



United Nations
Educational, Scientific and
Cultural Organization



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

- UNESCO Chair on the Prevention and Sustainable Management of Geo-Hydrological Hazards,
- University of Florence, Italy

Metodi Innovativi di Indagine e Monitoraggio come Strumenti per l'Analisi di Problemi Complessi di Ingegneria Geotecnica

Giovanni Barla



United Nations
Educational, Scientific and
Cultural Organization



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

• UNESCO Chair on the Prevention and
• Sustainable Management of Geo-Hydrological Hazards,
• University of Florence, Italy

→ **1. Introduzione**

→ **2. Metodi di indagine - Esempi**

→ **2. Sistemi di monitoraggio - Esempi**

→ **4. Caso di Studio 1 - Parete rocciosa**

→ **5. Caso di Studio 2 - Galleria urbana**

→ **6. Riepilogo e Conclusione**

Introduzione

- In *Ingegneria Geotecnica*, è importante definire il **Modello Geologico** ed il **Modello Geotecnico**, cioè le caratteristiche del mezzo (**terreno, roccia, ammasso roccioso**), avendo bene in mente il problema progettuale da affrontare. Questo comporta, tra l'altro, l'esecuzione di **indagini in situ ed in laboratorio**.
- Per un certo tempo (**qualche volta ancora oggi**), queste indagini sono state programmate e svolte in modo poco correlato alla fase progettuale. In breve, pianificazione ed esecuzione delle indagini avvenivano senza avere bene in mente le esigenze progettuali. In molti casi si rimandavano gli approfondimenti alla costruzione.

Introduzione

- Questo modo di procedere non è corretto e tanto meno accettabile. La costruzione di un'opera o l'esecuzione di un intervento progettuale dovrebbero avere luogo soltanto in presenza di un progetto che descrive il «lavoro» nel necessario dettaglio. Ciò significa che *«ogni componente dell'opera da eseguire è identificata e nota in forma, tipologia, qualità, dimensioni e costo»*

«The geotechnical method is not serial, but instead involves feedback between data acquisition, material and model idealisation, technical evaluation, judgement and risk-management»

Introduzione

- Il processo logico da seguire, a partire dalla idealizzazione dell'opera, della tipologia di intervento...interagente con il terreno e/o l'ammasso roccioso...porta allo sviluppo del progetto.
- Parte importante di questo processo sono la scelta e l'uso di **metodi di analisi progettuale**, che oggi si caratterizzano per il ricorso a **metodi di analisi e simulazione numerica**.
- Ecco quindi la rappresentazione, «idealizzazione» del problema, cioè nella maggior parte dei casi, la definizione del “**modello**” da adottare per descrivere «**in modo realistico**» l'opera o l'intervento progettuale.

Introduzione

Nel nostro caso l'attenzione è rivolta ai «**Problemi Complessi di Ingegneria Geotecnica**». Ne consegue, per logica e norma, il ricorso al «**Metodo Osservazionale**».

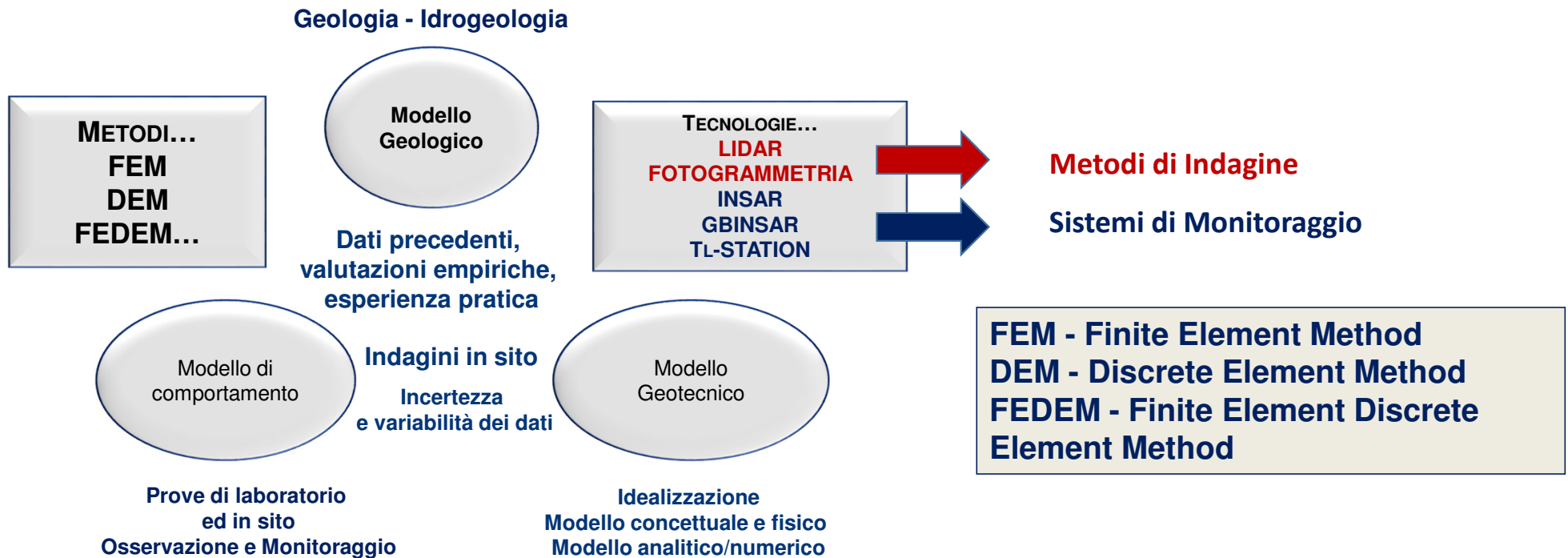
“if the governing phenomena are complex, or are not yet appreciated, the engineer may measure the wrong quantities altogether and may come to dangerously incorrect conclusions”

(Rankine lecture, Ralph B. Peck, 1969)

Questo comporta di definire anticipatamente:

- le grandezze caratteristiche, gli scenari possibili ed i valori di soglia
- il piano di monitoraggio
- i tempi di risposta del sistema di monitoraggio
- il piano di azioni/contingenze da adottare

Introduzione



Metodi di Indagine

Consideriamo due tecnologie (LIDAR e Fotogrammetria), in particolare con riferimento ai rilievi geomeccanici su fronti naturali o artificiali ed in galleria. In generale si tratta di:

1. Ottenere un’**“immagine del fronte”** con Laser Scanner (Light Detection And Ranging, LIDAR) o con fotocamera/telecamera ad alta risoluzione.
2. Produrre una “nuvola di punti”, un’immagine 3D (DTM, Digital Terrain Model) o una fotografia del fronte.
3. Analizzare l’immagine per caratterizzare l’AR (direzione di immersione, angolo di inclinazione, spaziatura, ecc. delle discontinuità/giunti)

Vantaggi:

1. Studio di grandi aree, anche non accessibili, in tempi brevi
2. Possibilità di visualizzare porzioni di AR a differenti scale
3. Minori condizionamenti dovuti a fattori climatici
4. Minori impatti sulle attività di cantiere
5. Produzione di documentazione tecnica di facile riferimento

Queste tecnologie non sono ovviamente sostitutive del rilievo geomeccanico convenzionale. Esse possono però essere di grande aiuto.

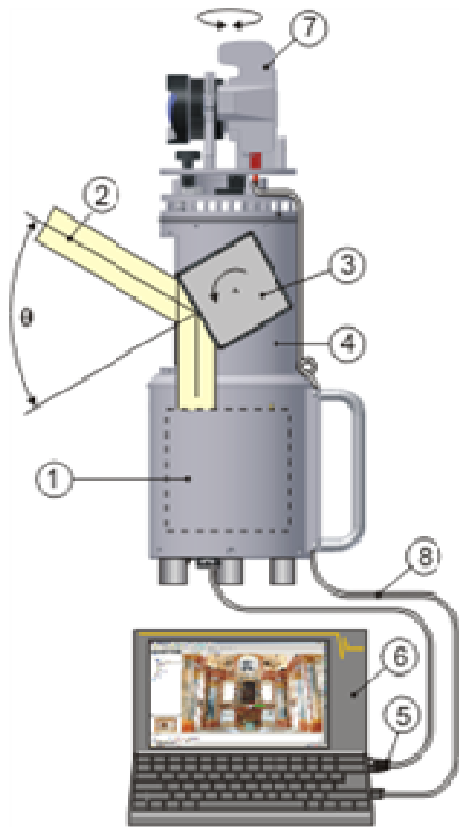
Metodi di Indagine



Laser Scanner

LASER SCANNER di tipo terrestre e di tipo mobile/veicolare, **LASER SCANNER** aerei, ma anche di sistemi basati sull'impiego dei **DRONI**

Metodi di Indagine



3D Laser Imaging Sensor
Modello Riegl LMS-Z420i

La nuvola di punti (***point cloud***) prodotta dalla scansione laser costituisce direttamente il modello tridimensionale dell'oggetto scansionato e può essere gestita con qualsiasi software di elaborazione grafica tridimensionale.

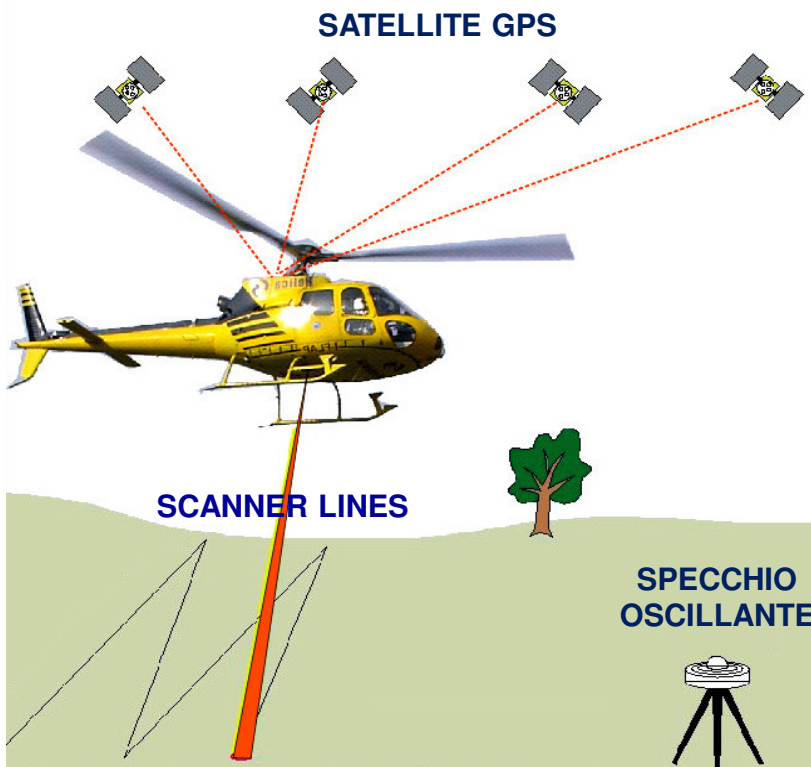
Si noti che la tecnica trova numerose applicazioni in diversi campi quali quello topografico, geologico, architettonico e di conservazione dei beni culturali.

Il ***Laser Scanner da terra (TLS)*** non necessita di sistemi di correzione del posizionamento, visto che le distanze vengono riferite ad una terna cartesiana che rimane fissa e centrata sullo strumento per ogni posizione.

Il corretto posizionamento su una terna di riferimento geografica può essere fatto successivamente tramite la conoscenza delle coordinate geografiche di alcuni punti individuati nella scansione.

Laser Scanner

Metodi di Indagine



Nel **Laser Scanner da Aeromobile (ALS)** (ad esempio da elicottero, drone, ecc.) gli impulsi laser vengono diretti verso uno specchio oscillante che li riflette in senso ortogonale alla direzione di avanzamento dell'aeromobile, dove si trova il sistema.

Il raggio laser, una volta colpito il suolo, viene riflesso e parte dell'energia incidente sul terreno ritorna verso lo specchio che convoglia il segnale luminoso ad un sistema di rilevamento che determina il tempo di ritorno dell'impulso.

Dal tempo impiegato dalla luce a percorrere il tragitto relativo al punto di emissione - riflessione - ricezione si determina la distanza fra lo specchio ed punto di riflessione al suolo.

Laser Scanner

Metodi di Indagine

**Immagini
Fotografiche**

**Rilievo
Laser Scanner**

**Immagini
Termografiche**

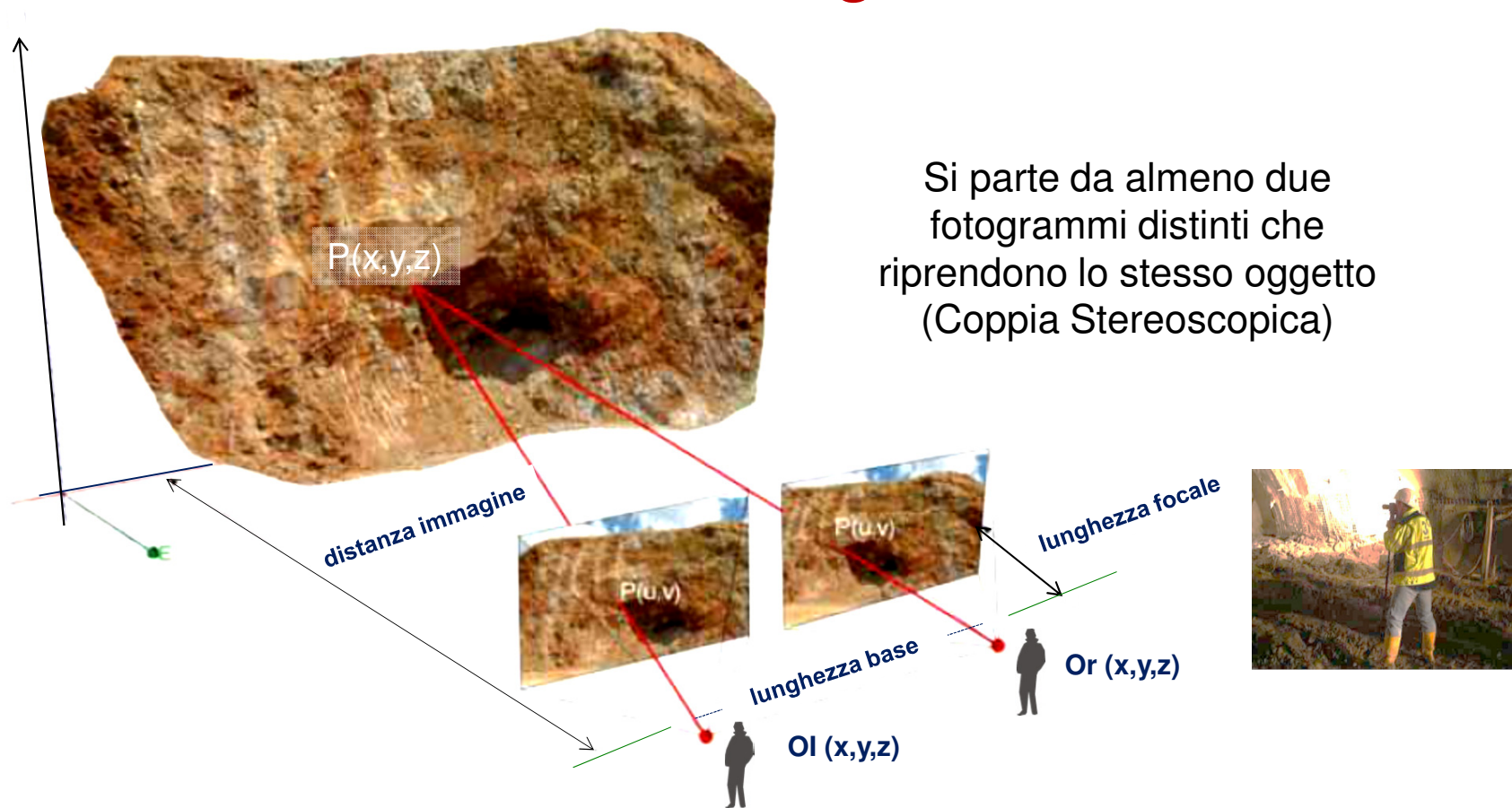


**Generazione DTM
Estrazione Discontinuità
Dimensione Volumi Rocciosi
Analisi Cinematica dei Meccanismi di Dissesto
Analisi di stabilità**

In sintesi, l'obiettivo è condurre rilievi geomeccanici su fronti naturali o artificiali ed in galleria. In generale si tratta di:

1. Ottenere un'immagine del fronte con Laser Scanner.
2. Produrre una "nuvola di punti", un'immagine 3D del fronte (DTM, Digital Terrain Model), ricoperta da una fotografia.
3. Analizzare l'immagine per caratterizzare l'AR... (direzione di immersione, angolo di inclinazione, spaziatura, ecc. delle discontinuità e dei giunti).

Metodi di Indagine

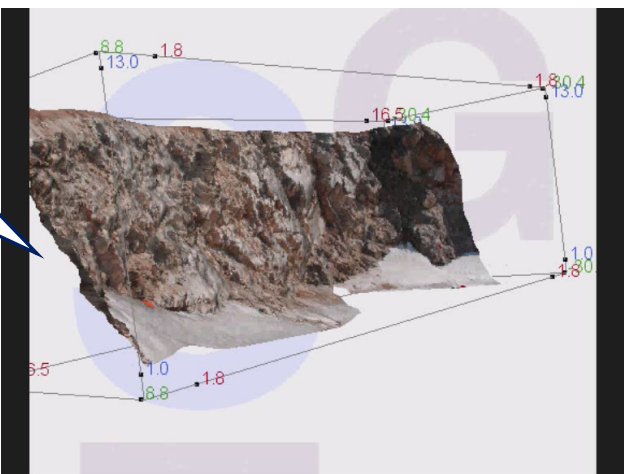


Fotogrammetria

Metodi di Indagine



**Immagine 3D
(unione di più
foto)**



Fotogrammetria

Metodi di Indagine

**Immagini
Fotografiche**
*(almeno due
fotogrammi)*



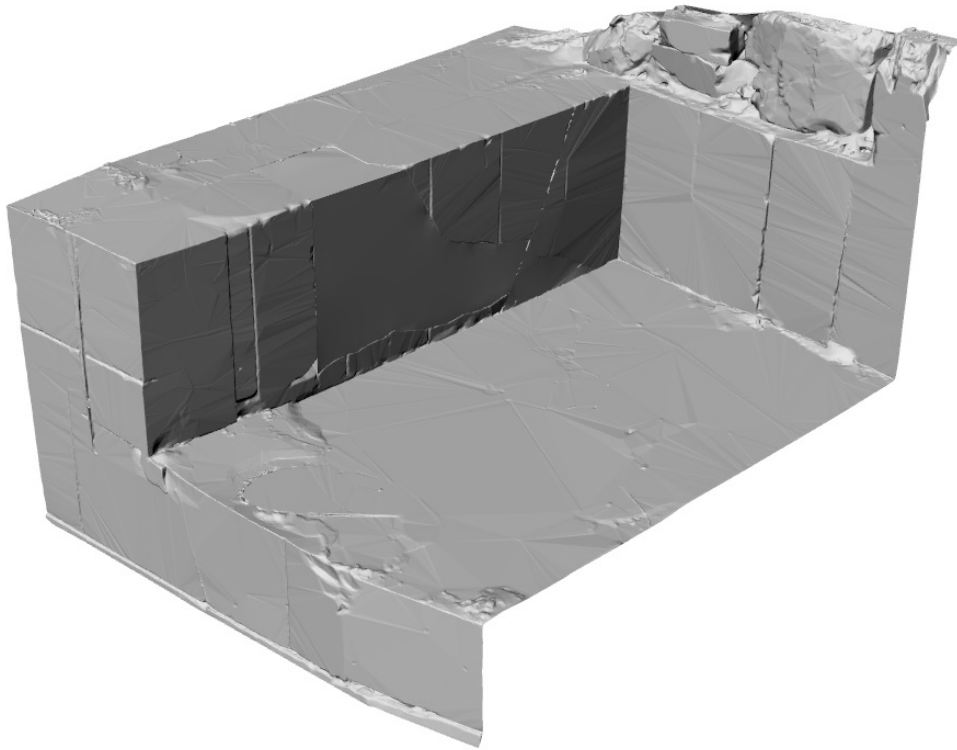
**Generazione Immagine
Estrazione Discontinuità
Dimensione Volumi Rocciosi
Analisi Cinematica dei Meccanismi di Dissesto
Analisi di stabilità**

La tecnologia (Fotogrammetria) è utilizzabile per rilievi geomeccanici su fronti naturali o artificiali ed in galleria. In generale si tratta di:

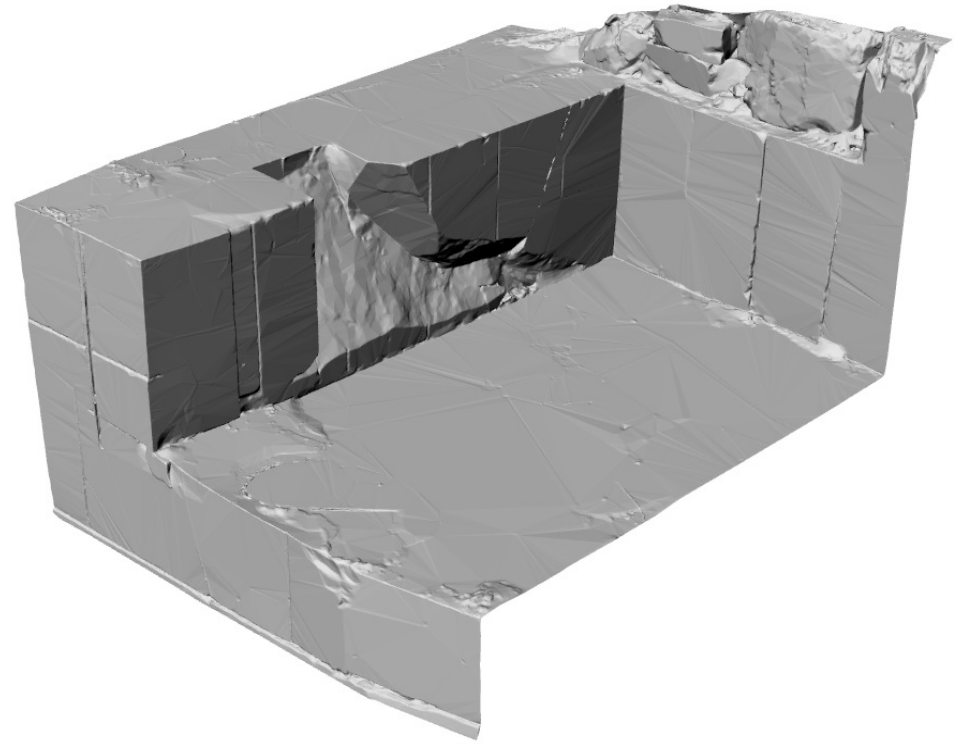
1. Ottenere almeno due immagini del “fronte” (con una fotocamera ad alta risoluzione).
2. Produrre una fotografia del fronte (spesso per composizione di più immagini).
3. Analizzare l’immagine con software specialistico dedicato per caratterizzare l’AR (direzione di immersione, angolo di inclinazione, spaziatura, ecc. delle discontinuità e dei giunti).

Fotogrammetria

Esempio 1 - Rilievo LS da Terra

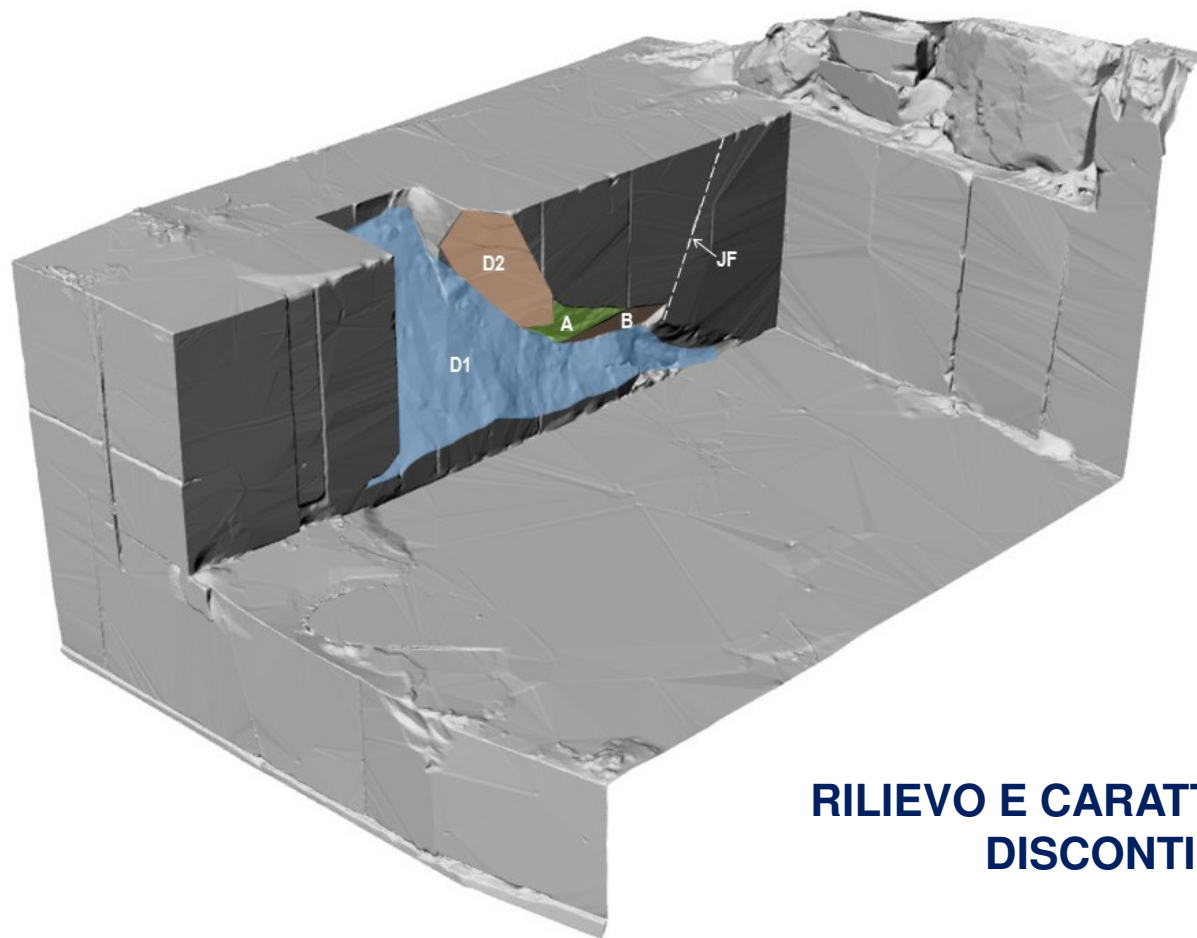


BANCATA PRIMA DEL CROLLO
(Ricostruzione)



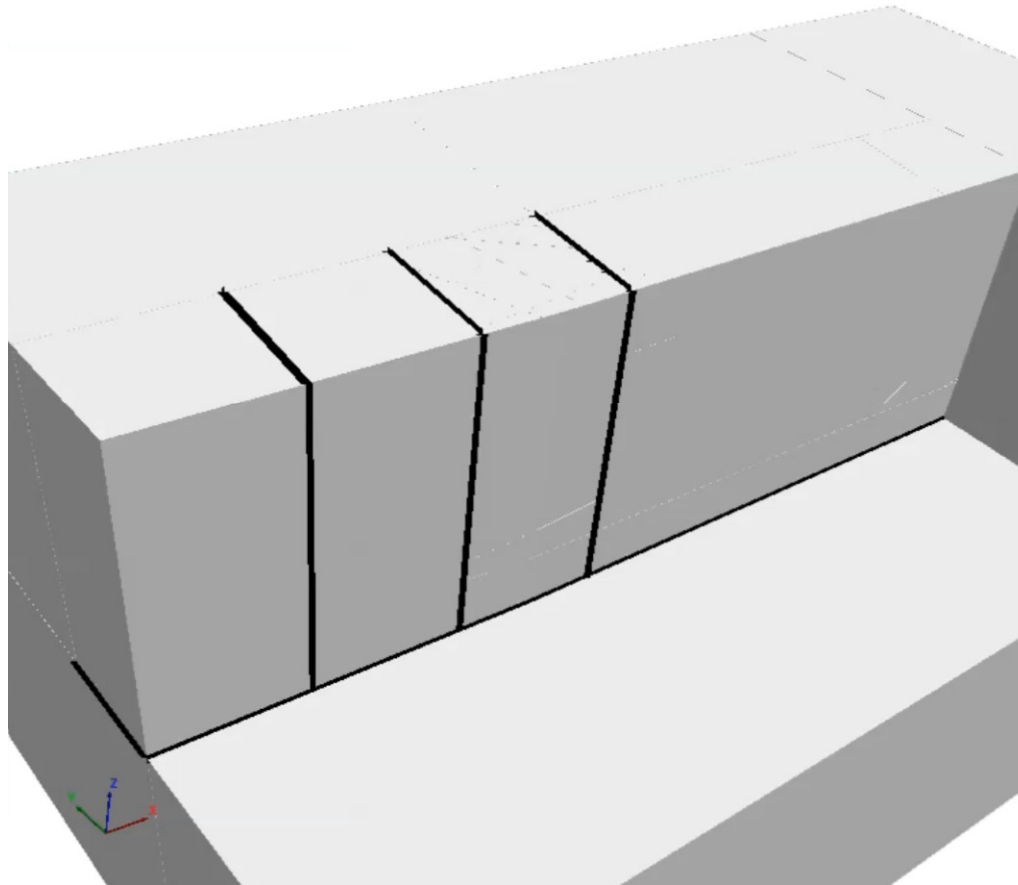
BANCATA DOPO IL CROLLO
(Rilievo LS)

Esempio 1 - Rilievo LS da Terra



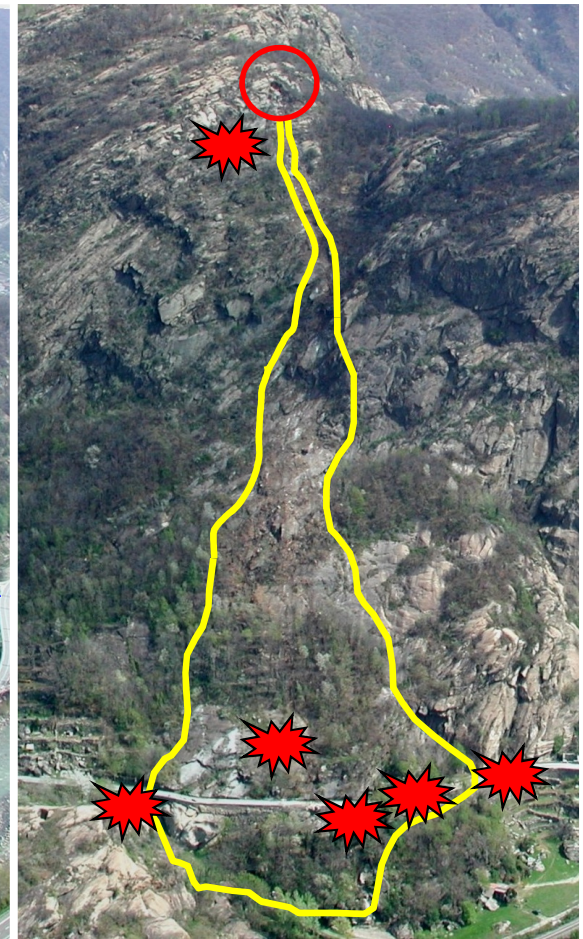
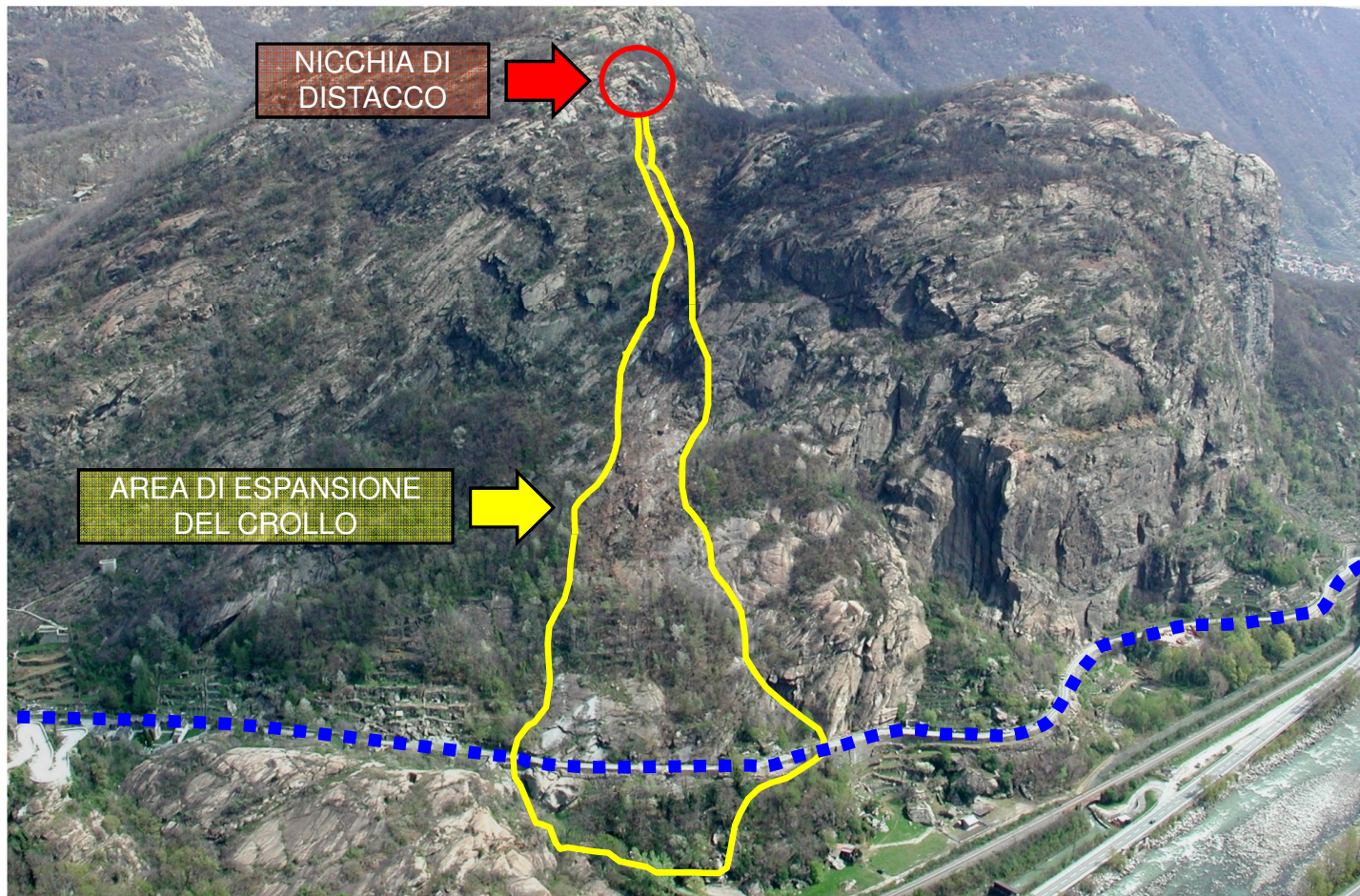
**RILIEVO E CARATTERIZZAZIONE
DISCONTINUITA'**

Esempio 1 - Rilievo LS da Terra



**MODELLO DEM
DEL CROLLO**

Esempio 2 - Rilievo LS da Elicottero



Esempio 2 - Rilievo LS da Elicottero

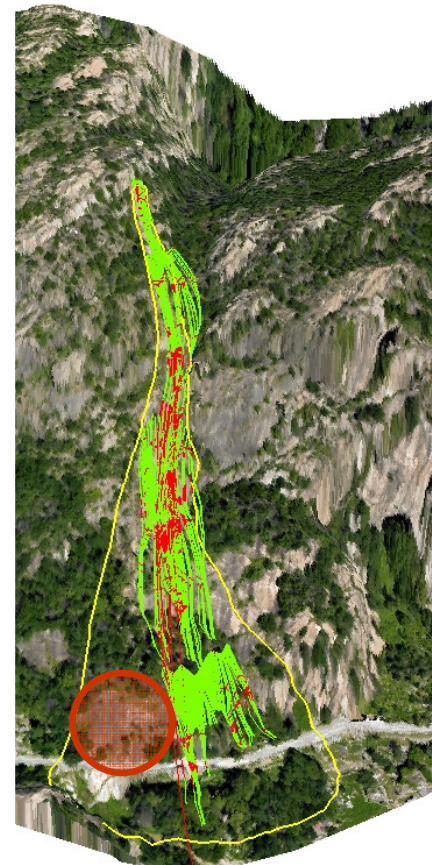
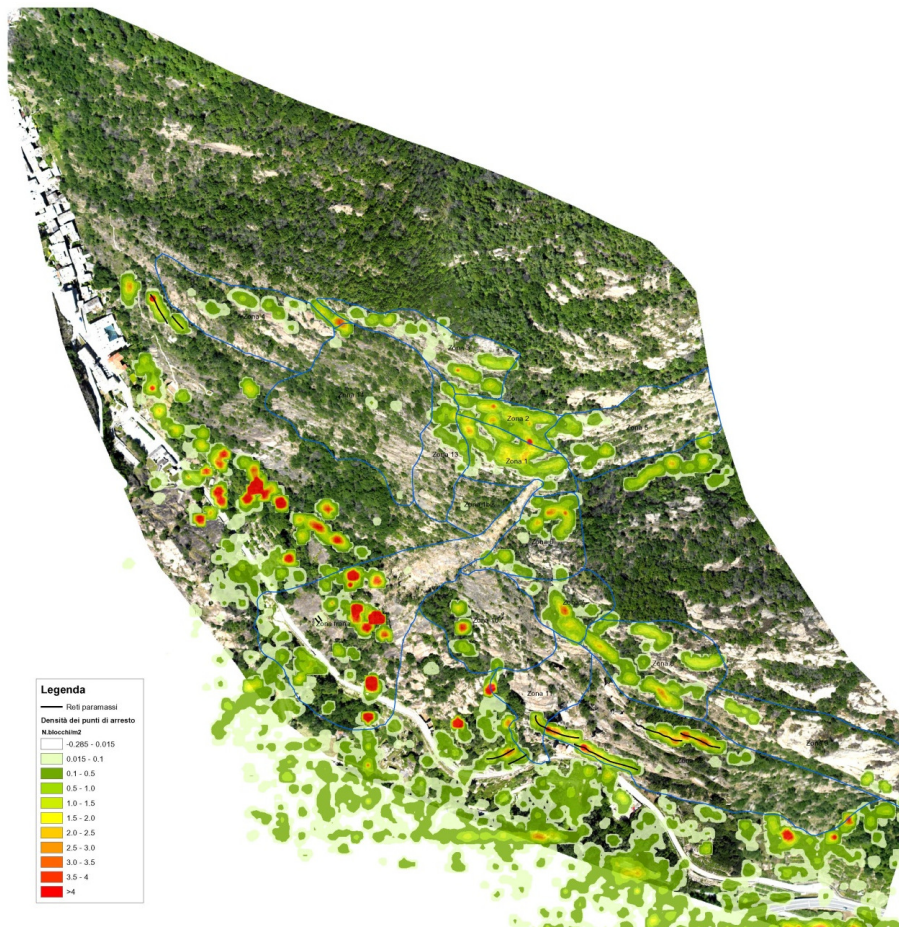


**ORTOFOTO
DALL'ALTO**

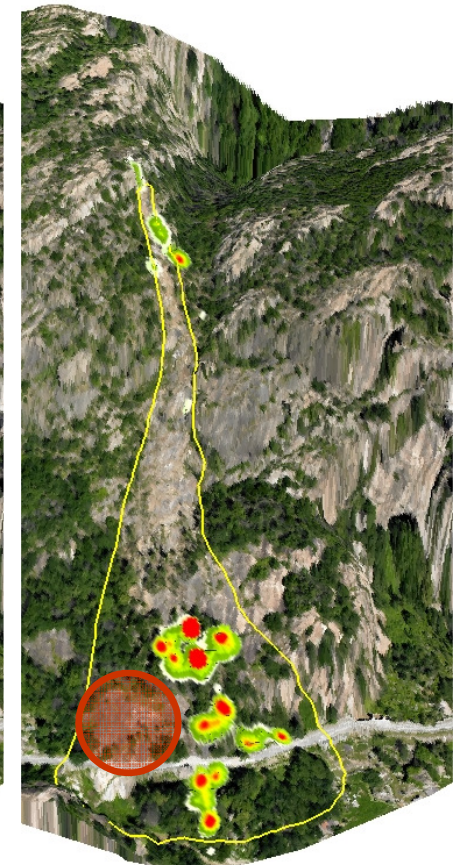


**ORTOFOTO
FRONTALI**

Esempio 2 - Rilievo LS da Elicottero

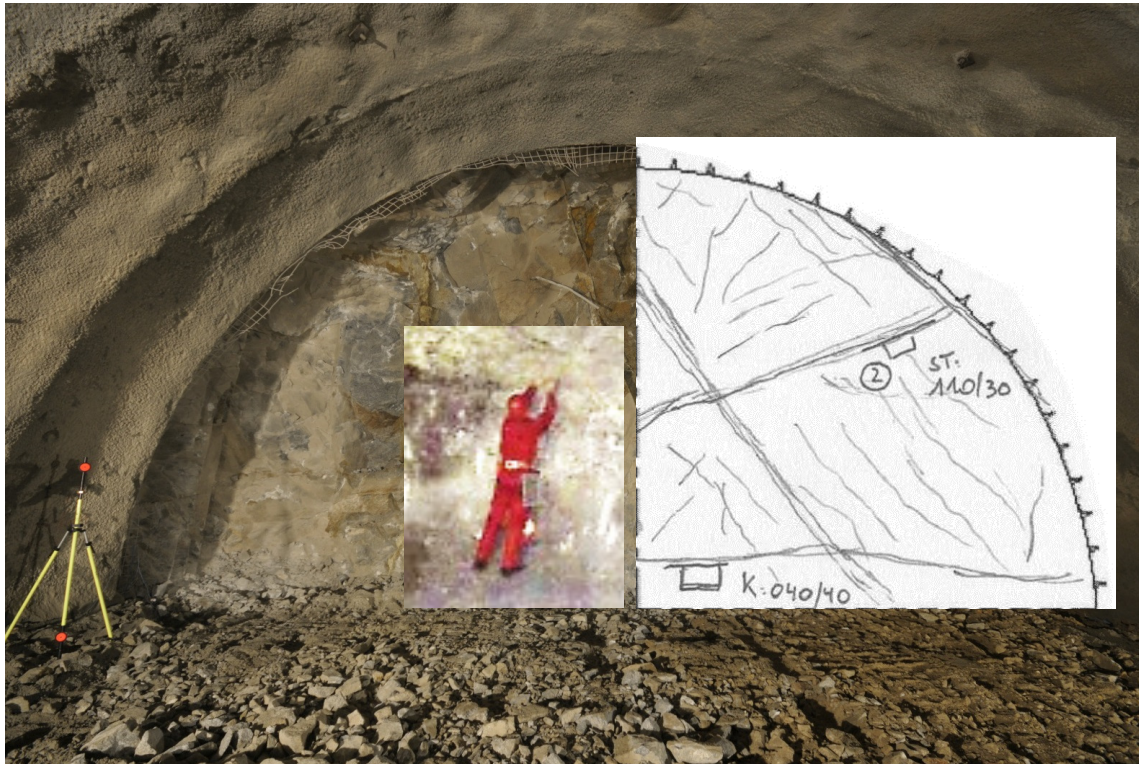


TRAIETTORIE



PUNTI DI ARRESTO

Esempio 3 - Rilievo Fotogrammetrico in Galleria



**Rilievo
geologico
geomeccanico
convenzionale**

Esempio 3 - Rilievo Fotogrammetrico in Galleria

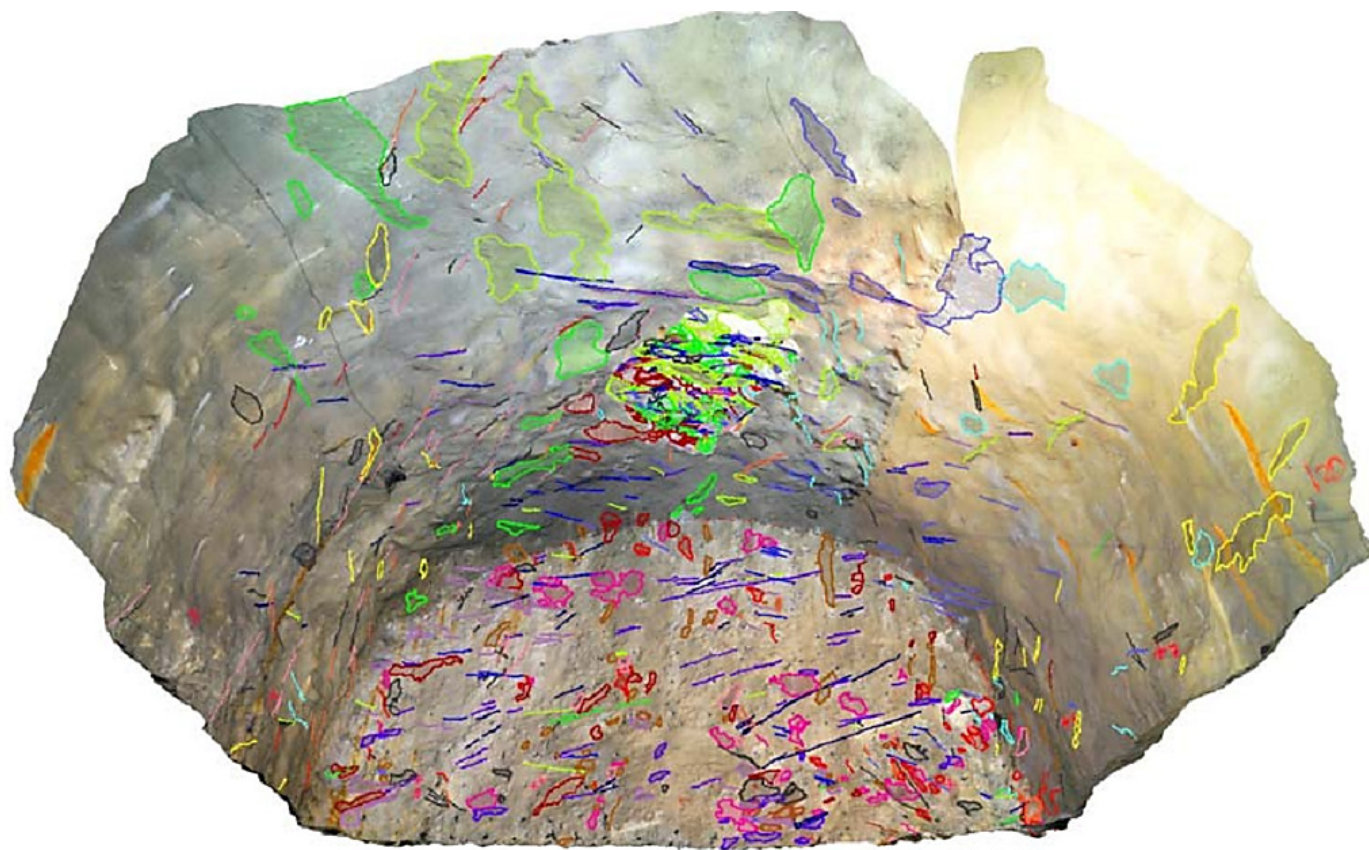
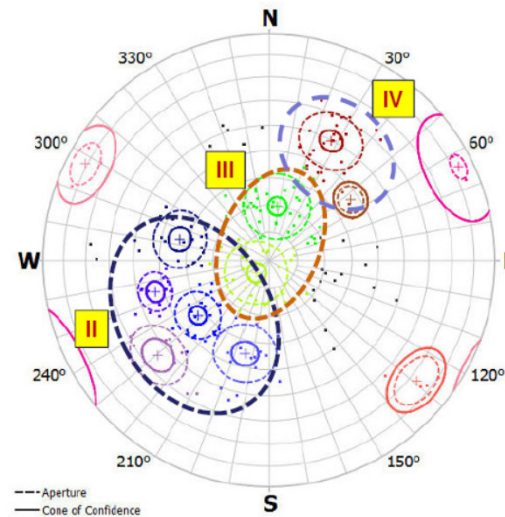
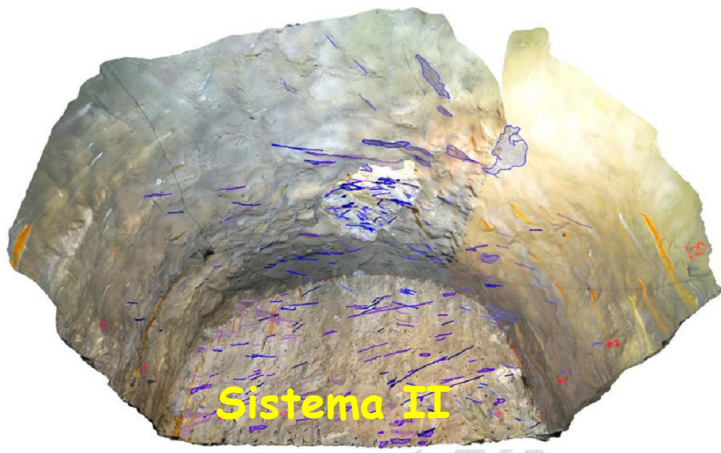


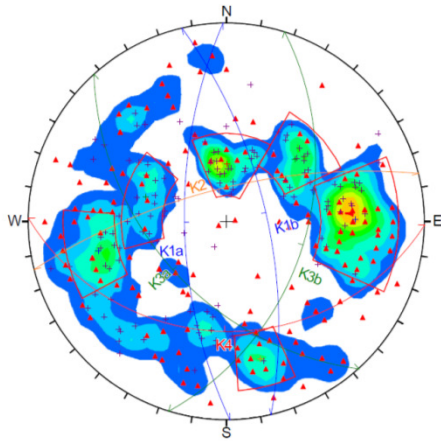
IMMAGINE RESTITUITA DELLA ZONA

Esempio 3 - Rilievo Fotogrammetrico in Galleria

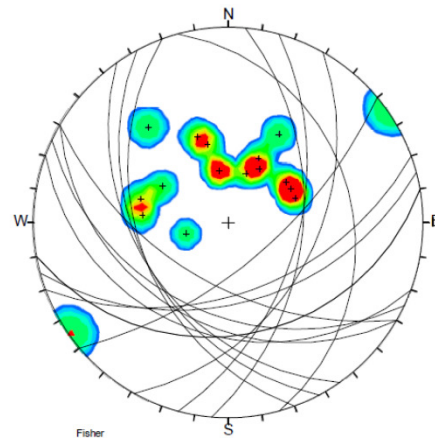


Con la restituzione delle immagini, associando il diverso colore ai sistemi di discontinuità è possibile individuarne posizione e giacitura

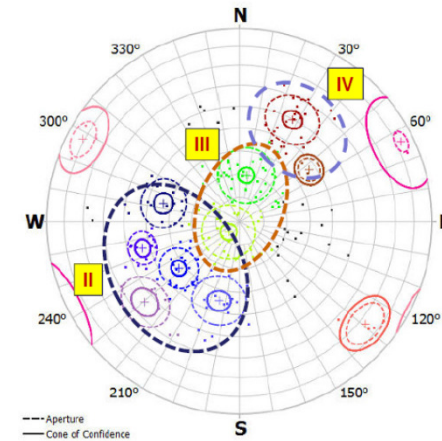
Esempio 3 - Rilievo Fotogrammetrico in Galleria



Rilievi in tutta la galleria



Ultimi rilievi

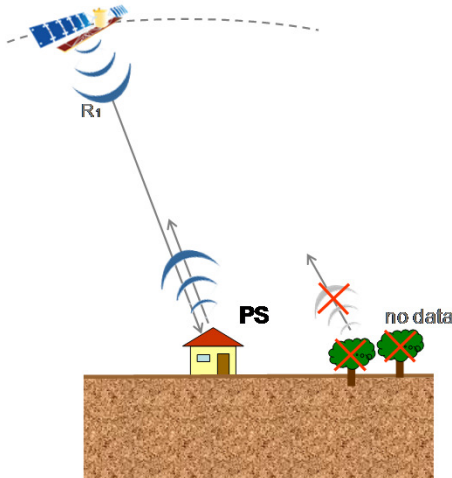


Rilievo SMX

In corrispondenza della volta si evidenzia la presenza del sistema III, con discontinuità circa orizzontali, molto importanti nel determinare la formazione del volume roccioso distaccatosi, ...una sottile lastra di roccia...

Sistemi di monitoraggio

Consideriamo tre diverse tecnologie di monitoraggio (Interferometria Satellitare **SAR**, e.g. con analisi multitemporale **Squee-SAR** o convenzionale **DInSAR**; Interferometria Terrestre, **GB-InSAR**; Stazione Totale Robotizzata, **T_LStation**). Sono utilizzabili per misure di spostamento su pendii naturali o fronti di scavo, opere in sottterraneo, nonché edifici e strutture (con qualche ovvia limitazione per la Interferometria)



SAR

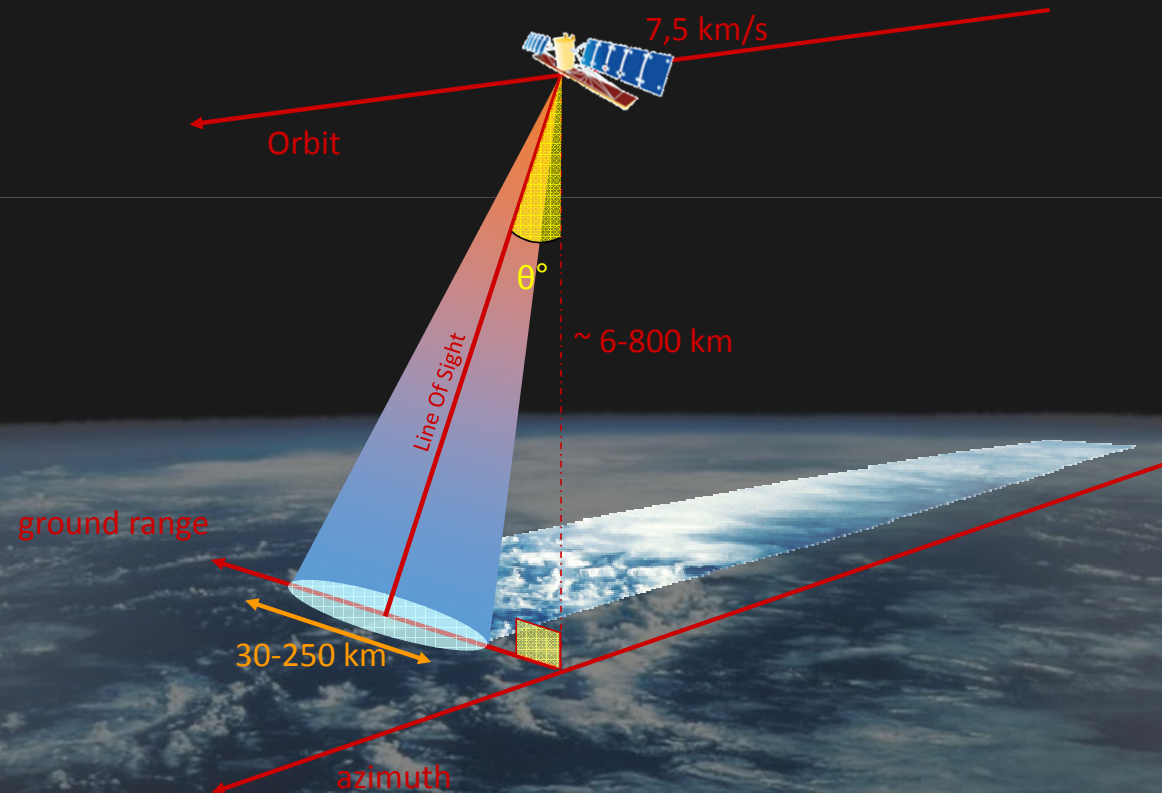


GB-InSAR



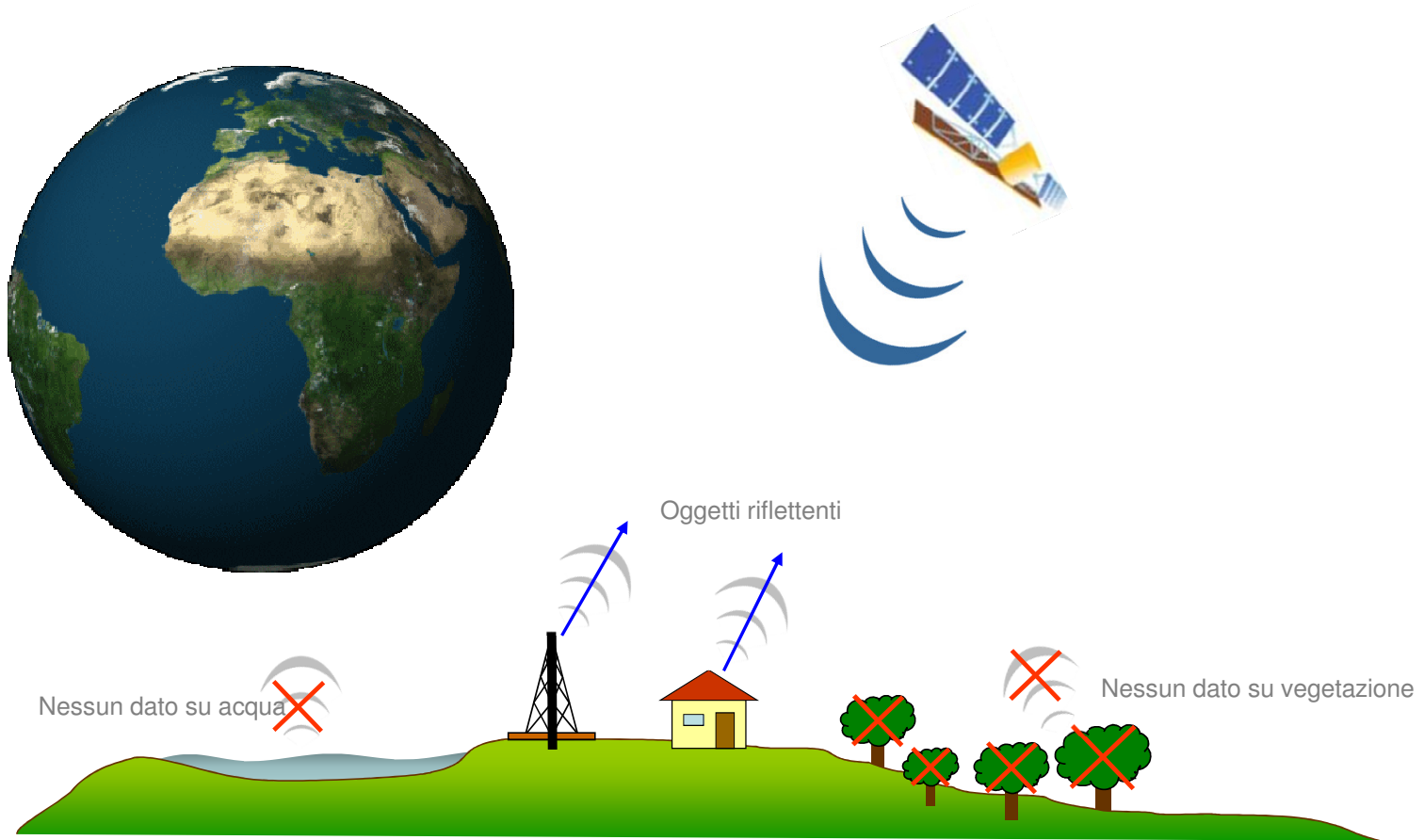
T_LStation

SAR satellites

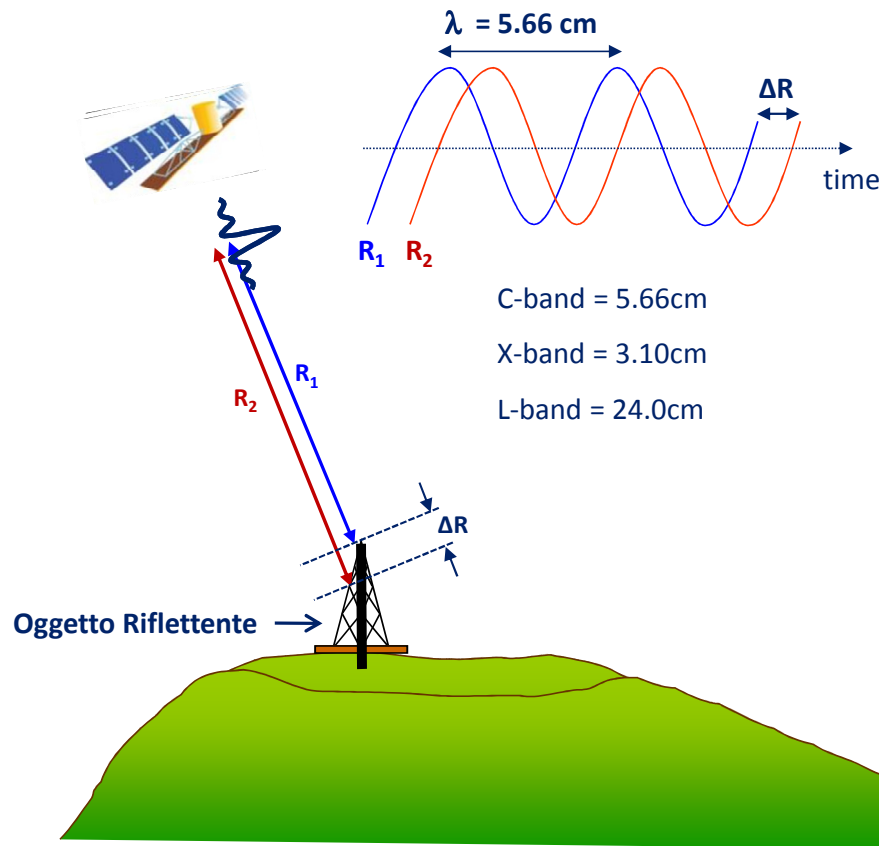


Interferometria Satellitare

(SAR) – Principi di base

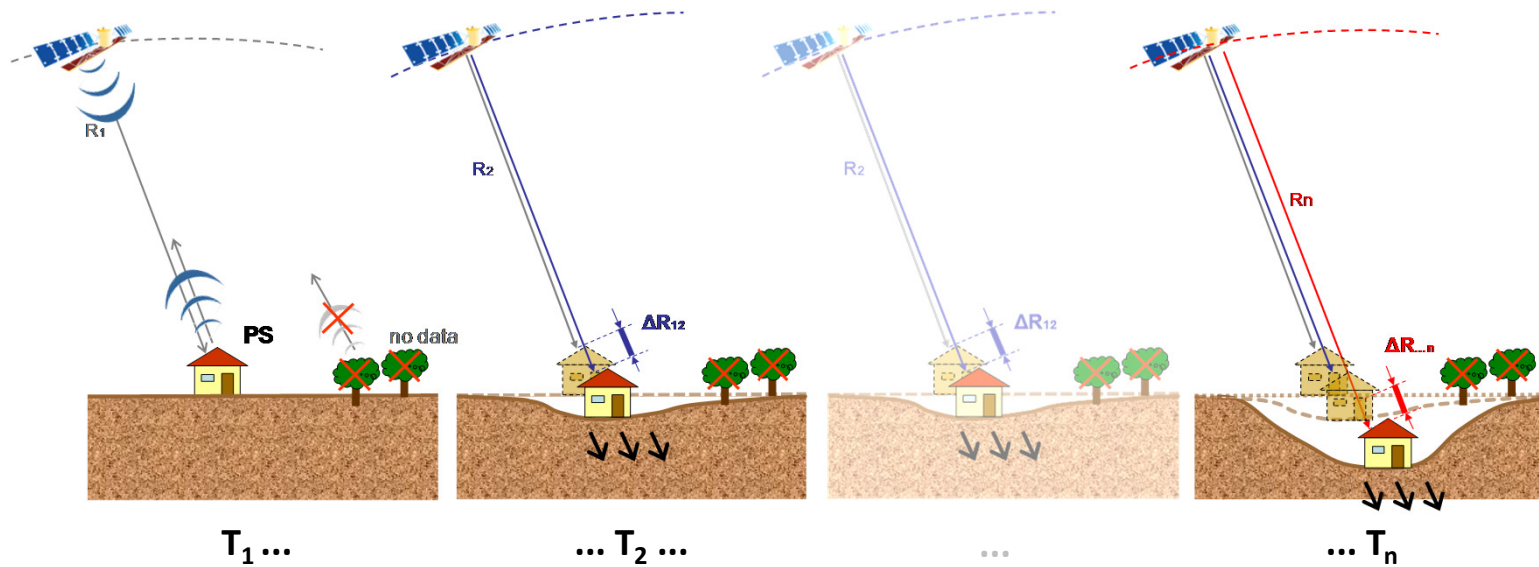


(SAR) – Principi di base



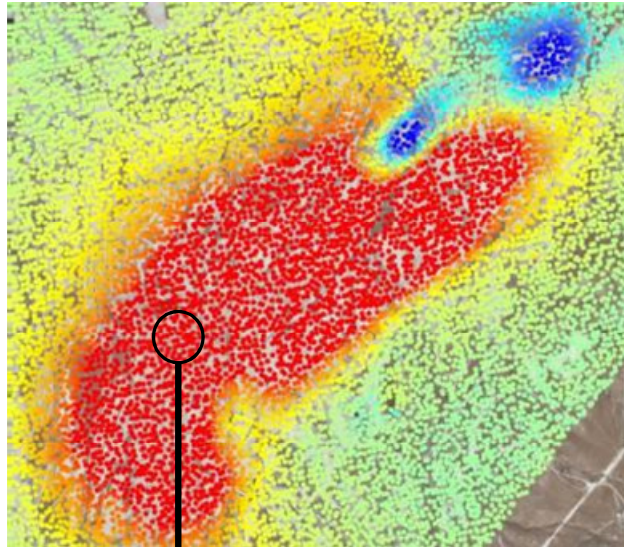
- Il Satellite passa sopra l'area di interesse
- I segnali Radar sono riflessi indietro verso il satellite da **oggetti ad alta riflettività**
- La distanza tra il satellite e l'oggetto nello schema è **R_1**
- Si verifica uno spostamento al suolo
- Il satellite passa sopra la stessa area
- La differenza tra **R_1** ed **R_2** è lo spostamento (**ΔR**) lungo la linea di vista (LOS)
- **Si misura lo spostamento verificatosi**

(SAR) Metodo con Molte Immagini Deformazione nel tempo

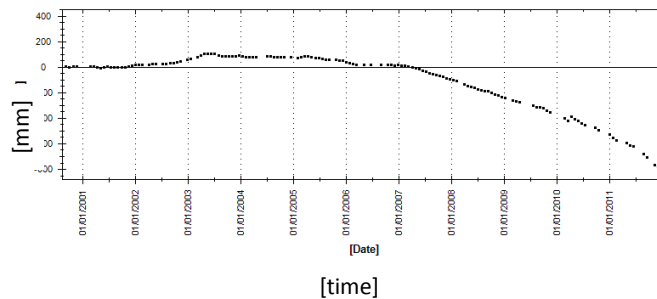


- Distanza tra Satellite e Suolo
 - Si ha una deformazione
 - Il Satellite passa nuovamente sulla stessa area
 - Si misura lo spostamento

Analisi temporale SqueeSAR™



Time series of displacement



L'analisi SqueeSAR™ fornisce la seguente informazione for ciascun riflettore:

- » **Posizione** [m] (Lat, Lon, H)
- » **Velocità di spostamento** [mm/yr]
- » **Serie temporale di spostamento** [mm]

Tutte le misure sono lungo la LOS e riferite ad un punto di riferimento.

Sistemi di monitoraggio

L'Interferometria Terrestre, **GB-InSAR** e la Stazione Totale Robotizzata, **T_LStation** sono utilizzabili per misure di spostamento su pendii naturali o fronti di scavo, opere in sotterraneo, nonché edifici e strutture (con qualche ovvia limitazione per la Interferometria)



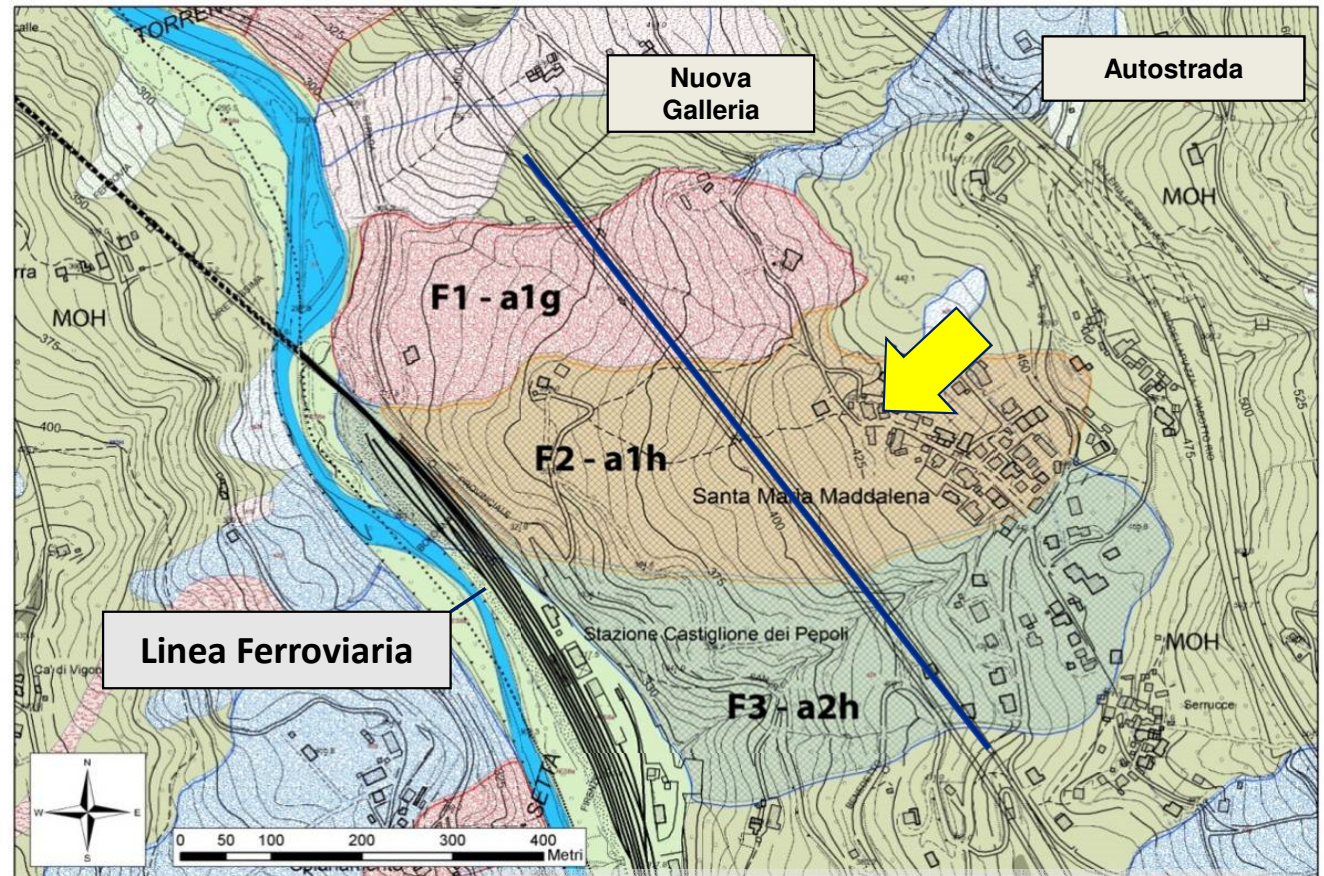
**Sistema radar a terra
(IBIS-L)**



**Stazione totale
robotizzata (TM30, Leica)**

Esempio 1 - Monitoraggio durante lo scavo di gallerie

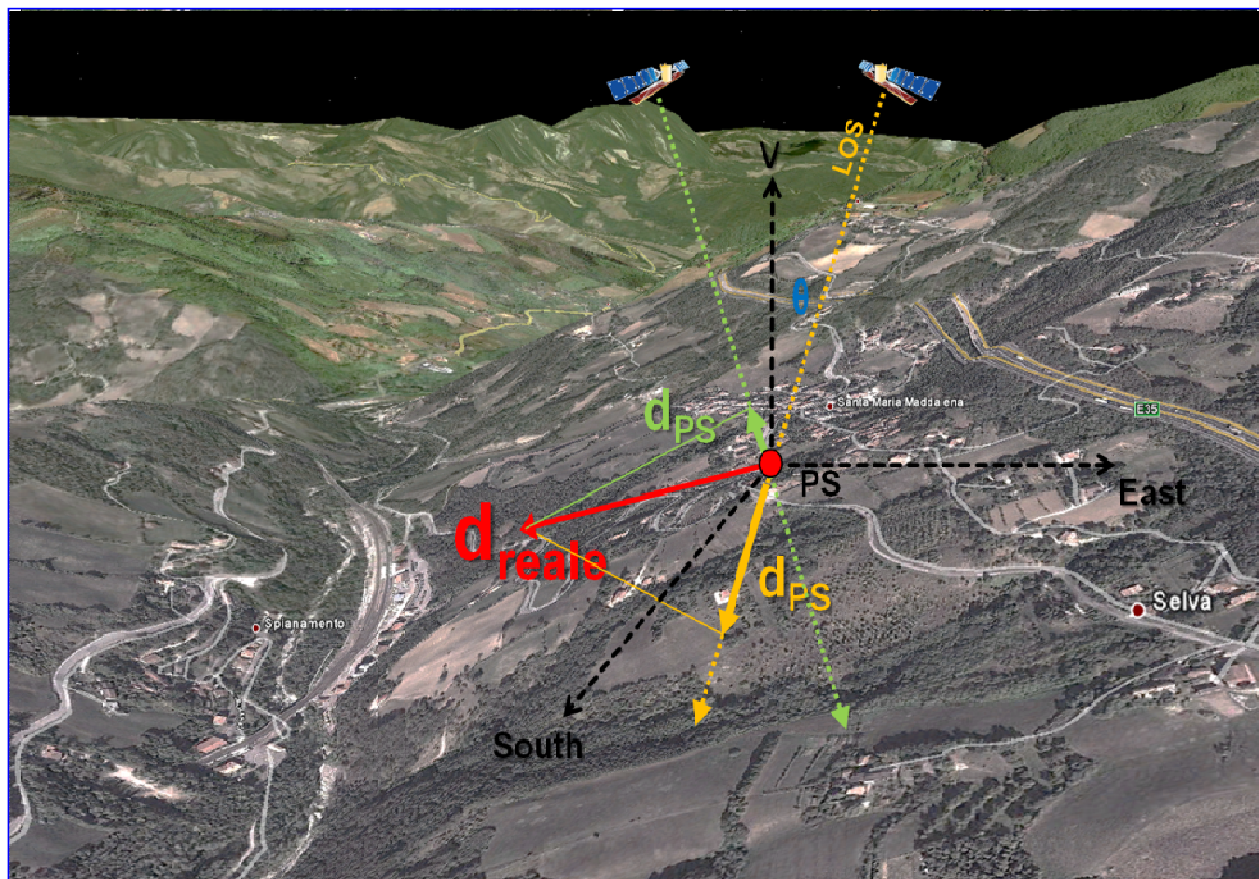
- Due gallerie affiancate di grande sezione (ciascuna di 160 m²) sono state scavate a piena sezione.
- Lo scavo è avvenuto in un ammasso roccioso flyschoido (strati arenacei e di marna di potenza variabile, da centimetrica a metrica).
- Le due gallerie interagiscono con un versante interessato da Deformazioni Gravitative Profonde – DSGD.



F1 - a1g, F2 - a1h, F3 - a2h DSGD

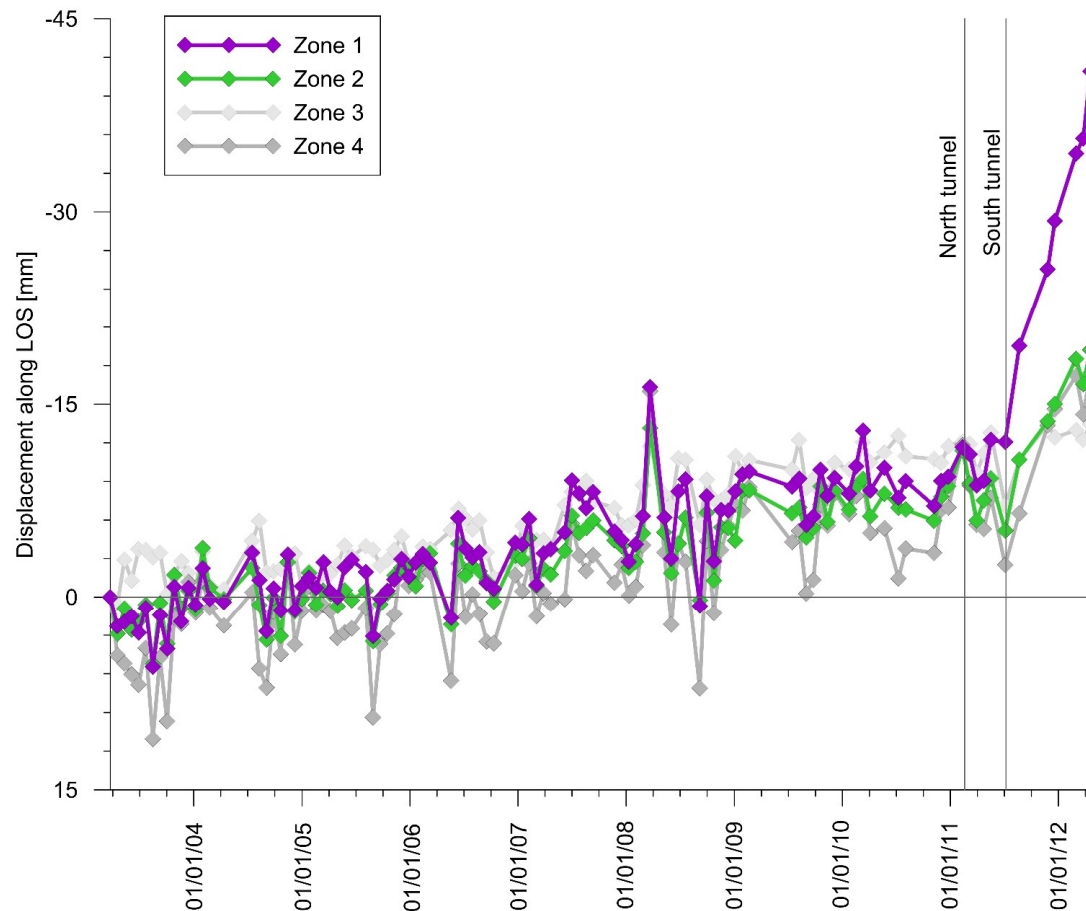
Esempio 1 - Monitoraggio durante lo scavo di gallerie

- Si è ricorsi in modo sistematico durante lo scavo alle misure con tecnica Satellitare (SAR).
- Si è fatto uso dell'analisi SqueeSAR™ con RADARSAT S3.
- I punti di riflessione sono gli edifici in superficie, le infrastrutture, le strade, le strutture metalliche...



Esempio 1 - Monitoraggio durante lo scavo di gallerie

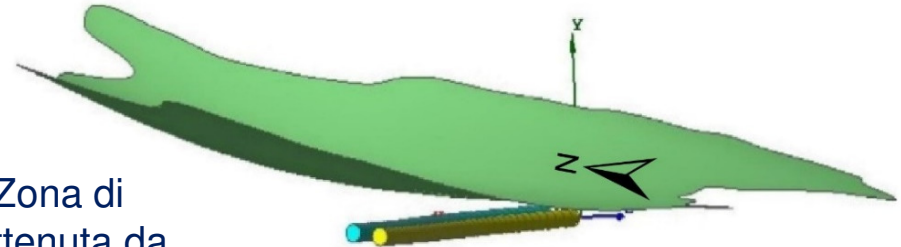
- E' stata individuata una chiara correlazione tra l'attività di scavo in galleria e gli spostamenti in superficie, ciò attraverso l'interpretazione dei dati satellitari.
- Mentre si hanno velocità di spostamento ridotte in condizioni naturali, in assenza di scavo, gli spostamenti diventano molto grandi via via che il fronte di avanzamento si avvicina al punto di osservazione.



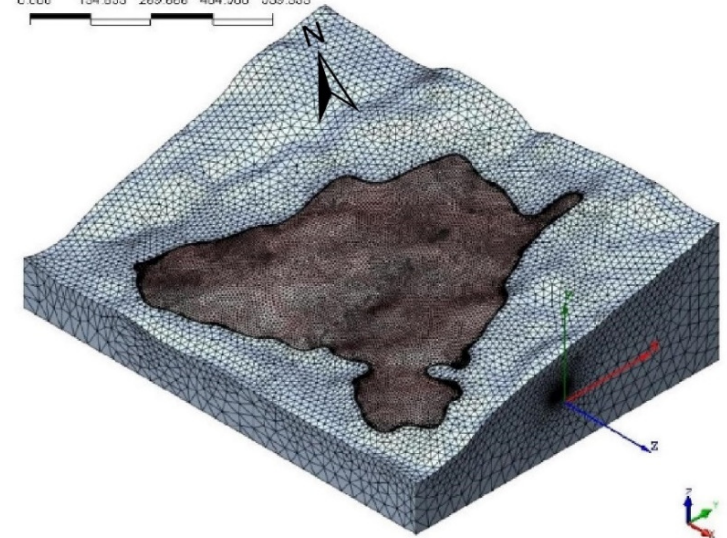
Esempio 1 - Monitoraggio durante lo scavo di gallerie

- Via via che i dati di monitoraggio in superficie (SAR, TST), in profondità (inclinometri ed estensimetri) ed in galleria sono diventati disponibili, si sono compresi i fenomeni deformativi sul versante e l'interazione con le gallerie sottostanti in corso di scavo.
- Rilievi geologico-geotecnici sistematici in galleria, al fronte di scavo, associati all'esecuzione di prove geotecniche in laboratorio ed in sito, hanno consentito di derivare i parametri geotecnici rappresentativi.
- Il complesso delle informazioni progressivamente acquisite ha portato all'elaborazione di un modello ad elementi finiti tridimensionale 3D FEM.

Superficie – Zona di scivolamento ottenuta da misure superficiali (SAR e TST) e profonde (inclinometri)



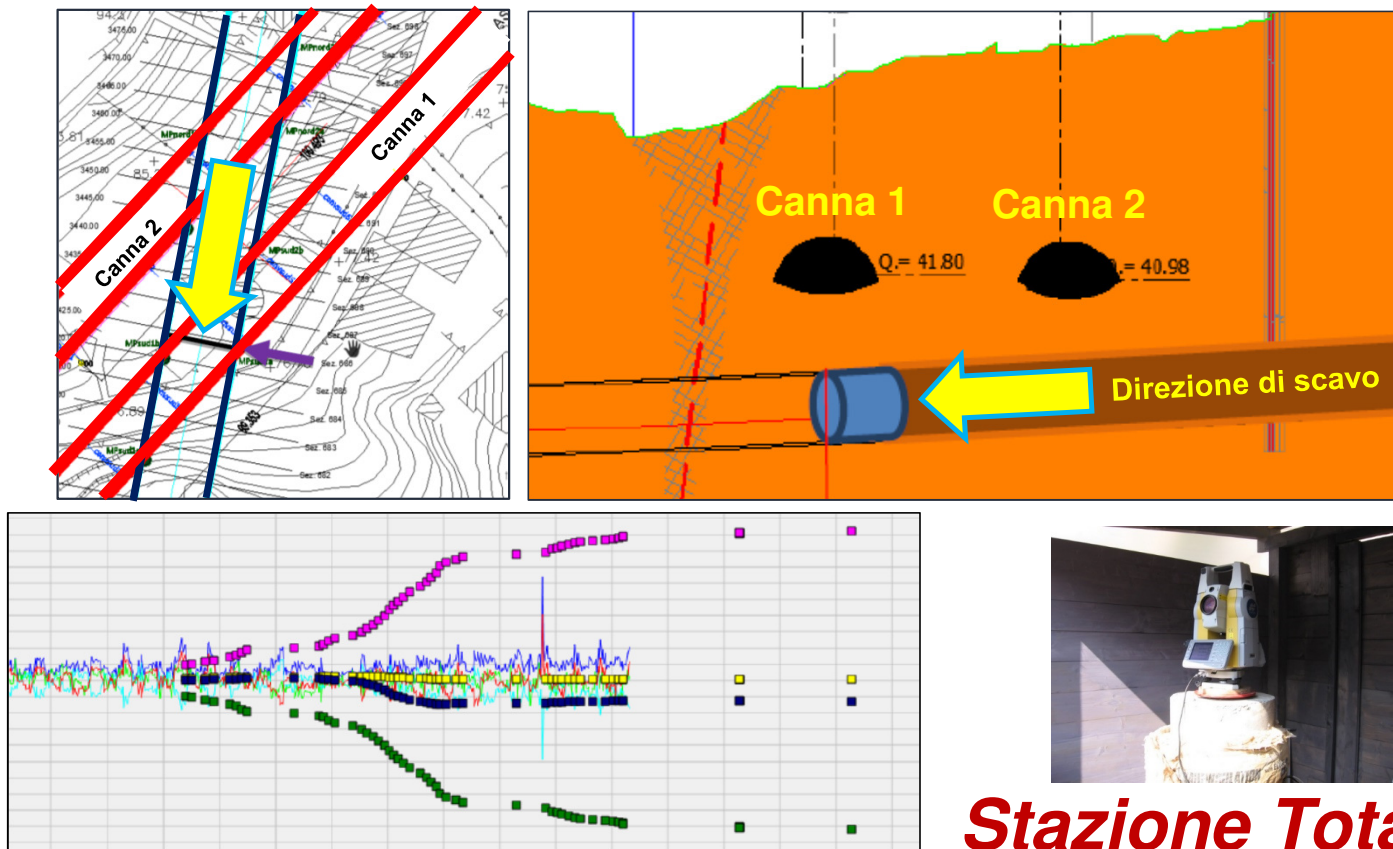
0.000 134.833 269.666 404.500 539.333



Modello FEM 3D

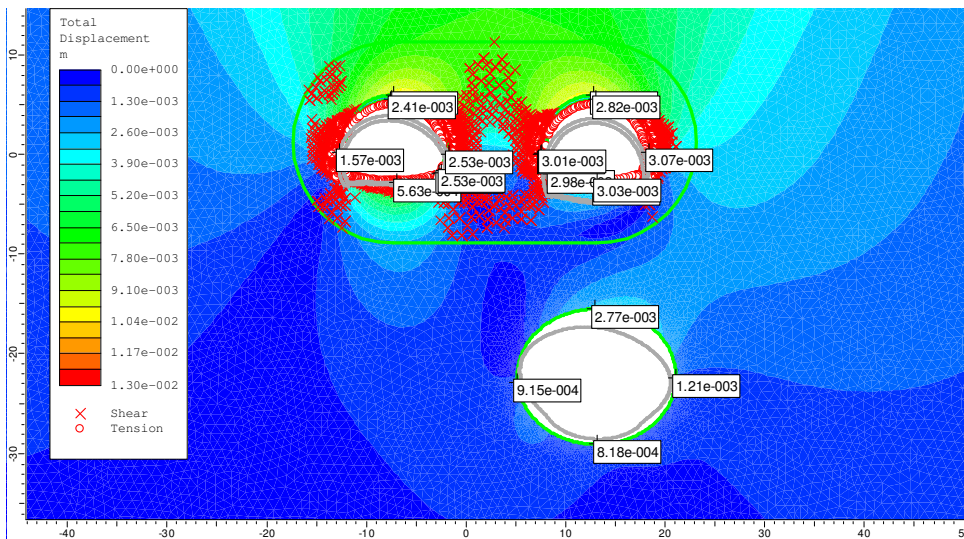
Esempio 2 - Monitoraggio durante lo scavo di gallerie

Due stazioni totali, una installata nella canna 1 e l'altra nella canna 2, sono state usate per monitorare gli spostamenti indotti (tre componenti x,y,z) in sezioni trasversali equidistanti, attrezzate con mire ottiche, durante lo scavo con TBM di una nuova galleria sottostante.

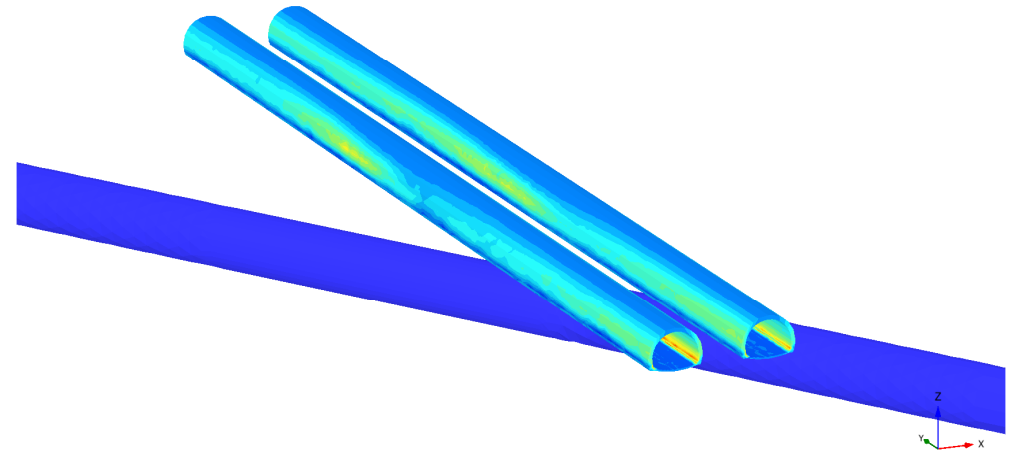


Stazione Totale

Esempio 2 - Monitoraggio durante lo scavo di gallerie

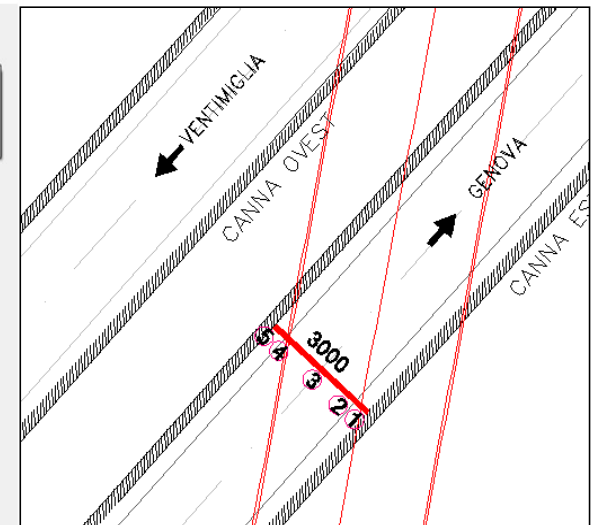
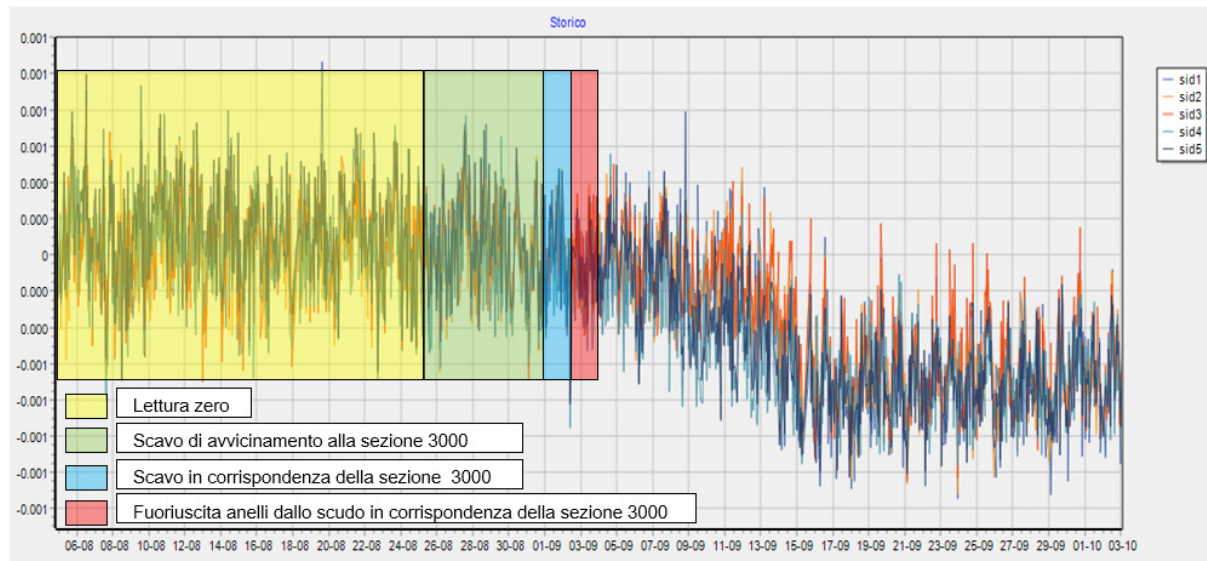


Modello FEM 2D



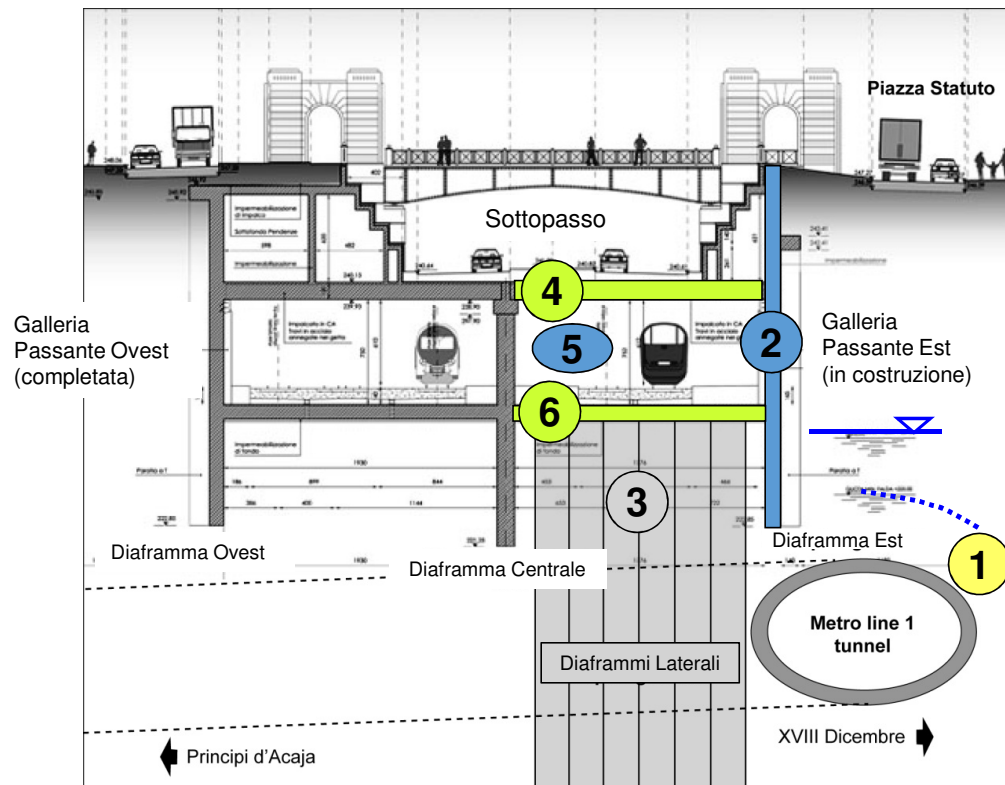
Modello FEM 3D

Esempio 2 - Monitoraggio durante lo scavo di gallerie



Monitoraggio in corso di scavo

Esempio 2 - Monitoraggio durante lo scavo di gallerie



1. Consolidamento con iniezioni cementizie nell'intorno della galleria Metro 1 creando una corona di 2.5-3.0 m di terreno trattato sopra ed ai lati.

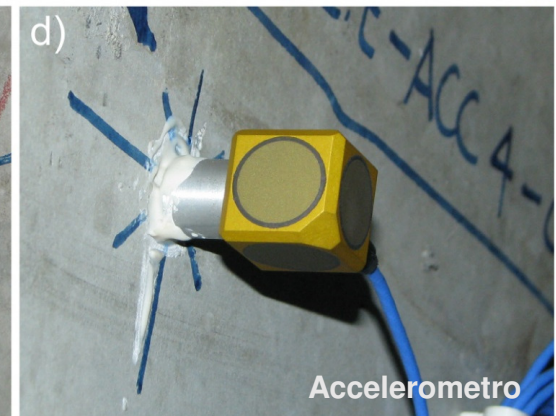
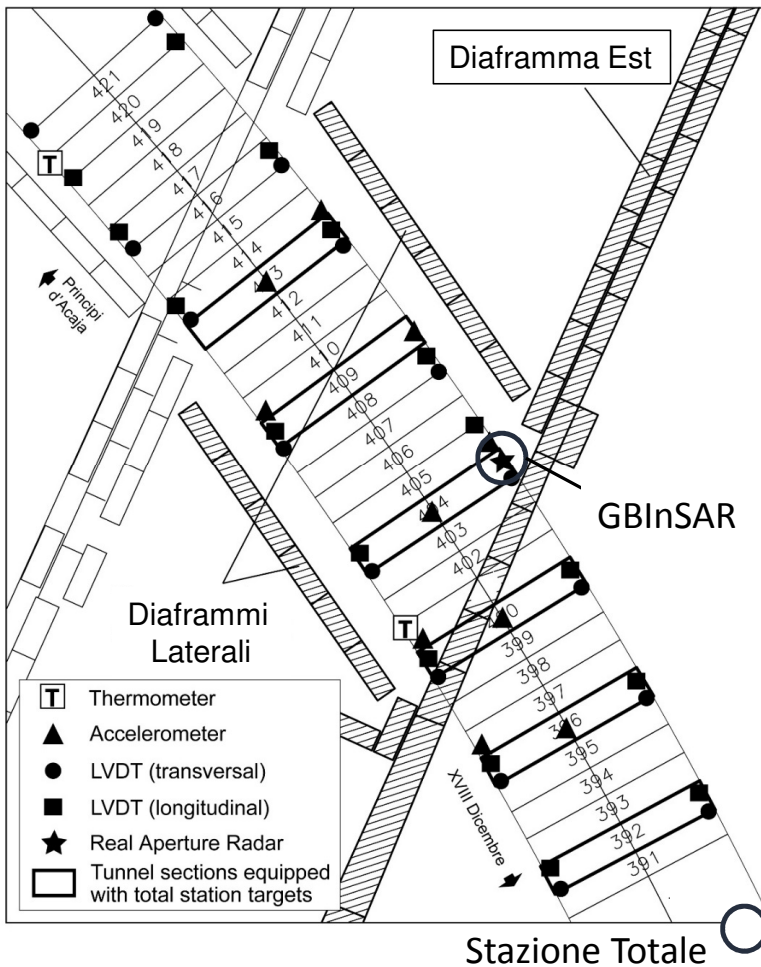
2. Costruzione dei diaframmi longitudinali (parete Est) a completamento della galleria Passante Est.

3. Costruzione di due diaframmi laterali a protezione della galleria Metro 1, ad una distanza di 1.5 m.

4. Costruzione della soletta superiore a copertura della galleria Passante Est.

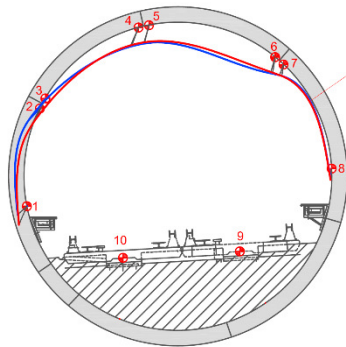
5. & 6. Scavo per fasi della galleria Passante Est e getto della soletta inferiore, ad una distanza di 4 m dalla galleria Metro 1.

Esempio 2 - Monitoraggio durante lo scavo di gallerie



Esempio 2 - Monitoraggio durante lo scavo di gallerie

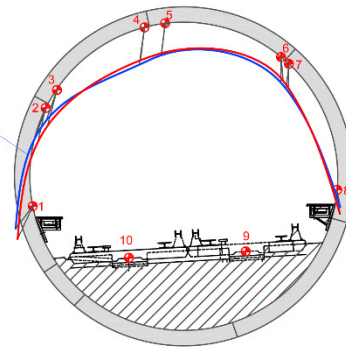
Sezione 392



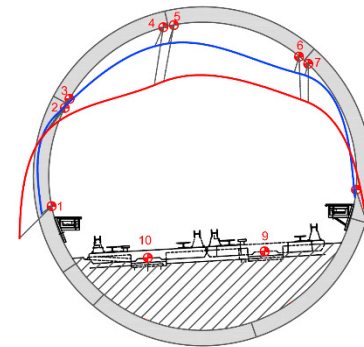
09/01/2010

04/15/2011

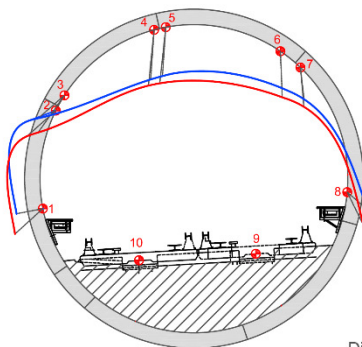
Sezione 396



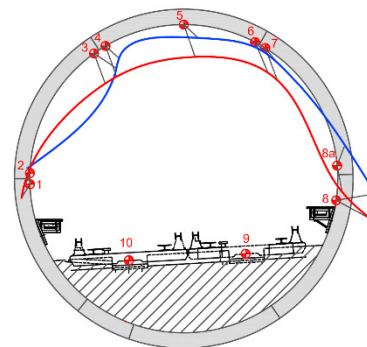
Sezione 400



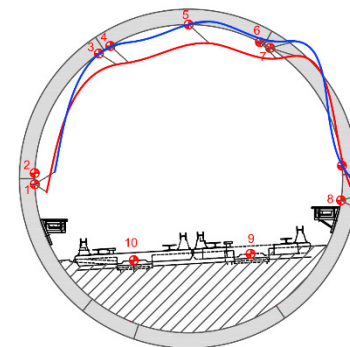
Sezione 404



Sezione 409



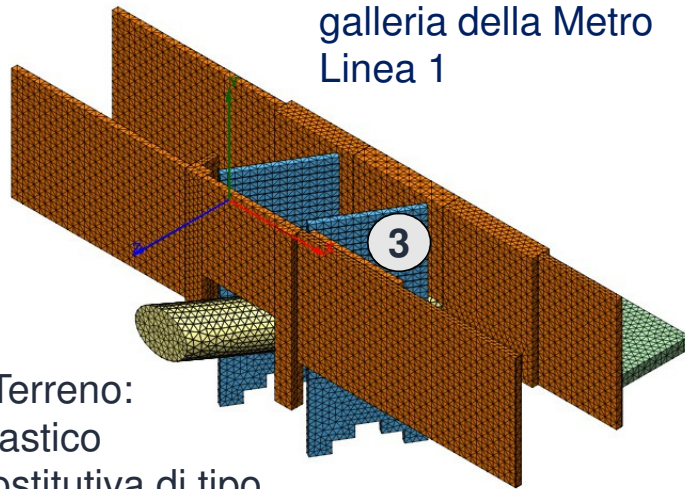
Sezione 413



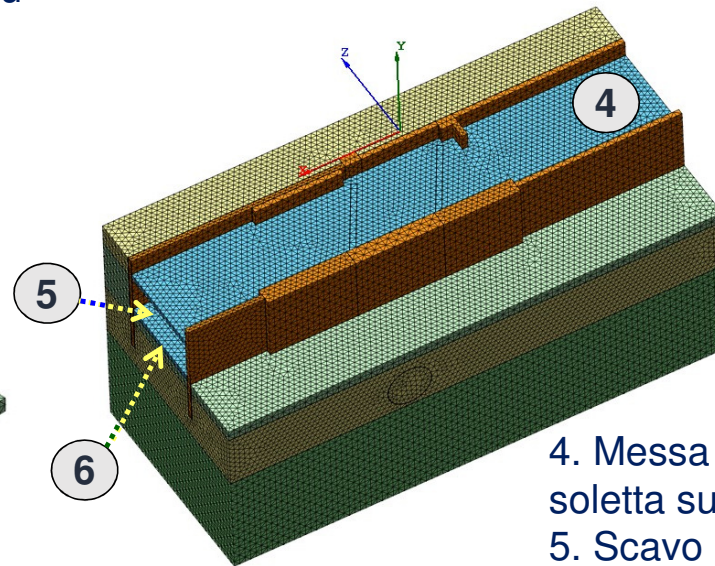
Displacement scale
0 50 mm

Esempio 2 - Monitoraggio durante lo scavo di gallerie

3. Simulazione della
posa dei diaframmi su
ciascun lato della
galleria della Metro
Linea 1



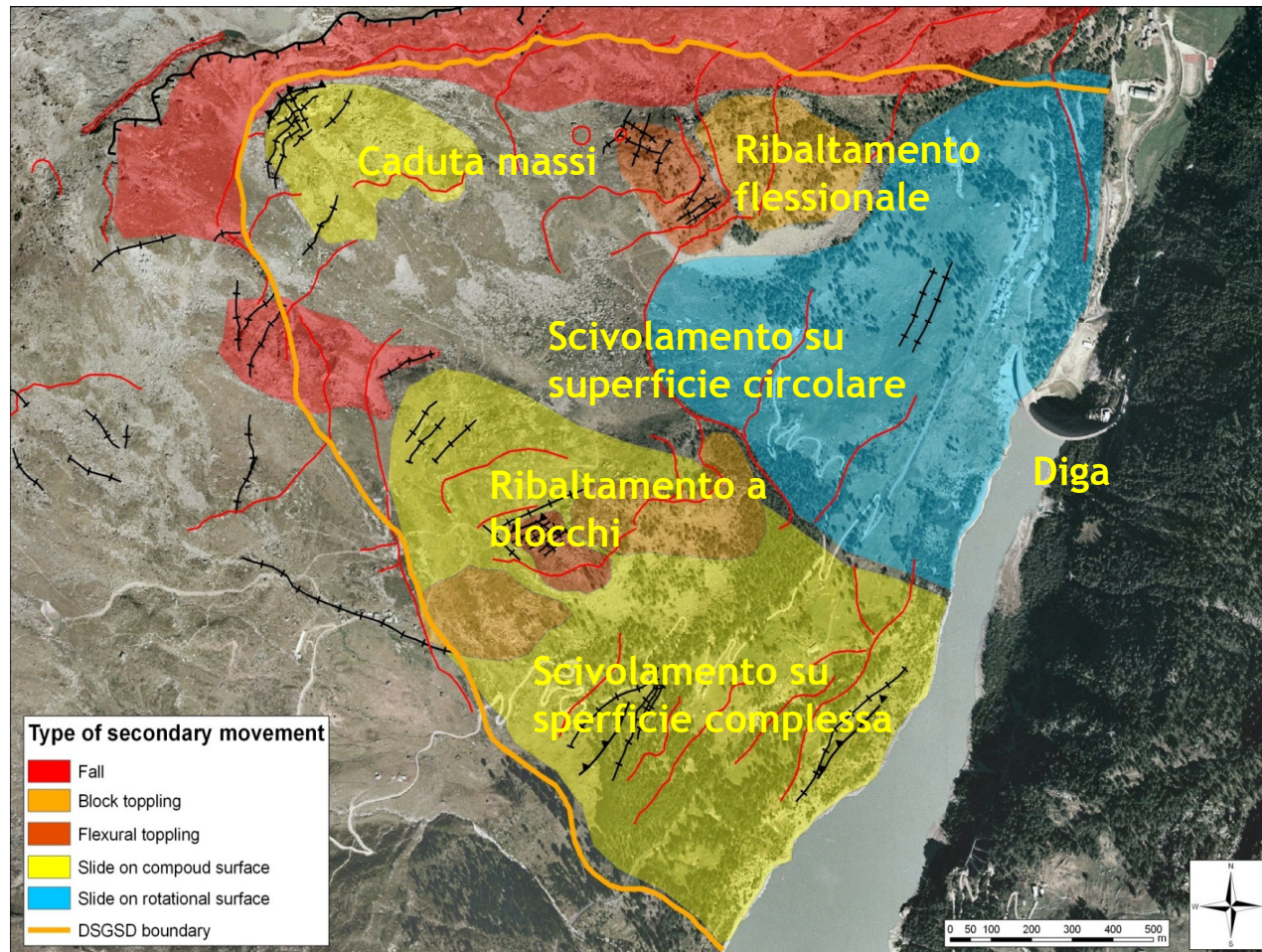
Modello Terreno:
Elasto-Plastico
Legge Costitutiva di tipo
iperbolico



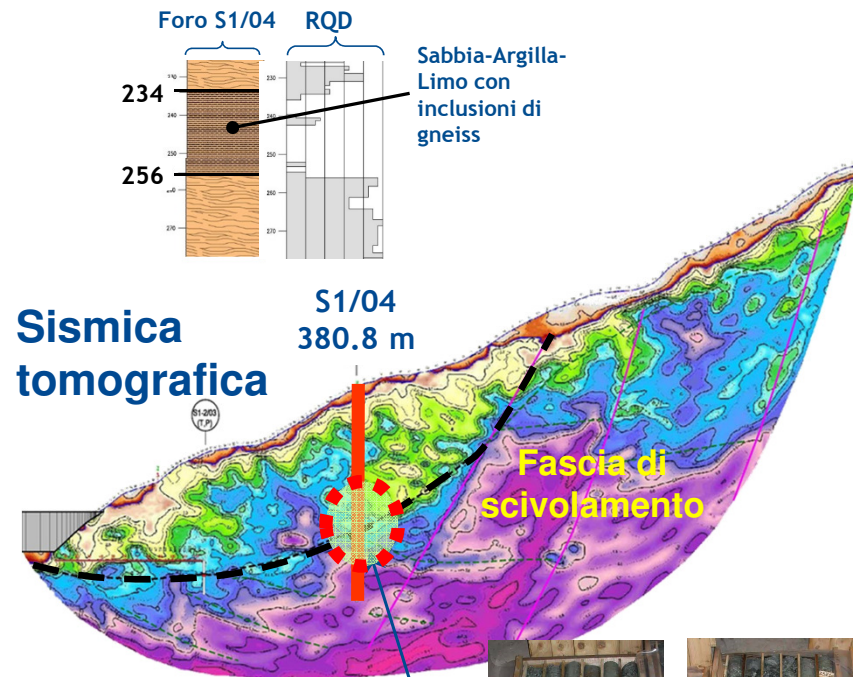
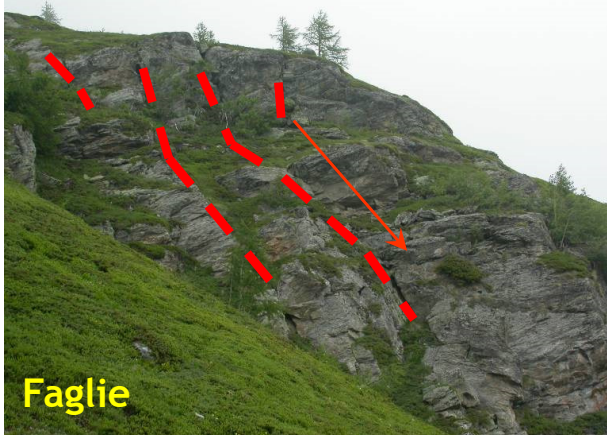
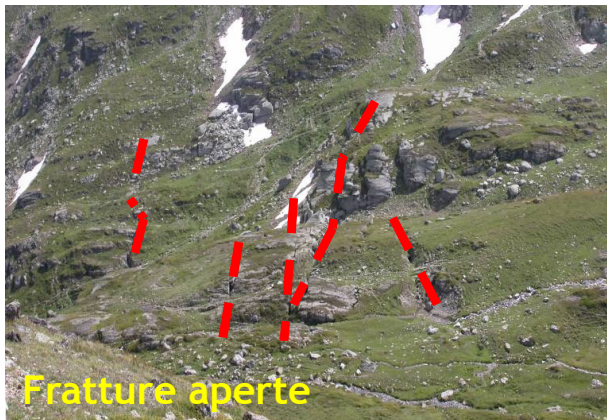
4. Messa in opera della
soletta superiore
5. Scavo per fasi
6. Messa in opera della
soletta inferiore

Modello FEM 3D

Esempio 3 - Interazione tra DGPV e Diga



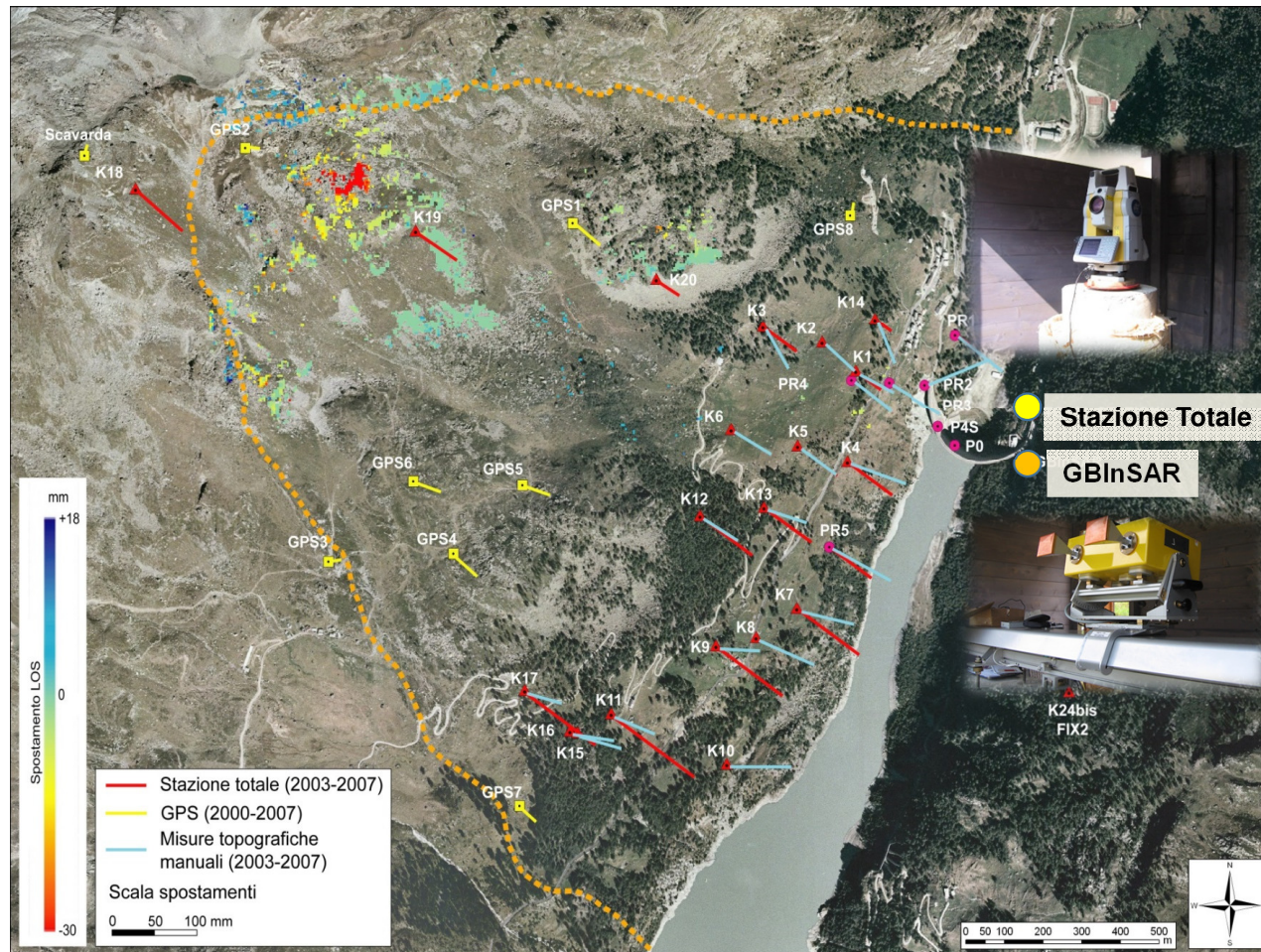
Esempio 3 - Interazione tra DGPV e Diga



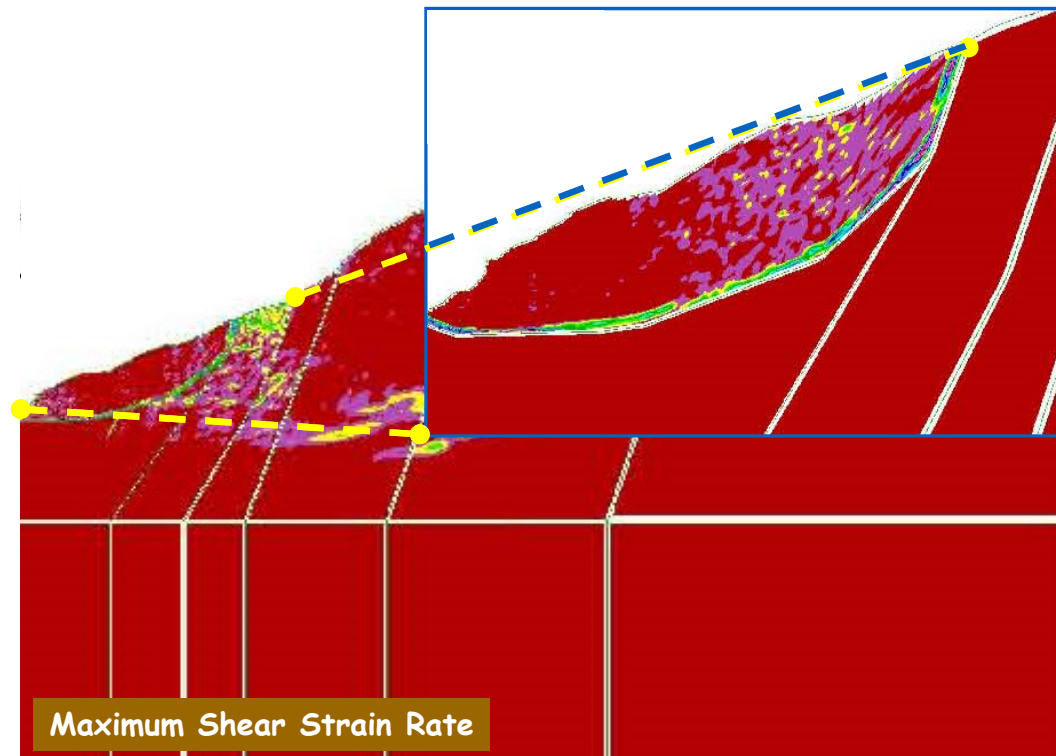
Cassette con campioni alla profondità della fascia di scivolamento



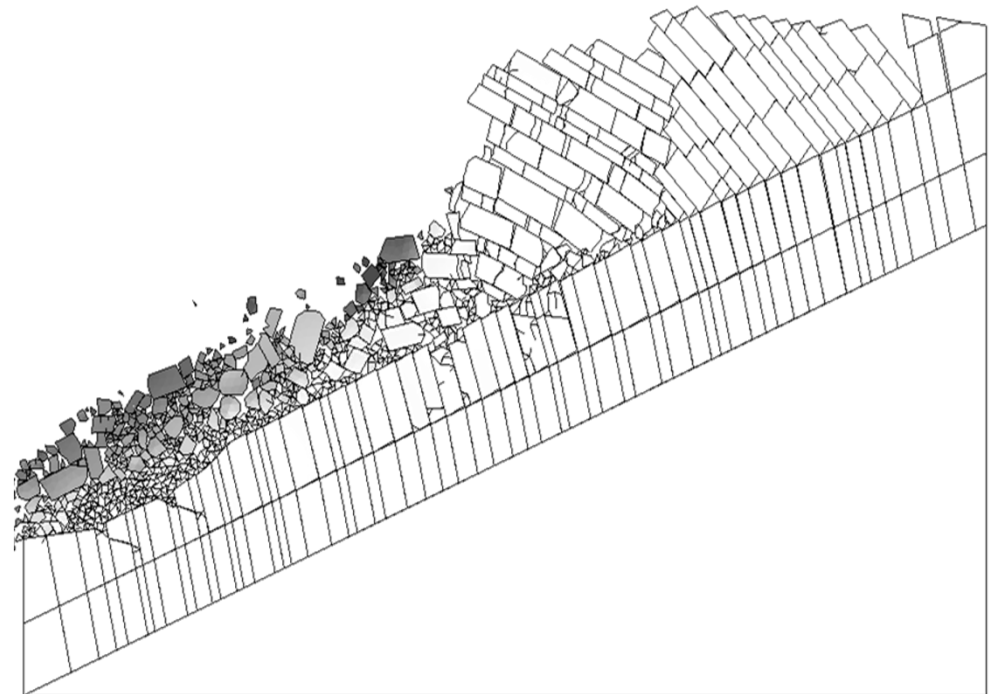
Esempio 3 - Interazione tra DGPS e Diga



Esempio 3 - Interazione tra DGPV e Diga

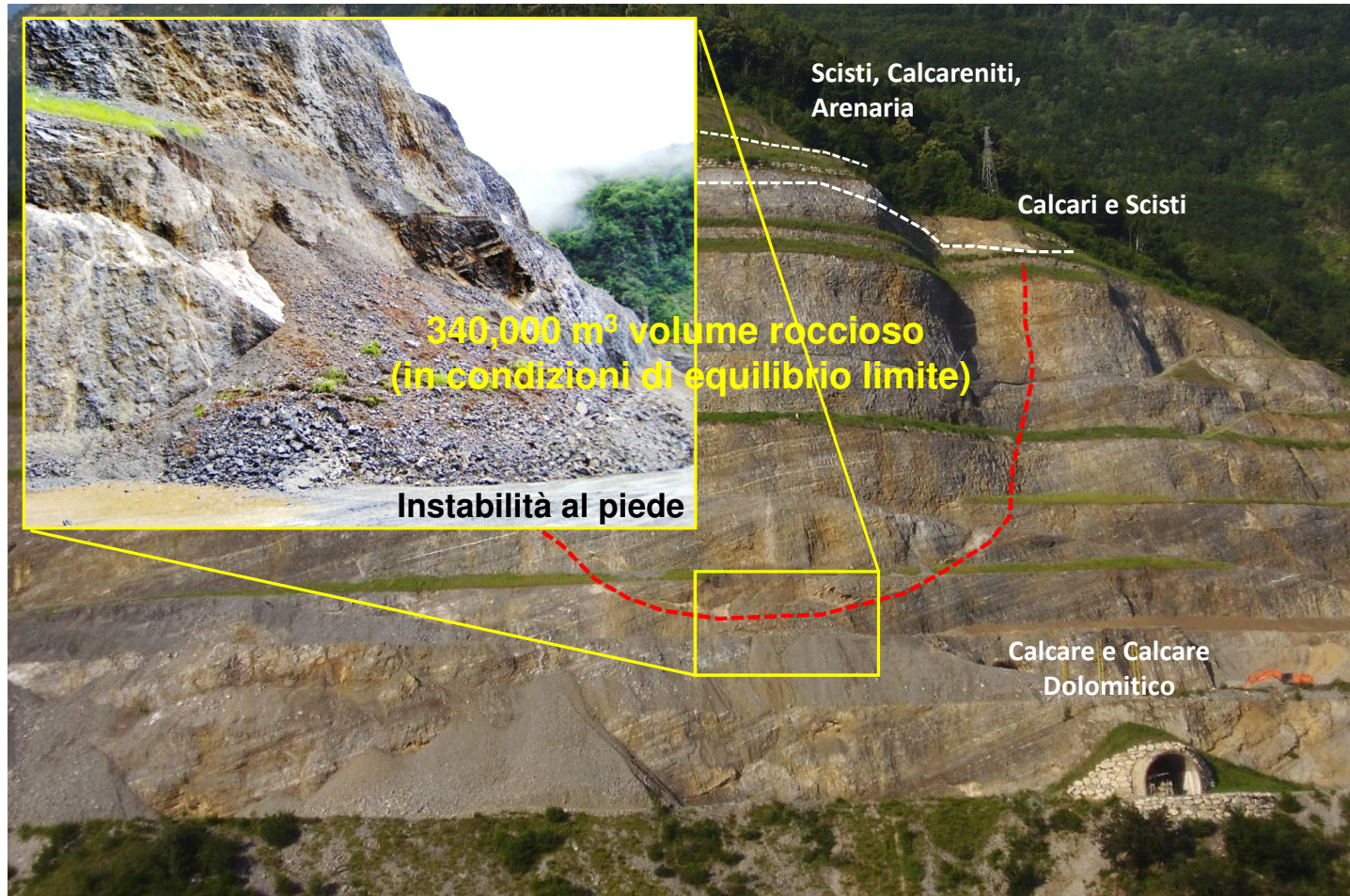


Modello FEM 2D



Modello FEDEM 2D

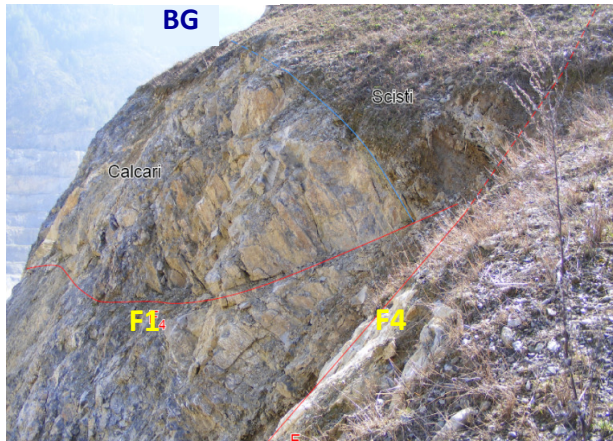
Caso di Studio 1 - Parete in Calcarea



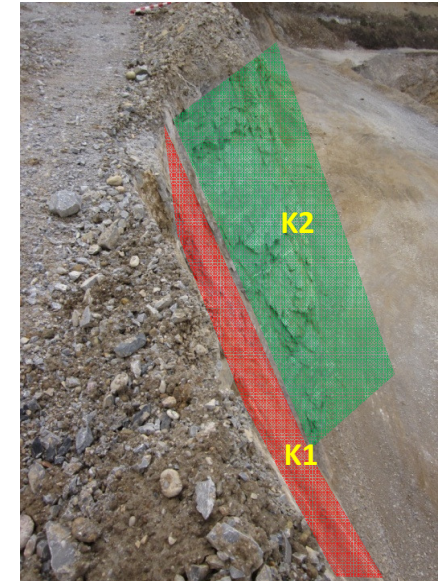
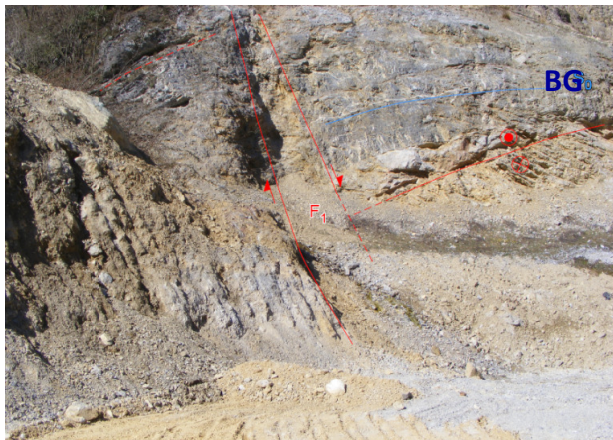
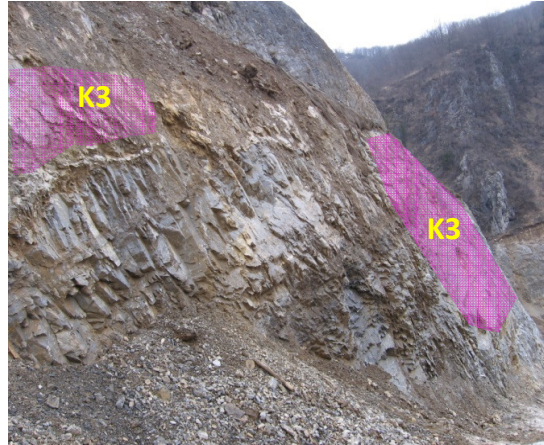
Inquadramento del problema

Caso di Studio 1 - Parete in Calcarea

Faglie (F1 – F2 – F3 – F4)

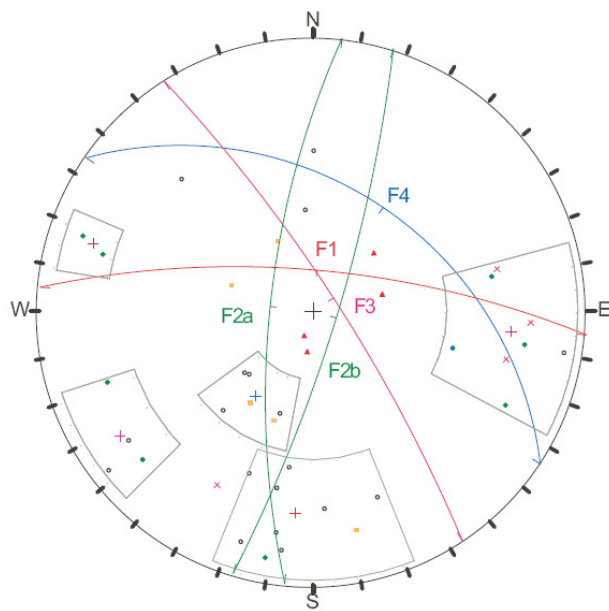


3 Sistemi (K1 – K2 – K3) + Stratificazione (BG)

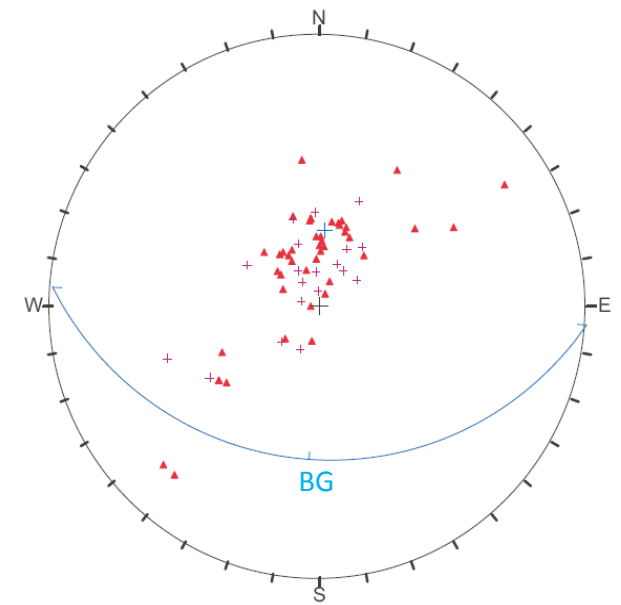
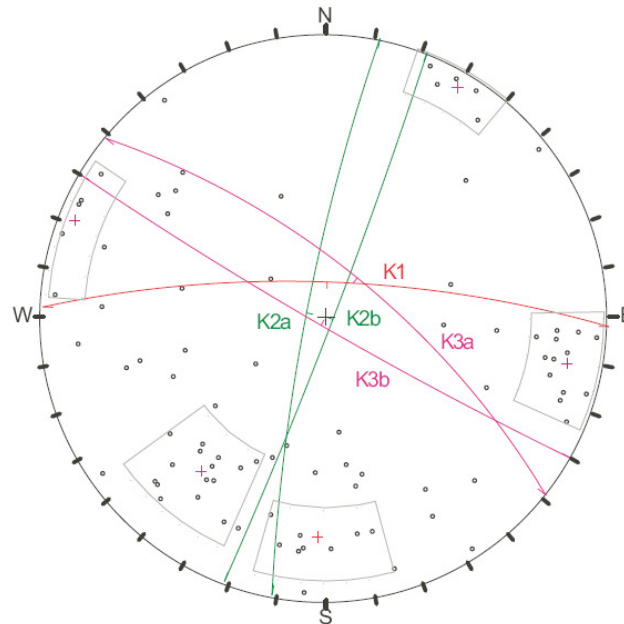


Caso di Studio 1 - Parete in Calcare

Faglie (F1 – F2 – F3 – F4)

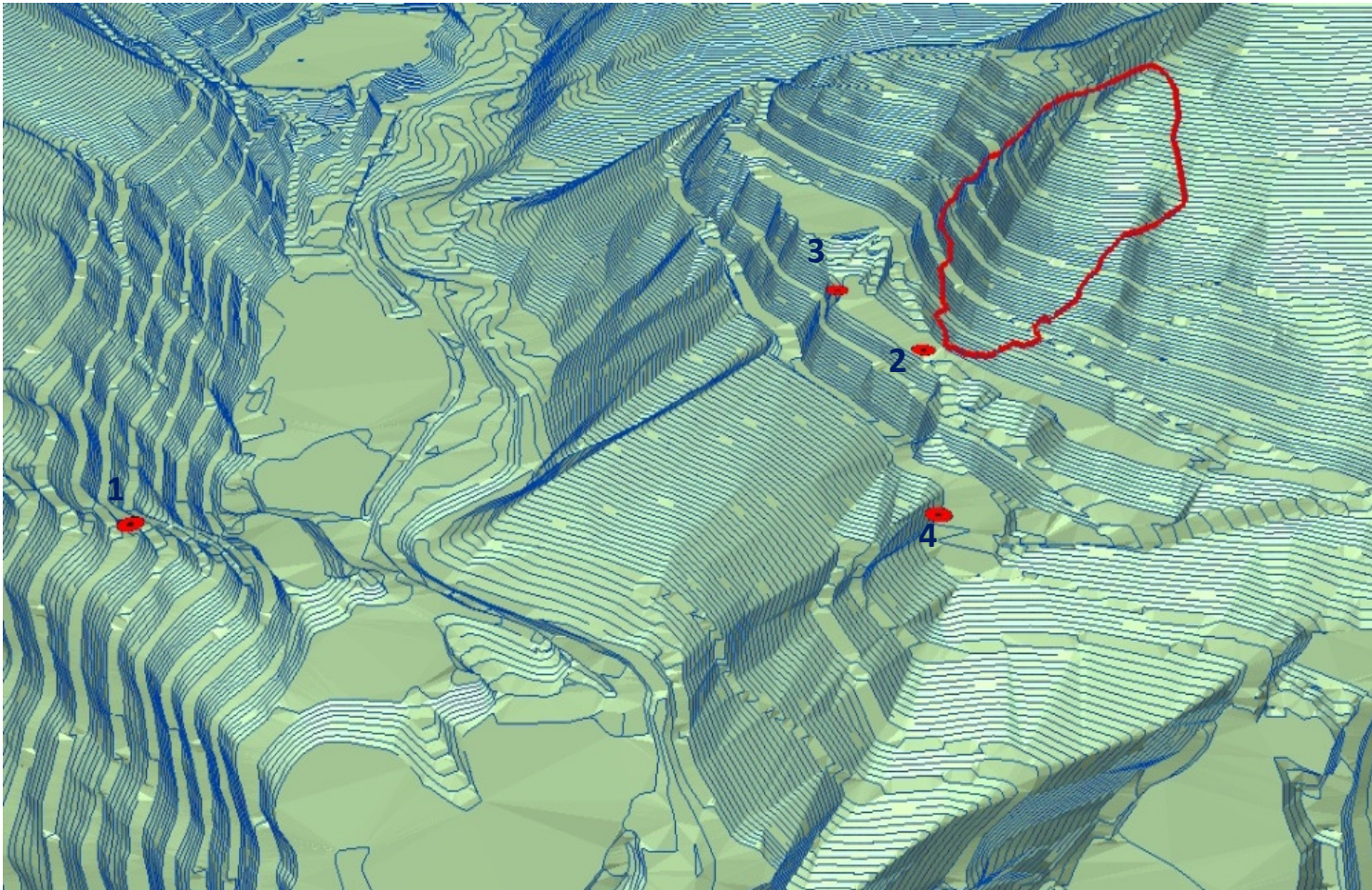


3 Sistemi (K1 – K2 – K3) + Stratificazione (BG)



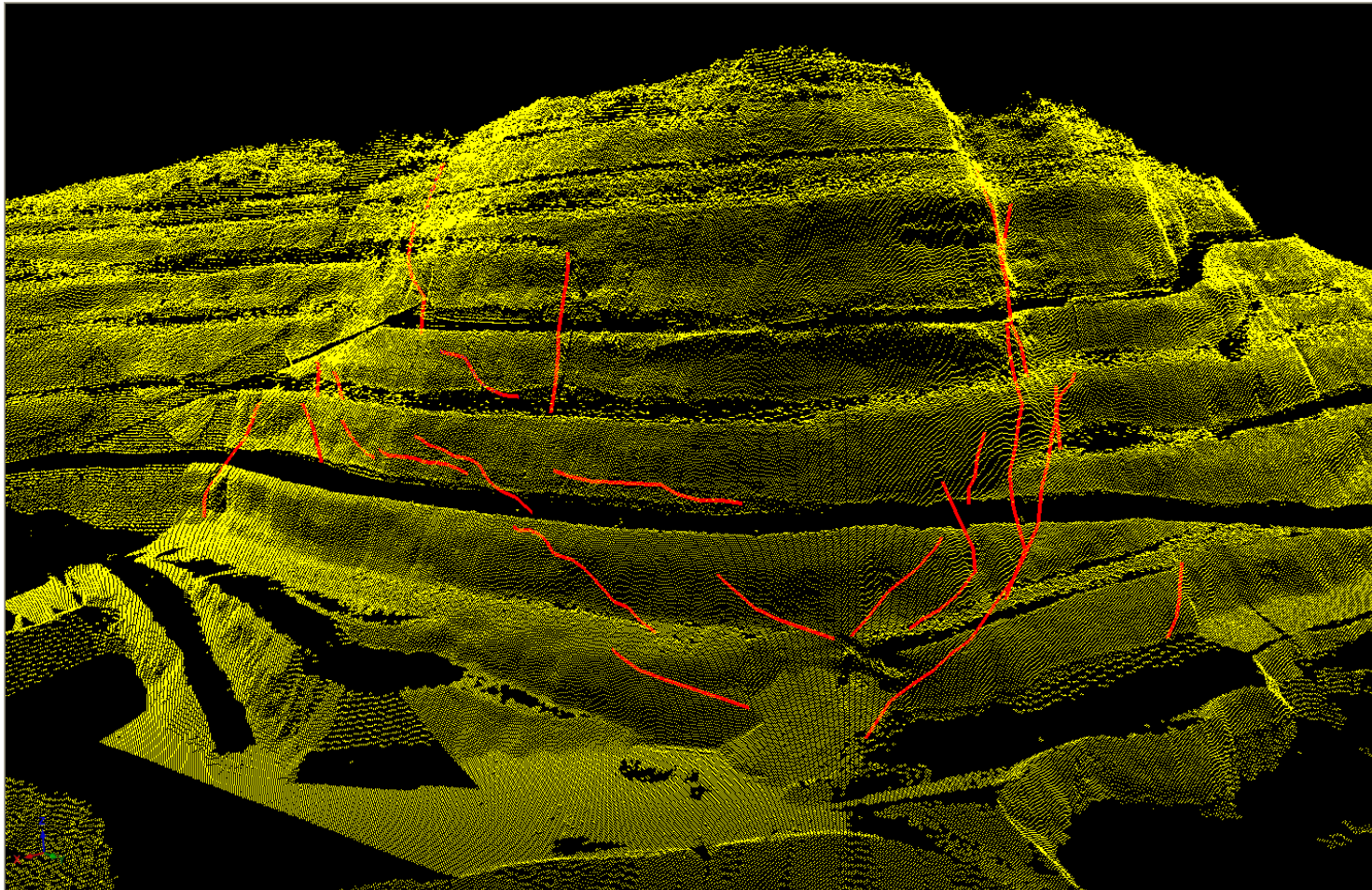
Discontinuità (Faglie, Giunti, Stratificazione)
in rappresentazioni stereografiche

Caso di Studio 1 - Parete in Calcare



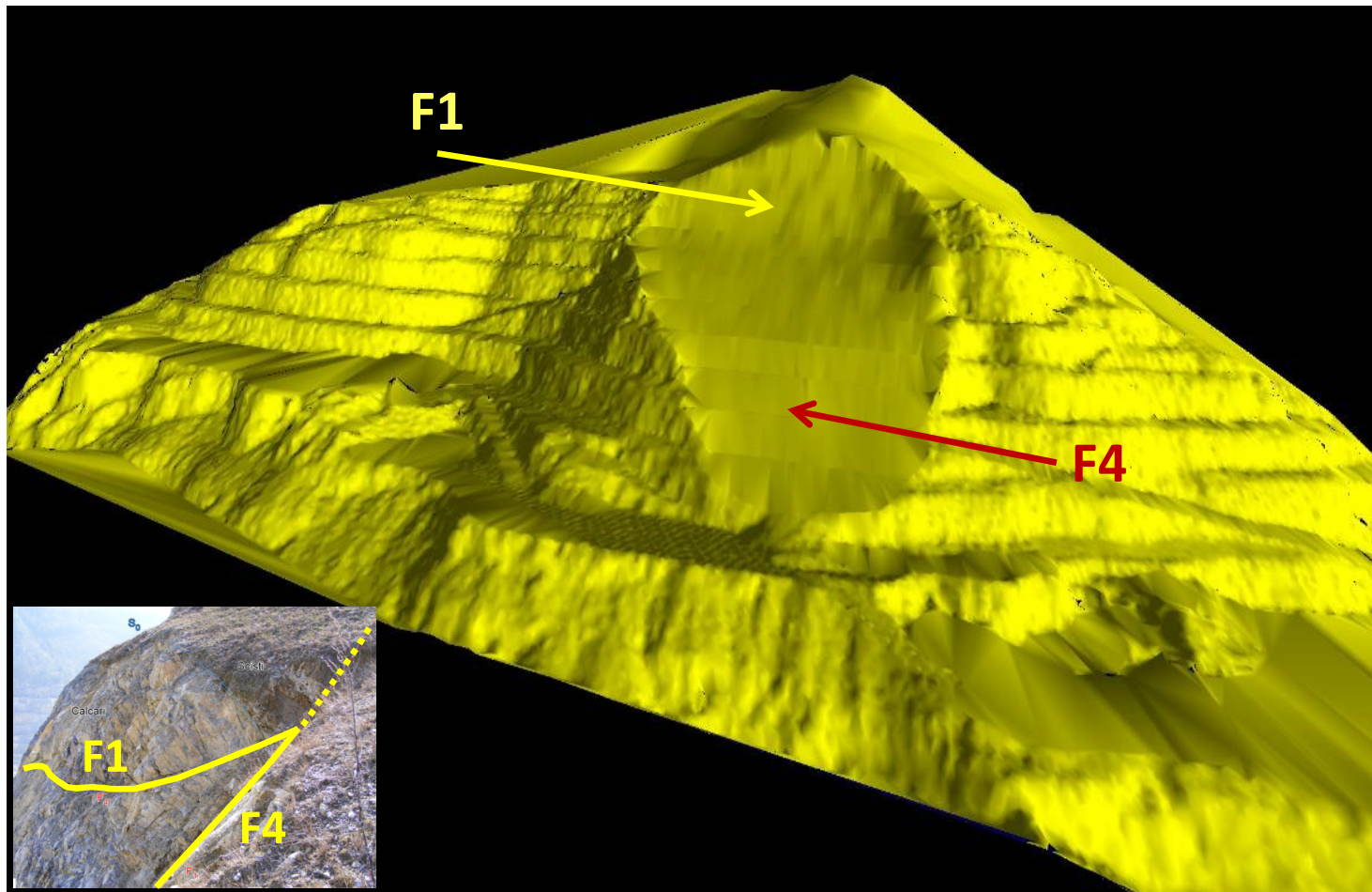
Laser Scanning
(1, 2, 3, 4)
punti di
scansione

Caso di Studio 1 - Parete in Calcare



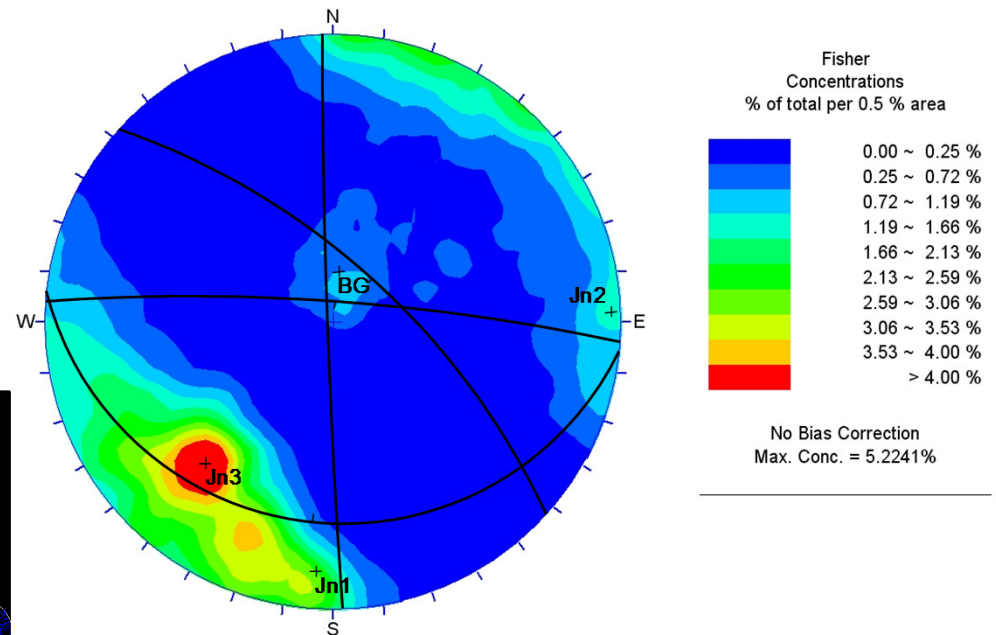
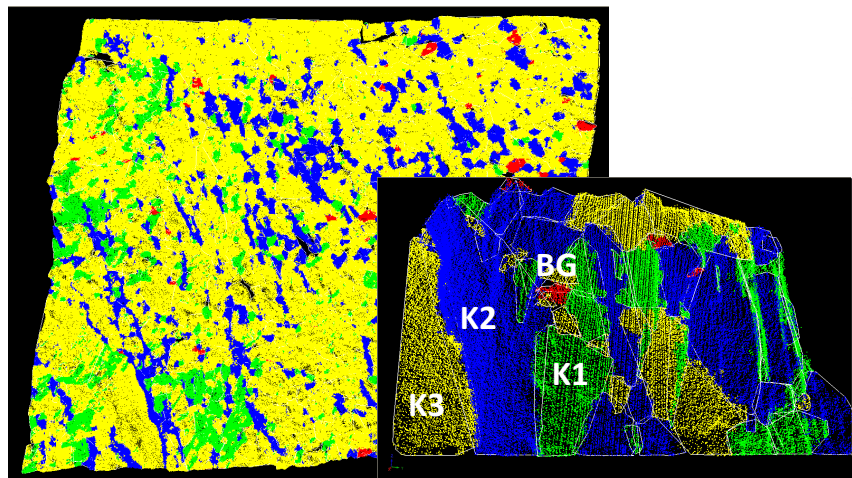
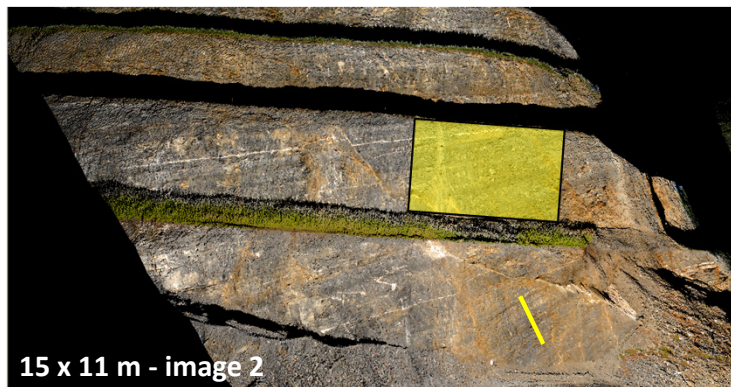
DTM con
sovrapposte
tracce di faglia,
discontinuità,...

Caso di Studio 1 - Parete in Calcare



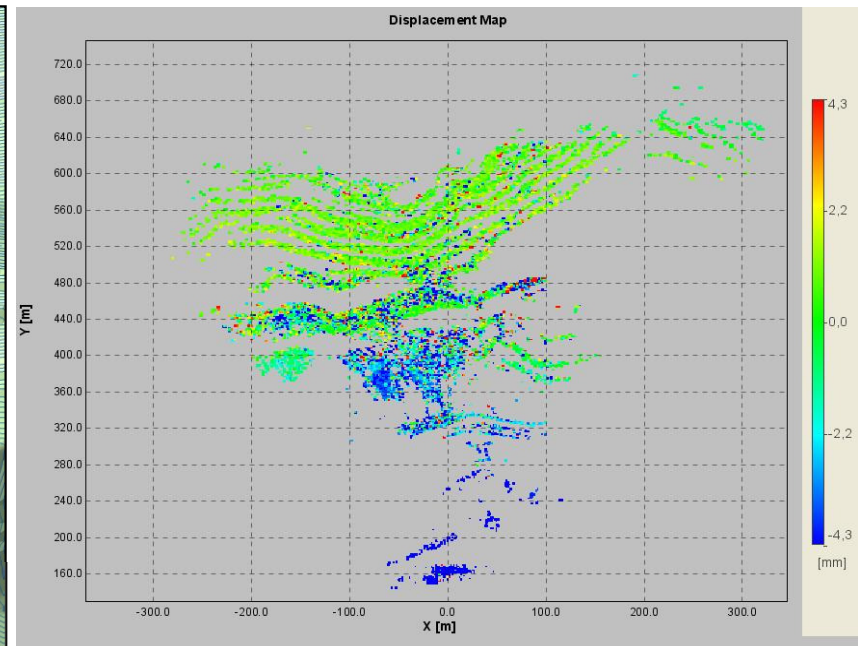
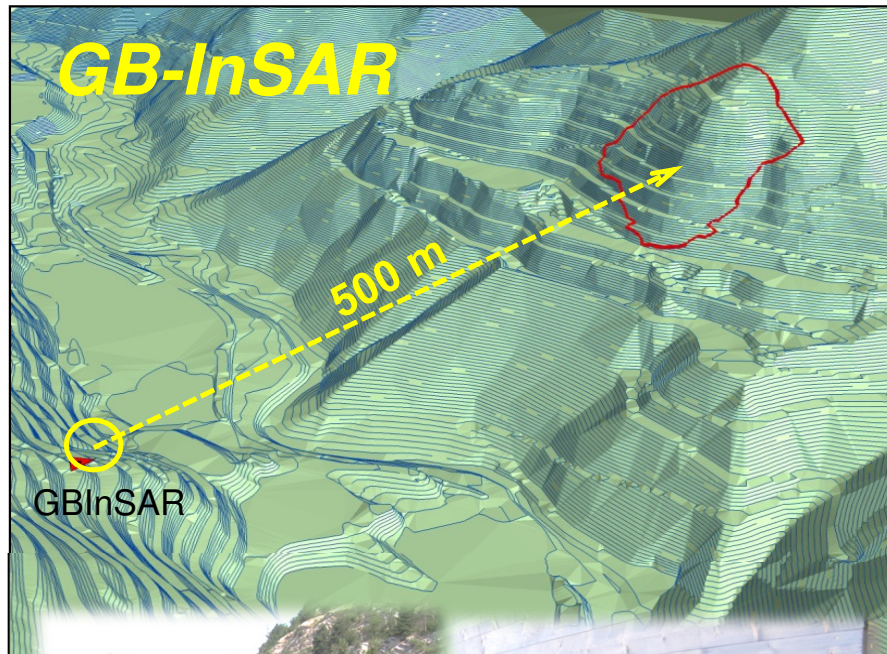
Stima volume
roccioso in
condizioni di
equilibrio limite
 $340 \cdot 10^3 \text{ m}^3$

Caso di Studio 1 - Parete in Calcare



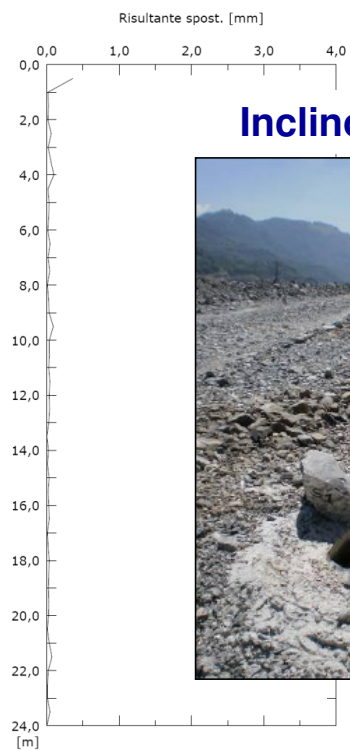
Vista l'intensa fratturazione dell'AR, l'analisi delle discontinuità è stata effettuata su una finestra rettangolare di dimensioni 15x11 m, estraendo 3571 superfici di discontinuità

Caso di Studio 1 - Parete in Calcare

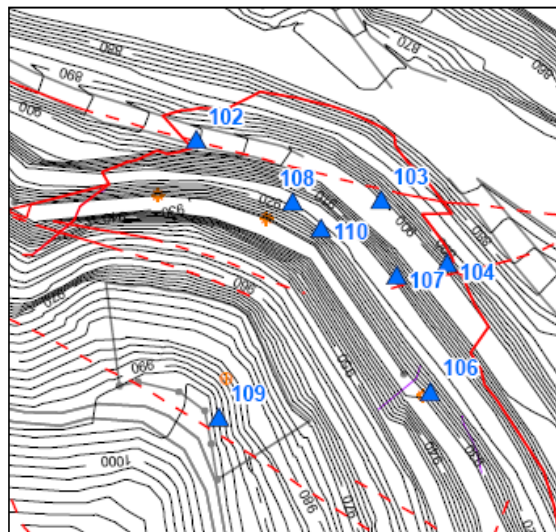


Lo scopo del monitoraggio è stato la determinazione del quadro deformativo del fronte di cava, l'individuazione di cinematismi di instabilità, nonché "early warning".

Caso di Studio 1 - Parete in Calcarea



Inclinometro S1

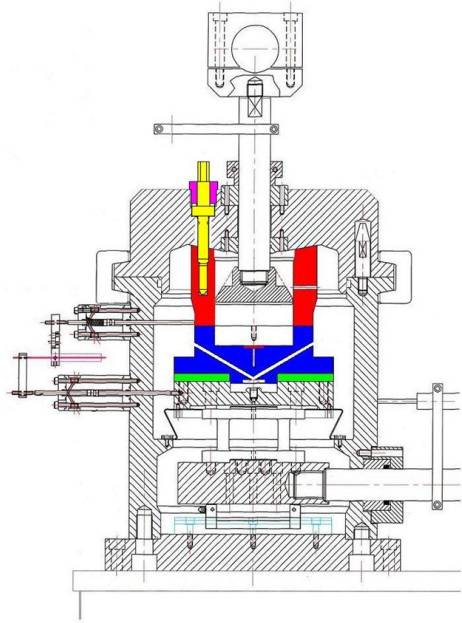


Stazione Totale

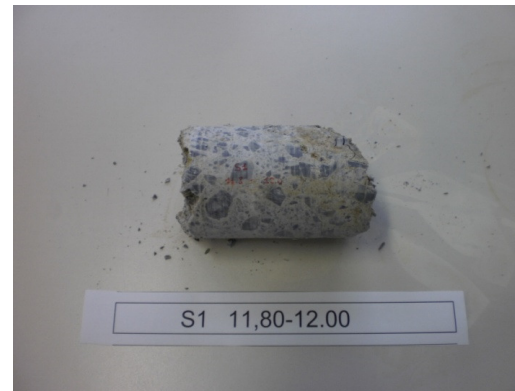
001:25/07/2011

Sistema di monitoraggio "convenzionale"

Caso di Studio 1 - Parete in Calcare



Calcare



Breccia



Giunti Artificiali Piani



Giunto Naturale

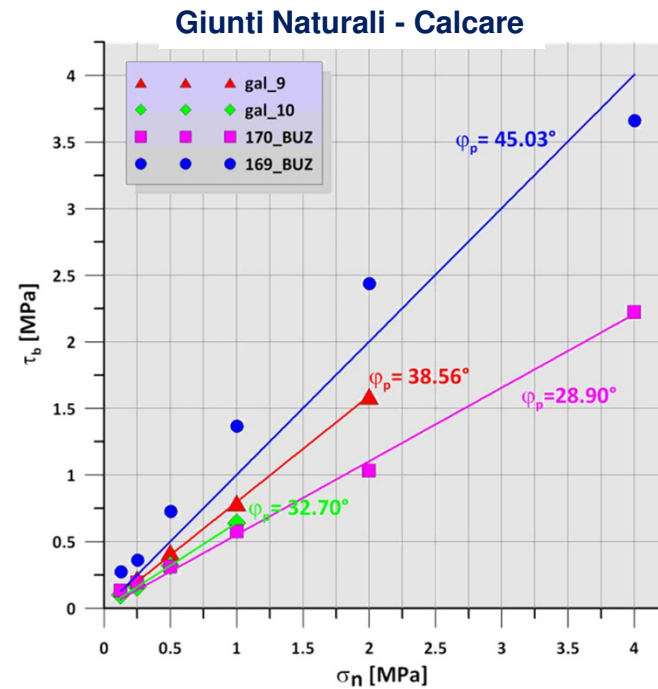
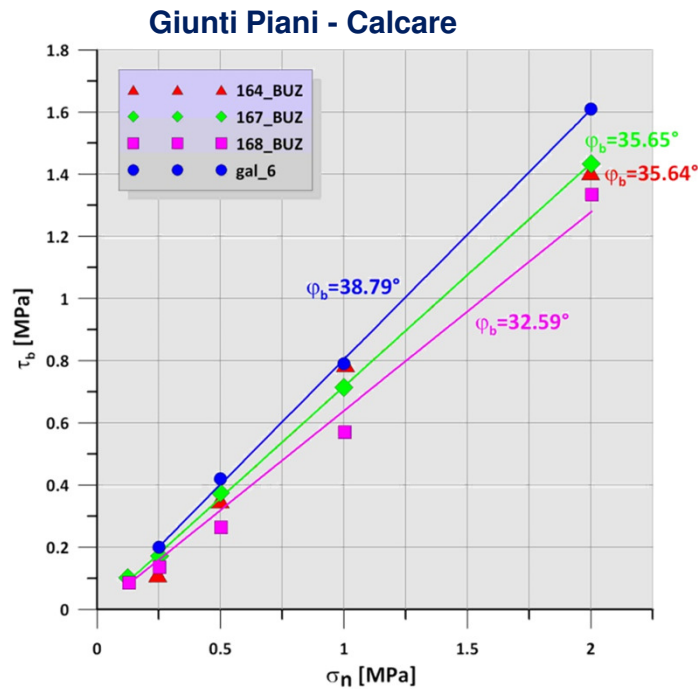


Giunti Naturali, Stratificazione

Prove Brasiliana,
Compressione Uniassiale e
Triassiale (Calcare e
Breccia)
Prove di Taglio Diretto
(Calcare e Breccia)
- Piani artificiali
- Giunti Naturali e
Stratificazione

Prove di Laboratorio

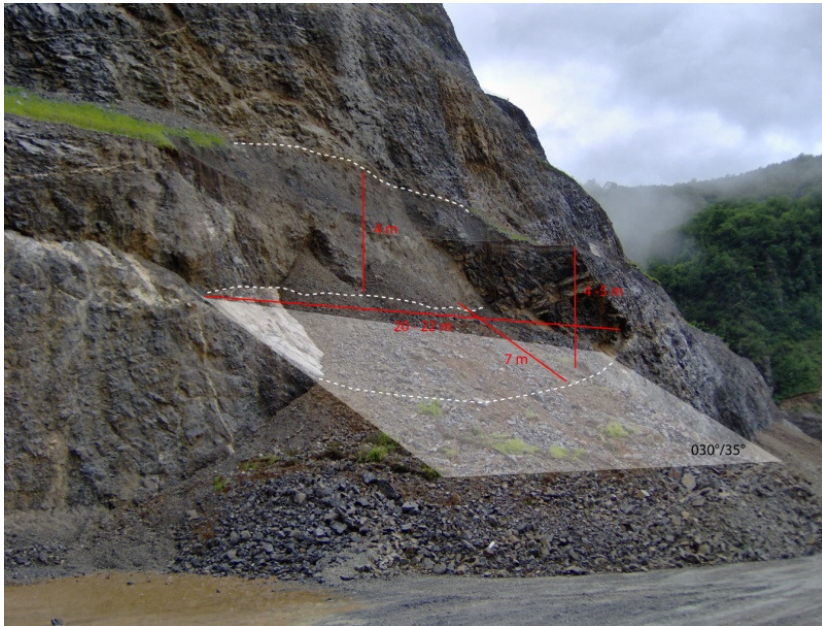
Caso di Studio 1 - Parete in Calcare



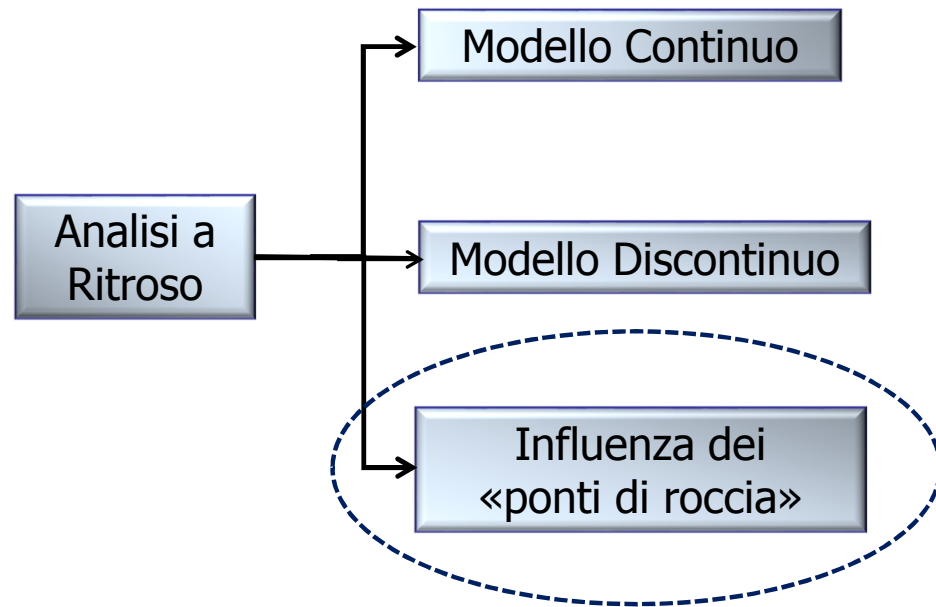
Test	Borehole	Φ_b forward [°]	Φ_b - back [°]	Φ_b - mean [°]	Test	Borehole	Φ_p - forward [°]	Φ_p back [°]	Φ_p - mean [°]	JRC
HPBPSA_164_BUZ	S2 - (9.0-9.6m)	35.64	-	35.7	HPBPSA_169_BUZ	S1-C1 (6.5-6.9m)	45.03	26.50	36.3	10-12
HPBPSA_167_BUZ	S1-C1 (6.5-6.9m)	35.65	37.87		HPBPSA_170_BUZ	S3-C4 (21.2-21.5m)	28.90	34.70		2-4
HPBPSA_168_BUZ	S1-C1 (6.5-6.9m)	32.59	29.91		gal9	S2 (16.4-16.6m)	38.56	-		2-4
gal6	S2 - (9.0-9.6m)	38.79	-		gal10	S3 (14.1-14.4m)	32.70	-		2-4

Prove di Laboratorio

Caso di Studio 1 - Parete in Calcarea

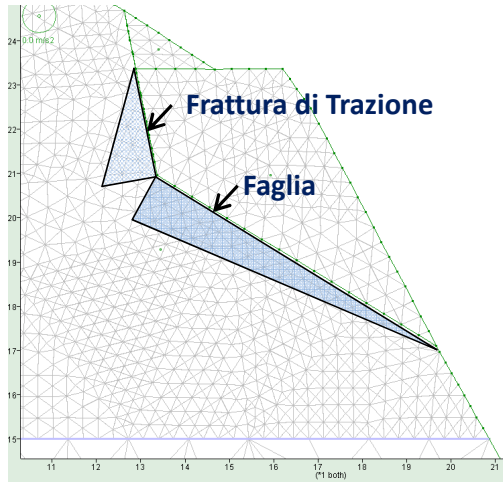


**l'angolo di attrito lungo la superficie di scivolamento
che coincide con F_4 per $F_s = 1$**

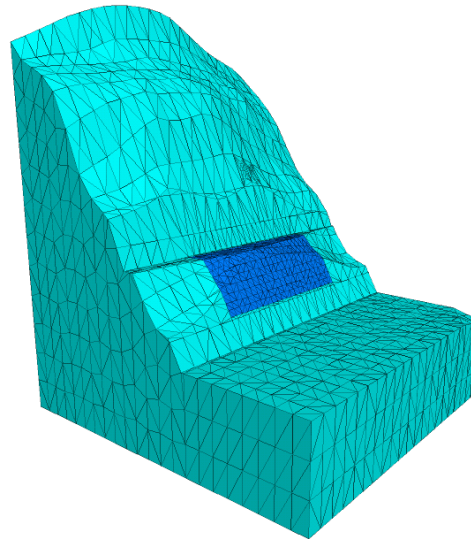


Analisi a ritroso

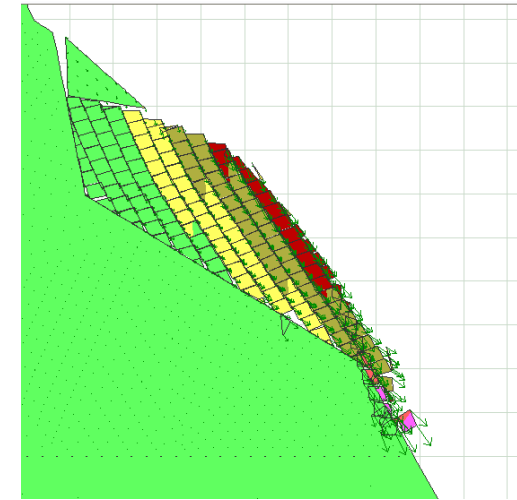
Caso di Studio 1 - Parete in Calcarea



Continuo - UDEC (2D)



Continuo - 3DEC (3D)



Discontinuo - UDEC (2D)

Superficie di scivolamento – No Acqua $F_s = 1$	
Metodo	φ_F [°]
LEM	31.3
UDEC 2D	30.8
3DEC 3D	29.7

Superficie di scivolamento – Con Acqua $F_s = 1$	
Metodo	φ_F [°]
LEM	42.6
UDEC 2D	40.4
3DEC 3D	37.3

Discontinuo – No Acqua $F_s = 1$	
Metodo	φ_F [°]
UDEC 2D	45.8
3DEC 3D	44.0

Discontinuo – Con Acqua $F_s = 1$	
Metodo	φ_F [°]
UDEC 2D	53.2
3DEC 3D	51.1

Analisi a ritroso

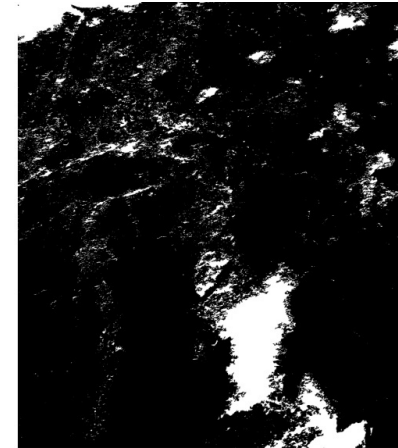
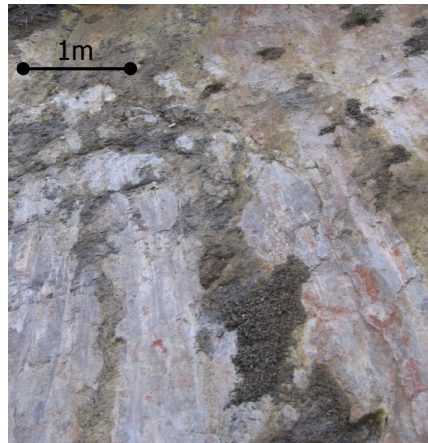
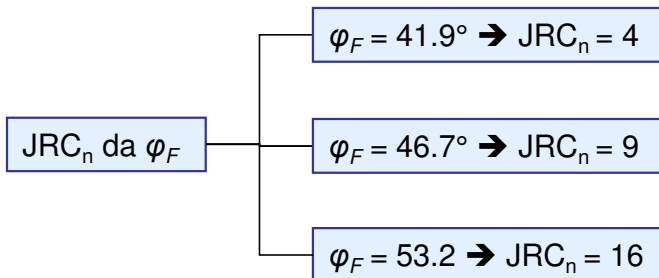
Caso di Studio 1 - Parete in Calcare

Valutazione di scabrezza – Ondulazione JRC_n :

Parametri	
σ_n mean	53.07 kPa
JCS ₀	1.77 MPa
φ_r	38.2°

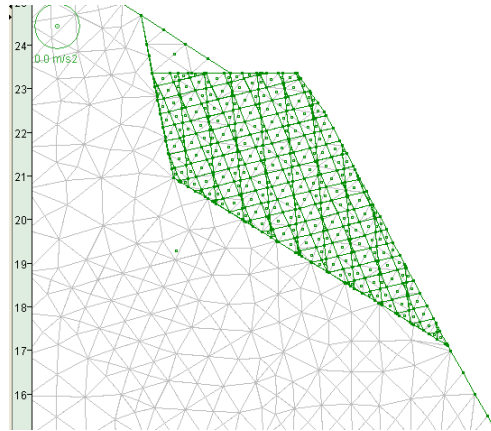
$$\varphi_F = JRC_n \cdot \text{Log} \frac{JCS_n}{\sigma_n} + \varphi_r \longrightarrow JRC_n$$

Persistenza stimata (dove apprezzabile) 80-85%

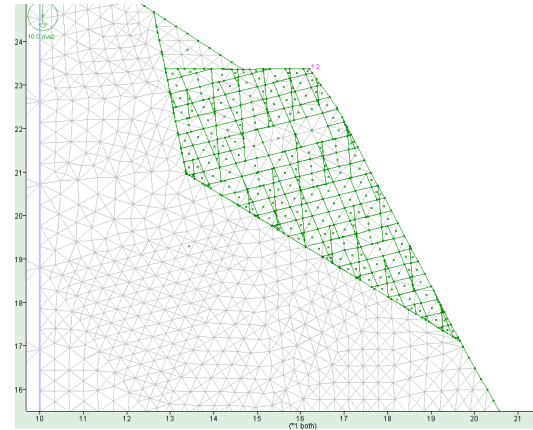


Analisi a ritroso

Caso di Studio 1 - Parete in Calcare



Persistenza 100%

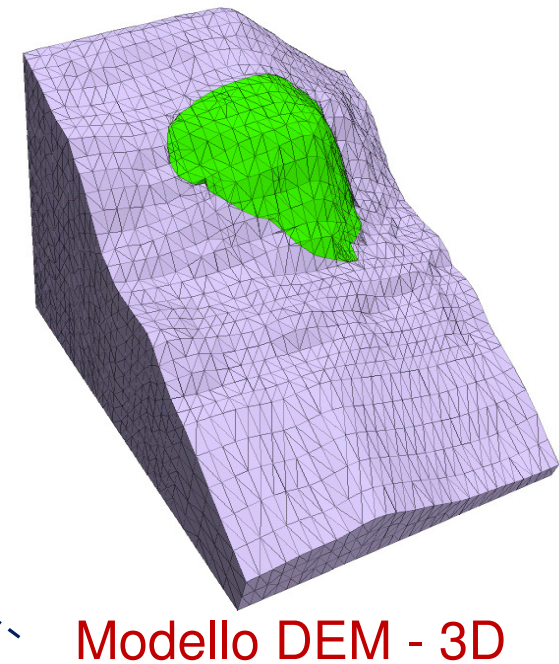
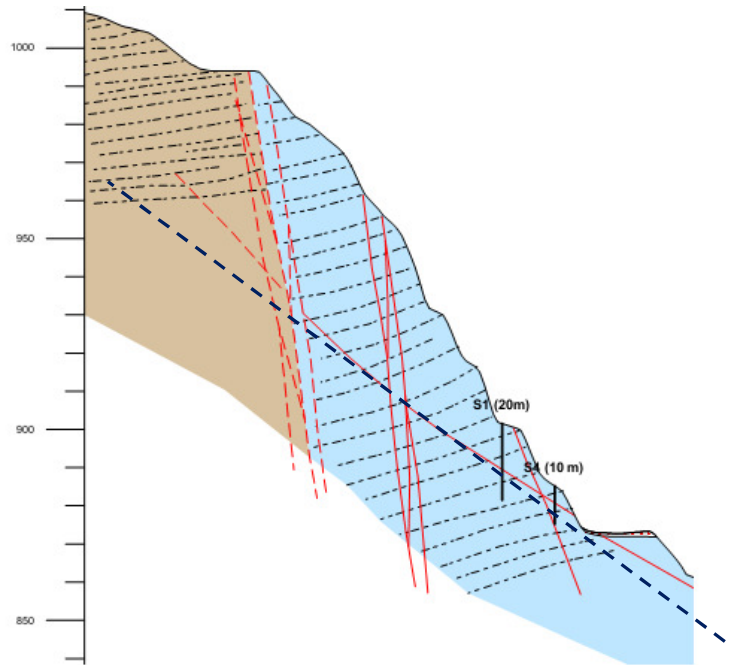
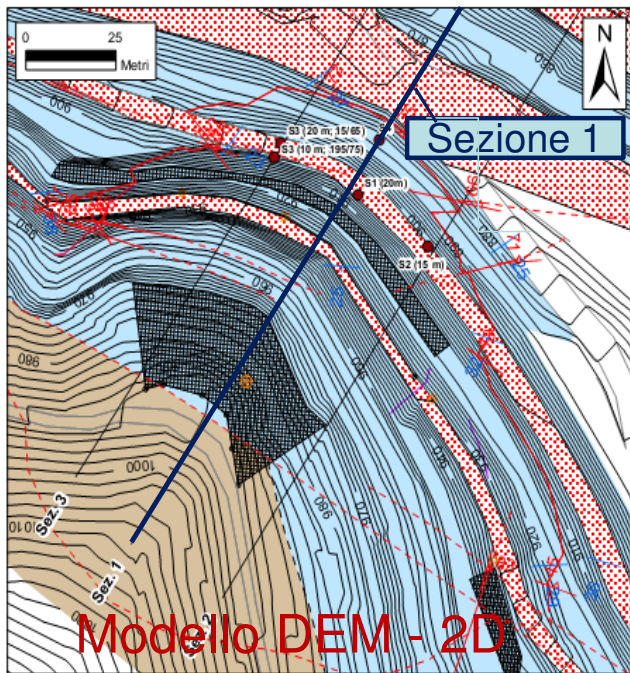


Persistenza 80%

Discontinuo – No Acqua $F_s = 1$		Discontinuo – Con Acqua $F_s = 1$	
Persistenza	φ_F [°]	Persistenza	φ_F [°]
100	45.8	100	53.2
80	36.7	80	43.8
70	34.1	70	41.6
0	30.8	0	40.4

Analisi a ritroso

Caso di Studio 1 - Parete in Calcare



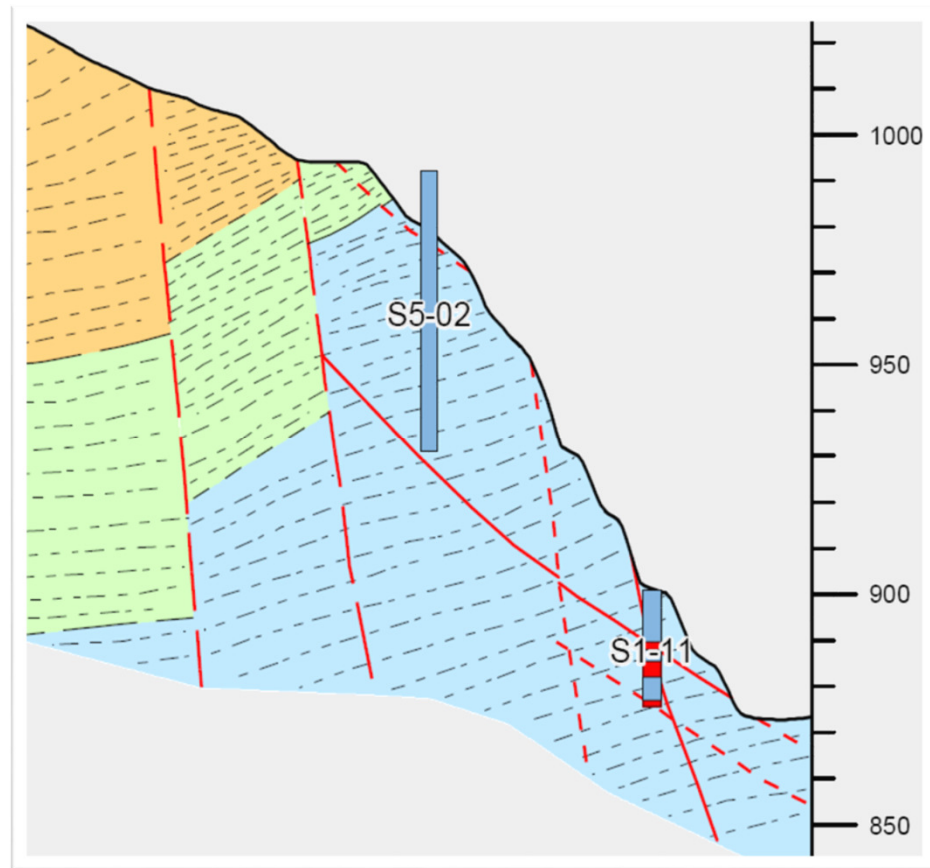
Analisi di stabilità globale

Caso di Studio 1 - Parete in Calcare

F _s		Overall Slope – Water Head			
Water Head z _w [m]	φ _F [°]	LEM	UDEC		3DEC ELPLA
			EL	ELPLA	
50	37.3	0.46	0.52	0.50	0.53
25	37.3	0.75	0.78	0.76	0.83
15	37.3	0.88	0.90	0.85	0.93
5	37.3	1.01	1.01	0.96	1.03

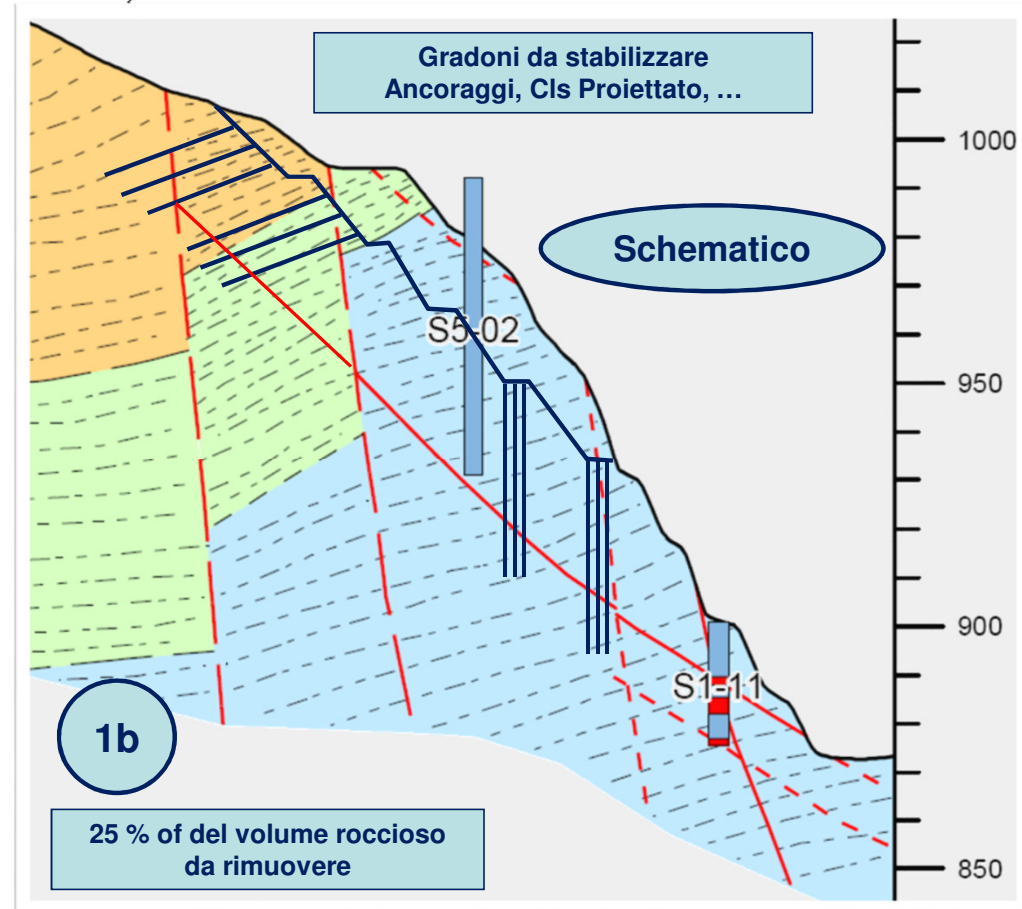
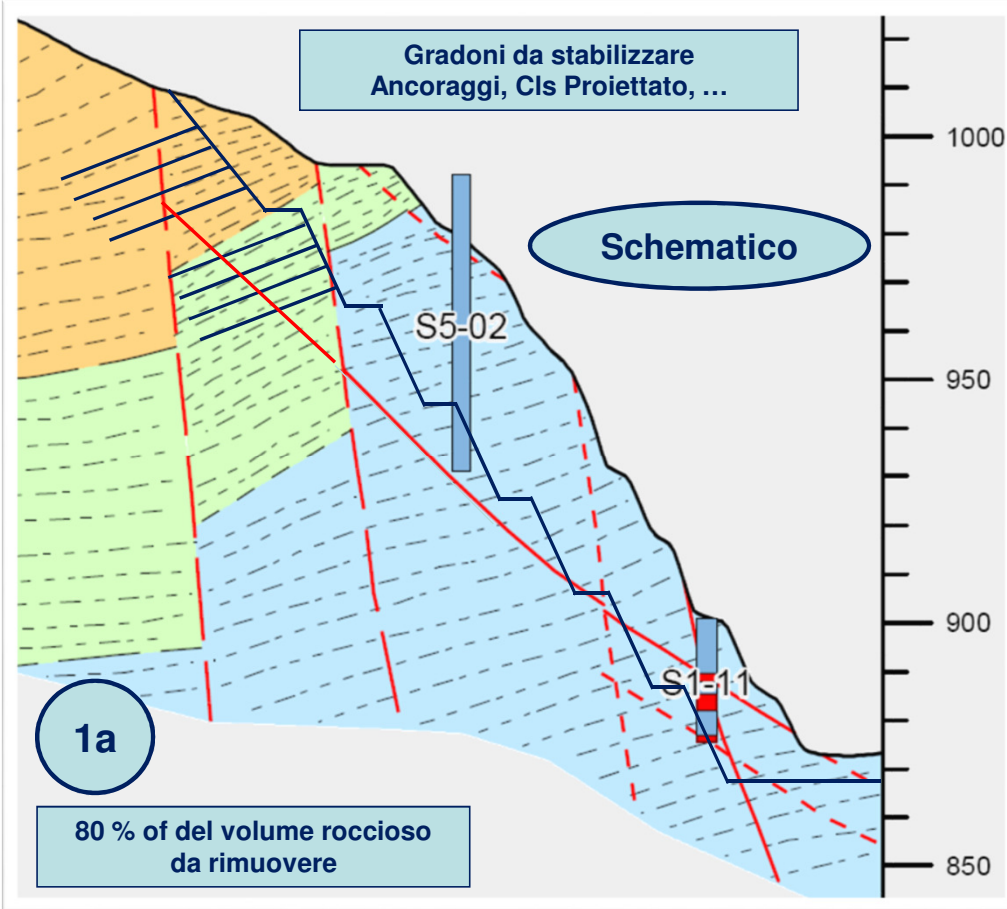
F _s		Overall Slope – Water Head			
Water Head z _w [m]	φ _F [°]	LEM	UDEC		3DEC ELPLA
			EL	ELPLA	
50	41.9	0.54	0.61	0.58	0.62
25	41.9	0.88	0.92	0.88	0.97
15	41.9	1.03	1.06	0.99	1.08
5	41.9	1.19	1.20	1.07	1.19

F _s		Overall Slope – Water Head			
Water Head z _w [m]	φ _F [°]	LEM	UDEC		3DEC ELPLA
			EL	ELPLA	
50	46.7	0.64	0.72	0.63	0.74
25	46.7	1.04	1.08	1.04	1.13
15	46.7	1.22	1.25	1.12	1.26
5	46.7	1.41	1.42	1.15	1.37



Analisi di stabilità globale

Caso di Studio 1 - Parete in Calcare



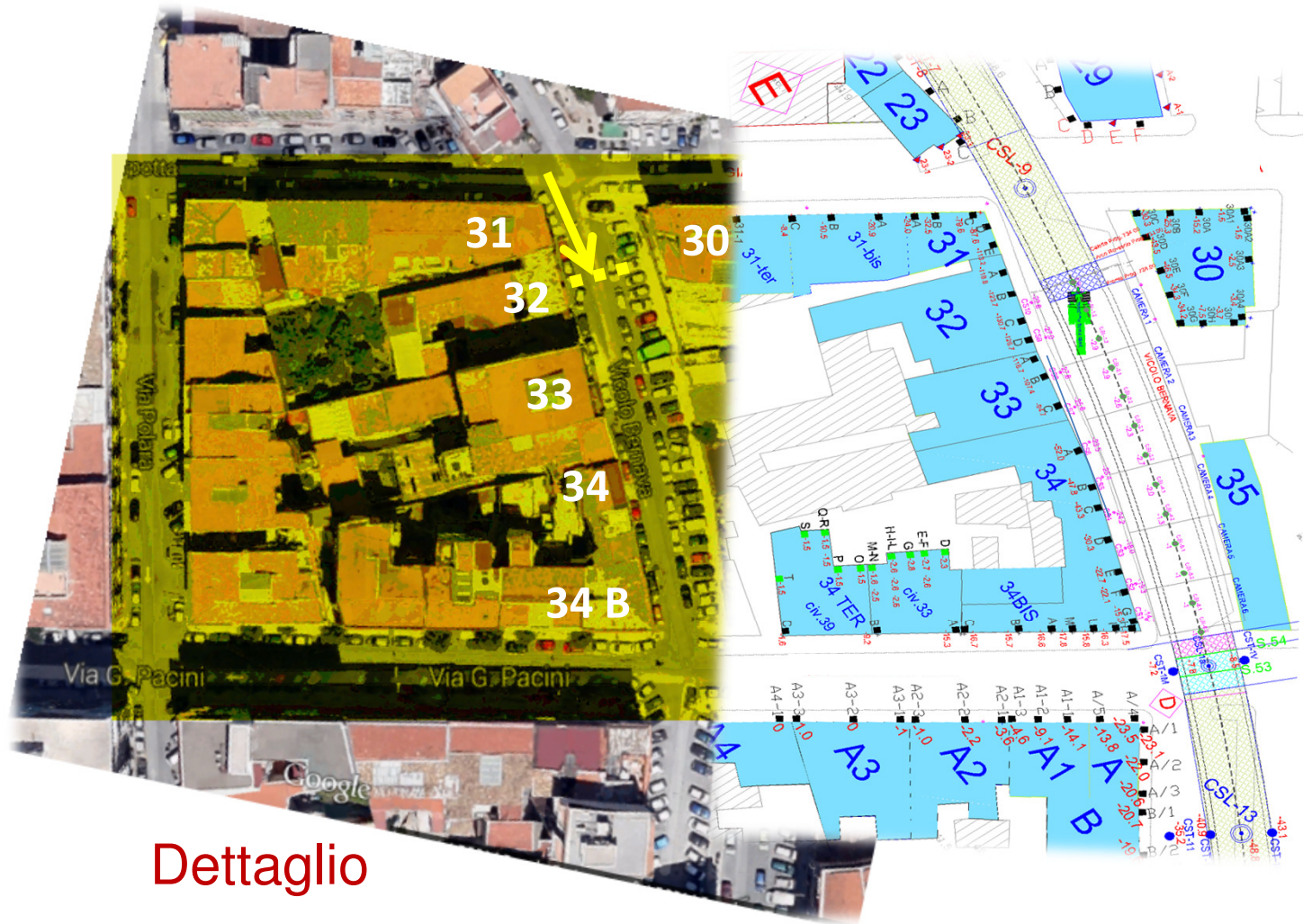
Possibili Interventi

Caso di Studio 2 - Galleria Urbana



Il problema riguarda una galleria urbana, in un tratto interessato da venute d'acqua accompagnata da sabbia. Si sono indotti cedimenti in superficie con effetti importanti sugli edifici. I fenomeni si sono verificati dopo un articolato intervento di consolidamento dall'alto con trattamenti colonnari.

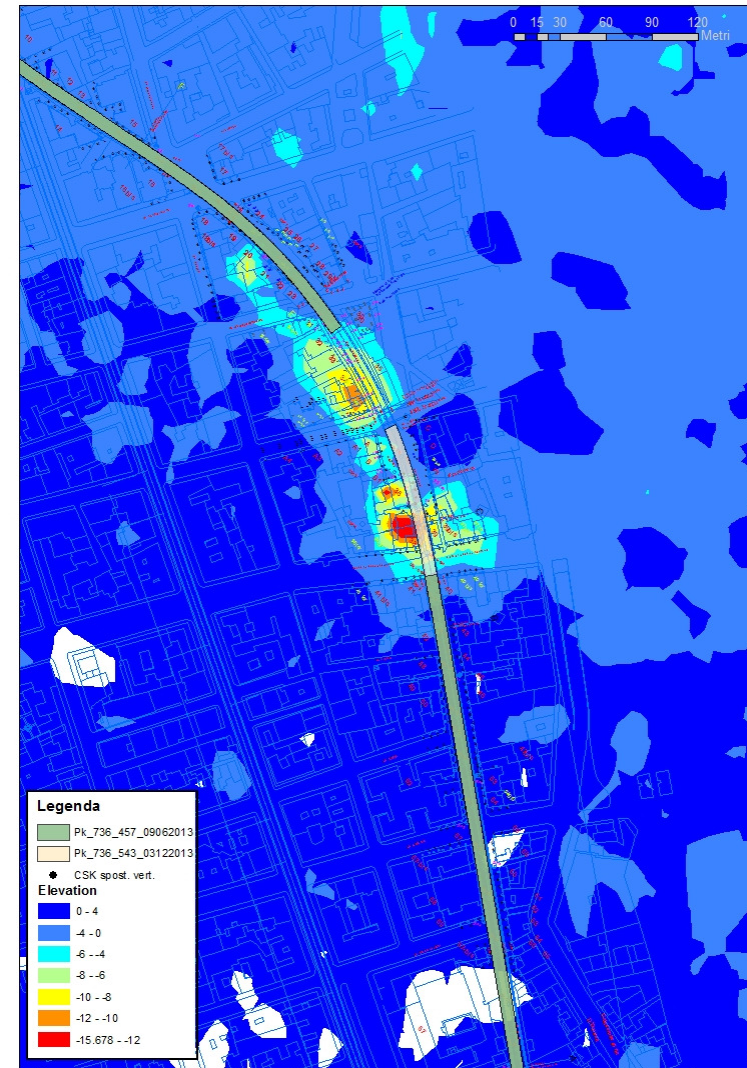
Caso di Studio 2 - Galleria Urbana



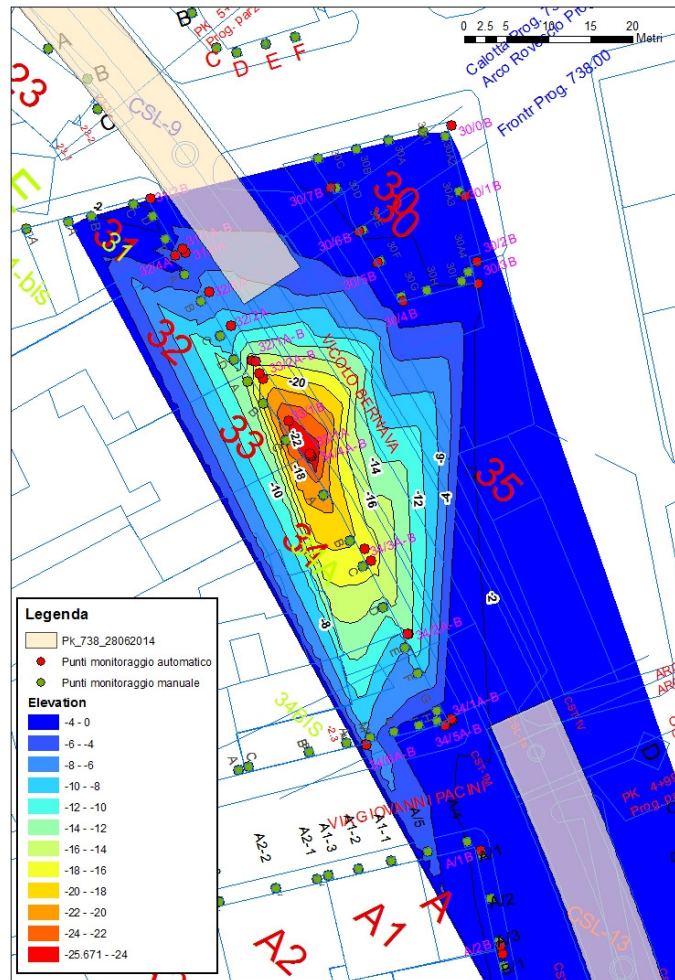
I dati satellitari sono stati usati per creare delle mappe di spostamento cumulato e differenziale, da cui estrarre le curve di iso-cedimento e valutare i volumi persi

Metodologia:

- Interpolando i dati puntuali si ricavano delle mappe di spostamento cumulato (raster). La metodologia di interpolazione comporta:
 1. Ricampionamento dati su griglia regolare (esempio: 20x20m, 10x10m)
 2. Estrazione delle curve di iso-cedimento a spaziatura scelta, utilizzando un tool tipo «*Countour* di ArcMap»
 3. Calcolo del volume perso, ipotizzando il limite della conca di subsidenza



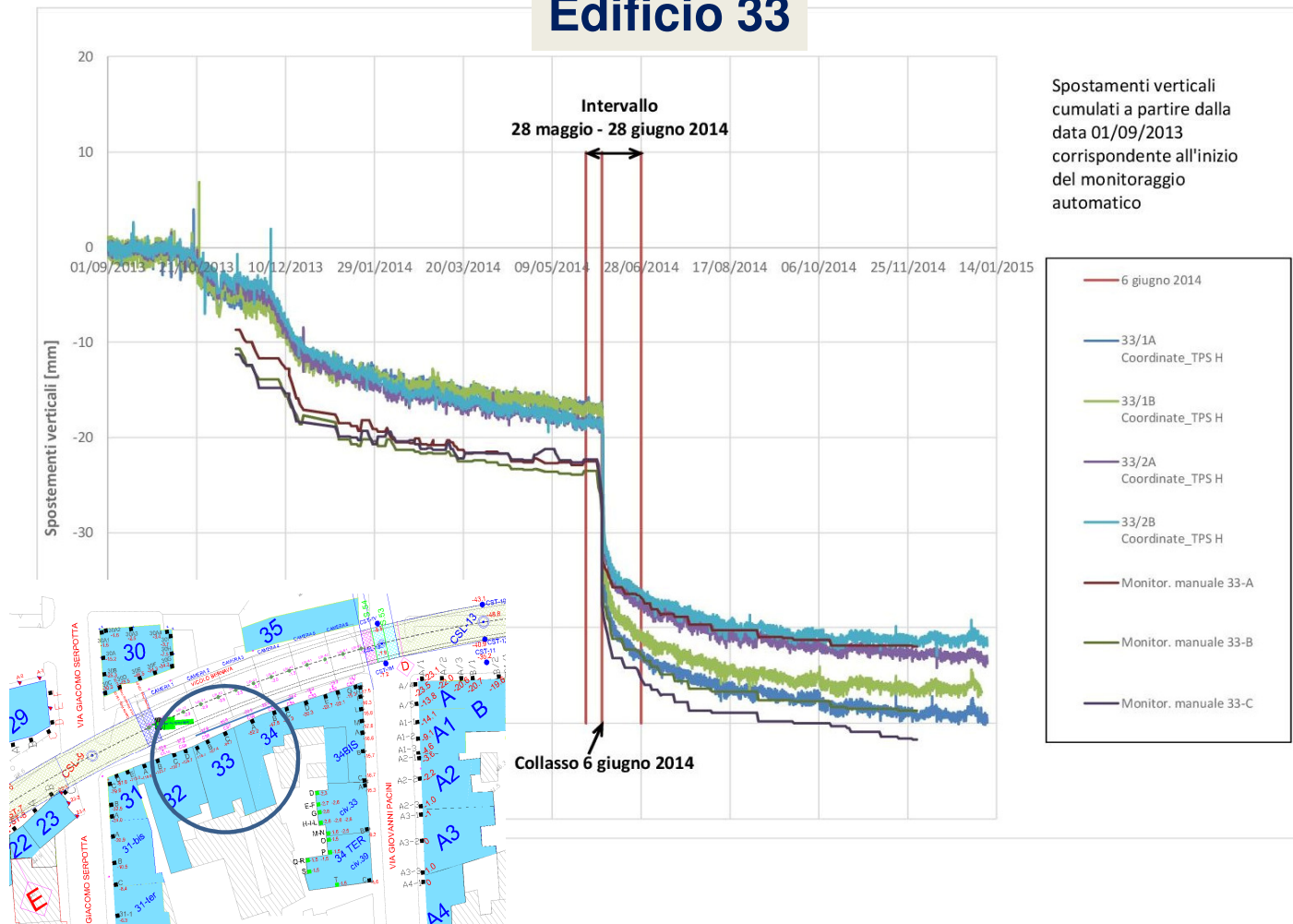
Caso di Studio 2 - Galleria Urbana



**MONITORAGGIO
AUTOMATICO E
MANUALE**

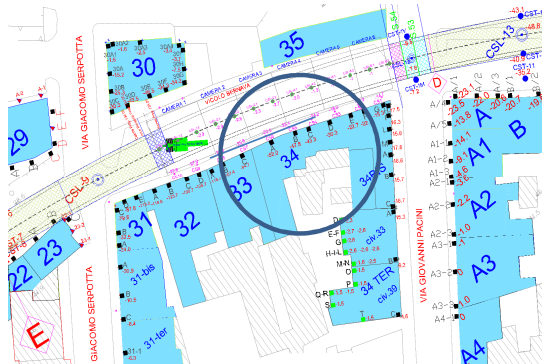
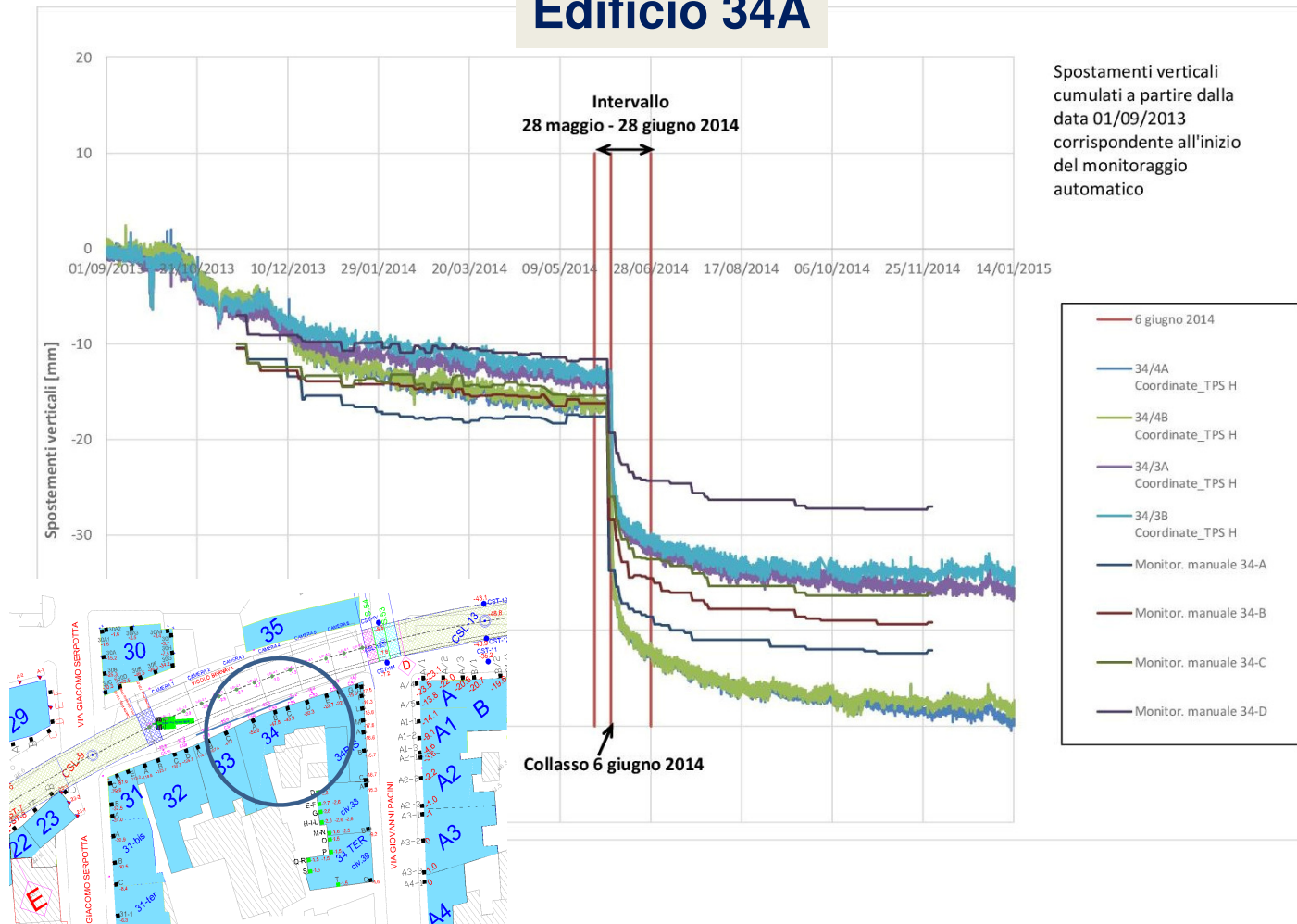
Caso di Studio 2 - Galleria Urbana

Edificio 33

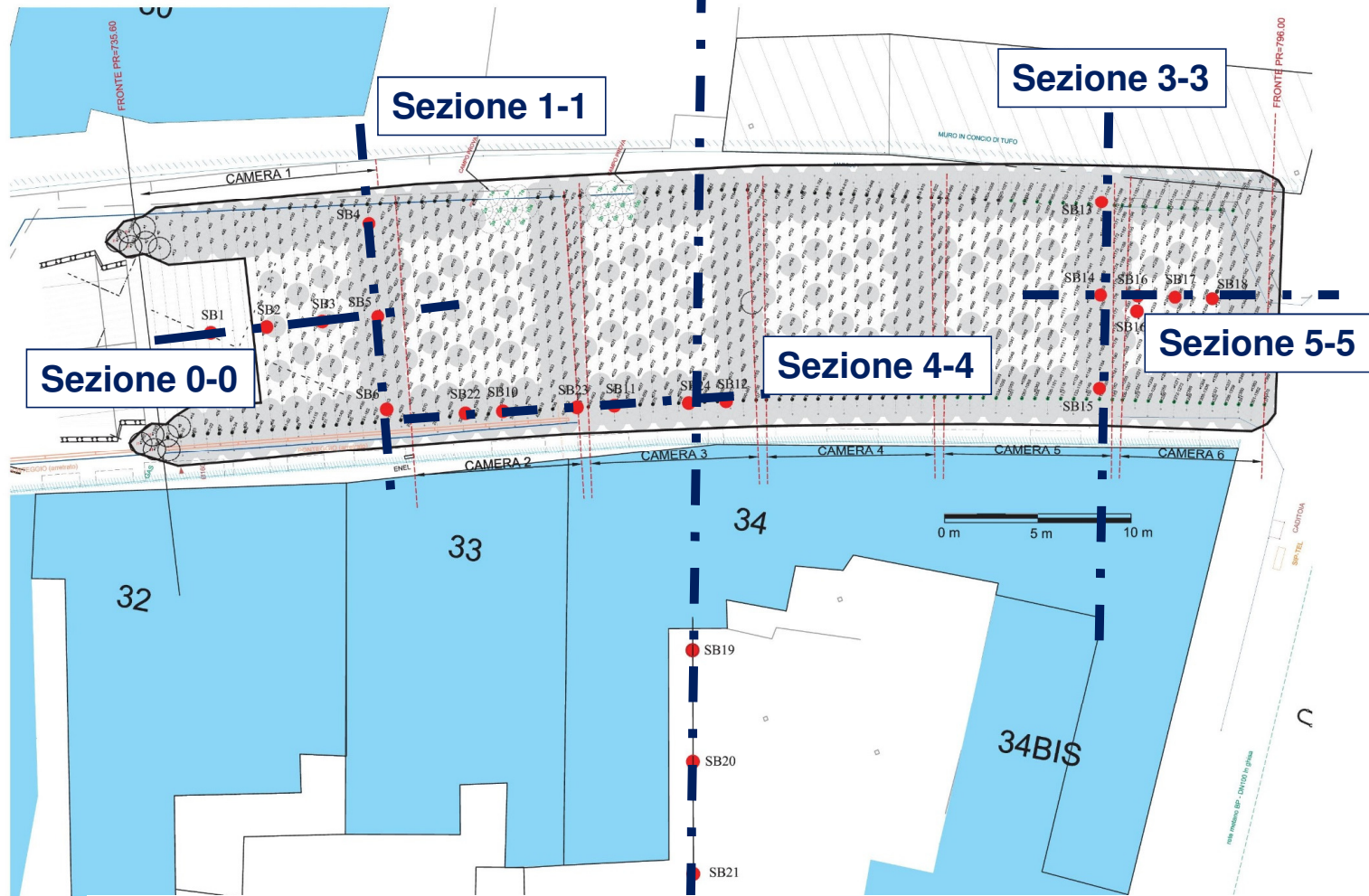


Caso di Studio 2 - Galleria Urbana

Edificio 34A



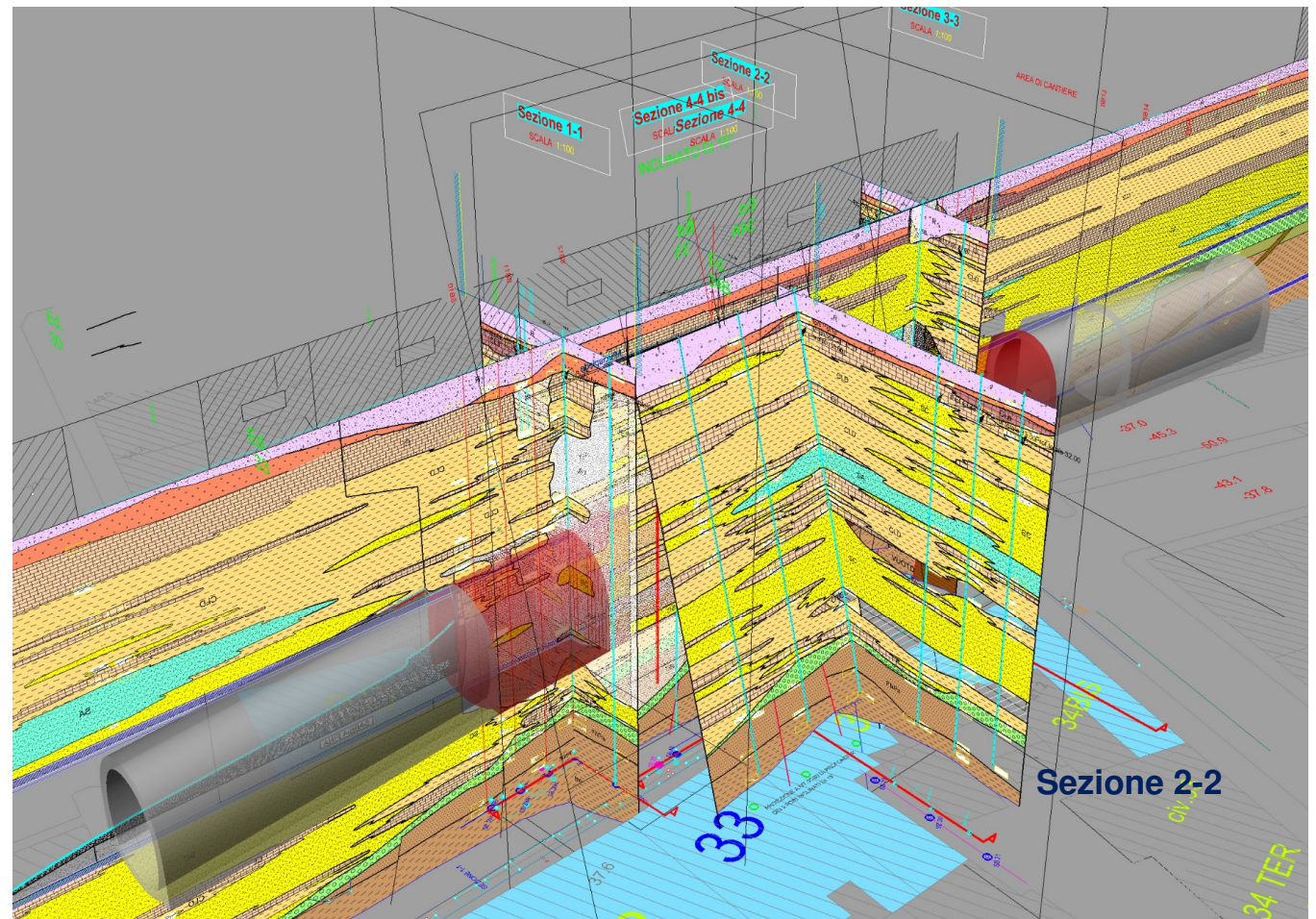
Caso di Studio 2 - Galleria Urbana



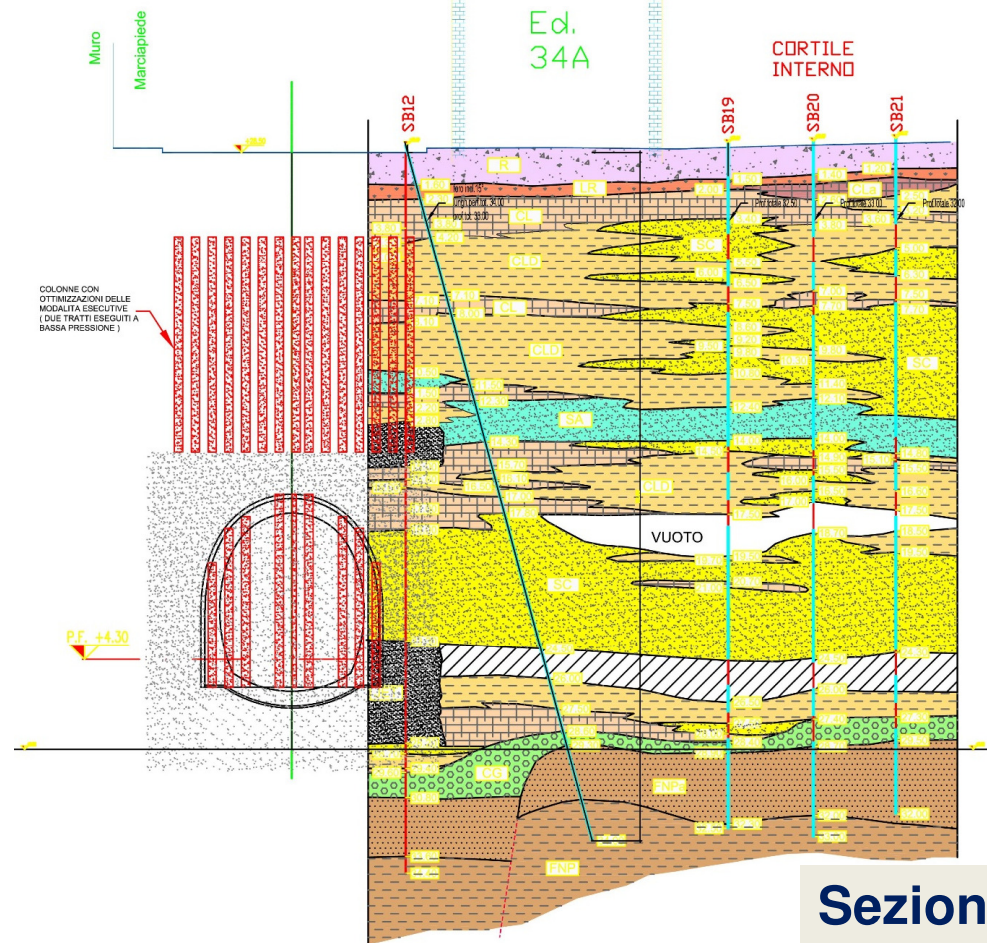
PERFORAZIONI DI SONDAGGIO ED INDAGINE CROSS-HOLE

Caso di Studio 2 - Galleria Urbana

**MODELLO 3D
CONDIZIONI
GEOLOGICO-
STRATIGRAFICHE DA
PERFORAZIONI DI
SONDAGGIO ED
INDAGINE CROSS-HOLE**



Caso di Studio 2 - Galleria Urbana



PERFORAZIONI DI SONDAGGIO ED INDAGINE CROSS-HOLE

Caso di Studio 2 - Galleria Urbana

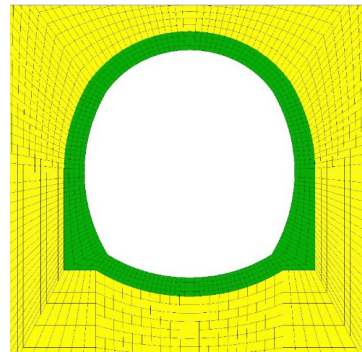
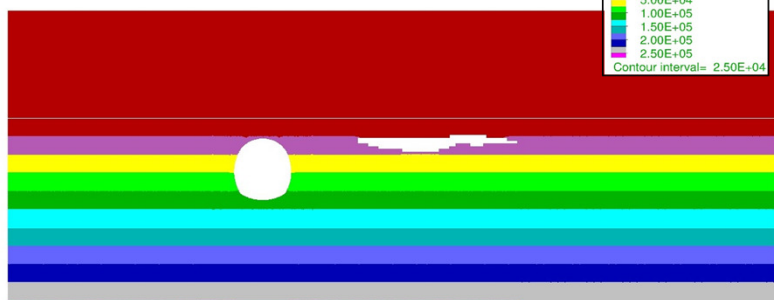
Sezione geologico-stratigrafica ricostruita



User-defined Groups



Pressioni idrostatiche



Lo scopo è stato quello di ricostruire a ritroso l'andamento degli spostamenti derivati dai dati satellitari!

Il modello comprende la galleria, sul cui intorno è introdotta la zona di terreno consolidato.

Vengono riprodotti fedelmente il vuoto sotto gli edifici (*vuoto superiore*) ed il livello di sabbie poco addensate (*vuoto inferiore*).

Caso di Studio 2 - Galleria Urbana

Litotipo	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ' (°)	E (MPa)	ν (-)
R/LR	19	15	32	24	0.30
CL/CLD/CLa	19	25	32	130	0.35
SC/CG/SA	19	0	27	40	0.35
FNP/FNP _a	20	20	24	60	0.35

La legge di comportamento del terreno (per ciascun litotipo presente) è quella di un mezzo omogeneo, isotropo ed elasto-plastico, secondo il modello di Mohr-Coulomb.

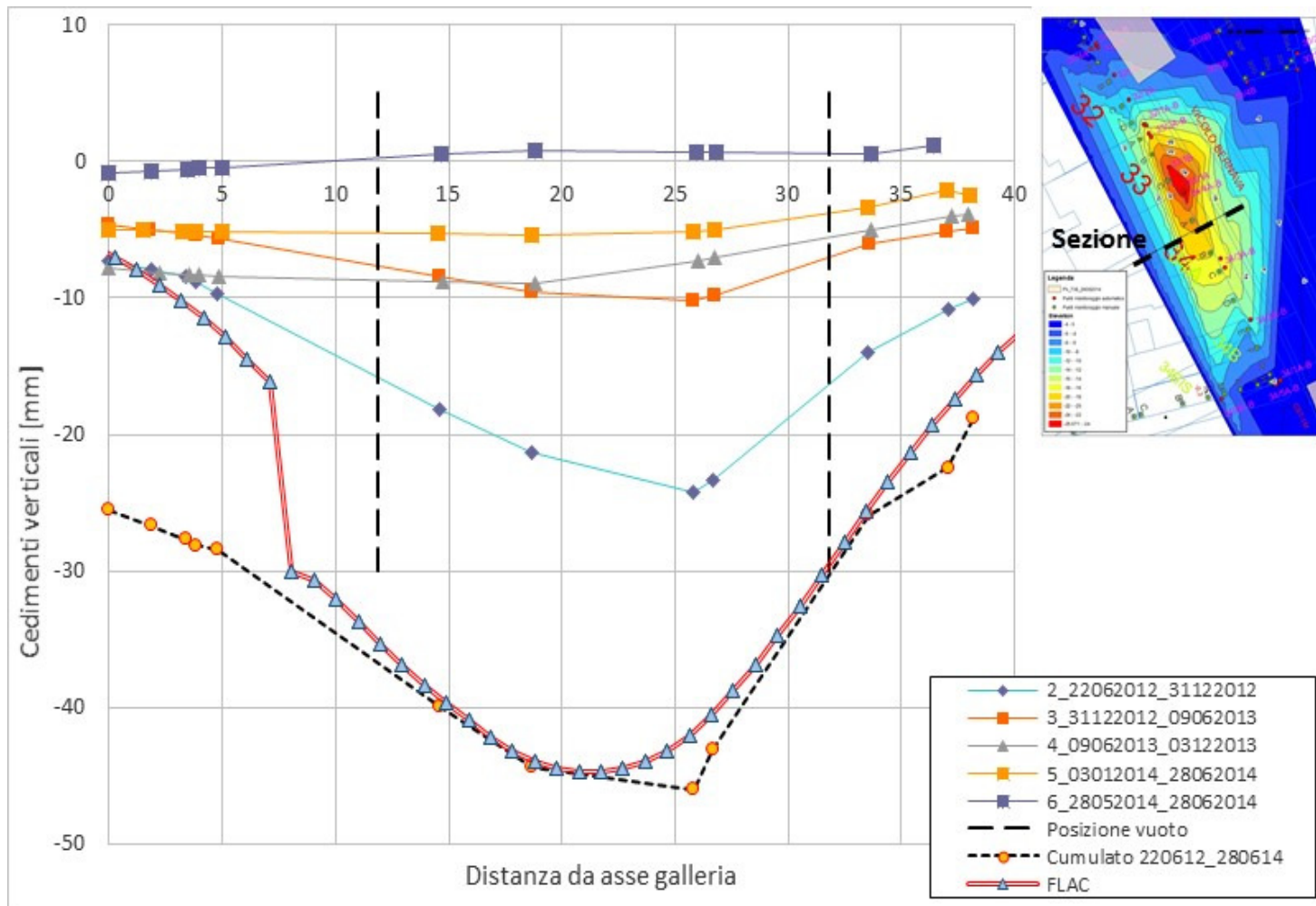
In linea con la ricostruzione geologico-stratigrafica disponibile, ai diversi litotipi sono attribuite le caratteristiche geotecniche note.

Caso di Studio 2 - Galleria Urbana

Le condizioni iniziali nel modello sono definite simulando a ritroso i cedimenti verificatisi in superficie, tenendo conto dell'andamento dei cedimenti derivanti dalle misure interferometriche da satellite.

Si sono rilasciate progressivamente le tensioni agenti sul bordo del “vuoto superiore”, partendo da una condizione di equilibrio statico, sino ad ottenere la condizione ricercata. Al livello di terreno inferiore (“vuoto inferiore”), poco addensato, è attribuito un comportamento elasto-plastico con parametri $c'=0$ kPa, $\varphi'=27^\circ$, $E=15$ MPa.

Caso di Studio 2 - Galleria Urbana



Riepilogo e Conclusioni

- ❖ I metodi innovativi di rilievo geomeccanico descritti (Laser Scanner e Fotogrammetria), debbono essere sempre accompagnati da rilevamento geomeccanico convenzionale, indispensabile a scopo di validazione.
- ❖ Le tecnologie di monitoraggio esaminate (SAR, GB-InSAR, TLStation) sono state viste come integrazione ai metodi di monitoraggio convenzionale, per una completa descrizione quantitativa dei fenomeni.
- ❖ L'auspicio è che gli esempi fatti abbiano concorso ad illustrare quanto sopra. In tutti i casi, la modellazione è vista come utile ed indispensabile strumento, solo se basato su dati e scenari documentati e realistici.
- ❖ L'augurio è che i due casi di studio (parete rocciosa e galleria urbana), analizzati nei diversi aspetti, abbiano completato il quadro di cui sopra.



United Nations
Educational, Scientific and
Cultural Organization



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

- UNESCO Chair on the Prevention and Sustainable Management of Geo-Hydrological Hazards,
- University of Florence, Italy

Metodi Innovativi di Indagine e Monitoraggio come Strumenti per l'Analisi di Problemi Complessi di Ingegneria Geotecnica

Giovanni Barla