

## CONTRIBUTO ALLE CONOSCENZE IDROGEOLOGICHE DEL SOTTOSUOLO DI CREMONA ED ALLO SFRUTTAMENTO DI NUOVE RISORSE IDROPOTABILI

## CONTRIBUTION TO THE HYDROGEOLOGICAL KNOWLEDGE OF THE CREMONA AQUIFER SYSTEM AND TO THE EXPLOITATION OF NEW WATER RESOURCES

COSTANZA CAMBI\*, WALTER DRAGONI\*, FEDERICO PASSERI\*, DANIELA VALIGI\*

\*University of Perugia - Department of Earth Sciences - Perugia, Italy - valigi@unipg.it

### RIASSUNTO

Il lavoro riporta i risultati di un insieme di indagini idrogeologiche ed idrochimiche eseguite sul sistema acquifero multistrato di Cremona - caratterizzato dalla presenza di una interfaccia acqua dolce/acqua salmastra tra i 400-500 m dal piano campagna - dove sorgerà un nuovo campo pozzi, ad est della città (AEM, 2001). Il progetto del campo pozzi, realizzato dall'Azienda Energetica Municipale di Cremona (AEM), prevede l'abbandono di alcune precedenti captazioni e la realizzazione di dieci nuove opere. Al momento sono stati realizzati quattro piezometri e due pozzi, che emungono da diversi livelli acquiferi posti a differente profondità. Dalle prove di emungimento effettuate sui due pozzi sono stati ricavati trasmissività ( $\sim 10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s) e coefficiente d'immagazzinamento ( $10^{-3}$ ÷ $10^{-5}$ ) per ogni orizzonte acquifero.

È stato costruito un modello semplificato del campo pozzi, calibrato sulla base dei risultati delle prove di pompaggio: il modello è stato successivamente utilizzato per simulare il comportamento dell'acquifero a campo pozzi ultimato. La simulazione ha messo in evidenza l'interferenza tra i coni di depressione, che determina un abbassamento piezometrico massimo di circa 4 m superiore rispetto a quello che si è verificato con un solo pozzo in funzione, nel caso in cui tutti i pozzi sfruttino due soli degli orizzonti acquiferi utilizzabili.

Le analisi chimiche delle acque hanno rilevato la presenza naturale di ammoniaca, ferro, manganese ed arsenico in tutte le falde, confermando la necessità di un impianto di potabilizzazione.

Le analisi delle prove di pompaggio e dei risultati delle simulazioni eseguite indicano che, pur se in tempi lunghi (probabilmente dell'ordine della decina di anni) vi è una possibilità realistica che l'interfaccia acqua dolce/acqua salmastra risalga fino ai pozzi. È quindi opportuno che l'avvio del campo pozzi coincida con ulteriori indagini per progettare sin da ora soluzioni che eliminino la possibilità che tale fenomeno si verifichi.

**TERMINI CHIAVE:** pozzo, acquifero multistrato, prova di pompaggio, interfaccia acqua dolce/salata

### INTRODUZIONE

Questo lavoro intende portare un contributo alle conoscenze del sistema acquifero multistrato della Provincia di Cremona e fornire

### ABSTRACT

This paper gives the results of a series of hydrogeological and hydrochemical investigations carried out on the multilayered aquifer system of Cremona – characterized by a fresh water/salt water interface 400-500 meters below ground level – where a new well field is to be built east of town (AEM, 2001). The well field project is being carried out by the Municipal Energy Company of Cremona (AEM) and calls for the abandoning of a number of older wells and the building of ten new wells. Up to now four piezometers and two wells have already been drilled, which pump at different levels from aquifers located at different depths. The pumping tests done at the two wells have provided transmissivity ( $\sim 10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s) and storage coefficient ( $10^{-3}$ ÷ $10^{-5}$ ) data for each aquifer horizon.

A simplified model of the well field was built, calibrated from the pumping test results. The model was then used to simulate aquifer behavior with the well field completed. The simulation showed that the cones of depression would interfere with each other, causing a maximum drawdown of about 4 meters greater than that occurring with only one well in operation, if all the wells exploit only two of the usable aquifer horizons.

The hydrochemical analysis revealed the natural presence of ammonia, iron, manganese and arsenic in all the aquifers, confirming the necessity of a water treatment plant.

An analysis of both the pumping tests and the simulation results indicate that there is a realistic possibility that the salt/fresh water interface may rise up to the wells, although over a long time period (probably decades). Thus it is advisable that the putting into operation of the well field coincide with further investigations for planning solutions to eliminate the possibility of the rising of this interface.

**KEY WORDS:** well, multilayered aquifer, pumping test, salt/fresh water interface

### INTRODUCTION

This paper aims at contributing to the knowledge on the multilayered aquifer system in the Province of Cremona and to provide

ipotesi di gestione del nuovo campo pozzi ad est della città. Il sistema acquifero multistrato di Cremona comprende varie unità idrostratigrafiche (Gruppi Acquiferi) definite da barriere di permeabilità ad estensione regionale. In particolare il Gruppo Acquifero da cui viene prelevata l'acqua nel nuovo campo pozzi è denominato "C" (REGIONE LOMBARDIA – ENI DIVISIONE AGIP, 2002). Nell'area cremonese è presente una interfaccia acqua dolce-acqua salmastra, caratteristica di tutta la pianura lombarda, che ha una profondità intorno ai 400-500 m dal p.c. (REGIONE LOMBARDIA – ENI DIVISIONE AGIP, 2002), così da limitare la massima profondità raggiungibile da pozzi per acque potabili, anche in funzione della risalita legata al pompaggio. La presenza di elevate concentrazioni di solfuri e cloruri è stata infatti recentemente rilevata anche a profondità inferiori (circa a 250 m dal p.c.) nel già esistente pozzo Postumia, anch'esso situato ad est della città, ed in funzione da diversi anni.

Il lavoro si basa su prove idrogeologiche ed idrochimiche eseguite sulle perforazioni già realizzate per il nuovo campo pozzi e può essere così sintetizzato:

- u Caratterizzazione dell'acquifero multistrato sulla base di dati stratigrafici e geofisici sperimentali, esistenti e di nuova acquisizione.
- u Esecuzione di prove di pompaggio su due pozzi di recente realizzazione denominati A e B. Analisi chimica dei campioni di acqua prelevati dai pozzi A e B.
- u Costruzione, tramite il noto codice alle differenze finite MODFLOW, di un modello semplificato del campo pozzi per ottenere indicazioni riguardo al comportamento dell'acquifero quando tutti i pozzi saranno attivati.

## INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO

La pianura lombarda si caratterizza per la presenza di sedimenti continentali sovrapposti a sedimenti marini preesistenti; nella provincia di Cremona affiorano esclusivamente depositi continentali costituiti da sedimenti fluvio-glaciali ed alluvionali di età compresa tra il Pleistocene e l'Olocene. In particolare affiorano le seguenti unità (BERETTA *et alii*, 1993):

- u Alluvioni recenti (Olocene): alluvioni ghiaioso-sabbioso-limose degli alvei fluviali. Affiorano con continuità sulle sponde del Fiume Adda, del Fiume Serio e del Fiume Oglio.
- u Alluvioni antiche (Olocene inferiore): alluvioni sabbiose e ghiaiose, poligeniche con strato di alterazione superficiale mancante o ridotto; ricoprono una fascia estesa di territorio alla sinistra del Fiume Adda.
- u Fluvioglaciale Wurm Auct. (Pleistocene superiore): alluvioni sabbiose e ghiaiose per lo più non alterate; è presente, tra i Fiumi Adda e Po, uno strato di alterazione giallo con spessore inferiore al metro.
- u Fluvioglaciale Riss – Mindel Auct. (Pleistocene medio): sedimenti fluvio-glaciali e ghiaiosi, con lenti e banchi limoso argillosi. Tali depositi formano il terrazzo di Romanengo e sono ricoperti da una coltre di alterazione argilloso – limosa gialla rossastra spessa fino a 2.50 m.

hypotheses for the management of the new well field on the eastern side of town. The Cremona multilayered aquifer system includes a number of hydrostratigraphic units (Aquifer Groups) defined by regional permeability barriers. In particular, the water in the new well field is drawn from Aquifer Group "C" (REGIONE LOMBARDIA – ENI DIVISIONE AGIP, 2002). In the Cremona area there is a fresh water/salt water interface, characteristic of the entire Lombardy plain, at a depth of 400-500 m from ground level (REGIONE LOMBARDIA – ENI DIVISIONE AGIP, 2002), limiting the maximum depth that can be reached by the wells for drinkable water, also depending on the interface rise resulting from pumping. High concentrations of sulfides and chlorides have in fact been found recently at lesser depths (about 250 m from ground level) in the existing Postumia well, also located east of town, and which has been in operation for a number of years.

This work is based on hydrogeological and hydrochemical tests done on wells already drilled for the new well field, and can be summarized thus:

- u Characterization of the multilayered aquifer on the basis of both known and newly acquired experimental stratigraphic and geophysical data.
- u Carrying out of pumping tests on two recently drilled wells, called A and B. Chemical analysis of water samples taken from wells A and B.
- u The building of a simplified model of the well field using the well-known MODFLOW finite differences code, in order to simulate the behavior of the aquifer when all the wells will be in operation.

## GEOLOGIC AND GEOMORPHOLOGIC OUT-LINE

The Lombardy plain is characterized by continental sediments lying over preexisting marine sediments; in the province of Cremona only continental deposits outcrop, composed of fluvial-glacial and alluvial sediments from the Pleistocene to the Holocene. In particular, the following units outcrop (BERETTA *et alii*, 1993):

- u Recent alluvial sediments (Holocene): gravelly– sandy–silty alluvial sediments of river beds. They outcrop with continuity on the banks of the Adda River, the Serio River and the Oglio River.
- u Ancient alluvial sediments (Lower Holocene): sandy and gravelly alluvial sediments, polygenetic with a limited or no layer of surface alteration; they cover a wide strip of the area on the left of the Adda River.
- u Fluvial-glacial Wurm Auct. (Upper Pleistocene): sandy and gravelly alluvial sediments, for the most part unaltered; between the Adda and Po rivers there is a yellow layer of alteration less than one meter thick.
- u Fluvial-glacial Riss–Mindel Auct. (Middle Pleistocene): fluvial-glacial and gravelly sediments, with lenses and silty-argillaceous banks. These deposits form the Romanengo terrace and are covered with a sheet of reddish yellow argillaceous–silty alteration up to 2.50 m thick.

Dal punto di vista morfologico il territorio in esame presenta una complessiva uniformità con quote comprese tra i 42 e i 43 m s.l.m.. Il reticolo idrografico è costituito da una fitta rete di canali alimentati da vari corsi d'acqua (Adda, Oglio, etc.); le acque nell'insieme scorrono verso sud est in accordo con la pendenza del terreno.

### CARATTERISTICHE IDROGEOLOGICHE

Dal punto di vista idrogeologico nella pianura lombarda riveste particolare importanza il fatto che i depositi marini sono ancora in parte, permeati da acqua salmastra. L'acqua dolce infiltratasi successivamente ha permeato i depositi continentali e ha spinto in profondità l'interfaccia acqua dolce/acqua salmastra. Presso Brescia l'interfaccia si attesta attualmente a circa 740 m al di sotto del livello del mare, per risalire bruscamente verso la superficie nelle aree Mantovana e Cremonese, tra i 350 e i 450 m al di sotto del livello del mare (REGIONE LOMBARDIA – ENI DIVISIONE AGIP, 2002). L'interfaccia acqua dolce/acqua salmastra non è comunque statica perché dipende anche dai prelievi esercitati nelle soprastanti e più leggere acque dolci. I depositi permeati da acque dolci si caratterizzano per l'alternanza di livelli sabbiosi, limosi ed argillosi, con subordinati livelli di ghiaietto, torba e lignite che determinano una sovrapposizione di livelli permeabili e non. Ciò comporta la presenza di acquiferi multistrato, la cui impostazione è favorita anche dall'andamento monoclinale della successione alluvionale, che determina, tra l'altro, un flusso idrico unidirezionale verso l'alveo del Po (BERETTA *et alii*, 1993; REGIONE LOMBARDIA – ENI DIVISIONE AGIP, 2002). È da notare che l'isolamento tra una falda e l'altra sembra verificarsi per un'estensione areale non superiore a qualche chilometro quadrato (BASSI, 2000).

### PROGETTO DEI NUOVI CAMPI POZZI DI CREMONA

L'attuale servizio di approvvigionamento idrico di Cremona è affidato all'Azienda Energetica Municipale (AEM). L'AEM ha deciso di abbandonare buona parte delle captazioni già esistenti e di realizzare due nuovi campi pozzi situati ad est e ad ovest della città al fine di rientrare nei nuovi parametri limite proposti dalla Direttiva Europea 98/83/CE del 03/11/1998, divenuta D.L. n° 31 il 2 febbraio 2001. Tale direttiva obbliga alla rimozione spinta di ferro, manganese, ammoniaca e arsenico, elementi che si trovano in natura nella zona cremonese (ZAVATTI *et alii*, 1995). I due nuovi campi pozzi andrebbero ad affiancare alcuni pozzi già esistenti, quali il pozzo Postumia ed il pozzo Nuvolone, e ogni sito sarà dotato di un proprio impianto di trattamento.

In questo lavoro ci si occuperà del campo pozzi situato ad est della città, che da ora in poi verrà chiamato Campo Pozzi Est.

### CAMPO POZZI EST

Il progetto esecutivo del Campo Pozzi Est prevede la realizzazione di dieci nuovi pozzi che andranno ad affiancare il già esistente Pozzo Postumia (Fig. 1). Per evitare possibili problemi di contami-

Morphologically, the area being investigated is uniform overall, at an elevation between 42 and 43 m a.s.l. The channel net is composed of a dense network of channels fed by various rivers (Adda, Oglio, etc.); on the whole the water flows southeast, following the slope of the land.

### HYDROGEOLOGICAL CHARACTERISTICS

In the Lombardy plain, of particular importance from a hydrogeological viewpoint is the fact that the marine deposits are still partially permeated by salt water. The fresh water that infiltrated subsequently permeated the continental deposits and pushed the fresh water/salt water interface downward. The interface is currently at about 740 m below sea level near Brescia, and then it rises abruptly to 350-450 m below sea level in the Mantua and Cremona areas (REGIONE LOMBARDIA – ENI DIVISIONE AGIP, 2002). The fresh water/salt water interface is not static, however, because it depends also on the amount of water being drawn from the overlying and lighter fresh water. The deposits permeated with fresh water are characterized by the alternation of sandy, silty and argillaceous levels, with subordinate levels of fine gravel, peat and lignite that create a superposition of permeable and impermeable levels. This brings about the presence of multilayered aquifers, whose structure is favored also by the monocline trend of the alluvial sequence, which, moreover, causes the groundwater to flow in a single direction, toward the Po River (BERETTA *et alii*, 1993; REGIONE LOMBARDIA – ENI DIVISIONE AGIP, 2002). It should be noticed that the isolation between one groundwater layer and the next seems to occur over an area no greater than a few square kilometers (BASSI, 2000).

### NEW WELL FIELDS PROJECT IN CREMONA

At the present time, water in Cremona is supplied by the Azienda Energetica Municipale (AEM–Municipal Energy Company). The AEM has decided to abandon many of the existing wells and to build two new well fields on the eastern and western sides of town, in order to comply with the new maximum allowable levels proposed by European Directive 98/83/EC of 3 November 1998, which became D.L. no. 31 of 2 February 2001. This directive requires the removal of iron, manganese, ammonia and arsenic, elements which are found in nature in the Cremona area (ZAVATTI *et alii*, 1995). The two new well fields will join a number of existing wells, such as the Postumia and Nuvolone wells, and each site will have its own treatment plant.

This work will deal with the well field located east of town, which hereinafter will be called the Eastern Well Field.

### EASTERN WELL FIELD

The final plan for the Eastern Well Field calls for the drilling of ten new wells, which will join the existing Postumia Well (Fig. 1). In order to avoid possible problems of contami-

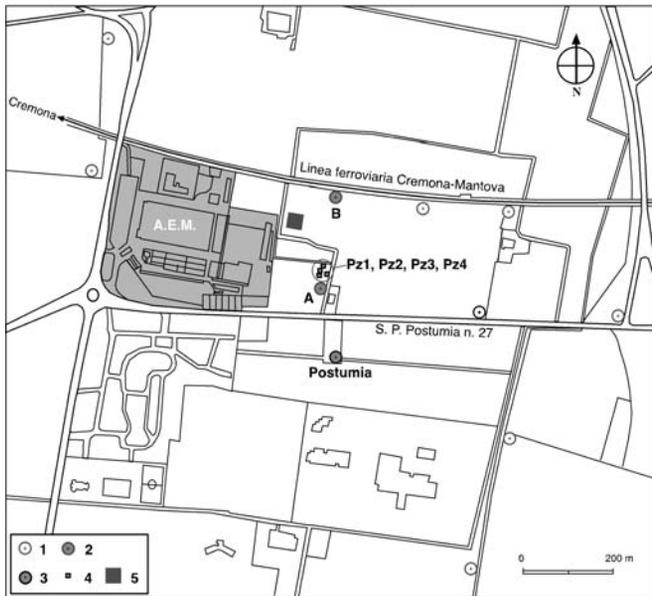


Fig. 1 - Schema progettuale preliminare del campo pozzi Est (1. Pozzi da realizzare secondo il progetto; 2. Pozzi perforati recentemente; 3. Pozzi preesistenti ed in esercizio; 4. Piezometri; 5. Impianto di trattamento)  
 - Eastern well field scheme according to the project (1. Wells to be drilled according to the project; 2. Recently borehole; 3. Former wells currently in operation; 4. Piezometers; 5. Treatment plant)

nazione di origine antropica l'AEM ha scelto di sfruttare gli orizzonti acquiferi più profondi.

L'area rientra nella tavoletta NW, quadrante III, foglio 61 della Carta IGM 1:25000. Una volta ultimato, il Campo Pozzi Est svolgerebbe una doppia funzione: alimentare la zona orientale della città e rifornire la Centrale Realdo Colombo per l'approvvigionamento idrico del centro storico. Il progetto prevede inoltre che, dopo aver messo in esercizio le nuove opere di captazione, si provveda, in maniera graduale, a dismettere e successivamente a cementare parte dei pozzi attualmente in uso.

La portata di emungimento prevista per ogni pozzo è di circa 0.050-0.060 m<sup>3</sup>/s. Il progetto prevede la captazione selettiva da diversi acquiferi, garantita dalla ricostruzione degli orizzonti di separazione a bassa permeabilità attraversati dalla perforazione. La profondità massima prevista per i pozzi non sarà superiore ai 240 m dal p.c. come suggerito dalle indagini eseguite preventivamente sul pozzo Postumia, profondo 285 m dal p.c. Ulteriori informazioni idrogeologiche-idrochimiche sono state ottenute dopo la realizzazione di quattro piezometri (Pz1, Pz2, Pz3 e Pz4) e di due pozzi (Pozzo A e Pozzo B). I quattro piezometri, realizzati nel 2001, raggiungono diverse profondità, e captano acqua da livelli acquiferi differenti; i pozzi, realizzati tra la fine del 2001 e l'inizio del 2002, raggiungono 150 (pozzo A) e 223 (pozzo B) m di profondità (Fig. 2), e distano 200 m l'uno dall'altro. I piezometri 2 e 3 attingono, ciascuno, ad uno dei livelli che interessano il pozzo B, mentre il piezometro 4 interessa uno dei due livelli che alimentano il pozzo A.

La Tabella 1 mostra la profondità di ciascun piezometro e la posizione dei filtri. Sulla base delle indagini idrogeologiche condotte sul pozzo Postumia, dei logs geofisici effettuati nel piezometro 3 (BALDI, 2001) e della ricostruzione litostratigrafica basata sui campioni di cuttings prelevati durante le perforazioni dei pozzi A e B e dei piezo-

nation caused by man, the AEM decided to exploit the deeper aquifer levels.

The area lies within the NW table, quadrant III, sheet 61 of the IGM Map 1:25000. Once completed, the Eastern Well Field will have a dual function: to supply the eastern area of town and to supply the Centrale Realdo Colombo for providing water to the historic center. After the new wells are in operation, the plan also provides for the gradual abandoning and sealing of part of the wells currently being used.

The pumping discharge estimated for each well is approximately 0.050-0.060 m<sup>3</sup>/s. The plan provides for the selective tapping of different aquifers, guaranteed by the reconstruction of the low permeability separation horizons through drilling. The maximum depth planned for the wells will not be greater than 240 m from ground level, as suggested by the investigations done beforehand on the Postumia Well, which is 285 m deep from ground level. Further hydrogeological-hydrochemical information was obtained after the drilling of four piezometers (Pz1, Pz2, Pz3 and Pz4) and two wells (Well A and Well B). The four piezometers, drilled in 2001, reach different depths, and draw water from different aquifer levels. The wells were drilled in late 2001/early 2002, and reach depths of 150 m (well A) and 223 meters (well B) (Fig. 2), and are located 200 m apart from each other. Piezometers 2 and 3 each draw at one of the levels that feed well B, and piezometer 4 at one of the two levels that feed well A.

Table 1 shows the depth of each piezometer and the position of the filters.

On the basis of the hydrogeological investigations conducted on the Postumia well, the geophysical logs carried out in piezometer 3 (BALDI, 2001) and the lithostratigraphic reconstruction based on samples of cuttings taken during the drilling of the piezometers

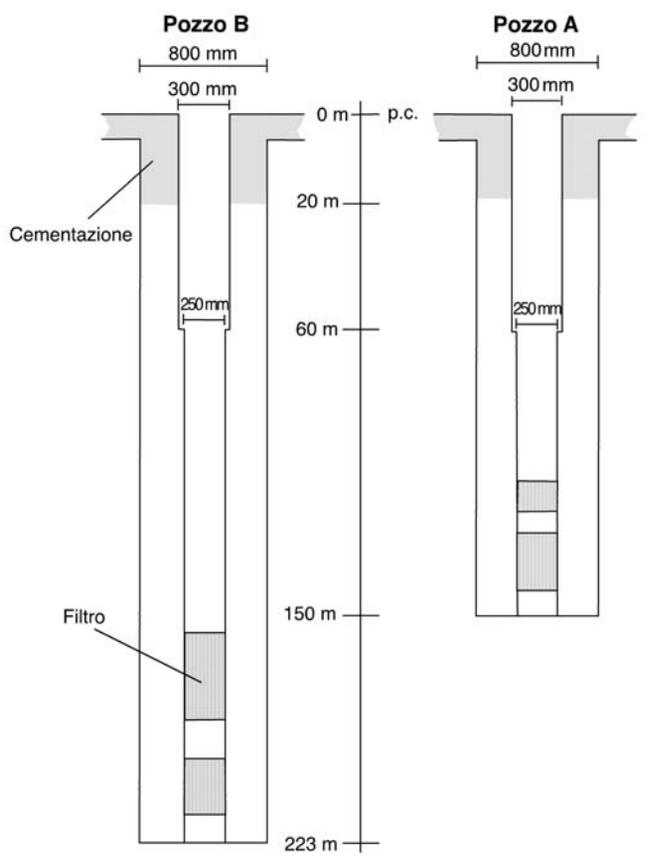


Fig. 2 - Caratteristiche costruttive dei pozzi A e B  
- Characteristics of wells a and B

Piezometers	Depth (m)	Location of the screen (m)
Pz1	240	235.5-228.0
Pz2	188	185.0-179.0
Pz3	217	213.0-207.0
Pz4	144	144.0-135.0

Tab. 1 - Caratteristiche dei piezometri  
- Characteristics of piezometers

metri, è stato possibile evidenziare gli orizzonti acquiferi che interessano la zona dove sorgerà il nuovo Campo Pozzi Est. Mettendo a confronto tutte le stratigrafie a disposizione è stata realizzata una colonna stratigrafica unica che rappresenta tutta la zona (Fig. 3).

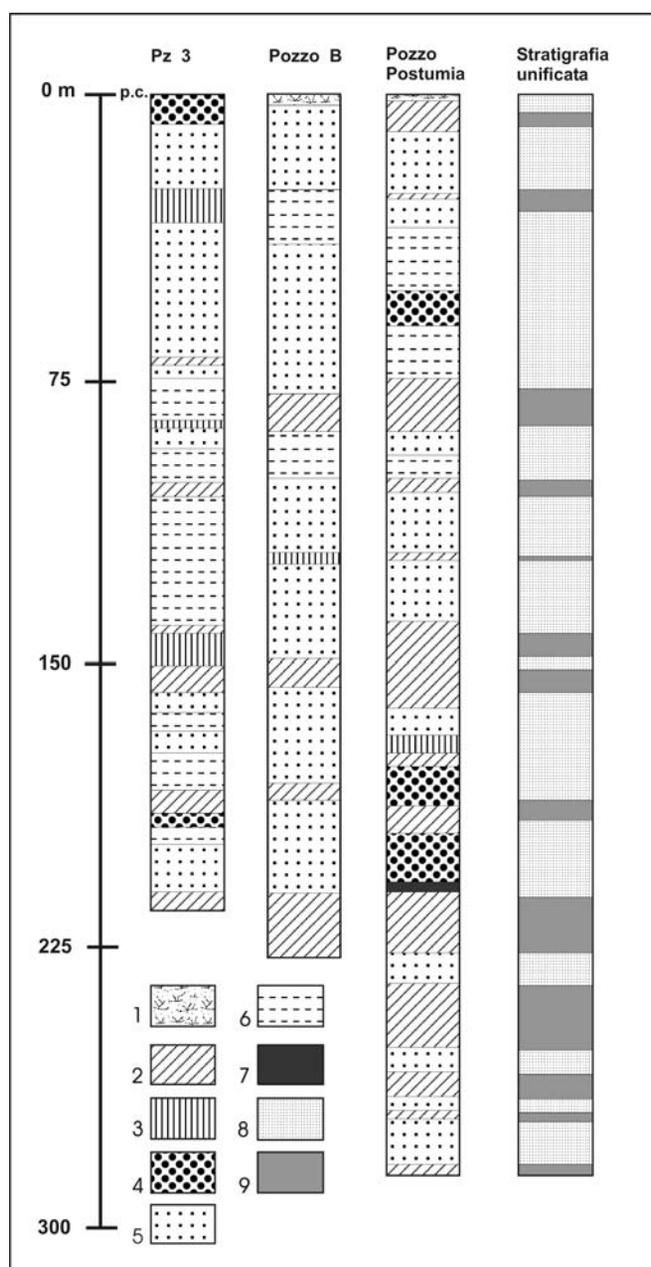


Fig. 3 - Stratigrafia dell'area in esame ricostruita sulla base delle perforazioni eseguite. (1. Terreno vegetale; 2. Argilla; 3. Argilla sabbiosa; 4. Sabbia argillosa; 5. Sabbia; 6. Sabbia con ghiaia; 7. Torba; 8. Livelli ad alta permeabilità; 9. Livelli a bassa permeabilità)  
- Stratigraphy of the study area defined on the basis of the recent borehole and piezometers (1. Soil; 2. Clay; 3. Sandy clay; 4. Sand with clay; 5. Sand; 6. Sand with gravel; 7. Peat; 8. High permeability levels; 9. Low permeability levels)

and of wells A and B, it is possible to show the aquifer horizons in the area where the new Eastern Well Field will be built. By comparing all the available stratigraphies, a single stratigraphic sequence was defined which represents the entire area (Fig. 3).

**PROVE DI EMUNGIMENTO NEL CAMPO POZZI EST**

Per avere maggiori indicazioni sulle caratteristiche idrogeologiche dell'area, sono state eseguite prove di pompaggio, a gradini e di lunga durata, sui pozzi A e B, i cui livelli statici erano rispettivamente, al momento delle prove, 11.04 e 10.87 m da p.c.. In contemporanea sono stati misurati i livelli dinamici sui piezometri circostanti. I dati delle prove a gradini sono stati utilizzati per definire i parametri della curva caratteristica di ciascun pozzo, mentre i dati delle prove a lunga durata e quelli registrati in risalita sono serviti a definire il valore di trasmissività (T) e coefficiente d'immagazzinamento (S) dei vari acquiferi.

**Prova a gradini nel pozzo A**

La prova, effettuata l'8 marzo 2002, ha consistito in quattro gradini di portata crescente della durata di 120 minuti ciascuno (Tab. 2). A causa di problemi tecnici che hanno provocato l'interruzione dell'emungimento nella prima ora di prova si è ritenuto opportuno utilizzare i soli dati degli ultimi tre gradini per la sua interpretazione. Poiché non si è raggiunta una situazione di perfetto equilibrio per nessuna delle portate emunte (Q), per minimizzare i possibili errori, i dati piezometrici misurati ( $s_w$ ) sono stati corretti secondo il metodo riportato da CUSTODIO & LLAMAS (1983), in modo da fornire valori ( $s_c$ ) utilizzabili per ricavare i parametri della curva caratteristica del pozzo (B, C ed n) (Fig. 4).

**PUMPING TESTS IN THE EASTERN WELL FIELD**

In order to improve knowledge on the area's hydrogeological characteristics, multi-step and long term constant discharge pumping tests were carried out on wells A and B, whose undisturbed piezometric levels at the time of the tests were respectively 11.04 m and 10.87 m from ground surface. At the same time, the drawdown of the surrounding piezometers were measured. The multi-step test data were used to define the parameters of the discharge-drawdown curve for each well, while the long-term test data and the recovery data served to define the transmissivity (T) and storage coefficient (S) values of the various aquifers.

**Multi-step test on well A**

The test was carried out on March 8, 2002 and consisted of four steps of increasing discharge and having a duration of 120 minutes each (Table 2). Because of technical problems which interrupted the pumping during the first hour of the test, it was considered best to use only the data from the last three steps. Since a perfect equilibrium was not reached for any of the discharges pumped (Q), in order to minimize the possible errors, the piezometric data measured ( $s_w$ ) were corrected according to the method given by CUSTODIO & LLAMAS (1983), in order to provide ( $s_c$ ) values that could be utilized for obtaining the parameters of the well discharge-drawdown curve (B, C and n) (Fig. 4).

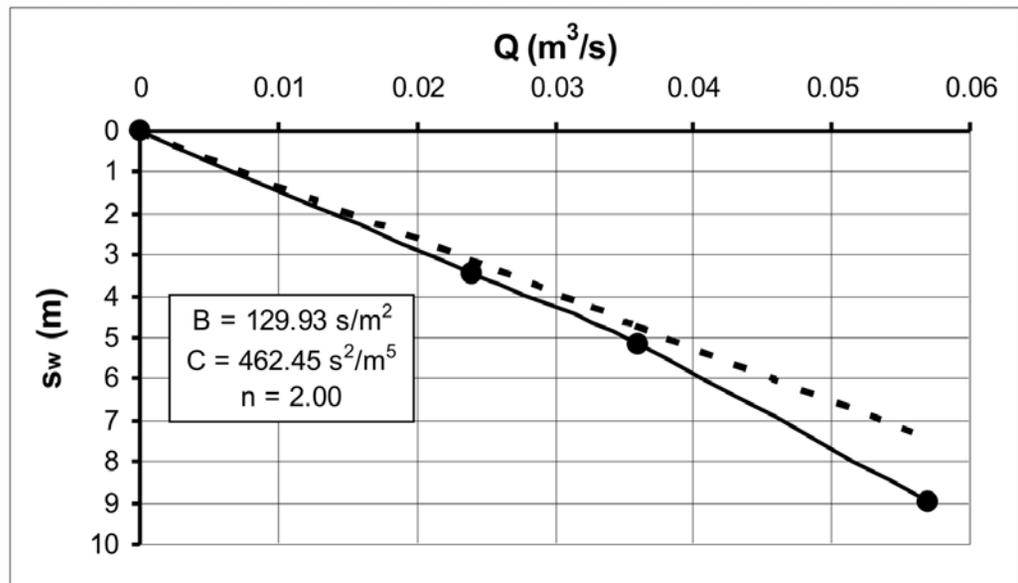


Fig. 4 - Curva caratteristica del pozzo A e relativi parametri. La linea tratteggiata indica l'andamento delle perdite di carico lineari  
 - Discharge-drawdown curve of well A and parameters according to the Jacob equation. The dashed line indicates the linear trend

Gradino Step	Q (m³/s)	$s_w$ (m)	$s_c$ (m)
1°	0.024	3.43	3.43
2°	0.036	5.23	5.17
3°	0.057	9.08	8.97

Tab. 2 - Dati relativi alla prova a gradini nel pozzo A  
 - Multi-step pumping test data in well A

### Prova di lunga durata nel pozzo A

La prova di lunga durata sul pozzo A, seguita da una fase di risalita, è stata effettuata dall'11 al 14 marzo 2002 con una portata di  $0.057 \text{ m}^3/\text{s}$ . L'abbassamento massimo registrato sul pozzo è stato di 9.38 m (Fig. 5). Sono stati registrati contemporaneamente gli abbassamenti anche nei piezometri circostanti. Per l'interpretazione dei risultati sono stati utilizzati i dati del piezometro 4, che ha la propria sezione filtrante in corrispondenza di uno degli acquiferi interessati dal pozzo A. In tabella 3 sono riportati i valori di trasmissività (T) e coefficiente d'immagazzinamento (S) ricavati con il metodo di Theis e con il metodo di Hantush-Walton per falde semiconfinatae (FETTER, 2001). Come si può osservare i risultati sono pressoché uguali; l'analisi con il metodo di Hantush-Walton ha mostrato che la curva tempi depressioni è pressoché coincidente con la curva di Theis per acquiferi confinati.

		Theis	Hantush-Walton
		Pz4	Pz4
Long term pumping test (Q = $0.057 \text{ m}^3/\text{s}$ )	T ( $\text{m}^2/\text{s}$ )	$3.15 \cdot 10^{-2}$	$2.75 \cdot 10^{-2}$
	S	$8.16 \cdot 10^{-4}$	$7.35 \cdot 10^{-4}$
Recovery test	T ( $\text{m}^2/\text{s}$ )	$2.92 \cdot 10^{-2}$	-

Tab. 3 - Parametri idrogeologici relativi alle prove di pompaggio eseguite sul pozzo A  
- Hydrogeological parameters from pumping tests in well A

### Prova a gradini nel pozzo B

La prova, effettuata il 21 marzo 2002, è consistita in cinque gradini di portata crescente della durata di 90 minuti ciascuno (Tab. 4). Poiché non si è raggiunta una situazione di perfetto equilibrio per nessuna delle portate emunte (Q), per minimizzare i possibili errori, i dati piezometrici misurati ( $s_w$ ) sono stati corretti secondo il metodo riportato da CUSTODIO & LLAMAS (1983) in modo da fornire valori ( $s_c$ ) utilizzabili per ricavare i parametri della curva caratteristica del pozzo (B, C ed n) (Fig. 6).

### Prova di lunga durata nel pozzo B

La prova di lunga durata sul pozzo B, seguita da una fase di risalita, è stata effettuata dal 25 al 28 marzo 2002 con una portata di  $0.057 \text{ m}^3/\text{s}$ . Sono stati registrati contemporaneamente gli abbassamenti anche nei piezometri circostanti. I dati utilizzati per ricavare i parametri dell'acquifero sono stati quelli dei piezometri 2 e 3, ciascuno dei quali interessa uno dei due livelli acquiferi sfruttati dal pozzo B. Per quanto riguarda i dati del pozzo, in sostituzione di questi sono stati utilizzati i dati raccolti nel piezometro 6, costituito da un tubo da 2 pollici inserito nell'intercapedine tra la parete del foro ed il tubo di rivestimento del pozzo (Fig. 7). In tabella 5 sono riportati i

### Long-term test on well A

The long-term test at well A, followed by a recovery was carried out March 11 - 14, 2002 with a discharge of  $0.057 \text{ m}^3/\text{s}$ . The maximum drawdown recorded on the well was 9.38 m (Fig. 5). The drawdowns were recorded at the same time in the surrounding piezometers. The results were interpreted using the data from piezometer 4, which had its filtering section in one of the aquifers feeding well A. Table 3 gives the transmissivity (T) and the storage coefficient (S) values obtained with the Theis method and the Hantush-Walton method for semi-confined aquifers (FETTER, 2001). As can be seen, the results are virtually identical; the analysis using the Hantush-Walton method showed that the time-drawdown curve is practically the same as the Theis curve for confined aquifers.

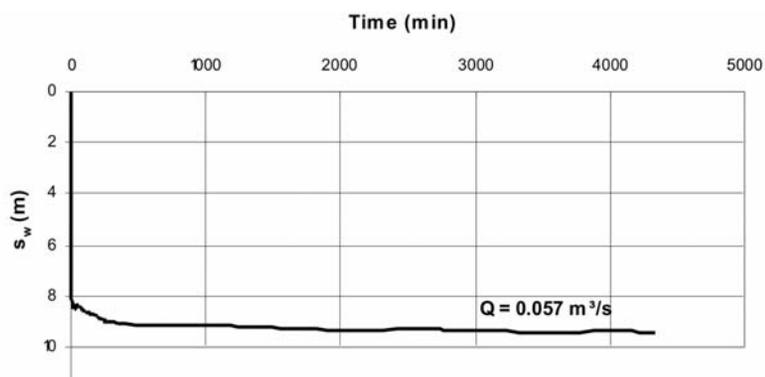


Fig. 5 - Prova di lunga durata nel pozzo A  
- Long term pumping test in well A

### Multi-step test on well B

The test was carried out on March 21, 2002 and consisted of five steps of increasing discharge and having a duration of 90 minutes each (Table 4). Since a perfect equilibrium was not reached for any of the discharges pumped (Q), in order to minimize the possible errors, the piezometric data measured ( $s_w$ ) were corrected according to the method given by CUSTODIO & LLAMAS (1983), in order to provide ( $s_c$ ) values that could be utilized for obtaining the parameters of the well discharge-drawdown curve (B, C and n) (Fig. 6).

### Long-term test on well B

The long-term test on well B, followed by a recovery, was carried out March 25 - 28, 2002 with a discharge of  $0.057 \text{ m}^3/\text{s}$ . The drawdowns were recorded at the same time in the surrounding piezometers. The data from piezometers 2 and 3, each of which has the filters in one of the two levels that feed well B, were used to obtain the aquifer parameters. The well data were substituted by the data collected in piezometer 6, composed of a 2-inch pipe inserted in the space between the wall of the hole and the well casing (Fig. 7). Table 5 gives the transmissivity (T) and the storage coefficient (S) values obtained with the Theis method and the

Gradino Step	$Q$ ( $m^3/sec$ )	$s_w$ (m)	$s_c$ (m)
1°	0.019	0.81	0.81
2°	0.029	1.31	1.28
3°	0.041	1.98	1.91
4°	0.046	2.27	2.15
5°	0.057	2.92	2.76

Tab. 4 - Dati relativi alla prova a gradini nel pozzo B  
- Multi-step pumping test data in well B

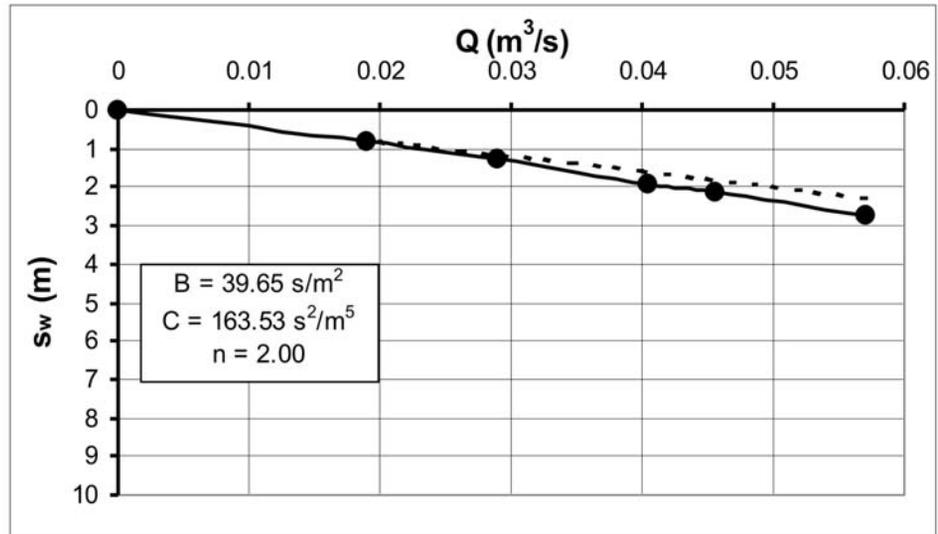


Fig. 6 - Curva caratteristica del pozzo B e relativi parametri. La linea tratteggiata indica l'andamento delle perdite di carico lineari  
- Discharge-drawdown curve of well B and parameters according to the Jacob equation. The dashed line indicated the linear losses

valori di trasmissività (T) e coefficiente d'immagazzinamento (S) ricavati con il metodo di Theis e con il metodo di Hantush-Walton per falde semiconfinatae (FETTER, 2001). Come si può osservare anche in questo caso i risultati sono pressoché uguali; anche in questo caso la curva di Hantush-Walton coincide con la curva tipica di acquiferi confinati.

Hantush-Walton method for semi-confined aquifers (FETTER, 2001). As can be observed, also in this case the results are virtually identical; also in this case the Hantush-Walton curve coincides with the typical curve for confined aquifers.

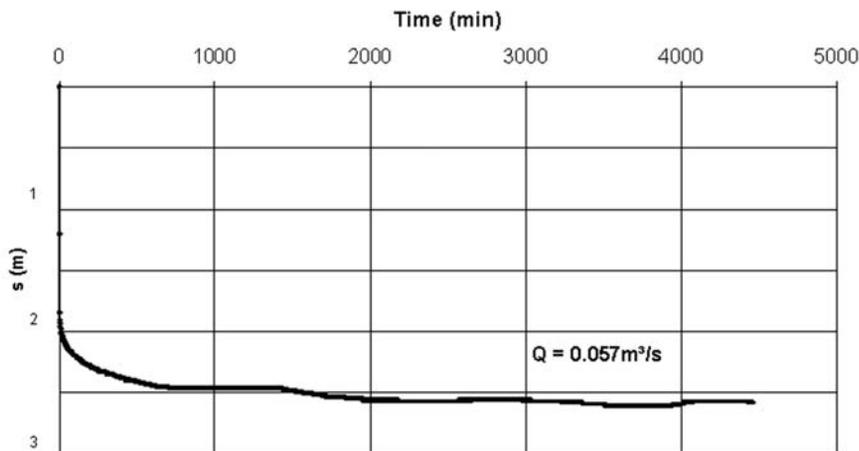


Fig. 7 - Abbassamenti nel piezometro 6 (Pz6) durante la prova di lunga durata nel pozzo B  
- Well losses in Pz6 during the long term pumping test in well B

		Theis			Hantush-Walton		
		Pz6	Pz2	Pz3	Pz6	Pz2	Pz3
Long term pumping test ( $Q = 0.057 m^3/s$ )	T( $m^2/s$ )	$3.78 \cdot 10^{-2}$	$4.09 \cdot 10^{-2}$	$2.95 \cdot 10^{-2}$	-	$2.11 \cdot 10^{-2}$	$3.74 \cdot 10^{-2}$
	S	-	$4.29 \cdot 10^{-3}$	$2.56 \cdot 10^{-3}$	-	$2.69 \cdot 10^{-3}$	$4.26 \cdot 10^{-3}$
Recovery test	T( $m^2/s$ )	$4.45 \cdot 10^{-2}$	$6.20 \cdot 10^{-2}$	$3.73 \cdot 10^{-2}$	-	-	-

Tab. 5 - Parametri idrogeologici relativi alle prove di pompaggio eseguite sul pozzo B  
- Hydrogeological parameters from pumping tests in well B

## OSSERVAZIONI SULLE PROVE

I grafici delle prove di pompaggio e la loro interpretazione indicano che, sostanzialmente, gli acquiferi considerati possono essere assimilati ad acquiferi confinati. Le prove a gradini mostrano che, nonostante le perplessità che si possono avanzare sui metodi tradizionali d'interpretazione della curva caratteristica (DRISCOLL, 1989; DRAGONI, 1999), i pozzi sono stati ben progettati e ben costruiti: per entrambe le opere i dati indicano infatti che la curva caratteristica segue l'equazione di Jacob e che l'efficienza rimane al di sopra del 75%, anche alla massima portata (0.057 m<sup>3</sup>/s). Sebbene il parametro efficienza possa talvolta non dare indicazioni significative sulla "qualità" del sistema pozzo acquifero (CAMBI, 2001), nel caso in questione le depressioni si mantengono piuttosto contenute in rapporto alle portate emunte. In questo contesto, nonostante i dubbi che si possono avanzare sul cosiddetto criterio di Walton, vale la pena di sottolineare che in entrambi i pozzi il coefficiente C dell'equazione di Jacob è ben inferiore a 675 s<sup>2</sup>/m<sup>5</sup>: secondo tale criterio ciò indica che i pozzi sono "ben costruiti e ben condizionati" (DE MARSILY, 1986; HAMILL & BELL, 1986).

Si noti che, sia alla massima portata emunta nel corso della prova a gradini che durante la prova di lunga durata, la depressione registrata nel pozzo A (~ 9 m) è circa il triplo di quella registrata nel pozzo B (~ 3 m): ciò è coerente con il maggiore valore medio della trasmissività per il pozzo B e con il minor valore del coefficiente C per lo stesso pozzo. La curva caratteristica di entrambi i pozzi è tipica di opere che emungono da acquiferi confinati.

Nel corso delle prove di lunga durata e nel corso della risalita si sono verificate delle oscillazioni periodiche dei livelli dovute, con ogni probabilità, al fatto che alcune opere di captazione nei pressi del nuovo Campo Pozzi Est, sono attive di giorno e vengono spente durante la notte. In fase di elaborazione dei dati non si è tenuto conto di queste oscillazioni, che sono dell'ordine di pochi centimetri e possono essere considerate ininfluenti. Tuttavia l'esistenza di queste anomalie indica l'interferenza delle opere del Campo Pozzi Est con pozzi già esistenti in zone limitrofe.

## PRINCIPALI CARATTERI CHIMICI DELL'ACQUIFERO DI CREMONA

La più recente normativa sulla qualità delle acque è il D.L. 31 del 2001; questo decreto indica le concentrazioni massime ammissibili con il termine "Valore del Parametro" (Allegato I, parte B): nel seguito, si userà il termine VMA (Valore Massimo Ammissibile) perché di più immediata comprensione.

Ammoniaca, ferro, manganese e arsenico sono naturalmente presenti, in quantità non trascurabili, nelle acque degli acquiferi cremaschi (FRANCANI *et alii*, 1994). È importante notare che l'entrata in vigore del suddetto decreto ha abbassato il VMA dell'arsenico a 10 µg/l, contro i 50 µg/l precedentemente ammessi dal D.P.R. 236 del 1988, mentre ha lasciato invariate i VMA di Fe, Mn ed ammoniaca. Questa variazione è particolarmente significativa nel caso delle acque di Cremona perché, in base alle indagini sulle

## TEST OBSERVATIONS

The graphs of the pumping tests and their interpretation indicate that, in practice, the aquifers under consideration can be assimilated to confined aquifers. The multi-step tests show that although there may be some perplexities regarding the traditional methods of interpretation of the discharge-drawdown curve (DRISCOLL, 1989; DRAGONI, 1999), the wells were properly planned and built: the data for both wells show in fact that the discharge-drawdown curve follows the Jacob equation and that efficiency remains above 75% even at maximum discharge (0.057 m<sup>3</sup>/s). Even though the efficiency parameter may not always give significant indications as to the "quality" of the aquifer-well system, (CAMBI, 2001), in the case being examined here the drawdowns remained rather limited in relation to the discharges pumped. In this context, despite the doubts that may be entertained regarding the so-called Walton criterion, it should be underlined that in both wells coefficient C of the Jacob equation is much lower than 675 s<sup>2</sup>/m<sup>5</sup>: according to the mentioned criterion this indicates that the wells are "well-built and well-conditioned" (DE MARSILY, 1986; HAMILL & BELL, 1986).

It should be noted that at the maximum discharge pumped during both the multi-step and the long-term tests, the drawdown recorded in well A (~ 9 m) is about three times higher than the drawdown recorded in well B (~ 3 m): this is consistent with the higher mean transmissivity value and the lower coefficient C for well B. The discharge-drawdown curve for both wells is typical of wells pumping from confined aquifers.

During the long-term tests and during the recovery stage there were periodic oscillations in the levels, probably due to the fact that some wells near the new Eastern Well Field are in operation during the day and are shut down at night. These oscillations were not taken into consideration during the processing of the data, as they are on the order of a just a few centimeters and can be considered to be not influential. However, these anomalies provide evidence of the interference of the Eastern Well Field wells with existing wells in nearby areas.

## MAIN CHEMICAL CHARACTERISTICS OF THE CREMONA AQUIFER

The most recent law on water quality is D.L. 31/2001; this decree gives the maximum concentrations allowable using the term "Parameter Value" (Annex I, part B): hereinafter the term MAV (Maximum Allowable Value) will be used, because it is more readily understood.

Ammonia, iron, manganese and arsenic are naturally present in significant amounts in the water in the Cremona aquifers (FRANCANI *et alii*, 1994). It is important to note that the coming into force of the aforesaid decree has lowered the MAV of arsenic to 10 µg/l, compared to the 50 µg/l previously allowed by D.P.R. 236 of 1988, while the MAVs of Fe, Mn and ammonia have remained unchanged. This variation is particularly significant in the case of Cremona's water, because analysis of the chemical-

caratteristiche chimico fisiche delle acque estratte dai pozzi attualmente sfruttati dall'AEM, la concentrazione di arsenico rilevata in natura è superiore ai 10 µg/l in tutti i punti esaminati, il che rende necessario un impianto di trattamento anche per la rimozione dell'arsenico (Fig. 8)

physical characteristics of the water taken from the wells currently being used by the AEM show a concentration of arsenic in nature that is higher than 10 µg/l at all spots investigated, which makes a treatment plant necessary also for the removal of arsenic (Fig. 8).

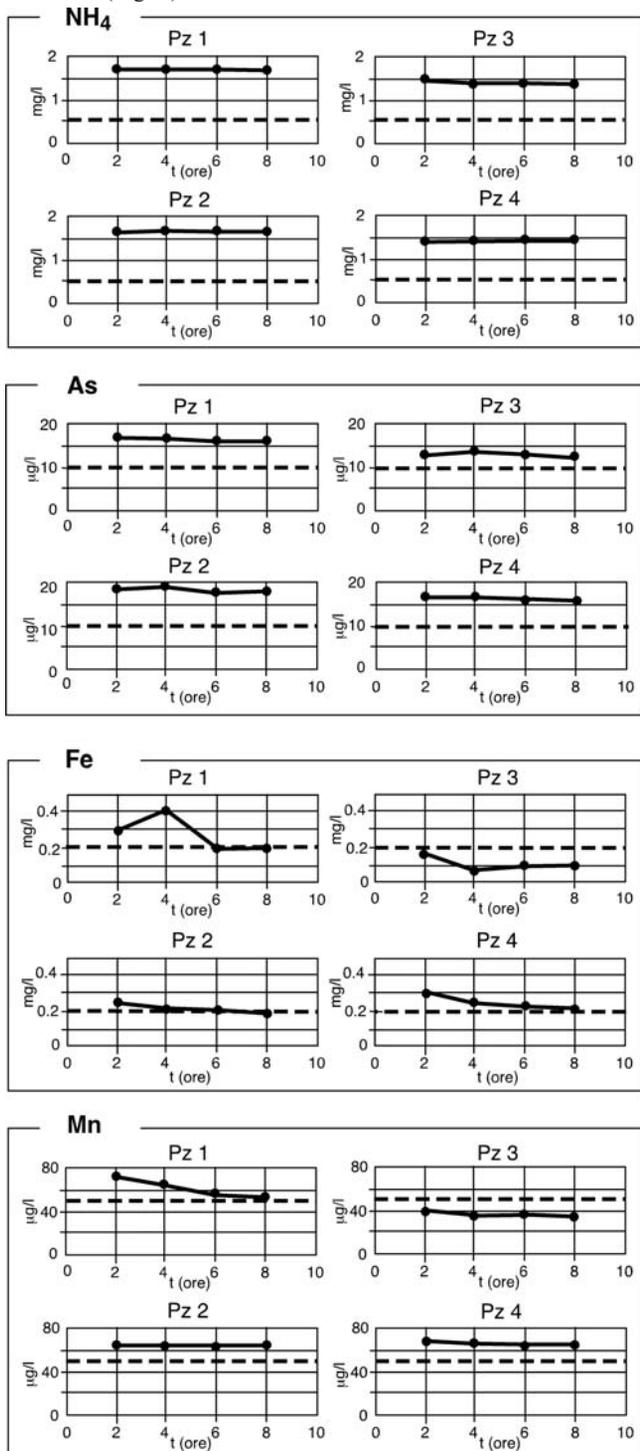


Fig. 8 - Concentrazioni di  $NH_4$ , As, Fe e Mn nei piezometri. (----- VMA)  
 -  $NH_4$ , As, Fe and Mn concentration in the piezometers. (-----VMA)

### Piezometri

Nel corso delle prove di pompaggio preliminari eseguite sui piezometri 1, 2, 3 e 4 (CADROBBI *et alii*, 2001) sono stati effettuati prelievi per la caratterizzazione idrochimica dell'acqua, con cadenza di due ore, allo scopo di verificare le concentrazioni delle varie sostanze. Per quanto riguarda l'ammoniaca, la sua concentrazione risulta superiore alla VMA; la concentrazione dello ione ammonio è minore nella falda più superficiale e nel livello acquifero compreso tra i 207.0 e i 213.0 m dal p.c., che interessa il piezometro 3. Nello stesso piezometro non si registrano concentrazioni di ferro e manganese superiori alla VMA, come accade, invece, negli altri piezometri. La concentrazione di arsenico è costantemente superiore al valore di VMA previsto dal D.L. n° 31/2001. Anche nel caso dell'arsenico il piezometro 3 è quello che presenta concentrazioni più basse.

### Pozzi "A" e "B"

Durante la prova di lunga durata sul pozzo A sono stati eseguiti tre prelievi di acqua, con cadenza giornaliera, per effettuare le analisi idrochimiche.

Analogamente a quanto riscontrato nei piezometri, le concentrazioni di arsenico, manganese ed ammonio risultano costantemente al di sopra della VMA secondo la nuova normativa. L'arsenico ha una concentrazione media di 22.6 µg/l, il manganese ha una concentrazione media di 65.6 µg/l mentre la concentrazione di ammoniaca è pari, in media, a 1.5 mg/l. La concentrazione di Ferro (0.14 mg/l) è inferiore alla VMA. La temperatura misurata è di 15.3 °C, il pH di poco inferiore ad 8.00 unità ed il contenuto di solfati, nitrati, mercurio, nitriti, selenio, cadmio, cromo, piombo, solfuri e silice è trascurabile.

È stato eseguito un prelievo di acqua anche durante la prova di emungimento di lunga durata effettuata nel pozzo B, dopo quattro giorni dall'inizio del pompaggio.

La concentrazione di ammoniaca (1.44 mg/l) e quella di manganese (62.8 µg/l) sono circa uguali a quelle del pozzo A, mentre la concentrazione di arsenico è inferiore (18 µg/l), sebbene ancora superiore alla VMA. Anche in questo caso la concentrazione del ferro (0.056 mg/l) è inferiore alla VMA ed è anche inferiore alla concentrazione rilevata nel pozzo A. La temperatura misurata è di 16.2 °C, mentre il pH è di poco superiore alle 8.00 unità.

Da questa analisi si ha la conferma che le acque emunte dai pozzi A e B dovranno subire un processo di potabilizzazione.

### STUDIO PRELIMINARE CON IL MODELLO MOD-FLOW DELL'USGS

Visto che il progetto dell'ente gestore prevede la realizzazione di dieci nuovi pozzi, per avere una prima indicazione sul comportamento dell'acquifero multistrato in condizioni di pompaggio simultaneo da tutti i pozzi, è stato costruito, sulla base dei dati finora acquisiti, un modello preliminare semplificato dell'acquifero, in cui sono stati trascurati gli effetti di interferenza con altri pozzi limitro-

### Piezometers

During the preliminary pumping tests carried out on piezometers 1, 2, 3 and 4 (CADROBBI *et alii*, 2001) samples for determining the hydrochemical characteristics of the water were taken every two hours, in order to monitor the concentrations of various substances. The concentration of ammonia was always higher than the MAV; the concentration of the ammonium ion was lower in the stratum nearest the surface and in the aquifer level between 207.0 and 213.0 m from ground level, which are both cut by piezometer 3. The concentrations of iron and manganese recorded in this piezometer were not above the MAV, contrary to that found in the other piezometers. The concentration of arsenic is persistently above the MAV established by D.L. 31/2001. For arsenic, piezometer 3 was again that which showed the lowest concentration.

### Wells "A" and "B"

During the long-term test on well A, three water samples were taken, one per day, for hydrochemical analysis.

Like that found in the piezometers, the concentrations of arsenic, manganese and ammonium were constantly above the MAV of the new regulation. Arsenic had an average concentration of 22.6 µg/l, manganese had an average concentration of 65.6 µg/l, and the average concentration of ammonia was 1.5 mg/l. Iron (0.14 mg/l) was below the MAV. The temperature measured was 15.3°C, the pH just below 8.00, and the content of sulfates, nitrates, mercury, nitrites, selenium, cadmium, chrome, lead, sulfides and silica was negligible.

A water sample was also taken during the long-term pumping test done on well B, four days after the start of pumping.

The concentrations of ammonia (1.44 mg/l) and of manganese (62.8 µg/l) were about equal to those of well A, while the concentration of arsenic was lower (18 µg/l), although still above the MAV. Here also the concentration of iron (0.056 mg/l) was lower than the MAV, and was also lower than the concentration found in well A. The temperature measured was 16.2°C, and the pH just above 8.00.

This analysis confirmed that the water pumped from wells A and B must be treated to make it suitable for drinking.

### PRELIMINARY STUDY WITH THE USGS MOD-FLOW MODEL

Given that the AEM's plan calls for the building of ten new wells, in order to get an initial idea of the behavior of the multilayered aquifer in conditions of simultaneous pumping from all the wells, a simplified preliminary model was built on the basis of the data acquired up until now, ignoring the effects of interference with other nearby wells. The model

fi. Per la costruzione del modello è stato utilizzato il ben noto codice darciano MODFLOW dell'USGS.

Sulla base dei dati stratigrafici disponibili, l'acquifero è stato rappresentato mediante un griglia di 14 strati orizzontali fino ad una profondità di 265 m (Fig. 9), per una estensione areale di 1.000x20000 m<sup>2</sup>, dimensione ritenuta superiore al possibile raggio di influenza dei pozzi.

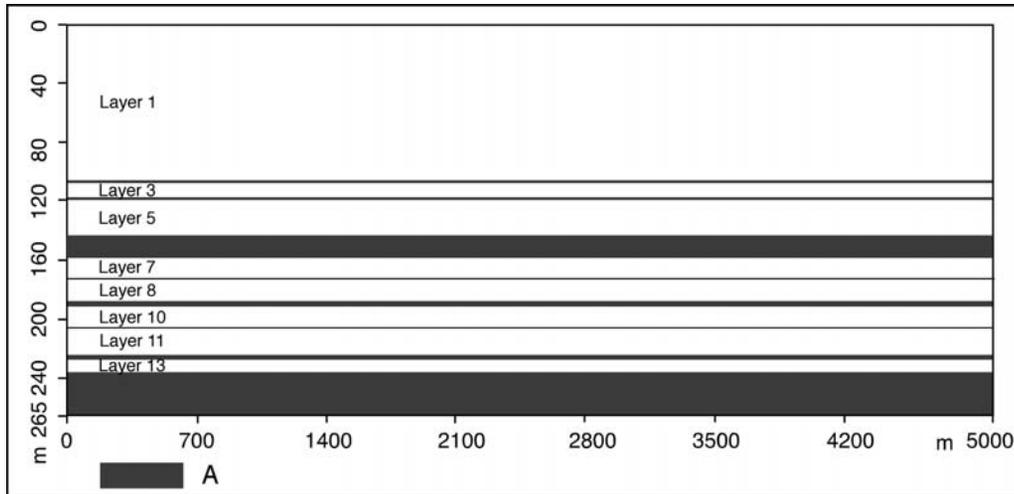


Fig. 9 - Sezione della griglia. Gli strati scuri sono quelli a bassa permeabilità (A)  
- Cross-section of the grid. The dark strata have low permeability (A)

Gli orizzonti compresi tra 0 e 105 m dal p.c., non influenzati dal pompaggio negli acquiferi più profondi, sono stati rappresentati mediante un unico strato; inoltre gli orizzonti a bassa permeabilità posti tra i 145 e i 158 m dal p.c. - separati da un sottile orizzonte permeabile - sono stati considerati come un unico livello a bassa permeabilità. A ciascuno degli strati permeabili sono stati inizialmente assegnati i parametri idrogeologici medi ricavati dall'analisi delle prove di emungimento. Sulla griglia sono stati ubicati tutti i pozzi e i piezometri già realizzati ed i pozzi da realizzare secondo il progetto (cfr. Fig. 1). Questi ultimi sono stati inseriti, inizialmente, con lo stesso schema costruttivo del pozzo B, che è quello in cui le depressioni registrate risultano inferiori. Per questo motivo in fase di calibrazione sono stati utilizzati, come dati di riferimento, quelli relativi alla prova di lunga durata eseguita sul pozzo B, con portata di 0.057 m<sup>3</sup>/s. Nelle immediate vicinanze del pozzo B e dei due piezometri la griglia è stata infittita, ovvero è stato aumentato il numero di righe e colonne, per poter riprodurre al meglio la distribuzione dei potenziali osservati e le sue variazioni.

La griglia è stata delimitata mediante due contorni a potenziale imposto situati sui lati nord e sud, in modo da simulare il flusso naturale della falda diretto a sud, verso il fiume Po: il valore del potenziale assegnato a questi due contorni è stato scelto in modo da ottenere un gradiente idraulico pari 0.001, conforme a quello rilevato da precedenti studi - a larga scala - sull'acquifero profondo cremonese (BERETTA *et alii*, 1993) e tale da consentire di riprodurre in maniera appropriata il livello statico indisturbato dei punti di misura disponibili.

was built using the well-known Darcian MODFLOW of the USGS.

On the basis of the available stratigraphic data, the aquifer was represented by a grid of 14 horizontal layers down to a depth of 265 m (Fig. 9), over an area of 10,000x20,000 m<sup>2</sup>, considered greater than the possible range of influence of the wells.

The horizons between 0 m and 105 m from ground level, not influenced by pumping in the deeper aquifers, were represented by a single layer; furthermore, the low permeability horizons located between 145 m and 158 m from ground level – separated by a thin permeable horizon – were considered as a single low permeability level. Each of the permeable layers was initially assigned the mean hydrogeological parameters obtained from the analysis of the pumping tests. All the wells and piezometers already drilled and the wells yet to be drilled were placed on the grid (cf. Fig. 1). The wells to be drilled were initially inserted with the same construction plan as well B, which is the well which showed lesser draw-downs. For this reason during the calibration stage the data from the long-term test on well B, with a discharge of 0.057 m<sup>3</sup>/s, were used as reference data. The number of rows and columns in the grid was increased near well B and the two piezometers, in order to better reproduce the distribution of potentials observed and its variations.

The grid was delimited by two imposed potential boundaries situated on the northern and southern sides, so as to simulate the natural southward flow of groundwater toward the Po River: the value of the potential assigned to these two boundaries was chosen so as to obtain a hydraulic gradient of 0.001, in conformity with that found in the preceding large-scale studies on the deep Cremona aquifer (BERETTA *et alii*, 1993) and such as to make it possible to reproduce appropriately the undisturbed static level of the available points of

bili. Gli altri due contorni sono stati imposti a flusso nullo. Sulla base delle prove di pompaggio gli strati di separazione degli acquiferi sono stati considerati impermeabili. Lungo la verticale i potenziali sono stati posti costanti, visto che dai dati a disposizione e dalla letteratura non sono risultate indicazioni riguardo diverse distribuzioni.

### CALIBRAZIONE DEL MODELLO

Poiché nel corso delle prove di pompaggio è stato pressoché raggiunto l'equilibrio, la calibrazione del modello è stata eseguita in regime stazionario. In fase di calibrazione è stato necessario variare leggermente il valore della trasmissività relativa agli strati interessati dal pozzo B e dai due piezometri, portandoli a  $1.6 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$  nel livello acquifero superiore, ed a  $1.42 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$  nel livello acquifero inferiore. Inoltre gli strati interessati dai filtri del pozzo, sono stati suddivisi in due per tentare di simulare la presenza di lenti a bassa permeabilità. Si è così passati da 12 a 14 strati.

Dopo vari tentativi lo scarto tra i dati osservati e quelli calcolati dal modello è risultato accettabile per un modello preliminare; la figura 10 riporta il confronto tra i dati delle depressioni osservate e di quelle calcolate con il modello.

measurement. The other two boundaries were set at zero flow. Based on the pumping tests, the layers separating the aquifer levels were considered impermeable. The potentials were set constant along the vertical, as the data available and the literature gave no indications of any different distributions.

### CALIBRATION OF THE MODEL

Since an equilibrium was nearly reached during the pumping tests, the model was calibrated in steady state. During the calibration stage it was necessary to vary slightly the transmissivity values for the levels tapped by well B and by the two piezometers, bringing them to  $1.6 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$  in the upper aquifer level, and to  $1.42 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$  in the lower aquifer level. In addition, the levels where the well filters are were divided in two to attempt to simulate the presence of low permeability lenses. Thus the number of layers was increased from 12 to 14.

After various attempts, the deviation between the observed data and those calculated from the model was acceptable for a preliminary model. Figure 10 shows the comparison between the data of the drawdowns observed and those calculated with the model.

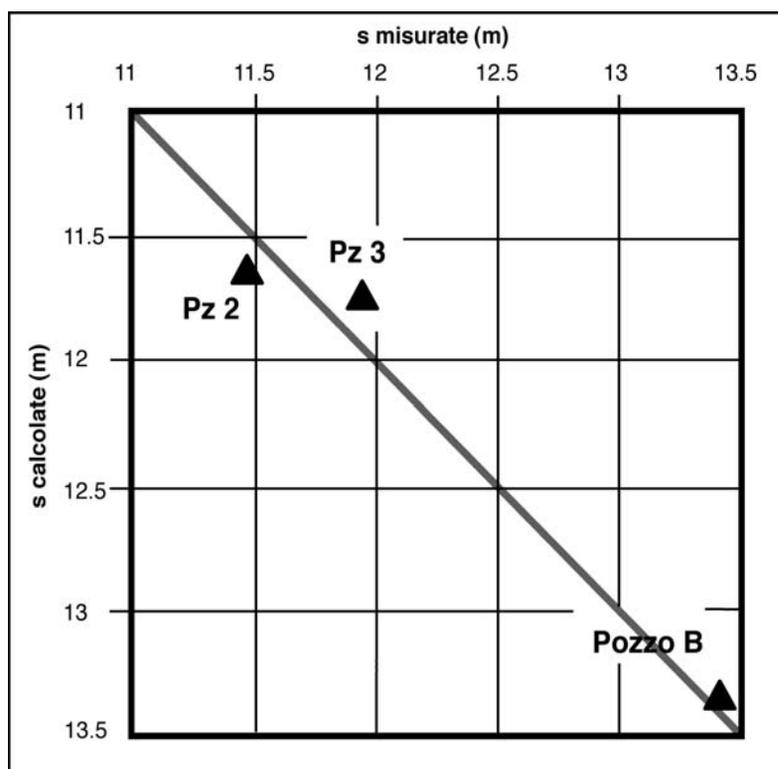


Fig. 10 - Confronto tra i risultati del modello ed i dati misurati (1. Valori misurati; 2. Valori calcolati)  
- Comparison between measured and calculated data (1. Field data; 2. Calculated data)

L'andamento delle linee equipotenziali e delle linee di flusso all'equilibrio – sempre parallele ai contorni laterali tranne che nelle

The trend of the equipotential lines and the flow lines in equilibrium – parallel to the lateral boundaries everywhere but nearby the

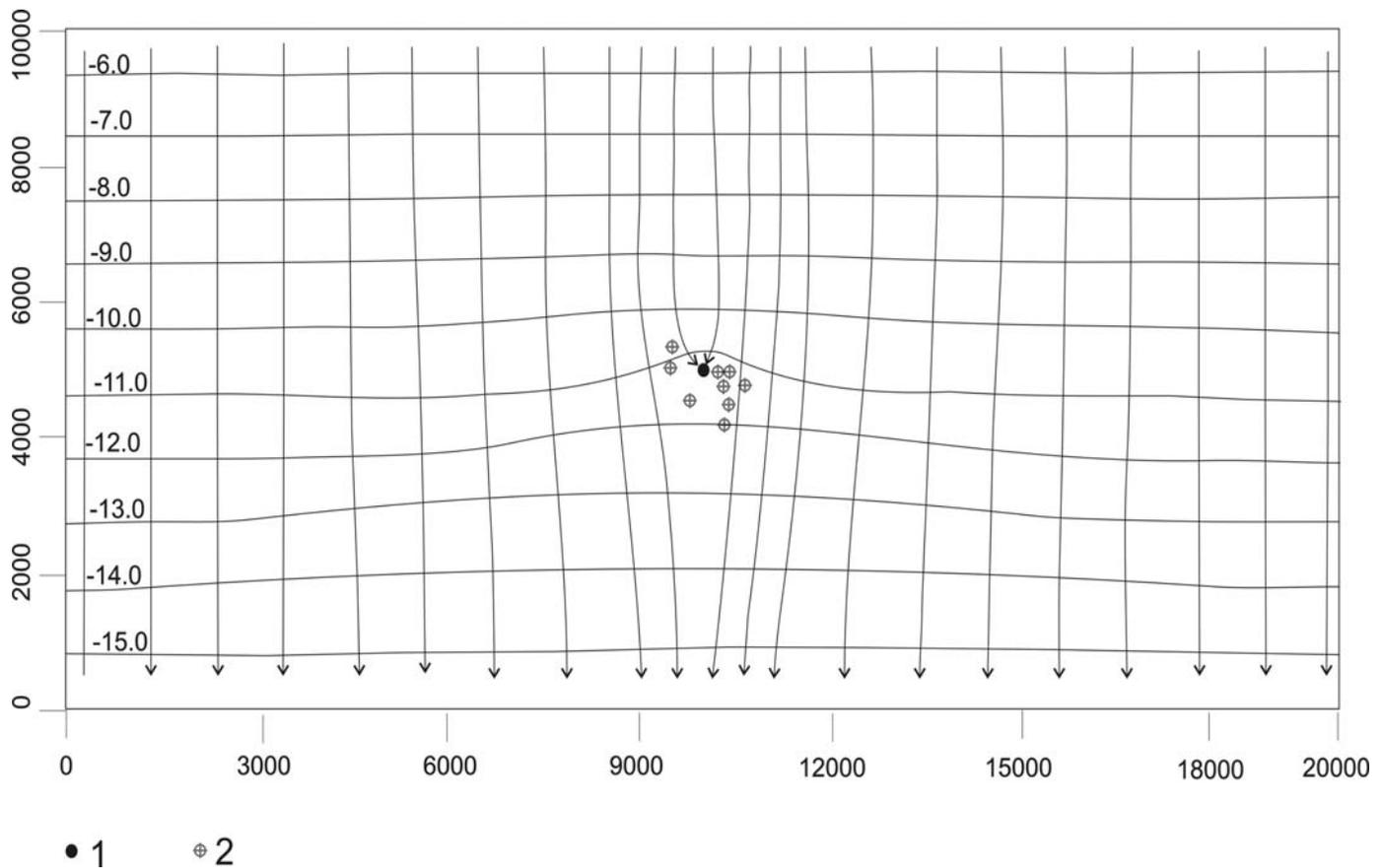


Fig. 11 - Linee di flusso al termine della prima simulazione, con il solo pozzo B in funzione. (1. Pozzo in funzione; 2. Pozzi non in funzione)  
 - Flow lines at the end of the first simulation, with the pumping only in well B (1. Active well; 2. Inactive wells)

La simulazione ha mostrato inoltre che gli strati in cui il potenziale risente degli effetti del pompaggio sono quelli compresi circa tra 160 m e 230 m di profondità dal p. c.

Una volta calibrato il modello, sono stati attivati gli altri nove pozzi previsti dal progetto, ciascuno con una portata pari a 0.057 m<sup>3</sup>/s e sempre in regime stazionario, cioè ipotizzando un pompaggio continuo e simultaneo da tutti i pozzi, fino al raggiungimento dell'equilibrio. Un simile schema di pompaggio è il più critico per l'acquifero; inoltre i dati attualmente a disposizione non hanno consentito di effettuare una calibrazione affidabile in regime transitorio, che avrebbe permesso di simulare la reazione dell'acquifero ad un pompaggio intermittente. Come mostrato in figura 12 in queste condizioni la depressione registrata all'equilibrio nel pozzo B è di circa 4 m superiore a quella misurata con il solo pozzo B in esercizio. Ciò indica, pur con le approssimazioni insite nel modello e nei dati di partenza, che i pozzi in progetto interferiranno significativamente l'uno con l'altro.

The simulation also showed that the layers in which the potential is influenced by pumping are those between 160 m and 230 m from ground level.

Once the model was calibrated, the other nine wells of the plan were activated, each with a discharge of 0.057 m<sup>3</sup>/s and always in a steady state, i.e. assuming the pumping from all of the wells to be continuous and simultaneous, until reaching an equilibrium. This pumping arrangement is the most critical for the aquifer; furthermore, the data currently available did not allow a reliable calibration in a unsteady state, which would have made it possible to simulate the reaction of the aquifer to intermittent pumping. As is shown in Figure 12, in these conditions the drawdown recorded with an equilibrium in well B is about 4 m greater than that measured with only well B in operation. This indicates, even with the problems inherent in the model and in the initial data, that the planned wells interfere significantly with each other.

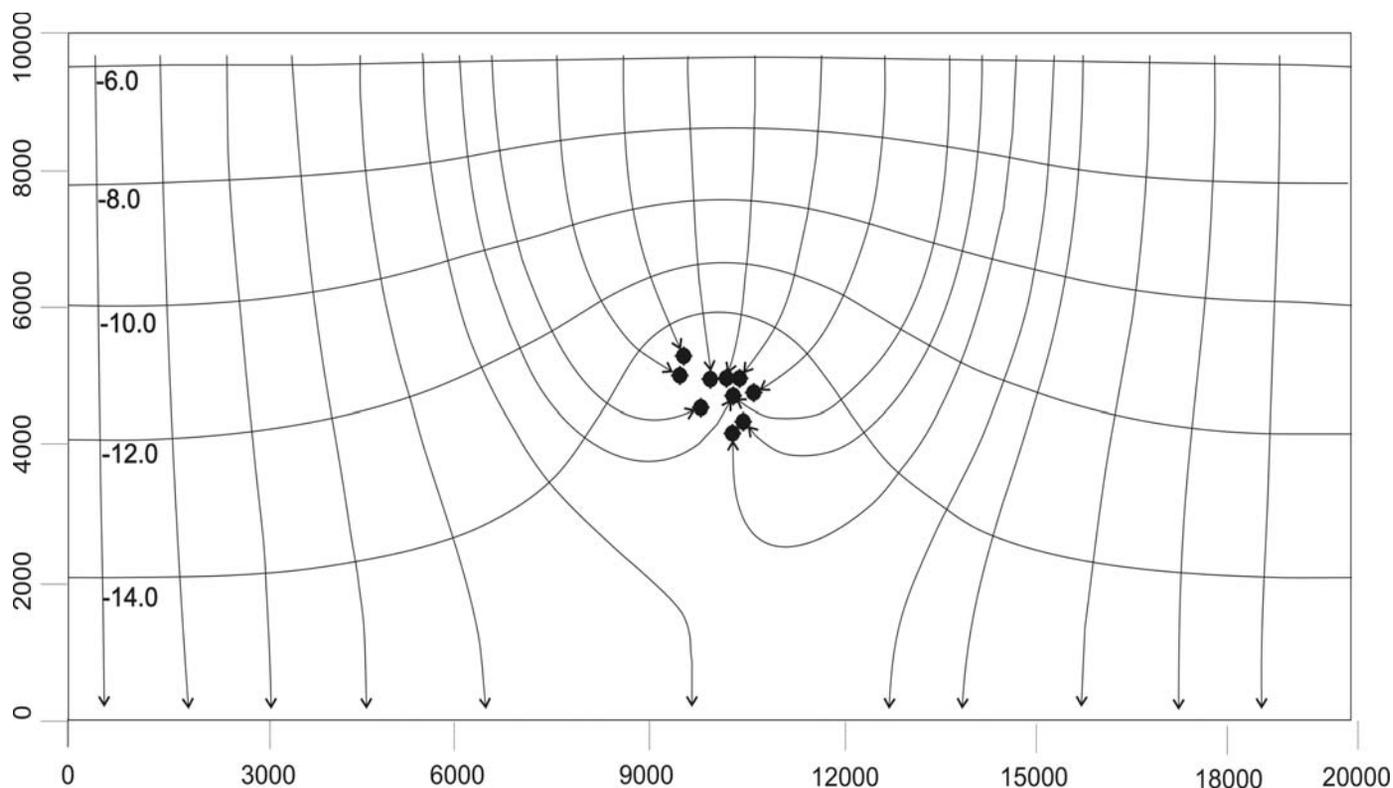


Fig. 12 - Linee di flusso al termine della seconda simulazione, con tutti i pozzi in funzione  
 - Flow lines at the end of the second simulation, with the pumping in all wells in operation

vicinanze del pozzo (Fig. 11) – indica che i contorni laterali non influenzano la simulazione del pompaggio.

well (Fig. 11) – indicates that the lateral boundaries do not influence the pumping simulation.

**IL PROBLEMA DELLA RISALITA DELL’INTERFACCIA ACQUA DOLCE - ACQUA SALMASTRA**

**THE PROBLEM OF THE RISING OF THE FRESH WATER SALT - WATER INTERFACE**

È stato detto precedentemente che nel pozzo Postumia (Fig.1) è stata rilevata la presenza di cloruri e solfuri in concentrazioni elevate nella parte più profonda del pozzo. Ciò suggerisce l’opportunità di analizzare i possibili effetti che il nuovo campo pozzi avrebbe in termini di risalita dell’interfaccia acqua dolce/acqua salata.

It was said earlier that chlorides and sulfides were found in high concentrations in the deeper part of the Postumia well (Fig. 1). This suggests that that it would be advisable to analyze the possible effects that the new well field would have in terms of the rising of the fresh water/salt water interface.

E’ ben noto (cfr., per esempio BEAR, 1979) che nel caso di un acquifero costituito da uno strato di acqua dolce sovrastante uno strato di acqua salata l’emungimento dell’acqua dolce provoca una risalita (upconing) di acqua salata, come schematizzato in figura 13.

It is well known (cf., for example, BEAR, 1979) that in an aquifer having a layer of fresh water above a layer of salt water, the pumping of fresh water causes an upconing of salt water, as is shown in Figure 13.

Per avere almeno un’idea del valore della risalita dell’acqua salata sotto il pozzo (DELLEUR, 1999), si consideri lo schema di figura 13, e si assuma che i simboli  $\rho_d$  e  $\rho_s$  siano rispettivamente la densità dell’acqua dolce e dell’acqua salata ( $g/cm^3$ ). Al di sotto del pozzo, in condizioni di equilibrio si avrà:

To get an idea of the extent of the upconing of salt water underneath the well (DELLEURS, 1999), consider the diagram in Figure 13, and assume that the symbols  $\rho_d$  and  $\rho_s$  are respectively the density of fresh water and of salt water ( $g/cm^3$ ). Underneath the well, in equilibrium conditions, we will have:

$$H_d + \rho_d \cdot Z_d = H_s + \rho_s \cdot Z_s \quad (1)$$

$$H_d + \rho_d \cdot Z_d = H_s + \rho_s \cdot Z_s \quad (1)$$

da cui:

from which:

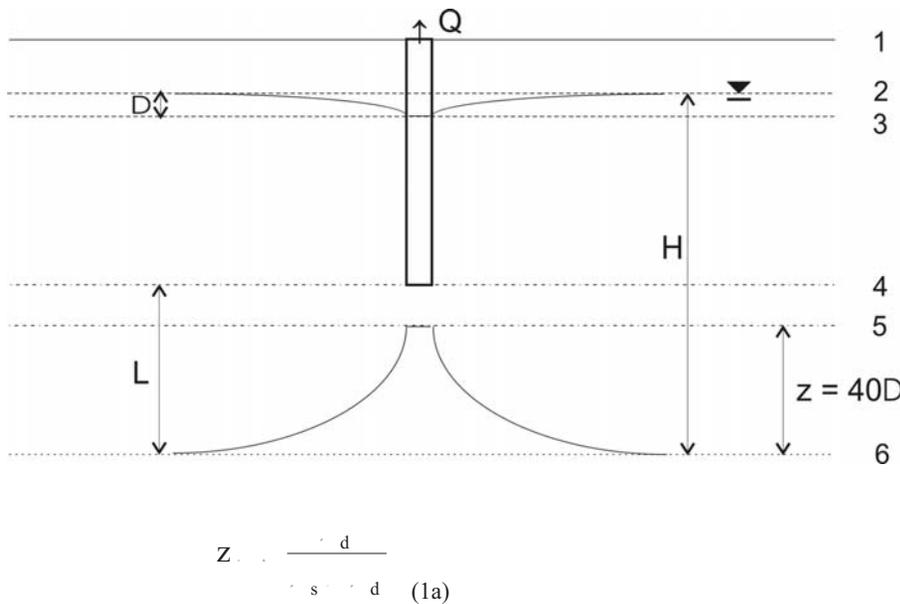


Fig. 13 - Risalita dell'interfaccia acqua dolce/acqua salata durante il pompaggio nel pozzo. 1. Piano Campagna; 2. Superficie indisturbata della falda; 3. Livello dinamico della falda all'equilibrio; 4. Livello del fondo pozzo; 5. Livello di risalita dell'interfaccia acqua dolce/acqua salata all'equilibrio; 6. Livello indisturbato dell'interfaccia acqua dolce/acqua salata  
- Upcone of salt/fresh water interface during the pumping. 1. Ground surface; 2. Static piezometric surface; 3. Dynamic piezometric surface in steady state conditions; 4. Well bottom level; 5. Upcone of salt/fresh water interface in steady state conditions; 6. Uninfluenced salt/fresh water interface

Il fatto che la (1a) coincida con la ben nota equazione di Ghyben-Hertzberg per le intrusioni saline su acquiferi costieri, mentre nel nostro caso si sia ben lontani dal mare, è irrilevante: la situazione infatti è descritta fisicamente nello stesso modo ed indica che, per  $\rho_s = 1.025 \text{ g/cm}^3$  e  $\rho_d = 1 \text{ g/cm}^3$  densità tipiche dell'acqua marina e dell'acqua dolce, si avrebbe  $z \sim 40D$ . Peraltro la (1a) indica che se fosse  $\rho_s < 1.025 \text{ g/cm}^3$  si avrebbe  $z > 40D$ . È evidente che l'innalzamento dell'interfaccia è comunque di qualche decina di volte superiore all'abbassamento piezometrico indotto dal pompaggio. La possibilità di richiamare nei pozzi acqua salmastra dipende dalla conduttività idraulica verticale del materiale che si trova al di sopra dell'interfaccia e dalla effettiva profondità di questa, ma purtroppo in questo caso tali informazioni sono piuttosto incerte. Secondo BASSI (2000) l'interfaccia ha profondità variabile da luogo a luogo ed è compresa fra gli estremi di 250-400 m dal p.c.; secondo la Regione Lombardia l'interfaccia nei pressi di Cremona si trova fra i 450 ed i 500 metri dal p.c. (REGIONE LOMBARDIA – ENI DIVISIONE AGIP, 2002). Nella migliore delle ipotesi, quindi, l'interfaccia si trova a circa 280 m al di sotto del fondo del pozzo B.

Se si considerano i valori di densità sopra indicati, e il campo pozzi dovesse emungere secondo lo schema adottato nel modello, all'equilibrio e alla massima depressione registrata (circa 6 m), si avrebbe un innalzamento dell'interfaccia di circa 240 metri; questo implica che se l'interfaccia si trova ad una profondità inferiore ai 460 metri si avrebbe, in tempi più o meno lunghi, l'arrivo di acqua salina nei pozzi.

Tale considerazione rimane valida anche se il problema viene affrontato con metodi più sofisticati dell'equazione di Ghyben-Hertzberg. Il problema della risalita dell'acqua salina a partire da una interfaccia orizzontale è meglio descritta, all'equilibrio, dall'equazio-

The fact that (1a) coincides with the well-known Ghyben-Hertzberg equation for salt-water intrusions in coastal aquifers, while in our case we are far from the sea, is irrelevant: the situation is in fact described physically in the same way and indicates that for  $\rho_s = 1.025 \text{ g/cm}^3$  and  $\rho_d = 1 \text{ g/cm}^3$  typical densities of sea water and fresh water we would have  $z \sim 40D$ . Moreover (1a) indicates that if we have  $\rho_s < 1.025 \text{ g/cm}^3$ , then  $z > 40D$ . It is evident that the rising of the interface is in any case a few dozen times greater than the piezometric drawdown induced by pumping. The possibility of abstracting salt water into wells depends on the vertical hydraulic conductivity of the material found above the interface and the actual interface depth, but unfortunately in this case these information are rather uncertain. According to BASSI (2000), the depth of the interface varies from place to place, and lies between the extremes of 250-400 m from ground level; according to Regione Lombardia, the interface in the Cremona area is between 450 and 500 m from ground level (REGIONE LOMBARDIA – ENI DIVISIONE AGIP, 2002). At best, therefore, the interface is at about 280 m below the bottom of well B.

If one considers the above density values, and if the well field pumps according to the scheme adopted by the model, at equilibrium and with the maximum drawdown recorded (about 6 m), the interface would rise by about 240 meters. This implies that if the interface is at a depth of less than 460 meters, sooner or later salt water would reach the wells.

This consideration remains valid even if the problem is faced using more sophisticated methods than that of the Ghyben-Hertzberg equation. The problem of the upconing of salt water starting with a horizontal interface is better described, at equilibrium, by the Dagan-Bear equation (DAGAN & BEAR, 1968), which takes into consideration the discharge pumped, the distance between the bottom of the well and the interface  $L$

ne di Dagan-Bear (DAGAN & BEAR, 1968), che considera la portata emunta, la distanza fra il fondo del pozzo e l'interfaccia L (Fig. 13) e la permeabilità orizzontale. Dato che quest'ultima non è nota e che si ha a che fare con un insieme di pozzi con notevole interferenza, non si è qui ritenuto opportuno cercare di affrontare il problema secondo questo approccio. Va tenuto però presente che i lavori di Dagan e Bear indicano che una risalita  $Z \approx 0.3L$  rende instabile l'interfaccia, che oltre tale soglia risale fino a raggiungere il pozzo, indipendentemente dalla depressione registrata al suo interno. Secondo il criterio di Dagan e Bear, assumendo che la distanza L tra il fondo dei pozzi e l'attuale interfaccia sia di circa 225 (differenza tra i 223 m di profondità nel pozzo B e i 450 m di profondità dell'interfaccia secondo la letteratura esistente), una risalita accettabile sarebbe dell'ordine dei 75 m, che corrisponde ad una depressione non superiore a 1.9 m.

Alla luce di queste osservazioni, appare opportuno integrare l'attuale progetto del Campo Pozzi Est con uno studio finalizzato ad investigare il possibile problema della risalita di acqua salmastra. Nel caso tale eventualità si dimostri concreta, una ovvia soluzione sarebbe quella di diminuire i prelievi in maniera opportuna. Un'alternativa potrebbe essere quella di prevedere la perforazione di pozzi che attingano contemporaneamente da tutti gli orizzonti acquiferi sfruttabili, cioè sia da quelli che alimentano il pozzo A che da quelli che alimentano il pozzo B. Tale schema, che avrebbe comunque lo svantaggio di non rispettare l'attuale tendenza a non perforare pozzi che mettono in comunicazione più acquiferi, permetterebbe, a parità di portata emunta, di avere un sistema acquifero complessivamente più trasmissivo e, conseguentemente, depressioni più contenute. Per avere un'indicazione quantitativa sulla validità di questa ipotesi il modello precedentemente descritto è stato nuovamente utilizzato aggiungendo ad ogni pozzo sezioni filtranti in corrispondenza degli strati che rappresentano i livelli acquiferi che alimentano il pozzo A, in modo tale che ogni pozzo risultasse alimentato da quattro orizzonti anziché da due. È stata poi eseguita una simulazione assumendo, ancora, che tutti i pozzi emungessero simultaneamente e continuamente, fino a raggiungere l'equilibrio, con una portata di  $0.057 \text{ m}^3/\text{s}$ . Stando ai risultati del modello l'aggiunta di due nuovi orizzonti filtranti a ciascuno dei pozzi utilizzati fa sì che la massima depressione registrata nel sistema (che si verifica intorno al pozzo B, dove la densità dei pozzi è massima) sia dell'ordine dei 3.5 m, anziché dell'ordine dei 6 come si verificava quando tutti i pozzi erano costruiti sul modello del pozzo B (due soli orizzonti filtranti). Ciò implicherebbe una risalita dell'ordine dei 140 m, cioè ancora superiore al massimo ammissibile (attorno a 75 m).

Il problema della risalita di acqua salmastra, sebbene da valutare con attenzione, dovrebbe comunque presentarsi in tempi tali da consentire di determinare la miglior soluzione; la risalita dell'interfaccia infatti, avviene in genere in tempi dell'ordine di decenni (MANDEL & SHIFTAN, 1981); ciò dovrebbe permettere di adattare progressivamente lo schema del campo pozzi e del pompaggio, in modo da ridurre la massima depressione e quindi l'entità della risalita. Per la corretta

(Fig. 13), and horizontal permeability. Given that the horizontal permeability is unknown and that we are dealing with a set of wells with considerable interference, in this case it did not seem wise to attempt to face the problem following this approach. It should be kept in mind however that the works of Dagan and Bear indicate that an upconing  $Z \approx 0.3L$  makes the interface unstable, which beyond that threshold rises until it reaches the well, regardless of the drawdown recorded inside the well. According to Dagan & Bear's criterion, assuming that the distance L between the well bottom and the current interface is 225 meters (the difference between the 223-meter depth of well B and the 450-meter depth of the interface according to the existing literature), an acceptable upconing would be around 75 m, which corresponds to a drawdown of not more than 1.9 m.

In light of these observations, it seems best to integrate the current Eastern Well Field plan with a study aimed at investigating the possible problem of the upconing of salt water. Should this possibility prove to be concrete, an obvious solution would be to decrease in an appropriate manner the amount of water pumped. One alternative could be to plan the drilling of wells that draw from all of the exploitable aquifers at the same time, i.e. both from those that feed well A and from those that feed well B. This plan, which would have the disadvantage of not following the current tendency not to drill wells that put aquifers into communication with each other, would however make it possible, with the same discharges pumped, to have an aquifer system that is more transmissive overall and, consequently, more limited drawdowns. To get a quantitative idea of the validity of this hypothesis, the model described previously was used again, adding filtering sections to each well at the layers that represent the aquifer levels that feed well A, such that each well is fed by four horizons instead of two. A simulation was then done assuming, once again, that all the wells pumped simultaneously and continuously until reaching an equilibrium, with a discharge of  $0.057 \text{ m}^3/\text{s}$ . According to the results of the model, the addition of two new filtering horizons to each of the wells used would make the maximum drawdown recorded in the system (which takes place around well B, where there is the highest concentration of wells) be about 3.5 m, instead of about 6 m as occurred when all of the wells were built on the model of well B (only two filtering horizons). This would mean an upconing of about 140 m, still higher than the maximum allowable (around 75 m).

Although the problem of the upconing of salt water must be carefully evaluated, the time needed for it to occur should be long enough to allow for the determining of the best solution. The rising of the interface generally takes place over a number of decades (MANDEL & SHIFTAN, 1981); this should make it possible to adapt progressively the well field and pumping plan, so as to reduce the maximum drawdown and, therefore, the extent of the rise. An accurate mathematical model would be of great help in correctly determining the solution, starting from an experimental data base that is

determinazione della soluzione sarebbe comunque di grande aiuto una accurata modellazione matematica eseguita a partire da una base di dati sperimentali molto più ampia di quella oggi disponibile, e che potrebbe essere raccolta una volta che il campo pozzi fosse operativo. In particolare sarebbe opportuno che la nuova modellazione fosse sviluppata con un codice che tratti il flusso di fluidi a diversa densità, con dati precisi sulle permeabilità verticali, sulla profondità dell'interfaccia, sulla distribuzione dei potenziali indisturbati e considerando simulazioni per periodi molto lunghi, fino ad una-due decine di anni (cf., per esempio, LIN *et alii*, 1999; VASS & KOCH, 2001; ZHOU *et alii*, 2004).

## CONCLUSIONI

I dati piezometrici osservati nei pozzi A e B, e nei piezometri adiacenti, durante le prove di emungimento, hanno permesso la caratterizzazione del sistema acquifero multistrato di Cremona. I valori di trasmissività stimati - simili per tutti gli orizzonti acquiferi sfruttati - sono dell'ordine di  $10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s; i valori del coefficiente d'immagazzinamento sono indicativamente compresi tra  $10^{-3}$  e  $10^{-5}$ ; l'andamento delle prove ha mostrato che gli orizzonti sfruttati possono essere assimilati ad acquiferi confinati.

L'unico acquifero in pressione non interessato dai filtri dei due nuovi pozzi del Campo Pozzi Est è quello più profondo, 244 m circa dal p.c., escluso dopo aver appurato, sulla base delle analisi chimiche, una alta presenza di cloruri che fa pensare ad una stretta vicinanza con l'interfaccia acqua dolce - acqua salmastra, presumibilmente risalita in seguito al pompaggio dei pozzi già esistenti.

Entrambi i pozzi, secondo i criteri convenzionalmente adottati per l'interpretazione della curva caratteristica, mostrano un'efficienza di almeno il 75% anche per le portate più elevate (0.057 m<sup>3</sup>/s). Dalle analisi chimiche sono state riscontrate delle concentrazioni di ammoniaca, ferro, manganese ed arsenico che hanno confermato la necessità di un impianto di potabilizzazione.

L'applicazione del programma MODFLOW dell'USGS, pur se basata su alcune assunzioni semplificative - potenziali idraulici costanti lungo la verticale, acquiferi perfettamente confinati - ha mostrato che i pozzi, se costruiti in modo da attingere a due soli dei livelli acquiferi utilizzabili, e ubicati secondo lo schema preliminare del progetto del campo pozzi, generano coni di depressione che interferiscono gli uni con gli altri, provocando una depressione massima di circa 6 m, nel caso in cui tutti i pozzi emungano continuamente e simultaneamente, ciascuno con una portata costante di 0.057 m<sup>3</sup>/s. Secondo l'equazione di Ghyben-Hertzberg e secondo il criterio di DAGAN & BEAR (1968), una simile depressione potrebbe provocare fenomeni di upconing della sottostante falda salmastra, con conseguente fenomeni di contaminazione: sarebbe quindi utile considerare l'opportunità di ultimare il campo pozzi perforando pozzi che attingano contemporaneamente ad un maggior numero di orizzonti acquiferi, in modo tale da aumentare la trasmissività complessiva del sistema. Ovviamente, in via cautelativa, la captazione dovrebbe essere

much more extensive than that now available, and that could be created once the well field is in operation. In particular, it would be advisable to develop the new model with a code that deals with the flow of fluids of different density, with precise data on vertical permeability, on the interface depth, on the distribution of undisturbed potentials, and considering simulations for very long time periods, up to 10-20 years (cf., for example, LIN *et alii*, 1999; VASS & KOCH, 2001; ZHOU *et alii*, 2004).

## CONCLUSIONS

The piezometric data observed in wells A and B and in the nearby piezometers during the pumping tests made it possible to characterize the Cremona multilayered aquifer system. The estimated transmissivity values - similar for all the aquifer horizons exploited - are on the order of  $10^{-2}$  m<sup>2</sup>/s; the storage coefficient values are approximately between  $10^{-3}$  and  $10^{-5}$ ; the test results showed that the horizons exploited can be assimilated to confined aquifers.

The only aquifer under pressure not tapped by the filters of the two new wells in the Eastern Well Field is the deepest one, approximately 244 m from ground level, which was excluded after verifying from chemical analyses that a high concentration of chlorides suggests a close proximity to the fresh water/salt water interface, which had presumably risen following the pumping at the existing wells.

According to criteria conventionally adopted for the interpretation of the discharge-drawdown curve, both wells show an efficiency of at least 75% even at the highest discharges (0.057 m<sup>3</sup>/s). Chemical analyses revealed concentrations of ammonia, iron, manganese and arsenic, which confirmed the necessity of a water treatment plant.

The application of the USGS's MODFLOW program, although based on some simplified assumptions - hydraulic potentials constant along the vertical, perfectly confined aquifers - has shown that if the wells are built so as to draw from only two of the usable aquifer levels and are located according to the preliminary plan of the well field project, they generate cones of depression that interfere with each other, causing a maximum drawdown of about 6 meters, in the case in which all the wells are pumping continuously and simultaneously, each with a constant discharge of 0.057 m<sup>3</sup>/s. According to the Ghyben-Hertzberg equation and the criterion of DAGAN & BEAR (1968), such a drawdown could cause the upconing of the underlying salt water, resulting in contamination: thus it would be useful to consider the opportuneness of completing the well field by drilling wells that draw from a greater number of aquifer horizons at the same time, so as to increase the system's overall transmissivity. Obviously,

effettuata singolarmente (con più pozzi o con pozzi cluster) e non simultaneamente nello stesso pozzo. In ogni caso il fenomeno della risalita dell'interfaccia avviene in generale in tempi sufficientemente lenti (decine di anni) da permettere di determinare la miglior soluzione al problema (modifica dello schema di pompaggio e/o del campo pozzi) una volta che i pozzi saranno in funzione e forniranno ulteriori dati sperimentali. In quest'ottica sarebbe opportuna una ulteriore modellazione matematica tridimensionale (con codici che considerino gradienti di densità), basata su dati precisi riguardo permeabilità verticali, potenziali idraulici e profondità dell'interfaccia.

Si ringrazia l'Azienda Energetica Municipale di Cremona e in particolare l'Ing. Andrea Guerreschi per aver messo a disposizione i dati storici e per il supporto tecnico-logistico. Il lavoro è frutto della collaborazione paritetica di tutti gli autori.

as a precaution, the tapping must be done singly (with several wells or with cluster wells) and not simultaneously in the same well. In any event the phenomenon of the rising of the interface generally takes place over a sufficiently long period (decades) as to allow time for determining the best solution to the problem (modifying of the pumping schedule and/or well field) once the wells are in operation and can provide further experimental data. In this perspective further tridimensional mathematical modeling (with codes that take into consideration density gradients) would be advisable, based on precise data regarding vertical permeability, hydraulic potentials and interface depth.

The Authors wish to thank the Azienda Energetica Municipale of Cremona and in particular the engineer Andrea Guerreschi for providing historical data and for technical-logistical assistance. This work is the fruit of the joint collaboration of all the authors.

## OPERE CITATE – REFERENCES

- AEM (Azienda Energetica Municipale di Cremona) (2001) - *Progetto campo pozzi: studi di impatto ambientale*. Cremona.
- BALDI A.M. (2001) - *Esecuzione di carotaggi geofisici all'interno di una perforazione ubicata in via Postumia, Cremona*. Relazione tecnica, Cremona.
- BASSI G. (2000) - *Progetto di un campo pozzi ad est della città. Relazione geologica*. Cremona.
- BEAR J. (1979) - *Hydraulic of Groundwater*. Mc Graw-Hill, New York.
- BERETTA G.P., FRANCANI V. & FUMAGALLI L. (1993) - *Studio Idrogeologico della Provincia di Cremona*. Pubbl. n°610 del GNDCI, Pitagora Editrice, Bologna.
- CADROBBI L., NOBILE M., PATERNOSTER S. & VALLE C. (2001) - *Interpretazione preliminare delle prove di falda su quattro piezometri*. Relazione geologica. Cremona.
- CAMBI C. (2001) - *Considerazioni sul significato del parametro efficienza nell'analisi delle prove di pompaggio*. Acque Sotterranee, **71**: 45-51.
- CUSTODIO E. & LLAMAS M. R. (1983) - *Hidrologia subteranea*, tomo 1 e 2, Omega, Barcellona.
- DAGAN G. & BEAR J. (1968) - *Solving the problem of local interface upconing in a coastal aquifer by a method of small perturbations*. J. Hydr. Research, **6**: 15-44.
- DELLEUR J.W. (1986) - *Elementary groundwater flow and transport processes*. In "The Handbook of Groundwater Engineering", Delleur J.W. Ed., CRC Press, ISBN 0-8493-2698-2.
- DE MARSILY G. (1986) - *Quantitative Hydrogeology - Groundwater Hydrology for Engineers*. Academic Press, INC, ISBN 0-12-208916-2.
- DRAGONI W. (1999) - *La curva caratteristica dei pozzi: considerazioni teorico-pratiche, stima dei coefficienti e procedura PTA*. In "La curva caratteristica dei pozzi", Cerbini G., Dragoni W., Nucci M., 3-49, GEOGRAPH, Milano.
- DRISCOLL F.G. (1989) - *Groundwater and wells*. Johnson Filtration System Inc., St. Paul, Minnesota, 2<sup>nd</sup> ed.
- FETTER C.W. (2001) - *Applied Hydrogeology*. Prentice Hall. Upper Saddle River, New Jersey.
- FRANCANI V. (1990) - *Protection of Ground waters in the Po valley*. Pubbl. n° 83 del GNDCI, 445-465, Torino.
- FRANCANI V., BERETTA G.P., BAREGGI A., NOBILE A., CREMONINI BIANCHI M., CATTANEO F. (1994) - *Aspetti idrogeologici del problema della presenza di azoto ammoniacale nelle acque sotterranee della provincia di Cremona*. Quaderni di Tecniche e Protezione Ambientale, **41**, Pitagora Editrice, Bologna.
- HAMILL L. & BELL F.G. (1986) - *Groundwater Resources Development*. Butterworths, London, 344 pp.
- LIN L., TSAY T. & HSU N. (1999) - *Saltwater upconing due to freshwater pumping*. Proc. Nat. Sc. Council. ROC(A), **23**,2: 248-258.
- MANDEL S. & SHIFAN Z.L. (1981) - *Groundwater Resources Investigation and Development*. Academic Press, Inc., 269 pp.
- REGIONE LOMBARDIA - ENI DIVISIONE AGIP (2002) - *Geologia degli acquiferi padani della Regione Lombardia* a cura di Carcano C. & Piccin A. S.E.L.C.A., Firenze.
- VOSS A. & KOCH M. (2001) - *Numerical simulations of topography-induced saltwater upconing in the state of Brandenburg, Germany*. Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere. Elsevier Science, 353-359.
- ZAVATTI A., ATRAMINI D., BONAZZI A., BORALDI V., MALAGÒ R., MARTINELLI G., NALDI S., PATRIZI G., PEZZERA G., VANDINI W., VENTURINI L. & ZUPPI G.M. (1995) - *La presenza di Arsenico nelle acque sotterranee della Pianura Padana: evidenze ambientali e ipotesi geochimiche*. Quaderni di Geologia Applicata, **2**: 301-325, Pitagora Editrice, Bologna.
- ZHOU Q., BEAR J. & BENSABAT J. (2004) - *Saltwater upconing and decay beneath a well pumping above an interface zone*. Lawrence Berkeley National Laboratory, Paper LBNL 55486, 34 pp.

