

LIAISON LYON - TURIN / COLLEGAMENTO TORINO - LIONE

Partie commune franco-italienne
Section transfrontalière

Parte comune italo-francese
Sezione transfrontaliera

NOUVELLE LIGNE LYON TURIN – NUOVA LINEA TORINO LIONE
PARTIE COMMUNE FRANCO-ITALIENNE – PARTE COMUNE ITALO-FRANCESE

REVISION DE L'AVANT-PROJET DE REFERENCE – REVISIONE DEL PROGETTO DEFINITIVO
CUP C11J05000030001

GEOLOGIE – GEOLOGIA

TUNNEL DE BASE – TUNNEL DI BASE

TRAVERSEMENT EN SOUTERRAIN DU CENISCHIA –
ATTRAVERSAMENTO IN SOTTERRANEO DEL CENISCHIA

Géologie, hydrogéologie et géotechnique – Geologia, Idrogeologia e Geotecnica

Rapport géologique et hydrogéologique de détail – Modèle numérique d'écoulement 3D
Relazione geologica e idrogeologica di dettaglio - Modello numerico di flusso 3D

Indice	Date/ Data	Modifications / Modifiche	Etabli par / Concepito da	Vérfié par / Controllato da	Autorisé par / Autorizzato da
0	11/01/2013	Première diffusion / Prima emissione	R. TORRI (SEA) V. DELL'ORTO (SEA) A. DEMATTEIS (SEA)	R. TORRI C. OGNIBENE	L. CHANTRON M. PANTALEO
A	31/01/2013	Reception des commentaires LTF et passage au status AP / Recepimento dei commenti LTF e passaggio allo stato AP	R. TORRI (SEA) V. DELL'ORTO (SEA) A. DEMATTEIS (SEA)	R. TORRI C. OGNIBENE	L. CHANTRON M. PANTALEO

 **Tecnimont**
Civil Construction
Dott. Ing. Aldo Mancarelli
Ordine Ingegneri Friuli Venezia Giulia n. 6271 R



CODE DOC	P	D	2	C	3	B	T	S	3	0	0	2	1	A
	Phase / Fase		Sigle étude / Sigla			Émetteur / Emittente			Numero			Indice		

A	P	N	O	T
Statut / Stato		Type / Tipo		

ADRESSE GED INDIRIZZO GED		//	//	26	60	01	10	01
------------------------------	--	----	----	----	----	----	----	----

ECHELLE / SCALA
-



LTF sas – 1091 Avenue de la Boisse – BP 80631 – F-73006 CHAMBERY CEDEX (France)
Tél. : +33 (0)4.79.68.56.50 – Fax : +33 (0)4.79.68.56.75
RCS Chambéry 439 556 952 – TVA FR 03439556952
Propriété LTF Tous droits réservés – Proprietà LTF Tutti i diritti riservati

Ce projet est cofinancé par l'Union européenne (DG-TREN)



Questo progetto è cofinanziato dall'Unione europea (TEN-T)

SOMMAIRE / INDICE

1. SINTESI	3
2. INTRODUZIONE	5
3. ACQUIFERO POROSO DEL FONDOVALLE CENISCHIA (PK 56+058 – 57+160)	6
4. MODELLO NUMERICO	11
4.1 Estensione del modello	11
4.2 Modello geologico e idrogeologico di riferimento	13
4.2.1 Geometria	13
4.2.2 Parametri idrodinamici	16
4.3 Condizioni di flusso ai limiti	17
4.4 Calibrazione del modello	18
5. RISULTATI DEL MODELLO IN PRESENZA DEL TUNNEL DI BASE	22

Rapport géologique et hydrogéologique de détail – Modèle numérique d'écoulement 3D
 Relazione geologica e idrogeologica di dettaglio - Modello numerico di flusso 3D

1. Synthèse

Ce rapport décrit le modèle stratigraphique et hydrogéologique à la base du modèle numérique d'écoulement 3D également décrit ici. Ce dernier a été réalisé en correspondance du tronçon de traversée en souterrain du Val Cenischia dans le but d'évaluer le possible effet barrage lié à la position transversale du tunnel de base par rapport à la direction d'écoulement de la nappe phréatique des dépôts quaternaires du fond de vallée.

Ce modèle numérique répond à la prescription du CIPE n°133 concernant la ressource hydrique et qui demande la réalisation d'un modèle mathématique pour la quantification de l'effet barrage qui pourrait se vérifier le long du Val Cenischia.

Ce modèle numérique a été réalisé en conditions d'écoulement stationnaires avec des conditions aux limites cohérentes par rapport au modèle conceptuel issu des données disponibles. Le modèle a été réalisé avec le module de calcul à éléments finis fourni par le logiciel Feflow 5.3 (Wasy AG, Berlin) qui applique la loi de Darcy sur tout le volume du modèle.

Notamment, le modèle numérique a été réalisé à partir des données historiques qui ont permis la reconstruction du contexte stratigraphique et qui proviennent de la consultation des documents géologiques, géotechnique et hydrogéologique des forages S18, S19 et S20. La séquence stratigraphique des terrains quaternaires du fond de vallée Cenischia qui constituent l'aquifère phréatique et qui seront traversés par le tunnel de base a été également définie par l'analyse des investigations géophysiques réalisées le long la plaine (réfraction tomographique, sismique à réflexion, géo-électrique).

La calibration du modèle, bien que de bonne qualité, se base sur les mesures piézométrique des forages S18 et S19 ; elle pourrait être améliorée par la mise à jour et la nouvelle acquisition de données piézométriques.

1. Sintesi

La presente relazione descrive il modello stratigrafico e idrogeologico alla base del modello numerico di flusso 3D sempre qui descritto e realizzato in corrispondenza della tratta di attraversamento in sotterraneo della Val Cenischia al fine di valutare il possibile effetto diga esercitato dal tunnel di base sulla falda ospitata nei depositi quaternari del fondovalle Cenischia.

Tale modello ottempera alla prescrizione CIPE n°133 riguardante la risorsa idrica che prescrive la realizzazione di un modello numerico (matematico) al fine di quantificare l'effetto diga che più probabilmente potrebbe interessare la val Cenischia.

Il modello numerico è stato dunque realizzato in stato stazionario con condizioni al contorno adeguate al modello concettuale elaborato sulla base dei dati disponibili. Il modello numerico è stato eseguito utilizzando il metodo degli elementi finiti con il programma Feflow 5.3 (Wasy AG, Berlin) che applica la legge di Darcy in tutte le parti del modello.

In particolare, il modello numerico è stato realizzato sulla base di dati storici che hanno permesso la ricostruzione dell'assetto stratigrafico derivati dalla consultazione dei dati geologici, geotecnici e idrogeologici dei sondaggi S18, S19 e S20. L'assetto stratigrafico dei terreni quaternari del fondovalle Cenischia che ospitano la falda freatica e che saranno attraversati durante lo scavo del tunnel di base è altresì derivato dall'analisi delle indagini geofisiche realizzate lungo la piana (rifrazione tomografica, sismica a riflessione e geoelettrica).

La calibrazione del modello, seppur di buona qualità, è stata esclusivamente realizzata in corrispondenza dei sondaggi S18 e S19; essa potrà essere migliorata con ulteriori e più estese indagini idrogeologiche.

È comunque possibile affermare che il risultato del modello numerico sia rappresentativo dell'ordine di grandezza dei fenomeni simulati e che essi

Rapport géologique et hydrogéologique de détail – Modèle numérique d'écoulement 3D
 Relazione geologica e idrogeologica di dettaglio - Modello numerico di flusso 3D

Il est toutefois possible d'affirmer que les résultats du modèle numérique sont représentatifs de l'ordre de grandeur des phénomènes simulés et qu'ils peuvent être considérés suffisamment fiables pour les besoins du projet.

Le résultat du modèle en condition post operam (avec le tunnel réalisé) montre que la présence du tunnel de base provoque une faible augmentation du niveau piézométrique dans le secteur à l'amont de l'ouvrage ; dans le secteur à l'aval, les variations du niveau piézométrique sont presque nulles. Ce résultat est cohérent avec les perméabilités élevées des dépôts quaternaires.

Notamment, à l'amont du tracé du tunnel de base, le niveau piézométrique augmente jusqu'à environ 0.3 mètres. A l'aval, les variations du niveau de la nappe montrent une baisse de l'ordre de 1-2 cm.

En conclusion, les variations piézométriques simulées en relation à l'effet barrage sont très réduites et inférieures aux variations saisonnières liées à l'alimentation de la nappe par les précipitations atmosphériques (pluies et neiges) et des régimes d'irrigation par les canaux de dérivation des eaux de surface.

Par rapport aux connaissances hydrogéologiques actuelles, les variations de la nappe simulées sont négligeables et ne nécessitent pas de mesures de mitigation des effets de la présence du tunnel de base sur la nappe phréatique dans la vallée Cenischia.

Toutefois, il est jugé nécessaire de mettre en œuvre un réseau de suivi piézométrique pour la phase ante operam et qui continue pendant et après la réalisation des ouvrages pendant un temps suffisamment long (au moins 2 ans).

possano essere considerati sufficientemente affidabili per gli scopi progettuali prefissati.

Il risultato del modello in condizioni post operam (con il tunnel completato) mostra come la presenza del tunnel determini un modesto sollevamento delle acque sotterranee nel settore a monte; nel settore a valle le variazioni (abbassamento) sono minime e le isopieze post operam sono pressoché coincidenti con l'andamento della falda ante operam. Questo risultato è coerente con l'elevata permeabilità dei depositi alluvionali recenti che caratterizzano l'acquifero in cui si inserisce l'opera.

In particolare, a monte del tracciato del tunnel di base il livello freatico subisce un innalzamento che raggiunge valori massimi di 0.3 m. A valle del tunnel di base le variazioni del livello freatico indicano un abbassamento dell'ordine di 1-2 cm.

In conclusione, si evince che la variazione delle quote piezometriche dovute all'effetto diga è di entità ridotta e inferiore alle variazioni stagionali dovute all'alimentazione della falda da parte delle precipitazioni meteoriche (piogge e scioglimento delle nevi) e dei regimi di irrigazione regolati tramite le derivazioni lungo i corsi d'acqua verso i canali irrigui che solcano il fondovalle.

In relazione alle conoscenze idrogeologiche attuali le variazioni risultano trascurabili e non si prescrivono misure di mitigazione degli effetti della presenza del tunnel di base sulla falda freatica del fondovalle Cenischia.

Tuttavia si ritiene necessario mettere in opera una rete di monitoraggio del livello piezometrico ante operam e che continui durante e dopo la realizzazione degli scavi per un tempo sufficientemente lungo (almeno 2 anni).

2. Introduzione

La presente relazione descrive il modello numerico di flusso 3D realizzato in corrispondenza della tratta di attraversamento in sotterraneo della Val Cenischia al fine di valutare il possibile effetto diga esercitato dal tunnel di base sulla falda ospitata nei depositi quaternari del fondovalle Cenischia.

Tale modello ottempera alla prescrizione CIPE n°133 riguardante la risorsa idrica. In particolare, essa prescrive che *per gli aspetti inerenti la permeabilità primaria, e quindi riguardanti la circolazione idrica nel mezzo poroso, dovranno essere effettuate valutazioni generali sulle interferenze dell'opera nel suo complesso (non solo i tratti in galleria) con l'andamento della sottostante falda, evidenziando le criticità che si dovessero presentare; tali criticità, in questo caso, potrebbero essere causate, nella zone di fondovalle attraversate trasversalmente dall'opera, dal cosiddetto "effetto diga" ovvero lo sbarramento del naturale deflusso delle acque sotterranee che potrebbe causare un innalzamento (da quantificare) della falda a monte e un conseguente abbassamento (da quantificare) a valle dell'opera. In particolare nelle valli del Clarea, del Cenischia e nelle piane di Susa e di Chiusa dovrà essere effettuata una caratterizzazione litostratigrafica ed idrogeologica del materasso alluvionale fino al substrato (geoelettrica, sismica, sondaggi). Al fine di quantificare l'effetto diga sopra descritto che più probabilmente potrebbe interessare la val Cenischia e la piana di Chiusa dovrà essere inoltre effettuata una modellizzazione matematica che a partire dalle previste indagini di dettaglio simuli l'interferenza dell'opera nei confronti del regime idrogeologico; a questo proposito dovrà essere incrementato il numero dei sondaggi aggiungendone almeno uno a monte dell'opera in senso idrogeologico. Tutti i sondaggi dovranno raggiungere il substrato roccioso dove possibile o la base dell'acquifero superficiale.*

Per quanto riguarda il fondovalle Clarea, la valutazione del possibile impatto diretto e indiretto sulla falda di subalveo è descritta nei seguenti elaborati specifici:

- n°doc PD2 C3B 0082 26 47 05 10 0 - Iimbocco galleria di ventilazione Clarea: valutazione di probabilità d'impatto in relazione allo scavo della galleria di ventilazione Clarea e ai lavori di installazione della stessa centrale di ventilazione;
- n°doc PD2 C3B 0097 00 02 01 10 03 - Probabilità d'impatto su sorgenti e corsi d'acqua: valutazione di probabilità d'impatto in relazione allo scavo del tunnel di base.

La probabilità d'impatto sull'acquifero del fondo valle della Piana di Susa è stato altresì trattata nel documento PD2 C3B 0097 00 02 01 10 03 - Probabilità d'impatto su sorgenti e corsi d'acqua, a cui si rimanda per i dettagli.

Il settore della Piana delle Chiuse non è stato invece trattato in questa fase di progettazione in quanto relativo alla successiva fase 2 di realizzazione delle opere secondo quanto stabilito dal progetto di fasaggio (Prescrizione CIPE n°1).

Al fine di quantificare l'effetto diga che potrebbe interessare la val Cenischia in corrispondenza dell'attraversamento nei terreni alluvionali con falda, è stato aggiornato il modello geologico ed idrogeologico di dettaglio, ed è stato realizzato un modello numerico in stato stazionario con condizioni al contorno adeguate al modello concettuale elaborato sulla base dei dati disponibili. Il modello numerico è stato eseguito utilizzando il metodo degli elementi finiti con il programma Feflow 5.3 (Wasy AG, Berlin) che applica la legge di Darcy in tutte le parti del modello.

Il modello numerico di flusso è stato realizzato sulla base di dati storici per la ricostruzione dell'assetto stratigrafico; i dati a disposizione risultano concentrati lungo il tracciato del tunnel di base dell'APR che prevedeva l'attraversamento della Val Cenischia 400 metri circa più a sud in viadotto (allineamento dei sondaggi S18, S19 e S20 in Figura 1); la piezometria della falda del fondovalle Cenischia è stata definita solo sulla base delle misure realizzate fino al 2001 sui sondaggi S18, S19 e S20 (Figura 2) anch'essi allineati lungo lo stesso tracciato del tunnel di base APR.

L'affidabilità del modello è bassa soprattutto in relazione alla fase di calibrazione ovvero della simulazione dei flussi nelle condizioni attuali in assenza del tunnel di base (ante operam), e potrà essere migliorata con ulteriori indagini idrogeologiche (sondaggi e piezometri) che potranno essere realizzate nelle prossime fasi di progetto (Progetto Esecutivo). Per i dettagli del piano indagini si confronti l'elaborato PD2 C3B 0107 00-05-05 10-01 Piano indagini. È comunque possibile affermare che il risultato del modello numerico sia rappresentativo dell'ordine di grandezza dei fenomeni simulati e che essi possano essere considerati sufficientemente affidabili per gli scopi progettuali prefissati.

3. Acquifero poroso del fondovalle Cenischia (PK 56+058 – 57+160)

L'attraversamento in sottterraneo della Val Cenischia prevede lo scavo in depositi alluvionali di fondovalle generalmente sabbiosi e ghiaioso-sabbiosi debolmente limosi che costituiscono, alla scala del fondovalle, un acquifero generalmente omogeneo seppur caratterizzato da un certo grado di anisotropia verticale e orizzontale in relazione al complesso assetto stratigrafico. Sulla base dei dati disponibili si presuppone la comunicazione diretta tra i livelli acquiferi sovrapposti ovvero non è considerata la presenza di livelli acquiferi in pressione profondi e isolati dalla falda freatica superficiale.

I rapporti idrogeologici tra la falda freatica e il torrente Cenischia mostrano che quest'ultimo rivesta un ruolo alternatamente di drenaggio e alimentazione della falda. In particolare, si presuppone che nel settore a monte dell'attraversamento, in cui la soggiacenza della falda sia più importante, esso principalmente alimenti la falda mentre, nel settore più a valle, con soggiacenza ridotta, rivesta un ruolo di elemento drenante delle acque sotterranee. Questo fenomeno è testimoniato dalla portata del Cenischia in regime di magra, pari a zero a monte e superiore a zero a valle. Durante l'estate e l'autunno 2012 sono state realizzate misure di portata, conducibilità elettrica, temperatura e analisi chimiche ed isotopiche al fine di comprendere i rapporti esistenti tra il torrente Cenischia e la falda di fondovalle (confrontare doc n° PD2_C3B_0097_00-02-01_10-03_Relazione idrogeologica punti acqua - § 6.2).

Sulla base dei dati stratigrafici e idrogeologici ottenuti tramite i sondaggi S18, S19 e S20, e dai profili sismici realizzati lungo il fondovalle (Figura 1) è possibile distinguere differenti orizzonti con permeabilità che variano in base al contenuto in materiale fine (limi e argille) e al grado di compattazione:

- *Complesso a bassa permeabilità costituito da depositi lacustri e palustri o da depositi glaciali di fondo.* Al di sotto dei depositi alluvionali di fondovalle esistono degli orizzonti di limi e sabbie limose (af5), originatisi ipoteticamente in epoca glaciale (depositi glacio-lacustri) in relazione con la presenza di depressioni chiuse sbarrate da morene frontali. Tali depositi si trovano in prossimità del contatto con il substrato roccioso, e la loro estensione laterale è difficilmente ipotizzabile sulla base dei dati attualmente a disposizione. È tuttavia ragionevole ritenere che tali livelli siano discontinui. A un livello stratigraficamente inferiore rispetto a questi depositi, a diretto

contatto con il substrato roccioso, si trovano talora dei depositi glaciali di fondo (*fg*). Entrambi questi tipi di depositi hanno permeabilità basse rispetto agli altri depositi quaternari permeabili per porosità e dell'ordine dei 1^E-7 m/s (dati Alpetunnel, rapporto RAT-STA-1158/97 di ISMES). Poiché comunemente nelle valli di origine glaciale i depositi glaciali di fondo ricoprono i fondovalle in maniera più o meno continua al di sotto dei depositi glaciali di ablazione e alluvionali, è probabile che anche lungo le Valli Cenischia e Dora sia presente un livello di base di questi depositi più o meno continuo. Questo livello, a causa della sua bassa permeabilità, isola parzialmente gli acquiferi di fondovalle in mezzi porosi da quelli in roccia. I depositi glacio-lacustri localmente (es. sbocco della Val Cenischia) si sovrappongono a quelli di fondo, aumentando la potenza di questo setto semipermeabile. Piccoli lembi di questo complesso possono affiorare anche lungo i versanti, al di sotto dei principali accumuli di depositi glaciali di ablazione, soprattutto in corrispondenza delle superfici preservate di antichi terrazzi glaciali.

- *Complesso a permeabilità elevata costituito da depositi alluvionali recenti e non cementati.* Questo complesso è l'acquifero per porosità più esteso dell'area rilevata, poiché è localizzato lungo tutti i fondovalle principali. Esso comprende i termini da ciottoloso – ghiaioso – sabbioso con limi a sabbioso – limosi (da *afl* a *af4*). Di quest'insieme fanno parte gli estesi depositi di conoide (*ac*) che caratterizzano il fondovalle Cenischia allo sbocco del Rio Supita. La permeabilità al suo interno è stata valutata tramite prove Lefranc in numerosi sondaggi (S15, S16, S18, S19, S20), e mediamente oscilla tra 5^E-5 e 1^E-6 m/s (dati Alpetunnel, rapporto RAT-STA-1158/97 di ISMES).
- *Complesso a permeabilità molto elevata costituito da depositi detritici.* Questo complesso raggruppa gli acquiferi costituiti dalle placche di detrito di falda o dai corpi di frana di crollo più estesi arealmente (*db* e *df*). Benché non vi siano prove di permeabilità dirette al loro interno, si può affermare che tali depositi hanno una permeabilità molto elevata, a causa della natura prevalentemente ghiaiosa della loro matrice.

Rapport géologique et hydrogéologique de détail – Modèle numérique d'écoulement 3D - Relatione geologica e idrogeologica di dettaglio - Modello numerico di flusso 3D

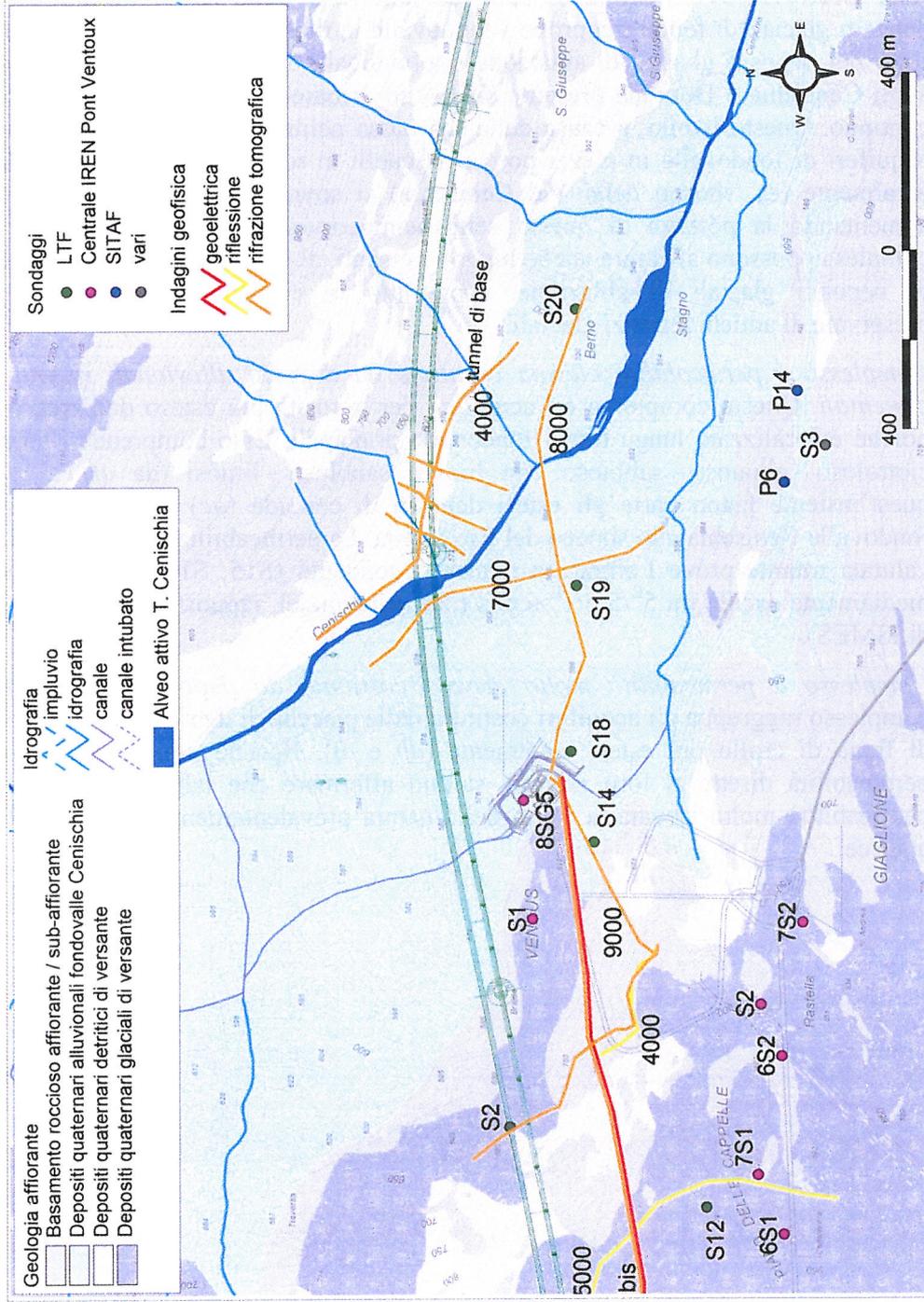


Figura 1 – Ubicazione delle indagini realizzate lungo il fondovalle Cenischia e nelle tratte adiacenti

Tuttavia, l'incerta continuità laterale delle lenti a granulometria differente e il loro accentuato grado di eteropia e interdigitazione non permettono di distinguere nettamente orizzonti continui e sovrapposti in maniera ubiquitaria lungo tutto il fondovalle Cenischia. Per questo motivo, l'insieme stratigrafico è stato inteso facente parte di un unico acquifero poroso omogeneo alla scala del fondovalle.

Nei tre sondaggi S18, S19 e S20 sono state realizzate prove Lefranc a carico variabile in abbassamento (dati Alpetunnel, rapporto RAT-STA-1158/97 di ISMES ; Tabella 1). I valori indicano una permeabilità media di circa 5^E-6 m/s (permeabilità di grado medio).

Sond.	Prova Lefranc n°	da (m)	a (m)	K (m/s)	Descrizione
S18	1	49.0	50.0	3.69E-06	Sabbia fine, talora debolmente limosa con ghiaia fine
	2	59.0	60.0	4.53E-06	Sabbia fine, talora debolmente limosa
S19	1	22.5	23.5	3.46E-06	Ghiaia eterometrica in matrice sabbiosa m/f, localmente limosa
	2	52.3	53.0	1.63E-05	Ghiaia eterometrica in matrice sabbiosa m/g, localmente limosa con intercalati livelli dmdi sabbia fine
	3	70.4	73.0	3.42E-07	Sabbia m/g con ghiaia m/f con intercalati livelli cm/dm di limo sabbioso debolmente argilloso
	4	87.7	89.0	3.81E-07	Sabbia m/f debolmente limosa con ghiaia eterometrica
S20	1	24.0	25.0	2.56E-06	Ghiaia eterometrica con sabbia m/f debolmente limosa con intercalati livelli dm di sabbia limosa
	2	49.5	51.0	2.12E-06	Sabbia eterometrica limosa con ghiaia m/f
	3	75.0	76.5	6.14E-06	Sabbia eterometrica limosa localmente argillosa con ghiaia m/f

Tabella 1 – Risultati delle prove idrauliche di tipo Lefranc realizzate nei sondaggi S18, S19 e S20

In condizioni imperturbate, la falda freatica ospitata nei depositi di fondovalle si trova in equilibrio con il reticolo idrografico (T. Cenischia) e presenta generalmente una soggiacenza che diminuisce da monte verso valle dove risulta anche essere inferiore a 5 metri.

Nel settore indagato dai sondaggi S18, S19 e S20, invece, le misure piezometriche eseguite tra il mese di maggio 1998 e il mese di maggio 2001 (durante la realizzazione delle opere sotterranee di Pont Ventoux) mostrano una soggiacenza variabile tra 10 e 30 metri e una generale deformazione dei flussi che sembrano essere richiamati verso il versante destro della valle (settore del sondaggio S18, Figure 12) in corrispondenza dei settori in cui sono stati registrati i drenaggi più importanti nella galleria di accesso alla centrale di Pont Ventoux. Tali piezometri oggi non sono più misurabili perché andati distrutti.

In questo settore l'acquifero di fondovalle è apparentemente drenato dalle opere di Pont Ventoux alle quali è idrogeologicamente connesso attraverso la Faglia di Venaus.

In asse al tunnel di base che attraversa i depositi di fondovalle circa 400 metri più a nord rispetto all'allineamento dei sondaggi S18, S19 e S20, il battente idraulico massimo, in

assenza di misure aggiornate, è ipoteticamente di circa 50-60 metri e coincidente con la copertura topografica in corrispondenza del Torrente Cenischia.

Lo scavo dovrà quindi considerare condizioni di pressione idrostatica prossime ai 6 bar.

La base dell'acquifero è ipoteticamente fissato in corrispondenza del basamento roccioso al di sotto dei depositi quaternari che si trova a una quota inferiore alle opere in progetto come testimoniato dai sondaggi realizzati da LTF in questo settore (S18, S19 e S20). In particolare, solo il sondaggio S20 ha intercettato il basamento roccioso a una profondità di 99 metri.

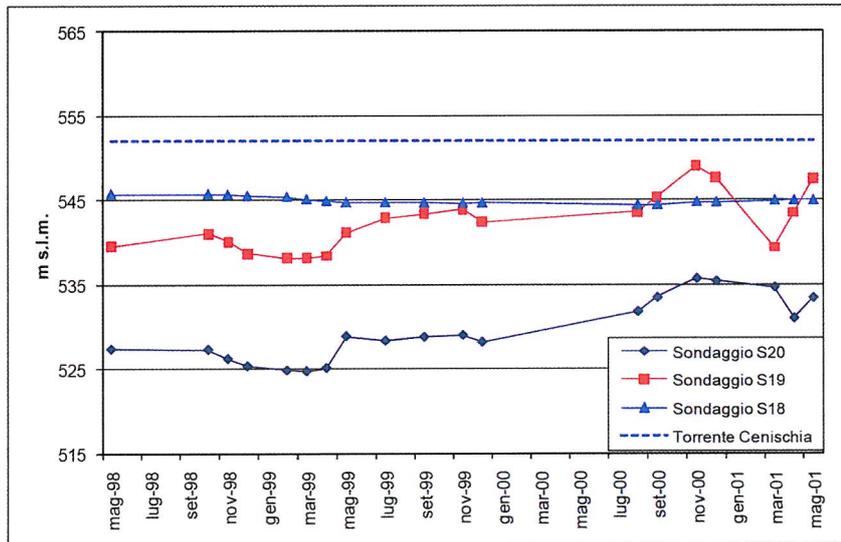


Figura 2 – Variazioni del livello freatico tramite misure piezometriche realizzate nei sondaggi S18, S19 e S20 tra il maggio 1998 e il maggio 2001. È riportato altresì la quota del T. Cenischia misurato in corrispondenza dei sondaggi.

Le variazioni misurate sono connesse al regime climatico con un picco autunnale e uno primaverile, il primo legato alle precipitazioni piovose e il secondo allo scioglimento delle nevi che ricoprono i versanti a quote più elevate. Si nota inoltre la presenza di un minimo invernale legato alle precipitazioni di carattere nevoso.

L'escursione massima del livello freatico durante un ciclo idrologico (1 anno) è dell'ordine di 10 m.

4. Modello numerico

4.1 Estensione del modello

L'area del modello è stata definita in base all'obiettivo dello studio. Il tratto in cui il tunnel di base attraversa trasversalmente all'asse vallivo il fondovalle Cenischia è posizionato al centro dell'area del modello la quale si estende sufficientemente sia a monte che a valle.

I limiti di tale area sono stati individuati facendo coincidere il tratto a nord con il Rio della Croce che attraversa trasversalmente il fondo valle in corrispondenza del settore a nord del conoide del rio Supita e alimenta il Cenischia, ad est con il corso dello stesso T. Cenischia, per una lunghezza di circa 2 km, il cui alveo in questo tratto si trova al limite del fondovalle sul lato sinistro ai piedi del versante in roccia, mentre a ovest l'area del modello coincide con la linea di contatto tra il versante in roccia e i depositi quaternari di fondovalle (Figura 3).

Il limite orientale coincide con il Torrente Cenischia che a monte dell'intersezione con l'asse del tracciato del tunnel di base scorre a ridosso del versante dove affiorano i depositi detritici di versante. Si suppone che il basamento roccioso, che costituisce il limite impermeabile di base dell'acquifero poroso del fondovalle Cenischia, si trovi in prossimità dell'alveo attivo a una profondità trascurabile alla scala del modello.

A valle dell'intersezione del T. Cenischia con l'asse del tracciato, il limite orientale del modello segue l'alveo attivo dello stesso torrente che costituisce un elemento di compartimentazione dei flussi dell'acquifero di fondovalle.

4.2 Modello geologico e idrogeologico di riferimento

4.2.1 Geometria

Per tenere conto della variazione verticale di conducibilità idraulica all'interno dei depositi quaternari, il modello è stato sviluppato in tre dimensioni (3D): per poter simulare l'eterogeneità stratigrafica verticale dei depositi quaternari di riempimento del fondovalle e considerare la presenza del tunnel di base, sono stati definiti 7 strati (layer) di prismi triangolari i cui spessori sono stati modellizzati in coerenza con il modello stratigrafico definito sulla base dei dati dei sondaggi S18, S19 e S20 e i dati di progetto di ingombro delle due canne del tunnel di base (vedere § 3).

La base dell'acquifero dei depositi quaternari è stata posta al contatto presunto con il basamento roccioso assumendo che questo sia posto a una profondità maggiore di 100 metri in accordo al modello concettuale di evoluzione glaciale del fondovalle Cenischia e avvallato dai dati dei sondaggi e dalle indagini sismiche realizzate nella Val Cenischia.

Sulla base della campagna geognostica (indagini sismiche del 1999 Alpetunnel, Figura 4, Figura 5 e Figura 6), le cui ubicazioni in pianta sono riportate in Figura 1, unitamente alla stratigrafia del sondaggio S20, si evince che il fondovalle sepolto ed eroso in roccia è posto a una quota di circa 460 mslm in corrispondenza della tomografica 9000.

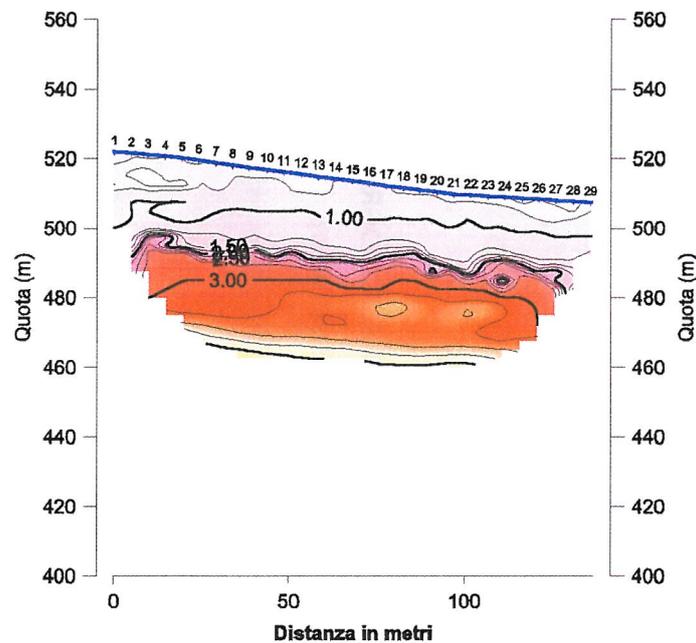
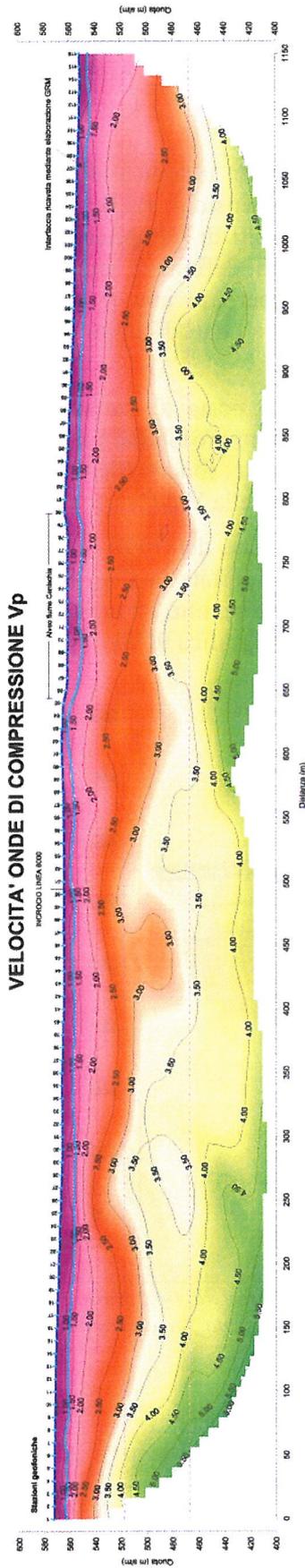


Figura 4 – Linea tomografica 9000 da cui si evince che il substrato (vel. di 4-4,5 km/sec) è posto a 460 m circa (giallo nell'immagine). Sezione trasversale rispetto alla Val Cenischia, in corrispondenza di Pietrastretta. Legenda nella successiva figura.

Rapport géologique et hydrogéologique de détail – Modèle numérique d'écoulement 3D
 Relazione geologica e idrogeologica di dettaglio - Modello numerico di flusso 3D

SEZIONE SISMICA CON ELABORAZIONE TOMOGRAFICA E GRM (LINEA 7000)



SEZIONE SISMICA CON ELABORAZIONE TOMOGRAFICA E GRM (LINEA 8000)

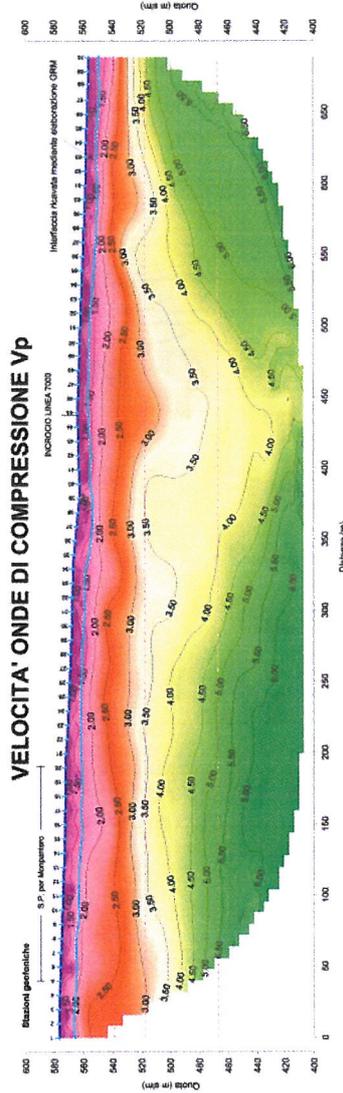


Figura 5 – Linea tomografica 7000 e 8000 da cui si evince che il substrato (vel. di 4-4,5 km/sec, tarato con il sondaggio S20 ed S19) è posto a 460 m circa (giallo nell'immagine). Sezioni all'incirca trasversali rispetto alla Val Cenisichia, in corrispondenza di Venaus.

È inoltre ipotizzato che nei pressi delle località Pietrastretta e Brunetta (Susa) alla confluenza della Val Cenischia nella Piana di Susa, il basamento roccioso sepolto costituisca una sorta di soglia in roccia incisa da gorge sempre sepolte come indicato nel profilo geologico schematico seguente.

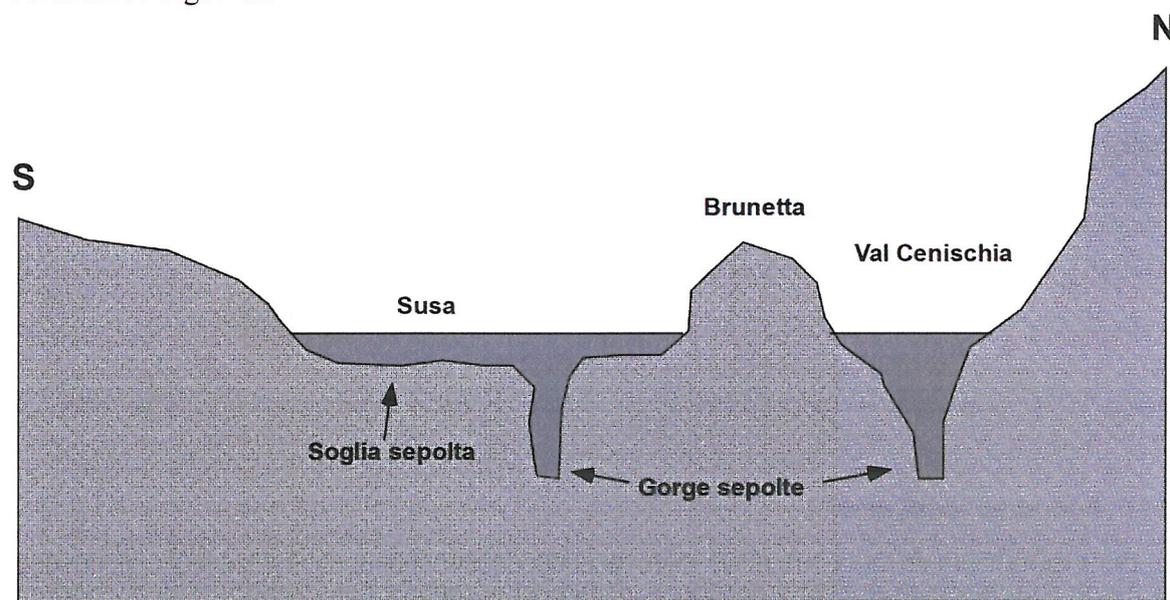


Figura 6 – Sezione schematica orientata N-S passante per il concentrico di Susa. Si notano la soglia sepolta e le due gorge, anch'esse sepolte, il cui fondo si dovrebbe trovare a circa 460 m. L'estensione verso valle (oriente) della soglia sepolta non è per il momento conosciuta.

Questo tipo di morfologia del basamento roccioso sepolto è stato considerato ai fini della costruzione del volume del modello numerico di flusso.

La maglia di celle è stata quindi infittita in corrispondenza degli elementi morfologici principali (corsi d'acqua) ma soprattutto lungo il tracciato del tunnel di base in modo da consentire al modello di simulare con più precisione l'andamento dei flussi in corrispondenza degli elementi che potrebbero determinare un maggiore incurvamento delle linee di flusso.

Il numero totale di nodi è 48304 e il numero totale di elementi è 81319 (Figura 7).

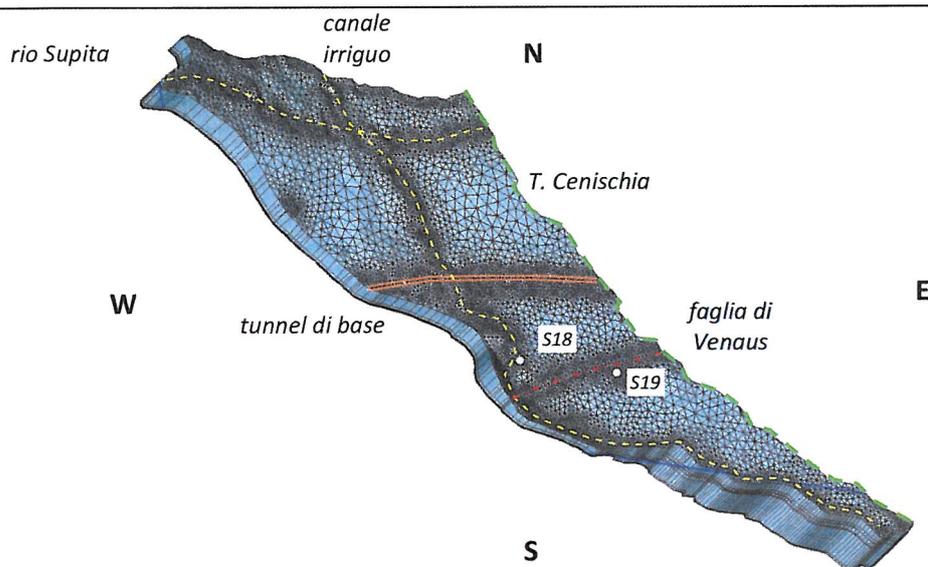


Figura 7 – Vista tridimensionale del volume del modello. Le porzioni di modello in corrispondenza del tunnel di base e dei corsi d'acqua risaltano con maglia più fitta. Nella figura sono riportate le tracce di questi elementi

4.2.2 Parametri idrodinamici

Le permeabilità attribuite ai singoli layer sono state definite anche sulla base delle condizioni di flusso simulate dal modello numerico e che hanno permesso di avvicinarsi alle condizioni naturali dell'acquifero definite sulla base delle misure piezometriche disponibili dei sondaggi S18, S19 e S20.

Il volume del modello numerico che costituisce l'acquifero di fondovalle è stato dunque distinto in layer sovrapposti secondo il seguente schema:

Layer	Complesso idrogeologico	Unità litostratigrafica	Permeabilità m/s		
			Kx	Ky	Kz
1-2-3	Q1	Depositi alluvionali recenti	5e-4	5e-4	5e-4
4	Q2	Depositi fluvio-glaciali	5e-6	5e-6	5e-6
5	Q3	Depositi glacio-lacustri	1e-7	1e-7	1e-7
6	Q1	Depositi alluvionali antichi	5e-4	5e-4	5e-5
7	Q3	Depositi glaciali di fondo	1e-7	1e-7	1e-7

La porzione di acquifero più superficiale, costituito da depositi alluvionali recenti è stato suddiviso in 3 layer al fine di poter simulare la presenza del tunnel (layer 2) che sarà materializzato geometricamente dall'intersezione delle celle del layer 2 (di altezza pari a 10 metri) con l'ingombro planimetrico complessivo delle due canne.

Le condizioni di permeabilità descritte hanno consentito di ottenere una buona calibrazione del modello da cui dipende la sua affidabilità (vedere § 4.4).

4.3 Condizioni di flusso ai limiti

L'alimentazione della falda dei depositi quaternari di fondovalle Cenischia, nel tratto isolato per il modello numerico, è garantita da tre elementi principali:

1. Alimentazione a monte da parte della stessa falda freatica;
2. Alimentazione diretta dall'alto da parte delle piogge che si infiltrano in funzione della permeabilità dei terreni affioranti e delle pendenze topografiche;
3. Alimentazione laterale da parte del torrente Cenischia.

Il valore di infiltrazione considerato è pari a 40 mm/giorno nel settore su cui insiste il conoide del Rio Supita e 80 mm/giorno nella restante parte del modello (Figure 8). I dati sono stati ricavati attraverso l'analisi dei dati meteorologici delle stazioni pluviometriche di Barcenisio e Grange Martina tra il gennaio 2007 e dicembre 2010.

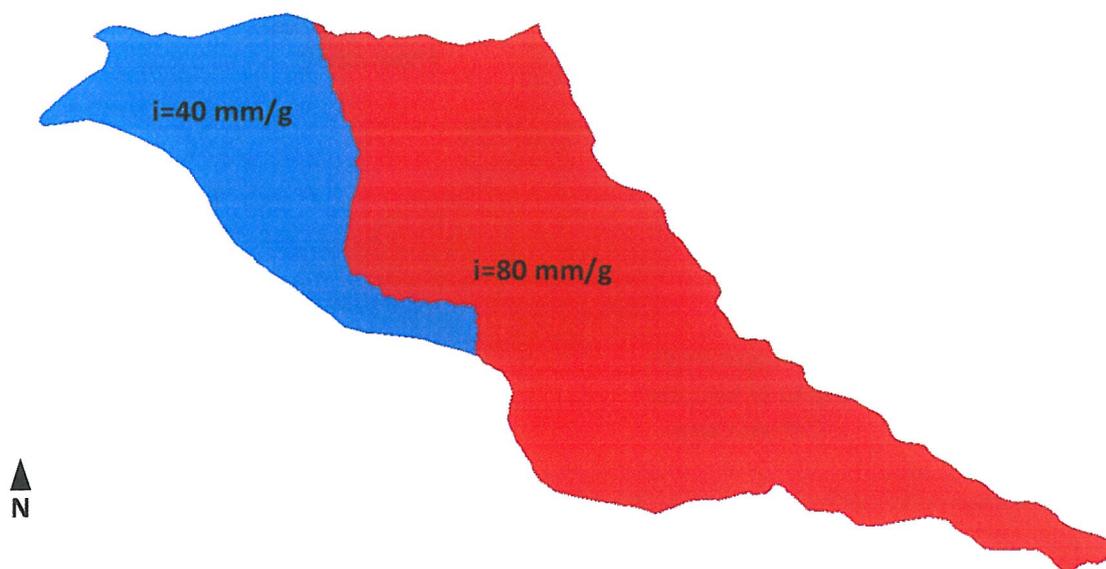


Figure 8 – Infiltrazione (i) entrante nel modello dalla superficie topografica.

Lungo il bordo orientale del modello, la presenza del T. Cenischia è stata simulata applicando condizioni di carico idrostatico tali da consentire al modello di rappresentare tratte in cui il corso d'acqua alimenta l'acquifero (generalmente nel tratto a monte dove la soggiacenza della falda freatica è stata supposta maggiore e dell'ordine di 20 metri) e tratte in cui drena l'acquifero (generalmente nelle porzioni verso valle dove la soggiacenza della falda è minore e dell'ordine di 5 metri, Figure 9).

Lungo i fianchi vallivi è stato assunto un limite impermeabile nei tratti in cui il basamento roccioso affiora o sub-affiora.

Tuttavia, lungo il bordo sud-occidentale del modello, è stata considerata l'intersezione in sotterraneo della faglia di Venaus con l'acquifero di fondovalle che attualmente è responsabile delle portate drenate dalle gallerie della centrale di Pont Ventoux (Figure 9).

È stato quindi simulato un pompaggio con portata pari a 250 l/s. Questo valore di portata rappresenta in modo sufficientemente affidabile quanto osservato attualmente lungo le opere di sotterranee connesse all'impianto idroelettrico.

L'effetto di tale drenaggio sull'andamento della piezometrica è stato inoltre desunto dalle misure del livello piezometrico nei sondaggi S18 e S19 (ultima misura disponibile nel 2001 rispettivamente a quota 544,97 e 542,45 m s.l.m.) che mostrano un suo progressivo abbassarsi verso il punto di drenaggio.

Nella figura seguente, sono rappresentati i punti in cui il modello simula i flussi entranti (nodi rossi) e quelli uscenti (nodi blu).

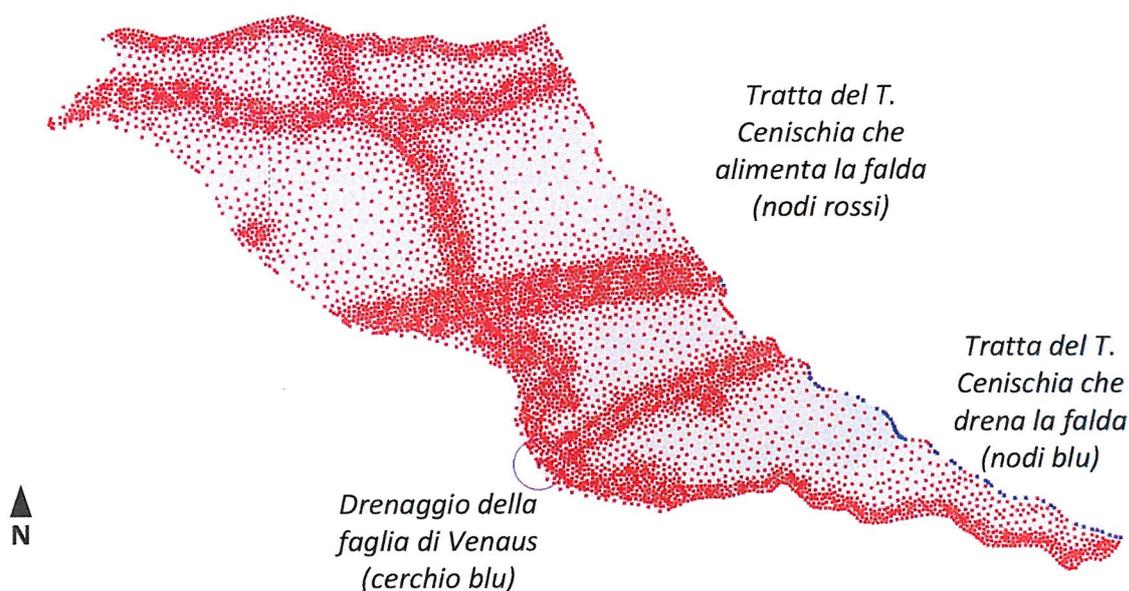


Figure 9 – Visualizzazione dei nodi in cui i flussi sono entranti nel modello in superficie (in rosso) e uscenti (in blu).

4.4 Calibrazione del modello

Per la fase di calibrazione, il modello è stato fatto girare per simulare le condizioni di flusso in assenza del tunnel di base ovvero per simulare le condizioni di flusso attuali.

Questa fase permette di valutare la coerenza delle condizioni considerate per il calcolo (permeabilità, condizioni ai limiti, pompaggi, ecc) con le condizioni osservate e definite sulla base dei dati a disposizione (cfr. § 3).

In particolare, la qualità della calibrazione del modello è stata definita paragonando i livelli piezometrici simulati in corrispondenza dei sondaggi S18 e S19 con quelli misurati nel 2001 (Figure 10).

Le condizioni ai limiti considerate, permettono di ottenere un grado di approssimazione metrico che, tenendo in considerazione la notevole eterogeneità del mezzo geologico e la variabilità spaziale dei carichi osservati, è stata ritenuta sufficientemente soddisfacente alla scala dell'acquifero.

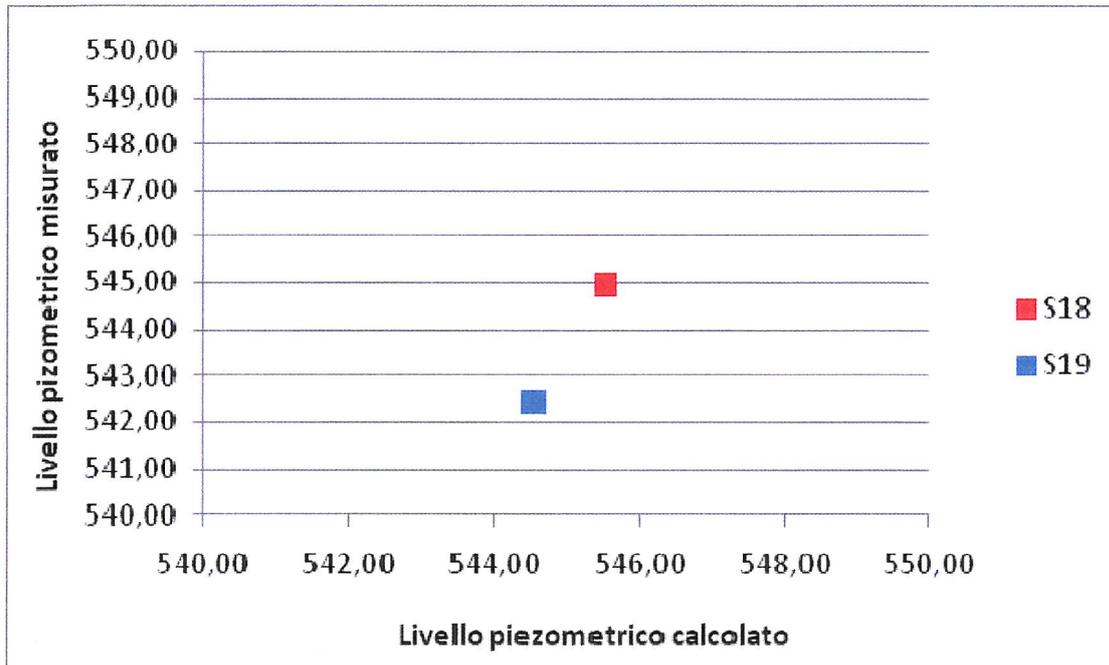


Figure 10 – Calibrazione del modello numerico: confronto dei livelli piezometrici calcolati (simulati) con quelli misurati nei sondaggi S18 e S19.

In particolare, in corrispondenza del sondaggio S18, la differenza tra i valori di carico idraulico misurato e calcolato è pari a circa 0.5 m mentre per il sondaggio S19 la differenza tra il valore misurato e quello simulato è di circa 2 m.

L'andamento della piezometria ottenuto è raffigurata nelle seguenti figure.

È possibile osservare l'effetto di deformazione della falda dovuto al drenaggio ad opera delle opere di Pont Ventoux tramite la faglia di Venaus (Figure 12). Tale elemento ha permesso di simulare i livelli piezometrici misurati nei sondaggi S18 e S19.

L'alimentazione della falda avviene dal settore a monte dell'acquifero e dal conoide del rio Supita. Inoltre, l'incurvamento delle linee equipotenziali (Figure 12) mostra come il torrente Cenischia (lungo il bordo orientale del modello) alimenti la falda nel settore a monte mentre abbia funzione drenante nel settore di valle.

Rapport géologique et hydrogéologique de détail – Modèle numérique 3D – Relatione geologica e idrogeologica di dettaglio – Modello numerico di flusso 3D

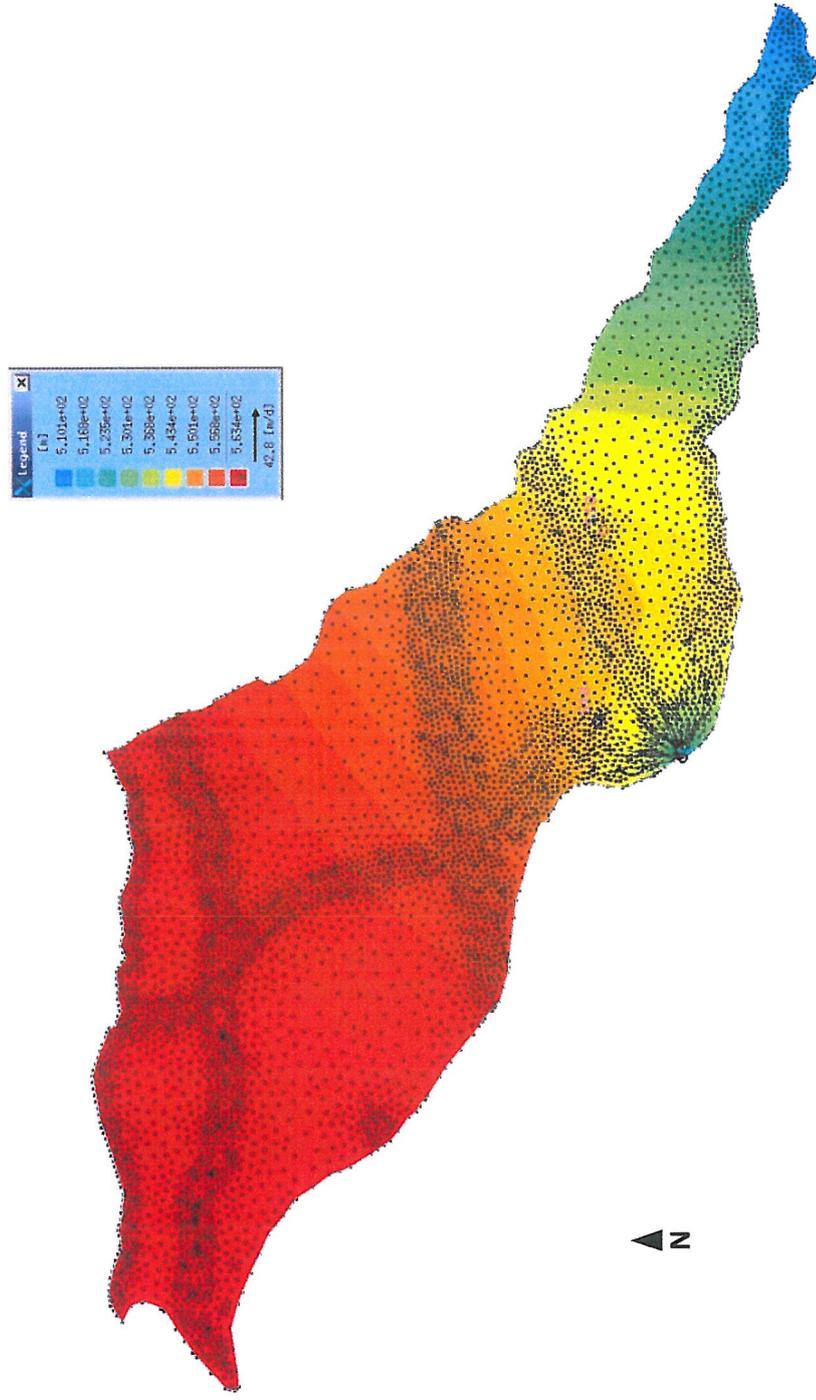


Figure 11 – Andamento della falda di fondovalle Cenischia con indicazione delle quote piezometriche.

Rapport géologique et hydrogéologique de détail – Modèle numérique d'écoulement 3D - Relatione geologica e idrogeologica di dettaglio - Modello numerico di flusso 3D

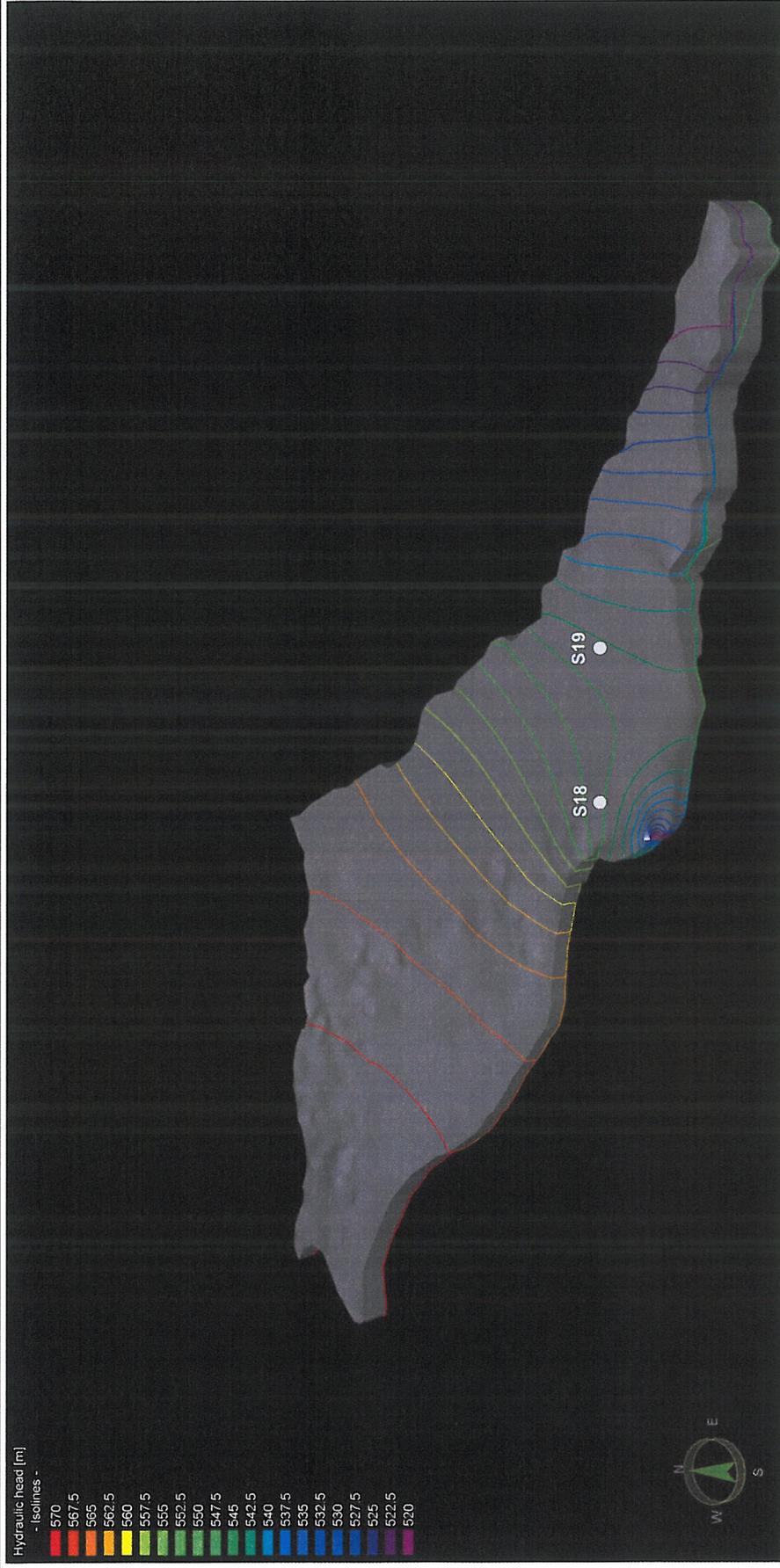


Figure 12 – Linee equipotenziali della falda di fondovalle Cenischia ; è indicata altresì la posizione dei condaggi S18 e S19.

5. Risultati del modello in presenza del tunnel di base

Dopo aver completato la simulazione di flusso in condizioni naturali è stata simulata la presenza del tunnel di base secondo progetto. Il tunnel è stato inserito come un corpo trasversale all'acquifero totalmente impermeabile ($K = 1e-12$ m/s) al fine di verificare le interferenze in condizioni di esercizio dell'opera.

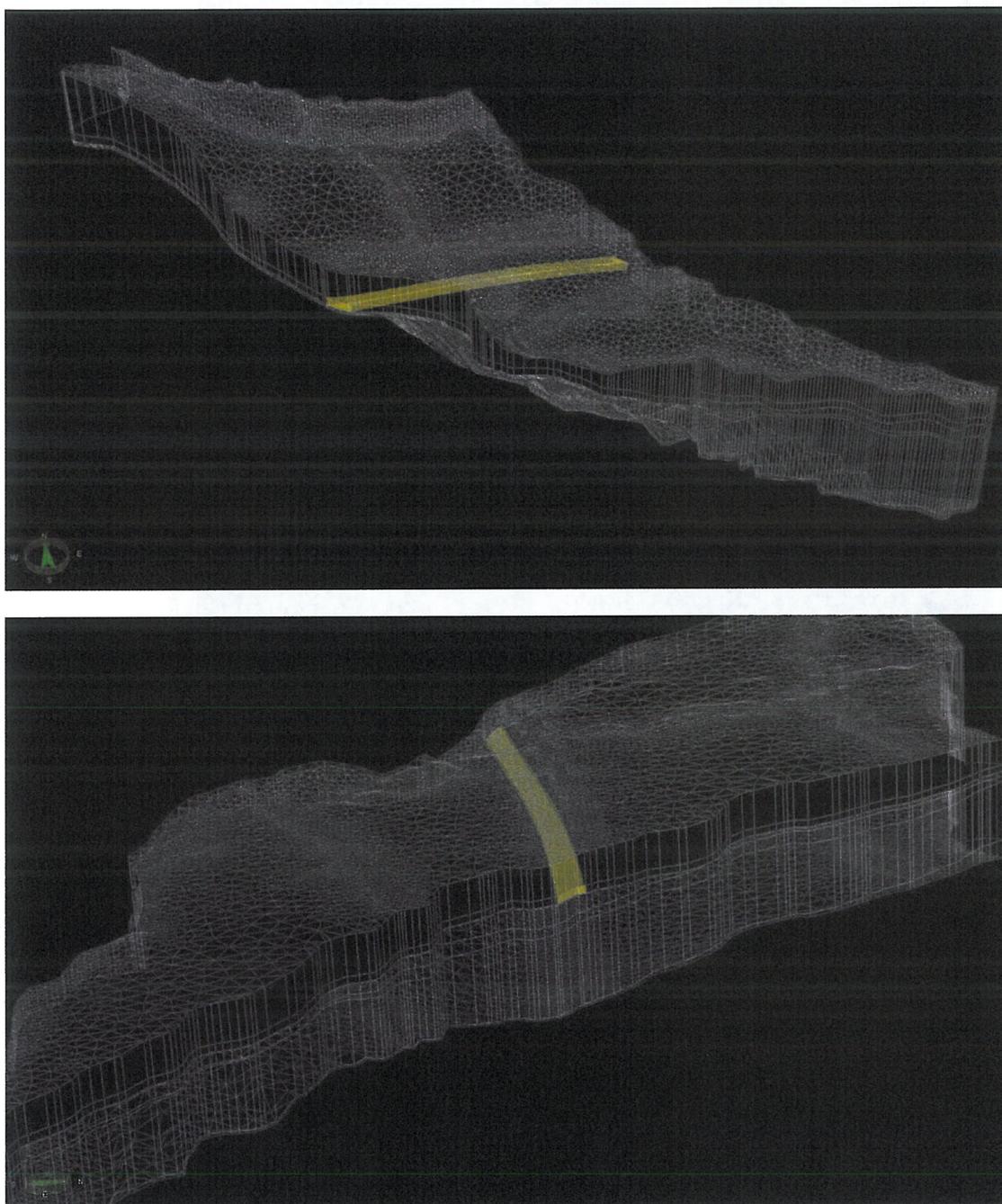


Figure 13 – Visualizzazione del tunnel all'interno del volume del modello ; sopra, vista da S, sotto vista da E. Per facilitare la visualizzazione, le altezze del modello sono state aumentate di 3 volte.

L'ingombro del tunnel è stato considerato massimo ovvero con un'altezza pari a 10 metri e un'estensione laterale coincidente con l'ingombro di entrambe la canne pari a 50 metri (2X10 metri diametro canna + 30 metri di distanza tra le due canne).

La presenza del tunnel determina un modesto sollevamento delle acque sotterranee nel settore a monte dell'attraversamento delle opere sotterranee del fondovalle Cenischia (Figure 14); nel settore a valle le variazioni sono minime e le isopieze post operam sono pressoché coincidenti con l'andamento della falda ante operam (Figure 14). Questo risultato è coerente con l'elevata permeabilità dei depositi alluvionali recenti che caratterizzano l'acquifero in cui si inserisce l'opera.

L'entità della variazione della falda è raffigurata nella Figure 15 dove è riportata la differenza della quota piezometrica tra le condizioni ante operam (H0) e quelle post operam (H1). Si può osservare come a monte del tracciato del tunnel di base il livello freatico subisca un innalzamento che raggiunge valori massimi di 0.3 m. A valle del tunnel di base le variazioni del livello freatico indicano un abbassamento dell'ordine di 1-2 cm.

In conclusione, si evince che l'effetto diga che causa una variazione del livello freatico in condizioni di esercizio del tunnel di base (post operam) è di entità ridotta e inferiore alle variazioni stagionali (dell'ordine di una decina di metri) dovute all'alimentazione della falda da parte delle precipitazioni meteoriche (piogge e scioglimento delle nevi) e dei regimi di irrigazione regolati tramite le derivazioni lungo i corsi d'acqua verso i canali irrigui che solcano il fondovalle (Figura 2).

In relazione alle conoscenze idrogeologiche attuali le variazioni risultano trascurabili e non si prescrivono misure di mitigazione degli effetti della presenza del tunnel di base sulla falda freatica del fondovalle Cenischia.

Tuttavia si ritiene necessario mettere in opera una rete di monitoraggio del livello piezometrico ante operam e che continui durante e dopo la realizzazione degli scavi per un tempo sufficientemente lungo (almeno 2 anni).

Rapport géologique et hydrogéologique de détail – Modèle numérique d'écoulement 3D - Relazione geologica e idrogeologica di dettaglio - Modello numerico di flusso 3D

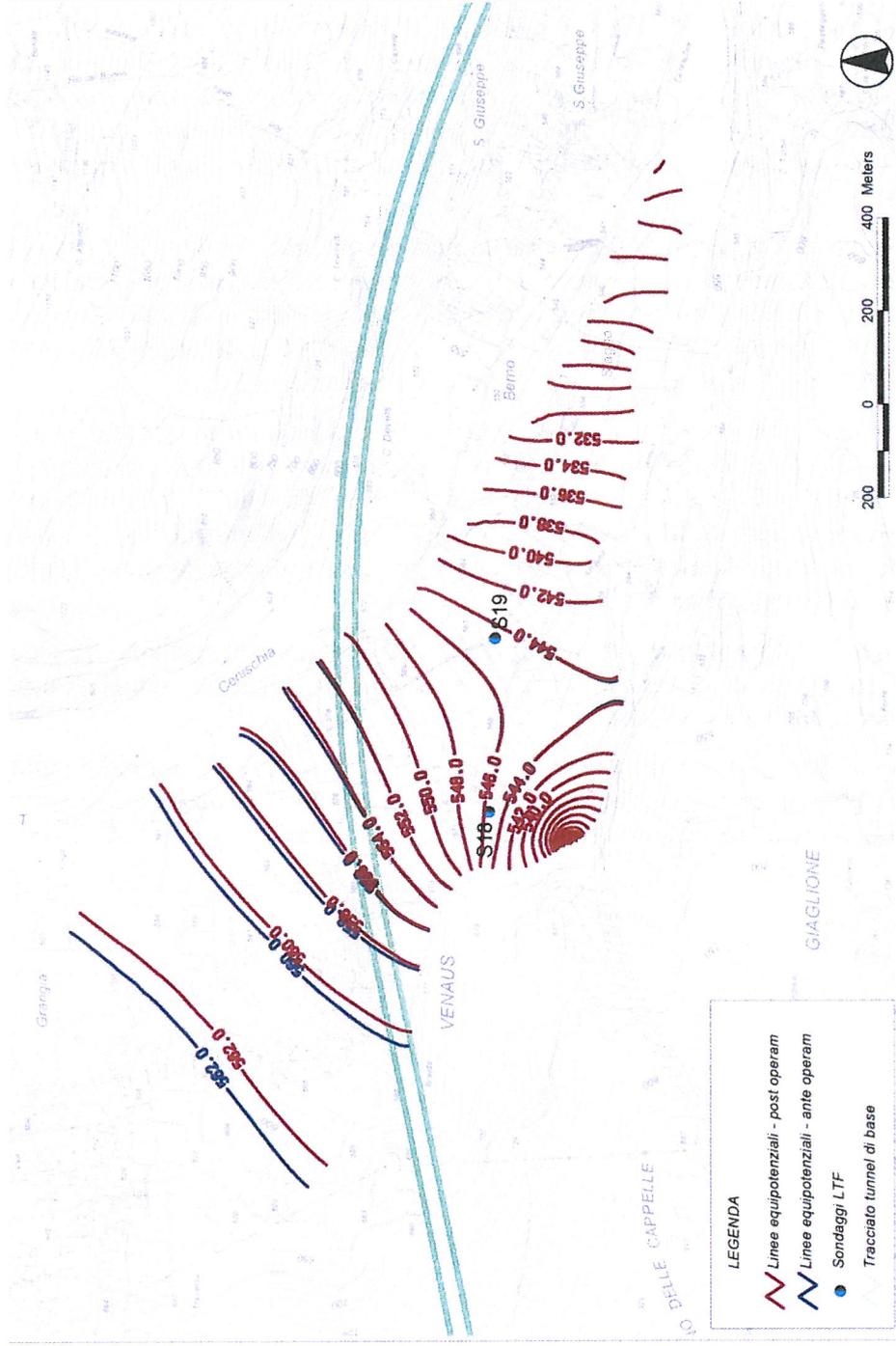


Figure 14 – Variazione delle isopieze della falda freatica del fondovalle Cenischia per effetto diga operato dalla presenza del tunnel di base.

Rapport géologique et hydrogéologique de détail – Modèle numérique d'écoulement 3D – Relatione geologica e idrogeologica di dettaglio – Modello numerico di flusso 3D

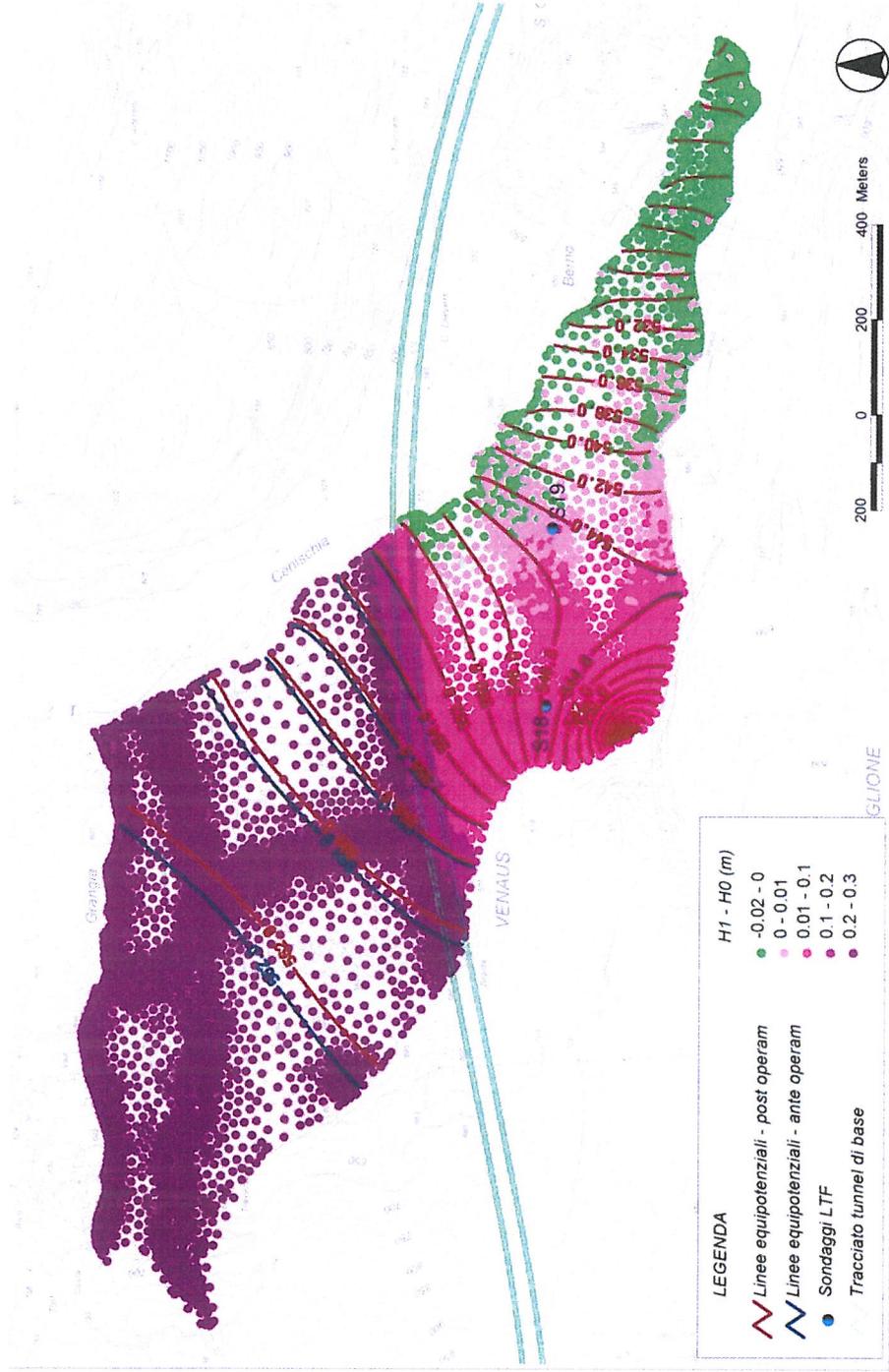


Figure 15 – Entità della variazione dell'andamento della falda freatica tra ante (H0) e post (H1) operam valutata in corrispondenza dei nodi della maglia utilizzata per il calcolo numerico.

