

Importanza dell'analisi idrogeologica nella predisposizione di modelli concettuali per la progettazione di opere di drenaggio e captazione



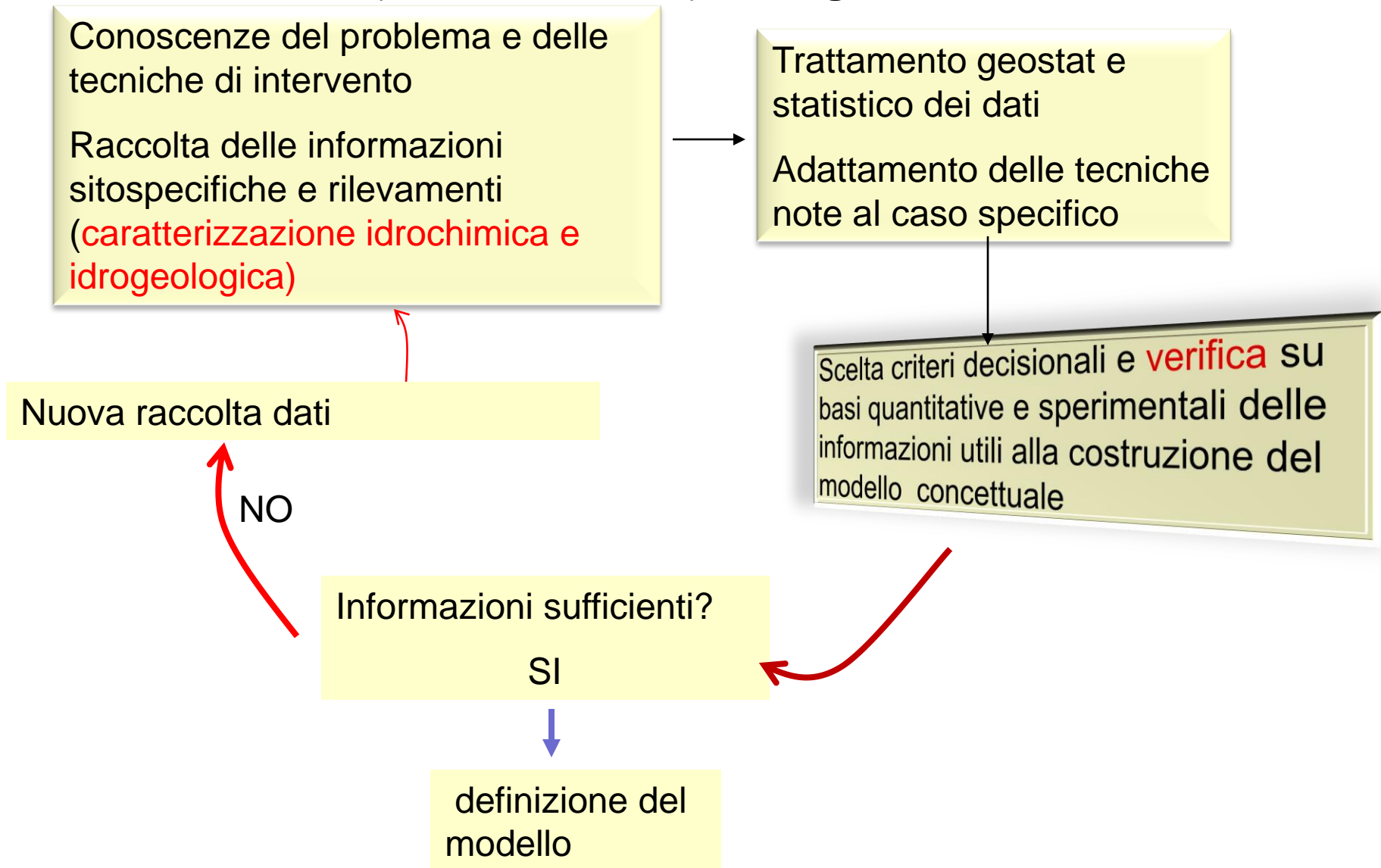
Seminario didattico 10 giugno 2008 Politecnico di Milano

Le opere di drenaggio e captazione , a causa dell'incidenza della geologia sulla distribuzione della piezometria e dell'andamento del flusso idrico sotterraneo, richiedono un approfondimento della struttura idrogeologica nella prima fase di lavoro che comprende la **costruzione del modello concettuale e idrogeochimico** .

Verranno presentati quindi i casi nei quali l'analisi idrogeologica deve essere particolarmente approfondita, che riguardano :

1. Identificazione delle fonti di inquinamento (metodo idrogeochimico)
2. Problemi degli acquiferi nei depositi alluvionali: posizionamento delle captazioni in presenza di livelli particolarmente trasmissivi e livelli o lenti poco permeabili
3. inquinamento diffuso per rilascio di inquinanti da livelli poco permeabili
4. Applicazioni del rilevamento geostrutturale allo studio di drenaggi e infrastrutture in roccia

Schema delle fasi di lavoro: costruzione del **modello concettuale** (Bardos e al.2001) e **idrogeochimico**



Modello idrogeochimico e localizzazione delle fonti della contaminazione

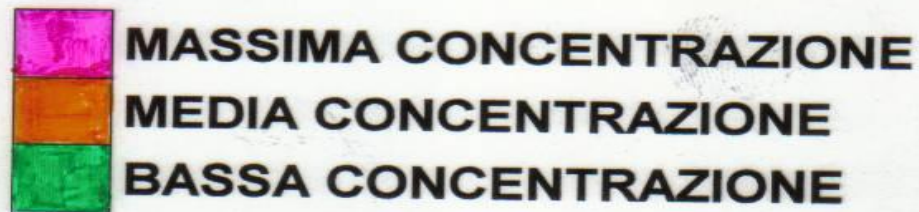
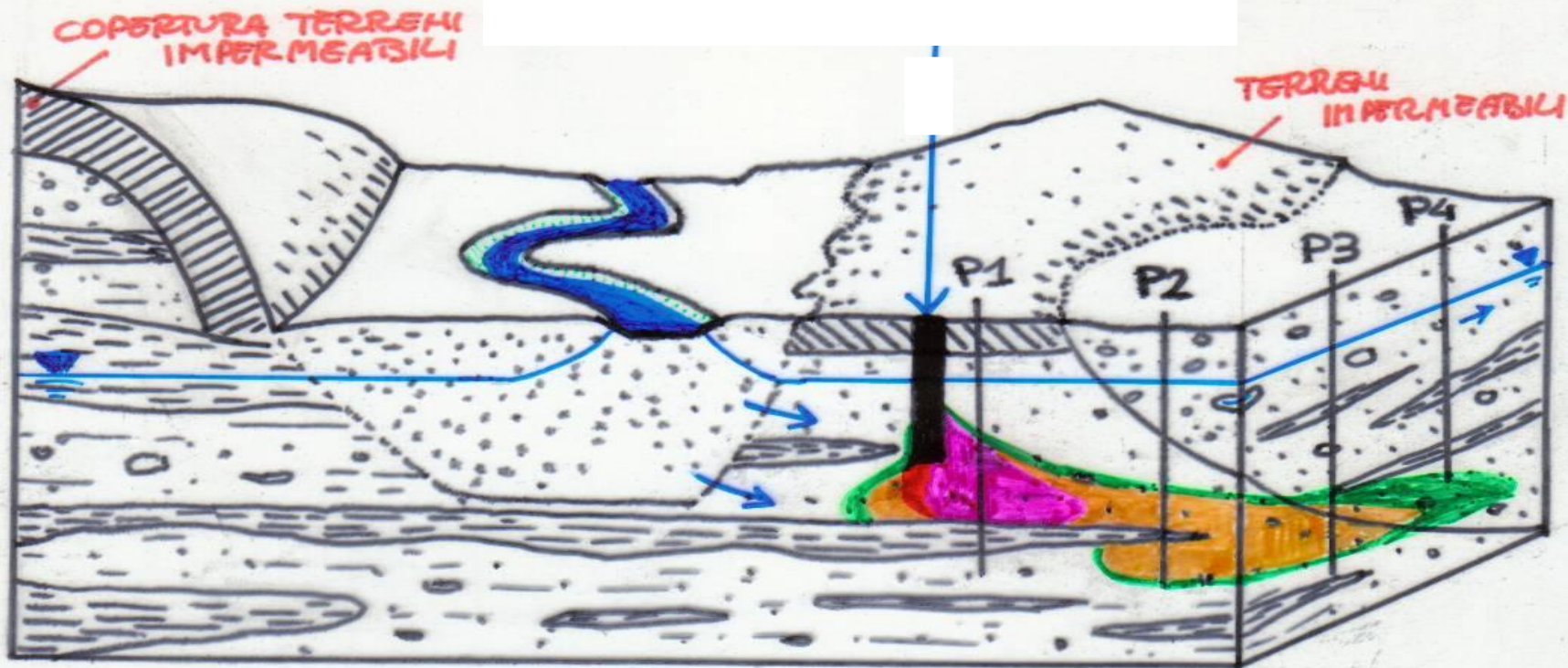
Il metodo più semplice per ricostruire il flusso idrico sotterraneo è quello di individuare le fonti che determinano il chimismo della falda, quasi sempre coincidenti con quelle che alimentano un inquinamento.

Tradizionalmente si procede con

la predisposizione di carte piezometriche dei corpi idrici interessati dal flusso. Dal tracciamento delle linee di flusso passanti per l'area contaminata si può risalire ai settori posti a monte nei quali le elevate concentrazioni dell'inquinante oggetto di studio evidenziano la possibile presenza di una fonte di inquinamento.

Questa tecnica (**metodo idrogeochimico**) è stata applicata in molti casi con successo, quando i punti di monitoraggio dei diversi corpi idrici erano sufficienti per numero e qualità.

Essa richiede che, a monte dell'area inquinata e preferibilmente anche di quelle che si rivelano essere le probabili fonti, vengano posizionati punti di monitoraggio che indichino lo stato delle acque campionate (**punti di bianco**). Senza questo accorgimento, **il modello concettuale assume il significato di una semplice ipotesi.**

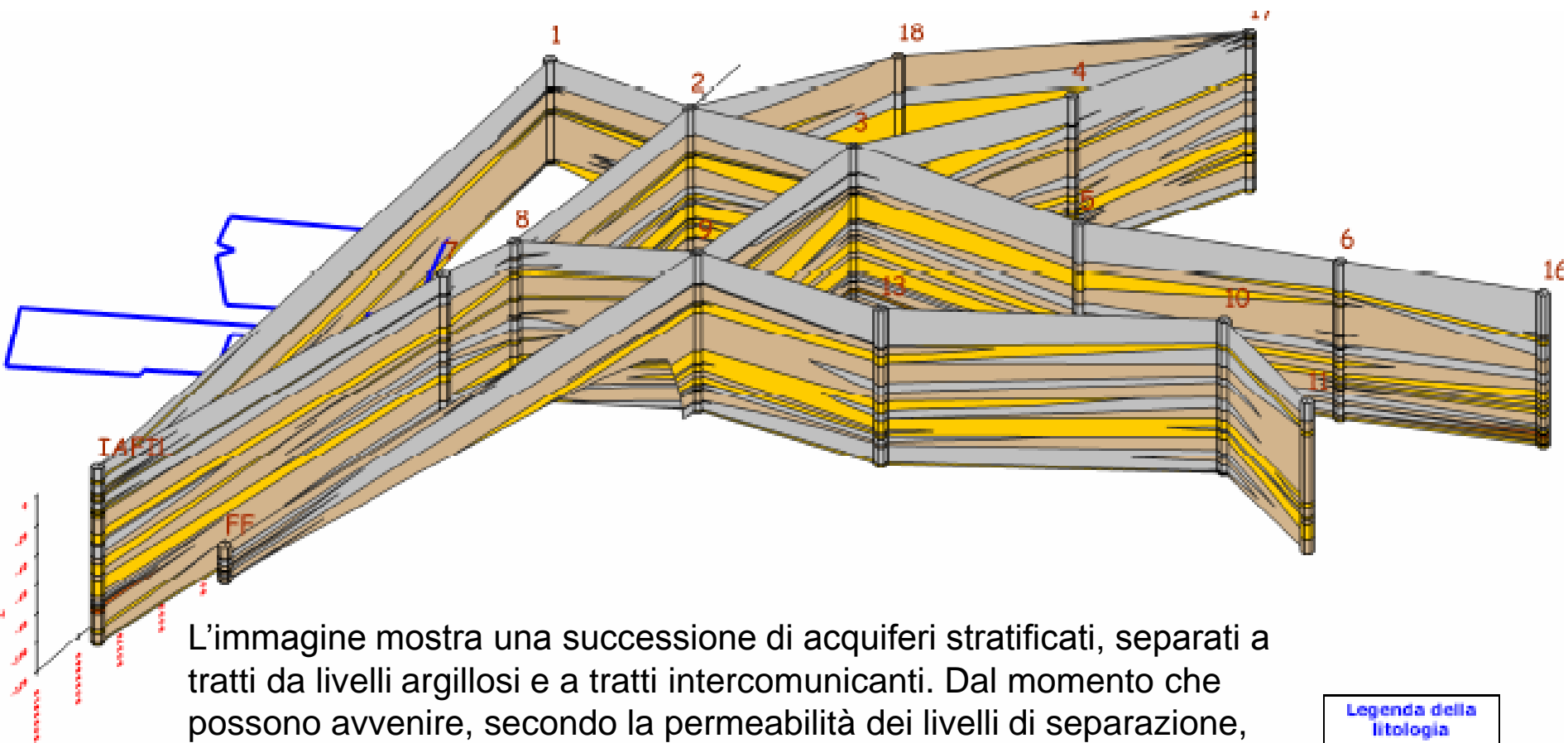


L'origine della contaminazione viene stabilita tradizionalmente applicando la classica metodologia idrogeochimica.

Una volta ricostruito il modello fisico del sottosuolo, si applicano modelli matematici basati sulla conoscenza dei parametri idrodispersivi: trasmissività, permeabilità, porosità efficace, coefficiente di immagazzinamento, dispersività, diffusività, che permettono un primo approccio quantitativo al problema.

Caso degli acquiferi alluvionali eterogenei

- Quando il bersaglio dell'inquinamento è rappresentato da un pozzo o da un gruppo di captazioni, per la ricostruzione dei modelli concettuali nascono problemi, determinati dall'assetto differenziato dei filetti liquidi nei diversi corpi idrici.
- I filetti si muovono infatti con velocità diverse alle diverse profondità, in specie quando il pozzo non è totalmente finestrato. Questo accade quando gli abbassamenti previsti sono rilevanti, e quando si hanno livelli a k diversa.
- Ogni caso è da esaminare a parte, in dipendenza della geometria dell'acquifero e dei livelli a k differente
- **In particolare risulta fondamentale tener conto dell'anisotropia della permeabilità**
- La letteratura ha evidenziato la necessità in questi casi di utilizzare cluster di piezometri nelle prove di pompaggio.



L'immagine mostra una successione di acquiferi stratificati, separati a tratti da livelli argillosi e a tratti intercomunicanti. Dal momento che possono avvenire, secondo la permeabilità dei livelli di separazione, **interscambi fra gli acquiferi**, una buona ricostruzione del modello concettuale è necessariamente accompagnata da una base di dati geologici sufficiente a chiarire la localizzazione e l'entità di questi scambi, che possono determinare importanti conseguenze per la distribuzione delle sostanze inquinanti.



Conseguenze dell'erronea valutazione della permeabilità e della trasmissività

Un errore nella valutazione della T per insufficiente cura nell'effettuazione delle prove su pozzo comporta quindi seri problemi per la funzionalità dell'opera. Inoltre si possono determinare condizioni negative per la buona riuscita dei progetti di contenimento, dei quali si possono fare diversi esempi.

La relazione di Dupuit, che qui viene riportata nella forma più semplice, riferita alle falde in pressione, evidenzia che l'abbassamento ΔH del livello piezometrico prodotto dal pompaggio dei pozzi è valutabile sulla base della portata Q estratta, della distanza dall'asse del pozzo alla quale viene misurato l'abbassamento del livello piezometrico, del raggio r del pozzo e della trasmissività T dell'acquifero:

$$\Delta H = [(QLn(x/r) / (2\pi T)$$

Ne consegue che a parità di distanza e di raggio della captazione, i pozzi con minore T determinano abbassamenti maggiori. Quindi gli acquiferi con minore T sono in prima approssimazione più idonei all'installazione di barriere idrauliche.

D'altra parte l'abbassamento che ciascun pozzo può creare al suo interno senza deterioramenti dell'acquifero, è determinato essenzialmente dalla velocità critica dell'acqua al passaggio nei filtri del pozzo, velocità che non deve essere superiore ai 3 cm/s (ANIPA) . Negli acquiferi permeabili si ottengono ottime portate anche con velocità di afflusso decisamente più ridotte, mentre nei terreni con una sensibile componente limosa, dove è necessario un gradiente elevato per ottenere buone portate, questa velocità viene invece facilmente raggiunta , fatto che determina trascinarsi di materiale fine e un accurato controllo dello stato di intasamento dei filtri .

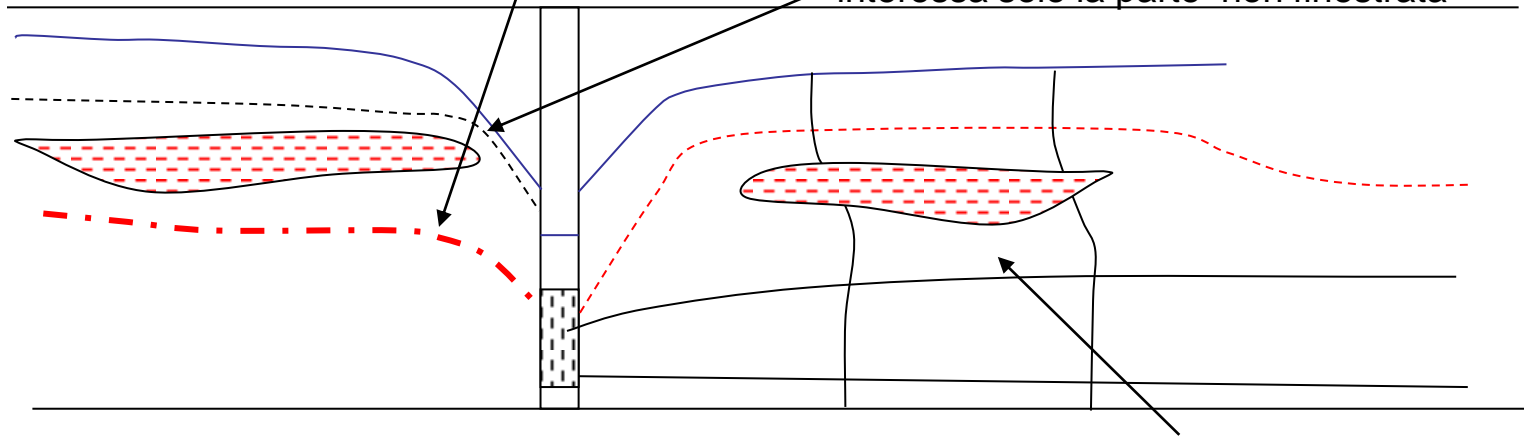
Di conseguenza i pozzi barriera in acquiferi di mediocre permeabilità (inferiore a 0,01 cm/s) sono un'ottima soluzione ma solo se l'abbassamento al loro interno è contenuto, e la manutenzione accurata.

I pozzi collocati in acquiferi di elevata permeabilità sono in grado di produrre , anche quando la falda assume una portata molto elevata, un efficace intervento. Va comunque verificato che nel, corso dell'anno , lo **spessore dell'acquifero sia sempre abbastanza elevato da consentire forti abbassamenti.**

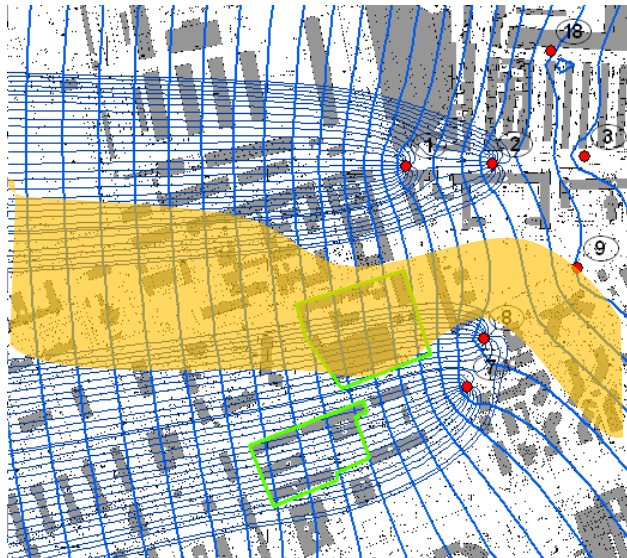
Effetto della mancata individuazione di livelli poco permeabili in alluvioni

Le acque attraversano un tratto in cui la sezione si va restringendo progressivamente

Questa porzione del flusso non arriva ai filtri, e aggira il pozzo in quanto interessa solo la parte non finestrata



Moto più rettilineo e incremento di cadente



Nel caso di pozzi barriera il danno è notevole : la contaminazione viene solo deviata , e prosegue verso valle

Effetti della mancata individuazione di livelli molto permeabili

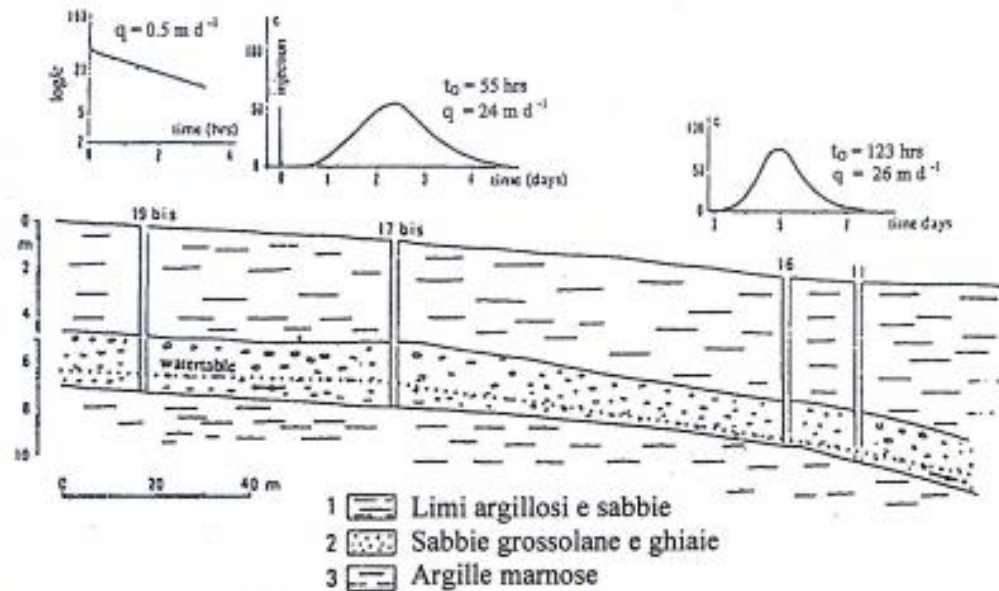
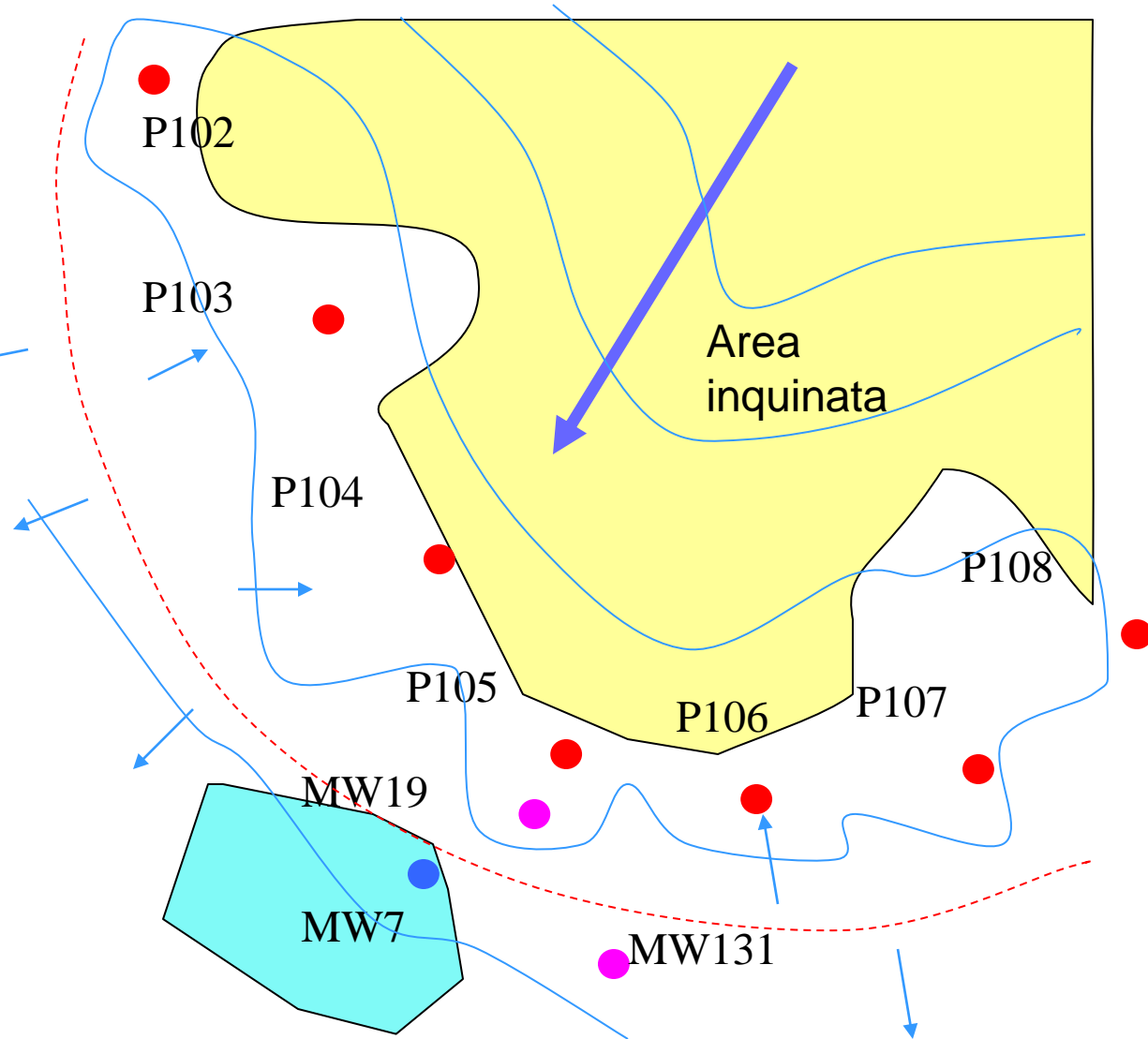


Fig. 15: Misure con l'uso di traccianti artificiali della portata unitaria q di Darcy e della velocità effettiva ($V_e = u$) relative alle acque sotterranee situate all'esterno dell'Industria di Cromatura. 1: limi argillosi; 2: ghiaie e sabbie; 3: argille marnose (Tazioli et al., 1994).

Da tempo le prove con traccianti vengono utilizzate per identificare i livelli più permeabili (Tazioli G.S. e al., 1994), la cui mancata individuazione può comportare errori nella gestione delle opere di disinquinamento o di contenimento (barriere idrauliche). In questi casi, la stima della portata da estrarre e quindi anche quella del volume delle acque da depurare risulta anche sensibilmente inferiore al reale, comportando periodi anche lunghi di malfunzionamento degli impianti.

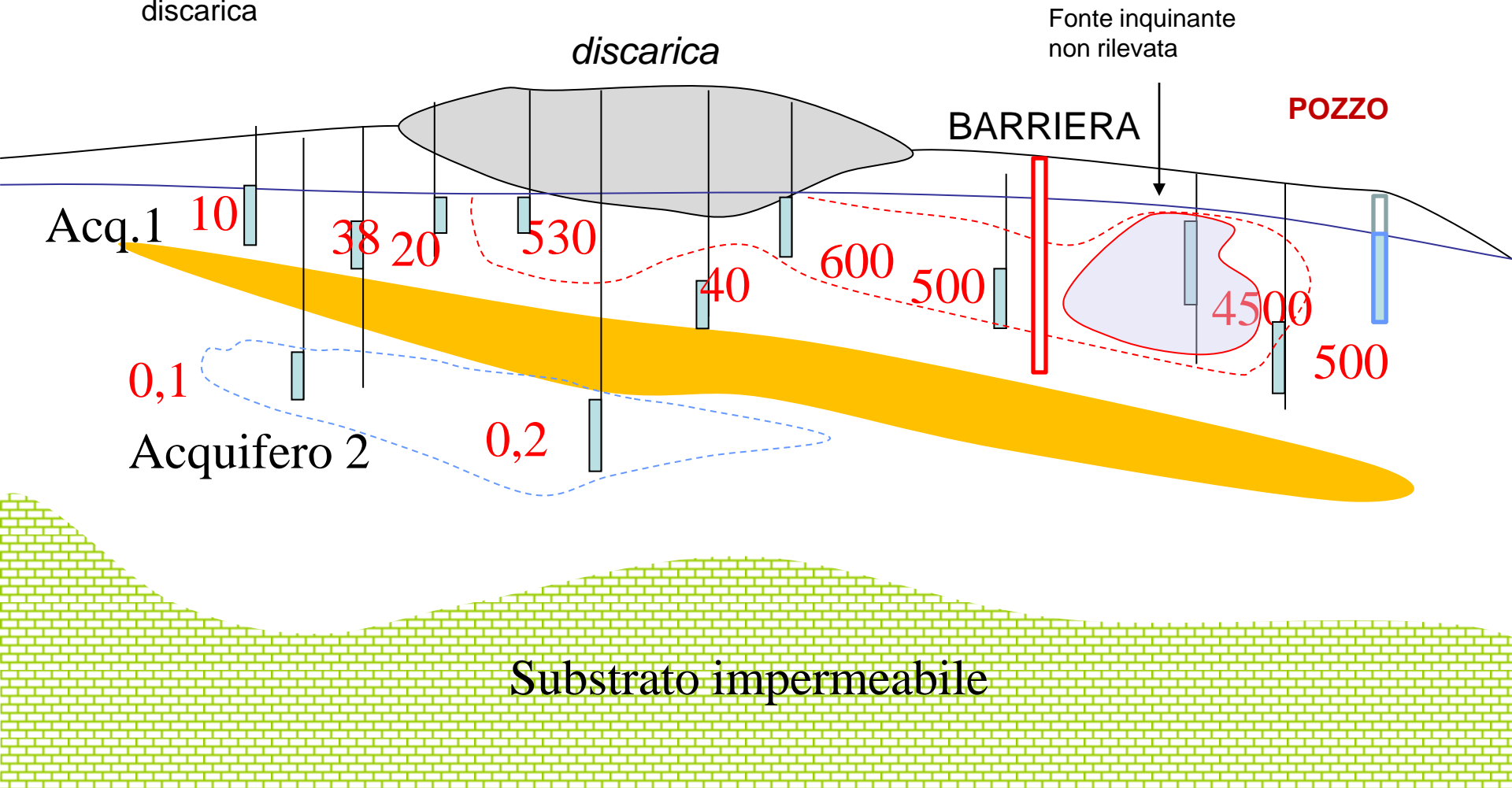
Una sottovalutazione della distribuzione verticale della T può determinare effetti analoghi. In questo esempio, nonostante che la piezometria mostri un' **apparente chiusura totale** ad opera delle barriera, i pozzi **MW7 e MW131** risultano contaminati.

Tale effetto è determinato dal fatto che lungo un livello particolarmente permeabile i **filetti liquidi inquinati si spostano con velocità superiori alla media**, e non sono quindi interamente richiamati dal pozzo, dimensionato con il valore della k media ricavato dalle prove.



Necessità di un dettagliato rilevamento idrogeochimico

Il calcolo della depressione piezometrica deve essere preceduto dalla costruzione del modello concettuale dell'inquinamento; per chiarezza viene riportato nella figura un esempio banale : la mancata rilevazione di una fonte di inquinamento posta a valle della discarica (concentrazioni in mg/l riportate in rosso) poco a monte del pozzo da difendere, ben visibile dall'aumento delle concentrazioni a valle della contaminazione prodotta dalla discarica



La presenza di **aquitard** ha un ruolo fondamentale di separazione idraulica fra acquiferi , e in molti casi un acquifero semiartesiano, soprattutto se il suo livello piezometrico è superiore a quello della sovrastante falda semilibera, risulta sufficientemente protetto.

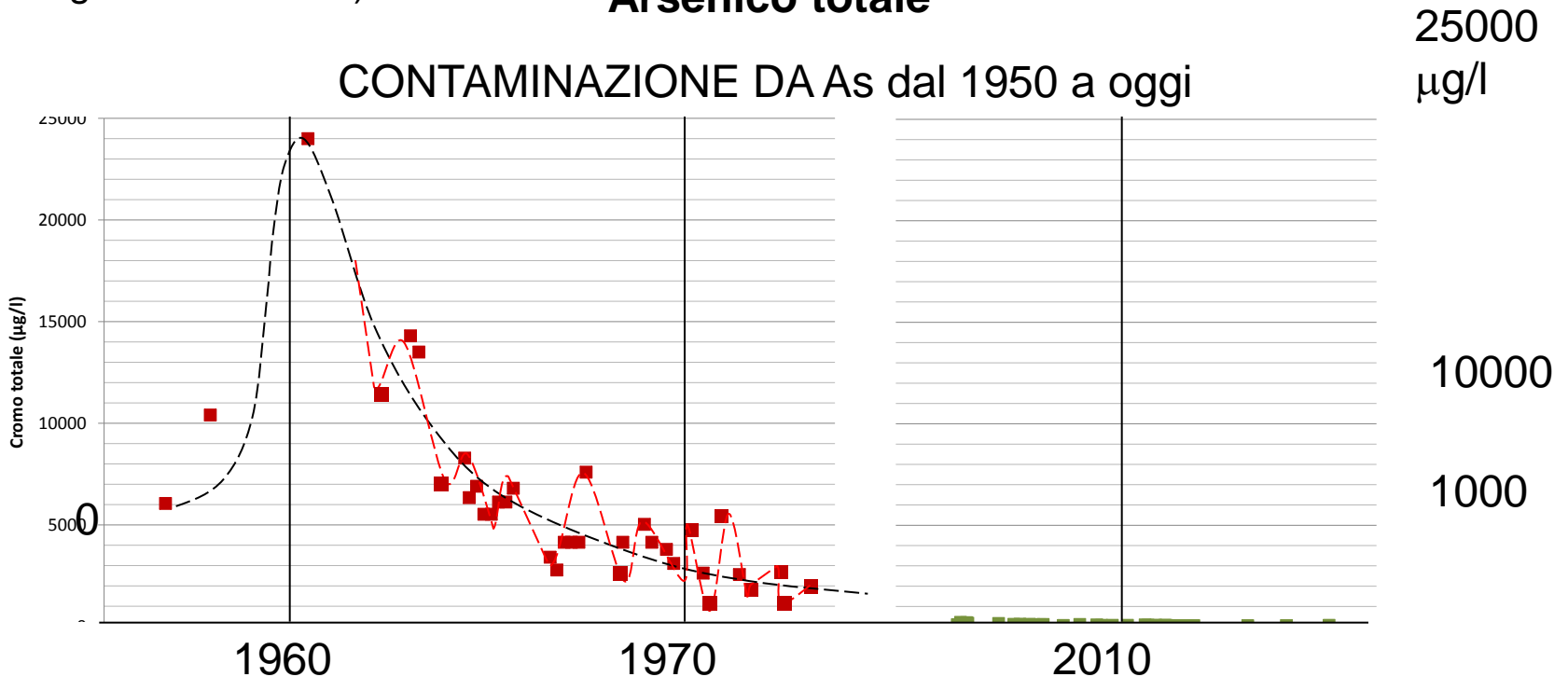
Vi sono tuttavia alcuni casi in cui conviene approfondire la parametrizzazione idrogeologica dell'aquitard, per raggiungere condizioni di maggiore sicurezza.

Esaminiamo due casi diversi

Effetto della presenza di livelli fini compressibili sul rilascio di contaminanti

Una delle concause che determinano la non linearità della discesa delle contaminazione nelle fasi di regresso dell'inquinamento (linea rossa nella figura sottostante)

Arsenico totale



è il fatto che i livelli limosi e argilloso-limosi rilasciano molto lentamente l'inquinante rimasto adeso alle particelle del terreno, e in generale sotto l'oggetto di impulsi quali aumento o diminuzione della pressione esercitata dai terreni sovrastanti (ad es. per costruzione di edifici), o per variazione del livello piezometrico.

Come noto, **il detensionamento produce in generale la fuoriuscita di acqua** dai terreni fini, in specie se dotati di un buon coefficiente di immagazzinamento

Un approccio quantitativo alla comprensione del problema è fornito da BREDEHOEFT e PINDER, che propongono una relazione che permette di ricostruire la funzione che regola l'entità del rilascio di acqua dall'aquitard quando il livello piezometrico si riduce

La relazione che regola questo flusso Q, consiste nell'espressione :

$$Q = ds/dz = (KH_0 / \pi Kt / BS_0) [1 + 2 \sum \exp (-n^2 / (Kt / BS_0))]$$

La sommatoria viene eseguita addizionando i valori che l'espressione $\exp (-n^2 / (Kt / BS_0))$ assume variando n da 1 all'infinito.

Nei siti inquinati è quindi importante **la mappatura dei livelli poco permeabili (essenzialmente quelli limoso-argillosi) e una stima del loro volume**, in modo da poter valutare tramite la rete di monitoraggio se il rilascio determina sensibili effetti sulla qualità delle acque, quali la genesi di **inquinamenti diffusi**, contaminazioni con ridotta concentrazione ma numerosi e di origine indeterminabile

Inquinamenti diffusi per il passaggio tramite vie preferenziali di inquinanti attraverso un aquitard.

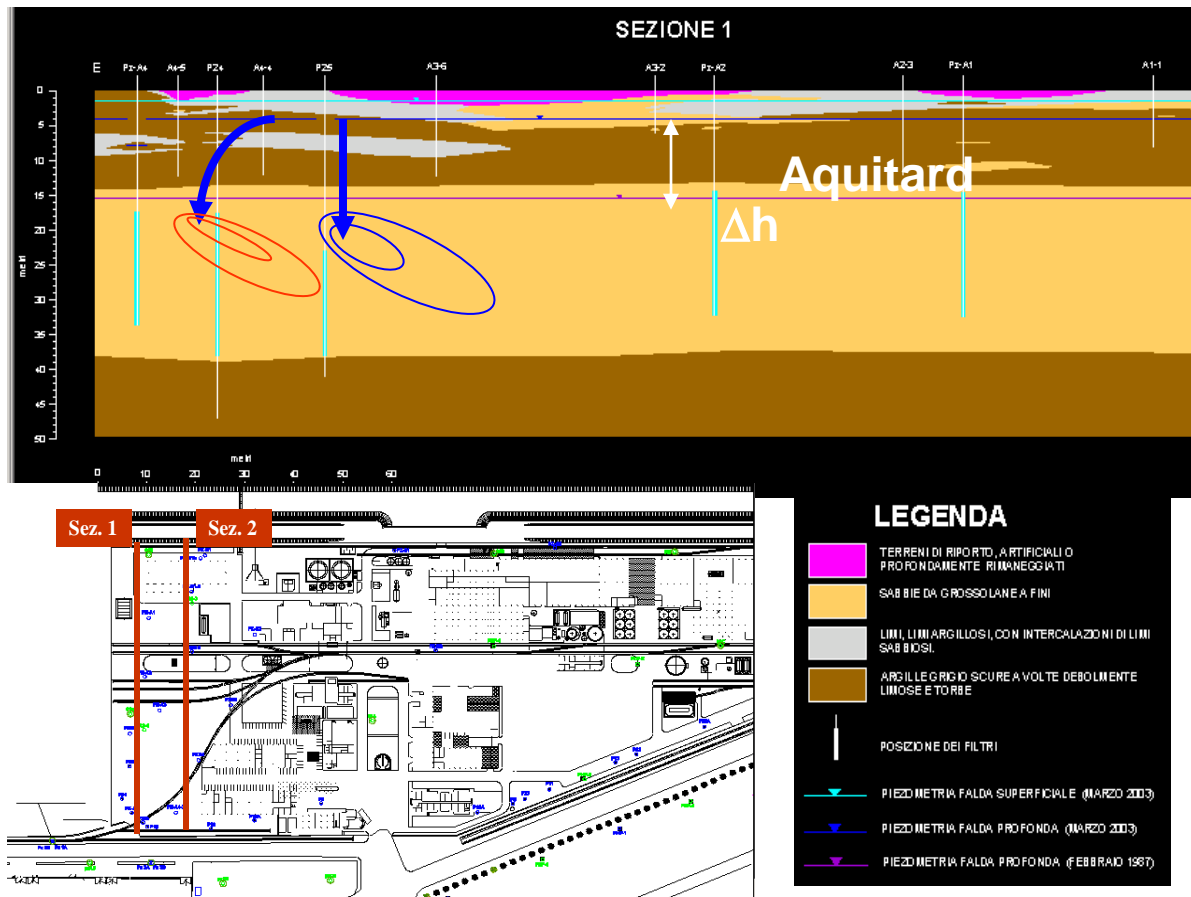
Tale evento si realizza solo se l'aquitard presenta **fessurazioni per deformazioni meccaniche naturali** che si sono realizzate dopo la sua deposizione (es i sedimenti sono stati esposti all'atmosfera per un lungo periodo e visi sono prodotte fenditure non riempite), o per **carichi artificiali recenti**.

L'entità della drenanza è ricavabile dalla relazione:

$$D = kA(\Delta h)/b$$

in cui A è la superficie della depressione piezometrica della falda e Δh il dislivello piezometrico medio.

Nei punti di contatto con l'acquifero sottostante, hanno origine modesti nuclei di contaminazione tra loro separati, di localizzazione molto difficoltosa (**inq.diffusi**)



Nel modello concettuale è opportuno **porre in evidenza le aree dalle quali avviene il passaggio di contaminante dalla falda superiore a quella inferiore**, per consentire al progettista gli interventi più idonei e per valutare l'esposizione all'inquinamento delle diverse parti dell'acquifero

Verifica della presenza di scambi idrici attraverso l'aquitard

L'effettuazione di prove di pompaggio può consentire di verificare che attraverso l'aquitard non avvengono passaggi di acqua.

1) Una prima verifica consiste nel controllare se nei pozzi posti al disotto dell'aquitard, il livello piezometrico si abbassa quando nell'acquifero semilibero superiore viene posto in funzione un pozzo che produce elevati abbassamenti.

2) La prova tangibile del passaggio di acqua può essere fornita, come risulta da alcuni esempi di letteratura, dall'immissione di soluzioni saline nell'acquifero superiore. Per la loro maggiore densità esse scendono verso la base dell'acquifero e possono penetrare nell'aquitard soprattutto se nel livello semiartesiano inferiore si pone un pozzo in prelievo che produce un buon abbassamento.

Questa applicazione ha il vantaggio che, in molte circostanze, con il rilevamento geoelettrico in continuo si può seguire l'approfondimento della soluzione salina.

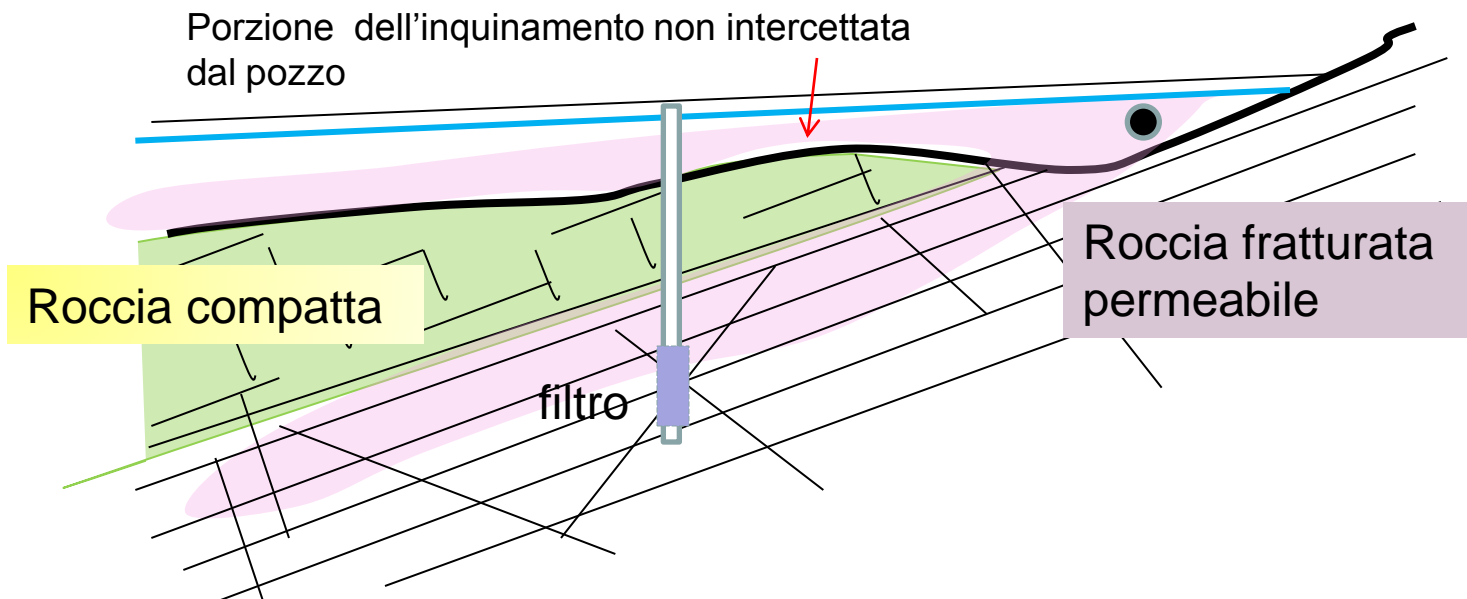
Necessità di un corretto posizionamento dei filtri dei pozzi

Quando i terreni sono eterogenei, la ricostruzione della struttura geologica deve essere abbastanza accurata da consentire un'adeguata collocazione dei filtri dei pozzi di captazione, e permette di evitare errori nel progetto.

Il campo di studio è molto vasto, e non è possibile rappresentare esaurientemente questa casistica, e si fa solo cenno quindi ai casi più comuni.

In molte circostanze si può mancare l'individuazione di litozone poco permeabili. Dal momento che essi sono in grado di deviare le linee di flusso della falda, può accadere che i filtri del pozzo siano disposti in modo da intercettare solo parzialmente il flusso, senza poter captare la porzione deviata dai livelli poco permeabili, come nella figura. Anche nel caso di acquifero non inquinato i danni possono essere notevoli, in quanto una parte della falda non viene captata, ma i danni maggiori si hanno quando il pozzo è progettato per una barriera idraulica.

.In questi casi, il flusso inquinato non intercettato, riversa l'inquinamento a valle, come indicato dalla figura seguente ..

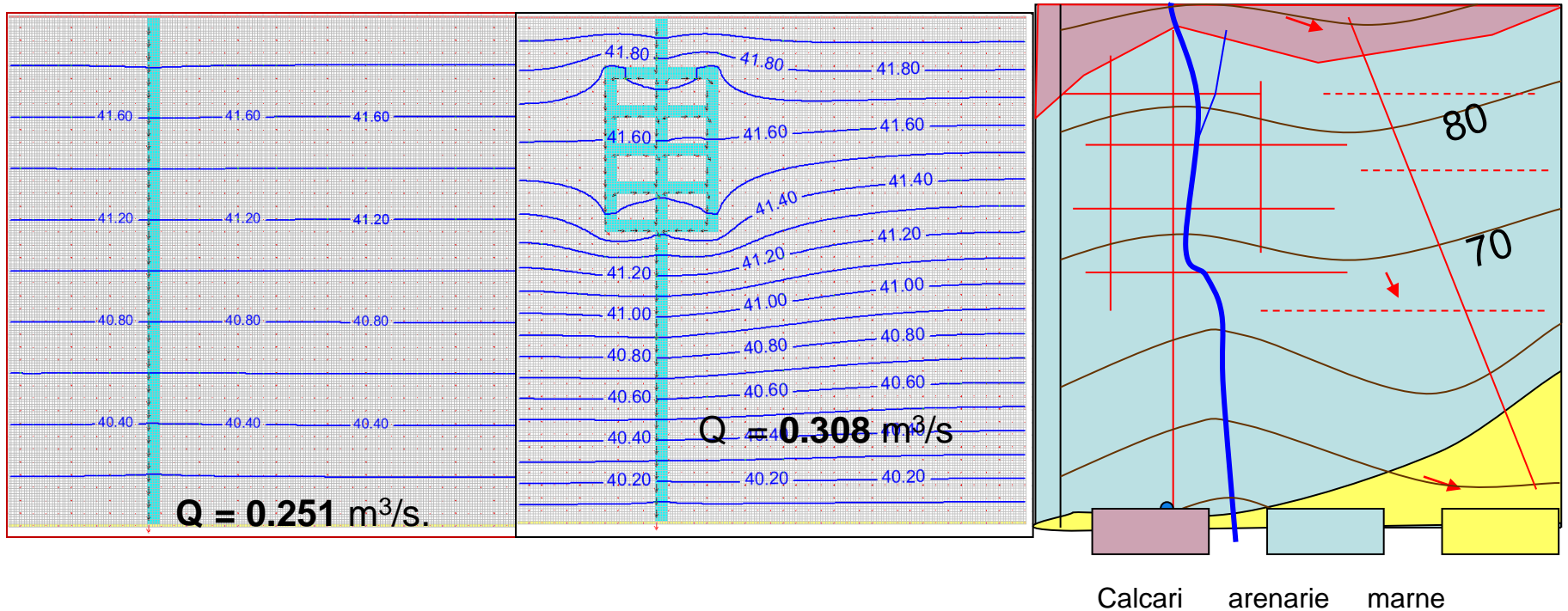


Accertamenti necessari per lo studio di un acquifero in roccia

Il posizionamento delle prospezioni geognostiche e la scelta della loro tipologia presentano molti aspetti difficili da affrontare . E' quindi molto utile verificare quali siano i parametri che condizionano maggiormente la circolazione idrica nel caso in studio , ed approfondire i problemi che riguardano questi elementi fondamentali. Negli acquiferi in roccia costituiti da fratture aperte /condotte naturali ben collegate tra loro , le portate allo sbocco di un sistema sono maggiori quanto più un sistema è interconnesso e, nei singoli tratti, quanto più direttamente connesso il tratto considerato con il flusso idrico principale.

E' quindi frequente il caso che **l'apertura delle discontinuità e il loro grado di interconnessione** rappresentino gli elementi l'elemento più importanti da accertare

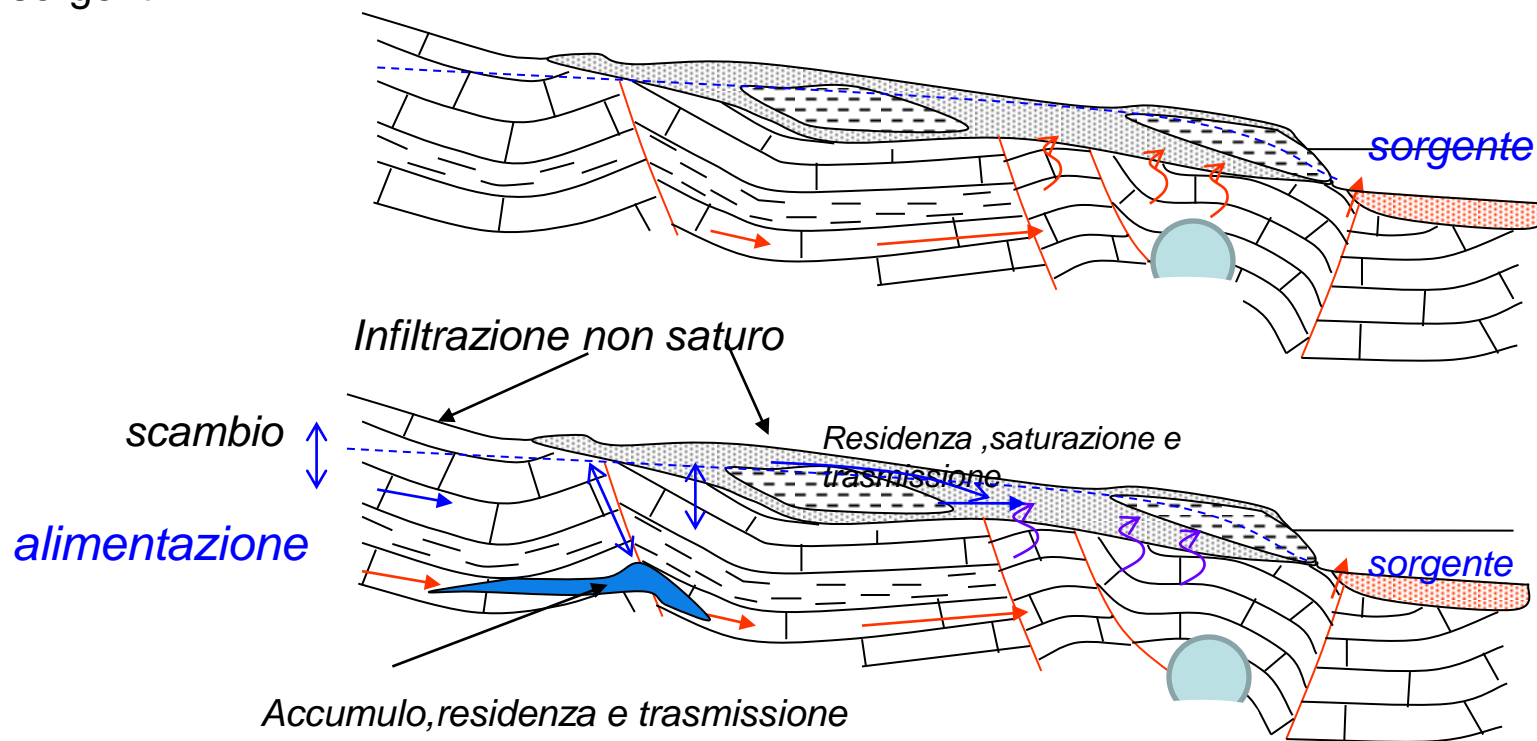
A tale proposito si deve sottolineare che, quando in un settore del bacino idrogeologico è presente una rete di discontinuità interconnesse fra loro e con la frattura principale, le portate aumentano in modo sensibile rispetto al caso della presenza di un solo sistema di discontinuità rilevante. Nei progetti di contenimento degli inquinanti, nei quali la valutazione della distribuzione delle portate è particolarmente significativo, la determinazione di questi parametri geologici assume una particolare importanza



L'esempio considera due strutture, che evidenziano come anche un modesto aumento del numero di fratture importanti interconnesse aumenta di un sesto circa la portata della sorgente. Si nota come la carta geologica, che rappresenta le discontinuità più importanti, sia un ottimo ausilio per identificare le aree nelle quali il flusso è potenzialmente di maggiore entità, a parità di condizioni piezometriche e di alimentazione.

Si nota come il rilevamento geostrutturale permetta in questo caso, una buona approssimazione in specie se accompagnato da prove di permeabilità

. Nel caso particolare dei **progetti di gallerie drenanti e per la valutazione dell'entità del drenaggio operato dalle gallerie artificiali in roccia**, è necessario provvedere alla valutazione della distribuzione della permeabilità dell'ammasso roccioso, tenendo presente che essa può essere molto variabile, come indica la figura (in cui viene rappresentata in azzurro la galleria), soprattutto per verificare che l'opera comporti il non desiderato drenaggio delle sorgenti



I processi che regolano la circolazione idrica sotterranea sono rappresentati nella figura sottostante.

In queste circostanze appare indispensabile che il rilevamento geologico sia accompagnato prima di tutto da un'indagine **geosismica** idonea a valutare lo spessore della coltre superficiale solitamente detensionata e quindi più permeabile, supportata da sondaggi . L'impiego di tecniche di tracciamento , anche isotopiche , fornisce in generale dati affidabili. Nella foto sottostante, che rappresenta una parete in rocce metamorfiche (metabasalti) percorsa da diversi sistemi di discontinuità, si è evidenziata in giallo la base della zona superficiale profondamente alterata, in cui le discontinuità sono molto aperte, e il contatto (in arancio) con la roccia **non detensionata**. Alla base della zona detensionata compare un **allineamento di sorgenti** che sottolinea una sensibile circolazione idrica nei primi 20-40 m dalla superficie. A maggiore profondità il flusso si riscontra solo lungo le zone di frattura.

Base della zona di alterazione superficiale



Base della zona di detensionamento

Conclusioni

Sono stati presentati esempi che evidenziano come la predisposizione di una accurata indagine geologica e idrogeologica sia indispensabile per realizzare un modello concettuale idoneo a risolvere i problemi della progettazione di opere di contenimento degli inquinanti, drenaggio e di infrastrutture.

Il rilevamento geologico non supportato da prospezioni geognostiche e idrogeochimiche adeguate è peraltro spesso insufficiente, ed è auspicabile un miglioramento delle esistenti normative perché sia reso più agevole e meglio regolato il rispetto di questa necessità