

# LIAISON LYON - TURIN / COLLEGAMENTO TORINO - LIONE

Partie commune franco-italienne  
Section transfrontalière

Parte comune italo-francese  
Sezione transfrontaliera

## NOUVELLE LIGNE LYON TURIN – NUOVA LINEA TORINO LIONE PARTIE COMMUNE FRANCO-ITALIENNE – PARTE COMUNE ITALO-FRANCESE

### PARTE IN TERRITORIO ITALIANO – PROGETTO IN VARIANTE (OTTEMPERANZA ALLA PRESCRIZIONE N. 235 DELLA DELIBERA CIPE 19/2015)

CUP C11J05000030001 – PROGETTO DEFINITIVO

#### GEOLOGIE – GEOLOGIA GENERAL – GENERALE ANALYSE DES RISQUES GEOLOGIQUES - ANALISI DEI RISCHI GEOLOGICI GENERALITES - ELABORATI GENERALI

#### Rapport de synthèse (côté Italie) – Relazione di sintesi (lato Italia)

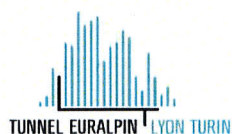
Indice	Date/ Data	Modifications / Modifiche	Etabli par / Concepito da	Vérifié par / Controllato da	Autorisé par / Autorizzato da
0	09/11/2012	Première diffusion / Prima emissione	G. W. BIANCHI G. AIROLDI (SEA)	R. TORRI C. OGNIBENE	L. CHANTRON M. PANTALEO
A	31/01/2013	Prise en compte des commentaires LTF / Recepimento commenti LTF	G. W. BIANCHI G. AIROLDI (SEA)	R. TORRI C. OGNIBENE	L. CHANTRON M. PANTALEO
B	5/02/2013	Prise en compte des commentaires LTF / Recepimento commenti LTF	G. W. BIANCHI G. AIROLDI (SEA)	R. TORRI C. OGNIBENE	L. CHANTRON M. PANTALEO
C	8/02/2013	Prise en compte des commentaires CCF / Recepimento commenti CCF	G. W. BIANCHI G. AIROLDI (SEA)	R. TORRI C. OGNIBENE	L. CHANTRON M. PANTALEO
D	23/12/2016	Première émission phase PRF-PRV / Prima emissione fase PRF-PRV	G. MANGARI (GEODATA)	A. EUSEBIO C. OGNIBENE	L. CHANTRON A. MORDASINI
E	16/03/2017	Reception observations TLF / Recepimento osservazioni TLF	G. MANGARI (GEODATA)	A. EUSEBIO C. OGNIBENE	L. CHANTRON A. MORDASINI
G	08/04/2017	Reception observations TLF / Recepimento osservazioni TLF	G. MANGARI (GEODATA)	A. EUSEBIO C. OGNIBENE	L. CHANTRON A. MORDASINI

CODE DOC	<b>P</b>	<b>R</b>	<b>V</b>	<b>C</b>	<b>3</b>	<b>B</b>	<b>T</b>	<b>S</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>F</b>
	Phase / Fase		Sigle étude / Sigla			Émetteur / Emittente			Numero			Indice		

<b>A</b>	<b>P</b>	<b>N</b>	<b>O</b>	<b>T</b>
Statut / Stato		Type / Tipo		

ADRESSE GED INDIRIZZO GED	<b>C3B</b>	//	//	<b>00</b>	<b>06</b>	<b>00</b>	<b>10</b>	<b>01</b>
------------------------------	------------	----	----	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

ECHELLE / SCALA
-



TELT sas – Savoie Technolac - Bâtiment "Homère"  
13 allée du Lac de Constance – 73370 LE BOURGET DU LAC (France)  
Tél. : +33 (0)4.79.68.56.50 – Fax : +33 (0)4.79.68.56.75  
RCS Chambéry 439 556 952 – TVA FR 03439556952  
Propriété TELT Tous droits réservés – Proprietà TELT Tutti i diritti riservati

Ce projet  
est cofinancé par  
l'Union européenne  
(DG-TREN)



Questo progetto  
è cofinanziato  
dall'Unione europea  
(TEN-T)

## SOMMAIRE / INDICE

1. INTRODUZIONE .....	10
2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO, IDROGEOLOGICO E GEOTECNICO - TRATTO MODANE/SUSA E GALLERIE DI INTERCONNESSIONE .....	12
2.1 Serie di Clarea e d'Ambin (pk 48+672 - 55+029).....	12
2.2 Zona a Scaglie Tettoniche (pk 55+029 - 56+058).....	13
2.3 Val Cenischia (pk 56+058 - 57+160) .....	14
2.4 Unità Puys - Venaus (Zona Piemontese) (pk 57+160 - 60+711) .....	14
2.5 Unità Oceaniche (pk 60+711 - 61+090).....	14
2.6 Gallerie d'interconnessione Susa-Bussoleno.....	15
3. ANALISI DELL'AFFIDABILITÀ DELLE PREVISIONI GEOLOGICHE - METODO DELL'“R-INDEX”.....	15
3.1 Parametri di Indagine (Investigation Parameters) .....	16
3.1.1 Sondaggi realizzati.....	16
3.1.2 Rilevamento geologico di superficie.....	17
3.1.3 Indagini geofisiche.....	19
3.2 Parametri di Sistema (System Parameters).....	20
3.2.1 Complessità del contesto litostratigrafico.....	20
3.2.2 Complessità delle strutture originate per deformazione duttile .....	21
3.2.3 Complessità delle strutture originate per deformazione fragile.....	22
3.3 Significato dell'R-Index .....	23
3.4 Analisi e descrizione del valore dell'R-Index .....	24
3.5 Considerazioni sull'interpretazione dei valori di R-Index.....	26
4. ANALISI DELL'AFFIDABILITÀ DEI DATI GEOMECCANICI – METODO GRA (GEOMECHANICAL RELIABILITY ANALYSIS).....	29
4.1 Dati di partenza e loro provenienza (parametro D) .....	32
Rilevanza dei dati disponibili (parametro N) .....	34
Dispersione statistica del set di dati (parametro S) .....	35
4.2 Calcolo del grado di affidabilità (GR-index).....	37
4.3 Risultati del metodo GRA lungo il tracciato .....	38
5. INCERTEZZE DEL MODELLO GEOLOGICO DI RIFERIMENTO E REGISTRO DELLE INCERTEZZE .....	39
5.1 Registro delle incertezze e identificazione delle fonti di rischio.....	40
6. METODI DI SCAVO DEL TUNNEL (LATO ITALIA) .....	42
6.1 Tunnel di Base lato Italia (gallerie di linea inclusi cameroni all'imbocco) .....	42
6.2 Tunnel di Interconnessione (gallerie di linea compresi cameroni e rami).....	43
7. ANALISI DEI RISCHI .....	44
7.1 Terminologia.....	44
7.1.1 Probabilità .....	44
7.1.2 Impatto o gravità .....	45
7.1.3 Grado di rischio.....	45
7.2 Descrizione dei principali rischi identificati.....	47
7.3 Misure di mitigazione dei rischi .....	49

Rapport de synthèse (côté Italie) – Relazione di sintesi (lato Italia)

8. RISULTATI DELL'ANALISI: REGISTRO DEI RISCHI .....	52
8.1 Serie di Clarea e d'Ambin (pk 48+672 - 55+029).....	55
8.2 Zona a Scaglie Tettoniche (pk 55+029 - 56+058).....	60
8.3 Val Cenischia (pk 56+058 - 57+160).....	62
8.4 Unità Puys - Venaus (pk 57+160 - 60+711).....	64
8.5 Unità Oceaniche (pk 60+711 - 61+090).....	66
8.6 Gallerie d'interconnessione Susa-Bussoleno.....	67
9. BIBLIOGRAFIA.....	68
10. ALLEGATO 1 SINTESI DELL'ANALISI DELL'AFFIDABILITA' DEI DATI GEOLOGICI (R-INDEX) .....	69
11. ALLEGATO 2 CALCOLO DEL GR-INDEX PER LE LITOLOGIE ATTESE LUNGO IL TUNNEL DI BASE (LATO ITALIA) .....	70

**LISTE DES FIGURES / INDICE DELLE FIGURE**

Figura 1 – Grafico di sintesi della metodologia di analisi e gestione dei rischi, estratto dalla raccomandazione AFTES GT32-2. ....	11
Figura 2 - Esempio di sistemi naturali con diversa complessità del contesto deformativo duttile.....	21
Figura 3 - Esempio di sistemi naturali con diversa complessità del contesto deformativo fragile .....	22
Figura 4 – Valori di R-Index calcolati per spezzoni di 500 m suddivisi nella tratta in esame. 25	
Figura 5 – Grafico di sintesi della metodologia di analisi dell'affidabilità dei dati geomeccanici (GRA).....	31

**LISTE DES TABLEAUX / INDICE DELLE TABELLE**

Tabella 1 – Scala di rating utilizzata per la valutazione del parametro “Numero di sondaggi nella tratta esaminata” (nell'analisi si considera il n° di sondaggi compresi nel raggio di un chilometro nell'intorno della tratta).....	16
Tabella 2 – Scala di rating utilizzata per la valutazione del parametro “Tipo di sondaggi nella tratta esaminata”.....	17
Tabella 3 – Scala di rating utilizzata per la valutazione del parametro “Distanza media dei sondaggi dal tracciato nella tratta esaminata”.....	17
Tabella 4 – Scala di rating utilizzata per la valutazione del parametro “Profondità dei sondaggi rispetto alla profondità dell'opera”. I valori 0,25 – 0,5 – 1 - 1,2 esprimono il valore del rapporto tra la profondità d'indagine raggiunta e quella del tunnel. ....	17
Tabella 5 – Scala di rating utilizzata per la valutazione del parametro “Scala di rilevamento nella tratta esaminata” .....	18
Tabella 6 – Scala di rating utilizzata per la valutazione del parametro “Estensione dell'area rilevata nella tratta esaminata” .....	18
Tabella 7 – Scala di rating utilizzata per la valutazione del parametro “Tecnica di rilevamento nella tratta esaminata” .....	18
Tabella 8 – Scala di rating utilizzata per la valutazione del parametro “Percentuale di affioramento nella tratta esaminata” .....	19
Tabella 9 – Scala di rating utilizzata per la valutazione del parametro “Numero di sezioni nella tratta esaminata” .....	19

Rapport de synthèse (côté Italie) – Relazione di sintesi (lato Italia)

Tabella 10 – Scala di rating utilizzata per la valutazione del parametro “Tipo d’indagine geofisica nella tratta esaminata”	19
Tabella 11 – Scala di rating utilizzata per la valutazione del parametro “Distanza media dal tracciato delle indagini geofisiche nella tratta esaminata”	20
Tabella 12 – Scala di rating utilizzata per la valutazione del parametro “Profondità d’indagine rispetto alla profondità del tunnel nella tratta esaminata”. I valori 0,25 – 0,5 – 1 - 1,2 esprimono il valore del rapporto tra la profondità d’indagine raggiunta e quella del tunnel. .	20
Tabella 13 – Scala di rating utilizzata per la valutazione del parametro “Complessità del contesto litostratigrafico” (*: 1: le variazioni litologiche non sono significative dal punto di vista geotecnico; 2: le variazioni litologiche possono essere significative dal punto di vista geotecnico)	21
Tabella 14 – Scala di rating utilizzata per la valutazione del parametro “Complessità del contesto strutturale duttile”	22
Tabella 15 – Scala di rating utilizzata per la valutazione del parametro “Complessità del contesto strutturale fragile”	23
Tabella 16 – Significato dell’R-Index	24
Tabella 17 – Sintesi dei parametri utilizzati nella valutazione del grado d’affidabilità dei dati geomeccanici - esempio per tre delle litologie interessate dalla NTLT (‘TCS’ calcemicascisti Dora Maira; ‘CI’ micascisti e gneiss minuti del Complesso di Clarea; ‘GDng, tG, tng, tGsb’ anidriti e gessi). Per ogni litologia sono riportati i valori minimo (min), medio (med/moy) e massimo (max) del set di dati. $\gamma$ - peso di volume, $\sigma_c$ – resistenza a compressione monoassiale, $E_s$ - modulo d’elasticità per la roccia intatta, $E_t$ - modulo di deformazione. In rosso tra parentesi i dati derivanti dal ritorno di esperienza del cunicolo della Maddalena. .	33
Tabella 18– (Sinistra) Distinzione e parametrizzazione del ‘dato’ geomeccanico e (destra) esempio del calcolo eseguito per tre delle litologie di cui alla Tabella A4-1 e per le rocce di faglia (v. testo); val’- valore calcolato per il parametro D.	34
Tabella 19– (Sinistra) Parametrizzazione della rilevanza dei dati geomeccanici. ‘n/l’ è la quantità di dati (n) sulla tratta complessiva occupata dalla litologia (l). 1 *x ‘o nessun dato’. (Destra) Esempio del calcolo di N eseguito per le tre litologie e per le rocce di faglia (v. testo); val’- valore calcolato per il parametro N; $\gamma$ - peso di volume, $\sigma_c$ – resistenza a compressione monoassiale, $E_s$ - modulo d’elasticità per la roccia intatta, $E_t$ - modulo di deformazione. In verde i valori aggiornati sulla base dei dati di nuova acquisizione.	35
Tabella 20– (Sinistra) Parametrizzazione della dispersione dei dati geomeccanici. 1*x ‘o nessun dato’. (Destra) Calcolo di S eseguito per le tre litologie e per le rocce di faglia (v. testo). ‘val’- valore calcolato per il parametro S; ‘st. dev.’-deviazione standard del set di dati; $\gamma$ - peso di volume, $\sigma_c$ – resistenza a compressione monoassiale, $E_s$ - modulo d’elasticità per la roccia intatta, $E_t$ - modulo di deformazione. In verde i valori aggiornati sulla base dei dati di nuova acquisizione.	36
Tabella 21– Classi d’affidabilità suddivise per i parametri geomeccanici considerati nella progettazione, e loro descrizione. A destra è riportata la classificazione delle litologie considerate in questo capitolo.	37
Tabella 22– Classificazione delle litologie lungo la tratta in analisi del TdB in base al GR-index.	38
Tabella 23 – Registro delle incertezze e dei rischi geologici, geotecnici e idrogeologici lungo il tracciato	41
Tabella 24 - Sintesi delle metodologie di scavo per la tratta da Modane a Susa	43
Tabella 25 – Scala di probabilità per l’analisi dei rischi	44
Tabella 26 – Scala di gravità definita nell’analisi dei rischi	45

Rapport de synthèse (côté Italie) – Relazione di sintesi (lato Italia)

---

Tabella 27 – Matrice del rischio in funzione della probabilità d'occorrenza e dell'impatto delle criticità.....	45
Tabella 28 – Scala del rischio definito sulla base della matrice del rischio.....	46
Tabella 29 – Criticità dipendenti dal contesto geologico e tipi di rischi possibili nel caso di scavo con metodo tradizionale o meccanizzato con TBM (in grassetto sono indicate le criticità prese in considerazione nell'analisi dei rischi – si veda la tabella seguente).....	48
Tabella 30 – Esempio di com'è costruita la tabella-registro dei rischi (cf. testo).....	54

## RESUME / RIASSUNTO

L'actuelle phase d'étude du Projet en Variante (PRV) prévoit le déplacement de l'excavation de la partie italienne du Tunnel de Base, à partir de la nouvelle Galerie Maddalena 2, vers l'entrée Est du Tunnel de Base située à Susa.

En outre, est partie intégrante de cette phase du projet l'intégration des informations principalement dérivée par le retour d'expérience de l'excavation du tunnel de la Maddalena qui constitue la principale source de données nouvellement acquises pour la mise à jour et l'intégration du Modèles Géologique, Géomécanique, Hydrogéologiques du Tunnel de Base, pour lesquelles le présente rapport est finalisée.

Sur la base des résultats de l'excavation du Tunnel exploratif de la Maddalena, il était possible améliorer le niveau de connaissances et la fiabilité du Modèle Géologique de Référence en rapport à ce qui est défini dans la précédente phase du projet « Progetto Definitivo Approvato ». Cette mise à jour a affecté seulement une partie du Tunnel de Base dans le Massif de Ambin.

L'identification, la caractérisation et la gestion des criticités géologiques sont des phases très importantes au cours de l'analyse des risques liés à la conception et à la réalisation d'ouvrages souterrains, et elles demandent une analyse multidisciplinaire, intégrée et prolongée sur toutes les phases de conception de l'ouvrage, jusqu'à sa conclusion.

Le présent rapport décrit la méthodologie utilisée pour caractériser les incertitudes et les risques géotechniques, d'après la recommandation AFTES GT 32-2. Cette méthodologie comprend trois phases principales, dont (1) la rédaction d'un bilan des connaissances qui ont défini le modèle géologique, hydrogéologique et géotechnique de référence, et ses incertitudes relatives; (2) l'estimation des criticités géotechniques par identification, analyse et évaluation des

L'attuale fase di studio di Progetto in Variante (PRV) prevede lo spostamento dello scavo del lato italiano del Tunnel di Base partendo dalla nuova Galleria della Maddalena 2 verso l'imbocco est del Tunnel di Base ubicato a Susa.

Inoltre, è parte integrante di questa fase progettuale l'integrazione dei dati derivanti principalmente dal ritorno di esperienza dello scavo del Cunicolo della Maddalena che costituisce la principale fonte di dati di nuova acquisizione per l'aggiornamento e l'integrazione del Modelli Geologico, Geomeccanico e Idrogeologico del Tunnel di Base, per cui il presente elaborato è finalizzato.

Sulla base delle risultanze dello scavo del Cunicolo esplorativo della Maddalena è stato possibile migliorare il livello di conoscenza e l'affidabilità del Modello di Riferimento Geologico rispetto a quanto definito nella precedente fase di progetto Progetto Definitivo Approvato. Questo aggiornamento ha interessato solo una parte del Tunnel di Base nel Massiccio di Ambin.

L'identificazione, la caratterizzazione e la gestione delle criticità geologiche sono fasi molto importanti nel processo di analisi dei rischi legati alla progettazione e alla realizzazione di un'opera in sotterraneo e richiedono un'analisi multidisciplinare, integrata e protratta per tutte le fasi di progettazione dell'opera, fino alla sua conclusione.

In questo rapporto si applica la metodologia utilizzata per la caratterizzazione delle incertezze e dei rischi geotecnici, come descritto nella raccomandazione AFTES GT 32-2. Tale metodologia comprende tre fasi principali, di cui (1) la redazione di un bilancio delle conoscenze che han portato a definire il modello geologico, idrogeologico e geotecnico di riferimento, e delle relative incertezze; (2) la stima delle criticità geotecniche mediante identificazione, analisi e valutazione delle

sources de risques et leur conséquences; (3) le traitement des risques par la définition de mesures d'atténuation appropriées.

Ces trois phases comprennent (a) la définition d'un niveau de fiabilité du modèle géologique (R-index) sur des tronçons homogènes de 500 m de longueur, (b) la définition d'un niveau de fiabilité des données géomécaniques ou GR-index, la compilation de (c) un registre des incertitudes et des sources de risques et de (d) un Registre des Risques. De ce dernier suit la définition des risques résiduels qui devront être caractérisés en détail et gérés pendant les phases de Projet Exécutif et Constructif.

Ce rapport se réfère au tracé compris entre la frontière franco-italienne (pk 48+672) et la tête Est du Tunnel de Base, cette dernière se situant sur la commune de Susa (pk 61+076 environ).

Le contexte géologique de référence est très complexe. D'Ouest en Est on retrouve: (1) les roches du socle et de la couverture des Séries de Clarea et d'Ambin; (2) une zone complexe de transition ou "Zone à Ecailles Tectoniques" entre les roches d'Ambin et celles de la Zone Piémontaise; (3) les alluvions fluviales quaternaires de remplissage de la Vallée Cenischia; (4) les calcschistes et les gneiss de l'Unité Puys - Venaus (Zone Piémontaise); (5) les metabasites (Unités Océaniques) du Massif Dora Maira. Finalement, on retrouve (6) les calcschistes et les paragneiss du Dora Maira au niveau des galeries d'interconnexion entre Susa et Bussoleno.

Les valeurs de R-index le long du tracé sont comprises entre 3.12 (fiabilité faible-moyenne) et 8.70 (fiabilité de bonne à très bonne). De la frontière à la fin de l'ouvrage la fiabilité du modèle est faible à moyenne (R-index moyen inférieur à 4.1 jusqu'au pk 52+000, et entre 3.12 et 6.41 sur les kilomètres qui suivent). L'incertitude liée aux caractéristiques géomécaniques est exprimée par le Geomechanical Reliability index (GR-index); le GR-index est le produit de trois paramètres: (1) provenance et (2) importance

fonti di rischio e delle loro conseguenze; (3) il trattamento dei rischi mediante la definizione di misure di mitigazione appropriate.

Associate a queste tre fasi sono (a) la definizione di un grado di affidabilità del modello geologico (R-index) su tratte omogenee di 500 m di lunghezza, (b) la definizione di un grado d'affidabilità dei dati geomeccanici o GR-index, la compilazione di (c) un registro delle incertezze e delle fonti di rischio e di (d) un Registro dei Rischi. A quest'ultimo consegue, come risultato, la definizione dei rischi residuali che dovranno essere caratterizzati in dettaglio e gestiti durante le fasi successive di Progettazione Esecutiva e di Costruzione.

In questa relazione si fa riferimento alla parte di Tunnel di Base compresa tra il confine franco-italiano (pk 48+672) e l'imbocco est, ubicato nel Comune di Susa (pk 61+076 circa).

Il contesto geologico di riferimento è piuttosto complesso. Procedendo da ovest verso est si succedono: (1) rocce di basamento e di copertura delle Serie di Clarea e d'Ambin; (2) una complessa zona di transizione o "Zona a Scaglie Tettoniche" tra le rocce dell'Ambin e quelle della Zona Piemontese; (3) i depositi quaternari alluvionali di riempimento della Val Cenischia; (4) calcescisti e gneiss dell'Unità Puys - Venaus (Zona Piemontese); (5) le metabasiti (Unità Oceaniche) del Massiccio Dora Maira. Infine, in corrispondenza delle gallerie d'interconnessione Susa-Bussoleno, si trovano (6) calcescisti e paragneiss del Dora Maira.

I valori del R-index lungo il tracciato sono compresi tra 3.12 (affidabilità medio-bassa) e 8.70 (affidabilità da buona a molto buona). L'incertezza legata alle caratteristiche geomeccaniche è espressa da un Geomechanical Reliability index (GR-index) che è prodotto di tre parametri: (1) provenienza e (2) rilevanza (numero di dati rapportati alla lunghezza del tratto lungo il quale l'opera attraversa una medesima litologia) del dato, e (3) dispersione statistica del set di dati disponibili.

(nombre de données par rapport à la longueur du tronçon où l'ouvrage traverse une même lithologie) de la donnée, et (3) dispersion statistique de l'ensemble des données disponibles.

Respect la précédente phase de « Progetto Definitivo Approvato », dans la phase actuelle de PRV, Il y a beaucoup importants informations de nouvelle acquisition qui a permis d'affiner le niveau de connaissance et le degré de fiabilité dans certains importants secteurs du Tunnel de Base, en particulier long le secteur compris entre le pk 50+000 et 53+500, en raison des données de profondeur acquises dans l'excavation du Tunnel exploratif de la Maddalena dont le tracé dans ce secteur est coïncide approximativement avec le tracé du Tunnel de Base.

Les valeurs du GR-Index se réfèrent aux lithologies singulières; la fiabilité géomécanique de la plus grande partie des lithologies est classifiée bonne ou moyenne, tandis que la fiabilité des roches de failles et des cargneules est faible.

Sur la base des valeurs obtenues pour les différentes lithologies du tronçon analysé, les sous-zones principales sont :

- complexes de Clarea et d'Ambin, avec une fiabilité de la caractérisation géomécanique 'moyenne' (GR-index 21%-47%, sauf au niveau des zones de failles ou de cisaillement, où l'index est de 84%).
- Dépôts quaternaires, avec caractérisation fiable.
- Zone Piémontaise et Massif Dora Maira, jusqu'aux galeries d'interconnexion : degré de fiabilité des données géomécaniques moyen (GR-index 40-62%), sauf le long des bandes de déformation fragile (GR-index ponctuel élevé et fiabilité géomécanique faible).

Au préalable de l'analyse détaillée des risques il y a la définition des incertitudes géologiques, géotechniques et hydrogéologiques et de celles potentiellement sources de risque, le long du tracé. De la

Rispetto a quanto presentato nella precedente fase di Progetto Definitivo Approvato, nell'attuale fase di PRV si hanno a disposizione una serie di importanti informazioni di nuova acquisizione che hanno permesso di affinare il livello delle conoscenze e di conseguenza il grado di affidabilità in alcuni importanti settori del Tunnel di Base, in particolare lungo il settore compreso tra 50+000 e 53+500, in ragione dei dati di sottosuolo acquisiti nello scavo del Cunicolo esplorativo della Maddalena il cui tracciato in questo tratto è circa coincidente con quello del Tunnel di Base.

I valori di GR-Index sono riferiti alle litologie prese separatamente e classificano come buona o media l'affidabilità dei dati geomeccanici relativi alla maggior parte delle litologie, mentre scarsa è l'affidabilità per le rocce di faglia e le carniole.

Sulla base dei valori ottenuti per le diverse litologie nella tratta in analisi sono state suddivise le sottozone principali:

- complessi di Clarea e d'Ambin, con affidabilità della caratterizzazione geomeccanica principalmente 'media' (GR-index 21%-47%, salvo in corrispondenza delle zone di faglia dov'è pari a 84%).
- depositi quaternari, con caratterizzazione affidabile.
- Zona Piemontese e Massiccio Dora Maira, fino alle gallerie d'interconnessione: grado d'affidabilità dei dati geomeccanici intermedio (GR-index 40-62%), eccezion fatta per le fasce affette da deformazione fragile (GR-index puntuale elevato e scarsa affidabilità del modello geomeccanico).

Previa all'analisi di dettaglio dei rischi è anche la definizione delle incertezze di tipo geologico, geotecnico e idrogeologico lungo il tracciato, e di quali di esse siano potenziali sorgenti di rischio. Dal confine franco-italiano a Bussoleno il tracciato è suddiviso in cinque 'macro-tratte' in base alle litologie dominanti in ognuna. Le incertezze che sono anche



frontière franco-italienne à Bussoleno le tracé a été subdivisé en cinq macro-tronçons par lithologies dominantes. Les incertitudes qui sont aussi des sources potentielles de risques ont été identifiées pour l'analyse de risque suivante: l'intégralité du tracé analysé se caractérise par une criticité de type géotechnique due, notamment, à la dispersion des propriétés géomécaniques du massif rocheux.

L'analyse des risques a pris en compte les criticités du modèle géologique de référence, en rapport aux méthodes d'excavation prévues (notamment la méthode mécanisée, sauf le long de tronçons brefs où l'on exécutera le creusement en traditionnel). Aux risques initiaux identifiés dans chaque tronçon du projet on associe des mesures spécifiques d'atténuation; on suit une nouvelle analyse des risques, sur la base de l'efficacité potentielle de ces mesures, et la redéfinition des risques en termes de 'risques résiduels'.

Le niveau de risque résiduel obtenu le long du tunnel est en général acceptable (Niveau 2 ou moyen). Par conséquent on doit maintenir les mesures d'atténuation appliquées jusqu'au franchissement de chaque tronçon critique, et éventuellement appliquer des systèmes d'auscultation en continu. Quelques tronçons, localisés, restent caractérisés par un niveau de risque 4 (Important) malgré les mesures d'atténuation. Ceci est dû aux incertitudes sur l'étendue réelle et sur les caractéristiques des zones critiques : cela ne compromet pas la possibilité de maîtriser ces criticités en toute sécurité, mais signale cependant un risque résiduel en termes de délais et coûts d'excavation.

potenziali fonti di rischio son distinte per la successiva analisi del rischio: tutto il tracciato in analisi è caratterizzato da una criticità di tipo geotecnico dovuta principalmente alla dispersione delle proprietà geomeccaniche dell'ammasso.

L'analisi del rischio ha preso in considerazione le criticità nel modello geologico di riferimento valutate rispetto al metodo di scavo previsto (principalmente meccanizzato, ad eccezione d'alcune brevi tratte per le quali si opererà in tradizionale). Ai rischi iniziali individuati per ogni tratta sono inoltre associate delle misure di mitigazione specifiche; seguono una rianalisi dei rischi, alla luce dell'efficacia potenziale di tali misure, e la ridefinizione dei rischi in termini di rischi residuali.

Il livello di rischio residuale risultante lungo il tunnel è generalmente accettabile (Livello 2 o Significativo). Ciò implica che le procedure adottate come misure di mitigazione vanno mantenute fino al superamento di ogni tratta, eventualmente impiegando sistemi di monitoraggio continui. Alcune tratte localizzate restano caratterizzate da un livello di rischio 4 (Importante) anche a valle delle misure di mitigazione: ciò è dovuto all'incertezza circa le reali estensione e caratteristiche di tali zone critiche e non pregiudica la possibilità di superare queste ultime in condizioni di sicurezza, ma segnala un rischio residuo riguardante i tempi e i costi di scavo.

## 1. Introduzione

L'identificazione, la caratterizzazione e la gestione delle criticità geologiche sono fasi molto importanti nel processo di analisi dei rischi legati alla progettazione e alla realizzazione di un'opera in sotterraneo. Concettualmente queste tre fasi vanno identificate come un processo distintivo, perché integrano un insieme di fattori coinvolti in due aspetti fondamentali di sviluppo del progetto:

1. La Fase di Progettazione tecnica, che si basa sull'interazione tra le caratteristiche dell'opera, le caratteristiche geologiche, idrogeologiche e geotecniche dei litotipi e i metodi di costruzione;
2. La Fase Programmatica, finalizzata alla definizione dei costi e dei tempi di realizzazione, alla pianificazione delle tappe successive, alla contrattualizzazione etc.

Ne conseguono la natura multidisciplinare sia del tipo di studio che dell'equipe incaricata di portarlo a termine, e quindi la necessità che l'analisi stessa sia condotta con continuità, in modo integrato e senza settorizzazione delle sue varie componenti, fino alla conclusione della progettazione dell'opera.

L'ammasso roccioso nel quale si deve ubicare l'opera, così come gli elementi strutturali di supporto messi in opera durante la costruzione (sostegni, rivestimenti, etc...), va considerato come parte integrante dell'opera stessa. Ne deriva che il dimensionamento dell'opera (per esempio la geometria e la sezione d'intradosso di una sezione tipo) e i metodi di costruzione scelti sono direttamente legati alle caratteristiche geotecniche del massiccio lungo tutto l'asse di progetto e alle possibili problematiche ad esse connesse.

L'eventuale inadeguatezza delle scelte costruttive rispetto alle reali condizioni geotecniche dell'ammasso può avere, infatti, conseguenze estremamente penalizzanti. Questa è la ragione principale per la quale, nel corso degli studi per la progettazione di un tunnel, ingegneria civile e geotecnica possono mai essere dissociate.

Al fine di poter meglio identificare, caratterizzare e gestire le possibili criticità geologiche durante la realizzazione delle opere in sotterraneo, è stata effettuata un'analisi del rischio. La presente relazione è volta a descrivere il metodo utilizzato e a illustrare i risultati delle analisi svolte.

La metodologia utilizzata per la caratterizzazione delle incertezze e dei rischi geotecnici è quella descritta nella raccomandazione AFTES GT 32-2, alla quale si rimanda per una presentazione dettagliata del metodo, e composta da tre fasi principali:

- la redazione di un bilancio delle conoscenze geologiche, idrogeologiche e geotecniche e delle relative incertezze;
- la stima dei rischi geotecnici mediante identificazione delle fonti di rischio, analisi e valutazione dei rischi stessi;
- il trattamento del rischio mediante la definizione di misure di mitigazione del rischio stesso.

A queste tre fasi si accompagna la compilazione di un Registro dei Rischi che rappresenta una sorta di catalogo delle fonti di rischio identificate, della valutazione del relativo livello di rischio e della variazione di quest'ultimo in funzione dell'applicazione delle misure di mitigazione previste.

Il risultato dell'intero processo è rappresentato dalla definizione dei rischi residuali che dovranno essere caratterizzati in dettaglio e gestiti durante le fasi successive del progetto di Progettazione Esecutiva e di Costruzione.

L'insieme delle diverse attività che compongono la metodologia adottata e le modalità d'interazione tra le diverse fasi dell'analisi sono schematizzate nel grafico seguente.

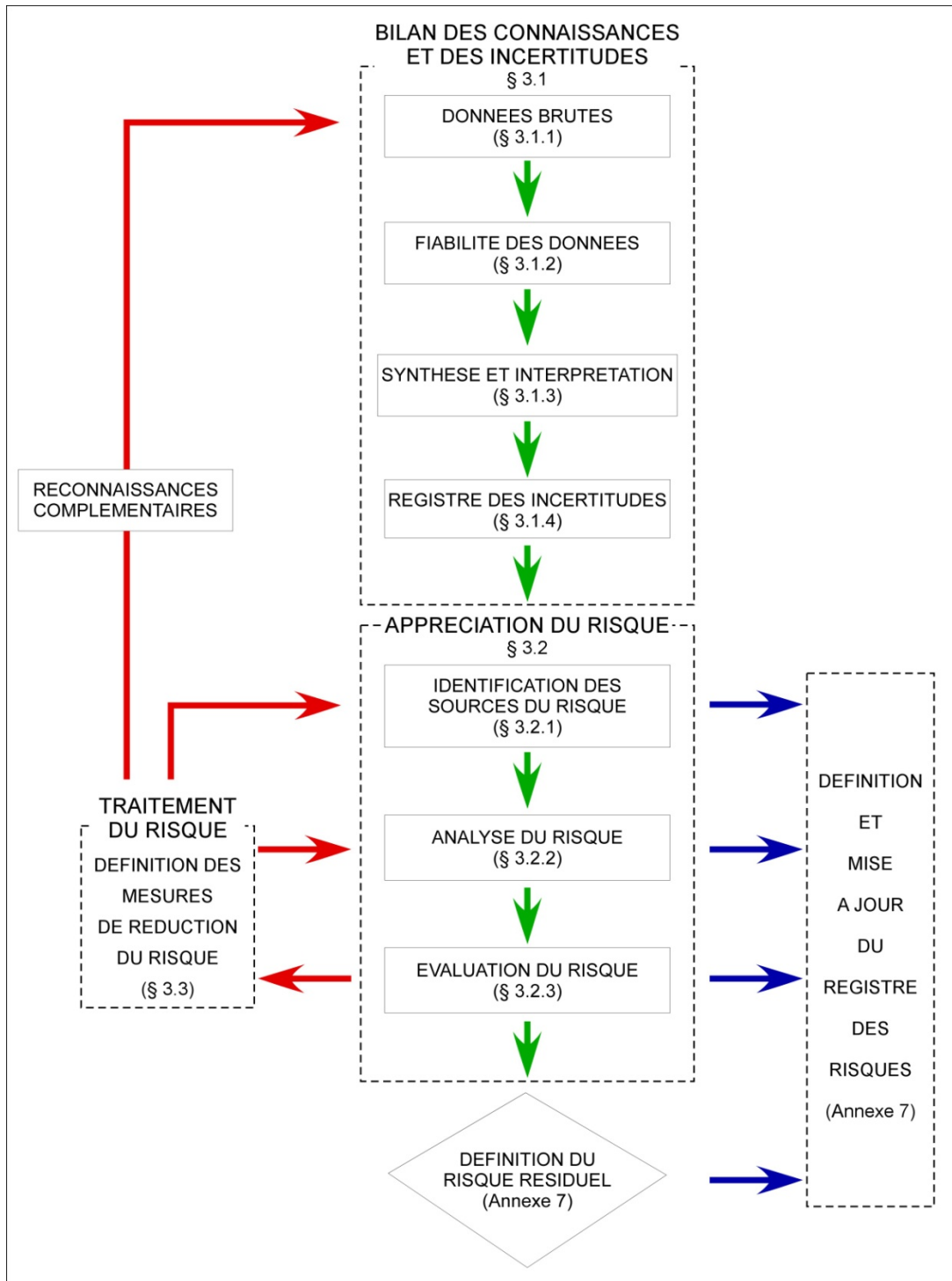


Figura 1 – Grafico di sintesi della metodologia di analisi e gestione dei rischi, estratto dalla raccomandazione AFTES GT32-2.

Nel presente elaborato le tappe che compongono il processo d'identificazione e analisi del rischio sono esposte come segue:

- definizione del modello geologico, geotecnico e idrogeologico (cap. 2)
- analisi dell'affidabilità delle previsioni geologiche (R-index – cap. 3)
- analisi dell'affidabilità del modello geomeccanico (GRA – cap. 4)
- identificazione delle incertezze e compilazione del Registro delle incertezze (cap. 5)
- identificazione delle incertezze che possono condurre a rischi (fonti di rischio ) (§ 5.1)
- descrizione del metodo di scavo (cap. 6)
- valutazione del rischio: stima di probabilità, impatto e grado di rischio iniziale (cap.7.2)
- identificazione delle misure di mitigazione (par. 7.3)
- valutazione dell'efficacia delle misure di mitigazione proposte e analisi del rischio residuale (cap. 8)
- presentazione del registro dei rischi (cap. 8)

## **2. Inquadramento geologico, idrogeologico e geotecnico - tratto Modane/Susa e Gallerie di Interconnessione**

In questa relazione si fa riferimento alla parte di Tunnel di Base compresa tra il confine franco-italiano (pk 48+672) e l'imbocco est, ubicato nel Comune di Susa (pk 61+076 circa). I paragrafi seguenti sintetizzano il contesto geologico lungo la tratta in analisi; si fa qui riferimento alle unità geomeccaniche come suddivise nella presente fase progettuale (PRV) ed esposto nella "Relazione geomeccanica di sintesi" (PRV C3B TS3 0100 0 PA NOT).

In particolare le modifiche/aggiornamenti apportati al seguente elaborato, rispetto a quanto descritto nella precedente fase di Progetto Definitivo Approvato, riguardano principalmente il tratto del Tunnel di Base compreso all'incirca tra le pk (BP) 50+100 e 53+750, in cui, a seguito delle nuove informazioni provenienti dal ritorno di esperienza della Maddalena, è stato possibile aggiornare il Modello Geologico di Riferimento. In particolare tra circa le pk 50+100 e 52+000 i tracciati dei due tunnel coincidono, pertanto si attende di trovare condizioni del tutto simili; tra circa le pk (BP) 52+000 e 53+750 i tracciati si allontanano progressivamente verso est, tuttavia le informazioni acquisite nello scavo del cunicolo esplorativo possono essere proiettate, con un certo grado di affidabilità, su tale settore del Tunnel di Base.

Inoltre anche per il settore relativo al Complesso di Ambin, nonostante esso sia ubicato oltre la pk 53+750, è stata eseguita una integrazione dei parametri geomeccanici provenienti dal Cunicolo della Maddalena. Sebbene, infatti, la distanza non permette di proiettare con affidabilità le diverse informazioni geologico-strutturali, a livello di parametrizzazione geomeccanica si è tuttavia deciso, anche per questi litotipi, di dare evidenza dei nuovi dati e utilizzarli per aggiornare il grado di affidabilità GR-Index.

Si ricorda inoltre che al momento della stesura del seguente rapporto, l'analisi dei dati *as built* del cunicolo della Maddalena si ferma alla data del 18 Luglio 2016, riferiti alla pk 5+510 del cunicolo. Per il motivo sopra esposto, per il settore di ammasso del Tunnel di Base, prima della pk 50+100, si è fatto riferimento alle condizioni previste in progetto in fase di Progetto Definitivo Approvato.

### **2.1 Serie di Clarea e d'Ambin (pk 48+672 - 55+029)**

Inizia qui una delle tratte con la copertura topografica più significativa su tutta l'opera (1000 – 2000 m circa); essa interesserà nel suo insieme il complesso di Clarea e quello dell'Ambin

(rispettivamente costituiti principalmente da micascisti e gneiss) entrambi afferenti al Massiccio d'Ambin. I micascisti e gneiss minuti del Complesso di Clarea sono caratterizzati da scistosità pervasiva a scala millimetrica e debolmente inclinata verso ESE – SSE. Tale andamento tende a verticalizzarsi procedendo verso est. Il tracciato interesserà i litotipi del Complesso di Clarea fino a circa pk 53+740. Da un punto di vista della strutturazione fragile il tracciato dovrebbe attraversare una zona a fratturazione pervasiva, con spaziatura da metrica a plurimetrica, dal confine di stato fino alla pk 50+100 circa. Sempre in questo settore, il tracciato potrà intercettare delle zone di faglia riferibili a un sistema regionale con direzione N60°-70°E (zona di faglia Seguret/Col Clapier) con associati sistemi minori a direzione N110°-120°E e N-S. In questo settore i caratteri geologici e geomeccanici dell'ammasso roccioso saranno fortemente condizionati dall'elevato carico litostatico.

Nel tratto compreso tra le pk 48+672 e 50+000 sono previste condizioni geomeccaniche da buone a discrete, (classi RMR II 75% e III 25%) con possibili peggioramenti (RMR II 55%, III 25% e IV 20%) in dipendenza dello stato di fratturazione intrinseca dell'ammasso descritta in precedenza. Condizioni di roccia più scadente, comunque di estensioni limitate, potranno anche essere incontrate in corrispondenza di faglie (classi RMR IV 70% e V 30%) .

Il tratto compreso tra circa le pk 50+100 e 52+000 è coperto dalle informazioni provenienti dal ritorno di esperienza del Cunicolo esplorativo della Maddalena, nel quale, nonostante la generale buona/discreta qualità geomeccanica (classi RMR II e III), si è evidenziato un peggioramento nel comportamento dell'ammasso allo scavo e generali problemi di stabilità concentrati in calotta. In questo tratto sono previste una serie di faglie che, stando alle informazioni provenienti dal cunicolo della Maddalena, dovrebbero per lo più presentare classi RMR III e IV (mai con condizioni di classe V), lo scavo della galleria della Maddalena non ha riscontrato particolari problemi nell'attraversare tali strutture.

Tra le pk 52+000 e 52+700 sono attese condizioni per lo più di classe RMR III (e solo localmente IV) per presenza di uno settore verosimilmente con fratturazione più marcata e qualche limitata faglia. Questa ipotesi è legata alle evidenze riscontrate nel cunicolo della Maddalena che, seppure non sia in asse al tracciato del Tunnel di Base, in questo tratto è comunque molto prossimo e le informazioni sono ancora discretamente proiettabili.

Oltre la pk 52+700 (fino alla pk 54+800) le indicazioni provenienti dal cunicolo della Maddalena risentono della distanza tra i tracciati e sono estrapolabili con minor affidabilità, tuttavia la qualità dell'ammasso dovrebbe progressivamente migliorare verso una classe RMR II prevalente (classe III subordinata) grazie alla presenza degli gneiss e alla minore fratturazione complessiva dell'ammasso, in particolare nei litotipi del Complesso di Ambin.

Nella tratta compresa tra le pk 54+800 e 55+029, ove sono presenti le quarziti delle coperture meso-cenozoiche, prevalgono ancora le classe II e III di Bieniawsky (gruppo UG B), salvo lungo un piano di taglio dove è verosimile attendersi condizioni geomeccaniche più scadenti.

## **2.2 Zona a Scaglie Tettoniche (pk 55+029 - 56+058)**

La copertura rocciosa decresce regolarmente dalla progressiva 55+050 fino alla progressiva 56+000 passando da circa 500 a circa 100 metri. In questo settore lo scavo avverrà all'interno di livelli di calcescisti, gneiss e orizzonti evaporitici (gessi e carnioli) che si alternano in una sequenza caotica tipica della Zona a Scaglie Tettoniche che costituisce di fatto una potente banda di transizione tra il Massiccio d'Ambin e la Zona Piemontese. Questo tratto è sostanzialmente caratterizzato da un ammasso di scadenti qualità e da potenziale presenza di condotti carsici e Importanti venute d'acqua.

In termini geomeccanici il tracciato attraverserà una successione eterogenea di sottozone con caratteristiche da mediocri a discrete (gruppo geomeccanico UG D dei calcescisti della Zona Piemontese, qualitativamente classificabile come classe di Bieniawsky III prevalente (66%) e classe II subordinata (34%)) e altre geomeccanicamente molto scadenti (UG J, rocce di faglia e carnirole) corrispondenti sia agli orizzonti di carnirole sia alle intersezioni con zone di faglia.

In corrispondenza della pk 55+300 è possibile la concomitanza di un orizzonte di carnirole e di una zona di faglia principale, con conseguente presenza dei materiali più scadenti al fronte di scavo e di condizioni idrogeologiche molto sfavorevoli.

### 2.3 Val Cenischia (pk 56+058 - 57+160)

L'attraversamento in sotterraneo della Val Cenischia è previsto in depositi alluvionali di fondovalle generalmente sabbiosi e ghiaioso – sabbiosi debolmente limosi e scarsamente coesivi. Il battente idraulico massimo previsto in questo settore è di circa 50-60 metri e quasi coincidente con la copertura topografica. Nel settore di attraversamento della Val Cenischia un elemento di criticità può essere rappresentato dall'effetto diga generato dal Tunnel di Base sulla falda freatica con il conseguente innalzamento di quest'ultima nel settore a monte delle opere di progetto e un possibile abbassamento a valle.

I depositi sciolti presenti lungo la tratta in esame sono classificati come gruppo geomeccanico UG K.

### 2.4 Unità Puys - Venaus (Zona Piemontese) (pk 57+160 - 60+711)

Il tracciato sarà qui realizzato all'interno dei calcescisti della Zona Piemontese, con coperture massime di circa 200 m. In questo settore non sono previste condizioni di criticità particolari se non la possibilità di intersecare zone di faglia.

L'ammasso presenta caratteristiche discrete, in quanto rientra nel gruppo geomeccanico UG D dei calcescisti della Zona Piemontese e degli orizzonti di Gneiss di Charbonnel, ed è qualitativamente ripartito tra le classi RMR di Bieniawsky III (66% -100%) e II (34%).

In corrispondenza della Zona di faglia di Venaus e degli altri piani di taglio presunti è da attendersi un peggioramento delle caratteristiche dell'ammasso. Nel caso della faglia di Venaus la roccia ricade prevalentemente nelle classi IV e V di Bieniawski (UG J).

### 2.5 Unità Oceaniche (pk 60+711 - 61+090)

L'imbocco est del Tunnel di Base è situato al piede di un versante caratterizzato da pendenze che variano da 25° fino a raggiungere circa 50°, con la possibilità che lungo il pendio si possano innescare fenomeni franosi con caduta massi e coinvolgenti la copertura quaternaria (colamenti veloci) in relazione ad eventi meteorici intensi.

Lo scavo del tratto finale del Tunnel di Base è previsto all'interno delle rocce basiche e ultrabasiche delle unità di copertura di pertinenza oceanica (rocce verdi); esso risulta critico per la possibile locale presenza di orizzonti contenenti minerali d'amianto con aspetto fibroso come evidenziato dalle analisi petrografiche eseguite nelle fasi precedenti di studio. Le maggiori concentrazioni di minerali asbestiformi sono localizzate lungo le principali zone di taglio. In particolare nel settore di Mompantero le specie mineralogiche amiantifere sono principalmente costituite da tremolite, attinolute e crisotilo, che richiederanno l'adozione di procedure particolari di scavo e gestione del materiale di risulta, così come descritto in dettaglio nelle relazioni di pertinenza:

- “Nota sintetica sulle problematiche connesse alla presenza di rocce potenzialmente amiantifere” PRV C3B TS3 0122 0 PA NOT,

- “Gestione del materiale contenente amianto” PRV C3B TS3 0086 0 PA NOT.

Il superamento di tale criticità prevede la messa in opera di misure di protezione dei lavoratori e dell'ambiente, oltre allo stoccaggio del materiale di scavo presso strutture idonee al conferimento di rifiuti speciali secondo quanto prescritto dalle norme vigenti (doc. PRV C3B TS3 0086 0 PA NOT).

In questa tratta l'ammasso roccioso rientra nel gruppo geomeccanico UG G e presenta caratteristiche discrete, corrispondenti alla classe III prevalente (90%) e subordinatamente (10%) alla classe II di Bieniawsky.

## 2.6 Gallerie d'interconnessione Susa-Bussoleno

Le gallerie d'interconnessione Susa Bussoleno si sviluppano principalmente entro le coperture mesozoiche del Massiccio Dora Maira, qui raggruppate nel Complesso di Meana-M.te Muretto. Si tratta di una potente sequenza di metapeliti, passante da calcescisti s.s. (TCS) a micascisti a granato  $\pm$  cloritoide  $\pm$  grafite con contenuto in carbonato variabile. Nel settore più occidentale e corrispondente all'imbocco di Traduerivi, in affioramento sono stati osservati paragneiss leucocratici (TPG) associati a quarziti impure e generalmente intercalati ai calcemicascisti. Il resto della galleria si sviluppa entro un settore geologicamente omogeneo quasi interamente costituito dai calcemicascisti TCS.

Lo studio di terreno ha messo in evidenza la presenza di lenti sporadiche (dimensioni metriche e plurimetriche) di lenti e boudins basici e ultrabasici (TCSg). La loro presenza è stata quantificata in circa 1% dell'ammasso roccioso. L'analisi al microscopio ottico di campioni prelevati in affioramento ha evidenziato l'assenza di minerali amiantiferi al loro interno.

I paragneiss e i calcemicascisti del Dora Maira che saranno interessati dalle gallerie sono classificati nell'UG D. Entrambe le litologie sono classificate nelle classi di Bieniawsky II e III, e sono caratterizzate da valori di GSI tra 48 e 69. Sono possibili fenomeni di splaccaggio in funzione dall'orientazione della scistosità nell'ammasso rispetto all'asse del tunnel. Si attendono inoltre fenomeni d'instabilità al fronte e possibili venute d'acqua in corrispondenza degli imbocchi o comunque dei settori a minor copertura, dove si possono trovare fronti misti tra l'ammasso roccioso e la copertura quaternaria.

## 3. Analisi dell'affidabilità delle previsioni geologiche - Metodo dell'“R-Index”

La conoscenza delle condizioni geologiche è uno degli aspetti più importanti nella valutazione dei rischi coinvolti nella costruzione di tunnel. Per questo motivo è sempre necessario valutare in dettaglio il modello geologico di riferimento come prima tappa fondamentale per la progettazione.

I modelli geologici sono affetti da un grado d'incertezza variabile, dipendente dalla complessità del contesto naturale. La sottovalutazione di tale incertezza è una delle cause principali di problematiche economiche e costruttive, e di possibili conseguenti arbitrati. La quantificazione dell'affidabilità di un modello geologico non è tuttavia di facile raggiungimento.

Un metodo computazionale relativamente semplice elaborato di recente (Perello *et al.*, 2005, Bianchi *et al.*, 2009) permette di quantificare il range di variabilità delle condizioni geologiche/geomeccaniche lungo l'asse del tunnel in progetto e di valutare l'affidabilità delle previsioni offerte in funzione sia della complessità del contesto geologico che delle indagini

eseguite. Tale metodo ha come obiettivi principali la definizione di un indice (R-Index) che possa esprimere l'affidabilità dell'interpretazione ovvero la capacità delle indagini svolte di rappresentare in modo affidabile il contesto geologico e la sua complessità.

La prima tappa del metodo prevede la suddivisione del tracciato in tratte di lunghezza omogenea. La suddivisione delle tratte non dipende dalle caratteristiche geologiche ed è definita quindi su criteri puramente geometrici. Nel caso in esame del Tunnel di Base e del Tunnel di Interconnessione, sono state adottate tratte di lunghezza pari a 500 m.

Per ogni singola tratta il valore del Reliability Index o R-Index si ottiene dalla computazione di due gruppi di parametri che influenzano l'affidabilità delle previsioni geologiche:

- Parametri di Indagine (Investigation Parameters): corrispondono ai parametri che definiscono la quantità e la qualità (i.e. il tipo) di indagini svolte per la definizione del modello geologico;
- Parametri di Sistema (System Parameters): corrispondono ai parametri che definiscono e descrivono la complessità del contesto geologico in cui è inserito il progetto.

Attraverso l'analisi dell'interazione tra questi parametri è possibile valutare la capacità (in termini di numero e di tipologia) delle indagini eseguite di decifrare il contesto geologico e la sua complessità intrinseca; di conseguenza, il valore del R-Index sarà rappresentativo dell'affidabilità del modello offerto e delle previsioni offerte in corrispondenza di ciascuna tratta in cui il tracciato è suddiviso.

### 3.1 Parametri di Indagine (Investigation Parameters)

I parametri d'indagine sono rappresentati dai tre metodi d'indagine principali.

#### 3.1.1 Sondaggi realizzati

Per ogni tratta sono computati:

- il numero di sondaggi eseguiti
- il tipo di sondaggi (a distruzione, con recupero o misti; esecuzione di eventuali diagrafie, riprese televisive etc)
- la distanza dall'asse del tracciato
- la profondità raggiunta dai sondaggi in rapporto alla profondità dell'opera.

Le scale di rating corrispondenti ai parametri computati sono illustrate nelle tabelle seguenti.

Numero di sondaggi	
valore parametro	rating
n°sondaggi = 10	10
n°sondaggi = 7	8
n°sondaggi = 5	6
n°sondaggi = 3	4
n°sondaggi = 2	2
n°sondaggi = 1	1

Tabella 1 – Scala di rating utilizzata per la valutazione del parametro “Numero di sondaggi nella tratta esaminata” (nell'analisi si considera il n° di sondaggi compresi nel raggio di un chilometro nell'intorno della tratta)



<b>Tipo di sondaggi</b>			
<b>valore parametro</b>	<b>rating</b>	<b>rating con BHTV</b>	<b>rating con diagrafie</b>
m sond. carotati / m sond. Distr. = 0,1	3	4	3.5
m sond. carotati / m sond. Distr. = 1	5	6	5.5
m sond. carotati / m sond. Distr. = 2	7	8	7.5
Totalmente carotati	9.5	10	9.5

Tabella 2 – Scala di rating utilizzata per la valutazione del parametro “Tipo di sondaggi nella tratta esaminata”

<b>Distanza media dal tracciato</b>	
<b>valore parametro</b>	<b>rating</b>
2000 m	1
1000 m	2
500 m	4
250 m	7
0 m	10

Tabella 3 – Scala di rating utilizzata per la valutazione del parametro “Distanza media dei sondaggi dal tracciato nella tratta esaminata”

<b>Profondità dei sondaggi</b>	
<b>valore parametro</b>	<b>rating</b>
0,25 * profondità opera	1
0,5 * profondità opera	3
1 * profondità opera	9
1,2 * profondità opera	10

Tabella 4 – Scala di rating utilizzata per la valutazione del parametro “Profondità dei sondaggi rispetto alla profondità dell’opera”. I valori 0,25 – 0,5 – 1 - 1,2 esprimono il valore del rapporto tra la profondità d’indagine raggiunta e quella del tunnel.

La presenza delle discenderie di Modane, La Praz, Saint Martin La Porte e del Cunicolo esplorativo della Maddalena è stata altresì valutata nella definizione del R-Index. La struttura di base del metodo R-Index non permette di considerare una galleria di accesso o una discenderia in modo specifico. Tali opere vengono computate considerando una disponibilità di sondaggi carotati superiore (anche massima). In questo caso i parametri “distanza dall’asse” e “profondità d’indagine” vengono definiti in funzione del tracciato della discenderia rispetto a quello del tunnel in progetto (ad esempio parallelo all’opera, perpendicolare ecc) e della quota della discenderia nelle diverse tratte rispetto alla quota del tunnel in progetto.

### 3.1.2 Rilevamento geologico di superficie

Per ogni tratta sono analizzate:

- L’estensione della zona cartografata rispetto alla profondità dell’opera;
- La scala del rilevamento;
- La percentuale di affioramento;
- Il tipo di rilevamento realizzato (analisi puramente litologica, litologica e strutturale, strutturale con caratterizzazione di dettaglio e interpretazione genetica delle strutture osservate).

Le scale di rating corrispondenti ai parametri computati per il rilevamento di superficie sono illustrate nelle tabelle seguenti.

<b>Scala rilevamento</b>	
<b>valore parametro</b>	<b>rating</b>
1:1.000	10
1:5.000	8
1:10.000	6
1:15.000	4
1:30.000	2
1:50.000	1

Tabella 5 – Scala di rating utilizzata per la valutazione del parametro “Scala di rilevamento nella tratta esaminata”

<b>Estensione area rilevata</b>	
<b>valore parametro</b>	<b>rating</b>
Est.area (Km2)/ Prof. (Km)= 20	10
Est.area (Km2)/ Prof. (Km)= 10	8
Est.area (Km2)/ Prof. (Km)= 6	6
Est.area (Km2)/ Prof. (Km)= 4	4
Est.area (Km2)/ Prof. (Km)= 3	2
Est.area (Km2)/ Prof. (Km)= 2	1

Tabella 6 – Scala di rating utilizzata per la valutazione del parametro “Estensione dell’area rilevata nella tratta esaminata”

<b>Tecnica rilevamento</b>	
<b>valore parametro</b>	<b>rating</b>
Interpretazione genetica delle strutture e delle successioni stratigrafiche	10
No interpr. Genetica delle strutture e successioni stratigrafiche, ma Sì misurazione diffusa delle superfici stratigrafiche e strutturali	5
No interpr. Genetica delle strutture e successioni stratigrafiche, scarsa misurazione diffusa delle superfici stratigrafiche e strutturali	2

Tabella 7 – Scala di rating utilizzata per la valutazione del parametro “Tecnica di rilevamento nella tratta esaminata”

Rapport de synthèse (côté Italie) – Relazione di sintesi (lato Italia)

<b>Percentuale affioramento</b>	
<b>valore parametro</b>	<b>rating</b>
100%	10
70%	8
50%	6
30%	4
20%	2
10%	1

Tabella 8 – Scala di rating utilizzata per la valutazione del parametro “Percentuale di affioramento nella tratta esaminata”

### 3.1.3 Indagini geofisiche

Per questa tipologia d’indagini vengono computate:

- Il numero di sezioni realizzate;
- La lunghezza delle sezioni;
- La profondità d’indagine rispetto alla profondità del tunnel;
- La distanza delle sezioni rispetto al tracciato;
- Il tipo di indagini svolte (bassa o alta risoluzione, tomografia etc).

Le scale di rating corrispondenti ai parametri computati per le indagini geofisiche sono illustrate nelle tabelle seguenti.

<b>Lunghezza delle sezioni</b>	
<b>valore parametro</b>	<b>rating</b>
L sezioni = 4Km	10
L sezioni = 3Km	8
L sezioni = 2Km	6
L sezioni = 1Km	4
L sezioni = 0,5Km	2
L sezioni = 0,25Km	1

Tabella 9 – Scala di rating utilizzata per la valutazione del parametro “Numero di sezioni nella tratta esaminata”

<b>Tipo di indagine</b>	
<b>valore parametro</b>	<b>rating</b>
Alta definizione	10
Bassa definizione	6
Tomografia	3

Tabella 10 – Scala di rating utilizzata per la valutazione del parametro “Tipo d’indagine geofisica nella tratta esaminata”

Rapport de synthèse (côté Italie) – Relazione di sintesi (lato Italia)

<b>Distanza media asse tunnel</b>	
<b>valore parametro</b>	<b>rating</b>
2000 m	1
1000 m	2
500 m	4
250 m	7
0 m	10

Tabella 11 – Scala di rating utilizzata per la valutazione del parametro “Distanza media dal tracciato delle indagini geofisiche nella tratta esaminata”

<b>Profondità</b>	
<b>valore parametro</b>	<b>rating</b>
0,25 * profondità opera	1
0,5 * profondità opera	3
1 * profondità opera	9
1,2 * profondità opera	10

Tabella 12 – Scala di rating utilizzata per la valutazione del parametro “Profondità d’indagine rispetto alla profondità del tunnel nella tratta esaminata”. I valori 0,25 – 0,5 – 1 – 1,2 esprimono il valore del rapporto tra la profondità d’indagine raggiunta e quella del tunnel.

Le variabili sopra elencate contribuiscono alla prima fase di valutazione del modello geologico, ossia alla quantificazione della qualità delle indagini (*investigation quality*, IQ). È importante sottolineare che, com’è implicito dalle tabelle precedenti, i parametri d’indagine e l’insieme dei dati a disposizione del professionista non contribuiscono alla definizione del modello a meno che siano usati.

Una volta quantificato, il valore di IQ permette di definire l’efficacia d’indagine (*investigations effectiveness*, IE), ossia la potenzialità di previsione dei parametri considerati relativamente alla strutturazione dell’ammasso al contorno dell’opera. Si parla di sola ‘potenzialità’ per il fatto di doversi confrontare con la complessità del contesto naturale, ossia con i parametri di sistema.

### 3.2 Parametri di Sistema (System Parameters)

I parametri di sistema dipendono dal contesto geologico nel quale si localizzerà l’opera in sotterraneo e si possono dividere in tre categorie, illustrate nel seguito.

#### 3.2.1 Complessità del contesto litostratigrafico

La complessità litostratigrafica (LC) può variare in modo significativo da un sito all’altro. Ciò vuol dire che le previsioni geologiche ottenute per contesti geologici diversi, ovvero in tratte diverse dello stesso tunnel, avranno gradi d’affidabilità diversi a parità di parametri d’indagine (quali, per esempio, il numero di fori di sondaggio).

Le scale di rating per la valutazione della complessità del contesto sono illustrate nella tabella seguente.

Rating 1*	Complessità litostratigrafica	Rating 2*
0.1	Complessità bassa: no eteropie a scala chilometrica, no variazioni significative spessore strati	0.2
0.4	Complessità media: no eteropie a scala chilometrica, sì variazioni significative spessore strati.	0.5
0.6	Complessità elevata: sì eteropie a scala chilometrica, sì variazioni significative spessore strati.	0.75
0.8	Complessità molto elevata: sì eteropie a scala ettometrica, sì variazioni significative spessore strati	1

Tabella 13 – Scala di rating utilizzata per la valutazione del parametro “Complessità del contesto litostratigrafico” (\*: 1: le variazioni litologiche non sono significative dal punto di vista geotecnico; 2: le variazioni litologiche possono essere significative dal punto di vista geotecnico)

### 3.2.2 Complessità delle strutture originate per deformazione duttile

Considerazioni analoghe a quelle fatte per la complessità litologica possono essere fatte per quanto riguarda la complessità delle strutture per deformazione duttile (DC). A parità d'indagini eseguite, un contesto naturale caratterizzato da una singola fase plicativa (Figura 2A) e uno risultato da due o più fasi sovrapposte (Figura 2B) porteranno a gradi d'affidabilità diversi delle previsioni; nel secondo caso sono necessari più dati di input per ottenere lo stesso grado d'affidabilità del primo.

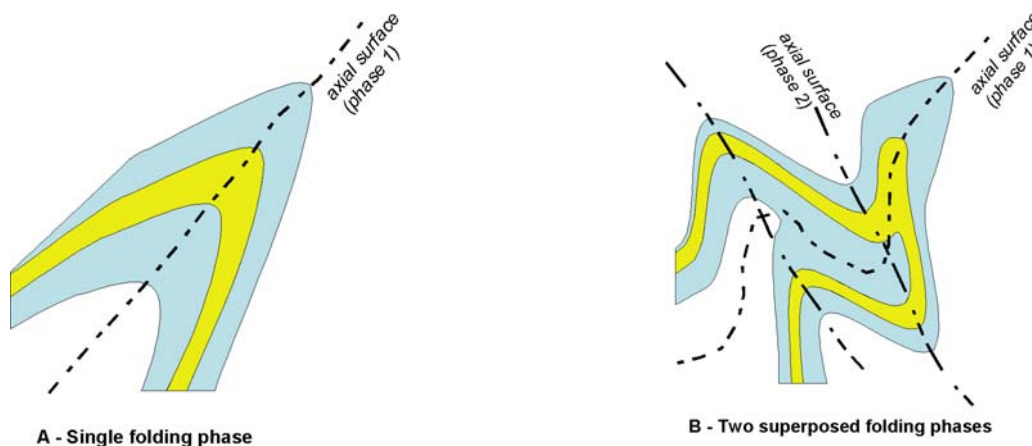


Figura 2 - Esempio di sistemi naturali con diversa complessità del contesto deformativo duttile

Le scale di rating per la valutazione della complessità del contesto strutturale duttile sono illustrate nella tabella seguente.

Rating	Complessità strutturale duttile
0.25	Complessità bassa: no fasi di piegamento sovrapposte, no fenomeni traspositivi
0.5	Complessità media: Due fasi di piegamento sovrapposte, no fenomeni traspositivi
0.75	Complessità elevata: Tre o più fasi di piegamento sovrapposte, sì fenomeni traspositivi per una delle fasi di piegamento
1	Complessità molto elevata: Tre o più fasi di piegamento sovrapposte, sì fenomeni traspositivi per più di una delle fasi di piegamento, numerose zone di taglio duttili

Tabella 14 – Scala di rating utilizzata per la valutazione del parametro “Complessità del contesto strutturale duttile”

### 3.2.3 Complessità delle strutture originate per deformazione fragile

La Figura 3 esemplifica come la complessità di strutture fragili (BC) influenzi l'affidabilità previsionale. Dall'esempio è implicito che faglie molto segmentate siano più difficili da prevedere rispetto a sistemi ‘maturi’ e siano ragione d'incertezze elevate.

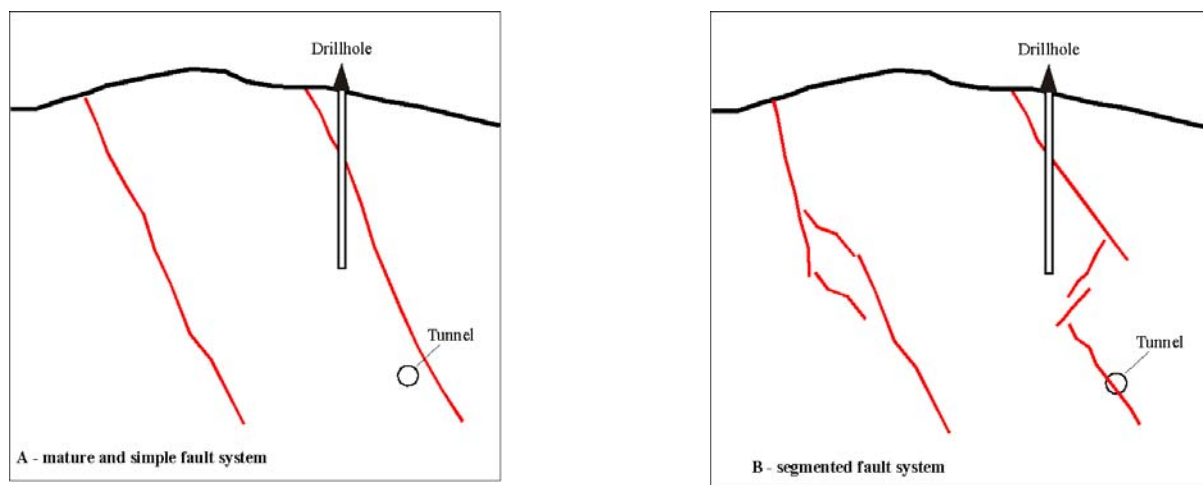


Figura 3 - Esempio di sistemi naturali con diversa complessità del contesto deformativo fragile

Le scale di rating per la valutazione della complessità del contesto strutturale fragile sono illustrate nella tabella seguente.

Rating	Complessità del contesto strutturale fragile
0.25	Complessità bassa: Un solo sistema di faglie con elevato grado di maturità
0.5	Complessità media: Numerosi sistemi di faglia con elevato grado di maturità
0.75	Complessità elevata: Numerosi sistemi di faglia di cui alcuni poco maturi
1	Complessità molto elevata: Numerosi sistemi di faglia tutti con basso grado di maturità

Tabella 15 – Scala di rating utilizzata per la valutazione del parametro  
“Complessità del contesto strutturale fragile”

I *system parameters* vanno quantificati e combinati al valore di IE per concludere il processo di valutazione dell'affidabilità del modello geologico.

### 3.3 Significato dell'R-Index

Il risultato dell'analisi è dato da un indice di affidabilità, R-Index, che può variare tra 0 e 10; la scala dei valori di R-Index è suddivisa in quattro classi di affidabilità, illustrate nella tabella seguente.

Come si evince dalla tabella, per ogni tratta, il valore R-Index fornisce indicazioni sui seguenti aspetti:

- Indicazioni sulla potenza degli strati rocciosi e i margini di variazioni che si possono attendere (da 10%-20% per affidabilità elevata a > 50% per affidabilità bassa);
- Indicazioni sulla posizione dei contatti litologici previsti nella tratta esaminata; la posizione definita per i contatti può quindi essere caratterizzata da un errore di  $\pm 25-50$  m per affidabilità elevata a  $\pm 100-200$  m per affidabilità bassa. Nel caso di affidabilità nulla i contatti previsti potrebbero essere assenti mentre potrebbero essere presenti contatti non previsti;
- Indicazioni sulla posizione delle zone di faglia previste nella tratta esaminata. Come per i contatti litologici, la posizione prevista può essere affetta da un errore compreso tra  $\pm 25-50$  m e  $\pm 100-200$  m, per valori di affidabilità elevata e bassa rispettivamente. In caso di affidabilità nulla, le faglie previste potrebbero essere assenti e invece si potrebbero incontrare zone di faglia diverse da quelle previste.

R-Index	Significato
10.0 – 7.6	<b>Affidabilità da buona a molto buona:</b> I limiti geologici e le faglie rappresentate sono certi/e e verranno intersecati/e con un errore di $\pm 25-50$ m; lo spessore degli orizzonti litologici ha un errore del 10-20%.
7.5 – 5.1	<b>Affidabilità da media a buona:</b> i limiti geologici e le faglie rappresentate sono certi/e verranno intersecati/e con un errore di $\pm 50-100$ m; lo spessore degli orizzonti litologici ha un errore del 30-50%. Sono possibili altre faglie oltre a quelle già previste.
5 – 2.6	<b>Affidabilità da bassa a media:</b> i limiti geologici e le faglie rappresentate sono certi/e verranno intersecati/e con un errore di $\pm 100-200$ m; lo spessore degli orizzonti litologici ha un errore del 30-50%. Sono possibili faglie principali ulteriori rispetto a quelle già previste.
2.5 – 0	<b>Non o poco affidabile:</b> i limiti geologici e le faglie rappresentate potrebbero essere assenti, mentre potrebbero essere riscontrati altri elementi; lo spessore delle formazioni non è vincolato. Potrebbero essere presenti elementi geologici non previsti.

Tabella 16 – Significato dell'R-Index

I valori di R-Index ottenuti dall'analisi del modello geologico sono presentati nel Profilo Geologico Longitudinale e illustrati sinteticamente nel paragrafo seguente.

### 3.4 Analisi e descrizione del valore dell'R-Index

Come si vede nel grafico di Figura 4 e si può leggere nella tabella dell'Allegato 1 “Sintesi dell'analisi dell'affidabilità dei dati geologici (R-Index)” i valori dell'R-index lungo il tracciato sono compresi tra 3.12 (affidabilità da bassa a media) e 8.70 (affidabilità da buona a molto buona).

Come già precedentemente accennato, l'analisi presentata nell'ambito della presente fase progettuale differisce principalmente, rispetto a quanto presentato nella precedente fase di Progetto Definitivo Approvato, nel settore compreso tra circa le Pk 50+000 e 53+500. In questo tratto infatti, a seguito delle nuove informazioni provenienti dal ritorno di esperienza della Maddalena, è stato possibile aggiornare l'analisi dell'R-Index.



Rapport de synthèse (côté Italie) – Relazione di sintesi (lato Italia)

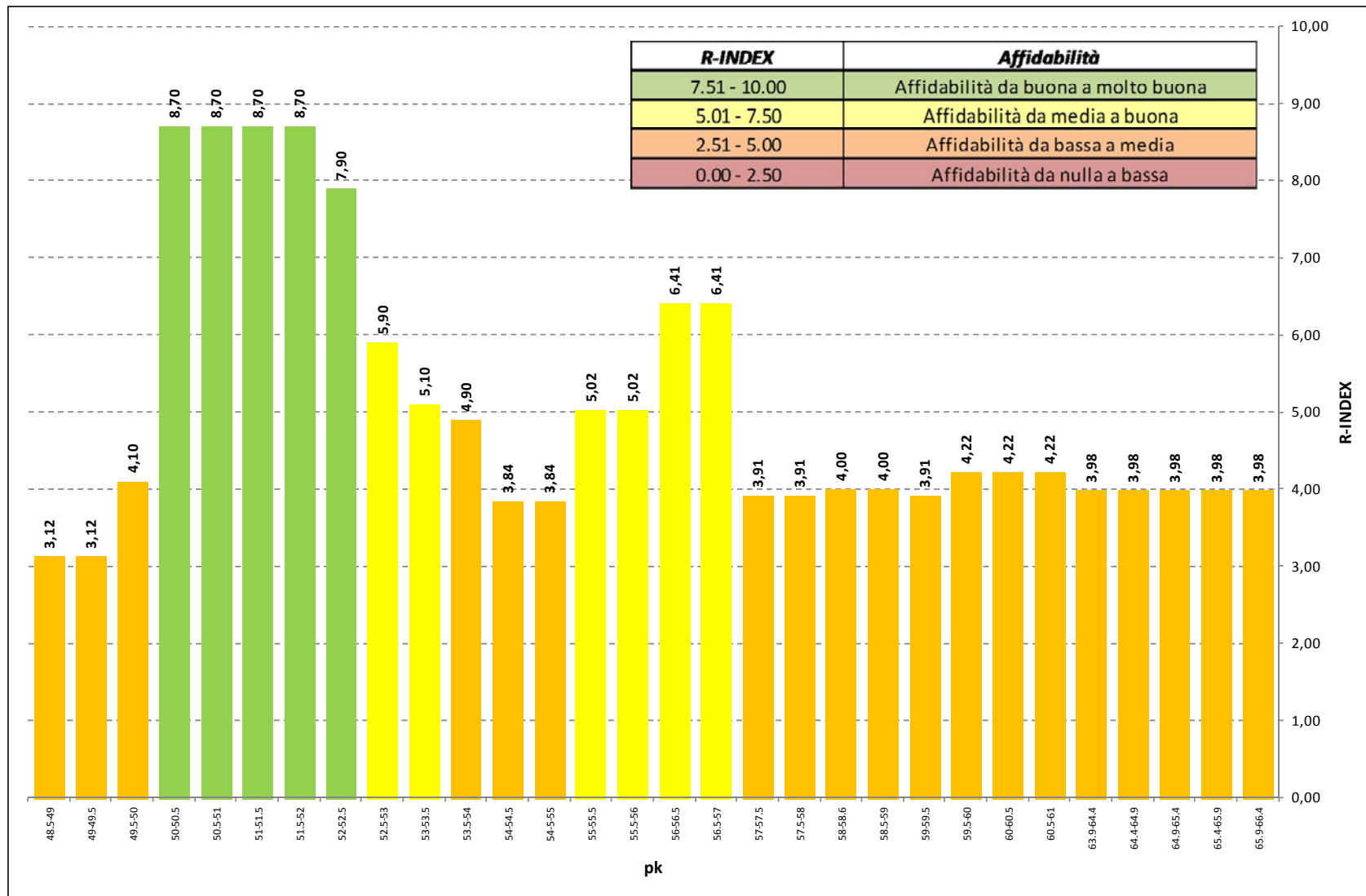


Figura 4 – Valori di R-Index calcolati per spezzoni di 500 m suddivisi nella tratta in esame

I fattori che condizionano principalmente il grado di affidabilità corrispondono alla presenza di coperture elevate (che possono arrivare a 1000-2000 m) e all'assenza di sondaggi profondi che permettano di raggiungere la quota dell'opera. Va inoltre sottolineato che lievi variazioni del valore di R-Index lungo il tracciato possono essere dovute alla locale variazione di alcuni fattori quali la percentuale di affioramento o l'estensione dell'area rilevata rispetto alla profondità del tunnel.

Nel dettaglio, come in parte già accennato, si distingue un settore all'incirca tra le Pk 50+000 e 52+500 caratterizzato da un grado di affidabilità da buona a molto buona, in considerazione dell'insieme dei dati e informazioni di nuova acquisizione derivanti dal Cunicolo esplorativo della Maddalena e del fatto che il suo tracciato e quello del Tunnel di Base in tale settore, per buona parte, coincidono. Di conseguenza in questo settore le informazioni provenienti dal Cunicolo possono essere proiettate con elevata accuratezza sul Tunnel di Base.

In misura simile anche tra le Pk 52+500 e 53+500 le informazioni acquisite nella prima parte del Cunicolo esplorativo, ove i tracciati divergono progressivamente spostandosi verso est, possono in buona parte, essere proiettate con un discreto margine di affidabilità sul Tunnel di Base. Questo settore è pertanto caratterizzato da un grado di affidabilità delle previsioni da medio a buono.

I settori sopra indicati, a valle dello scavo del Cunicolo della Maddalena, sono quelli interessati dai principali aggiornamenti rispetto alla precedente fase di Progetto Definitivo Approvato.

Altri settori con grado di affidabilità da medio a buono sono, come già descritti nel Progetto Definitivo Approvato:

- il settore compreso tra le Pk 55+000 e 56+000 circa, in cui risultano valori di R-Index di 5.02. L'aumento di affidabilità in questo settore è dovuto alla presenza di alcuni sondaggi, sebbene localizzati ad una certa distanza dal tracciato, nonché ad un rilevamento geologico di maggior dettaglio;
- il settore compreso tra le Pk 56+000 e 57+000 circa, corrispondente all'attraversamento del torrente Cenischia: il contesto geologico di riferimento in questa tratta è completamente diverso rispetto al resto del tracciato, essendo caratterizzato dalla presenza di depositi alluvionali. La complessità del contesto geologico è quindi principalmente legata all'eterogeneità dei depositi mentre sono ovviamente assenti deformazioni di carattere duttile o fragile. In questa tratta sono altresì presenti alcuni sondaggi che raggiungono la quota del tunnel, sebbene posti a notevole distanza dal tracciato.

Le restanti settori sono caratterizzati da un grado di affidabilità delle previsioni geologiche da basso a medio, con valori abbastanza omogenei.

### 3.5 Considerazioni sull'interpretazione dei valori di R-Index

I valori di R-Index ottenuti per le tratte esaminate e riportati nella Tabella dell'Allegato 1 indicano un grado di affidabilità complessiva variabile da basso a medio con un incremento del grado di affidabilità, localizzato, da buono a molto buono.

Rispetto a quanto presentato nella precedente fase di Progetto Definitivo Approvato, nell'attuale fase progettuale si hanno a disposizione una serie di importanti informazioni di nuova acquisizione che hanno permesso di affinare il livello delle conoscenze e di conseguenza il grado di affidabilità in alcuni importanti settori del Tunnel di Base. In particolare, come già accennato in precedenza, in ragione dei dati di sottosuolo provenienti

dallo scavo del Cunicolo esplorativo della Maddalena, il settore con affidabilità da buona a molto buona è attualmente quello compreso tra circa le pk 50+000 e 52+500 circa, nel quale i valori più elevati di affidabilità si hanno tra le pk 50+000 e 52+000 (R-Index pari a 8,7) settore dove il tracciato plano-altimetrico del cunicolo della Maddalena è quasi coincidente con quello del Tunnel di Base.

In questo tratto pertanto è stato possibile aumentare notevolmente l'affidabilità del Modello Geologico, nonostante le elevate coperture, che fino ad oggi avevano limitato, attraverso le sole indagini classiche, una raccolta di dati significativi alla quota di progetto. Inoltre anche altri settori, non direttamente esplorati dal Cunicolo della Maddalena, hanno beneficiato di un miglioramento delle conoscenze per mezzo della proiezione dei nuovi dati sul tracciato del Tunnel di Base, in particolare il tratto Pk 52+500 - 53+750 in cui il grado di affidabilità tende progressivamente a diminuire verso est, via via che il tracciato del cunicolo della Maddalena si allontana da quello del Tunnel di Base.

Più in dettaglio:

- il tratto compreso tra circa pk 50+000 e 52+500 è passato da affidabilità medio bassa, nella precedente fase di Progetto Definitivo Approvato, ad affidabilità da buona a molto buona nell'attuale fase di PRV (Figura 4);
- il tratto compreso tra le Pk 52+500 e 53+500 è passato da affidabilità medio bassa, nella precedente fase di Progetto Definitivo Approvato, ad affidabilità da media a buona nell'attuale fase di PRV (Figura 4).

Per i restanti settori, nei quali non è stato possibile proiettare le informazioni del ritorno di esperienza della Maddalena, rimangono valide le considerazioni fatte nella precedente fase di Progetto Definitivo Approvato.

Come già ricordato nella precedente fase progettuale, al fine di permettere una migliore e più corretta interpretazione dei valori di R-Index ottenuti per le diverse tratte esaminate e del loro significato, i risultati vanno tuttavia letti tenendo conto di importanti considerazioni, aggiuntive, alcune di carattere più generale relative al metodo R-Index e altre relative in modo specifico al progetto in esame.

Da un punto di vista generale di applicazione del metodo usato, valgono le seguenti considerazioni:

- Il metodo R-Index, per sua concezione, è un metodo “generale”, ovvero è stato definito e tarato in modo da essere applicabile a qualunque contesto geologico nonché a tutti i contesti geologici possibili. La scala globale di affidabilità delle previsioni illustrata in Tabella 16 va quindi riferita a tutti i possibili contesti geologici esistenti. Un valore di R-Index uguale a 10, ad esempio, è possibile solo in un contesto geologico semplice, caratterizzato da una notevole omogeneità litostratigrafica e dall'assenza di condizioni geologico-strutturali complesse (fasi deformative duttili numerose e sovrapposte e sistemi di faglia numerosi e complessi) e corroborato dall'esecuzione di un programma di indagini completo sia in termini di numero di indagini eseguite sia di metodi di indagine applicati. A titolo esemplificativo un valore di R-Index = 10 potrebbe essere ottenuto in un bacino sedimentario con strati orizzontali sovrapposti e in assenza di pieghe o di sistemi di taglio distinti e in cui sia stato eseguito un programma di indagini completo, con esecuzione di sondaggi, di rilevamenti geologico e di indagini geofisiche. Com'è anche espresso nel paragrafo precedente, il grado di affidabilità delle previsioni geologiche è necessariamente determinato anche dalla complessità delle condizioni lito-tettoniche locali e quindi, nel caso di un contesto litologico e tettonico

particolarmente complesso, quale un settore interno della catena alpina, può risultare basso e ‘non migliorabile’ anche in presenza di una elevata quantità di informazioni a disposizione. Non deve quindi stupire che in un contesto litologico e tettonico particolarmente complesso, quale un settore interno della catena alpina, sia difficile ottenere un grado elevato di affidabilità delle previsioni geologiche. Tali considerazioni sono supportate da esperienze pregresse, anche recenti, in zone analoghe o addirittura limitrofe al progetto in esame: per esempio durante il recente scavo della galleria di sicurezza del Frejus, all’incirca parallela al tunnel stradale esistente posto ad un interasse di circa 50 m (quindi in una condizione teoricamente ottimale per una diretta estrapolazione dei dati geologici e una elevata affidabilità delle previsioni lungo la galleria in fase di esecuzione) si è osservata una locale notevole differenza circa la sequenza di litotipi attraversati dalle due opere e la posizione dei contatti sia litologici che tettonici. Ciò dimostra l’oggettiva difficoltà nel fornire previsioni affidabili in contesti geologici complessi e come la sovrapposizione di più fasi deformative possa determinare condizioni geologiche e strutturali molto diverse anche nello spazio di poche decine di metri nonostante la disponibilità di un “tunnel pilota” adiacente. Nel caso specifico dell’opera in esame, quindi, la complessità generale del contesto geologico di per sé limita fortemente la possibilità concreta di giungere a livelli di affidabilità elevati;

- Il tipo di informazione fornita dal metodo R-Index riguarda esclusivamente l’affidabilità della previsione geologica lungo il tracciato e non le caratteristiche del tipo di roccia o la qualità dell’ammasso interessato dallo scavo. Il valore di R-Index ci dice quindi se è probabile che in una determinata posizione si incontrino o meno il litotipo o il contatto litologico o la zona di faglia prevista. Nessuna informazione, invece, viene fornita circa le caratteristiche del litotipo (valori di resistenza, grado di fratturazione, permeabilità ecc). La presenza di un valore di R-index basso non è quindi indicativa di un ammasso con caratteristiche scadenti, così come un valore di R-index elevato non è garanzia di una roccia con buone caratteristiche dal punto di vista dello scavo del tunnel. La scelta di separare la valutazione dell’affidabilità delle previsioni geologiche dalla valutazione dell’affidabilità della parametrizzazione geomeccanica è stata fatta proprio per evitare ambiguità circa l’interpretazione del valore di R-Index; una valutazione circa l’affidabilità della parametrizzazione geomeccanica è infatti rappresentata dal valore di GR-Index (descritto nei capitoli seguenti): come illustrato nel seguito, riguardo la parametrizzazione geomeccanica e per la tratta in esame si ottiene un grado di affidabilità dei parametri geomeccanici variabile da medio a buono e solo localmente basso (in corrispondenza delle zone di faglia).

Per quanto riguarda specificatamente il grado di affidabilità delle previsioni geologiche lungo il Tunnel di Base e il Tunnel di Interconnessione, è opportuno considerare i seguenti fattori:

- Come dimostrato precedentemente va evidenziato che, al di là della complessità geologica che influenza fortemente il valore di R-Index la morfologia dell’area di progetto pone difficoltà logistiche oggettive per l’esecuzione di un programma di indagini completo ed esaustivo e quindi limita la possibilità concreta di ottenere valori di affidabilità elevati; ciò è anche dimostrato nel seguito:
- In termini di accessibilità ai siti di indagine, si osserva come il settore caratterizzato da grado di affidabilità inferiore coincida con le zone di cresta a cavallo del confine di stato e poste alle quote più elevate (a ridosso dei 3000 m di quota). In tali sottotratte corrispondenti l’esecuzione di sondaggi o di un rilevamento geologico di dettaglio

risulta quindi particolarmente ardua, con conseguente impatto negativo sul valore di R-Index;

- I settori con grado di affidabilità inferiore coincidono anche con le zone in cui il tunnel è caratterizzato dalle coperture massime, localmente superiori ai 2000 m. In aggiunta alle difficoltà di accesso sopra descritte, la presenza di coperture comprese tra 1500 e 2000 m lungo una tratta di circa 13 km del tracciato pone seri limiti di fattibilità di un programma di indagine efficace: le possibilità concrete di eseguire tra 15 e i 20 sondaggi carotati profondi oltre 1500 m in zone montuose difficilmente accessibili appare poco realistico, così come la possibilità di eseguire una campagna di indagini geofisiche che copra un'area di oltre 10 km e raggiunga le profondità necessarie in tali zone.

Da quanto sopra espresso è possibile concludere che, in un contesto geologico-strutturale complesso e caratterizzato da zone ad elevata copertura e di difficile accesso, il metodo più efficace in termini di costi vs benefici per implementare il modello geologico e aumentare l'effettiva conoscenza delle condizioni geologiche lungo l'opera consiste nell'eseguire un programma sistematico di indagini in avanzamento durante la fase di scavo. Come verrà descritto nei capitoli successivi, l'esecuzione di un programma di indagini sistematiche in avanzamento rappresenta anche una delle più importanti misure di mitigazione dei rischi geologici durante la fase di scavo.

#### **4. Analisi dell'affidabilità dei dati geomeccanici – Metodo GRA (Geomechanical Reliability Analysis)**

Nel capitolo precedente si è mostrato come il metodo R-Index per la valutazione dell'affidabilità dei dati geologici non fornisca informazioni circa l'affidabilità delle caratteristiche geomeccaniche stimate per gli ammassi rocciosi. E' stato quindi sviluppato un metodo per la valutazione dell'affidabilità dei parametri geomeccanici stimati: nei paragrafi che seguono si espone la metodologia per l'Analisi dell'affidabilità dei dati geomeccanici (Geomechanical Reliability Analysis o GRA) mediante l'applicazione del GR-Index (Bianchi & Airoidi, in prep.). Il GR-Index indica il grado di incertezza dei parametri geomeccanici considerati.

In linea generale, il grado di affidabilità dei dati geomeccanici stimati in base alle prove in situ e / o di laboratorio eseguite, è funzione essenzialmente del grado di INCERTEZZA legata alla rappresentatività dei campioni raccolti e alla rappresentatività dei valori ottenuti per i parametri rispetto al volume complessivo di ammasso roccioso interessato dallo scavo. Quanto maggiori saranno il numero e la distribuzione dei campioni raccolti e delle prove eseguite, tanto maggiore sarà la loro rappresentatività e l'affidabilità delle caratteristiche geomeccaniche stimate.

E' quindi possibile esprimere l'incertezza legata alle caratteristiche geomeccaniche stimate in termini percentuali come risultante dal prodotto di tre parametri principali, anch'essi classificati in termini percentuali. I tre parametri sono:

- D o provenienza del dato,
- N o rilevanza del dato (numero di dati rapportati alla lunghezza del tratto lungo il quale l'opera attraversa una medesima litologia),
- S o dispersione statistica del set di dati disponibili.

Per ciascuno dei tre parametri i dati sono stati classificati in modo da attribuire loro uno specifico valore percentuale, inversamente proporzionale all'affidabilità del dato per il

**Rapport de synthèse (côté Italie) – Relazione di sintesi (lato Italia)**

---

corridoio progettuale oggetto d'analisi. A ogni parametro così calcolato corrisponde, infine, un 'peso percentuale' stabilito arbitrariamente in base all'importanza attribuita allo specifico parametro.

Questa metodologia ha il duplice scopo di:

- valutare in modo obiettivo il set dei dati geomeccanici, anche in termini di possibili indagini integrative successive;
- integrare la valutazione dei rischi nella progettazione di un'opera in sotterraneo quale il Tunnel di Base della NLTL.

La metodologia proposta è illustrata schematicamente nella figura seguente.

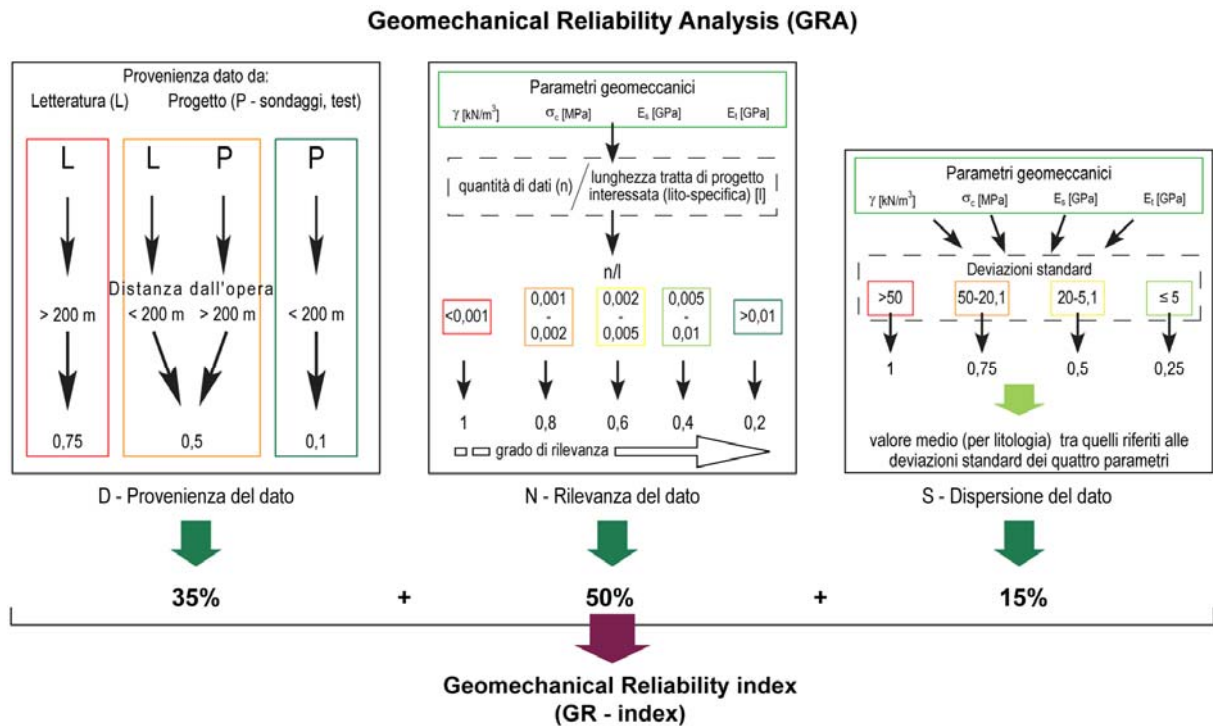


Figura 5 – Grafico di sintesi della metodologia di analisi dell'affidabilità dei dati geomeccanici (GRA)

I risultati del processo di discriminazione dei tre parametri di valutazione di cui sopra sono presentati nella tabella in Allegato 2 e nella fincatura "Grado di affidabilità dei dati geomeccanici" rappresentata nei profili in scala 1:25,000 di corredo alle relazioni geomeccanica (PRV C3B TS3 0100) e alla presente nota. Per quanto riguarda l'applicazione del punto 'b' di cui sopra, si rimanda appunto al "Profilo di sintesi con individuazione dei rischi" (PRV C3B TS3 0089).

#### 4.1 Dati di partenza e loro provenienza (parametro D)

Come visto nei capitoli precedenti, i parametri geomeccanici usati per la definizione delle 11 unità geomeccaniche (UG) proposte risultano dall'integrazione di

- dati di sondaggi, test e rilievi eseguiti in fasi progettuali precedenti, elaborati e sintetizzati nella “Relazione geomeccanica per le opere in sotterraneo” APR-B2/-TS2-0055-C;
- dati da sondaggi, test e rilievi eseguiti più recentemente nell'ambito di questo progetto;
- dati di letteratura, da studi eseguiti nell'ambito di altri progetti, per le litologie interessate dalla NLTL ma delle quali non fossero disponibili altri dati oppure ad integrazione dei dati disponibili.

La Tabella seguente è uno stralcio della tabella di sintesi dei parametri geomeccanici elaborata, per le diverse litologie, e presentata per intero nell'Allegato 1. In essa sono distinte le informazioni oggetto di integrazione sulla base di nuovi dati di progetto o di dati di letteratura (in arancione) e quelle rimaste invariate rispetto alle fasi progettuali precedenti

La Tabella seguente è uno stralcio della tabella di sintesi dei parametri geomeccanici elaborata, per le diverse litologie, e presentata per intero nell'Allegato 1. In essa sono distinte, nelle litologie interessate, le informazioni oggetto di integrazione provenienti dal ritorno di esperienza della Maddalena (in rosso tra parentesi).

In termini generali, per i tratti coperti dal ritorno di esperienza della Maddalena, ai fini di una rigorosa scelta dei migliori parametri di calcolo, è consigliabile utilizzare gli effettivi parametri *as built* che definiscono le condizioni riscontrate in fase di scavo. Per gli altri settori non direttamente interessati dallo scavo del cunicolo esplorativo, o dove le condizioni geologico-geomeccaniche non possono essere estrapolate sul Tunnel di Base, rimane valida la classificazione definita in fase di Progetto Definitivo Approvato, a cui è preferibile far riferimento.



**Rapport de synthèse (côté Italie) – Relazione di sintesi (lato Italia)**

Litologia <i>Lithologie</i>		$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]			$\sigma_c$ [MPa]			$E_s$ [GPa]			$E_t$ [GPa]		
		min	med <i>moy</i>	max	min	med <i>moy</i>	max	min	med <i>moy</i>	max	min	med <i>moy</i>	max
1	TCS	27.6	27.8	28.5	42.8	72.4	117.5	23.7	43.3	102.8	29.4	49.5	102.2
5	AMC	26,1 (26.3)	26,8 (26.8)	28,1 (27.2)	34,5 (138.8)	149,5 (183.8)	386,1 (236.0)	27.0 (33.5)	42,3 (37.5)	71,4 (50.7)	20,2 (46.2)	50.0 (55.5)	75,9 (70.8)
7	CI	27.2 (26,5)	27.8 (27,6)	28.3 (29,0)	36.9 (37,7)	97.9 (85,7)	193.9 (152)	31.2 (17,3)	49.6 (46,8)	86.1 (76,0)	36.7 (20,9)	54.5 (52,3)	73.4 (75,2)

*Tabella 17 – Sintesi dei parametri utilizzati nella valutazione del grado d'affidabilità dei dati geomeccanici - esempio per tre delle litologie interessate dalla NLTL ('TCS' calcemicascisti Dora Maira; 'CI' micascisti e gneiss minuti del Complesso di Clarea; 'GDng, tG, tng, tGsb' anidriti e gessi). Per ogni litologia sono riportati i valori minimo (min), medio (med/moy) e massimo (max) del set di dati.  $\gamma$  - peso di volume,  $\sigma_c$  - resistenza a compressione monoassiale,  $E_s$  - modulo d'elasticità per la roccia intatta,  $E_t$  - modulo di deformazione. In rosso tra parentesi i dati derivanti dal ritorno di esperienza del cunicolo della Maddalena.*

Il primo parametro di valutazione della qualità dei dati geomeccanici nasce appunto dalla constatazione sulla provenienza dei dati direttamente da sondaggi/prove eseguite nelle fasi di progettazione della NLTL, o da sorgenti esterne. Appartengono a questa seconda categoria i dati relativi ai calcemicascisti del complesso Dora Maira, ottenuti dalla pubblicazione di Stragiotti *et al.* (1979) in seguito agli studi fatti per la realizzazione della Galleria Tanze nel settore di Bussoleno, e i parametri geomeccanici assunti per le rocce di faglia. Questo porta ad una prima distinzione tra:

- dati ricavati da indagini eseguite nell'ambito del progetto (**P**)
- dati ricavati da letteratura disponibile e riguardanti la stessa area o zone limitrofe (**L**).

Un ulteriore criterio di distinzione è dato dalla distanza della fonte del dato rispetto all'asse del tunnel. I dati disponibili sono quindi stati ulteriormente distinti in:

- dati da sondaggi / test 'vicini' ( $\leq 200$  m) all'opera,
- dati da sondaggi / test 'lontani' ( $> 200$  m) dall'opera,

I valori attribuiti ai diversi tipi di dati sono definiti come segue:

- ai dati di letteratura (L) "lontani" è stato attribuito un valore 0.75 (o 75% d'INAFFIDABILITÀ);
- ai dati di progetto (P) 'lontani' e a quelli di letteratura (L) 'vicini' è stato dato un valore 0.5 (o 50% d'INAFFIDABILITÀ);
- ai dati di progetto (P) 'vicini', infine, è stato attribuito il valore 0.1 (o 10% d'INAFFIDABILITÀ).

Ne consegue l'attribuzione dei tre specifici valori ai parametri relativi ad ogni litologia considerata ('P, L') (Tabella 17).

Rapport de synthèse (côté Italie) – Relazione di sintesi (lato Italia)

	tipo <i>type</i>	Descrizione <i>description</i>	val	Litologia <i>Lithologie</i>			D	
				P, L	%			
<b>Données / Dati - D</b>	P	Dati del progetto <i>Données du projet</i>	0.1	1	TCS	0.5	0.35	0.175
		Dati di progetto relativi a volumi/tipi di roccia geograficamente lontani dall'opera (> 200m) o <i>Données de projet rapportées aux volumes/types de roche géographiquement loin de l'ouvrage (&gt; 200m) ou</i>	0.5	5	AMC	0.1	0.35	0.035
	L	Dati di letteratura relativi a volumi/tipi di roccia paragonabili a quelli di progetto <i>Données de littérature rapportées aux volumes/types de roche comparables à celles du projet</i>		7	CI	0.1	0.35	0.035
		Dati da letteratura <i>Données de littérature</i>	0.75	23	rocce di faglia, carnirole <i>roches de faille, cargneules</i>	0.75	0.35	0.2625

Tabella 18– (Sinistra) Distinzione e parametrizzazione del 'dato' geomeccanico e (destra) esempio del calcolo eseguito per tre delle litologie di cui alla Tabella A4-1 e per le rocce di faglia (v. testo); val'- valore calcolato per il parametro D.

Poiché al parametro D è attribuito un peso percentuale uguale a 35% per la contribuzione alla definizione del grado di incertezza delle caratteristiche geomeccaniche, il valore percentuale ottenuto per i parametri P ed L è moltiplicato per 0.35 al fine di ottenere il valore di D da usare per il calcolo del GR-Index.

Si noti che, anche se le indagini superficiali e i sondaggi profondi eseguiti per il progetto del Tunnel di Base hanno interessato tutte le litologie, per alcune di esse mancano del tutto o in parte informazioni geotecniche dirette. Un caso è quello delle rocce di faglia e delle carnirole ed è riportato in Tabella 18 e in quelle dei tre capitoli che seguono, mentre altri casi sono evidenziati nei paragrafi d'analisi pertinenti. Di qui l'attribuzione di valori che esprimono 'scarsa affidabilità' (0.75 nel caso del parametro D) alle rocce di faglia e alle carnirole. Il fatto che tali tipi di roccia siano stati attraversati durante lo scavo delle discenderie o di opere vicine (ad esempio l'impianto idroelettrico di Pont Ventoux) da solo non implica una maggiore affidabilità della caratterizzazione geomeccanica che può essere implementata solo mediante l'esecuzione di prove in situ e/o di laboratorio.

### Rilevanza dei dati disponibili (parametro N)

Il parametro N di rilevanza dei dati disponibili è rappresentativo del numero di dati disponibili per ciascuno dei litotipi interessati dall'opera.

Il parametro N si calcola come rapporto tra il numero di dati disponibili e la lunghezza complessiva della tratta di tunnel interessata dal litotipo esaminato. Quindi:

$N = \text{numero prove eseguite per il parametro geomeccanico di interesse} / \text{lunghezza del tunnel nel litotipo esaminato.}$

In maniera analoga a quanto fatto per il parametro D, i valori del rapporto tra il numero di dati geomeccanici (i 4 principali considerati, Tabella A4-3) e la lunghezza complessiva della tratta

Rapport de synthèse (côté Italie) – Relazione di sintesi (lato Italia)

progettuale interessata dalla medesima litologia sono stati raggruppati in 5 classi; ad ognuna di tali classi è stato attribuito un valore percentuale. Le classi identificate sono elencate nel seguito:

- Classe 1: rapporto  $n/l > 0.01$ . Valore percentuale = 0.2
- Classe 2:  $0.005 < n/l < 0.01$ . Valore percentuale = 0.4
- Classe 3:  $0.002 < n/l < 0.005$ . Valore percentuale = 0.6
- Classe 4:  $0.002 < n/l < 0.001$ . Valore percentuale = 0.8
- Classe 5: rapporto  $n/l < 0.001$ . Valore percentuale = 1

N		Litologia <i>Lithologie</i>	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\sigma_c$ [MPa]	$E_s$ [GPa]	$E_t$ [GPa]	I [m]	n/l				n/l med / moy	%	Z	
n/l	val							$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\sigma_c$ [MPa]	$E_s$ [GPa]	$E_t$ [GPa]				
< 0.001	1 <sup>*x</sup>		n	n	n	n		$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\sigma_c$ [MPa]	$E_s$ [GPa]	$E_t$ [GPa]				
0.001 0.002	0.8	1	TCS	3	10	10	10	2160	0.8	0.8	0.6	0.6	0.7	0.5	0.35
0.002 0.005	0.6	8	AMC	62	55	22	22	738	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.5	0.1
0.005 0.01	0.4	7	CI	49	83	24	24	12450	0.6	0.4	0.8	0.8	0.65	0.5	0.325
> 0.01	0.2	23	rocce di faglia, carniole <i>roches de faille, cargneules</i>	-	-	-	-	2490	1	1	1	1	1	0.5	0.32

Tabella 19– (Sinistra) Parametrizzazione della rilevanza dei dati geomeccanici. 'n/l' è la quantità di dati (n) sulla tratta complessiva occupata dalla litologia (l). 1<sup>\*x</sup> 'o nessun dato'. (Destra) Esempio del calcolo di N eseguito per le tre litologie e per le rocce di faglia (v. testo); val'- valore calcolato per il parametro N;  $\gamma$  - peso di volume,  $\sigma_c$  - resistenza a compressione monoassiale,  $E_s$  - modulo d'elasticità per la roccia intatta,  $E_t$  - modulo di deformazione. In verde i valori aggiornati sulla base dei dati di nuova acquisizione.

Al parametro N è attribuito un peso percentuale uguale a 50% per la contribuzione alla definizione del grado di incertezza delle caratteristiche geomeccaniche. Quindi il valore percentuale ottenuto per il rapporto n/l per ognuno dei 4 parametri geomeccanici principali è moltiplicato per 0.5 al fine di ottenere il valore di N da usare per il calcolo del GR-Index come illustrato nella Tabella 19.

### Dispersione statistica del set di dati (parametro S)

L'ultimo parametro considerato riflette la dispersione statistica del set di dati disponibili per ciascun parametro geomeccanico.

Il parametro S corrisponde alla deviazione standard dei parametri geomeccanici  $\gamma$ ,  $\sigma_c$ ,  $E_s$  e  $E_t$  delle varie litologie.

Per computare S, i valori di deviazione standard sono quindi suddivisi in quattro classi, ad ognuna delle quali è attribuito un valore percentuale:

Rapport de synthèse (côté Italie) – Relazione di sintesi (lato Italia)

- Classe 1: dev.st.  $\leq 5$ . Valore percentuale = 0.25
- Classe 2:  $5.1 < \text{dev.st.} < 20$ . Valore percentuale = 0.5
- Classe 3:  $20.1 < \text{dev.st.} < 50$ . Valore percentuale = 0.75
- Classe 4: dev.st.  $> 50.1$ . Valore percentuale = 1

Dev. std - S	val		Litologia <i>Lithologie</i>	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\sigma_c$ [MPa]	$E_s$ [GPa]	$E_t$ [GPa]	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\sigma_c$ [MPa]	$E_s$ [GPa]	$E_t$ [GPa]			S	
				st. dev.	st. dev.	st. dev.	st. dev.	st. dev.	st. dev.	st. dev.	st. dev.	st. dev.	%		med moy
	>50	1 *x		0.5	24.6	25.0	21.1	0.25	0.75	0.75	0.75	0.15	0.63		0.09
50 20.1	0.75	5	AMC	0.4	27.5	49.1	11.3	0.25	0.75	0.50	0.50	0.15	0.50	0.08	
20 5.1	0.5	7	CI	0.4	35.4	19.8	17.5	0.25	0.75	0.50	0.50	0.15	0.50	0.08	
$\leq 5$	0.25	23	rocce di faglia, carniole <i>roches de faille, cargneules</i>	-	-	-	-	0.5	0.5	0.5	0.5	0.15	0.50	0.09	

Tabella 20– (Sinistra) Parametrizzazione della dispersione dei dati geomeccanici. 1\*x 'o nessun dato'. (Destra) Calcolo di S eseguito per le tre litologie e per le rocce di faglia (v. testo). 'val'- valore calcolato per il parametro S; 'st. dev.'-deviazione standard del set di dati;  $\gamma$  - peso di volume,  $\sigma_c$  – resistenza a compressione monoassiale,  $E_s$  - modulo d'elasticità per la roccia intatta,  $E_t$  - modulo di deformazione. In verde i valori aggiornati sulla base dei dati di nuova acquisizione.

Al parametro S è attribuito un peso percentuale uguale a 15% per la contribuzione alla definizione del grado di incertezza delle caratteristiche geomeccaniche. Quindi il valore percentuale ottenuto per la deviazione standard per ognuno dei 4 parametri geomeccanici principali è moltiplicato per 0.15 al fine di ottenere il valore di S da usare per il calcolo del GR-Index come illustrato nella Tabella 20.

## 4.2 Calcolo del grado di affidabilità (GR-index)

Il grado finale di incertezza dei dati geomeccanici (GR-Index) è calcolato come la somma dei valori dei tre parametri D, N e S e viene espresso in termini percentuali. Nella tabella seguente sono riportate le tre classi di incertezza identificate. Il GR-index è inversamente proporzionale al range percentuale che rappresenta ogni classe. Valori percentuali più alti (o 'gradi d'incertezza') corrispondono a gradi d'affidabilità inferiori, e viceversa.

<b>GR-index = (D, 35%) + (N, 50%) + (S, 15%)</b>		<b>Litologia Lithologie</b>		<b>GR- index</b>
<b>Grado d'incertezza Degré d'incertitude</b>	<b>Descrizione Description</b>	<b>1</b>	<b>TCS</b>	<b>62%</b>
<b>ELEVATO ELEVE</b> (bassa affidabilità $\geq 67$ % <i>fiabilité basse</i> )	Dati da sondaggi e test di laboratorio eseguiti al di fuori di questo progetto; dispersione dei dati elevata e rapporto n° sondaggi / lunghezza tratta in galleria $\leq 0.001$ <i>Données de forage et de laboratoire n'exécutées pas pour ce projet; dispersion élevée des données et rapport n° forages / longueur traite galerie <math>\leq 0.001</math></i>	<b>5</b>	<b>AMC</b>	<b>21%</b>
<b>MEDIO MOYEN</b> (affidabilità media 34 - 66 % <i>fiabilité moyenne</i> )	Dati da sondaggi e test di laboratorio eseguiti per questo progetto; dispersione dei dati medio-alta e rapporto n° sondaggi / lunghezza tratta in galleria 0.001 - 0.005 <i>Données de forage et de laboratoire exécutées pour ce projet; dispersion moyenne-élevée des données et/ou données incomplètes (valeurs manquants); rapport n° forages / longueur traite galerie 0.001 - 0.005</i>	<b>7</b>	<b>CI</b>	<b>44%</b>
<b>BASSO BAS</b> (affidabilità elevata $\leq 33$ % <i>fiabilité élevée</i> )	Dati da sondaggi e test di laboratorio eseguiti per questo progetto; dispersione dei dati bassa e rapporto n° sondaggi / lunghezza tratta in galleria $\geq 0.01$ <i>Données de forage et de laboratoire exécutées pour ce projet; dispersion basse des données; rapport n° forages / longueur traite galerie <math>\geq 0.01</math></i>	<b>23</b>	rocce di faglia, carnirole <i>roches de faille, cargneules</i>	<b>84%</b>

Tabella 21– Classi d'affidabilità suddivise per i parametri geomeccanici considerati nella progettazione, e loro descrizione. A destra è riportata la classificazione delle litologie considerate in questo capitolo.

Come si vede a destra in Tabella 21, le caratteristiche geomeccaniche definite per i calcescisti del Complesso Dora Maira e le rocce del Complesso di Clarea sono mediamente affidabili; elevata è invece l'affidabilità dei parametri relativi agli gneiss leucocratici dell'Ambin, e scarsa, infine, l'affidabilità dei parametri stimati per le rocce di faglia.

Un quadro completo di questa classificazione per tutte le litologie interessate dal tracciato progettuale della NLTL si ritrova nel paragrafo successivo e nell'Allegato 5.

### 4.3 Risultati del metodo GRA lungo il tracciato

I valori del GR-Index sono riferiti alle litologie prese separatamente, in modo analogo a quanto fatto nella classificazione delle unità geomeccaniche. La tabella seguente è uno stralcio di quella nell'Allegato 4 e sintetizza i risultati del processo di calcolo descritto in precedenza.

I valori riportati in rosso nella tabella sono quelli ottenuti per litologie di cui per la classificazione geomeccanica fossero disponibili o solo valori di letteratura, o set 'incompleti' di dati geotecnici. Per facilità di visualizzazione nella Tabella 11 i valori calcolati per le rocce fratturate, le rocce di faglia e le carnirole sono in nero ma esse, come già specificato in precedenza, sono state determinate e caratterizzate 'solo' in termini geologici, e non geotecnicamente mediante dati derivati dai sondaggi geognostici.

	<b>Litologia <i>Lithologie</i></b>	Lunghezza <i>longueur</i> [m]	<b>D</b>	<b>N</b>	<b>S</b>	<b>GR-index</b>
1	<b>TCS</b>	2160	0.175	0.35	0.09	62%
2	<b>Gcc</b>	4410	0.035	0.4	0.11	55%
3	<b>gck, TPG</b>	120	0.035	0.3	0.11	45%
4	<b>OMB, cl-b</b>	330	0.035	0.25	0.11	40%
5	<b>AMC</b>	738	0.035	0.1	0.08	21%
6	<b>AMA, AMD, AMF</b>	2611	0.035	0.35	0.07	45%
7	<b>CI</b>	12450	0.035	0.325	0.08	44%
9	<b>DGA</b>	1830	0.035	0.2	0.10	34%
10	<b>QSE</b>	2550	0.035	0.35	0.08	47%
22	<b>rocce fratturate <i>roches fracturées</i></b>	2054	0.175	0.45	0.08	70%
23	<b>rocce di faglia, carnirole <i>roches de faille, cargneules</i></b>	2490	0.263	0.5	0.08	84%
	<b>Depositi / <i>dépôts</i> ac, af, at, gi</b>	1470	0.035	0.1	0.075	21%

Tabella 22– Classificazione delle litologie lungo la tratta in analisi del TdB in base al GR-index.

Come si vede dalla Tabella 22 i valori del GR-index classificano come buona o media l'affidabilità dei dati geomeccanici relativi alla maggior parte delle litologie (campi verdi e/o gialli), mentre scarsa è l'affidabilità per le rocce di faglia e le carnirole.

Una descrizione dettagliata della variazione del GR-index longitudinalmente al tracciato è complicata, in quanto tutte e tre le classi d'affidabilità si succedono irregolarmente o a causa di frequenti alternanze litologiche, o per la presenza di contatti tettonici e zone di fratturazione.

In ogni caso si possono suddividere tre sottozone principali:

- ZONA 1: Pk 48+672-56+058: le rocce dei complessi di Clarea e d'Ambin sono caratterizzate da GR-index circa omogeneo, principalmente compreso tra 34% e 47%, salvo in corrispondenza delle zone di faglia (GR-index 84%, affidabilità bassa) e negli gneiss aplitici della formazione AMC (GR-index 21%, affidabilità elevata), il grado

d'affidabilità della caratterizzazione geomeccanica in questa lunga tratta è dunque principalmente 'medio'.

- ZONA 2: Pk 56+058-57+160: la caratterizzazione dei depositi quaternari risulta affidabile: il GR-index è infatti pari a 21% e risulta dalla somma di valori di D, N e S relativi a un set quantitativamente e qualitativamente significativo di dati da indagini e sondaggi eseguiti nell'ambito del progetto del Tunnel di Base. Il grado d'affidabilità della caratterizzazione geomeccanica in questa lunga tratta è dunque principalmente 'elevato'.
- ZONA 3: Pk 57+160-61+076 e pk 63+870-1+943 (interconnessione): eccezion fatta per le fasce affette da deformazione fragile (GR-index puntuale elevato e scarsa affidabilità del modello geomeccanico), le rocce della zona Piemontese e del Massiccio Dora Maira che verranno attraversate negli ultimi chilometri dell'opera in progetto sono caratterizzate da GR-index intermedio (40-62%) e corrispondente grado d'affidabilità dei dati geomeccanici. Il grado d'affidabilità della caratterizzazione geomeccanica in questa lunga tratta è dunque principalmente 'medio'.

Il tipo di informazione fornita dal metodo GR-Index riguarda esclusivamente l'affidabilità, per ogni litotipo, dei parametri e della caratterizzazione geomeccanica offerti. Il valore del GR-Index ci dice quindi se i parametri geomeccanici utilizzati siano più o meno affidabili e considerati rappresentativi dell'ammasso analizzato. Non si fornisce quindi alcuna informazione circa la qualità geomeccanica del litotipo e il suo comportamento (valore della resistenza alla compressione o del modulo di deformazione). La presenza di un valore di GR-index basso non è quindi indicativa di un ammasso con caratteristiche scadenti, così come un valore di GR-index elevato non è garanzia di una roccia con buone caratteristiche dal punto geomeccanico

## **5. Incertezze del Modello Geologico di Riferimento e registro delle incertezze**

Prima di procedere con l'analisi dei rischi si è provveduto a individuare le incertezze di tipo geologico, geotecnico ed idrogeologico lungo il tracciato, e a definire quali di tali incertezze siano potenziali sorgenti di rischio. Ciò è stato fatto tenendo conto sia del contesto geologico visualizzabile sulla cartografia e sulle sezioni di progetto, sia della valutazione dell'affidabilità del modello geologico-geomeccanico eseguita mediante R-index e GR-index.

Conformemente a quanto dettagliato nella Raccomandazione AFTES n° GT32.R2F1 l'incertezza è definibile rispetto a 5 tipologie di elementi:

- tipo 1 – lacune nelle informazioni geologiche;
- tipo 2 – localizzazione precisa di elementi quali contatti tra litologie e posizione delle zone di faglia;
- tipo 3 – caratterizzazione geomeccanica e/o idrogeologica di elementi 'certi' quali faglie, fasce carniozzate, etc. nell'ammasso;
- tipo 4 – presenza, numero o caratteristiche d'elementi geologici 'probabili' (e.g. zone permeabili o fratturate, zone carsificate o filoni di quarzo);
- tipo 5 – dispersione naturale delle proprietà geotecniche / idrogeologiche di rocce e terreni.

Una volta identificate le incertezze lungo il tracciato e definito il carattere geologico (G), idrogeologico (H) o geotecnico (T), vanno identificate le incertezze che siano anche potenziali fonti di rischio, prese in considerazione nella successiva analisi del rischio. L'incertezza

relativa alla caratterizzazione di una faglia, per esempio, ha carattere sia geotecnico sia idrogeologico, e può tradursi in una criticità effettiva nelle fasi esecutive dell'opera. Una serie di contatti geologici tra rocce ben caratterizzate geotecnicamente e le cui proprietà geomeccaniche siano analoghe, invece, può costituire una incertezza ma non condurrà a rischi significativi.

### **5.1 Registro delle incertezze e identificazione delle fonti di rischio**

La tabella seguente costituisce il registro delle incertezze e delle sorgenti di rischio; dalla discenderia di Modane in Francia a Bussoleno in Italia, il tracciato è suddiviso in dodici 'macro-tratte' in base alle litologie dominanti in ognuna. A ogni macro-tratta sono associate ulteriori suddivisioni, e ognuna di queste corrisponde a uno o più tipi d'incertezza. Dove le progressive d'inizio e fine della 'sotto-tratta' sono in grassetto l'incertezza corrispondente interessa tutta la macro-tratta. Le righe evidenziate in grigio permettono di visualizzare direttamente le tratte dove le incertezze si traducono in rischi. Tutto il tracciato in analisi è caratterizzato da una criticità di tipo geotecnico (T) dovuta principalmente alla dispersione delle proprietà geomeccaniche dell'ammasso.



Settore <i>Secteur</i>	pk inizio <i>début</i>	Pk fine <i>fin</i>	Lunghezza <i>Longueur</i> (m)	Tipo d'incertezza / <i>Type d'incertitude</i>							Sorgenti di rischio <i>Sources de Risque</i>					
				pk inizio <i>début</i>	pk fine <i>fin</i>	Descrizione <i>Description</i>	Tipo <i>Type 1</i>	Tipo <i>Type 2</i>	Tipo <i>Type 3</i>	Tipo <i>Type 4</i>	Tipo <i>Type 5</i>	pk	G / H / T			
<b>Complesso di Complex de Clarea</b>	48672	53741	5069	48672	53741		H, T				H, T	H, T	48672 - 53741	H, T		
				49330	49350	Contatto tettonico / <i>Contact Tectonique</i>		G		H, T						
				50085	50100	Contatto tettonico / <i>Contact Tectonique</i>		G		H, T						
				50440	50465	Contatto tettonico / <i>Contact Tectonique</i>		G		H, T						
				50821	50834	Contatto tettonico / <i>Contact Tectonique</i>		G		H, T						
				51222	51250	Contatto tettonico / <i>Contact Tectonique</i>		G		H, T						
				51285	51310	Contatto tettonico / <i>Contact Tectonique</i>		G		H, T						
				51780	51806	Contatto tettonico / <i>Contact Tectonique</i>		G		H, T						
				51930	51950	Contatto tettonico / <i>Contact Tectonique</i>		G		H, T						
				52018	52038	Contatto tettonico / <i>Contact Tectonique</i>		G		H, T						
				52310	52335	Contatto tettonico / <i>Contact Tectonique</i>		G		H, T						
				52602	52634	Contatto tettonico / <i>Contact Tectonique</i>		G		H, T						
<b>Complesso Complex d'Ambin</b>	53741	55029	1288	53741	55029					H, T	H, T			H, T		
				53741	54008	Alternanze litologiche <i>Alternances lithologiques</i>	H, T									
<b>Zona a Scaglie Tettoniche Zone à écailles tectoniques</b>	55029	56050	1021	55029	56050		H	G			H, T	H, T	55170 - 55400	T		
				55170	56050	orizzonti di scollamento <i>horizons de décollement</i>				H, T				55660 - 55820	H	
<b>V. Cenischia</b>	56050	57100	1050	56050	57100	depositi sottoconsolidati - <i>dépôts meubles</i>	G, H				H, T	H, T		G, H, T		
<b>Zona Piemontese Zone Piémontaise</b>	57100	60680	3580	57100	58540	calcescisti / <i>calc-schistes</i>	G, H						57100 - 60680	H, T		
				58540	60680	calcescisti / <i>calc-schistes</i>	H, T									
				57780	58820	Faglia di / <i>Faille de Venaus</i>					H, T					H, T
				54440	58480	faglia / <i>faille</i>		G			H, T					
				59630	59670	faglia / <i>faille</i>		G			H, T					H, T
				60240	60290	GCK (?)		G			H, T					
				60330	60370	faglia / <i>faille</i>		G			H, T					H, T
				60550	60600	GCK (?)		G			H, T					
<b>Piana di Susa</b>	61080	63870	2790	60680	61080	ofioliti / <i>ophiolites</i>	G							G, T		
				60680	60720	Contatto tettonico / <i>Contact Tectonique</i>		G		H, T					H	
				60880	60920	Contatto tettonico / <i>Contact Tectonique</i>		G		H, T						
<b>Massiccio Massif Dora Maira</b>	63870	1900	2030	63870	1900		H					H, T		G, H, T		
				63870	250	(380 m, Coldimosso)	G									
				1550	1900	(350 m, Bussoleno)	G									

Tabella 23 – Registro delle incertezze e dei rischi geologici, geotecnici e idrogeologici lungo il tracciato del Tunnel di Base in territorio italiano fino all'imbocco delle gallerie d'interconnessione a Bussoleno. Carattere (G) geologico, (H) idrogeologico o geotecnico (T) dell'incertezza identificata.

## 6. Metodi di scavo del Tunnel (lato Italia)

### 6.1 Tunnel di Base lato Italia (gallerie di linea inclusi cameroni all'imbocco)

Al fine di procedere con l'analisi del rischio è necessario definire il metodo di scavo adottato per le singole tratte del tunnel. Infatti uno stesso tipo di fonte di rischio può portare a condizioni critiche e grado di rischio differenti a seconda del metodo di scavo. In questo senso l'attraversamento di una zona di faglia con il metodo tradizionale, grazie anche a una maggiore flessibilità (a scapito della velocità media di avanzamento), può portare a un livello di rischio più basso rispetto all'attraversamento con scavo meccanizzato.

Il Tunnel di Base tra il confine e l'imbocco est a Susa sarà scavato principalmente con metodo meccanizzato procedendo da ovest verso est; fanno eccezione alcune brevi tratte per le quali è previsto lo scavo in tradizionale.

L'uso di una TBM scudata, grazie allo scudo ed alla posa dei conci al di sotto della coda dello scudo (che garantisce una continuità di protezione tra scudo ed anello di conci), è preferibile in considerazione delle condizioni geologiche-geomeccaniche previste, ma lo scavo con TBM aperta rimane tuttavia fattibile mediante l'uso di dispositivi e sezioni tipo adeguate.


L'uso di una TBM scudata che possa lavorare in modalità chiusa/confinata sotto il val Cenischia ed in modalità aperta nelle altre tratte è preferibile rispetto ad una TBM con grippers per l'attraversamento della zona a scaglie, della Val Cenischia e delle rocce verdi ed è fattibile in tutte le altre tratte. Gli studi di Progetto Definitivo Approvato, convalidati dal Comitato Esperti Tunnel del 07/09/2012, hanno mostrato la fattibilità dello scavo con TBM mista scudata (mixshield), appropriata e tecnicamente avanzata, fino alla pk 52+000 circa.

Si è quindi prevista che questa fresa venga montata nell'area di cantiere della Maddalena e scavi la Galleria Maddalena 2 fino ad immettersi sul BP del TdB e successivamente scavi la sezione corrente del TdB fino all'imbocco. La fresa del BD viene invece montata in un'apposita caverna lungo il BD e scava la sezione corrente fino all'imbocco (anche per il BD del TB e verso imbocco Est, verrà usata una TBM mista scudata).

Per la tratta dall'estremità ovest dell'area di sicurezza di Clarea all'innesto/ montaggio delle frese miste scudate, la lunghezza limitata della tratta (circa 1 km) porta ad adottare lo scavo con metodo tradizionale (esplosivo) in questa tratta.

Per la tratta dalla fine dell'area di sicurezza di Modane fino all'area di sicurezza di Clarea, il tracciato interessa litologie di vario tipo (principalmente gessi, quarziti, dolomie) fino ad arrivare al Massiccio d'Ambin (micascisti di Clarea). Si tratta di ammassi rocciosi tendenzialmente di buona qualità, contenenti al loro interno delle zone fratturate e faglie, con caratteristiche geomeccaniche da mediocri a scadenti. Data la migliore adattabilità a questi litotipi si prevede, in continuità con le fasi progettuali precedenti (APR, PP2, PD2), l'uso di una TBM aperta.

La tabella seguente riassume i metodi di scavo per la tratta Modane-Susa.

PK canna BP	PK canna BD*	Metodo di scavo / sezione	Senso dello scavo
61+076-61+021	61+076-60+934	Sezioni allargate in corrispondenza degli imbocchi (scavo con fresa mista scudata poi alesaggio con martello demolitore)	

61+021-60+711	60+934-60+711	Scavo con fresa mista scudata – modalità aperta – procedura speciale per scavo rocce verdi	↑
60+711-57+400	60+711-57+400	Scavo con fresa mista scudata – modalità aperta	↑
57+400-55+950	57+400-55+950	Scavo con fresa mista scudata – modalità chiusa o confinata	↑
55+950-53+514.8	55+950-53+690	Scavo con fresa mista scudata – modalità aperta	↑
53+514.8-53+417	53+690-53+650	Caverna per montaggio e lancio fresa mista scudata per BD/	↑
		Innesto tra Maddalena 2 e TdB per BP	↑
53+417-52+598	53+650-52+598	Scavo in D&B – sezione corrente	↑
52+598-51+759.5	52+598-51+759.5	Galleria in linea area di sicurezza di Clarea	↓
51+759.5-51+680	51+759.5-51+680	Scavo in D&B – sezione corrente	↓
51+680-51+640	51+680-51+640	Caverna per smontaggio TBM aperta	↓
51+640-33+550	51+640-33+325	Scavo con TBM aperta (grippers)	↑

Tabella 24 - Sintesi delle metodologie di scavo per la tratta da Modane a Susa

## 6.2 Tunnel di Interconnessione (gallerie di linea compresi cameroni e rami)

La metodologia di scavo proposta è in tradizionale. Si prevede l'uso di esplosivo principalmente sulle base delle seguenti motivazioni:

- 1) Durezza della formazione rocciosa: secondo il profilo geologico-geomeccanico, il GSI e l'UCS indicano che la roccia è competente, per cui poco si presterebbe ad uno scavo con martellone.

Esperienze precedenti: nella zona in oggetto sia la galleria ferroviaria Tanze prima che la galleria autostradale A32 Prapontin poi, sono state scavate interamente all'esplosivo fatta eccezione per gli imbocchi che sono stati scavati con martellone fino ad incontrare condizioni idonee per lo scavo con esplosivo. E' previsto monitorare la geometria dei binari nella zona di influenza dello scavo del camerone della galleria del binario pari del TdI sotto la linea storica di superficie.

## 7. Analisi dei rischi

Di seguito è illustrata la terminologia utilizzata per l'analisi dei rischi lungo il tracciato del Tunnel di Base. Il risultato dell'analisi è il registro dei rischi presentato alla fine. I rischi geologici sono valutati in funzione delle condizioni geologiche/geomeccaniche di cui si è parlato in precedenza, e del metodo di scavo previsto per ogni tratta (v. cap. 6).

### 7.1 Terminologia

Questo paragrafo fornisce una sintesi della terminologia adottata nell'analisi dei rischi. Le definizioni proposte sono conformi alla terminologia descritte nelle « Raccomandazioni per la caratterizzazione delle incertezze e dei rischi geologici, idrogeologici e geotecnici » (GT32.R2F1), cui si rimanda per una descrizione di dettaglio circa la scelta e la spiegazione del vocabolario utilizzato. Per un'esposizione completa della metodologia e dei relativi allegati si consiglia la consultazione dello stesso testo nella versione francese « Recommandations sur la caractérisation des incertitudes et des risques géologiques, hydrogéologiques et géotechniques » (Tunnels et Espace Souterrain - N. 232 - 2012).

#### 7.1.1 Probabilità

La probabilità indica il grado di eventualità che un evento si verifichi. In quest'analisi sono distinte quattro classi di probabilità.

Scala di Probabilità / <i>Echelle de vraisemblance</i>	
1	Improbabile / <i>Improbable</i>
2	Molto poco probabile / <i>Très peu probable</i>
3	Poco probabile / <i>Peu Probable</i>
4	Possibile / <i>Possible</i>

Tabella 25 – Scala di probabilità per l'analisi dei rischi

### 7.1.2 Impatto o gravità

La valutazione dell'impatto o delle criticità sul progetto è stata eseguita sulla base di quattro classi, in funzione dell'effetto degli elementi critici su costi e i tempi di realizzazione:

Scala di gravità / <i>Echelle de gravité</i>			
Livello / <i>Niveau</i>		Costo economico / <i>Enjeu coût</i>	Costo temporale (ritardi) / <i>Enjeu délai</i>
1	Lieve / <i>Faible</i>	< 5% dell'importo totale / < 5% du montant	< 1 settimana / < 1 semaine
2	Medio / <i>Moyen</i>	5÷10 dell'importo totale / 5÷10 du montant	1 settimana - 1 mese / 1 semaine - 1 mois
3	Forte / <i>Forti</i>	10÷30 dell'importo totale / 10÷30 du montant	1 - 3 mesi / 1 - 3 mois
4	Molto forti / <i>Très Forti</i>	> 30% dell'importo totale / > 30% du montant	> 3 mesi / > 3 mois

Tabella 26 – Scala di gravità definita nell'analisi dei rischi

### 7.1.3 Grado di rischio

La valutazione del rischio consiste nell'identificare la probabilità d'occorrenza P per ogni criticità, nell'associare a ognuna uno o più impatti specifici (I) in termini di costi e tempi, e nel valutare il livello di rischio finale risultante R. Quest'ultimo è definito dal prodotto della probabilità per l'impatto ( $R = P * I$ ) sulla base di una matrice di rischio (cf. Tabella 27).

Matrice del rischio <i>Matrice du risque</i>					
<b>Probabilità <i>Vraisemblance</i></b>	Possibile / <i>Possible</i>	4	8	12	16
	Poco probabile / <i>Peu Probable</i>	3	6	9	12
	Molto poco probabile / <i>Très peu probable</i>	2	4	6	8
	Improbabile / <i>Improbable</i>	1	2	3	4
		Lievi / <i>Faibles</i>	Medie / <i>Moyennes</i>	Forti / <i>Fortes</i>	Molto forti / <i>Très Fortes</i>
<b>Conseguenze / <i>Conséquences</i></b>					

Tabella 27 – Matrice del rischio in funzione della probabilità d'occorrenza e dell'impatto delle criticità

Dalle considerazioni precedenti risulta una classificazione del rischio a quattro livelli, com'è illustrato nella seguente tabella.

<b>Scala dei gradi di rischio / <i>Echelle des niveaux de risque</i> (NR)</b>	
NR < 2	Minore <i>Mineur</i>
Non son richieste azioni / <i>Aucune action requise</i>	
2 < NR < 5	Significativo <i>Significativo</i>
La costruzione può esordire, i fattori di rischio devono essere oggetto di controllo specifico mediante procedure apposite, e il progetto deve essere eventualmente completato da una serie di contromisure predefinite, ammettendo di poter fare adattamenti durante la fase esecutiva / <i>La construction peut débuter, les facteurs de risque doivent faire l'objet d'un suivi spécifique par le biais de procédures adaptées et le projet doit éventuellement être complété par une série de contre-mesures prédéfinies pouvant faire l'objet d'adaptations durant la phase d'exécution</i>	
5 < NR < 10	Importante <i>Importante</i>
La costruzione non può cominciare prima che il rischio venga ridotto o annullato. Sono possibili soluzioni senza cambiamenti progettuali Importanti <i>/ La construction ne peut débuter avant que le risque ne soit réduit ou annulé. Des solutions sont possibles sans changements Importantes du projet</i>	
NR > 10	Inaccettabile <i>Inacceptable</i>
La costruzione non può cominciare prima che il rischio venga ridotto o annullato; è possibile l'abbandono del progetto <i>/ La construction ne peut débuter avant que le risque ne soit réduit ou annulé. Si le risque ne peut être maîtrisé; il est possible que le projet soit abandonné</i>	

Tabella 28 – Scala del rischio definito sulla base della matrice del rischio

## 7.2 Descrizione dei principali rischi identificati

Nei paragrafi seguenti sono illustrate schematicamente le criticità geologiche, idrogeologiche e geotecniche che, in seguito alla fase d'analisi descritta nel capitolo 5, conducono a rischi 'iniziali' per le fasi esecutive dell'opera. Una volta identificati tali rischi, si devono progettare e mettere in opera delle misure di gestione delle criticità. Se, nonostante queste ultime, i rischi sussistono, essi sono definiti 'rischi residuali'. Il risultato di una tale analisi è un 'registro dei rischi', che per il Tunnel di Base della NLTL sarà esposto nel capitolo seguente.

La descrizione delle condizioni geologiche, idrogeologiche e geotecniche costituenti dei rischi e/o ad essi predisponenti è presentata in modo schematico nelle tabelle seguenti. Le 22 criticità analizzate nelle fincature della sezione longitudinale al tracciato sono indicate in grassetto e sottolineate. Come si vedrà anche per i metodi di gestione dei rischi esposti nel paragrafo 7.3, le criticità e le loro possibili conseguenze sono specificamente riferite al metodo di scavo di progetto (i.e. tradizionale con esplosivo o D&B, e meccanizzato o TBM).

In questo documento la definizione di rischio viene quindi essenzialmente:

- riferita ad una differenza, positiva o negativa, rispetto alle condizioni attese e
- dovuta ad una carenza anche parziale di informazione circa la conoscenza di un evento, le sue conseguenze o la sua probabilità di occorrenza.

Condizioni			Criticità e rischi associati	
Geologiche	Idrogeologiche	Geomeccaniche	Scavo in tradizionale	TBM
Condizioni geomorfologiche sfavorevoli (depositi sciolti)			<b>Instabilità del fronte di scavo</b>	<b>Instabilità del fronte di scavo</b> – arresto possibile della TBM
<b>Presenza di blocchi di dimensioni da decimetriche a metriche in terreni sciolti</b>			Sovrascavo	Sovrascavo – possibili danneggiamenti alla testa fresante
<b>Materiale/rocce abrasive non previste</b>			Allungamento dei tempi di manutenzione - consumo degli utensili di scavo superiore alle previsioni	Consumo dei cutter elevato – tempi d'arresto più lunghi
<b>Tenori di gas radon superiori alle previsioni</b>			Rischio di sicurezza per gli operai	Rischio di sicurezza per gli operai
<b>Possibilità di subsidenza della superficie</b>			Cedimenti in superficie	Cedimenti in superficie
<b>Rocce amiantifere non previste</b>			Rischio di sicurezza per gli operai	Rischio di sicurezza per gli operai
	<b>Permeabilità superiore alle previsioni</b>		Venute d'acqua molto diffuse con portate elevate	Venute d'acqua molto diffuse con portate elevate
	<b>Venute d'acqua persistenti o continue</b>		Venute d'acqua molto diffuse	Venute d'acqua molto diffuse
	<b>Minerali rigonfianti o solubili</b>		Danneggiamento dei supporti installati - Venute d'acqua molto diffuse	Danneggiamento dei supporti installati - Venute d'acqua molto diffuse
	<b>Presenza di sistemi di circolazione carsica</b>		Venute d'acqua con portate elevate – presenza di depositi sciolti	Venute d'acqua con portate elevate – presenza di depositi sciolti
	<b>Presenza d'acque aggressive (solfatiche)</b>		Danneggiamento dei rivestimenti in calcestruzzo	Danneggiamento dei rivestimenti in calcestruzzo
	<b>Temperature elevate</b>		Condizioni di lavoro difficili	Condizioni di lavoro difficili
<b>Ammasso roccioso fratturato (blocky ground)</b>		Presenza di ammasso con caratteristiche scadenti	Instabilità del fronte di scavo	Instabilità del fronte di scavo – Difficoltà nell'avanzamento della TBM
<b>Faglie non previste</b>		Presenza di rocce di cattiva qualità o di condizioni peggiori del previsto	Necessità di sezioni tipo più pesanti delle previsioni – Possibili interventi al fronte di scavo	Necessità di sezioni tipo più pesanti delle previsioni – Possibili interventi al fronte di scavo
		<b>Fronti di scavo misti, tra rocce con proprietà geotecniche molto diverse</b>	Instabilità locale del profilo di scavo	Instabilità locale del profilo di scavo e sovrascavo - difficoltà di guida della TBM
		<b>Fronti di scavo misti, tra rocce e depositi sciolti</b>	Instabilità locale del profilo di scavo	Instabilità locale del profilo di scavo e sovrascavo - difficoltà di guida della TBM
		<b>Fenomeni di 'squeezing' superiori alle previsioni</b>	Convergenze importanti durante gli scavi – collasso del fronte	Convergenze importanti durante gli scavi – collasso del fronte – blocco della TBM
Rocce dure sotto coperture elevate			<b>Possibilità di 'rockburst'</b> – rischio per la sicurezza – danno ai sostegni installati	<b>Possibilità di 'rockburst'</b> – rischio per la sicurezza – danno ai sostegni installati
Rocce dure sotto coperture elevate		Orientazione della scistosità sfavorevole	<b>Presenza di spalling</b> - Instabilità locale del profilo di scavo	<b>Presenza di spalling</b> - Instabilità locale del profilo di scavo
Rocce sotto coperture elevate		Orientazione della scistosità sfavorevole	<b>Possibilità di splaccaggio</b> – instabilità delle pareti, in calotta e al fronte	<b>Possibilità di splaccaggio:</b> instabilità delle pareti, in calotta e al fronte
		<b>Presenza d'argille collanti</b>	-	Difficoltà nello scavo
Depositi sciolti			-	<b>Difficoltà a operare in condizioni iperbariche</b>
<b>Presenza di concentrazioni elevate in Arsenico</b>			Allungamento tempi, gestione materiale di scavo come rifiuto.	Allungamento tempi, gestione materiale di scavo come rifiuto.

Tabella 29 – Criticità dipendenti dal contesto geologico e tipi di rischi possibili nel caso di scavo con metodo tradizionale o meccanizzato con TBM (in grassetto sono indicate le criticità prese in considerazione nell'analisi dei rischi – si veda la tabella seguente).



### 7.3 Misure di mitigazione dei rischi

Le misure di trattamento mirano a ridurre o a sopprimere delle criticità che possono sorgere nelle fasi esecutive di un'opera. Le operazioni di trattamento di tali rischi possono essere più o meno efficaci e portare:

- all'eliminazione della condizione geologica, idrogeologica e/o geomeccanica individuata come la fonte di rischio; si può trattare ad esempio di indagini specifiche atte a eliminare una data incertezza in corrispondenza del sito;
- ad una riduzione del livello di probabilità d'occorrenza di un 'evento-rischio'; questo potrebbe essere nuovamente l'effetto di sondaggi/indagini complementari volti a caratterizzare in maggior dettaglio il modello geologico laddove il livello di incertezza rimane significativo o a misure di intervento in fase esecutiva che riducano la probabilità di insorgere di un determinato evento;
- la riduzione delle conseguenze di un avvenimento rispetto alle condizioni di realizzazione previste, per esempio con la messa in opera di misure tecniche preventive o con la modifica dei metodi di costruzione;
- la messa in opera di un programma geognostico specifico per monitorare un fenomeno critico e definire delle misure d'attenuazione apposite.

Dopo l'applicazione di queste misure si procederà a una nuova valutazione del rischio. Se il rischio rimane inaccettabile nonostante le operazioni di trattamento, si dovrà avviare un nuovo processo di trattamento.

Nella tabella seguente sono elencate le criticità già definite nel paragrafo precedente, e le misure di mitigazione previste per far fronte a ognuna nel caso di scavo con metodo tradizionale e/o meccanizzato.

Criticità	Misure di mitigazione possibili	
	D&B	TBM
<b>Instabilità del fronte di scavo</b>	Esecuzione di indagini complementari volte a definire meglio la criticità – Eventuali interventi di consolidamento del fronte e della volta – cambiamento della sezione tipo	Esecuzione di indagini complementari volte a definire meglio la criticità – Eventuali interventi di consolidamento del fronte e della volta – Cambiamento della sezione tipo (per TBM aperta)
<b>Presenza di blocchi di dimensioni da decimetriche a metriche in terreni sciolti</b>		Esecuzione di prove in avanzamento per verificare la presenza di blocchi di dimensioni significative (sistemi di tipo SSP - Sonic Softground Probing, Herrenknecht)
<b>Materiale/rocce abrasive non previste</b>	Esecuzione di prove in avanzamento – Selezione di utensili di scavo appropriati – Presenza di stock in cantiere per ridurre ritardi dovuti all'approvvigionamento	Esecuzione di prove in avanzamento – Selezione di utensili di scavo appropriati – Possibilità di rimpiazzare gli utensili da tergo per ridotte i tempi di sosta – Presenza di stock in cantiere per ridurre ritardi dovuti all'approvvigionamento
<b>Tenori di gas radon superiori alle previsioni</b>	Istallazione d'un sistema di ventilazione appropriato - Esecuzione di indagini in avanzamento per quantificare i livelli di radioattività – Drenaggio in fase di scavo e trasporto in condotti specifici	Istallazione d'un sistema di ventilazione appropriato - Esecuzione di prove in avanzamento per quantificare i livelli di radioattività – Drenaggio in fase di scavo e trasporto in condotti specifici
<b>Possibilità di subsidenza della superficie</b>	-	Utilizzo di TBM con confinamento del fronte per ridurre la subsidenza – Controllo della pressione di confinamento al fronte – Controllo del volume dei materiali di scavo per evitare fuori-sagoma – Interventi di consolidamento della superficie o in avanzamento a partire da settori in roccia
<b>Rocce amiantifere non previste</b>	Esecuzione di indagini ulteriori in avanzamento; applicazione della procedura di scavo adatta alle rocce potenzialmente amiantifere	Esecuzione di controlli ulteriori in avanzamento; applicazione della procedura di scavo adatta alle rocce potenzialmente amiantifere
<b>Permeabilità superiore alle previsioni</b>	Esecuzione di indagini e drenaggio con SAS o preventer in avanzamento, al fine di ridurre le portate delle venute d'acqua in galleria – Operazioni d'iniezione e impermeabilizzazione per ridurre le venute in galleria	Esecuzione di test e drenaggio con SAS o preventer in avanzamento, al fine di ridurre le portate delle venute d'acqua in galleria – Operazioni d'iniezione e impermeabilizzazione per ridurre le venute in galleria
<b>Venute d'acqua persistenti o continue</b>	Esecuzione di indagini e drenaggio con SAS o preventer in avanzamento, al fine di ridurre le portate delle venute d'acqua in galleria – Operazioni d'iniezione e impermeabilizzazione per ridurre le venute – captazione della sorgente d'acqua	Esecuzione di test e drenaggio con SAS o preventer in avanzamento, al fine di ridurre le portate delle venute d'acqua in galleria – Operazioni d'iniezione e impermeabilizzazione per ridurre le venute - captazione della sorgente d'acqua
<b>Minerali rigonfianti o solubili</b>	Sovrascavo - Esecuzione di indagini in avanzamento – Diminuzione delle soste al fine di ridurre i tempi d'esposizione dei minerali rigonfianti	Esecuzione di indagini in avanzamento – Diminuzione delle soste al fine di ridurre i tempi d'esposizione dei minerali rigonfianti – TBM scudata
<b>Presenza di sistemi di circolazione carsica</b>	Esecuzione di indagini in avanzamento per localizzare le strutture carsiche - drenaggio in avanzamento al fine di ridurre le portate delle venute d'acqua in galleria – interventi di consolidamento in caso di materiale sciolto/instabile	Esecuzione di indagini in avanzamento per localizzare le strutture carsiche - drenaggio in avanzamento al fine di ridurre le portate delle venute d'acqua in galleria – interventi di consolidamento in caso di materiale sciolto/instabile
<b>Presenza d'acque aggressive (solfatiche)</b>	Esecuzione d'analisi per verificare la presenza d'acque aggressive e i loro eventuali tenori in solfati – composizione adeguata del calcestruzzo	Esecuzione d'analisi per verificare la presenza d'acque aggressive e i loro eventuali tenori in solfati – composizione adeguata del calcestruzzo
<b>Temperature elevate</b>	Istallazione d'un sistema di ventilazione appropriato - Esecuzione di indagini in avanzamento per definire i livelli termici – Drenaggio in fase di scavo e trasporto in condotti specifici – Utilizzo di materiali testati a temperature elevate	Istallazione d'un sistema di ventilazione appropriato - Esecuzione di indagini in avanzamento per definire i livelli termici – Drenaggio in fase di scavo e trasporto in condotti specifici – Utilizzo di materiali testati a temperature elevate
<b>Ammasso roccioso fratturato (blocky ground)</b>	Esecuzione di indagini complementari volte a definire meglio la criticità - Caratterizzazione delle discontinuità per identificare i potenziali cunei instabili – Eventuali interventi di stabilizzazione / consolidamento	Esecuzione di indagini complementari volte a definire meglio la criticità e caratterizzazione dei sistemi di discontinuità – Eventuali interventi di stabilizzazione/consolidamento – Controllo del dispositivo di guida della TBM
<b>Faglie non previste</b>	Indagini sistematiche in avanzamento per individuare in anticipo le condizioni dell'ammasso	Indagini sistematiche in avanzamento per individuare in anticipo le condizioni dell'ammasso
<b>Fronti di scavo misti, tra rocce con proprietà geotecniche molto diverse</b>	Rilievi al fronte in avanzamento – Interventi d'impermeabilizzazione per ridurre le venute d'acqua in galleria, ove necessario – sezioni tipo funzionali alle condizioni dell'ammasso	Rilievi al fronte in avanzamento – Interventi d'impermeabilizzazione per ridurre le venute d'acqua in galleria, ove necessario – sezioni tipo funzionali alle condizioni dell'ammasso (TBM aperta)
<b>Fronti di scavo misti, tra rocce e depositi sciolti</b>	Indagini in avanzamento per individuare le caratteristiche geotecniche dei terreni – sezioni tipo funzionali al tipo di fronte	Indagini in avanzamento per individuare le caratteristiche geotecniche dei terreni – sezioni tipo funzionali al tipo di fronte
<b>Fenomeni di 'squeezing' superiori alle previsioni</b>	Utilizzo di centine scorrevoli, consolidamento del fronte e del contorno di scavo con barre in fibra di vetro, elementi comprimibili nel calcestruzzo spruzzato – scavo parzializzato – ombrello di infilaggi	Utilizzo di tecniche di scavo che permettano un aumento della sezione di scavo – Sosta della TBM e eventuale scavo by-pass in tradizionale prima di attraversare le zone a rischio di squeezing, in modo da evitare arresti nelle tratte critiche – frese scudate: utilizzo di TBM con valori di spinta adatti a contrastare la pressione sullo scudo – Scudo a conicità importante – drenaggio / consolidamento dell'ammasso – eventuale installazione di ombrello di infilaggi
<b>Possibilità di 'rockburst' – rischio di sicurezza – danno ai sostegni installati</b>	Pre-fratturazione del fronte - sovrascavo – bullonaggio adeguato	Pre-fratturazione del fronte - sovrascavo e installazione di bulloni a tergo della testa della fresa

Criticità	Misure di mitigazione possibili	
	D&B	TBM
<b>Presenza di spalling</b> - Instabilità locale del profilo di scavo	Aumento della sezione di scavo – Definizione di sezioni tipo di sostegno proporzionate	Aumento della sezione di scavo – Definizione di sezioni tipo di sostegno proporzionate (TBM aperta)
<b>Possibilità di splaccaggio:</b> instabilità delle pareti, in calotta e al fronte	Cambio delle sezioni tipo - sovrascavo	Cambio delle sezioni tipo – sovrascavo – dimensionamento e progettazione dei conci volta a garantire maggior resistenza alle spinte asimmetriche dell'ammasso
<b>Presenza d'argille collanti</b>	-	Campionamento ed analisi dei materiali argillosi al fine di valutarne il grado di collosità – Uso di eventuali additivi al fine di ridurre la collosità delle argille
<b>Difficoltà a operare in condizioni iperbariche</b>	-	Trattamento preventivo del fronte (creazione di un semplice “cake” di bentonite o blocco di materiale trattato con iniezioni di malta cementizia e/o additivata con sostanze reagenti all'acqua) – In caso di necessità interventi con tecniche sottomarine
<b>Presenza di concentrazioni elevate in Arsenico</b>	Campionamento ed analisi dei materiali / Indagini in avanzamento	Campionamento ed analisi dei materiali / Indagini in avanzamento

## 8. Risultati dell'analisi: registro dei rischi

In questo capitolo è proposto il registro dei rischi elaborato per il Tunnel di Base della NLTL. Il registro è esposto in modo schematico nei paragrafi successivi, mediante tabelle analoghe alla seguente.

Come si può vedere nell'esempio di Tabella 30, per i settori suddivisi sono stati descritti i seguenti fattori:

- le litologie;
- il metodo di scavo;
- il tipo di criticità (geologica, idrogeologica e/o geotecnica);
- i rischi legati alle condizioni geologiche, idrogeologiche e geotecniche previste lungo il tracciato;
- la probabilità d'occorrenza dei rischi identificati;
- l'impatto sulla realizzazione delle opere, in termini di costi e tempi;
- il grado di rischio iniziale;
- le contromisure preventive previste allo scopo di ridurre il grado di rischio, rappresentate da:
  - misure approntate al fronte di scavo per affinare la valutazione del rischio per le sezioni da realizzare (analisi a ritroso fondata sui dati del programma di monitoraggio);
  - misure preventive aggiuntive, quando i dati del programma di monitoraggio ne confermino la necessità, con lo scopo di un'ulteriore riduzione del rischio per le sezioni in progetto;
- la valutazione del rischio finale, successiva all'applicazione delle misure preventive e da tener in considerazione all'inizio delle operazioni di scavo (probabilità d'occorrenza, impatto sul progetto e grado di rischio risultante).

Va evidenziato che nella definizione del livello di rischio iniziale sono considerate:

- le condizioni geologiche, idrogeologiche e geotecniche critiche e le loro implicazioni in funzione del metodo di scavo adottato nelle singole tratte;
- le proposte progettuali presentate nell'ambito della fase attuale (PRV), in termini di metodi di scavo, definizioni delle sezioni di supporto e relativa applicazione, locali modifiche al metodo di scavo (ad esempio passaggio da modalità aperta a modalità chiusa slurryshield per la tratta dall'imbocco est del Tunnel di Base verso la Francia). L'impatto delle fonti di rischio tiene quindi già conto delle soluzioni progettuali proposte.

Le misure di mitigazione del rischio sono per lo più rappresentate da misure e procedure che vanno applicate in fase di esecuzione dell'opera e sono volte a:

- permettere una identificazione tempestiva delle condizioni critiche durante lo scavo (ad esempio tramite indagini sistematiche in avanzamento);
- selezionare la contromisura preventiva più efficace, in base alle indicazioni fornite nel registro dei rischi.

Sebbene sia possibile definire le necessarie misure di mitigazione del rischio in fase progettuale, è importante sottolineare che solo le conoscenze che verranno acquisite in fase di scavo permetteranno una reale caratterizzazione delle fonti di rischio e quindi una calibrazione ottimale delle misure da adottare. Ciò perché l'incertezza residua sulle reali

condizioni geotecniche nelle zone critiche è causa stessa della fonte di rischio e può essere annullata solo mediante accesso diretto al fronte di scavo o ai settori immediatamente antistanti.

Il livello di rischio residuale risultante dall'applicazione delle misure di mitigazione lungo la tratta in analisi è generalmente accettabile ovvero di Livello 2 (Significativo). Ciò implica che le procedure adottate come misure di mitigazione andranno mantenute fino al superamento di ogni tratta critica, eventualmente mantenendo operative delle misure di controllo (monitoraggio). Alcune tratte localizzate possono essere caratterizzate da un livello di rischio 4 (Importante). In questi casi la valutazione di un livello di rischio "Importante", anche a valle delle misure di mitigazione, è legata all'incertezza attuale circa la reale estensione e le reali caratteristiche della zona critica. Ad esempio, in una tratta in cui è previsto un drenaggio in avanzamento come la necessità di trattamento dell'ammasso, il livello di rischio residuale (calcolato a valle dell'applicazione del drenaggio o del trattamento) tiene conto del fatto che la lunghezza della tratta in cui eseguire il drenaggio può essere più lunga del previsto. Laddove presente, quindi, un livello di rischio residuale "Importante" non pregiudica la possibilità di superare la zona critica in condizioni di sicurezza ma segnala un rischio residuo in termini di tempi e costi per l'attraversamento.

Rapport de synthèse (côté Italie) – Relazione di sintesi (lato Italia)

	Metodo di scavo	Settore - litologia	CONDIZIONI			RISCHIO INIZIALE				Possibili misure d'attenuazione	RISCHIO RESIDUALE					
			Settore	Geologiche critiche	Idrogeologiche critiche	Geomeccaniche critiche	Rischi possibili	Probabilità	Impatti sull'opera		Livello di rischio finale	Probabilità	Impatti sull'opera		Livello di rischio finale	
									pk inizio				pk fine	Lunghezza (m)		Costi
TDB / Tradizionale																
Rocce della Falda dei Gessi																
	36200															
	36920															
	720															
Faglie non previste																
Presenza di faglie o di rocce di qualità peggiore rispetto alle previsioni																
Necessità di sezioni tipo più pesanti di quanto previsto																
	2															
Molto poco probabile																
	3															
Elevati																
	3															
Elevati																
	6															
Importantee																
Riconoscimento sistematico in avanzamento per definire in anticipo le condizioni dell'ammasso																
	1															
Improbabile																
	2															
Medi																
	2															
Medi																
	2															
Significativo																

Tabella 30 – Esempio di com'è costruita la tabella-registro dei rischi (cf. testo).

Il registro è proposto nei paragrafi seguenti. Le tratte principali sono state suddivise su base litologica come nel capitolo 2. Questo è dovuto al bisogno di schematizzazione generale per la presente trattazione, ma si contrappone alla precisione dello studio: oltre che delle litologie l'analisi dei rischi tiene infatti anche conto dei metodi di scavo, e delle incertezze geologiche, idrogeologiche e geomeccaniche lungo il tracciato. A queste ragioni si devono alcune differenze tra le pk delle tabelle e quelle indicate nei titoli dei paragrafi dei capitoli 2 e 8.

8.1 Serie di Clarea e d'Ambin (pk 48+672 - 55+029)

Metodo di scavo	Settore			CONDIZIONI			RISCHIO INIZIALE					Misure di mitigazione possibili	RISCHIO RESIDUALE												
							Geologiche critiche	Idrogeologiche critiche	Geomeccaniche critiche	Rischi possibili / conseguenze	Probabilità		Impatti sull'opera		Livello di rischio Finale	Probabilità	Impatti sull'opera		Livello di rischio finale						
	Costi	Tempi	Costi	Tempi																					
TBM aperta	Complessi di Clarea e d'Ambin del Massiccio d'Ambin	48672	53741	5069	Rocce dure sotto coperture elevate	Orientazione sfavorevole della scistosità	Presenza di spalling - instabilità locale del fronte di scavo	2	Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	4	Significativo	Aumento della sezione di scavo – Definizione di sezioni tipo di sostegno proporzionate (TBM aperta)	1	Improbabile	2	Medi	2	Medi	2	Significativo	
					Cl massiccio: condizioni geomorfologiche (coperture > 500 m)		Possibilità di 'rockburst' – rischio di sicurezza – danno ai sostegni installati	3	Poco probabile	3	Forti	3	Forti	9	Importante	Pre-fratturazione del fronte - sovrascavo e installazione di bulloni a tergo della testa della fresa	2	Molto poco probabile	3	Forti	3	Forti	6	Importante	
		48672	50100	1428	Faglie non previste		Presenza di rocce di cattiva qualità o di condizioni peggiori del previsto	Necessità di sezioni tipo più pesanti delle previsioni – Possibili interventi al fronte di scavo	2	Molto poco probabile	3	Forti	3	Forti	6	Importante	Indagini sistematiche in avanzamento per individuare in anticipo le condizioni dell'ammasso	1	Improbabile	3	Forti	2	Medi	3	Significativo
		50100	52000	900	Faglie non previste		Presenza di rocce di cattiva qualità o di condizioni peggiori del previsto	Necessità di sezioni tipo più pesanti delle previsioni – Possibili interventi al fronte di scavo	1	Improbabile	2	Medi	2	Medi	2	Significativo	Indagini sistematiche in avanzamento per individuare in anticipo le condizioni dell'ammasso	1	Improbabile	2	Medi	2	Medi	2	Significativo
		48672	52025	3353		Temperature elevate		Condizioni di lavoro difficili	2	Molto poco probabile	3	Forti	2	Medi	6	Importante	Installazione d'un sistema di ventilazione appropriato - Esecuzione di indagini in avanzamento per definire i livelli termici – Drenaggio in fase di scavo e trasporto in condotti specifici – Utilizzo di materiali testati a temperature elevate	2	Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	4	Significativo
						Venute d'acqua persistenti o continue		Venute d'acqua molto diffuse	2	Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	4	Significativo	Esecuzione di test e drenaggio con SAS o preventer in avanzamento, al fine di ridurre le portate delle venute d'acqua in galleria – Operazioni d'iniezione e impermeabilizzazione per ridurre le venute - captazione della sorgente d'acqua	1	Improbabile	2	Medi	2	Medi	2	Significativo
						Rocce sotto coperture elevate		Orientazione sfavorevole della scistosità	Possibilità di splaccaggio: instabilità delle pareti, in calotta e al fronte	2	Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	4	Significativo	Cambio delle sezioni tipo - sovrascavo – dimensionamento e progettazione dei conci volta a garantire maggior resistenza alle spinte asimmetriche dell'ammasso	1	Improbabile	2	Medi	2	Medi	2

Metodo di scavo	Settore			CONDIZIONI	RISCHIO INIZIALE						Misure di mitigazione possibili	RISCHIO RESIDUALE																								
					Geologiche critiche	Idrogeologiche critiche	Geomeccaniche critiche	Rischi possibili / conseguenze	Probabilità	Impatti sull'opera		Livello di rischio Finale	Probabilità	Impatti sull'opera		Livello di rischio finale																				
	Costi	Tempi	Costi							Tempi				Costi	Tempi																					
TBM scudata (aperta)	Complexi di Clarea e d'Ambin del Massiccio d'Ambin	48672	51100	20	2428	20	49330	49350	20		Permeabilità superiore alle previsioni			Venute d'acqua molto diffuse con portate elevate	3	Poco probabile	3	Forti	3	Forti	9	Importante	Esecuzione di test e drenaggio con SAS o preventer in avanzamento, al fine di ridurre le portate delle venute d'acqua in galleria – Operazioni d'iniezione e impermeabilizzazione per ridurre le venute in galleria	2	Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	4	Significativo					
															3	Poco probabile	2	Medi	2	Medi	6	Importante		Istallazione d'un sistema di ventilazione appropriato - Esecuzione di prove in avanzamento per quantificare i livelli di radioattività – Drenaggio in fase di scavo e trasporto in condotti specifici	2	Molto poco probabile	2	Medi	1	Deboli	4	Significativo				
															2	Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	4	Significativo			Esecuzione di prove in avanzamento – Selezione di utensili di scavo appropriati – Scavo con TBM : possibilità di rimpiazzare gli utensili da tergo per ridurre i tempi di sosta – Presenza di stock in cantiere per ridurre ritardi dovuti all'approvvigionamento	1	Improbabile	2	Medi	2	Medi	2	Significativo			
															2	Molto poco probabile	3	Forti	3	Forti	6	Importante				Esecuzione di indagini complementari volte a definire meglio la criticità e caratterizzazione dei sistemi di discontinuità - Eventuali interventi di stabilizzazione/consolidamento -- Controllo del dispositivo di guida della TBM	2	Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	4	Significativo		
															2	Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	4	Significativo					Esecuzione di test e drenaggio con SAS o preventer in avanzamento, al fine di ridurre le portate delle venute d'acqua in galleria – Operazioni d'iniezione e impermeabilizzazione per ridurre le venute in galleria	2	Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	2	Significativo	
		51100	53741	2641									Permeabilità superiore alle previsioni			Venute d'acqua molto diffuse con portate elevate	2	Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	4	Significativo	Esecuzione di test e drenaggio con SAS o preventer in avanzamento, al fine di ridurre le portate delle venute d'acqua in galleria – Operazioni d'iniezione e impermeabilizzazione per ridurre le venute in galleria	2		Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	2	Significativo		
																	2	Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	4	Significativo		Istallazione d'un sistema di ventilazione appropriato - Esecuzione di prove in avanzamento per quantificare i livelli di radioattività – Drenaggio in fase di scavo e trasporto in condotti specifici	1	Improbabile	2	Medi	1	Deboli	2	Significativo		
																	2	Molto poco probabile	3	Forti	3	Forti	6	Importante			Esecuzione di indagini complementari volte a definire meglio la criticità e caratterizzazione dei sistemi di discontinuità - Eventuali interventi di stabilizzazione/consolidamento -- Controllo del dispositivo di guida della TBM	2	Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	4	Significativo	
																	2	Molto poco probabile	3	Forti	3	Forti	6	Importante				Esecuzione di indagini complementari volte a definire meglio la criticità e caratterizzazione dei sistemi di discontinuità - Eventuali interventi di stabilizzazione/consolidamento -- Controllo del dispositivo di guida della TBM	2	Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	4	Significativo
																	2	Molto poco probabile	3	Forti	3	Forti	6	Importante					Utilizzo di tecniche di scavo che permettano un aumento della sezione di scavo – Sosta della TBM e eventuale scavo by-pass in tradizionale prima di attraversare le zone a rischio di squeezing, in modo da evitare arresti nelle tratte critiche – frese scudate: utilizzo di TBM con valori di spinta adatti a contrastare la pressione sullo scudo – Scudo a conicità importantee – drenaggio / consolidamento dell'ammasso – eventuale installazione di ombrello di infilaggi	2	Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	4
51250	51270	20	51250	20	20	20	51230	51250	20	20	Faglie		Fenomeni di 'squeezing' più forti delle previsioni	Convergenze importanti durante gli scavi – collasso del fronte – blocco della TBM	2	Molto poco probabile	3	Forti	3	Forti	6	Importante	Esecuzione di indagini complementari volte a definire meglio la criticità e caratterizzazione dei sistemi di discontinuità - Eventuali interventi di stabilizzazione/consolidamento -- Controllo del dispositivo di guida della TBM	2	Molto poco probabile	2	Medi	2		Medi	4	Significativo				
															2	Molto poco probabile	3	Forti	3	Forti	6	Importante		Esecuzione di indagini complementari volte a definire meglio la criticità e caratterizzazione dei sistemi di discontinuità - Eventuali interventi di stabilizzazione/consolidamento -- Controllo del dispositivo di guida della TBM	2	Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	4	Significativo				
															2	Molto poco probabile	3	Forti	3	Forti	6	Importante			Esecuzione di indagini complementari volte a definire meglio la criticità e caratterizzazione dei sistemi di discontinuità - Eventuali interventi di stabilizzazione/consolidamento -- Controllo del dispositivo di guida della TBM	2	Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	4	Significativo			
															2	Molto poco probabile	3	Forti	3	Forti	6	Importante				Esecuzione di indagini complementari volte a definire meglio la criticità e caratterizzazione dei sistemi di discontinuità - Eventuali interventi di stabilizzazione/consolidamento -- Controllo del dispositivo di guida della TBM	2	Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	4	Significativo		
															2	Molto poco probabile	3	Forti	3	Forti	6	Importante					Esecuzione di indagini complementari volte a definire meglio la criticità e caratterizzazione dei sistemi di discontinuità - Eventuali interventi di stabilizzazione/consolidamento -- Controllo del dispositivo di guida della TBM	2	Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	4	Significativo	



Metodo di scavo	Settore			CONDIZIONI	RISCHIO INIZIALE					Misure di mitigazione possibili	RISCHIO RESIDUALE																																				
					Geologiche critiche	Idrogeologiche critiche	Geomeccaniche critiche	Rischi possibili / conseguenze	Probabilità		Impatti sull'opera		Livello di rischio Finale	Probabilità	Impatti sull'opera		Livello di rischio finale																														
	Costi	Tempi	Costi								Tempi																																				
TBM scudata (aperta)	Complessi di Clarea e d'Ambin del Massiccio d'Ambin	51840 51860	51840 51860	20				2	Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	4	Significativo	Esecuzione di campagne di riconoscimento ulteriori volte a definire meglio la criticità – Eventuali interventi di consolidamento del fronte e della volta (per TBM aperta)	1	Improbabile	2	Medi	2	Medi	2	Significativo																							
																									52015 52035	52015 52035	20				2	Molto poco probabile	3	Forti	3	Forti	6	Importante	Esecuzione di test e drenaggio con SAS o preventer in avanzamento, al fine di ridurre le portate delle venute d'acqua in galleria – Operazioni d'iniezione e impermeabilizzazione per ridurre le venute in galleria	2	Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	4	Significativo
		52025 53741	53741	1716		Temperature elevate			1	Improbabile	3	Forti	2	Medi	3	Significativo	Istallazione d'un sistema di ventilazione appropriato - Esecuzione di indagini in avanzamento per definire i livelli termici – Drenaggio in fase di scavo e trasporto in condotti specifici – Utilizzo di materiali testati a temperature elevate	1	Improbabile	2	Medi	2	Medi	2	Significativo																						
																											Faglie non previste		2	Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	4	Significativo	Indagini sistematiche in avanzamento per individuare in anticipo le condizioni dell'ammasso	1	Improbabile	2	Medi	2	Medi	2	Medi	2	Significativo
			Rocce sotto coperture elevate		2	Molto poco probabile	3	Forti	3	Forti	6	Importante	Cambio delle sezioni tipo - sovrascavo – dimensionamento e progettazione dei conci volta a garantire maggior resistenza alle spinte asimmetriche dell'ammasso	1	Improbabile	3	Forti	3	Forti	3	Forti	3	Significativo																								
																								53741 55040	55040	1299		AMA, AMC, AMD, CI, QSE: rocce abrasive non previste			2	Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	4	Significativo	Esecuzione di prove in avanzamento – Selezione di utensili di scavo appropriati – Scavo con TBM : possibilità di rimpiazzare gli utensili da tergo per ridurre i tempi di sosta – Presenza di stock in cantiere per ridurre ritardi dovuti all'approvvigionamento	1	Improbabile	2	Medi	2	Medi	2	Medi
			Temperature elevate		1	Improbabile	3	Forti	2	Medi	3	Significativo	Istallazione d'un sistema di ventilazione appropriato - Esecuzione di indagini in avanzamento per definire i livelli termici – Drenaggio in fase di scavo e trasporto in condotti specifici – Utilizzo di materiali testati a temperature elevate	1	Improbabile	2	Medi	2	Medi	2	Medi	2	Significativo																								

Metodo di scavo	Settore			CONDIZIONI	RISCHIO INIZIALE						Misure di mitigazione possibili	RISCHIO RESIDUALE														
					Geologiche critiche	Idrogeologiche critiche	Geomeccaniche critiche	Rischi possibili / conseguenze	Probabilità	Impatti sull'opera			Livello di rischio Finale	Probabilità	Impatti sull'opera		Livello di rischio finale									
	Costi	Tempi								Costi		Tempi														
TBM scudata (aperta)	Complessi di Clarea e d'Ambin del Massiccio d'Ambin	53741	55040	1299	Ammasso roccioso fratturato (blocky ground)	Presenza di rocce di cattiva qualità	Instabilità del fronte di scavo - Difficoltà nell'avanzamento della TBM	1	Improbabile	2	Medi	2	Medi	2	Significativo	Esecuzione di indagini complementari volte a definire meglio la criticità e caratterizzazione dei sistemi di discontinuità - Eventuali interventi di stabilizzazione/consolidamento -- Controllo del dispositivo di guida della TBM	1	Improbabile	2	Medi	2	Medi	2	Significativo		
					Faglie non previste	Presenza di rocce di cattiva qualità o di condizioni peggiori del previsto	Necessità di sezioni tipo più pesanti delle previsioni – Possibili interventi al fronte di scavo	2	Molto poco probabile	3	Forti	3	Forti	6	Importante	Indagini sistematiche in avanzamento per individuare in anticipo le condizioni dell'ammasso	1	Improbabile	3	Forti	3	Forti	3	Forti	3	Significativo
					Rocce sotto coperture elevate	Orientazione sfavorevole della scistosità	Possibilità di splaccaggio: instabilità delle pareti, in calotta e al fronte	2	Molto poco probabile	3	Forti	3	Forti	6	Importante	Cambio delle sezioni tipo - sovrascavo – dimensionamento e progettazione dei conci volta a garantire maggior resistenza alle spinte asimmetriche dell'ammasso	1	Improbabile	3	Forti	3	Forti	3	Forti	3	Significativo
					Rocce dure sotto coperture elevate	Orientazione sfavorevole della scistosità	Presenza di spalling - Instabilità locale della sezione di scavo	2	Molto poco probabile	3	Forti	3	Forti	6	Importante	Aumento della sezione di scavo – Definizione di sezioni tipo di sostegno proporzionate (TBM aperta)	2	Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	4	Medi	4	Significativo
							Possibilità di 'rockburst' – rischio di sicurezza – danno ai sostegni installati	2	Molto poco probabile	3	Forti	3	Forti	6	Importante	Pre-fratturazione del fronte - sovrascavo e installazione di bulloni a tergo della testa della fresa	2	Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	4	Medi	4	Significativo
			Tenori di gas radon superiori alle previsioni			Rischio di sicurezza per gli operai	2	Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	4	Significativo	Installazione d'un sistema di ventilazione appropriato - Esecuzione di prove in avanzamento per quantificare i livelli di radioattività – Drenaggio in fase di scavo e trasporto in condotti specifici	1	Improbabile	2	Medi	1	Deboli	2	Deboli	2	Significativo	
			Tenori di gas radon superiori alle previsioni			Rischio di sicurezza per gli operai	4	Possibile	2	Medi	2	Medi	8	Importante	Installazione d'un sistema di ventilazione appropriato - Esecuzione di prove in avanzamento per quantificare i livelli di radioattività – Drenaggio in fase di scavo e trasporto in condotti specifici	2	Molto poco probabile	2	Medi	1	Deboli	4	Deboli	4	Significativo	
			Presenza di concentrazioni elevate in Arsenico				4	Possibile	1	Deboli	1	Deboli	4	Significativo	Campionamento ed analisi dei materiali / Indagini in avanzamento	4	Possibile	1	Deboli	1	Deboli	4	Deboli	4	Significativo	
			Ammasso roccioso fratturato (blocky ground)			Presenza di rocce di cattiva qualità	Instabilità del fronte di scavo - Difficoltà nell'avanzamento della TBM	2	Molto poco probabile	3	Forti	3	Forti	6	Importante	Esecuzione di indagini complementari volte a definire meglio la criticità e caratterizzazione dei sistemi di discontinuità - Eventuali interventi di stabilizzazione/consolidamento -- Controllo del dispositivo di guida della TBM	1	Improbabile	3	Forti	3	Forti	3	Forti	3	Significativo

					Faglia	Fenomeni di 'squeezing' più forti delle previsioni	Convergenze importanti durante gli scavi – collasso del fronte – blocco della TBM	2	Molto poco probabile	3	Forti	3	Forti	6	Importante	Utilizzo di tecniche di scavo che permettano un aumento della sezione di scavo – Sosta della TBM e eventuale scavo by-pass in tradizionale prima di attraversare le zone a rischio di squeezing, in modo da evitare arresti nelle tratte critiche – frese scudate: utilizzo di TBM con valori di spinta adatti a contrastare la pressione sullo scudo – Scudo a conicità importantee – drenaggio / consolidamento dell'ammasso – eventuale installazione di ombrello di infilaggi	2	Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	4	Significativo
--	--	--	--	--	--------	--	---	---	----------------------	---	-------	---	-------	---	------------	---	---	----------------------	---	------	---	------	---	---------------

Metodo di scavo	Settore			CONDIZIONI			RISCHIO INIZIALE					Misure di mitigazione possibili	RISCHIO RESIDUALE										
							Rischi possibili / conseguenze	Probabilità	Impatti sull'opera		Livello di rischio Finale		Probabilità	Impatti sull'opera		Livello di rischio finale							
	Costi	Tempi	Costi	Tempi																			
TBM scudata (aperta) Complessi di Clarea e d'Ambin del Massiccio d'Ambin	54945 54975	30				Instabilità della sezione di scavo – arresto della TBM	2	Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	4	Significativo	Esecuzione di campagne di riconoscimento ulteriori volte a definire meglio la criticità – Eventuali interventi di consolidamento del fronte e della volta (per TBM aperta)	1	Improbabile	2	Medi	2	Medi	2	Significativo
				Permeabilità superiore alle previsioni		Venute d'acqua molto diffuse con portate elevate	2	Molto poco probabile	3	Forti	3	Forti	6	Importante	Esecuzione di test e drenaggio con SAS o preventer in avanzamento, al fine di ridurre le portate delle venute d'acqua in galleria – Operazioni d'iniezione e impermeabilizzazione per ridurre le venute in galleria	2	Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	4	Significativo
				Presenza d'argille collanti		Difficoltà nello scavo	2	Molto poco probabile	1	Deboli	2	Medi	4	Significativo	Campionamento ed analisi dei materiali argillosi al fine di valutarne il grado di collosità – Uso di eventuali additivi al fine di ridurre la collosità delle argille	1	Improbabile	1	Deboli	2	Medi	2	Significativo

8.2 Zona a Scaglie Tettoniche (pk 55+029 - 56+058)

Metodo di scavo	Settore			CONDIZIONI	RISCHIO INIZIALE	Misure di mitigazione possibili					RISCHIO RESIDUALE											
											Probabilità	Impatti sull'opera		Livello di rischio Finale	Probabilità	Impatti sull'opera		Livello di rischio finale				
	Costi	Tempi	Costi									Tempi	Costi			Tempi						
TBM scudata (aperta) Scaglie tettoniche della Z. Piemontese: (cataclasi, anidriti e gessi tra calcescisti grigi a livelli di marmi e gneiss albitici)	55040	56050	1010	Geologiche critiche	Idrogeologiche critiche	Geomeccaniche critiche	Rischi possibili / conseguenze	Probabilità	Costi	Tempi	Livello di rischio Finale	Misure di mitigazione possibili	Probabilità	Costi	Tempi	Livello di rischio finale						
				Venute d'acqua persistenti o continue	Venute d'acqua molto diffuse	2	Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	4	Significativo	Esecuzione di test e drenaggio con SAS o preventer in avanzamento, al fine di ridurre le portate delle venute d'acqua in galleria – Operazioni d'iniezione e impermeabilizzazione per ridurre le venute - captazione della sorgente d'acqua	1	Improbabile	2	Medi	2	Medi	2	Significativo
				Minerali rigonfianti o solubili	Danneggiamento dei sostegni installati - Venute d'acqua molto diffuse	2	Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	4	Significativo	Esecuzione di indagini in avanzamento – Diminuzione delle soste al fine di ridurre i tempi d'esposizione dei minerali rigonfianti – TBM scudata	2	Molto poco probabile	1	Deboli	1	Deboli	2	Significativo
				Ammasso roccioso fratturato (blocky ground)	Presenza di rocce di cattiva qualità	2	Molto poco probabile	3	Forti	3	Forti	6	Importante	Esecuzione di indagini complementari volte a definire meglio la criticità e caratterizzazione dei sistemi di discontinuità - Eventuali interventi di stabilizzazione/consolidamento -- Controllo del dispositivo di guida della TBM	1	Improbabile	3	Forti	3	Forti	3	Significativo
				Faglie non previste	Presenza di rocce di cattiva qualità o di condizioni peggiori del previsto	2	Molto poco probabile	3	Forti	3	Forti	6	Importante	Indagini sistematiche in avanzamento per individuare in anticipo le condizioni dell'ammasso	1	Improbabile	3	Forti	3	Forti	3	Significativo
				GCC con copertura < 350 m	Orientazione sfavorevole della scistosità	1	Improbabile	3	Forti	3	Forti	3	Significativo	Cambio delle sezioni tipo - sovrascavo – dimensionamento e progettazione dei conci volta a garantire maggior resistenza alle spinte asimmetriche dell'ammasso	1	Improbabile	2	Medi	2	Medi	2	Significativo
					Fronti di scavo misti, tra rocce con proprietà geotecniche molto diverse	3	Poco probabile	2	Medi	2	Medi	6	Importante	Rilievi al fronte in avanzamento - Interventi d'impermeabilizzazione per ridurre le venute d'acqua in galleria, ove necessario - sezioni tipo funzionali alle condizioni dell'ammasso (TBM aperta)	2	Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	4	Significativo
						3	Poco probabile	2	Medi	2	Medi	6	Importante	Esecuzione di campagne di riconoscimento ulteriori volte a definire meglio la criticità – Eventuali interventi di consolidamento del fronte e della volta (per TBM aperta)	2	Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	4	Significativo
	Permeabilità superiore alle previsioni		Venute d'acqua molto diffuse con portate elevate	2	Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	4	Significativo	Esecuzione di test e drenaggio con SAS o preventer in avanzamento, al fine di ridurre le portate delle venute d'acqua in galleria – Operazioni d'iniezione e impermeabilizzazione per ridurre le venute in galleria	1	Improbabile	2	Medi	2	Medi	2	Significativo		

Metodo di scavo	Settore	Settore			CONDIZIONI			RISCHIO INIZIALE						Misure di <u>mitigazione</u> possibili	RISCHIO RESIDUALE									
		pk inizio	pk fine	Lunghezza (m)	Geologiche critiche	Idrogeologiche critiche	Geomeccaniche critiche	Rischi possibili / conseguenze	Probabilità	Impatti sull'opera		Livello di rischio Finale	Probabilità		Impatti sull'opera		Livello di rischio finale							
										Costi	Tempi				Costi	Tempi								
<b>TBM scudata (aperta)</b> <b>Scaglie tettoniche della Z. Piemontese:</b> (cataclasti, anidriti e gessi tra calcescisti grigi a livelli di marmi e gneiss albittici)		55270	55290	20	Carniole e faglie carniolizzate	Presenza di sistemi di circolazione carsica	Venute d'acqua con portate elevate – depositi sciolti	3	Poco probabile	2	Medi	2	Medi	6	Importante	Esecuzione di indagini in avanzamento per localizzare le strutture carsiche - drenaggio in avanzamento al fine di ridurre le portate delle venute d'acqua in galleria - interventi di consolidamento in caso di materiale sciolto/instabile	1	Improbabile	2	Medi	2	Medi	2	Significativo
		55720	55760	40		Fenomeni di 'squeezing' più forti delle previsioni	Convergenze importanti durante gli scavi – collasso del fronte – blocco della TBM	2	Molto poco probabile	3	Forti	3	Forti	6	Importante	Utilizzo di tecniche di scavo che permettano un aumento della sezione di scavo – Sosta della TBM e eventuale scavo by-pass in tradizionale prima di attraversare le zone a rischio di squeezing, in modo da evitare arresti nelle tratte critiche – frese scudate: utilizzo di TBM con valori di spinta adatti a contrastare la pressione sullo scudo – Scudo a conicità importantee – drenaggio / consolidamento dell'ammasso – eventuale installazione di ombrello di infilaggi	1	Improbabile	3	Forti	3	Forti	3	Significativo
		56050	56075	50		Presenza d'argille collanti	Difficoltà nello scavo	2	Molto poco probabile	1	Deboli	2	Medi	4	Significativo	Campionamento ed analisi dei materiali argillosi al fine di valutarne il grado di collosità – Uso di eventuali additivi al fine di ridurre la collosità delle argille	1	Improbabile	1	Deboli	2	Medi	2	Significativo
						Presenza d'acque aggressive (solfatiche)	Danneggiamento dei rivestimenti in calcestruzzo	3	Poco probabile	1	Deboli	1	Deboli	3	Significativo	Esecuzione d'analisi per verificare la presenza d'acque aggressive e i loro eventuali tenori in solfati - composizione adeguata del calcestruzzo	2	Molto poco probabile	1	Deboli	1	Deboli	2	Significativo
						Fronti di scavo misti tra rocce e depositi sciolti	Instabilità locale della sezione di scavo e sovrascavo - difficoltà di guida della TBM	2	Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	4	Significativo	Indagini in avanzamento per individuare le caratteristiche geotecniche dei terreni – sezioni tipo funzionali al tipo di fronte	1	Improbabile	1	Deboli	2	Medi	2	Significativo

8.3 Val Cenischia (pk 56+058 - 57+160)

Metodo di scavo	Settore			CONDIZIONI			RISCHIO INIZIALE					Misure di mitigazione possibili	RISCHIO RESIDUALE												
	pk inizio	pk fine	Lunghezza (m)	Geologiche critiche	Idrogeologiche critiche	Geomeccaniche critiche	Rischi possibili / conseguenze	Probabilità	Impatti sull'opera		Livello di rischio Finale		Probabilità	Impatti sull'opera		Livello di rischio finale									
									Costi	Tempi				Costi	Tempi										
TBM scudata (modalità chiusa con contropressione di fango)	V. Cenischia	56025	56075	50			Fronti di scavo misti tra rocce e depositi sciolti	Instabilità locale della sezione di scavo e sovrascavo - difficoltà di guida della TBM	2	Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	4	Significativo	Indagini in avanzamento per individuare le caratteristiche geotecniche dei terreni – sezioni tipo funzionali al tipo di fronte	1	Improbabile	1	Deboli	2	Medi	2	Significativo
		56050	57100	1050	Materiale abrasivo non previsto			Consumo dei cutter elevato – tempi d'arresto più lunghi	2	Molto poco probabile	3	Forti	3	Forti	6	Importante	Esecuzione di prove in avanzamento – Selezione di utensili di scavo appropriati – Scavo con TBM : possibilità di rimpiazzare gli utensili da tergo per ridurre i tempi di sosta – Presenza di stock in cantiere per ridurre ritardi dovuti all'approvvigionamento	1	Improbabile	2	Medi	3	Forti	3	Significativo
					Condizioni geomorfologiche sfavorevoli (depositi sciolti)			Instabilità della sezione di scavo – crollo del fronte e arresto possibile della TBM	2	Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	4	Significativo	Esecuzione di campagne di riconoscimento ulteriori volte a definire meglio la criticità – Eventuali interventi di consolidamento del fronte e della volta (per TBM aperta)	1	Improbabile	2	Medi	2	Medi	2	Significativo
						Permeabilità locale superiore alle previsioni: forti variazioni di permeabilità		Venute d'acqua molto diffuse con portate elevate	2	Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	4	Significativo	Esecuzione di test e drenaggio con SAS o preventer in avanzamento, al fine di ridurre le portate delle venute d'acqua in galleria – Operazioni d'iniezione e impermeabilizzazione per ridurre le venute in galleria	1	Improbabile	2	Medi	2	Medi	2	Significativo
					Presenza di blocchi di dimensioni da decimetriche a metriche in terreni sciolti			Sovrascavo – possibili danneggiamenti alla testa fresante	2	Molto poco probabile	2	Medi	3	Forti	6	Importante	Esecuzione di prove in avanzamento per verificare la presenza di blocchi di dimensioni significative (sistemi di tipo SSP - Sonic Softground Probing, Herrenknecht)	1	Improbabile	2	Medi	3	Forti	3	Significativo
							Presenza d'argille collanti	Difficoltà nello scavo	2	Molto poco probabile	1	Deboli	2	Medi	4	Significativo	Campionamento ed analisi dei materiali argillosi al fine di valutarne il grado di collosità – Uso di eventuali additivi al fine di ridurre la collosità delle argille	1	Improbabile	1	Deboli	2	Medi	2	Significativo
								Cedimenti in superficie	2	Molto poco probabile	3	Forti	3	Forti	6	Importante	Utilizzo di TBM con confinamento del fronte per ridurre la subsidenza – Controllo della pressione di confinamento al fronte – Controllo del volume dei materiali di scavo per evitare fuorisagoma – Interventi di consolidamento della superficie o in avanzamento a partire da settori in roccia	1	Improbabile	3	Forti	3	Forti	3	Significativo
								Difficoltà a realizzare interventi in condizioni iperbariche	2	Molto poco probabile	2	Medi	3	Forti	6	Significativo	Trattamento previo del fronte (creazione di un semplice cake di bentonite o blocco di materiale trattato con iniezioni di malta cementizia e/o additivata con sostanze reagenti all'acqua)	2	Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	4	Significativo
								Rischio di sicurezza per gli operai	4	Possibile	2	Medi	2	Medi	8	Importante	Istallazione d'un sistema di ventilazione appropriato - Esecuzione di prove in avanzamento per quantificare i livelli di radioattività – Drenaggio in fase di scavo e trasporto in condotti specifici	2	Molto poco probabile	2	Medi	1	Deboli	4	Significativo

Metodo di scavo	Settore			CONDIZIONI			RISCHIO INIZIALE					Misure di mitigazione possibili	RISCHIO RESIDUALE													
							Probabilità	Impatti sull'opera		Livello di rischio Finale	Probabilità		Impatti sull'opera		Livello di rischio finale											
	Costi	Tempi	Costi	Tempi	Costi	Tempi																				
		56300	57100	800	Tenori di gas radon superiori alle previsioni				Rischio di sicurezza per gli operai	2	Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	4	Significativo	Istallazione d'un sistema di ventilazione appropriato - Esecuzione di prove in avanzamento per quantificare i livelli di radioattività – Drenaggio in fase di scavo e trasporto in condotti specifici	1	Improbabile	2	Medi	1	Deboli	2	Significativo
		57135	57185	50				Fronti di scavo misti tra rocce e depositi sciolti	Instabilità locale della sezione di scavo e sovrascavo - difficoltà di guida della TBM	2	Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	4	Significativo	Indagini in avanzamento per individuare le caratteristiche geotecniche dei terreni – sezioni tipo funzionali al tipo di fronte	1	Improbabile	1	Deboli	2	Medi	2	Significativo

8.4 Unità Puys - Venaus (pk 57+160 - 60+711)

Metodo di scavo	Settore			CONDIZIONI			RISCHIO INIZIALE					RISCHIO RESIDUALE												
																	pk inizio	pk fine	Lunghezza (m)	Geologiche critiche	Idrogeologiche critiche	Geomeccaniche critiche	Rischi possibili / conseguenze	Probabilità
	Costi	Tempi	Costi	Tempi	Costi	Tempi	Costi	Tempi																
TBM scudata (aperta) Z. Piemontese: calcemicascisti	57135	57185	50			Fronti di scavo misti tra rocce e depositi sciolti	Instabilità locale della sezione di scavo e sovrascavo - difficoltà di guida della TBM	2	Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	4	Significativo	Indagini in avanzamento per individuare le caratteristiche geotecniche dei terreni – sezioni tipo funzionali al tipo di fronte	1	Improbabile	1	Deboli	2	Medi	2	Significativo
	57100	60700	3600			Rocce abrasive non previste	Consumo dei cutter elevato – tempi d'arresto più lunghi	2	Molto poco probabile	3	Forti	3	Forti	6	Importante	Esecuzione di prove in avanzamento – Selezione di utensili di scavo appropriati – Scavo con TBM : possibilità di rimpiazzare gli utensili da tergo per ridurre i tempi di sosta – Presenza di stock in cantiere per ridurre ritardi dovuti all'approvvigionamento	1	Improbabile	2	Medi	3	Forti	3	Significativo
						Ammasso roccioso fratturato (blocky ground): GCC/GCK massicci	Instabilità del fronte di scavo - Difficoltà nell'avanzamento della TBM	1	Improbabile	2	Medi	2	Medi	2	Significativo	Esecuzione di indagini complementari volte a definire meglio la criticità e caratterizzazione dei sistemi di discontinuità - Eventuali interventi di stabilizzazione/consolidamento -- Controllo del dispositivo di guida della TBM	1	Improbabile	2	Medi	2	Medi	2	Significativo
						Orientazione sfavorevole della scistosità	Possibilità di splaccaggio: instabilità delle pareti, in calotta e al fronte	1	Improbabile	2	Medi	2	Medi	2	Significativo	Cambio delle sezioni tipo - sovrascavo – dimensionamento e progettazione dei conci volta a garantire maggior resistenza alle spinte asimmetriche dell'ammasso	1	Improbabile	2	Medi	2	Medi	2	Significativo
	57100	57760	660			Tenori di gas radon superiori alle previsioni	Rischio di sicurezza per gli operai	2	Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	4	Significativo	Istallazione d'un sistema di ventilazione appropriato - Esecuzione di prove in avanzamento per quantificare i livelli di radioattività – Drenaggio in fase di scavo e trasporto in condotti specifici	1	Improbabile	2	Medi	1	Deboli	2	Significativo
	57760	57820	60			Tenori di gas radon superiori alle previsioni	Rischio di sicurezza per gli operai	3	Poco probabile	2	Medi	2	Medi	6	Importante	Istallazione d'un sistema di ventilazione appropriato - Esecuzione di prove in avanzamento per quantificare i livelli di radioattività – Drenaggio in fase di scavo e trasporto in condotti specifici	2	Molto poco probabile	2	Medi	1	Deboli	4	Significativo
	57820	60680	2860			Tenori di gas radon superiori alle previsioni	Rischio di sicurezza per gli operai	2	Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	4	Significativo	Istallazione d'un sistema di ventilazione appropriato - Esecuzione di prove in avanzamento per quantificare i livelli di radioattività – Drenaggio in fase di scavo e trasporto in condotti specifici	1	Improbabile	2	Medi	1	Deboli	2	Significativo
	60680	60720	40			Tenori di gas radon superiori alle previsioni	Rischio di sicurezza per gli operai	4	Possibile	2	Medi	2	Medi	8	Importante	Istallazione d'un sistema di ventilazione appropriato - Esecuzione di prove in avanzamento per quantificare i livelli di radioattività – Drenaggio in fase di scavo e trasporto in condotti specifici	2	Molto poco probabile	2	Medi	1	Deboli	4	Significativo
	60720	61080	360			Tenori di gas radon superiori alle previsioni	Rischio di sicurezza per gli operai	3	Poco probabile	2	Medi	2	Medi	6	Importante	Istallazione d'un sistema di ventilazione appropriato - Esecuzione di prove in avanzamento per quantificare i livelli di radioattività – Drenaggio in fase di scavo e trasporto in condotti specifici	1	Improbabile	2	Medi	1	Deboli	2	Significativo



Metodo di scavo	Settore			CONDIZIONI			RISCHIO INIZIALE					Misure di mitigazione possibili	RISCHIO RESIDUALE												
													Probabilità	Impatti sull'opera		Livello di rischio finale	Probabilità	Impatti sull'opera		Livello di rischio finale					
	Costi	Tempi	Costi	Tempi	Costi	Tempi																			
TBM scudata (aperta)	Z. Piemontese: calcemicascisti	57800	60700	2900	Ammasso roccioso fratturato (blocky ground)		Presenza di rocce di cattiva qualità	Instabilità del fronte di scavo - Difficoltà nell'avanzamento della TBM	2	Molto poco probabile	3	Forti	3	Forti	6	Importante	Esecuzione di indagini complementari volte a definire meglio la criticità e caratterizzazione dei sistemi di discontinuità - Eventuali interventi di stabilizzazione/consolidamento -- Controllo del dispositivo di guida della TBM	2	Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	4	Significativo
					Faglie alle pk 57800, 58460, 59650, 60350, 60700		Fenomeni di 'squeezing' più forti delle previsioni	Convergenze importanti durante gli scavi – collasso del fronte – blocco della TBM	1	Improbabile	2	Medi	2	Medi	2	Significativo	Utilizzo di tecniche di scavo che permettano un aumento della sezione di scavo – Sosta della TBM e eventuale scavo by-pass in tradizionale prima di attraversare le zone a rischio di squeezing, in modo da evitare arresti nelle tratte critiche – frese scudate: utilizzo di TBM con valori di spinta adatti a contrastare la pressione sullo scudo – Scudo a conicità importantee – drenaggio / consolidamento dell'ammasso – eventuale installazione di ombrello di infilaggi	1	Improbabile	1	Deboli	2	Medi	2	Significativo
							Fronti di scavo misti, tra rocce con proprietà geotecniche molto diverse	Instabilità locale della sezione di scavo e sovrascavo - difficoltà di guida della TBM	2	Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	4	Significativo	Rilievi al fronte in avanzamento - Interventi d'impermeabilizzazione per ridurre le venute d'acqua in galleria, ove necessario - sezioni tipo funzionali alle condizioni dell'ammasso (TBM aperta)	2	Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	4	Significativo
					Permeabilità superiore alle previsioni			Venute d'acqua molto diffuse con portate elevate	2	Molto poco probabile	3	Forti	3	Forti	6	Importante	Esecuzione di test e drenaggio con SAS o preventer in avanzamento, al fine di ridurre le portate delle venute d'acqua in galleria – Operazioni d'iniezione e impermeabilizzazione per ridurre le venute in galleria	2	Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	4	Significativo

8.5 Unità Oceaniche (pk 60+711 - 61+090)

Metodo di scavo	Settore			CONDIZIONI	RISCHIO INIZIALE						Misure di mitigazione possibili	RISCHIO RESIDUALE												
					pk inizio	pk fine	Lunghezza (m)	Geologiche critiche	Idrogeologiche critiche	Geomeccaniche critiche		Rischi possibili / conseguenze	Probabilità		Impatti sull'opera		Livello di rischio Finale	Probabilità	Impatti sull'opera		Livello di rischio finale			
	Costi	Tempi	Costi										Tempi	Costi	Tempi									
TBM scudata (aperta)	Z. Piemontese: metabasiti	60700 61080	380		Permeabilità superiore alle previsioni		Venute d'acqua molto diffuse con portate elevate	2	Molto poco probabile	3	Forti	3	Forti	6	Importante	Esecuzione di test e drenaggio con SAS o preventer in avanzamento, al fine di ridurre le portate delle venute d'acqua in galleria – Operazioni d'iniezione e impermeabilizzazione per ridurre le venute in galleria	2	Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	4	Significativo
				Rocce amiantifere non previste		Rischio di sicurezza per gli operai	1	Improbabile	1	Deboli	1	Deboli	1	Mimore	Esecuzione di controlli ulteriori in avanzamento; applicazione della procedura di scavo adatta alle rocce potenzialmente amiantifere	1	Improbabile	1	Deboli	1	Deboli	1	Mimore	
				Rocce abrasive non previste		Consumo dei cutter elevato – tempi d'arresto più lunghi	2	Molto poco probabile	3	Forti	3	Forti	6	Importante	Esecuzione di prove in avanzamento – Selezione di utensili di scavo appropriati – Scavo con TBM : possibilità di rimpiazzare gli utensili da tergo per ridurre i tempi di sosta – Presenza di stock in cantiere per ridurre ritardi dovuti all'approvvigionamento	1	Improbabile	2	Medi	3	Forti	3	Significativo	
				Ammasso roccioso fratturato (blocky ground): OMB massicce	Presenza di rocce di cattiva qualità	Instabilità del fronte di scavo - Difficoltà nell'avanzamento della TBM	1	Improbabile	2	Medi	2	Medi	2	Significativo	Esecuzione di indagini complementari volte a definire meglio la criticità e caratterizzazione dei sistemi di discontinuità - Eventuali interventi di stabilizzazione/consolidamento -- Controllo del dispositivo di guida della TBM	1	Improbabile	2	Medi	2	Medi	2	Significativo	
		60700 60890	190	Ammasso roccioso fratturato (blocky ground)	Presenza di rocce di cattiva qualità	Instabilità del fronte di scavo - Difficoltà nell'avanzamento della TBM	2	Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	4	Significativo	Esecuzione di indagini complementari volte a definire meglio la criticità e caratterizzazione dei sistemi di discontinuità - Eventuali interventi di stabilizzazione/consolidamento -- Controllo del dispositivo di guida della TBM	1	Improbabile	2	Medi	2	Medi	2	Significativo	
				Faglia	Fenomeni di 'squeezing' più forti delle previsioni	Convergenze importanti durante gli scavi – collasso del fronte – blocco della TBM	1	Improbabile	3	Forti	3	Forti	3	Significativo	Utilizzo di tecniche di scavo che permettano un aumento della sezione di scavo – Sosta della TBM e eventuale scavo by-pass in tradizionale prima di attraversare le zone a rischio di squeezing, in modo da evitare arresti nelle tratte critiche – frese scudate: utilizzo di TBM con valori di spinta adatti a contrastare la pressione sullo scudo – Scudo a conicità importantee – drenaggio / consolidamento dell'ammasso – eventuale installazione di ombrello di infilaggi	1	Improbabile	3	Forti	3	Forti	3	Significativo	

8.6 Gallerie d'interconnessione Susa-Bussoleno

Metodo di scavo	Settore	Settore			CONDIZIONI			RISCHIO INIZIALE					Misure di mitigazione possibili	RISCHIO RESIDUALE											
		pk inizio	pk fine	Lunghezza (m)	Geologiche critiche	Idrogeologiche critiche	Geomeccaniche critiche	Rischi possibili / conseguenze	Probabilità	Impatti sull'opera		Livello di rischio Finale		Probabilità	Impatti sull'opera		Livello di rischio finale								
										Costi	Tempi				Costi	Tempi									
Piana di Susa		61080	63870	2790																					
Tradizionale	Massiccio Dora Maira (calcescisti)	63870	64240	370	Tenori di gas radon superiori alle previsioni			Rischio di sicurezza per gli operai	2	Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	4	Significativo	Istallazione d'un sistema di ventilazione appropriato - Esecuzione di prove in avanzamento per quantificare i livelli di radioattività – Drenaggio in fase di scavo e trasporto in condotti specifici	1	Improbabile	2	Medi	1	Deboli	2	Significativo
		64240	1900	1660	Tenori di gas radon superiori alle previsioni			Rischio di sicurezza per gli operai	3	Poco probabile	2	Medi	2	Medi	6	Importante	Istallazione d'un sistema di ventilazione appropriato - Esecuzione di prove in avanzamento per quantificare i livelli di radioattività – Drenaggio in fase di scavo e trasporto in condotti specifici	2	Molto poco probabile	2	Medi	1	Deboli	4	Significativo
		63870	1900	2030	Rocce dure sotto coperture elevate		Orientazione sfavorevole della scistosità	Possibilità di splaccaggio: instabilità delle pareti, in calotta e al fronte	2	Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	4	Significativo	Cambio delle sezioni tipo - sovrascavo	1	Improbabile	2	Medi	2	Medi	2	Significativo
					pk 0-150 e 1900-2000		Fronti di scavo misti tra rocce e depositi sciolti	Instabilità locale della sezione di scavo	2	Molto poco probabile	2	Medi	2	Medi	4	Significativo	Indagini in avanzamento per individuare le caratteristiche geotecniche dei terreni – sezioni tipo funzionali al tipo di fronte	1	Improbabile	2	Medi	2	Medi	2	Significativo
					pk 0-150 e 1900-2000	Permeabilità superiore alle previsioni		Venute d'acqua molto diffuse con portate elevate	1	Improbabile	3	Forti	3	Forti	3	Significativo	Esecuzione di test e drenaggio con SAS o preventer in avanzamento, al fine di ridurre le portate delle venute d'acqua in galleria – Operazioni d'iniezione e impermeabilizzazione per ridurre le venute in galleria	1	Improbabile	2	Medi	2	Medi	2	Significativo

## 9. BIBLIOGRAFIA

Bianchi, G.W., Perello, P., Venturini, G. & Dematteis, A., 2009. Determination of reliability in geological forecasting for tunnel projects: The method of the R-index and its application on two case studies. WTC 2009, *Proceedings of the ITA-AITES World Tunnel Congress*, Budapest.

AFTES GT32-2 (2012). Recommandation de l'AFTES n° GT32.R2F1 - Recommandations sur la caractérisation des incertitudes et des risques géologiques, hydrogéologiques et géotechniques, *Tunnels et espace souterrain*, 274-314, doi.

Perello, P., Venturini, G., Dematteis, A., Bianchi, G.W., Delle Piane, L. & Damiano, A., 2005. Determination of reliability in geological forecasts for linear underground structures: the method of the R-index. *in Proceedings of Geoline International Symposium*, pp. 8, Lyon.

Stragiotti, L., Armando, E., Barisone, G.P., Del Greco, O., Innaurato, N., Lunardi, P., Pelizza, S., Polino, R. & Ventosi, U., 1979. Essais et auscultations dans la conception et l'exécution de quatre tunnels dans les schistes lustrés de la Vallée de Suse (Italie). *in International Congress on Rock Mechanics*, pp. 15, ed mechanics, I. S. f. R. Poligrafico Pedrazzini, Locarno, Montreux, Suisse.

### 10.ALLEGATO 1 SINTESI DELL'ANALISI DELL'AFFIDABILITA' DEI DATI GEOLOGICI (R-INDEX)

tratta n.	SONDAGGI				RILEVAMENTO GEOLOGICO				INDAGINI GEOFISICHE				COMPLESSITA'			R - INDEX	pk
	rating quantità	rating tipo	rating distanza media dal tunnel	rating profondità di indagine	rating scala	rating estensione area	rating tecnica rilevamento	rating % affioramento	rating lunghezza sezioni	rating definizione	rating distanza media dal tunnel	rating profondità di indagine	rating litostratigrafia	rating deformazioni duttili	rating deformazioni fragili		
1	0	0	0	0	6	5	6	7	0	0	0	0	0,80	1,00	0,75	3,12	48.5-49
2	0	0	0	0	6	5	6	7	0	0	0	0	0,80	1,00	0,75	3,12	49-49.5
3	6	5	4	9	6	5	6	7	0	0	0	0	0,80	1,00	0,75	4,10	49.5-50
4	10	9,5	10	10	6	8	10	9	0	0	0	0	0,80	1,00	0,75	8,70	50-50.5
5	10	9,5	10	10	6	8	10	9	0	0	0	0	0,80	1,00	0,75	8,70	50.5-51
6	10	9,5	10	10	6	8	10	9	0	0	0	0	0,80	1,00	0,75	8,70	51-51.5
7	10	9,5	10	10	6	8	10	9	0	0	0	0	0,80	1,00	0,75	8,70	51.5-52
8	10	9,5	4	9	6	8	10	9	0	0	0	0	0,80	1,00	0,75	7,90	52-52.5
9	10	9,5	4	10	6	8	10	7	0	0	0	0	0,80	1,00	0,75	5,90	52.5-53
10	10	9,5	4	10	6	5	10	7	0	0	0	0	0,80	1,00	0,75	5,10	53-53.5
11	6	9,5	4	9	6	5	10	7	0	0	0	0	0,80	1,00	0,75	4,90	53.5-54
12	1	9	1	7	6	8	10	5	0	0	0	0	0,80	1,00	0,75	3,84	54-54.5
13	1	9	1	7	6	8	10	5	0	0	0	0	0,80	1,00	0,75	3,84	54-5-55
14	2	9,5	7,5	9	8	8	10	7	0	0	0	0	0,80	1,00	0,75	5,02	55-55.5
15	2	9,5	7,5	9	8	8	10	7	0	0	0	0	0,80	1,00	0,75	5,02	55.5-56
16	2	9,5	6,5	9	0	0	0	0	0	0	0	0	1,00	0,00	0,00	6,41	56-56.5
17	2	9,5	8,5	10	0	0	0	0	0	0	0	0	1,00	0,00	0,00	6,41	56.5-57
18	0	0	0	0	8	8	10	6	0	0	0	0	0,80	1,00	0,75	3,91	57-57.5
19	0	0	0	0	8	8	10	6	0	0	0	0	0,80	1,00	0,75	3,91	57.5-58
20	1	9,5	8	10	8	8	10	8	0	0	0	0	0,80	1,00	0,75	4,00	58-58.6
21	1	9,5	8	10	8	8	10	8	0	0	0	0	0,80	1,00	0,75	4,00	58.5-59
22	0	0	0	0	8	8	10	6	0	0	0	0	0,80	1,00	0,75	3,91	59-59.5
23	0	0	0	0	9	8	10	9	0	0	0	0	0,80	1,00	0,75	4,22	59.5-60
24	0	0	0	0	9	8	10	9	0	0	0	0	0,80	1,00	0,75	4,22	60-60.5
25	0	0	0	0	9	8	10	9	0	0	0	0	0,80	1,00	0,75	4,22	60.5-61
26	0	0	0	0	8	10	10	8	0	0	0	0	0,80	1,00	0,75	3,98	63.9-64.4
27	0	0	0	0	8	10	10	8	0	0	0	0	0,80	1,00	0,75	3,98	64.4-64.9
28	0	0	0	0	8	10	10	8	0	0	0	0	0,80	1,00	0,75	3,98	64.9-65.4
29	0	0	0	0	8	10	10	8	0	0	0	0	0,80	1,00	0,75	3,98	65.4-65.9
30	0	0	0	0	8	10	10	8	0	0	0	0	0,80	1,00	0,75	3,98	65.9-66.4

### 11.ALLEGATO 2 CALCOLO DEL GR-INDEX PER LE LITOLOGIE ATTESE LUNGO IL TUNNEL DI BASE (lato Italia)

Lithologie Litologia	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]		$\sigma_c$ [MPa]		$E_s$ [GPa]		$E_t$ [GPa]		Longueur Lunghezza [m]	D			(n/l)				N			S						GR index					
	st. dev.	n	st. dev.	n	st. dev.	n	st. dev.	n		P, L	%		$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\sigma_c$ [MPa]	$E_s$ [GPa]	$E_t$ [GPa]	med moy	%	val.	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\sigma_c$ [MPa]	$E_s$ [GPa]	$E_t$ [GPa]	%	dev. std.		val.				
1 TCS	0,5	3	24,6	10	25,0	10	21,1	10	2160	0,5	0,35	0,175	0,001	0,8	0,0046	0,8	0,0046	0,6	0,0046	0,6	0,7	0,5	0,35	0,25	0,75	0,75	0,75	0,15	0,63	0,09	62%
2 gcc	0,2	13	21,1	26	-	1	-	1	4410	0,1	0,35	0,035	0,003	0,6	0,0059	0,6	0,0002	1	0,0002	1	0,8	0,5	0,4	0,25	0,75	1	1	0,15	0,75	0,11	55%
3 gck, TPG	0,6	10	23,1	24	-	-	-	-	120	0,1	0,35	0,035	0,083	0,2	0,2000	0,2		1		1	0,6	0,5	0,3	0,25	0,75	1	1	0,15	0,75	0,11	45%
4 OMB, cl-b	0,6	7	38,9	11	-	-	-	1	330	0,1	0,35	0,035	0,021	0,2	0,0333	0,2		1	0,0030	0,6	0,5	0,5	0,25	0,75	1	1	0,15	0,75	0,11	40%	
5 AMC	0,4	62	49,1	55	11,3	22	12,9	22	738	0,1	0,35	0,035	0,084	0,2	0,0745	0,2	0,0298	0,2	0,0298	0,2	0,2	0,5	0,1	0,25	0,75	0,50	0,50	0,15	0,50	0,08	21%
6 AMD, AMF	0,3	23	30,3	20	2,4	2	6,5	2	2611	0,1	0,35	0,035	0,009	0,4	0,0077	0,4	0,0008	1	0,0008	1	0,7	0,5	0,35	0,25	0,75	0,25	0,50	0,15	0,44	0,07	45%
7 CI	0,4	49	35,4	83	19,8	24	17,5	24	12450	0,1	0,35	0,035	0,004	0,6	0,0067	0,4	0,0019	0,8	0,0019	0,8	0,65	0,5	0,325	0,25	0,75	0,50	0,50	0,15	0,50	0,08	44%
9 DGA	0,7	55	40,5	48	-	1	22,1	40	1830	0,1	0,35	0,035	0,030	0,2	0,0262	0,2	0,0005	1	0,0219	0,2	0,4	0,5	0,2	0,25	0,75	1	0,75	0,15	0,69	0,10	34%
10 QSE	0,2	12	50,2	12	0,4	2	23,1	8	2550	0,1	0,35	0,035	0,005	0,6	0,0047	0,6	0,0008	1	0,0031	0,6	0,7	0,5	0,35	0,25	1,00	0,25	0,75	0,15	0,56	0,08	47%
22 roches fracturées rocce fratturate	-	-	-	-	-	-	-	-	2054	0,5	0,35	0,175	-	0,8	-	0,8	-	1	-	1	0,9	0,5	0,45	0,5	0,5	0,5	0,5	0,15	0,50	0,08	70%
23 roches de failles, cargneules rocce di faglia, carniole	-	-	-	-	-	-	-	-	2490	0,75	0,35	0,2625	-	1	-	1	-	1	-	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,15	0,50	0,08	84%

Lithologie Litologia	$\gamma_n$ [kN/m <sup>3</sup> ]		$C_{uu}$ (kPa)		$E_m$ (MPa)		PI (MPa)		Longueur Lunghezza [m]	D			(n/l)				N			S						GR Index					
	st. dev.	n	st. dev.	n	st. dev.	n	st. dev.	n		P, L	%		$\gamma_n$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$C_{uu}$ (kPa)	$E_m$ (MPa)	PI (MPa)	n/l moy.	%	val.	$\gamma_n$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$C_{uu}$ (kPa)	$E_m$ (MPa)	PI (MPa)	%	dev. std.		val.				
dépôts meubles / depositi non consolidati (ac, af, at, EJ, Ez, gi)	0,71	47	14,7	19	723	433	2,5	433	1470	0,1	0,35	0,035	0,03	0,2	0,013	0,2	0,295	0,2	0,295	0,2	0,2	0,5	0,1	0,25	0,5	1	0,25	0,15	0,5	0,075	21%

Classificazione delle litologie lungo la tratta in analisi del TdB in base al GR-index. I valori riportati in rosso nella tabella sono quelli ottenuti per litologie di cui per la classificazione geomeccanica fossero disponibili o solo valori di letteratura, o set 'incompleti' di dati geotecnici. I valori in verde corrispondono a quelli interessati dall'aggiornamento con i dati di nuova acquisizione (ritorno di esperienza della Maddalena).

