

# Previsione del rischio idrogeologico derivante dalla costruzione di gallerie in roccia a media copertura

Paola Gattinoni<sup>1</sup>, Laura Scesi<sup>2</sup>, Vincenzo Francani<sup>3</sup>

<sup>1</sup>DIIAR, Politecnico di Milano, paola.gattinoni@polimi.it

<sup>2</sup>DIIAR, Politecnico di Milano, laura.scesi@polimi.it

<sup>3</sup>DIIAR, Politecnico di Milano, vincenzo.francani@polimi.it, fax 0223996602, p.zza Leonardo da Vinci 32, 20133 Milano (Autore corrispondente).

## *Hydrogeological risk forecasting for underground excavations*

**ABSTRACT:** Frequently, the excavation of medium-deep tunnels without waterproofing brings about hydrogeological risks, because they can interfere with springs as well as surface waters. This work is aimed at describing a methodology: - to locate the risk areas; - to calculate the drained flows and the radii of influence; - to quantify the tunnels impact on the hydrogeological balance; - to evaluate the probability that the drained flow can exceed safety limits.

**Key terms:** Tunnelling, springs, connectivity, risk

**Termini chiave:** Gallerie, sorgenti, interconnessione, rischio

## **Riassunto**

La presente nota sintetizza uno studio per la previsione del rischio idrogeologico derivante dalla costruzione di una galleria di piccolo diametro, non impermeabilizzata, mediamente profonda, situata nelle Prealpi Lombarde. La realizzazione dell'opera ha evidenziato, in alcuni settori molto localizzati, una forte interferenza con le manifestazioni idriche superficiali. Lo studio ha consentito di delineare una metodologia per la perimetrazione delle zone soggette a rischio idrogeologico, tramite la ricostruzione dei circuiti idrici sotterranei, la stima delle portate drenate e dei raggi d'influenza, nonché la quantificazione dell'incidenza della galleria sul bilancio idrogeologico. L'accoppiamento di metodi geognostici con analisi statistiche ha consentito di valutare in quale misura lo scavo della galleria costituisce un pericolo per l'assetto idrogeologico, calcolando la probabilità che la portata drenata o il conseguente abbassamento piezometrico superino valori limite ritenuti accettabili.

## **1. Introduzione**

Il problema dell'interazione tra lo scavo di una galleria e le acque di falda ha assunto negli ultimi anni grande rilevanza per la necessità di salvaguardare le risorse idriche dal depauperamento e dal rischio di inquinamento.

Dal punto di vista ambientale, il depauperamento, l'estinzione o, più in generale, la variazione di regime delle sorgenti costituisce uno dei rischi idrogeologici più difficili da prevedere e quantificare nella fase progettuale di una galleria, in quanto governato da fenomeni complessi caratterizzati da un certo grado di aleatorietà.

La presente nota propone, tramite la trattazione di un caso reale, una metodologia di studio relativamente nuova, che prevede l'uso accoppiato di metodi geognostici e analisi statistiche finalizzate alla valutazione del rischio idrogeologico nelle gallerie. In particolare, viene analizzato il caso di una galleria di piccolo diametro, mediamente profonda, la cui realizzazione ha originato un impatto negativo sul regime di alcune sorgenti. Lo studio si è articolato in due fasi principali:

- la perimetrazione delle zone soggette a rischio idrogeologico, tramite la ricostruzione dei circuiti idrici sotterranei, la stima delle portate drenate e dei raggi d'influenza, la quantificazione dell'incidenza della galleria sul bilancio idrogeologico;
- la valutazione, in termini statistici, della pericolosità della galleria per l'assetto idrogeologico, attraverso il calcolo della probabilità che la portata drenata o l'abbassamento piezometrico prodotto dallo scavo superino dei valori limite ritenuti accettabili.

## **2. Definizione del problema e della metodologia di studio**

La valutazione del rischio idrogeologico derivante dalla costruzione di un'opera in sotterraneo costituisce un problema complesso, sia per il gran numero di variabili in gioco sia per la frequente carenza di dati disponibili in fase progettuale.

Come bene noto, una galleria in fase di costruzione ha un effetto drenante che determina un abbassamento più o meno generalizzato del livello di falda, con effetti non sempre desiderabili, tra i quali: estinzione di sorgenti e/o

pozzi, variazioni qualitative della falda (Civita et al., 2002), modificazioni della vegetazione, variazioni nelle condizioni di stabilità dei versanti (Picarelli et al., 2002), cambiamenti nel regime e nella qualità delle acque termali, variazioni del bilancio idrogeologico a scala di bacino. A livello del tutto generale, si può affermare che l'effetto della galleria sull'assetto idrogeologico dipende dalle condizioni di alimentazione e dalla permeabilità dell'acquifero, nonché dalle caratteristiche del sistema di rivestimento della galleria (Reuter et al., 2000).

Lo studio di tali problematiche idrogeologiche applicate ad un caso reale ha evidenziato i limiti dei metodi di indagine tradizionali, soprattutto in presenza di gallerie mediamente profonde che attraversano acquiferi multifalda. In particolare, è stato analizzato il caso di una galleria di piccolo diametro, non impermeabilizzata, realizzata in rocce prevalentemente di tipo flyschoidi (zona delle Prealpi Lombarde), caratterizzate da una permeabilità medio-bassa. Gli studi idrogeologici eseguiti in fase progettuale, pur avendo individuato il rischio di depauperamento per la falda più profonda, presente all'interno dell'ammasso roccioso interessato dalle attività di scavo, non avevano tenuto conto di possibili interferenze con le acque superficiali.

Come emerge dai numerosi studi sull'argomento, diversamente da quanto accade nei mezzi porosi, le interazioni tra un acquifero profondo in roccia e le acque di superficie (intese sia come deflusso dei corsi d'acqua sia come deflusso ipodermico nei primi strati di suolo) si localizzano prevalentemente lungo le zone di frattura verticali distribuite all'interno dell'ammasso roccioso (Oxtobee & Novakowski, 2003). Tali fasce di roccia molto permeabile costituiscono infatti delle zone di interconnessione tra i diversi livelli acquiferi. L'effetto prodotto dalla galleria sull'acquifero superficiale (Fig. 1) è generalmente di entità inferiore rispetto a quello che si rinviene nell'acquifero profondo, ma può dar luogo a impoverimenti delle risorse idriche superficiali non previsti. Il problema è particolarmente rilevante laddove sono presenti sorgenti molto vulnerabili, caratterizzate da bacini di alimentazione ristretti e tempi di esaurimento brevi.

Durante la realizzazione dell'opera in esame, avvenuta per altro in concomitanza ad un lungo periodo fortemente siccitoso, si sono osservati locali effetti negativi sul regime di alcune sorgenti. L'esigenza di salvaguardare le altre sorgenti presenti nell'area e di valutare l'impatto dell'opera a lungo termine ha portato all'esecuzione di studi idrogeologici di maggiore dettaglio, finalizzati all'individuazione delle zone potenzialmente critiche e alla relativa quantificazione del rischio. Tale metodologia prevede:

- la ricostruzione del circuito idrico sotterraneo (con individuazione dei corpi acquiferi principali e quantificazione del loro grado di interconnessione),
- la stima delle portate drenate dalla galleria,
- la stima del raggio di influenza della galleria (tenendo conto anche di eterogeneità e anisotropie),

- gli eventuali effetti di drenanza su acquiferi superficiali
- la quantificazione dell'incidenza della galleria sul bilancio idrogeologico dell'area, attraverso il censimento e il monitoraggio delle emergenze idriche superficiali, il monitoraggio piezometrico e l'eventuale rilevamento delle emergenze idriche in galleria.

### 3. Delimitazione della zona di influenza della galleria

#### 3.1 Ricostruzione del circuito idrico sotterraneo

Per delimitare la zona di territorio potenzialmente interessata, a livello idrogeologico, dalla costruzione della galleria, risulta di fondamentale importanza integrare gli studi geologici, geologico-strutturali, geomeccanici e idrogeologici tradizionali con analisi più approfondite circa l'individuazione e la caratterizzazione delle "zone di frattura" e dei circuiti carsici.

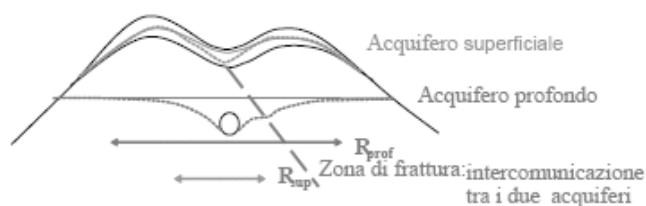


Figura 1: Effetti drenanti della galleria sui due livelli acquiferi, in corrispondenza di una zona di frattura. Le linee continue e tratteggiate rappresentano la superficie piezometrica rispettivamente indisturbata e conseguente al drenaggio.

*The drained effect on the two water levels near a shear zone. The unbroken and the broken lines represent the water level before and after drainage.*

L'interpretazione dei risultati ottenuti da tali indagini consente di ricostruire, con un buon grado di dettaglio, il modello concettuale della circolazione idrica sotterranea e di evidenziare l'eventuale presenza di zone di interconnessione tra i diversi livelli acquiferi.

#### 3.2 Stima delle portate drenate dalla galleria e del suo raggio di influenza

Una stima delle portate drenate dalla galleria può essere ricavata attraverso l'utilizzo di classificazioni geomeccaniche oppure tramite formulazioni analitiche (Jacob e Lohman, 1952; Goodman, 1965) o l'implementazioni di modelli matematici, sia pure con tutti gli errori derivanti dall'aleatorietà delle variabili in gioco. Infatti, è necessario tenere presente che i risultati ottenuti sono fortemente condizionati dal valore di permeabilità, che dipende dallo stato di faturazione e dallo stato tensionale, e dalle ipotesi di isotropia e omogeneità che stanno alla base di tali formulazioni.

Le medesime formulazioni analitiche e numeriche consentono di stimare, in prima approssimazione, il raggio di influenza medio che si viene a creare nell'intorno dello scavo; la zona di influenza può inoltre essere ridefinita

tenendo conto dell'anisotropia del mezzo roccioso. A tale scopo si sono calcolati i tensori di permeabilità su aree geologicamente e strutturalmente omogenee e, quindi, i valori di permeabilità massima ( $k_{max}$ ) e minima ( $k_{min}$ ) sul piano orizzontale. A partire dal raggio d'influenza medio  $R$ , stimato per il mezzo isotropo, si valutano i semiassi ( $a$  e  $b$ ) dell'ellisse d'influenza (Fig. 2), in funzione del rapporto di anisotropia  $k$ :

$$K = \frac{k_{max}}{k_{min}}; \quad a = R \sqrt{\frac{k_{max}}{k_{eq}}}; \quad b = R \sqrt{\frac{k_{min}}{k_{eq}}}$$

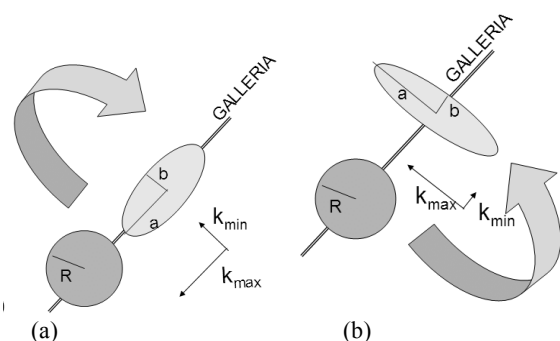


Figura 2: Effetto dell'anisotropia del mezzo roccioso sul raggio di influenza della galleria: (a)  $k_{max}$  parallelo all'asse della galleria, (b)  $k_{max}$  ortogonale all'asse della galleria.

*The effect of the rock medium anisotropy on the radius of influence near the tunnel. (a)  $k_{max}$  parallel to the tunnel axis, (b)  $k_{max}$  orthogonal to the tunnel axis.*

In tal modo è possibile delimitare la fascia di acquifero potenzialmente influenzata dal drenaggio della galleria lungo tutto il suo sviluppo (Fig. 3).

A scopo cautelativo, per il calcolo della portata e la delimitazione della zona di influenza conviene considerare inizialmente l'abbassamento piezometrico massimo. In pratica, però, la presenza del rivestimento riduce sensibilmente gli effetti drenanti a lungo termine e, di conseguenza, il livello piezometrico finale potrebbe risultare superiore rispetto alla quota  $ht$  della galleria. In seguito allo scavo, disponendo dei dati di monitoraggio dei piezometri e delle portate osservate in ingresso alla galleria sarà possibile procedere ad una correzione dei risultati ottenuti durante l'analisi preliminare, con conseguente restringimento della zona di influenza.

In alternativa è possibile stimare l'entità e la direzione degli afflussi idrici in galleria attraverso l'implementazione di un modello matematico, che consente la simulazione alla scala della galleria (scala di bacino idrogeologico) delle condizioni di deflusso sotterraneo prima e dopo la realizzazione dell'opera, valutandone così l'effetto drenante (Fig. 4), al variare delle condizioni di alimentazione (es. piogge) e per le diverse varianti progettuali (es. permeabilità del rivestimento, profondità della galleria).

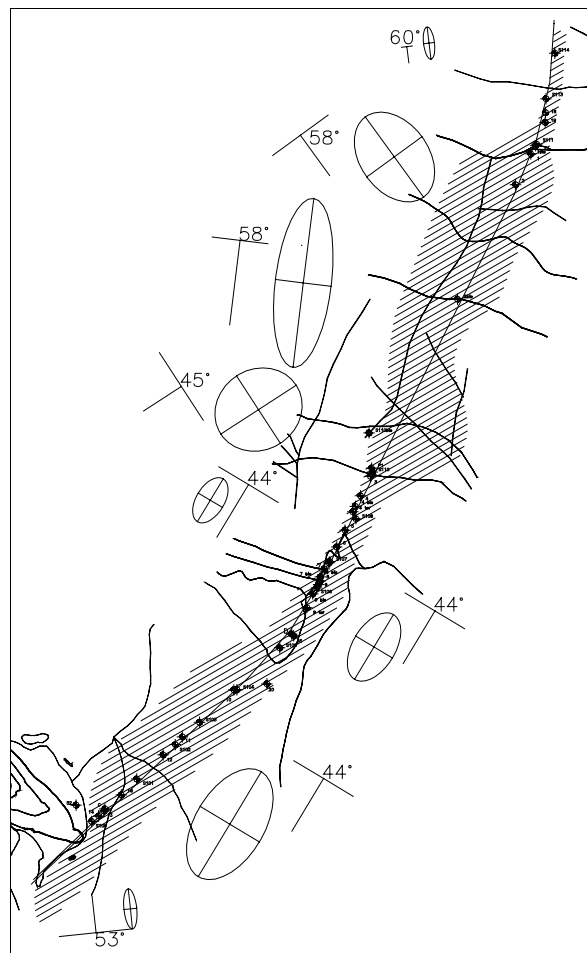


Figura 3: Esempio di delimitazione della zona di influenza di una galleria sull'acquifero profondo, in base all'anisotropia dell'ammasso roccioso (evidenziata dalle ellissi).

*The anisotropy of the rock mass and the borderline of the influence zone on the deep aquifer near a tunnel.*

### 3.3 Effetti di drenanza sull'acquifero superficiale

La delimitazione della zona di influenza della galleria precedentemente ottenuta è relativa unicamente all'acquifero profondo contenuto all'interno dell'ammasso roccioso, direttamente interessato dalla scavo della galleria stessa. Per quanto riguarda, invece, l'acquifero superficiale contenuto nei depositi quaternari, risultava molto difficile definire una zona di influenza con continuità lungo tutto l'asse della galleria, in quanto: la morfologia del territorio è molto eterogenea (pianura, collina, montagna), la natura e lo spessore della coltre superficiale variabile, le portate defluenti fortemente influenzate dagli eventi meteorici e i rapporti di drenanza con l'acquifero profondo differenti da zona a zona.

Per delimitare la zona di influenza prodotta dalla galleria sull'acquifero superficiale è stato quindi necessario delimitare le aree di interconnessione tra i due acquiferi, attraverso l'esecuzione di indagini geofisiche mirate,

eseguite nei tratti di galleria individuati come critici. Infatti l'esecuzione di indagini geosismiche a riflessione ad alta definizione ha consentito di evidenziare la presenza e l'andamento delle fasce di rocce molto fratturate, che costituiscono le zone di alimentazione dei circuiti idrici profondi (Fig. 5).

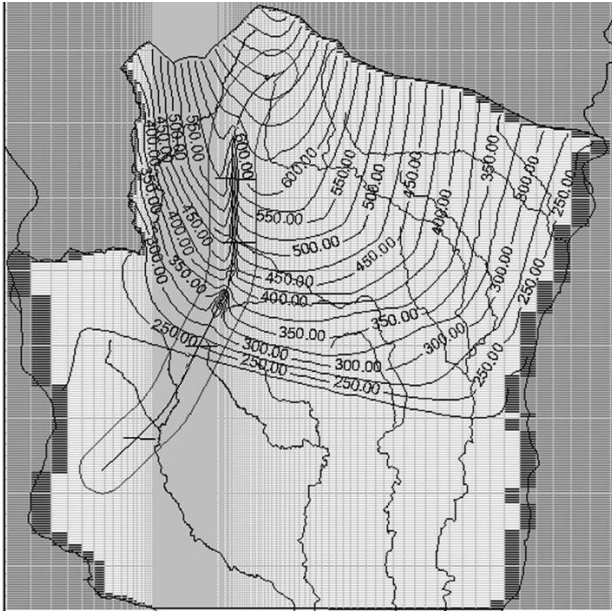


Figura 4: Piezometria dell'acquifero profondo simulata con il modello generale.

*The deep aquifer piezometry simulated using a numerical model.*

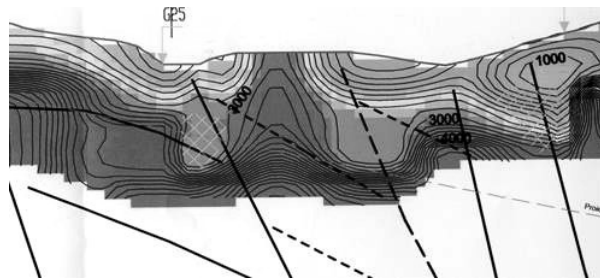


Figura 5: Esempio di profilo sismico a riflessione. La retinatura indica le zone di frattura.

*The reflection seismic section. The grid shows a shear zone.*

#### 4. Quantificazione dell'incidenza della galleria sul bilancio idrogeologico

La presenza di fasce di rocce fratturate ad andamento prevalentemente verticale determina, quindi, una locale interconnessione tra l'acquifero profondo intercettato dalla galleria e le acque di superficie (Fig. 6); di conseguenza, la zona di cattura superficiale deve essere definita in funzione delle caratteristiche idrauliche delle zone di frattura precedentemente identificata e caratterizzata.

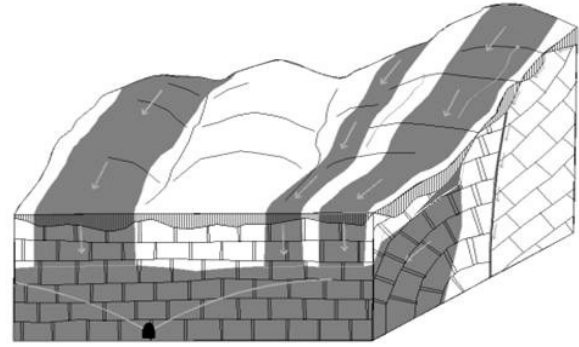


Figura 6: Schematizzazione tridimensionale delle fasce di frattura e schema di circolazione idrica associato.

*Water circulation in the shear zones-*

Al fine di quantificare l'effetto drenante di tali fasce di interconnessione sulle acque di superficie si è utilizzato un approccio modellistico, implementato a partire dal modello generale della galleria, aumentando localmente il grado di dettaglio. In tal modo è stato possibile ricostruire i principali meccanismi che controllano le portate drenate dall'acquifero profondo con e senza la galleria e determinare la dimensione della zona di cattura in funzione delle caratteristiche idrauliche delle zone di interconnessione, al variare delle condizioni al contorno. Il bilancio idrogeologico dell'area è stato ricostruito sia con approccio analitico sia utilizzando il modello numerico; entrambi gli approcci di analisi si basano sulla ricostruzione di un modello concettuale caratterizzato da diversa complessità e sui risultati desunti dalle indagini in sito e dall'attività di monitoraggio.

Ai fini della valutazione del rischio idrogeologico risulta di particolare interesse la determinazione dell'incidenza della galleria sul bilancio idrico locale. Tale valutazione può essere eseguita a partire dai risultati ottenuti dal monitoraggio, stimando le portate in ingresso (piogge, dalle quali stimare i volumi d'acqua infiltrati nel sottosuolo) e in uscita relative ai diversi comparti idrogeologici (galleria, sorgenti, corsi d'acqua, ecc.) presi in esame nel periodo di riferimento.

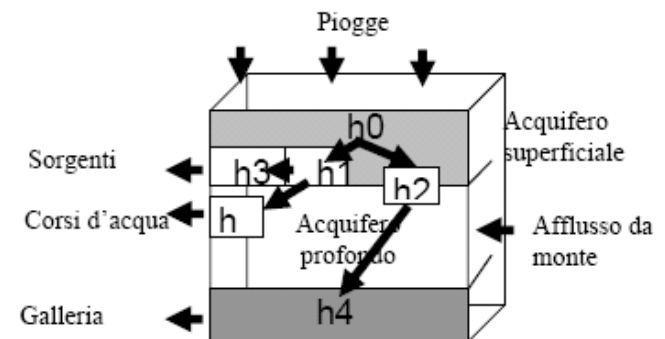


Figura 7: Rappresentazione schematica della distribuzione delle acque infiltrate dalle piogge.

*A sketch of the water distribution coming from rainfalls.*

Sulla base di tali risultati è possibile anche valutare, in prima approssimazione, gli scambi tra i diversi comparti idrogeologici. Pertanto, ipotizzando un regime stazionario, il comportamento dell'acquifero può essere così schematizzato (Fig. 7):

- l'infiltrazione avviene nella copertura quaternaria;
- all'interno della copertura quaternaria circola generalmente una rilevante massa idrica, con un livello piezometrico medio ( $h_0$ );
- le zone di sbocco di questa unità idrogeologica sono: sorgenti (livello piezometrico  $h_3$ ), corsi d'acqua ( $h_5$ ) e galleria ( $h_4$ );
- la parte di acquifero che viene drenato dalle sorgenti presenta un livello piezometrico medio  $h_1$ , e quella drenata dalla galleria un livello  $h_2$ .

Il valore del carico idraulico in ogni nodo del sistema si calcola come media pesata dei carichi idraulici nei nodi adiacenti, moltiplicati per un coefficiente di trasmissività  $N_{ij}$  relativo al flusso tra il nodo  $i$  e il nodo  $j$ :

$$h_0 = \frac{N_{10}h_1 + N_{20}h_2}{N_{10} + N_{20}}$$

Noti i carichi piezometrici di due nodi attigui e il coefficiente di trasmissività, è immediato il calcolo delle portate defluente tra i due nodi:

$$Q_{13} = (h_1 - h_3)N_{13}$$

Note le portate e i carichi piezometrici osservati nel monitoraggio, è quindi possibile stimare i valori dei coefficienti di trasmissività, che possono essere in seguito utilizzati per eseguire bilanci in diverse condizioni, ad esempio in assenza della galleria e in seguito a variazioni nel regime delle piogge.

I risultati ottenuti evidenziano che, in seguito allo scavo della galleria le portate affluenti verso sorgenti e corsi d'acqua costituiscono quasi il 50% delle infiltrazioni; di queste la maggior parte (circa il 38%) contribuisce all'alimentazione dei corsi d'acqua e solo il 10% a quella delle sorgenti. Oltre il 50% dei volumi d'acqua provenienti dall'infiltrazione contribuisce al deflusso idrico ipodermico verso la galleria e verso le falde acquifere poste a valle. Rispetto alla situazione antecedente lo scavo si osserva una modesta variazione percentuale nelle portate affluenti ai diversi recettori: aumentano quelle verso l'acquifero profondo e diminuiscono quelle verso sorgenti e corsi d'acqua.

## 5. Approccio statistico alla valutazione del rischio idrogeologico

Per valutare statisticamente se e in quale misura l'opera costituisce un pericolo per l'assetto idrogeologico dell'area si sono ricostruite le distribuzioni di probabilità della permeabilità (una per ciascuna zona omogenea) e ci si è avvalsi di simulazioni Monte Carlo sia per definire il campo

di variabilità delle portate drenate dalla galleria, sia per valutare la distribuzione di probabilità degli abbassamenti nel tempo. In questo secondo caso, si è impostata una "performance function" in cui il termine incognito è la variazione delle altezze piezometriche nel tempo, scritta in funzione degli altri termini di un bilancio idrico che esprime la conservazione della massa nel volume di controllo.

### 5.1 Definizione della "performance function"

Ai fini dell'analisi del rischio idrogeologico la "performance function" può essere scritta sotto forma di bilancio idrico su un volume di controllo delimitato superiormente dal piano campagna, inferiormente dalla galleria, lateralmente dal raggio di influenza della galleria stessa. La "performance function" viene espressa come:

$$g(x_1 \dots x_n) = \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{i + q_{monte} + q_{valle} - q_{gall}}{A}$$

in cui:  $i$  è il tasso di infiltrazione, che può essere stimato a partire dalla distribuzione statistica delle piogge;  $dh/dt$  la variazione del livello piezometrico nel tempo;  $q_{monte}$  e  $q_{valle}$  rispettivamente le portate in falda nella sezione di monte e di valle del volume di controllo, che possono essere desunte dai risultati della modellazione numerica o dal bilancio idrogeologico;  $q_{gall}$  la portata affluente in galleria calcolata attraverso le formule analitiche precedentemente illustrate in funzione della distribuzione statistica di alcuni termini, con particolare riferimento alla permeabilità dell'ammasso roccioso.

### 5.2 Analisi statistica dei dati e distribuzione di probabilità della portata drenata dalla galleria

I valori della permeabilità sono generalmente stimati attraverso prove in sito e/o relazioni che si basano su dati provenienti da rilevamenti geologico-strutturali (sia superficiali che nei fori di sondaggio), come apertura e frequenza delle discontinuità. In tal modo è possibile ottenere un campione sufficientemente ampio di dati di permeabilità, sul quale eseguire i test di adattamento statistico (Figg. 8 e 9), che danno buoni risultati solo se applicati a campioni di dati omogenei per litologia o assetto strutturale.

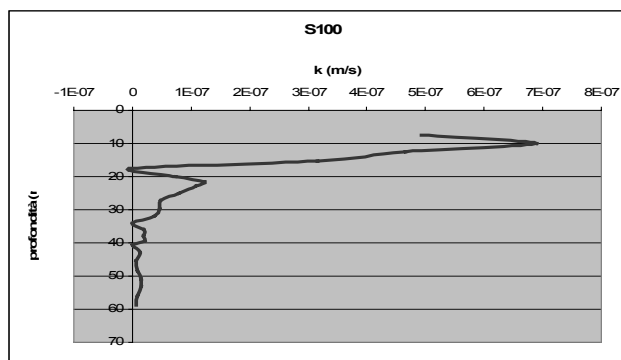


Figura 8: Esempio di variazione della permeabilità in profondità  
*Permeability decrease in depth.*

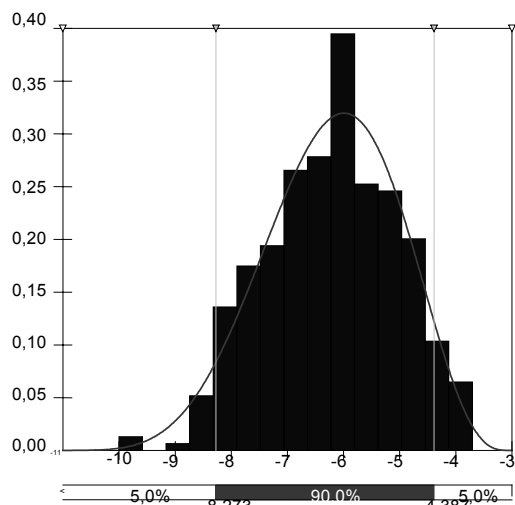


Figura 9: Distribuzione di probabilità dei logaritmi della permeabilità in una zona omogenea.  
*Probability distribution of the permeability in a homogeneous zone.*

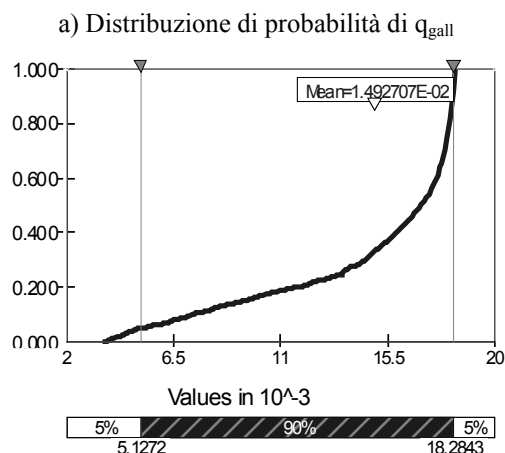
La portata drenata dalla galleria è anche funzione dell'abbassamento piezometrico indotto dallo scavo; in linea teorica, sarebbe opportuno considerare l'abbassamento come una variabile aleatoria ed eventualmente valutarne la correlazione con la permeabilità della roccia. In realtà i dati a disposizione sono spesso insufficienti ed è necessario considerare l'abbassamento come una costante, stimata in modo cautelativo e per tratti omogenei. Sotto tale ipotesi è possibile ricostruire la distribuzione di probabilità della portata drenata dalla galleria, ottenendo la probabilità che possa verificarsi una venuta d'acqua di una certa entità (Fig. 10a).

### 5.3 Applicazione della “performance function” e analisi del rischio

L'analisi del rischio idrogeologico, inteso come riduzione della disponibilità delle risorse idriche, presuppone la necessità di stabilire un valore di abbassamento accettabile  $\Delta h$ , che permette poi di definire il rischio in funzione delle caratteristiche geologiche, morfologiche, climatiche e di utilizzo della risorsa idrica ( $x_1, x_2, \dots, x_n$ ) nell'area in esame come:

$$Pf = Pr[ g(x_1, x_2, \dots, x_n) < \Delta h ]$$

A questo scopo, a partire dalla “performance function”, è possibile procedere alla simulazione degli scenari di rischio, valutando la distribuzione di probabilità degli abbassamenti piezometrici prodotti dall'opera in diversi istanti di tempo (Fig. 10b). Per stabilire un valore di abbassamento accettabile, in termini di disponibilità delle risorse idriche superficiali, si è considerata la portata media delle sorgenti e si è scelto come abbassamento piezometrico accettabile quello che produce una riduzione di portata pari al 20%.



b) Distribuzione di probabilità dell'abbassamento

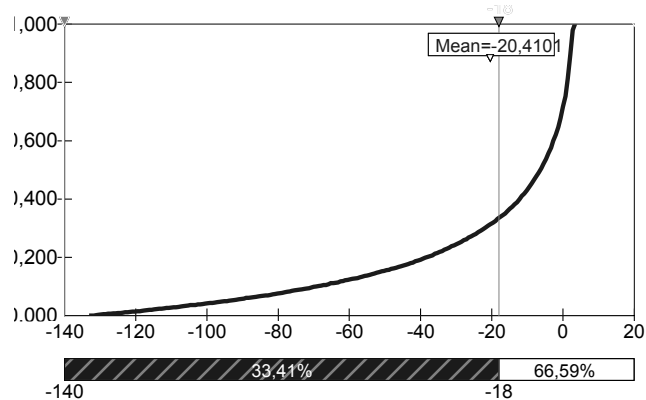


Figura 10: Distribuzione di probabilità: (a) della portata drenata da una galleria (in mc/s) in un tratto omogeneo (circa 100m); (b) degli abbassamenti in un tratto omogeneo della galleria dopo 36 mesi dallo scavo.

*Probability distribution: (a) of the water flow drained from a tunnel (mc/s) along a homogeneous section (about 100m); (b) of the water subsidence in a homogeneous section 36 months after the beginning of the excavation.*

## 6. Conclusioni

L'analisi del caso reale ha consentito di mettere a punto una metodologia per la valutazione del rischio idrogeologico indotto dalla realizzazione della galleria che integra in modo innovativo metodi di indagine geognostici tradizionali con tecniche statistiche di analisi del rischio. I risultati ottenuti nel caso in esame evidenziano una buona rispondenza della metodologia proposta, che costituisce un primo tentativo per codificare le indagini necessarie alla ricostruzione di un modello concettuale attendibile e per definire le procedure di calcolo utili alla quantificazione probabilistica del rischio inteso come probabilità di accadimento.

L'esperienza del caso si studio evidenzia che i risultati dell'analisi di rischio devono comunque essere verificati in corso d'opera attraverso il monitoraggio delle variabili che

descrivono l'evento, procedendo ad un continuo aggiornamento del modello di previsione del rischio. Spesso, infatti, stime errate di alcuni dei parametri in gioco portano ad un'errata previsione del rischio con due possibili conseguenze: da una lato la sovrastima dei costi di realizzazione e di ripristino ambientale, dall'altro la

sottostima dell'impatto dell'opera sull'ambiente circostante. Tali inconvenienti possono essere facilmente superati introducendo nella procedura dell'analisi di rischio un programma di monitoraggio e verifica in grado di evidenziare eventuali incongruenze nel modello concettuale di partenza.

## Bibliografia

- Civita M., De Maio M., Fiorucci A., Pizzo S., Vigna B. (2002) - Le opere in sotterraneo e il rapporto con l'ambiente: problematiche idrogeologiche. *MIR*, 73-106, Torino, Italy.
- Goodman R.E., Moye D.G., Van Schalkwyk A., Javandel I. (1965) - Ground water inflow during tunnel driving. *Eng. Geol.*, 2, 39-56.
- Jacob, C. E., and Lohman, S. W. (1952) - Nonsteady flow to a well of constant drawdown in an extensive aquifer. *Trans. Am. Geophys. Un.*, 33(4), 559-569.
- Oxtobee J.P.A., Novakowski K.S. (2003) - Ground water/Surface Water Interaction in a Fractured Rock Aquifer. *Ground Water*.
- Picarelli L., Petrazzuoli S.M., Warren C.D. (2002) - Interazione tra gallerie e versanti. *MIR*, 219-248, Torino, Italy.
- Reuter E., Kopp B., Lemke S. (2000) - Hallandsas Tunnel. Waterproofing system with a 4 mm thick plastic membrane. *Tunnel*, 6, 39-45.