

STUDIO CALVI S.r.l.  
Ingegneria e architettura  
Via Boezio, 10 – 27100 Pavia (Italy)  
Tel. +39.0382.538817 – Fax +39.0382.538702  
e-mail: info@studiocalvi.eu  
Website: www.studiocalvi.eu



GEODATA S.p.A.  
Corso Bolzano 14 - 10121 Turin - Italy  
Tel: +39 011.58.10.611 Fax: +39 011.59.74.40  
Website: geodata@geodata.it



**Contratto n. 0895**

**PROGETTO DI FATTIBILITA' TECNICA ED ECONOMICA PER IL  
“COMPLETAMENTO DEI LAVORI CONCERNENTI LA FRANA DI BEMA  
SUL TORRENTE BITTO, REALIZZAZIONE ED ADEGUAMENTO DEL  
COLLEGAMENTO VIARIO COL FONDOVALLE”**

*Relazione Geologica Geotecnica*

**0895-IT-Bema-PTFE-STU-01-R0**



## TABELLA DELLE REVISIONI

REV.	DATA	PREPARATO DA	CONTROLLATO DA	APPROVATO DA	NOTE
REV. 0	15/04/2020	Alessandro Riella	Attilio Eusebio	Attilio Eusebio	

DESCRIZIONE DELLA REVISIONE:

REV. 0 \_\_\_\_\_

PER APPROVAZIONE DEL CLIENTE: \_\_\_\_\_

Copia controllata [            ]

Distribuito a: \_\_\_\_\_

**Nome file: 0895-IT\_Bema\_PFTE\_STU\_01\_R0\_Relazione Geologica\_Geotecnica.docx**

*Il documento contiene informazioni che sono soggette a copyright. La riproduzione totale o parziale del documento senza autorizzazione è pertanto vietata.*



## INDICE

<b>1</b>	<b>PREMESSA.....</b>	<b>6</b>
<b>2</b>	<b>INQUADRAMENTO GENERALE .....</b>	<b>7</b>
2.1	AREA DI INTERVENTO .....	7
2.2	PROPOSTA PROGETTUALE .....	8
2.3	DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO .....	9
2.4	DOCUMENTI DI RIFERIMENTO .....	10
<b>3</b>	<b>INQUADRAMENTO GEOLOGICO-GEOMORFOLOGICO .....</b>	<b>12</b>
3.1	ASSETTO STRUTTURALE .....	14
3.2	MONITORAGGIO DELLA FRANA DI BEMA.....	16
<b>4</b>	<b>MODELLO GEOMECCANICO .....</b>	<b>16</b>
4.1	STUDI PREGRESSI E DOCUMENTAZIONE DISPONIBILE .....	16
4.2	ANALISI GEOMECCANICA – METODOLOGIA APPLICATA .....	18
4.3	ANALISI GEOMECCANICA – RISULTATI .....	21
4.4	PARAMETRI DELLA ROCCIA INTATTA .....	24
<b>5</b>	<b>MODELLO GEOLOGICO E GEOMECCANICO DI RIFERIMENTO .....</b>	<b>25</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONI E RACCOMANDAZIONI.....</b>	<b>27</b>
	<b>ALLEGATO A .....</b>	<b>28</b>
	<b>ALLEGATO B .....</b>	<b>40</b>

## **1 PREMESSA**

Il Comune di Bema, mediante la procedura di affidamento diretto CIG Z952B95DAC, ha incaricato le società Studio Calvi S.r.l. e Geodata Engineering S.p.A. della redazione dello Studio di Fattibilità Tecnica ed Economica per il *"Completamento dei lavori concernenti la frana di Bema sul Torrente Bitto, realizzazione ed adeguamento del collegamento viario col fondovalle"*. Tale progetto riprende una complessa procedura analiticamente descritta nelle motivazioni della deliberazione adottata dalla Giunta Comunale in data 9/11/2019, n.36 e ha lo scopo di fornire indicazione relativamente alle integrazioni finanziarie necessarie al Comune di Bema per la realizzazione dell'opera.

Di seguito si riporta la relazione Geologica e Geotecnica dell'intervento redatta a firma del Dott. Geol. Giuseppe Attilio, in qualità di Direttore Tecnico di Geodata Engineering, iscritto al n.154 dell'Albo professionale dell'Ordine dei Geologi del Piemonte.

## 2 INQUADRAMENTO GENERALE

### 2.1 AREA DI INTERVENTO

Il Comune di Bema (800 m.s.l.m.) si trova in Provincia di Sondrio a 9 km da Morbegno, tra la valle del Bitto di Albaredo e quella di Gerola, in versante orobico, all'interno del Parco Regionale delle Orobie Valtellinesi. Si sviluppa su un ampio terrazzo ai piedi del Monte Berro (1870 m), in posizione dominante verso Morbegno. L'abitato è circondato da prati coltivati a foraggio.



Figura 1: Inquadramento territoriale del Comune di Bema



Figura 2: Vista del Comune di Bema

Nel passato l'economia nel territorio di Bema era di tipo rurale, legata principalmente all'agricoltura ed alla pastorizia. Nel corso degli anni il Comune ha subito un fenomeno di emigrazione che ha comportato una riduzione della popolazione da circa 440 abitanti, agli inizi del Novecento, a meno di 150 abitanti. Essendo

pressoché inesistenti le attività secondarie e d artigianali la maggior parte dei residenti si reca quotidianamente a valle per esigenze lavorative.

Il progetto in questione è prevalentemente riferito alle opere viarie di collegamento del Comune con il fondovalle. Visto il contesto montano che caratterizza Bema risulta infatti necessaria la disponibilità di una rete di trasporti adeguata per garantire la sopravvivenza ed il rilancio di un nucleo storico che rischia di essere compromesso per via delle difficoltà che l'attuale infrastruttura viaria comporta.

## **2.2 PROPOSTA PROGETTUALE**

La richiesta del Comune di Bema relativamente la redazione del presente Studio di Fattibilità nasce a valle di una serie di vicissitudini che si sono succedute negli anni passati.

Il progetto in questione ha inizio grazie all'accordo stipulato l'11 Agosto 2005 tra la Regione Lombardia, l'Amministrazione Provinciale di Sondrio ed i Comuni di Bema e Morbegno. Tale accordo prevedeva la progettazione preliminare in capo al Comune di Bema per tutto l'intervento, sia di difesa del suolo che viabilistico, con riqualifica della SP 8 dir. A fino al ponte sul T. Bitto ed il proseguimento con la realizzazione ex novo del tratto fino a congiungersi con la Strada Comunale "Vigna-Bema".

I livelli progettuali si susseguono negli anni fino al livello di Progettazione Esecutiva nell'Aprile del 2007.

Grazie alla Convenzione dell'11.12.2012 no. 7 e relativo atto di rettifica del 26.02.2013 n. 7 stipulati tra il Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti ed il Comune di Bema, con riferimento all'appalto dei lavori "frana sul torrente Bitto, consolidamento dei versanti e realizzazione delle infrastrutture viarie per il collegamento dell'abitato di Bema con il fondovalle LOTTO A", viene messa a disposizione la somma di 5.546.183,46 di Euro per la realizzazione dell'opera.

In data 4 Giugno 2015, su mandato del Provveditorato alle OO.PP. della Lombardia e dell'Emilia-Romagna, il Prof. Geol. Lamberto Griffini redige una "consulenza geologica sulle possibili problematiche connesse alla realizzazione delle opere in progetto" dal quale si evidenziano, a fronte di precise valutazioni tecniche presenti nel PE, serie perplessità sulla reale fattibilità dell'opera così come progettata, non ritenendo si realizzino le condizioni di sicurezza del cantiere e dell'area, tali per cui l'intero impianto progettuale risulterebbe non approvabile.

A valle della suddetta consulenza il giorno 28 Luglio 2015 il Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti comunica al Comune di Bema il Recesso dalla Convenzione dell'11.12.2012 n. 7 e relativo atto di rettifica del 26.02.2013 n. 7.

Ne Dicembre 2017 l'ATI affidataria dei lavori di costruzione (Accisa S.p.A., Rete Costruzioni s.r.l., Valena S.r.l.) del progetto in questione redige quindi una "verifica di fattibilità progettuale in base alle indicazioni del commissario ad acta relativamente alla realizzazione delle infrastrutture viarie per il collegamento dell'abitato di Bema con il fondovalle – LOTTO A". In tale documento viene proposta una variante al progetto originario che prevede l'allungamento del tratto in galleria naturale per superare la zona instabile della frana sul T. Bitto e la realizzazione di rilevati in terra rinforzata per la parte di tracciato fuori terra. La proposta dell'ATI mostra come sarebbe possibile contenere i costi dell'opera, nonostante l'allungamento della galleria naturale, rientrando nella somma a disposizione del Comune di Bema per la realizzazione dell'opera.

In data 10-01-2018 il Prof. Geol. Lamberto Griffini, su incarico del Comune di Bema, nella persona del Commissario ad acta Dott. Umberto Sorrentino, redige una "consulenza geologica e geomeccanica per la valutazione della fattibilità del progetto" nella quale si conferma la fattibilità della proposta dell'ATI.

Il presente studio di fattibilità è stato quindi sviluppato partendo dalla soluzione in variante proposta dall'ATI e sviluppando le considerazioni progettuali ritenute necessarie per il completamento dell'opera.



## 2.3 DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO

Il progetto prevede il rifacimento della strada esistente SP 8 dir. A dall'uscita Nord della galleria artificiale esistente al ponte che attraversa il torrente Bitto di Albaredo come si mostra in Figura 3.

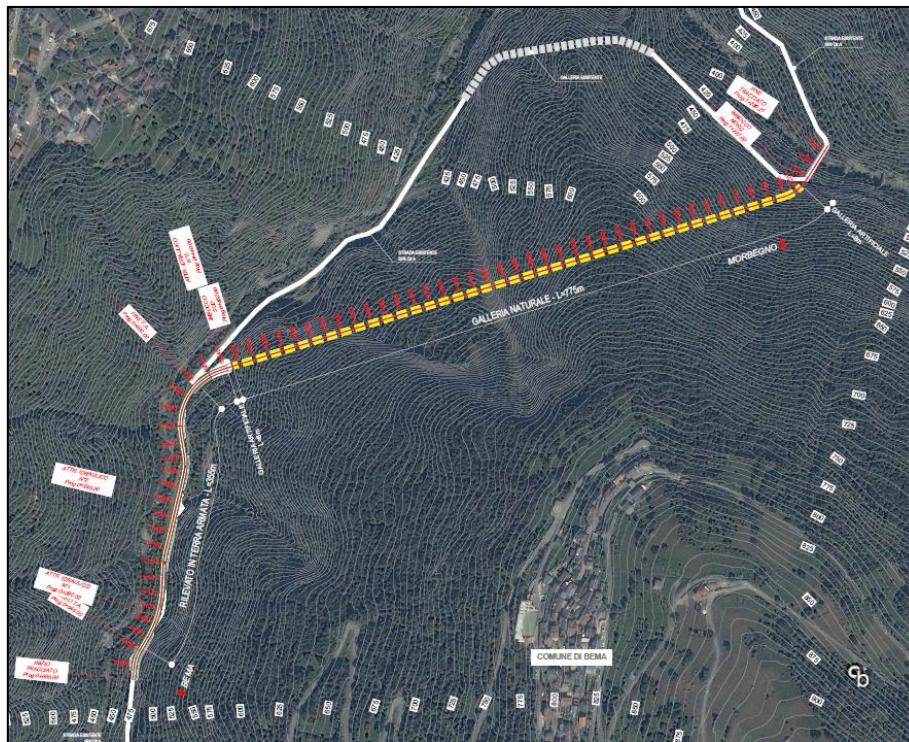


Figura 3: Planimetria del progetto

Il progetto presenta un primo tratto di circa 400m in rilevato da realizzarsi con la tecnologia della terra armata ed un secondo tratto in sotterraneo lungo circa 780m per superare la frana di Bema e collegarsi al ponte esistente.

Le opere in rilevato consentiranno un recupero graduale di quota tra l'imbocco Sud della galleria naturale e l'uscita Nord della galleria artificiale esistente. La strada attuale infatti risulta avere una pendenza pari a circa il 13% che sarà ridotto al 7,75%, 2,4% e 0,6% rispettivamente nelle zone iniziali, centrali ed in galleria come si evince dalla Figura 4.

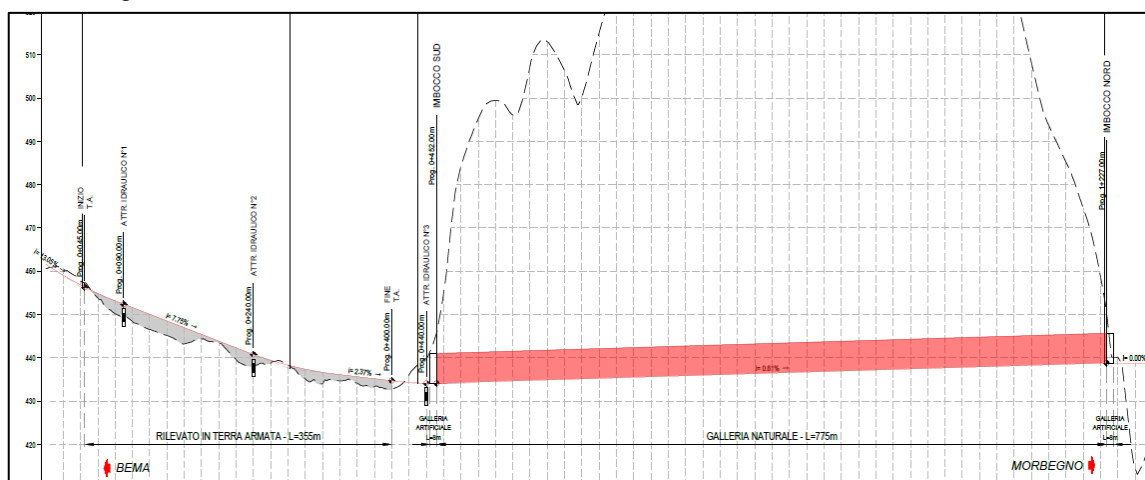


Figura 4: Stralcio del profilo longitudinale di progetto

Lungo il tratto in terra rinforzata è prevista la realizzazione di no. 3 attraversamenti idraulici per garantire il

deflusso delle acque lungo le pendici e le linee di impluvio che verrebbero altrimenti occluse dalle opere in rilevato.

È incluso inoltre nel progetto la realizzazione di interventi di stabilizzazione delle scarpate lato monte lungo il percorso stradale, la stabilizzazione del piede della frana di Bema ed il rifacimento di 54m circa di muratura nella zona di Crocetta, all'ingresso dell'abitato di Bema.

## 2.4 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

Gli elaborati di riferimento alla presente relazione, relativi alla presente fase progettuale sono elencati in Tabella 1.

**Tabella 1: Elaborati di riferimento attinenti al Progetto di fattibilità tecnica ed economica**

No Documento	Codice Documento
Elenco Elaborati	0895-IT-Bema-PFTE-GEN-01-R1
Relazione Generale e Tecnica di Progetto	0895-IT-Bema-PFTE-GEN-02-R1
Corografia con proposta di tracciato	0895-IT-Bema-PFTE-GEN-03-R0
Piano Particellare preliminare	0895-IT-Bema-PFTE-GEN-04-R1
Inquadramento Urbanistico	0895-IT-Bema-PFTE-GEN-05-R0
Relazione Sismica e sulle Strutture	0895-IT-Bema-PFTE-STU-02-R0
Prime indicazioni e prescrizioni per la stesura dei Piani di Sicurezza	0895-IT-Bema-PFTE-STU-03-R0
Planimetria del tracciato su ortofoto	0895-IT-Bema-PFTE-TRA-01-R0
Profilo Longitudinale del tracciato	0895-IT-Bema-PFTE-TRA-02-R0
Sezione Tipo in galleria	0895-IT-Bema-PFTE-TRA-03-R0
Sezioni Tipo in rilevato	0895-IT-Bema-PFTE-TRA-04-R0
Carta Geologica/Geomorfologica	0895-IT-Bema-PFTE-GEO-01-R0
Carta dei dissesti su base dati geografica: GEOIFFI	0895-IT-Bema-PFTE-GEO-02-R0
Profilo e sezioni geologiche	0895-IT-Bema-PFTE-GEO-03-R1
Galleria Naturale - Carpenteria delle sezioni tipo	0895-IT-Bema-PFTE-TUN-01-R0
Galleria Naturale - Sezioni Tipo di Scavo e Consolidamento - 1 di 2	0895-IT-Bema-PFTE-TUN-02-R0
Galleria Naturale - Sezioni Tipo di Scavo e Consolidamento - 2 di 2	0895-IT-Bema-PFTE-TUN-03-R0
Opere d'arte minori - attraversamenti idraulici	0895-IT-Bema-PFTE-MIN-01-R0
Calcolo Sommario di Spesa	0895-IT-Bema-PFTE-STI-01-R1
Elenco Prezzi Unitari	0895-IT-Bema-PFTE-STI-02-R1
Quadro Economico	0895-IT-Bema-PFTE-STI-03-R1

Il modello geologico, geomorfologico e geotecnico assunto come riferimento per il presente Progetto di Fattibilità, riportato nel seguito della presente relazione e negli elaborati grafici specifici (Carta Geologica/Geomorfologica, Carta dei dissesti su base dati geografica: GEOIFFI, Profilo e sezioni geologiche) è stato elaborato dall'analisi degli studi ed indagini pregresse, i più rilevanti dei quali sono elencati nel seguito (in ordine cronologico):

1. Genio Civile di Sondrio. *"Frana di Bema – Indagine Geologica - CARTA GEOLOGICA"*; M. Azzola e T. Tuia, 28/04/1988;
2. Genio Civile di Sondrio. *"Frana di Bema – Indagine Geologica – SONDAGGI REALIZZATI DALLA DITTA RODIO SPA"*; M. Azzola e T. Tuia, 28/04/1988;
3. Così M. *"La frana in roccia di Bema (Valtellina, Italia)"* Padova, Società Cooperativa Tipografica, 1989;
4. Azzola M. (1991). *"The Bema Landslide: Analysis and Monitoring."*
5. P. Frolidi; P. Lunardi (1994). *"The Engineering geological study of the Bema Landslide in North Italy"*.
6. Comune di Bema (SO). *"Lavori concernenti la frana sul T. Bitto. Consolidamento dei versanti – Realizzazione infrastrutture viarie per il collegamento dell'abitato di Bema con il fondo valle. LOTTO A – ANALISI GEOLOGICA – ALLEGATI 1,2,3,4"*; Progetto Definitivo, Agosto 2006.
7. Comune di Bema (SO). *"Lavori concernenti la frana sul T. Bitto. Consolidamento dei versanti – Realizzazione infrastrutture viarie per il collegamento dell'abitato di Bema con il fondo valle. LOTTO A – SEZIONE GEOLOGICO TECNICA – TRATTO GALLERIA BEMA"*; Progetto Definitivo, Agosto 2006.
8. Comune di Bema (SO). *"Lavori concernenti la frana sul T. Bitto. Consolidamento dei versanti – Realizzazione infrastrutture viarie per il collegamento dell'abitato di Bema con il fondo valle. LOTTO A – CARTA LITOLOGICA"*; Progetto Definitivo, Agosto 2006.
9. Comune di Bema (SO). *"Lavori concernenti la frana sul T. Bitto. Consolidamento dei versanti – Realizzazione infrastrutture viarie per il collegamento dell'abitato di Bema con il fondo valle. LOTTO A – CARTA STRUTTURALE"*; Progetto Definitivo, Agosto 2006.
10. Comune di Bema (SO). *"Lavori concernenti la frana sul T. Bitto. Consolidamento dei versanti – Realizzazione infrastrutture viarie per il collegamento dell'abitato di Bema con il fondo valle. LOTTO A – CARTA IDROLOGICA IDROGEOLOGICA"*; Progetto Definitivo, Agosto 2006.
11. Comune di Bema (SO). *"Lavori concernenti la frana sul T. Bitto. Consolidamento dei versanti – Realizzazione infrastrutture viarie per il collegamento dell'abitato di Bema con il fondo valle. LOTTO A – UBICAZIONE DEI SONDAGGI E DELLE OPERE DI PROTEZIONE"*; Progetto Definitivo, Agosto 2006.
12. Comune di Bema (SO). *"Lavori concernenti la frana sul T. Bitto. Consolidamento dei versanti – Realizzazione infrastrutture viarie per il collegamento dell'abitato di Bema con il fondo valle. LOTTO A – ALLEGATO B2 – RELAZIONE GEOTECNICA"*; Progetto Definitivo, Gennaio 2007.
13. Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti – Provveditorato Interregionale delle OO.PP. per la Lombardia e l'Emilia Romagna. *"Lavori concernenti la frana sul T. Bitto. Consolidamento dei versanti – Realizzazione infrastrutture viarie per il collegamento dell'abitato di Bema con il fondo valle. CONSULENZA GEOLOGICA SULLE POSSIBILI PROBLEMATICHE CONNESSE ALLA REALIZZAZIONE DELLE OPERE IN PROGETTO"*; Studio Griffini, 04/05/2015;
14. Comunità Montana Valtellina di morbegno. *"Prolungamento del Sentiero Valtellina volto al superamento dell'attuale criticità rappresentata dal Torrente Tartano (1° Lotto – Opere*

*infrastrutturali della rete ciclopeditonale) – Progetto di Fattibilità Tecnica ed Economica –  
RELAZIONE GEOLOGICA, SISMICA E GEOMECCANICA"; 29/05/2017;*

15. Comune di Bema (SO). *"Lavori concernenti la frana sul T. Bitto. Consolidamento dei versanti –  
Realizzazione infrastrutture viarie per il collegamento dell'abitato di Bema con il fondo valle.  
CONSULENZA GEOLOGICA E GEOMECCANICA PER LA VALUTAZIONE DELLA FATTIBILITA'  
DEL PROGETTO"; Studio Griffini, 06/11/2017;*
16. Comune di Bema (SO). *"Lavori concernenti la frana sul T. Bitto. Consolidamento dei versanti –  
Realizzazione infrastrutture viarie per il collegamento dell'abitato di Bema con il fondo valle.  
CONSULENZA GEOLOGICA E GEOMECCANICA PER LA VALUTAZIONE DELLA FATTIBILITA'  
DEL PROGETTO. Rapporto finale"; Studio Griffini, 01/02/2018;*
17. REGIONE LOMBARDIA – Sistema Informativo Territoriale (S.I.T.); *"Base dati geografica: GEOIFFI  
– Inventario dei fenomeni franosi della Regione Lombardia"; Versione 3.0, Settembre 2016;*
18. ARPA Lombardia – Settore Tutela dai Rischi Naturali – Centro Monitoraggio Geologico.  
*"MONITORAGGIO GEOLOGICO SUL DISSESTO BEMA – COMUNE DI BEMA (SO)";  
Aggiornamento Maggio 2017.*

### **3 INQUADRAMENTO GEOLOGICO-GEOMORFOLOGICO**

Il substrato roccioso dell'area in esame risulta costituito principalmente da gneiss a granato e staurolite, talvolta passanti a micascisti, con intercalazioni di quarziti. L'analisi dei dati geologici disponibili evidenzia la presenza di frequenti livelli di miloniti nerastre, il cui spessore può variare da qualche decimetro a decine di metri, orientati parallelamente alla scistosità. Quest'ultima risulta orientata prevalentemente in direzione NW-SE, con inclinazioni variabili tra i 40°÷80°.

La morfologia glaciale caratterizza i settori altimetricamente più elevati della valle del T. Bitto, mentre il fondovalle è costituito da una profonda incisione fluviale dalla tipica forma a "V" con ripide scarpate rocciose.

Lungo il versante, ai piedi del quale si sviluppa l'intervento in fase di studio, sono presenti due movimenti franosi riconosciuti come "attivi/riattivati/sospesi" nella cartografia IFFI (anno 2017) e oggetto di interventi di sistemazione a partire dal 1990. Il primo, più importante, considerato "frana storica" in quanto mobilitato nel 1872 e nel 1987, è classificato IFFI n°0140200200, a dinamica complessa, con aree di colamento rapido, con dimensioni circa 60.000 m<sup>2</sup>, l'altro, di dimensioni ridotte, classificato IFFI n°0140141600, anch'esso a dinamica complessa, con dimensioni 20.000 m<sup>2</sup> circa (dati da cartografia IFFI).

La frana storica ha una larghezza al piede di circa 300 m e una lunghezza che si sviluppa tra circa i 380 m s.l.m. e i 740 m s.l.m. (nicchia di distacco della frana). L'altra frana, di dimensioni ridotte, ha una larghezza al piede di circa 60m e una lunghezza che si sviluppa tra circa i 420 m s.l.m. e i 630 m s.l.m.

La figura seguente, estratta dalla "Carta dei dissesti su base dati geografica: GEOIFFI" (Rif.: Carta dei dissesti su base dati geografica: GEOIFFI) mostra i dissesti presenti nell'area dell'intervento e nelle zone limitrofe sulla base dei dati provenienti dalla cartografia IFFI (dati reperibili on line 2020).

Dal punto di vista strutturale si riconoscono due zone con caratteristiche geomeccaniche totalmente differenti: il tratto di versante a monte della nicchia della frana principale è caratterizzato da un substrato roccioso meno alterato e compatto, mentre la zona nella quale si sviluppa il dissesto è costituita da rocce intensamente fratturate ed alterate, con fenomeni di rilascio tensionale ed intensa circolazione idrica.

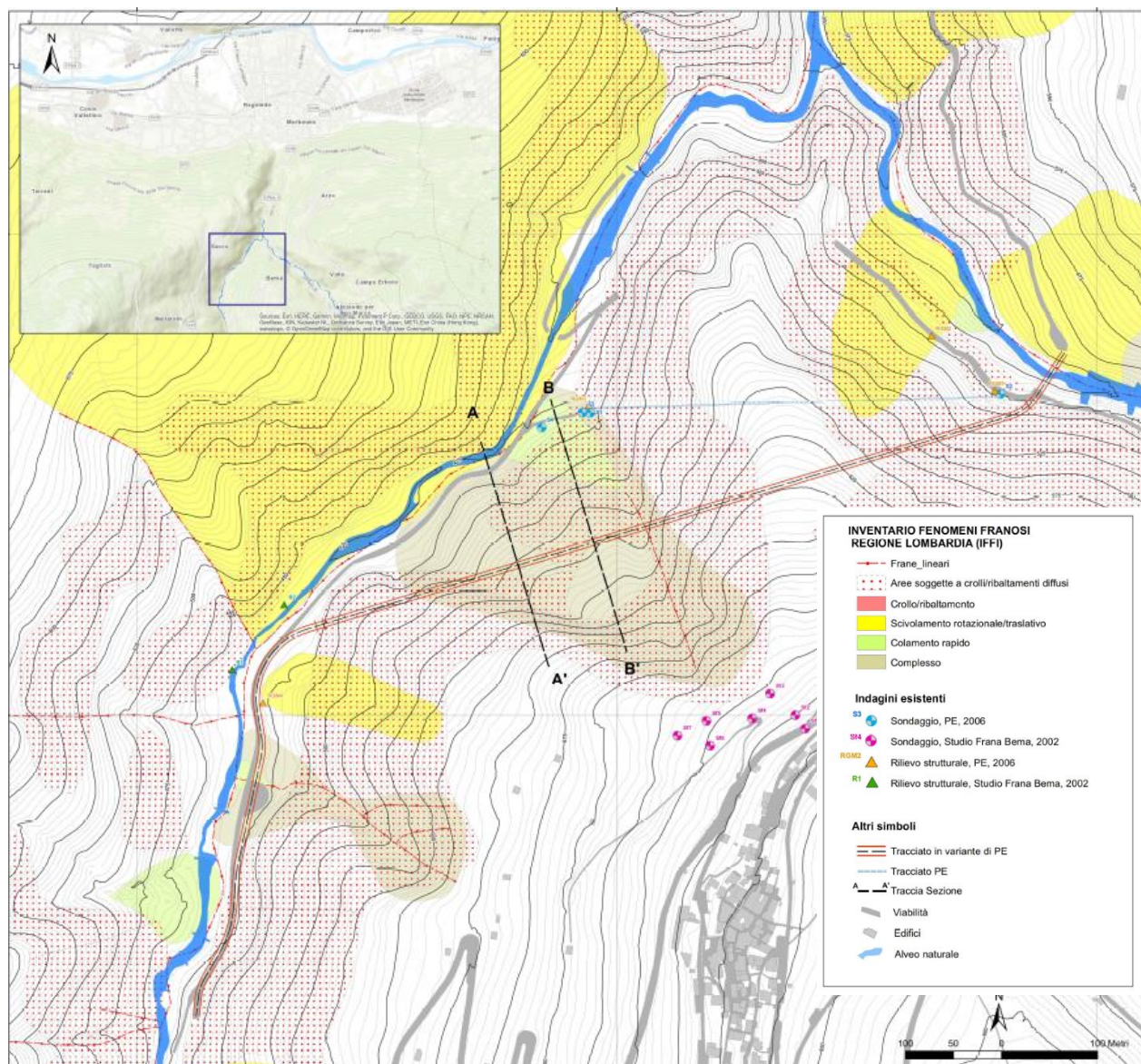
Il tratto di versante interessato dalla frana è caratterizzato da un substrato roccioso affiorante o subaffiorante, localmente ricoperto da sottili e discontinue coltri eluvio-colluviali (spessori di 0.5÷2 m).

Nella parte sommitale della frana principale sono evidenti i fenomeni di arretramento del fronte di distacco il cui movimento avviene in genere con crolli di piccole entità (alcuni metri cubi).

Al piede del versante, in occasione di grandi piene del torrente Bitto, si innescano fenomeni di erosione



con asportazione di materiali dell'accumulo di frana; tale fenomeno contribuisce allo sviluppo di fenomeni di rilascio tensionale nel sovrastante ammasso roccioso alterato e decompresso.



**Figura 5: Stralcio della Carta dei dissesti su base dati geografica: GEOIFFI.**

L'acclività dei versanti e la fratturazione degli ammassi rocciosi favorisce il drenaggio delle acque verso i collettori di fondo valle e dunque, in base a quanto descritto nei documenti progettuali esistenti, non è in genere presente una falda di base stabile, come sembra infatti essere dimostrato dall'innalzamento temporaneo del livello piezometrico nei pozzi, legato ai periodi di intense precipitazioni con percolazione delle acque superficiali in profondità.

Sulla base degli studi esistenti è consolidata la classificazione della frana di Bema come una frana complessa in roccia. Il fenomeno franoso è favorito da una serie di fattori, tra i quali i principali sono la forte fratturazione e l'alterazione del substrato roccioso, riconducibili all'assetto geo-strutturale dell'ammasso.

Il primo evento franoso dell'area si verificò nel 1873 (volume stimato di 250.000 m<sup>3</sup>) e determinò uno sbarramento dell'alveo con la conseguente formazione di un invaso a monte lungo circa due chilometri. Successivamente si registrarono delle riattivazioni del fenomeno in concomitanza con gli eventi alluvionali che interessarono il bacino nell'estate 1987. In tale periodo si ebbe un nuovo evento di grandi proporzioni che

coinvolse tutta l'area dissestata, con volumi che vengono stimati tra 500.000 m<sup>3</sup> (Azzola 1991) e 2 milioni (Lunardi e Froidi 1994). Il materiale si accumulò nell'alveo e nella parte bassa del versante formando una conoide. In seguito a questi eventi vennero decisi gli interventi di sistemazione.

Oggi la frana si mostra con una nicchia pressoché completamente vegetata e ricoperta di alto fusti a testimonianza di una certa stabilità raggiunta negli ultimi decenni. La falda di detrito nella parte medio inferiore del dissesto, generata dalle passate attività di crollo della frana, presenta una copertura vegetazionale più giovane e mostra alcuni segni di attività recente nella parte di impluvio.

Situazione del tutto simile è riscontrabile sul secondo fenomeno, posto a sud della frana di Bema, che seppur in scala assai minore mostra analoga situazione.

### 3.1 ASSETTO STRUTTURALE

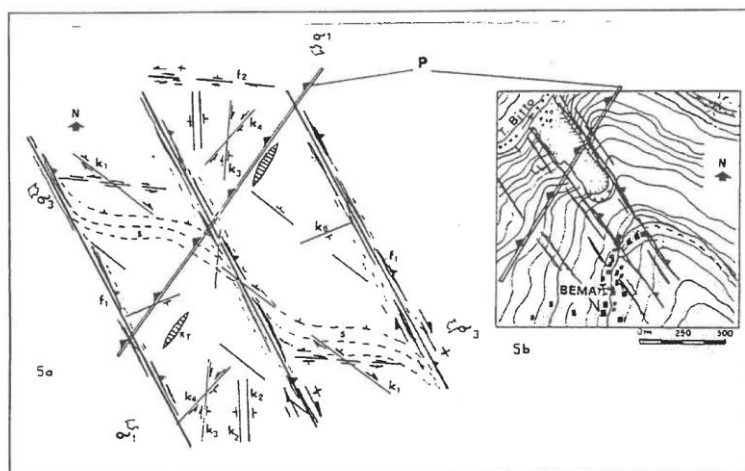
L'assetto strutturale dell'area risulta essere estremamente complesso e la schematizzazione delle numerose discontinuità che caratterizzano il substrato roccioso non è semplice in base ai dati disponibili.

Nella documentazione progettuale inerente alla soluzione precedente definisce la presenza di due zone strutturali differenti, una a monte della zona di frana (con substrato roccioso di qualità medio-buona) e l'altra in corrispondenza del ciglio di quest'ultima (con substrato roccioso estremamente scadente). Entrambe le zone risultano comunque discostate rispetto alla posizione del tracciato oggetto del presente studio di fattibilità.

Nella prima zona, a monte della frana, si osservano fasce milonitiche in corrispondenza di piani di movimento subverticali a direzione E-W e NNW-SSE e numerosi giunti di taglio raggruppabili in 6 famiglie. La scistosità dello gneiss di Morbegno risulta leggermente piegata, con giacitura variabile da N75E (inclinazione 70-80°) a N40E (inclinazione 70-80°).

La seconda zona, ubicata in corrispondenza del coronamento della frana, risulta essere strutturalmente più complessa di quella descritta precedentemente e i massimi di concentrazione dei giunti sono difficilmente definibili: si osserva prevalentemente un ammasso caotico di volumi di roccia anche di notevoli dimensioni (fino a qualche decina di metri cubi) separati tra loro da fratture aperte e parzialmente riempite.

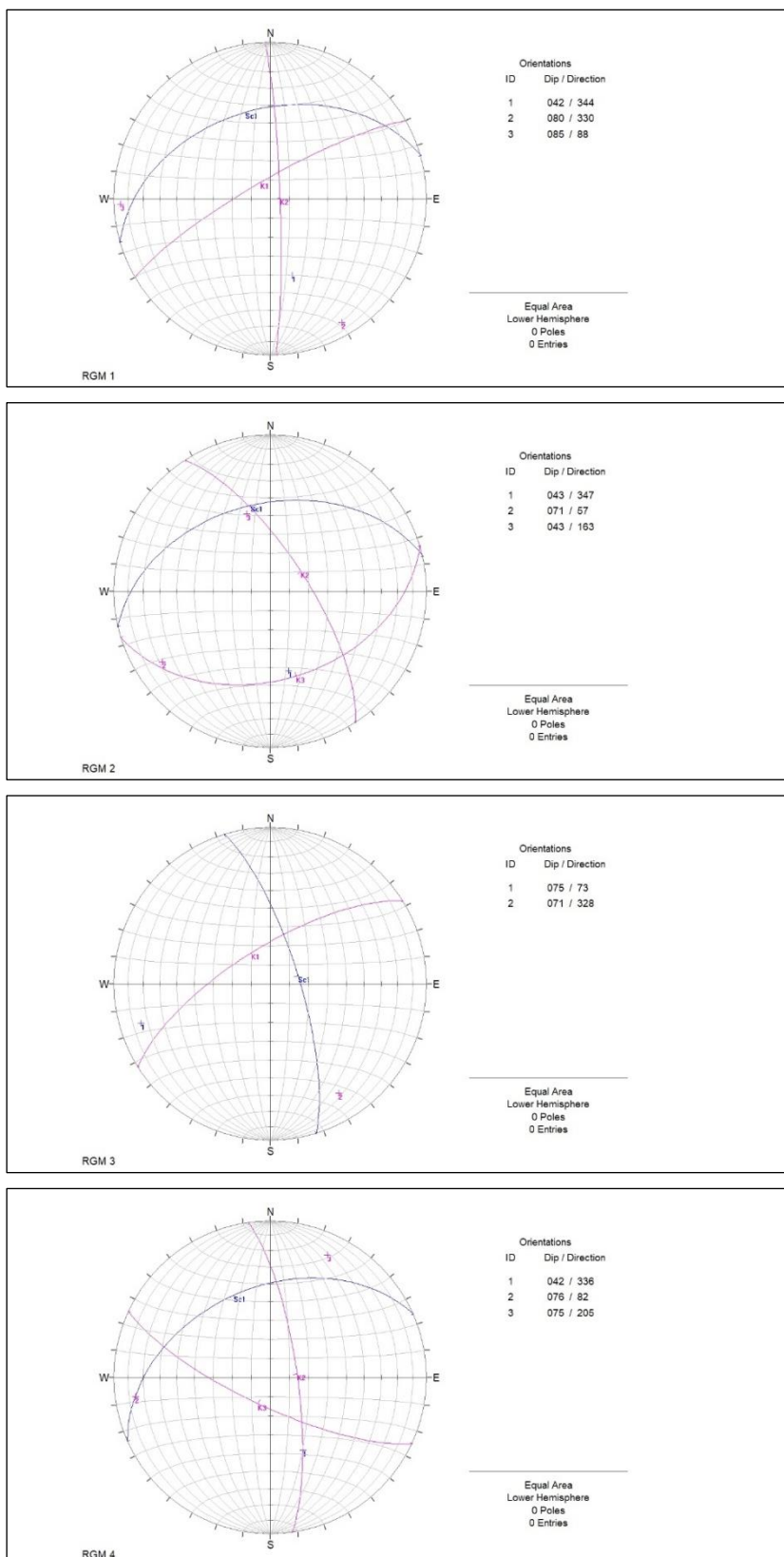
L'elemento strutturale che appare consolidato a livello bibliografico (Figura 6) è il controllo della zona di frana da parte di lineamenti tettonici subverticali e con direzione circa NNW-SSE, lungo i quali pare si concentri la presenza di livelli milonitici.



**Figura 6: Discontinuità tettoniche osservate nell'area di Bema e rappresentazione schematica del campo degli sforzi (Cosi, 1989).**

Alla quota di sviluppo del tracciato oggetto del presente studio sono stati eseguiti n.4 rilievi strutturali,

denominati RGM1, RGN2, RGM3 e RGM4, di cui si riportano nel seguito i relativi stereogrammi, dai quali si evince la presenza di una significativa dispersione della direzione dei giunti misurati.



**Figura 7: Stereogrammi dei rilievi strutturali eseguiti lungo il tracciato della soluzione precedente.**



### **3.2 MONITORAGGIO DELLA FRANA DI BEMA**

L'areale all'intorno della frana di Bema è monitorato dal 1990 sia attraverso misure in superficie (letture topografiche) che in profondità (misure piezometriche, estensimetriche multibase profonde e inclinometriche). Nel corso degli anni, si è passati da un monitoraggio automatico a uno di tipo manuale con misure di controllo con cadenza annuale. L'ultima campagna di misura che risulta attualmente disponibile è quella descritta nel Report dell'ARPA Lombardia risalente a maggio 2017.

La rete di monitoraggio installata è stata pensata con lo scopo di verificare eventuali movimenti dell'area che, sin dal 1989, era stata individuata come instabile e quindi di possibile espansione rispetto alle due frane "storiche" del versante. Conseguentemente i dati di monitoraggio non possono avere finalità di controllo dell'attività dei due corpi di frana, ma sono piuttosto finalizzati alla verifica di eventuali ampliamenti (retrogressioni) degli areali di frana tali da poter compromettere in qualche modo la sicurezza dell'abitato di Bema.

I dati acquisiti, sia quelli riguardanti il monitoraggio superficiale (dati topografici) che quelli riguardanti il monitoraggio profondo (dati inclinometrici e derivati da estensimetri multibase profondi) non si evidenziano movimenti significativi, nemmeno in concomitanza di annualità caratterizzate piovosità abbondante (es. 2002 e 2014).

L'assenza di movimenti significativi dell'area in cui sorge l'abitato di Bema è inoltre confermata dai dati dell'interferometria satellitare messi a disposizione dalla DG Protezione Civile di Regione Lombardia.

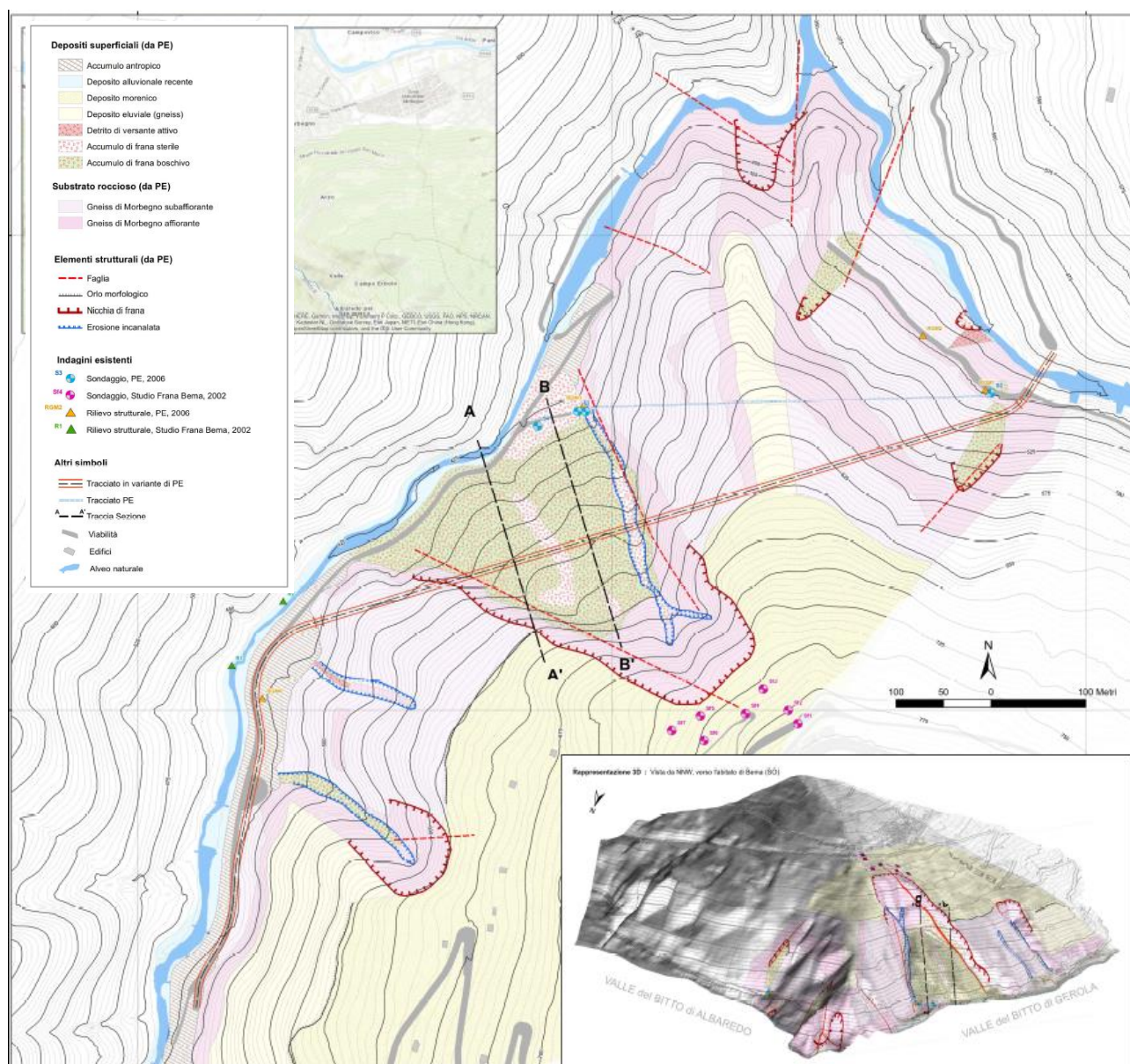
## **4 MODELLO GEOMECCANICO**

### **4.1 STUDI PREGRESSI E DOCUMENTAZIONE DISPONIBILE**

La valutazione delle condizioni d'ammasso roccioso attese durante lo scavo della galleria si basa sull'analisi dei dati estrapolabili dalla documentazione inerente i sondaggi eseguiti nell'area di progetto e nel suo intorno. I sondaggi disponibili si possono raggruppare in due gruppi in base alla fase d'esecuzione degli stessi.

I primi sondaggi eseguiti in prossimità dell'area d'intervento si riferiscono allo studio geognostico e al monitoraggio geologico della frana di Bema, iniziato nel 1988 quando è stata prima predisposta e poi messa in funzione una rete di monitoraggio avente lo scopo *"..di definire l'estensione reale dell'area di instabilità della zona di distacco con lo scopo di studiare la necessità, ove fosse necessario, di ulteriori interventi atti a garantire la sicurezza del versante sovrastante la frana, includendo principalmente la sicurezza dell'abitato di Bema"*. Questi sondaggi, di cui sono disponibili le stratigrafie (immagini di copie cartacee) con indicazioni dell'RQD e descrizioni sommarie delle condizioni dei giunti, sono ubicati a monte dell'area di frana e indagano l'ammasso roccioso a quote superiori ai 670 m s.l.m., dunque circa 200m al di sopra del livello in cui si sviluppa la galleria in progetto (440 m s.l.m. ca.). Sono rispettivamente nominati Sf1, Sf2, Sf3, Sf4, Sf5, Sf6 e Sf7 (Figura 8).





**Figura 8: Stralcio della Carta Geologica/Geomorfologica.**

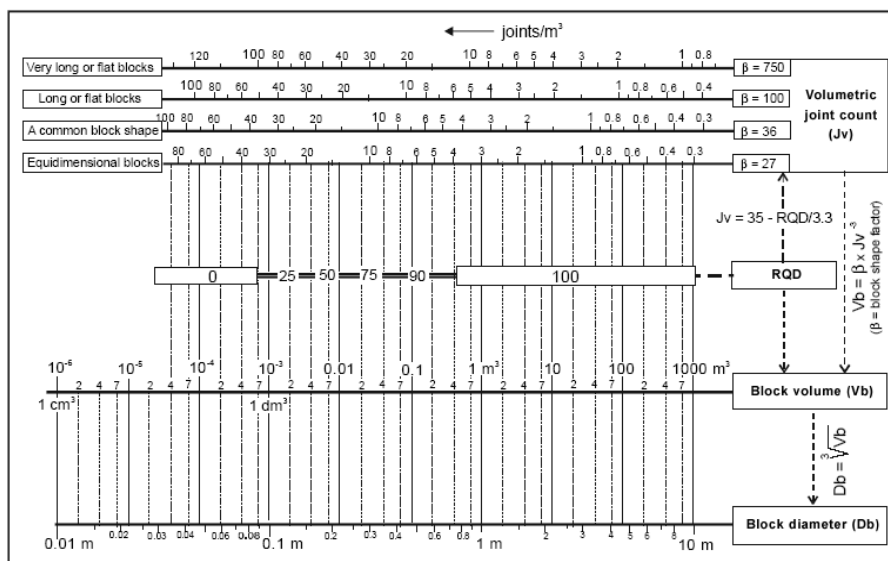
Il secondo gruppo d'indagini geognostiche è stato eseguito nel 2008, nell'ambito del progetto inerente ai *"Lavori concernenti la frana sul T. Bitto – Consolidamento dei versanti – Realizzazione delle infrastrutture viarie per il collegamento dell'abitato di Bema con il fondo valle."* Le indagini eseguite comprendono 4 sondaggi geognostici finalizzati per lo più con lo scopo di indagare le condizioni geologiche in corrispondenza del tracciato proposto all'epoca, sono dunque ubicati in corrispondenza di quest'ultimo e sono sominati S1, S2, S3 e S4, come riportato in Figura 8. Di tali sondaggi sono disponibili le stratigrafie (in PDF) e le foto delle carote con indicazioni dell'RQD e descrizioni sommarie delle condizioni dei giunti. Le caratteristiche geometriche dei sondaggi precedentemente menzionati sono riportati nella tabella seguente.

**Tabella 2: Caratteristiche geometriche dei sondaggi analizzati**

Sondaggi PE 2006				Sondaggi studio frana 1988			
S1	Quota (m s.l.m.)	S3	Quota (m s.l.m.)	Sf1	Quota (m s.l.m.)	Sf5	Quota (m s.l.m.)
	440		441		783		735
	Incl. (°)		Incl. (°)		Incl. (°)		Incl. (°)
	0		0		90		90
	Azimut (°)		Azimut (°)		Azimut (°)		Azimut (°)
	86		266		-		-
S2	L (m)		L (m)		L (m)		L (m)
	50		50		50		60
	Quota (m s.l.m.)		Quota (m s.l.m.)		Quota (m s.l.m.)		Quota (m s.l.m.)
	440		440		768		743
	Incl. (°)		Incl. (°)		Incl. (°)		Incl. (°)
	90		90		90		90
S4	Azimut (°)		Azimut (°)		Azimut (°)		Azimut (°)
	-		-		-		-
	L (m)		L (m)		L (m)		L (m)
	18		50		25		60
	Quota (m s.l.m.)		Quota (m s.l.m.)		Quota (m s.l.m.)		Quota (m s.l.m.)
	440		440		768		743
Sf3	Incl. (°)		Incl. (°)		Incl. (°)		Incl. (°)
	90		90		90		90
	Azimut (°)		Azimut (°)		Azimut (°)		Azimut (°)
	-		-		-		-
	L (m)		L (m)		L (m)		L (m)
	32		32		32		60
Sf4	Quota (m s.l.m.)		Quota (m s.l.m.)		Quota (m s.l.m.)		Quota (m s.l.m.)
	750		750		750		715
	Incl. (°)		Incl. (°)		Incl. (°)		Incl. (°)
	90		90		90		90
	Azimut (°)		Azimut (°)		Azimut (°)		Azimut (°)
	-		-		-		-
Sf7	L (m)		L (m)		L (m)		L (m)
	57,2		57,2		57,2		60

## 4.2 ANALISI GEOMECCANICA – METODOLOGIA APPLICATA

Le informazioni desumibili dai logs dei sondaggi sono state elaborate per determinare le condizioni geomeccaniche dell'ammasso roccioso definendo le caratteristiche delle discontinuità (geometria, alterazione, rugosità, ecc.) e tenendo conto del volume unitario dei blocchi più rappresentativo (GDB/ISRM, 1981; Palmstrøm, 2000, 2005). Secondo questo approccio, il grado di fratturazione dell'ammasso roccioso è stato analizzato attraverso l'indice RQD (Deere, 1989) e il parametro Volumetric Joint Count (Jv) (Palmstrøm 2000, 2005) applicato ai alle carote dei sondaggi.



**Figura 9: Relazione tra forma dei blocchi / dimensione e frequenza delle discontinuità (Palmstrøm, 2000).**

I dati dei log dei sondaggi sono stati analizzati per stimare il  $V_b$  = Volume dei blocchi, e le caratteristiche dei giunti (JR - rugosità, JA - alterazione, JL - persistenza), lungo ciascuna verticale.

Seguendo la metodologia proposta da Palmstrøm (2000-2005), i logs sono stati analizzati considerando l'RQD e il parametro  $J_v$  secondo l'equazione di seguito riportata:

$$RQD = 110 - 2,5 \times J_v$$

dalla quale:

$$J_v = \frac{110 - RQD}{2.5}$$

Ottenuto il valore di  $J_v$ , il parametro  $V_b$  (volume dei blocchi) si ricava secondo l'equazione seguente:

$$V_b = (\beta \times J_v^{-3})$$

L'attribuzione dell'indice  $\beta$  (coefficiente dei blocchi) è basata sulla tabella seguente:

**Tabella 3: Valori tipici del coefficiente di forma dei blocchi ( $\beta$ ) secondo Palmstrøm 2000, 2005.**

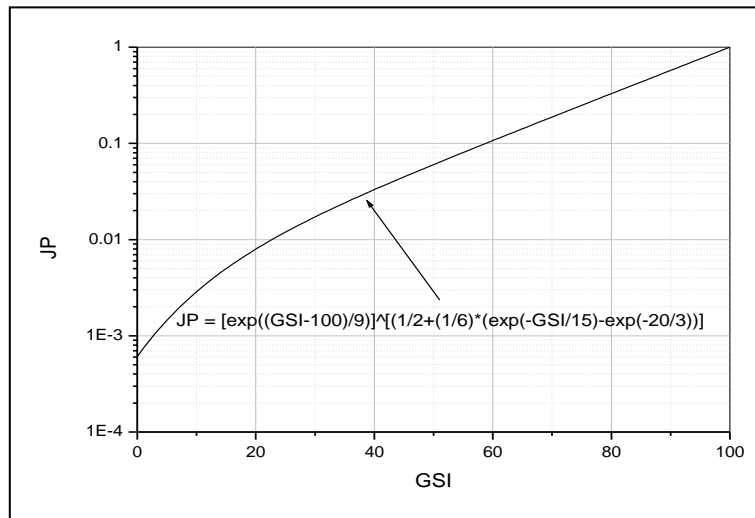
Palmstrøm, 2000	$\beta$	Palmstrøm, 2005	$\beta$
Blocks very long or flat	750	Extremely long or flat blocks	>500
Blocks flat or long	100	Very long or flat blocks	100-500
Common block shape	36	Moderately long or flat blocks	50-100
Equidimensional blocks	27	Slightly long or flat blocks	32-50
		Cubical blocks	27-32

La classificazione geomeccanica adottata in questa fase di studio è stata basata sul GSI (Geological Strength Index). Il GSI è stato calcolato utilizzando l'approccio quantitativo proposto da Russo (Russo, 2007, a,b) che correla il GSI e il Joint Parameter (JP) dell'"RMI system" di Palmstrøm (Palmstrøm, 1996), considerando che entrambi i parametri sono utilizzati per ridurre la resistenza della roccia intatta ( $\sigma_{cm}$ ) nella resistenza dell'ammasso roccioso ( $\sigma_c$ ).

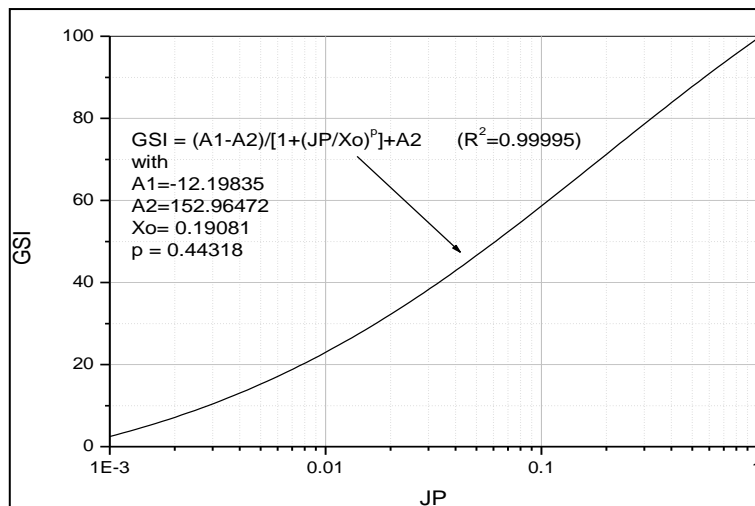
Secondo i due sistemi sopra menzionati si può definire che:

- $RMI \rightarrow \sigma_{cm} = \sigma_c \cdot JP$ ;
- $GSI \rightarrow \sigma_{cm} = \sigma_c \cdot s^a$  (dove "s" e "a" sono le costanti di Hoek & Brown's 1997).

L'approccio quantitativo (Russo, 2007, a,b), basato sulla correlazione tra JP e GSI, è riportato nei diagrammi delle figure seguenti.



**Figura 10: Relazione tra GSI e JP.**



**Figura 11: Relazione sigmoideale tra LP e GSI.**

Sulla base di queste correlazioni, il GSI è derivato mediante gli stessi parametri di input che consentono la stima di JP, ovvero il volume dei blocchi ( $V_b$ ) e il Joint Condition Factor ( $J_C$ ):

$$GSI = \frac{A1 - A2}{\left[1 + \left(\frac{JP}{x_0}\right)^p\right]} + A2$$

dove:

$$\begin{aligned} A1 &= -12.198 \\ A2 &= 152.965 \\ X_0 &= 0.191 \\ p &= 0.433 \end{aligned}$$

Sono costanti.

$$Jp = 0.2 \times JC^{0.5} \times (Vb)^D$$

dove:

$$Vb = (\beta \times Jv^{-3})$$

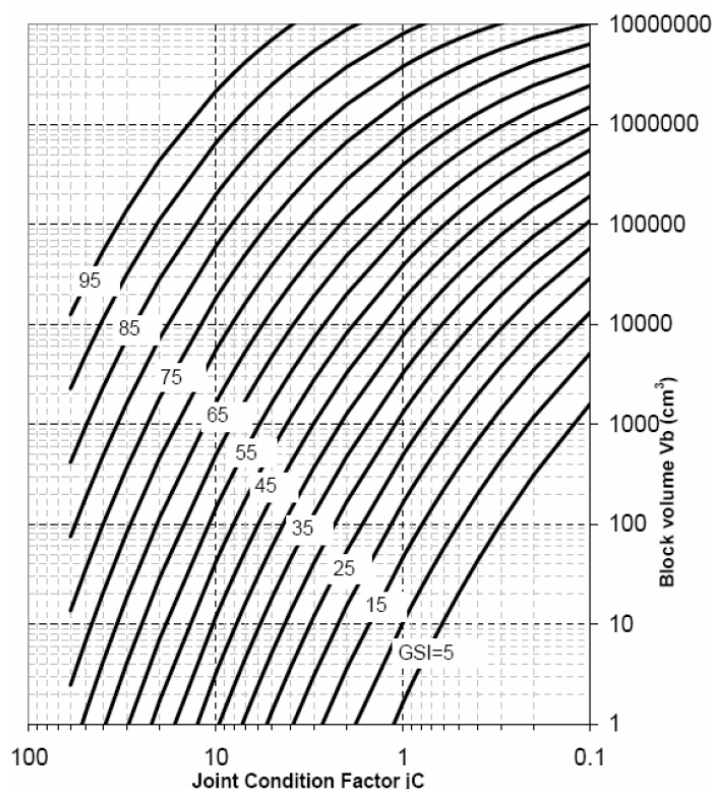
con  $\beta=36$

$$Jv = \frac{110 - RQD}{2.5}$$

$$JC = Jr \times \frac{Jl}{JA}$$

$$D = 0.37 \times JC^{-0.2}$$

Una rappresentazione grafica della correlazione è presentata nella Figura 12. Va notato che qui il Joint Condition Factor (jC) è l'originale come proposto da Palmstrøm (2000, 2005), cioè quello che include il fattore jL:  $jC = jR \times jL / jA$ .



**Figura 12: Diagramma per la valutazione di GSI mediante i parametri Rmi JC e Vb (Russo, 2007).**

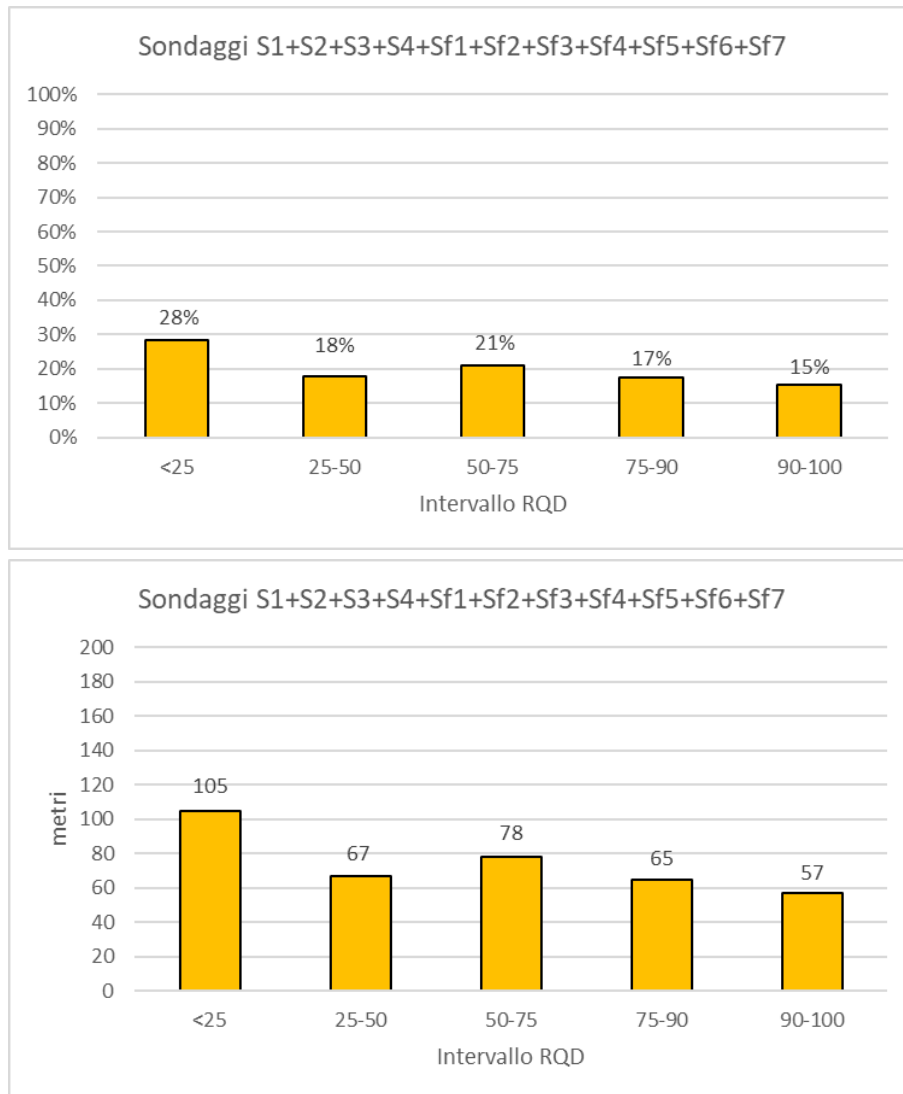
Secondo questo approccio il GSI è stato definito lungo ciascun sondaggio.

#### 4.3 ANALISI GEOMECCANICA – RISULTATI

Una prima analisi è stata condotta considerando tutti i valori di RQD disponibili lungo ciascun sondaggio. Il dettaglio dei risultati ottenuti lungo ciascun sondaggio è riportato nell'Allegato A.

L'analisi complessiva dei valori di RQD (evidenzia la che il 46% della perforazione totale (172m su 372m) ha interessato un ammasso da mediamente ad intensamente fratturato, con il 28% (105 m) dei metri totali di perforazione aventi un RQD<25% (valori tipici di zone tettonizzate e/o di faglia).



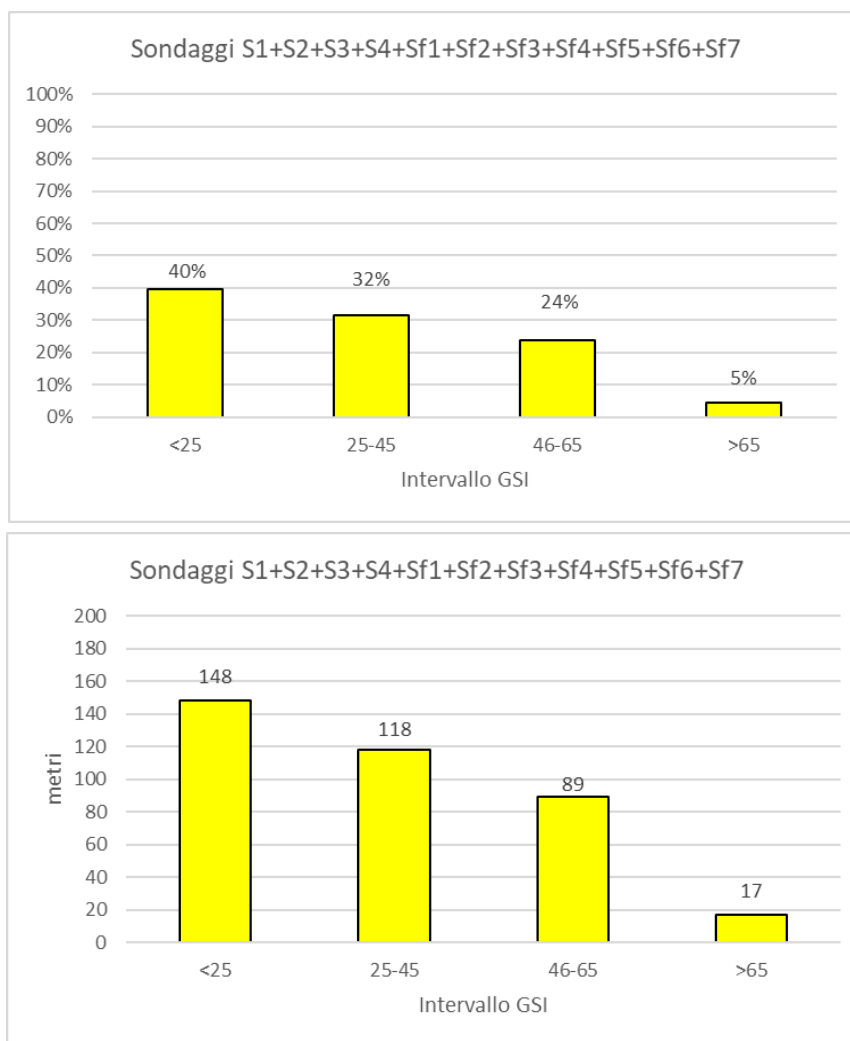


**Figura 13: Analisi di frequenza degli intervalli di RQD (in metri totali e in percentuale) lungo tutti i sondaggi esaminati.**

Sulla base della correlazione di Russo 2007, descritta precedentemente, che determina il GSI dal Vb (ricavato dall'RQD) e dalle condizioni dei giunti JC, è stato ricavato il GSI lungo le verticali dei sondaggi. I parametri per ottenere il Jc, ovvero il jA, i jR e il jL sono stati stimati tenendo in conto le descrizioni delle carote e le fotografie delle cassette (ove disponibili).

I risultati ottenuti lungo ciascun sondaggio sono riportati nell'Allegato B.

Le figure seguenti riportano le distribuzioni complessive del GSI ottenuto nelle porzioni di ammasso attraversate dai sondaggi.



**Figura 14: Analisi di frequenza degli intervalli di GSI (in metri totali e in percentuale) lungo tutti i sondaggi esaminati.**

L'analisi evidenzia che il 72% (266m su 372m) della lunghezza perforata ha interessato un ammasso roccioso da molto fratturato a disintegrato/laminato, con il 40% (148m) di ammasso in condizioni di GSI<25 (ammasso disintegrato/laminato).

Dai grafici riportati in Allegato A e Allegato B, e riguardanti l'andamento dell'RQD e GSI in corrispondenza di ciascun foro di sondaggi, si può osservare che le condizioni dell'ammasso roccioso possono cambiare repentinamente da buone a scadenti e viceversa, nell'arco di pochi metri. L'estrema variabilità, in base a quanto descritto nei sondaggi, è verosimilmente collegata alla presenza di:

- lineamenti tettonici principali (esempio il sondaggio S1 che attraversa orizzontalmente il lineamento che definisce il limite nord orientale del corpo principale di frana)
- di orizzonti milonitici di spessore plurimetrico diffusi all'interno dello gneiss

In particolare, la presenza di questi ultimi sembra essere tanto diffusa quanto imprevedibile all'interno dell'ammasso, e dunque sono da attendersi anche lungo il tracciato della galleria in progetto.

Nella valutazione degli opportuni sostegni di prima fase (del fronte e del cavo) bisognerà dunque tener conto della possibile presenza di questi livelli milonitici in corrispondenza dei quali potrebbero verificarsi dei fenomeni di instabilità. Si suggerisce di prevedere delle sezioni di applicazioni modulari, che si possano facilmente adattare alle variabili condizioni dell'ammasso, i cui intervalli sono riportati nei grafici di distribuzione di cui sopra.

#### 4.4 PARAMETRI DELLA ROCCIA INTATTA

Nella documentazione progettuale attualmente esistente non si ha evidenza di prove di laboratorio eseguite per la determinazione delle caratteristiche di resistenza della matrice rocciosa. Nello studio commissionato dalla Comunità Montana Valtellina di Morbegno [Ref.:14] per il prolungamento del Sentiero Valtellina sono riportati i risultati di una serie di prove tipo Point Load Test effettuate sulla roccia appartenente all'Unità degli Gneiss di Morbegno eseguite presso il laboratorio di geologia applicata dell'Università degli Studi di Milano. Le resistenze ottenute, riportate nella tabella seguente, variano da un minimo di 78 MPa ad un massimo di 249 MPa.

**Tabella 4: Riepilogo risultati delle prove di Point Load Test sugli gneiss di Morbegno eseguite presso il laboratorio di geologia applicata dell'Università degli Studi di Milano.**

Postazione	Point Load Test $C_0$ (MPa)
ARS-1	225.1
ARS-2	185.409
ARS-4	249.174
ARS-6	160.3935
ARS-7	171.675
ARS-8	71.1225
ARS-11	141.264
ARS-12	78.48

Nel medesimo studio sono inoltre citati ulteriori dati, di Compressione Monoassiale e di Point Load Test, eseguiti sugli gneiss di Morbegno e reperiti dalla relazione relativa alle indagini geognostiche svolte per il progetto esecutivo della variante alla SS. 38. I valori, come riportato nella tabella seguente, variano da un minimo di 90 MPa ad un massimo di 151 MPa.

**Tabella 5: Riepilogo risultati delle prove eseguite sugli gneiss di Morbegno reperiti dalla relazione relativa alle indagini geognostiche svolte per il progetto esecutivo della variante alla SS. 38.**

Postazione	Compressione Monoassiale $\sigma_c$ (MPa)	Point Load Test $C_0$ (MPa)
S11-CL1	120.5	151.1
S11-CL2	91.4	119.3
S11-CL3	90.44	106.0

In base ai dati reperibili in letteratura ed a esperienze pregresse in contesti analoghi, in assenza di prove dirette sulla matrice rocciosa dell'area di progetto, si suggeriscono i seguenti intervalli di resistenza alla Compressione Monoassiale, da assumere come riferimento per il Progetto di Fattibilità Tecnica ed Economica:

**Tabella 6: Intervalli di resistenza alla Compressione Monoassiale di riferimento per il Progetto di Fattibilità Tecnica ed Economica**

Descrizione	Resistenza alla Compressione Monoassiale (MPa)
fasce milonitiche e matrice rocciosa alterata in zone di faglia	50-75
micascisti e gneiss mediamente alterati in zone tettonizzate	75-100
gneiss e micascisti in zone di ammasso ordinarie	100-150



## 5 MODELLO GEOLOGICO E GEOMECCANICO DI RIFERIMENTO

Sulla base delle considerazioni riportate nei capitoli precedenti è stato possibile ricostruire il modello geologico e geomeccanico di riferimento per il Progetto di Fattibilità Tecnica ed Economica, che è schematizzato nell'elaborato progettuale "Profilo e sezioni geologiche" (Rif.: 0895-IT-Bema-PFTE-GEO-03-R0) e il cui stralcio è riportato in Figura 15.

Tale modello si basa sui dati ad oggi disponibili che derivano da studi finalizzati a scopi differenti da quello oggetto di studio (es. indagini eseguite per lo studio e il monitoraggio della frana di Bema) e sulle indagini e sugli studi eseguiti in corrispondenza dell'impianto progettuale precedente, che, ad esclusione dei primi 400m circa e dell'ultima tratta dopo l'imbocco Nordest della galleria, si discosta significativamente dal tracciato ora in fase di valutazione.

Il tracciato oggetto dello Studio di Fattibilità, a differenza del precedente, sottopassa nella sua tratta centrale la zona della frana di Bema, con coperture comprese tra 50 e 100m. Si sottolinea che in questa tratta estremamente sensibile dal punto di vista progettuale non esistono né indagini dirette né indagini indirette che possano dare indicazioni sulle sue reali condizioni geologiche, geomorfologiche e geomeccaniche (spessore del corpo di frana, presenza e spessore del sottostante orizzonte di ammasso alterato e fratturato, presenza e spessore di fasce milonitiche, caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso roccioso). Si raccomanda dunque l'esecuzione di opportune indagini geognostiche al fine di dettagliare le reali condizioni attese nel settore al di sotto del corpo di frana.

Tenuto conto delle conoscenze pregresse sulla frana di Bema, per la quale risulta evidente il controllo strutturale, in via cautelativa ed in assenza di dati specifici, al di sotto del corpo di frana è stata ipotizzata la presenza di un ammasso roccioso tettonizzato al quale sono state attribuite caratteristiche geomeccaniche prevalentemente scadenti. In tale tratta dovranno inoltre essere considerate come molto probabili venute d'acqua importanti ed improvvise, legate all'ipotizzato elevato grado di fratturazione dell'ammasso roccioso.

Lungo il profilo della galleria naturale sono state identificare cinque zone omogenee dal punto di vista geologico-strutturale, per le quali sono stati indicati, sulla base delle valutazioni descritte nei capitoli precedenti, gli intervalli di confidenza dei principali parametri geotecnici (GSI e UCS) necessari per la definizione dei supporti di scavo.

Tutte e cinque le zone omogenee ricadono nella Formazione dello Gneiss di Morbegno e sono definite nel seguito:

- Zona 1: da pk. 0+452 (imbocco Sudovest) a circa pk 0+600 (inizio della zona di faglia delimitante a sudovest il corpo di frana principale): presenza di ammasso roccioso in condizioni ordinarie, da poco a mediamente fratturato, con possibili subordinati orizzonti di miloniti e di zone più intensamente fratturate ed alterate;
- Zona 2: zona di faglia Sud con spessore di circa 40m (assunta tra le pk. 0+600 e pk. 0+640): presenza di un ammasso roccioso intensamente fratturato e/o milonitizzato, con alto grado di alterazione;
- Zona 3: da pk. 0+640 circa a pk. 0+780 circa (zona interessata dal sottoattraversamento del corpo di frana): presenza di un ammasso roccioso prevalentemente tettonizzato, da molto fratturato e alterato a mediamente fratturato, con possibili passaggi a zone milonitiche e zone più intensa fratturazione ed elevata alterazione;
- Zona 4: Faglia Nord con spessore di circa 70m (assunta tra le pk. 0+780 e pk. 0+850): presenza di un ammasso roccioso intensamente fratturato e/o milonitizzato, con alto grado di alterazione
- Zona 5: da pk. 0+850 (imbocco Sud) a pk 1+227 (attraversamento del massiccio roccioso caratterizzato dalle massime coperture: presenza di ammasso roccioso in condizioni ordinarie, da poco a mediamente fratturato, con possibili subordinati orizzonti di miloniti e di zone più intensamente fratturate ed alterate.

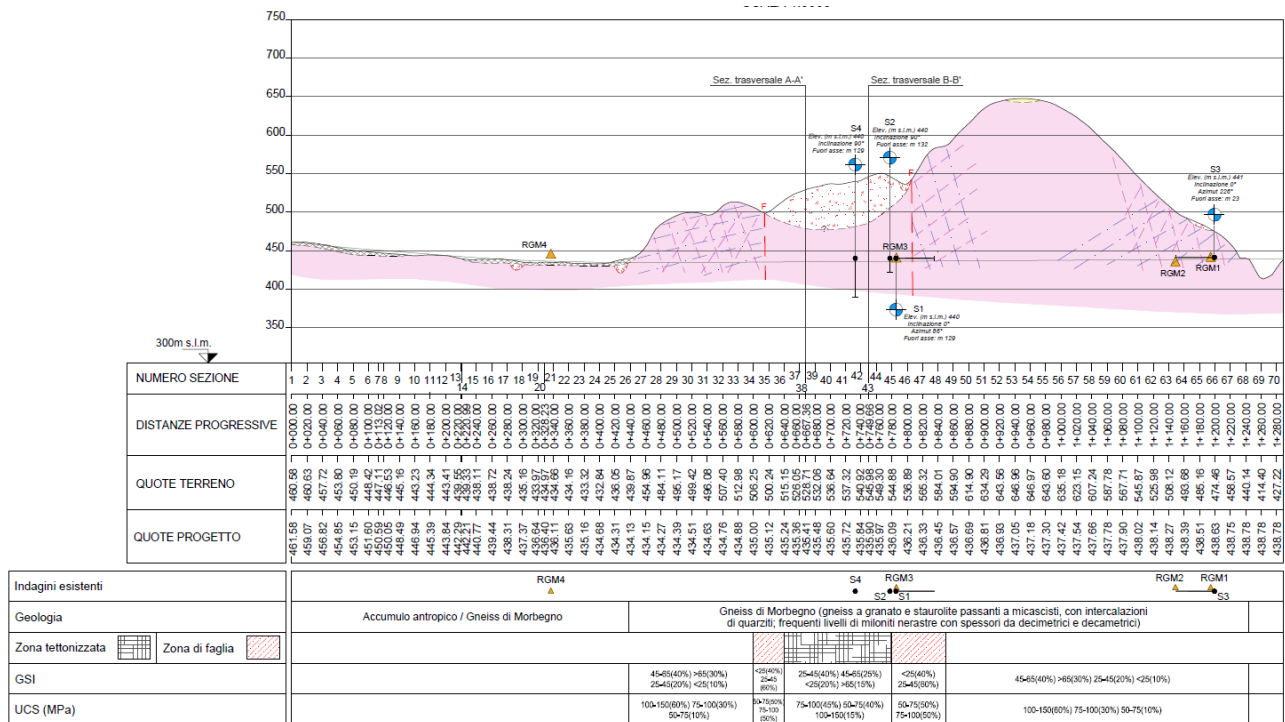


Figura 15: Profilo geologico - geomeccanico con identificazione delle zone omogenee.

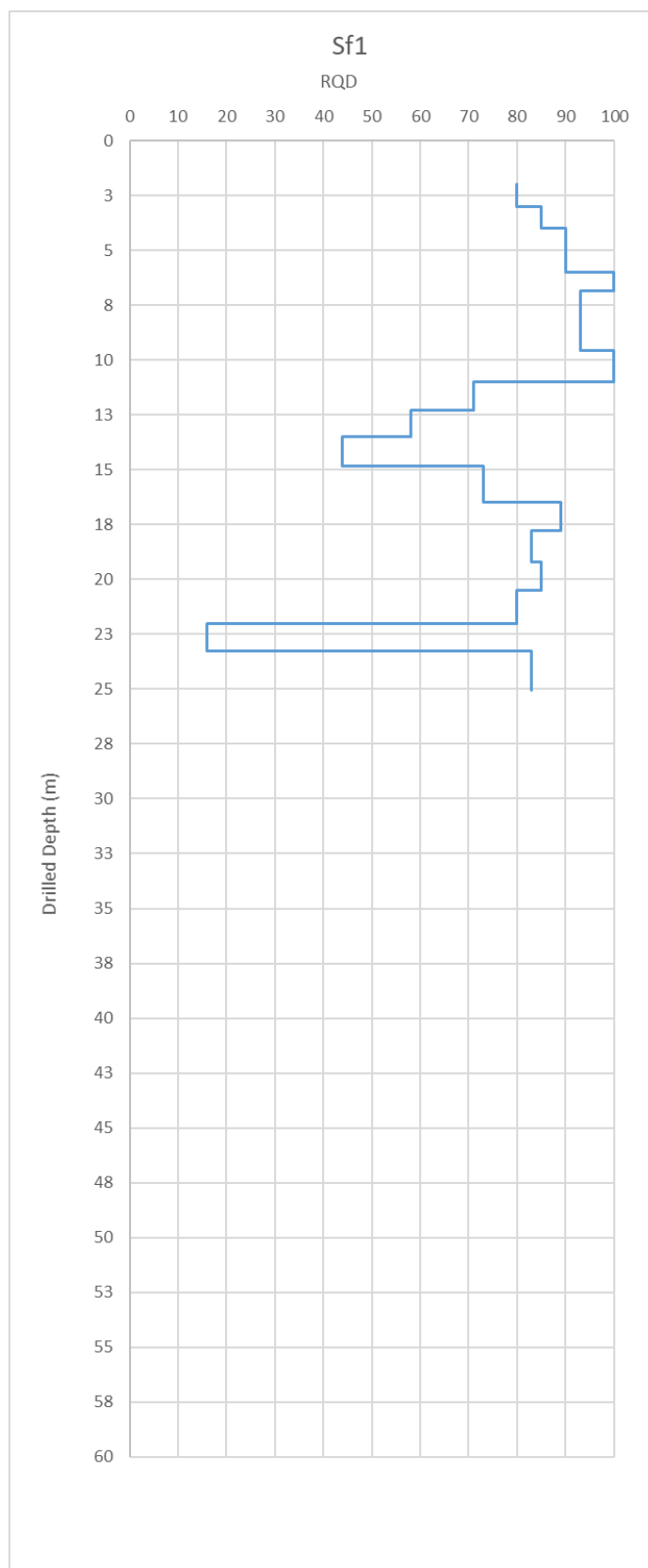
## **6 CONCLUSIONI E RACCOMANDAZIONI**

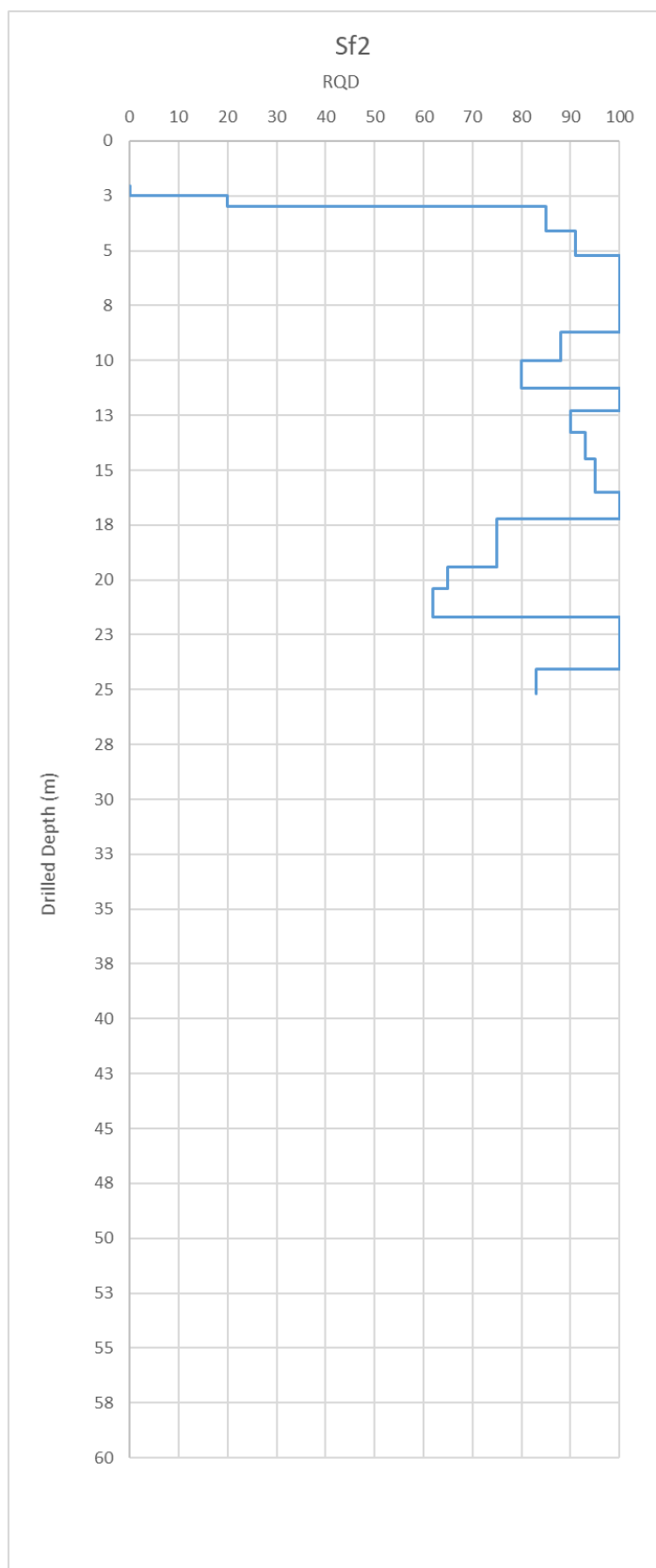
La presente relazione ha illustrato il contesto geologico tecnico preso come riferimento per lo studio preliminare di fattibilità delle opere necessario alla realizzazione del progetto.

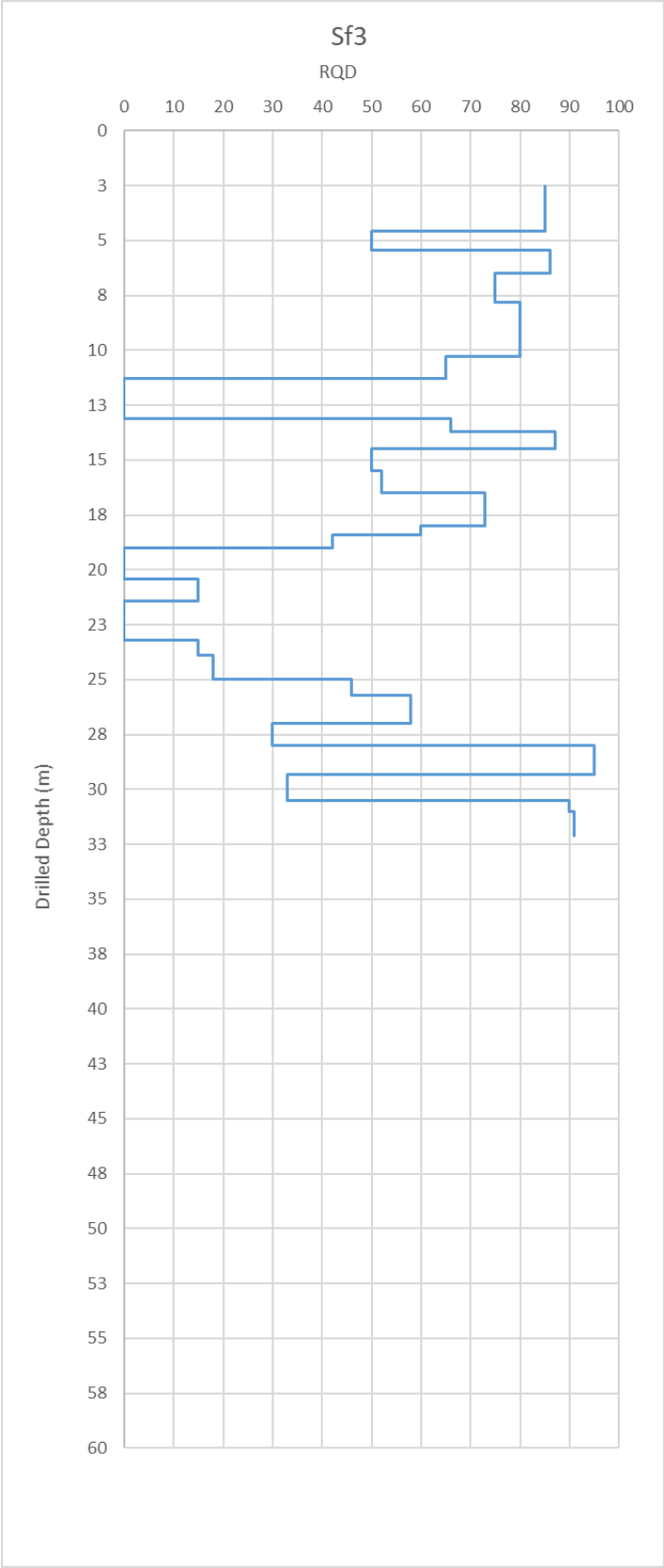
Il modello proposto scaturisce dall'analisi dei dati geologici ad oggi disponibili nell'area del progetto e nelle zone limitrofe e necessitano di conferma ed approfondimento nelle successive fasi progettuali.

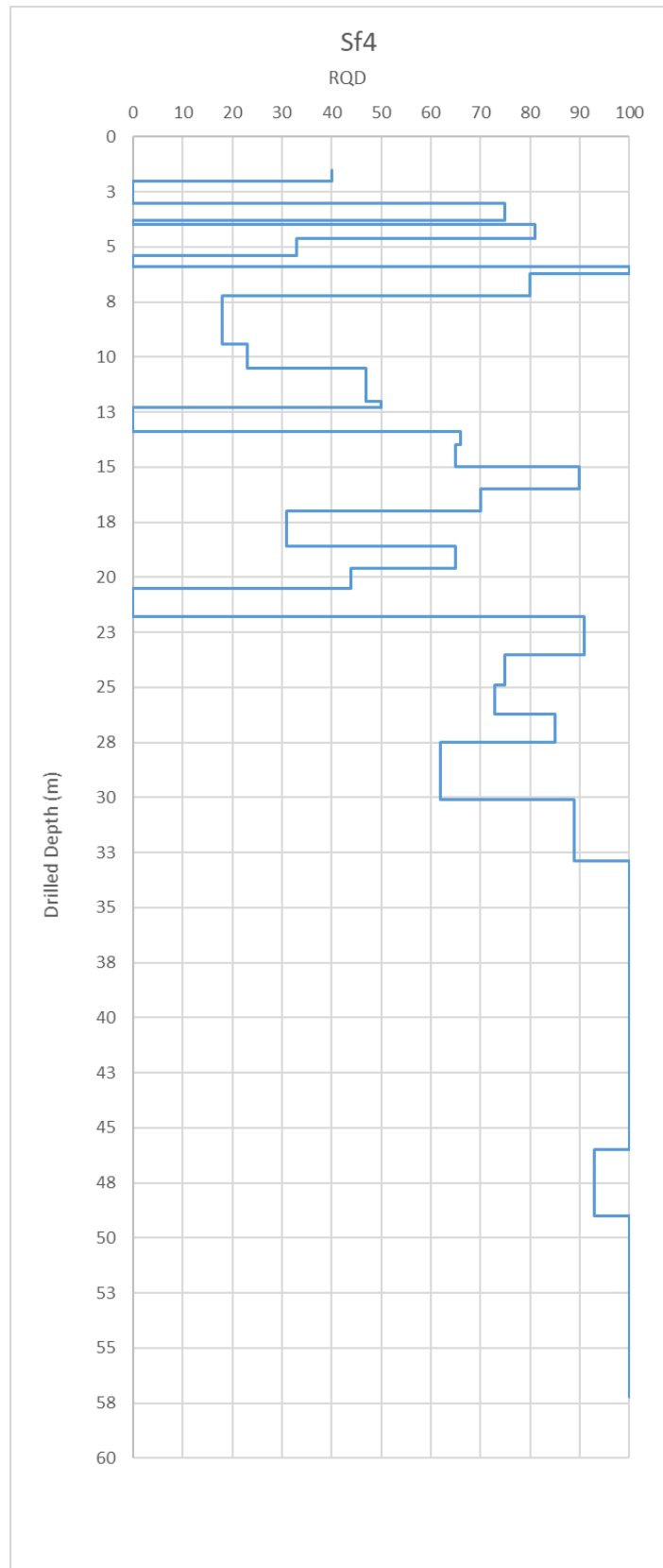
Si ritiene in particolare necessario prevedere opportune campagne di indagini geognostiche al fine di dettagliare lo spessore del corpo della frana di Bema, di definire le caratteristiche meccaniche della matrice rocciosa, di individuare le differenti condizioni geostrutturali dell'ammasso roccioso (zone ordinarie, zone tettonizzate, zone di faglia) e di meglio definire le caratteristiche geometriche delle zone di faglia (orientazione, inclinazione, spessore). A tale scopo si suggerisce l'esecuzione di sondaggi geognostici, di prove geofisiche (es. sismica a rifrazione in corrispondenza del corpo di frana), di prove di laboratorio su campioni di roccia e di una campagna di rilevamento geologico-strutturale di dettaglio.

## **ALLEGATO A**

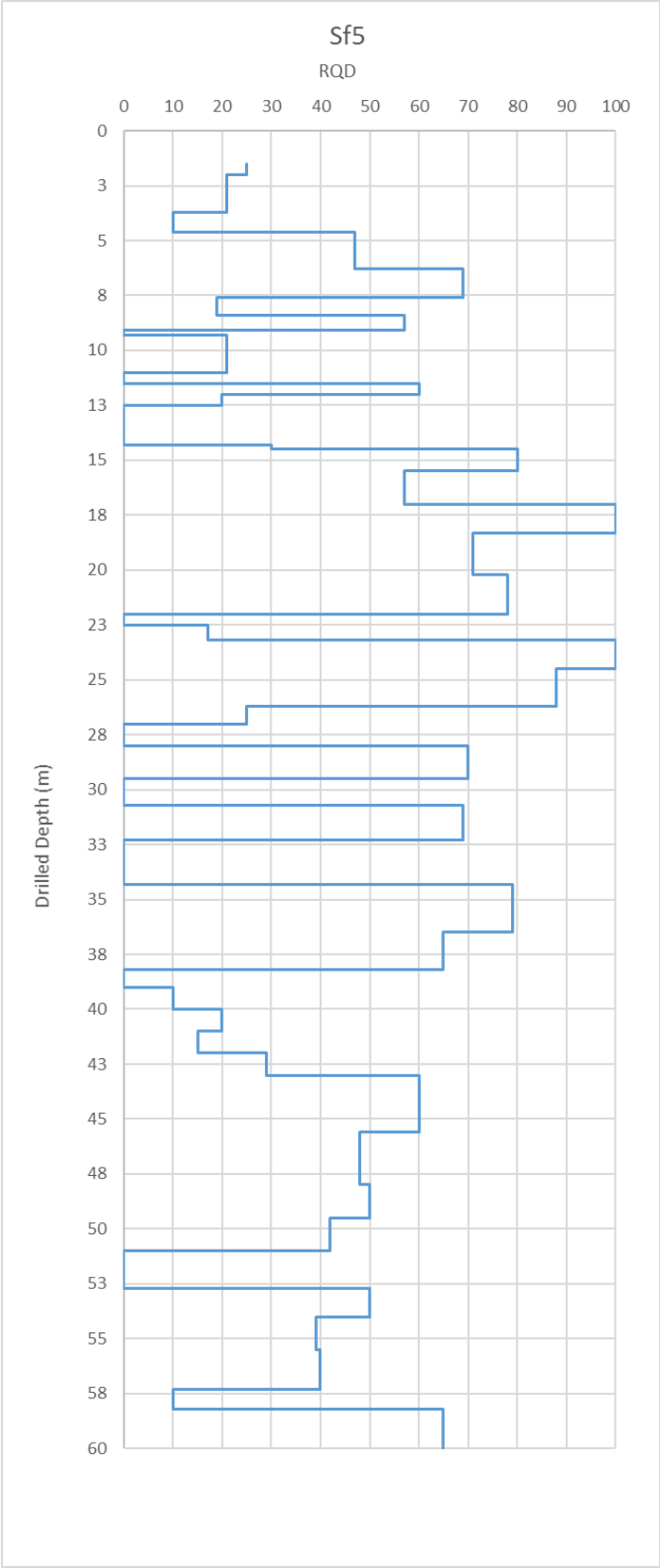


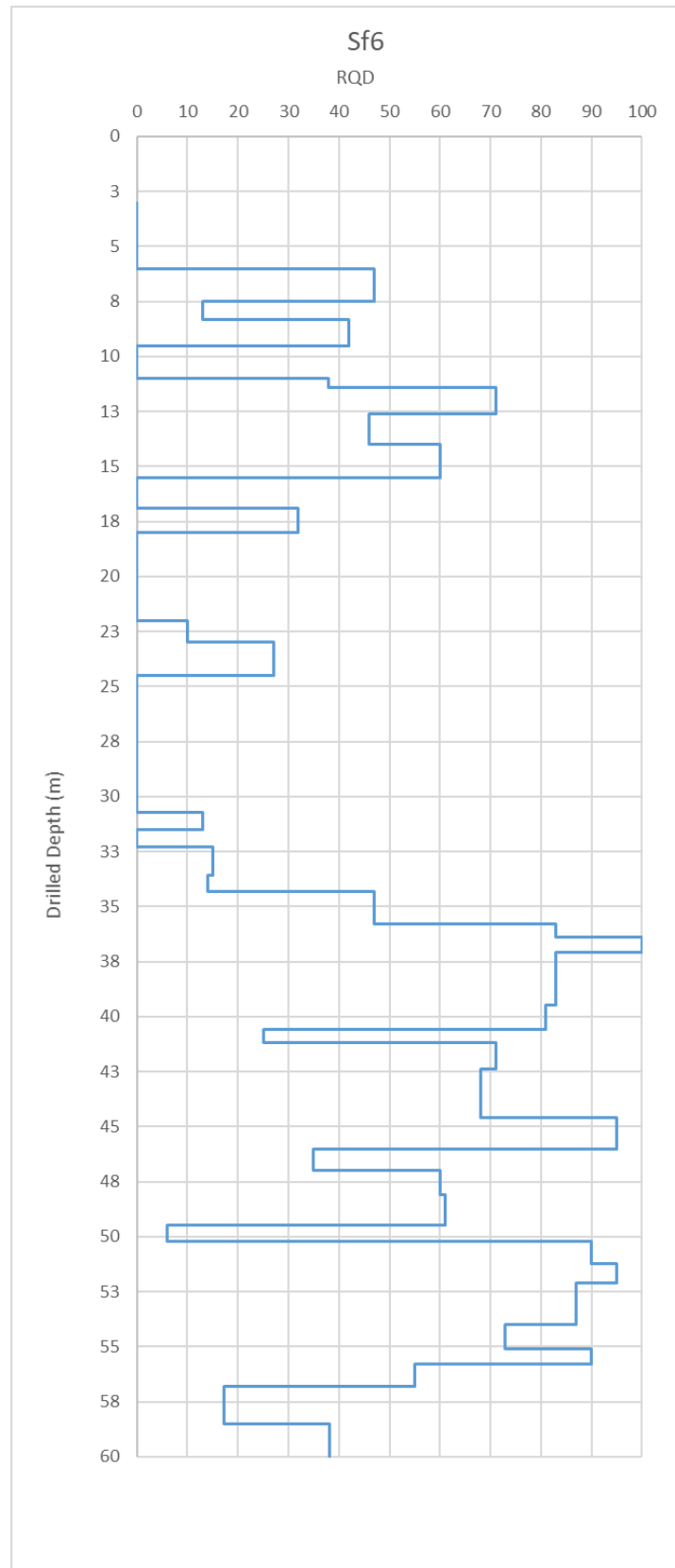


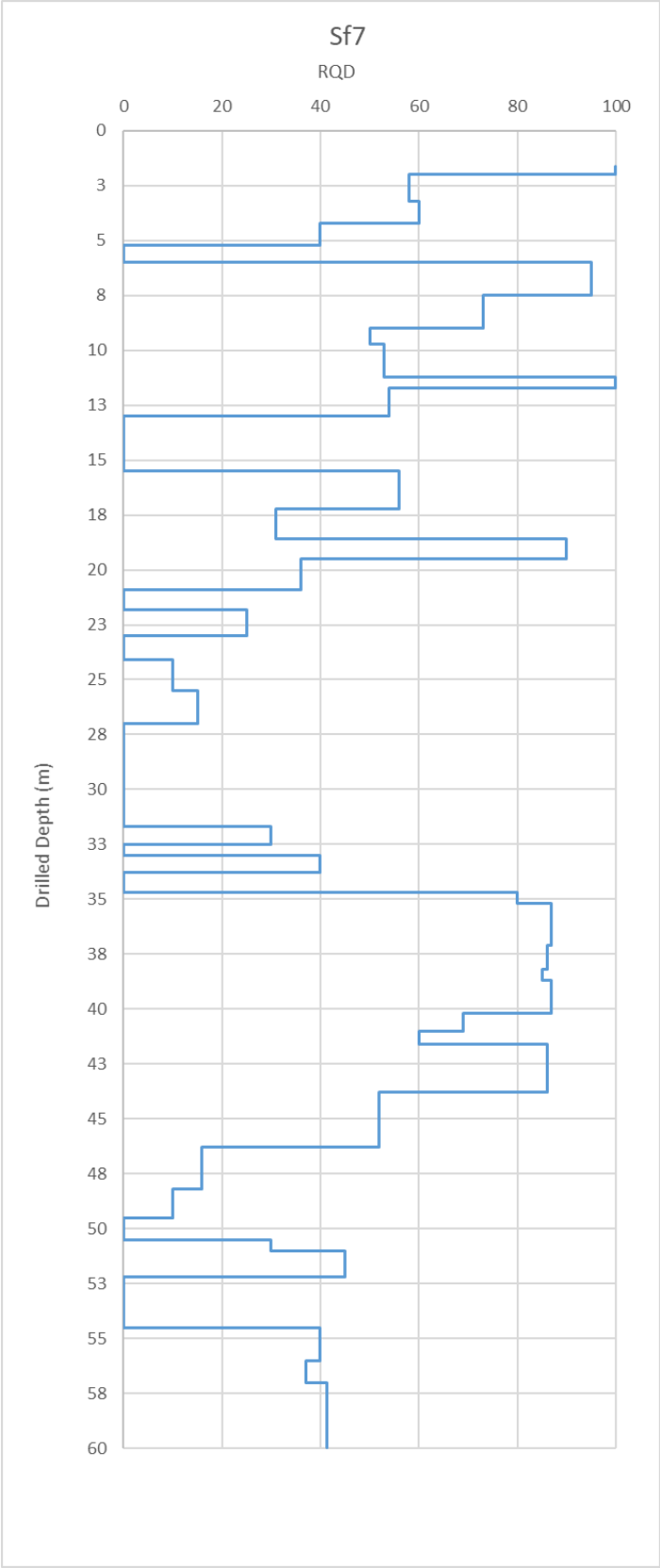


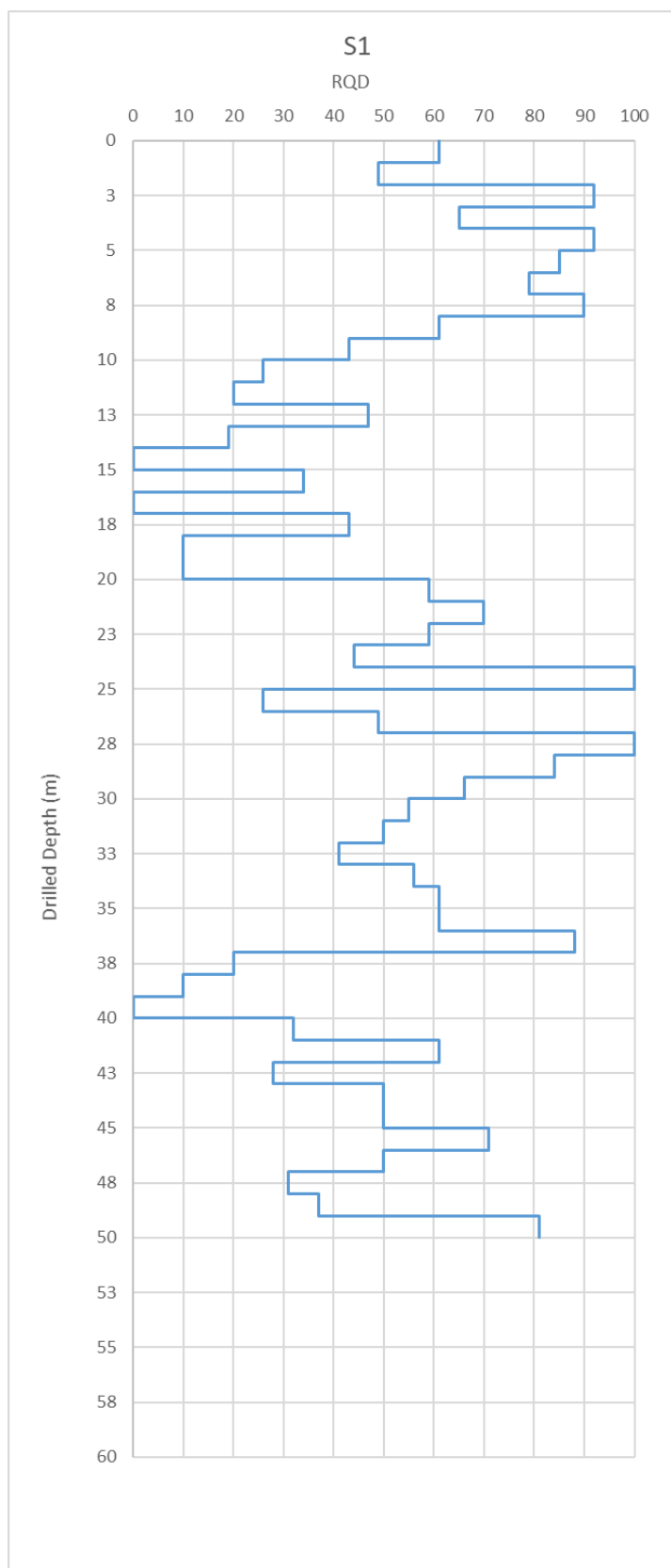


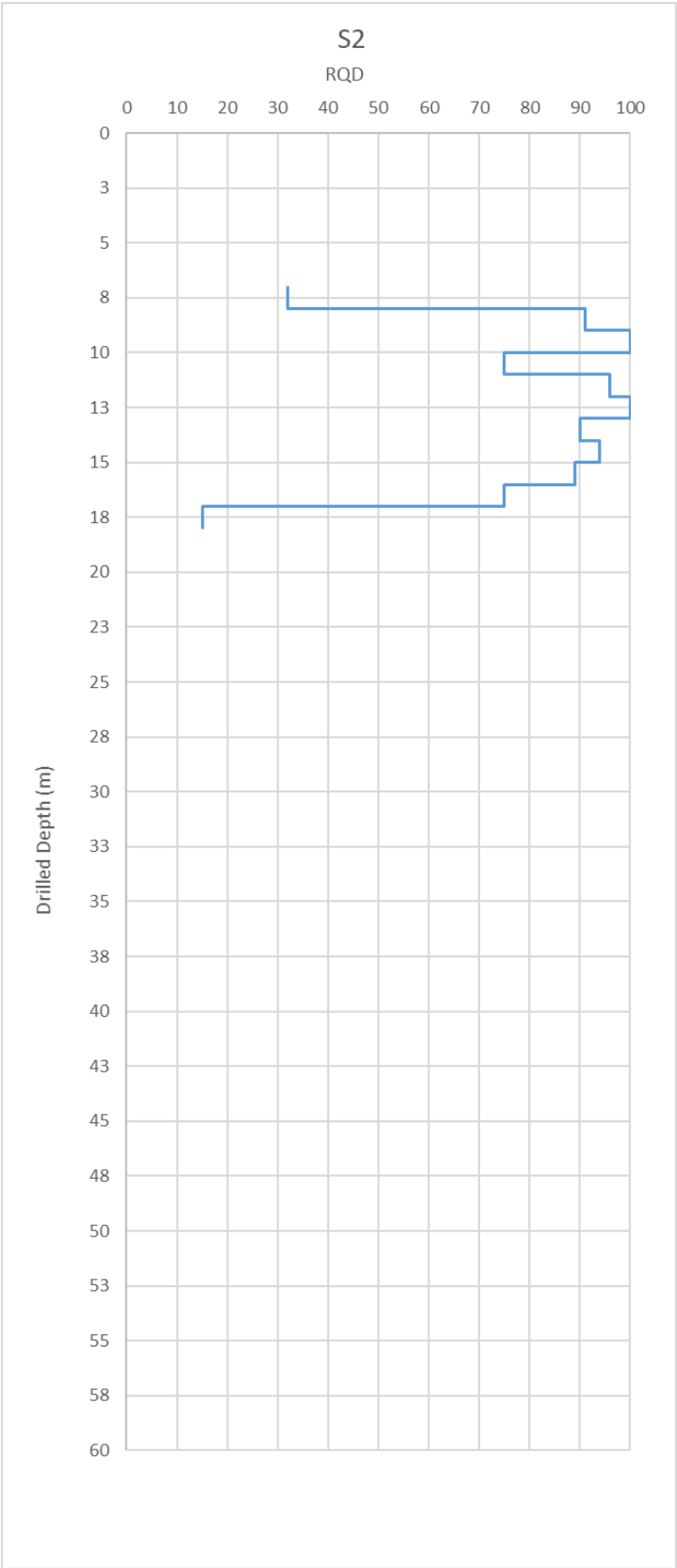


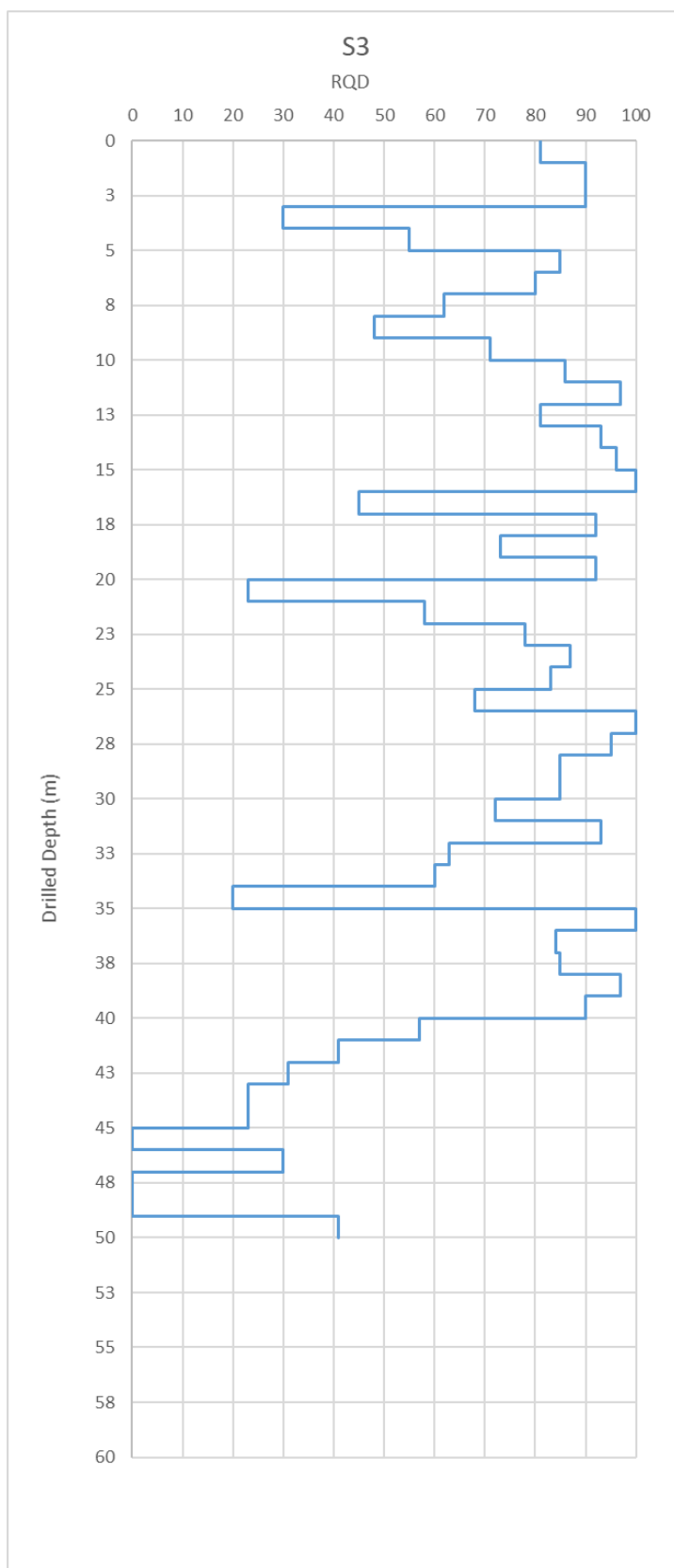




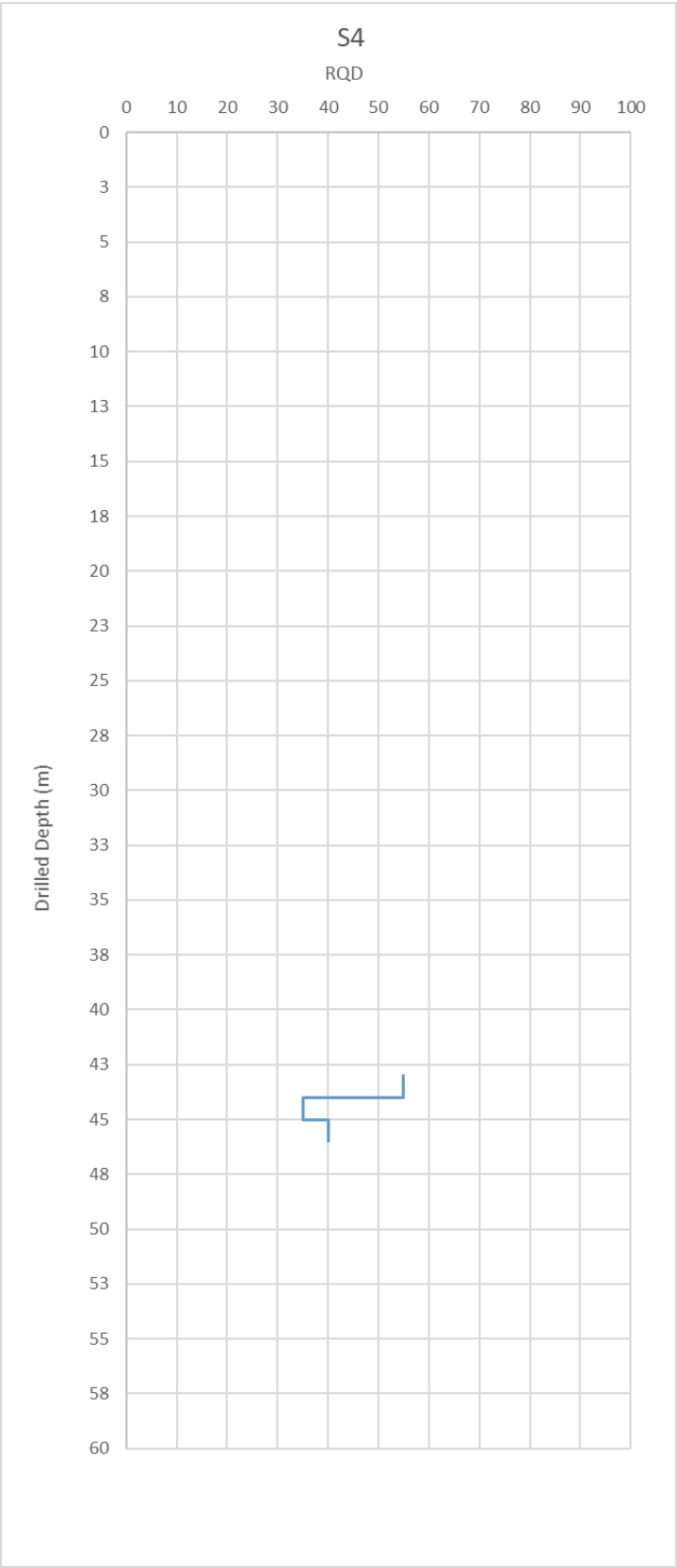












## **ALLEGATO B**

