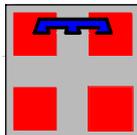




Autostrada Asti-Cuneo



PROVINCIA DI ASTI



REGIONE PIEMONTE



PROVINCIA DI CUNEO

COLLEGAMENTO AUTOSTRADALE ASTI - CUNEO

TRONCO II A21 (ASTI EST) - A6 (MARENE)
LOTTO 6 RODDI - DIGA ENEL

PROGETTO ESECUTIVO
OPERE D'ARTE IN SEDE

GALLERIA DI VERDUNO
PARTE GENERALE
RELAZIONE IDROGEOLOGICA

Aggiornato: 00	Data : Apr. 2013	Descrizione: EMISSIONE	Redatto: Dott. Pennino	Controllato: Ing. Ossezia	Approvato: Ing. Ghislandi	Codifica: 2.6 E - r D.2.1.04
Aggiornato: 01	Data : Marzo 2015	Descrizione: Rev. a seguito richieste MIT-SVCA	Redatto: Dott. Pennino	Controllato: Ing. Saurio	Approvato: Ing. Ghislandi	Data: Marzo 2015
Aggiornato:	Data :	Descrizione:	Redatto:	Controllato:	Approvato:	Scala: -



PROGETTISTA E RESP. INTEGRAZIONE
PRESTAZIONI SPECIALISTICHE:
Dott. Ing. Enrico Ghislandi
Albo di Milano
N° A 16993

GEOLOGO :
Dott. Geol. Maurizio Conte
Albo dei Geologi delle Marche
N° 409

CONCESSIONARIA:





INDICE

1. PREMESSA.....	4
2. QUADRO RIEPILOGATIVO DELLE OPERE PREVISTE IN SOTTERRANEO NELL'ACQUIFERO DEI GESSI	6
3. SINTESI DEI DATI IDROGEOLOGICI DISPONIBILI.....	10
3.1. CENSIMENTO DEI PUNTI D'ACQUA.....	10
3.1.1. <i>Sorgenti.....</i>	<i>10</i>
3.1.2. <i>Opere di captazione delle acque sotterranee</i>	<i>12</i>
3.2. CAMPAGNE GEOGNOSTICHE FINALIZZATE ALLA RICOSTRUZIONE DELLE CARATTERISTICHE IDROGEOLOGICHE DEL SETTORE DI PROGETTO.....	13
3.2.1. <i>Campagne di indagini del Progetto Preliminare della variante della S. S. n. 231 Alba-Bra (1991-1996).....</i>	<i>13</i>
3.2.2. <i>Campagne di indagini del Progetto Definitivo (1998).....</i>	<i>15</i>
3.2.3. <i>Campagne di indagini del Progetto Esecutivo (2001)</i>	<i>16</i>
3.2.4. <i>Campagna di indagini integrative 2006.....</i>	<i>17</i>
3.2.5. <i>Campagna di indagini integrative 2011-2012.....</i>	<i>18</i>
3.3. CAMPAGNA GEOFISICA.....	20
3.4. ULTERIORI STUDI REALIZZATI NELL'AREA DI PROGETTO	21
3.4.1. <i>Studio doline eseguito dal Comune di Verduno</i>	<i>22</i>
3.4.2. <i>Studio strada di accesso al nuovo ospedale Alba-Bra (lato Alba) eseguito dalla Provincia di Cuneo</i>	<i>23</i>
3.4.3. <i>Studi per il progetto di realizzazione del Nuovo Ospedale Alba-Bra e di consolidamento del versante collinare.....</i>	<i>24</i>
3.5. CAMPAGNE DI MONITORAGGIO PIEZOMETRICO.....	25
3.5.1. <i>Campagna 2001-2002.....</i>	<i>25</i>
3.5.2. <i>Campagna 2009.....</i>	<i>28</i>
3.5.3. <i>Campagna 2011-2013 (Monitoraggio Ambientale)</i>	<i>28</i>
4. DESCRIZIONE DEI COMPLESSI IDROGEOLOGICI E DEGLI ACQUIFERI34	
4.1. QUADRO GEOLOGICO DI RIFERIMENTO	34
4.2. COMPLESSI IDROGEOLOGICI E PERMEABILITÀ	36
4.2.1. <i>Complesso 1 – Complesso a medio-bassa permeabilità</i>	<i>37</i>
4.2.2. <i>Complesso 2 – Complesso a permeabilità da medio-elevata ad elevata 40</i>	
4.2.3. <i>Complesso 3 – Complesso a permeabilità variabile da bassa a medio- elevata 44</i>	
4.2.4. <i>Complesso 4 – Complesso a permeabilità medio-elevata</i>	<i>45</i>



5. CARATTERIZZAZIONE IDROGEOLOGICA GENERALE DELL'AREA DI PROGETTO	47
5.1. ASSETTO GENERALE	47
5.1.1. <i>Reticolo idrico superficiale</i>	49
5.2. CIRCOLAZIONE NELL'ACQUIFERO DEI GESSI	50
5.2.1. <i>Assetto idrogeologico</i>	50
5.2.2. <i>Assunzioni alla base della ricostruzione della superficie piezometrica</i> 55	
5.2.3. <i>Piezometria nel settore dei gessi ricostruita utilizzando i soli dati dei piezometri utilizzati monitoraggio ambientale (2011-2013)</i>	57
5.2.4. <i>Piezometria nel settore dei gessi ricostruita utilizzando l'insieme dei dati piezometrici riferiti alle campagne dal 2001 al 2013</i>	58
5.2.5. <i>Ricostruzione piezometrica di grande scala</i>	59
5.2.6. <i>Variazioni del livello piezometrico</i>	61
5.3. CIRCOLAZIONE NELL'ACQUIFERO DELLE INTERCALAZIONI DETRITICHE	63
5.4. CIRCOLAZIONE NELL'ACQUIFERO DEI DEPOSITI DI FRANA E COLLUVIALI	64
5.5. CIRCOLAZIONE NELL'ACQUIFERO ALLUVIONALE DEL F. TANARO	66
5.6. CARATTERISTICHE FISICO-CHIMICHE DELLE ACQUE SOTTERRANEE	67
6. CARATTERIZZAZIONE IDROGEOLOGICA DI DETTAGLIO DELLE TRATTE DELLA GALLERIA	71
6.1. SETTORE 1 – IMBOCCO LATO CUNEO	72
6.2. SETTORE 2 – FORMAZIONE GESSI	76
6.3. SETTORE 3 – FORMAZIONE MARNE	87
6.4. SETTORE 4 – INTERCALAZIONI DI CORPI DETRITICI	88
6.5. SETTORE 5 – IMBOCCO LATO ALBA	92
7. PROVA DI TRACCIAMENTO	95
7.1. SCOPO DELLA PROVA	95
7.2. PIANIFICAZIONE E PREPARAZIONE DELLA PROVA	95
7.3. SCELTA DEI PUNTI DI IMMISSIONE E DI CAMPIONAMENTO	96
7.4. RISULTATI	98
8. MODELLO NUMERICO 3D	102
8.1. OBIETTIVI DELLA MODELLIZZAZIONE	102
8.2. MODELLO GEOMETRICO	104
8.2.1. <i>Settore di modellizzazione</i>	104
8.2.2. <i>Costruzione del modello 3D</i>	104
8.3. MODELLO DI FLUSSO	108
8.3.1. <i>Codice numerico (FeFlow 6.0)</i>	108
8.3.2. <i>Struttura del modello numerico</i>	109



8.3.3.	<i>Simulazione del flusso in condizioni naturali (ante-operam)</i>	114
8.3.4.	<i>Simulazione del flusso in fase di scavo del cunicolo centrale rispetto all'asse delle due canne</i>	118
8.3.5.	<i>Simulazione della fase di scavo delle due canne della galleria di Verduno</i>	122
8.3.6.	<i>Simulazione con realizzazione di un by-pass drenante.....</i>	128
9.	DESCRIZIONE DEGLI SCENARI DI IMPATTO E DI RISCHIO DERIVANTI DALLO SCAVO DELLA GALLERIA DI VERDUNO.....	132
9.1.	IMPATTO SUGLI ACQUIFERI	132
9.1.1.	<i>Acquifero dei gessi (complesso 2a).....</i>	133
9.1.2.	<i>Acquifero delle intercalazioni detritiche sabbiose (complesso 2b)</i>	138
9.2.	LE DUE CANNE NON DRENANTI POTRANNO PERÒ AGIRE DA OSTACOLO AL DEFLUSSO, COME SI DIRÀ AL PARAGRAFO SUCCESSIVO. RISCHI IDROGEOLOGICI.	138
9.2.1.	<i>Rischi in galleria</i>	139
9.2.2.	<i>Rischi in superficie</i>	140
10.	PREVISIONE DELLE PORTATE IN GALLERIA	144
10.1.	VALUTAZIONE DELLE PORTATE NEL CUNICOLO CENTRALE ALLE DUE CANNE (ACQUIFERO DEI GESSI).....	146
10.1.1.	<i>Calcolo delle portate massime transitorie</i>	146
10.1.2.	<i>Calcolo delle portate stabilizzate</i>	147
10.2.	VALUTAZIONE DELLE PORTATE TRANSITORIE NEL CORSO DELLO SCAVO DELLA GALLERIA DI VERDUNO CON TBM-EPB	147
10.2.1.	<i>Metodologia del calcolo analitico delle portate transitorie</i>	147
10.2.2.	<i>Risultati</i>	149
10.3.	VALUTAZIONE DELLE PORTATE STABILIZZATE ATTRAVERSO IL SISTEMA DRENANTE COSTITUITO DA BY-PASS E FASCI DI DRENI	152
10.4.	STIMA DELLE VENUTE ECCEZIONALI NEL CUNICOLO CENTRALE	152
11.	MONITORAGGIO IDROGEOLOGICO.....	155
ALLEGATI.....		156
ALLEGATO 1		156
ALLEGATO 2		158
ALLEGATO 3		162
ALLEGATO 4		163
ALLEGATO 5		165
ALLEGATO 6		167
ALLEGATO 7		168
ALLEGATO 8		169

1. PREMESSA

Oggetto della presente relazione è la caratterizzazione dell'assetto idrogeologico dell'area interessata dalla futura realizzazione della galleria naturale "Verduno", facente parte del Lotto 6, Tronco 2 del collegamento autostradale A6-A21 (Asti-Cuneo).

Questa relazione si inquadra nel contesto degli studi finalizzati alla progettazione esecutiva. Gli studi e gli approfondimenti realizzati in quest'ambito consentono di ricostruire un modello concettuale di dettaglio dei settori di attraversamento della galleria. Tale modello costituisce un elemento fondamentale per una stima affidabile dei possibili impatti sulle falde acquifere, per l'identificazione degli effetti di superficie (es. innesco frane, sprofondamenti) connessi a variazioni dell'assetto idraulico dell'acquifero, per la progettazione delle opere in galleria e per la predisposizione delle misure necessarie ai fini della riduzione dei rischi in fase di scavo e degli impatti sul lungo periodo.

Il modello concettuale ricostruito in questo ambito ha rappresentato anche la base per l'implementazione di un modello numerico tridimensionale di flusso. Tale modello costituisce uno strumento indispensabile per la quantificazione degli effetti connessi al drenaggio della galleria, specialmente in un contesto geologicamente complesso come quello che caratterizza il versante collinare di Verduno. Il modello numerico è stato utilizzato allo scopo di validare alcune ipotesi del modello concettuale (es. presenza di cavità carsiche nell'acquifero dei gessi), di stimare gli abbassamenti della falda dovuti al drenaggio della galleria, di calcolare le venute d'acqua in galleria sul breve e lungo periodo.

Si specifica che Il presente documento recepisce in pieno le osservazioni e le prescrizioni riportate nel DEC VIA 576/2011, provvedendo a fornire gli approfondimenti richiesti e definendo un quadro conoscitivo di maggior dettaglio rispetto a quello definito in precedenza. L'approfondimento è stato possibile a seguito dell'analisi delle risultanze della campagna di indagini geognostiche e della campagna di monitoraggio piezometrica svolte nel 2011/2012, che hanno permesso di aggiungere maggiori informazioni rispetto a quanto



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno - Relazione idrogeologica

precedentemente disponibile. Per rendere evidenti le risposte fornite alle osservazioni e prescrizioni di carattere idrogeologico riportate nel DEC VIA 576/2011 si provvede a fornire il seguente quadro sinottico:

Componente DEC VIA	Descrizione	Riferimento agli approfondimenti effettuati in questo studio
Componente suolo e sottosuolo	2.43 - [...] il proponente dovrà produrre uno specifico studio modellistico ad elementi finiti di valutazione delle entità degli effetti di dissesto potenziali indotti [...].	Modello geometrico 3D e numerico di flusso: Capitolo 8, pag. 102
Componente suolo e sottosuolo	2.44 - [...] dovrà essere selezionata attraverso una selezione documentata la migliore tecnologia costruttiva per lo scavo delle gallerie, con particolare riferimento al settore con litologie della Formazione Gessoso-Solfifera e alle zone di contatto con la Formazione delle Marne di S. Agata Fossili dovrà ridurre al minimo il rischio di interferenze con l'acquifero carsico contenuto nei gessi [...].	In questa relazione vengono descritte, attraverso il confronto di diverse metodologie costruttive, le previsioni delle risposte idrauliche dell'acquifero: Paragrafi 8.3.4 e Errore. L'origine riferimento non è stata trovata. , pag. 118 e Errore. Il segnalibro non è definito.
Prescrizioni della Regione Piemonte	6 - [...] Dovrà essere definito un quadro più completo sulla circolazione idrica nella zona tra i sondaggi SFG23 e SFG11 ... per verificare il salto di carico idraulico evidenziato dai profili e di conseguenza prevedere conseguenti venute d'acqua durante lo scavo.	Descrizione del modello idrogeologico concettuale e sua verifica attraverso la modellizzazione numerica: Paragrafi 6.2e 8.3.3, pag. 76 e 114.
Prescrizioni della Regione Piemonte	[...] Il rilievo in superficie di depressioni, inghiottitoi e forme tipiche collegate alla presenza di condotti carsici nel sottosuolo evidenzia il rischio che un abbassamento, anche temporaneo, della falda (e quindi una riduzione dei carichi idraulici) possa indurre una ripresa dei fenomeni di subsidenza. [...]	Verifica degli abbassamenti del livello di falda: Paragrafo 9.2, pag. 132

2. QUADRO RIEPILOGATIVO DELLE OPERE PREVISTE IN SOTTERRANEO NELL'ACQUIFERO DEI GESSI

Poiché l'obiettivo della seguente relazione è anche quello di fornire un approfondimento relativamente ai possibili impatti che si possono verificare a livello dell'acquifero nel corso delle diverse fasi costruttive della Galleria di Verduno, è necessario che il lettore possa seguire la descrizione dei risultati conseguiti attraverso gli studi e le modellizzazioni idrogeologiche in relazione allo schema dei lavori previsti in sotterraneo. In particolare, l'acquifero dei gessi sarà quello maggiormente interessato da una sequenza piuttosto articolata di lavori che implicheranno la realizzazione, in diverse fasi temporali, di opere che potranno interferire in maniera sostanzialmente differente con il naturale deflusso di falda. Pertanto, allo scopo di facilitare al lettore una comprensione del significato degli studi idrogeologici svolti per il Progetto Esecutivo e descritti nella presente relazione, si fornisce di seguito un breve richiamo su quello che sarà lo schema di realizzazione dei lavori che coinvolgeranno l'acquifero dei gessi, rimandando alla Relazione Generale ed alle relazioni specialistiche ogni approfondimento specifico inerente a tali opere:

- Fase I: sarà realizzato un cunicolo centrale all'asse delle due canne principali (diametro di ca. 6 m), scavato con metodologia tradizionale e per una lunghezza di 400 m, corrispondente alla lunghezza necessaria all'intero attraversamento dell'acquifero dei gessi fino al raggiungimento delle Marne di Sant'Agata Fossili (cfr. 4.1). Tale cunicolo costituisce un'opera attraverso la quale sarà possibile eseguire dei sondaggi inclinati necessari all'approfondimento delle condizioni locali di attraversamento delle due future canne e al riconoscimento di eventuali situazioni di criticità (es. esistenza di cavità carsiche); nel caso avvenga il riconoscimento di tali situazioni i sondaggi saranno utilizzati per l'esecuzione di specifici trattamenti (es. riempimenti), finalizzati al garantire che la TBM non sia soggetta a improvvisi cedimenti del fronte

di scavo o di porzioni sottostanti l'arco rovescio, che impedirebbero il regolare avanzamento dello scavo o, peggio ancora, potrebbero rappresentare un rischio per un parziale affossamento della fresa. Inoltre, il cunicolo centrale costituisce un'opera attraverso la quale, nel caso in cui si verificano serie problematiche di avanzamento della TBM sulla canna di monte o di valle, sarebbe possibile effettuare l'apertura di un by-pass verso il fronte di scavo della macchina permettendo di agire con interventi mirati e consentendo la ripresa dello scavo in tempi relativamente brevi. Procedendo dal lato Cherasco, tale cunicolo avrà un primo tratto discendente per poi assumere un'inclinazione uguale a quella delle canne principali, attestandosi ad una quota di progetto che si manterrà indicativamente a ca. 5 m al di sopra della quota di progetto della canna di monte. Quest'opera sarà attrezzata con sistemi di drenaggio che consentiranno l'abbattimento delle pressioni attorno al cavo, riducendole ad un minimo corrispondente alla quota dell'arco rovescio del cunicolo stesso. Secondo lo schema idrogeologico che verrà approfondito nel corso dei successivi capitoli, il cunicolo in questione intercetterà e quindi drencherà la falda limitatamente alla porzione finale di attraversamento dell'acquifero dei gessi. Questo significa che nelle porzioni rimanenti di cunicolo il drenaggio avverrà solo qualora si registreranno degli innalzamenti della superficie piezometrica al di sopra di un livello medio annuale;

- Fase II: al termine della realizzazione del cunicolo (dopo ca. 14 mesi) verrà eseguito lo scavo meccanizzato delle due canne principali della Galleria di Verduno (diametro di ca. 15 m), con tecnica TBM-EPB (*Earth Pressure Balance*). Questa tecnica permette di scavare in materiali incoerenti effettuando un confinamento e sostegno del fronte attraverso la pressurizzazione del materiale di scavo, anche attraverso l'uso di additivi specifici. Questo metodo di scavo consente un avanzamento in terreni saturi senza che venga provocata una depressurizzazione dell'acquifero. L'impermeabilizzazione della galleria sarà garantita dalla

messa in opera di conci prefabbricati di calcestruzzo giuntati attraverso guarnizioni a tenuta idraulica. Lo scavo procederà utilizzando la stessa macchina fresatrice prima per la messa in opera della canna di monte e, successivamente all'estrazione ed al riposizionamento della macchina stessa, per l'esecuzione della canna di valle. In queste fasi il cunicolo di servizio realizzato centralmente all'asse delle due canne sarà ancora funzionante e, oltre alle funzioni specifiche a cui esso è preposto (realizzazione di indagini e trattamenti verso le due canne), esso costituirà anche un elemento drenante nei confronti dell'acquifero dei gessi, finché non saranno realizzati gli interventi di controllo della piezometrica in fase III;

- **Fase III:** al termine dello scavo delle due canne sarà realizzato un sistema di fasci di drenaggi lanciati da due cavi, denominati by-pass drenanti. Tale dispositivo drenante ha la funzione di costituire un sistema di controllo degli innalzamenti piezometrici. I due cavi avranno una sezione corrispondente a quella di una galleria di servizio carrabile. Il primo sarà innestato con direzione circa ortogonale sul paramento di monte della canna di monte (approssimativamente alla pk 1+000) e si svilupperà verso Sud per circa 40 m. Il secondo conetterà le due canne attraversando il cunicolo centrale (approssimativamente alla pk 1+100 della canna di monte) ed avrà una lunghezza complessiva di ca. 65 m. Dai due by-pass saranno lanciati fasci di tubi microfessurati in PVC, lievemente inclinati per facilitare il deflusso delle acque per gravità verso i by-pass stessi, da cui le acque saranno collettate ed allontanate all'esterno tramite le canalette di scarico dei tunnel. La disposizione delle estremità dei dreni è stata configurata in modo da massimizzare l'effetto di drenaggio: essi verranno collocati in corrispondenza della superficie di interfaccia tra gessi e marne sottostanti, cercando di conferire all'involuppo del fondo dei dreni una direzione quanto più possibile ortogonale alla direzione del deflusso della falda per il settore considerato, consentendo la massimizzazione dell'effetto drenante.



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno - Relazione idrogeologica

Un'importante specificazione riguarda il fatto che, per caratteristiche geologiche intrinseche dell'acquifero dei gessi, che è composto da complesse alternanze di interstrati gessosi e marnosi, l'individuazione dell'effettiva interfaccia tra acquifero e substrato sottostante e quindi il dimensionamento definitivo della lunghezza dei dreni sarà effettuato sulla base delle effettive caratteristiche geologiche riscontrate in loco. Analogamente il progetto prevede, nelle tratte interessate dall'acquifero dei gessi (imbocco lato Cherasco) e dei corpi detritici (zone imbocco Alba), la posa in opera di drenaggi laterali, diametro 100 mm, al fine di evitare fenomeni di innalzamento della falda. L'intensità dell'intervento potrà essere regolata in corso d'opera in funzione dei dati raccolti dal sistema di monitoraggio topografico.

3. SINTESI DEI DATI IDROGEOLOGICI DISPONIBILI

I dati idrogeologici che contribuiscono alla definizione del modello concettuale dell'area del tracciato derivano dall'analisi dei punti d'acqua (sorgenti, pozzi) censiti nei comuni di Cherasco, Verduno e La Morra, dei sondaggi realizzati attraverso le diverse campagne di indagine geognostiche e dalle indagini geofisiche che sono state eseguite nell'ambito del progetto della Galleria di Verduno.

3.1. CENSIMENTO DEI PUNTI D'ACQUA

Il censimento dei punti d'acqua (sorgenti e pozzi d'acqua) è stato effettuato nel corso delle diverse fasi di studio precedenti a quella in corso.

3.1.1. Sorgenti

Nel 2009 sono stati condotti rilievi sul terreno che hanno consentito di individuare emergenze idriche relative a sorgenti perenni poste al piede del versante collinare lungo la strada di servizio del canale ENEL di Verduno (tra l'opera di presa e il Mulino di Verduno) e sorgenti diffuse e venute in alveo lungo il tratto inferiore delle incisioni dei Rii Deglia e San Michele. I punti censiti sono stati riportati nelle Schede Sorgenti del Progetto Definitivo (Collegamento Autostradale Asti - Cuneo, rif. 2.6 D – r B.1.7.7, dicembre 2011). Altre sorgenti erano state precedentemente riconosciute nel corso dell'indagine di terreno svolta nel Settembre 2001-Gennaio 2002 (cfr. Documenti di Progetto/Expertise "Relazione geologica e idrogeologica" Rev. 1 del 08/04/03, codice elaborato B.1.1.1). Le caratteristiche di tali sorgenti sono riportate nell'Allegato 1. L'ubicazione delle sorgenti censite nel Marzo 2009 e nel 2001-2002 è riportata in Figura 1 (quelle del 2009 sono indicate con il codice; le sorgenti 2001-2002 sono prive di codice). Alcune delle sorgenti individuate hanno carattere permanente o semi-permanente, mentre altre hanno carattere periodico associato al regime di piovosità.

Sorgente	Quota (m s.l.m.)	Tipo emergenza
SRG1	217	DF
SRG2	222	DF
SRG3	270	LC
SRG4	255	LC
SRG5	255	LC
SRG6	215	LC
SRG7	203	LC
SRG8	210	LC
SRG9	212	LC

Tabella 1. Sorgenti censite nel Marzo 2009; DF: sorgente diffusa, LC: sorgente localizzata. Le sorgenti senza codifica sono quelle riconosciute nel corso del rilevamento effettuato nel 2001-2002.

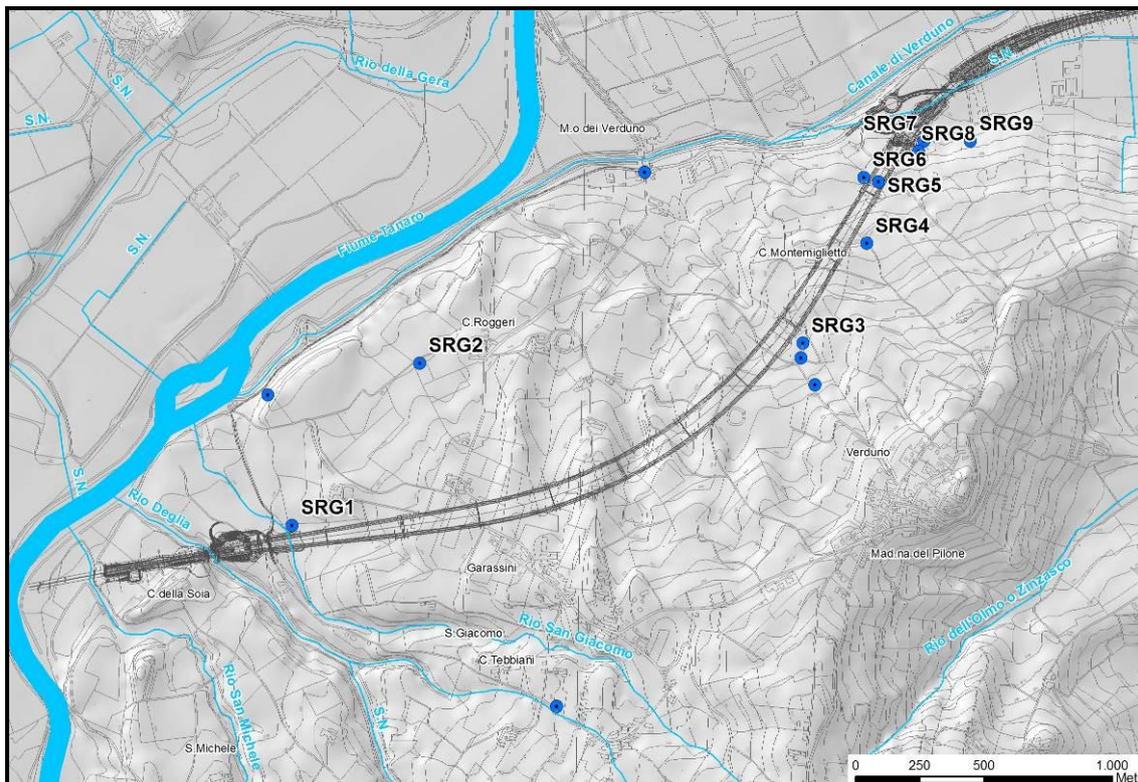


Figura 1. Ubicazione delle sorgenti; le sorgenti indicate col codice sono relative al censimento di Marzo 2009; le sorgenti censite negli anni 2001-2002 sono prive di codice.

Le emergenze idriche a carattere permanente o semi-permanente sono rappresentate dalle sorgenti ubicate:

- lungo la strada comunale che scende da Verduno alla strada provinciale Pollenzo-Alba;
- alla base del settore Ovest del versante, verso Toetto;
- in corrispondenza delle scarpate che delimitano la zona superiore dei corpi di frana sovrastanti la zona industriale di Verduno;
- lungo la strada Rossi - C. Trebbiani, in corrispondenza del bivio per Ascheri;
- nella vallecola al margine della strada che da Verduno scende a C. Montemiglietto;
- lungo l'alveo, alla base dell'abitato della Morra, lungo l'affluente Rio dei Berri;
- sul versante est del crinale Verduno - La Morra, alla testata del Rio Plaustra;
- al piede del versante collinare lungo la strada di servizio del canale ENEL di Verduno (tra l'opera di presa e il Mulino di Verduno);
- sorgenti e venute in alveo nel bacino del Rio Brandini (La Morra);

3.1.2. Opere di captazione delle acque sotterranee

Le opere di captazione delle acque sotterranee sono state oggetto di un censimento su base documentale (archivi di vari enti pubblici); non è tuttavia disponibile un'ubicazione delle opere censite su base cartografica. Una sintesi dei dati relativi al censimento è riportata nelle tabelle dell'Allegato 2. Più in particolare i dati sono stati reperiti attraverso la consultazione di documenti presso:

- l'Ufficio Risorse Idriche della Provincia di Cuneo, per la localizzazione dei Pozzi ad uso irriguo/industriale e delle sorgenti;



- l'Ufficio Tecnico del Comune di Cherasco, per quanto riguarda le denunce pozzi ad uso domestico esclusivo e la documentazione facente parte del Piano Regolatore Comunale vigente;
- l'Ufficio Tecnico del Comune di La Morra, per l'ubicazione dei pozzi idrici;
- l'Ufficio Tecnico del Comune di Verduno, per il repertorio delle denunce pozzi ad uso domestico esclusivo e la documentazione allegata al Piano Regolatore Comunale vigente;
- la Società Tecnoedil, che gestisce l'acquedotto comunale di Verduno, per quanto riguarda le opere di captazione site in località Mulino di Verduno.

Si tratta di opere di utilizzo strettamente locale, generalmente di limitate potenzialità e, almeno in alcuni casi, abbandonate da tempo.

3.2. CAMPAGNE GEOGNOSTICHE FINALIZZATE ALLA RICOSTRUZIONE DELLE CARATTERISTICHE IDROGEOLOGICHE DEL SETTORE DI PROGETTO

Nel corso degli ultimi 15-20 anni circa sono state eseguite numerose campagne geognostiche, realizzate nell'ambito delle diverse fasi di progettazione della Galleria di Verduno. Si riporta di seguito una sintesi delle indagini realizzate nelle varie fasi di progettazione che mette in evidenza, in particolare, i sondaggi che sono stati utilizzati per la caratterizzazione idrogeologica ed idraulica dell'ammasso. Per un elenco completo delle indagini finalizzate alla caratterizzazione geologico-geomeccanica dell'ammasso si rimanda alla Relazione Geologica di Progetto Esecutivo.

3.2.1. Campagne di indagini del Progetto Preliminare della variante della S. S. n. 231 Alba-Bra (1991-1996)

Nella campagna di indagini geognostiche del Progetto Preliminare della variante della S.S. n. 231 Alba-Bra sono stati eseguiti 31 sondaggi a carotaggio continuo. Solo 3 di questi sondaggi sono stati attrezzati a piezometro

(caratteristiche indicate in Tabella 2). L'ubicazione dei sondaggi realizzati nell'ambito di questa fase di progetto è riportata in Figura 2.

Codice punto	Quota p.c.	Profondità sondaggio	Tratto finestrato	
			Da:	A:
ASP3	199	30 m	3	14
ASP4	201	30 m	6	30
G3	202	30 m	3	17

Tabella 2. Sondaggi attrezzati a piezometro relativi alle campagne di indagine del Progetto Preliminare.

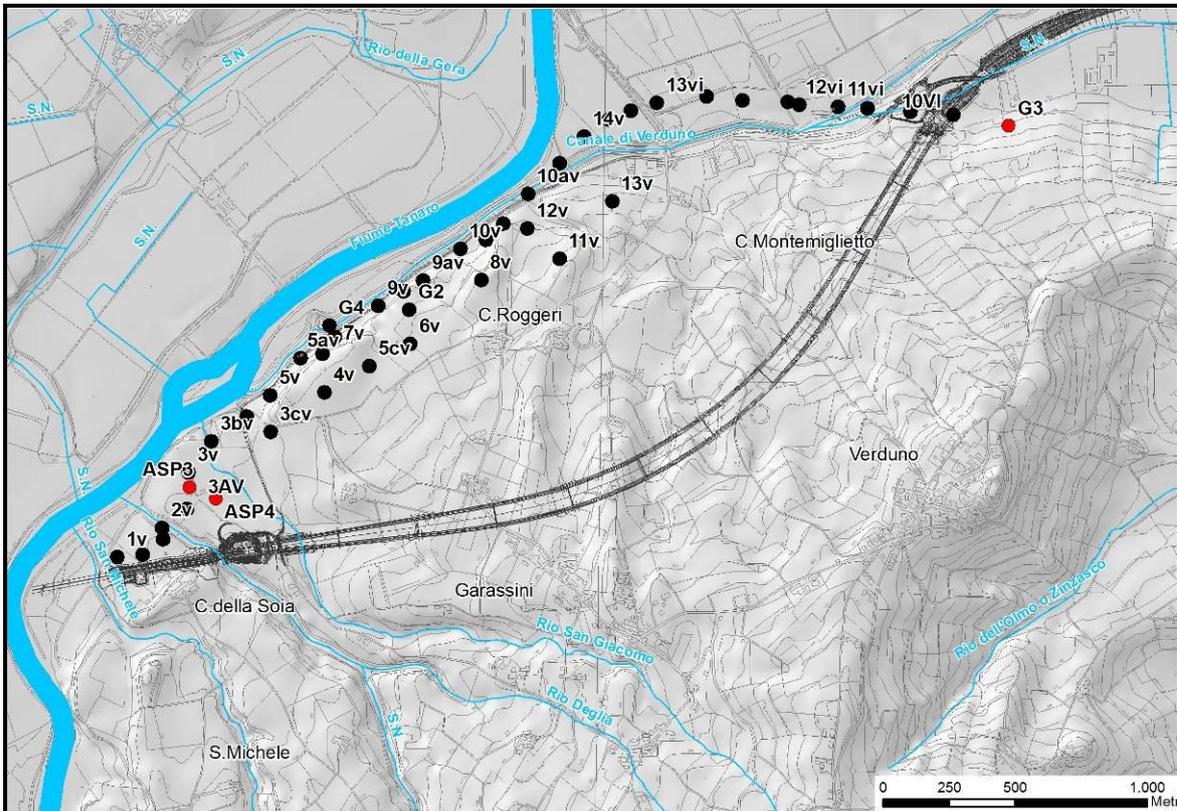


Figura 2. Ubicazione dei sondaggi realizzati nel corso del Progetto Preliminare della variante della S.S. n. 231 Alba-Bra; il pallino nero indica i sondaggi non attrezzati come piezometri, il pallino rosso i piezometri.

3.2.2. Campagne di indagini del Progetto Definitivo (1998)

Nella campagna geotecnica per il Progetto Definitivo (1998) sono stati eseguiti sondaggi a carotaggio continuo spinti fino a profondità di 40 m dal p.c (codice SPD). Nel corso delle perforazioni, oltre al recupero integrale del terreno attraversato, al prelevamento di campioni indisturbati e campioni rimaneggiati e all'esecuzione di prove penetrometriche dinamiche SPT, sono state effettuate prove di permeabilità Lefranc e Lugeon. Tutti i sondaggi realizzati sono stati attrezzati come piezometro a tubo aperto. Le caratteristiche principali di tali sondaggi e le modalità di attrezzaggio degli stessi a piezometro sono descritte nella tabella dell'Allegato 3, mentre l'ubicazione dei sondaggi è riportata in Figura 3.

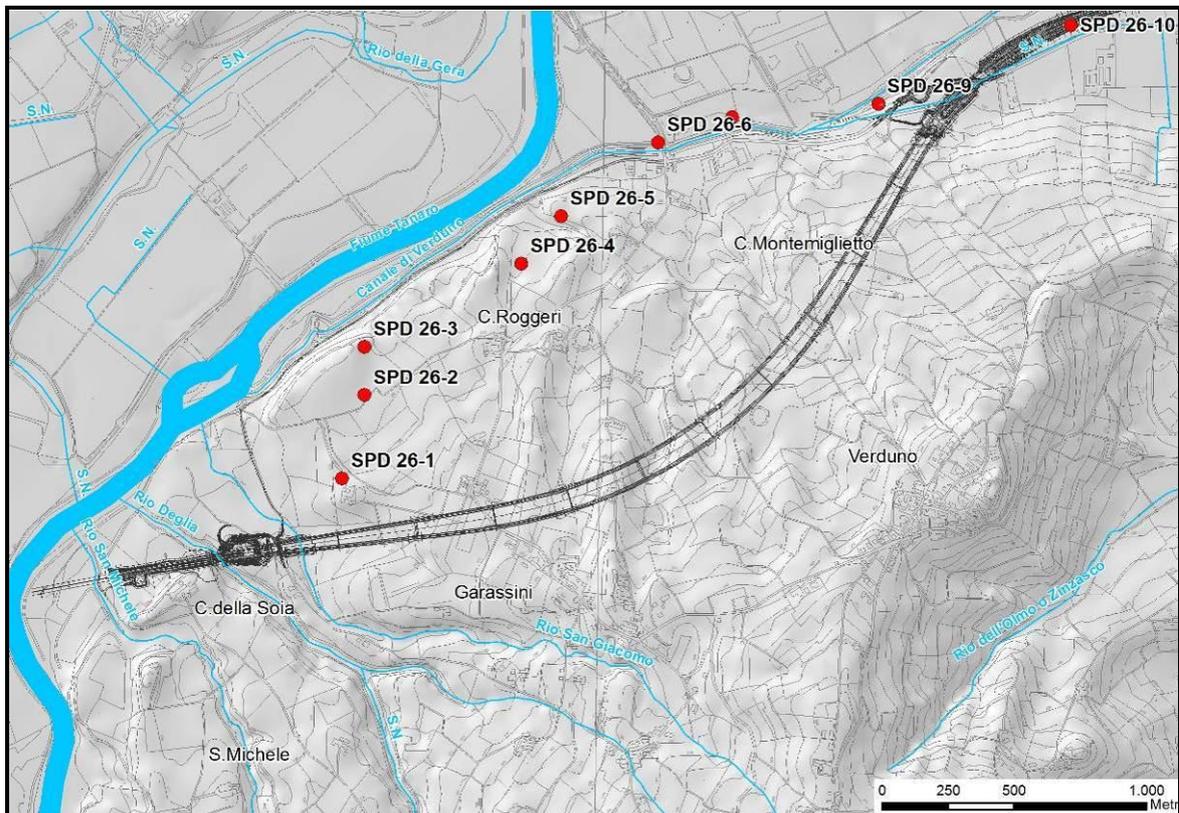


Figura 3. Ubicazione ei sondaggi realizzati nel corso del Progetto Definitivo (1998).

3.2.3. Campagne di indagini del Progetto Esecutivo (2001)

Nel 2001 sono stati effettuati ulteriori sondaggi ad integrazione di quelli già presenti. Sono stati realizzati 61 sondaggi (codice SFG e SPE) a rotazione con carotaggio continuo, con profondità comprese tra 25 m e 125 m da p.c. Le perforazioni denominate con la sigla SFG sono state eseguite nel tratto di lotto interessato dallo scavo della galleria Verduno, mentre le altre perforazioni, indicate con la sigle SPE sono state eseguite nelle restanti parti del Lotto 6. Per valutare il livello della falda, sono stati realizzati 71 piezometri, 65 dei quali sono a tubo aperto semplice, i rimanenti a tubo aperto con cella di Casagrande; in alcuni sondaggi il tratto fenestrato interessa la formazione dei gessi della Formazione Gessoso-Solfifera, in altri le marne della Formazione delle Marne di S. Agata Fossili.

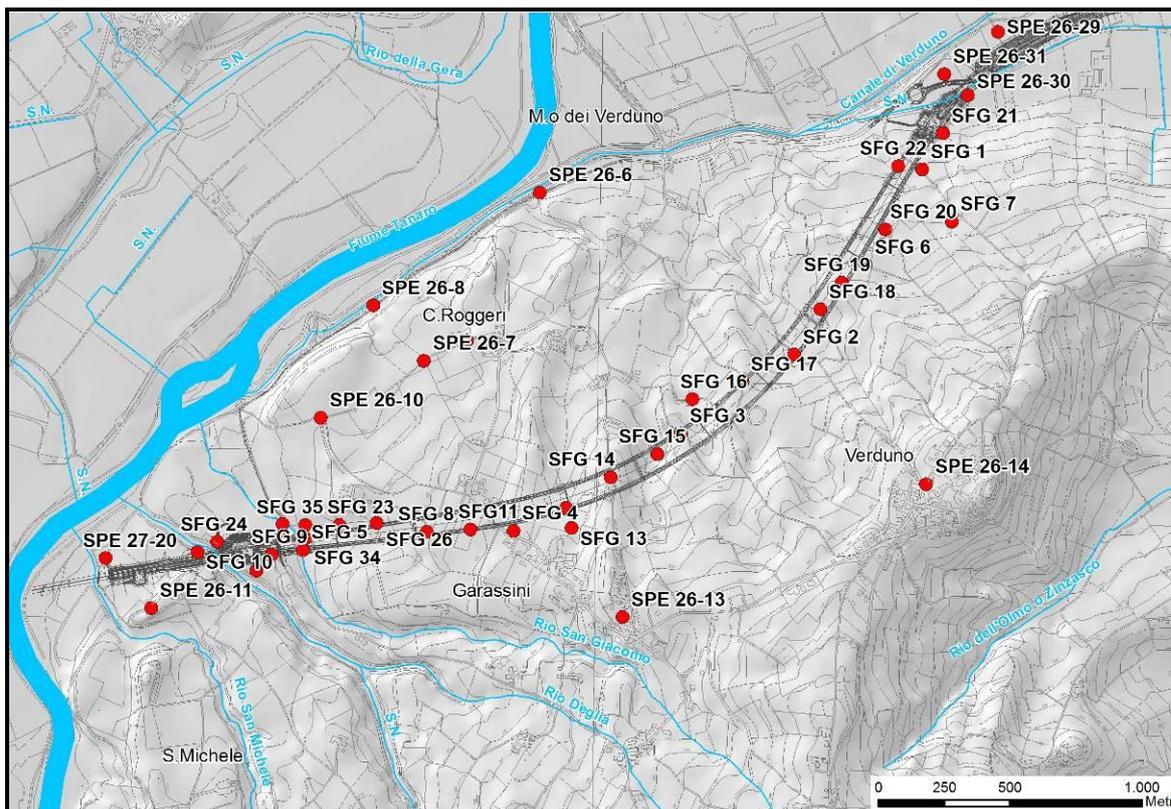


Figura 4. Ubicazione dei sondaggi realizzati nel corso del Progetto Esecutivo (2001).

Le caratteristiche principali dei sondaggi e le modalità di attrezzaggio degli stessi a piezometro sono descritte nella tabella dell'Allegato 4, mentre

l'ubicazione dei sondaggi è riportata in Figura 4. Sui sondaggi sono state eseguite 30 prove di permeabilità tipo Lefranc e 4 Lugeon.

3.2.4. Campagna di indagini integrative 2006

Nel 2006 è stata realizzata una campagna di indagini integrative finalizzata all'approfondimento delle conoscenze relative ai livelli sabbioso-ghiaiosi intercalati nelle argille-marnose, la cui presenza era stata rilevata dalle indagini del progetto esecutivo nella zona di galleria adiacente all'imbocco lato Alba. In particolare l'obiettivo è stato quello di valutare la continuità sia in direzione longitudinale che trasversale all'asse della galleria dei livelli più permeabili e conseguentemente di valutarne le potenzialità idriche in termini di volumi d'acqua mobilizzabili. L'indagine è consistita nella realizzazione di quattro sondaggi integrativi (SIV1÷SIV4) in corrispondenza dei settori lungo il tracciato della galleria in cui è stata evidenziata una carenza di dati (cfr. ubicazione in Figura 5). Per valutare il livello della falda, i fori sono stati attrezzati con piezometri a tubo aperto (tutti) e/o tipo Casagrande (SIV1 e SIV2). I piezometri a tubo aperto hanno le seguenti caratteristiche:

Codice punto	Quota p.c. (m.s.l.m.)	Tratto finestrato (m)	
		Da:	A:
SIV 1	270	24	42
SIV 2	254	1,5	19,5
SIV 3	269	1,5	8
SIV 4	275	40	63

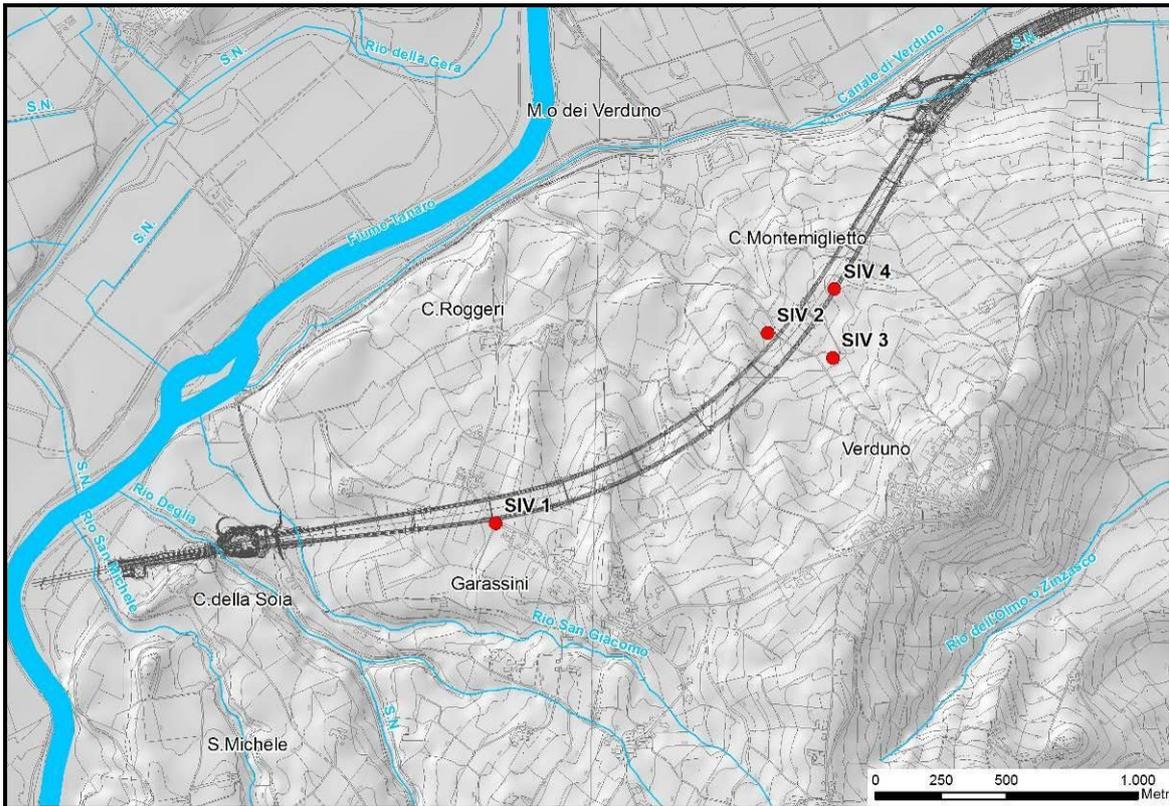


Figura 5. Ubicazione dei sondaggi realizzati nel corso della campagna di integrazione sondaggi del Progetto Esecutivo (2006).

3.2.5. Campagna di indagini integrative 2011-2012

Nell'area del tracciato della Galleria di Verduno, tra Settembre 2011 e Luglio 2012, sono stati realizzati ulteriori sondaggi con profondità variabili tra 20 e 70 metri. Tali sondaggi hanno consentito sia di ottemperare alle prescrizioni del DEC VIA 576/2011, sia di predisporre sulla collina di Verduno una rete di monitoraggio ambientale inclinometrica e piezometrica. Le indagini effettuate hanno permesso di realizzare un approfondimento delle condizioni geologiche, idrogeologiche e idrauliche del sottosuolo, consentendo di affinare le previsioni relative agli impatti in falda ed ai possibili rischi costruttivi derivanti dallo scavo dell'opera.

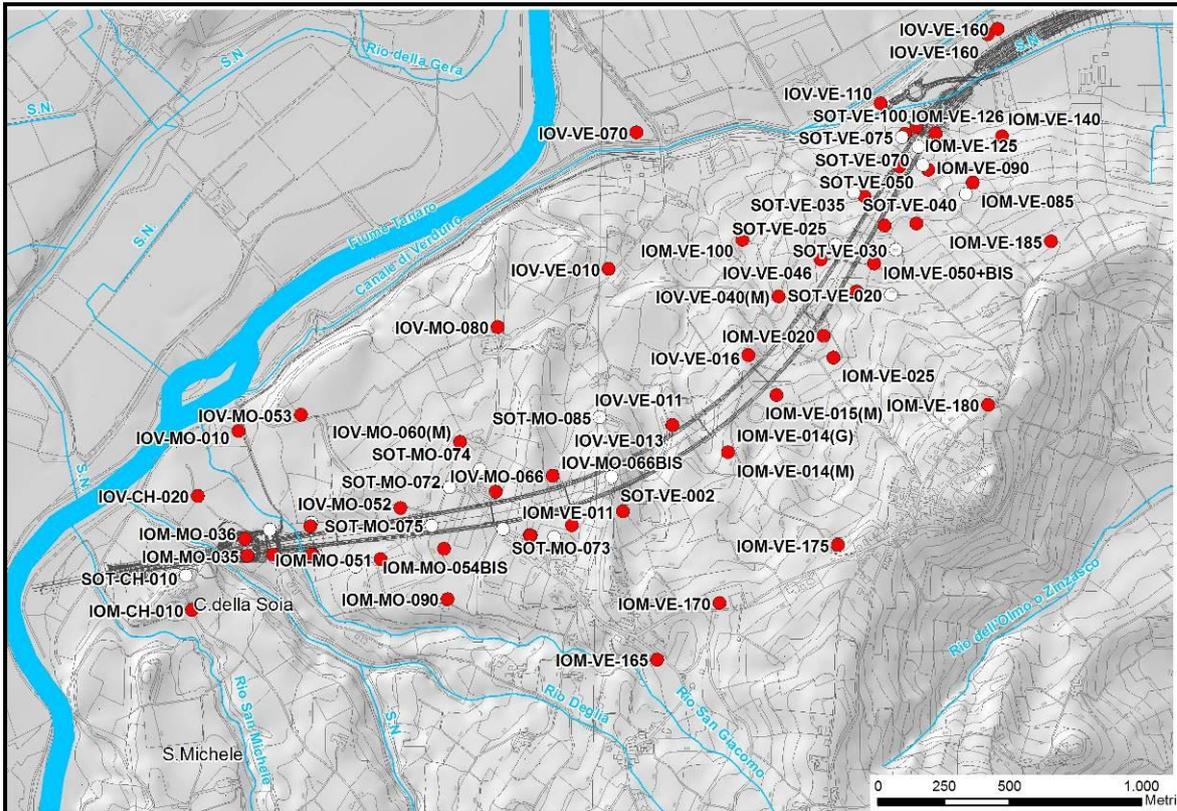


Figura 6. Ubicazione dei sondaggi realizzati nel corso della campagna integrativa del Progetto Esecutivo (2011-2012); i pallini rossi indicano i piezometri, quelli bianco gli inclinometri.

Nel dettaglio sono state eseguite:

- n. 66 perforazioni a carotaggio continuo per l'installazione di piezometri a tubo aperto, per il monitoraggio lungo il tracciato della galleria e lungo tutto il versante ai fini di intercettare la superficie della zona saturata all'interno dei terreni gessiferi e all'interno dei livelli a grana fine meno permeabili (codice *IOM*, *IOV*).
- n. 25 perforazioni a carotaggio continuo per l'installazione di inclinometri al fine di monitorare eventuali movimenti di versante in fase ante-operam, nel corso degli scavi della galleria e post-operam (codice *SOT*).

Le caratteristiche principali dei sondaggi attrezzati a piezometro sono descritte nella tabella dell'Allegato 5, mentre l'ubicazione dei sondaggi è riportata in

Figura 6; i sondaggi eseguiti hanno una profondità variabile da un minimo di 20 metri circa fino ad un massimo di 80 metri. E' importante specificare che i piezometri eseguiti in questa campagna geognostica sono stati realizzati applicando in alcuni casi una superficie filtrante nelle sole marne ed in altri casi nei soli gessi (cfr. Unità litotecnica della tabella dell'Allegato 5), al fine di valutare un eventuale diverso comportamento idrodinamico nei due casi.

Le indagini hanno consentito un ulteriore approfondimento della caratterizzazione geologico-stratigrafica, lungo il tracciato della galleria e, più in generale, di tutto il versante in cui si inserisce l'opera, consentendo un affinamento del modello geologico ed idrogeologico di riferimento.

3.3. CAMPAGNA GEOFISICA

Una prima campagna di indagini geofisiche è stata realizzata nell'ambito degli studi per il Progetto Definitivo (1998) e ha riguardato l'esecuzione di:

- sondaggi elettrici con elaborazioni tomografiche;
- sezioni elettrostratigrafiche;
- profili elettrici tripotenziale;
- sondaggi elettrici verticali.

Una seconda campagna è stata realizzata nell'ambito del Progetto Esecutivo (2011-2012), ed è stata finalizzata sia alla verifica di eventuali interferenze tra lo scavo della galleria di Verduno e le cavità carsiche presenti in prossimità dell'area oggetto di studio sia alla caratterizzazione dei settori in frana posti nel settore prossimo all'imbocco lato Alba della Galleria di Verduno.

L'indagine geofisica è consistita nella realizzazione delle seguenti tipologie di indagine (cfr. ubicazione degli stendimenti in Figura 7):

- indagini elettriche, volte alla determinazione dei valori di resistività e ad una modellizzazione 2D/3D in continuo nel sottosuolo;
- indagini sismiche a rifrazione. Le indagini in rifrazione sono state realizzate al fine di evidenziare la presenza di eventuali dissesti,

condizioni di instabilità, aree carsiche o zone caratterizzate dalla possibile presenza di fluidi che interessino le unità più superficiali;

- indagini sismiche a riflessione.

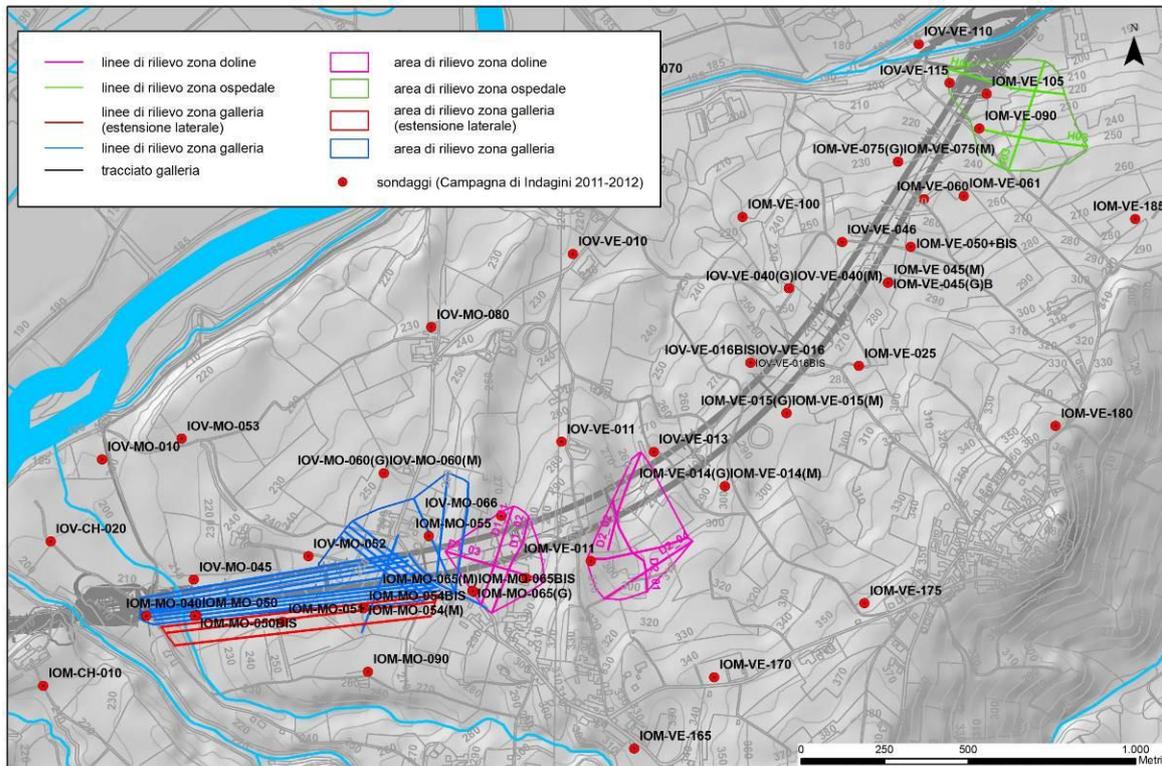


Figura 7. Traccia degli stendimenti delle indagini sismiche a rifrazione e delle indagini geoelettriche; come riferimento è riportata l'ubicazione dei sondaggi relativi alla campagna indagini 2011-2012.

3.4. ULTERIORI STUDI REALIZZATI NELL'AREA DI PROGETTO

Il presente rapporto beneficia di una serie di studi specifici svolti nell'area del progetto della Galleria di Verduno. I risultati di tali studi costituiscono una base conoscitiva importante che è stata utilizzata come riferimento per lo sviluppo del modello idrogeologico concettuale descritto nel Capitolo 5. Gli studi che, in aggiunta alle indagini ed agli elaborati prodotti in questa e nelle precedenti fasi progettuali, forniscono un supporto interpretativo delle condizioni geologico-idrogeologiche dell'area sono rappresentati da:

- Studio delle doline eseguito dal comune di Verduno (Marzo 2011)

- Studio strada di accesso ospedale (lato Alba) eseguito dalla Provincia di Cuneo
- Studi per il progetto di consolidamento del versante collinare del Nuovo Ospedale Alba-Bra.

3.4.1. Studio doline eseguito dal Comune di Verduno

Nel 2011, il Comune di Verduno ha commissionato uno studio delle forme carsiche presenti nell'ambito comunale con il fine di predisporre uno strumento utile all'amministrazione per mettere in atto le azioni necessarie a mantenere e sviluppare le attività agricole e antropiche in armonia con le naturali peculiarità dell'area di studio. Tale studio risulta di notevole interesse anche al fine di meglio identificare le caratteristiche dell'acquifero carsico e quindi di individuare i potenziali impatti determinati dallo scavo della Galleria di Verduno. Lo studio svolto (realizzato da SEA Consulting s.r.l.) è consistito nella mappatura e catalogazione delle forme carsiche. Tale studio ha permesso di migliorare la conoscenza del territorio, verificare lo stato di conservazione delle forme naturali utili allo smaltimento delle acque superficiali e stimare una possibile interconnessione all'interno del reticolo idrografico sotterraneo. Va specificato che il censimento (cfr. limiti illustrati in Figura 8) non riguarda tutto il versante collinare interessato dall'opera, in quanto esso è limitato esclusivamente al territorio comunale di Verduno, e quindi non fornisce informazioni sulle eventuali forme carsiche presenti nelle aree limitrofe che sono comunque interessate dal progetto della galleria.

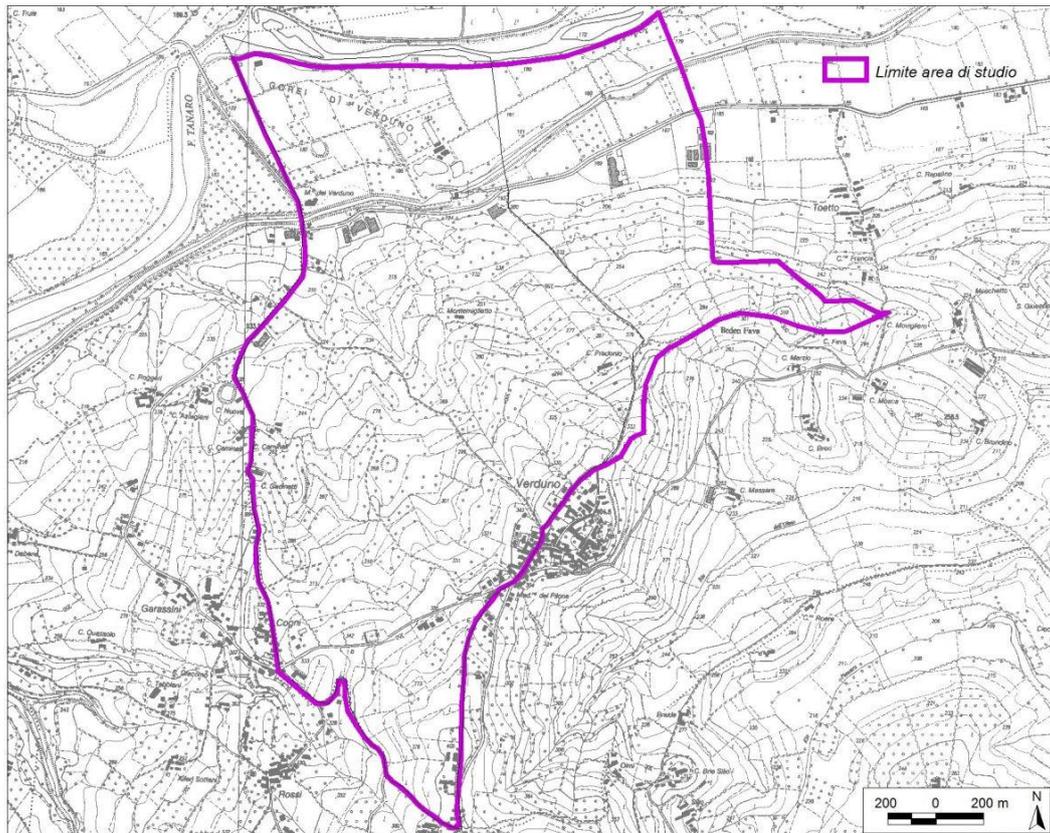


Figura 8. Area di studio delle forme carsiche del Comune di Verduno.

3.4.2. Studio strada di accesso al nuovo ospedale Alba-Bra (lato Alba) eseguito dalla Provincia di Cuneo

Nel 2001 la Provincia di Cuneo ha predisposto uno studio per il Progetto Preliminare del “Collegamento fra la viabilità ordinaria ed il punto d’accesso al nuovo ospedale Alba-Bra” nell’ambito dei territori comunali di Verduno e Roddi. In questo ambito sono stati realizzati una serie di studi geologico – geotecnici dell’area immediatamente a monte dell’imbocco della galleria Verduno lato Alba. La campagna geognostica a supporto del progetto preliminare è stata articolata in due campagne distinte, rispettivamente condotte nei mesi di Maggio e Luglio del 2011.

Le indagini svolte sono consistite in n°5 sondaggi geognostici a carotaggio continuo con profondità massima di 25 m (S1P÷S5P/011), n°1 sondaggio a distruzione di nucleo (S3PB/011) e n°4 prove penetrometriche pesanti (SCPT



1÷4/2011). Ai fini del monitoraggio dei livelli idrici nel sottosuolo, i sondaggi S1P/011, S2P/011 e S3PB/011 sono stati attrezzati con piezometri a tubo aperto.

3.4.3. Studi per il progetto di realizzazione del Nuovo Ospedale Alba-Bra e di consolidamento del versante collinare

Il versante della Collina di Verduno è stato interessato dai lavori per la realizzazione del Nuovo Ospedale Alba-Bra. Nel corso del Progetto Definitivo del Nuovo Ospedale era stata evidenziata l'esigenza di uno studio dettagliato che riguardasse gli interventi di stabilizzazione del versante sede dell'ospedale. Gli studi effettuati hanno infatti messo in luce sia evidenze di antichi movimenti gravitativi profondi, sia l'esistenza di una coltre di depositi sciolti superficiali sede di una circolazione idrica non trascurabile. Sono state svolte numerose indagini geognostiche, intraprese nel corso delle fasi progettuali (1998-2001) e poi proseguite nell'ambito del consolidamento del versante operato successivamente (2006-2007) alle prime fasi costruttive dell'ospedale. Numerosi sondaggi effettuati sono stati attrezzati a piezometro a tubo aperto.

La Figura 9 riporta l'ubicazione di alcuni di quelli realizzati nell'ambito del Progetto Preliminare (1998-1999) e Definitivo (2000-2001) dell'ospedale. Di seguito sono riportate le caratteristiche realizzative dei sondaggi attrezzati a piezometro:

Piezometro	SF 1	SF 2	S1 - P2	S2 - P4	S3 - P3	S5 - P1	SI 4	SI 14	SI 15
Profondità foro (m)			32,0	30,0	40,0	30,0	40,0	25,0	30,0
Tipo piezometro	Tubo aperto								
Posizione tratto filtrante (m dal p.c.)			6 ÷ 32	6 ÷ 30	6 ÷ 40	3 ÷ 30	3 ÷ 15	3 ÷ 25	3 ÷ 24
Data ultimazione sondaggio			04/02/99	10/02/99	12/02/99	22/01/99	25/01/01	20/12/00	12/01/01
Livello a fine sondaggio (m dal p.c.)			- 28,10 m	- 3,20 m	- 2,80 m	- 6,50 m	assente	assente	assente

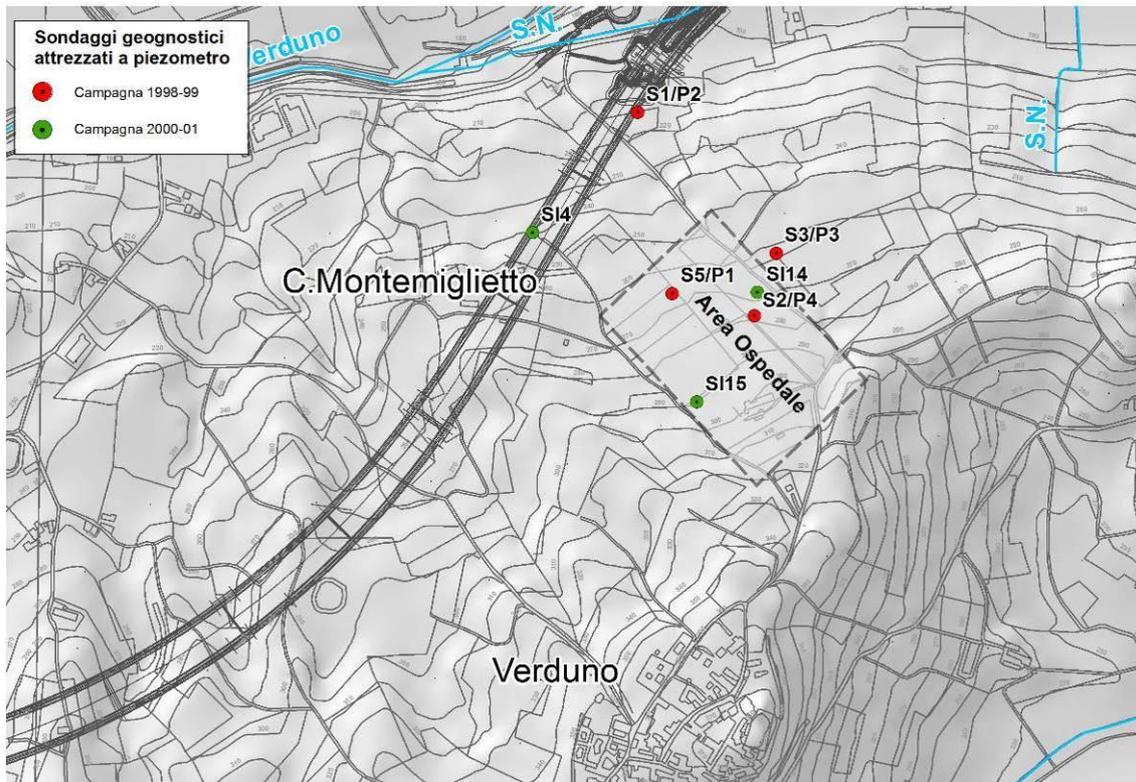


Figura 9. Ubicazione dei piezometri realizzati nell'ambito della campagna geognostica del progetto preliminare (1998-1999) e del Progetto Definitivo per la realizzazione del Nuovo Ospedale di Alba-Bra.

3.5. CAMPAGNE DI MONITORAGGIO PIEZOMETRICO

Nel corso delle varie fasi progettuali sono state condotte le seguenti campagne di misura della piezometria della falda acquifera:

- Campagna 2001-2002;
- Campagna Marzo 2009;
- Campagna di Monitoraggio Ambientale (2011-2012).

3.5.1. Campagna 2001-2002

Misure piezometriche sistematiche sono state acquisite per il periodo che va dall'estate 2001 al febbraio 2002. I piezometri sono stati realizzati sia per la lettura manuale che automatica del livello di falda, secondo lo schema seguente:

<i>Prima parte del Lotto in ambito collinare</i>				
	Piezometri a lettura manuale		Piezometri a lettura automatica in continuo	
	<i>Installati</i>	<i>In funzione (al febbraio 2002)</i>	<i>Installati</i>	<i>In funzione (al febbraio 2002)</i>
Sul versante a monte del tracciato	5	5	1	1
Lungo il tracciato	22	22	6	6
Nel settore inferiore del versante	17	13	2	2
<i>Seconda parte del Lotto lungo il fondovalle del Tanaro</i>				
Nella pianura alluvionale lungo il tracciato	27	17	-	-

Nel corso di questa campagna piezometrica è stato effettuato anche il rilevamento sistematico in sito di alcuni parametri chimico-fisici delle acque superficiali e sotterranee. Nella tabella di Allegato 6 sono riportati i valori dei parametri principali relativi a 30 punti di campionamento distribuiti in un ampio settore a cavallo del tracciato della Galleria di Verduno. Per una descrizione di maggior dettaglio relativa a tale campagna si faccia riferimento all'elaborato di Progetto Esecutivo "Relazione geologica-idrogeologica Generale ed Inquadramento Sismico" cod. 2.6D-rB.1.1.1.

Nell'interpretazione dei dati occorre comunque sottolineare le particolari condizioni meteorologiche verificatesi nel periodo interessato dalle indagini più recenti (sondaggi serie SFG- e SPE 26-). Nel corso del 2001, ad una primavera con precipitazioni non elevate ha fatto seguito una stagione estiva ed autunnale caratterizzata da apporti meteorici trascurabili, ad eccezione di alcune perturbazioni di limitata durata ed intensità. A queste condizioni di clima asciutto si sono associate, nel periodo dicembre - gennaio temperature molto basse, che hanno provocato il congelamento dei corsi d'acqua minori ed il mantenimento per un periodo prolungato di una modesta copertura nevosa. Le uniche precipitazioni di un certo rilievo si sono verificate nel febbraio 2002. La nevicata dei giorni 5-6 ha determinato un'altezza equivalente in acqua di circa 60 mm, mentre apporti ancora maggiori si sono avuti nei giorni 14-16, con

pioggia mista a neve. L'innalzamento evidenziato in alcuni piezometri a seguito di questi apporti conferma il precedente stato di depauperamento delle riserve idriche sotterranee conseguente agli scarsi apporti idrologici nel corso del 2001. I valori registrati nei piezometri con fenestratura nei gessi e nelle marne sono illustrati rispettivamente nei diagrammi di Figura 10 e Figura 11. I valori misurati sono riportati nell'Allegato 8.

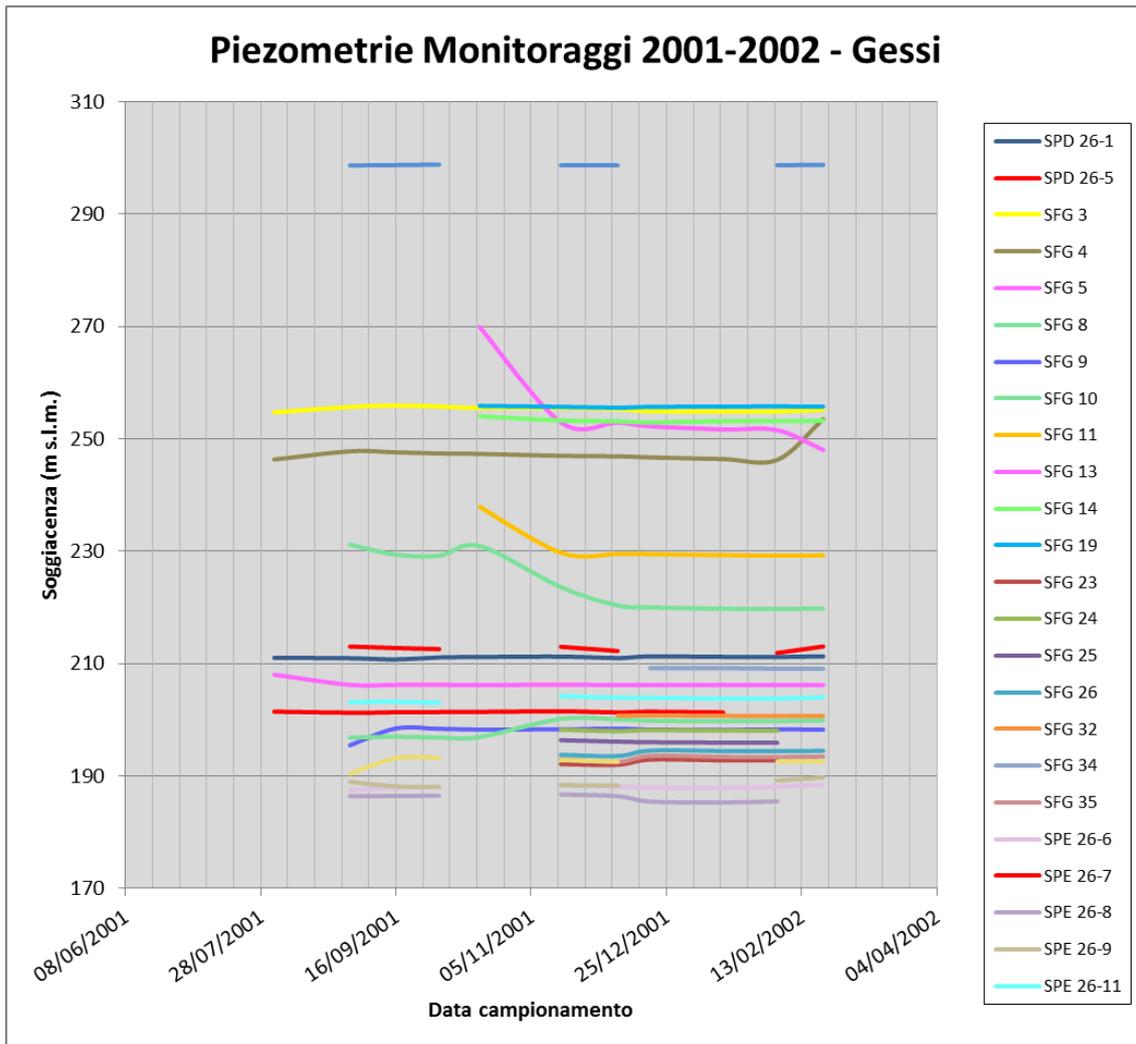


Figura 10. Variazioni piezometriche nei gessi misurate nei piezometri relativi alla campagna del 2001-2002.

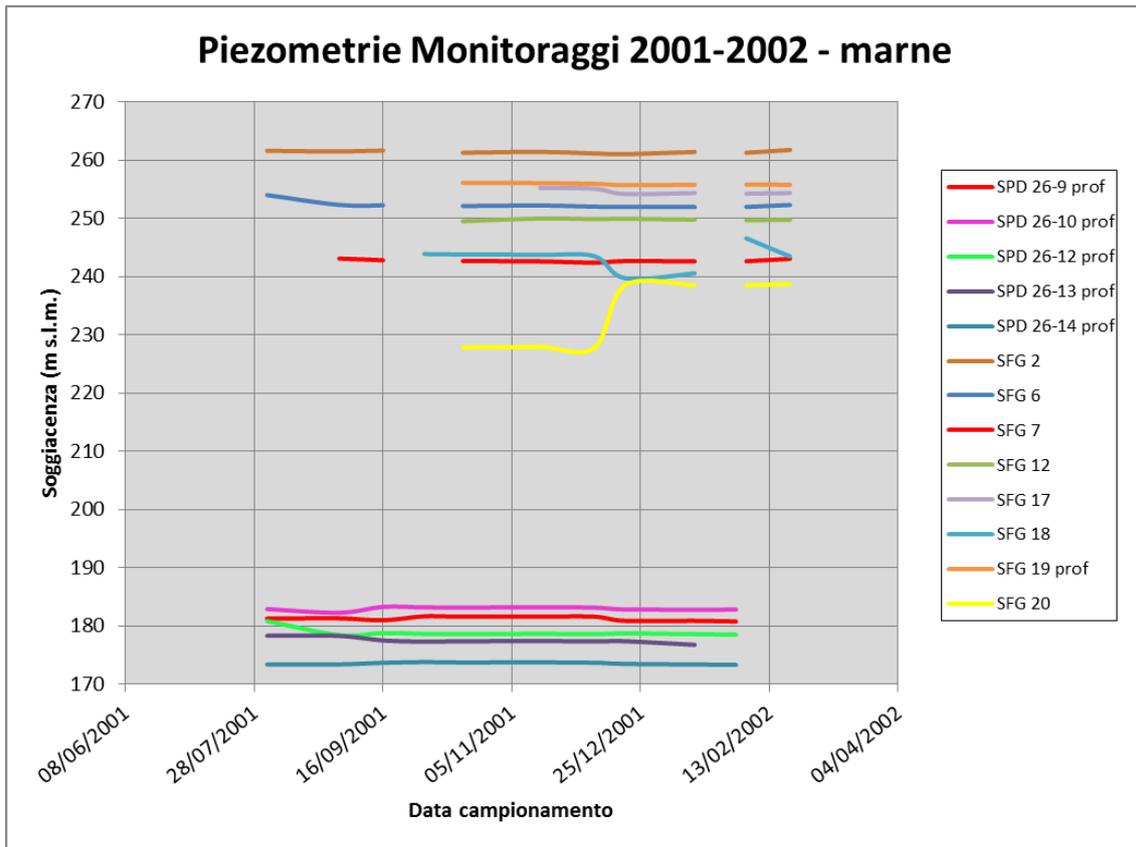


Figura 11. Variazioni piezometriche nelle marne misurate nei piezometri relativi alla campagna del 2001-2002.

3.5.2. Campagna 2009

I risultati di tale campagna e le relative schede fotografiche di accompagnamento sono descritte nell'elaborato di Progetto Definitivo 2.6D-rB.1.7.6.

3.5.3. Campagna 2011-2013 (Monitoraggio Ambientale)

Attraverso l'installazione di più di 60 piezometri, avvenuta tra il 2011-2012, è stato possibile effettuare una campagna di Monitoraggio Ambientale molto dettagliata del versante collinare di Verduno. Seppure i piezometri siano distribuiti principalmente in prossimità del tracciato della galleria, un numero di piezometri ubicati anche a monte ed a valle del tracciato consentono di avere a



disposizione un elevato dettaglio del contesto piezometrico dei diversi acquiferi presenti sul versante collinare.

La campagna di monitoraggio è iniziata in Ottobre 2011 ed è ancora attiva (le ultime misure disponibili risalgono a Luglio 2013). Le letture di ottobre e novembre 2011 hanno avuto cadenza quindicinale, quindi la campagna è proseguita con letture a cadenza mensile. Ad oggi, sono pertanto disponibili un numero rappresentativo di letture, per un utile raffronto con i dati piezometrici relativi al Progetto Definitivo. Questa campagna di rilievo piezometrico è stata realizzata da Sina Spa, in condivisione con Arpa Piemonte ed in ottemperanza alle Prescrizioni avanzate sia dal Ministero dell'Ambiente che dalla Regione Piemonte.

Dal confronto dei valori misurati è possibile osservare che i vari piezometri mostrano variazioni di diversa entità. Questo dipende dal fatto che i vari piezometri hanno caratteristiche spesso molto differenti tra loro: sono installati a profondità differenti, hanno una diversa lunghezza dei filtri, la loro misura interessa porzioni di versanti che risentono naturalmente di diversi comportamenti idrodinamici (es. prossimi a zone di ricarica o a zone di emergenza). Queste diverse caratteristiche fanno sì che non sia possibile una sintesi univoca dei dati.

Per facilitare la lettura e l'interpretazione dei valori piezometrici, i dati sono stati separati in funzione della formazione litologica in cui sono state collocate le superfici filtranti dei piezometri. La restituzione in forma grafica dei valori è riportata in nelle figure seguenti, dove sono rappresentate le variazioni relativamente alle marne, ai gessi ed ai depositi quaternari; i grafici riportano una selezione di alcuni dei piezometri monitorati, in quanto la rappresentazione di tutto l'insieme dei dati disponibili impedirebbe una chiara lettura del diagramma.

Dall'osservazione dei grafici di variazione piezometrica, pur prescindendo da puntuali discostamenti che dipendono appunto dalle locali condizioni idrogeologiche in cui sono stati inseriti i piezometri, è possibile osservare quanto segue:

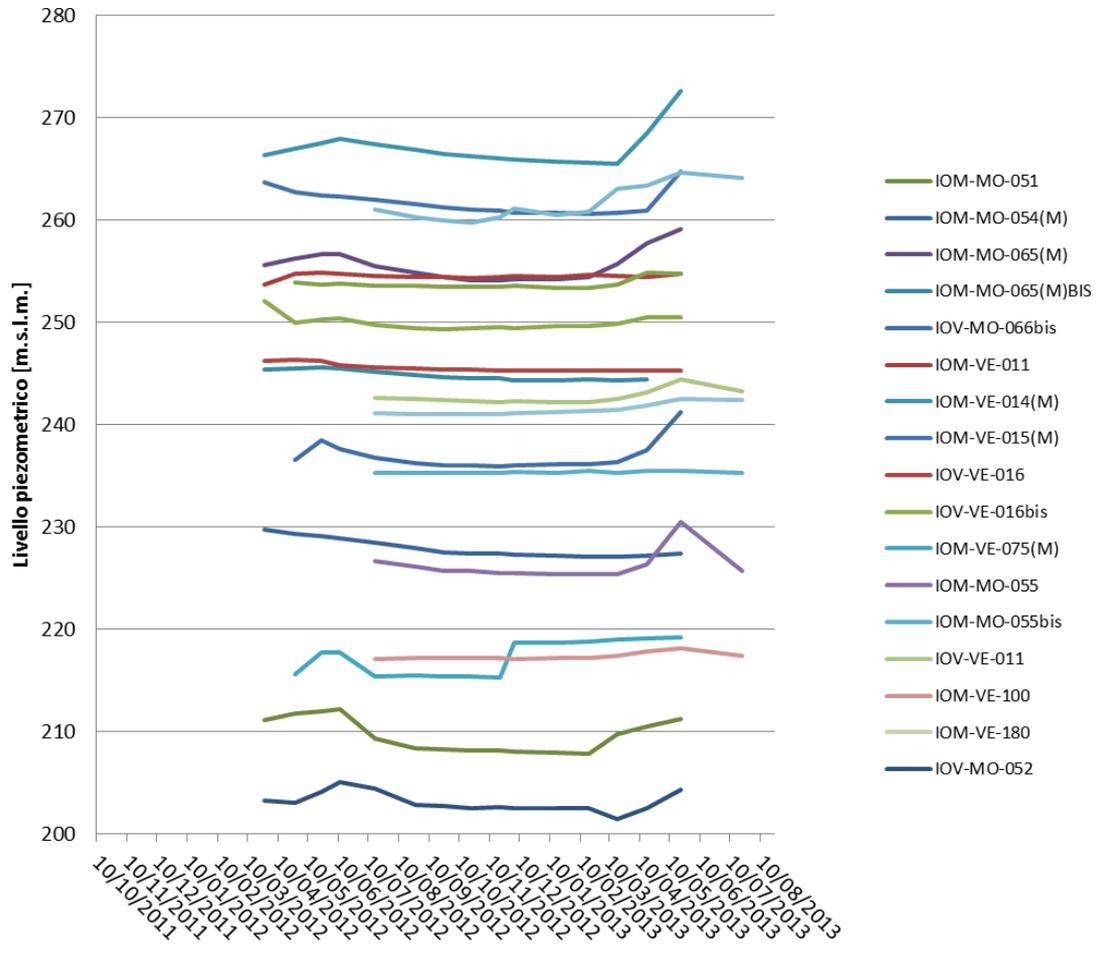
- esiste una tendenza dei valori piezometrici globalmente congruente. Questa riflette la diminuzione di piovosità, e quindi della ricarica dell'acquifero e la conseguente riduzione di livello, nel periodo autunnale - invernale, ed il successivo aumento dei valori di livello in corrispondenza del periodo primaverile - estivo;
- le variazioni osservate nei piezometri che misurano il livello della falda nei gessi sono soggette ad una maggiore variabilità rispetto a quelle relative ai piezometri con i filtri installati nelle altre formazioni. Questo comportamento riflette il fatto che l'acquifero dei gessi risente maggiormente delle variazioni dovute alla piovosità a causa di un diffuso carsismo.

L'analisi di dettaglio delle variazioni piezometriche è riportata nei capitoli relativi alla ricostruzione del modello idrogeologico concettuale e alle tratte di attraversamento della galleria contenuti nella Relazione Idrogeologica della Galleria di Verduno. In questi capitoli sono analizzati in dettaglio le possibili ripercussioni derivanti dallo scavo della galleria e dalle variazioni del livello di falda che si instaurano all'interno dei diversi acquiferi.



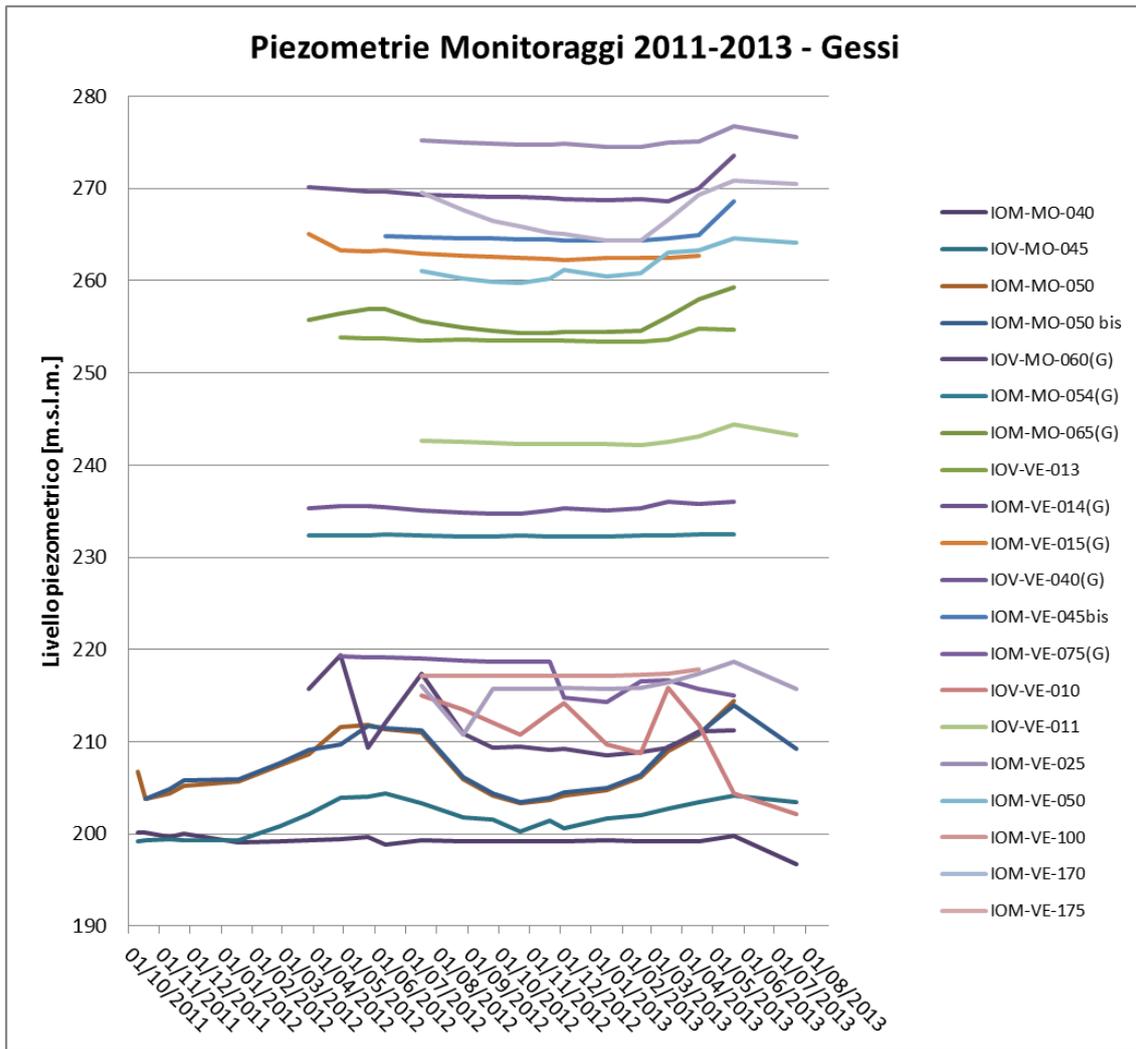
Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno - Relazione idrogeologica

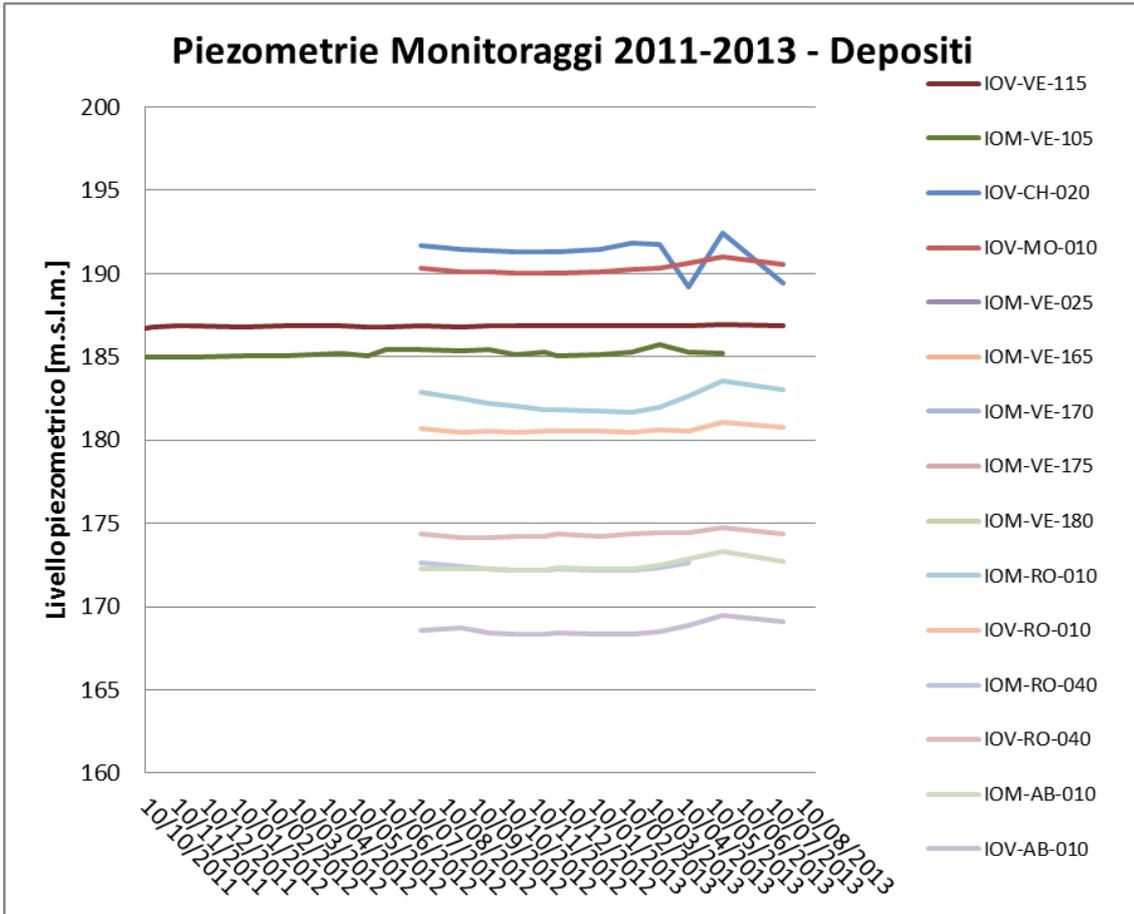
Piezometrie Monitoraggi 2011-2013 - Marne





Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno - Relazione idrogeologica





Misure piezometriche relative al monitoraggio Ambientale effettuate nei piezometri con fenestratura rispettivamente nelle marne, nei gessi e nei depositi alluvionali di fondovalle (2011-2013).

4. DESCRIZIONE DEI COMPLESSI IDROGEOLOGICI E DEGLI ACQUIFERI

4.1. QUADRO GEOLOGICO DI RIFERIMENTO

Le caratteristiche geologiche dell'area di progetto della galleria di Verduno sono descritte in dettaglio nella Relazione Geologica allegata. In questo capitolo si riporta solamente un breve richiamo alle tipologie di corpi geologici che caratterizzano il versante ed il fondovalle della collina di Verduno.

Come inquadramento generale, il tratto di interesse della Valle Tanaro è impostato nella parte superiore della sequenza di ambiente marino o transizionale marino-continentale riferibile al Bacino Terziario Ligure-Piemontese, su cui si sovrappongono direttamente, in corrispondenza dell'incisione valliva, sottili coperture di depositi alluvionali e di versante del Quaternario recente. La sequenza complessiva comprende, procedendo dal basso verso l'alto, le seguenti unità:

- Marne di Sant'Agata Fossili (Tortoniano-Miocene sup.);
- Formazione Gessoso-Solfifera (Messiniano);
- Argille di Lugagnano (Pliocene inferiore-medio)
- Depositati alluvionali medio-recenti, recenti ed attuali (Pleistocene superiore- Attuale).
- Depositati colluviali (Olocene-attuale)
- Depositati di frana (Olocene-attuale)

A partire dalla fase di progettazione definitiva, le varie unità sono state raggruppate in complessi litologici secondo i seguenti criteri:

- per le unità del substrato pre-pleistocenico la suddivisione ha preso in considerazione la composizione litologica, la granulometria, la consistenza, la plasticità, il riconoscimento di zone di discontinuità meccanica (relativa a deformazioni tettoniche o gravitative) e la presenza di intercalazioni detritiche grossolane



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno - Relazione idrogeologica

in unità fini. Ai caratteri macroscopici sono stati associati i risultati ottenuti con le prove geomeccaniche.

- per i depositi alluvionali grossolani sono stati considerati la granulometria, l'addensamento ed i risultati delle prove SPT, mentre per i sedimenti fini alluvionali o detritico-colluviali è stato fatto riferimento alla consistenza ed alla resistenza alla punta con il pocket penetrometer.

Le varie unità relative al substrato ed ai depositi sono state raggruppate in complessi litologici nel modo seguente:

Unità Litologiche	Descrizione	Sottounità	Litologia
Unità 1	Terreni di riporto	1a	<i>Sabbie e ghiaie (relative a rilevati stradali)</i>
		1b	<i>Sabbie limose e limi sabbiosi (piccoli argini relativi alle canalizzazioni irrigue)</i>
		1c	<i>Limi e sabbie con ghiaie e terreno vegetale (colmamento di scavi sede di attività estrattiva)</i>
Unità 2	Terreno agricolo		<i>Limi sabbiosi e limi argillosi, con locale presenza di sabbia e ghiaia fine</i>
Unità 3	Depositi alluvionali attuali e medio recenti	3a	<i>Complesso ghiaioso-sabbioso</i>
		3b	<i>Complesso limoso-sabbioso</i>
		3c	<i>Complesso limoso-argilloso</i>
Unità 4	Coperture costituite da accumuli di frana e coltri di terreno rimaneggiato dallo scorrimento superficiale (depositi colluviali)	-	<i>Limi argillosi, limi sabbioso fini, argilla limosa con sabbia e localmente ciottoli di argilla marnosa alterata</i>
Unità 5	Argille di Lugagnano e depositi granulari riferibili alla Formazione Gessoso-Solfifera	-	<i>Argille marnose e siltose grigio-azzurre e limi sabbiosi</i>
Unità 6	Gessi della Formazione Gessoso-Solfifera	-	<i>Corpi gessosi litoidi, limi argillosi con intercalato gesso e argille marnose con inclusi di gesso</i>
Unità 7	Marne di S. Agata Fossili	7	<i>Argille marnose e limi argillosi molto consistenti, con livelli millimetrici di sabbia fine limosa e livelli decimetrici di calcareniti</i>
		7a	<i>Corpi intercalati nelle argille marnose costituiti da sabbie-ghiaiose, ghiaie medio-grossolane, ghiaie in matrice limosa, sabbie grossolane o medio fini</i>
		7b	<i>Orizzonte di alterazione delle argille marnose costituito da limo argilloso e argilla limosa</i>

4.2. COMPLESSI IDROGEOLOGICI E PERMEABILITÀ

Le litologie presenti nei settori di pianura e della collina Verduno sono state raggruppate in Complessi Idrogeologici, in funzione delle caratteristiche di permeabilità e del ruolo che esse rivestono nei confronti della circolazione sotterranea. Questo criterio è stato adottato per la rappresentazione dei Complessi Idrogeologici in Figura 17 e nella Carta Idrogeologica allegata. Le caratteristiche dei complessi riconosciuti e la relativa corrispondenza alle Unità Litologiche è la seguente:

Complesso Idrogeologico	Sottocomplesso	Descrizione	Unità Litologica corrispondente
Complesso 1	1a	<i>Complesso a permeabilità primaria molto bassa per porosità, costituito da marne argillose siltose con sottili intercalazioni di sabbie e limi, riferibili alla Formazione delle Marne di Sant'Agata Fossili; complesso acquiclude basale.</i>	Unità 7
	1b	<i>Complesso a permeabilità primaria molto bassa, costituito da limi argillosi, argille marnose e limi sabbiosi riferibili alla Formazione Gessoso-Solfifera e da argille riferibili alla Formazione delle Argille di Lugagnano; complesso acquiclude di tetto della Collina di Verduno.</i>	Unità 5
Complesso 2	2a	<i>Complesso a permeabilità elevata o medio-elevata per fratturazione e carsismo diffuso e localizzato, costituito prevalentemente dai gessi della Formazione Gessoso-Solfifera.</i>	Unità 6
	2b	<i>Complesso a permeabilità medio-elevata per porosità, costituito dalle intercalazioni sabbiose e ghiaiose o sabbioso-limose sovente da pochi metri fino a diversi metri, presenti all'interno delle marne della Formazione delle Marne di Sant'Agata Fossili.</i>	Unità 7a
Complesso 3	3a	<i>Complesso a permeabilità variabile da bassa a medio-elevata per porosità costituito da terreni sciolti, quali limi argillosi, argille limose, limi sabbioso-fini, sabbie e locali ciottoli, derivanti dall'alterazione del substrato in posto e da accumuli di corpi di frana.</i>	Unità 4/7b
	3b	<i>Complesso a permeabilità medio-bassa costituito da argille limose derivanti da processi di dilavamento ad opera delle acque di scorrimento non incanalate.</i>	Depositi colluviali
Complesso 4	-	<i>Complesso a permeabilità medio-elevata per porosità, costituito da ghiaie, ciottoli, sabbie e limi, riferibili ai depositi alluvionali di fondovalle del Tanaro.</i>	Unità 3



I depositi comprendenti i terreni di riporto e i terreni agricoli (Unità Litologiche 1 e 2) non sono stati distinti in complessi in quanto non hanno un ruolo idrogeologico paragonabile a quello degli altri complessi per estensione e profondità. Essi influenzano circolazioni idriche epidermiche di scarsa rilevanza in rapporto ai sistemi di circolazione più profondi.

Nella Carta Idrogeologica allegata, oltre ai Complessi Idrogeologici sopracitati, sono stati distinti ulteriori elementi idrogeologici che contribuiscono ad un aumento da localizzato a diffuso delle permeabilità delle litologie presenti. Tali elementi sono rappresentati dai blocchi di substrato disarticolato e dalle forme carsiche associate alla dissoluzione dei gessi. Sono di seguito descritte le caratteristiche idrogeologiche e di permeabilità relative a ciascun complesso. I risultati delle prove di permeabilità realizzate nell'ambito delle diverse campagne di indagini geognostiche sono stati riportati in forma di diagrammi di frequenza. Tali elaborati consentono di avere una percezione immediata di quale sia l'intervallo di variazione della permeabilità di ciascun complesso, sebbene in nessun caso siano disponibili risultati sufficientemente numerosi da poter fornire una stima di tipo statistico.

4.2.1. Complesso 1 – Complesso a medio-bassa permeabilità

Rispetto a quanto descritto negli Elaborati inerenti l'idrogeologia del Progetto Definitivo, in cui è stato indicato un Complesso 1 unico, nella presente fase di studio viene effettuata una distinzione tra un Complesso 1a, inerente al substrato marnoso delle Marne di S. Agata, ed un Complesso 1b, che considera unitamente le argille plioceniche della Formazione delle Argille di Lugagnano, presenti sulla porzione Ovest collinare di Verduno, e le argille marnose messiniane della Formazione Gessoso-Solfifera (esclusi i gessi). Il motivo di tale distinzione è che, sebbene in termini di permeabilità le Marne di S. Agata presentino dei valori simili a quelli riscontrati per le argille messiniane e plioceniche, le prime costituiscono la superficie basale dell'acquifero principale, mentre le seconde rappresentano un livello affiorante e subaffiorante molto esteso, che rappresenta un acquiclude sovrastante l'acquifero principale.

Complesso 1a

E' costituito dalla successione delle Marne di Sant'Agata Fossili e comprende in grande prevalenza una successione monotona di marne argilloso-siltose, con sottili intercalazioni di sabbie e limi. I sottili livelli a granulometria limoso sabbiosa fine risultano completamente inglobati nella frazione marnoso-argillosa. La permeabilità primaria è molto bassa per porosità. Sono escluse da questo complesso le intercalazioni detritiche (sabbioso-ghiaiose) di potenza metrica che si osservano all'interno delle mane (Complesso 2b) e le porzioni di marne caratterizzate da diffusa fratturazione indotta da processi tettonici e/o da movimenti franosi (Complesso 3a): in questi due casi, infatti, le permeabilità riscontrate sono maggiori di quelle delle marne, seppur sempre piuttosto basse. Il complesso nell'insieme presenta una giacitura immergente a NNO. Al suo interno, data la bassa permeabilità, non avvengono deflussi sotterranei significativi; tuttavia i modesti deflussi presenti profondi ed epidermici sono diretti verso il fondovalle del Tanaro. Tale complesso rappresenta un acquiclude basale al di sopra del quale si imposta la circolazione principale.

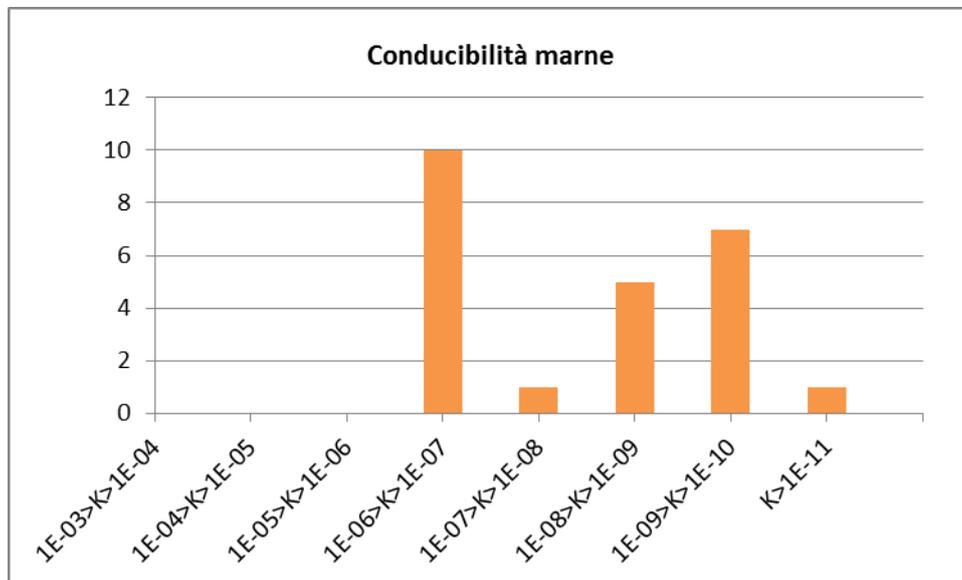


Figura 12. Diagramma di frequenza delle conducibilità idrauliche delle marne del Complesso 1a (Marne di S. Agata); conducibilità idrauliche in m/s.



Dalle varie prove Lefranc realizzate nelle diverse campagne di sondaggi è stato possibile ricostruire un diagramma di frequenza relativo ai valori delle conducibilità idrauliche (Figura 12). Da tale rappresentazione è possibile osservare come le conducibilità abbiano un certo grado di variabilità (1×10^{-11} - 1×10^{-6} m/s), posizionandosi perlopiù su valori bassi o molto bassi. I dati piuttosto numerosi relativi alla classe di conducibilità più alta (10^{-6} - 10^{-7} m/s) sono rappresentativi dei livelli discontinui a composizione sabbiosa. Tali dati non debbono trarre in errore nel valutare la permeabilità media dell'ammasso, che va comunque considerata bassa, dal momento che questi livelli sabbiosi sono elementi stratigrafici con scarsa continuità laterale e che quindi contribuiscono in modo trascurabile ai flussi a grande scala nel complesso idrogeologico.

Complesso 1b

Complesso che considera globalmente sia i limi argillosi, limi sabbiosi e argille marnose messiniane della Formazione Gessoso-Solfifera (esclusi i gessi), sia le argille plioceniche marnose e siltose grigio-azzurre della Formazione delle Argille di Lugagnano. I litotipi delle due formazioni sono stati raggruppati in quanto posseggono una permeabilità confrontabile e rivestono un simile ruolo idrogeologico. Infatti, tale complesso rappresenta un acquitardo estesamente affiorante o subaffiorante nel settore interessato dalla Galleria di Verduno. Il Complesso 1b rappresenta un ostacolo sia alla diffusa infiltrazione delle acque di superficie sia all'emersione delle acque di circolazione profonda, costituendo pertanto un livello di confinamento per quelle porzioni di acquifero in cui la falda profonda raggiunge la quota corrispondente alla sua base. E' tuttavia importante sottolineare che a causa delle forti eterogeneità litologiche che contraddistinguono i litotipi della Formazione Gessoso-Solfifera, questo complesso mostra dei locali aumenti di permeabilità che permettono limitati scambi idraulici tra i circuiti idrici superficiali e quelli più profondi.

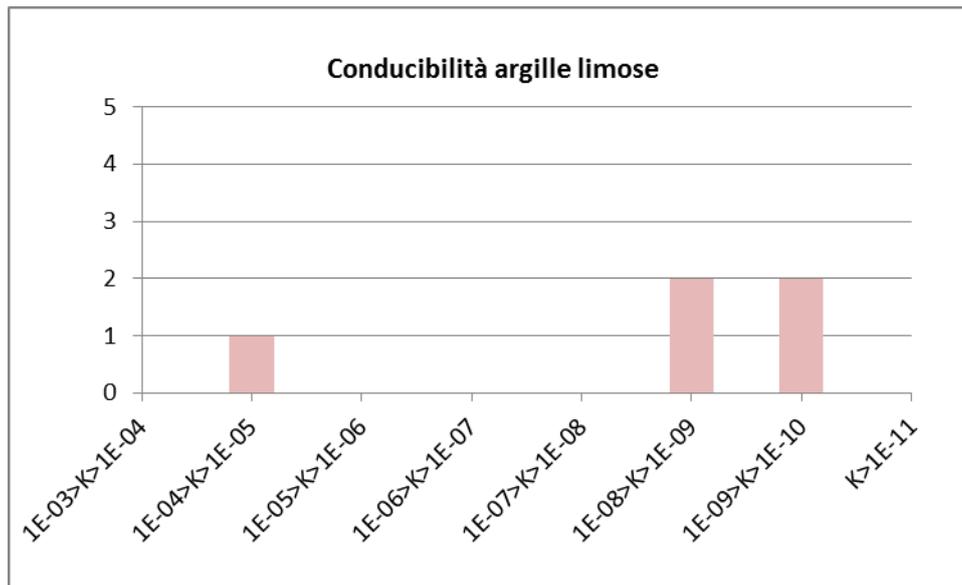


Figura 13. Diagramma di frequenza delle conducibilità idrauliche relative ai limi argillosi e alle argille marnose del Complesso 1b; conducibilità idrauliche in m/s.

Le litologie presenti hanno generalmente una permeabilità primaria molto bassa per porosità e possono essere considerate globalmente poco o molto poco permeabili. Tale situazione è riscontrabile osservando il grafico di Figura 13 con la distribuzione di frequenza delle conducibilità idrauliche che riporta un intervallo compreso tra 1×10^{-10} e 1×10^{-8} m/s. Il grafico mostra che valori puntualmente più elevati (fino a quasi 1×10^{-4} m/s) sono comunque possibili, anche se limitati a porzioni spazialmente circoscritte del complesso.

4.2.2. Complesso 2 – Complesso a permeabilità da medio-elevata ad elevata

Complesso 2a

Complesso costituito dai gessi della Formazione Gessoso-Solfifera, presenti in livelli di spessore da centimetrico a plurimetrico. I gessi presentano una notevole eterogeneità spaziale essendo quasi sempre intercalati tra livelli di argille marnose, limi argillosi e limi sabbiosi. I corpi gessosi di maggiori dimensioni e le marne con elevato contenuto in gesso presentano una permeabilità estremamente variabile, che è generalmente bassa (a causa della bassa porosità primaria) nelle porzioni intatte, fino a molto elevata nelle porzioni

interessate da carsismo di dissoluzione e/o fratturazione. Le porzioni litoidi diffusamente fratturate o soggette a carsismo possiedono una permeabilità secondaria per fratturazione nettamente superiore a quella primaria per porosità, anche se questa si colloca in un ampio spettro di variabilità. Questa unità rappresenta l'acquifero principale il cui dominio di esistenza interessa l'intero versante della collina di Verduno.

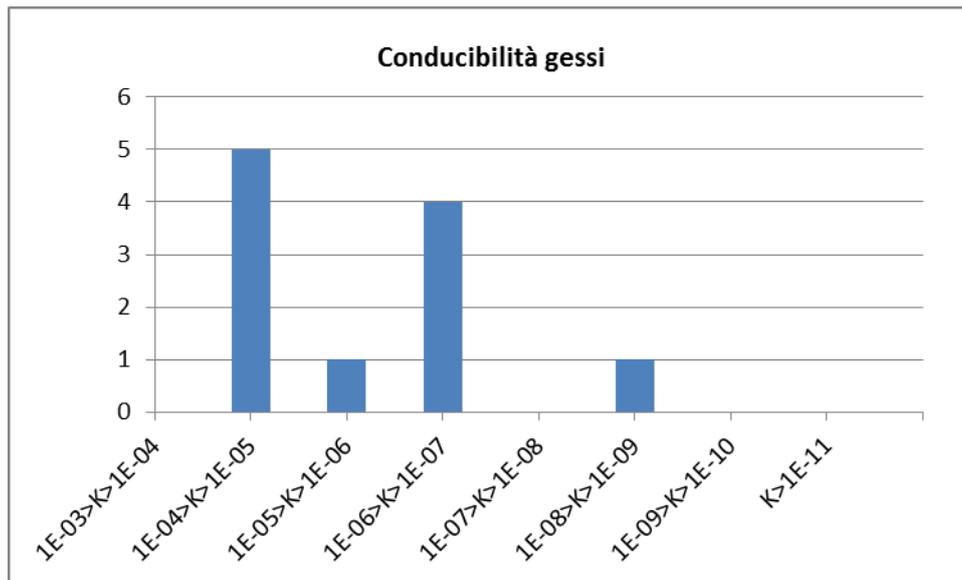


Figura 14. Diagramma di frequenza delle conducibilità idrauliche relative ai gessi del Complesso 2a; conducibilità idrauliche in m/s.

La distribuzione di frequenza di Figura 14, ricavata dai risultati delle prove Lefranc, mostra dei valori compresi tra 1×10^{-4} (in generale più frequentemente posizionati attorno a 5×10^{-5} m/s) e 1×10^{-9} m/s.

E' tuttavia importante sottolineare che questo grafico fornisce un'informazione solo parziale della reale variabilità della permeabilità dei gessi. Questo è dovuto al fatto che le prove di permeabilità sono sempre state eseguite in corrispondenza a livelli in cui i gessi non presentavano un carsismo particolarmente sviluppato che, peraltro, avrebbe comportato l'ineseguibilità della prova stessa per la caduta repentina dei carichi idraulici imposti. Pertanto, le informazioni ottenute sono da assumere come un dato "di minima" rispetto a quanto ci si può aspettare realmente in termini di permeabilità in

corrispondenza ai reticoli di cavità carsiche. Infatti, la permeabilità di un condotto carsico può arrivare ad un valore teorico “infinito”. A tal proposito è tuttavia opportuno fare alcune considerazioni sulle caratteristiche attese per il fenomeno carsico nella formazione gessosa oggetto di studio, a valle dell'esame dei sondaggi e prove geofisiche eseguite.

Non si può escludere che nella zona di interesse, all'interno della formazione gessosa siano presenti delle vere e proprie cavità o condotti; va tuttavia precisato che la presenza di cavità di dimensione pluri-metrica, seppur non da escludersi, vada comunque ritenuta assai poco probabile, dal momento che nei sondaggi eseguiti, né gli stendimenti geofisici realizzati hanno mai dato evidenza di tali elementi.

Sembra invece essere maggiormente probabile che la dissoluzione chimica dei gessi abbia perlopiù generato una disgregazione piuttosto frequente della roccia originaria, originando livelli continui di materiale residuale a granulometria ghiaioso-sabbiosa, elevata permeabilità per porosità secondaria e scarsa consistenza. Sacche di materiale di questo tipo sono state incontrate con una certa frequenza in molti dei sondaggi realizzati. Localmente sembra anche probabile che esistano dei veri e propri condotti di piccolo diametro (da centimetrico a pluri-decimetrico) e, più in generale, un reticolo microcarsico derivante essenzialmente da un inizio di dissoluzione delle pareti delle fratture che ha generato aperture diffuse di entità millimetrica o sub-millimetrica. Il reticolo di condotti di grande e piccolo diametro è verosimilmente discontinuo e passante gradualmente ai livelli di materiale residuale ad elevata permeabilità secondaria per porosità.

Su grande scala si ritiene quindi corretto approssimare il comportamento idrodinamico del Complesso 2a a quello di un acquifero pseudo-poroso. Per contro su scala locale (metrico-decametrica) si possono verificare condizioni idrodinamiche prossime a quelle di un acquifero carsico o talora anche a quelle di un acquifero permeabile per fratturazione.

Un'indicazione dei valori di permeabilità che possono verosimilmente caratterizzare i gessi del Complesso 2a deriva dalla calibrazione del modello

numerico effettuato per la simulazione dello stato naturale della falda acquifera profonda. Come discusso in dettaglio nel paragrafo 8.3, ciò che emerge dal modello è che per riprodurre in maniera soddisfacente una distribuzione piezometrica simile a quella ricostruita in corrispondenza dei gessi presenti in prossimità dell'imbocco Lato Cuneo è necessario considerare, come parametro di input della simulazione, la presenza di una zona ad elevata permeabilità con conducibilità idraulica variabile da 1×10^{-3} a 1×10^{-2} m/s. Seppur questo risultato debba essere considerato con cautela (per il fatto che il modello numerico è necessariamente basato su numerose assunzioni), esso fornisce comunque un'indicazione verosimile dell'entità delle permeabilità dei condotti carsici.

Complesso 2b

Complesso costituito da corpi detritici grossolani intercalati nelle marne argillose della Formazione delle Marne di Sant'Agata Fossili. Questi corpi sono stati generalmente rinvenuti alla sommità delle Marne di S. Agata e alla base della formazione Gessoso-Solfifera. Le intercalazioni sono rappresentate da sabbie e ghiaie e da sabbie limose con rare ghiaie. Tali corpi sono spesso presenti a diversi livelli con spessori complessivi anche di vari metri. E' probabile che essi costituiscano depositi rimaneggiati da correnti di torbida che, sia pure di ampiezza limitata, posseggono una discreta continuità spaziale variabile tra poche decine di metri fino a centinaia di metri. Tale complesso costituisce un acquifero con falda in pressione: una circolazione idrica significativa è presente nei livelli grossolani dotati di maggiore continuità laterale e che ricevono apporti meteorici diretti dalla superficie o indiretti attraverso la loro comunicazione idraulica con altri corpi permeabili affioranti (es. Complessi 3a e 3b).

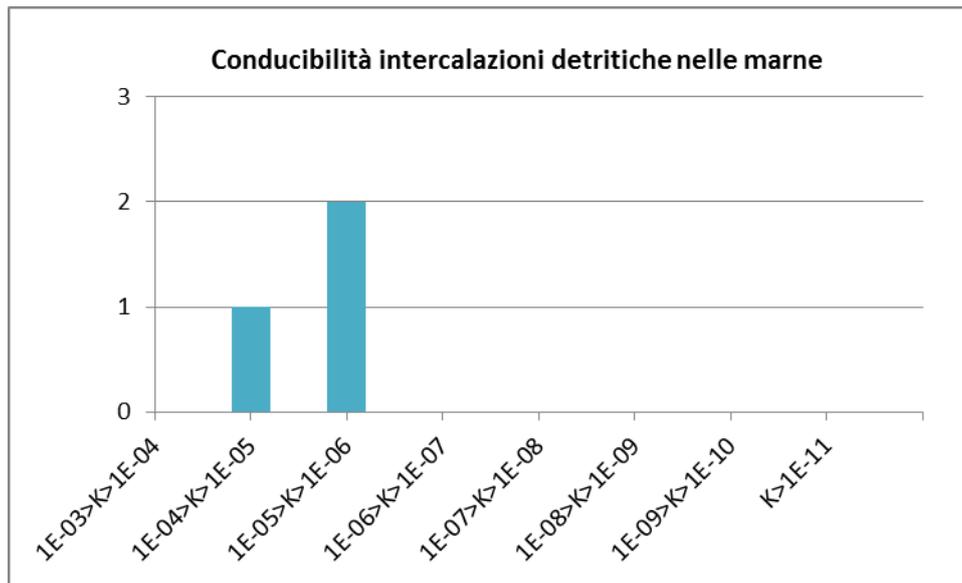


Figura 15. Diagramma di frequenza delle conducibilità idrauliche relative alle intercalazioni ghiaioso-sabbiose del Complesso 2b; conducibilità idrauliche in m/s.

Le intercalazioni detritiche hanno permeabilità medio-elevate, con valori di conducibilità idraulica ricavati dalle prove Lefranc compresi tra 1×10^{-6} m/s e valori anche maggiori di 1×10^{-5} m/s (Figura 15).

4.2.3. Complesso 3 – Complesso a permeabilità variabile da bassa a medio-elevata

Complesso 3a

Complesso costituito dai depositi di accumulo di frana e dai prodotti di alterazione del substrato in posto. I depositi di frana sono relativi sia a movimenti corticali, sia a fenomeni gravitativi più profondi che hanno coinvolto porzioni alterate del substrato in posto. I depositi di frana sono rappresentati da accumuli a struttura caotica comprendenti terreni incoerenti a granulometria fine, frammenti di marne alterate e blocchi di substrato anche non alterato con potenza da metrica a decametrica. I materiali a granulometria fine sono costituiti da limi argillosi, argille limose, limi sabbioso-fini, sabbie e locali ciottoli.

Complesso a permeabilità variabile da bassa a medio-elevata per porosità. Nei depositi in cui prevale la frazione sabbiosa la conducibilità idraulica è dell'ordine

di 10^{-4} - 10^{-6} m/s, mentre permeabilità inferiori (1×10^{-7} m/s) sono associate ai terreni prevalentemente argilloso-limosi. Non è presente in questo caso una quantificazione dei valori di conducibilità idraulica effettuata tramite prove in situ.

Complesso 3b

Le coperture detritico-colluviali sul versante comprendono terreni sciolti, prevalentemente a granulometria limoso-argillosa derivanti dall'alterazione in posto delle litologie del substrato, a cui fa seguito il rapido rimaneggiamento ed un eventuale limitato trasporto ad opera delle acque di scorrimento superficiale non incanalate. Questo complesso ha una valenza idrogeologica solo locale e limitata alle porzioni più corticali del versante in cui sono presenti tali depositi. Nel Complesso 3b sono presenti circolazioni idriche di limitata estensione e, probabilmente, solo localmente connesse con il sistema di circolazione più profondo. Le permeabilità sono variabili da basse fino a medio-elevate.

Non è presente in questo caso una quantificazione dei valori di conducibilità idraulica effettuata da prove in situ.

4.2.4. Complesso 4 – Complesso a permeabilità medio-elevata

Complesso costituito da ghiaie, ciottoli, sabbie limose e sabbie lungo la pianura di fondovalle del Tanaro. Tali depositi sono dotati di un'elevata eterogeneità litologica e granulometrica, sia laterale che verticale, tipica dei depositi fluviali relativi a corsi d'acqua di tipo braided.

Questo complesso costituisce un acquifero a falda libera, il cui sistema di circolazione dipende dall'equilibrio idrodinamico che si instaura tra la circolazione della falda acquifera dei gessi (Complesso 2a) e il regime di deflusso del Fiume Tanaro.

La permeabilità è di tipo primario per porosità, con valori da elevati a medi (dell'ordine di 1×10^{-4} a 1×10^{-6} m/s), sebbene caratterizzati da una spiccata variabilità sia orizzontale che verticale.

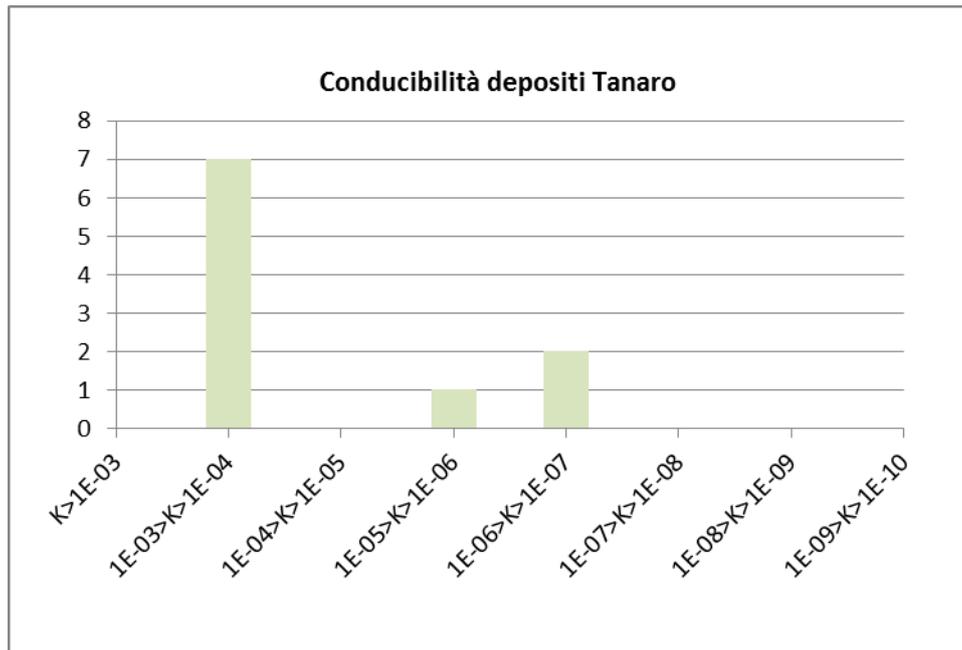


Figura 16. Diagramma di frequenza delle conducibilità idrauliche relative ai depositi alluvionali del Tanaro (Complesso 4); conducibilità idrauliche in m/s.

5. CARATTERIZZAZIONE IDROGEOLOGICA GENERALE DELL'AREA DI PROGETTO

5.1. ASSETTO GENERALE

Preliminarmente alla descrizione di dettaglio del contesto idrogeologico che interessa il tracciato delle due canne della galleria è necessario fornire una caratterizzazione a grande scala dell'assetto idrogeologico del settore collinare di Verduno.

L'insieme delle indagini e degli studi eseguiti nelle precedenti fasi progettuali cui si aggiungono gli approfondimenti effettuati attraverso la realizzazione dei sondaggi geognostici, delle indagini geofisiche e della campagna di monitoraggio piezometrica eseguita nell'ambito della presente fase progettuale, permettono di definire un quadro della circolazione idrica sotterranea piuttosto dettagliato.

In generale, la circolazione idrica sotterranea è localizzata nei seguenti acquiferi:

- Acquifero dei gessi (*Complesso Idrogeologico 2a*);
- Acquifero delle intercalazioni ghiaioso-sabbiose presenti all'interno delle marne (*Complesso Idrogeologico 2b*);
- Acquifero dei depositi colluviali e di frana (*Complesso Idrogeologico 3a e 3b*);
- Acquifero dei depositi alluvionali del Tanaro (*Complesso Idrogeologico 4*).

L'acquifero dei depositi alluvionali del Tanaro è ubicato nel settore di fondovalle, mentre gli altri acquiferi sono impostati sul versante collinare di Verduno. Tra gli acquiferi del settore collinare, quello ospitato nei gessi rappresenta l'acquifero principale, per estensione e volumetria dei flussi coinvolti.

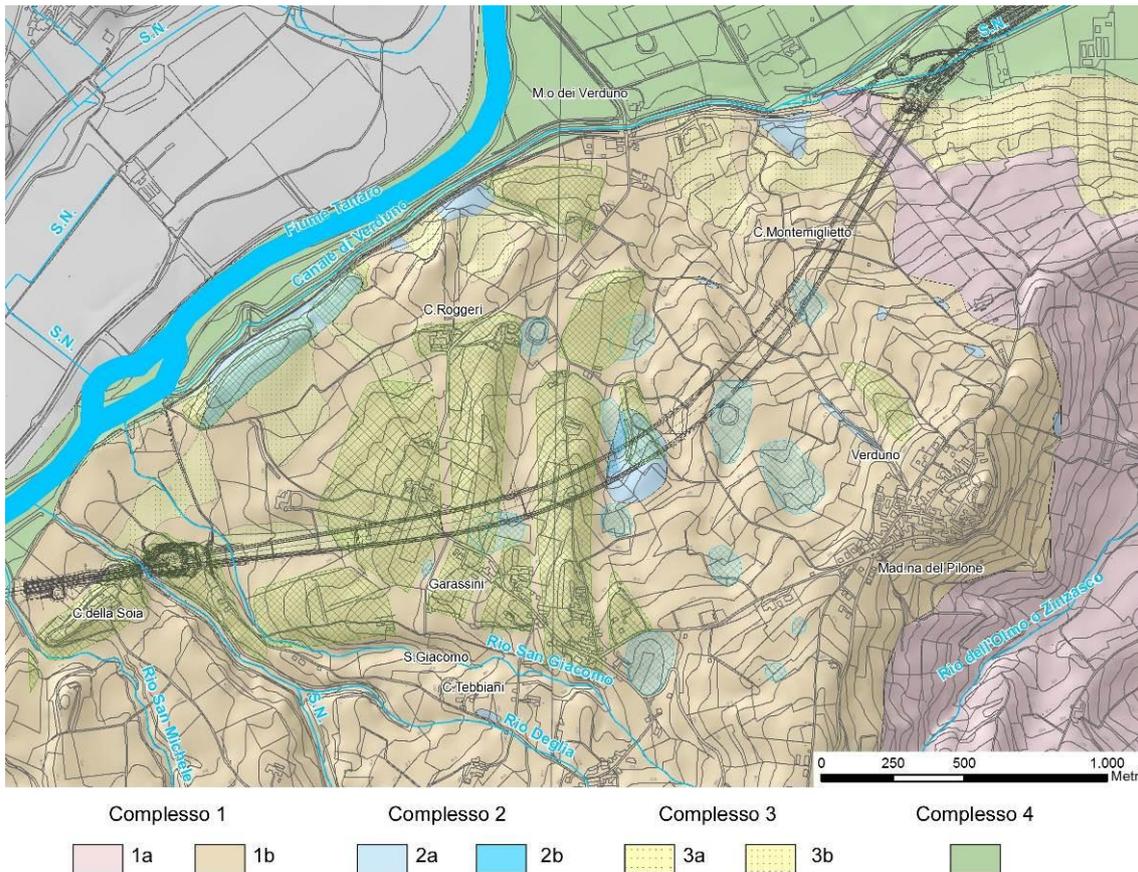


Figura 17. Rappresentazione dei Complessi Idrogeologici (il complesso 2b non è affiorante). I retini verdi e azzurri rappresentano rispettivamente zone in cui la permeabilità è tendenzialmente maggiore per effetto di una disarticolazione del substrato e della presenza di fenomeni carsici.

Come si può osservare in Figura 17 (e nella Carta Idrogeologica allegata per un dettaglio maggiore), i Complessi 1a e 1b a medio-bassa permeabilità rappresentano i complessi affioranti e sub-affioranti prevalenti, mentre l'affioramento dell'acquifero dei gessi (Complesso 2a) è limitato a settori poco estesi. Va specificato che nonostante il Complesso 1a sia caratterizzabile come un complesso impermeabile, ad Est del settore in progetto le marne del substrato sono state interessate da fenomeni di fratturazione ed alterazione tali da determinare un aumento significativo delle permeabilità. In questo caso non è quindi corretto considerare che le marne si comportino indefinitamente come un substrato impermeabile, mentre in realtà esse probabilmente assumono il ruolo di locali acquitardi o acquiferi; le porzioni più permeabili di questo

complesso non sono state comunque distinte per il fatto che non è possibile una loro chiara delimitazione spaziale.

L'acquifero impostato nel Complesso 2b non è affiorante nell'area di studio e la sua estensione sotterranea è stata definita unicamente attraverso la correlazione delle stratigrafie di sondaggio.

I complessi 3a e 3b rappresentano degli acquiferi superficiali di estensione relativamente limitata, sebbene connessi a circolazioni sotterranee di carattere permanente; essi sono presenti nel settore Est ed in quello Ovest del lotto, nonché nell'area di fondovalle.

Il complesso 4 dei depositi del Tanaro borda in maniera omogenea la base del versante collinare di Verduno e rappresenta un acquifero a falda libera.

Il bacino idrogeologico degli acquiferi collinari corrisponde al settore compreso all'incirca tra la Centrale ENEL di Verduno, l'abitato di Verduno, il versante est del crinale Verduno - La Morra, Rio dei Brandini, la loc. Merlotti, San Michele, Cascina Rotte e la sponda destra del F. Tanaro. La distribuzione spaziale e le caratteristiche della circolazione idrica associata a ciascun acquifero vengono descritte nei successivi paragrafi.

5.1.1. Reticolo idrico superficiale

Il reticolo idrico principale dell'area di progetto è costituito dal Fiume Tanaro, mentre sul settore collinare è presente un reticolo idrico secondario a sviluppo limitato. Il reticolo idrico secondario rappresenta un sistema poco strutturato ed in discontinuità con il fondovalle, costituito da incisioni e fossi sub-rettilinei, privi di tributari. Alcune incisioni sono di origine artificiale, in quanto realizzate in funzione della viticoltura e della pratica agricola; la maggior parte di esse disperde le acque al piede del versante in prossimità dell'area artigianale parte per infiltrazione, parte per diramazione in una rete secondaria di fossi.

Il versante collinare tuttavia, dal punto vista del reticolato idrografico può essere suddiviso in due settori con caratteristiche differenti. Nel settore est, sono presenti numerose forme epicarsiche, specialmente degli inghiottitoi, che

determinano le condizioni per un'infiltrazione rapida da parte delle acque di scorrimento superficiale intercettate da piccoli bacini endoreici. In questo settore pertanto è presente un reticolo a sviluppo molto frammentario ed irregolare, che spesso utilizza come punti di recapito gli inghiottitoi.

Nel settore Ovest dell'area di progetto è invece presente un reticolo secondario più evoluto, che comunque ha uno sviluppo limitato: si osservano solo due corsi d'acqua (Rio Deglia e San Michele) di una certa lunghezza e con deflussi a carattere semi-permanente, di modesta entità. Altri rii (es. San Giacomo) hanno invece solo brevi periodi di attività durante l'anno.

In generale, lo scorrimento idrico superficiale, sia incanalato in alveo che libero lungo i versanti, assume un'importanza rilevante solo in occasione di precipitazioni intense e prolungate. In ragione della limitata estensione dei bacini e delle basse permeabilità dei terreni affioranti la risposta dello scorrimento superficiale agli apporti meteorici è rapida, con tempi di corrivazione molto ridotti ed elevati contributi specifici delle aree drenate. Deflussi idrici rilevanti (dell'ordine dei $m^3/s \div$ decine di m^3/s) possono riversarsi lungo le aste dei rii o nelle depressioni relative alle forme di sprofondamento presenti sul versante.

5.2. CIRCOLAZIONE NELL'ACQUIFERO DEI GESSI

5.2.1. Assetto idrogeologico

Il complesso dei gessi (Complesso 2a) rappresenta l'acquifero principale del versante collinare compreso tra Verduno e La Morra. Alla scala del versante, l'acquifero ha un'immersione media a franapoggio verso Nord-Ovest, con bassi angoli di inclinazione. La circolazione idrica è principalmente impostata in corrispondenza delle porzioni interessate da carsismo e/o da fratturazione che caratterizzano diffusamente i corpi gessosi litoidi e gli orizzonti con maggior frequenza di intercalazioni gessose. La permeabilità è estremamente variabile, da bassa (a causa della bassa porosità primaria) nelle porzioni intatte dei gessi,



fino a molto elevata nelle porzioni intensamente carsificate o fratturate (cfr. paragrafo 4.2.2). La base dell'acquifero è rappresentata dalle marne di Sant'Agata (Complesso 1a), mentre il tetto è costituito in parte dai limi argillosi, limi sabbiosi e argille marnose messiniane della Formazione Gessoso-Solfifera, in parte dalle argille plioceniche marnose e siltose grigio-azzurre della Formazione delle Argille di Lugagnano (Complesso 1b). I gessi affiorano in superficie in maniera sporadica, in zone con estensione massima da decametrica a ettometrica, mentre in profondità sono estesi con continuità nella porzione centro-occidentale del settore di progetto.

Un dato che emerge dai profili longitudinali delle canne della galleria, dalle sezioni trasversali (sezioni A-L) e dalla ricostruzione volumetrica dei corpi effettuata per la modellizzazione di flusso (cfr. § 8.2.2) è quello della grande variabilità laterale che caratterizza lo spessore dell'acquifero dei gessi. Tale variabilità è imputabile sia ai processi di natura tettonica che hanno deformato la successione stratigrafica, sia ai fenomeni di natura gravitativa che hanno interessato diverse porzioni del versante. Mentre nel settore centro-occidentale di progetto i gessi sono ubiquitariamente presenti (comunque con notevoli variazioni laterali di spessore), nella parte intermedia del settore orientale della collina essi sono stati riscontrati solo in blocchi isolati, traslati e deformati nei livelli a minore permeabilità del Complesso 2b. Nella parte bassa del settore orientale i gessi scompaiono del tutto in corrispondenza dell'imbocco lato Alba. E' importante specificare che in questo settore in cui i gessi tendono a scomparire, nella parte alta della successione stratigrafica essi vengono in contatto laterale con coltri ispessite di depositi superficiali, originate dalla presenza di corpi di frana; nella parte bassa della loro successione stratigrafica i gessi vengono invece in contatto con settori del substrato marnoso molto fratturati (per motivi tettonici o gravitativi), che quindi hanno acquisito un grado di permeabilità secondaria più elevato del normale. Sembra pertanto verosimile ipotizzare che in questo settore orientale dell'acquifero parte della circolazione presente al suo interno venga trasferita al settore di substrato marnoso più permeabile per via dello stato di fratturazione anomala. Un'altra parte della

circolazione presente nell'acquifero potrebbe invece essere trasferita verso i livelli più superficiali di coltri detritiche ispessite per motivi gravitativi. Questa ipotesi sembra anche essere confermata dalla presenza a mezzo versante in tale settore di alcune risorgive, presenza che potrebbe essere determinata proprio dal trasferimento di parte dei flussi dei gessi all'acquifero superficiale delle coltri detritiche, meno potente, quindi meno trasmissivo e pertanto costretto a recapitare in superficie parte del volume d'acqua circolante.

Malgrado l'elevata variabilità spaziale dello spessore e la permeabilità fortemente eterogenea dei gessi è possibile assumere che tale complesso, fatta eccezione per il settore Est verso l'imbocco, rappresenti a grande scala un unico acquifero a comportamento pseudo-poroso (cfr. § 4.2.2).

E' tuttavia molto probabile che a piccola scala tale acquifero sia costituito anche da circuiti carsici (cfr. § 4.2.2) che sostengono sistemi di circolazione solo parzialmente connessi, o persino indipendenti dal sistema di circolazione principale. Tale condizione pare essere testimoniata dai dati di monitoraggio piezometrico che mostrano come alcuni piezometri limitrofi siano soggetti a variazioni di diversa entità nel corso di uno stesso periodo di osservazione.

La presenza di un carsismo diffuso, o più in generale di fenomeni di dissoluzione chimica del gesso, alla scala del versante è riconoscibile sulla base di diversi elementi:

- morfologia del versante, con presenza di numerose doline, forme di sprofondamento, bacini di drenaggio chiusi;
- stratigrafie di sondaggio che evidenziano la presenza di numerose piccole cavità carsiche e di livelli con materiale residuale;
- evidenze derivanti dai risultati delle indagini geofisiche.

Gli elementi di caratterizzazione morfologica dei processi carsici che interessano il versante collinare di Verduno emergono sia dal rilevamento geologico-geomorfologico effettuato per la progettazione definitiva-esecutiva della galleria di Verduno, sia da uno studio commissionato dal Comune di Verduno per il censimento delle forme carsiche superficiali (cfr. § 3.4.1).

Tali studi evidenziano come in superficie il grado di carsismo sia piuttosto avanzato, con forme carsiche con caratteristiche che variano da uno stadio evolutivo iniziale o intermedio con presenza di doline, fino ad uno maturo con inghiottitoi ben sviluppati. Oltre alle doline ed agli inghiottitoi che sono diffusi lungo il versante, sono anche presenti solchi carsici connessi a valle con inghiottitoi e depressioni che si attivano in occasione degli eventi piovosi. Dalle stratigrafie di sondaggio emerge che le cavità carsiche ipogee generalmente sono riempite da sedimenti fini quali limi argillosi e limi sabbiosi che, in alcuni casi, occludono completamente la cavità.

In superficie lo spartiacque principale del bacino idrogeologico coincide con lo spartiacque morfologico della zona, ovvero con il crinale collinare Verduno - Roddi. Le zone d'infiltrazione preferenziale delle acque meteoriche alimentanti il sistema idrogeologico dei gessi corrispondono ai settori in cui i gessi affiorano direttamente in superficie oppure alle zone meno acclivi o debolmente concave nelle quali, nel corso di eventi meteorici prolungati, le acque si concentrano e ristagnano percolando in profondità. In particolare, le forme epicarsiche più evolute, quali specialmente gli inghiottitoi, rappresentano gli elementi idraulici preferenziali attraverso cui avviene l'alimentazione del sistema di circolazione profondo da parte delle acque superficiali.

Come si può evincere dalla Figura 18, la distribuzione spaziale delle doline e degli inghiottitoi fornisce un'indicazione sulla possibile localizzazione di alcune direttrici di drenaggio sotterraneo. Tale ricostruzione risulta in particolare realizzabile per il settore compreso nei limiti comunali di Verduno, in cui lo studio effettuato dal Comune di Verduno ha evidenziato la presenza di numerose doline ed inghiottitoi (cfr. paragrafo 3.4.1). Dalla figura si possono osservare 4-5 potenziali assi di drenaggio che percorrono il versante collinare lungo la linea di massima pendenza, attraversando in pianta il tracciato delle due canne del tunnel; in realtà, dalla descrizione di dettaglio del tracciato del tunnel si vedrà che il tunnel, lungo la tratta in cui sono state evidenziate le linee di drenaggio, è interamente contenuto all'interno della formazione delle Marne di Sant'Agata Fossili, posta base dell'acquifero dei gessi.

La circolazione sotterranea nei gessi alimenta alcune sorgenti poste alla base del versante, quali ad esempio la Fontana del Mulino posta nei pressi del Mulino di Verduno (all'incrocio della provinciale Alba-Pollenzo) e la sorgente posta lungo il canale ENEL nelle vicinanze dell'opera di presa in alveo al Tanaro (cerchi rossi in Figura 18). Queste sorgenti, che hanno portate modeste e sono caratterizzate da deflusso permanente ed elevati tenori in sali disciolti, rappresentano l'emergenza della circolazione idrica profonda.

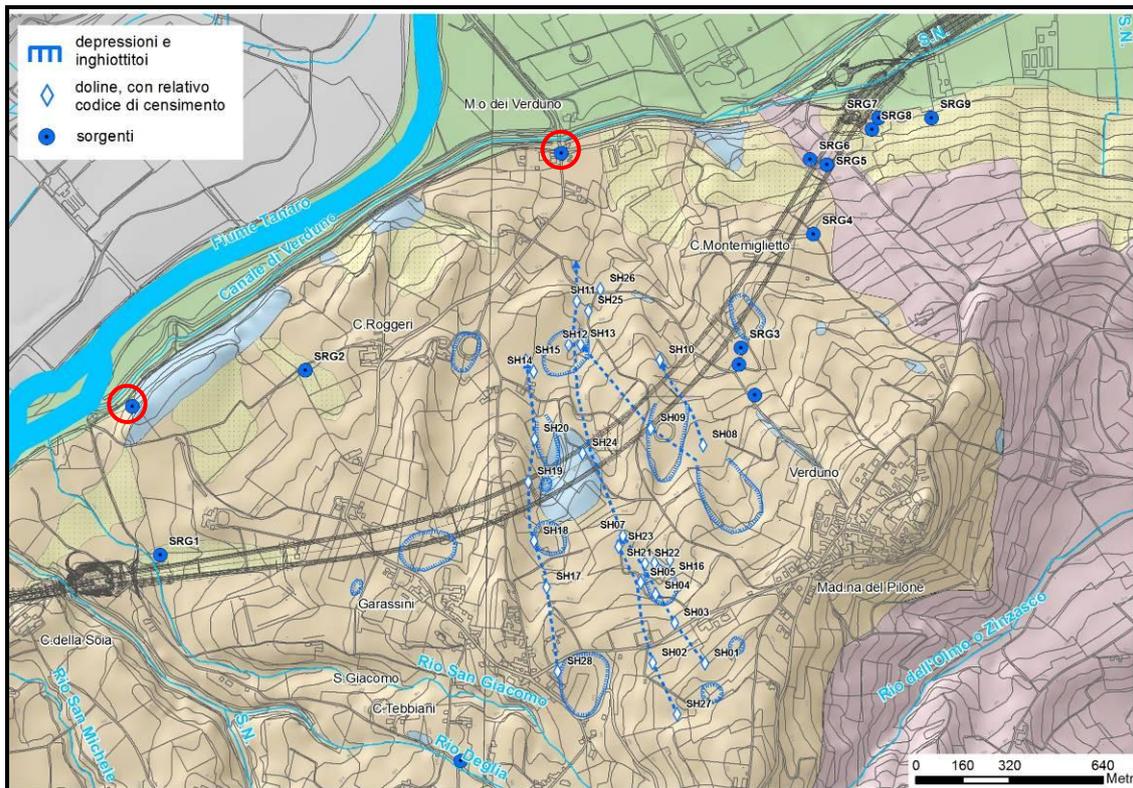


Figura 18. Possibili linee di drenaggio sotterranee ricavate dalla correlazione spaziale tra le doline/inghiottitoi (dal censimento eseguito dal Comune di Verduno, 2011) e ubicazione delle sorgenti (in rosso le sorgenti con acclarata alimentazione da parte dell'acquifero dei gessi); per la legenda dei Complessi idrogeologici fare riferimento alla Carta idrogeologica allegata.

5.2.2. Assunzioni alla base della ricostruzione della superficie piezometrica

Prima di discutere le caratteristiche della piezometria ricostruita nel settore dei gessi occorre fare una premessa riguardante le assunzioni considerate per tale ricostruzione. La piezometria di questo settore può essere ricostruita in due modi differenti: (1) considerando i soli dati relativi al Monitoraggio Ambientale (2011-2013), (2) combinando i dati del Monitoraggio Ambientale con i dati relativi alla campagna 2001-2002. Entrambe le scelte hanno dei pro e dei contro che vengono di seguito analizzati.

Come si può osservare dalla Figura 19, la distribuzione in pianta delle due serie di piezometri è dissimile. A tal proposito si specifica che i primi sondaggi attrezzati a piezometri (es. sondaggi del 2001) sono quasi tutti andati persi oppure non sono più nelle condizioni di fornire dei dati piezometrici affidabili (in quelli rimanenti è stata spesso constatata la presenza di materiale terroso o fango al loro interno). Per questo motivo la campagna di Monitoraggio Ambientale (2011-2012) non ha più potuto usufruire dei piezometri precedentemente utilizzati per il monitoraggio. Questo significa che, anche se complessivamente i diversi dati piezometrici raccolti nel corso delle diverse fasi di monitoraggio ricoprono un'area piuttosto vasta, singolarmente ciascuna campagna insiste su di un'area specifica.

Nonostante la differenza di periodo di riferimento, il vantaggio derivante dall'integrazione dei dati piezometrici relativi alle serie 2001-2002 e 2011-2013 è quello di poter ottenere una ricostruzione piezometrica basata su numero di campioni più elevato e con una maggiore distribuzione areale. L'estrapolazione basata sui soli valori derivanti dai piezometri del Monitoraggio Ambientale implica infatti la correlazione tra un numero inferiore di dati e quindi il ricorso ad un maggior grado di libertà nella ricostruzione della superficie piezometrica. Ad esempio, l'utilizzo dei valori dei piezometri SFG23 e SFG26 (cfr. Figura 19) in combinazione a quelli dei piezometri IOM-MO-050, IOV-MO-045, IOV-MO-052 e IOM-MO-051 permette sicuramente di aggiungere un dettaglio significativo all'interpretazione che altrimenti mancherebbe.

D'altra parte, il limite di un'operazione di integrazione di dati riferibili a periodi molto differenti è quello di "forzare" una superficie continua basata sull'estrapolazione di valori che possono essere rappresentativi di stati differenti dell'acquifero (i.e. diverse condizioni di alimentazione/drenaggio). Inoltre, va tenuto in conto che i piezometri realizzati nel corso delle diverse campagne geognostiche hanno caratteristiche costruttive spesso differenti, essendo nel caso della serie 2001-2002 costituiti da fenestrature che interessano tratti "misti", ovvero che interessano litologie a diversa permeabilità (es. marne, gessi), mentre nel caso della serie 2011-2013 sono stati realizzati applicando una fenestratura selettiva attraverso i soli gessi o le sole marne.

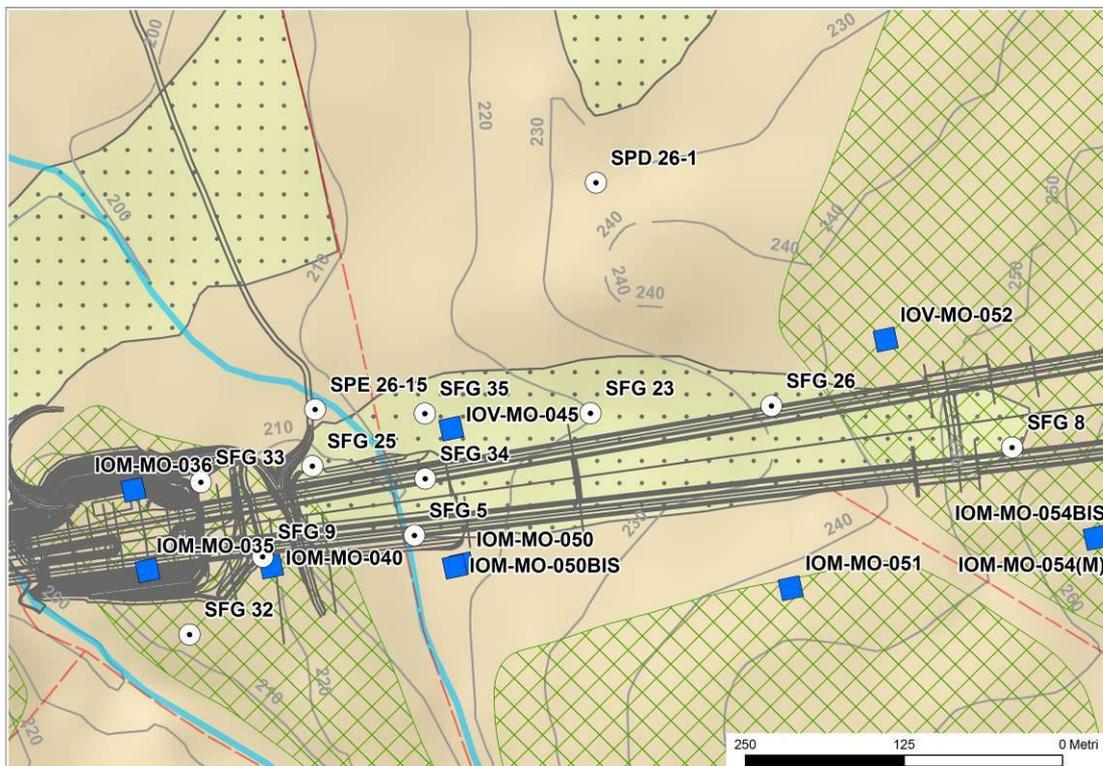


Figura 19. Individuazione dei piezometri appartenenti alla rete di monitoraggio 2001-2002 e a quella del Monitoraggio Ambientale (2011-2013), nel settore dei gessi.

Tenuto conto dei suddetti vantaggi e svantaggi, si è scelto di procedere alla ricostruzione della superficie piezometrica ricorrendo ad entrambe gli approcci e

confrontando i risultati ottenuti. Il confronto tra le due situazioni ha consentito di evidenziare in entrambe i casi le criticità idrogeologiche emergenti. Di seguito vengono quindi discussi i due “scenari piezometrici” e vengono successivamente descritte le motivazioni che hanno fatto ritenere come maggiormente rappresentativo lo scenario emergente dall’integrazione delle serie di monitoraggio del 2001-2002 e 2011-2013.

5.2.3. Piezometria nel settore dei gessi ricostruita utilizzando i soli dati dei piezometri utilizzati monitoraggio ambientale (2011-2013)

Come descritto nel paragrafo 3.5.3, i piezometri realizzati per il Monitoraggio Ambientale sono stati oggetto di misure di livello da Fino a Luglio 2013. La Figura 20 rappresenta la piezometria media ricostruita utilizzando i valori medi delle misure prese nel periodo 2011-2013.

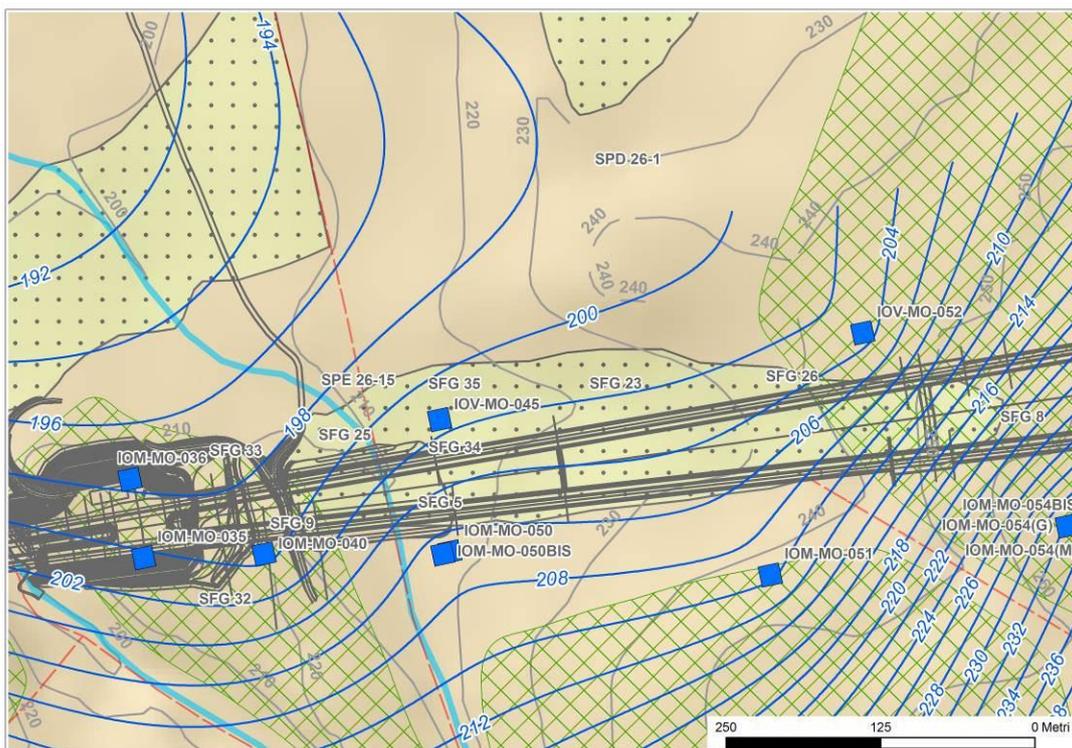


Figura 20. Ricostruzione della piezometria utilizzando i valori medi misurati nei piezometri appartenenti alla rete di Monitoraggio Ambientale (2011-2013); equidistanza 2 m.

Come si può vedere la superficie che emerge da questa ricostruzione ha un andamento circa monoclinale con direzione media verso NW-SE. Locali variazioni si osservano in corrispondenza al settore di Sud-Ovest e in quello di Nord-Ovest rappresentati in figura, ove i flussi sono rispettivamente diretti verso N e verso E. Si sottolinea come in questa rappresentazione non emergano né spartiacque, né assi di drenaggio idrogeologici.

5.2.4. Piezometria nel settore dei gessi ricostruita utilizzando l'insieme dei dati piezometrici riferiti alle campagne dal 2001 al 2013

L'integrazione dei valori medi ottenuti dalle serie di monitoraggio 2001-2002 e 2011-2013 produce la ricostruzione mostrata in Figura 21.

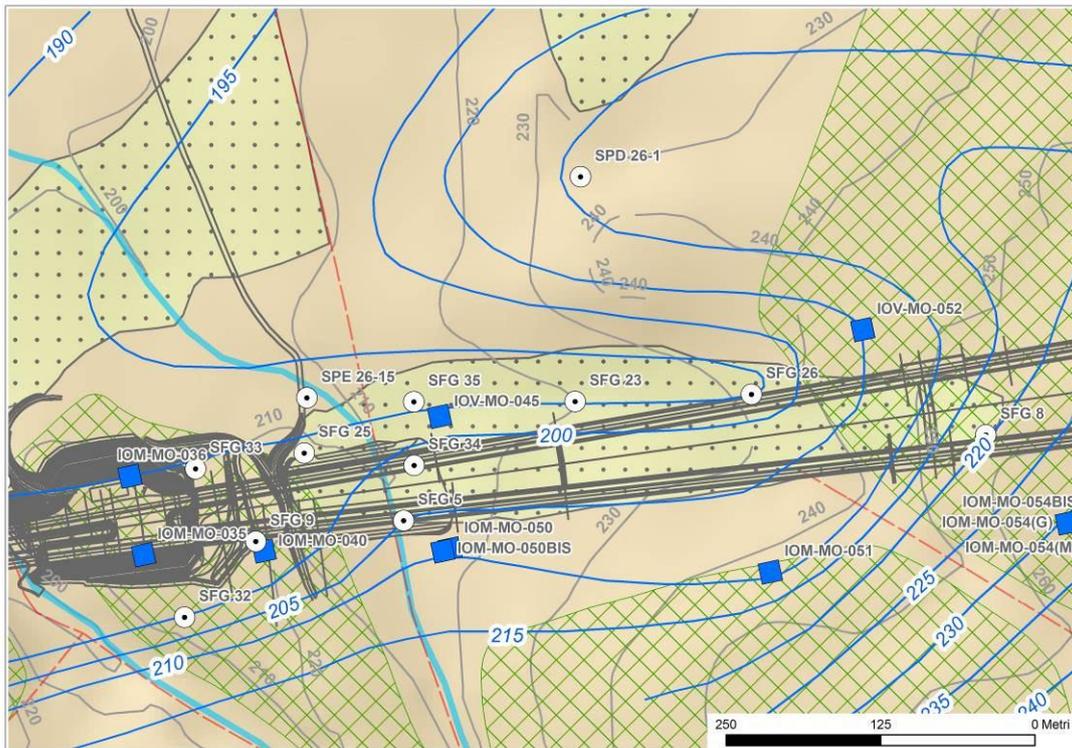


Figura 21. Ricostruzione della piezometria utilizzando sia i valori medi misurati nei piezometri appartenenti alla rete di Monitoraggio Ambientale (2011-2013), sia i valori del monitoraggio del 2001-2002; equidistanza 5 m.

Come si può osservare dal confronto tra la Figura 20 e la Figura 21, l'elemento di maggiore discordanza tra i due scenari ricostruiti riguarda la presenza, nel secondo scenario, di un'insenatura molto pronunciata della piezometria in corrispondenza del tracciato della canna di valle della futura Galleria di Verduno. Sostanzialmente, dalla ricostruzione di Figura 21 risulta una piezometria che nel settore della canna di valle risulta essere fino a 4-5 m più bassa di quella rappresentata in Figura 20. L'interpretazione del significato di questa particolare forma viene affrontata nel paragrafo 6.2.

5.2.5. Ricostruzione piezometrica di grande scala

Si specifica che il settore rappresentato in Figura 21 e in Figura 22 è l'unico in cui si denotano differenze significative di ricostruzione derivanti dall'utilizzo della sola serie piezometrica del Monitoraggio Ambientale o dall'integrazione di questa serie con quella del 2001-2002.

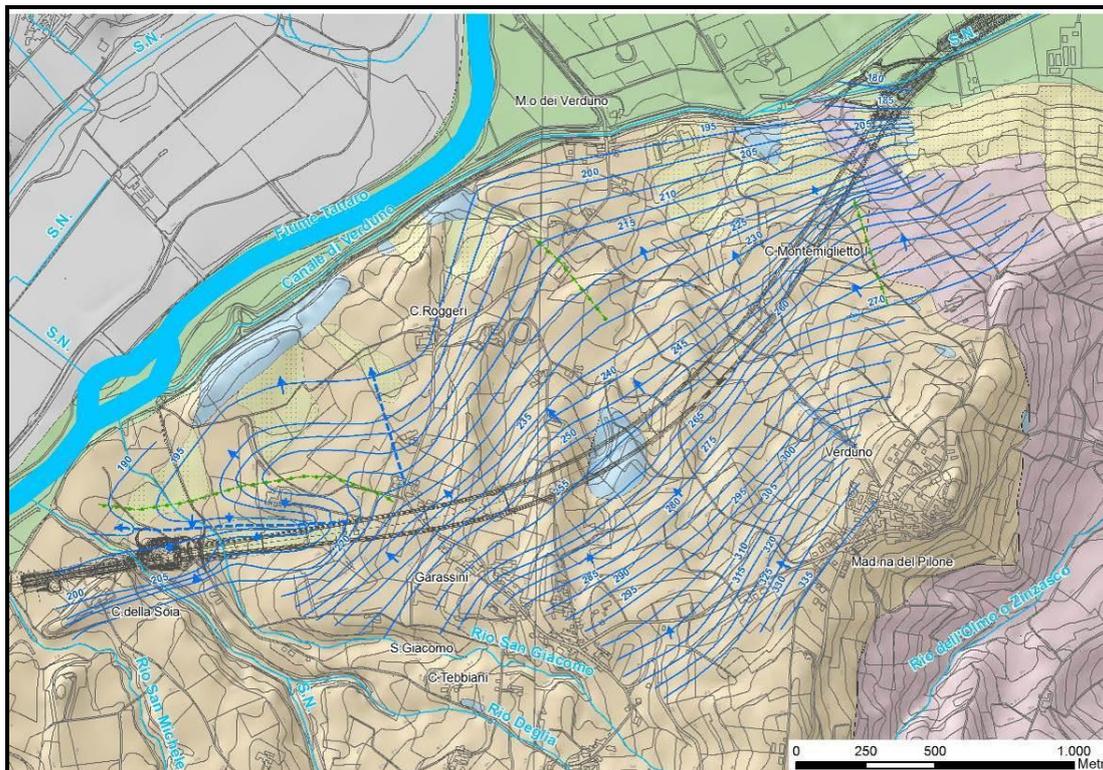


Figura 22. Ricostruzione della piezometria di falda dell'acquifero principale. Nel settore dei gessi è stata assunta la ricostruzione ottenuta dall'integrazione della serie di dati 2001-2013.

Dall'interpretazione dei dati piezometrici di grande scala emergono le seguenti considerazioni:

- la ricostruzione mostra come nel complesso la falda sembri essere caratterizzata da una continuità spaziale che è tipica degli acquiferi porosi. In altre parole, dall'interpretazione delle piezometrie non sono emerse particolari eterogeneità spaziali che avrebbero potuto far supporre che l'acquifero fosse frammentato in diversi sistemi di circolazione tra loro idraulicamente indipendenti (es. condotti carsici separati). Al contrario, la ricostruzione piezometrica mostra una falda la cui morfologia ricalca sostanzialmente la topografia del versante e che può essere pertanto attribuita ad un unico sistema acquifero interconnesso. La presenza di condotti parzialmente o completamente indipendenti è invece possibile a scala locale (non esistono tuttavia sufficienti indicazioni per una ricostruzione di tali condotti). Una possibile evidenza di questi circuiti isolati risiede nel fatto che alcune misure piezometriche eseguite in fori di sondaggio attigui, con fenestrature posizionate a profondità confrontabili, mostrano una diversa evoluzione temporale del livello.
- dalla morfologia della superficie piezometrica sono osservabili elementi riconducibili alla presenza di assi di drenaggio e di spartiacque idrologici. Sono osservabili due principali assi di drenaggio, ubicati nel settore Ovest in prossimità dell'imbocco della galleria lato Cuneo, uno a direzione ca. Est-Ovest ed uno a direzione ca. Nord-Sud; per la stretta relazione spaziale tra questi elementi e il tracciato della galleria, una loro analisi idrogeologica di dettaglio e la valutazione delle possibili ripercussioni derivanti dalla loro intercettazione da parte delle due canne viene discussa nel paragrafo 6.2. Si osserva, invece, solo una parziale corrispondenza tra gli assi di drenaggio desumibili dalla piezometria di falda e quelli ipotizzati a partire dalla distribuzione spaziale delle doline e degli inghiottitoi (cfr. § 5.2.1). Ciò potrebbe essere imputabile al fatto che non necessariamente gli allineamenti di doline osservabili in superficie

corrispondano ad effettivi assi di drenaggio sotterranei. Benché sia assai probabile che tali allineamenti corrispondano a forme carsiche sviluppatesi lungo direttrici strutturali preferenziali (fratture ecc.) è verosimile che fenomeni post-carsici di riduzione della permeabilità (es. presenza di materiali residuali fini) ne abbiano considerevolmente ridotto la capacità idraulica. E' altresì possibile che tali direttrici di origine carsica siano a loro volta connesse a un più diffuso reticolo di fratturazione o di microcarsismo esteso a tutto il loro intorno e che pertanto non determina evidenti incrementi di permeabilità a scala locale;

- le variazioni di gradiente idraulico osservabili lungo il versante sono attribuibili a variazioni di trasmissività dell'acquifero. Tali variazioni sono riconducibili sia ad un aumento o riduzione dello spessore dell'acquifero dei gessi sia alle eterogeneità spaziali delle permeabilità connesse al diverso grado di sviluppo dei condotti carsici;
- tranne alcuni limitati settori in cui la falda è confinata, per la presenza a tetto dell'acquifero dell'acquiclude costituito dal complesso 1b con la cui base localmente il livello d'acqua viene a contatto, alla scala del versante l'acquifero è a falda libera, poiché il livello d'acqua non raggiunge mai il tetto dell'acquifero. Questa situazione corrisponde ad uno stato medio della falda, da riferire a periodi in cui sono assenti fenomeni piovosi di particolare intensità. In concomitanza di fenomeni meteorici intensi il regime idrodinamico può mutare e in alcuni settori, specialmente quelli della parte bassa del versante, a causa di bruschi incrementi del livello d'acqua, la falda va in pressione in risposta al brusco incremento del tasso di alimentazione delle acque meteoriche percolanti direttamente nell'acquifero attraverso cavità carsiche superficiali.

5.2.6. Variazioni del livello piezometrico

Dal precedente paragrafo emerge che la distribuzione piezometrica di Figura 22 fotografa una situazione "media", quindi relativa ad uno stato della falda



rappresentativo di un periodo in cui non si sono verificati eventi piovosi di particolare entità, né vi è una situazione protratta nel tempo di mancanza di apporti meteorici.

Indicazioni sull'entità dell'oscillazione della falda possono invece essere ottenute valutando i dati del Monitoraggio Ambientale del sito, condotto tra l'ultimo trimestre del 2011 ed i primi tre trimestri del 2012. Dai piezometri con fenestratura nei gessi di cui si dispone di un intervallo di registrazione completo (ca. 1 anno), è stato osservato che la falda è soggetta ad oscillazioni annuali variabili da 1-2 m fino ad un massimo di 12 m. Dall'analisi delle misure complessive realizzate per il Monitoraggio Ambientale si può concludere che le oscillazioni maggiori di livello avvengono nel settore dell'imbocco Lato Cuneo, mentre nel resto dell'area le oscillazioni sono di minore entità, con valori di incremento o diminuzione del livello dell'ordine di 1-2 m rispetto al valore medio. Anche l'analisi dei dati piezometrici relativi al monitoraggio effettuato nel 2001-2002 (cfr. § 3.5.1) conferma un quadro delle variazioni piezometriche compatibile con quello sopra descritto.

Un'ulteriore indicazione sulle potenziali oscillazioni della falda successivamente al verificarsi di eventi piovosi di elevata intensità proviene dai dati derivanti dai piezometri a registrazione automatica installati dalla Regione Piemonte (cfr. Relazione Geologica del Progetto Definitivo per un maggiore dettaglio). Questi indicano che, a seguito delle elevate precipitazioni dell'anno 2000 si sono registrate variazioni repentine del livello medio di 1-2 m ad Aprile-Maggio e di 4 m ad Ottobre nel piezometro PS3-P3. Nel piezometro PS2-P4 si è registrato invece un brusco innalzamento di 7.5 m a Maggio 2000 e, successivamente ad un ritorno ai valori medi, questo è repentinamente risalito di 12 m a Giugno.

Oltre all'innalzamento causato da eventi piovosi intensi sono stati documentati fenomeni di *fontanamento* da parte di doline presenti alla base del versante, che hanno funzionato da "troppo pieno" del sistema di circolazione, lasciando defluire portate notevoli, come segnalato dal Servizio di Prevenzione del Rischio Idrogeologico della Regione Piemonte.

Va inoltre specificato che la serie di piezometri della rete di Monitoraggio Ambientale fenestrati esclusivamente nel substrato marnoso indica oscillazioni del livello di falda più contenute di quelle riscontrate nei gessi, dell'ordine di 1-5 m. Verosimilmente la minor permeabilità del complesso marnoso determina uno smorzamento delle variazioni di pressione indotte dagli impulsi cui è soggetto il soprastante acquifero gessoso.

5.3. CIRCOLAZIONE NELL'ACQUIFERO DELLE INTERCALAZIONI DETRITICHE

Questo acquifero (Complesso 2b) è costituito da sabbie e ghiaie e da sabbie limose con rare ghiaie intercalate nelle marne del substrato di S. Agata (generalmente nella parte alta della successione stratigrafica). Tali intercalazioni formano lenti di potenza da metrica a decametrica, con uno sviluppo areale presunto variabile da pochi metri fino a un centinaio di metri. I sondaggi di prospezione mettono in luce l'estrema variabilità d'estensione laterale delle lenti di materiale detritico, il che pone una difficoltà nella loro precisa ricostruzione spaziale. Sulla base dei numerosi sondaggi predisposti per la caratterizzazione di dettaglio del tracciato risulta infatti possibile una ricostruzione spaziale solo in senso longitudinale alla galleria, mentre questa è maggiormente incerta in senso trasversale alla galleria, poiché allontanandosi dal tracciato diminuisce il numero dei sondaggi e quindi le informazioni stratigrafiche.

Quel che appare evidente è che tali lenti compaiono esclusivamente nel settore centro-orientale dell'area di progetto, a profondità comprese tra 10 e 30 m dal piano campagna, mentre non ve ne è evidenza nel settore centro-occidentale. Nell'insieme l'assetto giaciturale segue la disposizione complessiva della morfologia collinare, immergendo debolmente verso N-NO.

I corpi detritici ospitano una falda idrica di tipo confinato: livelli di falda in pressione sono stati rilevati in tutto il settore compreso tra il Mulino di Verduno e Roddi. Le quote piezometriche raggiungono livelli anche superiori a quello della falda libera superficiale, disponendosi fino ad un massimo di 1-3 m al di sotto del piano campagna.

L'alimentazione della falda potrebbe avvenire attraverso il recapito diretto delle acque meteoriche nelle porzioni sub-affioranti di tale acquifero, peraltro poco note e presumibilmente localizzate nella parte alta del versante, nel settore del concentrico di Verduno. In alternativa questi acquiferi potrebbero ricevere acque circolanti lungo zone maggiormente fratturate o alterate, e quindi relativamente più permeabili, del substrato marnoso in cui si trovano imballate. Il chimismo delle acque che circolano in questo acquifero, tipicamente solfato-calcico (cfr. § 5.6) indica tuttavia che deve esistere una connessione idraulica con il sistema acquifero dei gessi, poiché acque di questo tipo non si giustificerebbero in assenza di scambi con questa unità idrogeologica. E' possibile che le lenti sabbioso-ghiaiose si trovino in contatto laterale (forse eteropico) con l'acquifero dei gessi e che possano pertanto avvenire degli scambi.

In sostanza il meccanismo di alimentazione di questo acquifero è poco noto; è anche possibile, ma verosimilmente poco probabile, che l'alimentazione sia molto limitata e che le lenti costituiscano delle sacche idrogeologicamente poco interconnesse con vere e proprie zone di ricarica e zone di recapito.

5.4. CIRCOLAZIONE NELL'ACQUIFERO DEI DEPOSITI DI FRANA E COLLUVIALI

I depositi di frana (Complesso 3a) e i depositi colluviali (Complesso 3b) costituiscono acquiferi di estensione relativamente limitata e distribuiti eterogeneamente sul versante del settore di progetto. Per quanto riguarda i depositi di frana, i principali tra questi sono stati cartografati in corrispondenza del settore Est del versante, in prossimità dell'imbocco lato Alba.

Nel settore centro-occidentale sono presenti coltri di depositi colluviali con spessori variabili da pochi metri fino a una decina di metri. Tali coltri ospitano circolazioni idriche pellicolari di rilevanza solo locale e di modesta entità, anche a causa della permeabilità media o medio-bassa che le caratterizza. Nel settore orientale del versante (zona dell'Ospedale e dell'imbocco lato Alba) affiora con continuità una coltre di depositi detritico-colluviali, misti ad accumuli



di frana, costituiti in prevalenza da terreni limoso-argillosi con intercalazioni a granulometria maggiore e frammenti di marne alterate. In questo settore i depositi colluviali in parte costituiscono il prodotto dell'alterazione in posto del substrato marnoso ed in parte rappresentano il prodotto del rimaneggiamento operato dalle acque di scorrimento superficiale. Nonostante le numerose indagini effettuate nell'ambito della progettazione della galleria (incluse quelle della campagna geognostica del 2011-2012) e gli studi realizzati per la progettazione delle opere di consolidamento del versante per la costruzione del Nuovo Ospedale di Alba-Bra, rimane la difficoltà di delimitare con chiarezza la superficie inferiore degli accumuli di frana. Questa difficoltà è determinata dal fatto che l'intero versante ha avuto una evoluzione complessa e polifasica dal punto di vista geomorfologico, con due grandi movimenti franosi che lo hanno interessato dai pressi del crinale spartiacque di Verduno sino al fondovalle del Tanaro. Di conseguenza, anche la localizzazione della base dell'acquifero impostato nei depositi di frana è incerta per gli stessi motivi.

Dalle indagini effettuate nell'area sembra in ogni caso probabile che nel settore del nuovo ospedale, e quindi nella zona dell'imbocco lato Alba, sia presente un acquifero che, oltre ai complessi 3a e 3b coinvolge anche parte del substrato marnoso, in linea di principio non acquifero (complesso 1a), ma che in questo settore, come già ricordato in precedenza, è interessato da uno stato di fratturazione anomalo, più intenso del normale e pertanto possiede una permeabilità relativamente elevata. In sostanza nel settore Ovest dell'area di progetto la base dell'acquifero presente nei complessi 3a e 3b non coincide con il tetto del substrato delle marne di S. Agata, ma include anche una parte delle marne medesime, fino a profondità non meglio precisabili sulla base dei dati disponibili.

Pertanto è anche importante notare che le marne fratturate riconducibili a questo acquifero superficiale rappresentano un elemento potenziale di connessione idraulica tra circuiti posti in posizione stratigrafica diversa. Ad esempio, è possibile che in questo acquifero, attraverso la fascia di fratturazione nelle marne, avvengano lateralmente degli scambi con l'acquifero nelle intercalazioni

detritiche profonde (complesso 2b), o addirittura, come già ipotizzato nel paragrafo 5.2, con l'acquifero dei gessi soprastante tali intercalazioni, che nel settore ovest tende a chiudersi. E' comunque possibile escludere che la circolazione idrica ospitata nei depositi di frana sia interamente veicolata in profondità attraverso le marne fratturate ed eventualmente anche verso le intercalazioni detritiche soggiacenti. Infatti, a monte dell'imbocco lato Alba della galleria sono presenti numerose sorgenti che ricevono un'alimentazione diretta dai depositi di frana e colluviali. Peraltro, le misure piezometriche realizzate alla base del versante indicano la presenza di due diverse falde acquifere, una ubicata nei depositi ad una quota prossima alla superficie ed una localizzata alla base dei depositi in prossimità del contatto con le marne. Falde poste a quote differenti indicano quindi che i sistemi di circolazione superficiali non sono connessi (oppure lo sono solo in parte) con quelli profondi.

5.5. CIRCOLAZIONE NELL'ACQUIFERO ALLUVIONALE DEL F. TANARO

Nel settore di fondovalle i depositi alluvionali limoso-sabbiosi e ghiaiosi del Tanaro (Complesso 4), a permeabilità medio-elevata, ospitano un sistema di circolazione a falda libera. Il limite inferiore dell'acquifero è rappresentato dalla superficie sommitale delle successioni argilloso marnose del substrato (Formazione Gessoso-Solfifera e Marne di S. Agata), il cui assetto deriva dagli intensi processi erosivi conseguenti alla diversione del corso del Tanaro. Il tetto del substrato si presenta modellato in una serie di ripiani, posti a quote decrescenti procedendo verso gli alvei attuali, e ricoperti completamente dalla successione alluvionale. Questa configurazione individua una serie di falde di modesto spessore (10 m al massimo), sviluppate soprattutto in sponda sinistra dove il fondovalle (e la successione ghiaioso-sabbiosa recente) risulta maggiormente estesa.

In sponda destra, al contrario, il maggiore sviluppo dei rilievi collinari si associa a più rilevanti apporti meteorici e ad un assetto morfologico-strutturale che consente una rilevante alimentazione del fondovalle, in particolare attraverso la valle laterale percorsa dal T. Talloria.

Nel settore di fondovalle la circolazione idrica sotterranea si svolge nell'ambito dei depositi alluvionali recenti e medio-recenti. La falda superficiale, libera, è alimentata dai contributi provenienti dal margine del rilievo, dalle piccole sorgenti al piede della collina e, in misura minore, dalle perdite dei canali.

Le caratteristiche della falda freatica sono in questo caso strettamente connesse all'equilibrio che si instaura tra il Fiume Tanaro e le acque provenienti dagli acquiferi profondi presenti in corrispondenza del versante collinare.

5.6. CARATTERISTICHE FISICO-CHIMICHE DELLE ACQUE SOTTERRANEE

Le caratteristiche fisico-chimiche delle acque sotterranee sono desumibili attraverso l'analisi dei dati di monitoraggio condotto tra il 2011 e il 2012. Come si può osservare dalla Figura 23, i valori di conducibilità elettrica sono tendenzialmente alti (compresi tra 1'000 e 3'000 $\mu\text{S}/\text{cm}$), ad indicazione dell'influenza esercitata dai processi di dissoluzione dei gessi e quindi dalla presenza di elevati tenori di solfato in soluzione.

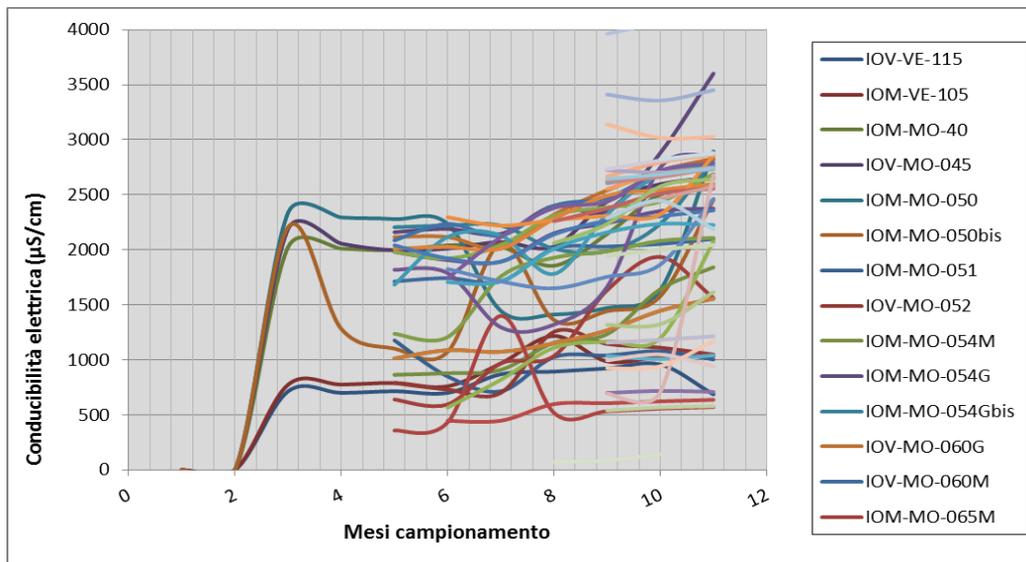


Figura 23. Variazioni delle conducibilità elettrica misurate attraverso i piezometri della rete di Monitoraggio Ambientale (Mesi di campionamento 2011-2012).

La Figura 24 mostra la distribuzione delle conducibilità elettriche medie relative al periodo di monitoraggio 2011-2012 nel settore dell'imbocco lato Cuneo. Si osserva che le conducibilità sono generalmente elevate e si attestano su valori

simili tra loro, compresi tra 2.000 e 2550 $\mu\text{S}/\text{cm}$. In questo settore anche i corsi d'acqua minori (Rio Deglia, San Giacomo e San Michele) presentano conducibilità più elevate (1400 ÷ 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) rispetto a quelle mediamente mostrate dai corsi d'acqua superficiali. Questo può significare che le acque di questi rii si caricano di ioni solfato scorrendo in alvei incisi direttamente nei gessi della Formazione Gessoso-Solfifera, oppure che questi rii rappresentano dei recettori in cui vengono recapitate almeno in parte le acque di circolazione sotterranea le quali si sono già caricate precedentemente di ioni solfato nell'acquifero dei gessi; dai valori prossimi di conducibilità tra le acque sotterranee e quelle superficiali sembra essere più probabile la seconda ipotesi.

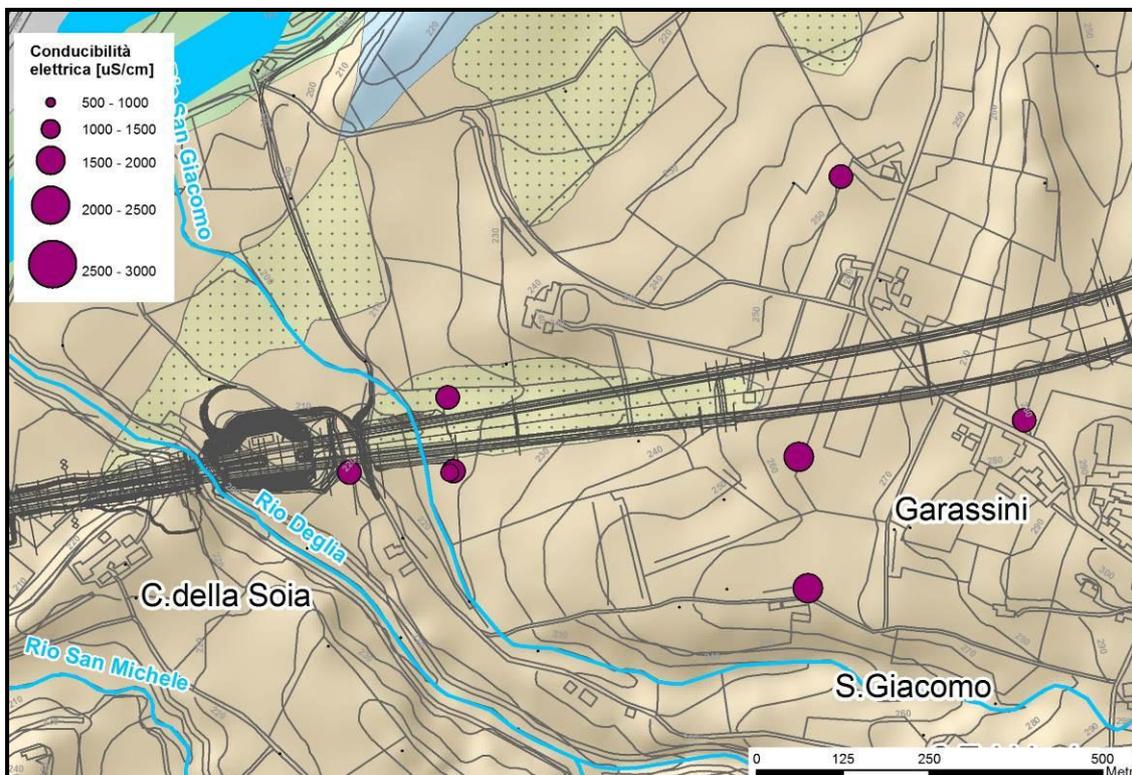


Figura 24. Distribuzione delle conducibilità elettriche medie dell'acqua di falda dalle misure dei piezometri fenestrati nei gessi.

Va specificato che valori simili di conducibilità sono stati misurati anche nell'acquifero delle intercalazioni detritiche (Complesso 2b), a testimonianza del fatto che probabilmente una buona parte dell'alimentazione di questi corpi proviene dall'acquifero dei gessi (cfr. § 5.3).

Ulteriori considerazioni relative alle caratteristiche fisico-chimiche delle acque sotterranee sono riportate nella Relazione Geologica ed Idrogeologica Generale del Progetto Definitivo (rif. 2.6 D-r B.1.1.1.). Da questo rapporto è utile riportare quanto descritto circa il quantitativo di solfati disciolti nelle acque, in quanto la concentrazione di tale anione può avere importanti risvolti sia per quanto riguarda l'aggressività delle acque sul calcestruzzo, sia per la stima del potenziale di dissoluzione delle acque nei confronti dei gessi. Dalle analisi svolte dai punti d'acqua presenti nel settore verso l'imbocco lato Cherasco emerge un valore di concentrazione prossimo ai 1500 mg/l (es. SFG9: 1500 mg/l; SPE26-15: 1500 mg/l; Rio Deglia: 1510 mg/l). Valori anche più elevati e prossimi ai 2000 mg/l sono stati misurati in corrispondenza di piezometri ubicati a maggiore distanza rispetto a questi (es. SFG1: 1650 mg/l; SFG19: 2010 mg/l). Considerando un valore medio di solfati pari a 1750 mg/l e un deflusso medio nella sezione di deflusso di 5 l/s (ottenuto attraverso il modello numerico, cfr. Capitolo 8) che interessa il settore di attraversamento della galleria nell'acquifero dei gessi è possibile ottenere, attraverso il calcolo della concentrazione molare dei solfati, la massa di solfato (gesso) disciolta in acqua e rimossa dall'acquifero appunto, per dissoluzione. Questa massa corrisponde ovviamente a un volume di gesso che viene sistematicamente rimosso con il trascorrere del tempo. In sostanza ciò significa che l'acquifero tende a perdere spessore, verosimilmente in maniera non omogenea, come testimoniano le evidenti forme epicarsiche e i vuoti incontrati con le perforazioni.

La stima di dissoluzione dei gessi in questa porzione di acquifero, fatta in ragione delle assunzioni precedenti è pari a 488×10^3 kg/anno.

Sulla base di questa stima è possibile fare due valutazioni sulla riduzione di spessore dell'acquifero dei gessi: una ottimistica ed una pessimistica.

1. La prima riguarda la possibilità che il flusso sia ripartito in maniera omogenea (i.e. mezzo perfettamente poroso) e che quindi anche la dissoluzione interessi in maniera omogenea l'acquifero. La stima effettuata indicherebbe in questo caso un'asportazione di gesso pari a 0.05 mm/anno (5 mm/100 anni);

2. La seconda riguarda la possibilità che il flusso sia prevalentemente canalizzato attraverso sistemi poroso-carsici ad elevata permeabilità. Rispetto a questo è chiaramente difficile ipotizzare l'estensione e la superficie complessiva. Ragionando in maniera abbastanza conservativa e assumendo che nell'acquifero possano esistere dei canali di maggior flusso (ca. 1/10 dell'estensione dell'intero acquifero) è possibile ipotizzare una dissoluzione che provoca un'asportazione di ca. 0.4 mm/anno (40 mm in 100 anni).

I valori sopra ricavati possono essere quindi considerati ragionevolmente come due end-members da utilizzare per la valutazione sulla stabilità d'insieme opera-ammasso sul lungo termine. Queste sono comunque da intendersi come valutazioni medie che non tengono conto dell'eventuale presenza di vere e proprie cavità carsiche in cui si sviluppa un flusso turbolento e, quindi, a cui sono associate problematiche ancora di tipo differente. Tenendo comunque conto che queste stime si basano su ragionamenti molto empirici, che hanno dei grossi margini di incertezza, è opportuno applicare un adeguato fattore di sicurezza a questo risultato. Viste le incertezze che stanno dietro il calcolo, un fattore di sicurezza ragionevole potrebbe essere pari almeno a 2. Quindi, riconsiderando il caso sopra discusso relativo alla situazione pessimistica è possibile stimare cedimenti massimi dell'ordine di 8-10cm/100 anni.

6. CARATTERIZZAZIONE IDROGEOLOGICA DI DETTAGLIO DELLE TRATTE DELLA GALLERIA

La revisione critica dei risultati degli studi effettuati per le precedenti fasi progettuali e l'integrazione dei rilievi di superficie con i risultati delle indagini geofisiche e geognostiche hanno consentito di effettuare una caratterizzazione idrogeologica di dettaglio delle diverse tratte del tunnel.

La caratterizzazione idrogeologica di dettaglio viene effettuata utilizzando lo stesso criterio adottato nelle altre relazioni relative alla Galleria di Verduno, ovvero suddividendo il tracciato delle gallerie principali in cinque tratte, corrispondenti a porzioni di ammasso con caratteristiche litologiche e geotecniche omogenee:

Codice	Descrizione
Settore 1	Imbocco lato Cuneo
Settore 2	Formazione gessi
Settore 3	Formazione marne
Settore 4	Intercalazioni di corpi detritici
Settore 5	Imbocco lato Alba

Relativamente alla canna di monte, la galleria naturale si sviluppa dalla progressiva 3+747.38 (lato Alba) alla progressiva 0+559.88 (lato Cuneo), per una lunghezza complessiva di 3187.50 metri. Relativamente alla canna di valle la galleria naturale si sviluppa dalla progressiva 1+159.02 (lato Alba) alla progressiva 4+263.60 (lato Cuneo), per una lunghezza complessiva di 3104.58 metri. In asse con le due canne è localizzato il cunicolo di lunghezza complessiva di ca. 400 m.

Le coperture della galleria aumentano gradualmente: dall'imbocco della galleria naturale lato Cuneo-Cherasco (pochi metri in corrispondenza dell'imbocco, 30 m a circa 500 m di distanza dall'imbocco) raggiungono valori compresi tra 40 e 95 m nel tratto centrale della galleria e infine diminuiscono progressivamente in corrispondenza dell'imbocco lato Asti-Alba (35 m a circa 300 m di distanza



dall'imbocco, fino a pochi metri in corrispondenza dell'imbocco della galleria naturale).

6.1. SETTORE 1 – IMBOCCO LATO CUNEO

L'imbocco lato Cuneo della Galleria di Verduno si colloca in un contesto morfologico caratterizzato da una vallecola poco incisa e aperta, con i portali delle due canne ubicati sul fianco in sinistra idrografica. L'asse della vallecola non è inciso da alcun corso d'acqua, mentre sono presenti due rii, il San Giacomo e il Deglia, che attraversano trasversalmente la vallecola in direzione ca. N-S. L'imbocco delle due canne interessa l'attraversamento di un primo tratto di coltri costituite da accumuli di frana e da depositi colluviali (Complesso idrogeologico 3a-b) e di un secondo tratto corrispondente al passaggio dalle coltri ai gessi (Complesso 2a). Questo settore interessa le progressive da pk 0+904 a pk 0+559.9 in canna di monte e da pk. 3+862.00 a progr. 4+263.60 in canna di valle.

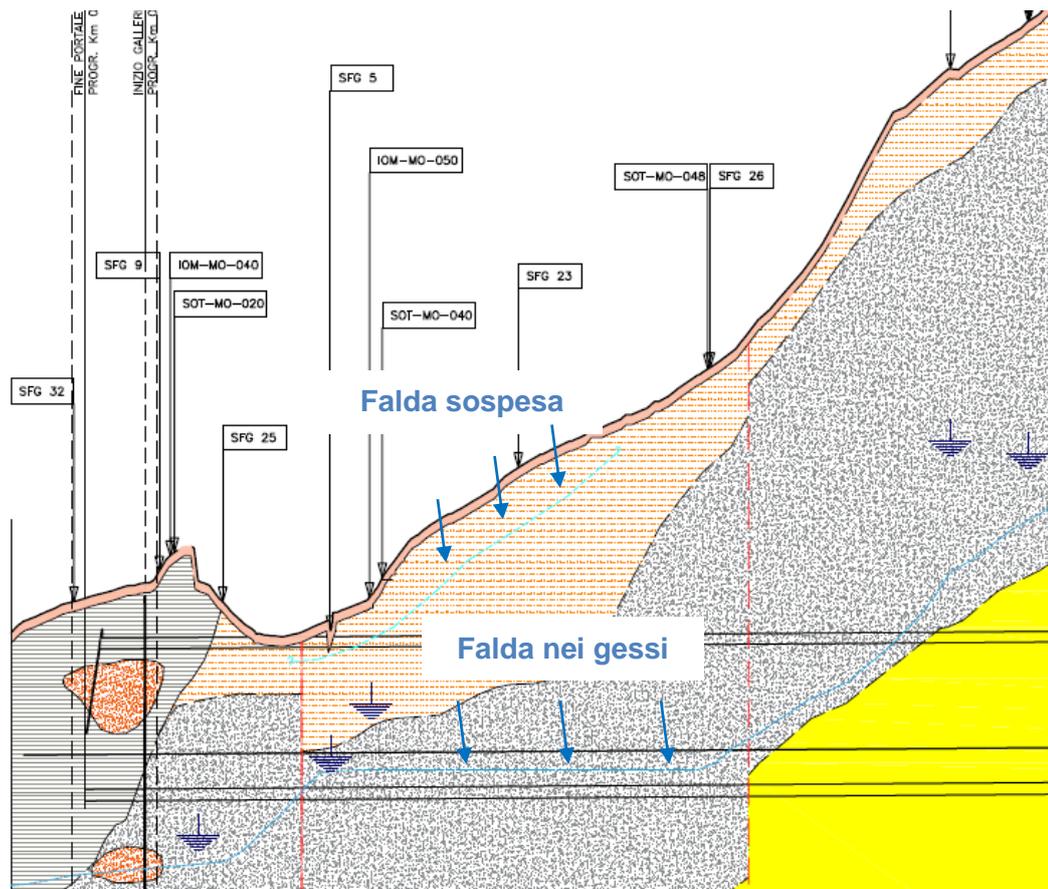


Figura 25. Rappresentazione del profilo geomeccanico della canna di monte nei settori dell'imbocco lato Cuneo e dell'attraversamento dell'acquifero dei gessi.

Nelle coltri dei depositi di frana e colluviali è presente dell'acqua interstiziale (Figura 25), che tuttavia non fa parte di un sistema di circolazione sviluppato ed alimentato con continuità. L'acqua è perlopiù presente in lenticelle corrispondenti a piccole falde sospese impostate nei limi sabbiosi e nelle argille limose. Tali circuiti sono alimentati direttamente dal sottobacino imbrifero rappresentato dalla vallecchia, peraltro con bassi tassi di infiltrazione a causa delle permeabilità ridotte dei terreni di copertura (es. la stratigrafia del sondaggio IOV-MO-045 mostra la presenza di prevalenti argille e argille limose).

Per quanto riguarda la falda profonda, invece, ad inizio lotto questa è impostata nei gessi (Figura 25) i quali sono ubicati a letto delle coltri detritico-colluviali. La canna di monte intercetta la falda dei gessi attorno alla pk 0+700, mentre quella

di valle rimane costantemente ad un livello superiore alla falda per l'intero settore di attraversamento. Procedendo lungo la canna di monte il livello di falda rimane costante su valori di 1-2 m sopra l'arco rovescio fino alla fine del settore di pertinenza (pk 0+904). Il motivo per cui in questa tratta si instaura un gradiente idraulico estremamente basso viene dettagliatamente descritto nel paragrafo successivo (§ 6.2), in quanto esso trova giustificazione nel particolare assetto idrogeologico che caratterizza i gessi a monte della tratta dell'imbocco.

Un aspetto molto importante da rimarcare riguarda l'entità delle oscillazioni attese del livello di falda dei gessi sul tratto dell'imbocco. Infatti, le misure piezometriche mettono in evidenza che tali variazioni possono essere in questo tratto molto consistenti, con escursioni dell'ordine di qualche metro.

Per valutare l'entità delle oscillazioni di falda in questo tratto sono stati considerati i piezometri con fenestrazione nei gessi di cui si dispone di un intervallo di registrazione completo (Ottobre 2011-Luglio 2013): piezometri IOM-MO-040, IOV-MO-045, IOM-MO-050, IOM-MO-050 bis. Oltre a questi è stato analizzato il piezometro IOV-MO-060 che, sebbene non sia di stretta pertinenza di questa tratta (per quanto collocato in un contesto idrogeologico simile e poco distante) mostra comunque delle oscillazioni di livello piezometrico simili a quelle degli altri piezometri e quindi risulta meritevole di un approfondimento. Il box-plot di Figura 26 mostra che il range di escursione dei valori non è lo stesso nei diversi piezometri, ma esso può variare da un minimo di 2-5 m (IOM-MO-040, IOV-MO-045), fino ad un massimo di 10 m (IOM-MO-050, IOM-MO-050 bis). Il piezometro IOV-MO-060 ha un range di oscillazione ancora più elevato con valori di 12 m. Dal box plot si può osservare che, rispetto alla mediana, le escursioni di maggiore entità sono quelle positive, con valori di incremento da 1 m (IOM-MO-040) fino a 8 m (IOV-MO-060).

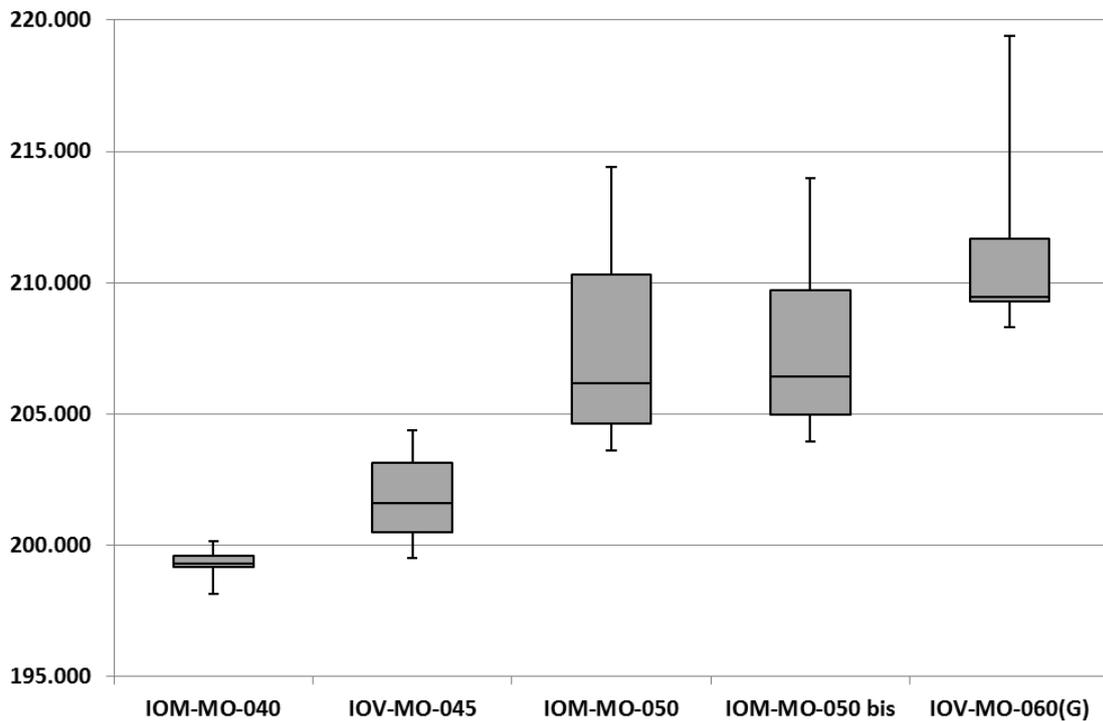


Figura 26. Box-plot delle oscillazioni piezometriche di 5 piezometri della rete di Monitoraggio Ambientale selezionati tra quelli con fenestratura nell'acquifero dei gessi. Valori rappresentativi del periodo 2011-2013.

Un'ulteriore indicazione sull'entità delle escursioni del livello di falda rispetto alla quota della galleria deriva dalle misure piezometriche effettuate nel 2001-2002 sui sondaggi all'imbocco. Ad esempio, nel settore dell'imbocco Lato Cuneo i piezometri SFG 8 e SFG 11 mostrano un range di variazione di 9-11 m, compatibile con le variazioni messe in evidenza dai piezometri della rete di Monitoraggio Ambientale.

In conclusione, dai dati sopra discussi emerge che il contesto idrogeologico dell'imbocco lato Cuneo è particolarmente dinamico e può registrare variazioni positive anche di 10 m (è possibile ipotizzare che in condizioni di piovosità molto intensa sia addirittura più elevato) rispetto al livello medio sopra descritto e riportato nei profili previsionali longitudinali (cfr. Figura 25 con illustrazione dei livelli di incremento registrati sulla canna di monte).

6.2. SETTORE 2 – FORMAZIONE GESSI

In questo settore le due canne della Galleria di Verduno attraversano interamente l'acquifero dei gessi (Complesso idrogeologico 2a). Sulla canna di monte l'attraversamento dei gessi è previsto tra la tratta compresa tra le pk 0+570 e 1+180 circa, mentre sulla canna di valle questo è previsto tra le pk 3+540 circa e 4+100 circa. Come si è discusso nei paragrafi 5.2.3 e 5.2.4. la piezometria di questo settore può essere rappresentata in maniera differente a seconda che vengano considerati i soli valori inerenti alla campagna di monitoraggio 2011-2013 o l'insieme di questi valori e quelli della campagna 2001-2002. Si ritiene che la rappresentazione derivante dall'integrazione dei dati delle due differenti campagne sia tuttavia quella maggiormente rappresentativa dell'effettivo stato della falda (Figura 27).

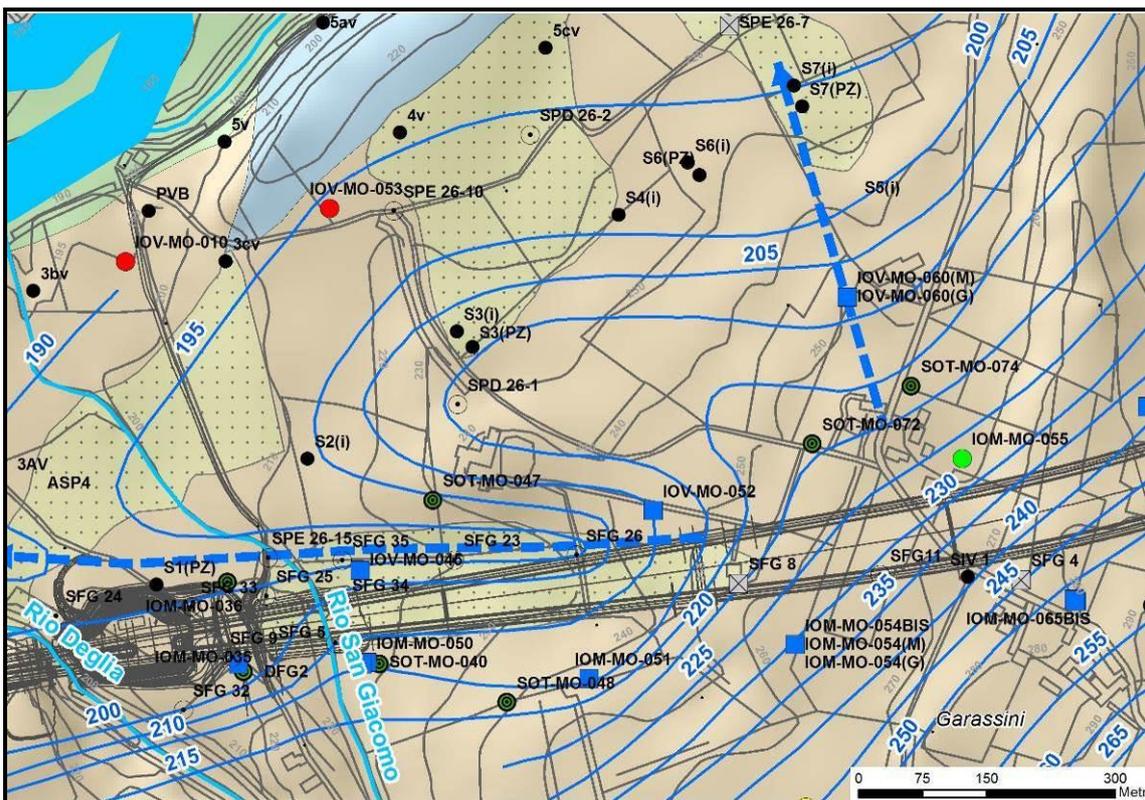


Figura 27. Distribuzione piezometrica nell'intorno del settore di attraversamento dei gessi ottenuta dall'integrazione della serie di monitoraggio 2001-2002 e 2011-2013.

Come discusso successivamente questa scelta è motivata da evidenze geologico-idrogeologiche e geofisiche che ben si accordano con la particolare distribuzione piezometrica ricostruita integrando le due serie di dati. Al contrario, una distribuzione piezometrica regolare come quella rappresentata in Figura 20, ricostruita considerando i soli dati del Monitoraggio Ambientale, è difficile da motivare in relazione alle eterogeneità geologico-strutturali evidenziate per il settore dei gessi e che di seguito verranno discusse.

Pertanto, alla luce di questa premessa, nel prosieguo si è deciso di fare riferimento unicamente alla piezometria rappresentata in Figura 27, ritenendola come quella più rappresentativa del settore indagato. Anche nella modellizzazione numerica discussa nel Capitolo 8 questa rappresentazione è quella che viene considerata come riferimento per la calibrazione; peraltro, come verrà accennato nel capitolo relativo alla modellizzazione, ai fini degli impatti sulla falda si è verificato che la scelta di una o dell'altra configurazione piezometrica non comporta sostanziali differenze.

Quindi, andando nel dettaglio di quanto emerge dalla ricostruzione piezometrica di Figura 27, si può notare come gli elementi più peculiari sono rappresentati da due assi di drenaggio, uno a direzione ca. Est-Ovest ed uno a direzione Nord-Sud. L'asse E-W è molto accentuato e rappresenta l'elemento idrogeologico principale di questo settore, in corrispondenza del quale il gradiente idraulico diminuisce di quasi un ordine di grandezza rispetto ai settori adiacenti, passando da valori del 10-20% a monte dell'asse di drenaggio a valori del 2-8%. Esso veicola i flussi provenienti in parte da Sud (a monte), da Nord (a valle corrispondente ad un settore di alto topografico) ed in parte da Est, canalizzando in direzione Ovest il deflusso con un probabile recapito nell'acquifero dei depositi alluvionali del Tanaro (Complesso 4).

Già negli studi precedenti effettuati nell'ambito della progettazione della galleria era stata messa in evidenza la presenza di anomalie piezometriche in quest'area. Nel profilo geomeccanico longitudinale del Progetto Definitivo la piezometria nella zona è stata rappresentata con una faglia che separa due blocchi caratterizzati da differenti livelli di falda (cfr. canna di monte in Figura

28). In questa rappresentazione, pertanto è implicitamente assunto che esista una compartimentazione idraulica da parte della faglia, la quale avrebbe quindi il ruolo di mantenere separati i sistemi di circolazione provenienti da Est e da Sud (cfr. Figura 29 per la raffigurazione in pianta della faglia a direzione NW-SE). La ricostruzione fornita nel presente rapporto contrasta evidentemente con la rappresentazione utilizzata nel Progetto Definitivo.

Questa situazione richiede di essere esaminata attentamente attraverso il confronto dei diversi dati disponibili, specialmente per le ricadute che diverse ricostruzioni idrogeologiche potrebbero avere sullo scavo della galleria in termini di venute d'acqua ed eventuali ripercussioni in superficie, quali ad esempio sprofondamenti (*sinkholes*). Infatti, in uno scenario di scavo della galleria dall'imbocco lato Cuneo, il superamento di una barriera idraulica quale sarebbe la faglia prospettata nel Progetto definitivo, esisterebbe la problematica indotta da un passaggio repentino da una zona con carichi idraulici bassi ad una con carichi alti. Ciò potrebbe provocare venute improvvise, con rischi per la sicurezza delle maestranze. Allo stesso tempo, una riduzione pressoché istantanea delle pressioni neutre dell'acquifero potrebbe determinare cedimenti in superficie o persino l'innesco di fenomeni gravitativi.

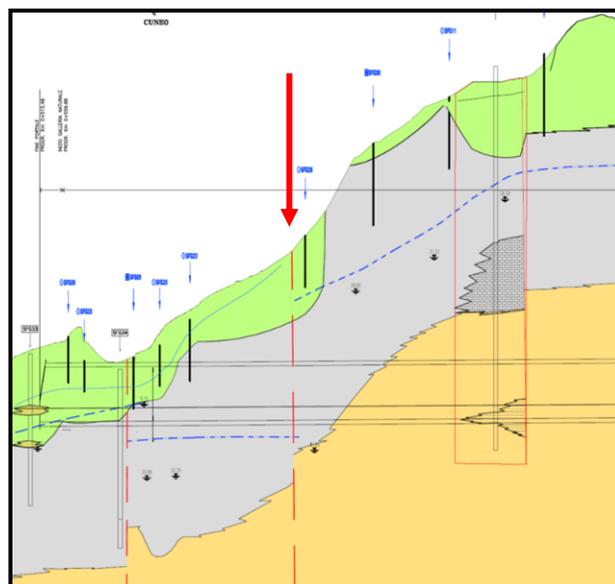


Figura 28. Profilo Geomeccanico del Progetto Definitivo con indicazione della faglia (freccia rossa) in corrispondenza della quale è stato ipotizzata la presenza di un presunto salto piezometrico.

L'ipotetico salto idraulico evidenziato nel Progetto Definitivo è stato peraltro oggetto delle prescrizioni del DEC VIA 576/2011, che ha espressamente richiesto un approfondimento di tale contesto cercando evidenze che potessero confermare o smentire una situazione di questo tipo¹.

Il monitoraggio sistematico dei numerosi piezometri che sono stati realizzati in questa zona nell'ambito della campagna di indagini geognostiche del 2011-2012 ha consentito un notevole approfondimento dell'assetto idrogeologico di questo settore, migliorando il quadro delle conoscenze disponibili.

Il problema dell'esistenza di un salto piezometrico è stato rivalutato nel corso del Progetto Esecutivo attraverso il confronto dei seguenti aspetti:

1. ricerca di evidenze nella ricostruzione piezometrica di indizi idrogeologici compatibili con la presenza di una barriera idraulica;
2. analisi delle stratigrafie di questo settore per una caratterizzazione qualitativa delle caratteristiche idrauliche dei gessi;
3. analisi dei risultati delle indagini geofisiche svolte in corrispondenza di questo settore.

¹Dal DEC VIA 576/2011: "...I profili geologici delle due canne della galleria naturale, per contro evidenziano un considerevole dislivello della piezometria dell'acquifero impostato nei gessi tra i sondaggi SFG8 e SFG26 dove il gradiente subisce un incremento di un ordine di grandezza [...] questo dato potrebbe comunque stare a significare la presenza di condotti carsici e di acqua in pressione proprio nel tratto dove lo scavo attraversa i gessi."; Prescrizioni: "...dovrà essere definito un quadro più completo sulla circolazione idrica tra i sondaggi SFG23 e SFG11, eventualmente con la perforazione di nuovi sondaggi esplorativi, per verificare il salto idraulico e di conseguenza prevedere conseguenti venute d'acqua durante lo scavo."

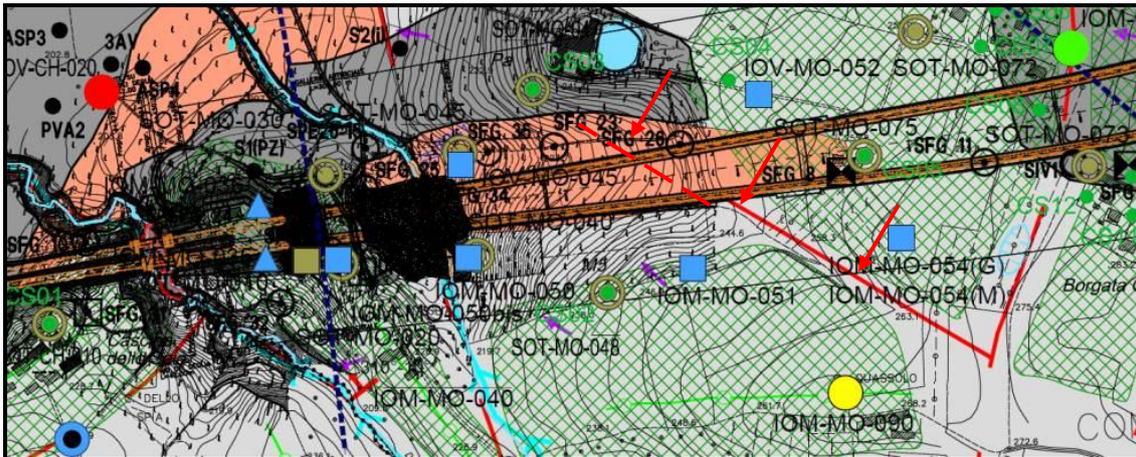


Figura 29. Ubicazione in carta della presunta faglia NW-SE lungo la quale è stato ipotizzata la presenza di un salto piezometrico.

Per quanto attiene al punto 1, la piezometria ricostruita non evidenzia di per sé dei trend riconducibili alla presenza di una barriera idraulica a direzione NW-SE. Per dare maggiore consistenza a quest’osservazione è stato effettuato un confronto delle oscillazioni piezometriche nei sondaggi ubicati sui due lati della faglia presunta che nel Progetto Definitivo era ritenuta all’origine della repentina variazione di livello d’acqua. Infatti, se la faglia avesse un comportamento compartimentante con molta probabilità ci si dovrebbe aspettare di osservare variazioni piezometriche di tipo differente sui due lati, in ragione dell’esistenza di due aree di alimentazione indipendenti. Il confronto è stato effettuato tra i piezometri IOV-MO-052, e SFG 26 ubicati ad Est della faglia e i piezometri IOM-MO-051 e SFG 23 ubicati ad Ovest; il periodo di confronto è relativo al periodo 2001-2002 e 2011-2012, rispettivamente per i piezometri SFG e quelli della rete di Monitoraggio Ambientale (IOV-MO e IOM-MO). Dalla Figura 30 si può osservare che i piezometri collocati sui due lati della faglia hanno un’evoluzione piezometrica simile, ad indicazione del fatto che essi sembrano misurare il livello idrodinamico di un medesimo sistema di circolazione. In particolare è molto significativo il fatto che oltre all’esistenza di una stretta correlazione temporale nelle variazioni è anche visibile una forte correlazione a livello di entità della variazione, cosa che sarebbe piuttosto eccezionale per

piezometri che monitorano sistemi di flusso separati e con aree di alimentazione di diversa estensione.



Figura 30. Confronto dell'evoluzione piezometrica tra piezometri selezionati sui due lati della presunta faglia.

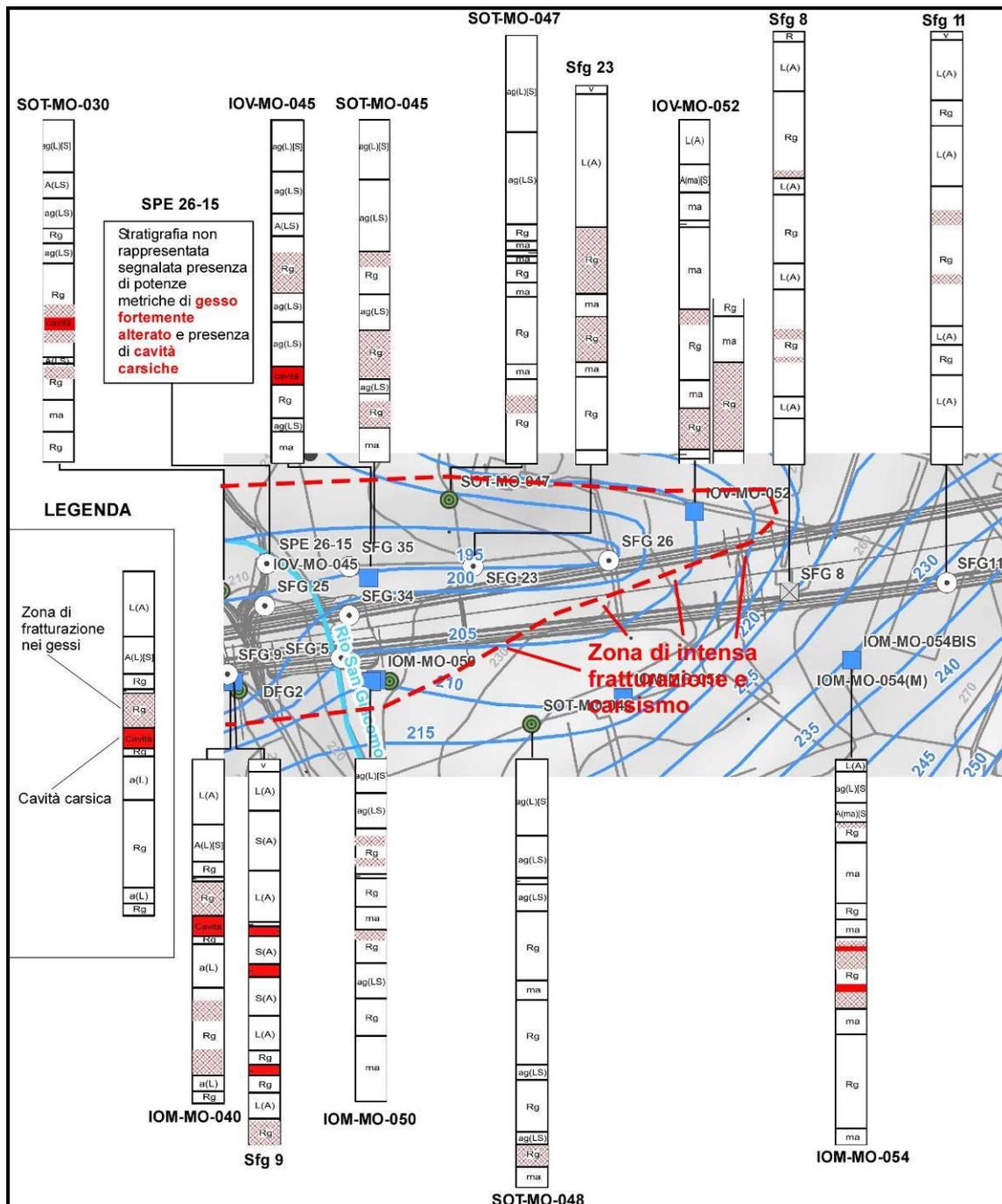


Figura 31. Illustrazione schematica di alcune stratigrafie di sondaggio nel settore dei gessi. La linea rossa tratteggiata demarca una zona in cui all'interno i gessi sono intensamente fratturati e soggetti a fenomeni di dissoluzione carsica.

Per quanto attiene al punto 2, le stratigrafie di sondaggio del settore circostante il settore in questione mostrano la presenza diffusa di un'intensa fratturazione e

di numerose cavità carsiche (Figura 31). Ciò sembra essere maggiormente compatibile con una zona diffusa di allentamento (probabilmente per dissoluzione) dell'ammasso roccioso, piuttosto che non per la presenza di una faglia discreta. Inoltre, lungo l'asse di drenaggio ipotizzato nel presente rapporto, le stesse stratigrafie evidenziano come il letto dell'acquifero tenda ad abbassarsi da Est verso Ovest, favorendo ulteriormente la variazione graduale del gradiente piezometrico ipotizzata nel modello del presente rapporto che non prevede la presenza di faglie compartimentanti (cfr. profilo di Figura 25).

Per quanto infine attiene al punto 3, ulteriori indicazioni relative all'assetto strutturale di questo settore derivano dalle indagini geofisiche svolte nell'ambito degli studi per il Progetto Esecutivo (cfr. § 3.3).

Le indagini geofisiche svolte nel settore dell'imbocco lato Cuneo mostrano l'evidenza di alcune anomalie. Ad esempio, dal confronto delle immagini di tomografia sismica lungo lo stendimento J e A (questa corrispondente alla posizione dell'asse di drenaggio) è possibile osservare come, da monte a valle vi sia una tendenza all'approfondimento della zona a maggiore velocità (Figura 32). Non avendo l'anomalia di minore velocità una conformazione regolare, ma essendo piuttosto caratterizzata da una forma lobata, essa può essere verosimilmente associata alla presenza di cavità carsiche. Anche nelle indagini di geoelettrica eseguite nella stessa area sono apprezzabili anomalie analoghe a quelle osservate con i profili di velocità e presumibilmente riferibili alla presenza di cavità carsiche.

In conclusione, dal confronto dei dati piezometrici, stratigrafici e dalle indagini geofisiche non emergono elementi tali da confermare la presenza di una faglia con comportamento idraulico compartimentante.

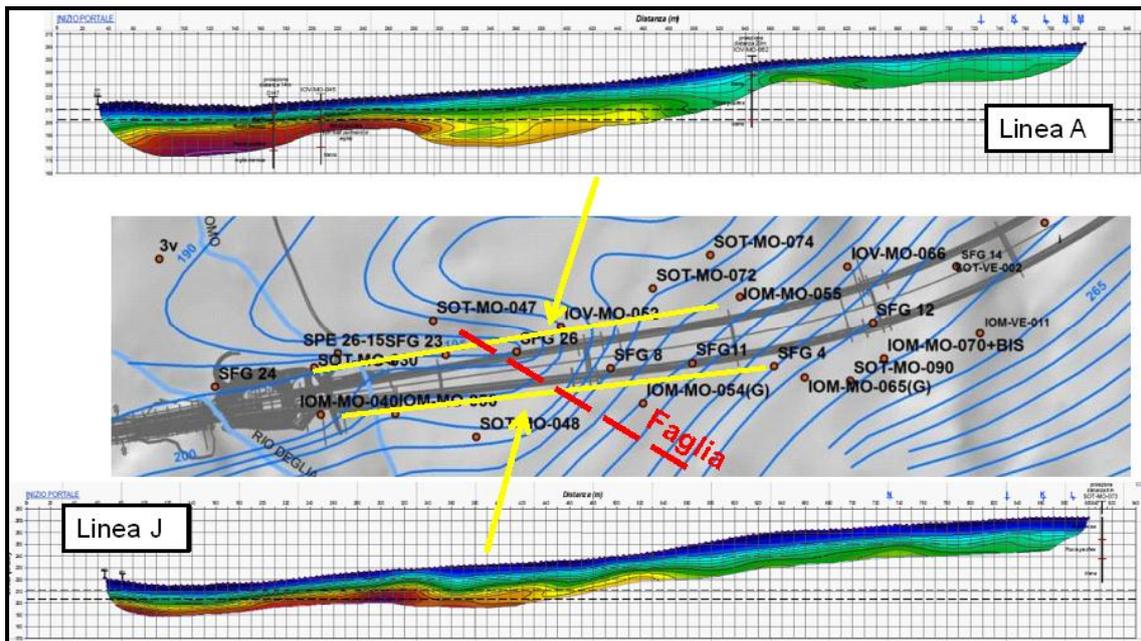


Figura 32. Profili di tomografia sismica relativi a linee di indagine tracciate a monte (Linea J) della canna di monte e a valle (Linea A) della canna di valle.

Va comunque detto che l'originaria interpretazione del Progetto Definitivo di un salto piezometrico connesso alla presenza di una faglia era basata su un numero di dati minore rispetto a quello disponibile nell'attuale studio. Le evidenze emergenti dal confronto dei numerosi dati disponibili permettono quindi di attribuire, con ragionevole certezza, le variazioni piezometriche riscontrate nel settore dei gessi alla presenza di una zona di dissoluzione con materiale residuale maggiormente conduttiva e con possibile esistenza di un reticolato di condotti microcarsici o carsici, probabilmente sviluppatosi in corrispondenza a zone di fratturazione. La zona di dissoluzione funge da asse di drenaggio, veicolando il deflusso di falda da Est a Ovest sul fondovalle del Fiume Tanaro e nei tratti inferiori dei Rii San Michele e Deglia. Va rimarcato che anche la modellizzazione numerica conferma questo quadro interpretativo (cfr. § 8.3), in quanto, per ottenere una calibrazione soddisfacente della piezometria in quest'area è stato necessario inserire una fascia a direzione Est-Ovest con valori di conducibilità idraulica molto elevati (fino a 1×10^{-2} m/s). Similmente a quanto descritto per questa fascia Est-Ovest, anche l'asse di drenaggio ad

orientazione Nord-Sud mostrato in Figura 27 è probabilmente associato ad una fascia di dissoluzione di maggiore permeabilità.

Dal punto di vista dello scavo la previsione è che mentre la canna di valle attraverserà la parte intermedia ed alta dell'asse di drenaggio Est-Ovest, quella di monte rimarrà esterna ad essa; le stratigrafie di sondaggio indicano che comunque lo scavo della canna di monte interesserà una zona di intensa fratturazione e carsismo.

Alla luce delle precedenti considerazioni emerge comunque che l'attraversamento del settore dei gessi comporterà una serie di precauzioni in fase di scavo (cfr. descrizione § 10.4) e anche la consapevolezza che, a fronte delle pur numerose indagini svolte e dello studio idrogeologico dettagliato realizzato, non è tuttavia possibile escludere del tutto che il tunnel intercetti cavità carsiche sature d'acqua e contenenti sedimenti fini intrappolati. Ciò vale anche per settori di galleria che teoricamente saranno ubicati sopra il livello d'acqua dell'acquifero carsico, poiché sacche d'acqua isolate o sifoni presenti in cavità non connesse con la parte preponderante del sistema idrogeologico potrebbero esistere, seppur ciò sia ritenuto assai poco probabile. In tal caso si potrebbero verificare svuotamenti repentini e violenti delle sacche d'acqua da evitare con monitoraggi sistematici in avanzamento.

In condizioni di assenza di precipitazioni importanti, il battente idraulico sulla canna di monte si attesta per un lungo tratto (pk 0+700-0+970) su valori pressoché costanti corrispondenti a 2-3 m sopra la quota di progetto della base scavi. In prossimità dell'intersezione con il limite gessi-marne il battente idraulico nell'acquifero si innalza raggiungendo valori di 2 m sopra la calotta della galleria. La canna di valle invece intercetta la falda acquifera ad una progressiva più avanzata rispetto alla canna di monte (verso la pk 3+850 ca) e per un tratto piuttosto esteso del tracciato il livello di falda si colloca al di sotto della base scavi. Questo è dovuto al fatto che la canna di valle si trova in posizione prossima all'asse di drenaggio Est-Ovest, il quale esercita un controllo sul sistema di circolazione abbattendo significativamente il livello d'acqua.



Come per il settore di scavo descritto precedentemente, anche in questo settore sono possibili variazioni significative e repentine di livello piezometrico. Infatti, nell'area delle due canne le misure piezometriche indicano che incrementi di livello superiori anche ai 10 m possono verificarsi in seguito ad eventi piovosi di una certa importanza. Pertanto, il livello piezometrico incontrato durante lo scavo può essere diverso da quello definito nei profili previsionali se nel corso dell'avanzamento si verificano precipitazioni intense o prolungate; in questo caso costituiscono un riferimento i punti indicati nei profili di massima escursione registrata nel corso del monitoraggio (cfr. Figura 25).

Per quanto riguarda la previsione dei possibili impatti del drenaggio della cunicolo sulla falda dei gessi si rimanda al paragrafo della modellizzazione numerica (§ 8.3), nel quale tali effetti sono stati oggetto di un'analisi quantitativa.

Un ulteriore aspetto che è stato considerato riguarda la stabilità della galleria di Verduno sul lungo termine. Questa valutazione va effettuata considerando che i conci della galleria costituiscono elementi rigidi interconnessi attraverso delle guarnizioni elastiche a tenuta idraulica. Tali guarnizioni hanno una tolleranza che consente uno spostamento relativo tra conci al massimo di qualche centimetro (fino a 5-6 cm), superata la quale si può verificare la rottura delle stesse. Un fenomeno che non va quindi escluso a priori è quello che nel corso del tempo le porzioni di acquifero sottostanti la galleria siano soggette ad una progressiva dissoluzione dei gessi tale da comportare una riduzione del volume dell'ammasso e quindi potenziali cedimenti differenziali che potrebbero risultare deleteri per il rivestimento e per i suoi elementi di giunzione.

Una stima dell'effettiva potenzialità dell'acquifero di essere soggetta a fenomeni di dissoluzione di entità tale da provocare questi fenomeni è stata fornita al paragrafo 5.6.

6.3. SETTORE 3 – FORMAZIONE MARNE

L'attraversamento delle marne del substrato (Complesso Idrogeologico 1a) interessa un lungo tratto della Galleria di Verduno, separato da una tratta intermedia (Settore dei corpi detritici) in cui compaiono lenti ghiaioso-sabbiose intercalate nelle marne. Sulla canna di monte l'attraversamento della marne è previsto tra la tratta compresa tra le pk 1+180 e 2+760 (ad Ovest delle intercalazioni) e le pk 3+655 e 3+400 (ad Est). Sulla canna di valle le marne sono previste tra la tratta compresa tra le pk 2+360 e 3+540 (ad Ovest delle intercalazioni) e le pk 1+340 e 1+620 (ad Est).

Dal punto di vista idrogeologico tale tratta non presenta particolari criticità, ad esclusione delle prime decine di metri dal passaggio dall'acquifero dei gessi. Infatti, in corrispondenza del primo tratto di questo settore è possibile che le marne risentano indirettamente delle fenomenologie carsiche che interessano l'acquifero dei gessi. In pratica, non è possibile escludere che lo scavo della galleria attraverso i primi metri delle marne, in cui la copertura è ridotta, possa determinare il rilascio improvviso di acqua circolante attraverso condotti carsici alla base dell'acquifero dei gessi oppure intrappolata in cavità chiuse e separate dal sistema di circolazione.

Nel resto della tratta della marne invece non si ravvisano particolari criticità, anche perché le maggiori cavità carsiche si localizzano sempre a quote significativamente superiori alle gallerie (10 ÷ 20 m al di sopra della calotta) e in questo caso non sono coinvolte direttamente dagli scavi. Peraltro, la permeabilità delle marne è bassa e, di conseguenza, anche i deflussi previsti nella galleria sono previsti di piccola entità (cfr. paragrafo previsione portate).

In compenso, si prevede che i battenti idraulici insistenti sulle due canne della galleria siano piuttosto alti, sebbene variabili in funzione della profondità del tetto del substrato. Dal settore dei gessi, nei primi tratti delle due canne attraverso le marne i battenti sono dell'ordine di 4-5 m, ed aumentano a 45-50 m nel tratto di spartiacque della galleria, raggiungendo valori massimi di quasi 60 m nel tratto precedente l'attraversamento del settore dei corpi detritici (cfr. paragrafo successivo). Dopo l'attraversamento del settore dei corpi detritici i

battenti si diminuiscono progressivamente da 50 m fino ad un abbattimento totale in corrispondenza del passaggio con il settore dell'imbocco lato Alba.

6.4. SETTORE 4 – INTERCALAZIONI DI CORPI DETRITICI

L'attraversamento di questo settore comporta lo scavo di lenti di materiale ghiaioso-sabbioso e sabbioso-limoso (Complesso Idrogeologico 2b) intercalate nelle marne del substrato. Per la canna di monte è previsto che le lenti ghiaioso-sabbiose siano attraversate dal tracciato o si trovino poco sopra di esso tra le pk 2+760 e la 3+400 circa; per la canna di valle la zona di pertinenza di queste lenti è prevista tra le pk 1+620 e 2+360 circa.

Si ricorda che per queste lenti non vi è un riscontro diretto in affioramento; esse sono state ricostruite spazialmente attraverso i numerosi sondaggi che le hanno intercettate in prossimità del tracciato della galleria: SFG 2, SFG 6, SFG 18, SFG 19, SFG 20, IOV-VE-046, IOV-VE-040(M) e IOV-VE-075(M), IOM-VE-045 (Figura 33); inoltre, esse sono state riconosciute attraverso il sondaggio SPE 26-14 nel settore sommitale della collina (nei pressi dell'abitato di Verduno) e dal sondaggio effettuato nell'ambito degli studi realizzati dalla Provincia di Cuneo per la progettazione della strada di collegamento al Nuovo Ospedale Alba – Bra.

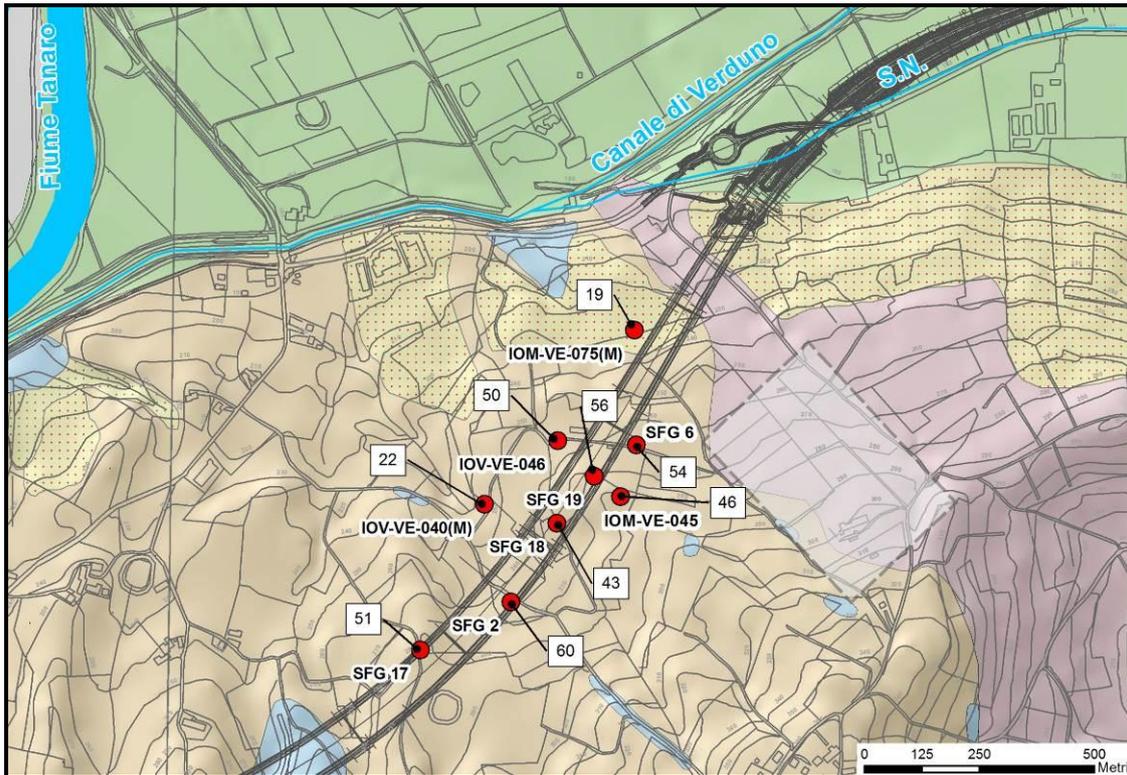


Figura 33. Carta con ubicazione dei piezometri con fenestrazione nelle intercalazioni detritiche. Il valore riportato è relativo al carico idraulico medio [m] misurato rispetto alla quota di progetto della galleria.

Lo spessore complessivo delle lenti rilevato tramite sondaggio varia da 2 m a 20 m circa e, come si può osservare anche dai profili geologici e geomeccanici allegati, esse sono fortemente eterogenee lateralmente. Lungo il profilo della canna di monte sono state ricostruite due intercalazioni. Una con una lunghezza di poco meno di 300 m è prevista essere intersecata dallo scavo, mentre l'altra con un'estensione complessiva di ca. 500 m, è ubicata poco sopra la calotta. Lungo il profilo della canna di valle invece i sondaggi hanno dato evidenza della presenza di un numero maggiore di corpi, singolarmente meno estesi di quelli precedenti.

I corpi detritici ospitano falde in pressione con quote piezometriche anche superiori alla falda libera superficiale, con valori fino a 1 - 3 m dal piano campagna. La Figura 33 riporta i valori di carico idraulico medio misurato in ciascun piezometro e previsti alla quota della galleria. Come si può osservare, i



valori attesi di carico sono elevati e compresi tra ca. 20 e 60 m dalla quota di progetto. Non è possibile stabilire dai dati piezometrici quale sia il grado di interconnessione idraulica di questi corpi e pertanto non risulta facile effettuare una stima precisa di quanto il drenaggio da parte della galleria possa interessare tali corpi e a quale distanza si possa estendere la perturbazione innescata dal drenaggio; si tenga conto che la ricostruzione spaziale dei corpi detritici è relativamente incerta in senso trasversale alla galleria, a causa del minor numero di sondaggi, e quindi di informazioni stratigrafiche, presenti verso monte del versante.

In ogni caso, è importante sottolineare che questi corpi rappresentano un elemento di criticità idrogeologica per le problematiche che la loro intercettazione da parte della galleria comporta a livello di spinte idrostatiche sul materiale di riempimento della camera di confinamento della TBM, nonché di possibili venute d'acqua (in caso di superamento della pressione massima di confinamento del fronte) e di possibile dilavamento di materiale fine.. Va inoltre rimarcato che se la galleria agirà da elemento impermeabile essa potrà originare dei fenomeni di riduzione della sezione di deflusso all'interno delle lenti, con eventuale conseguente aumento dei battenti idrici a monte. Questi effetti sono tuttavia difficilmente stimabili, poiché non è chiara l'entità del flusso all'interno dei corpi detritici.

In questo settore, oltre alla falda (verosimilmente in pressione e appartenente a un sistema isolato) delle intercalazioni detritiche, sono presenti altri sistemi di circolazione più superficiali. Il principale tra questi è il sistema ospitato negli accumuli misti di frana relativi ai due grandi movimenti franosi che hanno interessato questa porzione di versante (Complesso Idrogeologico 3a). Questi depositi sono frammisti a coltri di depositi colluviali (Complesso 3b) e sono sede di circolazioni con carattere permanente, alimentate direttamente dagli apporti meteorici. Il sistema di flusso dei depositi del complesso 3, come già ricordato al paragrafo 5.2.1, sembra essere in continuità idrodinamica laterale con il sistema di flusso presente nel complesso 2° dei gessi, sebbene abbia delle caratteristiche di permeabilità differenti. La ricostruzione piezometrica fornita

nella Carta Idrogeologica allegata e riproposta in Figura 34 evidenzia questa continuità, in quanto la falda attraversa in continuità sia l'acquifero dei gessi che quello dei depositi di frana.

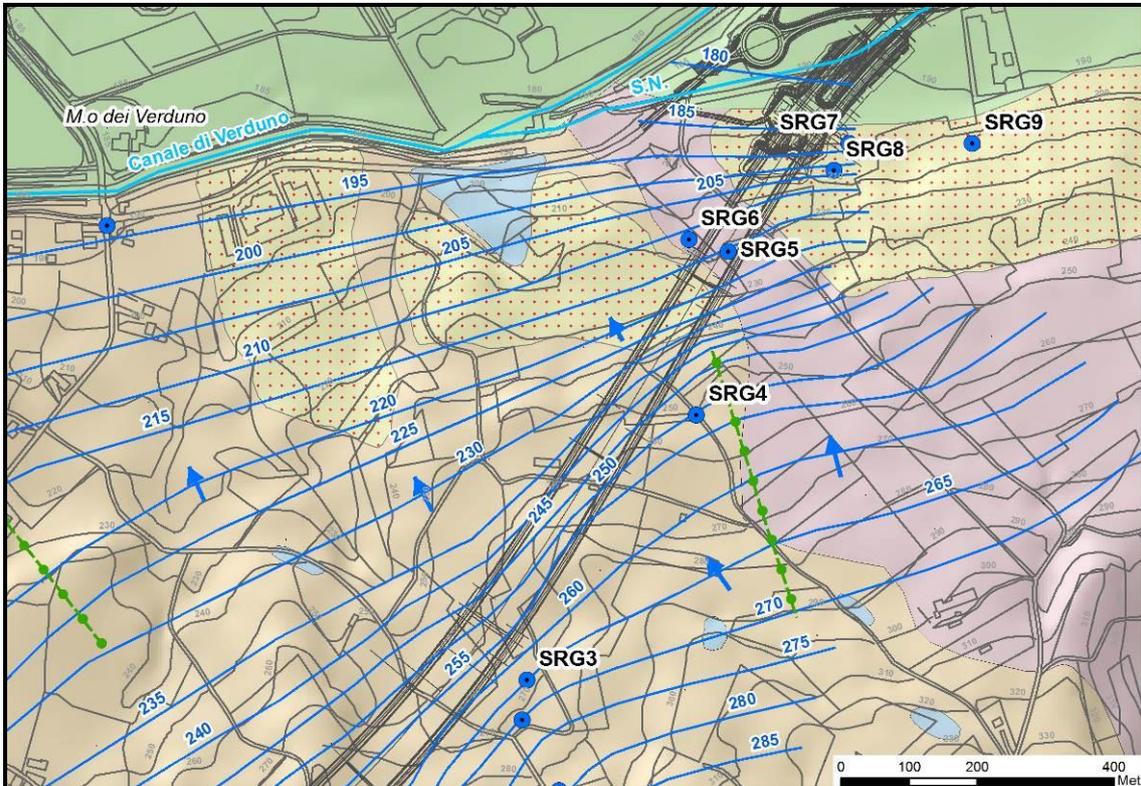


Figura 34. Distribuzione piezometrica del sistema di circolazione principale. Con i cerchi blu è riportata l'ubicazione delle principali sorgenti di questo settore; per la legenda fare riferimento alla Carta Idrogeologica.

Allo stesso sistema di circolazione dei depositi di frana, ma a livelli più profondi, possono essere ricondotti anche i flussi ospitati all'interno delle porzioni di substrato marnoso diffusamente interessate da fratturazione ed alterazione su cui i depositi di frana poggiano (cfr. § 5.4). Queste porzioni più permeabili di substrato marnoso sono state principalmente caratterizzate attraverso lo scavo delle trincee realizzate per il progetto di consolidamento del versante, nell'ambito della costruzione del Nuovo Ospedale Alba – Bra. Dai profili geologici del presente Progetto Esecutivo (cfr. anche Figura 35) si può infatti notare che la superficie di falda cade al di sotto dell'acquifero costituito dai depositi del complesso 3 e interamente all'interno del substrato (complesso 1a),



volendo indicare che in questo caso dei flussi significativi sono ospitati anche da porzioni molto fratturate di questo complesso.

Dai profili geologici previsionali lungo il tracciato del tunnel e dalle indicazioni idrogeologiche a disposizione non vi sono elementi che facciano supporre che esista una connessione diretta tra i sistemi di circolazione ora descritti, contenuti nei depositi del complesso 3 e 1a fratturato e quello più profondo localizzato nell'acquifero dei corpi detritici, confinato e descritto in precedenza. Questa considerazione deriva anche dalla constatazione del diverso livello piezometrico che caratterizza gli acquiferi superficiali e quello profondo. Tuttavia, non è possibile escludere che lungo il versante vi siano delle zone di limitata intercomunicazione idraulica, specialmente nelle zone in cui il substrato marnoso nell'intorno dei corpi detritici in esso contenuti è maggiormente fratturato.

6.5. SETTORE 5 – IMBOCCO LATO ALBA

Nell'area dell'imbocco Est (lato Alba) il sistema di circolazione principale è localizzato negli estesi affioramenti di terreni rimaneggiati per frana e nei depositi colluviali, oltre che nelle porzioni di substrato marnoso alterato e diffusamente fratturato. Mentre il contesto idrogeologico in superficie è lo stesso di quello descritto per il settore precedente (i.e. i due settori sono in continuità idraulica), in profondità la differenza è rappresentata dal fatto che la galleria non intercetta più i corpi detritici in cui è impostato un sistema di circolazione profondo. Le due canne attraversano le marne del substrato (da pk 3+400 a 3+650 ca. per la canna di monte e da pk 1+340 a 1+620 ca. per quella di valle) fino all'imbocco vero e proprio che sarà impostato in coltri di depositi superficiali. Si può assumere pertanto che nel tratto di scavo che interessa le marne non ci siano particolari interazioni tra galleria e falda, mentre nel tratto dell'imbocco è probabile che la falda acquifera superficiale venga drenata dalla galleria.

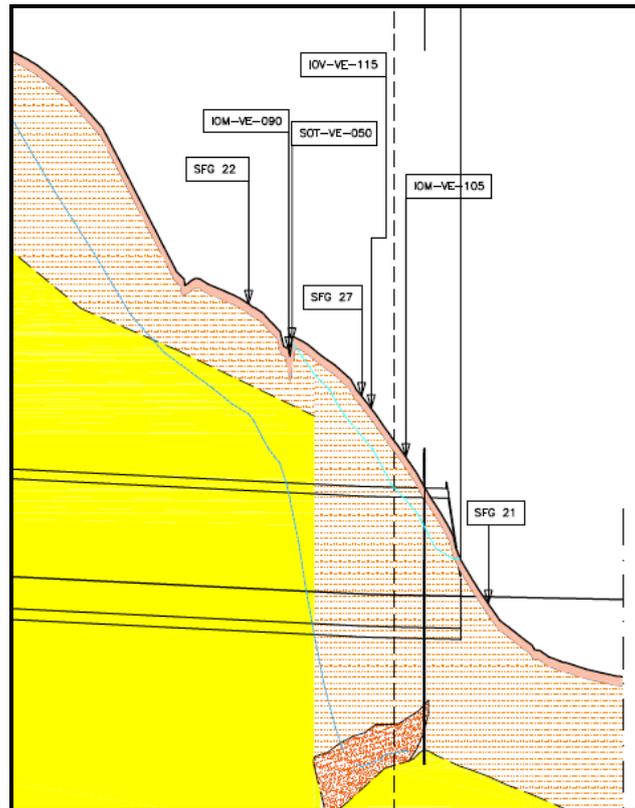


Figura 35. Profilo longitudinale lungo la canna di monte nel settore dell'imboccato Alba; sono riportati i livelli della falda profonda e di quella superficiale.

Dalla revisione dei dati di monitoraggio piezometrico 2001-2002 e 2011-2012 emerge la distribuzione dei livelli di falda mostrata in Figura 34. Ciò che si desume da questa ricostruzione è che la falda drena verso l'alveo recente del F. Tanaro, registrando un aumento importante del gradiente idraulico, determinato probabilmente dal fatto che questo settore si colloca nella zona di raccordo tra i flussi sotterranei del sistema acquifero della collina di Verduno e quelli del fondovalle Tanaro, ove è presente un acquifero decisamente più trasmissivo e in grado di smaltire deflussi decisamente maggiori.

In questo settore non si rilevano particolari oscillazioni del livello d'acqua causate da apporti meteorici.

Riguardo al livello piezometrico è tuttavia utile segnalare quanto viene riportato nella Relazione Geologica-Geomorfologica ed Idrogeologica per il consolidamento del versante collinare di Verduno per il Nuovo Ospedale Alba-



Bra (Il Lotto, Opere di Completamento Progetto Esecutivo, Maggio 2009). Nell'area dell'ospedale, posta a monte dell'imbocco lato Alba, sono state mantenute in esercizio centraline automatiche per un intervallo significativo di tempo (marzo 1999 – marzo 2003). Quelle collocate nei piezometri PS3P3 e PS2P4 (cfr. ubicazione in Figura 9), connessi al monitoraggio nell'ambito dell'intervento di consolidamento del versante, hanno consentito di rilevare le conseguenze di apporti meteorici elevati e prolungati tra i più significativi verificatisi nell'ultimo decennio (Maggio-Giugno e Ottobre 2000; Autunno 2002, Autunno-Inverno 2003) sulla circolazione sotterranea. Nel piezometro PS3P3 il livello piezometrico ha mostrato oscillazioni importanti, fino a 4 m. Variazioni del livello di falda ancora più rilevanti sono evidenziate dal piezometro PS2P4. In questo piezometro sono state infatti registrate oscillazioni variabili da 1 a 12 m. La diffusa presenza in affioramento delle coperture, unitamente agli spessori generalmente elevati, consentono in occasione di periodi con apporti meteorici rilevanti e prolungati l'infiltrazione di notevoli volumi idrici. Questi fattori determinano condizioni di elevata ricarica della falda superficiale, con una circolazione sotterranea epidermica, o localmente affiorante.

In sostanza, da quanto sopra descritto emerge che mentre nel settore limitrofo all'ospedale il livello della falda in occasione di particolari eventi meteorici reagisce con innalzamenti significativi, nel settore dell'imbocco i livelli piezometrici non subiscono variazioni altrettanto significative (almeno nell'intervallo di tempo in cui è stato effettuato il monitoraggio). Come già suggerito precedentemente questo potrebbe essere dovuto alla presenza sopra l'imbocco di numerose sorgenti, permanenti ed effimere, che in seguito a precipitazioni intense, si comporterebbero come dei "troppo pieni" in grado di smaltire una parte sostanziale di deflusso, e quindi preservando le parti più basse del versante da sostanziali innalzamenti.

7. PROVA DI TRACCIAMENTO

7.1. SCOPO DELLA PROVA

Per ottenere ulteriori informazioni relative al comportamento dell'acquifero dei gessi ed alle sue condizioni idrodinamiche è stata effettuata una prova di tracciamento con fluoresceina. L'immissione del tracciante è stata effettuata il giorno 8 Agosto 2012 e la prova è tuttora in corso. Gli obiettivi principali della prova erano:

- la verifica della validità della ricostruzione piezometrica nel settore di attraversamento della galleria nei gessi (cfr. Figura 22);
- la stima semi-quantitativa del flusso in falda nel settore centro-occidentale della Galleria di Verduno.

La prova di tracciamento è stata pertanto concepita in maniera tale da costituire un test sulla validità del modello idrogeologico concettuale relativo al settore in cui la galleria attraversa i gessi (cfr. § 6.2). Attraverso l'immissione di un tracciante nel sistema di circolazione sotterraneo e il suo reperimento in alcuni tra i piezometri ubicati a valle diviene possibile ricostruire il percorso di deflusso dell'acqua. Questo risultato consente di perfezionare il modello previsionale degli impatti del drenaggio della galleria sulla falda acquifera.

7.2. PIANIFICAZIONE E PREPARAZIONE DELLA PROVA

La prova è stata pianificata in modo da ottenere una risposta qualitativa sull'arrivo/non arrivo del tracciante, mentre non si è ritenuto utile in questo contesto avere anche una valutazione sulle quantità del tracciante che raggiungono i punti di osservazione. Per questo motivo è stato scelto di effettuare il campionamento attraverso garze contenenti carbone attivo (anche dette fluocaptor) il quale, grazie alla sua elevata superficie specifica, è in grado di assorbire efficacemente le sostanze organiche, tra cui anche la fluoresceina.

I fluocaptori acquisiscono un'informazione relativa al passaggio del tracciante per il periodo relativo alla loro esposizione. Un vantaggio legato al ricorso a questa tecnica di campionamento risiede nel fatto che grazie ad un accumulo del tracciante (nel caso in cui esso venga intercettato) i fluocaptori consentono di ottenere una maggiore sensibilità all'analisi rispetto a dei campionamenti puntuali.

L'analisi della presenza del tracciante viene effettuata in laboratorio attraverso fluorimetria. Un'inconveniente di questa tecnica è rappresentato dal fatto che i fluocaptori possono assorbire, oltre ai traccianti fluorescenti, anche altre sostanze organiche che una volta analizzate in fluorimetria emettono dei picchi spettrali simili a quelli dei traccianti fluorescenti, il che può condurre a degli equivoci interpretativi. Per evitare di incorrere in questo problema, i campioni risultati positivi sono stati successivamente sottoposti ad un'ulteriore analisi con il metodo HPLC (*High Performance Liquid Chromatography*).

7.3. SCELTA DEI PUNTI DI IMMISSIONE E DI CAMPIONAMENTO

Il punto di immissione è rappresentato dal piezometro IOM-MO-054: si tratta nella realtà di tre piezometri posti ad una distanza minima (ca. 5 m uno dall'altro), tanto da poter essere considerati come un unico punto di immissione.

La scelta di utilizzare questi piezometri è giustificata dal fatto che essi sono ubicati a monte della galleria ed in una posizione in cui si suppone che il flusso sotterraneo passante venga indirizzato verso l'asse di drenaggio a direzione circa Est-Ovest ubicato in prossimità dell'imbocco lato Cuneo.

I punti di campionamento sono stati selezionati sia tra i piezometri appartenenti alla rete di Monitoraggio Ambientale (2011-2012) sia tra i pochi piezometri ancora reperibili e funzionanti installati durante la campagna geognostica 2000-2001. Sono stati inoltre installati fluocaptori in alcuni corsi d'acqua. La scelta di campionare punti d'acqua sia in falda che in superficie è motivata dall'esigenza di ricostruire un quadro quanto più dettagliato possibile sulle interconnessioni del sistema idrico superficiale e quello profondo.

I piezometri selezionati per il campionamento sono: IOM-MO-040, IOM-MO-065(G), IOM-MO-070, IOM-MO-050, IOV-MO-045, IOV-MO-060, SFG35. Il campionamento dei punti d'acqua superficiali ha riguardato il Rio Deglia ed il Canale dell'Enel. Come si può osservare dalla Figura 36i punti di campionamento sono stati ripartiti in un intorno piuttosto esteso del punto di immissione, ed hanno interessato, oltre a piezometri posti lungo la direttrice di diffusione ipotizzabile sulla base della carta piezometrica disponibile, anche altri piezometri ove teoricamente non era atteso l'arrivo di traccianti.

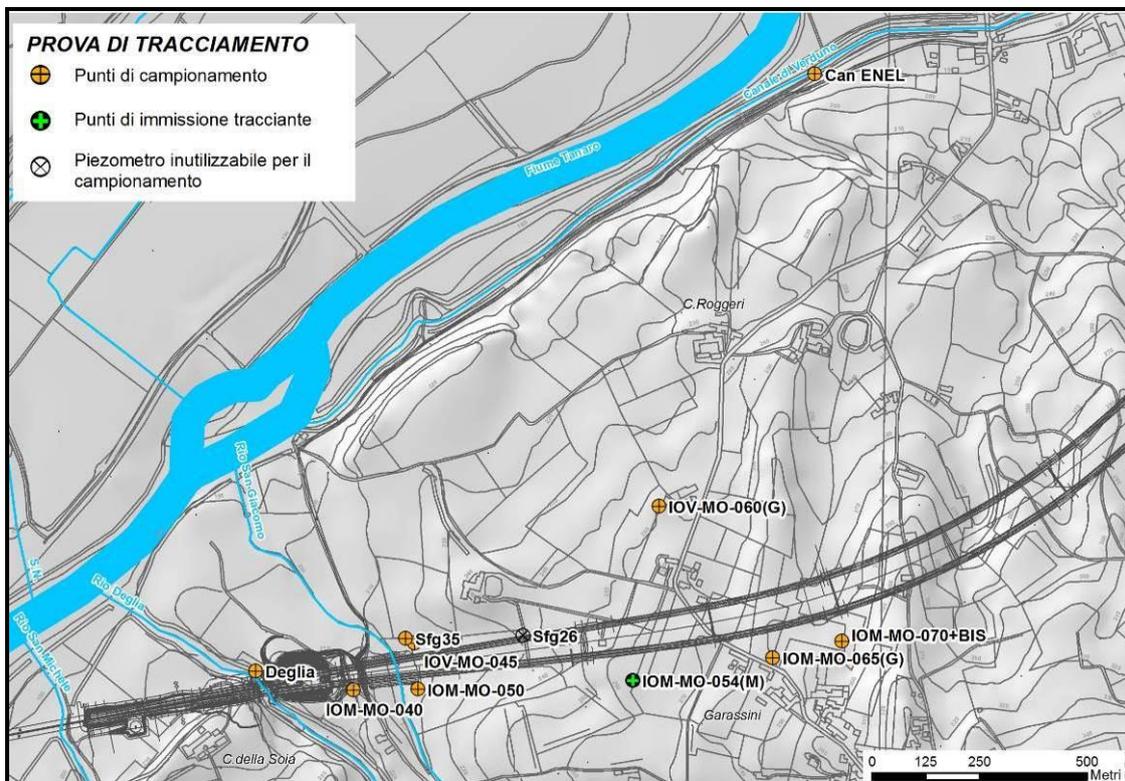


Figura 36. Ubicazione in carta del punto di immissione della fluoresceina e dei punti di campionamento.

Il campionamento è stato protratto per ca. 5 mesi, da Agosto a Dicembre 2012. Con cadenze prestabilite i fluocaptori venivano rimossi, sostituiti con nuovi fluocaptori e analizzati in laboratorio; ciò per consentire di avere anche qualche indicazione di massima sugli eventuali tempi di arrivo del tracciante. Inizialmente il campionamento è stato realizzato con frequenza maggiore, mentre successivamente è stato diradato. Questa scelta è stata indotta

dall'ipotesi che il punto di immissione potesse intercettare un canale carsico in diretta comunicazione con uno dei punti di campionamento. In questo caso l'arrivo della fluoresceina al punto di osservazione poteva avvenire con tempistiche molto rapide, che per poter essere caratterizzate necessitavano appunto di frequenze di campionamento elevate.

Nell'ultima campagna di prelievo dei campioni si è constatato che purtroppo molti dei fluocaptori sono stati asportati (probabilmente in maniera involontaria), mentre alcuni di quelli che erano legati con un filo di spago di canapa sono marciti e probabilmente caduti nel perforo. E' stato possibile recuperare solo un campione che è stato analizzato, quello collocato nel piezometro IOV-MO-045. Pertanto in realtà i dati disponibili coprono un periodo di monitoraggio di soli 2 mesi.

7.4. RISULTATI

Nessuno dei campioni analizzati in laboratorio nelle diverse campagne di prelievo ha evidenziato un arrivo del tracciante fluorescente dopo circa 50 giorni dal momento dell'immissione. La tabella che segue riporta gli esiti delle analisi sui diversi fluocaptori e le date di prelievo.

Campione	Serie 0	Serie 1	Serie 2	Serie 3	Serie 4	Serie 6	Serie 7
	08/08/12	09/08/2012	10/08/12	14/08/12	22/08/12	11/09/12	25/09/12
IOM MO 040	NEG.	NEG.	NEG.	NEG.	NEG.	NEG	NEG
IOM-MO-065G	NEG.	NEG.	NEG.	NEG.	NEG.	NEG	NEG
IOM MO 070	NEG.	NEG.	NEG.	NEG.	NEG.	NEG	NEG
IOM MO 050	NEG.	NEG.	NEG.	NEG.	NEG.	NEG	NEG
SFG35	NEG.	NEG.	NEG.	NEG.	NEG.	NEG	NEG
IOV MO 045	NEG.	NEG.	NEG.	NEG.	NEG.	NEG	NEG
IOV MO 060	NEG.	NEG.	NEG.	NEG.	NEG.	NEG	NEG
RIO DEGLIA	NEG.	NEG.	NEG.	NEG.	NEG.	NEG	An. labo
CANALE ENEL	NEG.	NEG.	NEG.	NEG.	n.c.	n.c	n.c

Un aspetto importante da sottolineare è che nel periodo in cui si è protratto il campionamento le Langhe sono state caratterizzate da bassi apporti piovosi e quindi da un clima relativamente secco che deve aver molto probabilmente influito in negativo sull'alimentazione della falda acquifera dei gessi.

L'esito della prova può avere diverse spiegazioni. Un primo aspetto da valutare per giustificare il risultato ottenuto, consiste nel confrontare il tempo di arrivo teorico che si sarebbe dovuto registrare con quanto effettivamente riscontrato. A tal proposito, attraverso un approccio analitico semplificato, è possibile calcolare la velocità di migrazione in falda di una particella in un acquifero omogeneo a superficie di base inclinata e per determinati gradienti della falda. Tale approccio empirico è stato sviluppato da Kresic (2007). Senza entrare nel dettaglio delle elaborazioni matematiche, vengono di seguito presentati i grafici relativi al caso in esame, per i tempi di arrivo al piezometro più prossimo al punto d'immissione, e pertanto per il piezometro ove si sarebbe dovuto registrare il primo arrivo di tracciante. Si tratta del piezometro IOM-MO-050, che si trova a circa 500m dal piezometro IOM-MO-054.

La velocità di migrazione in falda dipende, oltre che dall'inclinazione della base dell'acquifero e dal gradiente idraulico, anche dalla sua permeabilità e dalla porosità efficace. Dando per consolidata l'inclinazione dell'acquifero, deducibile per approssimazione dai dati geologici disponibili, e dando per assodato anche il gradiente medio della falda, desumibile dalla carta piezometrica, è necessario invece prendere in considerazione diverse ipotesi per la conducibilità idraulica, non nota con esattezza, e per la porosità efficace, anch'essa non nota.

I due diagrammi che seguono illustrano due diverse condizioni di porosità efficace (10% e 20%), definite sulla base di stime ragionevoli per acquiferi del tipo di quello in questione, e mostrano il variare dei tempi d'arrivo in funzione delle diverse permeabilità attese per l'acquifero. I diagrammi permettono in sostanza di stabilire che, su distanze di 500m, affinché si verificasse un arrivo di tracciante entro circa 50 giorni dall'immissione sarebbero state necessarie permeabilità dell'acquifero maggiori di un valore compreso tra circa 2×10^{-4} e 8×10^{-5} m/s, a seconda della porosità efficace dell'acquifero. Dal momento che

nessun arrivo si è verificato al piezometro nel corso dei 50 giorni di monitoraggio una delle ipotesi che possono giustificare questo comportamento è che l'acquifero abbia permeabilità inferiori a 8×10^{-5} m/s ca.

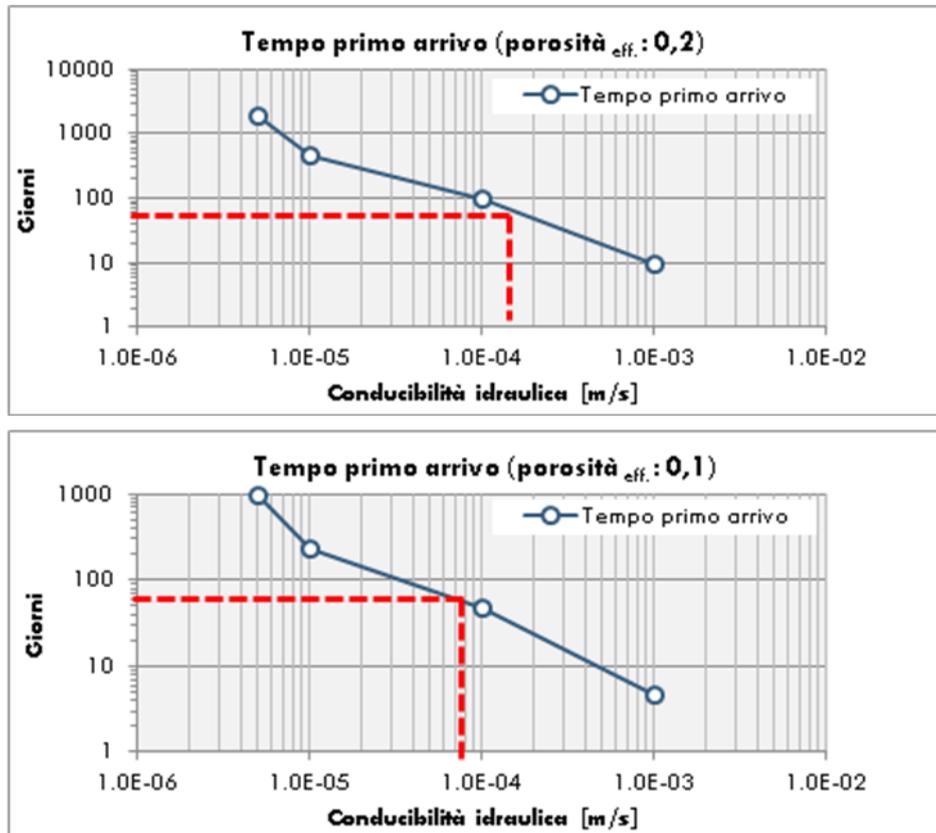


Figura 37. Diagrammi tempo di arrivo tracciante vs. conducibilità idraulica per un acquifero con porosità efficace media del 20% (diagramma in alto) e del 10% (diagramma in basso). Il diagrammi si riferiscono al caso del piezometro IOM-MO-050, che si trova a circa 500m dal piezometro di immissione IOM-MO-054. La linea tratteggiata rossa orizzontale è un'isocrona a 50gg dall'immissione, tempo circa corrispondente al periodo trascorso fino all'ultimo prelievo di fluocaptori disponibile.

Esistono tuttavia altre possibili spiegazioni. Come già accennato in precedenza il periodo di realizzazione della prova è stato un periodo secco, in cui quindi si può presumere che l'entità dei deflussi sotterranei nell'acquifero sia stata piuttosto ridotta. In un tale contesto non si può escludere che temporaneamente i gradienti idraulici fossero minori di quelli desumibili dalla ricostruzione piezometrica mediata disponibile. Se poi si assume la possibilità di flussi



sotterranei di tipo carsico, non si può escludere che il tracciante immesso nel piezometro sia rimasto immobilizzato in sacche d'acqua temporaneamente isolate dalle zone di deflusso principali, che potrebbero attivarsi in caso di eventi meteorici, ad esempio a causa di fenomeni di sifonamento.

Un altro aspetto critico per la prova eseguita è che il campionamento non è avvenuto in punti di recapito dell'acquifero (es. sorgenti) ove vi è la ragionevole certezza che gran parte dei deflussi sotterranei venga scaricata. D'altra parte punti di recapito di questo tipo non sono noti nella zona. Il campionamento è invece avvenuto in sondaggi, che hanno intercettato zone dell'acquifero non necessariamente poste lungo le direttrici di flusso connesse con il punto d'immissione, benché siano stati scelti, tra quelli disponibili, anche sondaggi il più possibile ubicati in corrispondenza dell'asse di drenaggio principale la cui presenza si è tentato di validare.

In conclusione la prova di tracciamento eseguita che necessariamente ha dovuto essere realizzata con tempistiche compatibili con i tempi progettuali e in condizioni non ideali, non può essere considerata risolutiva, ma allo stesso tempo non contrasta con le assunzioni su cui si basano il modello idrogeologico concettuale e il modello idrogeologico numerico presentati nel presente studio.

8. MODELLO NUMERICO 3D

8.1. OBIETTIVI DELLA MODELLIZZAZIONE

Questo capitolo descrive la modellizzazione tridimensionale del tratto di galleria che attraversa l'acquifero dei gessi, nel settore prossimo all'imbocco lato Cuneo. Come discusso nel Capitolo 2, questo tratto di acquifero sarà interessato dalla realizzazione di una serie articolata di opere che verranno scavate in successione, la cui influenza sulla falda acquifera sarà valutata attraverso la modellizzazione. Pertanto, la modellizzazione numerica è stata realizzata con i seguenti obiettivi:

- confronto e validazione delle ipotesi descritte nel modello idrogeologico concettuale riferibili allo stato naturale dell'acquifero;
- stima degli effetti idraulici indotti dalla opere in sottterraneo previste (Galleria di Verduno ed opere connesse) sia in termini di perturbazione idraulica sull'acquifero, sia come portate drenate dalle opere sotterranee che agiranno come sistemi di drenaggio temporanei (i.e. cunicolo centrale alle due gallerie) e permanenti sul lungo periodo (i.e. by-pass della galleria collegato ad un sistema di fori drenanti);
- supporto al dimensionamento dei sistemi di drenaggio in modo da massimizzare i benefici commensurandoli ad un abbassamento accettabile del livello di falda tale da non rappresentare una potenziale minaccia per gli abitati limitrofi (in particolare la Borgata Garassini, che è l'abitato di maggiore rilievo tra quelli ubicati vicino all'opera).

Il confronto tra le simulazioni relative alle condizioni naturali e quelle in presenza della galleria permette di valutare delle possibili perturbazioni del sistema di circolazione della falda. La modellizzazione idraulica consente pertanto di ottemperare alle richieste del DEC VIA 576/2011 che al punto 2.43 specifica: "...il proponente dovrà produrre specifico studio modellistico ad

elementi finiti di valutazione delle entità degli effetti di dissesto potenziali indotti....”.

Inoltre, la realizzazione di simulazioni di flusso in presenza delle canne della galleria consente di effettuare una previsione delle portate transitorie e di quelle stabilizzate attese, rispettivamente, nel corso dello scavo e durante il periodo successivo.

Pertanto, il modello numerico che verrà discusso ha la valenza di uno strumento funzionale sia alla previsione dell’impatto ambientale atteso nella falda acquifera, sia alla progettazione della galleria stessa in funzione delle portate attese a breve e a lungo termine.

Un ulteriore scopo della modellizzazione è stato quello di fornire una validazione delle ipotesi considerate nel modello idrogeologico concettuale e descritte nel Capitolo 6. Questo è un aspetto importante in quanto consente di considerare che anche le previsioni relative ai possibili impatti attesi sulla falda hanno un buon grado di affidabilità.

Si consideri che in fase di realizzazione del cunicolo centrale alle due gallerie saranno disponibili nuovi dati che consentiranno una ricostruzione del contesto idrogeologico in maniera più dettagliata rispetto a quanto oggi risulti possibile il e l’andamento della piezometria del settore modellizzato. Questo permetterà di poter effettuare una validazione delle ipotesi concettuali prese come riferimento durante la progettazione esecutiva, come ad esempio l’effettiva presenza o meno del canale di permeabilità orientato E-W e descritto nel paragrafo 6.2. Peraltro, i dati che verranno raccolti permetteranno di poter impostare un nuovo modello numerico di flusso aggiornato, con possibilità di adeguare le previsioni alle condizioni geologiche-idrogeologiche effettivamente incontrate dal cunicolo.

La costruzione del modello tridimensionale è avvenuta attraverso due fasi successive:

- Implementazione del modello geometrico 3D
- Implementazione del modello di flusso

E' importante sottolineare che, vista la difficoltà tecnica correlata alla costruzione di un modello tridimensionale in un contesto complesso dal punto di vista geologico come quello della collina di Verduno, è stato necessario effettuare alcune assunzioni e semplificazioni.

Una prima semplificazione è stata quella di considerare come dominio di simulazione la sola porzione di acquifero dei gessi (Complesso 2a; cfr. § 4.2.2) interessata dall'attraversamento delle due canne della galleria. Pertanto, la simulazione riguarda unicamente il tratto di versante relativo all'imbocco Ovest (Lato Cuneo) fino a circa metà dell'estensione del tracciato di questo lotto (tralasciando quindi il settore Est, relativo all'imbocco lato Alba). E' infatti in questo settore che, come anche sottolineato dal DEC VIA 576/2011, è stata evidenziata una delle criticità principali associate alla presenza di gessi.

8.2. MODELLO GEOMETRICO

8.2.1. Settore di modellizzazione

Il settore di modellizzazione è quello rappresentato in Figura 38, che si estende tra lo spartiacque della collina a Sud e il fondovalle fino al Fiume Tanaro a Nord. Ad Est e ad ovest la delimitazione è stata stabilita sulla base di un criterio idrogeologico, ovvero seguendo un'ideale linea di deflusso delle acque sotterranee così come evidenziata dalla ricostruzione piezometrica dell'acquifero principale. Nel caso di questi bordi si tratta quindi di bordi a flusso entrante ed uscente nulli.

8.2.2. Costruzione del modello 3D

La realizzazione del modello tridimensionale è stata effettuata attraverso strumenti di calcolo geospaziale in ambiente GIS, in particolare tramite l'utilizzo integrato degli applicativi ArcMap, Spatial Analyst e ArcScene (Esri).

Il processo che ha portato alla creazione di volumi relativi ai diversi complessi idrogeologici è consistito nelle seguenti fasi:

- Creazione di un geodatabase contenente i dati di stratigrafia dei sondaggi con definizione delle quote assolute relative al contatto tra complessi idrogeologici;
- Implementazione del geodatabase attraverso l'inserimento di sondaggi "virtuali" riportanti una stratigrafia interpretativa, frutto dell'estrapolazione di stratigrafie di sondaggi adiacenti. Questo processo di creazione di sondaggi "virtuali" consente di mantenere un controllo sulla successiva fase di creazione delle superfici;
- Generazione geostatistica delle superfici delimitanti i diversi complessi idrogeologici. Le superfici sono state generate attraverso kriging previo controllo dell'affidabilità dei parametri geostatistici utilizzati. Le superfici sono state create prima in formato raster e successivamente sono state esportate in formato TIN;
- Generazione dei volumi dei diversi complessi idrogeologici. I volumi sono stati creati in formato multipatch a partire dai TIN delle superfici.
- Rappresentazione tridimensionale dei vari complessi idrogeologici attraverso il software ArcScene.

La Figura 38 illustra i confini del dominio di ricostruzione 3D e di successiva simulazione del sistema di flusso. La Figura 39 illustra il risultato di tale ricostruzione mostrando i dettagli inerenti alla distribuzione spaziale dei diversi complessi idrogeologici. E' importante sottolineare che il processo di ricostruzione delle geometrie tridimensionali è stato sottoposto ad un controllo a campione e ad una validazione dei risultati ottenuti. Questo pertanto consente di considerare la ricostruzione sufficientemente affidabile per essere utilizzata come base di partenza allo scopo di quantificare in maniera realistica gli impatti derivanti dal drenaggio della galleria.

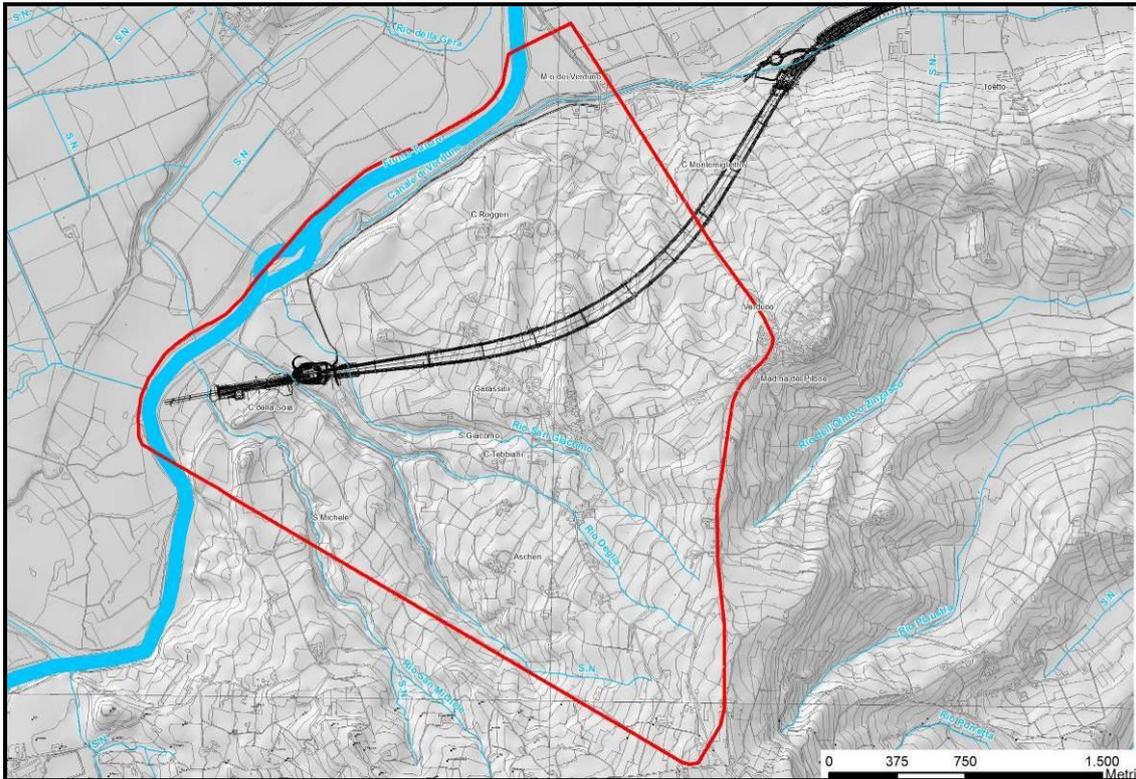


Figura 38. Bordo del modello numerico (in rosso).

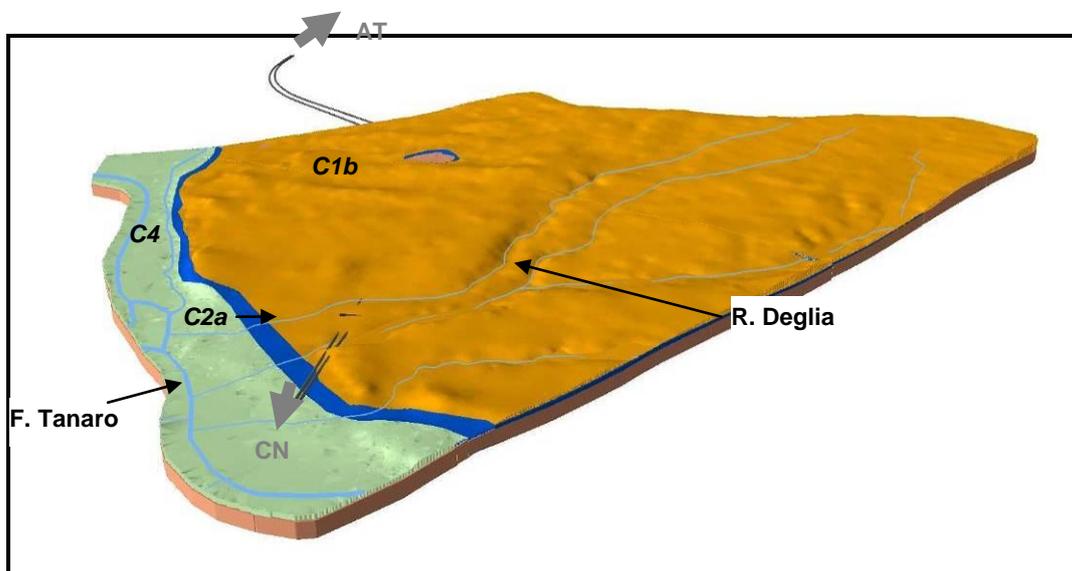


Figura 39. Ricostruzione tridimensionale dei diversi Complessi Idrogeologici presenti sulla Collina di Verduno; la prospettiva è da Ovest verso Est; C1b, C2a, C4 = complessi idrogeologici 1b, 2a e 4.

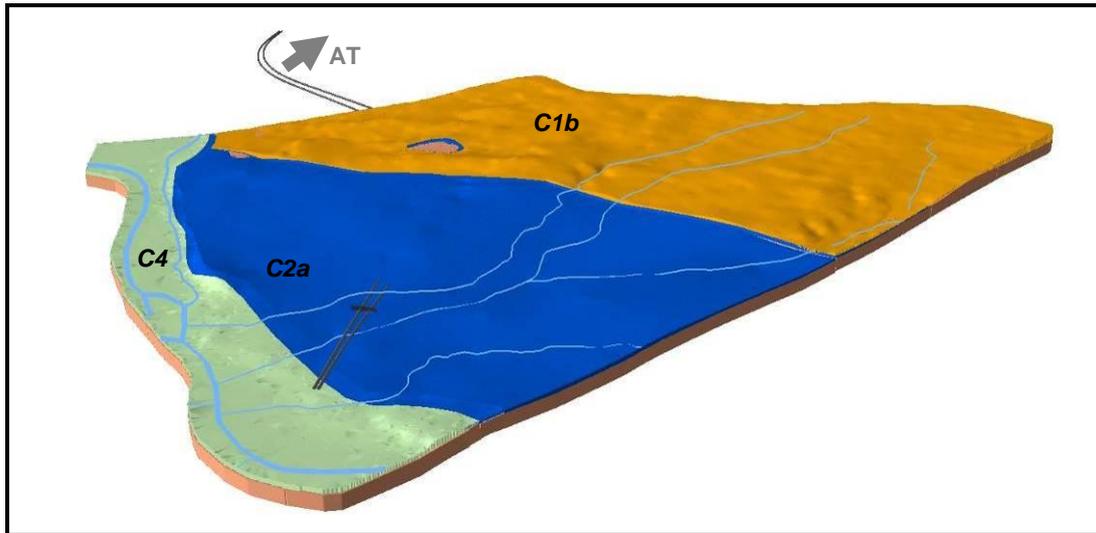


Figura 40. Dettaglio dell'acquifero dei gessi relativamente al settore Ovest del modello; rispetto all'immagine precedente è stata parzialmente esclusa dalla visualizzazione la copertura affiorante dei materiali appartenenti al Complesso 1b.

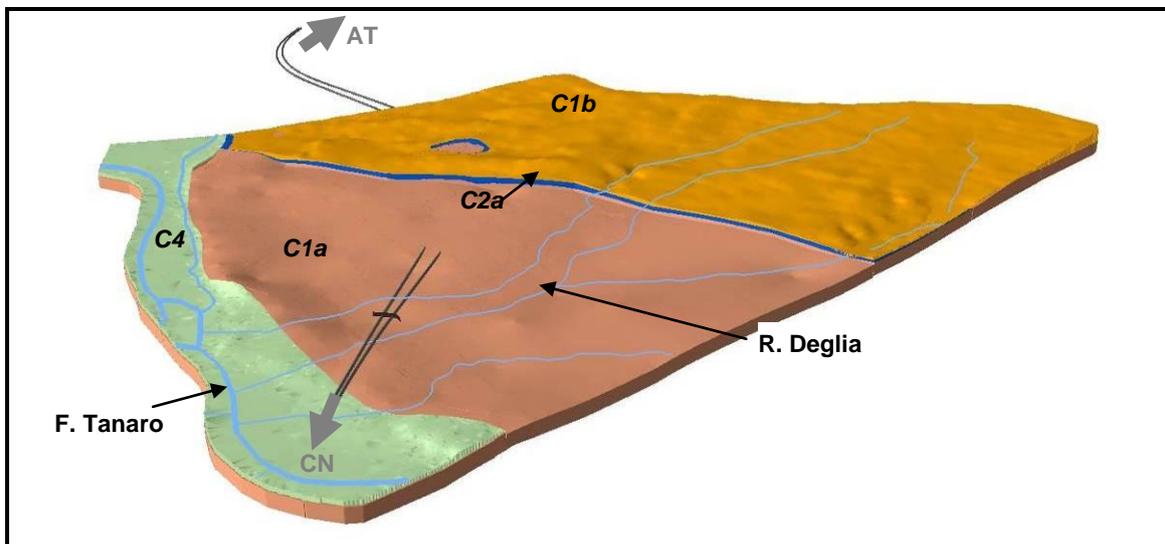


Figura 41. Dettaglio del substrato marnoso relativamente al settore Ovest del modello; rispetto alle immagini precedenti è stata parzialmente esclusa dalla visualizzazione sia la copertura affiorante dei materiali appartenenti al Complesso 1b, sia l'acquifero dei gessi del Complesso 2a.

8.3. MODELLO DI FLUSSO

8.3.1. Codice numerico (FeFlow 6.0)

Il software utilizzato per le simulazioni è Feflow ® (DHI-Wasy), release 6.0. Feflow è un codice ad elementi finiti che permette di gestire simulazioni di flusso idraulico sotterraneo, in condizioni stazionarie o transitorie, con la possibilità di accoppiare al flusso il trasporto di massa (es. soluti) e/o di calore.

Rispetto ad altri codici di calcolo ad elementi finiti o alle differenze finite, questo software ha il vantaggio di una maggiore flessibilità a livello di gestione della simulazione. Infatti, esso può riprodurre con buon grado di accuratezza anche contesti geometricamente complessi. Nei modelli 3D è possibile replicare le variazioni spaziali sia orizzontali sia verticali dei corpi geologici, arrivando a rappresentare situazioni di forte eterogeneità, come ad esempio chiusure laterali di livelli, contatti geologici complessi, presenza di faglie, etc.

Ad ogni materiale è possibile attribuire conducibilità idrauliche variabili secondo un tensore orientato lungo tre assi x,y,z, mutuamente perpendicolari. Inoltre, il simulatore permette di considerare elementi di canalizzazione del flusso come condotti, fratture o dreni a cui vengono applicate specifiche leggi idrauliche (*discrete features*).

La versione 6.0 (utilizzata nell'ambito delle simulazioni di questo studio) ha un'interfaccia decisamente più flessibile rispetto alle versioni precedenti. Questa versione mette a disposizione una serie di strumenti di visualizzazione e di esportazione di output grafici che consentono all'utente di controllare, attraverso rappresentazioni in pianta o in sezione, l'evoluzione spaziale e temporale dei parametri idrodinamici in tutti i settori del dominio di simulazione. Inoltre, l'evoluzione dei carichi idraulici o delle pressioni in specifici punti di controllo del dominio può essere gestita attraverso la visualizzazione di diagrammi espressi come parametro vs. tempo.

8.3.2. Struttura del modello numerico

Vengono di seguito descritte le caratteristiche geometrico-strutturali utilizzate per la rappresentazione del dominio di modellizzazione. La definizione dei limiti del modello, come noto, deve tenere conto della massima estensione possibile delle perturbazioni indotte dagli elementi che alterano lo stato naturale.

In una prima fase è stata quindi ipotizzata, sulla base del modello concettuale discusso nel Capitolo 6, una delimitazione dei confini idrogeologici entro i quali si suppone sia circoscritta la circolazione idrica e si estenda la perturbazione dovuta al drenaggio della galleria. Per questa ragione, nonostante il settore di indagine interessi prevalentemente l'acquifero dei gessi, il dominio di modellizzazione (rappresentato in Figura 38) è stato esteso ben oltre il tratto in cui la galleria attraversa tale acquifero, sia verso monte sia lateralmente.

Il modello è discretizzato attraverso una maglia di elementi finiti triangolari. Gli elementi sono stati oggetto di un affinamento, specialmente in corrispondenza alle zone in cui è richiesta una maggiore precisione di calcolo, quali ad esempio le zone dei contatti litologici, le due canne della galleria, il cunicolo centrale alle due canne e i fori di drenaggio previsti successivamente alla messa in opera della galleria.

Le proprietà geometriche del modello sono riassunte nella tabella seguente:

Mesh	
Number of Dimensions	3
Nodes per Element	6
Element Type	Triangle prism
Mesh Elements	1661031
Mesh Nodes	940560
Problem Geometry	
Width	3486.31 [m]
Height	4441.48 [m]
Depth	346.988 [m]
Vertical Exaggeration	1 : 1
Number of Layers	9
Number of Slices	10
Elements per Layer	184559
Nodes per Slice	94056

La Figura 42 riporta una rappresentazione 3D globale del modello di simulazione e delle maglie di elementi finiti, mentre la Figura 43 riporta un

dettaglio della zona dell'imbocco lato Cuneo e del settore di attraversamento dei gessi.

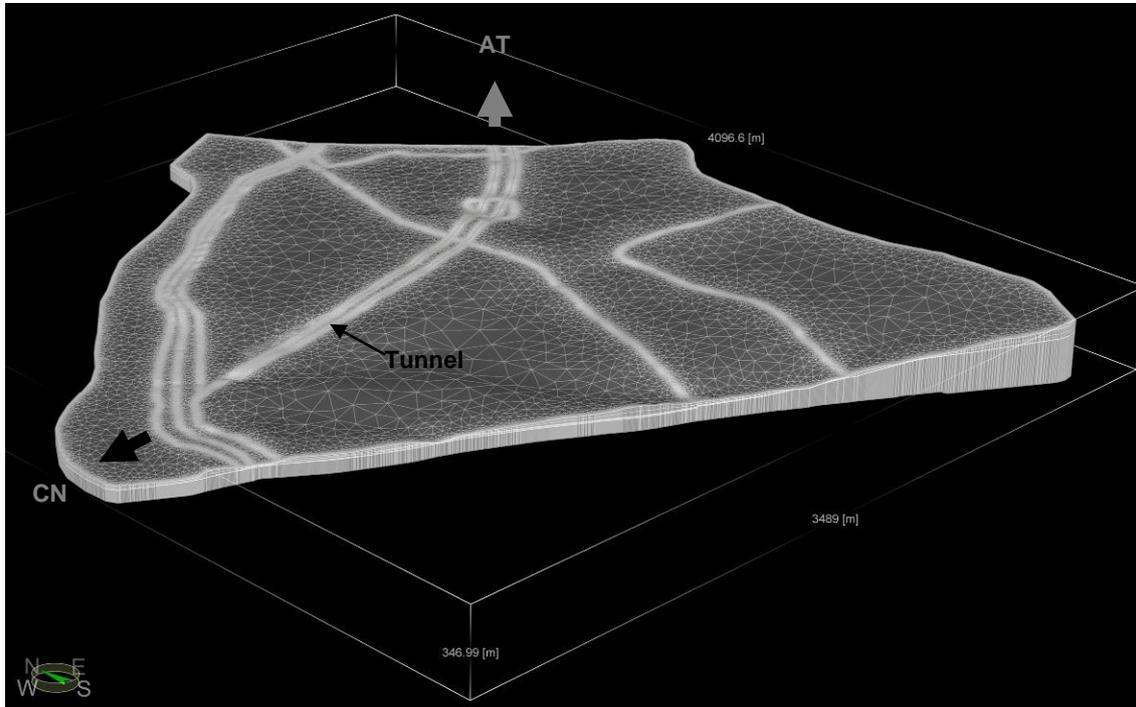


Figura 42. Visualizzazione 3D della geometria e degli elementi finiti con punto vista dall'imbocco Lato Cuneo.

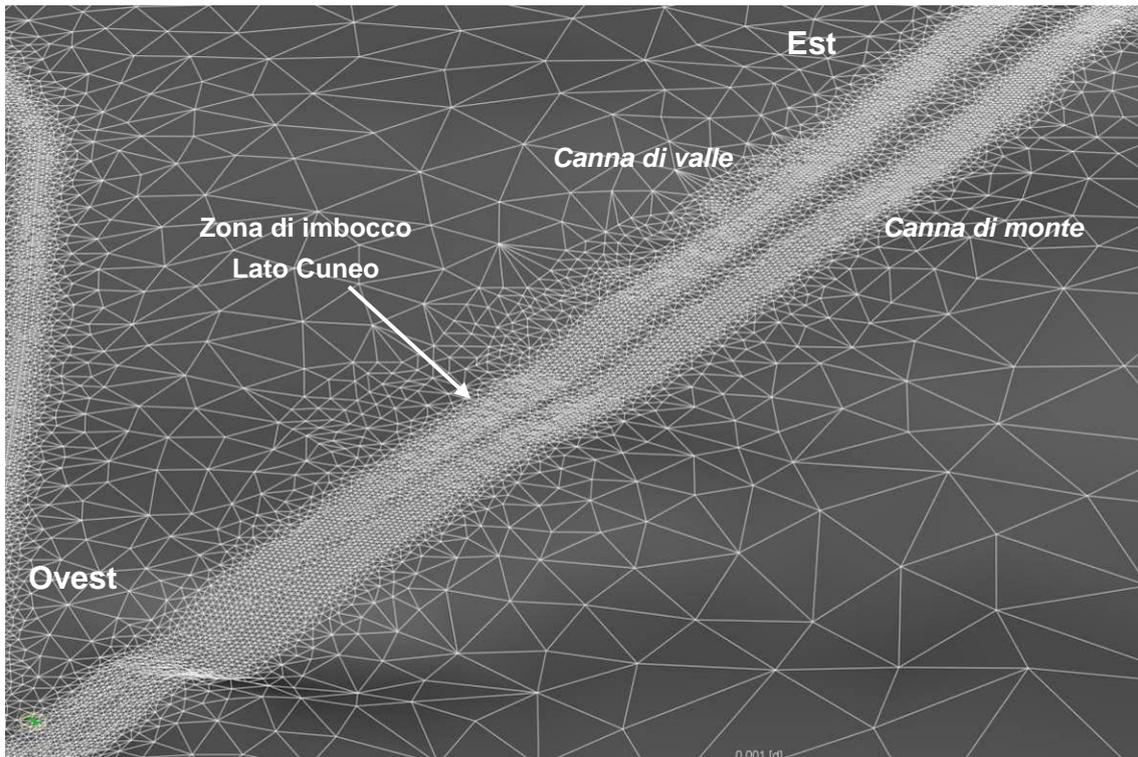


Figura 43. Dettaglio della della zona di imbocco con evidenza dell'elevato affinamento degli elementi finiti.

La creazione delle maglie del modello è stata inoltre condizionata alle caratteristiche spaziali reali delle due canne della galleria e del cunicolo centrale ad esse nel settore dei gessi (quote e caratteristiche dimensionali del cavo) e alle proprietà geometriche dei vari corpi geologici ricostruiti nella precedente fase modellistica (cfr. § 8.2). Nella ricostruzione geometrica dei corpi è stata effettuata una verifica di congruenza con le geometrie definite nei profili longitudinali al tracciato della galleria e nelle sezioni trasversali (Figura 44).

La Figura 45 e la Figura 46 illustrano il dettaglio geometrico nella zona delle due gallerie e del cunicolo centrale utilizzato con funzioni di servizio e di prospezione nella fase antecedente lo scavo delle due canne. Si rammenta che mentre il cunicolo centrale rappresenta un elemento permeabile e quindi con potenziale di drenaggio rispetto all'acquifero, le due canne della galleria di Verduno costituiscono invece un elemento impermeabile anche all'atto dello

scavo, dal momento che il battente idrico dell'ammasso viene in linea di principio controbilanciata dalla pressione di confinamento del fronte fornita dalla TBM. La realizzazione delle varie fasi di modellizzazione di flusso di falda segue lo schema di realizzazione cronologico delle opere in sottterraneo brevemente sintetizzato nel Capitolo 2.

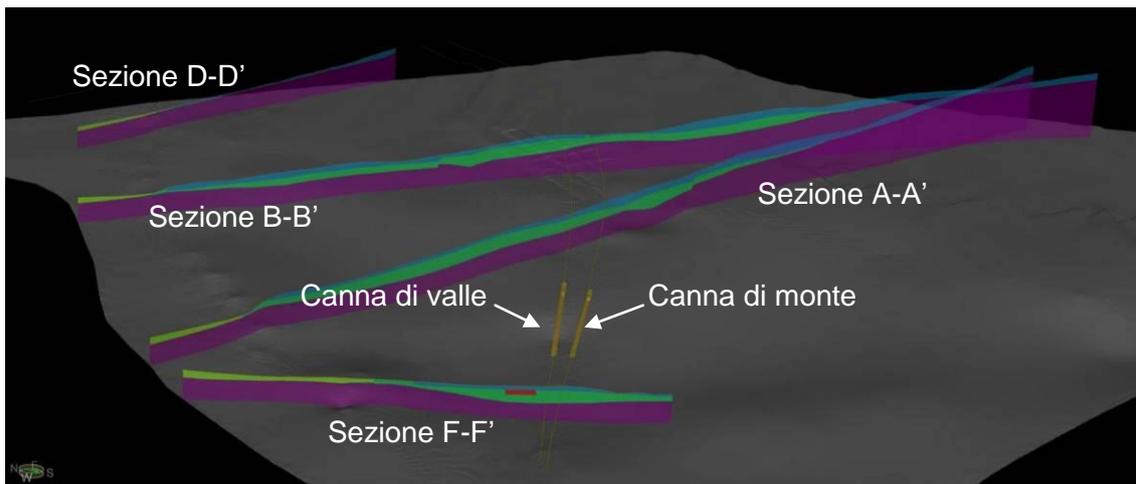


Figura 44. Visualizzazione delle sezioni trasversali al tracciato della galleria attraverso la ricostruzione geometrica dei corpi di Feflow.

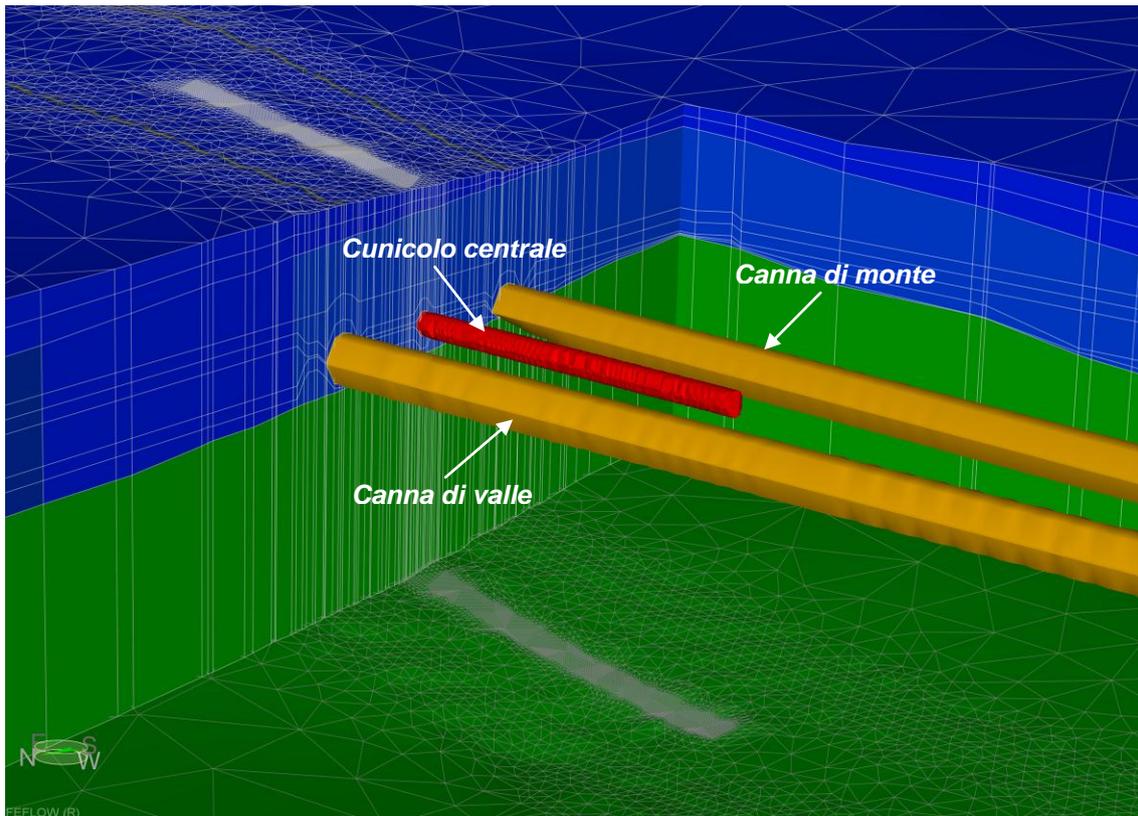


Figura 45. Dettaglio delle due canne del tunnel utilizzate e del cunicolo centrale, con spaccato utile per comprendere le geometrie interne dei layer con cui è stato costruito il modello numerico.

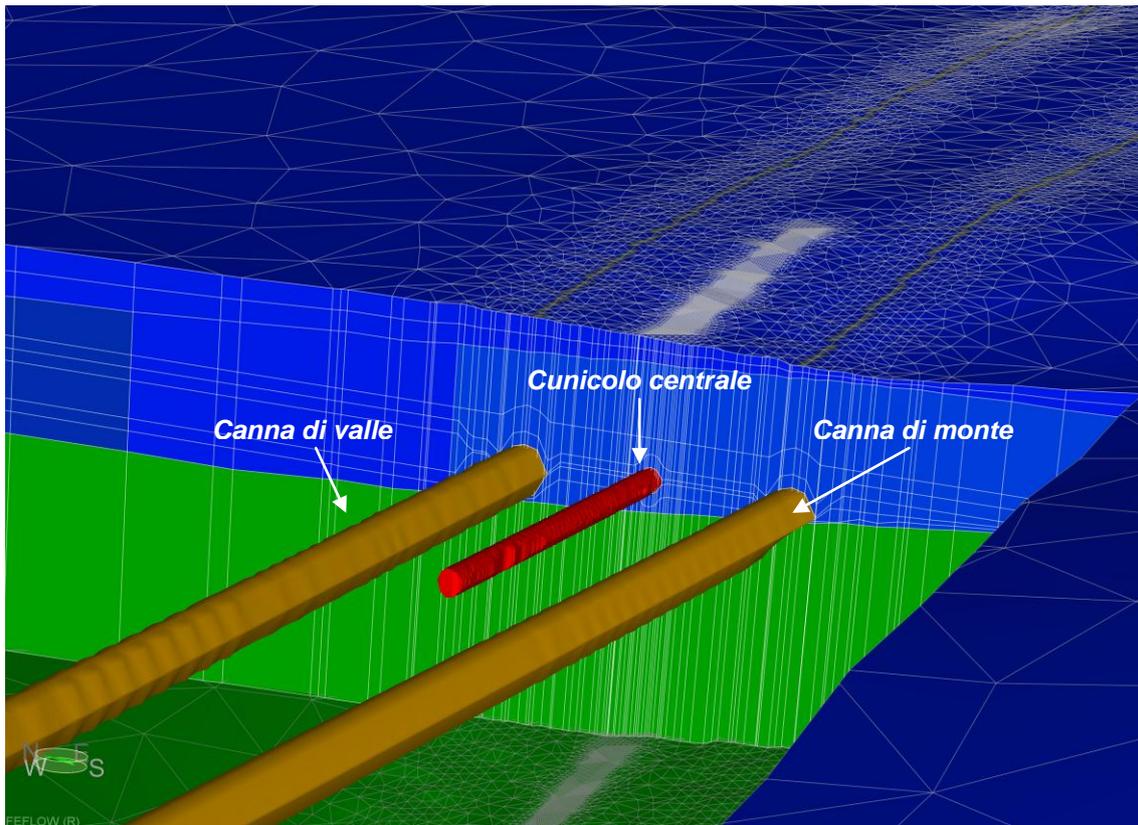


Figura 46. Dettaglio delle due canne del tunnel utilizzate per la simulazione del drenaggio della falda, con spaccato utile per comprendere le geometrie interne dei layer con cui è stato costruito il modello numerico; diversa visione prospettica rispetto alla figura precedente.

8.3.3. Simulazione del flusso in condizioni naturali (ante-operam)

La modellizzazione del deflusso naturale della falda (situazione ante-operam) è stata realizzata con lo scopo di ottenere una riproduzione dello stato idraulico rappresentativo della distribuzione piezometrica misurata. La piezometria presa come riferimento per la calibrazione è quella derivante dall'integrazione dei dati di monitoraggio piezometrico della campagna 2001-2002 e 2011-2013, rappresentata in Figura 21, per il solo settore dei gessi, e Figura 22, a più ampia scala.

La modellizzazione delle condizioni ante-operam ha richiesto l'esecuzione di numerose simulazioni (ca. 60) prima di riuscire ad ottenere una calibrazione soddisfacente. La calibrazione è stata ottenuta attraverso la progressiva

variazione sia delle conducibilità idrauliche dei principali elementi idrogeologici sia delle condizioni idrauliche al contorno ai bordi del dominio di simulazione.

La distribuzione di conducibilità idrauliche che è stato necessario imporre per ottenere una calibrazione soddisfacente è quella rappresentata in Figura 47.

La figura rappresenta una vista in prospettiva del dominio di modellizzazione da cui è stato parzialmente rimosso il livello più alto corrispondente al complesso 1b, che affiora in superficie e ricopre gran parte del dominio di modellizzazione, al fine di rendere visibile la distribuzione di permeabilità nel sottostante complesso 2a.

Nel settore di sinistra della figura è inoltre visibile uno spaccato che permette di mostrare l'articolazione interna al complesso 2a nella zona prossima all'imbocco.

Dalla figura emerge come il modello numerico, al fine di includere gli assi di drenaggio ipotizzati nel modello concettuale nella zona prossima all'imbocco lato Cuneo (cfr. § 6.4 e Figura 27) abbia necessitato di introdurre nel complesso 2a, ovverosia nell'acquifero dei gessi, delle eterogeneità di permeabilità. La permeabilità media utilizzata per l'acquifero dei gessi (zona con colore verde bluastro in Figura 47) è pari a 2×10^{-6} m/s. In corrispondenza dell'asse di drenaggio principale E-W individuato in Figura 27 e interpretato come una zona a maggior dissoluzione nei gessi, è stata invece inserita una fascia più permeabile (colori marroncini), ove la conducibilità idraulica varia tra 1×10^{-3} m/s e 1×10^{-2} m/s.

Inoltre dall'analisi dei sondaggi è emerso che poco a nord della fascia di alta permeabilità più settentrionale è presente una zona dell'acquifero ove dominano nettamente le facies argilloso-marnose e dove i gessi sostanzialmente sono assenti. Questo settore che geograficamente si situa nell'intorno di Cascina Dabene, è stato tenuto in conto nel modello inserendo un volume a bassa permeabilità ($k = 1 \times 10^{-7}$ m/s; colore celeste in Figura 47).

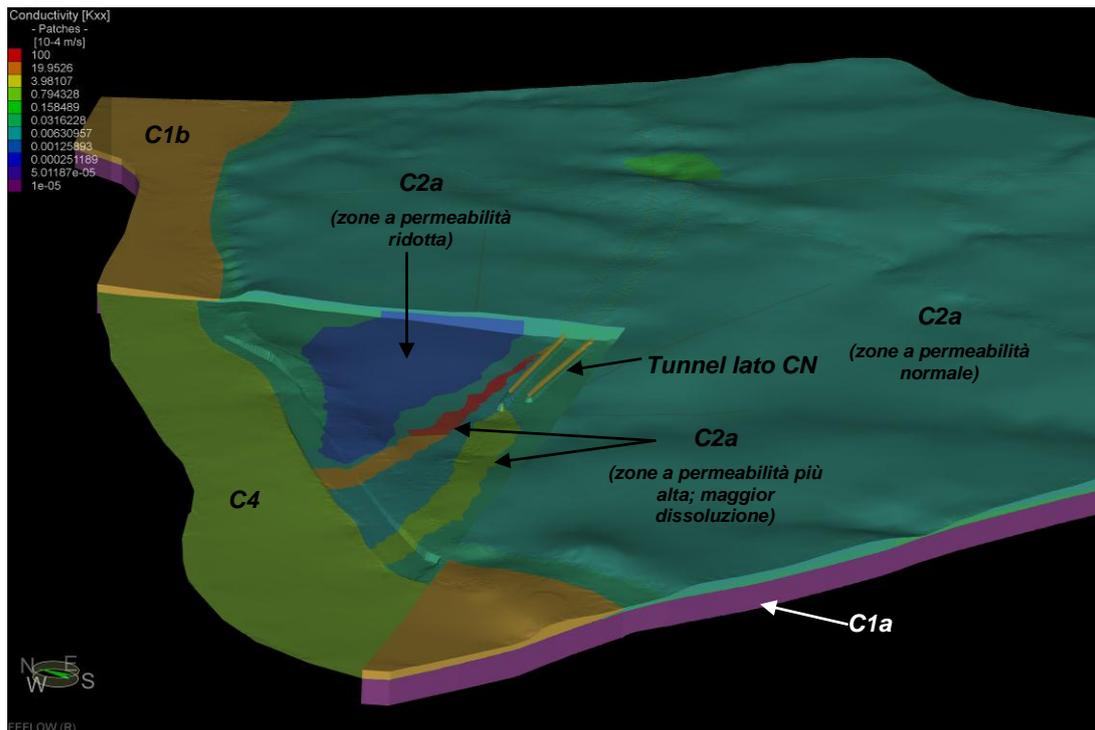


Figura 47. Distribuzione delle conducibilità idrauliche utilizzate per una calibrazione ottimale del modello numerico; C1a, C1b, C2a, C4 = complessi idrogeologici 1a, 1b, 2a e 4

E' stata inoltre inserita, a fianco della precedente e poco a sud, una seconda fascia con permeabilità meno elevate, dell'ordine dei 10^{-4} m/s (colore verde chiaro) per prendere in conto alcune inflessioni della superficie piezometrica e alcune anomalie osservabili nei profili geofisici.

Inoltre dall'analisi dei sondaggi è emerso che poco a nord della fascia di alta permeabilità più settentrionale è presente una zona dell'acquifero ove dominano nettamente le facies argilloso-marnose e dove i gessi sostanzialmente sono assenti. Questo settore, che geograficamente si situa nell'intorno di Cascina Dabene, è stato tenuto in conto nel modello inserendo un volume a bassa permeabilità ($k = 1 \times 10^{-7}$ m/s; cfr. colore violetto in Figura 48).

Ulteriori dettagli del settore di acquifero dei gessi includente le eterogeneità ora descritte sono riportate nella vista in pianta più particolareggiata di Figura 48. I colori sono differenti rispetto a quelli della figura precedente per evidenziare maggiormente le varie differenze di permeabilità. Peraltro questa figura di

dettaglio permette anche di visualizzare parzialmente il secondo asse di drenaggio individuato dalla carta piezometrica di Figura 27, che ha direzione circa N-S (angolo destra in alto della Figura 48).

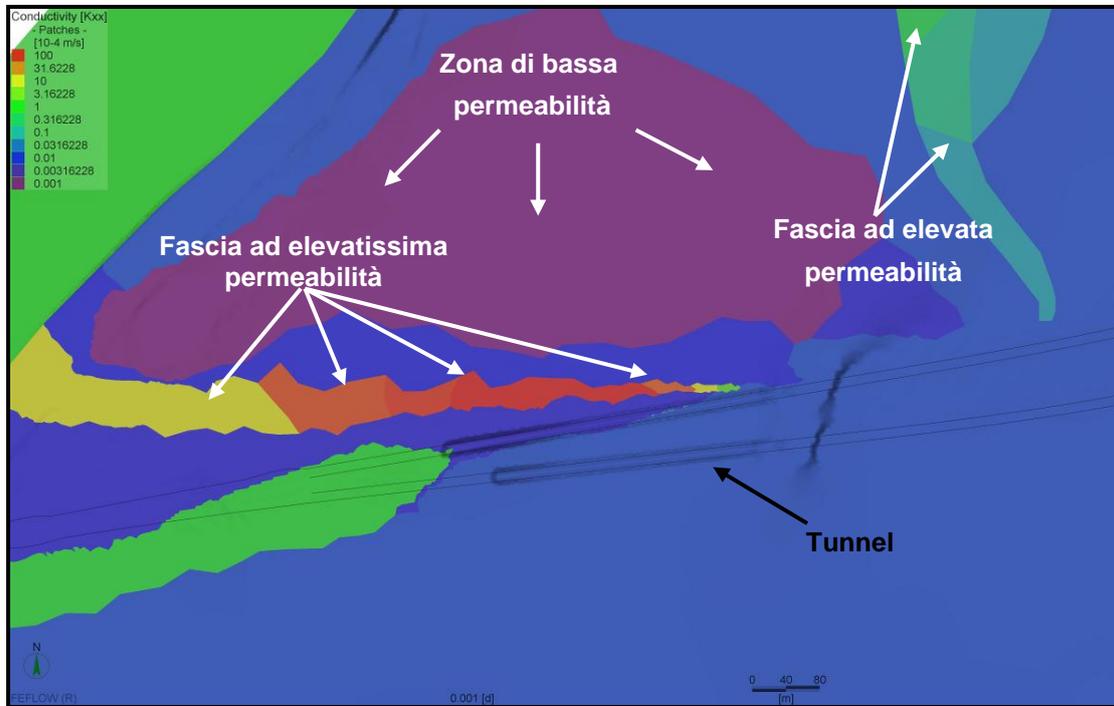


Figura 48. Dettaglio relativo alle conducibilità idrauliche utilizzate (vista in pianta); il layer del modello visualizzato è quello relativo all'acquifero dei gessi.

Passando invece alle condizioni idrauliche imposte ai contorni del modello, queste sono le seguenti:

- a valle (bordo NW), condizione di carico idraulico corrispondente alle quote imposte dalla superficie libera media del Fiume Tanaro;
- a monte (settore E e SE), lungo lo spartiacque del versante collinare, condizione di carico ricavata attraverso l'estrapolazione dei valori disponibili dai piezometri più vicini;
- sul bordo superiore del modello (superficie topografica), condizione di flusso corrispondente all'infiltrazione media efficace ricavata per questo settore. Valori più elevati di infiltrazione (3×10^{-3} m/giorno) sono stati posti in corrispondenza alle forme carsiche superficiali censite in questo settore e ai gessi presenti in affioramento, mentre valori più bassi (1×10^{-3} m/giorno) sono stati posti in corrispondenza delle aree a gessite affioranti.

⁴ m/giorno) sono stati imposti in corrispondenza delle litologie meno permeabili affioranti (es. argille marnose, limi argillosi).

La rappresentazione della distribuzione piezometrica naturale ottenuta attraverso la simulazione è mostrata in Figura 49.

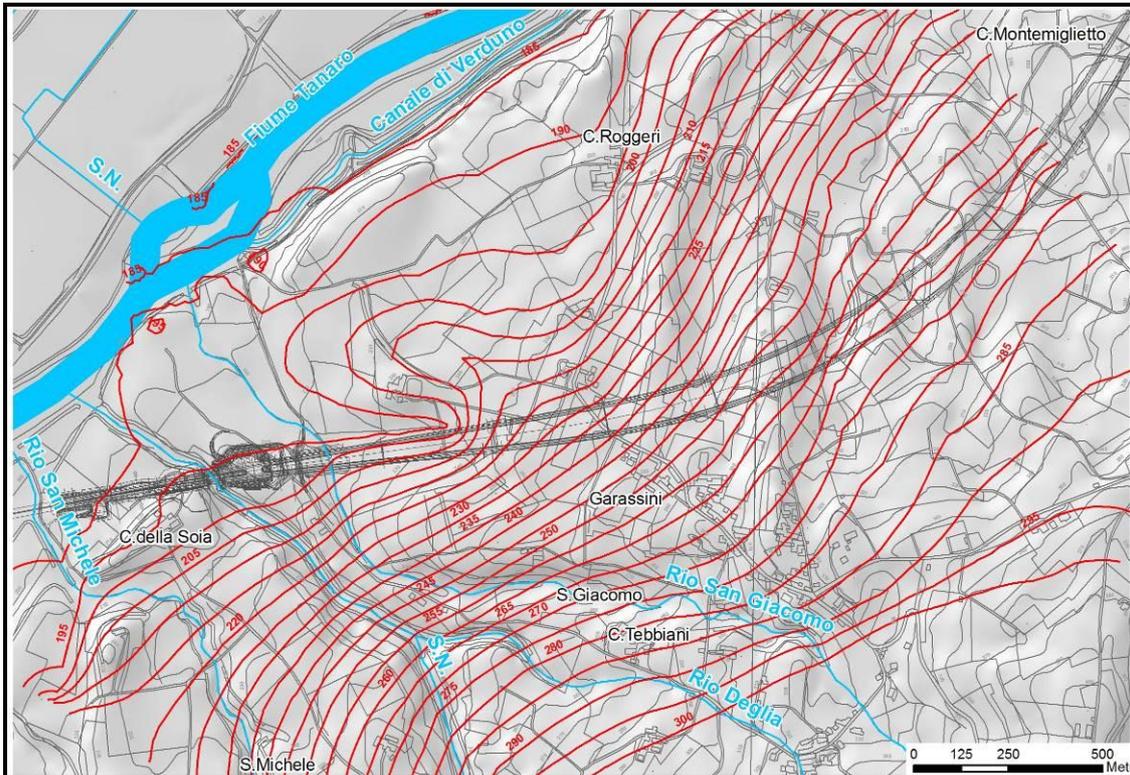


Figura 49. Distribuzione piezometrica relativa all'acquifero dei gessi ottenuta tramite la simulazione numerica.

8.3.4. Simulazione del flusso in fase di scavo del cunicolo centrale rispetto all'asse delle due canne

La simulazione prende in considerazione lo scavo del cunicolo in asse con le due canne (cfr. Capitolo 2). Il progetto prevede che tale cunicolo abbia una lunghezza di ca. 400 m, corrispondente alla distanza necessaria all'attraversamento dell'acquifero dei gessi, e che esso sia provvisto di un sistema drenante che permetta l'abbassamento della piezometria alla quota minima di scavo dello stesso; (i.e. canalette alla base dei piedritti convoglianti l'acqua percolante su un rivestimento di tipo *full-round*). Come si desume dalla



documentazione progettuale, la quota minima di scavo del cunicolo sarà a ca. 205 m.s.l.m. Confrontando questa quota con la ricostruzione della piezometria media della falda dei gessi emerge che il cunicolo andrà ad intercettare la falda negli ultimi 70-80 m di scavo.

Le simulazioni in regime perturbato, ovverosia con inserimento del drenaggio determinato dalla realizzazione delle gallerie in fase di scavo, hanno preso in considerazione una situazione in cui lo scavo comincerà dall'imbocco, attraversando progressivamente tutta la tratta dell'acquifero dei gessi fino ai primi metri nel substrato marnoso. E' stata assunta una situazione più prossima possibile alla realtà in cui la galleria viene scavata per piccole tratte successive, approfondendosi quindi progressivamente nell'acquifero e innescando il drenaggio su sezioni via via più lunghe.

Tuttavia, a causa delle lunghe tempistiche imposte dal simulatore in fase di calcolo in regime transitorio (si consideri a titolo d'esempio che due giorni di simulazione in condizioni drenate richiedono un tempo di calcolo pari a ca. 10 minuti), è stato necessario simulare una progressione di scavo che potrebbe anche risultare più rapida rispetto a quello che avverrà nella realtà. Più precisamente per ogni simulazione successiva sono stati attivati lungo l'asse del cunicolo 20 m di tratta drenante, corrispondenti quindi a 20 m di nuovi scavi. Relativamente a ciascuna tratta di avanzamento il drenaggio della galleria è stato protrato per 5 giorni. In sostanza in questo modo si è tentato di approssimare una velocità di scavo di circa 20 m ogni 4 giorni, corrispondenti a 5 m/gg, velocità che potrebbe anche risultare più rapida di quella che realmente si verificherà, quando si consideri che l'ammasso roccioso da scavare sarà piuttosto scadente e necessitante di messa in opera di sostegni consistenti. Una velocità di scavo maggiore di quella reale è comunque un'ipotesi cautelativa ai fini del calcolo delle portate, dal momento che le venute che via via verrebbero incontrate avremmo meno tempo per tendere alla stabilizzazione, con la conseguenza di ottenere delle portate cumulate al portale superiori a quelle reali.



Per simulare il drenaggio di questo tratto di falda, a tutti i nodi del perimetro del cunicolo è stato imposto un limite di carico corrispondente alla quota reale; a tali nodi è stato inoltre imposto un vincolo di flusso per evitare influssi dalla galleria verso l'interno del modello (*condizione seepage*).

Un dato importante che emerge da queste simulazioni è che il drenaggio progressivo del tunnel determina venute d'acqua relativamente contenute (dell'ordine di pochi litri al secondo); cfr. § 10.1 per la quantificazione delle portate. Portate di questa entità sono giustificate dal fatto che il tunnel innesca molto gradualmente il drenaggio della falda; a sua volta i carichi idraulici in questo settore sono relativamente bassi; caso diverso sarebbe se la galleria drenasse un acquifero con battenti idrici elevati.

In Figura 50 con le linee verdi è mostrata la distribuzione piezometrica relativa ad una situazione in cui il drenaggio del cunicolo è stabilizzato da circa 1 anno; per confronto, è riportata anche la distribuzione della piezometria ante-operam. Come si può osservare dalla figura la piezometria registra una variazione che tuttavia risulta essere limitata al settore intorno al cunicolo, mentre non si registrano variazioni consistenti oltre i 500 m di distanza dal cunicolo stesso.

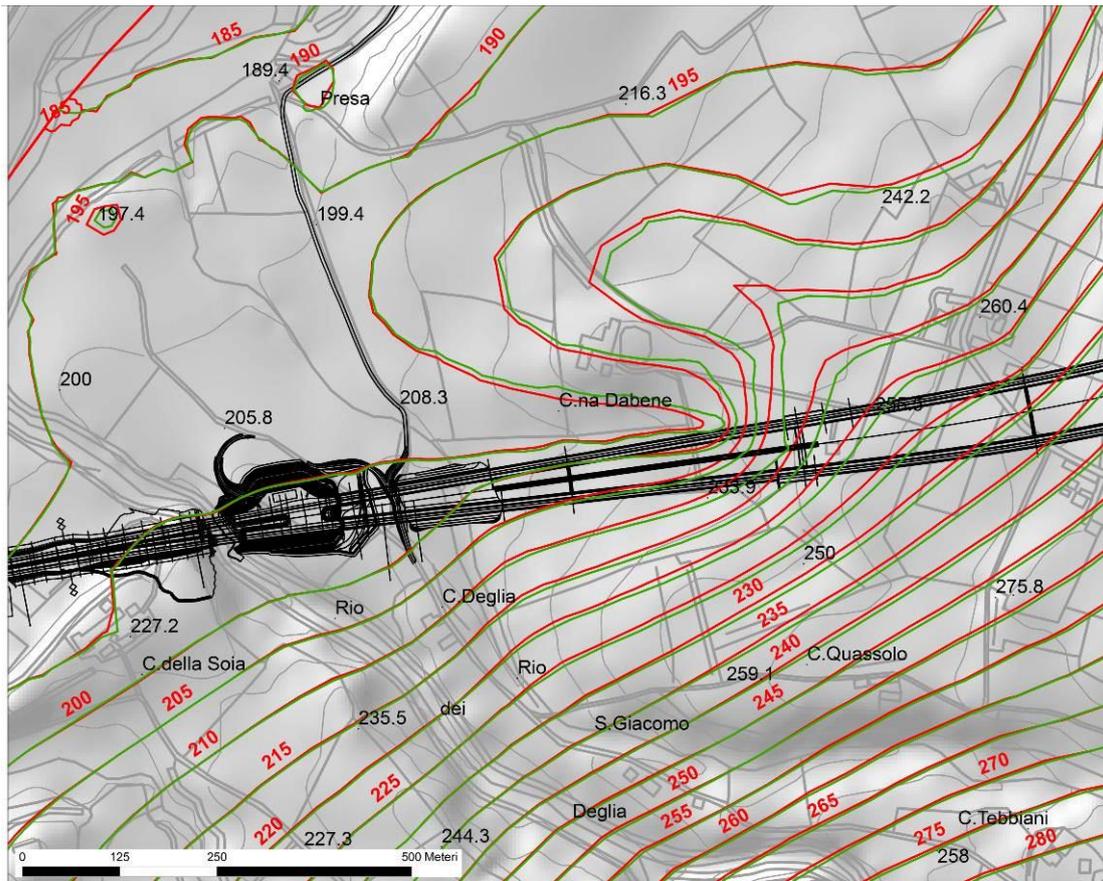


Figura 50. Confronto tra distribuzione piezometrica allo stato naturale (linee rosse) e in una situazione in cui il drenaggio del cunicolo centrale ha raggiunto una stabilizzazione dopo 1 anno dalla fine dello scavo all'interno dell'acquifero dei gessi (linee verdi).

In Figura 51, attraverso il confronto tra la situazione ante-operam (a) e quella post-operam (b), è possibile apprezzare l'entità della variazione piezometrica che interessa la superficie di falda nel settore circostante il cunicolo. L'impatto derivato da tale abbassamento è analizzato e discusso nel § 9.1.1.

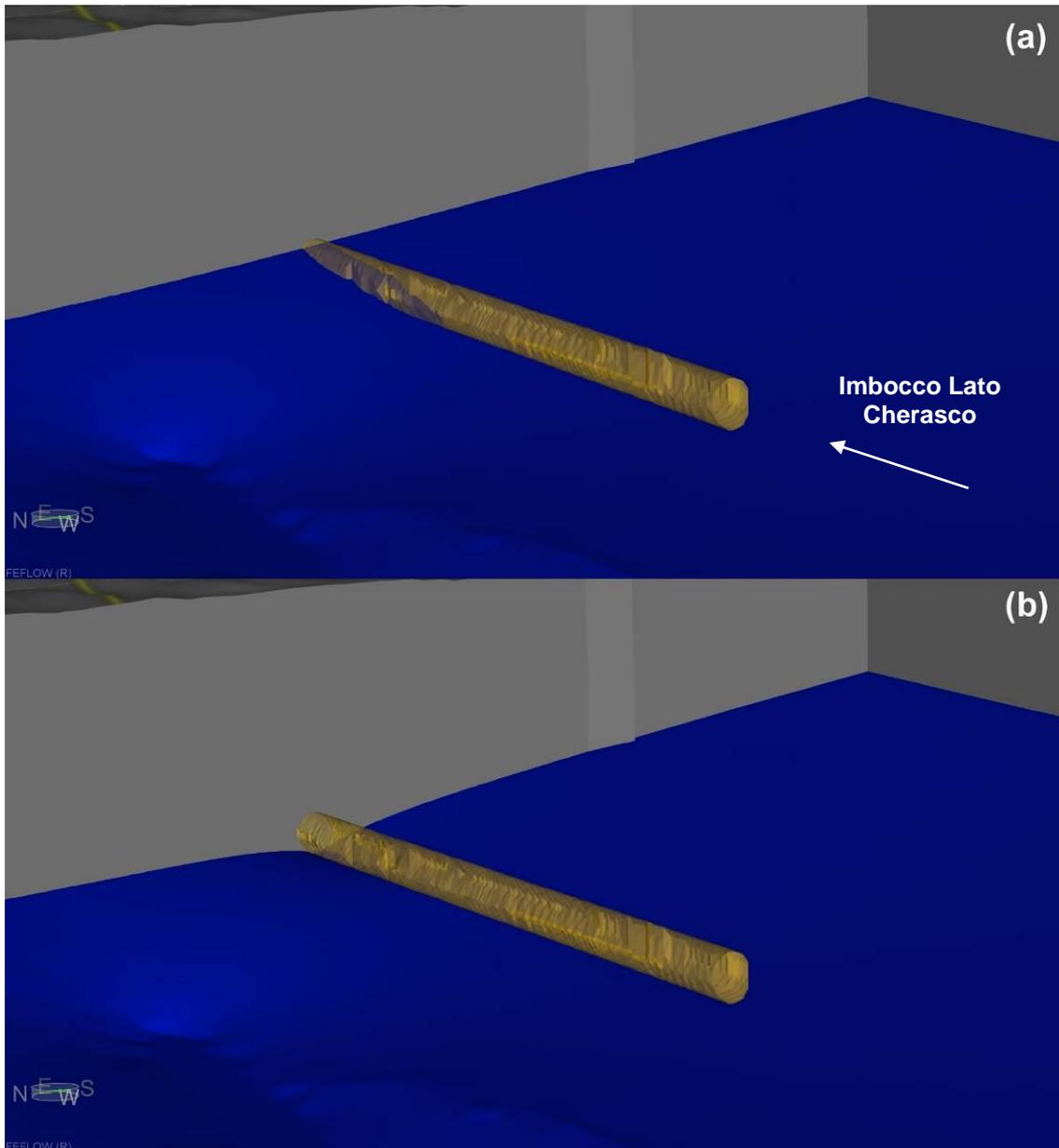


Figura 51. Visualizzazione prospettica del cunicolo con confronto tra la superficie piezometrica (a) prima del drenaggio ad opera del cunicolo (situazione ante-operam) e (b) in seguito al drenaggio della falda da parte del cunicolo (situazione stabilizzata).

8.3.5. Simulazione della fase di scavo delle due canne della galleria di Verduno

Successivamente alla realizzazione del cunicolo è previsto lo scavo delle due canne della galleria con tecnica TBM-EPB. Inizialmente, si procederà con lo scavo della canna di monte, al termine del quale seguirà quello della canna di

valle. La tecnica di scavo, che permette di realizzare un contrasto di pressione sul fronte della galleria e la posa in opera di conci dotati di interconnessioni a tenuta idraulica, implica che le due canne si comportino permanentemente come due elementi impermeabili a partire dal momento del loro scavo.

Questa condizione è stata pertanto presa in considerazione nella simulazione di flusso, mirando a definire quella che sarà la risposta idraulica della falda a questa configurazione di progetto. Peraltro, nel modello è stato considerato che il cunicolo centrale alle due canne sarà comunque esistente durante il periodo di scavo delle due canne, e fungerà da elemento drenante nei confronti della falda.

Per quanto lo scavo delle due canne sarà svolto progressivamente, per semplicità la simulazione ha preso in considerazione solamente il momento finale dello scavo, prima della canna di monte e poi di quella di valle. La distribuzione della piezometria riferibile ad una condizione di stabilizzazione del sistema di flusso dopo la realizzazione delle due canne è riportata in Figura 52, ove è possibile effettuare un confronto rispetto alla distribuzione della piezometria al naturale (ante-operam). Si può affermare che a grande scala la configurazione piezometrica non è molto diversa da quella già osservata in seguito all'inserimento del cunicolo centrale, per questo motivo non è stata inserita una figura di confronto tra la situazione con il solo cunicolo e la situazione con cunicolo e canne. La differenza tra i due casi è che, rispetto alla condizione in cui è presente il solo cunicolo drenante, l'aggiunta delle due canne, rappresentanti elementi impermeabili, determina un modesto effetto di parziale aumento dei carichi idraulici della falda a monte della canna di monte.

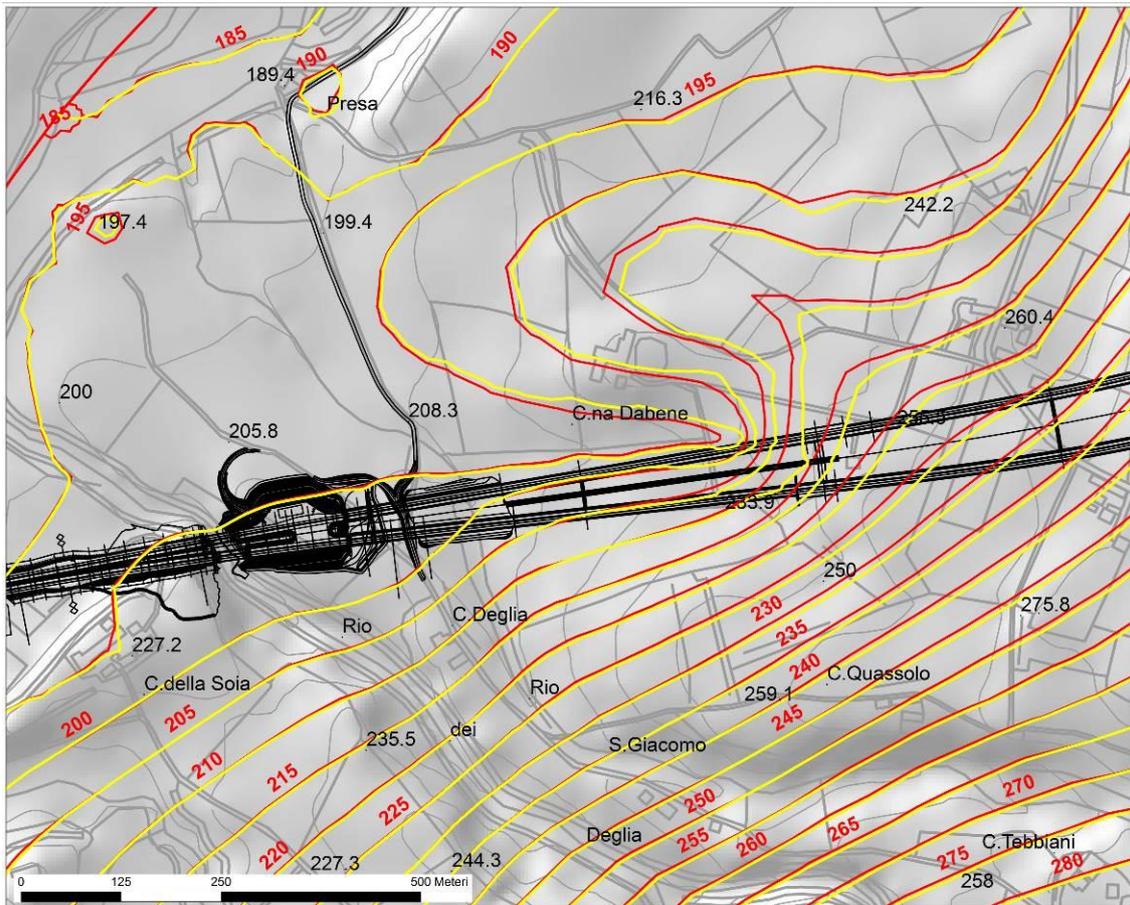


Figura 52. Confronto tra distribuzione piezometrica allo stato naturale (linee rosse) e in una situazione in cui la falda raggiunge una condizione di stabilizzazione dopo la messa in opera del cunicolo e delle due canne (linee gialle).

L'entità dell'innalzamento di carico idraulico è comunque relativamente contenuta ed è dell'ordine di 0.5-1.2 m nelle immediate vicinanze della canna di monte (i.e. pochi metri), per poi ridursi ulteriormente allontanandosi dalla galleria. Questo effetto è apprezzabile anche in Figura 53 e descritto nel dettaglio nel paragrafo § 9.1.1, inerente ai possibili impatti ambientali connessi alla galleria. Il significato di questo aumento è dovuto al fatto che la canna di monte agisce da parziale barriera idraulica ed il flusso è in parte costretto a scavalcare l'ostacolo, avvolgendolo, tanto che come è possibile osservare dalle linee di flusso di Figura 53, visualizzabili con la tecnica del *particle tracking*, parte del flusso avviene anche al di sopra della calotta della galleria di monte.

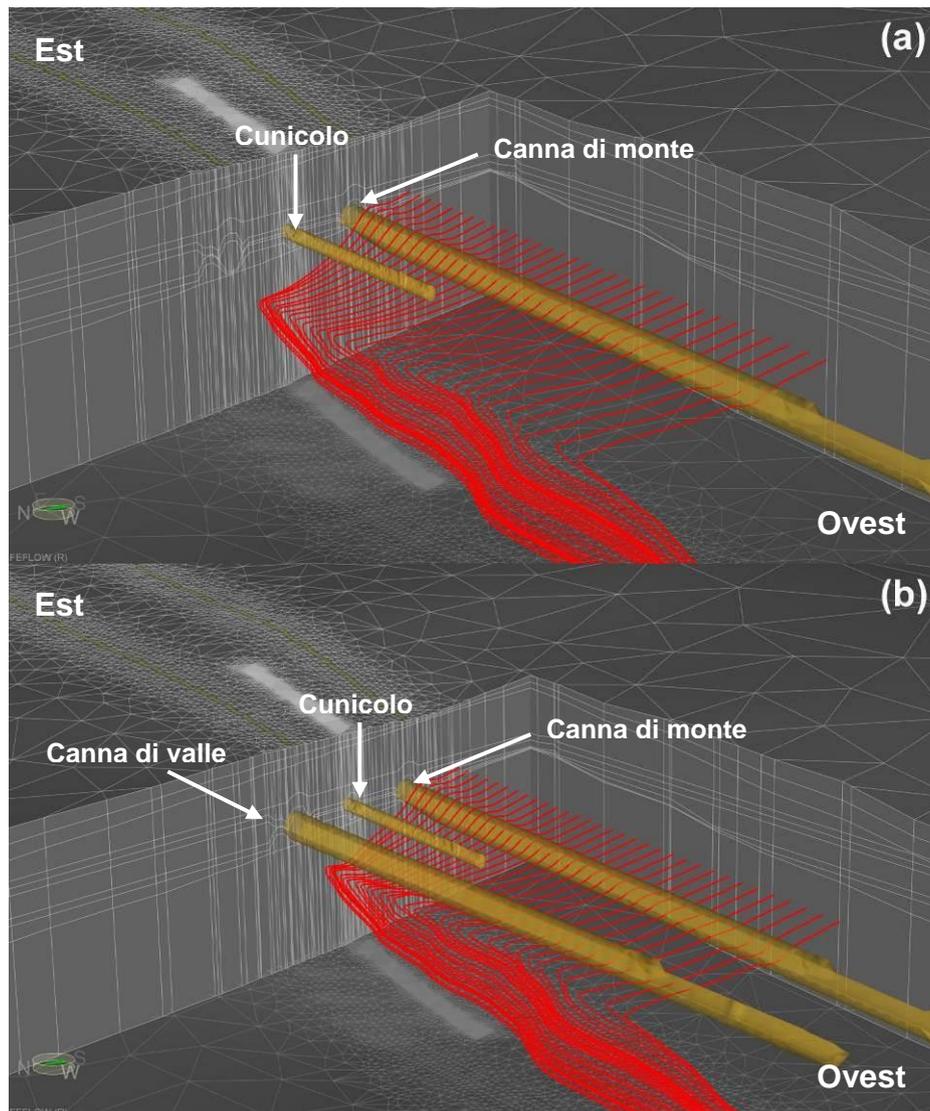


Figura 53. Rappresentazione delle linee di flusso (in rosso) nell'acquifero dei gessi relativamente alla fase di realizzazione della galleria di monte (a) e, successivamente, della galleria di valle (b).

Questo fenomeno invece non si visualizza per la galleria di valle a causa del fatto che il cunicolo drenante induce un abbassamento piezometrico, tale per cui per questa canna la tratta sotto falda risulta ridotta a quella ipotizzabile da piezometria imperturbata. Dalla figura è anche osservabile come a valle della canna di valle le particelle d'acqua si orientino in direzione ca. Est-Ovest a seguito della loro canalizzazione nel condotto ad elevata permeabilità di cui si è discusso in dettaglio nel § 6.2.

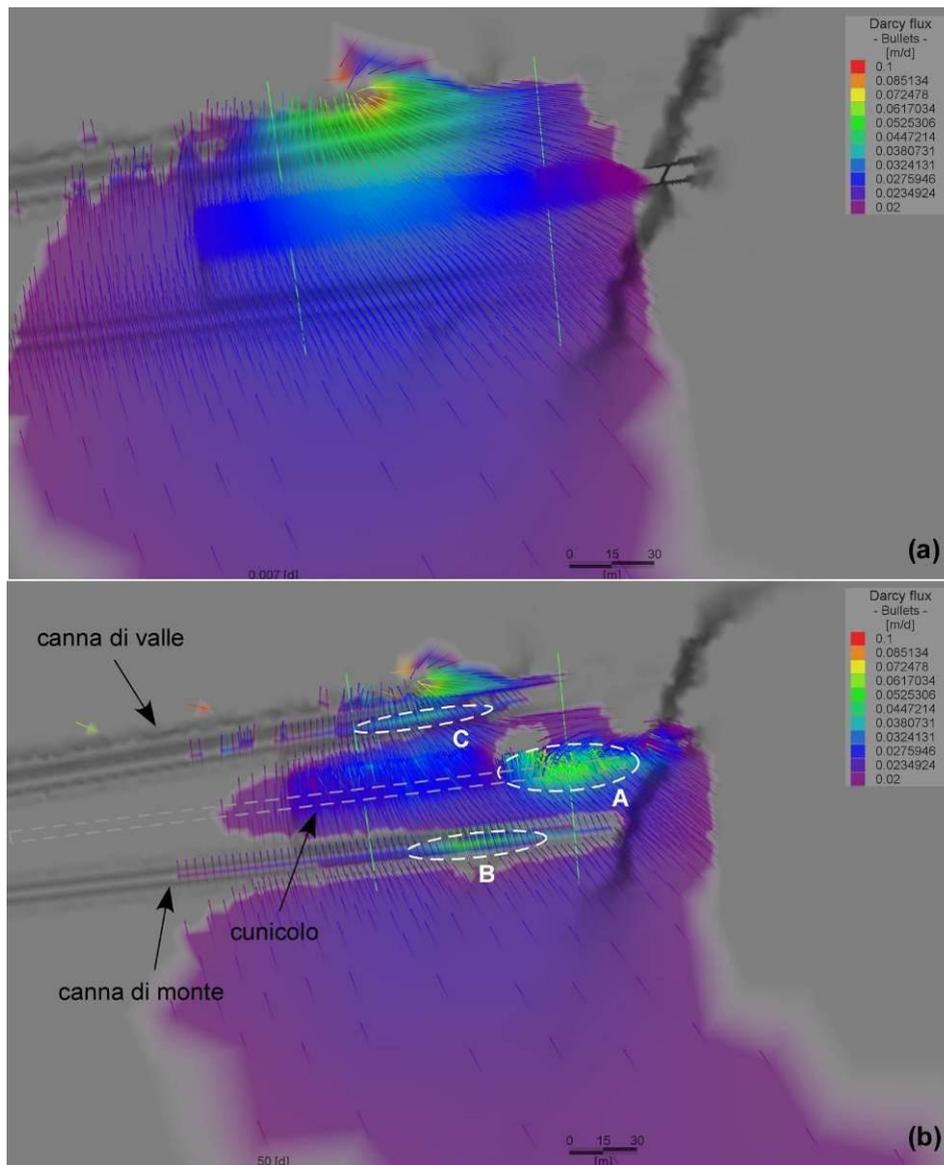


Figura 54. Confronto tra distribuzione del campo di flusso in condizioni naturali (a), ed in presenza del cunicolo drenante e delle due canne impermeabilizzate (b); i campi tratteggiati e codificati A, B e C mostrano i settori in cui vi è un locale aumento di flusso rispetto alla situazione al naturale. Nel settore a monte della galleria di valle le zone non coperte da colorazione indicano prevalentemente situazioni di deflusso di bassa entità (< 2 cm/giorno).

Il modello numerico permette anche di visualizzare le differenze nella distribuzione delle linee di flusso nell'intorno della galleria in presenza prima della canna di monte e poi di entrambe. A questo proposito, in Figura 54 si può osservare come la presenza del cunicolo drenante e delle due canne impermeabilizzate determini una variazione della configurazione del campo di

distribuzione del flusso rispetto alla configurazione osservabile in condizioni naturali (ante-operam). In particolare, si registra un aumento localizzato di flusso, il quale ovviamente è giustificato dal drenaggio dell'opera che ha l'effetto di determinare un aumento del gradiente idraulico, e quindi della velocità di scorrimento dell'acqua nelle immediate vicinanze del cunicolo stesso. Nei settori B e C invece l'incremento di flusso è imputabile al restringimento di sezione dell'acquifero dovuto alla messa in posa dei conci impermeabili.

In relazione a quanto sopra descritto al riguardo delle variazioni idrauliche indotte dalla configurazione delle opere sotterranee in progetto nell'acquifero dei gessi non è possibile escludere che sul lungo periodo si possano verificare i seguenti fenomeni:

- a livello della galleria. Lo sviluppo di flussi concentrati di maggiore entità può favorire lo sviluppo di circuitazioni carsiche nell'intorno del cavo, con l'eventuale successivo instaurarsi di fenomeni erosivi attorno ai rivestimenti. Questa condizione potrebbe determinare lo sviluppo di cedimenti differenziali su conci attigui con innesco di un loro potenziale disallineamento. Come discusso nel paragrafo 5.6 questa è un'evenienza che ha una probabilità di accadimento bassa o molto bassa su un intervallo temporale di medio termine (< 30-50 anni), mentre è maggiormente probabile che si verifichi una fenomenologia di questo tipo, sebbene non necessariamente con caratteristiche particolarmente deleterie per l'opera (es. lieve disallineamento dei conci), su un intervallo temporale di lungo termine (50-100 anni);
- in superficie. L'effetto concomitante dell'incremento di livello idrico causato dall'impermeabilizzazione del cavo e dell'occorrenza di eventi piovosi di particolare intensità (che comportano un aumento naturale di livello) può determinare una risalita della falda fino in superficie, con sviluppo di fenomeni di erosione dal basso (*piping*) e formazione di sinkholes. Peraltro le elaborazioni precedentemente illustrate testimoniano che comunque, anche in caso di eventi meteorici

eccezionali il livello d'acqua nell'intorno delle gallerie subirebbe un innalzamento anche rispetto al suo valor medio naturale.

Sebbene i fenomeni sopra descritti e le ripercussioni a livello della galleria e di superficie abbiano una maggiore probabilità di manifestazione sul lungo periodo, pare tuttavia ragionevole predisporre degli accorgimenti atti, se non ad eliminare, almeno a ridurre in maniera consistente tale possibilità, in modo da garantire una stabilità di lungo termine dell'opera e la minimizzazione degli impatti in superficie. A questo scopo, un intervento finalizzato alla riduzione della circolazione idrica nei settori sottostanti le due canne della galleria nel settore di attraversamento dei gessi permette di minimizzare gli effetti di dissoluzione dei gessi e di erosione dal basso, che sono correlati alla stessa circolazione idrica. Questo intervento è stato preso in considerazione nel progetto della galleria di Verduno e si concretizza nella predisposizione di un sistema di fasci di dreni collocati a monte delle due canne (cfr. Fase 3 in Capitolo 2) e gli effetti sulla circolazione idrica sono descritti nel successivo paragrafo.

8.3.6. Simulazione con realizzazione di un by-pass drenante

Nella simulazione numerica è stato preso in considerazione un sistema di fasci di dreni disposti come dall'estratto del progetto illustrato in Figura 55. La disposizione dei dreni è stata progettata nella prospettiva di realizzare un drenaggio quanto più possibile efficiente nell'ottica di una riduzione del deflusso al di sotto delle due canne quando esse si sviluppano nell'acquifero dei gessi.

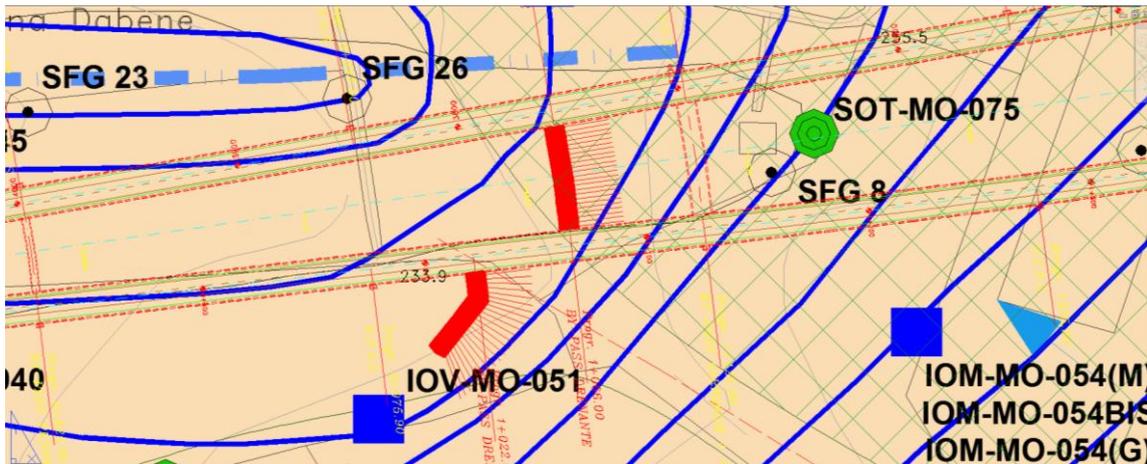


Figura 55. Estratto dello schema di realizzazione del sistema di drenaggi. I bypass sono rappresentati con le linee rosse spesse, mentre i dreni microfessurati sono rappresentati con le linee rosse sottili.

La modellizzazione numerica ha consentito di verificare gli effetti di tale drenaggio tramite il confronto tra soluzioni dimensionate diversamente e quindi permette di scegliere la soluzione più opportuna sia dal punto di vista ambientale, sia dal punto di vista della stabilità a lungo termine della galleria. Attraverso il confronto tra la distribuzione piezometrica in condizioni naturali e in presenza del sistema di drenaggio di Figura 56 è possibile valutare quale sia la variazione indotta dal sistema stesso; la descrizione di dettaglio degli impatti attesi da questa configurazione progettuale è affrontata nel § 9.1.1.

Si valuta che l'effetto del drenaggio prodotto dal sistema sopra descritto vada a ridurre di una percentuale del 40-50 % l'entità del deflusso di falda nel settore della galleria. Si ritiene che questa riduzione vada a ridurre in maniera consistente il potenziale di dissoluzione dei gessi, che sul lungo periodo potrebbe essere la causa di cedimenti differenziali della base della galleria, con effetti di disallineamento dei conci fino a possibile rottura delle giunture a tenuta idraulica dei diversi elementi in calcestruzzo. In conclusione, si ritiene che a fronte del potenziale già relativamente limitato di dissoluzione nell'acquifero dei gessi, da cui gli eventuali cedimenti deriverebbero (cfr. stima sul potenziale di dissoluzione dei gessi discusso nel § 5.6), il sistema di drenaggio messo in opera consentirà di ridurre ulteriormente il rischio che si verifichi una tale



eventualità. Inoltre, le simulazioni numeriche mostrano che il sistema di drenaggio consentirà di operare positivamente come un sistema di smorzamento, o un “troppo pieno”, per i carichi idraulici che si potranno produrre nell’acquifero in corrispondenza di precipitazioni di elevata intensità.

Si specifica che le modellizzazioni numeriche hanno costituito uno strumento utile anche alla definizione delle caratteristiche dimensionali del sistema di drenaggio oggetto di questa fase costruttiva. Infatti, attraverso le simulazioni sono state testate più alternative riguardanti la porzione di acquifero da sottoporre a drenaggio.

Un’importante precisazione da fare è che sebbene le simulazioni numeriche costituiscano uno strumento molto importante per il controllo dell’influenza del sistema drenante ha sull’acquifero, il dimensionamento definitivo dei dreni sarà effettuato in fase costruttiva nel momento in cui il modello geologico-idrogeologico di riferimento sarà confermato o localmente aggiornato sulla scorta dei dati che verranno acquisiti ed elaborati nel corso dello scavo della galleria.

Da ultimo si evidenzia che, in aggiunta al by-pass drenante, anche lungo la galleria, nella tratta interessata dai gessi, si predisporranno drenaggi, di diametro 100 mm, L=16.00 m, la cui intensità sarà valutata in corso d’opera anche in funzione dei dati di monitoraggio raccolti dalla rete di controllo piezometrico.

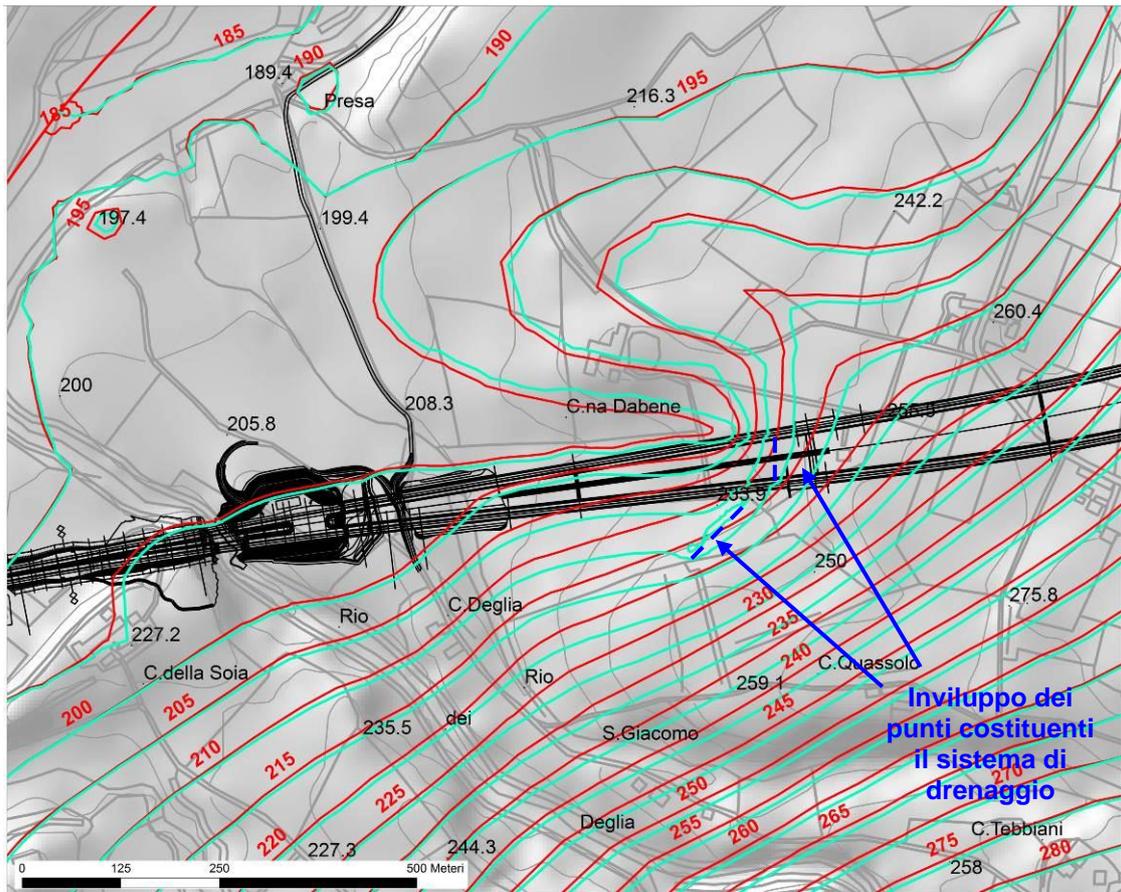


Figura 56. Confronto tra distribuzione piezometrica allo stato naturale (linee rosse) e in una situazione in cui la falda raggiunge una condizione di stabilizzazione dopo la messa in opera dei fasci di dreni connessi ai due by-pass drenanti (linee azzurre).

9. DESCRIZIONE DEGLI SCENARI DI IMPATTO E DI RISCHIO DERIVANTI DALLO SCAVO DELLA GALLERIA DI VERDUNO

Il presente capitolo descrive i possibili scenari di impatto sulle falde acquifere derivanti dallo scavo della Galleria di Verduno. I risultati delle indagini geologiche, idrogeologiche, geofisiche delineano un quadro conoscitivo piuttosto dettagliato sulla base del quale è possibile sia effettuare una previsione degli impatti attesi sugli acquiferi, sia fornire una descrizione qualitativa dei potenziali rischi idrogeologici.

9.1. IMPATTO SUGLI ACQUIFERI

Il modello idrogeologico discusso nei capitoli precedenti consente di identificare l'acquifero dei gessi come quello maggiormente impattato dall'opera, specificando che al termine impatto si attribuisce in questo caso specifico unicamente il significato di depauperamento quantitativo, e non qualitativo, dovuto al drenaggio della galleria e delle opere connesse. Come descritto nelle premesse del modello, la distribuzione piezometrica presa come riferimento per la calibrazione ante-operam è quella relativa alla ricostruzione che tiene conto sia della campagna di misure del 2001-2002 sia di quella del 2011-2013 (cfr. Figura 20). Pur considerando questa configurazione come quella valida ai fini predittivi degli impatti, è stata fatta una valutazione anche degli impatti conseguenti che deriverebbero partendo da una configurazione piezometrica come quella che risulterebbe considerando i soli dati piezometrici del 2011-2013 (cfr. Figura 21). Attraverso questa valutazione emerge che gli impatti risultanti a scala del versante sarebbero sostanzialmente confrontabili con quelli derivanti dalla configurazione precedente. La differenza risiede nel fatto che, nel caso della configurazione con la piezometria ante-operam più elevata (ovvero soli dati 2011-2013), si otterrebbe un maggiore gradiente idraulico nel settore più prossimo ai by-pass drenanti, indicativamente a 20-30 m di distanza dagli stessi. Oltrepassata questa distanza, la distribuzione spaziale e l'entità degli impatti risultanti è del tutto simile all'altra configurazione. Si specifica che la

differenza che tra le due configurazioni nel settore più prossimo i by-pass drenanti è comunque inferiore all'entità delle oscillazioni piezometriche naturali che si osservano in questo settore e quindi, agli effetti pratici, si valuta che l'assunzione di uno stato della piezometria rispetto ad un altro non abbia alcuna ripercussione in termini di una sottovalutazione degli impatti idraulici derivanti dal drenaggio. Alla luce di questa premessa, in questa fase si è ritenuto sufficiente fornire una descrizione degli impatti basata sulla configurazione piezometrica derivante dalla ricostruzione con i dati 2001-2002 e del 2011-2013, rimandando ad un approfondimento o revisione della modellizzazione alla fase esecutiva del cunicolo esplorativo in cui saranno disponibili nuovi dati idrogeologici.

Inoltre, va specificato che, escludendo l'acquifero dei gessi che sarà interessato dalla realizzazione di una serie di opere sotterranee il cui effetto sarà oggetto di un'attenta analisi nei paragrafi successivi, per gli altri acquiferi non si prevede che si verifichi alcun particolare impatto. Questo è dovuto al fatto che la tecnologia TBM-EPB prescelta per lo scavo della galleria consente di minimizzare questa evenienza (cfr. Capitolo 2). Come verrà discusso nel paragrafo relativo alla quantificazione delle portate, un minimo di impatto è possibile che si verifichi in corrispondenza di alcune tratte poste al di fuori dell'acquifero dei gessi in cui il carico idrostatico eccede il valore soglia di tenuta di pressione che la TBM-EPB è in grado di esercitare in corrispondenza del fronte di scavo. Tuttavia, si rimarca che il drenaggio si verifica in periodi di tempo molto ristretti e limitati all'intervallo di tempo necessario affinché la macchina possa avanzare e proseguire con la messa in opera dei conci.

9.1.1. Acquifero dei gessi (complesso 2a)

In relazione alla configurazione progettuale e al cronoprogramma di realizzazione delle opere in sotterraneo previste nell'acquifero dei gessi è possibile fare una distinzione tra gli impatti attesi sul breve e sul lungo periodo:

- Impatti a breve termine: determinati, in un primo tempo, dal drenaggio operato dal cunicolo centrale alle due canne e, in un secondo tempo,

dalla somma degli effetti idraulici determinati dalla compresenza del cunicolo drenante e dalle due canne impermeabili;

- Impatti a lungo termine: sul lungo termine il cunicolo in asse tra le due canne verrà sigillato e conseguentemente ne risulterà una condizione di assenza di drenaggio; contemporaneamente anche le due canne principali rimarranno in condizione di assenza di drenaggio, se non in corrispondenza del sistema di dreni descritto in precedenza..

Attraverso il confronto geospaziale (in ambiente ArcGis) dei valori di livello relativi ad una situazione ante-operam (stato naturale della falda) e quelli ottenuti assumendo l'inserimento delle diverse opere in sottterraneo è stato possibile ottenere una serie di elaborazioni grafiche utili a valutare il grado di impatto prevedibile sull'acquifero.

Impatti attesi a breve termine

Al termine dei lavori per la realizzazione del cunicolo centrale alle due canne l'abbassamento del livello di falda atteso è quello rappresentato in Figura 57. Tale figura mostra una zonizzazione degli abbassamenti attesi, suddividendo tre fasce: un settore in cui gli abbassamenti sono di lieve entità (0.5-1.5 m), uno in cui sono di media entità (1.5-2.5 m) ed un in cui sono di forte entità (2.5-4.5 m). L'abbassamento di lieve entità (fino a 0.5 m) si estende fino a 250 m dalla zona ipocentrale definita tramite l'elaborazione dei dati di simulazione, mentre un abbassamento di massima entità (3.5-4.5 m) ha un'estensione al massimo di 40 m. L'abitato della Borgata Garassini rimane ubicato su una fascia esterna anche alla zona di minimo abbassamento previsto.

L'aspetto importante da rimarcare è che gli abbassamenti stimati, compresi quelli massimi, sono di una grandezza inferiore rispetto alle variazioni stagionali misurate attraverso i piezometri della rete di Monitoraggio Ambientale. Infatti, come descritto nel Capitolo 6, in questo settore il livello di falda ha un'escursione tra valori massimi e minimi anche di oltre 10 m. In sostanza, si

può concludere che lo scavo del cunicolo induce una variazione negativa che rientra ampiamente nell'ordine delle oscillazioni naturali del livello di falda.

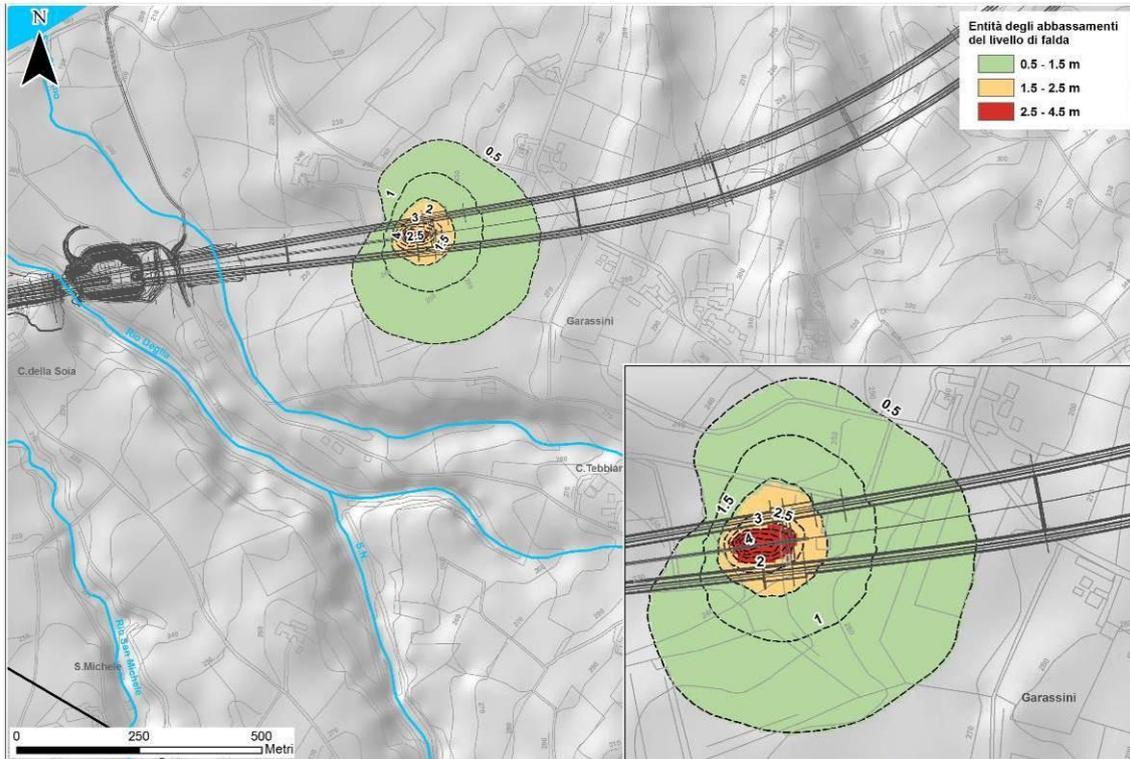


Figura 57. Rappresentazione degli abbassamenti attesi del livello piezometrico dovuto al drenaggio del cunicolo centrale all'asse delle due canne, successivamente all'attraversamento dell'acquifero dei gessi; ingrandimento del settore con il massimo abbassamento nel riquadro a destra.

Successivamente a questa fase, i risultati della simulazione con l'inserimento delle due canne della galleria hanno permesso l'elaborazione della immagine di Figura 58. Da questa immagine è possibile apprezzare come la superficie di abbassamento rimanga complessivamente la stessa di quella evidenziata dalla figura precedente. Essa è lievemente distorta dall'inserimento delle due canne non drenanti le quali hanno l'effetto di produrre un innalzamento piuttosto localizzato dell'ordine di 0.5-1.5 m nelle vicinanze della canna di monte. Tuttavia, l'entità di questo innalzamento non è tale da ritenere che esso possa determinare qualche significativo effetto in superficie. Chiaramente valgono anche in questo caso le considerazioni precedenti riguardanti la Borgata

Garassini, che rimane ubicata esternamente al settore interessato dagli abbassamenti di falda più consistenti.

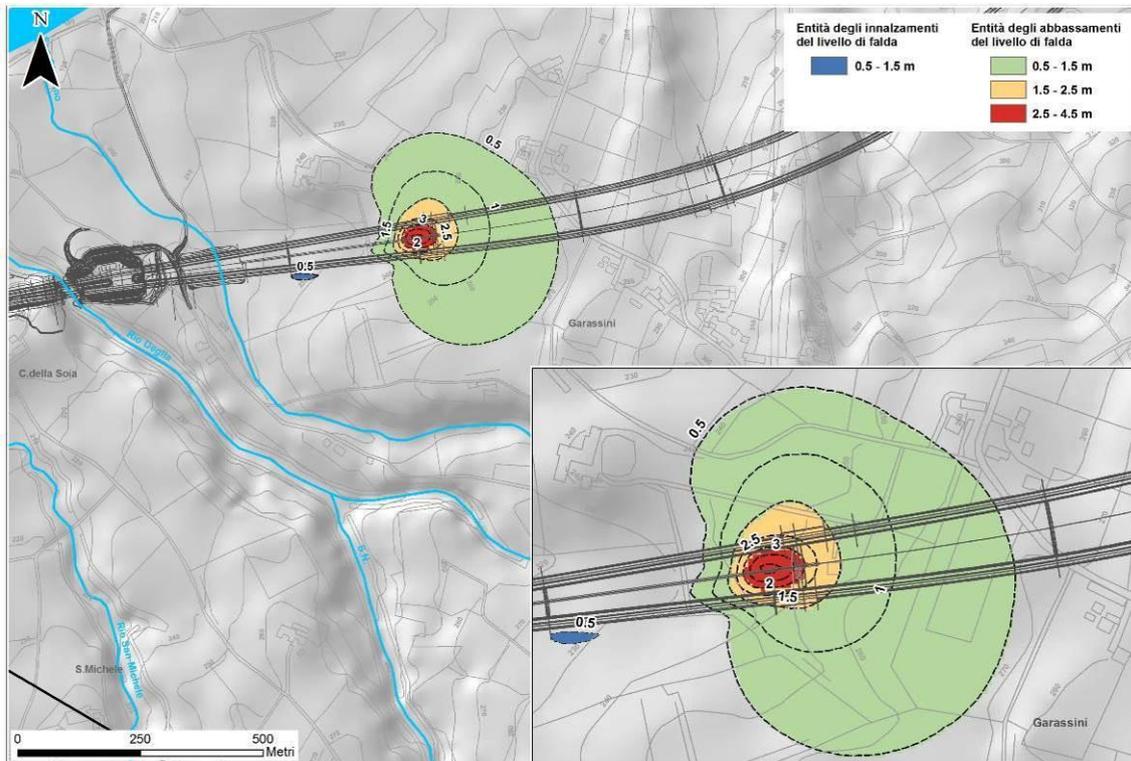


Figura 58. Rappresentazione delle variazioni (abbassamenti e innalzamenti) di livello piezometrico dovute in seguito alla somma degli effetti del drenaggio del cunicolo centrale e alla realizzazione delle due canne impermeabilizzate; ingrandimento del settore con il massimo abbassamento nel riquadro a destra.

Impatti attesi a lungo termine

In assenza di drenaggio dalle canne principali e dal cunicolo assiale che sarà ritombato a chiusura dei lavori, l'inserimento dei vari fori drenanti connessi ai due by-pass della galleria provoca comunque lo sviluppo di un abbassamento della superficie naturale di falda comparabilmente maggiore di quello osservato nelle fasi costruttive precedenti.

L'abbassamento massimo si registra a qualche decina di metri a Sud della canna di monte e raggiunge valori di 8 m rispetto alla condizione naturale (ante-operam). Un abbassamento di 2.5 m è atteso in una fascia compresa tra 150-

190 m di distanza dal punto di abbassamento massimo, mentre un abbassamento di 1.5 m è atteso in una fascia compresa tra 400-450 m di distanza dal punto di abbassamento massimo. Un aspetto molto importante è che anche in questo caso la Borgata Garassini ricade in una fascia di territorio esterna al cono di abbassamento illustrato in Figura 59 e pertanto gli effetti dell'abbassamento in corrispondenza dell'abitato possono essere considerati ininfluenti ai fini dei rischi di innesco di fenomeni d'instabilità in superficie (es. cedimenti, franamenti).

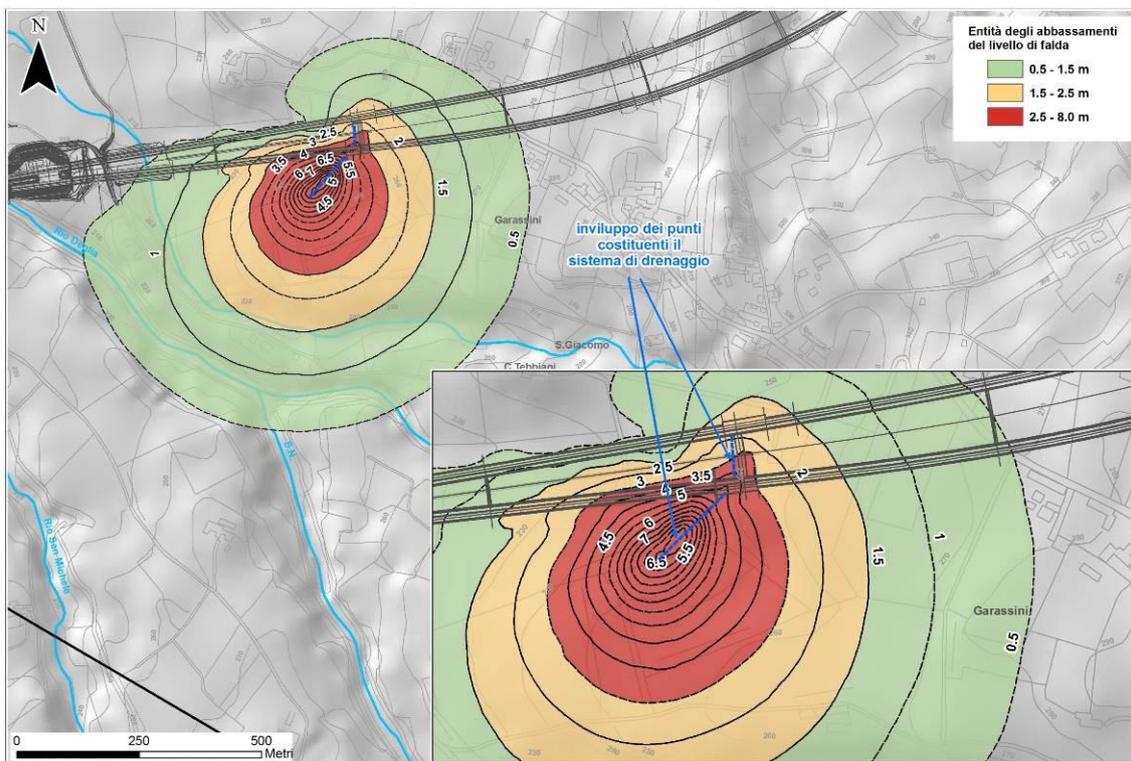


Figura 59. Rappresentazione delle variazioni di livello piezometrico dovute in seguito alla somma degli effetti derivanti dalla messa in funzione del sistema di fasci di fori drenanti; ingrandimento del settore con il massimo abbassamento nel riquadro a destra.

Va rimarcato che l'inserimento dei fasci di dreni ha lo scopo di produrre intenzionalmente un controllo del livello piezometrico della falda in questo settore in quanto esso consentirà di operare positivamente come un sistema di smorzamento, o un "troppo pieno", per i carichi idraulici che si potranno produrre nell'acquifero in corrispondenza di precipitazioni di elevata intensità.

Infatti, se non si provvedesse ad un sistema di questo tipo, l'aumento dei carichi provocati dalle piogge, combinato con l'effetto di locale aumento dei carichi idraulici a monte del rivestimento della galleria (in particolare della canna di monte; cfr. Figura 58 e discussione precedente), potrebbe provocare un'eccessiva risalita di livello, che localmente si attesterebbe a quote prossime alla superficie. In questo caso non si potrebbe escludere che a lungo andare una ridistribuzione del flusso di questo tipo possa provocare una dissoluzione progressiva nelle parti più superficiali dei gessi, dovuta ad un incremento delle velocità di flusso nell'intorno della galleria, ed una conseguente accelerazione di fenomenologie tipo sink-holes. In conclusione, il sistema di drenaggio proposto consente di minimizzare il rischio che si verifichi una tale evenienza oltre ad escludere che si verifichino dei locali cedimenti, indotti sempre dalla dissoluzione dei gessi, in corrispondenza della galleria.

9.1.2. Acquifero delle intercalazioni detritiche sabbiose (complesso 2b)

Nel caso delle intercalazioni detritiche sabbiose all'interno delle marne la valutazione di impatto risulta di difficile definizione in quanto la loro forte eterogeneità spaziale non consente di pervenire ad un quadro idrogeologico sufficientemente rappresentativo, in particolare per l'incertezza che riguarda l'estensione di tali corpi nella porzione di versante a monte della galleria. Pertanto, anche il tasso di alimentazione di questo acquifero, che può compensare più o meno l'effetto di svuotamento prodotto dalla galleria, non è noto.

Si può tuttavia ipotizzare che lo scenario più probabile, sia quello che l'attraversamento della galleria produca un limitato svuotamento che è comunque circoscritto temporalmente al periodo intercorrente allo scavo con TBM-EPB e immediato successivo armamento dei conci che avviene a tergo della testa della fresa.

9.2. LE DUE CANNE NON DRENANTI POTRANNO PERÒ AGIRE DA OSTACOLO AL DEFLUSSO, COME SI DIRÀ AL PARAGRAFO SUCCESSIVO. RISCHI IDROGEOLOGICI

Gli aspetti idrogeologici che possono rappresentare un fattore di rischio per gli effetti che possono produrre sono stati suddivisi in funzione di previsioni di accadimento a livello della galleria e di superficie.

9.2.1. Rischi in galleria

Settore dei gessi:

- Intercettazione di cavità carsiche e svuotamento di sacche d'acqua. Va premesso che mentre questa situazione non desta particolari preoccupazioni per quanto riguarda lo scavo meccanizzato, che attraverso la tecnica EPB è in grado di fornire un contrasto alle venute improvvise, essa può rappresentare invece una possibilità concreta nel tratto di scavo in tradizionale del cunicolo centrale alle due gallerie. Uno dei rischi principali è rappresentato dalla possibilità che durante lo scavo il cunicolo intercetti sacche d'acqua e sedimenti fini intrappolati in cavità carsiche connesse o anche non connesse, con il resto del sistema di circolazione. L'apertura improvvisa di una di queste cavità provocherebbe la liberazione repentina di volumi d'acqua e di materiale fine che, nel caso peggiore, può mettere a rischio l'incolumità delle persone e delle cose e, nel caso migliore, può determinare un fattore di rallentamento dei lavori in galleria. Tale scenario risulta possibile nel settore di attraversamento dei gessi. Si rimanda al § 10.4 la discussione inerente la tipologia di gestione che viene proposta per minimizzare i rischi sopra esposti. Si precisa che questo rischio riguarda sia la zona satura dell'acquifero che quella insatura, dove comunque cavità poco connesse con il reso del sistema potrebbero essersi riempite d'acqua per sifonamento durante eventi meteorici intensi.
- Intercettazione di corpi detritici sabbiosi (complesso 2b) all'interno del substrato marnoso. I corpi detritici sabbiosi del complesso 2b, confinati all'interno delle marne hanno permeabilità elevate e sono in grado, in contesti in cui manchi un adeguato confinamento, di rilasciare rapidamente forti quantitativi di acqua e di materiali fini. Lo scavo

meccanizzato con tecnica TBM-EPB fornisce un contrasto alle pressioni idrauliche con valori soglia che possono essere cautelativamente considerati pari a 3-4 bar. Superato tale valore, la pressione d'acqua eccedente viene gradualmente scaricata attraverso la coclea della TBM, e gestita attraverso il sistema di collettamento delle acque previsto in galleria. Quindi, questa tecnica di scavo si rivela particolarmente idonea per l'attraversamento di questa formazione. Infatti, se lo scavo fosse realizzato attraverso tecnica tradizionale sarebbe stato necessario predisporre una serie di tecniche di pretrattamento (es. dalla superficie topografica o in avanzamento) e di drenaggio controllato, atte ad evitare l'accadimento di venute d'acqua improvvise con rischi per la sicurezza delle maestranze e per la stabilità del fronte.

9.2.2. Rischi in superficie

Settore Imbocco lato Cuneo e settore sovrastante l'attraversamento dell'acquifero dei gessi:

Possibili sprofondamenti e sinkholes. Come discusso nel paragrafo precedente, lo scavo del cunicolo centrale alle due canne della galleria nei gessi indurrà sul breve termine una diminuzione del livello d'acqua che è di grandezza inferiore a quella delle oscillazioni naturali del livello di falda. Questo significa che la perturbazione dell'acquifero rispetto al regime naturale non sarà particolarmente accentuata. Invece, l'abbassamento piezometrico che verrà innescato successivamente alla predisposizione di fasci di fori drenanti connessi ai by-pass delle gallerie sarà invece più significativo avrà carattere permanente rispetto a quello derivante dal drenaggio del cunicolo.

Si tenga conto che, a fronte di questo previsto abbattimento, una delle motivazioni che inducono a ritenere che la messa in opera dei dreni sia comunque una scelta opportuna è dovuto al fatto che questi avranno la funzione di un "troppo pieno" che permetterà di smorzare gli innalzamenti di livello piezometrico connessi a precipitazioni di elevata intensità o durata. Infatti, come discusso nel § 8.3.5 la galleria potrebbe contribuire all'incremento



dell'innalzamento piezometrico che si potrebbe verificare in corrispondenza ad eventi piovosi intensi o prolungati, determinando sul lungo periodo effetti indesiderati in superficie (es. sinkholes).

In ogni caso, si dovrà tenere conto degli abbassamenti connessi alla messa in opera del sistema drenante per valutare se esse possano indurre limitati fenomeni di subsidenza, in particolare in vicinanza dell'abitato di Garassini (dove comunque gli abbassamenti previsti sono dell'ordine di 0.5 m). Per quanto attiene invece ad una possibile accelerazione dei fenomeni di dissoluzione nei gessi dovuta ad un incremento delle velocità di flusso nell'intorno della galleria e conseguente accelerazione di fenomenologie tipo sink-holes, si ritiene questa eventualità piuttosto remota, dal momento che il modello numerico non mostra forti incrementi delle velocità di flusso, soprattutto in caso di galleria con drenaggio permanente nell'acquifero dei gessi.

Settore sovrastante l'attraversamento dell'acquifero delle intercalazioni detritiche (complesso 2b):

Possibili subsidenze e attivazione di fenomeni gravitativi. Lo scavo della galleria tramite TBM-EPB nel settore in cui sono presenti le intercalazioni detritiche implica certamente che vi siano rischi minori in superficie di quelli che vi sarebbero se lo scavo avvenisse con tecnica tradizionale. Infatti, rispetto a quest'ultima tecnica la tenuta in pressione del fronte di scavo della testa della TBM consente di ridurre lo svuotamento della falda delle intercalazioni detritiche e pertanto di produrre una minore riduzione delle pressioni neutre in questa formazione. Sebbene questo fenomeno possa indurre lo sviluppo di subsidenze in superficie e, in teoria, anche causare l'innesco o la riattivazione di possibili movimenti gravitativi sul versante, si ritiene che questa sia una circostanza poco probabile; si consiglia in ogni caso di effettuare una verifica di questi fenomeni attraverso opportuna modellizzazione di tipo geotecnico. Invece, una circostanza che non va esclusa e pertanto tenuta sotto controllo attraverso la rete di monitoraggio del livello piezometrico e dei movimenti di versante, riguarda la possibilità che l'impermeabilizzazione della galleria determini sul livello detritico un aumento delle pressioni neutre che concorrerebbe al



potenziale innesco di fenomeni gravitativi. Infatti, dall'analisi del profilo previsionale della galleria, specialmente per la canna di valle, si prefigurerebbe una situazione in cui dal momento in cui vengono messi in opera i conci a tenuta idraulica la canna stessa potrebbe agire come un ostacolo o una strozzatura per il normale deflusso della falda, determinando un aumento delle pressioni idrauliche dell'acquifero. Va detto che il sistema di monitoraggio che sarà approntato consentirà di riconoscere facilmente se si verifica un aumento consistente delle pressioni e in questo caso di approntare le opportune contromisure atte a contrastare eventuali fenomeni di superficie. Ad esempio, una soluzione che potrà essere considerata per contrastare una situazione di questo tipo è quella di realizzare in corrispondenza alle lenti detritiche un sistema puntuale di drenaggio con tubi microfessurati direzionati in modo da drenare parte della circolazione idrica abbassando le pressioni a monte della galleria.

Settore Imbocco lato Alba:

Possibili sovrappressioni idrauliche nel substrato. Gli studi eseguiti per la progettazione delle opere di consolidamento del versante di Verduno nel contesto della costruzione del Nuovo Ospedale Alba-Bra indicano la presenza di fenomeni gravitativi diffusi pregressi e in atto che interessano sia la coltre detritico-colluviale superficiale, sia l'orizzonte di substrato alterato. Tali fenomeni gravitativi sono i medesimi che si estendono fino alla zona dell'imbocco della galleria originandovi le medesime tipologie di coltri detritiche incluse nei complessi idrogeologici 3a e 3b. In occasione di eventi di precipitazione intensi e prolungati è possibile che si determinino le condizioni per un sensibile innalzamento del livello d'acqua in questi complessi idrogeologici. In concomitanza con gli sbancamenti previsti per la realizzazione dell'imbocco delle due canne sul lato Alba, si dovrà tenere conto di questa eventualità, che sarebbe all'origine di un innalzamento delle pressioni neutre lungo superfici di debolezza pre-esistenti e quiescenti, indicandone una possibile riattivazione. Tale situazione potrebbe essere di fatto simile a quella



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno - Relazione idrogeologica

che è venuta a determinarsi durante le prime fasi di scavo per la realizzazione dell'ospedale.

10. PREVISIONE DELLE PORTATE IN GALLERIA

La stima delle portate discussa in questo capitolo riguarda solo le opere in sotterraneo per le quali si assume che vi sia un drenaggio dell'acqua di falda. Vanno distinte tra situazioni in cui è previsto che vi sia un drenaggio di acqua di falda:

1. la stima delle portate ha riguardato la porzione nei gessi in cui è prevista la realizzazione del cunicolo (cfr. Fase I nel Capitolo 2). Tale cunicolo sarà infatti scavato con tecnica tradizionale e sarà soggetto sia a venute d'acqua transitorie, corrispondenti ad un periodo immediatamente successivo allo scavo del fronte in cui si verificano le venute massime in galleria, sia a portate d'acqua stabilizzate, corrispondenti al periodo in cui il sistema idraulico che alimenta le venute ha raggiunto un equilibrio idrodinamico, senza significative variazioni temporali. La stima di queste portate è stata effettuata attraverso la modellizzazione numerica. La stima delle portate relativa a questa opera è importante per il dimensionamento dei sistemi di pompaggio che dovranno provvedere a mantenere, durante lo scavo e per tutto il periodo necessario alla realizzazione delle due canne della galleria fino alla chiusura del cunicolo stesso, un fronte di scavo asciutto;
2. la tecnologia di scavo meccanizzato TBM-EPB prevista per la realizzazione delle due canne della galleria (cfr. Fase II nel Capitolo 2) permette di assumere che fin dal momento dello scavo la galleria possa essere considerata come un elemento impermeabile all'interno dell'acquifero. Questa è un'assunzione che può essere considerata come valida per tutti i tratti di galleria in cui la pressione idrostatica si attesta al di sotto di 3-4 bar. Infatti, tali valori possono essere considerati come una soglia al di sopra della quale la macchina non è più in grado di contrastare la pressione idrica e quindi lascia infiltrare un certo quantitativo d'acqua, funzione dei carichi idraulici iniziali e delle proprietà idrogeologiche dell'acquifero. Pertanto, la stima relativa alle portate in

galleria sarà svolta soltanto per quelle porzioni di scavo della galleria in cui si ipotizza che vi sia un'eccedenza di pressione idraulica di 3 bar. Per tali porzioni verrà fatta una valutazione delle portate in regime transitorio, mentre non verrà effettuata per le stesse tratte una stima delle portate stabilizzate in quanto si considera che il rivestimento dei conci che verrà effettuato subito a tergo del fronte di scavo della fresa verrà effettuato in un periodo in cui è ancora attivo l'abbattimento transitorio del carico idraulico;

3. una volta che saranno realizzate le due canne della galleria sarà successivamente messo in opera anche il sistema di drenaggio delle acque dell'acquifero dei gessi. Tali acque confluiranno nel sistema di drenaggio all'interno delle due gallerie e pertanto è utile avere una stima relativa alle portate complessive dei dreni in modo tale che il sistema di aggotamento delle gallerie sia dimensionato adeguatamente.

Va specificato che le stime effettuate sono relative ad una situazione "ordinaria" ovvero sono riferite ad un livello di falda medio, che fa riferimento alla distribuzione piezometrica ricostruita in questo studio e riportata nella carta idrogeologica. Variazioni delle portate previste a seguito di un incremento repentino del livello piezometrico della falda dovuto a precipitazioni particolarmente intense o prolungate nell'acquifero sono discusse in maniera semi-quantitativa, fornendo indicazioni di massima sull'effetto che queste potrebbero avere sulle venute.

Un'altra situazione che è da considerare come non prevedibile, ma possibile, è quella della presenza di sacche d'acqua intrappolate in cavità carsiche non connesse al resto del sistema di circolazione cfr. § 9.2.1. che potrebbero essere attraversate nella parte di scavo nell'acquifero dei gessi o nella parte immediatamente successiva delle marne in cui i gessi sono a quote di poco soprastanti la calotta della galleria. Le implicazioni relative a una tale evenienza sono descritte nel seguito e sono distinte per quanto riguarda il tratto di galleria nei gessi interessato da scavo meccanizzato da quelle riguardanti il cunicolo centrale alle due canne scavato in tradizionale.

10.1. VALUTAZIONE DELLE PORTATE NEL CUNICOLO CENTRALE ALLE DUE CANNE (ACQUIFERO DEI GESSI)

10.1.1. Calcolo delle portate massime transitorie

Secondo la ricostruzione piezometrica eseguita nel presente lavoro (cfr. Carta Idrogeologica allegata), il cunicolo in progetto intercetta la falda acquifera negli ultimi 120 m di scavo. La modellizzazione numerica discussa precedentemente ha consentito di effettuare una stima delle portate. Per effettuare tale valutazione nel modello si è dovuta fare l'assunzione di un avanzamento del fronte scavo di 5 m/giorno (20 m ogni 4 gg), la quale è probabilmente ottimistica visto il complesso contesto geologico in cui questa si realizza. Tuttavia, una tempistica di questo tipo sembra rappresentare un buon compromesso tra un avanzamento abbastanza realistico e tempistiche di simulazione non eccessivamente lunghe.

La Figura 60 illustra le portate cumulate al portale previste per lo scavo della canna di monte calcolate su tratte progressive di scavo di 20 m. Come si può osservare le portate hanno un picco che si smorza dopo i primi istanti dal drenaggio, mostrando un decremento di tipo esponenziale. Dopo ca. 120 m di avanzamento (20 gg) le portate di picco si attestano attorno ai 1,1 l/s per stabilizzarsi sui 0.6 l/s. ca.

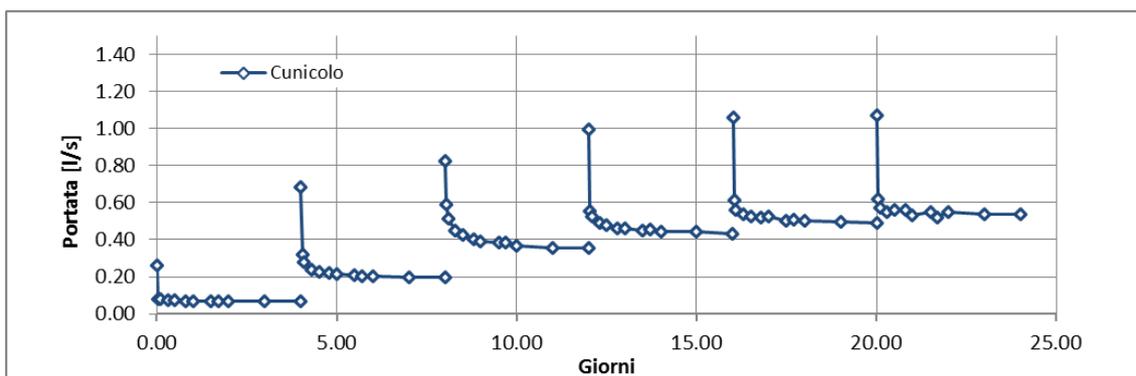


Figura 60. Portate transitorie cumulate al portale calcolate numericamente su tratte successive di 20 m scavate ogni 4 gg; calcolo effettuato sulla cunicolo centrale alle due canne attraversante l'acquifero dei gessi.

Attraverso il modello è stata ipotizzata anche una situazione in cui al termine dello scavo delle due canne, a seguito di piogge intense, il livello della falda ospitata dai gessi registri un innalzamento repentino a cui fa seguito un aumento delle portate in galleria. Imponendo un aumento istantaneo di 5 m di carico, coerente con le oscillazioni massime misurate nei piezometri di questo settore, il modello ha mostrato un incremento delle portate fino a 4 l/s. Peraltro, questa condizione che è peggiorativa in termini di previsione delle portate di picco è quella che va tenuta in conto per il dimensionamento del sistema di pompaggio e per le opere di scolo per l'allontanamento delle acque dal cunicolo.

10.1.2. Calcolo delle portate stabilizzate

Dalle simulazioni svolte dopo 1 anno dal drenaggio del cunicolo centrale, le portate cumulative dovute al drenaggio dei gessi attese sono di 0.5-0.6 l/s, in condizioni normali (assenza di eventi piovosi intensi o prolungati). Tali portate di verificano ovviamente se si assume che il cunicolo sia lasciato interamente drenante. Tali portate saranno smaltite attraverso l'imbocco lato Cherasco e l'allontanamento delle acque sarà effettuato tramite pompaggio in quanto la galleria non è in grado di smaltire per scorrimento gravitativo tali acque.

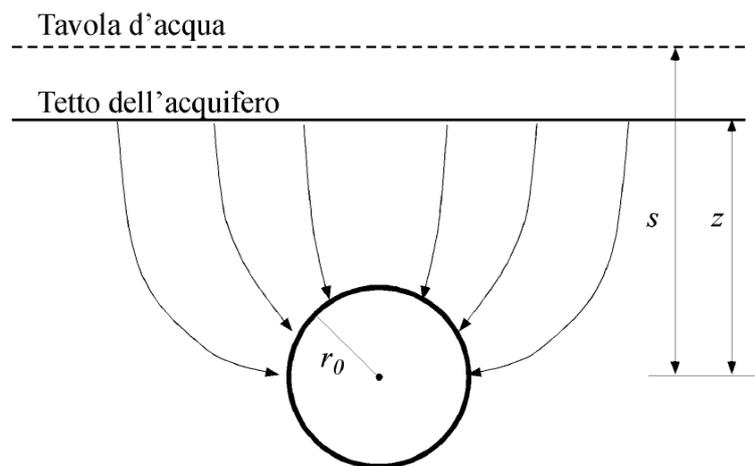
10.2. VALUTAZIONE DELLE PORTATE TRANSITORIE NEL CORSO DELLO SCAVO DELLA GALLERIA DI VERDUNO CON TBM-EPB

10.2.1. Metodologia del calcolo analitico delle portate transitorie

Al fine di simulare l'ingresso di uno scavo in una galleria sotto falda, valutando quindi l'entità della portata transitoria che si può generare nelle prime fasi di avanzamento nell'acquifero, è stata utilizzata una soluzione analitica del tipo di quella proposta da Goodman et al. (1965), che si può esprimere come segue

$$Q = \frac{2\pi k_s}{\ln\left(\frac{2z}{r_0}\right)} L$$

Dove Q è la portata, k la conducibilità idraulica, s è il carico idraulico, z è lo spessore dell'acquifero, r_0 è il raggio approssimativo del tunnel ed L è la lunghezza della tratta di galleria su cui si intende calcolare la portata. La funzione si basa sullo schema concettuale riportato nella figura che segue, il quale assume un acquifero lateralmente infinito e una tavola d'acqua fissa. Per una galleria scavata in un acquifero la portata si ottiene generalmente facendo coincidere il livello della tavola d'acqua con lo spessore di acquifero (cioè s con z).



Ad ulteriore chiarimento di quanto già riportato nelle righe precedenti, si precisa che nel presente studio, la formula proposta da Goodman et al. (1965) è stata utilizzata esclusivamente per simulare le venute massime transitorie che si verificano nei primi momenti (ore) in cui lo scavo del cunicolo fa il suo ingresso all'interno della zona acquifera.

Si tratta quindi di un dato progettuale rilevante per dimensionare i sistemi di aggotamento e per gestire gli afflussi nel momento in cui essi raggiungono i valori più rilevanti. Successivamente alle prime venute importanti le portate tendono poi a decrescere piuttosto rapidamente, secondo un fenomeno fisico regolato da una legge esponenziale. Gli avanzamenti dello scavo successivi ai primi momenti di ingresso all'interno dell'acquifero non producono più picchi di afflussi così accentuati come quello iniziale, poiché avvengono in un contesto

già parzialmente drenato. Essi debbono quindi essere gestiti attraverso altre funzioni analitiche.

Va quindi rimarcato che la funzione proposta da Goodman et al. (1965) non può essere utilizzata per stimare il valore delle portate stabilizzate, poiché questa non può tenere in conto gli ovvi abbassamenti di carico, che avvengono a seguito del drenaggio.

Un ultimo chiarimento va infine fornito circa la lunghezza di galleria sulla quale la formula viene applicata, dalla quale peraltro dipende la portata transitoria massima stimata. A tal proposito, la formula originaria è una soluzione analitica valida per ottenere i valori di portata su una lunghezza pari a 1m di galleria. Tale lunghezza, ai fini progettuali, è tuttavia poco rilevante, poiché in genere lo scavo, una volta entrato in zona acquifera, procede piuttosto rapidamente per un certo tratto generando nuovi afflussi ancora prossimi al massimo transitorio. E' dunque verosimile che ci si trovi con una certa lunghezza di galleria in condizioni di drenare, per ogni metro di sviluppo, portate molto prossime al massimo transitorio. Per praticità, nei calcoli è stato considerato un tratto di avanzamento del fronte di lunghezza pari ai 10 m; le portate sono quindi espresse in termini di l/s*10 m di galleria.

10.2.2. Risultati

Come premesso all'inizio del capitolo, i calcoli sono stati effettuati per le porzioni di galleria in cui si prevede che la pressione idrostatica ecceda i 3 bar di carico, ovvero il valore che si considera come il limite di tenuta della TBM-EPB. In corrispondenza di questi tratti è stato pertanto considerato nel calcolo il valore eccedente tale soglia. Si rimarca, che questa è una procedura che presenta un certo grado di approssimazione in quanto non viene presa in considerazione la permeabilità che si crea sul fronte di scavo in corrispondenza alla testa della TBM-EPB, che sarà determinata dalla macinazione del materiale scavato e dall'utilizzo combinato di additivi. Ad esempio, in corrispondenza dell'attraversamento delle intercalazioni detritiche, l'utilizzo di specifici additivi (es. schiume, polimeri) permetterà di ridurre considerevolmente la permeabilità



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco Il Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno - Relazione idrogeologica

dei materiali di scavo e quindi di contrastare meglio l'azione dell'acqua di falda. Tuttavia, il fatto di non considerare nei calcoli la variazione di permeabilità sul fronte di scavo consente di fare una stima maggiormente conservativa.

Inoltre, un'ultima importante precisazione riguarda il fatto che le portate transitorie stimate costituiscono una valutazione del drenaggio che è attivo nello spazio che separa la testa di scavo dallo scudo attraverso cui vengono armati i conci. Dalla porzione retrostante l'armatura si considera che non avvenga alcun drenaggio, indipendentemente da qualsiasi condizione idraulica in cui si trovi l'acquifero. E' pertanto comprensibile come in questo caso non sia necessario effettuare una valutazione delle portate stabilizzate in quanto nessun tratto dell'opera avrà il tempo di raggiungere questa condizione.

I calcoli effettuati per l'attraversamento nelle marne hanno restituito i seguenti valori (l'assenza di valori di portata indica porzioni di acquifero in cui il carico idrostatico è completamente contrastato dal fronte della fresa TBM-EPB):

Inizio pK	Fine pk	Raggio tunnel	Cond. idraulica	Car. idr. tot	Car. idr. res. EPB	Spessore strato	Lunghezza tratta	Portata
		r_0	k	s	s	z	L	Q
		(m)	(m/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(l/s*10m)
1+135	1+300	5	1.0E-07	20	-	16	10	-
1+300	1+600	5	1.0E-07	38	8	32	10	0.021
1+600	1+900	5	1.0E-07	48	18	24	10	0.054
1+900	2+200	5	1.0E-07	48	18	44	10	0.042
2+200	2+500	5	1.0E-07	56	26	50	10	0.058
2+500	2+800	5	1.0E-07	58	28	52	10	0.062
2+800	2+920	5	1.0E-07	56	26	47	10	0.059

I calcoli per l'attraversamento dei corpi detritici hanno restituito i seguenti valori (l'assenza di valori di portata indica porzioni di acquifero in cui il carico idrostatico è completamente contrastato dal fronte della fresa TBM-EPB):

Inizio pK	Fine pk	Raggio tunnel	Cond. idraulica	Car. idr. tot	Car. idr. res. EPB	Spessore strato	Lunghezza tratta	Portata
		r_0	k	s	s	z	L	Q
		(m)	(m/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(l/s*10m)



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno - Relazione idrogeologica

2+920	3+190	6	1.0E-05	60	30	4	10	65.522
2+920	3+190	6	1.0E-05	50	20	4	10	43.681
2+920	3+190	6	1.0E-05	40	10	6	10	9.065
2+920	3+190	6	1.0E-05	60	30	15	10	11.712
2+920	3+190	6	1.0E-05	50	20	15	10	7.808
2+920	3+190	6	1.0E-05	40	10	15	10	3.904

I calcoli per l'attraversamento del successivo tratto di corpi detritici hanno restituito i seguenti valori (l'assenza di valori di portata indica porzioni di acquifero in cui il carico idrostatico è completamente contrastato dal fronte della fresa TBM-EPB):

Inizio pK	Fine pk	Raggio tunnel	Cond. idraulica	Car. idr. tot	Car. idr. res. EPB	Spessore strato	Lunghezza tratta	Portata
		r_0	k	s	s	z	L	Q
		(m)	(m/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(l/s*10m)
3+190	3+400	6	1.0E-07	48	18	40	10	0.044
3+400	3+500	6	1.0E-07	40	10	30	10	0.027
3+500	3+665	6	1.0E-07	20	-	20	10	-

I calcoli per l'attraversamento tratto di imbocco lato Alba hanno restituito i seguenti valori (l'assenza di valori di portata indica porzioni di acquifero in cui il carico idrostatico è completamente contrastato dal fronte della fresa TBM-EPB):

Inizio pK	Fine pk	Raggio tunnel	Cond. idraulica	Car. idr. tot	Car. idr. res. EPB	Spessore strato	Lunghezza tratta	Portata
		r_0	k	s	s	z	L	Q
		(m)	(m/s)	(m)	(m)	(m)	(m)	(l/s*10m)
3+650	3+750	6	1.0E-05	3	-	40	10	-
3+650	3+750	6	1.0E-05	3	-	30	10	-
3+650	3+750	6	1.0E-05	3	-	20	10	-

Come si può osservare dalle varie tabelle, per ogni settore di attraversamento sono stati considerati i valori di permeabilità più elevati dell'intervallo stabilito per ciascuna delle litologie incontrate.

10.3. VALUTAZIONE DELLE PORTATE STABILIZZATE ATTRAVERSO IL SISTEMA DRENANTE COSTITUITO DA BY-PASS E FASCI DI DRENI

La realizzazione del sistema drenante costituito da fasci di tubi in PVC microfessurato consentirà di ridurre considerevolmente il deflusso in falda nel settore di attraversamento della galleria nei gessi. Attraverso la simulazione numerica è stato possibile quantificare le portate di drenaggio attese che verranno smaltite attraverso le due canne principali. In condizioni normali, ovvero di assenza di piogge intense o prolungate, le simulazioni indicano che l'acqua drenata risulta pari a ca. 2 lt/s di acqua. Invece, assumendo che la falda registri un aumento carico idraulico istantaneo di 5 m conseguentemente a fenomeni di piovosità significativa, le simulazioni numeriche mostrano un incremento della quantità di acqua drenata fino a quasi 7 l/s. Quest'ultima è pertanto la portata di progetto da considerare per il dimensionamento del sistema drenante e delle canalette di scolo della galleria. Al riguardo si osserva che il sistema drenante previsto presenta, cautelativamente, una capacità di drenaggio assai superiore, come in dettaglio indicato nella "Relazione galleria naturale". Infine si evidenzia che in corso d'opera, durante la realizzazione dei lavori (in particolare modo una volta completato lo scavo del cunicolo drenante), sarà possibile raccogliere e disporre di informazioni aggiuntive per la taratura del modello di previsione.

10.4. STIMA DELLE VENUTE ECCEZIONALI NEL CUNICOLO CENTRALE

L'unica opera, tra quelle previste in sotterraneo, che è potenzialmente soggetta a venute eccezionali di acqua durante lo scavo è il cunicolo centrale realizzato in Fase I (cfr. Capitolo 2) che attraversa l'acquifero dei gessi. In questo caso l'accezione che viene data al termine "eccezionale" è quella di una portata che si discosta significativamente da quelle valutate e discusse nei paragrafi precedenti e che può pertanto rappresentare un fattore di rischio per l'incolumità delle maestranze e per il regolare avanzamento del fronte di scavo. Infatti, sebbene lo scavo delle due canne della galleria abbia la stessa probabilità di intercettare sacche d'acqua, che in assenza di accorgimenti potrebbero invadere improvvisamente lo scavo, tuttavia per esse non è previsto



che vi siano venute “eccezionali” (nel senso di rischiose), in quanto la tecnica di scavo TBM-EPB consente di gestire tali venute senza problemi per la sicurezza delle persone o delle attrezzature. Pertanto, quanto di seguito riportato relativamente a tali venute riguarda esclusivamente la realizzazione del cunicolo centrale e non include il resto dell’opera scavata con tecnica meccanizzata.

L’aspetto critico non è tanto quello di stimare tali portate, il che comunque risulta molto complesso perché legato alla definizione di diversi fattori di difficile previsione e parametrizzazione. L’aspetto principale è che venute eccezionali in galleria vanno evitate per i rischi che comportano sulla sicurezza delle maestranze e per l’imprevedibilità della loro gestione. Pertanto, per le venute eccezionali di acqua il problema va ricondotto alle modalità operative che vanno messe in opera durante lo scavo, in maniera da evitare che si verifichino situazioni potenzialmente pericolose.

Le venute eccezionali sono riconducibili alla possibile intercettazione di cavità carsiche nei gessi contenenti volumi d’acqua che verrebbero liberati istantaneamente.

Per prevenire tale situazione, si consiglia di realizzare sondaggi in avanzamento rispetto al fronte di scavo, i quali permetteranno di intercettare preventivamente venute di acque consistenti. Tali sondaggi dovranno inevitabilmente essere attrezzati con preventer, al fine di poter effettuare un drenaggio controllato, che potrà essere modulato in funzione delle esigenze di cantiere. La situazione preferibile è quella di effettuare sondaggi sufficientemente lunghi (almeno 50-100 m), tali da avere il tempo di smaltire le venute rispetto all’avanzamento del fronte di scavo verso la zona in cui tali venute hanno origine. Sarebbe anche consigliabile che i sondaggi venissero realizzati in un numero di 2-4, in modo da aumentare la probabilità che qualcuno di essi intercetti i volumi saturi, e che questi fossero perforati a partire da nicchie laterali sulle due canne della galleria, in modo da evitare che le tempistiche richieste per lo smaltimento delle acque di drenaggio impediscano il regolare avanzamento del fronte di scavo.



Attraverso alcune assunzioni di massima che tengono conto della possibile presenza di cavità di alcuni metri cubi, compatibilmente con quanto osservato dai sondaggi e dalla geofisica, sono state effettuate delle stime indicative su quelli che possono essere i tempi necessari per lo smaltimento di venute elevate attraverso due fori in avanzamento. In funzione delle portate che sarà possibile gestire in cantiere (es. capienza delle vasche di trattamento) attraverso il *preventer*, si può prevedere che un drenaggio completo dei volumi acquosi possa avvenire con le seguenti tempistiche:

- 30 l/s: esaurimento in 1-2 giorni;
- 20 l/s: esaurimento in 2-3 giorni;
- 10 l/s: esaurimento in 3-6 giorni;
- 5 l/s: esaurimento in 5-10 giorni.

11. MONITORAGGIO IDROGEOLOGICO

Sulla base della valutazione degli impatti e dei rischi idrogeologici si propone di attuare un piano di monitoraggio idrogeologico da effettuare attraverso misurazione in continuo dei livelli piezometrici.

I piezometri da monitorare in continuo sono stati scelti in funzione delle criticità maggiori che possono derivare da un abbassamento significativo del livello di falda indotto dal drenaggio della galleria di Verduno. Tali valutazioni sono state effettuate basandosi sul modello idrogeologico concettuale e numerico, oltre che sull'ubicazione degli abitati presenti, i quali costituiscono gli elementi di maggiore vulnerabilità di questo settore. Questo criterio ha quindi permesso di effettuare una scelta dei piezometri più significativi ai fini di un monitoraggio in continuo, da realizzare secondo le prescrizioni riportate nel DEC-VIA 576/2011. I piezometri scelti tra quelli esistenti sono i seguenti:

Codice Piezometro	Fenestrazione	Abitati limitrofi	Caratteristiche
IOM-MO-050	Gessi	-	Ubicato in una zona in cui è attesa una variazione del livello di falda di media entità
IOM-MO-054(G)	Gessi	-	Ubicato in una zona in cui è attesa una variazione del livello di falda di media entità
IOM-MO-065(G)	Gessi	In prossimità di Borgata Garassini	Ubicato ai limiti della fascia in cui iniziano a verificarsi variazioni del livello di falda
IOM-VE-045(M)	Corpi detritici	-	Ubicato nell'acquifero in pressione dei corpi detritici intercalati nelle marne
IOM-VE-061	Corpi detritici	-	Ubicato nell'acquifero in pressione dei corpi detritici intercalati nelle marne
Pz1	Corpi detritici	A valle di Verduno	Ubicato nell'acquifero in pressione dei corpi detritici a valle di Verduno

In generale, è consigliabile cominciare il monitoraggio ante-operam su tutti i piezometri sopra indicati, in modo tale da avere una registrazione dello stato imperturbato della falda il più dettagliato possibile.



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno - Relazione idrogeologica

ALLEGATI

ALLEGATO 1

Caratteristiche delle sorgenti riconosciute attraverso il rilevamento sul terreno (Settembre 2001 – Gennaio 2002)

Località	Descrizione	Caratteristiche
Mulino di Verduno, quota 190 m slm.	"Fontana del Mulino", posta a margine della strada provinciale, e censita dalla Provincia di Cuneo.	Portata = < 0.1 l/s.
Al margine collinare, alla base di Cascina Roggeri. Parete impostata nelle marne gessose inglobanti corpi gessosi al margine della strada di servizio del Canale ENEL di Verduno.	Stillicidio di acque affioranti dalla parete ed evidenze di zone di ristagno idrico.	Portata minima non stimabile.
Canale ENEL nei pressi dell'opera di presa.	Sorgente alla base della parete al contatto gessi -marne gessose. Le acque che fuoriescono sono allontanate dalla sede stradale tramite una canaletta di scolo.	Portata stimata < 1 l/s.
Verduno, versante a nord degradante verso C. Montemigletto.	Sorgente 1 (vedi anche dati nella tab. 5), è situata nei pressi di quota 269 m, all'interno una piccola depressione dell'ordine di poche decine di metri quadrati. Circa 10 m a valle dell'emergenza, l'acqua viene incanalata in un fosso per scopi irrigui.	Portata = 1 l/s.
Verduno, versante a nord degradante verso C. Montemigletto.	Circa 200 m a valle della Sorgente 1, poco sotto la strada vicinale per C. Montemigletto è presente un settore topograficamente depresso con circolazione di acqua. E' riferibile ad una zona di emergenza della circolazione idrica sotterranea che si disperde all'interno dei terreni delle coperture.	Portata non valutabile.
Crinale La Morra-Castagni, testata della vallecola presente nei pressi di Roncaglia Soprano.	Poco a valle della strada presenza di una piccola sorgente. Sono probabili anche afflussi idrici dovuti a scarichi della rete fognante.	Portata stimata in circa 1 l/s.



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno - Relazione idrogeologica

Località	Descrizione	Caratteristiche
La Morra, incisione del Rio Brandini, Fontana delle Cento Sorgenti	Zona con evidenze di emergenze idriche diffuse, in corrispondenza di un'area depressa ampia alcune decine di metri quadrati. Al momento del rilevamento era visibile solo una vasta area umida con ampie pozze d'acqua. La zona di emergenza alimenta un rio, ora praticamente asciutto. In corrispondenza della Fontana Cento Sorgenti si vedono i resti di un'opera di captazione in muratura. Nell'area si riversano probabilmente anche acque provenienti da scarichi fognari.	Portata non valutabile.
La Morra, incisione del Rio Brandini, in corrispondenza della frazione di Brandini	Zona di emergenza idrica diffusa, in corrispondenza di un'area depressa ampia una decina di metri quadrati. Al momento del rilevamento era visibile solo una vasta area umida con ampie pozze d'acqua. La zona di emergenza alimenta un rio, ora praticamente asciutto.	Portata non valutabile.
La Morra, in sinistra dell'incisione del Rio Brandini, di fronte alla frazione di Brandini	Zona di emergenza idrica ampia solo alcuni metri quadrati. Al momento del rilevamento era visibile solo un'area umida. La zona di emergenza alimenta un rio, ora praticamente asciutto.	Portata non valutabile.
La Morra, versante ovest nel tratto sottostante l'abitato.	Zona di emergenza idrica diffusa, probabilmente connessa a circuiti idrici superficiali. Si situa in corrispondenza di un'area depressa ampia alcune decine di metri quadrati. Al momento del rilevamento era visibile solo una vasta area umida con ampie pozze d'acqua. La zona di emergenza alimenta un rio, ora praticamente asciutto.	Portata non valutabile.
La Morra, incisione del Rio dei Berri.	In corrispondenza dell'attraversamento stradale si individua un'area di emergenza generalizzata con presenza di acqua proveniente da varie scaturigini.	Portata totale valutabile in 1 ÷ 2 l/s.



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno - Relazione idrogeologica

ALLEGATO 2

1. POZZI UFFICIALMENTE CENSITI NELL'AMBITO DELLA COLLINA DI VERDUNO

Località	Descrizione	Caratteristiche
Comune di Verduno, loc. Gorei di Verduno. Circa 100 m a NE del Ristorante "La Cascata".	Opere di captazione dell'Acquedotto di Verduno. Comprendono due pozzi ad uso potabile con profondità stimata dell'ordine di 30+40 m. Le perforazioni risalgono almeno alla metà del Novecento. Le caratteristiche sono desunte dalla domanda di concessione alla Prov. di Cuneo. I dati di portata sono stimati dal tecnico in funzione della tubazione di mandata (diametro = 100 mm). Non sono disponibili misure dirette di portata e soggiacenza. I pozzi sono perforati nell'ambito dei depositi alluvionali recenti (a7a) del fondovalle del F. Tanaro. Viene captata la falda libera ospitata nel fondovalle alluvionale ed alimentata dalla circolazione di subalveo.	Pozzo 1: profondità = 30 m; portata dichiarata = 11 l/s; livello falda = non noto. Pozzo 2: profondità = 40 m; portata dichiarata = 9 l/s; livello falda = non noto.



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno - Relazione idrogeologica

Comune di Verduno, loc. Mulino di Verduno.	Due pozzi sono stati perforati nelle immediate adiacenze dell'edificio Mulino di Verduno (loc. Molino n. 17), nell'ambito dei depositi della pianura alluvionale del F. Tanaro. Risultano attualmente in attività. I pozzi sono perforati nell'ambito dei depositi alluvionali recenti (a7a) del fondovalle del F. Tanaro. Viene captata la falda libera ospitata nel fondovalle alluvionale ed alimentata dalla circolazione di subalveo.	Pozzo 1: profondità = 4 m; portata dichiarata = 1 l/s; livello falda = non noto. Pozzo 2: profondità = 8 m; portata dichiarata = 1 l/s; livello falda = non noto. Le due serie di valori accanto al simbolo in Carta corrispondono ai dati relativi ai due pozzi.
Comune di Verduno.	Nell'ambito del territorio di Verduno sono stati censiti altri pozzi che, tuttavia, non è stato possibile localizzare nella Carta delle risorse idriche per le limitate informazioni disponibili. Si tratta di due pozzi attualmente inattivi, ma utilizzabili.	Pozzo 1: profondità = 10 m; altri dati non noti. Pozzo 2: dati non noti.
Comune di La Morra, loc. Mulino di Verduno. Lato ovest del Ristorante "Le due Lanterne".	Pozzo in attività, ubicato in Borgata Molini, 15. Il pozzo è perforato nell'ambito dei terreni della Formazione Gessoso-Solfifera, al piede del versante collinare degradante (M5) sul fondovalle del F. Tanaro. Viene captata la circolazione sotterranea defluente alla base del versante ed in connessione idraulica con la falda della pianura alluvionale.	profondità = 11 m; portata dichiarata = 1 l/s; livello falda = non noto.
Comune di Verduno. Area industriale di Verduno, estesa al margine della strada provinciale Alba-Bra.	I pozzi n. 1 e 2 sono perforati nell'ambito dei terreni della Formazione Gessoso-Solfifera, al piede del versante collinare degradante (M5) sul fondovalle del F. Tanaro. Viene captata la circolazione sotterranea defluente alla base del versante e, probabilmente, in parte in connessione idraulica con la falda ospitata nella sequenza alluvionale della pianura. Il pozzo n. 3 è perforato nell'ambito dei depositi alluvionali medio-recenti (a6) che individuano un terrazzo a quote superiori al fondovalle attuale. Viene captata la circolazione sotterranea ospitata nei depositi alluvionali, alimentata dalla falda di subalveo e dalle acque del Canale di Verduno. Apporti sono possibili anche dalla circolazione defluente dal sovrastante versante collinare.	Pozzo 1: profondità = 10 m; portata dichiarata = 2 l/s; livello falda = non noto. Pozzo 2: profondità = 14 m; portata dichiarata = 1 l/s; livello falda = non noto. Pozzo 3: profondità = 10 m; portata dichiarata = non noto; livello falda = non noto.



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno - Relazione idrogeologica

Comune di Cherasco, loc. San Michele. Sul campo poco a sud della Cascina dello Spia.	Vecchio pozzo ad uso irriguo. Il pozzo è perforato nell'ambito dei terreni della Formazione Gessoso-Solfifera, nel settore inferiore del versante collinare degradante (M5) sul fondovalle del F. Tanaro. Viene captata la circolazione idrica superficiale presente nelle argille marnose con gessi.	Livello falda = 5.5 m dal p.c.. Dati di profondità e portata non noti.
Comune di Cherasco, loc. San Michele. Circa 150 m a sudovest della Cascina Vacchetta.	Il pozzo per uso irriguo è stato realizzato nel 1958-59. Sulla base delle indicazioni sommarie disponibili si può ipotizzare la seguente stratigrafia: - 0 ÷ 9 m = terreni rimaneggiati delle coperture (limi argillosi); - 9 ÷ 105 m = argille marnose con bancate di gesso; - 105 ÷ 125 m = sabbia. Il pozzo è perforato nell'ambito dei terreni della Formazione Gessoso-Solfifera (M5).	Profondità = 125 m; portata dichiarata = 15 l/s; livello falda = 9 m dal p.c; diametro = 0.3 m.

2. Pozzi individuati nella collina di Verduno, ma non inseriti negli elenchi ufficiali

Località	Descrizione	Caratteristiche
Comune di Cherasco, loc. San Michele. All'interno della Cascina dello Spia.	Vecchio pozzo ad uso domestico.	Dati non noti.
La Morra, Cascina Mascarelli	Le abitazioni della C. Mascarelli sono dotate di pozzi utilizzati a scopo domestico (innaffiamento orti, giardini, ecc.). Secondo informazioni ricevute sul posto, si tratta di pozzi poco profondi, scavati a mano, tuttora utilizzati. Non sono ispezionabili. I pozzi sono scavati all'interno dei terreni della Formazione Gessoso-Solfifera.	Diametro = 1 ÷ 2 m; profondità = 7 ÷ 10 m; livello falda = normalmente a 3 ÷ 4 m da p.c., risale a 1 m dal p.c. in occasione di piogge prolungate.



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco Il Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno - Relazione idrogeologica

La Morra, frazione Brandini	Pozzi scavati a mano sono presenti a servizio di quasi tutti gli edifici di Brandini. Attualmente non ispezionabili, secondo informazione degli abitanti sono tuttora utilizzati a scopo domestico (irrigazione, ecc.).	Diametro = 1 + 2 m; profondità = 7 + 10 m; livello falda = normalmente a 3 + 4 m da p.c., risale a 1 m dal p.c. in occasione di piogge prolungate.
La Morra, versante sottostante Brandini (Cascina a quota 406 m)	Pozzo adiacente alla cascina, scavato a mano per usi domestici. Inattivo da alcuni anni, non interessava i terreni gessosi. Il pozzo, non ispezionabile, è stato ostruito con pietrisco.	Diametro = 1.5 m; profondità = 9 + 10 m; livello falda = 3 + 4 m da p.c.
La Morra, versante ovest sottostante l'abitato. Cascina a quota 449 m, lungo l'asta affluente del Rio Brandini	Opera di captazione, protetta da una piccola costruzione in mattoni (dimensioni 2 x 2m). L'acqua che fuoriesce dall'opera alimenta il rio sottostante, asciutto al momento del rilevamento.	Livello falda = a circa 2 m dal p.c.
La Morra, versante ovest sottostante l'abitato. Rio sottostante la Cascina di quota 449 m.	Opera di captazione, protetta da una piccola costruzione in mattoni (dimensioni 1 x 1 m). L'acqua che fuoriesce dall'opera alimenta il rio sottostante, asciutto al momento del rilevamento.	Livello falda = non noto
La Morra, versante alla base dell'abitato nei pressi del laghetto.	Opera di captazione, protetta da una costruzione in mattoni (dimensioni 5 x 5 m). L'acqua che fuoriusciva dall'opera probabilmente serviva ad alimentare il laghetto sottostante con un canale interrato. Attualmente non lo alimenta più.	Livello falda = circa 1 m dal pc.
La Morra, nelle adiacenze del laghetto (indicato in carta come "Serbatoio").	Opera di captazione, protetta da una piccola costruzione in mattoni (dimensioni 2 x 3 m) danneggiata. Non sono visibili condotte di alimentazione, i deflussi erano indirizzati verso il laghetto, come si intuisce dai resti delle strutture presenti.	Livello falda = non rilevabile per la presenza di macerie
La Morra, breve rio confluyente nel laghetto.	Opera di captazione, protetta da una costruzione in calcestruzzo (dimensioni 3 x 5 m). Non sono visibili opere di alimentazione o di eduazione delle acque.	Livello falda = circa 1 m dal pc.
La Morra, località Fontana.	Pozzo a forma quadrata in mattoni. Si presenta parzialmente chiuso e probabilmente non è più utilizzato.	Livello falda = circa 1 m dal pc.
Verduno, Cascina Caminali.	Vallecola subito ad est della Cascina, impostata lungo una delle principali zone di discontinuità. Il pozzo, utilizzato a scopo irriguo, è posto circa 50 m a valle del sondaggio SFG15.	Profondità stimata = circa 6 m; Livello falda = circa al pc.



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno - Relazione idrogeologica

ALLEGATO 3

SONDAGGI GEOGNOSTICI REALIZZATI NEL CORSO DELLA CAMPAGNA PER IL PROGETTO DEFINITIVO
(1998)

Codice punto	Quota P.C.	Profondità sondaggio	Tratto fenestrato		Unità geologico-tecnica
SPD 26-01	236,71	40	2	40	6
SPD 26-02	218,7	40	2	40	6
SPD 26-03	215,71	40	2	40	6
SPD 26-04	213,66	25	3	22	6
SPD 26-05	210,36	25	3	22	6
SPD 26-06 prof	188,79	30	12	30	6
SPD 26-07 sup	185,99	30	3	8	3
SPD 26-07prof	185,99	30	10,5	30	6
SPD 26-09 prof	184,19	30	10,5	30	7
SPD 26-10 prof	186	25	9	25	7
SPD 26-11 sup	184,64	30	3	6	3
SPD 26-11 prof	184,64	30	10	30	7
SPD 26-12 prof	183,68	25	9	25	7
SPD 26-13 prof	180,96	25	9	25	7
SPD 26-14 prof	177,61	30	10,5	30	7
SPD 26-15 sup	173,74	30	3	6	3
SPD 26-15 prof	173,74	30	9	30	7
SPD 26-16 sup	173,8	30	3	6	3
SPD 26-16 prof	173,8	30	9	30	7



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno - Relazione idrogeologica

ALLEGATO 4

SONDAGGI GEOGNOSTICI REALIZZATI NEL CORSO DELLA CAMPAGNA PER IL PROGETTO ESECUTIVO
(2001)

Codice punto	Quota P.C.	Profondità sondaggio	Tratto fenestrato		Unità geologico-tecnica
			Da:	A:	
SFG 01	222,06	60	1,5	13,5	4
SFG 02	263,55	80	18	45	7
SFG 03	277,87	100	6	54	6
SFG 04	276,42	80	21	39	6
SFG 05	217,11	50	9	33	6
SFG 06	264,7	80	21	45	7
SFG 07	252,23	70	10	40	7
SFG 08	260,43	80	21	45	6
SFG 09	220,29	45	12	45	6
SFG 10	209,89	40	12	36	6
SFG 11	269,23	70	9	45	6
SFG 12	280,2	100	84	100	7
SFG 13	287,61	80	15	63	6
SFG 14	301,95	125	9	60	6
SFG 15	261,87	75	48	75	7
SFG 16	261,99	80	9	33	6
SFG 17	282	105	66	72	7
SFG 18	266,25	75	51	60	7
SFG 19	278,49	90	3	36	6
SFG 19 prof	278,49	90	66	70	7
SFG 20	249,47	65	15	30	7
SFG 22	216,81	25	3	9	4
SFG 23	225,26	60	12	45	6
SFG 24	207,69	50	3	24	6
SFG 25	215,01	30	9	30	6
SFG 26	236,35	50	17	47	6
SFG 32	214,46	-	12	33,5	6
SFG 33	215	-	9	24	5
SFG 34	215,04	-	6	30	6
SFG 35	219,43	40	25	40	6
SPE 26-01	174,59	40	3	9	3
SPE 26-02	174,08	35	3	9	3
SPE 26-03	173,19	50	3	9	3
SPE 26-04	173,41	35	3	9	3



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno - Relazione idrogeologica

SPE 26-05	173,04	40	3	9	3
SPE 26-06	189,79	30	3	15	6
SPE 26-07	221,01	40	9	33	6
SPE 26-08	189,91	30	3	18	6
SPE 26-09	230,61	60	21	45	6
SPE 26-11	223,97	50	15	33	6
SPE 26-13	329,02	60	15	36	6
SPE 26-14	357	60	12	39	6
SPE 26-15	211,28	55	10	55	6
SPE 26-19	173,22	35	3	9	3
SPE 26-20	176,89	25	3	9	3
SPE 26-21	174,77	25	1,5	7,5	3
SPE 26-23	179,11	25	1,5	6	3
SPE 26-27	182,19	35	3	9	3
SPE 26-29	185,89	25	1	7	3
SPE 26-30	190,57	35	3	9	3
SPE 26-31	187,62	35	3	9	3
SPE 26-32	184,24	35	3	9	3
SPE 27-10	-	-	3	35	3
SPE 27-11	-	-	3	35	3
SPE 27-12	-	-	3	35	3
SPE 27-20	-	-	2	45	3



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno - Relazione idrogeologica

ALLEGATO 5

SONDAGGI GEOGNOSTICI INTEGRATIVI REALIZZATI NEL CORSO DELLA CAMPAGNA PER IL PROGETTO
DEFINITIVO-ESECUTIVO (2011-2012)

Codice punto	Quota P.C.	Profondità sondaggio	Tratto finestrato		Unità geologico-tecnica
			Da:	A:	
IOM-MO-040	221,561	40	18	21	6
IOM-MO-050	218,348	40	8	24	6
IOM-MO-050 bis	218,282	35	28	32	6
IOM-MO-051	248,681	80	50	80	7
IOM-MO-054(G)	267,336	45	21	43	6
IOM-MO-054(M)	267,336	80	45	80	7
IOM-MO-054bis	267,336	20	12	19	7
IOM-MO-055	262,11	80	31	49	6
IOM-MO-065(G)	281,282	65	27	42	6
IOM-MO-065(M)	281,282	80	45	48	6
IOM-MO-090	265	60	18	37	6
IOM-VE-011	304,577	80	53	80	7
IOM-VE-014(G)	297,579	50	10	30	6
IOM-VE-014(M)	297,579	80	50	80	7
IOM-VE-015(G)	288,037	35	3	21	7
IOM-VE-015(M)	288,037	80	50	80	7
IOM-VE-061	254,959	45	9	15	7
IOM-VE-075(G)	231,495	24	15	21	6
IOM-VE-075(G)	231,495	24	15	21	7
IOM-VE-075(M)	231,495	60	30	60	7
IOM-VE-085	253,669	45	20	45	7
IOM-VE-100	224,28	35	6	12	6
IOM-VE-170	349,621	60	16,5	42	6
IOM-VE-175	353,405	60	17	37	6
IOM-VE-180	359,2	60	17,5	33	6
IOV-MO-045	217,282	40	15	18	6
IOV-MO-052	248,682	80	52	80	7
IOV-MO-060(G)	251,877	55	27	46	6
IOV-MO-060(M)	251,877	60	50	60	7
IOV-MO-066	269,314	80	50	80	7
IOV-VE-010	224,408	50	29	45	6
IOV-VE-013	276,137	80	3	24	6
IOV-VE-016	273,68	80	50	80	7
IOV-VE-040(G)	245,033	45	8	22	6



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno - Relazione idrogeologica

IOV-VE-040(M)	245,033	60	40	46	7
IOV-VE-046	256,725	70	35	57	7
IOV-VE-115	207,701	40	18	22	7
IOM-VE-090	226,681	40	24	40	7
IOM-VE-105	211,86	40	24	27	3
IOM-MO-065(M)BIS	283,648	80	52	80	-
IOV-MO-066bis	269,314	38	23	35	-
IOV-VE-016bis	273,68	30	15	27	-
IOM-VE-045	282,108	80	39	45	3
IOM-VE-045bis	282,108	24	6	22	-
IOV-CH-020	204,163	15	11	15	3
IOV-MO-010	196,54	15	10	15	3
IOV-MO-053	220,432	35	18	35	7
IOM-MO-055bis	262,11	30	12	30	-
IOM-MO-070	287,146	80	28	62	6
IOM-MO-070bis	287,146	30	15	30	-
IOV-VE-011	274,458	60	15	45	6
IOM-VE-025	276,742	80	29	53	3
IOM-VE-050	266,063	75	32	38	3
IOM-VE-050bis	266,063	19	16	19	-
IOM-VE-060	247,552	65	18	22	3
IOV-MO-080 (S10)	226		2,7	17,75	-
IOM-CH-010	220,973	pozzo			-
IOM-VE-165	325,181	60	39	60	7
IOM-VE-185	273,622	60	15	40	7
IOM-RO-010	186,556	15	3	9	3
IOV-RO-010	184,605	15	2	6	3
IOM-RO-040	176,766	15	2	6	3
IOV-RO-040	176,33	15	1	4	3
IOM-AB-010	174,948	15	1,5	7,5	3
IOV-AB-010	173,04	15	1	6	3
IOM-RO-030(pz6-2)		7,1	2	7	-
IOV-RO-030(pz6-4)		7	2	6	-



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno - Relazione idrogeologica

ALLEGATO 6

MISURA IN SITO DEI PARAMETRI CHIMICO FISICI RELATIVI AD ACQUE SUPERFICIALI E SOTTERRANEE
(OTTOBRE 2001)

Campione	Punto prelievo	Soggiacenza del livello idrico (m dal p.c.)	Conducibilità elettrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Temperatura acqua ($^{\circ}\text{C}$)	Temperatura aria ($^{\circ}\text{C}$)	Ora campionamento
SPE 26-13	Piezometro	30.14	2140	13.5	15.3	10.00
Fontana del Mulino	Sorgente	- 1.50	1003	14.2	17.5	10.00
Rio Deglia (punto 1 a monte)	Corso d'acqua	0.00	1887	13.7	17.8	11.00
SPE 26-06	Piezometro	2.06	2070	14.0	18.9	11.00
SFG 9	Piezometro	22.06	1936	12.6	18.4	
Canale ENEL (punto 2 intermedio)	Canale artificiale	0.00	328	16.8	19.6	12.00
SPE 26-15	Piezometro	19.11	1973	12.0		12.30
Rio S. Giacomo (punto 2 a valle)	Corso d'acqua	0.00	1404	14.6	19.9	13.00
SPE 26-14	Piezometro	37.69	2400	13.6	19.6	13.00
F. Tanaro (punto 1 a monte)	Corso d'acqua	0.00	329	16.0		13.00
Canale ENEL (punto 1 a monte)	Canale artificiale	0.00	329	16.1		13.00
Canale ENEL (punto 3 a valle)	Canale artificiale	0.00	332	15.0		14.00
SFG 14	Piezometro	47.65	1878	13.9	20.4	14.00
Sorgente Canale ENEL di Verduno	Sorgente	0.00	1890	15.0	22.3	14.00
SFG 12	Piezometro	30.06	613	13.2	20.7	15.00
SPE 26-8	Piezometro	4.10	1292	13.8	22.9	15.00
SFG 19	Piezometro	22.71	2070	13.0	20.7	16.00
SPE 26-7	Piezometro	8.43	2030	13.0	22.8	16.00
F. Tanaro (punto 3 a valle)	Corso d'acqua	0.00	363	17.5		17.00
SFG 1	Piezometro	6.35	2490	13.0	21.2	17.00
Sorgente 1	Sorgente	0.00	2150	14.1		17.00
SFG 11	Piezometro	39.06	1860	14.4	22.8	17.00
Cascina Dabene	Laghetto	0.00	334	18.9	20.9	18.00
Pozzo 2 (nei pressi di Cogni)	Pozzo	1.50	1116	14.4	20.3	18.00
Sorgente 2	Sorgente	0.00	2110	15.3		18.00
Rio S. Michele (punto 1 a monte)	Corso d'acqua	0.00	1970	15.0	19.8	19.00
Rio S. Giacomo (nei pressi frazione)	Corso d'acqua	0.00	1694	15.3	19.6	19.00
Rio S. Michele (punto 2 a valle)	Corso d'acqua	Alveo asciutto	-	-	-	19.10
F. Tanaro (punto 2 intermedio)	Corso d'acqua	0.00	355	18.0		19.10
Rio Deglia (punto 1 a monte)	Corso d'acqua	0.00	1683	15.0		19.20

ALLEGATO 7

SONDAGGI ATTREZZATI A PIEZOMETRO E INCLINOMETRO REALIZZATI NELL'AMBITO DEL PROGETTO
 PRELIMINARE (1998-1999) PER LA COSTRUZIONE DEL NUOVO OSPEDALE ALBA-BRA

Sigla	Tipologia indagine	Profondità (m dal p.c.)	Strumentazione
S 1 / I5	sondaggio a carotaggio continuo	45,0	Inclinometro (prof. 45 m)
S 1 / P2	sondaggio a distruzione di nucleo	32,0	Piezometro a tubo aperto (prof. 32 m)
S 2 / I6	sondaggio a carotaggio continuo	45,0	Inclinometro (prof. 45 m)
S 2 / P4	sondaggio a distruzione di nucleo	30,0	Piezometro a tubo aperto (prof. 30 m)
S3 / P3	sondaggio a carotaggio continuo	40,0	Piezometro a tubo aperto (prof. 40 m)
S4 / I1	sondaggio a carotaggio continuo	70,0	Inclinometro (prof. 65 m)
S 5 / P1	sondaggio a distruzione di nucleo	30,0	Piezometro a tubo aperto (prof. 30 m)
S 5 / I2	sondaggio a carotaggio continuo	45,0	Inclinometro (prof. 45 m)
S 6 / I3	sondaggio a carotaggio continuo	40,0	Inclinometro (prof. 40 m)
S 7 / I4	sondaggio a carotaggio continuo	50,0	Inclinometro (prof. 50 m)
S 10	sondaggio a carotaggio continuo	31,1	-
S 11	sondaggio a carotaggio continuo	25,2	-
S 12	sondaggio a carotaggio continuo	22,0	-
S 13	sondaggio a carotaggio continuo	26,3	-
S 14	sondaggio a carotaggio continuo	35,8	-

SONDAGGI ATTREZZATI A PIEZOMETRO E INCLINOMETRO REALIZZATI NELL'AMBITO DEL PROGETTO
 DEFINITIVO (2000-2001) PER LA COSTRUZIONE DEL NUOVO OSPEDALE ALBA-BRA

Sigla	Tipologia indagine	Profondità (m dal p.c.)	Strumentazione
SI 1	sondaggio a carotaggio continuo	35,0	-
SI 4	sondaggio a carotaggio continuo	40,0	Piezometro a tubo aperto (prof. 15 m)
SI 5	sondaggio a carotaggio continuo	35,0	Inclinometro (prof. 35 m)
SI 6	sondaggio a carotaggio continuo	30,0	
SI 7	sondaggio a carotaggio continuo	30,0	
SI 9	sondaggio a carotaggio continuo	35,0	
SI 11	sondaggio a carotaggio continuo	50,0	
SI 14	sondaggio a carotaggio continuo	25,0	Piezometro a tubo aperto (prof. 25 m)
SI 15	sondaggio a carotaggio continuo	30,0	Piezometro a tubo aperto (prof. 24 m)
SI 17	sondaggio a carotaggio continuo	35,0	
SI 18	sondaggio a carotaggio continuo	30,0	
SI 18bis	sondaggio a distruzione di nucleo	50,0	Inclinometro (prof. 50 m)
SI 19	sondaggio a carotaggio continuo	30,0	Inclinometro (prof. 30 m)



Collegamento autostradale Asti – Cuneo – Tronco II Lotto 6
PROGETTO ESECUTIVO
Galleria Verduno - Relazione idrogeologica

ALLEGATO 8

VALORI PIEZOMETRICI MINIMI, MASSIMI E MEDI RELATIVI ALLA CAMPAGNA DEL 2001-2002

ID PIEZOMETRO	02/08/01	30/08/01	16/09/01	02/10/01	17/10/01	16/11/01	07/12/01	19/12/01	15/01/02	04/02/02	21/02/02	MIN	MAX	MEDIO
SPD 26-1	211.0	210.9	210.7	211.1	211.2	211.2	211.0	211.3	211.2	211.2	211.3	210.7	211.3	211.1
SPD 26-5	201.4	201.2	201.3	201.4	201.4	201.5	201.3	201.4	201.3	-	201.5	201.2	201.5	201.4
SPD 26-6 prof	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	188.8	188.8	188.8	188.8
SFG 3	254.7	255.7	255.9	255.8	255.5	255.5	255.3	254.9	254.9	254.9	255.2	254.7	255.9	255.3
SFG 4	246.3	247.8	247.6	247.4	247.3	247.0	246.9	246.7	246.4	246.3	253.5	246.3	253.5	247.6
SFG 5	208.0	206.2	206.2	206.2	206.2	206.2	206.2	206.2	206.2	206.2	206.2	206.2	208.0	206.3
SFG 8	-	231.2	229.4	229.2	230.9	223.6	220.3	220.0	219.8	219.7	219.8	219.7	231.2	224.4
SFG 9	-	195.4	198.4	198.4	198.3	198.3	198.4	198.2	198.2	198.3	198.2	195.4	198.4	198.0
SFG 10	-	196.8	197.0	196.8	196.9	200.1	200.1	199.8	199.7	199.7	199.9	196.8	200.1	198.7
SFG 11	-	-	232.7	-	237.9	229.7	229.5	229.5	229.3	229.2	229.3	229.2	237.9	230.9
SFG 13	-	-	-	-	269.9	252.9	252.9	252.2	251.7	251.5	248.0	248.0	269.9	254.2
SFG 14	-	-	-	-	254.0	253.3	253.1	252.9	253.2	253.2	253.2	252.9	254.0	253.3
SFG 16	-	-	-	-	-	-	-	245.7	262.0	-	-	245.7	262.0	253.9
SFG 19	-	-	256.2	-	255.9	255.7	255.6	255.7	255.8	255.8	255.7	255.6	256.2	255.8
SFG 23	-	-	-	-	-	192.1	192.0	192.9	192.8	192.8	192.7	192.0	192.9	192.5
SFG 24	-	-	-	-	-	198.2	198.0	198.2	198.1	198.0	198.2	198.0	198.2	198.1
SFG 25	-	-	-	-	-	196.3	196.1	196.0	195.9	195.9	195.9	195.9	196.3	196.0
SFG 26	-	-	-	-	-	193.7	193.5	194.5	194.4	194.4	194.5	193.5	194.5	194.2
SFG 32	-	-	-	-	-	-	200.7	200.8	200.7	200.7	200.7	200.7	200.8	200.7
SFG 34	-	-	-	-	-	-	209.2	209.2	209.1	209.1	209.1	209.1	209.2	209.1
SFG 35	-	-	-	-	-	193.0	192.5	193.6	193.4	193.4	193.4	192.5	193.6	193.2
SPE 26-6	-	187.4	187.9	187.9	-	188.3	188.1	187.9	187.9	188.1	188.4	187.4	188.4	188.0
SPE 26-7	-	213.0	212.8	212.6	-	213.0	212.2	-	-	211.9	213.0	211.9	213.0	212.6
SPE 26-8	-	186.4	186.4	186.5	-	186.7	186.4	185.4	185.3	185.4	-	185.3	186.7	186.1
SPE 26-9	-	188.9	188.1	188.0	-	188.3	188.3	-	-	189.2	189.7	188.0	189.7	188.7
SPE 26-11	-	203.1	203.2	203.0	-	204.2	203.9	203.9	203.8	203.8	204.0	203.0	204.2	203.6
SPE 26-13	-	298.7	298.8	298.8	-	298.7	298.7	-	-	298.7	298.8	298.7	298.8	298.7
SPE 26-14	-	-	319.6	319.5	-	319.4	319.2	-	-	324.4	335.7	319.2	335.7	323.0
SPE 26-15	-	190.4	193.2	193.2	-	192.8	192.5	-	-	192.6	192.6	190.4	193.2	192.5