Comune di GENOVA
Sestri Ponente

UNICALCE S.p.A.

Cave Ghigliazza S.r.l.

CAVA GIUNCHETTO – CAVA GNEO

Progetto unitario di coltivazione e recupero ambientale

VERIFICHE DI STABILITA'

a cura di: *Vincenzo PIOVANO geologo*

Relazione C3533-S02

Cuneo, giugno 2012

GEOMIN srl

INDICE DEL TESTO

0. PREMESSA 1
1. VERIFICHE DI STABILITA' DEI FRONTI IN ROCCIA 2
1.1 Introduzione 2
1.2 Caratterizzazione geomeccanica 2
1.2.1 Caratteristiche delle discontinuità 3
1.2.2 Classificazione RMR dell'ammasso roccioso 6
1.3 Parametri geomeccanici 7
1.3.1 Gradoni 7
1.3.2 Superfici d'inviluppo dei fronti 8
1.4 Caratterizzazione sismica del sito 9
1.4.1 Classificazione 9
1.4.2 Categorie di suolo e condizioni topografiche 10
1.4.3 Azione sismica 10
1.5 Test di Markland 12
1.5.1 Geometria dei fronti e dei gradoni 12
1.5.2 Fronte 20° 12
1.5.3 Fronte 35° 13
1.5.4 Fronte 65° 13
1.5.5 Fronte 115° 13
1.5.6 Fronte 165° 13
1.6 Calcoli di stabilità dei cinematismi potenziali 20
1.6.1 Introduzione 20
1.6.2 Parametri geomeccanici di progetto 20
1.6.3 Scivolamento di cunei 21
1.6.4 Ribaltamento 21
1.6.5 Considerazioni conclusive 23
2. VERIFICHE DI STABILITA' DEL RILEVATO DI SABBIE LIMOSE 24
2.1 Introduzione 24
2.2 Caratteristiche dei rilevati in sabbie limose 24
2.3 Proprietà fisico-meccaniche dei materiali 24
2.4 Caratterizzazione sismica 25
2.4.1 Classificazione 25
2.4.2 Categorie di suolo e condizioni topografiche 25
2.4.3 Azione sismica 25
2.5 Parametri geotecnici di progetto 26
2.6 Verifica di stabilità 26
2.7 Verifiche alla liquefazione 27
3. VERIFICHE DI STABILITA' DELLE OPERE IN SOTTERRANEO 34
3.1 Assetto strutturale 34
4. CARATTERIZZAZIONE GEOMECCANICA DEGLI AMMASSI ROCCIOSI 35

4.1 Caratteristiche delle discontinuità....35
4.2 Classificazione RMR....36
4.3 Criterio di rottura di Hoek e Brown e classificazione GSI....37
4.4 Indice di qualità del NGI....39
5. ANALISI DI STABILITÀ DEL CAVO IN FUNZIONE DELLE DISCONTINUITA' DEGLI AMMASSI ROCCIOSI....40
5.1 Introduzione....40
5.2 Geometria ed orientazione delle opere in sotterraneo....40
5.3 Parametri di progetto....41
5.4 Risultati dei calcoli....41
5.4.1 Galleria orientata parallelamente alla stratificazione....41
5.4.2 Galleria orientata normalmente alla stratificazione....42
5.4.3 Camera di frantumazione....43
6. ESAME DELLE CONDIZIONI DI STABILITÀ DEL CAVO IN FUNZIONE DEGLI SFORZI INDOTTI....46
7. INTERVENTI DI SOSTEGNO....48

ALLEGATI

Tabulati di calcolo

INDICE DELLE TAVOLE E FIGURE NEL TESTO

Tav. 1 Ubicazione degli stendimenti del rilievo geomeccanico scala 1 : 4.000
Tav. 2 Schematizzazione dei fronti di cava scala 1 : 4.000
Fig. 1÷23 Verifiche di stabilità

0. PREMESSA

La presente relazione illustra i risultati delle verifiche di stabilità elaborate per il progetto di coltivazione congiunto e recupero ambientale di Cava Giunchetto-Gneo con riferimento a:

- fronti in roccia
- scarpate di accumulo dei limi
- opere in sotterraneo

La caratterizzazione geomeccanica delle rocce entro cui saranno impostati i fronti di coltivazione e le opere in sotterraneo è basata sulle informazioni di carattere geologico-strutturale raccolte con approfonditi rilevamenti sul terreno.
Per l'inquadramento geologico generale del sito di cava si fa riferimento al capitolo specifico riportato nella relazione illustrativa di progetto.

1. VERIFICHE DI STABILITA' DEI FRONTI IN ROCCIA

1.1 Introduzione

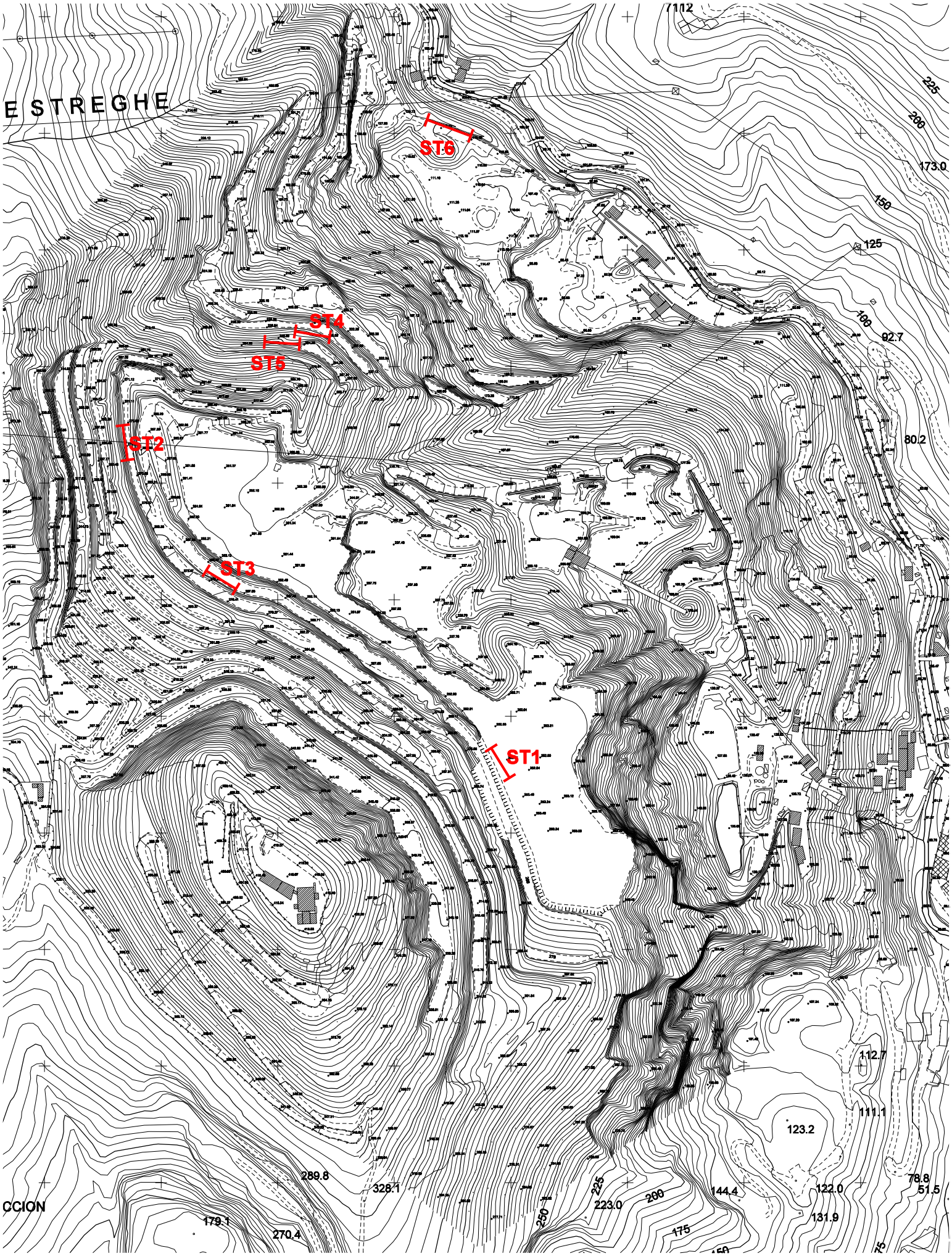
La caratterizzazione geomeccanica del giacimento, eseguita da Geomin nel 2004 in occasione del precedente progetto di coltivazione, è stata aggiornata nel 2011 per controllarne l'adeguatezza nelle nuove condizioni dei fronti.
Il rilevamento sul terreno delle discontinuità degli ammassi rocciosi è stato eseguito con 6 stendimenti, di 20 m di lunghezza, posti alla base delle scarpate dei gradoni, compiendo osservazioni sistematiche lungo gli allineamenti, e rilevando in totale oltre 300 misure di discontinuità. L'ubicazione degli stendimenti e delle stazioni, rappresentata in tav. 1, è stata scelta, compatibilmente con le condizioni di accesso e di affioramento, allo scopo di studiare fronti ad orientazione spaziale differente e di coprire in modo il più possibile omogeneo l'area di coltivazione.

Per ogni discontinuità rilevata sono stati descritti i parametri geometrici e fisico-meccanici principali (giacitura, persistenza, spaziatura, scabrezza, apertura, condizioni d'alterazione, presenza d'acqua, riempimento). Le classi in cui sono stati suddivisi i valori misurati per i differenti parametri sono quelle suggerite da ISRM (1981).
Sono state eseguite misure della rugosità di alcune famiglie di discontinuità per mezzo di uno *Shape Tracer* (con passo di lettura uguale a 1 mm).
Misure della resistenza meccanica delle pareti dei giunti delle famiglie principali sono state effettuate con uno sclerometro di tipo L.
L'orientazione spaziale delle superfici di discontinuità è stata rappresentata mediante proiezioni stereografiche equiareali su reticolo di Schmidt (semisfera inferiore).

1.2 Caratterizzazione geomeccanica

Le rocce oggetto della coltivazione in entrambe le cave appartengono alla formazione delle Dolomie di M. Gazzo. Si tratta di dolomie a stratificazione decimetrico - metrica, di colore da grigio chiaro a nerastro, con rare intercalazioni di sottili livelli marnosi giallastri, più frequenti nella cava Gneo.

Il comportamento geomeccanico dell'ammasso roccioso delle dolomie è riferibile al modello di un mezzo discontinuo, in cui la resistenza complessiva dell'ammasso è determinata principalmente dalle caratteristiche meccaniche delle discontinuità.
I dati di orientazione spaziale delle discontinuità, ricavati dal rilevamento strutturale dei fronti di cava, sono stati sottoposti ad un'elaborazione statistica di *cluster analysis*, eseguita con il programma DIPS della *Rocscience* di Toronto.



N

GEOMIN srl
geologia cave miniere

UNICALCE SpA/GHIGLIAZZA srl - **Cava GIUNCHETTO/GNEO**

Ubicazione degli stendimenti del rilievo geomeccanico
Scala 1:4.000

TAV. N° :
1

1.2.1 Caratteristiche delle discontinuità

Nelle dolomie sono stati riconosciuti 4 sistemi di discontinuità significativi (vedi tabella 1), denominati S, K1, K2, K3. A ciascun sistema è stato attribuito, come rappresentativo della giacitura media (fig. 1), il valore centrale della distribuzione delle misure, che è stato calcolato con il metodo di distribuzione statistica di Schmidt.

S (104°/85°, 289°/82°) rappresenta la stratificazione delle dolomie, superficie ubiquitaria e di notevole persistenza, cui sono associate raramente faglie di analoga orientazione. Lungo la stratificazione si osservano localmente fenomeni di dissoluzione, con formazione di cavità sub-verticali di apertura decimetrica talora con concrezioni calcaree.

K1 (195°/62°) ha una frequenza di circa il 10% del totale delle misure, ed è caratterizzato da persistenza prevalentemente metrica. La distribuzione delle misure di K1 mostra una buona costanza della direzione, con dispersione più accentuata dell'inclinazione.

K2 (023°/69°) ha la maggiore frequenza (circa il 12%), persistenza compresa tra 1 m e 3 m, ed è associato al sistema di faglie più importante, caratterizzato da orientazione NO – SE ed immersione verso NE (l'orientazione media del sistema di faglie è in cava di 044°/59°).

K3 (003°/82°), il sistema a minor frequenza (intorno al 7%), è caratterizzato da un'orientazione prossima a K2.

Sistema	S	K1	K2	K3
Orientazione	104°/85° 289°/82° (S')	195°/62°	23°/69°	03°/82°
Lunghezza	10 m – 20 m	< 1m, 1-3 m rara	< 1m e 1-3 m, 3-10 m (rara)	< 1m (prevalente) 1-3 m 3-10 m
Spaziatura	20-60 cm (prevalente) 6-20 cm 60-200 cm	6-20 cm (prevalente) 2-6 cm	6-20 cm (prevalente) 2-6 cm	6-20 cm e 2-6 cm
Scabrezza	planare/ ondulata, rugosa	Planare, talora ondulata, liscia	planare, ondulata, liscia, talora rugosa	Ondulata (preval.), planare, rugosa
JRC	12 – 14 prevalente	2 - 4	14 - 16 prevalente	-
Apertura	chiusa, talora aperta (dissoluzione)	chiusa, raramente aperta	chiusa	Chiusa, talora aperta
Condizioni d'alterazione	da debolmente a moderatamente alterata	da non alterata a debolmente alterata	da non alterata a moderatamente alterata	da debolmente alterata a non alterata
Riempimento	argilla, marna	calcite rara	calcite, breccia	calcite, breccia
Presenza d'acqua	assente	assente	assente	assente
JCS	100±20 Mpa	-	80±15 MPa	-

Tabella 1 Caratterizzazione delle famiglie di discontinuità dell'ammasso roccioso in dolomie

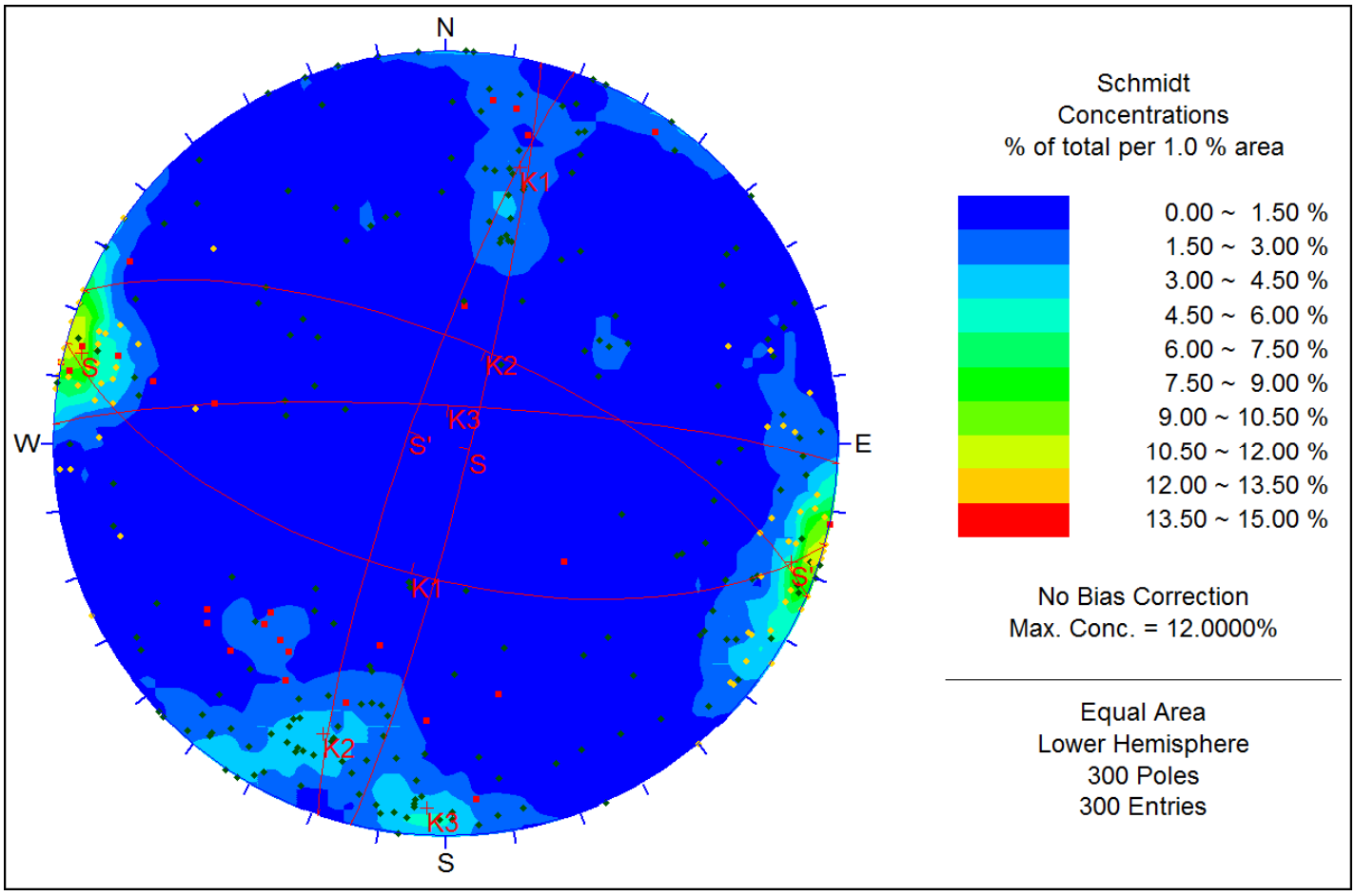


Fig. 1 – Proiezione equiareale sulla semisfera inferiore delle discontinuità rilevate nelle dolomie (il simbolo di colore verde indica le fratture, il simbolo rosso le faglie, il simbolo giallo la stratificazione).

1.2.2 Classificazione RMR dell'ammasso roccioso

La valutazione delle caratteristiche di resistenza degli ammassi rocciosi del giacimento è stata eseguita utilizzando la classificazione RMR di Bieniawski. La resistenza alla compressione monoassiale è stata stimata sulla base dei dati ricavati dalle misure sclerometriche.
Il valore di RQD è stato calcolato mediante la relazione empirica proposta da ISRM (1978):
$RQD = 115 - 3.3J_v$

con J_v = somma del numero di discontinuità per metro per ciascun sistema di discontinuità, risultando uguale a circa il 40%.

Nella tabella sottostante sono riportati i valori base della classificazione, gli indici BMRM e i parametri di resistenza degli ammassi rocciosi, ottenuti impiegando le espressioni:

c (kPa) = 5 BMRM
f (°) = 5 + (0.5 BMRM)

Parametri	**Valore**	***Rating***
Resistenza alla compressione monoassiale	*50-100 Mpa*	***7***
RQD	*25% - 50%*	***8***
Spaziatura delle discontinuità	*6 – 20 cm*	***8***
Condizioni delle discontinuità	*-*	***19***
Condizioni idrauliche	*Drenate*	***15***
INDICE BRMR		***57***
Coesione (kPa)		***285***
Angolo d'attrito (°)		***33.5***

Tabella 2 Caratterizzazione dell'ammasso roccioso in dolomie

1.3 Parametri geomeccanici

1.3.1 Gradoni

Nei calcoli di stabilità relativi ai gradoni, la resistenza al taglio dei giunti dei diversi sistemi di discontinuità riconosciuti è stata stimata ricorrendo al criterio empirico di Barton (1976) [1]

$$\tau = \sigma_n \tan [JRC \log_{10} (JCS/\sigma_n) + \phi_b]$$

in cui τ è la resistenza al taglio del giunto, σ_n lo sforzo normale agente sul piano, ϕ_b l'angolo d'attrito di base, JRC e JCS i parametri che tengono conto rispettivamente della rugosità della superficie e della resistenza a compressione delle pareti del giunto.
Per tener conto degli effetti di scala che influiscono su JRC e su JCS, legati alla diversa persistenza dei sistemi di discontinuità in rapporto alla lunghezza della superficie su cui è misurato JRC (lunghezza della base pari a 30 cm) sono state applicate le equazioni di Barton & Bandis (1990)[2]

$JRC_n = JRC_0[L_n/L_0]^{-0.02\,JRC_0}$

$JCS_n = JCS_0[L_n/L_0]^{-0.03\,JRC_0}$

in cui JRC_0 e JCS_0 sono i valori effettivamente misurati, JRC_n e JCS_n i valori scalati in base alla persistenza del sistema di discontinuità, L_n la lunghezza effettiva del sistema di discontinuità, L_0 la lunghezza della base su cui è misurato sul terreno JRC.

Sulla scorta dei valori di JRC e JCS misurati o stimati, dello sforzo normale medio riferibile alle condizioni geometriche dei gradoni, sono stati ricavati i valori di ϕ_p (angolo d'attrito di picco, corrispondente al termine contenuto in parentesi quadra nell'equazione di Barton), riportati nella tabella 3, insieme ai relativi valori di JRC_0, JRC_n, JCS_0 e JCS_n.

Sistema di discontinuità	JRC_0	JRC_n	JCS_0	JCS_n	ϕ_p
K1	3	2,5	80	65	36
K2	10	6,3	80	40	44
K3	5	3,5	80	47	38
S	15	4,6	100	22	39

Tabella 3 Angolo d'attrito di picco su giunto ϕ_p (°)

[1] Barton N. – *The shear strength of rock and rock joints* – Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 1976
[2] Barton N., Bandis S. – *Review of predictive capabilities of JRC–JCS model in engineering practice* – Rock joints, Balkema, Rotterdam, 1990.

Gli angoli di picco così ottenuti possono essere assunti come valori caratteristici dei parametri di resistenza dei diversi sistemi di discontinuità per l'analisi di stabilità dei gradoni.

1.3.2 Superfici d'inviluppo dei fronti

I calcoli di stabilità vengono eseguiti analizzando i tetraedri rimuovibili (costituiti da due superfici di discontinuità dell'ammasso roccioso e dalle superfici libere della scarpata e dalla berma del gradone), delle dimensioni massime compatibili con l'altezza del fronte considerato.

Nel caso dei fronti del progetto, la cui altezza è compresa tra 50 e 200 m circa, le dimensioni (ettometriche) dei cunei analizzati sono maggiori di almeno un ordine di grandezza rispetto alle dimensioni della maggior parte dei sistemi di discontinuità che danno luogo ai cunei potenzialmente instabili (aventi persistenze generalmente comprese tra 1 m e 10 m). Ciò implica che le superfici che definiscono i cunei potenzialmente instabili dei fronti corrispondono in minima parte a piani di discontinuità e in massima parte a ponti di roccia integra.

Allo scopo di tener conto della resistenza al taglio di tali ponti di roccia, ai diversi sistemi di discontinuità è stata attribuito un valore di coesione pari ad una frazione della resistenza al taglio della matrice rocciosa risultante dalla classificazione RMR, in funzione del valore medio della persistenza rilevata in ciascuno di essi. Al sistema di discontinuità S, la cui persistenza è sempre decametrica, è stata attribuita il valore più basso di coesione. Per tutti i sistemi è stato adottato un angolo d'attrito di 30°, conservativo rispetto al valore stimato con la classificazione RMR (33,5°).

Sistema di discontinuità	c (kPa)	φ (°)
S	25	30
K1	150	30
K2	150	30
K3	75	30

Tabella 4 Dolomie. Resistenza al taglio dei sistemi di discontinuità nelle verifiche di stabilità dei fronti

1.4 Caratterizzazione sismica del sito

1.4.1 Classificazione

La pericolosità sismica di riferimento è stata ricavata, sulla base dei dati forniti a livello nazionale nel sito *web* dell'INGV, con il *software* NCTSISMA (Castalia Srl).
Le coordinate geografiche decimali del centroide del sito di cava nel sistema ED 50 sono le seguenti:

lat: 44,446719; long: 8,851159

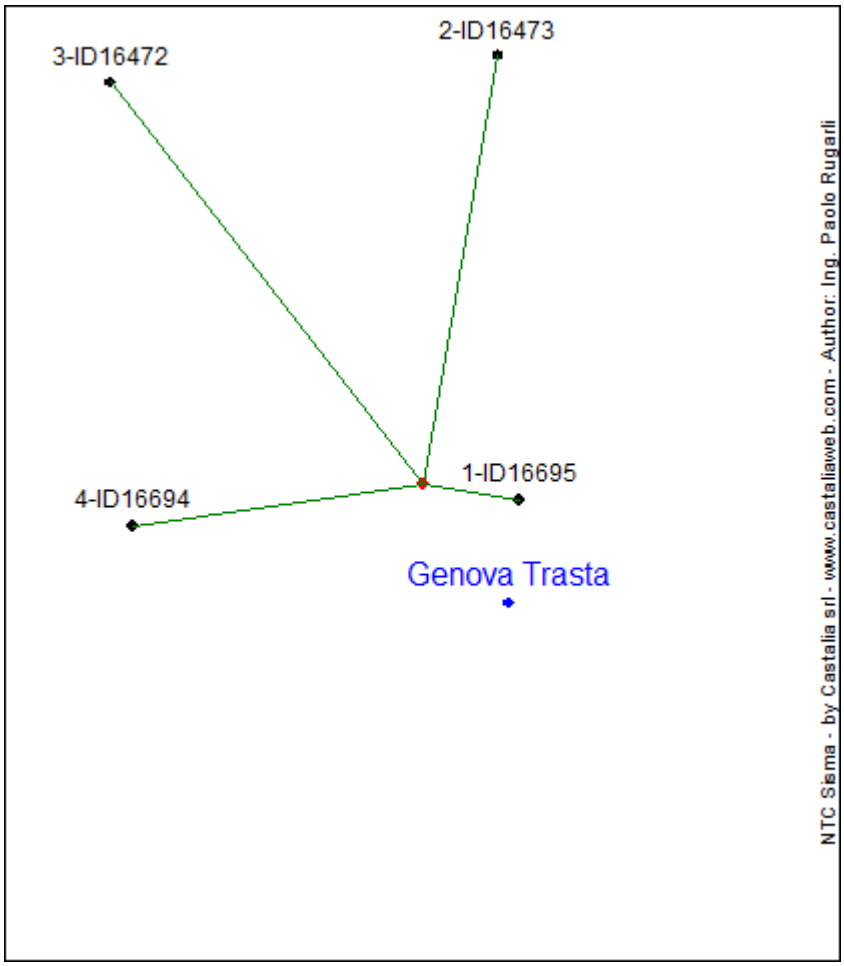


Fig. 2 – Localizzazione del sito di cava (in rosso) e dei punti della maglia elementare del reticolo di riferimento entro la quale si trova il sito.

I risultati ottenuti sono riportati in fig. 2 e nella tabella 5. Sulla base delle indicazioni delle Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14/01/2008, § 2.4), nella stima dei parametri sismici si è tenuto conto cautelativamente di

una Vita Nominale di 50 anni (opera ordinaria) e di una Classe d'uso I, per costruzioni con presenza occasionale di persone. E' stata assunta di conseguenza un periodo di riferimento, Vr, uguale a 35 anni (D.M. 14/01/2008, § 2.4.3).

Parametri	SLO	SLD	SLV	SLC
Probabilità di superamento nel Vr	0.81	0.63	0.1	0.05
Tr	35 anni	35 anni	332 anni	682 anni
a_g	0.0225 g	0.0243 g	0.0599 g	0.0774 g
F_o	2.5486	2.5392	2.5212	2.5234
Tc	0.1800 sec	0.1864 sec	0.2807 sec	0.2902 sec

Tabella 5 – Parametri sismici ottenuti per le condizioni degli stati limite del collasso (SLC), del danno (SLD), di operatività (SLO) e di salvaguardia della vita (SLV). (Vr periodo di riferimento, Tr tempo di ritorno, ag accelerazione massima di riferimento, F_o fattore di amplificazione spettrale, Tc periodo relativo all'inizio del tratto a velocità costante dello spettro).

1.4.2 Categorie di suolo e condizioni topografiche

Il profilo stratigrafico del substrato roccioso nei fronti di cava è assimilabile ai sottosuoli compresi nella categoria A, per la quale il parametro di amplificazione stratigrafica S_S vale 1 (D.M. 14/01/2008, Tabella 3.2.V).
Per pendii con inclinazione media superiore ai 15°, le condizioni topografiche del sito rientrano nella categoria T2 della tabella 3.2.VI delle citate Norme Tecniche per le Costruzioni, cui corrisponde un valore di ST = 1,20.

1.4.3 Azione sismica

Poiché mancano analisi specifiche riguardanti la risposta sismica locale, l'accelerazione massima attesa nel sito può essere calcolata (§ 7.11.3.5.2 delle Norme Tecniche per le Costruzioni) con la relazione

$amax = S_S\ ST\ a_g$

che, utilizzando i parametri ottenuti nei paragrafi precedenti, fornisce per il sito i valori di amax riportati nella tabella sottostante.

	SLO	SLD	SLV	SLC
amax	0.02700 g	0.02916 g	0.07188 g	0.09288 g

Tabella 6 – Valori di amax ottenuti per i diversi stati limite

Nel metodo di verifica di stabilità pseudo - statico che è stato adottato, l'azione sismica è rappresentata da un'azione statica equivalente, i cui coefficienti sismici orizzontale e verticale possono calcolarsi secondo le relazioni:

$kh = \beta s \, amax/g$
$kv = 0.5 \, kh$

in cui kh è il coefficiente della componente orizzontale della forza, kv il coefficiente della componente verticale e βs il coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa, valutato secondo i valori riportati nella tabella 7.11.I delle Norme Tecniche per le Costruzioni e pari nel caso attuale a 0.20. I valori ottenuti sono riportati nella tabella che segue.

	SLO	SLD	SLV	SLC
kh	0.00540	0.00583	0.01437	0.01857
kv	0.00270	0.00292	0.00719	0.00929

Tabella 7 – Coefficienti sismici ottenuti per le condizioni degli stati limite del collasso (SLC), del danno (SLD), di operatività (SLO) e di salvaguardia della vita (SLV).

1.5 Test di Markland

1.5.1 Geometria dei fronti e dei gradoni

Per analizzare i possibili meccanismi di instabilità sono stati eseguiti i *test* di Markland, utilizzando i valori medi di giacitura dei sistemi di discontinuità principali e l'orientazione media dei fronti prevista dal progetto di coltivazione nella configurazione finale della cava, ad attività esaurita.

Nelle fasi intermedie della coltivazione i fronti provvisori avranno sostanzialmente la stessa orientazione prevista per la configurazione finale. Ne consegue che le verifiche di stabilità dei fronti nella configurazione finale, essendo più gravose, in ragione della maggiore altezza complessiva, valgono anche per i fronti provvisori.

Per le singole famiglie di discontinuità sono stati utilizzati i valori centrali della distribuzione delle misure di orientazione, calcolati secondo gli algoritmi statistici del programma DIPS (Rocscience Inc., Toronto). Nel *test* è stato introdotto, come valore dell'angolo di attrito di base delle discontinuità, un cerchio d'attrito di 30°.
Le caratteristiche geometriche dei fronti nella configurazione finale del progetto di coltivazione sono illustrate nella tabella 8 ed in tav. 2.

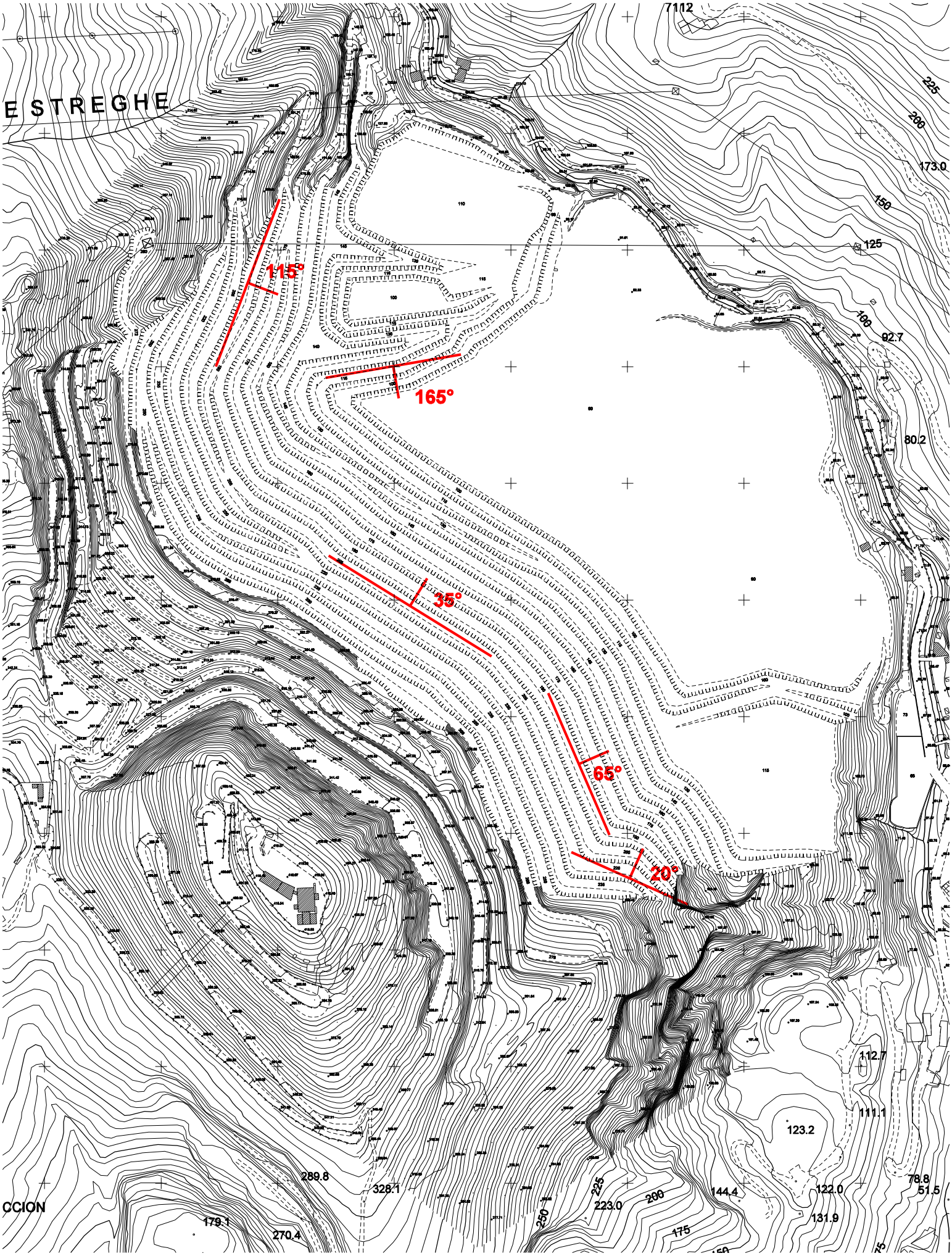
Orientazione del fronte (immersione - gradi)	Altezza (m)	Inclinazione (°)
Fronte 25°	200	45
Fronte 35	200	45
Fronte 65	95	45
Fronte 115	80	45
Fronte 165°	50	45

Tabella 8. Geometria dei fronti e dei gradoni

In tutti i fronti i gradoni hanno altezza di 15 m, inclinazione di 70°, profondità della pedata pari a circa 7 - 8 m.
Le verifiche sono state effettuate sia per la superficie di inviluppo del fronte sia per le alzate dei singoli gradoni.

1.5.2 Fronte 20°

Per la superficie d'inviluppo non esiste alcun potenziale cinematismo (fig. 3).
Per il gradone sono stati rilevati due possibili cinematismi, i cunei S/K2 e S'/K2 (fig. 4).



N

GEOMIN srl
geologia cave miniere

UNICALCE SpA/GHIGLIAZZA srl - Cava GIUNCHETTO/GNEO

Schematizzazione dei fronti di cava - Scala 1:4.000

TAV. N° :

2

1.5.3 Fronte 35°

Anche in questo caso per la superficie d'inviluppo non esiste alcun potenziale cinematismo (fig. 5).
Per il gradone sono stati rilevati due possibili cinematismi, i cunei S/K2 e K2/K3 (fig. 6).

1.5.4 Fronte 65°

Per quanto riguarda la superficie d'inviluppo non è possibile alcun cinematismo (fig. 7).
Per quanto riguarda il gradone è stato rilevato un solo possibile cinematismo, il cuneo K2/K3 (fig. 8).

1.5.5 Fronte 115°

Per quanto riguarda la superficie d'inviluppo non è possibile alcun cinematismo (fig. 9).
Per il gradone sono stati rilevati due possibili cinematismi, il cuneo K2/K3 ed il ribaltamento su S (fig. 10 e 11).

1.5.6 Fronte 165°

Per quanto riguarda la superficie d'inviluppo non è possibile alcun cinematismo (fig. 12).
Per il gradone sono stati rilevati due possibili cinematismi, i cunei S/K1 e S'/K1 (fig. 13).

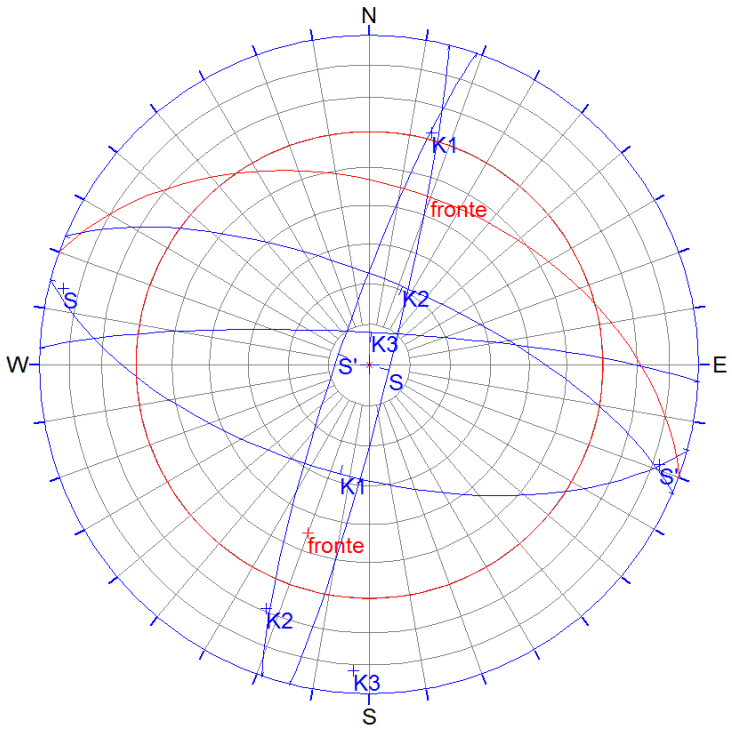


Fig. 3 – Fronte 20°. Test di Markland. La linea ed il cerchio di colore rosso indicano l'orientazione del fronte ed il cerchio d'attrito.

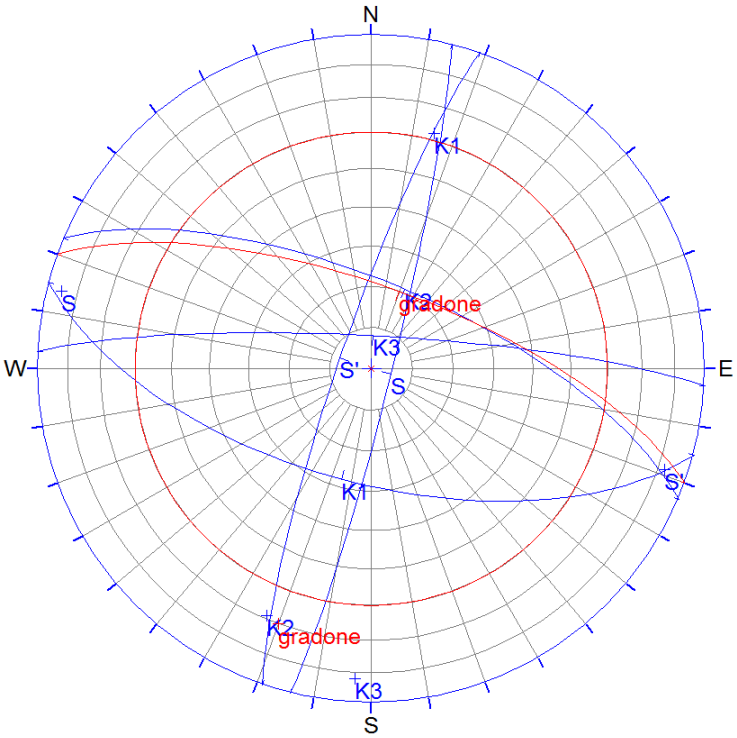


Fig. 4 – Gradone 20°. Test di Markland. La linea ed il cerchio di colore rosso indicano l'orientazione del fronte ed il cerchio d'attrito.

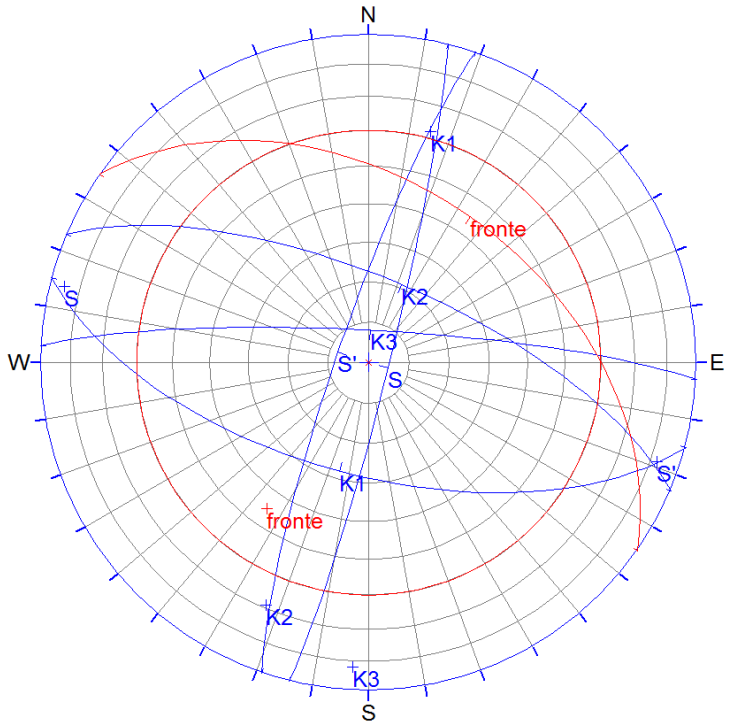


Fig. 5 – Fronte 35°. Test di Markland. La linea ed il cerchio di colore rosso indicano l'orientazione del fronte ed il cerchio d'attrito.

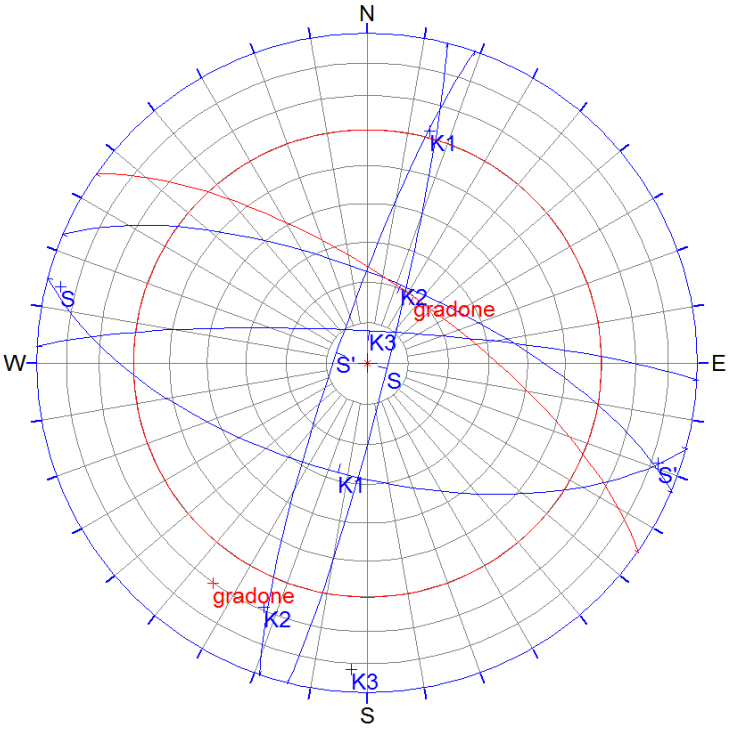


Fig. 6 – Gradone 35°. Test di Markland. La linea ed il cerchio di colore rosso indicano l'orientazione del fronte ed il cerchio d'attrito.

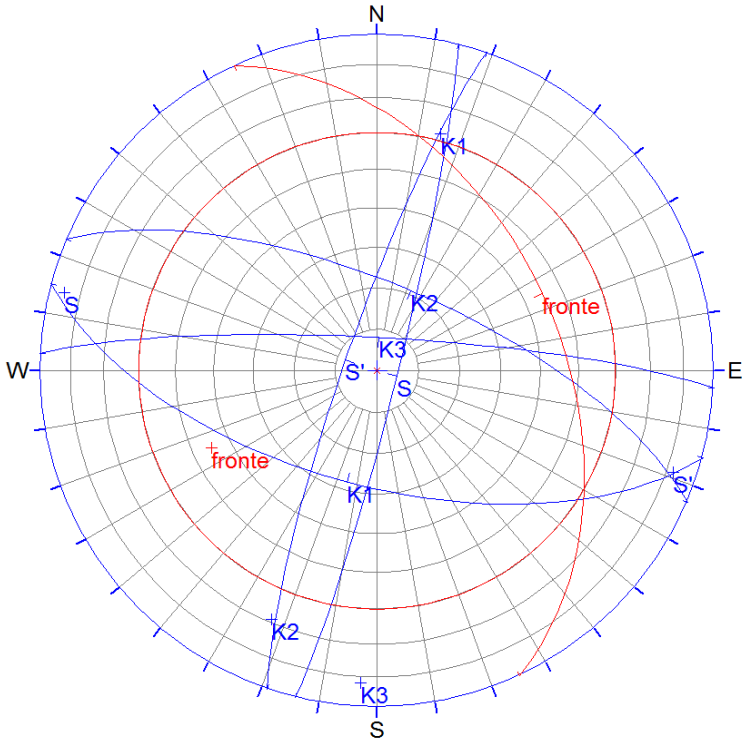


Fig. 7 – Fronte 65°. Test di Markland. La linea ed il cerchio di colore rosso indicano l'orientazione del fronte ed il cerchio d'attrito.

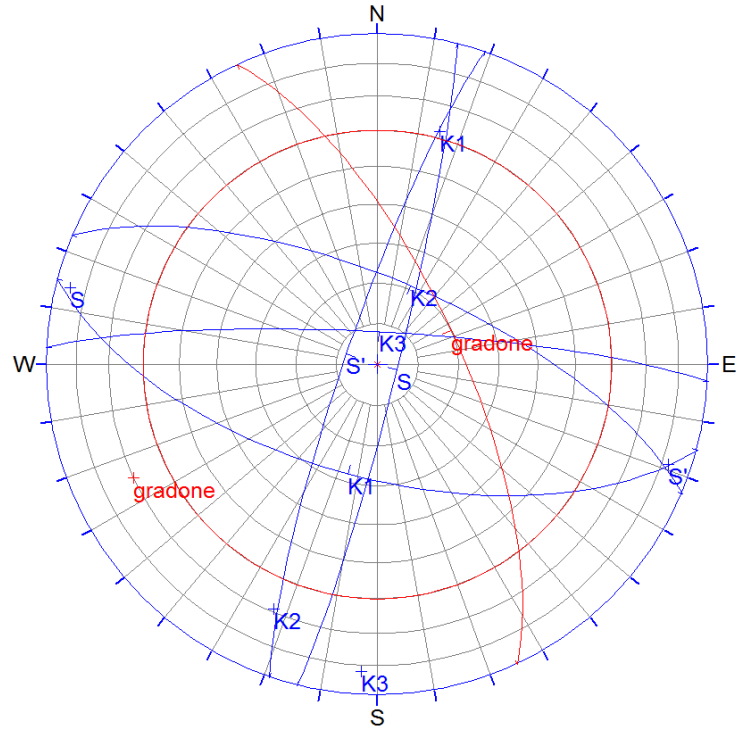


Fig. 8 – Gradone 65°. Test di Markland. La linea ed il cerchio di colore rosso indicano l'orientazione del fronte ed il cerchio d'attrito.

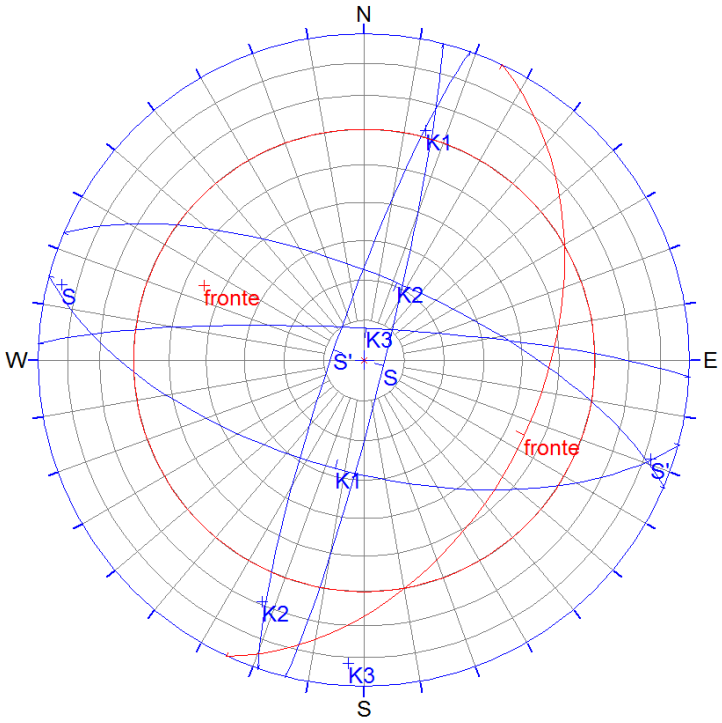


Fig. 9 – Fronte 115°. Test di Markland. La linea ed il cerchio di colore rosso indicano l'orientazione del fronte ed il cerchio d'attrito.

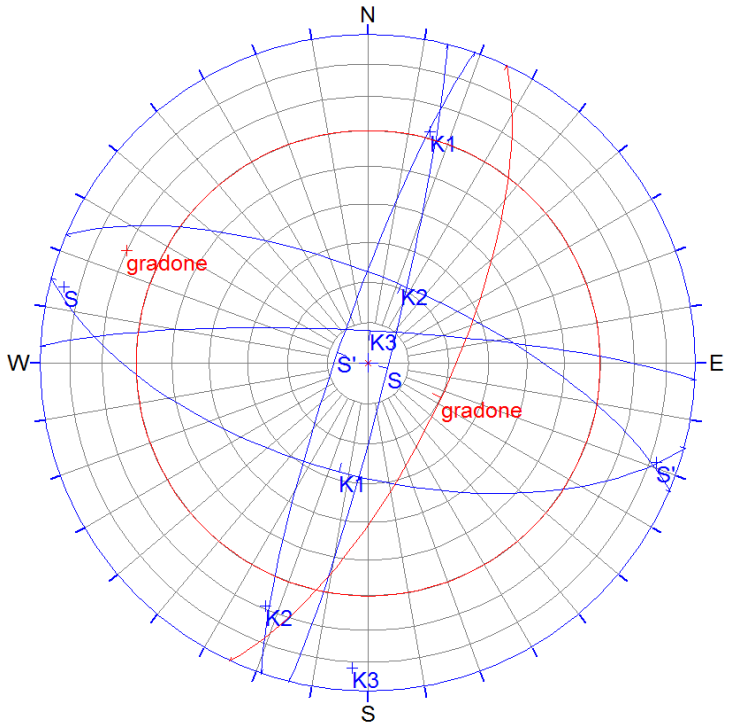


Fig. 10 – Gradone 115°. Test di Markland. La linea ed il cerchio di colore rosso indicano l'orientazione del fronte ed il cerchio d'attrito.

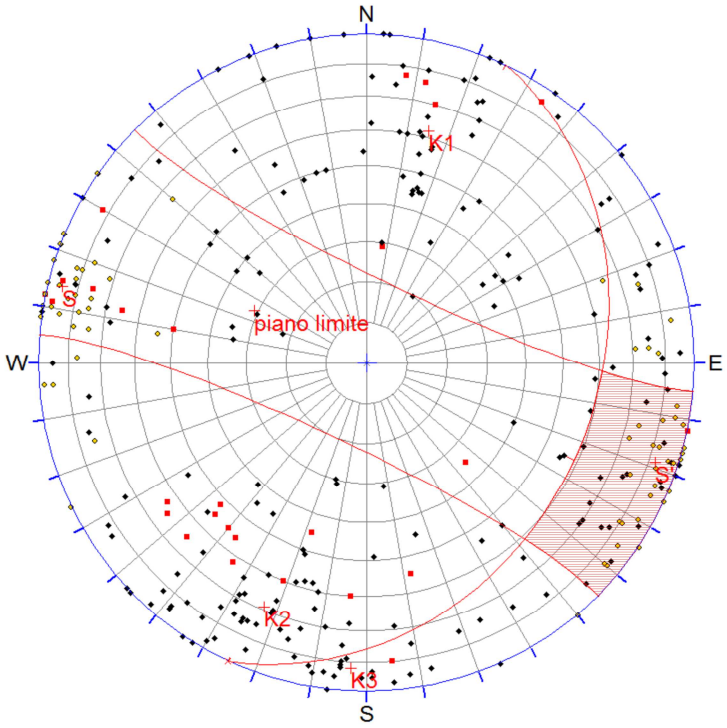


Fig. 11 – Gradone 115°. Test di Markland per il ribaltamento di S'. L'area a tratteggio fine racchiude i poli delle discontinuità potenzialmente instabili.

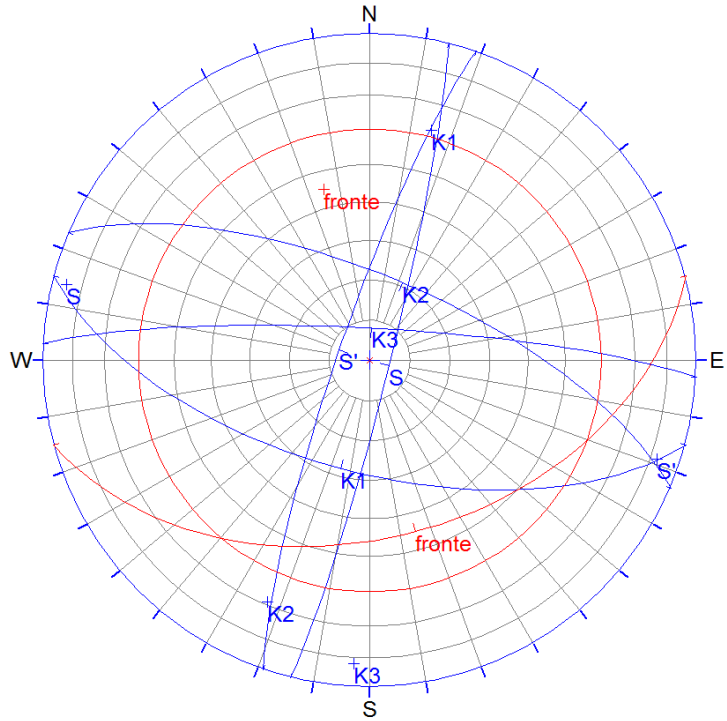


Fig. 12 – Fronte 165°. Test di Markland. La linea ed il cerchio di colore rosso indicano l'orientazione del fronte ed il cerchio d'attrito.

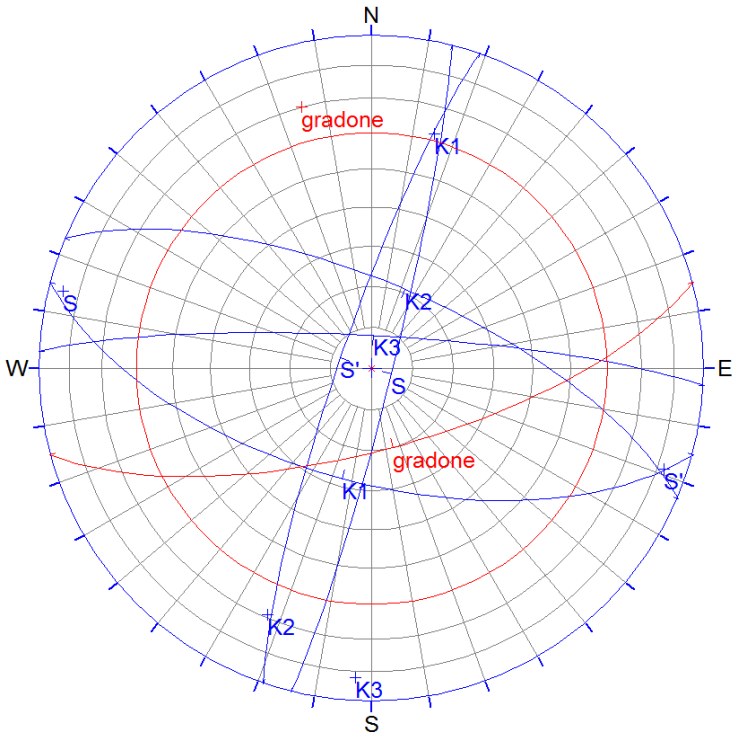


Fig. 13 – Gradone 165°. Test di Markland. La linea ed il cerchio di colore rosso indicano l'orientazione del fronte ed il cerchio d'attrito.

1.6 Calcoli di stabilità dei cinematismi potenziali

1.6.1 Introduzione

Secondo le Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14/01/2008, § 7.1) il rispetto degli stati ultimi in condizioni sismiche si considera soddisfatto quando siano state eseguite le verifiche relative agli stati limite SLD, stato limite di danno, e SLV, stato limite di salvaguardia della vita.
Non essendo valutabile per un fronte in roccia uno stato limite di esercizio, nelle verifiche di stabilità è stato preso in considerazione solo lo stato limite ultimo SLV.

I potenziali cunei di scivolamento ricavati dai *test* di Markland sono stati sottoposti a verifica analitica, eseguendo i calcoli di stabilità con il programma *Swedge* di Rocscience Inc. (Toronto, Canada). Il programma utilizza le equazioni di Hoek[3].

1.6.2 Parametri geomeccanici di progetto

Per ottenere i parametri di progetto sono stati adottati i coefficienti parziali dell'Approccio 1 Combinazione 2 previsti dalle Norme Tecniche per le Costruzioni per i fronti di scavo. Pertanto ai valori caratteristici della coesione intercetta e della tangente dell'angolo di resistenza al taglio sono stati applicati i coefficienti parziali (1,25 in entrambi i casi, secondo la tabella 6.2.II delle citate norme). Alla resistenza globale deve essere applicato il coefficiente 1,1 (tabella 6.8.I).
Per la generalità dei casi sono state assunte condizioni idrauliche drenate. Il peso specifico apparente è stato assunto pari a □□= 26,5 kN/m^3. L'azione sismica è stata simulata con il metodo pseudo - statico, per mezzo di un'azione statica equivalente, espressa dai coefficienti sismici calcolati nel capitolo precedente. Per quanto riguarda le dimensioni dei cunei potenzialmente instabili, la stima è stata eseguita assumendo il valore modale (di maggior frequenza) della persistenza dei diversi sistemi di discontinuità, indicata in allegato nei tabulati.

Sistema di discontinuità	φ (°)
S	33
K1	30
K2	38
K3	32

Tabella 9 Parametri di progetto.
Angolo d'attrito di picco su giunto

[3] Hoek E., Bray J. – *Rock Slope Engineering* – IMM, London, 1977.

Sistema di discontinuità	c (kPa)	φ (°)
S	20	25
K1	120	25
K2	120	25
K3	60	25

Tabella 10 – Parametri di progetto. Resistenza al taglio dei sistemi di discontinuità per le superfici d'inviluppo dei fronti

Nelle verifiche del gradone immergente verso 115°, è stato considerato anche l'effetto del sistema di faglie denominato F2, associato a K2 per analogia di giacitura, che attualmente affiora con una frequenza significativa nei gradoni superiori della cava Gneo. Nella cava Giunchetto la frequenza delle faglie di tale sistema è sufficientemente bassa da poter essere considerata trascurabile nella verifica dei fronti finali.

1.6.3 Scivolamento di cunei

I coefficienti di sicurezza ottenuti dai calcoli sono riportati nella tabella 11.

Cinematismo	**Fattore di sicurezza**	**Volume (m³)**	**Peso (t)**
Gradone 20°/70°			
Cuneo S/K2	0,31	0,020	0,050
Cuneo S'/K2	0,44	0,050	0,120
Gradone 35°/70°			
Cuneo K2/K3	2,55	0,150	0,400
Cuneo S/K2	0,32	0,006	0,015
Gradone 65°/70°			
Cuneo K2/K3	2,55	0,170	0,440
Gradone 115°/70°			
Cuneo K2/K3	2,55	0,060	0,160
Cuneo F2/K3	1,15	4,980	13,190
Gradone 165°/70°			
Cuneo S/K2	0,36	0,142	0,380
Cuneo S'/K2	0,29	0,002	0,005

Tabella 11 Fattori di sicurezza calcolati per i cinematismi potenziali

1.6.4 Ribaltamento

Il potenziale cinematismo di ribaltamento riguarda il gradone immergente verso 115°, la cui direzione è circa parallela alla direzione del massimo

S'della distribuzione della stratificazione. La verifica delle condizioni predisponenti è stata eseguita sulla scorta dell'analisi di Goodman (1989) [4].
Le caratteristiche geometriche significative delle discontinuità S' sono spaziatura prevalente 20-60 cm, meno frequentemente 60-200 cm, persistenza decametrica. La continuità delle superfici S' è interrotta da fratture soprattutto del sistema K2, oltre che da giunti irregolari circa normali alla S.
La prima condizione necessaria al verificarsi del cinematismo, che permette il reciproco scivolamento delle colonne di roccia, fase che precede il ribaltamento, è verificata dall'espressione

$\psi > \varphi + 90° - \beta$

in cui ψ è l'angolo di inclinazione della superficie di discontinuità che dà luogo al ribaltamento (S'), φ è l'angolo di attrito lungo tale superficie, β è l'angolo di inclinazione del fronte.
La seconda condizione riguarda la fase di ribaltamento, che può avvenire se è verificata la disequazione

$b/h < \tan (90° - \psi)$

in cui b è la larghezza e h l'altezza del prisma di roccia. La relazione si basa sull'ipotesi che la superficie basale dei prismi (con inclinazione ψ) sia circa normale all'allungamento.

ψ	φ	β	b/h
82°	33°	70°	0,04-0,13

Tabella 12 – Parametri del ribaltamento

Nel caso in esame la prima condizione è sempre verificata (82° > 53°), e il ribaltamento è possibile. La seconda condizione, impiegando i dati citati sopra, è verificata per la spaziatura dell'intervallo 20-60 cm (0,04<0,14); mentre si è vicini alla stabilità con la spaziatura maggiore (0,13<0,14).
Tenendo conto della variabilità dei dati, i fenomeni di ribaltamento sono possibili soprattutto con i valori inferiori di spaziatura. Va tuttavia osservato ancora che nell'ammasso roccioso in cui sarà ricavato il fronte 115° la giacitura della stratificazione immerge attualmente in prevalenza verso E, secondo la giacitura principale S, che non dà luogo a ribaltamento, piuttosto che verso O secondo S'.
In conclusione i fenomeni di ribaltamento sono possibili ma verosimilmente solo in settori limitati delle scarpate dei gradoni, e possono essere controllati ed eliminati con le operazioni di disgaggio consuete.

[4] Goodman R.E. (1989) – *Introduction to Rock Mechanics* - John Wiley & Sons, New York.

1.6.5 Considerazioni conclusive

Per quanto riguarda le superfici d'inviluppo dei fronti, i valori di inclinazione adottati secondo le indicazioni progettuali (45°), largamente inferiore ai valori di inclinazione della maggior parte dei sistemi di discontinuità (60°-85°), assicurano complessivamente condizioni di stabilità intrinsecamente sicure.

Per quanto riguarda i gradoni, i fattori di sicurezza calcolati risultano superiori al limite di 1,1 tranne che in cinque casi (i cunei S/K2 e S'/K2 dei gradoni immergenti verso 20° e 35°, ed i cunei S/K1 ed S'/K1 del gradone immergente verso 165°) per i quali i fattori di sicurezza sono ampiamente inferiori all'unità.
Tuttavia il volume ed il peso di alcuni cunei (S/K2 dei gradoni 20° e 35° e S'/K1 del gradone 165°, vedi tabella 11), stimati sulla base dei valori modali di persistenza, sono del tutto trascurabili. La forma geometrica dei cunei inoltre (lastre molto sottili, a causa del piccolo angolo tra le due superfici) appare irrealistica (vedi rappresentazione tridimensionale in allegato).
I cunei rimanenti hanno ancora volumi ridotti, inferiori ad 1 m^3. Ciò significa che nel caso in cui durante la coltivazione si verifichino effettivamente condizioni di rischio, cioè che le discontinuità componenti il cuneo si intersechino sul bordo superiore del gradone per dar luogo ad un blocco rimuovibile, i volumi instabili possono essere eliminati attraverso le consuete operazioni di disgaggio delle scarpate, senza che la stabilità del gradone nel suo insieme venga compromessa.

Per quanto riguarda l'impatto sulla stabilità del sistema di faglie F2, presente quasi esclusivamente nei fronti della cava Gneo e caratterizzato da elevata persistenza, i cunei che si formano con il sistema S nel fronte immergente verso 115° sono stabili.

2. VERIFICHE DI STABILITA' DEL RILEVATO DI SABBIE LIMOSE

2.1 Introduzione

Le acque di lavaggio provenienti dagli impianti di frantumazione vengono trattate in filtropressa.
Il processo produce terre a granulometria limoso-sabbiosa con umidità non superiore al 20%, quindi "palabili" e immediatamente trasportabili, nel sito di discarica, per realizzare l'intervento di rimodellamento previsto dal progetto di recupero ambientale.

2.2 Caratteristiche dei rilevati in sabbie limose

Il rilevato di riporto in sabbie limose, sagomato con opportuna geometria, sarà realizzato nel settore NO della cava Gneo. Le scarpate verso valle saranno caratterizzate da un'inclinazione di 23°. I gradoni avranno un'altezza massima di 5 m e pendenze intorno a 25°. La configurazione geometrica descritta è rappresentata nelle sezioni rappresentative delle fig. 14 e 16.

2.3 Proprietà fisico-meccaniche dei materiali

Le caratteristiche geotecniche dei materiali sabbioso – limosi sono state studiate in passato per mezzo di analisi e prove di laboratorio (relazioni dello Studio di Geologia Applicata Maifredi).

I risultati delle prove indicano che la composizione granulometrica dei materiali di risulta è compresa tra limi di bassa plasticità e sabbie limose non ceosive. I valori dei parametri geotecnici ottenuti dalle analisi sono riportati nella tabella sottostante.

Parametri geotecnici	Limi	Sabbie limose
Peso di volume	16,4 ÷ 19,6 kN/m^3	16,4 kN/m^3
Angolo di attrito di picco	26,6°	33,3°
Coesione	15,4 kPa	0 kPa

Tabella 13 Parametri geotecnici dei materiali sterili

Le NTC consentono l'uso come parametri caratteristici dei parametri medi quando debba essere preso in considerazione un elevato volume di terreno, con possibile compensazione delle eterogeneità.

In accordo con tale considerazione e tenendo conto del fatto che le sabbie limose sono di gran lunga predominanti, è stato assunto come parametro caratteristico un valore dell'angolo di attrito di picco inferiore al valore misurato, ed una coesione cautelativamente nulla.

Parametri geotecnici	Sabbie limose
Peso di volume	16,4 kN/m^3
Coesione	32°
Angolo d'attrito di picco	0 kPa

Tabella 14 Parametri geotecnici dei materiali sterili

2.4 Caratterizzazione sismica

2.4.1 Classificazione

Si riprende quanto detto nel paragrafo 1.4.1. per quanto riguarda i parametri sismici di base funzione della localizzazione del sito di cava. Vengono modificati invece per le verifiche di stabilità delle sabbie limose le categorie di suolo e l'azione sismica risultante.

2.4.2 Categorie di suolo e condizioni topografiche

Il profilo stratigrafico del substrato roccioso nei fronti di cava è assimilabile ai sottosuoli compresi nella categoria E, per la quale il parametro di amplificazione stratigrafica S_S ha un valore di 1,8÷1,9 (D.M. 14/01/2008, Tabella 3.2.V).
Per pendii con inclinazione media superiore ai 15°, le condizioni topografiche del sito rientrano nella categoria T2 della tabella 3.2.VI delle citate Norme Tecniche per le Costruzioni, cui corrisponde un valore di ST = 1,20.

2.4.3 Azione sismica

Poiché mancano analisi specifiche riguardanti la risposta sismica locale, l'accelerazione massima attesa nel sito può essere calcolata (§ 7.11.3.5.2 delle Norme Tecniche per le Costruzioni) con la relazione

$amax = S_S\ ST\ a_g$

che, utilizzando i parametri ottenuti nei paragrafi precedenti, fornisce per il sito i valori di amax riportati nella tabella sottostante.

	SLO	SLD	SLV	SLC
amax	0,0524 g	0,0563 g	0,1315 g	0,1663 g

Tabella 15 – Valori di amax ottenuti per l diversi stati limite

Nel metodo di verifica di stabilità pseudo - statico che è stato adottato, l'azione sismica è rappresentata da un'azione statica equivalente, i cui

coefficienti sismici orizzontale e verticale possono calcolarsi secondo le relazioni:

kh = βs amax/g
kv = 0.5 kh

in cui kh è il coefficiente della componente orizzontale della forza, kv il coefficiente della componente verticale e βs il coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa, valutato secondo i valori riportati nella tabella 7.11.I delle Norme Tecniche per le Costruzioni e pari nel caso attuale a 0.20. I valori ottenuti sono riportati nella tabella che segue.

E	SLO	SLD	SLV	SLC
kh	0,0105	0,0113	0,0263	0,0332
kv	0,0053	0,0057	0,0132	0,0166

Tabella 16 – Coefficienti sismici ottenuti per le condizioni degli stati limite del collasso (SLC), del danno (SLD), di operatività (SLO) e di salvaguardia della vita (SLV).

2.5 Parametri geotecnici di progetto

Per ottenere i parametri di progetto sono stati adottati i coefficienti parziali dell'Approccio 1 Combinazione 2 previsti dalle Norme Tecniche per le Costruzioni per i rilevati. Pertanto ai valori caratteristici della coesione intercetta e della tangente dell'angolo di resistenza al taglio sono stati applicati i coefficienti parziali (1,25 in entrambi i casi, secondo la tabella 6.2.II delle citate norme).
Alla resistenza globale deve essere applicato il coefficiente 1,1 (tabella 6.8.I).

Parametri geotecnici	**Sabbie limose**
Peso di volume	16,4 kN/m^3
Angolo di attrito di picco	26.5°
Coesione	0 kPa

Tabella 17 – Parametri di progetto

2.6 Verifica di stabilità

Secondo le Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. 14/01/2008, § 7.1) il rispetto degli stati ultimi in condizioni sismiche si considera soddisfatto quando siano state eseguite le verifiche relative agli stati limite SLD, stato limite di danno, e SLV, stato limite di salvaguardia della vita.
Non essendo valutabile per un rilevato uno stato limite di esercizio, nelle verifiche di stabilità è stato preso in considerazione solo lo stato limite ultimo SLV.

I calcoli di stabilità sono stati eseguiti applicando il metodo dell'equilibrio limite nelle versioni di Bishop, Spencer, Lowe - Karafiath e GLE/Morgenstern-Price, per potenziali superfici di scorrimento circolari, con il programma *Slide 5.0* (Rocscience Inc.- Toronto, Canada). Sono stati adottati i parametri geotecnici definiti nel paragrafo precedente.

Per quanto riguarda le condizioni idrauliche, la permeabilità medio – bassa dei materiali fini posti a discarica, la permeabilità per contro elevata del substrato carbonatico ed il positivo effetto del sistema di regimazione delle acque progettato, consentono di ritenere che nel rilevato non si possa sviluppare una circolazione sotterranea significativa. Tuttavia cautelativamente nelle verifiche di stabilità si è ipotizzato, in corrispondenza della fossa basale su cui verrà realizzato il rilevato, un livello piezometrico di qualche metro di spessore.

Sono stati calcolati i fattori di sicurezza di oltre 4800 superfici di scivolamento potenziale distribuite sull'intera sezione rappresentativa. I valori dei fattori di sicurezza sono rappresentati nelle fig. 15 e 17 con aree di diverso colore nel quadrato che racchiude i centri dei cerchi di scorrimento. Il cerchio riprodotto è relativo al fattore di sicurezza minimo calcolato con il metodo di Bishop.
I risultati delle verifiche hanno fornito in tutte le superfici esaminate (escludendo le superfici che intersecano il rilevato per profondità limitata, dello spessore di circa 1 m) fattori di sicurezza superiori a 1,1. I rilevati previsti dal progetto sono pertanto in grado di garantire le condizioni di sicurezza richieste dalla normativa attualmente in vigore.

I tabulati delle verifiche di stabilità sono riportati in allegato.

2.7 Verifiche alla liquefazione

Le NTC indicano cinque condizioni, manifestandosi almeno una delle quali le verifiche a liquefazione possono essere omesse (§ 7.11.3.4.2).

Delle due circostanze che riguardano le condizioni sismiche, quella relativa all'accelerazione massima attesa è sfavorevole, essendo amax superiore a 0,1 g per lo stato limite SLV. Per quanto riguarda la magnitudo M, Genova non è compresa nelle zone sismogenetiche per le quali vi è una valutazione di magnitudo massima[5]. I valori medi e modali di M calcolati per la città di

[5] Gruppo di lavoro (2004) *Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanaza PCM 3274 del 20 marzo 2003, rapporto conclusivo.* INGV Milano-Roma.

Genova nel rapporto dell'INGV di Spallarossa *et al.* (2007)[6] risultano rispettivamente pari a 4,99 e 4,75.
Esaminando i dati di disaggregazione di a_g del nodo più vicino al sito delle cave (ID16695, vedi fig. 2) ottenibili dal sito *WebGis* dell'INGV relativo alla pericolosità sismica, il valor medio di M risulta ancora inferiore a 5 (pari a 4,96).

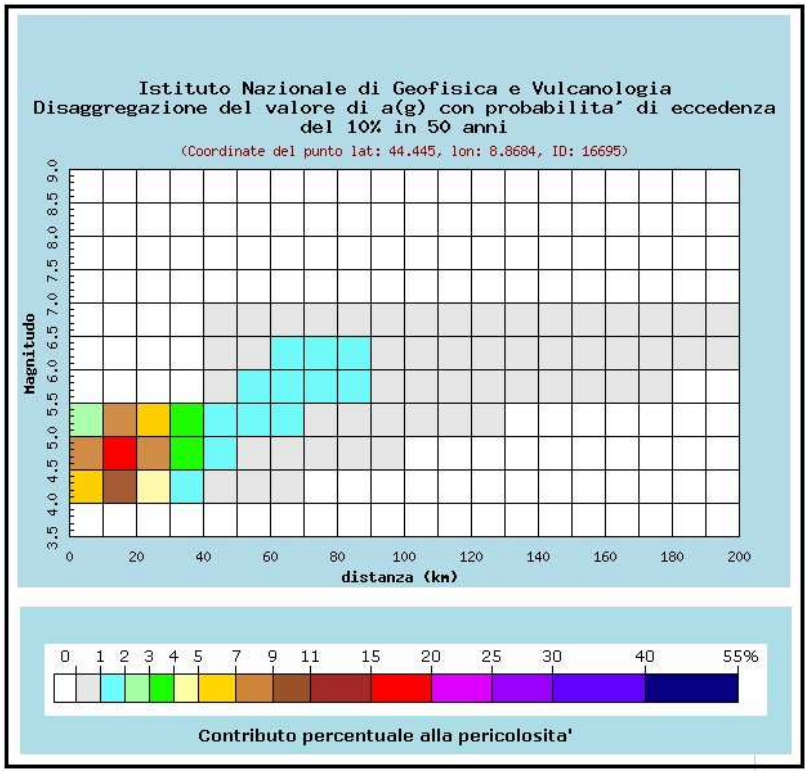


Fig. 18 – Disaggregazione del valore di a_g (rappresentata come magnitudo in funzione della distanza) per il punto di reticolo ID 16695.

La condizione di esclusione basata sulla resistenza dei terreni ricavata da prove penetrometriche non è valutabile, non essendo state eseguite indagini geotecniche in sito, così come la distribuzione granulometrica, per assenza di analisi granulometriche di dettaglio.

Le condizioni idrauliche rappresentano una circostanza globalmente favorevole all'esclusione delle verifiche, potendosi ammettere che la soggiacenza della superficie freatica sia superiore a 15 m dal p.c. per una parte significativa del rilevato, il cui spessore massimo arriva a 55 m.

[6] Spallarossa D., Barani S. (2007). *Disaggregazione della pericolosità sismica in termini di M-R-ε. Progetto DPC-INGV S1, Deliverable D14*. http://esse1.mi.ingv.it/d14.html

In conclusione si può ritenere che due delle cinque condizioni per l'esclusione delle verifiche siano sostanzialmente verificate (magnitudo e profondità della falda), consentendo così di omettere le analisi di dettaglio.
A favore della stabilità va ancora tenuto conto del grado elevato di addensamento cui saranno portate le sabbie limose del rilevato, come previsto dal progetto.

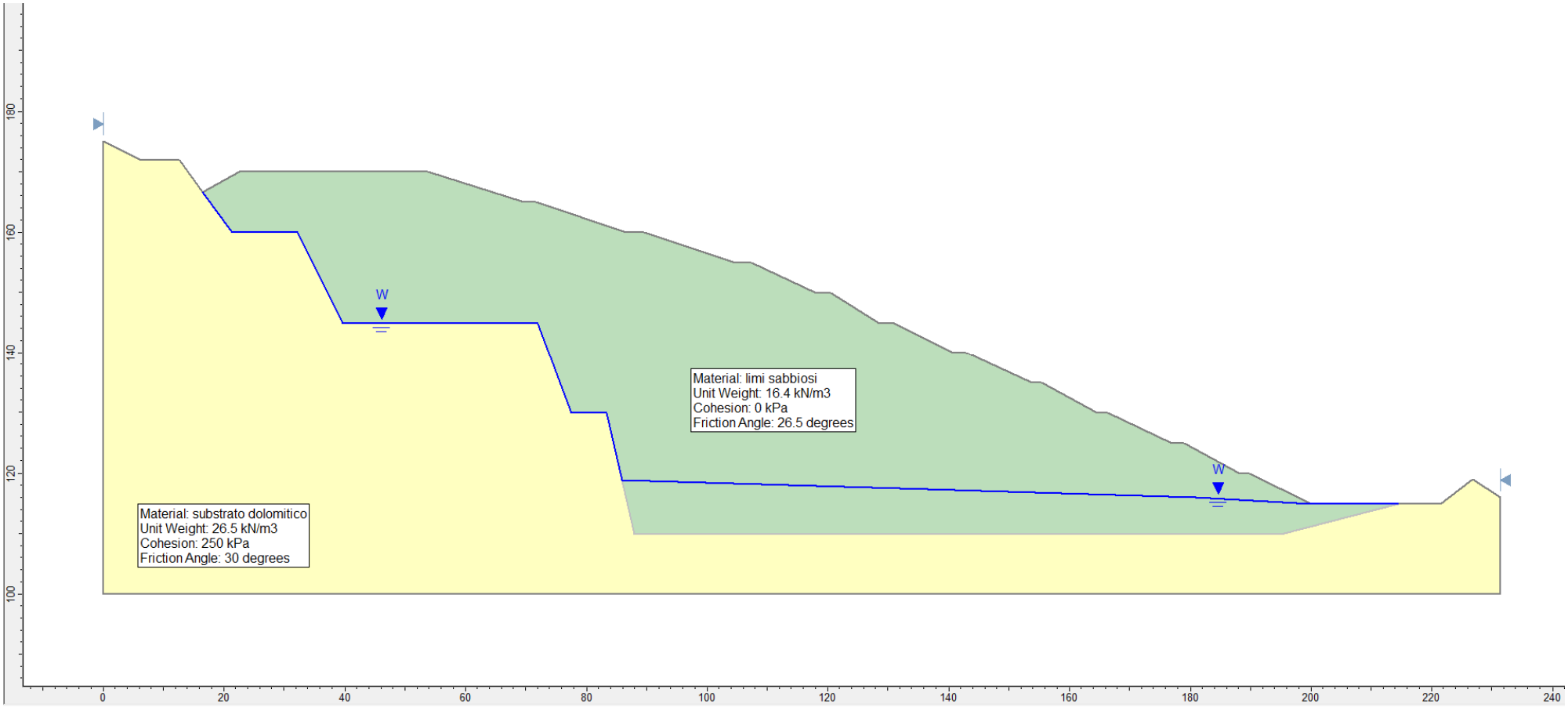


Fig. 14 –Rilevato in sabbie limose. Sezione x-x'. Caratteristiche geometriche

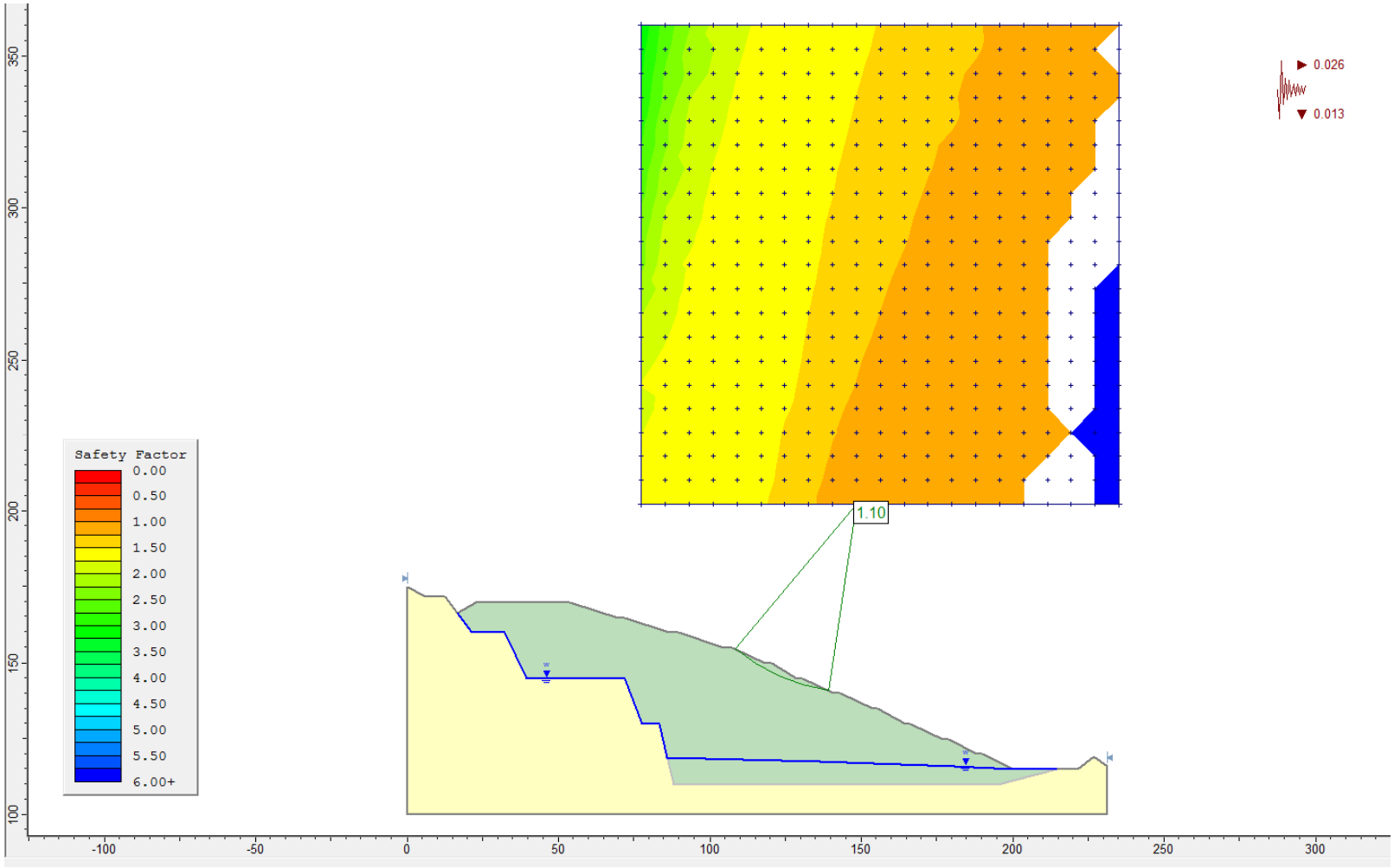


Fig. 15 –Rilevato in sabbie limose. Sezione x-x'. Verifiche di stabilità. E' rappresentato il valore minimo del coefficiente di sicurezza.

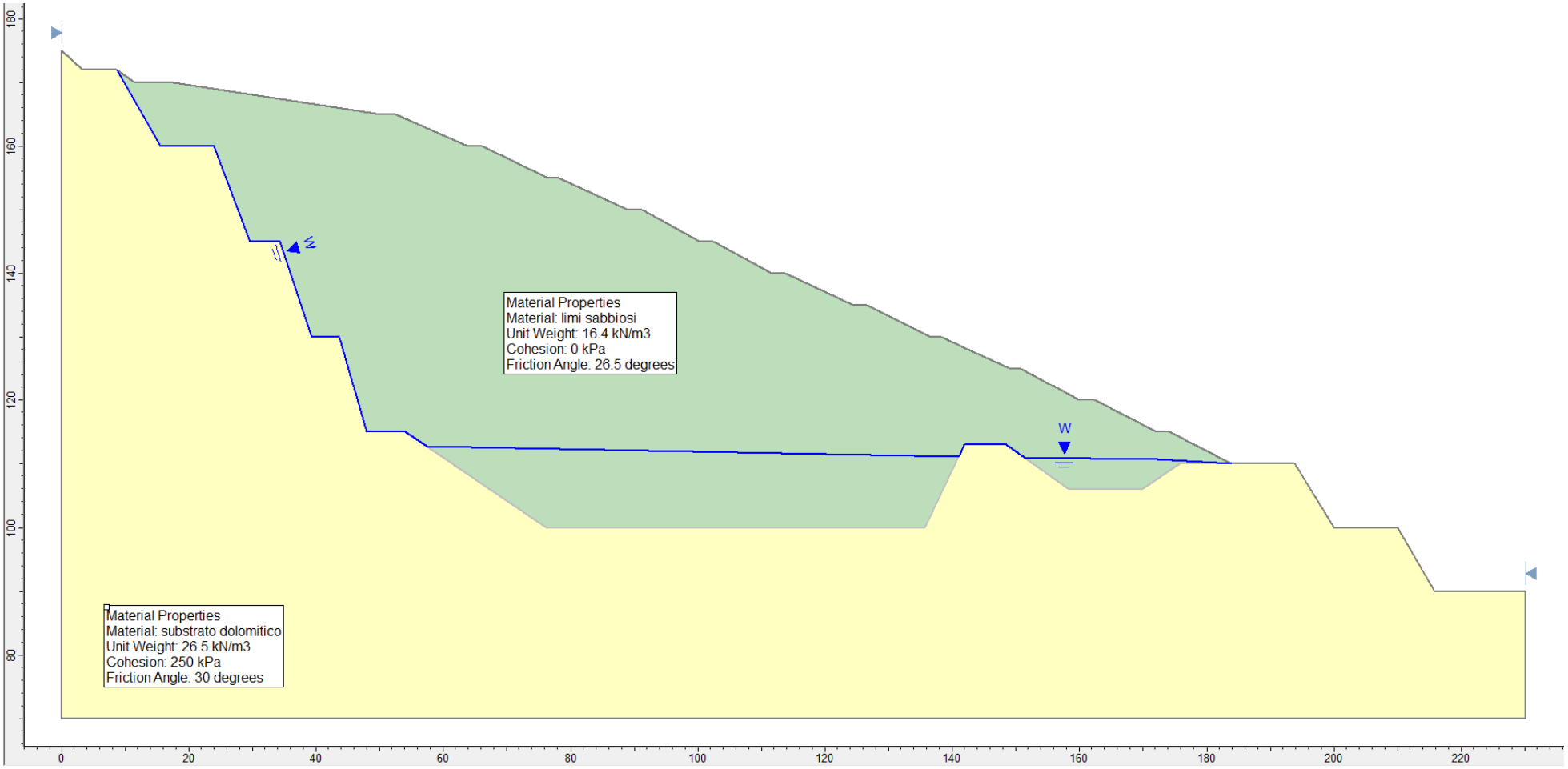


Fig. 16 –Rilevato in sabbie limose. Sezione y-y'. Caratteristiche geometriche

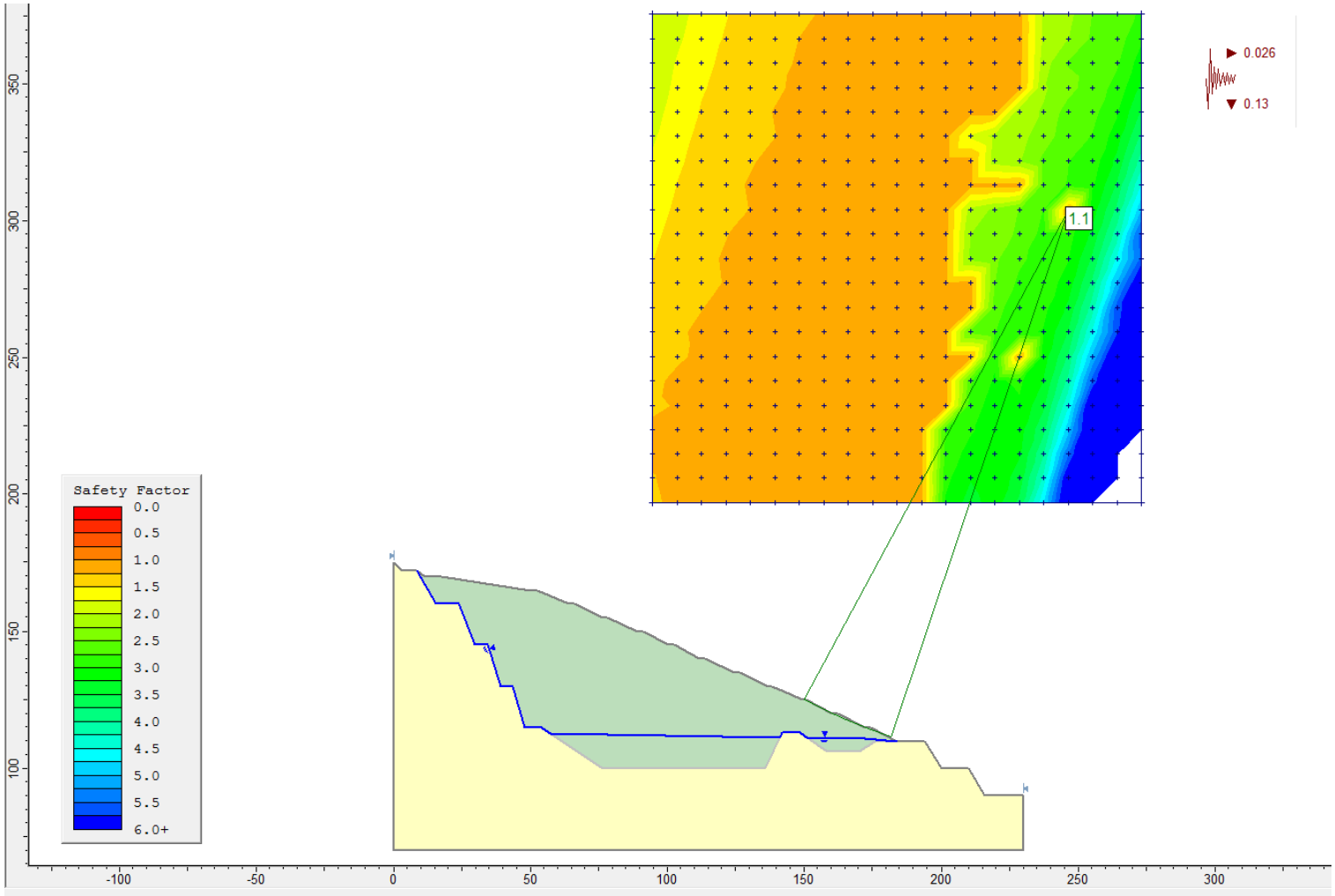


Fig. 17 – Rilevato in sabbie limose. Sezione y-y′. Verifiche di stabilità. E′ rappresentato il valore minimo del coefficiente di sicurezza

3. VERIFICHE DI STABILITA' DELLE OPERE IN SOTTERRANEO

3.1 Assetto strutturale

Per quanto riguarda l'inquadramento geologico e geomorfologico si rimanda ai relativi paragrafi del progetto di coltivazione delle cave Giunchetto e Gneo.

Sia la camera di frantumazione che gran parte della galleria attraverseranno la formazione della Dolomie di M. Gazzo, costituita da dolomie stratificate con giacitura sub - verticale e direzione NNE, come è presumibile tenuto conto dei dati del rilevamento in esterno. Nel settore dell'imbocco saranno attraversati, per una lunghezza indicativa dell'ordine di qualche decina di metri, calcari scistosi in strati sottili, attribuiti alla formazione dei Calcari di Gallaneto, le cui caratteristiche geomeccaniche non sono tali da imporre una diversa valutazione di resistenza dell'ammasso roccioso.

4. CARATTERIZZAZIONE GEOMECCANICA DEGLI AMMASSI ROCCIOSI

4.1 Caratteristiche delle discontinuità

Trascurando la sequenza di calcari scistosi affiorante per poche decine di metri all'inizio della galleria, le unità litologiche che saranno attraversate dal cavo sono attribuibili ad un unico ammasso roccioso dolomitico, il comportamento geomeccanico del quale è riferibile al modello di un mezzo discontinuo, in cui la resistenza complessiva dell'ammasso è determinata principalmente dalle caratteristiche delle discontinuità.

Per l'analisi delle caratteristiche geomeccaniche delle discontinuità, in assenza di opere in sotterraneo, sono stati utilizzati gli stendimenti eseguiti per le verifiche di stabilità a cielo aperto.

La descrizione del rilievo eseguito e delle caratteristiche delle discontinuità fa riferimento ai capitoli relativi del progetto di coltivazione.
In sintesi nelle dolomie sono stati riconosciuti 4 sistemi di discontinuità significativi (vedi tabella 1), denominati S, K1, K2, K3. A ciascun sistema è stato attribuito, come rappresentativo della giacitura media, il valore centrale della distribuzione delle misure, che è stato calcolato con il metodo di distribuzione statistica di Schmidt (fig. 19).

S (104°/85°, 289°/82°) rappresenta la stratificazione delle dolomie, superficie ubiquitaria e di notevole persistenza, cui sono associate raramente faglie di analoga orientazione. Lungo la stratificazione si osservano localmente fenomeni di dissoluzione, con formazione di cavità sub-verticali di apertura decimetrica, talora con concrezioni calcaree.

K1 (195°/62°) ha una frequenza di circa il 10% del totale delle misure, ed è caratterizzato da persistenza prevalentemente metrica. La distribuzione delle misure di K1 mostra una buona costanza della direzione, con dispersione più accentuata nell'inclinazione.

K2 (023°/69°) ha la maggiore frequenza (circa il 12%), persistenza compresa tra 1 m e 3 m, ed è associato al sistema di faglie più importante, caratterizzato da orientazione NO – SE ed immersione verso NE (l'orientazione media del sistema di faglie è in cava di 044°/59°).

K3 (003°/82°), il sistema a minor frequenza (intorno al 7%), è caratterizzato da un'orientazione prossima a K2.

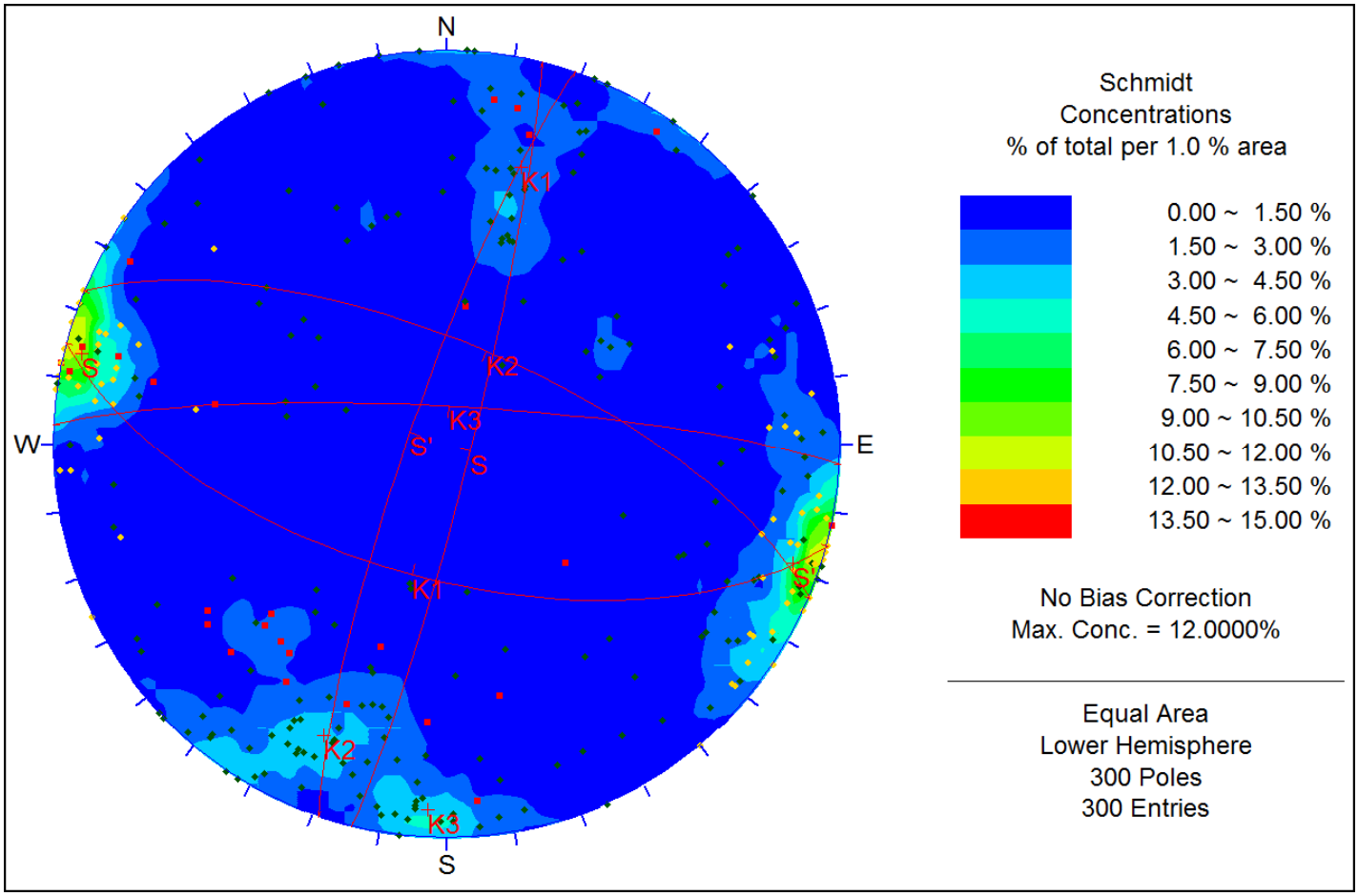


Fig. 19 – Proiezione equiareale sulla semisfera inferiore delle discontinuità rilevate nelle dolomie (il simbolo di colore verde indica le fratture, il simbolo rosso le faglie, il simbolo giallo la stratificazione).

4.2 Classificazione RMR

La valutazione delle caratteristiche di resistenza dell'ammasso roccioso di dolomie è stata eseguita utilizzando la classificazione RMR di Bieniawski.
La resistenza alla compressione monoassiale è stata stimata sulla base dei dati ricavati dalle misure sclerometriche.
Il valore di RQD è stato calcolato mediante la relazione empirica proposta da ISRM (1978):

$$RQD = 115 - 3.3J_v$$

con J_v = somma del numero di discontinuità per metro per ciascun sistema di discontinuità, risultando uguale a circa il 40%.

Nella tabella sottostante sono riportati i valori base della classificazione, gli indici BMRM e i parametri di resistenza degli ammassi rocciosi, ottenuti impiegando le espressioni:

c (kPa) = 5 BMRM
f (°) = 5 + (0.5 BMRM)

Parametri	Valore	*Rating*
Resistenza alla compressione monoassiale	*50-100 Mpa*	***7***
RQD	*25% - 50%*	***8***
Spaziatura delle discontinuità	*6 – 20 cm*	***8***
Condizioni delle discontinuità	*-*	***19***
Condizioni idrauliche	*Drenate*	***15***
INDICE BRMR		***57***
Coesione (kPa)		***285***
Angolo d'attrito (°)		***33.5***

Tabella 1 Caratterizzazione dell'ammasso roccioso in dolomie

4.3 Criterio di rottura di Hoek e Brown e classificazione GSI

Il criterio di rottura generalizzato di Hoek – Brown, formulato su base empirica ed espresso in funzione degli sforzi principali σ_1, σ_2, σ_3, utilizza le proprietà della roccia intatta e introduce fattori di riduzione delle proprietà di resistenza sulla base delle caratteristiche delle discontinuità dell'ammasso roccioso. Gli sforzi principali a rottura sono messi in relazione con la resistenza a compressione della roccia integra e con alcune costanti empiriche, legate alle caratteristiche geologiche dell'ammasso attraverso il GSI. (Geological Strength Index – GSI, Hoek and Marinos [2000]).

Con il programma *RocLab* di *Rocscience Inc.* (Toronto, Canada), impiegando i valori della resistenza a compressione uniassiale della roccia intatta, dell'indice *GSI* (funzione dei parametri strutturali e del grado di alterazione), e di *m* (funzione delle caratteristiche litologiche), questi ultimi due parametri ottenuti sulla base delle tabelle di valutazione di Hoek e Brown fornite dal programma stesso, sono stati calcolati i parametri di resistenza dell'ammasso roccioso dolomitico (fig. 1).

Nella figura 20 sono riportati gli inviluppi di rottura di Hoek – Brown dell'ammasso roccioso, in funzione degli sforzi principali σ_1 e σ_3, e le rette di Mohr - Coulomb (funzione della resistenza al taglio e dello sforzo normale) che meglio le approssimano. Sono inoltre riportati i parametri di

caratterizzazione degli ammassi rocciosi e i valori di resistenza dell'ammasso roccioso (*uniaxial compressive strenght* e *global strenght*). Secondo gli autori citati, il primo può essere impiegato per calcolare le condizioni di stabilità ai limiti di uno scavo in sotterraneo in funzione dello stress indotto sul bordo dalla creazione del vuoto.
Il secondo permette di valutare il comportamento globale dell'ammasso piuttosto che il processo locale di propagazione della rottura. E'il caso della stima della resistenza complessiva di un pilastro.

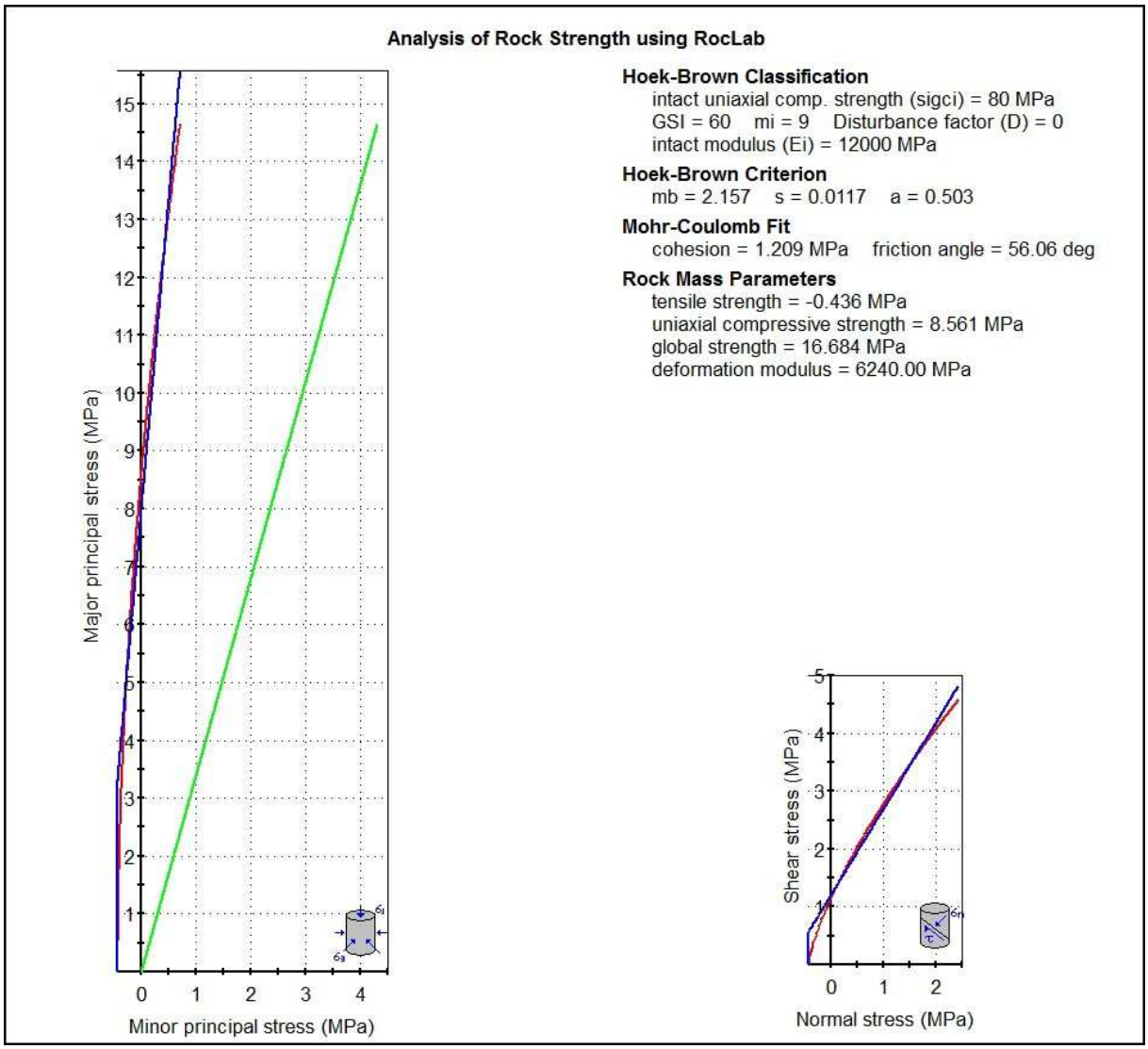


Fig. 20 – Caratteristiche di resistenza dell'ammasso roccioso di dolomie sulla base dell'indice GSI. Legenda: la linea rossa indica l'andamento della resistenza secondo

Hoek and Brown, la linea blu l'approssimazione secondo Mohr – Coulomb, la linea verde indica la transizione tra rottura fragile e duttile.

4.4 Indice di qualità del NGI

L'indice di qualità degli ammassi rocciosi del NGI (Norvegian Geotechnical Institute), chiamato Q (Barton *et al.*, 1974)[7], si ottiene dalla valutazione di sei parametri di base, indicati in tabella 2 insieme al valore ottenuto di Q.
J_r e J_a si riferiscono alle condizioni del meno favorevole dei diversi sistemi di discontinuità rilevati.

Parametro	Descrizione	Valore
RQD	*40%*	*40*
J_n	*Tre sistemi e discontinuità isolate*	*12*
J_r	*Discontinuità lisce, ondulate*	*2*
J_a	*Bassa alterazione*	*2*
J_w	*Presenza occasionale*	*1*
SRF	*Media pressione*	*1*
Q		*3,3*

Tabella 2 - Classificazione degli ammassi rocciosi di brecce calcaree e calcari secondo l'indice Q di Barton

Il valore dell'indice Q è ottenuto applicando l'espressione di Barton

$$Q = RQD\ J_r\ J_w / J_n\ J_a\ SRF$$

[7] **Barton N., Lien R. & Lunde J. (1974) – Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support – Rock Mechanics 6:4:189-236.**

5. ANALISI DI STABILITÀ DEL CAVO IN FUNZIONE DELLE DISCONTINUITA' DEGLI AMMASSI ROCCIOSI

5.1 Introduzione

Lo studio delle condizioni di stabilità dei volumi tetraedrici che la combinazione delle superfici appartenenti ai principali sistemi di discontinuità rilevati in esterno produce nell'ammasso roccioso dolomitico è stato eseguito con il programma UNWEDGE di *Rocscience Inc.* di Toronto.
Il programma applica la *block theory* sviluppata da Goodman and Shi [8] (1985). Viene esaminata la stabilità di tetraedri di roccia formati dall'intersezione di 3 sistemi di discontinuità indipendenti e dalle superfici libere perimetrali o del fronte di avanzamento del cavo. L'analisi è compiuta sul tetraedro avente un volume compatibile con le reali caratteristiche di persistenza dei diversi sistemi di discontinuità e con la geometria del cavo. La procedura di calcolo determina se il volume roccioso tende a scivolare lungo un piano o lungo la linea di intersezione di due piani, se cade verticalmente, o se è intrinsecamente stabile.

I dati di ingresso del programma UNWEDGE riguardano le dimensioni e l'orientazione spaziale del cavo e le caratteristiche di orientazione e resistenza dei sistemi di discontinuità dell'ammasso roccioso.
Sulla base dei dati in ingresso, vengono esaminate tutte le possibili combinazioni di 3 superfici di discontinuità che si possono formare a partire dai 5 sistemi rilevati nelle dolomie, considerando cioè le due diverse orientazioni medie di S ed i sistemi K1, K2, K3. Si ottengono quindi 10 diverse combinazioni, che si riducono a 7 escludendo le tre combinazioni che contengono sia S che S'. Per ogni combinazione di 3 superfici di discontinuità si possono formare lungo il perimetro del cavo un massimo di 6 tetraedri (in funzione dell'orientazione del pavimento, della calotta e dei piedritti, che costituiscono alternativamente la quarta faccia del tetraedro); i due ultimi tetraedri possono formarsi sul fronte di scavo nelle due opposte direzioni di avanzamento. Poiché sia la galleria che la camera di frantumazione hanno andamento orizzontale, tutti i tetraedri che si formano sul pavimento sono intrinsecamente stabili, e sono quindi stati omessi nelle verifiche.

5.2 Geometria ed orientazione delle opere in sotterraneo

La galleria di accesso alla camera di frantumazione è orientata per un primo tratto normalmente alla direzione media della stratificazione delle dolomie

[8] Goodman, R.E. and Shi, G. (1985), "Block Theory and Its Application to Rock Engineering", Prentice-Hall, London.

nell'area dell'imbocco (N285°, circa E-O), per un secondo tratto parallelamente a questa (N195°, circa N-S). La camera di frantumazione posta al termine della galleria ha un'altezza ed una larghezza di 14 m, una lunghezza di 80 m; il lato più lungo della camera è orientato in direzione E – O.

5.3 Parametri di progetto

Sono stati adottati i parametri di progetto definiti per le verifiche di stabilità dei fronti a cielo aperto ed il coefficiente sismico calcolato per il sito di cava.

Sistema di discontinuità	φ (°)
S	33
K1	30
K2	38
K3	32

Tabella 3 Parametri di progetto. Angolo d'attrito di picco su giunto

5.4 Risultati dei calcoli

Le tabelle 4, 5 e 6 riportano i coefficienti di sicurezza inferiori al limite di 1,1 ottenuti dalle verifiche di stabilità per i tre casi esaminati (galleria con orientazione parallela e normale alla stratificazione, camera di frantumazione). In allegato sono riportate le rappresentazioni tridimensionali dei tetraedri (sia stabili che instabili), i fattori di sicurezza (FS), i valori del volume e l'altezza dell'apice del tetraedro rispetto alla superficie del cavo, le modalità di scivolamento, per le 7 diverse combinazioni estratte dalle 5 famiglie di discontinuità prese in considerazione.

5.4.1 Galleria orientata parallelamente alla stratificazione

Le combinazioni **K1/K2/K3** e **K1/K3/S'** producono tetraedri instabili di dimensioni molto ridotte (volume inferiore a 0,15 m^3, altezze dell'apice inferiori a 0,5 m); ciò significa possibilità di intervenire facilmente con operazioni di disgaggio, senza modificare in modo significativo la geometria del cavo, per stabilizzare la galleria.

Per le cinque combinazioni restanti si possono formare, in particolare in calotta, tetraedri instabili di dimensioni fino a 1 m^3, in un caso fino a 2 m^3 (combinazione **K2/K3/S**). In tali situazioni sarà necessario provvedere alla

chiodatura dei volumi instabili. La lunghezza prevedibile dei chiodi dovrebbe essere, per stabilizzare i cunei di dimensioni maggiori, almeno pari a 3 m.

Cinematismo	Fattore di sicurezza	Volume del cuneo (m^3)	Altezza apice (m)
K1/K2/K3			
Calotta settore centrale	0,000	0,001	0,09
Calotta settore orientale	0,099	0,011	0,28
Fronte avanzamento	0,302	0,072	0,16
K1/K2/S			
Calotta settore orientale	0,000	0,321	0,73
Calotta settore occidentale	0,071	0,992	1,37
Fronte avanzamento	0,372	0,105	0,23
K1/K2/S'			
Calotta settore occidentale	0,000	0,547	0,98
Calotta settore orientale	0,114	1,179	1,85
Fronte avanzamento	0,302	0,119	0,23
K1/K3/S			
Calotta settore orientale	0,000	0,743	1,34
Calotta settore occidentale	0,071	0,300	0,75
Fronte avanzamento	0,302	0,242	0,31
K1/K3/S'			
Calotta settore occidentale	0,000	0,104	0,50
Calotta settore orientale	0,099	0,011	0,28
Fronte avanzamento	0,433	0,130	0,24
K2/K3/S			
Calotta settore centrale	0,209	2,123	4,69
Calotta settore orientale	0,099	0,003	0,11
K2/K3/S'			
Calotta settore centrale	0,099	1,580	3,33
Piedritti settore orientale	0,166	0,074	0,27

Tabella 4 – Galleria parallela alla stratificazione. Fattori di sicurezza, volumi e altezza dell'apice del tetraedro rispetto alla superficie del cavo di tutti i cunei potenzialmente instabili

5.4.2 Galleria orientata normalmente alla stratificazione

Le combinazioni **K1/K2/K3, K1/K2/S** e **K1/K2/S'** producono tetraedri instabili di dimensioni molto ridotte (volume inferiore a 0,2 m^3, altezze dell'apice inferiori a 0,5 m). I volumi instabili potranno essere eliminati facilmente con operazioni di disgaggio, senza modificare in modo significativo la geometria del cavo e la sua stabilità complessiva.

Le combinazioni **K1/K3/S** e **K1/K3/S'** danno luogo a tetraedri di dimensioni ancora contenute (inferiori a 0,5 m^3), con altezza dell'apice pari al massimo ad 1 m. Con le combinazioni **K2/K3/S** e **K2/K3/S'** si possono formare, in

calotta in particolare, tetraedri instabili di dimensioni pari a circa 1,5 - 2 m^3. In tali casi sarà necessario provvedere alla chiodatura dei volumi instabili. La lunghezza prevedibile dei chiodi dovrebbe essere, per stabilizzare i cunei di dimensioni maggiori, almeno pari a 3 m.

Cinematismo	Fattore di sicurezza	Volume del cuneo (m^3)	Altezza apice (m)
K1/K2/K3			
Parete laterale settore Nord	0,302	0,072	0,16
Parete laterale settore Sud	0,315	0,072	0,16
Calotta settore Nord	0,000	0,112	0,33
K1/K2/S			
Parete laterale settore Nord	0,372	0,105	0,23
Parete laterale settore Sud	0,315	0,105	0,23
Calotta settore Nord	0,071	0,189	0,50
K1/K2/S'			
Parete laterale settore Nord	0,302	0,119	0,23
Parete laterale settore Sud	0,448	0,119	0,23
Calotta settore Nord	0,000	0,162	0,47
K1/K3/S			
Parete laterale settore Nord	0,302	0,242	0,31
Parete laterale settore Sud	0,209	0,242	0,31
Calotta settore Nord	0,000	0,381	0,93
Fronte avanzamento	0,071	0,214	0,24
K1/K3/S'			
Parete laterale settore Nord	0,433	0,130	0,24
Parete laterale settore Sud	0,099	0,130	0,24
Calotta settore Nord	0,114	0,404	1,06
K2/K3/S			
Calotta settore Nord	0,000	0,001	0,02
Calotta settore Sud	0,209	2,567	4,75
Fronte avanzamento	0,209	0,077	0,26
K2/K3/S'			
Calotta settore centrale	0,099	1,773	3,65
Calotta settore Nord	0,114	0,001	0,03

Tabella 5 – Galleria normale alla stratificazione. Fattori di sicurezza, volumi e altezza dell'apice del tetraedro rispetto alla superficie del cavo di tutti i cunei potenzialmente instabili

5.4.3 Camera di frantumazione

La camera di frantumazione ha condizioni strutturali analoghe a quella della galleria di simile orientazione, differendone per la presenza di due pareti stabili in luogo del fronte di avanzamento, oltre che per le dimensioni maggiori (e la differente curvatura della calotta).

Le combinazioni **K1/K2/K3, K1/K2/S** e **K1/K2/S'** producono tetraedri instabili di dimensioni molto ridotte (volume inferiore a 0,25 m^3, altezze dell'apice inferiori a 0,5 m), il che significa possibilità di intervenire facilmente con operazioni di disgaggio, senza modificare in modo significativo la geometria del cavo e la sua stabilità complessiva.

Le combinazioni **K1/K3/S** e **K1/K3/S'** danno luogo a tetraedri di dimensioni ancora contenute (intorno a 0,5 m^3 come valore massimo), con altezza dell'apice non superiore ad 1 m. Con le combinazioni **K2/K3/S** e **K2/K3/S'** si possono formare, in calotta in particolare, tetraedri instabili di dimensioni pari a circa 2 m^3. In tali casi sarà necessario provvedere alla chiodatura dei volumi instabili. La lunghezza prevedibile dei chiodi dovrebbe essere, per stabilizzare i cunei di dimensioni maggiori, almeno pari a 3 m.

Cinematismo	Fattore di sicurezza	Volume del cuneo (m^3)	Altezza apice (m)
K1/K2/K3			
Parete laterale Nord	0,302	0,096	0,18
Calotta settore Nord	0,000	0,139	0,30
Parete laterale Sud	0,315	0,072	0,16
K1/K2/S			
Parete laterale Nord	0,372	0,123	0,24
Parete laterale Sud	0,315	0,105	0,23
Calotta settore Nord	0,071	0,222	0,49
Parete laterale Ovest	0,071	0,229	0,23
K1/K2/S'			
Parete laterale Nord	0,302	0,143	0,25
Parete laterale Sud	0,448	0,119	0,23
Calotta settore Nord	0,000	0,190	0,41
Parete laterale Est	0,114	0,237	0,31
K1/K3/S			
Parete laterale Nord	0,302	0,242	0,31
Parete laterale Sud	0,209	0,242	0,31
Calotta settore Nord	0,000	0,429	0,89
Parete laterale Ovest	0,071	0,214	0,24
K1/K3/S'			
Parete laterale Nord	0,433	0,130	0,24
Parete laterale Sud	0,099	0,130	0,24
Calotta settore Nord	0,144	0,538	0,97
Parete laterale Est	0,114	0,300	0,41
K2/K3/S			
Calotta settore Sud	0,209	2,558	4,50
Calotta settore Nord	0,000	0,001	0,03
Parete laterale Ovest	0,209	0,077	0,26
K2/K3/S'			
Calotta settore centrale	0,099	1,769	3,63
Calotta settore Nord	0,124	0,002	0,04
Parete laterale Est	0,166	0,075	0,27

Tabella 6 – Camera di frantumazione. Fattori di sicurezza, volumi e altezza dell'apice del tetraedro rispetto alla superficie del cavo di tutti i cunei potenzialmente instabili

6. ESAME DELLE CONDIZIONI DI STABILITÀ DEL CAVO IN FUNZIONE DEGLI SFORZI INDOTTI

In prima approssimazione si può ritenere che il comportamento dell'ammasso roccioso dolomitico, tenuto conto delle dimensioni degli scavi, dello spessore non elevato della copertura e delle buone caratteristiche di resistenza degli ammassi, rimanga sostanzialmente compreso in campo elastico.

Infatti, in accordo con Hoek *et al.* (1995), gli spostamenti che si producono nell'ammasso roccioso in conseguenza delle tensioni derivanti dal carico litostatico rimangono in campo elastico se

$\sigma_{cm} > 2p_o$

in cui σ_{cm} è la resistenza a compressione dell'ammasso roccioso e p_o è lo sforzo principale verticale.

La disuguaglianza è ampiamente verificata, come risulta dalla tabella sottostante, in cui sono riportati i valori di resistenza a compressione monoassiale dell'ammasso roccioso derivati dalla classificazione GSI di Hoek e Brown e i valori del carico litostatico massimo, per una copertura minima di circa 50 m.

Ammasso roccioso	σ_{cm} (MPa)	p_o (MPa)
Dolomie	16,7	1,325

Pertanto, essendo le deformazioni elastiche di limitata entità, tenuto conto del valore elevato del modulo elastico (pari a 6,2 GPa, vedi fig. 2), e potendo escludere che, in conseguenza degli sforzi indotti dalla realizzazione dello scavo, si creino importanti deformazioni permanenti, gli interventi previsti assicurano buone condizioni di stabilità alle opere in sotterraneo.

Dalla classificazione geomeccanica di Barton si possono trarre altre considerazioni sulla capacità di autosostentamento della camera di frantumazione, il cavo di maggiori dimensioni.

Utilizzando il valore dell'indice Q, e considerando un valore di ESR (*Excavation Support Ratio*) uguale a 1,3 (consigliato dall'autore per impianti di trattamento permanenti), si può valutare in prima approssimazione la tipologia di opere di sostegno e consolidamento del cavo necessarie (fig. 21).

Dati un valore di Q di 3,3 e del rapporto dimensione del cavo/ESR di 10,7, il punto rappresentativo è situato al limite tra la categoria 5, per la quale viene consigliata una chiodatura con posa di cemento proiettato (*shotcrete*) e rinforzato, per uno spessore di 5-9 cm, e la categoria 4, per la quale è suggerita una chiodatura sistematica e la posa di cemento proiettato non rinforzato, con uno spessore di 4-10 cm.

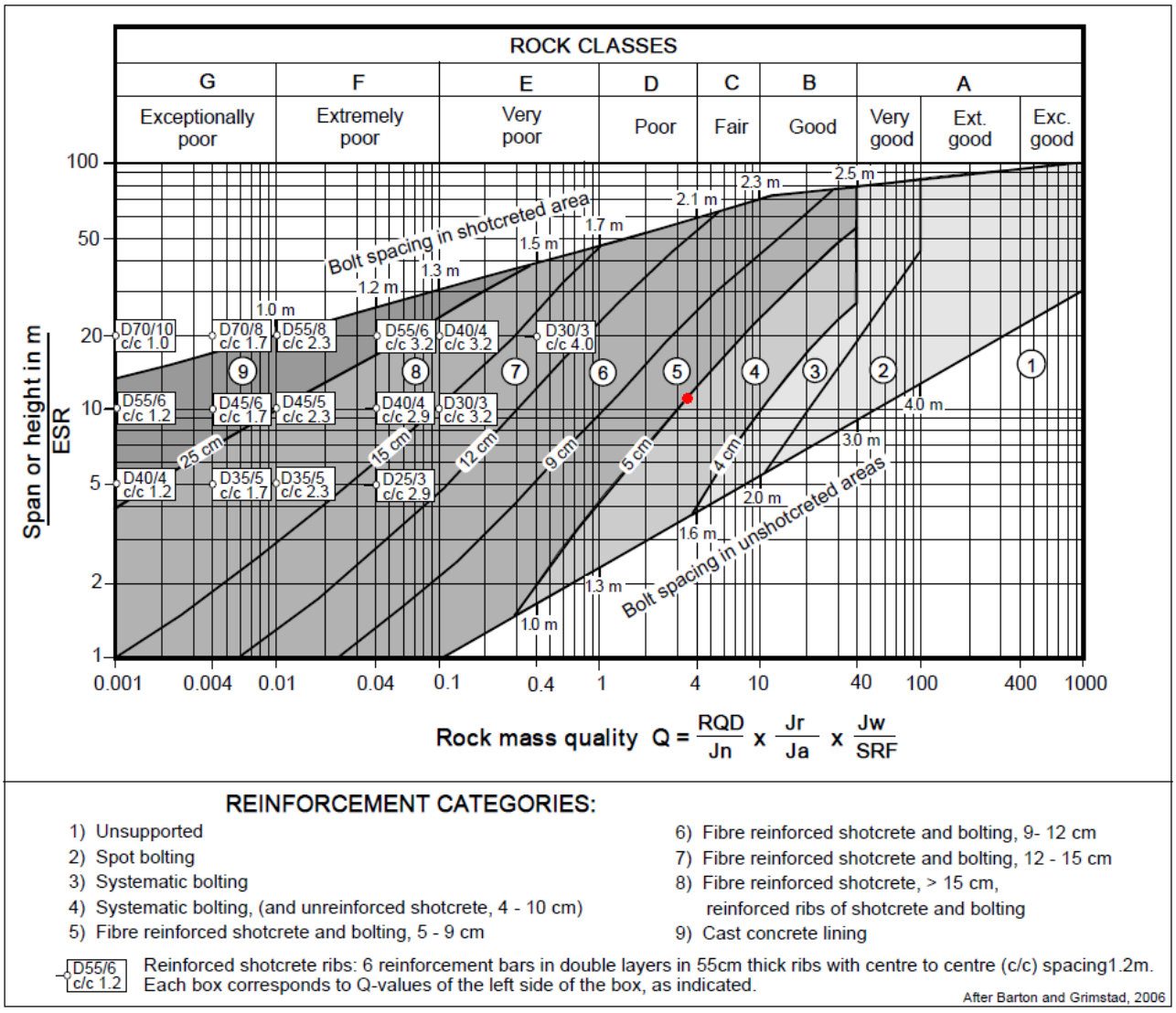


Fig. 21 – Dimensione del cavo e delle opere di sostegno in funzione dell'indice Q. Il cerchio in colore rosso indica il punto rappresentativo della camera di frantumazione (figura tratta da Barton e Grimstad, 2006, modificata).

7. INTERVENTI DI SOSTEGNO

Sulla base dei risultati dell'analisi di stabilità e dell'esperienza di opere in sotterraneo di simili caratteristiche, si prevede di realizzare interventi e opere di sostegno del cavo sia nella galleria che nella camera di frantumazione.

Per quanto riguarda la camera di frantumazione, in cui gli interventi saranno più importanti, sarà eseguita una chiodatura sistematica con spaziatura a maglia quadrata di 1,5 m di lato, e lunghezza di 3 m, con chiodi di tipo ad ancoraggio continuo. Verrà poi realizzato un rivestimento con cemento proiettato rinforzato da una rete elettrosaldata, di spessore paria a 5 cm.

Per la galleria si prevede invece di eseguire una chiodatura non sistematica, in funzione dell'effettiva presenza di volumi instabili.

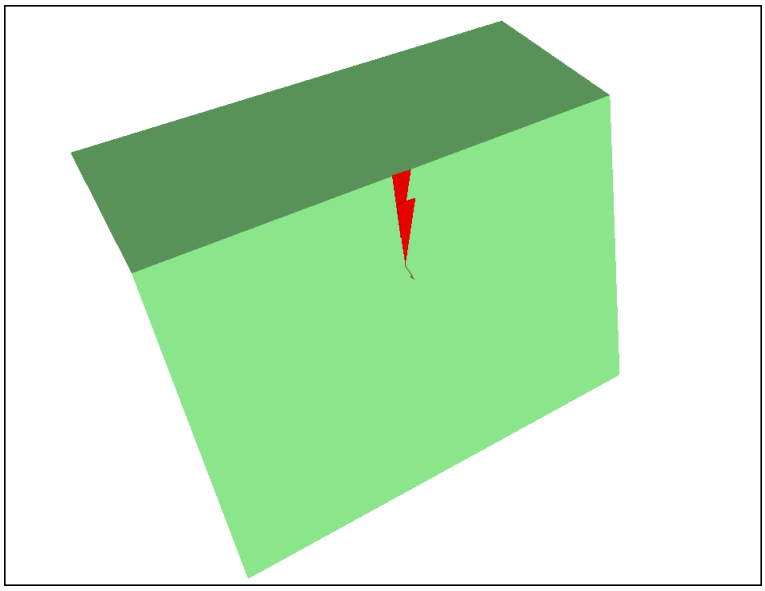
Una verifica dell'efficacia degli interventi proposti per la camera di frantumazione è stata eseguita per i tetraedri instabili di maggiori dimensioni, legati alle combinazioni K2/K3/S e K2/K3/S'. I risultati riportati in tabella 7 indicano che con gli interventi previsti si raggiungono condizioni di stabilità adeguate.

Cinematismo	Fattore di sicurezza	Volume del cuneo (m^3)	Altezza apice (m)
K2/K3/S			
Calotta settore Sud	9,011	2,558	4,50
Calotta settore Nord	135,9	0,001	0,03
K2/K3/S'			
Calotta settore centrale	10,857	1,769	3,63
Calotta settore Nord	104,8	0,002	0,04

Tabella 7 – Camera di frantumazione. Fattori di sicurezza, volumi e altezza dell'apice del tetraedro dei cunei dopo la realizzazione delle opere di sostegno

Grafici e tabulati delle verifiche di stabilità dei fronti in roccia

Gradoni del fronte 20°
Cuneo S/K2



Swedge Analysis Information
Analysis Results:

- Analysis type: Deterministic
- Wedge is scaled, scale factor: 0.1765
- Safety Factor: 0.3067
- Wedge height (on slope) [m]: 2.65
- Bench width (on upper face) [m]: 0.05
- Wedge volume [m^3]: 0.019
- Wedge weight [tonnes]: 0.050
- Wedge area (joint1) [m^2]: 0.06
- Wedge area (joint2) [m^2]: 1.28
- Wedge area (slope) [m^2]: 1.27
- Wedge area (upper face) [m^2]: 0.02

Effective Normal and Strength Properties:

	Joint 1	Joint 2
Effective Normal force [tonnes]	0.00	0.02
Effective Normal stress [t/m^2]	0.00	0.01
Shear Strength [t/m^2]	0.00	0.01
Strength due to Waviness [t/m^2]	0.00	0.00

- Driving force [tonnes]: 0.05
- Resisting force [tonnes]: 0.01

Seismic Force:

- Seismic force [tonnes]: 0.00

Failure Mode:

- Sliding on joint2

Joint Sets 1&2 line of Intersection:

Plunge [deg]	Trend [deg]	Length [m]
68.95	27.14	2.84

Trace Lengths:

	Slope Face [m]	Upper Face [m]
Joint 1	2.82	0.05
Joint 2	3.00	0.91

Persistence:

- Joint 1 [m]: 2.84
- Joint 2 [m]: 3.00

Intersection Angles:

	Slope Face	Upper Face
Joint 1 & Joint 2	17.44	81.00
Joint 1 & Crest	92.67	96.00
Joint 2 & Crest	69.89	3.00

Dip and Dip Direction:

	Dip [deg]	Dip Direction [deg]
Joint Set 1	85.00	104.00
Joint Set 2	69.00	23.00
Slope	70.00	20.00
Upper Face	0.00	20.00

Joint Set 1 Data:

- Cohesion [t/m^2]: 0.00
- Friction Angle [deg]: 33.00

Joint Set 2 Data:

- Cohesion [t/m^2]: 0.00
- Friction Angle [deg]: 38.00

Slope Data:

- Slope height [m]: 15.00
- Rock unit weight [t/m^3]: 2.65
- Water pressures in the slope: NO
- Overhanging slope face: NO
- Externally applied force: NO
- Tension crack: NO

Seismic Data:

- Direction: line of intersection J1&J2 but horizontal
- Seismic coefficient: 0.014
- Trend [deg]: 27.14, Plunge [deg]: -0.00

Gradoni del fronte 20°
Cuneo S'/K2

Swedge Analysis Information
Analysis Results:

- Analysis type: Deterministic
- Wedge is scaled, scale factor: 0.1765
- Safety Factor: 0.4428
- Wedge height (on slope) [m]: 2.65
- Bench width (on upper face) [m]: 0.07
- Wedge volume [m^3]: 0.047
- Wedge weight [tonnes]: 0.124
- Wedge area (joint1) [m^2]: 0.10
- Wedge area (joint2) [m^2]: 2.02
- Wedge area (slope) [m^2]: 2.00
- Wedge area (upper face) [m^2]: 0.05

Effective Normal and Strength Properties:

	Joint 1	Joint 2
Effective Normal force [tonnes]	0.02	0.04
Effective Normal stress [t/m^2]	0.17	0.02
Shear Strength [t/m^2]	0.11	0.02
Strength due to Waviness [t/m^2]	0.04	0.00

- Driving force [tonnes]: 0.11
- Resisting force [tonnes]: 0.05

Seismic Force:

- Seismic force [tonnes]: 0.00

Failure Mode:

- Sliding on intersection line (joints 1&2)

Joint Sets 1&2 line of Intersection:

Plunge [deg]	Trend [deg]	Length [m]
67.27	359.40	2.87

Trace Lengths:

	Slope Face [m]	Upper Face [m]
Joint 1	2.84	0.07
Joint 2	3.00	1.42

Persistence:

- Joint 1 [m]: 2.87
- Joint 2 [m]: 3.00

Intersection Angles:

	Slope Face	Upper Face
Joint 1 & Joint 2	27.97	86.00
Joint 1 & Crest	82.14	91.00
Joint 2 & Crest	69.89	3.00

Dip and Dip Direction:

	Dip [deg]	Dip Direction [deg]
Joint Set 1	82.00	289.00
Joint Set 2	69.00	23.00
Slope	70.00	20.00
Upper Face	0.00	20.00

Joint Set 1 Data:

- Cohesion [t/m^2]: 0.00
- Friction Angle [deg]: 33.00

Joint Set 2 Data:

- Cohesion [t/m^2]: 0.00
- Friction Angle [deg]: 38.00

Slope Data:

- Slope height [m]: 15.00
- Rock unit weight [t/m^3]: 2.65
- Water pressures in the slope: NO
- Overhanging slope face: NO
- Externally applied force: NO
- Tension crack: NO

Seismic Data:

- Direction: line of intersection J1&J2 but horizontal
- Seismic coefficient: 0.014
- Trend [deg]: 359.40, Plunge [deg]: -0.00

Gradoni del fronte 35°
Cuneo K2/K3

Swedge Analysis Information
Analysis Results:

- Analysis type: Deterministic
- Wedge is scaled, scale factor: 0.1600
- Safety Factor: 2.5459
- Wedge height (on slope) [m]: 2.40
- Bench width (on upper face) [m]: 0.35
- Wedge volume [m^3]: 0.151
- Wedge weight [tonnes]: 0.401
- Wedge area (joint1) [m^2]: 0.80
- Wedge area (joint2) [m^2]: 2.16
- Wedge area (slope) [m^2]: 1.38
- Wedge area (upper face) [m^2]: 0.19

Effective Normal and Strength Properties:

	Joint 1	Joint 2
Effective Normal force [tonnes]	0.48	0.58
Effective Normal stress [t/m^2]	0.60	0.27
Shear Strength [t/m^2]	0.37	0.21
Strength due to Waviness [t/m^2]	0.05	0.01

- Driving force [tonnes]: 0.32
- Resisting force [tonnes]: 0.82

Seismic Force:

- Seismic force [tonnes]: 0.01

Failure Mode:

- Sliding on intersection line (joints 1&2)

Joint Sets 1&2 line of Intersection:

Plunge [deg]	Trend [deg]	Length [m]
53.15	82.19	3.00

Trace Lengths:

	Slope Face [m]	Upper Face [m]
Joint 1	2.67	0.66
Joint 2	2.57	1.68

Persistence:

- Joint 1 [m]: 3.00
- Joint 2 [m]: 3.00

Intersection Angles:

	Slope Face	Upper Face
Joint 1 & Joint 2	23.77	20.00
Joint 1 & Crest	73.40	148.00
Joint 2 & Crest	82.83	12.00

Dip and Dip Direction:

	Dip [deg]	Dip Direction [deg]
Joint Set 1	82.00	3.00
Joint Set 2	69.00	23.00
Slope	70.00	35.00
Upper Face	0.00	35.00

Joint Set 1 Data:

- Cohesion [t/m^2]: 0.00
- Friction Angle [deg]: 32.00

Joint Set 2 Data:

- Cohesion [t/m^2]: 0.00
- Friction Angle [deg]: 38.00

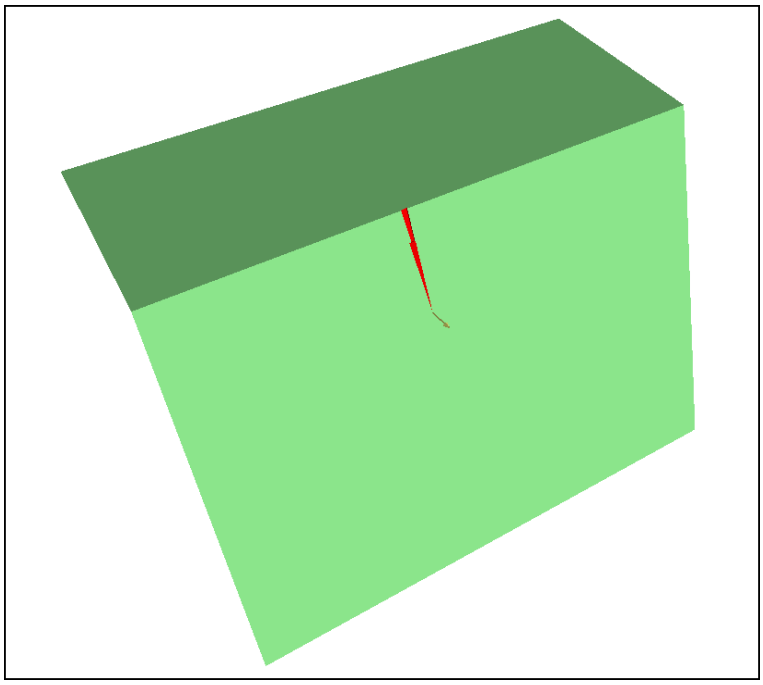
Slope Data:

- Slope height [m]: 15.00
- Rock unit weight [t/m^3]: 2.65
- Water pressures in the slope: NO
- Overhanging slope face: NO
- Externally applied force: NO
- Tension crack: NO

Seismic Data:

- Direction: line of intersection J1&J2 but horizontal
- Seismic coefficient: 0.014
- Trend [deg]: 82.19, Plunge [deg]: -0.00

Gradoni del fronte 35°
Cuneo S/K2



Swedge Analysis Information
Analysis Results:

- Analysis type: Deterministic
- Wedge is scaled, scale factor: 0.1865
- Safety Factor: 0.3249
- Wedge height (on slope) [m]: 2.80
- Bench width (on upper face) [m]: 0.05
- Wedge volume [m^3]: 0.006
- Wedge weight [tonnes]: 0.015
- Wedge area (joint1) [m^2]: 0.07
- Wedge area (joint2) [m^2]: 0.35
- Wedge area (slope) [m^2]: 0.37
- Wedge area (upper face) [m^2]: 0.01

Effective Normal and Strength Properties:

	Joint 1	**Joint 2**
Effective Normal force [tonnes]	0.00	0.01
Effective Normal stress [t/m^2]	0.00	0.01
Shear Strength [t/m^2]	0.00	0.01
Strength due to Waviness [t/m^2]	0.00	0.00

- Driving force [tonnes]: 0.01

- Resisting force [tonnes]: 0.00

Seismic Force:

- Seismic force [tonnes]: 0.00

Failure Mode:

- Sliding on intersection line (joints 1&2)

Joint Sets 1&2 line of Intersection:

Plunge [deg]	Trend [deg]	Length [m]
68.95	27.14	3.00

Trace Lengths:

	Slope Face [m]	Upper Face [m]
Joint 1	2.98	0.05
Joint 2	3.00	0.23

Persistence:

- Joint 1 [m]: 3.00
- Joint 2 [m]: 3.00

Intersection Angles:

	Slope Face	Upper Face
Joint 1 & Joint 2	4.70	99.00
Joint 1 & Crest	92.48	69.00
Joint 2 & Crest	82.83	12.00

Dip and Dip Direction:

	Dip [deg]	Dip Direction [deg]
Joint Set 1	85.00	104.00
Joint Set 2	69.00	23.00
Slope	70.00	35.00
Upper Face	0.00	35.00

Joint Set 1 Data:

- Cohesion [t/m^2]: 0.00
- Friction Angle [deg]: 33.00

Joint Set 2 Data:

- Cohesion [t/m^2]: 0.00
- Friction Angle [deg]: 38.00

Slope Data:

- Slope height [m]: 15.00
- Rock unit weight [t/m^3]: 2.65
- Water pressures in the slope: NO
- Overhanging slope face: NO
- Externally applied force: NO
- Tension crack: NO

Seismic Data:

- Direction: line of intersection J1&J2 but horizontal
- Seismic coefficient: 0.014
- Trend [deg]: 27.14, Plunge [deg]: -0.00

Gradoni del fronte 65°
Cuneo K2/K3

Swedge Analysis Information
Analysis Results:

- Analysis type: Deterministic
- Wedge is scaled, scale factor: 0.1600
- Safety Factor: 2.5459
- Wedge height (on slope) [m]: 2.40
- Bench width (on upper face) [m]: 0.85
- Wedge volume [m^3]: 0.165
- Wedge weight [tonnes]: 0.438
- Wedge area (joint1) [m^2]: 1.16
- Wedge area (joint2) [m^2]: 1.62
- Wedge area (slope) [m^2]: 0.62
- Wedge area (upper face) [m^2]: 0.21

Effective Normal and Strength Properties:

	Joint 1	**Joint 2**
Effective Normal force [tonnes]	0.52	0.64
Effective Normal stress [t/m^2]	0.45	0.39
Shear Strength [t/m^2]	0.28	0.31
Strength due to Waviness [t/m^2]	0.04	0.02

- Driving force [tonnes]: 0.35
- Resisting force [tonnes]: 0.90

Seismic Force:

- Seismic force [tonnes]: 0.01

Failure Mode:

- Sliding on intersection line (joints 1&2)

Joint Sets 1&2 line of Intersection:

Plunge [deg]	**Trend [deg]**	**Length [m]**
53.15	82.19	3.00

Trace Lengths:

	Slope Face [m]	**Upper Face [m]**
Joint 1	2.56	0.96
Joint 2	2.59	1.26

Persistence:

- Joint 1 [m]: 3.00
- Joint 2 [m]: 3.00

Intersection Angles:

	Slope Face	Upper Face
Joint 1 & Joint 2	10.90	20.00
Joint 1 & Crest	88.15	118.00
Joint 2 & Crest	80.95	42.00

Dip and Dip Direction:

	Dip [deg]	Dip Direction [deg]
Joint Set 1	82.00	3.00
Joint Set 2	69.00	23.00
Slope	70.00	65.00
Upper Face	0.00	65.00

Joint Set 1 Data:

- Cohesion [t/m^2]: 0.00
- Friction Angle [deg]: 32.00

Joint Set 2 Data:

- Cohesion [t/m^2]: 0.00
- Friction Angle [deg]: 38.00

Slope Data:

- Slope height [m]: 15.00
- Rock unit weight [t/m^3]: 2.65
- Water pressures in the slope: NO
- Overhanging slope face: NO
- Externally applied force: NO
- Tension crack: NO

Seismic Data:

- Direction: line of intersection J1&J2 but horizontal
- Seismic coefficient: 0.014
- Trend [deg]: 82.19, Plunge [deg]: -0.00

Gradoni del fronte 115°
Cuneo K2/K3

Swedge Analysis Information
Analysis Results:

- Analysis type: Deterministic
- Wedge is scaled, scale factor: 0.1600
- Safety Factor: 2.5459
- Wedge height (on slope) [m]: 2.40
- Bench width (on upper face) [m]: 0.64
- Wedge volume [m^3]: 0.060
- Wedge weight [tonnes]: 0.160
- Wedge area (joint1) [m^2]: 0.83
- Wedge area (joint2) [m^2]: 0.82
- Wedge area (slope) [m^2]: 0.30
- Wedge area (upper face) [m^2]: 0.08

Effective Normal and Strength Properties:

	Joint 1	Joint 2
Effective Normal force [tonnes]	0.19	0.23
Effective Normal stress [t/m^2]	0.23	0.28
Shear Strength [t/m^2]	0.14	0.22
Strength due to Waviness [t/m^2]	0.02	0.01

- Driving force [tonnes]: 0.13
- Resisting force [tonnes]: 0.33

Seismic Force:

- Seismic force [tonnes]: 0.00

Failure Mode:

- Sliding on intersection line (joints 1&2)

Joint Sets 1&2 line of Intersection:

Plunge [deg]	Trend [deg]	Length [m]
53.15	82.19	3.00

Trace Lengths:

	Slope Face [m]	Upper Face [m]
Joint 1	2.65	0.69
Joint 2	2.73	0.64

Persistence:

- Joint 1 [m]: 3.00
- Joint 2 [m]: 3.00

Intersection Angles:

	Slope Face	**Upper Face**
Joint 1 & Joint 2	4.77	20.00
Joint 1 & Crest	105.68	68.00
Joint 2 & Crest	69.55	92.00

Dip and Dip Direction:

	Dip [deg]	**Dip Direction [deg]**
Joint Set 1	82.00	3.00
Joint Set 2	69.00	23.00
Slope	70.00	115.00
Upper Face	0.00	115.00

Joint Set 1 Data:

- Cohesion [t/m^2]: 0.00
- Friction Angle [deg]: 32.00

Joint Set 2 Data:

- Cohesion [t/m^2]: 0.00
- Friction Angle [deg]: 38.00

Slope Data:

- Slope height [m]: 15.00
- Rock unit weight [t/m^3]: 2.65
- Water pressures in the slope: NO
- Overhanging slope face: NO
- Externally applied force: NO
- Tension crack: NO

Seismic Data:

- Direction: line of intersection J1&J2 but horizontal
- Seismic coefficient: 0.014
- Trend [deg]: 82.19, Plunge [deg]: -0.00

Gradoni del fronte 115°
Cuneo F2/K3

Swedge Analysis Information
Analysis Results:

- Analysis type: Deterministic
- Wedge is scaled, scale factor: 0.5289
- Safety Factor: 1.1544
- Wedge height (on slope) [m]: 7.93
- Bench width (on upper face) [m]: 2.24
- Wedge volume [m^3]: 4.977
- Wedge weight [tonnes]: 13.189
- Wedge area (joint1) [m^2]: 9.69
- Wedge area (joint2) [m^2]: 10.98
- Wedge area (slope) [m^2]: 7.09
- Wedge area (upper face) [m^2]: 1.88

Effective Normal and Strength Properties:

	Joint 1	**Joint 2**
Effective Normal force [tonnes]	5.98	10.93
Effective Normal stress [t/m^2]	0.62	1.00
Shear Strength [t/m^2]	0.39	0.67
Strength due to Waviness [t/m^2]	0.05	0.05

- Driving force [tonnes]: 10.58
- Resisting force [tonnes]: 12.21

Seismic Force:

- Seismic force [tonnes]: 0.18

Failure Mode:

- Sliding on intersection line (joints 1&2)

Joint Sets 1&2 line of Intersection:

Plunge [deg]	**Trend [deg]**	**Length [m]**
52.51	82.44	10.00

Trace Lengths:

	Slope Face [m]	**Upper Face [m]**
Joint 1	8.77	2.42
Joint 2	9.36	2.37

Persistence:

- Joint 1 [m]: 10.00
- Joint 2 [m]: 10.00

Intersection Angles:

	Slope Face	Upper Face
Joint 1 & Joint 2	9.94	41.00
Joint 1 & Crest	105.68	68.00
Joint 2 & Crest	64.39	71.00

Dip and Dip Direction:

	Dip [deg]	Dip Direction [deg]
Joint Set 1	82.00	3.00
Joint Set 2	59.00	44.00
Slope	70.00	115.00
Upper Face	0.00	115.00

Joint Set 1 Data:

- Cohesion [t/m^2]: 0.00
- Friction Angle [deg]: 32.00

Joint Set 2 Data:

- Cohesion [t/m^2]: 0.00
- Friction Angle [deg]: 34.00

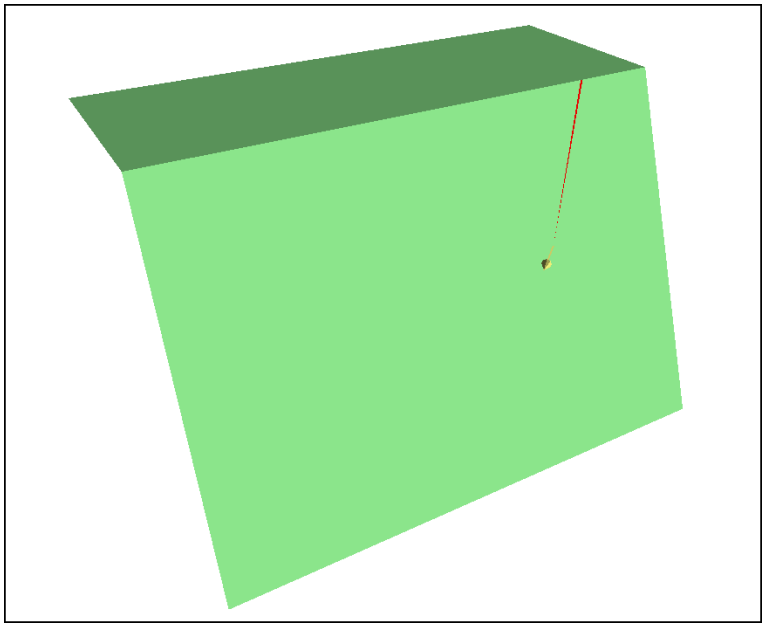
Slope Data:

- Slope height [m]: 15.00
- Rock unit weight [t/m^3]: 2.65
- Water pressures in the slope: NO
- Overhanging slope face: NO
- Externally applied force: NO
- Tension crack: NO

Seismic Data:

- Direction: line of intersection J1&J2 but horizontal
- Seismic coefficient: 0.014
- Trend [deg]: 82.44, Plunge [deg]: -0.00

Gradoni del fronte 165°
Cuneo S/K1



Swedge Analysis Information
Analysis Results:

- Analysis type: Deterministic
- Wedge is scaled, scale factor: 0.1741
- Safety Factor: 0.3649
- Wedge height (on slope) [m]: 2.61
- Bench width (on upper face) [m]: 0.38
- Wedge volume [m^3]: 0.142
- Wedge weight [tonnes]: 0.377
- Wedge area (joint1) [m^2]: 0.57
- Wedge area (joint2) [m^2]: 1.12
- Wedge area (slope) [m^2]: 1.20
- Wedge area (upper face) [m^2]: 0.16

Effective Normal and Strength Properties:

	Joint 1	**Joint 2**
Effective Normal force [tonnes]	0.03	0.17
Effective Normal stress [t/m^2]	0.05	0.15
Shear Strength [t/m^2]	0.03	0.09
Strength due to Waviness [t/m^2]	0.01	0.00

- Driving force [tonnes]: 0.33
- Resisting force [tonnes]: 0.12

Seismic Force:

- Seismic force [tonnes]: 0.01

Failure Mode:

- Sliding on intersection line (joints 1&2)

Joint Sets 1&2 line of Intersection:

Plunge [deg]	Trend [deg]	Length [m]
61.61	184.68	2.97

Trace Lengths:

	Slope Face [m]	Upper Face [m]
Joint 1	2.79	0.43
Joint 2	3.00	0.76

Persistence:

- Joint 1 [m]: 2.97
- Joint 2 [m]: 3.00

Intersection Angles:

	Slope Face	Upper Face
Joint 1 & Joint 2	16.68	89.00
Joint 1 & Crest	95.46	61.00
Joint 2 & Crest	67.86	30.00

Dip and Dip Direction:

	Dip [deg]	Dip Direction [deg]
Joint Set 1	85.00	104.00
Joint Set 2	62.00	195.00
Slope	70.00	165.00
Upper Face	0.00	165.00

Joint Set 1 Data:

- Cohesion [t/m^2]: 0.00
- Friction Angle [deg]: 33.00

Joint Set 2 Data:

- Cohesion [t/m^2]: 0.00
- Friction Angle [deg]: 30.00

Slope Data:

- Slope height [m]: 15.00
- Rock unit weight [t/m^3]: 2.65
- Water pressures in the slope: NO
- Overhanging slope face: NO
- Externally applied force: NO
- Tension crack: NO

Seismic Data:

- Direction: line of intersection J1&J2 but horizontal
- Seismic coefficient: 0.014
- Trend [deg]: 184.68, Plunge [deg]: -0.00

Gradoni del fronte 165°
Cuneo S'/K1

Swedge Analysis Information
Analysis Results:

- Analysis type: Deterministic
- Wedge is scaled, scale factor: 0.2901
- Safety Factor: 0.2972
- Wedge height (on slope) [m]: 4.35
- Bench width (on upper face) [m]: 0.03
- Wedge volume [m^3]: 0.002
- Wedge weight [tonnes]: 0.005
- Wedge area (joint1) [m^2]: 0.09
- Wedge area (joint2) [m^2]: 0.16
- Wedge area (slope) [m^2]: 0.18
- Wedge area (upper face) [m^2]: 0.00

Effective Normal and Strength Properties:

	Joint 1	Joint 2
Effective Normal force [tonnes]	0.00	0.00
Effective Normal stress [t/m^2]	0.00	0.01
Shear Strength [t/m^2]	0.00	0.01
Strength due to Waviness [t/m^2]	0.00	0.00

- Driving force [tonnes]: 0.00
- Resisting force [tonnes]: 0.00

Seismic Force:

- Seismic force [tonnes]: 0.00

Failure Mode:

- Sliding on joint2

Joint Sets 1&2 line of Intersection:

Plunge [deg]	Trend [deg]	Length [m]
60.72	213.52	4.99

Trace Lengths:

	Slope Face [m]	Upper Face [m]
Joint 1	4.97	0.04
Joint 2	5.00	0.07

Persistence

- Joint 1 [m]: 4.99
- Joint 2 [m]: 5.00

Intersection Angles:

	Slope Face	Upper Face
Joint 1 & Joint 2	0.84	94.00
Joint 1 & Crest	111.31	56.00
Joint 2 & Crest	67.86	30.00

Dip and Dip Direction:

	Dip [deg]	Dip Direction [deg]
Joint Set 1	82.00	289.00
Joint Set 2	62.00	195.00
Slope	70.00	165.00
Upper Face	0.00	165.00

Joint Set 1 Data:

- Cohesion [t/m^2]: 0.00
- Friction Angle [deg]: 33.00

Joint Set 2 Data:

- Cohesion [t/m^2]: 0.00
- Friction Angle [deg]: 30.00

Slope Data:

- Slope height [m]: 15.00
- Rock unit weight [t/m^3]: 2.65
- Water pressures in the slope: NO
- Overhanging slope face: NO
- Externally applied force: NO
- Tension crack: NO

Seismic Data:

- Direction: line of intersection J1&J2 but horizontal
- Seismic coefficient: 0.014
- Trend [deg]: 213.52, Plunge [deg]: -0.00

:

Tabulati delle verifiche di stabilità sul cumulo dei limi

RILEVATO IN LIMI SABBIOSI
Sezione x-x'

Slide Analysis Information

Project Settings

Project Title: SLIDE - An Interactive Slope Stability Program
Failure Direction: Left to Right
Units of Measurement: SI Units
Pore Fluid Unit Weight: 9.81 kN/m3
Groundwater Method: Water Surfaces
Data Output: Standard
Calculate Excess Pore Pressure: Off
Allow Ru with Water Surfaces or Grids: Off
Random Numbers: Pseudo-random Seed
Random Number Seed: 10116
Random Number Generation Method: Park and Miller v.3

Analysis Methods

Analysis Methods used:
Bishop simplified
GLE/Morgenstern-Price with interslice force function: Half Sine
Lowe-Karafiath
Spencer

Number of slices: 25
Tolerance: 0.005
Maximum number of iterations: 50

Surface Options

Surface Type: Circular
Search Method: Grid Search
Radius increment: 10
Composite Surfaces: Disabled
Reverse Curvature: Create Tension Crack
Minimum Elevation: Not Defined
Minimum Depth: 1.25

Loading

Seismic Load Coefficient (Horizontal): 0.026
Seismic Load Coefficient (Vertical): 0.013

Material Properties

Material: substrato dolomitico
Strength Type: Mohr-Coulomb
Unit Weight: 26.5 kN/m3
Cohesion: 250 kPa
Friction Angle: 30 degrees

Water Surface: None

Material: limi sabbiosi
Strength Type: Mohr-Coulomb
Unit Weight: 16.4 kN/m3
Cohesion: 0 kPa
Friction Angle: 26.5 degrees
Water Surface: Water Table
Custom Hu value: 1

Global Minimums

Method: bishop simplified
FS: 1.095770
Center: 148.361, 202.421
Radius: 62.386
Left Slip Surface Endpoint: 108.349, 154.556
Right Slip Surface Endpoint: 139.302, 140.696
Resisting Moment=26743.5 kN-m
Driving Moment=24406.2 kN-m

Method: spencer
FS: 1.094400
Center: 148.361, 202.421
Radius: 62.386
Left Slip Surface Endpoint: 108.349, 154.556
Right Slip Surface Endpoint: 139.302, 140.696
Resisting Moment=26710.3 kN-m
Driving Moment=24406.2 kN-m
Resisting Horizontal Force=391.718 kN
Driving Horizontal Force=357.928 kN

Method: lowe-karafiath
FS: 1.094760
Center: 148.361, 202.421
Radius: 62.386
Left Slip Surface Endpoint: 108.349, 154.556
Right Slip Surface Endpoint: 139.302, 140.696
Resisting Horizontal Force=391.778 kN
Driving Horizontal Force=357.866 kN

Method: gle/morgenstern-price
FS: 1.093900
Center: 148.361, 202.421
Radius: 62.386
Left Slip Surface Endpoint: 108.349, 154.556
Right Slip Surface Endpoint: 139.302, 140.696
Resisting Moment=26697.9 kN-m
Driving Moment=24406.2 kN-m
Resisting Horizontal Force=391.656 kN
Driving Horizontal Force=358.037 kN

Valid / Invalid Surfaces

Method: bishop simplified
Number of Valid Surfaces: 4398

Number of Invalid Surfaces: 453
Error Codes:
Error Code -103 reported for 98 surfaces
Error Code -106 reported for 9 surfaces
Error Code -107 reported for 23 surfaces
Error Code -115 reported for 125 surfaces
Error Code -1000 reported for 198 surfaces

Method: spencer
Number of Valid Surfaces: 4394
Number of Invalid Surfaces: 457
Error Codes:
Error Code -103 reported for 98 surfaces
Error Code -106 reported for 9 surfaces
Error Code -107 reported for 23 surfaces
Error Code -111 reported for 4 surfaces
Error Code -115 reported for 125 surfaces
Error Code -1000 reported for 198 surfaces

Method: lowe-karafiath
Number of Valid Surfaces: 4360
Number of Invalid Surfaces: 491
Error Codes:
Error Code -103 reported for 98 surfaces
Error Code -106 reported for 9 surfaces
Error Code -107 reported for 23 surfaces
Error Code -108 reported for 19 surfaces
Error Code -111 reported for 19 surfaces
Error Code -115 reported for 125 surfaces
Error Code -1000 reported for 198 surfaces

Method: gle/morgenstern-price
Number of Valid Surfaces: 4392
Number of Invalid Surfaces: 459
Error Codes:
Error Code -103 reported for 98 surfaces
Error Code -106 reported for 9 surfaces
Error Code -107 reported for 23 surfaces
Error Code -111 reported for 6 surfaces
Error Code -115 reported for 125 surfaces
Error Code -1000 reported for 198 surfaces

Error Codes

The following errors were encountered during the computation:

-103 = Two surface / slope intersections,
but one or more surface / nonslope external polygon
intersections lie between them. This usually occurs
when the slip surface extends past the bottom of the
soil region, but may also occur on a benched
slope model with two sets of Slope Limits.

-106 = Average slice width is less than
0.0001 * (maximum horizontal extent of soil region).
This limitation is imposed to avoid numerical errors

which may result from too many slices, or too small a slip region.

-107 = Total driving moment or total driving force is negative. This will occur if the wrong failure direction is specified, or if high external or anchor loads are applied against the failure direction.

-108 = Total driving moment or total driving force < 0.1. This is to limit the calculation of extremely high safety factors if the driving force is very small (0.1 is an arbitrary number).

-111 = safety factor equation did not converge

-115 = Surface too shallow, below the minimum depth.

-1000 = No valid slip surfaces are generated at a grid center. Unable to draw a surface.

List of All Coordinates

Search Grid

77.404	202.421
235.088	202.421
235.088	360.105
77.404	360.105

Material Boundary

16.500	166.600
21.300	160.000
32.200	160.000
39.600	145.000
71.900	145.000
77.500	130.000
83.300	130.000
88.000	110.000
195.000	110.000
214.400	115.000

External Boundary

0.000	100.000
231.300	100.000
231.300	116.000
226.700	119.000
221.500	115.000
214.400	115.000
200.000	115.000
189.800	120.000
188.200	120.000
179.000	125.000
177.000	125.000
166.300	130.000

164.600	130.000
155.300	135.000
153.700	135.000
142.900	140.000
140.700	140.000
130.610	145.026
128.564	144.994
120.500	150.000
118.108	149.995
107.400	155.000
104.600	155.000
89.600	160.000
86.600	160.000
71.700	165.000
69.600	165.000
53.700	170.000
22.500	170.000
16.500	166.600
12.600	172.000
6.200	172.000
0.000	175.000

Water Table

16.500	166.600
21.300	160.000
32.200	160.000
39.600	145.000
71.900	145.000
77.500	130.000
83.300	130.000
85.922	118.841
136.437	117.463
180.802	116.106
200.000	115.000
214.400	115.000

RILEVATO IN LIMI SABBIOSI
Sezione y-y'

Slide Analysis Information

Project Settings

Project Title: SLIDE - An Interactive Slope Stability Program
Failure Direction: Left to Right
Units of Measurement: SI Units
Pore Fluid Unit Weight: 9.81 kN/m3
Groundwater Method: Water Surfaces
Data Output: Standard
Calculate Excess Pore Pressure: Off
Allow Ru with Water Surfaces or Grids: Off
Random Numbers: Pseudo-random Seed
Random Number Seed: 10116
Random Number Generation Method: Park and Miller v.3

Analysis Methods

Analysis Methods used:
Bishop simplified
GLE/Morgenstern-Price with interslice force function: Half Sine
Lowe-Karafiath
Spencer

Number of slices: 25
Tolerance: 0.005
Maximum number of iterations: 50

Surface Options

Surface Type: Circular
Search Method: Grid Search
Radius increment: 10
Composite Surfaces: Disabled
Reverse Curvature: Create Tension Crack
Minimum Elevation: Not Defined
Minimum Depth: 1.25

Loading

Seismic Load Coefficient (Horizontal): 0.026
Seismic Load Coefficient (Vertical): 0.13

Material Properties

Material: substrato dolomitico
Strength Type: Mohr-Coulomb
Unit Weight: 26.5 kN/m3
Cohesion: 250 kPa
Friction Angle: 30 degrees
Water Surface: None

Material: limi sabbiosi
Strength Type: Mohr-Coulomb
Unit Weight: 16.4 kN/m3
Cohesion: 0 kPa
Friction Angle: 26.5 degrees
Water Surface: Water Table
Custom Hu value: 1

Global Minimums

Method: bishop simplified
FS: 1.096780
Center: 246.317, 304.019
Radius: 203.398
Left Slip Surface Endpoint: 149.763, 125.000
Right Slip Surface Endpoint: 181.493, 111.228
Resisting Moment=33800.2 kN-m
Driving Moment=30817.7 kN-m

Method: spencer
FS: 1.097050
Center: 246.317, 304.019
Radius: 203.398
Left Slip Surface Endpoint: 149.763, 125.000
Right Slip Surface Endpoint: 181.493, 111.228
Resisting Moment=33808.6 kN-m
Driving Moment=30817.7 kN-m
Resisting Horizontal Force=152.703 kN
Driving Horizontal Force=139.194 kN

Method: lowe-karafiath
FS: 1.097060
Center: 246.317, 304.019
Radius: 203.398
Left Slip Surface Endpoint: 149.763, 125.000
Right Slip Surface Endpoint: 181.493, 111.228
Resisting Horizontal Force=152.704 kN
Driving Horizontal Force=139.194 kN

Method: gle/morgenstern-price
FS: 1.097010
Center: 246.317, 304.019
Radius: 203.398
Left Slip Surface Endpoint: 149.763, 125.000
Right Slip Surface Endpoint: 181.493, 111.228
Resisting Moment=33807.3 kN-m
Driving Moment=30817.7 kN-m
Resisting Horizontal Force=152.702 kN
Driving Horizontal Force=139.199 kN

Valid / Invalid Surfaces

Method: bishop simplified
Number of Valid Surfaces: 4743
Number of Invalid Surfaces: 108
Error Codes:

Error Code -103 reported for 7 surfaces
Error Code -106 reported for 4 surfaces
Error Code -115 reported for 53 surfaces
Error Code -1000 reported for 44 surfaces

Method: spencer
Number of Valid Surfaces: 4743
Number of Invalid Surfaces: 108
Error Codes:
Error Code -103 reported for 7 surfaces
Error Code -106 reported for 4 surfaces
Error Code -115 reported for 53 surfaces
Error Code -1000 reported for 44 surfaces

Method: lowe-karafiath
Number of Valid Surfaces: 4603
Number of Invalid Surfaces: 248
Error Codes:
Error Code -103 reported for 7 surfaces
Error Code -106 reported for 4 surfaces
Error Code -108 reported for 92 surfaces
Error Code -111 reported for 48 surfaces
Error Code -115 reported for 53 surfaces
Error Code -1000 reported for 44 surfaces

Method: gle/morgenstern-price
Number of Valid Surfaces: 4726
Number of Invalid Surfaces: 125
Error Codes:
Error Code -103 reported for 7 surfaces
Error Code -106 reported for 4 surfaces
Error Code -111 reported for 17 surfaces
Error Code -115 reported for 53 surfaces
Error Code -1000 reported for 44 surfaces

Error Codes

The following errors were encountered during the computation:

-103 = Two surface / slope intersections,
but one or more surface / nonslope external polygon
intersections lie between them. This usually occurs
when the slip surface extends past the bottom of the
soil region, but may also occur on a benched
slope model with two sets of Slope Limits.

-106 = Average slice width is less than
0.0001 * (maximum horizontal extent of soil region).
This limitation is imposed to avoid numerical errors
which may result from too many slices, or too
small a slip region.

-108 = Total driving moment
or total driving force < 0.1. This is to
limit the calculation of extremely high safety
factors if the driving force is very small

(0.1 is an arbitrary number).

-111 = safety factor equation did not converge

-115 = Surface too shallow, below the minimum depth.

-1000 = No valid slip surfaces are generated
at a grid center. Unable to draw a surface.

List of All Coordinates

Search Grid

94.648	196.959
273.082	196.959
273.082	375.393
94.648	375.393

Material Boundary

8.600	172.000
15.600	160.000
23.900	160.000
29.600	145.000
34.300	145.000
39.300	130.000
43.600	130.000
47.900	115.000
54.000	115.000
76.300	100.000
135.700	100.000
141.900	113.000
148.500	113.000
158.400	106.000
169.800	106.000
175.800	110.000
183.900	110.000

External Boundary

0.000	70.000
230.100	70.000
230.100	90.000
215.800	90.000
210.000	100.000
200.000	100.000
193.900	110.000
183.900	110.000
174.100	115.000
172.100	115.000
162.400	120.000
160.000	120.000
150.762	125.000
149.100	125.000
141.768	128.394
138.300	130.000
136.600	130.000
126.600	135.000

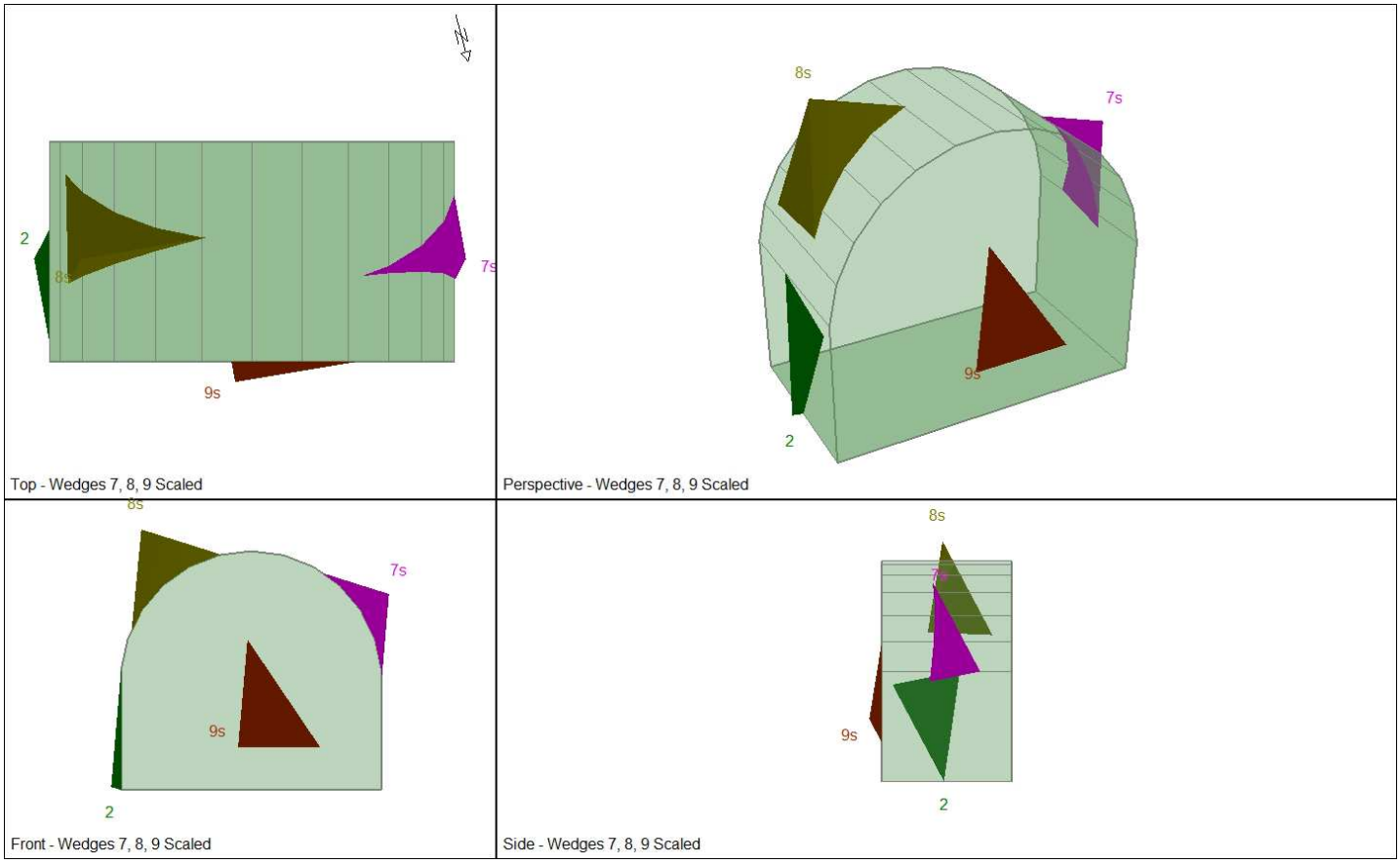
124.400	135.000
113.800	140.000
111.700	140.000
102.500	145.000
100.300	145.000
91.200	150.000
89.000	150.000
78.200	155.000
76.400	155.000
66.100	160.000
63.900	160.000
52.500	165.000
50.200	165.000
17.600	170.000
11.500	170.000
8.600	172.000
3.200	172.000
0.000	175.000

Water Table

8.600	172.000
15.600	160.000
23.900	160.000
29.600	145.000
34.300	145.000
39.300	130.000
43.600	130.000
47.900	115.000
54.000	115.000
57.408	112.708
140.999	111.111
141.900	113.000
148.500	113.000
151.377	110.966
172.195	110.778
183.900	110.000

Grafici e tabulati delle verifiche di stabilità delle opere in sotterraneo

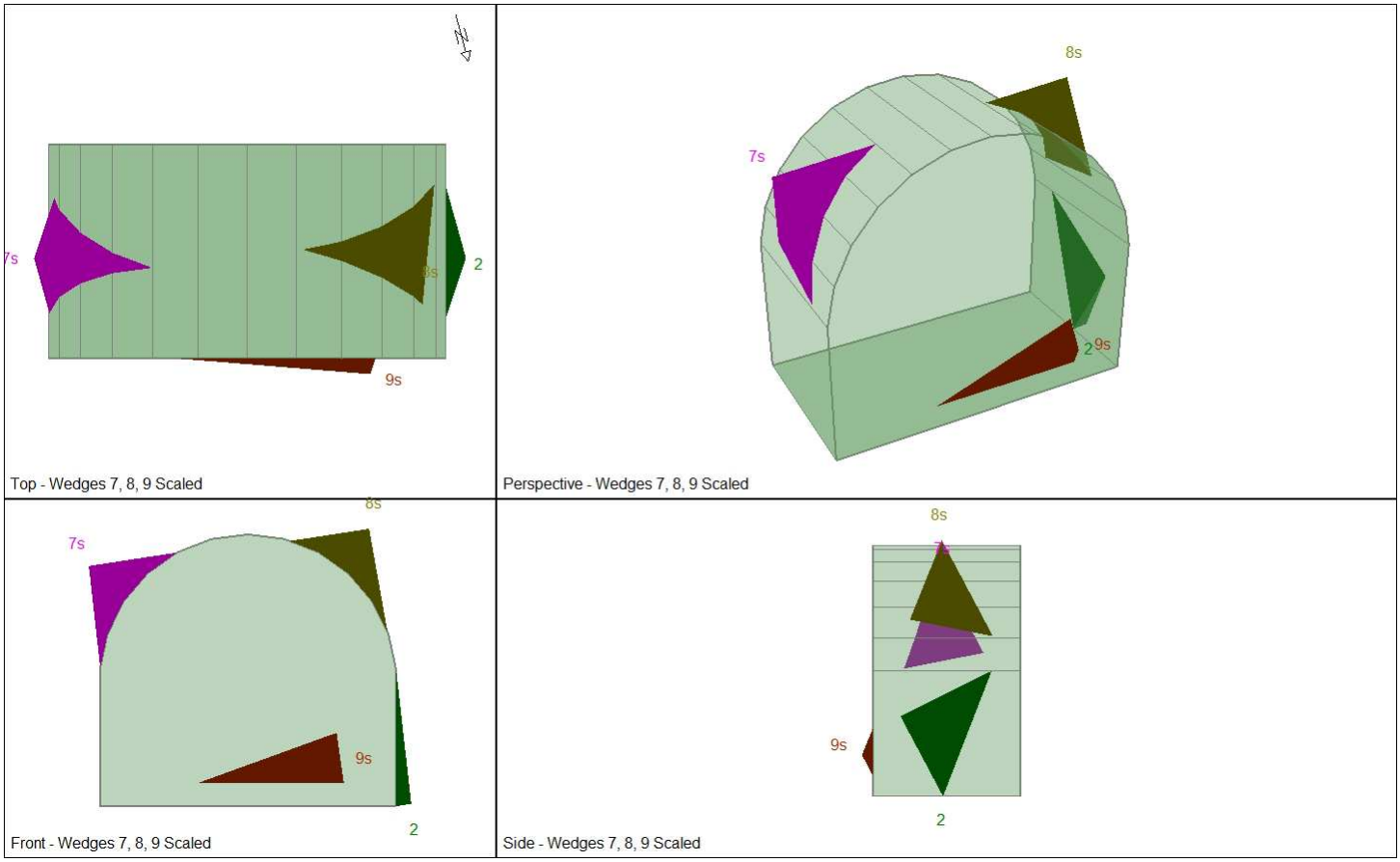
GALLERIA N-S
Sistemi K1, K3 e S



Le sigle dei tetraedri riportate nello schema prospettico corrispondono a quelle poste tra parentesi quadre nell'elenco sottostante. Il suffisso s indica che le dimensioni del tetraedro sono state scalate in funzione dei valori di persistenza misurati.

Lower Left wedge [2] Factor of Safety: 5.978 Wedge Volume: 0.170 m3 Apex Height: 0.23 m Sliding Mode: wedge sliding along line of intersection of joints 1 and 3 Upper Right wedge [7] Factor of Safety: 0.071 Wedge Volume: 0.300 m3 Apex Height: 0.75 m Sliding Mode: wedge sliding on joint 4	Upper Left wedge [8] Factor of Safety: 0.000 Wedge Volume: 0.743 m3 Apex Height: 1.34 m Sliding Mode: falling wedge Near End wedge [9] Factor of Safety: 0.302 Wedge Volume: 0.242 m3 Apex Height: 0.31 m Sliding Mode: wedge sliding on joint 1

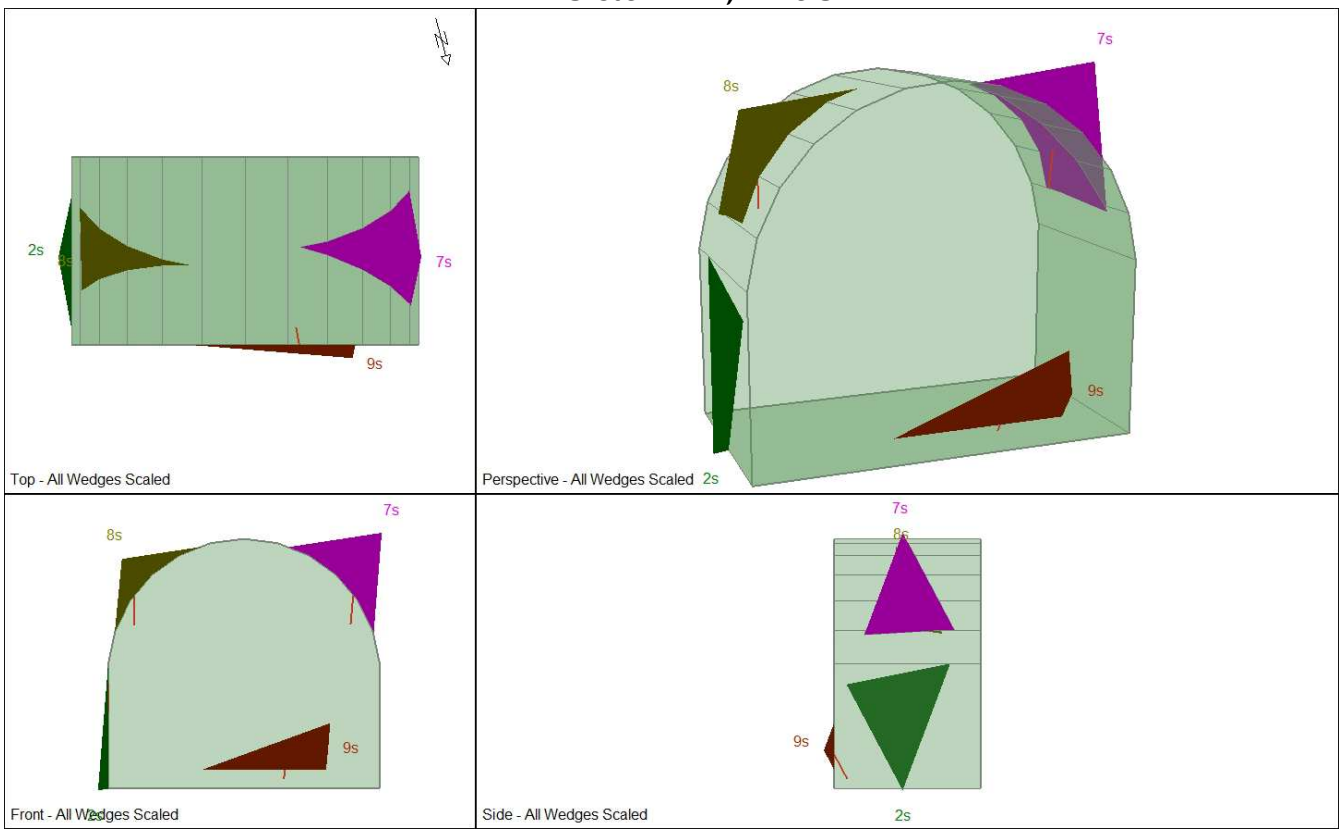
GALLERIA N-S
Sistemi K1, K2 e S'



Le sigle dei tetraedri riportate negli schemi corrispondono a quelle poste tra parentesi quadre nell'elenco sottostante. Il suffisso s indica che le dimensioni del tetraedro sono state scalate in funzione dei valori di persistenza misurati.

Lower Right wedge [2] Factor of Safety: 10.027 Wedge Volume: 0.226 m3 Apex Height: 0.30 m Sliding Mode: wedge sliding along line of intersection of joints 1 and 2 Upper Left wedge [7] Factor of Safety: 0.114 Wedge Volume: 0.580 m3 Apex Height: 1.00 m Sliding Mode: wedge sliding on joint 5	Upper Right wedge [8] Factor of Safety: 0.000 Wedge Volume: 0.547 m3 Apex Height: 0.98 m Sliding Mode: falling wedge Near End wedge [9] Factor of Safety: 0.302 Wedge Volume: 0.119 m3 Apex Height: 0.23 m Sliding Mode: wedge sliding on joint 1

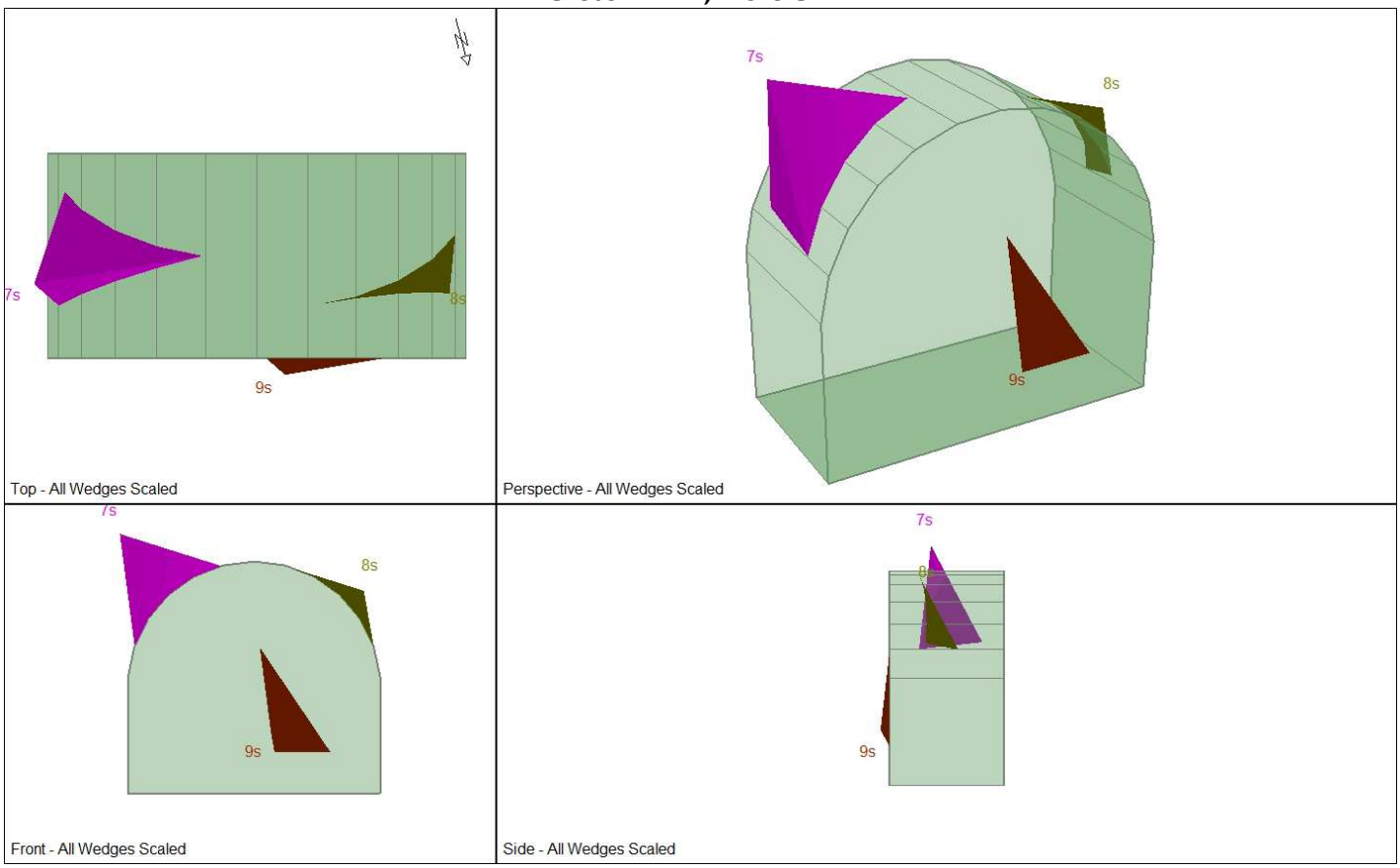
GALLERIA N-S
Sistemi K1, K2 e S



Le sigle dei tetraedri riportate negli schemi corrispondono a quelle poste tra parentesi quadre nell'elenco sottostante. Il suffisso s indica che le dimensioni del tetraedro sono state scalate in funzione dei valori di persistenza misurati.

<u>Lower Left wedge [2]</u> Factor of Safety: stable Wedge Volume: 0.220 m3 Apex Height: 0.23 m Sliding Mode: unconditionaly stable wedge	<u>Upper Left wedge [8]</u> Factor of Safety: 0.000 Wedge Volume: 0.321 m3 Apex Height: 0.73 m Sliding Mode: falling wedge
<u>Upper Right wedge [7]</u> Factor of Safety: 0.071 Wedge Volume: 0.992 m3 Apex Height: 1.37 m Sliding Mode: wedge sliding on joint 4	<u>Near End wedge [9]</u> Factor of Safety: 0.372 Wedge Volume: 0.105 m3 Apex Height: 0.23 m Sliding Mode: wedge sliding along line of intersection of joints 1 and 4

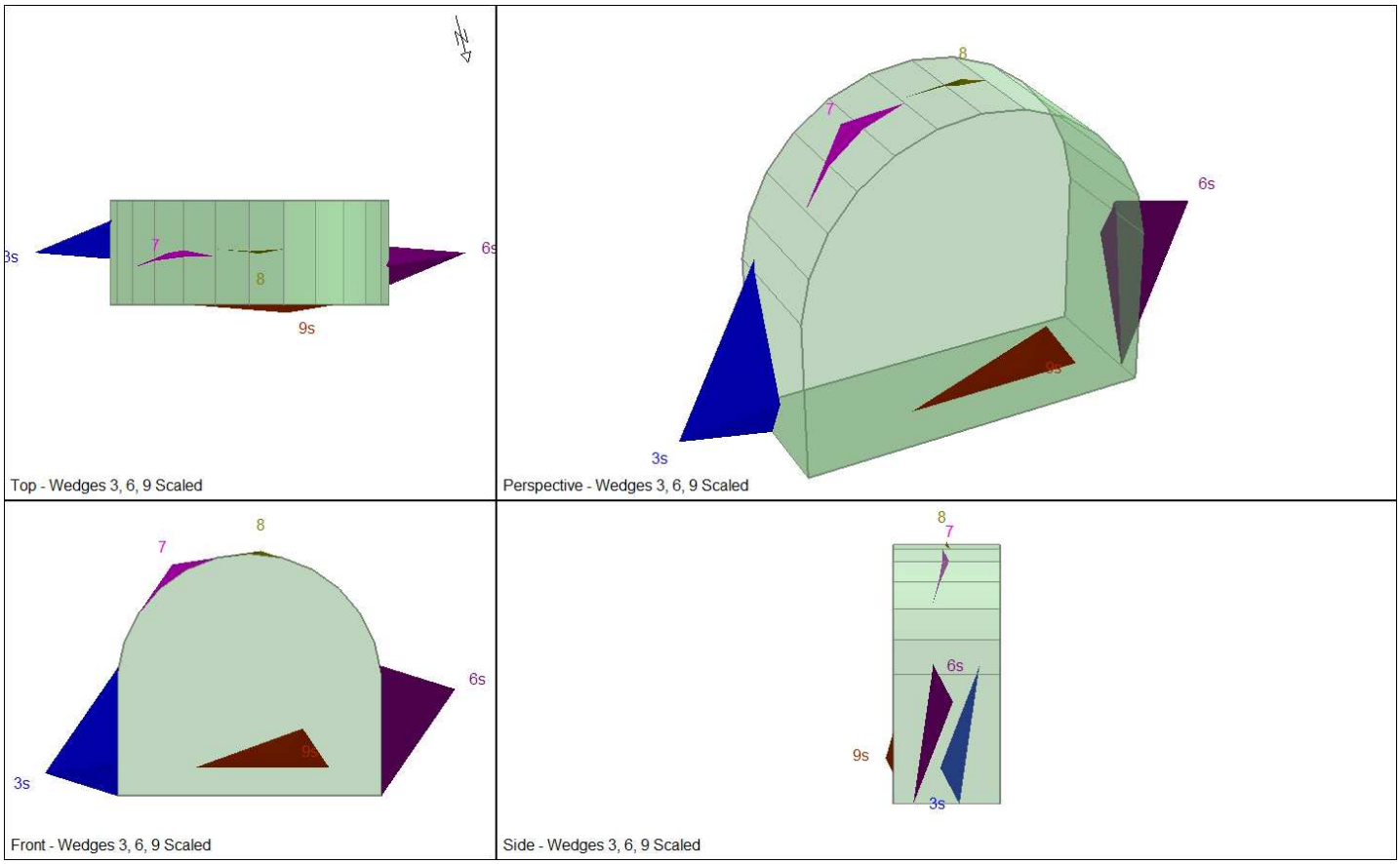
GALLERIA N-S
Sistemi K1, K3 e S'



Le sigle dei tetraedri riportate negli schemi corrispondono a quelle poste tra parentesi quadre nell'elenco sottostante. Il suffisso s indica che le dimensioni del tetraedro sono state scalate in funzione dei valori di persistenza misurati.

Lower Right wedge [2] Factor of Safety: stable Wedge Volume: 0.290 m3 Apex Height: 0.96 m Sliding Mode: unconditionaly stable wedge Upper Left wedge [7] Factor of Safety: 0.114 Wedge Volume: 1.179 m3 Apex Height: 1.85 m Sliding Mode: wedge sliding on joint 5	Upper Right wedge [8] Factor of Safety: 0.000 Wedge Volume: 0.104 m3 Apex Height: 0.50 m Sliding Mode: falling wedge Near End wedge [9] Factor of Safety: 0.433 Wedge Volume: 0.130 m3 Apex Height: 0.24 m Sliding Mode: wedge sliding along line of intersection of joints 1 and 5

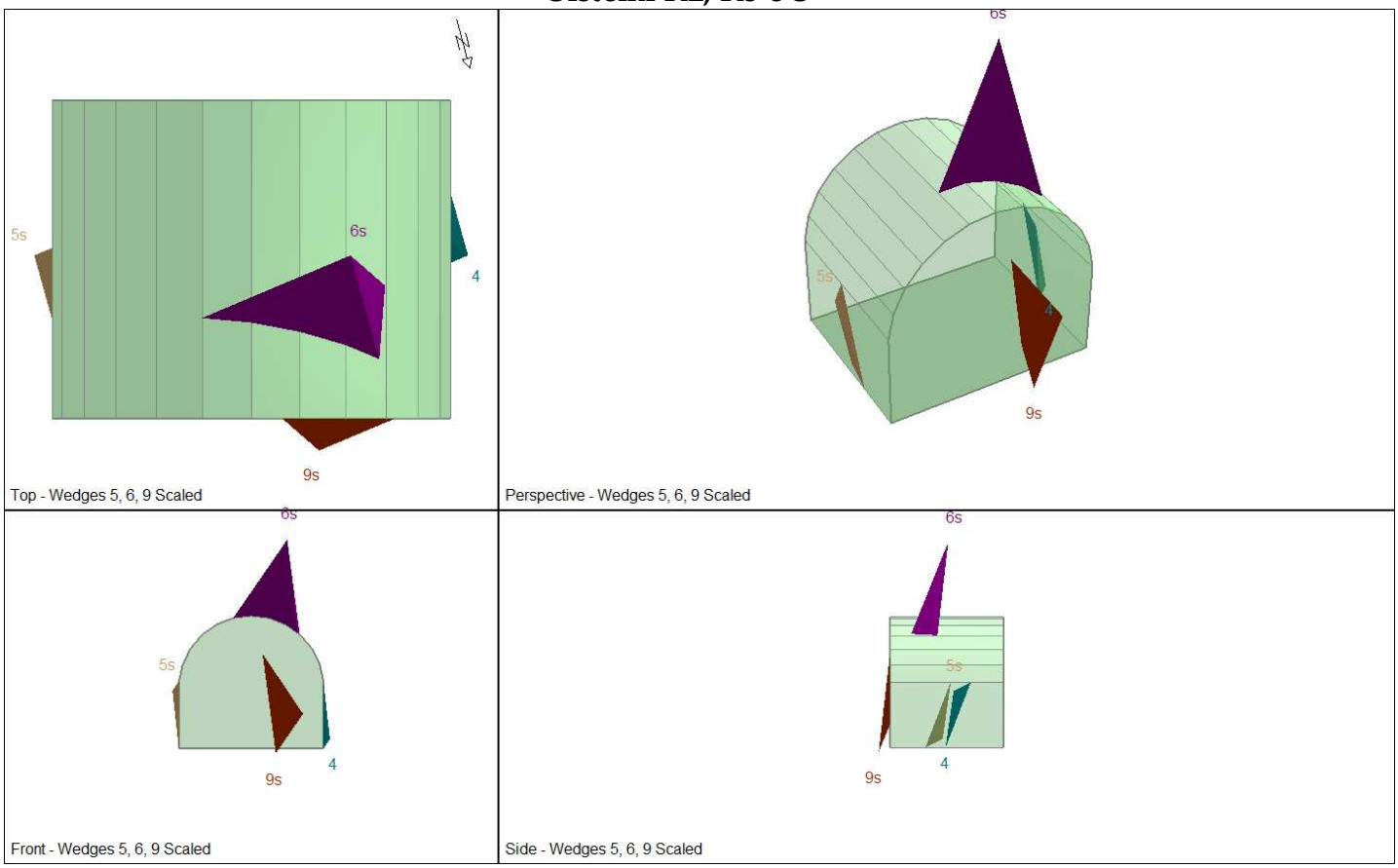
GALLERIA N-S
Sistemi K1, K2, K3



Le sigle dei tetraedri riportate negli schemi corrispondono a quelle poste tra parentesi quadre nell'elenco sottostante. Il suffisso s indica che le dimensioni del tetraedro sono state scalate in funzione dei valori di persistenza misurati.

Lower Left wedge [3] Factor of Safety: 5.978 Wedge Volume: 0.412 m3 Apex Height: 1.64 m Sliding Mode: wedge sliding along line of intersection of joints 1 and 3 Lower Right wedge [6] Factor of Safety: 2.576 Wedge Volume: 0.436 m3 Apex Height: 1.67 m Sliding Mode: wedge sliding along line of intersection of joints 2 and 3 Upper Left wedge [7] Factor of Safety: 0.099	Wedge Volume: 0.011 m3 Apex Height: 0.28 m Sliding Mode: wedge sliding on joint 3 Roof wedge [8] Factor of Safety: 0.000 Wedge Volume: 0.001 m3 Apex Height: 0.09 m Sliding Mode: falling wedge Near End wedge [9] Factor of Safety: 0.302 Wedge Volume: 0.072 m3 Apex Height: 0.16 m Sliding Mode: wedge sliding on joint 1

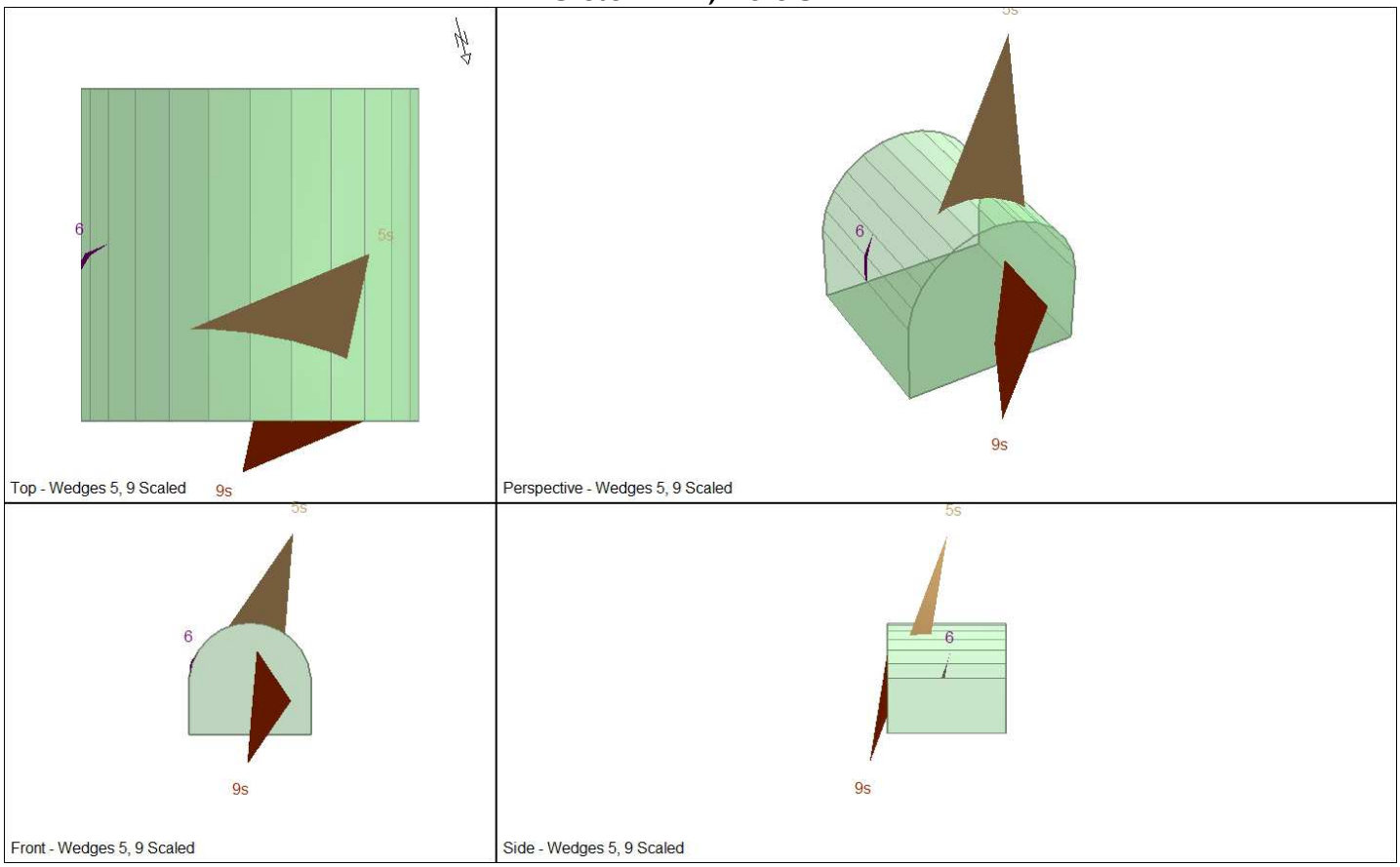
GALLERIA N-S
Sistemi K2, K3 e S'



Le sigle dei tetraedri riportate negli schemi corrispondono a quelle poste tra parentesi quadre nell'elenco sottostante. Il suffisso s indica che le dimensioni del tetraedro sono state scalate in funzione dei valori di persistenza misurati.

Lower Right wedge [4] Factor of Safety: 2.576 Wedge Volume: 0.071 m3 Apex Height: 0.27 m Sliding Mode: wedge sliding along line of intersection of joints 2 and 3 Lower Left wedge [5] Factor of Safety: 0.166 Wedge Volume: 0.074 m3 Apex Height: 0.27 m Sliding Mode: wedge sliding along line of intersection of joints 3 and 5	Roof wedge [6] Factor of Safety: 0.099 Wedge Volume: 1.580 m3 Apex Height: 3.33 m Sliding Mode: wedge sliding on joint 3 Near End wedge [9] Factor of Safety: stable Wedge Volume: 0.311 m3 Apex Height: 0.48 m Sliding Mode: unconditionaly stable wedge

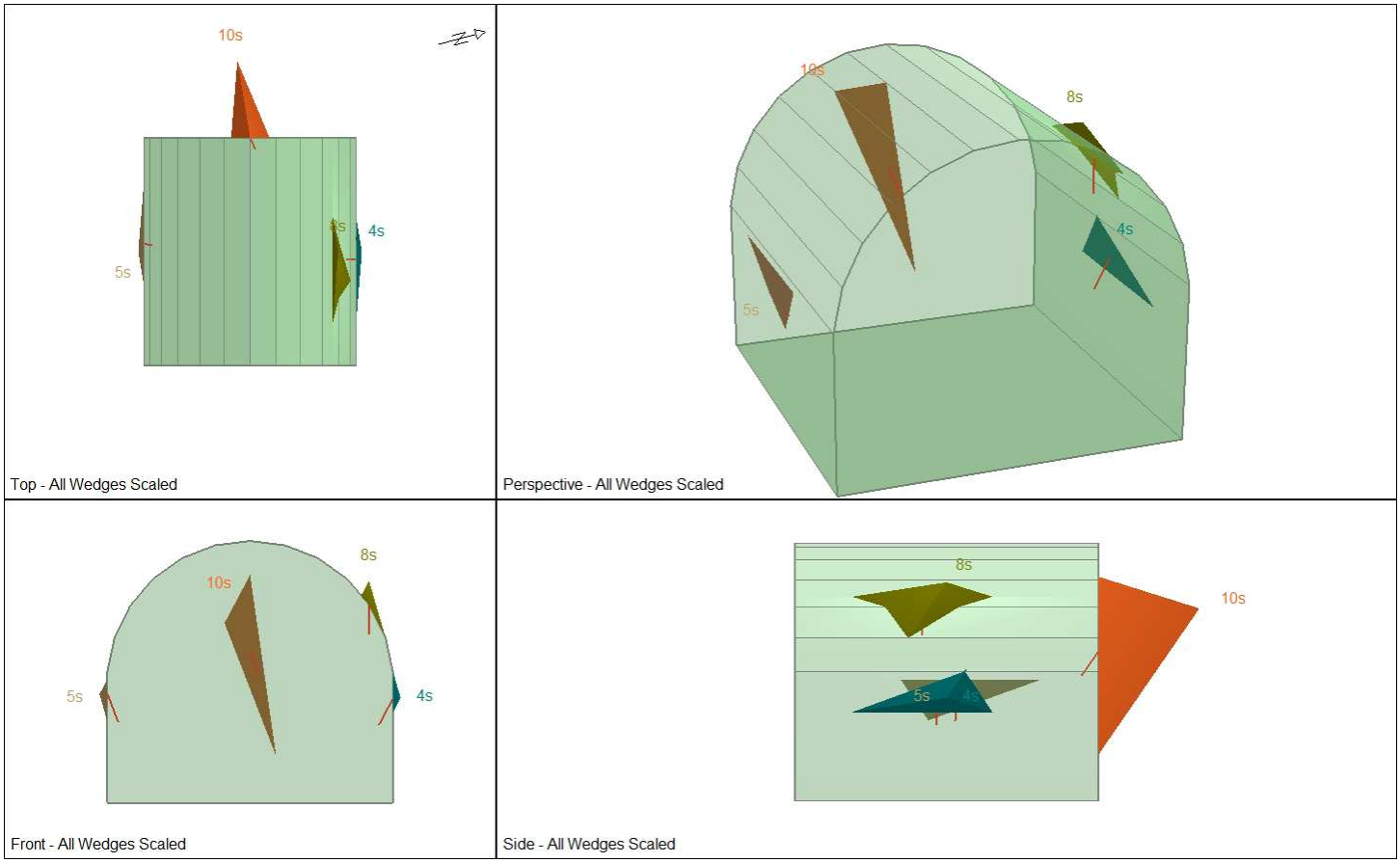
GALLERIA N-S
Sistemi K2, K3 e S



Le sigle dei tetraedri riportate negli schemi corrispondono a quelle poste tra parentesi quadre nell'elenco sottostante. Il suffisso s indica che le dimensioni del tetraedro sono state scalate in funzione dei valori di persistenza misurati.

Roof wedge [5] Factor of Safety: 0.209 Wedge Volume: 2.123 m3 Apex Height: 4.69 m Sliding Mode: wedge sliding along line of intersection of joints 3 and 4 Upper Left wedge [6] Factor of Safety: 0.099 Wedge Volume: 0.003 m3 Apex Height: 0.11 m	Sliding Mode: wedge sliding on joint 3 Near End wedge [9] Factor of Safety: stable Wedge Volume: 0.916 m3 Apex Height: 0.91 m Sliding Mode: unconditionaly stable wedge

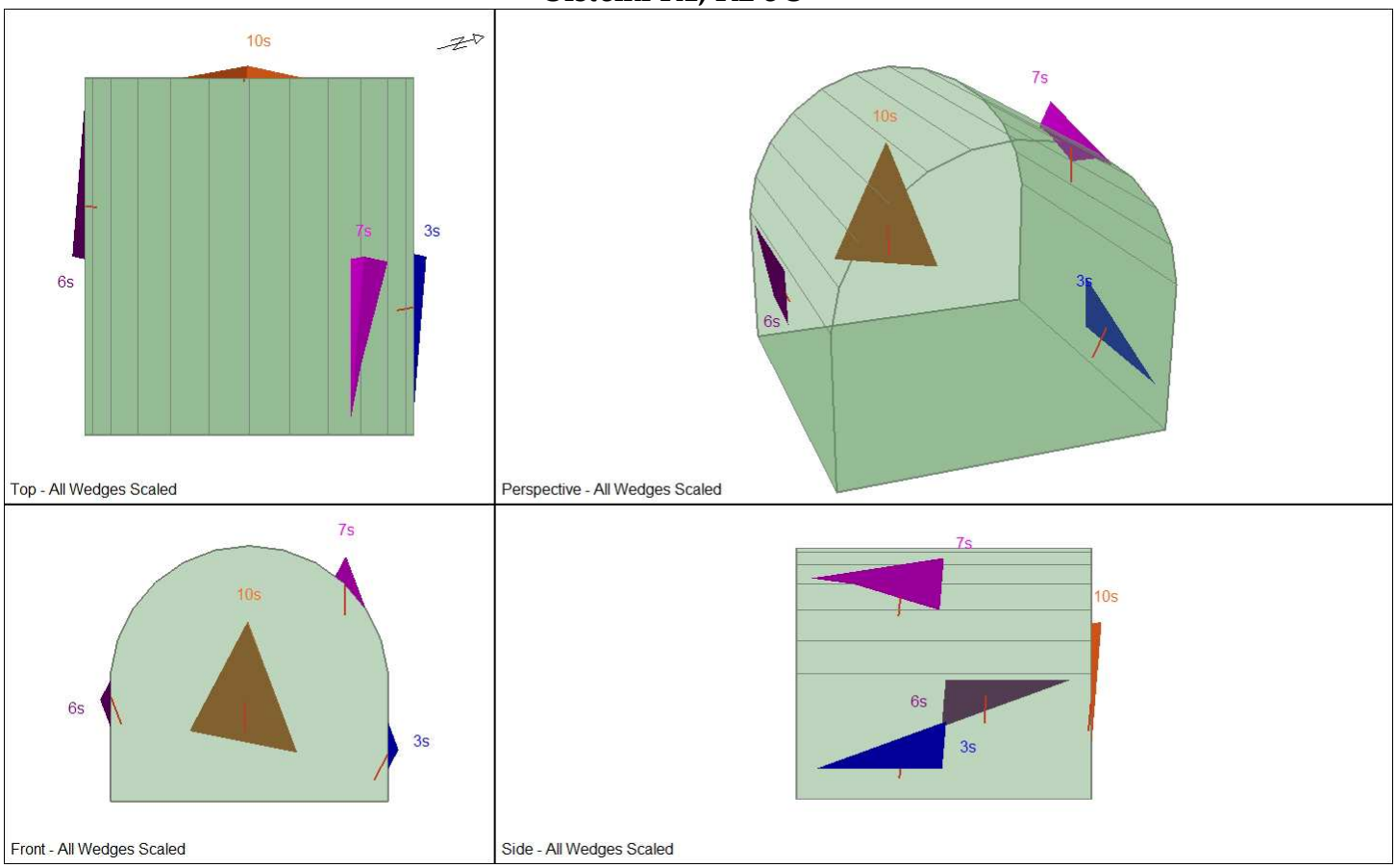
GALLERIA E - O
Sistemi K1, K2 e K3



Le sigle dei tetraedri riportate negli schemi corrispondono a quelle poste tra parentesi quadre nell'elenco sottostante. Il suffisso s indica che le dimensioni del tetraedro sono state scalate in funzione dei valori di persistenza misurati. Le linee rosse indicano la direzione di scivolamento

Lower Right wedge [4]	Upper Right wedge [8]
Factor of Safety: 0.302	Factor of Safety: 0.000
Wedge Volume: 0.072 m3	Wedge Volume: 0.112 m3
Apex Height: 0.16 m	Apex Height: 0.33 m
Sliding Mode: wedge sliding on joint 1	Sliding Mode: falling wedge
Lower Left wedge [5]	Far End wedge [10]
Factor of Safety: 0.315	Factor of Safety: 2.576
Wedge Volume: 0.072 m3	Wedge Volume: 0.936 m3
Apex Height: 0.16 m	Apex Height: 2.16 m
Sliding Mode: wedge sliding on joint 2	Sliding Mode: wedge sliding along line of intersection of joints 2 and 3

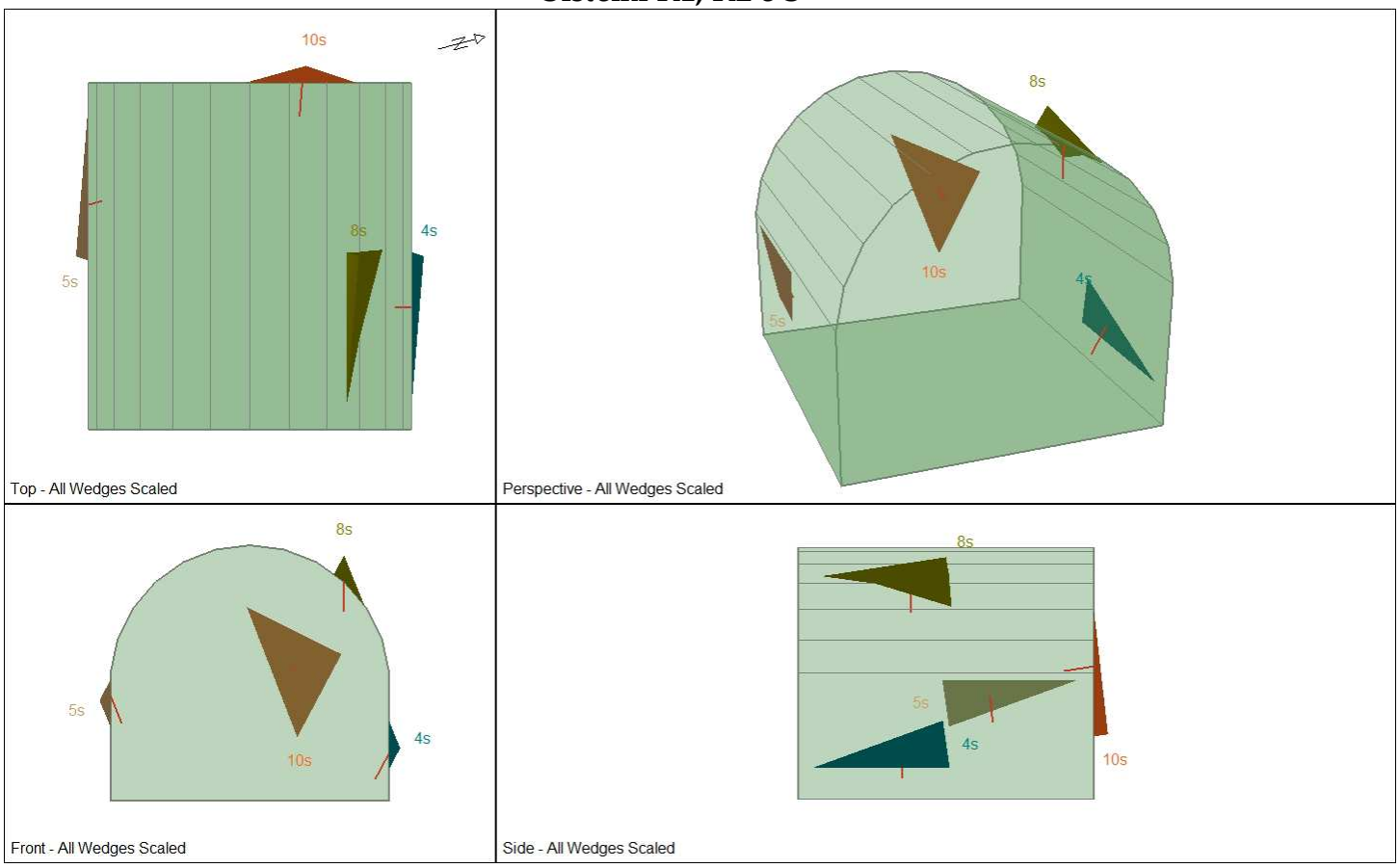
GALLERIA E - O
Sistemi K1, K2 e S



Le sigle dei tetraedri riportate negli schemi corrispondono a quelle poste tra parentesi quadre nell'elenco sottostante. Il suffisso s indica che le dimensioni del tetraedro sono state scalate in funzione dei valori di persistenza misurati. Le linee rosse indicano la direzione di scivolamento

Lower Right wedge [3] Factor of Safety: 0.372 Wedge Volume: 0.105 m3 Apex Height: 0.23 m Sliding Mode: wedge sliding along line of intersection of joints 1 and 4 Lower Left wedge [6] Factor of Safety: 0.315 Wedge Volume: 0.105 m3 Apex Height: 0.23 m Sliding Mode: wedge sliding on joint 2	Upper Right wedge [7] Factor of Safety: 0.071 Wedge Volume: 0.189 m3 Apex Height: 0.50 m Sliding Mode: wedge sliding on joint 4 Far End wedge [10] Factor of Safety: 0.071 Wedge Volume: 0.229 m3 Apex Height: 0.23 m Sliding Mode: wedge sliding on joint 4

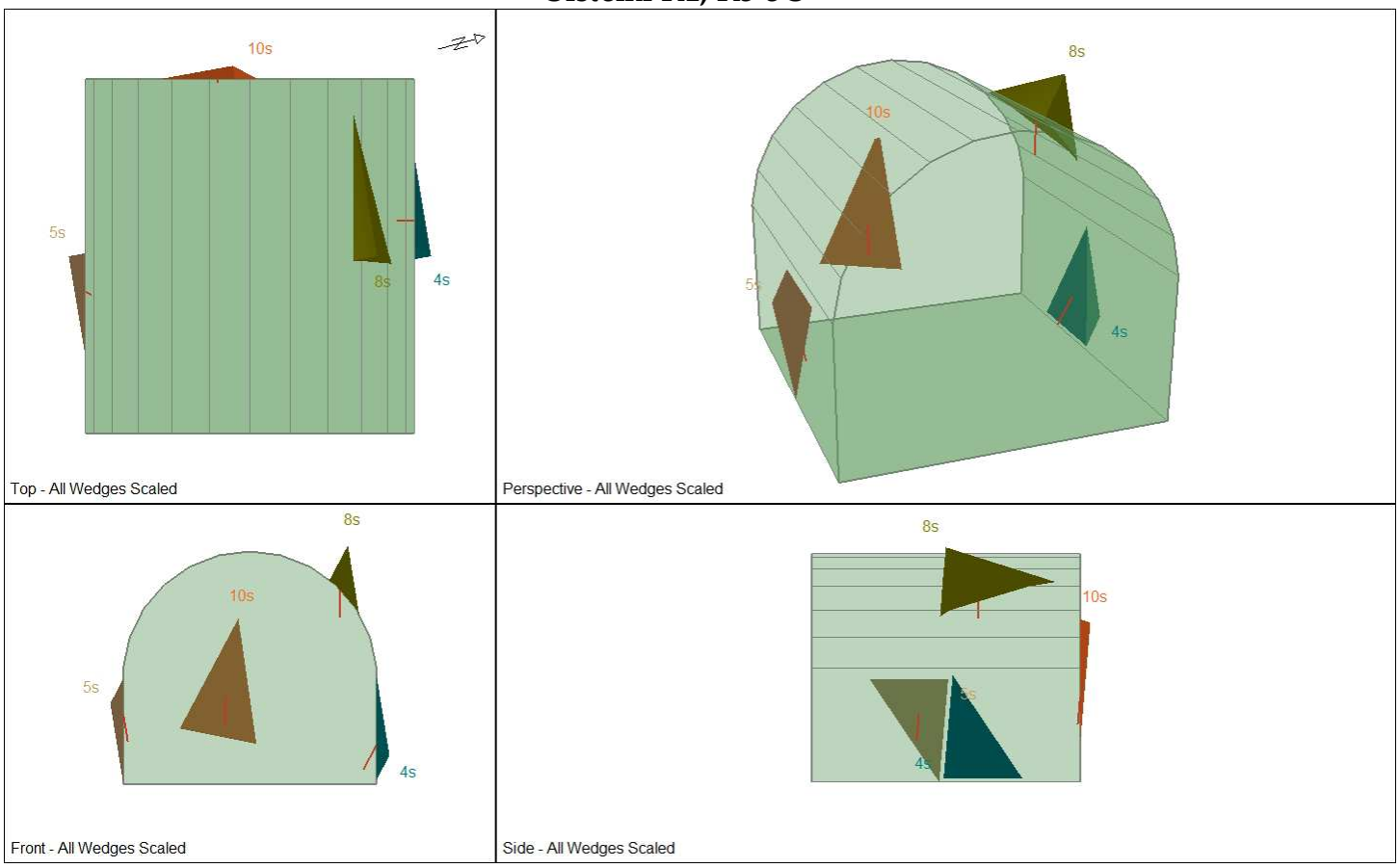
GALLERIA E - O
Sistemi K1, K2 e S'



Le sigle dei tetraedri riportate negli schemi corrispondono a quelle poste tra parentesi quadre nell'elenco sottostante. Il suffisso s indica che le dimensioni del tetraedro sono state scalate in funzione dei valori di persistenza misurati. Le linee rosse indicano la direzione di scivolamento

Lower Right wedge [4]	Upper Right wedge [8]
Factor of Safety: 0.302	Factor of Safety: 0.000
Wedge Volume: 0.119 m3	Wedge Volume: 0.162 m3
Apex Height: 0.23 m	Apex Height: 0.47 m
Sliding Mode: wedge sliding on joint 1	Sliding Mode: falling wedge
Lower Left wedge [5]	Far End wedge [10]
Factor of Safety: 0.448	Factor of Safety: 10.027
Wedge Volume: 0.119 m3	Wedge Volume: 0.237 m3
Apex Height: 0.23 m	Apex Height: 0.31 m
Sliding Mode: wedge sliding along line of intersection of joints 2 and 5	Sliding Mode: wedge sliding along line of intersection of joints 1 and 2

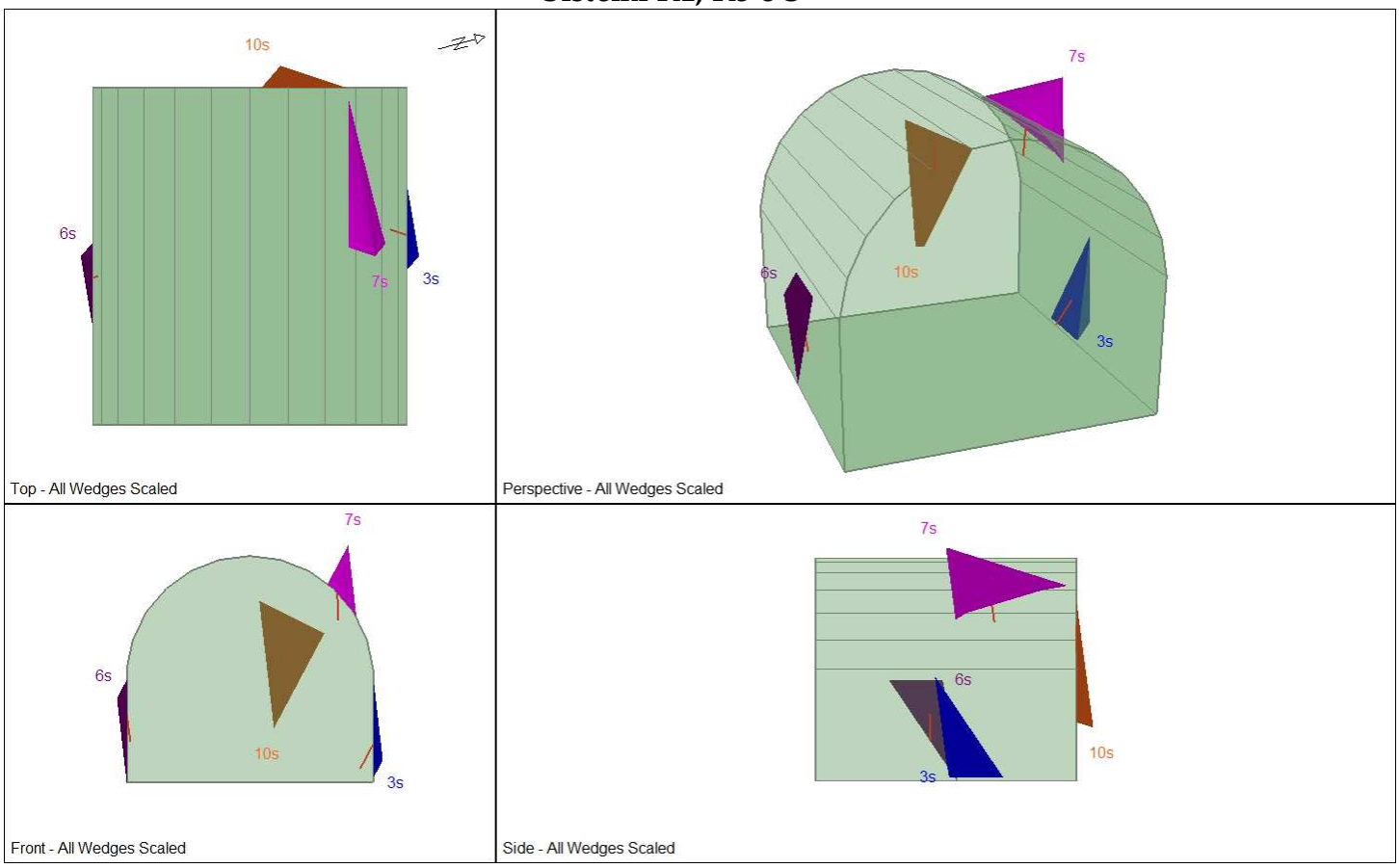
GALLERIA E - O
Sistemi K1, K3 e S



Le sigle dei tetraedri riportate negli schemi corrispondono a quelle poste tra parentesi quadre nell'elenco sottostante. Il suffisso s indica che le dimensioni del tetraedro sono state scalate in funzione dei valori di persistenza misurati. Le linee rosse indicano la direzione di scivolamento

Lower Right wedge [4]	Upper Right wedge [8]
Factor of Safety: 0.302	Factor of Safety: 0.000
Wedge Volume: 0.242 m3	Wedge Volume: 0.381 m3
Apex Height: 0.31 m	Apex Height: 0.93 m
Sliding Mode: wedge sliding on joint 1	Sliding Mode: falling wedge
Lower Left wedge [5]	Far End wedge [10]
Factor of Safety: 0.209	Factor of Safety: 0.071
Wedge Volume: 0.242 m3	Wedge Volume: 0.214 m3
Apex Height: 0.31 m	Apex Height: 0.24 m
Sliding Mode: wedge sliding along line of intersection of joints 3 and 4	Sliding Mode: wedge sliding on joint 4

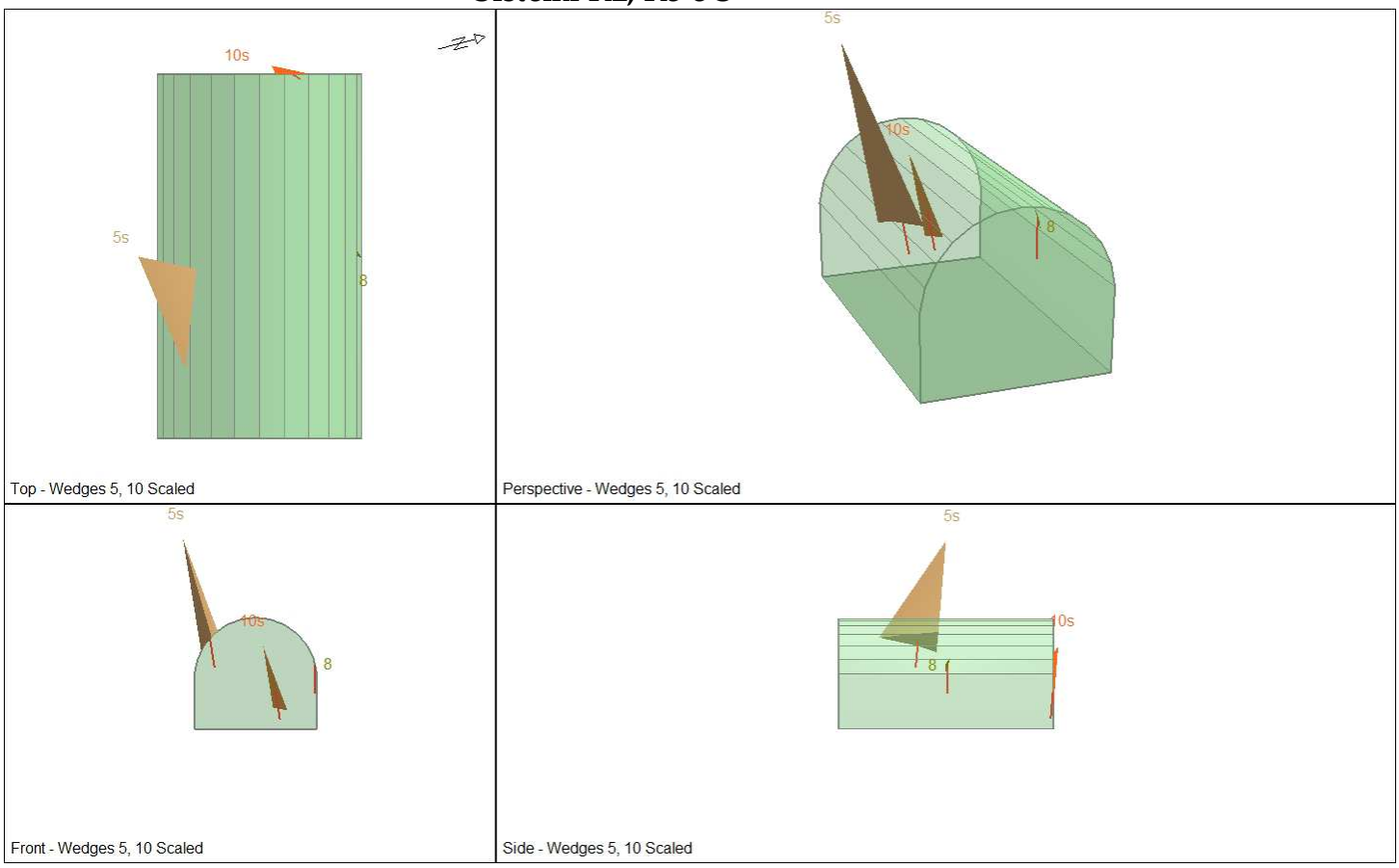
GALLERIA E - O
Sistemi K1, K3 e S'



Le sigle dei tetraedri riportate negli schemi corrispondono a quelle poste tra parentesi quadre nell'elenco sottostante. Il suffisso s indica che le dimensioni del tetraedro sono state scalate in funzione dei valori di persistenza misurati. Le linee rosse indicano la direzione di scivolamento

Lower Right wedge [3] Factor of Safety: 0.433 Wedge Volume: 0.130 m3 Apex Height: 0.24 m Sliding Mode: wedge sliding along line of intersection of joints 1 and 5 Lower Left wedge [6] Factor of Safety: 0.099 Wedge Volume: 0.130 m3 Apex Height: 0.24 m Sliding Mode: wedge sliding on joint 3	Upper Right wedge [7] Factor of Safety: 0.114 Wedge Volume: 0.464 m3 Apex Height: 1.06 m Sliding Mode: wedge sliding on joint 5 Far End wedge [10] Factor of Safety: stable Wedge Volume: 0.300 m3 Apex Height: 0.41 m Sliding Mode: unconditionaly stable wedge

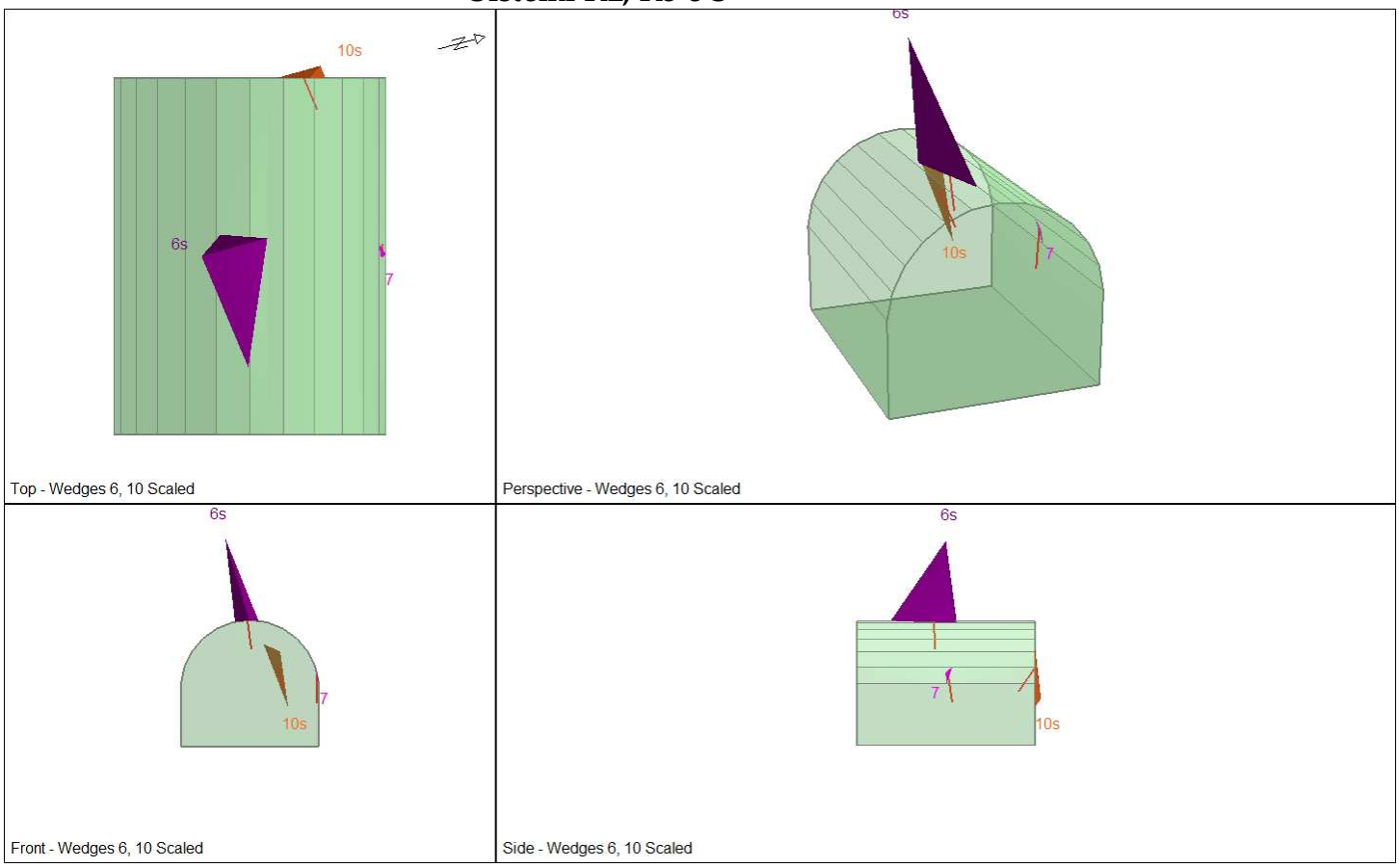
GALLERIA E – O
Sistemi K2, K3 e S



Le sigle dei tetraedri riportate negli schemi corrispondono a quelle poste tra parentesi quadre nell'elenco sottostante. Il suffisso s indica che le dimensioni del tetraedro sono state scalate in funzione dei valori di persistenza misurati. Le linee rosse indicano la direzione di scivolamento

Upper Left wedge [5] Factor of Safety: 0.209 Wedge Volume: 2.567 m3 Apex Height: 4.75 m Sliding Mode: wedge sliding along line of intersection of joints 3 and 4 Upper Right wedge [8] Factor of Safety: 0.000 Wedge Volume: 0.000 m3 Apex Height: 0.02 m	Sliding Mode: falling wedge Far End wedge [10] Factor of Safety: 0.209 Wedge Volume: 0.077 m3 Apex Height: 0.26 m Sliding Mode: wedge sliding along line of intersection of joints 3 and 4

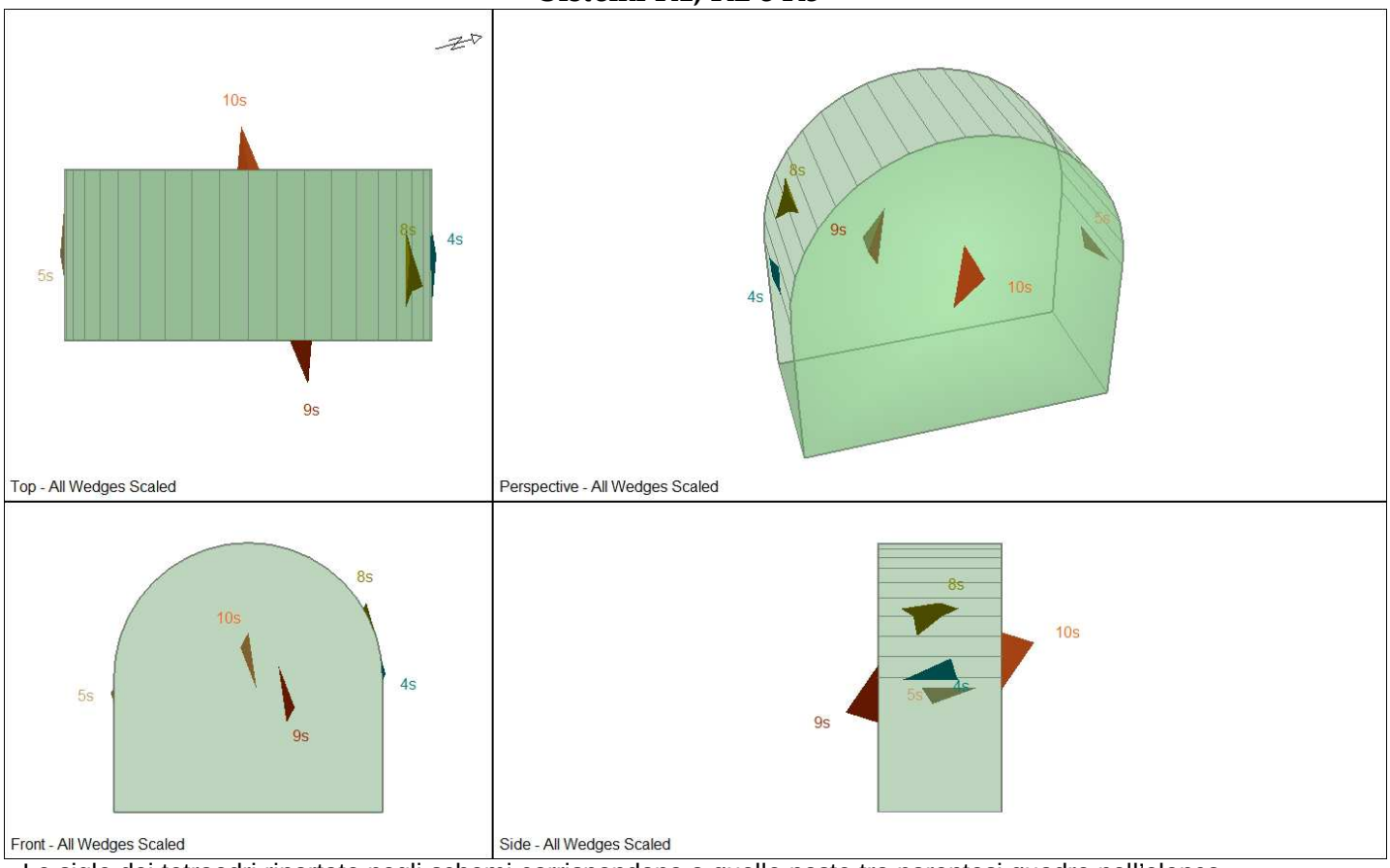
GALLERIA E – O
Sistemi K2, K3 e S′



Le sigle dei tetraedri riportate negli schemi corrispondono a quelle poste tra parentesi quadre nell'elenco sottostante. Il suffisso s indica che le dimensioni del tetraedro sono state scalate in funzione dei valori di persistenza misurati. Le linee rosse indicano la direzione di scivolamento

<u>Roof wedge [6]</u> Factor of Safety: 0.099 Wedge Volume: 1.773 m3 Apex Height: 3.65 m Sliding Mode: wedge sliding on joint 3 <u>Upper Right wedge [7]</u> Factor of Safety: 0.114 Wedge Volume: 0.001 m3	Apex Height: 0.03 m Sliding Mode: wedge sliding on joint 5 <u>Far End wedge [10]</u> Factor of Safety: 2.576 Wedge Volume: 0.075 m3 Apex Height: 0.27 m Sliding Mode: wedge sliding along line of intersection of joints 2 and 3 4

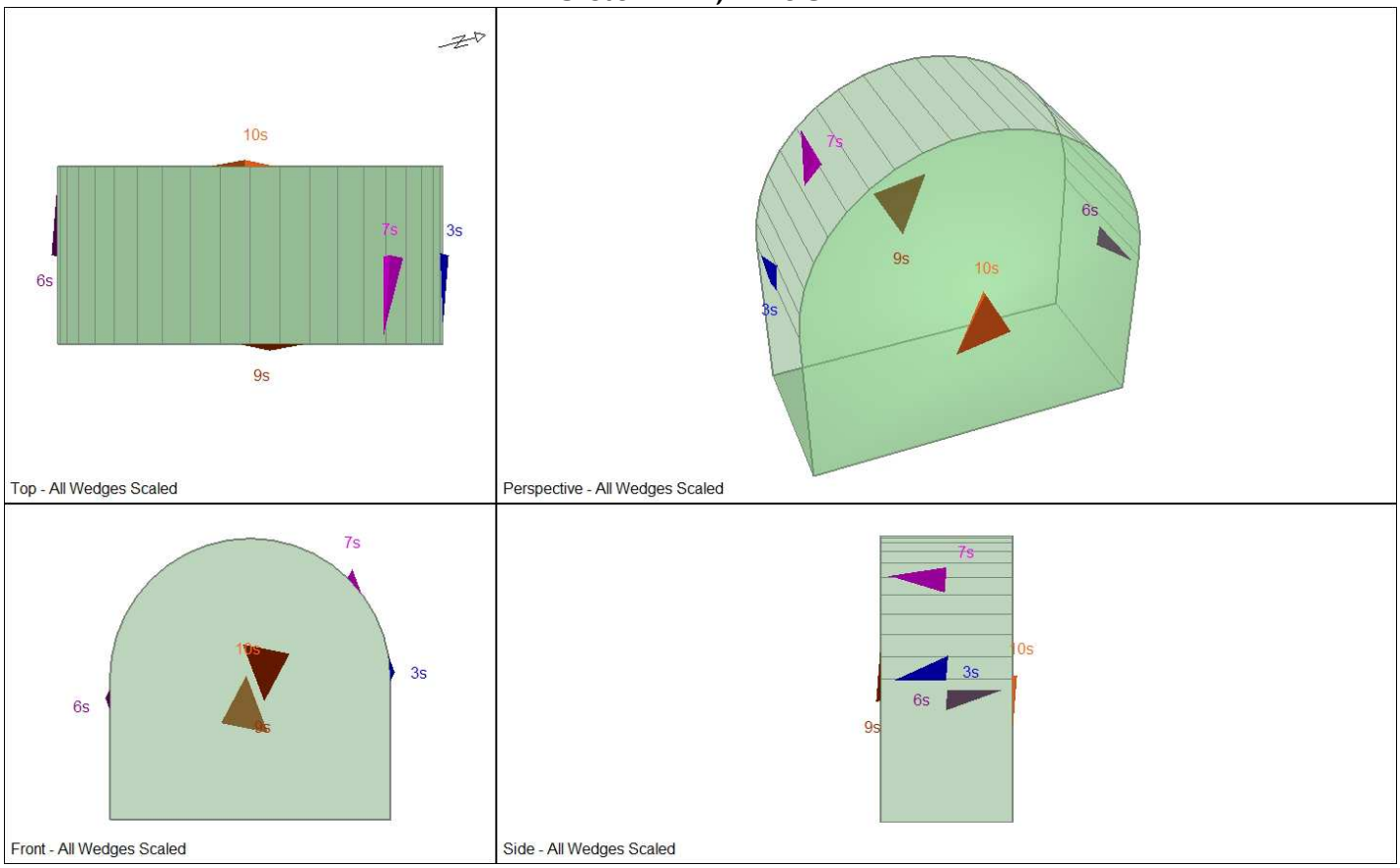
CAMERA DI FRANTUMAZIONE
Sistemi K1, K2 e K3



Le sigle dei tetraedri riportate negli schemi corrispondono a quelle poste tra parentesi quadre nell'elenco sottostante. Il suffisso s indica che le dimensioni del tetraedro sono state scalate in funzione dei valori di persistenza misurati.

Upper Right wedge [4]	Apex Height: 0.30 m
Factor of Safety: 0.302	Sliding Mode: falling wedge
Wedge Volume: 0.096 m3	Near End wedge [9]
Apex Height: 0.18 m	Factor of Safety: 5.978
Sliding Mode: wedge sliding on joint 1	Wedge Volume: 0.444 m3
Lower Left wedge [5]	Apex Height: 1.69 m
Factor of Safety: 0.315	Sliding Mode: wedge sliding along line of intersection of joints 1 and 3
Wedge Volume: 0.072 m3	Far End wedge [10]
Apex Height: 0.16 m	Factor of Safety: 2.576
Sliding Mode: wedge sliding on joint 2	Wedge Volume: 0.444 m3
Upper Right wedge [8]	Apex Height: 1.69 m
Factor of Safety: 0.000	Sliding Mode: wedge sliding along line of intersection of joints 2 and 3
Wedge Volume: 0.159 m3	

CAMERA DI FRANTUMAZIONE
Sistemi K1, K2 e S

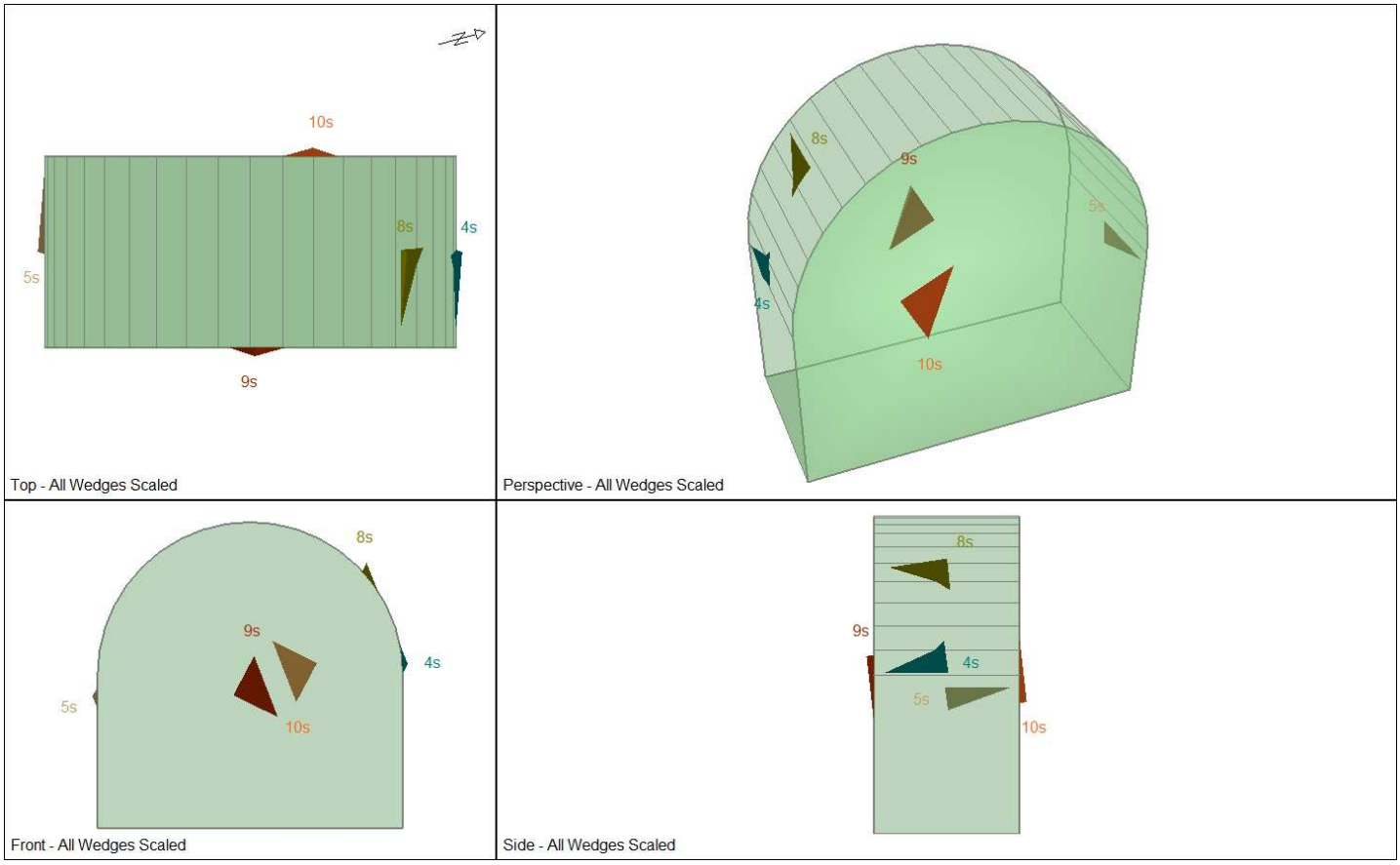


Le sigle dei tetraedri riportate negli schemi corrispondono a quelle poste tra parentesi quadre nell'elenco sottostante. Il suffisso s indica che le dimensioni del tetraedro sono state scalate in funzione dei valori di persistenza misurati

.

Upper Right wedge [3]	Apex Height: 0.49 m
Factor of Safety: 0.372	Sliding Mode: wedge sliding on joint 4
Wedge Volume: 0.123 m3	Near End wedge [9]
Apex Height: 0.24 m	Factor of Safety: stable
Sliding Mode: wedge sliding along line of intersection of joints 1 and 4	Wedge Volume: 0.229 m3
	Apex Height: 0.23 m
Lower Left wedge [6]	Sliding Mode: unconditionaly stable wedge
Factor of Safety: 0.315	Far End wedge [10]
Wedge Volume: 0.105 m3	Factor of Safety: 0.071
Apex Height: 0.23 m	Wedge Volume: 0.229 m3
Sliding Mode: wedge sliding on joint 2	Apex Height: 0.23 m
Upper Right wedge [7]	Sliding Mode: wedge sliding on joint 4
Factor of Safety: 0.071	
Wedge Volume: 0.222 m3	

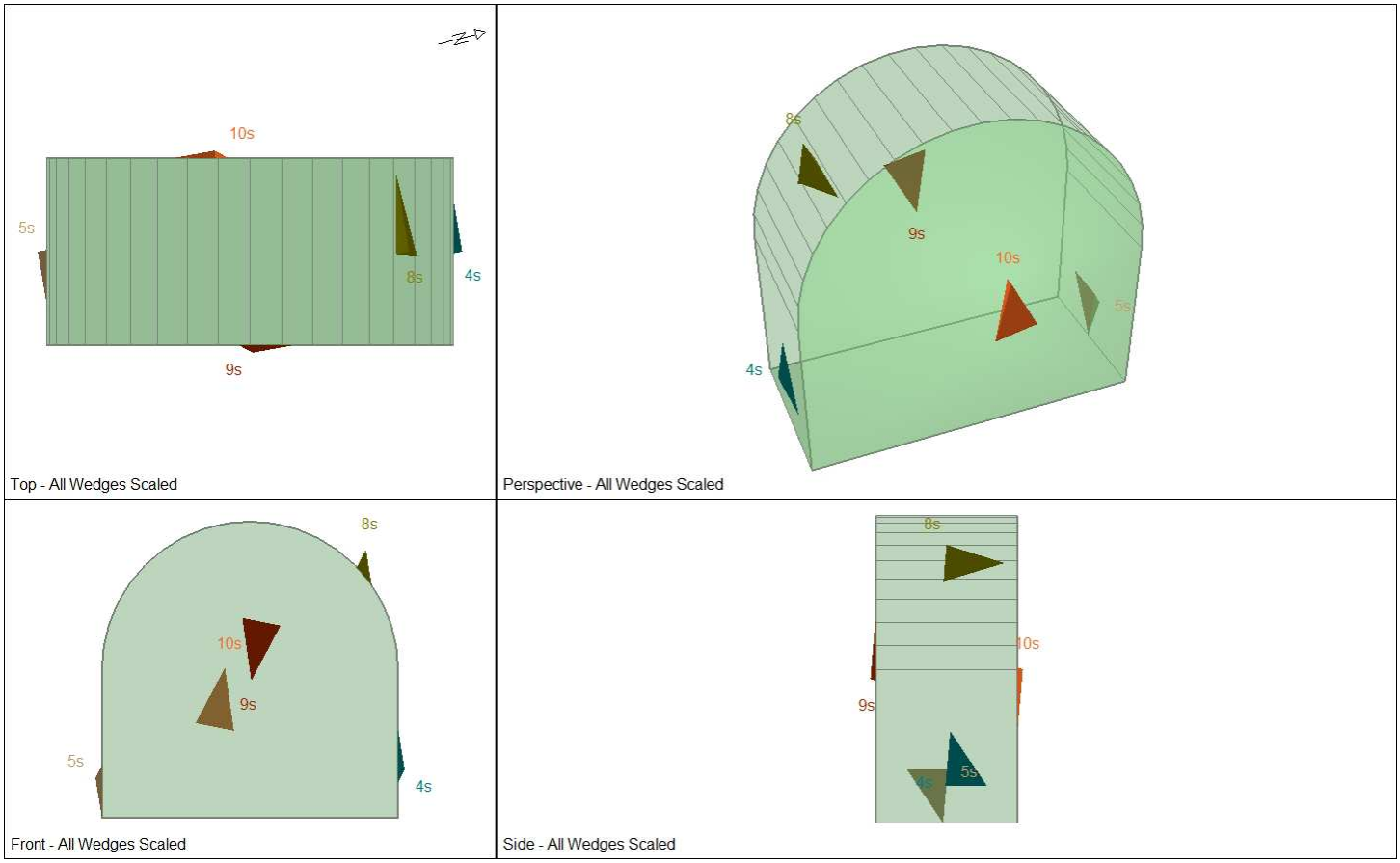
CAMERA DI FRANTUMAZIONE
Sistemi K1, K2 e S'



Le sigle dei tetraedri riportate negli schemi corrispondono a quelle poste tra parentesi quadre nell'elenco sottostante. Il suffisso s indica che le dimensioni del tetraedro sono state scalate in funzione dei valori di persistenza misurati.

Upper Right wedge [4]	Apex Height: 0.41 m
Factor of Safety: 0.302	Sliding Mode: falling wedge
Wedge Volume: 0.143 m3	Near End wedge [9]
Apex Height: 0.25 m	Factor of Safety: 0.114
Sliding Mode: wedge sliding on joint 1	Wedge Volume: 0.237 m3
Lower Left wedge [5]	Apex Height: 0.31 m
Factor of Safety: 0.448	Sliding Mode: wedge sliding on joint 5
Wedge Volume: 0.119 m3	Far End wedge [10]
Apex Height: 0.23 m	Factor of Safety: 10.027
Sliding Mode: wedge sliding along line of intersection of joints 2 and 5	Wedge Volume: 0.237 m3
Upper Right wedge [8]	Apex Height: 0.31 m
Factor of Safety: 0.000	Sliding Mode: wedge sliding along line of intersection of joints 1 and 2
Wedge Volume: 0.190 m3	

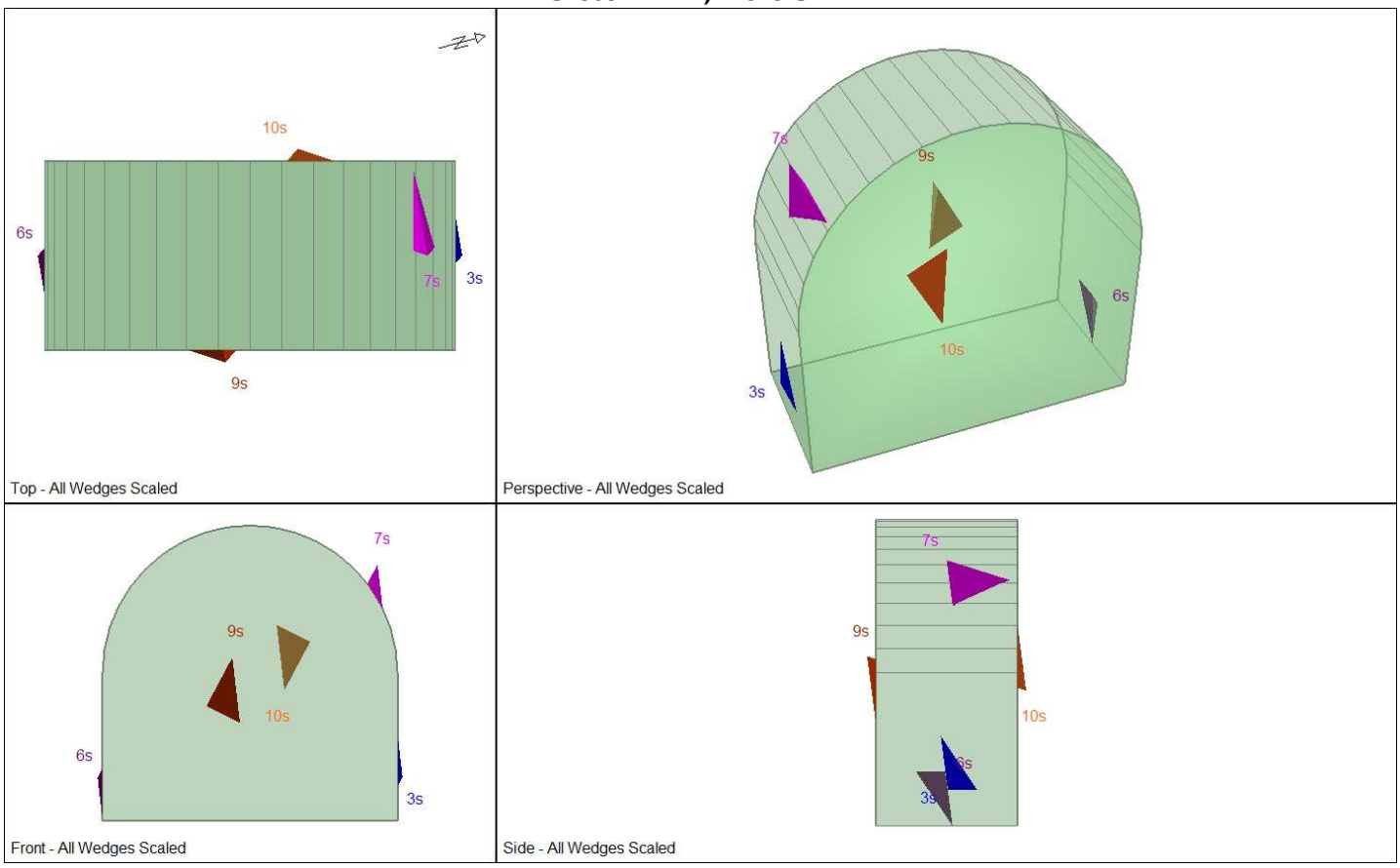
CAMERA DI FRANTUMAZIONE
Sistemi K1, K3 e S



Le sigle dei tetraedri riportate negli schemi corrispondono a quelle poste tra parentesi quadre nell'elenco sottostante. Il suffisso s indica che le dimensioni del tetraedro sono state scalate in funzione dei valori di persistenza misurati.

Lower Right wedge [4] Factor of Safety: 0.302 Wedge Volume: 0.242 m3 Apex Height: 0.31 m Sliding Mode: wedge sliding on joint 1 Lower Left wedge [5] Factor of Safety: 0.209 Wedge Volume: 0.242 m3 Apex Height: 0.31 m Sliding Mode: wedge sliding along line 3 and 4 Upper Right wedge [8] Factor of Safety: 0.000 Wedge Volume: 0.429 m3	Near End wedge [9] Factor of Safety: 5.978 Wedge Volume: 0.214 m3 Apex Height: 0.24 m Sliding Mode: wedge sliding along line of intersection of joints 1 and 3 Far End wedge [10] Factor of Safety: 0.071 Wedge Volume: 0.214 m3 Apex Height: 0.24 m Sliding Mode: wedge sliding on joint 4

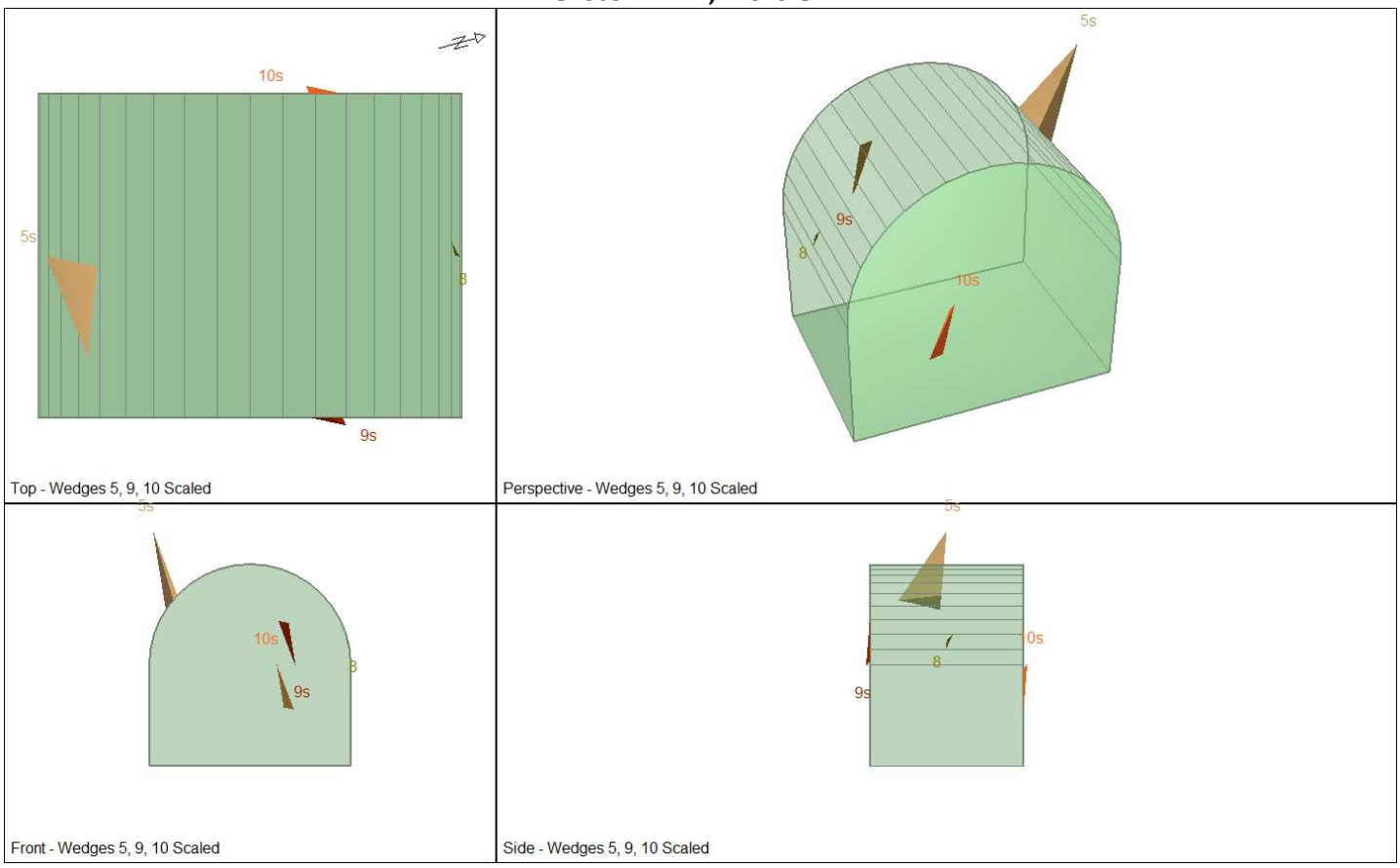
CAMERA DI FRANTUMAZIONE
Sistemi K1, K3 e S'



Le sigle dei tetraedri riportate negli schemi corrispondono a quelle poste tra parentesi quadre nell'elenco sottostante. Il suffisso s indica che le dimensioni del tetraedro sono state scalate in funzione dei valori di persistenza misurati.

Lower Right wedge [3] Factor of Safety: 0.433 Wedge Volume: 0.130 m3 Apex Height: 0.24 m Sliding Mode: wedge sliding along line of intersection of joints 1 and 5 Lower Left wedge [6] Factor of Safety: 0.099 Wedge Volume: 0.130 m3 Apex Height: 0.24 m Sliding Mode: wedge sliding on joint 3 Upper Right wedge [7] Factor of Safety: 0.114 Wedge Volume: 0.538 m3	Apex Height: 0.97 m Sliding Mode: wedge sliding on joint 5 Near End wedge [9] Factor of Safety: 0.114 Wedge Volume: 0.300 m3 Apex Height: 0.41 m Sliding Mode: wedge sliding on joint 5 Far End wedge [10] Factor of Safety: stable Wedge Volume: 0.300 m3 Apex Height: 0.41 m Sliding Mode: unconditionaly stable wedge

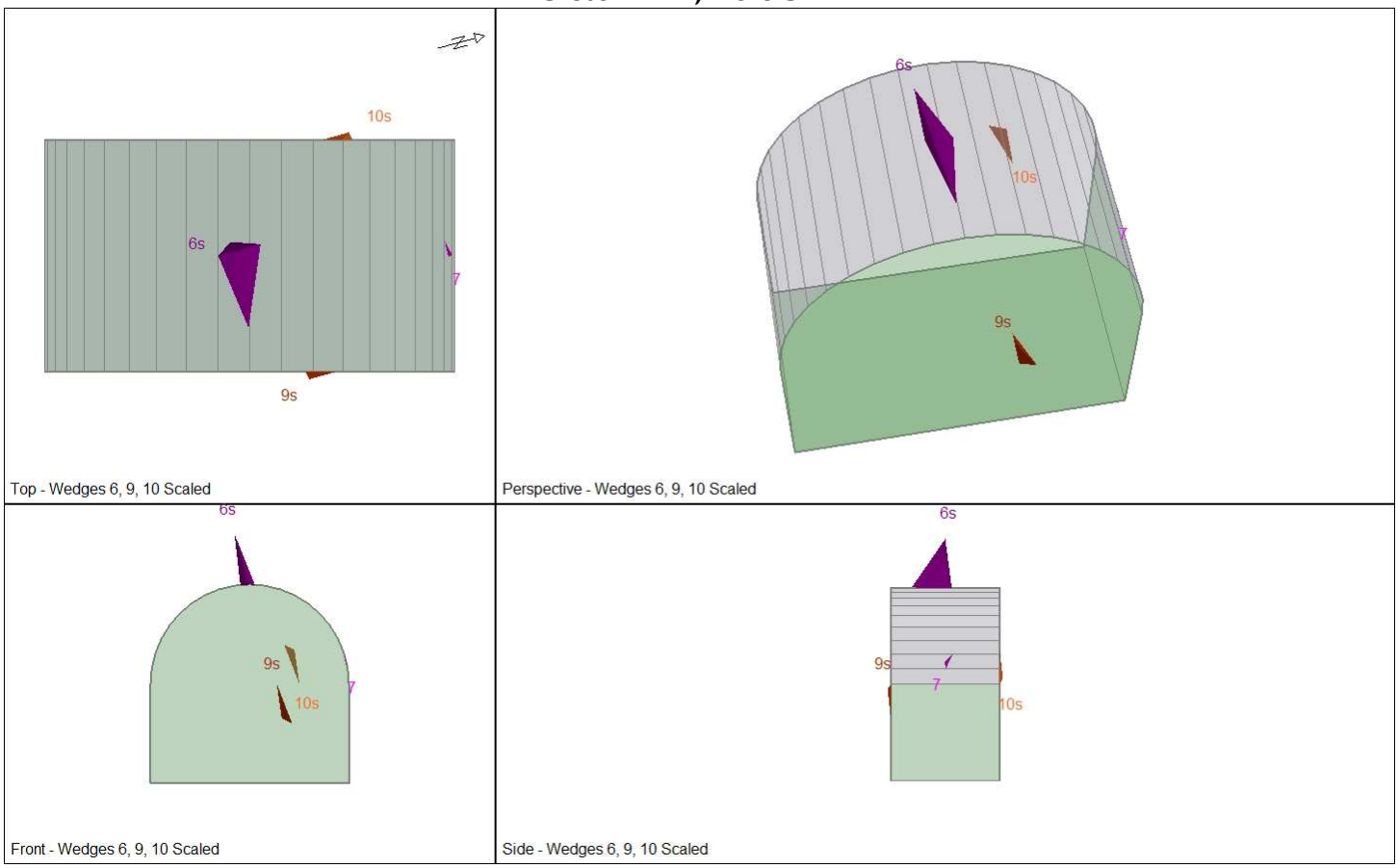
CAMERA DI FRANTUMAZIONE
Sistemi K2, K3 e S



Le sigle dei tetraedri riportate negli schemi corrispondono a quelle poste tra parentesi quadre nell'elenco sottostante. Il suffisso s indica che le dimensioni del tetraedro sono state scalate in funzione dei valori di persistenza misurati.

Upper Left wedge [5]	Near End wedge [9]
Factor of Safety: 0.209	Factor of Safety: stable
Wedge Volume: 2.558 m3	Wedge Volume: 0.077 m3
Apex Height: 4.50 m	Apex Height: 0.26 m
Sliding Mode: wedge sliding along line of intersection of joints 3 and 4	Sliding Mode: unconditionaly stable wedge
Upper Right wedge [8]	Far End wedge [10]
Factor of Safety: 0.000	Factor of Safety: 0.209
Wedge Volume: 0.001 m3	Wedge Volume: 0.077 m3
Apex Height: 0.03 m	Apex Height: 0.26 m
Mode: falling wedge	Sliding Mode: wedge sliding along line of intersection of joints 3 and 4

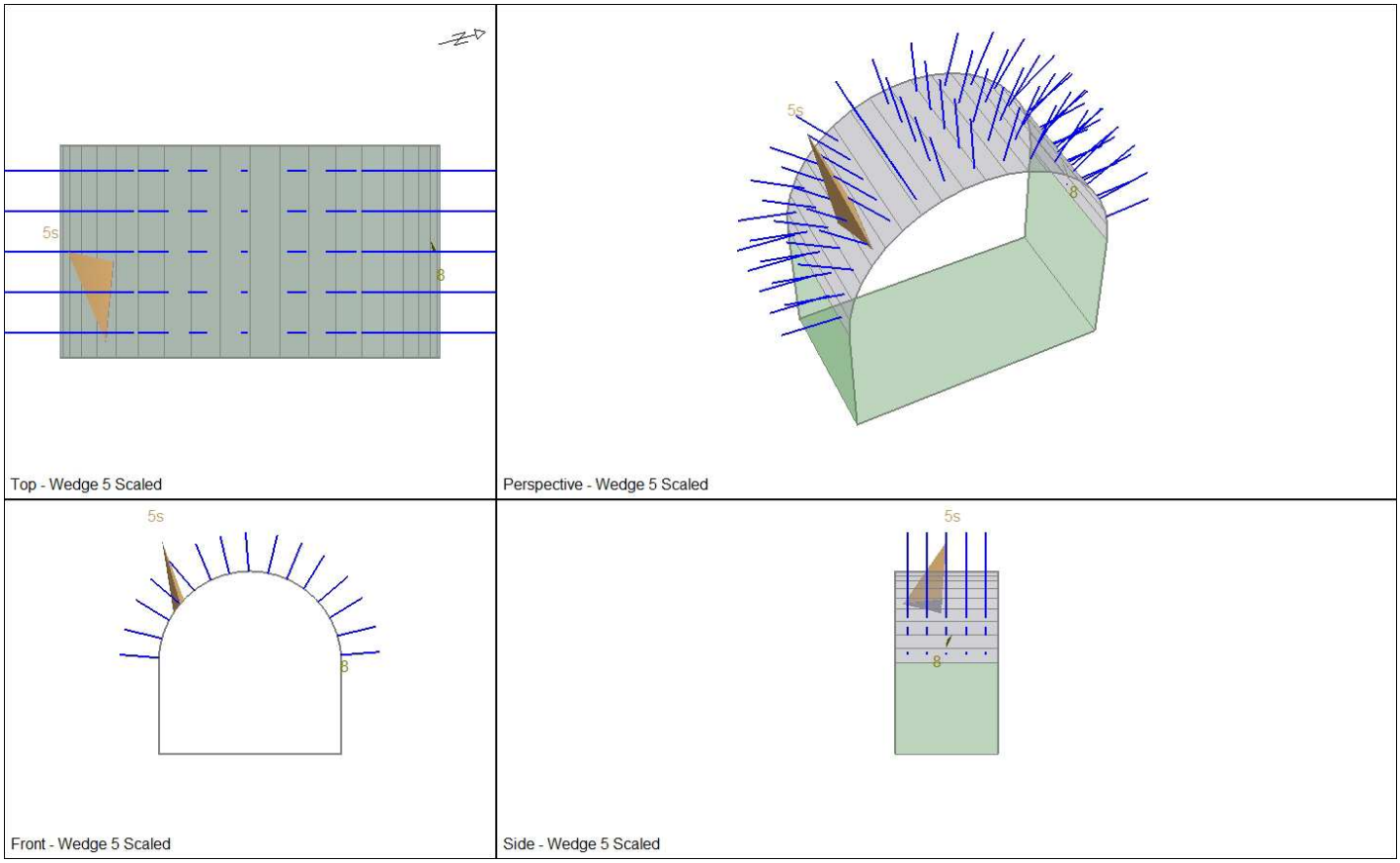
CAMERA DI FRANTUMAZIONE
Sistemi K2, K3 e S'



Le sigle dei tetraedri riportate negli schemi corrispondono a quelle poste tra parentesi quadre nell'elenco sottostante. Il suffisso s indica che le dimensioni del tetraedro sono state scalate in funzione dei valori di persistenza misurati.

Roof wedge [6] Factor of Safety: 0.099 Wedge Volume: 1.769 m3 Apex Height: 3.63 m Sliding Mode: wedge sliding on joint 3 Right wedge [7] Factor of Safety: 0.114 Wedge Volume: 0.002 m3 Apex Height: 0.04 m Sliding Mode: wedge sliding on joint	Near End wedge [9] Factor of Safety: 0.166 Wedge Volume: 0.075 m3 Apex Height: 0.27 m Sliding Mode: wedge sliding along line of intersection of joints 3 and 5 Far End wedge [10] Factor of Safety: 2.576 Wedge Volume: 0.075 m3 Apex Height: 0.27 m Sliding Mode: wedge sliding along line of intersection of joints 2 and 3

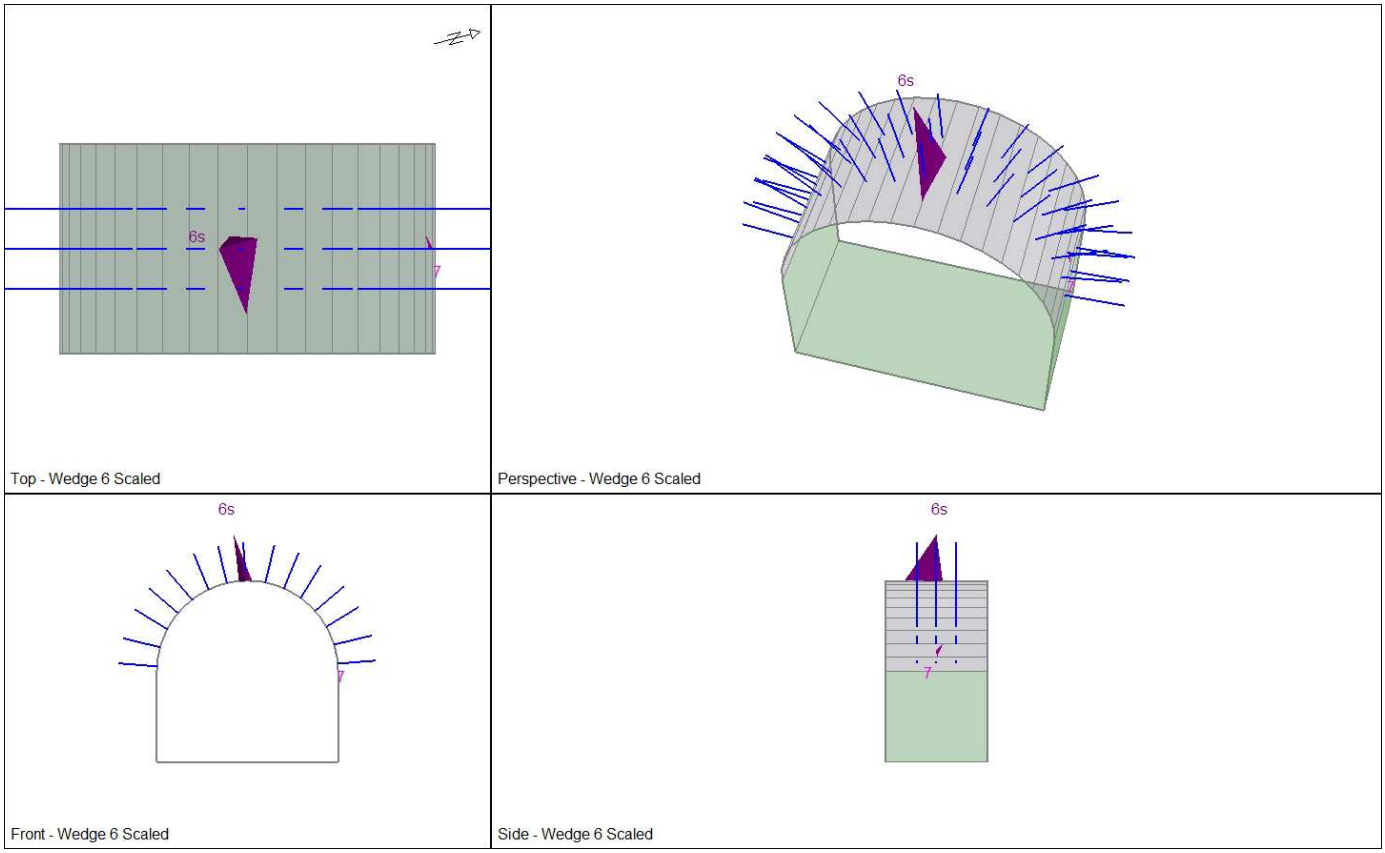
CAMERA DI FRANTUMAZIONE
Sistemi K2, K3 e S
Verifiche di stabilità con chiodatura e rivestimento di shotcrete



Le sigle dei tetraedri riportate negli schemi corrispondono a quelle poste tra parentesi quadre nell'elenco sottostante. Il suffisso s indica che le dimensioni del tetraedro sono state scalate in funzione dei valori di persistenza misurati.

Upper Left wedge [5]	Upper Right wedge [8]
Factor of Safety: 9.011	Factor of Safety: 135.880
Wedge Volume: 2.558 m3	Wedge Volume: 0.001 m3
Apex Height: 4.50 m	Apex Height: 0.03 m
Sliding Mode: wedge sliding along line of intersection of joints 3 and 4	Sliding Mode: falling wedge

CAMERA DI FRANTUMAZIONE
Sistemi K2, K3 e S'
Verifiche di stabilità con chiodatura e rivestimento di shotcrete



Le sigle dei tetraedri riportate negli schemi corrispondono a quelle poste tra parentesi quadre nell'elenco sottostante. Il suffisso s indica che le dimensioni del tetraedro sono state scalate in funzione dei valori di persistenza misurati.

Roof wedge [6]	Upper Right wedge [7]
Factor of Safety: 10.857	Factor of Safety: 104.786
Wedge Volume: 1.769 m3	Wedge Volume: 0.002 m3
Apex Height: 3.63 m	Apex Height: 0.04 m
Sliding Mode: wedge sliding on joint 3	Sliding Mode: falling wedge