

Groundwater recharge through wells in open loop geothermal system: problems and solutions - part 2

Ricarica delle acque sotterranee mediante pozzi in sistemi geotermici a circuito aperto: problemi e soluzioni - parte 2

Giovanni Pietro Beretta Università di Milano, Dipartimento di Scienze della Terra "Ardito Desio"- via Mangiagalli 34, 20133 Milano
giovanni.beretta@unimi.it

Parole chiave: ciclo aperto, bassa entalpia, pompe di calore geotermiche, pozzi di ricarica, intasamento.

Keywords: *open loop, low enthalpy, geothermal heat pump, recharge wells, clogging.*

Individuazione preventiva di fenomeni di intasamento dei pozzi

L'idraulica dei pozzi è nota e ampiamente studiata sia per il regime stazionario che per quello transitorio in tutti i tipi di falde.

Per il problema in esame viene generalmente fatta l'assunzione che il comportamento di un pozzo di prelievo (presa) sia equivalente ad un pozzo di ricarica (resa), anche se ciò non risulta pienamente verificato.

Infatti, come ampiamente riportato da Chiesa 1992, in un pozzo di presa il cono di alimentazione tende ad allargarsi in modo indefinito pur rimanendo un livello nel pozzo abbastanza stabile, mentre in un pozzo di presa la portata di ricarica dovrebbe invece tendere ad equilibrare quella proveniente dalla falda, raggiungendo un regime stazionario o pseudo-stazionario; inoltre in una falda libera si ha un aumento della zona satura o parzialmente satura dovuta all'acqua di ricarica che invade l'acquifero.

Considerando comunque quanto allo stato dell'arte circa l'interpretazione dell'idraulica di un pozzo di ricarica, dal punto di vista operativo appare importante individuare in tempo la presenza di problemi dovuti all'intasamento e per questo motivo si possono utilizzare quattro metodi poco costosi, basati sull'idraulica dei pozzi come suggerito da Pyne 2005, prima di intraprendere altre attività di relativi maggiori complessità e costo (ad esempio videoispezioni).

Tempo specifico di iniezione. Il metodo è utilizzato in assenza di piezometri di monitoraggio e consiste nel verificare l'innalzamento dovuto all'iniezione di acqua per una durata temporale prefissata. Se si mantengono costanti le condizioni operative del pozzo, la ripetizione della prova nel tempo dovrebbe fornire gli stessi risultati. In sostanza si tratta di eseguire l'equivalente prova per valutare la portata specifica di un pozzo di pompaggio, ma con l'avvertenza che devono essere mantenuti costanti nel tempo delle diverse prove la portata e la durata del test.

Differenza nei livelli di risalita. Il metodo richiede la presenza di un piezometro di monitoraggio. Si tratta di misurare la differenza di livello nel pozzo di ricarica rispetto ad un piezometro limitrofo per una data portata di iniezione.

Mantenendo la stessa portata in prove successive, se la differenza aumenta si manifesta l'intasamento del pozzo.

Confronto tra innalzamento misurato e teorico. Il metodo richiede la conoscenza dei parametri idrogeologici dell'acquifero sfruttato (trasmissività, conducibilità idraulica, coefficiente di immagazzinamento) e l'approssimazione che per una determinata portata le perdite di carico nel pozzo sono costanti. Effettuando una prova a portata costante di iniezione, si misura il livello mantenendo costanti i tempi di iniezione fine delle prove. Se si rileva una differenza tra innalzamento misurato e calcolato con le note relazioni dell'idraulica dei pozzi, si ipotizza che vi sia intasamento.

Andamento degli innalzamenti nel tempo. In assenza di limiti al contorno e mantenendo costante la portata si riportano in un grafico semilogaritmico gli innalzamenti (scala aritmetica) in funzione del tempo (scala logaritmica). In presenza di inizio di intasamento il grafico risultante non risulta interpolabile con sufficiente approssimazione con una linea.

Il metodo attualmente molto utilizzato a livello nazionale di valutazione nel tempo della portata specifica del pozzo di ricarica può essere considerato in modo preliminare come un sintomo della possibile presenza di intasamento, ma richiede l'applicazione dei metodi precedentemente illustrati. Infatti l'utilizzo di portate differenti nell'elaborazione del valore della portata specifica coinvolge anche le note perite di carico nel pozzo che non seguono una legge lineare di variazione e quindi possono introdurre variabili poco definibili che rendono approssimativi i risultati ottenibili.

Nel caso di ulteriori necessità di accertamenti per la verifica dell'effettivo intasamento, della posizione e tipologia di materiali intasanti è poi possibile effettuare una prospezione televisiva, con necessità di rimozione delle apparecchiature elettromeccaniche nel pozzo.

Prevenzione dell'intasamento: completamente proponibile dei pozzi di ricarica

Nell'ambito della costruzione dei pozzi da destinare alla ricarica degli acquiferi si sfruttano generalmente le tecniche utilizzate per la costruzione dei pozzi di prelievo; tuttavia si richiedono alcune cautele, stante il fatto che si utilizzano

tecniche e materiali derivati dalla perforazione di pozzi di presa anche per i pozzi di resa.

Ad esempio (Chiesa 1992):

- viene consigliata per quanto possibile la perforazione con metodo a percussione o con circolazione inversa di sola acqua per impedire la formazione di pannello;
- sono da adottare diametri maggiori di perforazione e di completamento per i pozzi di resa rispetto a quelli di presa;
- si deve progettare una modalità di completamento che possa evitare la possibilità di introduzione di aria nelle acque sotterranee;
- il livello dell'acqua di iniezione non deve raggiungere la cementazione, in quanto potrebbe poi trascinarsi verso il dreno materiali fini nel caso di un abbassamento del livello, dovuto ad interruzione delle operazioni o alla dinamica naturale delle acque sotterranee;
- devono essere prolungate le operazioni di sviluppo dei pozzi per eliminare tutte le particelle fini che sono all'interno della tubazione ad ultimazione della perforazione.

Anche la selezione dei materiali delle tubazioni può contribuire a minimizzare i fenomeni di intasamento attesi in un impianto durante il suo funzionamento, soprattutto in corrispondenza di fenomeni di corrosione che mettono in gioco particelle solide che possono intasare i filtri e il dreno.

E' quindi possibile fornire alcune sintetiche indicazioni di carattere generale, riprese dalla letteratura tecnico-scientifica disponibile (ad esempio Pyne 2005), sui vari materiali d'uso comune o più raro nella realizzazione dei pozzi.

Acciaio al carbonio – Il materiale è largamente utilizzato nella costruzione ordinaria di pozzi di presa e le problematiche di corrosione sono note agli operatori. Se si utilizza un pozzo di presa o di resa esistenti è necessaria una preventiva videoispezione per controllare lo stato dell'opera e programmare eventuali interventi per ripristino della funzionalità.

Acciaio inox – L'utilizzo di questo materiale è limitato a situazioni di drenaggio di acque con particolari composizioni idrochimiche, garantendo una serie di vantaggi (resistenza all'abrasione e alla corrosione, ridotte perdite di carico, etc.) e lo svantaggio dovuto al maggiore costo. Essendo ridotta la corrosione, è comunque diminuita la frequenza di operazioni di manutenzione ordinaria del pozzo.

PVC - L'utilizzo di tubazioni in PVC può contribuire a minimizzare la produzione di particolato durante le operazioni di ricarica; sono resistenti alla corrosione. Permangono le imitazioni al suo utilizzo dovute alla disponibilità di tubazioni e filtri di varie dimensioni e alla loro resistenza meccanica.

Vetroresina – La costruzione di pozzi con questo materiale è poco diffuso e soprattutto in Italia non si hanno dati. Il materiale è resistente alla corrosione, ma è considerato fragile dal punto di vista della costruzione di pozzi, anche in relazione alla profondità da raggiungere. Inoltre la superficie aperta dei filtri non è elevata.

Rivestimento epossidico di pozzi esistenti – Il rivestimento è generalmente utilizzato per ripristino di pozzi

danneggiati. E' necessario prestare attenzione all'insorgere di problemi di corrosione galvanica, soprattutto nel caso di trattamento su acciaio inox.

Sono importanti le modalità di realizzazione del completamento soprattutto per quanto attiene al dimensionamento dei filtri e del dreno.

Per quanto riguarda i filtri sono disponibili commercialmente vari tipi di aperture: circolari, quadrate, rettangolari, a deflettore (a persiana), graniglia (con pre-dreno), a ponte e a spirale.

Queste due ultime aperture sono generalmente le più utilizzate, con particolare riferimento a quelle a ponte, ma in relazione alla percentuale di apertura bisognerebbe privilegiare le aperture a spirale, considerando in ogni caso i costi relativamente maggiori, anche in merito ai percorsi che il fluido tende a compiere in vicinanza di filtri e dreno e poi nell'acquifero che sono assunti come maggiormente lineari.

A tal proposito si riportano nella seguente Tab. 4 i valori della

Tab. 4 - Open area of bridge and continuous slot in well screen (Chiesa 1992).

Tab. 4 - Superficie aperta di filtri a ponte e a spirale (Chiesa 1992).

Diametro	Taglia slot	Filtri a ponte (%)	Filtri a spirale (%)
4"	20	-	25
	60	12	52
8"	30	-	25
	60	6	41
	95	-	51
12"	30	3	16
	60	7	28
	95	-	38
	125	14	45
16"	30	3	16
	60	6	28
	95	-	38
	125	13	45

superficie di apertura dei filtri per quelli a ponte e a spirale.

Possono però essere adottate alcune cautele circa la necessità di far defluire le acque nel senso opposto rispetto a quello convenzionale previsto dal dreno e dai filtri.

Anche se un po' datati i criteri introdotti da Corps of Engineers, 1948 per il dreno e l'apertura dei filtri per i pozzi di iniezione di acqua consigliano:

$$D_{15} \text{ dreno} \geq D_{15} \text{ acquifero} \quad (37)$$

$$D_{15} \text{ dreno} < 20 D_{15} \text{ acquifero} \quad (38)$$

$$D_{50} \text{ dreno} < 25 D_{50} \text{ acquifero} \quad (39)$$

$$\text{apertura filtri} \leq D_{85} \text{ acquifero} \quad (40)$$

Altri criteri sono stati proposti da Johnson E.E., 1963, con caratteristiche dimensionali minori rispetto a quelli precedentemente proposti:

$$D_{30} \text{ dreno} \geq 4D_{30} \text{ acquifero} \quad (41)$$

$$D_{30} \text{ dreno} < 6 D_{30} \text{ acquifero} \quad (42)$$

$$\text{apertura filtri} \leq D_{50-70} \text{ acquifero} \quad (43)$$

$$\text{apertura filtri} \leq D_{10} \text{ dreno} \quad (44)$$

Non sono descritti ulteriori particolari di completamento, come la dotazione di apparecchiature elettromeccaniche e le dimensioni e la disposizione delle tubazioni, che meritano una trattazione a parte.

Integrità della struttura i completamento del pozzo

Nel corso della vita di un pozzo di iniezione deve essere garantita la sua maggiore efficienza nel tempo evitando rotture.

Un problema da affrontare riguarda l'integrità di dreno e cementazione del pozzo, anche se correttamente realizzati, in corrispondenza di attività di iniezione di acque.

Il dreno e la cementazione, oltre che in qualche caso anche il terreno circostante l'opera, si possono fratturare se la pressione di iniezione è troppo elevata (Hubbert, Willis 1972), rendendo il pozzo inservibile; è quindi necessario operare con cautela, rimanendo al di sotto della massima pressione ammissibile (Fig. 15).

Se con $\sigma_1 \equiv \sigma_v$ (Pa) si vuole indicare la componente verticale dello sforzo totale e con $\sigma_3 \equiv \sigma_h$ (Pa) quella orizzontale, si ha che sono tra di loro legati dalla nota relazione, che considerando gli sforzi efficaci è espressa da:

$$K_0 = \frac{\sigma'_h}{\sigma'_v} \tag{45}$$

In terreni non coesivi, come quelli di un acquifero ghiaioso sabbioso, ha generalmente valore $K_0 = 0.5$ (Lancellotta 1987)

Lo sforzo efficace principale nell'acquifero σ'_1 è, secondo il principio degli sforzi efficaci (immaginando un unico orizzonte stratigrafico omogeneo) si ha ad una determinata profondità z (m):

$$\sigma'_1 = \sigma_1 - u = \gamma_{sat} z - u \tag{46}$$

essendo γ_{sat} il peso di volume saturo del terreno (N/m³), u la pressione dei pori (Pa) dovuta alla presenza di acque nel sottosuolo di peso di volume γ_w (N/m³) con altezza h (m) data dalla nota relazione:

$$u = \gamma_w \cdot h \tag{47}$$

In presenza di un'azione di ricarica si ha un veloce incremento di pressione dei pori Δu (Pa), causato dall'innalzamento del livello piezometrico:

$$\Delta u = \gamma_w \cdot \Delta h \tag{48}$$

che determina una diminuzione dello sforzo efficace.

Il minimo sforzo intergranulare σ_3 (Pa) in un punto del suolo non deve essere inferiore rispetto a quello massimo σ_1 (Pa) diviso per il coefficiente di spinta passiva del suolo K_p .

Per litotipi dell'acquifero, con coesione trascurabile come sabbie e ghiaie, questo dipende esclusivamente dall'angolo di resistenza al taglio o angolo di attrito ϕ (°) secondo la

relazione:

$$\frac{\sigma'_s}{\sigma'_1} > \frac{1}{K_p} = \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} \tag{49}$$

La fratturazione idraulica del suolo avviene quando l'incremento di u modifica gli sforzi efficaci, determinando la tangenza alla linea limite del modello di resistenza al taglio di Mohr-Coulomb; in questo caso si hanno rotture per taglio.

Se si incrementa significativamente la σ'_3 si deve rispettare la relazione seguente per evitare problemi:

$$\sigma'_3 > \frac{\sigma'_1 - u}{K_p} - \Delta u \tag{50}$$

Se la sommità del dreno è posta ad una profondità h (m) al di sotto del livello piezometrico si ha:

$$\Delta h = \frac{\gamma_{sat} - \gamma_w}{\gamma_w} \cdot \frac{h}{K_p} \tag{51}$$

Con un angolo di resistenza al taglio elevato $\phi=40^\circ$ e considerando un peso di volume saturo del solido in generale di $\gamma_{sat} = 20$ kN/m³ e dell'acqua di $\gamma_w = 10$ kN/m³ si ottiene come limite superiore $K_p=5$ e di conseguenza:

$$\Delta h = 0.2h \tag{52}$$

Questo valore può essere una stima del massimo innalzamento possibile che si può realizzare in un acquifero soggetto a ricarica artificiale senza provocare una fratturazione, che può compromettere soprattutto la stabilità di dreno e di cementazione in vicinanza del pozzo.

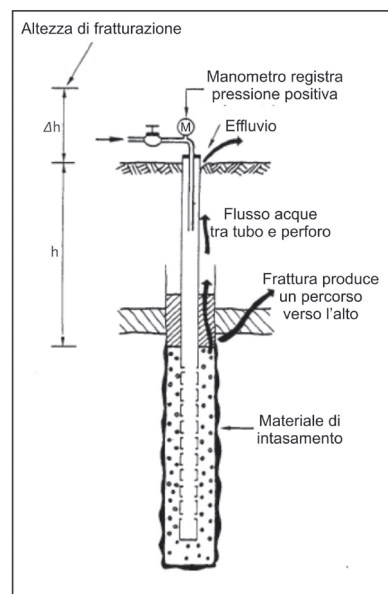


Fig. 15 - Hydraulic fracturing of a recharge well with contribution of clogging (Olsthoorn 1982).

Fig. 15 - Fratturazione indotta da operazioni di ricarica in un pozzo e con il contributo anche dell'intasamento (Olsthoorn 1982).

Qualità delle acque utilizzate nel sistema di presa-resa

La composizione delle acque interessate da prelievo e ricarica deve essere necessariamente individuata preventivamente e sorvegliata nel tempo.

Risulta necessaria la correlazione con le modalità di alimentazione delle acque sotterranee e pertanto, insieme alla parte qualitativa, deve essere monitorato anche il livello piezometrico; ciò può essere effettuato disponendo di misure nei pozzi e possibilmente anche in piezometri.

E' anche necessario procedere ad un inquadramento idrochimico generale dell'area in cui si intendono installare i pozzi, sulla base dei dati disponibili e oggetto di misura in reti di monitoraggio esistenti o da pubblicazioni scientifiche disponibili per una duplice motivazione:

- ricostruire lo stato della qualità delle acque sotterranee per poter individuare elementi e composti che le caratterizzano, da ricercare e analizzare nel successivo campionamento;
- riconoscere l'eventuale presenza di elementi e composti considerati come inquinanti, anche per l'eventuale superamento di valori limite normativi.

Questo secondo aspetto è molto importante dal punto di vista autorizzativo in quanto determina il diverso grado di accettabilità della possibile reiniezione di acque di qualità originariamente degradata e prelevate per l'uso geotermico; nello schema di Tab. 5; tali contaminanti sono generalmente denominati come "sostanze contaminanti locali".

E' inoltre possibile organizzare un monitoraggio in continuo, anche con trasmissione in telemetria, per alcuni dei parametri chimico-fisici installando apposite sonde nei pozzi, così come per i livelli piezometrici e la conducibilità elettrolitica.

Tab. 5 - Minimum parameters to be identified through waters analysis.

Tab. 5 - Parametri minimi da individuare mediante analisi delle acque.

Parametri, elementi e composti	Misura in situ	Misura in laboratorio
Parametri chimico-fisici (temperatura, pH, conducibilità elettrolitica, Eh, O ₂ disciolto)	X	
Anioni e cationi maggiori (Ca, Mg, Na, K, HCO ₃ , Cl, SO ₄ , NO ₃)		X
Metalli (Fe, Mn, As)		X
Composti organici (TOC)		X
Sostanze contaminanti locali		X
Gas (CH ₄ , CO ₂)		X
Microbiologia (carica batterica)		X

Per quanto attiene alla frequenza delle determinazioni in un monitoraggio ordinario è possibile proporre il seguente schema di approccio (Tab. 6), nel quale si effettuano prelievi frequenti nel primo anno di sfruttamento delle acque sotterranee, anche per avere un buon data set statistico di riferimento, per poi passare ad una frequenza annuale.

Come è ovvio, tale frequenza potrà essere incrementata considerando la dimensione modeste o grandi degli impianti.

Tab. 6 - Hydrochemical ordinary monitoring frequency.

Tab. 6 - Frequenza del monitoraggio idrochimico ordinario.

Tempo	Monitoraggio ordinario	Anno
T0 - costruzione pozzi	Fine perforazione	1
T1 - inizio sfruttamento	1-2 settimane	
T2 - in corso d'uso	3-4 mesi	
T3 - in corso d'uso	12 mesi	
T4 - in corso d'uso	12 mesi	2
T5 - in corso d'uso	12 mesi	3
T6 -

Modifiche allo schema di monitoraggio ordinario possono essere proposte se sono note o si verificano variazioni stagionali significative delle caratteristiche idrodinamiche (es.: sollevamenti e abbassamenti del livello della falda) e di quelle idrochimiche.

Ulteriori accertamenti circa la qualità delle matrici ambientali riguardano in particolari casi anche l'analisi della composizione petrografica dei clasti e dei granuli che compongono l'acquifero e i test di eluizione.

In presenza di materiali fini all'interno dell'acquifero è anche utile considerare la determinazione dell'indice SAR modificato, di uso comune nelle indagini pedologiche ad eccezione della considerazione anche della presenza del Potassio.

Questo indice viene calcolato per verificare se esiste la possibilità di rigonfiamento e dispersione di minerali delle argille e ad alti valori del parametro (ad esempio > 3) corrisponde un rischio elevato (valori in meq/l):

$$SAR_m = \frac{[Na^+] + [K^+]}{\sqrt{\frac{[Ca^{++}] + [Mg^{++}]}{2}}} \quad (53)$$

Inoltre dal punto di vista teorico l'equilibrio chimico delle sostanze in soluzione possono essere meglio studiate mediante l'applicazione di software quali PHREEQC (Parkhurst, Appelo 1999).

Il monitoraggio straordinario, che implica un prelievo di acque aggiuntivo e una conseguente analisi sia sul pozzo di resa che su quello di presa deve essere realizzato nel caso di:

- variazioni significative dei parametri monitorati tra il pozzo di presa e quello di resa;
- indicazioni di possibile intasamento dal punto di vista idrodinamico secondo quanto illustrato nel capitolo sulla "Individuazione preventiva di fenomeni di intasamento dei pozzi"

- Nel caso di conferma di problemi idrochimici viene ipotizzato;
- un arrivo di acque contaminate dall'esterno del campo pozzi dovuto probabilmente a ragioni non dovute allo sfruttamento geotermico;
- un effettivo intasamento e quindi la necessità di intervenire per ripristinare l'efficienza dell'impianto.

Esempio di dimensionamento dei pozzi in un impianto a ciclo aperto

Considerando gli elementi esposti in precedenti capitoli, si osserva come diventi difficile prevedere dettagliatamente il comportamento di un pozzo di iniezione e per tale ragione deve essere approfondito l'aspetto sperimentale quando si costruisce un'opera di questo tipo.

Un pozzo di ricarica viene realizzato nel caso si progetti una pompa di calore a circuito aperto formata da un "doppietto", cioè dall'accoppiamento pozzo di presa-pozzo di resa.

In gran parte dei casi a livello regionale si sfruttano le falde più superficiali, in genere non confinate o semiconfinate e anche per motivi normativi e autorizzativi, riservando quelle profonde all'utilizzo strategico e più nobile del consumo umano delle acque; l'uso geotermico delle acque sotterranee appare quindi concorrenziale sostanzialmente con quelli irriguo, industriale o ricreativo, anche se può essere in effetti abbinato ad uno di questi usi.

Appare quindi proponibile un approccio come illustrato nell'esempio di seguito esposto, del tutto orientativo, cercando per una maggiore semplicità di utilizzare le metodologie di prova allo stato dell'arte e quindi di facile accessibilità da parte degli operatori.

1. **Perforazione di un pozzo di presa e di un pozzo di resa** - Viene realizzato con metodo a percussione un pozzo di prelievo completo, in questo caso della profondità di circa 35 m in un acquifero prevalentemente ghiaioso-sabbioso con poca matrice limosa; viene realizzato anche un pozzo gemello destinato alla ricarica ad una distanza di circa 26 m. Il livello della falda ha una soggiacenza di 17 m.

2. **Completamento dei pozzi** - Il pozzo di presa è completato con cementazione superficiale fino a 2.5 m di profondità e dotato di filtri a ponte con spessore di 15 m e relativo dreno; anche il pozzo di resa ha in pratica le stesse caratteristiche.
3. **Sviluppo e prove sul pozzo di presa** - Si effettua una prova con portata variabile a gradini nel pozzo di presa per individuare la portata ottimale mediante il grafico $Q^2/s-s$, non registrandosi in questo caso il suo raggiungimento.
4. **Caratterizzazione dell'acquifero** - Sul pozzo di presa è effettuata anche una prova di pompaggio a portata costante, ottenendosi una conducibilità idraulica elevata di 10^{-3} m/s.
5. **Sperimentazione delle portate del doppietto** - Si opera una prova a portata variabile a gradini prelevando acqua nel pozzo di presa ed immettendola direttamente in quello di resa, ottenendo due curve: abbassamenti-tempo e innalzamenti-tempo (Fig. 16). Una difficoltà riscontrata è dovuta alla installazione di idonee pompe e al collegamento dei pozzi, che deve tenere in considerazione la loro distanza e l'eventuale presenza di ostacoli.
6. **Portata di esercizio** - Sulla base delle risultanze della prova di cui al punto 5 è possibile proporre la portata di esecuzione del sistema a ciclo aperto della pompa di calore, che può essere anche intorno alla portata massima determinata per questo caso.

Come si osserva l'entità di abbassamento e del relativo innalzamento del livello della falda in prova sono differenti (circa in rapporto di 1:2) in relazione a quanto ampiamente descritto in precedenza nel testo relativamente alla resistenza al flusso e di ciò si deve tenere conto nella progettazione del sistema; in generale e in merito al valore assunto dalla conducibilità idraulica dell'acquifero si possono avere anche differenze maggiori tra abbassamento e innalzamento dei livelli (anche in rapporto fino a 1:4).

Ciò potrebbe essere dovuto anche a diverse perdite di carico nei pozzi, difficilmente stimabili in quello di ricarica per quanto precedentemente illustrato.

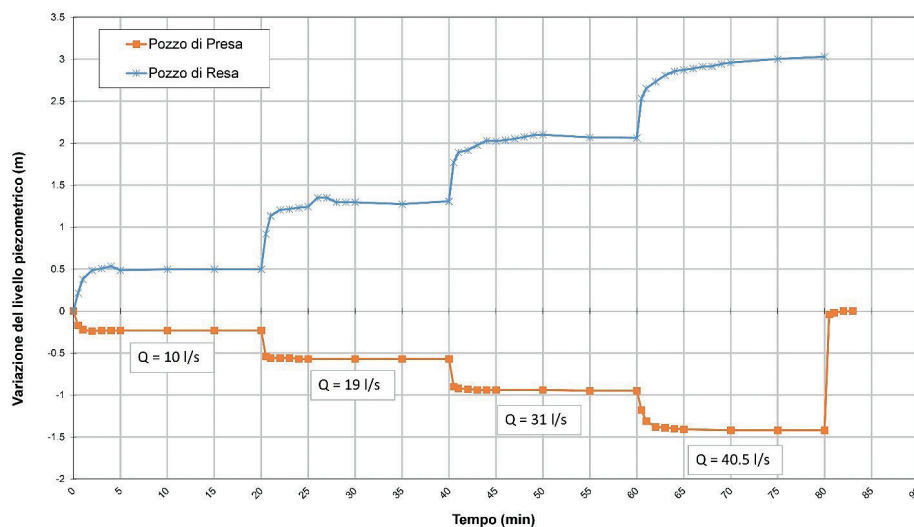


Fig. 16 - Example of steep-drawdown pumping test and step-rise recharge test in couple of well for open cycle geothermal heat pump.

Fig. 16 - Esempio di prova di pompaggio a portata variabile a gradini e misure contemporanee del livello piezometrico nel pozzo di presa e nel pozzo di resa.

È inoltre evidente nella pratica la difficoltà di disporre di un campo prova che possa rispettare tutti i requisiti teorici che si applicano alle prove di pompaggio sui pozzi, ma si deve cercare un ragionevole compromesso sul grado di conoscenza dei parametri che possono influenzare la dinamica delle acque prelevate e reiniettate.

È altresì evidente che in presenza di un campo pozzi, a servizio di una richiesta elevata dell'utenza per l'approvvigionamento energetico, è possibile disporre della potenzialità tecnica ed economica per l'esecuzione delle prove e per la modellazione numerica del sistema.

A questo proposito possono essere utilizzati software specifici che modellano direttamente la propagazione dell'onda di calore, oppure più semplicemente software di uso più comune che sfruttano la similitudine tra la propagazione di una sostanza in soluzione nelle acque sotterranee e quella dell'onda di calore, come in Beretta et al. 2014.

Conclusioni

Sono state esaminate nel testo le problematiche connesse all'installazione di un sistema a circuito aperto per lo sfruttamento dell'energia geotermica a bassa entalpia che prevede la costruzione di pozzi di presa e di resa e l'interessamento di acque sotterranee dello stesso acquifero, senza provvedere comunque ad alcuna forma di trattamento.

Dopo un inquadramento della fattibilità del sistema si è in particolare esaminata la presenza di un possibile cattivo funzionamento dei pozzi causato da intasamento, che determina anche un incremento dei costi per il sollevamento dell'acqua in un pozzo di prelievo.

In un pozzo di reiniezione si determinano invece difficoltà dovute alla resistenza al flusso e innalzamenti eccessivi di livello piezometrico, che in alcuni casi può affiorare se la soggiacenza della falda non è significativa.

Anche per questo motivo per la manutenzione del sistema si possono prevedere cicli di inversione dei flussi, anche se ciò causa l'interruzione momentanea dell'utilizzo della pompa di calore; queste inversioni sono invece programmate nella normale gestione di pozzi a destinazione alterna, come descritti precedentemente.

In caso di presenza di intasamento sono allora necessari interventi per ripristinare la funzionalità costituiti da sistemi semplici come la spazzolatura per arrivare poi a controlavaggio, pistonaggio, jetting-tools ed infine a trattamenti chimici con anidride carbonica o a impulsi idraulici generati da espansione di gas ad alta pressione con maggiore contenuto tecnologico.

Per non arrivare alla necessità di adozione di questi sistemi (non descritti nel testo e talora di consistente impegno tecnico-economico) si sono indicate, grazie ad una sintesi della letteratura scientifico-tecnica sull'argomento, innanzitutto le modalità, anche con elementi di elaborazioni quantitative, con cui si verifica l'intasamento di un pozzo in particolare di ricarica, dove assume primaria importanza la presenza e/o produzione di bolle di gas.

Successivamente è stata sottolineata anche l'importanza di ridurre l'incremento di pressione idrostatica generata

dagli innalzamenti del livello al fine di evitare fratturazione idraulica e conservare l'integrità di dreno e cementazione del pozzo.

Sono stati infine riportati alcuni suggerimenti circa le modalità di completamento dei pozzi di ricarica e indicazioni sui monitoraggi da effettuare, oltre a descrivere una tipologia di prova in situ a portata variabile a gradini con misura contemporanea in abbassamento e innalzamento dei livelli piezometrici, verificando che l'entità degli innalzamenti è sensibilmente maggiore di quella degli abbassamenti.

Questo aspetto sperimentale assume una notevole importanza, visto quanto riportato nel testo circa l'assimilazione delle modalità costruttive e di comportamento del flusso idrico sotterraneo che si adottano nel caso di reiniezione di acqua nei pozzi al suo prelievo, che per molti aspetti non sono sufficientemente esaustive.

Lo sfruttamento dell'energia geotermica a bassa entalpia a ciclo aperto mediante pompe di calore costituisce una occasione di miglioramento delle procedure tecniche di realizzazione degli impianti, in particolare nella perforazione dei pozzi costituendo una occasione di incremento delle attività per tecnici ed imprese e di riduzione dell'impatto ambientale dello sfruttamento energetico di altre risorse per la comunità, non escludendo anche l'interesse per l'acquisizione di migliori conoscenze mediante sperimentazioni e modellazioni sugli aspetti meno conosciuti del problema così come descritti nel testo.

BIBLIOGRAFIA

- Alford, G. Cullimore R. (1999) The Application of Heat and Chemicals in the Control of Biofouling Events in Wells. Lewis Publishers, Boca Raton, Florida
- Auseur J.Y., Sauty J.J. (1982) Exploitation de doublets de forage pour le chauffage ou la climatisation avec pompes à chaleur. Les milieux discontinus en hydrogéologie "Exploitation of wells doublet for heating or conditioning with heat pumps". Documents du BRGM n. 45, Orléans
- Banks D. (2009) An introduction to 'thermogeology' and the exploitation of ground source heat. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology, Vol. 42, 283-293.
- Beretta G.P. (1984) Condizioni idrogeologiche per lo sfruttamento degli acquiferi poco profondi mediante pompe di calore "Hydrogeological conditions for the exploitation of shallow aquifers through heat pumps". Ingegneria Ambientale, vol. 13, n. 9, settembre, Milano
- Beretta G.P., Coppola G., Della Pona L. (2014) Solute and heat transport in groundwater similarity: Model application of a high capacity open-loop pump. Geothermics 51 (2014), 63-70
- Bichara A.F. (1986) Clogging of recharge wells by suspended solids J. Irrig. Drain Eng., 112(3): 210-224
- Borsi, I., Mazzanti, G., Barbagli, A., Rossetto, R. (2014) L'impianto di ricarica riverbank filtration di S.Alessio (Lucca): attività di monitoraggio e modellistica nel progetto EU FP7 MARSOL "Riverbank filtration plant in S.Alessio (Lucca): monitoring and modeling activities in the EU FP7 MARSOL project". Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater, Vol. 3, n. 3/137
- Bouwer H. (2002) Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering. Hydrogeology Journal, Vol. 10, 121-142.
- British Geological Survey (2007) Open-loop ground source heat pumps and the groundwater systems: A literature review of current applications, regulations and problems. Energy Geoscience Programme Open Report OR/10/045, 24 pp.
- Characklis, W.G., Marshall K.C. (1990) Biofilms. John Wiley and Sons, Inc, New York
- Chiesa G. (1992) La ricarica artificiale delle falde "The artificial aquifer recharge". 293 pp., Ed. Geo-Graph s.n.c.
- Conorzio Villorosi (1978) Artificial Recharge in the Milan Area. Int. Comm. on Irrigation and Drainage. Symp. Athens R8, Atene
- Cullimore M.R. (1978) The Identification, Cultivation and Control of Iron Bacteria in Ground Water. Aquatic Microbiology, Editors Skinner & Shewan Academic Press
- Cullimore M.R. (1999) Microbiology of Well Biofouling, Lewis Publishers, CRC Press, Boca Raton, Florida
- de la Loma González B. (2013) Clogging of Deep Well Infiltration Recharge Systems in the Netherlands. In. Clogging associated with well injection, 163-173
- Dwivedi S.N., Shukla R.R., Singh R., Adhikari S.K., Nambi K.A., Purty S.S., Roy G.K. (2015) Determining the recharging capacity of an injection well in a semi-confined alluvial aquifer. Current Science, vol. 109, no. 6, 25 september, 1177-1181
- Environmental Security & Technology Certification Program (ESTCP) (2005) A review of biofouling controls for enhanced in situ bioremediation of groundwater. ESTCP PROJECT ER-0429, 64 pp., Arlington, Virginia
- Hem J.D. (1985) Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. U.S. Geological Survey Water Supply Paper 22454, 264 pp.
- Hubbert M.K.; Willis D.G. (1972) Mechanics of Hydraulic Fracturing. AAGP. Memoir 18, pp. 199-217
- Johnson E.E. (1963) Basic principles of water well design. pt. 3: Johnson Drillers Jour., v. 35, no. 6, p. 4-5, 8
- Johnson A.I., Moston R.P., Versaw S.F. (1966) Laboratory Study of Aquifer Properties and Well Design for an Artificial-Recharge Site. Geological Survey Water-Supply Paper 1615-H, 46 pp.
- Kharal L. (2002) Artificial recharge of groundwater by injection well. 28th WEDC Conference Kolkata (Calcutta), India
- Le Feuvre P., St John Cox C. (2009) Ground source heating and cooling pumps – state of play and future trends. Evidence Directorate, Environment Agency of England and Wales, ISBN 978-1-84911-136-2.
- Lippmann M.J., Tsang C.F. (1980) Groundwater use for cooling: associated temperature changes. Ground Water, 18(5), 452-458
- Marshall, J. K., Saravanapavan, A., Spiegel, Z. (1968) Operation of a Recharge Borehole, Proceedings, Institution of Civil Engineers, Vol. 41, Nov., 447-473
- Mayer C., Moritz R., Kirschner C., Borchard W., Maibaum R., Wiggender J., Flemming H. (1999) The Role of Intermolecular Interactions: Studies on Model Systems for Bacterial Biofilms. Int. J. Bio. Macromol. 26: 3-16.
- Olsthoorn T.N. (1982) The clogging of recharge wells, main subjects". Working group on recharge wells, Assembled within the research program of the VEWIN Association, 139 pp., Rijswijk
- Parkhurst, D.L., and Appelo, C.A.J. (1999) User's guide to PHREEQC (Version 3)-A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations". U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99-4259, 312 p.
- Pyne, R.G.D. (2005) Aquifer storage and recovery: A guide to groundwater recharge through wells. Second Edition ISBN 0-9774337-090000, 609 pp.
- Rahman, M. D. A., Snerdon, E. T., Hiler, E. A., (1969) Effect of Sediment Concentration on Well Recharge through Fine Sand Aquifer, Water Resources Research, Vol. 5, No. 3, June, 1969, pp. 641-646
- Rehban, M., Schwarz, J. (1968) Clogging and Contamination Processes in Recharge Wells. Water Resources Research, Vol. 4, No. 6, Dec, 1207-1217.
- Repubblica Italiana (2001) Attuazione della direttiva 98/83/CE relativa alla qualità delle acque destinate al consumo umano. D.Lgs. 2 febbraio 2001, n. 31, G.U. n.41/L del 3 marzo 2001, Roma
- Repubblica Italiana (2006) Norme in materia ambientale. D.Lgs. 3 aprile 2006, n. 152, G.U. Serie generale, 14-4-2006, Roma
- Repubblica Italiana (2009) Attuazione della direttiva 2006/118/CE, relativa alla protezione delle acque sotterranee dall'inquinamento e dal deterioramento. (09G0038). D.Lgs. 16 marzo 2009, n. 30, G.U. n. 79 del 4 aprile 2009, Roma
- Repubblica Italiana (2013) Conversione, con modificazioni, del decreto-legge 21 giugno 2013, n. 69 Disposizioni urgenti per il rilancio dell'economia Legge 9 agosto 2013, n. 98, G.U. n. 194 del 20 agosto 2013, Roma
- Repubblica Italiana (2016) Regolamento recante criteri per il rilascio dell'autorizzazione al ravvenamento o all'accrescimento artificiale dei corpi idrici sotterranei al fine del raggiungimento dell'obiettivo di qualità, ai sensi dell'articolo 104, comma 4-bis, del decreto legislativo 3 aprile 2006, n. 152. (16G00111). Decreto del ministero dell'Ambiente e della tutela del territorio e del mare 2 maggio 2016, n. 100, G.U. del 13 giugno 2016, n.136, Roma

- Rossetto R., Bonari E. (2014) Il futuro della ricarica delle falde in condizioni controllate in Italia: il progetto europeo FPVII MARSOL e la EIP on Water MAR to MARKET “*The future of recharging groundwater under controlled conditions in Italy: the European project FPVII MARSOL and the EIP on Water MAR to MARKET* “. *Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater*, 9-12
- Schippers J.C., Verdouw J. (1980) The Modified-Fouling Index. A Method for Determining the Fouling Characteristics of Water. *Desalination* 32 (1980) pp 137-148.
- Schomburgk S., Goyeneche O., Gateau C., Vernoux, J., Denis L. (2005) Guide d'aide à la decision pour l'installation de pompes a chaleur sur nappes aquifere en region Ile-de-France: Partie1-Atlas hydrogeologique. BRGM, BRGM/RP-53306-FR
- Severi, P., Bonzi, L., Ferrari, V., Pellegrino, I. (2014) Ricarica in condizioni controllate della conoide del Fiume Marecchia (Rimini), avvio della sperimentazione e primi risultati “*Managed aquifer recharge in the Marecchia alluvial fan (Rimini - Italy), start of the test and first results*”. *Acque Sotterranee- Italian Journal of Groundwater*, Vol. 3, n. 3/137. DOI: 10.7343/as-083-14-0110
- Smith, S.A. (1995) *Monitoring and Remediation of Remediation Wells. Problem Prevention, Maintenance, and Rehabilitation*. CRC Press, Lewis Publishers, Boca Raton, Florida
- Sniegocki R.T. (1963) *Geochemical Aspects of Artificial Recharge Water-Supply paper 1615-E*, Washington, USGS-1963, 41 pp.
- Sniegocki R.T., Reed J.E. (1963) *Principles of Siphons with respect to the Artificial Recharge, Studies in the Grand-Prairie region, Arkansas* Washington, USGS, 1963, *Water-Supply Paper 1615-D*, 1965 pp.
- Taylor, S.W., and PR. Jaffe P.R. (1991) Enhanced In-Situ Biodegradation and Aquifer Permeability Reduction. *Journal of Environmental Engineering*. 117(1): 25-46
- Unione Europea (2000) Direttiva 2000/60/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 23 ottobre 2000 che istituisce un quadro per l'azione comunitaria in materia di acque. G.U. delle Comunità europee L 327/1, 22/12/2000
- Unione Europea (2006) Direttiva 2006/118/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 12 dicembre 2006 sulla protezione delle acque sotterranee dall'inquinamento e dal deterioramento. G.U. dell'Unione europea L 372/19, 27/12/2006
- U.S. Army Corps of Engineers (1948) Laboratory investigation of filters for Enid and Grenada Dams: Vicksburg, Miss., Waterways Expt. Sta. Tech. Memo. 3-245, 50 pp.
- U.S. Environmental Protection Agency (1997) *Manual on environmental issues related to geothermal heat pump systems*. EPA 430-B-97-028.
- U.S. Environmental Protection Agency (1999) *The Class V Underground Injection Study: Volume 19: Heat pump and air conditioning return flow wells*. EPA/816-R-99-01s.
- Van Beek C.G.E.M., Hubeck A.A., de la Loma Gonzalez B., Stuyfzand P.J. (2016) Chemical and mechanical clogging of groundwater abstraction wells field Heel, the Netherlands. *Hydrogeology Journal*, September,