

Regimazione delle acque sotterranee e protezione da eventi estremi per le acque superficiali: approccio integrato mediante canale drenante in sotterraneo a Milano

Giovanni Pietro Beretta¹, Monica Avanzini², Giulio Burchi³, Fabio Marelli⁴, Maurizio Nespoli⁵, Adelio Pagotto⁶

¹Dipartimento di Scienze della Terra "Ardito Desio", Università degli Studi di Milano, via Mangiagalli 34, 20133 Milano e-mail: giovanni.beretta@unimi.it

²Eg Engineering Geology, via Carpaccio 2, 20133 Milano, e-mail eg-milano@eg-milano.it

³Metropolitana Milanese, via del Vecchio Politecnico 8, 20121 Milano, e-mail: g.burchi@metropolitanamilanese.it

⁴Metropolitana Milanese, via del vecchio Politecnico 8, 20121 Milano, e-mail: f.marelli@metropolitanamilanese.it

⁵Eg Engineering Geology, via Carpaccio 2, 20133 Milano, e-mail: eg-milano@eg-milano.it

⁶Eg Engineering Geology, via Carpaccio 2, 20133 Milano, e-mail eg-milano@eg-milano.it

Integrated approach to groundwater managing and to surface water floodplain protection by means of a drainage canal in the subsoil of Milan

ABSTRACT: The paper describes the effects that could be induced on the groundwater of Milan (Italy) by a new drainage canal of the the Seveso River (Drainage Canal of North East) approximately 11 km long, that will be digged in the subsoil at a maximum depth of about 25 m upstream of the city. The tunnel, in addition to the traditional hydraulic action of surface waters discharge in flood conditions, will be able to carry out a drainage of the groundwater to hinder negative effects of the the water table raising in urban area, too. The drainage action will be carried out by means of suitable facilities for groundwater uptake, whose effects have been estimated using a flow groundwater model reconstructing both more onerous historical conditions for groundwater and the actual condition. With simulations of the barrier condition (canal closed) and with those of water-drainage on the groundwater (canal open) it has been possible both to characterize effects on public wells near the tunnel and optimize the dimensioning of the drainage elements and estimate positive effects on the Lambro River downstream of the city by means of groundwater contribution in regimen of low and normal flow condition (estimated with maximum values varying between approximately 1-2 m³/s considering either the average medium water table elevation or the one of "high groundwater" observed in the Fifties).

Key terms: subsoil drainage canal, flood drainage, groundwater model, water table lowering

Termini chiave: canale drenante sotterraneo, drenaggio piena fluviale, modello di flusso, abbassamento falda

Riassunto

Lo studio ha esaminato gli effetti che potranno essere indotti sulla falda di Milano da un nuovo scolmatore delle piene del T.Seveso (Canale Drenante di Nord Est) lungo circa 11 km, che sarà realizzato nel sottosuolo ad una profondità massima di circa 25 m.

La galleria, oltre al tradizionale funzionamento idraulico di collettamento delle acque superficiali in condizioni di piena, potrà esplicare anche un'azione drenante sulla falda superficiale, contribuendo a ostacolare gli effetti negativi del noto fenomeno dell'innalzamento del livello piezometrico.

L'azione drenante sarà svolta mediante idonee opere di presa della falda, i cui effetti sono stati stimati per mezzo dell'implementazione di un modello di flusso, ricostruendo le condizioni storiche più gravose per le acque sotterranee

sia le situazioni attuali

Dalle simulazioni delle condizioni di barriera (canale chiuso) e di quelle di drenaggio sulla falda (canale drenante) è stato possibile individuare gli effetti sui pozzi acquedottistici limitrofi al tracciato, ottimizzare il dimensionamento degli elementi drenanti e valutare gli effetti positivi sul F. Lambro a valle di Milano mediante apporto di acque di falda in regime di magra e di morbida (stimate in valori massimi variabili tra circa 1-2 m³/s a seconda che si consideri la situazione piezometrica media attuale o quella di "alto" osservata negli anni '50).

1. Quadro di riferimento e finalita' dell'intervento

La gestione del ciclo urbano delle acque (superficiali e sotterranee) rappresenta un problema difficile da affrontare nei maggiori insediamenti per la salvaguardia quali-

quantitativa delle risorse, richiedendo notevoli investimenti per opere di difesa idraulica.

Un esempio di approccio integrato di intervento sulle acque è quello realizzato per affrontare i problemi prodotti dal T. Seveso (Fig. 1) che, giunto alle porte di Milano nel settore Nord, causa spesso allagamenti di varie zone della città.

Numerosi studi sono stati svolti dagli anni ottanta fino ad oggi finalizzati all'analisi di soluzioni per eliminare il problema delle esondazioni.

A fronte di questi studi è risultato importante determinare l'entità degli apporti di piena riconducibili alla parte terminale del corso del T. Seveso, nella parte di sottobacino urbano compreso tra la traversa di derivazione del Canale Scolmatore di Nord Ovest (CSNO) a Palazzolo e l'abitato di Milano.

Le portate di piena all'interno di tale sottobacino, superiori alla massima pervietà dell'alveo del torrente, possono essere ricondotte anche ad eventi pluviometrici intensi avvenuti localmente (data la notevole estensione delle aree impermeabilizzate e delle reti di drenaggio) così da originare i frequenti allagamenti della città; a partire dal 1976 si sono infatti verificati complessivamente 72 eventi alluvionali, con una media di circa 2.5 volte all'anno, che scende a 1.65 considerando solo il tratto oggetto di studio.

In generale le principali problematiche legate alle acque sotterranee nella città di Milano sono state in un primo tempo legate ad un eccessivo abbassamento del livello piezometrico (anni '60-'70) che ha determinato la necessità di approfondire i pozzi esistenti, il richiamo dalle zone circostanti di inquinanti e un fenomeno, seppur modesto, di subsidenza (Beretta G.P. et al., 1992); successivamente (anni '90-2000) si è invece invertita la tendenza così da produrre in molte zone della città il noto fenomeno dell'"acqua alta" (Beretta G.P., Peterlongo G., 1997, Beretta G.P., Avanzini M., 1998, 1999, Avanzini M. et al., 1998, 1999a, 1999b, Rosti G. et al., 1997, Tabacco E., 1975).

Infatti a partire dall'autunno del 1992 e fino agli anni 1998-1999 si è realizzato un progressivo aumento del livello piezometrico variabile da circa 9 m nelle aree a Nord di Milano a 3 m circa in quelle a Sud connesso alle intense precipitazioni (forti apporti meteorici degli anni 1993 e 1994) e alla generale riduzione del prelievo di acque sotterranee (potabile e industriale) che ha determinato in molti settori urbani l'invasione di infrastrutture nel sottosuolo progettate con il livello piezometrico degli anni sessanta-settanta (minimo piezometrico).

La tendenza alla crescita attualmente in atto ha portato ad un recupero dei livelli piezometrici che si pongono a quote assolute inferiori mediamente di circa 6-10 m rispetto a quelle rilevate nei primi anni cinquanta nel centro della città. In particolare nel settore Nord la differenza di quota tra la piezometria del 1952 e quella del 2003 indica un dislivello di oltre 12-16 m mentre nel settore Sud-orientale, al confine con i comuni di San Donato Milanese e Peschiera Borromeo il dislivello si riduce a soli 2-3 m.

Per risolvere i problemi causati dal sollevamento del livello piezometrico sono stati proposti e realizzati vari interventi strutturali e non strutturali: pozzi di drenaggio, pompaggio da cava, variazione delle modalità di irrigazione a scorrimento, incentivazione dell'uso energetico delle acque sotterranee, etc. (Beretta G.P. et al., 2003, 2004, Avanzini M. et al., 1999).

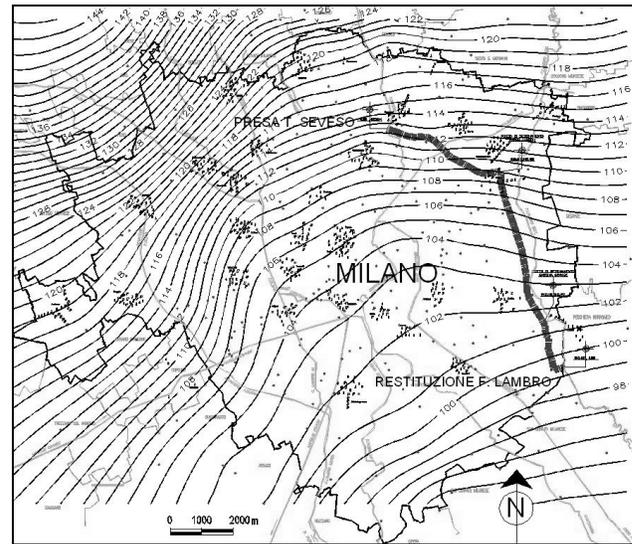


Fig. 1 – Ubicazione del canale drenante e andamento delle isopiezometriche (m s.l.m.)

Location of the drainage canal and isopiezometric map (m a.s.l.)

Dato il coinvolgimento complessivo delle acque superficiali e sotterranee nelle opere di regimazione, ne è derivata la necessità di progettare una serie di interventi finalizzati a risolvere i problemi sopra esposti.

In questa sede si riferisce del progetto di realizzazione di un nuovo canale scolmatore delle piene del T. Seveso, denominato Canale Drenante di Nord Est (CDNE), che è stato dimensionato con una portata massima di 30 m³/s e di cui si è progettata l'opera di presa, il canale di collettamento e l'opera di restituzione nel F. Lambro a Sud Est della città in località Ponte Lambro.

A causa di un insufficiente spazio in superficie per l'intensa urbanizzazione, il CDNE avrà una lunghezza di circa 11 km e passerà nel sottosuolo ad una profondità media di 20-25 m dal piano campagna, intercettando in parte anche la falda.

In base a questa condizione è stata progettata dalla Metropolitana Milanese (MM), che come è noto ha una notevole esperienza nella costruzione di opere in sotterraneo, anche una funzione di regolazione del livello piezometrico, consentendo alle acque sotterranee di entrare nel canale sotterraneo nei periodi in cui non si richiede la derivazione della portata di piena.

Per tale ragione è stato svolto uno studio idrogeologico finalizzato a valutare, oltre l'eventuale effetto barriera provocata dall'opera, il quantitativo di acque di falda

drenabili e l'eventuale interferenza con i pozzi per acqua limitrofi al tracciato e in particolare con le centrali di pompaggio dell'Acquedotto di Milano.

2. Il canale drenante di nord est

L'area interessata dalla progettazione idrologico-idraulica del CDNE ricade nel settore Nord/Nord orientale del Comune di Milano, in ragione di una lunghezza complessiva dell'opera di circa 11 km, con andamento all'incirca ONO-ESE nel tratto compreso tra la presa sul T. Seveso e Parco Lambro (sviluppo circa 4 km) e con direzione circa N-S sino alla sua confluenza con il Fiume Lambro all'altezza di Ponte Lambro (sviluppo circa 7 km).

Il canale, trovandosi a una profondità media di circa 20-25 m dal piano campagna nella tratta a Nord di Milano con direzione Ovest-Est può agevolmente esercitare, in assenza dei deflussi di acque superficiali derivanti dallo scolmo delle piene, l'azione drenante nei confronti della falda contenuta nel primo acquifero. L'opera sotterranea potrà in tal modo contribuire, unitamente agli altri interventi adottati negli ultimi anni, al contenimento dell'innalzamento della falda a Milano.

Congiuntamente all'azione drenante, le acque sotterranee intercettate e veicolate lungo lo scolmatore sino al recapito ubicato nel settore Sud-Est di Milano, potranno essere immesse o direttamente nel F. Lambro o essere utilizzate a scopo irriguo, alimentando la fitta rete di canali e colatori che disegnano la campagna extra urbana.

Il condotto dello scolmatore presenta un diametro interno di 3.3 m, un diametro di scavo di 4 m e una pendenza pari allo 0.05%. La portata massima scaricabile per gravità dalla galleria è di circa 12.5 m³/s; per portate superiori si ha pertanto un funzionamento in pressione, garantito dal livello di piena del T. Seveso a Niguarda di circa 130 m s.l.m. a fronte di una quota di circa 100.2 m s.l.m. allo scarico nel F. Lambro.

Il canale è dimensionato per una portata massima di circa 30 m³/s con una velocità di afflusso in Lambro pari a 2.7 m/s.

Valutate alcune ipotesi sulle modalità di captazione e di drenaggio delle acque di falda attraverso lo scolmatore sotterraneo, la scelta è caduta su una fitta rete di tubi drenanti di piccolo diametro a disposizione inclinata e/o sub orizzontale a partire dal settore superiore alla generatrice mediana della parete semicircolare della galleria sotterranea.

Le perforazioni, da attuarsi nella tratta compresa tra la progressiva 6 km +160 (attraversamento di via Rombon) e la progressiva 11 km + 130 (manufatto di presa De Angelis), coprono complessivamente la zona di alimentazione di Nord-Est della falda libera milanese compresa tra Seveso e Lambro (lunghezza di 4970 m).

Le perforazioni verranno realizzate dall'interno della galleria mediante l'utilizzo di sonda a rotazione a corone a inserti o a scalpello, con mantenimento del foro per

l'introduzione successiva delle tubazioni drenanti di piccolo diametro dotate di fenestrature a spirale con filtri tipo Johnson.

Il materiale costituente le tubazioni filtranti sarà acciaio zincato in considerazione degli standard di durabilità dell'opera e per minimizzare gli effetti dovuti alla corrosione.

Il controllo del funzionamento delle tubazioni drenanti sarà effettuato mediante l'utilizzo di circa 2500 elettrovalvole (una per ciascun dreno), appositamente studiate, IP68 governate e alimentate da condotto metallico realizzato all'interno cunicolo. Tali elettrovalvole consentiranno un funzionamento on-off del sistema consentendo la manutenzione ordinaria-straordinaria e la messa in esercizio oltre che la regolazione delle portate emunte.

In estrema sintesi il sistema drenante costituito da circa 2500 tubazioni suborizzontali in acciaio zincato di diametro interno 40.9 mm ed esterno di 48.3 mm circa, con filtro a spirale, della lunghezza di 3 m, posate con perforazione da cunicolo, potrà consentire un prelievo continuo e regolare lungo l'intero sviluppo dell'opera in falda (tratta di monte).

Tutto il sistema di captazione delle acque sotterranee sarà presidiato da una apparecchiatura di telecontrollo governata da un software gestionale appositamente implementato.

Il funzionamento del telecontrollo potrà essere di tipo manuale ma anche di tipo automatico asservito sia ai livelli di falda ma anche alle portate nel collettore sotterraneo e/o alle condizioni di presa a monte dello scolmatore.

In caso di sistema ad aria compressa non funzionante per manutenzione/guasto il sistema delle valvole pneumatiche rimarrà chiuso non consentendo un eventuale scambio tra le acque di falda e le acque presenti in galleria (provenienti dal T. Seveso).

3. Interferenze tra il tracciato del canale drenante e la falda

L'analisi piezometrica condotta elaborando i dati contenuti in un data-base appositamente implementato ha permesso di descrivere il grado di interferenza tra la falda e il CDNE in progetto, con specifico riferimento alla tratta avente funzione di galleria drenante.

Il funzionamento idraulico del CDSE prevede che la quota base di drenaggio della falda sia rappresentata dal baricentro del condotto drenante stesso.

Secondo i dati progettuali la quota del tetto del condotto della galleria risulta variabile tra un massimo di 108.8 m s.l.m. (Presa Seveso) e un minimo di 106.5 m s.l.m. (sette centrale Feltre), che corrisponde ad una profondità variabile tra 22 e 16 m dal piano campagna.

Esaminando i dati di escursione piezometrica disponibili per l'area di studio a partire dall'inizio degli anni 1950 e considerando un valore medio della base drenante della galleria a circa 107 m s.l.m., si possono in sintesi trarre le

seguenti considerazioni, anche con riferimento alla sezione idrogeologica di dettaglio di Fig. 2, dove sono indicati i diversi livelli di falda raggiunti negli anni in questo settore della città di Milano:

- le quote massime assolute registrate nel 1889 sono rappresentative di una condizione di una falda praticamente indisturbata, difficilmente ipotizzabile per la realtà in esame;

- le quote massime relative registrate nell'agosto 1952 potrebbero rappresentare la situazione più cautelativa per valutare la quota di riferimento di un ipotetico massimo innalzamento della falda entro la città di Milano;

- le quote minime assolute registrate nell'agosto 1976 sono rappresentative di una situazione di sovrasfruttamento della falda a Milano (minimo piezometrico);

- le quote piezometriche registrate nell'aprile 1994 sono indicative di un anno a partire dal quale si osserva una graduale e lenta ripresa nel recupero dei livelli di falda;

- le quote del gennaio 2003 rappresentano il massimo piezometrico relativo all'ultimo trentennio.

In base alle caratteristiche progettuali della galleria drenante, nella situazione di massima soggiacenza osservata storicamente nell'area (agosto 1975) il livello di falda mediamente rilevato ad una profondità di circa 39 m dal piano campagna all'altezza della Centrale Suzzani e a circa 23 m dal piano campagna alla Centrale Feltre, si troverebbe nei confronti della base della galleria drenante a profondità superiori, variabili tra 14 m dal piano di posa della galleria in zona Suzzani e circa 7.5 m all'altezza della centrale Feltre.

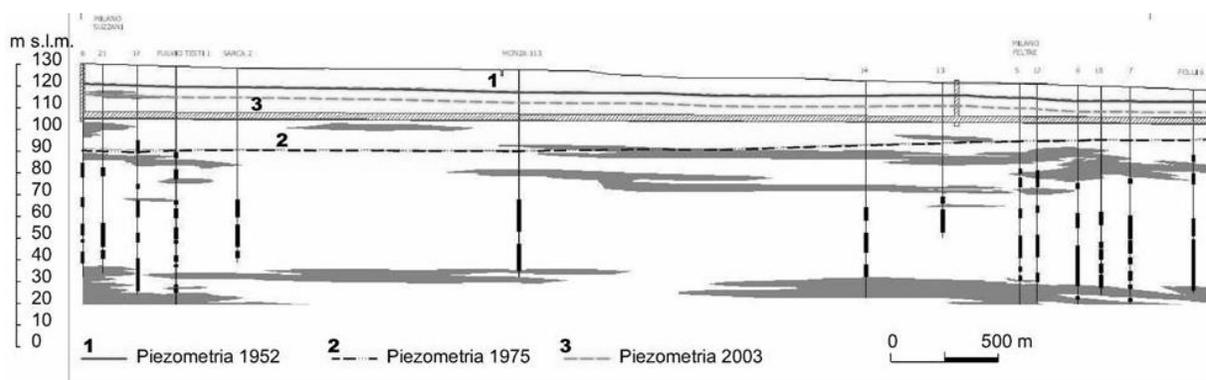


Fig. 2 – Sezione geologica lungo la parte drenante della falda del canale sotterraneo (CDNE)
Geological section along the groundwater drainage sector of the subsoil canal (CDNE)

Nella situazione proposta per l'anno 1994 si osserva come il livello di falda si rinvenga mediamente all'altezza della profondità di posa della galleria drenante (variabile tra un massimo di 24 m dal piano campagna alla presa del Seveso e di circa 16 m dal piano campagna all'altezza del pozzo di sezionamento Parco Lambro) e pertanto essa non potrebbe svolgere alcun ruolo drenante nei confronti della falda stessa.

Nella situazione osservata nel gennaio 2003 (massimo piezometrico registrato nell'ultimo trentennio) il livello di falda mediamente rilevato ad una profondità di circa 16.5 m dal piano campagna all'altezza della Centrale Suzzani e a circa 12.4 m dal piano campagna alla Centrale Feltre, si troverebbe nei confronti del condotto drenante a profondità inferiori, determinando un battente idraulico rispetto al condotto stesso, variabile tra un massimo di 5.3 m alla Presa del Seveso e di circa 3.2 m all'altezza del pozzo di sezionamento Parco Lambro.

Nella situazione di minima soggiacenza rilevata nell'agosto 1952, contraddistinta da soggiacenze del livello di falda variabili tra 8 m nel settore della Presa del Seveso e 6 m all'altezza della Centrale Feltre, il battente idraulico che si verrebbe a determinare nei confronti del condotto drenante sarebbe compreso tra valori di circa 13 m

all'altezza della centrale Suzzani e di 10 m all'altezza di Feltre.

Infine nella situazione estrema osservata nell'anno 1889, trovandosi la falda ad una profondità di 1.8-0.5 m dal piano campagna, il battente idraulico nei confronti del condotto drenante raggiungerebbe i valori massimi compresi tra circa 20 m all'altezza di Suzzani e 15 m all'altezza di Feltre.

Con specifico riferimento ai pozzi delle centrali acquedottistiche che ricadono in prossimità del tracciato del CDNE in progetto e i due tratti principali del canale, di cui il primo ad andamento circa Ovest-Est con funzione anche di galleria drenante, si osserva quanto segue.

A fronte di un prelievo idrico complessivo di Milano di 9.16 m³/s, le centrali acquedottistiche limitrofe al tracciato prelevano circa il 32.5% delle acque per i fabbisogni potabili della città.

Prendendo in esame solo i pozzi delle centrali poste a Nord del tratto della galleria drenante in progetto il 23% delle opere di captazione presenta filtri anche in prima falda mentre il 73% delle opere di presa presenta filtri in seconda falda; infine solo il 4% dei pozzi preleva esclusivamente dalla terza falda (acquiferi profondi).

Dall'analisi condotta emerge come sia importante una valutazione dei possibili effetti della presenza del canale

sotterraneo sulle opere di captazione di acque destinate al consumo umano; in questa fase dello studio sono stati valutati solo gli effetti dal punto di vista quantitativo (variazioni del livello piezometrico), rimandando ad una seconda fase quelli qualitativi.

4. Costruzione del modello di flusso idrico sotterraneo

4.1 Struttura idrogeologica

La struttura del sottosuolo nell'area di studio (Avanzini M. et al., 1995) è stata di recente rivista da Regione Lombardia-Eni Divisione Agip, 2002, distinguendo nuove unità idrostratigrafiche (definite come Gruppi acquiferi).

In corrispondenza dell'area interessata dalla realizzazione del CSNE si individuano in estrema sintesi i seguenti sistemi di falde:

- *prima falda libera*: contenuta nell'unità Ghiaioso-sabbiosa (Gruppo Acquifero A), con livello piezometrico a circa 13 m dal piano campagna e base ad una profondità variabile tra 37-47 m;
- *seconda falda semi-confinata*: contenuta nell'unità Sabbioso-ghiaiosa (Gruppo Acquifero B), compresa mediamente tra 42-45 e 130 m di profondità;
- *falde profonde confinate*: contenute nei depositi villafranchiani presenti oltre 120-130 m di profondità (Gruppi Acquiferi C e D).

Ai fini dello studio è risultato importante definire con dettaglio le caratteristiche geometrico-strutturali degli acquiferi sede della prima e seconda falda e, in particolar modo, del sistema acquifero più superficiale in quanto quello che maggiormente può interferire con l'opera in progetto.

Utilizzando le informazioni presenti nel data-base appositamente costruito, sono state costruite una serie di carte tematiche che identificano il modello fisico del sottosuolo.

Per quanto riguarda i valori dei parametri idrogeologici i dati di prove di pompaggio e di portata acquisiti nel data base hanno consentito di elaborare con metodi geostatistici anche cartografie della distribuzione della trasmissività degli acquiferi T (m²/s).

I dati relativi al solo primo acquifero si riferiscono perlopiù ad aree ubicate nei settori meridionali e sud-orientali del comune di Milano: essi sono contraddistinti da valori elevati di T, compresa tra un minimo di $9 \cdot 10^{-3}$ m²/s ed un massimo di $5.5 \cdot 10^{-2}$ m²/s e valori di conducibilità idraulica k variabile tra $5 \cdot 10^{-4}$ e $3 \cdot 10^{-3}$ m/s.

I valori di T calcolati per il secondo acquifero mostrano valori massimi, superiori a $3 \cdot 10^{-2}$ m²/s, prevalentemente nel settore Est del territorio comunale lungo una fascia allungata Nord-Sud, lungo la direttrice centrale Testi, Bruzzano a Nord, Gorla, Anfossi, Martini e confine Sud di Milano. I massimi pari a $1.1 \cdot 10^{-1}$ m²/s sono stati calcolati all'altezza della centrale Anfossi.

Nei restanti settori del territorio comunale i valori di T

risultano mediamente omogenei e perlopiù compresi tra $1.5 \cdot 10^{-2}$ m²/s.

In prossimità del tracciato della galleria drenante in progetto i valori di T sono mediamente compresi tra $2 \cdot 3 \cdot 10^{-2}$ m²/s.

La distribuzione di T calcolata per gli acquiferi profondi (terzo acquifero) mostra nel complesso valori piuttosto omogenei, crescenti procedendo mediamente da NE verso SO, passando da un minimo di $1 \cdot 1.5 \cdot 10^{-3}$ m²/s ad un massimo di $7 \cdot 8 \cdot 10^{-3}$ m²/s lungo l'allineamento delle centrali di Chiusabella, Novara e Abbiategrasso.

4.2 Implementazione del modello di flusso

Il settore che si è scelto di modellare risulta ben più vasto rispetto all'area interessata dall'opera in progetto in quanto esso è stato esteso lateralmente e a valle sino a raggiungere i corsi d'acqua maggiori (Adda, Ticino e Po) in quanto regolatori della morfologia piezometrica dell'intera provincia di Milano, mentre gli afflussi provenienti da monte sono stati considerati a partire dal settore di alta pianura, in corrispondenza del limite pedemontano.

L'area effettivamente modellata è così compresa entro un rettangolo avente i lati di 105 x 80 km, corrispondenti a una superficie pari a 4250 km².

La superficie è stata discretizzata secondo una griglia composta da 105 colonne (direzione Nord-Sud) e 80 righe (direzione Est-Ovest), per un totale quindi di 8400 maglie aventi una dimensione di lato 1 km.

L'orientazione della griglia è stata mantenuta Nord-Sud, Est-Ovest in quanto nell'area di maggior interesse il flusso principale delle acque sotterranee è diretto prevalentemente all'incirca da Nord a Sud.

Per quanto riguarda la discretizzazione verticale, in base alla schematizzazione idrogeologica effettuata è stato necessario approntare un sistema a cinque strati così costituito:

- strato 1 del modello: primo acquifero sede della falda libera/semiconfinata;
- strato 2 del modello: orizzonte semi-impermeabile di separazione tra il primo acquifero e il secondo acquifero (acquitardo);
- strato 3 del modello: secondo acquifero sede della falda semiconfinata;
- strato 4 del modello: orizzonte impermeabile di separazione tra il sistema acquifero tradizionale e il sistema degli acquiferi profondi (acquicludo);
- strato 5 del modello: sistema degli acquiferi profondi a falda confinata.

Il 4 e 5 strato, rispettivamente caratteristici dell'orizzonte di separazione tra secondo e terzo acquifero e terzo acquifero (sistema acquiferi profondi) sono stati resi inattivi in questa fase dello studio imponendo una condizione di flusso nullo; essi potranno essere sviluppati in una fase successiva.

Gli acquitardi di separazione tra il primo e il secondo acquifero risultano continui su tutto l'areale investigato, con l'eccezione del settore posto a Nord del Comune di Milano

dove si osserva la presenza di un acquifero praticamente indifferenziato (strati 1-2-3 del modello).

La taratura del modello è stata ricostruita ricorrendo pertanto a una griglia a maglie regolari aventi lato di 1 km in ragione delle informazioni a disposizione dell'intero areale modellato; in fase di applicazione del modello si è ritenuto opportuno infittire la griglia, sull'areale di Milano, ricorrendo a maglie regolari aventi lato di 100 m. In quest'ultima configurazione il modello è stato quindi discretizzato mediante n. 332 righe, n. 335 colonne e n. 3 strati.

Dopo aver definito le condizioni al contorno ed iniziali, assegnati i valori dei parametri idrogeologici e delle sollecitazioni al sistema afflussi-deflussi (ricarica da precipitazioni e da irrigazioni, prelievi da pozzi) si è operata la taratura del modello, ottenendosi errori estremamente contenuti per entrambe le falde.

Per i n. 118 punti di controllo disponibili per la prima falda si osserva che lo scarto tra i valori misurati e quelli simulati è molto contenuto con valori di errore medio di circa 0.1 m, errore medio assoluto 0.92 m e scarto quadratico medio di 1.21 m.

Per n. 28 punti di controllo a disposizione per la seconda falda, solo 9 punti sono utilizzabili poiché riferiti a pozzi acquedottistici fermi captanti la seconda falda, mentre i restanti punti fanno riferimento a pozzi che risultano attivi in base alla schematizzazione prescelta per la distribuzione dei prelievi nelle singole centrali; nonostante queste limitazioni l'analisi della retta di calibrazione evidenzia errori comunque contenuti con valori di errore medio di circa 0.19 m ed errore medio assoluto e scarto quadratico medio di circa 2 m.

4.3 Previsione degli effetti del canale drenante sulle acque sotterranee

Gli effetti della presenza di una galleria nel sottosuolo, con le funzioni previste per il CDNE, possono essere dovuti ad uno sbarramento della falda, quando il sistema deve operare per smaltire le acque di piena del T. Seveso (canale chiuso), o ad un suo drenaggio, laddove si facciano entrare le acque sotterranee nel condotto (canale aperto); la prima azione ha una durata ridotta mentre la seconda può essere esercitata per un maggiore lasso di tempo.

A partire dalla condizione piezometrica di taratura (marzo 2003), le simulazioni effettuate considerando lo sbarramento della falda operato dalla struttura in progetto hanno dimostrato che gli effetti sulla morfologia della falda e sulle quote piezometriche risultano poco significativi (variazioni dei valori di quote piezometriche all'interno del margine di errore del modello); ciò in ragione del ridotto diametro della galleria rispetto allo spessore dell'acquifero e alla sua elevata permeabilità.

Per esaminare l'effetto di drenaggio della falda esercitata dall'opera in progetto al variare del regime della falda nel milanese sono state poi ricostruite altre condizioni piezometriche di riferimento.

In particolare sono stati esaminati gli effetti indotti sulla

falda in seguito alla realizzazione della galleria del CDNE nelle seguenti condizioni piezometriche:

- situazione del marzo 2003, rappresentativa del massimo piezometrico dell'ultimo trentennio (*scenario 1*);
- riduzione del 20% dell'attuale prelievo acquedottistico dalle centrali acquedottistiche Suzzani, Gorla, Crescenzago, Feltre e Padova, poste sopragradiante alla galleria drenante (*scenario 2*);
- sospensione dell'attuale prelievo delle centrali acquedottistiche Suzzani, Gorla, Crescenzago, Feltre e Padova poste sopragradiante rispetto alla galleria drenante (*scenario 3*);
- situazione del 1952, rappresentativa di un massimo piezometrico relativo (*scenario 4*);
- situazione del 1889, rappresentativa di una falda pressoché indisturbata dai prelievi (*scenario 5*);
- situazione della metà degli anni 1970, rappresentativa di un minimo piezometrico assoluto (*scenario 6*).

Il tratto di canale avente funzione di galleria drenante è stato schematizzato nel modello ricorrendo all'opzione "drain" prevista dal codice numerico di calcolo.

In particolare entro il primo strato del modello, in corrispondenza delle maglie discretizzate con lato 100 m e interessate dal tracciato della galleria drenante sono stati inseriti i valori della quota assoluta di drenaggio che si è ipotizzato far corrispondere al baricentro del condotto stesso.

In ragione dello sviluppo complessivo del tratto di galleria drenante pari a circa 5 km, nel modello sono state pertanto inserite n. 61 maglie con funzione "dreno", aventi come base di drenaggio valori variabili tra circa 107.3 m s.l.m. (presa Seveso) e circa 104.8 m s.l.m. (settore centrale Feltre) alla fine della tratta drenante (progressiva 6+160.00 attraversamento di Via Rombon).

I risultati delle simulazioni sono descritti nelle conclusioni ad esclusione dello scenario 6 in quanto, nella situazione piezometrica ipotizzata, tutto il tratto della galleria in progetto non viene mai ad interferire con il livello di falda.

5. Risultati e considerazioni conclusive

Lo studio ha analizzato gli effetti indotti sulla falda di Milano a seguito della realizzazione del Canale Drenante di Nord-Est delle piene del T. Seveso.

L'opera in progetto è rappresentata da un canale in galleria, che si sviluppa dal punto di presa del T. Seveso a Nord di Milano fino allo sbocco nel Lambro all'altezza di Ponte Lambro a Sud Est della città, avente quale finalità primaria quella di canale scolmatore delle piene del corso d'acqua e quale finalità secondaria, o valore aggiunto, quella di sistema di drenaggio delle acque sotterranee, essendo per buona parte del proprio percorso posto a quote inferiori a quelle di falda.

La modellazione è stata effettuata ricorrendo al codice numerico di calcolo alle differenze finite "MODFLOW"

nella versioni più aggiornate e compatibili con gli attuali sistemi informatici di archiviazione e gestione dei dati; essa ha riguardato in modo specifico i gruppi acquiferi A e B, che nel loro complesso definiscono il cosiddetto “acquifero tradizionale”, in quanto direttamente interessati dall’opera in progetto e per i quali si dispone di un maggior numero di dati ed informazioni per una idonea caratterizzazione geometrica e parametrica.

Le interferenze dell’opera sul sistema idrico sotterraneo sono state valutate sia in termini di effetti di sbarramento della falda nei tratti in cui l’opera interferisce con le acque sotterranee sia, in particolare, in termini di effetto di drenaggio ad opera della galleria in progetto, soprattutto per la tratta di monte più profonda.

Di seguito si riportano due esempi di valutazione

relative alle condizioni del 1952 (scenario 4) e del 2003 (scenario 1).

A - In questo scenario, nel quale la piezometria di ingresso è quella ricostruita per simulare le condizioni che si avevano nel 1952, prima che si registrasse il forte incremento dei prelievi connesso allo sviluppo industriale e demografico dell’area milanese, in corrispondenza del tratto drenante si ha in carico idraulico variabile tra un massimo di 14 m (settore Ovest) e un minimo di circa 8.5 m (settore Est). In queste condizioni piezometriche la portata di falda che può essere drenata dalla galleria è di circa 2000 l/s. La depressione piezometrica si esplica con abbassamenti di circa 7 m presso la centrale Bicocca, 5.5 m presso la centrale Parco, 4.5 m presso la centrale Anfossi e 3 m presso la centrale di Abbiategrasso (Fig. 3).

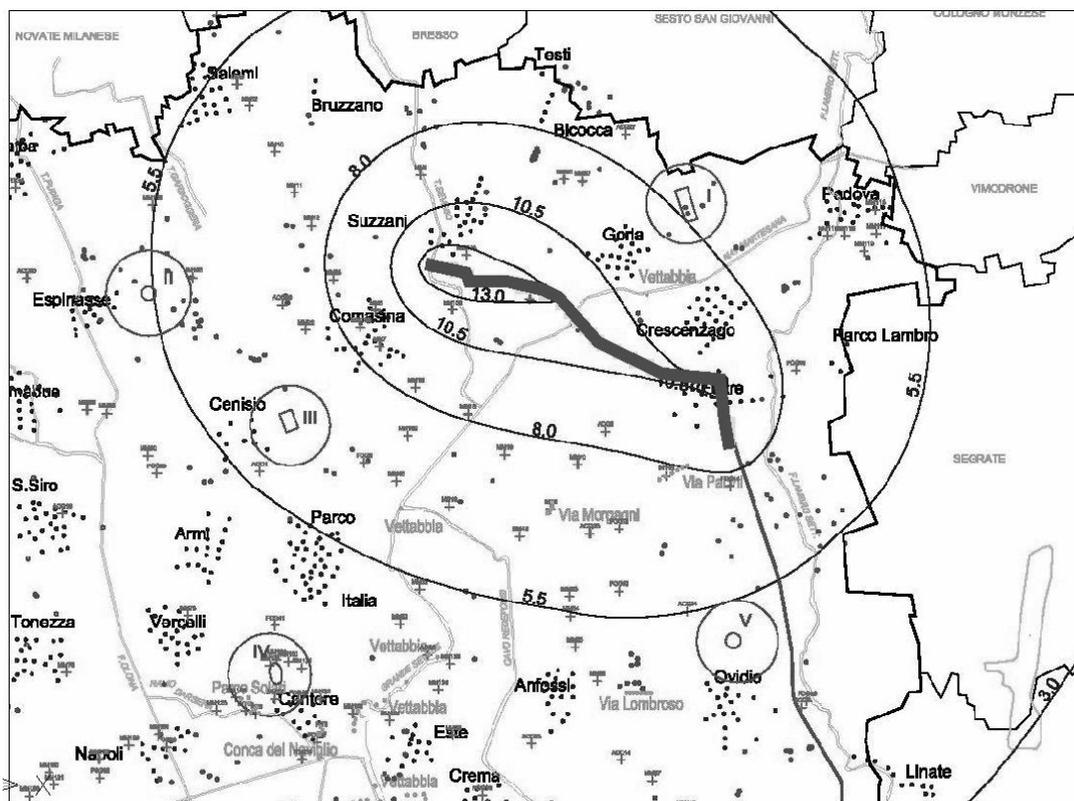


Fig. 3 – Canale drenante aperto: isoabbassamenti della falda (m) previsti con piezometria del 1952
Drainage from open canal: water table drawdowns (m) with the piezometric condition of the 1952

B - In questo scenario, in cui si è analizzato l’effetto indotto sulla falda dalla galleria drenante nella condizione piezometrica osservata nel marzo 2003, al di sopra del canale, nel tratto drenante, si ha in carico idraulico variabile tra un massimo di 6 m (settore Ovest) e un minimo di circa 3 m (settore Est). In queste condizioni piezometriche la portata di falda che può essere drenata dalla galleria è di circa 670 l/s. La depressione piezometrica si esplica con abbassamenti di circa 2.5 m presso la centrale Bicocca

(confine settentrionale di Milano), 2 m presso la centrale Parco, 1.5 m presso la centrale Anfossi e 1.2 m presso la centrale Abbiategrasso (confine meridionale di Milano). In seconda falda, il drenaggio ad opera della galleria in progetto determina abbassamenti di entità di poco inferiore. L’entità dei suddetti abbassamenti si può ritenere ininfluenza nei confronti del normale esercizio dei pozzi per acqua (sia acquedottistici che privati) operanti nel capoluogo, in quanto determina una riduzione dello spessore saturo del primo acquifero che valutata, a titolo di

esempio, presso le centrali acquedottistiche più prossime al tracciato (Feltre, Crescentago, Gorla e Suzzani), risulta mediamente pari al 10% con un massimo del 18% presso la centrale Suzzani (Fig. 4).

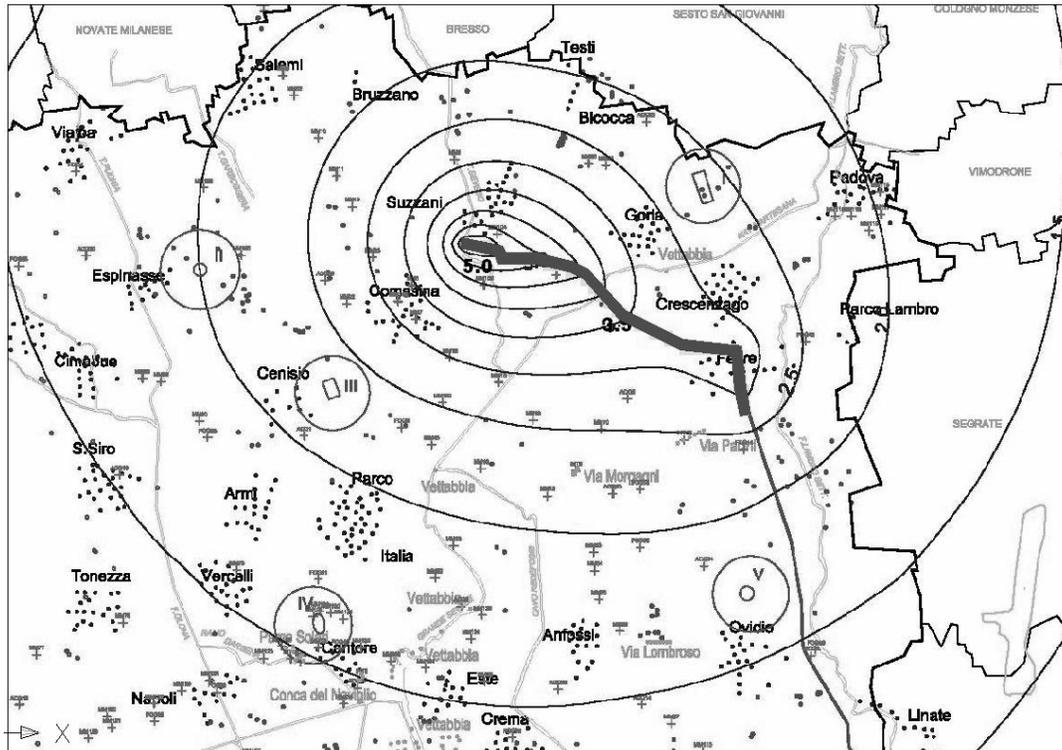


Fig. 4 – Canale drenante aperto: isoabassamenti della falda previsti con piezometria del 2003
Drainage from open canal: water table drawdowns with the piezometric condition of the 2003

Si sottolinea il carattere di estrema flessibilità dell'opera in progetto e il valore aggiunto fornito dalla funzione drenante del canale per le acque di falda.

Il progetto prevede anche un adeguato monitoraggio quali-quantitativo della falda e, più in particolare, degli effetti di depressione e di eventuali variazioni idrochimiche delle acque di falda indotte dall'azione di drenaggio, che dovranno essere valutati sperimentalmente su una rete di monitoraggio che potrà in parte appoggiarsi su quella esistente (piezometri e pozzi acquedottistici) e in parte sarà da realizzare appositamente.

Queste azioni, che potranno essere sviluppate in una

successiva fase di lavoro potranno comportare la predisposizione di un modello di trasporto, finalizzato ad esempio alla definizione di eventuali migliorie indotte alla qualità delle acque veicolate nell'acquifero tradizionale, nell'ipotesi di drenare le acque della sua porzione più superficiale.

L'esistenza di un modello di flusso aggiornato dell'acquifero milanese potrà consentire un suo utilizzo anche ai fini di una migliore pianificazione e tutela delle risorse idriche sotterranee volte ad una loro gestione sostenibile.

Bibliografia

Avanzini M., Beretta G.P., Francani V. (1999) - "Il controllo della falda". Costruzioni, n. 516 - Anno XLVIII, Ed. La Fiaccola, Milano
 Avanzini M., Beretta G.P., Francani V., Nespoli M. (1995) - "Indagine preliminare sull'uso sostenibile delle falde profonde nella Provincia di Milano". C.A.P. Milano
 Avanzini M., Beretta G.P., Pagotto A., Peterlongo G. (1998) - "Sollevamento della falda a Milano ed hinterland". Ambiente, n.5, IPSOA, Milano
 Avanzini M., Beretta G.P., Cattaneo M., Di

Palma F., Francani V., Rosti G. (1999) - "Rilevante drenaggio delle acque da un bacino di cava al fine di ridurre gli effetti dell'innalzamento della falda a Milano". 3° Convegno Nazionale sulla protezione e gestione delle acque sotterranee per il III Millennio, Parma 13-15 ottobre, Quaderni di Geologia Applicata, N.2, Vol. 2, Pitagora Editrice, Bologna
 Beretta G.P., Avanzini M. (1998) - "Il sollevamento della falda ed hinterland: analisi delle cause del fenomeno e delle soluzioni

previste per minimizzare le interferenze con l'urbanizzazione. Geologia dell'Ambiente, 4/98, Numero speciale: Geologia Urbana, SIGEA, Roma

Beretta G.P., Avanzini M. (1999) - "La gestione sostenibile del sollevamento della falda a Milano ed hinterland". L'acqua, n.1-2, Roma

Beretta G.P., Cavallin A., Francani V., Mazzarella S., Pagotto A. (1985) - "Primo bilancio idrogeologico della Pianura Milanese". Acque Sotterranee, n.2-3-4, Geograph, Segrate.

Beretta G.P., Pagotto A., Vandini R., Zanni S.

(1992) - "Aquifer overexploitation in the Po Plain: Hydrogeological, geotechnical and hydrochemical aspects". In: Selected Papers on Aquifer Overexploitation, 23rd Interbational Congress of the I.A.H., Puerto de la Cruz, Tenerife (Spain), April 15-19, Vol. 3, Heise, Hannover

Beretta G.P., Peterlongo G. (1997) - "Il sollevamento della falda a Milano ed hinterland: problemi delle opere in sotterraneo e della qualità delle acque e possibili soluzioni". In atti del Convegno: Geologia delle grandi aree urbane-Progetto strategico CNR, Consiglio Nazionale delle Ricerche, Regione Emilia-Romagna, 4-5 Novembre 1997, Bologna.

Beretta G.P., Avanzini M., Pagotto A. (2003) - "Managing groundwater rise: experimental results and modelling of water pumping from a quarry lake in Milan urban area (Italy)". *Environmental geology*. 25, 600-608

Beretta G.P., Avanzini M., Pagotto A. (2004) "Pompaggio da un bacino di cava per contrastare i problemi dovuti al sollevamento della falda a Milano: risultati sperimentali e modellazione" *L'Acqua, Rivista bimestrale dell'Associazione Idrotecnica Italiana*, 3/2004, Roma

Regione Lombardia, "Geologia degli Acquiferi Padani della Regione Lombardia", Eni.

Regione Lombardia, Direzione Generale Servizi

di Pubblica Utilità, Unità Organizzativa Risorse Idriche, "Programma di tutela e uso delle acque", L.R. 12 dicembre 2003 n. 26, art. 45, comma 3 D.Lgs. 11 maggio 1999, n. 152, art. 44, Titolo IV, Capo I

Rosti G., Raffaelli L., Raimondi P. (1997) - "Finanziamento di interventi prevedibili per affrontare i problemi connessi al sollevamento della falda a Milano". IGEA, n.9, Torino.

Tabacco E. (1975) - "Acqua, Scienza e Società". Atti del Convegno: Acqua, Scienza e Società, 6-7 maggio, CLUED, Milano