

POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile - Geotecnica

BBT SE – Brenner Base Tunnel



Tesi di Laurea Magistrale

Utilizzo dei parametri macchina chiave per una classificazione in continuo dell'ammasso roccioso durante lo scavo con TBM:
l'esempio della Galleria di Base del Brennero

Relatore:
Prof. Ing. Daniele Martinelli

Candidato

Correlatori:
Dott. Ing. Antonio Voza
Dott. Geol. Harald Egger

Gianluca Maggio

Anno Accademico 2019/2020

Indice

Abstract	I
Abstract	II
INTRODUZIONE	1
CAPITOLO 1 – La Galleria di Base del Brennero	3
1.1 Cenni storici.....	3
1.2 Inserimento nel contesto europeo	4
1.3 Il progetto della Galleria di Base del Brennero (BBT).....	8
1.4 Metodi di scavo	12
1.5 La società BBT-SE.....	15
1.6 Stato di avanzamento dei lavori.....	17
1.6.1 TULFES-PFONS.....	18
1.6.2 PFONS-BRENNERO	19
1.6.3 MULES 2-3	19
1.6.4 SOTTOATTRAVERSAMENTO ISARCO	20
CAPITOLO 2 – Aspetti geomeccanici del lotto “Mules 2-3”	22
2.1 Inquadramento geografico.....	22
2.2 Inquadramento geologico	27
2.3 Il modello geologico ed idrogeologico	29
2.4 Il modello geomeccanico.....	33
2.5 Classificazione geomeccanica interna di BBT-SE.....	37
CAPITOLO 3 – Lo scavo meccanizzato nell’ambito del lotto “Mules 2-3”	46
3.1 Lo scavo meccanizzato e le tipologie di TBM	46
3.1.1 Gripper Shield.....	48
3.1.2 Single Shield TBM.....	49
3.1.3 Double Shield TBM	50
3.2 Caratteristiche tecniche – costruttive della TBM S-1054.....	53
3.3 Caratteristiche tecniche – costruttive delle TBM S-1071 / S-1072	57
3.4 Gestione del rischio per lo scavo meccanizzato.....	60
3.4.1 Valutazione e identificazione del rischio.....	61
3.4.2 Interventi di mitigazione del rischio.....	63
3.5 Il piano delle indagini in avanzamento.....	68
3.5.1 Indagini sistematiche	70
3.5.2 Indagini puntuali	72
3.6 La documentazione geologica: rilievo dei fronti di scavo	72

3.7 Il monitoraggio del processo di scavo: Parametri TBM.....	74
3.7.1 Monitoraggio del processo di scavo – Zona I.....	75
3.7.2 Monitoraggio nella zona dello scudo – Zona II	77
3.8 Il monitoraggio geotecnico zona III	80
CAPITOLO 4 - Analisi statistica e confronto dei parametri TBM del Cunicolo Esplorativo e delle Gallerie di Linea	84
4.1 Introduzione alla statistica descrittiva	84
4.1.1 Indici di posizione: Media, Moda e Mediana	85
4.1.2 Indici di dispersione: Varianza e Deviazione standard.....	85
4.1.3 Quantili e quartili.....	85
4.1.4 Distribuzione normale (Gaussiana)	86
4.1.5 Box Plot	87
4.1.6 Istogrammi di frequenza	88
4.2 Analisi statistica dei parametri della TBM S-1054.....	90
4.3 Analisi statistica dei parametri della TBM S-1071.....	98
4.4 Analisi statistica dei parametri della TBM S-1072.....	106
4.5 Confronto dei parametri delle tre TBM: diagrammi di frequenza di confronto e range di funzionamento	113
CAPITOLO 5 - Analisi geomeccanica dei parametri TBM e correlazione con il comportamento dell’ammasso roccioso	123
5.1 Linee guida interne BBT SE per la definizione dei comportamenti dell’ammasso.....	123
5.2 Le modalità di scavo in condizioni non standard	126
5.3 Andamento dei parametri macchina per la zona I.....	128
5.4 Andamento delle misure di monitoraggio in zona II.....	137
5.5 Correlazione tra le misure	141
5.5.1 Andamenti tipici dei parametri macchina principali	141
5.5.2 Esempio di analisi dei KPI per la valutazione dell’instabilità del fronte e del comportamento spingente dell’ammasso sul cavo: Fermo della TBM S-1071 alla pk 43+176,25.....	146
5.6 Definizione dei range dei KPI.....	156
CONCLUSIONI	167
BIBLIOGRAFIA.....	170
ALLEGATI.....	178

Abstract

Il Cunicolo Esplorativo di BBT viene scavato precedentemente alle due uguali gallerie principali e presenta un diametro ridotto rispetto a queste, il suo fine è quello di investigare le condizioni dell'ammasso roccioso e la sua risposta allo scavo, permettendo così di costruire l'opera con una ragionevole ottimizzazione dei rischi. Nell'ambito di BBT, viene adottata una classificazione di tipo comportamentale dell'ammasso roccioso, in cui una serie di parametri macchina chiave sono associati al comportamento dell'ammasso roccioso incontrato. Mentre i sistemi di classificazione comunemente utilizzati (RMR, GSI) si basano solo sulla mappatura geologica e la parametrizzazione del fronte della galleria, l'analisi dei parametri macchina consente la previsione del comportamento dell'ammasso roccioso per lo scavo successivo sulla base dei dati analitici derivanti dal funzionamento della macchina e dei dati geologici ottenuti durante la loro manutenzione quotidiana. Lo studio analizza una sezione di circa 500 metri prima dell'arresto per motivi geologici che ha avuto luogo in una delle gallerie principali, effettuando un'analisi statistica dei parametri chiave della macchina delle tre diverse TBM e, successivamente, confrontandone gli intervalli operativi. Infine, il comportamento dell'ammasso roccioso è determinato mediante una correlazione con i corrispondenti intervalli dei parametri della macchina.

Abstract

The exploratory tunnel of the BBT is excavated ahead of the two equal main tunnels with a smaller diameter regarded to them, in order to investigate the rock mass conditions and its response to excavation, thus allowing to carry out the construction works with a reasonable optimization of the risks. In the context of BBT, a behavioural classification of the rock mass has been adopted, in which a range of key machine parameters is associated with the rock mass behaviour encountered. While commonly used classification systems (RMR, GSI) rely only on the geological mapping and parameterization of the tunnel face, the analysis of the machine parameters allows the prediction of the rock mass behaviour for the subsequent excavation based on analytical data arising from the machine operation and on geological data gained during their daily maintenance. The study analyses a section of about 500m prior the stop for geological reasons that took place in one of the main tunnels, carrying out a statistical analysis of the key machine parameters of the three different TBMs and, subsequently by comparing operating ranges between them. Finally, the rock mass behaviour is determined by correlating it with the corresponding intervals of the machine parameters.

INTRODUZIONE

Durante lo scavo di una galleria, risulta essenziale la classificazione dell'ammasso roccioso che, in aggiunta ai dati del modello di previsione geomeccanico, offre le informazioni necessarie per una corretta mitigazione dei rischi prefigurati nel progetto. Le tecniche conoscitive ad oggi in uso, sono differenti se si tratta di uno scavo in tradizionale o in meccanizzato. Nel primo caso, durante l'esecuzione dei singoli sfondi, vengono effettuati rilievi al fronte di scavo utili per valutare le condizioni geologiche-idrogeologiche e per classificare l'ammasso roccioso tramite indici quantitativi o qualitativi-descrittivi. Insieme a questa operazione essenziale, il monitoraggio in corso d'opera permette di valutare l'idoneità dei sostegni e del rivestimento di prima fase messi in opera; questa procedura è sinonima del cosiddetto "metodo osservazionale". Discorso differente viene fatto per lo scavo meccanizzato (specialmente per le TBM scudate), infatti la limitata possibilità di accesso alle pareti dello scavo rende la classificazione dell'ammasso di più complessa acquisizione. I rilievi geologici vengono fatti ad intervalli molto più elevati soltanto durante i fermi della TBM, dovuti alla normale manutenzione, per mezzo di aperture che si trovano sul fronte e sulle parti laterali degli scudi (telescopie). Questo permette di valutare le condizioni geologiche-idrogeologiche, ma rende difficile la classificazione della tratta percorsa tra un fermo e l'altro, con gli indici di qualità. Al fine di poter ottenere più informazioni possibili, nell'ambito della Galleria di Base del Brennero, lo scavo delle Gallerie di Linea viene preceduto su tutta la lunghezza del tracciato da un Cunicolo Esplorativo con dimensioni ridotte rispetto alle Gallerie di Linea e con la funzione di investigare le condizioni dell'ammasso roccioso e la sua risposta allo scavo. Nell'ambito del lotto "Mules 2-3, lo scavo del cunicolo ha permesso di zonizzare le tratte scavate a seconda delle tipologie di comportamento dell'ammasso (TCR) riscontrate. A tal proposito, è stato possibile suddividere il profilo geologico consuntivo di BBT SE in zone a comportamento omogeneo attraverso lo studio degli andamenti dei parametri TBM, tarati in base ai rilievi geologici disponibili e, chiudendo così alcune lacune d'informazioni tra quest'ultimi. Il lavoro svolto nel presente studio, consta nell'acquisizione e analisi dei parametri macchina registrati non solo dal Cunicolo Esplorativo ma anche dalle due Gallerie di Linea. Nello specifico è stata effettuata un'analisi di circa 9 km di gallerie (tratto di 3 km di scavato da tutte e tre le frese) facendo riferimento all'ultimo anno di scavo per le due gallerie principali. Lo scavo avviene per mezzo di TBM doppio scudate, scelte per le caratteristiche complesse della geologia da

attraversare. Le DS-TBM, S-1054 “Serena” impegnata nello scavo del cunicolo esplorativo” e le S-1071 / S-1072 “Flavia” e “Virginia” impegnate invece nello scavo delle due Gallerie di Linea, registrano in continuo un vasto set di parametri: scegliendo i più rappresentativi ed analizzando il loro andamento, è stato possibile correlare ad essi le tipologie di comportamento dell’ammasso roccioso già definite in fase progettuale. I risultati ottenuti sono stati utili per la redazione di una tabella riepilogativa in cui sono stati definiti, per ogni tipo di comportamento dell’ammasso, un intervallo dei parametri macchina per ciascuna delle tre gallerie in questione in questione. L’analisi è stata svolta soprattutto con lo scopo di osservare possibili anomalie che possano fungere da parametri indicatori rispetto al rischio di futuri fermi delle TBM. In questo senso, il lavoro si è concentrato soprattutto nel chilometro di scavo che ha interessato il fermo della fresa “Flavia” avvenuto nel gennaio del corrente anno. A supporto dell’analisi geomeccanica, è stata fatta parallelamente anche un’analisi di impronta prettamente statistica per la quale è stata redatta una tabella in cui sono riepilogati i range di funzionamento dei parametri per le tre macchine. La tratta investigata risulta essere di particolare interesse geologico in quanto nei 500 m a ridosso del fermo, l’unica canna ad aver subito tale problema è stata la Galleria di Linea Nord Ovest (GLON). Come verrà spiegato in questo elaborato, le registrazioni utili alla caratterizzazione dell’ammasso riguardano due zone distinte della TBM, i parametri meccanici relativi al processo di scavo che vengono registrati in continuo e le registrazioni delle celle di pressione e dei fontimeters per il monitoraggio dell’interazione tra cavo e scudi. Inoltre, una misura molto importante è il peso dello smarino, tramite il confronto del dato registrato con il peso teorico stimato (160 t per la S-1054 e 450 t per le S-1071/S-1072) è possibile individuare se il fronte abbia sofferto di fenomeni di instabilità durante lo scavo. Le misure dei parametri hanno mostrato diverse anomalie, circoscritte alla zona del fermo, avvenuta alla progressiva di progetto pk 43+176,25.

CAPITOLO 1 – La Galleria di Base del Brennero

1.1 Cenni storici

Il passo del Brennero è considerato, da sempre, uno dei collegamenti più importanti tra il nord ed il sud dell'Europa. Grazie ai suoi 1371 m di altitudine, risulta essere il valico più basso dell'arco alpino; inoltre, da un punto di vista sia economico che commerciale, si trova in una posizione strategica.

Fin dall'età del bronzo questo passo veniva usato come importante collegamento tra i paesi del nord Europa con quelli meridionali. Il primo sentiero di collegamento risale al periodo romano (XV a.C), ossia la cosiddetta Via Claudia Augusta, convertita successivamente in strada militare.



Figura 1.1 - Foto storiche della ferrovia del Brennero [Mostra "150 anni. Ferrovia del Brennero" – Museo storico del Trentino]

La quantità di merce trasportata attraverso il Brennero ha avuto nel corso della storia un incremento continuo, per cui è maturata l'idea di costruire un collegamento ferroviario: già all'inizio del XXIX secolo si registravano annualmente 15.000 tonnellate di merci transitate, e cinquanta anni dopo, si superavano le 60.000 tonnellate. Nel 1867, viene inaugurata la ferrovia del Brennero (fig. 1.1), che collega Bolzano ad Innsbruck; un'opera che ad oggi ricopre un ruolo di primaria importanza, oltre che rappresentare un vero e proprio capolavoro dell'Ingegneria Civile.

Nella seconda metà del secolo scorso, anche in seguito al boom economico europeo, si è registrato un notevole incremento di traffico su gomma. Questo ha portato ad una crescente domanda di opere infrastrutturali, motivo per cui venne realizzata anche una nuova rete autostradale, chiamata per l'appunto *autostrada del Brennero*, transitabile dal 1947.

Grazie a queste due opere (fig. 1.2), il volume delle merci trasportate ha raggiunto nel 2008 circa 50 milioni di tonnellate, di cui appena 14 milioni su rotaia.



Figura 1.2 - Volume merci trasportate su gomma/rotaia [www.bbt-se.com]

1.2 Inserimento nel contesto europeo

Nel 1994, l'Unione Europea nell'ottica di contrastare il crescente traffico pesante su strada in favore dell'infrastruttura ferroviaria, ne ha promosso il suo potenziamento, anche grazie al fatto che essa risulta più ecologica. Già nel 1990, venne fatto un primo passo attraverso lo sviluppo delle reti di trasporto TEN (fig. 1.3), che vennero trasformati, nel 2013, in collegamenti transfrontalieri multimodali.

I nuovi corridoi TEN-T (Trans European Network-Transport) collegano, ad oggi, i più importanti porti marittimi europei con l'infrastruttura ferroviaria ed i relativi accessi alle arterie stradali. Il progetto ha l'obiettivo di superare una serie di problematiche di tipo tecnico, geografico e di capacità dei flussi.

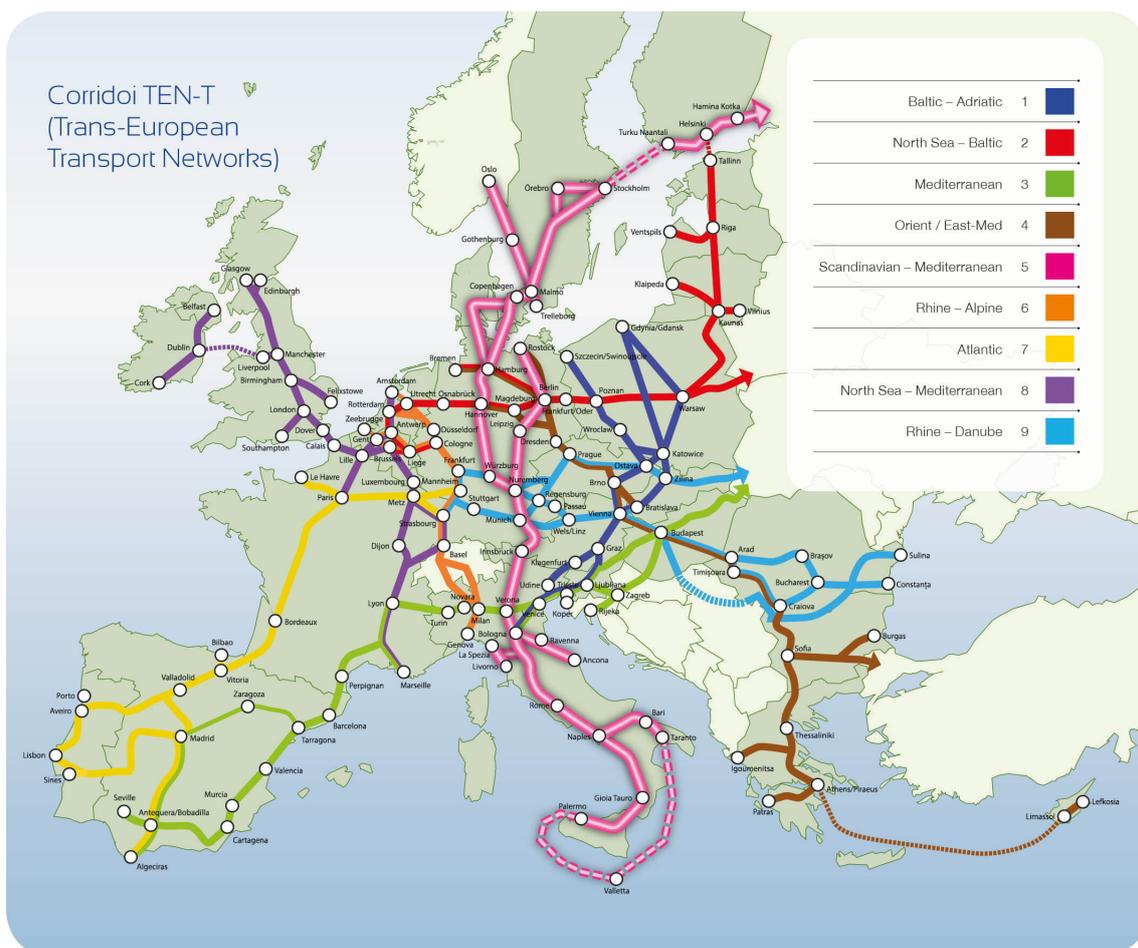


Figura 1.3 - Corridoi TEN-T (Trans-European Transport Network) [www.bbt-se.com]

La Galleria di Base del Brennero rientra all'interno del progetto dei TEN-T e dei nove corridoi principali, e rappresenterà una delle opere infrastrutturali più importanti, poiché consentirà il superamento della barriera naturale delle Alpi orientali.

La nuova rete centrale collegherà:

- 94 grandi porti europei con linee ferroviarie e stradali;
- 38 grandi aeroporti con linee ferroviarie che portano alle corrispettive città principali;
- 15000 km di linee ferroviarie convertite ad alta velocità;
- 35 progetti transfrontalieri destinati a ridurre le strozzature.

Nel complesso verranno realizzati nove corridoi:

1. Il corridoio Baltico-Adriatico è uno dei più importanti assi stradali e ferroviari transeuropei che collegherà il Mar Baltico al Mare Adriatico. La sua realizzazione comprende importanti progetti ferroviari come la Galleria di Base del Semarang, in fase di costruzione, e Galleria di Base del Koralm, in fase di ultimazione, entrambi in Austria.
2. Il corridoio Mare del Nord-Mar Baltico collegherà i porti della costa orientale del Baltico con i porti del Mare del Nord.
3. Il corridoio Mediterraneo collegherà la penisola iberica con il confine ungaro-ucraino costeggiando il litorale mediterraneo della Spagna e della Francia per poi attraversare le Alpi nell'Italia settentrionale in direzione est, toccando la costa adriatica in Slovenia e Croazia, proseguendo infine verso l'Ungheria. I principali progetti ferroviari lungo questo corridoio sono i collegamenti Lione-Torino e la sezione Venezia-Lubiana.
4. Il corridoio orientale-Mediterraneo orientale collegherà le interfacce marittime del Mare del Nord, Mar Baltico, Mar Nero e Mediterraneo ottimizzando l'uso dei relativi porti e delle rispettive autostrade del mare.
5. Il corridoio scandinavo-mediterraneo è un asse nord-sud, cruciale per l'economia europea. Attraversando il Mar Baltico dalla Finlandia e dalla Svezia, e passando attraverso la Germania, le Alpi e l'Italia, collegherà i principali centri urbani e porti della Scandinavia e della Germania settentrionale ai centri industrializzati di produzione della Germania meridionale, dell'Austria e del Nord Italia ed infine ai porti italiani. I progetti più importanti che verranno realizzati saranno la Galleria di Base del Brennero ed il collegamento fisso del Fehmarnbelt. Il corridoio raggiungerà anche l'isola di Malta, passando dalla Sicilia.
6. Il corridoio Reno-Alpi costituisce una delle rotte merci più trafficate d'Europa: collegherà i porti del Mare del Nord di Rotterdam e Anversa con il Mar Mediterraneo a Genova attraversando la Svizzera e passando per alcuni dei principali centri economici europei.
7. Il corridoio Atlantico collegherà la parte occidentale della Penisola iberica e i porti di Le Havre e Rouen a Parigi, a Mannheim/Strasburgo con linee ferroviarie ad alta

velocità e linee ferroviarie convenzionali parallele, includendo anche la Senna come via navigabile interna.

8. Il corridoio del Mare del Nord-Mar Mediterraneo va dall'Irlanda e dal nord del Regno Unito fino al Mar Mediterraneo nel sud della Francia attraverso i Paesi Bassi, il Belgio e il Lussemburgo. È un corridoio multimodale che comprende acque navigabili interne nel Benelux e in Francia.
9. Il corridoio Reno-Danubio, le cui arterie fluviali principali sono il Reno e il Danubio, collegherà le regioni centrali intorno a Strasburgo e Francoforte sul Reno attraverso la Germania meridionale a Vienna, Bratislava e Budapest per arrivare infine al Mar Nero, con una sezione importante tra Monaco di Baviera e Praga, Zilina, Kosice e il confine ucraino.

Nello specifico, il territorio italiano sarà attraversato da quattro corridoi (fig. 1.4):

- Corridoio Baltico-Adriatico, che collegherà Vienna a Ravenna, mettendo in rete i porti di Trieste, Venezia e Ravenna stessa.
- Corridoio del Mediterraneo, che taglierà in orizzontale tutto il Nord Italia, partendo da Torino fino a Trieste, unendo così la Francia e i Balcani.
- Corridoio scandinavo-mediterraneo, che è, probabilmente, quello più strategico per lo sviluppo italiano, in quanto partendo dal Brennero arriverà fino a Roma, per poi biforcarsi a Napoli, collegando la città partenopea a Palermo, da una parte, e la Puglia dall'altra.
- Corridoio alpino, che prevede il collegamento diretto di Genova e Milano con il confine svizzero.



Figura 1.4 - TEN-T: corridoi che attraversano l'Italia [Fonte: online]

1.3 Il progetto della Galleria di Base del Brennero (BBT)

La Galleria di Base del Brennero rappresenta l'opera infrastrutturale più importante del corridoio Scandinavo-Mediterraneo che parte da Helsinki e arriva sull'isola di Malta. Il progetto è sovvenzionato principalmente dall'Unione Europea, che sostiene il 50% delle spese del cunicolo esplorativo ed il 40% dei costi delle due gallerie di linea. Invece, il rimanente importo viene sostenuto equamente da Italia e Austria.

La storica linea ferroviaria del Brennero presenta un percorso alquanto tortuoso e acclive, con pendenze che raggiungono anche valori del 27% e ha una capacità giornaliera di soli 260 convogli. La Galleria di Base del Brennero, invece, dal punto di vista tecnico ed ingegneristico, è considerata un progetto che porterà notevoli miglioramenti, in termini di trasporto ed interscambio in Europa. Essa, infatti, avrà un percorso pianeggiante e privo di curve, con una pendenza massima del 4-7‰, permettendo così, di incrementare la velocità di percorrenza e la grandezza dei convogli, in termini di peso e lunghezza. I treni merci potranno raggiungere velocità intorno ai 120 km/h e i treni passeggeri anche di 250 km/h, riducendo così notevolmente i tempi di percorrenza da Fortezza ad Innsbruck, che saranno di soli 25 minuti, contro gli 80 minuti attuali.

La Galleria di Base del Brennero si svilupperà dal portale sud, sito in Fortezza (BZ) ad una quota di 749 m.s.l.m., al portale nord nella città di Innsbruck, nel Tirolo austriaco, ad una quota di 574 m.s.l.m., dopo un percorso in sotterraneo di 56 km circa (fig. 1.5).

In prossimità di Innsbruck si collegherà alla circonvallazione ferroviaria esistente, raggiungendo 64 km di lunghezza totali, e divenendo così la galleria ferroviaria più lunga al mondo. La lunghezza della nuova linea del Brennero Verona-Monaco raggiungerà i 425 km.



Figura 1.5 - Sezione longitudinale della Galleria di Base del Brennero [www.bbt-se.com]

La Galleria di Base del Brennero conta complessivamente uno scavo di 230 km tra cunicoli e gallerie, così suddivisi (fig. 1.6):

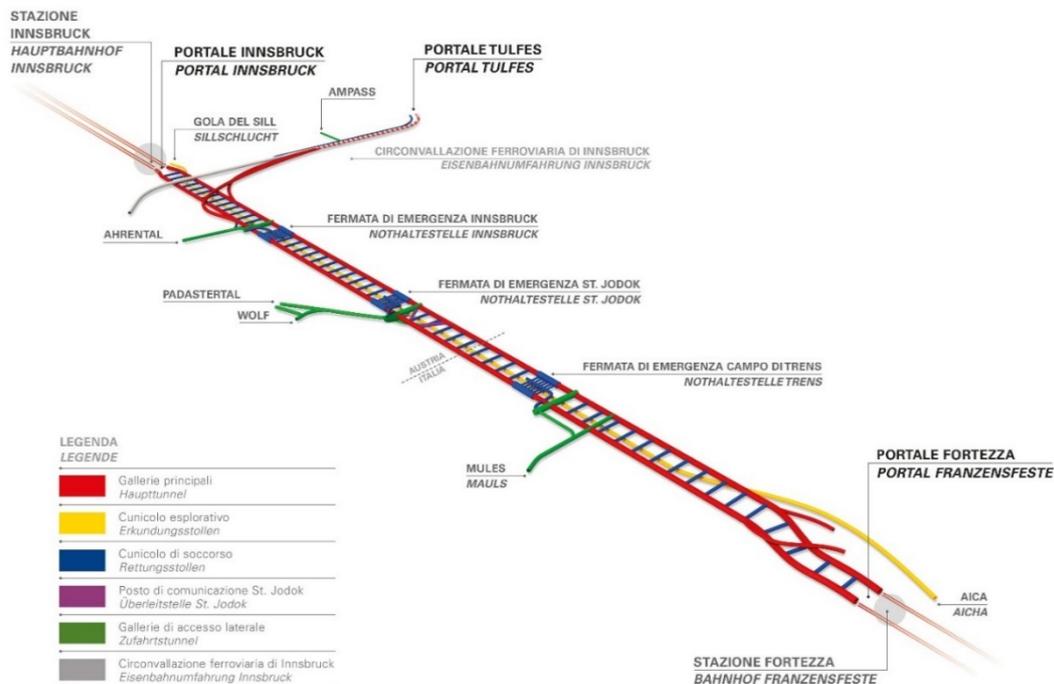


Figura 1.6 - Sistema di gallerie nel complesso della Galleria di Base del Brennero [www.bbt-se.com]

- Un Cunicolo Esplorativo che si sviluppa per l'intera lunghezza del collegamento Fortezza–Innsbruck, a una profondità di 12 m, in posizione centrale sotto le gallerie di linea (fig. 1.7). La sezione misura circa 6 m di diametro. Esso, oltre a fornire importanti informazioni di tipo geologico, funge da galleria logistica e di servizio durante le fasi di costruzione e da galleria di manutenzione e di drenaggio durante la fase di esercizio. Infatti, tramite le prospezioni è stato possibile indagare e caratterizzare l'ammasso roccioso, in modo da ottimizzare la progettazione delle Gallerie di Linea.
- Due Gallerie di Linea destinate ad ospitare la sovrastruttura ferroviaria (fig. 1.7). Ognuna di queste dispone di un binario singolo, ove i treni circoleranno in un'unica direzione. Le due canne (così vengono definite in gergo tecnico) avranno una lunghezza totale di 55 km, con interasse variabile tra 40-70m e diametro interno di circa 8 m. Inoltre, saranno interconnesse, ogni 333 m, per mezzo di cunicoli trasversali che, in caso di emergenza, saranno utilizzati come via di fuga. Tale concezione rispetta i più alti standard di sicurezza nella costruzione di gallerie.

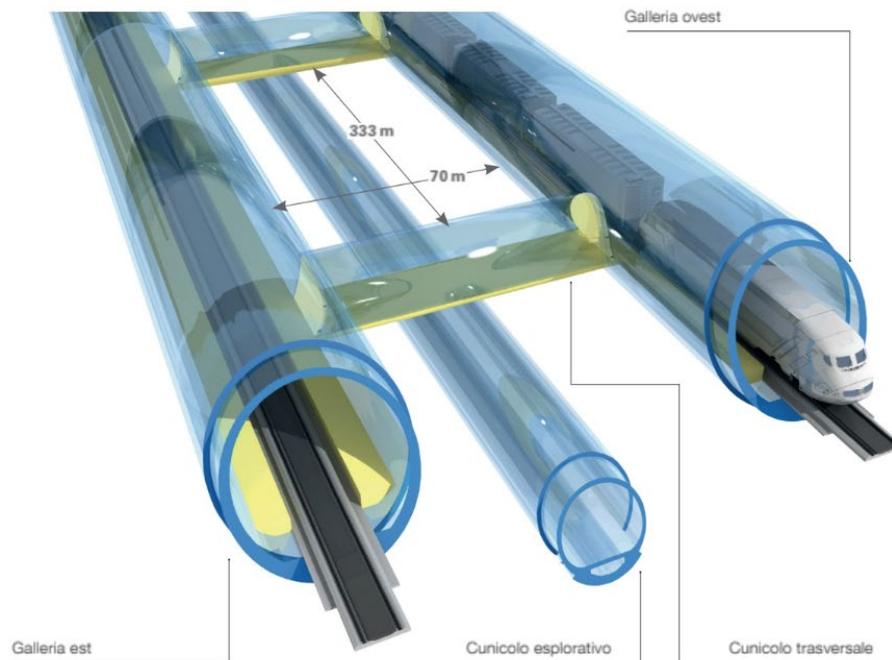


Figura 1.7 - Render sistema Gallerie di Linea e Cunicolo Esplorativo [www.bbt-se.com]

- Quattro gallerie di accesso laterali posizionate lungo il tracciato, nelle località di Ampass, Ahrental e Wolf in territorio austriaco ed a Mules in Italia. Queste partendo dalla superficie all'interno dell'ammasso roccioso, raggiungono il cunicolo esplorativo e le due canne principali. Durante la fase di costruzione, le

gallerie di accesso laterali hanno una funzione logistica. Vengono utilizzate, infatti, sia per il trasporto di approvvigionamento di materiale in galleria (calcestruzzo, ferro, conci prefabbricati), sia per il trasporto del materiale di scavo all'esterno. Inoltre, queste gallerie servono per il trasporto delle componenti delle TBM (Tunnel Boring Machine) in fase di assemblaggio.

- Tre fermate di emergenza, che sono collocate rispettivamente a Innsbruck, St.Jodok ed a Campo di Trens, a circa 20 km l'una dall'altra (fig. 1.8). Ogni fermata di emergenza si estende per una lunghezza di 470 m ed è fornita di vie di fuga sia verso il cunicolo centrale ogni 90 m sia verso le gallerie di linea ogni 45 m.

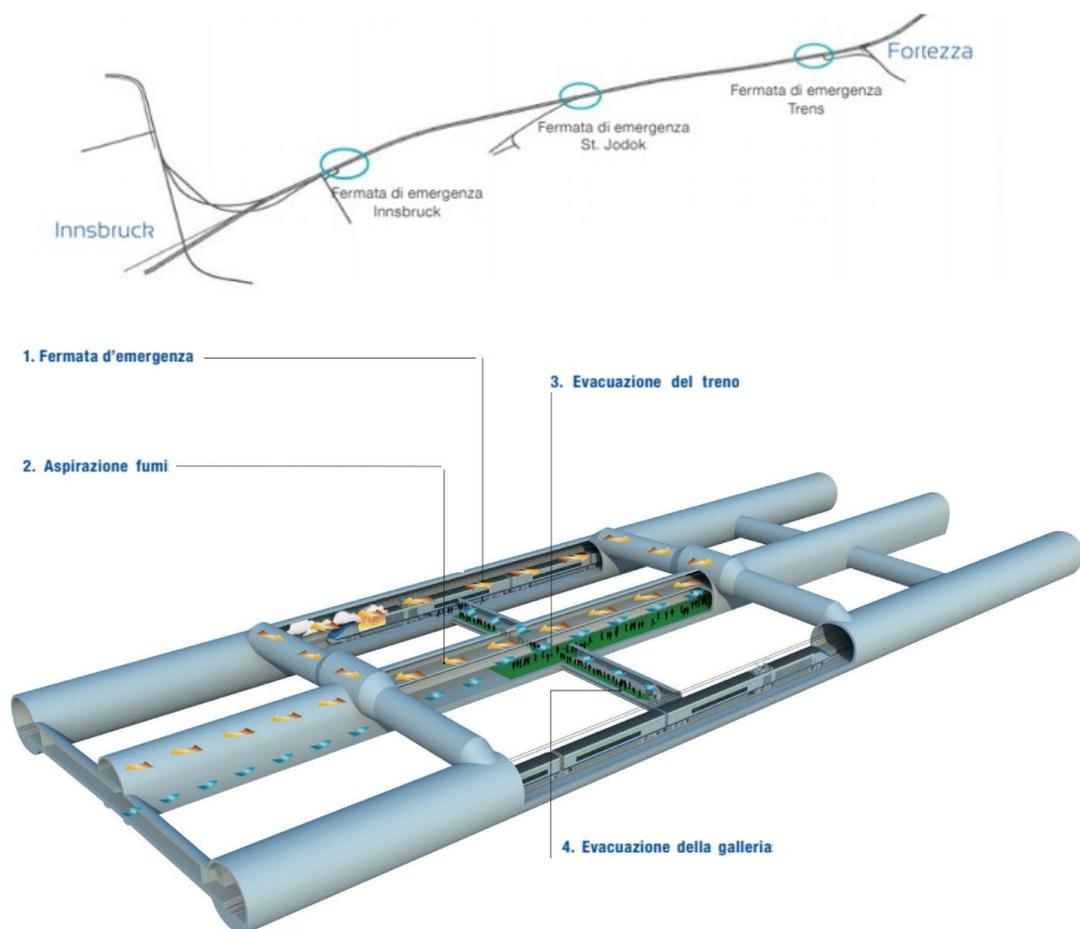


Figura 1.8 - In alto tracciato Fermate di Emergenza. In basso render piano degli interventi di soccorso in galleria [www.bbt-se.com]

1.4 Metodi di scavo

Per la realizzazione della Galleria di Base del Brennero vengono utilizzati due metodologie di scavo: il 50% circa viene scavato con il metodo tradizionale tramite l'utilizzo di esplosivo (tecnica "Drill&Blast"), mentre per l'altro 50% viene utilizzato il metodo "meccanizzato" per mezzo di TBM (Tunnel Boring Machine). Inoltre, per brevi tratti, l'avanzamento del fronte di scavo avviene per mezzo di martelloni idraulici e pale meccaniche, previo consolidamento del terreno. La scelta della metodologia più opportuna dipende, ovviamente, dalla qualità dell'ammasso roccioso incontrato, oltre che da altri fattori come la lunghezza del tratto da scavare, nonché le tempistiche di costruzione.

Nel caso di scavo in tradizionale, le fasi lavorative e la loro successione sono cicliche (fig. 1.9): perforazione dei fori dello schema di volata, riempimento di quest'ultimi con l'esplosivo e brillamento. Immediatamente dopo l'asporto del materiale così abbattuto, che consiste nelle fasi di disaggio e smarino, seguono le misure di laserscanning e rilievo geologico del fronte, per poi procedere con l'applicazione del calcestruzzo proiettato su fronte e cavo e la posa dei sostegni, e se necessario anche la posa di centine metalliche e di reti elettrosaldate. La perforazione dei fori al fronte di scavo per la posa dell'esplosivo e dei fori del cavo per la posa dei chiodi, viene effettuata tramite una macchina perforatrice chiamata "Jumbo", la quale attraverso i suoi bracci permette l'esecuzione di più fori in contemporanea.

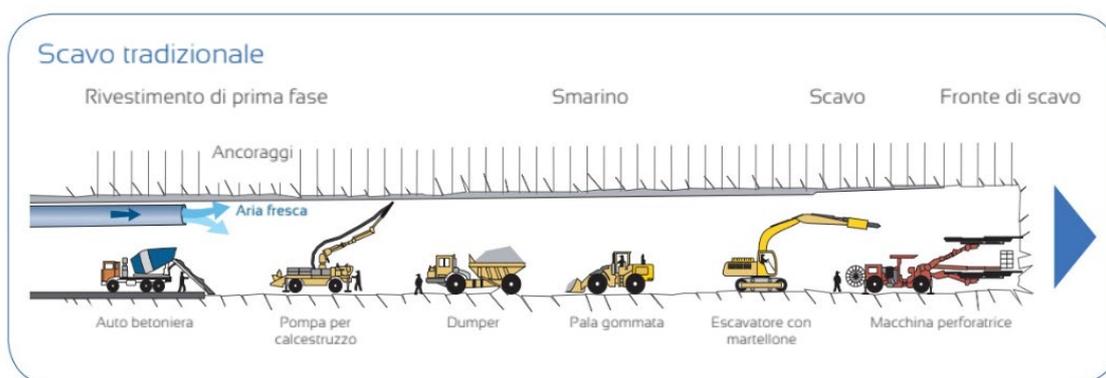


Figura 1.9 - Schema ciclico dello scavo "tradizionale" [AlpTransit Gotthard AG]

Lo scavo meccanizzato nell'ambito di BBT e cioè l'utilizzo delle TBM (Tunnel Boring Machine), o frese a piena sezione per rocce dure, per la continuità dell'avanzamento, porta grossi vantaggi in termini di produzione rispetto al metodo tradizionale.

Le TBM sono macchine che consentono un alto grado di industrializzazione del processo di scavo, costituendo nella pratica una "fabbrica mobile": scavano la roccia con una testa fresante, rimuovono il materiale di scavo e permettono la messa in opera del rivestimento definitivo grazie all'installazione dei conci prefabbricati in calcestruzzo. Quest'ultima parte avviene per mezzo dell'erettore di conci nello scudo di coda e consente di mettere in sicurezza il cavo appena realizzato.

Le TBM usate sul lato italiano, sono frese chiuse a doppio scudo (rif. Capitolo 3). Tali frese sono caratterizzate dalla presenza di uno scudo telescopico, che offre diversi vantaggi:

- possibilità di avanzare in roccia dura e stabile spingendosi sui grippers (gripper shoes) che contrastano direttamente contro l'ammasso roccioso;
- possibilità di montare, all'occorrenza, i supporti o rivestimenti contemporaneamente all'avanzamento del fronte;
- possibilità di avanzare, dove le condizioni dell'ammasso non consentano l'appoggio dei grippers contro l'ammasso, spingendosi direttamente sui rivestimenti montati dallo scudo di coda, in questo caso in fasi alterne con lo scavo.

Sul lato austriaco nell'ambito del lotto Tulfes-Pfons, è stato scavato un tratto di circa 16 km del cunicolo esplorativo con una TBM aperta: a differenza di quelle scudate, questa fresa è dotata solo dello scudo frontale e l'ammasso è visibile e quindi rilevabile affinché venga rivestito e consolidato nell'area retrostante mediante spritzbeton, centine e chiodi radiali. Tale tipologia di fresa avanza solo attraverso l'utilizzo dei grippers, che applicano una pressione di contrasto contro le pareti di scavo, e pertanto trova applicazione in ammassi rocciosi di media-alta qualità (fig. 1.10).

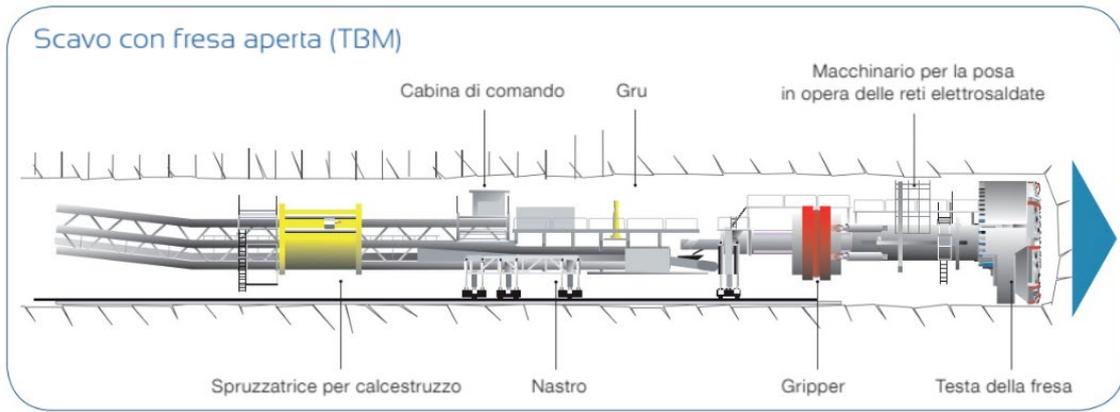


Figura 1.10 - Schema scavo "meccanizzato" [Fonte: AlpTransit Gotthard AG]

1.5 La società BBT-SE

La Società per Azioni Europea, denominata BBT SE, nasce con l'obiettivo di costruire una galleria ferroviaria tra Italia ed Austria, ovvero la Galleria di Base del Brennero. L'opera è progettata e realizzata su incarico dell'Unione Europea e delle Repubbliche Italia ed Austria.

Nel 1999 i Ministeri dei Trasporti dell'Italia e dell'Austria costituirono un Gruppo Europeo di Interesse Economico (GEIE), denominato GEIE BBT, il cui scopo era la progettazione della Galleria di Base del Brennero. In seguito, il GEIE venne trasformato in una SE, ossia una "Società Europea", una forma giuridica europea sancita dal regolamento 2157 del 08/10/01.

Il 16 dicembre 2004 venne istituita la *Galleria di Base del Brennero – Brenner Basistunnel* BBT-SE, incaricata anche della costruzione della Galleria di Base del Brennero. I lavori propedeutici alla costruzione della galleria hanno avuto inizio nel 2006. La costruzione vera e propria è iniziata nel 2007 e sarà completata entro il 2027. La galleria entrerà in esercizio nel 2028.

La realizzazione della Galleria di Base del Brennero viene cofinanziata dall'Unione Europea fino ad un massimo del 40-50%. In questo ambito, l'UE verifica costantemente lo stato di avanzamento lavori e l'utilizzazione dei fondi concessi. Il restante 50-60% dei costi viene ripartito equamente tra Italia e Austria (fig. 1.11). I costi complessivi vengono valutati pari a circa 8,384 miliardi di euro (base prezzi al 01.01.2018 per l'Italia). In tale stima, sono compresi i costi di costruzione, di gestione, di progettazione, dell'attrezzaggio ferroviario nonché una previdenza rischi.

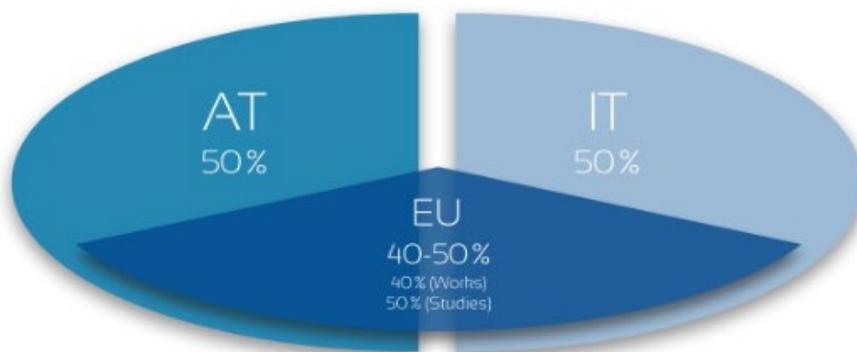


Figura 1.11 - Suddivisione finanziamenti [www.bbt-se.com]

La quota italiana pari al 50% (fig 1.11) viene detenuta da una società di partecipazione, la TFB (Tunnel Ferroviario del Brennero Holding S.p.A.), questa è formata da RFI (Rete Ferroviaria Italiana) per l'88,99 %, dalla Provincia Autonoma di Bolzano per il 6,38 %, dalla Provincia Autonoma di Trento per il 4,24 % e dalla Provincia di Verona per il 0,39 %.

La quota austriaca viene rappresentata da un unico azionista, la ÖBB (Österreichische Bundesbahnen) con il 50 % del capitale sociale (fig. 1.12). Inizialmente esisteva un secondo azionista, il Land Tirolo, che nel 2011 ha ceduto le proprie quote all'ÖBB, continuando ad essere rappresentato nel Consiglio di Sorveglianza della Società.

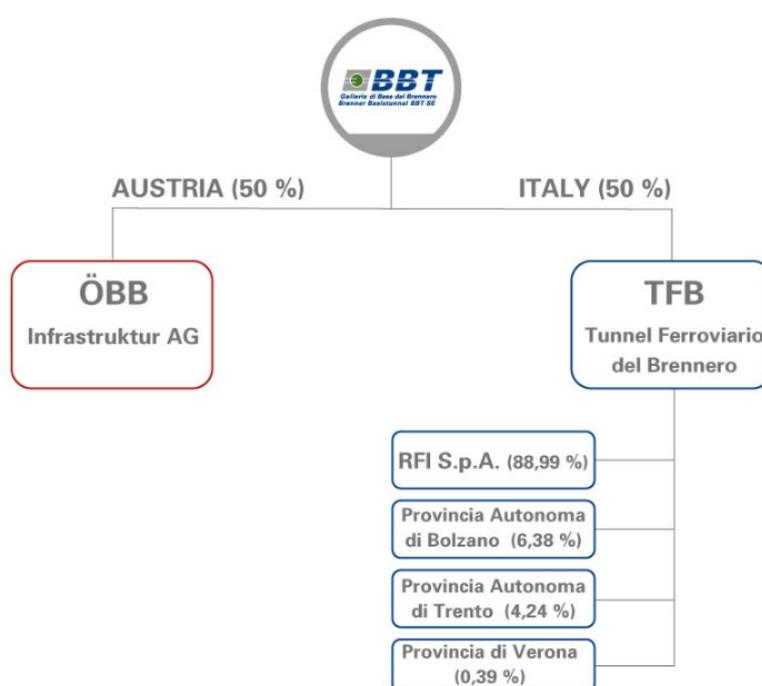


Figura 1.12 – Suddivisione quote Italia-Austria [www.bbt-se.com]

La Società Europea BBT-SE adotta un sistema di gestione dualistico, composto da due organi: il Consiglio di Sorveglianza e il Consiglio di gestione.

Il Consiglio di Sorveglianza ha funzioni di indirizzo e di controllo e i suoi componenti sono nominati dall'assemblea dei soci; al Consiglio di gestione è demandata la gestione della società.

La stipula dell'accordo di Stato tra Austria e Italia per la realizzazione della Galleria di Base del Brennero è avvenuta il 30/04/2004, e la sede legale della BBT-SE era sita ad

Innsbruck. Nel 2011, ad inizio della costruzione dell'opera, la sede legale della società viene trasferita in Italia, esattamente a Bolzano. In ragione di ciò, a decorrere da tale anno, gli appalti e gli affidamenti sono gestiti secondo le direttive nazionali degli appalti in Italia.

In futuro, quando la Galleria di Base del Brennero entrerà in funzione, la sede legale tornerà ad Innsbruck.

1.6 Stato di avanzamento dei lavori

In data 29.11.2019 l'avanzamento della Galleria di Base del Brennero ha raggiunto il 50% sul totale da scavare e cioè dei 230 km previsti a opera completata ne sono stati realizzati 115 km (fig. 1.13).

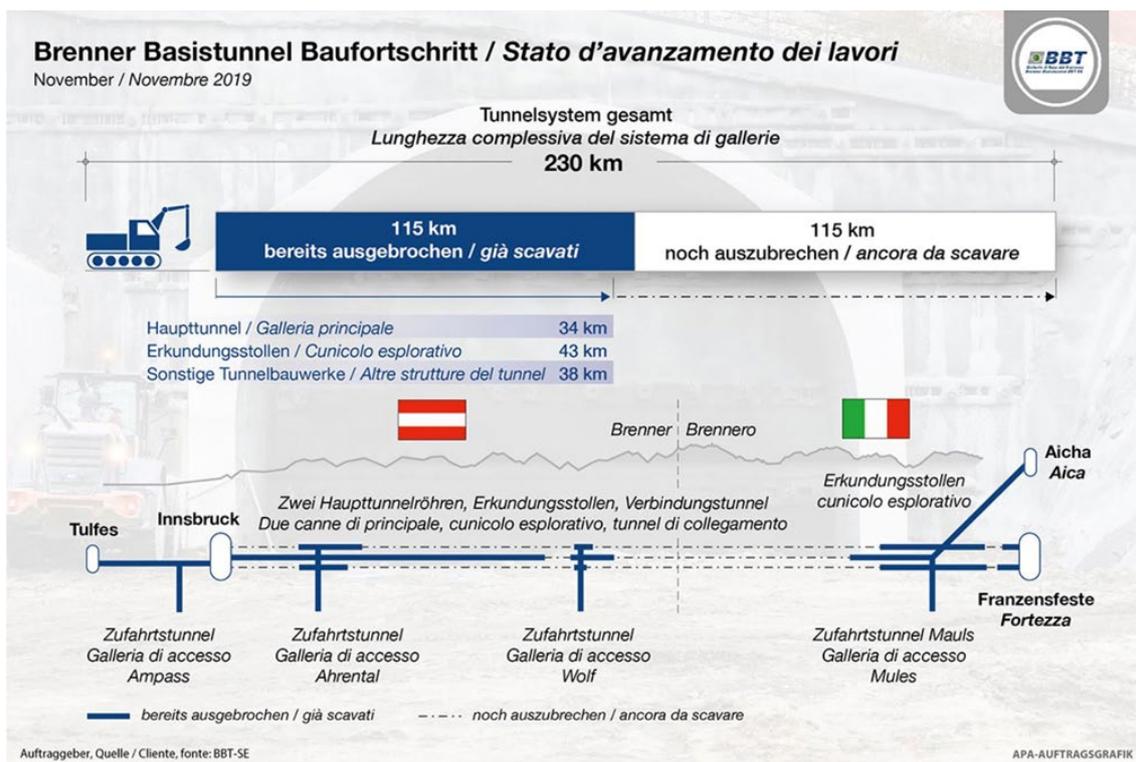


Figura 1.13 - Stato avanzamento lavori Galleria di Base del Brennero - Novembre 2019 [www.bbt-se.com]

Attualmente sono operativi quattro cantieri: due su territorio italiano e due su territorio austriaco (fig. 1.14).

In Italia i cantieri sono “Sottoattraversamento Isarco” sito nei pressi di Fortezza e “Mules 2-3” nei pressi dell’omonima cittadina. In Austria, si trovano i cantieri di “Tulfes-Pfons” e di “Pfons-Brennero”.

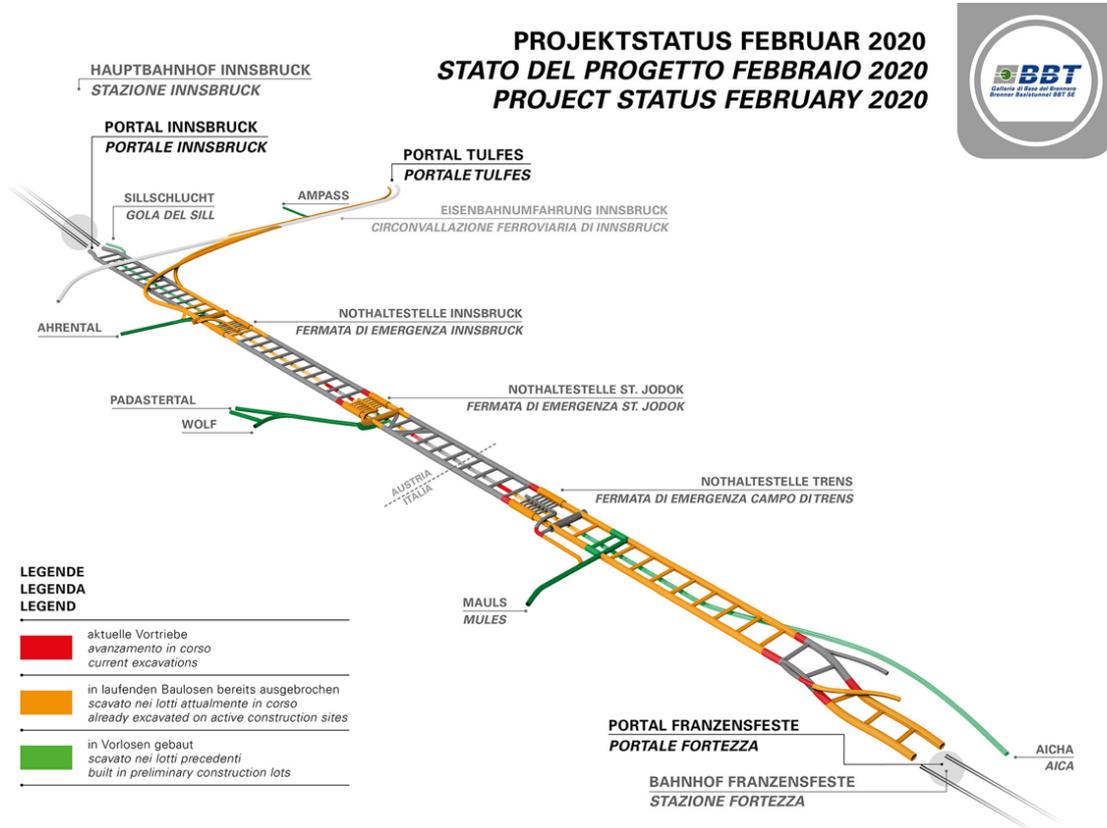


Figura 1.14 - Stato avanzamento lavori Galleria di Base del Brennero - Febbraio 2020 [www.bbt-se.com]

1.6.1 TULFES-PFONS

La costruzione dell’opera, per un totale di 38 km di gallerie da scavare, è stata affidata all’ATI Strabag/Salini-Impregilo nell’estate 2014. I lavori sono stati avviati nel mese di settembre dello stesso anno e conclusi nel mese di luglio 2019. Il lotto si compone delle seguenti opere:

- Cunicolo di soccorso Tulfes di 9,7 km lungo la circonvallazione di Innsbruck, scavato in tradizionale su tre fronti contemporanei: da Tulfes verso ovest e dalla galleria di accesso Ampass verso est e verso ovest. L’opera è stata completata nell’estate del 2017.

- Tre gallerie principali di 3 km, scavate in metodo tradizionale con il NATM (New Austrian Tunnel Method) e già completate. In questo tratto sono stati realizzati ca. 6 km di galleria.
- Le gallerie di interconnessione tra la Galleria di Base del Brennero e la Circonvallazione di Innsbruck, realizzate con metodo di scavo tradizionale. Le gallerie sono state completate nella primavera 2017, attualmente si sta procedendo con la posa in opera del rivestimento definitivo.
- La fermata di emergenza Innsbruck ed il cunicolo esplorativo Ahrental-Pfons di 16,5 km realizzato con TBM aperta. La fresa, lunga 200 metri, è stata avviata il 26 settembre 2015 e, da allora, sta scavando in direzione sud.

1.6.2 PFONS-BRENNERO

Tale lotto rappresenta la sezione costruttiva più grande e situata più a sud nell'area austriaca di progetto dell'opera Galleria di Base del Brennero. Con un totale di ca. 52 km di gallerie, l'area di progetto si estende dalla cittadina di Pfons fino al confine di stato italo-austriaco. Le opere presenti nel lotto sono:

- Le gallerie principali di 37 km, alcuni tratti vengono scavati tramite l'utilizzo di più TBM e altri tramite il metodo Drill&Blast.
- La fermata di emergenza di St.Jodok, costituita da una galleria principale di 590 m, un cunicolo intermedio di 900 m, un cunicolo di scarico, sei cunicoli trasversali di scarico aria, sei cunicoli di collegamento ed un camerone di manovra.
- Il cunicolo esplorativo, in direzione Brennero, posto tra le due canne principali 12 m sotto quest'ultime. Già nel propedeutico lotto "Wolf 2" sono stati ricavati 1,2 km di cunicolo esplorativo. I restanti 9 km vengono scavati tramite brillamento.

1.6.3 MULES 2-3

Nel 2015 sono terminati i lavori del lotto propedeutico "Mules1" con una lunghezza di scavo di 3,7 km di gallerie principali e 1,5 km di cunicolo esplorativo. Nell'ambito del

lotto si è attraversato il cosiddetto Lineamento Periadriatico, una delle zone di faglia più significative dell'arco alpino.

Con la conclusione di questo lotto si sono create le condizioni logistiche per affrontare il successivo lotto denominato “Mules 2-3”. Tale lotto è stato avviato a settembre 2016 ed è il più grande della Galleria di base del Brennero, si estende dal lotto “Sottoattraversamento Isarco” fino al confine di stato. Il lotto “Mules 2-3” è stato affidato per 993 milioni di euro al raggruppamento costituito da Astaldi S.p.A., Ghella S.p.A., Oberosler Cav Pietro S.r.l. (fino a giugno 2018), Cogeis S.p.A. e PAC S.p.A. Verranno scavati un totale di 65 km di gallerie per il singolo lotto, così suddivisi:

- L’accesso alla fermata di emergenza di Trens della lunghezza di 3,8 km, i cui lavori iniziati a dicembre 2016, si concluderanno entro breve. Seguirà lo scavo in tradizionale della fermata di emergenza che proseguirà fino al 2022.
- Il cunicolo esplorativo di 14,8 km, eseguito con metodo tradizionale per la prima parte, è andato avanti tramite utilizzo di TBM a doppio scudo fino al confine di stato. I lavori sono in progresso fino alla fine del 2021.
- Le gallerie principali di 39,8 km. Le canne in direzione nord, dopo un primo tratto (800m) in tradizionale, vengono scavate con TBM a doppio scudo fino al confine di stato. Le canne in direzione sud, invece, vengono realizzate con il metodo di scavo in tradizionale.

1.6.4 SOTTOATTRAVERSAMENTO ISARCO

I lavori di tale lotto sono iniziati nel 2014, e al termine il “Sottoattraversamento Isarco” collegherà la Galleria di Base del Brennero con la linea storica del Brennero e la stazione di Fortezza. La maggior parte dei lavori di questo lotto si svolge nel fondovalle e, a causa delle condizioni geotecniche del terreno, caratterizzato da sedimenti fluvio-glaciali, vengono eseguiti interventi di consolidamento in jet-grouting. Nell’ambito di questo lotto saranno sotto attraversate l’autostrada del Brennero A22, la strada statale SS12, la linea ferroviaria esistente e in particolar modo il fiume Isarco. Complessivamente saranno realizzati 6,7 km di gallerie, così suddivise:

- La realizzazione di 4 pozzi tramite i quali è possibile raggiungere la quota del tracciato delle gallerie, ad una profondità di ca. 20-25 m.
- La galleria di interconnessione con la linea storica (binario pari) e delle gallerie principali.
- Le gallerie principali di 4,2 km e con sezione trasversale variabile di 60-150 m². Per il collegamento della tratta a nord e quella a sud del fiume Isarco, verrà eseguita la tecnica del congelamento del terreno, permettendo così lo scavo al di sotto del letto del fiume, sotto attraversandolo. Tale tecnica, oltre che a garantire la sicurezza dello scavo e migliorare la consistenza del terreno, permette anche di non andare ad influenzare in maniera significativa il letto del fiume.

CAPITOLO 2 – Aspetti geomeccanici del lotto “Mules 2-3”

2.1 Inquadramento geografico

Il lotto di costruzione, denominato “Mules 2-3”, costituisce la parte principale del tracciato della Galleria di Base del Brennero sul versante italiano (fig. 2.1) e si sviluppa tra il confine di stato (km 32,0+88 canna est) ed il lotto adiacente “Sottoattraversamento Isarco” (km 54,0+15 canna est). Tale lotto è costituito da due Gallerie di Linea a singolo binario che corrono parallele con interasse costante di 70 m. Tra il km 48.2 ed il km 50.6 ca. (canna est) le due canne tendono ad avvicinarsi riducendo l’interasse fino a 40 m e, mantenendo tale distanza fino all’estremità sud (km 54.0+15). Le due canne principali sono collegate, ogni 333 m, da cunicoli trasversali. A completare il sistema sotterraneo, si trova il Cunicolo Esplorativo, in asse alle due Gallerie di Linea e ad una quota inferiore di 12 m per non interferire con i cunicoli trasversali di collegamento.



Figura 2.1 - Tracciato lotto "Mules 2-3" [www.bbt-se.com]

Il tracciato nel Lotto “Mules 2-3” si presenta con un andamento planimetrico caratterizzato, a partire dall’estremo nord del lotto, da un tratto rettilineo di circa 5 km, da una breve curva sinistrorsa di ampio raggio ($R=10.000\text{m}$) e da un successivo rettilineo di circa 10 km, cui segue un’ulteriore curva sinistrorsa più stretta e di maggiore estensione, che interessa principalmente il precedente lotto “Mules 1”. Il tracciato riprende con un tratto rettilineo di circa 1 km, cui segue una curva destrorsa ($R= 6.000\text{ m}$), per terminare, nella zona di sdoppiamento dei binari, con un tratto rettilineo di circa 1.500 m.

Altimetricamente il tracciato si distingue, per la canna est (GLE) una livelletta con due pendenze opposte, -3.907‰ $+7.399\text{‰}$, mentre per la canna ovest (GLO), sono presenti numerosi cambiamenti di pendenza limitati a causa della necessità di raccordare la canna con il tracciato del lotto “Mules 1”.

Nota di menzione va fatta per l’andamento delle progressive del progetto: le Gallerie di Linea hanno una progressiva decrescente proseguendo verso nord (dalla pk54+015 alla pk 32+088) essendo imposto lo ‘0’ a Innsbruck nella parte austriaca del cantiere (progressiva di progetto), ciò vale anche per la Galleria di Accesso alla Fermata di Emergenza di Trens. Al contrario, per il cunicolo Esplorativo sul lato italiano si ha una progressiva crescente che parte da Aica e che arriva fino al confine di stato alla pk 27+127.

Le opere previste nel Progetto Esecutivo (PE) del lotto “Mules 2-3” vengono divise in due zone.

Opere situate a Nord del punto d’innesto della Finestra di Mules con le gallerie principali:

- Galleria di Linea Est (GLEN);
- Galleria di Linea Ovest (GLON);
- Finestra di Mules (M) costituita dal camerone logistico e connessa Galleria di Collegamento, Caverna Centrale di Ventilazione con relative gallerie di collegamento e pozzo di aspirazione;
- Fermata di Emergenza Trens (FdE);
- Galleria di Accesso (GA) alla Fermata di Accesso Trens;
- Nuovo Nodo Logistico (NL), costituito da un camerone logistico, tre gallerie di collegamento con la Galleria di Accesso, un by-pass logistico di collegamento tra la Galleria di Accesso e le Gallerie di Linea ed un pozzo di collegamento con il Cunicolo Esplorativo;
- Cunicolo Esplorativo (CE);
- Dotazioni impiantistiche a servizio del Cunicolo Esplorativo, costituite dall’impianto di illuminazione, distribuzione MT/BT, dalla rete idrica

antincendio, dalla rete di telecomunicazione GSM e dagli impianti di drenaggio selettivo delle acque.

Opere situate a Sud del punto d'innesto della Finestra di Mules con le gallerie principali:

- Galleria di Linea Est (GLES);
- Galleria di Linea Ovest (GLOS).

In questa tratta le Gallerie di Linea, a partire dal km 52.6+29 circa per la canna est e dal km 52.8+66 circa per la canna ovest, fino al limite Sud del lotto "Mules 2-3", si presentano a doppio binario.

Si riportano di seguito le lavorazioni principali.

- 1) Lavorazioni principali situate a Nord del punto di innesto della Finestra di Mules con le gallerie principali:
 - Scavo e rivestimento definitivo della Galleria di Linea Est (GLEN) nel tratto compreso tra il km 47.2+59 (fine del lotto Mules 1) e il Confine di Stato al km 32+088;
 - Rivestimento definitivo della tratta della Galleria di linea Est esistente compresa tra il km 47.2+59 e i cameroni di montaggio TBM al km 48.9+02;
 - Scavo e rivestimento definitivo della Galleria di Linea (GL) Ovest nel tratto compreso tra il km 47.2+22 e il Confine di Stato al km 32.0+47;
 - Rivestimento definitivo della tratta della Galleria di linea Ovest esistente compresa tra il km 47.2+22 e i cameroni di montaggio TBM al km 48.8+73;
 - Rivestimento definitivo di tutte le opere riguardanti la Finestra di Mules (M) e sistemazione delle opere già realizzate nei precedenti lotti;
 - Scavo e rivestimento definitivo della Fermata di Emergenza (FdE) Trens compresa tra il km 44.5+15 e il km 45.0+25 ed i relativi collegamenti trasversali di collegamento;
 - Scavo con metodi tradizionali e rivestimento definitivo della Galleria di Accesso (GA) alla Fermata di Emergenza Trens;

- Scavo e rivestimento definitivo del Cunicolo Esplorativo (CE) compreso tra il km 12.4+59 e il Confine di Stato al km 27.2+17;
 - Rivestimento definitivo della tratta del Cunicolo Esplorativo esistente compresa tra il km 10.4+19 al km 12.4+60.
- 2) Lavorazioni principali situate a Sud del punto di innesto della Finestra di Mules con le gallerie principali:
- Scavo con TBM aperta e rivestimento interno della Galleria di Linea Est (GLES) dal km 49.0+83 al km 52.6+22.
 - Scavo con metodi tradizionali e rivestimento definitivo della Galleria di Linea a doppio binario est (GLES-D) dal km 52.6+29 al lotto adiacente “Sottoattraversamento Isarco” al km 54.0+15;
 - Scavo con TBM aperta e rivestimento interno della Galleria di Linea ovest (GLOS) dal km 49.0+57 al km 52.8+44.
 - Scavo con metodi tradizionali e rivestimento definitivo della Galleria di Linea a doppio binario ovest (GLOS-D) dal km 52.8+66 al lotto adiacente “Sottoattraversamento Isarco” al km 54.0+02.

Per accedere a questo sistema di gallerie dalla superficie nel primo lotto costruttivo (lotto Aica-Mules) è stata realizzata la Finestra di Mules (M) della lunghezza di 2 km. In tale lotto è stato scavato anche il cunicolo Aica-Mules di circa 10,5km mediante una TBM doppio-scudata.

Le varianti più significative, approvate da BBT SE nell’ambito della Progettazione Esecutiva di Dettaglio (PED) in corso d’opera, riguardano:

Variante Gallerie di Linea Sud:

- Scavo con metodi tradizionali delle Gallerie di Linea Est e Ovest verso Sud al posto dello scavo mediante TBM aperte previsto dal Progetto Esecutivo;

Variante Nord:

- Anticipo del camerone di montaggio TBM per il cunicolo Esplorativo e conseguente anticipo dello scavo meccanizzato del cunicolo esplorativo alla pk

13+079 e quindi di un tratto di galleria, previsto in scavo tradizionale dal Progetto Esecutivo (PE);

- Anticipo dei cameroni di montaggio TBM per le Gallerie di Linea, con conseguente scavo meccanizzato delle Gallerie di Linea della Fermata di Emergenza di Trens e delle adiacenti tratte di galleria. Pertanto, i tratti di galleria, previsti in scavo tradizionale dal PE, compresi tra la nuova ubicazione dei cameroni e la originaria posizione degli stessi, vengono previsti in scavo meccanizzato a partire dalla pk 46+298 della GLEN e dalla pk 46+285.5 della GLON. Ciò comporta un abbassamento del Cunicolo Esplorativo nella tratta in cui sottopassa la FdE oltre ad altre modifiche tecniche-costruttive.
- Modifica della posizione dei By-Pass logistici e loro diversa fasistica realizzativa, unitamente a quella dei By-Pass correnti, rispetto a quanto previsto dal PE. Introduzione di un nuovo by-pass logistico alla pk 46+552.5 (Binaria est) e di un cunicolo di collegamento GA-GL. Realizzazione di alcune nicchie nella GA tali da consentire l'inversione di marcia dei veicoli che, per qualsiasi motivo, si trovino a percorrere la galleria.

Attualmente si lavora su più fronti (fig.2.2): le due Gallerie di Linea di Nord (GLEN/GLON), le due Gallerie di Linea di Sud (GLES/GLOS), la Galleria di accesso (GA) ed il cunicolo esplorativo (CE).



Figura 2.2 - Stato di avanzamento lotto "Mules 2-3" (aggiornato al 03/06/2020)

2.2 Inquadramento geologico

Dal punto di vista geologico, la Galleria di Base del Brennero attraversa le maggiori unità tettoniche, che compongono la catena alpina (fig. 2.3) , da sud a nord:

- Alpi Meridionali: Granito di Bressanone;
- Plutoni Periadratici: Tonalite di Mules;
- Austroalpino superiore, a sud della finestra del tauri: Permomesozoico, Basamento Cristallino;
- Pennidico (Finestra del Tauri): Complesso della Falda del Glockner;
- Subpennidico (Finestra del Tauri): Complesso della Falda del Venediger;
- Pennidico (Finestra del Tauri): Complesso della Falda del Glockner;
- Ultrapennidico: Permomesozoico di Tarntal e Unità del Reckner;
- Austroalpino inferiore, a nord della Finestra del Tauri: Fillade quarzifera di Innsbruck.

Queste si presentano sotto forma di più falde sovrapposte e rappresentano i resti della zona di collisione tra la placca europea e quella adriatica (africana).

I contatti che separano queste unità sono di natura tettonica e corrispondono in parte a faglie fragili, che si estendono lateralmente e verticalmente per lunghe distanze ed appartengono ai più grandi e noti sistemi delle faglie delle Alpi. La maggior parte delle faglie principali nell'area di progetto sono il prodotto dell'evoluzione tettonica terziaria (Oligocene e Miocene), durante la quale è avvenuta l'esumazione e l'estrusione verso Est delle unità della Finestra del Tauri e verso Nord delle unità Sudalpine.

Il processo di esumazione che ha determinato la formazione della cupola ed il conseguente raffreddamento delle unità della Finestra del Tauri, è associato a movimenti normali lungo la Faglia del Brennero, ed a movimenti trascorrenti lungo la Faglia dell'Inntal e la Faglia della Val Pusteria, che hanno permesso l'estrusione per circa 20-30 km verso Est delle unità pennidiche della Finestra del Tauri ed il loro rialzamento di circa 10-15 km rispetto le unità circostanti.

Le grandi unità tettoniche sono caratterizzate da comportamenti deformativi di varia natura, infatti successivamente al periodo di raffreddamento, alla deformazione duttile è sopraggiunta anche una deformazione di tipo fragile.

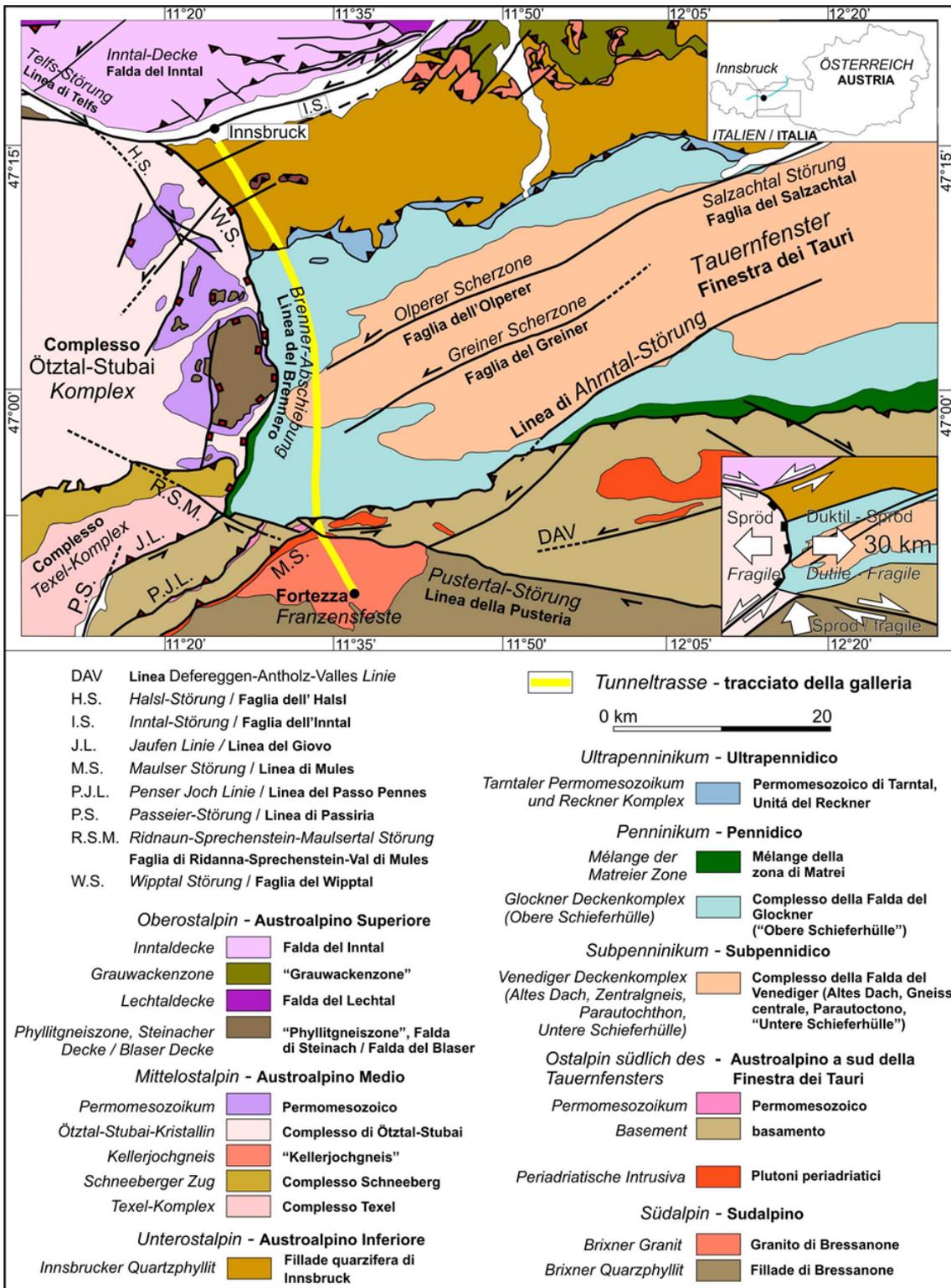


Figura 2.3 - Carta geologica-tettonica dell'area di progetto BBT [Quick et al., 2013]

L'area di progetto, seppur non attraversando direttamente la faglia diretta del Brennero, che costituisce il limite tra il Dominio Pennidico (Finestra del Tauri) ed il Dominio Austroalpino, è soggetta alla sua zona d'influenza; questa è caratterizzata da strutture di estensione secondarie, duttili e fragili con orientazione N-S ed un'immersione da basso a medio angolo verso W.

2.3 Il modello geologico ed idrogeologico

Per l'esplorazione geologica ed idrogeologica della Galleria di Base del Brennero sono stati eseguiti estesi rilevamenti geologici di superficie e numerosi carotaggi profondi (circa 3500m) in diversi punti dell'area di progetto, in parte fino alla quota della galleria. Nei fori di sondaggio sono state effettuate prove geofisiche, idrauliche, meccaniche e prove per la determinazione dello stato tensionale in sito. L'estrazione continua di carote ha permesso di effettuare prove geologiche e geotecniche di laboratorio. L'analisi complessiva di tutti questi dati ha permesso la costruzione di un modello geologico ed un modello idrogeologico di previsione, sulla base dei quali è stato poi definito il modello geomeccanico (rif. Cap. 2.4).

Nonostante l'impiego di tecniche moderne, le reali condizioni geologiche all'interno della montagna non possono essere determinate con precisione a causa dell'incertezza geologica derivata dalle elevatissime profondità (coperture) da indagare. Per questo motivo il progetto della Galleria di Base del Brennero prevede lo scavo di un cunicolo esplorativo ininterrotto, al fine di acquisire informazioni dettagliate sulle caratteristiche della roccia su tutta la tratta e, conseguentemente, ottimizzare lo scavo dal punto di vista tecnico ed economico.

Il modello geologico del lotto Mules 2-3 prevede da Nord verso Sud, la presenza delle seguenti unità tettoniche:

- km 54+300-48+200 (canna Est): Granito di Bressanone, costituito da graniti e granodioriti con filoni aplitici e pegmatitici, localmente disaggregati fratturati ed alterati;

- km 48+200-47+400 (canna Est): Zona di Faglia della Val Pusteria e Tonalite di Mules (entrambi appartenenti al “Lineamento Periadriatico”);
- km 47+400-45+000 (canna Est): Zona di Faglia della Val di Mules composta da rocce di faglia eterogenee e cristallino Austro-alpino mediamente compatto con le litologie principali anfiboliti, paragneiss, micascisti e locali intercalazioni di ortogneiss e marmi impuri;
- km 45+000-42+900 (canna Est): Calcescisti con locali intercalazioni di dolomiti, gesso, anidrite.
- km 42+900-40+500 (canna Est): Antiforme dello Zillertal composta da rocce della formazione dell'Aigerbach della Obere Schieferhülle, quali calcescisti cloritici, quarziti micacee, filladi quarzifere/micascisti e subordinati scisti anidriteici;
- km 40+500-37+200 (canna Est): Calcescisti della Falda di Vizze costituiti da scisti silicoclastici-calcarei e subordinato grafitici e da marmi impuri con intercalazioni di rocce verdi, spesso scistose;
- km 37+200-35+900 (canna Est): successione di unità piegate e a scaglie della Schieferhülle composto da quarziti e marmi);
- km 35+900-32+100 (canna Est): Ortogneiss compatti dello Gneiss centrale che rappresentano il nucleo della Finestra dei Tauri e, subordinatamente, rocce del basamento pregranitico.

Inoltre, nell'area di progetto sono previsti i seguenti sistemi di faglia regionali:

- Sistema di faglia del Wipptal
- Sistema di faglia della Val di Vizze
- Sistema di faglia di Avenes
- Sistema di faglia di Tolves
- Sistema di faglia del limite meridionale dei Tauri

Secondo la classificazione interna di BBT SE ciascuna faglia certa, appartenente ad un sistema di faglie regionale, viene suddivisa in una zona centrale (Core Zone) ed una zona

fratturata perimetrale (Damage Zone); la prima è la porzione costituita da rocce di faglia che subisce maggior grado di deformazione, ed è costituita principalmente da:

- *Fault gouge* : roccia frantumata di natura coesiva a grana fine, scistosa e a comportamento isotropo;
- *Cachirite*: roccia frantumata priva di coesione, composta da sabbia e ghiaia;
- *Cataclasite*: roccia di faglia detensionata oppure consolidata per cementazione.

Mentre la *Damage Zone* è caratterizzata da un ammasso roccioso con discontinuità elevata e presenza di specchi di faglia.

Per quanto riguarda la situazione idrogeologica prevista per lo scavo del cunicolo esplorativo, è possibile avere un quadro d'insieme grazie alla tabella 2.1, dove sono illustrate le portate transitorie massime Q [$l/s \cdot 10\text{ m}$] ed il carico idraulico H [m] stimate per le zone di faglia. Lo scavo del cunicolo esplorativo provoca un effetto drenante, aspetto positivo per lo scavo delle due gallerie di linea, in quanto le portate transitorie si abbassano ulteriormente, specialmente nelle zone di faglia.

Analogamente al cunicolo esplorativo nella maggior parte degli ammassi non interessati da zone di faglia si prevedono sia per la canna est che per la canna ovest portate transitorie massime inferiori a $0,16\text{ l/s} \cdot 10\text{ m}$ che per definizione corrisponde ad un ammasso umido. Fanno eccezione i marmi impuri introno alla pk 38+200, i marmi di Hochstegen a circa pk 36+100, nonché i marmi dolomitici e calcarei presso la pk 37+300, dove sono previste delle portate transitorie massime fino a $2\text{ l/s} \cdot 10\text{ m}$.

Kartierte Störung	Zuordnung Störungssystem	Maximale instationäre Zutritte [l/s*10m]	Hydraulische Druckhöhe [m]
Zona rilevata	Sistema di Faglia	Portata massima transitoria [l/s*10m]	Carico idraulico [m]
S19	SZ-BCA-AV	< 0,4	200-300
TWS1	SZ-TWS	< 0,16	200-300
S30	SZ-AV-1	< 2	200-300
S15	SZ-AV-1	< 2	400-600
n-sz-27		< 0,16	400-600
SWNW02	SZ-TU	< 0,16	100-400
SWNW01	SZ-TU	< 0,4	100-400
n-sz-26 (42+820)		< 0,16	400-500
n-sz-26 (42+470)		< 0,16	100-300
S11	SZ-AV-1	< 2	200-400
n-sz-26 (41+305)		< 0,16	400-1000
n-sz-26 (41+200)		< 0,16	400-1000
n-sz-26 (41+160)		< 0,16	400-1000
S10	SZ-AV-1	< 0,4	50-400
S09	SZ-AV-1	< 0,4	50-400
S08	SZ-AV-2	< 0,16	200-400
S05	SZ-AV-1	< 2	200-400
n-f539a	SZ-Vi-1	< 2	50-200
n-f539b	SZ-Vi-1	< 2	50-200
Vi-4-462	SZ-Vi-2	< 0,16	200-600
Vi-4-963	SZ-Vi-1	< 0,4	50-200
Vi-5-535	SZ-TU	< 2	100-300
Vi-5-600	SZ-Vi-1	< 2	100-300
Vi-5-755	SZ-Vi-1	< 2	100-300
nsz26		< 2	100-300
nsz26b		< 10	200-400
nsz26c		< 10	200-400
SL01	SZ-WS-ZG	< 2	600-900
S504	SZ-WS-ZG	< 0,4	600-900

Tabella 2.1 - Portata transitoria massima e carico idraulico in zone di faglia per il Cunicolo Esplorativo [Quick et al., 2013a]

Il modello idrogeologico del lotto Mules 2-3, da Nord verso Sud, può essere così suddiviso:

- Dal km 32+088 al km 35+960 non si attendono flussi particolarmente rilevanti, tuttavia portate transitorie fino ad un massimo di due l/s potranno essere riscontrate al momento dello scavo della prima canna.
- Dal km 35+960 al km 37+330 non si hanno permeabilità molto rilevanti. La zona di afflusso più rilevante è attesa tra il km 36+00 e il km 36+100 dove è prevista l'ipotetica intersezione con una falda che potrebbe alimentare le sorgenti termali del Brennero.
- Dal km 37+330 al km 40+870 non si ha in generale un grado di permeabilità molto grande. Fanno eccezione la tratta localizzata sotto la Val di Vizze dove si prevedono terreni più permeabili e una faglia rilevante, ma di presenza incerta al km 37+750, dove si

attendono portate dell'ordine di 1-2 l/s ogni dieci metri di scavo. Per le altre faglie presenti intorno al km 40+470 e al km 40+570 sono previste venute idriche transitorie basse, poiché esse sono caratterizzate da scarsa alimentazione dalla superficie e dovrebbero quindi risentire più pesantemente del drenaggio esercitato dal cunicolo esplorativo già scavato in precedenza.

- Dal km 40+870 al km 43+175 il grado di permeabilità presunto è sempre basso o molto basso, con limitate possibili eccezioni per le bancate di marmi impuri presenti intorno ai km 42+300 e 43+000, per i quali non si possono escludere modesti fenomeni di dissoluzione del carbonato lungo frattura, che determinano sporadici aumenti della permeabilità. Tali fenomeni sono comunque ritenuti poco probabili in questo caso, date le considerevoli profondità. Gli unici elementi permeabili dovrebbero, quindi, essere le faglie presenti ai km 41+960, 42+930 e 43+050. In corrispondenza di queste discontinuità sono attese portate transitorie poco consistenti al momento dello scavo della prima canna, inferiori a 0,5 l/s ogni dieci metri di scavo.

- Dal km 43+175 al km 44+192 le portate attese sono in generale molto modeste e anche nelle zone di faglia gli afflussi transitori non sono particolarmente problematici.

2.4 Il modello geomeccanico

Al fine di poter caratterizzare gli ammassi rocciosi da un punto di vista geomeccanico, durante la fase di progettazione dell'opera, sono state effettuate stime e modelli di previsione definendo, così, una serie di zone geomeccaniche lungo il tracciato. Tali informazioni vengono poi confermate o rigettate dall'avanzamento del cunicolo esplorativo, la cui funzione principale risiede nell'indagare le condizioni geologiche incontrate, traendone importanti informazioni di natura geomeccanica - comportamentale. Inoltre, di ulteriore importanza risultano le varie tecniche d'indagine in avanzamento (rif. Capitolo 3) e l'analisi dei parametri di scavo delle TBM (rif. Capitolo 4-5).

Nel Progetto Esecutivo vengono riprese le zone geomeccaniche omogenee e gli ammassi rocciosi individuati nella progettazione interna di BBT SE ("progettazione di sistema"), alla quale si fa riferimento nel capitolo successivo, dove il tratto da Mules a Brennero è

stato suddiviso in 15 zone omogenee, ognuna delle quali formata da uno o più tipi di ammasso roccioso che vanno a costituire l'unità geomeccanica più piccola (Tab. 2.2). all'interno delle zone ad alta incertezza sono stati definite le tipologie di ammasso come valore percentuale e la loro posizione esatta lungo il tracciato delle gallerie non è conosciuta con esattezza. L'individuazione degli ammassi rocciosi si basa su una classificazione per unità tettonica, per unità litostratigrafica in funzione della litologia prevalente, nel caso siano presenti più litotipi all'interno della medesima unità stratigrafica e dell'unità geo-strutturale. La denominazione è caratterizzata da un primo elemento GA, (Gebirgsart – tipo di ammasso roccioso) e da ulteriori tre elementi. Ad esempio, prendendo in considerazione l'ammasso roccioso denominato GA-BS-GM-8e le sigle stanno ad indicare:

- BS indica l'unità tettonica di appartenenza: Bündnerschiefer = Complesso dei Calcescisti;
- GM indica l'unità litostratigrafica: Glimmermarmor = Marmo micaceo;
- 8e è la sigla dell'unità geo-strutturale: giacitura e caratteristiche delle discontinuità.

Inoltre, ad ogni zona geomeccanica viene associato uno sviluppo, una copertura massima, una minima e la percentuale sulla lunghezza per ogni litologia presente in ogni zona.

Zone number	Zone initial pk (approx.)	Zone final pk (approx.)	Zone length	Zone max overburden	Zone min overburden	Rock mass name	Rock mass Length	
	[km]	[km]	[m]	[m]	[m]		[% of zone length]	[m]
01	32,0	34,9	2845	1715	1385	GA-ZG-G-1z	95%	2702,8
						GA-ZG-S-1z	5%	142,3
02	34,9	35,9	1089	1505	945	GA-ZG-G-1b	85%	925,7
						GA-ZG-S-1b	10%	108,9
						GA-ZG-A-1b	5%	54,5
03	35,9	36,3	296	1015	940	GA-UST-PH-2b	45%	133,2
						GA-UST-M-2b	30%	88,8
						GA-UST-Q-2b	20%	59,2
						GA-UST-A-2b	0-5%	0-14,8
						GA-UST-R-2b	0-5%	0-14,8
04	36,3	37,4	1035	1010	755	GA-T-M-2b	40%	414,0
						GA-T-PH-2b	25%	258,8
						GA-T-Q-2b	20%	207,0
						GA-T-A-2b	5-10%	51.75-103.5
						GA-T-R-2b	5-10%	51.75-103.5
05	37,4	38,3	925	890	615	GA-BS-KS-4b	55%	508,8
						GA-BS-GM-4b	20%	185,0
						GA-BS-KPH-4b	15%	138,8
						GA-BS-PR-4b	10%	92,5
06	38,3	39,2	880	865	620	GA-BS-KS-4c	50%	440,0
						GA-BS-GM-4c	25%	220,0
						GA-BS-KPH-4c	15%	132,0
						GA-BS-PR-4c	10%	88,0
07	39,2	40,9	1845	1255	865	GA-BS-GM-5c	35%	645,8
						GA-BS-KS-5c	35%	645,8
						GA-BS-KPH-5c	20%	369,0
						GA-BS-PR-5c	8%	147,6
						GA-BS-KQ-5c	2%	36,9
08	40,9	41,9	990	1515	1190	GA-T-PH-6	38%	376,2
						GA-US-PH-6	35%	346,5
						GA-US-Q-6	25%	247,5
						GA-T-A-6	1-2%	9.9-19.8
						GA-T-R-6	0-1%	0-9.9
09	41,9	42,8	860	1610	1510	GA-US-PH-6a	35%	301,0
						GA-US-Q-6a	30%	258,0
						GA-BS-GM-6a	25%	215,0
						GA-T-PH-6a	8%	68,8
						GA-T-A-6a	0-2%	0-17.2
						GA-T-R-6a	0-2%	0-17.2
10	42,8	43,8	940	1580	1020	GA-BST-KS-8e	50%	470,0
						GA-BST-KPH-8e	20%	188,0
						GA-BST-M-8e	3%	28,2
						GA-T-A-8e	0-2%	0-18.8
						GA-T-R-8e	0-2%	0-18.8
						GA-BS-GM-8e	25%	235,0
11	43,8	44,6	921	1060	905	GA-BST-KS-8f	100%	921
12	44,6	44,7	75	1080	1060	GA-BST-KPH-8f	87%	65,25
						GA-T-R-8f	0-13%	0-9.75
						GA-T-A-8f	0-13%	0-9.75
13	44,7	45,1	346	1115	1025	GA-BST-KS-8f	100%	346
14	45,1	45,5	390	1200	1095	GA-BCA-A-10g	85%	331,5
						GA-BCA-GS-10g	15%	58,5
15	45,5	46,0	513	1135	590	GA-BCA-GS-10g	90%	461,7
						GA-BCA-A-10g	10%	51,3

Tabella 2.2 - Zone geomeccaniche omogene e ammassi rocciosi ricadenti nel lotto "Mules 2-3" [Relazione geomeccanica di dettaglio, BBT 2019]

Per ciascuna zona geomeccanica omogenea vengono definiti i parametri geomeccanici di input, espressi attraverso il valore medio e la deviazione standard, per la caratterizzazione del mezzo continuo equivalente, che viene effettuata mediante i criteri di resistenza di Hoek&Brown (20002) e di Mohr-Coulomb. Per ciascuna zona i parametri geomeccanici della roccia e dell'ammasso roccioso sono (tab. 2.3):

- Peso di volume naturale della roccia intatta γ [kN/m³];
- Resistenza a compressione monoassiale dell'ammasso roccioso σ_{ci} [Mpa];
- Parametro dell'involuppo di rottura m_i [-];
- Modulo di deformazione della roccia intatta E_i [GPa];
- Indice di abrasività [-]
- Rock Mass Rating RMR'89 [-];
- Geological Strenght Index GSI [-].

Per quanto riguarda l'RMR, si utilizza cautelativamente come valore di riferimento il minimo corrispondente a ogni classe. Inoltre, nelle tratte in cui ricade una faglia, o nel caso in cui la faglia separi due ammassi si assumono cautelativamente i parametri associati all'ammasso peggiore. In genere vengono utilizzati GSI pari a 30 per la Damage Zone e GSI pari a 20 per la Core Zone.

Zone number	03				
Rock mass name	GA-UST-PH-2b	GA-UST-M-2b	GA-UST-Q-2b	GA-UST-A-2b	GA-UST-R-2b
$\gamma(m)$ [kN/m ³]	27	26,6	26,8	28,1	25
$\gamma(\sigma)$ [kN/m ³]	0,55	0,24	0,5	0,46	0,5
$\sigma_{ci}(m)$ [MPa]	71	89	117	40	15
$\sigma_{ci}(\sigma)$ [MPa]	15	7	36	18	10
$m_i(m)$	8	12	17	13	7
$m_i(\sigma)$	2	1	3	2	2
$E_i(m)$ [GPa]	43	46	38	52	5
$E_i(\sigma)$ [GPa]	8,1	7,7	5,9	10,6	3
RMR(m)	45	55	65	50	30
RMR(σ)	5	5	5	5	5
GSI(m)	35	55	55	60	25
GSI(σ)	5	5	5	10	5

Tabella 2.3 - Tabella valori dei parametri geomeccanici, zona 3. [Relazione geomeccanica di dettaglio ,BBT 2019]

2.5 Classificazione geomeccanica interna di BBT-SE

Nelle fasi preliminari di un progetto ingegneristico relativo ad un'opera sotterranea, raramente si hanno caratteristiche dettagliate sulle caratteristiche di resistenza e deformabilità dell'ammasso roccioso; per questo motivo diventa necessario adottare almeno uno schema di classificazione che riesca a dare un giudizio globale sulla qualità dell'ammasso. Si ricorda che la "qualità" dipende, oltre che dalle caratteristiche dell'ammasso roccioso anche da quelle delle discontinuità e dalle condizioni idrogeologiche.

La classificazione geomeccanica interna di BBT SE del tipo strumentale si basa sulla direttiva "progettazione geomeccanica di opere in sottterraneo con avanzamento ciclico" della Austrian Society for Geomechanics (ÖGG) e le "Norme tecniche per le costruzioni (NTC2008).

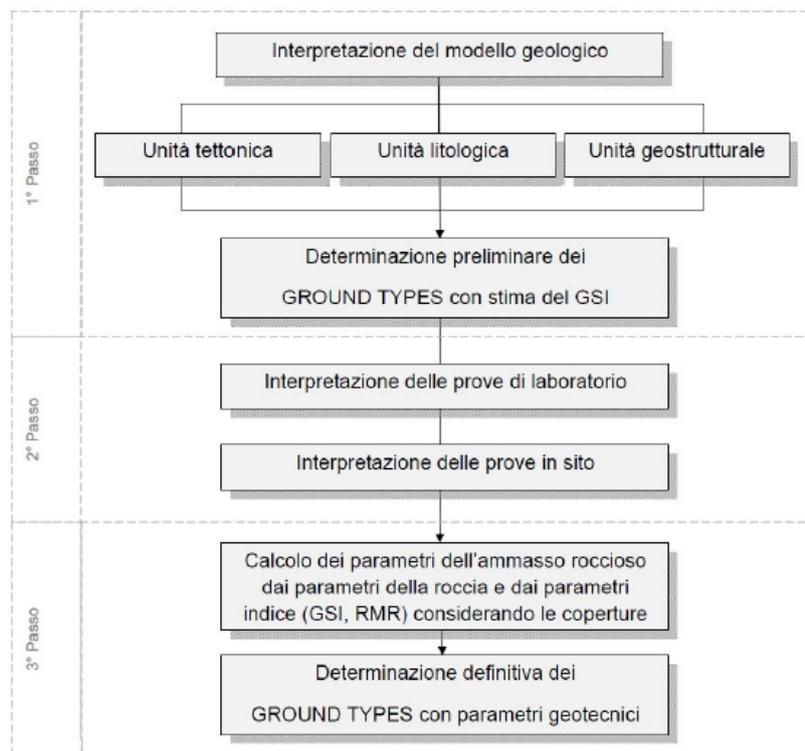


Figura 2.4 - Procedura progettazione geomeccanica del sistema, GROUND TYPES [Egger, 2014]

I passaggi della progettazione geomeccanica possono essere così sintetizzati:

1. Determinazione preliminare del tipo di ammasso roccioso (fig. 2.4): sulla base del modello geologico, basato sulle informazioni riguardanti l'unità tettonica, litologica e geostrutturale, si effettua una prima determinazione dei settori

geomeccanici omogenei. Si procede con l'analisi delle prove di laboratorio eseguiti per la determinazione dei parametri della roccia e delle discontinuità e con l'analisi delle prove in sito per la determinazione del modulo di deformazione dell'ammasso e delle tensioni primarie. Segue il calcolo dei parametri dell'ammasso roccioso dai parametri della roccia e dai parametri dell'ammasso di campagna (GSI, RMR) secondo diversi metodi conforme alla regola d'arte. Il primo step si chiude con la determinazione finale dei settori geotecnici omogenei, l'assegnazione dei rispettivi tipi di ammasso roccioso e la parametrizzazione geotecnica.

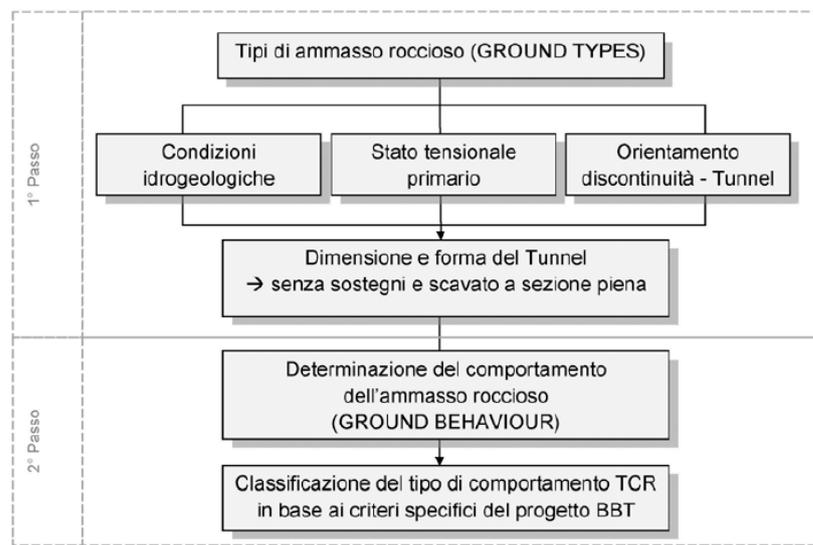


Figura 2.5 - Procedura progettazione geomeccanica del sistema, GROUND BEHAVIOUR [Egger, 2014]

2. Determinazione e descrizione dei comportamenti dell'ammasso roccioso (*Ground Behaviour types*): dipende dalle proprietà della roccia, dalle giaciture e dalle proprietà delle discontinuità, dallo stato tensionale in sito, dalle condizioni idrogeologiche nonché dalla forma del cavo (fig. 2.5).

Per la determinazione del comportamento dell'ammasso (si assume un cavo a sezione piena senza sostegni e senza effetto di sostegno del fronte di scavo), sono stati adottati i seguenti metodi di analisi:

- a. Metodi empirici: Rapporto di sollecitazione (Hoek 2000), classi di *squeezing* (Hoek&Marinos 2000), potenziale di *rock burst* (criterio $GSI \geq 70$; criterio delle tensioni tangenziali, Khanlari 2011; criterio PES – *Potential of elastic strain energy*, Khanlari 2011; criterio *Rock brittleness B*, Qiao&Tian 1998).

b. Metodi di calcolo analitici: Metodo delle curve caratteristiche (Sulem-Panet 1987), analisi cinematica dei blocchi (*Unwedge – Rocscience*), stabilità del fronte di scavo secondo il criterio Panet.

c. Metodi di calcolo numerici: Modellazione di zone di faglia mediante metodi numerici agli elementi finiti (*Phase2 - Rocscience*).

In tutti i metodi di calcolo sono stati adottati i valori caratteristici dell'ammasso roccioso e di regola le tensioni di copertura massimi del settore omogeneo. Tale approccio conservativo è giustificato soprattutto in grandi parti del modello geomeccanico con elevate incertezza di previsione.

3. Uno studio a parte è stato svolto per la caratterizzazione delle zone di faglia e per la determinazione del loro comportamento (fig. 2.6), seguendo la stessa procedura di cui sopra.

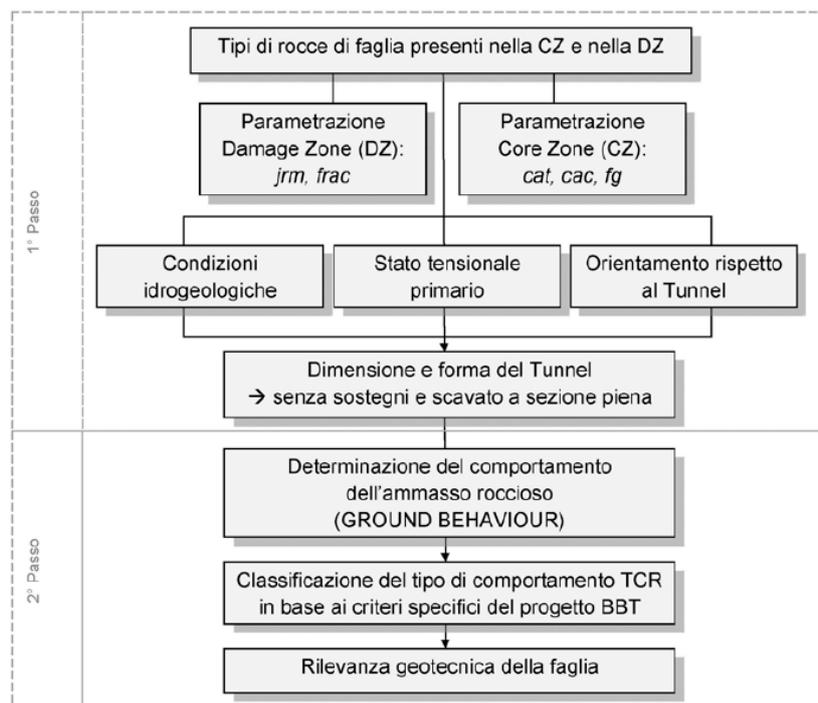


Figura 2.6 - Procedura progettazione geomeccanica del sistema, GROUND BEHAVIOUR ZONE DI FAGLIA [Egger, 2014]

Le ÖGG pongono l'accento su come stimare tipo e comportamento degli ammassi rocciosi in fase di progettazione, sulla base delle informazioni note, che successivamente vengono confermati o aggiornati in fase di costruzione. Per ogni ammasso roccioso sono stati definiti i comportamenti attesi; a titolo di esempio si riporta la scheda dell'ammasso roccioso GA-BST-KS-8e (fig. 2.7 e fig. 2.8).

Geotechnische Kennwerte		Gebirgsart GA-BST-KS-8e		
Parametri geotecnici		Tipo di ammasso roccioso GA-BST-KS-8e		
Lithologie	Bündnerschieferkomplex: Dünnschichtige Wechselfolge von Glimmermarmor, Kalzitquarzit und Phylliten - 531			
Litologia	Complesso dei calcescisti: alternanza poco spessi di calcescisti, quarziti calcitici e filadi - 531			
Gesteinskenneerte / Mineralogie (Labor)	Mittelwert (M)	Standardabweichung (s)	Versuchszahl (n)	
Parametri della roccia / Mineralogia (Laboratorio)	Valore medio (M)	Deviazione standard (s)	Numero di prove (n)	
γ [kN/m ³]	0,02656	$\pm 0,00036$	63	
σ_{ci} [MPa] med (F sf)	41	± 18	3	
σ_{ci} [MPa] min (F 45° sf)	24	± 9	12	
m [-] (Hoek&Brown) aus Triax.-Druckversuch / da prova triassiale	12	± 2	4	
E [MPa] aus Einax.-Druckversuch / da prova uniassiale	43000	± 11100	15	
ν [-] aus Einax.-Druckversuch / da prova uniassiale	0,21	$\pm 0,05$	8	
CAI [-]	2,7	$\pm 0,4$	8	
äquiv. Qz-Gehalt / Contenuto equ.di Qz [%]	42	± 9	8	
Quellpotential / Potenziale di swelling	keines / assente			
Trennflächeneigenschaften (Kartierung / Bohrungen)	Statistische Auswertung der Orientierungen und Eigenschaften der Trennflächen			
Proprietà delle discontinuità (Rilevamento / Sondaggi)	Elaborazione statistica delle giaciture e delle proprietà delle discontinuità			
Schieferung: Orientierung / Abstand	S2: 350/70		S2: 60-200	
Scistosità: Giacitura / Spaziatura				
Trennflächenorientierung [°]	RTF1: 180/70	RTF3: 320/80		
Giacitura delle discontinuità [°]	RTF2e: 085/80	RTF6: 220/80		
Trennflächenabstände [mm]	RTF1: 200-600	RTF3: 200-600		
Spaziatura delle discontinuità	RTF2e: 200-600	RTF6: 200-600		
Trennflächendurchgängigkeit [m]	RTF1: <1	RTF3: 1-3	S2: 3-10	
Persistenz der discontinuität	RTF2e: 1-3	RTF6: 1-3		
Trennflächenöffnung [mm]	RTF1: 0	RTF3: 0	S2: 0	
Apertura della discontinuità	RTF2e: 0	RTF6: 0		
Trennflächenrauigkeit JRC _{Co} [-]	RTF1: 4-8	RTF3: 4-8	S2: 4-8	
Rugosità delle discontinuità	RTF2e: 4-8	RTF6: 14-16		
Trennflächenverwitterung (EN ISO 14689-1)				
Alterazione delle discontinuità				
Trennflächenfüllung (Typ u. %-Anteil)				
Riempimento delle discontinuità (tipo e %)				
Trennflächenkenneerte (Labor)	Bandbreite		Versuchszahl (n)	
Parametri delle discontinuità (Laboratorio)	Range		Numero di prove (n)	
$\Phi_{peak/res}$ [°] (unverwitt. TF / Disc. inalterate)	44,0-46,3 / 19,4-35,8		3 / 2	
$c_{peak/res}$ [MPa] (unverwitt. TF / Disc. inalterate)	1,7-4,1 / 0,27-0,47		3 / 2	
Gebirgskenneerte in-Situ	Bandbreite		Versuchszahl (n)	
Parametri dell'ammasso roccioso in situ	Range		Numero di prove (n)	
E [MPa] (BLA / Prova dilatometrica): Last/carico 7,8-10,6 MPa	32500-63600		2	
Gebirgskenneerte	Statistik der Indexwerte u. berechnete Festigkeits- und Verformungsparameter			
Parametri dell'ammasso roccioso	Statistica dei parametri indice e parametri di resistenza e deformabilità calcolati			
Indexwerte (Kartierung / Bohrungen)	Mittelwert (M)	Standardabweichung (s)	Versuchszahl (n)	
Parametri indice (Rilevamento / Sondaggi)	Valore medio (M)	Deviazione standard (s)	Numero di prove (n)	
RQD [%] (ISRM)	85	\pm		
RMR [-] (Bieniawski, 1989)	60	\pm		
GSI [-] (Hoek)	50	-		
Festigkeits- u. Verformungskenneerte (berechnet)	Kombination 1: M	Kombination 2: M - s	Kombination 3: M + s	
Parametri di resistenza e deformabilità (calcolati)	Combinazione 1: M	Combinazione 2: M - s	Combinazione 3: M + s	
σ_{ci} [MPa] (Hoek&Brown)	2,5	1,8	3,7	
σ_{cm} [MPa] (Hoek&Brown)	7,8	5,5	11,6	
c [MPa] (Mohr-Coulomb): H _{min} =1030m / H _{max} =1440m	2,4 / 2,9	2,1 / 2,5	2,8 / 3,4	
ϕ [°] (Mohr-Coulomb): H _{min} =1030m / H _{max} =1440m	31 / 28	28 / 26	34 / 31	
E [MPa] (Boyd/Serafim 1983 / Hoek 2002 / Hoek&Diederichs 2006)	- / 6400 / 13200	- / (5400) / 9800	- / 7800 / 16600	
Charakteristische Werte / Valori caratteristici		Inputparameter / Valori di input		
γ_k (Gebirge / ammasso) [kN/m ³]	27,0	GSI [-] - Hoek&Brown	50	
$\sigma_{ci,k}$ (Gestein / roccia) [MPa]	41	RMR [-] - Bieniawski	60	
$\sigma_{cm,k}$ (Gebirge / ammasso roccioso) [MPa]	7,8	σ_{ci} (H _{min} /max) [MPa]	27,8 / 38,9	
c_k (Gebirge / ammasso roccioso) [MPa] - H _{min} /max	2,4 / 2,9	k_o [-]	0,8-1,0	
ϕ_k (Gebirge / ammasso roccioso) [°] - H _{min} /max	31 / 28			
E_k (Gebirge / ammasso roccioso) [MPa]	6400*			
Bemerkungen	*Hoek 2002			
Note	*Hoek 2002			

Figura 2.7 - Scheda tipo di ammasso roccioso GA-BST-KS-8e [Elaborazione tecnica del progetto, BBT 2013]

GA-BST-KS-8e: Gebirgsverhaltenstyp GVT 3	
GA-BST-KS-8e: Comportamento dell'ammasso roccioso TCR 3	
Gebirgsart : GA-BST-KS-8e	
SW 263°	NE 83° NW 353° SE 173°
Gebirgsarten	GA-BST-KS-8e: Dünnschichtige Wechselfolge von Glimmermarmor, Kalzitquarzit u. Phyllit (531)
Tipo di ammasso roccioso	GA-BST-KS-8e: Alternanze poco spessi di calcescisti, quarziti calcitici e filladi (531)
Orientierung der Haupttrennflächen	Steil einfallende, schleifend, quer bzw. senkrecht zur Tunnelachse verlaufende Trennflächen Schieferung: steil einfallend, senkrecht zur Tunnelachse
Direzione delle discontinuità principali	Discontinuità ad alta inclinazione con direzione subparallela, trasversale e perpendicolare all'AT; Scistosità ad alta inclinazione con direzione perpendicolare all'AT
Druckhaftigkeit $\sigma_{cm,k}/\sigma_{max}$ (Hoek 2000)	$\geq 0,20$: mittel druckhaft
Rapporto di sollecitazione $\sigma_{cm,k}/\sigma_{max}$	$\geq 0,20$: mediamente spingente
Einfluss des Bergwassers	keiner
Influenza della falda	assente
Quelldruck	keiner
Pressione di rigonfiamento	assente
Gebirgsverhalten	GVT 3: Spannungsbedingte Entfestigung in Hohlräumnähe durch Abscheren über Trennflächen Ortsbrust: lokale Ausbrüche
Comportamento dell'ammasso roccioso	TCR 3: Detensionamento nelle vicinanze della cavità attraverso rottura a taglio lungo discontinuità dovuto all'alto stato tensionale Fronte di scavo: locali distacchi di blocchi
Radialdeformation	$< 15 \text{ cm} / < 3\%$ (Kennlinienverfahren)
Deformazione radiale	$< 15 \text{ cm} / < 3\%$ (Metodo delle curve caratteristiche)
Bemerkungen	Überlagerung: 1030 - 1440 m
Note	Coperatura: 1030 - 1440 m

Figura 2.8 - Scheda tipo di comportamento GA-BST-KS-8e [Elaborazione tecnica del progetto, BBT 2013]

I criteri specifici di progetto per la determinazione dei tipi di ammasso roccioso e di comportamento attesi sulle base delle valutazioni fatte sono riportati nelle fig. da 2.9 a 2.14. Queste raffigurano la sezione trasversale della galleria per i diversi comportamenti riconosciuti. I fronti di scavo sono orientati verso nord.

- **TCR 1 Ammasso roccioso stabile (fig. 2.11):** cavità interamente stabile, distacchi di piccoli elementi rocciosi.

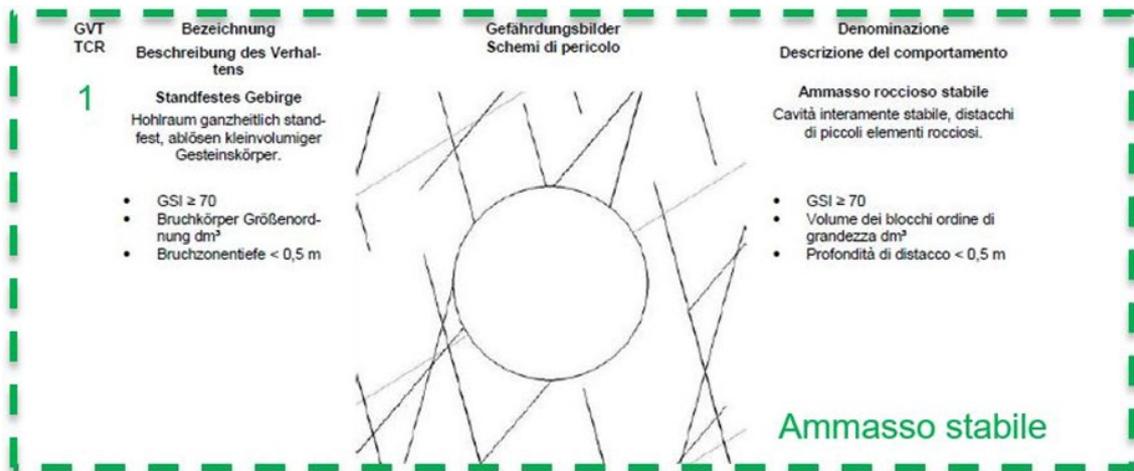


Figura 2.9 - Sezione trasversale per il TCR 1 [Egger, 2014]

- **TCR 2 Distacchi di origine strutturale (fig. 2.10):** distacchi di blocchi dovuti alla struttura e alla forza di gravità lungo le discontinuità persistenti o dovuto al superamento locale della resistenza al taglio dei piani di scistosità o di stratificazione.

- **TCR 3 Sovrasollecitazione nelle vicinanze della cavità (fig. 2.10):** detensionamento o plasticizzazione dovuto alla tensione attraverso il superamento della resistenza al taglio delle superfici di discontinuità.

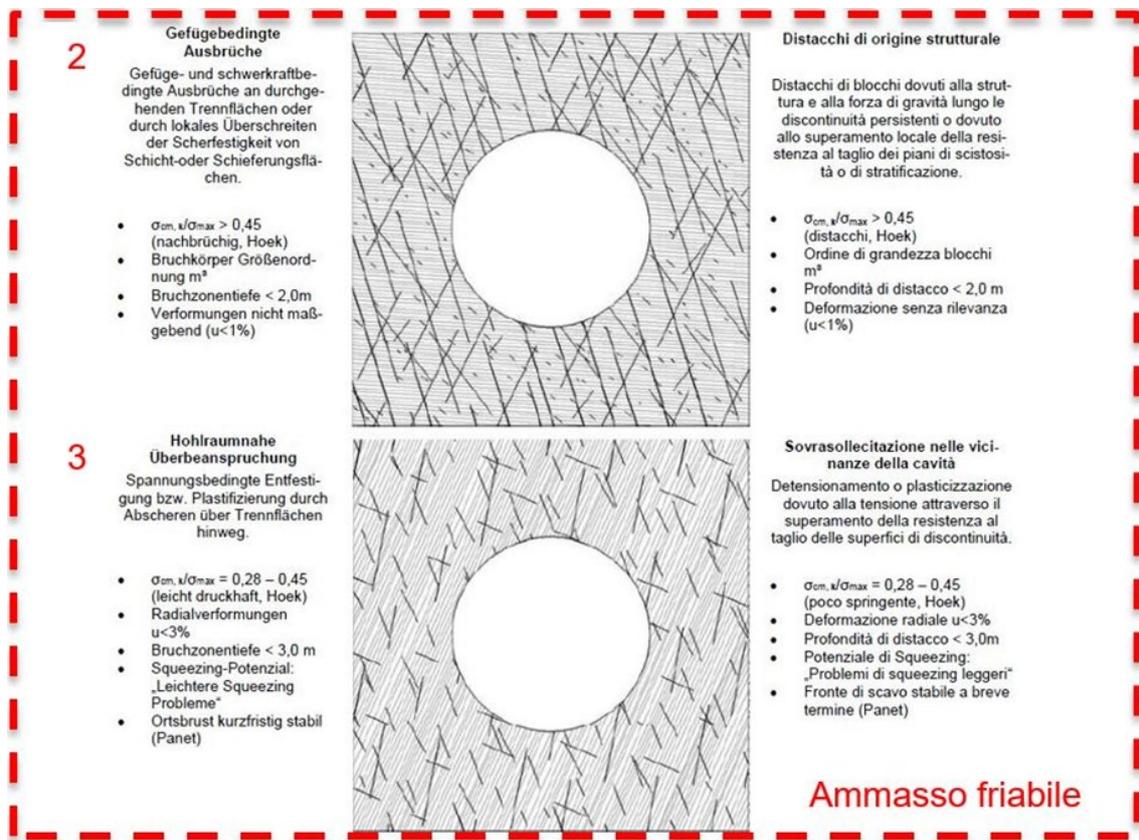


Figura 2.10 - Sezione trasversale per il TCR 2 e TCR 3 [Egger, 2014]

- **TCR 4 Sovrasollecitazione profonda (fig. 2.11):** allentamento o plasticizzazione profonda a causa dell'elevato stato tensionale.

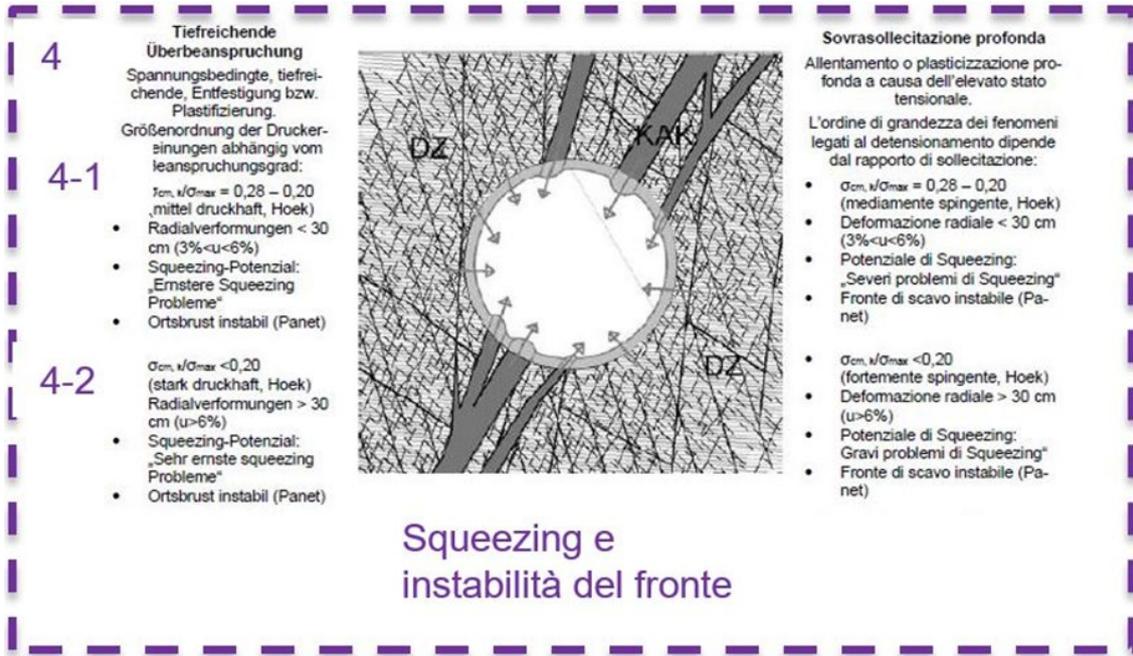


Figura 2.11 - Sezione trasversale per il TCR 4 [Egger, 2014]

- **TCR 5 Rockburst (fig. 2.12):** distacchi improvvisi di porzioni di roccia a causa di rottura fragile e condizionato da tensioni primarie elevate.

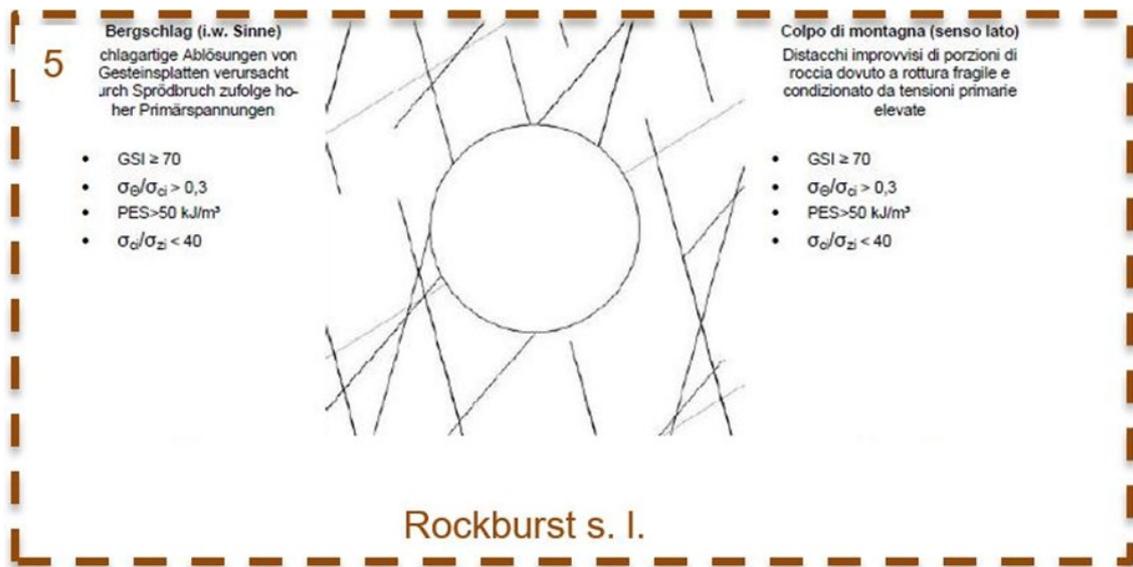


Figura 2.12 - Sezione trasversale per il TCR 5 [Egger, 2014]

- **TCR 6 e 7** indicati nella Linea guida austriaca (ÖGG) ma non presenti nella tratta in oggetto.

- **TCR 8 Ammasso roccioso incoerente (fig. 2.13):** sfaldamenti rocciosi di roccia fortemente frammentata, poco interdigitata in presenza di scarse venute idriche.

- **TCR 9 Ammasso roccioso fluido (fig. 2.13):** comportamento fluido di roccia fortemente frammentata, poco interdigitata, anche argillosa-limosa in presenza di forti venute idriche. Presenza di ammasso roccioso con proprietà geotecniche verosimili ad un terreno incoerente dotato di una bassa coesione. Spinta idrostatica o idrodinamica alta.

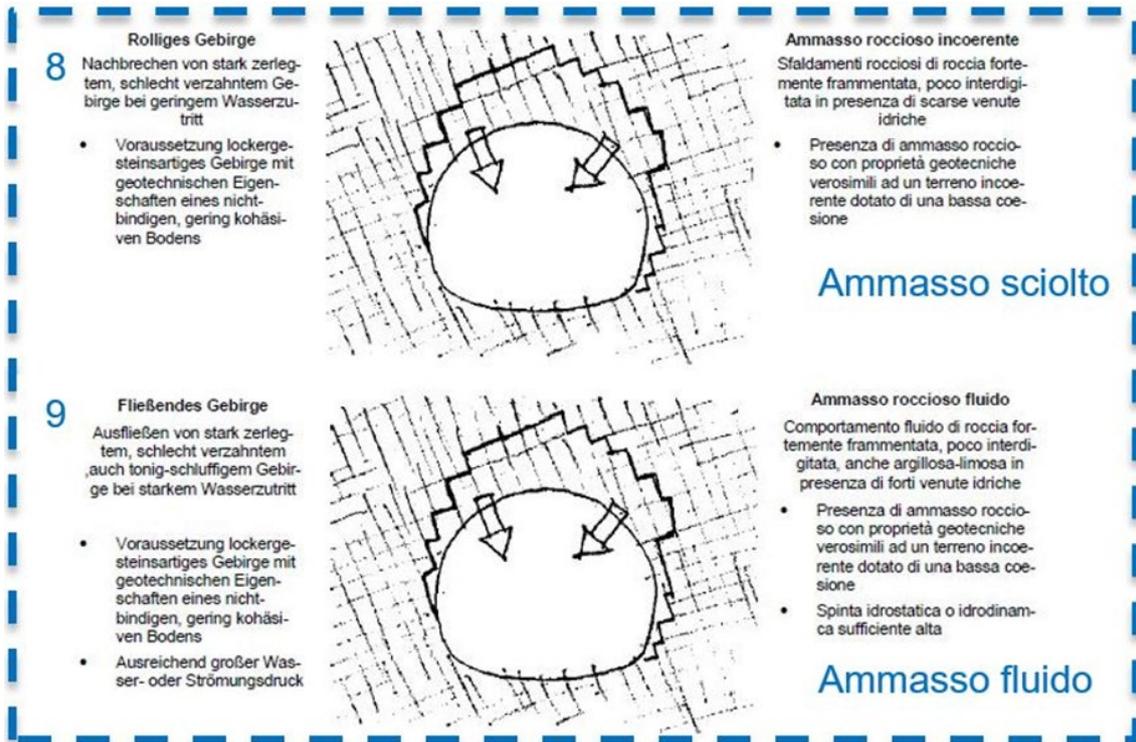


Figura 2.13 - Sezione trasversale per il TCR 8 e TCR 9 [Egger, 2014]

- **TCR 10 Roccia rigonfiante (fig. 2.14):** aumento del volume dell'ammasso roccioso nel tempo dovuto a processi chimico-fisici con acqua in combinazione a detensionamento.

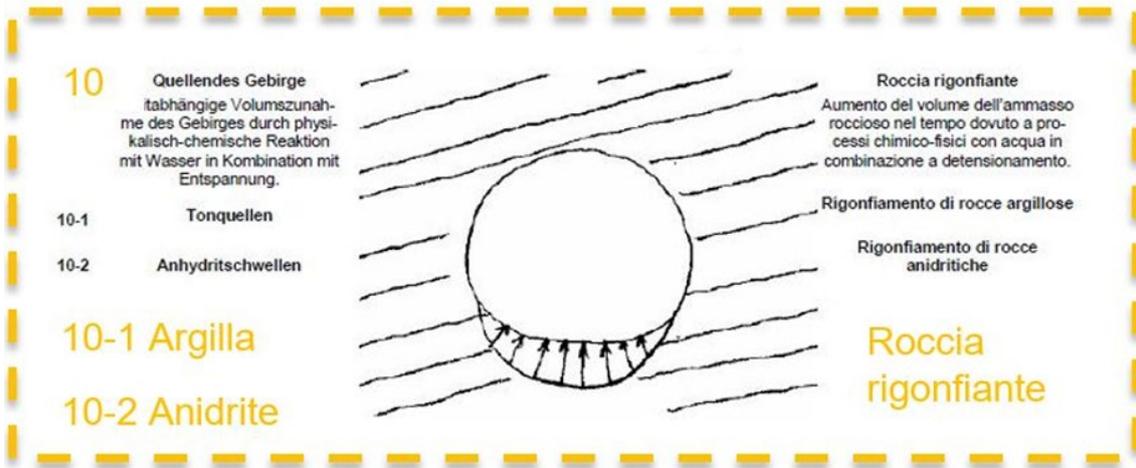


Figura 2.14 - Sezione trasversale per il TCR 8 e TCR 9 [Egger, 2014]

CAPITOLO 3 – Lo scavo meccanizzato nell’ambito del lotto “Mules 2-3”

3.1 Lo scavo meccanizzato e le tipologie di TBM

In fase di Progetto Esecutivo (PE), BBT SE ha valutato la possibilità di usare TBM da roccia nel rispetto delle complesse condizioni geologiche e del fattore tempo. In seguito alle analisi effettuate dall’appaltatore ed in base all’offerta tecnica, si è deciso di adottare delle DS-TBM, ossia delle frese doppio scudate.

Rispetto allo scavo in tradizionale, l’utilizzo delle TBM offre alcuni vantaggi:

- Maggiore velocità di avanzamento (produzione);
- Maggiore sicurezza durante lo scavo;
- Migliore rispetto del profilo di scavo (cavo);
- Minore disturbo del terreno o dell’ammasso circostante;
- Qualità del rivestimento più costante e più monitorabile.

Alcuni svantaggi delle TBM rispetto allo scavo in tradizionale sono:

- Costo fisso elevato;
- Elevato tempo di costruzione, tempo di trasporto e di montaggio / smontaggio in cantiere (circa $\geq 1,5$ anni);
- Predisposizione di uno scavo profondo o una caverna di montaggio / smontaggio scavato con i metodi tradizionali;
- Maggiore quantità di scavo per sezione circolare;
- Minore flessibilità di reagire ad imprevisti geologici.

Le TBM sono macchine che consentono un elevato grado di industrializzazione, costituendo una vera e propria “fabbrica mobile” che avanza nel sottosuolo, permettendo in alcuni casi anche l’installazione del rivestimento definitivo costituito da conci di calcestruzzo prefabbricati. Tuttavia, a causa dell’alto costo di produzione, per risultare convenienti rispetto al metodo tradizionale, queste macchine vengono adoperate solo per

tratti di scavo in genere molto lunghi a seconda delle proprietà specifiche di progetto ($\geq 3-5$ km); inoltre sono progettate in base alle condizioni geologiche che andranno a scavare, si nota infatti quanto siano importanti le indagini geologiche/geotecniche in avanzamento.

Nel corso degli anni, sono state progressivamente differenziate e quindi offerte dal mercato diverse tipologie di TBM:

- TBM per lo scavo di gallerie in terreni generalmente omogenei e sciolti: normalmente utilizzate per gallerie di lunghezza limitata. Il problema principale, in questo caso, è legato alla stabilità del cavo e del fronte di scavo. A questa categoria appartengono le Slurry Shield Macine (STBM) e le Earth Pressure Balance Machine (EPBM).
- TBM per lo scavo di gallerie in ammassi rocciosi: utilizzate per gallerie di elevata lunghezza in roccia caratterizzata da resistenze medio-alte, con coperture da moderate ad elevate. A questa categoria appartengono le Hard Rock Machine (HRTBM).

Si pone adesso l'attenzione sulla seconda macrocategoria di macchine, a cui appartengono quelle utilizzate nel progetto della Galleria di base del Brennero, le Hard Rock Machines, queste si dividono in:

- Gripper TBM;
- Single Shield TBM;
- Double Shield TBM.

Il principio di funzionamento di una TBM per rocce dure è che la testa rotante applica un'elevata pressione sull'ammasso roccioso del fronte di scavo e avanza sgretolandolo per mezzo di dischi taglienti (cutter) montati nella testa rotante (cutterhead). Per effettuare l'operazione di spinta, che avviene tramite cilindri idraulici, è necessario un contrasto, fornito da apposite scarpe di ancoraggio (grippers) spinte contro le pareti dell'ammasso roccioso. È sufficiente una singola corsa di scavo per generare un avanzamento a piena sezione. La testa fresante è dotata di un moto rotatorio grazie a motori elettrici posti nella zona posteriore della macchina ed è progettata in modo tale da riuscire a penetrare diversi tipi di terreno, sia rocce compatte che terreno non consistente, presenti nelle zone di faglia. La sezione di rimozione dello smarino è posizionata nella zona periferica della testa di scavo, dove sono assemblate le "tazze di raccolta" con la funzione di asportare il

materiale proveniente dal fronte e convogliarlo sul nastro trasportatore. Quest'ultimo attraversa l'intero corpo macchina. Effettuato il singolo avanzamento, i grippers vengono ritirati, fatti avanzare di una lunghezza pari alla corsa dei pistoni di spinta e nuovamente spinti contro le pareti del cavo. Il meccanismo di scavo risulta quindi essere ciclico.

L'apparato di scavo è seguito da un corpo centrale o di supporto contenente i motori e altri servizi accessori, quali ad esempio gli organi di messa in opera dei sostegni.

Alla macchina segue un'unità di traino, il back-up, comprendente tutti i componenti elettrici ed idraulici necessari al corretto funzionamento della stessa. Inoltre, tale parte ha la funzione di ricevere ed avvicinare i mezzi di sgombero del detrito e di ricevere le attrezzature che consentano di predisporre particolari operazioni riguardo alle opere di sostegno.

3.1.1 Gripper Shield

Nelle Gripper Shield TBM (o TBM aperte, fig. 3.1) la spinta per l'avanzamento della testa di scavo, viene contrastata da una coppia di *gripper shoes* di grandi dimensioni, espansi contro le pareti rocciose. La trasmissione della spinta da tali elementi al supporto della testa fresante, contenuto in uno scudo, avviene per mezzo di pistoni idraulici. Per poter avanzare in rocce instabili, la fresa deve essere predisposta per l'installazione di sostegni immediatamente dietro al supporto della testa stessa. Tali sostegni devono essere posti in modo tale da non interferire con le scarpe dei grippers. L'utilizzo di questo tipo di fresa è consigliato per lo scavo in ammassi rocciosi con buone caratteristiche meccaniche ed un alto tempo di auto-portanza.

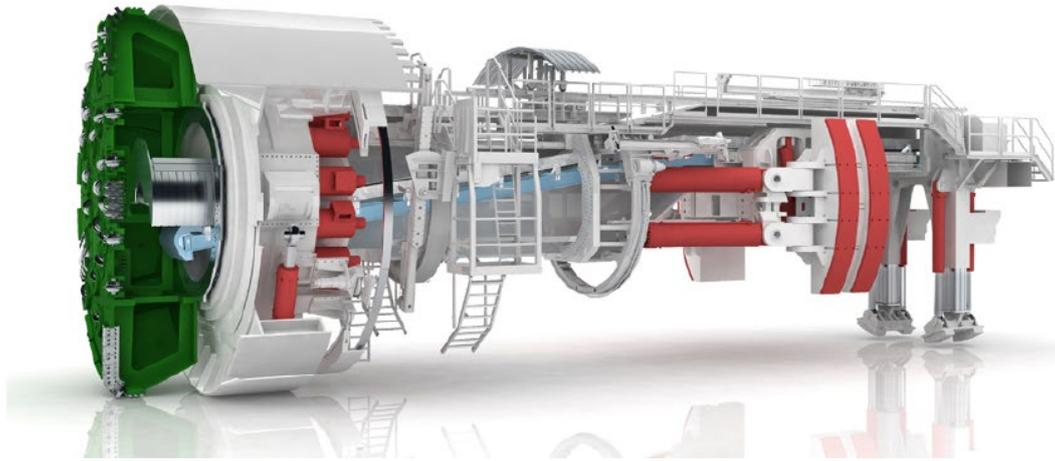


Figura 3.1 - Schema Gripper TBM [Herrenknecht]

Le TBM aperte a singolo sistema di ancoraggio, sono sostenute posteriormente dalla coppia proveniente dalle scarpe di ancoraggio ed anteriormente dallo stesso fronte di scavo, questo permette di poter variare l'asse di avanzamento per effettuare correzioni di guida. In quelle a doppio sistema di ancoraggio, invece, la spinta è contrastata da due coppie di grippers, quindi l'asse di avanzamento è fisso e, non può essere variato durante lo scavo. In seguito all'avanzamento del fronte vengono inseriti supporti tradizionali, quali centine e bulloni oltre all'impiego di spritz beton.

3.1.2 Single Shield TBM

Le Single Shield TBM vengono usate in ammassi rocciosi eterogenei, anche con scarse caratteristiche geomeccaniche, non in grado di garantire il contrasto richiesto dalle Gripper TBM. La S-TBM (fig. 3.2) è costituita da una testa fresante e uno scudo che contiene il supporto della testa e nella cui coda sono montati, obbligatoriamente, i rivestimenti prefabbricati. La testa fresante presenta un diametro maggiore rispetto allo scudo, questa scelta deriva dalla volontà di evitare che l'attrito che si viene a generare tra la roccia e la macchina non diventi troppo elevato, evitando così un possibile blocco della TBM. Lo scudo, caratterizzato da uno spessore variabile tra i 3 e i 6 cm, assolve la funzione di supporto temporaneo e di protezione degli operatori presenti all'interno della macchina. Nella zona dietro gli scudi c'è l'unità di back-up, il quale è sede delle attrezzature di servizio che seguono l'avanzamento della TBM durante le fasi di scavo. Il back-up non interagisce direttamente con l'ammasso roccioso, tuttavia è una parte fondamentale, poiché tramite esso vengono assolte importanti operazioni: rifornimento della testa di scavo di materiale (conci, malte, pea-gravel ecc.); rifornimento della zona

di scavo con aria compressa, acqua, elettricità e ventilazione adeguata al fine di garantire la salubrità dell'aria; rimozione del materiale di scavo attraverso nastri trasportatori; trasporto degli operatori alla testa di scavo.

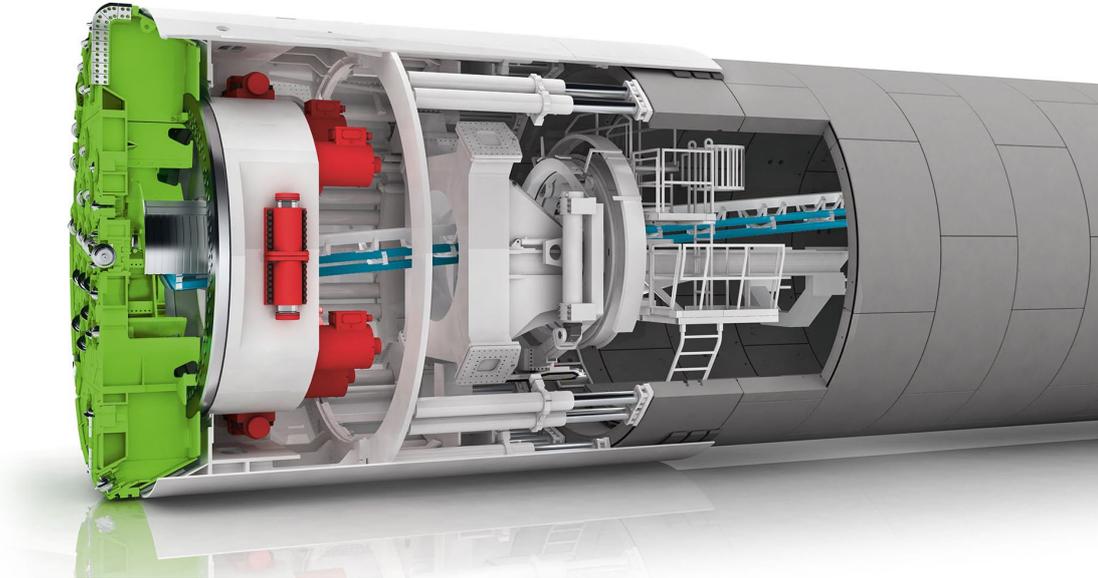


Figura 3.2 - Schema Single Shield TBM [Herrenknecht]

Il ciclo di funzionamento delle S-TBM consiste nell'avanzamento della testa fresante, spinta per mezzo di pistoni idraulici longitudinali che trovano contrasto nel rivestimento finale, montato in fase alterna a quella di scavo. Tale rivestimento è costituito da conci in cls prefabbricati, montati tramite un sistema a ventose per mezzo di un erettore situato posteriormente alla testa di scavo. Poiché le due fasi (scavo-montaggio) avvengono in fase alterna, l'avanzamento è influenzato dal tempo di montaggio dei conci, infatti il ciclo di scavo della macchina si deve fermare per tutto il tempo necessario all'installazione di un intero anello.

3.1.3 Double Shield TBM

Le Double Shield TBM (DS-TBM), usate per l'avanzamento nel lotto "Mules 2-3", sono concepite per superare i vincoli delle precedenti, risultano essere le frese a piena sezione più sofisticate. Infatti, questa tipologia è stata messa a punto per scavare in ammassi rocciosi eterogenei e per raggiungere elevate produzioni, in quanto possiede la capacità di avanzare simultaneamente all'erezione dei conci, riducendo notevolmente il tempo del ciclo di scavo.

Le DS-TBM sono costituite dal seguente sistema di scudi (fig. 3.3):

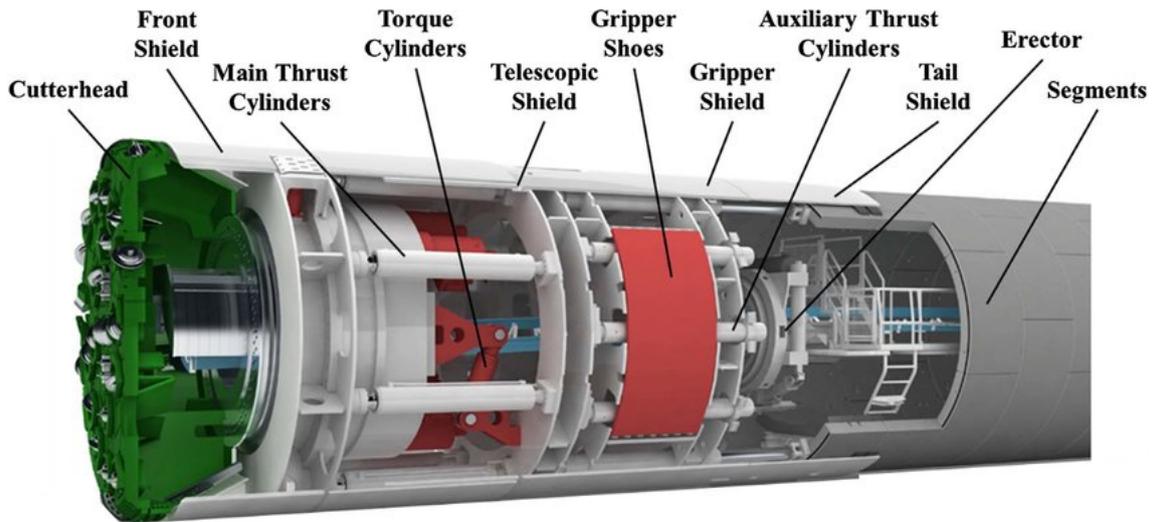


Figura 3.3 - Schema Double Shield TBM [Herrenknecht]

- Front shield o scudo frontale (FS), installato alle spalle della testa di scavo. Funge da protezione dei motori e del main drive.
- Telescopic shield o scudo telescopico (TS), sono due scudi concentrici che grazie al loro movimento “telescopico” permettono di poter scavare e installare contemporaneamente il rivestimento definitivo. Inoltre, essendo degli scudi mobili, permettono l’accesso alle pareti di scavo (fig. 3.4) durante le fasi di fermo della TBM.

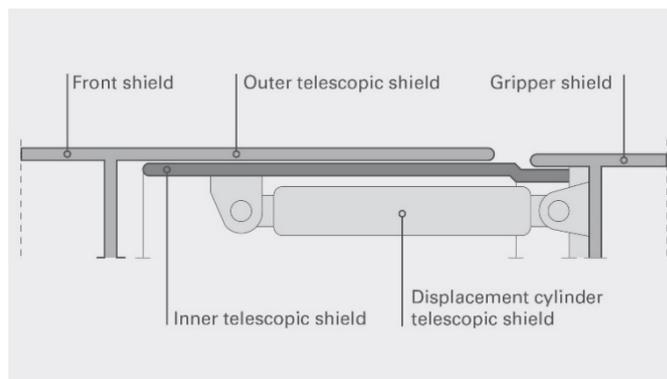


Figura 3.4 - Schema Telescopic Shield [Fonte: Herrenknecht]

- Gripper shield o scudo dei grippers (GS) che funge da protezione dei grippers.
- Tail shield o scudo di coda (TS) che protegge l’erettore dei conchi.

Nella fase di scavo, vengono spinti i grippers contro la parete rocciosa, attivando così il necessario contrasto ai cilindri principali usati per far avanzare lo scudo anteriore.

Contemporaneamente a questa fase, lo scudo posteriore resta fermo e tramite l'utilizzo dell'erecitore con il supporto dei cilindri ausiliari, viene installato concio per concio un anello di rivestimento definitivo. Raggiunta la corsa totale dei cilindri principali, due stabilizzatori, posti all'interno dello scudo frontale, vengono estratti e appoggiati sulla roccia per rendere stabile la TBM. In questa condizione i grippers vengono ritirati (fase di regripping) e lo scudo posteriore viene fatto avanzare per mezzo dei cilindri ausiliari che trovano contrasto nei conci prefabbricati appena installati. Il regripping, che conclude la fase di scavo (fig. 3.5), dura 15-30 minuti, così permettendo che lo scavo avvenga in maniera pressoché continua.

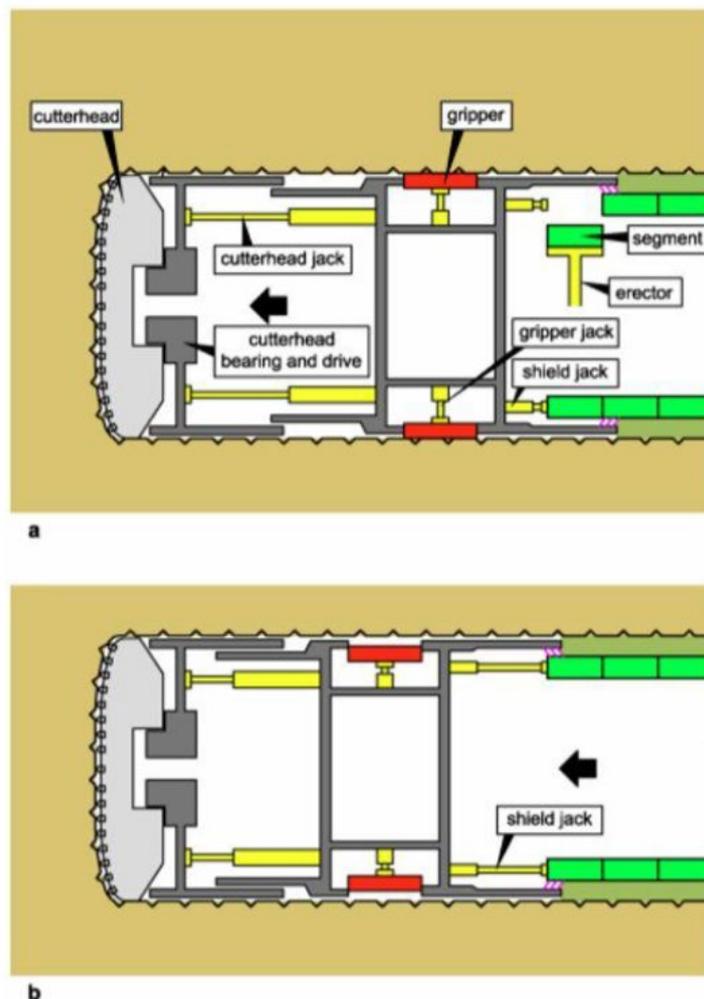


Figura 3.5 - Ciclo di scavo DS-TBM [Wittke, 2006]

Le TBM a doppio scudo possono procedere in due modi, a seconda dello scenario geomeccanico che si trovano davanti. Nel caso in cui attraversino ammassi rocciosi con ottime caratteristiche meccaniche, scavo ed installazione del rivestimento possono avvenire contemporaneamente come descritto precedentemente. Mentre, se ci si trova in

ammassi di scarsa qualità o in zone di faglia, la TBM non può avanzare usando come contrasto in direzione trasversale all'avanzamento i grippers, e funziona come una S-TBM; lo scudo telescopico viene represso completamente in modo che lo scudo frontale e quello dei grippers formino un'unità rigida. Quindi, l'avanzamento avviene utilizzando i cilindri di spinta ausiliari, i quali trovano contrasto unicamente, in direzione longitudinale, sui conci installati precedentemente (modalità monoscudo o scavo discontinuo). Tra questi due modi esiste anche la possibilità di eseguire avanzamenti parziali (re-gripping parziali) per il superamento di zone geomeccanicamente più scadenti (rif. Capitolo 4-5)

3.2 Caratteristiche tecniche – costruttive della TBM S-1054

Per lo scavo del Cunicolo Esplorativo nel lotto “Mules 2-3” viene usata la TBM “Serena” (Herrenknecht S-1054), caratterizzata da un diametro di 6850 mm (fig. 3.6) e una lunghezza complessiva del corpo macchina di 270 m; questa percorrerà un tracciato lungo 14 km.



Figura 3.6 - DS-TBM "Serena" [BBT SE]

Tale macchina, che rientra nella categoria delle DS-TBM, è costituita dal seguente schema di scudi (fonte: Herrenknecht) (fig.3.7):

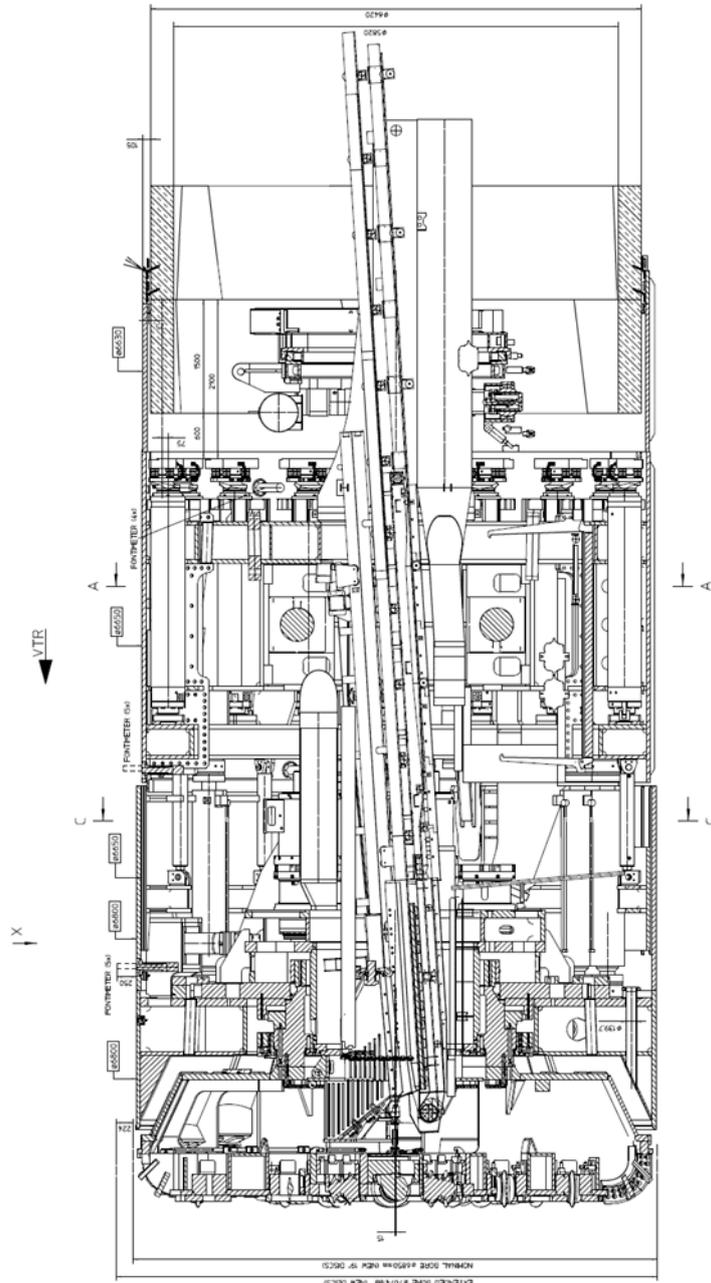


Figura 3.7 - Sistema di scudi della DS-TBM "Serena" [Particolare tavola TBM S-1054, Herrenknecht 2016]

- Front shield (FS) con una lunghezza di circa 1.800 mm ed un diametro di 6.800 mm.
- Inner Telescopic shield (iTTS) con una lunghezza di circa 2.200 mm ed un diametro di 6.650 mm.
- Outer Telescopic shield (oTS) con una lunghezza di circa 2.700 mm ed un diametro di 6.800 mm.

- Gripper shield (GS) con una lunghezza di circa 4.370 mm ed un diametro di 6.660 mm.
- Tail shield con una lunghezza di circa 2.380 mm ed un diametro di 6.630 mm.

La testa fresante (fig. 3.8) frantuma la roccia grazie alla presenza di 37 dischi taglienti (cutter) montati su di essa, così disposti:

- n.4 doppi cutters disposti nell'area centrale (centre area) con la funzione di rottura della parte centrale del fronte;
- n.28 cutters singoli disposti nell'area del fronte (face area) con il compito di costruire tracce circolari;
- n.5 cutters singoli nell'area di misura (gauge area) con la funzione di calibrazione del diametro di scavo.

Inoltre, sulla testa di scavo si trovano le “tazze di raccolta” (buckets) che convogliano il materiale scavato sul nastro trasportatore. Tramite questo, dopo un tragitto che a fine scavo raggiunge più di 20km, lo smarino raggiunge il deposito di Hinterrigger.

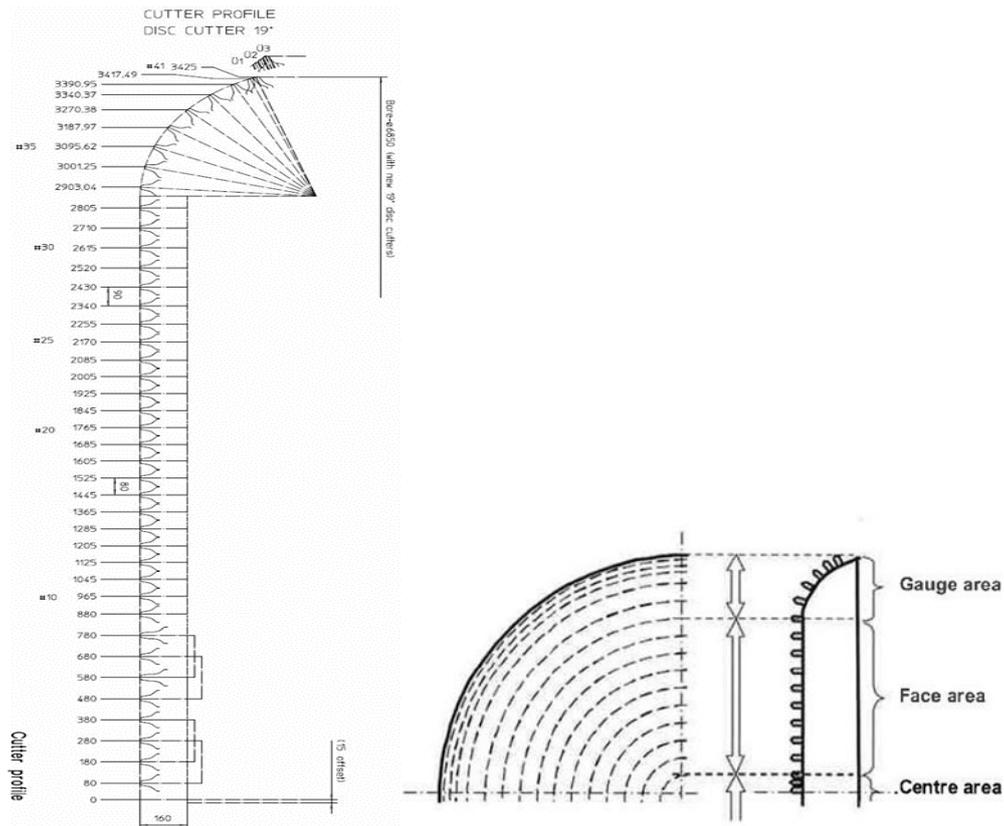


Figura 3.8 - A sinistra, particolare del profilo della testa di scavo [Herrenknecht, 2016]. A destra, schema della testa frestante [Gehring, 2009]

Di seguito si riporta una sintesi delle specifiche tecniche della TBM S-1054 (tab. 3.1)

DATI GENERALI						
Progetto	Opera / Lunghezza Tunnel [m]	Tipo di TBM	Fornitore	Tipo di rivestimento (segment lining type)		
Galleria di Base del Brennero - Lotto Mules 2-3	Cunicolo esplorativo / 14.100	Doppio scudo (Double Shield) lunghezza totale 280 m	Herrenknecht	Ring type / Segment division	Outer / Inner Diameter / Segment thickness [mm]	Segment length [mm]
				Universal / 5+1	6.420 / 5.820 / 300	1.500
SCUDO (Shield)						
Lunghezza scudo [mm] Shield length	Lunghezza scudo + Test fresa [mm] Shield length + Cutter Head	Diametro nominale [mm] Nominal diameter	Conicità [mm] Conicity	Conicità estesa [mm] Extended bore Conicity	Diam. scavo-diam. rivestimento [mm] Anular gap	
11.000	12.000	6.820 (used cutter) 6.850 (new cutter)	95	319	200 (used cutter)	
TESTA FRESA (Cutter Head)						
Diametro di scavo \varnothing [mm] Nominal boring \varnothing	N° dischi [-] n. cutter discs	Dimensione / interasse dischi cutter size / spacing	Spinta cilindri principali [kN] Total nominal thrust	Potenza totale [kW] Total Main drive Power	Velocità di rotazione [rpm] Rotational speed	Momento torcente nominale [kNm] Nominal torque
6.850 mm (new cutter) 6.852 mm (used cutter)	28 single (face) 5 single (gauge) 4 double (center)	19" / 90mm	42.750	2.800	0 - 9,0 (range I) 0 - 4,5 (range II)	5250 (range I) 10500 (range II)

Tabella 3.1 - Sintesi dati tecnici DS-TBM "Serena" [Egger, 2018]

3.3 Caratteristiche tecniche – costruttive delle TBM S-1071 / S-1072

Per lo scavo delle due Gallerie di Linea lungo il tracciato del lotto “Mules 2-3”, vengono adoperate due TBM gemelle S-1071 e S-1072, denominate rispettivamente “Virginia” e “Flavia”. Come per il Cunicolo Esplorativo, la tipologia di macchina adottata è la Double Shield TBM, con un diametro di 10.170 mm (fig. 3.9) ed una lunghezza complessiva del corpo macchina di 210 m. Le due DS-TBM percorreranno un tracciato di 14 km in direzione Nord.



Figura 3.9 - A sinistra testa fresante della DS-TBM "Virginia". A destra testa fresante della DS-TBM "Flavia". [BBT-SE]

Per il funzionamento delle TBM “Flavia” e “Virginia” si rimanda al paragrafo precedente. Nella TBM “Serena” si individuano il seguente sistema di scudi (fonte: Herrenknecht) (fig.3.10):

- Gripper shield (GS) con una lunghezza di circa 3.980 mm ed un diametro di 10.440 mm.
- Tail shield con una lunghezza di circa 2.475 mm ed un diametro di 10.420 mm.

La testa fresante frantuma la roccia grazie alla presenza di 60 cutter da 19", così disposti (fig. 3.11):

- n.4 doppi cutters disposti nell'area centrale (centre area) con la funzione di rottura della parte centrale del fronte;
- n.46 (56) cutters singoli disposti nell'area del fronte (face area) con il compito di costruire tracce circolari.
- n.10 cutters singoli nell'area di misura (gauge area) con la funzione di calibrazione del diametro di scavo.

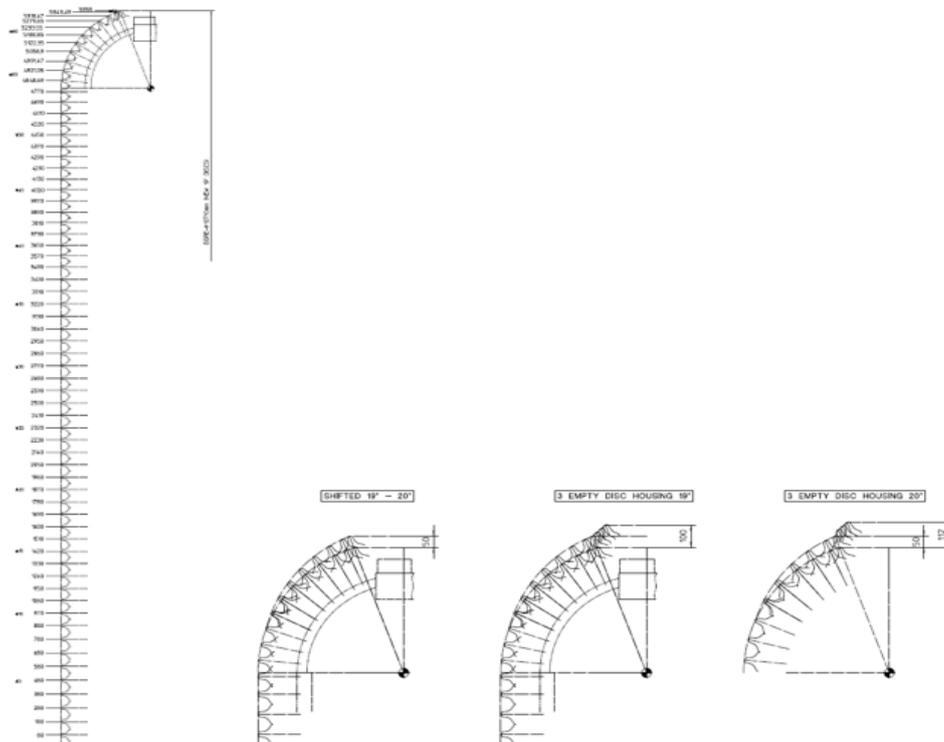


Figura 3.11 - Particolare del profilo della testa di scavo [Herrenknecht, 2016].

Il materiale scavato viene convogliato, tramite dieci “tazze di raccolta”, nel nastro trasportatore. Di seguito si riporta una sintesi delle specifiche tecniche della TBM S-1071/S-1072 (tab. 3.2).

DATI GENERALI						
Progetto	Opera / Lunghezza Tunnel [m]	Tipo di TBM	Fornitore	Tipo di rivestimento (<i>segment lining type</i>)		
Galleria di Base del Brennero - Lotto Mules 2-3	Galleria di Linea / 17.500	Doppio scudo (<i>Double Shield</i>) lunghezza totale 210 m	Herrenkecht	Ring type / Segment division	Outer / Inner Diameter / Segment thickness [mm]	Segment length [mm]
				Universal / 6+1	10.170 / 9.270 / 450	1.750
SCUDO (<i>Shield</i>)						
Lunghezza scudo [mm] <i>Shield length</i>	Lunghezza scudo + Test fresa [mm] <i>Shield length + Cutter Head</i>	Diametro nominale [mm] <i>Nominal diameter</i>	Conicità [mm] <i>Conicity</i>	Conicità estesa [mm] <i>Extended bore Conicity</i>	Diam. scavo-diam. rivestimento [mm] <i>Anular gap</i>	
11.350	12.480	10.680 (used cutter) 10.710 (new cutter)	115	242	255	
TESTA FRESA (<i>Cutter Head</i>)						
Diametro di scavo \varnothing [mm] <i>Nominal boring \varnothing</i>	N° dischi [-] <i>n. cutter discs</i>	Dimensione / interasse dischi <i>cutter size / spacing</i>	Spinta cilindri principali [kN] <i>Total nominal thrust</i>	Potenza totale [kW] <i>Total Main drive Power</i>	Velocità di rotazione [rpm] <i>Rotational speed</i>	Momento torcente nominale [kNm] <i>Nominal torque</i>
10.710 mm	46 single (face) 10 single (gauge) 4 double (center)	19"	95.000	4.200	0 - 5,11 (range I) 0 - 2,55 (range II)	13600 (range I) 27524 (range II)

Tabella 3.2 Sintesi dati tecnici DS-TBM "Virginia/Flavia"

3.4 Gestione del rischio per lo scavo meccanizzato

A causa della difficile previsione dei comportamenti degli ammassi rocciosi che si incontrano durante la fase scavo, risulta molto complesso, far fronte ad una serie di rischi che intervengono in fase di scavo delle gallerie e che possono avere ricaduta sulla sicurezza delle lavorazioni ed inevitabilmente condizionare il rispetto dei costi e tempi di realizzazione dell'opera.

A tal fine, nel progetto esecutivo è stato redatto un piano di gestione del rischio per lo scavo meccanizzato con il quale si sottolinea quali siano i possibili rischi e come poterli quantificare.

In generale, il rischio è un evento caratterizzato dalla probabilità di un accadimento e da un determinato danno procurato: è il prodotto della misura della probabilità di verificarsi di un certo fenomeno e del valore delle sue conseguenze. La gestione del rischio geologico è il processo d'identificazione della pericolosità geologica in riferimento a una

specifica opera sotterranea, con la valutazione delle conseguenze potenziali e della relativa probabilità di occorrenza, delle strategie preventive e delle azioni contingenti. La gestione del rischio è composta da tre fasi distinte, da affrontare in successione con l'avanzamento del progetto:

- Risk assesment (valutazione del rischio): consiste in un processo di individuazione di elementi di pericolosità e valutazione delle rispettive probabilità di occorrenza e delle specifiche conseguenze.
- Risk analysis (analisi del rischio): i rischi, individuati nella fase precedente, vengono ordinati in termini di probabilità di occorrenza e di impatto, permettendo di procedere alle successive fasi di progettazione degli interventi di mitigazione e gestione.
- Risk management (gestione del rischio): divisa in scelta, verifica e, se necessario, modifica delle misure di mitigazione per riportare il livello di rischio al di sotto della soglia accettabile.

I processi di gestione del rischio, che cominciano nella fase progettuale, diventano ancora più importanti in fase di realizzazione dell'opera, cercando un processo 'dinamico' che porti alla continua mitigazione del rischio residuo. In particolare, durante le fasi di costruzione, la gestione del rischio viene perseguita con il supporto del monitoraggio in corso d'opera. Al fine di procedere con una gestione e controllo del rischio si adopera un processo realizzativo, basato sull'uso di "indicatori di prestazione chiave" (KPI, *Key Performance Indicators*), aggiornamento degli stessi e organizzazione delle contromisure in caso di superamento dei valori soglia.

3.4.1 Valutazione e identificazione del rischio

La valutazione o identificazione del rischio è svolta qualitativamente partendo dalla definizione di eventi pericolosi (hazard) che hanno un potenziale impatto in termini di conseguenze negative, ossia sono fonte del conseguente rischio. Nel caso del lotto "Mules 2-3", sono state definite 19 situazioni di rischio potenziale (SRP), come descritto nella relazione tecnica '*Procedura per la gestione del rischio per lo scavo meccanizzato*' del PED (2016):

- SRP 1: Instabilità del fronte;
- SRP 2: Instabilità del cavo, grandi deformazioni;
- SRP 3: Stato deformativo fortemente dissimetrico: dissimmetria di deformazione e di carico;
- SRP 4: Formazione di camini;
- SRP 5: Splaccaggio e sgretolamento: instabilità flessionali o per imbozzamento;
- SRP 6: Faglie e sovrascorrimenti: rilascio del riempimento, peggioramento delle condizioni generali, venute d'acqua o di gas, rifluimenti;
- SRP 7: Infiltrazioni e pressione interstiziale: forti venute d'acqua improvvise con sviluppo di gradienti e possibili invasioni di materiale;
- SRP 8: Presenza di gas;
- SRP 9: Dissoluzione o trasporto: modifica delle caratteristiche fisiche del materiale per variazioni del contenuto d'acqua o per trasporto di particelle fini;
- SRP 10: Scavo in litotipi misti: disomogeneità di comportamento, zone di transizione a diversa permeabilità con possibili venute d'acqua o gas;
- SRP 11: Rigonfiamento;
- SRP 12: Distacco o scivolamento di blocchi rocciosi;
- SRP 13: Rock burst;
- SRP 14: Interferenze tra cavità limitrofe;
- SRP 15: Perdita di equilibrio e labilità delle strutture durante il ribasso di scavi in più fasi;
- SRP 16: Presenza di minerali radioattivi;
- SRP 17: Presa di elementi meccanici (clogging);
- SRP 18: Alte temperature;
- SRP 19: Impatti sulle risorse idriche.

Tutte le SRP sopra elencate possono tradursi essenzialmente nei seguenti rischi:

- a) significativo impedimento all'impiego delle attrezzature e delle maestranze;
- b) collasso o danno significativo del rivestimento;
- c) impatti su ambiente e su altre strutture.

3.4.2 Interventi di mitigazione del rischio

Fase principale nella gestione del rischio, risulta essere la mitigazione dello stesso. Infatti, identificato e valutato lo stesso, l'analisi deve prevedere, laddove la probabilità di un evento dannoso sia superiore a un valore prefissato, di intervenire con specifici interventi in grado di limitare convenientemente il rischio. Si riportano in tab. 3.3, gli interventi di mitigazione del rischio previsti secondo le SRP che si possono riscontrare durante lo scavo con TBM doppio scudata con rivestimento in conci prefabbricati in c.a.

Tipo di rischio	Interventi di mitigazione
SRP 1	Interventi mirati al consolidamento in avanzamento (Tipo 1, Tipo 2, Tipo 3).
SRP 2	Arresto preventivo dell'avanzamento e approfondimento delle condizioni geologico-geomeccaniche e idrogeologiche; messa in opera degli interventi particolari previsti (Tipo 1, Tipo 2, Tipo 3).
SRP 3	Arresto preventivo dell'avanzamento e approfondimento delle condizioni geologico-geomeccaniche e idrogeologiche; messa in opera degli interventi particolari previsti (Tipo 1, Tipo 2, Tipo 3).
SRP 4	SRP in generale non significativa per le opere in oggetto (scavo in roccia, coperture sempre superiori a 80m). Arresto preventivo dell'avanzamento e approfondimento delle condizioni geologico-geomeccaniche e idrogeologiche; messa in opera degli interventi particolari previsti (Tipo 1, Tipo 2, Tipo 3).
SRP 5	Arresto preventivo dell'avanzamento e approfondimento delle condizioni geologico-geomeccaniche e idro-geologiche; messa in opera degli interventi particolari previsti (Tipo 1, Tipo 2, Tipo 3).
SRP 6	Arresto preventivo dell'avanzamento e approfondimento delle condizioni geologico-geomeccaniche e idrogeologiche; messa in opera degli interventi particolari previsti (Tipo 1, Tipo 2, Tipo 3).
SRP 7	Messa in opera degli interventi particolari previsti (Tipo 2, Tipo 3), che prevedono anche l'esecuzione di drenaggi in avanzamento.
SRP 8	Adeguamento del sistema di ventilazione in fase di costruzione.
SRP 9	Messa in opera degli interventi particolari previsti (Tipo 2, Tipo 3), che prevedono anche l'esecuzione di drenaggi in avanzamento.
SRP 10	Arresto preventivo dell'avanzamento e approfondimento delle condizioni geologico-geomeccaniche e idrogeologiche; messa in opera degli interventi particolari previsti (Tipo 1, Tipo 2, Tipo 3).

SRP 11	<p>Arresto preventivo dell'avanzamento e approfondimento delle condizioni geologico-geomeccaniche e idrogeologiche; messa in opera degli interventi mirati.</p> <p>Adozione, nel corso dello scavo e delle fasi di applicazione degli interventi di confinamento, di tecnologie e metodi che minimizzino l'impiego di acqua.</p> <p>Dimensionamento opportuno dei rivestimenti definitivi.</p>
SRP 12	<p>Arresto preventivo dell'avanzamento, approfondimento delle condizioni geologico-geomeccaniche e idro-geologiche, nell'eventuale messa a punto di interventi integrativi mirati.</p>
SRP 13	<p>Arresto preventivo dell'avanzamento, approfondimento delle condizioni geologico-geomeccaniche e idro-geologiche, nell'eventuale messa a punto di interventi integrativi mirati.</p> <p>Riduzione della velocità di avanzamento</p> <p>Esecuzione di perforazioni in avanzamento per il rilascio preventivo delle tensioni</p>
SRP 14	<p>SRP non significativa per le opere in oggetto.</p>
SRP 15	<p>Applicazione di interventi di confinamento specifici per il rinforzo delle porzioni rocciose comprese tra le cavità limitrofe e / o interferenti.</p>
SRP 16	<p>Adozione di specifiche protezioni per il personale operante in sotterraneo e / riduzione del tempo di esposizione.</p>
SRP 17	<p>Impiego di specifici additivi condizionatori del materiale di scavo; minimizzazione dell'impiego di acqua nelle operazioni di scavo.</p>
SRP 18	<p>Adeguamento del sistema di raffreddamento in fase di costruzione.</p>
SRP 19	<p>Applicazione della procedura di gestione del rischio (relazione sulla salvaguardia delle risorse idriche)</p>

Tabella 3.3 - Interventi di mitigazione in funzione delle SRP [Documenti interni – BBT SE]

In base al tipo di problematiche sopraggiunte e al livello di gravità, è possibile intervenire con i seguenti interventi di consolidamento / impermeabilizzazione particolari, elencati in tabella.

- Interventi di tipo 1 (fig. 3.12): esecuzione di 2 sondaggi a carotaggio continuo (uno nella zona di calotta ed uno sul fronte), che coincidono con l'esecuzione di uno dei drenaggi in calotta e di un foro sul fronte, utilizzato successivamente per la posa in opera di uno dei previsti elementi tubolari in VTR. All'interno di ognuno dei due fori sono eseguite tre prove di permeabilità (tipo Lugeon), con l'uso del preventer per la misura della pressione di acqua. L'esecuzione di questi sondaggi, unitamente ai dati ricavati tramite l'indagine prevista nel PE, permette di ricostruire della struttura locale dell'ammasso attraverso la quale è possibile verificare l'efficacia dell'intervento.

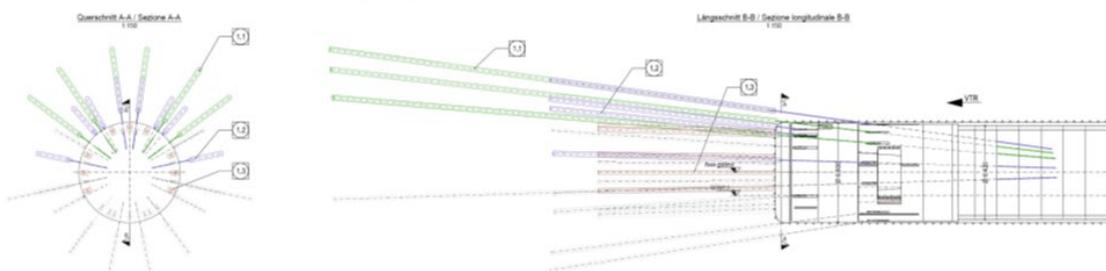


Figura 3.12 - Interventi di consolidamento / drenaggio tipo 1 [PED nr.23082]

- Interventi di tipo 2 (fig. 3.13): l'avanzamento avviene dopo la realizzazione di consolidamenti dell'ammasso al contorno del cavo ed in corrispondenza del fronte di scavo, mediante iniezioni con miscele cementizie a medio/alte pressioni, previa l'esecuzione di una serie di drenaggi al fine di ridurre le eventuali pressioni idrostatiche. Le iniezioni sono fatte da fori opportunamente realizzati attraverso la testa e lo scudo della TBM e appositamente allestiti con tubi valvolati. L'intervento nella zona di calotta e in quella sull'arco rovescio è eseguito utilizzando una perforatrice fissa. Si tende in tal modo alla realizzazione di un arco portante di ammasso roccioso consolidato e di ridotta permeabilità, con caratteristiche geomeccaniche migliori di quelle naturali, che limita il decadimento della tensione di confinamento e al contempo facilita la

canalizzazione delle tensioni al contorno del cavo e la formazione dell'effetto arco artificiale in posizione prossima al profilo dello scavo.

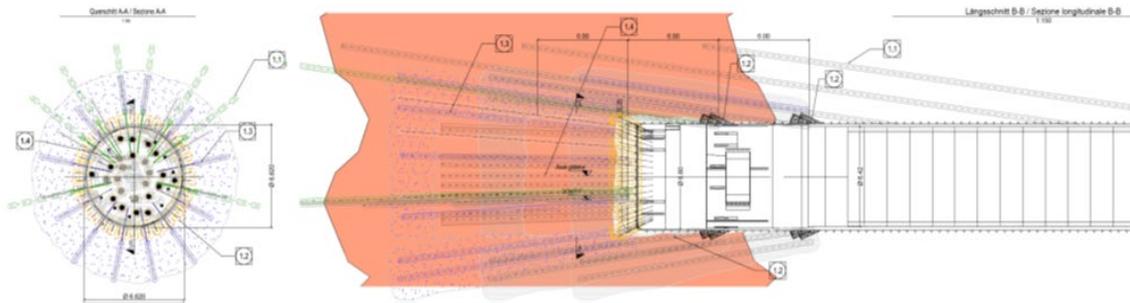


Figura 3.13 Interventi di consolidamento / drenaggio tipo 2 [PED nr.23082]

- Interventi di tipo 3 (fig.3.14): hanno lo scopo di impermeabilizzare/consolidare l'ammasso roccioso nell'intorno e sul fronte di scavo, prevedendo la realizzazione di un cunicolo laterale al tracciato della galleria, scavato in tradizionale, dal quale eseguire l'intervento di consolidamento dell'ammasso interessato dallo scavo delle Gallerie di Linea. Una volta realizzato il cunicolo laterale, si eseguirà verso la galleria e perpendicolare ad esso un drenaggio per l'abbassamento delle pressioni idrostatiche e successivamente il consolidamento con tubi in VTR iniettati in pressione attraverso valvole predisposte.

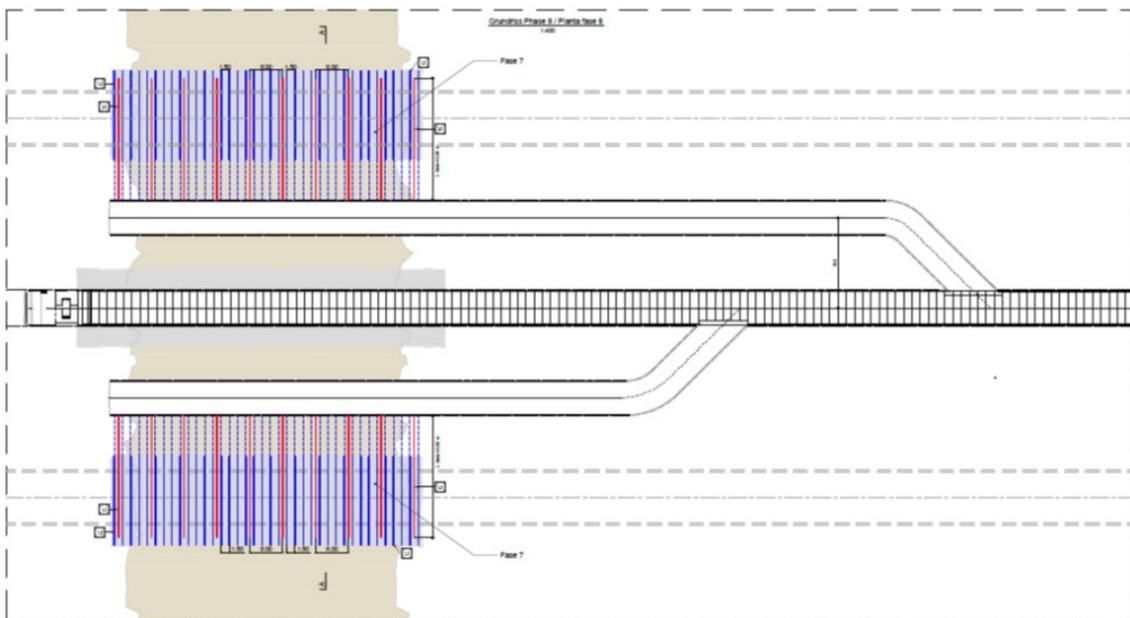


Figura 3.14 - Interventi di consolidamento / drenaggio tipo 3 [PED nt.23082]

3.5 Il piano delle indagini in avanzamento

Il piano delle indagini in avanzamento durante lo scavo in meccanizzato del cunicolo esplorativo assume un ruolo fondamentale per la determinazione delle condizioni geologiche-idrogeologiche oltre il fronte di scavo. Infatti, il fine è quello di individuare e prevenire eventuali zone critiche, quali ad esempio zone di faglia, zone con forti venute d'acqua ad alta pressione ecc. Le indagini di prospezione delle Gallerie di Linea sono più mirate, per cui di frequenze minori rispetto al Cunicolo Esplorativo, poiché lo scavo di quest'ultimo precedendo quello delle due canne principali, fornisce informazioni dettagliate sulle condizioni geologiche-idrogeologiche e sul comportamento dell'ammasso roccioso.

Al fine di una corretta classificazione e urgenza di mitigazione del rischio, è opportuno quantificare il rischio potenziale introducendo più livelli di rischio. Quindi, grazie al lavoro svolto in fase di progettazione (stima del rischio), ma soprattutto ai diversi tipi di indagini eseguiti in corso d'opera, di seguito descritti, sono state considerate delle soglie (descrittive o quantitative) che hanno permesso la distinzione di 3 livelli di rischio (basso, medio ed alto).

Nel progetto del lotto Mules 2-3 per lo scavo in meccanizzato del Cunicolo Esplorativo, il piano delle indagini si divide in due tipologie:

- 1) Indagini sistematiche e continue durante l'avanzamento;
- 2) Indagini puntuali durante l'avanzamento.

Fanno parte del primo gruppo i seguenti tipi di indagine:

- Sondaggi a distruzione di nucleo in avanzamento;
- Rilievi sismici TSP (*Tunnel Seismic Prediction*);
- Rilievi geoelettrici BEAM (*Bore-Tunneling Electrical Ahead Monitoring*);
- Registrazione dei parametri di scavo della TBM;
- Misure della portata d'acqua;
- Misura delle emissioni acustiche;
- Monitoraggio delle emissioni di gas;

- Monitoraggio delle radioattività.

Fanno parte del secondo gruppo i seguenti tipi di indagine:

- Sondaggi a carotaggio continuo in avanzamento;
- Sondaggi a distruzione di nucleo e/o a carotaggio continuo radiali;
- Rilievi elettrici (tomografia elettrica) e rilievi sismici a rifrazione ed a riflessione delle pareti del CE verso le due canne principali;
- Rilievi idrogeologici e termometrici.

Le caratteristiche geologiche-idrogeologiche che si andranno ad incontrare lungo il tracciato delle Gallerie di Linea, vengono stimate dai dati provenienti dal Cunicolo Esplorativo, integrati con i risultati delle indagini sistematiche e puntuali. La previsione geologica in avanzamento è eseguita tramite una classificazione semaforica “dinamica” (esempio di tabella 3.4) che viene aggiornata in corso d’opera per ogni formazione incontrata lungo lo scavo. I risultati ottenuti in termini di relazione parametri di perforazione/struttura dell’ammasso sono posti in relazione ai parametri di scavo della TBM con lo scopo di contribuire al protocollo di gestione delle eventuali anomalie stratigrafiche e strutturali riscontrabili durante lo scavo meccanizzato.

Previsione	PE RMR	Sondaggi a distruzione	Indagini geofisiche	Sondaggi a carotaggio RQD
Fratturazione bassa-lieve	I-II	Bassa velocità di avanzamento, alta coppia	Indisturbata	>50
Fratturazione media	III	Velocità di avanzamento media, coppia media	Disturbata lievemente	25-50
Fratturazione elevata	IV-V	Velocità di avanzamento alta, coppia bassa	Disturbata	<25

Tabella 3.4 - Scala semaforica per la previsione dello stato di fratturazione basata sulle indagini in avanzamento

Le indagini eseguite nell’ambito dello scavo meccanizzato delle Gallerie di Linea sono:

- Del tipo sistematico, limitate alla registrazione dei parametri della TBM;
- Del tipo puntuale, limitate alle zone critiche individuate nel Cunicolo Esplorativo, quali sondaggi a distruzione di nucleo in avanzamento e rilievi geofisici TSP.

3.5.1 Indagini sistematiche

Rilievi geoelettrici dalle pareti del cunicolo

Le indagini geoelettriche permettono di ricostruire la distribuzione della resistività elettrica nel sottosuolo. Oltre a questo parametro vengono misurati anche il potenziale spontaneo e la polarizzazione indotta. Tale tipologia di indagini saranno eseguite sistematicamente, ogni 250 m, per l'intero tracciato delle Gallerie di Linea.

Misure di emissioni acustiche

Le misure di emissioni acustiche tramite geofoni o accelerometri vengono eseguite come sistema di previsione al fenomeno del rockburst lungo il tracciato delle Gallerie di Linea. La sezione di misura tipo è costituita da tre sensori monoassiali, posizionati in calotta e sui paramenti laterali.

Registrazioni e analisi dei parametri della TBM

L'analisi dell'andamento dei parametri di scavo, acquisiti direttamente dalla fresa a piena sezione ogni 3 sec, risulta essere un sistema efficace per monitorare le condizioni dell'ammasso roccioso. I parametri sono registrati e organizzati in un database che permette di filtrarli e ordinarli, oltre che sintetizzare i valori medi per ogni anello. I parametri di maggior importanza sono:

- Velocità di rotazione della testa [rpm];
- Velocità di avanzamento [m/h];
- Penetrazione della testa [mm/giro];
- Spinta dei cilindri principali [kN];
- Coppia di rotazione [kNm];
- Energia specifica di scavo [MJ/m³].

L'andamento dei parametri macchina viene incrociato con i dati provenienti dalle indagini puntuali e dai profili per definire il loro comportamento in funzione della geologia (cap.5).

Monitoraggio gas e radiazioni

È effettuato grazie alla posa di tre sensori catalitici collegati ad una centralina d'analisi dei dati misurati e interessa acido solfidrico, anidride carbonica, metano, azoto, radon e radioattività naturale (uranio e torio nelle rocce).

Misure di portata d'acqua

È possibile misurare le portate d'acqua attraverso l'installazione di tre misuratori a ultrasuoni posti nei punti più significativi delle Gallerie di Linea. Le stazioni di rilevamento sono poste all'interno delle canalizzazioni di evacuazione delle acque a una distanza minima indicativa di 500 m, mentre le stazioni di rilevamento sono poste all'interno del concio di base

Sondaggi a distruzione di nucleo in avanzamento dalla TBM

I sondaggi a distruzione di nucleo sono eseguiti nelle porzioni di tracciato maggiormente critiche dal punto di vista geologico-geomeccanico. In tali tratte, i sondaggi devono essere eseguiti ogni 100 m e coprire una distanza dal fronte di scavo pari a 150 m, con una sovrapposizione di 50 m con il sondaggio precedente. Per garantire una buona direzionalità, il diametro minimo deve essere di 76mm. I sondaggi sono eseguiti per mezzo di una perforatrice a rotopercolazione, dotata di preventer. I parametri registrati durante i sondaggi a distruzione sono: velocità di penetrazione, coppia di rotazione, spinta, velocità di rotazione, pressione del fluido.

Rilievi geofisici dal CE

I rilievi sismici eseguiti nel Cunicolo Esplorativo verso le Gallerie di linea sono eseguiti tramite le tecniche di tomografia sismica a riflessione e a rifrazione. Queste permettono di caratterizzare in anticipo l'ammasso roccioso, individuare anomalie/disturbi con qualsiasi orientazione e giacitura ed inoltre di determinare gli effetti dello scavo. Nello specifico:

- Sismica a riflessione: consente di definire lungo il profilo indagato, tramite la valutazione della velocità di propagazione delle onde di compressione e di taglio, le unità litologiche e la loro geometria.
- Sismica a rifrazione: per mezzo di impulsi che attraversano l'area interessata si ottiene una ricostruzione stratigrafica, con individuazione di faglie e fratture.

3.5.2 Indagini puntuali

Sulla base dei risultati delle prospezioni sistematiche è possibile definire l'eventuale necessità di effettuare indagini puntuali più dettagliate in zone critiche, come ad esempio in prossimità delle zone di faglia. Nel piano di mitigazione del rischio per le Gallerie di Linea sono previsti i seguenti metodi di prospezione puntuale:

Sondaggi a carotaggio in avanzamento dalla TBM

Qualora le informazioni ottenute dalle indagini sistematiche e/o derivate dallo scavo del CE siano incerte, si prosegue con l'esecuzione di carotaggi al fine di classificare l'ammasso roccioso e definire le caratteristiche dei sistemi di discontinuità. I sondaggi possono arrivare ad una distanza massima dal fronte di scavo pari a 150m, con diametro di perforazione di 101mm. Inoltre, possono essere eseguite altre prove in foro (down-hole, cross-hole, dilatometriche, idrofratturazione, etc.)

Rilievi idrogeologici e termometrici

Nel caso in cui si intercettino importanti venute d'acqua, queste vengono monitorate fino al loro eventuale esaurimento. Per ogni venuta d'acqua significativa incontrata durante lo scavo, vengono misurate la progressiva, la portata, la conducibilità, la temperatura ed il pH. Le stazioni sono posizionate indicativamente in corrispondenza delle stazioni di misura di portata lungo le gallerie (distanza minima 500m). La misura della temperatura viene effettuata tramite termometri installati in corrispondenza delle stazioni idrogeologiche.

3.6 La documentazione geologica: rilievo dei fronti di scavo

La documentazione geologica, che consiste nei rilievi, risulta essere di fondamentale importanza per interpretare alcune delle misure che vengono registrate dalle TBM. Infatti, grazie all'analisi visiva dell'ammasso roccioso, sia al fronte di scavo che al cavo, è possibile indagare in riferimento alla natura geologica, individuando anche le possibili fratture.

A differenza dei tratti scavati in tradizionale, in cui vi è la possibilità di effettuare il rilievo osservando il fronte nella sua completezza, nei tratti scavati tramite TBM a doppio scudo è possibile osservare il fronte attraverso aperture della testa di scavo e le pareti

dell'ammasso roccioso per mezzo di finestre disposte in telescopica nei periodi di fermo delle TBM (ad esempio manutenzione ordinaria della TBM).

I rilievi geologici permettono di poter effettuare uno schizzo della struttura dell'ammasso e di descrivere nel dettaglio le litologie principali individuabili, tipo, giacitura (stima e misura) e condizioni delle discontinuità (giunti, scistosità, faglie) nonché le condizioni idrogeologiche. In base al rilievo geologico si definiscono i tipi di comportamento (TCR) e le situazioni di rischio potenziale (SRP) specifici di progetto e cioè si effettuano classificazioni qualitative-descrittive dell'ammasso, oltre a determinare gli indici di classificazione GSI e RMR, fornendo così anche un'informazione di tipo quantitativo. Uno dei principali problemi che nasce dalle classificazioni quantitative (GSI, RMR) deriva dall'incertezza dei valori assegnati, in quanto influenzati dall'esperienza dell'operatore. A causa di ciò, nella valutazione dei singoli parametri non si assegna un singolo valore bensì un range.

Il report sul rilievo al fronte si divide in più parti:

- Litologia: descrizione macroscopica, viene indicato il tipo di roccia incontrato e le sue caratteristiche, quali ad esempio colore, abrasività, presenza di scistosità ecc.
- Ammasso roccioso: descrizione qualitativa dell'ammasso, viene indicato il grado di fratturazione, l'immersione delle scistosità e le condizioni idriche. Viene inoltre indicato se si è in condizioni di stabilità/instabilità.
- Rischio potenziale: vengono indicate, se presenti, le condizioni di rischio potenziale (SRP) associate all'ammasso.
- Discontinuità: descrizione dettagliata delle discontinuità incontrate, viene indicata la spaziatura, l'inclinazione media, la rugosità delle superfici ecc.
- .Descrizione visiva: gli schizzi del fronte sono di grande importanza in un rilievo geologico, l'operatore riporta uno schema rappresentativo dell'ammasso, comprese le discontinuità/scistosità presenti. Oltre gli schizzi, l'operatore effettua una serie di rilievi fotografici al fine di testimoniare la realtà in cui si trova l'ammasso roccioso.

- Approfondimento discontinuità: vengono riportate informazioni riguardanti le famiglie di discontinuità incontrate, rappresentate tramite proiezione stereografica. Inoltre, viene riportato anche l'indice GSI.
- Calcolo dell'indice RMR: per ogni parametro si individua il range di valori in cui ricade l'ammasso. La somma di tutti i valori fornisce l'RMR e la classe di comportamento dell'ammasso roccioso.

Tramite queste informazioni è possibile associare all'ammasso incontrato, il tipo di comportamento. La documentazione geologica deve essere completata con informazioni riguardanti progressiva e data in cui è stato effettuato il rilievo, il tipo di avanzamento (meccanizzato/tradizionale) e la copertura.

Fanno parte della documentazione geologica anche:

- Prelievi di campioni in roccia durante i periodi di fermo della fresa, questi vengono inviati in laboratorio per effettuare prove geologiche e geotecniche;
- Misure idrogeologiche: misure di portata, della temperatura, del valore pH e della conducibilità elettrica di venute d'acqua;
- Prelievi di campioni d'acqua per poter effettuare analisi chimiche in laboratorio.

3.7 Il monitoraggio del processo di scavo: Parametri TBM

L'analisi dei parametri della TBM rientra nel complesso piano di prospezioni e monitoraggio ideato per lo scavo in meccanizzato delle Gallerie di Linea. Secondo la direttiva ÖGG (2013) le DS-TBM S-1071/S-1072 adoperate per l'avanzamento delle due canne principali, possono essere suddivise in quattro zone ai fini dello studio dell'interazione TBM-ammasso roccioso (fig. 3.15):

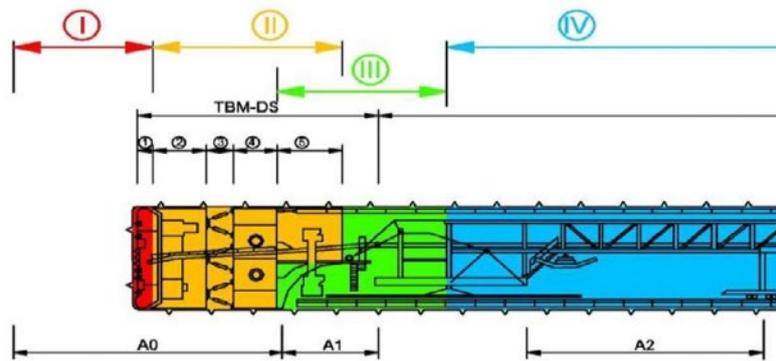


Figura 3.15 - Suddivisione zone DS-TBM

- zona I = Fronte di scavo /Testa di scavo;
- zona II = Cavo/Scudo;
- zona III = Cavo/ Anelli;
- zona IV = Cavo/Rivestimento definitivo.

3.7.1 Monitoraggio del processo di scavo – Zona I

Tramite l'analisi dei parametri macchina registrati dalla TBM e l'analisi dei dati geologici provenienti dalle indagini e dai rilievi geologici, la DL (Direzione dei Lavori) di BBT SE, redige una serie di report settimanali/mensili al fine di individuare, ove possibile, zone omogenee dal punto di vista geologico-geomeccanico. In base alle esperienze dei primi nove mesi di scavo del cunicolo esplorativo, BBT SE ha redatto delle linee guida interne per *“L'analisi dei parametri TBM S-1054 e definizione di valori di soglia per l'individuazione di situazioni di rischio potenziale SRP”* [Egger, 2019]. Ad oggi, tali linee guida vengono adoperate anche per lo scavo delle Gallerie di Linea. Si riporta nel seguente paragrafo la descrizione dei parametri utili allo studio in esame.

KPI 1 – *Velocità di rotazione della testa* [rpm]: si tratta di uno dei parametri più significativi, poiché tenuto abbastanza costante in condizioni di scavo normale (scavo “standard” in marcia “2” a cui corrisponde un'alta rotazione combinata ad un basso torque). Poiché direttamente impostato dal fresista, il parametro è direttamente correlabile a cambiamenti delle condizioni di scavo e quindi delle proprietà geomeccaniche dell'ammasso. Se la velocità di avanzamento supera un certo valore, il fresista abbassa i giri per tenere costante la penetrazione e per non sovraccaricare con materiale frantumato

il nastro, mentre aumenta leggermente la coppia. Nello scenario di fronte instabile o parzialmente instabile, in cui la testa si riempie di materiale e l'attrito aumenta, il fresista deve abbassare ulteriormente i giri con relativo aumento della coppia (scavo "eccezionale" in marcia 1 a cui corrisponde una bassa rotazione combinata ad un'alta coppia).

KPI 2 – *Spinta dei cilindri principali* [kN]: tale parametro viene impostato dal fresista e tenuto costante in condizioni di scavo "standard", ossia quando l'ammasso è caratterizzato da buone proprietà geomeccaniche. In presenza di ammassi meno resistenti, il thrust viene diminuito. Tuttavia, i valori di spinta possono riscontrare picchi più o meno puntuali in corrispondenza di particolari scenari di scavo:

- sviluppo di notevole attrito laterale lungo lo scudo frontale (ad es. nel caso di ammasso spingente e chiusura del cavo, oppure deviazione della fresa dall'asse teorico);
- attivazione del "freno" per tenere in asse la testa fresante che per il suo peso tende ad inclinarsi verso il basso, in presenza di ammasso poco resistente.

KPI 3 – *Coppia* [MNm]: questo è un parametro molto significativo, rappresenta lo sforzo compiuto dalla macchina per permettere la rotazione della testa. Dal punto di vista fisico rispecchia l'interazione della testa fresante con il fronte e indica se lo scavo stia proseguendo in modo regolare. Generalmente, in condizioni di scavo "standard", valori bassi della coppia legati ad una spinta bassa indicano un ammasso poco resistente; al contrario l'aumento di questi due parametri è legato ad un aumento della resistenza. Inoltre, fornisce buone indicazioni sulla stabilità del fronte di scavo poiché valori più elevati rispetto alla media possono indicare l'instabilità locale del fronte (controllata o da discontinuità sfavorevoli o dal rilascio tensionale) ed un processo di cutting irregolare con conseguente riempimento della testa di scavo di materiale con scadenti proprietà geotecniche e/o un aumento della pressione sulla testa. Come la velocità di rotazione della testa e la spinta, anche il *torque* (coppia) è indirettamente influenzato dall'azione del fresista.

KPI 4 – *Velocità di avanzamento* [m/s]: rappresenta la velocità con cui la TBM riesce a scavare l'ammasso roccioso. Viene controllata indirettamente dal fresista, che cerca di mantenerla costante, agendo su spinta e velocità di rotazione della testa.

KPI 5 – *Penetrazione* [mm/rot]: viene controllata indirettamente dal fresista che cerca di mantenerla costante. A differenza dei precedenti è un parametro calcolato e non misurato, pari al rapporto tra velocità di avanzamento e velocità di rotazione della testa. Soltanto se la velocità di avanzamento raggiunge un valore critico che rende necessario la riduzione delle velocità di rotazione si registra anche un aumento della penetrazione.

KPI 6 – *Energia specifica* [GJ/m³]: è un valore calcolato e consiste nella somma dell'energia specifica traslazionale (E_{stra}) e dell'energia rotazionale (E_{srot}). Quindi segue l'equazione (3.1):

$$E_s = E_{stra} + E_{srot} = \frac{F}{A} + \frac{2 \cdot \omega \cdot \pi \cdot T}{A \cdot AR} \quad (3.1)$$

dove :

E_{stra} = energia specifica traslazionale

E_{srota} = energia specifica rotazionale

F = spinta di avanzamento

A = sezione di scavo

Ω = velocità di rotazione

T = coppia

AR = velocità di avanzamento media.

L'energia specifica in condizioni di scavo “standard” fornisce un trend sulla resistenza dell'ammasso roccioso, aumenta con la sua resistenza e diminuisce in condizioni geomeccaniche sfavorevoli.

KPI 7 – *Peso dello smarino* [t]: rappresenta la quantità di materiale estratto, valutato attraverso l'uso di una bilancia dinamica “Spring”. Confrontando il peso registrato con quello teorico si possono definire i livelli di rischio.

3.7.2 Monitoraggio nella zona dello scudo – Zona II

Il monitoraggio in corso d'opera nella zona retrostante alla testa di scavo (zona II, fig. 3.15) riguarda l'analisi dei valori registrati dalle celle di pressione, dai martinetti

(fontimeters) e la spinta dei cilindri ausiliari. Facendo riferimento alle linee guida interne di BBT, si riportano i parametri macchina d'interesse.

KPI 8 – Celle di pressione [bar]

Le celle di pressione consentono di misurare nella zona di calotta la pressione di contatto causata dall'ammasso roccioso con l'estradosso dello scudo. Essi diventano essenziali nella valutazione del 'rischio squeezing' in quanto, insieme ai valori misurati dai martinetti, potrebbero essere un'ulteriore conferma della tendenza delle pareti di scavo alla chiusura. La registrazione dei valori di pressione, a differenza dei martinetti, avviene in continuo con una frequenza di registrazione di 3 secondi. Ad un alto valore registrato dalle celle di pressione corrisponderà un elevato spostamento radiale delle pareti confinato dallo scudo, con il conseguente rischio di bloccaggio della TBM. Le celle di pressione sono state installate tutte in sommità dello scudo (fig. 3.17 e fig. 3.18).

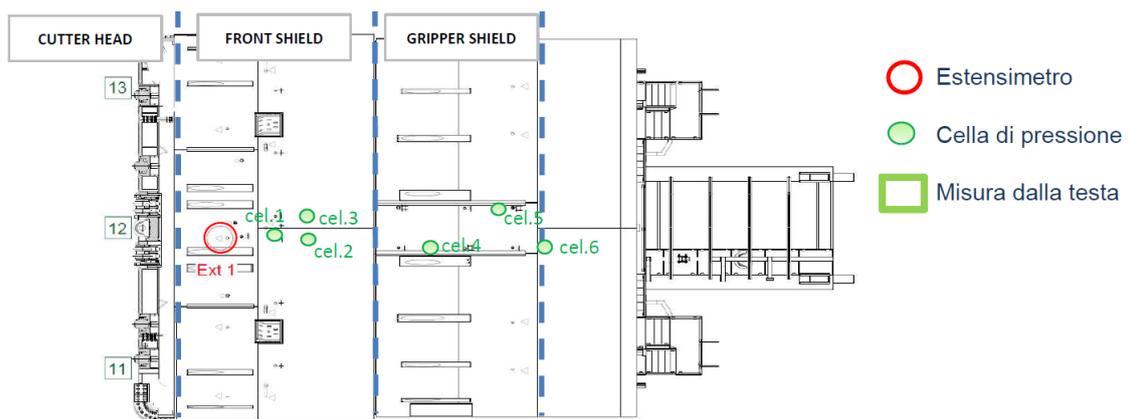


Figura 3.16 - Disposizione Fontimeters (in rosso) e celle di pressione (in verde) nelle TBM "Virginia "

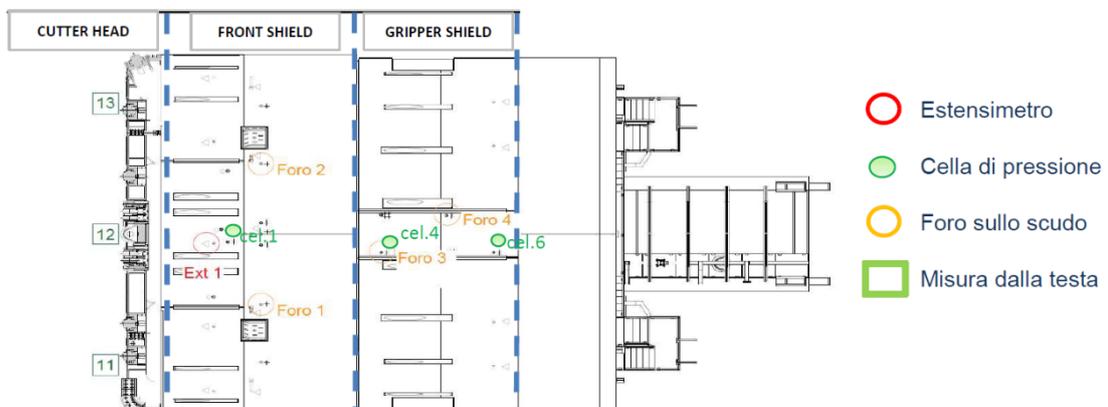


Figura 3.17 - Disposizione Fontimeters (in rosso) e celle di pressione (in verde) nelle TBM "Flavia"

KPI 9 – *Fontimeters* [mm]: rilevano ad ogni avanzamento la distanza tra l'estradosso scudo e il profilo di scavo (*gap*). La registrazione dei dati dei martinetti è effettuata manualmente da un operatore. A inizio e alla fine di ogni avanzamento e durante i fermi il fresista esegue misure puntuali del *gap* anulare, avendo così una valutazione locale del comportamento dell'ammasso. Teoricamente, quando non azionato, il martinetto dovrebbe registrare valori pari a zero; tuttavia, a causa della grande sensibilità e delle vibrazioni indotte dallo scavo stesso, in molti casi alcune letture sono diverse da zero. La distanza che intercorre tra il fronte di scavo e il punto di installazione dei fontimeters è di fondamentale interesse per una corretta interpretazione dei dati, nelle TBM interessate allo scavo delle Gallerie di Linea questo è posto ad una distanza di circa 3300 mm (fig. 3.16 e fig. 3.17).

KPI 10 - Spinta dei cilindri ausiliari [MN]: la forza compiuta dalla macchina in fase di *regripping* (chiusura degli scudi) è un buon indicatore del comportamento del cavo, in quanto in caso di una chiusura (anche parziale) associata all'aumento dell'attrito laterale tra scudo e ammasso, i valori di spinta aumentano notevolmente. Anche una deviazione dall'asse può causare un aumento dell'attrito laterale.

3.8 Il monitoraggio geotecnico zona III

Non di minore importanza risulta essere il monitoraggio geotecnico che viene in seguito all'installazione del rivestimento in conci prefabbricati. All'interno del Cunicolo Esplorativo e delle Gallerie di Linea, vengono adoperate diverse tipologie di monitoraggio:

- Misura della convergenza: mire ottiche e sistema AWCS, solo per i primi 2 km delle zone costituite da calcescisti;
- Misure dei vuoti in calotta;
- Misure dello stato tensionale dell'ammasso roccioso con conci strumentati.

Misure di convergenza: mire ottiche

Nelle sezioni, previste nel progetto esecutivo, sono installati cinque punti di misura dotati di mire ottiche (fig. 3.18), che permettono di ricostruire la deformazione dell'anello tramite la misura dello spostamento nelle tre direzioni (verticale, orizzontale e parallelo all'asse della galleria). Le mire riflettenti vengono installate sui conci prefabbricati dietro al back-up (zona 3), in corrispondenza delle nicchie e degli innesti con i cunicoli trasversali.

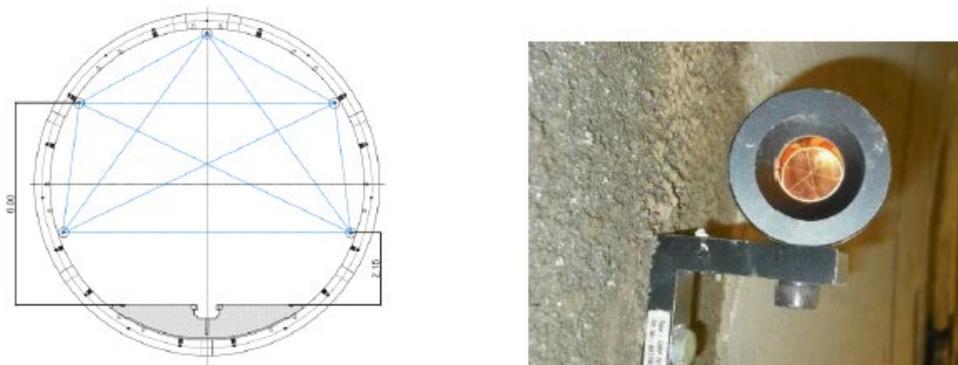


Figura 3.18 - A sinistra, disposizione delle mire sull'anello. A destra, esempio

L'installazione delle mire viene fatta con un mese di anticipo rispetto allo scavo della nicchia o by-pass, mentre la lettura dello zero viene effettuata subito dopo l'installazione delle stesse. Le misure sono effettuate con cadenza giornaliera/settimanale/mensile secondo tale schema:

- letture settimanali prima e a conclusione degli scavi della nicchia (sempre che la convergenza sia nulla o compresa tra 0,1 e 1,0 mm).
- letture giornaliere durante l'esecuzione degli scavi della nicchia;
- letture mensili fino alla posa dell'impermeabilizzazione (fino a valori di misura pari a \pm 1 mm).

Misure dei vuoti in calotta: Tecnica georadar

In seguito all'iniezione della malta nel vuoto arco rovescio-roccia e di pea-gravel nella parte rimanente, vi è la possibilità di lasciare zone di vuoto in calotta. Al fine di monitorare tale problematica, viene adoperato il georadar con antenna a doppia frequenza su singole sezioni di 50 m di lunghezza. Il funzionamento di tale tecnica risulta di facile comprensibilità; viene emanato un impulso elettromagnetico verso la direzione d'interesse, quando questo raggiunge l'interfaccia che separa materiali con differenti proprietà dielettriche, una porzione del fronte d'onda cambia direzione a causa del fenomeno di dispersione, che può verificarsi in quattro modi:

- Riflessione: parte dell'energia dell'onda incidente viene riflessa nel mezzo 1 in base alla legge di Snell (fig. 3.19_a).
- Rifrazione: parte dell'energia dell'onda incidente attraversa il mezzo 2 con un angolo definito sempre dalla legge di Snell (fig. 3.19_b).
- Diffrazione: l'impulso è parzialmente ostacolato da una variazione repentina dovuta all'inclinazione dell'interfaccia e l'onda si disperde nelle varie direzioni (fig. 3.19_c).
- Risonanza: l'impulso incide su superfici ridotte oppure c'è un contrasto elevato tra la costante dielettrica dell'onda e del mezzo attraversato. L'onda rimbalza tra differenti punti all'interno dell'oggetto. (fig. 3.19_d)

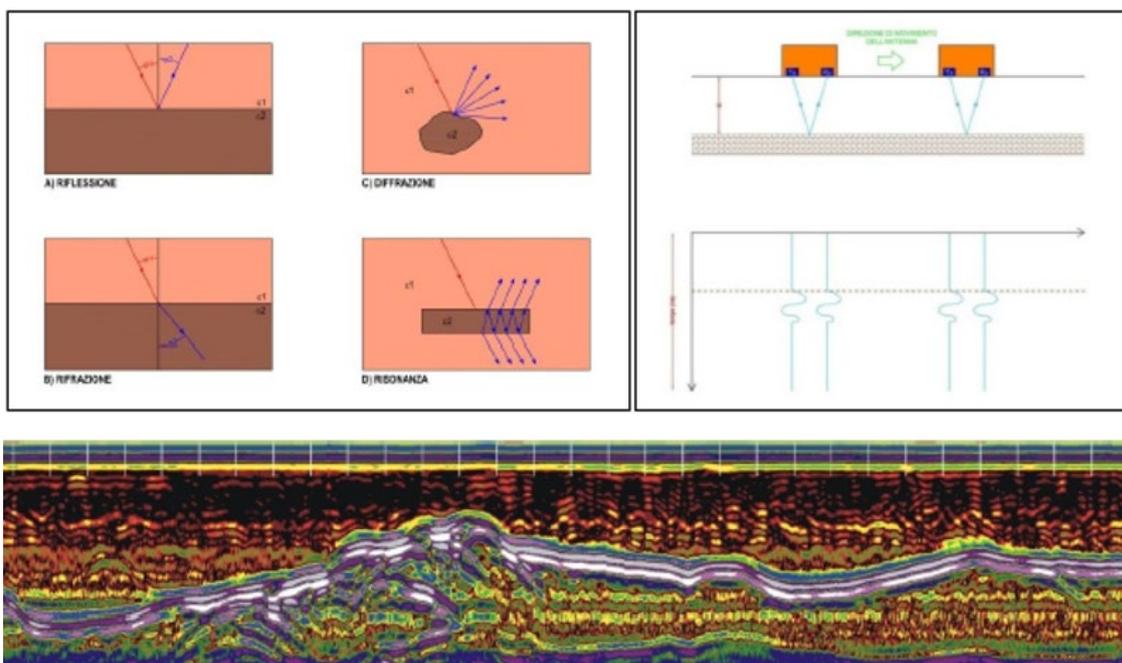


Figura 3.19 - In alto principio di funzionamento del georadar. In basso esempio di radargrafia

Misure di tensione nei conci strumentati

Le sollecitazioni degli anelli del Cunicolo Esplorativo e delle Gallerie di Linea sono misurate mediante l'uso di barrette estensimetriche saldate all'armatura del concho (fig. 3.20). Per ogni sezione di misura sono strumentati tutti i conci, ad esclusione di quello di chiave, con tre barrette estensimetriche ciascuno, al fine di misurare la deformazione dello stesso causata dalla spinta dell'ammasso. La lettura di "0" degli strumenti viene effettuata immediatamente dopo l'installazione. In seguito, sono effettuate misure almeno una volta al giorno fino alla stabilizzazione. Gli anelli strumentati sono previsti con una frequenza indicativa di 500m e in corrispondenza delle zone di faglia o delle zone critiche. All'interno della formazione dei Calcescisti è previsto un aumento delle sezioni di misura degli sforzi indotti dall'ammasso al rivestimento di 2 anelli ogni 500 m, quindi ogni 165m.



Figura 3.20 - A sinistra, esempio di barrette estensimetriche. A destra, disposizione del sistema di monitoraggio

CAPITOLO 4 - Analisi statistica e confronto dei parametri TBM del Cunicolo Esplorativo e delle Gallerie di Linea

Fulcro centrale di questo capitolo è l'analisi statistica dei parametri macchina chiave (KPI) delle tre frese che attualmente scavano la Galleria di Base del Brennero sul versante italiano. Nello specifico si andranno ad analizzare i dati delle TBM riferiti ai 500 m antecedenti al fermo avvenuto nella GLON (Galleria di Linea Ovest – Nord) alla pk 43+176,25.

Data la grande mole di dati è stato creato un foglio di lavoro “Excel”, tramite il quale è stato possibile eseguirne un'analisi statistica descrittiva per mezzo della *distribuzione di Gauss*, mentre la rappresentazione degli stessi è stata fatta con istogrammi, nei quali è possibile visualizzare i dati raggruppati in classi in funzione della loro frequenza relativa.

I valori dei parametri macchina analizzati, di seguito elencati, sono medie ad anello e si riferiscono alla zona I:

- KPI 1 - Velocità di rotazione della testa [rpm];
- KPI 2 - Spinta dei cilindri principali [MN];
- KPI 3 - Coppia [MNm];
- KPI 4 - Velocità di avanzamento [mm/min];
- KPI 5 - Penetrazione [mm/rot];
- KPI 6 - Energia specifica [MJ/m³];
- KPI 7 - Peso medio dello smarino [t].

Per la descrizione dei parametri TBM si rimanda al capitolo 3 del presente elaborato.

Dopo brevi richiami su alcuni concetti necessari per l'analisi statistica, si mostreranno i risultati conseguiti.

4.1 Introduzione alla statistica descrittiva

La statistica descrittiva ingloba una serie di tecniche utili a rappresentare una grande mole di dati (valori osservazionali o di misura, chiamati campioni), inoltre tramite l'utilizzo degli indici di posizione e di dispersione è possibile descriverne la natura. Al fine di ottenere deduzioni statistiche è fondamentale che la l'acquisizione dei dati avvenga in

maniera corretta; tale processo dipende soprattutto dal contesto generale d'indagine oltre che dalla natura dei dati stessi.

4.1.1 Indici di posizione: Media, Moda e Mediana

In un'analisi statistica, gli indici di posizione consentono di sintetizzare la posizione di una distribuzione e di valutare l'ordine di grandezza delle manifestazioni registrate, in pratica forniscono informazioni attorno a quale valore si accentra la distribuzione stessa.

Data una popolazione composta da N individui, la “*media*” è definita come la somma delle variabili d'interesse diviso il numero totale delle osservazioni :

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

Data la distribuzione di una variabile, la “*moda*” è definita come il valore che ha la frequenza più alta mentre la “*mediana*” è definita come il valore al di sotto del quale rientrano la metà dei valori campionari. La variazione di moda e mediana, sposta la posizione della distribuzione considerata.

4.1.2 Indici di dispersione: Varianza e Deviazione standard

La misura della dispersione di una distribuzione viene fornita dalla “*Varianza*”, ottenuta sommando per tutti gli elementi della popolazione i quadrati delle differenze tra il valore della variabile e la media aritmetica:

$$V = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2$$

Spesso nelle analisi statistiche si preferisce adottare la sua radice quadrata, chiamata “*Deviazione standard* σ ”.

4.1.3 Quantili e quartili

I quantili sono i valori che dividono un insieme di dati ordinati in un predefinito numero di parti.

Si definisce quantile x_p :

$$x_p: P_r(X \leq x_p) = p$$

Dato un valore di $p=0.5$, x_p rappresenta quel valore che divide l'intero campione in due parti in ognuna delle quali ricade la metà delle osservazioni, ossia la mediana. Altri valori comunemente usati sono i *quartili* che rappresentano una suddivisione in quattro parti, essi corrispondono ai quantili di ordine 1/4, 2/4 e 3/4.

4.1.4 Distribuzione normale (Gaussiana)

La distribuzione di gran lunga più importante nelle applicazioni statistiche e probabilistiche è la “Distribuzione normale” o “Distribuzione di Gauss”. Una variabile aleatoria X è distribuita normalmente, e si scrive $X \sim N(\mu; \sigma^2)$, con valor medio μ e deviazione standard $\sigma > 0$ quando X ha una densità di probabilità data dall'equazione (4.1):

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\left(-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right)}, \quad x \in R; \mu \in R; \sigma > 0 \quad (4.1)$$

Quando $\mu=0$ e $\sigma=1$, la distribuzione si dice “*normale standard*” e la variabile si indica come $Z \sim N(0; 1)$. Il grafico di f è simmetrico rispetto alla retta $x=\mu$ e presenta due flessi in $\mu - \sigma$ e $\mu + \sigma$ (fig. 4.1).

I valori della variabile X , distribuita normalmente, sono descritti in termini di lontananza dal valor medio μ in funzione della deviazione standard σ . Si ha infatti che la probabilità che X sia contenuta in un intervallo centrato di μ e di ampiezza t -volte la deviazione standard, non dipende da μ e σ , ma solo da t (4.2).

$$P(\mu - t \cdot \sigma \leq X \leq \mu + t \cdot \sigma) \quad (4.2)$$

La standardizzazione è fondamentale nelle applicazioni statistiche, essa permette di calcolare quale sia la probabilità che una variabile normalmente distribuita assuma valori in un certo intervallo. La funzione di distribuzione per la normale standard è definita dall'espressione (4.3):

$$F(z) = P(Z \leq z) = \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{z^2}{2}\right) ds \quad (4.3)$$

Questa funzione integrale non è esprimibile tramite combinazioni finite di funzioni elementari, quindi non è possibile eseguire il calcolo di $F(z)$ con i metodi abituali del calcolo integrale, motivo per cui si ricorre a delle tabelle. I valori più usati sono:

$$68.3\% = P\{\mu - 1,00 \sigma < X < \mu + 1,00 \sigma\}$$

$$95.5\% = P\{\mu - 2,00 \sigma < X < \mu + 2,00 \sigma\}$$

$$99.7\% = P\{\mu - 3,00 \sigma < X < \mu + 3,00 \sigma\}$$

4.1.5 Box Plot

I *BoxPlot* forniscono una rappresentazione sintetica della distribuzione di probabilità (fig. 4.1). Sono costituiti da un rettangolo che ingloba il 50% dei dati registrati (*intervallo interquartile, IQR*), caratterizzato da un segmento centrale che indica la mediana della distribuzione. Nel caso in cui tale intervallo sia piccolo, la metà delle osservazioni si trova fortemente concentrata intorno alla mediana. I lati del rettangolo paralleli alla mediana indicano il primo ed il terzo quartile (Q_1, Q_3), corrispondenti rispettivamente al 25% e al 75% di probabilità. Se la mediana si trova esattamente al centro tra il primo ed il terzo quartile, la distribuzione è simmetrica, se è più vicina a Q_1 si ha un'asimmetria positiva, se più vicina a Q_3 l'asimmetria è negativa. Le linee che si allungano dai bordi della scatola, denominati *baffi*, individuano gli intervalli in cui sono posizionati i valori rispettivamente minori di Q_1 e maggiori di Q_3 , pari al 24,65% di probabilità.

I valori oltre i baffi costituiscono gli *outliers*, cioè un'anomalia rispetto alla maggior parte dei dati osservati e pertanto è necessario identificarli per poterne analizzare le caratteristiche e le eventuali cause che li hanno generati. Essi forniscono informazioni ulteriori sulla dispersione e sulla forma della distribuzione. Inoltre, si osserva l'importanza di associare l'utilizzo dei *BoxPlot* alla probabilità di un determinato dato di trovarsi all'interno della popolazione distribuita secondo una normale di Gauss (fig. 4.1).

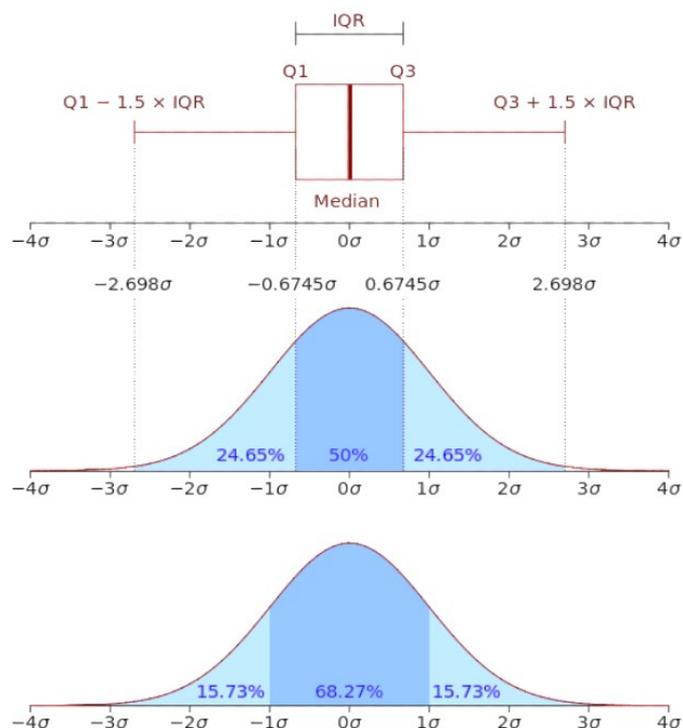


Figura 4.1 - Rappresentazione BoxPlot e relativa comparazione con la Curva di Gauss [Wikipedia]

4.1.6 Istogrammi di frequenza

La frequenza assoluta di un certo dato indica il numero delle volte che lo stesso si presenta in una serie di misure. È possibile costruire un diagramma nel quale in ascissa si riportano i valori delle misure ed in ordinata le frequenze assolute, tale rappresentazione riesce a mostrare in maniera abbastanza intuitiva una o più caratteristiche delle misure analizzate. Per confrontare in maniera più agevole i dati è opportuno normalizzarli. Questo processo consiste nel dividere la frequenza assoluta di ogni dato per il numero totale delle misure effettuate, al fine di ottenere le frequenze relative (4.4):

$$f_i = \frac{n_i}{N} \quad (4.4)$$

La somma delle frequenze relative di tutti gli N-dati deve essere pari all'unità. Sui diagrammi delle frequenze relative (*diagrammi a barre*) occorre sempre indicare il numero totale delle misure effettuate (numero dei dati). Nel caso in cui si vogliano sintetizzare dei dati non discreti, conviene raggruppare gli stessi in intervalli, associando ad essi delle frequenze relative, indicando con n_i il numero di dati il cui valore è compreso nell'intervallo i -esimo considerato.

Per rappresentare i dati si associa ad ogni intervallo di valori x un rettangolo, un diagramma di questo genere prende il nome di “*istogramma di frequenza*” e le altezze dei singoli rettangoli rappresentano le densità di frequenza (4.5):

$$(x_i - x_{i-1}) \cdot h_i = \Delta x \cdot h_i = \frac{n_i}{N} \quad (4.5)$$

Dove n_i rappresenta la frequenza con cui un dato valori x è compreso tra x_{i-1} e x_i , ossia il Δx . Con la definizione di *istogramma*, l'area racchiusa all'interno di tutti i rettangoli è pari all'unità e l'istogramma si dice normalizzato. La normalizzazione dell'istogramma rende più semplice il confronto fra istogrammi differenti. Se le frequenze assolute risultano troppo piccole, risulta opportuno dividere le misure in *classi di frequenza*.

Un'altra rappresentazione utile è quella della frequenza cumulativa (assoluta o relativa), essa è definita per ogni valore dell'ascissa x , dal numero di volte per cui il risultato della misura è stato minore o uguale ad x .

4.2 Analisi statistica dei parametri della TBM S-1054

Nell'ambito dello scavo del Cunicolo Esplorativo (CE) tramite la fresa S-1054, l'analisi statistica è stata condotta dalla pk 15+589,61 alla pk 16+089,14, ossia nei 500 m antecedenti al fermo della fresa S-1071, posta nella GLON.

Di seguito si riportano gli istogrammi con i relativi indici statistici descrittivi per i diversi parametri TBM analizzati, ossia la media aritmetica μ , la mediana, la deviazione standard σ ed il relativo range $\mu \pm 2\sigma$ (comprendente il 95,5% dei valori registrati).

A partire dal numero di campioni e dal loro valore massimo e minimo, è stato possibile associare per i singoli parametri delle classi di frequenza consone alla descrizione della natura delle grandezze in esame. Una volta scelte, queste rimarranno le medesime per tutte e tre le TBM al fine di poter effettuare un confronto, che verrà descritto nel paragrafo finale del presente capitolo (Par.4.5). Tramite l'utilizzo di classi di frequenza adeguate e del coefficiente di variazione, sarà inoltre possibile osservare come varino le registrazioni dei parametri rispetto il valore medio.

KPI 1 – Velocità di rotazione della testa

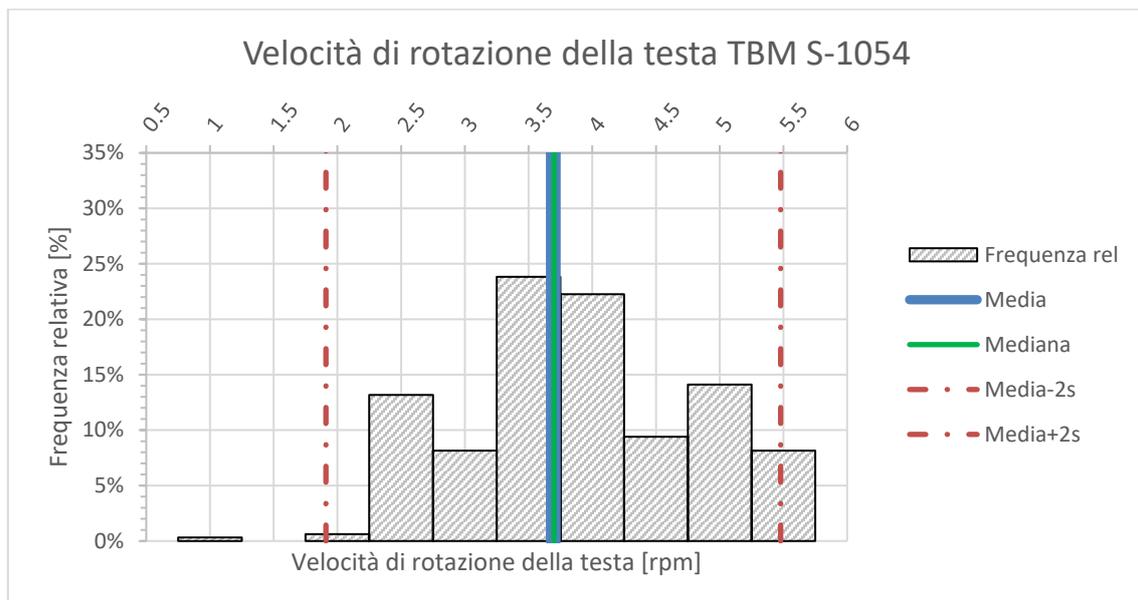


Figura 4.2 - Istogramma Velocità di rotazione della testa S-1054

I valori di velocità di rotazione della testa (fig. 4.2) risultano differire di poco rispetto alla media aritmetica, infatti dall'analisi statistica si è ottenuto un coefficiente di variazione

del 24,15 %. Inoltre, come si osserva dall'istogramma, i valori con frequenza massima si aggirano intorno ai 3,5 rpm, mentre le classi al di fuori al range $\mu \pm 2\sigma$ risultano trascurabili, in quanto la loro frequenza relativa è inferiore all'unità. Tale KPI risulta il più rappresentativo in quanto è controllato direttamente dal fresista ed il suo valore è correlato a cambiamenti delle condizioni di scavo:

Range I / Scavo eccezionale (marcia 1): bassa rotazione – alta coppia;

Range II / Scavo standard (marcia 2): alta rotazione - bassa coppia.

L'operatore cerca di tenere la rotazione abbastanza costante in condizioni di scavo standard. Si riporta in tab. 4.1 il riepilogo degli indici statistici che descrivono la velocità di rotazione della testa.

PARAMETRI STATISTICI		
Media μ	3.694	rpm
Mediana	3.700	rpm
Dev.standard σ	0.892	rpm
$\mu - 2\sigma$	1.910	rpm
$\mu + 2\sigma$	5.478	rpm
Coeff. Variazione	24.148	%
Conteggio valori	319	-

Tabella 4.1 - Riepilogo indici statistici Velocità di rotazione della testa S-1054

KPI 2 – Spinta cilindri principali

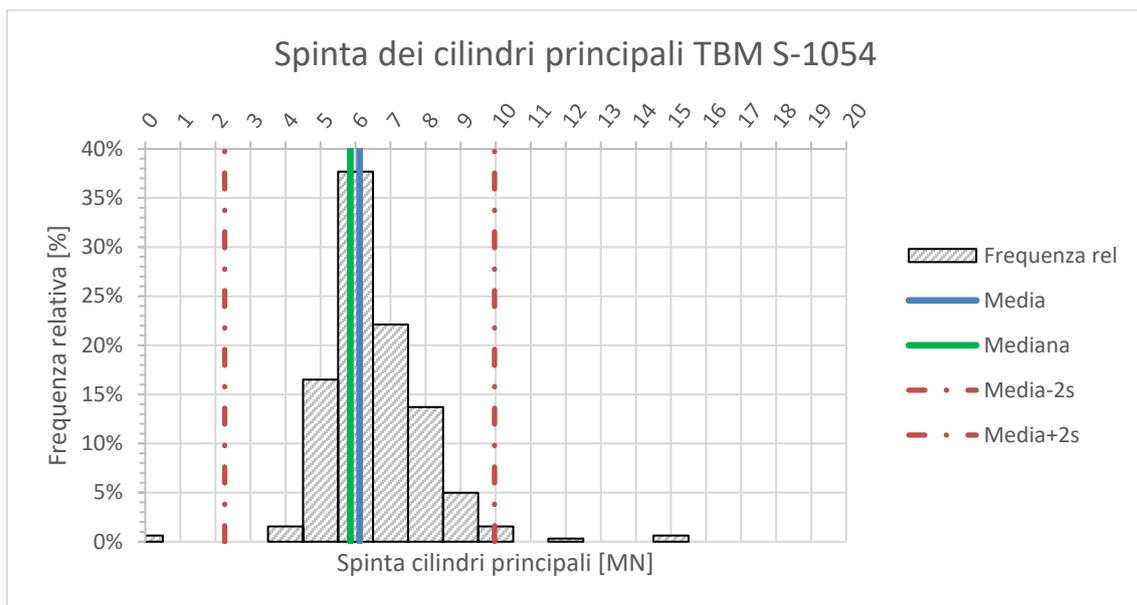


Figura 4.3 - Istogramma Spinta cilindri principali S-1054

I valori della spinta in avanzamento si attestano intorno al valore medio (fig.4.3), infatti dall'analisi statistica si ottiene un coefficiente di variazione pari al 31,5 %, non significativamente alto. La maggior parte dei valori si attesta nel range 5,0-8,0 MN, mentre le classi riferite a valori eccessivamente alti sono da correlare al tratto interessato dalla "Faglia S15", la quale ha causato il fermo della stessa TBM. Tale parametro viene impostato dal fresista e tenuto quanto più costante possibile in condizioni di scavo standard. La spinta dei cilindri principali è direttamente proporzionale alla resistenza dell'ammasso roccioso in condizioni di scavo "standard". Si riporta in tabella 4.2 il riepilogo degli indici statistici che descrivono la spinta dei cilindri principali.

PARAMETRI STATISTICI		
Media μ	6.116	MN
Mediana	5.850	MN
Dev.standard σ	1.924	MN
$\mu-2\sigma$	2.267	MN
$\mu+2\sigma$	9.965	MN
Coeff. Variazione	31.467	%
Conteggio valori	321	-

Tabella 4.2 - Riepilogo indici statici Spinta cilindri principali S-1054

KPI 3 - Coppia

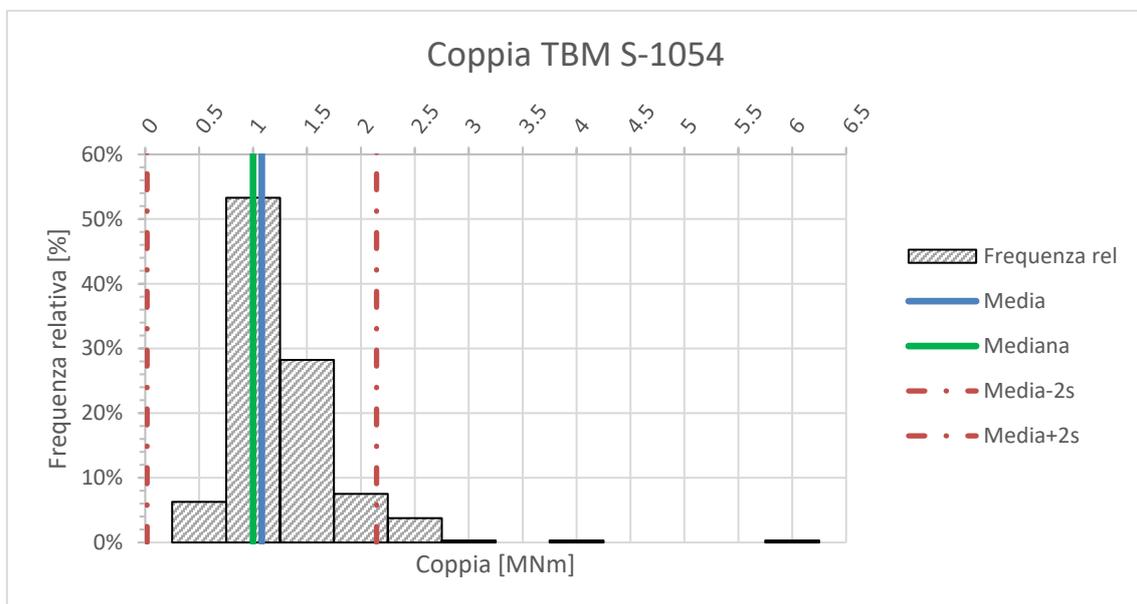


Figura 4.4 - Istogramma Coppia S-1054

Dall'analisi effettuata si registra un'elevata variazione dei valori rispetto alla media aritmetica pari al 49,23% (fig.4.4), nonostante ciò non si registrano molte anomalie. Il torque è un parametro molto significativo, in quanto rispecchia l'interazione tra testa

fresante e fronte di scavo ed indica se lo scavo, ossia il processo di cutting, procede regolare o meno. In condizioni di scavo standard valori di coppia e di spinta dei cilindri principali bassi indicano un ammasso poco resistente, mentre l'aumento sincrono è legato ad un aumento della resistenza. Nei 500 m analizzati la maggior parte dei valori rientrano tra gli 1,0-1,5 MNm e ciò si traduce in un processo regolare, mentre valori superiori ai 2 MNm risultano correlati come per gli altri KPI al solo tratto interessato dalla "Faglia S15", infatti si presentano con una frequenza relativa inferiore al 5%. Si riporta in tabella 4.3 il riepilogo degli indici statistici che descrivono la coppia.

PARAMETRI STATISTICI		
Media μ	1.081	MNm
Mediana	1.000	MNm
Dev.standard σ	0.532	MNm
$\mu-2\sigma$	0.017	MNm
$\mu+2\sigma$	2.145	MNm
Coeff. Variazione	49.229	%
Conteggio valori	319	-

Tabella 4.3 - Riepilogo indici statistici Coppia S-1054

KPI 4 – Velocità di avanzamento

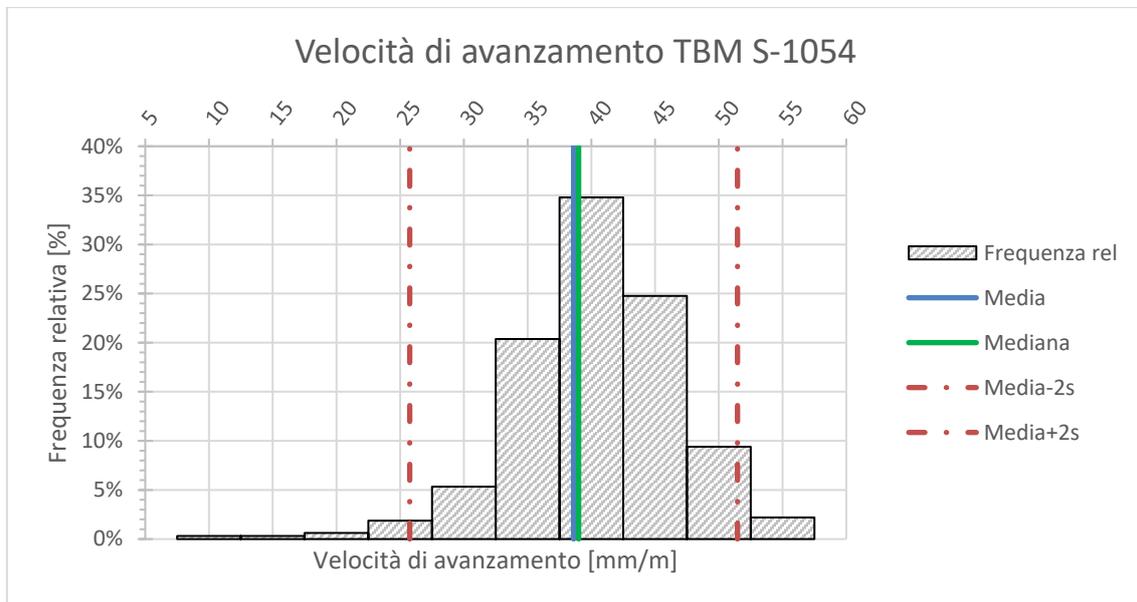


Figura 4.5 - Istogramma Velocità di avanzamento S-1054

Per quanto concerne la velocità di avanzamento (fig.4.5), i valori si attestano intorno alla media aritmetica, infatti dall'analisi statistica si ottiene un coefficiente di variazione pari al 16,7%. Le classi al di fuori del range $\mu \pm 2\sigma$ risultano avere una frequenza inferiore al

3% e sono relativi al tratto interessato dalla “Faglia S15”. Un valore basso dell’avanzamento può essere correlato ad un ammasso molto resistente (abbinato ad un’alta spinta). Tale parametro è regolato indirettamente dal fresista tramite la spinta e la velocità di rotazione, quindi bisogna tenere in conto anche della modalità di scavo adottata e dall’esperienza dell’operatore. Si riporta in tabella 4.4 il riepilogo degli indici statistici che descrivono la velocità di avanzamento.

PARAMETRI STATISTICI		
Media μ	38.608	mm/m
Mediana	39.000	mm/m
Dev.standard σ	6.429	mm/m
$\mu-2\sigma$	25.750	mm/m
$\mu+2\sigma$	51.466	mm/m
Coeff. Variazione	16.652	%
Conteggio valori	319	-

Tabella 4.4 - Riepilogo indici statistici Velocità di avanzamento S-1054

KPI 5 - Penetrazione

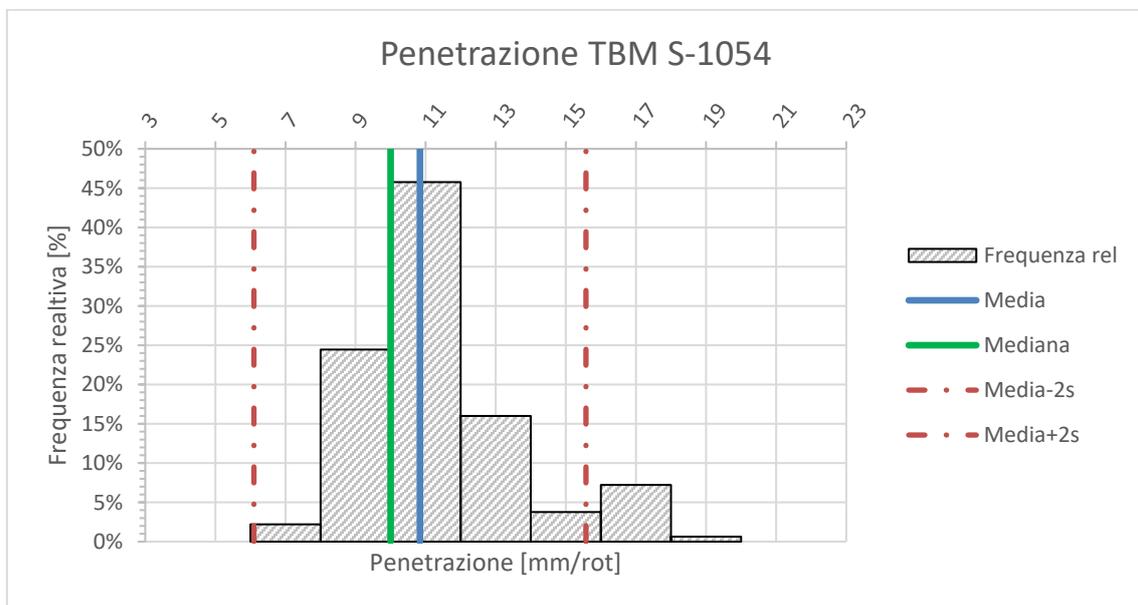


Figura 4.6 Istogramma Penetrazione S-1054

I valori di penetrazione (fig.4.6) variano poco rispetto al valor medio, dall’analisi statistica si ottiene un coefficiente di variazione del 21,85 % che risulta relativamente basso. La penetrazione risulta un parametro macchina chiave e viene controllato indirettamente dal fresista in quanto dipende dalla velocità di rotazione e di avanzamento (dati utilizzati in questa tesi) e fisicamente dal processo di cutting (interazione cutters –

fronte di scavo) e quindi essenzialmente dal layout del cutter-head e dalla forza normale trasmessa dai cutters all'ammasso roccioso con certe caratteristiche geomeccaniche. Come si può vedere dall'istogramma in figura quasi tutte le classi rientrano all'interno del range $\mu \pm 2\sigma$, mentre solamente tre classi risultano al di fuori e presentano una frequenza relativa inferiore al 6%. Si riporta in tabella 4.5 il riepilogo degli indici statistici che descrivono la penetrazione.

PARAMETRI STATISTICI		
Media μ	10.837	mm/rot
Mediana	10.000	mm/rot
Dev.standard σ	2.368	mm/rot
$\mu - 2\sigma$	6.101	mm/rot
$\mu + 2\sigma$	15.573	mm/rot
Coeff. Variazione	21.853	%
Conteggio valori	319	-

Tabella 4.5 - Riepilogo indici statistici Penetrazione S-1054

KPI 6 – Energia specifica

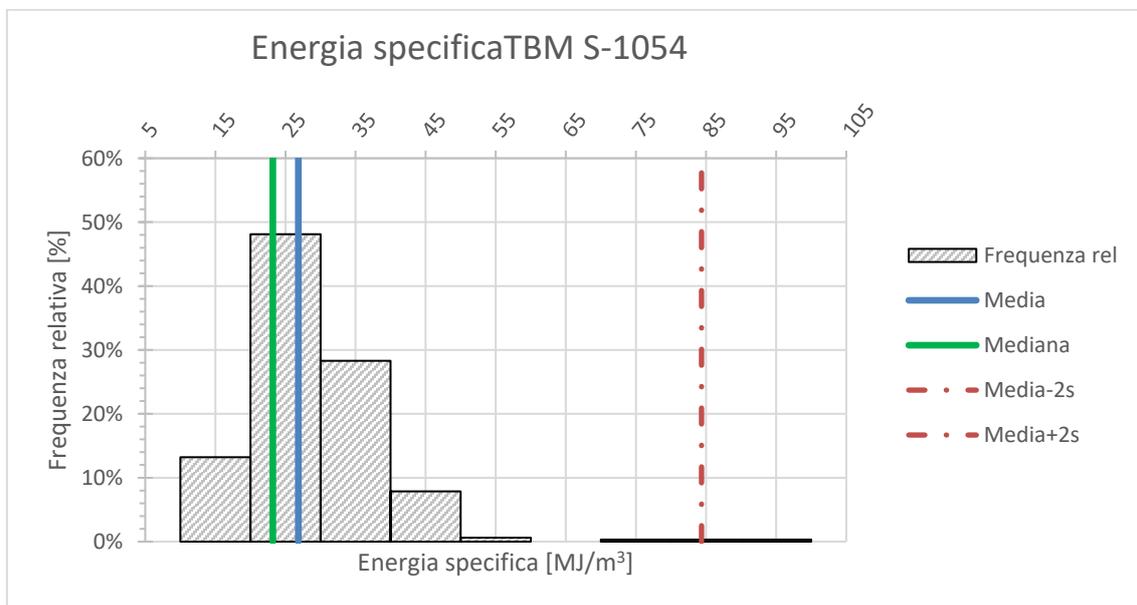


Figura 4.7 Iistogramma Energia specifica - S-1054

L'analisi statistica effettuata per i valori di energia specifica, porta a delle considerazioni aggiuntive rispetto ai precedenti KPI. Infatti, la presenza di tre *outliers* (non presenti in fig.4.7) condiziona molto l'analisi statistica. Nello specifico si sono registrati: 186,70 MJ/m³ alla pk 15+625,68 km, 308,30 MJ/m³ alla pk 15+684,85 km e 382,90 MJ/m³ alla pk 15+687,14 km. Il primo outliers è da ritenersi un errore di lettura mentre gli altri due

sono stati registrati in prossimità della "Faglia S15" che ha causato il fermo della fresa S-1054. Queste tre registrazioni spiegano il perché di un coefficiente di variazione così elevato. Si riporta in tabella 4.6 il riepilogo degli indici statistici che descrivono l'energia specifica penetrazione.

PARAMETRI STATISTICI		
Media μ	26.836	MJ/m ³
Mediana	23.200	MJ/m ³
Dev.standard σ	28.757	MJ/m ³
$\mu-2\sigma$	-30.678	MJ/m ³
$\mu+2\sigma$	84.350	MJ/m ³
Coeff. Variazione	107.158	%
Conteggio valori	318	-

Tabella 4.6 - Riepilogo parametri statistici Energia specifica S-1054

KPI 7 – Peso smarino

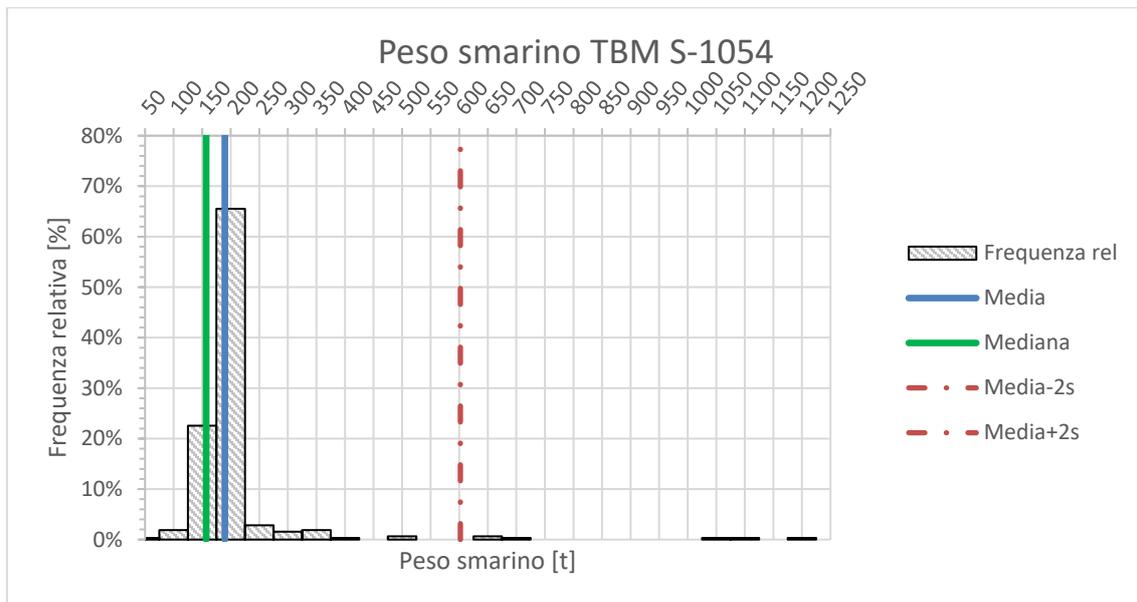


Figura 4.8 - Istogramma Peso smarino S-1054

Il valore di peso dello smarino risulta essere dato dalla media dei valori registrati dalle due bilance poste all'interno della TBM. Il peso registrato rappresenta la quantità di materiale estratto, mentre il peso teorico per una manovra di 1,5 m (anello installato dalla S-1054) corrisponde a circa 160 t. Confrontando quest'ultimo con quello registrato si possono definire i livelli di rischio attesi. Nonostante sia un parametro molto significativo poiché ci permette di capire la consistenza del materiale scavato, variazioni puntuali

possono destabilizzare la globalità dell'analisi statistica. Si osserva (fig.4.8) come la maggior parte dei valori registrati (classe con 65% di frequenza relativa) si attestano intorno alle 200 t. Si riporta in tabella 4.7 il riepilogo degli indici statistici che descrivono il peso dello smarino.

PARAMETRI STATISTICI		
Media μ	189.690	t
Mediana	157.000	t
Dev.standard σ	206.180	t
$\mu-2\sigma$	-222.670	t
$\mu+2\sigma$	602.050	t
Coeff. Variazione	108.693	%
Conteggio valori	319	-

Tabella 4.7 - Riepilogo indici statistici Peso smarino S-1054

4.3 Analisi statistica dei parametri della TBM S-1071

Nell'ambito dello scavo della Galleria di Linea Nord – Ovest (GLON) per mezzo della fresa S-1071, l'analisi statistica è stata condotta dalla pk 43+676,21 alla pk 43+177,12, ossia nei 500 m antecedenti al fermo della fresa, avvenuto al pk 43+176,25.

Di seguito si riportano gli istogrammi con i relativi indici statistici descrittivi per i diversi parametri TBM analizzati, ossia la media aritmetica μ , la mediana, la deviazione standard σ ed il relativo range $\mu \pm 2\sigma$ (comprendente il 95% dei valori registrati). Si rimanda al Par.4.2 il modo in cui sono state scelte le classi di frequenza.

KPI 1 – Velocità di rotazione della testa

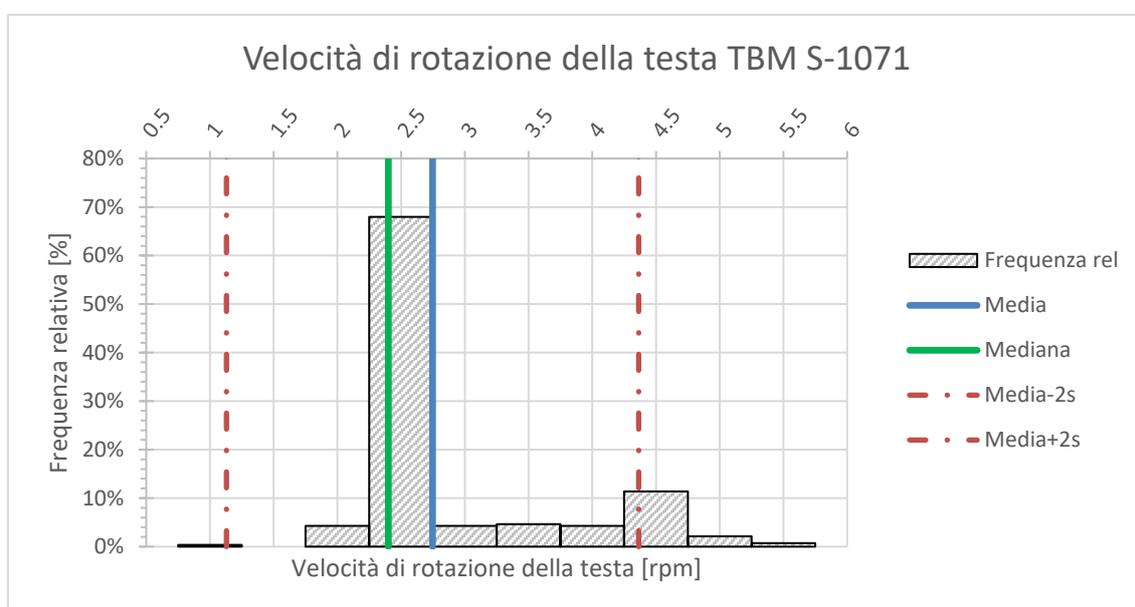


Figura 4.9 – Istogramma Velocità di rotazione della testa S-1071

I valori di velocità di rotazione della testa (fig. 4.9) risultano differire di poco rispetto alla media aritmetica anche se non sembrano ripartiti secondo una *distribuzione normale*; tramite l'analisi statistica si è ottenuto un coefficiente di variazione pari al 29,44 %. Inoltre, come si osserva dall'istogramma, i valori con frequenza massima si aggirano intorno ai 2,0-3,0 rpm, mentre le altre classi descrivono la rotazione in due tratti specifici, il primo compreso tra pk 43+452,12 e pk 43+402,12 ed il secondo in prossimità della progressiva di fermo (rif. Cap. 6). Si riporta in tabella 4.8 il riepilogo degli indici statistici che descrivono la velocità di rotazione della testa.

PARAMETRI STATISTICI		
Media μ	2.747	rpm
Mediana	2.400	rpm
Dev.standard σ	0.809	rpm
$\mu-2\sigma$	1.130	rpm
$\mu+2\sigma$	4.364	rpm
Coeff. Variazione	29.439	%
Conteggio valori	281	-

Tabella 4.8 – Riepilogo indici statistici Velocità di rotazione della testa S-1071

KPI 2 – Spinta dei cilindri principali

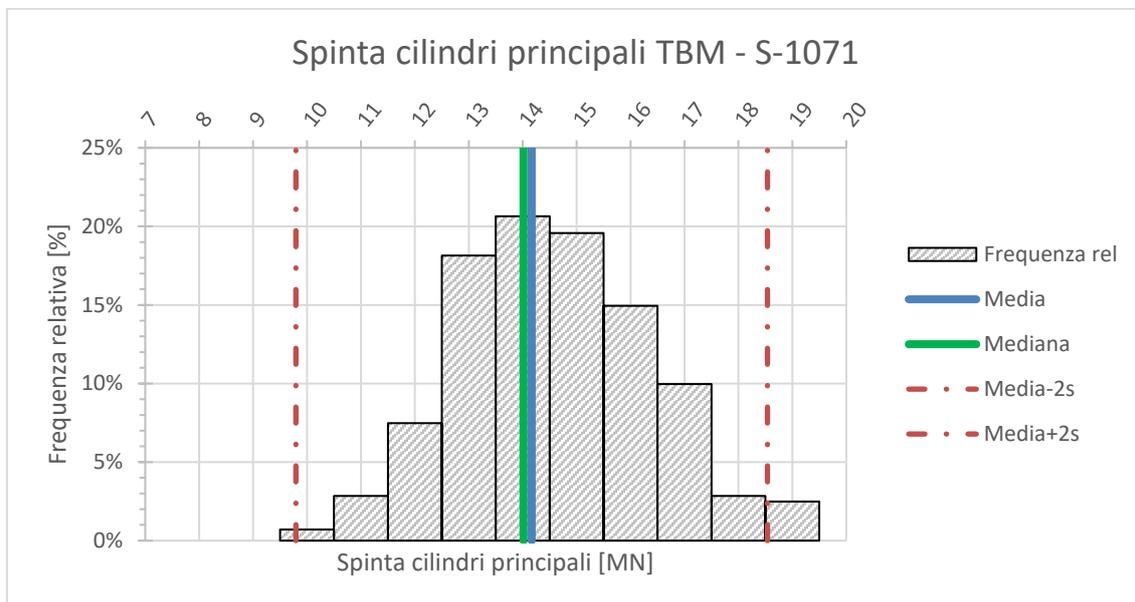


Figura 4.10 - Istogramma Spinta dei cilindri principali S-1071

I valori della spinta in avanzamento (fig.4.10) si affermano intorno al valor medio, infatti dall'analisi statistica si ottiene un coefficiente di variazione molto basso pari al 15,43 %. I valori risultano essere ben distribuiti secondo una forma a campana (*distribuzione normale*) e quasi tutti all'interno del range $\mu \pm 2\sigma$, le classi con maggior frequenza relativa sono quelle caratterizzate da valori di spinta compresi tra 13 MN e i 16 MN. Come si può notare dall'istogramma è presente una sola classe esterna all'intervallo $\mu \pm 2\sigma$, con una frequenza relativa molto ridotta (pari al 2,5% dei dati analizzati). Bisognerebbe approfondire la natura di questo dato per capire se si tratti di un errore di lettura o effettivamente possa essere utile per la classificazione del TCR (tipo di comportamento roccioso) dell'ammasso incontrato, si rimanda al Cap.5 per l'analisi dei parametri lungo

le progressive. Si riporta in tabella 4.9 il riepilogo degli indici statistici che descrivono la spinta dei cilindri principali.

PARAMETRI STATISTICI		
Media μ	14.166	MN
Mediana	14.014	MN
Dev.standard σ	2.186	MN
$\mu-2\sigma$	9.794	MN
$\mu+2\sigma$	18.538	MN
Coeff. Variazione	15.433	%
Conteggio valori	281	-

Tabella 4.9 - Riepilogo indici statistici Spinta cilindri principali S-1071

KPI 3 – Coppia

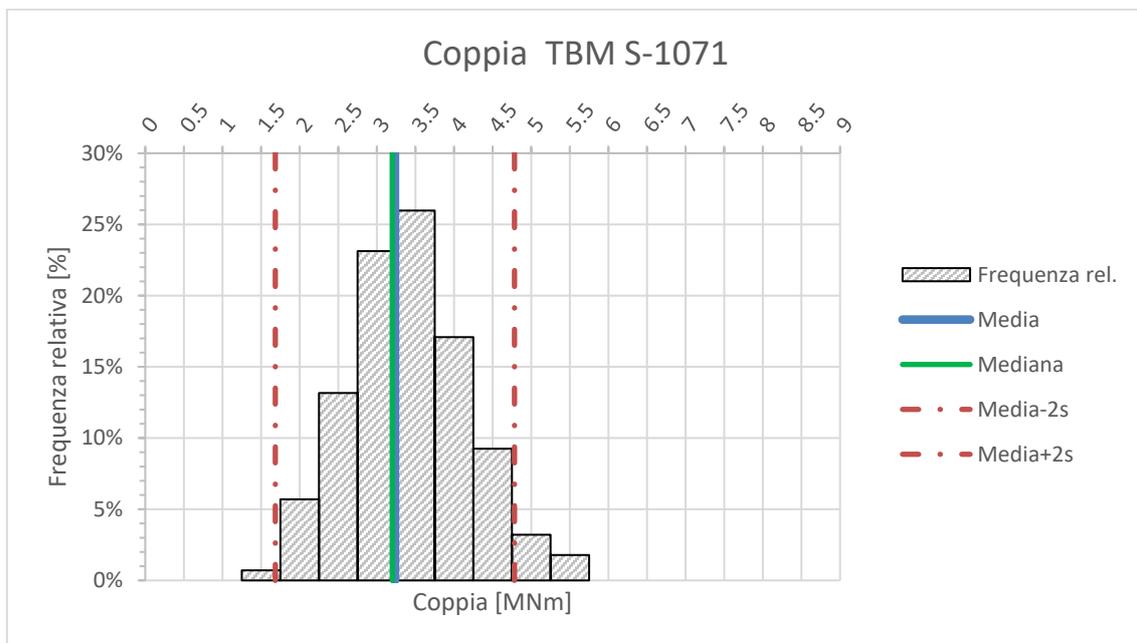


Figura 4.11 - Istogramma Coppia S-1071

Dall'analisi effettuata non si registra un'elevata variazione dei valori rispetto alla media aritmetica, infatti il coefficiente di variazione si attesta sul 23,95 %. Come per il thrust, valori di coppia registrati (fig.4.11) ricadono, quasi nella loro totalità, all'interno del range $\mu\pm 2\sigma$ eccetto tre classi che presentano una frequenza relativa inferiore al 5%. Nei 500 m analizzati la maggior parte dei valori rientrano tra gli 2,5-4,0 MNm e ciò si traduce in un processo regolare. Si riporta in tabella 4.10 il riepilogo degli indici statistici che descrivono la coppia.

PARAMETRI STATISTICI		
Media μ	3.234	MNm
Mediana	3.200	MNm
Dev.standard σ	0.775	MNm
$\mu-2\sigma$	1.685	MNm
$\mu+2\sigma$	4.783	MNm
Coeff. Variazione	23.950	%
Conteggio valori	281	-

Tabella 4.10 - Riepilogo indici statistici Coppia S-1071

KPI 4 – Velocità di avanzamento

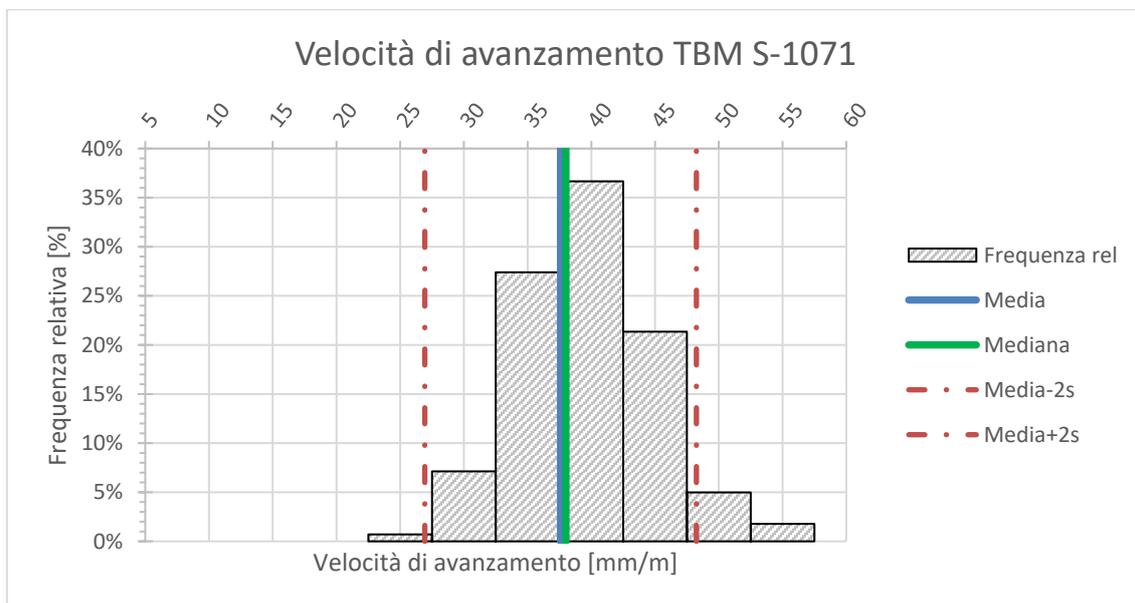


Figura 4.12 - Istogramma Velocità di avanzamento S-1071

Per quanto riguarda la velocità di avanzamento (fig.4.12), i valori si attestano intorno alla media aritmetica, infatti l'analisi statistica ha restituito un coefficiente di variazione pari al 14,17 %. Le classi al di fuori del range $\mu \pm 2\sigma$ risultano avere una frequenza inferiore al 3% e dovrebbero essere analizzati in maniera più approfondita per osservare a quale progressiva specifica siano riferiti (Cap.5). La TBM S-1071 ha proceduto con una velocità pressoché costante fino alla pk 43+176,25, punto in cui è avvenuto il fermo della macchina. Si riporta in tabella 4.11 il riepilogo degli indici statistici che descrivono la velocità di avanzamento.

PARAMETRI STATISTICI		
Media μ	37.587	mm/m
Mediana	38.000	mm/m
Dev.standard σ	5.327	mm/m
$\mu-2\sigma$	26.933	mm/m
$\mu+2\sigma$	48.242	mm/m
Coeff. Variazione	14.173	%
Conteggio valori	281	-

Tabella 4.11 - Riepilogo indici statistici Velocità di avanzamento S-1071

KPI 5 – Penetrazione

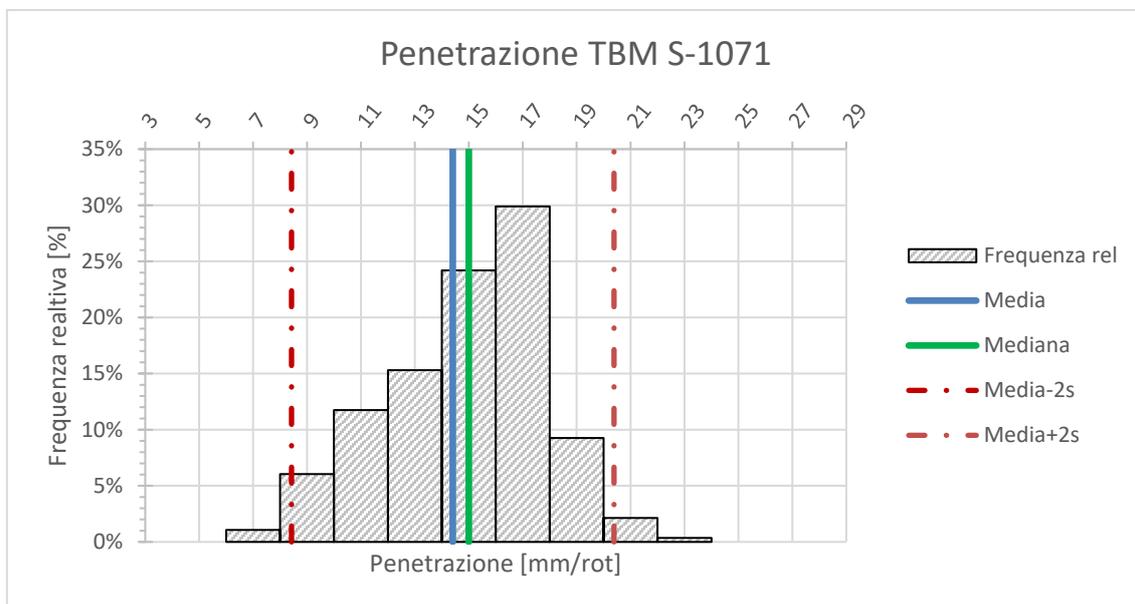


Figura 4.13 - Istogramma Penetrazione S-1071

I valori di penetrazione (fig. 4.13) variano poco rispetto alla media aritmetica, dall'analisi statistica si ottiene un coefficiente di variazione del 20,76 % che risulta relativamente basso data la mole di dati. La penetrazione essendo condizionata dalla velocità di avanzamento, risulta distribuita in maniera omogenea. Come si può vedere dall'istogramma in figura quasi tutte le classi rientrano all'interno del range $\mu \pm 2\sigma$, eccetto alcune che presentano una frequenza relativa molto bassa, inferiore al 5%, corrispondenti a tratti in cui si è registrato un incremento di velocità di rotazione della testa, in dipendenza dell'aumento di resistenza dell'ammasso roccioso. Si riporta in tabella 4.12 il riepilogo degli indici statistici che descrivono la penetrazione.

PARAMETRI STATISTICI		
Media μ	14.406	mm/rot
Mediana	15.000	mm/rot
Dev.standard σ	2.990	mm/rot
$\mu-2\sigma$	8.425	mm/rot
$\mu+2\sigma$	20.386	mm/rot
Coeff. Variazione	20.758	%
Conteggio valori	281	-

Tabella 4.12 - Riepilogo indici statistici Penetrazione S-1071

KPI 6 – Energia specifica di scavo

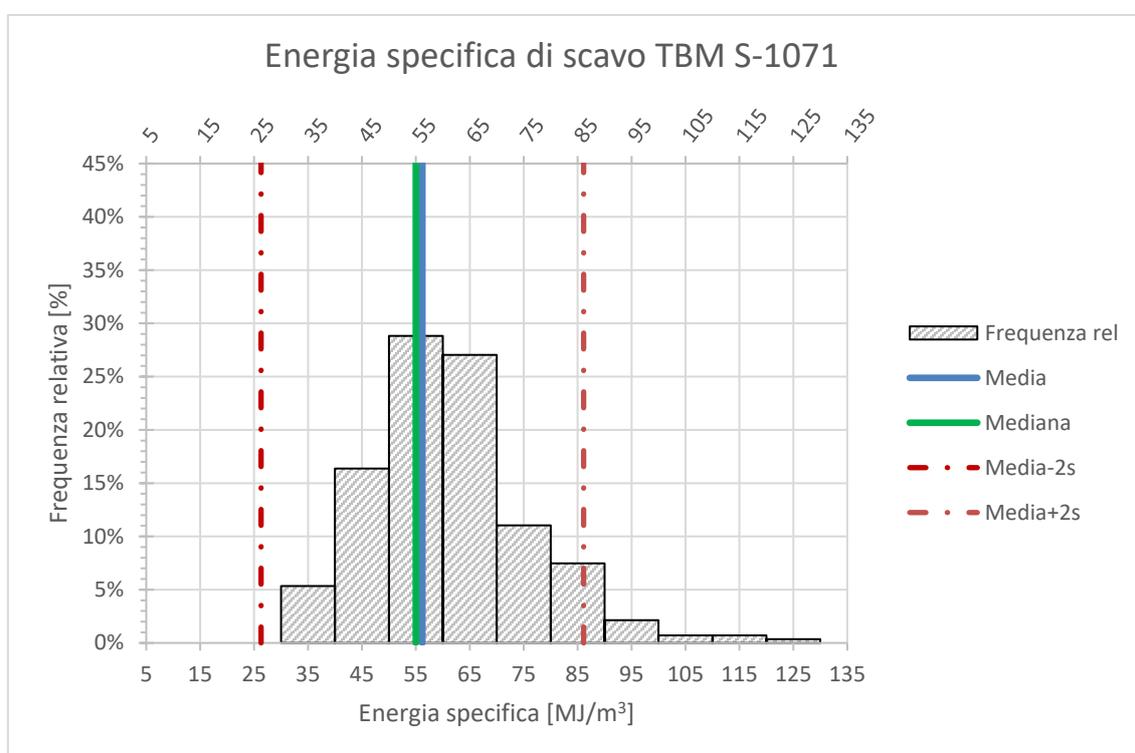


Figura 4.14 - Istogramma Energia Specifica S-1071

Le registrazioni di energia specifica risultano vicine al valor medio, infatti l'analisi statistica restituisce un coefficiente di variazione non elevato e pari al 26,61 %. Mentre nel Cunicolo Esplorativo si è osservato un picco di energia specifica nella zona corrispondente alla "Faglia 15", la TBM S-1071 sembra non aver avuto problemi a procedere, questo potrebbe essere spiegato oltre che dalla maggior potenza della macchina che scava la Galleria di Linea, dalla modalità di scavo adottata e anche dalla complessa geologia in esame. Nella GLON gli unici picchi sono stati registrati solamente in brevi tratti. Si riporta in tab. 4.13 il riepilogo degli indici statistici che descrivono la penetrazione.

PARAMETRI STATISTICI		
Media μ	56.202	MJ/m ³
Mediana	55.000	MJ/m ³
Dev.standard σ	14.953	MJ/m ³
$\mu-2\sigma$	26.295	MJ/m ³
$\mu+2\sigma$	86.109	MJ/m ³
Coeff. Variazione	26.607	%
Conteggio valori	281	-

Tabella 4.13 - Riepilogo indici statistici Energia specifica S-1071

KPI 7 – Peso smarino

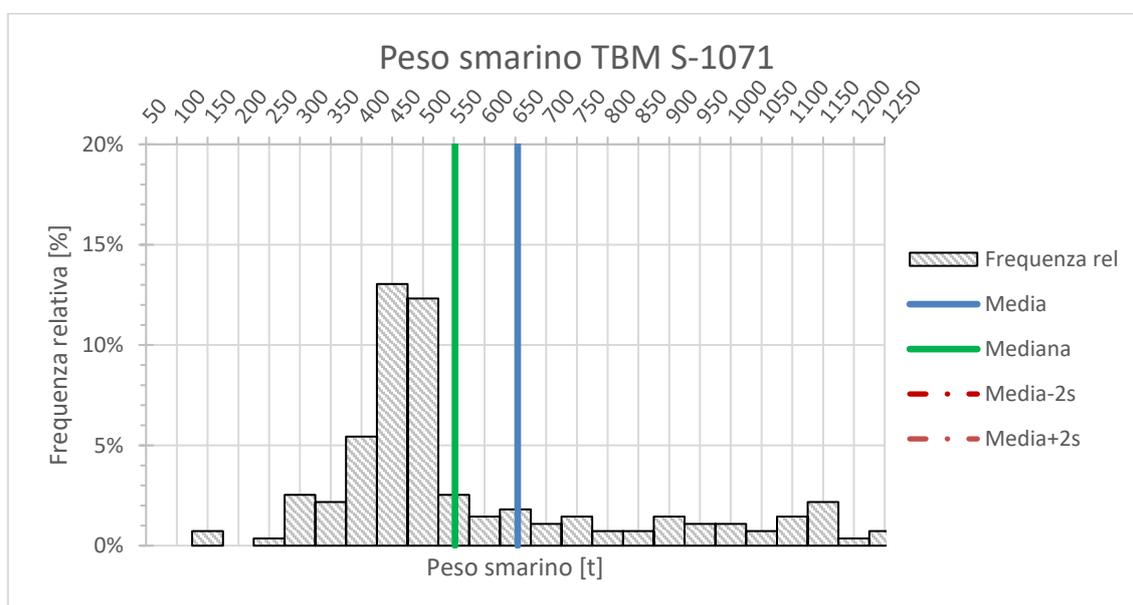


Figura 4.15 - Istogramma Peso smarino S-1071

Anche per quanto riguarda la TBM S-1071, la valutazione del peso dello smarino da un punto di vista statistico soffre di alcuni problemi, infatti i valori elevati ma puntuali di tale parametro possono influenzare di molto l'intera analisi. Dall'istogramma (fig. 4.15) si può osservare come i valori dello smarino si aggirino intorno alle 450-500 t tranquillamente confrontabili con i circa 450 t del peso teorico, l'alto valore del coefficiente di variazione, pari al 70,41%, dipende essenzialmente alle grandi quantità di materiale che occupano la camera di scavo lungo alcune tratte circoscritte. Sono stati registrati picchi anche superiori alle 2000 t nella zona antecedente alla "Faglia S15", questo è dovuto anche al fatto che in tale zona lo scavo è avvenuto per la maggior parte tramite "regrip parziale", motivo per cui risulta più esaustiva l'analisi fatta analizzando i

dati lungo la progressiva (rif. Cap.5). Si riporta in tabella 4.14 il riepilogo degli indici statistici che descrivono il peso dello smarino.

PARAMETRI STATISTICI		
Media μ	653.830	t
Mediana	552.000	t
Dev.standard σ	460.390	t
$\mu-2\sigma$	-266.950	t
$\mu+2\sigma$	1574.610	t
Coeff. Variazione	70.414	%
Conteggio valori	281	-

Tabella 4.14 - Riepilogo indici statistici Peso smarino S-1071

4.4 Analisi statistica dei parametri della TBM S-1072

Nell'ambito dello scavo della Galleria di Linea Nord Est (GLEN) per mezzo della fresa S-1072, l'analisi statistica è stata condotta dalla pk 43+714,27 alla pk 43+212,65, ossia nei 500 m antecedenti al fermo della fresa avvenuto nella GLON.

Di seguito si riportano gli istogrammi con i relativi indici statistici descrittivi per i diversi parametri TBM analizzati, ossia la media aritmetica μ , la mediana, la deviazione standard σ ed il relativo range $\mu \pm 2\sigma$ (comprendente il 95% dei valori registrati). Si rimanda al Par.4.2 il modo in cui sono state scelte le classi di frequenza.

KPI 1 – Velocità di rotazione della testa

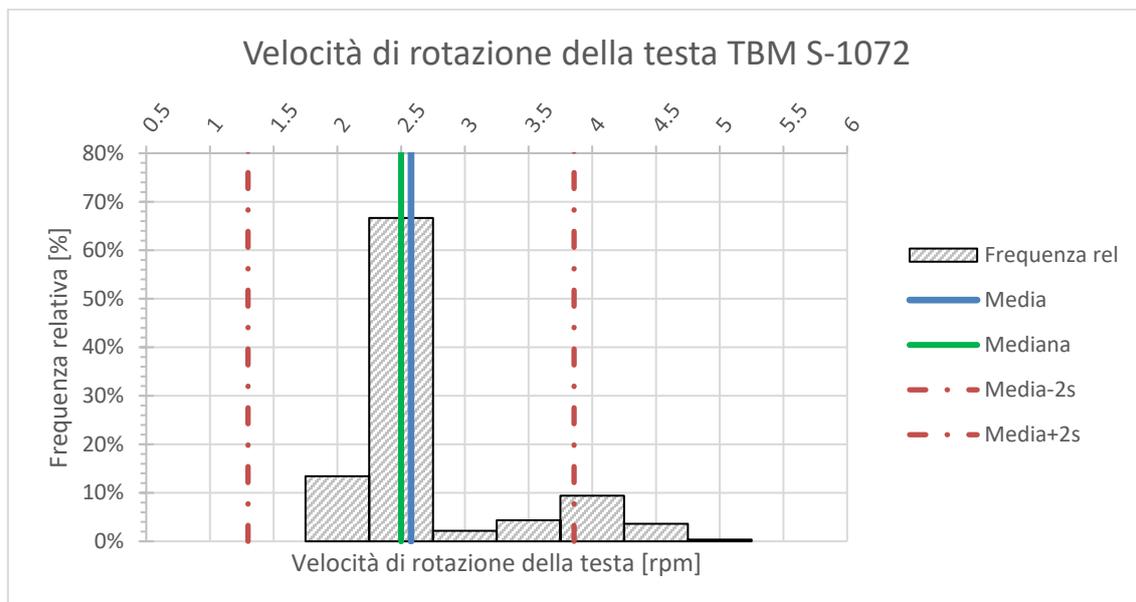


Figura 4.16 - Istogramma Velocità di rotazione della testa S-1072

Nonostante l'analisi statistica restituisca un coefficiente di variazione non troppo alto, pari a 24,81% (minore rispetto alla S-1071), i valori di velocità di rotazione della testa non sembrano essere descritti da una distribuzione Gaussiana, bensì da una distribuzione a due picchi come raffigurato in fig. 4.16. Inoltre, sempre dall'istogramma in figura si nota che i valori con frequenza massima si aggirano intorno ai 2,5 rpm. Si riporta in tabella 4.15 il riepilogo degli indici statistici che descrivono la velocità di rotazione della testa.

PARAMETRI STATISTICI		
Media μ	2.578	rpm
Mediana	2.500	rpm
Dev.standard σ	0.640	rpm
$\mu-2\sigma$	1.299	rpm
$\mu+2\sigma$	3.857	rpm
Coeff. Variazione	24.810	%
Conteggio valori	276	-

Tabella 4.15 - Riepilogo indici statistici Velocità di rotazione della testa S-1072

KPI 2 – Spinta dei cilindri principali

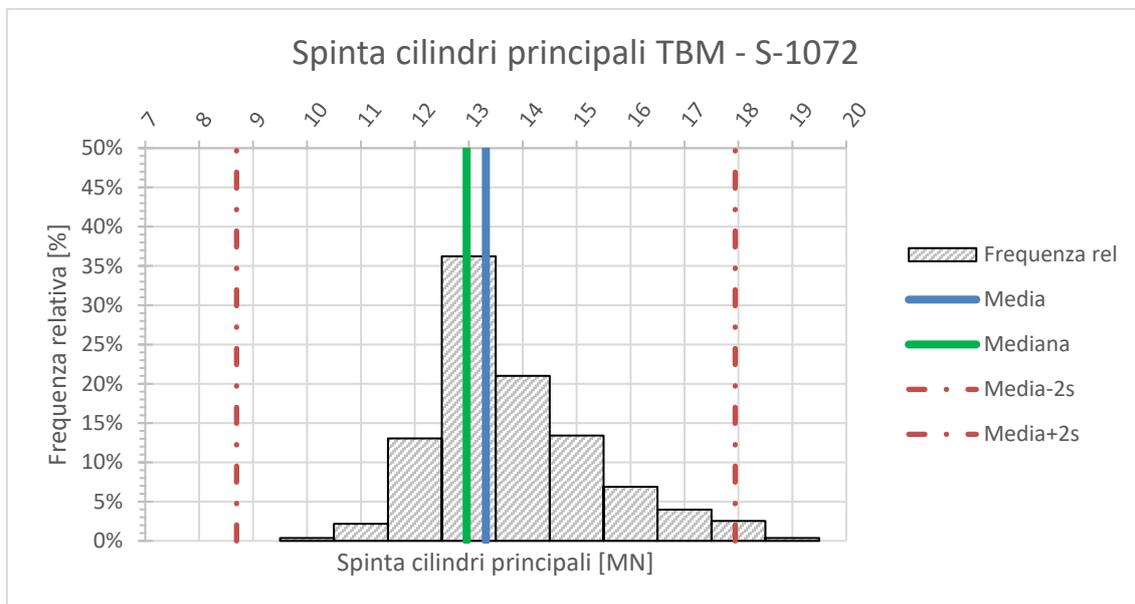


Figura 4.17 - Istogramma Spinta cilindri principali S-1072

I valori della spinta fornita dai cilindri principali (fig.4.17) si attestano intorno al valor medio, infatti dall'analisi statistica si ottiene un coefficiente di variazione basso e pari al 17,36 %. I valori risultano essere ben distribuiti secondo una forma a campana e quasi tutti all'interno del range $\mu \pm 2\sigma$, le classi con maggior frequenza relativa sono quelle caratterizzate da valori di spinta compresi tra 13 MN e i 14 MN. Come si può notare dall'istogramma è presente una sola classe esterna a tale intervallo, con una frequenza davvero ridotta, per cui sarebbe necessario approfondire la sua natura e individuare a quale progressiva sia riconducibile, si rimanda al Cap.5 l'analisi di tale parametro lungo la tratta d'interesse. Si riporta in tabella 4.16 il riepilogo degli indici statistici che descrivono la spinta dei cilindri principali.

PARAMETRI STATISTICI		
Media μ	13.317	MN
Mediana	12.960	MN
Dev.standard σ	2.311	MN
$\mu-2\sigma$	8.694	MN
$\mu+2\sigma$	17.940	MN
Coeff. Variazione	17.357	%
Conteggio valori	276	-

Tabella 4.16 - Riepilogo indici statistici Spinta cilindri principali S-1072

KPI 3 – Coppia

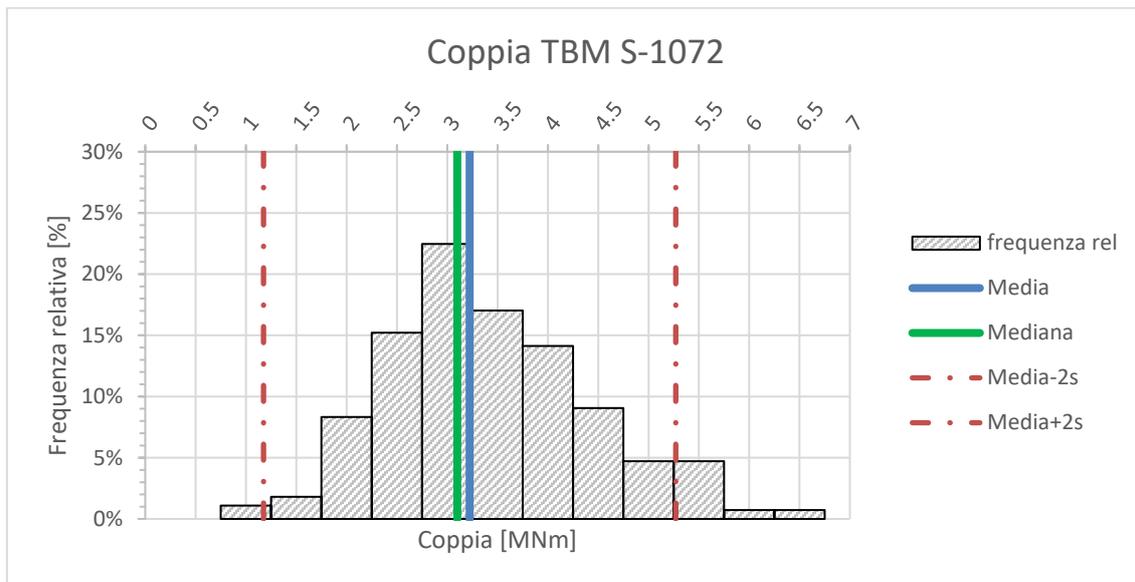


Figura 4.18 - Istogramma Coppia S-1072

Dall'analisi effettuata non si registra un'elevata variazione dei valori rispetto alla media aritmetica, infatti il coefficiente di variazione si attesta sul 31,77 %. Come per la spinta i valori di coppia registrati ricadono quasi nella loro totalità all'interno del range $\mu \pm 2\sigma$ (fig. 4.18), fanno eccezione quattro classi di dati che presentano una frequenza relativa inferiore al 5%. Nei 500 m analizzati la maggior parte dei valori rientrano tra gli 2,5-4,5 MNm e ciò si traduce in un processo regolare. Si riporta in tabella 4.17 il riepilogo degli indici statistici che descrivono la coppia.

PARAMETRI STATISTICI		
Media μ	3.223	MNm
Mediana	3.100	MNm
Dev.standard σ	1.024	MNm
$\mu-2\sigma$	1.175	MNm
$\mu+2\sigma$	5.271	MNm
Coeff. Variazione	31.769	%
Conteggio valori	276	-

Tabella 4.17 - Riepilogo indici statistici Coppia S-1072

KPI 4 – Velocità di avanzamento

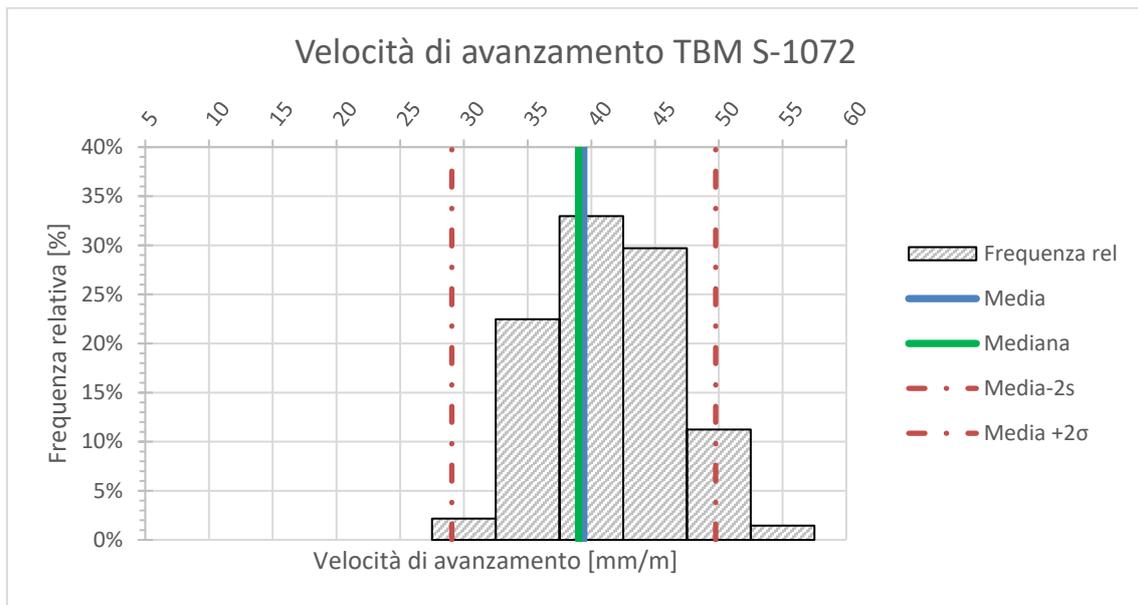


Figura 4.19 - Istogramma Velocità di avanzamento S-1072

Per quanto concerne la velocità di avanzamento (fig.4.19), i valori si attestano intorno alla media aritmetica, infatti l'analisi statistica restituisce un coefficiente di variazione pari al 13,14 %, abbastanza basso. Considerando che le due frese utilizzate per le Galleria di Linea sono identiche, non sorprende osservare che l'andamento della velocità di avanzamento sia così simile per le due macchine. Le classi al di fuori del range $\mu \pm 2\sigma$ risultano avere una frequenza inferiore al 3%, la DS-TBM S-1072 ha proceduto con una velocità pressoché costante (rif. Cap.5). Si riporta in tabella 4.18 il riepilogo degli indici statistici che descrivono la velocità di avanzamento.

PARAMETRI STATISTICI		
Media μ	39.402	mm/m
Mediana	39.000	mm/m
Dev.standard σ	5.176	mm/m
$\mu - 2\sigma$	29.051	mm/m
$\mu + 2\sigma$	49.753	mm/m
Coeff. Variazione	13.135	%
Conteggio valori	276	-

Figura 4.18 - Riepilogo indici statistici Velocità di avanzamento S-1072

KPI 5 – Penetrazione

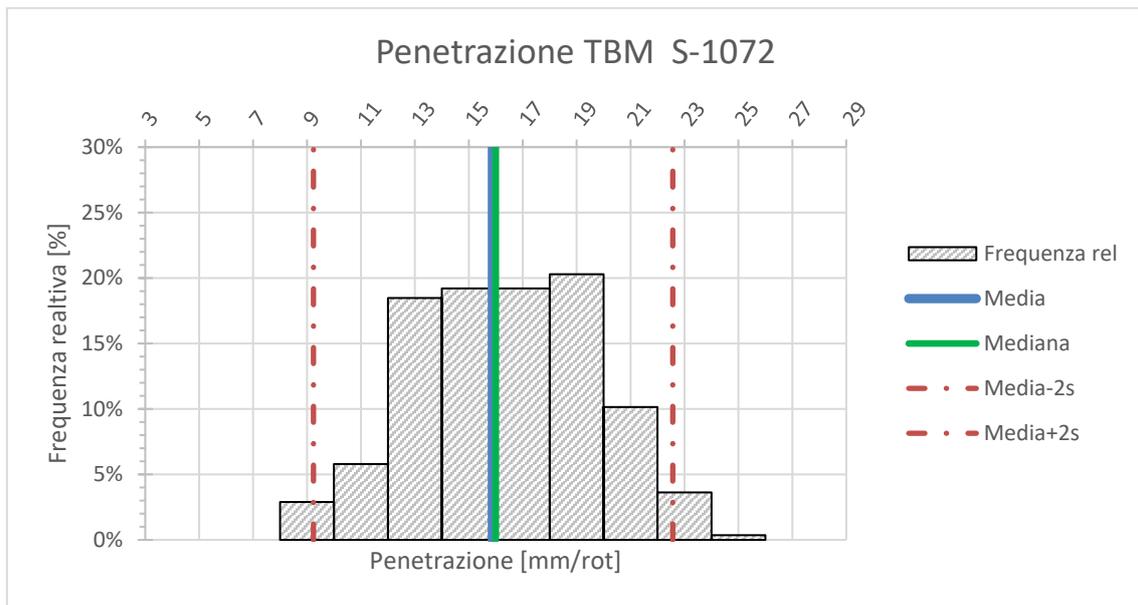


Figura 4.20 - Istogramma Penetrazione S-1072

I valori di penetrazione (fig.4.20) variano poco rispetto al valor medio, dall'analisi statistica si ottiene infatti un coefficiente di variazione del 20,95 % che risulta relativamente basso. Come si può vedere dall'istogramma in figura quasi tutte le classi rientrano all'interno del range $\mu \pm 2\sigma$, eccetto una che presenta una frequenza relativa molto bassa, inferiore al 5%. Le classi caratterizzate da valori di penetrazione più bassi corrispondono a tratti di scavo in cui si è registrato un incremento di rotazione della testa, dovuto all'aumento di resistenza dell'ammasso roccioso. Si riporta in tabella 4.19 il riepilogo degli indici statistici che descrivono la penetrazione.

PARAMETRI STATISTICI		
Media μ	15.902	mm/rot
Mediana	16.000	mm/rot
Dev.standard σ	3.332	mm/rot
$\mu - 2\sigma$	9.239	mm/rot
$\mu + 2\sigma$	22.565	mm/rot
Coeff. Variazione	20.951	%
Conteggio valori	276	-

Tabella 4.19 - Riepilogo indici statistici Penetrazione S-1072

KPI 6 – Energia specifica

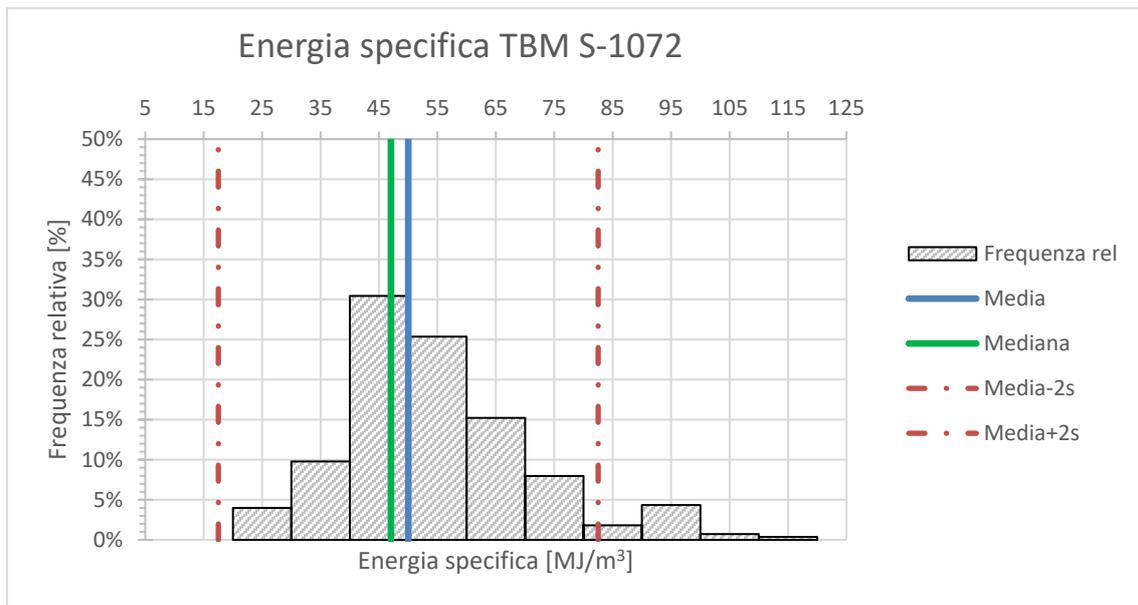


Figura 4.21 - Istogramma Energia specifica S-1072

I valori di energia specifica (fig. 4.21) risultano vicini al valor medio, infatti l'analisi statistica restituisce un coefficiente di variazione non elevato e pari al 32,5 %. Come si osserva dall'istogramma, quasi tutti i valori analizzati rientrano all'interno dell'intervallo $\mu \pm 2\sigma$ con trend crescente, infatti alcune classi superano in positivo questi limiti. Si riporta in tab. 4.20 il riepilogo degli indici statistici che descrivono l'energia specifica.

PARAMETRI STATISTICI		
Media μ	50.012	MJ/m ³
Mediana	47.050	MJ/m ³
Dev.standard σ	16.249	MJ/m ³
$\mu - 2\sigma$	17.514	MJ/m ³
$\mu + 2\sigma$	82.510	MJ/m ³
Coeff. Variazione	32.490	%
Conteggio valori	276	-

Tabella 4.20 - Riepilogo indici statistici Energia specifica S-1072

KPI 7 – Peso smarino

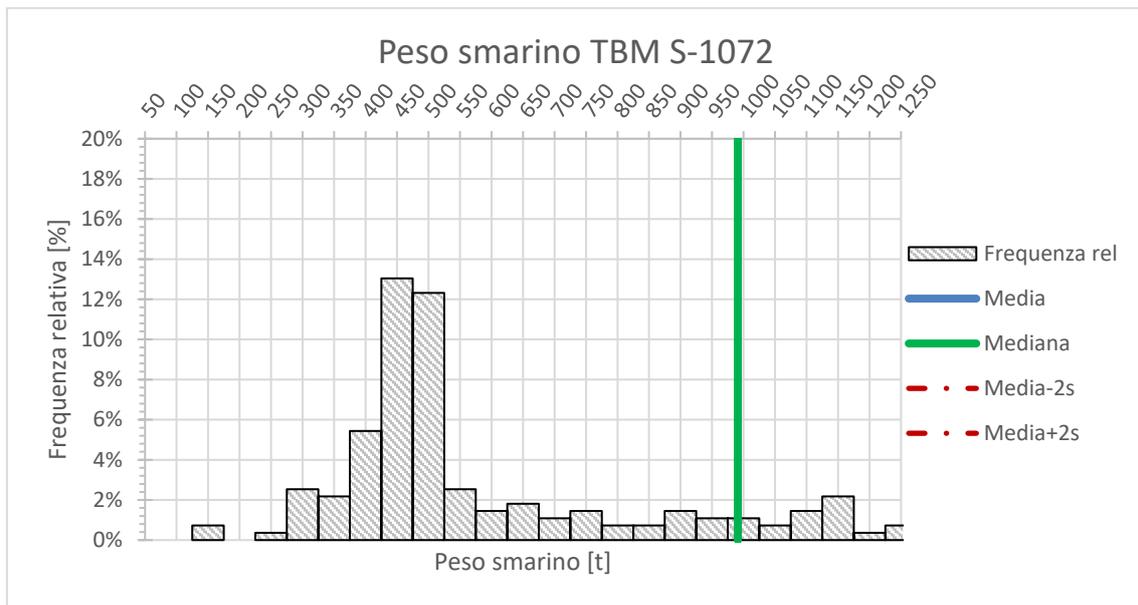


Figura 4.22 - Istogramma Peso dello smarino S-1072

Le stesse osservazioni fatte per la S-1071 valgono anche per la S-1072, risulta impossibile dare informazioni certe riguardo questa misura con una semplice analisi statistica, poiché intervengono molti fattori che condizionano il risultato finale. Per quanto riguarda la GLEN, i 500 m analizzati sono stati scavati per il 95% con “regrip parziale” per cui le misure registrate non possono essere considerate valide. Per completezza si riporta l’istogramma (fig. 4.22) dove si osserva che le classi con maggior frequenza relativa sono riferite ad un peso di 450-500 t, consone al peso teorico pari a 450 t. Si riporta in tabella 4.21 il riepilogo degli indici statistici che descrivono il peso dello smarino.

PARAMETRI STATISTICI		
Media μ	1894.851	t
Mediana	991	t
Dev.standard σ	2122.775	t
$\mu-2\sigma$	-2350.69	t
$\mu+2\sigma$	6140.40	t
Coeff. Variazione	112.023	%
Conteggio valori	276	-

Tabella 4.21 – Riepilogo indici statistici Peso della smarino S-1072

4.5 Confronto dei parametri delle tre TBM: diagrammi di frequenza di confronto e range di funzionamento

In questo paragrafo si procede con il confronto dei parametri macchina chiave relativi alle tre TBM al fine di individuarne le analogie e le differenze, inoltre saranno dedotti i range di funzionamento dei KPI sia per la S-1054 che per le due frese gemelle S-1071 e S-1072.

Per le analisi risulta fondamentale il confronto del rapporto tra la potenza e l'area della testa fresante della TBM che scava il Cunicolo Esplorativo e di quelle che scavano le due Gallerie di linea con diametro superiore.

TBM	Potenza/Area testa	
S-1054 "Serena"	46.62	[KW/m ²]
S-1071 "Flavia" S-1072 "Virginia"	75.98	[KW/m ²]

Tabella 4.22 - Rapporti Potenza/Area Cutterhead [Maggio, 2020]

Come mostrato in tabella 4.22, il rapporto nelle due tipologie di TBM risulta essere dello stesso ordine di grandezza, questo può darci indicazioni sul fatto che alcuni parametri possano essere condizionati da un *fattore scala macchina*.

Per il confronto dei KPI sono stati creati degli *istogrammi* in cui i dati vengono suddivisi in classi di frequenza uguali per le tre frese, motivo per cui (come si vedrà in seguito), alcuni parametri risultano non confrontabili perfettamente. Inoltre, l'uso dei *BoxPlot* ci permette di raffigurare le differenze sostanziali tra i parametri analizzati, oltre che fornirci in prima battuta un primissimo range di funzionamento. Infatti, basti ricordare che la *distanza interquantile* contiene al suo interno tutti i valori che hanno una probabilità di accadimento (frequenza relativa) del 50%.

Il secondo step riguarda la realizzazione, su base statistica, di un range di funzionamento per i vari parametri macchina. Al fine di ottenere ciò sono stati considerati altri due intervalli, oltre a quello descritto dal BoxPlot, relativi al 68,3% e al 95,5% di probabilità che i valori registrati ricadano all'interno e correlati rispettivamente a $\mu \pm \sigma$ e $\mu \pm 2\sigma$. Al fine di evidenziare come questi siano condizionati non solo dalla TBM stessa ma anche dalle caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso attraversato, si utilizza un sistema semaforico (verde= 50%; giallo=68,3%; rosso=95,5%).

KPI 1 – Velocità di rotazione della testa

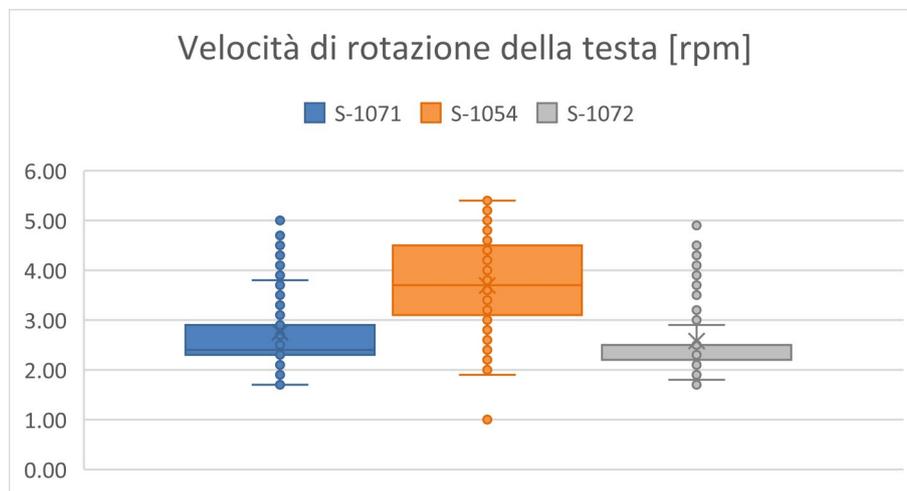
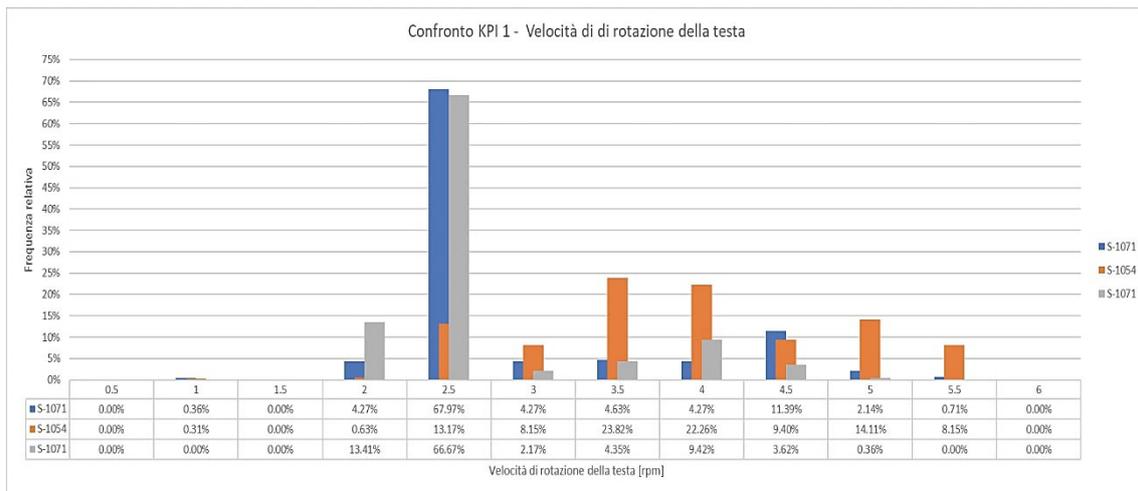


Figura 4.23 – Istogramma (sopra) e BoxPlot (sotto) di confronto Velocità di rotazione della testa per le tre TBM

Le due frese gemelle hanno un comportamento simile in termini di velocità di rotazione (fig. 4.23), la classe con maggior frequenza relativa pari al 66-67% è caratterizzata da un valore di rotazione pari a 2.5 rpm, mentre la S-1054 ha un range più elevato (26-30% rispetto al valore medio), visualizzabile nel BoxPlot, pari a 3,5-4,0 rpm e dovuto presumibilmente al *fattore scala* che caratterizza le frese. Si riportano in tabella 4.23, i range di funzionamento della velocità di rotazione ottenuti tramite analisi statistica.

S-1071		S-1054		S-1072	
Range	2.3	Range	3.1	Range	2.2
50%	2.9	50%	4.5	50%	2.5
Range	1.94	Range	2.80	Range	1.94
68.3%	3.56	68.3%	4.59	68.3%	3.22
Range	1.13	Range	1.91	Range	1.30
95.5%	4.36	95.5%	5.48	95.5%	3.86

Tabella 4.23 - Range di funzionamento riferiti alla Velocità di rotazione della testa per le tre TBM

KPI 2 – Spinta dei cilindri principali

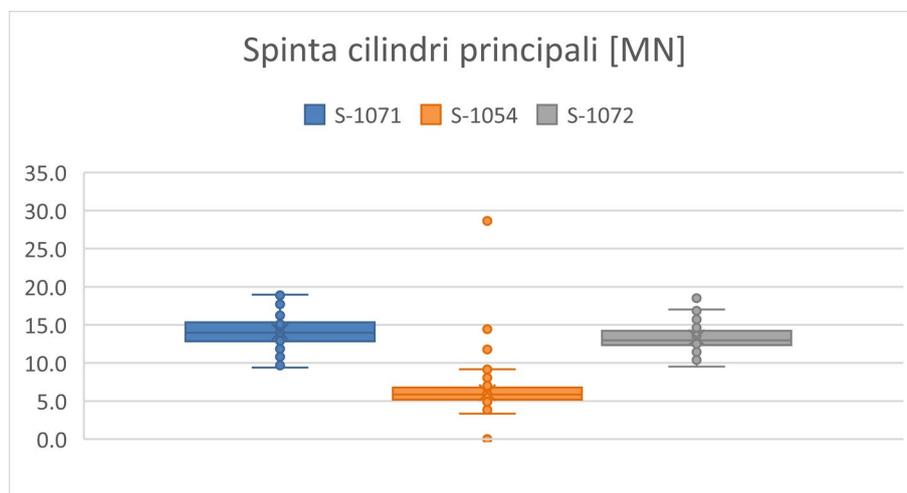
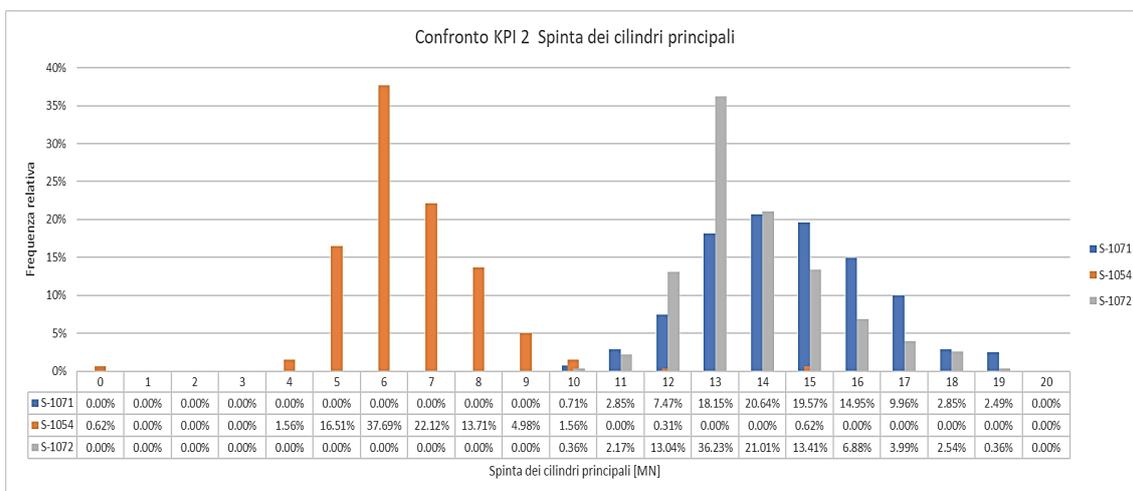


Figura 4.24 – Istogramma (sopra) e BoxPlot (sotto) di confronto Spinta dei cilindri principali per le tre TBM

Le due frese gemelle essendo dotate di motori molto più potenti rispetto a quella che scava il Cunicolo Esplorativo, godono di un range traslato verso valori superiori di spinta dei cilindri principali, ben visibile nel BoxPlot in fig.4.24. Nonostante le macchine siano identiche, si notano *classi di frequenza* massime differenti, la S-1071 si attesta su valori pari a 14 MN (20,64%) mentre la S-1072 si attesta intorno ai 13 MN (36.23%). Situazione completamente differente per quanto riguarda la S-1054 per la quale i valori di thrust si attestano in un range pari a 6,0-7,0 MN. Si riportano in tabella 4.24, i range di funzionamento della spinta dei cilindri principali ottenuti tramite analisi statistica.

S-1071		S-1054		S-1072	
Range	12.8	Range	5.18	Range	12.33
50%	15.3	50%	6.78	50%	14.23
Range	11.98	Range	4.19	Range	11.80
68.27%	16.35	68.27%	8.04	68.27%	14.84
Range	9.79	Range	2.27	Range	10.28
95.45%	18.54	95.45%	9.96	95.45%	16.36

Tabella 4.24 - Range di funzionamento riferiti alla Spinta dei cilindri principali per le tre TBM

KPI 3 – Coppia

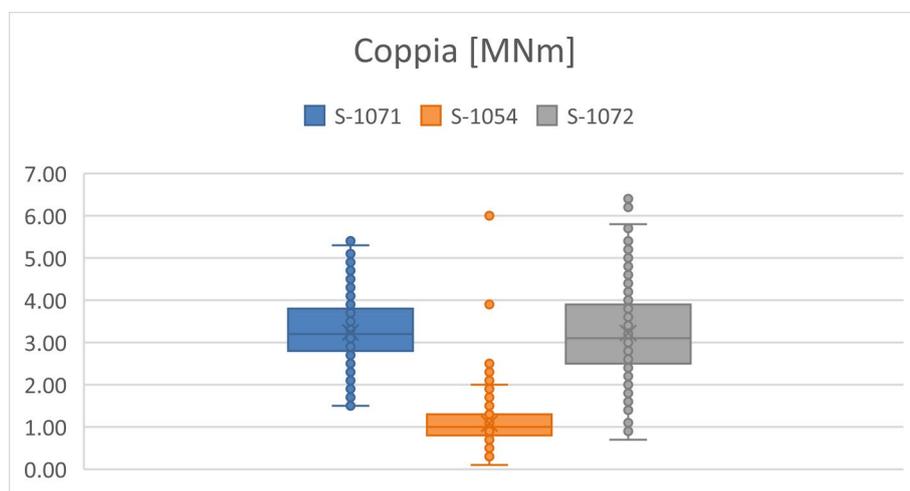
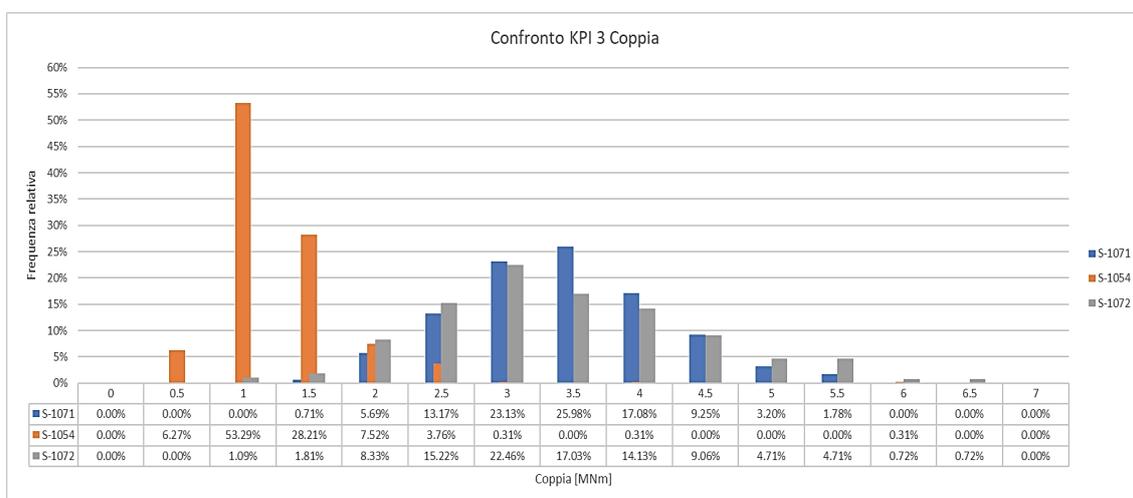


Figura 4.25 - Istogramma (sopra) e BoxPlot (sotto) di confronto Coppia

I valori di coppia (fig. 4.25) seguono lo stesso trend del thrust, la S-1054 ha un range inferiore rispetto alle frese più grandi, si nota una diminuzione di circa il 65% legato probabilmente ad un *fattore scala*. La S-1071 e la S-1072 sono caratterizzate da valori di coppia intorno a 3,0-4,0 MNm con percentuali rispettivamente del 63,19% e 53,62%. La S-1054 genera una coppia minore attestandosi in un range 1,0-1,5 MNm con l'81%. Si

riportano in tabella 4.25, i range di funzionamento della coppia ottenuti tramite analisi statistica.

S-1071		S-1054		S-1072	
Range	2.80	Range	0.8	Range	2.5
50%	3.80	50%	1.3	50%	3.9
Range	2.46	Range	0.55	Range	2.20
68.27%	4.01	68.27%	1.61	68.27%	4.25
Range	1.68	Range	0.02	Range	1.18
95.5%	4.78	95.45%	2.15	95.45%	5.27

Tabella 4.25 - Range di funzionamento riferiti alla Coppia per le tre TBM

KPI 4 – Velocità di avanzamento

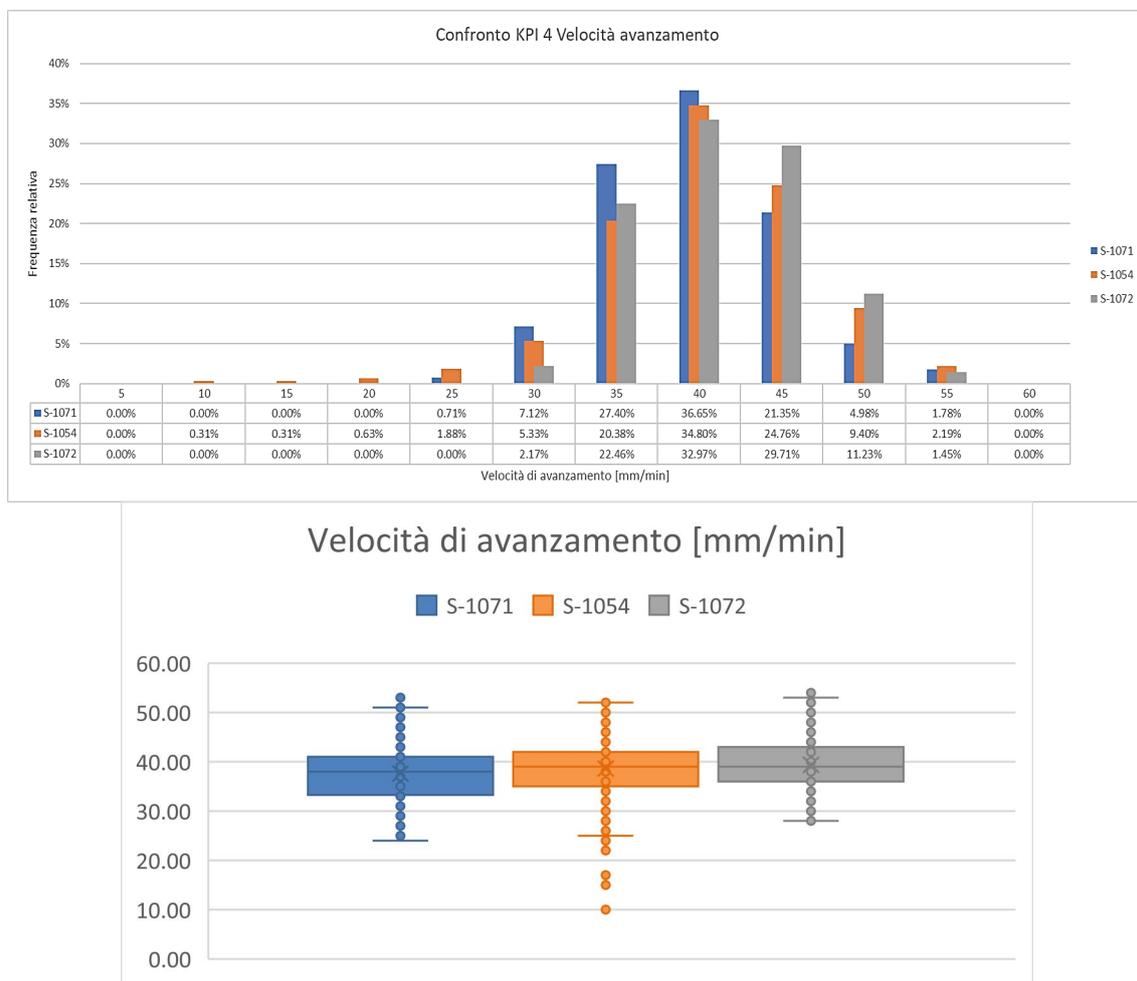


Figura 4.26 - Istogramma (sopra) e BoxPlot (sotto) di confronto Velocità di avanzamento

Per quanto concerne la velocità di avanzamento (fig. 4.26), nonostante le tre TBM attraversino nei 500 m analizzati la “Faglia S15”, tale parametro risulta molto simile e correlabile ad un andamento regolare. Tutte e tre le macchine mostrano una classe

caratterizzata dal valore di 40 mm/m con la massima percentuale (S-1071 36.65%; S-1054 34,80%; S-1072 32,97%). Si riportano in tabella 4.26, i range di funzionamento della velocità di avanzamento della testa ottenuti tramite analisi statistica.

S-1071		S-1054		S-1072	
Range	33.25	Range	35	Range	36
50%	41	50%	42	50%	43
Range	32.26	Range	32.18	Range	34.23
68.27%	42.91	68.27%	45.04	68.27%	44.58
Range	26.93	Range	25.75	Range	29.05
95.45%	48.24	95.45%	51.47	95.45%	49.75

Tabella 4.26 - Range di funzionamento riferiti alla Velocità di avanzamento per le tre TBM

KPI 5 – Penetrazione

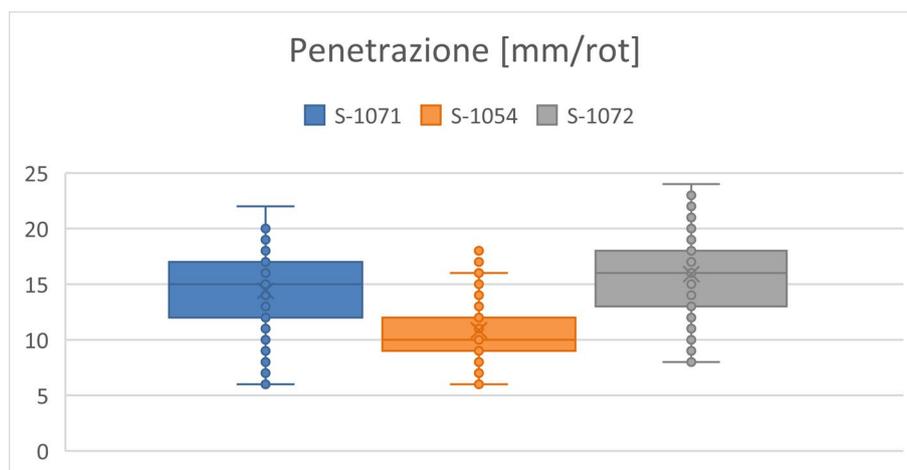
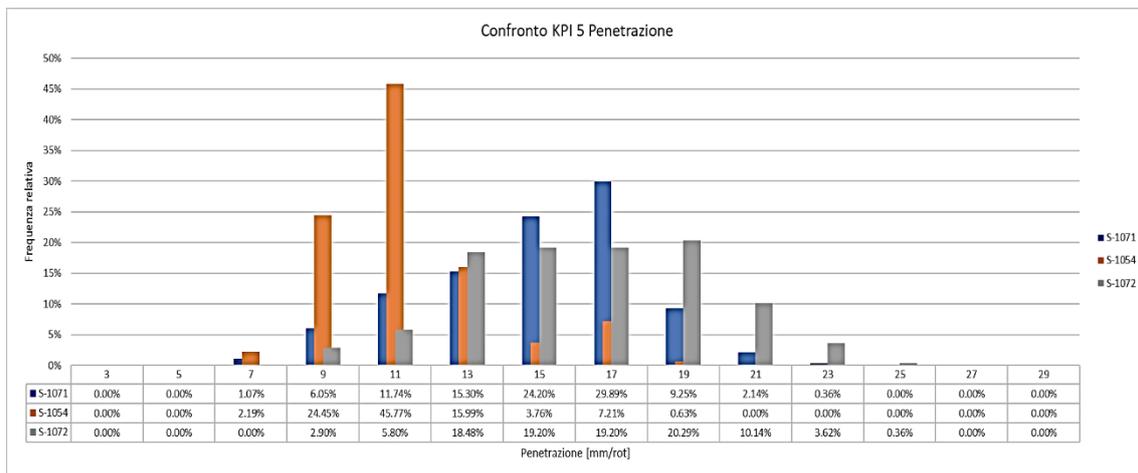


Figura 4.27 - Istogramma (sopra) e BoxPlot (sotto) di confronto Penetrazione

Dal confronto delle tre frese, in riferimento alla penetrazione (fig.4.27), si nota che la S-1054 rispetta un range inferiore (il *fattore scala* porta ad una riduzione di circa il 30%),

comprendendo più del 60% di dati tra i 9,0-12,0 mm/rot. Le due TBM gemelle invece nonostante abbiano un range spostato verso valori maggiori, non corrispondono perfettamente. Si riportano in tabella 4.27, i range di funzionamento della velocità di avanzamento della testa ottenuti tramite analisi statistica.

S-1071		S-1054		S-1072	
Range	12	Range	9	Range	13
50%	17	50%	12	50%	18
Range	11.42	Range	8.47	Range	12.57
68.27%	17.40	68.27%	13.21	68.27%	19.23
Range	8.43	Range	6.10	Range	9.24
95.45%	20.39	95.45%	15.57	95.45%	22.57

Tabella 4.27 - Range di funzionamento riferiti alla Penetrazione per le tre TBM

KPI 6 – Energia specifica di scavo

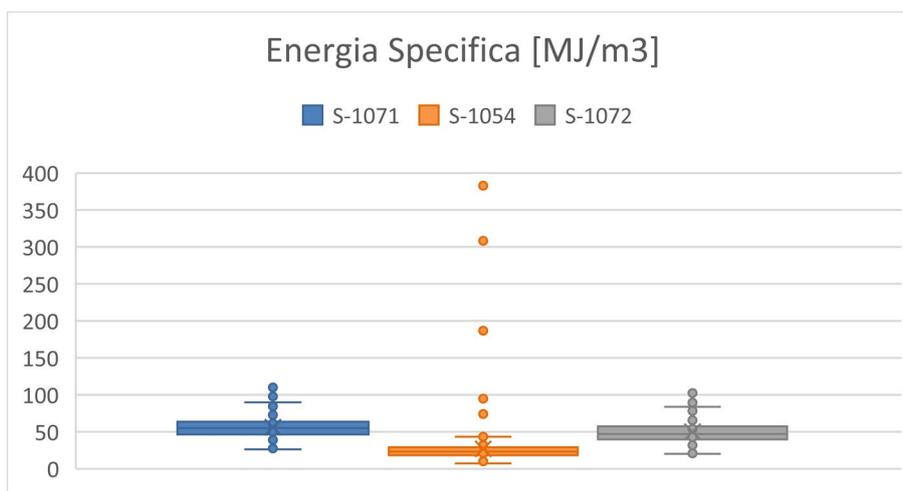
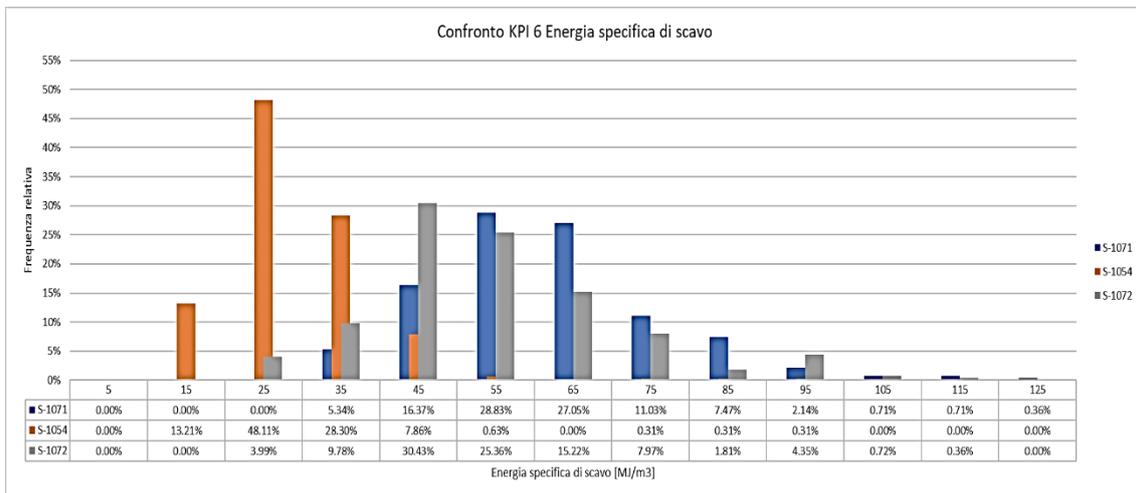


Figura 4.28 - Istogramma (sopra) e BoxPlot (sotto) di confronto Energia specifica

Come già accennato nel precedente paragrafo, per l'energia specifica andrebbe fatto un'analisi più approfondita a causa di molti outliers presenti tra i dati registrati dalla S-

1054 (fig.4.28), questi condizionano di parecchio gli indici statistici. Ciò nonostante è possibile attribuire dei range di funzionamento anche a questo parametro macchina. La S-1071 e la S-1072 sono caratterizzate da un range superiore, avente picco tra 45,0-65,0 MJ/m³, mentre la S-1054 si attesta su valori più bassi, 25,0 MJ/m³ con l'48%. Si riportano in tabella 4.28, i range di funzionamento dell'energia specifica di scavo ottenuti tramite analisi statistica.

S-1071		S-1054		S-1072	
Range	46	Range	18.2	Range	39.7
50%	64	50%	29	50%	57.4
Range	41.25	Range	-1.92	Range	33.76
68.27%	71.16	68.27%	55.59	68.27%	66.26
Range	26.30	Range	-30.68	Range	17.51
95.45%	86.11	95.45%	84.35	95.45%	82.51

Tabella 4.28 - Range di funzionamento riferiti all' Energia specifica di scavo per le tre TBM

KPI 7 – Peso Smarino

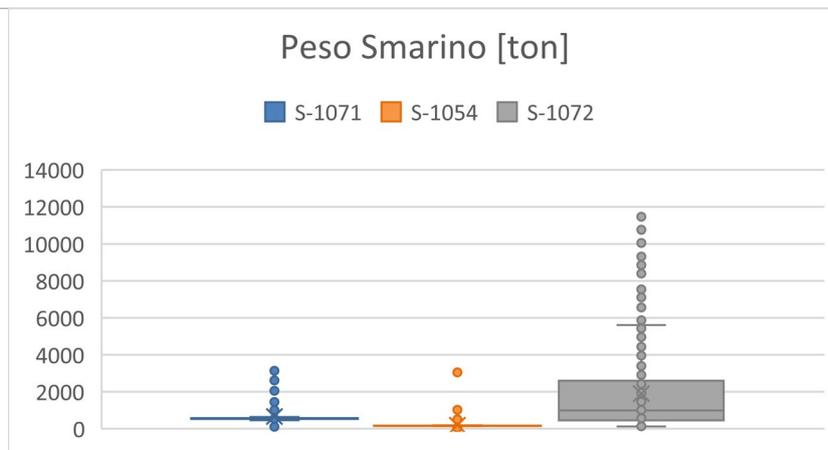
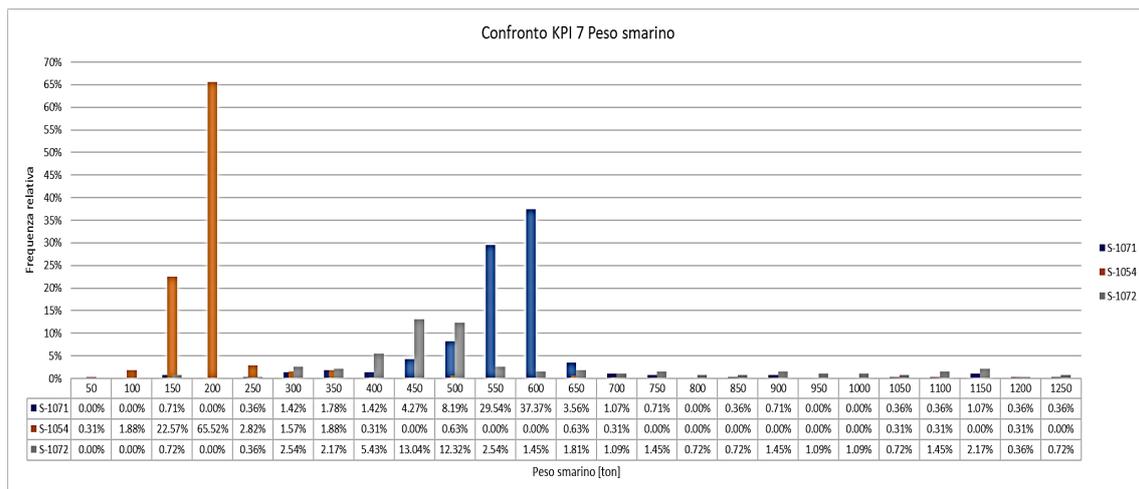


Figura 4.29 - Istogramma (sopra) e BoxPlot (sotto) di confronto Peso smarino medio

Per quanto riguarda i valori registrati di peso dello smarino, si attenziona il fatto che la S-1072 ha scavato nei 500 m analizzati tramite *regrip parziale* e ciò ha condizionato le registrazioni in negativo (fig. 4.29). Per lo studio d'interesse infatti tali dati sono inutilizzabili ed è possibile dire solamente che, usualmente, la S-1071 si attesta intorno a valori di 500 t (peso teorico 450t), la S-1054 intorno ai 200 t (peso teorico 160 t) e la S-1072 dovrebbe attestarsi intorno ai 500 t come la fresa gemella. Questo errore nell'analisi porta ad escludere dai range di funzionamento (tab.4.29) per il peso dello smarino l'intervallo del 95,5% per tutte e tre le frese e quello del 68,3% per la S-1054 (parzialmente) e per la S-1072.

S-1071		S-1054		S-1072	
Range 50%	527	Range 50%	150.5	Range 50%	452
	574		162.5		2600
Range 68.27%	194.49	Range 68.27%	-16.49	Range 68.27%	-227.92
	1115.83		395.87		4017.63
Range 95.45%	-266.17	Range 95.45%	-222.67	Range 95.45%	-2350.70
	1576.50		602.05		6140.40

Tabella 4.29 - Range di funzionamento riferiti al Peso dello smarino per le tre TBM.

Sulla base delle analisi effettuate, viene redatta la tabella 4.30 in cui si riportano i range di funzionamento effettivi dei parametri chiave per tutte e tre le frese, nella tratta in esame. La scelta dei range è stata fatta considerando tutte le informazioni ricavate dall'analisi statistica, dal metodo di scavo adottato e dalla geologia che caratterizza la tratta. Inoltre, si rimarca il fatto che per la velocità di rotazione, la spinta dei cilindri principali e la coppia, interviene un *fattore scala* che demarca notevoli differenze tra le due tipologie di TBM.

	S-1071	S-1054	S-1072
KPI 1 [rpm]	2.30	2.80	1.94
	4.36	5.48	3.86 (≈ 4)
KPI 2 [MN]	11.98	4.19	11.8
	18.54	9.96	16.36
KPI 3 [MNm]	2.46	0.55	2.20
	4.78	2.15	5.27
KPI 4 [mm/min]	32.26	25.75	29.05
	48.24	51.47	49.75
KPI 5 [mm/rot]	8.43	8.47	9.24
	20.39	15.57 (≈ 17)	19.23 (≈ 21)
KPI 6 [MJ/m ³]	26.30 (≈ 30)	18.2	17.51 (≈ 25)
	71.16	55.56 (≈ 45)	66.26
KPI 7 [t]	$\approx 450-550$	≈ 200	$\approx 450-550$

Tabella 4.30 – Riepilogo range effettivi di funzionamento dei KPI per la tratta indagata.

CAPITOLO 5 - Analisi geomeccanica dei parametri TBM e correlazione con il comportamento dell'ammasso roccioso

Nel presente capitolo vengono analizzati i parametri chiave delle DS-TBM che scavano le tre canne della Galleria di Base del Brennero sul versante italiano, al fine di correlarli al tipo di comportamento dell'ammasso roccioso.

L'analisi geomeccanica ha come obiettivo finale la definizione dei range dei parametri macchina chiave, definiti KPI (Key Performance Indicators) e già descritti nel Cap.3, per ogni comportamento dell'ammasso roccioso, individuato durante l'avanzamento sia del Cunicolo esplorativo che delle Gallerie di Linea. Tale analisi, fatta per la prima volta anche per le due canne principali, sarà utile per prevenire in anticipo eventuali problematiche che potrebbero influire sull'avanzamento ordinario delle TBM del Cunicolo Esplorativo e specialmente per le successive TBM delle Gallerie di Linea. In tale sede, seppur di notevole supporto per la valutazione della qualità dell'ammasso roccioso, non sono stati presi in conto i risultati delle indagini in avanzamento e delle attività di monitoraggio del rivestimento, ampiamente descritti nel Capitolo 3.

5.1 Linee guida interne BBT SE per la definizione dei comportamenti dell'ammasso

In fase di progettazione, sono stati individuati i diversi tipi di ammasso roccioso per la tratta in esame e, successivamente se ne è definito il comportamento atteso (Cap.2) . In corso d'opera, BBT SE, tramite le linee guida interne di cui al Par.3.7.1 e 3.7.2 [EGGER, 2019], ha ulteriormente definito il comportamento dell'ammasso in base a quanto osservato nei primi nove mesi di scavo del Cunicolo Esplorativo. Come descritto nelle linee guida e riportato in tab.5.1, il comportamento viene studiato sia per la zona I che risulta interessata dall'interazione tra fronte di scavo (e cavo sopra la testa) e testa fresante, sia per la zona II che invece è interessata dall'interazione tra cavo e scudi. Ad ogni comportamento sono stati associati uno o più SRP (situazioni di rischio potenziale), ampiamente descritti nel Capitolo 3, per mettere in evidenza i rischi possibili durante lo scavo meccanizzato e, se necessario, implementare una mitigazione del rischio adeguata.

TCR	SRP	Breve descrizione della situazione di rischio potenziale (SRP)
		FRONTE / TESTA (ZONA I) CAVO/SCUDO (ZONA II) ANELLI (ZONA III)
TCR 1	-	ZONA I - Scavo regolare, chipping regolare ZONA II - Avanzamento regolare
TCR 2	SRP n.12	ZONA I - Scavo regolare, chipping abbastanza regolare, ma presenza di blocchi nello smarino ZONA II - Avanzamento regolare, carichi puntuali sullo scudo, attrito scudo-ammasso trascurabile
TCR 3	SRP n.1 SRP n.12	ZONA I - Scavo irregolare, fronte localmente instabile, presenza di cuttings irregolari e di molti blocchi nello smarino, possibile intasamento del nastro ZONA II - Avanzamento regolare (modalità doppio-scudo), chiusura locale del gap e caricamento moderato e locale dello scudo, attrito scudo-ammasso non trascurabile
TCR 4	SRP n.1 SRP n.2 SRP n.6	ZONA I - Scavo eccezionale (scavo in marcia 1) con testa riempita di materiale per instabilità del fronte, intasamento del nastro ZONA II - Avanzamento (regrip) impedito dall'elevato caricamento dello scudo, mezzi regrip ed in caso di zona più estesa passaggio da modalità doppio-scudo a mono-scudo, elevato attrito traslazionale tra scudo e ammasso circostante, rischio elevato di "shield jamming" ZONA III: forte pressioni dei cilindri ausiliari sui conchi prefabbricati con possibili danni (fessurazioni, scostamenti dei giunti ecc.); carico medio-basso degli anelli nella zona di ammasso più spingente
TCR 5	SRP n.13 SRP n. 20	ZONA I - Rigetto violento di lastre di roccia, danni e usura dei cutters, cutting irregolare (spigoli vivi) con possibili danni al nastro; roccia molto resistente ed abrasiva (rischio di elevata usura e di mancata produzione) ZONA II - Rigetto violento di lastre di roccia appoggiandosi sullo scudo
TCR 6	SRP n.5	ZONA I - Nessuna anomalia ZONA II - Blocco avanzamento per "shield jamming" verificato ZONA III: forte pressioni dei cilindri sui conchi prefabbricati alla ripartenza (attrito statico tra scudo ed ammasso circostante) con danni (fessurazioni, scostamenti dei giunti ecc.); carico d'ammasso elevatissimo, dissimetrico agente sugli anelli nella zona più sollecitata
TCR 8	SRP n.1 SRP n.2 SRP n.6 SRP n.17	ZONA I - Scavo eccezionale (scavo in marcia 1), blocco testa per franamento continuo del fronte, necessario fermo per pre-consolidamento (necessari iniezioni del fronte ed riempimenti con miscele speciali in calotta) ZONA II - Blocco avanzamento per "shield jamming" verificato, riempimenti necessari ZONA III: forte pressioni dei cilindri ausiliari sui conchi prefabbricati alla ripartenza (attrito statico tra scudo ed ammasso circostante) con danni (fessurazioni, scostamenti dei giunti ecc.); carico d'ammasso elevatissimo, anche dissimetrico agente sugli anelli nella zona più critica (Core Zone)
TCR 9	SRP n.1 SRP n.2 SRP n.6 SRP n.7 SRP n.17 SRP n.19	ZONA I - Blocco testa per franamento continuo del fronte, necessario fermo per drenaggio, pre-consolidamento (necessari iniezioni del fronte ed riempimenti con miscele speciali in calotta) ZONA II - Blocco avanzamento per "shield jamming" verificato, riempimenti necessari ZONA III: forte pressioni dei cilindri sui conchi prefabbricati alla ripartenza (attrito statico tra scudo ed ammasso circostante) con danni (fessurazioni, scostamenti dei giunti ecc.); carico idraulico e carico d'ammasso elevatissimo, anche dissimetrico agente sugli anelli nella zona più critica (Core Zone)

Tabella 5.1 - Descrizione delle SRP delle modalità di scavo osservate o attese per ciascun TCR osservato o atteso nella zona I, II e III [Egger, 2019].

Inoltre, grazie al profilo geologico consuntivo (bozza interna di BBT-SE), elaborato in corso d'opera e rappresentativo delle reali condizioni dell'ammasso riscontrate in un tratto d'interesse specifico che BBT ha inteso analizzare "estraendolo" da tutto il resto, è stato possibile associare con minori incertezze le diverse tipologie di comportamento alle diverse zone omogenee, come descritto in fig.5.1 e fig.5.2.

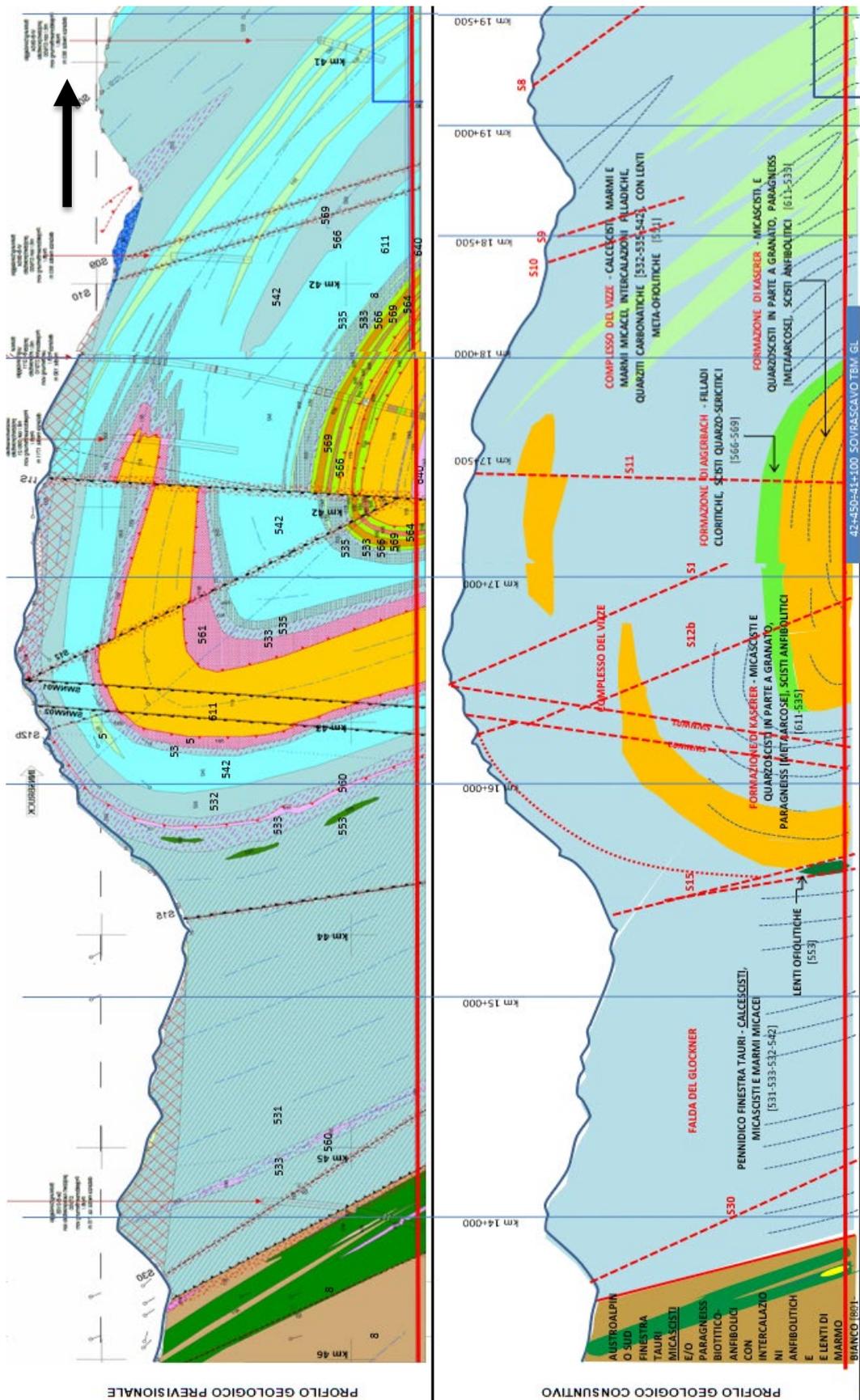


Figura 5.1 - Confronto profilo geologico consuntivo con quello previsionale per la tratta analizzata. La freccia indica la direzione d'avanzamento [Barovero, 2020]

TCR	Breve descrizione del tipo di comportamento (TCR) in ZONA I: FRONTE / TESTA	Breve descrizione del tipo di comportamento (TCR) in ZONA II: CAVO / SCUDO
TCR 1	Fronte stabile, ammasso a bassa fratturazione (-> <i>comportamento elastico</i>)	Cavo stabile, ammasso a bassa fratturazione (-> <i>comportamento elastico</i>)
TCR 2	Locali distacchi di blocchi dal fronte: causato dal processo di cutting e dall'intersezione sfavorevole di discontinuità in un ammasso a media fratturazione (<i>scivolamento lungo discontinuità a franappoggio, toppling (-> discontinuity controlled failure)</i>)	Locali distacchi di blocchi dal cavo: causato dall'intersezione sfavorevole di discontinuità in un ammasso a media fratturazione, carichi puntuali sullo scudo (<i>distacco cunei gravitativo o per scivolamento su discontinuità, $ur_{tot} < 1\% R$ -> discontinuity controlled failure</i>)
TCR 3	Distacchi di blocchi / Instabilità locale del fronte: formazione di una zona plastica poco profonda, concentrata al nucleo senza interferire con quella del cavo per sovrasollecitazione della roccia, e svincolo di blocchi maggiori in un ammasso a medio-alta fratturazione (-> <i>comportamento elasto-plastico</i>)	Ammasso poco spingente: formazione di una zona plastica poco profonda per sovrasollecitazione della roccia e svincolo di blocchi maggiori in un ammasso a medio-alta fratturazione, chiusura locale del gap e caricamento moderato e locale dello scudo (-> <i>comportamento elasto-plastico, $1\% R < ur_{tot} < 3\% R$</i>)
TCR 4	Frequenti distacchi di blocchi / Instabilità del fronte: formazione di una zona plastica profonda, in cui interagisce il nucleo con il cavo per sovrasollecitazione della roccia, instabilità del fronte e possibili sovrascavi nella zona di calotta sopra la testa (<i>elevato stato tensionale combinato ad una bassa resistenza della roccia -> comportamento elasto-plastico</i>)	Ammasso da mediamente a fortemente spingente: formazione di una zona plastica profonda per sovrasollecitazione della roccia, spostamenti elevati fino alla chiusura completa del gap e successivo caricamento elevato dello scudo (<i>elevato stato tensionale combinato ad una bassa resistenza della roccia -> comportamento elasto-plastico; fenomeni di creep; TCR 4-1: $3\% R < ur_{tot} < 6\% R$; TCR 4-2: $6\% R < ur_{tot} < 10\% R$</i>)
TCR 5	Rock-burst al fronte: regetto violento di lastre di roccia in ammassi da poco fratturati a compatti (<i>elevato stato tensionale combinato ad un'elevata resistenza e rigidità della roccia -> comportamento elastico-fragile</i>)	Rock-burst al cavo: regetto violento di lastre di roccia in ammassi da poco fratturati a compatti (<i>elevato stato tensionale combinato ad un'elevata resistenza e rigidità della roccia -> comportamento elastico-fragile</i>)
TCR 6		Buckling o buckling failure: dilatazione, flessione e/o rottura per flessione di singole lastre o "pacchetti" di lastre sotto l'azione dello stress circonferenziale elevato, agente parallelo ai piani di stratificazione o di scistosità dell'ammasso, caratterizzati da un'alta persistenza, bassa spaziatura e orientamento (anche parzialmente) tangente al profilo di scavo (<i>elevato stato tensionale, media resistenza della roccia, ammasso con un'assetto strutturale sfavorevole causando spostamenti fortemente asimmetrici -> comportamento elasto-plastico; $ur_{tot\ asimmetrico} > 3\% R$</i>)
TCR 8	Instabilità del fronte: materiale di faglia con proprietà geotecniche di un terreno sciolto, drenato (<i>cachirite incoerente, subordinato fault gouge coesivo -> comportamento plastico di un mezzo continuo</i>)	Instabilità del cavo: materiale di faglia con proprietà geotecniche di un terreno sciolto, drenato (<i>cachirite incoerente, subordinato fault gouge coesivo -> comportamento plastico di un mezzo continuo; $ur_{tot} > 10\% R$</i>)
TCR 9	Instabilità del fronte: materiale di faglia con proprietà geotecniche di un terreno sciolto, saturo o semi-saturo, forti venute d'acqua e possibile dissoluzione di materiale fine (<i>cachirite incoerente, subordinato fault gouge coesivo -> comportamento plastico di un mezzo continuo</i>)	Instabilità del cavo: materiale di faglia con proprietà geotecniche di un terreno sciolto, saturo o semi-saturo, forti venute d'acqua, carico idraulico e carico d'ammasso elevatissimo sullo scudo (<i>fault gouge coerente, cachirite incoerente -> comportamento plastico di un mezzo continuo; $ur_{tot} > 10\% R$</i>)

Figura 5.2 - Definizione dei tipi di comportamento dell'ammasso roccioso per lo scavo con la TBM S-1054. Nota: ur_{tot} : spostamento radiale totale; R: raggio di scavo. [Egger, 2019]

5.2 Le modalità di scavo in condizioni non standard

L'analisi dei parametri macchina risulta di estrema importanza per poter classificare l'ammasso roccioso incontrato, va sottolineato però che per la valutazione del comportamento sono necessari ulteriori informazioni, provenienti indagini in avanzamento, rilievi geologici e prove in sito e di laboratorio. Come già descritto nel Cap.3, i rilievi geologici in uno scavo meccanizzato, vengono eseguiti durante le fasi di fermo della TBM, svolti per la normale manutenzione della macchina. Oltre le informazioni di carattere geologico ed idrogeologico, durante questi rilievi speditivi si procede anche con il calcolo degli indici RMR₈₉ e GSI, per una classificazione e stima qualitativa dell'ammasso roccioso, e ad una prima valutazione del comportamento dell'ammasso. Una volta ottenute tutte le informazioni utili ad individuare il comportamento di un ammasso, è possibile usare gli andamenti dei parametri macchina per poter realizzare delle interpolazioni tra queste misure puntuali. Inoltre, per incrementare le informazioni utili ad una classificazione in continuo dell'ammasso

roccioso con scavo meccanizzato, risulta utile analizzare le modalità di avanzamento della TBM. Il fresista, in condizioni di scavo non standard può procedere nei seguenti modi:

Scavo per mezzo del freno idraulico: modalità adottata quando l'ammasso risulta meno competente. In questo caso l'operatore impone una spinta maggiore ai cilindri inferiori, consentendo un avanzamento regolare della TBM secondo l'asse teorico dello scavo ed evitando così che la testa tenda ad inclinarsi verso il basso.

Passaggio da marcia II a marcia I: modalità adottata nel caso ci sia un improvviso aumento di materiale da smarinare, dovuto a problemi legati a fenomeni di instabilità del fronte. Il passaggio consiste nel passare da un'alta velocità di rotazione ed una bassa coppia ad una bassa velocità di rotazione ed un'alta coppia necessaria per poter proseguire con lo scavo.

Scavo mediante regrip parziale: modalità adottata nel caso in cui si è in presenza di un ammasso con comportamento spingente e/o di faglie minori oppure quando si registrano deviazioni dall'asse teorico o un allineamento non perfetto degli scudi. Il regrip parziale consiste nell'estendere lo scudo telescopico ad una minore lunghezza, rendendo la fresa più rigida e quindi più resistente, quest'operazione comporta la necessità di effettuare più estensioni per un avanzamento completo.

Scavo in modalità monoscudo (Single Shield TBM): modalità più restrittiva, la TBM doppio scudata viene usata in modalità monoscudo quando la qualità dell'ammasso risulta essere ancora più scadente (comportamento da mediamente a molto spingente, zona di faglia). In questo caso, come descritto nel Cap.3, l'avanzamento è possibile grazie alla spinta dei cilindri ausiliari che trovano contrasto nell'anello installato precedentemente. Nonostante questa modalità garantisca una mitigazione del rischio molto alta, l'avanzamento necessita di molto più tempo in quanto avviene in maniera alternata all'installazione dei conci.

5.3 Andamento dei parametri macchina per la zona I

Per poter analizzare i parametri macchina, in un primo momento è stato necessario raccogliere tutti i dati che vengono forniti dal consorzio BTC (Brenner Tunnel Construction), appaltatore dei lavori del lotto “Mules 2-3”. Tra le documentazioni richieste dalla Direzione dei Lavori (DL), sono inclusi i report di produzione delle TBM con cadenza giornaliera, il report relativo ai parametri macchina mediati per anello e i dati grezzi con frequenza di registrazione ogni 3 sec, nonché del report in cui sono rappresentati i dati relativi ai parametri di scavo, alle celle di pressione e ai fontimeters (martinetti) con cadenza settimanale. Di questi dati la DL dispone già un’elaborazione dei parametri delle tre frese mediati ad anello per il tratto studiato, mentre per quanto riguarda l’utilizzo dei dati grezzi per la rappresentazione dell’andamento delle celle di pressione e dei fontimeters si rimanda al Cap.5.4.

Dovendo analizzare una tratta di 3 km scavata da tutte e tre le TBM e quindi una grande mole di dati (riferiti ad un totale di 9 km), si è deciso di considerare per le misure registrate in zona I, i dati mediati ad anello. Dunque, si riportano dalla fig. 5.3 alla fig. 5.9 il confronto dei parametri delle tre DS-TBM più significativi, utili all’analisi geomeccanica. Si nota subito come gli andamenti di alcuni parametri, quali spinta (fig.5.3), coppia (fig.5.4), velocità di rotazione (fig.5.5) ed energia specifica di scavo (fig.5.6) siano soggetti ad un effetto scala macchina ed alle modalità di scavo adottate dal fresista (fattore uomo), descritto ampiamente nel Cap.4. Inoltre, si può notare come i tipici andamenti dei parametri delle tre TBM non coincidano perfettamente e spesso si discostino, nonostante le gallerie siano non troppo distanti fra loro (l’interasse tra le due canne principali è variabile dai 40 ai 70 m, mentre il cunicolo è posto in posizione e ad una quota inferiore di 12 m), in quanto l’andamento delle unità stratigrafiche e delle faglie attraversate rispetto all’asse delle gallerie (che nella tratta indagata sono rettilinee con direzione N 353°) possono variare da sub-verticale ad obliquo, così come il loro spessore (effetto ammasso).

Per ogni galleria, le tratte analizzate sono state scavate in periodi diversi, così distribuiti:

Galleria di Linea Nord Ovest (GLON)

- da pk 45+918 a pk 42+580 (26/06/2019 – 17/06/2020).

Galleria di Linea Nord Est (GLEN)

- da pk 45+956 a pk 42+618 (02/08/2019 – 01/03/2020).

Cunicolo Esplorativo (CE)

- da pk 13+346 a pk 16+646 (19/06/2018 – 25/02/2019).

La discrepanza dei tempi tra le due Gallerie di Linea è causata dal fermo che ha interessato la GLON nei mesi di gennaio e febbraio 2020 alla pk 43+176,25, questo ha portato all'avanzamento più celere della GLEN. Va anche aggiunto che tutti e tre gli scavi sono stati sospesi dal 14/03/20 al 18/05/20 per effetto della sospensione delle attività del cantiere imposta dal COVID-19.

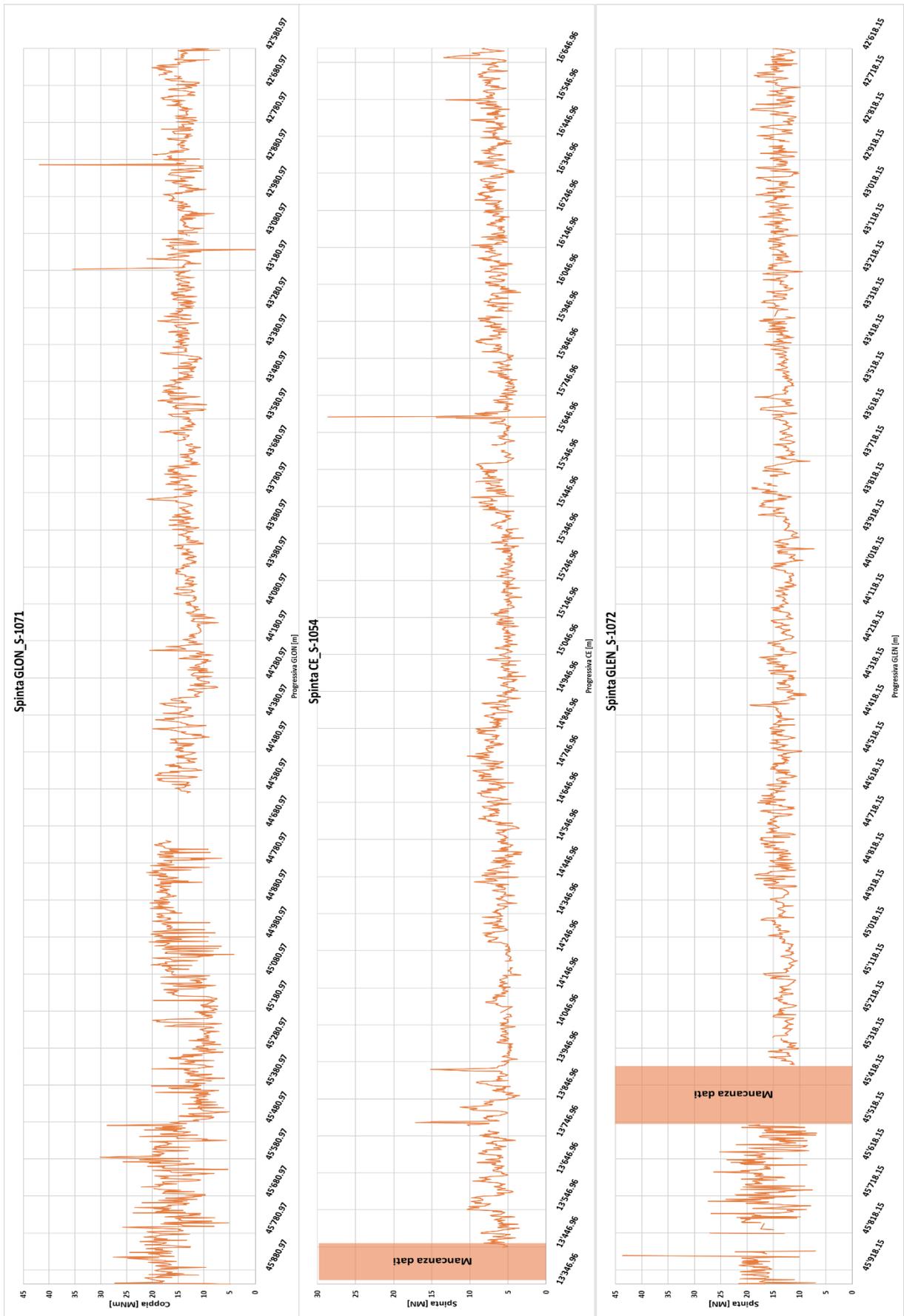


Figura 5.3 - Confronto dell'andamento della spinta dei cilindri principali per le tre frese nella tratta investigata (direzione Innsbruck).

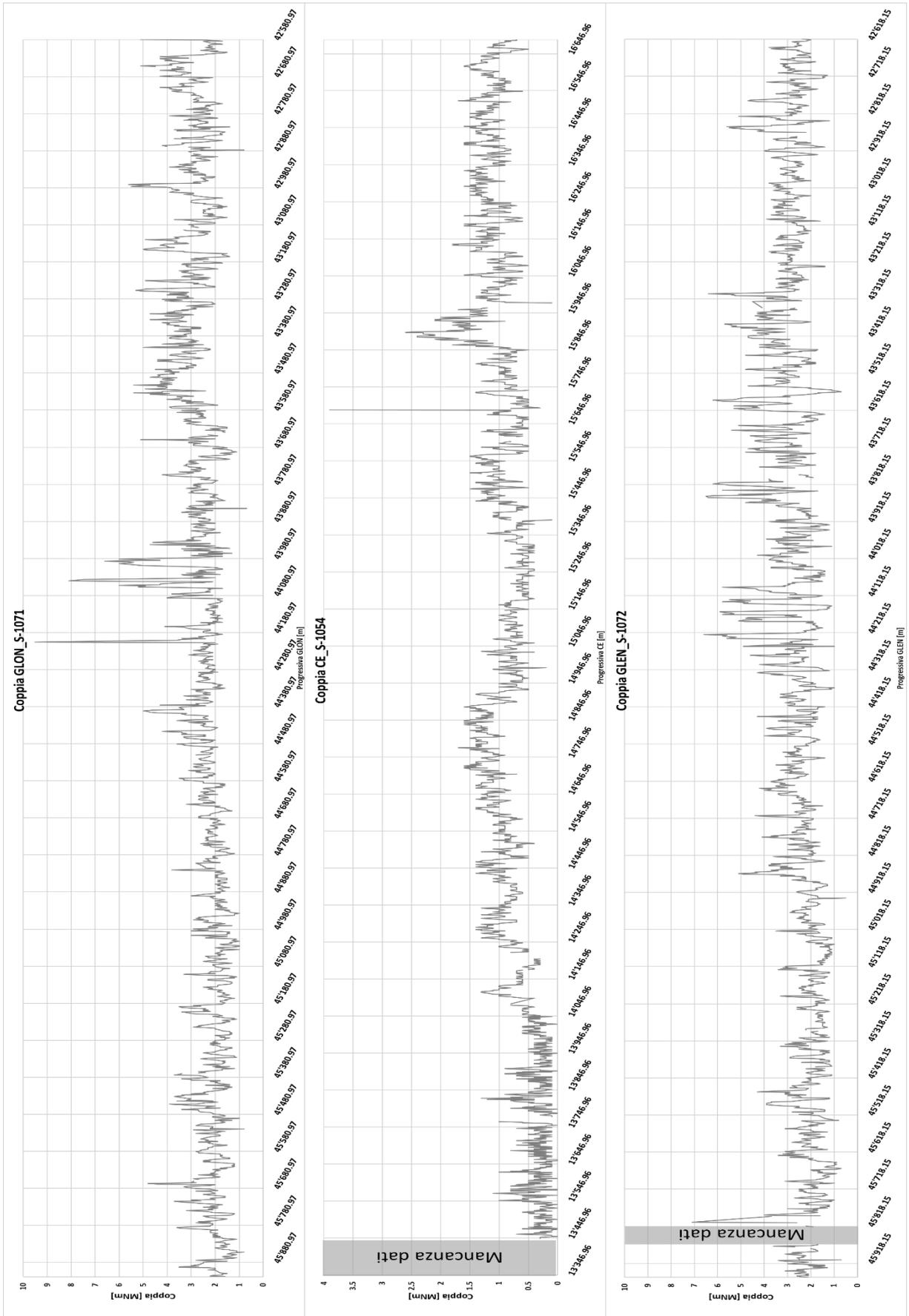


Figura 5.4 – Confronto dell' andamento della coppia per le tre frese nella tratta investigata (direzione Innsbruck).

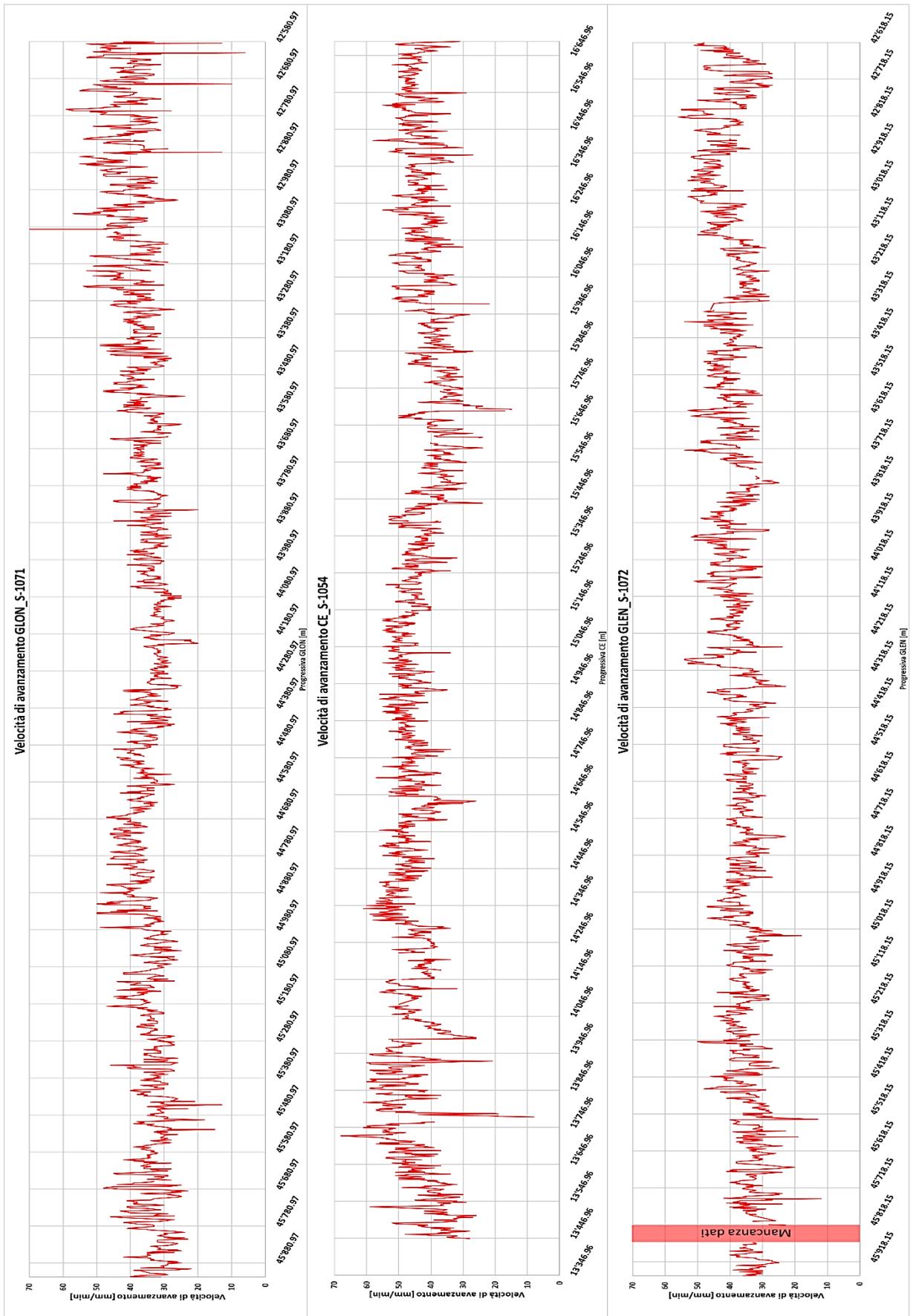


Figura 5.5 - Confronto dell'andamento della velocità d'avanzamento per le tre frese nella tratta investigata (direzione Innsbruck).

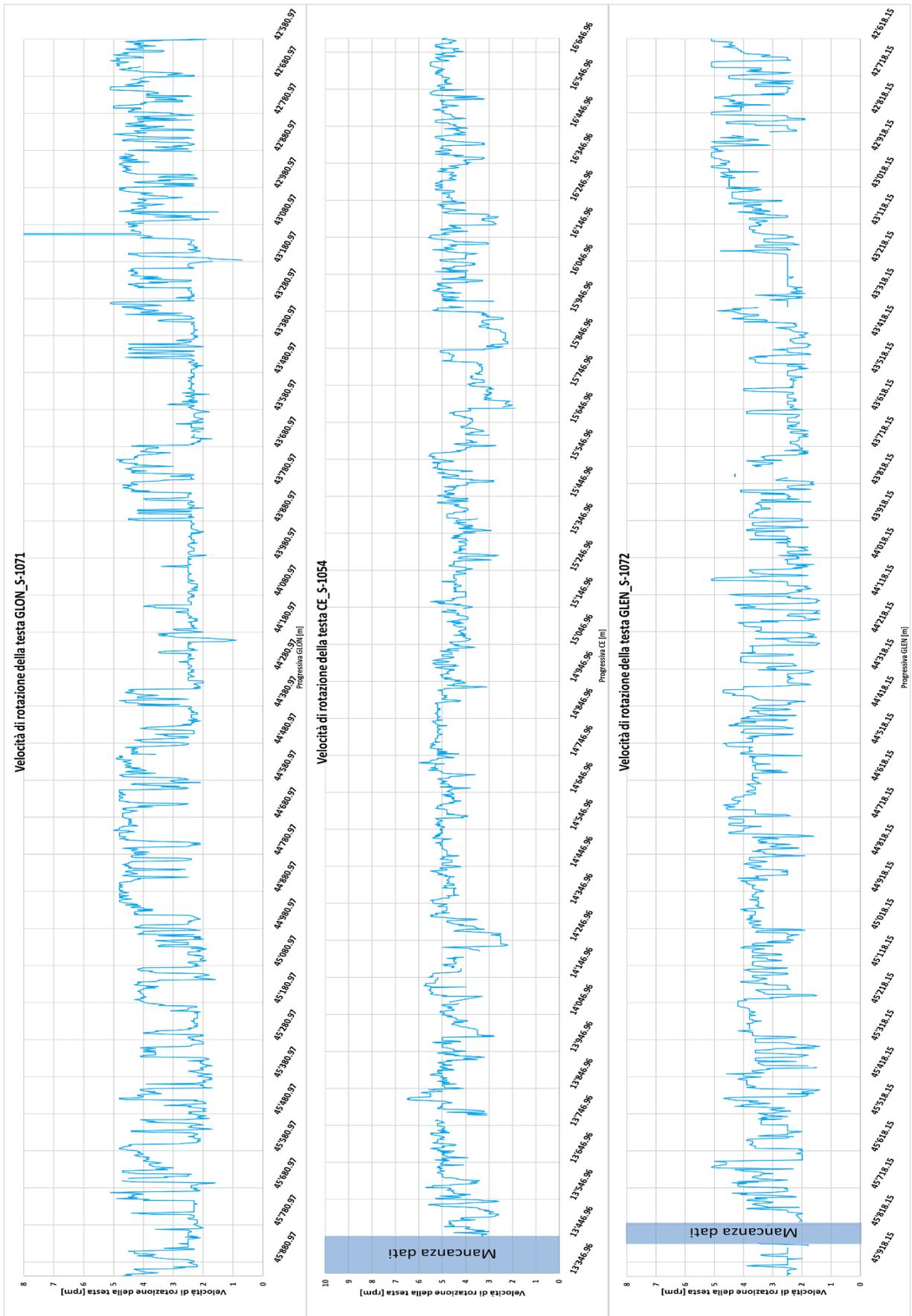


Figura 5.6 - Confronto dell'andamento della velocità di rotazione della testa per le tre frese nella tratta investigata (direzione Innsbruck).

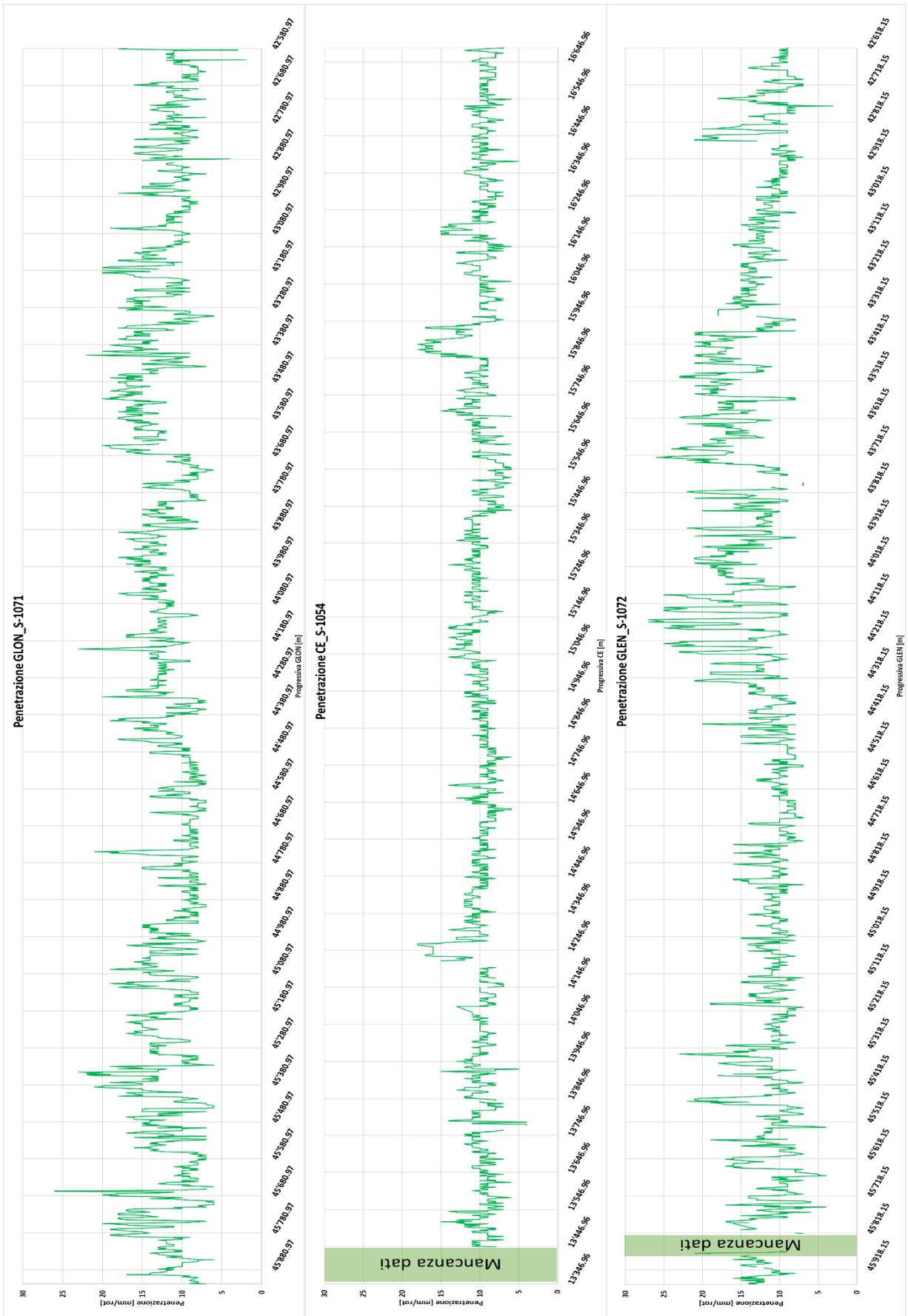


Figura 5.7 - Confronto dell'andamento della penetrazione per le tre frese nella tratta investigata (direzione Innsbruck).

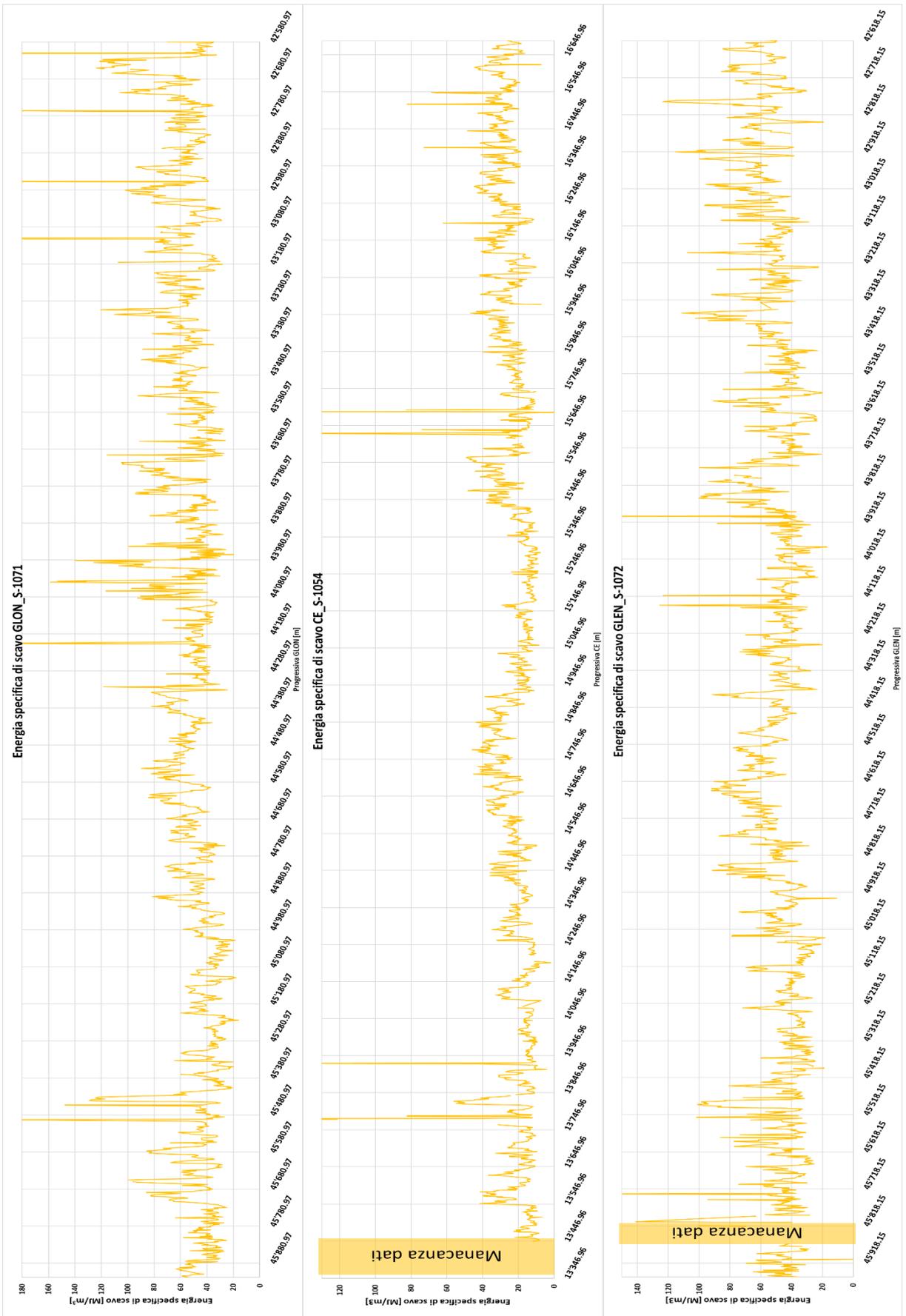


Figura 5.8 - Confronto dell'andamento dell'energia specifica di scavo per le tre frese nella tratta investigata (direzione Innsbruck).

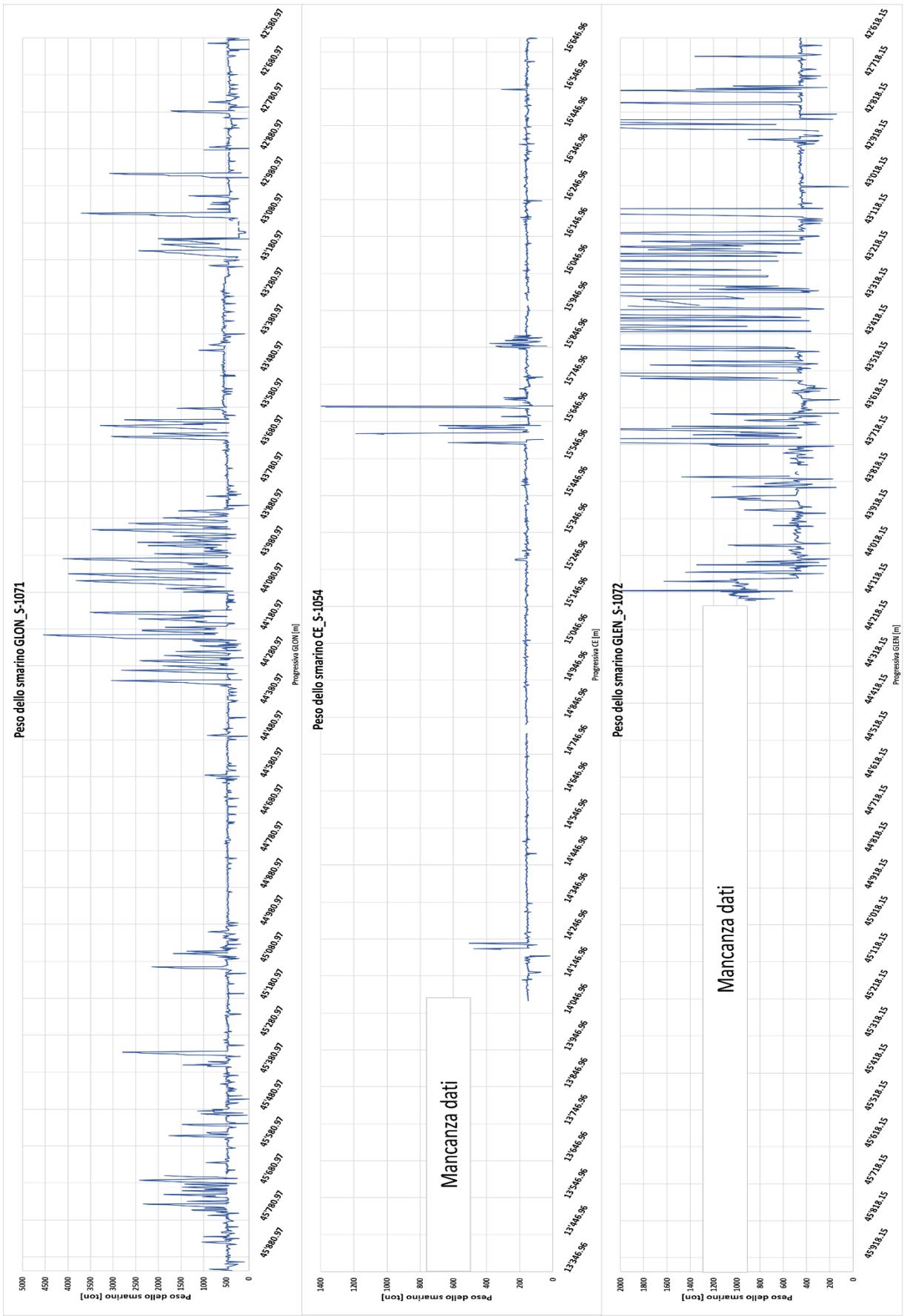


Figura 5.9 - Confronto dell'andamento del peso dello smerino per le tre frese nella tratta investigata (direzione Innsbruck).

5.4 Andamento delle misure di monitoraggio in zona II

Per una valutazione più precisa della tratta, all'analisi dei parametri registrati nella zona I della TBM, si aggiungono le valutazioni sui dati di monitoraggio della zona II. In particolare, sono stati analizzati i dati delle celle di pressione e l'estensione dei fontimeters (Capitolo 3).

L'analisi dei dati delle celle di pressione è stata resa possibile grazie alla creazione di un foglio di calcolo "Excel", basato su linguaggio "Visual Basic", tramite il quale sono state create delle "macro" necessarie al filtraggio dei dati input. Partendo da registrazioni ogni 3 sec, il file macro permette di poter considerare una serie di filtri simultanei che permettono di snellire le informazioni e considerare solo le più rappresentative. Per quanto riguarda le celle di pressione, l'operazione di filtraggio dei dati grezzi riguarda la selezione delle registrazioni effettuate (ogni 3 sec) soltanto durante lo scavo della TBM, per poi essere snelliti a valori medi al minuto. La creazione del foglio in macro è dettata dalla necessità di abbreviare i tempi di analisi, in quanto le informazioni di input sono racchiuse in formato giornaliero in file excel di circa 30mila righe. Si riporta in fig.5.10 l'andamento delle misure delle celle di pressione, al fine di considerare le misure che possano definire un comportamento spingente dell'ammasso sul cavo, si sceglie di diagrammare solamente valori superiori ai 3 bar: queste sono risultate determinanti per intuire la tendenza della chiusura del cavo e di conseguenza per definire il livello del rischio di comportamento spingente (squeezing) dell'ammasso.

Per quanto riguarda i fontimeters, è stato creato un codice differente. Tali strumenti a differenza delle celle di pressione, andrebbero azionati manualmente dall'operatore in più istanti di tempo, alle progressive corrispondenti ad inizio e fine di ciascun scavo e durante i periodi di fermo, restituendo così dei dati puntuali. I file grezzi purtroppo non restituiscono direttamente questa informazione, per cui è stato necessario implementare una macro, basata su un ulteriore codice di calcolo (sempre in *Visual Basic*). Il codice effettua un'operazione di filtraggio dei dati, permettendo di ottenere diversi scenari, può restituire i valori alle progressive di inizio e fine scavo, i valori massimi per anello (con progressiva annessa), ed i valori mediati nel tempo (ogni 60"). Al fine di poter dare informazioni sull'ammasso roccioso in una tratta abbastanza estesa, si è optato per l'utilizzo dei massimi valori puntuali ad anello, rappresentandoli poi in funzione delle progressive di riferimento in cui è avvenuta realmente la registrazione. Inoltre, all'interno

di tali diagrammi viene inserito il cosiddetto gap teorico, che consiste nella distanza tra scudo e roccia scavata. Secondo le informazioni del consorzio *BTC*, il gap teorico nella zona dello scudo frontale è pari a 50 mm per le due Gallerie di Linea e 40 mm per il Cunicolo Esplorativo, inoltre per il solo Cunicolo viene fornito anche il gap teorico sul gripper shield, pari a 115 mm (data la presenza dei fontimeters 3 e 4, non attivi sulle Gallerie di Linea). In tutte e tre le canne sono stati registrati anche picchi di 220-250 mm, quest'ultimo è il valore di fondoscala dei martinetti. Questi picchi locali danno informazioni importanti come la presenza di un sovrascavo e/o la formazione di una cavità da “fornello”, invece se la misura risulta inferiore al gap teorico può significare che l'ammasso abbia un comportamento spingente. Si riporta dunque l'andamento delle misure puntuali, relative ai martinetti, in fig.5.11.

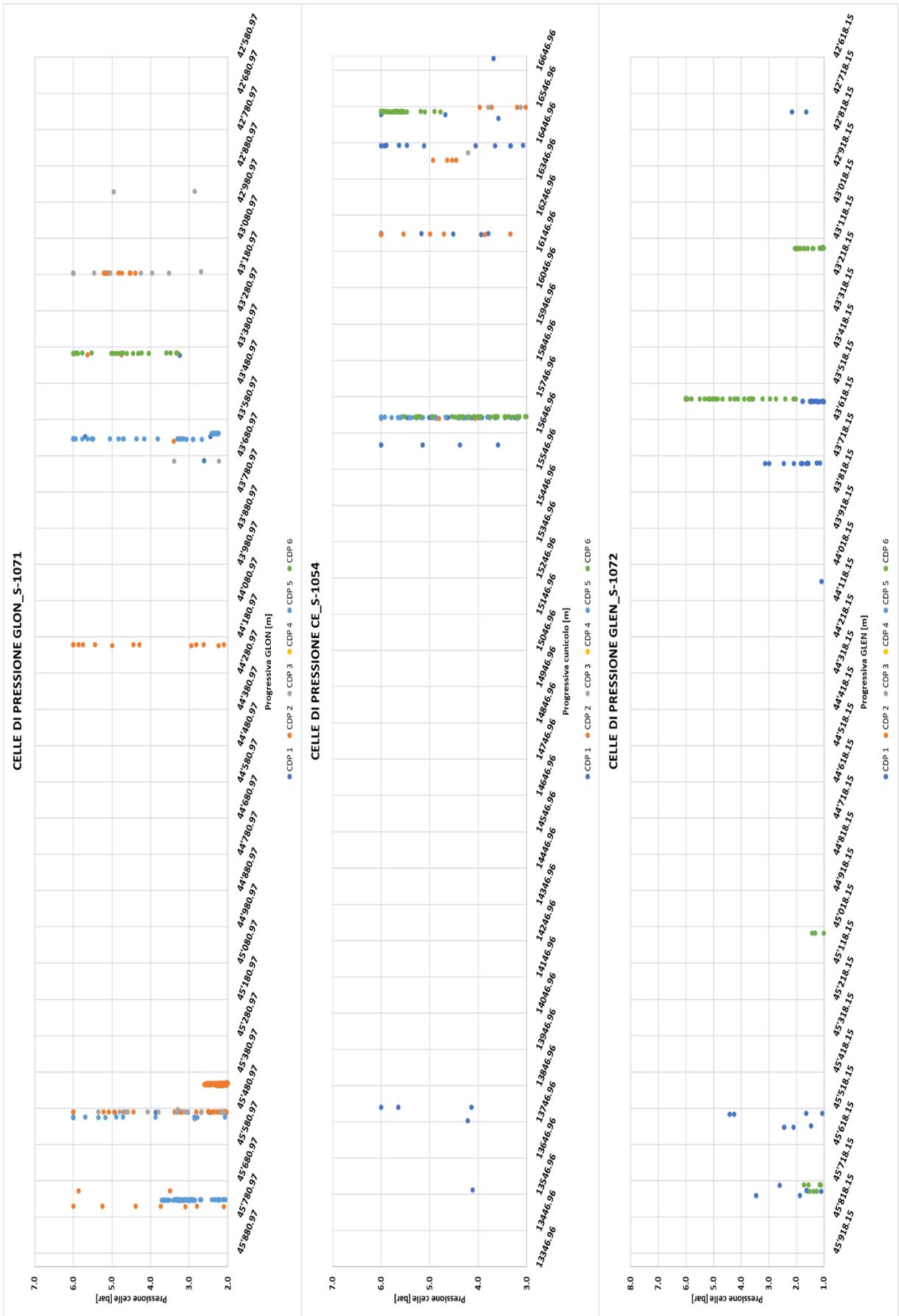


Figura 5.10 - Confronto dell'andamento delle misure delle celle di pressione per le tre frese nella tratta investigata.

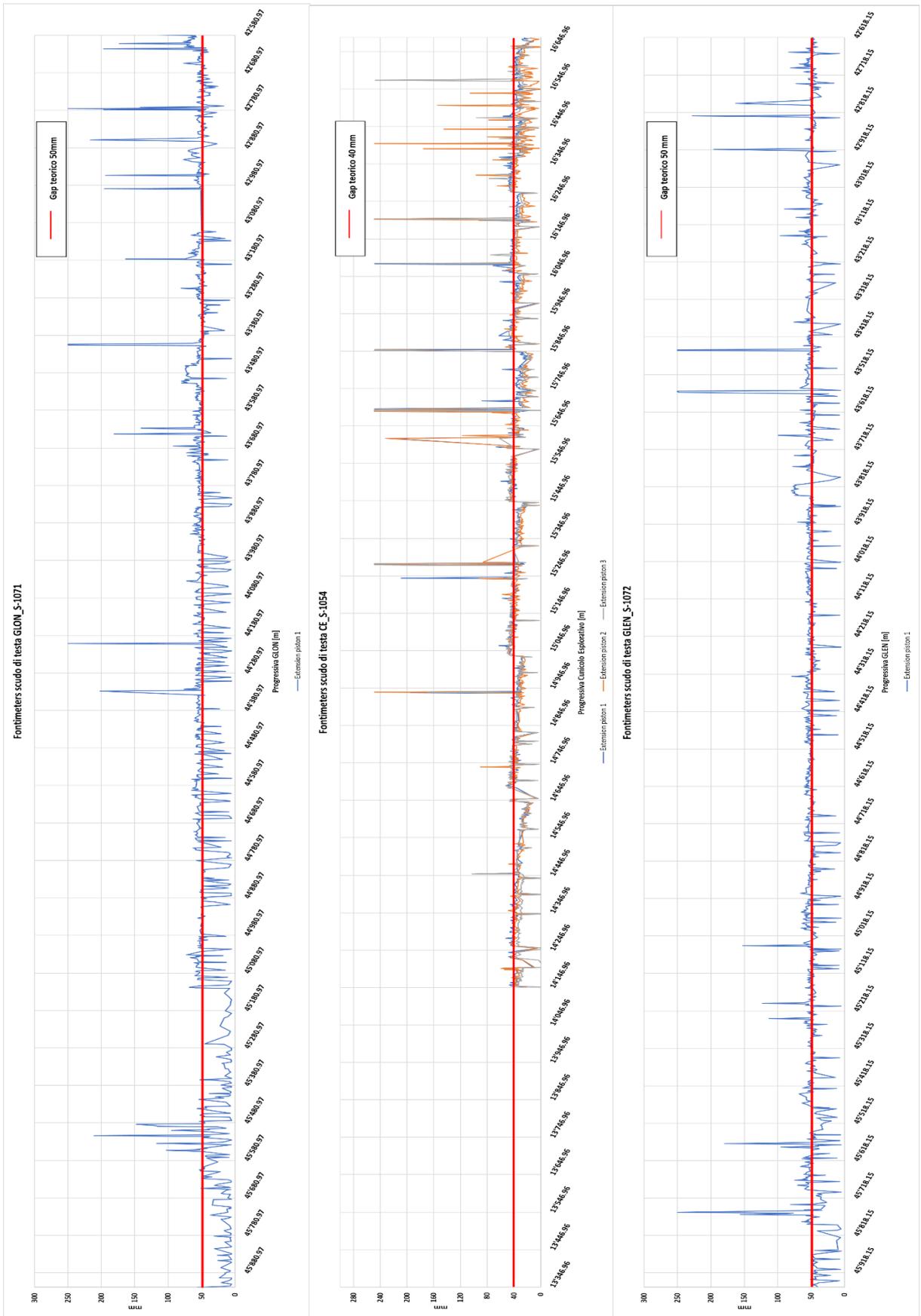


Figura 5.11 - Confronto dell'andamento delle misure dei fontimeters per le tre frese nella tratta investigata.

5.5 Correlazione tra le misure

La parte centrale del capitolo tratta l'analisi geomeccanica dei parametri macchina e la correlazione di questi con il comportamento dell'ammasso roccioso incontrato durante lo scavo, nella tratta indagata. Nei paragrafi successivi verranno descritti gli andamenti generici tra i parametri misurati nelle zone I e II delle DS-TBM, al termine delle analisi verrà creato un abaco di riferimento per le due Gallerie di Linea ed un aggiornamento di quello già esistente riferito al Cunicolo Esplorativo.

5.5.1 Andamenti tipici dei parametri macchina principali

Al fine di poter effettuare un'analisi più approfondita ed osservare come la variazione del trend di un parametro possa influenzarne altri, alcuni KPI sono stati diagrammati insieme: coppia [MNm] e spinta dei cilindri principali [rpm] (fig.5.12), velocità di avanzamento della testa [mm/rot] e velocità di rotazione della testa [rpm] (fig.5.13), penetrazione [mm/min] ed energia specifica di scavo [MJ/m³], queste ultime due misure vengono diagrammate insieme in quanto hanno un trend opposto (fig.5.14).

Dall'analisi di tali andamenti combinati è possibile individuare tratti con “scavo regolare”, “irregolare” e con “scavo eccezionale”. Nei primi due casi, la DS-TBM avanza in “marcia 2”, ossia ad una bassa coppia si associa un'alta velocità di rotazione alla testa. Nello *scavo regolare* in realtà i valori oscillano parecchio entro un certo range, associabile al tipo di comportamento TCR 1 e TCR 2. In presenza di ammassi più fratturati o meno consistenti con disposizione a distacchi di blocchi e/o con una leggera componente spingente, nonostante si mantenga la marcia 2, si parla di *scavo irregolare*, in questo caso si nota una diminuzione di coppia, spinta, energia specifica ma un cospicuo aumento di penetrazione e velocità di avanzamento con rotazione della testa all'incirca costante. In tale caso interviene spesso il fresista, abbassando la rotazione della testa per tenere sotto controllo la velocità di avanzamento che sta aumentando.

In zone più circoscritte, a causa delle proprietà scadenti dell'ammasso, ossia in presenza di materiale poco consistente e/o di faglie, il fresista è costretto a reagire passando dalla marcia 2 alla marcia 1, questo comporta una diminuzione drastica della velocità di rotazione legato ad un incremento di coppia e di spinta, l'aumento di quest'ultimo parametro dipende dalla determinazione del fresista a passare la zona di disturbo

impiegando o meno la massima forza disponibile. La necessità del cambio di marcia è dovuto al notevole aumento del volume di materiale che può sovraccaricare il nastro e/o può cedere sopra la testa della TBM, portando nel caso estremo al blocco della testa (per raggiungimento del limite di coppia) e di conseguenza al fermo della fresa. In questo caso si parla, dunque, di *scavo eccezionale*, i valori di coppia possono raggiungere picchi molto alti, maggiori di 2 MNm per la S-1054 e di 6 MNm per le S-1071/S-1072.

In presenza di ammassi più compatti, si osserva (fig.5.12) un incremento di spinta da parte dei cilindri principali associato ad un aumento di coppia e ad una riduzione di rotazione alla testa (per evitare consumi più elevati dei *cutters*), questo è dovuto al maggiore sforzo che la testa fresante nel processo di scavo deve impiegare per l'elevata resistenza e rigidità della matrice di roccia e del basso grado di fratturazione. Tale scenario viene confermato anche da un incremento di energia specifica e da una diminuzione di penetrazione (fig.5.14).

Si riporta in tabella 5.2 il riepilogo dei trend generali dei diversi parametri, tenendo conto della tipologia di scavo adottata.

	Marcia	Rotazione testa [rpm]	Spinta [MN]	Coppia [MNm]	Velocità d'avanzamento [mm/min]	Energia specifica [MJ/m ³]
Scavo regolare	II	Valori oscillanti, si faccia riferimento ai TCR 1 e TCR 2 presenti nelle tabelle 5.4 e 5.5				
Scavo irregolare	II	↓	↓	↓	↓ ↑	↓
Scavo eccezionale	I	↓	↑	↑	↓	↑

Tabella 5.2 – Trend dei principali KPI in funzione della tipologia di scavo.

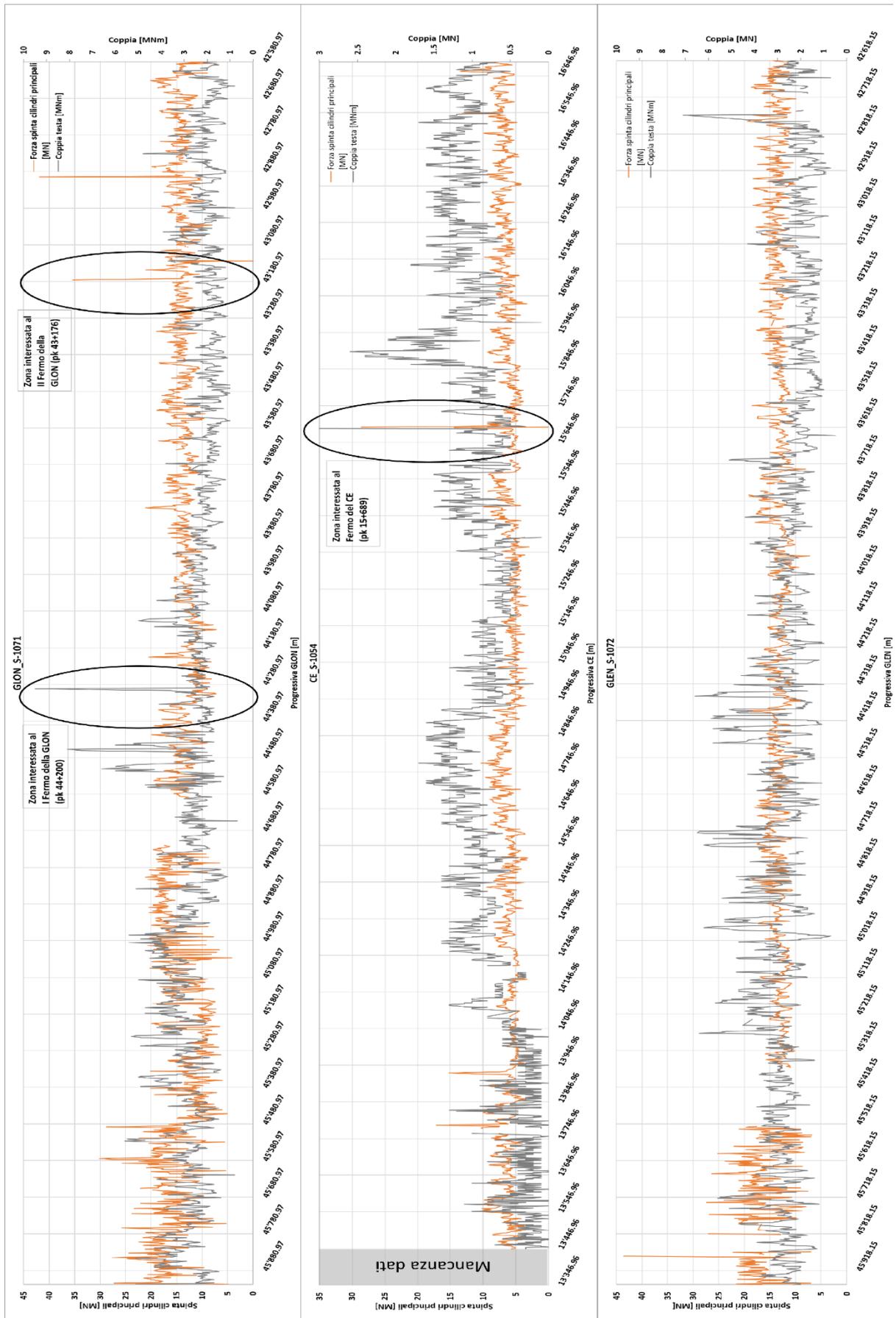


Figura 5.12 - Confronto dell'andamento delle misure di spinta cilindri principali/coppia per le tre frese nella tratta investigata. (Cerchiati i tre fermi più significativi)

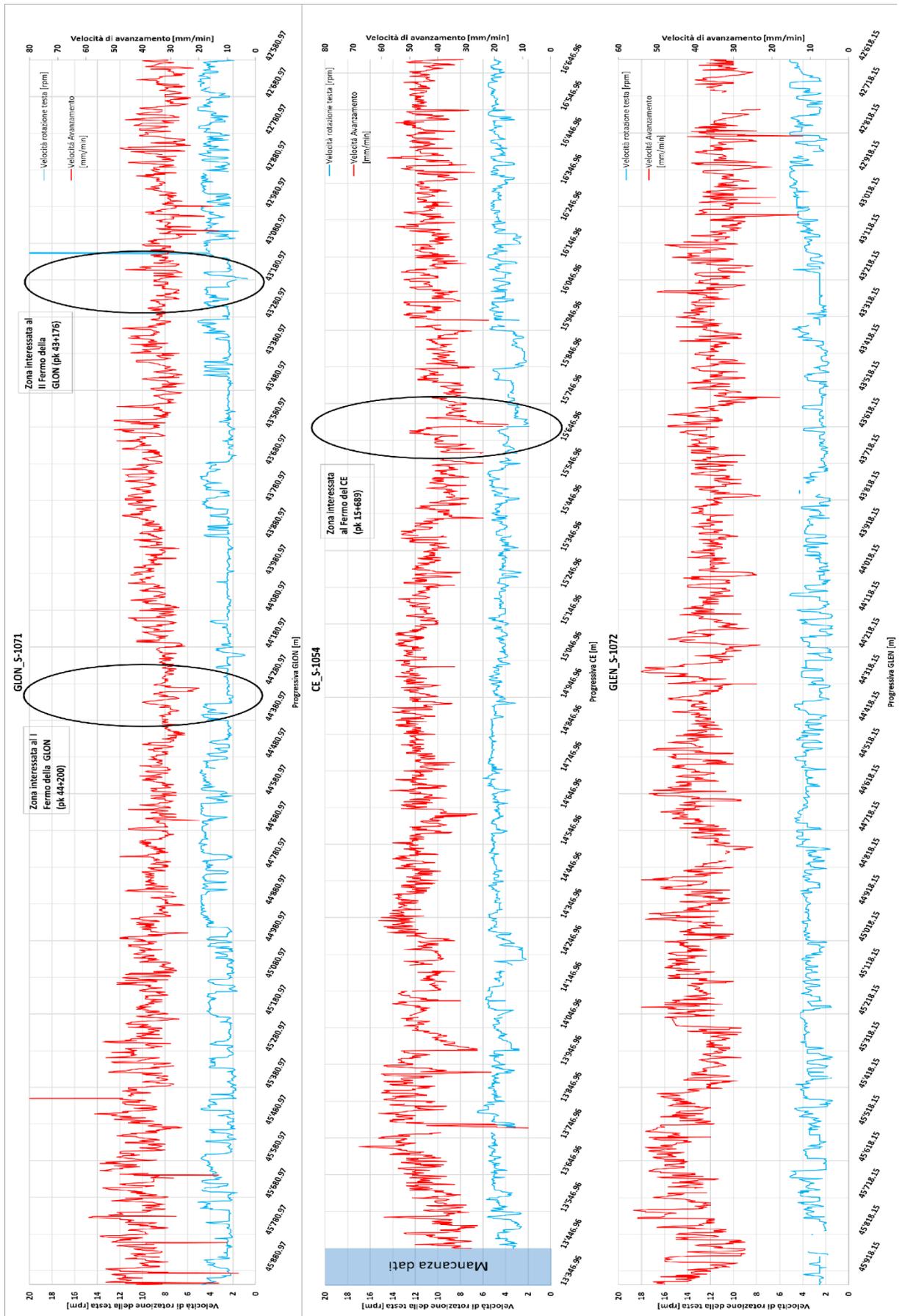


Figura 5.13 - Confronto dell'andamento delle misure di velocità di rotazione/velocità di avanzamento per le tre frese nella tratta investigata. (Cerchiati i tre fermi più significativi)

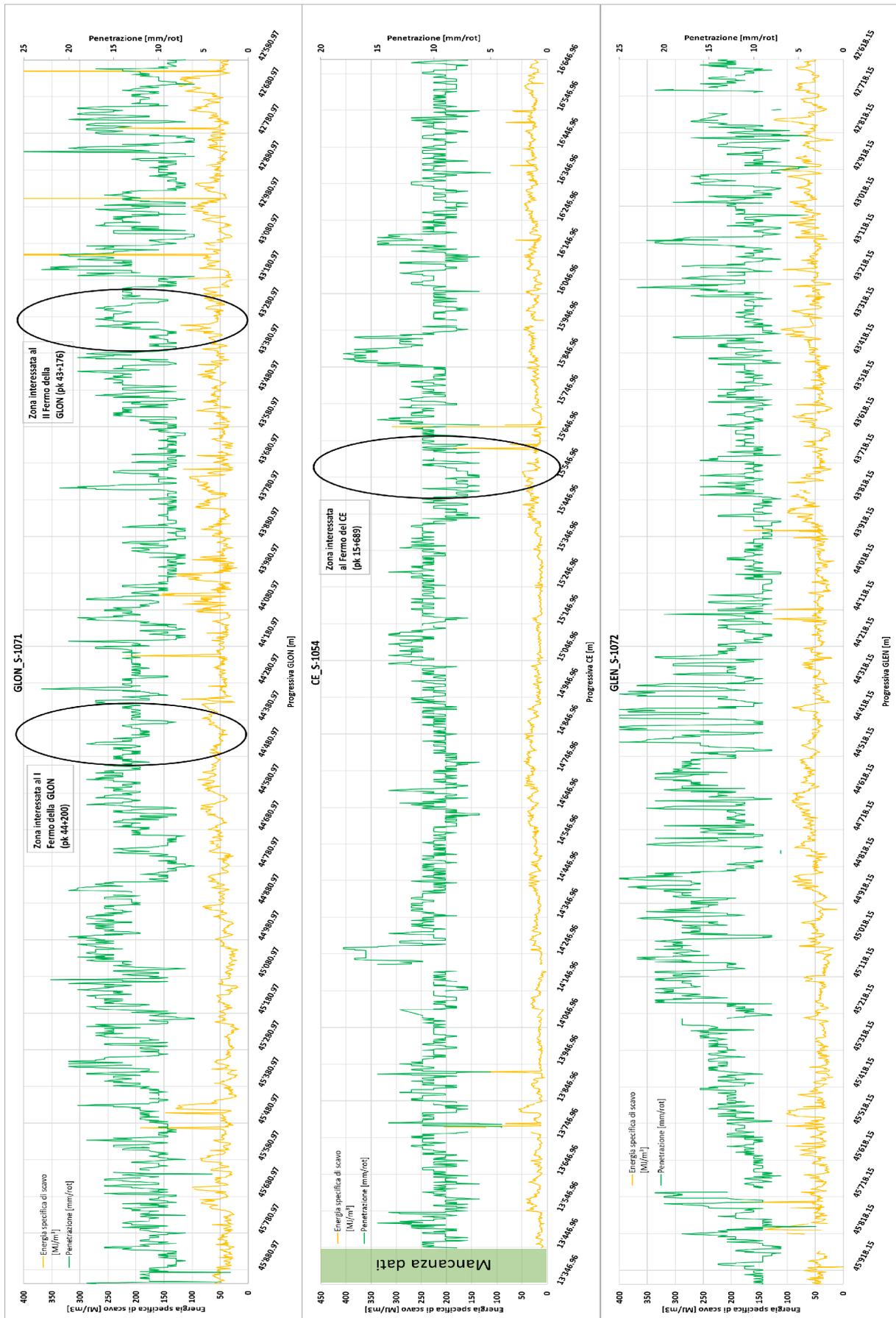
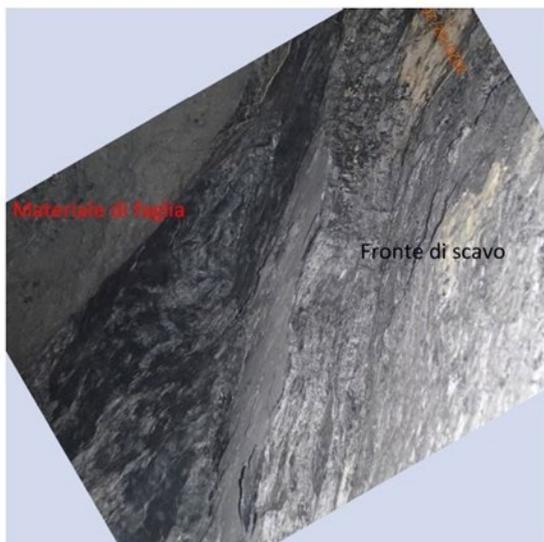


Figura 5.14 - Confronto dell'andamento delle misure di energia specifica/penetrazione per le tre frese nella tratta investigata. (Cerchiati i tre fermi più significativi)

5.5.2 Esempio di analisi dei KPI per la valutazione dell'instabilità del fronte e del comportamento spingente dell'ammasso sul cavo: Fermo della TBM S-1071 alla pk 43+176,25.

Nel mese di gennaio 2020, la TBM S-1071 "Flavia" ha subito un importante fermo dell'avanzamento per 39 giorni. Tale evento risulta essere di particolare interesse dal punto di vista geotecnico, in quanto sia il Cunicolo Esplorativo, che ha una funzione previsionale, sia la GLEN non hanno subito alcun tipo di rallentamento intorno alla progressiva in cui è avvenuto il fermo della GLON. In tale sede si vuole approfondire l'analisi dei parametri macchina al fine di individuare, se presenti, anomalie nel trend dei parametri che possano in futuro aiutare gli operatori ed i tecnici specializzati a prevedere, ove possibile, problemi di questo genere, al fine di mitigarne il rischio e procedere in maniera più speditiva con l'avanzamento del fronte.

La TBM si è arrestata alla pk 43+176,25 (progressiva GLON) a causa dell'instabilità del fronte di scavo, dovuto alla presenza di materiale di faglia del tipo sciolto (breccia di faglia quasi privo di coesione, fig.5.15 e 5.16) che aveva riempito la testa di scavo, superando in tale modo il torque massimo installato. Al fine di ottenere un'analisi più approfondita è stato analizzato un tratto di circa un chilometro (pk 43+918,87 – pk 42+580,97) interessato anche da un fermo della S-1054 che scava il CE, quest'ultimo causato dalla presenza della faglia S15 alla pk 15+688 (progressiva CE).



Note / Bemerkungen

Sulla parte destra si vede il fronte di scavo che è diviso con un piano liscio del materiale di faglia a sinistra

Figura 5.15 - Foto n.1 del materiale di faglia ripreso durante il rilievo geologico n.214 - fermo GLON [Skuk, 2020]



Note / Bemerkungen

Piano nerastro parallelo al fronte di scavo che divide l'ammasso intatto sulla parte destra con il materiale di faglia sulla parte sinistra

Figura 5.16 – Foto n.2 del materiale di faglia ripreso durante il rilievo geologico n.214 - fermo GLON [Skuk, 2020]

Dopo il fermo della TBM si è proceduto allo svuotamento del materiale dalla testa, per poi effettuare iniezioni di schiume poliuretaniche di riempimento sul fronte ed in calotta (tampone). Dopodiché sono stati eseguiti degli interventi di consolidamento sul contorno e sul fronte attraverso lo scudo posteriore e frontale mediante tubi auto perforanti in vetroresina (VTR) del tipo manchette ed iniezione con cemento micro-fino. In seguito, lo sbloccaggio della TBM è avvenuto tramite la tecnica dell'*idrodemolizione* attraverso fori presenti sul front shield.

Come rappresentato in fig. 5.17, dalla pk 43+525 alla pk 43+280 sono stati registrati valori anomali della coppia che fanno pensare ad una modalità di scavo irregolare. A conferma di tale scenario, in fig.5.18 si registrano valori altalenanti della velocità di rotazione, mentre qualche metro prima della progressiva in cui è avvenuto il fermo, tali grandezze subiscono un brusco decremento associato ad un aumento di penetrazione, sottolineando la ridotta consistenza dell'ammasso incontrato. Nonostante il peso dello smarino sia un parametro chiave nella valutazione dell'ammasso, prima del fermo non sono state registrate evidenti anomalie (fig.5.20), i valori si sono mantenuti intorno alla media. Infatti, dai dati analizzati si nota che il peso dello smarino medio si attesta intorno alle 500 tonnellate, mentre nelle zone subito dopo al fermo della TBM, si raggiungono picchi notevoli anche superiori alle 2000 tonnellate, sottolineando la presenza di una grande quantità di materiale nella testa di scavo. Bisogna tenere in conto che successivamente alla pk 43+176,25 sono state adottate modalità di scavo per mezzi regrip, che spesso comportano letture esagerate dello smarino. Un altro parametro chiave di

notevole interesse è l'energia specifica di scavo, una sua analisi ci permette di capire quanta difficoltà la macchina ha incontrato nell'attraversare un determinato ammasso roccioso. In fig.5.19 si può notare come effettivamente ci siano diverse zone in cui la TBM ha dovuto impiegare una notevole quantità di energia, come ad esempio tra la pk 42+780 e la pk 42+580 in cui si nota un trend crescente.

Per quanto concerne le misure di monitoraggio riferite al cavo, non si registrano importanti anomalie in quanto la causa che ha generato il fermo non è tanto da ricercare nell'eccessivo attrito tra scudi e roccia scavata ma in un cedimento del materiale sulla testa di scavo dovuto all'instabilità del fronte di scavo ed alla conseguente formazione di un fornello in calotta. La severità del fenomeno verificatosi nella GLON potrebbe anche essere connessa all'intersezione di due strutture di faglia (di cui una quasi perpendicolare e l'altra in maniera obliqua con l'asse) in corrispondenza della pk del fermo. Ciò spiegherebbe anche il fatto che la fresa piccola del cunicolo e la fresa grande della GdL hanno superato la zona in esame senza problemi.

Nonostante ciò sono stati registrati picchi concentrati nelle misure delle celle di pressione (fig.5.22), con valori da 2 a 6 bar, dalla pk 43+690 alla pk 43+616 ossia nella zona che ha interessato il fermo del CE (segnato in nero alla progressiva pk 43+560 nelle seguenti figure e corrispondente alla pk relativa 15+688) e nella zona circostante al fermo della GLON, in cui potrebbero esserci fenomeni di squeezing con TCR 4. Sono stati registrati anche picchi locali, alla pk 43+397 e alla pk 42+952, che potrebbero indicare la presenza di fenomeni d'instabilità del cavo limitati (TCR 3). Inoltre, in tali tratti le letture del fontimeter numero 1 (fig.5.21) sono minori di 40 mm e quindi inferiori al gap teorico proposto da BTC, il gap si riduce di circa 20 mm. Nonostante queste supposizioni, la S-1071 non ha avuto problemi nel procedere, come conferma anche la velocità di avanzamento che si mantiene con un trend pressoché costante in tutta la tratta, si ricordi quanto il fattore tempo sia importante e fortemente correlato al rischio di *squeezing*.

Per quanto concerne la zona interessata alla faglia S15 (rif. Allegato da 1 a 5), le Gallerie di Linea sono riuscite a passare senza problematiche in quanto dal cunicolo esplorativo e dalle indagini in avanzamento mirate, erano note le caratteristiche geometriche e geomeccaniche e quindi l'intersezione di tale zona di faglia con le canne principali. Ciò ha permesso di reagire in anticipo, infatti impiegando in parte interventi di preconsolidamento in calotta ed in parte le modalità di scavo, ampiamente descritti nei capitoli precedenti, quali mezzi-regripping eventualmente con l'impiego del freno

idraulico in maniera continua (la velocità di avanzamento è determinante), le interruzioni sono state ridotte al minimo.

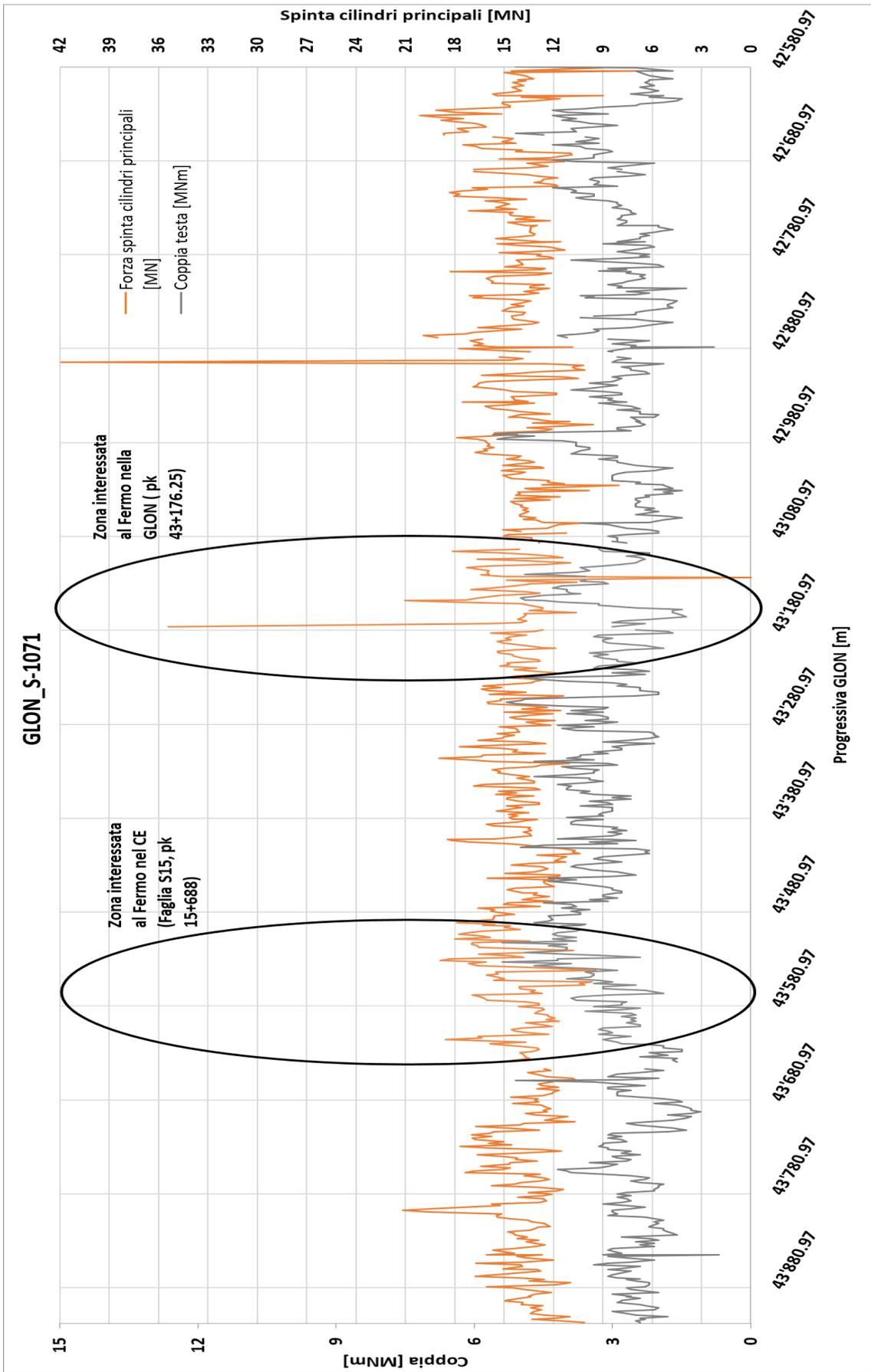


Figura 5.17 - Andamento di spinta e coppia della S-1071 per la tratta da pk 43+918 a pk 42+580.

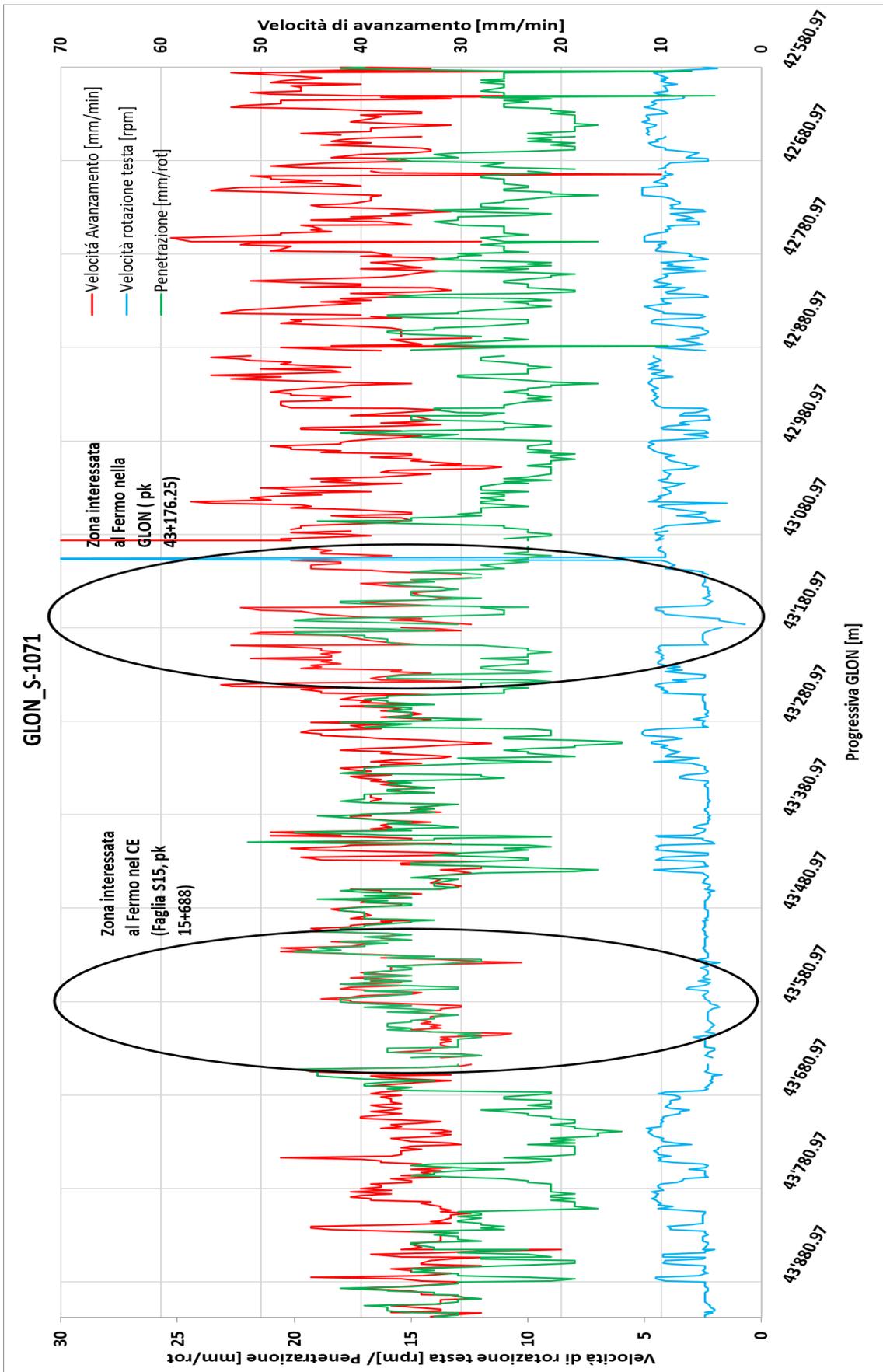


Figura 5.18 - Andamento di velocità di avanzamento, velocità di rotazione e penetrazione della S-1071 per la tratta da pk 43+918 a pk 42+580.

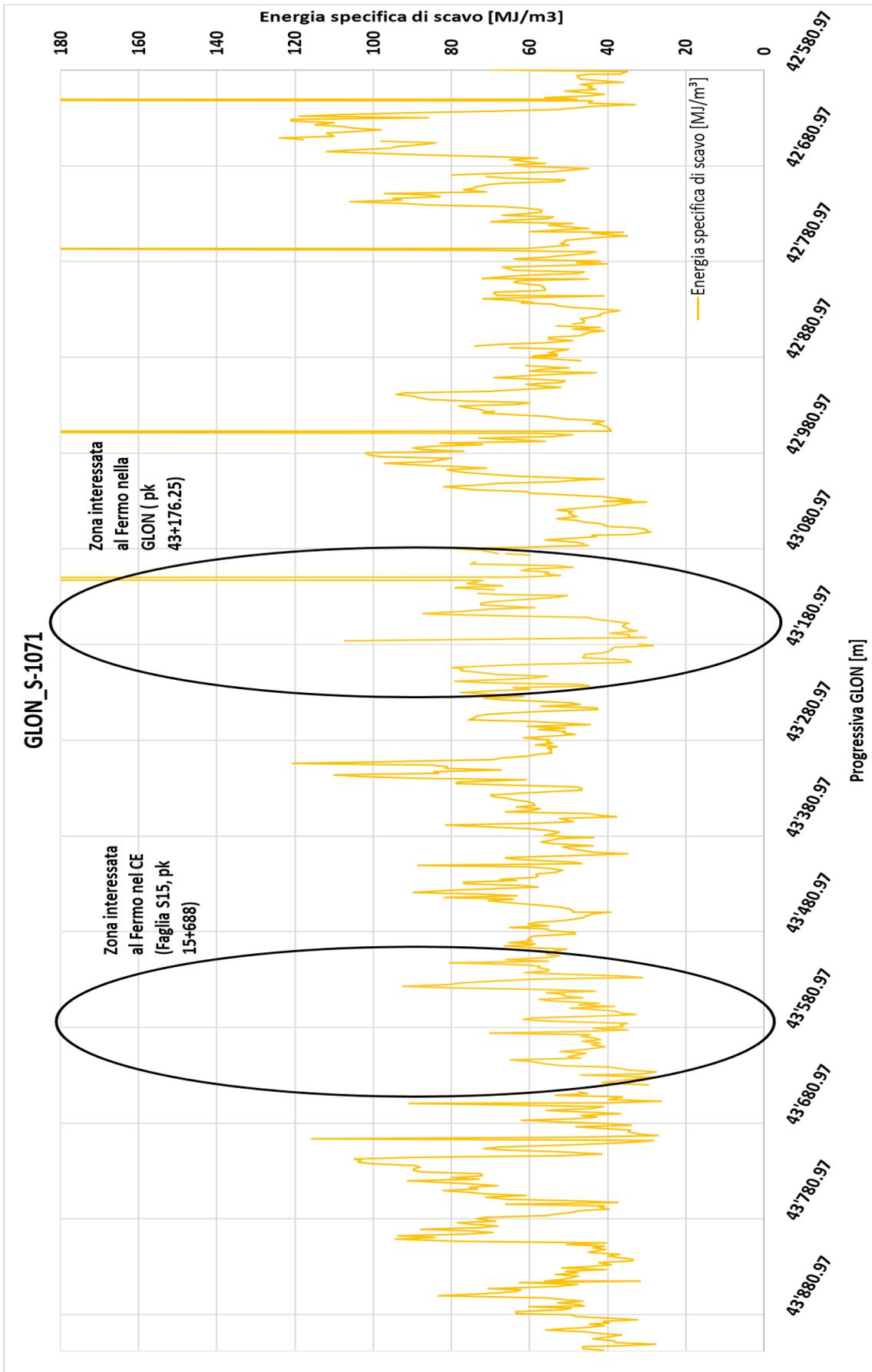


Figura 5.19 - Andamento dell'energia specifica di scavo della S-1071 per la tratta da pk 43+918 a pk 42+580.

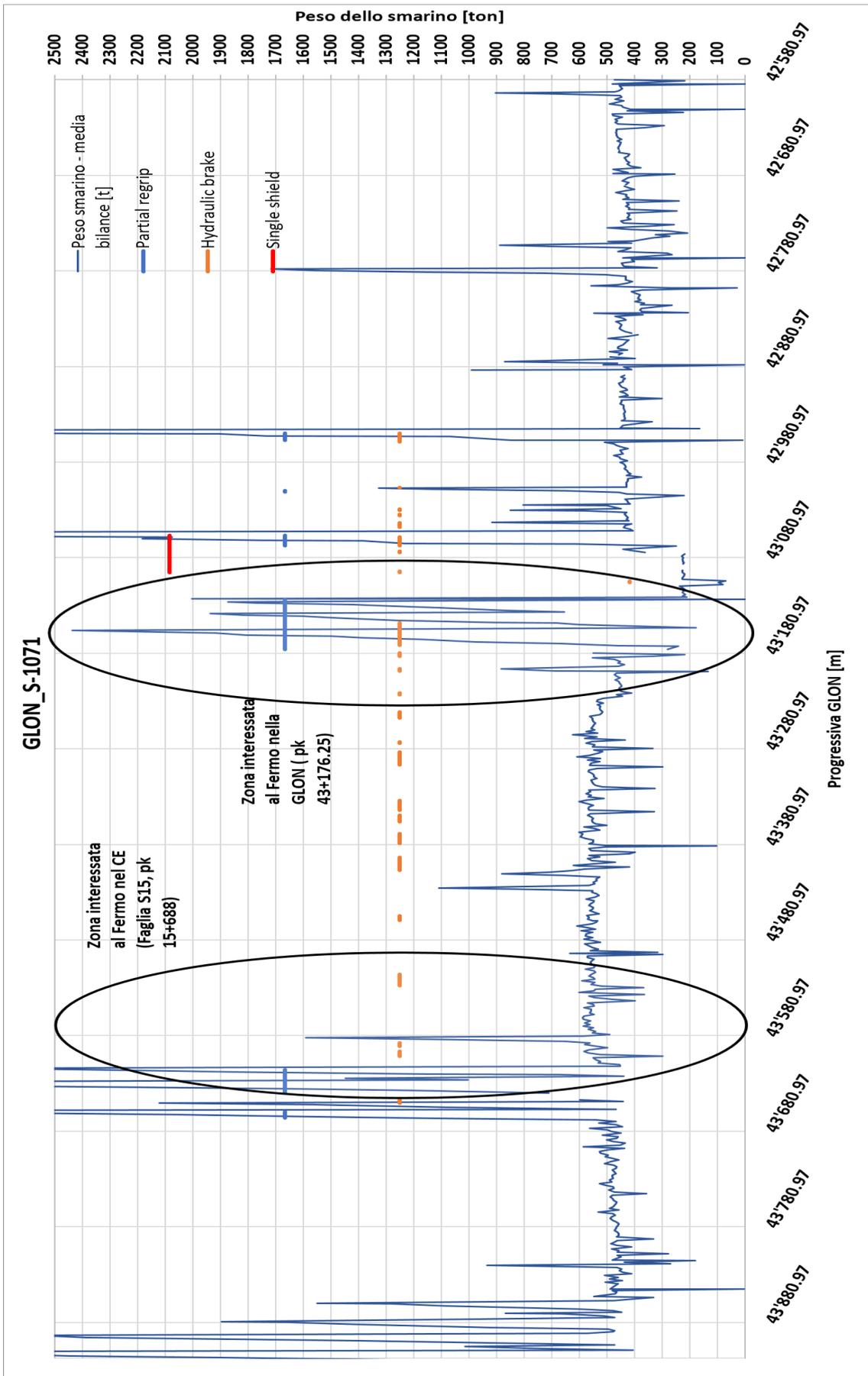


Figura 5.20 - Andamento del peso dello smarino della S-1071 per la tratta da pk 43+918 a pk 42+580. Sono inoltre segnati anche le modalità di scavo adottate.

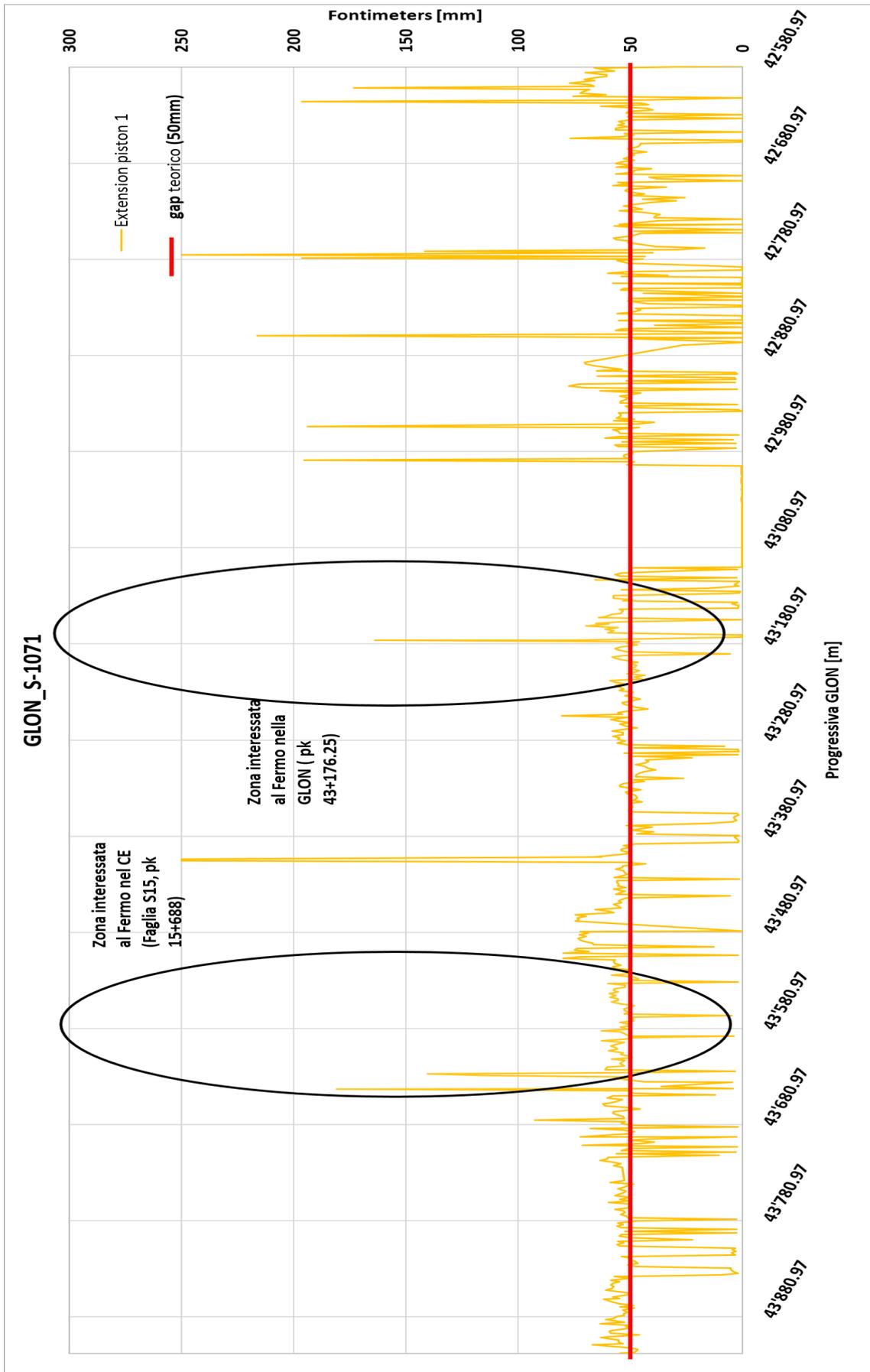


Figura 5.21 - Andamento del fontimeter 1 montato sulla S-1071 per la tratta da pk 43+918 a pk 42+580.

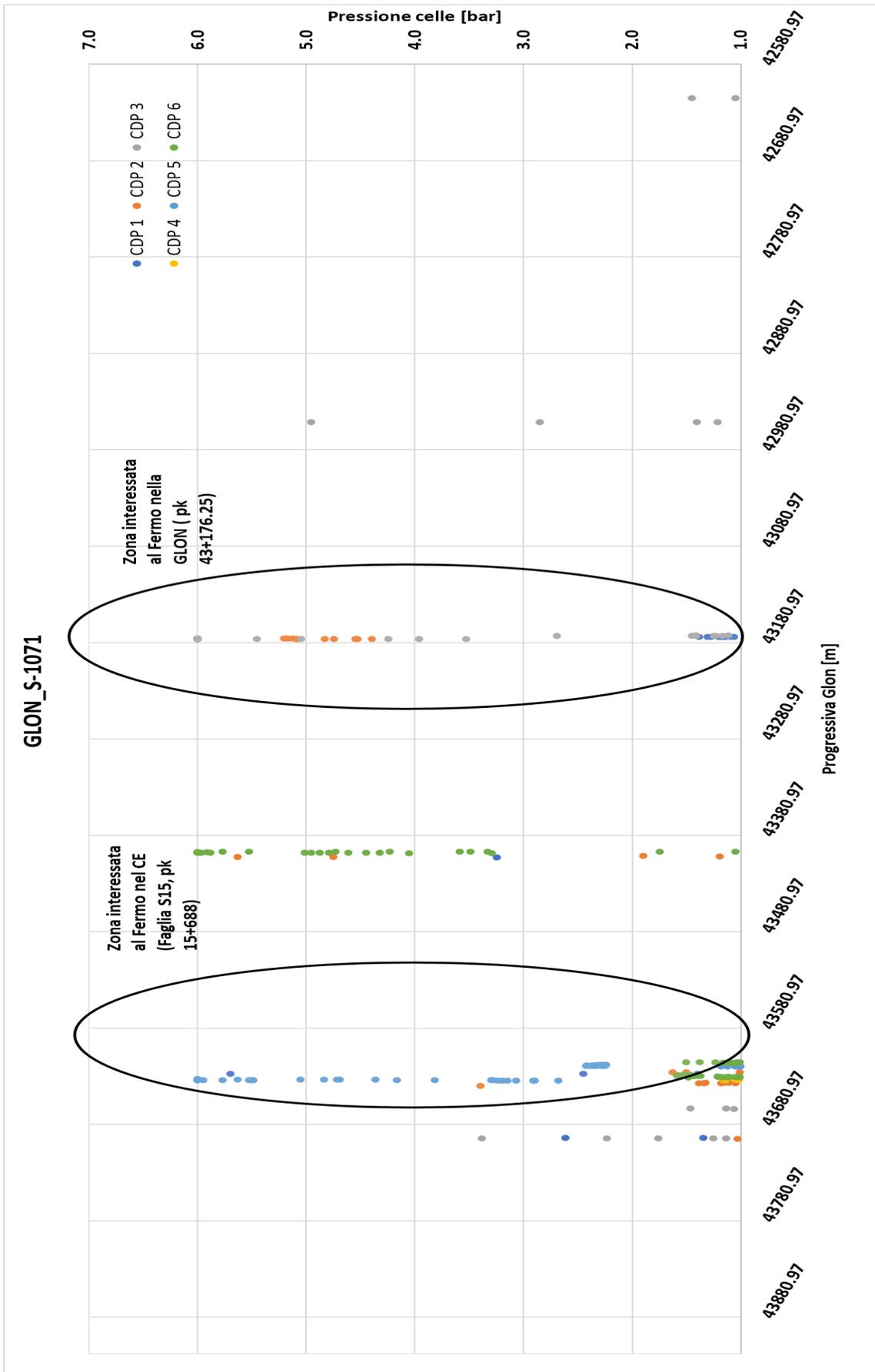


Figura 5.22 - Andamento delle celle di pressione montate sulla S-1071 per la tratta da pk 43+918 a pk 42+580. Per la disposizione delle celle si faccia riferimento al capitolo 3.

5.6 Definizione dei range dei KPI

Durante le fasi di scavo del Cunicolo Esplorativo, la Direzione dei Lavori della Società BBT SE [Egger,2019] ha provveduto a identificare un intervallo di valori dei parametri macchina chiave [KPI] al fine di identificare ed associare ad essi il comportamento tipico dell'ammasso roccioso. Come riassunto in tabella 5.3, ad ogni comportamento sono state associate una o più situazioni di rischio potenziale al fine di integrare una serie di procedure di mitigazione del rischio. Per la determinazione delle SRP è stato fatto riferimento alle documentazioni interne di BBT-SE, riguardanti la procedura per la gestione di rischio del progetto esecutivo e la procedura per la gestione del rischio per lo scavo meccanizzato del progetto di dettaglio. La tabella, creata in seguito alle analisi svolte per i primi nove mesi di scavo del Cunicolo Esplorativo mediante la TBM a doppio scudo S-1054, è formattata in righe caratterizzate da diversi colori a seconda della situazione di rischio attesa:

- rischio basso identificato dal colore verde;
- rischio medio identificato dal colore giallo;
- rischio elevato, ma comunque gestibile tramite scavo con freno idraulico e mezzi regrip, identificato dal colore arancione;
- rischio molto elevato identificato dal colore rosso, in questo caso sono richiesti interventi preventivi (ad es. consolidamenti);
- rischio legato al fenomeno di *rockburst* identificato dal colore azzurro.

Si fa presente che ad oggi, sono stati riscontrati tutti i TCR citati in tab.5.3 ad eccezione del TCR 5 , ossia il *rockburst* ed il TCR 9 che interessa faglie con proprietà geotecniche di materiale sciolto e forti venute d'acqua. Il fenomeno del *rockburst* si manifesta con il rigetto violento di lastre di roccia, causato dall'elevato stato tensionale a cui è soggetto l'ammasso roccioso. Si prevede che tale comportamento si possa manifestare sotto alte coperture (superiori ai 1000 m) e per ammassi come lo gneis granitico, caratterizzati da un'elevata resistenza a compressione ($UCS > 150$ Mpa). Nonostante questi due TCR non siano ancora stati incontrati lungo le tratte scavate con metodo meccanizzato da Mules in direzione Nord, BBT SE [Egger, 2019] ha stimato dei range per ogni parametro macchina per la S-1054, in quanto sono previsti nel modello geomeccanico del progetto esecutivo. Nello specifico, si è fissato un intervallo delle spinte dei cilindri principali alto (10-15

MN) ed una velocità di avanzamento bassa (20-35 mm/s) dovuto alle proprietà dell'ammasso per il TCR 5. Mentre al TCR 9 sono stati assegnati gli stessi intervalli dei parametri del TCR 8, ma con aggiuntive situazioni di rischio potenziali (SRP).

Per mezzo dei dati pervenuti da tutte e tre le DS-TBM che scavano la Galleria di Base del Brennero (lato italiano), le analisi sono state effettuate al fine di aggiornare la tab.5.3 riferita al solo Cunicolo Esplorativo.

L'analisi effettuata si basa sull'esperienza di 3 chilometri di scavo meccanizzato delle tre diverse canne mediante le DS-TBM, a cui si sono sommate le informazioni provenienti dal modello consuntivo e dai rilievi geologici disponibili. Si fa presente che in tale sede sono stati dedotti i range di funzionamento correlati ai soli TCR incontrati nella tratta investigata, motivo per cui non sono stati assegnati valori dei parametri per i TCR 5, 6 e 9. In particolare, l'analisi è stata eseguita indagando chilometro per chilometro la tratta d'interesse, in modo da avere una rappresentazione più dettagliata degli andamenti dei parametri macchina sia per la fresa piccola S-1054 sia per le due grandi S-1071/S-1072.

Bisogna sottolineare che rispetto allo studio effettuato in passato, si è voluto unire il TCR1 al TCR 2, poiché i comportamenti osservati sono molto simili: per entrambi si prevede uno scavo regolare e un ammasso compatto o a medio-bassa fratturazione, da stabile a leggermente friabile.

Si riporta in fig.5.23 il profilo consuntivo nella quale sono stati inseriti i diversi tipi di comportamento previsti in funzione delle analisi effettuate. Nello specifico sono stati individuati:

TCR 1-2. Nel caso di ammasso roccioso stabile ci si può imbattere in intervalli dei parametri ampi, a causa della tipologia di ammasso, della differenza di copertura e dalla sensibilità del fresista. L'avanzamento avviene sempre con la "marcia 2" e lo scavo risulta regolare, in un ammasso caratterizzato da un comportamento elastico. In zone circoscritte possono presentarsi locali distacchi di blocchi dal fronte e/o del cavo causati dall'intersezione sfavorevole di discontinuità in un ammasso a bassa/media fratturazione.

TCR 3. L'ammasso è caratterizzato da un grado di fratturazione medio/alto e presenta un comportamento elasto-plastico. Durante lo scavo non è raro incontrare distacchi di blocchi ed instabilità locali del fronte a causa della formazione di una fascia plastica poco profonda. In tali zone si identifica una diminuzione di alcuni parametri quali coppia, spinta (fig.5.17) e la velocità di rotazione, mentre si riscontra un aumento di penetrazione e velocità di avanzamento (fig.5.18). Anche in questo caso, l'avanzamento si protrae sempre con *marcia 2*, nonostante in certi tratti le frese trovino alcune difficoltà ad avanzare per via del fronte instabile localmente e dell'eccessivo smarino che potrebbe

causare l'intasamento del nastro trasportatore. Nello specifico sono stati individuati degli scavi irregolari correlabili ad un TCR 3, nelle seguenti tratte:

Galleria di Linea Nord Ovest (GLON):

- pk 45+629 - 45+320. Scavo irregolare causato dall'elevata fratturazione di micascisti quarziticci.
- pk 45+321 – 45+055. Scavo irregolare causato da un ammasso mediamente fratturato caratterizzato da calcescisti con lenti di calcite.
- pk 44+313 - 44+219. Presenza di calcescisti mediamente fratturati.
- pk 43+650 – 43+620. Presenza di micascisti leggermente tettonizzati e fratturati a causa nelle discontinuità molto persistenti.
- pk 42+886 – 42+580. Scavo irregolare causato dalla presenza di scisti e micascisti, caratterizzati da una media fratturazione.

Cunicolo Esplorativo (CE):

- pk 13+945 – 14+077. L'ammasso roccioso si presenta con una fratturazione medio-alta, sono presenti calcescisti tettonizzati in parte cataclasati.
- pk 14+125 – 14+278. Scavo irregolare causato dalla presenza di marmi impuri micacei e calcescisti grigi contenenti occhialini di quarzo molto deformati. L'ammasso risulta altamente fratturato e tende a sbriciolarsi al fronte.
- pk 14+927 ÷ 15+386. Scavo irregolare causato dalla fratturazione media di calcescisti poveri in carbonato;
- pk. 16+018 ÷ 16+638. Scavo irregolare causato dalla fratturazione medio alta di calcescisti carbonatici differenziati.

Galleria di Linea Nord Est (GLEN):

- pk 45+355 – 45+036. Scavo irregolare causato dalla presenza di calcescisti e micascisti caratterizzati da una media fratturazione.
- pk 43+575 – 43+382. Scavo irregolare causato dalla presenza di micascisti caratterizzati da una media fratturazione.

- pk 43+254 – 43+612. Scavo irregolare causato da scisti cloritici caratterizzati da un alto grado di fratturazione.

TCR 4. L'ammasso è instabile al fronte per sovrasollecitazione e spingente al cavo, il rischio di fermo è elevato ma l'avanzamento della macchina è garantito tramite modalità di scavo con *freno* o *mezzi re-grip*. Il fresista interviene abbassando la rotazione della testa al fine di evitare la produzione di eccessivo smarino che può sovraccaricare il nastro trasportatore. Inoltre, si nota un aumento di spinta e coppia necessari per far avanzare la TBM in un ammasso scarsamente consistente che potrebbe franare dal fronte di scavo. Nella tratta analizzata, tale comportamento è stato riscontrato in:

Galleria di Linea Nord Ovest (GLON):

- pk 44+203 – 43+918. Scavo irregolare, in tale tratta si nota il passaggio da filladi con intercalazioni di calcescisti alla zona di faglia di 2/3 m che ha causato il fermo della GLON alla pk 44+200. L'ammasso nella parte di filladi e calcescisti è mediamente fratturato.
- pk 43+176 – 43+170. Scavo irregolare causato da un ammasso altamente instabile al fronte ed in calotta, costituito da scisti micacei con cloritoidi e talco. In tale tratto vi è la presenza di un materiale di faglia (cacheriti) che ha causato il fermo della GLON alla pk 43+176,25.

Cunicolo Esplorativo (CE):

- pk. 15+565 ÷ 15+750. Scavo irregolare causato da micascisti biotitici con livelli quarziticci con grado di fratturazione medio; alla pk 15+689 si è registrato il blocco della macchina a causa della faglia S15;

Galleria di Linea Nord Est (GLEN):

- pk 43+772 – 43+520. Analizzando l'energia specifica di scavo, in tale tratta si nota un incremento modesto di energia specifica che fa pensare ad un TCR 4. Inoltre, le celle di pressione misurano valori superiori ai 3 bar, indice di un comportamento spingente. Purtroppo, data la non presenza di rilievi geologici in questa zona per la presente Galleria di Linea , non è possibile dire con certezza che tipo di ammasso sia stato incontrato.

TCR 8. Tale comportamento si associa ad un ammasso dalle proprietà geomeccaniche molto scadenti, per cui si registrano fenomeni di instabilità al livello globale, interessando quindi sia il fronte di scavo che il cavo. Si tratta di materiale di faglia con comportamento plastico associabile ad un mezzo continuo. Dall'analisi dei parametri chiave della *zona I* risultano valori di spinta e coppia elevate, oltre che picchi di energia specifica e peso dello smarino. Inoltre, informazioni importanti vengono restituite anche dalla *zona II* della TBM, quali le misure delle celle di pressione e dei fontimeters. In particolare, si ha:

Gallerie di Linea:

- Coppia: >6 MNm;
- Spinta: >28.5 MN;
- Energia specifica: >55 MJ/m³ (con picchi fino a 200 MJ/m³);
- Peso dello smarino: >700 ton (con picchi fino a 2000 ton);
- Celle di pressione: valori puntuali >3 bar (fondoscala fino a 6 bar)
- Fontimeters: valori <30/40 mm (fondoscala fino a 240 mm).

Cunicolo Esplorativo:

- Coppia: 0.3-3.8 MNm;
- Spinta: >24 MN;
- Energia specifica: >20 MJ/m³ (con picchi fino a 180 MJ/m³);
- Peso dello smarino: >250 ton (con picchi fino a 2000 ton);
- Celle di pressione: valori puntuali >3 bar (fondoscala fino a 6 bar)
- Fontimeters: valori <20/30 mm (fondoscala fino a 240 mm).

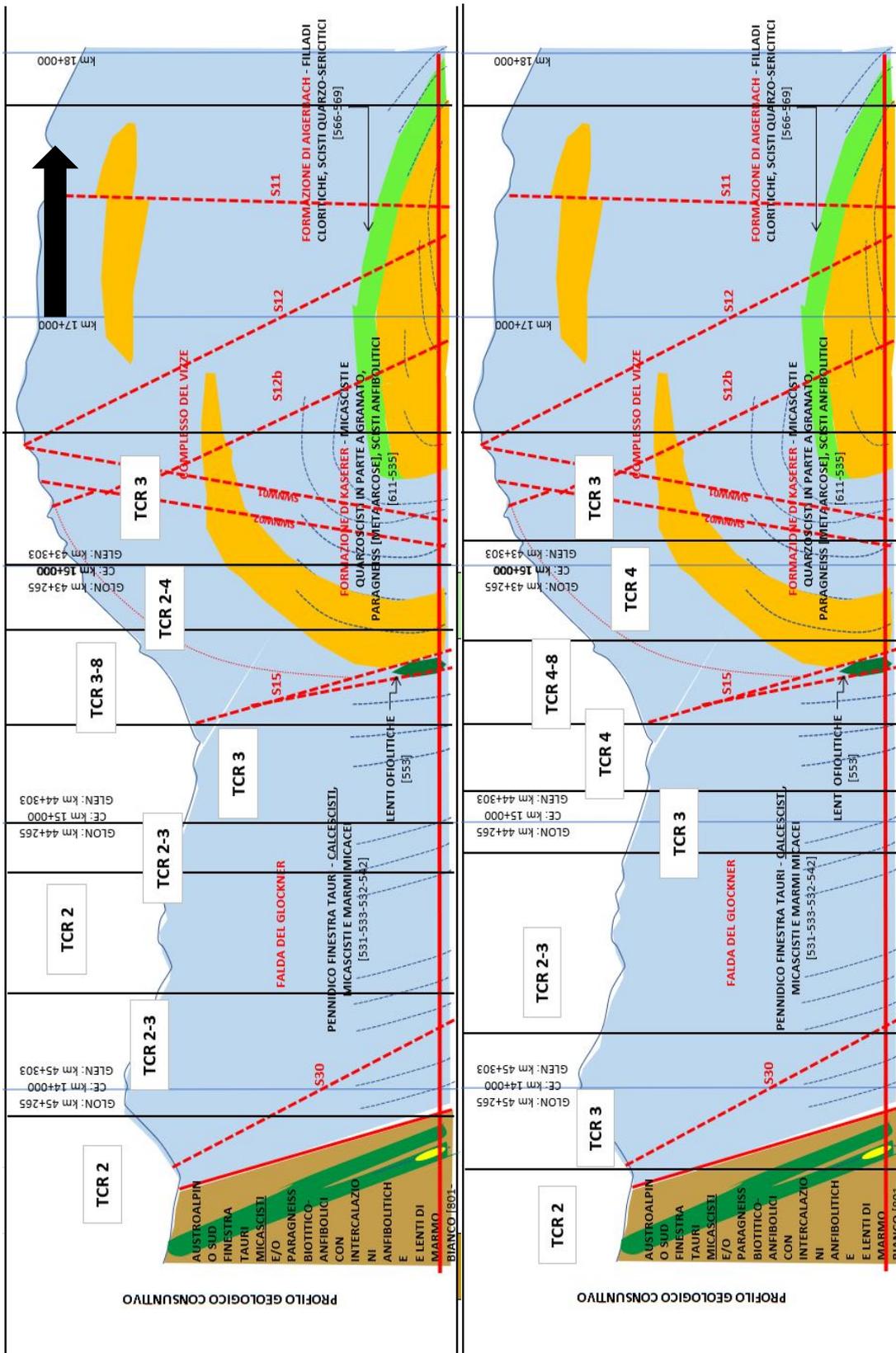


Figura 5.23 – Profilo geologico "as built" della tratta analizzata modificato con i TCR, a sinistra i TCR proposti per la CE e per la GLEN, a destra i TCR proposti per la GLEN. La freccia indica la direzione d'avanzamento [Barovero, 2020, modificato]

Grazie alle analisi effettuate, come detto in precedenza è stato possibile aggiornare la tab.5.4 in merito ai comportamenti riscontrati e, crearne una corrispettiva per le due Gallerie di Linea. Si riportano dunque in tab.5.4 e tab.5.5, il riepilogo dei range dei diversi parametri chiave analizzati in questo elaborato. Nella prima colonna sono inseriti i diversi tipi di comportamento riscontrati durante lo scavo e, proseguendo verso destra sono riportati per le diverse TBM i range di velocità di rotazione della testa, spinta dei cilindri principali, coppia e velocità di avanzamento. In successione si trovano i range di penetrazione ed energia specifica, grandezze caratterizzanti il comportamento ma calcolate a partire dalle precedenti. Infine, nelle ultime colonne sono disposti i parametri che mettono in risalto i comportamenti che potrebbero causare un fermo, ossia il peso dello smarino, utile per identificare zone d'instabilità relative al fronte ma sempre tenendo conto della modalità di scavo adottata e delle celle di pressione e dei fontimeters, utili per identificare possibili zone d'instabilità e comportamenti spingenti relativi al cavo (si riporta in allegato l'andamento dei parametri per tutte e tre le gallerie). Le due tabelle sono state ottenute mediando i range identificati chilometro per chilometro, inoltre per le due Gallerie di linea, essendo le due TBM gemelle, si è deciso di mediare i range ottenuti per ognuna delle due.

Cunicolo Esplorativo CE S-1054																		
TCR	KP1		KP2		KP3		KP4		KP5		KP6		KP7		KP8		KP9	
	ROTAZIONE TESTA [rpm]		SPINTA cilindri principali [MIN]		COPPIA [MNm]		VELOCITA' D'AVANZAMENTO		PENETRAZIONE [mm/min]		ENERGIA SPECIFICA [MJ/m ³]		PESO DELLO SMARINO [ton]		CELLE DI PRESSIONE [bar]		FONTIMETERS [mm]	
1-2	4.2	5.5	4.9	10.0	0.5	1.6	30.0	48.3	7.5	11.8	18.7	38.7	150	180	<1	>40		
3	3.2	4.5	3.3	7.8	0.4	1.2	34.3	55.7	9.3	15.5	9.8	35.8	150	180	Valori puntuali >3	<40 (fondoscala fino a 250) e valori continui <30		
4	2.0	3.2	>10		1.0	2.5	25.0	40.0	8.0	18.0	20.0	60.0	150	180	Valori puntuali >3 (fondoscala fino a	<30 (fondoscala fino a 240) e valori continui <20		
8	<2	>25	>25		0.30	3.80	<15		<7		>20 (>180)		>250		Valori puntuali >3 (fondoscala fino a	<30 (fondoscala fino a 240) e valori continui <20		

Galleria di Linea GLON S-1071 / GLEN S-1072																		
TCR	KP1		KP2		KP3		KP4		KP5		KP6		KP7		KP8		KP9	
	ROTAZIONE TESTA [rpm]		SPINTA cilindri principali [MIN]		COPPIA [MNm]		VELOCITA' D'AVANZAMENTO		PENETRAZIONE [mm/min]		ENERGIA SPECIFICA [MJ/m ³]		PESO DELLO SMARINO [ton]		CELLE DI PRESSIONE [bar]		FONTIMETERS [mm]	
1-2	3.2	4.5	12.2	18.9	2.0	3.8	28.8	40.3	7.5	12.7	43.3	75.0	335	475	<1	>50		
3	2.1	3.6	9.3	14.8	1.6	2.9	33.7	46.3	11.5	15.7	30.0	50.0	335	500	Valori puntuali >3	≤50 (fondoscala fino a 220)		
4	2.0	3.9	11.0	20.0	2.0	5.8	27.8	41.5	7.8	14.8	34.3	95 (picchi fino a 170)	400	650	Valori puntuali >3 (fondoscala fino a	<40 (fondoscala fino a 240) e valori continui <30		
8	<0.9	>28.5	>28.5		>6		<0.9		<12.5		>55 (picchi fino a 200 MJ/m ³)		>800		Valori puntuali >3 (fondoscala fino a	<40 (fondoscala fino a 240) e valori continui <25		

Tabelle 5.4 / 5.5 – Tabelle riassuntive degli intervalli dei parametri macchina secondo i comportamenti riscontrati, a sinistra relativa al Cunicolo Esplorativo e a destra relativa alle Gallerie di Linea.

CONCLUSIONI

La classificazione dell'ammasso roccioso in corso d'opera è indispensabile nell'ambito dello scavo di gallerie, soprattutto nel caso di tunnel lunghi sotto elevate coperture. A causa della minore frequenza dei rilievi geologici, eseguiti solamente tramite le aperture della testa fresante e dello scudo, l'analisi dei parametri macchina della TBM, pur rientrando in un più ampio sistema di monitoraggio dello scavo meccanizzato, assume un ruolo fondamentale. In tale elaborato, l'analisi dei parametri delle frese che nell'ambito del lotto "Mules 2-3" scavano le tre gallerie, un Cunicolo Esplorativo anticipato alle due Gallerie di Linea, ha come scopo la previsione del comportamento dell'ammasso roccioso ancora da scavare, oltre che reperire informazioni utili per ricostruire il profilo geomeccanico "as built", in base agli intervalli dei parametri individuati per ciascun comportamento e considerando l'effetto scala che si verifica tra il Cunicolo Esplorativo con minore diametro rispetto alle Gallerie di Linea.

Date le suddette premesse, la presente tesi ha perseguito i seguenti obiettivi:

- analizzare i parametri macchina delle TBM occupate nello scavo delle Gallerie di Linea (GLON e GLEN) e del Cunicolo Esplorativo (CE), e successivamente comparare gli andamenti dei parametri delle tre frese per la stessa tratta;
- aggiornare la tabella dei parametri macchina riferiti al Cunicolo Esplorativo in funzione dei tipi di comportamento dell'ammasso (TCR) riscontrati, lavoro già definito nei principi internamente in BBT SE, al fine di rintracciare problematiche e anomalie;
- creare una tabella di simile contenuto anche per le Gallerie di Linea.
- la ricerca di una consistenza analitica del cosiddetto "fattore scala", che pur se comprovato in termini di effetto sugli avanzamenti, richiede una più approfondita definizione che permetta di identificarlo come parametro progettuale vero e proprio, soprattutto nei casi, come quello in studio, di gallerie di diverso diametro che percorrono lo stesso tracciato;

Nel Cap. 4 si è svolta un'analisi statistica dei parametri macchina per le tre gallerie nei 500 m antecedenti al fermo subito nella GLON alla pk 43+176,25. Per mezzo della statistica descrittiva, si sono determinate le differenze tra i range di funzionamento dei parametri registrati dalle tre macchine al fine di valutare se l'esistenza di un fattore scala,

dovuto soprattutto alla differenza di diametro del *cutterhead* delle tre TBM, possa influenzare il processo di scavo. Nello specifico, per le Gallerie di Linea sono state adoperate le due frese gemelle S-1071 / S-1072, chiamate rispettivamente “Flavia” e “Virginia”, mentre il Cunicolo Esplorativo è stato scavato con la S-1054 “Serena” che presenta un diametro minore. L’analisi ha portato alla conferma che alcuni KPI quali coppia, spinta, velocità di rotazione ed energia specifica, come si evince dai BoxPlot, sono risultati soggetti ad un *fattore di scala*.

Nel Cap. 5 è stata descritta dettagliatamente l’analisi svolta su circa 9 chilometri complessivi di gallerie (3 km per canna), scavate con TBM doppio scudate. Oltre che a confermare il lavoro fatto all’interno di BBT con la stesura di una prima tabella relativa al Cunicolo e usata per la definizione del comportamento dell’ammasso roccioso, l’analisi ha portato all’aggiornamento della stessa e alla creazione di una corrispondente tabella per le Gallerie di Linea. Durante lo studio, nel quale si è approfondita la tratta interessata al fermo avvenuto nella GLON alla pk 43+176,25 sono stati evidenziati per la S-1071 andamenti eccezionali di alcuni parametri. In particolare, è possibile affermare che il fermo della TBM “Flavia” sia stato causato dall’instabilità del fronte di scavo che ha ceduto sui *cutterhead* della testa fresante. Sono stati registrati dalle bilance dello smarino valori maggiori di 700 t ben al di sopra della media di 450-500 t, sono state notate anomalie anche in merito ai valori di velocità di rotazione che hanno registrato una brusca diminuzione in prossimità del fermo, mentre il valore di penetrazione ha subito un picco prima di azzerarsi in corrispondenza del blocco della TBM.

Possibili sviluppi futuri del presente studio essere:

- il continuo aggiornamento del profilo geologico consuntivo con supporto dell’analisi dei parametri macchina, specialmente per l’individuazione delle zone di faglia e la redazione di un profilo geomeccanico “as built”;
- analisi approfondita del rischio di blocco per instabilità del fronte di scavo (essenzialmente superamento torque critico) attraverso gli andamenti dei parametri macchina con frequenza ogni 3 secondi (dati grezzi), l’analisi d’insieme dei dati geologici-geotecnici disponibili in base ai rilievi ed agli interventi di consolidamento (sondaggi, prove in sito, dati delle iniezioni, etc....) eseguiti nei fermi delle TBM.
- analisi approfondita del rischio di blocco per fenomeni di squeezing (ammasso spingente) e chiusura del gap in base a spostamenti/ spinte dell’ammasso registrati dai

fontimeters/celle di pressione con modelli che tengano in considerazione anche il fattore tempo (velocità di avanzamento).

- studio dell'influenza e analisi di sensitività del fattore tempo, nella determinazione del fattore di scala passando dai dati derivanti dallo scavo di un cunicolo esplorativo allo scavo di gallerie di maggior diametro.

BIBLIOGRAFIA

DOCUMENTI INTERNI DI BBT SE

02_H61_EG_991_KTB_B0130_15007_00 – Progettazione di dettaglio - B0130: Lotto Mules 2-3 - Opere generali - Relazione tecnica – Procedura per la gestione del rischio per lo scavo meccanizzato.

02_H61_EG_991_KTB_D0700_12001_21 – Progettazione esecutiva – D0700: Lotto Mules 2-3 – Opere generali – Relazione tecnica – Relazione descrittiva generale.

02_H61_EG_991_KST_D0700_15010_21 – Progettazione esecutiva – D0700: Lotto Mules 2-3 – Opere generali – Calcolo statico – Valutazione dell’interferenza tra le cavità in fase di scavo.

02_H61_DT_990_KTB_D0700_11115_21 – Progettazione esecutiva – D0700: Lotto Mules 2-3 – Opere generali – Relazione tecnica – Disposizioni tecniche di contratto: lavori in sotterraneo, lavori di scavo con TBM.

02_H61_GD_035_GTB_D0700_23001_21 - Progettazione esecutiva - D0700: Lotto Mules 2-3 - Opere generali Parte 3 – Relazione tecnica – Relazione geomeccanica di dettaglio.

02_H61_GD_035_GLS_B0130_23018_00 - Progettazione di dettaglio - B0130: Lotto Mules 2-3 – Profilo longitudinale – Profilo geomeccanico e progettuale di previsione Gallerie Principali GL-MS Canna Ovest (Tav. 1/3).

02_H61_MO_994_BTB_B0130_17001_21 - Progettazione di dettaglio - B0130: Lotto Mules 2-3 – Opere generali - Relazione tecnica - Relazione sui monitoraggi e le prospezioni in galleria.

02_H61_MO_994_BTB_B0130_17046_00 - Progettazione di dettaglio - B0130: Lotto Mules 2-3 – Gallerie Principali - Relazione tecnica - Relazione sui monitoraggi e le prospezioni in galleria.

02_H61_MO_994_BLS_B0130_17114_00 - Progettazione di dettaglio - B0130: Lotto Mules 2-3 – Profilo longitudinale - Prospezioni in avanzamento Gallerie Principali GL-MS Canna Ovest (Tav. 1/3).

02_H61_MO_994_BT B0130_CE035_00 - Progettazione di dettaglio - B0130: Lotto Mules 2-3 - Opere generali - Relazione tecnica - Cunicolo Esplorativo - Analisi SRP da km 16+750 a 16+891 (S035).

02_H61_OP_035_KTB_B0130_B0130_23085_00 – Progettazione di dettaglio – B0130: Lotto Mules 2-3 – Opere generali Parte 3 – Relazione tecnica - Gallerie di Linea – Relazione tecnica descrittiva Gallerie di Linea.

Barovero G. (2020). ‘Mules 2-3’ - Profilo geologico consuntivo per lo scavo meccanizzato del cunicolo esplorativo.

Egger H. (2014). Progettazione geomeccanica nell’ambito del lotto ‘Mules 2-3’, Presentazione interna.

Egger H. (2017). Individuazione parametri TBM doppia scudata significativi per interpretazioni di carattere geologico-geotecnico. Report di sintesi.

Egger H. (2018). Analisi e confronto dei parametri di scavo con dati geologici: DS-TBM ‘Serena’”. Presentazione interna.

Egger H. (2019). Analisi dei parametri TBM S-1054 e definizione di valori di soglia per l’individuazione di situazioni di rischio potenziale (SRP). Linea guida.

Herrenknecht (2016). Tavola della TBM DS S-1054

Herrenknecht (2016). Tavola della TBM DS S-1071 / S-1072

Quick H., Egger H., Skuk S. (2013). Elaborazione tecnica del progetto – Cunicolo esplorativo Mules -Brennero, Relazione geomeccanica.

Skuk S. (2020). Report del rilievo geologico in corrispondenza della pk 43+174.

ARTICOLI

Ates, Ugur & Bilgin, Nuh & Copur, Hanifi. (2014). Estimating torque, thrust and other design parameters of different type TBMs with some criticism to TBMs used in Turkish tunneling projects. *Tunnelling and Underground Space Technology*. 40. 46–63. 10.1016/j.tust.2013.09.004.

AFTES. (2014). Forward probing ahead of Tunnel Boring Machines. *Tunnels et Espace Souterrain*, n°242, Marzo-Aprile 2014.

Agharazi A., Tannant D., Jafari A. (2008). Stress and tunnel geometry effects on deformation modulus derived from plate load tests.

Alber M. (1996). Prediction of penetration, utilization for hard rock TBMs. In: *Proceedings of the international conference of Eurock '96*, Balkema, Rotterdam, pp 721–725.

Bhasin R. (1994). Criteri rapidi ed economici per la previsione dei problemi di stabilità nelle gallerie costruite in argilla, roccia tenera e roccia dura. *Gallerie e grandi opere sotterranee*.

Bianchi, G.W. & Andreis, I. & Valle, S.. (2020). Use of TBM parameters for assessing rock mass conditions during excavation: A feedback from the Tunnel 4, Angat Water Transmission Improvement Project (Philippines). 10.4324/9781003029748-11.

Bieniawski Z.T. (1989). *Engineering rock mass classifications A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering*, Wiley, New York.

Bruland A. (1998). *Hard rock tunnel boring*. (PhD), Norwegian University of Science and Technology, Trondheim.

Cheema S. (1999). Development of a rock mass boreability index for the performance of tunnel boring machines. PhD Thesis. p 262, Department of Mining Engineering, Colorado School of Mines, Co USA.

Choi, Sang-Soon & Kim, Jae-Kwon & Han, Byeong-Hyeon & Lee, In-Mo. (2020). Three-Dimensional Analysis of Fractured Zones ahead of Tunnel Face using Seismic Reflection.

Deere D. U., Hendron A. J., Patton F. D., Cording E. J. (1966, January 1). Design of surface and near-surface construction in rock. American Rock Mechanics Association.

Deere D.U. (1968). Geological consideration, In: Stagg, K.G., and Zienkiewicz, O.C., eds., *Rock mechanics in engineering practice*: New York, Wiley.

Dickson, Maria Michela & Giuliani, Diego. (2015). *Analisi statistica con Excel*.

Ergun, Omur & Erdogan, Cemalettin & Ekinici, Emre. (2016). Analysis of the EPB-TBM Excavation Parameters Used in a Tunnel Construction in Istanbul. 10.11159/mmme16.113.

Frenzel C., Galler R.T., Kaesling H., Villeneuve M. (2012). Penetration tests for TBMs and their practical application Penetrations tests für Tunnelbohrmaschinen und deren Anwendung in der Praxis. Geomechanik und Tunnelbau. pp 557-566. 10.1002/geot.201200042.

Gehring, K. (1995). Performance- and cutter-wear prediction for tunnel boring machines[Leistungs- und Verschleissprognosen im maschinellen Tunnelbau]. Felsbau. 13. 439-448.

Gehring Karlheinz. (2009). The influence of TBM design and machine features on performance and tool wear in rock. Der Einfluss von TBM-Konstruktion und Maschineneigenschaften auf Leistung und Werkzeugverbrauch in Gestein. Geomechanics and Tunnelling.

Hoek E., Marinos P. (2000). Predicting Tunnel Squeezing Problems in Weak Heterogeneous Rock Masses. Tunnels and Tunnelling International. 32. pp 45-51.

Hoek E. (2007). Practical Rock Engineering: RocScience. (Available from the publisher at <http://www.rocscience.com/hoek/PracticalRockEngineering.asp>).

Hoek E., Brown E.T. (2018). The Hoek-Brown failure criterion and GSI – 2018 edition. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 11.10.1016/j.jrmge.2018.08.001.

Hoek E., Carranza-Torres C., Corkum B., Carranza-Torres C. (2002). Hoek-Brown failure criterion - 2002 Edition.

Hoek E., Kaiser P.K., Bawden W.F. (1995). Support of Underground Excavations in Hard Rock. AA Balkema, Rotterdam.

Hoek E. (2007). Practical rock engineering, RocScience.

ISRM. (1978). Suggested methods for determining tensile strength of rock materials. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 15, pp 99-103.

- ISRM. (1979). Suggested method for determining in situ deformability of rock. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 16, pp 195-214.
- Lauffer H. (1958). Gebirgsklassifizierung für den Stollenbau: *Geology Bauwesen*, v. 24, pp 46-51.
- Lavine David M., Krehbiel Timothy C., Berenson Mark L. (2006). *Statistica II*. Apogeo Editore.
- Liuzzi G. (2020), L'utilizzo dei parametri macchina per la classificazione degli ammassi rocciosi in fase di scavo. Tesi di laurea magistrale in Ingegneria per l'ambiente e il territorio. A.A, 2018/2019.
- Lombardi G. (1975). Nuovi concetti sulla statica delle gallerie. Estratto da "Ingegneria ferroviaria" n. 2. Febbraio.
- Lugeon M. (1933). *Barrages et Geologie*. Dunod, Paris
- Lunardi P. (1988). Progetto e costruzione di gallerie: presentazione dell'approccio ADECO-RS, ISMES - Programma di istruzione permanente.
- Lunardi P. (Maggio 2001). Progetto e costruzione di gallerie – Approccio ADECO-RS. *Quarry and Construction*.
- Marinos P., Hoek, Evert. (2001). Estimating the geotechnical properties of heterogenous rock masses such as flysch. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. 60. pp 85-92. 10.1007/s100640000090.
- Nilsen B., Ozdemir L. (1993). Hard rock tunnel boring prediction and field performance. Paper presented at the RETC, Boston.
- Österreichische Gesellschaft für Geomechanik. (2008). Richtlinie für die geotechnische Planung von Untertagebauten mit zyklischem Vortrieb. Salzburg
- Österreichische Gesellschaft für Geomechnik ÖGG. (2013). Richtlinie für die geotechnische Planung von Untertagebauwerken im kontinuierlichen Vortrieb.
- Pacher F., Rabcewicz L., Golser J. (1974). Zum der seitigen Stand der Gebirgsklassifizierung in Stollen-und Tunnelbau, XXII Geomechanics colloquium: Salzburg, pp 51-58.

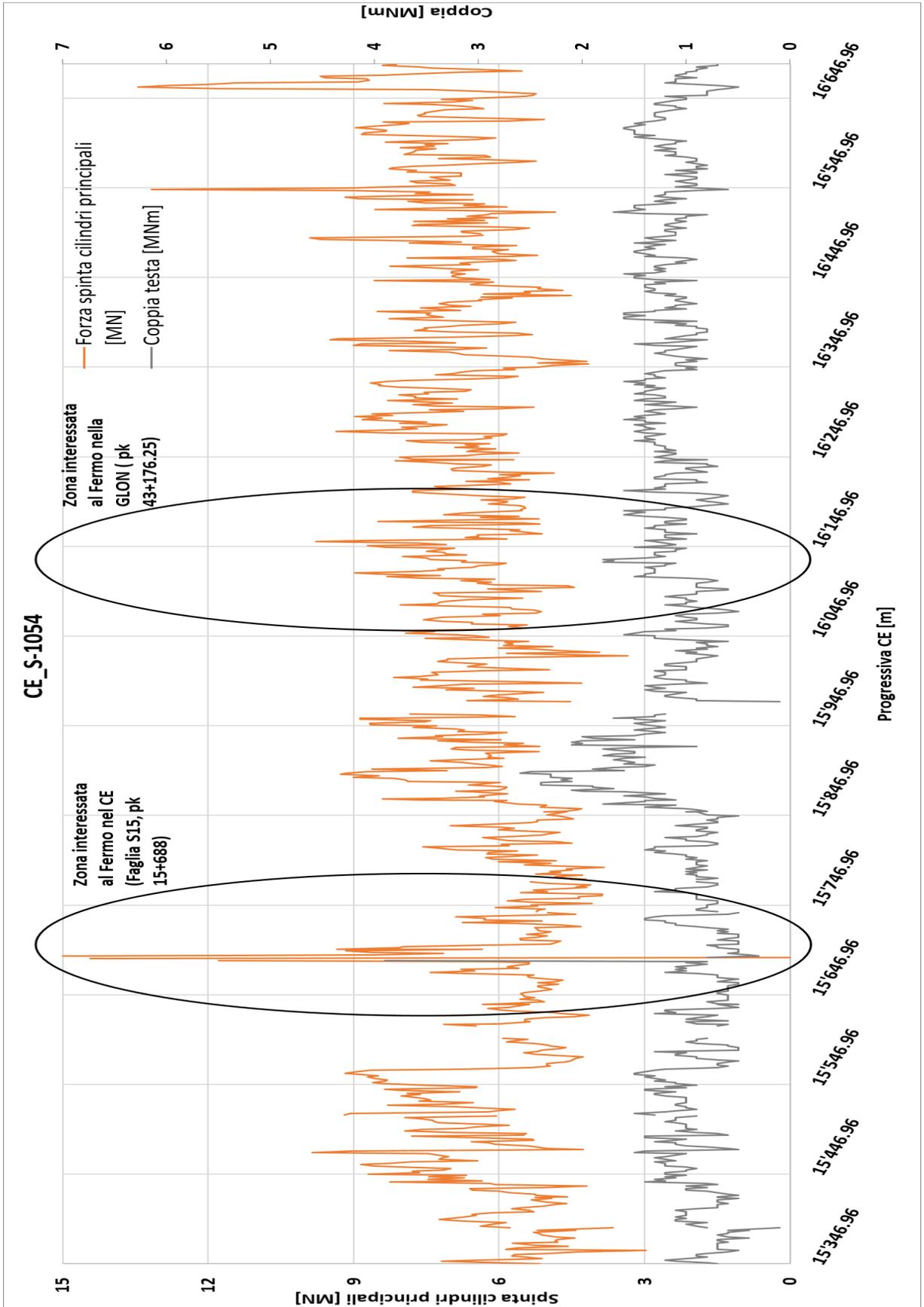
- Pan, Z. & Jiang, Y.-S. (2015). Analysis of the effects of TBM parameters on soil displacement. 8. 1467-1472.
- Panet M., Guenot A. (1983). Analysis of convergence behind the face of a tunnel: Tunnelling 82, proceedings of the 3rd international symposium, Brighton, 7–11 June 1982, pp 197–204. Publ London: IMM, 1982.
- Park, Byungkwan & Chang, Soo-Ho & Choi, Soon-Wook & Lee, Chulho. (2020). A Study for the Estimation of TBM Design Parameters by Statistical Analysis. 10.1007/978-981-15-2184-3_45.
- Patriarchi V. (2012), Relazione tra prestazioni di TBM EPB di grande diametro in ammassi complessi e parametri strutturali e meccanici - criticità e approcci risolutivi. Tesi di laurea magistrale in Ingegneria per l'ambiente e il territorio. A.A, 2010-2011.
- Pediconi, P. & Maffucci, M. & Giacomini, G.. (2020). Long and deep hard rock double shield TBM under the Alps. Base Brenner Tunnel Mules 2-3. 10.4324/9781003031642-71.
- Rabcewicz L.v. (1957). Ankerung in Tunnelbau ersetzt bisher gebräuliche Einbaumethoden. Bauztg., Vol. 75, No. 9, Switzerland.
- Rabcewicz L.v. (1964/1965). The new Austrian tunnelling method. Water Power, part 1 November 1964. pp 511-515, Part 2 January 1965 pp 19-24.
- Radoncic, Nedim, Hein, Mario, Moritz, Bernd. (2014). Determination of the system behaviour based on data analysis of a hard rock shield TBM / Analyse der Maschinenparameter zur Erfassung des Systemverhaltens beim Hartgesteins-Schildvortrieb. Geomechanics and Tunnelling. 7. 10.1002/geot.201400052.
- Ribacchi R., Riccioni R. (1977). Stato di sforzo e di deformazione intorno ad una galleria circolare. Gallerie e Grandi Opere Sotteranee, 4, pp 7-18.
- Rostami J., Ozdemir L. (1993). A new model for performance prediction of hard rock TBMs. In: Bowerman, L.D. et al. (eds), Proceedings of Rapid Excavation and Tunneling Conferences, Boston MA USA.
- Schotte K., (2016). Verification of the Performance of Segmental Tunnel Linings Using Strain and Ovalisation Monitoring. Università di Gent.

- Singh, B. (1979). Geological and Geophysical Investigation in Rocks for Engineering Projects, International Symposium Institute Testing of Soils & Performance of Structures.
- Tanzini M. (2015). Gallerie – Aspetti geotecnici nella progettazione e costruzione - Edizione. Flaccovio.
- Terzaghi K. (1946). Rock defects and loads on tunnel supports, in Proctor, R.V., and White, T.L., eds., Rock tunneling with steel support, Volume 1: Youngstown, Ohio, Commercial Shearing and Stamping Company. pp 17-99.
- Wang, Y.-S & He, J.-N & Wu, H. & Feng, G.-F & Li, Z.-H & Wang, T. & Zhou, L. & Wang, Z.-L. (2017). Research on the Parameters of Double-shield TBM Based on Mohr-Coulomb Criterion. Journal of Railway Engineering Society. 34. 83-88.
- Wilfing, L. (2016). The Influence of Geotechnical Parameters on Penetration Prediction in TBM Tunneling in Hard Rock.
- Wittke W. (2006). Stability analysis and design for mechanized tunneling, WBI-PRINT 6, VGE-Verlag Glückauf GmbH, Essen 2006, ISBN 978-3-77391306-7.
- W.C.Von, M.A.M. Isamil (2017). Evaluation of tunnel seismic prediction (TSP) result using the Japanese highway rock mass classification system for Pahang-Selangor Raw Water Transfer Tunnel. AIP Conference Proceedings 1892.
- Yagiz, Saffet (2001). Geotechnical parameters influencing the TBM performance in various rocks.
- Yagiz, Saffet & Kim, T. & Frough, Omid & Torabi, Seyed. (2013). Rock Mass Rating System for Predicting TBM Utilization.
- Yagiz, Saffet & Rostami, Jamal & Levent, Ozdemir. (2012). Colorado School of Mines approach for predicting TBM performance.

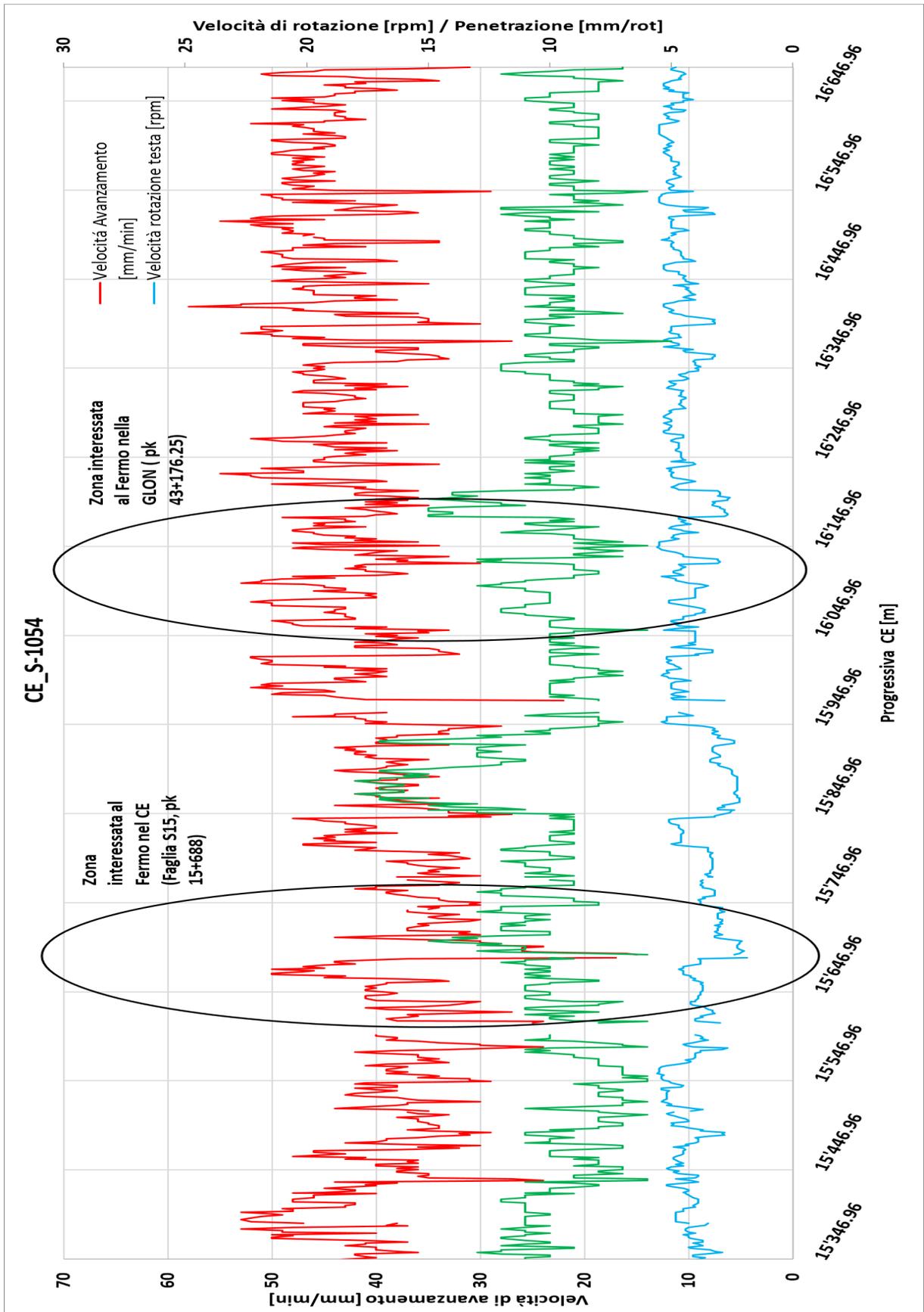
ALLEGATI

Allegato 1 – Parametri TBM S-1054 (pk 15+346 a pk 16+646): Coppia – Spinta cilindri principali	179
Allegato 2 – Parametri TBM S-1054 (pk 15+346 a pk 16+646): Velocità di avanzamento – Velocità di rotazione – Penetrazione	180
Allegato 3 – Parametri TBM S-1054 (pk 15+346 a pk 16+646): Energia specifica di scavo	181
Allegato 4 – Parametri TBM S-1054 (pk 15+346 a pk 16+646): Peso dello smarino	182
Allegato 5 – Monitoraggio TBM S-1054 (pk 15+346 a pk 16+646): Celle di pressione – Fontimeters	183
Allegato 6 – Parametri TBM S-1072 (pk 43+956 a pk 42+618): Coppia – Spinta cilindri principali	184
Allegato 7 – Parametri TBM S-1072 (pk 43+956 a pk 42+618): Velocità di avanzamento – Velocità di rotazione – Penetrazione	185
Allegato 8 – Parametri TBM S-1072 (pk 43+956 a pk 42+618): Energia specifica di scavo	186
Allegato 9 – Parametri TBM S-1072 (pk 43+956 a pk 42+618): Peso dello smarino	187
Allegato 10 – Monitoraggio TBM S-1072 (pk 43+956 a pk 42+618): Celle di pressione – Fontimeters	188

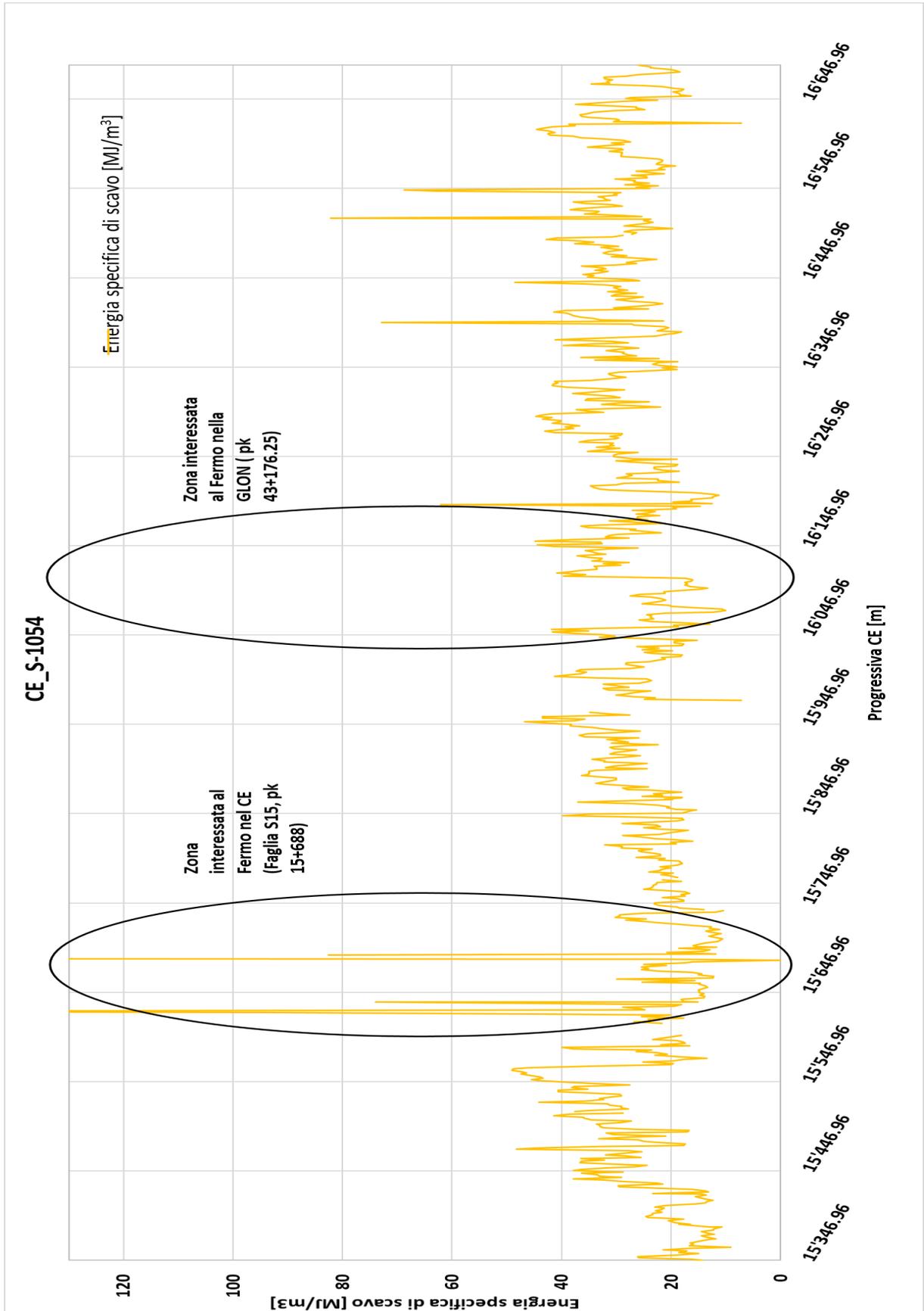
Allegato 1 – Parametri TBM S-1054 (pk 15+346 a pk 16+646): Coppia – Spinta cilindri principali



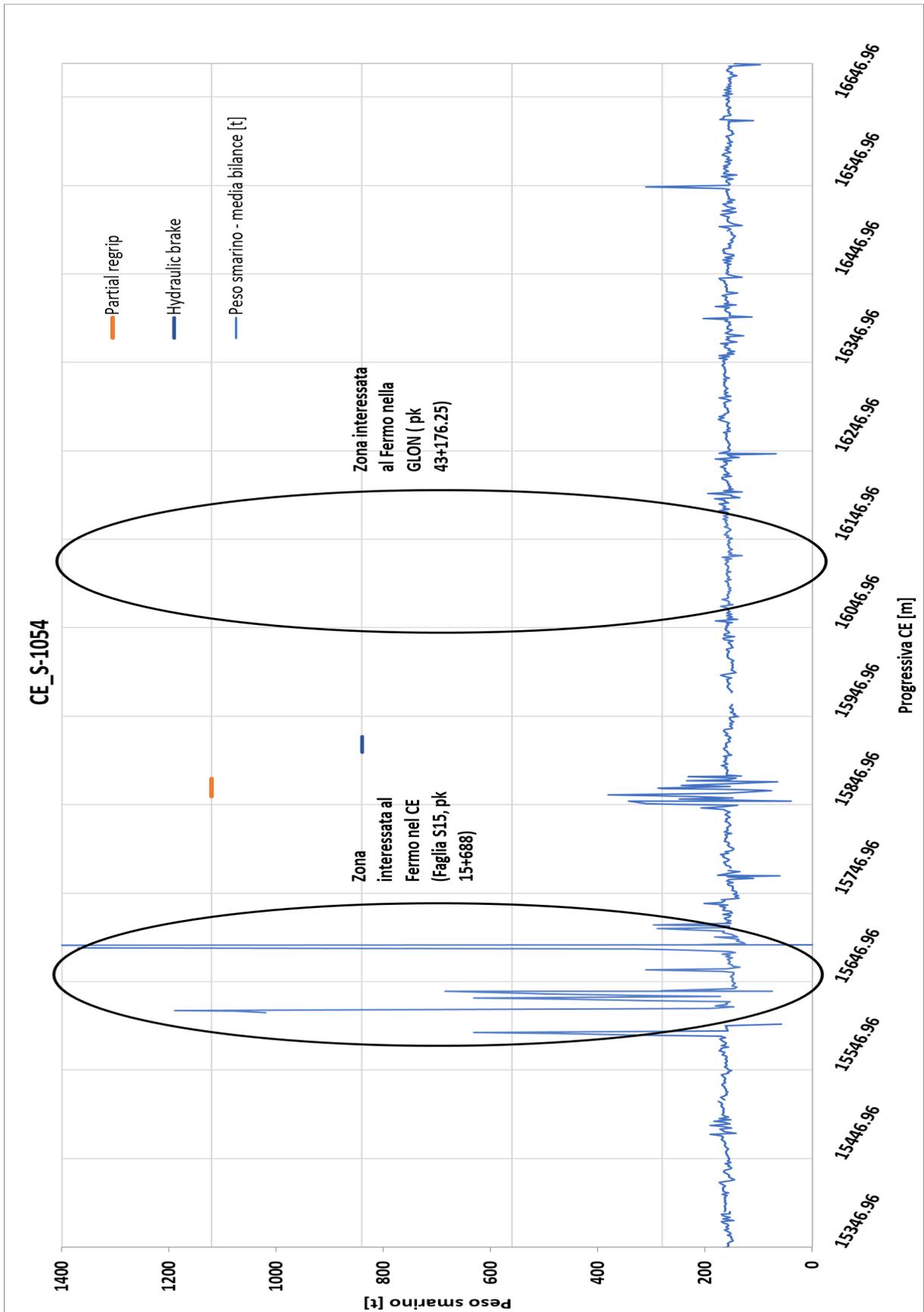
Allegato 2 – Parametri TBM S-1054 (pk 15+346 a pk 16+646): Velocità di avanzamento – Velocità di rotazione – Penetrazione



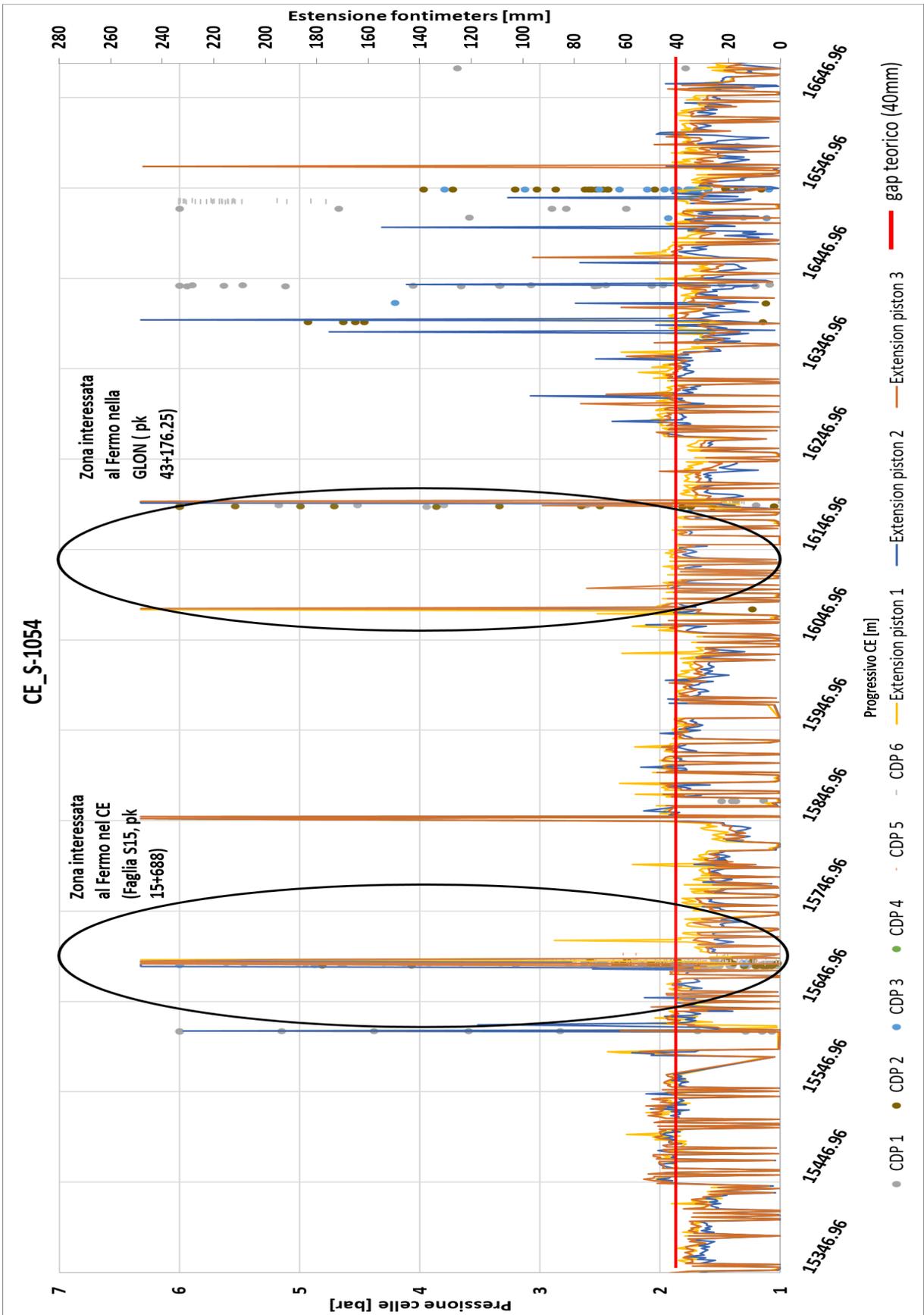
Allegato 3 – Parametri TBM S-1054 (pk 15+346 a pk 16+646): Energia specifica di scavo



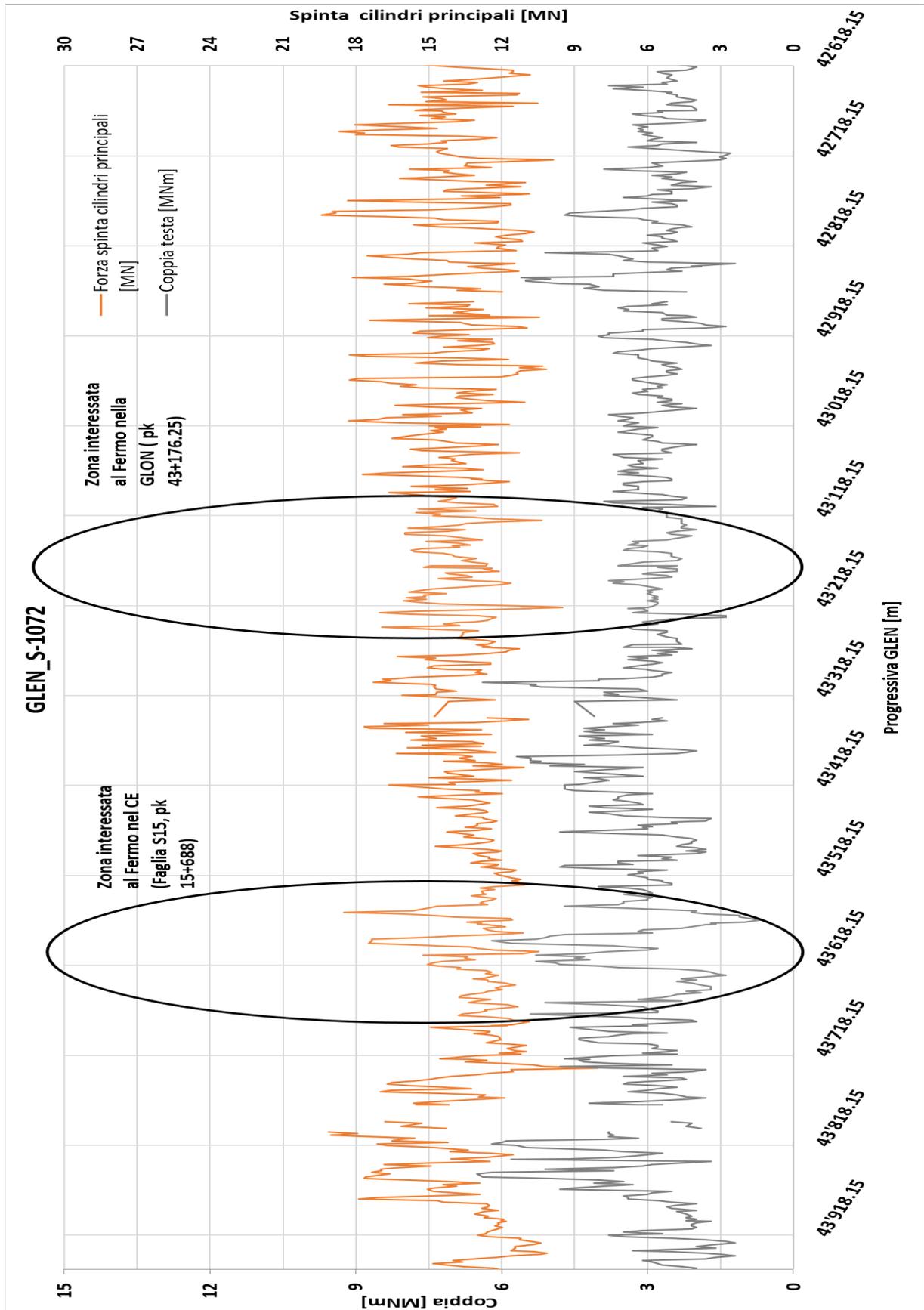
Allegato 4 – Parametri TBM S-1054 (pk 15+346 a pk 16+646): Peso dello smarino



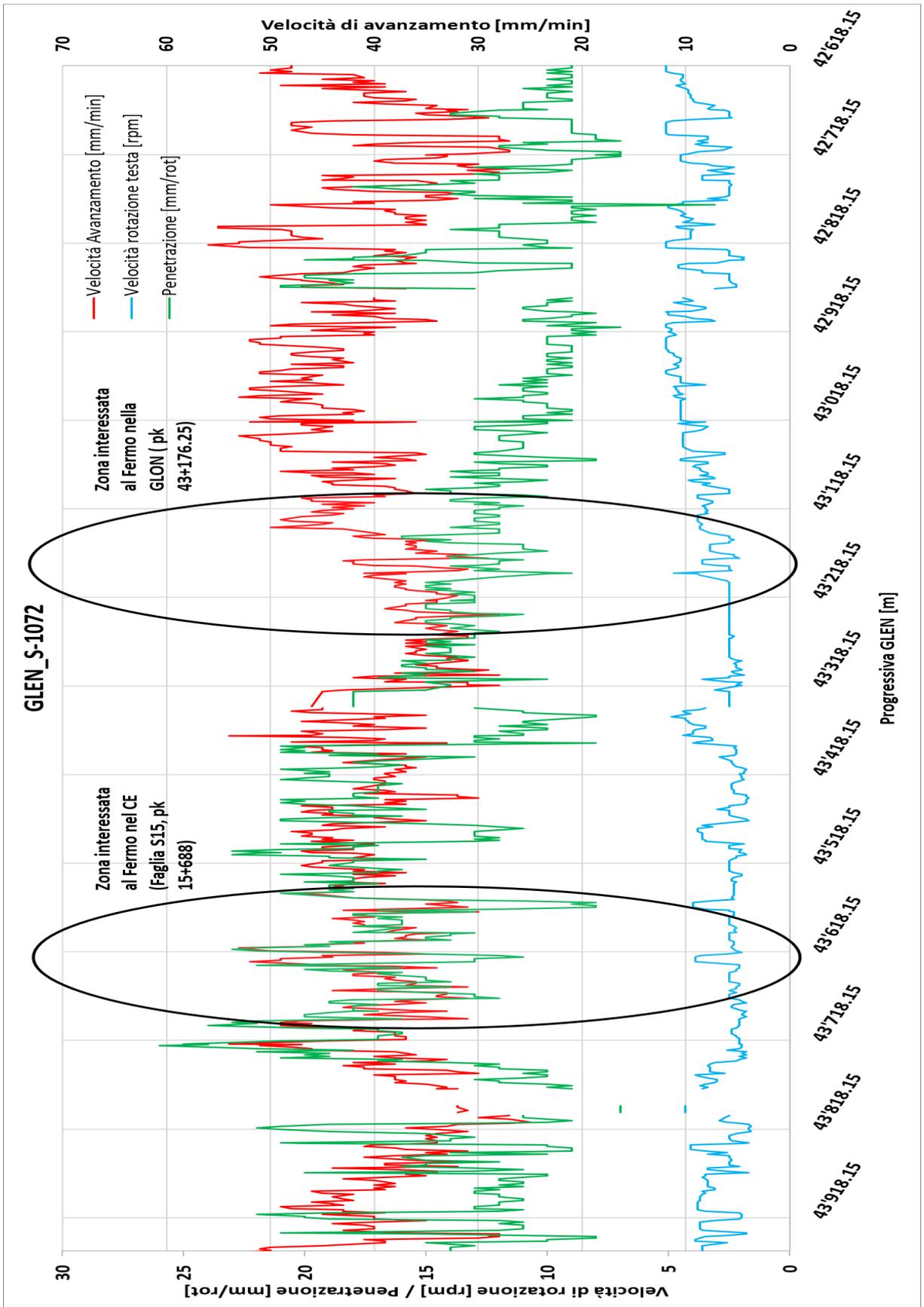
Allegato 5 – Monitoraggio TBM S-1054 (pk 15+346 a pk 16+646): Celle di pressione – Fontimeters



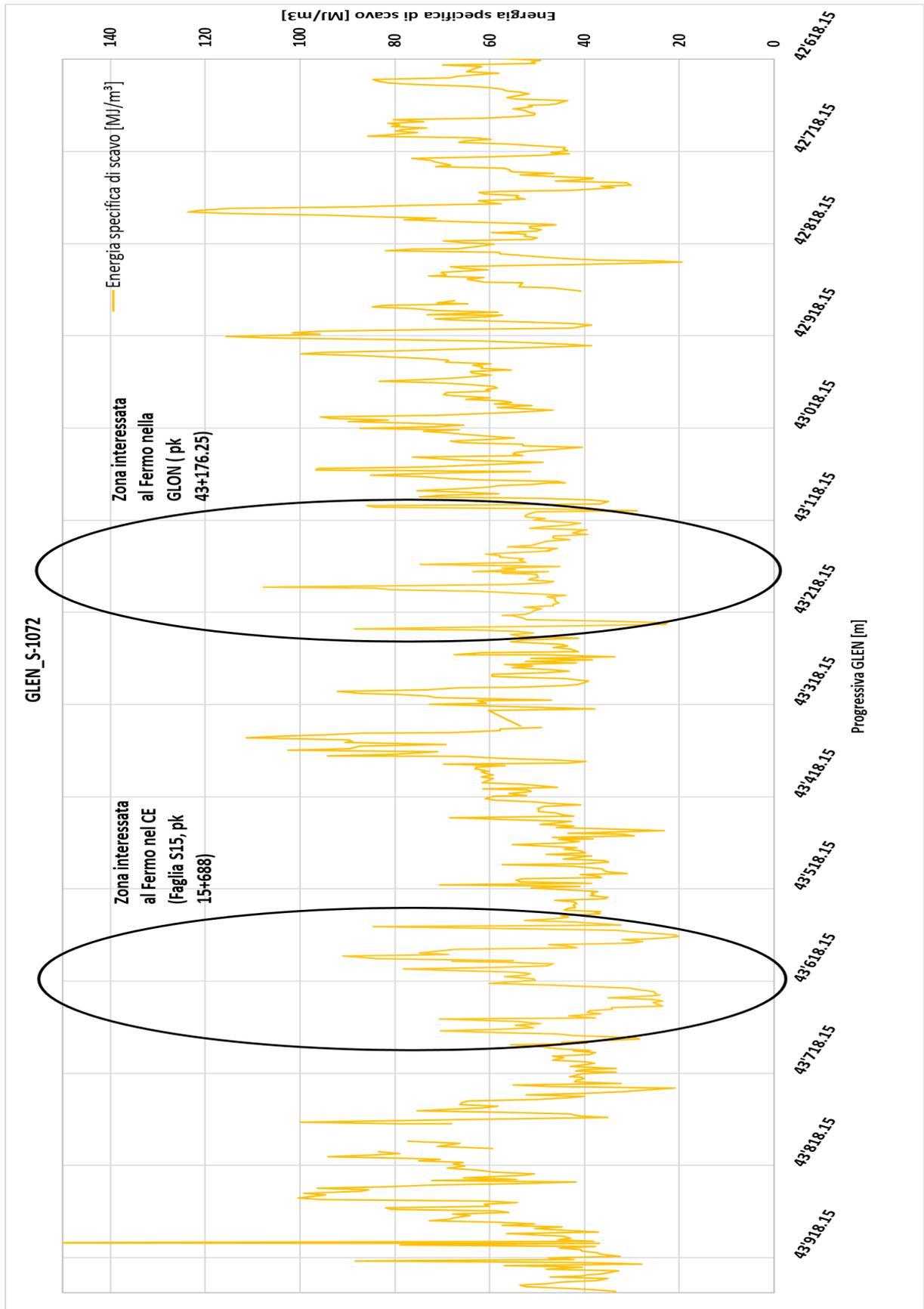
Allegato 6 – Parametri TBM S-1072 (pk 43+956 a pk 42+618): Coppia – Spinta cilindri principali



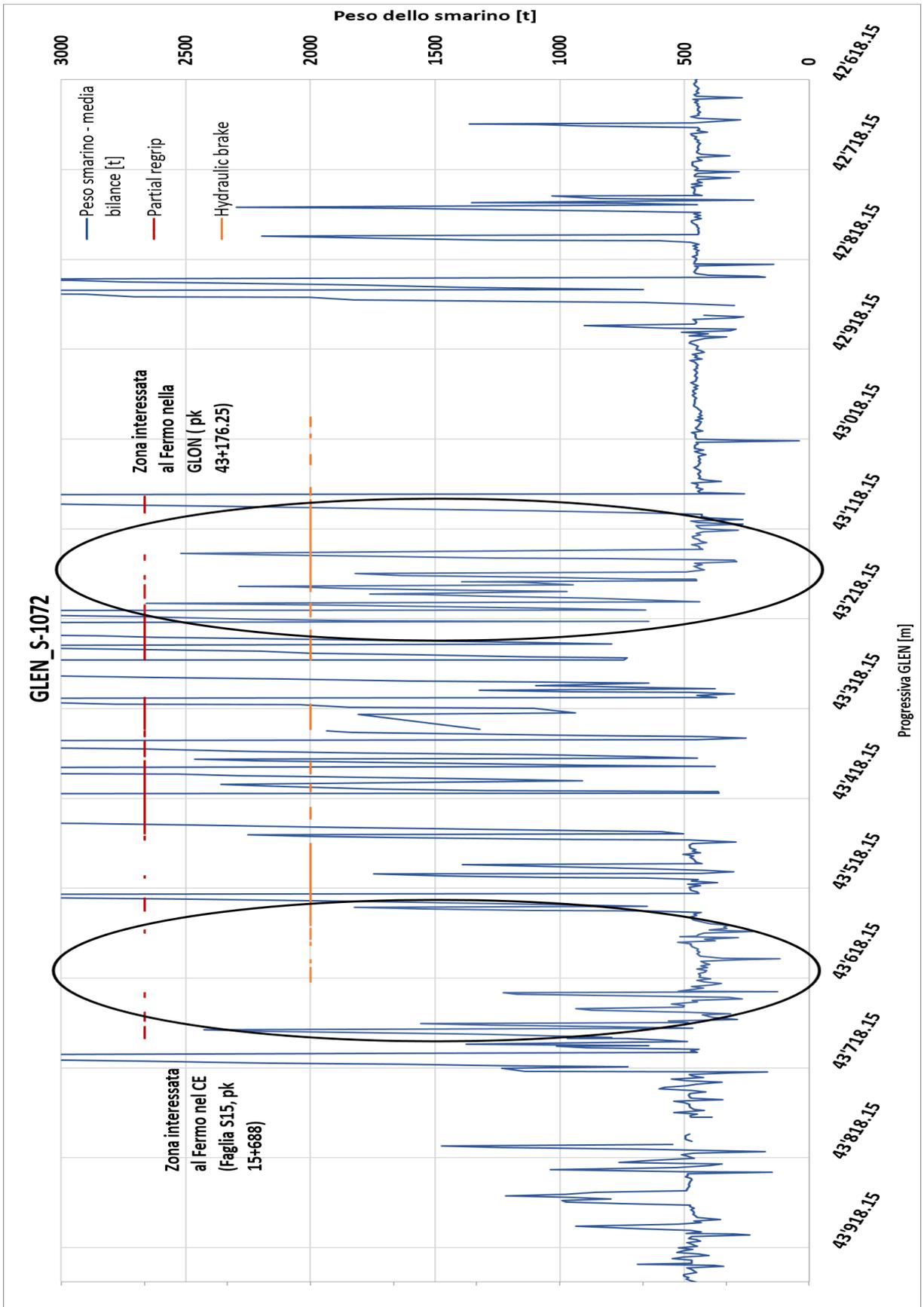
Allegato 7 – Parametri TBM S-1072 (pk 43+956 a pk 42+618): Velocità di avanzamento – Velocità di rotazione – Penetrazione



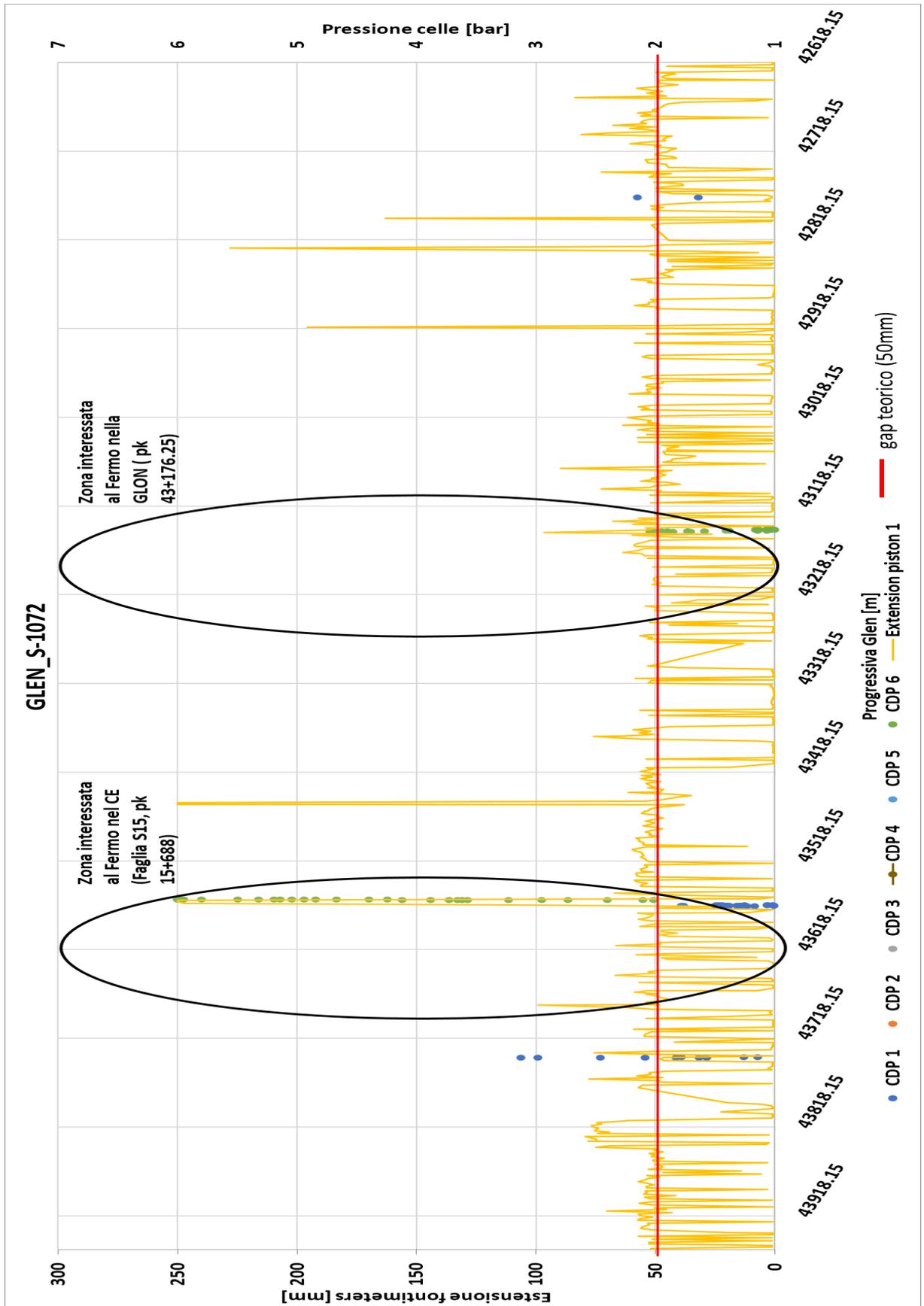
Allegato 8 – Parametri TBM S-1072 (pk 43+956 a pk 42+618): Energia specifica di scavo



Allegato 9 – Parametri TBM S-1072 (pk 43+956 a pk 42+618): Peso dello smarino



Allegato 10 – Monitoraggio TBM S-1072 (pk 43+956 a pk 42+618): Celle di pressione – Fontimeters



RINGRAZIAMENTI

Scrivere una tesi di Laurea in un periodo di emergenza sanitaria, estesa a livello mondiale, penso sia difficile per chiunque. Dunque, desidero ringraziare tutti coloro che mi sono stati vicini e hanno contribuito ad aiutarmi nella stesura di questo elaborato.

Un ringraziamento al professore Daniele Martinelli che nonostante la distanza, è riuscito a seguirmi in questa esperienza fornendomi supporto ed aiuto in tutto.

Ringrazio i miei tutor aziendali, il Dott. Ing. Antonio Voza e il Dott. Geol. Harald Egger, che mi hanno dato l'opportunità di poter ampliare il mio bagaglio culturale riguardo argomenti molto interessanti, fornendomi preziosi consigli per la mia futura carriera professionale. Un pensiero va anche a tutte le nuove persone che ho conosciuto durante i mesi di stage, colleghi che sin dal primo momento mi hanno accolto nella famiglia BBT SE.

Un ringraziamento speciale va a tutti i miei più cari amici e colleghi universitari: Stefano, Roberto, Tommaso P., Claudia, Simona, Alice, Tommaso I., Francesco, Antonio e molti altri che nonostante la distanza possa averci allontanato fisicamente, mi sono sempre stati vicini con il cuore. Oltre gli amici di una vita, sono state molto importanti le nuove amicizie: Gianluca che mi ha supportato durante la stesura di questo lavoro e a cui devo tanto ma anche Mariano, Roberta, Paola, Giuditta e Adriana che mi hanno sostenuto in questi mesi.

Infine, vorrei ringraziare chi mi ha permesso di poter fare tutto il necessario per poter arrivare a questo traguardo, la mia famiglia. Ringrazio i miei genitori che mi hanno spinto sempre a dare il massimo, permettendomi di poter continuare il mio percorso di studi al Politecnico di Torino, facendo avverare il sogno di una vita; loro che durante i periodi più duri mi hanno sempre dato i consigli di cui necessitavo. Ringrazio mia sorella Alessandra, un esempio di vita che ho sempre cercato di seguire e mio fratello Alberto, una delle persone più creative che conosco nonché l'artista di casa; sono felice che negli ultimi anni la nostra amicizia oltre che fratellanza sia diventata più solida che mai.

Grazie a tutti!

