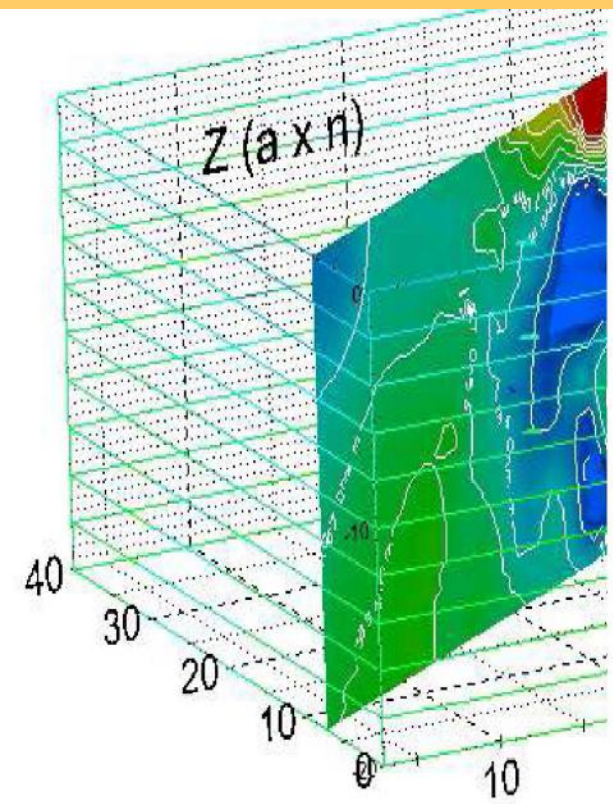


XIX WORKSHOP DI GEOFISICA

Tra geologia e geofisica 2022

GEOFISICA E GEOGNOSTICA
PER LA BONIFICA AMBIENTALE



AGGIORNAMENTO DEI MODELLI GEOLOGICO ED IDROGEOLOGICO MEDIANTE PROVE GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE E CALIBRAZIONE DI UN MODELLO DI SIMULAZIONE NUMERICA PER IL DEWATERING DELL'AREA DEL PALACONGRESSI A RIVA DEL GARDA IN UNA CONDIZIONE INASPETTATA DI RECENTE EVOLUZIONE GEOMORFOLOGICA

Dott. Geol. Stefano Paternoster
Ordine dei Geologi Trentino Alto Adige Südtirol

Rovereto, 2 dicembre 2022

NUOVO PALACONGRESSI RIVA DEL GARDA - TN
VISTA PANORAMICA AREA DI STUDIO



NUOVO PALACONGRESSI RIVA DEL GARDA - TN

IL PROGETTO



NUOVO PALACONGRESSI RIVA DEL GARDA - TN

SVILUPPO PLANIMETRICO CORPI INTERRATI – UBICAZIONE PIEZOMETRI



NUOVO PALACONGRESSI RIVA DEL GARDA - TN

PIEZOMETRIA

La piezometria ricostruita, da monte verso valle (da NNE a SSO), evidenzia un gradiente di filtrazione medio regolare, pari a 2.9×10^{-3} , che però a SO di Pz7 e sino al lago, si dimezza quasi, portandosi intorno al 1.5×10^{-3} , evidenziando possibile settore di aumento significativo della trasmissività verso lago



Le oscillazioni della falda libera sono localmente regimate dalla quota del Lago di Garda che costituisce limite a potenziale imposto in uscita. Le escursioni annuali della quota del lago sono normalmente comprese tra le quote idrometriche + 0.75/+1.3 m.

NUOVO PALACONGRESSI RIVA DEL GARDA - TN
MODELLO IDROGEOLOGICO DI RIFERIMENTO

Ai fini della modellazione del dewatering, la quota massima della falda di cantiere è stata fissata con riferimento alla quota massima annuale del Lago (+1.3 all'idrometro) corrispondente a 65.30 m slm.

Il modello concettuale dell'acquifero è di seguito riassunto:

- acquifero a falda libera (*free surface boundary*) con flusso entrante al limite NN/E.
- gradiente medio di filtrazione locale $i = 2.9 \times 10^{-3}$ passante a 1.5×10^{-3} a 140 m dal Lago.
- livello di base dell'acquifero posizionato a quota ≥ 50.0 m.
- limite a potenziale/flusso imposto sulla sponda nord del Lago di Garda con quota cautelativa del potenziale 65.3 m slm (*specified flow boundary*)
- limiti laterali di valle in sinistra e destra orografica a flusso nullo o trascurabile (*no flow boundary*).

LE PROVE DI POMPAGGIO PER LA CARATTERIZZAZIONE DELL'ACQUIFERO

Per gli acquiferi a falda libera sono raccomandati in genere i metodi di Neuman o C.V. Theis adattato per acquiferi liberi; potendo disporre di una prova di sufficiente durata, come nel nostro caso, è utilizzabile anche l'applicazione del metodo di C.E. Jacob.

Il metodo di Jacob è basato sull'approssimazione logaritmica della funzione di C.V. Theis:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^{\infty} \frac{e^{-u} du}{u} \quad u = \frac{Sr^2}{4Tt}$$

in cui la parte integrale dell'espressione viene sostituita dall'espressione di approssimazione logaritmica

di seguito riportata, applicabile per $t \geq 12.5 \cdot \frac{S \cdot x^2}{T}$ ovvero quando $u \leq 0.02$:

$$s = \frac{0.183}{T} \cdot Q \log \frac{2.25Tt}{x^2 S}$$

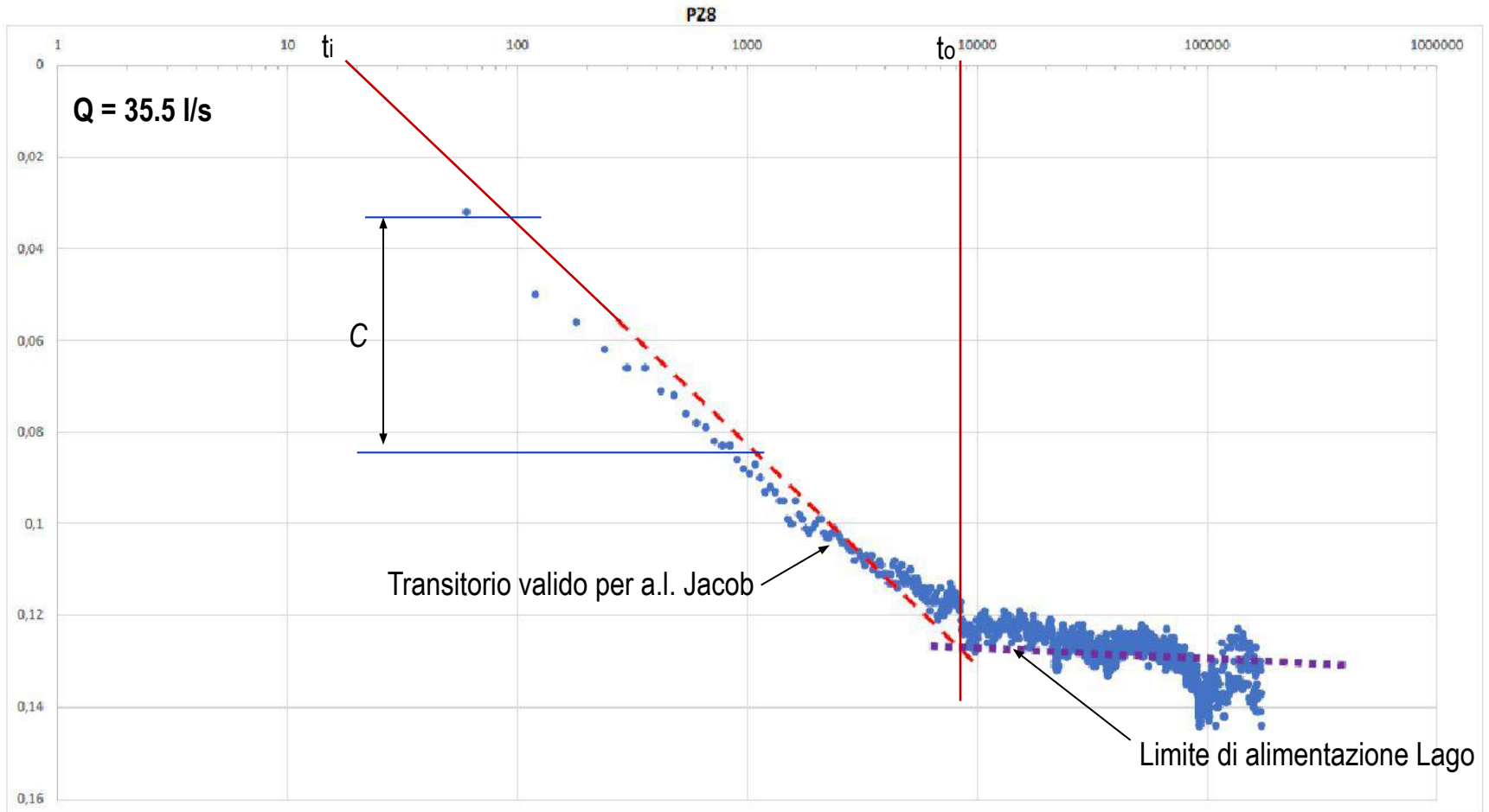
L'estensione del metodo agli acquiferi a falda libera (freatici) è inoltre condizionata, come nel caso precedente, dall'abbassamento s ; le condizioni di validità sono fissate ad $s < 0.1 H$, essendo H lo spessore dell'acquifero; nel nostro caso, per entrambi i piezometri tale condizione è ampiamente verificata per cui il metodo è applicabile ed inoltre è trascurabile la correzione degli abbassamenti.

NUOVO PALACONGRESSI RIVA DEL GARDA - TN

PROVE POMPAGGIO

$$T = \frac{0.183}{C} Q = \frac{0.183}{0.048} \cdot 0.0355 = 1.35 \times 10^{-1} m^2 / s$$

$$d = \frac{x}{2} \cdot \sqrt{t_i / t_0} = d = \frac{18.8}{2} \cdot \sqrt{9800 / 20} = 208m$$



Pz 8 - Diagramma abbassamenti s.n. – tempo s.l. – Interpretazione secondo Jacob

NUOVO PALACONGRESSI RIVA DEL GARDA - TN

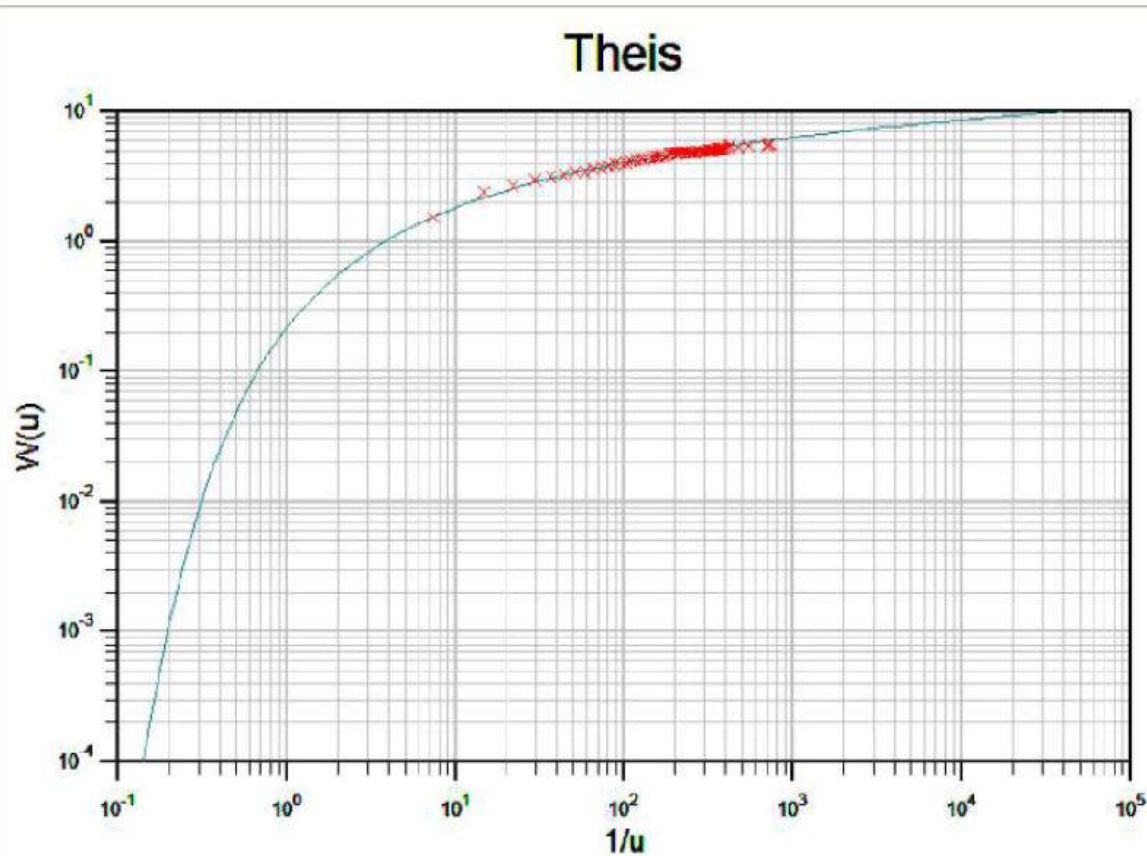
PROVE POMPAGGIO

Pz8

$d = 18.8 \text{ m}$

$Q = 35.5 \text{ l/s}$

Time (sec)	Drawdown (m)
1	0
2	60
3	120
4	180
5	240
6	300
7	360
8	420
9	480
10	540
11	600
12	660
13	720
14	780
15	840
16	900
17	960
18	1020
19	1080
20	1140
21	1200
22	1260
23	1320
24	1380
25	1440
26	1500



$T = 1.32 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$

For Help, press F1

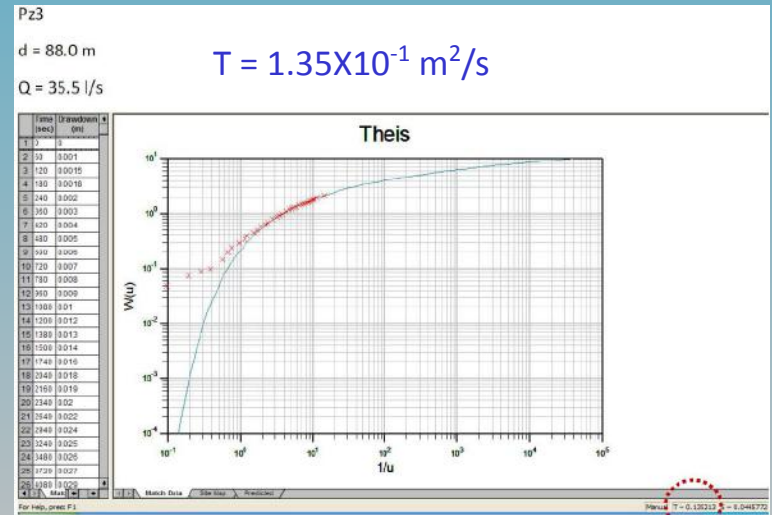
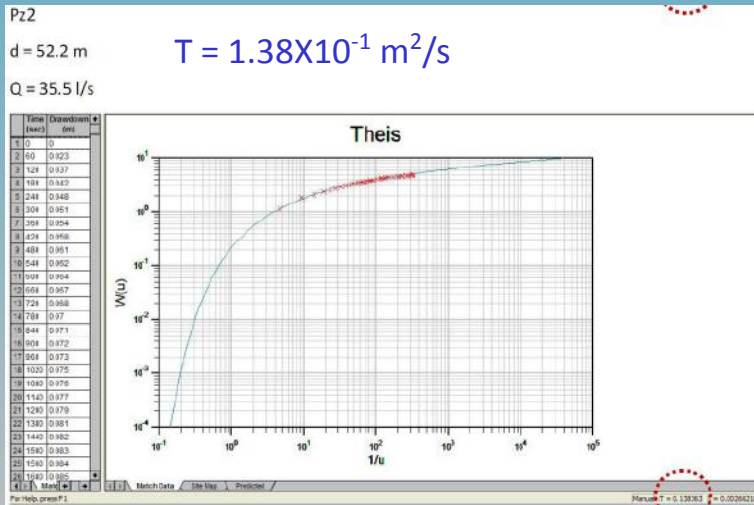
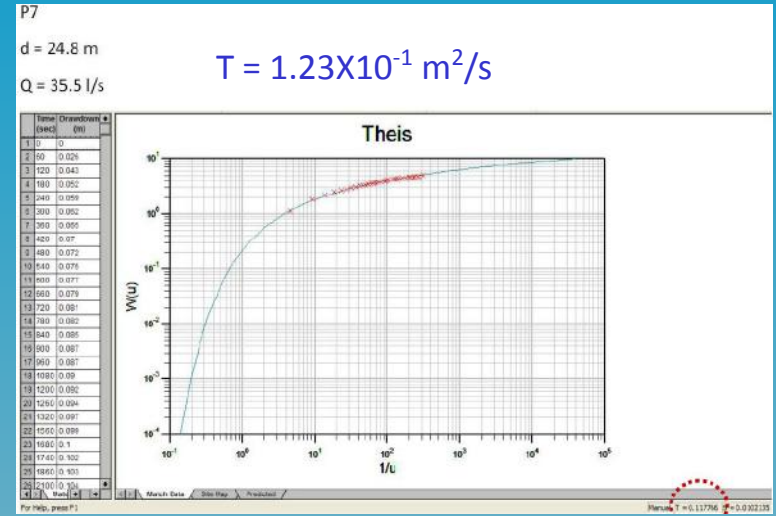
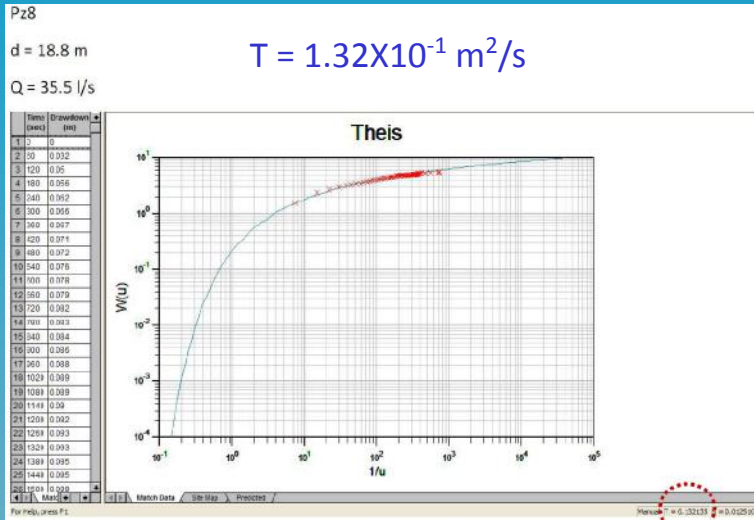
Match Data Site Map Predicted

Manual $T = 0.132135$ $S = 0.0125102$

Pz 8 - Diagramma abbassamenti s.l. – tempo s.l. – Interpretazione secondo Theis

NUOVO PALACONGRESSI RIVA DEL GARDA - TN

PROVE POMPAGGIO



NUOVO PALACONGRESSI RIVA DEL GARDA - TN

PROVE POMPAGGIO

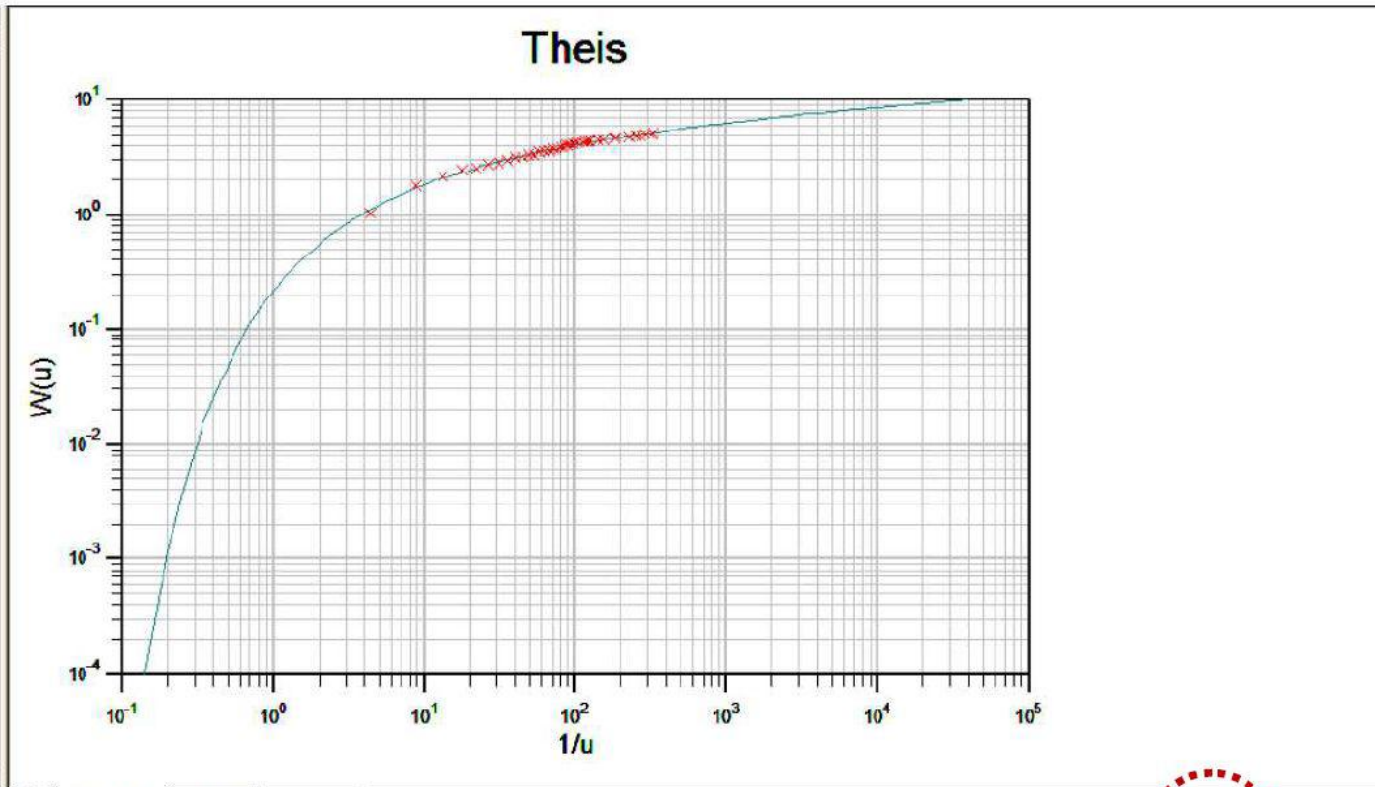
Pz4

d = 42.2 m

Q = 35.5 l/s

$T = 2.0 \times 10^{-1} \text{ m}^2/\text{s}$

Time (sec)	Drawdown (m)
1 0	0
2 60	0.014
3 120	0.024
4 180	0.029
5 240	0.033
6 300	0.034
7 360	0.037
8 420	0.038
9 480	0.04
10 540	0.042
11 600	0.043
12 660	0.045
13 720	0.045
14 780	0.047
15 840	0.048
16 900	0.049
17 960	0.05
18 1020	0.05
19 1080	0.052
20 1140	0.053
21 1200	0.054
22 1260	0.055
23 1320	0.056
24 1380	0.057
25 1500	0.058
26 1560	0.059



Match Data Site Map Predicted

For Help, press F1

Manual T = 0.204653 S = 0.00634533

Row Number: 6
Column Number: 10
Layer Number: 1
Stress Period: 1
Component Number: 1
Figure Number: 1

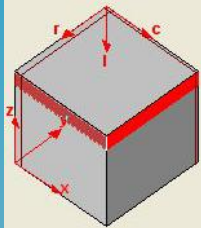
DISCRETIZZAZIONE VERTICALE

Ai layer è stata inizialmente assegnata un'unica conducibilità idraulica orizzontale $K_h = 2.7 \times 10^{-3}$ m/s ($T = 1.4 \times 10^{-1}$ m²/s), con K_z a posta pari a 1/5 di quella orizzontale K_h .



L'acquifero, in senso verticale è stato inizialmente suddiviso in 7 strati (layer), per uno spessore pari a 50.2 m, come di seguito indicato:

- PIANO CAMPAGNA: 67.5 m slm (zero di progetto)
- FALDA P8: 65.2 (prova di pompaggio) m slm
- Base Layer 1: 64.5 m slm (64.4 fondo scavo principale – 64.3 zone approfondimento)
- Base Layer 2: 62.5 m slm (62.4 fondo scavo teatro cinturato)
- Base Layer 3: 58.0 m slm (base filtri pozzi e piezometri)
- Base Layer 4: 56.0 m slm (base diaframma cinturamento zona teatro)
- Base Layer 5: 50.0 m slm (Acquifero fondo)
- Base Layer 6: 40.0 m slm (Acquifero fondo)
- Base Layer 6: 15.0 m slm (Acquifero fondo)



Limite a potenziale imposto – Falda entrante

DISCRETIZZAZIONE ORIZZONTALE

Limite a flusso nullo

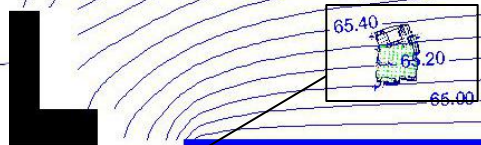
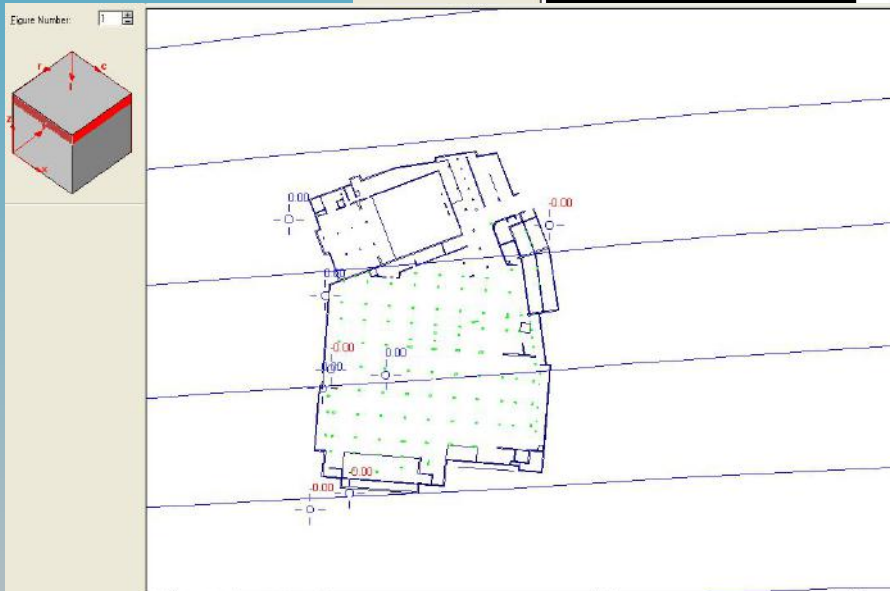
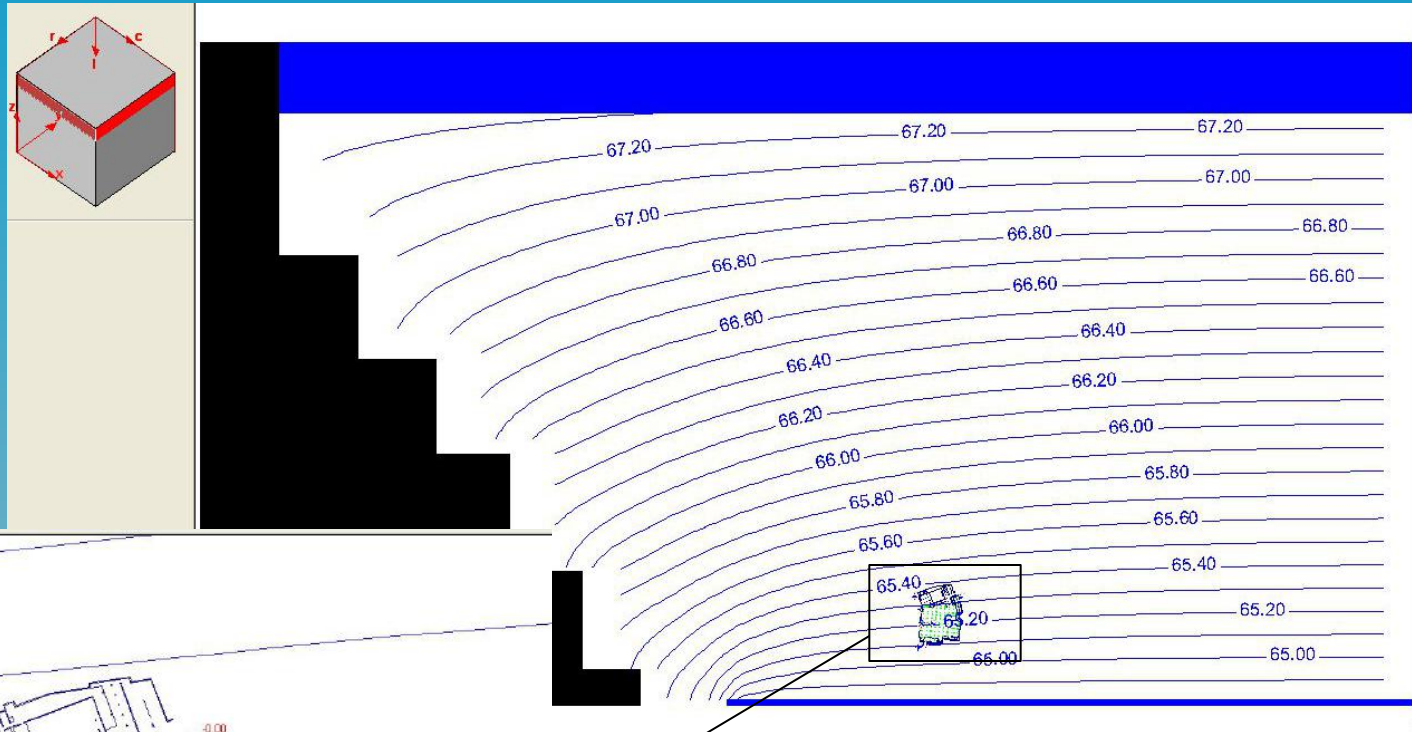
Area di cantiere

Limite a potenziale imposto – Lago

Modflow (McDonald e Harbaugh, 1988; Zheng et al., 2001)

Griglia rettangolare telescopica con lati 2550x1350 m (174 righe x 161 colonne)

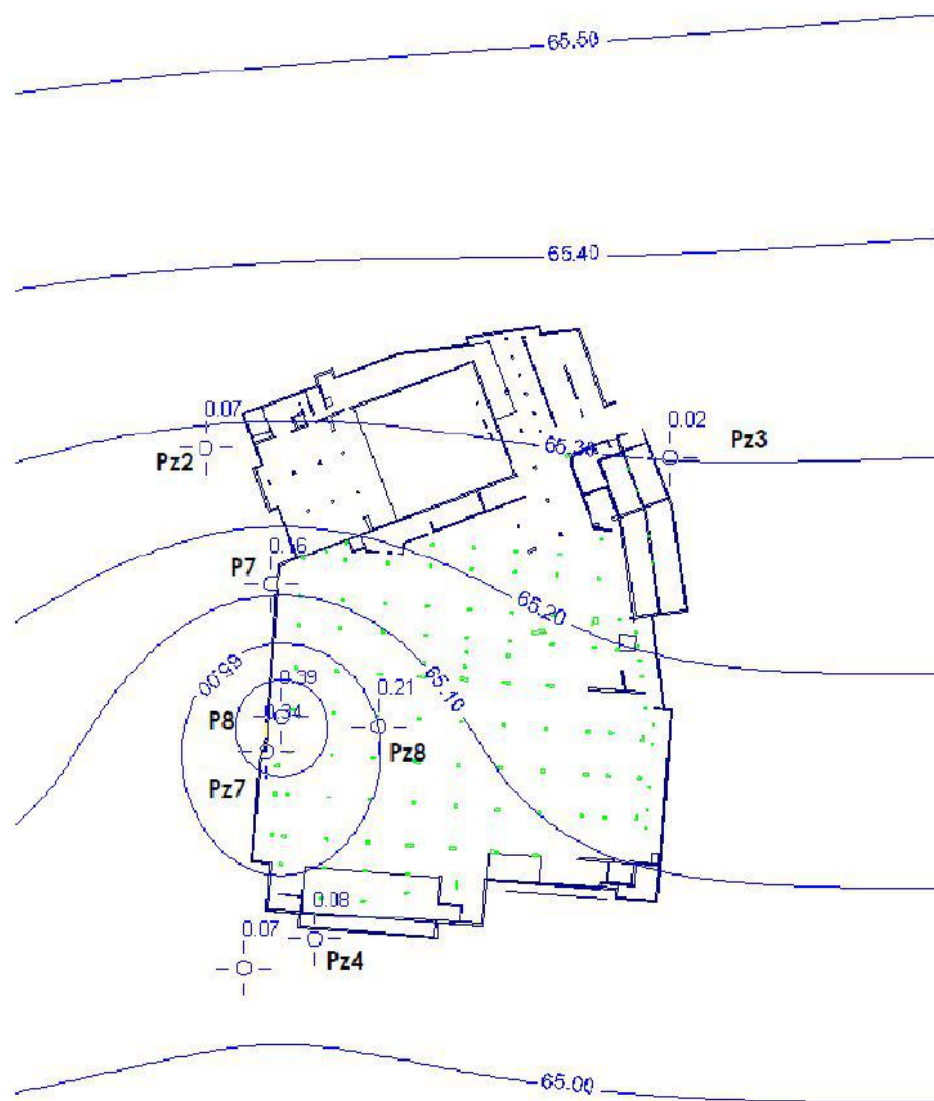
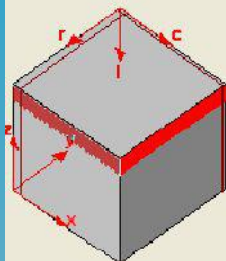
NUOVO PALACONGRESSI RIVA DEL GARDA – PIEZOMETRIA STATICA CALCOLATA DAL MODELLO IN REGIME STAZIONARIO



NUOVO PALACONGRESSI RIVA DEL GARDA

PROVA DI POMPAGGIO CALCOLATA DAL MODELLO IN REGIME STAZIONARIO

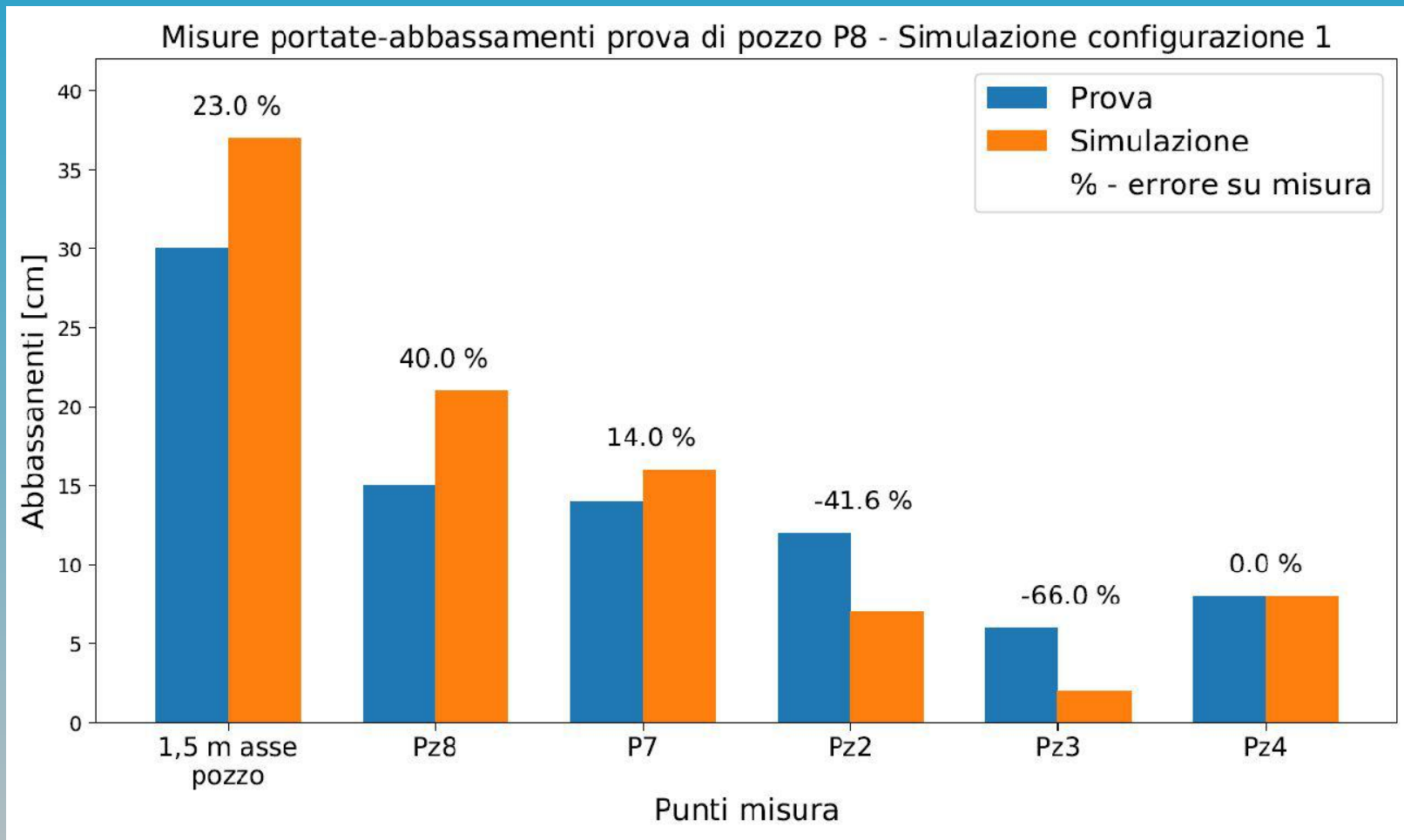
Column Number: 10
Layer Number: 1
Stress Period: 1
Component Number: 1
Figure Number: 1



Piezometria della prova di pompaggio in regime permanente calcolata dal modello – Kh unica su tutti i layer

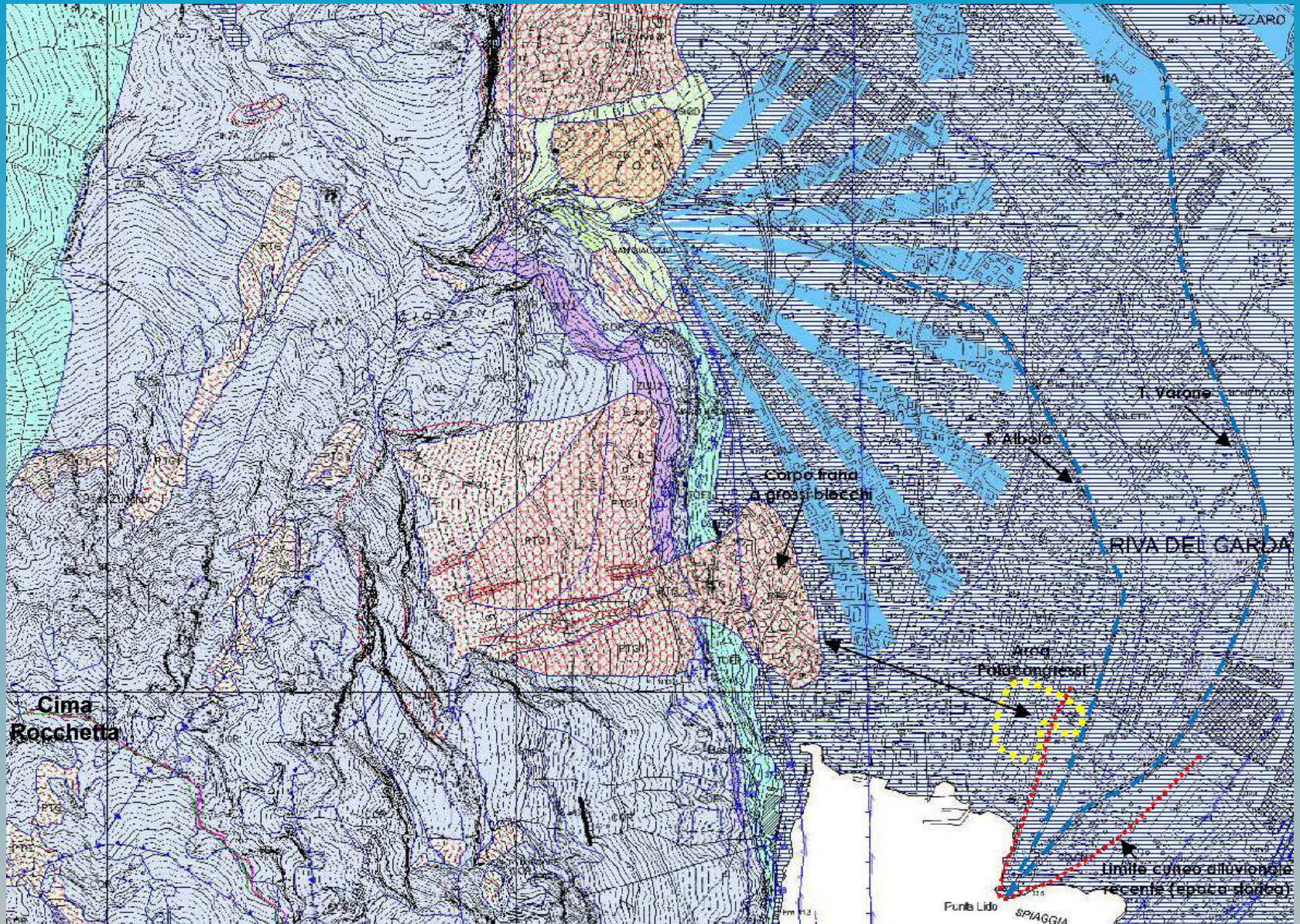
NUOVO PALACONGRESSI RIVA DEL GARDA PROVA DI POMPAGGIO CALCOLATA DAL MODELLO IN REGIME STAZIONARIO

SIMULAZIONE DI CONFIGURAZIONE 1



NUOVO PALACONGRESSI RIVA DEL GARDA - TN

ESTRATTO CARTA GEOLOGICA



NUOVO PALACONGRESSI RIVA DEL GARDA - TN

AREA EX TENNIS – VISTA SCAVI APERTI



CRONOLOGIA DEGLI EVENTI OSSERVATI NELL'AREA EX TENNIS:

- Evento franoso di crollo del tipo rock avalanches o similare con grossi blocchi di calcari dolomitici appartenenti alla formazione della Corna. Il corpo di frana, del quale nell'area ex-tennis si osservano gli effetti più distali, si è riversato su un'area alluvionale che localmente si sviluppava intorno a quota 62.0 63.0 m slm. L'evento oltre ad aver spostato il corso dell'Albola verso est ha probabilmente determinato anche un riassetto degli insediamenti antropici tardo romani e medioevali originariamente presenti.
- Segue una prima fase di alluvionamento da parte degli apparati di delta conoide dei Torrenti Albola e Varone che rimaneggiano in parte il materiale di frana e portano il piano campagna locale intorno a quota 65.0/66.0 m slm, su cui per un certo periodo, si è sviluppata l'attività antropica oggetto degli scavi archeologici (Basso medioevo).
- Sono infine seguiti altri eventi alluvionali di delta conoide di epoca storica limitati alla zona di deviazione dei torrenti Albola e Varone, che daranno la forma attuale al piccolo promontorio di Punta Lido, elevando il piano campagna locale di alcuni metri, sommergendo completamente gli insediamenti antropici.

ZONA SORGENTE DELLA FRANA A GROSSI BLOCCHI

PROBABILE EVENTO FRANOSO DI CROLLO DEL TIPO ROCK AVALANCHES O SIMILARE, STACCATOSI DALLE PENDICI DEL MONTE ROCCHETTA

POSSIBILE CORRELAZIONE CON EVENTO SISMICO DI ETÀ BASSO MEDIOEVALE CHE HA PRODOTTO EFFETTI ANALOGHI ANCHE IN ALTRE AREE VICINE (TERREMOTO DALLA VAL D'ADIGE DEL 1046*)

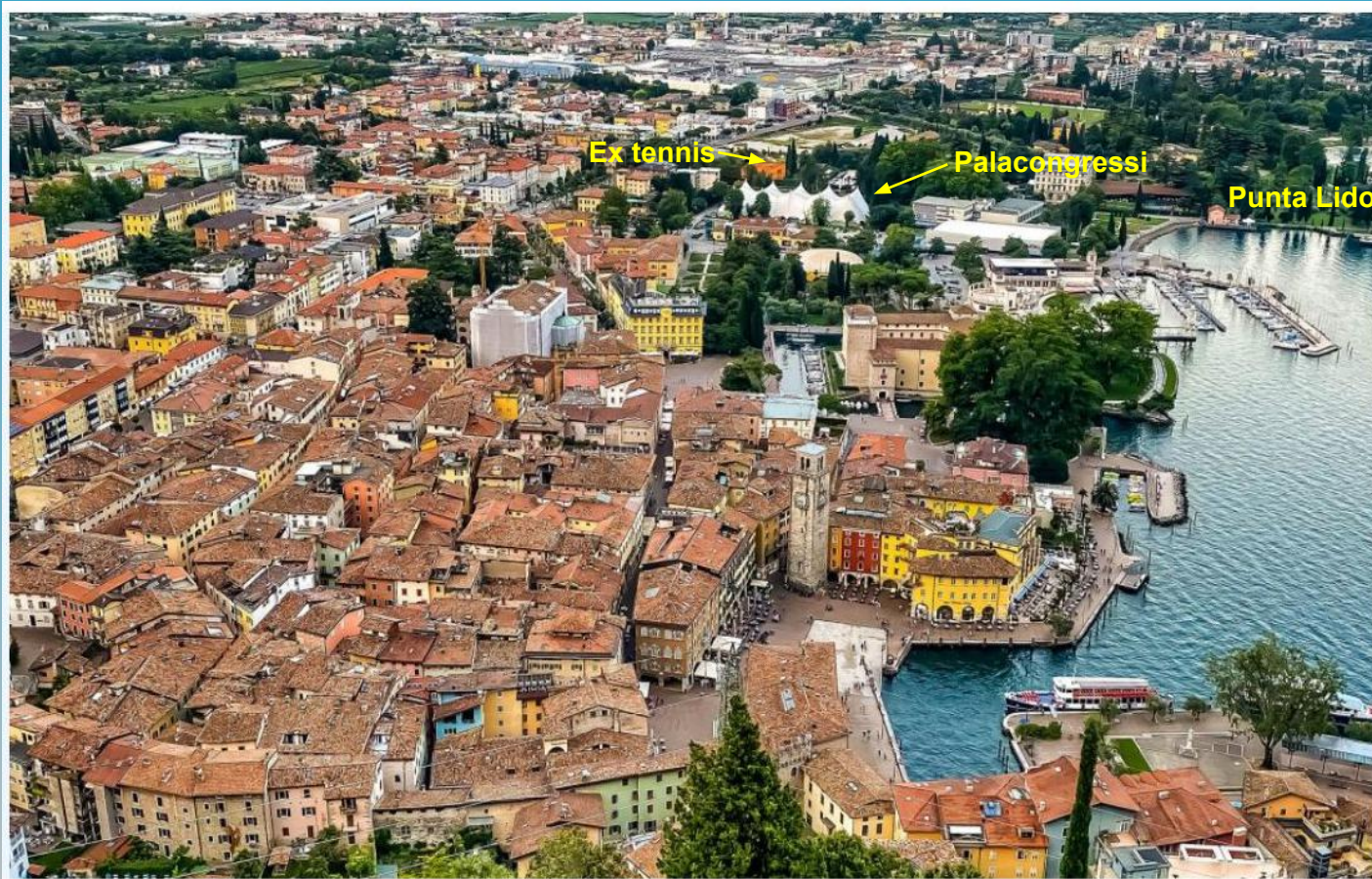
* Vedi recenti lavori di Ruggia G., Ivy-Ochs S., Martin S. e Viganò A



NUOVO PALACONGRESSI RIVA DEL GARDA - TN

PIANA ALLUVIONALE – RIVA DEL GARDA – CENTRO STORICO

RISULTA MOLTO PARTICOLARE IL MECCANISMO DI TRASPORTO DEI BLOCCHI CALCAREI AD UNA DISTANZA CONSIDEREBILE (700 m dal piede del versante), CONSIDERATO L'ESIGUO SPESSORE DEL CORPO DI FRANA, CHE NEL SETTORE URBANIZZATO COMPRESO TRA IL PIEDE DELLA FRANA CARTOGRAFATA E L'AREA DEL PALACONGRESSI, ATTUALMENTE NON PRESENTA EVIDENZE MORFOLOGICHE DI SUPERFICIE

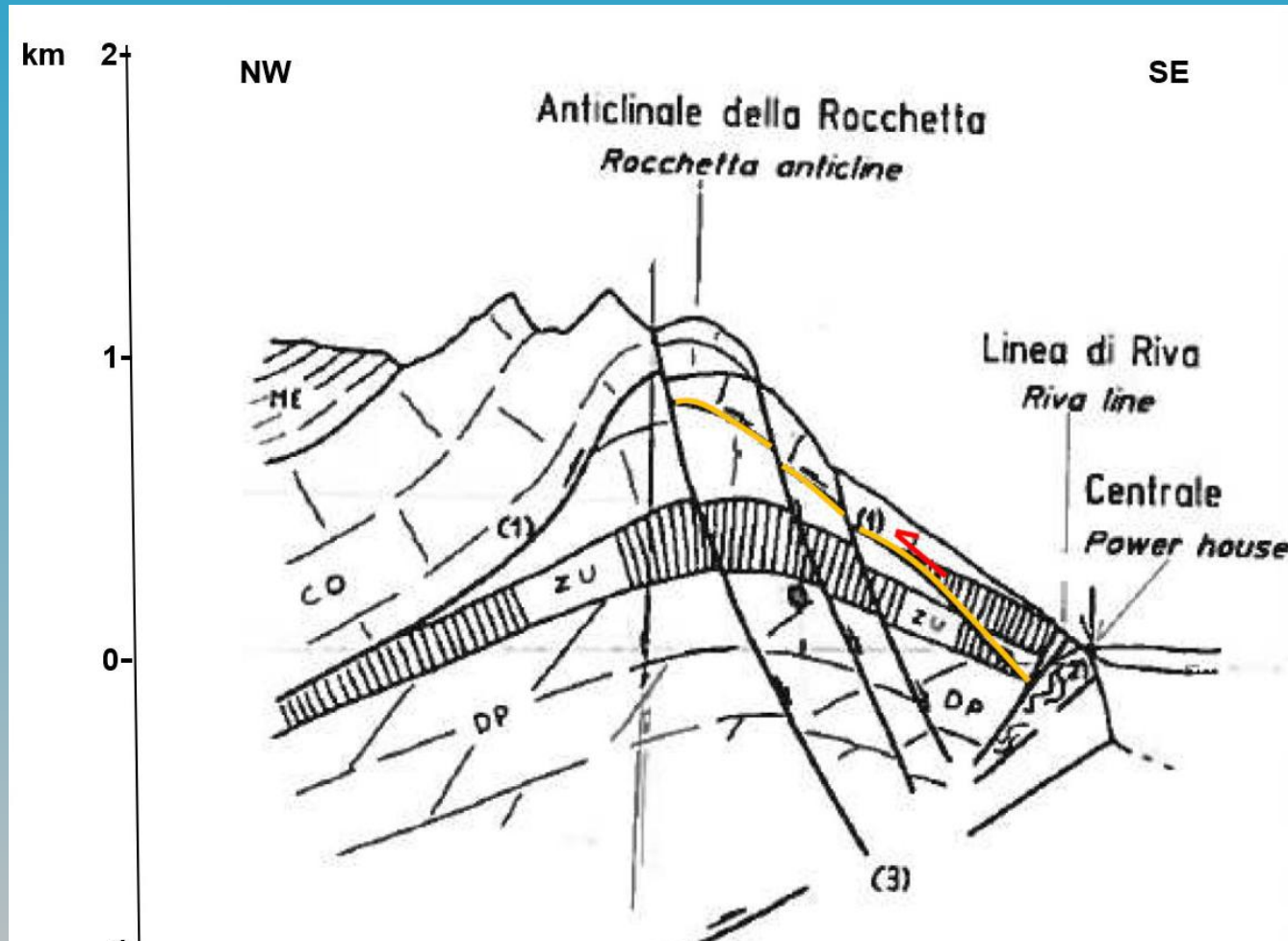


**NON SEMBRA VI SIA
NEMMENO MEMORIA O
DOCUMENTAZIONE
STORICA DELL'EVENTO**

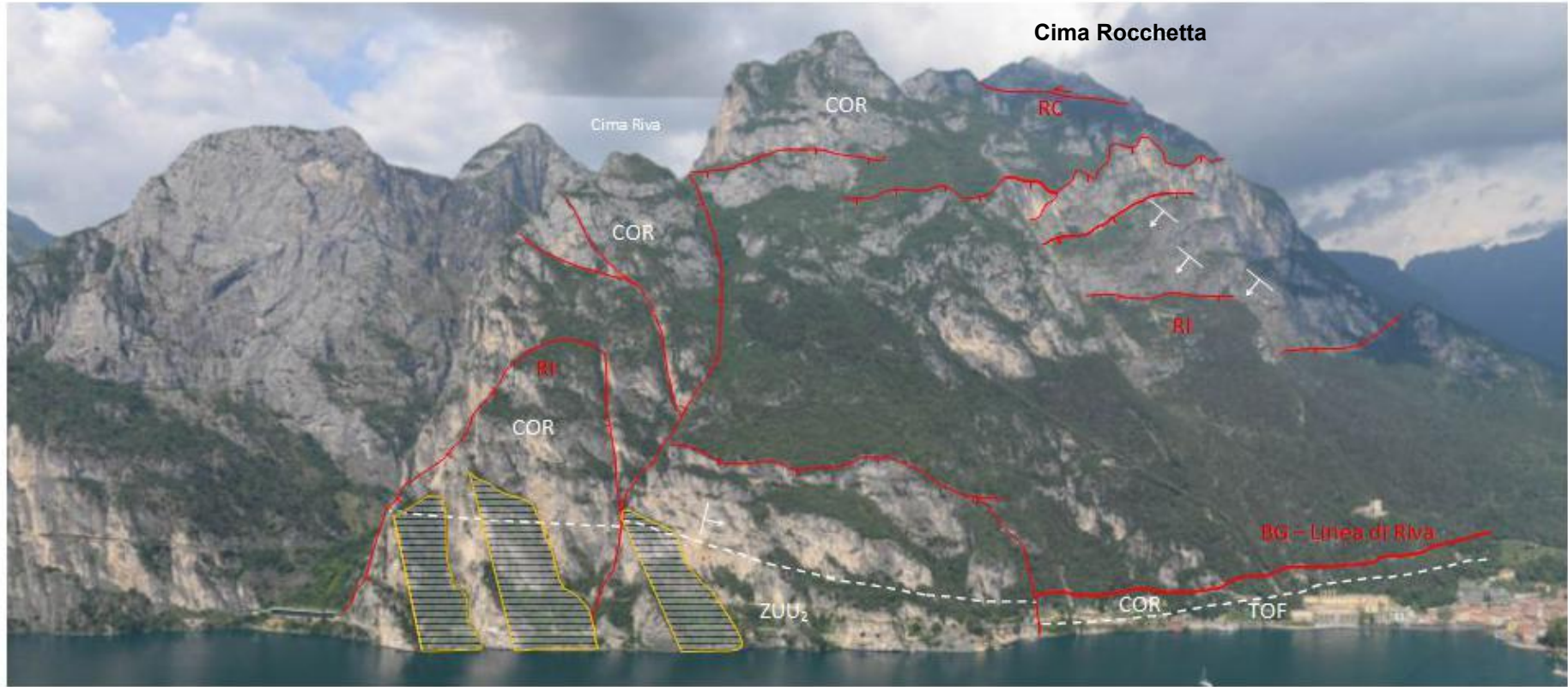
**LA STESSA IMPRESA
DEGLI SCAVI DI RIVA DEL
GARDA, CON ATTIVITA'
QUARANTENNALE, E'
RIMASTA «SORPRESA»**

SEZIONE GEOLOGICA STRUTTURALE MONTE ROCCHETTA

Sezione geologica interpretativa dell'Anticlinale della Rocchetta (da Astolfi et al., 1993). 1. Piani di taglio e sovrascorrimento della Rocchetta; 2. Fascia di deformazione della Linea di Riva e della Linea Ballino-Garda; 3. Faglie distensive plio-quadernarie. DP: Dolomia Principale, ZU: Calcare di Zu, CO: Corna, ME: ex Medolo, ora Formazione del Tofino. **Nella figura vengono evidenziati in giallo i piani di taglio di retroazione a ridosso della Linea Ballino-Garda**



PANORAMICA CIMA RIVA – CIMA ROCCHETTA - ELEMENTI GEOLOGICI STRUTTURALI



LEGENDA

COR	CORNA		SOVRASCORRIMENTO	FOTO: DSC722
ZUU ₃	CALCARE DI ZU – Membro di Tremalzo		FAGLIA TRASCORRENTE	
ZUU ₂	CALCARE DI ZU – Membro di Riva		PIANI DI TAGLIO	RI FAGLIE DIRETTE DI RIVA
ZUU ₁	CALCARE DI ZU – Membro del Grostè		FAGLIA DIRETTA	RC Antidinale e Sovrascorrimento Rocchetta
DPR	DOLOMIA PRINCIPALE		LIMITE STRATIGRAFICO	BG LINEA BALLINO-GARDA

NUOVO PALACONGRESSI RIVA DEL GARDA - TN
ESTRATTO IFFI – Inventario dei fenomeni franosi in Italia



NUOVO PALACONGRESSI RIVA DEL GARDA - TN

PRE SCAVO DI RIBASSO AREA PALACONGRESSI

Foto 9



Foto 10

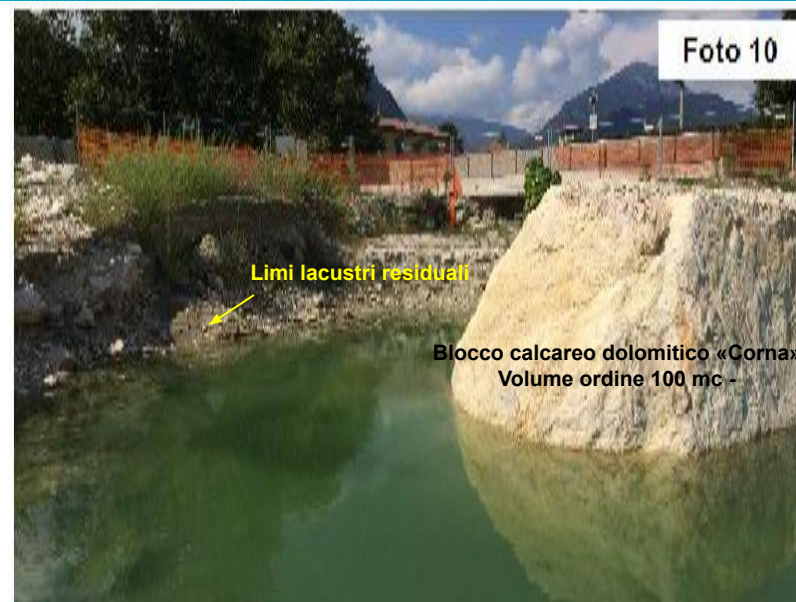


Foto 11



Foto 12



NUOVO PALACONGRESSI RIVA DEL GARDA - TN

PRE SCAVO DI RIBASSO AREA PALACONGRESSI

Si tratta di una roccia tenera, conosciuta con il nome di *prea morta*, storicamente impiegata per la maggior parte nell'edilizia locale. L'impiego di questa arenaria è antico dato che da essa è ricavata una delle statue stele di Arco (fine III millennio a.C.) [M. Avanzini, I. Salvador, 2008]

Foto 13



Foto 14



Foto 15



Foto 16



NUOVO PALACONGRESSI RIVA DEL GARDA - TN
LE INDAGINI GEOGOSTICHE E GEOFISICHE DI APPROFONDIMENTO

FINALITA' DELLE INDAGINI: GEOTECNICHE ED IDROGEOLOGICHE

POZZETTI ESPLORATIVI - VISIONE DI SCAVI APERTI

Comprensione delle dinamiche deposizionali e dei rapporti stratigrafici dei corpi di deposizione più recente – Corpo di frana – Alluvioni di rimaneggiamento del corpo di frana e di attività antropiche – Materiali di riporto

SONDAGGI GEOGNOSTICI POCO PROFONDI (7-8 m)

Verifica puntuale dello spessore complessivo dei corpi di deposizione più recente e del tetto delle alluvioni pre-frana

INDAGINI GEOFISICHE

Delimitazione spaziale del corpo di frana principale a grossi blocchi

Delimitazione spaziale di areali e volumi caratterizzati da scarso addensamento e/o bassa consistenza (nel caso specifico distribuzione di limi lacustri residuali e riporti molto areati)

Individuazione della posizione dei grandi blocchi entro il volume geotecnicamente significativo

NUOVO PALACONGRESSI RIVA DEL GARDA - TN LE INDAGINI GEOGNOSTICHE E GEOFISICHE DI APPROFONDIMENTO

POZZETTI ESPLORATIVI E SCAVI APERTI

POZZETTO 4



Da m 0.0 a m 0.6

Riporto: Ghiaia localmente sabbiosa, con clasti e blocchi angolari, superiormente sciolta, passante a ghiaia con blocchi in matrice sabbioso limosa maggiormente addensata (Unità Rs)

Da m 0.6 a m 0.9

Ghiaia calcarea sabbiosa subangolare, in matrice limosa di colore giallo ocra (materiale di alterazione Arenaria di Ceole)

Da m 0.9 a m 1.3

Sabbia debolmente limosa grigiasta con gaietto fine poligenico sub-arrotondato, con inclusi clasti sub angolari calcarei (Alluvionale di rimaneggiamento (Unità A1_{CS}))

Da m 1.3 a m 1.7

Ghiaia poligenica sub-arrotondata medio fine con radi clasti calcarei subangolari, in matrice sabbiosa grigiasta (Unità A1_{CS} rimaneggiamento)

NUOVO PALACONGRESSI RIVA DEL GARDA - TN

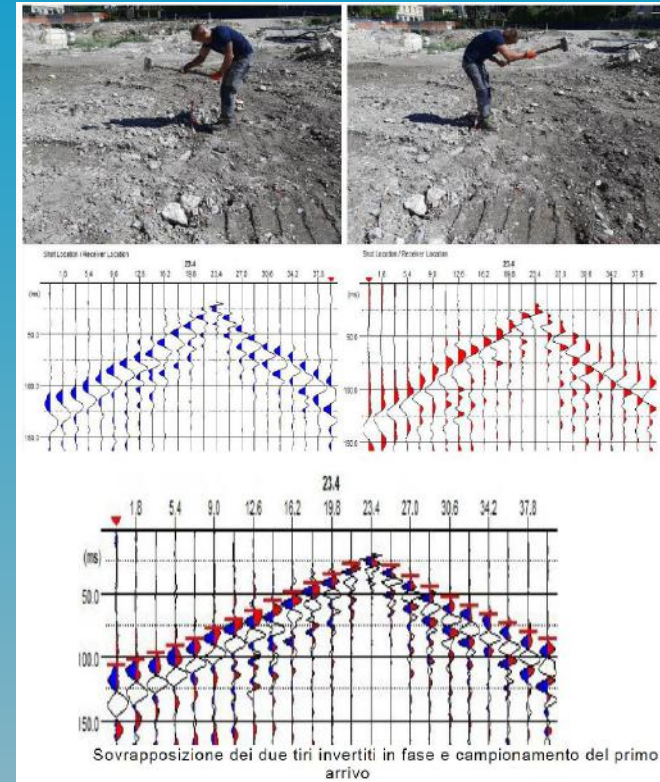
LE INDAGINI GEOFISICHE

TOMOGRAFIA SISMICA IN ONDE Sh

Ha previsto l'energizzazione in taglio con inversione di fase (mazzata + e mazzata -) e registrazione del segnale trasmesso nel sottosuolo con particolari sensori liberi di oscillare sul piano orizzontale.

Perché?

Presenza di falda a - 0.5 m dal piano di indagine
Determinazione dei moduli a piccole deformazioni

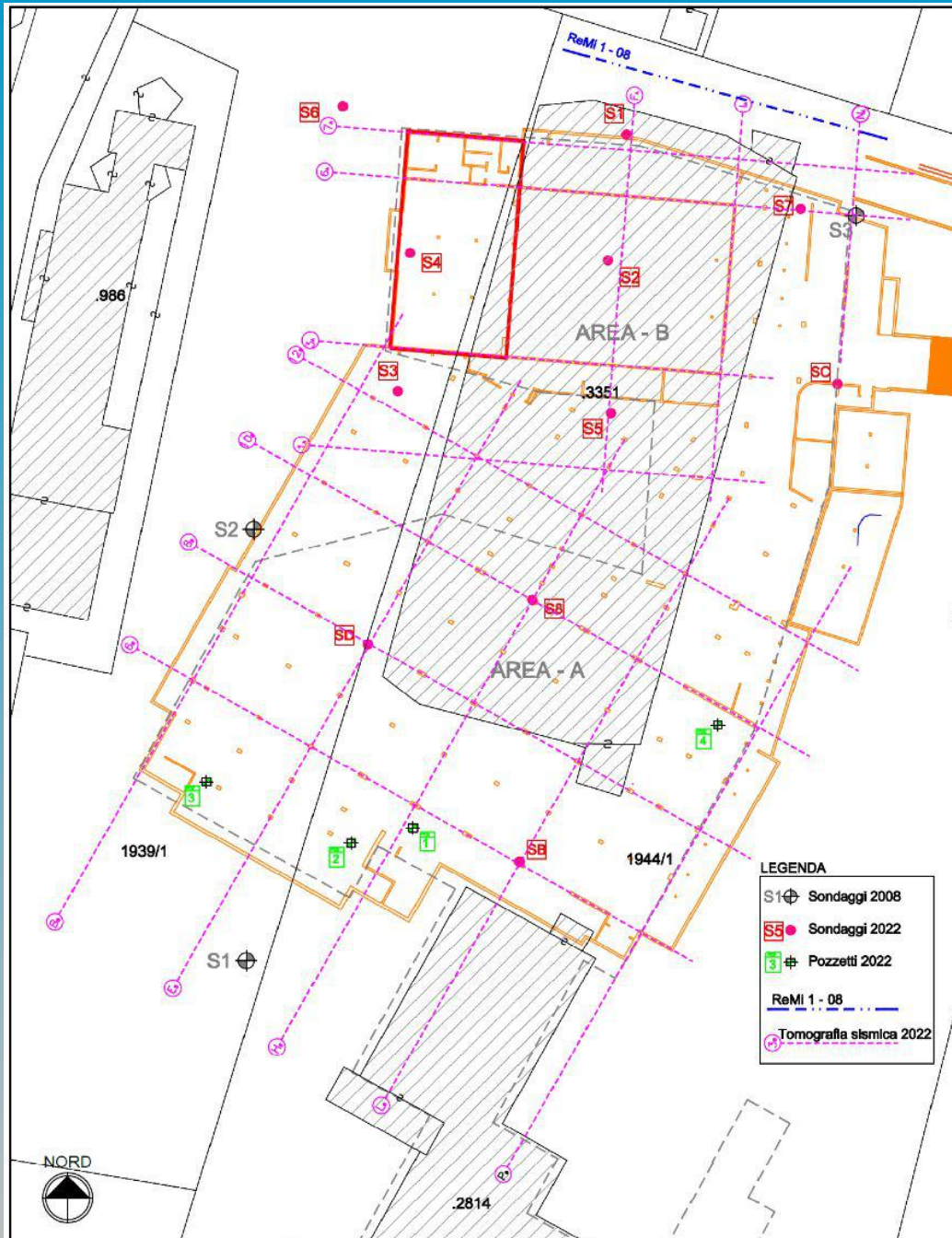


ELETTROMAGNETOMETRO MULTIFREQUENZA

In grado rilevare, teoricamente, la presenza di grossi blocchi (bassa conduttività) sub-superficiali.

La comodità di questo strumento consta nel fatto che non necessita di contatto e viene semplicemente trasportato a ~20cm raso suolo mentre l'operatore passeggia percorrendo linee tra loro parallele (ca 3m). Un gps interno consente l'identificazione del punto rilevato con frequenza di 1sec per ogni lettura (ca 2-3m)

UBICAZIONE DELLE INDAGINI ESISTENTI E DI VARIANTE



LEGENDA

S1 ⊕ Sondaggi 2008

S5 ● Sondaggi 2022

3 # Pozzetti 2022

ReMi 1 - 08

3 Tomografia sismica 2022

LEGENDA

S1 ⊕ Sondaggi 2008

S5 ● Sondaggi 2022

3 # Pozzetti 2022

ReMi 1 - 08

3 Tomografia sismica 2022

TOMOGRAFIA SISMICA IN ONDE Sh

Al fine di ricostruire con una risoluzione sufficientemente elevata la situazione del sottosuolo è stato pianificato un graticcio di maglia 15mx15m prevedendo sezioni tomografiche in ambedue le direzioni principali di sviluppo dell'opera.

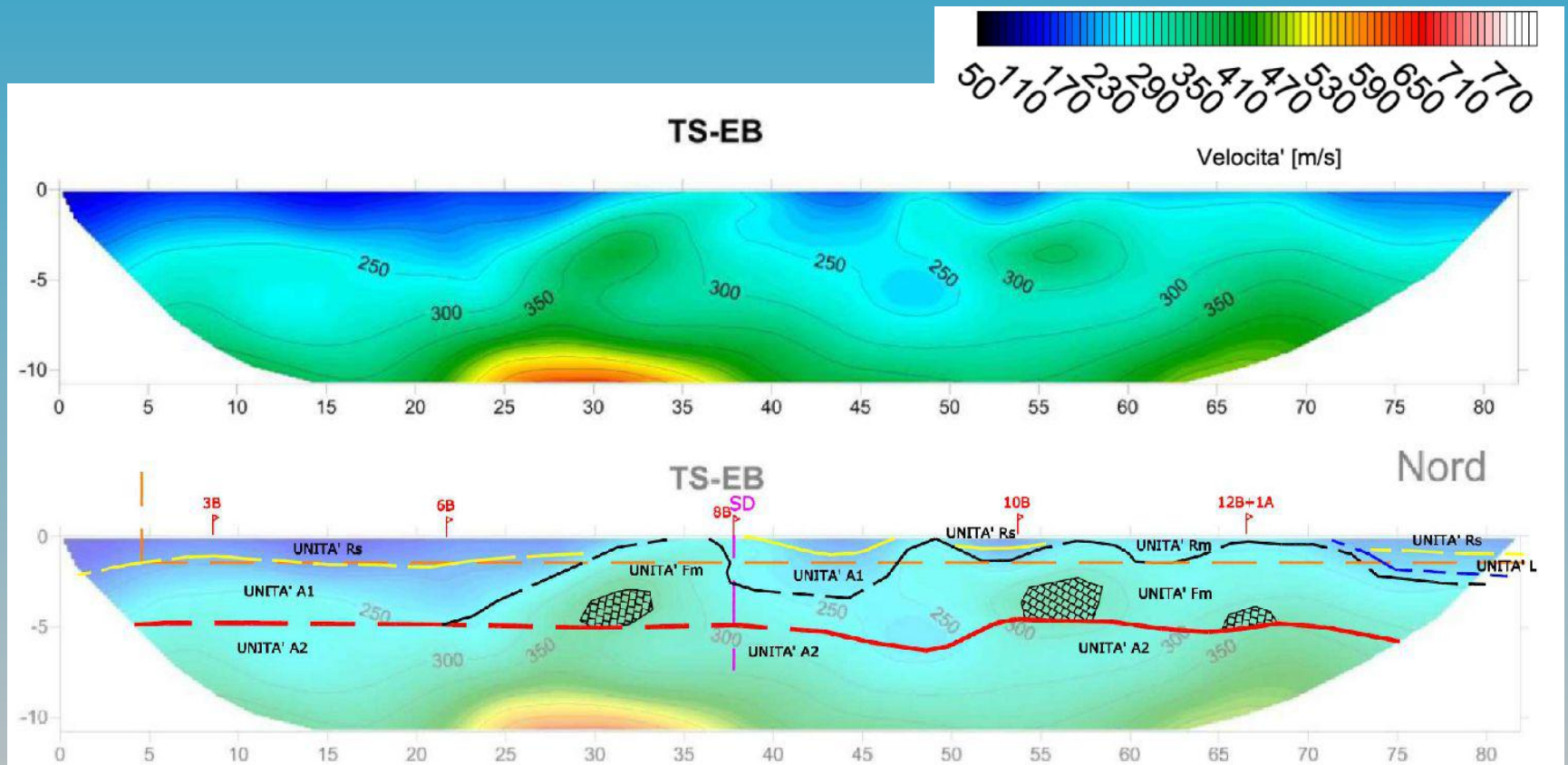
Rispetto alla metodica masw questa tecnica permette di ricavare un vero modello 2D delle velocità del sottosuolo e avendo adottato una spaziatura intergeofonica di 1.8m e' possibile ottimizzare i modelli ad una precisione orizzontale di 0,9m e verticale di 0,45m

NUOVO PALACONGRESSI RIVA DEL GARDA - TN

TOMOGRAFIA SISMICA IN ONDE Sh

TARATURA DELLE VELOCITA' V_s CON I DATI DEI POZZETTI E DEI SONDAGGI

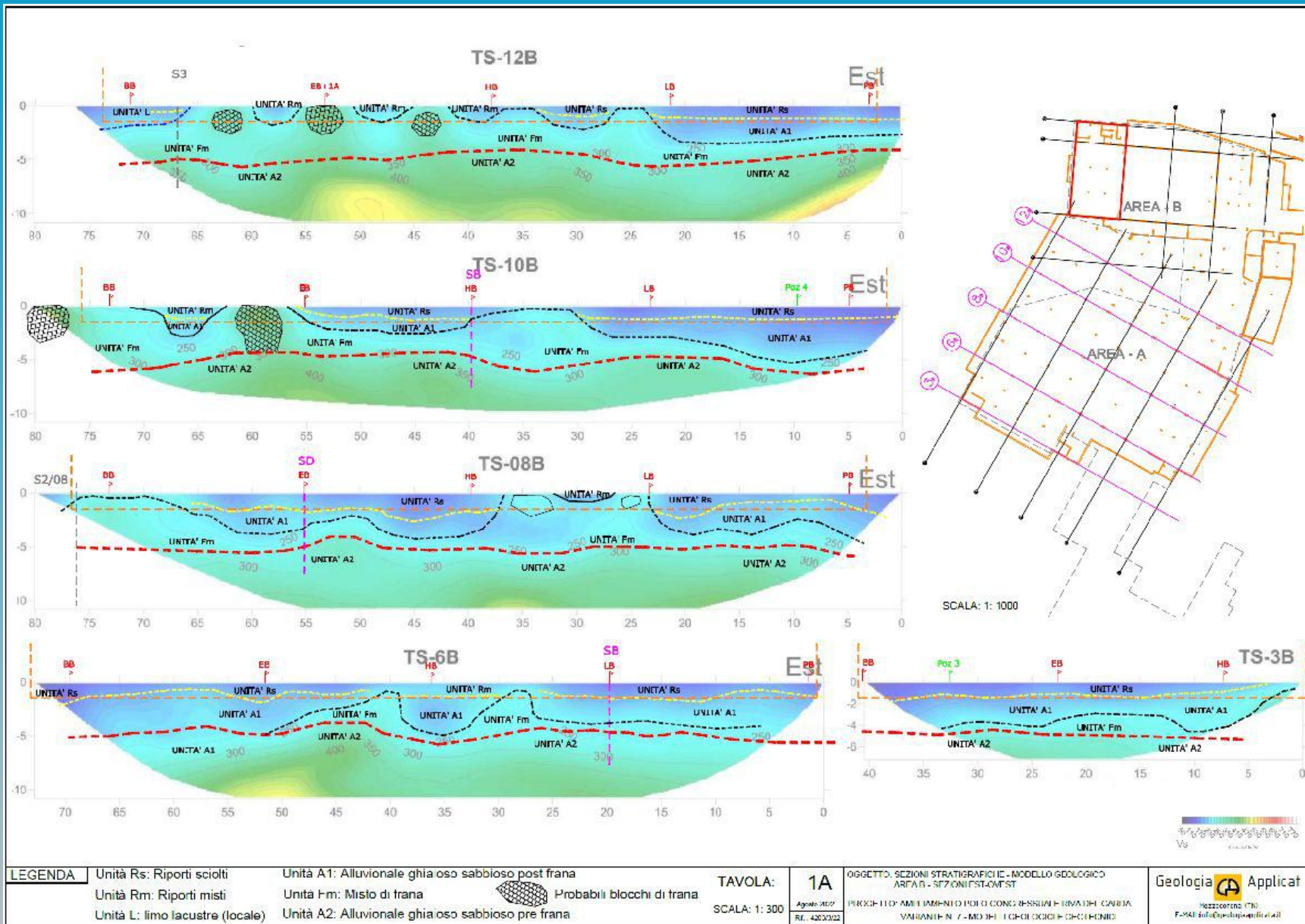
- Gli areali ascrivibili al corpo di frana sono circoscritti da aree con $V_s > 250-300$ m/s
- Le geometrie del corpo di frana sepolto con maggiore frequenza di blocchi si individuano come aumenti relativi di velocità che possono salire fino a 450-500 m/s.
- I settori con $V_s < 200$ m/s sono ascrivibili a limi lacustri residuali o riporti recenti molto areati



Esempio di interpretazione stratigrafica sulla relativa sezione tomografica in onde di taglio

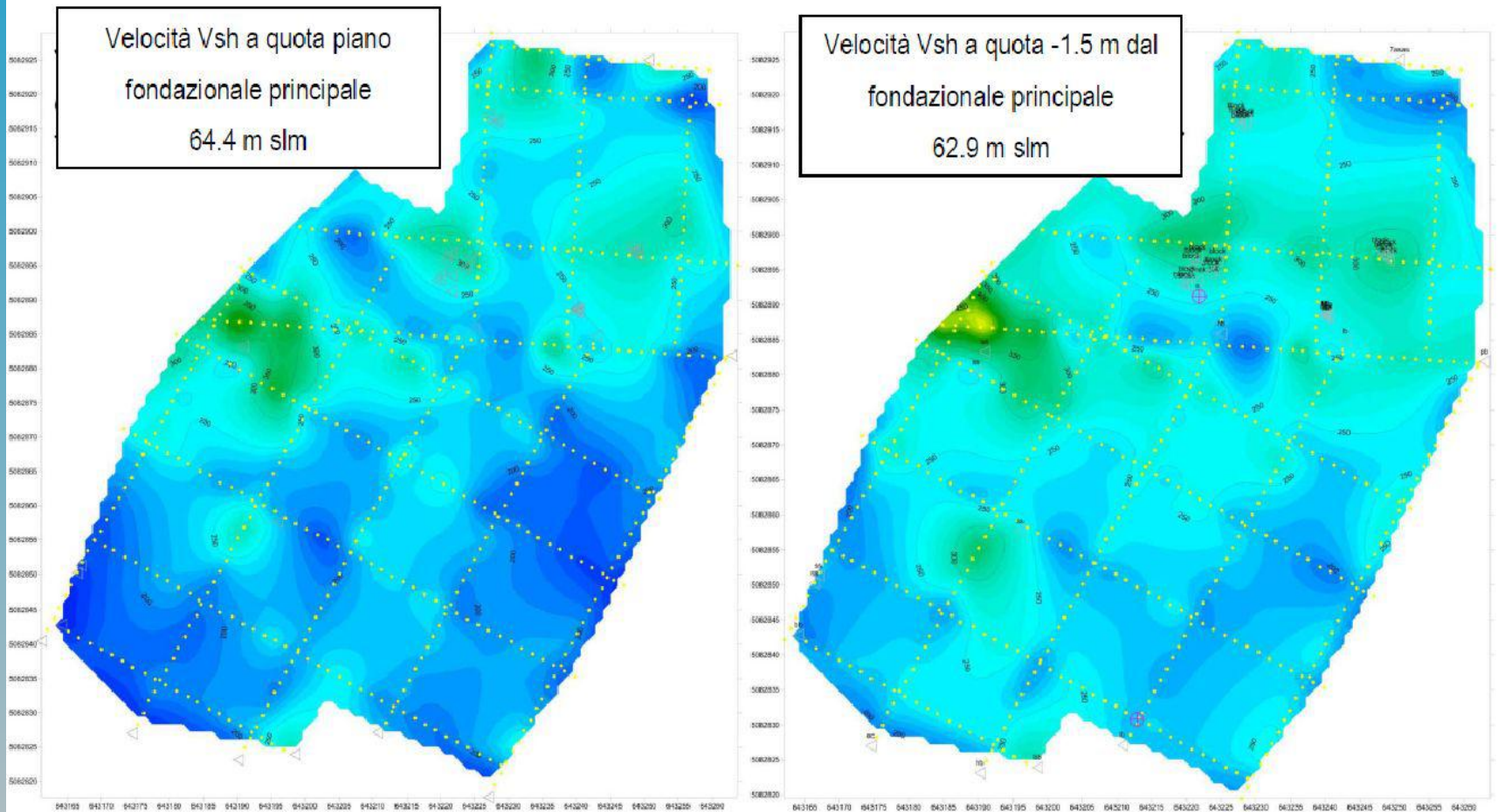
NUOVO PALACONGRESSI RIVA DEL GARDA - TN

TOMOGRAFIA SISMICA IN ONDE Sh



NUOVO PALACONGRESSI RIVA DEL GARDA - TN

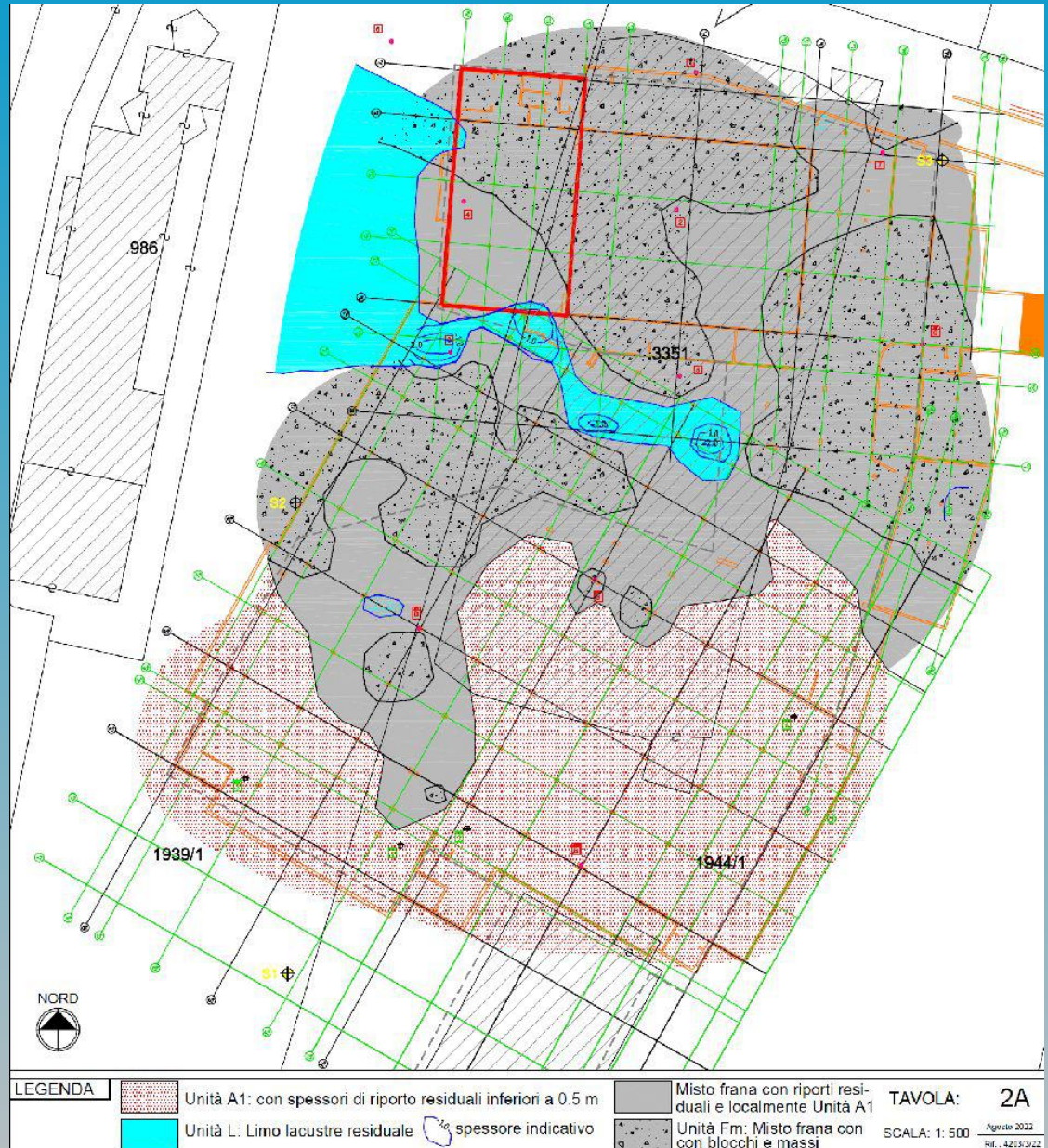
TOMOGRAFIA SISMICA IN ONDE Sh



Restituzione planimetrie della velocità delle onde di Taglio Vs al piano fondazionale e a -1.5 m dal piano fondazionale

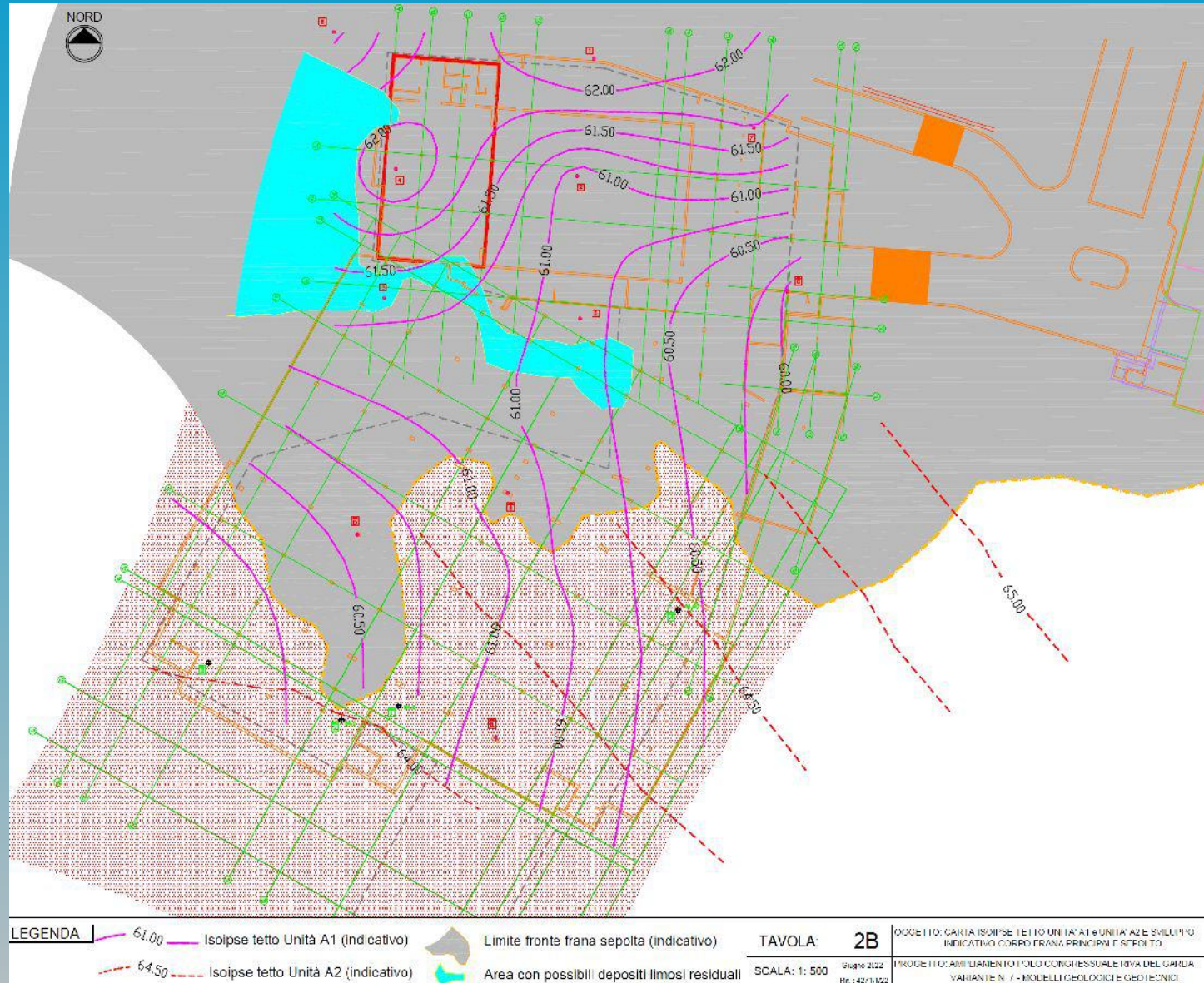
NUOVO PALACONGRESSI RIVA DEL GARDA - TN

CARTA DI PREVISIONE DELLE UNITA' GEOLOGICHE E GEOTECNICHE A QUOTA FONDAZIONALE



NUOVO PALACONGRESSI RIVA DEL GARDA - TN

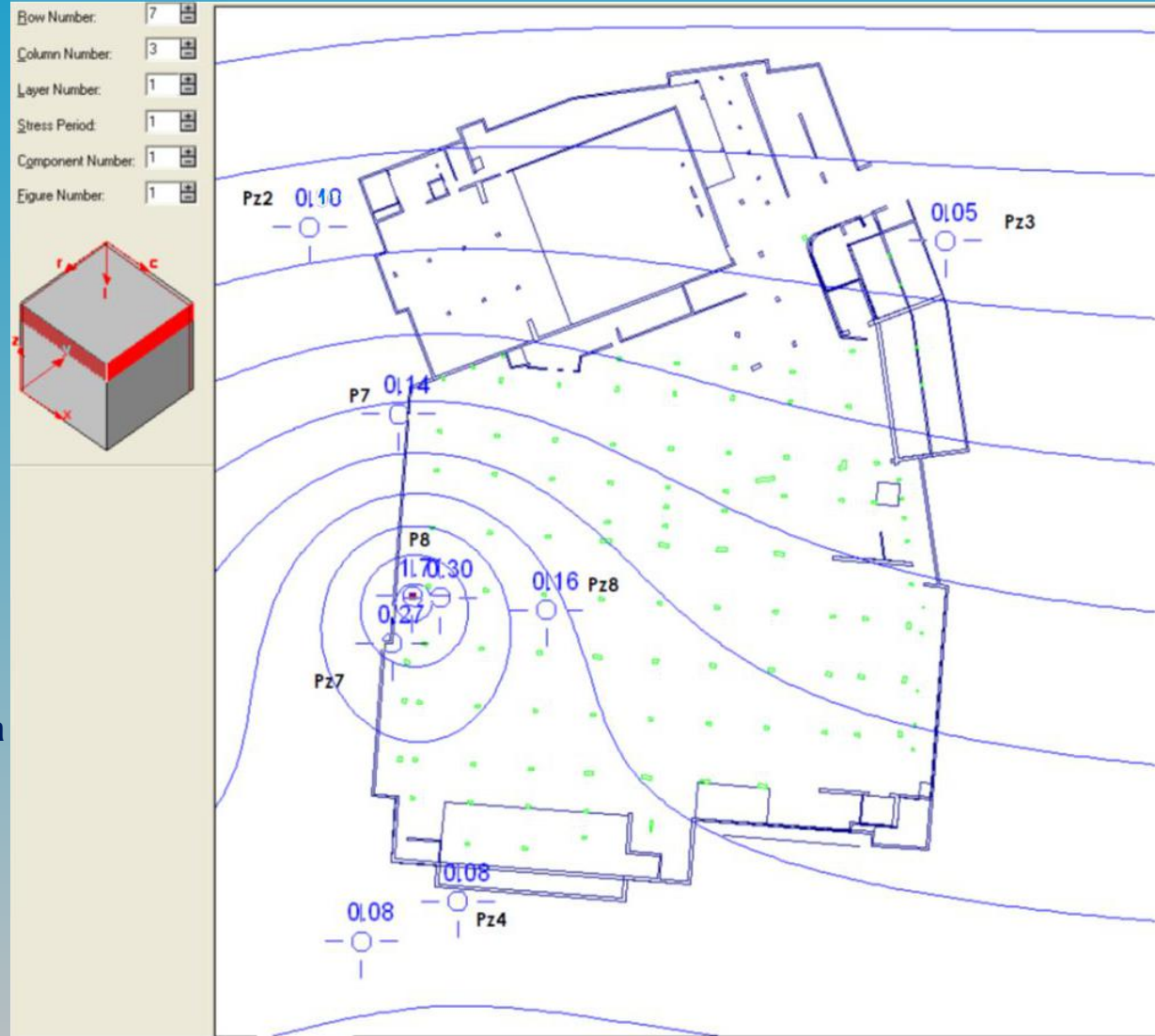
CARTA ISOIPSE TETTO UNITA' A1 E A2 E SVILUPPO INDICATIVO DEL CORPO DI FRANA SEPOLTO



NUOVO PALACONGRESSI RIVA DEL GARDA PROVA DI POMPAGGIO CALCOLATA DAL MODELLO IN REGIME STAZIONARIO

SIMULAZIONE DI CONFIGURAZIONE 2

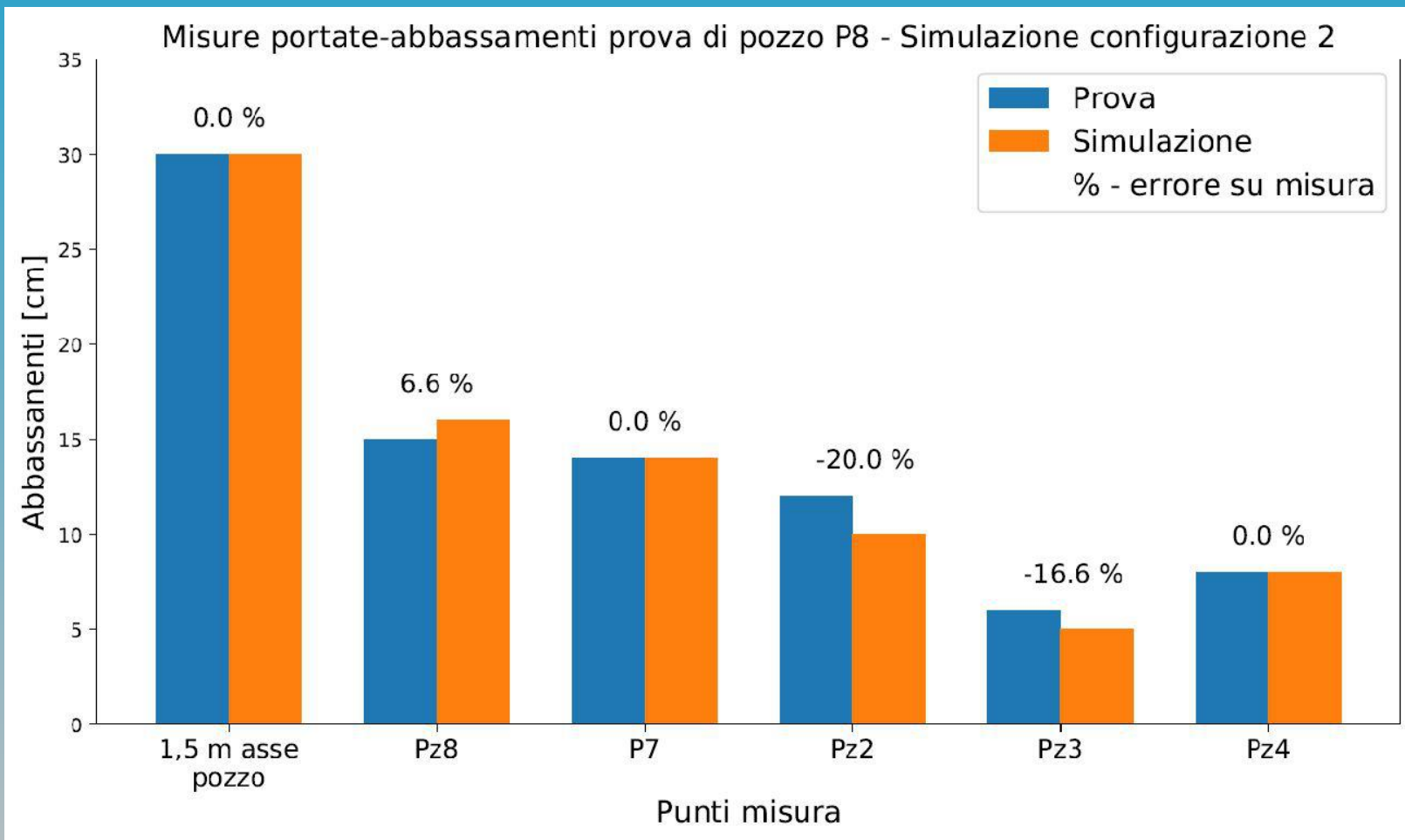
Considerata la condizione stratigrafica rilevata in superficie primi 5÷7 di sottosuolo) con presenza di trovanti (corpo di frana) e riporti aperti, ed una generale condizione di forte variabilità litologica laterale, per la modellazione della prova di pompaggio, mantenendo validi i valori complessivi di trasmissività registrati dalla prova di pompaggio, si è modificato l'assetto verticale del modello (configurazione 2), inserendo nell'area di cantiere, in continuità con il lago, uno strato superficiale (layer 1) con base 62.5 m slm al quale è stata assegnata una conducibilità idraulica orizzontale molto elevata $K_h = 6.0 \times 10^{-3}$ m/s (ad esclusione dei settori di limi residuali), diminuendo di conseguenza la conducibilità idraulica della serie inferiore.



NUOVO PALACONGRESSI RIVA DEL GARDA

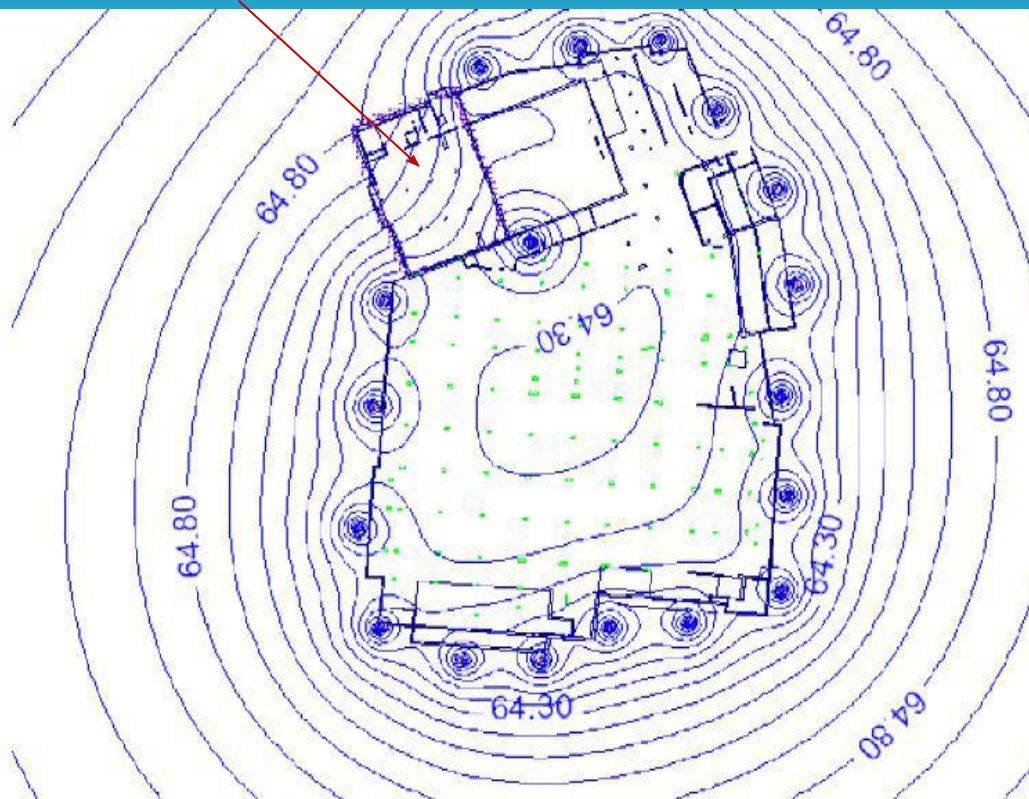
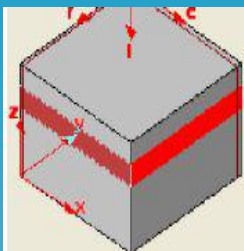
PROVA DI POMPAGGIO CALCOLATA DAL MODELLO IN REGIME STAZIONARIO

SIMULAZIONE DI CONFIGURAZIONE 2



NUOVO PALACONGRESSI RIVA DEL GARDA SIMULAZIONE DEL DEWATERING AREA DI SCAVO PRINCIPALE

Area cinturata e con fondello



- N 18 Pozzi in pompaggio – Portata complessiva 580 l/s
- La simulazione considera la presenza di diaframma di cinturamento con fondello in zona quinte teatro

Piezometria in pompaggio – layer 2 – Scavo asciutto

NUOVO PALACONGRESSI RIVA DEL GARDA



GRAZIE PER L'ATTENZIONE