



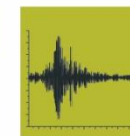
ASSEMBLEA GENERALE
DEGLI ISCRITTI ALL'ORDINE DEI GEOLOGI DEL LAZIO
LA PROFESSIONE DEL GEOLOGO NEL LAZIO
Prevenzione, analisi e soluzioni.



FRANE



EROSIONE



TERREMOTI



CAVITÀ



CAVE

Monitoraggio e gestione della pericolosità da crollo di cavità sotterranee

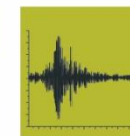
Gianluigi Giannella – geologo libero professionista
Marco Mizzoni - ingegnere libero professionista



FRANE



EROSIONE



TERREMOTI



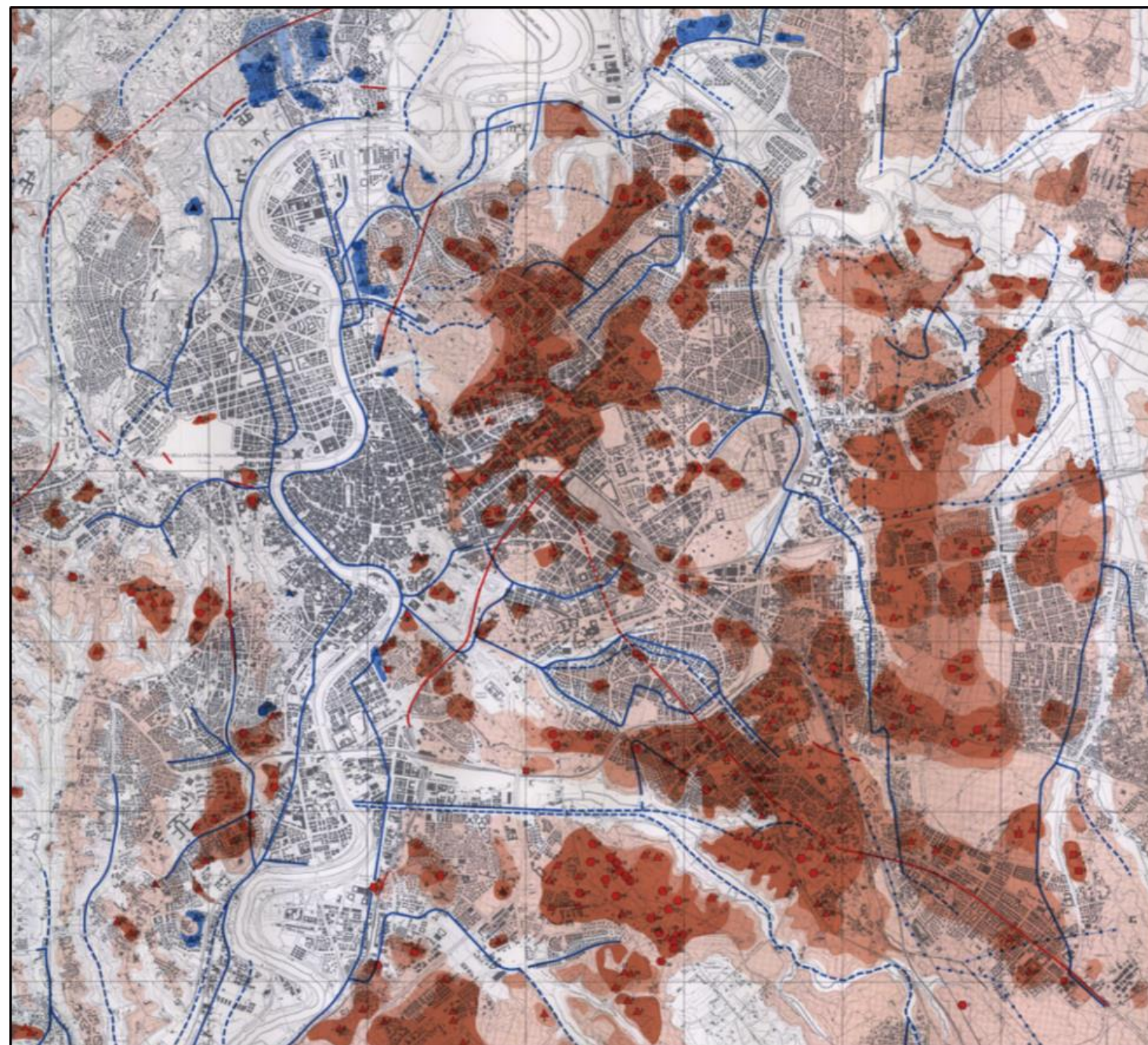
CAVITÀ



CAVE

Gran parte della città di
Roma in sinistra
Tevere è interessata da
fitti reticoli di cavità
sotterranee realizzati
nel corso dei secoli per
l'escavazione di
pozzolane

*Ugo Ventriglia (1971)
La geologia della città di Roma
Carta delle Cavità sotterranee*



*“Monitoraggio e gestione della pericolosità da crollo di cavità
sotterranee”*

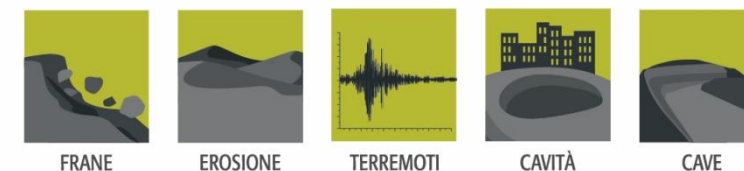


ASSEMBLEA GENERALE

DEGLI ISCRITTI ALL'ORDINE DEI GEOLOGI DEL LAZIO

LA PROFESSIONE DEL GEOLOGO NEL LAZIO

Prevenzione, analisi e soluzioni.



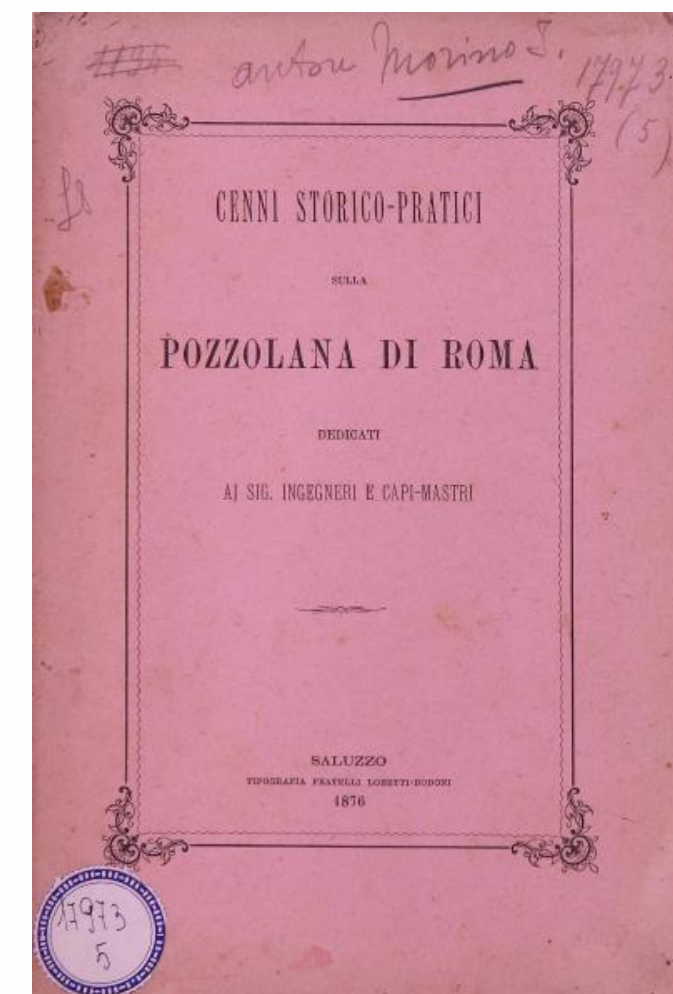
«Le pozzolane laziali sono migliori di quelle flegree perché più rapidamente reattive» (Enciclopedia Italiana, voce Pozzolana)



Civitavecchia 3. Dicembre. Durante l'anno milit. 1842 sono arrivati in questo porto 23 bastimenti austriaci di ton. 4616; cioè 5 da Marsiglia, 4 da Roma, 4 da Fiume, 3 da Venezia, 2 da Genova, 1 d' Alessandria, 1 da Livorno, 1 da Malta, 1 da Hyeres ed 1 da Segna; de' quali 14 carichi di div. per il valore di f. 11080. E ne partirono 7 per Venezia, 5 per Roma, 5 per Marsiglia, 2 per Messina, 2 per Trieste ed 1 per Fiume; in tutto 22, de' quali 8 carichi di Pozzolana, per il valore di f. 5560.

anni	pozzolana grezza (m ³)	pozzolana vagliata (m ³)
1887	1.411.000	196.300
1888	845.000	245.000
1889	737.750	173.000
1890	663.800	167.000
1891	318.700	275.000
1892	334.500	142.000
1893	300.000	140.000

Produzione annuale di pozzolana
(da: Le cave di pozzolana nei dintorni di Roma - L. Demarchi, ingegnere capo del Regio Corpo delle Miniere, 1894)



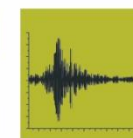
Le fortificazioni di Lione (Francia), sì antiche che moderne, furono costrutte in Pozzolana rossa di Roma, e così dicasi di quasi tutti i porti della Francia, Spagna, America, ed attualmente essa è esclusivamente impiegata nella costruzione del Porto di Odessa, in Russia, giacchè saggiamente quel Governo volle che le costruzioni murarie fossero esclusivamente costrutte in Pozzolana, e così dicasi degli ammirabili lavori del Porto della Spezia, eseguiti sotto la direzione dell'illustre generale Pescetto.



FRANE



EROSIONE



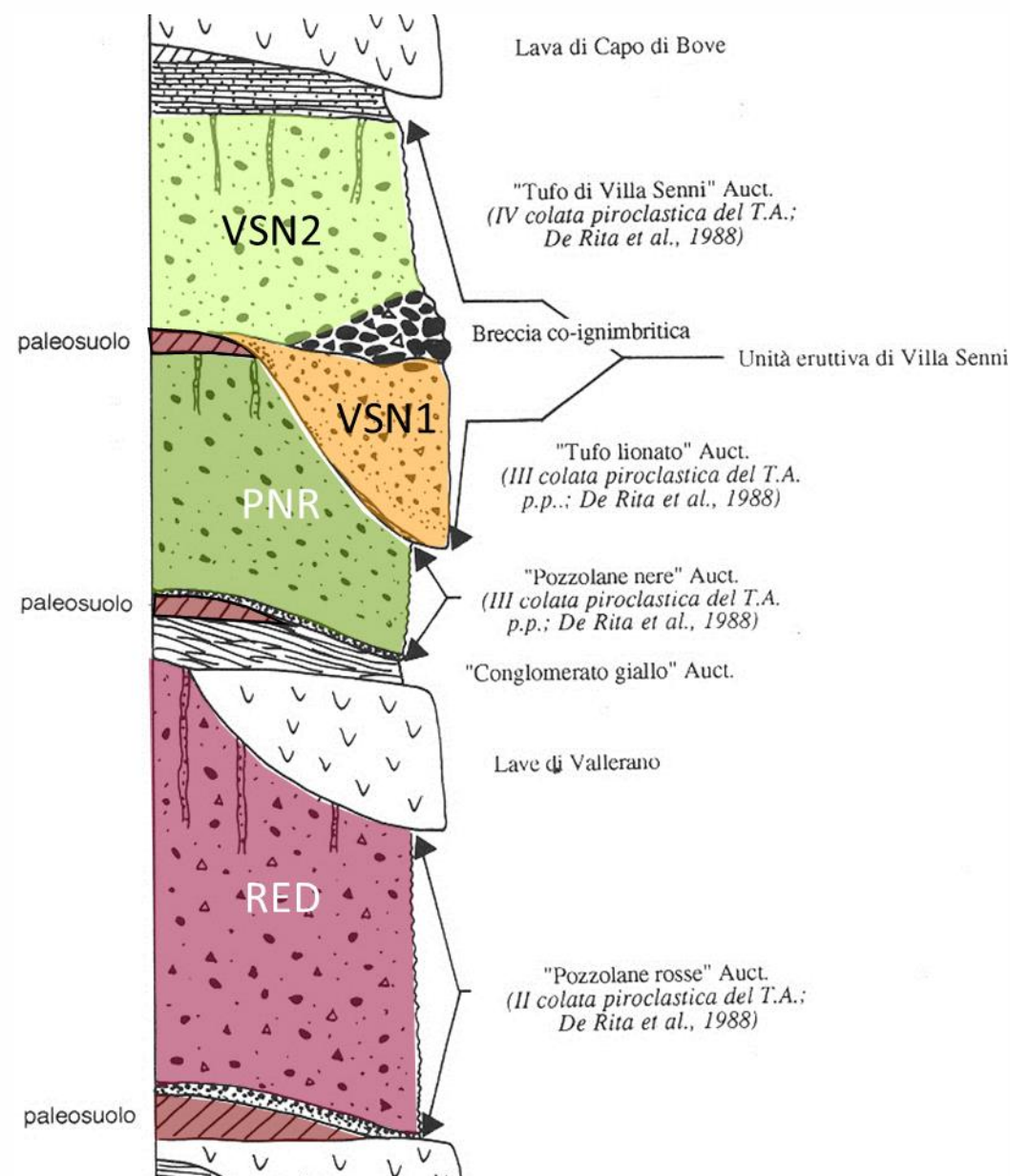
TERREMOTI



CAVITÀ



CAVE



Schema stratigrafico del Distretto Vulcanico dei Colli Albani (da Marra F & Rosa C., 1995) Particolare

"Monitoraggio e gestione della pericolosità da crollo di cavità sotterranee"

Le Pozzolane Rosse costituiscono un deposito massivo e caotico, a geometria tabulare, riferibile ad una eruzione ignimbratica di grande volume, dello spessore fino a circa 30 metri.

A questa unità piroclastica appartengono i materiali con il più spiccato comportamento pozzolanico e quindi utilizzati per confezionare le migliori malte idrauliche.



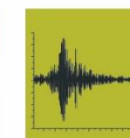
La successione ignimbratica dei Colli Albani presso cava Bulgarini (da Funiciello R. & Giordano G. (1995))



FRANE



EROSIONE



TERREMOTI

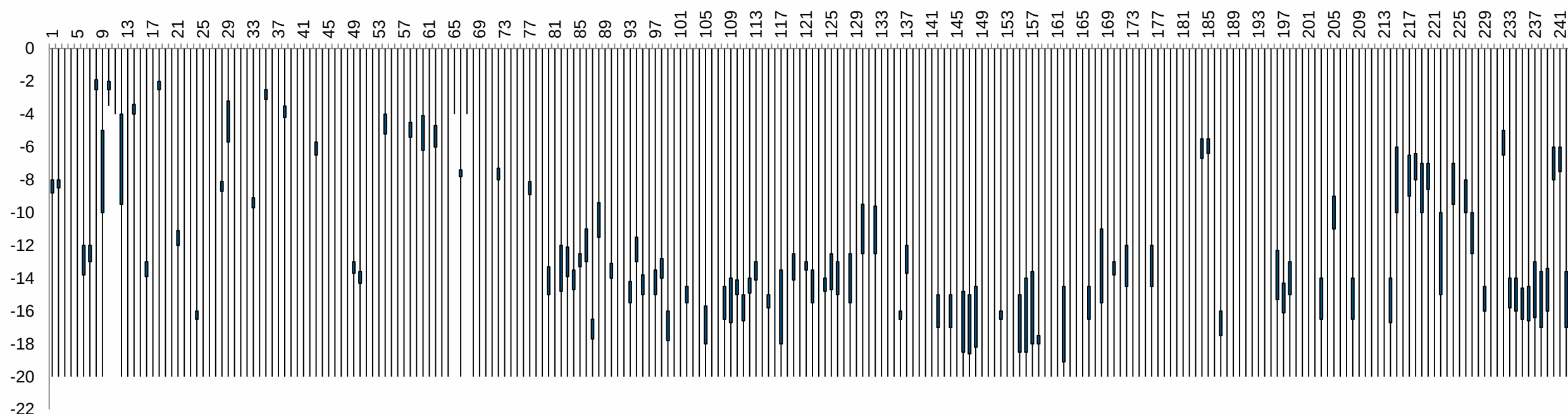


CAVITÀ



CAVE

La ricostruzione delle quote di letto e di tetto delle cavità e, conseguentemente, delle loro altezze è condizionata dall'evoluzione dei dissesti che hanno interessato le cavità stesse



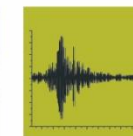
“Monitoraggio e gestione della pericolosità da crollo di cavità sotterranee”



FRANE



EROSIONE



TERREMOTI



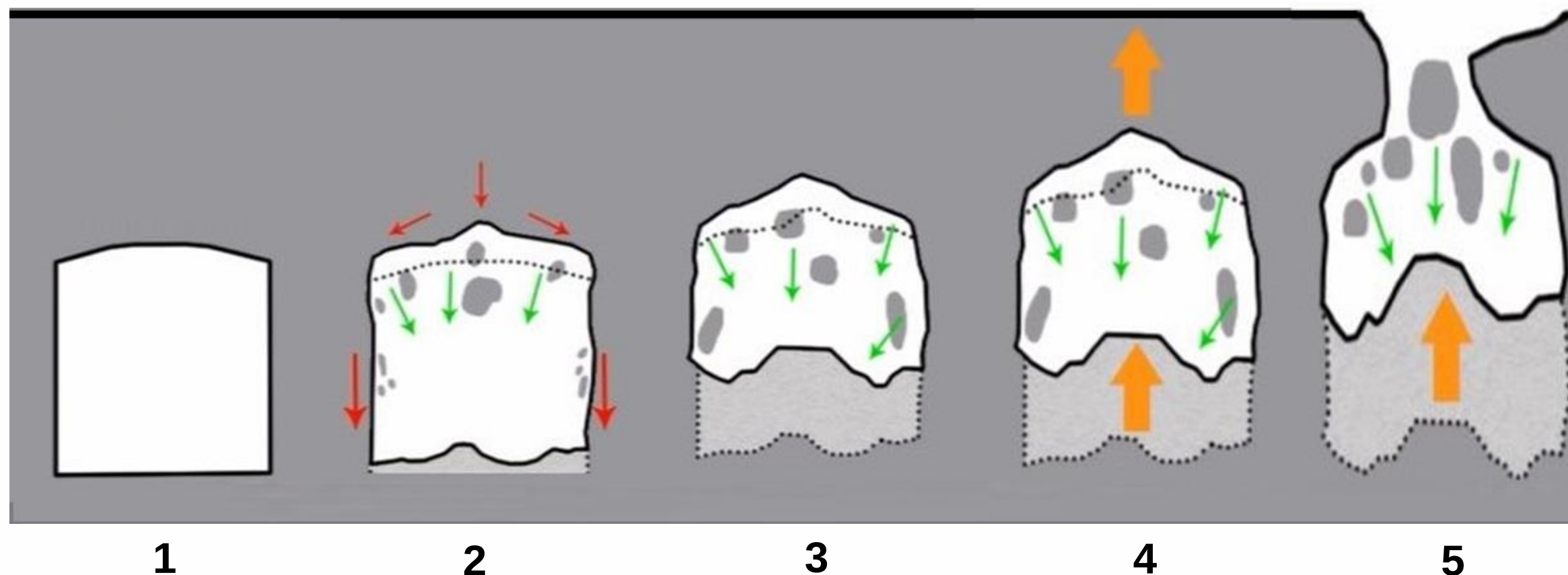
CAVITÀ



CAVE

Modello di evoluzione di una cavità sotterranea

1. Sezione originaria della galleria
2. Distacchi dalla calotta, dai pilastri e dalla loro connessione
3. Allargamento della cavità per crolli ai pilastri, diminuzione della stabilità della calotta
4. Migrazione della calotta verso la superficie e innalzamento per ripetuti crolli
5. Aumento delle condizioni instabili e crollo della copertura con formazione della voragine



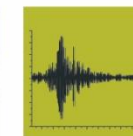
“Monitoraggio e gestione della pericolosità da crollo di cavità sotterranee”



FRANE



EROSIONE



TERREMOTI

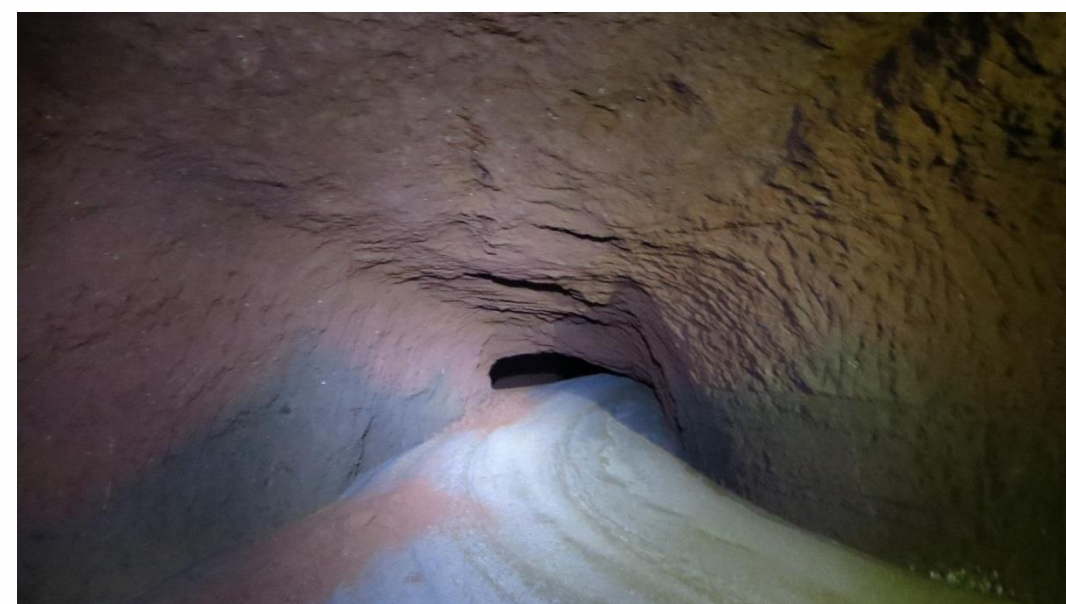


CAVITÀ



CAVE

Per la ricostruzione delle geometrie dei vuoti furono eseguiti numerosi sondaggi a distruzione di nucleo.



Interventi inefficaci di stabilizzazione
mediante iniezioni di malte cementizie per
riempimento delle cavità

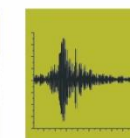
*“Monitoraggio e gestione della pericolosità da crollo di cavità
sotterranee”*



FRANE



EROSIONE



TERREMOTI



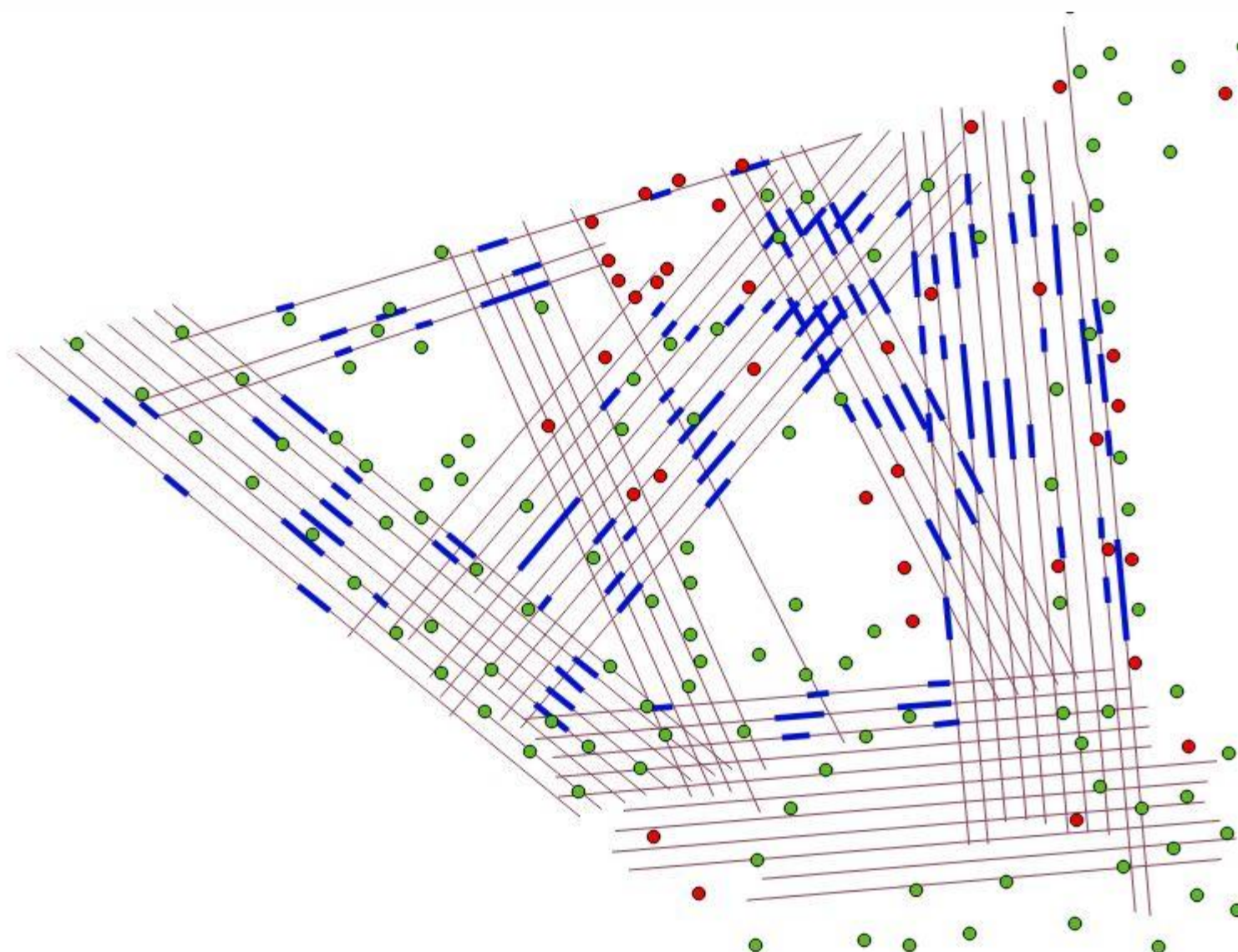
CAVITÀ



CAVE

Comparazione dei risultati delle tomografie elettriche con i dati di sondaggio

Gli elementi lineari rappresentano gli stendimenti ERT, i segmenti più spessi in blu le zone dove le tomografie elettriche indicano la presenza probabile di cavità. I cerchi indicano la localizzazione dei sondaggi meccanici dei quali sono rappresentati in rosso quelli che hanno intercettato cavità sotterranee, in verde gli altri. Non può non riscontrarsi il basso grado di attendibilità della prospezione indiretta



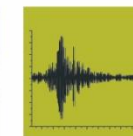
“Monitoraggio e gestione della pericolosità da crollo di cavità sotterranee”



FRANE



EROSIONE



TERREMOTI



CAVITÀ



CAVE

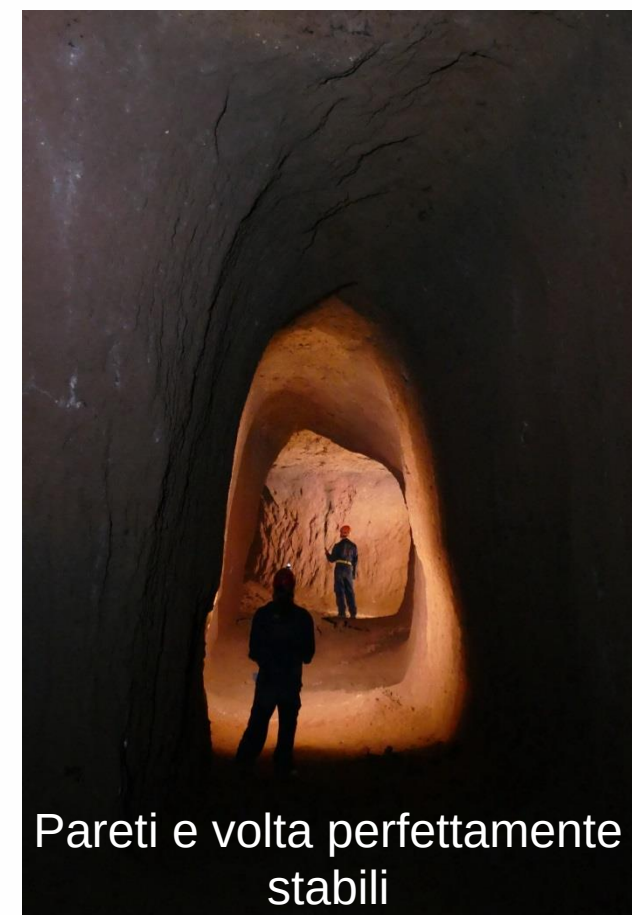
Lesioni sul pilastro e imminente distacco



Importante frana della calotta

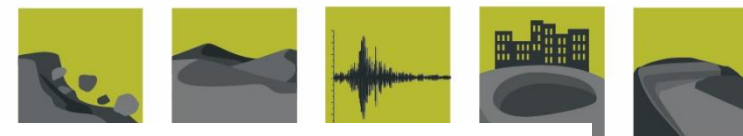


Distacco dalla volta

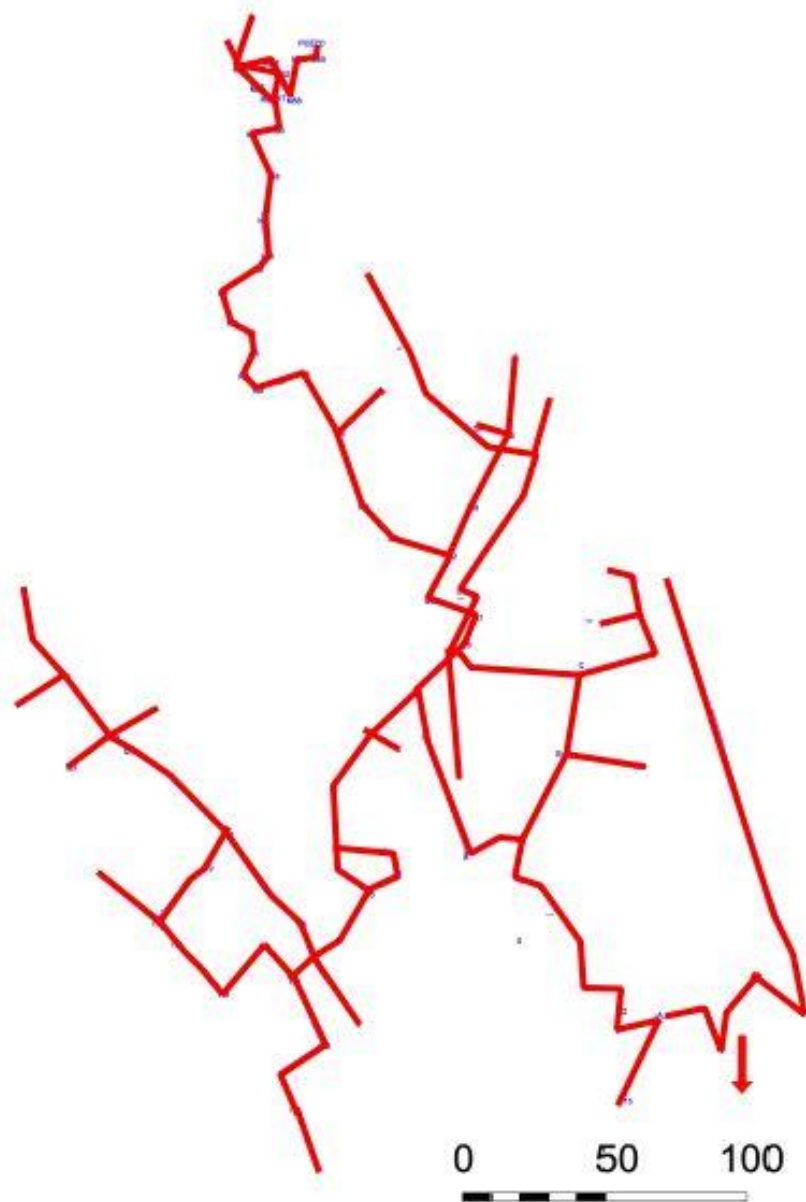


Pareti e volta perfettamente stabili

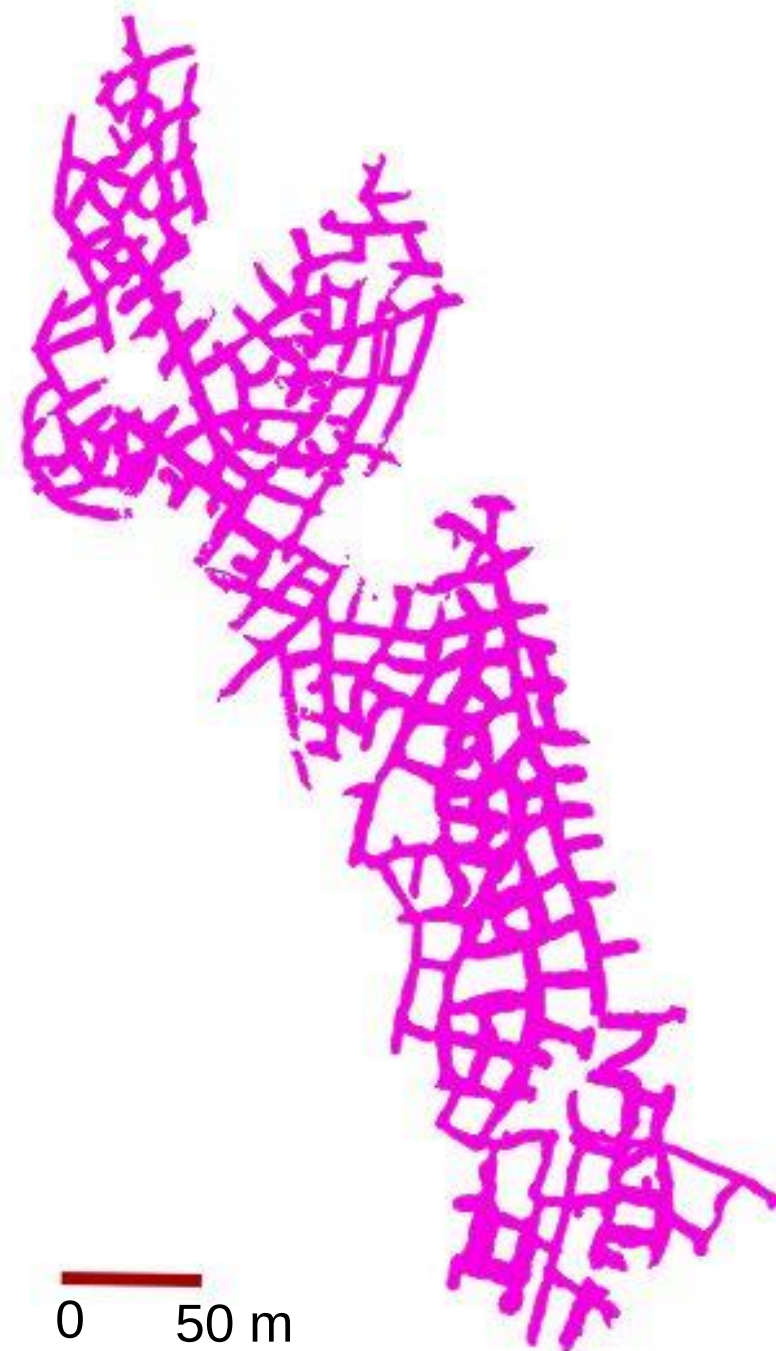
“Monitoraggio e gestione della pericolosità da crollo di cavità sotterranee”



CAVE



Primo rilievo con metro laser e bussola
effettuato da Roma Sotterranea su parte
della rete caveale



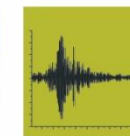
Reticolo di cavità rilevato da Roma
Sotterranea con tecnica laser scanner



FRANE



EROSIONE



TERREMOTI



CAVITÀ



CAVE

I sopralluoghi hanno permesso di rilevare:

- le dimensioni e le morfologie di camere e pilastri;
- i dissesti (lesioni, crolli, ecc.) che interessano la volta e i piedritti;
- le litologie dei terreni attraversati dalle gallerie.

Hanno consentito di evidenziare le zone critiche per problemi di stabilità, da tenere sotto controllo mediante un monitoraggio sistematico, anche con impiego di tecnologie laser scanner.

Hanno messo in luce la necessità di dare l'avvio a urgenti lavori di consolidamento di una cavità interessata da crolli di grosse dimensioni

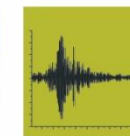
“Monitoraggio e gestione della pericolosità da crollo di cavità sotterranee”



FRANE



EROSIONE



TERREMOTI



CAVITÀ



CAVE

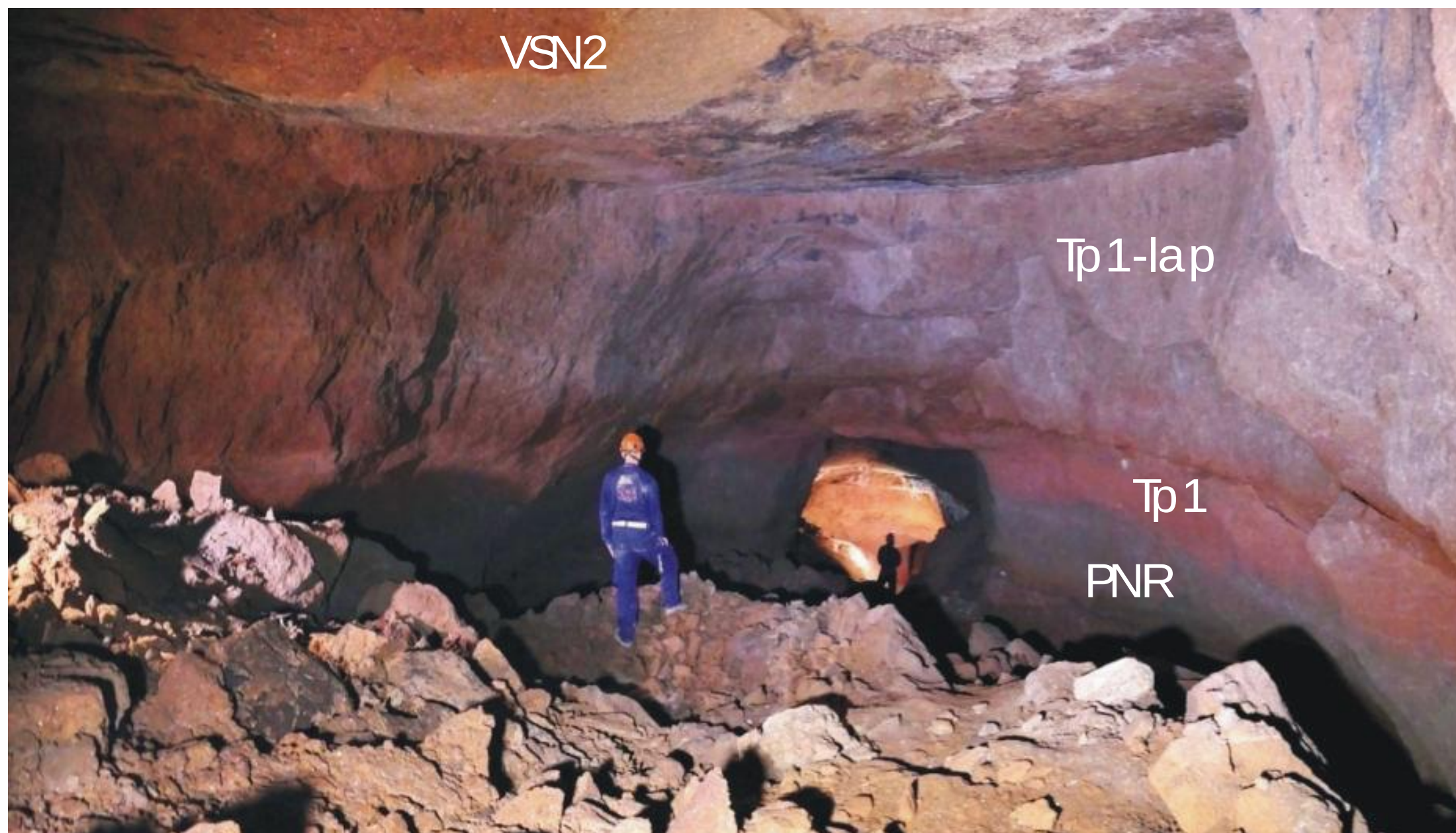


Foto di Roma Sotterranea

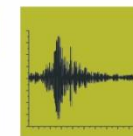
“Monitoraggio e gestione della pericolosità da crollo di cavità sotterranee”



FRANE



EROSIONE



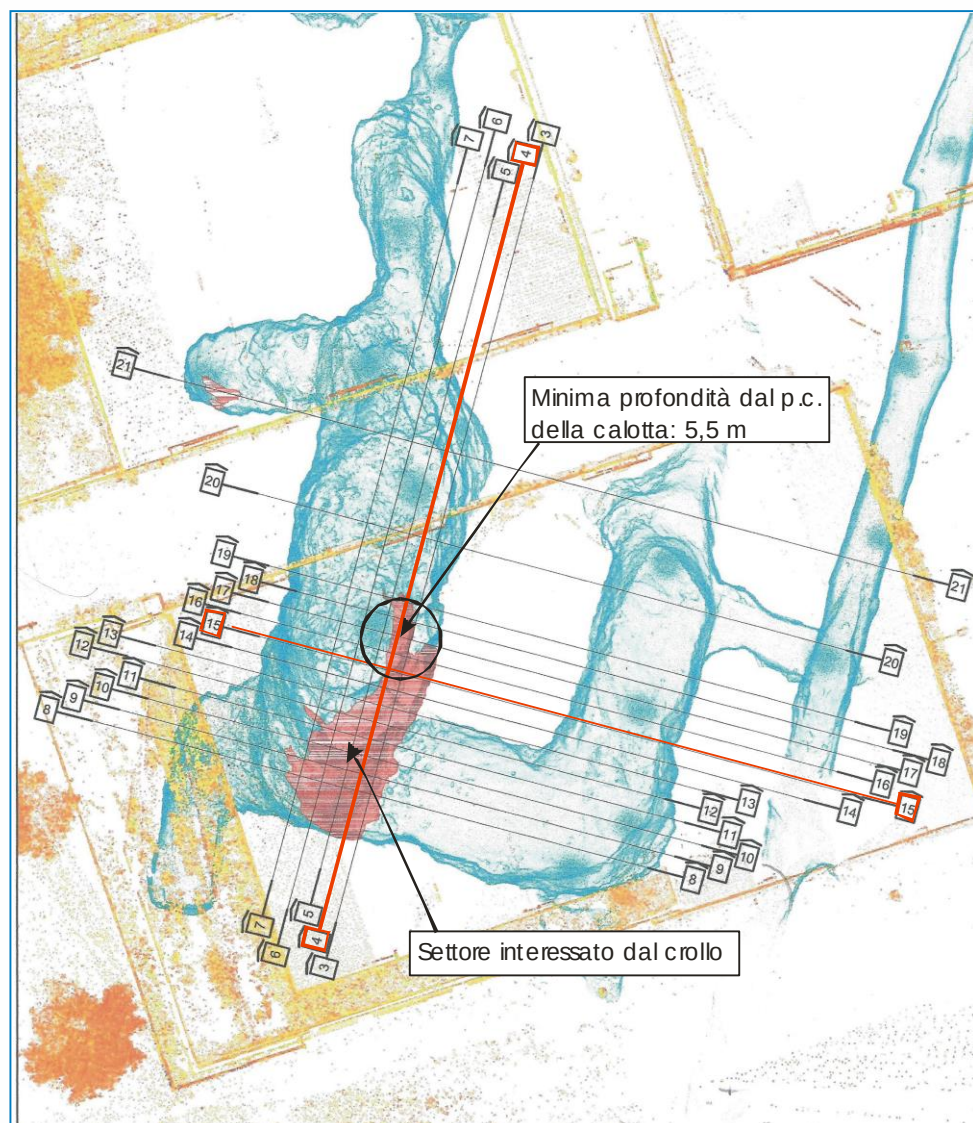
TERREMOTI



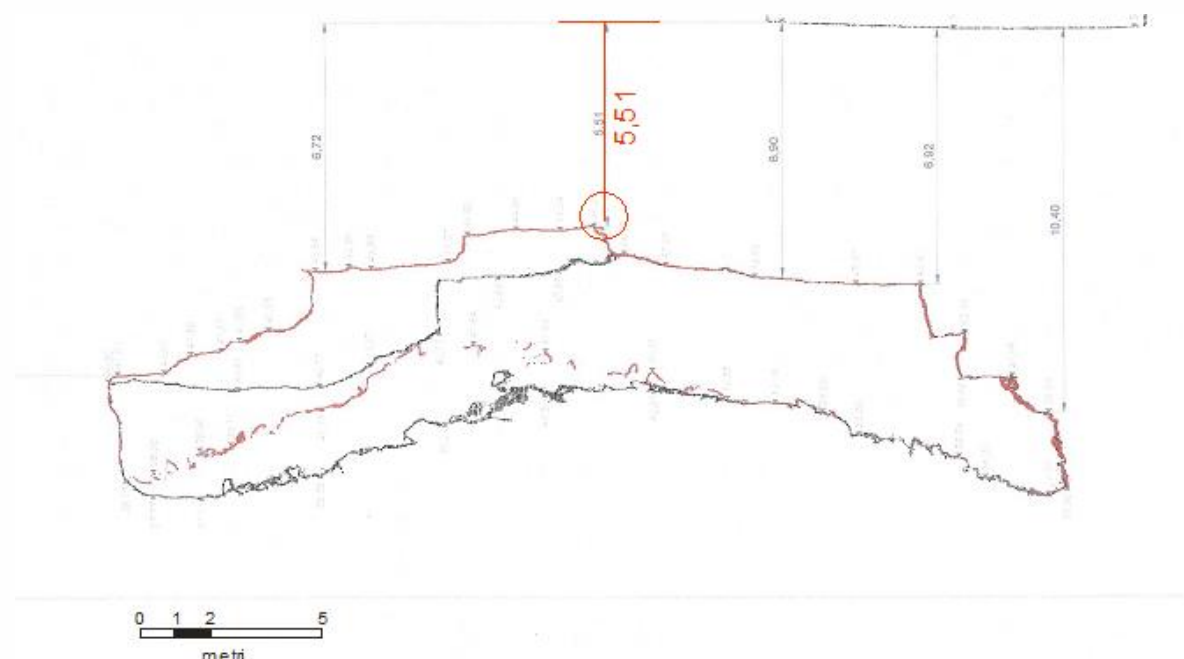
CAVITÀ



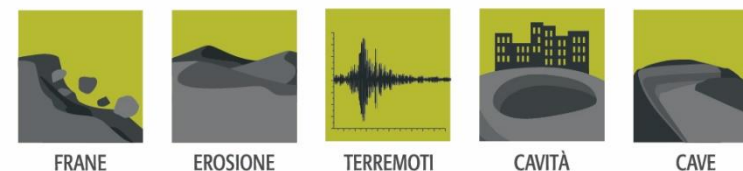
CAVE



Un recente crollo ha determinato il parziale aumento della larghezza della galleria e l'assottigliamento dello spessore della calotta fino a poco più di 5 metri



“Monitoraggio e gestione della pericolosità da crollo di cavità sotterranee”

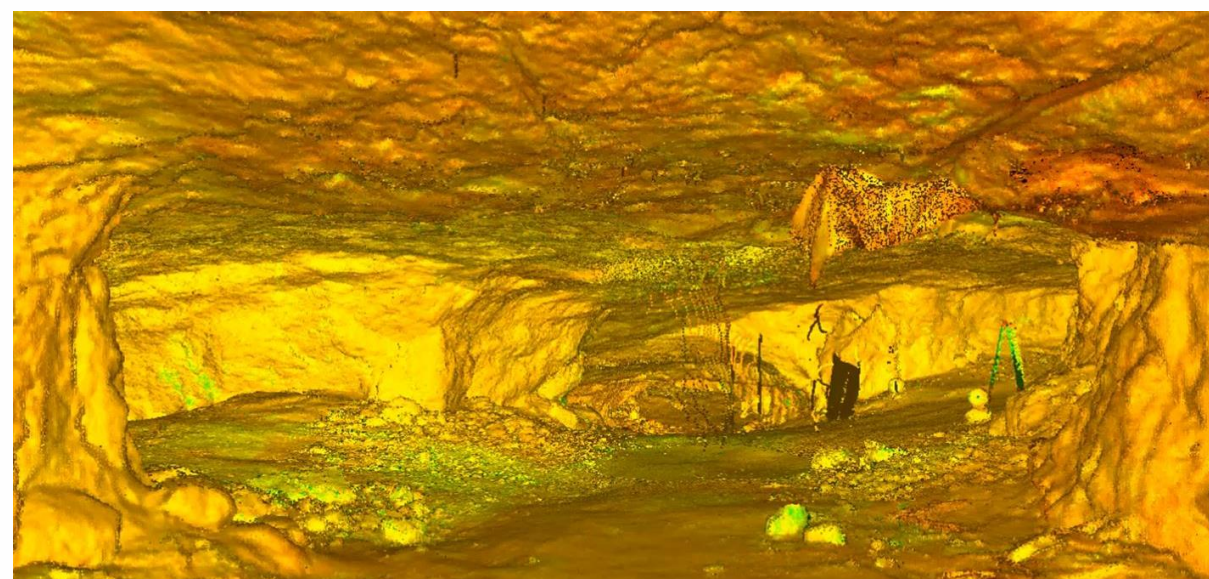


Fino a pochi anni fa la valutazione di stabilità e la progettazione di interventi di messa in sicurezza potevano essere condotti solo con l'uso di **procedure empiriche** o **modelli meccanici** estremamente **semplificati**.

L'applicazione del **laser scanner** nella fase di rilievo offre nuove possibilità nella definizione della **geometria** della cavità, che viene fedelmente descritta da una nuvola di punti con elevata risoluzione.

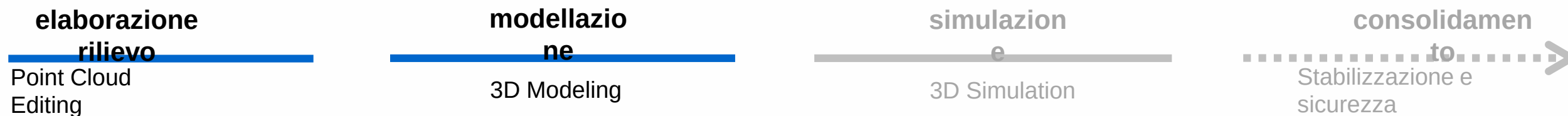
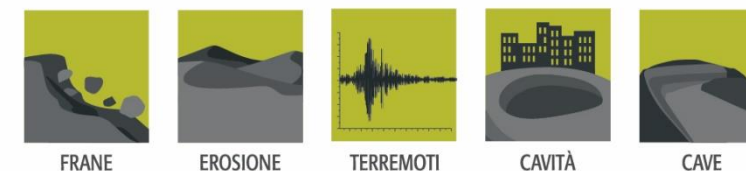


Nuvola di punti area di una cavità abbandonata in materiali piroclastici



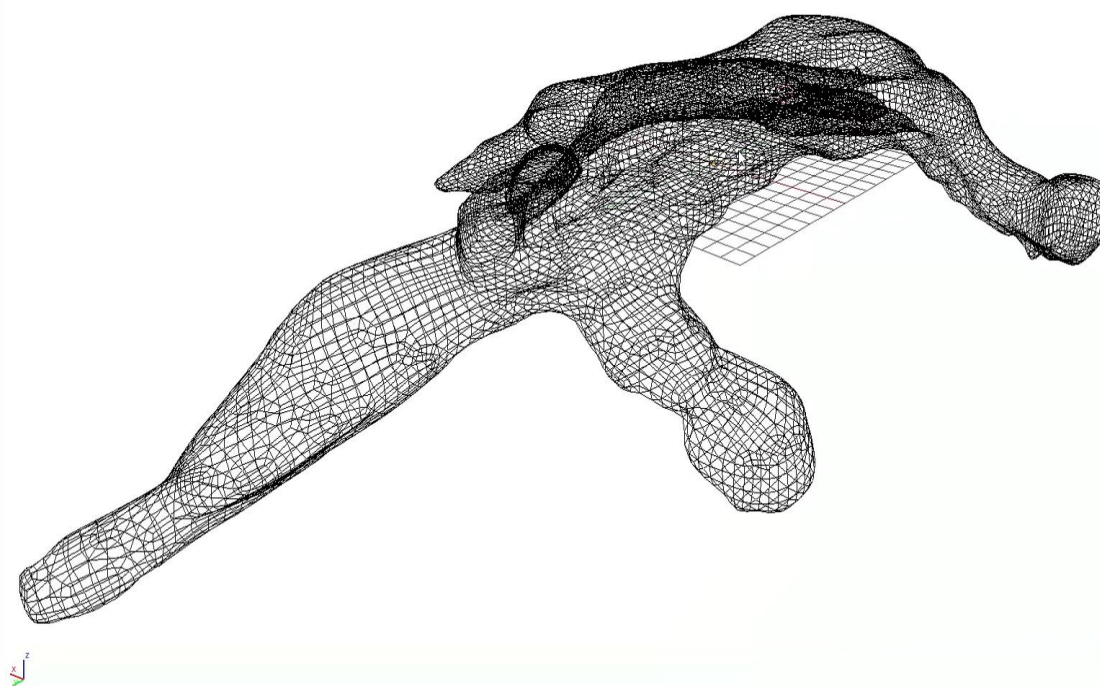
Vista interna di una cavità sotterranea rilevata con laser scanner

"Monitoraggio e gestione della pericolosità da crollo di cavità sotterranee"



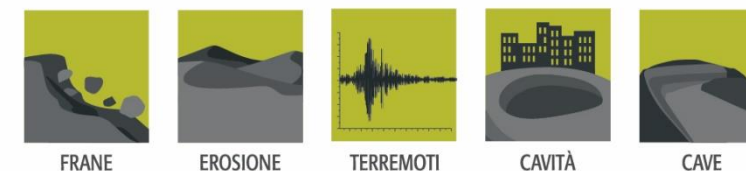
Per ottenere un modello adatto all'analisi dell'intervento occorrono una serie di **operazioni preliminari** da operare sulla nuvola e poi sulla mesh.

Le operazioni, per quanto supportate da software dedicati, richiedono l'intervento diretto di un **operatore**, sia nella fase della gestione della nuvola di punti, sia durante la modellazione, soprattutto per l'integrazione di eventuali lacune nel rilievo.



Esempio di una mesh di cavità sotterranea

“Monitoraggio e gestione della pericolosità da crollo di cavità sotterranee”



elaborazione

rilievo

Point Cloud
Editing

modellazio

ne

3D Modeling

simulazion

e

3D Simulation

consolidamen

to

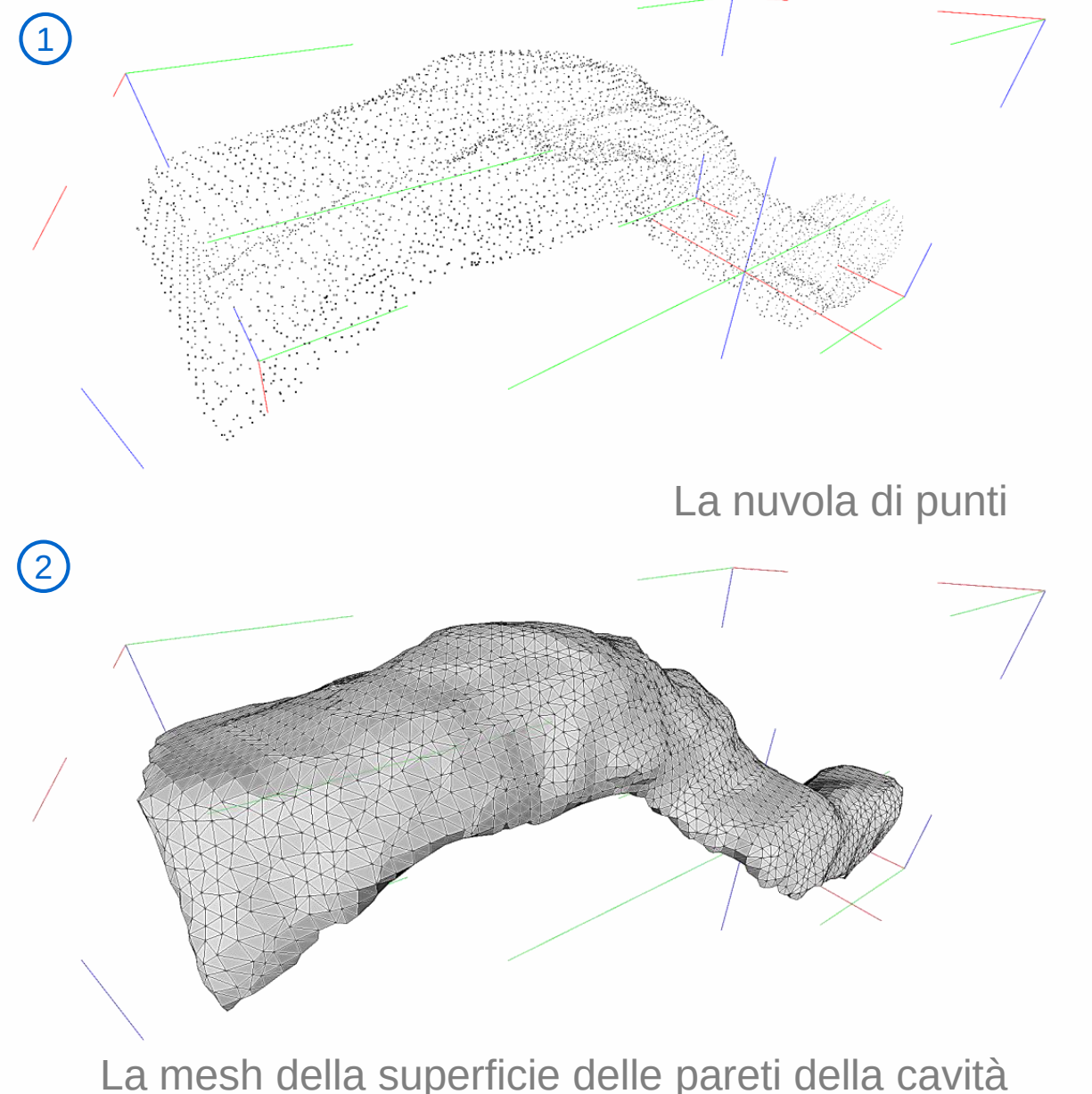
Stabilizzazione e
sicurezza

In dipendenza dalle dimensioni e dalla **densità** della nuvola di punti, possono essere necessarie delle operazioni preliminari di **decimazione**, per rendere più agevole la manipolazione del data set ottenuto dal laser scanner

Dalla nuvola occorre ora ricavare una **mesh** della **superficie** delle pareti descritta da triangoli, la quale ha la caratteristica di essere un formato facilmente gestibile.

Un esempio della nuvola di punti già decimata è riportato in **figura 1**, mentre la mesh della superficie interna della cavità ricavata è riportata in **figura 2**.

"Monitoraggio e gestione della pericolosità da crollo di cavità sotterranee"

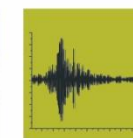




FRANE



EROSIONE



TERREMOTI



CAVITÀ



CAVE

elaborazione

rilievo

Point Cloud
Editing

modellazio

ne

3D Modeling

simulazion

e

3D Simulation

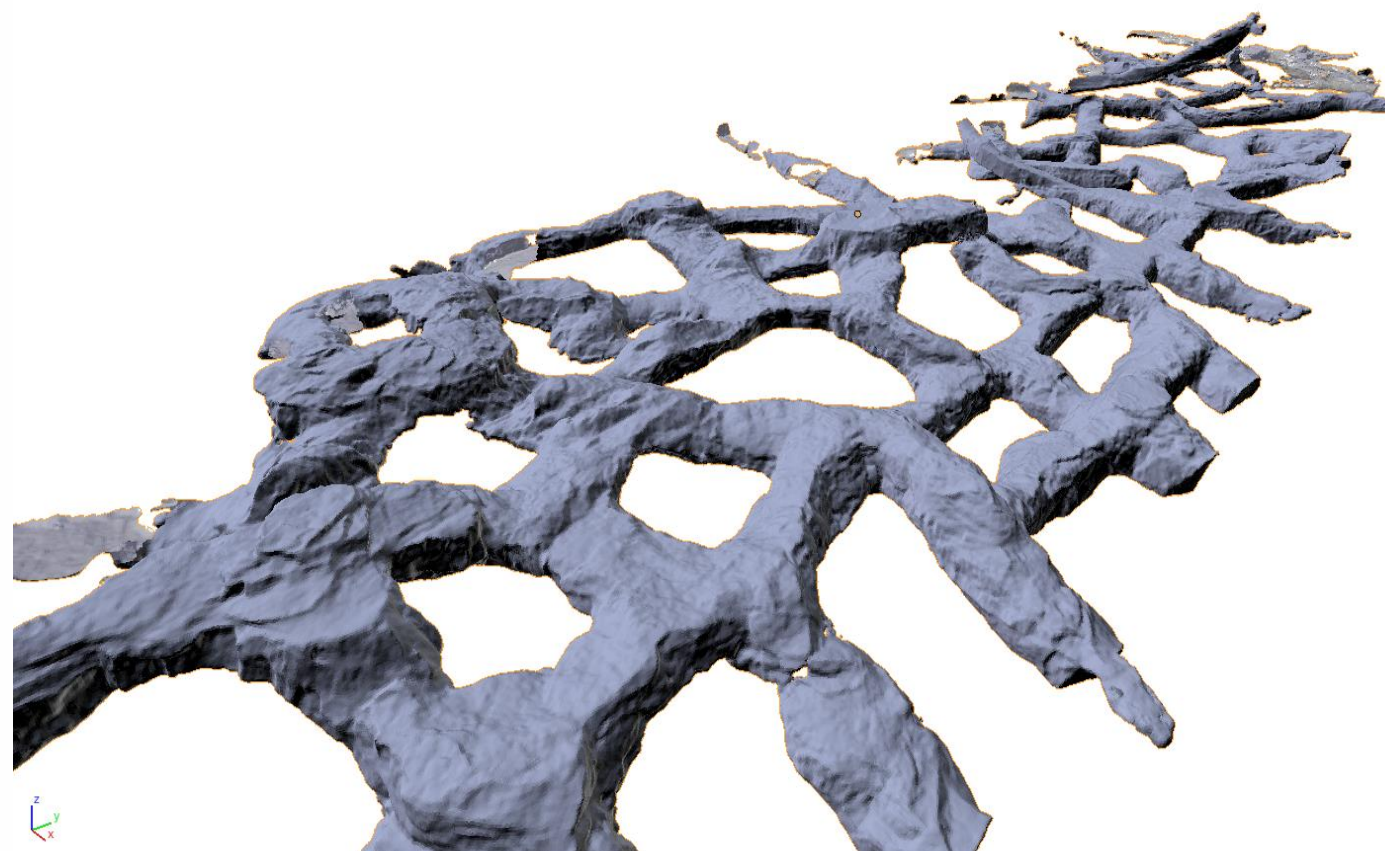
consolidamen

to

Stabilizzazione e
sicurezza

La mesh così ottenuta descrive in un formato relativamente compatto la superficie delle pareti della cavità.

Lo studio condotto, attraverso la definizione di opportune operazioni preliminari, rende praticabile una **gestione tridimensionale** del progetto. Attraverso la definizione di un **modello ad elementi finiti** è stato quindi possibile introdurre come punto di avvio alla progettazione il modello 3D.



Ricostruzione 3D di un sistema caveale

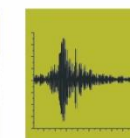
“Monitoraggio e gestione della pericolosità da crollo di cavità sotterranee”



FRANE



EROSIONE



TERREMOTI



CAVITÀ



CAVE

elaborazione

rilievo

Point Cloud
Editing

modellazio

ne

3D Modeling

simulazion

e

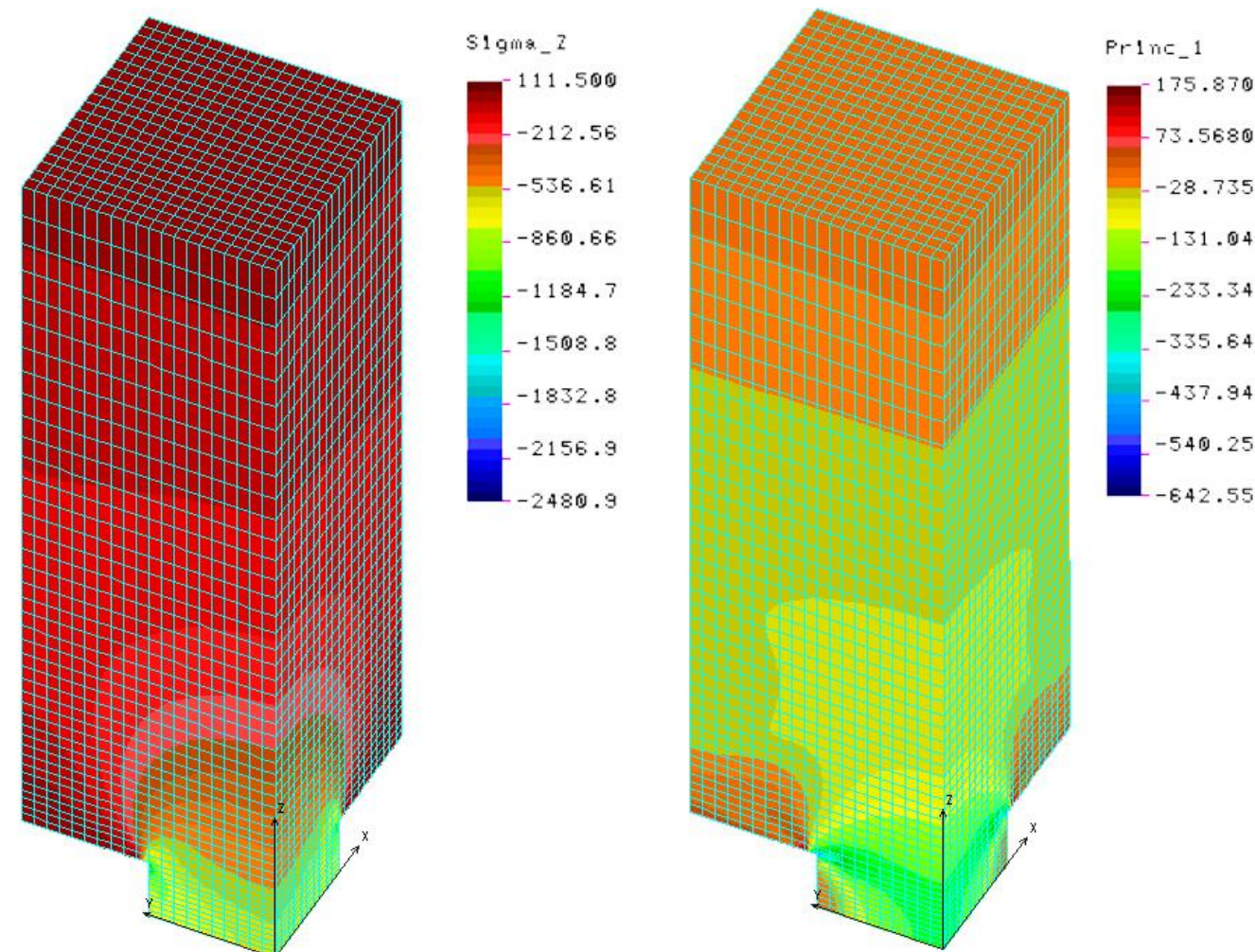
3D Simulation

consolidamen

to

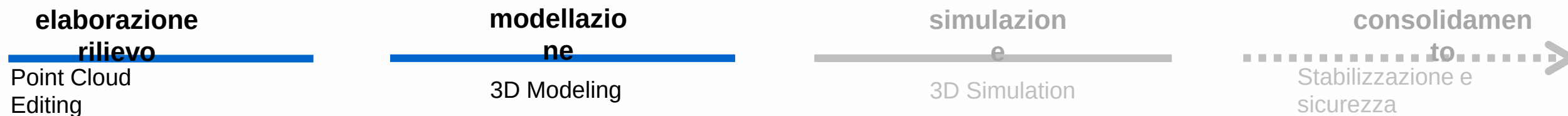
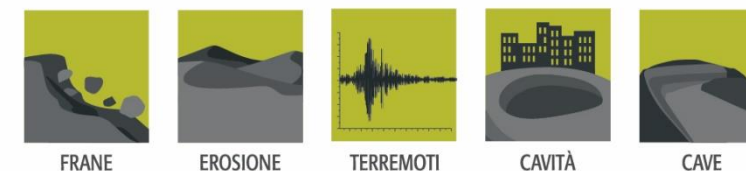
Stabilizzazione e
sicurezza

In questo lavoro si vuole valutare l'applicabilità di una procedura di **analisi lineare** su modelli agli elementi finiti sviluppati a partire da un modello digitale della geometria delle cavità, che, pur rinunciando ad una descrizione più dettagliata del comportamento del materiale, consente di tener conto della effettiva geometria del pilastro, con la relativa influenza sulle condizioni di confinamento del materiale che lo costituisce. Le condizioni di stabilità del pilastro vengono valutate con riferimento al criterio di **Mohr-Coulomb**.



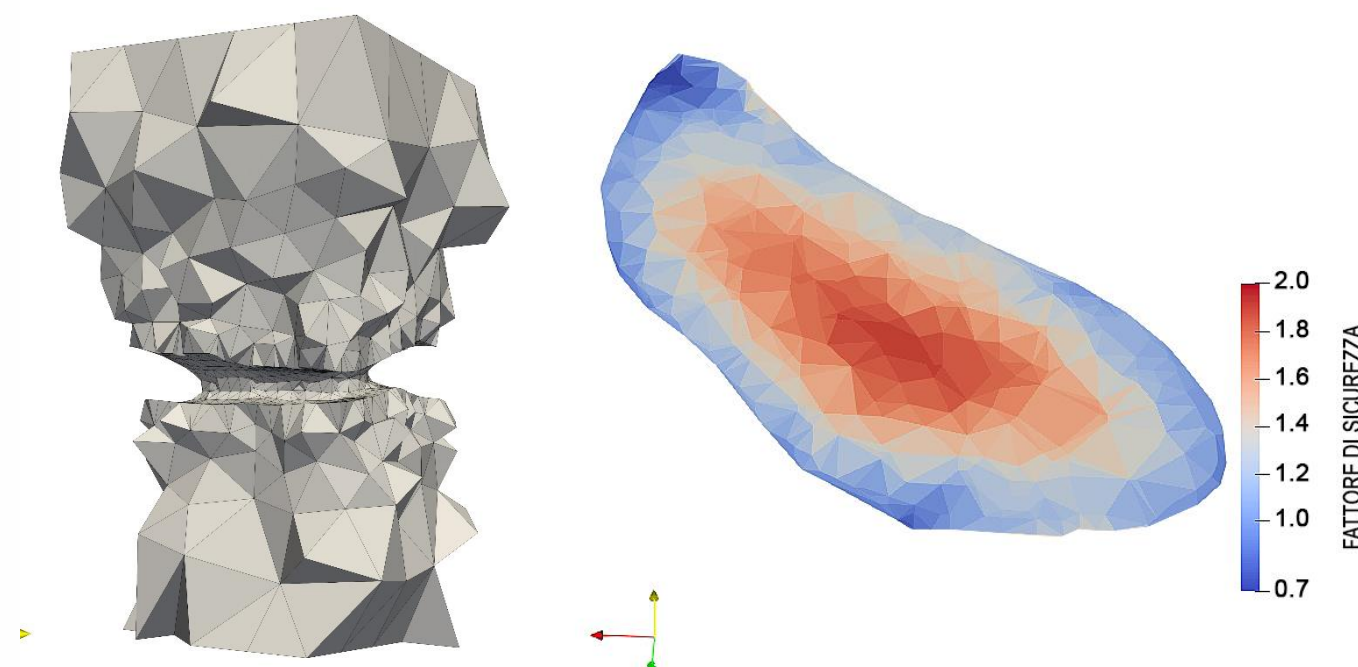
Tensioni σ_z (verticale). Tensioni σ_1 (principale massima)

“Monitoraggio e gestione della pericolosità da crollo di cavità sotterranee”



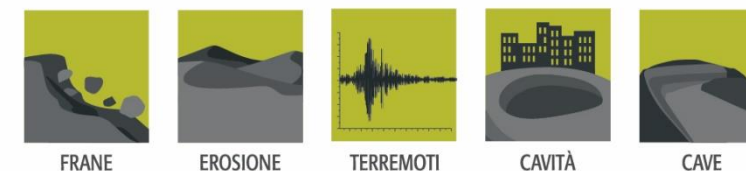
La procedura si basa sull'impiego di un modello agli elementi finiti della cavità e dei pilastri e consente quindi di tenere correttamente conto della complessa geometria delle gallerie.

L'analisi dello stato di sollecitazione viene effettuata con un modello **elastico lineare** e la determinazione delle condizioni di sicurezza è stata fatta con riferimento ad un criterio di rottura alla Mohr-Coulomb.



Coefficiente di sicurezza puntuale nel pilastro di geometria irregolare

“Monitoraggio e gestione della pericolosità da crollo di cavità sotterranee”



elaborazione

rilievo

Point Cloud
Editing

modellazio

ne

3D Modeling

simulazion

e

3D Simulation

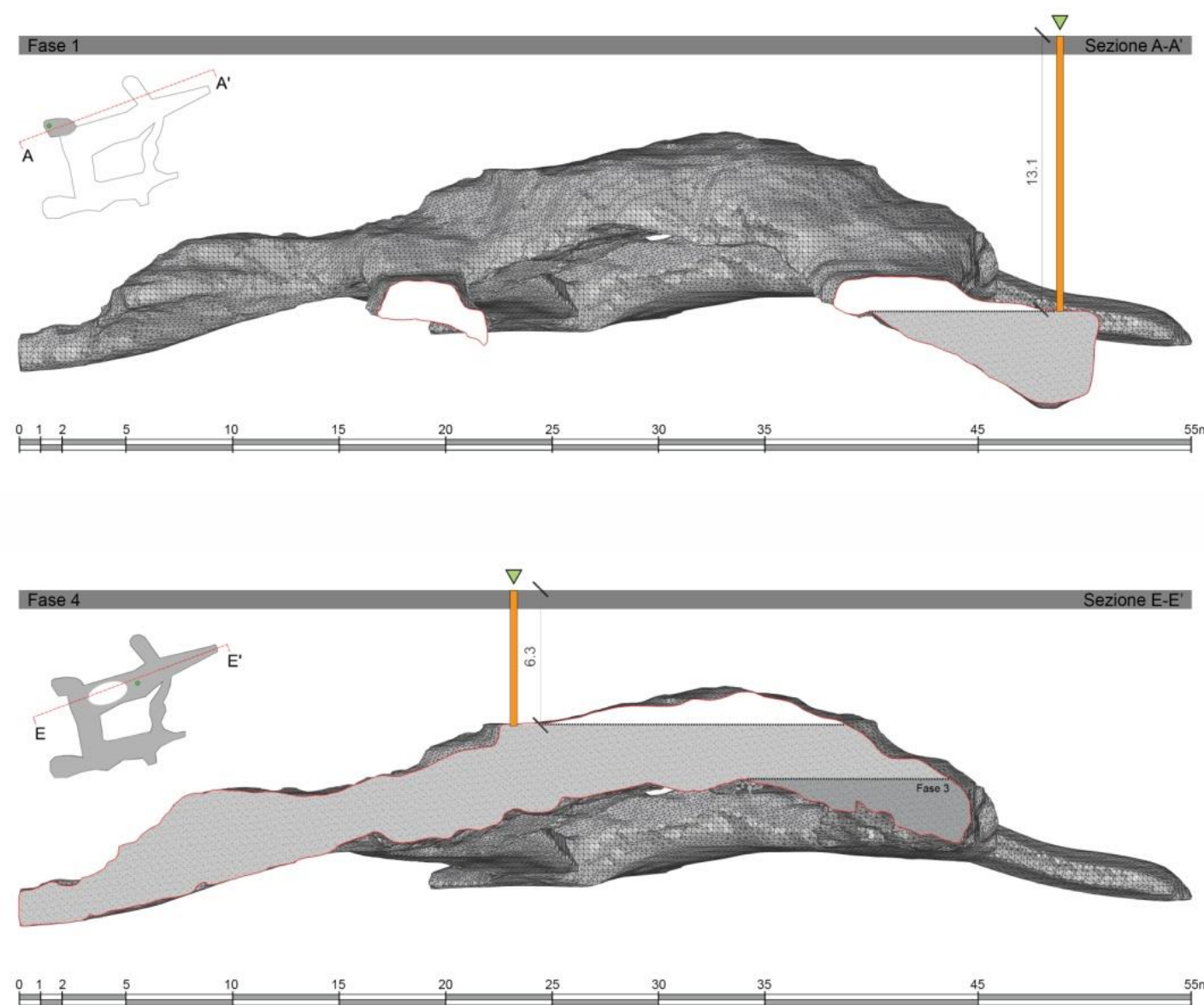
consolidamen

to

Stabilizzazione e
sicurezza

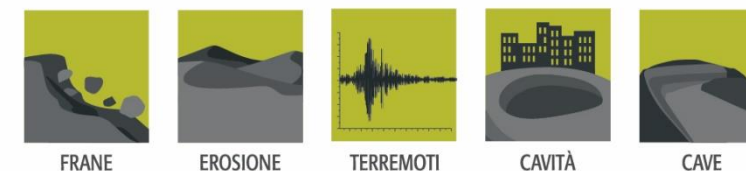
Una ricostruzione 3D del sistema caveale può essere utile anche in **fase di progettazione** degli interventi di messa in sicurezza.

Vantaggi: programmazione dettagliata degli interventi da eseguire per pianificare un'adatta **gerarchia delle iniezioni** attraverso lo studio della simulazione fluidodinamica del getto.



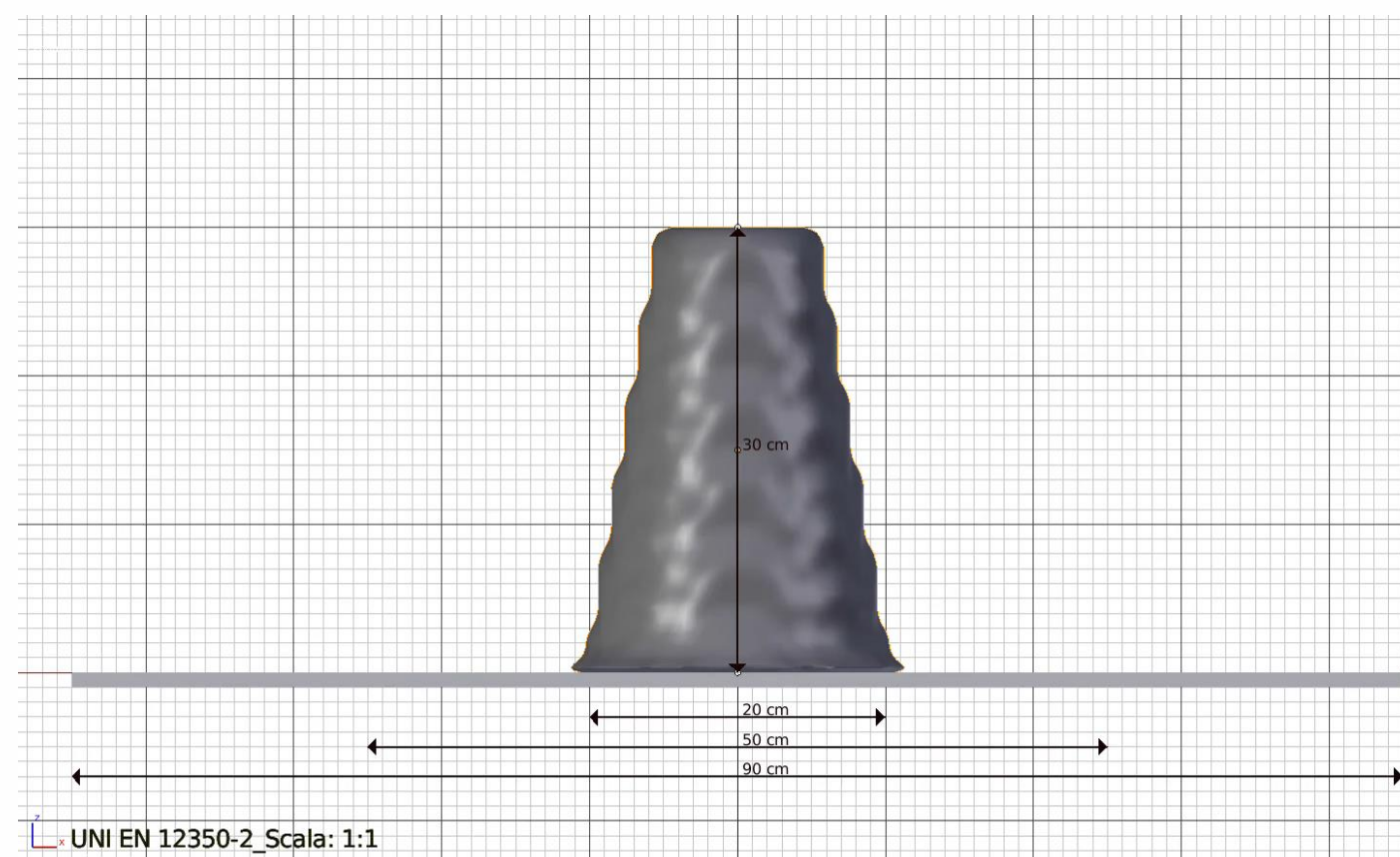
Studio delle fasi di riempimento delle cavità

“Monitoraggio e gestione della pericolosità da crollo di cavità sotterranee”



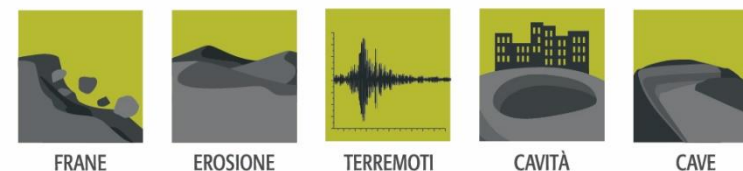
La classe di consistenza della miscela di calcestruzzo che verrà utilizzata per l'intervento di risanamento corrisponde a **S5**, con un abbassamento del cono pari o superiore a 220mm.

I parametri di viscosità per la realizzazione della simulazione del getto sono state dedotti da una ricostruzione 3D della prova sperimentale del **Cono di Abrams**.

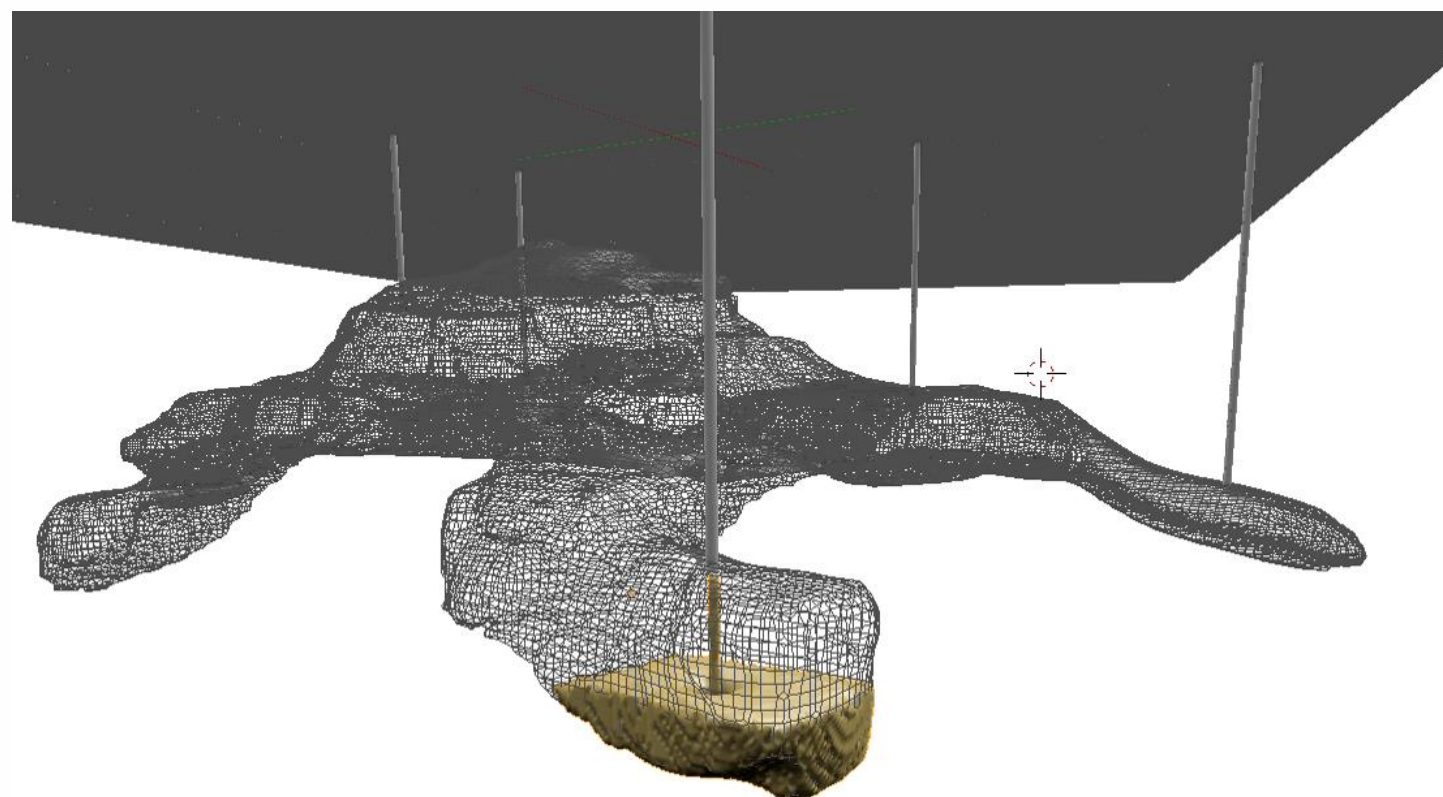


Studio sulla fluidità del materiale – Slump Test

“Monitoraggio e gestione della pericolosità da crollo di cavità sotterranee”



L' utilizzo di un modello 3D permette di valutare l'efficacia dell'intervento attraverso una **simulazione dinamica del getto** di calcestruzzo all'interno della cavità.



Simulazione del getto di cls nelle cavità

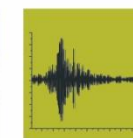
"Monitoraggio e gestione della pericolosità da crollo di cavità sotterranee"



FRANE



EROSIONE



TERREMOTI



CAVITÀ



CAVE

elaborazione

rilievo

Point Cloud
Editing

modellazio

ne

3D Modeling

simulazion

e

3D Simulation

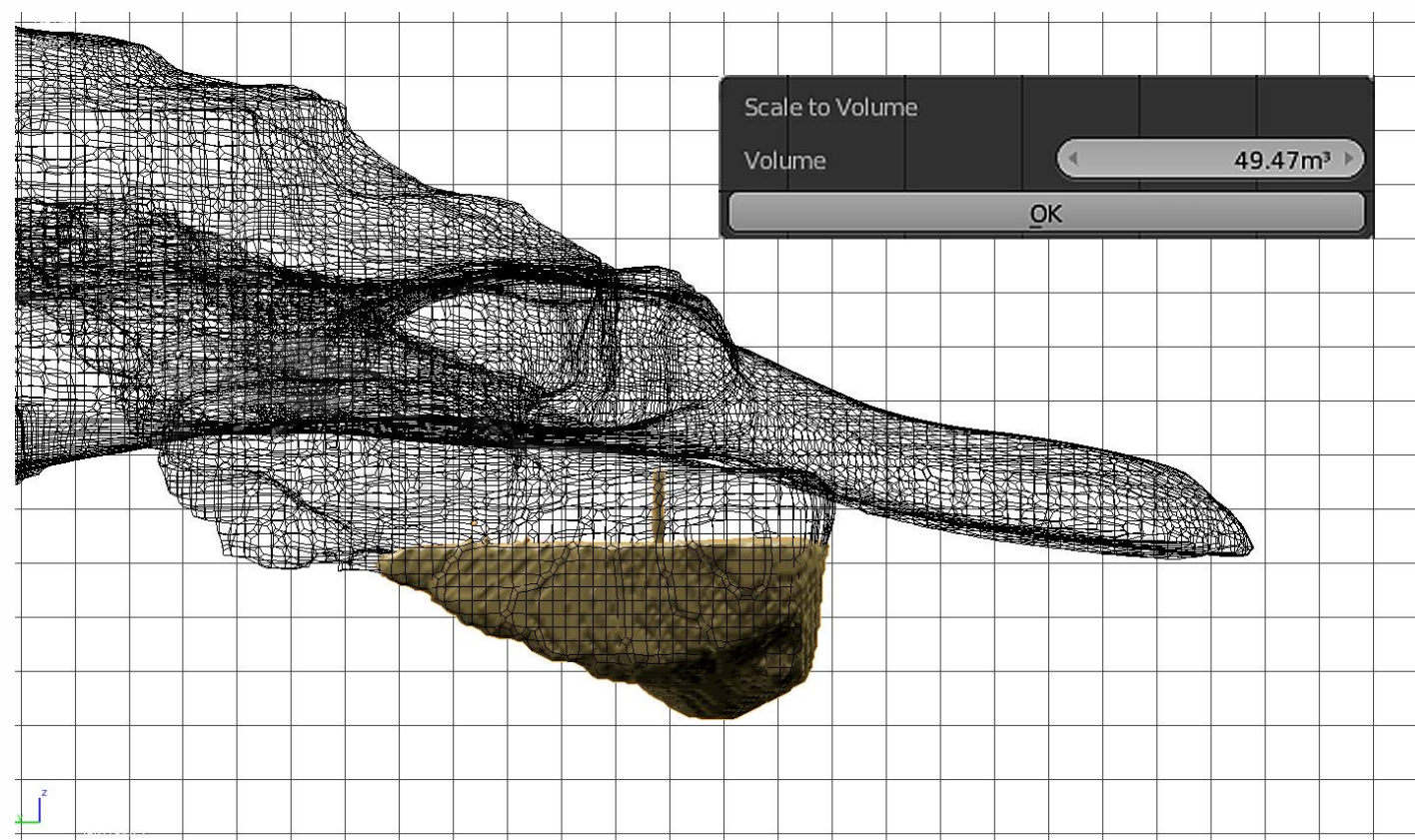
consolidamen

to

Stabilizzazione e
sicurezza

Il fluido generato dalla simulazione è una **mesh** che può essere indagata in ogni istante durante la fase di riempimento.

È possibile quindi stabilire un **cronoprogramma** efficace delle lavorazioni in funzione del livello di riempimento richiesto e del materiale da iniettare.



Analisi del volume di miscela da immettere

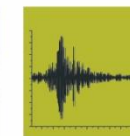
“Monitoraggio e gestione della pericolosità da crollo di cavità sotterranee”



FRANE



EROSIONE



TERREMOTI



CAVITÀ



CAVE

elaborazione

rilievo

Point Cloud
Editing

modellazio

ne

3D Modeling

simulazion

e

3D Simulation

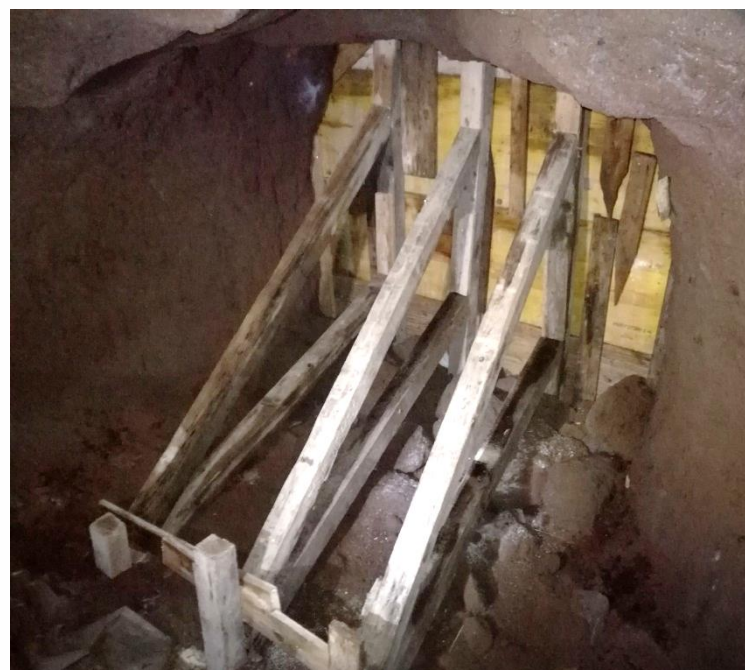
consolidamen

to

Stabilizzazione e
sicurezza

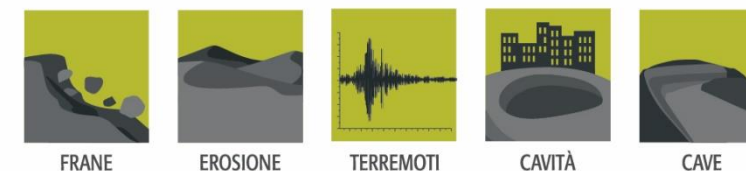
Per delimitare le aree da riempire, verrà realizzato un **contenimento** che sarà eseguito con una casseratura di legno a perdere all'interno della cavità.

È importante in fase progettuale valutare la posizione delle **casserature** in funzione dei punti di sezione minima in modo da ridurre la spinta idrostatica.



Contenimento del getto

“Monitoraggio e gestione della pericolosità da crollo di cavità sotterranee”



elaborazione

rilievo

Point Cloud
Editing

modellazio

ne

3D Modeling

simulazion

e

3D Simulation

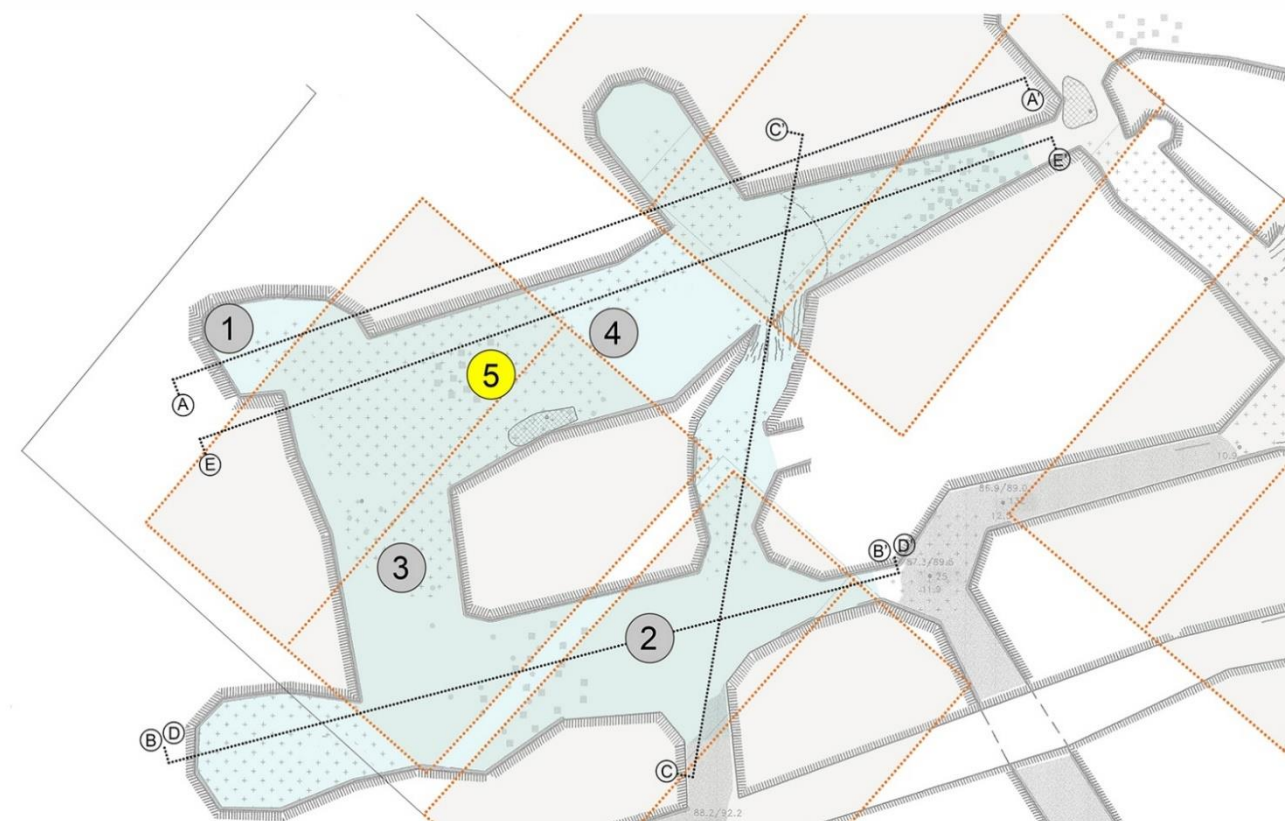
consolidamen

to

Stabilizzazione e
sicurezza

La sequenza di intervento e i punti di iniezione sono stati stabiliti a valle dello studio preliminare sul volume della cavità e della del getto. **simulazione**

È possibile in questa predisporre o utilizzare fori esistenti per **monitorare** l'andamento del getto all'interno della cavità



Schema di intervento

“Monitoraggio e gestione della pericolosità da crollo di cavità sotterranee”



ASSEMBLEA GENERALE

DEGLI ISCRITTI ALL'ORDINE DEI GEOLOGI DEL LAZIO

LA PROFESSIONE DEL GEOLOGO NEL LAZIO

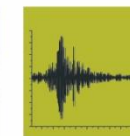
Prevenzione, analisi e soluzioni.



FRANE



EROSIONE



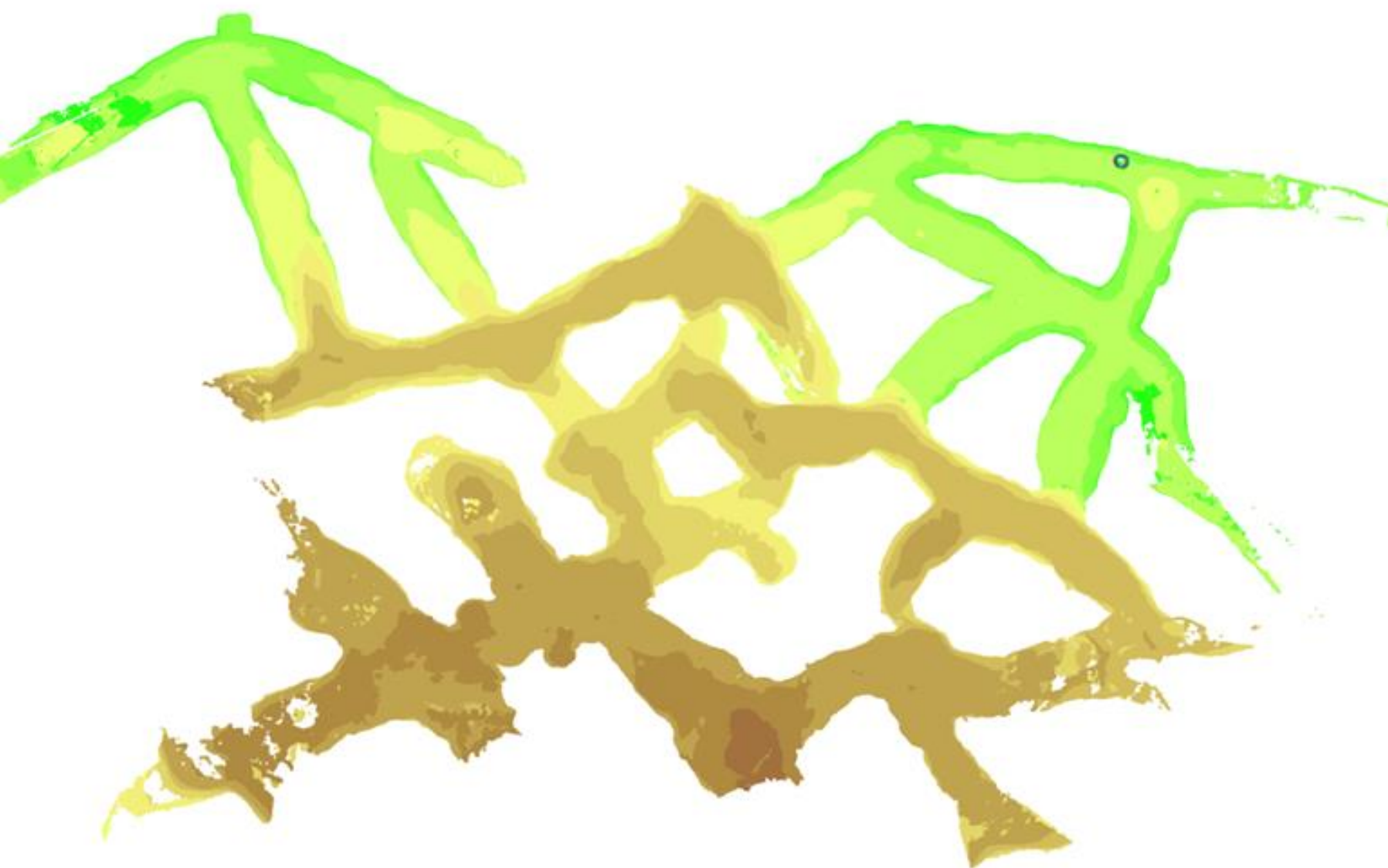
TERREMOTI



CAVITÀ



CAVE



“Monitoraggio e gestione della pericolosità da crollo di cavità sotterranee”

Marco Mizzoni
Ingegnere libero professionista

Gianluigi Giannella
Geologo libero professionista

Si ringrazia:
Roma Sotteranea
Ing. Filippo Virgili
Geol. Eutizio Vittori
Geol. Maurizio Lanzini