

MODELLISTICA IDROGEOLOGICA A SUPPORTO DI OPERE INGEGNERISTICHE IN FALDA

HYDROGEOLOGICAL MODELING IN GROUNDWATER ENGINEERING STRUCTURES

TULLIA BONOMI(*), ARIANNA BRAMBILLA(*), DAVIDE GASPERETTI(**), & ALESSANDRO MODONESI(***)

(*) Dipartimento di Scienze dell'Ambiente, Università Milano Bicocca, Piazza Scienza 1, I - 20126 Milano (Italy), tel. (0039) 02 64482862 e-mail: tullia.bonomi@unimib.it

(**) Studio Geologia Ambiente Brescia - Via T. Olivelli 5 - 25123 Brescia (Italy)

(***) Azienda Servizi Municipalizzati Brescia, Aprica Studi - 25100 Brescia (Italy)

RIASSUNTO

Oggetto di studio è la realizzazione di una vasca di equalizzazione e omogeneizzazione nell'area adiacente l'impianto di depurazione di Verziano (BS) realizzata completamente nella falda libera presente. Questo fatto ha generato problematiche nella progettazione, nell'esecuzione dei lavori e nei costi realizzativi dell'opera. E' stato elaborato un modello di flusso che considera i diversi interventi previsti per ottenere l'abbattimento della falda (paratie, wellpoint e dreni), necessari per la realizzazione della vasca interrata, tramite il codice MODFLOW, in regime stazionario. L'area modellizzata è pari a 18492 m² ed è stata discretizzata con una griglia disomogenea di 96 righe e 247 colonne. La dimensione verticale è stata suddivisa in 44 strati.

Sono state elaborate un certo numero di simulazioni, cercando di ricreare la reale sequenza di interventi effettuati e dalle diverse simulazioni si è cercato di dedurre alcuni elementi significativi.

Dai risultati delle simulazioni con le paratie è emerso che la costruzione dei diaframmi permette di deviare il moto della falda sotto i pannelli, in modo influenzato dal tipo di granulometria presente.

Dalle simulazioni con i wellpoint è emerso che l'eccessiva vicinanza di due micropozzi può rendere il sistema inefficiente in quanto i due coni di influenza interferiscono tra loro.

Gli interventi considerati provocano una variazione del livello della falda localizzato alla sola zona della vasca e non arrivano ad interessare elementi idrogeologici (fontanili) presenti nelle vicinanze.

TERMINI CHIAVE: modello idrogeologico tridimensionale, wellpoint, paratie, simulazioni

INTRODUZIONE

Nella realizzazione di molte opere, spesso si unisce la fase progettuale vera e propria con quella operativa ricavata dai lavori in corso d'opera. In questo lavoro si è cercato di valutare se uno studio modellistico possa migliorare la fase progettuale ed essere d'aiuto nella sua fase realizzativa. Sono stati considerati i diversi interventi previsti per la costruzione di una vasca di equalizzazione e omogeneizzazione nei pressi dell'impianto di depurazione di Verziano (Brescia), valutandone la loro reciproca interazione e differente risposta con diverse impostazioni progettuali.

ABSTRACT

The aim of this study is to create an equalization and homogenization tank in an area adjacent to the depuration plant of Verziano (Brescia Province, Italy), using existing unconfined groundwater. This has caused problems in both planning and implementation of this project and has also affected costs. A flow model was elaborated by means of MODFLOW software in the steady-state mode, which considered the various interventions to be undertaken in order to lower the water table (bulkheads, wellpoints and drains) and create the underground tank. The modeled area is 18,492 m² and was discretized with a dishomogeneous grid consisting of 96 lines and 247 columns. The vertical dimension was sub-divided into 44 layers.

A number of simulations were elaborated in an attempt to recreate the real sequence of the interventions undertaken and some significant elements have been. From the simulation results using bulkheads, it was shown that the construction of diaphragms allows the flow of groundwater to be diverted under the panels, according to grain-size distribution. From the wellpoint simulations it was shown that when two microwells are placed too close together, the system becomes inefficient as there is interference between the two cones. The interventions considered cause a variation of groundwater localized only in the area of the tank, without exerting any influence on hydrogeologic features (springs) present in the surrounding area.

KEY WORDS: three-dimensional hydrogeologic model, wellpoint, bulkhead, simulation

INTRODUCTION

When engineering works are being carried out, the planning phase often merges with the implementation phase as a result of the works in progress. This research tries to assess the contribution of a modeling study to the improvement of planning and construction phases of hydraulic works. Various interventions planned for the construction of an equalization and homogenization tank near the depuration plant of Verziano (Brescia Province, northern Italy) have been studied, and their reciprocal interaction and different responses to various planning approaches has also been assessed (ASM BRESCIA,

Il lavoro è stato svolto in due fasi: è stata seguita l'esecuzione dei lavori, direttamente in cantiere e in seguito, le informazioni raccolte relative all'opera, agli interventi per l'abbattimento della falda e alla falda stessa sono state elaborate per l'applicazione di un modello di flusso tridimensionale.

INQUADRAMENTO GEOLOGICO-IDROGEOLOGICO

L'area in esame è situata nella zona di transizione tra la media e l'alta pianura bresciana, in prossimità della fascia settentrionale delle risorgive. A sud di Verziano, infatti, sono presenti diversi fontanili (BONOMI & VERRO, 1998; BONOMI *et alii*, 1997; BONOMI *et alii*, 1999; DENTI *et alii*, 1998). L'impianto di depurazione di Verziano è caratterizzato dai depositi fluviali del Fiume Mella (Olocene) costituiti prevalentemente da sabbie e ghiaie limose contenenti lenti sabbioso-limose o limoso-argillose.

Dai risultati di una indagine geologica, idrogeologica e geotecnica di dettaglio, eseguita in un'area adiacente all'impianto di depurazione di Verziano, si evidenzia la presenza di ghiaie sabbiose alternate a sabbie ghiaiose più o meno limose e di livelli di spessore decimetrico di limi argillosi. Questa indagine è stata caratterizzata dall'esecuzione d'indagini geognostiche in sito per mezzo di 5 sondaggi a carotaggio continuo spinti a diverse profondità (fino a 25 m) a partire dalla quota di piano campagna. I risultati di tali studi si possono vedere nella sezione litostratigrafica e idrogeologica in figura.2 (GASPARETTI, 2004).

L'area dell'intervento è caratterizzata quindi dalla presenza di una falda freatica superficiale, di conseguenza la vasca è stata realizzata completamente in falda. Questo fatto ha generato problematiche

1995; ASM BRESCIA, 2000).

The study was carried out in two phases: at first the implementation of the works was followed directly on the construction site, subsequently, all data collected concerning construction, measures for lowering the water table and groundwater conditions were elaborated and inserted in a three-dimensional flow model.

GEOLOGIC-HYDROGEOLOGIC SETTING

The study area is situated in the transition zone between the mid- and high plain of the Brescia Province, in proximity of the northern belt of water springs. Various water emergences are, in fact, found south of Verziano (BONOMI & VERRO, 1998; BONOMI *et alii*, 1997; BONOMI *et alii*, 1999; DENTI *et alii*, 1998). The Verziano depuration plant is characterized by the fluvial deposits of the Mella River (Holocene), mainly made up of sand and silty gravel, with sandy-silty or silty-clayey lenses.

Detailed geologic, hydrogeologic and geotechnical investigations - carried out in an area adjacent to the Verziano depuration plant - have shown the presence of sandy gravel alternating with gravelly, fairly silty sand and with a level of clayey silt 10 cm thick. In particular, five continuous-coring bore holes were made at different depths (up to 25 m). The results of these subsurface investigations are shown in the stratigraphic and hydrogeologic section of Fig. 1 (GASPARETTI, 2004).

The intervention area is characterized by the presence of a surficial saturated aquifer. As a consequence, the tank is completely surrounded by unconfined groundwater. This was a problem in the planning and implementation of interventions, resulting from both the

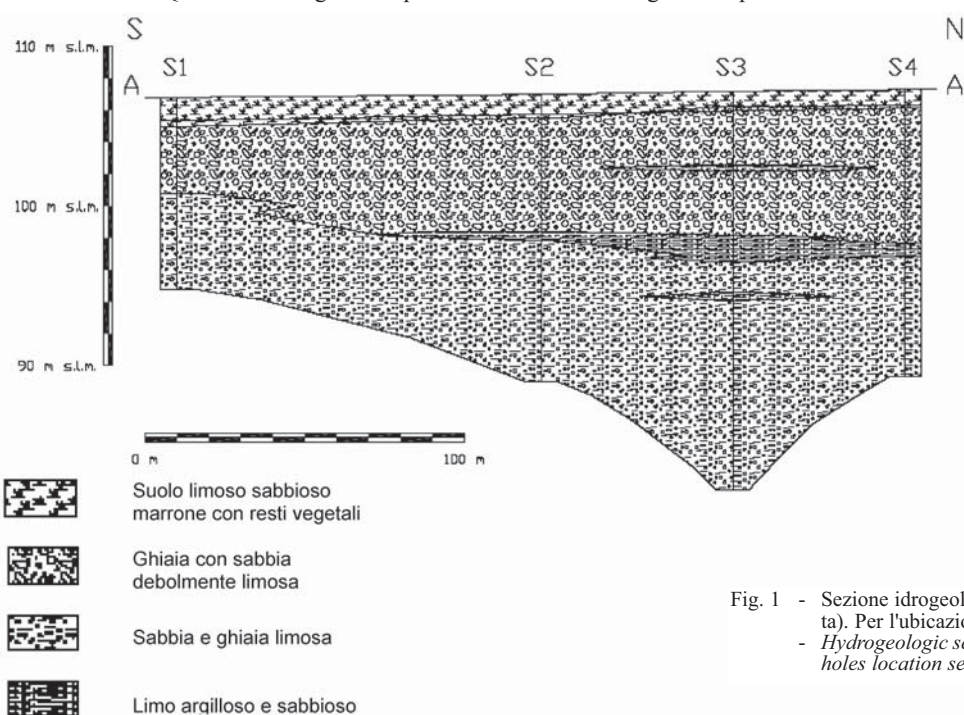


Fig. 1 - Sezione idrogeologica (GASPARETTI, 2004, modificata). Per l'ubicazione dei sondaggi vedi Figura 7 - Hydrogeologic section [after GASPARETTI, 2004]. Bore holes location see figure 7

Fig. 2 - Dimensioni della vasca. Per i valori di profondità, vedi Fig. 3 [ASM, 2000, modificata]
 - Dimensions of the tank. As for depth values, see Fig. 3 [modified after ASM, 2000]

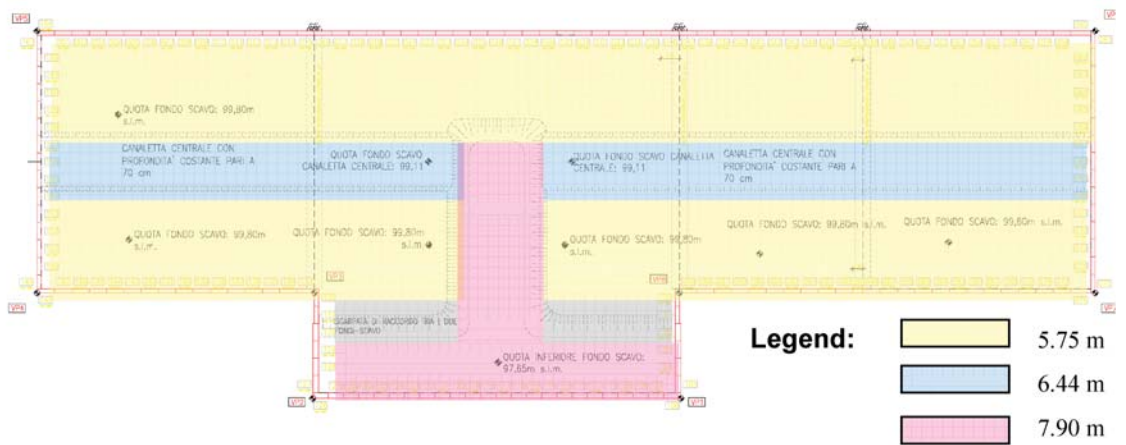
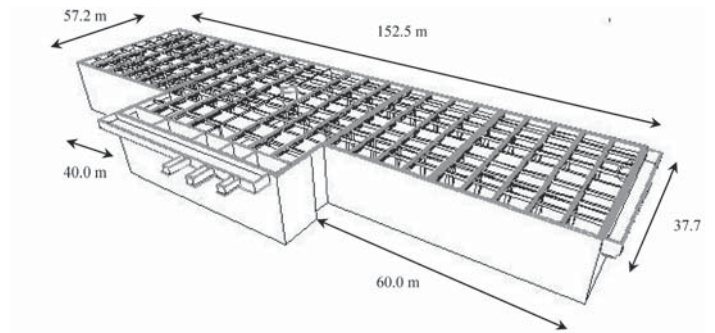


Fig. 3 - Visione in pianta della vasca. La legenda mostra i tre differenti valori di profondità della vasca [ASM, 2000, modificata]
 - Plan of the tank. Legend shows the three different values of depth according to color [modified after ASM, 2000]

nella progettazione e nell'esecuzione dei lavori, legate sia all'impermeabilizzazione che alla resistenza dell'opera nel tempo. Inoltre, la progettazione ha dovuto considerare l'elevato impatto che l'opera potrebbe generare sulla falda, dovendo contenere i liquami in ingresso all'impianto di depurazione.

DESCRIZIONE DEL PROGETTO

La vasca è stata costruita, come da progetto, a forma di "T", ha una lunghezza di 152,70 m e una larghezza di 37,70 m ma, nella zona più larga, essa diventa di 52,70 m. La profondità dell'opera non è uniforme in quanto il fondo della vasca è stato progettato "a gradoni", in modo da favorire il passaggio dei liquami dalla vasca all'impianto adiacente. Quindi, la profondità della vasca nelle tre aree è di: 5,75 m, 6,44 e 7,90 m (Figg. 2 e 3).

INTERVENTI PER L'ABBATTIMENTO DELLA FALDA

Sono stati utilizzati tre tipi di interventi per ottenere l'abbassamento della falda:

- la costruzione di paratie verticali in cemento impermeabili sul perimetro della vasca: permettono di abbassare la falda in corrispondenza della zona della vasca (Fig. 4). Lo spessore dei pannelli utilizzati è di 0,60 o di 0,80 m a seconda della zona ed ha una lunghezza rispettivamente di 14,40 m oppure di 15,80 m;

proofing and resistance of this hydraulic structure over time. In addition, planning had to consider the high impact that the tank might have on groundwater, since it will contain sewage water conveyed to the depuration plant.

DESCRIPTION OF THE PROJECT

This "T"-shaped tank is 152.70 m long and 37.70 m wide but is 52.70 m wide in its widest part. The depth of this hydraulic work is not uniform since the tank floor was planned at three different levels in order to favor the passage of sewage from the tank to the adjacent plant. Therefore, in the three areas the tank depth is: 5.75 m, 6.44 and 7.90 m, respectively (Figs. 2 and 3).

INTERVENTIONS FOR WATER TABLE LOWERING

Three types of interventions were carried out in order to lower the water table:

- construction of waterproof vertical concrete bulkheads along the tank perimeter: they allow the water table to be lowered in correspondence with the tank area (Fig. 4). The panels used are 0.60 or 0.80 m thick, according to their positioning, and 14.40 or 15.80 m long, respectively;



Fig. 4 - Dettaglio di alcune sezioni durante la costruzione delle paratie laterali (Verziano, giugno 2004)
 - Details of some sections during the construction of bulkheads (Verziano, June 2004)

- l'installazione di un impianto wellpoint: permette di ottenere l'abbassamento e il controllo del livello di falda nei terreni sciolti (limi, sabbie, ghiaie fini) (Fig. 5). L'impianto è costituito da una serie di micropozzi (nel caso in studio, di diametro 1"½) e lunghezza adeguata alle specifiche esigenze, connessi ad una pompa centrifuga autoadescante mediante una serie di collettori, raccordi e giunti di collegamento. La pompa permette di accelerare e deviare il flusso di falda. Ogni singolo wellpoint è costituito da una tubazione chiusa, alla cui estremità inferiore è posizionato un filtro attraverso il quale avviene l'emungimento dell'acqua dal terreno;
- la posa di dreni: per bilanciare la spinta idrostatica generata dalla falda sulla vasca stessa (Fig. 6). I dreni sono rimasti attivi solo nella fase di cantiere: infatti, in fase di funzionamento dell'impianto, il peso della vasca piena è sufficiente per rendere il sistema in equilibrio. Gli impianti wellpoint non sono interventi destinati a rimanere permanenti nel tempo, ma sono stati utili solo nelle fasi di costruzione dell'opera, mentre i dreni potrebbero anche rimanere fissi e funzionanti sotto l'opera.

- installation of a wellpoint plant which permits the lowering of the water table and the monitoring of the piezometric levels in cohesionless soils (silt, sand, fine gravel) (Fig. 5). This plant is made up of a series of microwells (in this case with a 1.5" diameter) sufficiently long for the applications required. They are connected to a self-priming centrifugal pump by means of headers, turnouts and push nipples. The pump can accelerate or divert the groundwater flow. Each wellpoint consists of a sealed pipe with a filter positioned at its lower end through which groundwater is drawn up;
- laying of drains (Fig. 6): their function is to counterbalance the pressure exerted by groundwater on the tank. Drains were kept active only during the construction phase. Indeed, during the plant running phase, the weight of the tank full of water is sufficient to keep the system balanced. These wellpoint plants were not meant to be permanent structures but were useful only during construction, whereas drains could remain fixed and active even below the work constructed.



Fig. 5 - Esempio di installazione di una serie di well point; sullo sfondo sono visibile le paratie in calcestruzzo (Verziano, agosto 2004)
 - Example of a series of wellpoints installed; in the background, concrete bulkheads are located (Verziano, August 2004)



Fig. 6 - Costruzione del pavimento della vasca, dopo l'installazione dei dreni (Verziano, settembre 2004)
 - Construction of the tank floor after drain installation (Verziano, September, 2004)

APPLICAZIONE DEL MODELLO DI FLUSSO MODFLOW AL SITO DI INDAGINE

Per la valutazione di diversi scenari di intervento nella realizzazione della vasca, è stato applicato un modello di flusso tridimensionale. Tramite l'utilizzo del codice Modflow (McDONALD & HARBAUGH, 1988; HARBAUGH & McDONALD, 1996; ANDERSON & WOESSNER, 1992) si è realizzato un modello in regime stazionario. E' stato quindi necessario definire la caratterizzazione geologica e idrogeologica dell'area.

Per quanto riguarda la caratterizzazione geologica, si sono confrontate le stratigrafie ottenute da cinque sondaggi effettuati nell'area prima dell'inizio di lavori, con le stratigrafie rilevate durante i lavori di scavo, compilate dai tecnici durante la costruzione delle paratie (Tab. 1). Esse identificavano la presenza di uno strato più grossolano, in un acquifero prevalentemente costituito da sabbia con ghiaia. Le indagini arrivano però solamente a 14 m di profondità.

Per la ricostruzione della superficie piezometrica si è considerata quella elaborata a partire da dati del periodo da luglio 2001 a novembre 2001, antecedente l'inizio dei lavori (Fig. 7). Non è stato possibile utilizzare i dati acquisiti in campo in quanto anche le misure sono state effettuate a lavori già iniziati.

APPLICATION OF THE MODFLOW FLOW MODEL TO THE INVESTIGATION SITE

In order to assess various intervention scenarios for the construction of the tank, a three-dimensional flow model was applied. By using Modflow code (McDONALD & HARBAUGH, 1988; HARBAUGH & McDONALD, 1996; ANDERSON & WOESSNER, 1992) a steady-state model was developed. It was therefore necessary to define the geologic and hydrogeologic characteristics of the area.

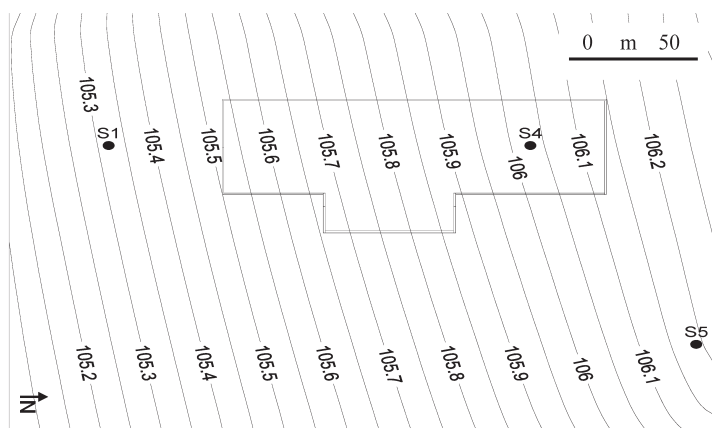
The stratigraphic cores obtained from the five bore holes carried out before work started, were compared with the stratigraphic data recorded during the excavation and construction of bulkheads (Tab. 1). The presence of a coarser layer in an aquifer mainly made up of sand and gravel was identified. Investigations, however, stopped at a depth of 14 m.

As for reconstructing the trend of the piezometric levels, data collected in the July-November 2001 period in the bore S1, S4 and S5 were considered, that is prior to the excavation works. It was not possible to make use of data acquired in the field after works had already begun.

| Quota da piano campagna (m) | Materiale | Quota da piano campagna (m) | Materiale | Quota da piano campagna (m) | Materiale |
|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| 0,00-0,50 | Terra | 0,00-0,50 | Terra | 0,00-0,50 | Terra |
| 0,50-8,00 | Sabbia e ghiaia | 0,50-8,50 | Ghiaia e sabbia | 0,50-4,50 | Ghiaia e sabbia |
| | | | | 4,50-5,30 | argilla |
| | | | | 5,30-8,00 | Ghiaia con sabbia |
| 8,00-9,00 | Argilla | 8,00-8,50 | Argilla | 8,00-8,50 | Argilla |
| 9,00-14,00 | Sabbia e ghiaia molto grande | 9,00-14,00 | Sabbia e ghiaia molto grande | 9,00-14,00 | Sabbia e ghiaia molto grande |
| 14,00-14,60 | Argilla | 14,00-14,60 | Argilla | 14,00-14,60 | Argilla |

Tab. 1 - Esempio della stratigrafia ricavata dalle perforazioni in campo dei diaframmi
 - Example of field stratigraphic data drawn up during excavations of bulkheads

Fig. 7 - Carta piezometrica (m s.l.m.) (ottobre 2001) ricostruita utilizzando i piezometrici S1, S4 and S5. Nella figura è riportato anche il profilo della vasca
 - Piezometric trend (m a.s.l.) (October 2001) reconstructed by means of S1, S4 and S5 piezometers. Also the tank profile is shown



La figura 7 mostra il livello piezometrico misurato nell'ottobre 2001 in m s.l.m. La soggiacenza è tra 1 e 2 m da piano campagna. I pochi dati sono stati interpolati usando il metodo Kriging con una griglia alle differenze finite. La direzione di flusso concorda con gli studi a carattere generale presenti nell'area: il flusso è da N-NW verso S-SE. Le quote della tavola d'acqua variano da 105 m s.l.m. a 106.6 m s.l.m. In figura 7 è anche indicato il profilo della vasca.

CONCETTI SINTETICI DEL MODELLO DI FLUSSO UTILIZZATO

Il modello matematico è uno strumento che rappresenta una approssimazione di una situazione reale. Il modello simula i processi principali che caratterizzano il sito di interesse, flusso della falda e trasporto dei soluti, impiegando dati derivanti dal monitoraggio e dalle analisi di laboratorio. Questi dati vengono utilizzati nelle equazioni che regolano i processi fisici che accadono nel sistema e permettono quindi di simulare il flusso idrico in modo indiretto.

Considerando una cella infinitesima all'interno di un acquifero, nell'intervallo di tempo $t, t + \Delta t$, il flusso netto che entra nell'elemento di volume deve essere bilanciato da un corrispondente flusso in uscita o da un cambiamento di massa immagazzinato nel volume o nel tempo.

Il movimento delle acque sotterranee in un volume elementare di materiale omogeneo e isotropo può essere descritto dalla seguente equazione differenziale alle derivate parziali rispetto ad h :

$$k \left[\frac{\delta^2 h}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 h}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 h}{\delta z^2} \right] = (\alpha \rho_w g + n \beta \rho_w g) \frac{\delta h}{\delta t} \quad (1)$$

dove:

k = conducibilità idraulica;

h = valore di quota piezometrica;

t = tempo;

α = compressibilità dell'acquifero;

β = compressibilità dell'acqua;

n = porosità;

ρ_w = densità dell'acqua.

Quando si utilizza un approccio numerico per modellizzare un sistema, il dominio continuo del problema viene sostituito da un dominio discretizzato, rappresentato da un reticolo, la griglia, che suddivide lo spazio in celle (o maglie). In ogni cella è presente un punto, definito nodo, in corrispondenza del quale si calcolano i valori del carico idraulico o dell'incognita del problema.

Modflow ("A modular three-dimensional finite difference ground water flow model", MC DONALD & HARBAUGH, 1988) è un modello di flusso tridimensionale a differenze finite, sviluppato e utilizzato dal Servizio Geologico Americano (USGS).

Modflow consente di modellizzare uno o più acquiferi definendone la loro potenzialità per mezzo di uno spessore. Nella discretizzazione spaziale di un ipotetico sistema acquifero, le celle della griglia sono descritte attraverso il loro numero di riga (i), di colonna (j) e strato (k).

Per risolvere un'equazione differenziale lungo tre dimensioni, è

Figure 7 shows the piezometric level of October 2001 in m a.s.l.. The water depth is between 1 to 2 meters from the topographic surface. The few data have been interpolated using kriging method applied to a finite difference grid. The flux direction is according to general studies of the area: the flux comes from N-NW to S-SE. Water table elevations range from 105 m (a.s.l.) to 106.4 m (a.s.l.). In the figure 7 also the tank profile is shown.

SYNTETHIC CONCEPTS OF THE USED FLOW MODEL

The mathematical model is a tool which simulates real conditions. The model reproduces the main processes typifying the site in question, groundwater flow and solute transport, using data derived from monitoring and laboratory analyses. These data are used for the equations which regulate physical processes occurring in the system and hence allow flow to be simulated indirectly.

Considering an infinitesimal cell within an aquifer within the time lapse $t, t + \Delta t$, the net flow entering the element of volume must be counterbalanced by a corresponding exit flow or by a change in the mass stored in the volume or over time.

The groundwater movement in a homogeneous, isotropic volume of material may be described by the following differential equation to partial derivatives with respect to h :

$$k \left[\frac{\delta^2 h}{\delta x^2} + \frac{\delta^2 h}{\delta y^2} + \frac{\delta^2 h}{\delta z^2} \right] = (\alpha \rho_w g + n \beta \rho_w g) \frac{\delta h}{\delta t} \quad (1)$$

where:

k = hydraulic conductivity;

h = piezometric elevation;

t = time;

α = aquifer compressibility;

β = water compressibility;

n = porosity;

ρ_w = water density.

When a numerical approach is used to create a model of a system, the continuum of the problem is substituted by a discretized domain, represented by a lattice, whose grid divides the area into cells.

In every cell there is a point, defined as a node, at which the hydraulic load values or the unknown quantity of the problem are calculated.

Modflow ("A modular three-dimensional finite difference ground water flow model", MC DONALD & HARBAUGH, 1988) is a three dimensional flow model with finite differences, developed and utilized by the American Geological Survey (USGS).

Modflow allows one or more aquifers to be modelled, defining their potential by means of thickness. In spatial discretization of a theoretical aquifer system, the cells of the grid are described by their line (i), column (j) and layer (k) numbers.

To solve a differential equation in three dimensions, an initial

necessario che vengano stabilite una condizione iniziale e alcune condizioni (o limiti) al contorno.

Definire una condizione iniziale significa assegnare al modello una piezometria di partenza, ossia una quota alla quale riferire i calcoli successivi.

Le condizioni al contorno descrivono l'interazione tra il sistema che deve essere modellizzato e ciò che lo circonda. Esse sono espressioni matematiche che specificano l'andamento della variabile dipendente (quote piezometriche) o la derivata della variabile dipendente (flusso) ai limiti della griglia del modello.

Groundwater Vistas (GWV) rappresenta l'interfaccia grafica che organizza l'input e l'output di Modflow in modo intuitivo e grafico ed è stato sviluppato su piattaforma Windows.

GWV supporta vari modelli (ad esempio, Modflow, MT3D, MODPATH, Path3D), e tramite il suo utilizzo i dati vengono automaticamente attribuiti ai pacchetti idonei di Modflow. Infatti, l'introduzione dei parametri sopra menzionati è facilitata dall'organizzazione di Modflow in un menù principale ed in una serie di pacchetti (*packages*), ognuno dei quali simula uno specifico parametro o un set di parametri del sistema idrogeologico.

Ci sono numerosi pacchetti risolutori (SIP, SOR, PCG2) che sono utilizzati per risolvere l'equazione generale del flusso idrico in MODFLOW e producono un file con estensione di tipo *.sip o *.sor o *.pcg. Nel caso in esame è stato utilizzato il risolutore PCG2, che cerca di risolvere l'equazione mediante continue iterazioni fino a quando è stata soddisfatta la convergenza. Si possono impostare sia il livello di accuratezza di risoluzione dell'equazione che un numero massimo di iterazioni, durante le quali, il modello dovrebbe arrivare a convergenza.

1) I dreni utilizzati durante i lavori sono stati simulati con il pacchetto *DRN*. Il pacchetto *Drain* rappresenta una condizione al contorno del III tipo, a flusso in funzione del carico. In questo caso il flusso è calcolato al contorno in base alla differenza di carico tra celle lungo il contorno e celle dell'acquifero adiacente. Possono solo rimuovere acqua dal modello, ma bisogna fare attenzione che il carico idraulico sia superiore rispetto alla quota del dreno, altrimenti il dreno diventa inattivo. A questo pacchetto bisogna attribuire un valore di conduttanza orizzontale che viene calcolato, nel caso di un tubo di drenaggio, con la seguente formula:

$$C = (2 \pi R L) / M = (K A) / M \quad (2)$$

dove:

C : Conduttanza;

R : Raggio del tubo;

L : Larghezza della cella;

M : Spessore del materiale di fondo del fosso;

K : permeabilità del materiale.

Il valore di conduttanza orizzontale è un parametro che governa la portata di scambio tra una cella e l'altra. L'equazione (2) viene calcolata direttamente dall'interfaccia *Groundwater Vistas*, attribuendo come input i valori delle sue variabili. Nel caso in esame, il raggio del tubo usato come dreno ha un raggio di 0,125 m e si è considera-

condition and some boundary conditions need to be established.

Defining an initial condition means assigning the model a start-up piezometer, i.e. an altitude to which subsequent calculations can be referred.

Boundary conditions describe the interaction between the system to be modelled and its surroundings. These are mathematical expressions which specify the trend of the dependent variable (piezometric levels) or the derivative of the dependent variable (flow) at the edges of the grid of the model.

Groundwater Vistas (GWV) is a graphic interface which organizes the input and output of Modflow in an intuitive and graphic way. It has been developed on a Windows platform.

GWV supports various models (for example, Modflow, MT3D, MODPATH, Path3D) and allows data to be automatically attributed to suitable Modflow packages. In fact, the introduction of the aforementioned parameters is facilitated by the way Modflow organises it into a main menu and into a series of packages, each of which simulates a specific parameter or a set of parameters of a hydrogeological system.

There are numerous solver packages (SIP, SOR, PCG2) utilized to solve the general equation of water flow in MODFLOW and they produce a file with a *.sip or *.sor or *.pcg. type of extension. In the case in point the PCG2 solver was used, which attempts to solve the equation by means of continuous iterations until convergence is satisfied. It is possible to set both the level of equation solving accuracy and the number of iterations during which convergence should be reached.

1) The drains utilised during works were simulated by means of the *DRN* package. The *Drain* package represents a boundary condition of the 3rd type, with flow as function of the hydraulic head. In this case, the flow is calculated at the boundary on the basis of the head difference between the cells along the boundary and those from the adjacent aquifer. They can only remove water from the model, but attention must be paid in order to keep the hydraulic head higher than the drain elevation, otherwise the drain becomes inactive. A horizontal conductance value must be attributed to this package which, in the case of a drainage pipe, is calculated as follows:

$$C = (2 \pi R L) / M = (K A) / M \quad (2)$$

where:

C : Conductance;

R : Radius of pipe;

L : Width of cell;

M : Thickness of the ditch bottom material;

K : Permeability of the material.

The horizontal conductance value is a parameter which governs the exchange flow rate between one cell and another. Equation (2) is calculated directly from the *Groundwater Vistas* interface, considering the values of its variables as an input. In the case here examined, the radius of the pipe used as a drain is 0.125 m, assuming that the ditch

to che il materiale di fondo del fosso abbia uno spessore di 0,20 m e una permeabilità di 864 m/g.

2) La presenza delle paratie in calcestruzzo è stata simulata con l'uso del pacchetto HFB. La condizione al contorno *Wall* è diversa da tutti gli altri tipi di condizioni viste, in quanto rappresenta una barriera orizzontale al flusso della falda

Per utilizzare questa condizione, bisogna specificare lo spessore della barriera e la sua conducibilità idraulica. Nella finestra di dialogo dell'interfaccia Groundwater Vistas ci sono quattro check-boxes per indicare in quali lati della cella è presente la barriera.

3) Per simulare il sistema wellpoint è stato utilizzato il pacchetto *Well*. Il pacchetto *Well* è classificabile tra le condizioni del II tipo a *flusso costante*: rappresenta solitamente elementi la cui portata è nota o viene impostata con certezza. Questo modulo simula quindi il comportamento di pozzi che estraggano o iniettino acqua nel sistema sotterraneo con una certa portata, durante un certo intervallo di tempo della simulazione.

Per ogni pozzo, si devono introdurre i seguenti parametri:

- l'ubicazione nello spazio (riga, colonna e strato);
- la portata nell'unità di tempo (m^3/g);
- il raggio del pozzo.

MODELLO CONCETTUALE

Si è definito il modello concettuale del sistema idrogeologico, il dominio di calcolo, la discretizzazione spaziale (griglia), i parametri in ingresso, i limiti al contorno e le condizioni iniziali. Nella costruzione del modello si è cercato di riprodurre fedelmente il dato reale, sia per ricreare correttamente la conformazione dell'area e delle opere, sia per avere una risposta affidabile del modello.

Per la costruzione del modello numerico, è essenziale sostituire il dominio continuo con uno discretizzato, ossia una griglia che suddivide lo spazio in celle.

Discretizzazione orizzontale

Nel caso in esame si è deciso di utilizzare una griglia non uniforme: la scelta delle dimensioni della cella nella zona della vasca è stata fatta considerando le due diverse dimensioni dello spessore della paratia. In questo modo, è stato possibile mantenere un grande dettaglio sufficientemente elevato per riprodurre al meglio la situazione reale. Le celle della griglia creata hanno, quindi, una dimensione di 0,80 m o di 0,60 m di lato. La zona oggetto di studio ($18492 m^2$) è stata discretizzata con una griglia disomogenea di 23712 celle (96 righe x 247 colonne), centrata sulla vasca (Fig. 8). La regola sull'incremento della griglia è rispettata, infatti l'incremento tra celle adiacenti non supera il valore di 1.5.

Discretizzazione verticale

Per quanto riguarda la direzione verticale, la terza dimensione della cella, è stato ipotizzato uno spessore totale dell'acquifero di 50 m, in base alla relazione geologica e geotecnica. Il modello è costituito da 44 layers (strati) aventi, in prima approssimazione, uno spes-

bottom material is 0.20 m thick with permeability equal to 864 m/g.

2) The presence of concrete bulkheads was simulated by using the HFB package. The *Wall* boundary condition is different from all other types of conditions previously examined, since it constitutes a physical barrier to groundwater flow.

In order to use this condition, the barrier's thickness and hydraulic conductivity should be specified. In Groundwater Vistas dialogue interface window there are four check-boxes to indicate the cell's sides on which the barrier is to be found.

3) In order to simulate the wellpoint system, the *Well* package was used. The *Well* package is classifiable among the Type 2 conditions characterised by a steady-state flow: it usually represents elements whose flow rate is known or is established with certainty. Therefore, this module simulates the behaviour of wells that extract from or inject water into the underground system with a considerable flow rate during a certain simulation time interval.

For each well, the following parameters must be introduced:

- the location in space (line, column and layer);
- the flow rate in time unit (m^3/d);
- the well radius.

CONCEPTUAL MODEL

The following elements were defined: conceptual model of the hydrogeologic system, calculation domain, spatial discretization (grid), input parameters, boundary and initial conditions. In constructing the model, an effort was made to reproduce the actual data accurately in order to: i) recreate the conformation of the ground and the location of the works correctly, ii) receive a reliable response from the model.

As for the construction of the numerical model, it is essential to substitute the continuous domain with a discretized one, that is setting up a grid to subdivide the space into cells.

Horizontal discretization

In this specific case it was decided to use a non-uniform grid. The choice of cell dimensions was made by considering the two different dimensions of bulkhead thickness. In this way it was possible to maintain sufficiently high detail for reproducing the actual situation as well as possible. The cells of this grid have a 0.80 m or 0.60 m side. The study area ($18,492 m^2$) was discretized by means of a dishomogeneous grid made up of 23,712 cells (96 rows x 247 columns), centered on the tank (Fig. 8). The rule of thumb has been respected: grid spacing should not increase by more than 50 percent between adjacent cells.

Vertical discretization

As for vertical direction - the third dimension of the cell - a total thickness of the aquifer of 50 m was hypothesized on the basis of the geologic and geotechnical report. This model is made up of 44 layers, some 0.50 m thick, approximately, although this

Fig. 8 - Visione in pianta della griglia di calcolo (96 righe e 247 colonne)
 - Plan of the grid (96 rows and 247 columns)

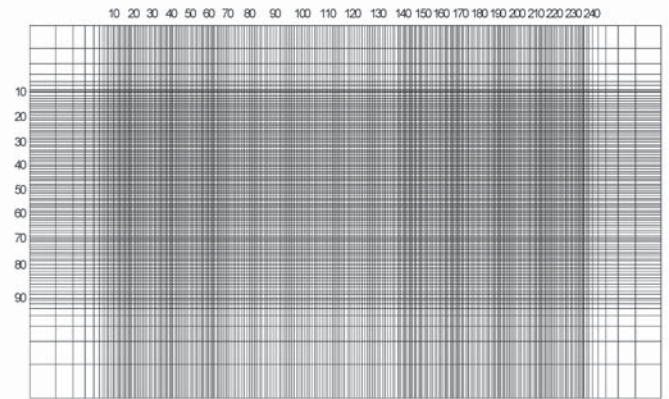
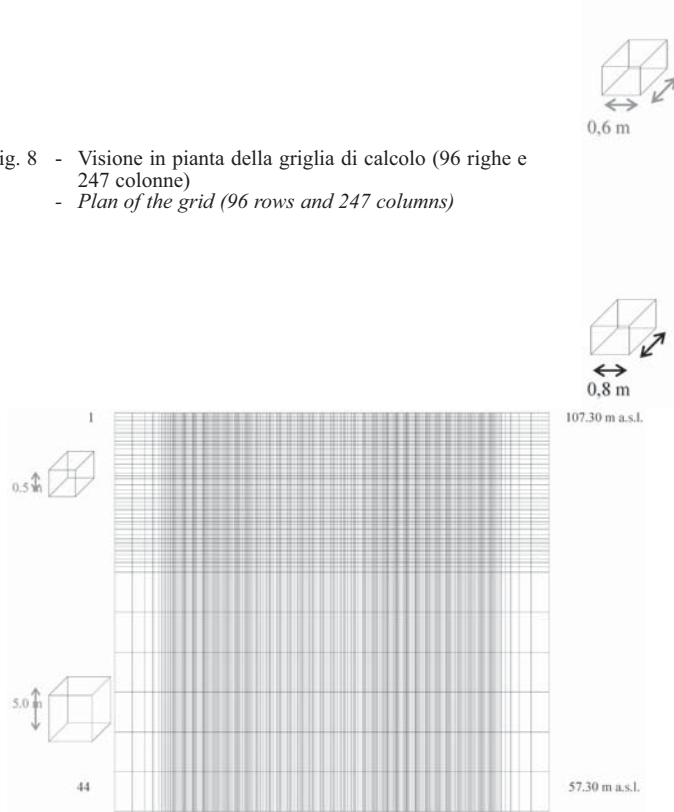


Fig. 9 - Griglia in sezione verticale (44 strati)
 - Vertical Grid section (44 layers)

sore di circa 0,50 m. In realtà nemmeno tale spessore è uguale per tutti gli strati. Infatti, per riprodurre più fedelmente la realtà, sono stati mantenuti tutti i dati riguardanti gli elementi naturali e progettuali che determinano nel terreno una variazione della conducibilità idraulica e/o delle caratteristiche dell'acquifero.

La regola dell'incremento delle celle non applicata perché non viene normalmente usata in senso verticale (FEINSTEIN *et alii*, 2005a and 2005b) ma, in ogni caso, sono state condotte alcune simulazioni per confrontare i risultati con differenti discretizzazioni verticali. Esse hanno confermato che nel profilo verticale, oltre la profondità raggiunta dall'obiettivo principale del modello, la dimensione della griglia non ha molta importanza.

Limiti al contorno

Lungo i margini del modello sono stati impostati due limiti al contorno, a carico controllato. In assenza di altri elementi significativi, si è deciso di considerare come tali due linee equipotenziali: quella avente un carico idraulico di 106,2 m s.l.m. e quella avente un carico di 105,5 m s.l.m.

Conducibilità idraulica dell'acquifero

Il parametro più difficile da assegnare e al quale tutti i modelli idrogeologici sono molto sensibili è la conducibilità idraulica. Al variare di questo fattore cambia completamente la distribuzione del flusso e le

value is not the same for all layers (Fig. 9). Therefore, in order to reproduce reality in the most accurate way, all data concerning both natural and project elements have been maintained, since they cause a change in hydraulic ground conductivity and/or aquifer characteristics.

The rule of thumb has not been respected because for vertical direction it's not generally used (FEINSTEIN *et alii*, 2005a and 2005b) but, in any case, some simulations have been developed to compare the results with different vertical discretization. They confirmed that in the vertical profile, after the focused depth, the grid dimension doesn't matter at all.

Boundary conditions

Two boundary conditions have been imposed along the margins of the model, with control of the hydraulic head. In the absence of other significant elements, it was decided to take into account two equipotential contour lines corresponding to 106.2 m a.s.l. and 105.5 m a.s.l. hydraulic head, respectively.

Hydraulic conductivity of the aquifer

The most difficult parameter to establish, since it influences all hydrogeological models, is hydraulic conductivity. As this factor varies, there is a considerable change in flow distribution and

quantità di acqua in gioco. Inoltre i dati rilevabili in cantiere spesso sono riferiti a porzioni medie di acquifero (vedi prove di pompaggio) e non vi sono quasi mai prove di strato. Il lavoro ha evidenziato come queste sarebbero estremamente utili per caratterizzare meglio l'acquifero.

Le simulazioni realizzate in questo lavoro sono tarate più sui dati reali di cantiere che sui dati rilevati dalle prove in situ. Avendo giornalmente la situazione reale come confronto, ci si è trovati in presenza di una situazione ottimale per tarare il modello.

In tabella 2 è riportata la successione stratigrafica ipotizzata e la corrispondenza con gli strati del modello; si osservano anche i valori di conducibilità idraulica attribuiti nel modello secondo vari scenari.

Si è voluto cercare di analizzare quali combinazioni di conducibilità idraulica avrebbero potuto dare risultati analoghi, soprattutto cercando di avvicinarsi al valore medio rilevato nella prova di pompaggio effettuata nel pozzo presente nell'area ($5.88 \cdot 10^{-4}$ m/s).

Sono state quindi effettuate variazioni sul livello di k, cambiando sia il valore della porzione di acquifero per il quale non si hanno dati (a partire da 14.60 m da p.c.) sia modificando il valore per la parte soprastante il livello più grossolano, che va da 8-9 m a 14 m di profondità. In fondo alla Tabella sono indicati i relativi bilanci di massa delle diverse simulazioni e si vede come abbassando i valori di conducibilità essi si riducono notevolmente. In particolare diminuendo la conducibilità generale dell'acquifero da 1×10^{-3} m/s a 1×10^{-4} m/s, il bilancio arriva a valori di 50 l/s.

Da queste analisi, si ritiene che:

- il valore medio di conducibilità dell'acquifero sia più vicino a 1×10^{-3} m/s;
- esista realmente un livello più grossolano al centro;
- la sabbia ghiaiosa soprastante abbia un discreto valore di conducibilità.

Probabilmente il basso valore rilevato dalla prova di portata nel pozzo è da attribuire a numerose lenti di argilla o limoso sabbiose che interessano il pozzo, non confermabili da alcuna stratigrafia, ma che nel complesso riducono molto la circolazione idrica.

In figura 10 si osserva la distribuzione in sezione ed in pianta della distribuzione della conducibilità.

amount of water. In addition, the data acquired at the building site often refer to average portions of the aquifer (see pumping tests) and layer tests are hardly ever carried out. This paper emphasizes the extreme usefulness of these tests for better characterization of the aquifer.

Simulations carried out during research were calibrated more on actual site data than on data obtained from *in situ* tests. Having the actual day by day situation as a comparison, we were in the best possible position for model calibration.

Tab. 2 shows the stratigraphic sequence assumed and the correspondence with the model's layers. The values of hydraulic conductivity attributed to the model in various scenarios, can also be observed.

First of all, we analyzed which combinations of hydraulic conductivity could produce similar results by trying to approach the mean value resulting from pumping tests carried out on a well present in the study area ($5.88 \cdot 10^{-4}$ m/s).

Variations on the k level were subsequently carried out both by changing both the value on the aquifer portion lacking data (starting from 14.60 m from ground level) and by modifying the value for the portion overlying the coarser level (8-9 m to 14 m in depth). At the bottom of the Table the relative mass balances of the various simulations are indicated. It can be noticed that there is a sharp decrease by lowering conductivity values. In particular, by lowering general aquifer conductivity from 1×10^{-3} m/s to 1×10^{-4} m/s, the balance attains values of 50 l/s.

From these analyses, the following results were found:

- mean aquifer conductivity value approaches 1×10^{-3} m/s;
- there is a coarser layer in the central portion;
- the overlying gravelly sand has a discrete hydraulic conductivity value.

The low value recorded in the pumping test is probably to be ascribed to numerous clayey and silty-sandy lenses which affect the well and considerably reduce groundwater circulation, although their presence has not been confirmed by any stratigraphy.

Figure 10 shows the section and plan distribution of hydraulic conductivity.

| layer # | Cumulative thickness (m) | Grain-size | Hydraulic conductivity 1 st Scenario (m/s) | 2 nd Scenario (m/s) | 3 rd Scenario (m/s) | 4 th Scenario (m/s) |
|---------|--------------------------|-------------------|---|--------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 1 | 0.50 | Soil | 1×10^{-4} | 1×10^{-4} | 1×10^{-4} | 1×10^{-4} |
| 2-15 | 7.90 | Sand and | 1.6×10^{-3} | 1.6×10^{-3} | 1×10^{-4} | 1×10^{-4} |
| 16-17 | 9.00 | Clay | 1×10^{-7} | 1×10^{-7} | 1×10^{-7} | 1×10^{-7} |
| 18-27 | 14.00 | Gravel and | 5.88×10^{-3} | 5×10^{-3} | 5×10^{-3} | 2×10^{-3} |
| 28 | 14.60 | Clay and | 1×10^{-7} | 1×10^{-7} | 1×10^{-7} | 1×10^{-7} |
| 29-44 | 50.0 | Sand and | 1.6×10^{-3} | 1×10^{-4} | 1×10^{-3} | 1×10^{-3} |
| | BALANCE | m ³ /g | 49,240 | 4,402 | 33,116 | 25,618 |
| | | l/s | 570 | 50 | 383 | 296 |

Tab. 2 - Descrizione dei 44 strati della vasca di equalizzazione. Per quota, si intende la quota della base dello strato
 - Description of the 44 layers of the equalization tank. Thickness values correspond to the bottom of layers

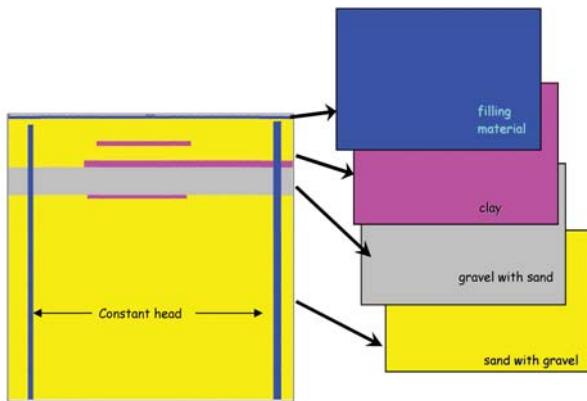


Fig. 10 - Conducibilità idraulica nel modello, vista attraverso una sezione lungo una riga. In blu è rappresentato il terreno di riporto, in giallo la sabbia con ghiaia, in grigio la ghiaia con sabbia e in fucsia le lenti di argilla
 - Hydraulic conductivity of the model, seen through a section along a line. Color blue shows the filling material, yellow is sand with gravel, gray is gravel with sand and pink is clay lenses

RISULTATI DELLE SIMULAZIONI

La vasca di equalizzazione ha una superficie di 6500 m² e si trova immersa nella falda per circa 8 m. Pertanto, il volume di terreno da asciugare dall'acqua di falda era di circa 52000 m³.

Nella realtà, per poter costruire l'opera, sono state utilizzate oltre al sistema di paratie, 13 pompe da 5000 l/min ciascuna (pari a 7200 m³/g) per una portata complessiva di 93600 m³/g (1,085 l/s). Tale portata era però teorica perché non era prevista alcuna misura di verifica, non essendo importante saper quanta acqua realmente veniva estratta. Gli addetti ai lavori ritenevano che il sistema lavorasse a portate inferiori rispetto alle teoriche.

Le simulazioni hanno quindi considerato anche la presenza di lenti di argilla oltre alla presenza di paratie in calcestruzzo che raggiungono una profondità di circa 6 m oltre il fondo della vasca e aventi una lunghezza complessiva di circa 14 m. Inoltre, poiché l'obiettivo è stato quello di valutare diversi scenari di intervento per la realizzazione della vasca e valutare i quantitativi d'acqua da estrarre per poter lavorare in asciutto, la vasca è stata modellizzata senza fondo di cemento.

Per la costruzione del modello di flusso si sono considerati i dati sopra descritti per simulare la piezometria di base, prima dell'inizio dei lavori, che è stata considerata il punto di partenza e di confronto per tutte le elaborazioni successive. A partire da questa, sono state costruite tutte le altre simulazioni.

Il modello ha in seguito considerato i diversi interventi effettuati (paratie, impianto wellpoint e dreni) che sono stati impostati come condizioni al contorno. Sono state effettuate un certo numero di simulazioni cercando di ricreare la reale sequenza di interventi effettuati nella costruzione della vasca, in modo valutare la loro reciproca interazione e differente risposta.

Simulazione base

Nel primo modello creato, si è cercato di ricostruire la piezometria statica reale, utilizzando come confronto i dati areali elaborati partendo dai dati puntuali. Lungo i margini del modello sono stati impostati due limiti al contorno, a carico controllato. In assenza di altri elementi significativi, si è deciso di considerare come tali due linee equipotenziali: quella avente un carico idraulico di 106,2 m

RESULTS OF SIMULATIONS

The equalization tank has a surface of 6,500 m² and is immersed in the groundwater for about 8 m. Therefore, the volume of ground to be drained of groundwater was some 52,000 m³.

In actual terms, in order to build this plant, 13 pumps of 5000 l/min each (equal to 7200 m³/g) for a total flow rate of 93.74 m³/day (1,085 l/s) were utilized, apart from the bulkhead system. This flow rate was, however, theoretical since no monitoring system had been set up. In fact, the actual amount of water that was being pumped out was not important. The technicians in charge thought that the system worked at flow rates lower than theoretical rates.

Therefore, simulations have also taken into account the presence of clayey lenses, apart from the 14 m long concrete bulkheads which were driven down to a depth of some 6 m below the tank floor. In addition, the tank was planned without a concrete floor since the goal was to assess various intervention scenarios for the construction of the tank and the water amounts that needed to be pumped out in order to work in dry conditions.

As for the idealization of the flow model, the data previously described were used in order to simulate the water table level before works started. This piezometric value was assumed as a reference point for all further elaborations. All other simulations were based on the first one.

Subsequently, this model has taken into account the various interventions carried out (bulkheads, wellpoint plant and drains) which were set as boundary conditions. A certain number of simulations were carried out trying to recreate the real sequence of the interventions carried out during tank construction, in order to evaluate their reciprocal interaction and different response.

Basic simulation

In the first model, an effort was made to reconstruct the actual static piezometric trend by using as a term of comparison the surface data elaborated by starting from point data. Along the margins of the model, two controlled-head boundaries were laid out. In the absence of other significant elements, it was decided to consider two equipotential lines: to the north, the equipotential line corresponding to the hydraulic head

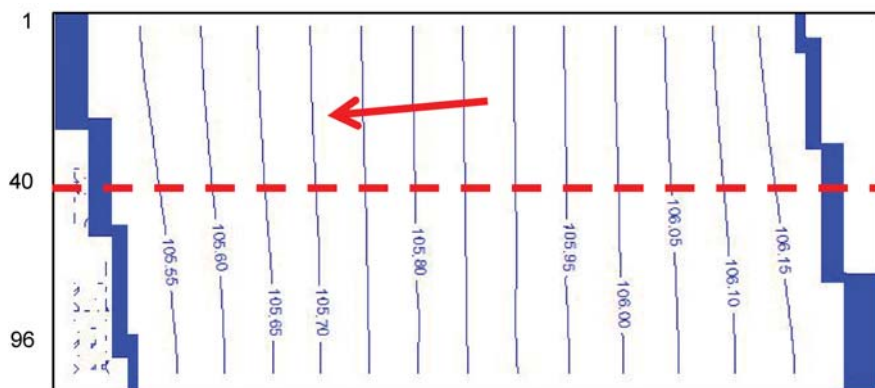
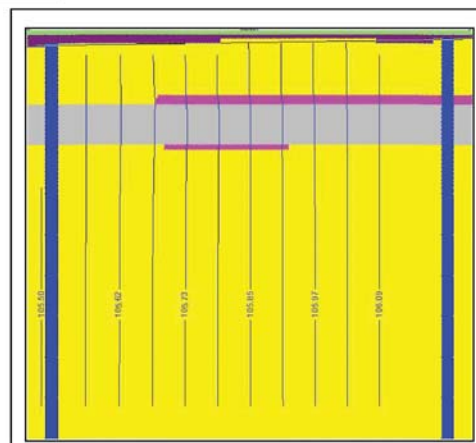


Fig. 11 - Piezometria simulata, uniforme su tutti gli strati. In blu sono rappresentati i due Constant Head. La linea rossa tratteggiata indica la posizione della colonna della sezione in Fig. 12
 - Simulation of a uniform piezometric trend in all layers. Blue represents the two Constant Heads whereas the broken red line indicates the position of the column shown in the section of Fig. 12

Fig. 12 - Piezometria simulata, vista in sezione, lungo la riga 40. In giallo è rappresentata la sabbia, in fucsia l'argilla, in grigio la ghiaia. I primi strati, rappresentati in viola e verde, indicano la zona non saturata, dal piano campagna
 - Simulated piezometric trend seen in section along line 40. Yellow is sand, pink is clay and gray is gravel. The first two layers, shown in green and purple, show the unsaturated zone, starting from ground level



s.l.m., a nord e quella avente un carico di 105,5 m s.l.m., a sud. Nella piezometria simulata, come in quella reale, c'è un dislivello piezometrico di circa 1 metro su tutta l'area (Fig. 11 e 12).

Simulazioni con le paratie

Per quanto riguarda le paratie, sono state effettuate diverse simulazioni, considerando varie soluzioni di tipo progettuale sia come sequenza di posa dei pannelli che come profondità degli stessi.

Innanzitutto è stato creato un modello con la situazione finale di costruzione delle paratie, con tutto il perimetro dello scavo composto dai pannelli. Il risultato che si ottiene mostra che nella zona interna alla vasca, la piezometria presenta valori più bassi di circa 0,20 m rispetto a quelli presenti all'esterno. Questo fatto è causato proprio dall'azione delle paratie: il moto dell'acqua viene ostacolato, deviato sotto i pannelli e una volta che questi sono stati superati, l'acqua non ha la forza sufficiente per tornare alla quota di partenza all'interno dell'area (Fig.13)

In seguito è stata analizzata la sequenza di costruzione dei pannelli, per verificare se ci fosse una soluzione migliore rispetto a quella prevista dal progetto. Infine è stata studiata la lunghezza dei pannelli, per cercare di verificare se, con pannelli di lunghezza superiore o inferiore a quella utilizzata, si possa ottenere una risposta migliore.

Dai risultati di queste prime simulazioni è emerso che:

of 106.2 m s.l.m., and, to the south, the equipotential line of 105.5 m a.s.l. A step of about 1 m was found throughout the area in both the simulated piezometric level and the real one (Fig. 11 and 12).

Simulations by means of bulkheads

As regards bulkheads, several simulations were carried out, considering various planning solutions concerning the installation of panels and their depth.

First of all, a model reproducing the final solution was created, with all the excavation perimeter composed of panels. The result obtained shows that in the tank's inner zone the piezometric level is some 0.20 m lower than the external level. This is caused by the presence of bulkheads: water flow is hindered and diverted underneath the panels and, having passed these structures, the water has not got enough strength to return to its original level inside the area (Fig. 13).

Subsequently, the sequence of construction of the panels was analyzed in order to assess whether a solution better than the one proposed in the project might be available. Finally, the length of the panels was studied in order to assess whether it was possible to obtain a better response by using panels with different lengths compared with those utilized.

The results of these first simulations were as follows:

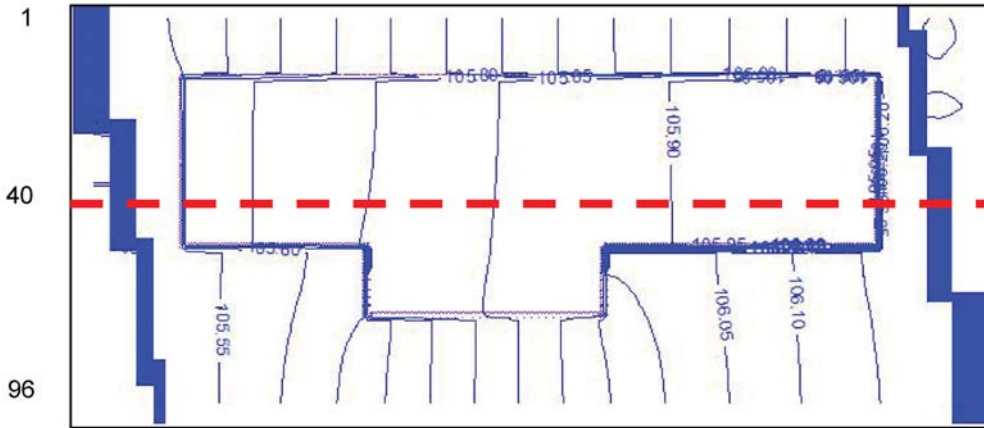
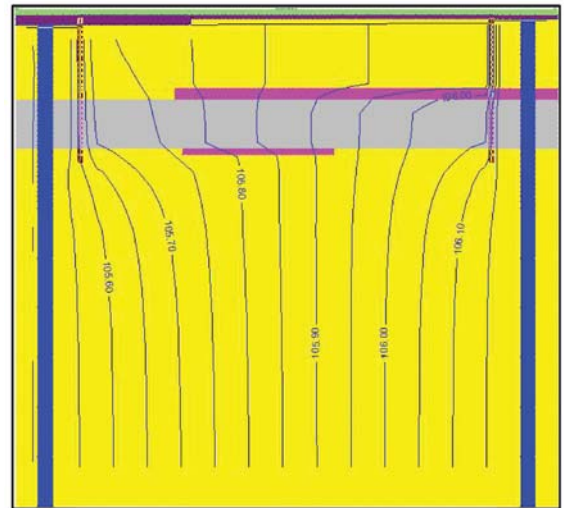


Fig. 13 Simulated piezometric trend with the presence of bulkheads. Broken red line shows the position of column in the section of Fig. 14
Piezometria simulata con la presenza delle paratie. La linea rossa tratteggiata indica la posizione della colonna della sezione in Fig.14

Fig. 14 Simulated piezometric trend with the presence of bulkheads seen in section along line 40
Piezometria prodotta dal modello con le paratie, vista in sezione, lungo la riga 40



- la costruzione dei diaframmi rappresenta un buon intervento per ottenere l'abbattimento della falda in quanto il moto dell'acqua viene ostacolato e deviato sotto i pannelli;
- lo smorzamento della risalita della falda è favorita dalla presenza delle lenti di argilla.

Analizzando la sequenza di costruzione dei diaframmi, soprattutto nelle prime fasi, si potrebbe ottenere un maggior abbassamento della falda se si partisse a costruire dal lato più corto verso nord.

La scelta della lunghezza dei pannelli non è banale: scegliere di costruire pannelli più profondi può provocare un aumento dei costi, senza avere un riscontro significativo per quanto riguarda la loro efficacia. Questo si verifica grazie alla particolare struttura del sottosuolo.

La presenza delle paratie sembra non influire eccessivamente sull'intorno della vasca. Pertanto i fontanili situati nelle vicinanze non dovrebbero risentirne.

Osservando la piezometria ottenuta sotto le paratie si nota come i diaframmi non influenzano oltre la loro profondità. Infatti, già 1 m sotto il loro termine, la falda cerca di riprendere il suo moto indisturbato.

- the construction of diaphragms is a good investment for obtaining piezometric lowering since groundwater flow is hindered and diverted underneath the panels;
- the slowing down of the water table rise is favored by the presence of clay lenses.

By analyzing the sequence of diaphragm construction, especially in initial phases, more pronounced piezometric lowering could be achieved, if construction started from the shorter side to the north.

The choice of the length of panels is important: indeed, choosing to insert deeper panels can cause an increase in costs without any significant improvement in effectiveness. This is due to the particular structure of the subsoil.

The presence of bulkheads does not seem to influence the boundaries of the tank excessively. Therefore, the water springs situated in the surroundings should not be affected.

By observing the piezometric trend underneath the bulkheads, it can be noted that diaphragms do not exert any influence beyond their depth. In fact, already at 1 m below their base, groundwater tries to recompose its undisturbed flow.

Simulazioni con gli impianti wellpoint

Per quanto riguarda il sistema wellpoint, sono stati modellizzati un certo numero di impianti, costituiti da un minimo di 26 micropozzi. A ciascuno di essi è stata attribuita una portata di circa 277 m³/g. Si è cercato di ricostruire il metodo di installazione “a gradoni”, realmente utilizzato in cantiere, posizionando i wellpoint a quote sempre più profonde, man mano che si otteneva un abbassamento della falda. In questo modo è stato possibile osservare il diverso comportamento dell’impianto in base alle diverse caratteristiche dell’area. Per ottenere un abbassamento della falda ad una quota inferiore a quello dello scavo (circa 10 m di abbattimento), è stato necessario impostare dieci “batterie” che hanno agito con una portata totale di circa 68000 m³/g e che hanno asciugato i primi 18 layers.(Figg.15 e 16)

Da queste simulazioni è emerso che:

- l’eccessiva vicinanza di due micropozzi adiacenti può rendere il sistema inefficiente;
- wellpoint adiacenti lavorano meglio a quote diverse in quanto i due coni di influenza non interferiscono tra loro;
- l’impianto wellpoint non è adatto per lavorare in terreni argillosi, in quanto l’argilla impedisce all’acqua di fluire verso i wellpoint. Nonostante ciò, si è notato che è possibile ottenere buoni risultati se si ha una buona conoscenza della distribuzione della granulometria del terreno in modo da poter scegliere la localizzazione più adatta per l’impianto;
- gli strati situati sopra le lenti di argilla non vengono asciugati dagli impianti wellpoint, ma rimane una lama d’acqua proprio in corrispondenza dell’argilla.

Simulazioni con i dreni

Una volta che è stato ottenuto lo svuotamento di tutta la vasca con l’utilizzo di impianti wellpoint, questi ultimi sono stati sostituiti dai dreni, posti sotto il fondo della vasca ad una quota di 98,10 m s.l.m. e di 97,20 m s.l.m., come in cantiere. Le simulazioni effettuate

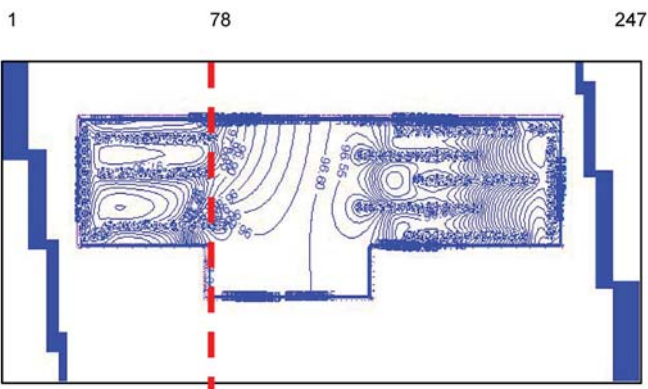


Fig. 15 Piezometria ottenuta nel modello con i wellpoint, con 10 impianti wellpoint nello strato 22 e 26. La linea rossa tratteggiata indica la posizione della colonna della sezione in figura 16
Piezometric trend obtained by the wellpoint model, with 10 well-point plants in layers 22 e 26. Broken line shows the position of column in the section of Fig. 16

Simulations by means of wellpoint plants

As for the wellpoint system, a certain number of plants, made up of at least 26 microwells, were modeled. A flow rate of about 277 m³/day was attributed to each of them. We also tried to reconstruct the “step-like” installation method, which was actually utilized at the site, by positioning wellpoints at progressively increasing depths, as the lowering of the water table was recorded. In this way it was possible to observe the different behavior of the plant on the basis of the various characteristics of the area. In order to attain a piezometric lowering at an elevation below the excavation depth (lowering of about 10 m), it was necessary to set up ten “batteries” which resulted in a total flow rate of about 68,000 m³/day and caused the drying up of the first 18 layers (Figg. 15 e 16).

From these simulations, it resulted that:

- excessive proximity of two adjacent microwells can make the system inefficient;
- adjacent wellpoints work better at different depths since their respective cones of influence do not interfere with one another;
- the wellpoint plant is not suitable for clayey soils since clay stops groundwater from flowing towards the wellpoints. Notwithstanding this, it was noticed that it is possible to obtain satisfactory results if there is a good knowledge of grain-size distribution in order to choose the best possible location for the plant;
- the layers overlying the clayey lenses are not dried by the wellpoint plants but a thin level of water remains in correspondence with clay.

Simulations by means of drains

Once the tank has been completely emptied by means of well-point plants, drains will be inserted under the tank floor, at a depth of 98.10 m a.s.l. and 97.20 m a.s.l., as on the construction site. Simulations carried out by using drains allowed groundwater low-

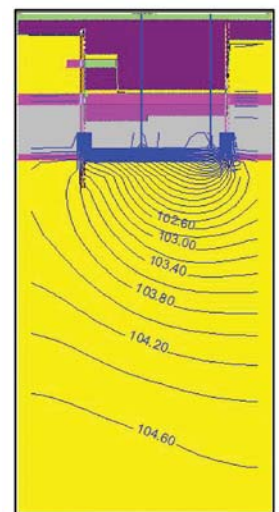


Fig. 16 Piezometria ottenuta nel modello con i wellpoint vista in sezione lungo la colonna 78. Si notano la posizione dei wellpoint e gli strati dry (rappresentati in viola e in verde)
Piezometric trend obtained by the wellpoint model seen in section along column 78. The position of wellpoints and dry layers are shown (in purple and green, respectively)

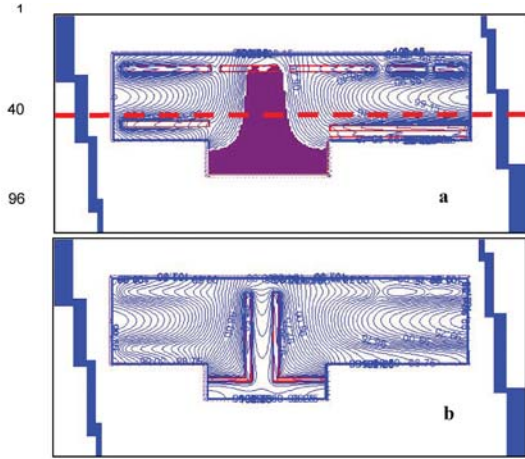


Fig. 17 Piezometria ottenuta nel Modello con i dreni. Con i rettangoli rossi sono indicate le posizioni dei dreni nello strato 18 (a) e nello strato 19 (b). La linea rossa tratteggiata indica la posizione della colonna della sezione in figura 18
 Piezometric trend obtained from the Model with drains. Red rectangles show the position of drains in layers 18 (a) and 19 (b). Broken red line shows the position of the column in the section of Fig. 19

utilizzando i dreni hanno permesso di ottenere un abbattimento della falda simile a quello ottenuto con i wellpoint e il modello indica un bilancio di massa di circa 49000 m³/g. Questo valore è inferiore a quello ottenuto con i wellpoint, ma questo è dovuto al fatto i pozzi prelevano acqua da un intorno maggiore, creando un bulbo di richiamo che va anche oltre la loro quota, mentre i dreni limitano la loro azione alla quota di posa (Fig. 17 e 18).

CONCLUSIONI

Il presente lavoro ha cercato di valutare l’impatto dei vari interventi effettuati per ottenere l’abbattimento della falda e di capire come le simulazioni modellistiche possano essere di supporto in fase sia progettuale che costruttiva.

Dai risultati delle simulazioni con le paratie che simulano i diaframmi realizzati intorno alla vasca, è emerso che:

- la costruzione dei diaframmi permette di ostacolare e deviare il moto della falda sotto i pannelli;
- lo smorzamento della risalita della falda è influenzata dal tipo di granulometria presente;
- la scelta della lunghezza dei pannelli andrebbe fatta considerando la struttura del sottosuolo;
- la presenza delle paratie sembra non influire eccessivamente sull’intorno della vasca.

Per quanto riguarda le simulazioni con i wellpoint per l’abbattimento della falda è emerso che:

- l’eccessiva vicinanza di due micropozzi adiacenti può rendere il sistema inefficiente;
- wellpoint adiacenti lavorano meglio a quote diverse in quanto i due coni di influenza non interferiscono tra loro;
- l’impianto wellpoint non è adatto per lavorare in terreni argillosi;

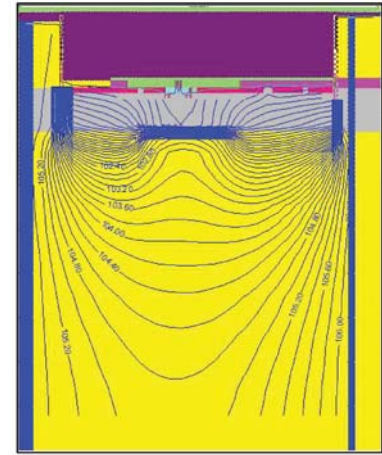


Fig.18 Piezometria ottenuta nel modello con i dreni vista in sezione lungo la riga 20. Si nota la posizione dei dreni, rappresentata in rosso. In viola e in verde sono rappresentati gli strati asciutti
 Piezometric trend obtained from the Model with drains seen in section along line 20. Position of drains is represented in red. Dry layers are represented in purple and green.

ering similar to that obtained by means of wellpoints and the model shows a mass balance of some 49,000 m³/day. This value is lower than that obtained using wellpoints, but this is due to the presence of wells which draw up water from a wider area, thus creating a bulb of abstraction reaching far beyond their elevation, whereas the action of drains is confined within the depth value where they have been laid (Fig. 17 and 18).

FINAL REMARKS

This research tried to assess the impact of various interventions aiming at lowering the water table; it also tried to understand the support given by modeling simulations both during the planning and construction phases.

The results of simulations with bulkheads, carried out by means of diaphragms constructed around the tank, are as follows:

- the construction of diaphragms hinders and diverts groundwater flow underneath the panels;
- the slow down of the water table rise is influenced by the type of grain-size distribution;
- the choice of panel length should be made by considering the sub-soil structure;
- the presence of bulkheads does not seem to influence the tank’s boundaries much.

As regards simulations by means of wellpoints for water table lowering, it resulted that:

- excessive proximity of two adjacent microwells can make the system inefficient;
- adjacent wellpoints work better at different depths since their respective cones of influence do not interfere with one another;
- the wellpoint plant is not suitable for clayey soils;

- gli strati situati immediatamente sopra le lenti di argilla non vengono asciugati dagli impianti wellpoint.

La taratura del modello è stata effettuata confrontando i dati ottenuti dalle varie simulazioni, con le osservazioni e i dati rilevati in cantiere.

Dagli studi effettuati emerge che le caratteristiche ambientali del sito vengono salvaguardate. Infatti tutti gli interventi presenti provocano una variazione del livello della falda molto localizzato alla zona della vasca e non arrivano ad interessare elementi idrogeologici presenti nelle vicinanze, quali i fontanili, in modo diretto. Inoltre gli impianti wellpoint installati non sono interventi permanenti, mentre i dreni potrebbero rimanere in opera ed essere disponibili in caso di necessità, se opportunamente attrezzati.

In base agli studi effettuati, si può affermare che il modello sembra fornire scenari progettuali idrogeologicamente validi che potrebbero essere significativi anche da un punto di vista economico. I risultati ottenuti, se valutati prima dell'inizio dei lavori, potrebbero infatti aiutare nelle fasi di definizione del progetto, focalizzando l'attenzione su alcuni problemi idrogeologici, per cercare le soluzioni migliori, anche dal punto di vista dei costi degli interventi.

- the layers situated immediately above clayey lenses are not dried by wellpoint plants.

Model calibration was carried out by comparing the data obtained from various simulations with the observations and data collected at the building site.

The studies carried out show that the environmental characteristics of this site are safeguarded. Indeed, all interventions cause a very localized change of the piezometric level just around the tank and do not affect directly other hydrogeological elements present in the surroundings, such as water springs. In addition, all wellpoint plants installed are not permanent interventions, whereas the drains, once adequately equipped, could remain in place and be available in case of need.

On the basis of investigations, it is assumed that this model offers hydrogeologically valid planning scenarios of intervention which could be significant also from an economic standpoint. The results obtained, if they are assessed before starting works, could help in the planning phase by focusing on some hydrogeological problems so that better solutions can be found also cost wise.

OPERE CITATE / REFERENCES

- ANDERSON M.P., WOEISSNER W.W. (1992) - *Applied Groundwater Modeling- Simulation of Flow and Advective Transport*, Academic Press Inc. San Diego (CA).
- ASM BRESCIA – UFFICIO ECOLOGIA (1995) - *Studio per l'individuazione delle caratteristiche morfologiche, geologiche, pedologiche ed idrogeologiche dell'area interessata dalla vasca di laminazione sita presso l'impianto di depurazione di Verziano (BS)*.
- ASM BRESCIA (2000) – *Depuratore di Verziano – Sistema di gestione Ambientale, norma UNI –EN –ISO 14000. Analisi iniziale del contesto geografico – ambientale del sito, caratteristiche geologiche, idrogeologiche e idrografiche*.
- BONOMI T., CAVALLIN A., VERRI R., (1999) - *Utilizzo integrato di banche dati e SIT per la valutazione della vulnerabilità degli acquiferi a scala provinciale*. Quaderni Geologia Applicata, suppl. n.1 2/99, V.1, pp. 1.45-1.58.
- BONOMI T., CAVALLIN A., VERRI R. (1997) - *Banca dati idrogeologica: elaborazioni per la caratterizzazione del sottosuolo nella pianura bresciana*. Rivista Acqua Aria, **6**: 89-97.
- BONOMI T., VERRI R. 1998 - *Caratterizzazione Idrogeologica della Pianura Bresciana mediante l'uso di Banche Dati e Sistemi Informativi Territoriali*. Acque Sotterranee, Milano, **60**: 27-35.
- DAVID J. HART, KENNETH R. BRADBURY, DANIEL T. FEINSTEIN (2006) – *The vertical Hydraulic Conductivity of an aquitard at Two Spatial Scales*. Ground Water **44** (2), 201-211.
- DENTI E., LAUZI S., SALA P., SCESI L. (1998). *Studio idrogeologico della pianura bresciana compresa tra i fiumi Oglio e Chiese*. Studi idrogeologici sulla Pianura Padana, **4**, Milano.
- FEINSTEIN, D., EATON, T., HART, D., KROHELSKI, J., AND K.R. BRADBURY (2005a) - *Regional aquifer model for southeastern Wisconsin; Report 1: Data collection, conceptual model development, numerical model construction, and model calibration*. Southeastern Wisconsin Regional Planning Commission U.S. Geological Survey, Technical Report 41. 81 p.
- FEINSTEIN, D., HART, D., EATON, T., KROHELSKI J., AND BRADBURY, K. (2005b) - *Simulation of regional groundwater flow in southeastern Wisconsin; Report 2: Model results and interpretation*. Southeastern Wisconsin Regional Planning Commission U.S. Geological Survey, Technical Report 41. 63 p.
- GASPERETTI D. (2004). *Studio geologico, geotecnico e idrogeologico a supporto della progettazione preliminare, definitiva, esecutiva dei pretrattamenti a servizio del collettore nord e ristrutturazione dello scaricatore di piena*.
- HARBAUGH, A.W., MC DONALD, M.G., (1996) - *User's documentation for MODFLOW-96, an update to the U.S. Geological Survey modular finite-difference groundwater flow model*. USGS Open-File Report 96-485, 56 p.
- MC DONALD M.G., HARBAUGH A.W. (1988) – *A modular three-dimensional finite-difference flow model*. U.S. Geological Survey Techniques of water Resources Investigations.

Received May 2006 - Accepted January 2008