

AUTOSTRADA (A14) : BOLOGNA-BARI-TARANTO

AMPLIAMENTO ALLA TERZA CORSIA DEL TRATTO RIMINI NORD-PEDASO

TRATTO: SENIGALLIA – ANCONA NORD

PROGETTO ESECUTIVO

AU – CORPO AUTOSTRADALE

IDROLOGIA E IDRAULICA

IDROLOGIA SOTTERRANEA

RELAZIONE DI CALCOLO

spea
autostrade

ingegneria
europea

IL PROJECT ENGINEER:

Ing. Michele Pastorino
Ord. Ingg. Savona N.1104

RESPONSABILE
INTEGRAZIONE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE

IL DIRETTORE TECNICO :

Ing. Maurizio Torresi
Ord. Ingg. Milano N.16492

RESPONSABILE
FUNZIONE "STUDI E PROGETTI"

WBS – Rif. elaborato										DATA:		REVISIONE	
DIRETTORIO					FILE					GIUGNO 2008		n.	data
codice	commessa	N.Prog.	unita'	n. progressivo	SCALA:								
1	1	1	4	2	3	0	2	IDR	150				

ELABORAZIONE GRAFICA A CURA DI :		CONSULENZA :	
ELABORAZIONE PROGETTUALE A CURA DI :		RESPONSABILE PROGETTAZIONE SPECIALISTICA :	Ing. Alessandro Alfì – O.I. Milano N.20015

VISTO DELLA COMMITTENTE

autostrade // per l'italia
Società per azioni

INDICE

1. PREMESSA	2
2. CODICE DI CALCOLO UTILIZZATO	3
3. ASSETTO IDROGEOLOGICO IN CORRISPONDENZA DELLA GALLERIA	5
3.1 CARATTERISTICHE STRATIGRAFICHE ED IDROGEOLOGICHE	5
3.2 RISULTATI DELLE PROVE DI PERMEABILITÀ	6
3.3 STIME DELL'ALTEZZA DI INFILTRAZIONE EFFICACE	7
4. MODELLO DELLA CIRCOLAZIONE IDRICA SOTTERRANEA NELLO STATO ATTUALE E POST-OPERAM.....	8
4.1 SCHEMATIZZAZIONE DELL'ACQUIFERO E IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLI.....	8
4.2 CALIBRAZIONE DEL MODELLO	9
4.3 RISULTATI DELLE SIMULAZIONI.....	11

1. **PREMESSA**

Con riferimento al progetto di ampliamento alla terza corsia dell'Autostrada A14 Bologna-Bari, nel tratto Senigallia - Ancona Nord, la presente relazione sintetizza metodologia e risultati degli studi di approfondimento finalizzati a definire le interferenze tra le opere in galleria e la circolazione idrica sotterranea.

Per la tratta in esame l'analisi è stata limitata alla Galleria "Cavallo", che costituisce l'unica opera in sotterraneo per la quale è stato valutato un carico idraulico permanente lungo tratti di estensione significativa.

Gli approfondimenti si basano su applicazioni modellistiche di dettaglio, finalizzate ad un'analisi quantitativa delle condizioni ante-operam e post-operam descritte a livello prevalentemente qualitativo nell'ambito degli studi idrogeologici parte integrante del progetto esecutivo delle gallerie.

Tali studi hanno messo in luce come i tratti in galleria, sia ove previsto l'ampliamento delle opere esistenti sia nuove varianti di tracciato, interessino complessi a bassa permeabilità, con circolazione idrica scarsa e prevalentemente limitata alla fascia corticale. Tuttavia si è riscontrata la presenza diffusa di captazioni, seppure di bassissima potenzialità (pozzi-cisterna), da cui la necessità di una delimitazione oggettiva della fascia di influenza del drenaggio operato dalle gallerie.

L'indagine è inoltre finalizzata ad una verifica e affinamento delle previsioni effettuate nell'ambito degli studi idrogeologici di progetto riguardanti le portate di drenaggio in galleria, peraltro molto contenute in considerazione della tipologia dei terreni attraversati.

In ordine a tali finalità sono stati implementati modelli di simulazione della circolazione idrica sotterranea sulla base del codice di calcolo Modflow PRO (U.S. Geological Survey).

I modelli sono stati implementati nelle condizioni che garantiscono la massima cautela, in funzione dei valori più elevati riscontrati ed ipotizzabili relativamente ai carichi piezometrici ed alla conducibilità idraulica degli acquiferi.

Le simulazioni sono state eseguite in regime permanente. Le previsioni di modello riguardano pertanto la stima delle condizioni di drenaggio all'equilibrio con la ricarica, a cui si associano gli effetti di modificazione permanente della circolazione sotterranea, di rilevanza ambientale e per l'interferenza con il sistema delle captazioni in superficie.

Relazione di calcolo	Pagina 2 di 22
IDR150-1.doc	

2. CODICE DI CALCOLO UTILIZZATO

Per le applicazioni di calcolo è stato utilizzato il codice MODFLOW-PRO (United States Geological Survey), che costituisce uno standard di comprovata affidabilità per la tipologia di problematiche in esame.

MODFLOW è un programma di calcolo che simula in tre dimensioni il flusso delle acque sotterranee, compilato in linguaggio FORTRAN 77; il codice ha struttura modulare, cioè consiste in un programma principale ed in una serie di sottoprogrammi indipendenti raggruppati in pacchetti, ciascuno dei quali tratta una specifica caratteristica del sistema idrologico (ad esempio il flusso della rete idrica superficiale o la presenza di barriere orizzontali di flusso).

La suddivisione in moduli e il loro raggruppamento in “pacchetti” permette di esaminare particolari processi indipendentemente; anche i sistemi di input e output permettono la massima flessibilità.

Possono essere simulati livelli confinati e non, semiconfinati, o una loro combinazione in acquiferi multifalda complessi.

I flussi associati a elementi esterni, quali pozzi, ricarica areale, evapotraspirazione, dreni e gallerie drenanti, barriere semipermeabili, sono simulati attraverso appositi “pacchetti”.

In particolare la presenza di una galleria filtrante viene simulata attraverso il pacchetto “Drain”. La galleria viene inserita nel modello in funzione della quota di fondo (“Drain elevation”), oltre che del diametro equivalente e della conducibilità idraulica all’interfaccia tra il dreno e l’acquifero indisturbato (espressa dal parametro “conduttanza”, s^2/t); è possibile inserire un profilo per punti corrispondente ad esempio alle quote di progetto della livelletta stradale, che il modello provvede ad interpolare ed infittire in automatico nei segmenti intermedi.

Il flusso delle acque sotterranee è simulato utilizzando un approccio alle differenze finite. Il dominio di simulazione del flusso viene suddiviso in una griglia lineare di righe (asse y), colonne (asse x), e layer (asse z)

Le equazioni alle differenze finite possono essere risolte utilizzando due diverse tecniche (Strongly Implicit Procedure o Slice Residual Overrelaxation).

Per le simulazioni in oggetto è stata utilizzata l’interfaccia utente Visual-MODFLOW-PRO-2000.

L’interfaccia in oggetto consente tra l’altro l’importazione da files ASCII Grid superfici di layers irregolari, permettendo una ottimale rappresentazione delle superfici di strato nel

Relazione di calcolo	Pagina 3 di 22
IDR150-1.doc	

caso di acquiferi a struttura complessa. Nella versione Visual-MODFLOW-PRO sono inoltre associati al pacchetto base i codici ZONE-BUDGET per il calcolo del bilancio idrico “cell by cell” o di settori del dominio di simulazione definiti dall’utente, e MODPATH, per il calcolo delle linee di flusso in regime stazionario e transitorio.

Relazione di calcolo	Pagina 4 di 22
IDR150-1.doc	

3. ASSETTO IDROGEOLOGICO IN CORRISPONDENZA DELLA GALLERIA

3.1 Caratteristiche stratigrafiche ed idrogeologiche

Nell’ambito del progetto esecutivo delle opere autostradali sono state effettuate specifiche indagini idrogeologiche, a scala sia di tratta complessiva, sia nel dettaglio della singola galleria.

A supporto della caratterizzazione sono state redatte planimetrie geologiche e idrogeologiche e profili longitudinali alla scala 1:5000, parte integrante degli elaborati di progetto.

A tali elaborati si rimanda per ogni dettaglio delle indagini eseguite. Con riferimento a tali studi, vengono nel seguito sintetizzate le caratteristiche idrogeologiche in corrispondenza delle gallerie, a supporto della schematizzazione per le verifiche con modelli numerici.

Le gallerie in progetto interessano settori costituiti da terreni parte del “Complesso idrogeologico dei depositi argillosi ed argilloso-marnosi” (GLG: QA; PA), di origine marina.

Tali depositi sono prevalentemente costituiti da argille ed argille-limose a luoghi debolmente marnose con sporadiche intercalazioni di livelli sabbiosi; il complesso argilloso è caratterizzato da una circolazione idrica sotterranea molto limitata, nell’ambito delle coltri superficiali, o assente. Le intercalazioni sabbiose, dove presenti con potenza superiore al metro, possono contenere piccole falde anche in pressione. Generalmente i depositi presentano permeabilità per porosità bassa o molto bassa ($10^{-6} \div 10^{-8}$ m/s).

Nel dettaglio, nel settore interessato dalla galleria Cavallo l’autostrada attraversa il Complesso idrogeologico dei depositi argillosi e argilloso – marnosi (PA) e in parte il Complesso dei depositi di versante, di frana ed eluvio colluviali.

I depositi sono stati caratterizzati in asse sud dal sondaggio B5-S2 che ha evidenziato la presenza dominante di litotipi argillosi e argilloso-limosi a cui si intercalano sporadici e sottili livelli sabbiosi per l’intera verticale esaminata.

Tale assetto litostratigrafico giustifica la scarsa valenza idrogeologica del locale sottosuolo nel quale le circolazioni idriche sono sostanzialmente limitate alle coltri superficiali alterate, e pertanto sono circoscrivibili ai settori relativi ad entrambi gli imbocchi.

Il livello idrostatico misurato all’interno di B5-S2 si attesta intorno a soli 7 m da p.c., nonostante il piezometro sia localizzato in corrispondenza del crinale di collina. Tale dato conferma il carattere sostanzialmente corticale della circolazione idrica sotterranea,

sebbene non siano da escludere livelli idrici relativamente più profondi, ma comunque di modesta entità, all'interno delle intercalazioni a dominante sabbiosa dove queste raggiungono spessori più consistenti.

In tale quadro, la presenza di una seppure molto limitata circolazione idrica prevalentemente nei settori subsuperficiali è confermata, oltre che dal dato piezometrico puntuale, dalle seguenti indicazioni, evidenziate nella relazione idrogeologica del progetto esecutivo:

- all'interno delle gallerie esistenti, in corrispondenza degli imbocchi relativi ad entrambi gli assi autostradali si è riscontrata la presenza di venute d'acqua alla base delle calotte;
- in tutta l'area sono presenti pozzi-serbatoio utilizzati stagionalmente ad uso irriguo, alimentati dalle acque circolanti nell'immediato sottosuolo, e caratterizzati da lunghi tempi di ricarica.

3.2 Risultati delle prove di permeabilità

In tabella 1 sono riportati i risultati delle prove di permeabilità tipo Lefranc eseguite nei depositi in esame. In tutti i casi si tratta di prove a carico variabile. Nella medesima tabella sono riportati la profondità e la tipologia dei depositi nel tratto di prova.

Dall'osservazione dei dati in tabella si evidenzia quanto segue:

- in corrispondenza dei livelli francamente limoso-argillosi non si osservano assorbimenti nel corso della prova;
- la prova eseguita in corrispondenza di livelli limoso-sabbiosi ha evidenziato un valore di permeabilità di $3.4 \cdot 10^{-7}$ m (la prova stessa è stata eseguita alla profondità di 27.5 m e non è pertanto strettamente riferita alla fascia corticale);
- il valore di permeabilità sale ad un valore prossimo a 10^{-6} m/s in corrispondenza di livelli limoso-sabbiosi dove presenti intercalazioni centimetriche più francamente sabbiose.

Relazione di calcolo	Pagina 6 di 22
IDR150-1.doc	

Cod.	Prof. (m)	K	Tipologia depositi tratto prova	note
E5-S1	6.0	-	limo argilloso	Non assorbe
E5-S8	6.5	-	limo argilloso	Non assorbe
E5-S17	10.5	$<1.0 \cdot 10^{-8}$ m/s	limo argilloso	
E5-S24	27.5	$3.4 \cdot 10^{-7}$ m/s	limo sabbioso	
E5-S27	11.5	$9.14 \cdot 10^{-7}$ m/s	limo deb. sabbioso con intercalazioni centimetriche sabbiose	
E5-S1	15.6	-	limo argilloso	non assorbe

Tabella 1 - Risultati delle prove Lefranc eseguite nei depositi marini pliocenici.

3.3 Stime dell'altezza di infiltrazione efficace

Nell'ambito degli studi idrogeologici di progetto è stata effettuata una stima dell'altezza di infiltrazione media annua nei settori interessati dalle gallerie, in riferimento al complesso stratigrafico-idrogeologico PA.

Rimandando per il dettaglio a tali studi, viene attribuito al complesso litologico in esame un coefficiente di infiltrazione potenziale C.I.P. (Civita, 1973; Celico, 1987) pari al 15% dell'altezza di precipitazione efficace, al netto dell'evapotraspirazione, stimata in 240 mm.

Si stima pertanto un'altezza di infiltrazione potenziale $I_p=36$ mm/a.

Tale valore ha evidentemente un significato orientativo, di riferimento per la taratura iniziale dei modelli.

4. MODELLO DELLA CIRCOLAZIONE IDRICA SOTTERRANEA NELLO STATO ATTUALE E POST-OPERAM

4.1 Schematizzazione dell'acquifero e implementazione dei modelli

Analogamente al settore “Sappanico”, che interessa la medesima tipologia di acquifero a bassa permeabilità, in analogo contesto morfoclimatico, la circolazione sotterranea è sostanzialmente corticale, con marcato adattamento della piezometrica alla morfologia dei versanti e coincidenza degli spartiacque principali superficiali e sotterranei. Il flusso sotterraneo diverge dagli spartiacque verso gli assi drenanti costituiti dalle depressioni dei principali corsi d'acqua.

L'andamento “parietale” della circolazione idrica, che determina soggiacenze ridotte, generalmente prossime al piano di campagna, è conseguente allo scarso approfondimento della circolazione stessa, dovuta alla permeabilità bassa e alla riduzione della stessa con la profondità, condizione che mantiene confinato il flusso maggiormente attivo alle coltri di alterazione superficiale.

La circolazione corticale è alimentata prevalentemente per infiltrazione diretta, lungo l'intera superficie del bacino e prioritariamente nei settori sommitali a più ridotta acclività.

In relazione a tale schema di circolazione sotterranea, il modello è stato costruito ed implementato come nel seguito descritto.

- Dominio di simulazione e discretizzazione dell'acquifero

Il dominio di simulazione è stato definito di ampiezza tale da comprendere i bacini idrologici principali sottesi dalle gallerie in progetto, ed esteso fino alla linea di costa. Lo stesso è stato discretizzato a partire da una griglia costituita sul piano orizzontale da 97 righe e 117 colonne (figura 2) e da 8 layer sul piano verticale, per un totale di 90792 elementi.

La topografia è stata inserita nel modello a partire dal DTM costruito sulla base del rilievo 3D del progetto autostradale, integrato per i settori non coperti da tale elaborato, in base alla cartografia vettoriale della Regione Marche.

- Condizioni al contorno

E' stata imposta come condizione al contorno di carico imposto (figura 3):

Relazione di calcolo	Pagina 8 di 22
IDR150-1.doc	

- la quota di fondo alveo lungo la rete idrografica principale, che costituisce il recapito della circolazione corticale di versante;
- la quota 0 m s.m. a partire dalla linea di costa.

E' stato inoltre attribuito un valore di ricarica, iniziale ante-calibrazione, di 36 mm/a costante sull'intero ambito di simulazione, sulla base delle stime contenute nello studio idrogeologico del progetto esecutivo.

- Conducibilità idraulica

E' stata considerata la progressiva riduzione della conducibilità idraulica con la profondità, condizione tipica della circolazione corticale in esame, attribuendo valori progressivamente decrescenti ai layer di modello, come evidenziato nella sezione di riportata in figura 4.

In particolare sono stati attribuiti i seguenti valori di conducibilità idraulica:

$$K1(x, y, z) = 2.0 \cdot 10^{-7}, 2.0 \cdot 10^{-7}, 2.0 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$$

$$K2(x, y, z) = 4.0 \cdot 10^{-8}, 4.0 \cdot 10^{-8}, 4.0 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$$

$$K3(x, y, z) = 1.0 \cdot 10^{-8}, 1.0 \cdot 10^{-8}, 1.0 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$$

I valori suindicati sono stati definiti a seguito della calibrazione del modello, come descritto nel successivo punto 5.2.

Indicativamente il campo di valori K1 è stato attribuito ai layer 1-3, K2 ai layer 4-5, K3 ai layer 6-8. Più nel dettaglio il campo K1, compatibile con i valori di conducibilità idraulica Lefranc per i depositi sabbioso-limosi, è stato attribuito ad una fascia corticale di spessore medio intorno a 35 m da p.c..

4.2 Calibrazione del modello

La calibrazione del modello si è basata:

- a) sui dati piezometrici disponibili a livello delle gallerie in progetto;
- b) su una verifica a scala più ampia della rispondenza, in funzione delle assunzioni effettuate, con lo schema generale di circolazione idrica sotterranea (circolazione corticale di versante a bassa soggiacenza, adattamento della piezometria agli spartiacque principali, ecc.).

Pertanto la calibrazione è stata effettuata le condizioni di riferimento:

- "originaria" precedente alla realizzazione di tutte le opere in galleria (comprese le gallerie del tracciato attuale);

- “ante-operam”, in presenza del tracciato attuale in galleria.

La quota di base del dreno è stata fatta coincidere con la livelletta autostradale, come risultante dagli elaborati di progetto, sia per il tracciato esistente sia per quello di nuova realizzazione. A riguardo il Drain package del codice Modflow consente l’inserimento dei punti quotati lungo l’asse galleria, che il modello provvede ad interpolare ed infittire in automatico nei segmenti intermedi.

La calibrazione relativa alla condizione “originaria” è stata effettuata in riferimento agli elementi generali di cui al precedente punto b. In particolare l’obiettivo di tale fase della calibrazione è stato quello di riprodurre in condizioni di equilibrio, attraverso l’attribuzione di opportuni campi di valori di conducibilità idraulica K e ricarica efficace R, una circolazione idrica subparallela al versante, a bassa soggiacenza, con flusso dai settori di spartiacque verso i limiti a carico imposto, evitando scenari che comportino l’affioramento della rete idrica al p.c. o viceversa l’aumento drastico della soggiacenza.

La calibrazione “ante operam” è riferita ad una condizione di flusso sotterraneo alterata dai tracciati attuali. Obiettivo della calibrazione è quello, mantenendo l’assetto generale di circolazione sotterranea parietale sopra descritto, di ottenere una rispondenza locale tra carichi calcolati e misurati ai piezometri lungo il tracciato.

I dati piezometrici disponibili sono riportati in tabella 2.

Si conferma anche sulla base di tali dati l’assetto di riferimento più generale, caratterizzato da bassi valori di soggiacenza. Nello specifico si osserva quanto segue:

- il dato di misura in E4-S3 (11.48 m) è molto prossimo al fondo foro del piezometro (12 m), e potrebbe pertanto riferirsi a ristagno d’acqua nel pozzetto più che alla superficie di saturazione dell’ordine di non oltre 10-15 m, in particolare nelle porzioni medio-inferiori dei versanti, con i valori massimi della soggiacenza stesa in corrispondenza dei crinali spartiacque principali (B5-S2);
- la soggiacenza in B5-S2 è relativamente bassa, considerando che il piezometro è realizzato all’apice del crinale spartiacque; è verosimile che il piezometro “raccolga” una debole circolazione limitata alla fascia corticale, che permane nel tubo attestato nei livelli semipermeabili più profondi.

La calibrazione “ante-operam” in riferimento ai valori piezometrici in tabella 2, considerati parte di una “falda” unica e continua è pertanto cautelativa, in quanto massimizza gli effetti di interferenza delle gallerie esistenti con la circolazione sotterranea, e in conseguenza di quelle in progetto nelle simulazioni previsionali post-operam.

Codice	Data lettura	Livello falda da p.c. (m)	Fondo da p.c. (m)
B5-S2	20/12/04	7.30	34.0
E4-S3	05/05/06	11.48	12.0

Tabella 2 - Misure piezometriche utilizzate per la calibrazione.

I risultati delle simulazioni, sia in riferimento all'assetto di calibrazione "ante-operam" sia previsionali sono riportate nel successivo paragrafo 4.3.

4.3 Risultati delle simulazioni

La calibrazione è stata avviata in riferimento ai valori di conducibilità idraulica $K(x, y, z)$ e di ricarica efficace R indicati nella seconda colonna delle tabelle 3, 4.

I valori iniziali sono derivati dalle prove in situ e dalle stime di cui ai precedenti paragrafi 3.2 e 3.3.

La massima rispondenza agli obiettivi di calibrazione si è riscontrata per il campo di valori indicato nella terza colonna.

Il campo di valori finale di conducibilità differisce da quello iniziale per un maggiore contrasto di conducibilità idraulica tra livelli superficiali e profondi, ovvero per una minore gradualità nel trend di riduzione del parametro K con la profondità.

Come si può notare dalla figura 5 il modello calibrato riproduce lo "stile" di circolazione corticale di versante, a bassa soggiacenza e con adattamento della piezometria agli spartiacque principali.

Riguardo i punti di controllo della piezometria si riscontra una corrispondenza soddisfacente tra valori calcolati e misurati, come riportato in tabella 5.

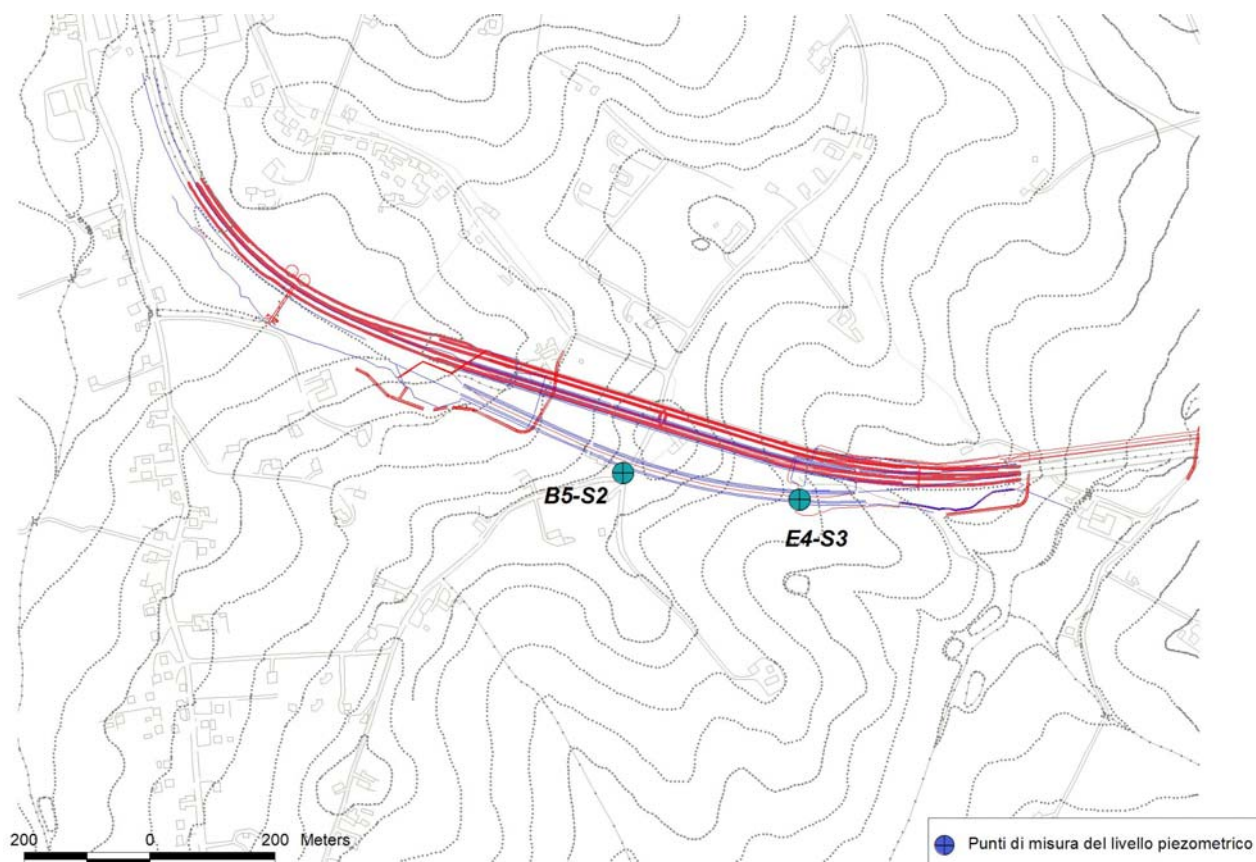


Figura 1 - Localizzazione e codice dei punti di misura del livello piezometrico.

	Campo iniziale di calibrazione	Campo finale di calibrazione
$K1(x, y, z)$	$6.0 \cdot 10^{-7}, 6.0 \cdot 10^{-7}, 6.0 \cdot 10^{-8}$ m/s	$2.0 \cdot 10^{-7}, 2.0 \cdot 10^{-7}, 2.0 \cdot 10^{-8}$ m/s (*)
$K2(x, y, z)$		
$K3(x, y, z)$		
$K4(x, y, z)$	$1.0 \cdot 10^{-7}, 1.0 \cdot 10^{-7}, 5.0 \cdot 10^{-8}$ m/s	$4.0 \cdot 10^{-8}, 4.0 \cdot 10^{-8}, 4.0 \cdot 10^{-9}$ m/s
$K5(x, y, z)$	$1.0 \cdot 10^{-8}, 1.0 \cdot 10^{-8}, 1.0 \cdot 10^{-8}$ m/s	$1.0 \cdot 10^{-8}, 1.0 \cdot 10^{-8}, 1.0 \cdot 10^{-9}$ m/s
$K6(x, y, z)$		
$K7(x, y, z)$		
$K8(x, y, z)$		

(*) l'attribuzione per layer dei valori $K1, K2, K3$ è indicativa (cfr. par 5.1); $K1$ è stato assegnato ad uno spessore corticale medio di circa 35 m da p.c., non ovunque coincidente con i layer 1-3

Tabella 3 - Campi di calibrazione della conducibilità idraulica.

	Campo iniz. calibrazione	Campo fin. calibrazione	Condizione
R1	36 mm/a	12	Versanti collinari
R2		40	Porzioni sommitali di crinale, a bassa acclività ($i < 6^\circ$)
R3		85	Piana costiera

Tabella 4 - Campi di calibrazione del parametro R (ricarica efficace, mm/a).

Codice	Soggiacenza misurata (m)	Quota f. misurata (m s.m.)	Quota f. calcolata (m s.m.)	Cella (Riga/Colonna)
B5-S2	7.30	77.70	76.07	R69/C49
E4-S3	11.48	53.25	53.03	R71/C72

Tabella 5 - Confronto tra carichi calcolati e simulati ai punti di controllo

Nella medesima figura 5 è riportato l'output di modello del bilancio di massa nella condizione ante-operam.

Il drenaggio operato all'equilibrio dalla galleria attuale (voce "Drains" nella finestra di sintesi del bilancio) è calcolato in 21.3 m³/d, pari a 0.25 l/s come contributo totale dalle due canne.

Considerando lo sviluppo complessivo delle gallerie si valuta un contributo medio di soli circa 0.17 l/s * km. Tale contributo, riferito all'intera superficie delle gallerie, si manifesta presumibilmente come umidità o locali gocciolii all'interfaccia tra il cavo ed i rivestimenti, e può in parte o totalmente venire reinfiltrato in settori della galleria eventualmente non soggetti ad un carico permanente.

Nelle figure 6, 7 è riportato l'output di modello del bilancio di massa nella condizione post-operam.

Il drenaggio operato all'equilibrio, riportato nella medesima finestra di sintesi alla voce "Drains" (figura 7), è calcolato in 24.6 m³/d, pari a 0.28 l/s.

Utilizzando il pacchetto Zone Budget del codice Modflow, è stato eseguito il bilancio di massa per zone, con riferimento alle opere definitive, relativo alle gallerie in asse sud e in asse nord.

I risultati dell'elaborazione sono riportati in figura 8.

Il drenaggio complessivo è stimato in circa 12.51 m³/d (0.14 l/s) per la nuova galleria in asse sud e 12.9 m³/d (0.15 l/s) complessivi per le gallerie in canna nord.

La realizzazione della nuova galleria in canna sud determina pertanto un lieve aumento del volume complessivo di drenaggio, con riduzione della portata drenata lungo le gallerie dell'attuale tracciato.

In figura 9 si riporta il confronto tra carichi nella condizione ante-operam (con gallerie attuali) e post-operam, effettuato in ambiente GIS sulla base dei carichi calcolati da ModFlow per le due situazioni di riferimento. Il settore indicato rappresenta l'area soggetta a modificazioni permanenti della circolazione sotterranea a seguito della realizzazione delle nuove opere in galleria, di riferimento per la valutazione degli effetti sui pozzi-cisterna presenti nell'area.

Sia l'area di influenza, sia i volumi di drenaggio, sono verosimilmente soggetti a cautelativa sovrastima, in quanto ipotizzano una circolazione idrica continua in assenza di limiti laterali di permeabilità. I limiti verticali relativi di permeabilità sono considerati dal modello attraverso l'assunzione di valori inferiori di conducibilità idraulica lungo l'asse z, ortogonale alla direzione di stratificazione. Nella realtà si evidenzia la presenza di riduzioni o limiti di permeabilità anche laterali, ovvero nell'ambito dei medesimi layer di modello, assunti a conducibilità idraulica orizzontale costante. La presenza di tali limiti laterali potrebbe determinare una minore estensione dell'area di influenza rispetto a quella calcolata, che rappresenta pertanto una condizione massima potenziale.

Relazione di calcolo	Pagina 14 di 22
IDR150-1.doc	

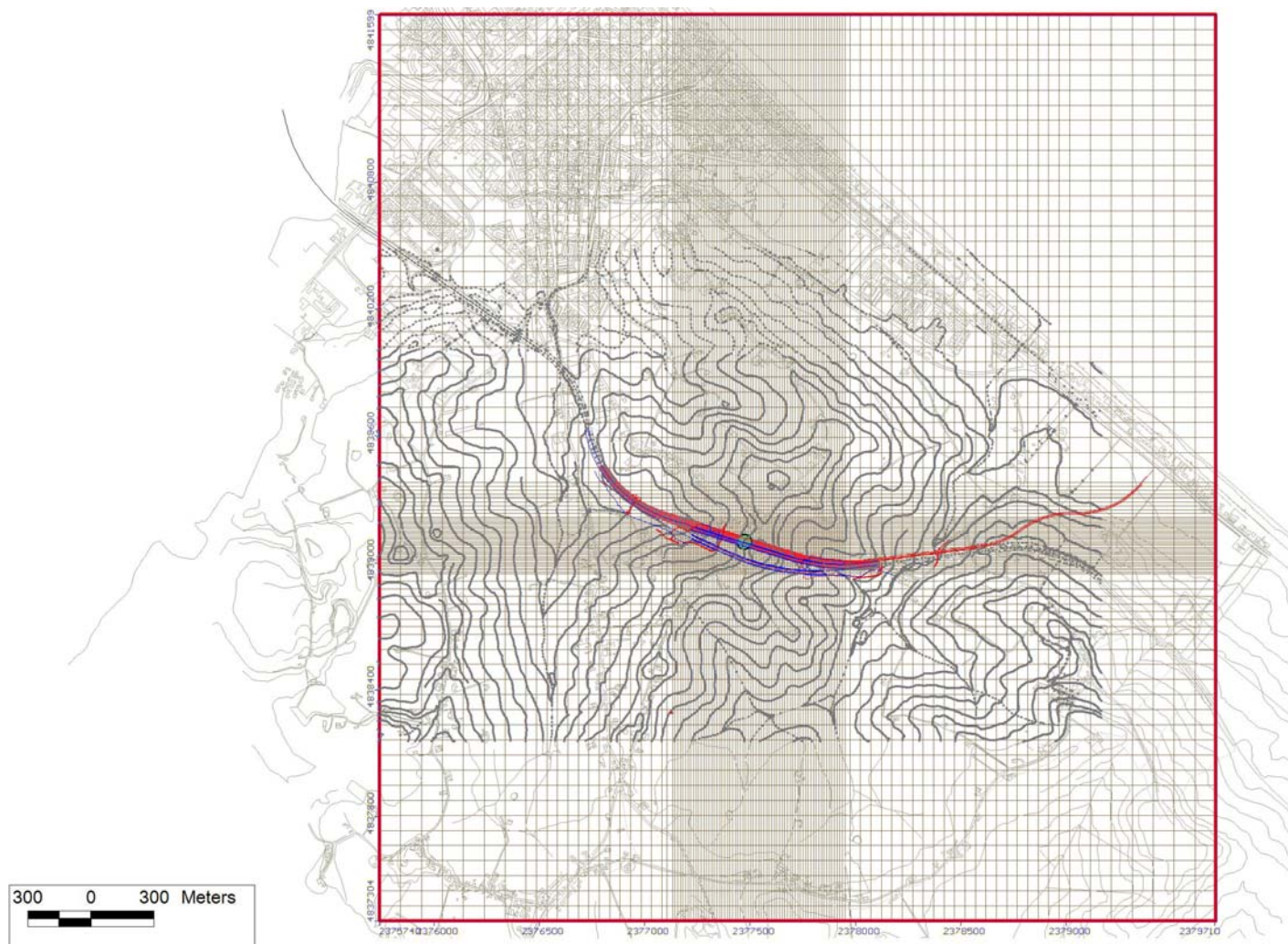


Figura 2 - Griglia di modello complessiva sul piano orizzontale.

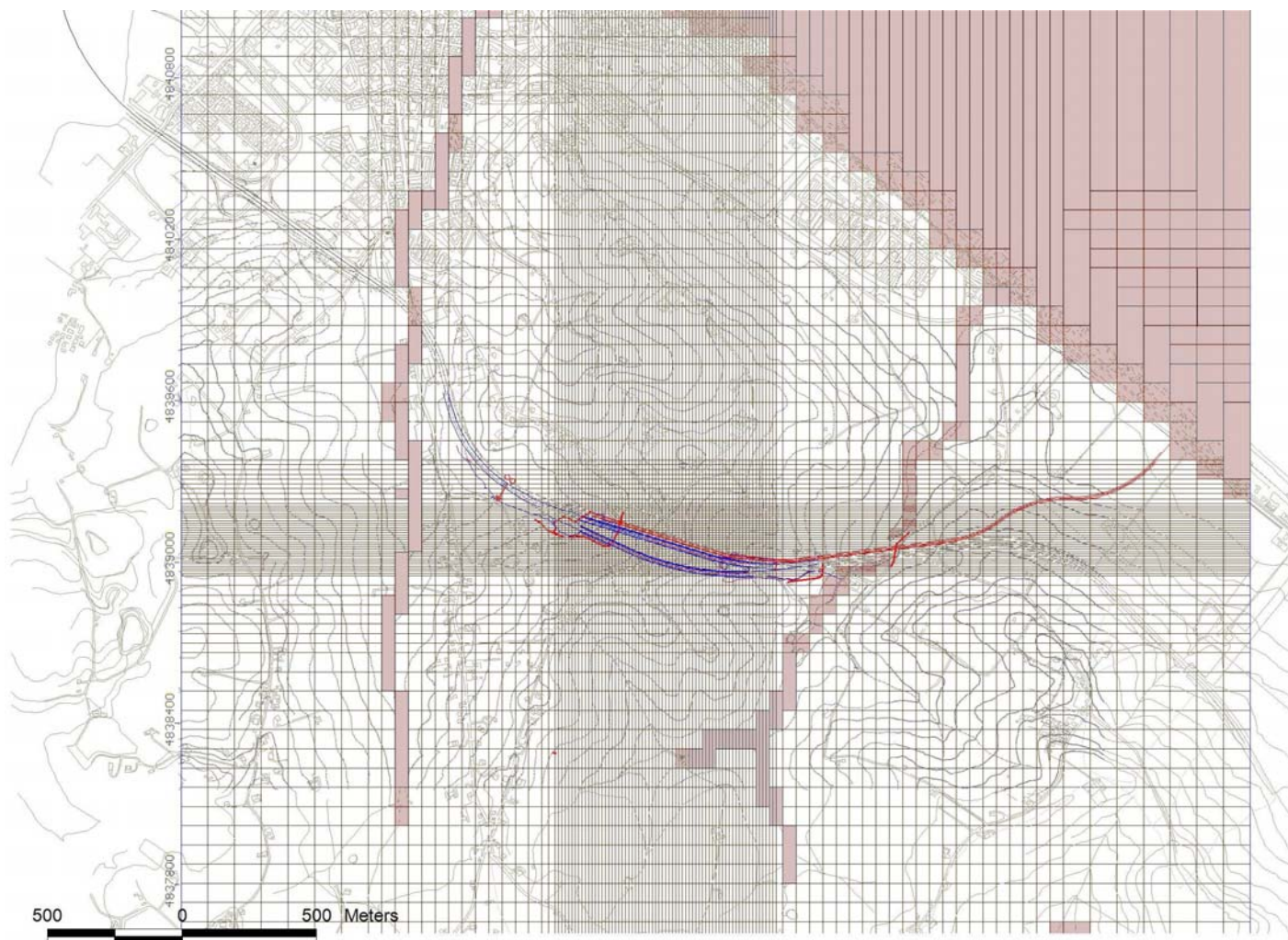


Figura 3 - Griglia di modello sul piano orizzontale - Condizioni al contorno: in rosso sono evidenziate le celle a carico imposto.

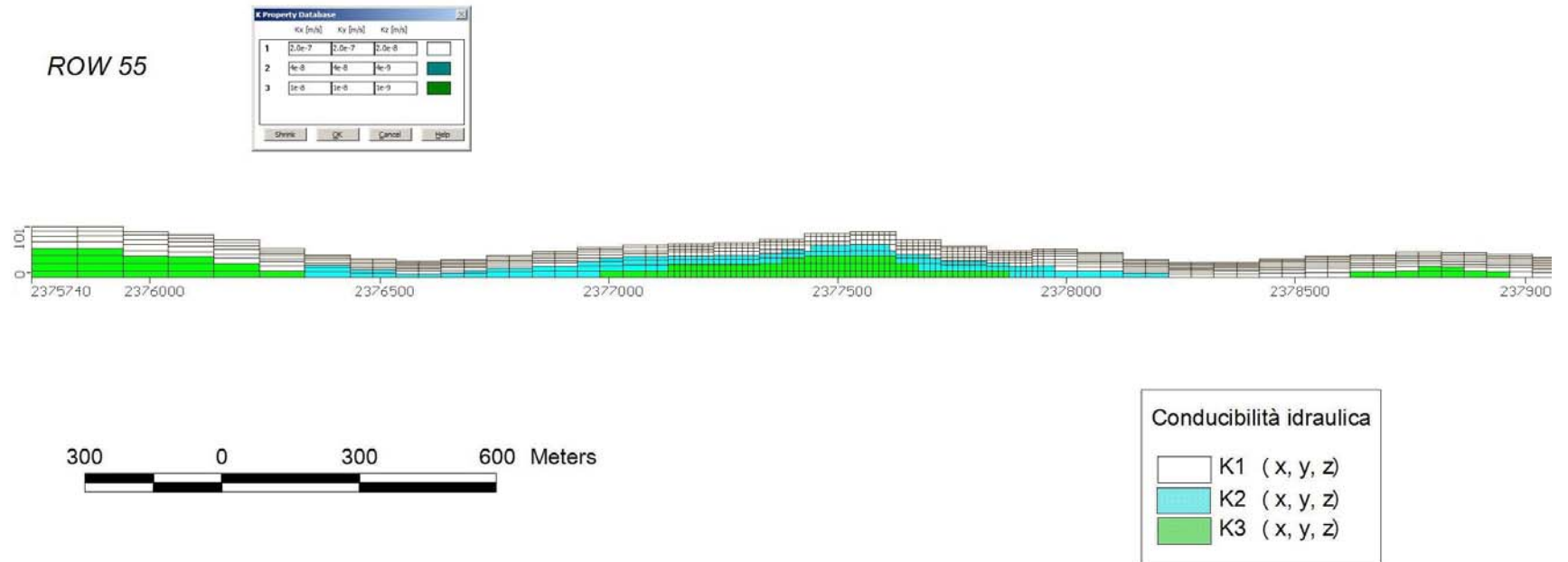


Figura 4 - Sezione di modello sul piano verticale (riga 55, E-W) e campo della conducibilità idraulica.

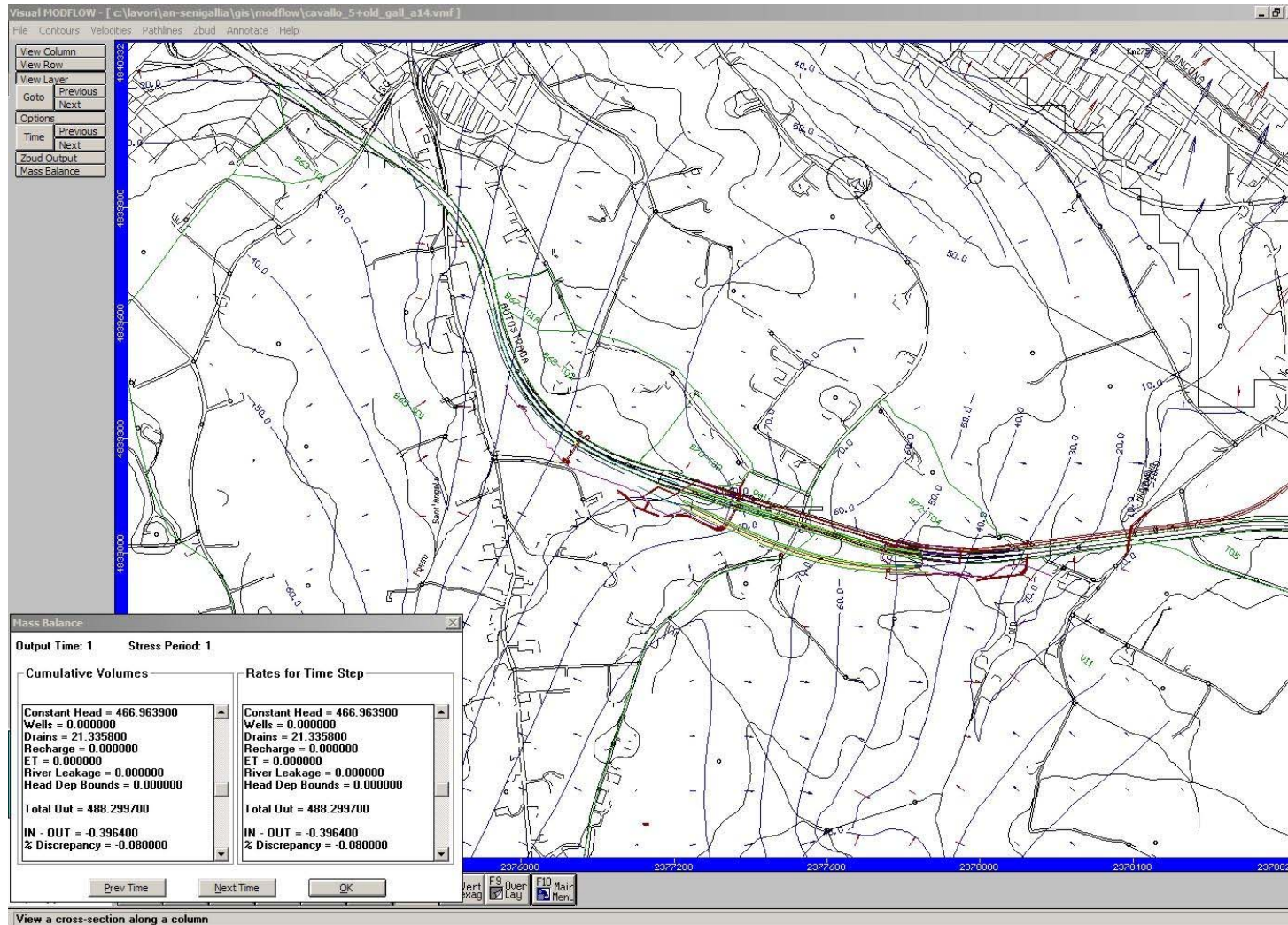


Figura 5 - Output di modello relativo alla condizione “ante operam” (in presenza delle gallerie esistenti).

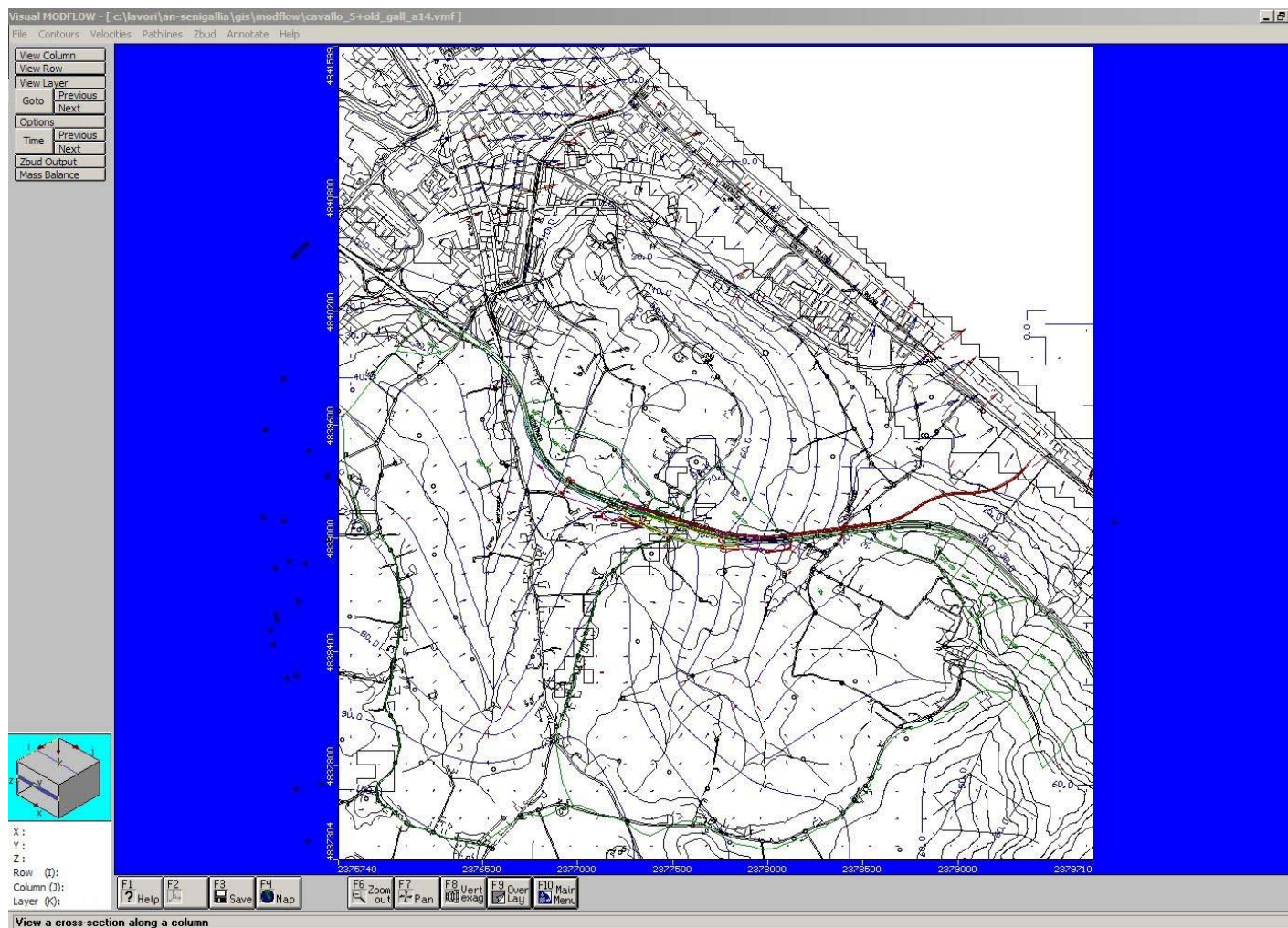


Figura 6 - Output di modello relativo all'assetto post-operam (intero dominio di simulazione).

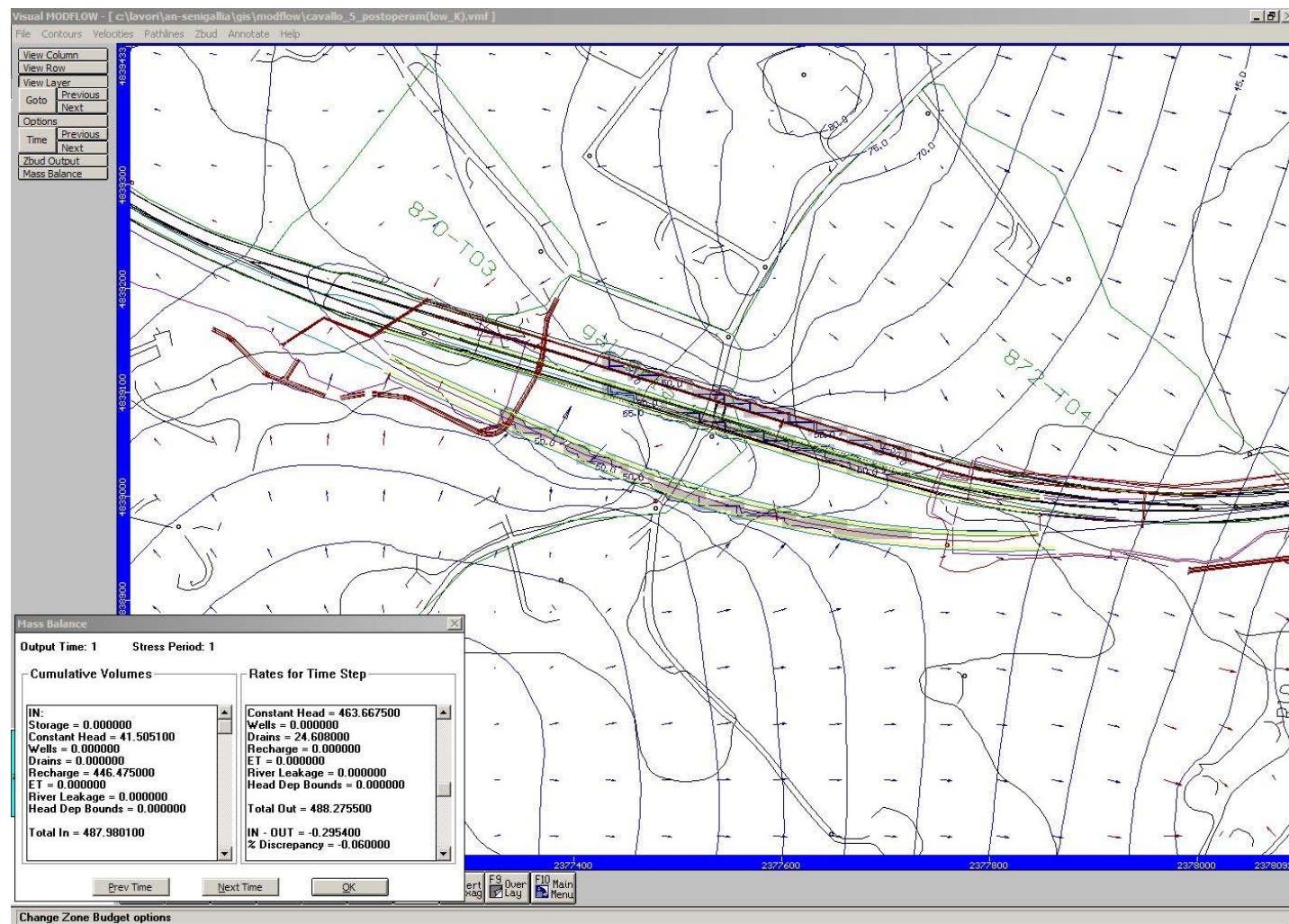


Figura 7 - Output di modello relativo all'assetto post-operam e bilancio di massa.

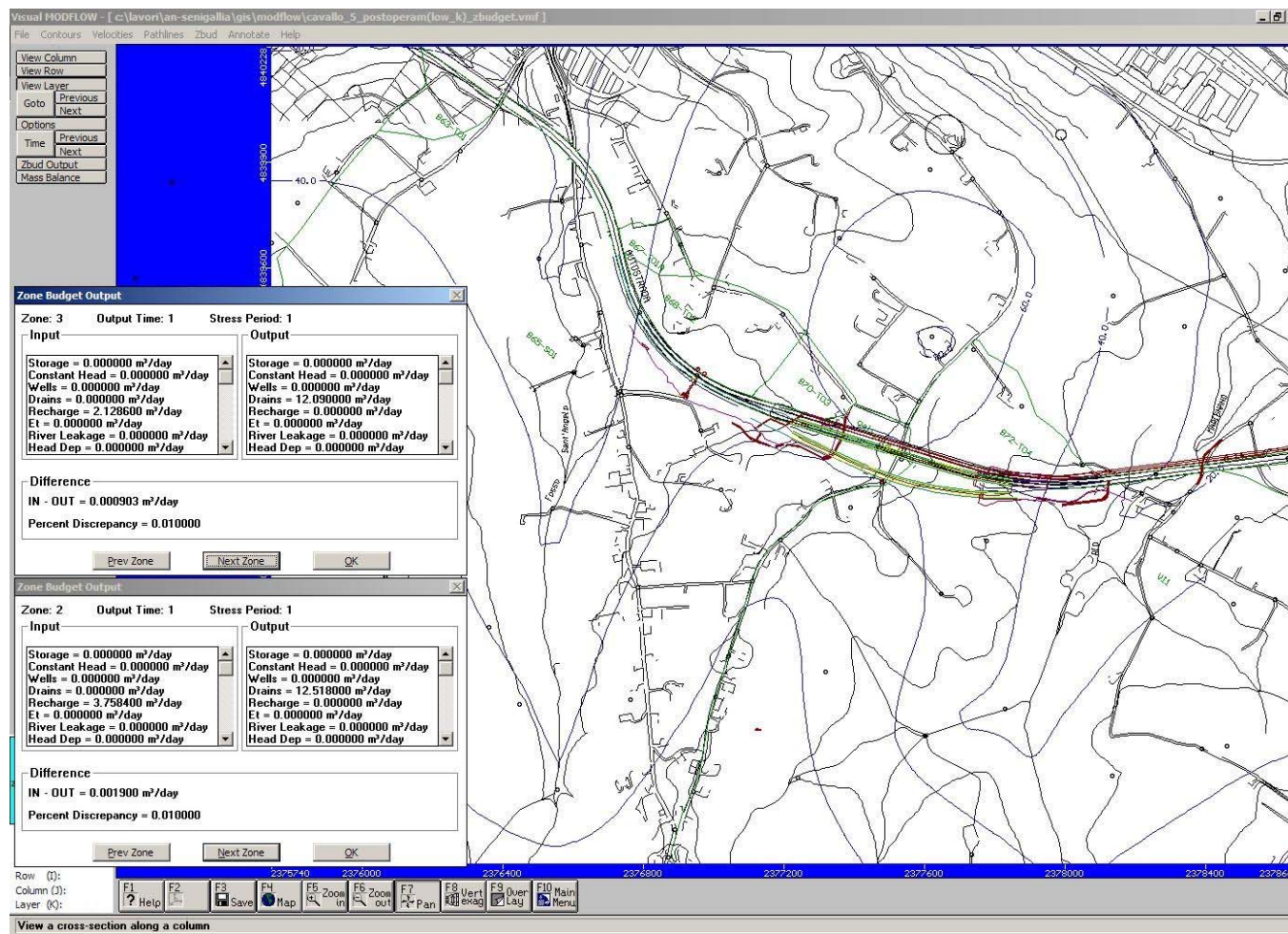


Figura 8 - Bilanci di massa nella condizione post-operam; la voce “Zone 2 – Drains” (12.51 m³/d) è riferita alla nuova galleria in asse Sud, “Zone 3 – Drains” (12.09 m³/d) è riferita alle gallerie esistenti.

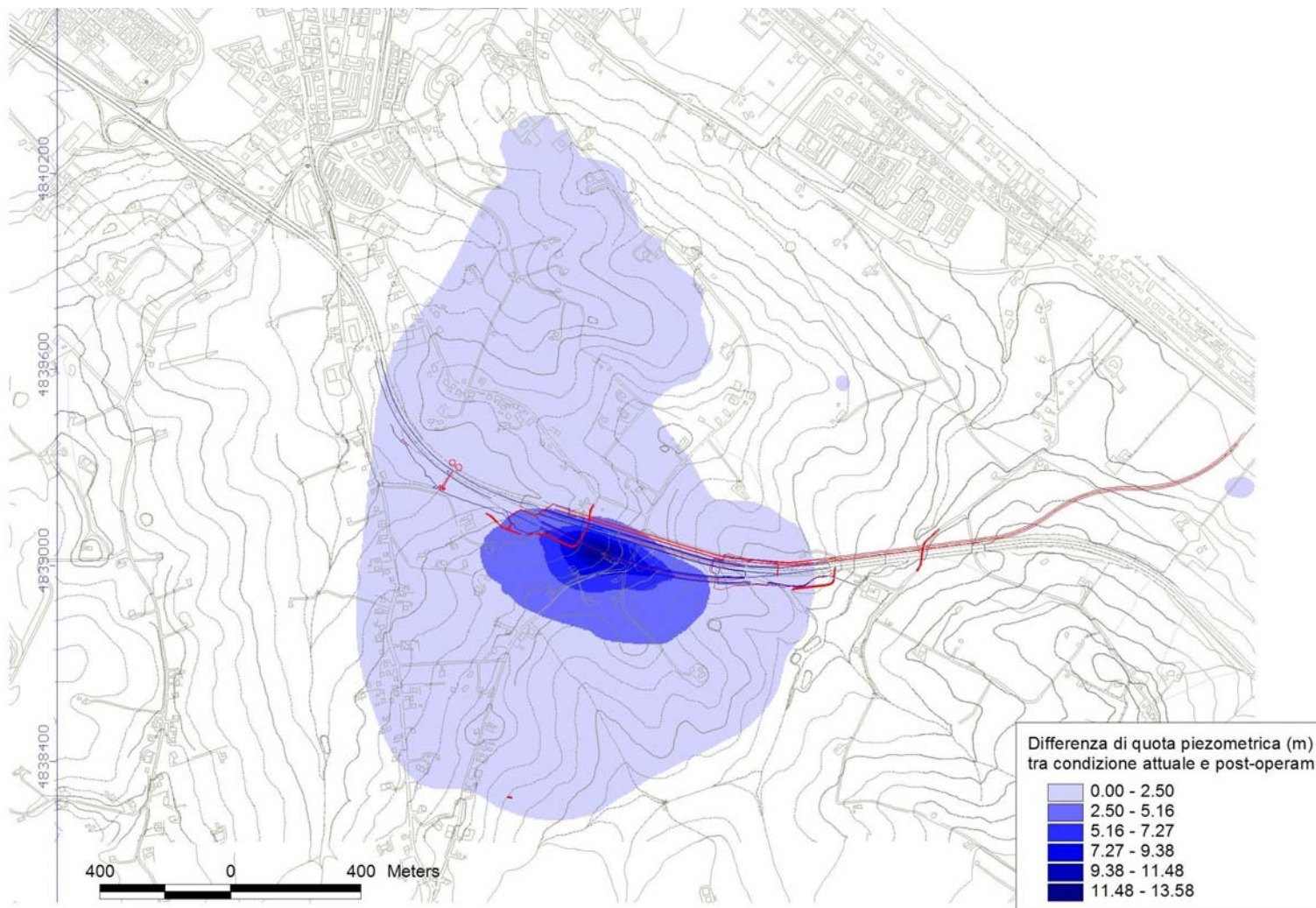


Figura 9 - Confronto tra quote piezometriche nella condizione attuale e post-operam.