POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Capitolo 6 - Valorizzazione del calore del terreno

Original
Capitolo 6 - Valorizzazione del calore del terreno / Insana, A., Barla, M. - In: Linee guida per la gestione sostenibile delle venute d'acqua e del calore geotermico nelle gallerie / Antonio Dematteis. - [s.l] : Editrice Acque Sotterranee, 2020. - pp. 43-45 [10.7343/as-2020-486]

Availability:
This version is available at: 11583/2858392 since: 2021-01-03T12:57:02Z

Publisher:
Editrice Acque Sotterranee

Published
DOI:10.7343/as-2020-486

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

29 November 2026

Associazione ACQUE SOTTERRANEE

iah aih Italian Chapter

Linee guida per la gestione sostenibile delle venute d'acqua e del calore geotermico nelle gallerie

Guidelines for sustainable management of groundwater inflows and geothermal heat in tunnels

Comitato Italiano dell'Associazione Internazionale degli Idrogeologi (IAH)

Italian Chapter of the International Association of Hydrogeologists (IAH)

DOCUMENTO ELABORATO DAL GRUPPO DI LAVORO GESTAG

DOCUMENT PREPARED BY THE GESTAG WORKING GROUP

EDITRICE ACQUE SOTTERRANEE

Dicembre 2020 - *December 2020*

ACQUE SOTTERRANEE
Italian Journal of Groundwater

Volume allegato alla rivista Acque Sotterranee - *Italian Journal of Groundwater* n° 162/4, dicembre 2020
Registrazione al tribunale di Milano n°113 del 25/02/1984
Iscrizione al ROC n°17382
Direttore responsabile: Stefano Chiarugi
Redazione e impaginazione: Bonizzella Brizzolari

Editore: Associazione Acque Sotterranee
c/o Piacenza Expo Via M. Tirotti, 11 - 29122 Piacenza
sede operativa: Via Maggiore di Oratoio 68d, 56121 Pisa - Tel 339 1501511 - CF/P.IVA: 01506990330
www.acquesotterranee.com - www.acquesotterranee.net
mail: acquesotterranee@anipapozzi.it

USPI 2020
Associazione Unione Stampa Periodica Italiana

Pubblicato on line - dicembre 2020

Linee guida per la gestione sostenibile delle venute d'acqua e del calore geotermico nelle gallerie

Guidelines for sustainable management of groundwater inflows and geothermal heat in tunnels

Documento elaborato dal gruppo di lavoro GESTAG (GEstione SosTenibile delle Acque nelle Gallerie), istituito il 20/06/2012 dal Comitato Italiano dell'Associazione Internazionale degli Idrogeologi. Questo documento è stato approvato dal Consiglio Direttivo del Comitato Italiano di IAH in data 09/07/2020.

Consiglio Direttivo IAH Italia: Luca Alberti, Paolo Cerutti, Daniela Ducci (Presidente), Paolo Fabbri, Alessandro Gargini, Francesco La Vigna, Marco Masetti, Marco Petitta, Vincenzo Piscopo, Maurizio Polemio, Viviana Re, Sergio Rusi (Segretario), Andrea Sottani, Daniela Valigi.

Coordinatore del gruppo di lavoro GESTAG: Antonio Dematteis.

I capitoli di questo documento sono stati redatti dai seguenti autori: Riccardo Torri (Cap. 2), Fabrizio Grosso e Paolo Perello (Cap. 3), Alessandro Gargini e Valentina Vincenzi (Cap. 4), Antonio Dematteis (Cap. 5), Alessandra Insana, Marco Barla (Cap. 6), Alessandro Boscaro (Cap. 7), Maria Elena Parisi (Cap. 8), Guido Ruffinatto, Sergio Vazzoler e Antonio Dematteis (Cap. 9), Maria Governa, Luca Ranfagni e Federico Marchionatti (Cap. 10) e Valentina Vincenzi (Cap. 11).

La composizione e revisione del documento è stata curata da Alessandro Gargini, Valentina Vincenzi, Luca Ranfagni e Antonio Dematteis.

Il cordinamento editoriale è stato curato da Paolo Cerutti, in qualità di Editor, anche per conto della Direzione Scientifica e della Redazione di Acque Sotterranee.

Per citare questo documento: *Dematteis A, Barla M, Boscaro A, Gargini A, Governa M, Grosso F, Insana A, Marchionatti F, Parisi ME, Perello P, Ranfagni L, Ruffinatto G, Torri R, Vazzoler S, Vincenzi V (2020): Linee guida per la gestione sostenibile delle venute d'acqua e del calore geotermico nelle gallerie, Comitato Italiano IAH, allegato alla rivista Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater Vol.9 n°162 DOI 10.7343/as-2020-486*

DOI 10.7343/as-2020-486

INDICE

Indice delle figure 5
Indice delle tabelle 6
Indice dei BOX 6
Prefazione 7
Riassunto-Abstract 8
1 Introduzione 9
2 Ritorno di esperienza 10
2.1 Dati provenienti dai progetti già realizzati 10
2.1.1 Fonti bibliografiche 10
2.1.2 Banche dati on-line 11
2.1.3 Consultazione di esperti 11
2.2 Osservazioni generali sui dati disponibili 11
2.2.1 Portate registrate in galleria 13
2.2.2 Evoluzione della temperatura 14
2.2.3 Evoluzione dei caratteri geochimici delle acque 14
2.2.4 Impatto sulle acque superficiali e GDE /Groundwater Dependent Ecosystem) 14
2.3 Criteri di analisi del dato (Creazione del database) 14
3 Studio idrogeologico 15
3.1 Schema operativo delle attività 15
3.2 Il modello geologico: elemento fondante del modello idrogeologico 17
3.2.1 Rilevamento geologico 17
3.2.2 Indagini dirette 17
3.2.3 Indagini indirette 18
3.2.4 Utilizzo dei migliori metodi scientifici 18
3.2.5 Rappresentazioni e modelli 3D geologici 18
3.3 Fase "ante-operam" 19
3.3.1 Modello idrogeologico concettuale 19
3.3.2 Modelli numerici 21
3.4 Fase di "corso d'opera" 26
3.4.1 Criteri per il monitoraggio idrogeologico in corso d'opera 26
3.4.2 Criteri per la previsione delle tratte con afflussi elevati in fase di scavo 28
3.5 Fase "post-operam" 29
4 Interferenze idrogeologiche e rischio di impatto 31
4.1 Ambito dell'opera in sotterraneo 31
4.2 Ambito dell'acquifero 31
4.3 Ambito ecosistemico 32
4.3.1 Definizione di GDE 32
4.4 Definizione dei bersagli e degli indicatori di impatto 33
4.5 Analisi del rischio di impatto idrogeologico 35
4.6 Definizione del rischio e delle sue componenti 35
4.7 Strumenti di valutazione del rischio 38
4.7.1 Definizione del territorio idrogeologicamente significativo di riferimento e dei bersagli 37
4.7.2 Definizione degli indicatori e delle soglie 37
4.7.3 Scelta ed applicazione del metodo di valutazione del rischio 37
4.7.4 Rappresentazione del grado di interferenza e del rischio 38
4.8 Interventi per la mitigazione/compensazione degli impatti 39
4.8.1 Ambito di cantiere di scavo 39
4.8.2 Ambito territoriale ed ambientale 39
4.9 Ritorno di esperienza e rimandi bibliografici 40

DOI 10.7343/as-2020-486

5 Valorizzazione delle acque drenate 40
5.1 Premessa 40
5.2 Criteri di progettazione 40
5.3 Monitoraggio 43
6 Valorizzazione del calore del terreno 43
6.1 Considerazioni generali 43
6.2 Il progetto termico 44
7 Prodotti chimici utilizzati nello scavo 46
7.1 Scavo meccanizzato di gallerie con TBM – Prodotti per il condizionamento del terreno 46
7.2 Scavo meccanizzato di gallerie con TBM – Miscela di iniezione a tergo dei conci e alcalinità 47
7.3 Scavo meccanizzato e scavo tradizionale di gallerie – Iniezioni di consolidamento al fronte della galleria 47
7.4 Scavo meccanizzato e scavo tradizionale di gallerie - Iniezioni secondarie di impermeabilizzazione 47
7.5 Impermeabilizzazione di gallerie e manufatti con manti sintetici 48
8 Monitoraggio 50
8.1 Finalità e fasi 50
8.2 Adempimenti normativi 50
8.3 Dinamicità del monitoraggio 50
8.4 Schema di un Piano di Monitoraggio delle Risorse Idriche 50
8.4.1 Definizione degli obiettivi di monitoraggio 50
8.4.2 Punti di monitoraggio idrologico ed idrogeologico 51
8.4.3 Parametri di monitoraggio 52
8.4.4 Metodologie di misura 52
8.5 Archiviazione dati 53
9 Comunicazione 54
9.1 Esperienze di comunicazione in grandi infrastrutture 54
9.2 Indicazioni 54
9.3 Metodo di lavoro 55
9.4 Stakeholders 55
9.5 Quale comunicazione 55
9.6 Buone norme e consigli pratici: la cassetta degli attrezzi 56
10 Regolamentazione 57
10.1 Valutazione di Impatto Ambientale (VIA) e prescrizioni 58
10.2 Verifica di ottemperanza 60
10.3 Normativa comunitaria sul monitoraggio ambientale 61
10.3.1 Direttiva 2000/60/CE 61
10.3.2 Direttiva 2006/118/CE 61
10.3.3 Direttiva 2008/105/CE 62
10.3.4 Direttiva 2009/90/CE 62
10.4 Normativa italiana sul monitoraggio ambientale 62
10.4.1 D.Lgs. 152/2006 del 3 aprile 2006 – Norme in materia ambientale 62
10.4.2 D.Lgs. 30/2009 del 16 marzo 2009 62
10.4.3 D.Lgs. 163/2006 del 12 aprile 2006 - Codice appalti 63
10.5 Linee guida per la predisposizione del Progetto di Monitoraggio Ambientale (PMA) 63
10.6 Normativa sugli scarichi 67
11 Bibliografia 68
11.1 Ricerca scientifica 68
11.2 Suggerimenti bibliografici 69
11.3 Riferimenti bibliografici citati nel testo 75
11.4 Normativa 77
11.5 Risorse Web 78
Lista delle sigle e abbreviazioni 79

Indice delle Figure/*Index of Figures*

Fig. 1 - Distribuzione delle affiliazioni dei partecipanti al Gruppo di Lavoro GESTAG.
Distribution of affiliations of the participants in the GESTAG Working Group.

Fig. 2 - Relazioni geometriche tra la galleria ed il suo contesto topografico.
Geometric relations between the tunnel and its topographical context.

Fig. 3 - Analisi delle venute d'acqua osservate in opere sotterranee già realizzate.
Analysis of water inflows observed in already completed underground works.

Fig. 4 - Curva di esaurimento delle venute d'acqua in galleria.
Depletion curve of water inflows into the tunnel.

Fig. 5 - Schema di flusso per la definizione e lo sviluppo del modello idrogeologico concettuale e/o numerico di un'opera sotterranea. Il cronoprogramma delle attività, dalle fasi di studio e progettazione alla costruzione, compare in alto, le attività progettuali per la minimizzazione degli impatti idrogeologici in basso.
Flow chart for the definition and development of the conceptual and/or numerical hydrogeological model of an underground work. The time schedule of the phases, from study and design to construction, is shown at the top. The design activities for the minimization of hydrogeological impacts are shown at the bottom.

Fig. 6 - Confronto tra modelli di simulazione 3D: discretizzazioni rettangolari alle Differenze Finite (FD - a sinistra) e triangolari nei modelli a elementi finiti (FEM - a destra).
Comparison between 3D simulation models: Finite Difference Model with rectangular mesh (FDM – left) and Finite Element Model with triangular mesh (FEM – right).

Fig. 7 - Modello di scenario (realizzato con il codice FEFLOW®), riferito all'abbattimento della falda corticale di versante, nell'ambito della verifica preliminare di differenti soluzioni progettuali di tracciato in galleria. La campitura giallo-rossa rappresenta la progressiva differenza di carico piezometrico, sovrapposta allo schema geologico di riferimento. La linea tratteggiata blu rappresenta il limite delle unità argillose impermeabili (campitura in grigio).
Scenario model (FEFLOW® code used) representing lowered surface water table as a result of drainage by different tunnel alignments. The drawdown is represented by the yellow-red chromatic scale, superimposed on the reference geological scheme. The blue dotted line represents the limit of the impermeable clay units (in grey on the map).

Fig. 8 - Prova di emungimento (sinistra) in trincea di sottopasso stradale, finalizzata al dimensionamento dell'impianto di drenaggio necessario in fase di cantiere e delle modificazioni permanenti indotte dall'opera sul regime della falda e dei fontanili di pianura. Rappresentazione di un modello di scenario (destra) sviluppato a supporto del processo decisionale per la scelta della soluzione definitiva: lo scenario è relativo all'abbattimento della falda in corso d'opera mediante lo schema di aggottamento progettato.
Pumping test (left) on the road underpass draining aimed at verifying the permanent modification induced on the water table and on surrounding springs. Scenario model (right) developed to support the decision-making process for identifying the best design solution for the road underpass.

Fig. 9 - Scenario di modificazione permanente dei livelli di falda freatica (effetto barriera) a seguito della definitiva impermeabilizzazione dell'opera sotterranea (elaborazione dati mediante codice FEFLOW® - Finite Element subsurface FLOW system).
Scenario related to the permanent modification of water table levels (barrier effect) following the final waterproofing of the underground structure (data processing by FEFLOW® code - Finite Element subsurface FLOW system).

Fig. 10 - Portate drenate durante l'avanzamento dello scavo della galleria: misure eseguite dapprima manualmente mediante campagne di terreno (a sinistra-centro) e successivamente mediante strumentazione automatica (a destra).
Groundwater inflow during tunnel excavation: measurements performed by periodic field manual campaigns (left-centre) and later by automatic instruments (right).

Fig. 11 - Stazione di misura della portata drenata all'imbocco di una galleria in costruzione.
Drained flow rate measurement station at a tunnel portal during construction.

Fig. 12 - Monitoraggio in continuo della portata di una sorgente tramite stramazzo tarato e sensore di livello a ultrasuoni.
Continuous monitoring of spring discharge by calibrated weir and ultrasonic level sensor.

Fig. 13 - Stazione di misura del deflusso di un torrente, a valle del tratto soggetto alla possibile interferenza con opere sotterranee.
Stream flow measurement station, located downstream of the area where interference with underground works is possible.

Fig. 14 - Modello concettuale: Fonte di pericolo > Percorso>– Bersaglio (spiegazione nel testo).
Conceptual model: Source>- Pathway > Target (explanation in the text).

DOI 10.7343/as-2020-486

Fig. 15 - Schema dei Fattori del Rischio.
Scheme of Risk Factors.

Fig. 16 - Procedura di Valutazione del Rischio.
Risk Assessment procedure.

Fig. 17 - Progetto Tropenhaus: esempio di utilizzo per scopi produttivi dell'acqua naturalmente calda intercettata dalla galleria ferroviaria.
Tropenhaus Project: example of use for production purposes of thermal water drained by a railway tunnel.

Fig. 18 - Procedura di progettazione termica di una galleria energetica (Barla, 2020; Insana, 2020).
Thermal design procedure for an energy tunnel (Barla, 2020; Insana, 2020).

Fig. 19 - Confronto tra i dati di ecotossicità di due agenti schiumogeni tradizionali e di uno più innovativo.
Comparison between the ecotoxicity data of "traditional" foaming agents and of a more innovative one.

Fig. 20 - Diagramma concettuale di una galleria drenante (sinistra) e di una con impermeabilizzazione full-round (destra).
Conceptual diagram of a drainage tunnel (left) and a tunnel with full-round waterproofing (right).

Fig. 21 - Principali aspetti da definire nella predisposizione di un Piano di Monitoraggio.
Main aspects to be defined in the preparation of a Monitoring Plan.

Fig. 22 - Diagramma di classificazione degli stakeholders in funzione dei parametri "interesse" ed "influenza".
Stakeholder classification diagram according to the parameters "interest" and "influence".

Fig. 23 - Schema del modello DPSIR (Fonte: ARPA Piemonte).
Diagram of the DPSIR model (Source: ARPA Piemonte).

Fig. 24 - Statistiche relative ad una ricerca per compresenza delle parole "tunnel" e "groundwater" all'interno del Database WOS (Web Of Science); v. spiegazione nel testo.
Statistics related to a search for the coexistence of the words "tunnel" and "groundwater", in the Web Of Science (WOS) database; see explanation in the text.

Indice delle Tabelle/*Index of Tables*

Tab. 1 - Elenco dei partecipanti al Gruppo di Lavoro GESTAG (in ordine alfabetico per cognome).
List of participants in the GESTAG Working Group (in alphabetical order by surname).

Tab. 2 - Proprietà e parametri chiave richiesti per il progetto termico di una galleria energetica.
Key properties and parameters required for the thermal design of an energy tunnel.

Tab. 3 - Test di variazione di massa e delle performance meccaniche su membrane in PVC-P (requisiti minimi).
Mass variation and mechanical performance tests on PVC-P membranes (minimum requirements).

INDICE DEI BOX

BOX 1: Esempio applicativo di analisi dei dati storici 12
BOX 2: Scelta dell'approccio modellistico per la simulazione del flusso 23
BOX 3: Esempi di simulazioni numeriche del flusso dell'acqua sotterranea in acquiferi permeabili per fratturazione e porosità 24
BOX 4: Evoluzione nel tempo delle venute d'acqua in galleria 26
BOX 5: Le gallerie sono strutture drenanti? 41
BOX 6: Progetto Tropenhaus - Traforo ferroviario del Lötschberg (CH) 41
BOX 7: Il modello DPSIR dell'Agenzia Europea dell'Ambiente AEA 57
BOX 8: Le opere e i progetti sottoposti a VIA 58
BOX 9: I contenuti dello Studio di Impatto Ambientale 59
BOX 10: Le Condizioni Ambientali 60
BOX 11: Organizzazione e principi di un PMA 64

PREFAZIONE

Se avete iniziato a leggere questo volume partendo da questa prefazione sappiate che ogni lungo viaggio inizia con un piccolo passo (Lao-Tze) e che voi siete solo al primo passaggio di un percorso articolato e non breve, che mi auguro e vi auguro sia anche interessante ed utile.

Questo volume è un primo risultato del lavoro svolto da un gruppo di lavoro di esperti, in dettaglio individuabili nell'introduzione, ognuno dei quali ha affrontato e affronta quotidianamente un problema comune da una diversa posizione e quindi con una diversa prospettiva; il gruppo è diversificato, e la diversità è spesso un valore, e multidisciplinare, date le aree di competenza da cui gli esperti provengono, e data anche la complementarietà delle loro affiliazioni all'interno dei mondi accademico, professionale, delle imprese e degli enti pubblici.

Gli autori con il volume hanno voluto contribuire a fornire uno strumento di comprensione organica e integrata di un insieme di processi e problemi, ossia una base per consentire ad altri di approcciare poi nel miglior modo studi, modellazione concettuale, indagini, progetti, monitoraggi, modellazione matematica a breve e lungo termine, previsioni e scenari di impatti ambientali, progettazione di misure di prevenzione e/o compensazione e/o mitigazione, *contingency plans*, ecc.; che il volume sia in questo caso dedicato alla gestione di acque sotterranee e calore geotermico nelle gallerie può essere visto anche come un esempio di approccio analitico da applicare alla programmazione, pianificazione o progettazione anche di altre opere infrastrutturali o civili più in generale.

Ciò che è interessante nel caso di quanto descritto in questo volume, oltre all'analisi generale ed ai contributi particolari evidenti, è ciò che leggendo si ritrova tra le righe, il salto in avanti che la lettura stimola; in avanti nella direzione della tentazione di approfondimento della stessa materia, o del tentativo di trapianto delle competenze assorbite, o della ispirazione per lo sviluppo di ulteriori conoscenze o di un diverso approccio al prossimo lavoro.

In questo senso è superfluo soffermarsi in questa prefazione sugli obiettivi, primari e secondari, cosiccome sul target e sui contenuti di queste Linee Guida, che sono descritti nel testo ed identificabili nelle sue parti; vale piuttosto la pena immaginare ciò che, non essendoci in queste Linee guida o forse semplicemente non essendoci ancora in questa edizione, potrebbe rappresentarne, e forse anche evocarne, il naturale sviluppo.

In questo volume si tratta di acque sotterranee e di calore nel sottosuolo, affrontando entrambi gli elementi con il chiaro intento della valorizzazione di due risorse delle quali, spesso e in contesti differenti, si sottovaluta il potenziale; in questo senso è ad esempio evidente che un'analisi costi-benefici mirata alla valutazione delle risorse idriche e del potenziale geotermico di un'area interessata da un progetto di galleria, già in fase di progettazione preliminare e di analisi delle alternative dovrebbe essere in grado di individuare le plusvalenze legate alla valorizzazione di cui sopra; e lo stesso si potrebbe dire e fare nelle analisi inziali di sostenibilità di molte altre opere.

La valorizzazione del calore viene trattata facendo prevalentemente riferimento ai suoi principi generali, ma è evidente la possibilità, in una seconda fase o in una futura edizione, di sviluppare le stesse analisi, considerazioni e principi analizzando e comparando contesti diversi, cosiccome applicando le stesse valutazioni ad opere diverse quali le miniere; e altre tentazioni potrebbero essere quella di travasare i principi della valorizzazione dell'energia termica in quella dell'energia idraulica, lavorando sugli invasi, o quella, per restare nel campo delle gallerie, di ripensare la valorizzazione dei materiali di risulta prodotti dallo scavo.

E potremmo continuare, ma è ormai ora di pensare invece ai doverosi ringraziamenti alle organizzazioni che hanno reso possibile la realizzazione di questo volume: il Gruppo Italiano di IAH (*International Association of Hydrogeologists*), che lo ha proposto e redatto, e Acque Sotterranee (associazione affiliata ANIPA ed Editrice della omonima rivista), che ne ha resa possibile la pubblicazione; con essa è stato intrapreso un percorso, di condivisione di idee e risorse e di ricerca di un denominatore comune, che mi auguro proficuo, replicabile e duraturo.

Paolo Cerutti
Co-Editor-in-Chief di Acque Sotterranee – Italian Journal of Groundwater
Membro Comitato Italiano IAH (International Association Hydrogeologists)

DOI 10.7343/as-2020-486

RIASSUNTO

Questo documento presenta le Linee Guida per la gestione sostenibile delle venute d'acqua e del calore geotermico nelle gallerie, elaborate dal Gruppo di Lavoro GESTAG (GEstione SosTenibile delle Acque nelle Gallerie), istituito il 20/06/2012 dal Comitato Italiano dell'Associazione Internazionale degli Idrogeologi.

Il documento affronta e descrive obiettivi, metodi e casi di studio, ciascuno dei quali richiede di adottare misure tecniche di vario tipo, illustrate nei capitoli seguenti, come studi idrogeologici, modelli predittivi degli impatti, soluzioni tecnologiche di contenimento del drenaggio e di captazione, recupero e valorizzazione delle risorse intercettate, monitoraggi.

Sono affrontati anche i così detti temi non tecnici, come la comunicazione, poiché è ormai noto che l'accettabilità sociale di una galleria influenza direttamente la sua sostenibilità economica e finanziaria, per gli effetti che può avere sui tempi di realizzazione e sui costi delle compensazioni.

Sulla base delle diverse esperienze dei componenti del Gruppo di Lavoro GESTAG, si è optato per una suddivisione in 11 temi principali, in particolare, in ciascuno dei capitoli successivi a quello introduttivo vengono trattati rispettivamente:

Capitolo 2: l'importanza del **ritorno di esperienza** proveniente da gallerie già scavate, le banche dati disponibili e i criteri di analisi dei dati pregressi;

Capitolo 3: come realizzare lo **studio idrogeologico** di una galleria, la relazione con il modello geologico, le metodiche da adottare nelle differenti fasi del progetto, che sono state distinte in *ante-operam*, in corso d'opera e *post-operam*;

Capitolo 4: il tema degli **impatti** che il drenaggio in galleria può avere sull'ambiente circostante, le analisi che devono essere svolte e gli strumenti da adottare per la gestione del rischio, infine gli interventi per la mitigazione degli impatti;

Capitoli 5 e 6: le metodiche di progettazione per la **valorizzazione** rispettivamente delle acque drenate in galleria e del calore;

Capitolo 7: i **prodotti chimici** che vengono utilizzati in fase di scavo per il sostegno e il miglioramento del terreno, e la loro compatibilità con l'utilizzo delle acque drenate;

Capitolo 8: i criteri di **monitoraggio** delle acque in un progetto di galleria;

Capitolo 9: la **comunicazione**, il rapporto con i territori e l'analisi di casi pregressi, nonché una guida sulle buone pratiche da adottare;

Capitolo 10: una panoramica sulla **normativa** europea ed italiana in tema di valutazione di impatto ambientale, monitoraggio e scarichi delle acque drenate;

Capitolo 11: la **bibliografia** ragionata inerente l'argomento trattato, che include pubblicazioni tecnico scientifiche, normative di riferimento e risorse web.

ABSTRACT

This document presents the Guidelines for the sustainable management of groundwater inflows and geothermal heat in tunnels, elaborated by the Working Group GESTAG (Sustainable Water Management in Tunnels), established on 20/06/2012 by the Italian Committee of the International Association of Hydrogeologists.

The document addresses and describes objectives, methods and case studies, each of which requires the adoption of different and specific technical measures, illustrated in the following chapters, such as hydrogeological studies, predictive models of impacts, technological solutions for the containment of drainage and uptake, recovery and enhancement of intercepted resources, monitoring.

The so-called non-technical issues are also addressed, such as communication, since it is now known that the social acceptability of a gallery directly influences its economic and financial sustainability, due to the effects it can have on construction times and the costs of compensation.

Based on the different experiences of the members of the GESTAG Working Group, a subdivision into 11 main themes, in more detail, in each of the chapters following the introductory one they are treated respectively:

***Chapter 2:** the importance of the **return of experience** from tunnels already excavated, the available databases and the criteria for analyzing pre-existing data;*

***Chapter 3:** how to carry out the **hydrogeological study** of a tunnel, the relationship with the geological model, the methods to be adopted in the different phases of the project, which were divided into ante-works, during construction and post-construction;*

***Chapter 4:** the issue of the **impacts** that tunnel drainage can have on the surrounding environment, the analysis that must be carried out and the tools to be adopted for risk management, and finally, the measures to mitigate the impacts;*

***Chapter 5 and 6:** the design methods for the **development** of the water drained in the tunnel and heat respectively;*

***Chapter 7:** the **chemicals** used during the excavation phase to support and improve the soil, and their compatibility with the use of drained water;*

***Chapter 8:** the water **monitoring criteria** in a tunnel project;*

***Chapter 9: communication**, relations with the territories and analysis of previous cases, as well as a guide on good practices to be adopted;*

***Chapter 10:** an overview of the **European and Italian legislation** on environmental impact assessment, monitoring and discharges of drained water;*

***Chapter 11:** the annotated **bibliography** relating to the subject matter, which includes technical scientific publications, reference standards and web resources.*

1 INTRODUZIONE

Queste linee guida intendono rispondere ad un sempre crescente interesse a realizzare progetti di gallerie, o più in generale di opere in sotterraneo, con più elevati standard di sostenibilità e sicurezza.

La sostenibilità di un progetto è da perseguire sotto diversi punti di vista: economico-finanziario, sociale ed ambientale. In questo contesto, l'obiettivo specifico che si prefigge questo documento è di sintetizzare le esperienze degli autori per suggerire delle buone pratiche volte a preservare e al tempo stesso valorizzare le risorse idriche, gli ecosistemi dipendenti dalle acque sotterranee e le risorse geotermiche che possono essere interferiti dagli scavi in sotterraneo. Nei casi in cui non sia tecnologicamente possibile evitare il drenaggio dell'acqua sotterranea nella galleria, l'impatto va previsto, quantificato, mitigato, compensato e ove possibile valorizzato, adottando soluzioni di captazione e utilizzo dell'acqua sotterranea e del calore geotermico.

L'intento delle linee guida è di fornire uno strumento di risposta a queste esigenze, da applicare a partire dalla fase di studio e progettazione delle gallerie, ed anche durante la fase di costruzione e di esercizio. Il documento è rivolto ai progettisti e agli specialisti degli studi propedeutici alla progettazione, alle imprese di costruzione, ai committenti pubblici e privati, ai gestori delle infrastrutture ed alle amministrazioni ed enti pubblici incaricati del controllo ambientale.

Nel seguito sono elencate in ordine alfabetico le persone che hanno partecipato con vario coinvolgimento alle attività del gruppo di lavoro GESTAG.

Il gruppo di lavoro GESTAG tra il 2012 e il 2019 ha organizzato tre incontri formali, tecnico-scientifici, aperti al pubblico, in occasione dei quali sono stati discussi i temi descritti in questo documento e raccolte le esperienze dei partecipanti:

- Workshop presso il Convegno GEOFLUID, Piacenza, 4 ottobre 2012;
- Workshop presso l'Università La Sapienza, IAH, Roma, 14 ottobre 2013;
- Corso di aggiornamento GEAM, Politecnico di Torino, 4 novembre 2019.

Questi incontri hanno permesso di definire gli 11 temi principali, che sono stati poi sviluppati in forma di capitolo in questa linea guida, a cura degli autori elencati in copertina e all'inizio di ogni capitolo.

L'organizzazione dei contenuti all'interno dei principali capitoli è risultata piuttosto complessa, perché articolata e poliedrica è la materia, che può essere affrontata su diversi piani (progettuale, esecutivo, normativo, ambientale, sociale, economico), che vanno a differenziarsi, e contemporaneamente ad intrecciarsi in numerosi e diversificati approcci, tanti quanti sono le parti coinvolte nel progetto. Per questo motivo alcuni argomenti risultano trattati allinterno di diversi capitoli, con diverso approccio e grado di approfondimento.

Marco	Barla	Politecnico di Torino
Alessandro	Boscaro	UTT-Mapei
Ulrich	Burger	BBT SE, Galleria di Base del Brennero
Flavio	Capozucca	ANAS S.p.A., Direzione Centrale Progettazione
Paolo	Cerutti	ECOTER CPA, Studio geologico professionale
Domenico	De Luca	Università di Torino
Antonio	Dematteis	Lombardi Engineering Ltd
Alessandro	Gargini	Alma Mater Studiorum Università di Bologna
Andrea	Geuna	GDTest S.r.l.
Maria	Governa	Regione Piemonte, Settore Acque
Fabrizio	Grosso	Hydrodata S.p.A.
Alessandra	Insana	Politecnico di Torino
Stefano	Lo Russo	Politecnico di Torino
Federico	Marchionatti	Politecnico di Torino
Maria Elena	Parisi	TELT SAS, Tunnel Euralpin Lyon Turin
Paolo	Perello	GDP Consultant S.r.l.
Marco	Petitta	Università di Roma "La Sapienza"
Massimiliano	Petricig	Regione Piemonte, Settore Acque
Maurizio	Polemio	CNR IRPI - Bari
Giona	Preisig	Université de Neuchatel, CH
Luca	Ranfagni	ARPA Toscana- Settore VIA/VAS
Giovanni	Ricci	Geodata S.p.A.
Guido	Ruffinatto	Amapola S.r.l., esperto di comunicazione
Francesco	Sindico	University of Strathclyde Law School
Stefan	Skuk	BBT SE, Galleria di Base del Brennero
Marco	Tallini	Università dell'Aquila, Dip. Ing. Civ. Arch. Amb.
Riccardo	Torri	EGTeam, Studio geologico professionale
Sergio	Vazzoler	Amapola S.r.l., esperto di comunicazione
Valentina	Vincenzi	Studio geologico professionale

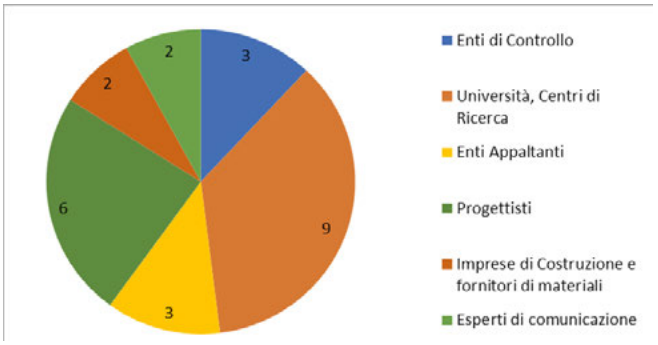

Fig. 1 - Distribuzione delle affiliazioni dei partecipanti al Gruppo di Lavoro GESTAG.

Fig. 1 - Distribution of affiliations of the participants in the GESTAG Working Group.

DOI 10.7343/as-2020-486

2 RITORNO DI ESPERIENZA

L'esperienza maturata a partire dalla metà del secolo scorso nel campo degli scavi in sotterraneo ha permesso di produrre un'enorme mole di dati di natura idrogeologica. Si tratta di dati acquisiti sia durante le varie fasi di progettazione, sia durante la realizzazione degli scavi stessi, che nella fase di esercizio delle opere completate.

In particolare, i dati idrogeologici raccolti nelle fasi progettuali riguardano soprattutto quelli ottenuti tramite le indagini dirette (sondaggi geognostici, prove in foro, analisi di laboratorio, ecc.) e indirette (principalmente prospezioni geofisiche); i dati raccolti durante e dopo lo scavo sono invece il risultato dei monitoraggi in galleria (misure di carico idraulico e portata) e dei monitoraggi ambientali al di fuori della galleria (misure su punti acqua quali sorgenti e pozzi).

L'insieme dei dati storici, dunque, costituisce un patrimonio comune di conoscenza la cui disponibilità permette di affinare i metodi di analisi e comprensione delle criticità di tipo geologico-idrogeologico, nonché di ottimizzare le soluzioni ingegneristiche per la loro mitigazione e/o superamento.

Nell'ambito dell'elaborazione del modello idrogeologico e della definizione del rischio geologico e idrogeologico connesso alla realizzazione di infrastrutture sotterranee (gallerie viarie, idroelettriche, centrali in caverna, ecc.), la possibilità di disporre di dati idrogeologici storici acquisiti durante esperienze dirette gioca un ruolo fondamentale sia nelle fasi iniziali di progettazione e/o studio di fattibilità sia nelle fasi di definizione delle scelte progettuali più avanzate.

Questo contributo deriva generalmente dall'acquisizione e successiva elaborazione di dati presenti in letteratura o provenienti da esperienze dirette dei progettisti e delle imprese di costruzione fatte durante lo scavo di infrastrutture terminate o in fase di realizzazione.

L'analisi dei dati storici deve in prima battuta soddisfare criteri di rappresentatività e confrontabilità a livello geologico-strutturale ed idrogeologico con il contesto che si sta affrontando. Questo è fondamentale al fine di poter minimizzare la forchetta di incertezza che l'accostamento tra due contesti, simili ma non coincidenti, porta con sé. È opportuno, quindi, che in un progetto sia inserito uno specifico capitolo su questo tema in cui siano definiti i benefici e i limiti dell'analisi effettuata dei dati storici.

Gli elementi principali che si possono dedurre dall'analisi del **ritorno di esperienza** sono i seguenti:

1. il potenziale di drenaggio delle acque sotterranee da parte della galleria, in contesti idrogeologici confrontabili;
2. gli impatti sulle acque sotterranee e sui punti di prelievo (sorgenti e pozzi), sugli ecosistemi dipendenti dalla falda (*Groundwater Dependent Ecosystems*; GDE) e sulle acque superficiali (corsi e specchi d'acqua, zone umide), nonché sulle dinamiche di versante;
3. lo sviluppo e pianificazione degli interventi progettuali come metodi di scavo e monitoraggio, sistemi di impermeabilizzazione o drenaggio;
4. la predisposizione di scenari di valorizzazione delle acque drenate (risorsa idrica e/o energetica).

2.1 Dati provenienti dai progetti già realizzati

La caratteristica principale dei dati bibliografici è quella di essere estremamente disomogenei. Questo elemento di evidente criticità è soprattutto dovuto alla mancanza di linee guida comuni di raccolta dati in cantiere. In effetti, la criticità risiede non tanto nella mancanza di dati *as built* ma piuttosto nella loro dispersione in termini di frequenza di acquisizione e nella loro talora eccessiva varietà tipologica: se da un lato aumenta la dimensione complessiva delle banche dati disponibili, dall'altro lato, in assenza di coordinamento, aumenta la difficoltà di correlazione tra i dati stessi diminuendo la loro rappresentatività statistica.

Emerge dunque la necessità di strutturare l'archivio dei dati storici non solo in funzione della loro fruibilità a posteriori ma anche, e soprattutto, per l'implementazione di banche dati organiche più facilmente ed efficacemente consultabili. Questo, soprattutto in corso d'opera, può anche facilitare il rapporto con gli Enti di controllo, rendendo più rapida, semplice e sistematizzata la fornitura di eventuali dati richiesti. Inoltre, la possibilità di analizzare il dato idrogeologico acquisito in fase di costruzione, da parte di chi realizza e gestisce la fase di esercizio di un'infrastruttura, permette di verificare la bontà delle scelte progettuali e di ripercorrere l'evoluzione dei fenomeni osservati in galleria, anche a lungo termine.

La disponibilità dei dati idrogeologici e geologici derivati dallo scavo di gallerie è di molto aumentata negli ultimi 20 anni grazie all'introduzione di dispositivi di acquisizione automatica delle misure. Sono, infatti, ormai parte integrante dell'equipaggiamento delle gallerie dispositivi quali i misuratori automatici di portata in galleria e ai portali, i fori di sondaggio equipaggiati con sonde multi-parametriche e la strumentazione per la misura in continuo, stoccaggio e trasmissione di parametri chimico-fisici e piezometrici.

Inoltre, la strutturazione di database GIS e webGIS per l'organizzazione e l'analisi del dato permette di geo-riferire ed organizzare temporalmente i dati acquisiti rendendoli potenzialmente più adeguati ad analisi incrociate con il contesto geologico e ingegneristico in cui sono stati rilevati.

L'obiettivo ultimo è quindi quello di rendere utile l'esperienza maturata nell'ambito di nuovi progetti. Con ciò non si deve intendere che la disponibilità di dati acquisiti altrove possa sostituire in toto la necessità di acquisire informazioni dirette; tuttavia, il confronto con contesti simili può, per esempio, essere di valido supporto nelle prime fasi di studio per indirizzare la definizione del modello concettuale e delle problematiche generali e, di conseguenza, definire il piano indagini.

2.1.1 Fonti bibliografiche

I dati storici, ottenibili da fonte bibliografica, sono generalmente disponibili in forma qualitativa e sono caratterizzati da elementi di criticità quali la soggettività della misura, la variabile e talvolta debole affidabilità dei metodi di acquisizione, la mancanza di banche dati strutturate e

la deperibilità e vetustà dei supporti su cui esse sono rese disponibili (supporti cartacei, supporti informatici superati, ecc.).

Nei casi più virtuosi, tali dati sono stati oggetto di studi specifici ed approfonditi che hanno permesso agli autori di redigere articoli e pubblicazioni scientifiche relative a singole opere che presentano solo raramente il dato acquisito ma piuttosto la loro analisi.

In altri casi, i dati sono rimasti custoditi in faldoni che riempiono magazzini e *caveaux* non più accessibili e addirittura non custoditi, se non di ignota ubicazione.

Nel primo caso il dato ha però un pregio ovvero che essendo dati generalmente pubblicati su riviste nazionali ed internazionali, essi, soprattutto se sottoposti ad un processo rigoroso di *peer review* anonima, hanno ottenuto la necessaria validazione scientifica. In molti casi, si tratta di lavori che costituiscono dei punti di riferimento nel campo dell'idrogeologia applicata.

Nel capitolo 11 è fornita una bibliografia tematica commentata, di seguito sono riportati alcuni esempi degni di nota per la raccolta di dati storici: Bianchetti et al. 1993; Marechal 1998; Pesendorfer & Loew 2004; Masset & Loew 2013; Vincenzi et al. 2014; Ranfagni et al. 2015; Scibek et al. 2016.

2.1.2 Banche Dati on-line

Consultando la rete web è possibile reperire i dati relativi allo scavo di tunnel e più in generale di opere sotterranee. Si tratta per lo più di elenchi di tunnel realizzati in vari paesi e in diversi contesti e per differenti obiettivi. Un esempio è quello consultabile su Wikipedia che fornisce un ricco elenco di gallerie corredato di: data di termine lavori, paese e lunghezza (*http://it.wikipedia.org/wiki/Lista_di_gallerie_per_lunghezza*).

Di carattere più specifico è invece la banca dati dell'*International Tunneling and Underground Space Association* (ITA-AITES) che permette di accedere ai numerosi articoli scientifici, agli atti dei convegni ed alle norme tecniche relative alla progettazione e scavo di opere sotterranee (*https://library.ita-aites.org/*).

Un altro esempio è quello della banca dati dell'USGS (*United States Geological Survey*) che permette di consultare i dati raccolti in ambito idrogeologico sul territorio degli Stati Uniti (*National Water Information System NWIS; http://waterdata.usgs.gov/nwis/qw*). Questo database è tuttavia onnicomprensivo e non è focalizzato sui dati che descrivono l'interazione tra opere sotterranee e acquiferi.

La *Australian Tunnelling Society* (ATS) mette a disposizione su sito web il proprio database (*http://www.ats.org.au/resources/tunnel-projects-2/*) in cui è possibile avere informazioni di tipo ingegneristico (metodo di scavo) e geologico (terreni in cui è avvenuto lo scavo); non sono però forniti in modo sistematico dati quantitativi di tipo idrogeologico.

È altresì possibile eseguire ricerche bibliografiche sui motori di ricerca delle principali riviste scientifiche (*www.sciencedirect.com,http://springerlink.metapress.com*) oppure consultando i motori di ricerca on-line delle biblioteche degli istituti universitari:

- Scuola Politecnica Federale di Losanna: *https://beast-epfl.hosted.exlibrisgroup.com/primo-explore/search?vid=EPFL&lang=fr_FR*
- Istituto Tecnologico del Massachusetts: *https://lib.mit.edu/search/bento?q=hydrogeology+tunnel*

Nonostante sia dunque possibile ottenere dati direttamente dal web, non sembra esistere una banca dati specifica che raccolga i dati di tipo idrogeologico e geologico al fine di essere utilizzati per trasferire, su nuovi progetti, l'esperienza accumulata.

2.1.3 Consultazione di esperti

Negli ultimi decenni, con lo sviluppo tecnologico dello scavo meccanizzato in gallerie e con l'aumentare della sensibilità nei confronti degli impatti sulla risorsa idrica e sugli ecosistemi associati, i committenti, i progettisti e le imprese di costruzioni, si avvalgono sempre più spesso di consulenti esperti in ambito geologico e idrogeologico. Il loro apporto è sovente connesso all'esperienza diretta e indiretta maturata nelle fasi di progettazione e realizzazione di opere sotterranee. È in particolare nella previsione e quantificazione dei rischi geologici e idrogeologici e nell'ambito dello studio degli impatti ambientali che il loro apporto diventa fondamentale.

2.2 Osservazioni generali sui dati disponibili

In linea generale, salvo alcune eccezioni, la qualità dei dati disponibili è maggiore per le opere realizzate più recentemente (da fine anni '90 in poi) soprattutto grazie alla possibilità di installare sistemi automatici di monitoraggio sia all'interno delle opere sotterranee sia in corrispondenza di corpi idrici sensibili in superficie. Tuttavia, per opere di importanza strategica, si dispone di dati significativi anche per tunnel realizzati precedentemente (es.: Tunnel del Monte Bianco, Tunnel del Sempione, Galleria "Direttissima" dell'Appennino). In questi casi, infatti, l'importanza dell'opera ha permesso di realizzare studi di valore scientifico che ancora oggi rappresentano un importante riferimento metodologico e applicativo (Marechal 1998).

In linea più generale, l'analisi dei dati storici riguarda lavori ubicati in diverse parti del mondo e interessati da differenti assetti geologici, tettonici e strutturali, aumentando la rappresentatività statistica delle valutazioni dei parametri idrogeologici.

In molti casi, inoltre, i dati di portata delle venute d'acqua sono indicati in modo qualitativo, ad esempio con la dicitura "acqua abbondante" oppure "venuta puntuale". La qualità del dato è dunque funzione del metodo di osservazione e di acquisizione.

Nei documenti maggiormente datati le informazioni relative alle portate non fanno distinzione tra portate transitorie e stazionarie. Tale distinzione tuttavia risulta importante per la valutazione delle caratteristiche idrauliche degli ammassi rocciosi entro cui sono stati scavati i diversi tunnel e permettono di verificare l'incidenza, sull'evoluzione

DOI 10.7343/as-2020-486

BOX 1 - Esempio applicativo di analisi dei dati storici

In alcuni casi è stato possibile, nelle fasi iniziali degli studi di progettazione, potere approfittare della disponibilità di dati acquisiti durante lo scavo di opere nelle vicinanze del nuovo progetto. Per esempio, i progetti del Tunnel di Base del Brennero o del Tunnel di Base Lyon-Torino hanno potuto giovare dell'importante massa di dati derivati dallo scavo delle gallerie idrauliche, stradali e ferroviarie, già presenti nello stesso settore alpino, permettendo talvolta una diretta trasposizione del dato storico sul nuovo progetto. In questi casi, gli studi di analisi del dato storico sono stati integrati nel processo di progettazione selezionando i dati disponibili in letteratura in relazione al contesto esaminato. In particolare, in questi casi, è stato seguito il seguente processo di analisi:

1. definizione del Modello Idrogeologico di Riferimento coerentemente al Modello Geologico di Riferimento e ai dati di caratterizzazione idrodinamica degli acquiferi interessati dallo scavo e per un intorno ritenuto significativo;
2. valutazione delle portate attese in galleria in termini di:
   a. portate massime transitorie (durante lo scavo)
   b. portate stabilizzate (a scavo terminato);
3. analisi dei dati storici equiparabili al contesto studiato con particolare attenzione ai dati relativi all'evoluzione nel tempo delle portate delle singole venute o delle portate complessive drenate da una galleria, considerando i) carichi idraulici simili; ii) condizioni idrodinamiche comparabili; iii) contesto topografico simile (Fig. 2); iv) contesto geologico-strutturale simile.

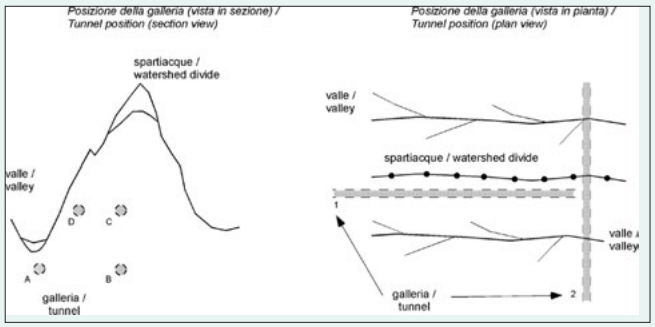

Fig. 2 - Relazioni geometriche tra la galleria ed il suo contesto topografico.
Fig. 2 - Geometric relations between the tunnel and its topographical context.

La possibilità di verificare a posteriori l'analisi di previsione delle venute in galleria, utilizzando il metodo del confronto con i dati storici, ha permesso di valutare una serie di elementi, che sovente occorrono, di incoerenza tra la previsione e le condizioni osservate in galleria:

- incertezza nella formulazione del modello geologico: alcune faglie previste, con ruolo idrogeologico, non sono state incontrate durante lo scavo;
- incertezza nella caratterizzazione idrodinamica delle zone acquifere (K, S) che influenza fortemente la valutazione quantitativa delle portate delle singole venute;
- incertezza nella valutazione delle modalità di esaurimento delle venute d'acqua in relazione alle portate complessive drenate da una galleria il cui andamento è da mettere in relazione con il cronoprogramma degli scavi.

Tuttavia, sono stati rilevati anche importanti punti di coerenza tra quanto previsto e quanto poi effettivamente osservato:

- le funzioni di smorzamento delle portate riproducono con accettabile coerenza quanto osservato;
- l'ordine di grandezza delle portate previste simula in modo cautelativo quanto osservato durante e dopo lo scavo.

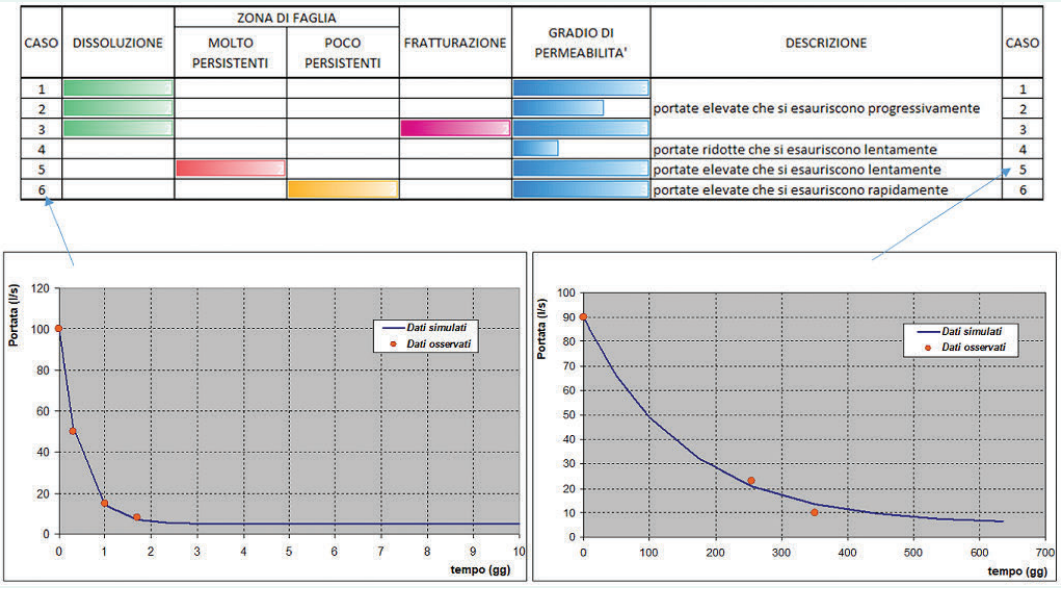

Fig. 3 - Analisi delle venute d'acqua osservate in opere sotterranee già realizzate.

Fig. 3 - Analysis of water inflows observed in already completed underground works.

delle portate nel tempo, di parametri come la ricarica, l'immagazzinamento e la variazione di permeabilità intrinseca degli acquiferi.

A tal proposito, la completezza del dato idrogeologico quantitativo (carico piezometrico, portata delle venute idriche ecc.) è garantita solo se il dato stesso viene accoppiato a quello geologico. In modo particolare, nel confronto fra le informazioni tecniche e i parametri idrogeologici derivanti da opere diverse, la disponibilità o meno di dati sullo stato tensionale dell'ammasso roccioso è risultata discriminante per una più corretta valutazione del significato di quelli idrogeologici quantitativi. Infatti, la mancanza di dati geologico-strutturali e geomeccanici non consente di descrivere in modo approfondito le diverse strutture idrogeologiche e di poter realmente fare dei confronti in sede di progettazione.

Di conseguenza, i parametri idrogeologici come la conducibilità idraulica, la trasmissività o la capacità d'immagazzinamento sono di difficile valutazione in assenza di informazioni sulle portate transitorie e stazionarie e sulle caratteristiche geologico-strutturali dell'ammasso roccioso e/o terreni scavati.

Il dato *as built* acquisito durante e dopo lo scavo assume maggior peso se comparato alle osservazioni e analisi derivate dai rilievi idrogeologici sia in galleria che in superficie. Nei lavori più recenti la disponibilità di dati di superficie è aumentata permettendo di acquisire informazioni sull'influenza dello scavo sulle sorgenti di superficie e sugli ecosistemi connessi al deflusso idrico. In tal senso, il monitoraggio ambientale e idrogeologico della componente idrica e biotica durante e dopo i lavori di scavo riveste un elemento ormai fondamentale per la progettazione di un'opera sotterranea e per il suo inserimento nell'ambiente.

2.2.1 Portate registrate in galleria

Nell'ambito dell'analisi delle variazioni di portata delle venute idriche di un tunnel debbono essere tenuti in considerazione numerosi fattori fisici al fine di comprendere la dinamica temporale del fenomeno:

- l'abbassamento progressivo del carico idraulico (livello piezometrico) a seguito del drenaggio;
- l'entità della ricarica degli acquiferi drenata in galleria;
- la dipendenza tra la permeabilità e il campo di stress effettivo.

Il primo fenomeno è direttamente connesso agli altri due. In generale, è possibile affermare che, in un contesto di terreni e/o ammassi rocciosi mediamente permeabili, in presenza di scarsa ricarica (inferiore al potenziale di drenaggio della galleria), l'abbassamento del carico idraulico sarà massimo e viceversa. L'abbattimento delle pressioni neutre (pressione dell'acqua nei pori e/o nelle fratture), e la conseguente diminuzione della permeabilità intrinseca dell'acquifero, determina nel lungo periodo un minor drenaggio e dunque un minor abbassamento piezometrico. Tale effetto è più forte per i tratti di galleria profonda.

Alla luce delle considerazioni di cui sopra, al fine di chiarire le terminologie che verranno adottate in questo paragrafo, viene definita una distinzione tra portata di picco, transitoria e stabilizzata.

La fase di svuotamento di un acquifero che alimenta una sorgente naturale può in linea generale essere presa ad esempio per simulare l'evoluzione nel tempo della portata di una venuta in galleria. Sulla base di questa curva distinguiamo tre momenti diversi, illustrati graficamente in Figura 4.

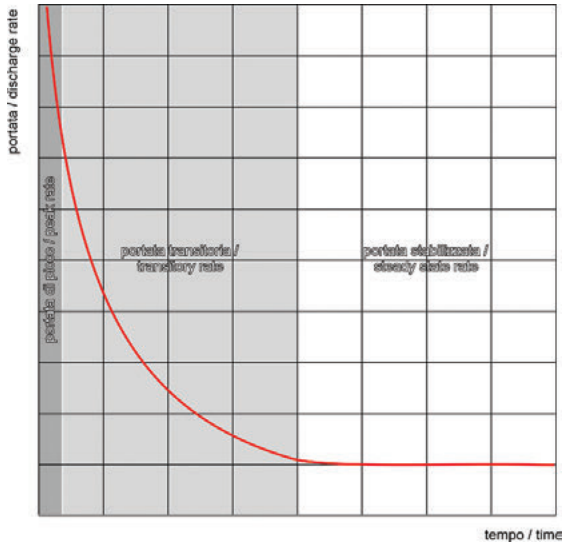

Fig. 4 - Curva di esaurimento delle venute d'acqua in galleria.
Fig. 4 - Depletion curve of water inflows into the tunnel.

Portata di picco

Nei primi istanti che seguono l'intercettazione di una venuta la diminuzione della portata procede molto rapidamente; i dati relativi a questi primi istanti della fase di svuotamento sono generalmente rari e disponibili solo per le venute principali in un tunnel. In questa fase la portata è influenzata dalla ricarica diretta del corpo acquifero intercettato dallo scavo.

Portata transitoria

La portata transitoria è riferita alla parte centrale e discendente della curva della Figura 4. Essa perdura fino a quando la pressione di svuotamento dell'acquifero che alimenta la venuta d'acqua non si equilibra con il sistema di flusso che lo alimenta. Questo periodo sarà più o meno rapido in funzione di vari fattori, tra cui il principale è la connettività dell'acquifero intercettato con i corpi idrici posti in superficie o con altri sistemi di flusso profondi. La maggior parte dei dati bibliografici disponibili possono essere riferiti a questo tipo di portata, perché sono stati analizzati in corso d'opera ma a distanze di qualche tempo (giorni-settimane) dall'intercettazione della venuta. Specialmente quando si analizzano tratte di gallerie lunghe e con venute diffuse, i dati cumulati sono sempre riferibili alle somme di venute che si trovano in questa fase evolutiva. Apparentemente dati relativi alle venute in questo stadio potrebbero risultare poco significativi, poiché spesso non è noto in quale tratto della curva si trovano le singole venute.

Portata stabilizzata

Dopo un certo tempo le portate tendono ad una fase di esaurimento; se l'ammasso roccioso acquifero si svuota

DOI 10.7343/as-2020-486

secondo il modello di Maillet (1905), la fase di esaurimento coincide con la coda della curva ad andamento esponenziale rappresentata in Figura 4 (lineare su un diagramma semi-logaritmico logQ - tempo). Questa fase può considerarsi generalmente effettiva solo dopo un certo tempo dalla fine dello scavo di un tunnel o di una sua tratta significativa, anche nell'ordine delle settimane o mesi. La portata stabilizzata risulterà più o meno importante in funzione del grado di connessione dell'acquifero intercettato con le zone di ricarica permanente generalmente poste in superficie.

2.2.2 Evoluzione della temperatura

Le osservazioni eseguite nei sondaggi profondi e nelle gallerie scavate hanno mostrato come la temperatura delle acque sotterranee sia in equilibrio con l'ammasso roccioso.

I dati disponibili derivano normalmente da misure realizzate in fori di sondaggi geognostici eseguiti sia dalla superficie a quota galleria che a partire dalle gallerie stesse (Rybach 1995; Hokr et al. 2014).

La temperatura del sottosuolo in profondità dipende dal gradiente geotermico e da fattori locali di tipo geologico e geologico strutturale come la natura della roccia e la sua conducibilità termica, la presenza di sistemi di fratturazione (anisotropie) e di circolazioni idriche nell'ammasso roccioso, oltre che dalla temperatura atmosferica a livello del suolo.

Nel passato, la stima della temperatura delle rocce a grande profondità era effettuata tramite formule empiriche a partire dalle osservazioni dirette nelle gallerie scavate oppure tramite lo sviluppo di formule analitiche (Andreae 1948) basate su una forte schematizzazione del massiccio roccioso.

Negli anni 1990, lo sviluppo informatico e delle tecniche di investigazione ha permesso l'utilizzo di modelli numerici. La previsione della temperatura a quota galleria prende in considerazione parametri come la temperatura in superficie in asse alla galleria, il gradiente geotermico locale e lo spessore della copertura. Per esempio, nei casi del tunnel del Sempione, del Monte Bianco e del Gottardo (Alpi) è stata mostrata una buona corrispondenza tra l'andamento della temperatura registrata e lo stato di fratturazione dell'ammasso permettendo di elaborare dei modelli teorici di previsione delle portate e delle temperature attese in galleria (Goy et al. 1996; Marechal et al. 1999).

La possibilità di intercettare venute d'acqua calda ha permesso di progettare (Pastorelli et al. 2003; Torri et al. 2014) e di realizzare impianti di valorizzazione del calore nelle immediate vicinanze dei portali delle gallerie (Rybach and Wilhelm 1995; Hufschmied and Brunner 2010).

2.2.3 Evoluzione dei caratteri geochimici delle acque

Il chimismo delle acque, come per le temperature, è valutato sulla base dei dati desunti dai prelievi in foro di sondaggio geognostico e dalle venute d'acqua in galleria oppure, in mancanza di questi, sulla base del modello idrogeologico proposto.

Per composizione chimica s'intende quella iniziale delle venute idriche. Si ipotizza che tale composizione rimarrà piuttosto stabile nei settori a permeabilità bassa e in assenza di fenomeni di dissoluzione. La concentrazione ionica potrà invece ridursi nei settori ad elevata permeabilità in cui il tunnel indurrà intensi fenomeni di richiamo di acqua di ricarica diretta o indiretta.

In termini generali il chimismo delle acque intercettate dalle gallerie sarà espresso in termini di concentrazione degli ioni principali in quanto essi sono generalmente monitorati con una certa continuità (Pastorelli et al. 2001).

Nei tunnel di più recente realizzazione sovente sono disponibili anche analisi relative alla composizione isotopica delle acque e relativa evoluzione nel tempo, che hanno contribuito a meglio caratterizzare i circuiti idrogeologici e gli impatti in superficie.

La stima dell'aggressività delle acque riportata sui profili idrogeologici si riferisce principalmente all'effetto sulle opere in calcestruzzo indotto dalla presenza di ione solfato. Le classi di aggressività si riferiscono alla Normativa tecnica UNI:EN 206:2016.

2.2.4 Impatto sulle acque superficiali e GDE

Il dato *as built* acquisito durante e dopo lo scavo assume maggior peso se comparato alle osservazioni e analisi derivate dai rilievi idrogeologici sia in galleria che in superficie. Nei lavori più recenti la disponibilità di dati di superficie è aumentata; tale disponibilità permette di acquisire informazioni sull'influenza dello scavo sulle sorgenti superficiali e sugli ecosistemi connessi al deflusso idrico sotterraneo. In tal senso, il monitoraggio ambientale e idrogeologico della componente idrica e biotica durante e dopo i lavori di scavo riveste un elemento ormai fondamentale per la progettazione di un'opera sotterranea e per il suo inserimento nell'ambiente.

2.3 Criteri di analisi del dato (creazione del database)

Lo scopo principale di questo capitolo è quello di fornire delle indicazioni o linee guida per la creazione di una base di dati storici e la loro messa in condivisione attraverso la realizzazione di un catalogo informatico di libero accesso per progettisti, committenti, imprese, ecc.

Di seguito sono quindi elencate le tipologie di dato utili per una corretta ed esaustiva analisi bibliografica. La lista è stata stilata in modo da risultare utile non solo all'utente consultatore del database ma anche per chi si dovesse trovare nell'opportunità di raccogliere dati *as built* perché coinvolto a vario titolo nella realizzazione di un'opera sotterranea.

Sulla scorta dei dati reperiti in bibliografia, ed in funzione delle esigenze di progettazione, sono state distinte 5 sezioni che concorrono ad ottenere un quadro completo del contesto dell'opera: i) informazioni generali sull'opera; ii) geologia; iii) geomeccanica / metodo di scavo; iv) idrogeologia; v) ecosistemi (*GDE*).

L'elenco che segue costituisce una traccia che, se pur già dettagliata, può essere implementata in funzione delle condizioni locali di ciascun progetto.

Per ogni sezione sarebbe auspicabile dunque poter raccogliere le seguenti informazioni:

i. Informazioni generali sull'opera
- Nome
- Settore geografico
- Tipologia (tunnel, di base, galleria parietale)
- Dimensioni (lunghezza/altezza/larghezza/diametro/ecc.)
- Spessore della copertura
- Eventuali valorizzazioni delle acque drenate dalle opere sotterranee

ii. Geologia
- Unità geologica
- Litotipo principale e secondario
- Contesto strutturale (giacitura principale)
- Temperatura dell'acqua drenata e/o dall'ammasso durante e dopo gli scavi
- Gradiente geotermico

iii. Geomeccanica / Metodi di scavo
- Classe RMR (*Rock Mass Rating*) media
- Tipo di fratturazione
- Presenza di terreni sciolti
- Metodo di scavo (tradizionale e/o meccanizzato) e velocità di avanzamento
- Tipo di rivestimento provvisorio e definitivo
- Impermeabilizzazione
- Presenza di sistemi di gestione delle venute d'acqua (dreni, nicchie, captazioni, sistema evacuazione acque, ecc.)

iv. Idrogeologia
- Temperatura della roccia durante e dopo gli scavi
- Tipo acquifero
- Permeabilità media
- Spessore acquifero attraversato
- Carico idraulico
- Tipo venuta acqua
- Estensione della zona di ricarica
- Tipo di portata: transitoria, di picco (faglia), stabilizzata
- Temperatura dell'acqua (min / max / med)
- Altri parametri chimico-fisici dell'acqua (pH, potenziale redox, conducibilità elettrica)
- Facies idrochimica e caratteristiche isotopiche
- Ecosistemi (*GDE*)
- Tipo di ambiente (sorgente, zona umida, lago, corso d'acqua, sistema carsico ecc.)
- Distanza e rapporti altimetrici con il tunnel
- Indicatori ecometrici
  - parametri chimico-fisici dell'acqua (portata, temperatura, facies idrochimica, ecc.)
  - parametri biotici (alghe, vegetazione, macro e micro-invertebrati, vertebrati, ecc.)
- Tipo di circuito idrico (profondo, superficiale, misto)
- Impatto previsto e/o registrato (*delay* temporale di manifestazione dell'impatto - questi ultimi aspetti possono essere rappresentati come percentili, ad esempio per fasce altimetriche o fasce di distanza).

3 STUDIO IDROGEOLOGICO

La progettazione di grandi opere nel passato ha comportato un approccio allo studio delle acque sotterranee prevalentemente di tipo "statico", ossia finalizzato alla valutazione dell'assetto piezometrico di riferimento per la progettazione geotecnica e strutturale (stima delle tensioni interstiziali, carichi idraulici sulle strutture, ecc.).

Negli ultimi 15 – 20 anni è invece fortemente aumentata la sensibilità, sia da parte dei progettisti che degli Enti di controllo, agli aspetti più strettamente ambientali e di tutela della risorsa idrica, anche a seguito della realizzazione di alcune grandi opere i cui effetti sull'ambiente idrogeologico non erano stati adeguatamente previsti e prevenuti e che hanno determinato conseguenti elevati costi economici ed ambientali.

In particolare, è emersa la necessità di integrare negli studi progettuali un approccio di tipo "dinamico" allo studio delle acque sotterranee, finalizzato a valutare le modificazioni nel tempo determinate dall'inserimento dell'opera sull'equilibrio degli acquiferi. Tali aspetti riguardano sia le modificazioni piezometriche, temporanee o permanenti, sia le conseguenze sulla conservazione e disponibilità della risorsa, nonché sugli ecosistemi dipendenti dalla falda.

Uno studio di progetto delle interferenze con gli acquiferi comporta l'applicazione di tecniche consolidate ma, comunque, in costante evoluzione, nel campo dell'idrogeologia, dell'idraulica sotterranea e del monitoraggio.

Lo strumento di valutazione delle interferenze è costituito dalle simulazioni di scenario, attraverso lo sviluppo di modelli concettuali e matematici (vedi anche Paragrafo 4.7.3), costantemente verificati e calibrati a partire dai risultati delle indagini geologiche e idrogeologiche e dal flusso di dati derivante dal monitoraggio nella fase *ante-operam*, di corso d'opera e *post-operam*.

L'obiettivo dei modelli di scenario è sempre la mitigazione diretta delle interferenze, attraverso *feedback* sull'attività di progettazione.

Per interferenze non mitigabili, ossia dove gli effetti sugli acquiferi non risultino eliminabili in assoluto od a costi economicamente sostenibili, gli interventi di minimizzazione o compensazione si rivolgeranno principalmente alla riduzione degli effetti socio economici degli impatti, attività che potrà comportare ancora l'applicazione delle medesime tecniche in un ambito più ampio, in particolare nello sviluppo di piani di approvvigionamento idrico alternativo di emergenza, di medio termine e definitivi (vedi anche Paragrafo 4.8.2).

Di seguito vengono pertanto sintetizzate le linee metodologiche ed operative per le attività di modellizzazione di scenario e di monitoraggio, in riferimento a diverse applicazioni, relative a grandi strutture inserite sia nell'ambito di acquiferi alluvionali di pianura sia in complessi idrogeologici fratturati.

3.1 Schema operativo delle attività

La valutazione di una grande opera in sotterraneo, dal punto di vista delle interferenze con gli acquiferi, deve seguire uno

DOI 10.7343/as-2020-486

schema logico ben definito con l'obiettivo di implementare le conoscenze e di definire in conseguenza il modello concettuale o numerico di riferimento a partire dalla fase di studio preliminare sino alla fase post-realizzativa di esercizio.

Tale schema operativo deve prevedere continui *feedback* sull'attività di progettazione e di cantiere, in modo da consentire, in ogni fase di realizzazione dell'opera, la previsione di interventi di tutela della risorsa oppure, dove ciò non risulti possibile tecnicamente, la compensazione degli impatti indiretti sul sistema socioeconomico e sulle eventuali componenti ambientali da tutelare.

Nella Figura 5 viene visualizzato schematicamente lo sviluppo nel tempo delle attività suddette. Obiettivo principale delle valutazioni idrogeologiche è la definizione del modello idrogeologico. Il conseguimento di tale obiettivo deve iniziare fin dall'avvio della progettazione preliminare che nello schema coincide con il tempo t = 0; deve quindi procedere con l'esecuzione delle distinte attività di studio idrogeologico finalizzate all'implementazione e definizione, *in progress*, del modello, sviluppandosi contestualmente alle fasi di avanzamento del progetto dell'opera e quindi con grado di approfondimento via via sempre maggiore e focalizzato sulle principali criticità.

Con preciso riferimento alle fasi di progettazione e di realizzazione dell'opera lo schema evidenzia il cronoprogramma di massima delle differenti attività di studio idrogeologico.

Le frecce rosse verticali hanno lo scopo di evidenziare il continuo contributo apportato dai risultati che emergono dalle singole attività all'evoluzione dello studio e alla definizione del modello nel corso dello sviluppo delle differenti fasi progettuali e realizzative dell'opera.

Parallelamente alla progressiva definizione del modello idrogeologico le frecce blu evidenziano il continuo *feedback* sull'attività di progettazione dell'infrastruttura stessa e degli interventi di riutilizzo e mitigazione delle eventuali interferenze.

È da sottolineare la necessità di seguire un percorso completo di valutazione attraverso tutte le fasi di progettazione, realizzazione e post-realizzazione dell'opera. Infatti, tutte le attività sono concatenate e conseguenti, rendendo poco efficaci sia valutazioni ed interventi di mitigazione "tardivi", ad opera conclusa, sia, viceversa, definiti in fase preliminare e non supportati da adeguati riscontri a seguito del monitoraggio di corso d'opera.

Lo schema di flusso di Figura 5 definisce in termini generali le attività nelle tre fasi, di progetto o di *ante-operam*, di cantiere e di esercizio o *post-operam*. Nello specifico le attività sono peculiari in relazione alle caratteristiche dell'infrastruttura ed alla tipologia dei complessi acquiferi, con particolare riferimento alle differenze tra complessi rocciosi fratturati o carsici a permeabilità per porosità secondaria (fratturazione, faglie, o carsismo) e complessi alluvionali a permeabilità per porosità primaria (sedimenti granulari).

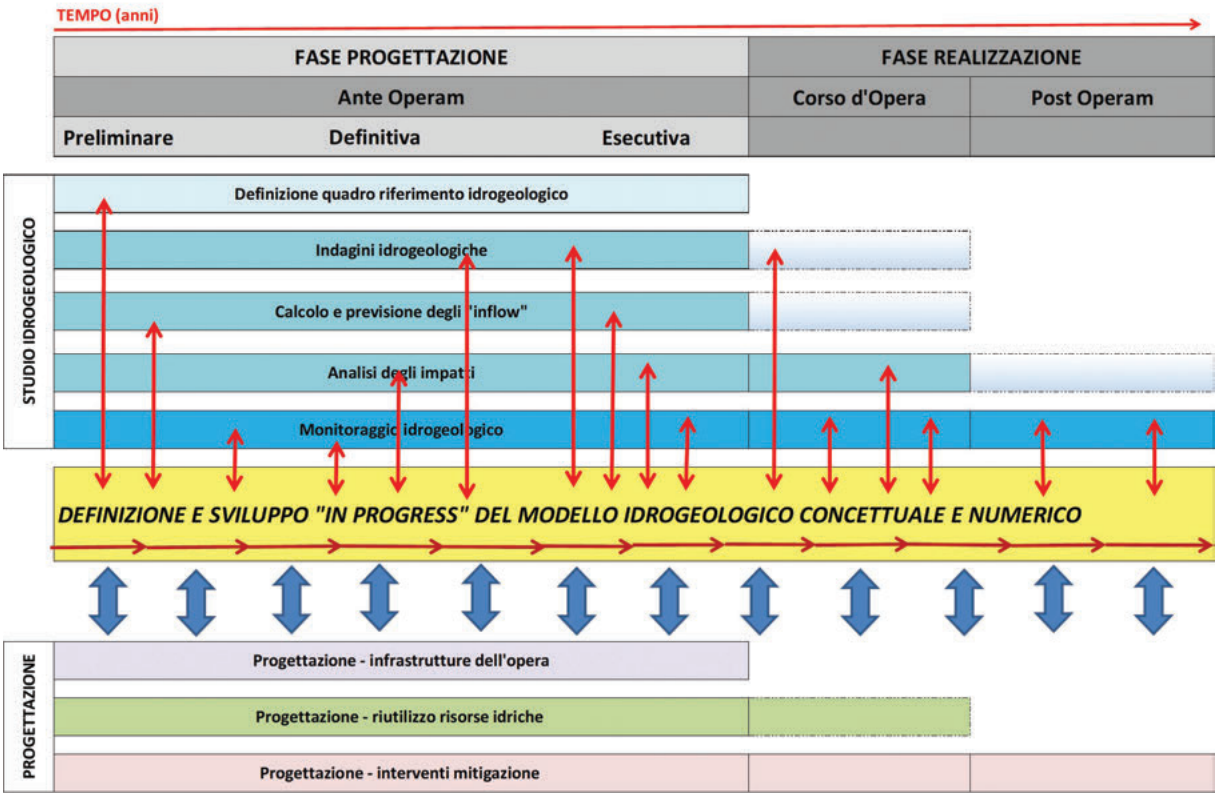

Fig. 5 - Schema di flusso per la definizione e lo sviluppo del modello idrogeologico concettuale e/o numerico di un'opera sotterranea. Il cronoprogramma delle attività, dalle fasi di studio e progettazione alla costruzione, compare in alto, le attività progettuali per la minimizzazione degli impatti idrogeologici in basso.

Fig. 5 - Flow chart for the definition and development of the conceptual and/or numerical hydrogeological model of an underground work. The time schedule of the phases, from study and design to construction, is shown at the top. The design activities for the minimization of hydrogeological impacts are shown at the bottom.

3.2 Il modello geologico: elemento fondante del modello idrogeologico

Sebbene possa apparire un'osservazione quasi ovvia, parlando di linee guida per gli studi idrogeologici relativi alle gallerie, è necessario premettere che non può esistere un modello idrogeologico affidabile in assenza di approfondite indagini ed analisi che abbiano permesso di ricostruire prima, o in parallelo, un modello geologico quanto più accurato ed affidabile possibile.

Anche a fronte di una caratterizzazione idrogeologica di alto dettaglio, che abbia ben approfondito tutte le proprietà idrauliche dei complessi coinvolti, nonché le problematiche idrogeochimiche o di rapporti di scambio con gli elementi del reticolo idrico superficiale, va sempre tenuto in mente che è sufficiente un errore significativo nel posizionamento di un contatto litologico o di un elemento tettonico con rilevante ruolo idraulico, per stravolgere l'intero impianto di un modello idrogeologico qualora questo elemento venga invece intercettato durante gli scavi. In questi casi, gli effetti sia a livello costruttivo che ambientale che ne derivano possono assumere dimensioni impreviste e difficilmente contrastabili con varianti in corso d'opera, se non con pesanti impatti economici, sociali e ambientali. L'intersezione imprevista con uno o più elementi con rilevante ruolo idrodinamico è sicuramente uno degli eventi più critici dal punto di vista della previsione idrogeologica e dei suoi impatti sull'ambiente.

Sebbene l'obbiettivo di queste linee guida non sia quello di fornire delle specifiche per indirizzare al meglio uno studio geologico per le opere in sotterraneo, viste comunque le importanti ricadute sul modello idrogeologico, vale la pena sintetizzare almeno alcuni concetti base e fornire degli elementi bibliografici a cui riferirsi per sviluppare un modello geologico di opportuno dettaglio.

Negli anni recenti sono stati pubblicati alcuni contributi di interesse riguardanti la tematica dell'affidabilità del modello geologico, da cui sostanzialmente è possibile derivare quali siano gli elementi chiave nello sviluppo di un tale modello e i criteri cui attenersi per metterlo a punto nel miglior modo possibile (Perello et al. 2003, Perello et al. 2005, Bianchi et al. 2009, Perello 2011, Dematteis and Soldo 2015).

La ricostruzione del modello geologico si dovrebbe sempre basare sulla somma di tre tipi di indagine: i) dati di superficie, ovvero rilevamento geologico, ii) dati da indagini dirette, ad esempio i sondaggi; iii) dati da indagini indirette, ovvero, principalmente geofisica. In tutti i casi, nella descrizione delle indagini all'interno del progetto, è necessaria una chiara distinzione tra il dato rilevato e quello interpretato, oltre che esplicitare le metodologie di scelta dei punti e di tipo di indagine adottata, al fine di tracciare il percorso logico e verificare l'informazione fornita, sia a fini progettuali che di controllo.

3.2.1 Rilevamento geologico

Il rilevamento geologico costituisce un elemento fondamentale soprattutto nei contesti montani e collinari, ove la complessità tettonico-stratigrafica è maggiore e i criteri di estrapolazione delle informazioni puntuali (indagini) possono essere dedotti principalmente dalle osservazioni specifiche su affioramenti. Senza entrare nel dettaglio, gli aspetti importanti nell'esecuzione del rilevamento di superficie sono:

- l'estensione su una zona al contorno del tunnel adeguatamente ampia, proporzionalmente maggiore al crescere della profondità dell'opera; per gli aspetti idrogeologici in particolare può essere importante, soprattutto per tunnel profondi, estendere l'areale almeno a tutti i bacini idrologici principali coinvolti; ovviamente il dettaglio può diminuire per le zone più lontane dal tracciato dell'opera, senza però ridursi ad un mero studio bibliografico; eventuali approfondimenti saranno sempre opportuni;
- un esame dettagliato di quanti più affioramenti possibile alla mesoscala è necessario, con criteri osservazionali non solo puramente geometrici ma genetici (analisi stratigrafica, rapporti di intersezione tra superfici ecc.);
- di estrema rilevanza, inoltre, per le problematiche idrogeologiche, sono le ricostruzioni stratigrafiche dei depositi quaternari e dei loro rapporti con i litotipi del substrato. I depositi quaternari infatti, in ambiente montano-collinare, sono sovente gli elementi principali per la ricarica delle sorgenti. Anche per tunnel profondi, la tematica dei rapporti geometrico-stratigrafici tra depositi quaternari ed elementi di rilevanza idrogeologica del substrato è fondamentale, benché spesso erroneamente sottovalutata in ragione della poca rilevanza ai fini delle previsioni geotecniche;
- con specifico riferimento alle problematiche idrogeologiche è importante, nel caso di sorgenti, in ambiente montano-collinare, eseguire dei rilevamenti di estremo dettaglio nell'immediato intorno delle sorgenti stesse, per determinare gli elementi geologici di sito che concorrono all'esistenza del punto di emergenza, che spesso è legato a delicati equilibri tra più fattori locali.

3.2.2 Indagini dirette

Le indagini dirette sono un elemento fondamentale in ogni contesto, dalle aree montane a quelle di pianura. Ovviamente la loro efficacia nel determinare risposte significative per le ricostruzioni geologiche varia molto da un contesto all'altro ed è funzione delle eterogeneità; nelle aree montano collinari, più complesse dal punto di vista strutturale, la capacità previsionale delle indagini dirette non può prescindere da uno studio di superficie molto dettagliato. Anche in questo caso è possibile delineare sinteticamente alcuni aspetti importanti da tenere in conto per la realizzazione di questi tipi di indagini:

- ovviamente il numero di sondaggi ha molta rilevanza nel determinare un risultato efficace; tuttavia va anche considerato che un corretto posizionamento dei sondaggi basato su un *pre-screening* operato con un'analisi critica dei dati di superficie, ove non ancora o non del tutto disponibili, può portare a risolvere problemi interpretativi meglio e più efficacemente che non un posizionamento acritico, anche se con esecuzione di un maggior numero di sondaggi;

DOI 10.7343/as-2020-486

- i sondaggi per lo sviluppo di un progetto infrastrutturale devono essere eseguiti interamente a carotaggio continuo; l'idea che sovente sia importante avere il carotaggio solo nell'intorno della posizione dell'opera è errato, poiché non prende in considerazione l'importanza della contestualizzazione generale e soprattutto non prende in considerazione la possibilità di correlare lateralmente, proiettandoli in profondità, dati raccolti a livelli del substrato più alti di quelli in cui puntualmente il sondaggio intercetta il tracciato;
- soprattutto per gli aspetti idrogeologici è importante disporre di indagini dirette per le coltri quaternarie, anche se poste molto al di sopra del livello dell'opera, per i motivi già precedentemente citati e legati alla rilevanza dei rapporti che intercorrono tra depositi e substrato; va altresì chiarito che in ogni caso, ma anche qui in particolare per gli aspetti idrogeologici, può essere fondamentale posizionare sondaggi anche a una certa distanza dall'asse dell'opera e non necessariamente con la finalità di raggiungere livelli del substrato comparabili a quelli dell'opera stessa, ma piuttosto di chiarire tematiche specifiche, quali ad esempio le già più volte citate tematiche dei rapporti tra depositi quaternari e substrato;
- benché carotati, per tutti i sondaggi è opportuno che, ove il foro si autosostiene, vengano eseguiti rilievi con *borehole televiewer* (BHTV) e ricostruzione geometrica degli elementi litologici e strutturali; tali indagini sono, ancora una volta, fondamentali per le ricostruzioni idrogeologiche, poiché la disponibilità di un rilievo BHTV permette una miglior contestualizzazione dei test idraulici che vengono eseguiti all'interno del foro e una loro estrapolazione anche ad altri tratti dello stesso sondaggio non testati per ovvie necessità di contenimento di tempi e costi.

3.2.3 Indagini indirette

Le indagini indirette possono essere di diverso tipo. Un primo aspetto importante è ovviamente quello di utilizzare il tipo di indagine più appropriato in funzione del contesto e di una approfondita analisi critica sull'efficacia delle risposte che tali indagini possono fornire; ciò permetterà di evitare inutili sprechi economici e un'ottimizzazione dei tempi, oltre che una migliore affidabilità del risultato finale. Queste indagini sono appropriate per investigare contesti anche profondi ma non eccessivamente complessi e ove esistono elementi in grado di determinare significativi contrasti di competenza, resistività ecc. In linea generale indagini di questo tipo possono ad esempio risultare fondamentali per definire l'andamento spaziale di contatti tra depositi quaternari e substrato, oppure la presenza di livelli con forte differenza di granulometria all'interno di depositi quaternari (limiti acquifero-aquiclude); sono invece poco efficaci per evidenziare elementi geologici all'interno di substrati cristallini, a meno che non si proceda con indagini di estremo dettaglio (stendimenti sismici o geoelettrici di lunghezza rilevante con spaziatura tra geofoni o elettrodi molto ridotta e forte energizzazione). Per questo tipo indagini le raccomandazioni principali sono essenzialmente due:

- procedere sempre ad una taratura dei risultati mediante sondaggi;
- procedere all'interpretazione dei dati in stretta collaborazione tra il team di geologi responsabile della creazione del modello geologico e il team di geofisici che esegue l'indagine.

3.2.4 Utilizzo dei migliori metodi scientifici

A livello generale, i criteri con cui si determina un modello geologico per un tunnel, soprattutto quando questo interessa tratte molto lunghe, devono essere di comprovata avanguardia scientifica. Ciò significa che, pur senza giungere ad approcci di analisi delle problematiche di un livello comparabile a quelli della ricerca scientifica, è necessario che i modelli di riferimento utilizzati, in termini di analisi geologico-strutturale, stratigrafica e anche petrografica, siano al passo con i più moderni avanzamenti delle conoscenze. In generale, i contesti geodinamico e stratigrafico regionale devono essere ben noti dalle fonti bibliografiche. Tenendo però presente che tali fonti sono in genere sviluppate per scopi diversi da quelli della progettazione di grandi infrastrutture e non entrano quindi nel dettaglio sufficiente, è necessario che siano sempre svolti degli approfondimenti di maggior dettaglio.

Attività spesso non eseguite in campo geologico applicativo, perché troppo prossime al campo della ricerca scientifica delle discipline geologiche di base, possono invece divenire dirimenti per stabilire l'esistenza di importanti elementi geologici talora non facilmente intuibili con altri mezzi perché sepolti o poco investigabili con le tipologie classiche di indagini. A titolo di esempio le analisi paleontologico-stratigrafiche, raramente utilizzate in campo applicativo, possono contribuire significativamente a ricostruire la successione di unità litologiche (e pertanto anche idrogeologiche) che saranno incontrate da una galleria, soprattutto in settori con scarsa disponibilità di continuità fra un affioramento e l'altro (es. numerosi settori dell'Appennino centro-meridionale). L'analisi strutturale alla meso-scala secondo criteri genetici con interpretazione delle successioni deformative può risultare importantissima per interpretare i dati forzatamente discontinui derivanti dai sondaggi in un settore orogenico complesso (es. catena Alpina). Similmente, in contesti quaternari e pliocenici, diventa importante il contributo della sedimentologia per una ricostruzione più affidabile delle geometrie di corpi a differente permeabilità.

3.2.5 Rappresentazioni e modelli 3D geologici

Un cenno merita poi la modalità di presentazione del modello geologico concettuale. Il modello è, di base, finalizzato a fornire una visualizzazione tridimensionale degli elementi geologici. Tale visualizzazione dovrebbe essere fornita mediante sezioni e profili verticali, posizionati in pianta in modo da intercettare le aree ritenute più critiche ed esemplificatrici delle problematiche generali.

Visualizzazioni mediante modellizzazioni numeriche sono anche auspicabili soprattutto per un loro successivo utilizzo in ambito modellistico idrogeologico. Tuttavia, è opportuno definire preliminarmente e con chiarezza la finalità di tali modelli 3D, oggi possibili mediante gli avanzamenti tecnologici intercorsi nell'ultimo decennio. Infatti, un modello 3D solido, che fornisca ovunque nell'intorno dell'opera un dettaglio di livello sufficiente a supportare la progettazione, è ottenibile solo con un elevato investimento in termini di tempi e costi, rischiando, in assenza di tali investimenti, di risultare del tutto inutile e talora anche fuorviante.

Per contro un modello tridimensionale a scopo di illustrazione generale della geologia, pur sempre utile per fare scelte progettuali di vasta scala, ma non per fare scelte progettuali di dettaglio, può richiedere un minor investimento e risultare ragionevolmente più utilizzabile. In generale è da suggerirsi la realizzazione di modelli geologici 3D di dettaglio solo per zone circoscritte dell'area di progetto ove esistono problematiche rilevanti, specificatamente di tipo idrogeologico.

3.3 Fase *ante-operam*

Le attività di studio e monitoraggio idrogeologico nella fase *ante-operam* devono condurre a definire il quadro naturale inalterato della circolazione idrica sotterranea di riferimento, e prevedere ogni successiva modificazione del regime idrologico connessa alla realizzazione dell'infrastruttura in progetto.

Alla base dell'analisi si colloca lo sviluppo del **modello idrogeologico concettuale di riferimento** attraverso: la ricostruzione strutturale dei rapporti tra i complessi acquiferi, la definizione dei regimi idrologici, delle aree di ricarica e delle modalità e profondità di circolazione idrica sotterranea, la valutazione dei termini del bilancio idrogeologico degli acquiferi interessati e dei parametri idrodinamici dei medesimi oltre alla caratterizzazione idrogeochimica.

A supporto della schematizzazione concettuale può essere sviluppato un modello analitico, classificativo o numerico, complessivo od in riferimento a sotto-modelli di dettaglio, attraverso l'applicazione di specifici codici di calcolo, la cui affidabilità sarà tuttavia proporzionale al grado di dettaglio ed approfondimento del modello concettuale di riferimento e dei dati fattuali disponibili per la taratura.

3.3.1 Modello idrogeologico concettuale

Lo schema di riferimento o "modello idrogeologico concettuale" è di fatto costituito da una rappresentazione tridimensionale, attraverso opportune sezioni stratigrafiche e idrogeologiche, della geometria degli acquiferi, dell'andamento di limiti e soglie di permeabilità, delle modalità di deflusso sotterraneo (zone di ricarica, di recapito, spartiacque sotterranei, linee di drenaggio, interscambi con la rete idrica, ecc.) e del campo di variabilità dei parametri idrodinamici ritenuto più rappresentativo per ogni formazione acquifera.

La definizione del modello di riferimento avviene attraverso le differenti attività elencate in Figura 5 che compongono lo studio idrogeologico ed in particolare:

- la definizione del quadro di riferimento dei dati idrogeologici disponibili;
- le indagini sperimentali;
- il monitoraggio idrogeologico.

La **definizione del quadro di riferimento** è un'attività bibliografica sistematica che ha l'obiettivo di acquisire dati e documentazione relativa alle risorse idriche del territorio interessato dal progetto. In particolare, deve essere acquisita:

- la documentazione ufficiale relativa alle concessioni idriche comprendenti anche le piccole e grandi derivazioni da corso d'acqua;
- qualsiasi censimento disponibile relativo a punti d'acqua (intesi come sorgenti, pozzi, piezometri, corsi d'acqua, aree umide);
- i dati storici idrometrici (livelli piezometrici, portata media delle sorgenti, portata di emungimento ecc..), idrogeochimici e di qualità;
- i dati meteoclimatici relativi a precipitazioni e temperature medie totali mensili e annue su stazioni storiche operanti nel territorio di studio da almeno un ventennio.

Il panorama italiano degli enti di possibile riferimento per competenze e conoscenze in materia di risorse idriche può essere frammentato, talvolta complesso e localmente mutevole, per cui il suddetto elenco è solamente indicativo; tuttavia, l'importanza dell'attività di acquisizione dati consiste proprio nell'individuazione di quelli che possono essere i principali soggetti interessati alle problematiche di interferenza delle risorse con le opere in progetto.

L'ente che al momento è preposto alla gestione delle concessioni idriche è generalmente la Provincia, oppure la Regione, ma può essere l'Agenzia Regionale di Protezione Ambientale (ARPA regionale), come nel caso dell'Emilia-Romagna (ARPAE). I contatti con gli enti preposti sono di fatto imprescindibili nell'ambito della definizione del quadro di riferimento idrogeologico.

Per quanto riguarda l'acquisizione dei dati meteoclimatici, dopo il trasferimento alle regioni, nel 2002, delle competenze dell'ex Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale (SINM), si fa riferimento ai dati rilevati dai Centri Funzionali Regionali (CFR), in alcuni casi costituiti all'interno delle ARPA. Sono spesso disponibili in rete sia i dati rilevati dai CFR sia quelli "storici" del Servizio Idrografico Nazionale, il che consente di norma di scaricare direttamente quanto necessario. In alcuni casi meno "fortunati", per le serie storiche più lunghe e complete deve essere fatto riferimento ai vecchi "Annali idrologici" editi dal SIMN.

Il quadro di riferimento deve essere completato dalla ricerca ed acquisizione di esperienze e studi in contesti analoghi a quello di indagine, per cui si rimanda a quanto trattato nel Capitolo 2.

Considerato già adeguatamente noto il contesto geologico, la definizione del modello idrogeologico concettuale avviene in base a **specifiche indagini sperimentali** che possono

DOI 10.7343/as-2020-486

essere in sintesi elencate:

- censimento dei punti d'acqua (sorgenti captate e non, pozzi) e censimento corpi idrici superficiali (corsi d'acqua e aree umide);
- caratterizzazione quali-quantitativa dei punti d'acqua, anche propedeutica alla definizione del piano di monitoraggio;
- prove specifiche per la valutazione dei parametri idrodinamici (prove di emungimento, di permeabilità in foro, analisi della portata d'esaurimento delle sorgenti), e per valutazioni sulla modalità di circolazione idrica (prove con traccianti, prove di emungimento);
- rilevamento geologico e geo-strutturale.

L'attività di censimento in campo dei punti d'acqua deve ampliare e sviluppare quanto emerso dalla preliminare definizione del quadro di riferimento su basi bibliografiche e di raccolta dati presso gli enti.

L'estensione dell'area da indagare è funzione del contesto di studio e indicativamente dovrebbe comprendere il bacino idrogeologico interessato dall'opera. Siccome la definizione dell'estensione dei bacini idrogeologici non è sempre scontata, soprattutto in fase di impostazione iniziale delle indagini, a titolo indicativo, almeno per gli ambiti montani, il censimento dovrà necessariamente essere esteso fino al limite dei principali bacini idrografici interessati dall'opera, includendo eventualmente, già in questa fase, anche bacini adiacenti qualora dalle ricerche bibliografiche risultino indizi di estensione dei bacini idrogeologici in tal senso. L'estensione dell'area di indagine potrà comunque variare in relazione a particolari contesti locali.

Nelle aree di pianura l'estensione delle aree di indagine potrà essere individuata in funzione della profondità delle opere e delle caratteristiche di permeabilità dei terreni, oltre che delle dinamiche della circolazione idrica sotterranea eventualmente individuate in studi precedenti.

Il censimento dei punti d'acqua costituisce una fonte di dati fondamentali per l'obiettivo di definizione del modello, pertanto deve essere svolta, o almeno direttamente coordinata, da personale di adeguata esperienza idrogeologica, in grado di acquisire e di filtrare con adeguata coscienza "critica" le informazioni acquisite per contatto diretto con i proprietari e i gestori delle risorse idriche individuate. Da questo punto di vista, va rilevato come spesso alcune caratteristiche del singolo punto d'acqua non siano informatizzate o sistematicamente archiviate, ma siano semplicemente a conoscenza dei tecnici che direttamente curano la gestione di tali opere, o dei privati cittadini che le hanno in concessione. Questo aspetto assume particolare importanza ai fini dell'affidabilità del dato rilevato: soprattutto nel caso di manufatti di non recente realizzazione, non sono rari i casi in cui, ad esempio, la portata di una sorgente captata debba essere misurata sommando quanto fuoriesce da più tubazioni in punti diversi.

Le informazioni emerse nel corso del censimento devono essere raccolte in schede monografiche per costituire un data base informatizzato implementabile.

Di rilevante importanza è anche il censimento dei corpi idrici superficiali, che deve essere esteso ai tratti di corso d'acqua relativi ai bacini idrografici sottesi dalle opere, salvo indicazioni differenti derivanti dal quadro geologico strutturale, oppure laddove non ci sia coincidenza tra bacini idrogeologici e idrografici. L'attività deve essere finalizzata a verificare la presenza di deflusso di base nei corsi d'acqua e deve quindi essere eseguita nei periodi di magra; di valore idrogeologico è la misura del tasso di diminuzione della portata di magra nel periodo a bassa ricarica per una stima delle risorse idriche sotterranee sottese. Sono utili misure di portata a quote diverse lungo il corso d'acqua, per lo meno a monte e a valle dell'intersezione con l'opera in sotterraneo. Dovranno essere censite e controllate opere di presa superficiale o di scarico nei tratti di interesse.

Contestualmente alle attività di censimento sia dei punti d'acqua relativi ad emergenze di sistemi di flusso sotterranei che dei corsi d'acqua superficiali, dovrà essere prevista l'esecuzione di misure di caratterizzazione quantitativa (portata, livello piezometrico) e qualitativa. Quest'ultima comprende essenzialmente determinazioni degli indicatori chimico-fisici di base (conducibilità, pH, temperatura) e degli ioni principali (ad esempio Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}, HCO_3^{-}, Cl^{-}, SO_4^{2-}, NO_3^{-}). In determinati contesti potrà essere utile anche la determinazione di alcuni isotopi (ad esempio ^{18}O, ^{2}H, utili a valutare la quota di infiltrazione delle acque, o ^{3}H, che può fornire indicazioni sui tempi di residenza delle acque), oppure quella di parametri indicatori di ricarica da circuiti particolarmente profondi di origine idrotermale (per esempio Li e Br) o ancora quella di parametri utili per la determinazione dello stato di riequilibrio termico in profondità del sistema (SiO_2). Le determinazioni chimiche ed isotopiche interesseranno un numero campione di punti d'acqua tra quelli più rappresentativi delle modalità di circolazione idrica. Tali valutazioni sono anche propedeutiche alla definizione del piano di monitoraggio idrogeologico (per il quale si rimanda anche ai Capitoli 8 e 10).

Le indagini per la valutazione dei parametri idrodinamici devono essere preventivamente pianificate nell'ambito delle indagini di progetto rivolte alla definizione del quadro di riferimento geologico - geotecnico.

Per l'ubicazione e le caratteristiche dei sondaggi i progettisti dovranno quindi interpellare l'idrogeologo al fine di ottimizzare il piano indagini anche in funzione delle esigenze di caratterizzazione idrodinamica degli acquiferi e con l'obiettivo di realizzare una rete piezometrica di controllo potenzialmente operativa fin dall'esecuzione delle indagini di progetto. Per questo motivo i sondaggi equipaggiati con piezometri non dovrebbero mai intersecare lo scavo in sotterraneo, per poter essere mantenuti attivi anche successivamente.

Sempre in fase di pianificazione delle indagini, con l'obiettivo di determinare i parametri idrodinamici in contesti particolarmente significativi dal punto di vista idrogeologico, dovrà essere prevista la possibilità di allestire pozzi/piezometri adatti all'esecuzione di prove di emungimento e piezometri limitrofi di controllo.

La caratterizzazione idrodinamica si basa frequentemente su prove di corta durata in foro di sondaggio, come ad esempio prove di tipo Lugeon o Lefranc, la cui utilità ai fini di caratterizzazione della permeabilità degli acquiferi è, tuttavia, limitata a validità puntuale. Per quello che riguarda in particolare le prove Lugeon, molto utilizzate in ambito italiano per la caratterizzazione idrogeologica dei mezzi fratturati, è importante notare che esse non sono prove ideate specificamente per valutare le caratteristiche idrogeologiche, bensì per stimare la iniettabilità dei mezzi fratturati con miscele cementizie. Il loro utilizzo a scopo idrogeologico deve basarsi su una scelta di gradini di pressione appropriati; in particolare spesso si utilizzano pressioni di iniezione particolarmente alte, che sono corrette per valutare l'iniettabilità, ma non per la stima degli aspetti idrogeologici, in quanto pressioni alte spesso determinano modificazioni del mezzo roccioso nell'intorno del foro alterando il risultato.

Più appropriate rispetto alle prove Lugeon possono risultare, per i mezzi fratturati, delle prove tra *packer*, a flusso o carico costante, eseguibili anche su fori di piccolo diametro. Queste prove, pur se su scala temporale e quantitativa (in termini di fluidi estratti/iniettati) ridotta, sono assimilabili a delle prove di emungimento di lunga durata. Alcune ditte specializzate si sono dotate negli ultimi anni dei dispositivi adatti all'esecuzione di tali prove, la cui esecuzione sta diventando sempre più frequente. Un'ultima annotazione in merito ai test appena citati e alle prove Lugeon, va fatta circa la lunghezza della camera di prova da mettere in opera per i mezzi fratturati. Tale lunghezza va scelta in funzione della scala a cui la permeabilità del mezzo è ritenuta significativa. Camere di prova troppo corte (metro o pochi metri) rischiano di restituire valori di permeabilità relativi a singole o poche fratture e di non considerare la connettività su scala decametrica-ettometrica tra tali fratture, che invece è il vero parametro significativo quando si ragiona di scavi per le gallerie.

Le prove di emungimento di medio-lunga durata consentono di caratterizzare più ampie porzioni dell'acquifero nel mezzo poroso e possono essere utilizzate anche per la caratterizzazione degli acquiferi fratturati. Per questi ultimi i risultati sono rappresentativi di singoli tratti acquiferi e meno dell'acquifero nel suo complesso. La modellizzazione della prova di emungimento in regime transitorio permette di caratterizzare anche i parametri di immagazzinamento dinamico.

Al fine di valutare i rapporti tra i deflussi superficiali e sotterranei, oltre alle citate misure di portata, nel reticolo idrografico potranno essere adottate misurazioni per mezzo di traccianti, che costituiscono un'importante tecnica di riferimento per situazioni specifiche non esclusivamente legate ai particolari contesti carsici.

Nei contesti in cui possono essere eseguiti rilievi geo-strutturali di superficie, le discontinuità degli ammassi rocciosi interessati dagli scavi vengono caratterizzate in termini di apertura, spaziatura, persistenza, rugosità, condizioni idrauliche, riempimento delle discontinuità e loro assetto spaziale. In tal modo viene stimata la conducibilità idraulica degli ammassi indagati, anche se va tenuto conto delle criticità nel trasferire il dato geomeccanico di affioramento al contesto dell'unità acquifera in profondità. Da questo punto di vista, assumono una certa importanza anche i rilievi con telecamera in foro (ad es. BHTV, ATV), che forniscono indicazioni sull'orientazione delle discontinuità in profondità, che possono essere correlate con quelle individuate dal rilevamento superficiale.

Sulla base dei risultati delle indagini idrogeologiche e di una prima definizione del modello concettuale deve essere anche predisposto un adeguato piano di monitoraggio idrogeologico finalizzato al controllo sperimentale con strumentazione automatica oppure mediante campagne di misura delle dinamiche degli acquiferi nel vasto arco temporale che comprende la realizzazione del progetto (fase *ante-operam*, corso d'opera e *post-operam*). Tale attività certifica la disponibilità quali-quantitativa delle risorse idriche prima dell'esecuzione di qualsiasi opera (*ante-operam*), contribuisce alla definizione oppure, con il continuo apporto di dati, alla ricalibrazione *in progress* del modello idrogeologico e ai conseguenti *feedback* per la progettazione (si veda il Capitolo 8 per i dettagli sui piani di monitoraggio).

Il modello idrogeologico concettuale di circolazione idrica viene quindi sviluppato sulla base di:

- analisi di regime delle precipitazioni e ricarica degli acquiferi:
  - quadro climatico;
  - bilancio idrogeologico dell'acquifero o degli acquiferi di interesse – stima dell'infiltrazione efficace (analisi e calcolo degli indici areali relativi ai parametri che determinano la capacità di infiltrazione e valutazione dei volumi medi annui di infiltrazione competenti alla struttura di interesse);
  - verifica per confronto fra la ricarica stimata al punto precedente ed il valore di *discharge* del sistema basato sulle misure di portata delle sorgenti o del deflusso di base dei corsi d'acqua;
- interpretazione dei dati idrochimici ed isotopici quando disponibili;
- interpretazione dei rilievi strutturali;
- individuazione ed interpretazione delle strutture tettoniche di rilievo;
- verifica ed analisi dell'eventuale carsismo;
- correlazione con strutture fragili (ad esempio faglie, giunti);
- definizione delle caratteristiche complessive dei circuiti idrici di alimentazione;
- planimetrie dei complessi idrogeologici, carta isopiezometrica, sezioni idrogeologiche.

3.3.2 Modelli numerici

I modelli numerici per la simulazione del flusso, in affiancamento alle più tradizionali tecniche di monitoraggio, costituiscono strumenti e standard di lavoro di grande utilità per la progettazione di opere in sotterraneo. Un approccio

DOI 10.7343/as-2020-486

deterministico consente di definire soluzioni ottimizzate sotto il profilo sia dell'affidabilità che della minimizzazione dei costi e degli impatti.

Le tecniche di studio e progettazione di interventi in falda hanno subìto negli ultimi anni un rilevante avanzamento, a seguito sia dell'innovazione nel campo del calcolo numerico, sia dell'evoluzione normativa che ha richiesto un approccio di tipo sempre più deterministico anche alle problematiche di idrologia e idraulica delle acque sotterranee.

La modellazione numerica deve schematizzare il contesto di simulazione di ambienti anche marcatamente eterogenei, come ad esempio gli acquiferi fratturati.

Nell'ambito della progettazione di una infrastruttura in galleria, la modellazione numerica dovrebbe venire inizialmente predisposta in sede progettuale ed essere poi sviluppata progressivamente durante le fasi di avanzamento del progetto dell'opera, con grado di approfondimento via via sempre maggiore e focalizzato su obiettivi specifici che possono essere a **carattere locale** o di più **larga scala**.

Durante la progettazione, la **modellazione a carattere locale** trova un'efficace applicazione in settori critici, in settori aventi condizioni specifiche oppure in settori chiaramente delimitabili da strutture geologiche di primaria importanza, con finalità rivolte ad esempio a:

- simulazione di condizioni idrogeologiche specifiche emerse da studi strutturali, eterogeneità delle caratteristiche di conducibilità idraulica in settori interessati dalle opere;
- scelta delle soluzioni di drenaggio più efficaci da adottare in fase di cantiere per l'abbattimento delle pressioni sul fronte di scavo, in diverse condizioni tipologiche di permeabilità e carico idraulico, o di mitigazione dell'effetto diga, in particolare in caso di acquiferi di pianura in aree urbane;
- verifica e controllo di valutazioni effettuate con metodi analitici (si veda anche Paragrafo 4.7) o empirici (per esempio Heuer 1995, 2005).

A differenza degli scenari locali, i **modelli a larga scala**, introducono necessariamente semplificazioni per descrivere sistemi idrogeologici complessi e richiedono una conoscenza di dettaglio non sempre ottenibile al di fuori dell'asse e della fascia interessata dalle opere in progetto. Tali modellazioni numeriche, che comunque presuppongono la disponibilità di un modello concettuale di riferimento completo ed affidabile e di sufficienti dati per la calibrazione, consentono di ottenere un livello di conoscenza superiore a quanto derivante dagli schemi e modelli concettuali. Essi permettono, tra l'altro, di controllare l'entità degli afflussi in galleria all'equilibrio con la ricarica, ovvero la stima delle portate drenate e gli effetti *post-operam* sul sistema idrogeologico in funzione della specifica capacità di ricarica degli acquiferi.

Pertanto, i modelli di larga scala, a differenza degli scenari locali, hanno finalità di caratterizzazione alla scala di bacini idrogeologici, in termini di:

- bilancio idrogeologico *ante-operam*;
- bilancio idrogeologico *post-operam*;
- effetti complessivi, e per aree, sulle risorse idriche in superficie.

In entrambi i casi, particolare cura andrà posta nella corretta interpretazione ed utilizzo dei dati di base (si veda il precedente Paragrafo 3.2) ai fini della modellazione, aspetto cruciale per l'affidabilità del risultato della modellazione.

Gli strumenti di modellazione dovranno essere flessibili ed aggiornabili nelle differenti fasi del progetto. Dovranno, in particolare, essere disponibili strumenti di calcolo gestibili con livello crescente di dettaglio delle geometrie e dei parametri idrogeologici.

È importante, infine, ribadire che i modelli numerici più complessi possono essere applicati solo se supportati da un'adeguata caratterizzazione sperimentale sviluppata nell'ambito delle indagini e del monitoraggio idrogeologico, che consenta l'elaborazione di un dettagliato modello concettuale del sito ed una adeguata calibrazione delle simulazioni numeriche eseguite. Anche nel Paragrafo 4.7 è ripreso questo concetto.

L'implementazione di un modello di simulazione numerica, a partire dal modello concettuale, ha significato soprattutto per gli ambienti aventi un ridotto grado di "complicazione" geologico-strutturale, dove, cioè, ogni elemento del modello concettuale possa essere adeguatamente parametrizzato. In ambienti idrogeologici di particolare complessità l'applicazione di un modello numerico si basa necessariamente su schematizzazioni spinte e sull'attribuzione di variabili in parte aleatorie, costituendo pertanto uno strumento di valutazione parametrico più che specificamente deterministico.

In tal senso la modellazione numerica è uno strumento che deve essere utilizzato a differenti livelli, adeguando gli strumenti di calcolo al grado di complicazione del modello concettuale. A riguardo vi sono importanti differenze nelle applicazioni modellistiche tra acquiferi porosi, come i complessi alluvionali di pianura, e gli acquiferi fratturati.

Le simulazioni numeriche, necessariamente semplificate, vengono solitamente eseguite in regime stazionario. Tale condizione costituisce un necessario standard per la maggior parte dei modelli di scenario riferiti a complessi acquiferi fratturati, sia per la carenza di dati di calibrazione tempo-dipendenti a supporto di simulazioni in regime transitorio, sia, in particolare, per la scarsa attendibilità in tali contesti delle metodologie per la valutazione dei parametri di immagazzinamento dinamico.

Tenuto conto dei suindicati limiti, derivanti già dalla fase di caratterizzazione a livello di schema concettuale, nelle condizioni in esame di flusso nel mezzo fratturato il modello deve essere calibrato sulla base:

- dei dati piezometrici localmente disponibili a livello delle opere sotterranee in progetto;
- del bilancio di massa a scala di bacino idrogeologico: le varie componenti del bilancio idrogeologico (ricarica diretta e laterale, prelievi antropici, deflusso superficiale) devono "chiudere a zero", o presentare discrepanze compatibili con il livello di incertezza sui parametri idrogeologici, ed in particolare vi deve essere una rispondenza con la stima di *discharge* (scarico) dei sistemi di circolazione idrica sotterranea;

BOX 2 - Scelta dell'approccio modellistico per la simulazione del flusso

Mentre negli acquiferi porosi si può assumere sempre valida la Legge di Darcy, negli acquiferi fratturati (o carsici) la validità di tale legge non è scontata, a causa della disomogeneità del mezzo: pertanto si può valutare l'applicazione di un approccio di tipo discreto, con simulazione del flusso nelle singole fratture (*Explicit Discrete Fracture, EDF*, o *Discrete Fracture Network*, DFN), oppure di un approccio del mezzo poroso equivalente (*Equivalent Porous Medium*, EPM), che consiste nel mediare le proprietà idrodinamiche della matrice rocciosa e delle discontinuità su un volume sufficientemente ampio da poter essere considerato statisticamente rappresentativo (*Representative Elementary Volume*, REV).

Gli approcci più utilizzati nella modellistica numerica delle acque sotterranee sono basati sul calcolo alle differenze finite (FD) e agli elementi finiti (FEM).

I codici di calcolo FEM hanno maggiori potenzialità sia per la possibilità di adattamento ai domini di forma complessa tipici dei contesti di insieme acquifero – galleria nei problemi di idrologia sotterranea in ambito di progettazione, sia per la flessibilità dei sistemi di risoluzione di problematiche complesse.

Nella Figura 6 viene riportato il confronto sul piano orizzontale e verticale tra discretizzazioni di modello FD e FEM. Nei sistemi FD gli elementi del modello concettuale, al fine di essere riprodotti nella corretta geometria sulla base di righe e colonne ortogonali, richiedono elementi parallelogrammi e un adattamento a gradini sul piano verticale. Ne consegue che schematizzazioni complesse risultano fortemente approssimate ed è comunque difficile riprodurre superfici irregolari ed acclivi, come ad esempio zone di faglia o fratturazione verticali o molto inclinate.

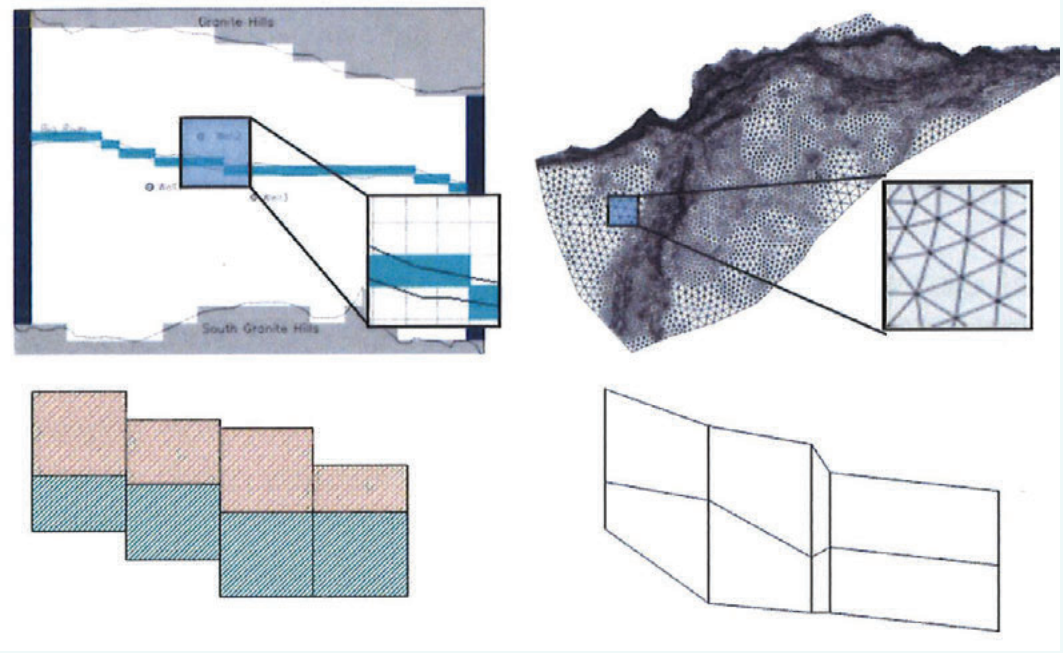

Fig. 6 - Confronto tra modelli di simulazione 3D: discretizzazioni rettangolari alle Differenze Finite (FD - a sinistra) e triangolari nei modelli a elementi finiti (FEM - a destra).

Fig. 6 - Comparison between 3D simulation models: Finite Difference Model with rectangular mesh (FDM – left) and Finite Element Model with triangular mesh (FEM – right).

I più recenti modelli FEM consentono la costruzione della griglia sulla base di elementi grafici vettoriali (puntuali, lineari e poligonali) che definiscono il modello geologico concettuale e le strutture garantendo la coincidenza degli schemi tridimensionali di modello e di progetto. La deformabilità degli elementi anche sul piano verticale consente l'adattamento a superfici fortemente inclinate o ripiegate. Sostanzialmente, quindi, molti strumenti modellistici, con particolare riferimento ai classici e diffusi FD, presentano limiti e importanti rigidità che costituiscono in alcuni casi elementi critici per l'affidabilità del modello. Tali elementi di criticità possono non risultare evidenti nelle prime fasi di studio di un'opera in sotterraneo, ma risultare decisivi in fase di approfondimento e richiedere *in progress* una modifica radicale dell'approccio e degli strumenti di calcolo.

I modelli FEM sono strumenti caratterizzati da estrema flessibilità, sia per la maggiore adattabilità della griglia di calcolo agli elementi strutturali e idrogeologici, sia per la capacità di affrontare, in un unico ambiente di simulazione, tutte le problematiche e le condizioni che caratterizzano un problema progettuale, anche secondo approcci a complessità crescente a seconda della disponibilità ed attendibilità dei dati, dalle prime fasi di studio comparativo delle soluzioni di progetto, alla fase di cantiere, a quella di gestione dell'opera ultimata.

Il modello concettuale costituisce lo schema di riferimento per l'implementazione di successivi sotto-modelli numerici, finalizzati ad una più spinta caratterizzazione quantitativa dei fenomeni descritti a livello prevalentemente qualitativo dal modello concettuale stesso, dove la disponibilità di dati relativi ai parametri idrodinamici degli acquiferi lo consenta.

DOI 10.7343/as-2020-486

- di una verifica a scala più ampia della rispondenza, in funzione delle assunzioni effettuate, con lo schema generale di circolazione idrica sotterranea (circolazione di versante, adattamento della piezometria agli spartiacque principali, ecc.).

Con riferimento a quest'ultimo punto, nelle condizioni in esame la calibrazione del modello, nella schematizzazione del regime permanente, costituisce un processo relativamente "affidabile", anche in carenza di dati piezometrici puntuali.

In riferimento allo schema di flusso dell'attività di cui alla Figura 5, la successiva evoluzione del modello è costituita dall'applicazione come strumento di supporto alle decisioni (*Decision Support System*, DSS), attraverso la sovrapposizione di elementi di progetto nelle differenti alternative che di norma sono oggetto di valutazione nella fase di studio e progettazione preliminare di un'opera complessa.

Questo processo consiste dunque nella verifica di differenti soluzioni di progetto, come in particolare alternative di tracciato in galleria, localizzazione di finestre e discenderie, particolari interventi di mitigazione, ecc., caratterizzate da specifiche condizioni di impatto sul sistema idrico sotterraneo.

In regime stazionario, il risultato di interesse del modello di scenario ai fini del processo decisionale è costituito dal campo di alterazione delle condizioni piezometriche indotto dall'opera. Tale indicazione si ottiene confrontando, attraverso le usuali tecniche di calcolo in ambiente GIS, il campo dei carichi statici con quelli riferiti all'opera inserita, calcolati dal modello di simulazione.

BOX 3 - Esempi di simulazioni numeriche del flusso dell'acqua sotterranea in acquiferi permeabili per fratturazione e porosità

Nella Figura 7, la scala cromatica rappresenta la variazione di carico piezometrico della falda corticale di versante, conseguente all'inserimento della galleria, drenante per l'intera lunghezza, per una delle opzioni di tracciato oggetto di studio. L'acquifero fratturato è costituito da calcari e calcari marnosi. La linea in tratteggio blu rimarca il limite con formazioni argillose a permeabilità molto bassa.

L'esempio evidenzia la possibilità, già dalla fase progettuale *ante-operam*, di definire attraverso il modello di scenario l'effetto dell'inserimento dell'opera nell'ambiente idrico sotterraneo ed in particolare il settore di potenziale influenza sulle sorgenti in superficie, ovvero dove il modello evidenzia un'alterazione nel campo piezometrico della falda di versante nella situazione di progetto.

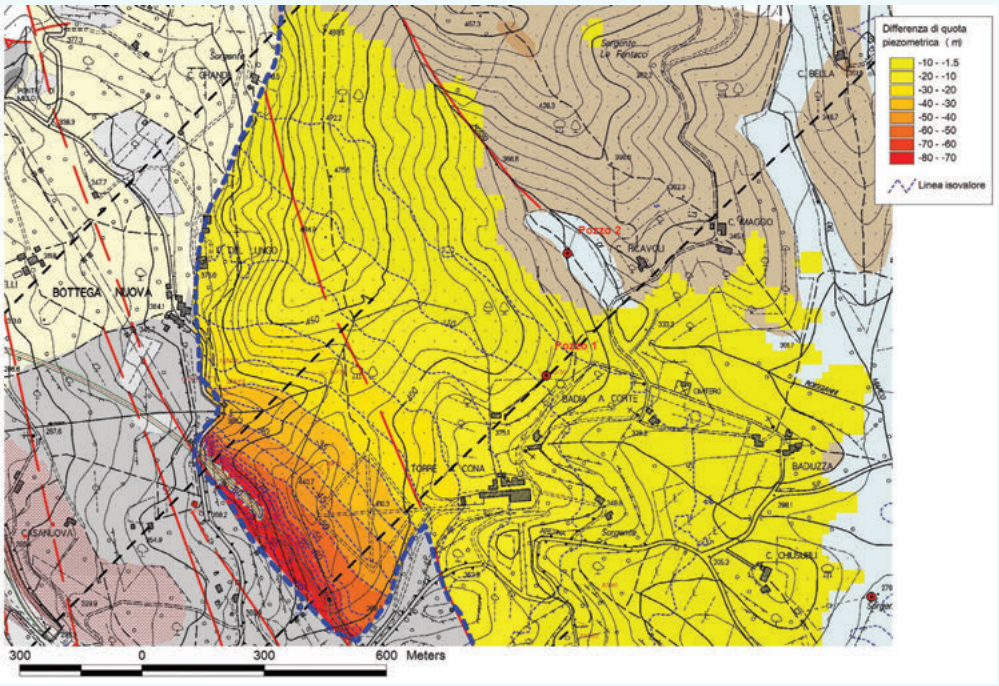

Fig. 7 - Modello di scenario (realizzato con il codiceFEFLOW®), riferito all'abbattimento della falda corticale di versante, nell'ambito della verifica preliminare di differenti soluzioni progettuali di tracciato in galleria. La campitura giallo-rossa rappresenta la progressiva differenza di carico piezometrico, sovrapposta allo schema geologico di riferimento. La linea tratteggiata blu rappresenta il limite delle unità argillose impermeabili (campitura in grigio).

Fig. 7 - Scenario model (FEFLOW® code used) representing lowered surface water table as a result of drainage by different tunnel alignments. The drawdown is represented by the yellow-red chromatic scale, superimposed on the reference geological scheme. The blue dotted line represents the limit of the impermeable clay units (in grey on the map).

Si tratta nel caso in esame di un valido esempio di applicazione di un modello di scenario alla fase decisionale, in quanto tale risultato consente di valutare l'estensione dei potenziali effetti in superficie (da cui le condizioni di rischio per pozzi e sorgenti), e, in base ad un giudizio di compatibilità di tali effetti, validare la soluzione di tracciato, o viceversa optare per la verifica di altre soluzioni progettuali, come ad esempio un tracciato nelle limitrofe Unità argillose a permeabilità molto bassa, in un processo iterativo di verifica del progetto.

Nel caso degli acquiferi porosi di pianura, la modellazione numerica ha di norma un livello di definizione largamente superiore rispetto al caso degli acquiferi fratturati, per la maggiore omogeneità stratigrafica e delle caratteristiche idrauliche, oltre che in generale per la maggiore disponibilità di punti per misure piezometriche.

La caratterizzazione idrodinamica può essere ben definita in contesti acquiferi permeabili per porosità mediante un approccio in *back-analysis* riproducendo le condizioni di prova con una modellazione numerica basata su dati sperimentali. Nel caso della realizzazione di un sottopasso ferroviario sottofalda in un acquifero alluvionale ad elevata permeabilità, per esempio, sono stati valutati gli effetti transitori e permanenti indotti dalla realizzazione dell'opera mediante pompaggio in regime stabilizzato a portata costante, entro un tratto di trincea corrispondente ad un primo lotto di scavo già realizzato (Fig. 8).

Ottenuta la caratterizzazione idrodinamica mediante *back analysis*, il modello è poi stato utilizzato come strumento previsionale per la valutazione delle portate di emungimento necessarie per l'aggottamento anche nei tratti non scavati, e delle relative aree di influenza. Nella sottostante Figura 8, compaiono un'immagine (a sinistra) riferita ad una prova di emungimento in trincea di sottopasso stradale finalizzata al dimensionamento, mediante modello numerico, dell'impianto di drenaggio necessario nella fase di cantiere, ed una rappresentazione (a destra) delle modificazioni permanenti indotte dall'opera sul regime della falda e dei fontanili di pianura presenti nel settore ed importanti ai fini irrigui.

L'inserimento nel modello dell'opera finita, totalmente impermeabile, consente la valutazione dello scenario di esercizio dell'opera in riferimento alla presenza di una barriera di flusso, un aspetto che è comunemente da valutare nell'ambito della realizzazione di opere in sotterraneo non profonde in acquiferi di pianura (Fig. 9). Tale barriera determina una condizione di incremento della quota di falda verso monte e depressione verso valle rispetto alla direzione di flusso sotterraneo.

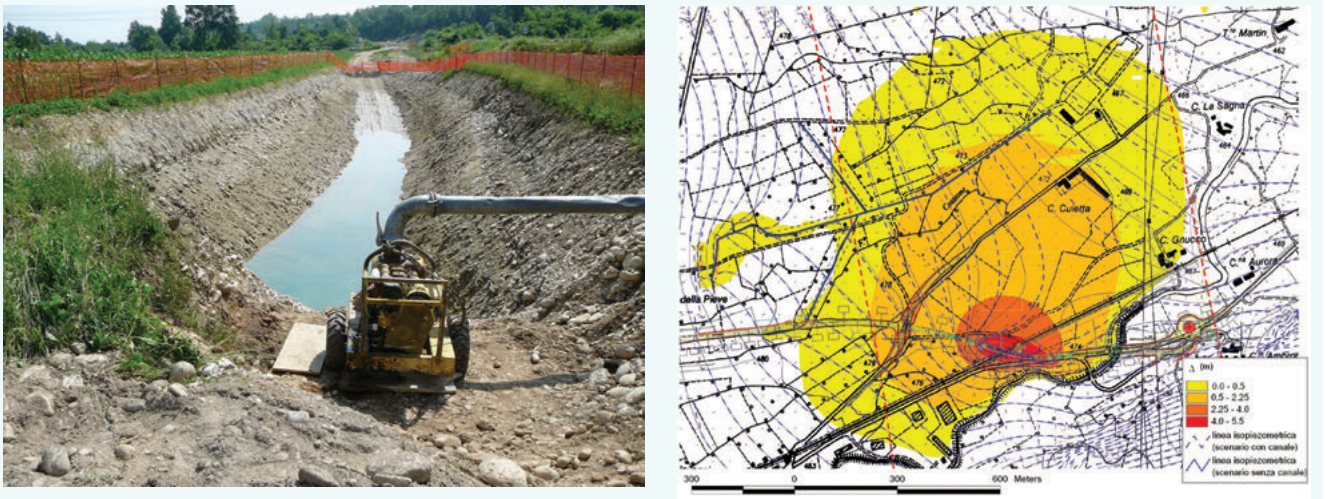

Fig. 8 - Prova di emungimento (sinistra) in trincea di sottopasso stradale, finalizzata al dimensionamento dell'impianto di drenaggio necessario in fase di cantiere e delle modificazioni permanenti indotte dall'opera sul regime della falda e dei fontanili di pianura. Rappresentazione di un modello di scenario (destra) sviluppato a supporto del processo decisionale per la scelta della soluzione definitiva: lo scenario è relativo all'abbattimento della falda in corso d'opera mediante lo schema di aggottamento progettato.

Fig. 8 - Pumping test (left) on the road underpass draining aimed at verifying the permanent modification induced on the water table and on surrounding springs. Scenario model (right) developed to support the decision-making process for identifying the best design solution for the road underpass.

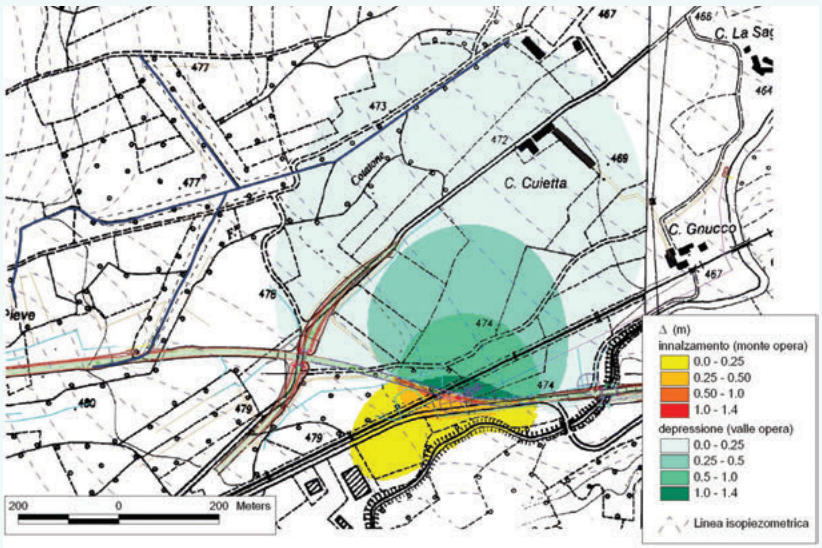

Fig. 9 - Scenario di modificazione permanente dei livelli di falda freatica (effetto barriera) a seguito della definitiva impermeabilizzazione dell'opera sotterranea (elaborazione dati mediante codice FEFLOW® - Finite Element subsurface FLOW system).

Fig. 9 - Scenario related to the permanent modification of water table levels (barrier effect) following the final waterproofing of the underground structure (data processing by FEFLOW® code - Finite Element subsurface FLOW system).

DOI 10.7343/as-2020-486

3.4 Fase di corso d'opera

Con riferimento allo schema delle attività in Figura 5 e alle indicazioni di carattere più generale riportate nel Paragrafo 8.4, nella fase di corso d'opera è prevista la conduzione di un monitoraggio mirato alla verifica quantitativa delle condizioni definite sulla base dei modelli di scenario nella fase *ante-operam.*

Sulla base del flusso dei dati di monitoraggio, oltre che dei dati stratigrafici provenienti dalla realizzazione dell'opera in sotterraneo (es. revisione in avanzamento del profilo geologico di progetto lungo l'asse galleria), è possibile verificare ed eventualmente apportare variazioni al modello idrogeologico concettuale ed ai suoi eventuali sviluppi matematici analitici o numerici, solo dove vi siano scostamenti rilevanti rispetto alle previsioni di cui alla fase precedente.

3.4.1 Criteri per il monitoraggio idrogeologico in corso d'opera

Il monitoraggio di corso d'opera (vedi anche quanto riportato negli specifici Paragrafi 8.3 e 8.4) è di norma riferito ai seguenti obiettivi, tra loro direttamente connessi per rapporto di causa-effetto:

- la verifica dei volumi di drenaggio indotto dall'opera, o degli aggottamenti funzionali a mantenere l'area di cantiere in assenza d'acqua;
- la verifica degli effetti al contorno dell'area di cantiere sul regime piezometrico e sul sistema di pozzi, sorgenti e deflusso di base dei corsi d'acqua.

Analogamente alla fase *ante-operam,* vi è una differenza di approccio metodologico nel monitoraggio in riferimento ad opere in acquiferi alluvionali di pianura ed in sistemi fratturati.

In particolare, nel caso di opere drenanti in acquiferi di pianura il controllo dei volumi di drenaggio è di norma riferito agli aggottamenti di cantiere effettuati per consentire le condizioni di sicurezza nell'area di lavoro o alla realizzazione di paratie o diaframmi con effetto barriera. In tal caso il monitoraggio consiste nel controllo tramite contatore volumetrico della portata di aggottamento e delle modificazioni piezometriche nell'intorno, da cui la verifica delle previsioni effettuate con il modello di flusso.

Nei sistemi fratturati il monitoraggio per gallerie drenanti è più complesso in quanto l'andamento del drenaggio è riferito ad una fase transitoria di abbattimento della piezometrica, seguita da una stabilizzazione in regime di equilibrio con la ricarica. Il drenaggio in galleria non è, inoltre, di norma, riferito ad un unico acquifero continuo, ma, più frequentemente, a complessi ed unità idrogeologico-strutturali distinte ed è fortemente concentrato a ridosso delle principali linee di discontinuità. In relazione allo stato di avanzamento della galleria il regime di portata ha un andamento complesso, riferito all'esaurimento e successiva stabilizzazione in regime di equilibrio delle venute lungo le fasce fratturate via via intercettate al procedere dello scavo.

In considerazione proprio della grande variabilità delle portate in galleria nella fase di cantiere e della necessità di

BOX 4 - Evoluzione nel tempo delle venute d'acqua in galleria

Un esempio dell'andamento degli ingressi d'acqua in una galleria drenante poco profonda in un mezzo fratturato è riportato nel grafico di Figura 10. Si può osservare come ad una fase di esaurimento delle portate a partire dai picchi raggiunti in corso d'opera, a seguito dello svuotamento delle principali fasce fratturate, segua un periodo di equilibrio delle portate drenate con la ricarica, che è correlabile con il regime stagionale delle precipitazioni in superficie.

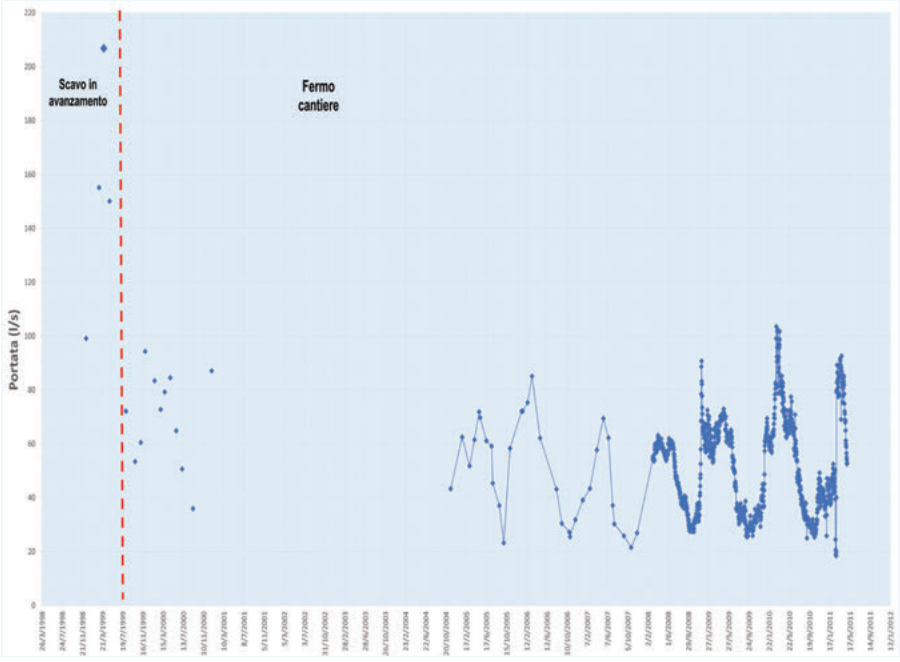

Fig. 10 - Portate drenate durante l'avanzamento dello scavo della galleria: misure eseguite dapprima manualmente mediante campagne di terreno (a sinistra-centro) e successivamente mediante strumentazione automatica (a destra).

Fig. 10 - Groundwater inflow during tunnel excavation: measurements performed by periodic field manual campaigns (left-centre) and later by automatic instruments (right).

ricostruire un regime di esaurimento esteso anche alla successiva fase *post-operam*, l'approccio metodologico più corretto per i sistemi fratturati è rappresentato dall'acquisizione in continuo dei dati di monitoraggio (si veda anche Paragrafo 8.4.4).

L'installazione di strumentazione automatica nel contesto di un cantiere con intensa operatività come quello di una galleria è un'attività che deve necessariamente essere progettata e concordata con la Direzione Lavori del cantiere stesso. L'installazione di sistemi costituiti da vasca di raccolta, stramazzo e misuratore del livello idrometrico per la determinazione indiretta della portata (Fig. 11), possono assicurare un'alta affidabilità se correttamente progettati (in conformità con specifiche normative ISO per gli stramazzi), inseriti e gestiti nel contesto delle attività di cantiere.

I dati misurati in continuo (si veda il Paragrafo 8.4.4) possono essere teletrasmessi ad un'unità centrale di controllo dove gli andamenti vengono analizzati, sia in relazione a possibili incrementi dovuti a venute idriche di entità rilevante, sia per verificare, in tempo reale, eventuali anomalie oppure malfunzionamenti del sistema di misura e prevedere tempestivamente le modalità di ripristino. Un sistema di allertamento automatico può prevedere l'invio di SMS al personale coinvolto nelle attività, qualora le strumentazioni rilevino dei superamenti di valori soglia indicativi di un aumento improvviso della portata drenata dalla galleria.

Contestualmente al monitoraggio in automatico delle portate agli imbocchi della galleria, deve essere prevista, in stretta collaborazione con la Direzione Lavori, un'attività di misura per campagne mirata alla caratterizzazione delle venute idriche progressivamente riscontrate all'avanzare dello scavo e delle relative modalità di esaurimento, nonché misurazioni differenziali della portata per valutare gli apporti parziali di singoli settori drenanti della galleria.



Fig. 11 - Stazione di misura della portata drenata all'imbocco di una galleria in costruzione.

Fig. 11 - Drained flow rate measurement station at a tunnel portal during construction.

Sempre in riferimento alle portate di drenaggio della galleria, il monitoraggio deve essere esteso alle risorse idriche in superficie (sorgenti, pozzi, ecc. - si veda anche Paragrafo 8.4.2) identificate a rischio in base a quanto emerso dalle valutazioni previsionali. Con riferimento alla Figura 12, si riporta un'esemplificazione di stazione di misura della portata su sorgente.



Fig. 12 - Monitoraggio in continuo della portata di una sorgente tramite stramazzo tarato e sensore di livello a ultrasuoni.

Fig. 12 - Continuous monitoring of spring discharge by calibrated weir and ultrasonic level sensor.

Tra i rilievi di superficie deve essere previsto il controllo in continuo dei corsi d'acqua il cui deflusso di base risulta potenzialmente a rischio di interferenza con lo scavo della galleria. A titolo esemplificativo nella Figura 13 è riportata la sezione di misura posta appena a valle di una zona di potenziale interferenza con lo scavo. L'andamento dei deflussi deve essere controllato in continuo acquisendo serie storiche pluriennali. L'affidabilità dei dati di misura viene periodicamente controllata sia verificando la taratura strumentale del misuratore di livello idrometrico, sia verificando la validità della scala di deflusso con periodiche misure correntometriche di portata.



Fig. 13 - Stazione di misura del deflusso di un torrente, a valle del tratto soggetto alla possibile interferenza con opere sotterranee.

Fig. 13 - Stream flow measurement station, located downstream of the area where interference with underground works is possible.

DOI 10.7343/as-2020-486

Come buona pratica operativa, l'allestimento di una rete di monitoraggio è da eseguirsi prevalentemente con acquisizione in continuo dei dati di portata. Infatti, soprattutto nella fase di corso d'opera, per definire eventuali interferenze, sul regime di alimentazione delle sorgenti e/o del deflusso di base dei corsi d'acqua, sono indicative correlazioni con il drenaggio in galleria riferite ad intervalli temporali brevi, corrispondenti in generale all'intercettazione lungo il fronte di avanzamento di soglie di permeabilità o fasce fratturate drenanti.

L'acquisizione di dati per campagne (Paragrafo 8.4.4), mensili o addirittura stagionali, non fornisce, in molti casi, indicazioni univocamente interpretabili, in particolare per un periodo limitato nel tempo come la fase di corso d'opera: le variazioni del regime idrologico indotte dall'interferenza con le gallerie possono risultare non distinguibili dalle naturali oscillazioni connesse al regime stagionale della ricarica.

L'acquisizione dei dati in continuo, integrata con un sistema in teletrasmissione predisposto per l'allertamento in tempo reale delle condizioni potenzialmente critiche (Paragrafo 8.4.4), consente una tempestiva attivazione di procedure che possono fare riferimento a "Piani di Emergenza per gli interventi di mitigazione e compensazione" appositamente predisposti in fase *ante-operam*. Tali piani rimandano a interventi di emergenza (anche entro 24-48 ore dal manifestarsi della criticità idrica) oppure di compensazione definitiva, già precedentemente pianificati, a livello di progettazione definitiva, sulla base del quadro di rischio per le captazioni derivante dai modelli di scenario.

3.4.2 Criteri per la previsione delle tratte con afflussi elevati in fase di scavo

In fase di scavo l'intersezione con sistemi di flusso sotterranei rilevanti può causare pesanti interferenze in superficie su risorse idriche sensibili per il loro valore ambientale o perché utilizzate a scopo idropotabile o irriguo. In casi specifici, ove la problematica risulti particolarmente critica, può essere opportuno localizzare esattamente e con anticipo le tratte di galleria in cui si renderà necessario limitare gli afflussi per evitare impatti eccessivi in superficie. Dal momento che nella definizione di un modello idrogeologico esistono sempre delle incertezze, è sovente difficile stabilire preliminarmente e sulla sola base del modello idrogeologico di progetto, la posizione precisa delle tratte in cui un determinato sistema di flusso sarà intercettato dalla galleria. Inoltre, per tunnel eseguiti in contesti complessi (es. tunnel profondi in ambiente alpino), è anche difficile prevedere esattamente il comportamento idrodinamico dell'acquifero e stabilire con sufficiente accuratezza le sue relazioni con acquiferi e sistemi di flusso circostanti.

Dal momento quindi che incertezze e imprevisti nel caso di contesti complessi sono inevitabili, per scongiurare impatti non sostenibili è quindi spesso necessario attuare delle procedure di indagine e di monitoraggio in corso d'opera volte a identificare e caratterizzare le zone acquifere sensibili, al fine di progettare adeguati interventi di impermeabilizzazione.

È necessario precisare che un'individuazione delle zone critiche che preceda una loro intersezione da parte degli scavi, è auspicabile perché generalmente, a livello progettuale, è preferibile mettere in atto degli interventi preventivi di riduzione della permeabilità se si vogliono ottenere dei risultati significativi di contenimento delle venute. Una riduzione delle venute a posteriori, dopo che gli afflussi sono già stati pesantemente attivati, ha spesso poche probabilità di risultare efficace, o comunque ne ha molte meno di un'impermeabilizzazione preventiva, per il fatto che quando i flussi verso la galleria sono particolarmente intensi (ovvero a venuta attivata) le iniezioni di prodotti sigillanti mediante sondaggi sono meno efficaci, sia per via del dilavamento causato dal forte flusso, sia per la plasticizzazione al contorno del cavo, che determina la nascita di nuove fratture e un allargamento di quelle pre-esistenti.

Queste considerazioni valgono soprattutto per gallerie scavate in contesti in cui il carico idraulico è elevato (indicativamente superiore a 5-10 bar), perché per gallerie scavate sotto carichi minori sarà possibile, in caso di estrema necessità, procedere a posteriori, mettendo in opera un rivestimento non drenante e in grado di contrastare i carichi idraulici che si verrebbero a ripristinare progressivamente.

Le opzioni per individuare preventivamente le venute in corso di scavo non sono molto numerose e sono sostanzialmente tre, di cui però in pratica una sola è in grado di restituire un esito certo:

- prospezioni geoelettriche;
- rilievi termografici;
- sondaggi in avanzamento.

Per quanto attiene alle prospezioni geoelettriche, queste sono perlopiù riconducibili al metodo BEAM, *Bore-tunnelling Electrical Ahead Monitoring*, molto utilizzato negli ultimi anni per il monitoraggio in avanzamento dalla testa delle TBM. Più in generale, anche prospezioni geoelettriche sistematiche in fase di scavo, operate su fronti di scavo in tradizionale, possono funzionare su un principio analogo. Attraverso queste metodologie, in via del tutto teorica, è possibile risalire alla presenza di zone più o meno sature in acqua dietro il fronte di scavo di una galleria. I dati che si ottengono con queste metodologie sono efficacemente interpretabili in contesti semplici, quando vi siano variazioni brusche e legate a elementi geologici ben delimitati. Più complessa e meno efficace è però l'interpretazione a fini idrogeologici in contesti complessi, come quelli di scavo in rocce cristalline fratturate. In pratica, in contesti complessi è difficile ottenere informazioni conclusive e sufficientemente affidabili con questo tipo di tecniche, che possono comunque essere applicate, ma che necessitano di un continuo riscontro con altri dati.

Il riscontro può provenire dal secondo metodo citato, ovvero da misurazioni termografiche ottenute in sondaggi radiali di scarsa profondità (10-15 m), in cui vengono installate celle di misurazione della temperatura. In questo caso il monitoraggio parte dal presupposto che all'approssimarsi degli scavi ad un importante sistema di flusso, si osservino dei gradienti di temperatura. Tali gradienti sono stati frequentemente osservati in tunnel già eseguiti e sono legati

al fatto che i sistemi di flusso importanti, ove discendenti o in fase di approfondimento/infiltrazione, tendono a raffreddare l'ammasso circostante, mentre ove sono in risalita tendono a scaldarlo. La principale problematica legata ai rilievi termometrici è la complessità e lentezza della loro messa in opera, che richiede tempi poco compatibili con l'avanzamento degli scavi, soprattutto nel caso di avanzamento meccanizzato.

Tuttavia, qualora si stia avanzando in un contesto in cui comunque piccole venute d'acqua siano sempre presenti, si può optare per la più semplice soluzione di misurare sistematicamente la temperatura di queste piccole venute con un comune termometro portatile. Tali venute infatti, essendo di piccola entità non sono generalmente in grado di perturbare significativamente lo stato termico dell'ammasso circostante e ne restituiscono quindi la temperatura, dal momento che tendono a riequilibrarsi con le temperature dell'ammasso stesso. Anche la conducibilità può essere un indicatore significativo ed è misurabile con facilità mediante un semplice conducimetro portatile. In questo caso si deve però ricadere in una situazione in cui la conducibilità del sistema principale sia diversa da quella dei sistemi minori che circolano al contorno, cosa non sempre vera e verificata.

I rilievi geoelettrici e il monitoraggio delle temperature sono quindi dei sistemi di monitoraggio utili per avere un controllo generale e di non gran dettaglio sulle probabilità di intersezione con sistemi di flusso maggiori. Sono sistemi speditivi e funzionali, ma di bassa precisione, che possono quindi essere applicati in contesti in cui i rischi non siano particolarmente elevati o in cui si possa comunque rimediare progettualmente alla mancata individuazione di un sistema di flusso.

La terza opzione elencata, ovvero quella dei sondaggi in avanzamento, è in sostanza il metodo più efficace per la prevenzione di intersezioni con sistemi di flusso importanti. Questa opzione è onerosa dal punto di vista costruttivo, poiché ovviamente implica un'interruzione nella routine costruttiva, ma se ben organizzata e integrata nelle operazioni di cantiere, può risultare poco impattante sulle tempistiche di lavorazione. L'opzione è più facilmente applicabile in gallerie ove si procede con scavo tradizionale o meccanizzato a fresa puntuale, mentre può risultare un po' più impattante sui tempi in cantieri in cui gli scavi avvengono con TBM. Va tuttavia anche detto che le moderne TBM prevedono ormai la possibilità di eseguire agevolmente sondaggi da perforatrici montate in corrispondenza della testa fresante.

L'opzione prevede che quando ci si approssima con gli scavi a zone ritenute sensibili per la possibile intersezione con acquiferi importanti, si proceda alla realizzazione di sondaggi in avanzamento sistematici dal fronte di scavo. I sondaggi possono essere eseguiti a distruzione, anche se la soluzione ottimale è sempre quella di avere dei sondaggi a carotaggio continuo per poter ricostruire meglio il contesto geologico e aggiornare nei dettagli il modello geologico e idrogeologico previsionale. Nell'eseguire i sondaggi a distruzione sarà opportuno raccogliere tutti i parametri di perforazione, tenere traccia delle intersezioni con zone acquifere ed eseguire un riconoscimento dei *cuttings*. I sondaggi devono sempre essere eseguiti con *sistema blow out preventer*, o in alternativa almeno con flangia filettata intestata nell'ammasso che permetta alla bisogna di avvitare una valvola di chiusura sulla bocca foro. Questi accorgimenti si rendono necessari poiché, in caso di intersezione con un sistema acquifero importante, nell'attesa di decidere quali soluzioni progettuali prendere, sarà opportuno bloccare il drenaggio.

Per quanto attiene alla lunghezza delle perforazioni, si suggeriscono lunghezze dell'ordine dei 100-150 m, usualmente raggiungibili nell'arco di poche ore o un giorno con le comuni perforatrici, ivi incluse quelle montate sulle TBM. Sondaggi successivi dovranno avere un ricoprimento parziale di almeno 20-30 m. In sistemi geologici complessi ed eterogenei alla meso-scala sarà sempre opportuno valutare se un solo sondaggio sia sufficiente a chiarire al meglio le problematiche idrogeologiche; in questi contesti potrebbe essere utile eseguire più sondaggi con orientazioni leggermente divergenti per individuare gli elementi critici.

A sondaggio eseguito, se ovviamente non sarà stata intercettata alcuna venuta, si avrà un esito certo e semplice dell'indagine. Quando invece viene intercettata una venuta significativa, si pone il problema di comprendere se essa sia legata ad un vero e proprio sistema di flusso stabile e ben ricaricato, oppure a un sistema minore, con poca ricarica. Infatti, sotto eventuali forti carichi idraulici e piccoli coefficienti di immagazzinamento (come spesso è il caso soprattutto negli ammassi rocciosi) anche un sistema di flusso minore è in grado di fornire inizialmente portate molto elevate e tali da dare l'impressione di trovarsi di fronte a un sistema importante.

Per discriminare rapidamente fra queste due casistiche il parametro più significativo da monitorare è la portata. Riduzioni molto rapide, con abbassamento della portata del 50% o più in poche ore rispetto alla portata registrata indicativamente dopo un'ora dalla fine della perforazione, sono perlopiù sintomatiche di sistemi locali e con poca ricarica.

Quando la diminuzione delle portate è invece più lenta è necessario procedere con maggior cautela e, in genere, prima di riprendere l'avanzamento degli scavi, monitorare per alcuni giorni anche altri parametri, quali temperatura, conducibilità e pH, per osservarne le variazioni. Il parametro più importante rimane comunque la portata. Se dopo alcuni giorni questa non è diminuita significativamente, ci si trova verosimilmente in presenza di un sistema rilevante. Gli altri parametri fisici possono essere utili in questo caso per comprendere che tipo di interazioni abbia innescato il drenaggio con i sistemi adiacenti o di superficie.

Un aspetto fondamentale è anche quello di procedere al prelievo di campioni di acqua ad intervalli di tempo regolari (giorni) e inviarli a laboratorio per analisi.

3.5 Fase *post-operam*

Nella schematizzazione delle attività di studio idrogeologico riportate nella Figura 5, la fase *post-operam* comprende **attività di monitoraggio strettamente finalizzate alla**

DOI 10.7343/as-2020-486

verifica degli effetti permanenti indotti dall'opera sulla circolazione sotterranea, sui livelli piezometrici e sul regime di portata delle sorgenti.

È in questa fase che viene affinata la progettazione esecutiva degli interventi di mitigazione e/o approvvigionamento alternativo sulla base dei deficit realmente riscontrati a seguito della realizzazione dell'opera. Tali interventi sono sostitutivi o integrativi delle eventuali soluzioni di emergenza già messe in atto in corso d'opera. Va comunque ribadito che in una fase *post-operam* è generalmente assai difficile mettere in opera interventi significativi di riduzione delle portate in galleria volti a ripristinare i carichi idraulici e le circolazioni iniziali, per i motivi già spiegati al paragrafo precedente. Ciò soprattutto in caso di gallerie con battenti idraulici elevati. Sarà per contro possibile eseguire interventi di mitigazione o compensazione di tipo diverso (cfr. Paragrafo 4.8).

In tal senso il monitoraggio e la realizzazione degli interventi di mitigazione (vedi Paragrafo 4.8) rappresentano il punto finale di un flusso di attività, di cui allo schema di Figura 5, che comporta, a partire dal progressivo affinamento dei modelli concettuali e numerici elaborati, di disporre, da un lato di un'adeguata certificazione degli effetti "ambientali" sul comparto acque sotterranee e dall'altro la definizione, a livello esecutivo, di soluzioni progettuali per l'approvvigionamento idrico o la compensazione ambientale cautelativamente predisposte a livello preliminare già a corredo della progettazione dell'opera.

Nel caso di grandi opere in galleria, il monitoraggio *post-operam* è di norma esteso ad un periodo pluriennale, per le motivazioni nel seguito indicate, confermate dalla pratica dell'analisi dei dati di misura:

- gli effetti di depauperamento della risorsa possono manifestarsi in tempi molto brevi, particolarmente nei casi in cui vengano alterate le condizioni di sfioro della rete idrica con conseguente isterilimento di sorgenti;
- più frequentemente, gli effetti dell'interferenza si manifestano con il drenaggio del flusso di base, ovvero della componente più profonda del flusso sotterraneo, a cui si sovrappongono di norma picchi di portata impulsivi da circuiti di alimentazione più brevi e superficiali.

In questo secondo caso, anche a seguito dell'interferenza, si mantengono talvolta pressoché inalterati i valori di picco della portata, mentre si osservano forti riduzioni o l'annullamento delle portate di magra. Tali condizioni, in caso di interferenza parziale, hanno come unico effetto un incremento dell'indice di variabilità delle portate, a seguito della riduzione dell'immagazzinamento dinamico e conseguente alterazione del regime di esaurimento. La certificazione dell'interferenza, oppure la sua esclusione, è pertanto possibile attraverso l'elaborazione delle curve di esaurimento in rapporto alla ricarica stagionale ed il confronto con le medesime condizioni rilevate nella fase *ante-operam*.

La durata del monitoraggio *post-operam* dipende pertanto in modo sostanziale dalla significatività idrologica del periodo di monitoraggio. Condizioni idrologiche "ordinarie" e comparabili con analoghe condizioni *ante-operam* possono permettere di esprimere un giudizio di interferenza su serie storiche anche relativamente brevi, ma sempre dell'ordine di un intero anno idrologico. Normalmente il monitoraggio *post-operam* comporta la riduzione nel tempo dei punti di misura rispetto al set iniziale, a seguito della progressiva definizione delle condizioni di interferenza o meno con l'opera ultimata, a partire dalle situazioni più evidenti, fino a quelle per cui un giudizio può derivare solo da elaborazioni statistiche sulla base di serie storiche pluriennali di dati di misura, da condurre anche in relazione all'effettiva rilevanza socioeconomica della risorsa idrica. Per la trattazione di dettaglio degli aspetti legati al monitoraggio si veda comunque il Capitolo 8.

Ciò che deve risultare chiaro è che fino dalla fase *ante-operam* l'acquisizione di dati in continuo è la modalità che garantisce la più efficace e di norma univoca interpretabilità dei dati stessi attraverso le fasi di cantiere e quella post realizzativa, consentendo, in ogni condizione, una certificazione dell'interferenza o meno del circuito di alimentazione con l'opera in galleria. Ciò in quanto la disponibilità di dati in continuo permette di separare l'idrogramma relativo al flusso di base dai picchi di breve durata, consentendo in ogni fase adeguate correlazioni tra portata e regime di ricarica.

Nell'ambito degli acquiferi alluvionali di pianura, nella fase *post-operam* il monitoraggio è di norma riferito ai livelli di falda in pozzi o piezometri ed eventualmente alle portate dei fontanili. In tali contesti la struttura ultimata è nella maggior parte dei casi totalmente impermeabilizzata, pertanto il monitoraggio è funzionale a verificare la sussistenza e l'entità di un effetto barriera conseguente all'inserimento di un'opera in sotterraneo anche in raffronto alle previsioni effettuate con la modellistica. I dati del monitoraggio *post-operam* possono essere correttamente interpretati attraverso la rielaborazione dei modelli numerici di scenario implementati a partire dalla fase di *ante-operam* e di cantiere, in considerazione della variabilità dei dati al contorno.

4 INTERFERENZE IDROGEOLOGICHE E RISCHIO DI IMPATTO

Lo scavo di tunnel è in grado di determinare, ove le condizioni idrogeologiche siano favorevoli, interferenze significative sulla circolazione idrica sotterranea e, di conseguenza, su quella superficiale ove influenzata dal processo di *discharge* dei sistemi di flusso ipogei. Tali interferenze, riconducibili sostanzialmente ad una modifica, transitoria o permanente, della distribuzione del carico piezometrico, e delle conseguenti portate specifiche di flusso idrico sotterraneo (in direzione, verso e intensità), possono determinare "impatti" sia sullo scavo in sé, e quindi sulla esecuzione dell'opera, sia sull'ambiente idrico esterno.

Mentre per "interferenza" possiamo considerare qualsiasi modifica misurabile del sistema di circolazione idrica sotterranea, per "impatto" intendiamo un effetto non solo misurabile ma, come definito dal D.Lgs. 152/06, "significativo" (che potremmo intendere come indesiderato o dannoso) sull'opera stessa, sull'ambiente e sull'uomo.

Sostanzialmente possiamo definire 3 ambiti di impatto idrogeologico:

1. ambito dell'opera in sotterraneo: effetti sullo scavo ed impatti sull'opera stessa e sui lavoratori coinvolti;
2. ambito dell'acquifero: effetti sull'immagazzinamento del reservoir, sul processo di *discharge* dei sistemi di circolazione idrica sotterranea e sulla modifica della composizione fisico-chimica dell'acqua di falda, con impatti sul bilancio idrico di bacino, sull'ambiente e sull'uomo;
3. ambito ecosistemico: effetti sul carico idraulico, sulla distribuzione dell'acqua nel terreno e sul processo di *discharge* dei sistemi di circolazione idrica sotterranea, in termine sia quantitativo che qualitativo, con impatti sui *Groundwater Dependent Ecosystems* (ecosistemi superficiali o sotterranei che dipendono, in tutto o in parte, dalla falda).

4.1 Ambito dell'opera in sotterraneo

In quest'ambito si possono determinare possibili conseguenze indesiderate sulle operazioni di scavo, sulla stabilità dell'opera e sulla sua durata di esecuzione, oltre che sulle condizioni di sicurezza dei lavoratori. Da un punto di vista idrogeologico i principali tipi di tali impatti sono rappresentati dalle grosse venute d'acqua in galleria (chiamate *inrush*) che irrompono all'interno del tunnel e determinano una serie di possibili conseguenze indesiderate quali: incidenti sul lavoro per chi opera nel cantiere, allagamento dello scavo con danni ai macchinari ed al cantiere, interruzione e differimento delle operazioni di scavo, abbattimento dei tassi di produzione dello scavo. Le violente ed improvvise ingressioni di acqua in galleria possono essere accompagnate da trasporto di materiale in sospensione e tale fenomeno può essere accompagnato da effetti alla superficie, soprattutto nel caso di limitate coperture (cedimenti, sfornellamenti, subsidenze). Tali eventi sono in genere associati all'attraversamento di zone ad elevata trasmissività/permeabilità o al passaggio di limiti di permeabilità.

Nel passato le prospezioni geologiche ed idrogeologiche, effettuate in fase di progetto preliminare o di progetto esecutivo, erano principalmente tese alla previsione del potenziale di accadimento di tali impatti e quindi finalizzate alla verifica delle condizioni di sicurezza e di produttività dello scavo, tenendo in scarsa considerazione gli effetti indesiderati sul regime idrogeologico naturale che poteva essere perturbato dallo scavo anche a distanza significativa dall'opera. Veniva ancora data molta importanza al "progetto" e poca al "contesto" dove il progetto si attuava. Come già messo in evidenza nei capitoli precedenti, tale approccio è mutato negli ultimi decenni e lo studio idrogeologico non è più semplicemente ancillare al progetto di scavo ma tende a divenire protagonista e guida della scelta del tracciato e della progettazione preliminare; tale ruolo primario dell'idrogeologia delle grandi opere in alcuni casi è realtà consolidata ma non è ancora pratica diffusa e, certamente, è ancora lunga la strada da percorrere in termini di evoluzione normativa ma soprattutto culturale.

In questo capitolo viene enfatizzata l'importanza della prognosi delle interferenze dello scavo sul regime idrogeologico naturale e sulla mitigazione o compensazione dei conseguenti impatti negli ambiti dell'acquifero e degli ecosistemi. La previsione delle interferenze di tipo idrogeologico è comunque sempre funzionale a valutare anche gli impatti nell'ambito dell'opera in sotterraneo.

4.2 Ambito dell'acquifero

Le interferenze idrogeologiche, in termini di variazioni, positive o negative, dell'immagazzinamento e del regime di scarico degli acquiferi, modificano, transitoriamente o permanentemente, i sistemi di circolazione idrica sotterranea (*Groundwater Flow Systems* - GFS), intesi come i percorsi naturali delle acque sotterranee dalla zona di ricarica (*recharge*) alla zona di recapito (*discharge*). La modifica è conseguenza della intercettazione di acque sotterranee da parte dello scavo e/o della zona detensionata/alterata che circonda lo scavo (opera in sotterraneo drenante), oppure dell'effetto barriera che un'opera in sotterraneo, completamente impermeabile, esercita sul deflusso idrico sotterraneo (opera in sotterraneo barriera).

I possibili impatti, osservabili e quantificabili alla superficie (corsi d'acqua, emergenze) o in punti di monitoraggio ipogei (pozzi, piezometri), sono:

1. diminuzione della portata delle sorgenti fino al completo disseccamento, perenne o su base stagionale;
2. diminuzione del deflusso di base dei corsi d'acqua alimentati dalla falda fino al completo disseccamento in periodi di assenza delle componenti del deflusso legate agli eventi meteorici (deflusso superficiale ed ipodermico);
3. diminuzione del livello di laghi alimentati dalla falda fino al completo prosciugamento, perenne o su base stagionale;
4. abbassamento del livello piezometrico in pozzi e piezometri fino al completo prosciugamento (*dewatering*) del perforo, su base perenne o stagionale;

DOI 10.7343/as-2020-486

5. diminuzione della portata specifica dei pozzi (portata per abbassamento unitario) con conseguenze in termini di diminuzione della portata d'esercizio sostenibile (*safe yield*);
6. variazioni del livello piezometrico a monte flusso e valle flusso dell'opera "barriera" con effetti indesiderati quali cedimenti differenziali, "sfornellamenti" e crolli (con diverso grado di distribuzione areale e velocità), lesioni di strutture, allagamenti di sottoservizi ed interrati, migrazioni di inquinanti disciolti in falda verso zone dell'acquifero in precedenza non contaminate;
7. deterioramento del chimismo naturale e del regime termico delle acque sotterranee in relazione a fenomeni di drenanza o travaso da altri acquiferi indotti dalla modifica della distribuzione dei carichi idraulici.

4.3 Ambito ecosistemico

Gli effetti sul deflusso idrico sotterraneo sono da mettere in relazione a modifiche idrologiche della distribuzione e valore sia dei carichi piezometrici sia dei flussi di falda associati; gli impatti alla superficie si traducono in aumenti della soggiacenza ed in variazioni e/o annullamenti di flussi idrici. Associati a tali impatti vi sono quelli sulle biocenosi (vegetali ed animali) che dipendono, in tutto o in parte, dalle acque sotterranee. Si parla, in tal caso, di ecosistemi dipendenti dalle acque sotterranee (GDE).

L'esistenza dei GDE è basata sulle caratteristiche peculiari dell'acqua sotterranea in termini di costanza delle caratteristiche fisico-chimiche quali: stato di saturazione del terreno superficiale, temperatura, salinità, ridotta torbidità. Appare essenziale considerare che gli impatti sul processo di *discharge* non si scaricano solo sulla collettività e sul sistema socioeconomico ma sugli ecosistemi, per cui l'aspetto ecologico deve essere incluso nella prognosi delle possibili conseguenze negative di un'opera. Pertanto, è importante definire cosa si intende per GDE, in modo tale da discriminare correttamente l'ambito ecosistemico di impatto rispetto a quello dell'acquifero.

Per l'importanza delle caratteristiche fisico-chimiche di un'acqua di falda nel garantire la piena funzionalità di un ecosistema "tipo GDE", anche le modifiche di tali caratteristiche indotte dallo scavo vanno a pieno titolo considerate come impatti di tipo ecosistemico anche ove non fossero associate a interferenze di tipo quantitativo.

4.3.1 Definizione di GDE

Un GDE è un ecosistema (insieme di una comunità di viventi, detta biocenosi, e di un ambiente fisico in cui essa vive, detto biotopo) che dipende per la sua sussistenza, interamente o in larga parte, dal deflusso idrico sotterraneo, dalla vicinanza alla zona di saturazione (falda) e dal chimismo associato alle acque sotterranee (Bertrand et al. 2012; Kløve et al. 2011).

Un GDE, pertanto, è localizzato vicino alla tavola d'acqua o nei pressi di una zona di recapito di una circolazione idrica sotterranea e trae giovamento dalle particolari condizioni idrologiche ed idrochimiche, in termini di stazionarietà dei parametri, tipici delle acque sotterranee. Un impatto sulla circolazione idrica sotterranea, in termini o quantitativi o qualitativi, determina evidentemente un impatto sulla biocenosi portandola in sofferenza anche fino alla completa estinzione.

I GDE possono essere distinti in superficiali o ipogei e sono tutti riconducibili all'essere ubicati in corrispondenza di zone di emergenza del deflusso sotterraneo o di zone dove la soggiacenza della tavola d'acqua è bassa con una componente importante di diminuzione del carico idraulico verso l'alto all'interno del mezzo poroso acquifero:

1. **GDE superficiali** localizzati presso zone di scarico del flusso idrico in uscita dall'ammasso roccioso (*discharge*):
   - **sorgenti**;
   - ambienti lotici (con acqua corrente) corrispondenti a **tratti di corsi d'acqua alimentati dalla falda** (inclusa la zona iporeica al di sotto dell'alveo) ed in cui il deflusso di base, equivalente al deflusso di falda nel periodo non perturbato da eventi e con ricarica inattiva, è essenziale per il mantenimento della biocenosi;
   - ambienti lentici (con acqua ferma o con lentissimo deflusso) con presenza di lama d'acqua al di sopra della superficie, quali **laghi, stagni, paludi, fontanili** dove il contributo di alimentazione da parte del deflusso idrico sotterraneo, eventualmente bilanciato dalla evaporazione o dal recapito in altri corpi superficiali (fiumi, mare), è essenziale per la biocenosi;
2. **Zone umide e torbiere** (GDE superficiali), genericamente definibili come *wetland*, localizzate in punti di recapito di sistemi di circolazione idrica sotterranea dove si verificano condizioni permanenti di completa saturazione in acqua del mezzo poroso superficiale o di bassissima soggiacenza della tavola d'acqua e dove si sviluppano biocenosi vegetali specifiche; l'attribuzione della caratteristica di GDE discende nel caso che siano alimentate solo o in maniera rilevante dalla falda (*fen wetland* o torbiere minerotrofiche) e non solo dalla precipitazione diretta (*bog wetland* o torbiere ombrotrofiche);
3. **Biocenosi arboree freatofite**: zone alberate localizzate dove si ha una bassa soggiacenza e dove la biocenosi è fortemente controllata dalla presenza e dal chimismo della falda;
4. **GDE ipogei**: si tratta di biocenosi che si sviluppano direttamente dentro l'acquifero o la zona vadosa, in particolare grotte e sistemi carsici ma anche le biocenosi costituenti la stigofauna (fauna adattata a vivere all'interno del mezzo poroso acquifero, anche a porosità interstiziale; Cantonati et al. 2020).

Relativamente alla lista precedente, dal n°1 al n°4 aumenta la profondità dell'ambiente acquatico dell'ecosistema legato al GDE, la cosiddetta *sphere of discharge* (Springer et al. 2008): fluente alla superficie nel caso delle sorgenti, completamente saturante il terreno superficiale nel caso delle *wetland*, falda con soggiacenza da bassa a più rilevante nel caso delle

comunità freatofite e delle grotte. In tutti i casi le biocenosi dipendono dalla falda ed in tutti i casi un impatto sulla falda si trasferisce sulle biocenosi.

La presenza e distribuzione dei GDE in un dato territorio deve essere verificata tramite censimento e classificazione, dato che, affinché un sito sia denominato come GDE, deve essere riconosciuto il valore ecologico e non solo idrogeologico del sito. Un GDE non contribuisce solo al bilancio idrico di un bacino idrogeologico ma garantisce la funzionalità di un determinato e specifico ecosistema.

4.4 Definizione dei bersagli e degli indicatori di impatto

Ai fini della previsione, valutazione, prevenzione e mitigazione degli impatti (azioni specifiche di cui parleremo più avanti) devono essere definiti, nell'ambito dei già descritti **ambiti di impatto**, gli associati **bersagli** e **indicatori** di impatto.

In un'ottica di valutazione del rischio di impatto secondo il consolidato paradigma di tutti i rischi ambientali *"**source-pathway-target**"* (**fonte di pericolo-percorso-bersaglio**) possiamo fare riferimento allo schema illustrato in Figura 14, dove:

- la **interferenza**, intesa come fonte del pericolo di impatto e quindi del manifestarsi di un evento indesiderato per l'ambiente e l'uomo, è rappresentata dall'effetto perturbante dell'opera in sotterraneo, variabile in relazione all'opera ed al contesto idrogeologico (drenaggio, barriera, inquinamento ecc.); è associabile, nell'adattamento specifico del paradigma dell'analisi di rischio, al "pericolo");
- la **connessione idrogeologica** (da ora in poi semplicemente ***"connessione"***) è rappresentata dal sistema di circolazione idrica sotterranea e dal grado di collegamento che tale sistema determina fra l'interferenza ed il bersaglio dell'impatto;
- il **bersaglio di impatto** (da ora in poi semplicemente ***"bersaglio"***) è rappresentato dal punto d'acqua o dal GDE in cui l'impatto si manifesta o in cui vi è un rischio potenziale che si manifesti;
- l'**indicatore di impatto** (da ora in poi semplicemente ***"indicatore"***) è rappresentato da una proprietà o grandezza fisica, misurabile, che quantifica l'impatto e che permette confronti con situazioni non perturbate dall'opera (situazioni *ante-operam*).

Sulla identificazione e parametrizzazione delle interferenze e delle connessioni ritorneremo parlando dell'analisi del rischio di impatto. Nel seguito, invece, diamo una classificazione dei bersagli con associati indicatori. Questi ultimi dovranno essere oggetto di una misurazione idrogeologicamente significativa (in relazione alla stagionalità ed alla variabilità fra anni idrologici diversi) in condizioni *ante-operam*, ai fini della verifica diretta delle eventuali condizioni di impatto durante la fase di scavo (in corso d'opera) e successivamente allo scavo (*post-operam*).

1 - Bersaglio: Sorgente idrica

Si tratta di una emergenza puntuale (singola) o riunita in gruppi/fronti di sorgenti puntuali legati geneticamente alla medesima idrostruttura. L'impatto si manifesta in una diminuzione della portata naturale fluente fino al completo prosciugamento, stagionale o perenne (impatto quantitativo). L'impatto può anche manifestarsi sotto forma di una alterazione della composizione idrochimica dell'acqua o di una sua contaminazione al seguito degli effetti di perturbazione/inquinamento della circolazione idrica sotterranea.

Gli indicatori fondamentali, che devono sempre essere presenti in qualsiasi programma di monitoraggio collegato all'opera, sono: **portata della sorgente** (nel caso di sorgenti captate la portata va intesa come la portata complessiva, incluso l'eventuale non captato o troppo pieno); **temperatura** e **conducibilità elettrica specifica** dell'acqua sorgiva. La conducibilità elettrica e la temperatura sono i più semplici

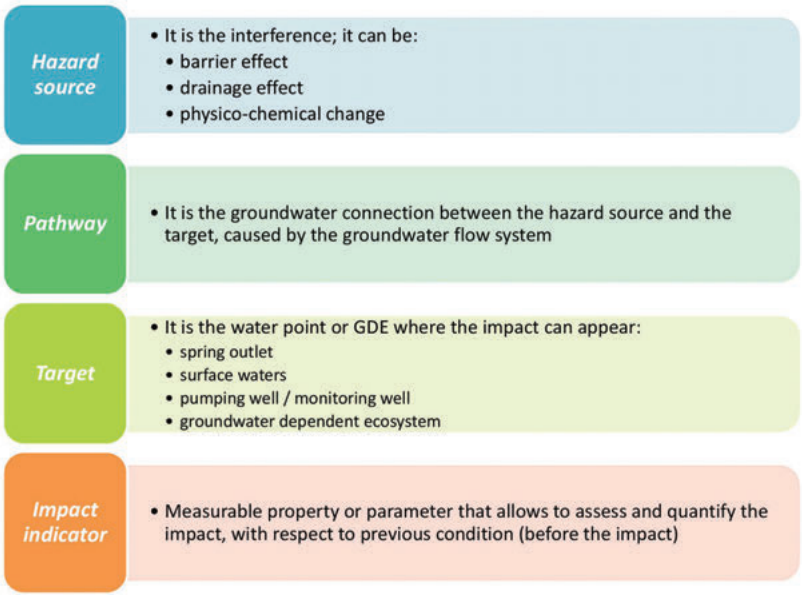

Fig. 14 - Modello concettuale: Fonte di pericolo>Percorso>Bersaglio (spiegazione nel testo).

Fig. 14 - Conceptual model: Source> Pathway>Target (explanation in the text).

DOI 10.7343/as-2020-486

parametri fisico-chimici da determinare *in situ* e possono indicare eventuali alterazioni nella circolazione idrica sotterranea. Indicatori specifici di tipo fisico (es. torbidità) o chimico potranno essere determinati *in situ* (es. pH, ossigeno disciolto, potenziale redox) o in laboratorio per verificare alterazioni idrodinamiche specifiche o inquinamenti.

La misura *ante-operam* ed in corso d'opera dell'indicatore è tanto più frequente (da un monitoraggio saltuario o stagionale ad un monitoraggio in discontinuo con maggiore frequenza, fino ad un monitoraggio in continuo con strumentazione di campo dedicata) in relazione all'importanza della sorgente ed al rischio di impatto.

2 - Bersaglio: Corpo d'acqua superficiale

Si può trattare di corpi idrici ad ambiente lotico (acqua fluente, quindi corsi d'acqua) o ambiente lentico (come laghi, stagni, lagune).

Nel caso dell'ambiente lotico il bersaglio è da intendersi la componente di deflusso di base (garantito dell'acquifero) del deflusso totale del corso d'acqua: sono escluse pertanto le componenti di deflusso d'evento (ruscellamento superficiale + deflusso ipodermico). L'impatto si manifesta in una diminuzione del deflusso di base fino al completo annullamento (impatto quantitativo): l'effetto complessivo è una diminuzione di portata in alveo o il completo prosciugamento nei periodi stagionali in cui il deflusso d'evento è assente o minimo.

Nel caso dell'ambiente lentico l'impatto quantitativo si manifesta sia in una diminuzione del livello, e quindi del volume invasato, sia nella diminuzione di portata dell'eventuale emissario. Sono ovviamente presi in considerazione i corpi idrici che hanno una alimentazione naturale da deflusso di falda e non dalle precipitazioni o dal solo deflusso di evento.

L'impatto sul corpo idrico superficiale può anche manifestarsi sotto forma di una alterazione della composizione chimica dell'acqua o di una sua contaminazione al seguito degli effetti di perturbazione/inquinamento della circolazione idrica sotterranea o di inquinamento per scarichi in alveo da cantieri.

Gli indicatori sono, nel caso di un corso d'acqua: **portata del deflusso di base**; parametri fisico-chimici *in situ* dell'acqua di deflusso di base: **temperatura**; **conducibilità elettrica specifica**; **pH**; **torbidità**. Il pH e la torbidità possono contribuire, nel caso dell'acqua superficiale, ad evidenziare scarichi di attività di cantiere. Ci si riferisce sempre al "deflusso di base" per depurare tutte le componenti, anche qualitative, legate al deflusso di evento. Ovviamente indicatori specifici di tipo chimico potranno essere determinati per verificare alterazioni chimiche specifiche o inquinamenti.

La misura *ante-operam* ed in corso d'opera dell'indicatore "portata del deflusso di base" dovrà essere condotta su sezioni d'alveo opportune ed in condizioni idrologiche che escludano o minimizzino la componente deflusso di evento (quindi lontano da periodi di precipitazioni; consigliabile effettuare le misure almeno 3 giorni dopo l'ultimo evento meteorico nel bacino o almeno 7 giorni dopo periodi piovosi particolarmente prolungati). Inoltre, dovrà essere posta cura a tenere in debito conto l'influenza di eventuali derivazioni o scarichi in alveo che possano inficiare l'oggettività della valutazione. Per bassi flussi ed in condizioni termiche specifiche non va trascurato l'effetto dell'evapotraspirazione.

Gli indicatori sono, nel caso di un ambiente lotico: **livello idrico**; **portata di deflusso di base dell'emissario**; parametri fisico-chimici *in situ* dell'acqua, misurati possibilmente sul deflusso di base dell'emissario: **temperatura**; **conducibilità elettrica specifica**; **pH**; **torbidità**. Il significato è analogo al caso del corso d'acqua.

3 - Bersaglio: Pozzo / Piezometro

Si tratta di perforazioni, armate o no con pompa, che attingono ad una determinata unità idrogeologica permeabile (acquifero). L'impatto si manifesta sia in termini di variazione del livello piezometrico (abbassamento o innalzamento nel caso di effetto barriera) sia in termini di diminuzione della resa del pozzo e quindi della sua portata specifica, intesa come rapporto fra portata di emungimento ed abbassamento (ad esempio per una diminuzione della capacità di ricarica della circolazione idrica sotterranea o come conseguenza del processo di *dewatering* del serbatoio acquifero). L'impatto può arrivare fino al completo prosciugamento del perforo nel caso che il livello piezometrico scenda al di sotto del tratto filtrato. L'impatto, come visto per le sorgenti, può anche manifestarsi sotto forma di una alterazione della composizione idrochimica dell'acqua o di una sua contaminazione al seguito degli effetti di perturbazione/inquinamento della circolazione idrica sotterranea.

Gli indicatori sono di tipo statico e dinamico: **livello piezometrico statico** (per statico si intende il livello piezometrico misurato al piezometro come media di almeno 3 misure successive intervallate di 10 minuti; nel caso di un pozzo utilizzato si intende il livello misurato, in modo analogo, dopo un periodo di spegnimento di almeno 24 ore e comunque da valutare in base alle caratteristiche idrogeologiche locali); come indicatore di tipo dinamico è importante la **portata specifica**. Tale parametro, anche noto come *well yield*, rappresentativo delle condizioni dinamiche del sistema, è in relazione alla capacità dell'acquifero di sostenere l'emungimento e viene calcolato come il rapporto fra portata di emungimento ed abbassamento stabilizzato (L/s per metro di abbassamento), per valori di portata inferiori alla portata critica relativa a quel pozzo in condizioni non perturbate da altri pompaggi all'interno dell'area di influenza; di fatto, dato che non si realizzano mai condizioni stazionarie, si può considerare l'abbassamento stabilizzato come l'abbassamento misurato nel pozzo dopo 1 ora di pompaggio. La portata specifica può essere anche stimata per un piezometro, tramite pompa elettrica portatile, e diviene un parametro di monitoraggio molto utile in integrazione alla determinazione del livello statico ed allo spurgo e campionamento dell'acqua di falda per determinazioni idrochimiche.

Si raccomanda, nei monitoraggi degli effetti idrogeologici di un'opera in sotterraneo, di considerare entrambi gli indicatori, sia quello statico che quello dinamico, dato che solo la loro lettura integrata permette di determinare appieno lo stato di interferenza locale dell'acquifero.

Per i pozzi, ai fini della determinazione delle condizioni *ante-*

operam, è importante determinare la portata critica e questo può essere fatto tramite l'effettuazione di una prova a gradini di portata (*Step Drawdown Test*, SDT). La portata critica deve essere intesa come quella a cui il rapporto fra perdite di carico lineari e perdite totali del pozzo è pari a 0,8. L'effettuazione della prova, come anche l'acquisizione degli indicatori statico e dinamico in condizioni *ante-operam*, dovranno tenere conto della stagionalità. L'effettuazione di una prova a gradini è importante per distinguere, in sede *ante-operam*, una eventuale scarsa efficienza di captazione legata allo specifico pozzo che potrebbe poi generare un'erronea definizione degli impatti.

La misura *ante-operam* ed in corso d'opera dell'indicatore statico del livello piezometrico è tanto più frequente (da un monitoraggio saltuario o stagionale ad un monitoraggio in discontinuo con maggiore frequenza, ad un monitoraggio in continuo con trasduttori di pressione) in relazione all'importanza dell'acquifero ed al rischio di impatto. L'indicatore dinamico portata specifica dovrà essere rilevato almeno su base stagionale. Nel rilevamento *ante-operam* di ambedue gli indicatori dovrà essere posta particolare attenzione alle eventuali interferenze di emungimenti limitrofi.

Da un punto di vista qualitativo possono essere associati indicatori idrochimici anche se generalmente hanno maggiore significatività per le acque di sorgente e dei corpi di acqua superficiale, in quanto terminali finali del *discharge* naturale del sistema di circolazione idrica sotterranea, escludendo specifici casi di inquinamento di origine antropica.

4 - Bersaglio: GDE

In precedenza, si sono definite le caratteristiche che rendono alcuni siti dei GDE. Si ritiene della massima importanza che, preliminarmente all'avvio di un programma di monitoraggio per valutare le interferenze di un'opera in sotterraneo, e, a maggior ragione, preliminarmente all'avvio dei lavori di scavo, venga effettuato un censimento dei GDE presenti nel territorio. Non tutte le sorgenti e non tutti i corsi d'acqua possono essere classificati come GDE. La individuazione di un sito come GDE implica che una ben definita biocenosi dipenda, per la sua sopravvivenza, dalla presenza di un punto di scarico attivo di falda o dalla presenza della tavola d'acqua nei pressi della superficie. Per la classificazione e tipizzazione dei GDE si rimanda a: (Bertrand et al. 2012; Cantonati et al. 2020; Kløve et al. 2011).

Ove un sito venga definito come GDE, e quindi ove le condizioni idrogeologiche locali siano sostentamento della comunità biologica, il monitoraggio idrogeologico del medesimo sito sarà basato sugli indicatori che verificano la qualità dello stato fisico-chimico adeguata a garantire la sussistenza della biocenosi.

Pertanto, per i GDE associati a sorgenti, corsi d'acqua e laghi si rimanda a quanto definito per i rispettivi bersagli nei 2 precedenti sotto paragrafi. Nel caso di GDE associati a *wetland* (torbiere, zone umide) ed associazioni vegetali freatofite un idoneo indicatore è rappresentato dal livello piezometrico, monitorato in piezometri o mini-piezometri predisposti all'uopo; nel caso di GDE associati a grotte e sistemi carsici si rimanda a quanto definito per i bersagli sorgente o corso d'acqua, in relazione alla tipologia di circolazione idrica sotterranea e di eventuale emergenza ipogea.

In tutte le tipologie di GDE il monitoraggio di tipo idrologico, oltre ad includere i parametri fisico-chimici determinati *in situ* e la determinazione di analiti in soluzione, sarà corredato da specifici indicatori di tipo biologico ed ecologico, individuati caso per caso ed in grado di verificare eventuali situazioni di sofferenza per la biocenosi.

4.5 Analisi del rischio di impatto idrogeologico

L'analisi del rischio di impatto, dovuto ad un'interferenza dell'opera in sotterraneo sulla circolazione idrica sotterranea, rappresenta di fatto una prognosi degli effetti attesi.

L'**interferenza idrogeologica** è una modifica della distribuzione del carico idraulico e della portata specifica della falda, eventualmente associata ad una modificazione del quadro composizionale, indotta dalle azioni di drenaggio/barriera dell'opera in sotterraneo e segnalata da variazioni significative dei valori degli indicatori registrati nei punti di monitoraggio.

Si ha un **impatto idrogeologico** ove tale interferenza (associabile al concetto di *hazard*, pericolo) "*determini degli effetti significativi, diretti o indiretti, su una serie di obiettivi quali: popolazione e salute umana; biodiversità; territorio, suolo, acqua, aria e clima; beni materiali, patrimonio culturale, paesaggio; interazione tra i fattori sopra elencati*" (le parti in corsivo sono riprese dalla definizione generale di impatto del D.Lgs. 152/2006).

Verranno analizzati in successione: la definizione di rischio di impatto (brevemente definito come rischio); le modalità o strumenti di valutazione del rischio; la rappresentazione del rischio; gli interventi di mitigazione del rischio; il ruolo del monitoraggio in sede di previsione del rischio e di verifica dell'avvenuto impatto.

4.6 Definizione del rischio e delle sue componenti

Il rischio di impatto idrogeologico è un termine probabilistico ed è in relazione alla probabilità che un certo fenomeno di perturbazione del sistema idrogeologico naturale (interferenza) determini degli effetti significativi per l'ambiente e la collettività (impatto) su determinati bersagli (come elencati al paragrafo precedente). L'interferenza idrogeologica, con l'associato impatto, si manifesta al bersaglio, dopo che i suoi effetti si sono manifestati lungo il percorso, quando gli indicatori registrano il superamento di certe predeterminate soglie, le quali vengono valutate tenendo conto di un adeguato e idrogeologicamente significativo monitoraggio *ante-operam* che tenga conto anche degli effetti di stagionalità idrologica.

Vediamo di adattare la formulazione analitica generale del rischio allo specifico contesto nel modo seguente:

$$R = I \times C \times V$$

dove:

R = **Rischio** di accadimento di un impatto idrogeologico su un certo bersaglio;

I = **Interferenza** (intesa come probabilità che un determinato tratto di una opera in sotterraneo induca effetti locali importanti di perturbazione idrologica ed idrochimica,

DOI 10.7343/as-2020-486

quindi idrogeologica, sull'ammasso roccioso); è associabile al concetto di Pericolosità (*Hazard*);

C = **Connessione** (intesa come struttura del sistema di circolazione idrica sotterranea, rappresentata dal relativo modello concettuale interpretativo, che evidenzi o meno l'esistenza di un percorso di collegamento idrogeologico, e l'eventuale intensità di tale collegamento, fra il punto di perturbazione dove si è originata l'interferenza ed il bersaglio di impatto); è associabile al concetto di Percorso (*Pathway*) e quindi anche di Vulnerabilità (*Susceptibility*) intesa come probabilità che il sistema naturale sia in grado di "difendere" i bersagli dall'impatto;

V = Valore del bersaglio di impatto (inteso come valore ecologico-ambientale o socioeconomico del bersaglio in relazione alle sue funzionalità e finalità d'uso, alla rilevanza delle medesime nel contesto territoriale ed alla presenza/assenza di fonti alternative e/o alla fattibilità di opere di mitigazione o compensazione),come schematizzato in Figura 15.

L'Interferenza è un fattore probabilistico, essendo assimilabile alla Pericolosità, e quindi soggetto a previsione con una certa alea di indeterminatezza. Quantifica, ad esempio: la probabilità che in un certo tratto di galleria, durante lo scavo, vi siano delle ingressioni di acqua di una certa portata; la probabilità che una certa opera in sotterraneo, se avente funzione di barriera, possa indurre una modifica del livello piezometrico oltre una certa soglia, ecc.

La Connessione, legata alla Vulnerabilità, è sostanzialmente rappresentata dal modello idrogeologico concettuale della circolazione idrica sotterranea ed indica, anche in questo caso in maniera probabilistica, l'effetto sul bersaglio di impatto in relazione al suo grado di collegamento idrogeologico con il punto di perturbazione all'opera, origine dell'interferenza. Ad esempio: presenza o assenza di strutture tettoniche o soglie di permeabilità; presenza ed intensità del grado di carsificazione; profondità ed estensione del sistema di circolazione idrica sotterranea; presenza di barriere di permeabilità o unità idrogeologiche tamponanti, ecc.

Il Valore del bersaglio di impatto è sostanzialmente il pregio del bersaglio medesimo, sia da un punto di vista ecologico e di funzionalità per il mantenimento dei deflussi minimi vitali sia da un punto di vista socioeconomico per le finalità d'uso (valore acquedottistico, irriguo ecc.).

Il Rischio, e la sua valutazione, deriva, quindi, dall'incrocio del quadro di progetto con il modello concettuale idrogeologico e con la distribuzione e caratterizzazione dei bersagli. Valutare il rischio di accadimento dell'impatto diventa una simulazione previsionale e probabilistica di scenario di impatto, realizzata con metodi parametrici, analitici o numerici, che va riferita sia alla fase di cantiere sia a quella *post-operam*.

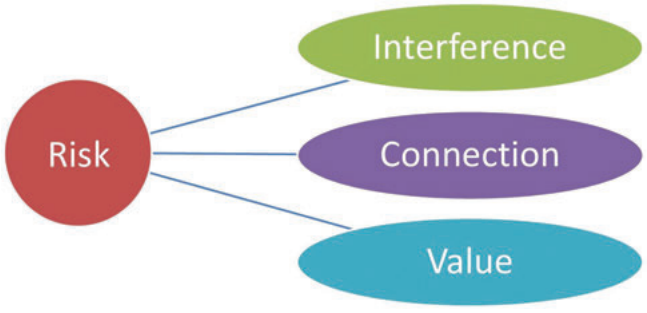

Fig. 15 - Schema dei Fattori del Rischio.
Fig. 15 - Scheme of Risk Factors.

La sussistenza di condizioni di Rischio non accettabile deve essere legata al superamento, da parte dei valori degli Indicatori, di soglie, predeterminate sulla base degli esiti del monitoraggio *ante-operam* (che avrà definito l'entità dei fenomeni di ciclicità idrologica stagionale); le soglie potranno essere "scalate" con crescente grado di severità passando da uno stato di "anomalia" o "attenzione" fino a quello di "allarme" o di "emergenza", in relazione all'intensità ed alla continuità temporale dei superamenti.

4.7 Strumenti di valutazione del rischio

La valutazione del rischio di impatto si basa sull'impiego di strumenti per la previsione della probabilità che determinati bersagli presentino un superamento di soglie critiche degli indicatori associati all'impatto e, quindi, dell'accadimento di conseguenze indesiderate sulla circolazione idrica sotterranea. Nell'applicare tali strumenti si può anche parlare di valutazione del rischio di isterilimento dei punti d'acqua o di *drawdown hazard index* (Dematteis et al. 2001), essendo l'isterilimento associato ad una caduta (*drawdown*) del carico idraulico.

La valutazione del rischio verrà effettuata a valle della definizione del modello concettuale geologico ed idrogeologico del territorio ritenuto potenzialmente interferibile dallo scavo, quindi del territorio corrispondente ad un intorno idrogeologicamente significativo rispetto all'opera sotterranea in progetto, a sua volta conseguente alla raccolta, analisi ed interpretazione dei dati di monitoraggio *ante-operam*, con una forte attenzione alla variabilità stagionale e pluriannuale degli indicatori.

La valutazione del rischio si svilupperà secondo i seguenti step:

1. definizione del territorio idrogeologicamente significativo di riferimento e dei bersagli;
2. definizione degli indicatori e delle soglie;
3. scelta ed applicazione del metodo di valutazione, come riassunto nello schema di Figura 16.

Vediamo di seguito gli aspetti importanti da considerare per ciascuno di questi passaggi.

4.7.1 Definizione del territorio idrogeologicamente significativo di riferimento e dei bersagli

L'estensione dell'area interessata dalla valutazione, che poi è anche l'estensione dell'area soggetta a monitoraggio ambientale, è variabile caso per caso e, nell'ambito dello stesso progetto, tratta per tratta, in relazione alle caratteristiche idrogeologiche, alla trasmissività idraulica degli ammassi rocciosi interessati dall'opera ed alla persistenza delle strutture tettoniche e delle soglie di permeabilità.

La definizione di tale areale sarà uno degli obiettivi fondamentali del modello concettuale geologico ed

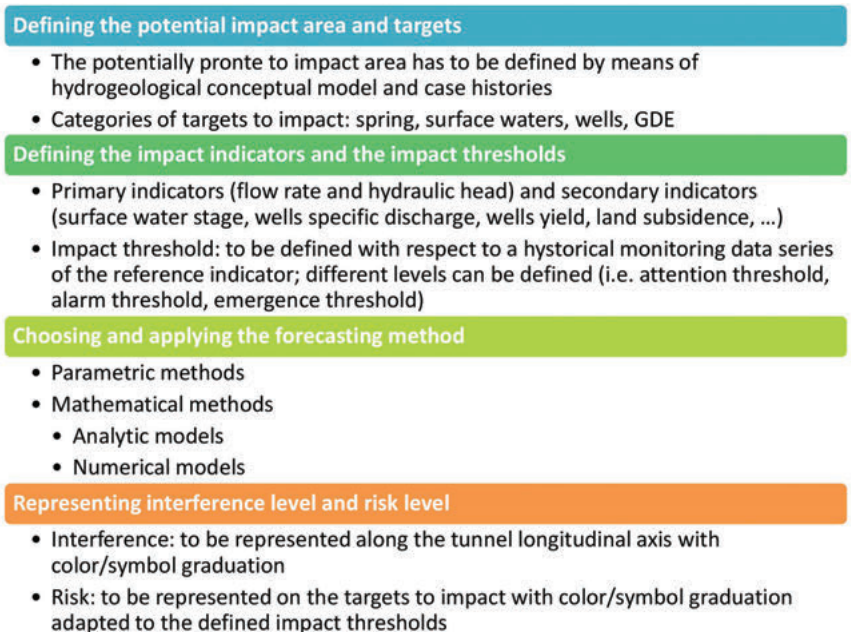

Fig. 16 - Procedura di Valutazione del Rischio.
Fig. 16 - Risk Assessment procedure.

idrogeologico. Dovrà anche essere basata sulla conoscenza di *case history* pregressi in condizioni geologiche analoghe; riteniamo assai importante, in questa fase, la consultazione dei dati di letteratura (si veda il Capitolo 2 "Ritorno di esperienza").

È essenziale che, nella definizione della fascia di interesse, non ci si basi su estensioni preordinate e geometriche ma sulla geologia ed idrogeologia. Ad esempio, nel caso dei tunnel TAV Firenze-Bologna, scavati in prevalenza in ammassi rocciosi torbiditici a permeabilità medio-bassa in grande (*bulk permeability*), la estensione della fascia di reale propagazione degli impatti rispetto all'asse del tunnel è risultata variare da meno di 0,2 km a 5 km, in relazione alla persistenza e diffusività idraulica delle strutture attraversate. In sistemi carsici la estensione attesa degli effetti potrebbe essere, ovviamente, ben maggiore.

I bersagli, oggetto anche del monitoraggio ambientale *ante-operam*, in corso d'opera e *post-operam*, dovranno essere compresi in una lista che includerà: sorgenti, tratti di corsi d'acqua, laghi, pozzi, piezometri, GDE. Tale lista sarà contenuta nel modello concettuale preliminare, verrà affinata ed integrata durante il monitoraggio *ante-operam* e verrà definitivamente codificata all'inizio del monitoraggio in corso d'opera.

Il prodotto finale di tale fase sarà la mappatura dell'areale di potenziale impatto assieme alla ubicazione e caratterizzazione dei bersagli. Ogni bersaglio dovrà essere predisposto per operazioni di monitoraggio degli indicatori.

4.7.2 Definizione degli indicatori e delle soglie

Gli indicatori di tipo idrologico ed idrochimico sono stati descritti al Paragrafo 4.4. Ove ritenuto opportuno, in certi contesti, possono essere associati indicatori di tipo geotecnico o strutturale per verificare gli eventuali effetti sulla stabilità di strutture antropiche (cedimenti differenziali, lesioni ecc.) conseguenti alle variazioni del carico idraulico e del regime delle pressioni neutre indotti dall'opera in sotterraneo.

La definizione delle soglie deve essere basata su una serie storica adeguata di dati di monitoraggio *ante-operam* che, in relazione alla importanza ambientale e/o socioeconomica di ogni bersaglio, dovrebbero rappresentarne, per quanto possibile, la variabilità idrologica sia stagionale sia pluriannuale. Scopo del monitoraggio *ante-operam* è anche quello di definire gli effetti di prelievi preesistenti all'opera.

L'approccio alla definizione delle soglie deve comunque tenere conto dell'incertezza e della imprevedibilità degli eventi idrologici. Può essere conveniente definire delle soglie a diversa intensità, ad esempio: soglia di attenzione, soglia di allarme, soglia di emergenza. Il superamento della prima può essere dovuto alla semplice variabilità idrologica naturale; il superamento della seconda (con minore probabilità) e della terza (con ragionevole certezza) indicano invece il verificarsi di una situazione di impatto in corso. Appare evidente che un isterilimento stagionale di una sorgente o un brusco abbassamento piezometrico in un pozzo non debbono essere necessariamente sempre associati ad un impatto in corso.

Si rimanda al Capitolo 8 sul monitoraggio per maggiori approfondimenti in merito e per l'adozione di una terminologia e metodica per quanto possibile codificate.

4.7.3 Scelta ed applicazione del metodo di valutazione del rischio

Indubbiamente uno degli sforzi tecnici maggiori, e quindi una delle sfide maggiori, nei progetti di grandi opere in sotterraneo è la previsione delle interferenze sulla circolazione idrica sotterranea e degli impatti sui bersagli in termini di abbassamento, o innalzamento, piezometrico e di isterilimento delle sorgenti e del deflusso di base dei corpi d'acqua superficiale. La possibilità di prevedere effetti indesiderati, in termini ambientali e socioeconomici, rappresenta infatti il requisito essenziale per approntare per tempo le necessarie misure di mitigazione, o anche deviare o abbandonare il progetto, sempre nell'ambito di un'analisi corretta del rapporto costi/benefici.

DOI 10.7343/as-2020-486

La previsione, ovviamente, avviene su 2 delle componenti del rischio: l'Interferenza e la Connessione. Che probabilità vi è di avere ingressioni di acqua di una certa portata in un determinato tratto di galleria (Interferenza) oppure che probabilità vi è che quelle ingressioni determinino effetti sugli indicatori al bersaglio di impatto oltre una certa soglia (Connessione) sono due tipiche domande associate alla previsione.

Le presenti linee guida non si propongono di entrare nel dettaglio dei differenti metodi di previsione. Le famiglie di metodi che possono essere ritenuti più significativi sono: i metodi parametrici non fisicamente basati ed i metodi matematici fisicamente basati.

Metodi parametrici: sono noti anche come metodi a matrice o metodi a punteggio e pesi. Identificano grandezze fisiche o proprietà considerate significative per la determinazione della Interferenza (ad esempio: conducibilità idraulica dell'ammasso roccioso, indice RQD, spessore della copertura, intersezione dello scavo con fratture ecc.) e della Connessione (es. distanza fra fronte di scavo e bersaglio, vicinanza del bersaglio a strutture tettoniche o soglie di permeabilità intersecate anche dallo scavo, classificazione idrogeologica del bersaglio, ecc.), le parametrizzano e le combinano tra loro tramite incrocio su matrice o tramite assegnazione di pesi moltiplicatori fino ad ottenere un indice probabilistico di rischio di impatto relativo assegnato al bersaglio. Viene utilizzata una cosiddetta matrice di contingenza, che incrocia assieme grandezze o proprietà diverse (simile come significato alla matrice di Leopold per la valutazione di impatto ambientale). Si cita, ad esempio, il metodo per la determinazione dell'indice DHI (*Drawdown Hazard Index*) associato al rischio di isterilimento delle sorgenti (Dematteis et al. 2001). Si veda anche Cesano et al. 2003.

I metodi parametrici non sono fisicamente basati e quindi hanno insito un determinato grado di soggettività. Peraltro, hanno il vantaggio di richiedere una mole ridotta di dati di ingresso, di tenere in conto comunque di numerosi parametri e di essere sufficientemente speditivi ed anche quantitativi, per cui permettono comparazioni relative fra contesti o bersagli diversi.

Metodi matematici: sono sostanzialmente rappresentati da modelli matematici di flusso di acqua sotterranea che, in modo fisicamente basato (unidimensionale, bidimensionale o tridimensionale) simulano realmente, ovviamente con semplificazioni ed assunzioni di generalizzazione, il reale processo di interferenza idrogeologica fra opera in sotterraneo e sistemi di circolazione idrica nel mezzo poroso. I codici adottati, di tipo comunque deterministico, possono essere analitici o numerici.

I metodi analitici sono basati su algoritmi relativamente semplici, condizioni al contorno semplici e stazionarie ed una distribuzione di conducibilità idraulica omogenea o comunque semplificata (Zhang and Franklin 1993; Goodman et al. 1965; Barton 1974; Federico 1984; Lei 1999, 2000; El Tani 1999).

I metodi numerici sono basati su codici complessi, implicano una maggiore flessibilità e adattabilità al mondo fisico reale ma sono, ovviamente, più esigenti in termini di competenza e sensibilità scientifica dell'utilizzatore, risorse finanziarie e disponibilità di dati di input. L'applicazione della modellazione numerica e le sue potenzialità nell'ambito degli studi idrogeologici per le opere in sotterraneo è trattata in queste linee guida al Capitolo 3. Si veda anche: Font-Capò et al. 2011, Vincenzi et al. 2010. Ancora non è frequente l'impiego di questi strumenti per la valutazione del rischio di impatto dell'opera su bersagli anche se la possibilità di assegnare una distribuzione quantificata di probabilità alle previsioni (ad esempio con simulazione della variabilità attesa dei parametri di input tramite metodi come quello Montecarlo) può grandemente contribuire ad una conoscenza accurata dell'affidabilità delle previsioni.

Una valutazione del rischio di impatto, parametrica o fisicamente basata, deve essere considerata parte essenziale del processo di progettazione. La valutazione basata su modellazione numerica è fortemente raccomandata anche se va intrapresa solo ove apporti informazioni più approfondite ed affidabili di quelle derivabili da metodi di minore complessità. La valutazione dell'opportunità di realizzare un modello numerico deve essere condotta sulla base di: completezza dei dati di base, distribuzione geografica dei sondaggi e delle prove, affidabilità del modello geologico ed idrogeologico di riferimento (alla scala richiesta dal modello), disponibilità di dati per la calibrazione. I rapporti geometrici e la distribuzione dei parametri idrodinamici dei sistemi di circolazione idrica devono essere ricostruiti con buon dettaglio, relativamente all'area idrogeologicamente significativa del progetto, e sono necessari dati quantitativi per la calibrazione (livelli piezometrici, portate fluenti).

4.7.4 Rappresentazione del grado di interferenza e del rischio

L'interferenza può essere mostrata, lungo il tracciato dell'opera, con diversi cromatismi in relazione alla probabilità del verificarsi di ingressioni di acqua in galleria di una certa entità (o di risalite piezometriche di una certa entità nel caso dell'effetto barriera).

Il Rischio del superamento di determinate soglie degli indicatori di impatto può essere associato, con opportune simbologie o cromatismi, a:

- i bersagli (quindi sorgenti, tratti di corsi d'acqua, pozzi, GDE ecc.);
- aree di impatto (proiezione planimetrica delle aree dove l'acquifero subisce un impatto).

Nella scelta dei colori il rosso segnalerà la situazione di maggiore rischio (ad esempio rischio di prosciugamento totale o parziale per una sorgente) ed altri colori meno accesi segnaleranno rischi di intensità minore. Allo stesso modo i tratti di galleria con la maggiore probabilità di indurre ingressioni di acqua saranno evidenziati con opportuna scala cromatica.

Al fine di superare l'intrinseca indeterminatezza associata alla valutazione probabilistica del rischio, si raccomanda di impiegare, in parallelo, 2 metodi, del tutto indipendenti fra loro come filosofia di approccio: ad esempio, un metodo parametrico ed un modello numerico. Per ogni singolo bersaglio

il cromatismo di rischio, codificato allo stesso modo, non sarà necessariamente sempre lo stesso per cui le condizioni effettive di sussistenza di un determinato grado di rischio potrebbero essere accertate con una valutazione di tipo "semaforico": nel caso di una conferma reciproca di un metodo rispetto all'altro il potere predittivo della valutazione è rafforzato, mentre esso viene indebolito se una delle 2 valutazioni smentisce l'altra. Possono ovviamente essere trovate combinazioni diverse all'esito delle 2 valutazioni, tenendo comunque presente che la valutazione finale di rischio deve essere conservativamente cautelativa secondo il principio di precauzione.

4.8 Interventi per la mitigazione/compensazione degli impatti

Ci si riferisce qui ad azioni progettuali o opere tese a prevenire o attenuare gli impatti sui bersagli originati dall'opera, oppure a compensarli qualora essi non siano eliminabili con modifiche al progetto.

Elenchiamo qui le principali modalità di intervento soprattutto in relazione all'ambito ed al momento progettuale in cui possono essere attivate.

4.8.1 Ambito di cantiere di scavo

Interventi di impermeabilizzazione del cavo

Sono interventi realizzati quando è necessario tentare di limitare il drenaggio del cavo per preservare l'abbassamento del livello piezometrico nel volume di mezzo poroso soggetto ad interferenza. O sono già previsti dalla progettazione preliminare, a seguito degli esiti della valutazione prognostica di rischio di interferenza, oppure vengono realizzati in corso d'opera se si vengono a verificare situazioni critiche, non previste.

Negli interventi previsti da progetto preliminare va soprattutto considerata la messa in opera di rivestimenti in grado di sopportare maggiori pressioni neutre; in quelli attivati in condizioni di emergenza va considerata la realizzazione di impermeabilizzazioni spinte in fase di avanzamento tramite prodotti speciali (vedi Capitolo 7).

Interventi di drenaggio attraverso il cavo

Diversamente dall'approccio di cui al paragrafo precedente, sono interventi realizzati quando l'opera crea un effetto barriera (*dam effect*) sul flusso delle acque sotterranee, inducendo, sulla superficie piezometrica, un innalzamento a monte ed un abbassamento a valle dell'opera stessa. Tipico è l'esempio di opere relative a nodi urbani o cameroni di stazioni sotterranee, posti trasversalmente al flusso di falda.

Si tratta di sistemi di *by-pass*, realizzati o con metodi passivi (dreni collegati da tubazioni che convogliano acqua attraverso i 2 lati della barriera riequilibrando "naturalmente" i carichi piezometrici) o con metodi attivi (tramite pompaggi e opportune re-immissioni).

La previsione e progettazione degli interventi è essenziale per prevenire fenomeni indesiderati quali: allagamenti di sottoservizi ed interrati (a monte); cedimenti e lesioni di edifici (a valle). Il progetto dovrà verificare con accuratezza non solo la fattibilità ed il dimensionamento idrogeologico, ma anche le criticità di manutenzione e durata dell'opera, minimizzando i rischi di intasamento e perdita di efficienza, assai probabili quando si tratta di reiniettare acqua nel mezzo poroso. Andrà anche verificato lo stato di contaminazione delle acque sotterranee, frequente in aree urbane, per evitare rischi di trasferimento diretto di contaminazioni da una porzione all'altra di un acquifero o verso altri acquiferi.

4.8.2 Ambito territoriale ed ambientale

Interventi di compensazione di emergenza

Sono interventi previsti dal piano di monitoraggio attivabili in corso d'opera qualora si verifichino situazioni di superamento delle soglie di impatto ai bersagli (es. soglia di emergenza).

Si tratta di progetti di approvvigionamento idrico straordinari che, comunque, con la chiara identificazione della fonte alternativa, dovrebbero essere identificati in fase progettuale, a seguito delle valutazioni sul rischio di impatto in precedenza esposte, e contestualmente all'implementazione del programma di monitoraggio in corso d'opera. La tipologia e qualità della fonte alternativa sarà funzione della destinazione d'uso della risorsa potenzialmente impattata: potabile, industriale, irriguo, sostentamento di un GDE.

Potrebbe essere prevista, ad esempio, la messa in opera di un allaccio acquedottistico temporaneo, con tubazioni posate in superficie, per la durata dei lavori e fin tanto che la situazione di impatto permanga. L'intervento, solo nel caso in cui l'impatto diventasse permanente, sarà reso stabile.

Nessuna opera importante sarà eseguita preventivamente ai lavori a meno del conseguimento della certezza di impatti. Dovrà però essere predisposto quanto necessario ad una rapida realizzazione dell'intervento previsto, quali, ad esempio, la messa in opera di piattaforme per il posizionamento di vasche o di unità mobili di trattamento delle acque. Sarà inoltre necessario avere cura di ottenere le autorizzazioni necessarie con congruo anticipo rispetto al momento di presumibile manifestazione dell'impatto.

Interventi di mitigazione o compensazione definitivi

Tali interventi sono da considerare "strutturali" e quindi permanenti. Sono pertanto interventi da attuare *post-operam*. Possono essere suddivisi nelle tipologie:

Sistemi per approvvigionamento definitivo in sostituzione delle captazioni impattate

Questi interventi dovranno essere progettati e realizzati prima dell'inizio dei lavori nei casi in cui il rischio di impatto sia giudicato tale da richiedere interventi preventivi. Dovranno comunque essere progettati (anche se non realizzati) nel caso che il rischio sia giudicato comunque superiore ad una certa soglia, altrimenti potranno essere progettati e/o approntati interventi temporanei di compensazione di emergenza (di cui al punto precedente).

Per le nuove captazioni dovranno essere selezionati punti d'acqua sicuramente non soggetti a rischio di impatto. Nel caso di impatti su sorgenti, le nuove captazioni non necessariamente dovranno coinvolgere ulteriori captazioni di emergenze (fino ad allora non captate): possono essere anche

DOI 10.7343/as-2020-486

progettati pozzi o derivazioni in alveo oppure può essere potenziato l'attingimento con captazioni di acquifero in aree già sfruttate. Nel caso di impatti su pozzi, potrà anche essere valutata l'efficacia di un approfondimento del pozzo esistente. Preliminarmente, comunque, dovrà essere valutata la sostenibilità idrogeologica ed ambientale delle nuove captazioni, evitando di trasferire su altri acquiferi situazioni di sfruttamento non sostenibili, che potrebbero creare degli effetti indesiderati a cascata.

Interventi di mitigazione o compensazione dell'isterilimento del deflusso di base dei corsi d'acqua

Gli interventi di mitigazione o compensazione degli impatti non sono finalizzati solamente a preservare le captazioni a rischio o ad integrarle, qualora perdute, limitando danni di tipo socioeconomico. Tali interventi possono essere finalizzati anche al ristoro o riduzione del danno ambientale conseguente alla diminuzione o completo isterilimento del deflusso di base nel reticolo superficiale, conseguente, ovviamente, anche all'isterilimento delle sorgenti. Tali depauperamenti possono infatti portare conseguenze sia dal punto di vista ecologico (es. impatti sui GDE, vegetazione riparia, abbeveramento specie selvatiche) che ricreativo antropico (zone di pratica di attività quali torrentismo/*canyoning*, pesca, o anche semplicemente escursionismo estivo).

Le misure, mitigative o compensative, sono in tal caso da effettuarsi in alveo e possono esplicarsi con differenti modalità:

- *by-pass* in alveo per oltrepassare tratte dove vi è una perdita di subalveo del deflusso a causa del drenaggio della galleria sottostante;
- progettazione e realizzazione di piccoli invasi per garantire un deflusso minimo vitale alle tratte isterilite;
- rilanci da galleria, tramite sistemi di emungimento, con una sorta di "autotrasfusione di acqua" del sistema idrogeologico, riportando ad un livello di base superiore l'acqua ora recapitata al livello di base inferiore (rappresentato dalla galleria);
- impermeabilizzazioni in alveo per prevenire perdite di subalveo.

Di tali misure dovrà essere effettuata, già in sede di progettazione *ante-operam*, una attenta analisi sia della fattibilità tecnica sia del rapporto costi-benefici.

4.9 Ritorno di esperienza e rimandi bibliografici

Le considerazioni e raccomandazioni contenute in questo capitolo derivano, in gran parte, dall'esperienza maturata dagli scriventi sulle conseguenze dello scavo dei tunnel ferroviari Alta Velocità-Alta Capacità Bologna-Firenze. Per maggiori dettagli sugli aspetti idrogeologici legati al progetto e sul modello concettuale degli ammassi rocciosi, di tipo sedimentario, da esso interessati si rimanda a: Canuti et al. 2009; Gargini et al. 2006, 2008; Vincenzi et al. 2009, 2014. Gli autori hanno anche tenuto conto di esperienze pubblicate sugli effetti di tunnel sulla circolazione idrica sotterranea in ammassi rocciosi cristallini (Masset & Loew 2010) e metamorfici (Bearmar 2012).

5 VALORIZZAZIONE DELLE ACQUE DRENATE

In questo capitolo viene affrontato il tema delle possibilità di valorizzare le acque drenate dalle gallerie. Anche la valorizzazione del calore è una buona pratica che questo documento suggerisce di adottare, mediante i criteri illustrati nel successivo Capitolo 6.

5.1 Premessa

Il quadro normativo (si veda il Capitolo 10) ed i principi della progettazione sostenibile prevedono che le risorse idriche e geotermiche siano beni comuni, e pertanto vadano preservati e soprattutto non sprecati. In questa ottica la valorizzazione delle acque eventualmente drenate dalle opere in sotterraneo appare come una buona pratica che necessariamente deve essere valutata in fase di progettazione.

Come illustrato nel BOX 5, in determinati contesti le gallerie sono inevitabilmente delle strutture drenanti, con conseguente estrazione di acqua sotterranea dal sistema acquifero.

Questi esempi hanno dimostrato, inoltre, come il riutilizzo dell'acqua drenata in una galleria aumenti l'effetto positivo che l'infrastruttura ha sul contesto sociale e produttivo (BOX 6, Fig. 17), contribuendo in questo modo alla sostenibilità dell'opera, da un punto di vista economico, sociale ed ambientale.

Sulla base di esperienze vissute dagli autori, è possibile affermare che esistono tuttavia ostacoli alla valorizzazione delle acque drenate in galleria, che non sono di tipo tecnico, ma piuttosto amministrativo. L'assenza di norme e regolamenti specificatamente dedicati alle captazioni in galleria da un lato ostacola gli amministratori pubblici e gli Enti di controllo che devono rilasciare e monitorare le concessioni di derivazione d'acqua e dall'altro legittima i gestori dell'infrastruttura in sotterraneo ad escludere un utilizzo multiplo delle gallerie. Infatti, per fare un esempio, in assenza di specifica normativa, un gestore ferroviario non è stimolato a realizzare e gestire l'infrastruttura di trasporto congiuntamente con un ente acquedottistico che simultaneamente gestisce una captazione d'acqua nella stessa galleria.

In conclusione, è urgente ed auspicabile l'emanazione di una normativa specifica che aiuti lo sviluppo dei progetti di captazione d'acqua in galleria.

5.2 Criteri di progettazione

Il riutilizzo e la valorizzazione delle acque drenate in galleria richiede la valutazione della qualità e quantità della risorsa disponibile, della compatibilità dei materiali utilizzati per il sostegno provvisorio e definitivo della galleria che potrebbero venire a contatto con l'acqua e, altrettanto importante, della domanda di acqua, ovvero delle esigenze idriche dell'area prossima alla galleria.

Il riutilizzo deve inoltre tenere in considerazione gli aspetti normativi locali, che regolano le concessioni di sfruttamento dell'acqua e la salvaguardia della captazione in relazione alla sua vulnerabilità.

BOX 5 - Le gallerie sono strutture drenanti?

Una prima basilare distinzione che va fatta tra i differenti tipi di gallerie esistenti è tra le gallerie completamente impermeabilizzate, e pertanto non drenanti, e quelle drenanti.

Le gallerie impermeabilizzate, non drenanti

L'impermeabilizzazione totale della galleria è tecnologicamente realizzabile e diffusamente adottata in contesti poco profondi, tipicamente urbani (ad es. le metropolitane), principalmente per evitare subsidenze generate dal drenaggio della falda, che potrebbe comportare lesioni agli edifici in superficie, limitrofi alla galleria.

L'annullamento del drenaggio della galleria può essere perseguito mediante l'adozione di uno scavo meccanizzato dotato di controllo delle pressioni dell'acqua di falda al fronte di scavo e, a lungo termine, mediante l'installazione di un rivestimento definitivo impermeabile, strutturalmente dimensionato per sorreggere i carichi idraulici all'estradosso della galleria.

Alcune tipologie di scavo meccanizzato permettono di mantenere una pressione controllata al fronte, che contrasta quella della falda evitando l'ingresso di acqua sotterranea nella galleria. In questi casi la limitante è data dal carico idraulico naturale al contorno della galleria stessa, che generalmente deve essere inferiore a 8-10 bar di pressione (circa 80-100 m di colonna d'acqua). La tecnologia esistente oggi sul mercato non permette di garantire il mantenimento di pressioni al fronte di scavo superiori a questo limite.

Lo scavo meccanizzato viene realizzato per mezzo di macchine TBM (*Tunnel Boring Machine*) dotate di un sistema che permetta di mantenere una determinata pressione al fronte di scavo, sufficiente a contrastare la pressione della falda circostante. L'effetto che si ottiene è quello di eliminare l'ingresso dell'acqua sotterranea nello scavo, anche in contesti di media o elevata permeabilità. Nelle macchine tipo EPB (*Earth Pressure Balance*) il materiale al fronte di scavo viene opportunamente miscelato con acqua ed additivi e mantenuto alla pressione desiderata (si veda a questo proposito anche il Paragrafo 7.1). Altre varianti tecnologiche sono le BS (*Bentonite Slurry*), dove la pressione al fronte di scavo è quella idrostatica del fango bentonitico mischiato al materiale scavato, oppure le più antiche e ormai in disuso CA (*Compressed Air*), ad aria compressa.

Nel Paragrafo 7.5 sono descritti i materiali utilizzati per l'impermeabilizzazione.

Le gallerie drenanti

Là dove l'impermeabilizzazione completa non fosse possibile, ad esempio in presenza di alte coperture e pressioni d'acqua maggiori di 10 bar, le acque sotterranee, durante lo scavo, sono drenate nella galleria. In questi casi il progetto della galleria deve includere uno specifico studio di valorizzazione dell'acqua e del calore incontrati.

Esistono in letteratura esempi di gallerie che ottemperano a scopi multipli, ovvero che coniugano lo scopo principale per cui il progetto in sotterraneo è stato finanziato, ad esempio ferroviario, o stradale, o di altro tipo, con la captazione e la restituzione all'esterno delle acque drenate da destinare a scopi vari, come ad esempio quello agricolo, industriale, potabile, idroelettrico, geotermico, antincendio, ed altri.

BOX 6 - Progetto Tropenhaus - Traforo ferroviario del Lötschberg (CH)



Fig. 17 - Progetto Tropenhaus: esempio di utilizzo per scopi produttivi dell'acqua naturalmente calda intercettata dalla galleria ferroviaria.

Fig. 17 - Tropenhaus Project: example of use for production purposes of thermal water drained by a railway tunnel.

L'acqua naturalmente calda captata nella galleria ferroviaria del Lötschberg è valorizzata sul lato nord, con portata di circa 100 l/s ad una temperatura di 17-20 °C. L'acqua viene utilizzata per coltivare frutti tropicali e per produrre caviale di storione in una piscicoltura.

DOI 10.7343/as-2020-486

Lo studio di fattibilità richiede una descrizione delle caratteristiche del sistema, che possono essere suddivise in cinque capitoli principali:

1. Caratteristiche dell'acqua sotterranea da valorizzare:
   - localizzazione dei settori di galleria con principali flussi d'acqua adatti alla realizzazione di specifiche opere di captazione, da raccogliere e da condurre all'esterno mediante apposite tubazioni; le acque adatte per il recupero dell'acqua, ed eventualmente dell'energia termica, dovranno beneficiare di tubazioni di diametro, tipologia e numero adatto alle esigenze;
   - descrizione delle caratteristiche idrogeologiche della venuta d'acqua da captare, che può essere puntuale o diffusa lungo un tratto di galleria, proveniente da zone fratturate o di faglia, o da acquiferi porosi;
   - condizioni di carico idraulico previsto lungo la galleria, in condizioni transitorie, durante lo scavo, ed in regime stabilizzato, durante l'esercizio dell'infrastruttura;
   - portata d'acqua drenata in galleria, in condizioni transitorie ed in regime stabilizzato; l'effettivo potenziale di sfruttamento delle acque drenate in galleria può essere valutato solo in condizioni stabilizzate; vanno descritte le potenziali variazioni stagionali della portata;
   - temperatura dell'acqua drenata, in condizioni transitorie ed in regime stabilizzato; è utile prevedere se la temperatura dell'acqua drenata rimarrà stabile nel tempo;
   - qualità chimico-fisica dell'acqua drenata, in condizioni transitorie ed in regime stabilizzato; l'acqua potenzialmente sfruttabile deve essere caratterizzata in termini chimico-fisici e biologici per ottemperare ai limiti di legge imposti per gli utilizzi specifici che saranno individuati (cfr. punto 2); il protocollo di analisi andrà definito in funzione dell'utilizzo scelto.
2. Possibilità di utilizzo, in funzione della qualità e quantità della risorsa:
   - potabile;
   - agricolo;
   - industriale;
   - altro uso.
3. Analisi del fabbisogno idrico ed energetico locale in esterno, in prossimità del portale di restituzione dell'acqua. Occorre identificare la potenziale domanda di risorsa idrica e termica, in termini di tipo di utilizzo e quantità, per verificare le ipotesi possibili individuate al punto 2, attraverso:
   - analisi delle attività economiche, di tipo agricolo, manifatturiero, industriale, ecc.;
   - analisi della popolazione, permanente o turistica fluttuante;
   - analisi delle tariffe dell'acqua;
   - analisi della proiezione della domanda per il futuro.
4. Progetto di massima della captazione, con descrizione delle caratteristiche dei materiali utilizzati per il sostegno della galleria (si veda a questo riguardo anche il Capitolo 7):
   - analisi dei vincoli amministrativi e ambientali locali. Elenco della normativa vigente applicabile alla captazione d'acqua, in funzione dei possibili utilizzi identificati ai punti 2 e 3.
   - verifica dei diritti di concessione dell'acqua e dei diritti di utilizzo della galleria. Alcuni utilizzi dell'acqua richiedono l'accesso frequente alla captazione, come ad esempio l'utilizzo potabile. Occorre verificare la compatibilità della captazione con le attività primarie a cui è inizialmente vocata l'infrastruttura sotterranea, come ad esempio il transito ferroviario, stradale o altro tipo di attività. È bene ricordare che, purtroppo, sono stati spesso i vincoli di accesso alla galleria dati dal gestore, sia esso ferroviario o stradale, il reale ostacolo alla realizzazione di progetti di valorizzazione dell'acqua drenata in galleria. Determinate modalità di realizzazione possono eliminare o limitare l'interferenza di queste attività con l'esercizio del tunnel, e pertanto è opportuno tenerne conto in fase progettuale.
   - cartografia dei vincoli urbanistici e ambientali.
   - progetto della captazione e eduzione all'esterno. La captazione deve possibilmente essere ispezionabile ed accessibile per manutenzione e pulizia, con cadenze e modalità variabili in funzione dell'utilizzo.
   - descrizione della tipologia di sostegni utilizzati nella galleria nei pressi della zona di captazione. Ad esempio, bulloni, perni, reti metalliche, centine, calcestruzzo proiettato, colato o prefabbricato, iniezioni cementizie, chimiche, ecc.
   - specifiche tecniche dei materiali utilizzati nell'opera di captazione in galleria, inclusi i rivestimenti provvisori e definitivi, i sistemi di drenaggio e le eventuali cortine di iniezione per il contenimento della venuta d'acqua. Occorre documentare con schede tecniche che evidenzino la durabilità dei materiali, l'eventuale tossicità e possibilità di cessione di composti inquinanti a contatto con l'acqua. È anche opportuna l'effettuazione di test ad hoc nel caso non siano disponibili informazioni sul rischio di cessione di prodotti miscelati e posti in opera.
   - analisi del rischio di contaminazione delle acque sotterranee. Occorre valutare la probabilità di contaminazione dell'acqua sotterranea al contatto con i materiali utilizzati per il sostegno della galleria, non solo nell'opera di captazione ma anche nelle zone limitrofe. Inoltre, occorre valutare il rischio di contaminazione per sversamenti accidentali che possano verificarsi nella galleria (questo è tipicamente il caso di gallerie stradali e ferroviarie).
   - delimitazione del bacino idrogeologico di alimentazione della venuta d'acqua in galleria.

- Studio di vulnerabilità degli acquiferi che alimentano le venute d'acqua in galleria.
- Analisi di fattibilità economica, anche sulla base di quanto emerso al punto 3.

5.3 Monitoraggio

Durante lo scavo della galleria, è necessario prevedere l'attuazione di un protocollo di monitoraggio stabilito in base al tipo di utilizzo previsto ed in coerenza con la normativa vigente. Per una trattazione completa del monitoraggio volto alla protezione della risorsa idrica in generale, e dei punti d'acqua e dei GDE in superficie, si rimanda ai Capitoli 8 e 10.

Ai fini della valorizzazione della risorsa idrica drenata in galleria, una captazione provvisoria dell'acqua (durante la fase di scavo della galleria) permetterà di monitorare le caratteristiche quantitative e fisico chimiche per verificare le ipotesi progettuali. Dovranno essere monitorati la portata, la conducibilità elettrica, la temperatura e il pH per almeno un anno. Eventuali analisi di maggior dettaglio (ad es. qualità chimiche, batteriologiche, isotopiche) dovranno essere pianificate in funzione del tipo di utilizzo previsto.

6 VALORIZZAZIONE DEL CALORE DEL TERRENO

6.1 Considerazioni generali

La necessità di ridurre le emissioni di anidride carbonica e di aumentare drasticamente la produzione di energia da fonti rinnovabili in risposta ai cambiamenti climatici ha portato ad un emergente interesse verso l'energia geotermica, con particolare riferimento a quella superficiale. Infatti, il suo utilizzo prescinde dalla posizione geografica, dal momento che è accessibile in ogni parte del mondo, rendendola una fonte energetica locale, affidabile ed economicamente competitiva. I recenti sviluppi della ricerca su questo fronte mostrano come, oltre a tradizionali impianti geotermici convenzionali *open-loop* (a circuito aperto) e *closed-loop* (a circuito chiuso), sia possibile utilizzare strutture geotecniche a contatto con il terreno anche in qualità di scambiatori di calore. Tra queste anche il rivestimento delle gallerie può essere adattato a geostruttura energetica fissando il circuito di serpentine geotermiche tra il rivestimento di prima fase e quello di seconda fase, nel caso di gallerie scavate con metodo convenzionale, o incorporandolo nei conci prefabbricati, per gallerie scavate con tecnica meccanizzata. L'energia termica estratta può avere svariati utilizzi, tra cui il condizionamento di stazioni metropolitane e di edifici, il riscaldamento del rivestimento stesso, il *deicing* (sghiacciamento) dei portali delle gallerie, di impalcati di ponti e, in generale, del manto stradale.

Il processo progettuale che conduce alla realizzazione di una galleria energetica esula da riferimenti normativi specifici e non può essere ricondotto in maniera semplificativa ad una serie di verifiche, siano esse strutturali e/o geotecniche. Esso necessariamente coinvolge un ampio spettro di problematiche che influenzano la pianificazione urbanistica e l'approvvigionamento e la distribuzione energetica dell'area. Pertanto, come nel caso del recupero dell'acqua drenata dalla galleria esposto nel Capitolo 5, anche lo studio della possibilità di realizzare una galleria energetica richiede una programmazione di ampio anticipo e, necessariamente, fin dalla fase di studio di fattibilità di una infrastruttura. Solo in tal modo è possibile garantire che l'infrastruttura possa contribuire allo sviluppo urbano sostenibile integrandosi nella pianificazione energetica del territorio.

Entrando nello specifico, l'attivazione termica dei rivestimenti di galleria comporta almeno due aspetti tecnici di approfondimento da prendere in considerazione durante le fasi progettuali. Al progetto strutturale, nel quale si identificano gli effetti meccanici indotti dalle variazioni di temperatura sugli elementi strutturali in modo tale da garantirne l'integrità a lungo termine, occorre affiancare un'analisi di ottimizzazione energetica, in modo tale da massimizzare il rendimento energetico a parità di costi (progetto termico).

Se il progetto strutturale e geotecnico potrà essere ragionevolmente approfondito nelle fasi di progettazione più avanzate, è proprio il progetto termico che dovrà trovare attuazione fin dall'ideazione dell'opera.

Nel seguito si illustrano le principali fasi del progetto termico, risultando questo di primario interesse nel contesto delle presenti Linee Guida rispetto al progetto strutturale.

DOI 10.7343/as-2020-486

6.2 Il progetto termico

Obiettivo del progetto termico è la quantificazione del calore scambiabile con il terreno a seconda delle specifiche condizioni del sito, al fine di valutare l'effettiva efficienza energetica dell'impianto, cui consegue la sua convenienza in termini economici, e la sostenibilità ambientale. Per efficienza del sistema si intende, sostanzialmente, la quantificazione del calore estratto o trasferito al serbatoio geotermico per mezzo del rivestimento della galleria. La sostenibilità ambientale, invece, riguarda la valutazione degli effetti di questi sistemi sull'ambiente circostante, al fine di limitarne l'impatto.

Trattandosi di una tecnologia di recente introduzione non esistono chiare indicazioni metodologiche o normative da seguire per il dimensionamento termico delle gallerie energetiche. Una proposta procedurale per le gallerie energetiche è schematizzata nel diagramma di flusso riportato nella Figura 18.

In primis, è necessario svolgere un supplemento di indagine, il cui livello di dettaglio dipenderà dalla fase progettuale analizzata, volto alla determinazione delle caratteristiche idrogeologiche del terreno, che possono influenzare i processi di scambio termico. I parametri dei materiali utili da determinare sono indicati in Tabella 2. Tra le tecniche di prova *in situ* si menziona il *Thermal Response Test* (TRT), molto diffuso per pozzi (*Borehole Heat Exchanger*, BHE) e pali energetici, utile per valutare la conducibilità termica del terreno, la resistenza termica dello scambiatore di calore e la temperatura indisturbata del terreno. Le prove in laboratorio si distinguono in metodi stazionari (e.g. piastra calda) e metodi transitori (e.g. *needle probe*, *transient plane source*) e permettono di valutare la conducibilità termica, la diffusività termica e la capacità termica volumetrica. Tuttavia, è necessario essere consapevoli che le misure in laboratorio non tengono conto di condizioni sito-specifiche quali la presenza del flusso di falda, l'eterogeneità spaziale ed effetti di scala che hanno un impatto diretto sulle proprietà termiche reali (Vieira et al. 2017).

La quantità di calore scambiabile dipende da diversi fattori. Per consentirne una valutazione di prima approssimazione è possibile utilizzare i nomogrammi suggeriti da Insana e Barla (2020) nei quali la quantità di calore scambiabile è valutata in funzione di una serie di parametri quali la temperatura del sottosuolo, il flusso di falda, la conducibilità termica del terreno, l'orientazione della direzione della falda e la temperatura di ingresso del fluido termovettore.

Per una quantificazione più completa occorre realizzare un modello numerico 3D termo-idraulico che riproduca una porzione di rivestimento attivato termicamente. Ad esempio,

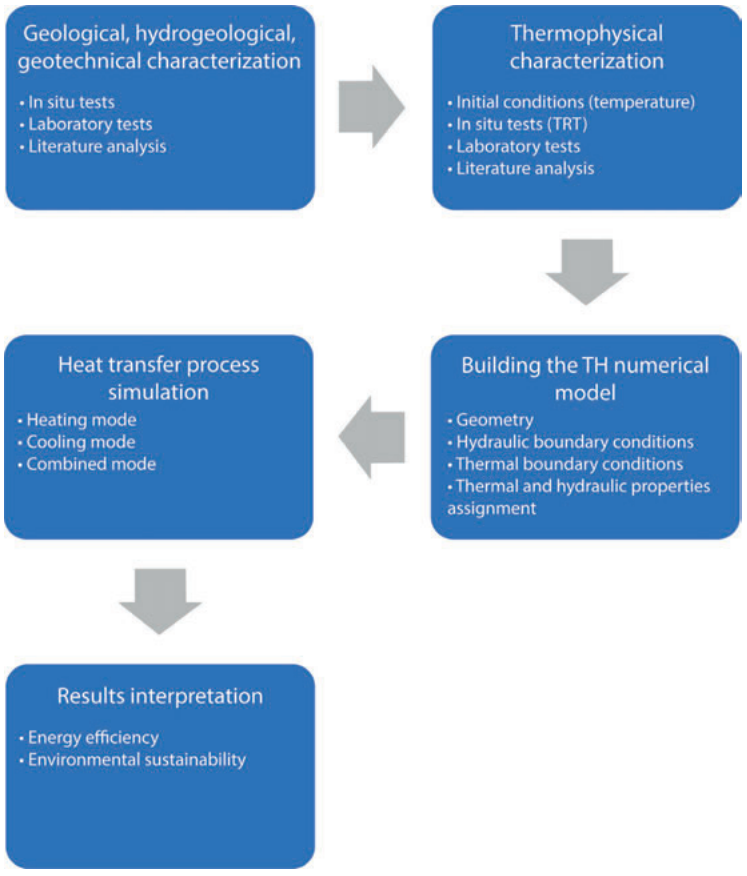

Fig. 18 - Procedura di progettazione termica di una galleria energetica (Barla 2020; Insana 2020).
Fig. 18 - Thermal design procedure for an energy tunnel (Barla 2020; Insana 2020).

Tab. 2 - Proprietà e parametri chiave richiesti per il progetto termico di una galleria energetica.

Tab. 2 - Key properties and parameters required for the thermal design of an energy tunnel.

Proprietà/Parametro	Simbolo	Unità	Materiali	Indagini
Conducibilità termica	λ	W/mK	Terreno, calcestruzzo	TRT, *needle probe*, *transient plane source*
Capacità termica specifica	S_c	J/kgK	Terreno, calcestruzzo	*Transient plane source*
Temperatura indisturbata	T_0	°C	Terreno	TRT, misura a diverse profondità con freatimetro con termocoppia in piezometro
Porosità efficace	n_e	-	Terreno	Prove con traccianti artificiali
Conducibilità idraulica orizzontale e verticale	K_h, K_v	m/s	Terreno	Prove di pompaggio e immissione, *slug test*
Velocità del flusso di falda	v	m/s		Campagne piezometriche (misurazioni con freatimetro), prove con traccianti artificiali
Soggiacenza della superficie freatica	f	m		Campagne piezometriche (misurazioni con freatimetro)
Direzione del flusso di falda	df	°		Campagne piezometriche (misurazioni con freatimetro)

nel caso di conci energetici, è possibile riprodurre un numero limitato di anelli di galleria attrezzati per lo scambio del calore. In generale, è possibile fare riferimento a codici di calcolo agli elementi finiti o alle differenze finite, costruiti adottando una formulazione THM (*Thermo-Hydro-Mechanical*) o TH (*Thermo-Hydraulic*).

Tipicamente, le analisi vengono eseguite riproducendo il funzionamento del rivestimento per un certo numero di anni, così da analizzare non solo gli effetti di breve termine, ma anche e soprattutto quelli di lungo termine.

Per costruire il modello è necessario riprodurre fedelmente la corretta geometria del caso di studio, includendo la disposizione e la geometria del circuito geotermico oltre alle condizioni idrogeologiche e termiche del sottosuolo. Il flusso di falda può essere riprodotto imponendo come condizione al contorno, sui bordi del modello, una differenza di carico idraulico, che determina pertanto un flusso nella direzione corrispondente a quella osservata *in situ*, in funzione della conducibilità idraulica del terreno. Una volta impostate le condizioni iniziali, l'analisi è condotta imponendo la temperatura e la velocità di flusso all'ingresso dei tubi scambiatori e calcolando la temperatura in uscita. Essa dipenderà dallo scambio termico che viene riprodotto numericamente nel corso dell'analisi. Variando la temperatura d'ingresso ai tubi scambiatori, l'analisi può consentire di simulare il comportamento medio nei diversi periodi di attivazione dell'impianto. Ad esempio, imponendo una temperatura d'ingresso compresa tra i 24° e i 28°C, si può simulare il funzionamento estivo, quando il calore in eccesso viene disperso nel terreno. Imponendo, invece, una temperatura d'ingresso compresa tra 3° e 6°C, è possibile simulare il comportamento invernale, estraendo calore dal terreno. Infine, facendo variare ciclicamente la temperatura d'ingresso, in base alle modalità di funzionamento annuali, è possibile simulare il comportamento stagionale dell'impianto e valutare gli effetti di lungo termine.

La potenza termica scambiata in inverno ed estate può essere calcolata a partire dalla differenza di temperatura tra ingresso e uscita delle tubazioni e utilizzata per determinare il potenziale geotermico del tratto di galleria di interesse.

Per l'analisi di sostenibilità ambientale, l'obiettivo consiste nel verificare l'impatto del rivestimento energetico della galleria sull'ambiente circostante. Anche a questo fine si può utilizzare un modello numerico termoidraulico, con lo scopo di riprodurre i flussi dinamici dell'acqua di falda e di valutare l'entità delle variazioni termiche indotte nella falda acquifera e nel sottosuolo per le reali condizioni di utilizzo della geostruttura energetica in esercizio.

Infine, una delle peculiarità delle gallerie energetiche che può influenzare notevolmente le prestazioni del sistema, come risulta da diversi studi (Bourne-Webb et al., 2016; Moormann et al., 2018; Insana e Barla, 2020), è la temperatura dell'aria interna alla galleria.

DOI 10.7343/as-2020-486

7 PRODOTTI CHIMICI UTILIZZATI NELLO SCAVO

Una grande varietà di prodotti chimici viene utilizzata per lo scavo di gallerie, sia nel caso di scavo meccanizzato con frese a piena sezione (TBM) sia nel caso di scavo con metodi tradizionali. Molti di questi prodotti chimici possono entrare in contatto con le acque di falda e con le acque di drenaggio della galleria e devono dunque essere valutati, oltre che dal punto di vista tecnico ed operativo, anche sotto il profilo del loro impatto ambientale.

A maggior ragione nel caso dell'utilizzo della galleria come opera di captazione dell'acqua è necessaria la completa conoscenza dei materiali utilizzati durante lo scavo, al fine di poter valutare la vulnerabilità della risorsa captata all'entrare nell'opera drenante.

Negli ultimi anni, le attività di ricerca e sviluppo di alcune aziende produttrici di materiali per l'industria del *tunnelling* hanno reso disponibili sul mercato varie soluzioni in grado di ridurre/minimizzare tale impatto, ad esempio variando le formulazioni di alcuni prodotti (es. gli agenti schiumogeni utilizzati per il condizionamento del terreno durante lo scavo con TBM di tipo *Earth Pressure Balance*, EPB) o proponendo soluzioni tecnologiche che evitano completamente il contatto tra prodotti chimici ed acque di falda (es. nel caso di infiltrazioni di acqua attraverso giunti tra conci di calcestruzzo in gallerie scavate con TBM scudate, è possibile sigillare il giunto tramite l'uso di idonei profili in plastica, evitando così l'iniezione di resine a tergo del rivestimento della galleria).

Di seguito vengono illustrate alcune di queste soluzioni.

7.1 Scavo meccanizzato di gallerie con TBM – Prodotti per il condizionamento del terreno

Lo scavo meccanizzato con TBM di tipo EPB prevede l'utilizzo di prodotti chimici che vengono miscelati con il terreno durante l'avanzamento della macchina, al fine di facilitare ed accelerare le operazioni di scavo. Il prodotto più comune, utilizzato praticamente su tutte le TBM EPB, è un agente schiumogeno, la cui materia prima principale è un tensioattivo miscelato in soluzione acquosa con diversi altri ingredienti (polimeri, solventi, ecc.). Da un punto di vista tecnico ed operativo, la scelta dell'agente schiumogeno si basa principalmente sulla compatibilità con il terreno da scavare (ad esempio, esistono formulazioni particolarmente adatte allo scavo di terreni argillosi, generalmente caratterizzati da caratteristiche di "adesione" che possono rendere l'avanzamento della TBM EPB complicato). Allo stesso tempo, le caratteristiche ambientali dell'agente schiumogeno sono parimenti importanti, in quanto questo prodotto chimico entra a contatto, oltre che con il terreno, anche con le acque di falda e con le acque contenute dentro al materiale scavato (estratto nella maggior parte dei casi con nastro orizzontale lungo la galleria e poi stoccato temporaneamente in aree di cantiere, dove l'acqua drenata dal materiale scavato è raccolta e adeguatamente trattata).

Ogni singolo ingrediente degli agenti schiumogeni quindi partecipa al grado di impatto ambientale del prodotto finito.

Nuove formulazioni di agenti schiumogeni sono state introdotte sul mercato negli ultimi anni, caratterizzate da una maggiore e più rapida biodegradabilità, da un minore apporto di materiale organico al terreno (a parità di risultato tecnico di condizionamento) e da indici di ecotossicità nettamente inferiori rispetto alle formulazioni "tradizionali".

In particolare, per quanto riguarda il potenziale impatto sulle acque di falda e sulle acque drenate, vengono misurati indici di ecotossicità nei confronti di organismi acquatici "standard", quali alghe, crostacei e pesci. Maggiore è tale indice (espresso in mg di prodotto su litri di acqua), minore è la tossicità del prodotto.

I seguenti due grafici (Figura 19) mostrano un confronto tra i dati di ecotossicità di una formulazione innovativa di agente schiumogeno e due prodotti "tradizionali".

Entrambi gli indici:

- EC_{50} = tossicità verso il crostaceo *Daphnia Magna* secondo la OECD 202
- LC_{50} = tossicità verso il pesce *Danio Rerio* secondo la OECD 203

dell'agente schiumogeno innovativo sono decine di volte superiori rispetto agli altri due. Ciò vuol dire che, per avere lo stesso effetto di tossicità sull'organismo oggetto della prova,

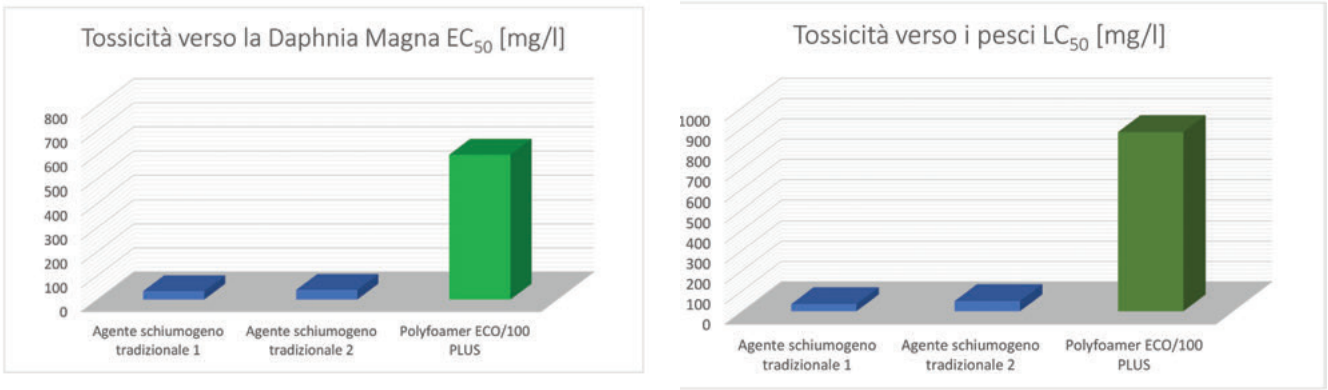

Fig. 19 - Confronto tra i dati di ecotossicità di due agenti schiumogeni tradizionali e di uno più innovativo.
Fig. 19 - Comparison between the ecotoxicity data of "traditional" foaming agents and of a more innovative one.

è necessario aumentare la concentrazione di questo prodotto di decine di volte in confronto a prodotti più "tradizionali".

Oltre alla minore tossicità, si riducono anche le quantità di tensioattivo e di altre sostanze organiche apportate al terreno e di conseguenza alle acque di drenaggio, rendendone quindi più semplice il trattamento e lo smaltimento.

7.2 Scavo meccanizzato di gallerie con TBM – Miscela di iniezione a tergo dei conci e alcalinità

Durante lo scavo di gallerie con qualsiasi TBM scudata (sia essa a pressione, come le macchine EPB o le TBM *slurry*, o aperta, quindi in roccia a singolo o a doppio scudo), è necessario riempire lo spazio anulare che si viene inevitabilmente a creare tra il rivestimento in conci di calcestruzzo ed il suolo o ammasso roccioso circostante. Nel caso di scavo in suolo, tale riempimento deve essere eseguito in contemporanea con lo scavo, al fine di evitare cedimenti del terreno verso gli anelli di rivestimento, potenzialmente pericolosi anche per fenomeni di subsidenza superficiale. In roccia invece, il riempimento anulare può essere eseguito sia in contemporanea all'avanzamento della macchina, e quindi direttamente dallo scudo, sia qualche metro più indietro, e quindi da fori predisposti nei conci di calcestruzzo. In qualsiasi situazione comunque il riempimento deve essere eseguito nel miglior modo possibile, in quanto influisce in maniera importante sulla qualità del rivestimento della galleria: ad esempio, eventuali vuoti lasciati a tergo dei conci provocano con grande probabilità fenomeni di ovalizzazione degli anelli o di fessurazione del calcestruzzo e favoriscono l'ingresso di acqua in galleria (dai giunti tra i conci e attraverso fessure passanti).

La metodologia comunemente utilizzata per il riempimento a tergo è definita "bicomponente", in quanto prevede l'utilizzo di una boiacca cementizia, estremamente fluida, stabile ed a lungo mantenimento della lavorabilità (quindi facilmente pompabile), alla quale viene aggiunto un secondo componente, ossia un accelerante, immediatamente prima dell'iniezione nel vuoto anulare.

La miscela bicomponente, così come tutti gli altri metodi di riempimento esistenti (malta non accelerata, *pea-gravel* con successivo intasamento degli interstizi con boiacca), è di natura cementizia e di conseguenza le acque di falda che entrano a contatto con il riempimento tendono ad alcalinizzarsi. In virtù di ciò, la maggior parte delle acque che si infiltrano in galleria (ad esempio, attraverso le spazzole dello scudo o attraverso fessure passanti) e che successivamente vengono pompate fuori hanno pH basico.

In alcune situazioni, è possibile sostituire il cemento con altri leganti minerali, mantenendo inalterate le caratteristiche tecniche della miscela di riempimento, ma diminuendo in maniera sensibile l'alcalinizzazione delle acque a contatto e di conseguenza facilitando il trattamento prima dello smaltimento.

Un altro esempio di soluzione tecnologica legata alla miscela di riempimento retroconci, con vantaggi in termini di impatto sulle acque, è l'utilizzo di un polimero stabilizzante, il quale può consentire il recupero delle acque raccolte in galleria (e successivamente trattate meccanicamente, normalmente con filtro-pressa) per la produzione della miscela di riempimento. Tali acque sono, come detto, alcaline e contaminate con vari elementi chimici: tal quali, il loro utilizzo per la produzione della miscela di riempimento di tipo bicomponente non è possibile, in quanto ne peggiora sensibilmente le caratteristiche tecniche (ad esempio, la stabilità volumetrica ne è compromessa, in quanto la bentonite non si attiva se miscelata in acque alcaline, e lo sviluppo delle resistenze meccaniche è di norma più lento e più basso). L'aggiunta invece alle acque di recupero dalla galleria di un apposito polimero stabilizzante permette di eliminare questi inconvenienti tecnici e di conseguenza consente il recupero/riciclo di tali acque per la produzione della miscela di riempimento di retroconci.

7.3 Scavo meccanizzato e scavo tradizionale di gallerie - Iniezioni di consolidamento al fronte della galleria

Numerosi materiali sono disponibili sul mercato per le iniezioni di consolidamento al fronte di una galleria, sia che venga scavata con metodo meccanizzato sia con metodo tradizionale.

La scelta del prodotto, e più in generale del metodo di intervento, dipende da numerosi fattori, quali granulometria e porosità nel caso di iniezioni in terreno, apertura delle fratture nel caso di iniezioni in ammassi rocciosi, presenza di acqua, ecc.

Esistono prodotti appositamente formulati per le iniezioni di consolidamento al fronte per i quali sono disponibili prove di cessione in acqua per dimostrare il non rilascio di elementi chimici (tra cui nitrati, solfati, rame, piombo, idrocarburi, ecc.) nelle acque di falda. Per le concentrazioni massime accettate di tali elementi si fa riferimento al D.M. 05/04/06 n°186 Allegato 3.

7.4 Scavo meccanizzato e scavo tradizionale di gallerie - Iniezioni secondarie di impermeabilizzazione

Infiltrazioni di acqua attraverso il rivestimento di calcestruzzo di una galleria sono un fenomeno piuttosto comune. Il problema viene generalmente risolto tramite l'iniezione di apposite resine: ne sono disponibili di molti tipi diversi, da scegliere in base alle caratteristiche del singolo intervento. Ad esempio, alcune resine poliuretaniche, monocomponenti o bicomponenti, sono in grado di generare una reazione di espansione non appena entrano in contatto con l'acqua, formando una schiuma impermeabile a cellule chiuse: tali resine sono quindi molto adatte ad iniezioni a tergo del rivestimento che hanno lo scopo di fermare infiltrazioni importanti di acqua. Le resine acriliche, invece, sono caratterizzate allo stato liquido da una bassissima viscosità, mentre a reazione avvenuta generano un materiale elastico di consistenza tipo gel: sono quindi particolarmente adatte ad esempio all'iniezione all'interno di fessure del calcestruzzo o all'interno di giunti sottoposti a potenziali movimenti.

Alcune di queste resine da iniezione, grazie alla loro

DOI 10.7343/as-2020-486

formulazione ed al bassissimo grado di rilascio di elementi chimici nelle acque con cui possono venire a contatto, sono dotate di certificazioni che ne consentono l'utilizzo anche a contatto con acque potabili fredde, secondo la normativa BS 6920-1:2014.

Un'ulteriore innovazione tecnologica consente di evitare totalmente l'iniezione di resine a tergo del rivestimento e di conseguenza la venuta a contatto delle acque di falda con le resine. In alcuni casi infatti le infiltrazioni di acqua attraverso i giunti, ad esempio tra i conci di calcestruzzo in gallerie scavate con TBM scudate, possono essere fermate utilizzando uno speciale profilo di plastica, ininfiammabile, che sigilla il giunto all'intradosso. In seguito, si inietta una resina nello spazio compreso tra il profilo in plastica appena posizionato ed i *gasket* (giunti di guarnizione) premontati sui conci. La resina quindi rimane confinata in questo spazio e non viene iniettata a tergo del rivestimento. Il profilo in plastica è dotato di particolari alette che evitano il rischio di fuoriuscita dal giunto durante l'iniezione della resina.

7.5 Impermeabilizzazione di gallerie e manufatti con manti sintetici

Per l'impermeabilizzazione di gallerie e di altri manufatti come stazioni, pozzi, *by-pass*, ecc., è largamente diffuso l'utilizzo di manti sintetici posati a secco (*loose laid*), disponibili in diversi materiali, ciascuno con le proprie specificità tecniche, e spessori. L'impiego di un sistema di posa a secco risulta essere particolarmente indicato per questa tipologia di strutture (gallerie, opere interrate in genere) in quanto i supporti di posa (es. calcestruzzo proiettato) risultano il più delle volte irregolari. Per questa ragione, all'interno della famiglia dei manti sintetici, il materiale più largamente diffuso risulta essere il PVC-P (*polyvinyl chloride plasticized*) che, per la sua ottima lavorabilità (*workability*) permette una più agevole installazione limitando costi di applicazione e migliorando la qualità finale del sistema di impermeabilizzazione.

All'interno della famiglia dei manti sintetici sono numerosi i sistemi che possono essere utilizzati per impermeabilizzare un'opera interrata. Di base è possibile suddividere questi sistemi in due grandi famiglie, sistemi drenati e sistemi non drenati, dotati di impermeabilizzazione generalmente denominata *full round* (Figura 20). Mentre i primi abbattono in maniera più o meno importante il livello della falda (per lo meno localmente) i secondi garantiscono il mantenimento della stessa evitando possibili alterazioni delle condizioni idrogeologiche del terreno. L'impiego di sistemi *full-round* (ovvero quei sistemi in cui la struttura è impermeabilizzata sulla sua intera superficie), là dove possibile, è pertanto preferibile in quanto l'impatto ambientale (*foot print*) a livello idrogeologico risulta essere contenuto o comunque inferiore rispetto a sistemi di tipo drenato. L'applicazione dei sistemi di impermeabilizzazione *full-round* è utilizzata in gallerie non molto profonde, con pressioni d'acqua all'estradosso generalmente inferiori ai 8-10 bar (si veda il BOX 5).

I sistemi di impermeabilizzazione di tipo full-round hanno come elemento cardine la membrana o manto a base di PVC-P (di diversi spessori in funzione delle pressioni in gioco), ma si compongono di fatto di una serie di elementi "accessori" che garantiscono il corretto funzionamento del sistema. Svolgono funzione cardine le seguenti componenti del sistema:

- strato di regolarizzazione in PP (polipropilene): protegge la membrana dalle azioni di punzonamento del supporto;
- *waterbar* (giunti) di compartimentazione/secondo strato in PVC: necessari a settorializzare la galleria, facendo "lavorare" il sistema di impermeabilizzazione a compartimenti indipendenti (gli eventuali danni e le relative conseguenze rimarranno circoscritte al comparto interessato rendendo più facile e meno costoso un intervento di ripristino);
- sistemi di *backup* (tubi e/o valvole di iniezione): sistemi di iniezione predisposti in fase di realizzazione del sistema di impermeabilizzazione che consentono di intervenire per ripristinare eventuali danni (operazioni che possono essere effettuate a valle della realizzazione dell'opera, evitando tecniche invasive come perforazioni che danneggerebbero ulteriormente il manto);

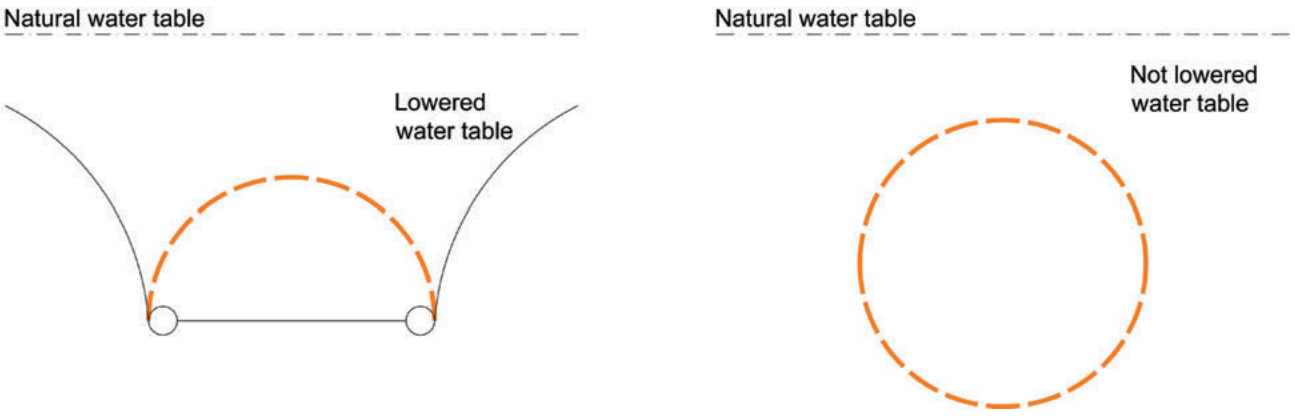

Fig. 20 - Diagramma concettuale di una galleria drenante (sinistra) e di una con impermeabilizzazione *full-round* (destra).
Fig. 20 - Conceptual diagram of a drainage tunnel (left) and a tunnel with full-round waterproofing (right).

- elementi di ancoraggio a tenuta (es. per il sostengo di armature o equipaggiamenti): sistemi impiegati per realizzare punti di ancoraggio (nel supporto attraverso la membrana) a tenuta senza compromettere l'impermeabilità del sistema.

I materiali impiegati per la realizzazione del sistema di impermeabilizzazione (ed in particolare i due elementi cardine del sistema quali la membrana e i *waterbar*) devono ovviamente possedere quei requisiti minimi meccanici e di aspettativa di vita richiesti per poter assolvere alla funzione per la quale sono impiegati (impermeabilizzazione).

Inoltre, nell'ottica di una eventuale interazione con acque di falda, è importante che le membrane possiedano una elevata stabilità chimica che si traduca da un lato in un mantenimento delle proprietà meccaniche del materiale, dall'altro in una limitata migrazione delle sostanze chimiche dal manto alle acque di falda nel lungo periodo. In Tabella 3 sono riportati i requisiti minimi delle membrane in PVC-P.

È altresì indispensabile che, nel caso in cui la struttura (e quindi la membrana) entri in contatto con falde acquifere destinate al consumo umano, il manto sia opportunamente certificato secondo la vigente normativa che regolamenta l'uso dei prodotti plastici a contatto con alimenti (per quanto concerne la normativa italiana D.M. n. 174 del 06/04/04 e il Regolamento UE n.10/2011).

Non ultimo, va ricordato che, non di rado, l'effettiva efficacia di questi interventi dipende dalla loro modalità di realizzazione in cantiere e dalla perizia del personale coinvolto. Pertanto, particolare cura dovrà essere posta nella scelta e formazione del personale dedicato e nella supervisione del lavoro.

Tab. 3 - Test di variazione di massa e delle performance meccaniche su membrane in PVC-P (requisiti minimi).

Tab. 3 - Mass variation and mechanical performance tests on PVC-P membranes (minimum requirements).

Behavior after storage in aqueous solution (EN 14415) Liquid type 2, 360 d at 50 °C	
Variation in tensile strength and elongation at break (	≤ 25
Variation in dynamic puncture test (perforation) (%)	≤ 40
Mass variation (%)	< 7
Behavior after storage in aqueous solution (EN 1847) Liquid type 3, 120 d at 23 °C	
Variation in tensile strength and elongation at break (%)	≤ 25
Variation in dynamic puncture test (perforation) (%)	≤ 30
Mass variation (%)	< 4
Behavior after storage in hot water (SIA V 280 Nr. 13) 240 d at 50 °C	
Variation in tensile strength and elongation at break (%)	≤ 25
Variation in dynamic puncture test (perforation) (%)	≤ 30
Mass variation (%)	≤ 3
Dimension variation (%)	≤ 3

DOI 10.7343/as-2020-486

8 MONITORAGGIO

8.1 Finalità e fasi

Come è ben noto il monitoraggio delle risorse idriche superficiali e sotterranee è un'attività necessaria ed indispensabile che caratterizza tutte le fasi concernenti un'opera in sotterraneo. Nel Capitolo 10 sono presentate le normative nazionali di riferimento in materia di monitoraggio, alle quali occorre riferirsi per la progettazione di un piano di monitoraggio. In questo capitolo riportiamo alcune indicazioni derivanti da esperienze maturate in progetti anche di grandi dimensioni (ad esempio il collegamento ferroviario Torino Lione, ma non solo), con il fine di integrare le indicazioni normative.

Il monitoraggio si sviluppa nelle seguenti fasi:

- preliminare, a scopo conoscitivo: per raccogliere i dati e ricostruire le conoscenze dell'ambiente idrico interessato dalla nuova opera, al fine di individuare lo stato di qualità ambientale delle acque superficiali e sotterranee e di caratterizzare gli acquiferi; queste conoscenze consentono di tutelare la componente idrica e di mitigarne l'impatto eventuale con proposte di metodi di scavo adeguati e/o la messa in opera di misure di salvaguardia e mitigazione;
- *ante-operam*: monitoraggio effettuato almeno 1 anno prima dell'inizio dei lavori, le cui misure effettuate servono da confronto con quanto verrà realizzato nel corso d'opera, rappresentano la fotografia del momento denominato t0;
- in corso d'opera: fase delicata in cui si deve controllare la risorsa idrica (esterna all'opera e in galleria) durante l'esecuzione dei lavori e verificare che questi non interferiscano con la risorsa idrica; nel malaugurato caso in cui invece questo si verifichi, il continuo monitoraggio deve consentire di attivare subito gli interventi idonei per ridurre l'impatto; anzi, come discusso al precedente Capitolo 4, nella fase progettuale l'analisi dei rischi deve consentire di prevedere gli impatti più probabili per poter attuare prima dello scavo quei sistemi preventivi al fine o di evitare che l'impatto avvenga o di attivarne rapidamente la sua compensazione;
- *post-operam*: a lavori ultimati e ad opera in esercizio il monitoraggio costituisce uno strumento per sorvegliare nel tempo il nuovo contesto (manifestazione di impatti tardivi), oltre che per avere una validazione delle previsioni a lungo termine e un ritorno di esperienza.

8.2 Adempimenti normativi

Le caratteristiche del monitoraggio devono adempiere a quanto la normativa prevede ed a quanto eventualmente richiesto dagli Enti di controllo in sede di procedura di Valutazione di Impatto Ambientale ("Condizioni Ambientali" si veda il Capitolo 10) La normativa di riferimento va considerata ai diversi livelli: internazionale (ad esempio nelle gallerie di valico), nazionale, regionale e locale.

Per una trattazione sistematica del tema normativo si rimanda al Capitolo 10.

8.3 Dinamicità del monitoraggio

È ovvio che la rete di monitoraggio viene aggiornata nelle diverse fasi del processo: la rete preliminare, definita in *ante-operam*, sarà integrata e aggiornata in funzione dei dati raccolti e delle nuove analisi eseguite in corso di progettazione definitiva.

L'efficacia del monitoraggio si manifesta nel corso dei lavori. È in questa fase che è possibile verificare il modello idrogeologico di previsione e affinarlo con dati reali e controllare dal punto di vista ambientale gli effetti della galleria sugli acquiferi.

Diventa fondamentale interpretare in modo congiunto le misure realizzate in galleria e quelle misurate all'esterno altrimenti saranno poco proficue in termini di efficacia e non daranno i risultati attesi, e quindi capire in che contesto reale siamo e capire cosa sta succedendo.

Il verificarsi di impatti non previsti in corso d'opera, anche temporanei, obbliga poi ad integrare la rete di monitoraggio, così come la frequenza ed eventualmente i parametri, in funzione delle problematiche sorte.

Durante i lavori di scavo il monitoraggio delle venute d'acqua in galleria diventa un'attività sostanziale. Diventa necessario essere tempestivi al primo accenno di venuta d'acqua in galleria dato che il suo esaurimento veloce potrebbe "far perdere l'occasione" di una misura, dell'ottenimento di un dato, quindi di una interpretazione, e della conseguente realizzazione di analisi di laboratorio specifiche che permetteranno di comprendere meglio la circolazione idrica soddisfacendo entrambi i seguenti obiettivi: la verifica del modello idrogeologico concettuale e la protezione ambientale del sistema idrogeologico.

8.4 Schema di un Piano di Monitoraggio delle Risorse Idriche

Il Piano di Monitoraggio delle Risorse idriche rientra nel Piano di Monitoraggio ambientale, programma molto più esteso che interessa polveri, emissioni in atmosfera, vegetazione, rumore, amianto, fauna, ecc. In queste linee guida ci occuperemo esclusivamente della componente idrica.

Il monitoraggio per la costruzione di una galleria include:

- il monitoraggio idrologico (acque superficiali) ed idrogeologico (acque sotterranee), in coesistenza oppure no e con lo stesso livello di dettaglio oppure no, a seconda dell'opera in progetto;
- il monitoraggio ambientale, per verificare e controllare gli impatti della galleria sugli acquiferi, sui GDE e sugli ecosistemi sotterranei e superficiali al contorno.

Nella Figura 21 è presentato uno schema riassuntivo dei principali aspetti da considerare nel definire un piano di monitoraggio ambientale delle risorse idriche, seguendo l'ordine con cui i diversi aspetti sono brevemente discussi nei seguenti paragrafi.

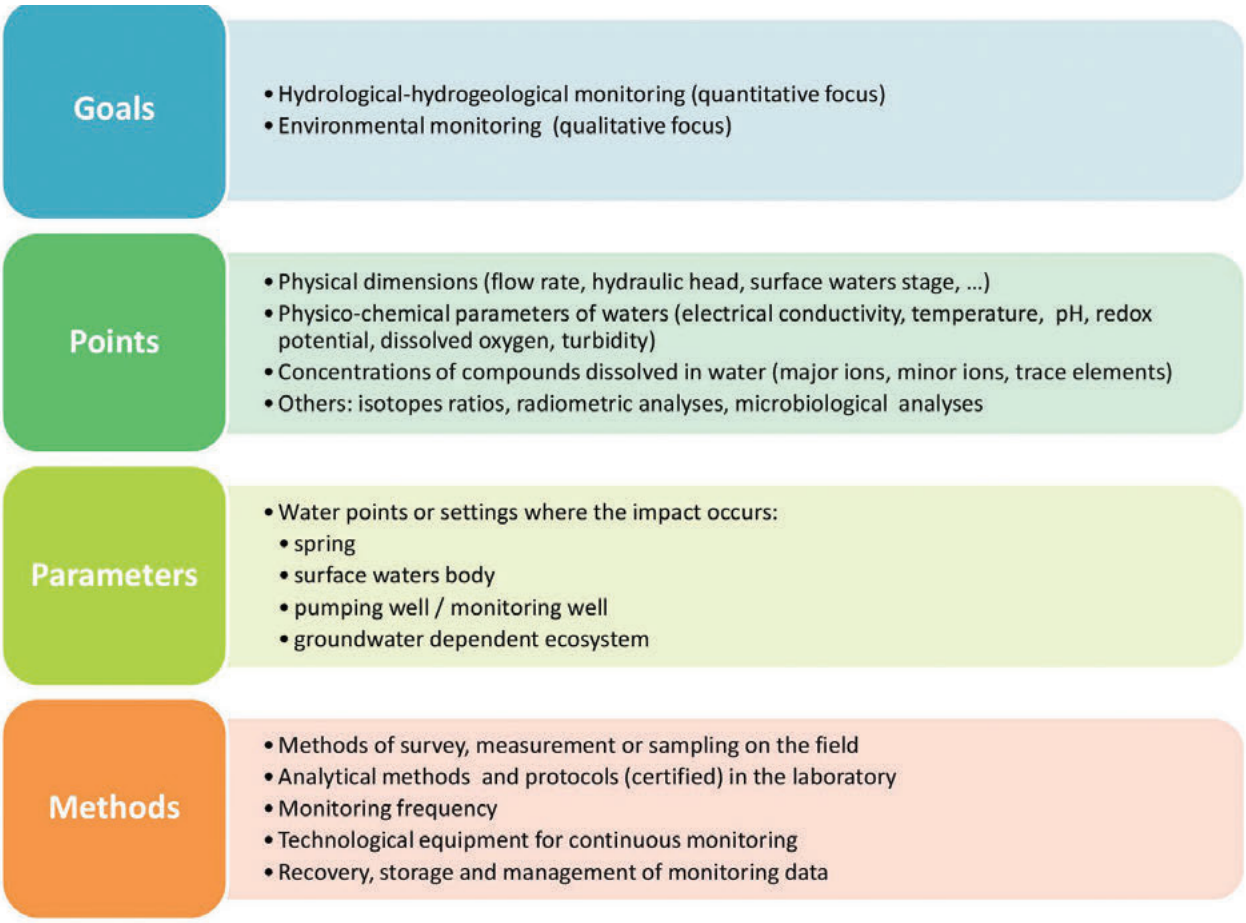

Fig. 21 - Principali aspetti da definire nella predisposizione di un Piano di Monitoraggio.

Fig. 21 - Main aspects to be defined in the preparation of a Monitoring Plan.

8.4.1 Definizione degli obiettivi di monitoraggio

Prima di iniziare un'attività di monitoraggio è necessario definire l'oggetto del monitoraggio e per fare questo si inizia con un processo di **censimento** dei target idrologici ed idrogeologici.

Il censimento si svolge inizialmente attraverso una dettagliata raccolta bibliografica sull'area interessata dal progetto, recuperando i dati di opere già realizzate, contattando gli Enti pubblici presenti sul territorio (Arpa, Regione, Università, Comuni, ecc.), gli enti gestori di servizi, eventualmente anche associazioni locali, ecc. Questo censimento a tavolino permette di cominciare a conoscere l'ambiente del progetto e scoprire la quantità e qualità dei dati disponibili, che dovranno successivamente essere implementati con nuove misure.

Questi elementi bibliografici consentono di programmare il successivo censimento, che richiederà una attività di rilevamento sul terreno per verificare i dati disponibili e implementare la banca dati idrologica, idrogeologica ed ambientale.

8.4.2 Punti di monitoraggio idrologico ed idrogeologico

Sono rappresentati da punti di accesso alle acque superficiali e sotterranee e possono quindi essere suddivisi nelle seguenti classi:

- punti d'acqua superficiali:
  - fiumi e torrenti;
  - laghi / specchi d'acqua;
- punti d'acqua sotterranei:
  - sorgenti;
  - pozzi;
  - piezometri;
- GDE;
- punti d'acqua in galleria:
  - venute idriche: singoli afflussi al fronte di scavo e nel tratto di galleria non ancora rivestito;
  - punti di misura di carico idraulico all'estradosso della galleria. Queste misure si realizzano con sensori di pressione da installare in fori di sondaggio realizzati in avanzamento durante lo scavo, oppure tra il

DOI 10.7343/as-2020-486

rivestimento della galleria e l'ammasso roccioso. Il monitoraggio dei carichi idraulici è fondamentale nel caso di gallerie rivestite ed impermeabilizzate;
  - punti di misura delle portate totali drenate nello scavo: nel caso di gallerie drenanti (o non ancora rivestite) è fondamentale il monitoraggio ad alta frequenza (meglio se automatizzato) delle portate totali drenate dal cavo. Generalmente questo monitoraggio si esegue presso l'imbocco, dove si misura la portata cumulata totale che entra nella galleria. È anche possibile installare stazioni di misura intermedie all'interno della galleria, al fine di quantificare le venute d'acqua in distinti settori di galleria.

La scelta dei punti di monitoraggio dipende da numerosi fattori, illustrati qui di seguito:

- un primo criterio è quello della **vicinanza all'opera** in sotterraneo che si vuole monitorare. Sono selezionati tutti i punti censiti ricadenti all'interno della zona dove si ritiene possibile un impatto e un rischio di depauperamento;
- l'**analisi del rischio di impatto su punti d'acqua superficiali e sotterranei** deve essere svolta in fase di progettazione, prima dell'inizio della costruzione. L'analisi del rischio viene identificata mediante uno studio geologico-strutturale ed idrogeologico, nel settore sotteso dal tracciato della galleria. L'analisi del rischio deve includere l'analisi della probabilità di venute d'acqua in galleria. Di questo si è già ampiamente trattato al Capitolo 4;
- la scelta dei punti da monitorare in superficie può essere estesa a **zone di particolare valore ambientale e paesaggistico**, anche ricadenti all'esterno della zona di potenziale impatto;
- la **densità della rete di monitoraggio** e le posizioni reciproche tra i punti sono ulteriori parametri importanti da considerare. Occorre garantire una relativa omogeneità di distribuzione nello spazio dei punti, al fine di poter ottenere informazioni sulla dinamica del sistema con eventuali infittimenti laddove le potenziali problematiche lo richiedano. Ad esempio, punti in galleria coerenti con punti in superficie a rischio d'impatto, ma anche punti a distanze crescenti a partire dall'asse di una galleria, per garantire di poter apprezzare un eventuale abbattimento piezometrico nello spazio e nel tempo.

8.4.3 Parametri di monitoraggio

I parametri di monitoraggio sono scelti a seconda del tipo di punto e di corpo idrico da monitorare. Per alcuni specifici punti d'acqua, caratterizzati da particolare importanza o vulnerabilità, possono essere definiti specifici indicatori di monitoraggio.

Gli indicatori di monitoraggio possono essere suddivisi nelle seguenti categorie:

- grandezze fisiche: portata fluente (di sorgente o di corso d'acqua), livello piezometrico (in pozzo o piezometro), livello batimetrico (in lago);
- parametri chimico-fisici (misurabili *in situ* e/o in laboratorio): conducibilità elettrica specifica, temperatura, pH, potenziale redox, ossigeno disciolto, torbidità;
- concentrazioni analitiche di sostanze disciolte (misurabili solo in laboratorio con applicazione di metodologie certificate):
  - ioni principali e minori;
  - metalli e altre sostanze inquinanti, in funzione di specifici rischi d'impatto individuati;
- concentrazioni isotopiche;
- analisi radiometriche;
- analisi batteriologiche (per la verifica di eventuali inquinamenti biologici);
- analisi ecologiche (per il monitoraggio dei GDE).

La scelta di una tipologia di analisi dipende da:

- caratteristiche endemiche del settore;
- caratteristiche dell'opera in progetto;
- potenziali rischi d'impatto.

8.4.4 Metodologie di misura

Per ogni indicatore deve essere definita precisamente la metodica di misura in campo o di analisi in laboratorio, oltre che la tipologia di strumentazione da utilizzare, affinché le diverse misure eseguite nel tempo siano confrontabili e gli errori strumentali/metodologici siano controllabili.

È utile includere queste informazioni nei rapporti di monitoraggio, dettagliando le procedure e le metodologie utilizzate per il campionamento e la conservazione dei campioni, il pretrattamento dei campioni, l'elenco dei laboratori coinvolti, con i riferimenti ai metodi di analisi impiegati.

Nel caso delle misure *in situ* è inevitabile, per alcuni parametri, una componente soggettiva nell'esecuzione di certe misure (ad esempio le misure di portata fluente in corso d'acqua con correntometro); in questi casi è importante archiviare anche la descrizione delle condizioni al contorno, come ad esempio quelle climatiche e orografiche ed il nome dell'operatore che esegue il rilievo, oltre che allegare documentazione fotografica.

Frequenza di monitoraggio

La frequenza delle azioni di monitoraggio (misure *in situ* e analisi di laboratorio) è legata a diversi fattori, tra cui i principali sono elencati di seguito:

- la fase del progetto, con frequenza più alta durante lo scavo delle opere in sotterraneo (anche quindicinale, settimanale) e più diradata nelle fasi precedenti (conoscitivo, *ante-operam*) o successive (*post-operam*);
- andamento stagionale delle portate nella regione del progetto;
- parametri idrodinamici degli acquiferi. Ad esempio, nei settori dove sono presenti acquiferi ad elevata conducibilità idraulica si richiedono frequenze di monitoraggio più elevate, perché le venute idriche che dovessero manifestarsi in galleria al fronte di scavo possono generare più rapidamente impatti in superficie;

- velocità di avanzamento dello scavo. Le cadenze di misura devono essere più serrate quando lo scavo si avvicina al punto di monitoraggio.

Possiamo citare a titolo di esempio alcune tipiche frequenze di base del monitoraggio:

- semestrale/annuale: sarebbe opportuno evitare queste frequenze in quanto non possono in alcun modo valutare la stagionalità dei processi che interessano i punti d'acqua superficiali e sotterranei;
- trimestrale: frequenza minima che consente di monitorare gli effetti di stagionalità; da valutare solamente per punti con scarse variazioni temporali o complementari ad altri punti vicini;
- mensile;
- quindicinale;
- settimanale;
- giornaliera o inferiore (orario): per queste alte frequenze è opportuno lavorare con installazione di apposita strumentazione di monitoraggio in continuo.

Per le venute idriche in galleria, che si mantengono attive nel tempo, è importante differenziare tra portate di picco, transitorie e stabilizzate, come definite al Paragrafo 2.2.1.

Monitoraggio in continuo

Le sonde che il mercato offre per la misura dei principali parametri idrogeologici (ad esempio il livello d'acqua in una captazione o in un pozzo o piezometro, la portata di una sorgente/corso d'acqua/drenaggio/scarico, la conducibilità elettrica dell'acqua, il pH, la temperatura) sono dotate di batterie a lunga durata e registratore dei dati collocati all'interno di una struttura stagna, di piccole dimensioni. Questo permette il monitoraggio ad alta frequenza di acquisizione, che nel caso delle gallerie è tipicamente da oraria a giornaliera.

Le sonde di monitoraggio sono vivamente consigliate per il caso delle gallerie, in quanto i dati raccolti, essendo più numerosi, meglio descrivono il funzionamento idrologico dei corpi idrici, facilitando grandemente l'interpretazione dei fenomeni studiati e la previsione degli impatti.

I dati di monitoraggio immagazzinati nel registratore dei dati della sonda possono essere scaricati manualmente da operatori che si recano sul terreno ad intervalli regolari, oppure trasmessi con ponti radio o dalla rete di ripetitori GSM/GPRS, ADSL o satellitari. La trasmissione dei dati è generalmente utilizzata per attivare in tempo reale sistemi di allarme tarati su soglie limite di allerta, come si opera, ad esempio, per il controllo delle frane e delle alluvioni.

Nel caso del monitoraggio delle risorse idriche negli scavi in sotterraneo la trasmissione dei dati è adottata più raramente. I motivi più tipici per cui generalmente si opta per una raccolta manuale dei dati sono la mancanza, in genere, dell'esigenza di immediatezza dell'informazione, la numerosità dei punti di monitoraggio ed il rischio di vandalismo, soprattutto in caso di aree urbane. In alcuni casi, è comunque necessario predisporre questi sistemi per verificare in tempo reale, anche con sistemi di allerta automatica, l'efficienza ed efficacia dei sistemi di mitigazione o compensazione (ad esempio, la funzionalità delle batterie di pozzi di presa e resa per la mitigazione dell'effetto barriera).

8.5 Archiviazione dati

L'insieme di tutti i punti di monitoraggio va a definire la rete di monitoraggio. L'insieme di tutti gli indicatori monitorati va a definire la banca dati di monitoraggio.

Di fondamentale importanza è la predisposizione di una banca dati di monitoraggio georiferita nello spazio (*Geo-Data-Base*), che raccolga tutti i punti della rete di monitoraggio e che sia poi contenitore dinamico di tutti i dati di monitoraggio. Essa costituisce, oltre che uno strumento di archivio, un prezioso strumento di consultazione, elaborazione ed analisi dei dati.

Per la predisposizione di *Geo-Data-Base* si utilizzano software GIS (*Geographic Information System*), ormai di diffusa applicazione, disponibili sia in versioni *open-source* che commerciali.

DOI 10.7343/as-2020-486

9 COMUNICAZIONE

La realizzazione di una grande infrastruttura deve essere accompagnata da regole di comunicazione e partecipazione dei cittadini, con particolare riferimento al **rapporto con i territori** e con le relative comunità locali. Nel caso di scavo di gallerie, che potenzialmente possono avere impatti sulle acque sotterranee e superficiali, questo aspetto riveste una importanza sovente prioritaria rispetto agli aspetti tecnici di progettazione dell'opera.

La decisione di realizzare una grande opera deve essere inquadrata in precise procedure che fanno riferimento alla Convenzione di Aarhus (e alla Legge 108/2001 che la recepisce in Italia).

Questo processo di comunicazione deve avviarsi in una fase preliminare dell'analisi del progetto. Tale fase può intrecciarsi con l'"inchiesta pubblica" che l'art. 24bis del D.Lgs. 152/2006 prevede possa essere disposta dall'autorità competente.

Il processo deve essere coordinato da uno staff composto dalla direzione di progetto e dagli Enti pubblici di controllo che, sulla base della condivisione e della sostenibilità del progetto e del relativo monitoraggio, sia in grado di sostenere un confronto costruttivo con la popolazione.

La comunicazione include azioni di divulgazione, formazione, supporto ai *decision makers*, pubblicizzazione, percezione degli impatti e delle opportunità di valorizzazione, ma anche ascolto e dialogo con le comunità interessate.

9.1 Esperienze di comunicazione in grandi infrastrutture

Vi sono **esperienze a livello italiano** molto istruttive per quanto riguarda l'utilità della comunicazione e i metodi da adottare. Un caso preso in esame è quello della Torino-Lione, dove la ricognizione delle posizioni in campo è avvenuta ex post, a valle di una conflittualità conclamata, ed è stata posta in capo a una struttura straordinaria complessa (Tavolo istituzionale della Presidenza del Consiglio dei Ministri, Osservatorio tecnico, Commissario di Governo) che si è aggiunta all'organizzazione canonica e alle relative procedure ordinarie (Commissione intergovernativa, Commissione di Valutazione di impatto ambientale, Conferenza dei Servizi ecc.). L'importante esperienza maturata in questo progetto permette di focalizzare l'attenzione su alcuni punti essenziali nel campo della comunicazione.

Un metodo già sperimentato a livello internazionale è quello del **confronto creativo** (*public consensus building*), che consiste nell'ascoltare i punti di vista ed esplorare insieme nuove idee e possibilità, per stabilire linee guida comuni che evitino il blocco decisionale e/o l'escalation dei conflitti. Questo approccio è tanto più prezioso quanto più vi siano casi di divergenze su valori di fondo non negoziabili. Infatti, permette di trovare convergenze su altri piani migliorando il clima morale e intellettuale della convivenza.

In USA è utilizzato dal governo Federale a partire dagli anni '90 (*Negotiated Rulemaking Act* 1990, *Administrative Dispute Resolution Act* 1996) per la stesura partecipata dei regolamenti attuativi delle leggi più controverse. In Sud Africa è utilizzato nelle trattative sindacali in settori produttivi molto frammentati e complessi.

Il confronto creativo include un processo di dialogo volto ad esplorare gli interessi sottostanti alle posizioni per costruire nuove proposte giudicate "migliori" dal numero più vasto possibile di partecipanti; coinvolge un numero di portatori di interessi (*stakeholders*) in grado di rappresentare tutte le preoccupazioni e i punti di vista relativi al tema in discussione; è guidato da un mediatore facilitatore indipendente rispetto alle parti; segue una struttura concordata con i partecipanti in cui viene chiarito l'obiettivo del dialogo e le sue regole e si propone di elaborare le linee guida di un "progetto comune".

In Italia esempi di percorsi partecipativi di confronto creativo sono le ex-fonderie di Modena (2007) e il "Cisternino" di Livorno (2008), il sito per il depuratore di Ponte Buggianese (2009-2010) e il sito e la tecnologia per l'impianto TMB (Trattamento Meccanico Biologico) di Reggio Emilia (2011). In altri casi solo alcune dinamiche del confronto creativo sono state adottate, come ad esempio nel caso del negoziato "No Dal Molin" a Vicenza (2006-2011) e per il citato Osservatorio Torino-Lione (da 2006 in corso).

9.2 Indicazioni

Da un punto di vista operativo, la comunicazione degli aspetti idrogeologici deve basarsi su **indicazioni provenienti dal progetto**.

I risultati delle indagini idrogeologiche evidenziano le probabilità di interferire o impattare risorse idriche di interesse rilevante. È pertanto necessario individuare le **modalità di condivisione delle problematiche** idrogeologiche progettuali tra i differenti esperti che prendono parte alla realizzazione del progetto, come minimo prevedendo un'interfaccia tecnica tra idrogeologi e strutturisti, al fine di valutare congiuntamente, ad esempio, modalità e tipologie dei sistemi di drenaggio della galleria.

Sulla base di queste indicazioni, il contenuto della comunicazione deve provenire dal gruppo di progettazione che la trasferisce al proponente e/o proprietario dell'opera. Da qui la comunicazione deve essere diretta verso gli Enti territoriali competenti, i gestori locali della risorsa idrica e la popolazione locale attraverso media e con linguaggio diversificato per venire incontro alle diverse competenze del pubblico. Questa fase deve essere finalizzata ad una corretta **informazione e percezione del rischio idrogeologico e degli impatti** sulla risorsa idrica e sugli ecosistemi dipendenti dalle acque sotterranee (GDE), oltre che delle mitigazioni e delle valorizzazioni possibili.

La divulgazione verso i soggetti "esterni" alla progettazione deve avvenire all'interno di un **processo pianificato e coordinato**, come secondo gli esempi del paragrafo precedente. Una tematica importante in tal senso è l'accessibilità, aperta a tutti, mediante l'organizzazione e la presentazione dei dati di interesse, ad esempio attraverso il web.

La comunicazione deve includere una rassegna delle **opportunità di valorizzazione** delle acque drenate dalle gallerie e del loro effettivo impatto positivo sulla popolazione,

per quanto possibile corredata da esempi di realizzazioni simili, già precedentemente sviluppate su altri progetti.

9.3 Metodo di lavoro

L'impostazione dell'attività comunicativa a supporto di un'opera pubblica, grande o piccola che sia, non può prescindere da alcuni aspetti preliminari. Questi includono **l'individuazione precisa degli *stakeholders* coinvolti**, l'analisi della loro **influenza** sul progetto stesso (che genera approcci e richiede strumenti e contenuti diversificati), la **definizione dei contenuti** da comunicare e la loro **calendarizzazione** in momenti specifici e, infine, la **canalizzazione** del contenuto sul medium più adatto (media locali, social, newsletter dirette).

Tale azione, che richiede professionalità specifiche, è tanto più necessaria in quanto l'Ambiente (inteso nella sua accezione più ampia) è **terra di scontro a più livelli**, di polarizzazione di posizioni, di difficile confronto fra opinioni diverse. In questo senso una comunicazione consapevole, diretta e coerente con i comportamenti adottati, è deterrente efficace e insostituibile al radicarsi di **sindromi oppositive** che rischiano di spaccare il tessuto sociale (come ricordato poco sopra a proposito della linea ferroviaria Torino - Lione).

È bene infine tenere sempre presente quale è l'importanza degli **aspetti "non tecnici"** che, congiuntamente a quelli più propriamente specifici e disciplinari, sono il cuore della comunicazione. Gli aspetti non tecnici sono fondamentali soprattutto quando il pubblico di riferimento a cui ci si rivolge (come nella maggior parte dei casi) non possiede competenze specifiche. Un'efficace azione di comunicazione non può escludere dai suoi argomenti anche questi temi.

9.4 *Stakeholders*

Gli *stakeholders* sono il bacino di utenti che, a vario titolo, vengono coinvolti dall'opera in questione. Un elenco sufficientemente esaustivo delle categorie in cui è possibile suddividerli (anche se non è infrequente l'appartenenza a più tipologie contemporaneamente) è il seguente:

- cittadini e opinione pubblica;
- enti terzi e di controllo;
- comitati pubblici e locali;
- imprese;
- istituzioni;
- mondo della scuola;
- associazioni ambientaliste;
- scienziati;
- nuovi media;
- scettici e antagonisti dell'ambientalismo.

Ciascuna delle precedenti categorie richiede un approccio diverso, un linguaggio peculiare ed è raggiungibile attraverso media diversi. Al tempo stesso non tutti gli *stakeholders* sopraelencati rivestono la medesima importanza (e influenza) sul progetto. In altre parole, non tutti agiscono allo stesso modo per o contro la realizzazione dell'opera. Per questo motivo, una volta identificati *gli stakeholders* di riferimento, è necessario analizzarli e stabilire che tipo di influenza/legame hanno con l'opera in oggetto.

Sulla base dei criteri utilizzati si può costruire un diagramma che esprima la posizione dello *stakeholder* nei confronti del progetto o dell'opera, rappresentato in Figura 22, che permette di differenziare le seguenti tipologie:

Interlocutore chiave: rappresenta l'interlocutore su cui si devono concentrare le principali attività di analisi, comunicazione e coinvolgimento.
Strategia → gestisci attentamente.

Interlocutore secondario: rappresenta uno *stakeholder* che può potenzialmente diventare chiave ma il cui ruolo è ancora da definire. Strategia → monitora e coinvolgi.

Interlocutore influente: ha forti influenze sugli attori chiave ma non dimostra particolare interesse al progetto perché distante dal proprio campo di attività.
Strategia → aumenta l'interesse.

Interlocutore interessato: non è in grado di influenzare gli interlocutori chiave ma può fornire conoscenze, risorse e spunti utili per lo sviluppo del progetto.
Strategia → coinvolgi e ascolta.

Interlocutore marginale: è un attore di cui bisogna tenere conto ma non rappresenta un determinante del processo.
Strategia → monitora.

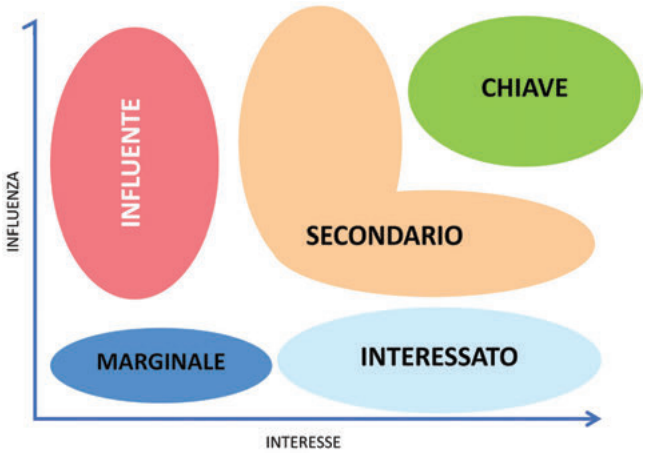

Fig. 22 - Diagramma di classificazione degli stakeholders in funzione dei parametri "interesse" ed "influenza".

Fig. 22 - Stakeholder classification diagram according to the parameters "interest" and "influence".

9.5 Quale comunicazione

Abbiamo sottolineato l'importanza della trattazione degli aspetti non tecnici all'interno del flusso comunicativo come parte essenziale per coinvolgere un pubblico non verticalmente competente sugli effetti dell'opera. È utile qui specificare **alcuni capisaldi della comunicazione**. Essa deve infatti rispettare alcuni criteri di chiarezza e accessibilità per massimizzare il coinvolgimento degli *stakeholders*. Troppo spesso infatti si è assistito all'uso, da parte del decisore e dell'esecutore, di una terminologia ostica, ultra-tecnica, a tratti persino repulsiva nei confronti degli utenti.

DOI 10.7343/as-2020-486

Una buona comunicazione rispetta quindi dei criteri di:

- chiarezza;
- trasparenza;
- semplicità;
- coerenza (fra quanto si afferma e il comportamento che si attua);
- capacità di far vivere esperienze concrete.

Quest'ultimo punto è particolarmente delicato in quanto uno dei difetti maggiormente riscontrati nella comunicazione ambientale odierna è quello di **generare una distanza** (spesso incolmabile) fra il narrato e le esperienze quotidiane del destinatario. Facciamo un esempio: descrivere gli effetti della crisi climatica mostrando immagini della banchisa artica in liquefazione va a toccare corde emotive profonde e cattura l'attenzione del destinatario del messaggio. Ma l'esoticità (e la lontananza dello scenario descritto dall'esperienza diretta) sono deterrenti potenti all'immedesimazione, alla capacità di trasformare il coinvolgimento emotivo in un comportamento attuabile. Questo narrato non è in grado di far vivere un'esperienza diretta al destinatario del mio messaggio, non genera in lui un comportamento conseguente. Quindi, ai fini dell'efficacia della comunicazione, è fallimentare (almeno parzialmente) poiché si limita a informare e non a generare una presa di posizione e una prassi attuabile.

Calando questo esempio nel contesto delle opere relative alle acque sotterranee (oggetto di queste linee guida) è quindi sempre necessario considerare, dal punto di vista della comunicazione, gli effetti che l'opera ha sulla realtà quotidiana del nostro *stakeholder*, sulla qualità della sua vita e dell'ambiente in cui risiede e sulla base di queste considerazioni generare il messaggio più idoneo. A titolo esemplificativo, si può spiegare come si farà in modo che non manchi l'acqua ai rubinetti, o che si potrà continuare a fruire di certi ambienti fluviali.

9.6 Buone norme e consigli pratici: la cassetta degli attrezzi

L'esperienza (e i casi di successo di comunicazione ambientale efficace) suggeriscono alcuni accorgimenti validi tanto per gli ambiti online che offline. Una buona comunicazione ambientale cerca di rispettare alcuni precetti.

Evitare tecnicismi e sigle incomprensibili. Non lo ripetiamo mai abbastanza: la chiarezza è il primo ingrediente della ricetta.

Evitare le scorciatoie di immagine. *Greenwashing* e analisi comparative fittizie sono mezzucci che vanno evitati. Così come il passare sotto silenzio e omettere elementi importanti del processo di realizzazione dell'opera. Nutrire la speranza che i nostri *stakeholders* non si accorgano della "falla" è controproducente. Una buona comunicazione ambientale anticipa le domande scomode e non aggira i problemi che sorgono lungo il cammino.

Evitare sensazionalismo ed esoticità. Soprattutto i media fanno un uso sempre più frequente di temi e toni di voce utili a scatenare una risposta emotiva negativa. O, come esemplificato sopra a proposito della necessità di far vivere esperienze dirette, ricorrono a scenari lontani, non riproducibili nella realtà quotidiana, in grado solamente di creare ulteriore distanza rispetto a quanto raccontato.

Dialogare e interagire con i propri *stakeholders* in modo da capirli, soddisfarli e allo stesso tempo responsabilizzarli sugli impegni condivisi.

Adattare il tono di voce e familiarizzare con il canale di comunicazione dei nostri *stakeholders*. Sono soprattutto le imprese e i gruppi organizzati (e strutturati in maniera complessa) a faticare nel dialogo con i propri *stakeholders* (comitati, associazioni, cittadini). Non ne intercettano i movimenti, non sono in grado (per l'alto tasso di strutturazione che le caratterizza) di rispondere con tempismo alle sollecitazioni che ricevono. Soprattutto i comitati spontanei, che aggregano un "no" organizzato intorno alle opere in esecuzione, si spostano con rapidità in rete, hanno una frequenza di comunicazione alta e un tono di voce caratteristico, hanno una presenza capillare e diffusa. Pensare di raggiungere questi interlocutori facendo ricorso unicamente a una comunicazione tradizionale basata su comunicati stampa, convegni, affissioni, rischia di essere altamente inefficace.

Attribuire un peso specifico alla cura delle relazioni con le comunità locali cogliendo al contempo le opportunità offerte dalla comunicazione digitale e dai social media per accorciare le distanze e instaurare un canale di ascolto e dialogo sempre attivo e presidiato.

Non rispettare questi semplici precetti comporta il rischio concreto di alimentare un clima di sfiducia e sospetto in grado di vanificare quel patrimonio di competenze tecniche ambientali (e di attenzione sincera) che alberga tanto in molte aziende quanto nelle istituzioni.

10 REGOLAMENTAZIONE

Questo capitolo illustra lo stato di fatto delle leggi, delle norme e del quadro programmatico, le prospettive e lo sviluppo di nuove normative e linee guida a livello italiano.

BOX 7 - Il modello DPSIR dell'Agenzia Europea dell'Ambiente AEA

La descrizione dello stato di qualità dell'ambiente e delle sue risorse e le conseguenze di un'azione su di essi sono un'operazione spesso complessa e delicata: si tratta di raccogliere ed organizzare informazioni al fine di delineare un quadro che sia rappresentativo della realtà, mantenendo le caratteristiche di sinteticità e comprensibilità, ma che sia in grado di individuare le relazioni che intercorrono tra lo stato delle risorse, le attività umane e i fattori di pressione.

Lo studio dell'interazione tra un'opera e l'ambiente determina la necessità di delineare un quadro il più possibile completo dello stato dell'ambiente nell'area in cui si prevede di realizzare il progetto e, successivamente, di identificare e valutare la possibilità che il progetto in esame generi effetti negativi in grado di compromettere la qualità ambientale di partenza o la salute pubblica.

È opportuno, quindi, disporre di un modello che sia in grado di descrivere le interazioni tra i sistemi economici, politici e sociali con le componenti ambientali, secondo un approccio causa-condizione-effetto.

Lo schema di riferimento generalmente adottato è quello del modello DPSIR (Determinanti, Pressioni, Stato, Impatti, Risposte; nell'originale inglese: *Driving forces, Pressures, States, Impacts, Responses*), proposto dall'AEA nel 1995, sviluppato dal precedente modello PSR, ideato dall'Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico (OCSE).

Secondo tale modello (Fig. 23), infatti, gli sviluppi di natura economica e sociale (Determinanti) esercitano Pressioni, che producono alterazioni sulla qualità e quantità (Stato) dell'ambiente e delle risorse naturali. L'alterazione delle condizioni ambientali determina degli Impatti sulla salute umana, sugli ecosistemi e sull'economia, che richiedono Risposte da parte della società.

Il concetto di "Pressione" e di "Impatto", nel contesto delle opere in sotterraneo, viene a coincidere con quello di "Fonte di Pericolo" e di "Impatto" descritti al Paragrafo 4.4. Lo "Stato" dell'ambiente e delle risorse naturali eventualmente alterato dall'Impatto viene misurato tramite gli "Indicatori" di impatto definiti nello stesso paragrafo.

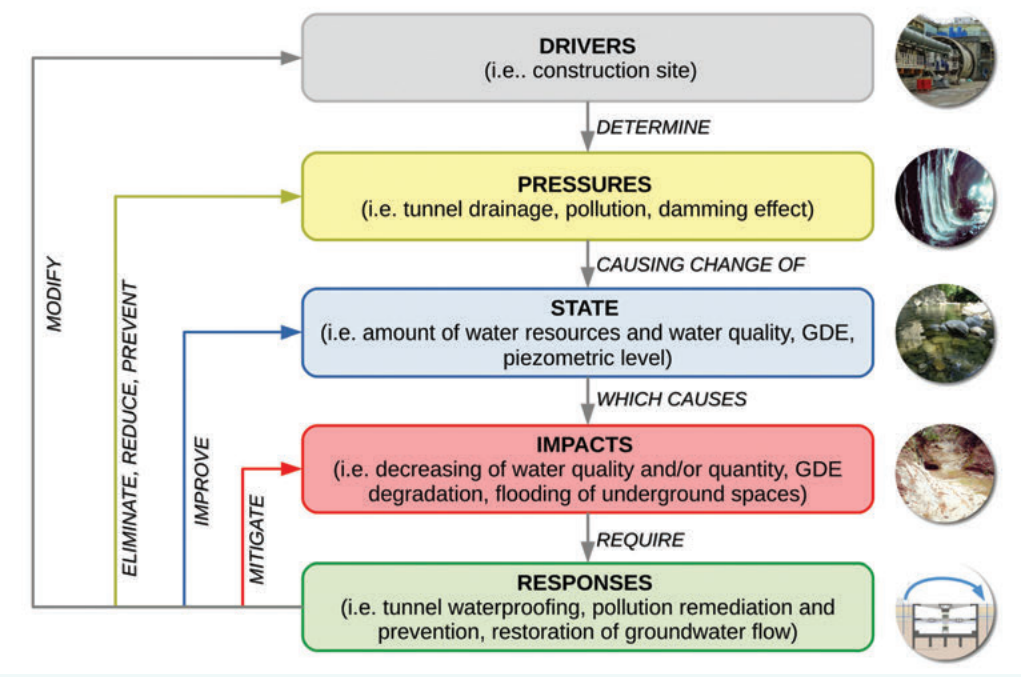

Fig. 23 - Schema del modello DPSIR (Fonte: ARPA Piemonte).
Fig. 23 - Diagram of the DPSIR model (Source: ARPA Piemonte).

In senso più generale, i vari elementi del modello costituiscono i nodi di un percorso circolare di politica ambientale che comprende la percezione dei problemi, la formulazione dei provvedimenti politici, il monitoraggio dell'ambiente e la valutazione dell'efficacia dei provvedimenti adottati.

Il monitoraggio si presenta, quindi, come elemento fondamentale nel processo di analisi dell'ambiente e nella valutazione degli impatti di un'opera.

In particolare, esso svolge un ruolo indispensabile nella fase di studio dello stato dell'ambiente e, in seguito, della valutazione degli impatti effettivi.

DOI 10.7343/as-2020-486

10.1 Valutazione di Impatto Ambientale (VIA) e prescrizioni

Le gallerie fanno in genere parte di quei progetti per i quali è necessaria una valutazione ambientale, che ha *"la finalità di proteggere la salute umana, contribuire con un miglior ambiente alla qualità della vita {…}"* e ne *"individua, descrive e valuta {…} gli impatti ambientali {…}"* (D.Lgs. 152/2006, Parte II, titolo I, art. 4, comma 4, punto b).

La VIA - Valutazione di Impatto Ambientale (EIA - *Environmental Impact Assessment*) è definita dalla normativa italiana (D.Lgs. 152/2006, art. 5 comma 1 lettera b) come *"Il processo che comprende{…} l'elaborazione e la presentazione dello studio d'impatto ambientale da parte del proponente, lo svolgimento delle consultazioni, la valutazione dello studio d'impatto ambientale, delle eventuali informazioni supplementari fornite dal proponente e degli esiti delle consultazioni, l'adozione del provvedimento di VIA in merito agli impatti ambientali del progetto, l'integrazione del provvedimento di VIA nel provvedimento di approvazione o autorizzazione del progetto"* cui devono essere sottoposti determinati progetti.

Viene inoltre prevista, per altre tipologie di progetti, la verifica di "assoggettabilità a VIA" intesa come *"la verifica attivata allo scopo di valutare, ove previsto, se un progetto determina potenziali impatti ambientali significativi e negativi e deve essere quindi sottoposto al procedimento di VIA"* (D.Lgs. 152/2006, art. 5 comma 1 lettera m).

Entrambe queste procedure possono essere, a seconda dell'importanza dell'opera, di competenza statale oppure regionale.

Le gallerie (sia esse stradali, ferroviarie, idrauliche) sottostanno di norma a una di queste procedure, non perché le gallerie siano espressamente citate dalla norma, ma perché ricomprese nelle opere che vi ricadono. Difatti, tra i progetti sottoposti a VIA (o ad assoggettabilità a VIA) troviamo una serie di opere che sovente richiedono la realizzazione di tunnel o comunque opere sotterranee (BOX 8).

Lo Studio di Impatto Ambientale (SIA) è predisposto dal proponente (art 22 D.Lgs. 152/2006), secondo le indicazioni dell'Allegato VII alla parte II del D.Lgs. 152/2006. Il SIA contiene tutte le informazioni sulle varie componenti, sia

BOX 8 - Le opere e i progetti sottoposti a VIA

Riportiamo di seguito le opere che possono richiedere la realizzazione di tunnel o comunque opere sotterranee, ricavate dagli allegati alla parte II del D.Lgs. 152/2006 (vigenti al marzo 2020).

VIA STATALE (allegato II):

2) Installazioni relative a: […]
- centrali per la produzione dell'energia idroelettrica con potenza di concessione superiore a 30 MW incluse le dighe ed invasi direttamente asserviti.

10) opere relative a:
- tronchi ferroviari per il traffico a grande distanza […].
- autostrade e strade riservate alla circolazione automobilistica o tratti di esse […].
- strade extraurbane a quattro o più corsie o raddrizzamento e/o allargamento di strade esistenti a due corsie al massimo per renderle a quattro o più corsie […].

16) Opere ed interventi relativi a trasferimenti d'acqua che prevedano […] trasferimento d'acqua tra regioni diverse e ciò travalichi i comprensori di riferimento dei bacini idrografici istituiti a norma della legge 18 maggio 1989, n. 183.

ASSOGETTABILITÀ A VIA STATALE (allegato II bis):

2. Progetti di infrastrutture:
a) interporti, piattaforme intermodali e terminali intermodali;
c) strade extraurbane secondarie di interesse nazionale;
d) acquedotti con una lunghezza superiore ai 20 km.

VIA REGIONALE (allegato III)

s) Cave e torbiere con più di 500.000 m3/a di materiale estratto o di un'area interessata superiore a 20 ettari.
af) Opere per il trasferimento di risorse idriche tra bacini imbriferi inteso a prevenire un'eventuale penuria di acqua […].

ASSOGETTABILITÀ A VIA REGIONALE (allegato IV)

2. Industria energetica ed estrattiva: […]
h) impianti per la produzione di energia idroelettrica con potenza nominale di concessione superiore a 100 kW […]"

7. Progetti di infrastrutture […]
h) strade extraurbane secondarie non comprese nell'allegato II-bis e strade urbane con lunghezza superiore a 1.500 metri non comprese nell'allegato III;
i) linee ferroviarie a carattere regionale o locale;
l) sistemi di trasporto a guida vincolata (tramvie e metropolitane), funicolari o linee simili […];

di livello progettuale (anche una disamina delle possibili alternative di progetto) che ambientali, che possono condurre ad una analisi puntuale degli impatti e delle relative misure di mitigazione da adottarsi. È evidente come sia proprio in questa fase che devono essere individuati quegli elementi, sia generali che di dettaglio, dal punto di vista idrogeologico, in modo da evidenziare con chiarezza le possibili interferenze / impatti (v. capitoli precedenti per le metodologie), le relative potenziali criticità ed eventuali mitigazioni.

Le indicazioni sui contenuti del SIA dell'allegato VII sono abbastanza generiche, difatti l'art 25 comma 4 del D.Lgs. 104/2017 ha previsto che vengano adottate con decreti del ministero dell'ambiente "linee guida nazionali e norme tecniche per l'elaborazione della documentazione finalizzata allo svolgimento della valutazione di impatto ambientale, anche ad integrazione dei contenuti degli studi di impatto ambientale di cui all'Allegato VII". Ad oggi (marzo 2020) le linee guida per la redazione degli studi di impatto ambientale dopo una prima redazione a cura del SNPA (Sistema Nazionale per le Protezione Ambientale, che comprende ISPRA e le ARPA regionali), è in corso di revisione da parte del Ministero con il contributo delle Regioni.

Questa attuale assenza di indicazioni di dettaglio pone quindi qualche problema per avere un quadro esaustivo dei contenuti minimi, anche per gli studi idrogeologici relativi ai tunnel. Peraltro, appare anche una certa incongruenza: la definizione delle dinamiche idrogeologiche e delle interferenze richiede un livello di dettaglio della progettazione non troppo generico, mentre l'elaborazione del SIA avviene in fase di progetto preliminare (ovvero di fattibilità), che potrebbe non essere sufficientemente dettagliato per effettuare delle valutazioni sufficientemente circostanziate.

Esiste in tutti i casi la possibilità di una fase di confronto per la definizione dei contenuti del SIA (art. 21 D.Lgs. 152/2006): *"Il proponente ha la facoltà di richiedere una fase di consultazione con l'Autorità competente e i soggetti competenti in materia ambientale al fine di definire la portata delle informazioni, il relativo livello di dettaglio e le metodologie da adottare per la predisposizione dello studio di impatto Ambientale {…}"*. Questa prima possibilità di confronto è un'ottima opportunità, soprattutto nell'attuale assenza di linee guida di dettaglio, anche per avere una prima fase di confronto con gli enti preposti alla tutela ambientale.

BOX 9 - I contenuti dello Studio di Impatto Ambientale

Nel citato allegato VII, tra i contenuti vengono indicati, tra quelli collegati alla tematica di interesse:

" 3. La descrizione degli aspetti pertinenti dello stato attuale dell'ambiente (scenario di base) […]".

" 4. Una descrizione dei fattori […] potenzialmente soggetti a impatti ambientali dal progetto proposto, con particolare riferimento […], all'acqua (quali, a titolo esemplificativo e non esaustivo, modificazioni idro-morfologiche, quantità e qualità) […]",.

" 5. Una descrizione dei probabili impatti ambientali rilevanti del progetto proposto, dovuti, tra l'altro:

a) alla costruzione e all'esercizio del progetto[…]

e) al cumulo con gli effetti derivanti da altri progetti esistenti e/o approvati […]

g) alle tecnologie e alle sostanze utilizzate.

La descrizione dei possibili impatti ambientali […] include sia effetti diretti che eventuali effetti indiretti, secondari, cumulativi, transfrontalieri, a breve, medio e lungo termine, permanenti e temporanei, positivi e negativi del progetto."

" 6. La descrizione […] dei metodi di previsione utilizzati per individuare e valutare gli impatti ambientali significativi del progetto, incluse informazioni dettagliate sulle difficoltà incontrate nel raccogliere i dati richiesti (quali, a titolo esemplificativo e non esaustivo, carenze tecniche o mancanza di conoscenze) nonché sulle principali incertezze riscontrate".

" 7. Una descrizione delle misure previste per evitare, prevenire, ridurre o, se possibile, compensare gli impatti ambientali significativi e negativi identificati del progetto e, ove pertinenti, delle eventuali disposizioni di monitoraggio (quale, a titolo esemplificativo e non esaustivo, la preparazione di un'analisi ex post del progetto). Tale descrizione deve spiegare in che misura gli impatti ambientali significativi e negativi sono evitati, prevenuti, ridotti o compensati […]"

DOI 10.7343/as-2020-486

10.2 Verifica di ottemperanza

In assenza di una regolamentazione specifica per la gestione sostenibile delle acque di galleria, gran parte degli aspetti vincolanti per il proponente si "giocano" nell'ambito della procedura di VIA (o di verifica di assoggettabilità a VIA). I procedimenti si concludono infatti con un provvedimento che contiene, normalmente, delle Condizioni ambientali. La **condizione ambientale** è una **prescrizione vincolante**, *"che definisce i requisiti per la realizzazione del progetto o l'esercizio"* e *"le misure previste per evitare, prevenire, ridurre e, se possibile, compensare gli impatti ambientali significativi e negativi nonché, ove opportuno, le misure di monitoraggio"*.

In teoria, la condizione ambientale dovrebbe essere un elemento non così frequente, dato che il progetto, al termine del procedimento, dovrebbe essere "fatto bene", cioè contenere tutte le modalità realizzative ed operative atte a monitorare, evitare, mitigare o compensare gli impatti. Dato che il proponente si deve attenere al progetto approvato, quest'ultimo sarebbe quindi già di per sé un vincolo importante. Di fatto, il quadro prescrittivo è sempre presente nei provvedimenti di VIA.

La verifica di ottemperanza alle condizioni ambientali viene effettuata dall'autorità competente, che si può avvalere del SNPA (ISPRA e le ARPA), ISS e altri soggetti pubblici *"al fine di identificare tempestivamente gli impatti ambientali significativi e negativi imprevisti e di adottare le opportune misure correttive"*. Per il supporto a queste attività, e per garantire trasparenza e diffusione delle informazioni sulle verifiche, per le opere di competenza statale possono essere istituiti degli Osservatori Ambientali (Art. 28 comma 2 D.Lgs. 152/2006). Alcune regioni hanno previsto, con propria normativa, la possibilità di istituire analoghi osservatori anche per le opere di competenza regionale.

In molti casi, l'Osservatorio Ambientale diventa sede privilegiata di confronti di carattere tecnico scientifico fra proponente ed enti di controllo, al fine di risolvere problematiche ambientali, in particolare quelle non specificamente normate (quali appunto il drenaggio delle gallerie o l'effetto diga delle opere sotterranee), tenendo sempre presente l'ottemperanza al quadro prescrittivo del provvedimento di VIA.

Viene anche prevista l'applicazione di una sanzione amministrativa in caso di non osservanza delle condizioni ambientali del provvedimento di VIA o di verifica di assoggettabilità (D.lgs.152/2006, art. 29, comma 5). La prassi operativa di questo regime sanzionatorio è ancora giovane (le sanzioni sono state infatti introdotte con le modifiche al D.Lgs. 152/2006 apportate dall'art. 18 del D.Lgs. 104/2017), nonché la formulazione della norma lascia ancora alcuni aspetti aperti nella sua interpretazione. Tuttavia, si tratta di un ulteriore elemento che rafforza la necessità sia di una corretta esecuzione degli studi preliminari sia di una corretta conduzione della fase realizzativa e del monitoraggio, in particolare dal punto di vista delle acque sotterranee.

BOX 10 - Le Condizioni Ambientali

La **condizione ambientale** viene definita in due modi diversi a seconda del tipo di provvedimento:

- nel provvedimento di VIA: *"prescrizione vincolante eventualmente associata al provvedimento di VIA che definisce i requisiti per la realizzazione del progetto o l'esercizio delle relative attività, ovvero le misure previste per evitare, prevenire, ridurre e, se possibile, compensare gli impatti ambientali significativi e negativi nonché, ove opportuno, le misure di monitoraggio"* (art. 5, comma 1, punto o-quater);
- nel provvedimento di verifica di assoggettabilità a VIA: *"prescrizione vincolante, se richiesta dal proponente, relativa alle caratteristiche del progetto ovvero alle misure previste per evitare o prevenire impatti ambientali significativi e negativi, eventualmente associata al provvedimento negativo di verifica di assoggettabilità a VIA"* (art. 5, comma 1, punto o-ter).

La formulazione delle condizioni ambientali (prescrizioni) è particolarmente importante, e non sono rari i casi in cui si sono verificati problemi di:

- complessità nell'articolazione e/o nei contenuti: se la prescrizione prevede azioni diverse, e da effettuarsi in tempi e fasi distinte, diventa di difficile lettura e talora di difficile interpretazione;
- indeterminatezza e ambiguità dei contenuti: possono indurre ad una errata interpretazione delle sue finalità e delle modalità di attuazione: formulazioni del tipo *"si dovranno comunque evitare impatti sostanziali sulla risorsa idrica sotterranea"* o *"l'opera dovrà essere idraulicamente trasparente"* mettono in difficoltà sia il proponente che l'ente di controllo;
- difficoltà di attuazione: si verifica, ad esempio, quando la prescrizione comporta adempimenti che coinvolgono soggetti terzi che condizionano l'attuazione della prescrizione da parte del proponente. Ad esempio, potrebbe essere il caso di una prescrizione in cui *"il Proponente non potrà procedere con lo scavo della galleria oltre il punto definito se la Società Acquedotto "X" non avrà preventivamente realizzato il citato progetto"*. In questo caso, qualora l'ente acquedottistico non realizzasse la sua opera in tempi utili, il proponente potrebbe essere costretto a fermare lo scavo per cause da lui non controllabili. Oppure, la difficoltà di attuazione può avvenire nel caso di prescrizioni estremamente difficili da realizzare dal punto di vista tecnico scientifico.

Per minimizzare queste problematiche, il ministero dell'Ambiente ha emanato degli *"Indirizzi metodologici per la predisposizione dei quadri prescrittivi nei provvedimenti di valutazione ambientale di competenza statale"* (DM 308 del 24/12/2015) che riportano *"contenuti minimi delle prescrizioni […] per una corretta interpretazione delle stesse, anche al fine di agevolarne l'attuazione e la verifica da parte dei soggetti preposti"*.

10.3 Normativa comunitaria sul monitoraggio ambientale

L'Unione europea ha da sempre avuto una particolare attenzione nei confronti dei temi ambientali, sviluppando una politica ambientale che ha subito un'evoluzione nel corso degli anni. Negli anni Settanta e Ottanta l'attenzione era rivolta a temi tradizionali, come tutelare le specie a rischio e migliorare la qualità dell'aria o dell'acqua riducendo le emissioni di inquinanti. Negli ultimi anni, invece, l'approccio della politica ambientale europea si è evoluto da una politica di risanamento ad una strategia di prevenzione del deterioramento ambientale, basata su un approccio più sistematico che tenga conto della correlazione tra i vari temi e della loro dimensione globale.

10.3.1 Direttiva 2000/60/CE

La Direttiva Quadro sulle Acque (DQA o *Water Frame Directive* - WFD), istituisce a livello comunitario un quadro di riferimento normativo per una efficace gestione e tutela delle risorse idriche attraverso la definizione di piani di gestione a scala di distretto idrografico, finalizzati alla pianificazione delle attività di monitoraggio e delle misure necessarie per il raggiungimento dell'obiettivo di qualità fissato a livello europeo e corrispondente ad uno stato "buono".

I principali obiettivi enunciati dalla Direttiva Europea sulle acque sono:

- impedire un ulteriore deterioramento per proteggere e migliorare lo stato degli ecosistemi acquatici e degli ecosistemi terrestri e delle zone umide direttamente dipendenti dagli ecosistemi acquatici sotto il profilo del fabbisogno idrico;
- agevolare un utilizzo idrico sostenibile fondato sulla protezione a lungo termine delle risorse idriche disponibili;
- proteggere e migliorare l'ambiente acquatico, anche attraverso misure specifiche per la graduale riduzione degli scarichi, delle emissioni e delle perdite degli inquinanti specifici individuati e delle sostanze "prioritarie" e "prioritarie pericolose" individuate dalla normativa europea, l'arresto o la graduale eliminazione degli scarichi, delle emissioni e delle perdite di sostanze prioritarie pericolose;
- assicurare la graduale riduzione dell'inquinamento delle acque sotterranee;
- contribuire a mitigare gli effetti delle inondazioni e della siccità;
- garantire una fornitura sufficiente di acque superficiali e sotterranee di buona qualità per un utilizzo idrico sostenibile, equilibrato ed equo.

La Direttiva stabilisce che i singoli Stati Membri affrontino la tutela delle acque a livello di *"bacino idrografico"* e l'unità territoriale di riferimento per la gestione del bacino è individuata nel *"distretto idrografico"*, area di terra e di mare, costituita da uno o più bacini idrografici limitrofi e dalle rispettive acque sotterranee e costiere.

In ciascun distretto idrografico gli Stati membri devono adoperarsi affinché vengano effettuati:

- un'analisi delle caratteristiche del distretto;
- un esame dell'impatto provocato dalle attività umane sullo stato delle acque superficiali e sotterranee;
- un'analisi economica dell'utilizzo idrico.

Relativamente ad ogni distretto, deve essere predisposto un programma di misure che tenga conto delle analisi effettuate e degli obiettivi ambientali fissati dalla Direttiva, con lo scopo ultimo di raggiungere uno "stato buono" di tutte le acque entro il 2015 (salvo casi particolari espressamente previsti dalla Direttiva).

I programmi di misure sono indicati nei Piani di Gestione che gli Stati Membri devono predisporre per ogni singolo bacino idrografico e che rappresenta pertanto lo strumento di programmazione/attuazione per il raggiungimento degli obiettivi stabiliti dalla direttiva.

L'art. 8 si riferisce al dello stato delle acque superficiali, dello stato delle acque sotterranee e delle aree protette.

10.3.2 Direttiva 2006/118/CE

È "figlia" della WFD ed è focalizzata sulla protezione delle acque sotterranee dall'inquinamento e dal deterioramento.

Istituisce misure per prevenire e controllare l'inquinamento delle acque sotterranee, ai sensi dell'articolo 17, paragrafi 1 e 2, della direttiva 2000/60/CE. Queste misure comprendono in particolare:

a. criteri per valutare il buono stato chimico delle acque sotterranee;
b. criteri per individuare e invertire le tendenze significative e durature all'aumento e per determinare i punti di partenza per le inversioni di tendenza.

Inoltre, integra le disposizioni intese a prevenire o limitare le immissioni di inquinanti nelle acque sotterranee, già previste nella direttiva 2000/60/CE e mira a prevenire il deterioramento dello stato di tutti i corpi idrici sotterranei.

L'art. 3 riporta i criteri per valutare lo stato chimico delle acque sotterranee:

a. le norme di qualità delle acque sotterranee di cui all'allegato I;
b. i valori soglia che devono essere stabiliti dagli Stati membri secondo la procedura descritta nell'allegato II, parte A della Direttiva, per gli inquinanti, i gruppi di inquinanti e gli indicatori di inquinamento che, all'interno del territorio di uno Stato membro, sono stati individuati come fattori che contribuiscono alla caratterizzazione di corpi o gruppi di corpi idrici sotterranei come a rischio, tenuto conto almeno dell'elenco contenuto nell'allegato II, parte B.

L'art. 4 definisce la procedura di valutazione dello stato chimico delle acque sotterranee. Un corpo o gruppo di corpi idrici sotterranei è considerato in buono stato chimico allorché:

a. i risultati del controllo dimostrano che le condizioni stabilite nella tabella 2.3.2 dell'allegato V della direttiva 2000/60/CE sono rispettate; oppure che

DOI 10.7343/as-2020-486

b. i valori per le norme di qualità delle acque sotterranee elencati nell'allegato I e i pertinenti valori soglia stabiliti in conformità dell'articolo 3 e dell'allegato II non sono superati in nessun punto di monitoraggio in tale corpo o gruppo di corpi idrici sotterranei; ovvero
c. il valore per una norma di qualità delle acque sotterranee o il valore soglia è superato in uno o più punti di monitoraggio ma un'appropriata indagine svolta in conformità dell'allegato III conferma che:
   – sulla scorta della valutazione di cui all'allegato III, punto 3 non si ritiene che le concentrazioni di inquinanti che superano le norme di qualità delle acque sotterranee o i valori soglia rappresentino un rischio ambientale significativo, tenuto conto, se del caso, dell'entità del corpo idrico sotterraneo interessato;
   – le altre condizioni concernenti il buono stato chimico delle acque sotterranee figuranti nella tabella 2.3.2 dell'allegato V della direttiva 2000/60/CE sono soddisfatte in conformità dell'allegato III, punto 4, della presente direttiva;
   – per i corpi idrici sotterranei identificati in conformità all'articolo 7, Paragrafo 1, della direttiva 2000/60/CE, i requisiti di cui all'articolo 7, Paragrafo 3, di detta direttiva sono rispettati, in conformità dell'allegato III, punto 4, della presente direttiva;
   – la capacità del corpo idrico sotterraneo o di ogni singolo corpo del gruppo di corpi idrici sotterranei di sostenere gli usi umani non è stata danneggiata in maniera significativa dall'inquinamento.

10.3.3 Direttiva 2008/105/CE

Relativa a "Standard di qualità ambientale nel settore della politica delle acque, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive del Consiglio 82/176/CEE, 83/513/CEE, 84/156/CEE, 84/491/CEE e 86/280/CEE, nonché modifica della direttiva 2000/60/CE del Parlamento europeo e del Consiglio".

La Direttiva aggiorna l'elenco delle sostanze prioritarie in materia di acque della Direttiva 2000/60/CE (riportato precedentemente, aggiornato alla versione 2008/105).

10.3.4 Direttiva 2009/90/CE

Relativa a "Quadro per l'azione comunitaria in materia di acque", stabilisce, conformemente alla direttiva 2000/60/CE del Parlamento europeo e del Consiglio, specifiche tecniche per l'analisi chimica e il monitoraggio dello stato delle acque.

La Direttiva ha come scopo garantire la qualità e la comparabilità dei risultati analitici ottenuti dai laboratori incaricati dalle autorità nazionali competenti di effettuare il monitoraggio chimico delle acque, come previsto dall'articolo 8 della direttiva 2000/60/CE.

A tal fine la Direttiva stabilisce che gli Stati membri debbano garantire che tutti i metodi di analisi, compresi i metodi di laboratorio, sul campo e on line, utilizzati ai fini dei programmi di monitoraggio chimico, siano convalidati e documentati ai sensi della norma EN ISO/IEC -17025 o di altre norme equivalenti internazionalmente accettate.

L'art. 4 stabilisce che i criteri minimi di efficienza per i metodi di analisi siano basati su un'incertezza di misura pari o inferiore al 50 % (k = 2) stimata al livello degli standard di qualità ambientale pertinenti e su un limite di quantificazione pari o inferiore al 30 % rispetto agli standard di qualità ambientale pertinenti.

10.4 Normativa italiana sul monitoraggio ambientale

A livello nazionale, il monitoraggio ambientale, già introdotto a suo tempo dal D.Lgs. 152/1999, costituisce elemento fondamentale della progettazione di opere pubbliche e/o sottoposte alla procedura di valutazione di impatto ambientale.

I testi legislativi di riferimento sono i seguenti.

10.4.1 D.Lgs. 152/2006 del 3 aprile 2006 – Norme in materia ambientale

Il Decreto legislativo 3 aprile 2006, n° 152 "Norme in materia ambientale", chiamato anche Codice dell'Ambiente, è il principale riferimento legislativo in materia di valutazione di impatto ambientale, difesa del suolo e tutela delle acque, gestione dei rifiuti, riduzione dell'inquinamento atmosferico e risarcimento dei danni ambientali.

Il decreto si distingue in:

- Parte prima: Disposizioni comuni e principi generali
- Parte seconda: Procedure per la valutazione ambientale strategica (VAS), per la valutazione d'impatto ambientale (VIA) e per l'autorizzazione ambientale integrata (IPPC)
- Parte terza: Norme in materia di difesa del suolo e lotta alla desertificazione, di tutela delle acque dall'inquinamento e di gestione delle risorse idriche
- Parte quarta: Norme in materia di gestione dei rifiuti e di bonifica dei siti inquinati
- Parte quinta: Norme in materia di tutela dell'aria e di riduzione delle emissioni in atmosfera
- Parte sesta: Norme in materia di tutela risarcitoria contro i danni all'ambiente.

Il monitoraggio ambientale entra a far parte del procedimento di Valutazione di impatto ambientale, normato dalla Parte seconda, il cui svolgimento è illustrato all'art. 19.

Il monitoraggio ambientale è introdotto all'interno del SIA, così come previsto dall'art. 22.

L'art. 28 è dedicato al monitoraggio nella VIA.

10.4.2 D.Lgs. 30/2009 del 16 marzo 2009

"Attuazione della direttiva 2006/118/CE, relativa alla protezione delle acque sotterranee dall'inquinamento e dal deterioramento".

È stato predisposto ai sensi della legge 25 febbraio 2008, n. 34, recante *"Disposizioni per l'adempimento di obblighi derivanti dall'appartenenza dell'Italia alle Comunità europee (Legge comunitaria 2007)"*, al fine di recepire la direttiva 2006/118/CE sulla protezione delle acque sotterranee dall'inquinamento e dal deterioramento.

La citata direttiva, adottata ai sensi dell'articolo 17 della direttiva quadro in materia di acque 2000/60/CE, integra le disposizioni della direttiva madre ed introduce una disciplina specifica in materia di prevenzione e di controllo dell'inquinamento delle acque sotterranee. In particolare, prevede la definizione degli standard e dei valori soglia necessari alla valutazione del buono stato chimico delle acque sotterranee, nonché i criteri per fissare i valori soglia nazionali, per individuare le tendenze significative e durature all'aumento di inquinamento e per determinare i punti di partenza per l'inversione di dette tendenze, completando coerentemente la disciplina generale introdotta dalla direttiva quadro.

Lo schema di decreto presentato recepisce puntualmente le disposizioni della direttiva madre (2000/60/CE) ma, al contempo, tiene conto, negli allegati tecnici, delle linee guida emanate successivamente all'adozione della stessa direttiva, così da fornire elementi tecnici più puntuali per impostare una corretta attività conoscitiva del territorio e dello stato qualitativo delle acque sotterranee.

Al fine di facilitare l'applicazione delle norme che regolano l'obiettivo di qualità ambientale per le acque sotterranee da parte delle autorità competenti, il Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare (MATTM) ha ritenuto opportuno definire, per quanto possibile, una disciplina sistematica della materia tutela delle acque sotterranee, raccogliendo in un unico corpus normativo le norme sulla tutela qualitativa previste dalla direttiva 2006/118/CE e quelle sulla tutela quantitativa contenute all'allegato 1 Parte terza del D.Lgs. 152/2006 che, conseguentemente si è provveduto in parte ad abrogare.

10.4.3 D.Lgs. 163/2006 del 12 aprile 2006 - Codice appalti

L'art. 164, della Sezione I - Infrastrutture ed insediamenti produttivi, del decreto legislativo 12 aprile 2006 n° 163 *"Codice dei contratti pubblici relativi a lavori, servizi e forniture in attuazione delle direttive 2004/17/CE e 2004/18/CE"* definisce le norme da applicare alla progettazione, rimandando all'Allegato tecnico XXI.

L'art. 10, comma 3 dell'Allegato XXI introduce per la prima volta il concetto di *"Progetto di Monitoraggio Ambientale (PMA)"* nell'elenco degli elaborati a corredo dei progetti.

10.5 Linee guida per la predisposizione del Progetto di Monitoraggio Ambientale (PMA)

La normativa, sia a livello comunitario che nazionale, come visto, stabilisce la necessità della redazione di un Progetto di monitoraggio ambientale, da attuare e realizzare contestualmente al progetto.

Il MATTM ha creato una commissione speciale di valutazione di impatto ambientale, che ha redatto nel 2007 un documento dal titolo *"Linee Guida per la predisposizione da parte del Proponente del Progetto di Monitoraggio Ambientale (PMA)"* che ha lo scopo di delineare delle linee guida comuni ed univoche per la redazione di *"un sistema di monitoraggio ambientale, opportunamente esteso a tutte le componenti di interesse, che, attraverso la restituzione di dati continuamente aggiornati, fornisca indicazioni sui trend evolutivi e consenta la misura dello stato complessivo dell'ambiente e del verificarsi di eventuali impatti non previsti nella fase progettuale e di SIA".*

Tali Linee guida definiscono innanzitutto i seguenti aspetti generali di un Piano di Monitoraggio ambientale:

- gli obiettivi del Monitoraggio Ambientale;
- i requisiti del Progetto di Monitoraggio Ambientale;
- l'articolazione temporale;
- i criteri metodologici di redazione del PMA;
- le modalità di attuazione del monitoraggio ambientale;
- le modalità di gestione e rappresentazione dei risultati;
- le modalità di gestione delle varianze;
- la struttura organizzativa preposta all'effettuazione del monitoraggio ambientale.

Il documento individua le componenti ambientali che dovrebbero essere oggetto del Monitoraggio Ambientale, di seguito sintetizzate:

- atmosfera;
- ambiente idrico;
- suolo e sottosuolo;
- vegetazione, flora, fauna ed ecosistemi;
- rumore;
- vibrazioni;
- campi elettromagnetici;
- paesaggio;
- rifiuti e terre e rocce da scavo;
- stato fisico dei luoghi, aree di cantiere e viabilità;
- ambiente sociale

Per ciascuna componente e/o fattore ambientale il documento riporta, in appendice, i criteri specifici per il PMA.

L'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) ha pubblicato a dicembre 2013 le *"Linee Guida per la predisposizione del Progetto di Monitoraggio Ambientale (PMA) delle opere soggette a Valutazione di Impatto Ambientale, ai sensi del D.Lgs. 152/2006 e s.m.i. e del D.Lgs. 163/2006 e s.m.i."*, aggiornate poi con Rev.1 del 16/06/2014, che rappresentano ad oggi il più recente riferimento tecnico a livello nazionale.

Il documento è dedicato alle opere sottoposte a Valutazione di impatto ambientale ai sensi della Parte Seconda del D.lgs.152/2006 e s.m.i. ed è finalizzato a:

- fornire al Proponente indicazioni metodologiche ed operative per la predisposizione del Progetto di Monitoraggio Ambientale (PMA),
- stabilire criteri e metodologie omogenei per la predisposizione dei PMA affinché, nel rispetto delle specificità dei contesti progettuali ed ambientali, sia possibile il confronto dei dati, anche ai fini del riutilizzo.

Il documento individua il *follow-up* che comprende le attività riconducibili sostanzialmente alle seguenti quattro principali fasi:

1. **monitoraggio** - l'insieme di attività e di dati ambientali antecedenti e successivi all'attuazione del progetto (in corso d'opera e in esercizio);
2. **valutazione** - la valutazione della conformità con le norme, le previsioni o aspettative delle prestazioni ambientali del progetto;

DOI 10.7343/as-2020-486

3. **gestione** - la definizione delle azioni appropriate da intraprendere in risposta ai problemi derivanti dalle attività di monitoraggio e di valutazione;
4. **comunicazione** - l'informazione ai diversi soggetti coinvolti sui risultati delle attività di monitoraggio, valutazione e gestione.

Il documento, sulle orme delle linee guida del 2007, delle quali costituisce un aggiornamento, oltre ai requisiti e criteri generali del monitoraggio ambientale, definisce le caratteristiche delle aree di indagine, delle stazioni e dei punti di monitoraggio, dei parametri analitici, dell'articolazione temporale delle attività e della restituzione dei dati.

BOX 11 - Organizzazione e principi di un Progetto di Monitoraggio Ambientale (PMA)

Le Linee guida redatte dalla commissione speciale per la valutazione di impatto ambientale citate nel testo stabiliscono alcuni principi generali ed indicazioni specifiche per la componente idrica, disponibili rispettivamente nei documenti:

- Linee Guida per la predisposizione del Progetto di Monitoraggio Ambientale (PMA) delle opere soggette a procedure di VIA (D.Lgs.152/2006 e s.m.i., D.Lgs.163/2006 e s.m.i.). Indirizzi metodologici generali (Capitoli 1-2-3-4-5) Rev.1 del 16/06/2014 Rev.1 del 16/06/2014;
- Linee Guida per la predisposizione del Progetto di Monitoraggio Ambientale (PMA) delle opere soggette a procedure di VIA (D.Lgs.152/2006 e s.m.i., D.Lgs.163/2006 e s.m.i.). Indirizzi metodologici specifici: Ambiente idrico (Capitolo 6.2) Rev. 1 del 17/06/2015.

PRINCIPI GENERALI

Il Monitoraggio Ambientale (MA) è uno strumento di fondamentale importanza nell'ambito della valutazione degli impatti ambientali di un'opera e in quanto tale persegue i seguenti obiettivi:

- verificare la conformità alle previsioni di impatto individuate nel SIA per quanto attiene le fasi di costruzione e di esercizio dell'Opera;
- correlare gli stati *ante-operam*, in corso d'opera e *post-operam*, al fine di valutare l'evolversi della situazione ambientale;
- garantire, durante la costruzione, il pieno controllo della situazione ambientale, al fine di rilevare prontamente eventuali situazioni non previste e/o criticità ambientali e di predisporre ed attuare tempestivamente le necessarie azioni correttive;
- verificare l'efficacia delle misure di mitigazione;
- fornire alla Commissione Speciale VIA gli elementi di verifica necessari per la corretta esecuzione delle procedure di monitoraggio;
- effettuare, nelle fasi di costruzione e di esercizio, gli opportuni controlli sull'esatto adempimento dei contenuti, e delle eventuali prescrizioni e raccomandazioni formulate nel provvedimento di compatibilità ambientale.

Il Monitoraggio Ambientale deve inoltre soddisfare i seguenti requisiti:

- prevedere il coordinamento delle attività di monitoraggio previste "ad hoc" con quelle degli Enti territoriali ed ambientali che operano nell'ambito della tutela e dell'uso delle risorse ambientali;
- essere coerente con il SIA relativo all'opera interessata dal MA. Eventuali modifiche e la non considerazione di alcune componenti devono essere evidenziate e sinteticamente motivate;
- contenere la programmazione dettagliata spazio-temporale delle attività di monitoraggio e la definizione degli strumenti;
- indicare le modalità di rilevamento e uso della strumentazione coerenti con la normativa vigente;
- prevedere meccanismi di segnalazione tempestiva di eventuali insufficienze e anomalie;
- prevedere l'utilizzo di metodologie validate e di comprovato rigore tecnico-scientifico;
- individuare parametri ed indicatori facilmente misurabili ed affidabili, nonché rappresentativi delle varie situazioni ambientali;
- definire la scelta del numero, delle tipologie e della distribuzione territoriale delle stazioni di misura in modo rappresentativo delle possibili entità delle interferenze e della sensibilità/criticità dell'ambiente interessato;
- prevedere la frequenza delle misure adeguata alle componenti che si intendono monitorare;
- prevedere l'integrazione della rete di monitoraggio progettata dal PMA con le reti di monitoraggio esistenti;
- prevedere la restituzione periodica programmata e su richiesta delle informazioni e dei dati in maniera strutturata e georeferenziata, di facile utilizzo ed aggiornamento, e con possibilità sia di correlazione con eventuali elaborazioni modellistiche, sia di confronto con i dati previsti nel SIA;
- pervenire ad un dimensionamento del monitoraggio proporzionato all'importanza e all'impatto dell'Opera. Il PMA focalizzerà modalità di controllo indirizzate su parametri e fattori maggiormente significativi, la cui misura consenta di valutare il reale impatto della sola Opera specifica sull'ambiente. Priorità sarà attribuita all'integrazione quali/quantitativa

di reti di monitoraggio esistenti che consentano un'azione di controllo duratura nel tempo;

- definire la struttura organizzativa preposta all'effettuazione del MA;
- identificare e dettagliare il costo del monitoraggio - da inserire nel quadro economico del progetto definitivo - tenendo conto anche degli imprevisti.

Il PMA deve sviluppare in modo chiaramente distinto le tre fasi temporali nelle quali si svolgerà l'attività di MA:

- monitoraggio *ante-operam*, che si conclude prima dell'inizio di attività interferenti con la componente ambientale. In tale fase il Proponente recepisce e verifica tutti i dati reperiti e direttamente misurati per la redazione del SIA;
- monitoraggio in corso d'opera, che comprende tutto il periodo di realizzazione, dall'apertura dei cantieri fino al loro completo smantellamento e al ripristino dei siti;
- monitoraggio *post-operam*, comprendente le fasi di pre-esercizio ed esercizio, la cui durata è funzione sia della componente indagata sia della tipologia di Opera.

I criteri metodologici per la redazione del Progetto di monitoraggio ambientale sono riportati di seguito.

Nella redazione del PMA si devono seguire le seguenti fasi progettuali:

- analisi dei documenti di riferimento e pianificazione delle attività di progettazione: sulla base delle linee guida, saranno definiti gli obiettivi da perseguire, le modalità generali e le attività necessarie per la realizzazione del PMA, nonché le risorse da coinvolgere;
- definizione del quadro informativo esistente: in piena coerenza con il SIA ed eventualmente in integrazione a quanto riportato dal SIA stesso, sarà necessario approfondire ed aggiornare l'esame di tutti gli elaborati tecnico-progettuali, nonché condurre indagini conoscitive presso gli Enti Locali, al fine di meglio definire ed aggiornare il quadro delle eventuali attività di monitoraggio svolte o in corso di svolgimento, ovvero previste, nella fascia di territorio interessato dalla realizzazione dell'Opera;
- identificazione ed aggiornamento dei riferimenti normativi e bibliografici: sia per la definizione delle metodiche di monitoraggio che per la determinazione dei valori di riferimento, rispetto ai quali effettuare le valutazioni ambientali;
- scelta delle componenti ambientali: le componenti ambientali interessate sono quelle individuate nel SIA, integrate con quelle indicate dalle raccomandazioni e prescrizioni del parere di compatibilità ambientale;
- scelta degli indicatori ambientali: la scelta delle componenti da monitorare è basata sulla sensibilità e vulnerabilità alle azioni di progetto. I relativi parametri individuati e selezionati sono quelli la cui misura consente di risalire allo stato delle componenti ambientali che devono essere controllate. Tra di essi, particolare attenzione dovrà essere rivolta ai bio-indicatori che, laddove esistenti (dati di letteratura consolidati), saranno compresi tra quelli indagati;
- scelta delle aree da monitorare: la scelta delle aree è basata sulla sensibilità e vulnerabilità alle azioni di progetto, sia per la tutela della salute della popolazione sia per la tutela dell'ambiente, in particolare le aree di pregio o interesse individuate dalla normativa comunitaria, nazionale e regionale, nonché quelle indicate nel parere di compatibilità ambientale e nei provvedimenti di approvazione del progetto nei suoi diversi livelli;
- strutturazione delle informazioni: considerata la complessità e la vastità delle informazioni da gestire, si devono identificare tecniche di sintesi dei dati (grafiche e numeriche) che semplifichino la caratterizzazione e la valutazione dello stato ambientale *ante-operam*, in corso d'opera e *post-operam*. Deve essere pienamente considerata la chiarezza e la semplicità delle informazioni per consentire una piena partecipazione dei cittadini all'azione di verifica;
- programmazione delle attività: la complessità delle opere di progetto e la durata dei lavori richiedono una precisa programmazione, in relazione allo stato di avanzamento dei lavori, delle attività di raccolta, elaborazione e restituzione delle informazioni. Qualora si riscontrassero anomalie, occorre inoltre effettuare una serie di accertamenti straordinari atti ad approfondire e verificare l'entità del problema, determinarne la causa e indicare le possibili soluzioni.

Inoltre, relativamente alle modalità di attuazione del monitoraggio, il PMA dovrà prevedere:

- l'individuazione delle attività di carattere preliminare, finalizzate all'acquisizione di tutte le necessarie informazioni esistenti ed all'effettuazione delle operazioni propedeutiche alle misure, quali:
  - sopralluoghi sui punti ove installare le apparecchiature;
  - acquisizione permessi;
  - georeferenziazione delle stazioni di misura;
- la scelta delle metodiche di rilievo, analisi ed elaborazioni dati, differenziate in funzione delle diverse tipologie di rilievo, delle fasi di monitoraggio e dei siti interessati;
- la scelta della strumentazione prevista per effettuare le operazioni di rilievo;
- l'articolazione temporale delle attività e frequenza per ciascun tipo di misura.

DOI 10.7343/as-2020-486

INDICAZIONI SPECIFICHE PER LA COMPONENTE IDRICA

Per quanto concerne la componente "ambiente idrico", nella fase *ante-operam*:

- la definizione delle caratteristiche del reticolo idrografico con la relativa circolazione idrica superficiale e sotterranea esistente, prima dell'apertura dei cantieri;
- la definizione delle caratteristiche chimico-fisiche e organolettiche delle acque, le caratteristiche idrauliche storiche (es.: portata, livello della falda, livello del corpo idrico superficiale), i dissesti idrogeologici storici, ecc., cui riferire l'esito dei successivi rilevamenti a seguito degli effetti indotti dalla realizzazione dell'Opera;
- la definizione della rete di pozzi nell'area vasta per tipologia (pozzi di attingimento di acquedotti, pozzi di controllo della falda, ecc.), compresi fontanili/risorgive;
- l'analisi delle pressioni ambientali che insistono sull'ambiente idrico interessato dall'Opera.

La definizione della struttura della rete di monitoraggio deve prevedere l'interfaccia sia con le reti locali di monitoraggio, sia con le reti regionali e/o nazionali meteo-idro-pluviometriche, reti di qualità delle acque superficiali e sotterranee e reti marine (ondametria e mareografia), ove esistenti.

Nella redazione del PMA della componente idrica deve essere inoltre fatto riferimento agli standard adottati a livello nazionale per le reti meteo-idro-pluviometriche e marine (Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale ora APAT) sulla base delle linee guida dell'Organizzazione Meteorologica Mondiale.

La scelta delle aree da monitorare deve essere basata sulla sensibilità e vulnerabilità delle stesse alle azioni di progetto.

Le aree devono essere differenziate in funzione dei criteri di indagine e delle potenzialità di interferenza della componente ambientale in esame (bacino idrografico, idrogeologia, ecc..).

I criteri che dovranno essere tenuti presenti nella loro determinazione sono:

- presenza di sorgenti puntuali di interferenza nel caso questa sia discretizzata (es. vasche, serbatoi, scarichi, ecc.);
- presenza di elementi significativi, attuali o previsti, rispetto ai quali è possibile rilevare una modifica delle condizioni di stato dei parametri caratterizzanti (es.: modifica del reticolo idrografico, superficiale e sotterraneo per la costruzione di rilevati e gallerie, ecc.).

Verranno sottoposti a monitoraggio tutti i punti scelti per il monitoraggio *ante-operam*, e in particolare:

- le falde acquifere, sorgenti e pozzi presenti nella zona interessata dall'Opera;
- i parametri idraulici, organolettici e chimico-fisici delle acque, sia superficiali che sotterranee, dei corpi idrici interessati dall'Opera;
- gli impluvi principali, i corsi d'acqua ed i loro affluenti ed in genere i bacini idrografici sui quali insiste l'Opera;
- la zona marino-costiera interessata dai bacini scolanti intersecati dall'Opera;
- i suoli ad elevata permeabilità, interessati dalle opere, in particolare nelle aree dove è ipotizzabile il rischio di inquinamento anche accidentale;
- le zone interessate da rilevanti opere in sotterraneo quali gallerie, fondazioni a pozzo e/o grossi movimenti terra che possono variare il regime del reticolo idrografico superficiale e/o sotterraneo;
- le aree a rischio idrogeologico, già classificate e/o individuate nel SIA, interessate dall'Opera.

Le Linee guida stabiliscono che, in via esemplificativa, per assicurare uniformità e comparabilità dei dati riferiti alle varie fasi temporali e in diverse aree geografiche, il PMA dovrà individuare almeno i seguenti aspetti:

- l'ubicazione dei punti di monitoraggio;
- i parametri da rilevare;
- la durata del campionamento;
- il numero dei campioni da rilevare nel periodo di osservazione (in funzione di parametri quali: lo stato del corpo ricettore, le condizioni climatiche locali (piovosità, venti, umidità, ecc.), la tipologia dell'Opera e la movimentazione di materiali connessa, le modificazioni del reticolo idrografico in seguito ad apporti o prelievi di materiali finalizzati all'Opera, le caratteristiche della permeabilità e dei parametri idrogeologici del sito, ecc.);
- le condizioni meteorologiche in cui si prevede di effettuare le misure;
- la strumentazione da impiegare.

10.6 Normativa sugli scarichi

Questo paragrafo presenta un inquadramento generale della normativa sugli scarichi, senza entrare nello specifico, ma focalizzandosi essenzialmente su un aspetto fondamentale: la destinazione finale delle acque intercettate durante lo scavo di un'opera sotterranea. Sebbene, qualora possibile, il riutilizzo delle acque sia da preferirsi (si veda a questo riguardo il Capitolo 5) in tanti casi tale soluzione non è perseguibile.

La tutela delle acque dall'inquinamento rappresenta un aspetto fondamentale della tutela dell'ambiente naturale. Il D.Lgs. 152/2006 e s.m.i., Parte Terza, costituisce il riferimento normativo in tema di scarichi in corpi idrici superficiali ed agisce da diversi punti di vista: individua gli obiettivi minimi di qualità ambientale, stabilisce i valori limite degli scarichi nei corpi idrici recettori, in funzione degli obiettivi di qualità di questo ed individua nell'autorizzazione allo scarico lo strumento per la tutela della qualità dei corpi idrici. Vi sono poi le Regioni che in molti casi hanno emanato Leggi e Regolamenti sul tema.

In generale, conviene dividere la situazione in **fase costruttiva** da quella in **fase di esercizio**.

Per quanto riguarda la **fase costruttiva**, secondo la definizione di acque reflue del Decreto (domestiche, industriali, urbane ed assimilabili), quelle che fuoriescono da una galleria sono in generale considerate acque reflue industriali; esse rientrano in linea di principio nella categoria definita come *"qualsiasi tipo di acque reflue scaricate da edifici od impianti in cui si svolgono attività commerciali o di produzione di beni, diverse dalle acque reflue domestiche e dalle acque meteoriche di dilavamento"*. Gli scarichi industriali possono essere recapitati, a determinate condizioni, in acque superficiali (corsi d'acqua, laghi, acque marine) o nella rete fognaria. (solo in casi particolari può essere consentito nel suolo e sottosuolo).

Lo scarico delle acque reflue industriali in acque superficiali è normato dall'art. 105 del Decreto, che rimanda all'Allegato 5 alla parte terza, che fissa i valori limite degli scarichi stessi Va posta attenzione al fatto che le Regioni possono aver fissato limiti più restrittivi. Il punto 1.2 dell'Allegato citato, che tratta appunto le acque reflue industriali, fissa le seguenti norme generali:

- gli scarichi di acque reflue industriali in acque superficiali devono essere conformi ai limiti di emissione indicati nella successiva Tabella 3 o alle relative norme disposte dalle Regioni;
- le determinazioni analitiche ai fini del controllo di conformità degli scarichi di acque reflue industriali sono di norma riferite ad un campione medio prelevato nell'arco di tre ore.

Tuttavia, sempre in fase di costruzione, in determinati casi gli enti di controllo hanno potuto valutare che le acque di falda intercettate prima della loro caduta a terra (quindi non contaminate) possono essere non considerate acque industriali (non entrano a far parte dei processi di lavorazione, sono, in sostanza, acque derivanti dall'esterno che necessitano di essere deviate per non interferire con la lavorazione). In tali situazioni, se c'è accordo con gli enti preposti, possono di conseguenza essere scaricate senza depurazione. Va, però, in tutti i casi considerato l'aspetto relativo al bilancio idrico: stante che i quantitativi possono essere copiosi, l'individuazione del (o dei) corpi recettori è necessario venga valutata con l'autorità competente (il più delle volte gli uffici del Genio Civile). Non è poi da escludere che, anche in fase di costruzione, si possano già prevedere e mettere in atto riutilizzi di queste acque, in quanto non contaminate.

Per quanto riguarda la **fase di esercizio** le acque provenienti dalla falda che sono intercettate sull'estradosso della galleria e che sono raccolte separatamente, quando non vengono riutilizzate, possono in linea di massima essere scaricate senza particolari atti autorizzativi. Le eventuali acque che invece filtrano attraverso il rivestimento vengono raccolte nelle canalette ai margini della sede stradale o sotto il ballast ferroviario (analogamente a quanto accade in esterno alle acque piovane). Non si tratta quindi di acque industriali, ma sono identificate come acque di dilavamento della piattaforma (vi possono confluire anche acque prodotte a seguito di incidente). Tali acque vengono inviate ad un sistema di depurazione, costituito in genere almeno da un sedimentatore ed un disoleatore; talora è presente anche una vasca-polmone da attivare in caso di incidente.

DOI 10.7343/as-2020-486

11 BIBLIOGRAFIA

11.1 Ricerca scientifica

L'attualità dei temi trattati dalle presenti Linee Guida può essere rapidamente verificata anche dall'analisi della produzione scientifica nei principali database scientifici disponibili (*Web Of Science, Science Direct, Scopus*), dove si possono eseguire ricerche semplici per parole chiave che caratterizzano l'argomento di interesse, ma anche ricerche avanzate, filtrate su numerosi campi, come area di ricerca, categoria, periodo di pubblicazione, nazionalità degli autori, nomi degli autori, e molto altro.

Ad esempio, qui di seguito vengono illustrati i risultati di una ricerca effettuata all'interno del database di *Web Of Science (WOS)* basata semplicemente sulle due parole "tunnel" e "*groundwater*", che devono essere entrambe contenute in uno o più dei campi Titolo, Abstract e Parole Chiave.

Il database WOS, alla data del 10/12/2020, restituisce un numero totale di 1.675 record, che si distribuiscono sull'intervallo temporale dal 1982 ad oggi, secondo l'andamento rappresentato dall'istogramma di Figura 24a. Il significativo incremento del numero di contributi per anno, che si osserva negli ultimi dieci anni circa, riflette non solo l'aumento di interesse per le tematiche correlate alla ricerca, e la progressiva specializzazione scientifica, ma anche l'evoluzione globale che ha subito il processo della pubblicazione scientifica.

Ad ogni modo si ritiene utile analizzare i risultati della ricerca su altri parametri utili a formulare alcune riflessioni. Si osserva prima di tutto che la tipologia prevalente di contributi è l'Articolo scientifico, seguito da Atti di congresso e *Review*, e da altre tipologie minori, come mostrato nel diagramma ad albero di Figura 24b.

Appare interessante la distribuzione statistica delle nazioni con il maggior numero di contributi (sull'intero database):



Fig. 24 - Statistiche relative ad una ricerca per compresenza delle parole *"tunnel"* e *"groundwater"* all'interno del Database WOS (Web Of Science); vd. spiegazione nel testo.

Fig. 24 - Statistics related to a search for the coexistence of the words "tunnel" and "groundwater", in the Web Of Science (WOS) database; see explanation in the text.

le prime 15 sono nell'ordine Cina, USA, Gran Bretagna, Corea del Sud, Germania, Giappone, Italia, Svizzera, Canada, Svezia, Iran, Spagna, Australia, Francia, Austria (Figura 24c). Vale la pena notare come l'Italia si trovi in ottima posizione, immaginando di normalizzare il risultato sulla superficie nazionale e sulla popolazione; a livello europeo l'Italia risulta preceduta solamente dalla Germania, in posizione pari merito con la Svizzera, e seguita per pochi punti da Spagna, Francia e Austria. A questi numeri contribuiscono certamente le morfologie dei territori delle diverse nazioni, dove negli ultimi anni sono state costruite molte nuove infrastrutture, soprattutto di trasporto, con numerosissime gallerie, sia montane che metropolitane, ed anche l'esistenza di Università e centri di ricerca scientifica a cui sono storicamente associati elevati livelli di expertise tecnologica nel settore delle opere in sotterraneo e dell'idrogeologia.

I risultati possono essere analizzati anche in termini di Categorie WOS, dove risultano nettamente dominanti Ingegneria civile, Geologia applicata all'ingegneria, Geoscienze, Risorse idriche, Scienze ambientali, Tecnologie di costruzione (Figura 24d). Analogamente in termini di aree di ricerca, sono dominanti Ingegneria, Geologia, Risorse idriche, Scienze Ambientali, Tecnologie di costruzione, Geochimica e Geofisica (Figura 24e).

Infine, escludendo raccolte speciali ed atti di congresso, le riviste che raccolgono il maggior numero di contributi sui temi sono: *Tunnelling And Underground Space Technology*, *Engineering Geology*, *Environmental Earth Sciences*, *Hydrogeology Journal*, *Applied Geochemistry*, *Applied Mechanics and Materials*, *Bulletin of Engineering Geology and The Environment*, *Journal of Hydrology*, *Advanced Materials Research*, *Environmental Geology*, *Rock Mechanics and Rock Engineering* (Figura 24f).

Questi risultati possono essere analizzati da molti punti di vista, ma, in relazione agli argomenti delle presenti Linee Guida, emerge chiaramente che le acque sotterranee, e più in generale gli aspetti ambientali connessi allo scavo delle gallerie, sono temi molto importanti, secondi solo a quelli più prettamente ingegneristici e geotecnici connessi a questa tipologia di opere in sotterranee.

Contribuisce a questa produzione scientifica un'ampia disponibilità di riviste tecniche specializzate sui settori di cui sopra, dove possono essere reperiti numerosi contributi sui temi delle Linee Guida, in special modo casi studi ed esempi applicativi relativi a specifici progetti e opere. Nel panorama italiano vale la pena citare la rivista Acque Sotterranee -*Italian Journal of Groundwater* edita dall'Associazione Acque Sotterranee affiliata ad ANIPA (Associazione Nazionale di Idrogeologia Pozzi Acqua e Geotermia) con i patrocini di IAH Italia e di ISPRA, la rivista Gallerie e Grandi Opere Sotterranee, della Società Italiana Gallerie, la rivista GEAM Geoingegneria Ambientale e Mineraria, dell'omonima Associazione, ed il sito web Strade & Autostrade.

11.2 Suggerimenti bibliografici

Per quanto illustrato, a corredo delle Linee Guida si è ritenuto utile allegare , oltre alle risorse effettivamente citate nel testo (per cui si rimanda ai Paragrafi 11.3, 11.4 e 11.5), una raccolta di suggerimenti bibliografici sui temi trattati. Certamente si tratta di una raccolta non esaustiva (parla da sé il numero totale di 1.675 record del database WOS), ma è il frutto dell'esperienza maturata sino ad oggi dagli autori e può rappresentare un buon punto di partenza per ricerche bibliografiche più mirate su temi specifici. L'aggiornamento di questa banca dati sarà onere del lettore, che potrà avvalersi dei database scientifici citati e dei motori di ricerca su web. Il Capitolo 2 delle Linee Guida offre delle indicazioni operative a questo proposito.

Ad ognuno dei contributi, elencati in ordine alfabetico per primo autore, sono associati uno o più numeri di capitoli delle Linee Guida, per dare una rapida indicazione degli argomenti predominanti del contributo stesso e per rendere più semplice la costruzione di bibliografie focalizzate sui macro-argomenti trattati.

Suggerimenti bibliografici	Capitoli
Anagnostou G (1995) The influence of tunnel excavation on the hydraulic head. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 19(10):725-746.	3, 4
Aksoy CO (2008) Chemical injection application at tunnel service shaft to prevent ground settlement induced by groundwater drainage: a case study. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 45(3):376–383.	7
Aller L, Bennett T, Lehr JH, Petty RJ (1985) DRASTIC - a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings: U.S. Environmental Protection Agency, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development, EPA/600/2–85/018, 163 pp.	4
Attanayake PM, Waterman MK (2006) Identifying environmental impacts of underground construction.Hydrogeology Journal, 14:1160-1170	2, 4
Atkinson JH, Mair RJ (1983) Loads on leaking and watertight tunnel linings, sewers and buried pipes due to groundwater. Geotechnique, 33(3): 341-344.	3, 4, 7
Baietto A, Perello P, Cadoppi P, Martinotti G (2009) Alpine tectonic evolution and thermal water circulations of the Argentera Massif (South-Western Alps). Swiss Journal of Geosciences, 102, 2, 223-245.	2, 5

DOI 10.7343/as-2020-486

Baietto A, Burger U, Perello P (2014) Hydrogeological Modeling Applications in Tunnel Excavations: Examples from Tunnel Excavations in Granitic Rocks. In: Engineering Geology for Society and Territory - Volume 6 - Applied Geology for Major Engineering Projects. DOI: 10.1007/978-3-319-09060-3_177 3, 4

Banzato C, Civita MV, Fiorucci A, Vigna B, Papale S (2011) Hydrogeological prognosis with regard to realisation of the New Colle Di Tenda Road Tunnel. Am. J. Environ. Sci., 7(1), 1. 3, 4

Barla M, Di Donna A, Perino A (2016) Application of energy tunnels to an urban environment. Geothermics,61, 104–11 3, 6

Barla M, Di Donna A, Insana A (2019) A novel real scale experimental prototype of energy tunnel. Tunnelling and Underground Space Technology, 87, 1-14. 6

Barla M, Baralis M, Insana A, Aiassa S, Antolini F, Vigna F, Azzarone F, Marchetti P (2020) On the thermal activation of Turin metro Line 2 tunnels. In: Proceedings of 16th IACMAG, Torino (Italy) May 5-8, 2021. 6

Baralis M, Insana A, Barla M (2020) Energy tunnels for deicing of a bridge deck in Alpine region. In: Proceedings of 16th IACMAG, Torino (Italy) May 5-8, 2021. 6

Bonomi T, Bellini R (2003) The tunnel impact on the groundwater level in an urban area: a modelling approach to forecast it. Materials and Geoenvironment, 50:45-48. 3, 4

Butscher C, Huggenberger P, Zechner E (2011) Impact of tunneling on regional groundwater flow and implications for swelling of clay-sulfate rocks. Engineering Geology,11:198–206. 3, 4

Butscher C (2012) Steady-state groundwater inflow into a circular tunnel. Tunelling and underground space technology,32:158-167 3, 4

Cacas MC, Ledoux E, Marsilly GD, Tillie B, Barbreau A, Durand E, Feuga B, Peaudecerf P (1990) Modelling fracture flow with a stochastic discrete fracture network: calibration and validation. Water Resources Research, 26:479–489 3, 4

Cao M, Wu C, Liu J, Jiang Y (2020) Increasing leaf $\delta^{13}C$ values of woody plants in response to water stress induced by tunnel excavation in a karst trough valley: Implication for improving water-use efficiency. Journal of Hydrology, available online. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124895 4, 5

Casagrande G, Cucchi F, Zini L (2005) Hazard connected to railway tunnel construction in karstic area: applied geomorphological and hydrogeological surveys. Natural Hazards and Earth System Science, 5(2), 243-250 3, 4

Celico P, Fabbrocino S, Petitta M, Tallini M (2005) Hydrogeological impact of the Gran Sasso motor-way tunnels (Central Italy). Giornale di Geologia Applicata 1:157-165. 2, 3, 4

Cesano D, Olofsson B, Bagtzoglou AC (2000) Parameters regulating groundwater inflows into hard rock tunnels – a statistical study of the Bolmen Tunnel in southern Sweden. Tunnelling and Underground Space Technology, 15(2):153-165. 4

Chae GT, Yun ST, Choi BY, Yu SY, Jo Y, Mayer B, Kim YJ, Lee JY (2008) Hydrochemistry of urban groundwater, Seoul, Korea: The impact of subway tunnels on groundwater quality. Journal of Contamant Hydrology, 101:42–52. 2, 3, 4

Chiocchini U, Castaldi F. (2011) The impact of groundwater on the excavation of tunnels in two different hydrogeological settings in central Italy. Hydrogeology Journal, 19: 651–669 doi:10.1007/s10040-010-0702- 12, 4

Chisyaki T (1984) A study of confined flow of ground water through a tunnel. Ground Water 22(2):162-167. 3, 4

Cokorilo Ilic M, Mladenovic A, Cuk M, Jemkov I (2019) The Importance of Detailed Groundwater Monitoring for Underground Structure in Karst (Case Study: HPP Pirot, Southeastern Serbia). Water, 2019, 11, 603; doi:10.3390/w11030603 2, 8

Coli M, Pinzani A (2014) Tunnelling and Hydrogeological Issues: A Short Review of the Current State of the Art. Rock Mechanics and Rock Engineering, 47:839–851. https://doi.org/10.1007/s00603-012-0319-x 3

Dal Piaz GV, Argentieri A (2019) Sessant'anni del Traforo del Monte Bianco, la storia di un'impresa. Prologo: Da Annibale alle grandi gallerie alpine. Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater, 8(3). https://doi.org/10.7343/as-2019-404 2

Day MJ (2004) Karstic problems in the construction of Milwaukee's Deep Tunnels. Environmental Geology, 45(6): 859-863. 3

Delle Piane L, Perello P, Martinotti G, Gallarà F, Damiano A, Dematteis A, Venturini G, Cadoppi P, Gattiglio M, Darmendrail X (2005) The geological and hydrogeological studies on the Italian side of the new Turin-Lyon railway link. Atti del simposio internazionale "Geoline 2005", Lyon (F), 23-25 maggio. 2, 3

Dematteis A, Gilli P, Parisi ME, Ferrero L, Furno F (2016) Maddalena exploratory adit: feedback on hydrogeological and geothermal aspects. Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater, 5(4). https://doi.org/10.7343/as-2016-201 2, 3, 5, 6

Dematteis A, Perello P, Delle Piane L, Torri R, Thiery M, Darmendrail X, Venturini G (2005) Tunnels profonds et impact des quifers : l'exemple du tunnel ferroviaire Lyon-Turin. Atti del simposio internazionale "Geoline 2005", Lyon (F), 23-25 maggio. 2, 4

Dematteis A, Torri R, Looser M, Perello P, Venturini G (2005) Water Resources Management in Tunnelling: a procedure to improve tunnels environmental sustainability. 2nd International Workshop on Aquifer Vulnerability and Risk, 4th Congress on the Protection and Management of Groundwater – Parma 21-22-23 September 2005. 1, 5

Dematteis A, Torri R, Chereau B, Ducrot M (2011) Groundwater in the Perthus Tunnel: feedback after excavation. AQUA mundi (2011) – Am03026: 027 – 034 DOI 10.4409/Am-026-11-0026 2

Deveughèle M, Zokimila P (2010) Impact of an impervious shallow gallery on groundwater flow. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 69:143-152. 4

Diersch HJG (2005) FEFLOW Software—Finite Element Subsurface Flow and Transport Simulation System-Reference Manual. WASY GmbH, Berlin. 3

El Tani M (2003) Circular tunnel in a semi-infinite aquifer. Tunnelling and Underground Space Technology, 18:49–55. 3, 4

Epting J, Huggenberger P, Rauber M (2008) Integrated methods and scenario development for urban groundwater management and protection during tunnel road construction: a case study of urban hydrogeology in the city of Basel, Switzerland. Hydrogeology Journal 16(3):575-591. 3, 4

Epting J, Bottcher F, Mueller MH, Garcìa-Gil A, Zosseder K, Huggenberger P (2019) City-scale solutions for the energy use of shallow urban subsurface resources – Bridging the gap between theoretical and technical potentials. Renewable Energy 147:751-763 6

Epting J, Baralis M, Kunze R, Muller MH, Insana A, Barla M, Huggenberger P (2020) Geothermal potential of tunnel infrastructures – development of tools at the city-scale of Basel, Switzerland. Geothermics, 83:101734 DOI: 10.1016/j.geothermics.2019.101734 6

Ercelebi, S.G., Copur, H., Ocak, I., 2011. Surface settlement predictions for Istanbul Metro tunnels excavated by EPB-TBM. Environmental Earth Science. 62, 357-365. 3

Federico F (1984) Il processo di drenaggio da una galleria in avanzamento. Rivista Italiana di Geotecnica, 4:191-208. 3

Font-Capó J, Pujades E, Vàzquez-Suñé E, Carrera J, Velasco V, et al. (2015) Assessment of the barrier effect caused by underground constructions on porous aquifers with low hydraulic gradient: A case study of the metro construction in Barcelona, Spain. Engineering Geology, 196:238-250. Doi: 10.1016/j.enggeo.2015.07.006f 2, 3, 4

Furno F, Barla M, Dematteis A, Lo Russo S (2015) Methodological approach for a sustainable management of water inflow and geothermal energy in tunnels. Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater, 4(3). https://doi.org/10.7343/as-119-15-0146 5, 6

Gattinoni P, Scesi L (2010) An empirical equation for tunnel inflow assessment: application to sedimentary rock masses. Hydrogeol Journal, 18:1797–1810. Doi: 10.1007/s10040-010-0674-1 3, 4

Gattinoni P, Scesi L, Terrana S (2008) Hydrogeological risk analysis for tunneling in anisotropic rock masses. In: Proceedings appor ITA-AITES World Tunnel Congress, Underground Facilities for Better Environment & Safety, Arga, India 1736–174 3, 4

Gisbert J, Vallejos A, González A, Pulido-Bosch A (2009) Environmental and hydrogeological problems in karstic terrains crossed by tunnels: a case study. Environmental Geology,58:347–357. 2, 3, 4

Hadi F, Arash NH (2018) Water flow into tunnels in discontinuous rock: a short critical review of the analytical solution of the art. Bull. Eng. Geol. Environ.,78:3833–3849. 3, 4

DOI 10.7343/as-2020-486

Harbaugh AW (2005) MODFLOW-2005, the U.S. Geological Survey modular ground-water model – the Ground-Water Flow Process: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A16. 3

Hassani AN, Katibeh H, Farhadian H (2016) Numerical analysis of steady-state groundwater inflow into Tabriz line 2 metro tunnel, northwestern Iran, with special consideration of model dimensions. Bull. Eng. Geol. Environ. 75 (4):1617–1627. 3, 4

Hwang JH, Lu CC (2007) A semi-analytical method for analyzing the tunnel water inflow. Tunn. Undergr. Space Technol. 22:39–46 3, 4

Ii H, Kagami H (1997) Groundwater level and chemistry changes resulting from tunnel construction near Matsumoto City, Japan. Environmental Geology, 31(1-2): 76-84. 2

Jimenez R, Senent S. (2012) Teaching the importance of engineering geology using case histories, in: McCabe, Pantazidou and Phillips (Eds.), Shaking the foundations of Geo-Engineering education. Francis and Taylor Group, London, pp. 99-104. 2

Jin XG, Li YY, Luo YJ, Liu HW (2016) Prediction of city tunnel water inflow and its influence on overlain lakes in karst valley. Environ. Earth Sci. 75:1162. 3, 4

Kitterod NO, Colleuille H, Wong WK, Pedersen TS (2000) Simulation of groundwater drainage into a tunnel in fractured rock and numerical analysis of leakage remediation, Romeriksporten tunnel, Norway. Hydrogeology Journal, 8(5): 480-493. 3, 4

Kolymbas D, Wagner P (2007) Groundwater ingress to tunnels – The exact analytical solution. Tunnelling and Underground Space Technology, 22(1): 23-27. 4

Kusumoto S, Omae H, Sato T, Watanabe M, Kobayashi N, Nishida K. (2003) Construction of preservation facilities on natural groundwater flows, in: Kono, Nishigaki and Komatsu (Eds.), Groundwater Engineering – Recent Advances. Swets and Zeitlinger, Lisse, pp. 237-242. 3, 4, 7

Lee IM, Nam SW, Ahn JH (2003) Effect of seepage forces on tunnel face stability. Canadian Geotechnical Journal, 40(2): 342-350. 3, 4

Lei S (1999) An analytical solution for steady state flow into a tunnel. Ground Water, 37(1):23-26. 3, 4

Lei S (2000) Steady state flow into a tunnel with constant pressure boundary. Ground Water 38(5):643-644. 3, 4

Leopold LB et al. (1971) A procedure for evaluating environmental impact. U.S. Geological Survey Circular 645, Washington D.C., U.S. Dep. Of the Interior. 4

Li H, Kagami H (1997) Groundwater level and chemistry changes from tunnel construction near Matsumoto City, Japan. Environmental Geology. 31, 76-84. 2

Lindstrøm M, Kveen A (2004) Tunnel investigations and groundwater control. Publication n. 107. Norwegian Public Roads Administration Technology Department. Oslo, Trondheim 2005. 3, 4

Loew S (2002) – in Barla G. & Barla M. (Eds) "Le opere in sotterraneo e il rapporto con l'ambiente" – IX ciclo MIR, Torino 26-27 novembre 2002, Patron Editore, p. 201-217. 2, 3, 4

López A (2009) Estudio analítico del efecto barrera: Definición, tipología, soluciones y aplicación a un caso real. Msc thesis. Universitat Politecnica de Catalunya (UPC). 3, 4

Lunardi G, Cassani G, Bellocchio A, Pennino F, Perello P (2016) Studi idrogeologici per la progettazione delle gallerie ac/av Milano-Genova. Verifica e mitigazione degli impatti dello scavo sugli acquiferi esistenti. Gallerie e grandi opere sotterranee, 117:15-22. 3, 4

Luzzini F (2014) Un dibattito lungo secoli. La galleria Adige-Garda. Acque Sotterranee - Italian Journal of Groundwater, 3(1). https://doi.org/10.7343/as-069-14-0095 2, 4

Lva Y, Jianga Y, Hu W, Cao M, Mao Y (2020) A review of the effects of tunnel excavation on the hydrology, ecology, and environment in karst areas: Current status, challenges, and perspectives. Journal of Hydrology 586 (2020) 124891. :// doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124891. 4, 5

Maddalena L (1933) Considerazioni geoidrologiche sulle acque della galleria dell'Appennino della Direttissima Bologna-Firenze. Rivista Tecnica delle Ferrovie Italiane vol. 43 fasc.2 anno 1933. 2, 3, 5

Maffiotti A (2006) Criteri per il monitoraggio ambientale delle grandi opere ferroviarie. Il cunicolo di Venaus. Rend. Soc. Geol. It., 3:47-52 8

Maréchal JC, Etcheverry D (2003) The use of ^{3}H and ^{18}O tracer to characterize water inflows in Alpine tunnels. Applied Geochemistry 18:339-351. 2, 3

Maréchal JC, Perrochet P (2003) New analytical solution for the study of hydraulic interaction between Alpine tunnels and groundwater. Bulletin de la Societe Geologique de France, 174(5): 441-448. 3, 4

Marinos P, Kavvadas M (1997) Rise of the groundwater table when flow is obstructed by shallow tunnels. In: Chilton, J. (Eds.), Groundwater in the urban environment: Problems, processes and management. Balkema, Rotterdam, pp. 49-54. 2, 3, 4

Marone E (1935) La direttissima Bologna-Firenze e la grande Galleria dell'Appennino. Stabilimenti poligrafici riuniti Bologna, 1935 2, 3, 5

Massoli Novelli R and Petitta M (1997) Hydrogeological impact of the Gran Sasso tunnels (Abruzzi, Italy). Paper presented at the International Symposium on Engineering geology and the Environment, Athens, Greece, June 1997, vol.3:2785-2790. 2, 4

Meiri D (1985) Unconfined groundwater flow calculation into a tunnel. Journal of Hydrology 82, 69–75. 3, 4

Merrick N, Jewell M (2003) Modelling of the groundwater impact of a sunken urban motorway in Sydney, Australia. Materials and Geoenvironment , 50:229-232. 3, 4

Molinero J, Samper J, Juanes R (2002) Numerical modeling of the transient hydrogeological response produced by tunnel construction in fractured bedrocks. Engineering Geology, 64(4):369-386. 3, 4

Moon J, Fernandez G (2010) Effect of Excavation-Induced Groundwater Level Drawdown on Tunnel Inflow in a Jointed Rock Mass. Engineering Geology, 110:33-42 3

Moon J, Jeong S (2011) Effect of highly pervious geological features on ground-water flow into a tunnel. Engineering Geology, 117:207-216. 2, 3, 4

Parisi M. E., Monin N., Brino L., Bufalini M., Fournier C. (2010) Approccio metodologico per determinare le previsioni idrogeologiche e le venute d'acqua nell'ambito della progettazione della Nuova Linea Torino Lione – Ritorno di esperienza della Discenderia di La Praz. Atti del Convegno pag. 451 Roma 6/7 maggio 2010. Le acque di superficie e sotterranee e le infrastrutture di trasporto dalla pianificazione all'esercizio. 2, 3, 4, 8

Parisi M. E., Marini L.,Martinotti G., Gilli P., Brino L., (2017). La circulation hydrique dans le Massif d'Ambin: retour d'expérience de la Galerie de Reconnaissance de La Maddalena. Congrés Aftes, 2017. Livre des résumés. 2, 3, 4, 8

Perello P, Burger U, Marini M, Torri R (2007) Hydrogeological characterisation and forecast of water inflow for the Brenner Base Tunnel. Atti BBT 2007 Internationales Symposium Brenner Basistunnel und Zulaufstrecken; Schneider, John, Brandner Eds., Innsbruck University Press, 25-32. 3, 4

Perello P, Baietto A, Burger U, Skuk S (2013) Excavation of the Aica-Mules pilot tunnel for the Brenner base tunnel: Information gained on water inflows in tunnels in granitic massifs. Rock Mechanics and Rock Engineering, 47:1049–1071 2

Perrochet P (2005) Confined flow into a tunnel during progressive drilling: An analytical solution. Ground Water, 43(6):943-946. 3, 4

Perrochet P, Dematteis A (2007) Modeling transient discharge into a tunnel drilled in a heterogeneous formation. Ground Water, 45(6):786-790. 3, 4

Piccinini L, Vincenzi V (2010) Impacts of a railway tunnel on the streams baseflow verified by means of numerical modeling. Aqua Mundi, 1(2):123-134. DOI 10.4409/Am-020-10-0016. 2, 4

Piccinini L, Vincenzi V, Pontin A, Andreella G, D'Agostini S (2013) Groundwater drainage into a tunnel in fractured rock mass (Flysch): Numerical modeling to predict maximum rate of water drainage. Geoingegneria Ambientale e Mineraria 140(3):5-20 3, 4

Preisig G, Dematteis A, Torri R, Monin N, Milnes E, Perrochet P (2014). Modelling discharge rates and ground settlement induced by tunnel excavation. Rock Mech. Rock Eng. 47(3):869–884. 3, 4

Pujades E, López A, Carrera J, Vázquez-Suñé E, Jurado A (2012) Barrier effect of underground structures on aquifers. Engineering Geology, 145-146:41-49. 3, 4

Pujades E, Vázquez-Suñé E, Culí L, Carrera J, Ledesma A, Jurado A (2015) Hydrogeological impact assessment by tunnelling at sites of high sensitivity. Engineering Geology, 193:421-434. 3, 4

DOI 10.7343/as-2020-486

Raposo JR, Molinero J, Dafonte J (2010) Quantitative evaluation of hydrogeological impact by tunnel construction using water balance models. Engineering Geology, 116 (3-4), 323-332. DOI 10.1016/j.enggeo.2010.09.014 3, 4

Rademacher LK, Clark JF, Boles JR (2003) Groundwater residence times and flow paths in fractured rock determined using environmental tracers in the Mission Tunnel; Santa Barbara County, California, USA. Environmental Geology, 43(5):557–567. 2, 3, 4

Raymer JH (2005) Groundwater inflow into hard rock tunnels: a new look at inflow equations. In: Proceeding unnel rapid excavation and tunnelling conference (RETC). Society of Mining & Metallurgy Inc., Society of Mining & Metallurgy Inc., pp 457–468 3, 4

Ribacchi R, Graziani A, Boldini D (2002) Previsione degli afflussi d'acqua in galleria e influenza sull'ambiente. Meccanica e Ingegneria delle rocce 143-199. 4

Ricci G, Enrione R, Eusebio A (2007) Numerical modelling of the interference between underground structures and aquifers in urban environment. The Turin subway – Line 1. In: Barták, Hrdine, Romancov and Zlámal (Eds.), Underground Space. Taylor and Francis Group, London, pp. 1323-1329. 3, 4

Rodríguez R, Blanco A (2012) Inquiry into the interactions between the Works on the Holy Family Temple and the construction of a high Speedy rail tunnel between the Sants and La Sagrera stations in Barcelona. Revista de Obras Públicas, 3529, 7–30. 3, 4

Scarponi F, Folini S, Bedendo A (2018) Il controllo delle acque nel nuovo tunnel dell'A1. Ecoscienza, 4, 2018. 8, 10

Schwarz L, Reichl I, Kirschner H, Robl KP (2006) Risks and hazards caused by groundwater during tunnelling: geotechnical solutions used as demonstrated by recent examples from Tyrol, Austria. Environmental Geology 49:858-864 4

Shin JH, Addenbrooke TI, Potts DM (2002) A numerical study of the effect of ground water movement on long-term tunnel behaviour. Geotechnique,52 (6):391–403. 2, 3

Sjolander-Lindqvist A (2005) Conflicting perspectives on water in a Swedish railway tunnel project. Environmental Values, 14(2): 221-239. 9

Soldo L, Dematteis A, Furno F, Barla M (2016) Istanbul metro: a possible example of energy geostructure. newDist: SBE16 Towards Post-Carbon Cities, July 2016 (ISSN 2283-8791) 6

Tambara M, Nishigaki M, Hashimoto T, Shinshi Y, Daito K (2003) Basic concept on preservation natural groundwater flows from intercepting by underground structure, in: Kono, Nishigaki and Komatsu (Eds.), Groundwater Engineering. Swets and Zeitlinger, Lisse, pp. 217-222. 4

Thapa BB, Nolting RM, Teske MJ, McRae MT (2005) Predicted and observed groundwater inflows into two rock tunnels. In: RECT Proceedings, Chapter 50, p. 556-567. 2, 3, 4

Tseng DJ, Tsai BR, Chang LC (2001) A case study on ground treatment for a rock tunnel with high groundwater ingression in Taiwan. Tunnelling and Underground Space Technology, 16(3): 175-183. 2, 7

Vázquez-Suñe E, Sánchez-Vila X, Carrera J (2005) Introductory review of specific factors influencing urban groundwater, an emerging branch of hydrogeology, with reference to Barcelona. Spain. Hydrogeology Journal, 13:522–533. 2, 3

Xeidakis G, Torok A, Skias S, Kleb B (2004) Engineering geological problems associated with karst terrains: their investigation. Monitoring, and mitigation and design of engineering structures on karst terrains. Bulletin of the Geological Society of Greece, 36(4):1932-1941. Doi:http://dx.doi.org/10.12681/bgsg.16679 3, 4, 8

Yang FR, Lee CH, Kung WJ, Yeh HF (2009) The impact of tunnelling construction on the hydrogeological environment of "Tseng-Wen Reservoir Transbasin Diversion Project" in Taiwan. Engineering Geology, 103(1-2):39-58. 2, 4

Yang SY, Yeh HD (2007) A closed-form solution for a confined flow into a tunnel during progressive drilling in a multi-layer groundwater flow system. Geophysical Research Letters, 34(7): L07405. 3, 4

Yoo CS (2005) Interaction between tunnelling and groundwater – Numerical investigation using three-dimensional stress-pore pressure coupled analysis. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 131(2): 240-250. 3, 4

Zangerl C, Eberhardt E, Loew S (2003) Ground settlements above tunnels in fractured crystalline rock: numerical analysis of coupled hydromechanical mechanisms. Hydrogeology Journal 2003, 11(1):162-173. 3, 4

Zarei HR, Uromeihy A, Sharifzadeh M (2011) Evaluation of high local groundwater inflow to a rock tunnel by characterization of geological features. Tunnelling and Underground Space Technology, 26:364-373. doi:10.1016/j.tust.2010.11.007 3, 4

Zhang L, Franklin JA (1993) Prediction of water inflow into rock tunnels: an analytical solution assuming a hydraulic conductivity gradient. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts 39(1):37-46. 3, 4

Zini L, Calligaris C, Cucchi F (2015) The challenge of tunneling through Mediterranean karst aquifers: the case study of Trieste (Italy). Environmental Earth Sciences, 74:281–295. DOI: 10.1007/s12665- 015-4165-5 2, 3

11.3 Riferimenti bibliografici citati nel testo

Andreae C (1948) Hundert Jahre Schweizerischer Tunnelbau [A hundred years of Swiss tunnel building], 46 pp. Naturf. Gesell. Zurich, Switzerland.

Barla M (2020) Le gallerie energetiche come opportunità di sviluppo sostenibile delle aree urbane. Relazione di Panel. XXVII Convegno Nazionale di Geotecnica, 22-24 giugno 2020, Reggio Calabria.

Barton CM (1974) Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mechanics, 6(4):189-239.

Bearmar M (2012) Arrowhead Tunnels Project Special Uses Permit – Geo Sciences Specialist Report, U.S. Forest Service, California. https://www.fs.usda.gov/nfs.

Bertrand G, Goldscheider N, Gobat JM, Hunkeler D. (2012) Review: From multi-scale conceptualization to a classification system for inland groundwater-dependent ecosystems. Hydrogeology Journal, 20:5–25.

Bianchetti G, Zuber F, Vuataz FD, Rouiller JD (1993) Hydrogeologische und geothermische Untersuchungen im Simplontunnel. Mat. GCol. Suisse, GCotechnique, 88,75 pp.

Bianchi G, Perello P, Venturini G, Dematteis A (2009) Determination of reliability in geological forecasting for tunnel projects: the method of R-Index and its application on two case studies. IAEG Italia 2009, 1–18.

Bourne-Webb P, Burlon S, Javed S, Kürten S, Loveridge F (2016). Analysis and design methods for energy geostructures. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 65: 402-419.

Cantonati M, Stevens LE, Segadelli S, Springer A, Goldscheider N, Celico F, Filippini M, Ogata K, Gargini A (2020). Ecohydrogeology: The interdisciplinary convergence needed to improve the study and stewardship of springs and other groundwater-dependent habitats, biota, and ecosystems. Ecological Indicators. 110, DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.105803.

Canuti P, Ermini L, Gargini A, Martelli L, Piccinini L, Vincenzi V (2009) Le gallerie TAV attraverso l'Appennino: impatto idrogeologico ed esempi di mitigazione. Edifir Edizioni, Firenze, pp. 207.

Cesano D, Amvrossios C, Bagtzoglou AC, Olofsson B. (2003) Quantifying fractured rock hydraulic heterogeneity and groundwater inflow prediction in underground excavations: the heterogeneity index. Tunnelling and Underground Space Technology 18:19-34

Dematteis A, Kalamaras G, Eusebio A (2001) A system approach for evaluating springs drawdown due to tunnelling. In AITES-ITA 2001 World Tunnel Congress: Progress in tunnelling after 2000 – p. 257-264. Milano, 10-13 June 2001

Dematteis A, Soldo L (2015) The geological and geotechnical design model in tunnel design: estimation of its reliability through the R-Index. Georisk Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards 9(4), 1–11.

El Tani M (1999) Water inflow into tunnels. In: Alten, et al. (Ed.), Challenges for the 21st Century. Balkema, Rotterdam, pp. 61-70.

Federico F (1984) Il processo di drenaggio da una galleria in avanzamento. Rivista Italiana di Geotecnica, 4:191-208.

Font-Capó J, Vázquez-Suñe E, Carrera J, Martí D, Carbonell R, Pérez-Estaun A (2011) Groundwater inflow prediction in urban tunneling with a tunnel boring machine (TBM). Engineering Geology, 121:46-54.

Gargini A, Piccinini L, Martelli L, Rosselli S, Bencini A, Messina A, Canuti P (2006) Idrogeologia delle unitá torbiditiche: un modello concettuale derivato dal rilevamento geologico dell'Appennino Tosco-Emiliano e dal monitoraggio ambientale per il tunnel alta velocità ferroviaria Firenze-Bologna – Bollettino Società Geologica Italiana, 125 (2006), 293-327.

Gargini A, Vincenzi V, Piccinini L, Zuppi G M, Canuti P (2008) Groundwater flow systems in turbidites of the Northern Apennines (Italy): natural discharge and high speed railway tunnel drainage. Hydrogeology Journal, 16, 8, 1577-1599.

Goodman R F, Moye D G, Van Schaikwyk A, and Javandel I (1965) Ground water inflows during tunnel driving. Bulletin of the International Association of Engineering Geologists 2(1):39–56.

Goy L, Fabre D, Menard G (1996) Modelling of Rock Temperatures for Deep Alpine Tunnel Projects. Rock Mechanics and Rock Engineering, 29(1):1-18. 2, 3, 6.

DOI 10.7343/as-2020-486

Heuer R (1995) Estimating rock tunnel water inflow. In: Proceedings of Rapid Excavation and Tunnelling Conference 1995, 41-60.

Heuer R (2005) Estimating rock tunnel water inflow - II. In: Proceedings of Rapid Excavation and Tunnelling Conference 2005, 394-407.

Hokr M, Straka T, VITA project team (2014) Modelling of Rock-Water Thermal Interaction in Different Scales Proc., Thirty-Ninth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, February 24-26, 2014 - SGP-TR-202.

Hufschmied P, Brunner A (2010) The exploitation of warm tunnel water through the example of the Lotschberg Base Tunnel in Switzerland. Geomechan-ics and Tunnelling 3 (2010), 5. DOI:10.1002/geot.201000045.

Insana A (2020) Thermal and structural performance of energy tunnels. Tesi di Dottorato, Politecnico di Torino.

Insana A, Barla M (2020) Experimental and numerical investigations on the energy performance of a thermo-active tunnel. Renewable Energy 152, 781-792.

Kløve B, Ala-aho P, Bertrand G, Boukalova Z, Ertürk A, Goldscheider N, Ilmonen J, Karakaya N, Kupfersberger H, Kvoerner J, Lundberg A, Mileusnić M, Moszczynska A, Muotka T, Preda E, Rossi P, Siergieiev D, Šimek J, Wachniew P, Widerlund A (2011) Groundwater Dependent Ecosystems Part I: Hydroecological status and trends. Environmental Science & Policy 14(7):770-781

Lei S (1999) An analytical solution for steady state flow into a tunnel. Ground Water, 37(1):23-26.

Lei S (2000) Steady state flow into a tunnel with constant pressure boundary. Ground Water 38(5):643-644.

Lva Y, Jianga Y, Hu W, Cao M, Mao Y (2020) A review of the effects of tunnel excavation on the hydrology, ecology, and environment in karst areas: Current status, challenges, and perspectives. Journal of Hydrology 586 (2020) 124891. :// doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124891.

Maillet E (1905) Essais d'hydraulique souterraine et fluviale. Librairie Sci. Hermann Paris, 218pp.

Maréchal JC (1998) Les circulations d'eau dans les massifs cristallins alpins et leurs relations avec les ouvrages souterrains. Sciences de l'ingénieur. Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), 1998.

Maréchal JC, Perrochet P, Tacher L (1999). Long-term simulations of thermal and hydraulic characteristics in a mountain massif: The Mont Blanc case study, French and Italian Alps. Hydrogeology Journal, 1999, 7: 341-354.

Masset O, Loew S (2010) Hydraulic conductivity distribution in crystalline rocks, derived from inflows to tunnels and galleries in the Central Alps, Switzerland. Hydrogeology Journal, 18, pp. 863-891.

Masset O, Loew S (2013) Quantitative hydraulic analysis of pre-drillings and inflows to the Gotthard Base Tunnel (Sedrun Lot, Switzerland). Engineering Geology, 164:50-66.

Moormann C, Gowda S, Giridharan S (2018) Numerical simulation of pile installation in saturated soil using CPDI. Proceedings of the 9th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering: 665-672

Pastorelli S, Marini L, Hunziker J (2001) Chemistry, isotope values (delta D, delta O^{-18}, delta $S^{-34}(SO_4)$) and temperatures of the water inflows in two Gotthard tunnels, Swiss Alps", APPL GEOCH, 2001, 16(6):633-649.

Pastorelli S, Perello P, Dematteis A, Martinotti G, Marini L (2003) Exploration and exploitation of the low geothermal resources in the Alpine Chain. RMZ – Materials and Geoenvironment, 2003, 50,1:285-288.

Perello P (2011) Estimate of the Reliability in Geological Forecasts for Tunnels: Toward a Structured Approach. Rock Mechanics and Rock Engineering, 44(6), 671–694.

Perello P, Venturini G, Delle Piane L, Martinotti G (2003) Geo-structural mapping applied to underground excavations: updated ideas after a century since the first transalpine tunnelas. In: RETC (Rapid Excavation Tunnelling Conference) Proc., Robinson A.E. & Marquardt J.M. Eds., New Orleans, 581-591.

Perello P, Venturini G, Dematteis A, Bianchi G, Delle Piane L, Damiano A (2005) Determination of reliability in geological forecasting for linear underground structures: the method of the R-Index. Geoline 2005, Lyon (FR), 1-8.

Pesendorfer M, Loew S (2004) Hydrogeologic Exploration during Excavation of the Lötschberg Base Tunnel (AlpTransit Switzerland). In: Hack R., Azzam R., Charlier R. (eds) Engineering Geology for Infrastructure Planning in Europe. Lecture Notes in Earth Sciences, vol 104. Springer, Berlin, Heidelberg.

Ranfagni L, Gherardi F & Rossi S (2015) Chemical and isotope composition of waters from Firenzuola railway tunnel, Italy. In: Engineering Geology for Society and Territory, 6:971-974. Springer International Publishing, Switzerland.

Rybach L (1995) Thermal waters in deep Alpine tunnels. Geothermics, 24:31-637.

Rybach L, Wilhelm J (1995) Potential and use of warm waters from deep alpine tunnels. Proc. World Geothermal Congress 1995, Florence, Vol.3.

Scibek J, Gleeson T, McKennzie JM (2016) The biases and trends in fault zone hydrogeology conceptual models: global compilation and categorical data analysis. John Wiley & Sons Ltd, Geofluids,16,4:782–798 ISSN 1468-8115.

Springer A, Stevens LE, Anderson DE, Parnell RA, Kreamer D, Levin L, Flora S (2008) A comprehensive springs classification system: integrating geomorphic, hydrogeochemical, and ecological criteria. In: Stevens LE & Meretsky VJ eds, Aridland Springs in North America: Ecology and Conservation. The University of Arizona Press and the Arizona-Sonora Desert Museum.

Torri R, Monin N, Glarey L, Dematteis A, Brino L, Parisi ME (2014) Methodological approach for the valorisation of the geothermal energy potential of water inflows within tunnels. Proc. IAEG XII Congress, Turin, September 15-19, 2014.

Vieira A, Alberdi-Pagola M, Christodoulides P, Javed S, Loveridge P, Nguyen F, Cecinato F et al. (2017) Characterisation of ground thermal and thermo-mechanical behaviour for shallow geothermal energy applications. Energies MDPI 10(12).

Vincenzi V, Gargini A, Goldscheider N (2009) Using tracer tests and hydrological observations to evaluate effects of tunnel drainage on groundwater and surface waters in the Northern Apennines (Italy). Hydrogeology Journal,17:135–150. https://doi.org/10.1007/s10040-008-0371-5

Vincenzi V, Gargini A, Goldscheider N, Piccinini L (2014) Differential hydrogeological effects of draining tunnels through the Northern Apennines, Italy. Rock Mechanics and Rock Engineering, 47:947-965.

Vincenzi V, Piccinini L, Gargini A, Sapigni M (2010) Parametric and numerical modelling tools to forecast hydrogeological impacts of a tunnel. Aqua Mundi, 1(2):135-154.

Zhang L, Franklin JA (1993) Prediction of water inflow into rock tunnels: an analytical solution assuming a hydraulic conductivity gradient. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts 39(1):37-46.

11.4 Normativa

BS 6920-1:2014 - Suitability of non-metallic materials and products for use in contact with water intended for human consumption with regard to their effect on the quality of the water. Specification.

Convenzione di Aarhus: Convenzione sull'accesso alle informazioni, la partecipazione del pubblico e l'accesso alla giustizia in materia ambientale

D.Lgs. 104/17 "Attuazione della direttiva 2014/52/UE del Parlamento europeo e del Consiglio, del 16 aprile 2014, che modifica la direttiva 2011/92/UE, concernente la valutazione dell'impatto ambientale di determinati progetti pubblici e privati, ai sensi degli articoli 1 e 14 della legge 9 luglio 2015, n. 114"

D.Lgs. 152/2006 "Norme in materia ambientale"

D.Lgs. 152/99 del 3 aprile 2006 "Norme in materia ambientale"

D.lgs. 163/2006 del 12 aprile 2006 "Codice dei contratti pubblici relativi a lavori, servizi e forniture in attuazione delle direttive 2004/17/CE e 2004/18/CE"

D.Lgs. 30/2009 del 16 marzo 2009, n. 30 "Attuazione della direttiva 2006/118/CE, relativa alla protezione delle acque sotterranee dall'inquinamento e dal deterioramento"

Decisione 2005/370/CE - conclusione della convenzione di Aarhus

Decreto 5 aprile 2006, n. 186. Regolamento recante modifiche al decreto ministeriale 5 febbraio 1998 «Individuazione dei rifiuti non pericolosi sottoposti alle procedure semplificate di recupero, ai sensi degli articoli 31 e 33 del decreto legislativo 5 febbraio 1997, n. 22. (Gazzetta Ufficiale 19 maggio 2006, n. 115)

Decreto 6 aprile 2004, n. 174. Ministero della Salute. Regolamento concernente i materiali e gli oggetti che possono essere utilizzati negli impianti fissi di captazione, trattamento, adduzione e distribuzione delle acque destinate al consumo umano. (GU n. 166 del 17-7-2004)

Direttiva 2000/60/CE Direttiva Quadro sulle Acque (DQA o Water Frame Directive - WFD)

Direttiva 2006/118/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 12 dicembre 2006 sulla protezione delle acque sotterranee dall'inquinamento e dal deterioramento

Direttiva 2006/118/CE sulla protezione delle acque sotterranee dall'inquinamento e dal deterioramento

Direttiva 2008/105/CE "Standard di qualità ambientale nel settore della politica delle acque, recante modifica e successiva abrogazione delle direttive del Consiglio 82/176/CEE, 83/513/CEE, 84/156/CEE, 84/491/CEE e 86/280/CEE, nonché modifica della direttiva 2000/60/CE del Parlamento europeo e del Consiglio"

Direttiva 2009/90/CE "Quadro per l'azione comunitaria in materia di acque"

DM 308 del 24/12/2015 "Indirizzi metodologici per la predisposizione dei quadri prescrittivi nei provvedimenti di valutazione ambientale di competenza statale"

Legge 16 marzo 2001, n. 108. Ratifica ed esecuzione della Convenzione sull'accesso alle informazioni, la partecipazione del pubblico ai processi decisionali e l'accesso alla giustizia in materia ambientale, con due allegati, fatta ad Aarhus il 25 giugno 1998. (Gazzetta Ufficiale n. 85 del 11 aprile 2001 - Supplemento Ordinario n. 80)

Legge 25 febbraio 2008, n. 34, recante "Disposizioni per l'adempimento di obblighi derivanti dall'appartenenza dell'Italia alle Comunità europee (Legge comunitaria 2007)"

Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (2007) "Linee Guida per il Progetto di Monitoraggio Ambientale (PMA) delle opere di cui alla Legge Obiettivo (Legge 21.12.2001, n.443) – Rev.2 del 23 luglio 2007".

Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare – Direzione per le Valutazioni Ambientali (2014) Linee Guida per la predisposizione del Progetto di Monitoraggio Ambientale (PMA) delle opere soggette a procedure di VIA (D.Lgs.152/2006 e s.m.i., D.Lgs.163/2006 e s.m.i.). Indirizzi metodologici generali (Capitoli 1-2-3-4-5) Rev.1 del 16/06/2014 Rev.1 del 16/06/2014. Download disponibile alla pagina: https://va.minambiente.it/it-it/ps/datiestrumenti/specifichetecnicheelineeguida

Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare – Direzione per le Valutazioni Ambientali (2014) Linee Guida per la predisposizione del Progetto di Monitoraggio Ambientale (PMA) delle opere soggette a procedure di VIA (D.Lgs.152/2006 e s.m.i., D.Lgs.163/2006 e s.m.i.). Indirizzi metodologici specifici: Ambiente idrico (Capitolo 6.2) REV. 1 DEL 17/06/2015. Download disponibile alla pagina: https://va.minambiente.it/it-it/ps/datiestrumenti/specifichetecnicheelineeguida

Regolamento (UE) n. 10/2011 della Commissione, del 14 gennaio 2011 , riguardante i materiali e gli oggetti di materia plastica destinati a venire a contatto con i prodotti alimentari Testo rilevante ai fini del SEE. http://data.europa.eu/eli/reg/2011/10/oj

UNI EN 206:2016. Calcestruzzo - Specificazione, prestazione, produzione e conformità. [91.100.30]

DOI 10.7343/as-2020-486

11.5 Risorse Web

Banca dati dell'International Tunneling and Underground Space Association (ITA-AITES): https://library.ita-aites.org/ (ultimo accesso 30/11/2020)

Banca dati idrogeologica dell'USGS: http://waterdata.usgs.gov/nwis/qw (ultimo accesso 30/11/2020)

Database Australasian Tunnelling Society (ATS): http://www.ats.org.au/resources/tunnel-projects-2/ (ultimo accesso 30/11/2020)

Instituto Tecnologico del Massachusetts: https://lib.mit.edu/search/bento?q=hydrogeology+tunnel (ultimo accesso 30/11/2020)

Motori di ricerca di riviste scientifiche: www.sciencedirect.com, http://springerlink.metapress.com (ultimo accesso 30/11/2020)

Scuola Politecnica Federale di Losanna: https://beast-epfl.hosted.exlibrisgroup.com/primo-explore/search?vid=EPFL&lang=fr_FR) (ultimo accesso 30/11/2020)

Wikipedia, elenco gallerie mondiali per lunghezza: https://it.wikipedia.org/wiki/Gallerie_per_lunghezza. (ultimo accesso 30/11/2020)

LISTA DI SIGLE E ABBREVIAZIONI

AEA	Agenzia Europea dell'Ambiente
ATS	Australasian Tunnelling Society
ARPA	Agenzia Regionale Protezione Ambientale
BEAM	Bore-tunnelling Electrical Ahead Monitoring
BHE	Borehole Heat Exchanger
BS	Bentonite Slurry
CA	Compressed Air
DF	Differenze Finite
DFN	Discrete Fracture Network
DHI	Drawdown Hazard Index
DPSIR	Determinanti, Pressioni, Stato, Impatti, Risposte
DQA	Direttiva Quadro sulle Acque
DSS	Decision Support System
EC50	Tossicità verso il crostaceo Daphnia Magna secondo la OECD 202
EDF	Explicit Discrete Fracture
EIA	Environmental Impact Assessment
EPB	Earth Pressure Balance
EPM	Equivalent Porous Medium
FE	Elementi Finiti
GDE	Groundwater Dependent Ecosystem
GESTAG	Gestione Sostenibile delle Acque nelle Gallerie
GFS	Groundwater Flow Systems
GIS	Geographic Information System
IAEA	International Association Environmental Agencies
IAH	International Association of Hydrogeologists
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISPRA	Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale
ISS	Istituto Superiore di Sanità
ITA-AITES	International Tunneling and Underground Space Association
K	Conducibilità idraulica
LC50	Tossicità verso il pesce Danio Rerio secondo la OECD 203
MATTM	Ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare
NWIS	National Water Information System
OCSE	Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico
PA	Pubbliche Amministrazioni
PMA	Piano di Monitoraggio Ambientale
PP	Polypropilene
PVC-P	Polyvinyl chloride plasticized
REV	Representative Elementary Volume
RMR	Rock Mass Rating
RQD	Rock Quality Designation
SIA	Studio di Impatto Ambientale
SNPA	Sistema Nazionale per le Protezione Ambientale
TBM	Tunnel Boring Machine
TH	Thermo-Hydraulic
THM	Thermo-Hydro-Mechanical
TRT	Thermal Response Test
USGS	United States Geological Service
VAS	Valutazione Ambientale Strategica
VIA	Valutazione di Impatto Ambientale
WFD	Water Frame Directive