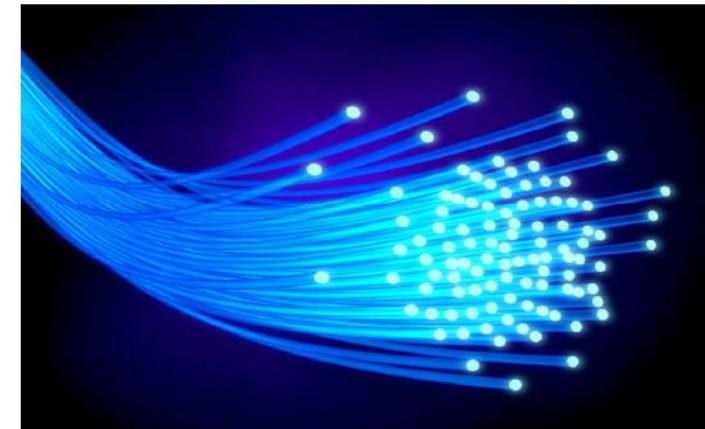
Queen's

# Επισκόπηση Οπτικών Ινών



## Άμεσα Οφέλη της χρήσης Οπτικών Ινών

- Πολύ μικροί αισθητήρες (εύκολη ενσωμάτωση/τοποθέτηση στο δείγμα)
- Ιδιαίτερα ασφαλείς και απρόσβλητες
- Μετασχηματιστής από γυαλί (σταθερότητα στον χρόνο)
- Πολύ χαμηλό κόστος (μεγάλα μήκη)
- Ένας αισθητήρας μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μέτρηση πλήθους σημείων σε μια διάταξη
  - Sensors are very small (easy to embed/surface mount to specimen)
  - Intrinsically safe and immune to EMI
  - Transducer/lead is composed of glass (stable over time)
  - Very low loss (long lead lengths)
  - One sensor can be used for an array of measurement points



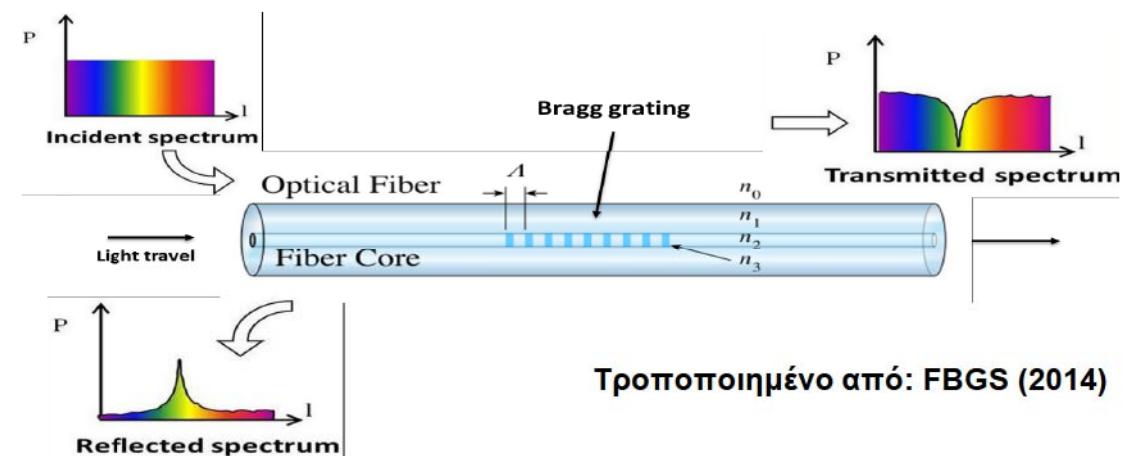


## Fiber Bragg Gratings

- Δομή Bragg Grating: συγκεκριμένος δείκτης εγγεγραμμένος στον πυρήνα της ίνας από έκθεση σε υπεριώδη ακτινοβολία υψηλής έντασης
- Το Bragg grating θα αντανακλά μια συνιστώσα του φάσματος του προσπίπτοντος μήκους κύματος
- Η καταπόνηση θα μεταβάλει τον τοπικό δείκτη ανάκλασης και περιοδικά του Bragg grating
- Το ανακλώμενο μήκος κύματος θα μεταβληθεί γραμμικά με την καταπόνηση

## Fiber Bragg Gratings

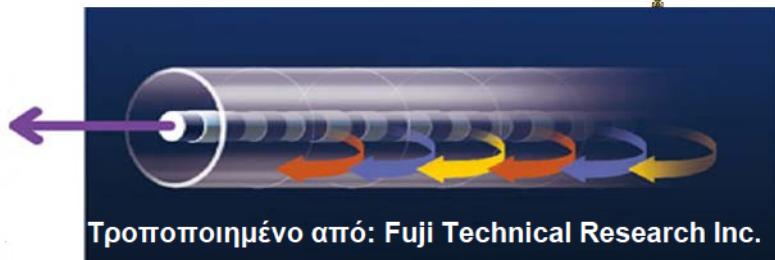
- Bragg grating structure: fixed index modulation inscribed into the fiber core from high-intensity UV exposure
- Bragg grating will reflect a component of the incident wavelength spectrum
- Strain will change the local refractive index and periodicity of the Bragg grating
- Reflected wavelength will shift linearly with strain



Τροποποιημένο από: FBGS (2014)



# Οπτική Ανίχνευση Καταπόνησης



## Διανεμημένη Οπτική Ανίχνευση(DOS)

- Παρακολούθηση του επιστρεφόμενου φωτός
- Χρήση τυπικής οπτικής ίνας χαμηλού κόστους
- Ανακλαστικότητα του Πεδίου Οπτικής Συνχότητας Rayleigh (ROFDR):
  - μέτρηση της διασποράς Rayleigh
  - Η διασπορά προκύπτει από τυχαίες διακυμάνσεις του δείκτη διάθλασης
  - Η καταπόνηση μεταβάλλει τον τοπικό δείκτη διάθλασης κατά μήκος της ίνας

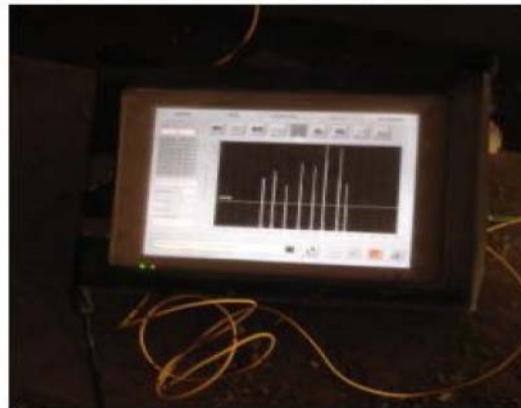
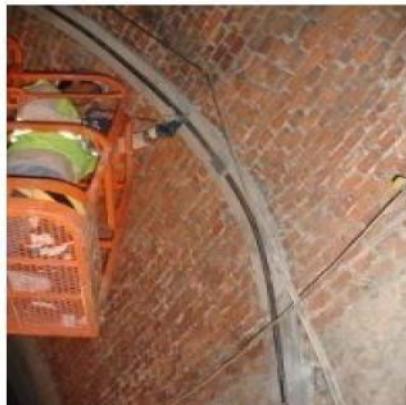
## Distributed Optical Sensing (DOS)

- Monitors back scattered components of light
- Uses a standard low-cost optical fiber
- Rayleigh Optical Frequency Domain Reflectometry (ROFDR):
  - measures Rayleigh scatter
  - scatter arises from random fluctuations in the refractive index
  - strain alters the local refractive index along the fiber

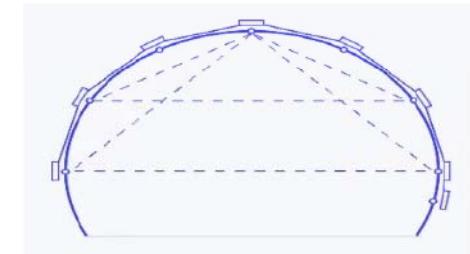
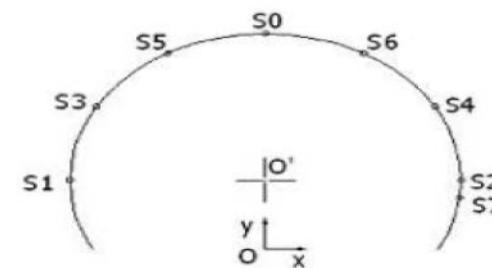


# Παράδειγμα Εφαρμογής FBG: Σήραγγα Rossio

Λισαβόνα, Πορτογαλία



- Περισσότεροι από 850 FBG ασθητήρες χρησιμοποιήθηκαν κατά μήκος των 2.6 km της σήραγγας
- Αυτόματη ανίχνευση των συγκλίσεων
- 8 αισθητήρες εγκατεστημένοι σε μεταλλική ράβδο η οποία τοποθετήθηκε περιμετρικά της σήραγγας (19m)
- Axial strain at location used to determined



Barbosa et al (2009)