

autostrade // per l'italia

RHO-MONZA

VIABILITA' DI ADDUZIONE AL SISTEMA
AUTOSTRADALE ESISTENTE A8 - A52

LOTTO 3 : VARIANTE DI BARANZATE

PROGETTO PRELIMINARE

CORPO AUTOSTRADALE

IDROLOGIA IDRAULICA

IDROLOGIA SOTTERRANEA

RELAZIONE IDROGEOLOGICA

IL RESPONSABILE PROGETTAZIONE SPECIALISTICA Ing. Paolo de Paoli Ord. Ingg. Pavia N. 1739 RESPONSABILE UFFICIO IDR	IL RESPONSABILE INTEGRAZIONE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE Ing. Massimiliano Giacobbi Ord. Ingg. Milano N. 20746 PROJECT ENGINEER	IL DIRETTORE TECNICO Ing. Maurizio Torresi Ord. Ingg. Milano N. 16492 RESPONSABILE FUNZIONE STP
--	---	--

WBS	RIFERIMENTO ELABORATO				DATA: LUGLIO 2013	REVISIONE	
	DIRETTORIO		FILE			n.	data
—	codice commessa	N.Prog.	unita'	n. progressivo			
—	11001601	IDR0020	—	—	—		

 ingegneria europea	COORDINATORE OPERATIVO DI PROGETTO Ing. Federica Ferrari	ELABORAZIONE GRAFICA A CURA DI : —
		ELABORAZIONE PROGETTUALE A CURA DI : —
CONSULENZA A CURA DI : —	IL RESPONSABILE UFFICIO/UNITA' : Ing. Paolo de Paoli	

VISTO DEL COORDINATORE GENERALE SPEA DIREZIONE OPERATIVA PROGETTAZIONE ED ESECUZIONE LAVORI ASPi Ing. Alberto Selleri	VISTO DEL COMMITTENTE  Ing. Stefano STORONI	VISTO DEL CONCEDENTE 
---	---	--

INDICE

1. PREMESSA	2
2. CARATTERIZZAZIONE IDROGEOLOGICA DELL'AREA DI INTERESSE	3
3. CONSIDERAZIONI SULL'ANDAMENTO DELLA FALDA FREATICA NEL TERRITORIO MILANESE	5
4. CONSIDERAZIONI PIEZOMETRICHE LOCALI	7
5. DESCRIZIONE DEL MODELLO MATEMATICO	9
5.1 IL CODICE DI CALCOLO MODFLOW E L'INTERFACCIA GRAFICA GMS 6.0	9
5.2 IMPLEMENTAZIONE DEL MODELLO DI FLUSSO	13
6. DEFINIZIONE DELLA NUOVA FALDA DI PROGETTO	19
6.1 LIVELLO PIEZOMETRICO DI PROGETTO DELLA FALDA A BREVE TERMINE (FASE DI COSTRUZIONE)	19
6.2 LIVELLO PIEZOMETRICO DI PROGETTO DELLA FALDA A LUNGO TERMINE (FASE DI ESERCIZIO)	21
7. VALUTAZIONE DELLE INTERFERENZE A BREVE E LUNGO TERMINE CON LE DIRETTIRICI DEL DEFLUSSO SOTTERRANEO	24
7.1 INTERFERENZE A BREVE TERMINE (FASE DI COSTRUZIONE) E VALUTAZIONE DELLE PORTATE DRENATE DURANTE LE OPERAZIONI DI SCAVO	24
7.2 INTERFERENZE A LUNGO TERMINE (FASE DI ESERCIZIO) E VALUTAZIONE DEGLI INNALZAMENTI DELLA PIEZOMETRIA LOCALE	25

1. PREMESSA

La presente relazione illustra lo studio idrogeologico sulle acque sotterranee, svolto nell'ambito della progettazione di riqualifica e potenziamento della S.P. 46.

L'intervento di riqualificazione della strada SP 46 nel tratto variante di Baranzate prevede la realizzazione di un tratto di strada in trincea compreso tra la progressiva km 0+800,00 e la progressiva km 1+600,00 per una lunghezza totale di 800 metri, e la costruzione della galleria artificiale "Baranzate" per un lunghezza di circa 150 metri.

Lo studio idrogeologico, condotto mediante l'implementazione di un modello matematico, ha avuto come finalità principale la definizione di una falda di progetto da assumere per il dimensionamento delle opere di fondazione profonda. Tale definizione è il risultato dell'analisi degli studi esistenti sulla falda nell'area in oggetto e dei livelli di falda nei due piezometri installati lungo il tracciato di progetto nell'Agosto 2008 e attualmente ancora in esercizio. L'aggiornamento dei dati disponibili ha consentito di affinare le prime ipotesi della falda di progetto fatte durante la redazione della prima versione del progetto definitivo.

Una volta definita la nuova falda di progetto si è proceduti a verificare le variazioni indotte dalle nuove opere con particolare attenzione all'entità delle portate da drenare in fase di cantiere (breve termine) ed agli innalzamenti causati dalla nuova infrastruttura in fase di esercizio (lungo termine).

2. CARATTERIZZAZIONE IDROGEOLOGICA DELL'AREA DI INTERESSE

Di seguito si riportano alcune considerazioni contenute nella relazione geologica, geomorfologica e di inquadramento idrogeologico allegata al progetto.

Nel sottosuolo dell'area milanese sono state riconosciute a fini idrogeologici tre litozone che, dall'alto al basso, hanno caratteri granulometrici decrescenti:

1. Litozona ghiaioso - sabbiosa: questa unità, nella quale si riconosce una sub-unità sabbioso-ghiaiosa e conglomeratica, è caratterizzata dalla netta prevalenza di litotipi grossolani, con lenti argillose di limitato spessore ed estensione areale. E' sede di un acquifero libero, che trae alimentazione per lo più dall'infiltrazione superficiale delle acque meteoriche e irrigue. La sub-unità sabbioso-ghiaiosa e conglomeratica più antica affiora nelle aree pedemontane e di alta pianura, dove forma i terrazzi morfologicamente più elevati; gli acquiferi in essa contenuti sono separati da quello sovrastante da diaframmi scarsamente permeabili costituiti da limi e argille, talora molto spessi e quasi sempre molto estesi, che limitano gli scambi tra i due livelli acquiferi determinando la presenza di falde semi-confinata e localmente confinata. In linea generale, gli acquiferi più produttivi e di maggiore estensione areale si localizzano nella porzione sommitale e sono quelli attualmente sfruttati dalla maggior parte delle opere di captazione. L'insieme degli acquiferi contenuti in questa unità viene identificato come "*acquifero tradizionale*" anche se, nella realtà, questo complesso è formato da un sistema multifalda che viene assimilato ad un acquifero monostrato; questa condizione strutturale assume un carattere ancor più marcato nelle aree di bassa pianura dove, in relazione all'affinamento della granulometria dei terreni, l'unità in esame è caratterizzata, già a partire dalla superficie, dalla prevalenza di livelli limoso – argillosi ai quali si alternano terreni più grossolani, che formano acquiferi con falde semi - confinate o confinate. Lo spessore medio varia da 90-100 m nel settore settentrionale ai 20-40 m nella zona meridionale.
2. Litozona sabbioso-argillosa: è formata in prevalenza da argille e limi di colore grigio e giallo, con frequenti alternanze nella colorazione e con presenza di torbe. Costituisce generalmente il substrato della falda acquifera tradizionalmente sfruttata, nei livelli sabbiosi o, più raramente, sabbioso-ghiaiosi. Sono presenti falde confinate, che traggono la loro alimentazione dalle aree poste più a nord e dallo scambio con gli acquiferi soprastanti, laddove i setti argillosi di separazione sono discontinui. Lo spessore più rilevante di tale unità si rinviene nell'area

occidentale della provincia di Milano con valori variabili compresi tra 0 e 160 m riscontrabili nei settori centrali e orientali.

3. Litozona argillosa: è formata prevalentemente da argille e limi di colore grigio e azzurro con micro e macro fossili marini, alle quali sono subordinati livelli sabbiosi, talora cementati, generalmente di modesto spessore. Queste unità, che si rinvenivano nei pozzi per acqua profondi oltre 220-280 m nella media pianura e 130 m nell'alta pianura, vengono attribuite al Pleistocene Inferiore. Le principali variazioni litologiche sono contraddistinte dalla progressiva prevalenza di terreni limoso argillosi, che si verifica non solo con l'aumento della profondità ma anche procedendo da nord verso sud.

In sintesi, vengono generalmente distinti nell'ambito del territorio milanese tre complessi acquiferi principali:

- Acquifero tradizionale: è l'acquifero superiore, costituito dalle unità ghiaioso - sabbiosa, sabbioso - ghiaiosa e conglomeratica comunemente sfruttato dai pozzi pubblici; la base di tale acquifero è generalmente definita dai depositi Villafranchiani.
- Acquifero profondo: è costituito dai livelli permeabili presenti all'interno dei depositi continentali del Pleistocene Inferiore ed è a sua volta suddiviso in quattro corpi acquiferi minori.
- Terzo acquifero: si tratta di una serie di livelli acquiferi presenti nelle argille marine, solo sporadicamente presente nelle sezioni stratigrafiche.

All'interno del corpo acquifero tradizionale viene comunemente distinto un acquifero freatico superficiale, presente fino ad una profondità di 40 - 45 m dal piano campagna, ed uno semiconfinato sottostante (con una profondità variabile tra 80 e 120 m dal p.c.), separato dal precedente tramite lenti poco permeabili di spessore variabile, da 5 a 20 m, e spesso discontinue. Tale orizzonte semipermeabile può essere individuato con una discreta continuità nella porzione meridionale dell'area, mentre tende ad assottigliarsi e progressivamente a scomparire verso Nord, dove non si ha più la distinzione tra gli acquiferi. Di conseguenza, nella parte nord del dominio di studio è presente la sola falda libera (una sola unità ghiaioso - sabbiosa), mentre nella parte a sud troviamo due unità ghiaiose - sabbiose separate da uno strato di argilla e limo. **Il presente studio riguarda l'acquifero freatico superficiale ovvero quello potenzialmente interferente con le opere in progetto.** L'andamento della superficie freatica è prevalentemente in direzione NW-SE con una pendenza media variabile tra il 4 ed il 6‰.

3. CONSIDERAZIONI SULL'ANDAMENTO DELLA FALDA FREATICA NEL TERRITORIO MILANESE

Fin dal 1996 la Provincia di Milano si è occupata del fenomeno dell'innalzamento della falda idrica sottostante il suo territorio, pubblicando nell'Ottobre dello stesso anno uno studio estremamente approfondito sulle cause del fenomeno.

L'analisi delle principali voci che costituiscono il bilancio idrico, suddivise in entrate (precipitazioni, irrigazioni e perdite della rete) e uscite (prelievi, uscite dai fontanili, evapotraspirazione), ha consentito di ricondurre le cause che hanno determinato il fenomeno, essenzialmente alla riduzione dei consumi; la dismissione industriale ha comportato infatti una riduzione dei prelievi a partire dai primi anni novanta stimata intorno ai 150.000.000 metri cubi annui.

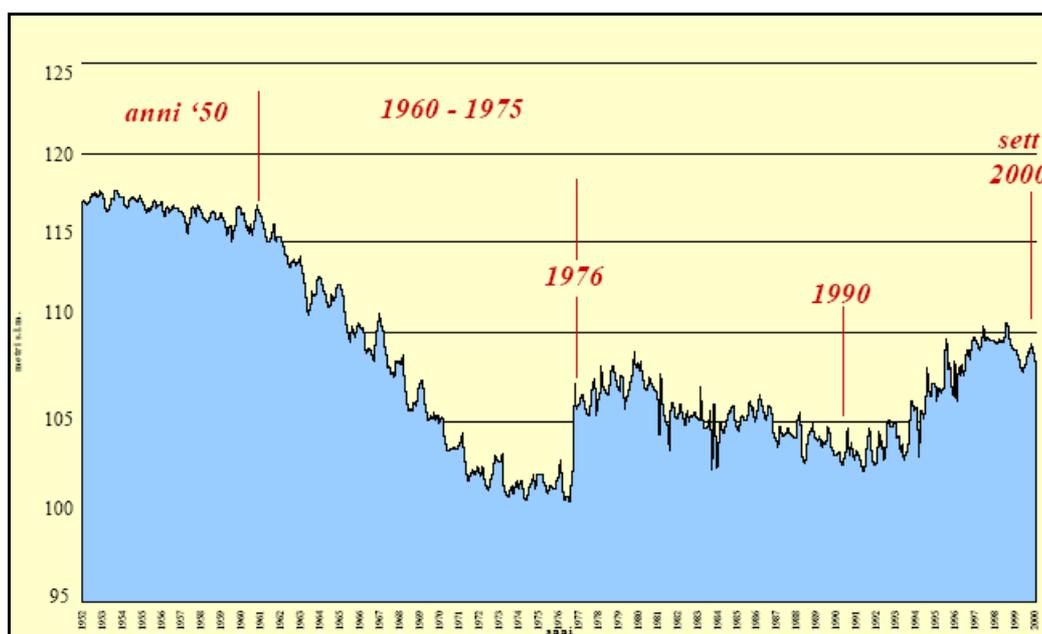


Figura 3-1: Oscillazioni piezometriche della prima falda per la città di Milano - Provincia di Milano – Sistema Informativo Falda

Il grafico riportato in *Figura 3-1* evidenzia una tendenza negativa (con abbassamenti superiori anche ai 10 metri) che a partire dagli anni '50 si protrae in maniera sempre più accentuata fino alla metà degli anni '70 in cui si raggiunge il minimo del periodo considerato. Successivamente si osserva una notevole ripresa dei livelli, culminata nel 1978, seguita dal secondo minimo verso la fine degli anni '80 che risulta legato ad un periodo caratterizzato da scarse precipitazioni. A partire dall'inizio degli anni '90 è

avvenuto un rapido incremento dei livelli sino a raggiungere valori di soggiacenza paragonabili a quelli della metà degli anni '60. Tale tendenza, che pare continuare anche nei primi anni del 2000, è da attribuirsi prevalentemente alla forte riduzione dei prelievi di origine industriale. Tale andamento è confermato anche dal 2000 ad oggi come confermato dalle misure effettuate dalla provincia di Milano in alcuni piezometri prossimi all'area di intervento.

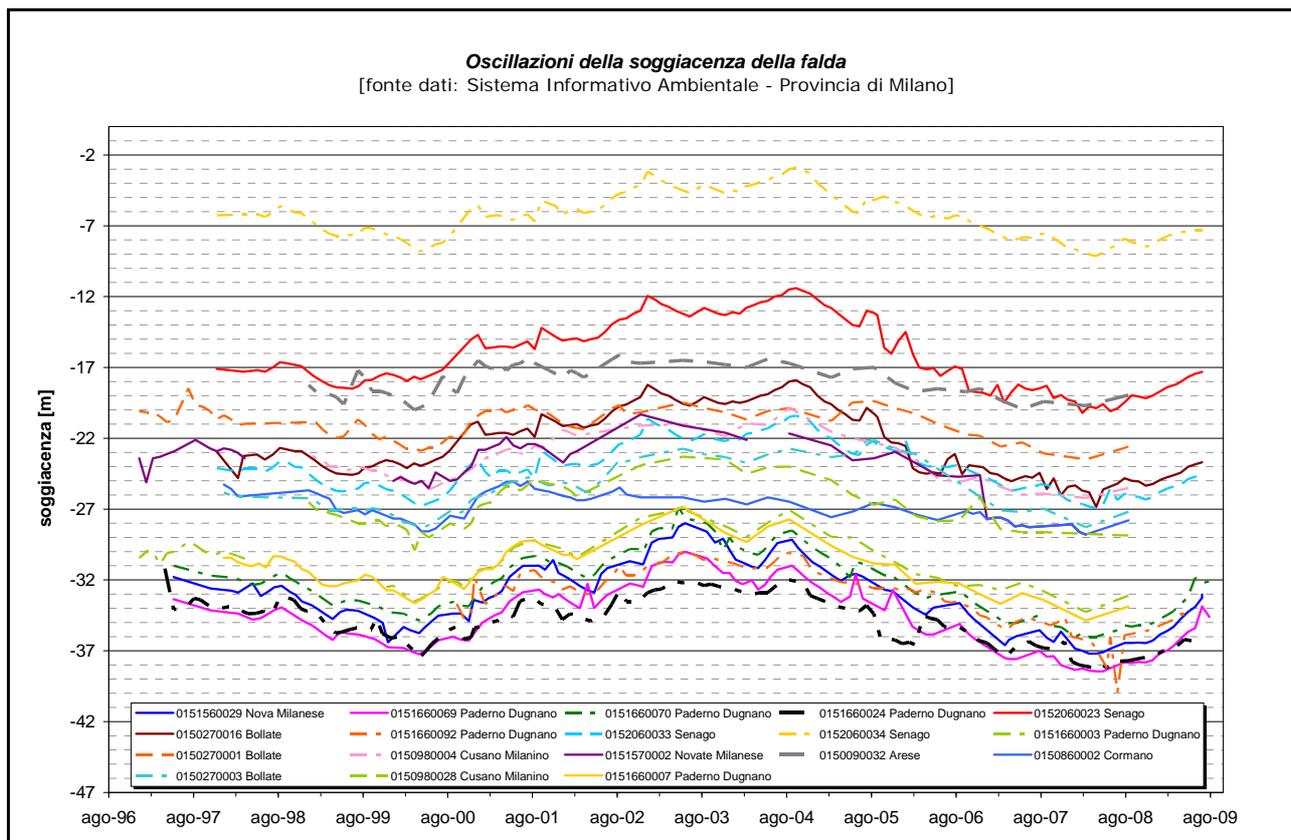


Figura 3-2: Oscillazioni della soggiacenza della falda

Analizzando nel dettaglio l'area di intervento si riscontra una rapida e continua evoluzione dell'andamento dei livelli di falda con incrementi probabilmente dovuti anche alla realizzazione delle infrastrutture viarie e commerciali al servizio del vicino nuovo polo fieristico di Rho, in grossa parte in scavo con fondazioni profonde, che causano l'innalzamento dei livelli di falda fino a pochi metri dal piano campagna. La prossimità della superficie freatica al piano campagna rende la falda soggetta non solo alle oscillazioni "lunghe" legate ai periodi di piovosità e siccità, ma anche ad oscillazioni "rapide" legate a eventi meteorici concentrati.

4. CONSIDERAZIONI PIEZOMETRICHE LOCALI

Durante la redazione della precedente versione del progetto definitivo (Agosto 2008), tenendo conto di quanto detto in merito alla peculiarità dell'area in cui si sviluppa il tracciato stradale e dell'assenza di piezometri nelle immediate vicinanze dell'opera in progetto fu avviata un'apposita campagna di monitoraggio realizzando due fori di sondaggio (**RM10** e **RM8**) lungo l'asse stradale in progetto. La serie storica dei dati provenienti da quella campagna di monitoraggio al momento della consegna del progetto (Marzo 2010) confermava una tendenza all'innalzamento dei livelli di falda di circa 2 metri nel periodo di osservazione.

Tali dati, data la modesta estensione temporale, non consentirono però di prevedere un trend del livello di falda e quindi di definire un livello di falda da assumere in progetto. Lo studio più aggiornato, con serie storiche di dati di circa 10 anni e avente carattere di ufficialità, al momento della redazione del progetto definitivo, risaliva all'ottobre 2003 (*"Indagini geologico tecniche di supporto alla pianificazione comunale ai sensi della L. R. 41/97 e della D.G.R. 7/6645/01 - Comune di Bollate*). In particolare in questo studio fu ricostruito il livello di falda all'Ottobre del 2002. Per tenere conto dell'evoluzione del livello di falda e del contesto urbanistico e viabilistico dell'area in esame dal 2002 al 2010, si ritenne indispensabile definire un livello di progetto della falda superiore, ai livelli dell'Ottobre 2002 anche in relazione all'importanza e alla vita attesa dell'opera. Sulla base dei dati disponibili si ritenne corretto assumere come livelli di riferimento per la progettazione delle opere quelli relativi all'Ottobre 2002 incrementati di un franco di sicurezza di 4 metri. Ad ulteriore cautela le opere in progetto furono poi verificate anche in corrispondenza di un innalzamento della falda rispetto al 2002 di 6 metri.

<i>Piezometro</i>	<i>Piano Campagna (m s.l.m.)</i>	<i>Livello Ottobre 2002 (m s.l.m.)</i>	<i>Livello progetto (Ottobre 2002+4) (m s.l.m.)</i>	<i>Livello verifica (Ottobre 2002+6) (m s.l.m.)</i>
RM8 (Pudiga)	147.20	133.55	137.55	139.55
RM10 (Guisa)	144.70	134.62	138.62	140.62

Successivamente alla conclusione del progetto definitivo, il monitoraggio della falda all'interno dei due piezometri è proseguito e l'ultima misura risale al Maggio 2013.

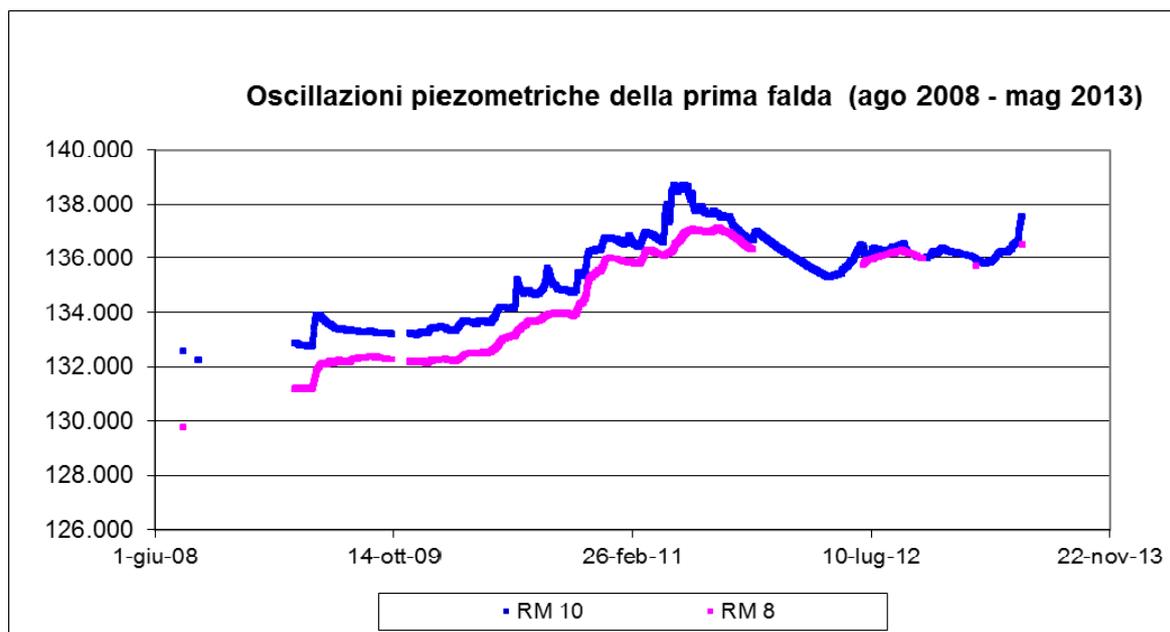


Figura 4-1: Andamento della falda nei fori di sondaggio RM8 e RM10

Come si evince dal grafico, le letture effettuate nel periodo 2008-2011 hanno evidenziato una continua risalita della falda fino a raggiungere, nel Maggio 2011 livelli di falda prossimi allo scenario di progetto ipotizzato (falda di ottobre 2002 + 4 metri).

Piezometro	Piano Campagna (m s.l.m.)	Livello Agosto 2008 (m s.l.m.)	Livello Maggio 2011 (m s.l.m.)	Livello progetto (Ottobre 2002+4) (m s.l.m.)
RM8 (Pudiga)	147.20	129.75	137.09	137.55
RM10 (Guisa)	144.70	132.52	138.69	138.62

Nel periodo compreso tra Maggio 2011 e Maggio 2012, si è avuta invece un'inversione di tendenza con un abbassamento della superficie piezometrica di circa 3 metri rispetto al 2011, stabilizzandosi ad una quota prossima ai 136 m s.l.m. in entrambi i piezometri; nell'ultimo semestre la falda ha ricominciato a crescere raggiungendo nel Maggio 2013 (ultima misura effettuata) i seguenti valori:

Piezometro	Livello Maggio 2013 (m s.l.m.)
RM8 (Pudiga)	136.49
RM10 (Guisa)	137.53

5. DESCRIZIONE DEL MODELLO MATEMATICO

Lo studio delle variazioni indotte sul regime idrologico naturale delle acque sotterranee è stato condotto con l'ausilio di un modello matematico che simula il flusso dell'acqua attraverso un mezzo poroso. Le equazioni matematiche che governano i fenomeni di flusso sotterraneo sono risolte con il metodo alle differenze finite che richiede la discretizzazione del dominio tramite una griglia di calcolo.

5.1 Il codice di calcolo MODFLOW e l'interfaccia grafica GMS 6.0

Il MODFLOW (Modular Groundwater Flow Model) è un codice di calcolo creato negli Stati Uniti negli anni 80 dal servizio geologico nazionale la cui validità è riconosciuta a livello internazionale.

Il dominio è stato discretizzato mediante una griglia tridimensionale a maglie rettangolari che descrive efficacemente la geometria dell'acquifero dedotta dalle indagini geognostiche in sito. Ogni cella ha dunque la forma di un parallelepipedo di dimensioni variabili e viene caratterizzata attraverso il suo baricentro (block-centred). Ogni cella viene poi identificata mediante un indice di riga (i), colonna (j) e layer (k). Il layer rappresenta la numerazione delle celle nel piano verticale e solitamente ad ogni strato viene associato un layer al fine di riprodurre nel modello la stratigrafia del sito.

E' inoltre possibile infittire la griglia di calcolo nei punti in cui viene richiesta alla soluzione una maggiore precisione.

Modflow simula il flusso dell'acqua attraverso un mezzo poroso usando il metodo delle differenze finite, ovvero sostituendo l'equazione differenziale di diffusività con un'equazione algebrica:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \frac{\partial h}{\partial t} \quad (1)$$

dove:

- x, y, z sono le direzioni principali;
- t tempo [T];
- h carico idraulico [L];
- K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} sono le permeabilità lungo le direzioni degli assi [LT^{-1}];
- W termine di flusso che tiene conto dell'eventuale pompaggio e ricarica [T^{-1}];
- SS coefficiente di immagazzinamento specifico [L^{-1}].

Il punto di partenza per lo sviluppo delle equazioni alle differenze finite è l'equazione di continuità che esprime la conservazione della massa: la somma dei flussi entranti e uscenti da ogni cella è uguale alla variazione di volume immagazzinato o rilasciato nell'unità di tempo. In termini matematici:

$$\Sigma Q_i = S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta r_i \Delta c_j \Delta v_k \quad (2)$$

dove:

- Q_i portate entranti o uscenti dalle sei celle adiacenti e portate relative ad una sorgente o ad un pozzo;
- Δh variazione del carico nel tempo Δt ;
- $\Delta r_i \Delta c_j \Delta v_k$ volume della cella.

Ogni portata che attraversa una faccia della cella può essere sviluppata secondo la legge di Darcy; ad esempio la portata entrante nella cella i, j, k dalla cella $i, j-1, k$ può essere scritta come:

$$Q_{i,j-\frac{1}{2},k} = K_{i,j-\frac{1}{2},k} \Delta c_i \Delta v_k \frac{(h_{i,j-1,k} - h_{i,j,k})}{\Delta r_{j-\frac{1}{2}}} \quad (3)$$

dove:

- $K_{i,j-1/2,k}$ è la permeabilità lungo la riga fra il nodo i, j, k e $i, j-1, k$;
- $\Delta c_j \Delta v_k$ area della faccia normale alla direzione delle righe;
- $\Delta r_{j-1/2}$ distanza fra il nodo i, j, k e $i, j-1, k$.

Infine esplicitando la discretizzazione del tempo:

$$\frac{\Delta h_{i,j,k}}{\Delta t} = \frac{h_{i,j,k}^m - h_{i,j,k}^{m-1}}{t_m - t_{m-1}} \quad (4)$$

dove m designa il passo temporale presente, in cui i carichi sono incogniti, e $m-1$ indica il precedente passo temporale, in cui i carichi sono noti. Tutti i carichi idraulici presenti nella definizione dei flussi, come nell'equazione (3), si intendono al tempo m (metodo completamente implicito).

Con le sostituzioni sopra descritte e portando a sinistra i termini incogniti, si scrive un'equazione per ogni nodo, ottenendo un sistema così strutturato, risolvibile iterativamente una volta impostate le condizioni al contorno e le condizioni iniziali:

$$[A] \cdot \{h\} = \{q\}$$

dove:

- A matrice dei coefficienti;
- h vettore dei carichi incogniti;
- q vettore dei termini noti.

Le condizioni al contorno impongono il carico idraulico, o la derivata di quest'ultimo, ed il flusso ai confini del sistema.

Le principali opzioni per le condizioni al contorno di Modflow sono:

- **Costant Head** (condizioni di carico costante): fissa a priori il carico idraulico; tipicamente le costant head cells corrispondono a superfici d'acqua libera (fiumi e laghi).
- **No Flow** (condizione di flusso nullo): fissa la derivata del carico (flusso) attraverso il confine. Il valore è zero perché la permeabilità è bassa o perché le linee isopiezometriche risultano ortogonali alle pareti della cella.
- **General head** (condizione di carico generalizzato): simula la presenza di un serbatoio di capacità infinita ad una distanza prefissata dai confini del modello. Lo scambio d'acqua fra il modello e il serbatoio avviene tramite un condotto ipotetico a permeabilità nota (quella della cella). La portata che entra o esce dalla cella dipende dalla differenza di carico e dalla conduttanza.
- **River** (condizione di scambio tra fiume/falda): simula l'azione dei fiumi e la loro interazione con la falda come drenanti o alimentanti. Le equazioni utilizzate sono le stesse delle general head cells, con l'aggiunta però dei parametri che rappresentano lo spessore e la conducibilità idraulica dei sedimenti che costituiscono il letto del fiume.
- **Drain** (condizione di drenaggio): simula la presenza di un dreno che asporta acqua dal modello; è simile alla condizione River con la differenza che non può mai alimentare la falda. L'acqua viene rimossa dal modello solo quando il carico idraulico è maggiore della quota del dreno. La portata che entra o esce dalla cella dipende dalla differenza di carico e dalla conduttanza:

$$Q = C(h_f - h_s)$$

dove:

Q flusso entrante o uscente dalla cella [L³/T];

h_f carico idraulico nella cella [L];

h_s carico idraulico simulato dal modello [L];

C conduttanza della cella [L²/T]; viene calcolata con la seguente equazione:

$$C = K_f A/b$$

con:

K_f conducibilità idraulica della cella [L/T];

A area della cella [L];

B spessore della cella [L].

- **Barrier** (condizione di barriera interna al modello): viene usata per simulare la presenza e l'effetto di pali, muri e barriere che intercettano parzialmente o totalmente il flusso orizzontale della falda. Esse sono definite da una caratteristica idraulica calcolata come rapporto tra la conducibilità idraulica del materiale per lo sviluppo verticale della barriera stessa.

Le condizioni iniziali analiticamente servono per risolvere i problemi in transitorio, ma vanno assegnate anche nelle simulazioni stazionarie, perché Modflow risolve il sistema iterativamente a partire da una soluzione iniziale. Continua a iterare fino a quando non si ottiene la precisione richiesta dall'utente.

L'interfaccia grafica con la quale è stato allestito il modello è Il GMS 6.0 "Groundwater Modeling System", sviluppato dall'Environmental Modeling Research Laboratory della Brigham Young University, in collaborazione con l'U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station. GMS comprende una serie di codici di calcolo (MODFLOW, MODPATH, FEMWATER, MT3DMS, RT3D, SEAM3D, SEEP2D, NUFT, UTCHEM).

L'interfaccia è divisa in dieci moduli, uno per ogni tipo di dato supportato:

- **Tin** (superfici)
- **Boreholes** (sondaggi)
- **Solids** (solidi)
- **2D Mesh** (maglie irregolari bidimensionali)
- **3D Mesh** (maglie irregolari tridimensionali)
- **2D Grid** (maglie regolari bidimensionali)
- **3D Grid** (maglie regolari tridimensionali)
- **2D Scatter point** (punti caratterizzati da coordinate x, y e da un'informazione aggiuntiva)
- **3D Scatter point** (punti caratterizzati da coordinate x, y, z e da un'informazione aggiuntiva)
- **Map** (immagini CAD, immagini raster, oggetti GIS, come punti, linee, poligoni)

Ad ogni modulo corrisponde una serie di strumenti e di menu, adatti a gestire ed elaborare quel tipo di dato.

GMS permette, attraverso i suoi moduli, di inserire le stratigrafie ottenute da sondaggi effettuati in sito, elaborarle e ottenere una griglia tridimensionale, sia con maglie regolari che irregolari. Permette inoltre di introdurre mappe per avere una visione più chiara dell'area investigata, ed è possibile assegnare ad ogni cella caratteristiche differenti, per avere la massima fedeltà nella modellazione del sito.

GMS permette infine di visualizzare la soluzione calcolata dai vari codici; nel caso di MODFLOW, ad esempio è possibile analizzare i carichi, o gli abbassamenti rispetto le condizioni iniziali (drawdown), o i flussi per ogni cella. Per visualizzare graficamente il risultato della simulazione, la scelta di default è il tracciamento delle curve di livello dei carichi. Per le simulazioni in transitorio è possibile scegliere gli istanti di calcolo di cui si vuole visualizzare la soluzione e costruire un filmato.

5.2 Implementazione del modello di flusso

Per studiare le interazioni tra la falda e le opere in progetto si è implementato un modello tridimensionale dettagliato idoneo a rappresentare con un buon livello di approssimazione la situazione reale dell'acquifero e degli schemi di circolazione idrica sotterranea. Per modello dettagliato si intende un modello con caratteristiche geometriche il più possibile precise sia per quanto riguarda l'estensione planimetrica che la struttura idrogeologica. Assegnando ai diversi complessi geologici i valori di permeabilità che li caratterizzano ed inserendo opportunamente nel modello i dati piezometrici disponibili si è ricostruito l'andamento della superficie freatica in modo affidabile.

L'area modellata ha un'estensione molto superiore, rispetto all'ingombro della galleria artificiale e del tratto previsto in trincea, al fine di valutare ed interpretare correttamente i risultati delle diverse simulazioni. Il modello si estende per circa 1,9 km in direzione est-ovest e per circa 1,6 km in direzione nord-sud. Non essendo possibile assumere come contorni del modello limiti a potenziale controllato, in quanto i corsi d'acqua presenti nell'area risultano vicini alle opere in progetto, i limiti nord-sud ed est-ovest sono stati tracciati sulla base dell'andamento delle linee piezometriche desunte dalle informazioni della Provincia di Milano e dalla tavola allegata allo studio "*Indagini geologico tecniche di supporto alla pianificazione comunale ai sensi della L. R. 41/97 e della D.G.R. 7/6645/01 - Comune di Bollate - ottobre 2003*".

Per quanto riguarda la discretizzazione sul piano orizzontale si è scelto di utilizzare una griglia che permettesse di descrivere con precisione la zona interessata dagli interventi

senza appesantire il calcolo. Si è utilizzata una griglia a maglia costante con dimensioni delle celle di 10x10 m e per un totale di circa 40.000 celle.

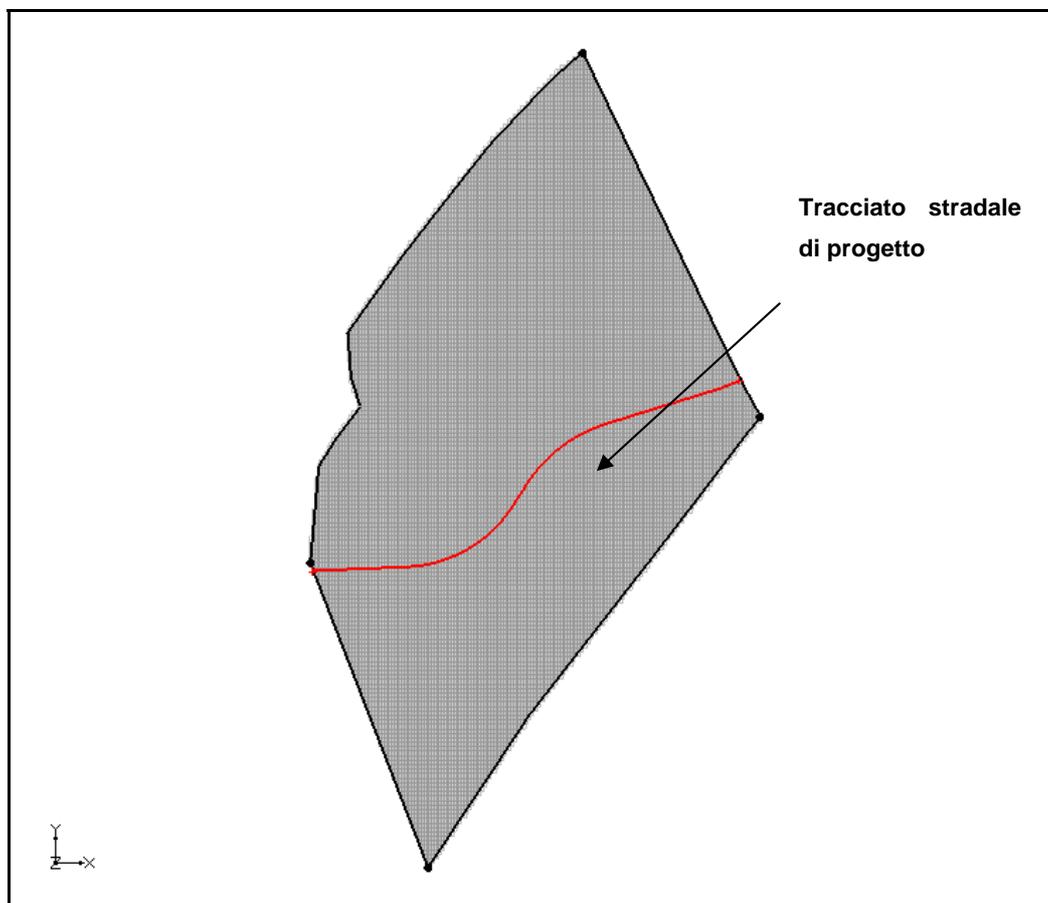


Figura 5-1: Discretizzazione orizzontale del dominio di calcolo

L'estensione verticale del modello è stata fissata col criterio di contenere solamente l'acquifero freatico essendo esso l'unico ad interferire con le opere in progetto. L'unità idrogeologica dell'area di interesse appartiene alla *litozona ghiaioso-sabbiosa* descritta nel paragrafo precedente, ed è costituita in prevalenza da depositi sciolti rappresentati per lo più da ghiaie e sabbie. Per semplicità la griglia è stata suddivisa in un unico "layer" in quanto l'acquifero di interesse è costituito essenzialmente dalla suddetta unità. La base impermeabile è stata supposta piana ad una quota di 109 m s.l.m. (a circa 40 - 50 metri rispetto al piano campagna).

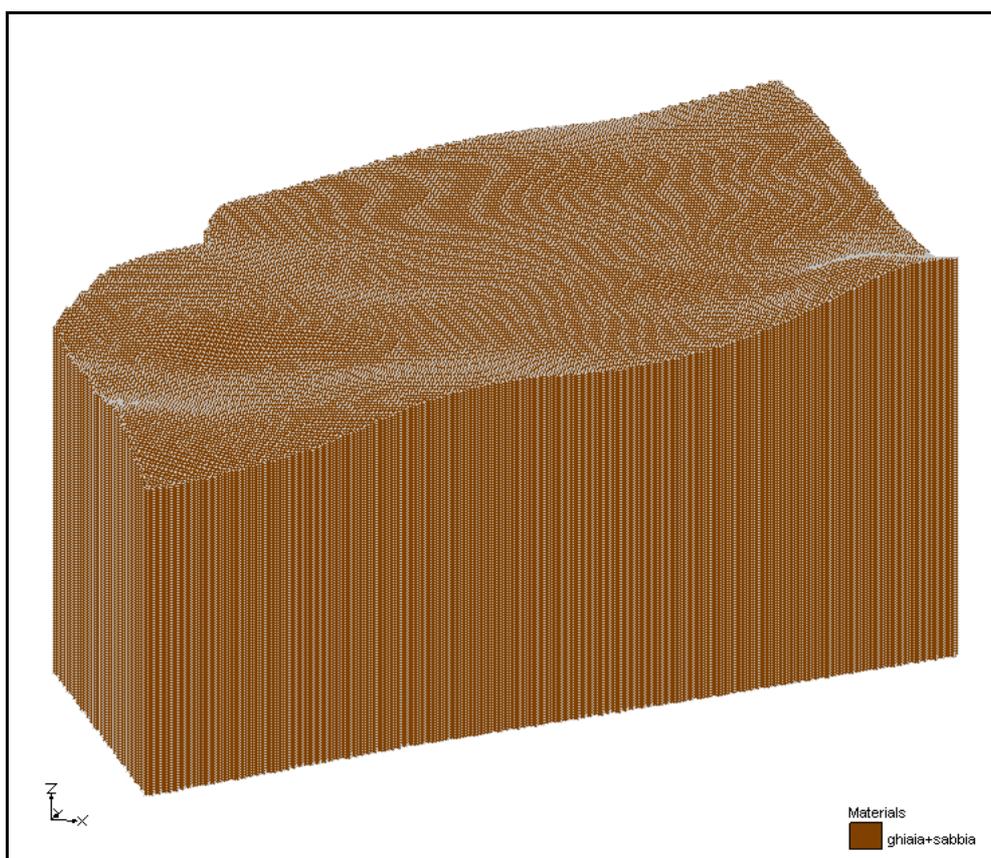


Figura 5-2: Andamento stratigrafico delle unità idrogeologiche presenti nell'area di studio riprodotte nel modello

Al modello tridimensionale così costruito è stato assegnato un valore di permeabilità pari a $1,00 \times 10^{-4}$ m/s in base alle seguenti considerazioni. Le prove di permeabilità di tipo Lefranc effettuate su tre piezometri interni all'area modellata, hanno fornito valori estremamente bassi, variabili tra $1,00 \times 10^{-6}$ m/s e $1,00 \times 10^{-7}$ m/s. Poiché però dalla caratterizzazione idrogeologica dell'acquifero risulta che i terreni hanno matrice mediamente più grossolana (sabbie e ghiaie) si è ritenuto maggiormente corretto e più cautelativo adottare i valori di permeabilità tipici di questi substrati ritenendo che i risultati delle prove effettuate potessero avere interessato zone di limitata estensione a minor permeabilità e quindi non rappresentative dell'intero acquifero.

Le condizioni al contorno assunte per l'implementazione del modello sono del tipo "constant head" (carico idraulico specifico). Lungo i contorni nord ed sud del modello (vedi figura seguente), posti ad una distanza adeguata dall'asse della galleria, si sono assegnate delle condizioni al contorno di tipo constant head le quali impongono alla falda freatica un flusso continuo in direzione prevalente NW-SE (così come indicato nell'andamento generale delle linee piezometriche).

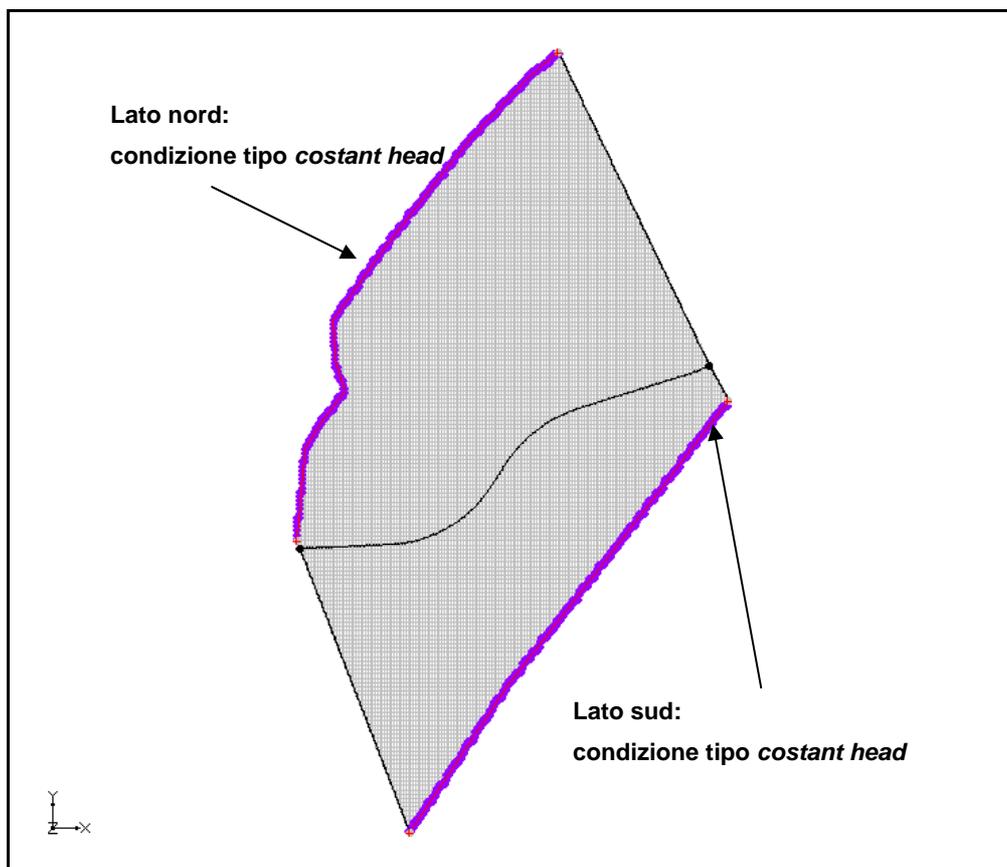


Figura 5-3: Condizioni al contorno utilizzate nel modello

Ultimata la fase di implementazione del modello si è proceduto alla calibrazione del modello mediante la riproduzione dello stato di fatto ossia alla ricostruzione della piezometria attuale sulla base delle ultime letture piezometriche effettuate (Maggio 2013). Fissate quindi le condizioni al contorno, così come descritto nel paragrafo precedente, si è assegnata una condizione iniziale da cui far partire la simulazione. Sulla base delle condizioni al contorno il modello risolve iterativamente l'equazione di diffusività e calcola il valore del carico idraulico all'interno di ogni singola cella convergendo alla soluzione finale attraverso ripetute iterazioni. Nelle figura seguente viene riportato l'andamento delle isofreatiche calcolate con il modello.



Figura 5-4: Andamento delle isofreatiche nello stato attuale (piezometria Maggio 2013)

I risultati della simulazione effettuata evidenziano l'esistenza di una direzione preferenziale del flusso sotterraneo lungo la direttrice nord-ovest sud-est con un gradiente di circa il 5,6% così come confermato negli elaborati idrogeologici e geologici di progetto. Per la calibrazione del modello si sono confrontati i valori calcolati con la quota di falda (Maggio 2013) in corrispondenza dei piezometri di riferimento. Nella tabella seguente si riporta il confronto tra il valore calcolato e quello misurato in corrispondenza di alcuni punti di interesse.

<i>Piezometro</i>	<i>Piano Campagna (m s.l.m.)</i>	<i>Livello misurato Maggio 2013 (m s.l.m.)</i>	<i>Livello calcolato (m s.l.m.)</i>
RM8 (Pudiga)	147.20	136.49	136.30
RM10 (Guisa)	144.70	137.53	137.55

La differenza tra la misura piezometrica ed il valore del carico calcolato con il modello è praticamente coincidente, pertanto si ritiene che il modello così implementato riproduca adeguatamente la realtà fisica.

6. DEFINIZIONE DELLA NUOVA FALDA DI PROGETTO

Alla luce di quanto esposto nel capitolo 4 per la definizione del nuovo livello piezometrico di progetto si è inevitabilmente dovuto tenere conto dell'evoluzione della falda negli ultimi anni e considerare dei franchi di sicurezza adeguati rispetto al livello massimo riscontrato nel periodo di osservazione (livello di Maggio 2011).

<i>Piezometro</i>	<i>Piano Campagna (m s.l.m.)</i>	<i>Livello Maggio 2011 (m s.l.m.)</i>
RM8 (Pudiga)	147.20	137.09
RM10 (Guisa)	144.70	138.69

Il livello misurato nel Maggio 2011 è stato quindi preso a riferimento per la definizione della nuova falda di progetto opportunamente incrementata con franchi di sicurezza differenti a seconda che si consideri il breve termine (fase di costruzione) o il lungo termine (fase di esercizio).

6.1 Livello piezometrico di progetto della falda a breve termine (fase di costruzione)

Per stabilire il franco di sicurezza da considerare per la definizione della falda di progetto a breve termine (fase di cantiere) si è considerato come fattore determinante la durata del cantiere. Si è quindi assunta come durata massima delle operazioni di scavo, ovvero di tutte quelle operazioni potenzialmente interferenti con l'acquifero freatico, la durata di 1 anno. Sulla base di queste considerazioni è stato quindi definito il livello piezometrico di progetto a breve termine, relativo alla fase di scavo per la costruzione delle opere, come quello **corrispondente al livello di Maggio 2011 incrementato con un franco di 1 metro**, ovvero incrementato della massima escursione avvenuta nell'ultimo anno (Maggio 2012 – Maggio 2013). Si considera quindi un franco di circa 2 metri rispetto all'ultima misura registrata.

<i>Piezometro</i>	<i>Piano Campagna (m s.l.m.)</i>	<i>Livello Maggio 2011 (m s.l.m.)</i>	<i>Livello Maggio 2011 + 1 m (m s.l.m.)</i>	<i>Livello Maggio 2013 (m s.l.m.)</i>
RM8 (Pudiga)	147.20	137.09	138.09	136.49
RM10 (Guisa)	144.70	138.69	139.69	137.53

Mediante il modello matematico descritto nel capitolo precedente è stata quindi ricostruita la piezometria di progetto a breve termine. Il risultato ottenuto è riportato nella figura seguente.



Figura 6-1: Andamento della falda di progetto a breve termine ricostruita con il modello

Per valutare l'attendibilità del modello si sono confrontati i valori calcolati con i livelli falda relativi a Maggio 2011 incrementati di 1 metro (falda 2011 + 1 m). Nella tabella seguente si riporta il confronto tra il valore calcolato e quello misurato in corrispondenza dei piezometri di riferimento RM8 e RM10.

<i>Piezometro</i>	<i>Livello 2011 + 1 m (m s.l.m.)</i>	<i>Livello calcolato con il modello (m s.l.m.)</i>
RM8 (Pudiga)	138.09	138.20
RM10 (Guisa)	139.69	139.59

Come si osserva la differenza tra la misura piezometrica ed il valore del carico calcolato con il modello è dell'ordine dei 10 centimetri, pertanto del tutto tollerabile nelle valutazioni delle grandezze di interesse per la verifica del progetto in esame. Si ritiene pertanto che il risultato della simulazione sia soddisfacente e quindi che il modello così implementato riproduca adeguatamente la falda di progetto a breve termine.

6.2 Livello piezometrico di progetto della falda a lungo termine (fase di esercizio)

Dato il più volte ribadito trend di crescita molto rapido della falda nell'area in oggetto (6 metri in circa tre anni) che ha raggiunto nel Maggio 2011 una soggiacenza minima (piezometro RM10) mai raggiunta negli ultimi 50 anni, per la definizione della falda di progetto a lungo termine vi è stata la necessità di assumere un adeguato franco di sicurezza rispetto alla piezometria di riferimento del 2011. Per valutare tale franco si è tenuto conto soprattutto della tipologia di infrastruttura che si andrà a realizzare, della vita attesa dell'opera (minimo 50 anni) e del livello di sicurezza che sarà necessario garantire ad un'opera viabilistica di quest'importanza. Infine è noto che futuri sviluppi urbanistici dell'area, evidentemente non prevedibili al momento, potrebbero alterare ulteriormente l'attuale andamento della falda creando altri innalzamenti della superficie freatica. Tale evenienza non è da escludere, ma tale innalzamento non è in alcun modo quantificabile e pertanto l'unico modo per tenerne conto è considerare un franco di sicurezza cautelativo sulla quota di falda di riferimento (Maggio 2011).

Alla luce di queste considerazioni si è ritenuto cautelativo definire come livello piezometrico di progetto a lungo termine per le verifiche strutturali, geotecniche e idrogeologiche in fase di esercizio dell'opera, **quello corrispondente al massimo misurato nel periodo di osservazione (Maggio 2011) incrementato con un franco di 3 metri**, pari circa alla massima escursione verificatasi dal 2011 ad oggi.

<i>Piezometro</i>	<i>Piano Campagna (m s.l.m.)</i>	<i>Livello Maggio 2011 (m s.l.m.)</i>	<i>Livello Maggio 2011 + 3 m (m s.l.m.)</i>
RM8 (Pudiga)	147.20	137.09	140.09
RM10 (Guisa)	144.70	138.69	141.69

Analogamente a quanto fatto per la falda di progetto a breve termine, mediante il modello di flusso è stato ricostruito l'andamento della falda di progetto a lungo termine. Il risultato è rappresentato nella figura seguente.

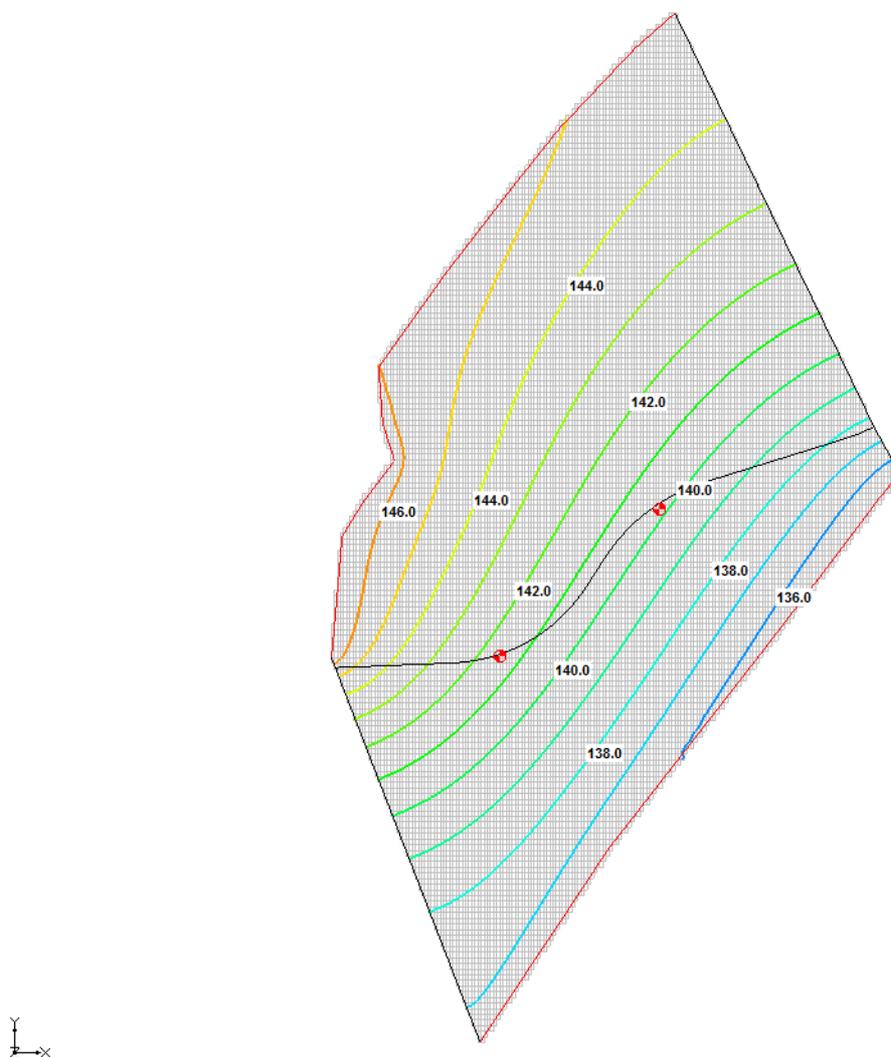


Figura 6-2: Andamento della falda di progetto a lungo termine ricostruita con il modello

Nella tabella seguente si riporta il confronto tra il valore calcolato e quello misurato in corrispondenza dei piezometri di riferimento RM8 e M10.

<i>Piezometro</i>	<i>Livello Maggio 2011 + 3 m (m s.l.m.)</i>	<i>Livello calcolato con il modello (m s.l.m.)</i>
RM8 (Pudiga)	140.09	140.17
RM10 (Guisa)	141.69	141.64

La differenza tra la misura piezometrica ed il valore del carico calcolato con il modello è dell'ordine di pochi centimetri, pertanto del tutto tollerabile.

7. VALUTAZIONE DELLE INTERFERENZE A BREVE E LUNGO TERMINE CON LE DIRETTIRICI DEL DEFLUSSO SOTTERRANEO

7.1 Interferenze a breve termine (fase di costruzione) e valutazione delle portate drenate durante le operazioni di scavo

La costruzione della galleria artificiale “Baranzate” e la realizzazione del tratto in trincea richiedono l’apertura di scavi che potrebbero interferire con l’acquifero freatico oggetto di studio. Si è pertanto utilizzato il modello matematico per valutare la possibile interferenza e per calcolare l’entità delle portate da allontanare durante la cantierizzazione dell’opera. Per simulare l’effetto di uno scavo all’interno del modello si è utilizzato il pacchetto “*Dreni (Drain Package)*” del codice MODFLOW. Tale pacchetto simula la presenza di un dispositivo drenante che asporta acqua dal modello quando il carico idraulico è maggiore della quota di fondo del dreno. La portata drenata dipende quindi dalla differenza di carico e dalla conducibilità idraulica del dreno. Per quanto riguarda la quota di fondo scavo si è ipotizzato che sia di 2 metri inferiore della livelleta di progetto, ad eccezione del tratto compreso tra la progr. km 1+000,00 e la progr. km 1+280,00 dove la quota di fondo scavo è stata posta costante alla quota di 137,01 m s.l.m. ovvero pari alla quota di fondo della soletta della galleria artificiale. Per quanto riguarda invece la conducibilità del dreno si è assunta la stessa conducibilità dell’unità stratigrafica costituita da ghiaie e sabbie ($1,00 \times 10^{-4}$ m/s) essendo uno scavo libero interamente realizzato all’interno di essa.

La condizione iniziale è rappresentata dalla piezometria di progetto a breve termine (falda 2011 + 1 metro) riportata nella Figura 6-1. Il livello di progetto a breve termine è quasi sempre al di sotto della quota di fondo scavo, ad eccezione del tratto compreso tra la progr. km 1+000,00 e la progr. km 1+280,00 dove il tirante risulta di circa 1,60. La portata da drenare in queste condizioni è di circa 10,0 l/s su un fronte di 280 metri. In termini di variazioni della piezometria locale gli abbassamenti risultano di circa 30 centimetri in corrispondenza del sondaggio RM10 e di circa 1,10 metri nel punto di maggior approfondimento di scavo, così come mostrato nella figura seguente.

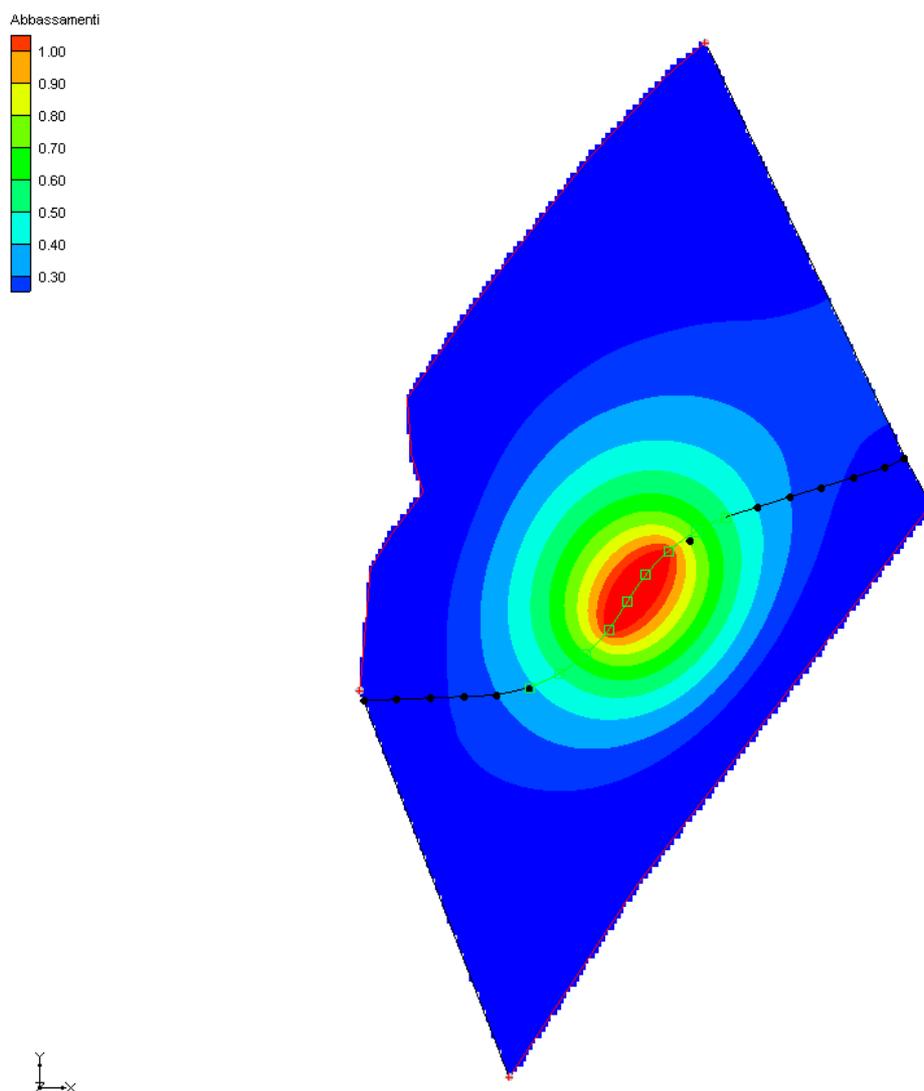


Figura 7-1: Abbassamenti massimi della falda freatica indotti durante la fase di scavo (in verde il tratto interessato dagli scavi)

7.2 Interferenze a lungo termine (fase di esercizio) e valutazione degli innalzamenti della piezometria locale

Dopo aver valutato le interferenze in fase di costruzione si è reso necessario studiare gli effetti a regime delle nuove opere in progetto. Attraverso la modellazione sono state quindi individuate e quantificate le variazioni locali dei livelli piezometrici determinati dalla presenza della nuova galleria artificiale e dal tratto di viabilità in trincea, realizzato con guscio ad U in calcestruzzo e quindi impermeabile.

Per riprodurre all'interno del modello la presenza della galleria e del tratto in trincea impermeabile si è utilizzato il pacchetto "Barrier (HFB Package)" del codice MODFLOW.

L'ingombro planimetrico della barriera viene inserito in modo diretto nella griglia di calcolo disegnando degli archi lungo il contorno dell'ostacolo; tali archi indicano le celle in cui è localizzata la barriera. La barriera viene caratterizzata dal punto di vista idraulico attraverso l'attribuzione di un parametro dato dal rapporto tra la conducibilità idraulica del materiale e l'estensione verticale della barriera. Si è considerato che la galleria di Baranzate ed il tratto in trincea in c.a. abbiano un'estensione verticale che va dal piano campagna a 2 metri sotto il piano viabile. Assumendo per il calcestruzzo un valore medio della permeabilità pari a 1×10^{-9} m/s la caratteristica idraulica della barriera (conducibilità/spessore) risulta pari a $1,10 \times 10^{-10}$ m/s x m.

Come piezometria di riferimento per la valutazione delle interferenze si è assunta la condizione iniziale rappresentata dalla piezometria di progetto a lungo termine (falda 2011 + 3 metri) riportata nella Figura 6-2.

I risultati della simulazione (vedi figura seguente) mettono in evidenza uno spostamento localizzato delle curve isofreatiche a ridosso della nuova galleria artificiale con innalzamenti massimi della superficie piezometrica pari a circa 90-100 cm in corrispondenza del punto di massimo approfondimento, pertanto anche le interazioni a lungo termine sono tali da non alterare significativamente l'idrogeologia locale lasciando quindi inalterato il bilancio idrico complessivo. Tale modesta interferenza risulta dal fatto che le opere di fondazione profonda causano solo un parziale ostacolo al deflusso sotterraneo in quanto esse occupano solo in parte il substrato saturo e non invece l'intero spessore dell'acquifero, lasciando in tal modo la possibilità all'acqua di circolare al di sotto di esse.

Le variazioni della falda in corrispondenza dei piezometri di riferimento sono riportati nella tabella seguente.

Piezometro	Piano Campagna (m s.l.m.)	Livello falda indisturbato (m s.l.m.)	Livello falda con infrastruttura (m s.l.m.)	Innalzamento (m)
RM8 (Pudiga)	147.20	140.17	141.00	+ 0.83
RM10 (Guisa)	144.70	141.64	141.73	+ 0.09

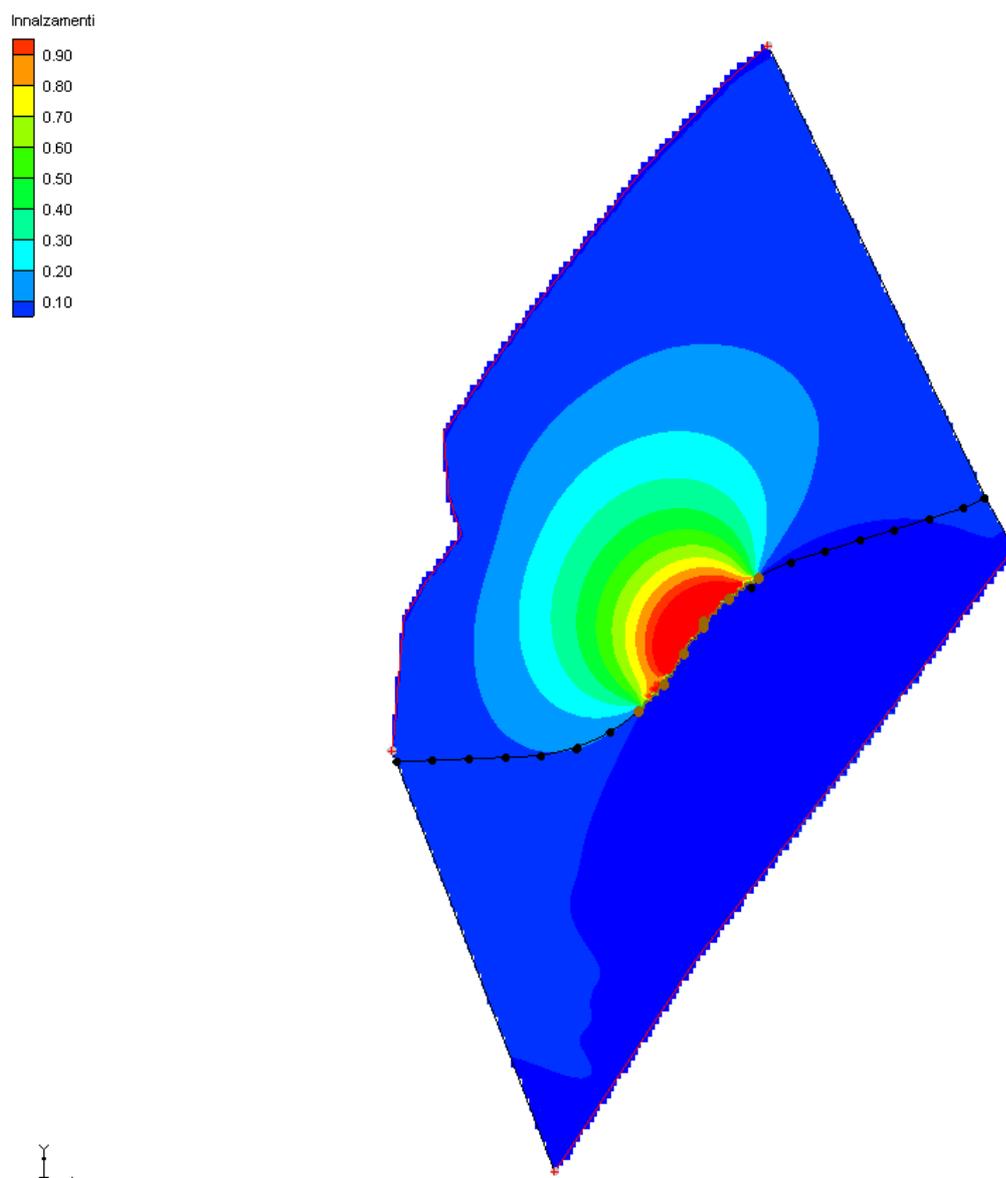


Figura 7-2: Innalzamenti massimi della falda freatica seguito della realizzazione delle opere