

STUDI IDROGEOLOGICI PER LA PROGETTAZIONE DELLE GALLERIE AC/AV MILANO-GENOVA. VERIFICA E MITIGAZIONE DEGLI IMPATTI DELLO SCAVO SUGLI ACQUIFERI ESISTENTI

Dott. Ing. Giuseppe Lunardi ROCKSOIL S.p.A. – Amministratore Delegato
Dott. Ing. Giovanna Cassani ROCKSOIL S.p.A. – Direttore Tecnico
Dott. Ing. Andrea Bellocchio ROCKSOIL S.p.A. – Project Manager
Dott. Geol. Fiorenza Pennino ROCKSOIL S.p.A. – Geologo
Dott. Geol. Paolo Perello GDP Consultants – Idrogeologo/Geologo

1. Introduzione ed inquadramento dell’opera

La nuova linea ad alta capacità/alta velocità, Terzo Valico, si sviluppa complessivamente per 53 km, di cui 37 km in galleria, ed interessa 12 comuni delle province di Genova e di Alessandria e le due regioni, Liguria e Piemonte. La nuova linea sarà collegata a Sud - mediante l’interconnessione di Voltri ed il Bivio Fegino – con gli impianti ferroviari del Nodo di Genova, per i quali sono in corso i lavori di adeguamento funzionale e di potenziamento, e con i bacini portuali di Voltri e del Porto Storico. A Nord, dalla piana di Novi Ligure, il tracciato si collega alle linee esistenti Genova - Torino (per i flussi di traffico in direzione Torino e Novara - Sempione) ed alla linea Tortona – Piacenza (per il traffico in direzione Milano - San Gottardo).

In dettaglio la linea, partendo dal nodo ferroviario di Genova (Bivio Fegino), si sviluppa quasi interamente in galleria (Galleria di Valico e Galleria Serravalle) fino alla Piana di Novi, ad eccezione di un breve tratto allo scoperto in corrispondenza di Libarna.

La Galleria di Valico, lunga circa 27 km, prevede quattro finestre di accesso intermedio, sia per motivi costruttivi sia di sicurezza (Finestre Polcevera, Cravasco, Castagnola e Vallemme). In linea con i più avanzati standard di sicurezza, il tracciato in sotterraneo prevede due gallerie a semplice binario affiancate e unite tra loro da collegamenti trasversali (by pass) in modo che ognuna possa servire da galleria di sicurezza per l’altra. Dall’uscita della galleria di Serravalle la Linea si trova prevalentemente all’aperto fino ad imboccare la Galleria di Pozzolo. All’uscita di quest’ultima galleria la Linea prosegue interamente all’aperto fino all’innesto sulla linea esistente Pozzolo Formigaro – Tortona (itinerario per Milano); nella tratta allo scoperto tra Novi Ligure e Pozzolo Formigaro è prevista la realizzazione del collegamento in galleria artificiale da e per Torino sull’attuale linea Genova – Torino.

Le opere più significative del Terzo Valico sono rappresentate dalle seguenti gallerie naturali:

- Galleria di Valico 27.110m
- Galleria Serravalle 7.094m
- Galleria Campasso 716m

Nel dicembre 2001, il CIPE (Delibera n. 121/2001) approva il primo programma delle opere strategiche ex Legge 443 del 21 dicembre 2001 (“Legge Obiettivo”) che inserisce il progetto

del Terzo Valico ferroviario nell'elenco delle infrastrutture strategiche e delle opere di preminente interesse nazionale. Nel settembre 2003 il CIPE (Delibera n. 78/2003) approva il Progetto Preliminare e si dà avvio alla redazione del Progetto Definitivo. Nel marzo 2005 il CIPE (Delibera n. 1/2005) approva il dossier economico e finanziario del Terzo Valico. Nel marzo 2006 il CIPE aggiorna il primo programma delle Grandi Opere strategiche e conferma il Progetto Definitivo della linea AV/AC Terzo Valico. Nel novembre 2010 il CIPE (Delibera n. 84/2010) autorizza l'avvio della realizzazione della tratta in sei lotti costruttivi non funzionali. Del novembre 2011 è la firma dell'Atto Integrativo tra il General Contractor COCIV e RFI (Gruppo Ferrovie dello Stato Italiane). Dell'aprile 2012 è la piena efficacia dell'Atto Integrativo con il conseguente avvio della realizzazione dell'opera.

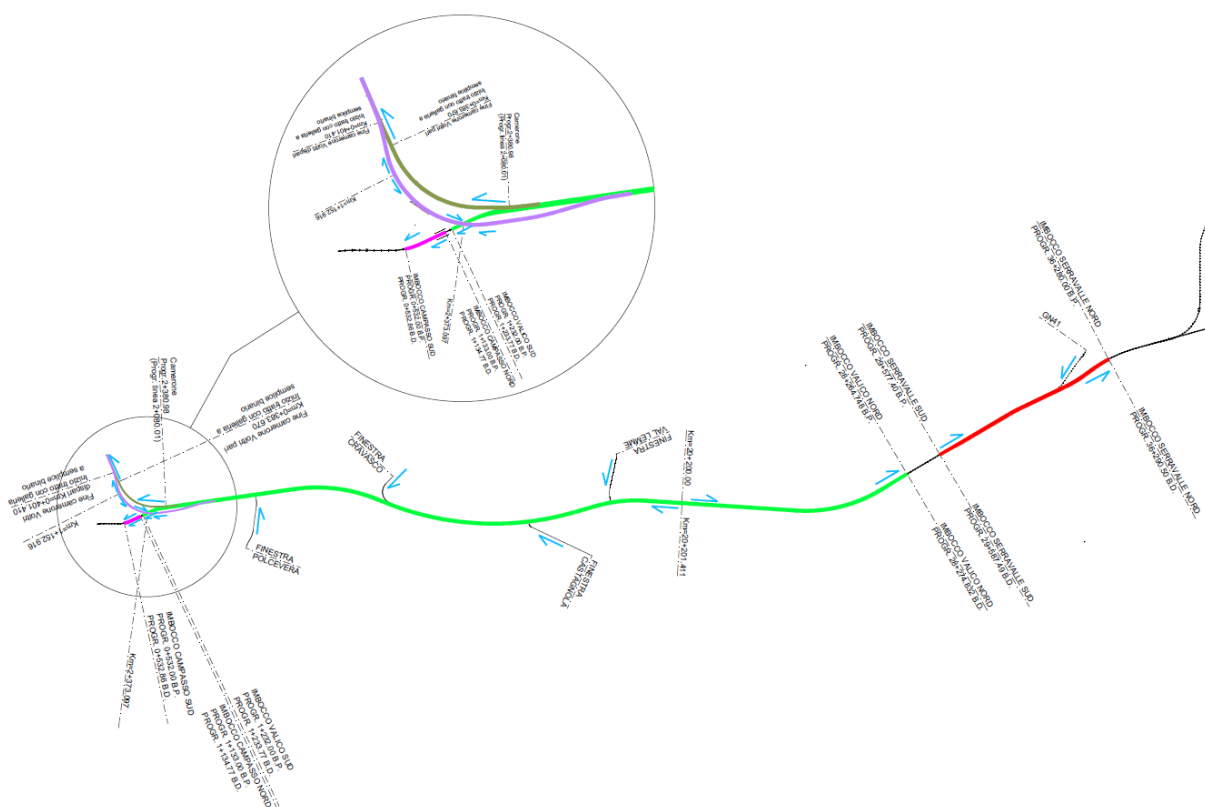


Fig. 1 – Schema generale delle opere previste

La definizione del modello geologico ed idrogeologico si basa su una serie di studi di base, realizzati a partire dal Progetto Preliminare ed affinati in fase di Progettazione Definitiva ed Esecutiva.

Gli studi di base sono consistiti nella realizzazione delle seguenti attività:

- Rilevamento geologico di superficie
- Sondaggi geognostici
- Prove in foro all'interno dei sondaggi geognostici (prove SPT, prove di permeabilità, prove dilatometriche, prove di fratturazione idraulica)

- Prelievo di campioni per la realizzazione di prove geotecniche e geomeccaniche di laboratorio
- Censimento di pozzi e sorgenti presenti in corrispondenza e nell'intorno del tracciato di progetto.

Nel presente contributo vengono descritte le principali problematiche di ordine idrogeologico e le metodologie con le quali sono state affrontate.

2. Tipi di problematiche idrogeologiche riscontrabili lungo il tracciato

Lungo lo sviluppo dell'opera in oggetto si devono distinguere due settori in cui le tipologie di problematiche idrogeologiche differiscono, sia per le caratteristiche dell'opera stessa, sia per i tipi di corpi acquiferi che vengono interessati:

- a. Settore montano-collinare (dal km 0+00 al km 36+500 circa)
- b. Settore di pianura (dal km 36+500 circa al km 54+000)

2.1. Settore montano-collinare

Nel settore montano-collinare l'opera si sviluppa in galleria e interessa principalmente un substrato cristallino che solo localmente presenta delle potenzialità acquifere. Tali potenzialità si manifestano principalmente: i) ove sono presenti zone di faglia, ii) in corrispondenza di rocce carbonatiche che presentano più o meno marcati fenomeni di dissoluzione ad opera delle acque circolanti (carsismo s.l.); iii) in corrispondenza di complessi rocciosi che presentano un reticolo di fratture ad elevata densità e buona interconnessione idraulica anche in assenza di faglie (es. basalti).

In contesti di questo tipo nel substrato sono presenti acquiferi scarsamente capacitivi, in cui i flussi sotterranei si sviluppano su distanze orizzontali limitate, che però possono costituire una risorsa talora importante a livello locale, perché alimentano sorgenti o gruppi di sorgenti.

In questi contesti, in genere, esistono anche sistemi di flusso molto superficiali, che si sviluppano all'interno dei depositi porosi quaternari, che possono essere costituiti dalla coltre detritico-colluviale e dal sottostante livello di substrato detensionato e, quindi, maggiormente permeabile per spessori variabili, da qualche metro fino a una decina di metri. I sistemi di flusso presenti in questi acquiferi possono subire delle interferenze di tipo indiretto, giacché sono in equilibrio idrodinamico con i sistemi di flusso del substrato sottostante, che, a loro volta, possono venire interferiti dal drenaggio causato dalle gallerie. Non necessariamente la perturbazione di questo equilibrio idrodinamico è causa di interferenze rilevanti nei sistemi di flusso più superficiali. Spesso questi ultimi risultano essere molto più permeabili e ricaricati dei sistemi di flusso presenti nel substrato. Pertanto la sottrazione di una quota di acqua verso gli acquiferi del substrato viene agevolmente compensata. La maggior parte delle sorgenti presenti nel settore montano-collinare delle Alpi liguri-piemontesi interessate dall'opera sono da correlarsi con sorgenti legate ad acquiferi superficiali di questo tipo.

Lo schema di Figura 2 illustra in maniera sintetica i tipi di circolazioni che si possono incontrare nel contesto montano-collinare interessato dall'opera in progettazione.

Nell'ambito del contesto montano-collinare gli impatti potenzialmente determinati dal tunnel sono legati al fatto che lungo quasi tutto il suo sviluppo l'opera risulta essere drenante, per l'impossibilità di sostenere le elevate pressioni idrauliche presenti sotto le forti coperture che si incontrano lungo il tracciato.

2.2. Settore di pianura

Il settore di pianura è caratterizzato da acquiferi permeabili per porosità, sviluppati all'interno di estesi corpi sedimentari di origine fluviale. In queste aree l'approvvigionamento di acqua per uso idropotabile e irriguo/industriale avviene esclusivamente mediante emungimento da pozzi. Le interferenze potenziali dell'opera sugli acquiferi sono determinate dalla presenza di gallerie artificiali (Galleria di Pozzolo e interconnessioni Novi Ligure) e, in misura minore, dallo scavo di trincee.

Per la costruzione di queste opere le interferenze si possono verificare in maniera diversa in fase costruttiva e in fase di esercizio. In fase costruttiva la realizzazione degli scavi può implicare il drenaggio delle acque di falda (pozzi o drenaggio spontaneo sul fondo della trincea). In fase di esercizio possono essere presenti fenomeni di sbarramento della falda, con innalzamento dei livelli piezometrici sopra flusso rispetto all'opera e abbassamento nel settore sotto flusso.

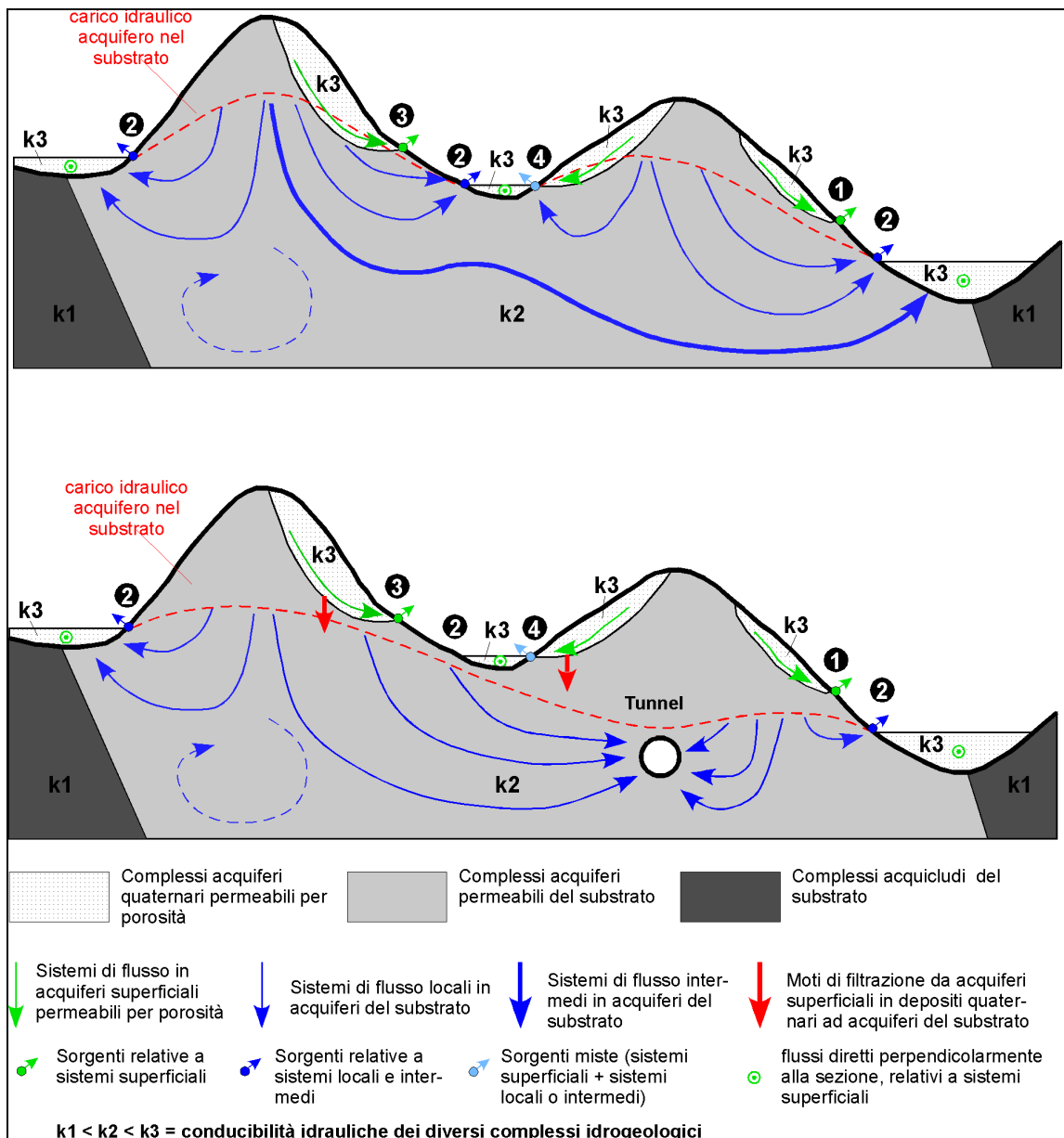


Figura 2 - Schema concettuale dei sistemi di flusso idrogeologici nell'area montano-collinare; i numeri bianchi su sfondo nero costituiscono i diversi tipi di sorgenti; le sorgenti di tipo 1 non vengono in nessun caso interferite dallo scavo delle gallerie; le sorgenti di tipo 2 vengono

sempre interferite seppur in misura variabile; le sorgenti di tipo 3 possono venire interferite ma spesso in misura non sensibile; le sorgenti di tipo 4 vengono interferite parzialmente.

3. Metodi di valutazione delle interferenze idrogeologiche nel settore montano-collinare

Nel settore montano-collinare sono state applicate tre diverse procedure di valutazione della pericolosità di impatto idrogeologico da parte del tunnel:

- ♣ Valutazione mediante metodo parametrico;
- ♣ Valutazione mediante modellizzazione numerica idrogeologica;
- ♣ Valutazione mediante procedura mista numerico-analitica.

3.1. Valutazione mediante metodo parametrico

Il metodo parametrico è stato utilizzato per la valutazione di tutte le sorgenti censite nell'area di studio, poiché esso è di applicazione relativamente rapida. Tra i vari metodi parametrici esistenti in letteratura nel caso del progetto in esame è stato utilizzato il così detto metodo DHI (Drawdon Hazard Index) sviluppato da Dematteis et al. (2001). Esso stima la probabilità di impatto su singole sorgenti utilizzando delle stime di qualità di alcuni parametri significativi in due passaggi.

Dapprima, attraverso una matrice d'interazione globale (Jiao & Hudson, 1995) vengono combinati dei parametri utili per definire il potenziale di drenaggio (PI) del tunnel (assunto come liberamente drenante), che sono: i) la permeabilità dell'acquifero, ii) lo spessore della copertura topografica, iii) l'ampiezza della zona plastica nell'intorno del tunnel, iv) la densità di fratturazione nell'acquifero.

In un secondo passaggio il potenziale di drenaggio del tunnel (PI) viene combinato attraverso una semplice somma pesata, con altri tre parametri significativi che sono: i) la distanza della sorgente dal tunnel, ii) il tipo di sistema di flusso che alimenta la sorgente; iii) la posizione della sorgente rispetto alla topografia, iv) la relazione della sorgente con canali principali di permeabilità quali faglie, canali carsici ecc.

Al termine della valutazione per ogni sorgente si ottiene un indice DHI, variabile da 0 a 1 che ha il seguente significato: $0 < \text{DHI} < 0,1$ pericolosità di impatto trascurabile; $0,1 < \text{DHI} < 0,2$ pericolosità di impatto bassa; $0,2 < \text{DHI} < 0,3$ pericolosità di impatto media; $0,3 < \text{DHI} < 1$ pericolosità di impatto elevata.

Dei 476 punti d'acqua censiti per il settore montano-collinare, 420 presentano una pericolosità d'impatto trascurabile, 43 una pericolosità bassa, 12 una pericolosità media e 1 una pericolosità elevata.

3.2. Valutazione mediante modellizzazione numerica idrogeologica

Alcune zone del settore montano-collinare risultano essere particolarmente sensibili nei confronti delle problematiche di impatto idrogeologico, sia perché in queste zone sono presenti risorse idriche particolarmente importanti per l'approvvigionamento idropotabile, difficilmente compensabili con fonti alternative, sia perché in queste aree sono presenti acquiferi molto permeabili e importanti che presentano delle condizioni di equilibrio idrodinamico anche con corsi d'acqua.

In queste aree si è ritenuto opportuno procedere ad eseguire delle modellizzazioni numeriche di dettaglio volte sia a verificare, per maggior sicurezza, i risultati ottenuti con il metodo parametrico, sia per ottenere delle stime anche sul grado di impatto nei confronti

dell'intero acquifero, oltre che sui singoli punti d'acqua, nonché delle possibili conseguenze nei confronti dei corsi d'acqua che con esso si trovano in equilibrio.

Le aree investigate in dettaglio con modelli numerici sono:

- ♣ Area di Cravasco-Isoverde
- ♣ Area di Borlasca.

Le modellazioni numeriche sono state realizzate utilizzando il software Feflow® (DHI-Wasy), release 6.2. Feflow; un codice ad elementi finiti che permette di gestire simulazioni di flusso idraulico sotterraneo, in condizioni stazionarie o transitorie

Nell'area di Cravasco-Isoverde è prevista la realizzazione di una galleria di accesso discendente il cui scavo interesserà un corpo di calcari dolomitici (Dolomie del Gazzo – dG in Figura 3 e 4) e calcari (Calcari di Gallaneto – cG) bordati da argilloscisti milonitici (f in Figura 3 e 4). Il corpo carbonatico (calcari dolomitici e calcari) costituisce un rilevante acquifero, permeabile sia per fratturazione che per carsismo, che alimenta alcune sorgenti di interesse locale e in cui sono presenti dei sistemi di flusso in equilibrio idrodinamico con alcuni corsi d'acqua minori superficiali. Considerando la rilevanza ambientale della problematica, per verificare i possibili effetti di interferenza tra lo scavo della discenderia e delle gallerie principali e i sistemi di flusso in questione e predisporre le eventuali opportune opere di mitigazione, è stato realizzato un modello idrogeologico numerico tridimensionale. Il dominio modellizzato si estende per circa 4 km². Alcune immagini del modello idrogeologico prodotto sono visibili in Figura 5.

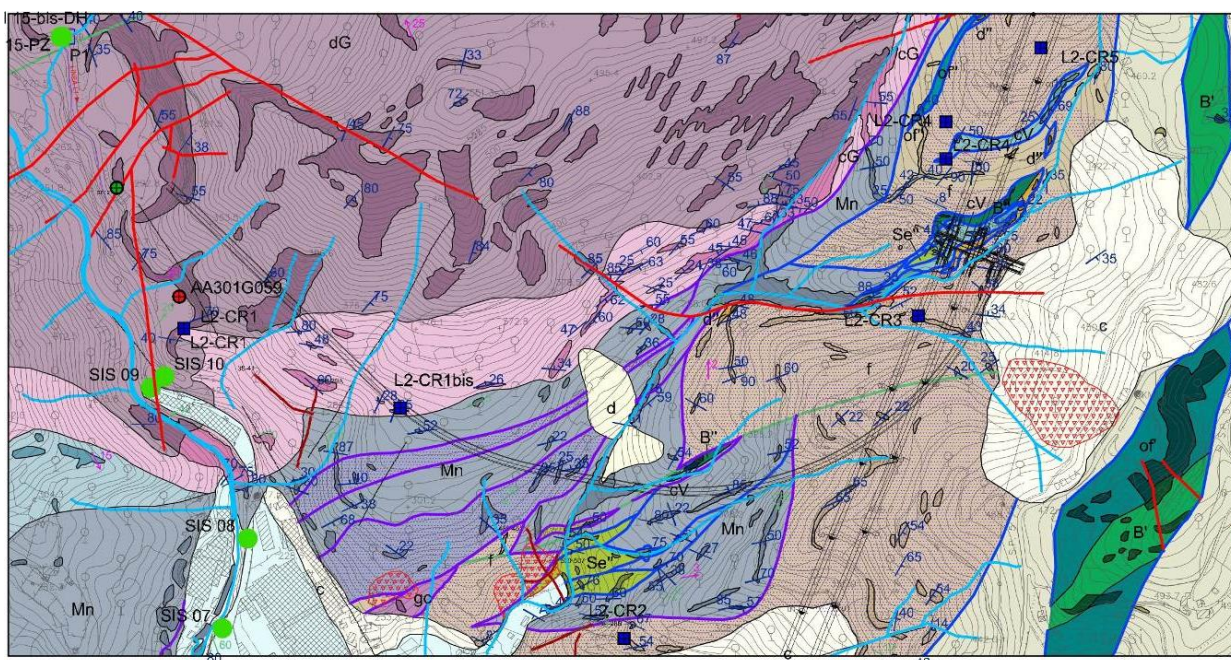


Figura 3 – Carta geologica del settore di Cravasco-Isoverde i quadrati blu indicano l'ubicazione dei sondaggi geognostici realizzati; Successioni metamorfiche - dG: Dolomie del Gazzo, cG: Calcari di Gallaneto, Mn: Argilloscisti neri, B': Metabasalti di Cravasco, of': Metafalciti, f: Argilloscisti filladici; depositi quaternari - c: Coltre detritico-colluviale, d: frana con blocchi.

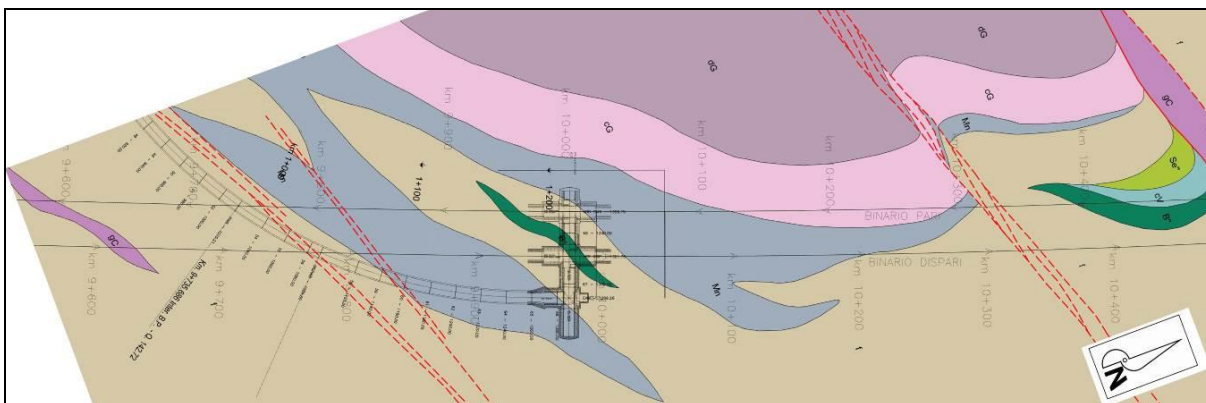


Figura 4 – Pianta geologica a quota galleria del settore di Cravasco-Isoverde; i colori hanno il medesimo significato del settore precedente..

Il modello prodotto ha permesso di fornire una stima delle portate drenate dalla discenderia e dalle gallerie principali sia in regime transitorio (ovvero in corso di scavo) che in regime stabilizzato (ovvero a distanza di uno o più anni dal momento dello scavo).

Le stime ottenute con la modellizzazione sono state successivamente confermate per la Finestra Cravasco, che è attualmente in corso di realizzazione, la quale, come previsto dal modello numerico, ha intercettato delle portate dell'ordine di una decina di litri per secondo in regime stabilizzato.

Per quanto attiene alle possibili interferenze, il modello ha permesso di mettere in luce le zone critiche, che verranno gestite con opportuni provvedimenti compensatori e accorgimenti progettuali in fase costruttiva.

L'area di Borlasca è in realtà un settore distante dal tracciato, ove però sono presenti delle sorgenti che alimentano importanti acquedotti. La necessità di realizzare un modello di dettaglio per questo settore nasce dalla presenza di alcune zone di faglia, che in parte verranno intercettate dalle canne principali della linea. Lateralmente (verso est) queste zone di faglia si spingono fino al settore in cui vengono a giorno i sistemi di flusso che alimentano le sorgenti. In questo caso il substrato pre-aternario in cui si sviluppano le zone di faglia è costituito dalla Formazione di Molare, composta da conglomerati in matrice ghiaioso-sabbioso-limosa cementata. Le faglie che si sviluppano in questi litotipi non risultano particolarmente permeabili, ma possono comunque giocare un ruolo idrogeologico.

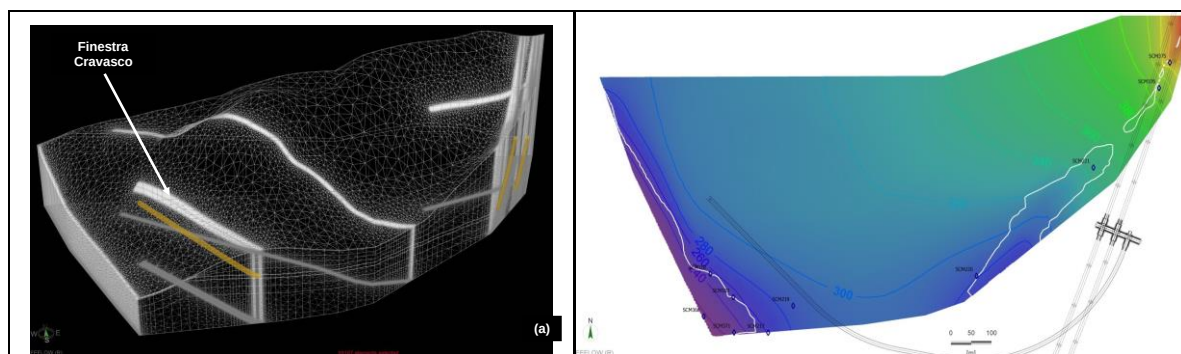


Figura 5 – Reticolo ad elementi finiti utilizzato per la modellizzazione tridimensionale nell'area di Cravasco (immagine a sinistra); risultato della calibrazione dei carichi idraulici: carichi decrescenti dal rosso al viola; la linea bianca illustra le sone di intersezione della superficie di falda con la superficie, ovvero con il Rio Verde (sinistra) e il Rizzolo (destra).

Le sorgenti sono in realtà tutte riconducibili a sistemi di flusso relativamente superficiali che si sviluppano nella coltre detritica di alterazione, ma non si può escludere che ricevano anche un limitato apporto da flussi che avvengono lungo le faglie, per tale motivo è stata

valutata la possibile entità delle interferenze qualora le faglie venissero drenate dalla galleria. L'immagine di Figura 6 rappresenta una vista del reticolo di discretizzazione del modello tridimensionale che è stato realizzato. Esso presenta uno sviluppo di circa 27 km in lunghezza per circa 7 km in larghezza. La zona di emergenza delle sorgenti si trova all'estremità destra del dominio di modellizzazione, a una distanza compresa tra 8 e 15 km dal tracciato.

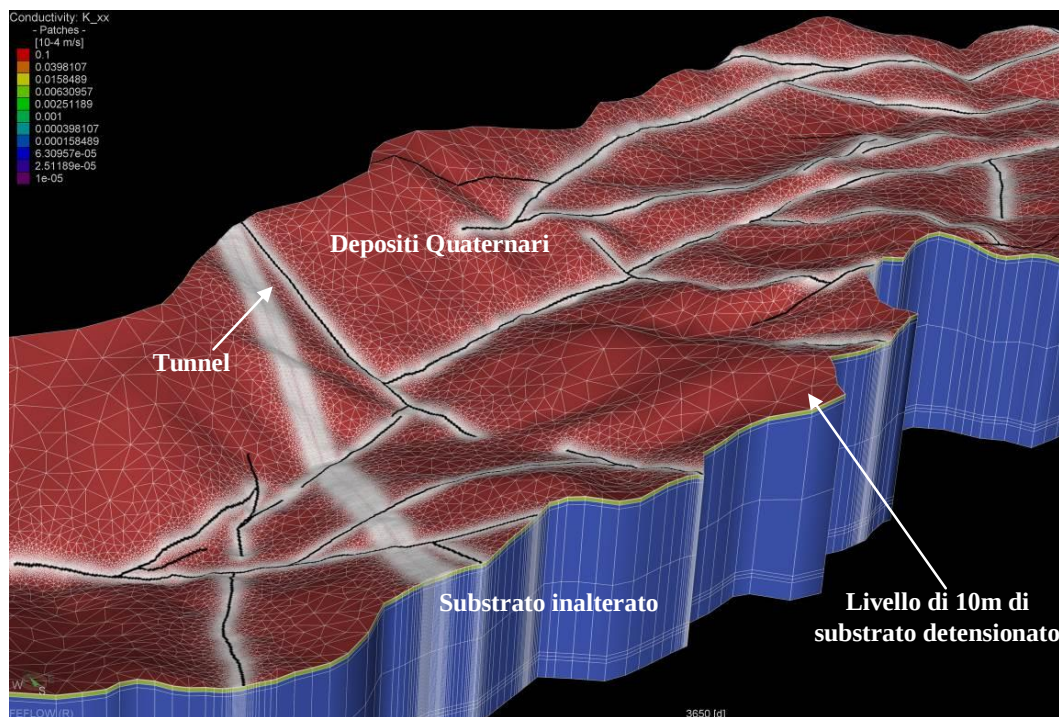


Figura 6 – Reticolo ad elementi finiti utilizzato per la modellizzazione tridimensionale nell'area di Borlasca. I colori blu rappresentano il substrato costituito dalla Formazione di Molare, mentre il colore amaranto rappresenta la coltre di depositi detritici

Le simulazioni eseguite in questo caso hanno permesso di escludere qualsiasi possibilità di interferenza con le sorgenti rilevanti ai fini acquedottistici.

3.3. Valutazione mediante procedura mista numerico-analitica

Al fine di rispondere ad alcune osservazioni degli enti pubblici sorte in sede di esame degli elaborati di progetto definitivo, durante la progettazione esecutiva si è reso necessario mettere a punto un metodo di valutazione che permettesse di verificare l'impatto delle opere sulla risorsa idrica nel suo complesso e non solo gli effetti puntuali sulle sorgenti o su acquiferi locali. Pur non volendo in questa sede entrare nel merito della metodologia predisposta, è sufficiente osservare che la stima dell'impatto areale è stata effettuata raffrontando l'entità delle portate drenate dalla galleria rispetto all'infiltrazione efficace media sui bacini idrogeologici sottesi. Il metodo per tale valutazione si compone di tre parti:

- Quantificazione della ricarica dei corpi acquiferi allo stato naturale mediante metodo di Kennessey (Barazzuoli, 1986).
- quantificazione preliminare dell'estensione della zona di alimentazione della galleria e delle infiltrazioni efficaci attraverso il substrato roccioso basata sui risultati di modelli numerici concettuali;
- utilizzo della quantificazione preliminare della zona di alimentazione e delle infiltrazioni efficaci per la quantificazione delle portate drenate dalla galleria e della

stima definitiva delle zone di alimentazione della galleria. Questa fase è stata gestita applicando ai risultati numerici di fattori correttivi empirici che consentono di differenziare tra diverse condizioni geologico-geomorfologiche dei diversi tratti di tracciato della galleria.

La Figura 7 mostra uno stralcio della carta di valutazione dei possibili impatti areali sulla risorsa idrica.

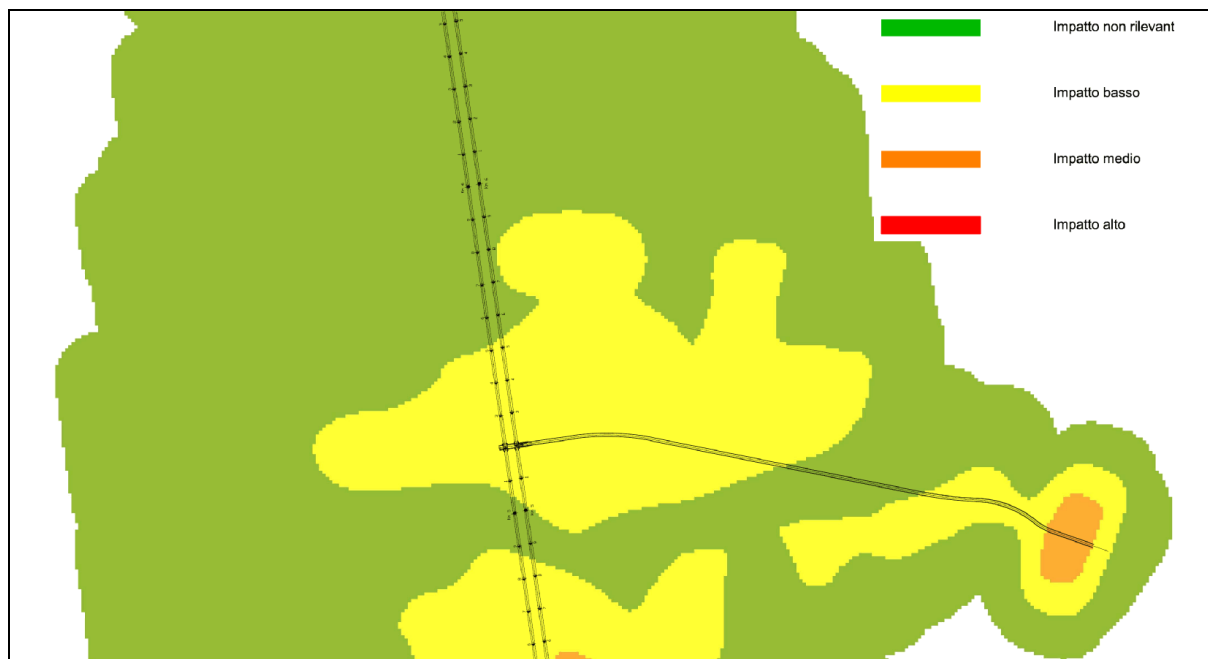


Figura 7 – Esempio di valutazione di impatto areale in corrispondenza dell'intersezione tra il tracciato e la Finestra Castagnola; verde=impatto non rilevante; giallo=impatto basso; arancione=impatto medio; rosso=impatto elevato.

4. Metodi di valutazione delle interferenze idrogeologiche nel settore di pianura

Anche nel settore di pianura le procedure di valutazione della pericolosità idrogeologica si sono articolate in funzione della risorsa da valutare e della sua rilevanza. In particolare le valutazioni eseguite si possono distinguere in due tipologie:

- ♣ Valutazione mediante metodo parametrico;
- ♣ Valutazione mediante modellizzazione numerica idrogeologica;

4.1 Valutazione mediante metodo parametrico

Il metodo parametrico è stato utilizzato per la valutazione della pericolosità di impatto nei confronti di singoli pozzi. In questo caso si tratta infatti essenzialmente di una valutazione di impatto puntuale.

La valutazione degli impatti sui pozzi è comunque strettamente legata ad una stima degli impatti areali indotti da trincee o gallerie. Questi impatti areali sono stati desunti sia da estrapolazioni dei modelli numerici eseguiti (si veda paragrafo successivo), sia attraverso l'applicazione di formulazioni analitiche. In altre parole, nota l'entità degli abbassamenti della falda è possibile stabilire degli impatti per i pozzi in funzione dell'ubicazione dei pozzi stessi rispetto alle fasce di abbassamento.

Gli impatti sono stati distinti tra, impatti in fase di realizzazione e impatti in fase di esercizio. In fase di realizzazione si verificano i maggiori abbassamenti, poiché la costruzione di trincee

e gallerie artificiali prevede il pompaggio e aggottamento delle acque per abbattere il livello di falda al di sotto del piano di costruzione. Va però notato che gli effetti di interferenza in fase di costruzione hanno valenza transitoria, poiché una volta terminata la costruzione il pompaggio cessa. Potranno invece sussistere effetti di sbarramento del flusso di falda legato all'inserimento delle nuove opere nell'acquifero.

Un altro principio preso in considerazione per questa analisi di impatto sui pozzi consiste nell'ipotizzare che l'impatto dei pozzi aumenta in maniera inversamente proporzionale alla profondità dei pozzi. Si considera che a parità di abbassamento indotto dall'aggottamento della falda, un pozzo più profondo, risenta in maniera proporzionalmente minore di quanto risentirebbe un pozzo relativamente meno profondo.

Sulla base di questo approccio, che combina l'entità degli abbassamenti piezometrici con la profondità dei pozzi è stata elaborata la matrice di pericolosità di isterilimento dei pozzi mostrata in Tabella 1. Tale matrice attribuisce ai vari pozzi una codifica relativamente a quelli potenzialmente più impattabili (4) a quelli di cui si ipotizza un impatto ininfluenza (1).

Abbassamento falda (m)	Profondità pozzo (m)				
		<10	10-30	30-50	>50
	<1	1	1	1	1
	1-3	2	1	1	1
	3-5	3	2	1	1
	>5	4	3	2	1

Tabella 1 – Schema concettuale della matrice di valutazione di pericolosità di impatto sui pozzi in fase costruttiva.

4.2 Valutazione mediante modellizzazione numerica idrogeologica

Come per il caso del settore montano-collinare, anche nel settore di pianura esistono zone in cui la problematica idrogeologica è stata approfondita in maggior dettaglio attraverso modellizzazioni numeriche. In questo caso gli approfondimenti si sono concentrati nelle aree in cui sono previste le opere in sotterraneo di maggior rilevanza, ovvero il settore di Pozzolo Formigaro, ove è prevista una galleria artificiale, il settore di Novi Ligure, ove sono previste le interconnessioni alla linea storica. A titolo di esempio viene qui brevemente illustrato il caso della galleria artificiale di Pozzolo-Formigaro.

Dal punto di vista idrogeologico, il settore in cui ricade la galleria artificiale di Pozzolo-Formigaro è caratterizzato dalla presenza di un acquifero superficiale a falda libera costituito da depositi alluvionali di pianura. Il substrato impermeabile o molto poco permeabile è invece costituito dalle Argille di Lugagnano. I depositi sono di tipo fluviale recente (fl3) e sono costituiti da ghiaie sabbioso-limose con percentuali variabili di matrice fine. All'interno di questi depositi è possibile distinguere tra un orizzonte superiore, maggiormente alterato e poco addensato (fl3b), e uno inferiore maggiormente addensato e caratterizzato da un maggior contenuto limoso (fl3a).

Un aspetto di rilievo che caratterizza il settore di realizzazione della Galleria di Pozzolo è che la permeabilità dei terreni è sensibilmente variabile sia in senso orizzontale che in senso verticale. In particolare, i terreni ubicati nell'orizzonte superiore fl3b e inferiore fl3a dei depositi alluvionali hanno permeabilità differenti, con il primo orizzonte che presenta valori generalmente superiori al secondo. L'orizzonte superiore fl3b ha una permeabilità media di $2.5E\ 04\ m/s$, mentre quello inferiore presenta permeabilità medie dell'ordine di $1.0E\ 05\ m/s$.

Durante le fasi realizzative dell'opera si procederà ad un abbattimento della falda in corrispondenza degli scavi che sarà all'origine di temporanei abbassamenti anche nell'intorno.

Le immagini di Figura 8 mostrano rispettivamente il reticolo ad elementi finiti che è stato utilizzato per la modellazione e una simulazione dell'effetto di drenaggio indotto dall'opera in corrispondenza di uno degli stadi di avanzamento degli scavi.

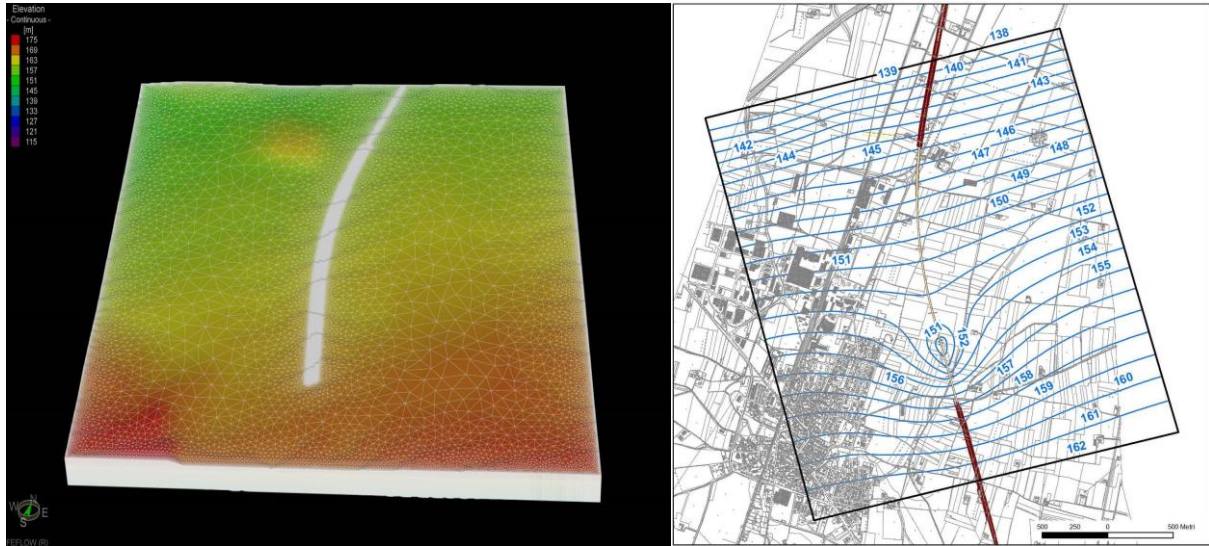


Figura 8 – Prospettiva 3D del modello numerico eseguito per la Galleria artificiale di Pozzolo Formigaro, con esagerazione verticale 5:1 (Figura a sinistra); Distribuzione piezometrica in presenza di batteria di pozzi lungo il secondo campo di avanzamento dello scavo in Cut & Cover; scenario di abbassamento dal livello minimo dopo 20 giorni dall'inizio del pompaggio (Figura a destra).

5. Bibliografia

- Barazzuoli, P., Micheluccini, M., Salleolini, M., Salvadori, L. (1986) - Valutazione delle risorse idriche nella Toscana meridionale: applicazione del metodo di Kennessey al bacino del torrente Farma e sua verifica con i calcoli di bilancio, Boll. Soc. Geol. It., n.105.
- Dematteis A., Kalamaras G. & Eusebio A. (1999) - A systems approach for evaluating springs drawdown due to tunneling. Atti del convegno AITES ITA, 69 Hudson, 1992.
- Jiao Y. & Hudson, J.A. (1995) - The Fully-Coupled Model for Rock Engineering Systems. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 32, 5, 491-512.