

LIASON LYON - TURIN / COLLEGAMENTO TORINO - LIONE

Partie commune franco-italienne
Section transfrontalière

Parte comune italo-francese
Sezione transfrontaliera

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

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

CUP C11J05000030001 – PROGETTO DEFINITIVO

TUNNEL DE BASE – TUNNEL DI BASE
SITE DE SECURITE DE CLAREA – AREA DI SICUREZZA DI CLAREA
DIMENSIONNEMENT – DIMENSIONAMENTO

RAPPORT TECHNIQUE ET DE CALCUL DES SOUTÈNEMENTS – RELAZIONE TECNICA E DI
CALCOLO DEI SOSTEGNI

Indice	Date/ Data	Modifications / Modifiche	Etabli par / Concepito da	Vérifié par / Controllato da	Autorisé par / Autorizzato da
0-B	2013-2014	Première diffusion / Prima emissione Révision suite aux commentaires de LTF/ Revisione a seguito dei commenti di LTF Mise au statut AP / Messa allo stato AP	F.MEMMI (AMB) D.FLOREANI (AMB)	M. RUSSO C. SALOT C.OGNIBENE	L. CHANTRON M. PANTALEO C. OGNIBENE
C	15.09.2016	Première émission PRV – Révision générale des calculs / Prima emissione PRV – revisione generale dei calcoli	M. JANUTOLO (BG) G. QUESTI (BG) C. SALOT (BG)	F. MAGNORFI C. OGNIBENE	L. CHANTRON A. MORDASINI
D	23.12.2016	Révision suite aux commentaires de TELT/ Revisione a seguito dei commenti di TELT	M. JANUTOLO (BG) G. QUESTI (BG) C. SALOT (BG)	F. MAGNORFI C. OGNIBENE	L. CHANTRON A. MORDASINI
E	16.03.2017	Révision suite aux commentaires de TELT et passage au statut AP/ Revisione a seguito commenti TELT e passaggio allo stato AP	M. JANUTOLO (BG) G. QUESTI (BG) C. SALOT (BG)	F. MAGNORFI C. OGNIBENE	L. CHANTRON A. MORDASINI

COD E DOC	P	R	V	C	3	A	T	S	3	3	7	3	0	E
	Phase / Fase			Sigle étude / Sigla			Émetteur / Emittente			Numero			Indice	

A	P	N	O	T
Statut / Stato		Type / Tipo		

ADRESSE GED INDIRIZZO GED	C3A	//	//	26	46	20	10	01
------------------------------	------------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

ECHELLE / SCALA



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

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



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

SOMMAIRE / INDICE

1. INTRODUZIONE	10
1.1 L'AREA DI SICUREZZA DI CLAREA	10
1.2 IPOTESI DI BASE E VARIAZIONI RISPETTO AL PR	10
2. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	11
2.1 QUADRO NORMATIVO DI RIFERIMENTO.....	11
2.2 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	11
3. SINTESI DELLE CONDIZIONI ATTESE IN SITO	13
3.1 GEOLOGIA/GEOMECCANICA	13
3.2 IDROGEOLOGIA	14
3.3 COMPORTAMENTO ALLO SCAVO.....	14
4. SEZIONI TIPO DI SOSTEGNO.....	15
4.1 TIPOLOGIE DI SOSTEGNO	15
4.2 CARATTERISTICHE DEI MATERIALI	17
5. ANALISI GEOTECNICA.....	18
5.1 DEFINIZIONE DELLA FILOSOFIA DI CALCOLO.....	18
5.2 PARAMETRI GEOMECCANICI.....	22
5.3 DESCRIZIONE DEL MODELLO NUMERICO	24
6. ANALISI DEL COMPORTAMENTO DELL'AMMASSO ROCCIOSO.....	24
7. VERIFICA DEL SOSTEGNO NELL' AMMASSO ROCCIOSO DI BUONA QUALITÀ (GSI=60/65).....	26
7.1 METODO DI CONVERGENZA-CONFINAMENTO.....	26
7.2 ANALISI NUMERICA FEM IN 2D.....	28
7.2.1 Sezione A-A, tipo di sostegno S1, GSI=65	31
7.2.2 Sezione B-B, tipo di sostegno S1, GSI=65.....	34
7.2.3 Sezione E-E, tipo di sostegno S1, GSI=65	38
7.2.4 Sezione H-H, tipo di sostegno S1, GSI=65	42
7.2.5 Sezione R-R, tipo di sostegno S1, GSI=65.....	46
7.2.6 Sezione I-I, tipo di sostegno S1, GSI=65	51
7.2.7 Sezione A-A, tipo di sostegno S2, GSI=60	51
7.2.8 Sezione B-B, tipo di sostegno S2, GSI=60.....	55
7.2.9 Sezione E-E, tipo di sostegno S2, GSI=60	60
7.2.10 Sezione H-H, tipo di sostegno S2, GSI=60	65
7.2.11 Sezione I-I, tipo di sostegno S2, GSI=60	69
7.2.12 Sezione R-R, tipo di sostegno S2, GSI=60.....	69
7.2.13 Sezione A-A, tipo di sostegno S4, GSI=65	74
7.2.14 Sezione B-B, tipo di sostegno S4, GSI=65.....	82
7.2.15 Sezione B-B, tipo di sostegno S3, GSI=65.....	90
7.2.16 Sezione E-E, tipo di sostegno S4, GSI=65	99

7.2.17	Sezione H-H, tipo di sostegno S4, GSI=65	105
7.2.18	Sezione R-R, tipo di sostegno S4, GSI=65	111
7.2.19	Sezione I-I, tipo di sostegno S4, GSI=65	115
8.	PARAMETRI EQUIVALENTI PER L'AMMASSO ROCCIOSO MOLTO FRATTURATO.....	121
9.	VERIFICA DEL SOSTEGNO NELL'AMMASSO ROCCIOSO MOLTO FRATTURATO.....	121
9.1	METODO DI CONVERGENZA-CONFINAMENTO.....	121
9.2	ANALISI NUMERICA FEM 2D	122
9.2.1	Sezione tipo A-A, tipo di sostegno S3, GSI=41	123
9.2.2	Sezione tipo E-E, tipo di sostegno S3, GSI=41	128
9.2.3	Sezione tipo I-I, tipo di sostegno S3, GSI=37	134
9.3	VERIFICA DELLA STABILITÀ DEL FRONTE DI SCAVO	140
10.	RIPARTIZIONE DELLE SEZIONI TIPO.....	144
11.	CONCLUSIONI	145
	ALLEGATI.....	147
	ALLEGATO 1: CURVE CARATTERISTICHE DI AMMASSO E SOSTEGNO.....	147
	ALLEGATO 2: CURVE CARATTERISTICHE GSI EQUIVALENTE	159
	ALLEGATO 3: DISTRIBUZIONE DELLE SEZIONI TIPO NELL'AREA DI SICUREZZA IN FZ. DELLA GEOMECCANICA E DEL RITORNO DI ESPERIENZA DEL CUNICOLO DELLA MADDALENA.....	161
	ALLEGATO 4: ESTRATTO DELLA NORMA SVIZZERA SIA 198 (2004).....	162

LISTE DES FIGURES / INDICE DELLE FIGURE

Figura 1:	Configurazione planimetrica dell'area di sicurezza.....	16
Figura 2:	Riassunto delle sezioni "medie"	19
Figura 3:	Linee caratteristiche, esempio sezione A-A, sostegno S1	27
Figura 4:	Fasi di calcolo sezione A-A	29
Figura 5:	Diagramma dei momenti sezione A-A, sostegno S1	31
Figura 6:	Diagramma degli sforzi normali sezione A-A, sostegno S1	31
Figura 7:	Diagramma d'interazione 20 cm di calcestruzzo proiettato	32
Figura 8:	Vettori di spostamento sezione A-A, sostegno S1	33
Figura 9:	Spostamenti assoluti sezione A-A, sostegno S1	33
Figura 10:	Zone plastiche "Stress Level" A-A, sostegno S1	34
Figura 11:	Diagramma dei momenti sezione B-B, sostegno S1.....	35
Figura 12:	Diagramma degli sforzi normali sezione B-B, sostegno S1.....	35
Figura 13:	Diagramma d'interazione 25 cm di calcestruzzo proiettato	36
Figura 14:	Vettori di spostamento sezione B-B, sostegno S1.....	37
Figura 15:	Spostamenti assoluti sezione B-B, sostegno S1	37
Figura 16:	Zone plastiche "Stress Level" B-B, sostegno S1.....	38
Figura 17:	Diagramma dei momenti sezione E-E, sostegno S1.....	39

Figura 18: Diagramma sforzi normali sezione E-E, sostegno S1	39
Figura 19: Diagramma sforzi normali nei bulloni sezione E-E, sostegno S1	40
Figura 20: Vettori di spostamento sezione E-E, sostegno S1	40
Figura 21: Spostamenti assoluti sezione E-E, sostegno S1	41
Figura 22: Zone plastiche "Stress Level" E-E, sostegno S1	41
Figura 23: Diagramma dei momenti sezione H-H, sostegno S1	42
Figura 24: Diagramma degli sforzi normali sezione H-H, sostegno S1	43
Figura 25: Diagramma d'interazione 5 cm di calcestruzzo proiettato	43
Figura 26: Vettori di spostamento sezione H-H, sostegno S1	44
Figura 27: Spostamenti assoluti sezione H-H, sostegno S1	45
Figura 28: Zone plastiche "Stress Level" H-H, sostegno S1	45
Figura 29: Diagramma dei momenti sezione R-R, sostegno S1	46
Figura 30: Diagramma degli sforzi normali sezione R-R, sostegno S1	47
Figura 31: Diagramma d'interazione 5 cm di calcestruzzo proiettato	48
Figura 32: Diagramma degli sforzi normali nei bulloni	49
Figura 33: Vettori di spostamento sezione R-R, sostegno S1	50
Figura 34: Spostamenti assoluti sezione R-R, sostegno S1	50
Figura 35: Zone plastiche "Stress Level" R-R, sostegno S1	51
Figura 36: Diagramma dei momenti sezione A-A, sostegno S2	52
Figura 37: Diagramma degli sforzi normali sezione A-A, sostegno S2	52
Figura 38: Diagramma d'interazione 15 cm di calcestruzzo proiettato	53
Figura 39: Vettori di spostamento sezione A-A, sostegno S2	54
Figura 40: Spostamenti assoluti sezione A-A, sostegno S2	54
Figura 41: Zone plastiche "Stress Level" A-A, sostegno S2	55
Figura 42: Diagramma dei momenti sezione B-B, sostegno S2	56
Figura 43: Diagramma degli sforzi normali sezione B-B, sostegno S2	56
Figura 44: Diagramma d'interazione 33 cm di calcestruzzo proiettato	57
Figura 45: Diagramma d'interazione centine reticolari 4G 180/22	58
Figura 46: Vettori di spostamento sezione B-B, sostegno S2	59
Figura 47: Spostamenti assoluti sezione B-B, sostegno S2	59
Figura 48: Zone plastiche "Stress Level" B-B, sostegno S2	60
Figura 49: Diagramma dei momenti sezione E-E, sostegno S2	60
Figura 50: Diagramma degli sforzi normali sezione E-E, sostegno S2	61
Figura 51: Diagramma di interazione di 20 cm di cls proiettato	62
Figura 52: Diagramma degli sforzi normali nei bulloni	63
Figura 53: Vettori di spostamento sezione E-E, sostegno S2	64
Figura 54: Spostamenti assoluti sezione E-E, sostegno S2	64
Figura 55: Zone plastiche "Stress Level" E-E, sostegno S2	65
Figura 56: Diagramma dei momenti sezione H-H, sostegno S2	66
Figura 57: Diagramma degli sforzi normali sezione H-H, sostegno S2	66
Figura 58: Diagramma d'interazione 5 cm di calcestruzzo proiettato	67
Figura 59: Diagramma degli sforzi normali sezione H-H, sostegno S2	67
Figura 60: Vettori di spostamento sezione H-H, sostegno S2	68
Figura 61: Spostamenti assoluti sezione H-H, sostegno S2	68
Figura 62: Zone plastiche "Stress Level" H-H, sostegno S2	69
Figura 63: Diagramma dei momenti sezione R-R, sostegno S2	70
Figura 64: Diagramma degli sforzi normali sezione R-R, sostegno S2	70
Figura 65: Diagramma di interazione di 20 cm di cls proiettato	71
Figura 66: Diagramma degli sforzi normali nei bulloni	72
Figura 67: Vettori di spostamento sezione R-R, sostegno S2	72

Figura 68: Spostamenti assoluti sezione R-R, sostegno S2	73
Figura 69: Zone plastiche "Stress Level" R-R, sostegno S2	74
Figura 70: Diagramma dei momenti sezione A-A, sostegno S4 L1	75
Figura 71: Diagramma degli sforzi normali sezione A-A, sostegno S4 L1	75
Figura 72: Diagramma d'interazione 10 cm di calcestruzzo proiettato	76
Figura 73: Diagramma dei momenti sezione A-A, sostegno S4 L2+L1	77
Figura 74: Diagramma degli sforzi normali sezione A-A, sostegno S4 L2+L1	77
Figura 75: Diagramma d'interazione 25 cm di calcestruzzo proiettato	78
Figura 76: Diagramma degli sforzi normali nei bulloni	79
Figura 77: Zone plastiche nella centina sezione A-A, sostegno S4	80
Figura 78: Vettori di spostamento sezione A-A, sostegno S4	80
Figura 79: Spostamenti assoluti sezione A-A, sostegno S4	81
Figura 80: Zone plastiche "Stress Level" A-A, sostegno S4	81
Figura 81: Diagramma dei momenti sezione B-B, sostegno S4 L1	82
Figura 82: Diagramma degli sforzi normali sezione B-B, sostegno S4 L1	83
Figura 83: Diagramma d'interazione 15 cm di calcestruzzo proiettato	84
Figura 84: Diagramma dei momenti sezione B-B, sostegno S4 L1+L2	85
Figura 85: Diagramma degli sforzi normali sezione B-B, sostegno S4 L1+L2	85
Figura 86: Diagramma d'interazione 25 cm di calcestruzzo proiettato	86
Figura 87: Sforzi nei bulloni. In blu sono cerchiati i bulloni la cui verifica non è soddisfatta	87
Figura 88: Zone plastiche nella centina sezione B-B, sostegno S4	88
Figura 89: Vettori di spostamento sezione B-B, sostegno S4	88
Figura 90: Spostamenti assoluti sezione B-B, sostegno S4	89
Figura 91: Zone plastiche "Stress Level" B-B, sostegno S4	89
Figura 92: Diagramma dei momenti sezione B-B, sostegno S3 L1	91
Figura 93: Diagramma degli sforzi normali sezione B-B, sostegno S3 L1	91
Figura 94: Diagramma d'interazione 32 cm di calcestruzzo proiettato	93
Figura 95: Diagramma d'interazione centina HEB 220	94
Figura 96: Diagramma dei momenti sezione B-B, sostegno S3 L1+L2	95
Figura 97: Diagramma degli sforzi normali sezione B-B, sostegno S3 L1+L2	95
Figura 98: Diagramma d'interazione 40 cm di calcestruzzo proiettato	96
Figura 99: Diagramma d'interazione centina HEB 220	97
Figura 100: Vettori di spostamento sezione B-B, sostegno S3	98
Figura 101: Spostamenti assoluti sezione B-B, sostegno S3	98
Figura 102: Zone plastiche "Stress Level" B-B, sostegno S3	99
Figura 103: Diagramma dei momenti sezione E-E, sostegno S4	100
Figura 104: Diagramma degli sforzi normali sezione E-E, sostegno S4	100
Figura 105: Diagramma di interazione di 10 cm di cls proiettato	101
Figura 106: Diagramma degli sforzi normali nei bulloni	102
Figura 107: Zone plastiche nella centina sezione E-E, sostegno S4	103
Figura 108: Vettori di spostamento sezione E-E, sostegno S4	103
Figura 109: Spostamenti assoluti sezione E-E, sostegno S4	104
Figura 110: Zone plastiche "Stress Level" E-E, sostegno S4	104
Figura 111: Diagramma dei momenti sezione H-H, sostegno S4 L1+L2	105
Figura 112: Diagramma degli sforzi normali sezione H-H, sostegno S4 L1+L2	106
Figura 113: Diagramma d'interazione 20 cm di calcestruzzo proiettato	107
Figura 114: Zone plastiche nella centina sezione H-H, sostegno S4	109
Figura 115: Vettori di spostamento sezione H-H, sostegno S4	109
Figura 116: Spostamenti assoluti sezione H-H, sostegno S4	110

Figura 117: Zone plastiche "Stress Level" H-H, sostegno S4	110
Figura 118: Diagramma dei momenti sezione R-R, sostegno S4	111
Figura 119: Diagramma degli sforzi normali sezione R-R, sostegno S4	112
Figura 120: Diagramma di interazione di 30 cm di cls proiettato	112
Figura 121: Diagramma degli sforzi normali nei bulloni	113
Figura 122: Zone plastiche nella centina sezione R-R, sostegno S4	113
Figura 123: Vettori di spostamento sezione R-R, sostegno S4	114
Figura 124: Spostamenti assoluti sezione R-R, sostegno S4	114
Figura 125: Zone plastiche "Stress Level" E-E, sostegno S4	115
Figura 126: Diagramma dei momenti sezione I-I, sostegno S4	116
Figura 127: Diagramma degli sforzi normali sezione I-I, sostegno S4	116
Figura 128: Diagramma d'interazione 5 cm di calcestruzzo proiettato	117
Figura 129: Diagramma degli sforzi normali nei bulloni	118
Figura 130: Zone plastiche nella centina sezione I-I, sostegno S4	119
Figura 131: Vettori di spostamento sezione I-I, sostegno S4	119
Figura 132: Spostamenti assoluti sezione I-I, sostegno S4	120
Figura 133: Zone plastiche "Stress Level" I-I, sostegno S4	120
Figura 134: Diagramma dei momenti sezione A-A, sostegno S3	123
Figura 135: Diagramma degli sforzi normali sezione A-A, sostegno S3	124
Figura 136: Diagramma di interazione di 40 cm di cls proiettato	125
Figura 137: Diagramma di interazione della centina HEB 220	126
Figura 138: Vettori di spostamento sezione A-A, sostegno S4	127
Figura 139: Spostamenti assoluti sezione A-A, sostegno S4	127
Figura 140: Zone plastiche "Stress Level" A-A, sostegno S4	128
Figura 141: Diagramma dei momenti sezione E-E, sostegno S3	129
Figura 142: Diagramma degli sforzi normali sezione E-E, sostegno S3	129
Figura 143: Diagramma di interazione di 28 cm di cls proiettato	131
Figura 144: Diagramma d'interazione centina HEB 180	132
Figura 145: Vettori di spostamento sezione E-E, sostegno S3	133
Figura 146: Spostamenti assoluti sezione E-E, sostegno S3	133
Figura 147: Zone plastiche "Stress Level" E-E, sostegno S3	134
Figura 148: Diagramma dei momenti sezione I-I, sostegno S3	135
Figura 149: Diagramma degli sforzi normali sezione I-I, sostegno S3	135
Figura 150: Diagramma di interazione di 25 cm di cls proiettato	137
Figura 151: Diagramma d'interazione centina HEB 140	138
Figura 152: Vettori di spostamento sezione I-I, sostegno S3	139
Figura 153: Spostamenti assoluti sezione I-I, sostegno S3	139
Figura 154: Zone plastiche "Stress Level" I-I, sostegno S3	140
Figura 155: Modello di calcolo della pressione sul fronte di scavo del tunnel	140
Figura 156: Schema delle forze che agiscono sul fronte	141
Figura 157: Curve caratteristiche sezione A-A, sostegno S1	147
Figura 158: Curve caratteristiche sezione B-B, sostegno S1	148
Figura 159: Curve caratteristiche sezione E-E, sostegno S1	148
Figura 160: Curve caratteristiche sezione H-H, sostegno S1	149
Figura 161: Curve caratteristiche sezione I-I, sostegno S1	149
Figura 162: Curve caratteristiche sezione R-R, sostegno S1	150
Figura 163: Curve caratteristiche sezione A-A, sostegno S2	150
Figura 164: Curve caratteristiche sezione B-B, sostegno S2	151
Figura 165: Curve caratteristiche sezione E-E, sostegno S2	151
Figura 166: Curve caratteristiche sezione H-H, sostegno S2	152

Figura 167: Curve caratteristiche sezione I-I, sostegno S2	152
Figura 168: Curve caratteristiche sezione R-R, sostegno S2	153
Figura 169: Curve caratteristiche sezione A-A, sostegno S3	153
Figura 170: Curve caratteristiche sezione B-B, sostegno S3	154
Figura 171: Curve caratteristiche sezione E-E, sostegno S3	154
Figura 172: Curve caratteristiche sezione I-I, sostegno S3	155
Figura 173: Curve caratteristiche sezione A-A, sostegno S4	155
Figura 174: Curve caratteristiche sezione B-B, sostegno S4	156
Figura 175: Curve caratteristiche sezione E-E, sostegno S4	156
Figura 176: Curve caratteristiche sezione H-H, sostegno S4	157
Figura 177: Curve caratteristiche sezione I-I, sostegno S4	157
Figura 178: Curve caratteristiche sezione R-R, sostegno S4	158
Figura 179: Curve caratteristiche sezione A-A, sostegno S3	159
Figura 180: Curve caratteristiche sezione E-E, sostegno S3	159
Figura 181: Curve caratteristiche sezione I-I, sostegno S3	160

LISTE DES TABLEAUX / INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1 – Parametri per i micascisti di Clarea (unità UGD7)	13
Tabella 2 – Caratteristiche delle sezioni di scavo	15
Tabella 3 – Calcoli effettuati	22
Tabella 4 – Parametri di calcolo utilizzati nei modelli 2D.....	23
Tabella 5 – Caratteristiche dei giunti utilizzate nel modello 2D multilaminare (S4).....	24
Tabella 6 – Spostamenti attesi in condizioni intrinseche	26
Tabella 7 – Risultati dell'analisi delle linee caratteristiche	28
Tabella 8 – Sforzi nelle sezioni critiche, sezione A-A, sostegno S1	32
Tabella 9 – Sforzi nelle sezioni critiche, sezione B-B, sostegno S1	36
Tabella 10 – Sforzi nelle sezioni critiche, sezione H-H, sostegno S1	43
Tabella 11 – Sforzi nelle sezioni critiche, sezione R-R, sostegno S1	47
Tabella 12 – Sforzi nelle sezioni critiche, sezione A-A, sostegno S2.....	53
Tabella 13 – Sforzi nelle sezioni critiche della sezione mista, sezione B-B, sostegno S2.....	57
Tabella 14 – Sforzi nelle sezioni critiche della sezione in calcestruzzo	57
Tabella 15 – Sforzi nelle sezioni critiche della sezione in acciaio	57
Tabella 16 – Sforzi nelle sezioni critiche, sezione E-E, sostegno S2.....	61
Tabella 17 – Sforzi nelle sezioni critiche, sezione H-H, sostegno S2.....	67
Tabella 18 – Sforzi nelle sezioni critiche, sezione R-R, sostegno S2	70
Tabella 19 – Sforzi nella sezione critica, sezione A-A, sostegno S4 L1.....	76
Tabella 20 – Sforzi nella sezione critica, sezione A-A, sostegno S4 L2+L1	78
Tabella 21 – Sforzi nella sezione critica, sezione B-B, sostegno S4 L1	83
Tabella 22 – Sforzi nella sezione critica, sezione B-B, sostegno S4 L2+L1	86
Tabella 23 – Sforzi nella sezione critica della sezione mista, sezione B-B, sostegno S3 L1..	92
Tabella 24 – Sforzi nella sezione critica della sezione in calcestruzzo.....	92
Tabella 25 – Sforzi nella sezione critica della sezione in acciaio	92
Tabella 26 – Sforzi nella sezione critica della sezione mista, sezione B-B, sostegno S3 L2+L1	96
Tabella 27 – Sforzi nella sezione critica della sezione in calcestruzzo.....	96
Tabella 28 – Sforzi nella sezione critica della sezione in acciaio	96
Tabella 29 – Sforzi nelle sezioni critiche, sezione E-E, sostegno S4.....	101
Tabella 30 – Sforzi nella sezione critica, sezione H-H, sostegno S4 L2+L1	107

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

Tabella 31 – Sforzi nelle sezioni critiche, sezione R-R, sostegno S4	112
Tabella 32 – Sforzi nella sezione critica, sezione I-I, sostegno S4	117
Tabella 33 –GSI equivalente per i sostegni S3.....	121
Tabella 34 – Parametri dell'ammasso roccioso equivalente	121
Tabella 35 – Risultati dell'analisi delle linee caratteristiche	122
Tabella 36 – Sforzi nelle sezioni critiche, sezione A-A, sostegno S3.....	124
Tabella 37 – Sforzi nelle sezioni critiche di cls, sezione A-A, sostegno S3	124
Tabella 38 – Sforzi nelle sezioni critiche della centina, sezione A-A, sostegno S3	124
Tabella 39 – Sforzi nelle sezioni critiche, sezione E-E, sostegno S3.....	130
Tabella 40 – Sforzi nelle sezioni critiche di cls, sezione E-E, sostegno S3	130
Tabella 41 – Sforzi nelle sezioni critiche della centina, sezione E-E, sostegno S3	130
Tabella 42 – Sforzi nelle sezioni critiche, sezione I-I, sostegno S3	136
Tabella 43 – Sforzi nelle sezioni critiche di cls, sezione I-I, sostegno S3	136
Tabella 44 – Sforzi nelle sezioni critiche della centina, sezione I-I, sostegno S3.....	136
Tabella 45 – Criteri di applicazione delle sezioni tipo.....	145

RESUME / RIASSUNTO

Le présent rapport a pour objectif le calcul du soutènement du site de sécurité de Clarea.

Le site de sécurité de Clarea présente une longueur totale d'environ 840 m et son axe se situe au Pk 52+164.5. Il est placé au pied de la galerie de connexion 1 (qui le relie à la galerie Maddalena 1) et de la galerie de connexion 2 (qui le relie à la galerie Maddalena 2).

Afin de rationaliser les calculs, le comportement du massif rocheux a été analysé en conditions intrinsèques (c.à.d. sans soutènement) et en présence du soutènement, selon la classification géomécanique des massifs rocheux du PRV-PRF et le retour d'expérience de la galerie de reconnaissance de Maddalena. Ces calculs tiennent compte de la géométrie des profils d'excavation, du phasage de l'excavation et de la pose du soutènement.

Les sollicitations ont été déterminées pour les éléments du système de soutènement par des calculs aux éléments finis sur la base desquels les vérifications selon les NTC 2008 ont été réalisées.

La presente relazione ha come scopo il calcolo del sostegno dell'area di sicurezza di Clarea.

L'area di sicurezza di Clarea presenta una lunghezza totale di circa 840 m ed il suo asse è situato alla Pk 52+164.5. Si trova al piede della galleria di connessione 1 (che la collega alla galleria Maddalena 1) e della galleria di connessione 2 (che la collega alla galleria Maddalena 2).

In un'ottica di razionalizzazione del calcolo, tenendo in conto l'effettiva geometria delle sezioni di scavo, il fasaggio dello scavo e della posa in opera del sostegno si è analizzato il comportamento dell'ammasso roccioso in condizioni intrinseche (ovvero senza sostegno) ed in presenza del sostegno, alla luce della classificazione geomeccanica degli ammassi rocciosi di PRV-PRF e del ritorno di esperienza del cunicolo esplorativo della Maddalena.

Mediante il calcolo agli elementi finiti sono state calcolate le sollecitazioni per gli elementi del sistema di sostegno sulla base delle quali sono state condotte le verifiche secondo le NTC 2008.

1. Introduzione

1.1 L'area di sicurezza di Clarea

Per ragioni di sicurezza lungo il Tunnel di Base (TdB) sono previste tre aree di sicurezza: La Praz, Modane e Clarea. Queste aree forniscono un accesso al Tunnel di Base sia per il soccorso che per la manutenzione. Inoltre le aree di sicurezza permettono l'accoglienza dei viaggiatori in un luogo sicuro (adibito anche alla prestazione delle prime cure). Le aree sono stati progettate per la gestione degli incidenti per tutti i tipi di treno che circoleranno lungo la nuova linea Torino - Lione.

La geometria delle aree di sicurezza è funzione delle esigenze tecniche, funzionali e di sicurezza (antincendio, intervento dei mezzi di soccorso, accesso dei veicoli bimodali, ventilazione e altre installazioni). I volumi necessari per il funzionamento in fase d'esercizio sono definiti in accordo con i volumi necessari per la logistica di cantiere e la progettazione delle aree tiene conto anche del fasaggio di costruzione e delle caratteristiche geomeccaniche degli ammassi rocciosi nell'area di progetto.

L'asse dell'area (ovvero l'asse della sala di accoglienza) è situato alla pk 52+164.5; l'area si estende per una lunghezza di circa 405 m verso Ovest e circa 435 m verso Est. La copertura varia da 1020 m a 1340 m circa.

L'interasse tra le gallerie in linea è pari a 80 m per il tratto in rettilineo. Si riduce poi nel tratto in raccordo parabolico ed è pari a 79.3 m nell'asse della caverna tecnica.

1.2 Ipotesi di base e variazioni rispetto al PR

Si elencano di seguito le ipotesi alla base della presente relazione tecnica e di calcolo e le variazioni rispetto al PR:

- **Geometria:** la variante che fa seguito alla prescrizione n° 235 del CIPE porta ad un certo numero di modifiche geometriche rispetto al PR come illustrato nella relazione [7]. Tuttavia, fatta salva la leggera modifica alla galleria intertubo (e sala d'accoglienza), le modifiche hanno riguardato il layout e non la forma generale delle sezioni.
- **Geologia e geomeccanica:** si è fatto riferimento al ritorno di esperienza del cunicolo esplorativo della Maddalena (cfr. doc. [4] e [5]), alla sezione geomeccanica dell'area di sicurezza di Clarea (cfr doc. [6]) e all'ultima classificazione geologica e geomeccanica di PRV/PRF (cfr. doc.[1] - [3]). Secondo tali documenti l'area di sicurezza si inserisce all'interno del complesso di Clarea, costituito da micascisti e gneiss minuti. Al suo interno si possono trovare zone fratturate e alcune faglie e zone tettonizzate minori, di spessori massimi decimetrici. Generalmente queste strutture sembrano sviluppare principalmente roccia di faglia costituita da cataclasite e solo limitatamente gouge argilloso. L'ammasso roccioso mostra in generale buone caratteristiche geomeccaniche, che si traducono, secondo la classificazione di Beniaowski, nelle classi RMR II e III (con prevalenza di classe III). Solo in corrispondenza delle zone fratturate/di faglia si trova un RMR di classe IV. Il modello geologico/geomeccanico integra il ritorno di esperienza del cunicolo esplorativo della Maddalena che si trova in media a circa 45 m al di sopra dell'area di sicurezza. Si è peraltro tenuto conto per la giustificazione ed il calcolo delle sezioni tipo della scistosità suborizzontale, dello stato tensionale nell'area e dei fenomeni di rilascio in calotta osservati durante lo scavo del cunicolo.
- **Sezioni tipo di sostegno:** le sezioni tipo S1 e S2 sono state sostanzialmente mantenute invariate rispetto al PR. A seguito del ritorno di esperienza della Maddalena e del nuovo posizionamento dell'area di sicurezza, si sono cambiati gli interventi di sostegno previsti

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

per la sezione tipo S3 e si è definita ad hoc una nuova sezione tipo, la S4. Per maggiori dettagli si veda il § 4.1.

In questo quadro generale è stata quindi effettuata la verifica dei sostegni come descritto nel § 5.

2. Documenti di riferimento

2.1 Quadro normativo di riferimento

Il quadro normativo di riferimento è trattato nell'allegato 4.1 del Dossier Preliminare della Sicurezza (documento PRF_C1_0003_00-00-00_10-03).

2.2 Documenti di riferimento

Riferimento	Titolo documento	Codice documento
[1]	Profilo geomeccanico lato Italia	PRV_C3B_0103_00-03-03
[2]	Profilo geologico-geomeccanico in asse galleria 2/3	PRV_C3B_0005_26-19-01
[3]	Relazione geomeccanica di sintesi (lato Italia)	PRV_C3B_0100_00-03-03
[4]	Relazione ritorno di esperienza scavo cunicolo geognostico Maddalena	PRV_C3B_7200_26-48-01
[5]	Profilo geomeccanico as-built con applicazione delle sezioni tipo – Galleria Maddalena 1	PRV_C3B_7206_26-48-01
[6]	Sezione geomeccanica - area di sicurezza di Clarea	PRV_C3B_7205_26-48-01
[7]	Relazione tecnica	PRV_C3A_3700_26-46-10
[8]	Coupe A-A – Profil type A-S1	PR_C3A_3734_26-46-20
[9]	Coupe A-A – Profil type A-S1 – Details	PR_C3A_3735_26-46-20
[10]	Coupe A-A – Profil type A-S2	PRV_C3A_3736_26-46-20
[11]	Coupe A-A – Profil type A-S2 – Details	PRV_C3A_3737_26-46-20
[12]	Coupe A-A – Profil type A-S3	PRV_C3A_3738_26-46-20
[13]	Coupe A-A – Profil type A-S3 – Details	PRV_C3A_3739_26-46-20
[14]	Coupe A-A – Profil type A-S4	PRV_C3A_7494_26-46-20
[15]	Coupe A-A – Profil type A-S4 – Details	PRV_C3A_7495_26-46-20
[16]	Coupe B-B – Profil type B-S1	PR_C3A_3740_26-46-20
[17]	Coupe B-B – Profil type B-S1 – Details	PR_C3A_3741_26-46-20
[18]	Coupe B-B – Profil type B-S2	PRV_C3A_3742_26-46-20
[19]	Coupe B-B – Profil type B-S2 – Details	PRV_C3A_3743_26-46-20
[20]	Coupe B-B – Profil type B-S3	PRV_C3A_7496_26-46-20
[21]	Coupe B-B – Profil type B-S3 – Details	PRV_C3A_7497_26-46-20
[22]	Coupe B-B – Profil type B-S4	PRV_C3A_7498_26-46-20
[23]	Coupe B-B – Profil type B-S4 – Details	PRV_C3A_7499_26-46-20
[24]	Coupe C-C - Profil type C-S1	PRV_C3A_3744_26-46-20
[25]	Coupe C-C - Profil type C-S1 - Details	PR_C3A_3745_26-46-20
[26]	Coupe C-C - Profil type C-S2	PRV_C3A_3746_26-46-20
[27]	Coupe C-C - Profil type C-S2 - Details	PRV_C3A_3747_26-46-20
[28]	Coupe C-C - Profil type C-S3	PRV_C3A_3748_26-46-20
[29]	Coupe C-C - Profil type C-S3 - Details	PRV_C3A_3749_26-46-20
[30]	Coupe C-C - Profil type C-S4	PRV_C3A_7498_26-46-20
[31]	Coupe C-C - Profil type C-S4 - Details	PRV_C3A_7499_26-46-20
[32]	Coupe D-D - Profil type D-S1	PRV_C3A_3750_26-46-20
[33]	Coupe D-D - Profil type D-S1 - Details	PR_C3A_3751_26-46-20
[34]	Coupe D-D - Profil type D-S2	PRV_C3A_3752_26-46-20
[35]	Coupe D-D - Profil type D-S2 - Details	PRV_C3A_3753_26-46-20
[36]	Coupe D-D - Profil type D-S3	PRV_C3A_3754_26-46-20
[37]	Coupe D-D - Profil type D-S3 – Details	PRV_C3A_3755_26-46-20
[38]	Coupe D-D - Profil type D-S4	PRV_C3A_7506_26-46-20
[39]	Coupe D-D - Profil type D-S4 – Details	PRV_C3A_7507_26-46-20
[40]	Coupe E-E - Profil type E-S1	PRV_C3A_3756_26-46-20
[41]	Coupe E-E - Profil type E-S1 - Details	PRV_C3A_3757_26-46-20
[42]	Coupe E-E - Profil type E-S2	PRV_C3A_3758_26-46-20
[43]	Coupe E-E - Profil type E-S2 - Details	PRV_C3A_3759_26-46-20

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

[44]	Coupe E-E - Profil type E-S3	PRV_C3A_3760_26-46-20
[45]	Coupe E-E - Profil type E-S3 - Details	PRV_C3A_3761_26-46-20
[46]	Coupe E-E - Profil type E-S4	PRV_C3A_7508_26-46-20
[47]	Coupe E-E - Profil type E-S4 - Details	PRV_C3A_7509_26-46-20
[48]	Coupe F-F - Profil type F-S1	PR_C3A_3762_26-46-20
[49]	Coupe F-F - Profil type F-S1 - Details	PR_C3A_3763_26-46-20
[50]	Coupe F-F - Profil type F-S2	PRV_C3A_3764_26-46-20
[51]	Coupe F-F - Profil type F-S2 - Details	PRV_C3A_3765_26-46-20
[52]	Coupe F-F - Profil type F-S3	PRV_C3A_3766_26-46-20
[53]	Coupe F-F - Profil type F-S3 - Details	PRV_C3A_3767_26-46-20
[54]	Coupe F-F - Profil type F-S4	PRV_C3A_7511_26-46-20
[55]	Coupe F-F - Profil type F-S4 - Details	PRV_C3A_7512_26-46-20
[56]	Coupe G-G - Profil type G-S1	PR_C3A_3768_26-46-20
[57]	Coupe G-G - Profil type G-S1 - Details	PR_C3A_3769_26-46-20
[58]	Coupe G-G - Profil type G-S2	PRV_C3A_3770_26-46-20
[59]	Coupe G-G - Profil type G-S2 - Details	PRV_C3A_3771_26-46-20
[60]	Coupe G-G - Profil type G-S3	PRV_C3A_3772_26-46-20
[61]	Coupe G-G - Profil type G-S3 - Details	PRV_C3A_3773_26-46-20
[62]	Coupe G-G - Profil type G-S4	PRV_C3A_7513_26-46-20
[63]	Coupe G-G - Profil type G-S4 - Details	PRV_C3A_7514_26-46-20
[64]	Coupe H-H - Profil type H-S1	PR_C3A_3774_26-46-20
[65]	Coupe H-H - Profil type H-S1 - Details	PR_C3A_3775_26-46-20
[66]	Coupe H-H - Profil type H-S2	PR_C3A_3776_26-46-20
[67]	Coupe H-H - Profil type H-S2 - Details	PR_C3A_3777_26-46-20
[68]	Coupe H-H - Profil type H-S3	PRV_C3A_3778_26-46-20
[69]	Coupe H-H - Profil type H-S3 - Details	PRV_C3A_3779_26-46-20
[70]	Coupe H-H - Profil type H-S4	PRV_C3A_7515_26-46-20
[71]	Coupe H-H - Profil type H-S4 - Details	PRV_C3A_7516_26-46-20
[72]	Coupe I-I - Profil type I-S1	PR_C3A_3780_26-46-20
[73]	Coupe I-I - Profil type I-S1 - Details	PR_C3A_3781_26-46-20
[74]	Coupe I-I - Profil type I-S2	PR_C3A_3782_26-46-20
[75]	Coupe I-I - Profil type I-S2 - Details	PR_C3A_3783_26-46-20
[76]	Coupe I-I - Profil type I-S3	PRV_C3A_3784_26-46-20
[77]	Coupe I-I - Profil type I-S3 - Details	PRV_C3A_3785_26-46-20
[78]	Coupe I-I - Profil type I-S4	PRV_C3A_7558_26-46-20
[79]	Coupe I-I - Profil type I-S4 - Details	PRV_C3A_7559_26-46-20
[80]	Coupe J-J - Profil type J-S1	PR_C3A_3786_26-46-20
[81]	Coupe J-J - Profil type J-S1 - Details	PR_C3A_3787_26-46-20
[82]	Coupe J-J - Profil type J-S2	PR_C3A_3788_26-46-20
[83]	Coupe J-J - Profil type J-S2 - Details	PR_C3A_3789_26-46-20
[84]	Coupe J-J - Profil type J-S3	PRV_C3A_3790_26-46-20
[85]	Coupe J-J - Profil type J-S3 - Details	PRV_C3A_3791_26-46-20
[86]	Coupe J-J - Profil type J-S4	PRV_C3A_7560_26-46-20
[87]	Coupe J-J - Profil type J-S4 - Details	PRV_C3A_7561_26-46-20
[88]	Coupe P-P - Profil type P-S1	PR_C3A_3792_26-46-20
[89]	Coupe P-P - Profil type P-S1 - Details	PR_C3A_3793_26-46-20
[90]	Coupe P-P - Profil type P-S2	PR_C3A_3794_26-46-20
[91]	Coupe P-P - Profil type P-S2 - Details	PR_C3A_3795_26-46-20
[92]	Coupe P-P - Profil type P-S3	PRV_C3A_3796_26-46-20
[93]	Coupe P-P - Profil type P-S3 - Details	PRV_C3A_3797_26-46-20
[94]	Coupe P-P - Profil type P-S4	PRV_C3A_7562_26-46-20
[95]	Coupe P-P - Profil type P-S4 - Details	PRV_C3A_7563_26-46-20
[96]	Coupe R-R - Profil type R-S1	PRV_C3A_7589_26-46-20
[97]	Coupe R-R - Profil type R-S1 - Details	PRV_C3A_7590_26-46-20
[98]	Coupe R-R - Profil type R-S2	PRV_C3A_7591_26-46-20
[99]	Coupe R-R - Profil type R-S2 - Details	PRV_C3A_7592_26-46-20
[100]	Coupe R-R - Profil type R-S4	PRV_C3A_7593_26-46-20
[101]	Coupe R-R - Profil type R-S4 - Details	PRV_C3A_7594_26-46-20
[102]	Anagnostou G. and Kovari K. (2003): The stability of tunnels in grouted fault zones; IGT, ETH, vol. 220	-
[103]	Kaiser P., Maloney S., Vasak P., Wang G. (2009): Seismic hazard evaluation in underground construction. Keynote lecture, RaSiM7, Dalian, China.	-

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

[104]	Kaiser P., Diederichs M., Martin C., Sharp J., Steiner W. (2000): Underground works in hard rock tunneling and mining. GeoEng, Melbourne, Australia.	-
[105]	Hoek P., Diederichs M. (2006): Empirical estimation of rock mass modulus. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 203-215	-

3. Sintesi delle condizioni attese in sito

3.1 Geologia/Geomeccanica

L'area di sicurezza di Clarea (che si sviluppa nella sua globalità dalla Pk 51+700.9 BP alla Pk 52+598.2 BP) è situata all'interno del Complesso di Clarea, appartenente all'unità d'Ambin, caratterizzato da micascisti e gneiss minuti. Nei micascisti si trovano localmente intercalate masse allungate di metabasiti (anfiboliti). Si prevede di incontrare, all'interno dell'ammasso, zone fratturate ed alcune faglie e zone tettonizzate minori.

Secondo i documenti [2] e [6] in quest'area si può distinguere un'unica unità geologica e cioè il complesso di Clarea (CL). All'interno di quest'unità si trovano le tre unità geomeccaniche seguenti, descritte nella relazione [3]:

- Unità UGD(7), corrispondente ai micascisti e gneiss occhiadini di Clarea;
- Unità UGH1(22), corrispondente alle rocce molto fratturate;
- Unità UGJ(23), corrispondente alle rocce di faglia e carnirole.

L'indice GSI è indicato nel documento [6] ed è inoltre presente nel documento [5] relativamente al cunicolo della Maddalena. Il GSI si trova globalmente nel range 40-80, con valori in un'ampia maggioranza compresi nell'intervallo 60-70 (valore medio: 62).

L'analisi del ritorno di esperienza del cunicolo della Maddalena (doc. [4]) ha permesso sostanzialmente di confermare i parametri geomeccanici della classificazione geomeccanica generale (già definiti nel Progetto Definitivo Approvato) per il complesso di Clarea (unità UGD7). I valori medi di tali parametri sono presentati nella tabella seguente.

UCS [MPa]	m_i (-)	E_i [GPa]	γ [kN/m ³]	GSI
97.9	10	78	27.7	62

Tabella 1 – Parametri per i micascisti di Clarea (unità UGD7)

Invece, per le unità UGH1(22) e UGJ(23), come descritto nella relazione [3], i dati geomeccanici acquisiti durante lo scavo del cunicolo della Maddalena mostrano, in generale, una caratterizzazione meno pessimistica. Ai fini della scelta dei parametri di calcolo, in conformità alla relazione [3], si è scelto quindi di utilizzare gli effettivi parametri *as built* che definiscono le condizioni riscontrate in fase di scavo.

Si è dunque considerato il GSI rilevato nel cunicolo nella tratta corrispondente all'area di sicurezza. In allegato 3 si fornisce la sezione geomeccanica a quota dell'area di sicurezza (ottenuta per proiezione dei dati della Maddalena, sulla base delle strutture principali) ed una fincatura con il GSI rilevato e le sezioni tipo messe in opera nel cunicolo nella tratta corrispondente.

La zona con l'indice GSI più basso è di potenza 17 m (dal PM 3467 al PM 3484), caratterizzata da GSI =30-35 (8 m a GSI=30 e 9 m a GSI=35). In seguito il GSI risale fino a ritornare nei

valori medi. Si ha poi un'altra zona con GSI pari a 40 dal PM 3859 al PM 3873, che trova corrispondenza all'estremità Ovest dell'area di sicurezza.

Per quanto riguarda i valori della resistenza a compressione monoassiale, della costante di Hoek-Brown m_i e del modulo elastico, si mantengono i valori in tabella 2, essendo relativi alla roccia intatta.

Per la massa volumica, si nota nel documento [4] una riduzione rispetto ai valori medi per i campioni prelevati attorno al PM 3400-3500. In questa zona la massa volumica è pari a circa 26.5 kN/m^3 .

La scistosità è orientata con direzione media NE-SW, con inclinazione che presenta angoli prossimi all'orizzontale.

Come descritto nella relazione [4], sono state eseguite delle prove di taglio diretto sui giunti (in particolare, sulle famiglie di giunti impostati sulla scistosità). Si considerano le prove eseguite su due campioni prelevati nell'intorno del PM 4000 del cunicolo esplorativo. I valori di coesione sono pari a circa 0.15 e 0.82 MPa, mentre i valori di angolo di resistenza al taglio a 26 e 36°.

Per quanto riguarda lo stato tensionale, le prove effettuate mostrano un k_0 che varia da 1 a 1.3 ed una tensione verticale che è prossima alla litostatica.

3.2 Idrogeologia

Nel settore interessato, i dati idrogeologici acquisiti dallo scavo del cunicolo esplorativo della Maddalena evidenziano in generale una circolazione idrica sotterranea di modesta entità e senza strutture acquifere di particolare rilevanza.

3.3 Comportamento allo scavo

Lo scavo del cunicolo esplorativo della Maddalena nella tratta in prossimità dell'area di sicurezza ha presentato una serie di problemi di stabilità dell'ammasso concentrati in calotta, fenomeni di rottura fragile e rilasci gravitativi, per i quali si è resa necessaria la messa in opera di sostegni più "pesanti" a discapito delle generali buone condizioni geomeccaniche. Tali eventi sono dovuti allo stato tensionale in situ, all'orientazione della scistosità, all'intersezione con sistemi di fratture pervasive e più limitatamente all'elevato carico litostatico (> 1000 m).

È dunque verosimile attendersi simile risposta dell'ammasso roccioso anche durante lo scavo dell'area di sicurezza.

Si deve considerare comunque la differenza nel metodo di scavo: infatti nel cunicolo della Maddalena lo scavo avviene con TBM aperta con 6 m di distanza non sostenuta per via dello scudo, mentre le gallerie/caverne che compongono l'area di sicurezza saranno scavate in tradizionale, con possibilità di interventi molto prossimi al fronte (cls proiettato di prima fase, bullonature) e con maggiore flessibilità nella gestione di tali fenomeni.

Nel caso di comportamento fragile in ammassi rocciosi competenti a grande profondità, la tendenza, evocata in letteratura (si veda ad es. [103]) e comprovata da alcuni ritorni di esperienza dei Tunnel di Base Alpini, è di avere fenomeni di maggiore entità nel caso di scavo con TBM aperta rispetto al metodo tradizionale. L'uso di esplosivi con emulsioni permette di liberare le tensioni in situ e quindi di dissipare maggiore energia rispetto allo scavo meccanizzato. In compenso, in D&B si potranno avere, dopo le volate, dei sovrascavi di una certa entità. Le operazioni di disaggio saranno comunque più semplici.

In letteratura (si veda ad es. [104]), il ruolo importante del cls proiettato nel contenere i fenomeni di rottura fragile viene inoltre sottolineato. In caso di scavo con TBM aperta non è

possibile mettere in opera del cls proiettato in L1 (per le definizioni di L1 e L2 ai sensi della norma svizzera SIA 198 si veda l'allegato 4).

L'orientazione delle gallerie condizionerà inoltre il comportamento allo scavo. I fenomeni dovrebbero essere meno gravi per le gallerie ortogonali agli assi del TdB.

4. Sezioni tipo di sostegno

4.1 Tipologie di sostegno

Al fine di razionalizzare il calcolo, le sezioni di scavo sono state raggruppate in differenti categorie in funzione della loro superficie e della loro forma (cfr. Tabella 2). La caverna tecnica e la galleria in linea, per la loro superficie, forma e metodo di scavo (parzializzazione della sezione), sono state trattate separatamente, mentre è stato possibile raggruppare le altre sezioni nelle categorie "media" e "piccola".

Gli interventi di sostegno (es. spessore del cls proiettato, dimensioni della centina, ecc.) sono molto simili all'interno di queste categorie. Solo la lunghezza dei bulloni viene adeguata alle dimensioni della sezione.

L'ubicazione delle sezioni è illustrata in Figura 1.

Sezione	Oggetto	Superficie di scavo (m ²)	Categoria della sezione
B-B	Caverna tecnica	~ 280	"Grande"
A-A	Galleria in linea	~ 150	"Medio-grande"
C-C	Galleria intertubo con sala d'accoglienza	~ 110	"Media"
E-E	Caverna Ovest	~ 110	
F-F e G-G	Ramo veicoli bimodali	~ 90	
D-D	Galleria intertubo	~ 65	
H-H	Serbatoio di raccolta Ovest	~ 60	
R-R	Galleria logistica	~ 55	
I-I	Serbatoio di raccolta Est	~ 35	"Piccola"
P-P	Giunzione	~ 25	
J-J	Ramo di comunicazione	~ 20	

Tabella 2 – Caratteristiche delle sezioni di scavo

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

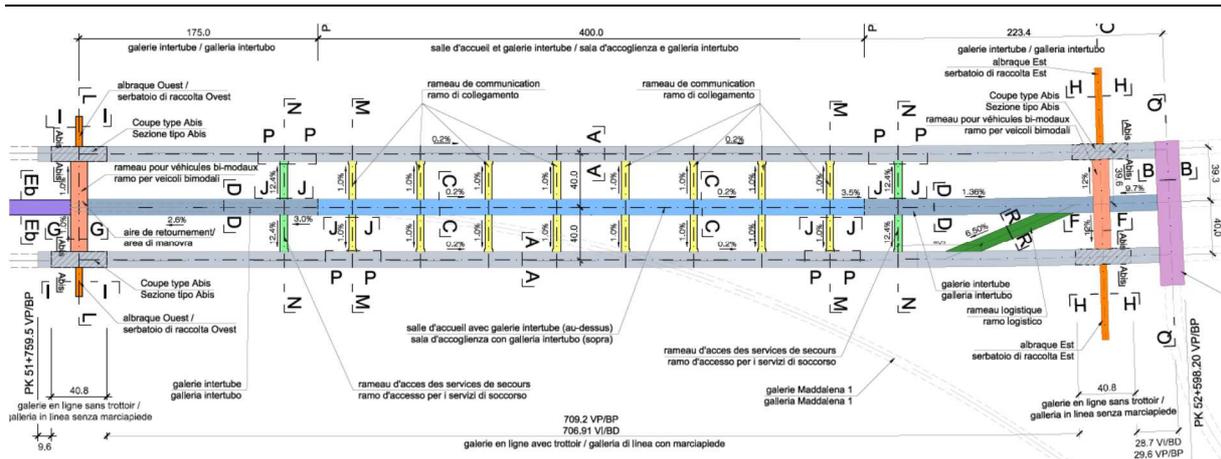


Figura 1: Configurazione planimetrica dell'area di sicurezza

L'analisi della geologia ed il ritorno di esperienza della Maddalena hanno portato alla definizione delle seguenti quattro tipologie di sostegno:

- **Tipo S1** (leggero): è previsto ai fini del controllo del sovrascavo, cadute di blocchi e defoliazioni del contorno di scavo ($GSI > 60$);
- **Tipo S2** (medio): è adatto per contrastare fenomeni moderati di convergenza del contorno del cavo e di plasticizzazione ($GSI \sim 55-60$). Rappresenta inoltre un'alternativa costruttiva alla sezione tipo S1, in quanto i bulloni di tipo Swellex sono sostituiti da bulloni di tipo IBO e SN. Nella caverna tecnica si prevede l'uso di centine 4G-180/22 per sostenere lo scavo.
- **Tipo S3** (pesante): è previsto per le zone tettonizzate e/o di faglia con intensa fratturazione ($GSI \leq 55$) per contrastare i fenomeni di instabilità del fronte di scavo e delle pareti. Si prevede l'uso di centine HEB con passo 1 m e di bulloni in VTR al fronte. Il ritorno di esperienza del cunicolo della Maddalena (doc. [4]) ha mostrato come le faglie attraversate sono classificabili in faglie minori, di spessori massimi decimetrici. Generalmente queste strutture sembrano sviluppare principalmente roccia di faglia costituita da cataclaste e solo limitatamente gouge argilloso. I valori di convergenza misurati sono risultati di modesta entità, inferiori a 4 cm. Occorre comunque precisare che, a causa di problemi operativi, si sono potute eseguire solo ad una distanza minima di 8-10 m dal fronte di scavo. Data anche la copertura inferiore rispetto alla posizione dell'area di PR, non si prevede un comportamento allo scavo né spingente né franoso e quindi tale da giustificare le misure di sostegno previste in PR (centine collassabili di tipo TH ed ombrello di infilaggi). Peraltro nel cunicolo della Maddalena nella tratta prossima all'area di sicurezza si è fatto largo uso di sezioni con centine HEB (sezioni tipo F4, F5 e FMV), non solo nelle zone più fratturate ma anche per contrastare i fenomeni più intensi di dilatanza e rilascio in calotta. Le differenze di metodologia di scavo evocate in precedenza portano a ridimensionare l'applicazione di tali sezioni tipo per questi fenomeni, nondimeno potranno essere usate nel caso in cui le misure previste per la sezione tipo S4 risultassero insufficienti. Tale sezione tipo è inoltre prevista per una distanza di 5 m in prossimità delle intersezioni (ad eccezione delle sezioni tipo "piccole").
- **Tipo S4** (per i rilasci in calotta): al fine di contrastare i fenomeni osservati durante lo scavo del cunicolo, nel caso di roccia comunque competente ($GSI > 60$) si è definita una sezione tipo analoga alla sezione tipo F3c_1 del cunicolo. Quest'ultima risulta infatti maggioritaria nella tratta di cunicolo prossima all'area di sicurezza. Oltre al cls progettato

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

(previsto anche per le sezioni tipo S1 e S2), tale sezione tipo prevede una bullonatura densa e delle centine UPN in calotta con passo 1.2 m. Anche gli sfondi saranno pari a 1.2 m per seguire il passo delle centine e ridurre i fenomeni che si spiegano, nel caso del cunicolo, con una lunghezza non sostenuta pari a 6 m.

Al fronte, si prevede di mettere in opera bulloni di tipo Swellex nel caso di ammassi rocciosi competenti (per sezioni tipo S1, S2 e S4) e bulloni VTR per la sezione tipo S3.

Si rimanda agli elaborati da [8] a [101] per dettagli circa gli elementi e le fasi esecutive di messa in opera del sostegno.

4.2 Caratteristiche dei materiali

Di seguito si riportano le caratteristiche dei materiali adottati in progetto e nell'elaborazione dei calcoli:

CALCESTRUZZO

Calcestruzzo proiettato

Tipo: classe C30/37
Resistenza caratteristica cubica: $R_{ck}=37$ MPa

ACCIAIO

Acciaio in barre ad aderenza migliorata (per rete elettrosaldata)

Tipo: B450C
Tensione di snervamento $f_{yk}=450$ N/mm²

Tiranti di ancoraggio iniettati

Tipo: SN M26
Carico di rottura 232 kN
Tensione di snervamento (filettatura) 211 kN

Bulloni autoperforanti

Tipo IBO R32L
Carico di rottura 200 kN
Tensione di snervamento 160 kN

Tipo IBO R32N
Carico di rottura 280 kN
Tensione di snervamento 230 kN

Bulloni ad espansione

Tipo Swellex Mn24
Carico di rottura 200 kN
Tensione di snervamento 180 kN

Centine

Tipo: UPN

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

Tensione di snervamento: $f_{yk}=235 \text{ N/mm}^2$
Tipo: HEB
Tensione di snervamento: $f_{yk}=355 \text{ N/mm}^2$

Centine reticolari

Tipo: 4G-180/22
Tensione di snervamento $f_{yk} \geq 500 \text{ N/mm}^2$

Fibre per rinforzo calcestruzzo proiettato

Lunghezza: $20 \text{ mm} < L < 40 \text{ mm}$
Diametro: 0.5mm
 $R_{ak} \geq 700 \text{ N/mm}^2$

ELEMENTI IN VETRORESINA E MALTA DI INIEZIONE

Tubi ad aderenza migliorata:

Diametro: 60mm
Spessore: 10mm
Resistenza a trazione: $\geq 800 \text{ MPa}$
Contenuto in vetro: $\geq 60\%$

Malta di iniezione:

$R_{ck} \geq 25 \text{ MPa}$
Rapporto a/c < 0.5

DRENAGGI IN AVANZAMENTO

Tubi in PVC microfessurati

Diametro: 60 mm
Spessore: $\geq 4 \text{ mm}$

5. Analisi geotecnica

5.1 Definizione della filosofia di calcolo

Il calcolo è stato effettuato nell'ottica di modellare l'ammasso roccioso e la sua interazione con il sostegno in funzione del fasaggio dello scavo e della contemporanea posa in opera del sostegno.

Nell'ottica della razionalizzazione del calcolo, si sono sovrapposte le varie geometrie di scavo per ciascuna categoria per poter definire le sezioni tipo da verificare e riferirsi a queste per le altre sezioni.

Nell'ambito della categoria di sezioni "media", si è notato, mediante la seguente figura, come la sezione E-E permette di eseguire un calcolo rappresentativo per le sezioni C-C, D-D, F-F e G-G, che presentano caratteristiche del sostegno molto simili. Le sezioni H-H e R-R presentano invece una forma sensibilmente diverse e quindi saranno oggetto di calcoli specifici.

Per le sezioni "piccole", si verifica la sezione I-I, la più grande della sua categoria.

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

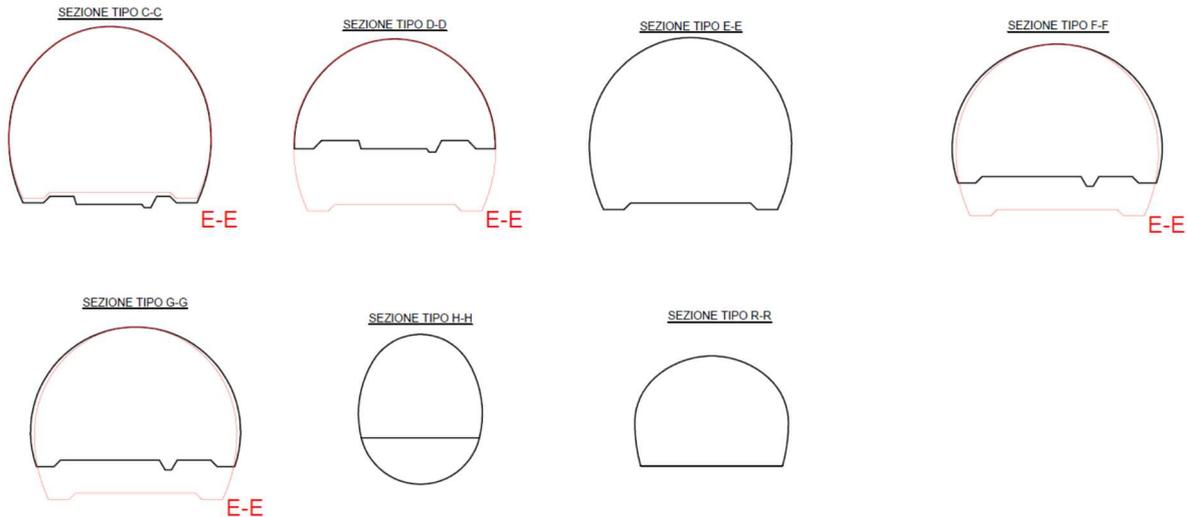


Figura 2: Riassunto delle sezioni "medie"

La metodologia di calcolo adottata è stata diversa nel caso di ammassi rocciosi competenti ed ammassi molto fratturati, come descritto nel seguito.

Ammassi rocciosi competenti

Alla luce dei parametri geotecnici descritti in precedenza, per ammassi rocciosi competenti si sono considerati due valori di GSI: 60 e 65. In particolare, per le sezioni tipo S1 e S4 si è considerato un GSI di 65, mentre per la sezione tipo S2 un GSI di 60.

Mediante il metodo delle linee caratteristiche, dopo aver studiato il comportamento intrinseco dell'ammasso roccioso durante lo scavo, si è effettuata una prima verifica del sistema di sostegno sulla base del punto di equilibrio tra la curva caratteristica dell'ammasso e del sostegno.

In secondo luogo, è stata effettuata una simulazione dello scavo tenendo conto delle effettive fasi di scavo e posa in opera del sostegno. La simulazione è stata effettuata mediante modellazione 2D agli elementi finiti (in condizione di deformazione piana).

I vantaggi di utilizzare un modello di tipo 2D sono i seguenti:

- Possibilità di rappresentare la geometria esatta della sezione di scavo senza approssimazione ad un'equivalente galleria circolare (la sezione A-A, per esempio, ha una geometria molto differente da quella circolare);
- Possibilità di considerare lo stato tensionale in sito anisotropo;
- Possibilità di considerare le varie fasi di scavo con la tecnica step - by - step.
- Possibilità di considerare dei modelli costitutivi diversi da quelli tradizionali di Mohr-Coulomb o Hoek-Brown.

Il tasso di deconfinamento da applicare al momento della posa in opera dei sostegni è stato determinato sulla base dei calcoli alle linee caratteristiche.

Come dettagliato nel seguito, per le sezioni tipo S1 e S2 è stato usato un modello costitutivo per l'ammasso roccioso di Hoek-Brown, mentre per la sezione tipo S4, al fine di rappresentare più adeguatamente i fenomeni di rilascio in calotta derivanti dalla scistosità suborizzontale, si è utilizzato un modello multilaminare.

Nel modello si sono rappresentati sia i sostegni che i rivestimenti definitivi; questi ultimi sono stati poi verificati nella relazione PRV_C3A_3731_26-46-20.

Ammassi rocciosi molto fratturati

Per gli ammassi rocciosi molto fratturati (faglie e zone tettonizzate minori), si è considerata la potenza limitata di tali zone lungo l'asse delle gallerie. Come descritto in precedenza, nel cunicolo esplorativo si è avuta una zona con GSI pari a 30-35 per una lunghezza di 17 m. Si considera un valore medio pari a 33. Come si può vedere in allegato 3, si prevede di incontrare tale zona, con simile potenza, nelle gallerie in linea (sezione A-A), nella galleria intertubo con sala d'accoglienza (sezione C-C) e nei rami di collegamento (sezioni J-J e P-P). Si ha poi una zona con GSI pari a 40 di potenza 14 m in corrispondenza della sezione E-E, che comunque non risulta dimensionante.

Il metodo elaborato dai proff. Anagnostou e Kovari del Politecnico di Zurigo [102] permette di considerare, nel metodo delle linee caratteristiche (con criterio di rottura di Mohr-Coulomb), lo spessore di tali zone.

Si è quindi considerato questo metodo per ottenere la curva caratteristica della galleria. Al fine di poter svolgere simulazioni 2D in condizioni di deformazione piana (che permettono di eseguire analisi tensio-deformative sull'ammasso roccioso e di poter ottenere l'andamento delle azioni nei sostegni e nei rivestimenti), si è in seguito considerato un valore di GSI equivalente che porta ad avere gli stessi spostamenti radiali massimi.

Le analisi FEM sono state dunque condotte considerando un ammasso roccioso isotropo e omogeneo caratterizzato dal valore di GSI equivalente. Il criterio di rottura implementato nelle analisi FEM, per motivi numerici, è quello di Mohr-Coulomb ottenuto per linearizzazione del criterio di Hoek-Brown mediante il software Roclab (Rocscience).

Non si prevede che la caverna tecnica (sezione B-B) sia attraversata da una zona molto fratturata. Peraltro, nell'eventualità, considerate le dimensioni notevoli della sezione, converrebbe piuttosto spostare la caverna di qualche metro per evitare tale zona. Per questa ragione non è stata effettuato il calcolo della sezione tipo B-B S3 con questo metodo, ma con il modello multilaminare, per le ragioni esposte al § 7.2.10.

Anche i serbatoi di raccolta (sezione H-H) e la galleria logistica (sezione R-R) non sono previsti all'interno di zone di faglia, per cui non è prevista verifica della sezione tipo S3. Si prevede una certa percentuale di sezione tipo S3 solo per il locale rinforzo alle intersezioni, le verifiche per la sezione tipo S2 sono considerate valide.

Inoltre in queste condizioni è stata condotta una verifica di stabilità del fronte di scavo in cui si è tenuto conto dei bulloni in VTR previsti per la sezione tipo S3. Per la sezione I-I (ed in generale le sezioni "piccole") non si sono previste bullonature VTR al fronte (con relative verifiche di stabilità) date le dimensioni ridotte della sezione.

I calcoli effettuati sono quindi riassunti nella tabella seguente.

Sezione	Descrizione	Tipo di sostegno	GSI	Analisi effettuata
A-A	Galleria in linea	S1	65	Linee caratteristiche Analisi FEM – modello Hoek-Brown

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

		S2	60	Linee caratteristiche Analisi FEM – modello Hoek-Brown
		S3	33	Linee caratteristiche - Approccio di Anagnostou e Kovari Analisi FEM con parametri equivalenti – modello Mohr-Coulomb Stabilità del fronte
		S4	65	Linee caratteristiche Analisi FEM – modello multilaminare
B-B	Caverna tecnica	S1	65	Linee caratteristiche Analisi FEM – modello Hoek-Brown
		S2	60	Linee caratteristiche Analisi FEM – modello Hoek-Brown
		S3	65	Linee caratteristiche Analisi FEM – modello multilaminare
		S4	65	Linee caratteristiche Analisi FEM – modello multilaminare
E-E	Caverna Ovest (rappresentativa delle sezioni "medie")	S1	65	Linee caratteristiche Analisi FEM – modello Hoek-Brown
		S2	60	Linee caratteristiche Analisi FEM – modello Hoek-Brown
		S3	33	Linee caratteristiche - Approccio di Anagnostou e Kovari Analisi FEM con parametri equivalenti – modello Mohr-Coulomb Stabilità del fronte
		S4	65	Linee caratteristiche Analisi FEM – modello multilaminare
H-H	Serbatoio di raccolta Est	S1	65	Linee caratteristiche Analisi FEM – modello Hoek-Brown
		S2	60	Linee caratteristiche Analisi FEM – modello Hoek-Brown
		S4	65	Linee caratteristiche Analisi FEM – modello multilaminare
R-R	Galleria logistica	S1	65	Linee caratteristiche Analisi FEM – modello Hoek-Brown
		S2	60	Linee caratteristiche Analisi FEM – modello Hoek-Brown
		S4	65	Linee caratteristiche Analisi FEM – modello multilaminare
I-I	Serbatoio di raccolta Ovest (rappresentativo delle sezioni "piccole")	S1	65	Linee caratteristiche Analisi FEM – modello Hoek-Brown
		S2	60	Linee caratteristiche Analisi FEM – modello Hoek-Brown
		S3	33	Linee caratteristiche - Approccio di Anagnostou e Kovari Analisi FEM con parametri equivalenti – modello Mohr-Coulomb
		S4	65	Linee caratteristiche

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

				Analisi FEM – modello multilaminare
--	--	--	--	-------------------------------------

Tabella 3 – Calcoli effettuati

5.2 Parametri geomeccanici

I parametri geomeccanici considerati per i calcoli (secondo i criteri di rottura di Hoek-Brown e di Mohr-Coulomb) sono sintetizzati nella tabella seguente.

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

Sezione tipo	GSI [-]	UCS [MPa]	D [-]	m _i [-]	c [MPa]	φ [°]	ψ [°]	E _i [GPa]	E _{rm} [GPa]	v [-]	γ [kN/m ³]	k ₀	H [m]
S1	65	97,9	0	10	5.5	36.7	9.1	78	49.27	0.25	27.7	1.3	1340
S2	60	97,9	0	10	4.9	35.4	8.8	78	40.56	0.25	27.7	1.3	1340
S3	33	97,9	0	10	2.4	30.4	7.6	78	7.73	0.3	26.5	1	1100
S4	65	97,9	0	10	5.5	36.7	9.1	78	49.27	0.25	27.7	1.3	1340

Legenda:

GSI: Geological Strength Index

UCS: resistenza a compressione monoassiale

D: fattore di disturbo secondo il criterio di Hoek-Brown

m_i: costante di Hoek-Brown

φ: angolo di resistenza al taglio (criterio di Mohr-Coulomb)

c: coesione (criterio di Mohr-Coulomb)

Ψ: angolo di dilatanza

E_i: modulo elastico della roccia intatta

E_{rm}: modulo elastico dell'ammasso roccioso

v: coefficiente di Poisson

γ: peso specifico

k₀: rapporto tra tensione orizzontale e tensione verticale (stato tensionale in situ dell'ammasso roccioso)

H: copertura considerata per determinare la tensione verticale (γH)

Tabella 4 – Parametri di calcolo utilizzati nei modelli 2D

Il modulo elastico dell'ammasso roccioso è stato calcolato a partire dal modulo elastico della roccia intatta mediante la formulazione di Hoek & Diederichs (2006) [105] implementata nel software RocLab (Rocscience). La dilatanza è stata calcolata mediante l'espressione seguente (da letteratura): $\psi = \frac{1}{4} \varphi$.

Per il peso di volume dell'ammasso roccioso si è utilizzato, in via cautelativa, il valore medio per la roccia intatta (in tabella 4) per gli ammassi rocciosi competenti (sezioni tipo S1, S2 e S4). Per la zona di faglia (sezione tipo S3), si è considerato un valore più basso (26.5 kN/m³), da un lato per rappresentare più correttamente i valori misurati nel cunicolo in prossimità di questa zona e dall'altro per considerare la presenza delle discontinuità che rende il peso di volume dell'ammasso roccioso inferiore rispetto alla roccia intatta.

Secondo la tendenza generale in letteratura, per il coefficiente di Poisson si è considerato 0.25 per ammassi rocciosi competenti e 0.3 per le zone di faglia.

Sempre secondo tendenze generali di letteratura, il valore di k₀ considerato è pari a 1.3 per ammassi rocciosi competenti e 1 per la zona di faglia con GSI 30-35.

Inoltre, per le sezioni tipo S1, S2 e S4 si è considerata la copertura massima (1340 m), mentre per la sezione tipo S3 si è considerata la copertura effettiva in corrispondenza della faglia con GSI 30-35, ovvero 1100 m.

Inoltre per le sezioni di tipo S4 è stato imposto un modello multilaminare al fine di meglio rappresentare i fenomeni osservati nel cunicolo esplorativo della Maddalena.

Il modello multilaminare presente in Zsoil permette di considerare fino a 3 piani di debolezza nell'ammasso roccioso, che ne condizionano la risposta meccanica.

In questo caso si simula un solo piano di debolezza, costituito dalla scistosità.

Il comportamento della matrice rocciosa viene rappresentato con una legge di Hoek e Brown, mentre quello dei giunti (piani di debolezza) con una legge di tipo Mohr-Coulomb.

I giunti sono posti nella direzione della scistosità (suborizzontale). La dilatanza è stata assunta pari a $2/3 \phi$. I parametri considerati nei calcoli per i giunti sono indicati nella tabella seguente.

ϕ [°]	ψ [°]	c [MPa]
31	20	0.5

Tabella 5 – Caratteristiche dei giunti utilizzate nel modello 2D multilaminare (S4)

Per i parametri equivalenti utilizzati per la modellazione FEM 2D nel caso della sezione S3 si veda il § 8.

5.3 Descrizione del modello numerico

Le analisi numeriche sono state effettuate con il programma di calcolo per elementi finiti Zsoil, che permette di lavorare in condizioni piane di deformazione (2D).

L'ammasso roccioso è stato modellato con una maglia quadrilatera salvo per calotta e strozzo. Per il sostegno tramite centine e calcestruzzo proiettato sono stati utilizzati elementi "BEAM". Gli ancoraggi sono rappresentati con degli elementi "ANCHOR".

Il rivestimento è stato modellato con elementi volumici (maglia quadrilatera) caratterizzati da un comportamento elastico con le proprietà del cls. Viene attivato prima della degradazione (disattivazione) dei sostegni e si carica principalmente dopo la disattivazione di essi.

Il dominio di calcolo per ogni sezione presenta le seguenti caratteristiche:

- La larghezza è almeno 12 volte l'altezza massima della sezione
- L'altezza è almeno 13 volte la larghezza massima della sezione
- Nei bordi verticali, gli spostamenti in x sono impediti
- Nel bordo orizzontale, gli spostamenti in y sono impediti
- La copertura è rappresentata da un carico ripartito sul bordo superiore del dominio.

6. Analisi del comportamento dell'ammasso roccioso

Il comportamento dell'ammasso è in un primo momento analizzato in assenza di sostegno (comportamento intrinseco), in termini di spostamenti del contorno di scavo di calotta e piedritti.

Nel metodo di convergenza-confinamento, si è utilizzata una legge di comportamento di tipo Mohr-Coulomb ottenuta per interpolazione del criterio di Hoek-Brown mediante l'ausilio del software Roclab (Rocscience).

Si è utilizzato un raggio equivalente ad una sezione circolare di uguale superficie. Si considera la superficie totale di scavo nel caso di parzializzazione della sezione.

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

La pressione iniziale p_0 è pari ad un valore medio tra la tensione verticale e quella orizzontale.

I risultati vengono poi convalidati dalla medesima analisi nel modello ZSoil, con la differenza che tutte le fasi di scavo sono prese in conto.

Per la zona all'interno di un ammasso molto fratturato (GSI=33), si applica il metodo delle curve caratteristiche con un aggiustamento al fine di tenere in conto la lunghezza finita di questa zona. La roccia competente alle due estremità della zona tettonizzata ha un effetto stabilizzatore (cosiddetto "wall effect": effetto parete): la deformazione della roccia fratturata crea una forza di taglio all'interfaccia con la zona di roccia sana che agisce contro la deformazione radiale. Di conseguenza la deformazione radiale e la sollecitazione del sostegno sono meno importanti rispetto ad una zona altrettanto fratturata ma di lunghezza infinita.

Per tenere conto di questo effetto è stato applicato il metodo descritto nel documento [102] per diagrammare le linee caratteristiche in funzione dello spessore della zona di faglia perpendicolare all'asse del tunnel, sulla base dei risultati ricavati per la zone fratturate a larghezza infinita.

Gli spostamenti radiali possono essere approssimati come segue:

$$u_b = u_{b\infty} (1 - e^{-0.4L/R_{pl\infty}})$$

$u_{b\infty}$: convergenza nella faglia di lunghezza infinita

L : lunghezza della faglia

$R_{pl\infty}$: raggio plastico nella faglia di lunghezza infinita

Si considera una lunghezza della faglia di 17 m.

Nella tabella seguente si presentano gli spostamenti ottenuti per ogni sezione:

Sezione	Tipo	GSI	Zsoil [cm]		Curve caratteristiche [cm]
			Calotta	Piedritto	
A-A	S1	65	1,4	1,8	1,3
	S2	60	2,0	2,3	1,7
	S3	33	-	-	4,1
	S4	65	3,0	1,5	1,3
B-B	S1	65	2,1	2,1	1,7
	S2	60	3,0	2,8	2,1
	S4	65	4,1	2,0	1,7
E-E	S1	65	1,0	1,0	1,1
	S2	60	1,8	1,6	1,5
	S3	33	-	-	4,1
	S4	65	2,6	1,2	1,1
H-H	S1	65	0,8	0,9	0,8
	S2	60	1,2	1,2	1,1
	S4	65	2,1	1,0	0,8
I-I	S1	65	0,7	0,7	0,6
	S2	60	1,0	0,9	0,8
	S3	33	-	-	3,3
	S4	65	1,2	0,6	0,6
R-R	S1	65	0,9	0,8	1,0
	S2	60	1,3	1,1	1,3

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

	S4	65	2,5	1,0	1,0
--	----	----	-----	-----	-----

Tabella 6 – Spostamenti attesi in condizioni intrinseche

Dall'analisi dei risultati dei calcoli effettuati appare evidente che per tutte le tipologie di sezione in un ammasso roccioso di buona qualità (GSI=60/65) la convergenza non è critica. Nel caso in cui nessun sostegno venga applicato, degli spostamenti inferiori a 3 cm si produrrebbero nelle sezioni grandi e dell'ordine di 1 cm nelle sezioni medie e piccole. In queste zone il sostegno ha la sola funzione di controllare i sovraprofilo di scavo, la caduta di blocchi e la defoliazione dei contorni di scavo. Se necessario il sostegno potrà contrastare i fenomeni di convergenza moderati, di destabilizzazione del fronte e di plasticizzazione.

Il metodo analitico di Convergenza-Confinamento ha fornito risultati molto simili alla simulazione FEM.

Come previsto, nel caso di ammassi più fratturati, gli spostamenti sono più marcati rispetto alle altre sezioni ma restano di un ordine di grandezza accettabile (massimo 4.1 cm nelle sezioni A-A e E-E).

In questo caso il sostegno avrà la funzione di limitare la deformazione delle sezioni e di contenere il distacco di blocchi nel contorno dello scavo.

7. Verifica del sostegno nell' ammasso roccioso di buona qualità (GSI=60/65)

7.1 Metodo di convergenza-confinamento

Il metodo di convergenza-confinamento permette di trattare analiticamente l'interazione ammasso-struttura al fine di determinare la pressione di equilibrio tra l'ammasso deconfinato ed il sostegno. Attraverso questo metodo è inoltre possibile calcolare la convergenza della sezione.

Durante l'avanzamento la pressione radiale interna ai contorni della sezione di scavo diminuisce lentamente (deconfinamento), simultaneamente il sostegno sviluppa una pressione radiale fittizia che compensa il deconfinamento.

E' dunque necessario tracciare la curva caratteristica di comportamento dell'ammasso e del sostegno al fine di poterne determinare l'intersezione che rappresenta l'equilibrio.

Il comportamento dell'ammasso segue una legge costitutiva di Mohr-Coulomb. Per il sostegno, viene ipotizzato che tutti i suoi elementi vengano messi in opera simultaneamente e per i sostegni misti centine-calcestruzzo si utilizza una rigidità ed una pressione limite equivalenti. I risultati grafici per tutte le sezioni sono presentati all'allegato 1, i risultati dell'analisi sono riassunti nella tabella 7.

A titolo di esempio, in figura 3 è presentato l'equilibrio tra la sezione A-A ed il sostegno di tipo S1:

Sezione AA S1

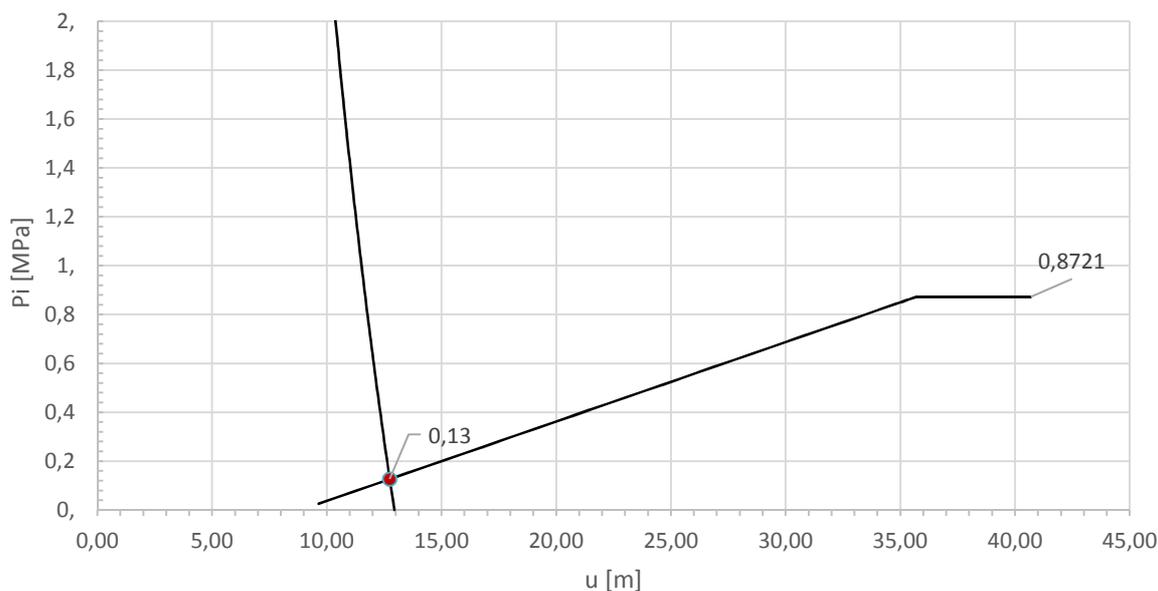


Figura 3: Linee caratteristiche, esempio sezione A-A, sostegno S1

La pressione di equilibrio è di 0.13 MPa, la capacità portante del sostegno è di 0.87 MPa. Il fattore di sicurezza è:

$$FS = \frac{0.87}{0.13} = 6.7$$

Come previsto, lo spostamento è molto simile a quello del comportamento in assenza del sostegno: 1.27 cm.

Sezione	Tipo	GSI [-]	Pressione equilibrio [MPa]	di	Portanza sostegno [MPa]	FS [-]	Spostamento all'equilibrio [cm]	Tasso deconfinamento λ [-]	di
A-A	S1	65	0,13		0,87	6,69	1,27	1	
	S2	60	0,26		0,87	3,35	1,71	0,99	
	S4	65	0,15		0,92	6,13	1,26	0,99	
B-B	S1	65	0,09		0,48	5,33	1,75	1	
	S2	60	0,42		1,56	3,71	2,04	0,99	
	S4	65	0,23		0,74	3,22	1,71	0,99	
E-E	S1	65	0,05		0,25	5,00	0,11	1	
	S2	60	0,08		0,25	3,13	0,15	1	
	S4	65	0,27		1,06	3,93	0,11	0,99	
H-H	S1	65	0,04		0,36	9,00	0,79	1	
	S2	60	0,08		0,36	4,50	1,07	1	
	S4	65	0,23		0,92	4,00	0,78	0,99	
I-I	S1	65	0,04		0,45	11,25	0,62	1	
	S2	60	0,07		0,45	6,43	0,85	1	
	S4	65	0,06		0,55	9,17	0,62	1	
R-R	S1	65	0,06		0,29	4,83	0,95	1	

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

	S2	60	0.08	0.29	3.63	0.13	1
	S4	65	0.26	1.06	4.08	0.92	0.99

Tabella 7 – Risultati dell'analisi delle linee caratteristiche

Il fattore di sicurezza è superiore a 1 per tutte le sezioni.

Un'ulteriore verifica deve essere effettuata applicando i coefficienti di sicurezza secondo le NTC e realizzando un modello ad elementi finiti.

7.2 Analisi numerica FEM in 2D

Lo scopo dell'analisi numerica con il programma ZSoil è di verificare le deformazioni della sezione, le zone di roccia plasticizzata e che gli sforzi indotti nei sostegni siano inferiori alla loro resistenza.

Il calcolo è stato fatto per tutte le sezioni rappresentative secondo la tabella 3.

Il tasso di deconfinamento λ inserito nel programma è quello ottenuto tramite il metodo di convergenza-confinamento. In questo modo si tiene conto della distanza tra lo scavo e la messa in funzione del sostegno.

In modo conservativo, nessuna interfaccia è stata inserita tra il calcestruzzo proiettato e la parete rocciosa. Si è invece posta un'interfaccia tra parete rocciosa e rivestimento.

Laddove la sezione viene scavata in 3 fasi (calotta, strozzo ed arco rovescio), lo scavo è stato simulato in 6 fasi grazie al programma ZSoil: nella prima fase dell'analisi solo il carico litostatico è presente. Nella fase successiva lo scavo viene simulato facendo scomparire la maglia corrispondente alla prima sezione scavata: la calotta. Dopodiché, il sostegno della sezione viene attivato secondo il tasso di deconfinamento calcolato con il metodo di convergenza-confinamento e così di seguito per le sezioni successive.

Al momento dello scavo dello strozzo viene attivato in calotta il sostegno in L2.

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

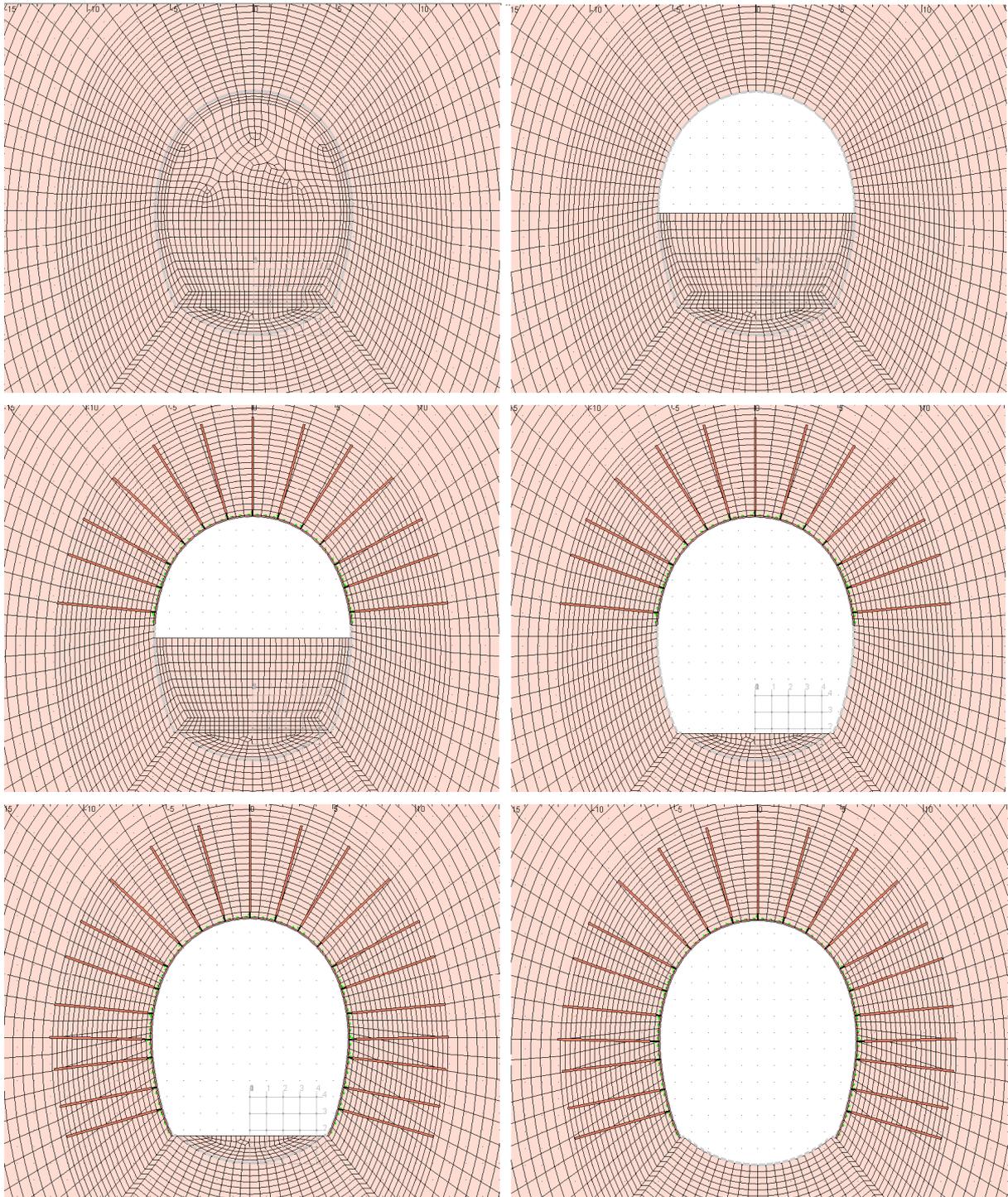


Figura 4: Fasi di calcolo sezione A-A

La verifica degli elementi strutturali viene effettuata secondo i criteri delle Norme Tecniche per la Costruzione (NTC 2008):

Resistenza del calcestruzzo alla compressione

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_c}$$
$$\gamma_c = 1.5$$

Per il calcestruzzo proiettato non viene applicato il coefficiente $\alpha_{cc}=0.85$ da applicarsi solo per i rivestimenti definitivi.

Resistenza dell'acciaio di carpenteria per centine e bulloni

$$f_{sd} = \frac{f_{sy}}{\gamma_{M0}}$$

$$\gamma_{M0} = 1.05$$

Carichi permanenti strutturali (carichi dovuti alla pressione dell'ammasso roccioso)

Coefficiente parziale sull'effetto delle azioni $\gamma_G = 1.3$

Verifica del sostegno in calcestruzzo proiettato

Il calcestruzzo viene modellato con comportamento elastico con modulo di elasticità pari a 7 GPa.

La verifica del sostegno in calcestruzzo proiettato è effettuata attraverso il diagramma d'interazione momento-sforzo normale secondo le raccomandazioni AFTES GT7 ("L'utilisation du béton non armé en tunnel") e GT29 ("Compatibilité des recommandations AFTES relatives aux revêtements des tunnels en béton avec les Eurocodes").

In modo conservativo, la presenza di fibre in acciaio nel calcestruzzo è stata trascurata sebbene sia prevista durante la messa in opera.

Verifica dei bulloni

I bulloni utilizzati sono del tipo Swellex Mn24, la verifica viene effettuata allo sforzo di trazione.

$$N_{Ed} \leq \frac{N_{Rd}}{\gamma_{M0}} = \frac{200 \text{ kN}}{1.05} = 190.5 \text{ kN}$$

Inoltre l'allungamento misurato per ogni fase deve essere inferiore al valore tipico della deformazione di rottura degli ancoraggi:

$$\frac{\Delta L}{L} \leq 7 - 10\%$$

Verifica delle centine

Nel caso della sezione tipo S4, le centine sono state introdotte nel modello come degli elementi travi ("liner") dal comportamento elastoplastico secondo il limite elastico dell'acciaio utilizzato. In questo caso, le centine ed il cls proiettato sono modellati come due diversi liner. Siccome sono legati entrambi all'ammasso roccioso senza interfaccia, si muovono assieme e quindi si ripartiscono gli sforzi. Si è ritenuto preferibile adottare questa modellazione al posto di considerare una sezione omogeneizzata (come fatto per le altre sezioni tipo), in quanto il cls non congloba le centine.

Il modello FEM 2D fornisce le informazioni necessarie riguardo alla plasticizzazione o meno della centina.

Nella sezione B-B S2 sono presenti centine: si considera la sezione mista centine-cls proiettato come una sezione equivalente di calcestruzzo, modellata quindi con un unico liner. Gli sforzi sono poi ripartiti tra centine e cls proiettato e la centina viene verificata all'interazione di momento e sforzo normale e allo sforzo di taglio.

Si constata che gli sforzi massimi nel sostegno in calcestruzzo come anche nei bulloni sono nella sezione della calotta, a livello della chiave di volta e dei piedritti.

Per le sezioni critiche dello strato di calcestruzzo proiettato si ha:

Combinazione	Sforzi		Sforzi di calcolo	
	M	N	M _{Ed}	N _{Ed}
	[kNm]	[kN]	[kNm]	[kN]
N _{max} , M	0,71	46,88	0,92	60,94
M _{min/max} , N	1,1	16,01	1,43	20,81

Tabella 8 – Sforzi nelle sezioni critiche, sezione A-A, sostegno S1

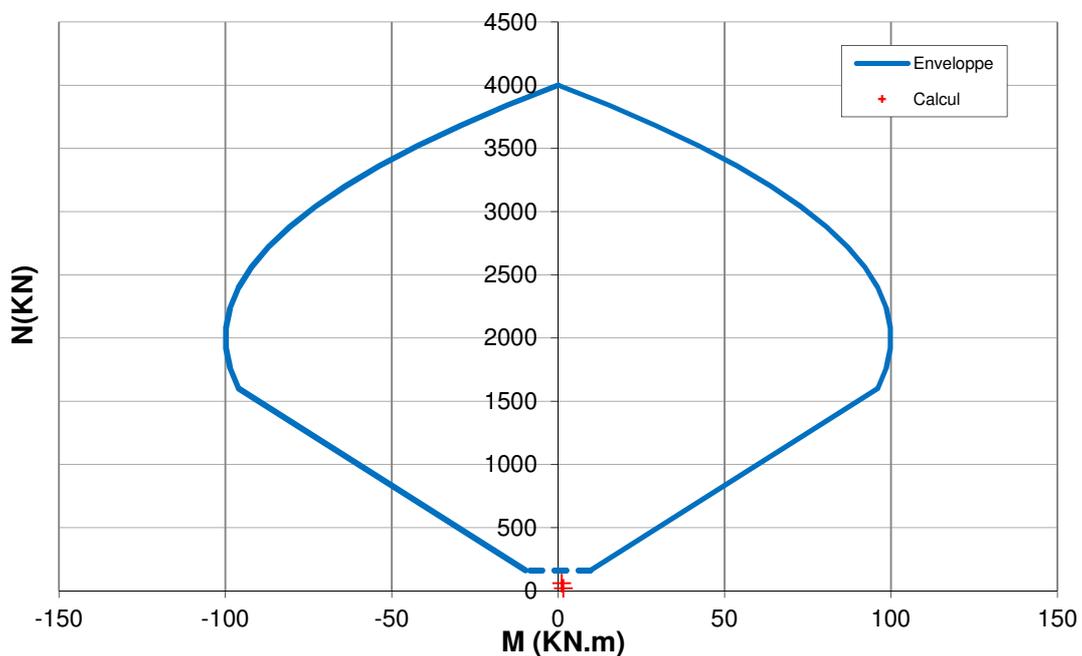


Figura 7: Diagramma d'interazione 20 cm di calcestruzzo proiettato

Secondo le raccomandazioni AFTES GT7, quando lo sforzo normale e il momento sono molto bassi (dominio al di sotto della linea tratteggiata), non si deve eseguire nessuna verifica particolare.

Per il bullone più sollecitato:

$$N_{Ed} = 1.3 \cdot 107.4 \text{ kN} = 139.6 \text{ kN} < N_{Rd} = 190.5 \text{ kN}$$

$$FS = \frac{190.5}{139.6} = 1.36$$

La deformazione massima è:

$$0.158\% < 7 - 10\%$$

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

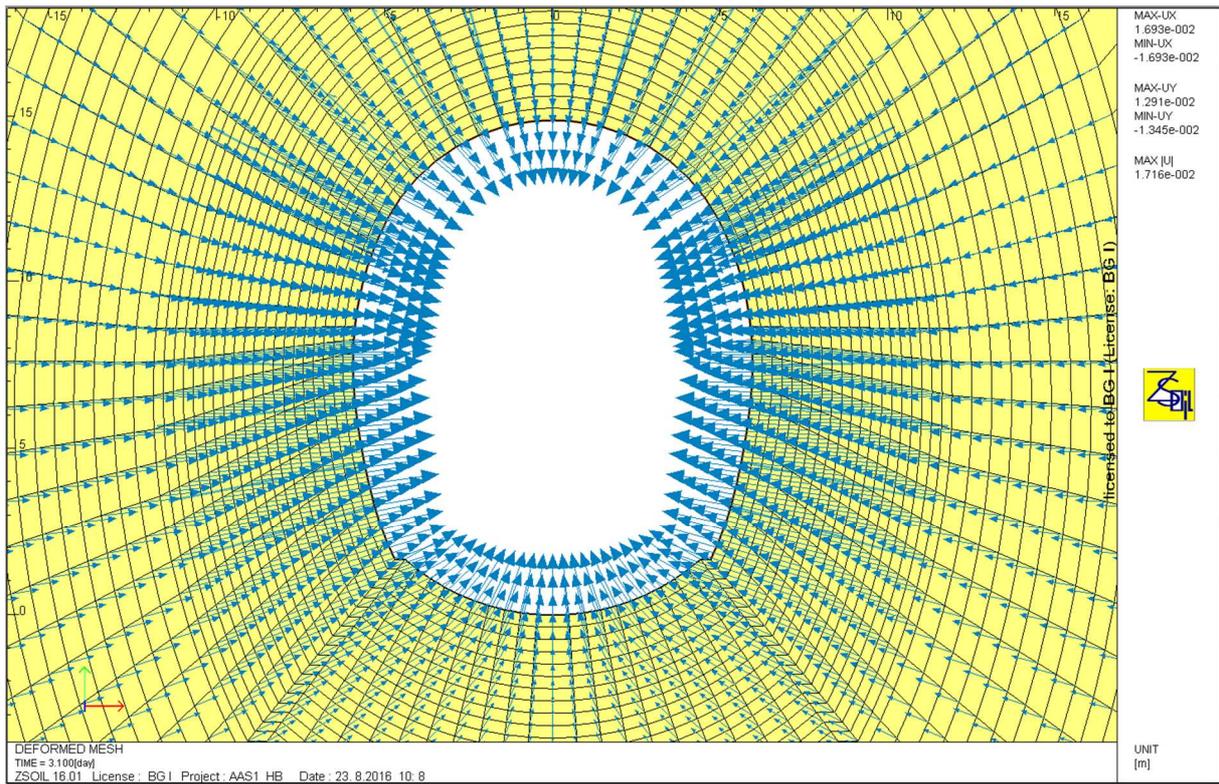


Figura 8: Vettori di spostamento sezione A-A, sostegno S1

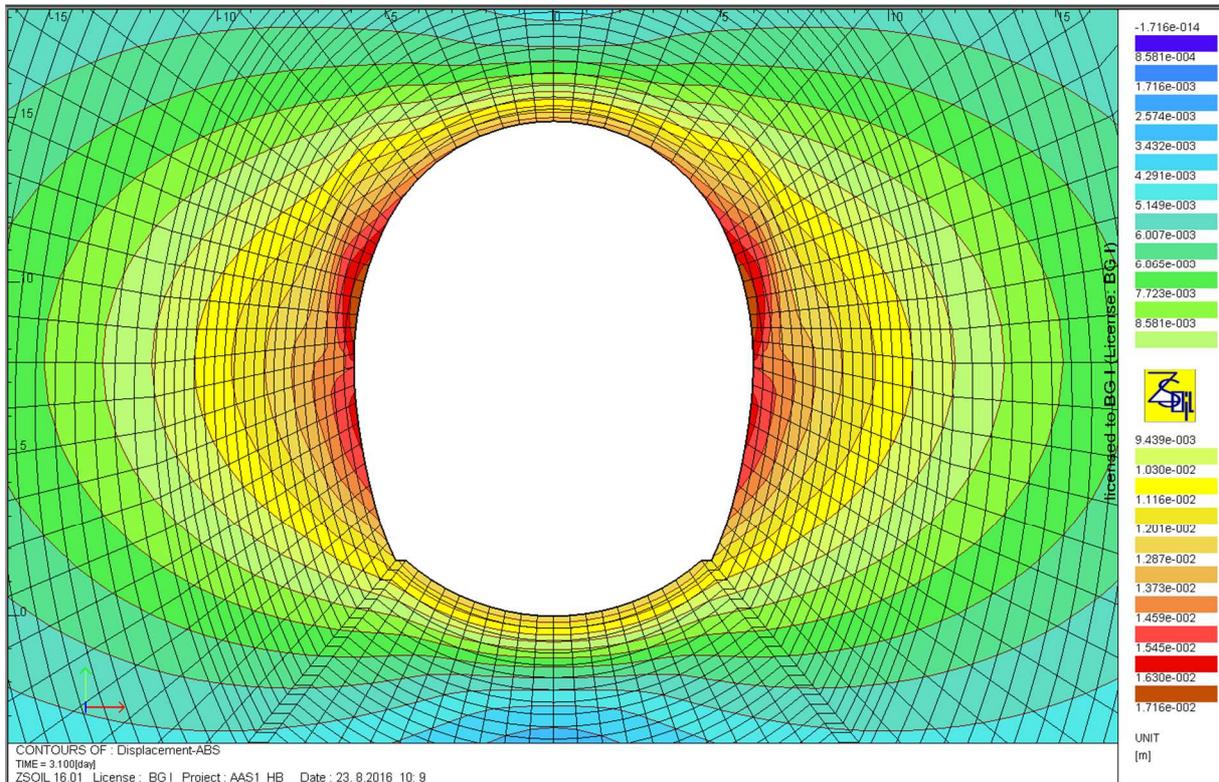


Figura 9: Spostamenti assoluti sezione A-A, sostegno S1

Analizzando gli spostamenti si vede che lo spostamento massimo è a livello dei piedritti della sezione calotta ed è di 1.7 cm. In calotta lo spostamento è di 1.3 cm.

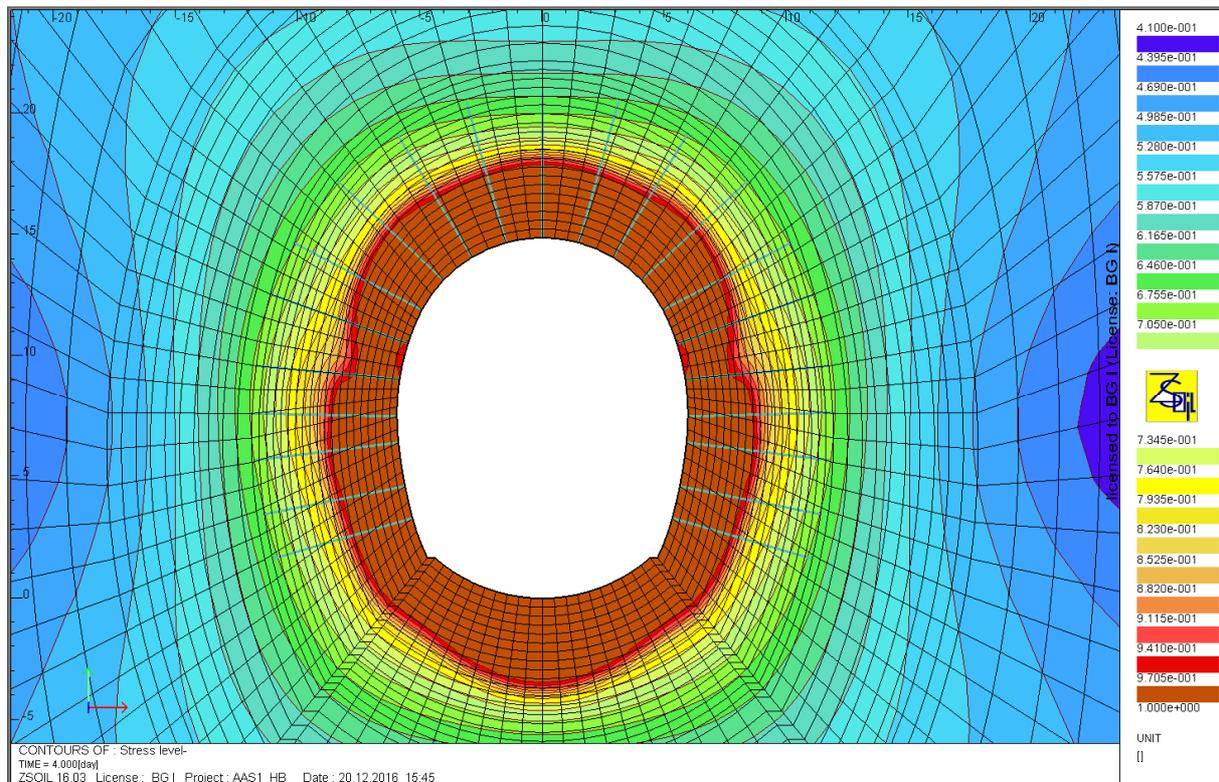


Figura 10: Zone plastiche "Stress Level" A-A, sostegno S1

Le zone plastiche sono visibili in Zsoil attraverso la funzione "Stress Level". Quando il livello tensionale è pari a 1 (zone rappresentate in marrone), si ha plasticizzazione dell'ammasso. Lo spessore della banda plastica è di circa 3 m ed è piuttosto uniforme tutt'attorno allo scavo.

7.2.2 Sezione B-B, tipo di sostegno S1, GSI=65

La situazione critica corrisponde allo scavo della sezione completa in presenza del sostegno L2; il momento massimo si trova nei piedritti della calotta e lo sforzo normale più importante è in chiave di volta.

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

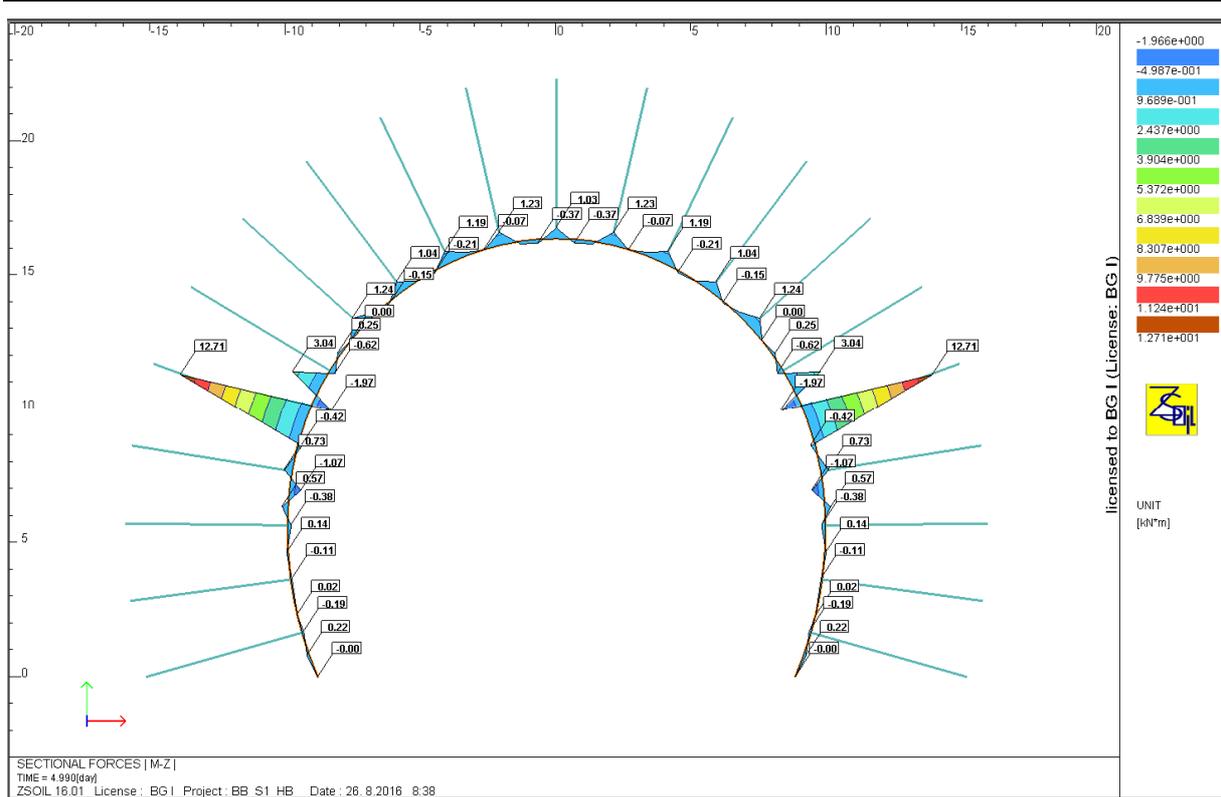


Figura 11: Diagramma dei momenti sezione B-B, sostegno S1

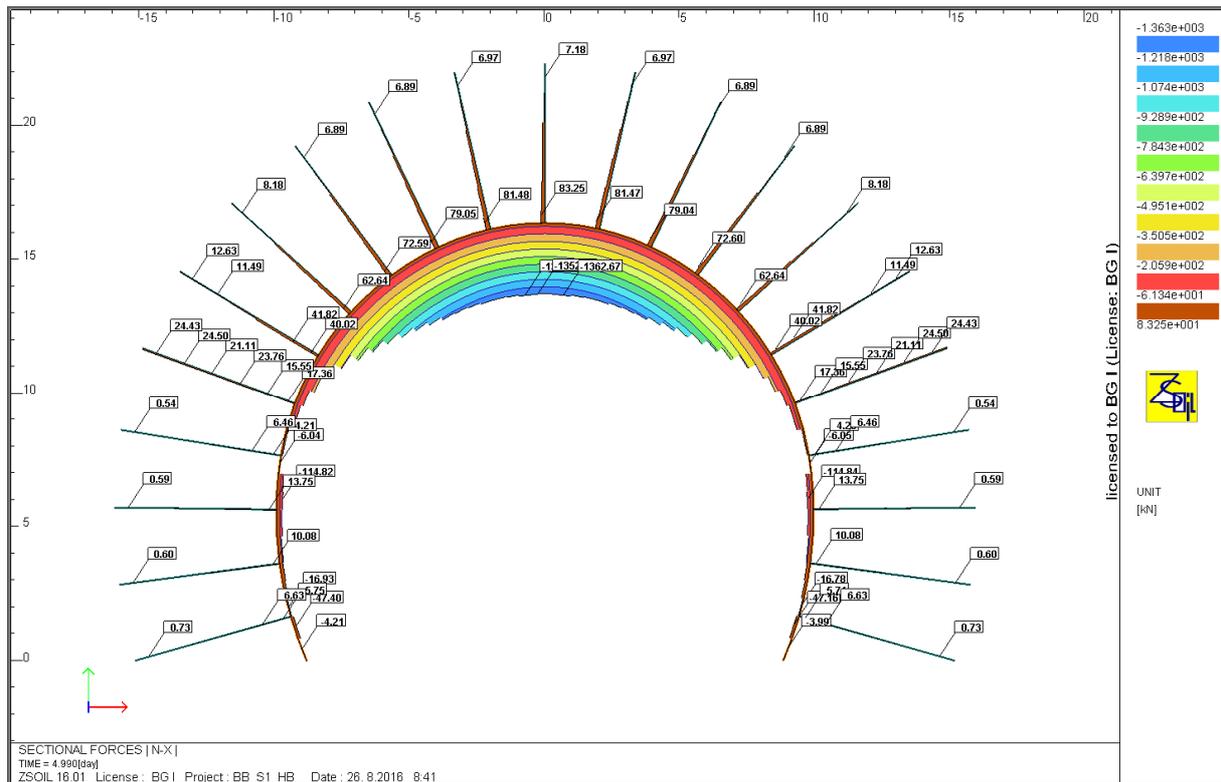


Figura 12: Diagramma degli sforzi normali sezione B-B, sostegno S1

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

Combinazione	Sforzi		Sforzi di calcolo	
	M	N	M _{Ed}	N _{Ed}
	[kNm]	[kN]	[kNm]	[kN]
N _{max} , M	1,03	1362,67	1,34	1771,47
M _{min/max} , N	12,71	61,34	16,52	79,74

Tabella 9 – Sforzi nelle sezioni critiche, sezione B-B, sostegno S1

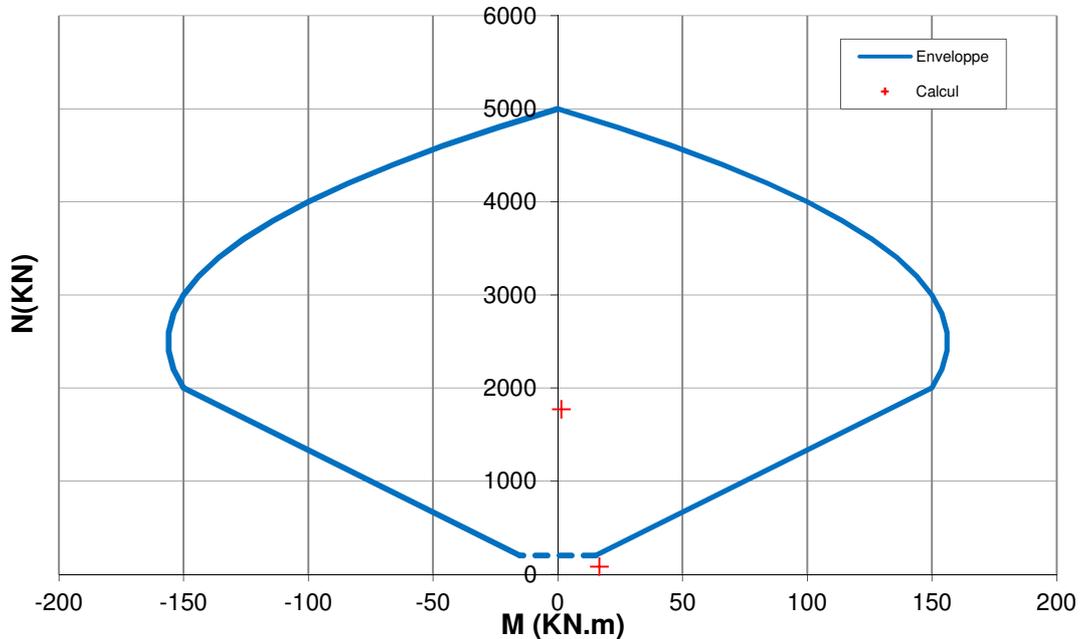


Figura 13: Diagramma d'interazione 25 cm di calcestruzzo proiettato

Secondo le raccomandazioni AFTES GT7, quando lo sforzo normale e il momento sono molto bassi (dominio al di sotto della linea tratteggiata), non si deve eseguire nessuna verifica particolare.

Il fattore di sicurezza per la sezione in calotta è di FS=2.8.

Il bullone più sollecitato è il seguente:

$$N_{Ed} = 1.3 \cdot 83.3 \text{ kN} = 108.29 \text{ kN} < N_{Rd} = 190.5 \text{ kN}$$

$$FS = \frac{190.5}{108.29} = 1.76$$

La deformazione massima è:

$$0.132\% < 7 - 10\%$$

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

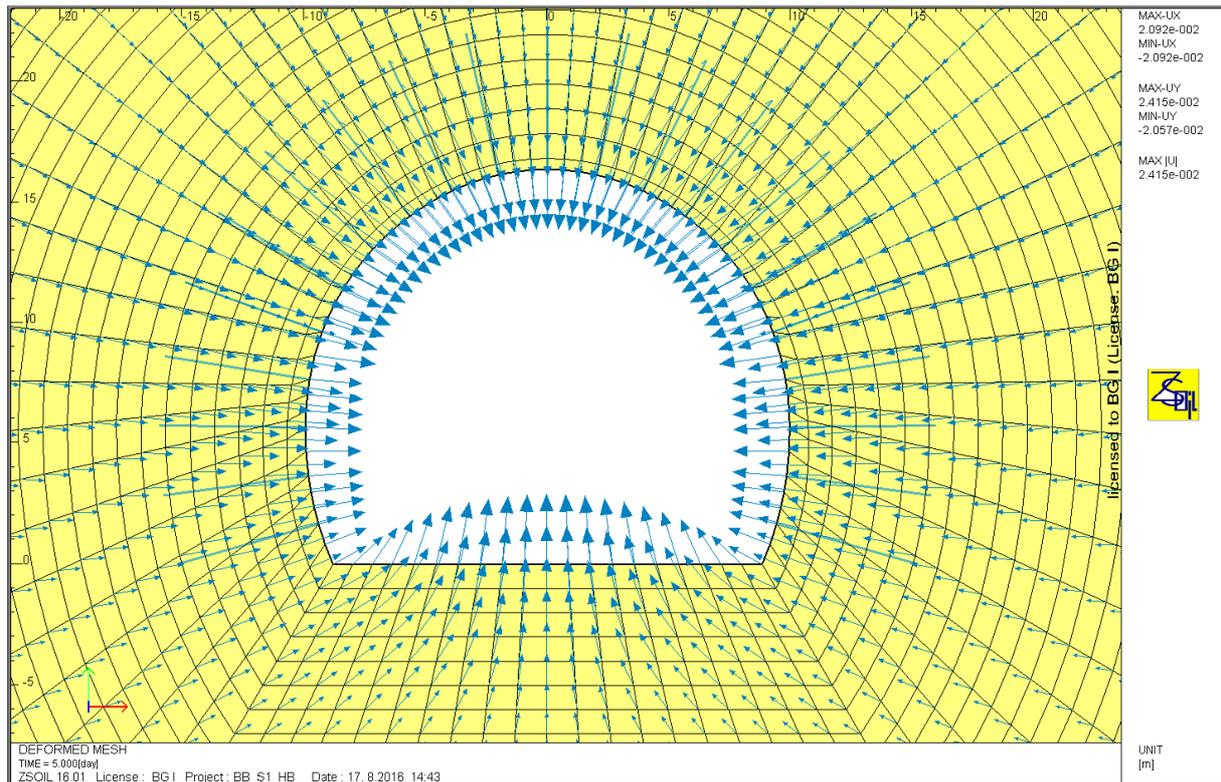


Figura 14: Vettori di spostamento sezione B-B, sostegno S1

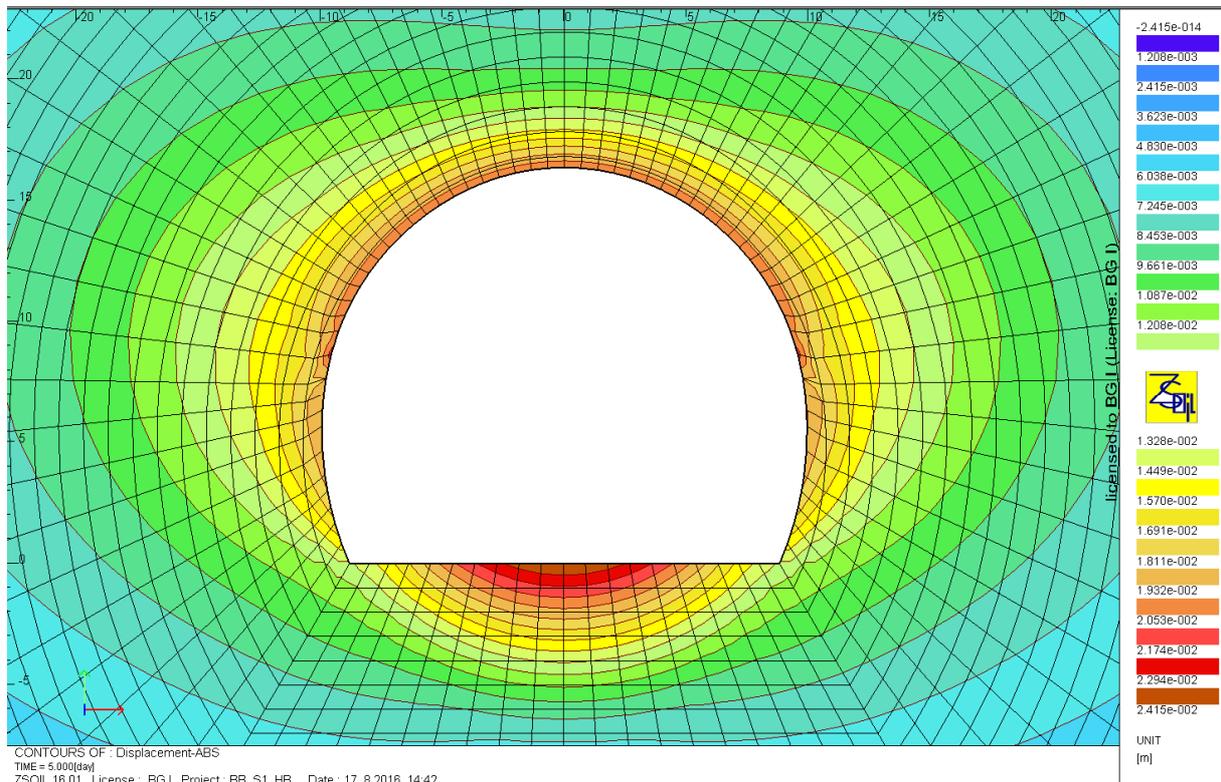


Figura 15: Spostamenti assoluti sezione B-B, sostegno S1

Analizzando gli spostamenti si vede che lo spostamento a livello della calotta ed è di 2.1 cm. Si osserva uno spostamento di 2.4 cm in platea.

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

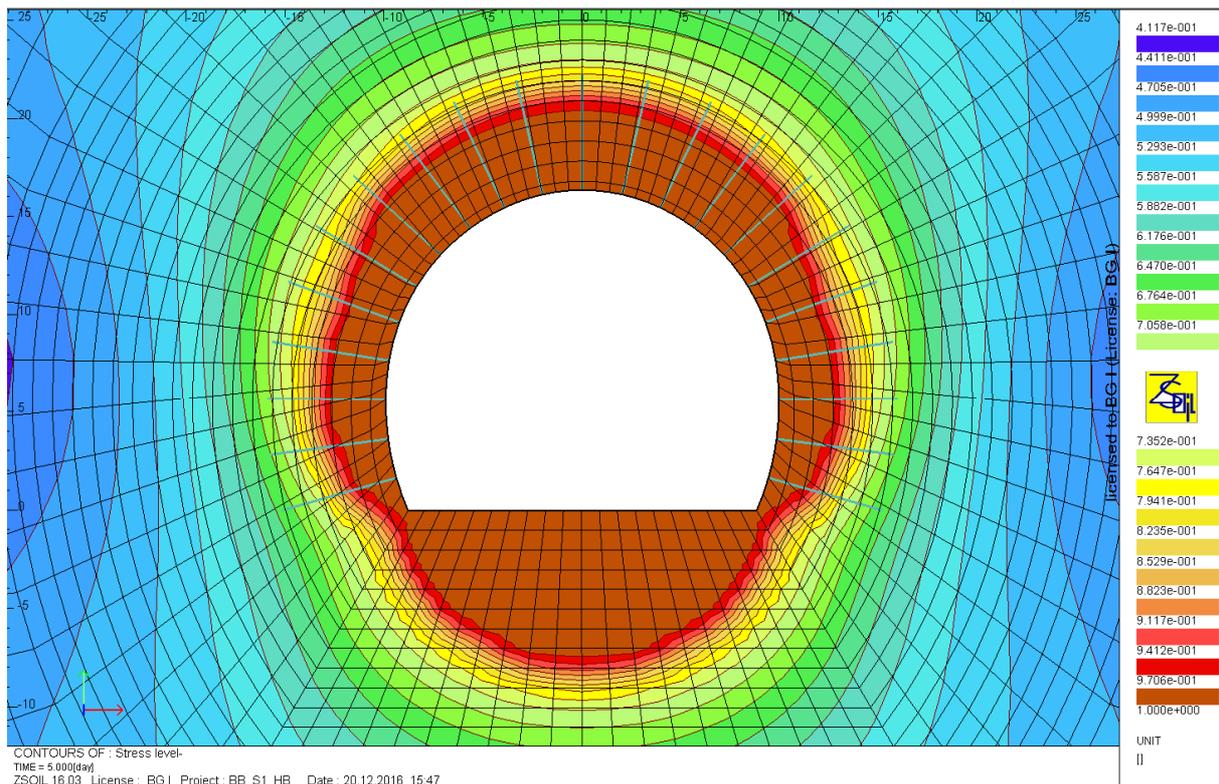


Figura 16: Zone plastiche "Stress Level" B-B, sostegno S1

Lo spessore della banda plastica è di circa 4.5 m in calotta, di circa 7.5 m in platea e di circa 2.5 m nei piedritti.

7.2.3 Sezione E-E, tipo di sostegno S1, GSI=65

La sezione E-E non è parzializzata, lo scavo avviene dunque in piena sezione. Mediante il metodo delle linee caratteristiche si è trovato un tasso di deconfinamento di $\lambda=1$. Il sostegno è attivo quando la convergenza è già avvenuta e non vi è dunque alcun effetto di deconfinamento. Il sostegno non subisce quindi deformazioni né sforzi tali da necessitare una verifica di resistenza.

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

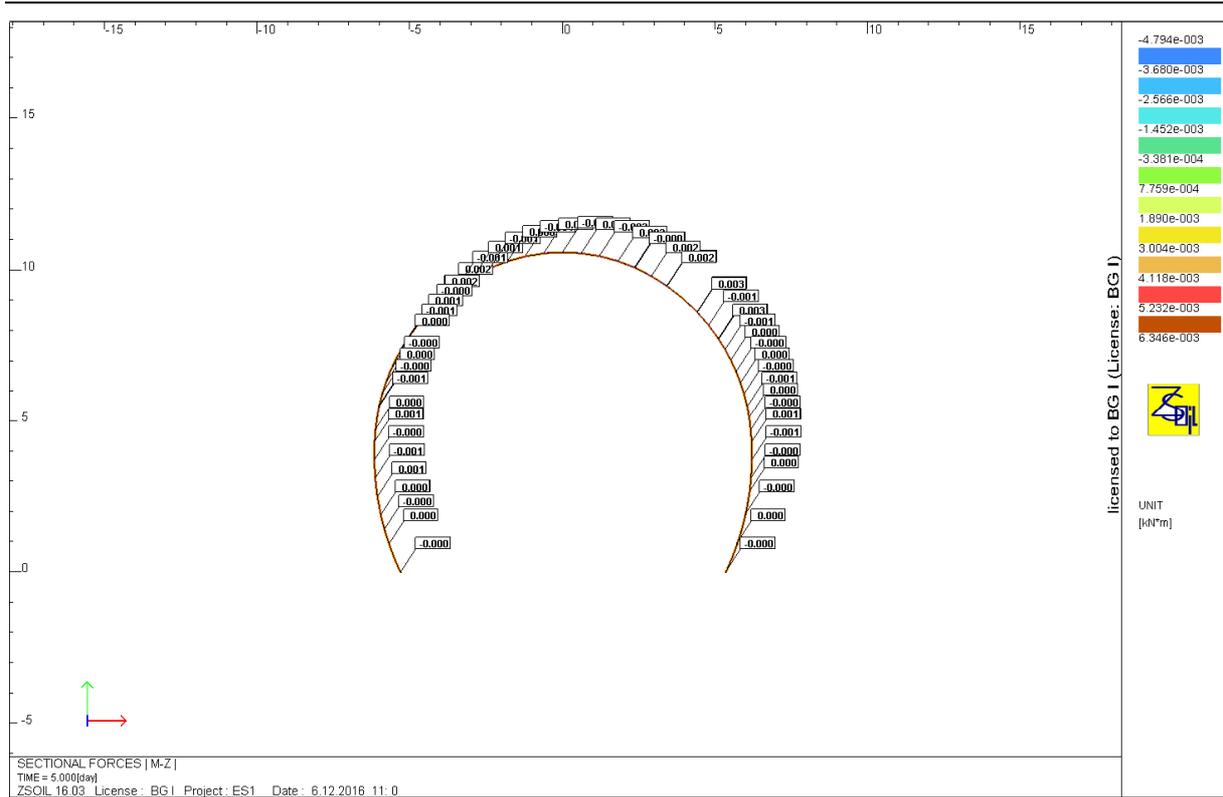


Figura 17: Diagramma dei momenti sezione E-E, sostegno S1

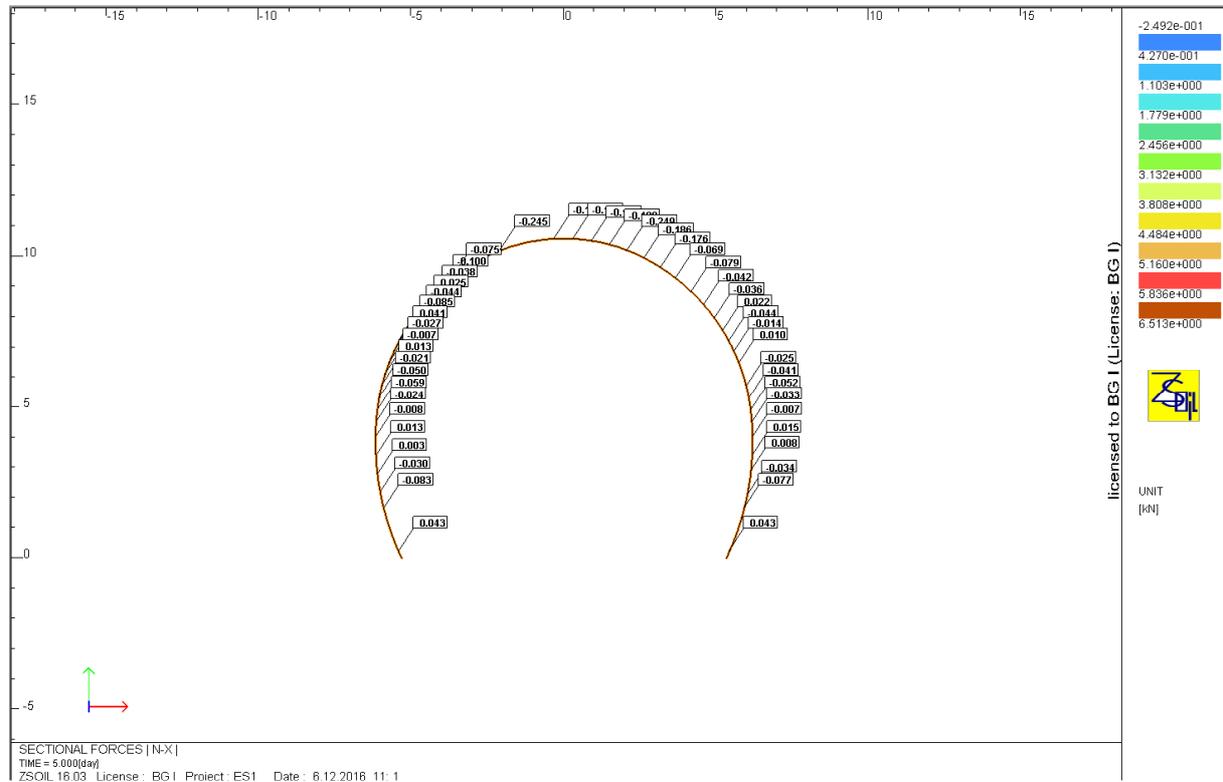


Figura 18: Diagramma sforzi normali sezione E-E, sostegno S1

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

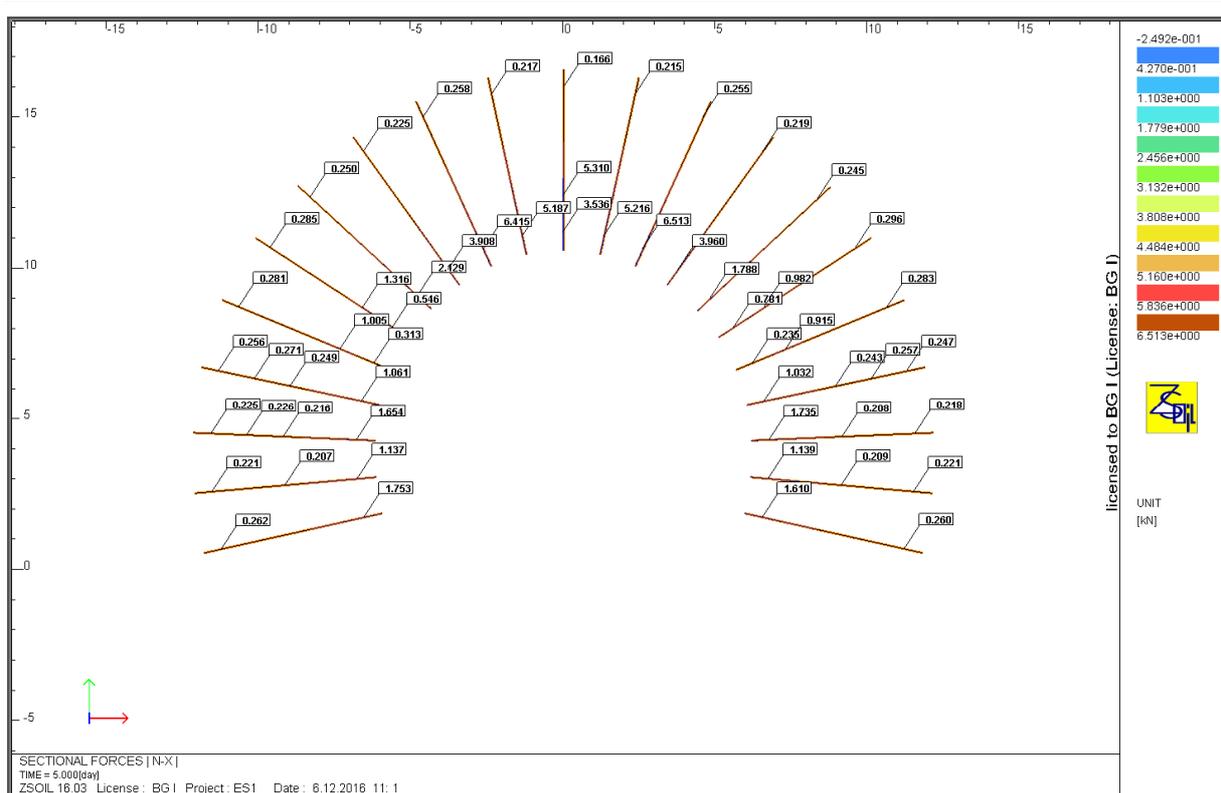


Figura 19: Diagramma sforzi normali nei bulloni sezione E-E, sostegno S1

Gli sforzi nei sostegni sono minimi, tali da non necessitare una verifica strutturale. La funzione del sostegno è quella di controllare i sovrascavi e la caduta di blocchi.

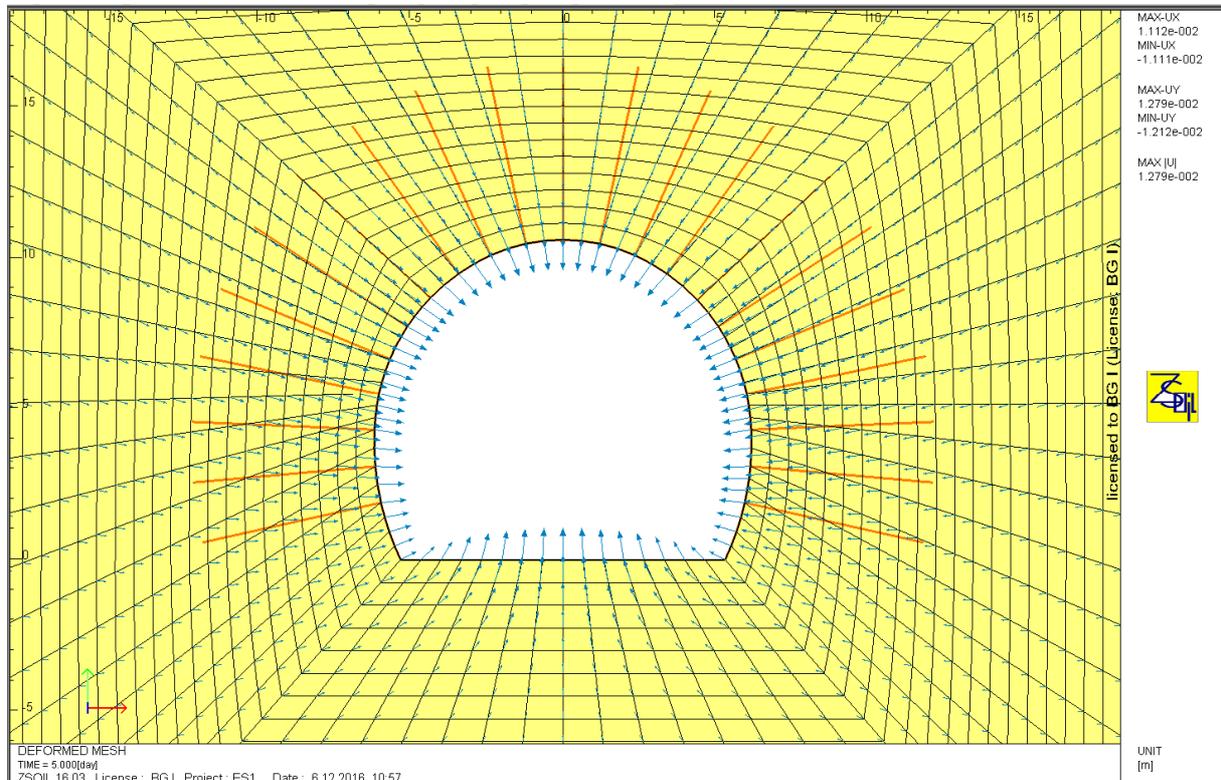


Figura 20: Vettori di spostamento sezione E-E, sostegno S1

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

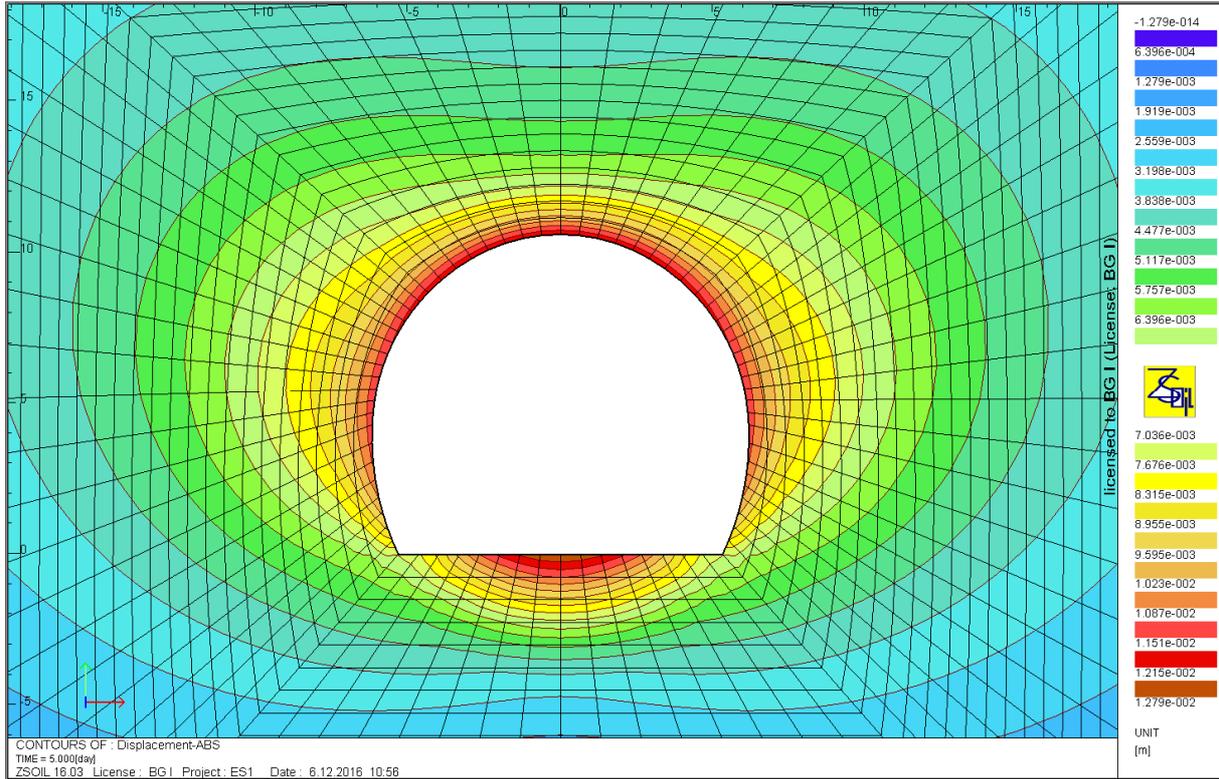


Figura 21: Spostamenti assoluti sezione E-E, sostegno S1

Analizzando gli spostamenti si vede che lo spostamento massimo è a livello della platea ed è di 1.28 cm. In calotta e piedritti lo spostamento massimo è di 1.21 cm.

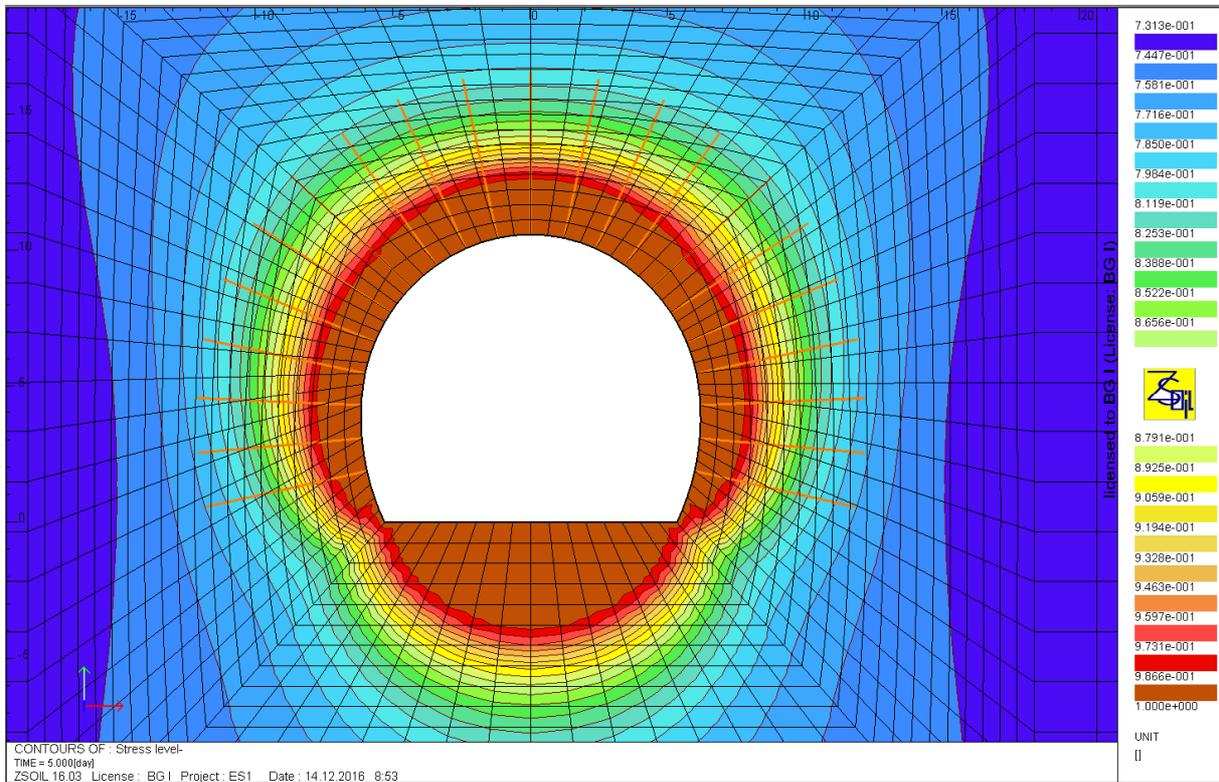


Figura 22: Zone plastiche "Stress Level" E-E, sostegno S1

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

La banda plastica ha uno spessore di 2.40 m in calotta, 1.9 m nei piedritti e 3.37m in arco rovescio.

7.2.4 Sezione H-H, tipo di sostegno S1, GSI=65

Il sostegno è presente solo in calotta, sarà dunque da verificare esclusivamente per la zona L1 siccome gli sforzi sono maggiori e la resistenza minore.

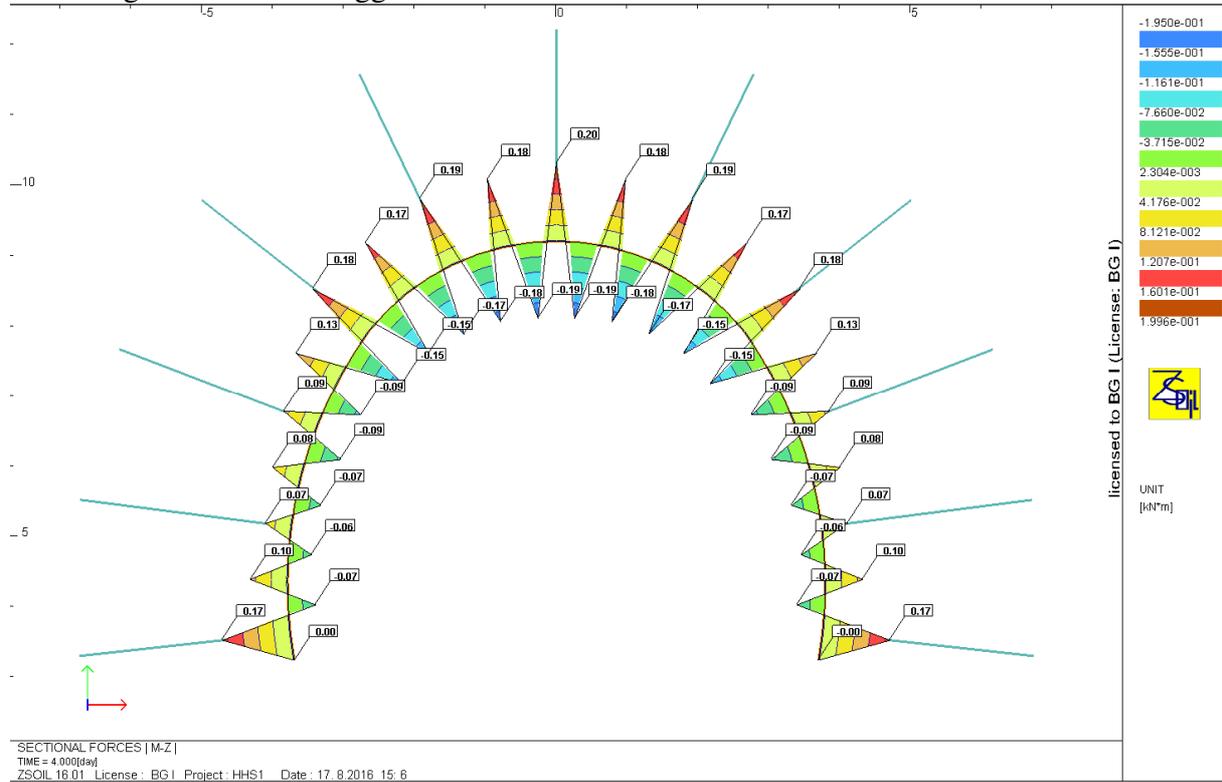


Figura 23: Diagramma dei momenti sezione H-H, sostegno S1

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

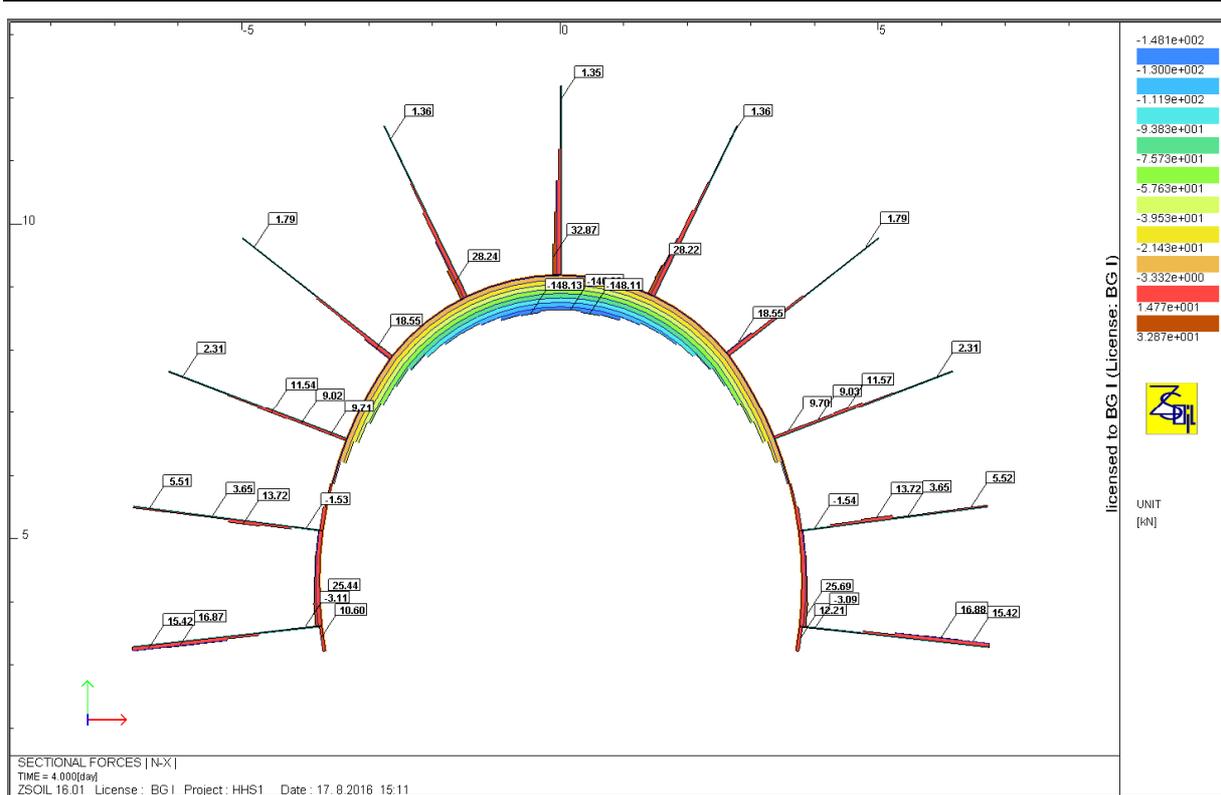


Figura 24: Diagramma degli sforzi normali sezione H-H, sostegno S1

Combinazione	Sforzi		Sforzi di calcolo	
	M	N	M _{Ed}	N _{Ed}
	[kNm]	[kN]	[kNm]	[kN]
N _{max} , M	0,2	148,11	0,26	192,54
M _{min/max} , N	0,17	10,6	0,22	13,78

Tabella 10 – Sforzi nelle sezioni critiche, sezione H-H, sostegno S1

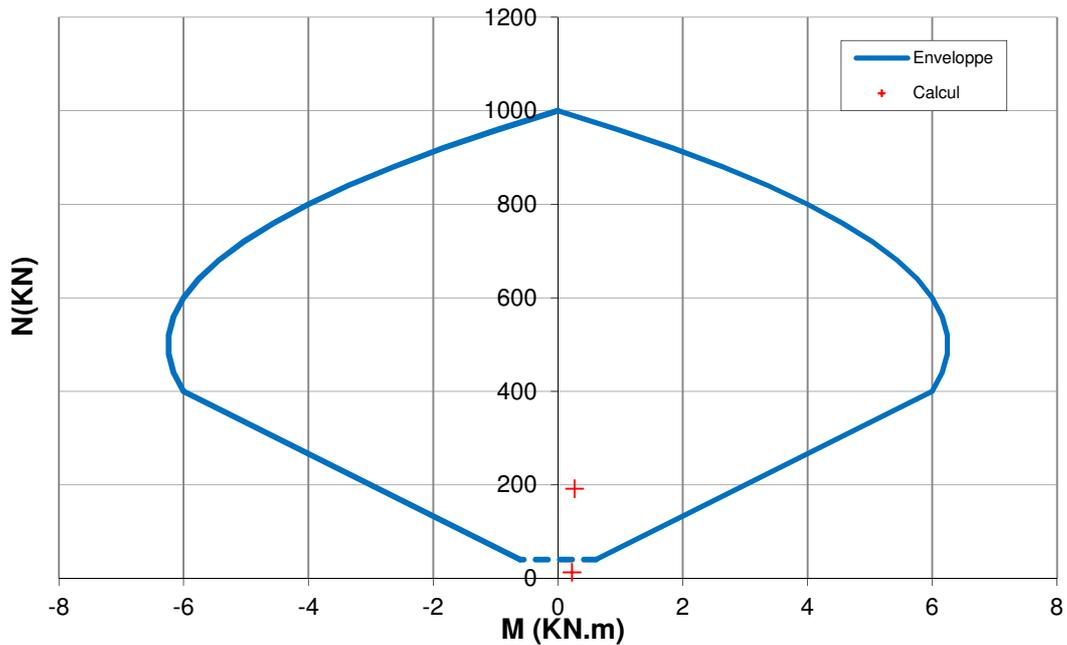


Figura 25: Diagramma d'interazione 5 cm di calcestruzzo proiettato

Secondo le raccomandazioni AFTES GT7, quando lo sforzo normale e il momento sono molto bassi (dominio al di sotto della linea tratteggiata), non si deve eseguire nessuna verifica particolare.

Riguardo alla resistenza, il fattore di sicurezza è $FS=4.9$.

Il bullone più sollecitato è il seguente:

$$N_{Ed} = 1.3 \cdot 32.87 \text{ kN} = 42.73 \text{ kN} < N_{Rd} = 190.5 \text{ kN}$$
$$FS = \frac{190.5}{42.73} = 4.46$$

La deformazione massima è:

$$0.052\% < 7 - 10\%$$

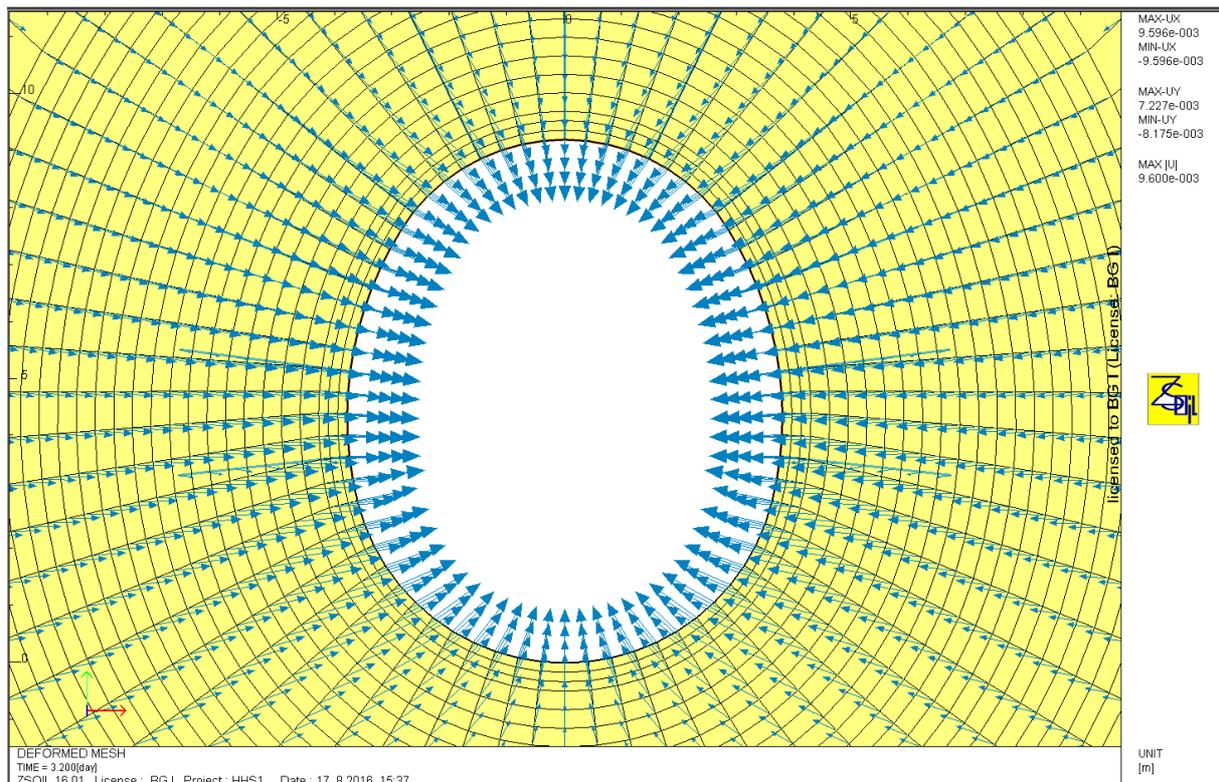


Figura 26: Vettori di spostamento sezione H-H, sostegno S1

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

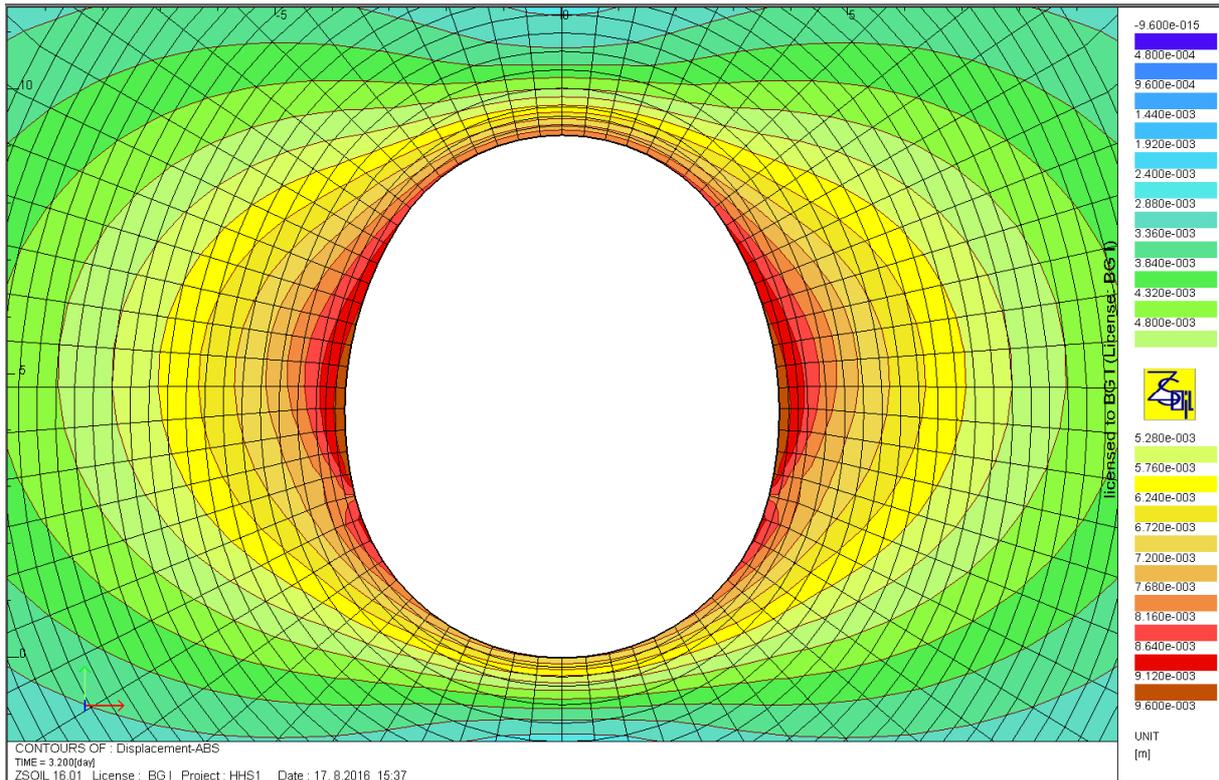


Figura 27: Spostamenti assoluti sezione H-H, sostegno S1

Analizzando gli spostamenti si vede che lo spostamento massimo è a livello dei piedritti della calotta ed è di 0.96 cm.

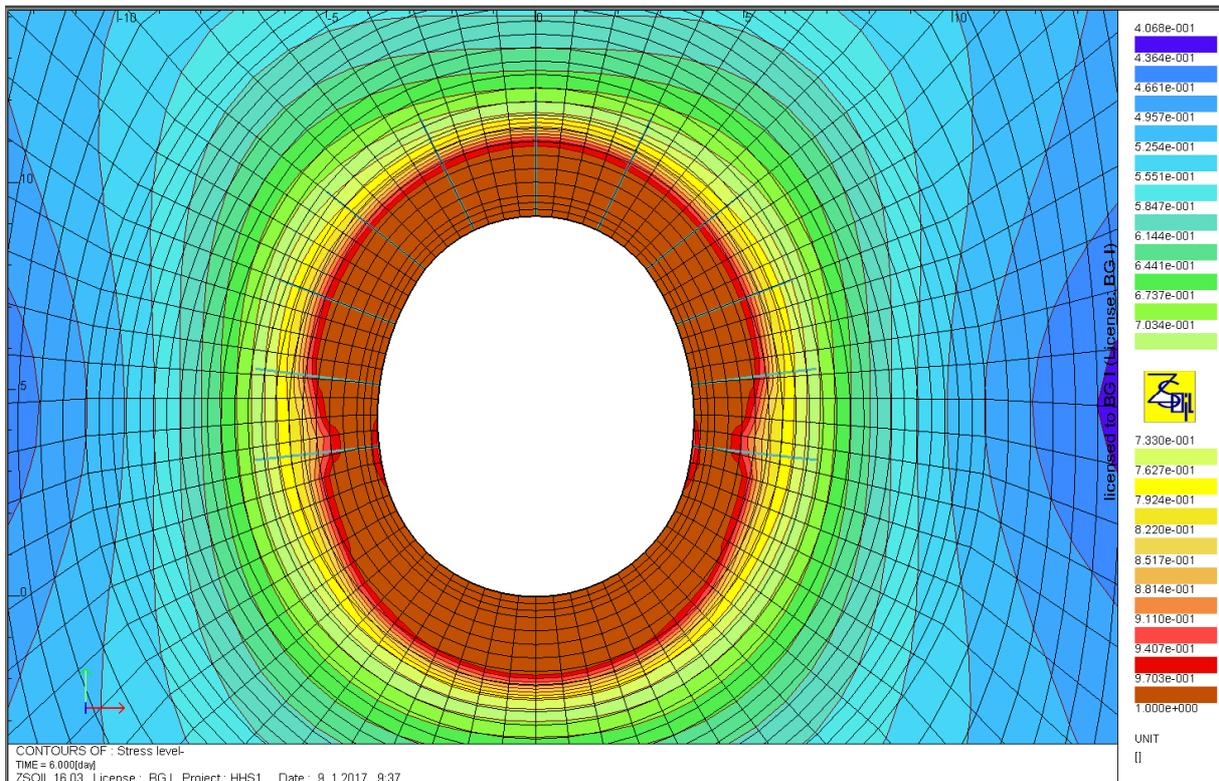


Figura 28: Zone plastiche "Stress Level" H-H, sostegno S1

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

Lo spessore della banda plastica è di circa 1.8 m in calotta e di 1.5 m nei piedritti.

7.2.5 Sezione R-R, tipo di sostegno S1, GSI=65

Mediante il metodo delle linee caratteristiche si è trovato un tasso di deconfinamento di $\lambda=1$. Il sostegno è attivo quando la convergenza è già avvenuta e non vi è dunque alcun effetto di deconfinamento.

La funzione del sostegno è quella di controllare i sovrascavi e la caduta di blocchi. Le deformazioni e le zone plastiche in condizioni intrinseche sono peraltro contenute.

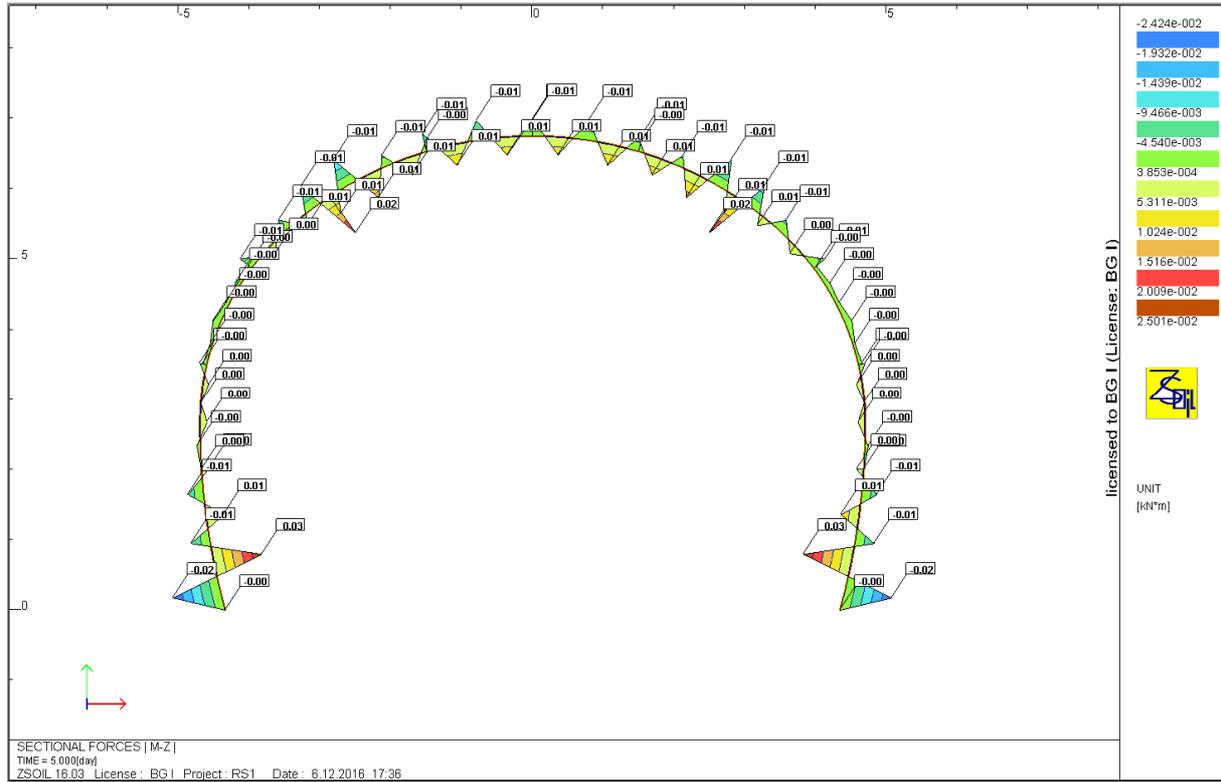


Figura 29: Diagramma dei momenti sezione R-R, sostegno S1

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

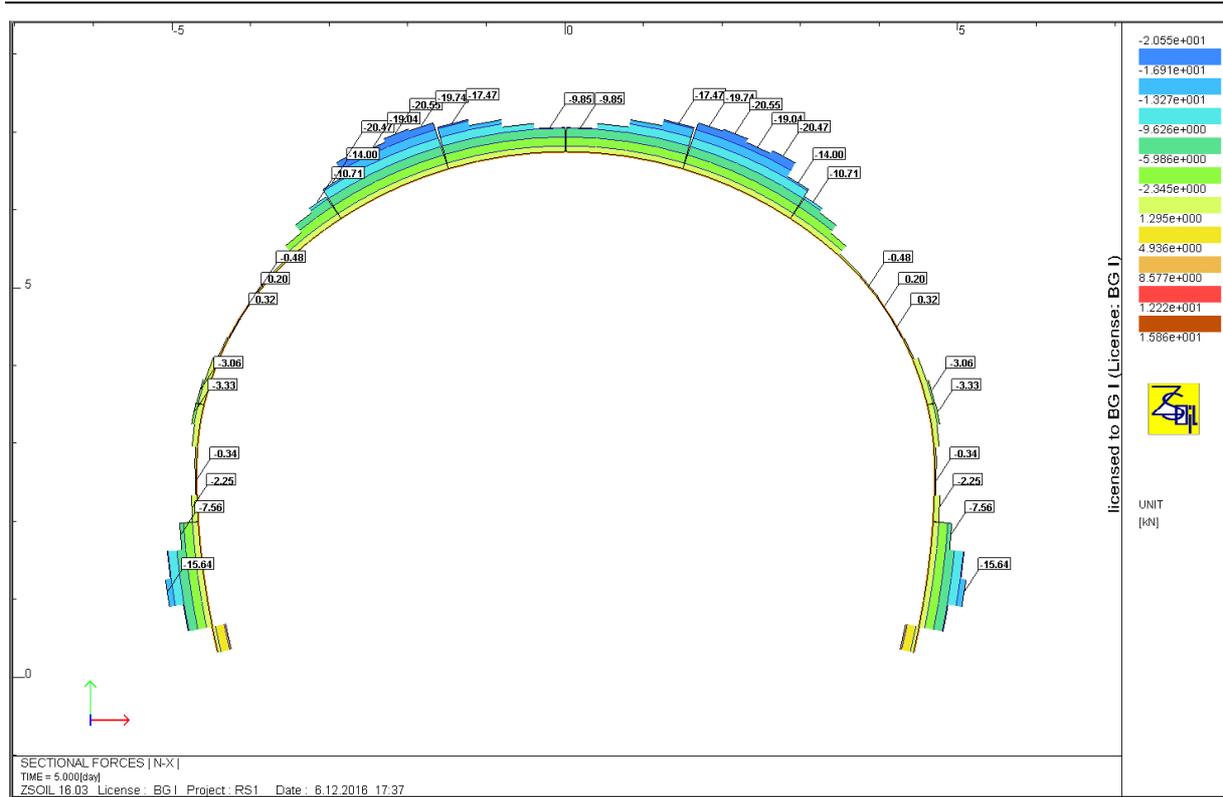


Figura 30: Diagramma degli sforzi normali sezione R-R, sostegno S1

Combinazione	Sforzi		Sforzi di calcolo	
	M	N	M_{Ed}	N_{Ed}
	[kNm]	[kN]	[kNm]	[kN]
$M_{min/max}, N_{max}$	0,02	20,55	0,026	26,715

Tabella 11 – Sforzi nelle sezioni critiche, sezione R-R, sostegno S1

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

Données

Largeur section $b =$	1 m
Epaisseur section $h_w =$	0,05 m
Résistance du béton à la compression $f_{ck} =$	30 MPa
Coefficient effets à long terme $\alpha_{cc,pl}$ et $\alpha_{ct,pl} =$	1
Facteur de sécurité (marge) =	1
Coefficient partiel relatif au béton $\gamma_c =$	1,5
Coefficient relatif aux actions $\gamma_{ELU} =$	1,3

Résultats

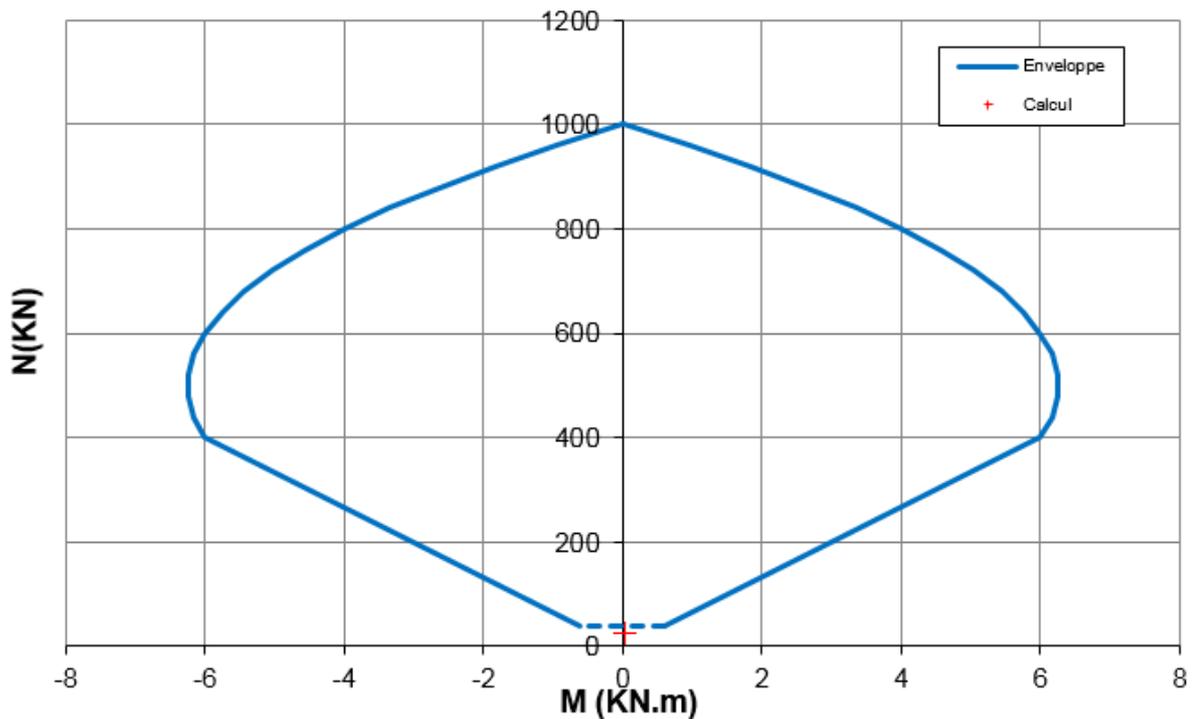


Figura 31: Diagramma d'interazione 5 cm di calcestruzzo proiettato

Secondo le raccomandazioni AFTES GT7, quando lo sforzo normale e il momento sono molto bassi (dominio al di sotto della linea tratteggiata), non si deve eseguire nessuna verifica particolare: $FS \gg 1$.

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

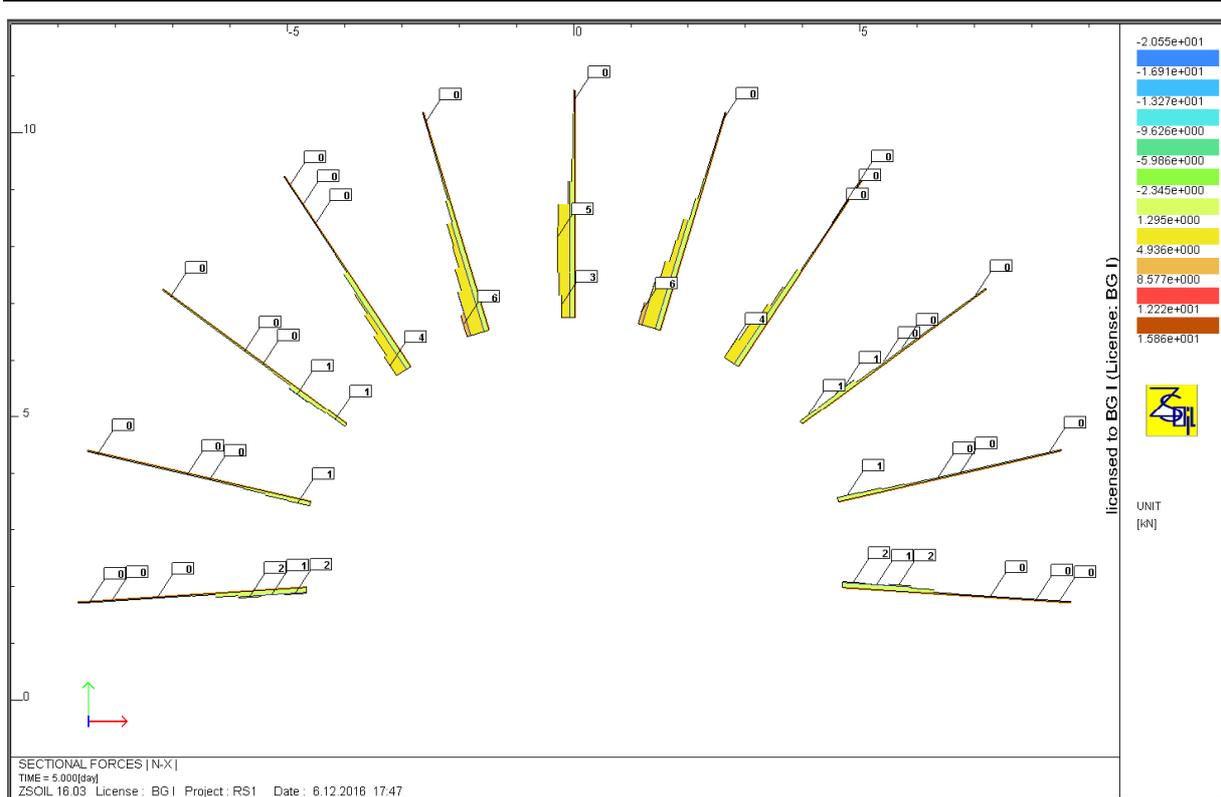


Figura 32: Diagramma degli sforzi normali nei bulloni

$$6 \text{ kN} \cdot 1.3 = 7.8 \text{ kN} < 190.5 \text{ kN}$$

$$FS = \frac{190.5}{7.8} = 24.4$$

$$0.005\% < 7 - 10\%$$

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

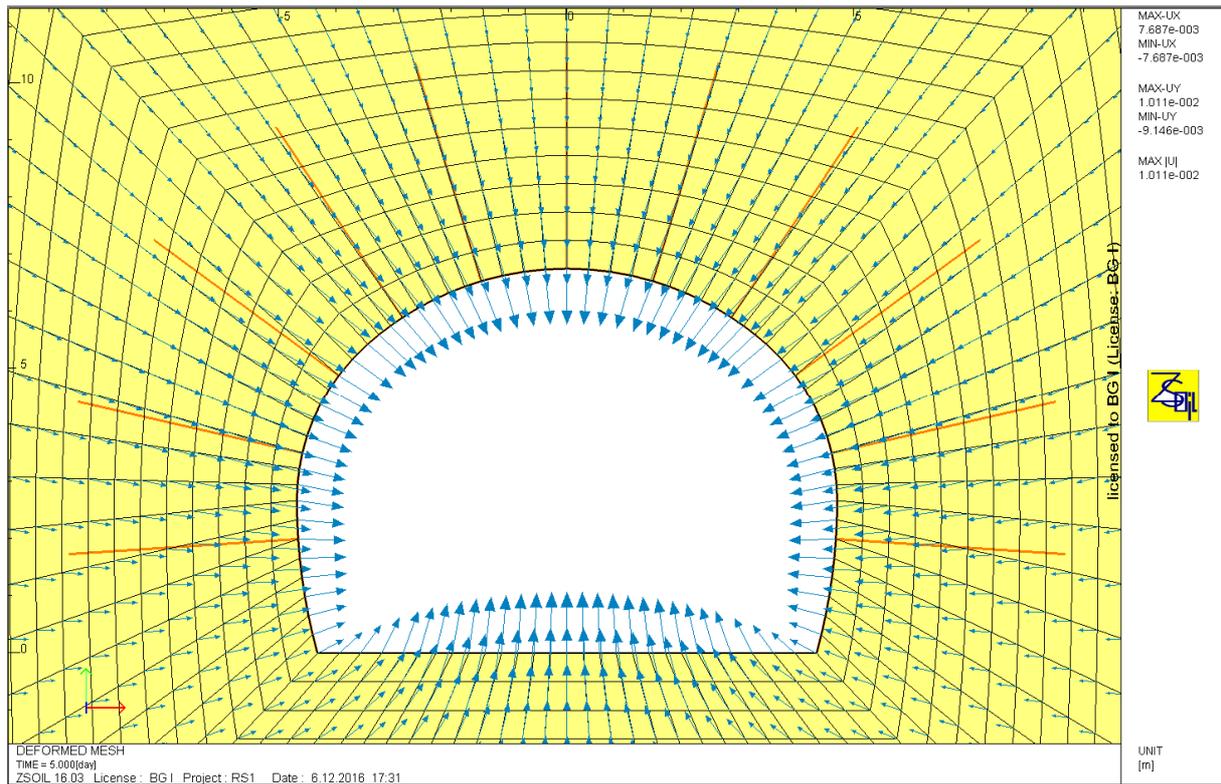


Figura 33: Vettori di spostamento sezione R-R, sostegno S1

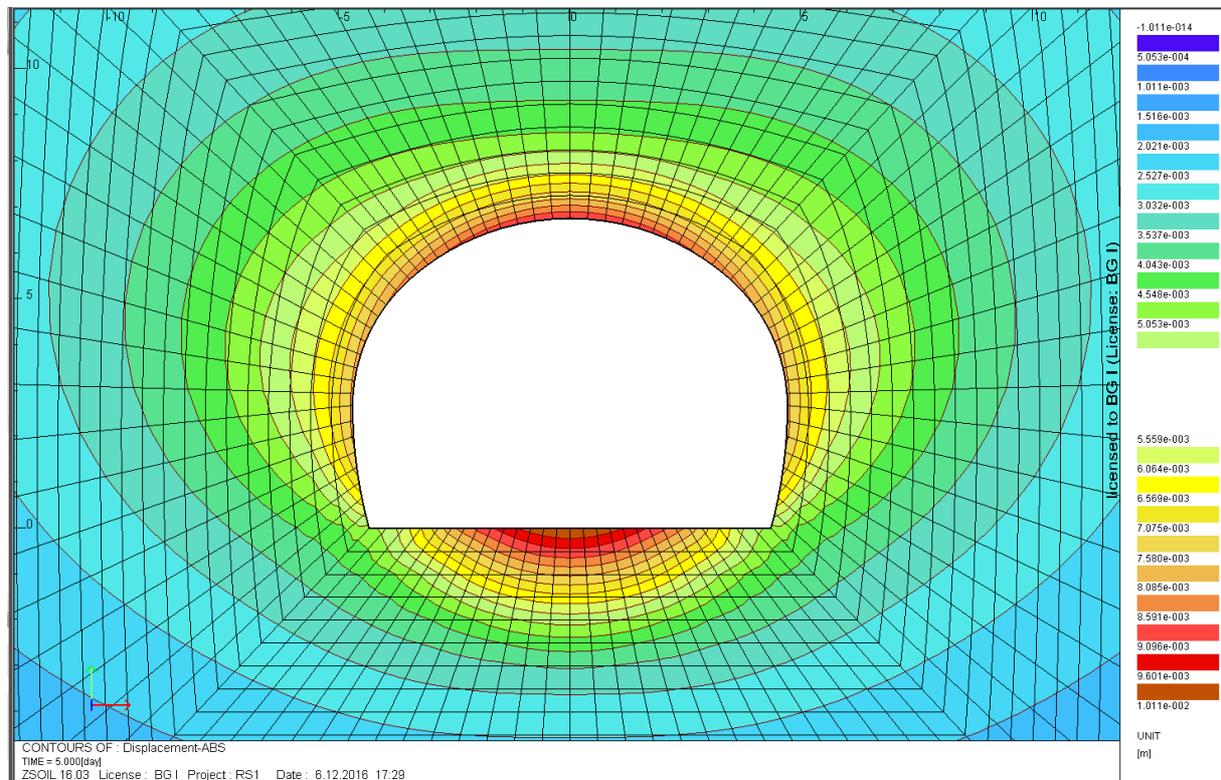


Figura 34: Spostamenti assoluti sezione R-R, sostegno S1

Analizzando gli spostamenti si vede che lo spostamento massimo è a livello della platea ed è di 1.0 cm. In calotta lo spostamento è di 0.9 cm.

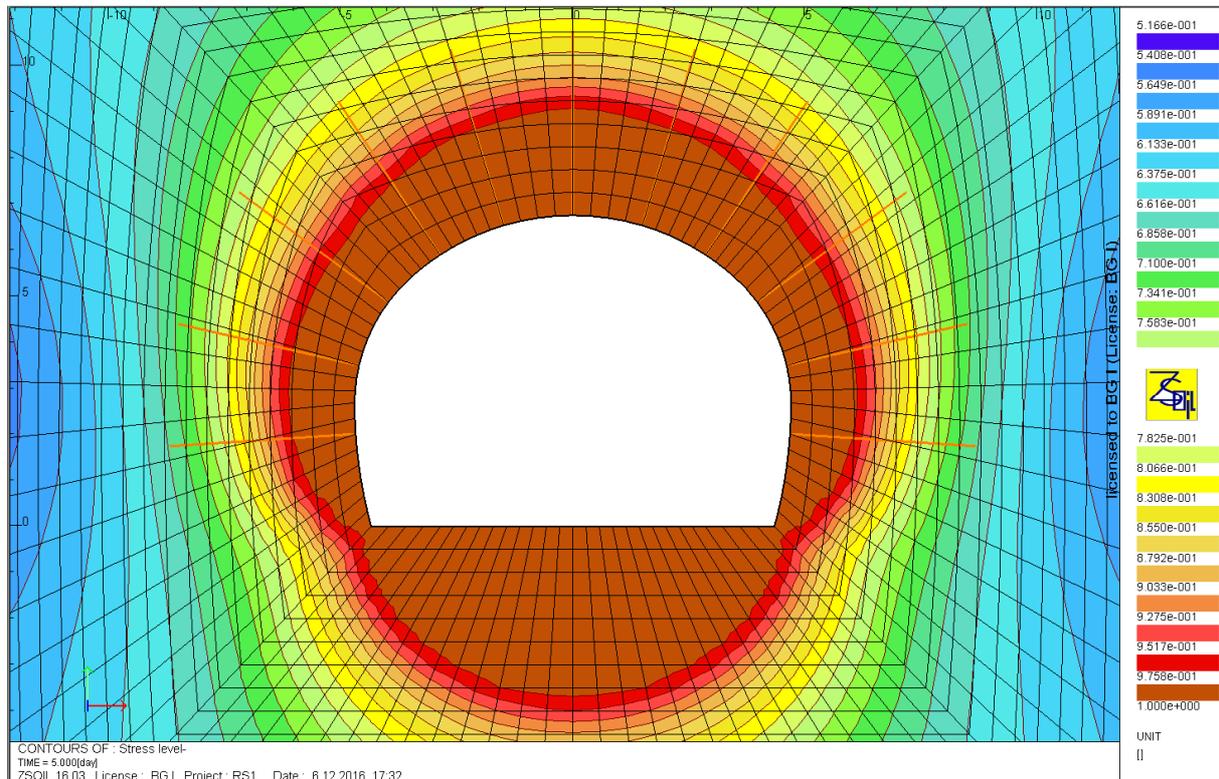


Figura 35: Zone plastiche "Stress Level" R-R, sostegno S1

La banda plastica ha uno spessore di 2.5 m in calotta, 1.5m nei piedritti e 4.0 m in arco rovescio.

7.2.6 Sezione I-I, tipo di sostegno S1, GSI=65

Mediante il metodo delle linee caratteristiche si è trovato un tasso di deconfinamento di $\lambda=1$. Il sostegno è attivo quando la convergenza è già avvenuta e non vi è dunque alcun effetto di deconfinamento. Inoltre lo scavo avviene a piena sezione e la forma della sezione è completamente circolare. Il sostegno non subisce quindi deformazioni né sforzi tali da necessitare una verifica di resistenza.

La funzione del sostegno è quella di controllare i sovrascavi e la caduta di blocchi. Le deformazioni e le zone plastiche in condizioni intrinseche sono peraltro contenute, anche in relazione alle dimensioni della sezione (sezioni "piccole").

7.2.7 Sezione A-A, tipo di sostegno S2, GSI=60

La situazione determinante per le verifiche è alla fine dello scavo dello strozzo. Infatti, dopo lo scavo della calotta e la messa in opera in calotta dei sostegni in L1 e L2, si scava lo strozzo e si mette in opera, nello strozzo, il sostegno in L1: questa è la situazione determinante siccome il sostegno non è completo (manca ancora la messa in opera dei sostegni in L2) e gli sforzi sono massimi.

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

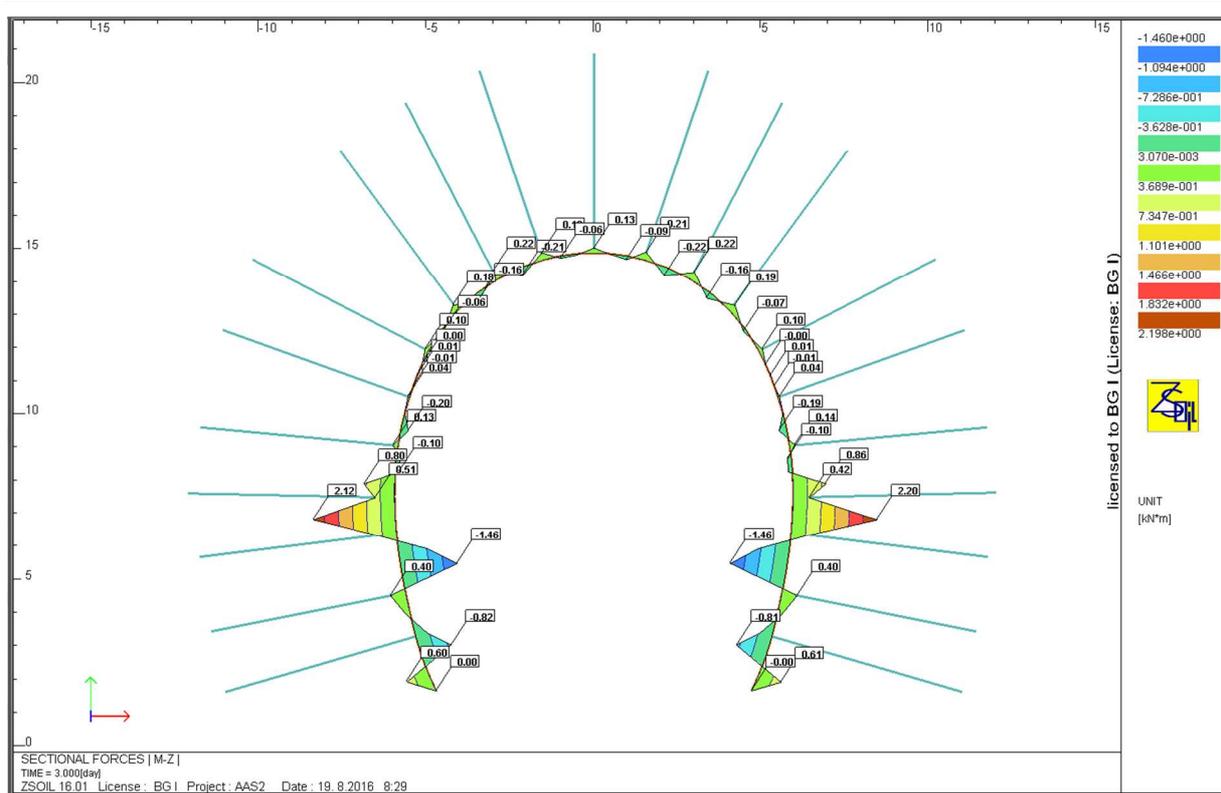


Figura 36: Diagramma dei momenti sezione A-A, sostegno S2

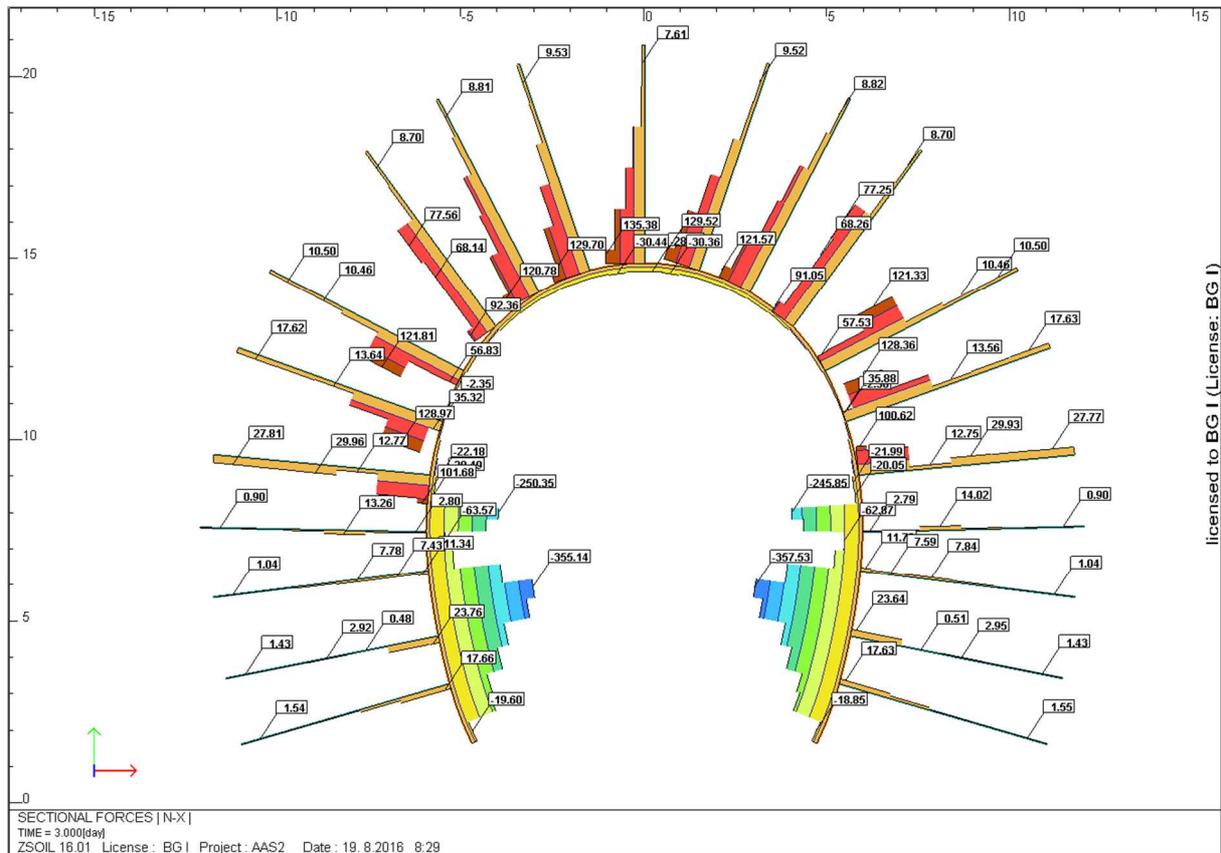


Figura 37: Diagramma degli sforzi normali sezione A-A, sostegno S2

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

Combinazione	Sforzi			Sforzi di calcolo		
	M	N	V	M _{Ed}	N _{Ed}	V _{Ed}
	[kNm]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kN]	[kN]
M _{min,max}	2.20	62.87	3.16	2,86	81,73	4,11
N _{max}	1.46	357.53	3.06	1,90	464,79	3,98

Tabella 12 – Sforzi nelle sezioni critiche, sezione A-A, sostegno S2

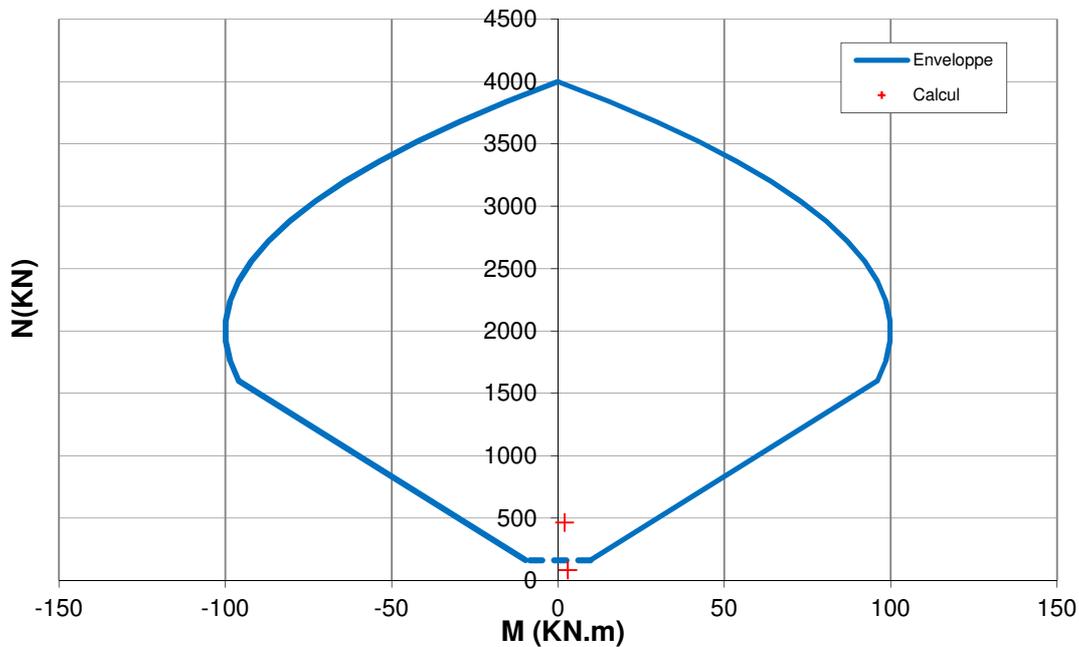


Figura 38: Diagramma d'interazione 15 cm di calcestruzzo proiettato

Secondo le raccomandazioni AFTES GT7, quando lo sforzo normale e il momento sono molto bassi (dominio al disotto della linea tratteggiata), non si deve effettuare nessuna verifica particolare. Per la sezione dove lo sforzo normale è determinante, il fattore di sicurezza è pari a FS=8.25.

Il bullone più sollecitato è il seguente:

$$N_{Ed} = 1.3 \cdot 137.0 \text{ kN} = 178.1 \text{ kN} < N_{Rd} = 190.5 \text{ kN}$$

$$FS = \frac{190.5}{178.1} = 1.07$$

La deformazione massima è:

$$0.201\% < 7 - 10\%$$

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

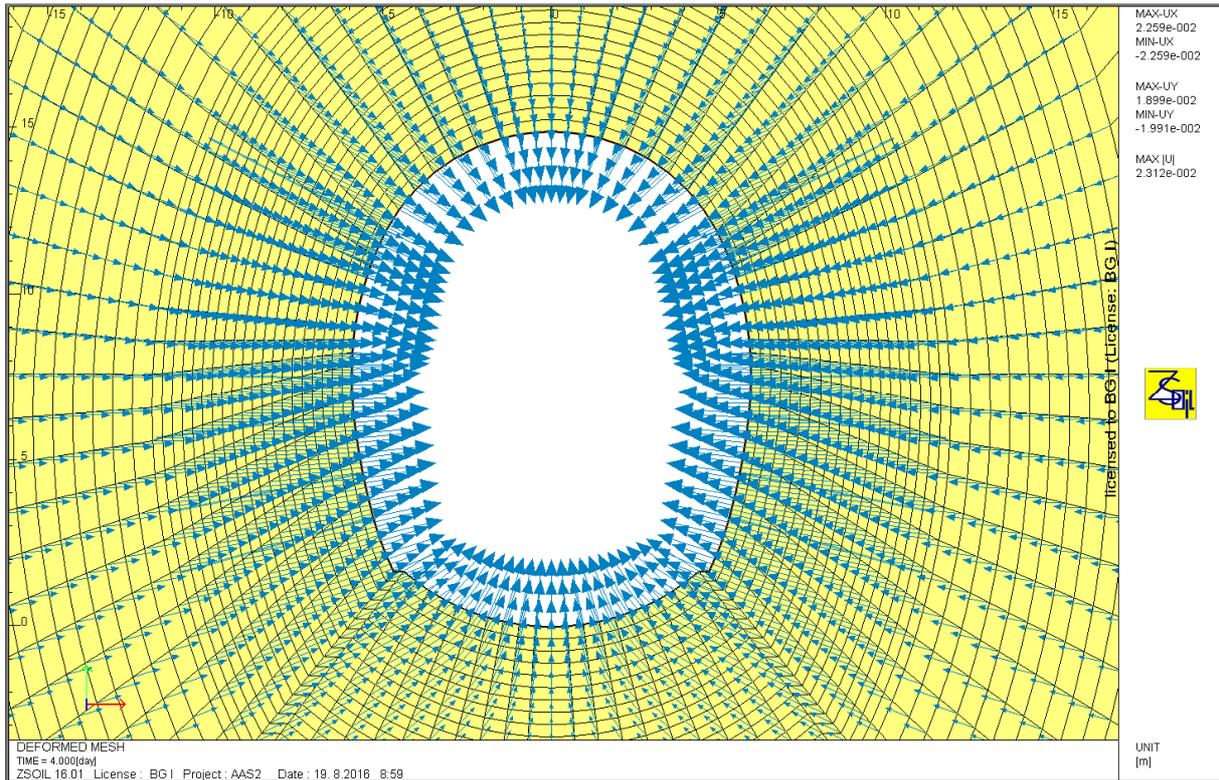


Figura 39: Vettori di spostamento sezione A-A, sostegno S2

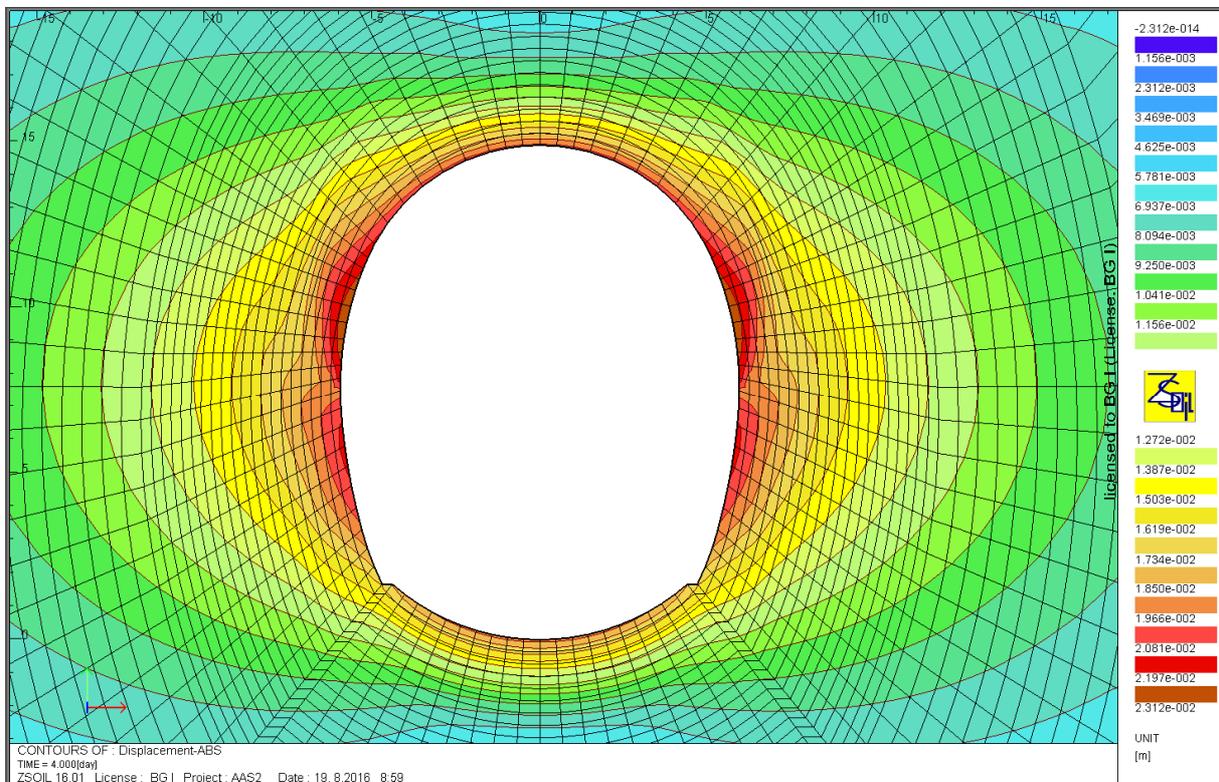


Figura 40: Spostamenti assoluti sezione A-A, sostegno S2

Gli spostamenti sono massimi nelle pareti, a livello dei piedi della calotta e pari a 2.31 cm.

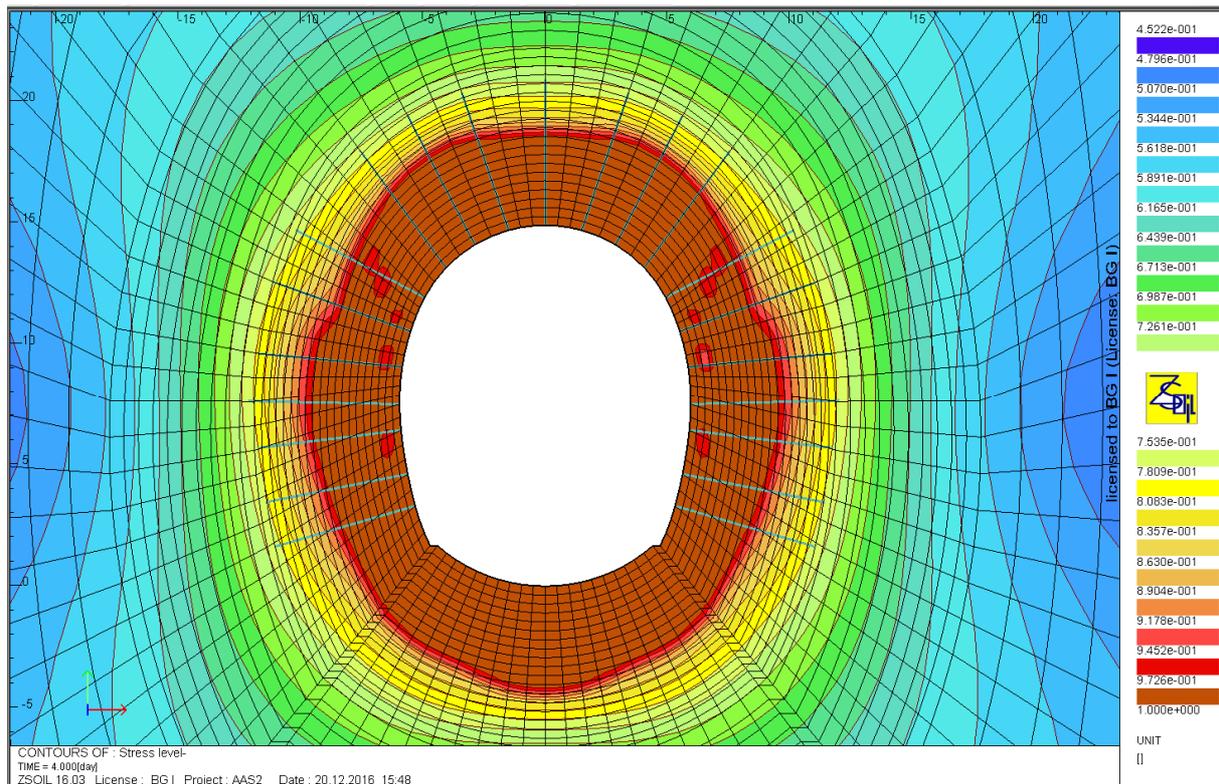


Figura 41: Zone plastiche "Stress Level" A-A, sostegno S2

In calotta e nelle pareti la banda plastica ha una larghezza di circa 4 m.

7.2.8 Sezione B-B, tipo di sostegno S2, GSI=60

In questa sezione sono presenti centine reticolari 4G 180/22 in 33 cm di calcestruzzo proiettato. Una sezione equivalente dalle caratteristiche seguenti è stata introdotta nel programma di calcolo:

$$t_{eq} = 33 \text{ cm}$$

$$E_{eq} = 8630 \text{ MPa}$$

La situazione critica è lo scavo della calotta in presenza del sostegno L1; il momento massimo si trova nei piedritti e lo sforzo normale più importante è in chiave di volta.

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

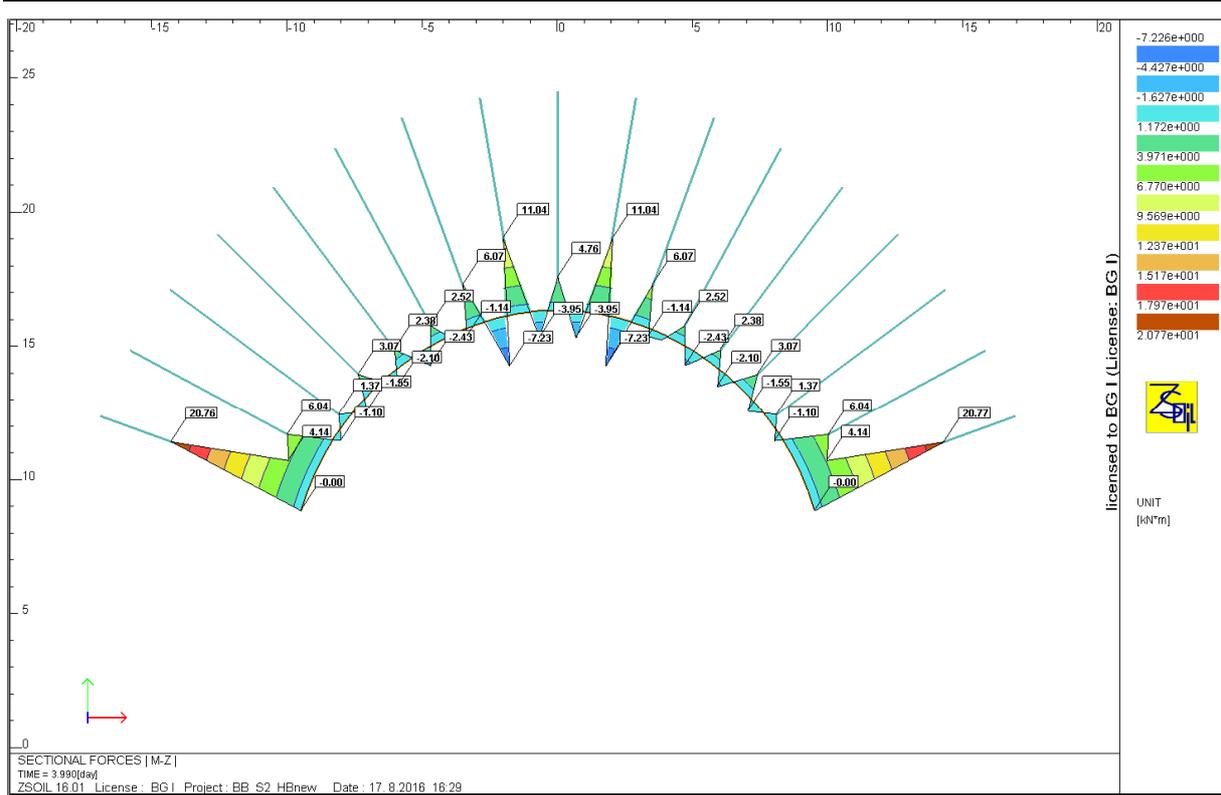


Figura 42: Diagramma dei momenti sezione B-B, sostegno S2

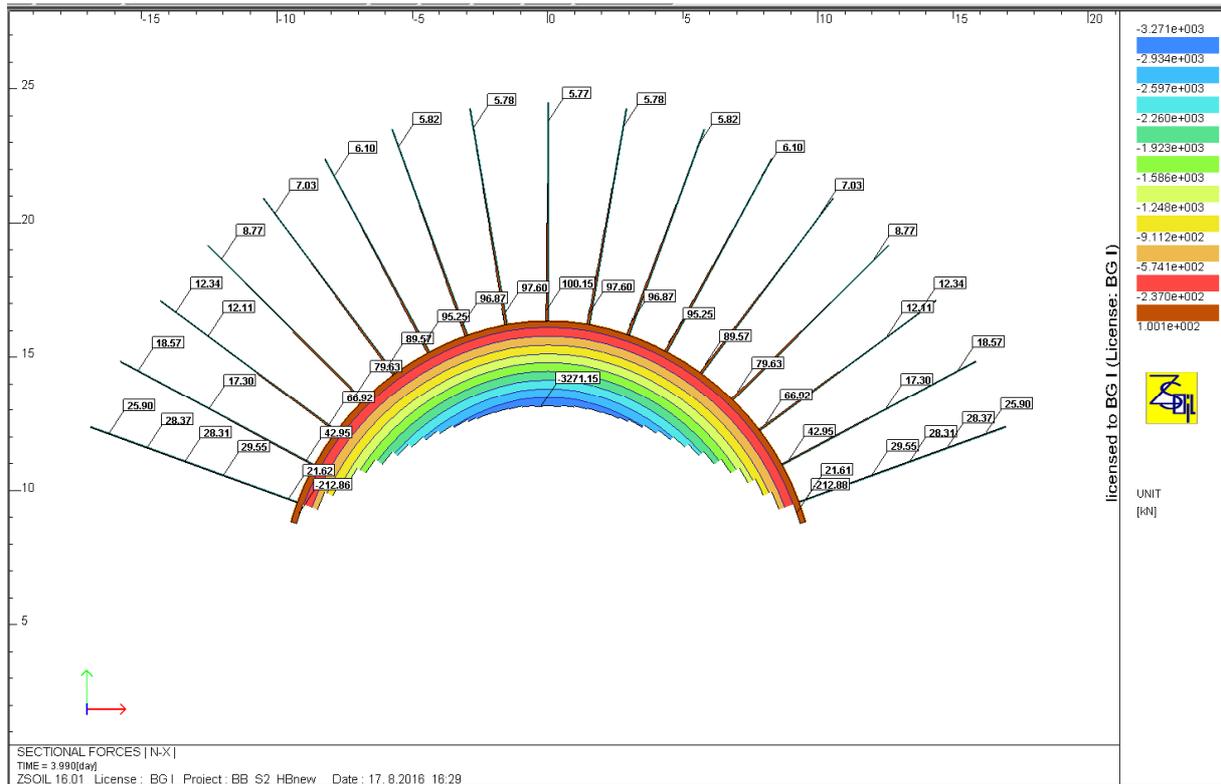


Figura 43: Diagramma degli sforzi normali sezione B-B, sostegno S2

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

Gli sforzi ottenuti vanno poi suddivisi nella parte ripresa dalla centina e quella ripresa dal calcestruzzo.

Combinazione	Sforzi nella sezione equivalente	
	Neq [kN]	Meq [kNm]
N _{max} , M	3271,2	11,0
M _{min/max} , N	212,9	20,8

Tabella 13 – Sforzi nelle sezioni critiche della sezione mista, sezione B-B, sostegno S2

Sforzi nel calcestruzzo proiettato			
N _b [kN]	M _b [kNm]	N _{b,Ed} [kN]	M _{b,Ed} [kNm]
2882,7	9,6	3747,5	12,5
187,6	18,0	243,8	23,4

Tabella 14 – Sforzi nelle sezioni critiche della sezione in calcestruzzo

Sforzi sulla centina			
N _a [kN]	M _a [kNm]	N _{a,Ed} [kN]	M _{a,Ed} [kNm]
388,5	1,5	505,0	1,9
25,3	2,7	32,9	3,6

Tabella 15 – Sforzi nelle sezioni critiche della sezione in acciaio

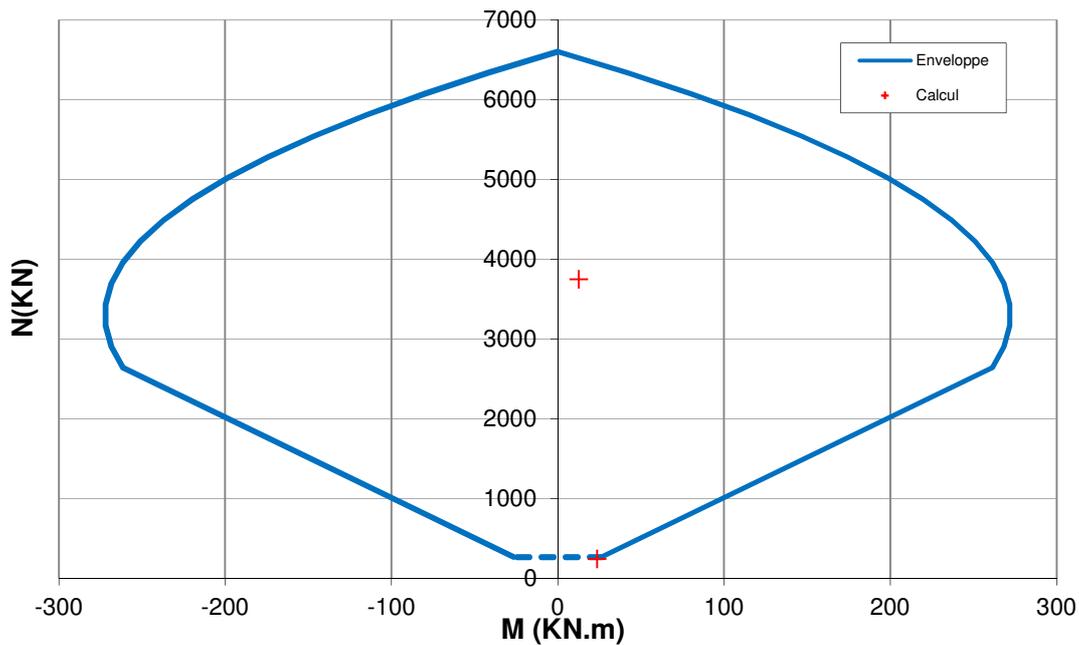


Figura 44: Diagramma d'interazione 33 cm di calcestruzzo proiettato

Il fattore di sicurezza è pari a FS=1.7.

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

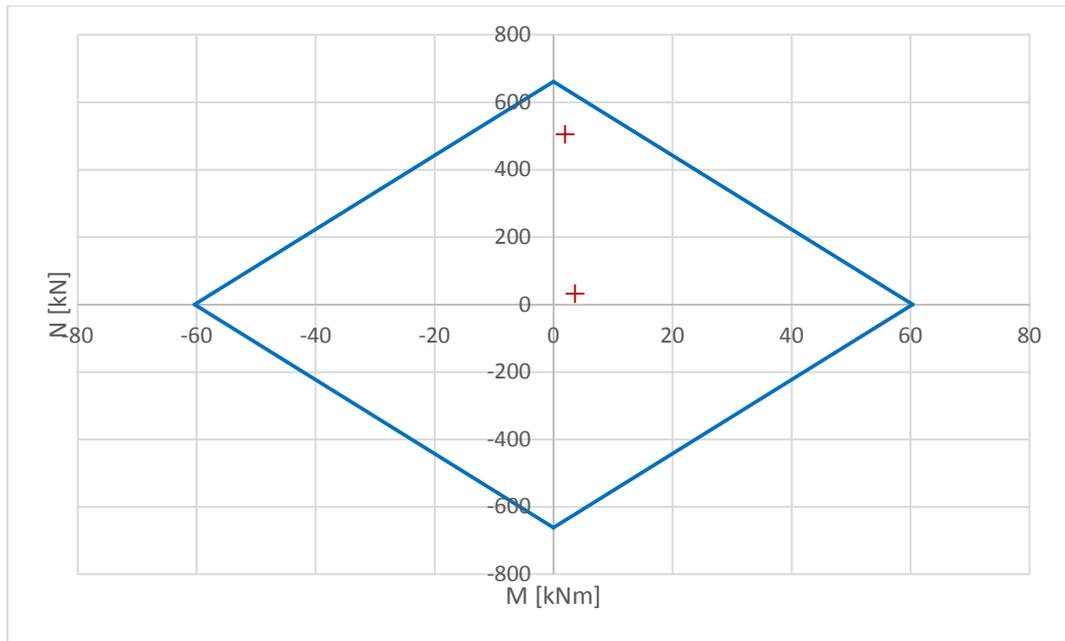


Figura 45: Diagramma d'interazione centine reticolari 4G 180/22

Per le centine il fattore di sicurezza è di $FS=1.25$.

Il bullone più sollecitato è il seguente:

$$N_{Ed} = 1.3 \cdot 100.15 \text{ kN} = 130.20 \text{ kN} < N_{Rd} = 190.5 \text{ kN}$$
$$FS = \frac{190.5}{130.2} = 1.46$$

La deformazione massima è:

$$0.178\% < 7 - 10\%$$

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

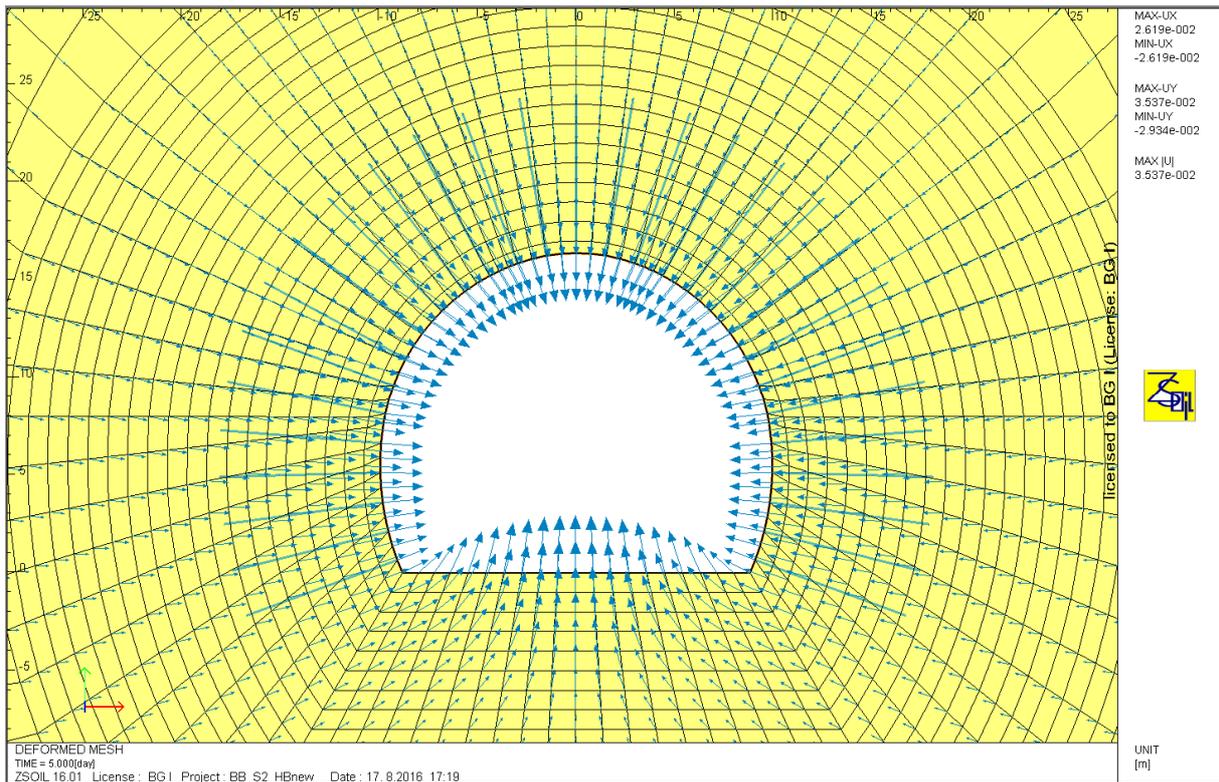


Figura 46: Vettori di spostamento sezione B-B, sostegno S2

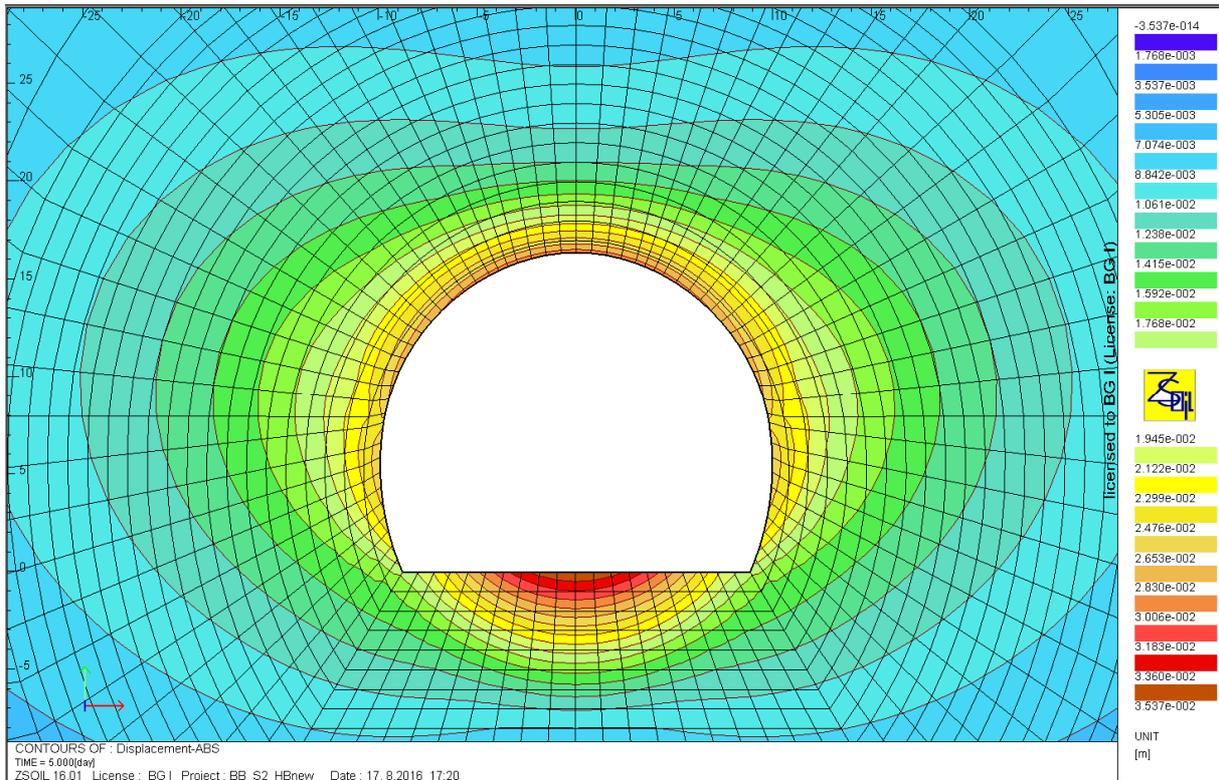


Figura 47: Spostamenti assoluti sezione B-B, sostegno S2

Lo spostamento radiale massimo in calotta è pari a 2.9 cm.
 Per quanto riguarda la platea, lo spostamento è pari a 3.54 cm.

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

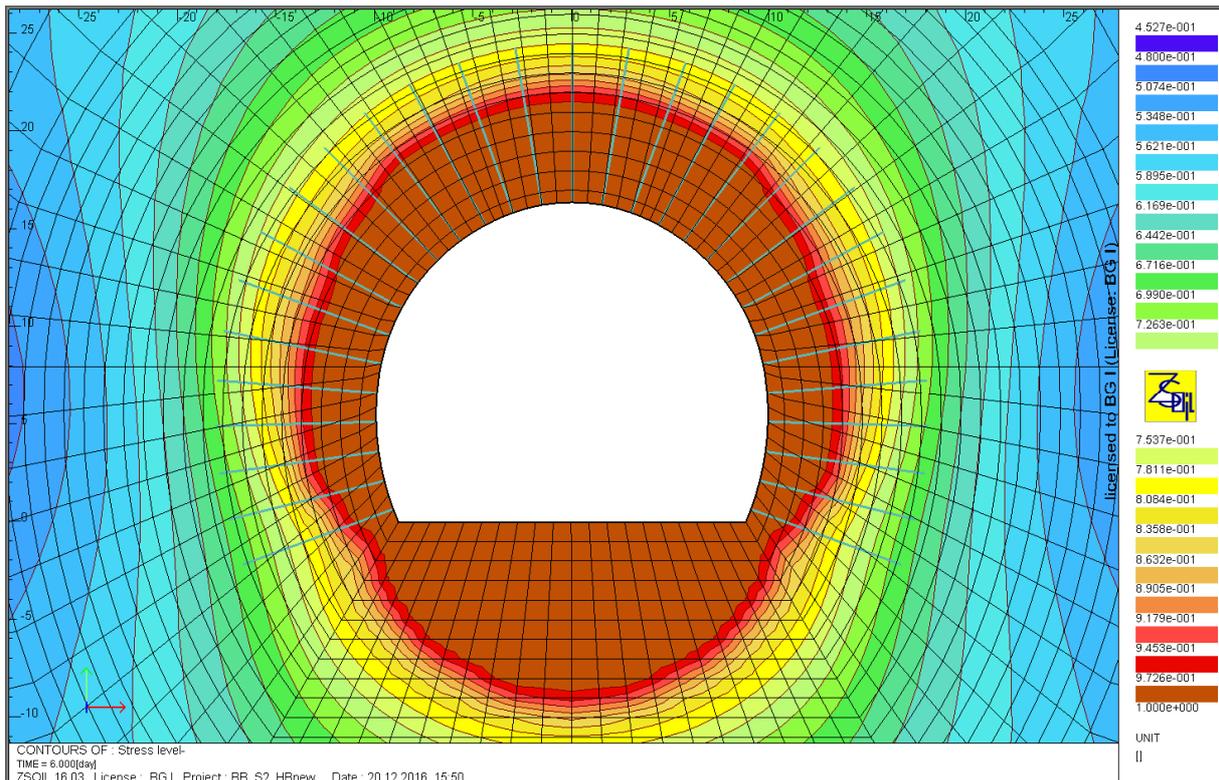


Figura 48: Zone plastiche "Stress Level" B-B, sostegno S2

La banda plastica ha uno spessore di circa 5.6 m in calotta, di 4 m nei piedritti e di 9 m in platea.

7.2.9 Sezione E-E, tipo di sostegno S2, GSI=60

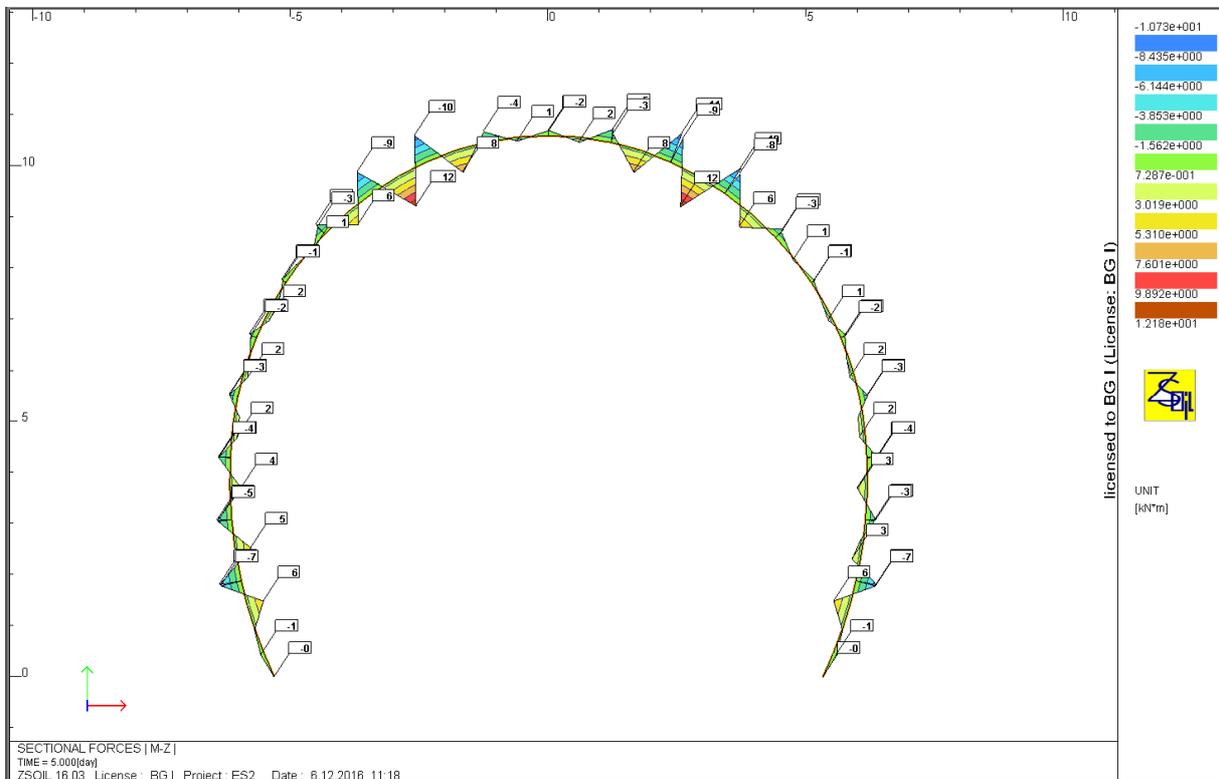


Figura 49: Diagramma dei momenti sezione E-E, sostegno S2

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

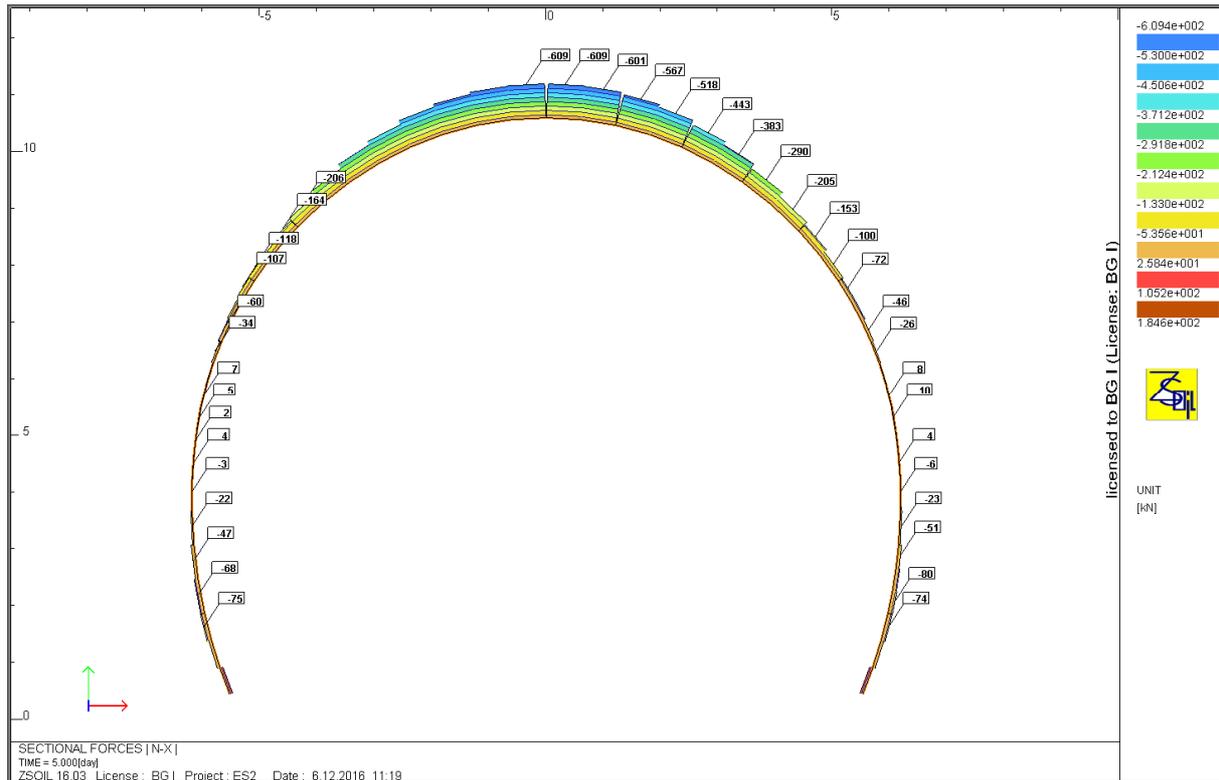


Figura 50: Diagramma degli sforzi normali sezione E-E, sostegno S2

Combinazione	Sforzi		Sforzi di calcolo	
	M	N	M_{Ed}	N_{Ed}
	[kNm]	[kN]	[kNm]	[kN]
N_{max}, M	-2	609	-2,6	791,7
$M_{min/max}, N$	12	518	15,6	673,4

Tabella 16 – Sforzi nelle sezioni critiche, sezione E-E, sostegno S2

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

Données

Largeur section b =	1 m
Epaisseur section h_w =	0,2 m
Résistance du béton à la compression f_{ck} =	30 MPa
Coefficient effets à long terme $\alpha_{cc,pl}$ et $\alpha_{ct,pl}$ =	1
Facteur de sécurité (marge) =	1
Coefficient partiel relatif au béton γ_c =	1,5
Coefficient relatif aux actions γ_{ELU} =	1,3

Résultats

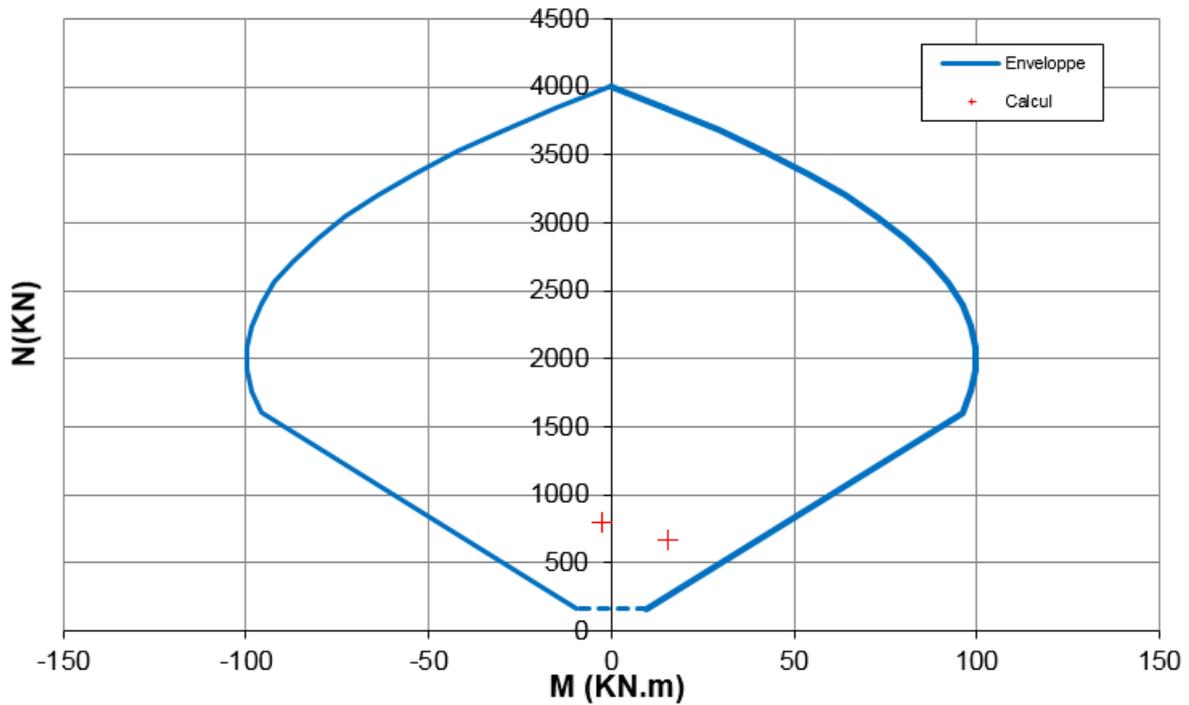


Figura 51: Diagramma di interazione di 20 cm di cls proiettato

Il fattore di sicurezza è pari a $FS=4.5$

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

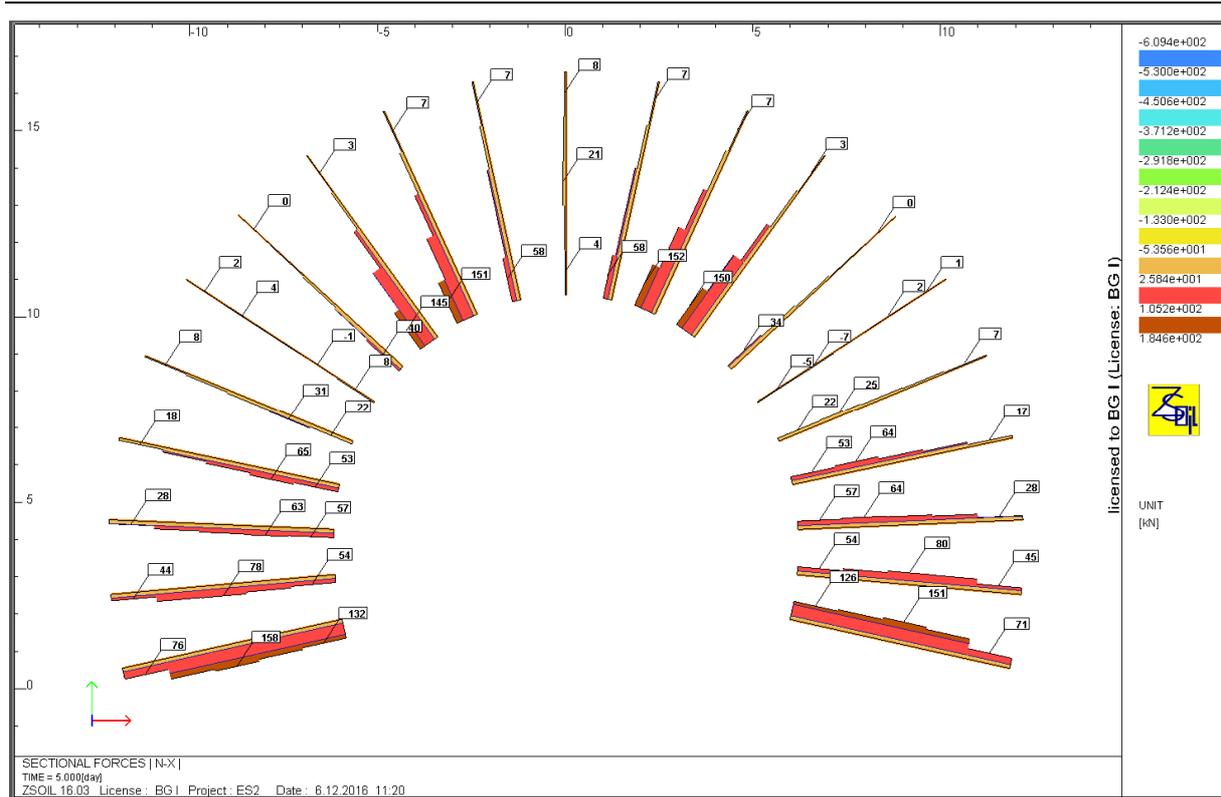


Figura 52: Diagramma degli sforzi normali nei bulloni

Per il bullone più sollecitato:

$$\frac{158 \text{ kN}}{2} \cdot 1.3 = 102.7 < 190.5$$

$$FS = \frac{190.5}{102.7} = 1.85$$

Allungamento:

$$0.005\% < 7 - 10\%$$

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

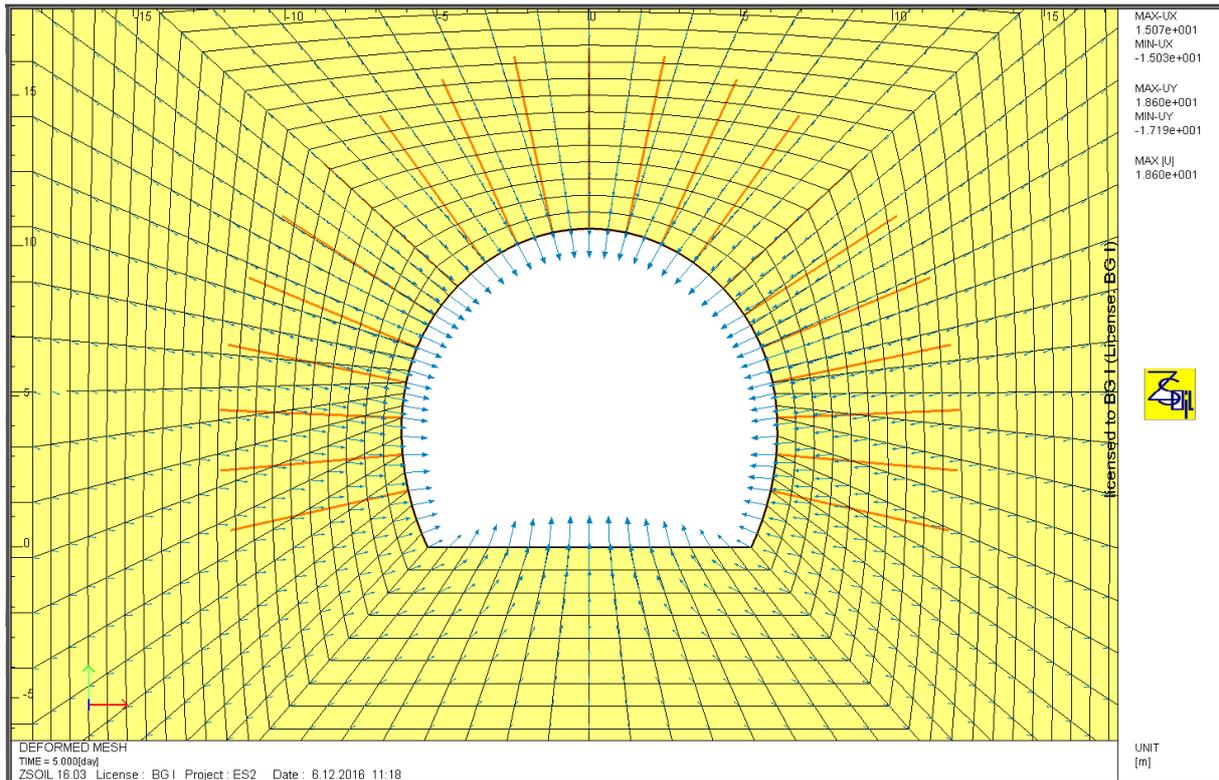


Figura 53: Vettori di spostamento sezione E-E, sostegno S2

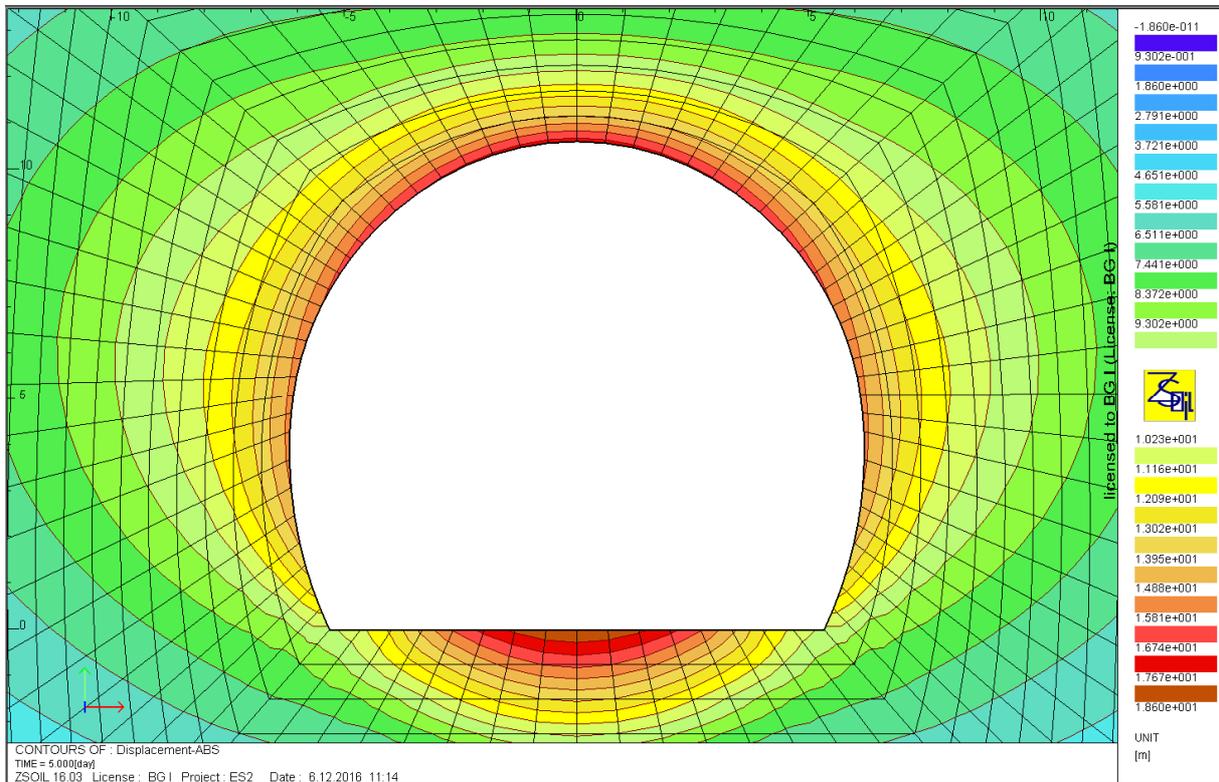


Figura 54: Spostamenti assoluti sezione E-E, sostegno S2

Analizzando gli spostamenti si vede che lo spostamento massimo è a livello platea ed è di 1.86 cm. In calotta lo spostamento radiale massimo è di 1.77 cm.

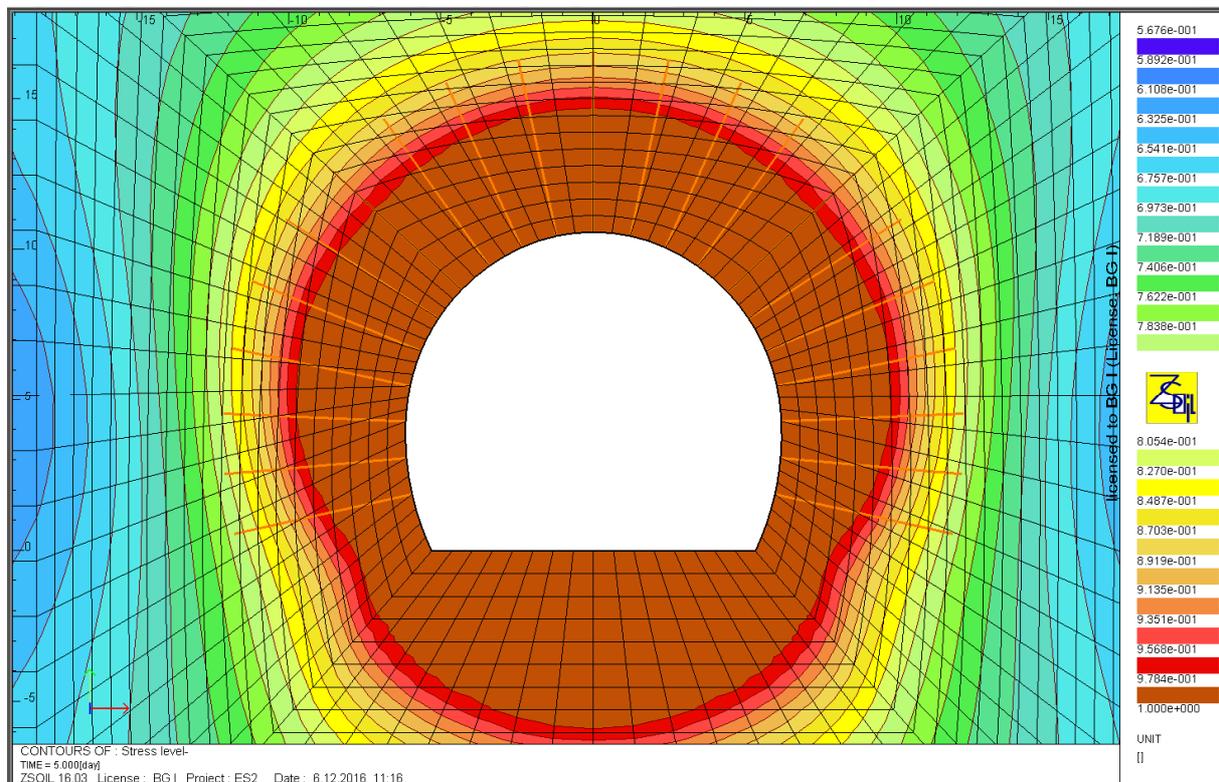


Figura 55: Zone plastiche "Stress Level" E-E, sostegno S2

La banda plastica ha uno spessore di 4 m in calotta e piedritti e di 6 m in arco rovescio.

7.2.10 Sezione H-H, tipo di sostegno S2, GSI=60

La verifica viene effettuata per due situazioni determinanti: per il calcestruzzo proiettato, fine dello scavo della calotta (con sostegno L1), mentre per i bulloni, fine dello scavo completo. Da notare che alla fine dello scavo dell'arco rovescio, la quantità di bulloni in L2 non cambia ma la loro sollecitazione è maggiore.

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

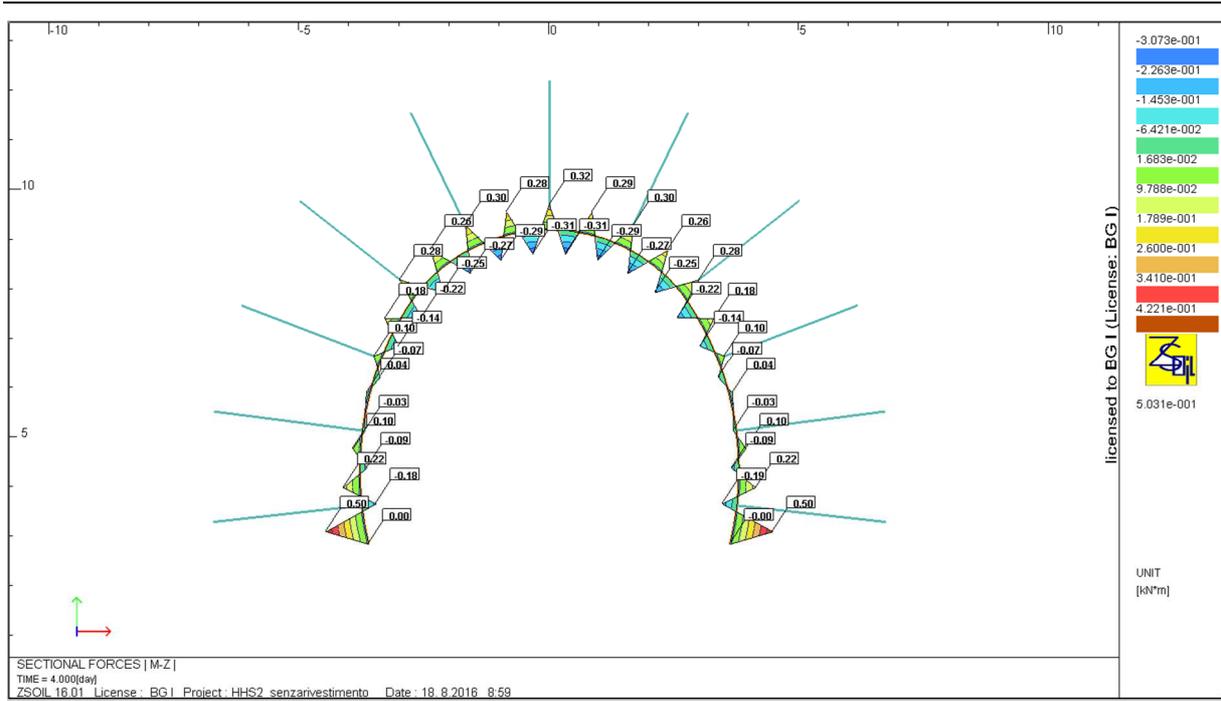


Figura 56: Diagramma dei momenti sezione H-H, sostegno S2

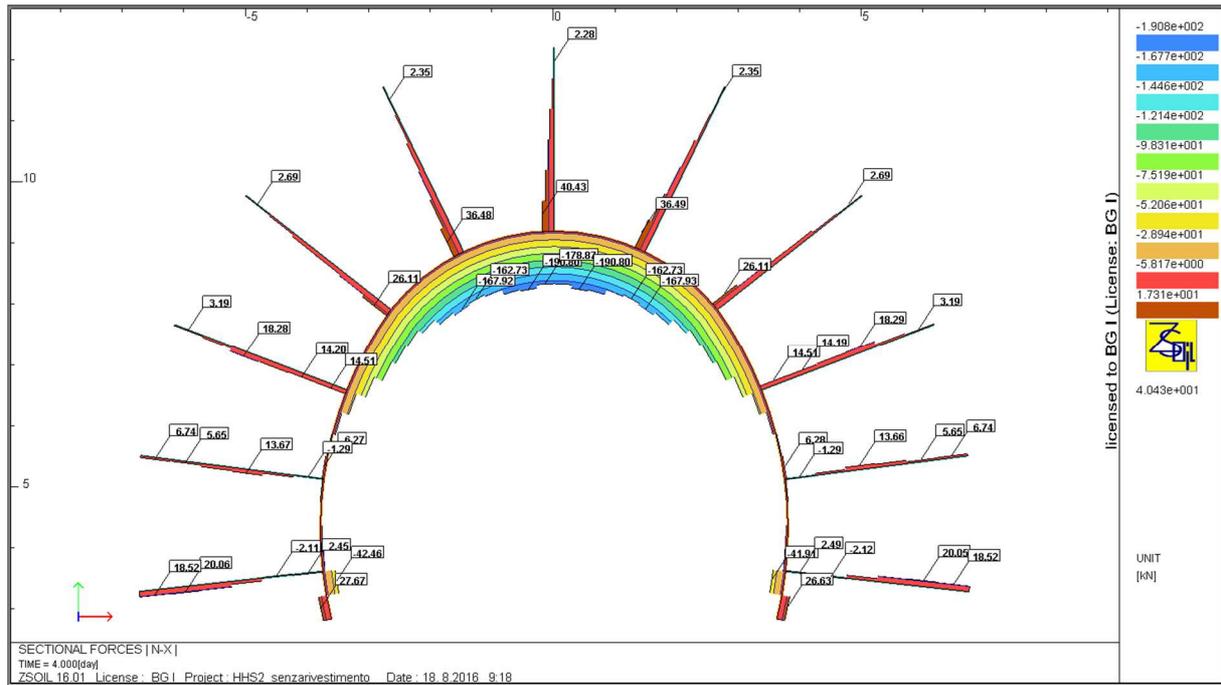


Figura 57: Diagramma degli sforzi normali sezione H-H, sostegno S2

Combinazione	Sforzi		Sforzi di calcolo	
	M	N	M _{Ed}	N _{Ed}
	[kNm]	[kN]	[kNm]	[kN]
M _{min,max} , N	0.5	41.91	0.65	54.48
N _{max} , M	0.32	190.8	0.42	248.04

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

Tabella 17 – Sforzi nelle sezioni critiche, sezione H-H, sostegno S2

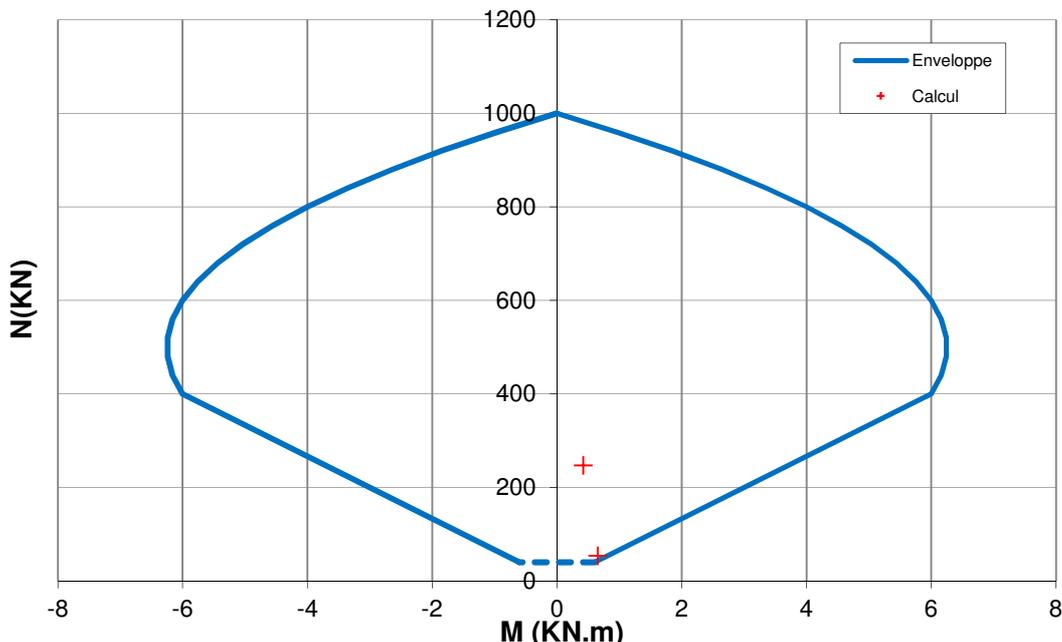


Figura 58: Diagramma d'interazione 5 cm di calcestruzzo proiettato

Le sezioni sono verificate con un fattore di sicurezza pari a FS=3.75

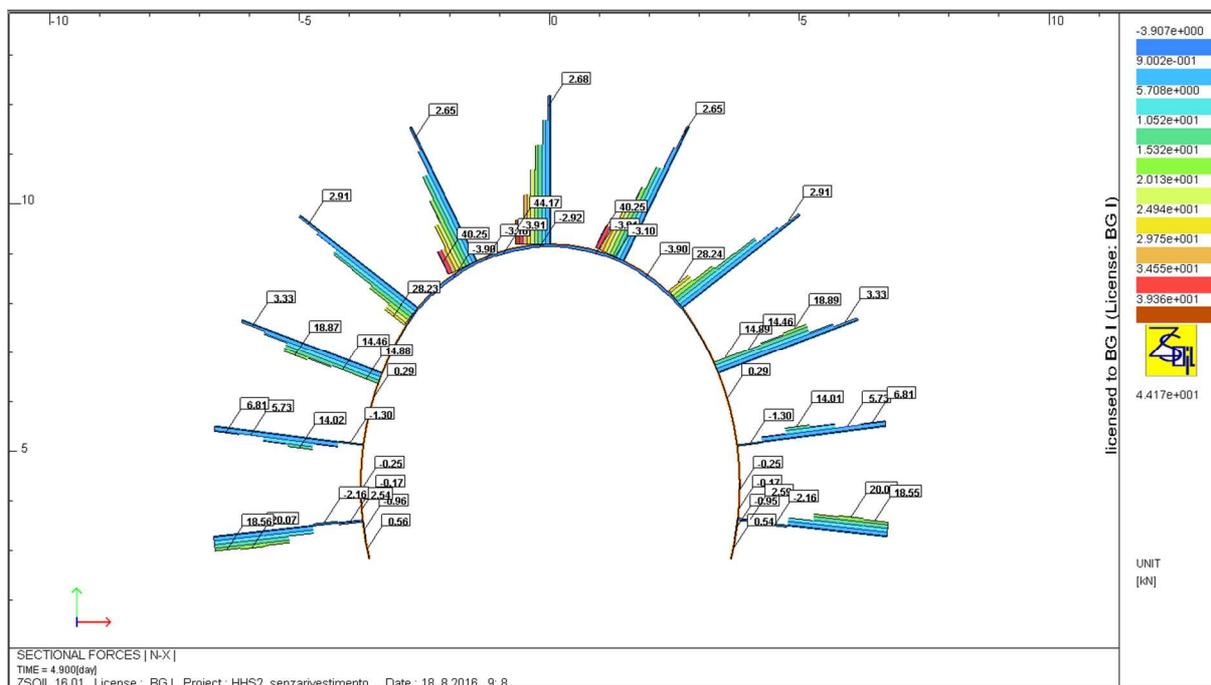


Figura 59: Diagramma degli sforzi normali sezione H-H, sostegno S2

Il bullone più sollecitato è il seguente:

$$N_{Ed} = 1.3 \cdot 44.17 \text{ kN} = 57.42 \text{ kN} < N_{Rd} = 190.5 \text{ kN}$$

$$FS = \frac{190.5}{57.42} = 3.32$$

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

La deformazione massima è:

$$0.065\% < 7 - 10\%$$

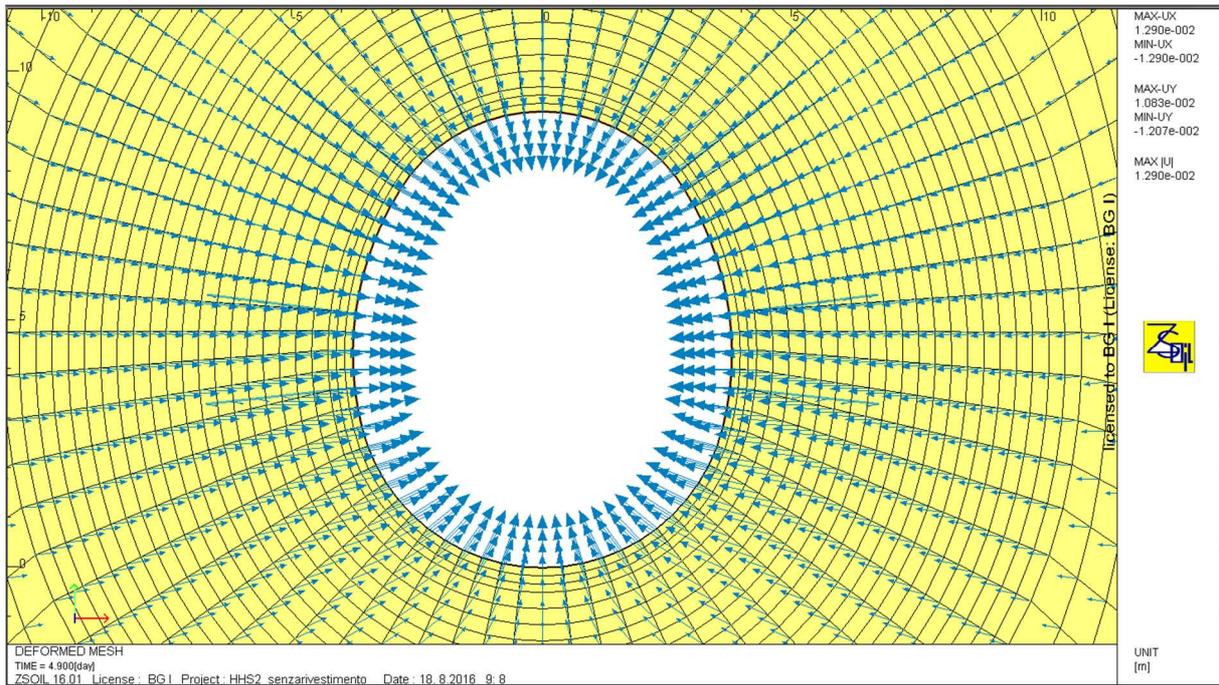


Figura 60: Vettori di spostamento sezione H-H, sostegno S2

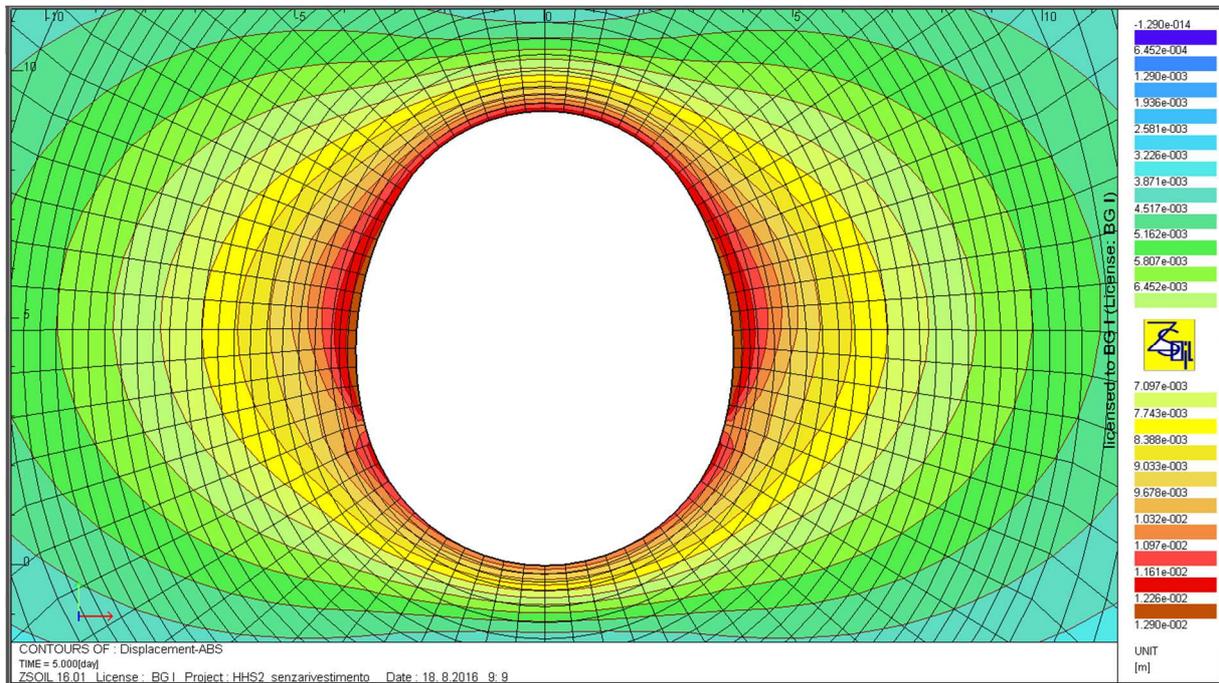


Figura 61: Spostamenti assoluti sezione H-H, sostegno S2

Gli spostamenti radiali sono massimi nei piedritti e sono di 1.3 cm.
Per quanto riguarda la calotta e l'arco rovescio lo spostamento è pari a 1.2 cm.

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

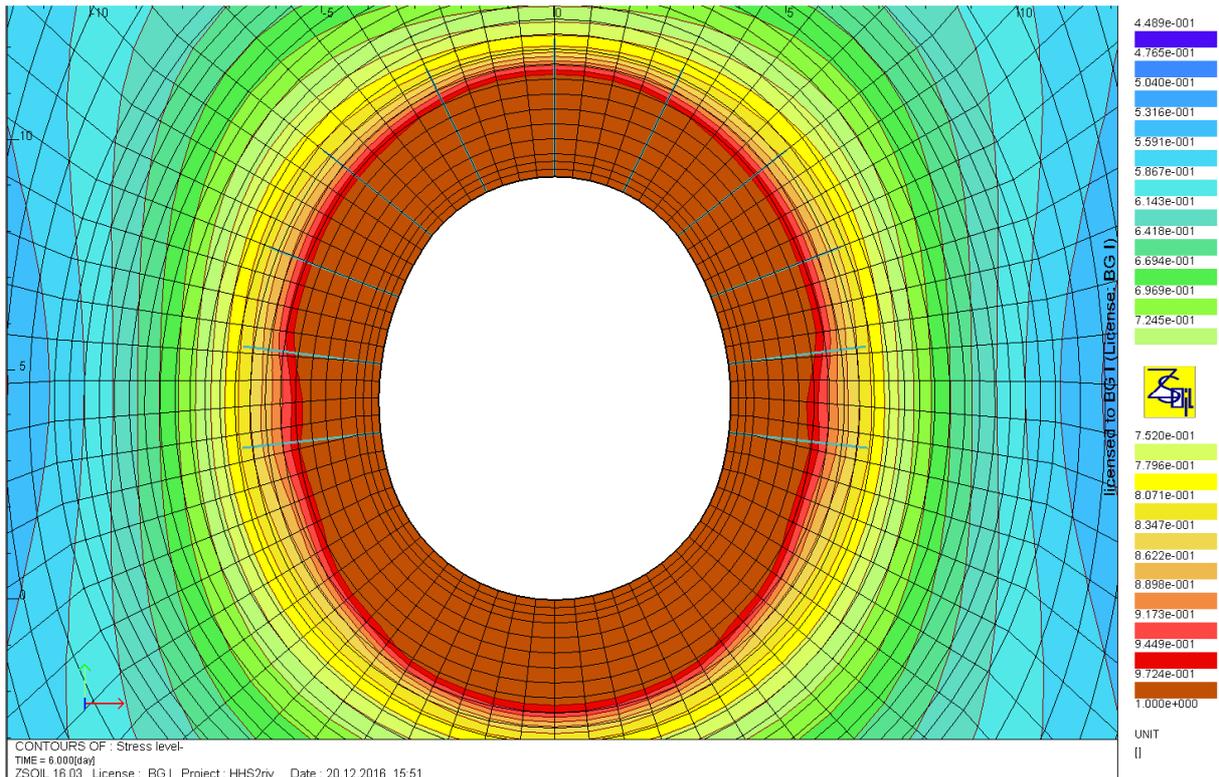


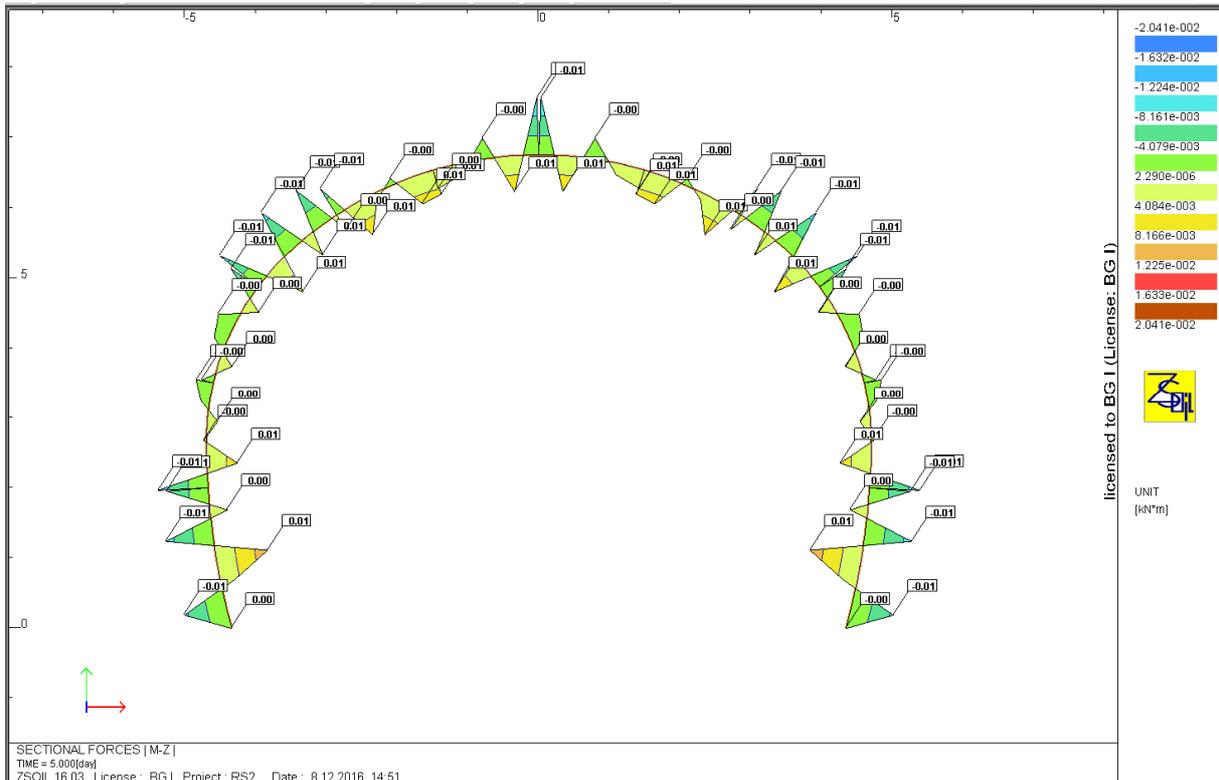
Figura 62: Zone plastiche "Stress Level" H-H, sostegno S2

Lo spessore della banda plastica è di circa 2.5 m in calotta e 2 m nei piedritti.

7.2.11 Sezione I-I, tipo di sostegno S2, GSI=60

Anche in questo caso la verifica non si rende necessaria (per dettagli vedi § 7.2.4).

7.2.12 Sezione R-R, tipo di sostegno S2, GSI=60



Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

Figura 63: Diagramma dei momenti sezione R-R, sostegno S2

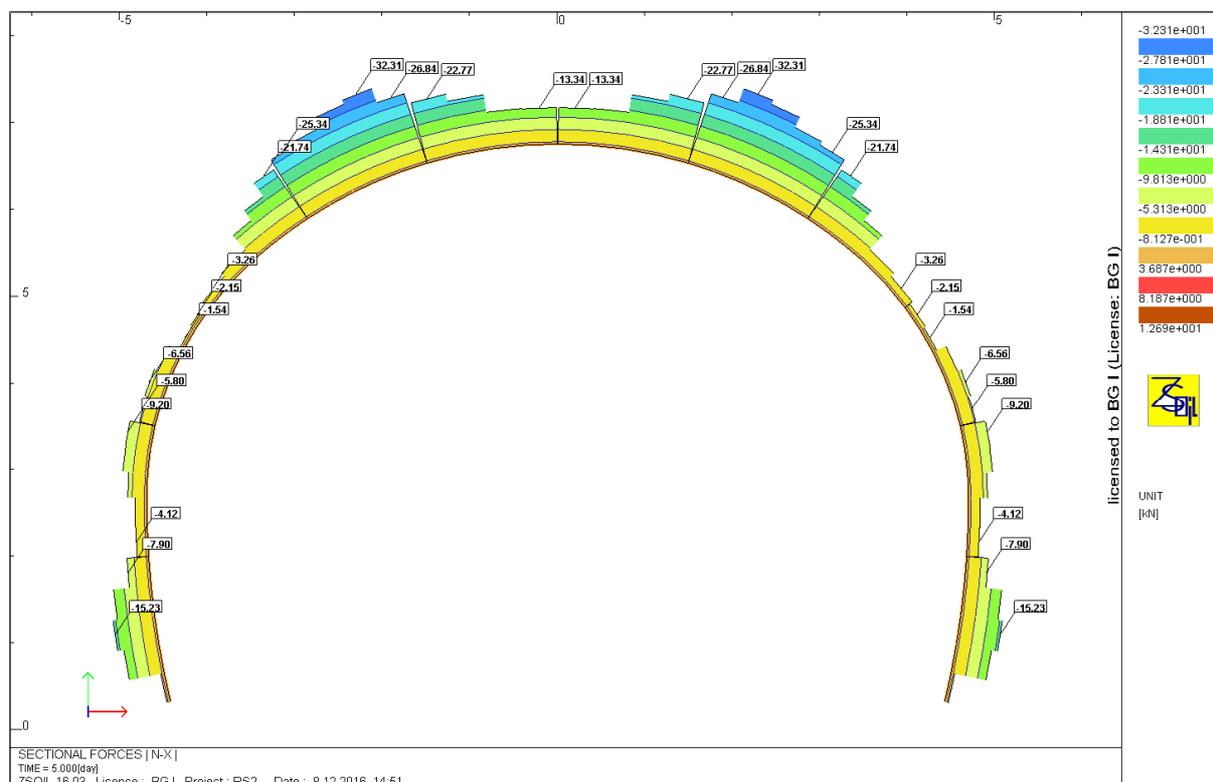


Figura 64: Diagramma degli sforzi normali sezione R-R, sostegno S2

Combinazione	Sforzi		Sforzi di calcolo	
	M	N	M _{Ed}	N _{Ed}
	[kNm]	[kN]	[kNm]	[kN]
M _{min/max} , N _{max}	0,01	32,30	0,013	41,99

Tabella 18 – Sforzi nelle sezioni critiche, sezione R-R, sostegno S2

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

Données

Largeur section $b =$	1 m
Epaisseur section $h_w =$	0,2 m
Résistance du béton à la compression $f_{ck} =$	30 MPa
Coefficient effets à long terme $\alpha_{cc,pl}$ et $\alpha_{ct,pl} =$	1
Facteur de sécurité (marge) =	1
Coefficient partiel relatif au béton $\gamma_c =$	1,5
Coefficient relatif aux actions $\gamma_{ELU} =$	1,3

Résultats

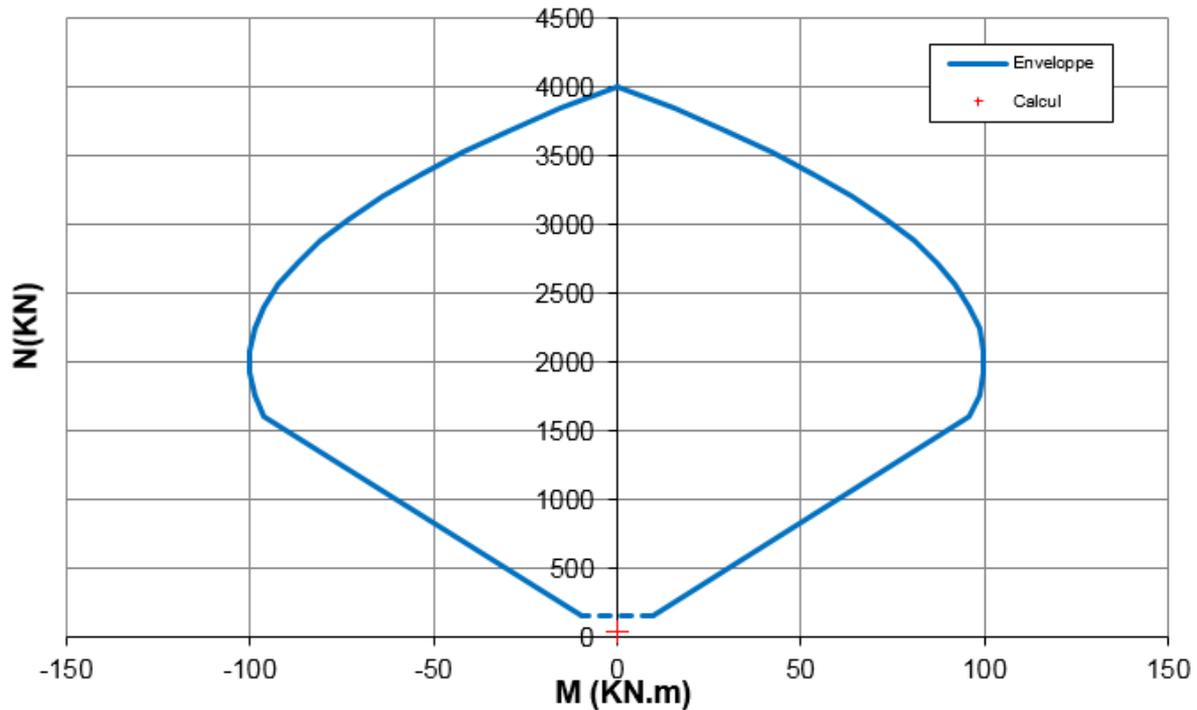


Figura 65: Diagramma di interazione di 20 cm di cls proiettato

Secondo le raccomandazioni AFTES GT7, quando lo sforzo normale e il momento sono molto bassi (dominio al di sotto della linea tratteggiata), non si deve eseguire nessuna verifica particolare: $FS \gg 1$.

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

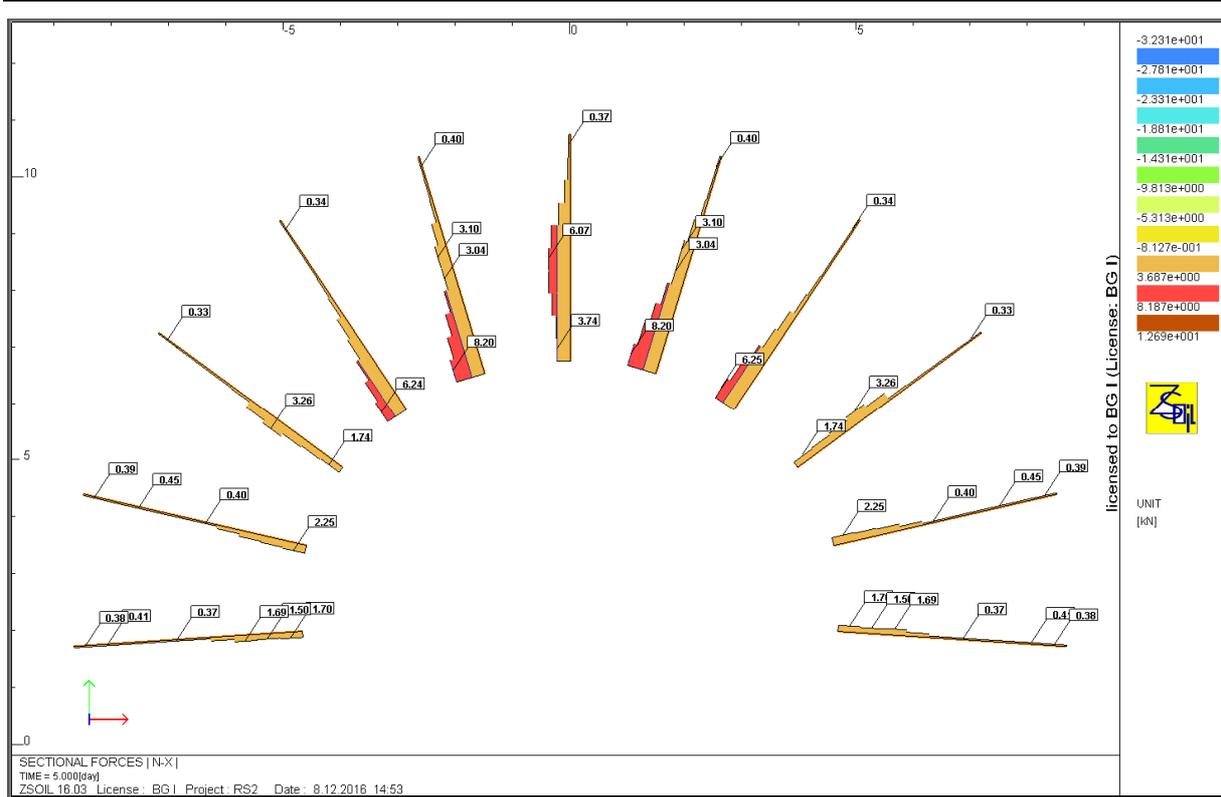


Figura 66: Diagramma degli sforzi normali nei bulloni

$$8.2 \text{ kN} \cdot 1.3 = 10.7 \text{ kN} < 190.5 \text{ kN}$$

$$FS = \frac{190.5}{10.7} = 17.8$$

$$0.008\% < 7 - 10\%$$

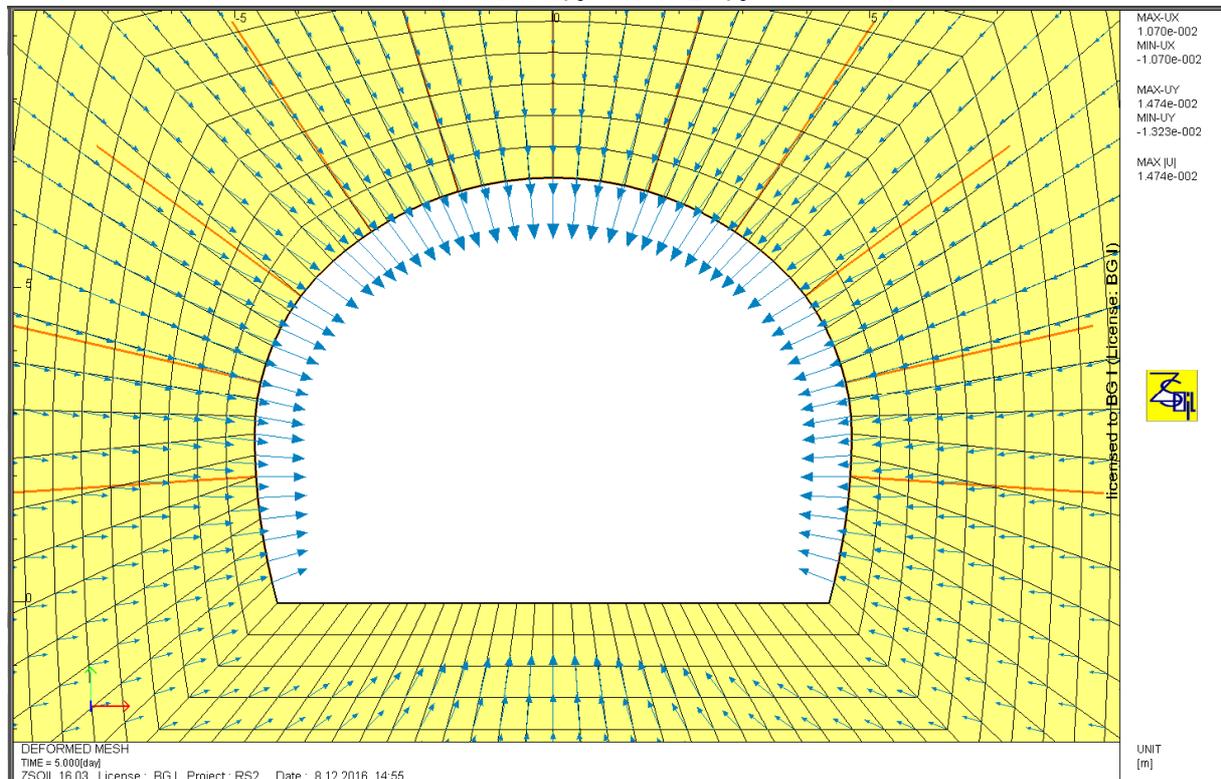


Figura 67: Vettori di spostamento sezione R-R, sostegno S2

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

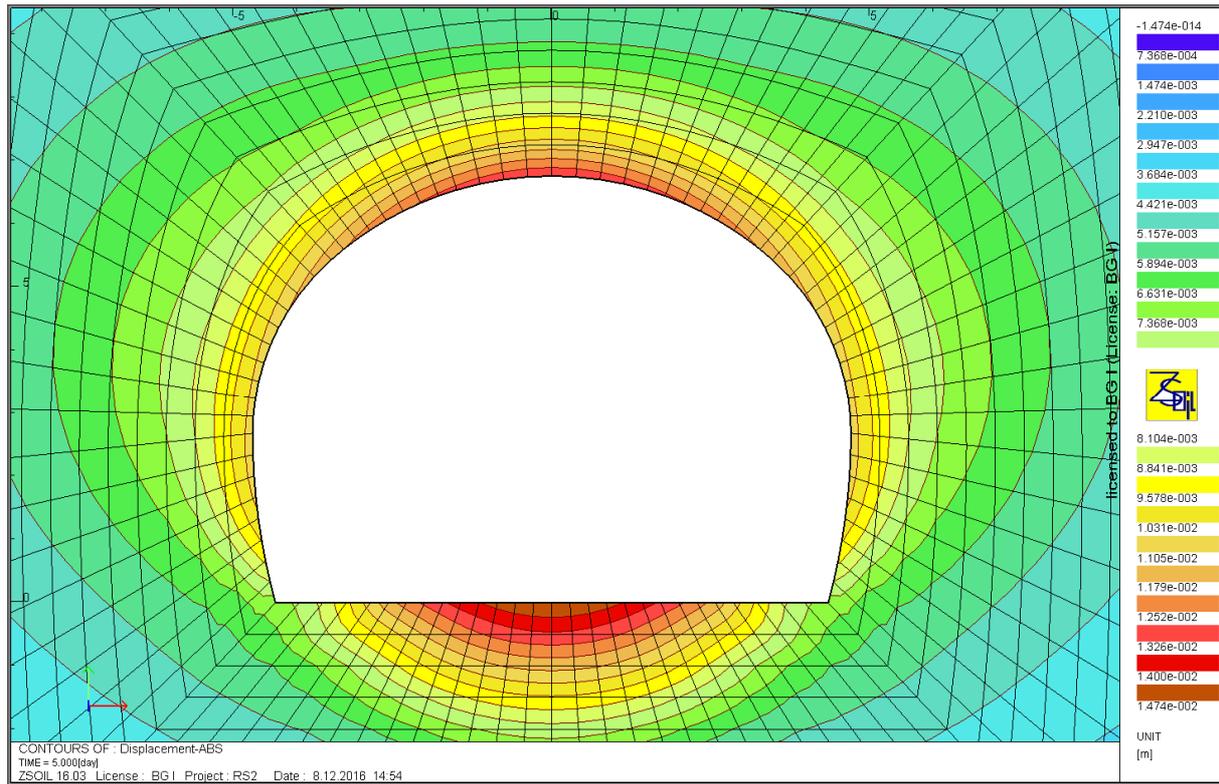


Figura 68: Spostamenti assoluti sezione R-R, sostegno S2

Lo spostamento massimo è a livello della platea ed è pari a 1.47 cm. In calotta lo spostamento è di 1.33 cm e nei piedritti 1.11 cm.

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

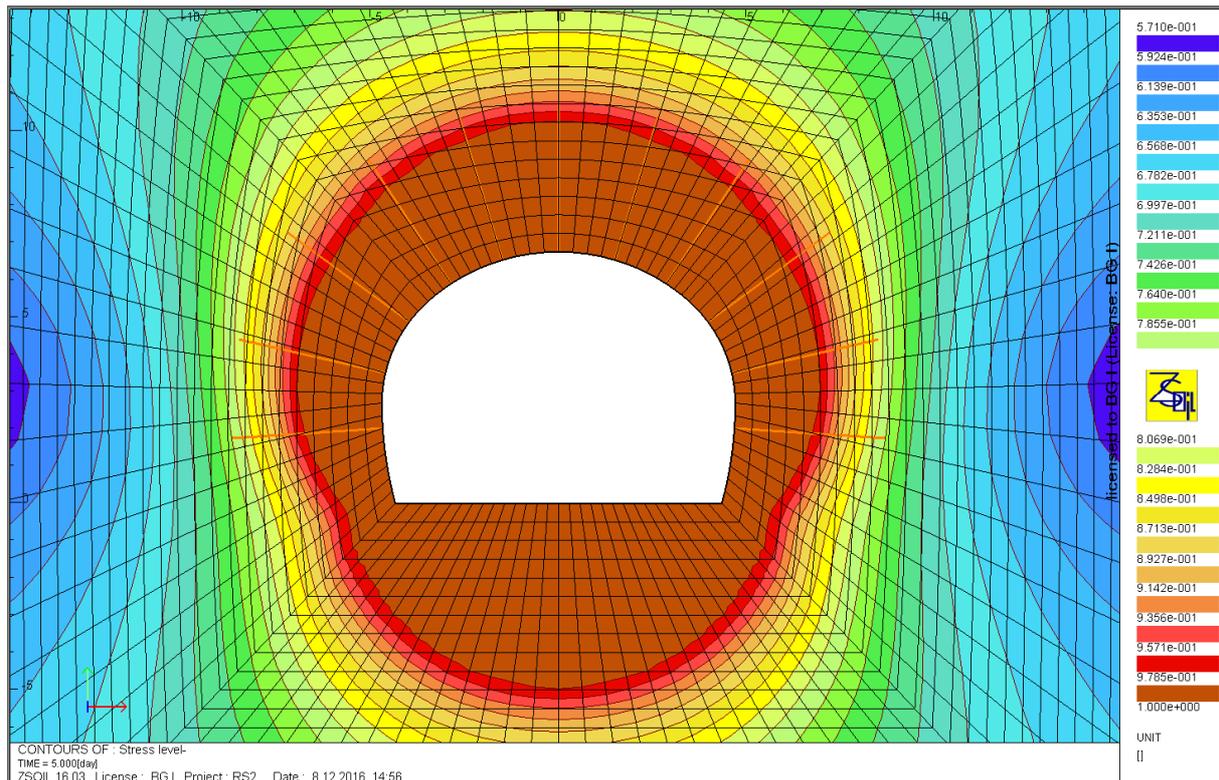


Figura 69: Zone plastiche "Stress Level" R-R, sostegno S2

La banda plastica ha uno spessore di 3.5m in calotta, 2.5m nei piedritti e 5.0 m in arco rovescio.

7.2.13 Sezione A-A, tipo di sostegno S4, GSI=65

La verifica deve essere eseguita sia alla fine dello scavo della calotta per il sostegno in L1 che alla fine dello scavo dello strozzo per il sostegno in L2 (comprensivo quindi anche di L1).

Verifica del sostegno in L1:

Gli sforzi massimi si trovano in calotta.

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

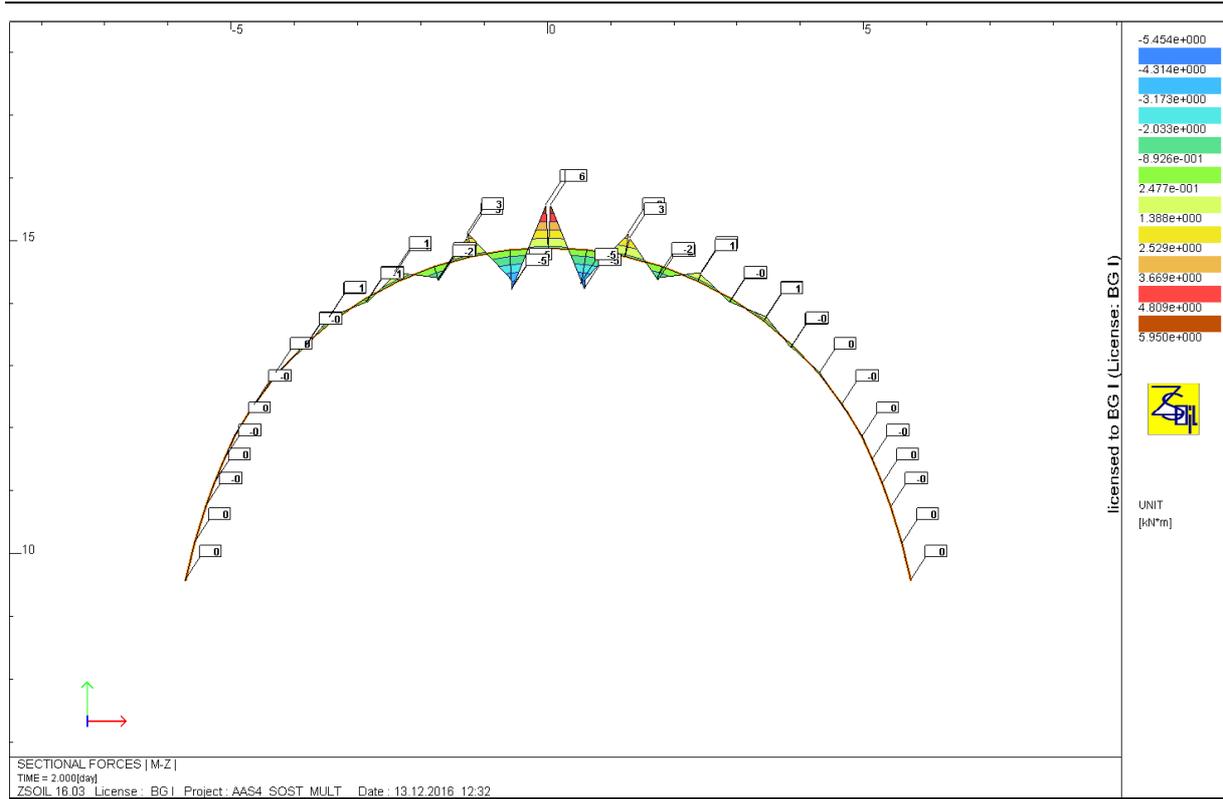


Figura 70: Diagramma dei momenti sezione A-A, sostegno S4 L1

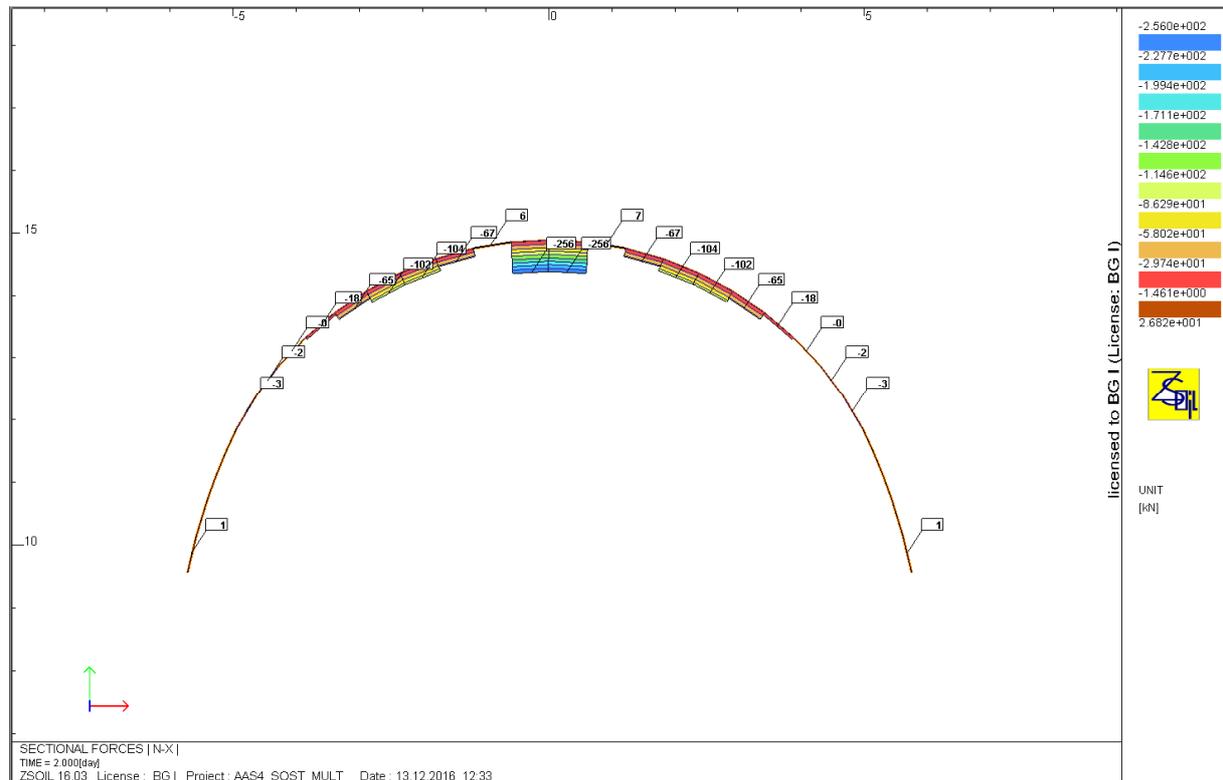


Figura 71: Diagramma degli sforzi normali sezione A-A, sostegno S4 L1

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

Sforzi		Sforzi di calcolo	
M	N	M_{Ed}	N_{Ed}
[kNm]	[kN]	[kNm]	[kN]
6	256	7,8	332,8

Tabella 19 – Sforzi nella sezione critica, sezione A-A, sostegno S4 L1

Données

Largeur section b =	1 m
Epaisseur section h_w =	0,1 m
Résistance du béton à la compression f_{ck} =	30 MPa
Coefficient effets à long terme $\alpha_{cc,pl}$ et $\alpha_{ct,pl}$ =	1
Facteur de sécurité (marge) =	1
Coefficient partiel relatif au béton γ_c =	1,5
Coefficient relatif aux actions γ_{ELU} =	1,3

Résultats

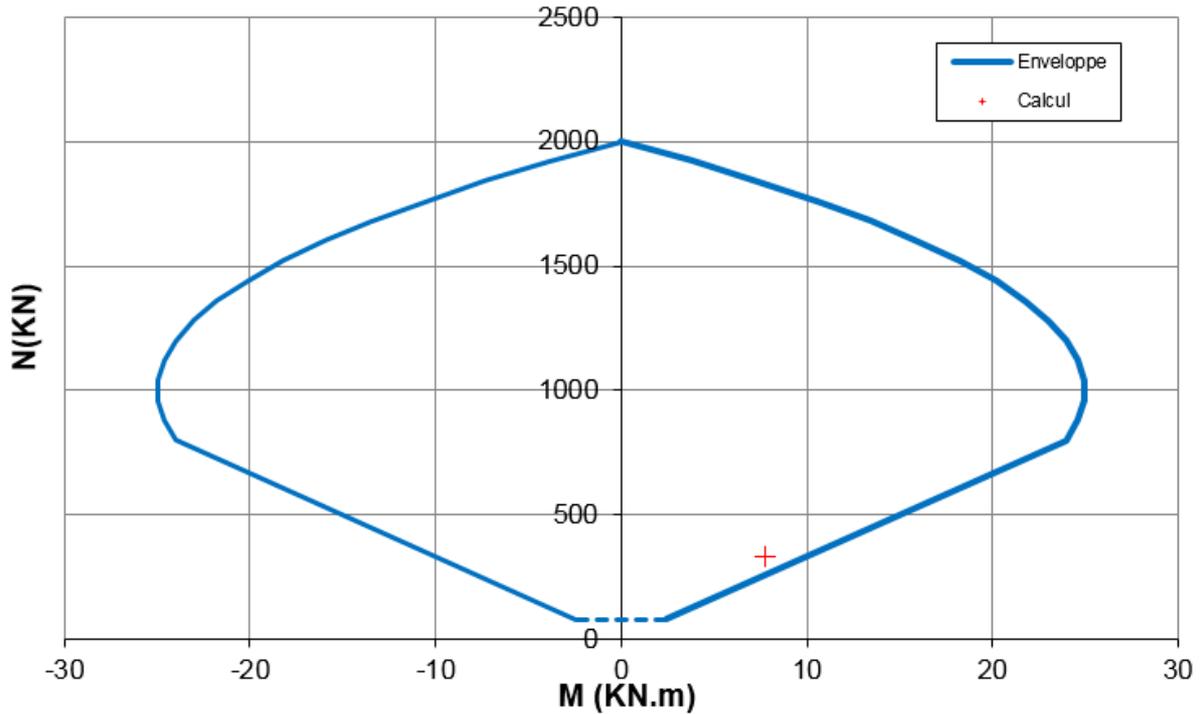


Figura 72: Diagramma d'interazione 10 cm di calcestruzzo proiettato

La sezione critica è verificata con un fattore di sicurezza pari a $FS=3.1$

Verifica del sostegno L1+L2:

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

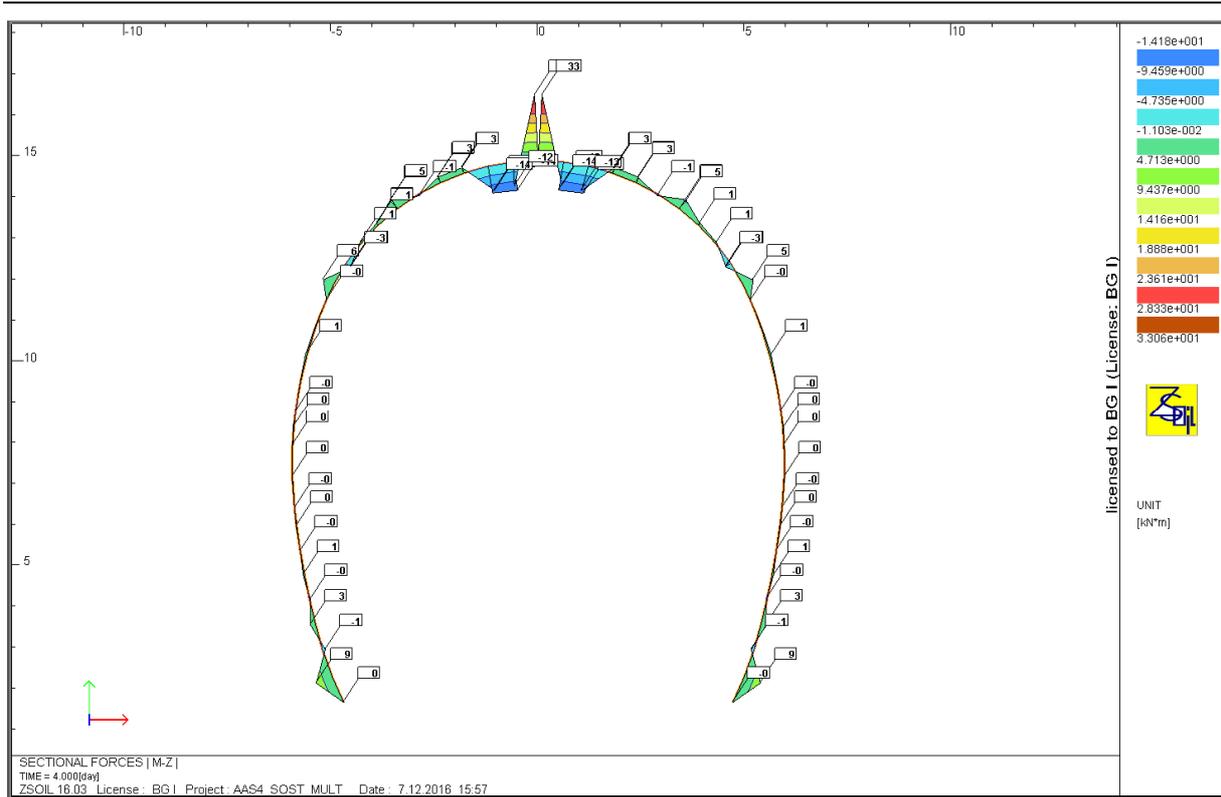


Figura 73: Diagramma dei momenti sezione A-A, sostegno S4 L2+L1

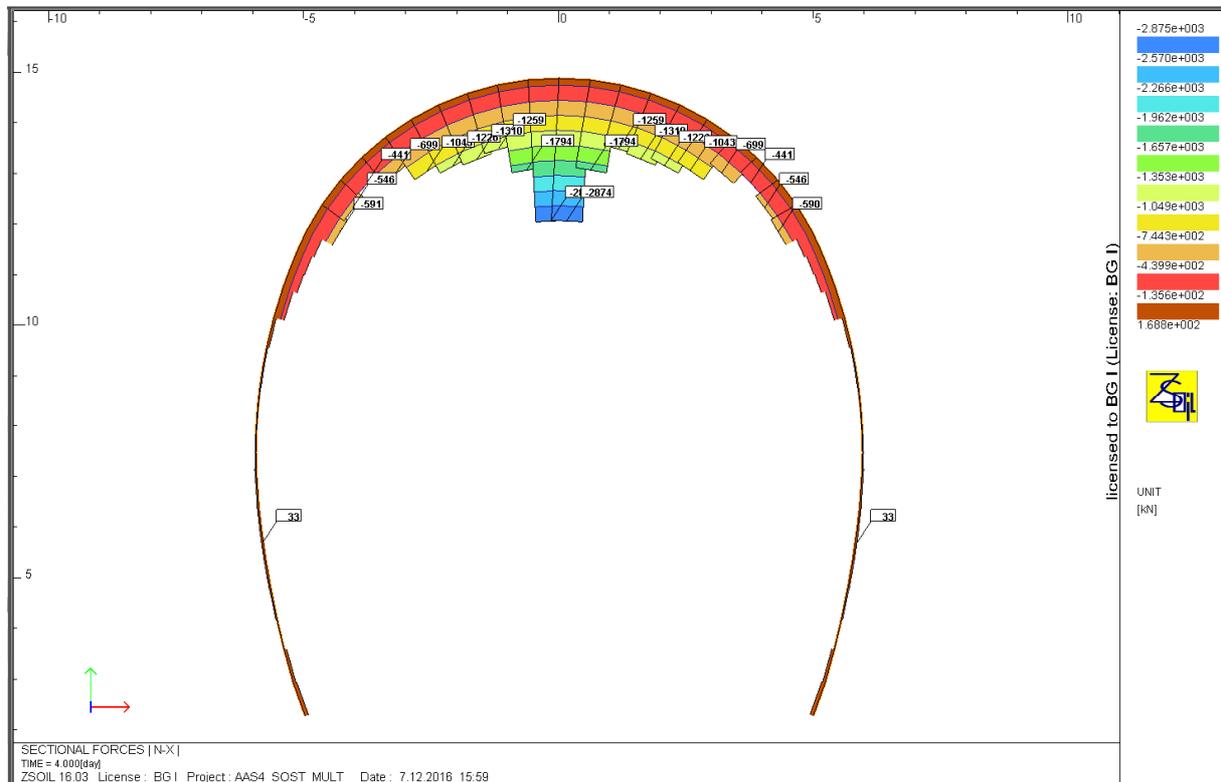


Figura 74: Diagramma degli sforzi normali sezione A-A, sostegno S4 L2+L1

Combinazione	Sforzi	Sforzi di calcolo
--------------	--------	-------------------

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

	M	N	M _{Ed}	N _{Ed}
	[kNm]	[kN]	[kNm]	[kN]
N _{max} , M _{max/min}	33	2874	42,9	3736,2

Tabella 20 – Sforzi nella sezione critica, sezione A-A, sostegno S4 L2+L1

Données

Largeur section b =	1 m
Epaisseur section h _w =	0,25 m
Résistance du béton à la compression f _{ck} =	30 MPa
Coefficient effets à long terme α _{cc,pl} et α _{ct,pl} =	1
Facteur de sécurité (marge) =	1
Coefficient partiel relatif au béton γ _c =	1,5
Coefficient relatif aux actions γ _{ELU} =	1,3

Résultats

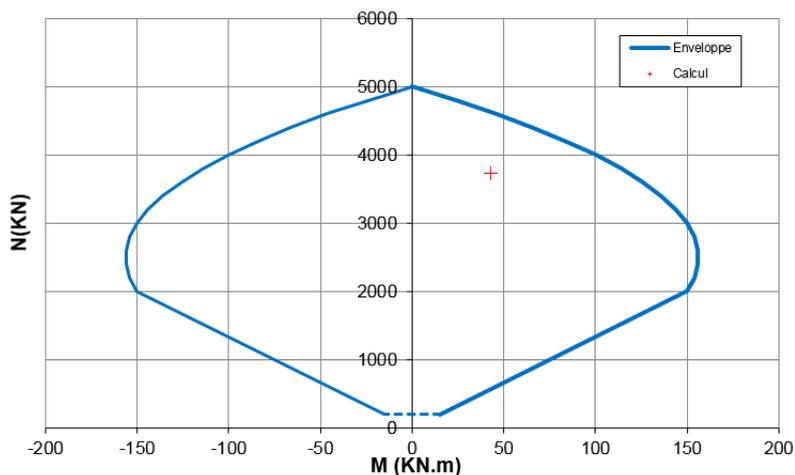


Figura 75: Diagramma d'interazione 25 cm di calcestruzzo proiettato

La sezione è verificata con una fattore di sicurezza di FS=1.2.

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

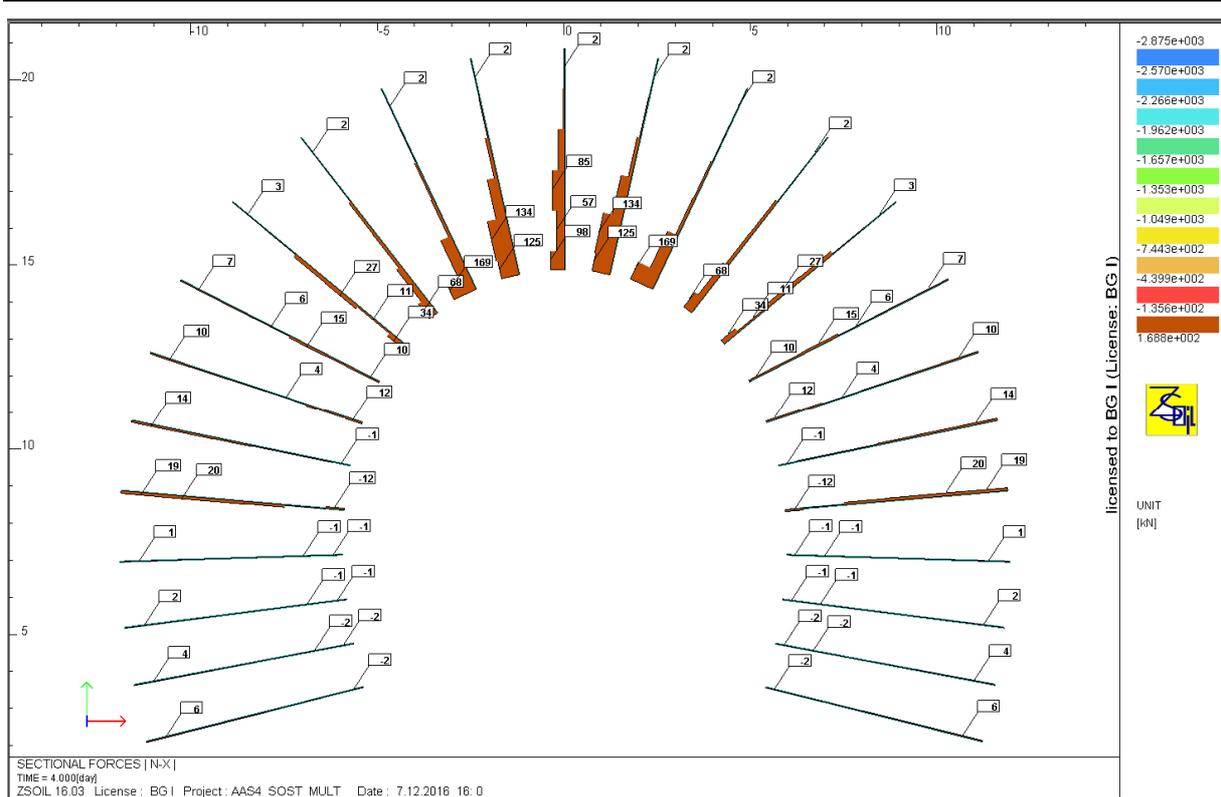


Figura 76: Diagramma degli sforzi normali nei bulloni

Il bullone più sollecitato è il seguente:

$$N_{Ed} = \frac{169 \text{ kN}}{2} \cdot 1.3 = 109.85 \text{ kN} < N_{Rd} = 190.5 \text{ kN}$$

$$FS = \frac{190.5}{109.85} = 1.7$$

La deformazione massima è:

$$0.071\% < 7 - 10\%$$

Per quanto riguarda la centina:

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

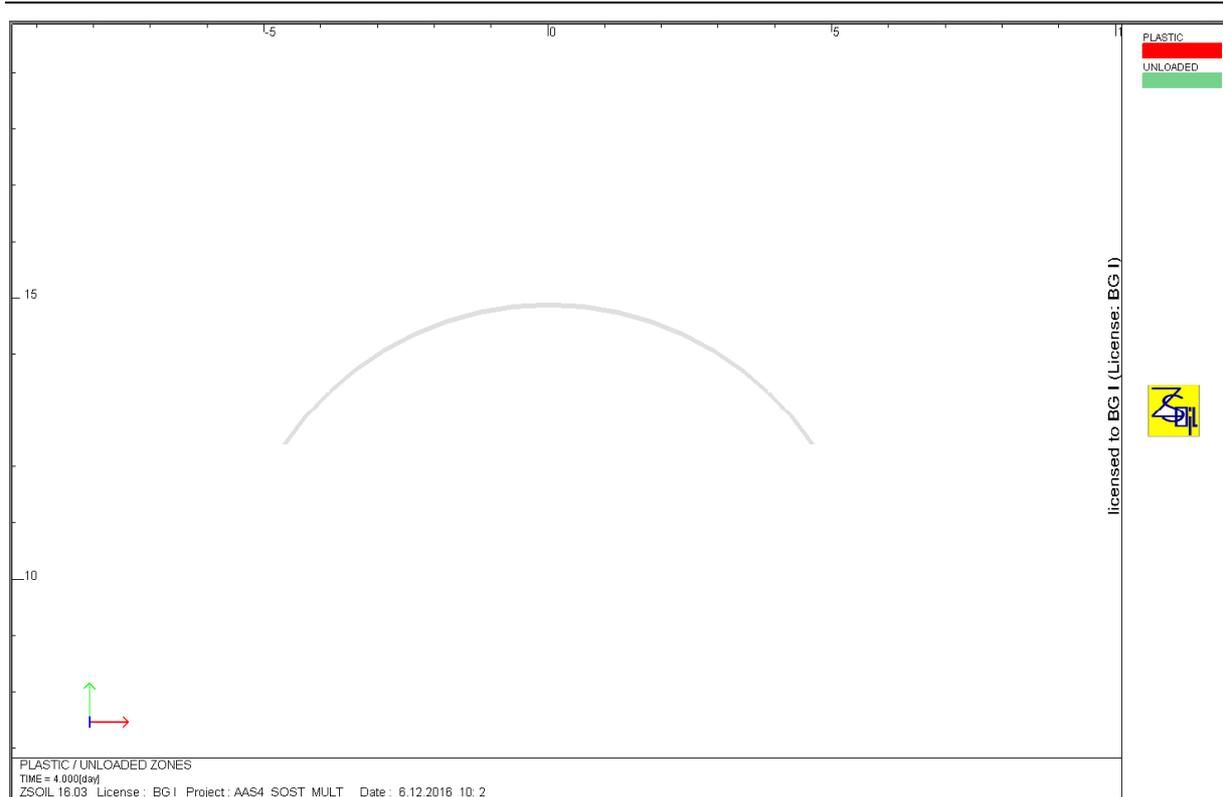


Figura 77: Zone plastiche nella centina sezione A-A, sostegno S4

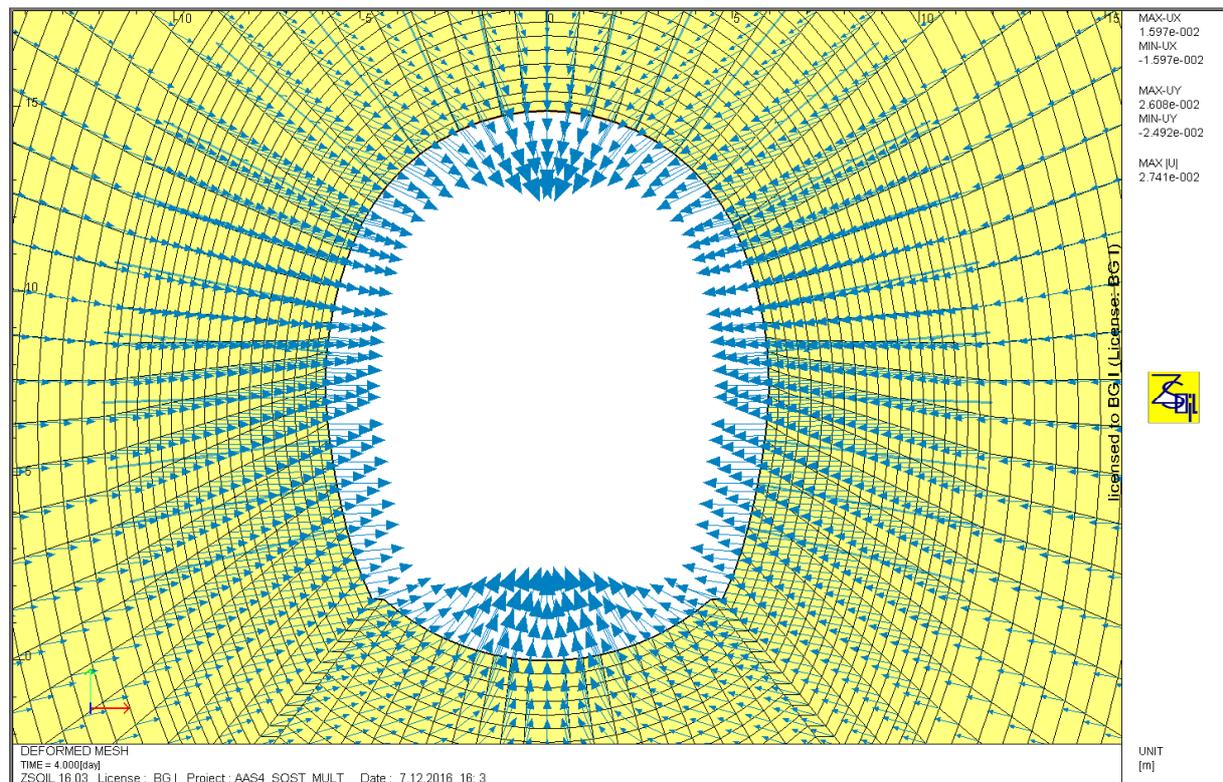


Figura 78: Vettori di spostamento sezione A-A, sostegno S4

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

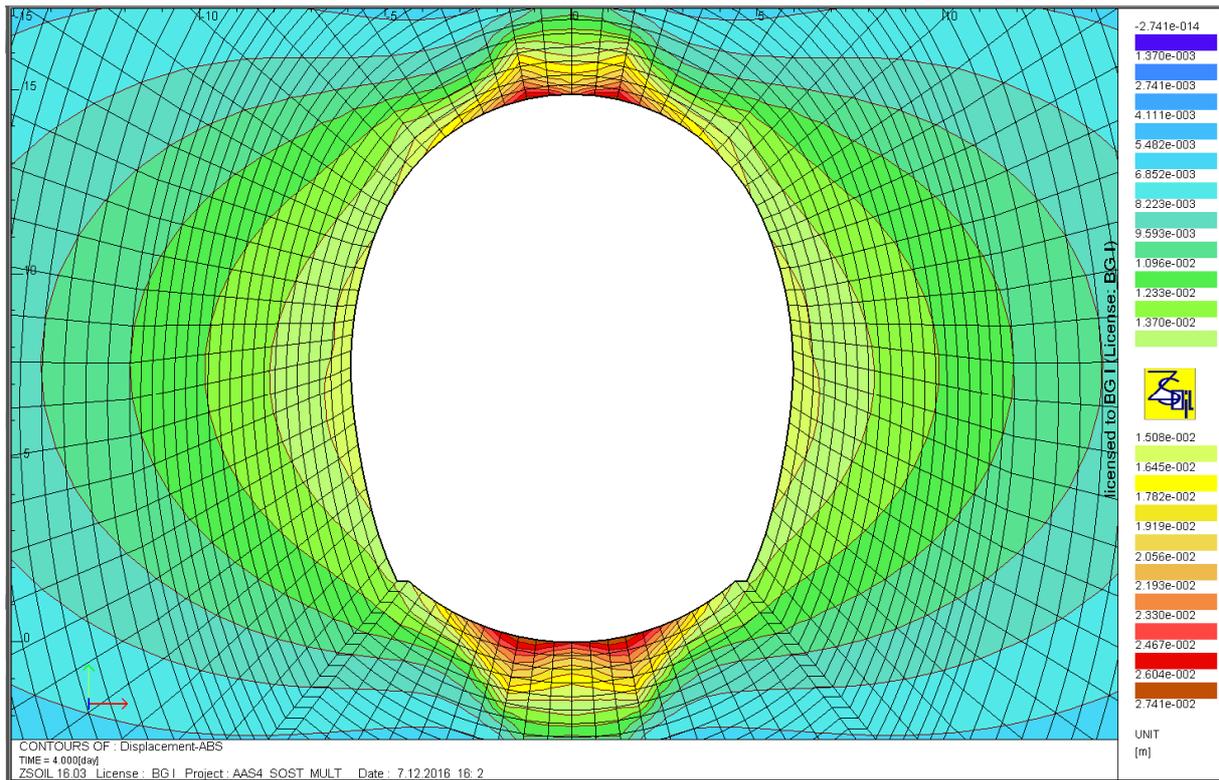


Figura 79: Spostamenti assoluti sezione A-A, sostegno S4

Lo spostamento massimo è a livello della calotta ed è pari a 2.7 cm.
 Nelle pareti lo spostamento è di 1.5 cm.

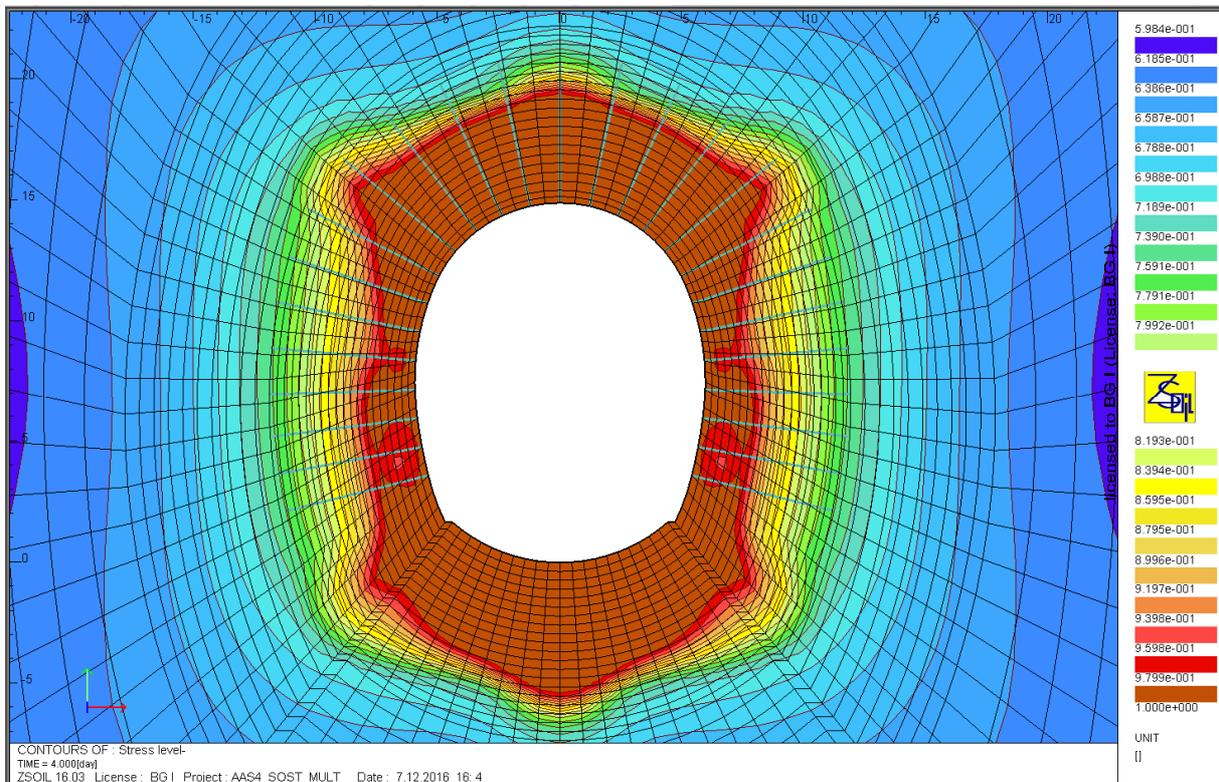


Figura 80: Zone plastiche "Stress Level" A-A, sostegno S4

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

L'analisi delle zone plastiche mostra il comportamento anisotropico multilaminare dell'ammasso. Nei piedritti la roccia plastifica su una zona meno ampia (lo spessore della banda è di circa 2 m) mentre in calotta la plasticizzazione raggiunge i 4.9 m di profondità. Questo si traduce, per effetto della gravità, nei fenomeni di rilascio e di dilatanza osservati. In arco rovescio la zona plastica raggiunge una profondità di 5.5m.

7.2.14 Sezione B-B, tipo di sostegno S4, GSI=65

Anche in questo caso per il calcestruzzo proiettato devono essere verificati sia la situazione a fine scavo della calotta con sostegno L1 sia la situazione alla fine totale dello scavo con sostegno L1+L2.

Verifica in L1:

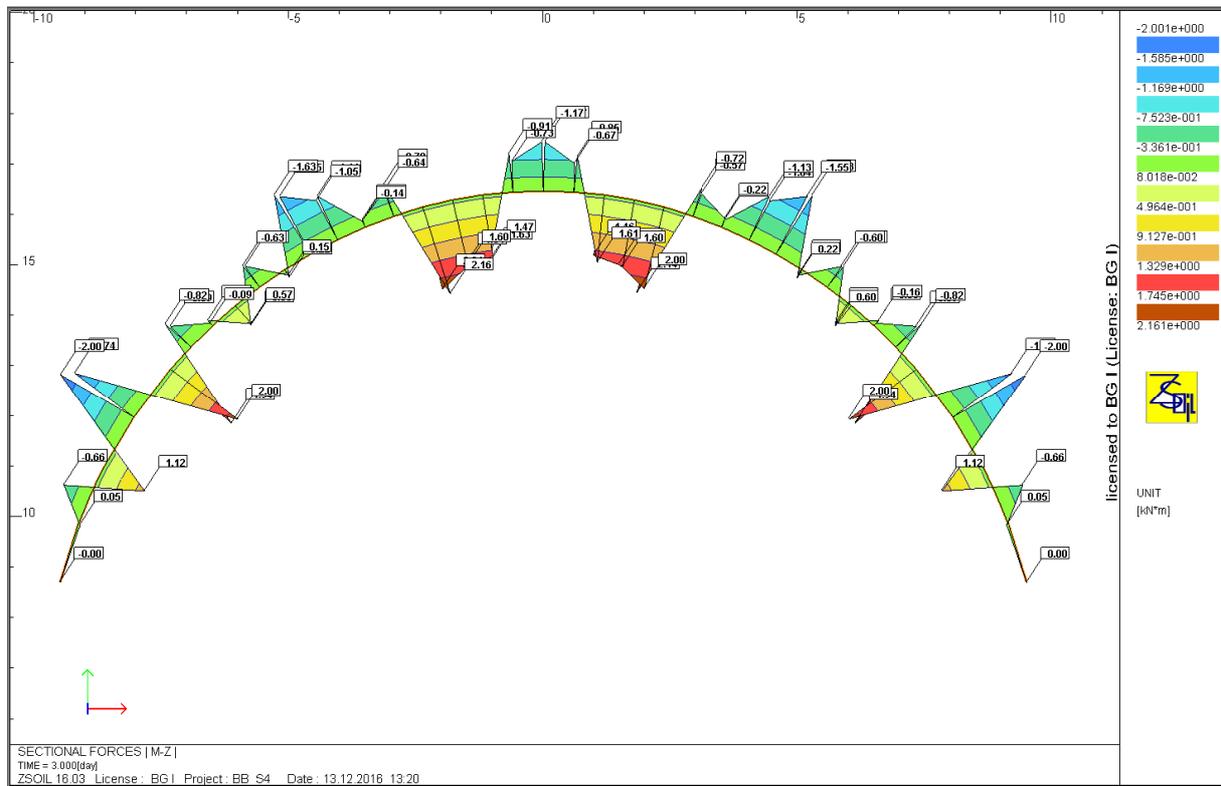


Figura 81: Diagramma dei momenti sezione B-B, sostegno S4 L1

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

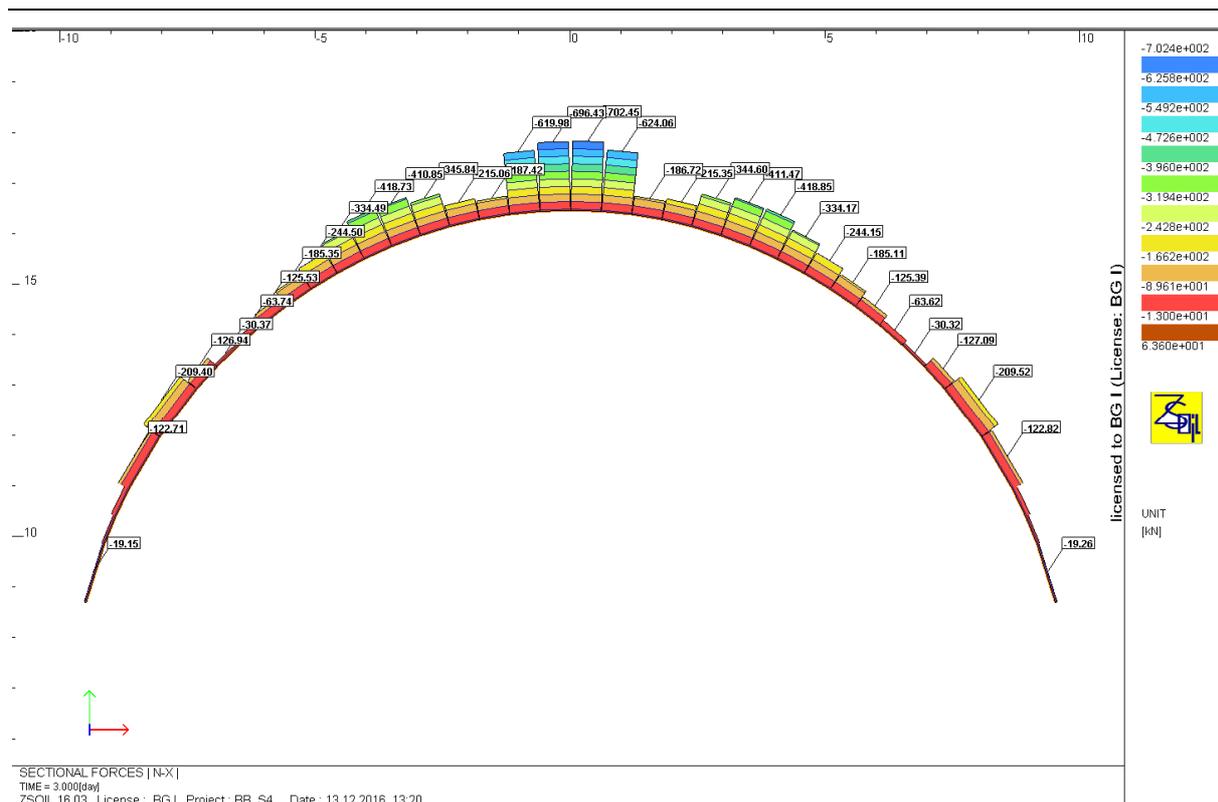


Figura 82: Diagramma degli sforzi normali sezione B-B, sostegno S4 L1

Combinazione	Sforzi		Sforzi di calcolo	
	M [kNm]	N [kN]	M _{Ed} [kNm]	N _{Ed} [kN]
N _{max} , M	1,2	702,5	1,5	913,2
N, M _{max,min}	-2,00	209,52	-2,6	272,4

Tabella 21 – Sforzi nella sezione critica, sezione B-B, sostegno S4 L1

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

Données

Largeur section $b =$	1 m
Epaisseur section $h_w =$	0,15 m
Résistance du béton à la compression $f_{ck} =$	30 MPa
Coefficient effets à long terme $\alpha_{cc,pl}$ et $\alpha_{ct,pl} =$	1
Facteur de sécurité (marge) =	1
Coefficient partiel relatif au béton $\gamma_c =$	1,5
Coefficient relatif aux actions $\gamma_{ELU} =$	1,3

Résultats

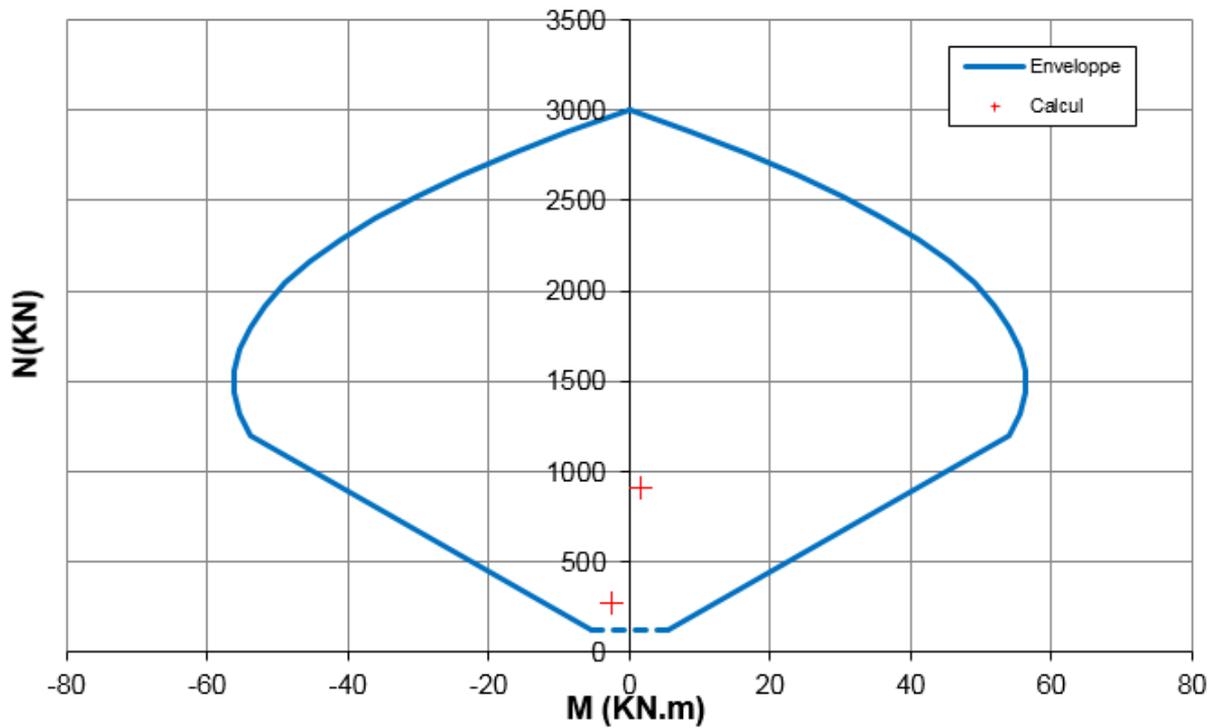


Figura 83: Diagramma d'interazione 15 cm di calcestruzzo proiettato

La sezione critica è verificata con un fattore di sicurezza pari a $FS=3.2$.

Verifica in L1+L2:

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

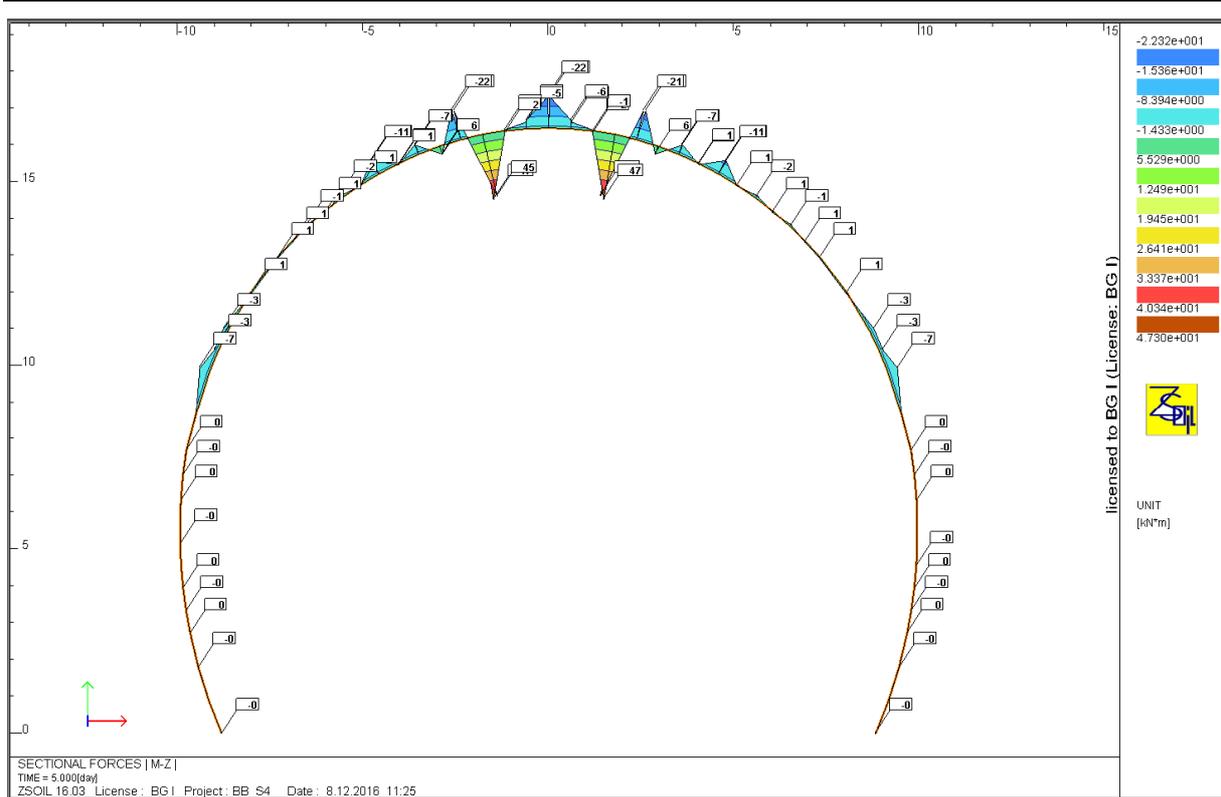


Figura 84: Diagramma dei momenti sezione B-B, sostegno S4 L1+L2

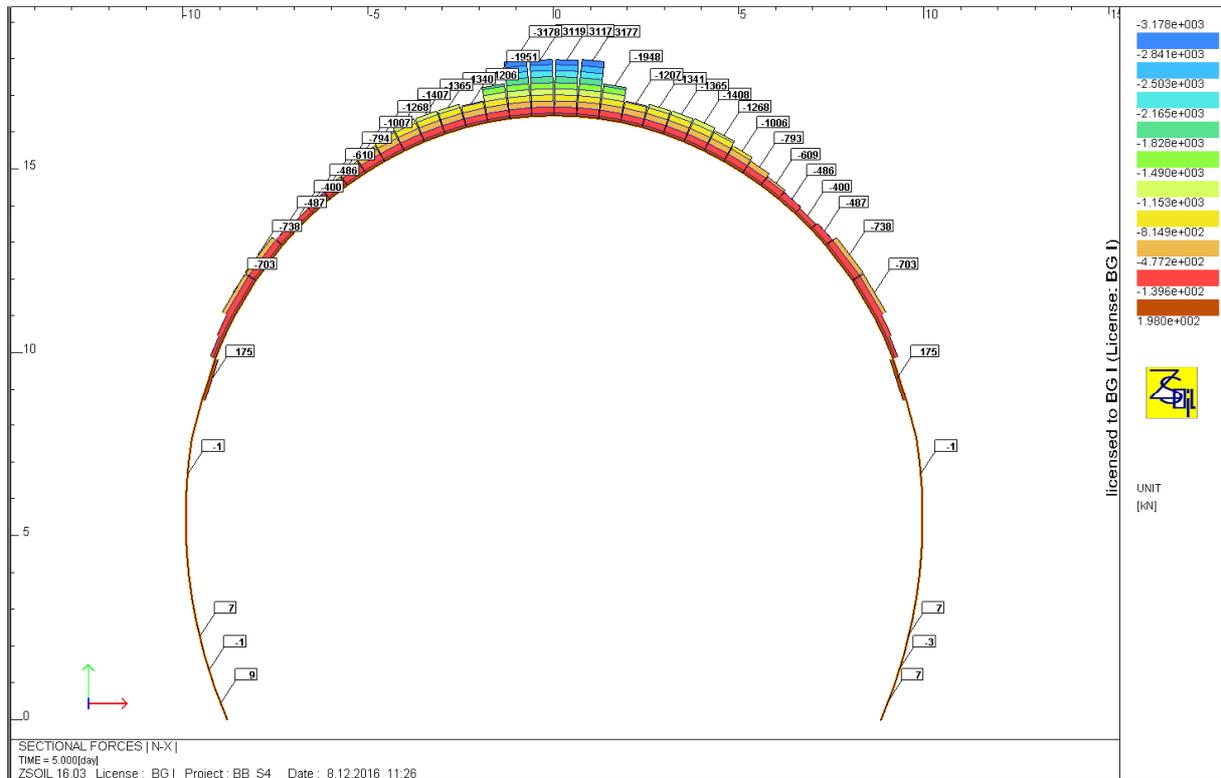


Figura 85: Diagramma degli sforzi normali sezione B-B, sostegno S4 L1+L2

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

Combinazione	Sforzi		Sforzi di calcolo	
	M	N	M _{Ed}	N _{Ed}
	[kNm]	[kN]	[kNm]	[kN]
N _{max} , M _{min/max}	45,0	3178,0	58,5	4131,4

Tabella 22 – Sforzi nella sezione critica, sezione B-B, sostegno S4 L2+L1

Données

Largeur section b =	1 m
Epaisseur section h _w =	0,25 m
Résistance du béton à la compression f _{ck} =	30 MPa
Coefficient effets à long terme α _{cc,pl} et α _{ct,pl} =	1
Facteur de sécurité (marge) =	1
Coefficient partiel relatif au béton γ _c =	1,5
Coefficient relatif aux actions γ _{ell} =	1,3

Résultats

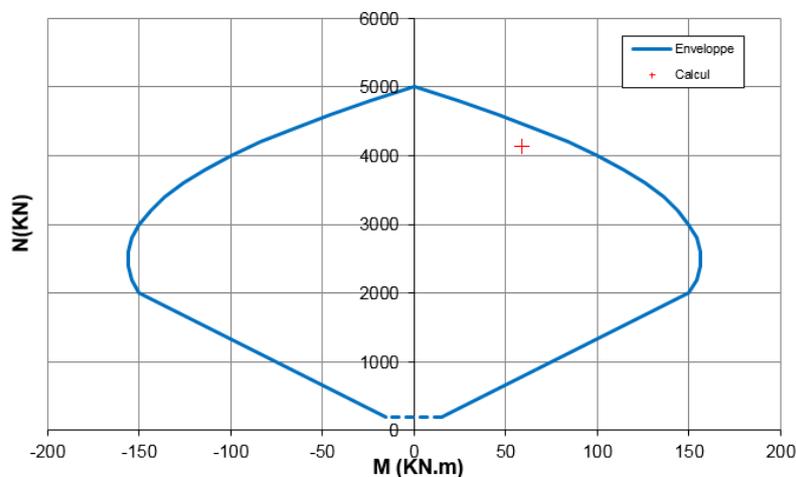


Figura 86: Diagramma d'interazione 25 cm di calcestruzzo proiettato

La sezione critica è verificata con un fattore di sicurezza pari a FS=1.07

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

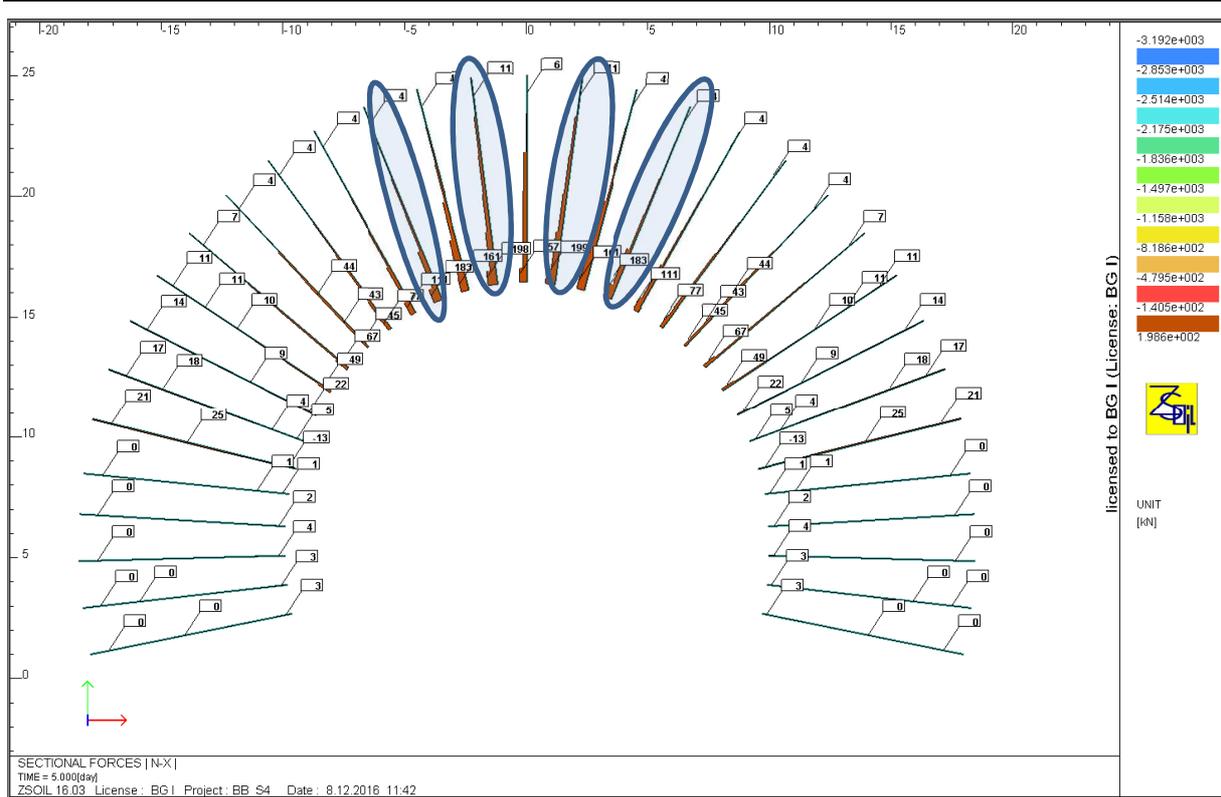


Figura 87: Sforzi nei bulloni. In blu sono cerchiati i bulloni la cui verifica non è soddisfatta

Il bullone più sollecitato è il seguente:

$$N_{Ed} = \frac{199 \text{ kN}}{1.2} \cdot 1.3 = 215.6 \text{ kN} > N_{Rd} = 190.5 \text{ kN}$$

$$FS = \frac{190.5}{215.6} \cong 0.9$$

Si nota che vi sono quattro bulloni (cerchiati in blu in figura 87) per cui la verifica non è soddisfatta. Per gli altri bulloni le verifiche sono soddisfatte, come mostrato di seguito per il più sollecitato di questi:

$$\frac{161 \text{ kN}}{1.2} \cdot 1.3 = 174.4 \text{ kN} < N_{Rd} = 190.5 \text{ kN}$$

$$FS = \frac{190.5}{174.4} \cong 1.1$$

La deformazione massima è:

$$0.15\% < 7 - 10\%$$

Per quanto riguarda la centina:

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

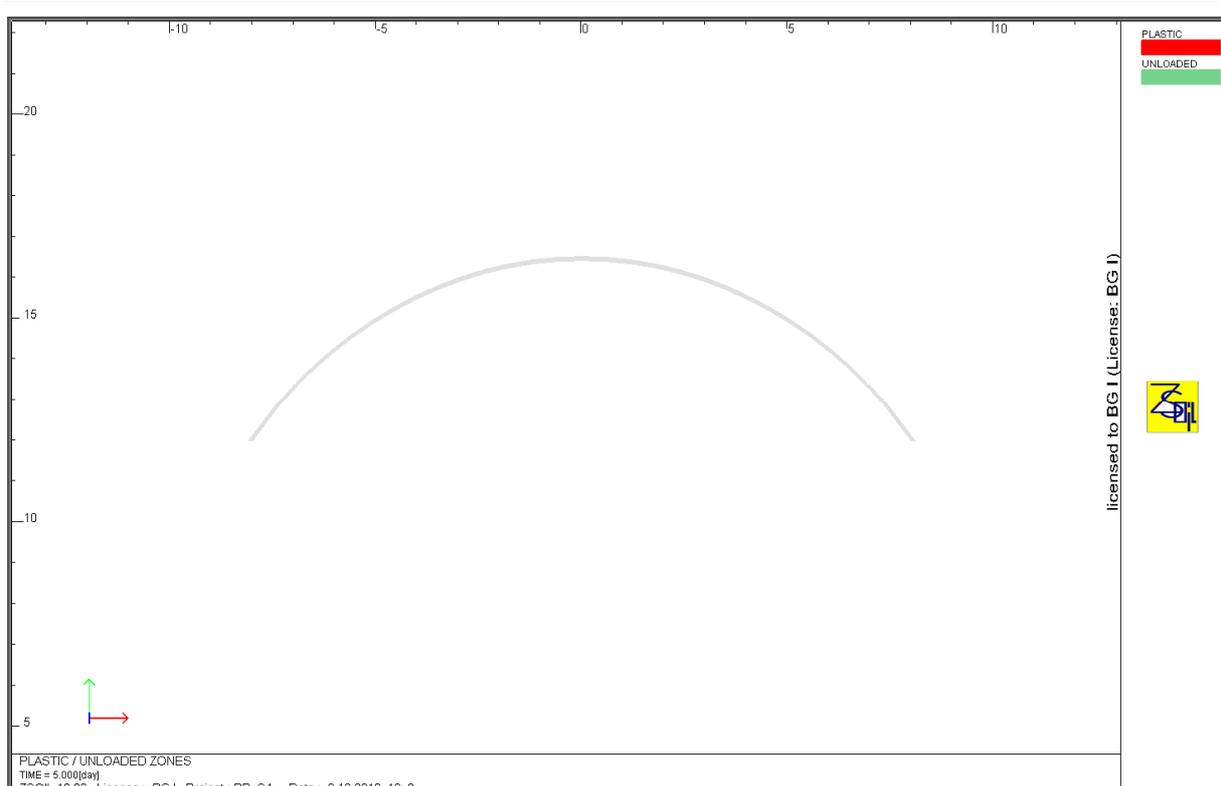


Figura 88: Zone plastiche nella centina sezione B-B, sostegno S4

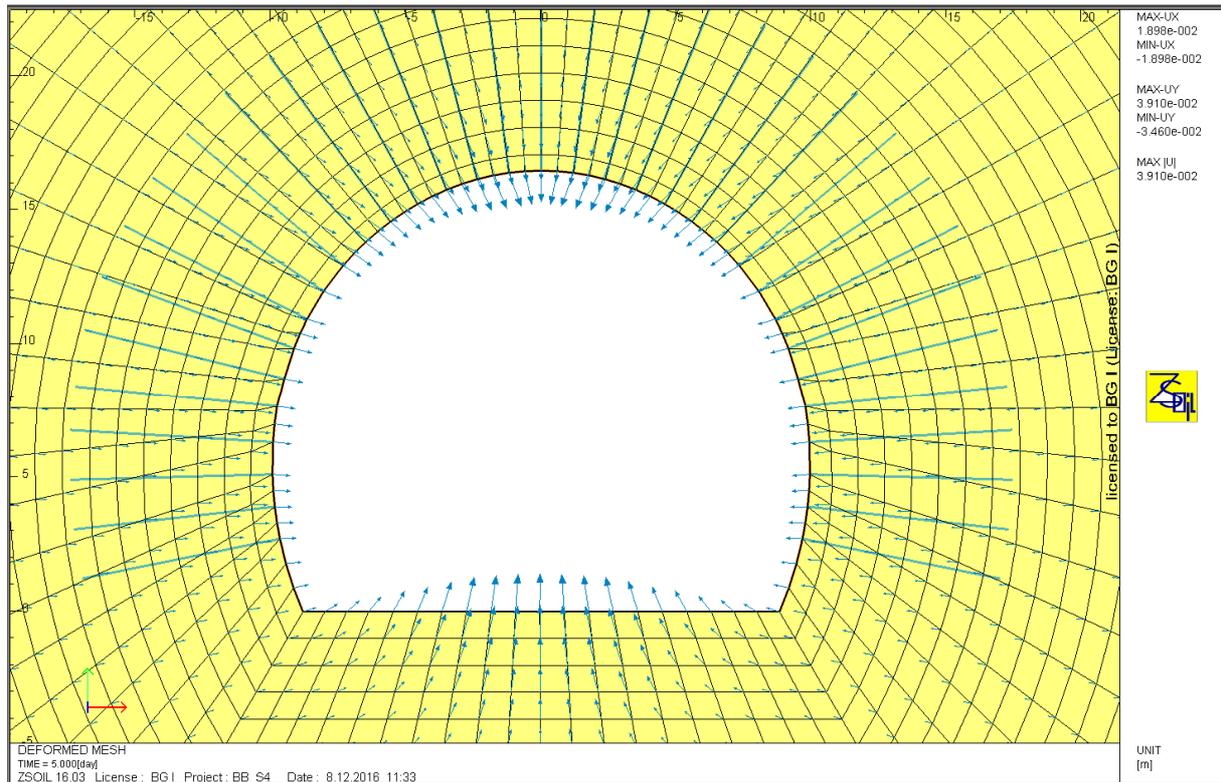


Figura 89: Vettori di spostamento sezione B-B, sostegno S4

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

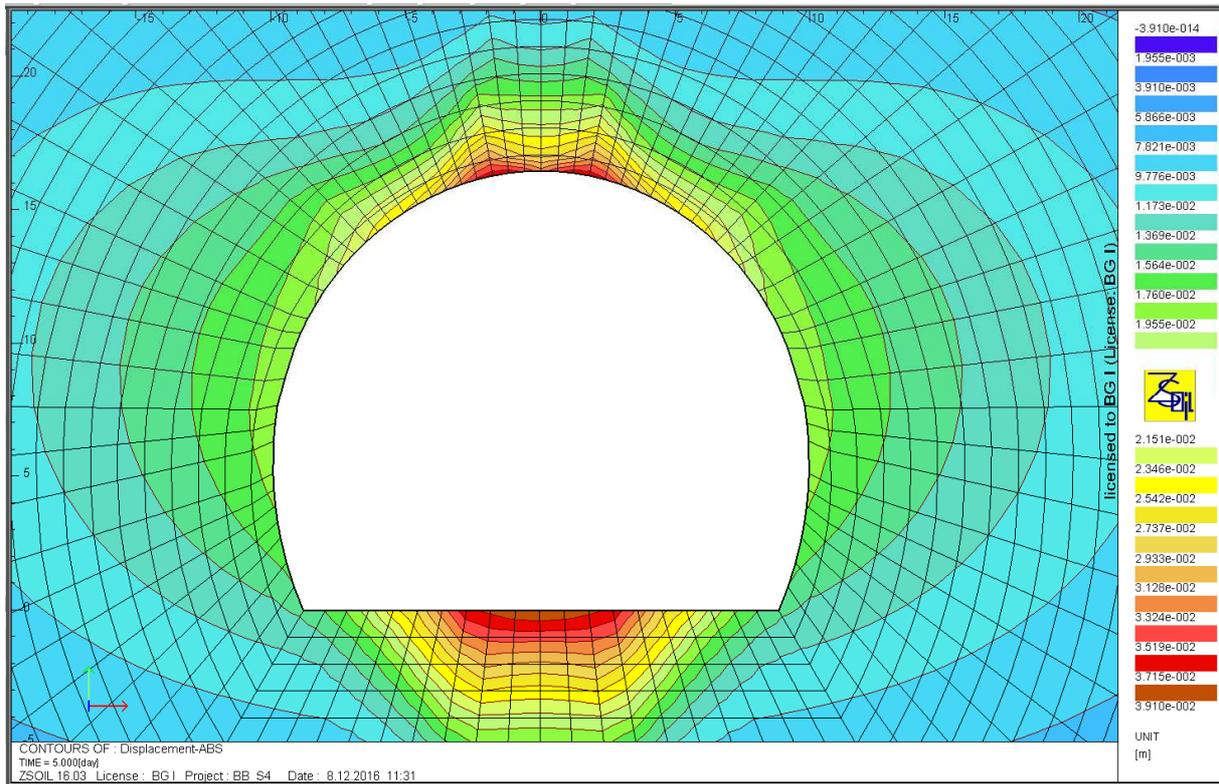


Figura 90: Spostamenti assoluti sezione B-B, sostegno S4

Lo spostamento massimo è in calotta ed è pari a 3.91 cm.
 Nei piedritti lo spostamento è di circa 2.0 cm.

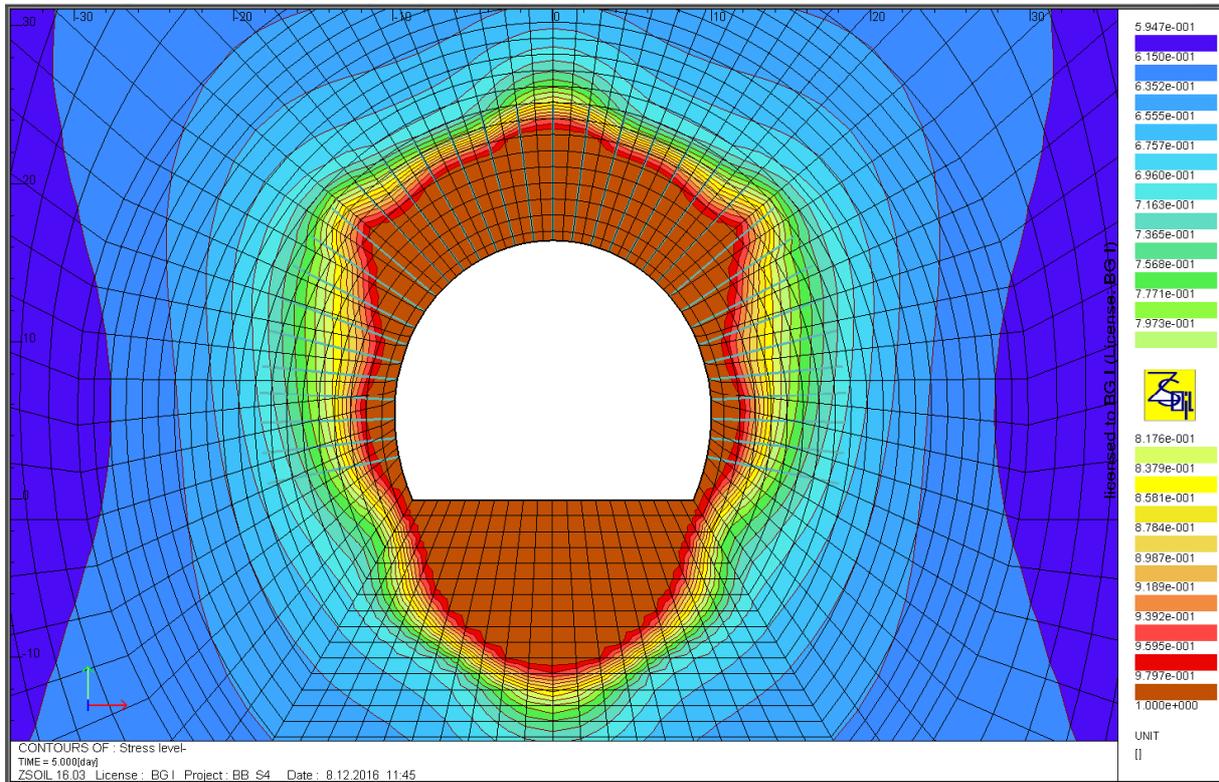


Figura 91: Zone plastiche "Stress Level" B-B, sostegno S4

La larghezza della banda plastica è di circa 1.8 m nei piedritti e 7 m in calotta.
A causa della forma piatta della platea, si forma una zona plastica importante (circa 11 m).
Tuttavia, i fenomeni di distacco di roccia non si producono poiché di natura gravitazionale.

Le verifiche sono soddisfatte per le centine ed il cls proiettato, mentre vi sono quattro bulloni il cui sforzo supera la capacità resistente a SLU (ma lo sforzo effettivo - 165 kN - è inferiore al carico di rottura - 200 kN).

Per questo tipo di fenomeni, la modellazione numerica non può essere dissociata dall'osservazione durante lo scavo.

Occorre inoltre notare che, nel cunicolo esplorativo (si veda la rel. [4]), i fenomeni di rilascio gravitativo si sono verificati principalmente a partire dal PM 3500 del cunicolo, ovvero quando questo si pone parallelo al TdB. In questa tratta l'ammasso roccioso risulta interessato dalla scistosità principale a basso angolo con direzione subparallela all'andamento del cunicolo, immergente verso lo scavo. Considerato il posizionamento e l'orientazione della caverna tecnica, i fenomeni dovrebbero essere meno intensi o potrebbero addirittura risultare inesistenti.

Ad ogni modo, nello spirito del metodo osservazionale, si considera che, nel caso di fenomeni particolarmente rilevanti, si potrà mettere in opera la sezione tipo S3.

Nel paragrafo successivo si verifica quindi la sezione tipo S3 nelle stesse condizioni geomeccaniche del presente calcolo e di conseguenza per condizioni geomeccaniche diverse rispetto alle verifiche delle altre opere.

7.2.15 Sezione B-B, tipo di sostegno S3, GSI=65

In questa sezione sono presenti centine HEB 220 in 32 cm di calcestruzzo proiettato in zona L1 e in aggiunta ulteriori 8 cm di calcestruzzo proiettato in zona L2. Una sezione equivalente dalle caratteristiche seguenti è stata introdotta nel programma di calcolo:

Zona L1:

$$t_{eq} = 32 \text{ cm}$$
$$E_{eq} = 13720 \text{ MPa}$$

Zona L2:

$$t_{eq} = 37 \text{ cm}$$
$$E_{eq} = 13520 \text{ MPa}$$

Anche in questo caso per il calcestruzzo proiettato devono essere verificati sia la situazione a fine scavo della calotta con sostegno L1 sia la situazione alla fine totale dello scavo con sostegno L1+L2.

Verifica in L1:

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

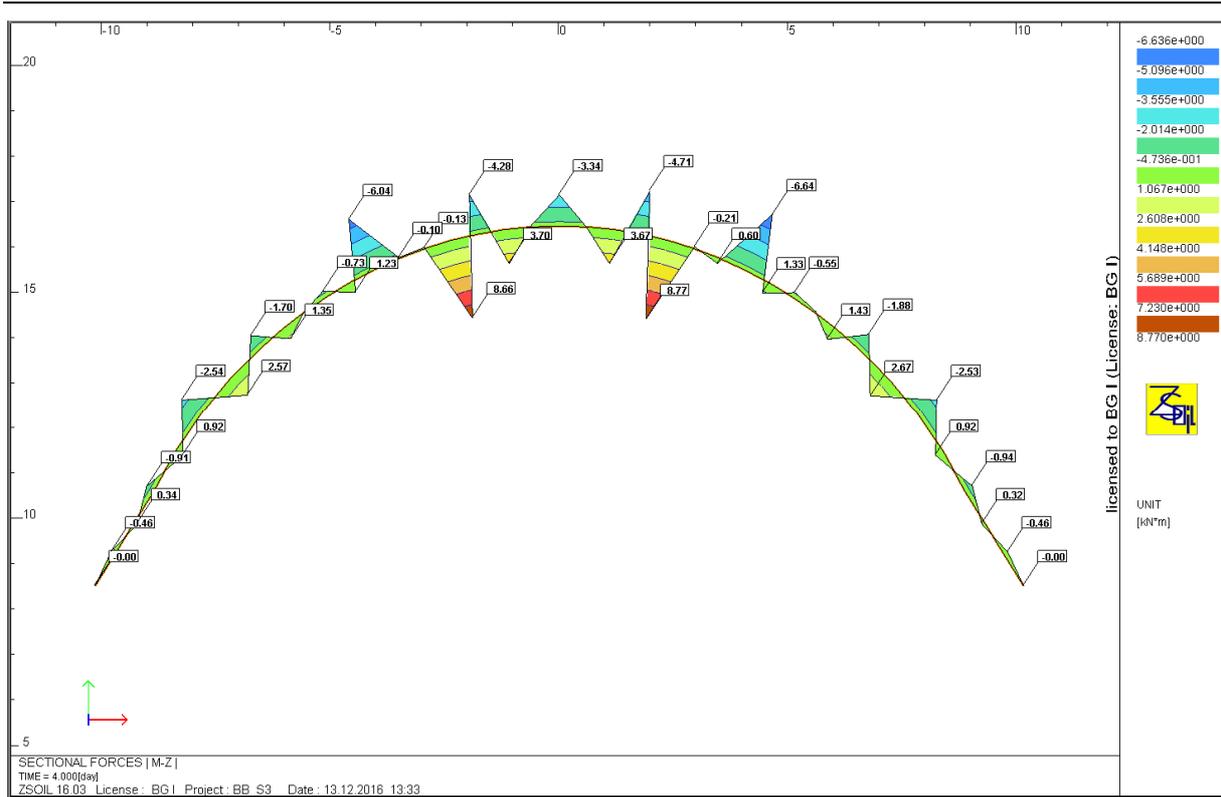


Figura 92: Diagramma dei momenti sezione B-B, sostegno S3 L1

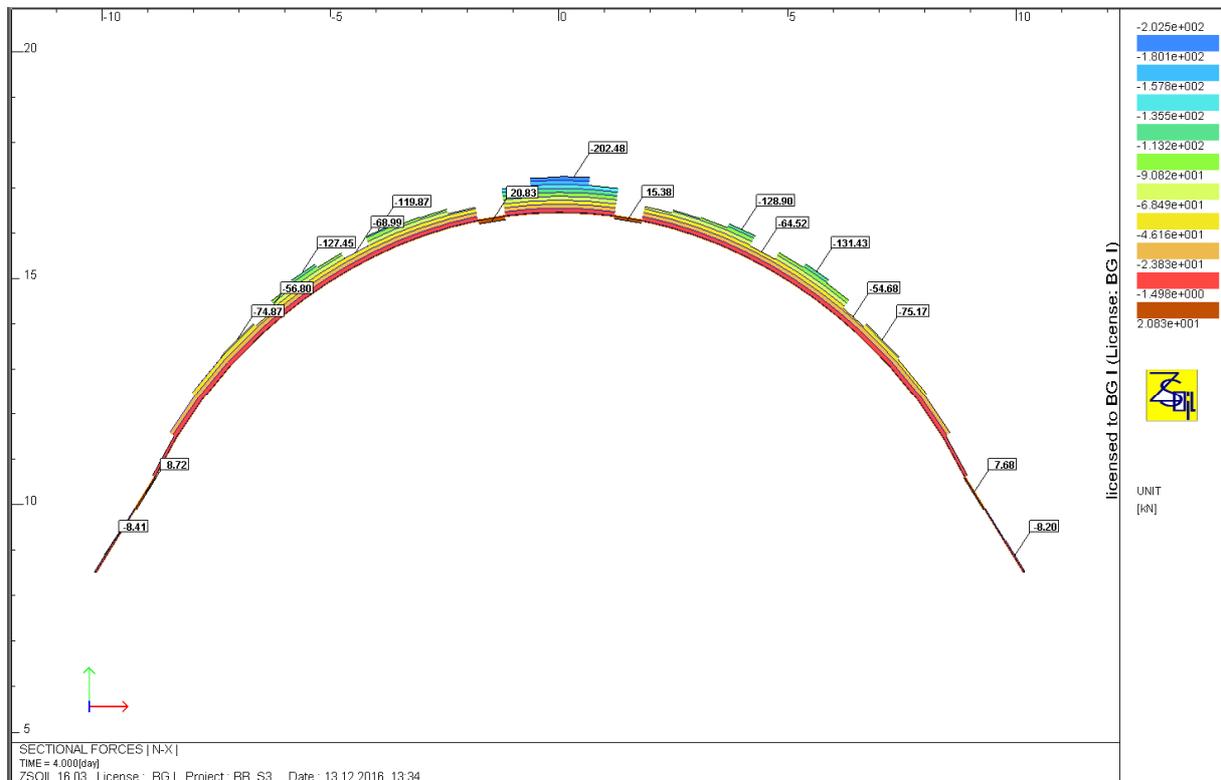


Figura 93: Diagramma degli sforzi normali sezione B-B, sostegno S3 L1

Gli sforzi ottenuti vanno poi suddivisi nella parte ripresa dalla centina e quella ripresa dal calcestruzzo.

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

Combinazione	Sforzi nella sezione equivalente	
	Neq [kN]	Meq [kNm]
N _{max} , M	202,5	3,3
N, M _{max,min}	128,9	6,6

Tabella 23 – Sforzi nella sezione critica della sezione mista, sezione B-B, sostegno S3 L1

Sforzi nel calcestruzzo proiettato			
N _b [kN]	M _b [kNm]	N _{b,Ed} [kN]	M _{b,Ed} [kNm]
129,1	2,1	167,8	2,7
82,2	4,1	106,8	5,4

Tabella 24 – Sforzi nella sezione critica della sezione in calcestruzzo

Sforzi sulla centina			
N _a [kN]	M _a [kNm]	N _{a,Ed} [kN]	M _{a,Ed} [kNm]
73,4	1,2	95,4	1,6
46,7	2,5	60,7	3,2

Tabella 25 – Sforzi nella sezione critica della sezione in acciaio

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

Données

Largeur section $b =$	1 m
Epaisseur section $h_w =$	0,32 m
Résistance du béton à la compression $f_{ck} =$	30 MPa
Coefficient effets à long terme $\alpha_{cc,pl}$ et $\alpha_{ct,pl} =$	1
Facteur de sécurité (marge) =	1
Coefficient partiel relatif au béton $\gamma_c =$	1,5
Coefficient relatif aux actions $\gamma_{ELU} =$	1,3

Résultats

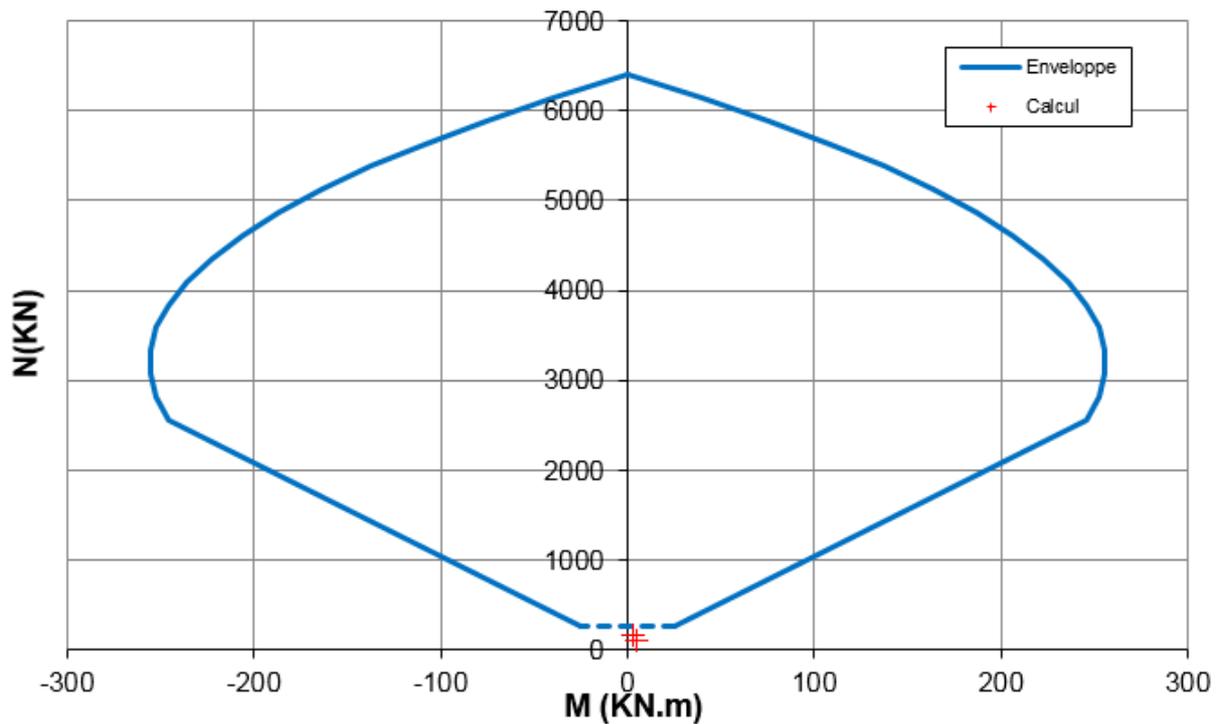


Figura 94: Diagramma d'interazione 32 cm di calcestruzzo proiettato

Secondo le raccomandazioni AFTES GT7, quando lo sforzo normale e il momento sono molto bassi (dominio al di sotto della linea tratteggiata), non si deve eseguire nessuna verifica particolare: $FS \gg 1$.

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

Données

Surface A =	0,0091 m ²
Moment d'inertie I =	0,0000809 m ⁴
Hauteur de la section h =	0,22 m
Résistance caractéristique de l'acier f_{yk} =	355 MPa
Facteur de sécurité (marge) =	1
Coefficient partiel relatif à l'acier γ_s =	1,05
Coefficient relatif aux actions γ_{ELU} =	1,3

Résultats

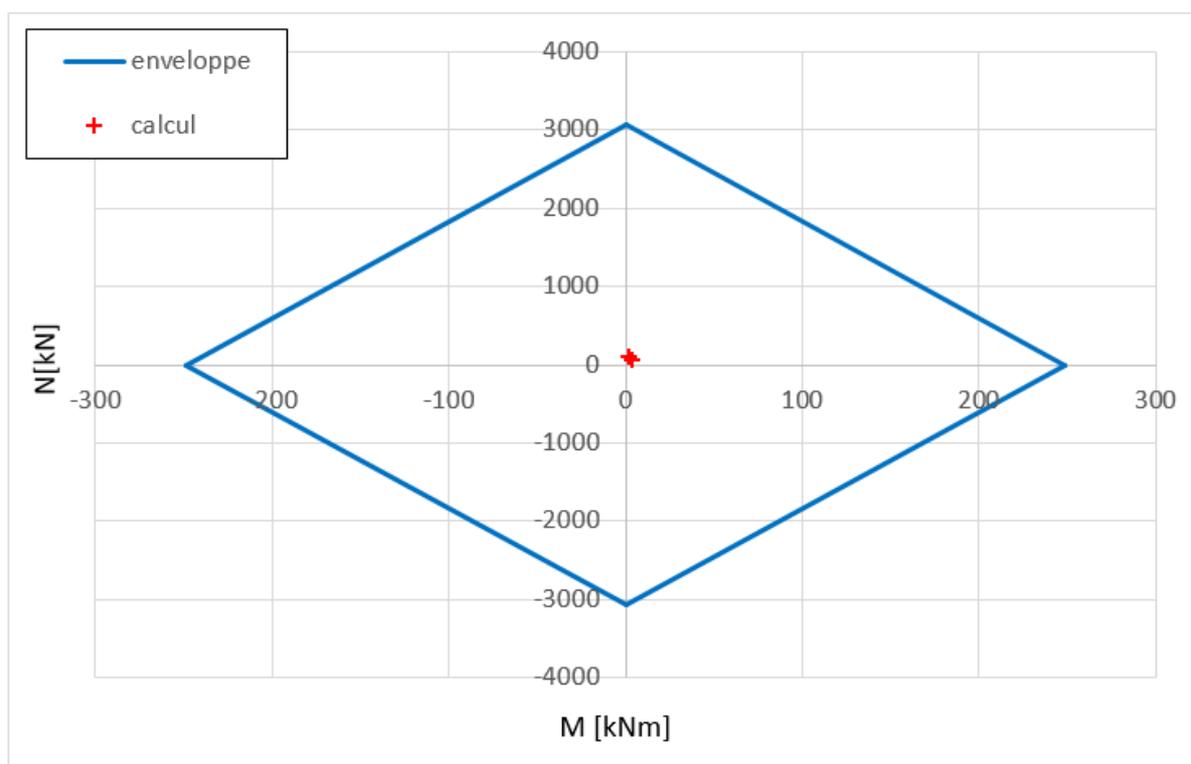


Figura 95: Diagramma d'interazione centina HEB 220

La centina è verificata con un fattore di sicurezza pari a FS=26.5.

Verifica in L1+L2:

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

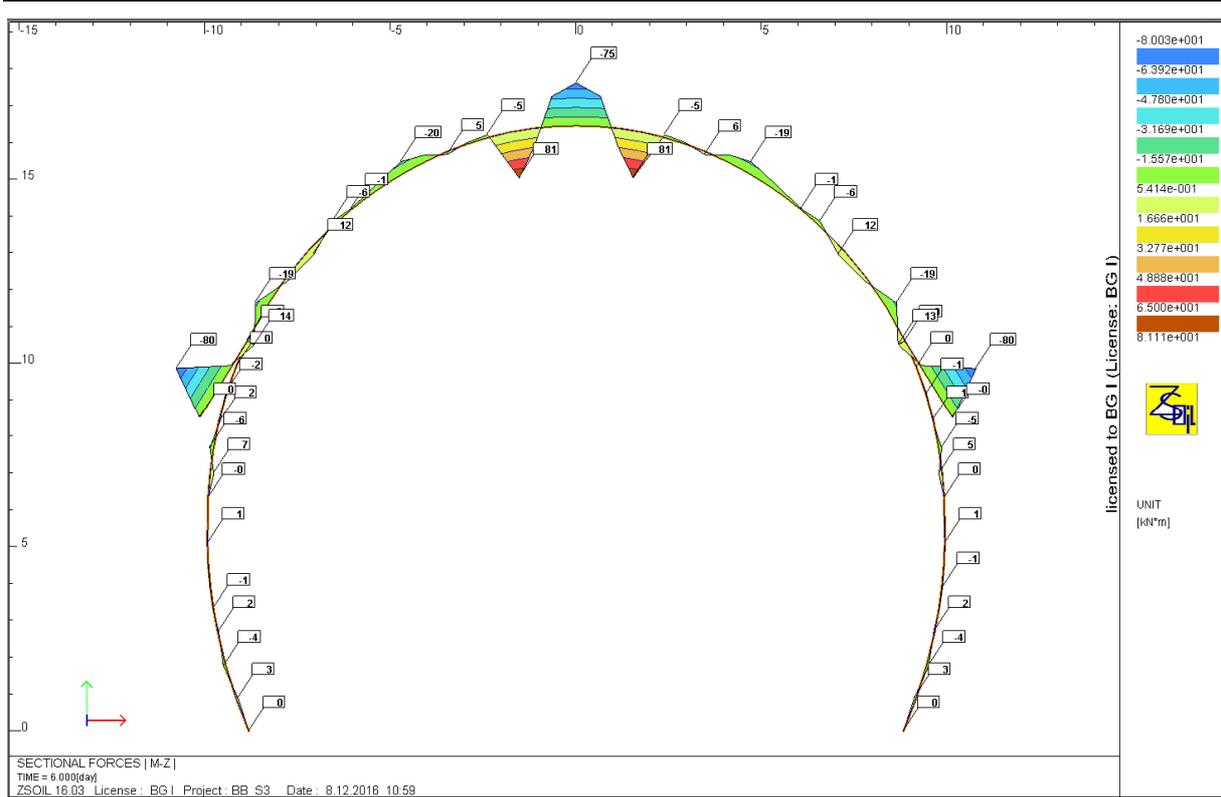


Figura 96: Diagramma dei momenti sezione B-B, sostegno S3 L1+L2

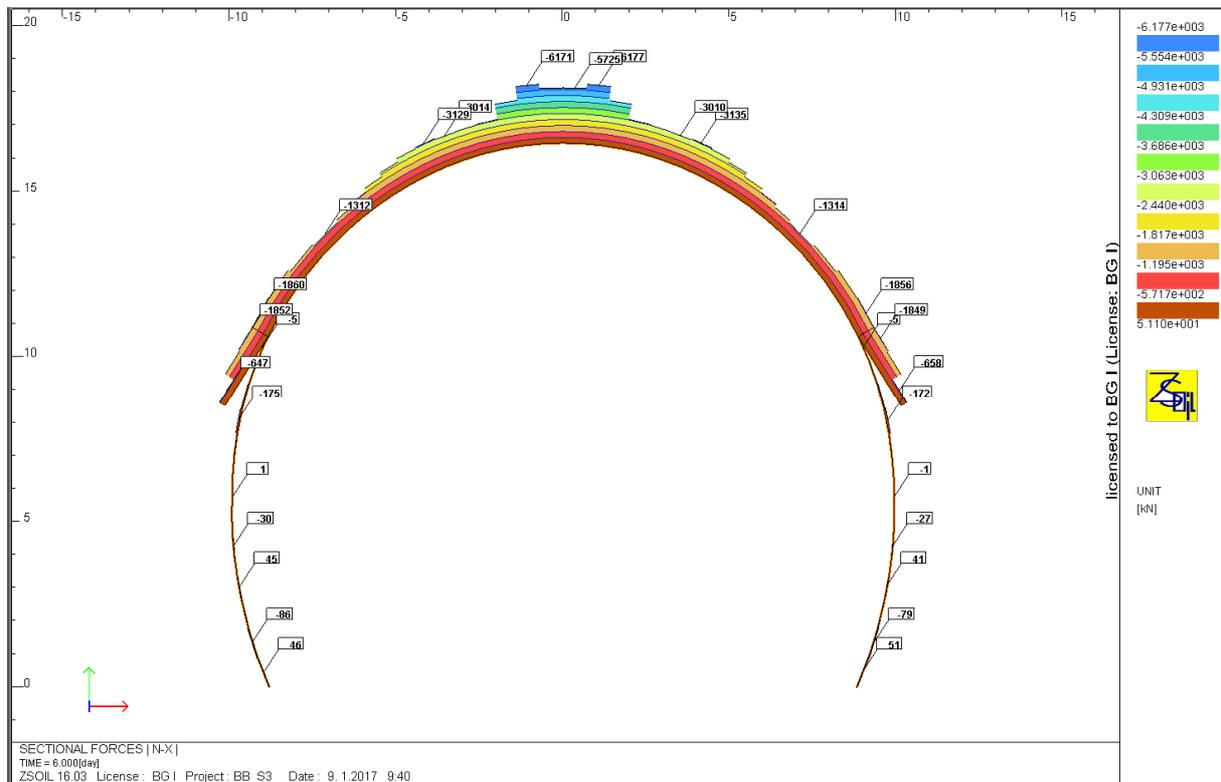


Figura 97: Diagramma degli sforzi normali sezione B-B, sostegno S3 L1+L2

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

Combinazione	Sforzi nella sezione equivalente	
	Meq [kN]	Neq [kNm]
N_{max}, M	-32,0	6177,0
$M_{min/max}, N$	81,0	3010,0

Tabella 26 – Sforzi nella sezione critica della sezione mista, sezione B-B, sostegno S3 L2+L1

Sforzi nel calcestruzzo proiettato			
M_b [kN]	N_b [kNm]	$M_{b,Ed}$ [kN]	$N_{b,Ed}$ [kNm]
-26,7	4746,5	-34,7	6170,5
67,5	2313,8	87,8	3008,0

Tabella 27 – Sforzi nella sezione critica della sezione in calcestruzzo

Sforzi sulla centina			
M_a [kN]	N_a [kNm]	$M_{a,Ed}$ [kN]	$N_{a,Ed}$ [kNm]
-5,3	1430,5	-6,9	1859,6
13,5	696,2	17,5	905,0

Tabella 28 – Sforzi nella sezione critica della sezione in acciaio

Données

Largeur section $b =$	1 m
Epaisseur section $h_w =$	0,4 m
Résistance du béton à la compression $f_{ck} =$	30 MPa
Coefficient effets à long terme $\alpha_{cc,pl}$ et $\alpha_{ct,pl} =$	1
Facteur de sécurité (marge) =	1
Coefficient partiel relatif au béton $\gamma_c =$	1,5
Coefficient relatif aux actions $\gamma_{ELU} =$	1,3

Résultats

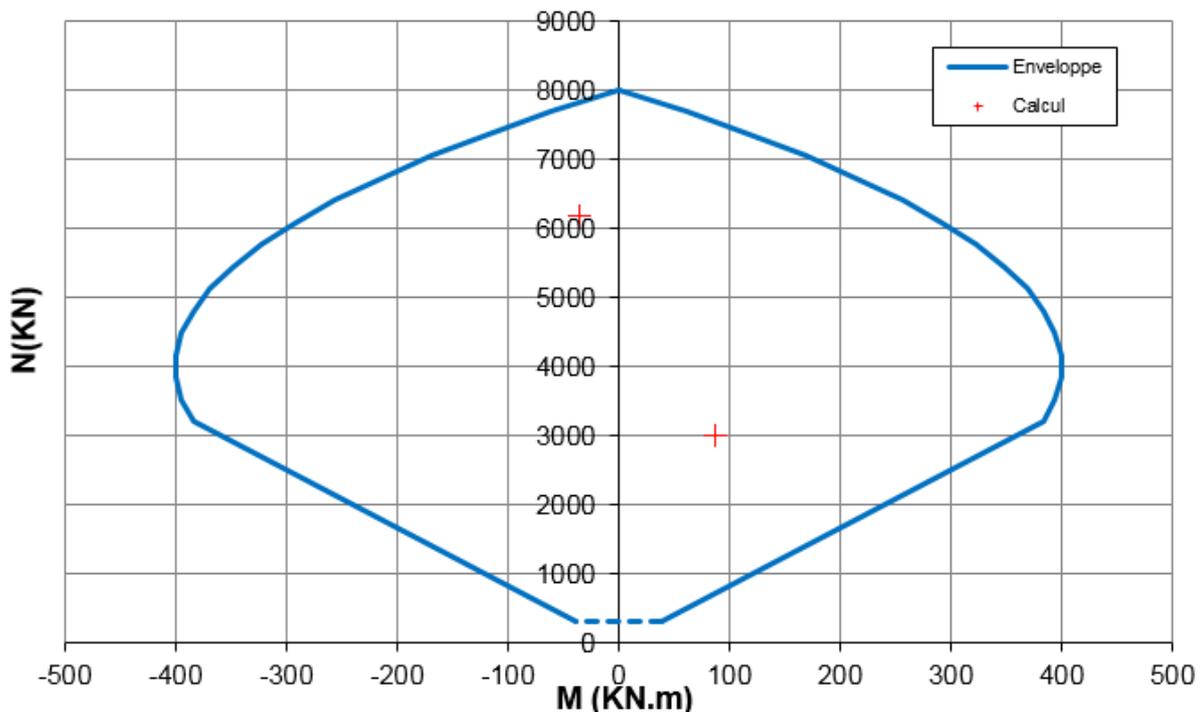


Figura 98: Diagramma d'interazione 40 cm di calcestruzzo proiettato

La sezione critica di calcestruzzo è verificata con un fattore di sicurezza pari a FS=1.25.

Données

Surface A =	0,0091 m ²
Moment d'inertie I =	0,0000809 m ⁴
Hauteur de la section h =	0,22 m
Résistance caractéristique de l'acier f_{yk} =	355 MPa
Facteur de sécurité (marge) =	1
Coefficient partiel relatif à l'acier γ_s =	1,05
Coefficient relatif aux actions γ_{ELU} =	1,3

Résultats

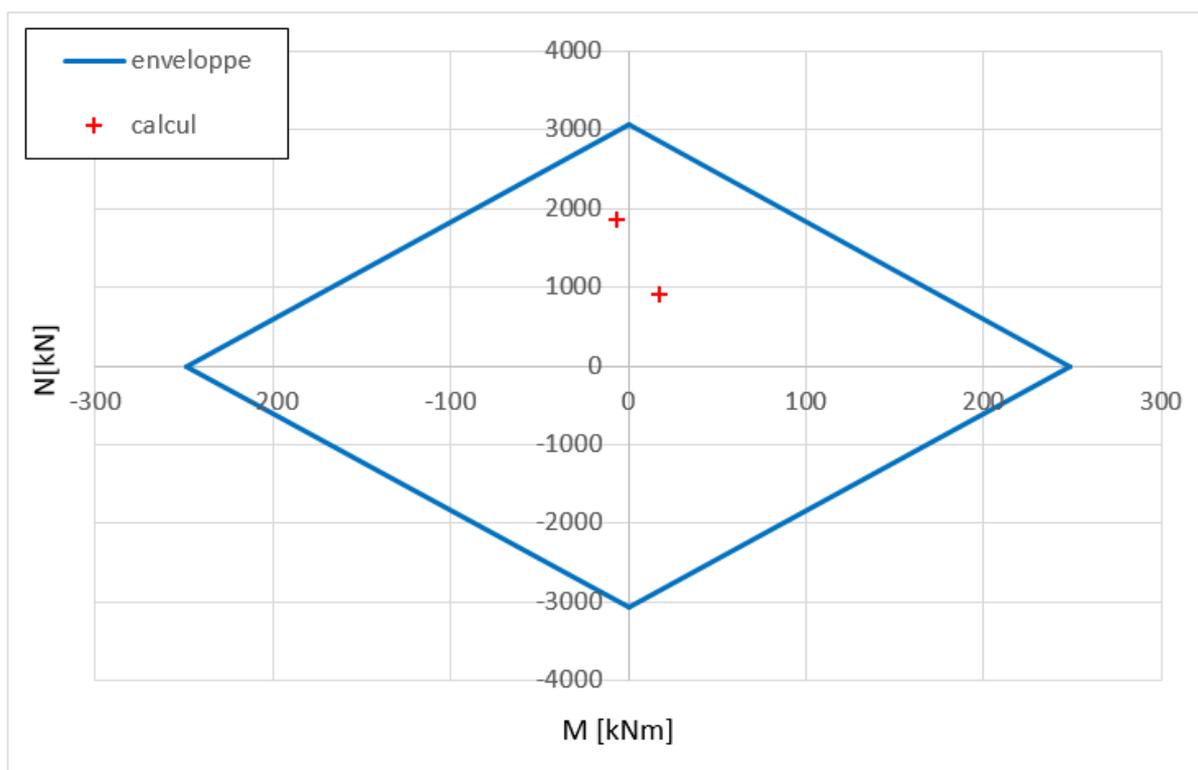


Figura 99: Diagramma d'interazione centina HEB 220

La sezione critica della centina è verificata con un fattore di sicurezza pari a FS=1.55.

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

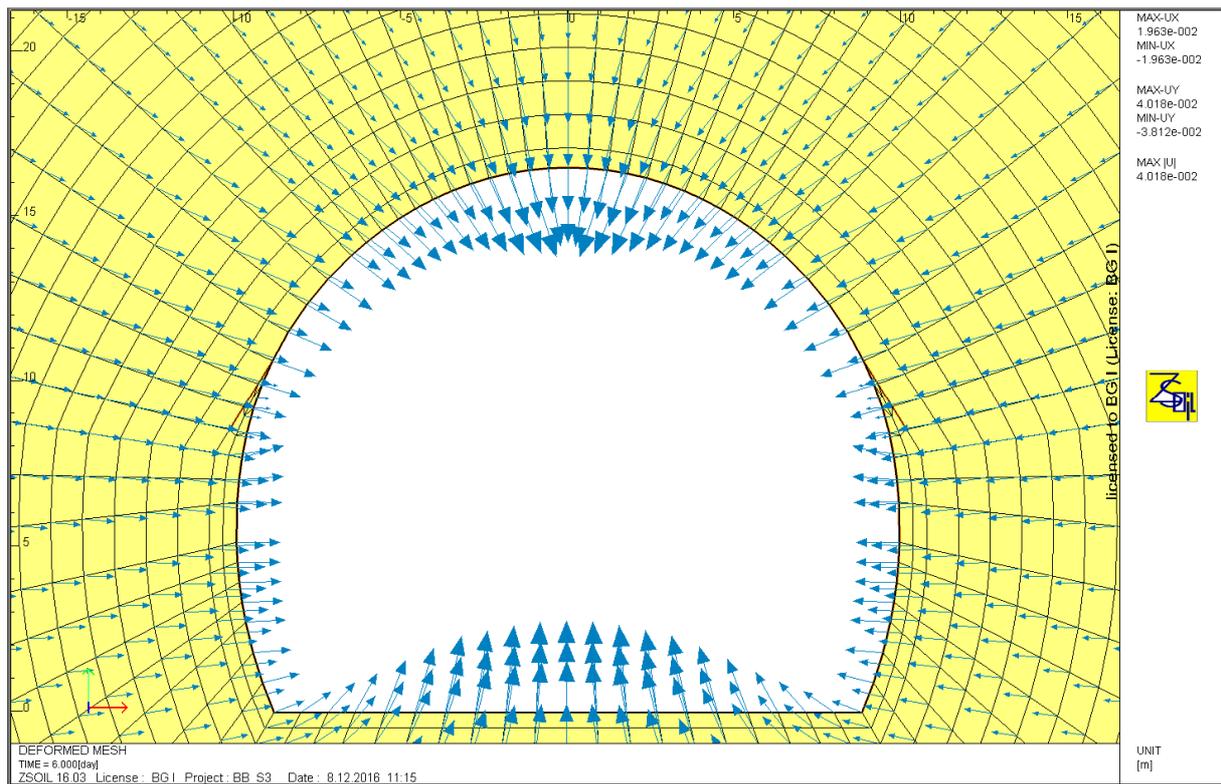


Figura 100: Vettori di spostamento sezione B-B, sostegno S3

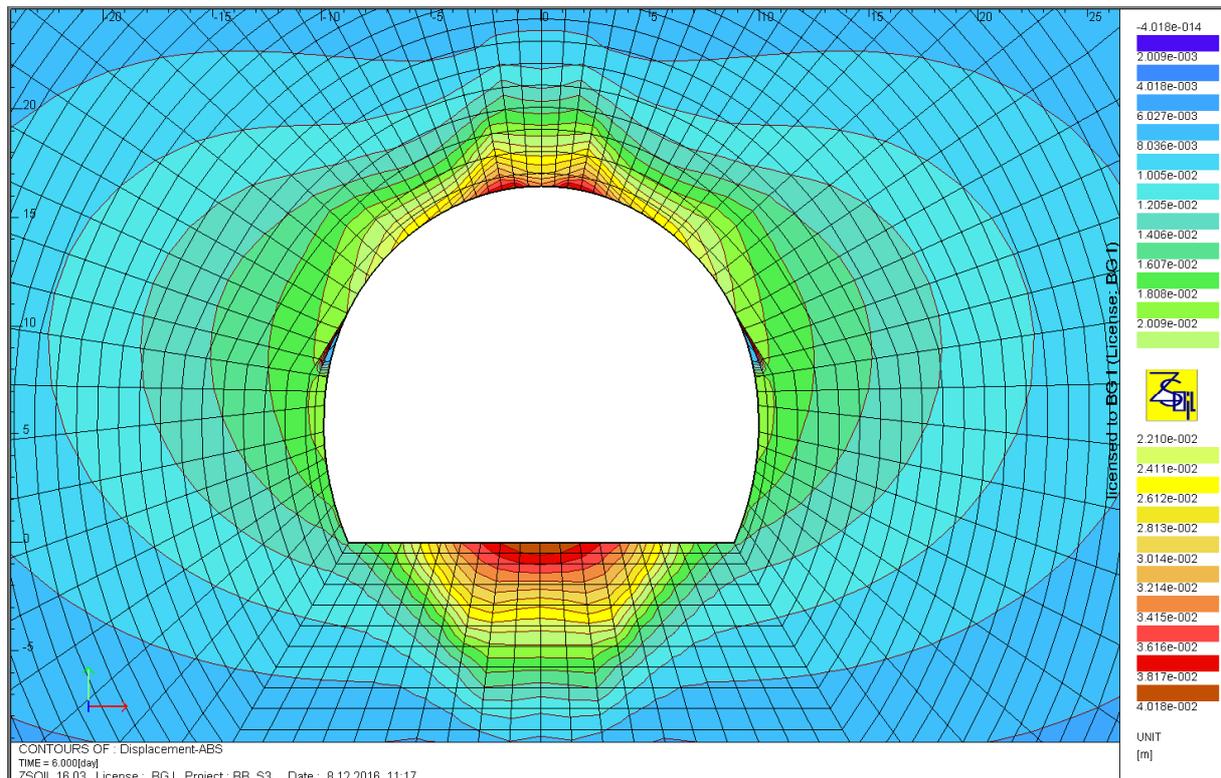


Figura 101: Spostamenti assoluti sezione B-B, sostegno S3

Lo spostamento massimo è in calotta ed è pari a 4.0 cm.
 Nei piedritti lo spostamento è di 2.0 cm.

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

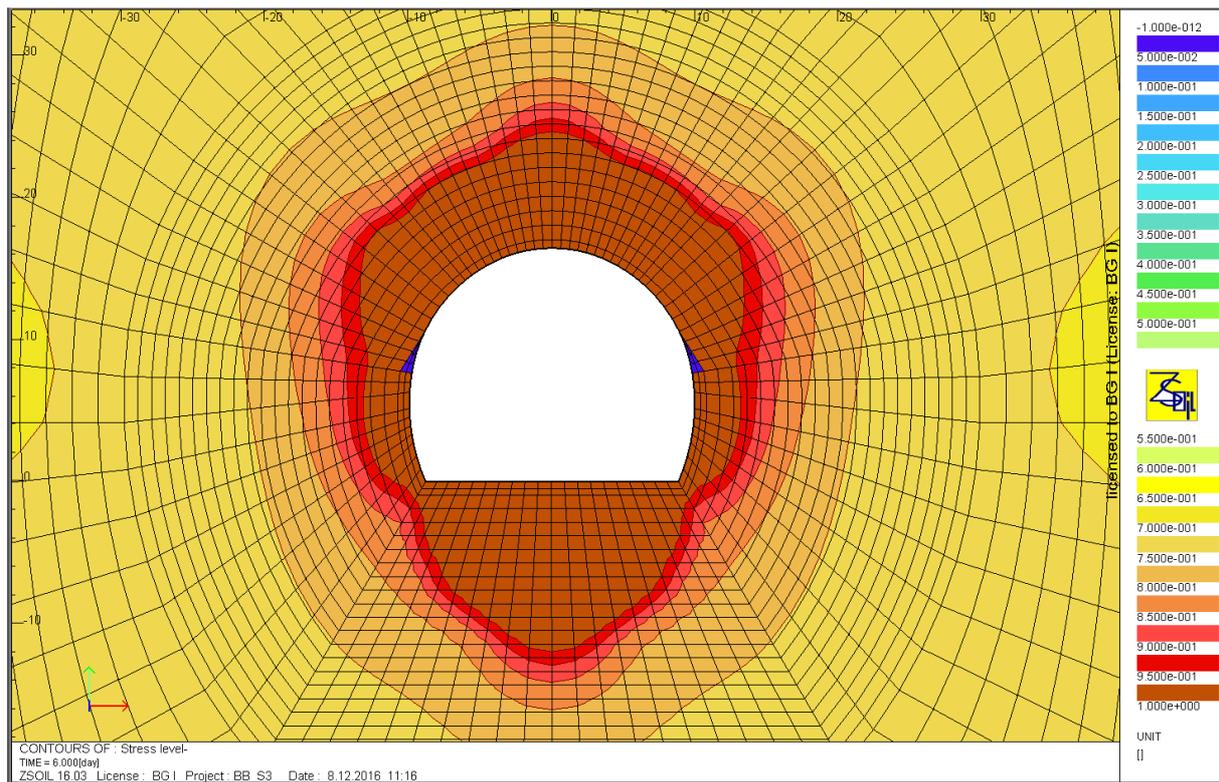


Figura 102: Zone plastiche "Stress Level" B-B, sostegno S3

La larghezza della banda plastica è di circa 4.0 m nei piedritti e 8.0 m in calotta.
A causa della forma piatta della platea, si forma una zona plastica importante (circa 11 m).
Tuttavia, i fenomeni di distacco di roccia non si producono poiché di natura gravitazionale.

7.2.16 Sezione E-E, tipo di sostegno S4, GSI=65

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

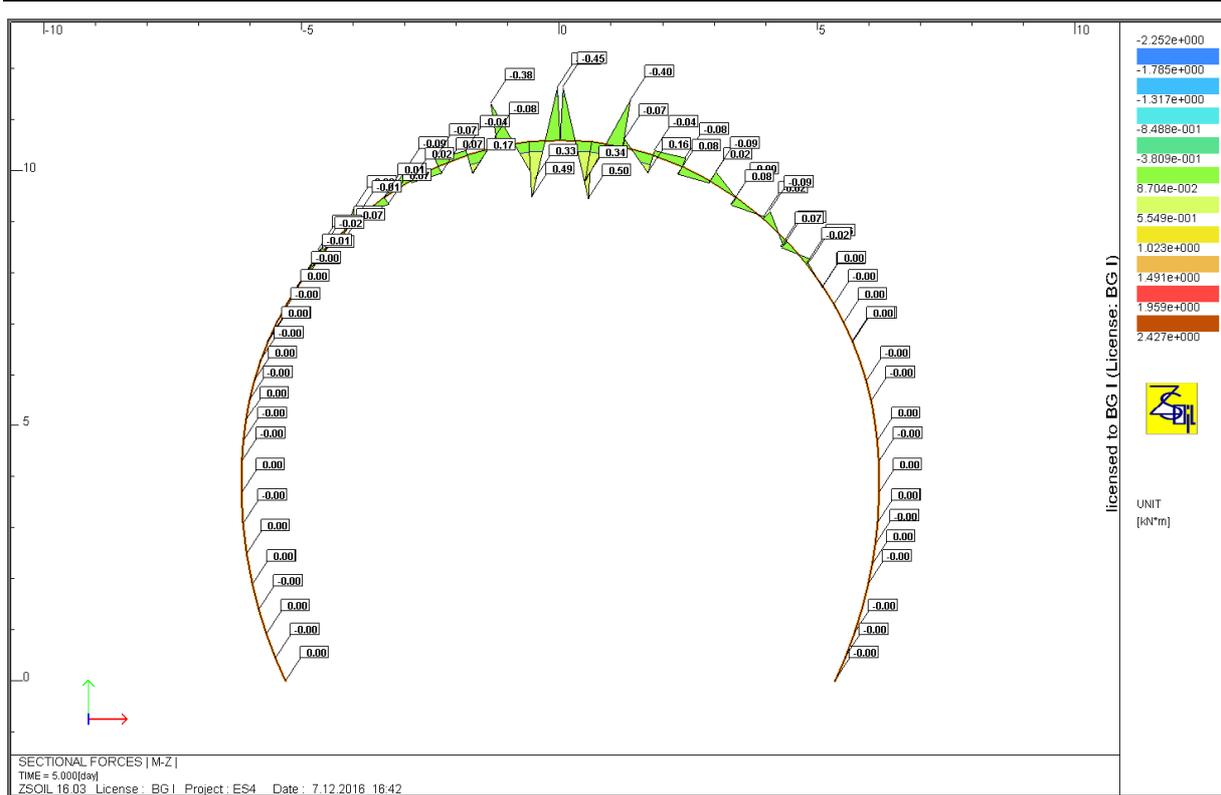


Figura 103: Diagramma dei momenti sezione E-E, sostegno S4

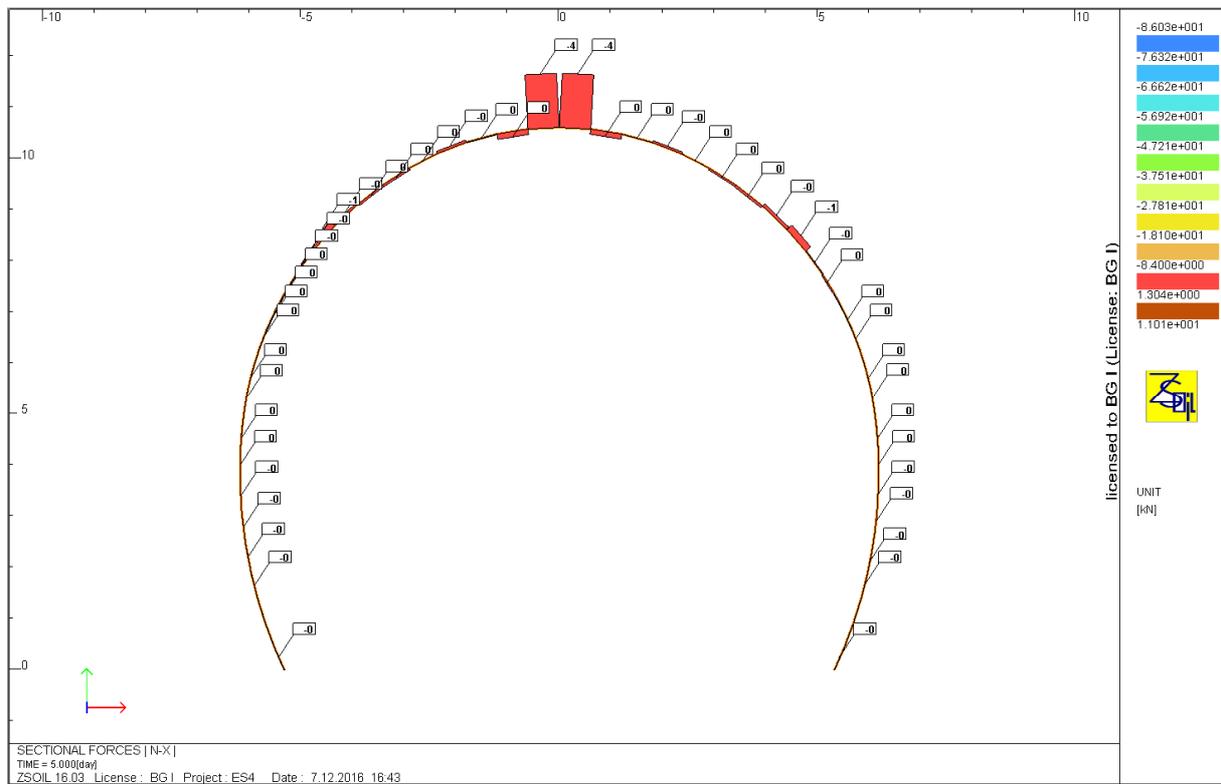


Figura 104: Diagramma degli sforzi normali sezione E-E, sostegno S4

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

Combinazione	Sforzi nel cls		Sforzi di calcolo	
	M	N	M_{Ed}	N_{Ed}
	[kNm]	[kN]	[kNm]	[kN]
$N_{max}, M_{min/max}$	0,5	4,0	0,6	5,2

Tabella 29 – Sforzi nelle sezioni critiche, sezione E-E, sostegno S4

Données

Largeur section b =	1 m
Epaisseur section h_w =	0,1 m
Résistance du béton à la compression f_{ck} =	30 MPa
Coefficient effets à long terme $\alpha_{cc,pl}$ et $\alpha_{ct,pl}$ =	1
Facteur de sécurité (marge) =	1
Coefficient partiel relatif au béton γ_c =	1,5
Coefficient relatif aux actions γ_{Ew} =	1,3

Résultats

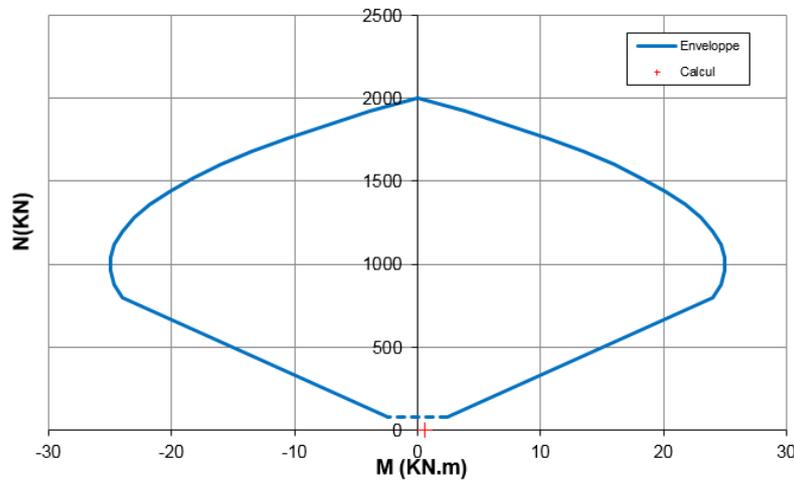


Figura 105: Diagramma di interazione di 10 cm di cls proiettato

Secondo le raccomandazioni AFTES GT7, quando lo sforzo normale e il momento sono molto bassi (dominio al di sotto della linea tratteggiata), non si deve eseguire nessuna verifica particolare: $FS \gg 1$.

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

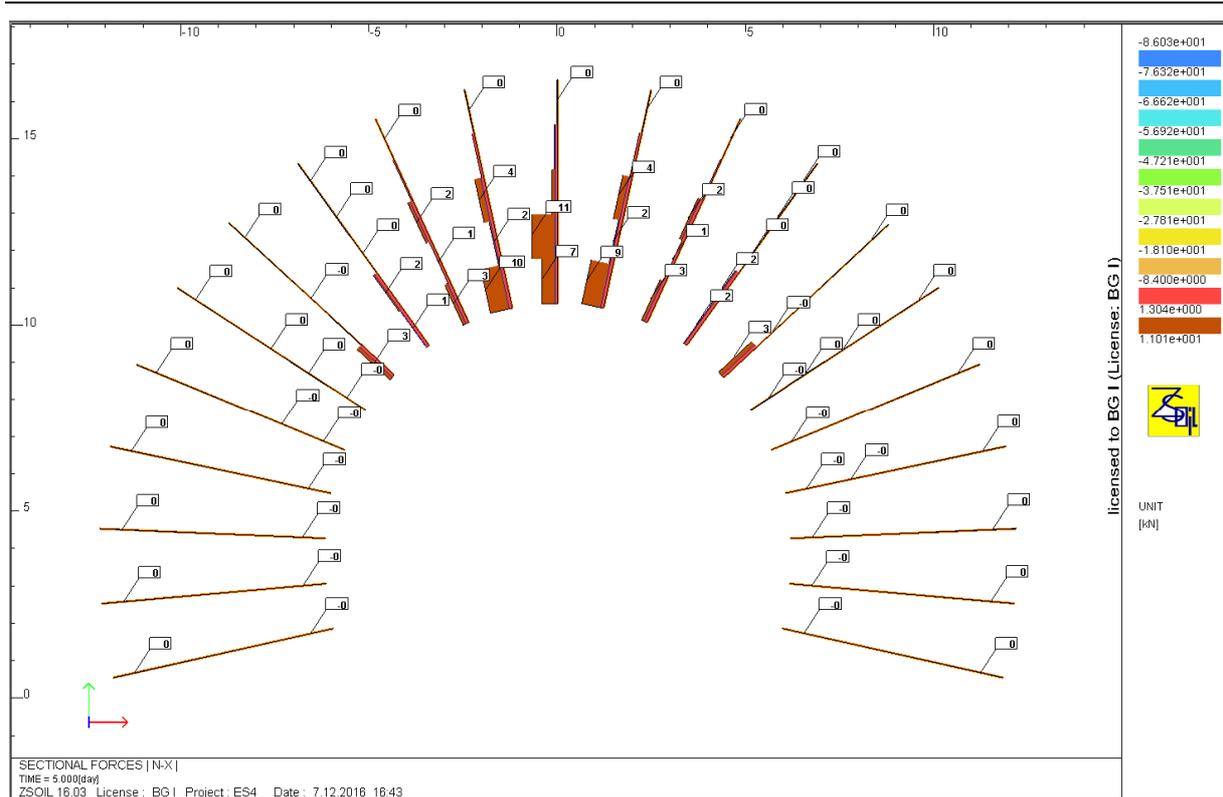


Figura 106: Diagramma degli sforzi normali nei bulloni

$$11 \text{ kN} \cdot 1.3 = 14.3 \text{ kN} < 190.5 \text{ kN}$$

$$FS = \frac{190.5}{14.3} = 13.3$$

$$0.006\% < 7 - 10\%$$

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

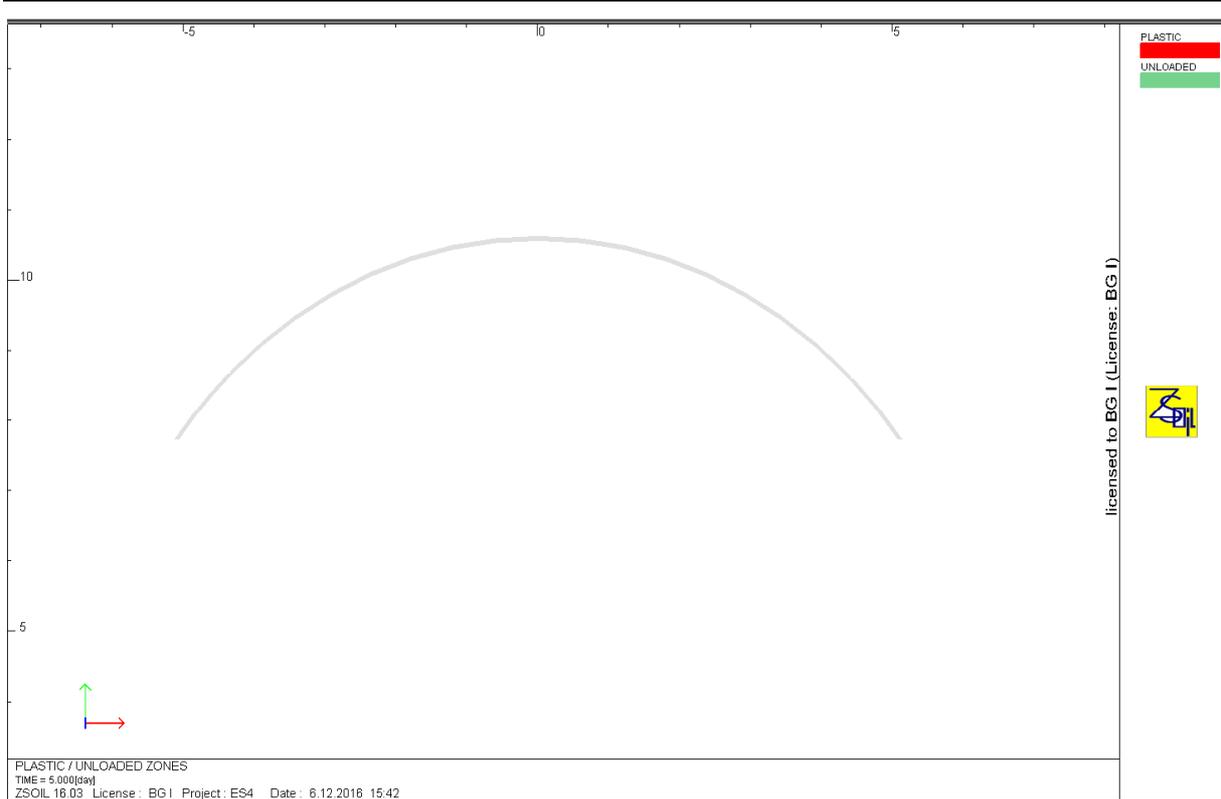


Figura 107: Zone plastiche nella centina sezione E-E, sostegno S4

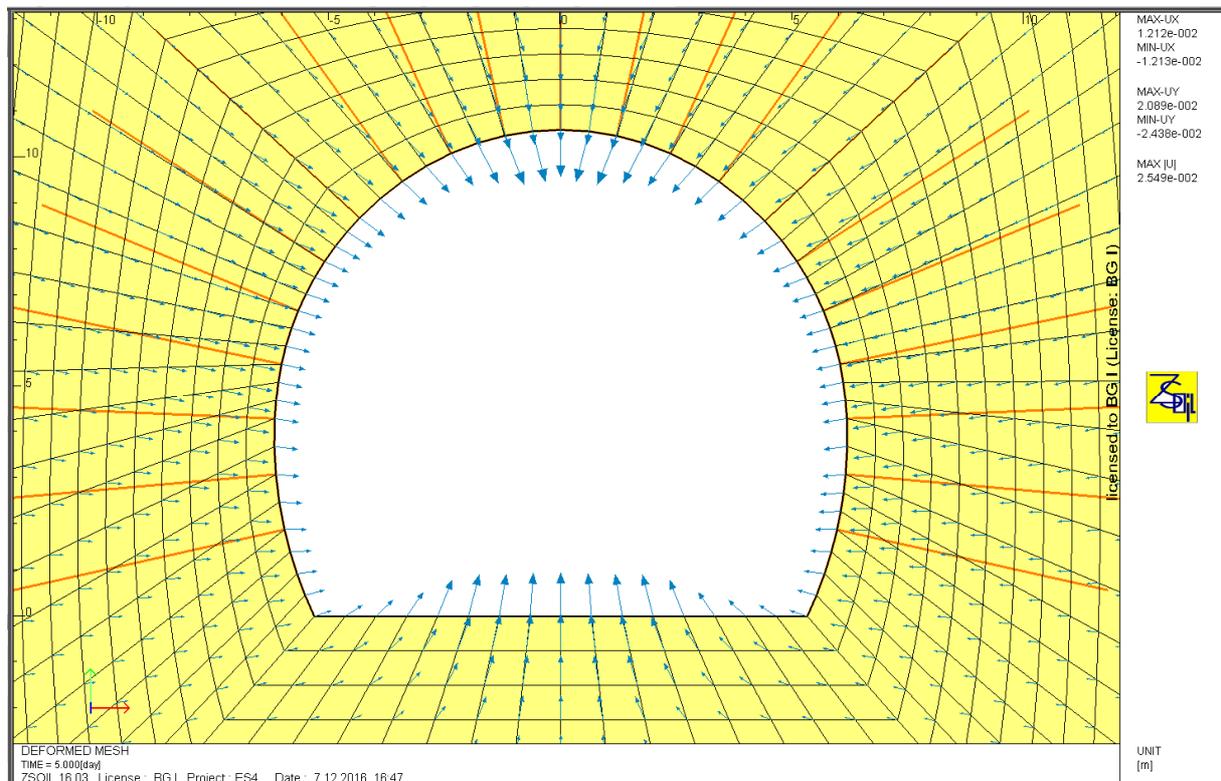


Figura 108: Vettori di spostamento sezione E-E, sostegno S4

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

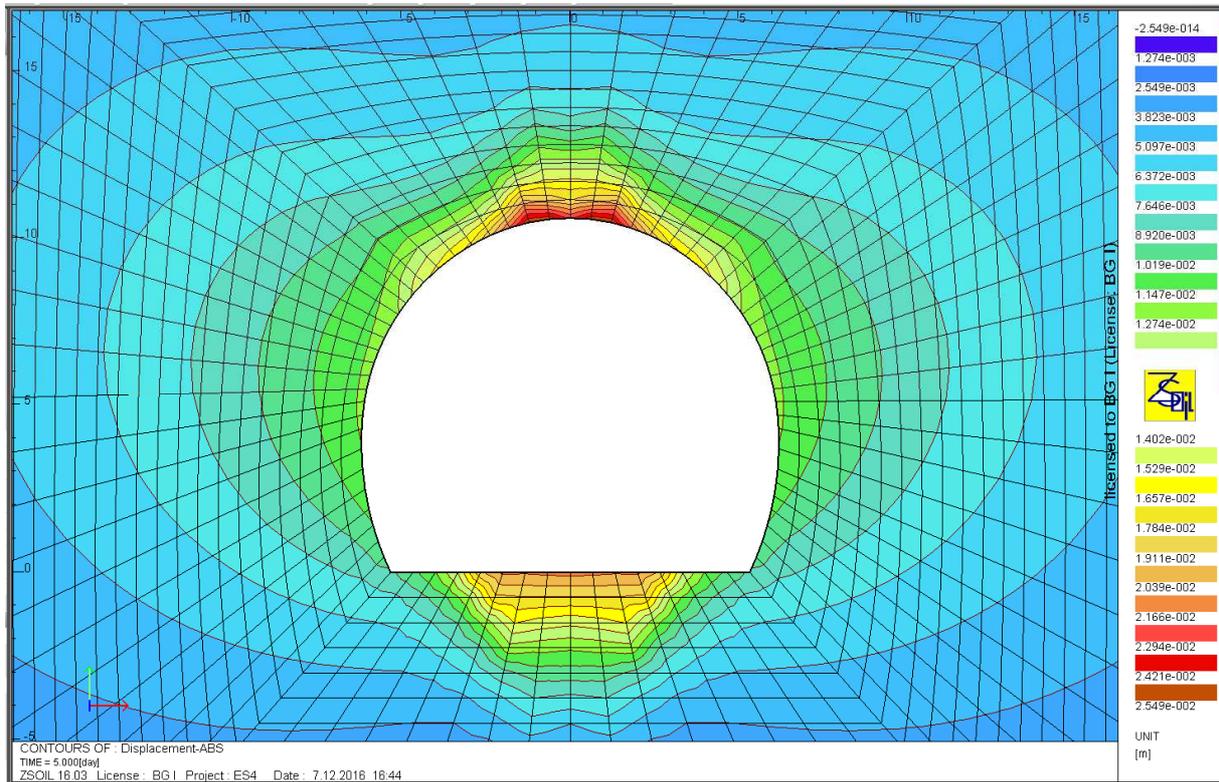


Figura 109: Spostamenti assoluti sezione E-E, sostegno S4

Lo spostamento radiale massimo è in calotta ed è pari a 2.5 cm.

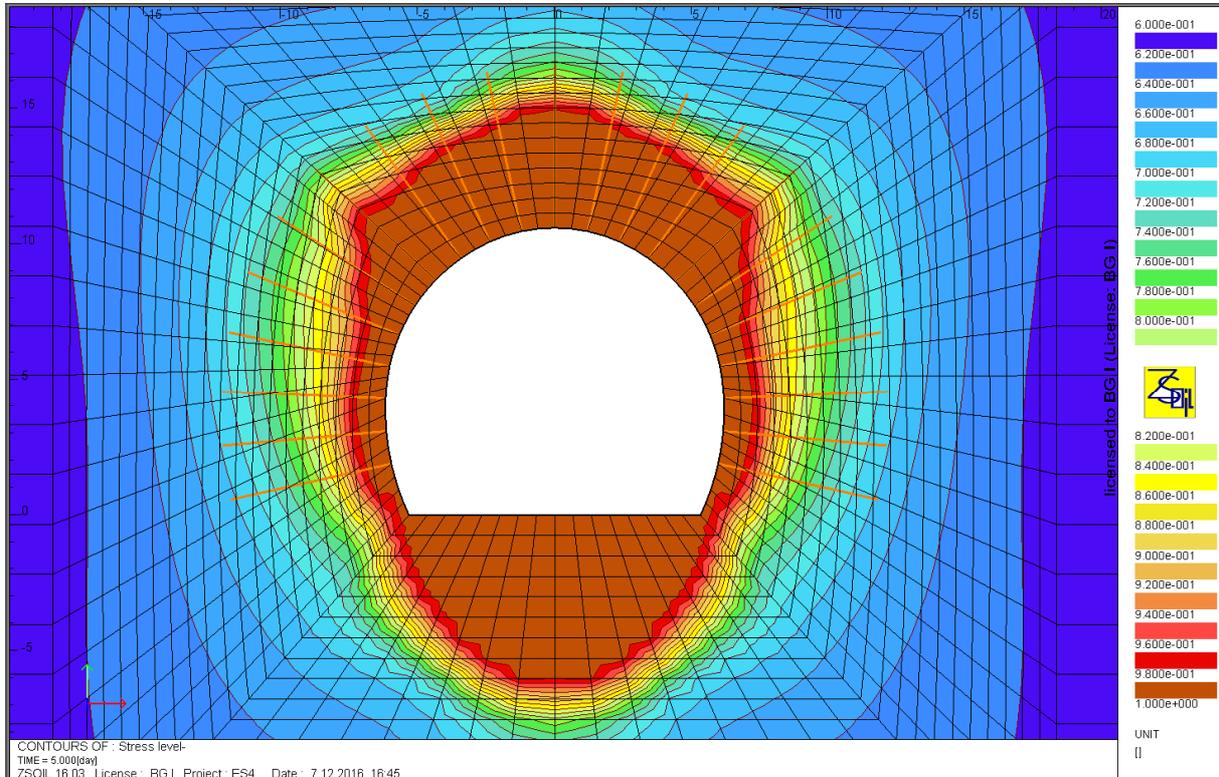


Figura 110: Zone plastiche "Stress Level" E-E, sostegno S4

La banda plastica è di massimo 4.4 m in calotta, 1.2 m nei piedritti e 6.0 m in arco rovescio.

7.2.17 Sezione H-H, tipo di sostegno S4, GSI=65

La verifica si effettua nel caso dove gli sforzi sono maggiori, ossia quando il sostegno in L2 è messo in opera.

Verifica del sostegno in L1+ L2:

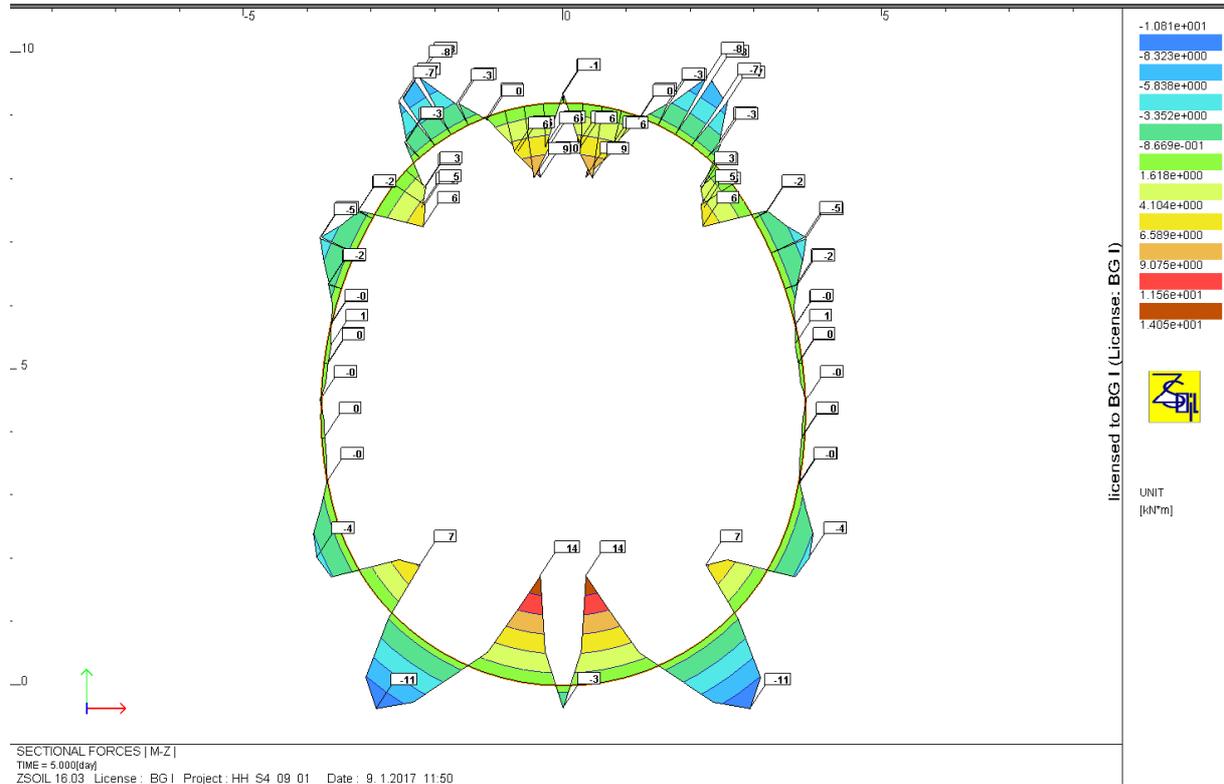


Figura 111: Diagramma dei momenti sezione H-H, sostegno S4 L1+L2

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

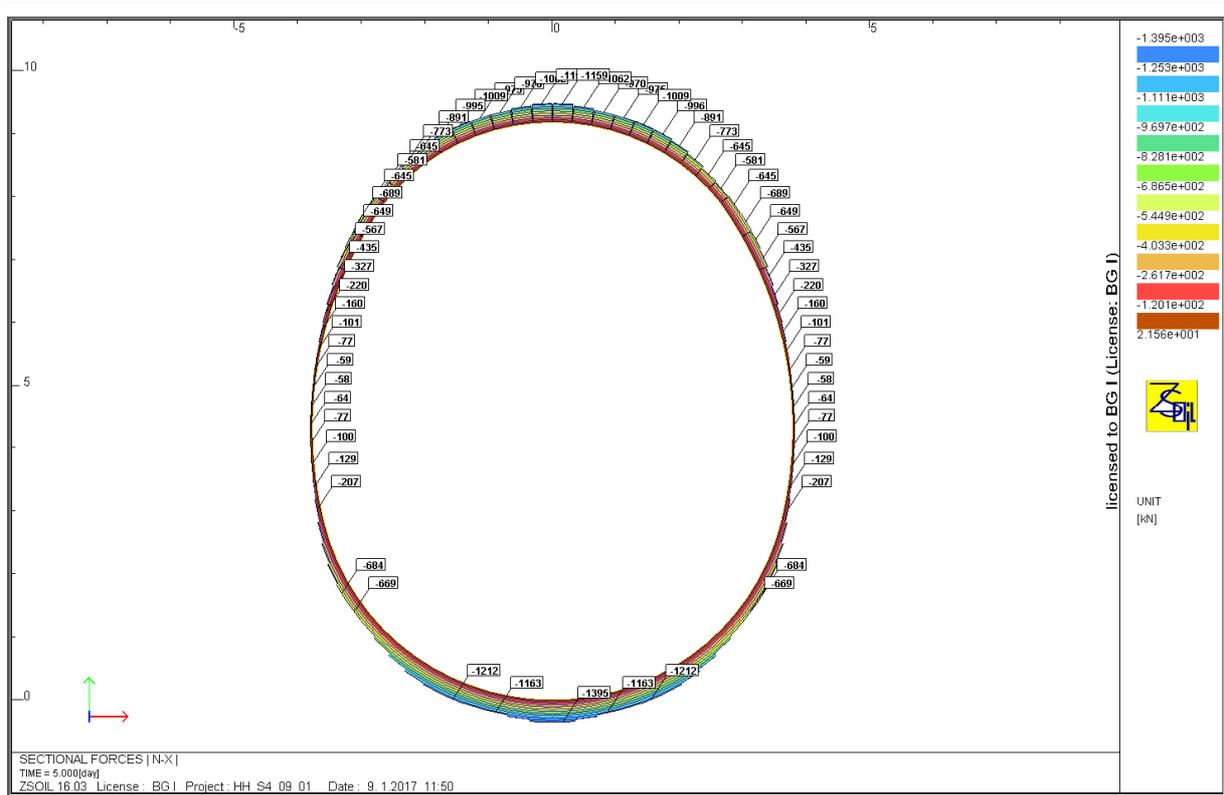


Figura 112: Diagramma degli sforzi normali sezione H-H, sostegno S4 L1+L2

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

	Sforzi		Sforzi di calcolo	
	M	N	M_{Ed}	N_{Ed}
	[kNm]	[kN]	[kNm]	[kN]
$N_{max}, M_{min,max}$	14	1395	18,2	1813,5

Tabella 30 – Sforzi nella sezione critica, sezione H-H, sostegno S4 L2+L1

Données

Largeur section b =	1 m
Epaisseur section h_w =	0,2 m
Résistance du béton à la compression f_{ck} =	30 MPa
Coefficient effets à long terme $\alpha_{cc,pl}$ et $\alpha_{ct,pl}$ =	1
Facteur de sécurité (marge) =	1
Coefficient partiel relatif au béton γ_c =	1,5
Coefficient relatif aux actions γ_{ELU} =	1,3

Résultats

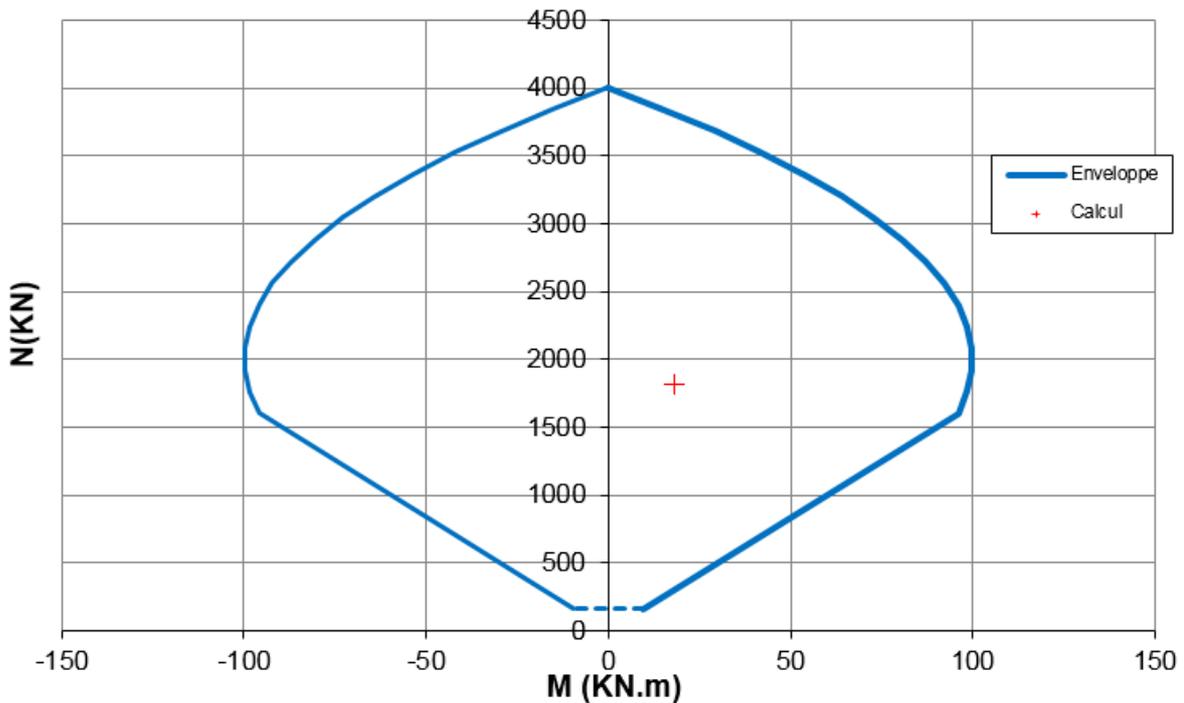
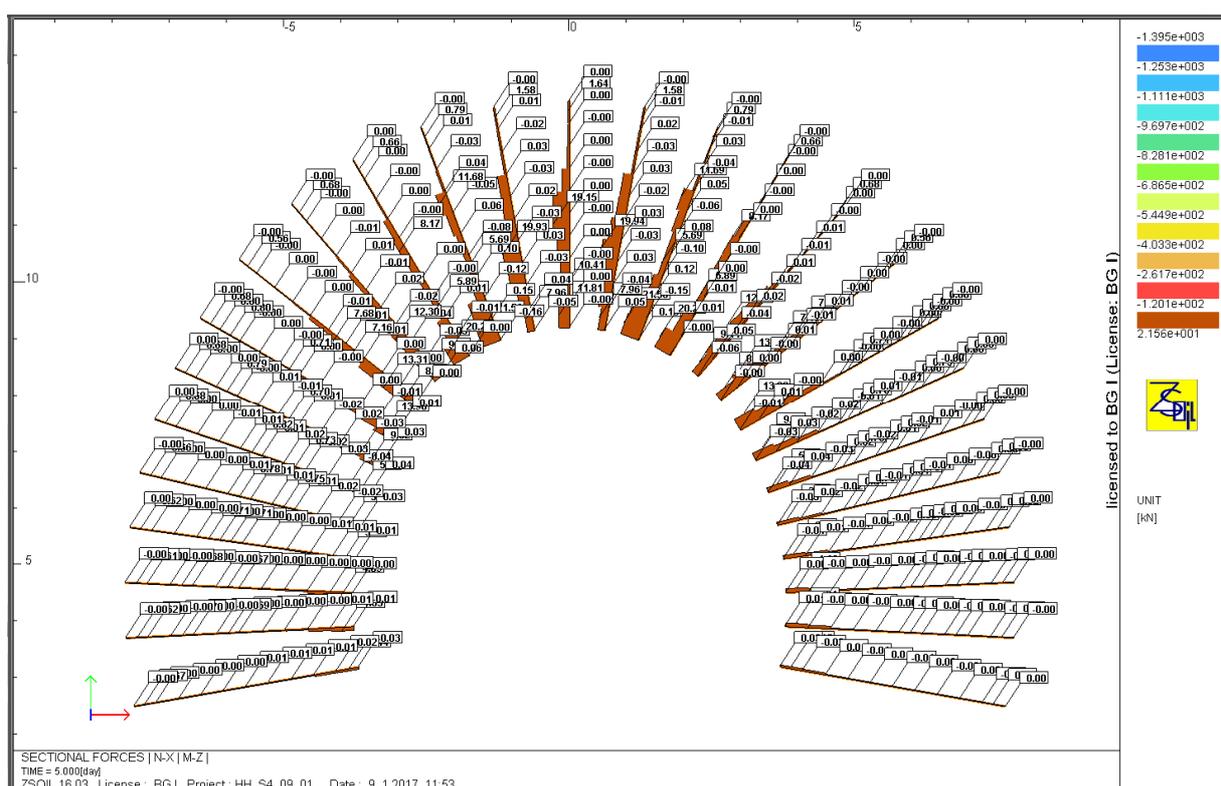


Figura 113: Diagramma d'interazione 20 cm di calcestruzzo proiettato

La sezione critica è verificata con un fattore di sicurezza di FS=2.0.

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni



Il bullone più sollecitato è il seguente:

$$N_{Ed} = 1.3 \cdot 21.6 \text{ kN} = 28.08 \text{ kN} < N_{Rd} = 190.5 \text{ kN}$$

$$FS = \frac{190.5}{28.08} = 6.78$$

La deformazione massima è:

$$0.013\% < 7 - 10\%$$

La centina non raggiunge la plasticizzazione. La sua capacità portante viene dunque sfruttata interamente.

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

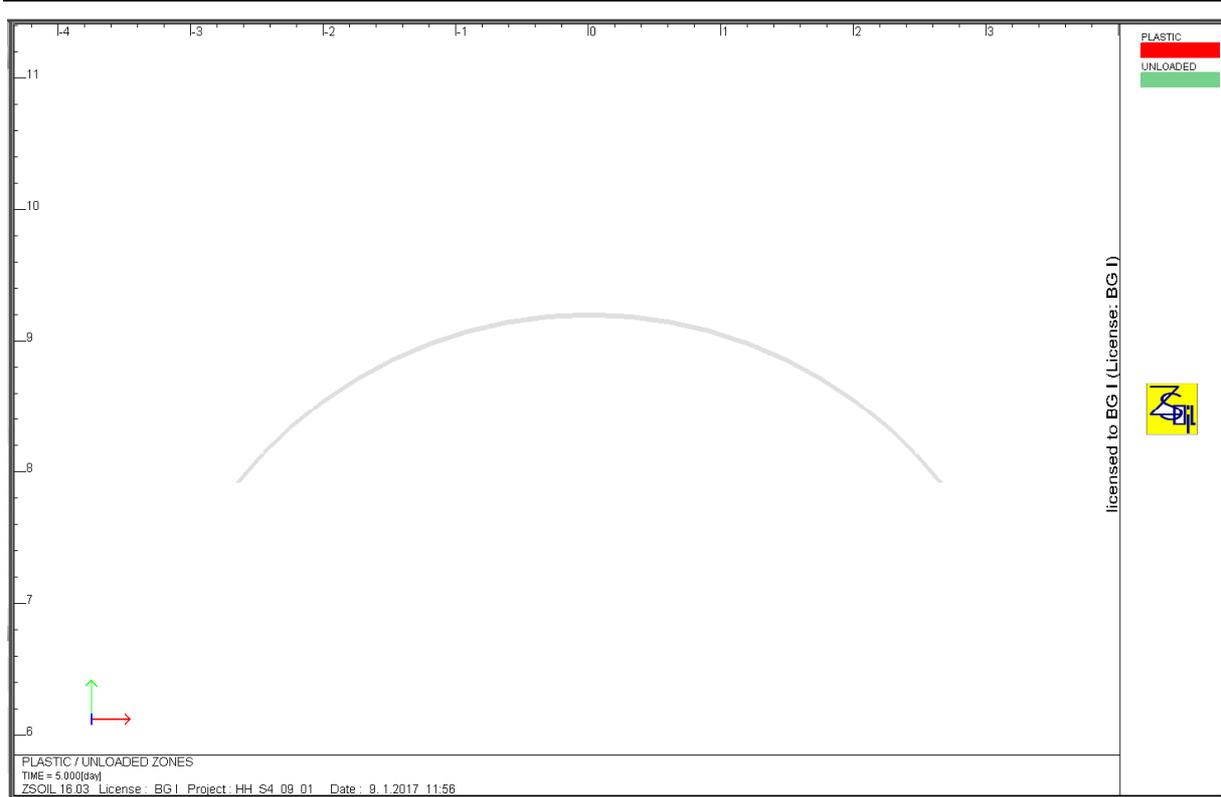


Figura 114: Zone plastiche nella centina sezione H-H, sostegno S4

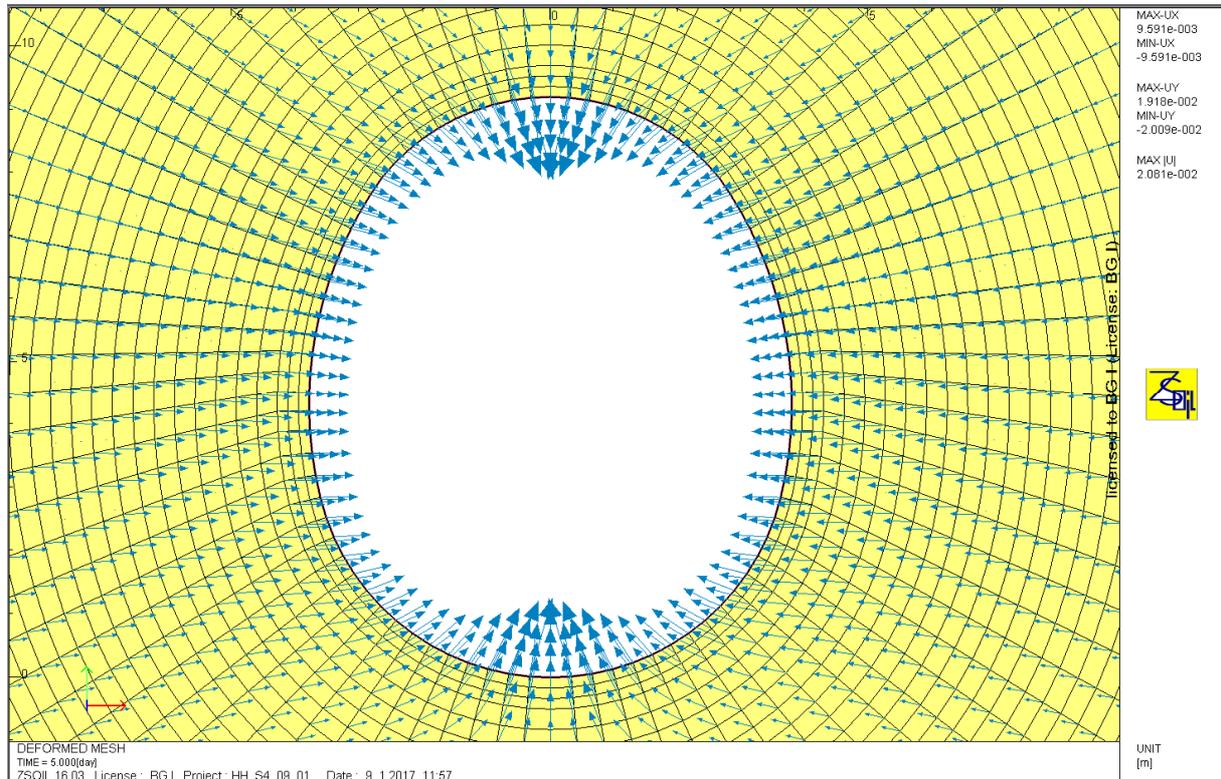


Figura 115: Vettori di spostamento sezione H-H, sostegno S4

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

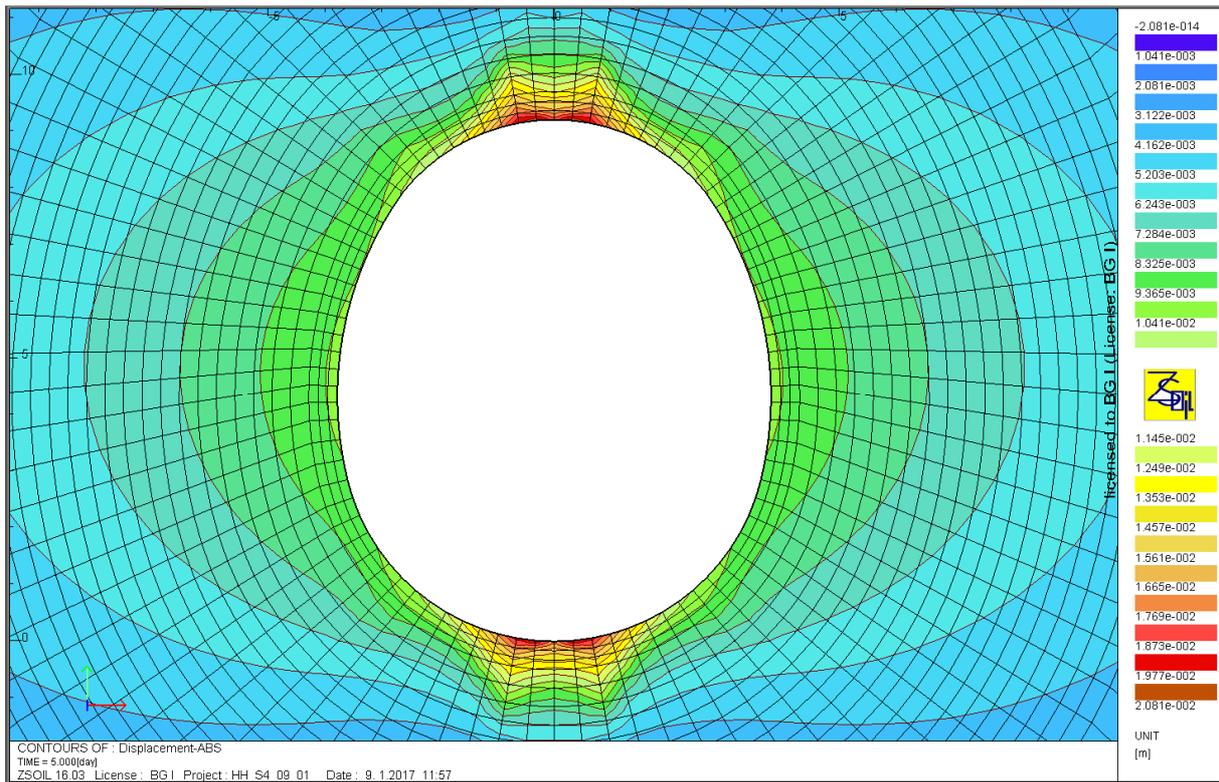


Figura 116: Spostamenti assoluti sezione H-H, sostegno S4

Lo spostamento è massimo a livello della calotta e dell'arco rovescio ed è di 2.08 cm.
 A livello delle pareti lo spostamento è di 0.94 cm.

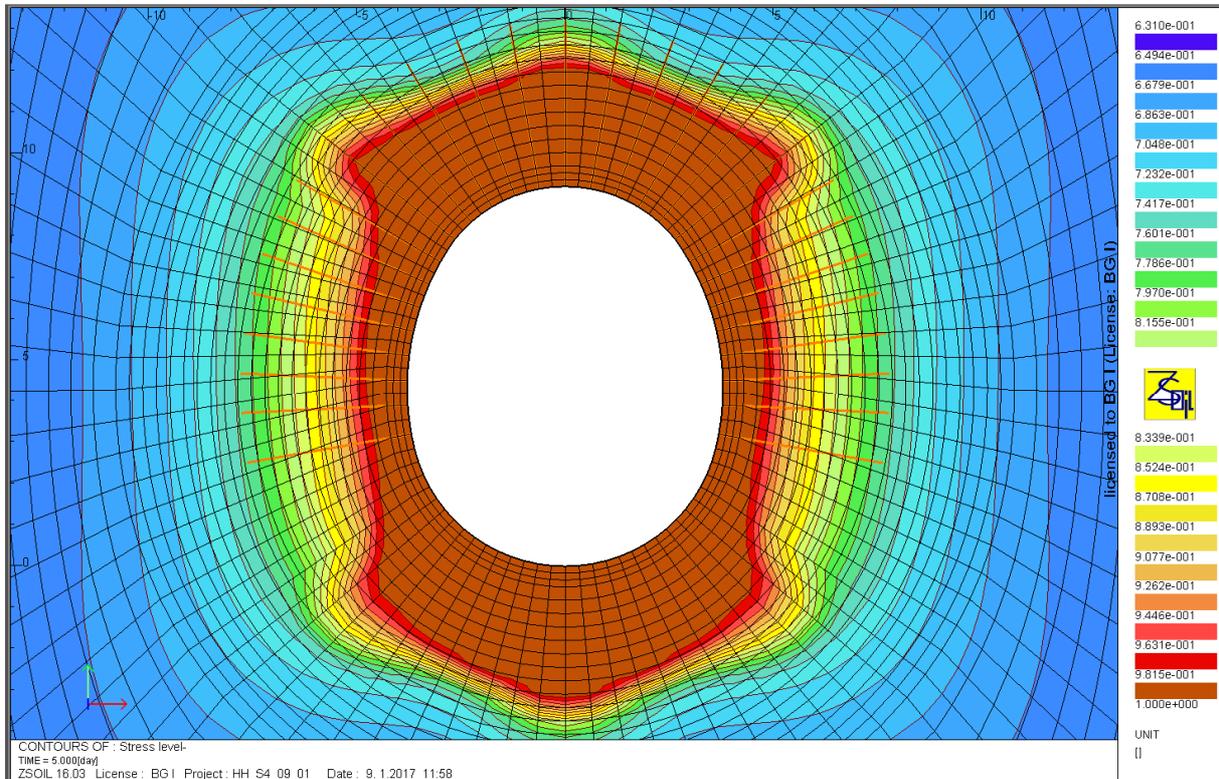


Figura 117: Zone plastiche "Stress Level" H-H, sostegno S4

La banda plastica è di circa 1.1 m nelle pareti, 2.8 m in calotta e 3.0 m in arco rovescio.

7.2.18 Sezione R-R, tipo di sostegno S4, GSI=65

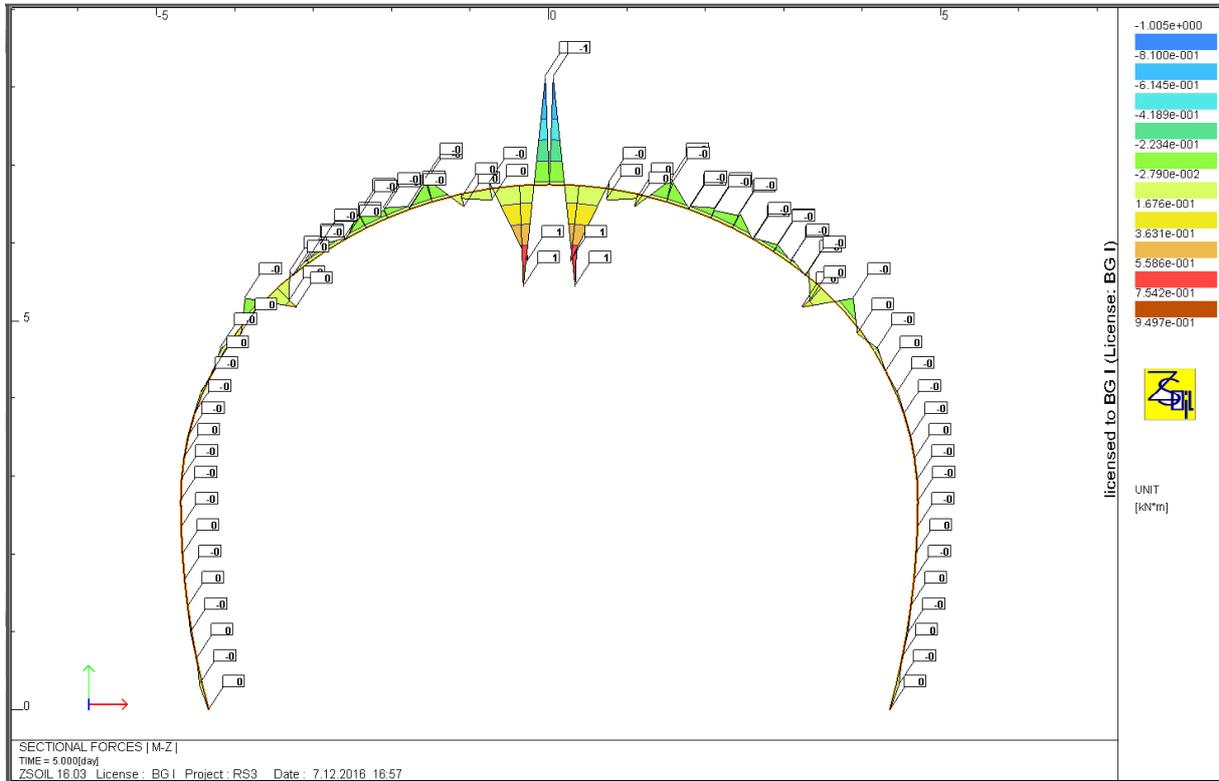


Figura 118: Diagramma dei momenti sezione R-R, sostegno S4

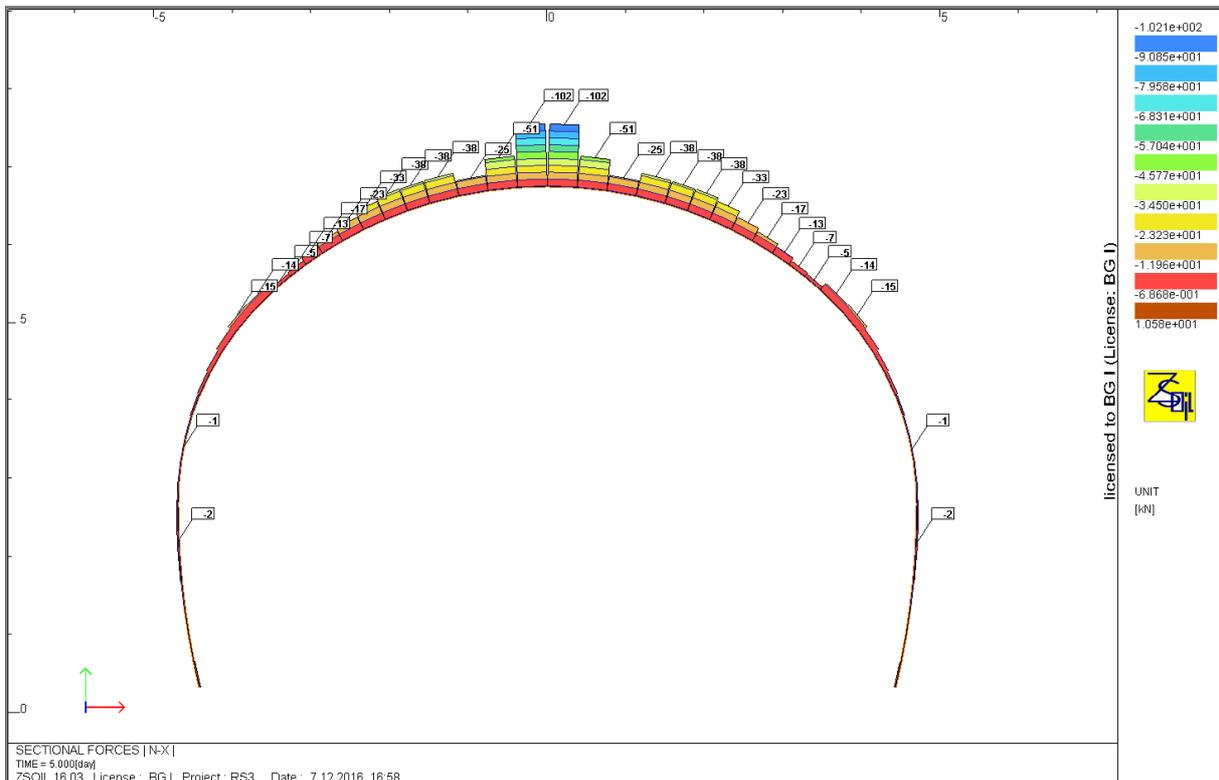


Figura 119: Diagramma degli sforzi normali sezione R-R, sostegno S4

Combinazione	Sforzi		Sforzi di calcolo	
	M	N	M _{Ed}	N _{Ed}
	[kNm]	[kN]	[kNm]	[kN]
M _{min/max} , N _{max}	-1	102	-1.3	132.6

Tabella 31 – Sforzi nelle sezioni critiche, sezione R-R, sostegno S4

Données

Largeur section b =	1 m
Epaisseur section h _w =	0,2 m
Résistance du béton à la compression f _{ck} =	30 MPa
Coefficient effets à long terme α _{cc,pl} et α _{ct,pl} =	1
Facteur de sécurité (marge) =	1
Coefficient partiel relatif au béton γ _c =	1,5
Coefficient relatif aux actions γ _{ELU} =	1,3

Résultats

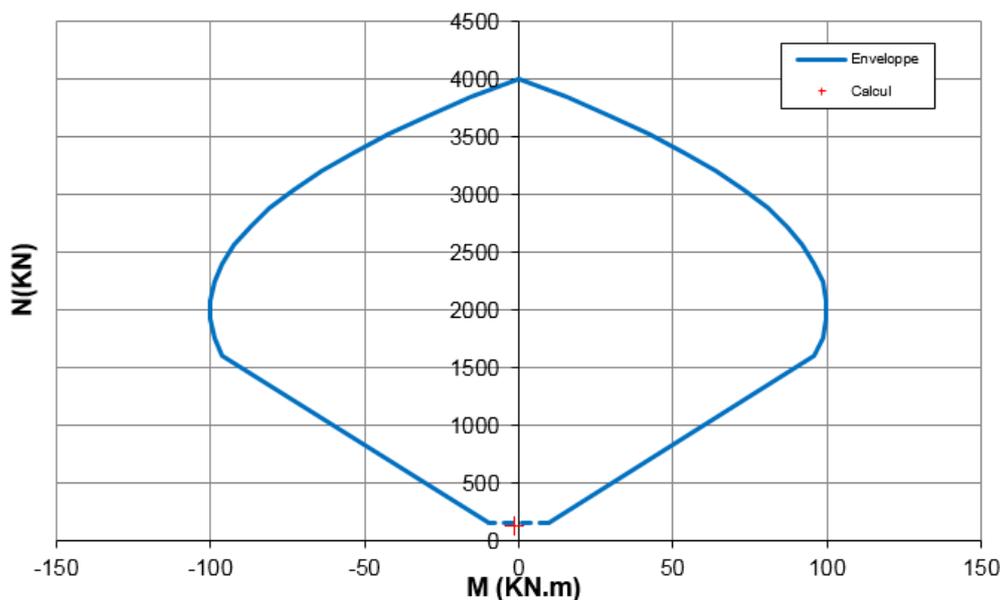


Figura 120: Diagramma di interazione di 30 cm di cls proiettato

Secondo le raccomandazioni AFTES GT7, quando lo sforzo normale e il momento sono molto bassi (dominio al di sotto della linea tratteggiata), non si deve eseguire nessuna verifica particolare: FS >> 1.

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

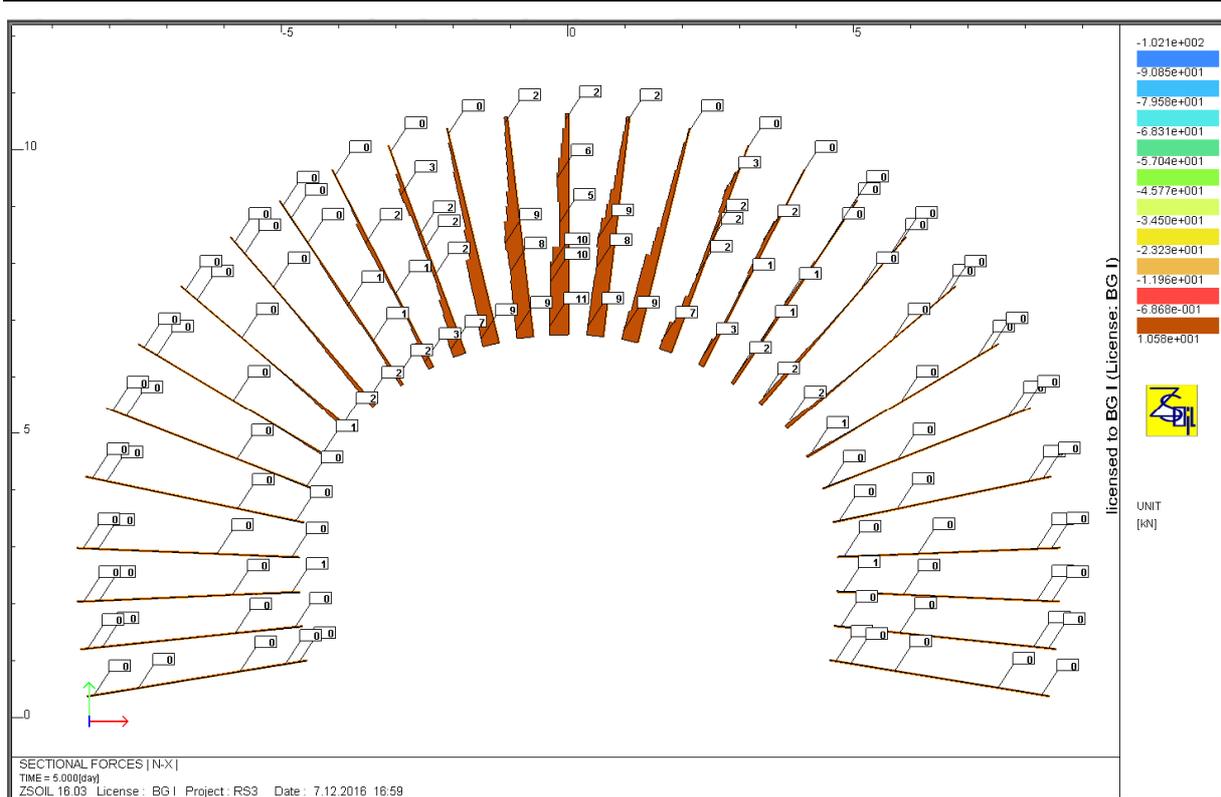


Figura 121: Diagramma degli sforzi normali nei bulloni

$$11 \text{ kN} \cdot 1.35 = 15 \text{ kN} < 190.5 \text{ kN}$$

$$FS = \frac{190.5}{15} = 12.7$$

$$0.01\% < 7 - 10\%$$

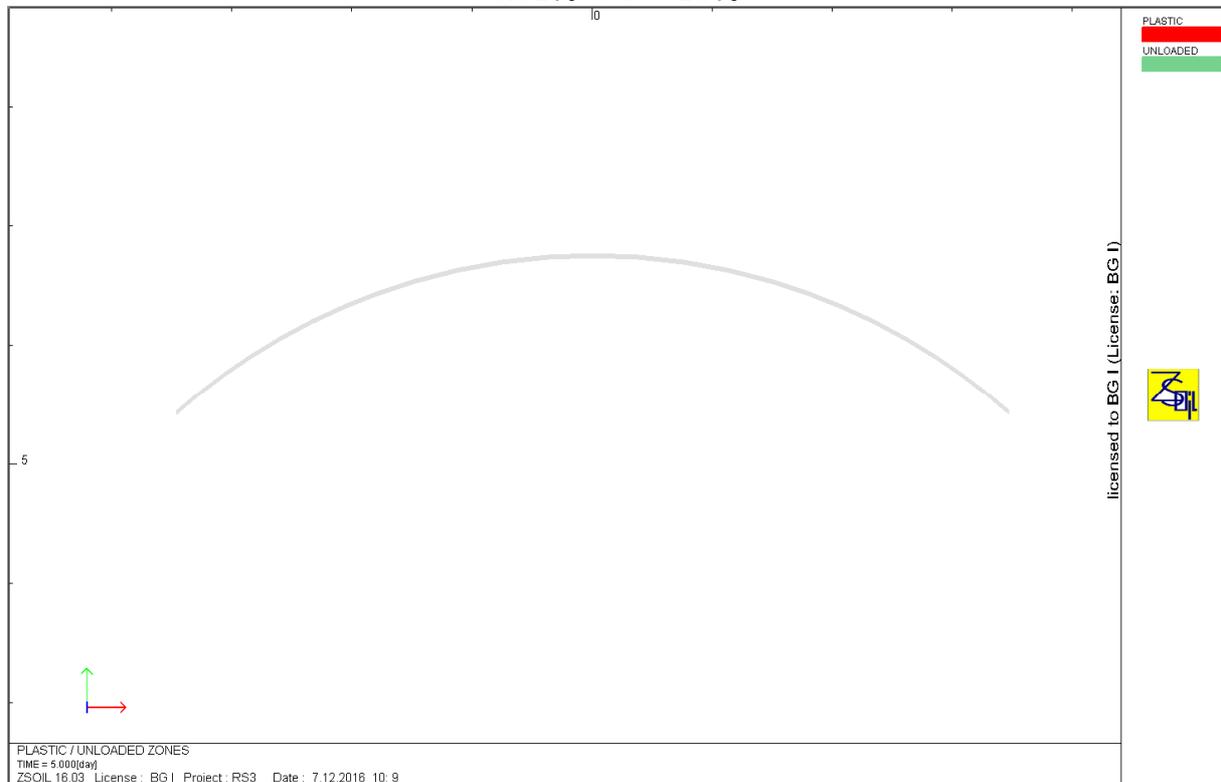


Figura 122: Zone plastiche nella centina sezione R-R, sostegno S4

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

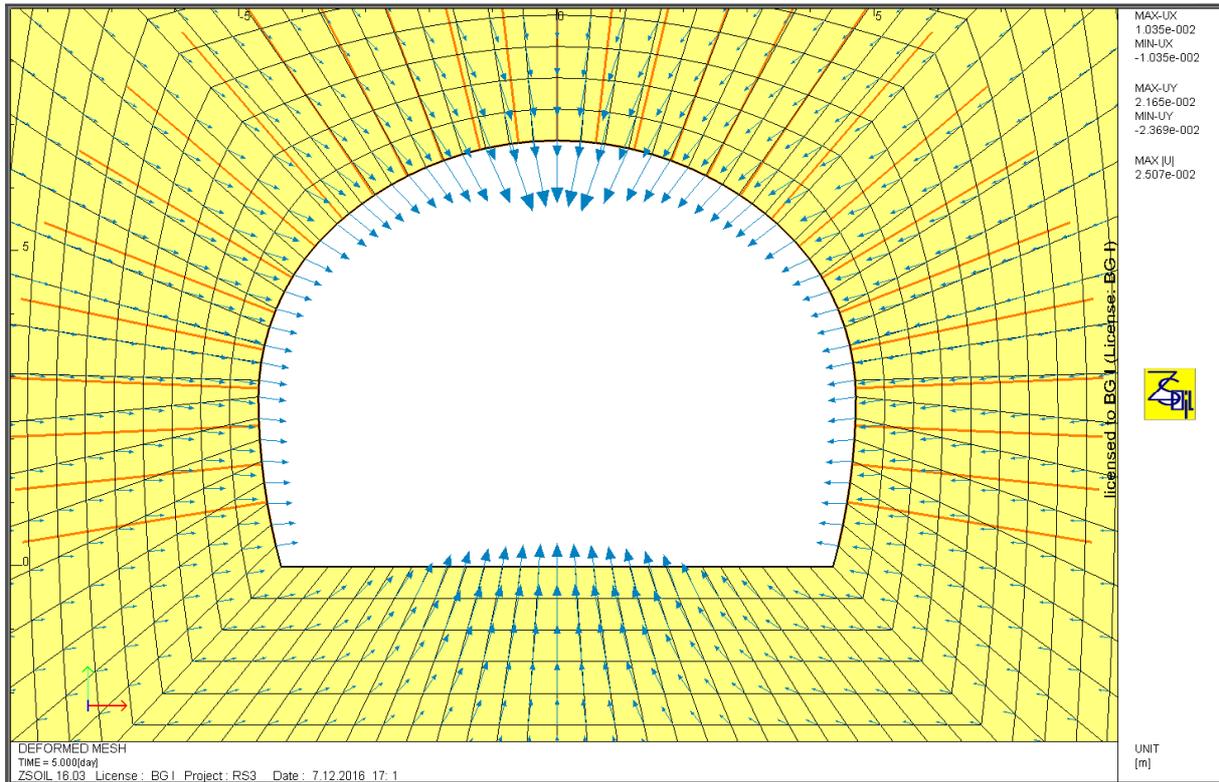


Figura 123: Vettori di spostamento sezione R-R, sostegno S4

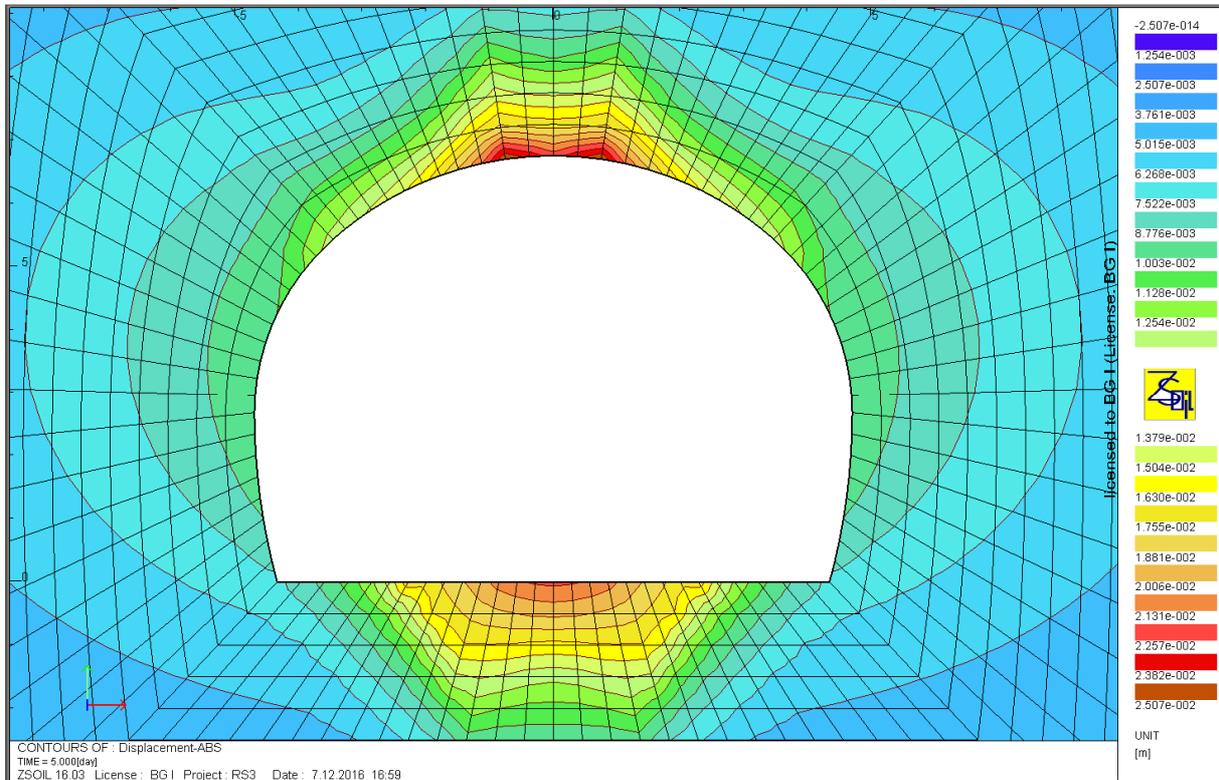


Figura 124: Spostamenti assoluti sezione R-R, sostegno S4

Gli spostamenti sono massimi in calotta e pari a 2.5 cm.

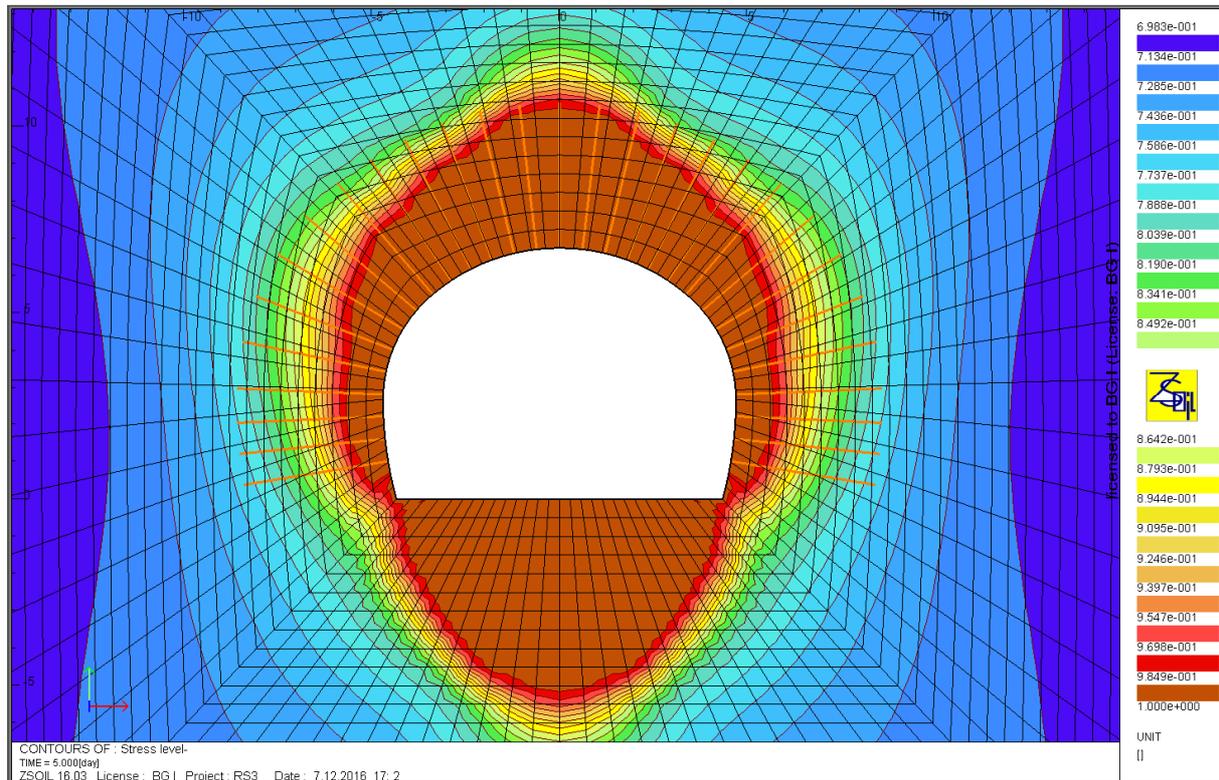


Figura 125: Zone plastiche "Stress Level" E-E, sostegno S4

La banda plastica è di circa 1.0 m nelle pareti e 3.6 m in calotta.
In arco rovescio la zona plastica raggiunge un'ampiezza di 5.0m.

7.2.19 Sezione I-I, tipo di sostegno S4, GSI=65

Anche in questo caso il tasso di deconfinamento è pari a 1. Il metodo delle linee caratteristiche non permette tuttavia di implementare un comportamento multilaminare della roccia. Si è reso quindi necessario un modello agli elementi finiti al fine di rappresentare realisticamente il comportamento anisotropo dell'ammasso.

Siccome la sezione viene scavata in una sola volta, solo la verifica del sostegno in L1 è necessaria.

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

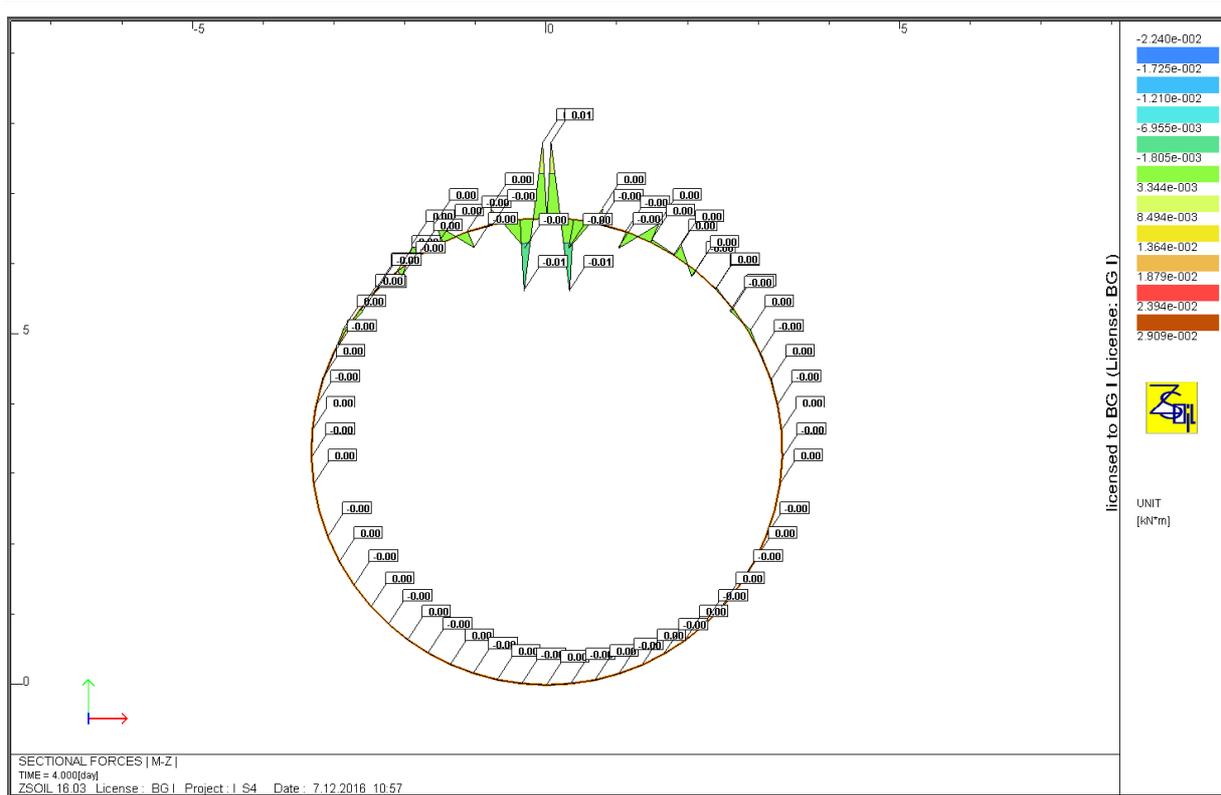


Figura 126: Diagramma dei momenti sezione I-I, sostegno S4

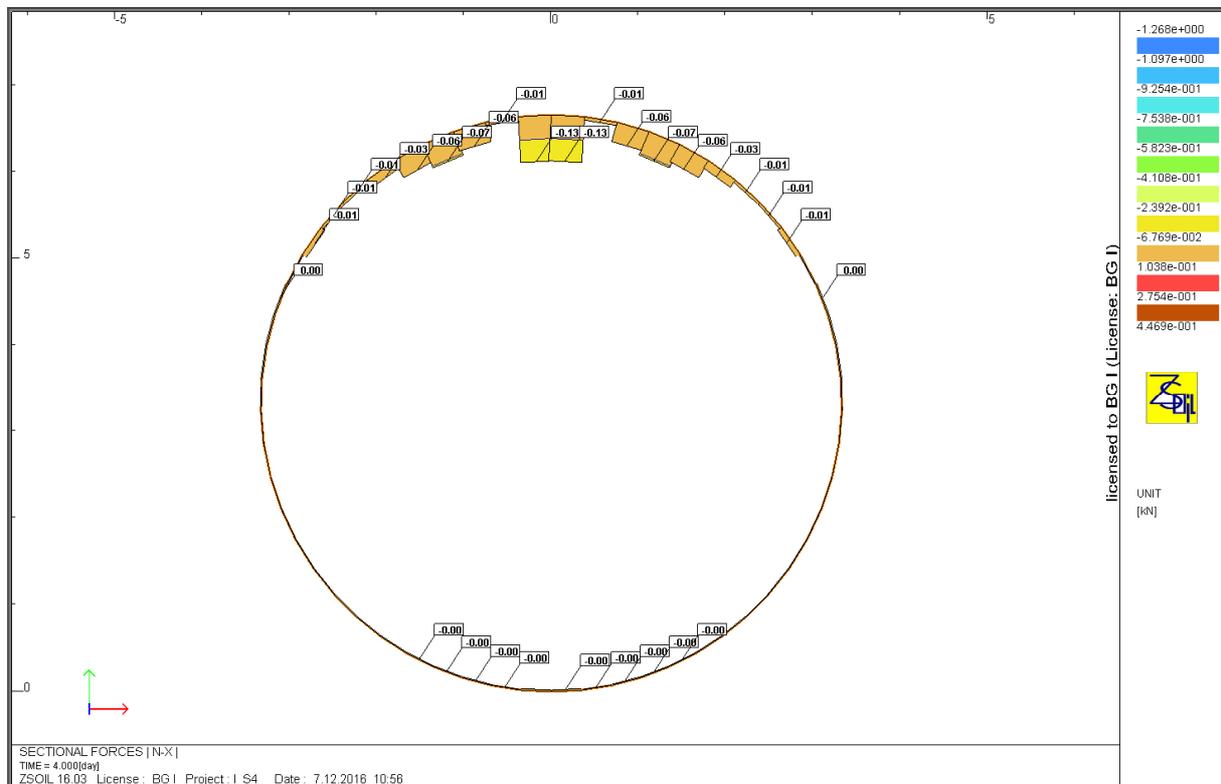


Figura 127: Diagramma degli sforzi normali sezione I-I, sostegno S4

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

Combinazione	Sforzi		Sforzi di calcolo	
	M	N	M_{Ed}	N_{Ed}
	[kNm]	[kN]	[kNm]	[kN]
$N_{max}, M_{min/max}$	0,01	0.13	0,013	0.169

Tabella 32 – Sforzi nella sezione critica, sezione I-I, sostegno S4

Données

Largeur section b =	1 m
Epaisseur section h_w =	0,05 m
Résistance du béton à la compression f_{ck} =	30 MPa
Coefficient effets à long terme $\alpha_{cc,pl}$ et $\alpha_{ct,pl}$ =	1
Facteur de sécurité (marge) =	1
Coefficient partiel relatif au béton γ_c =	1,5
Coefficient relatif aux actions γ_{ELU} =	1,3

Résultats

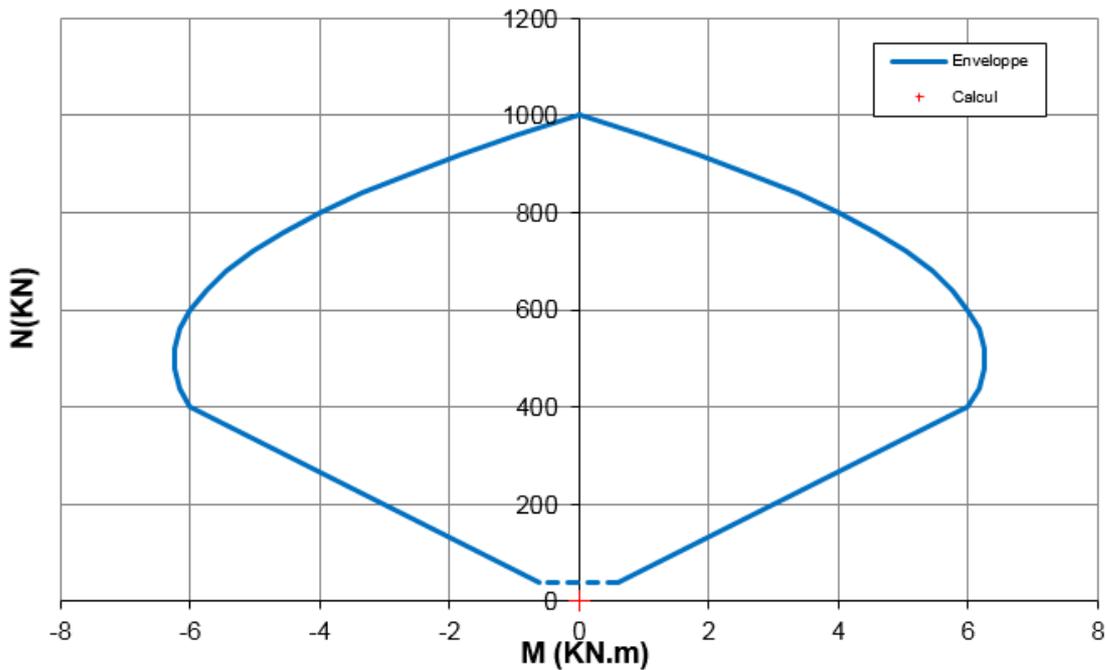


Figura 128: Diagramma d'interazione 5 cm di calcestruzzo proiettato

Secondo le raccomandazioni AFTES GT7, quando lo sforzo normale e il momento sono molto bassi (dominio al di sotto della linea tratteggiata), non si deve eseguire nessuna verifica particolare: $FS \gg 1$.

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

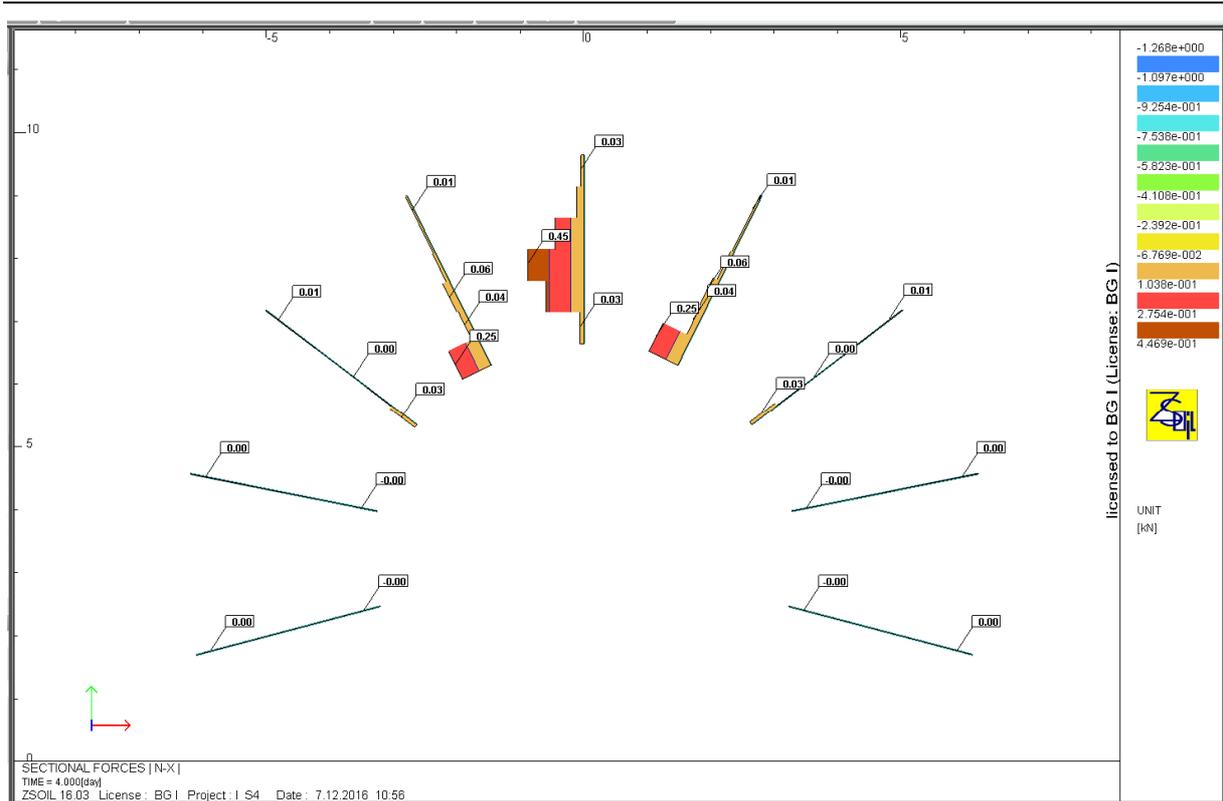


Figura 129: Diagramma degli sforzi normali nei bulloni

Anche in questo caso nessuna verifica si rende necessaria per calcestruzzo e bulloni.

La deformazione massima è:

$$0.033\% < 7 - 10\%$$

La centina non raggiunge la plasticizzazione.

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

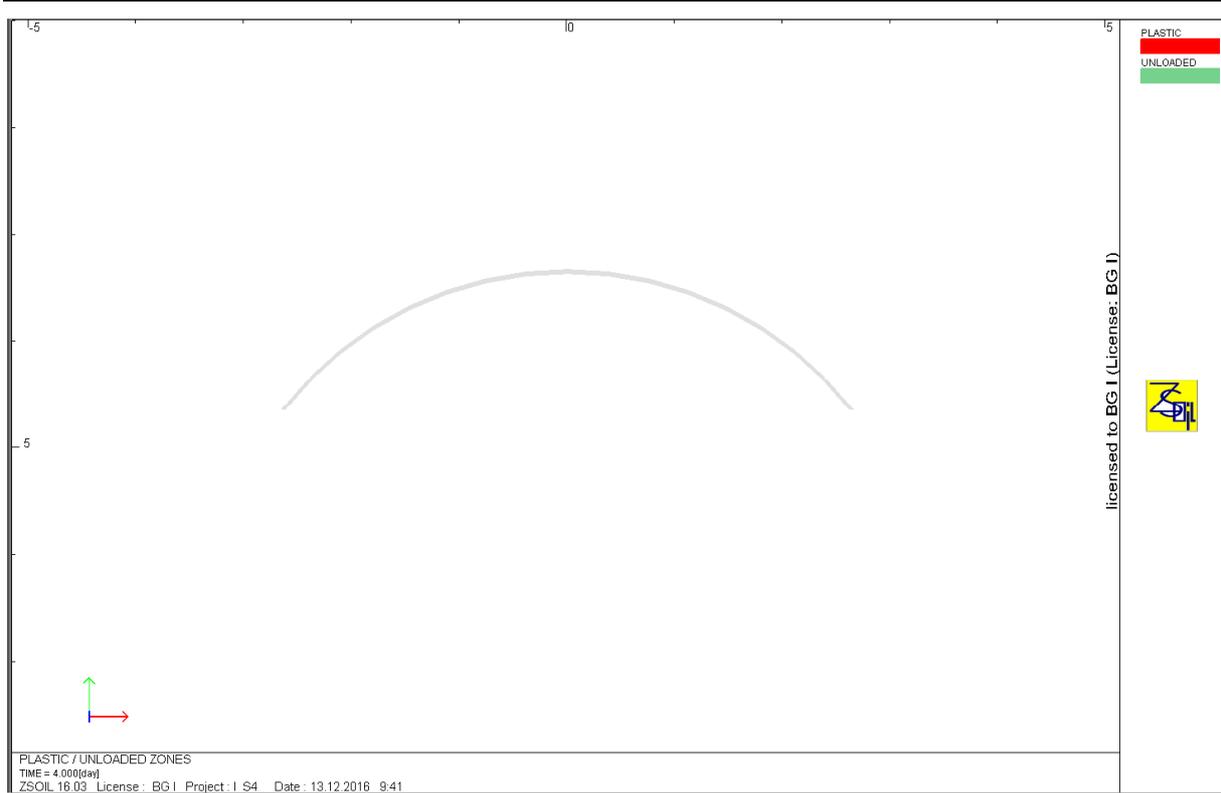


Figura 130: Zone plastiche nella centina sezione I-I, sostegno S4

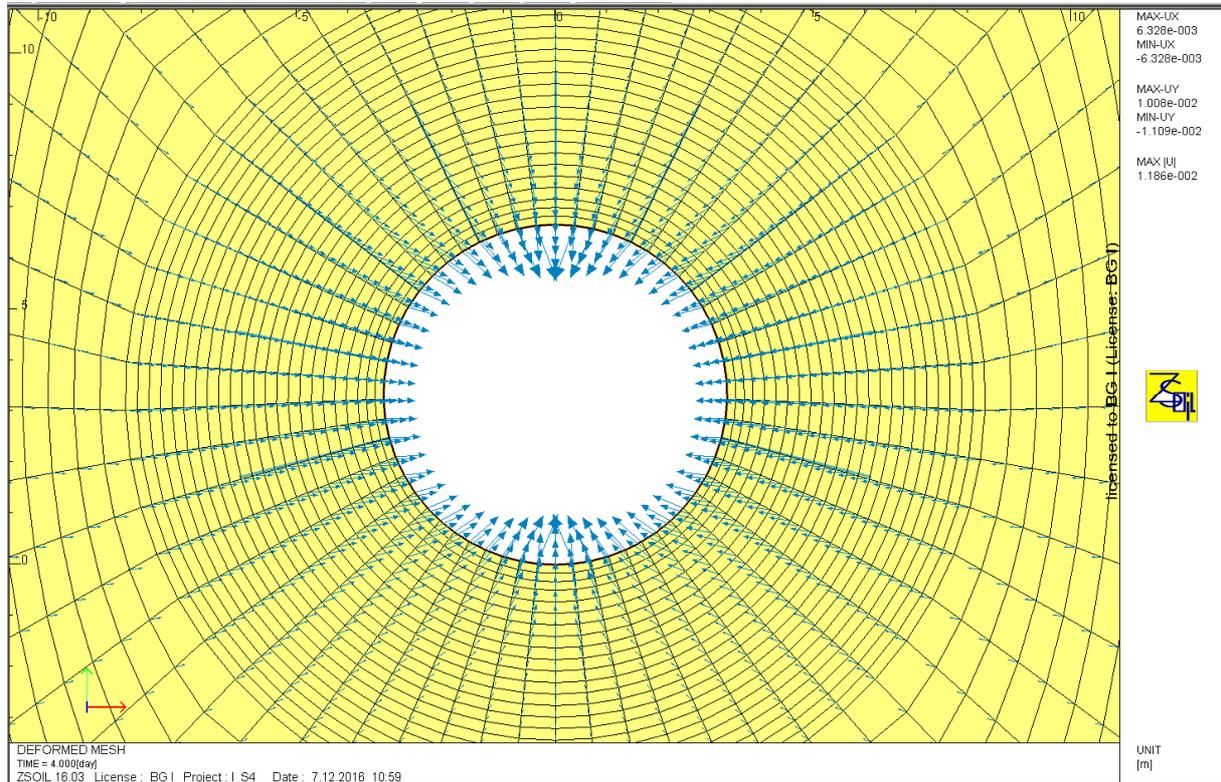


Figura 131: Vettori di spostamento sezione I-I, sostegno S4

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

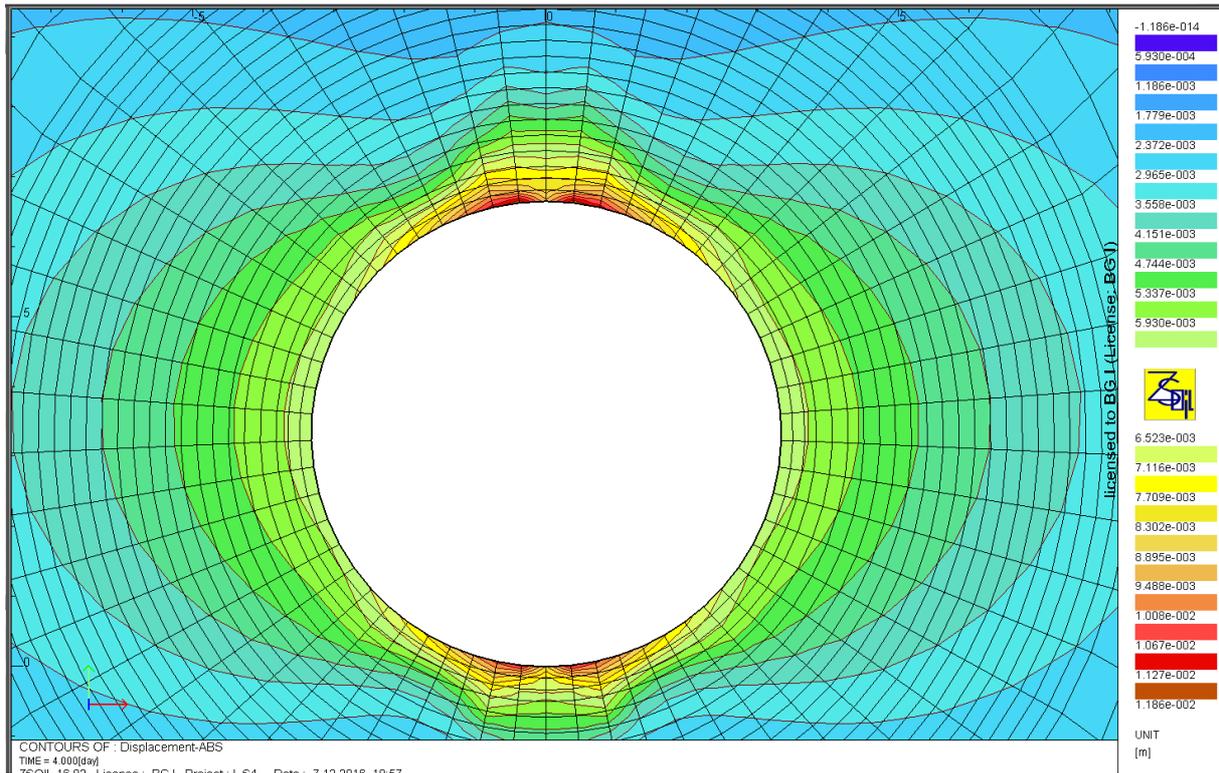


Figura 132: Spostamenti assoluti sezione I-I, sostegno S4

Lo spostamento è massimo a livello della calotta ed è di 1.19 cm. A livello dell'arco rovescio è di 1.13 cm. Nei piedritti lo spostamento è di 0.59 cm.

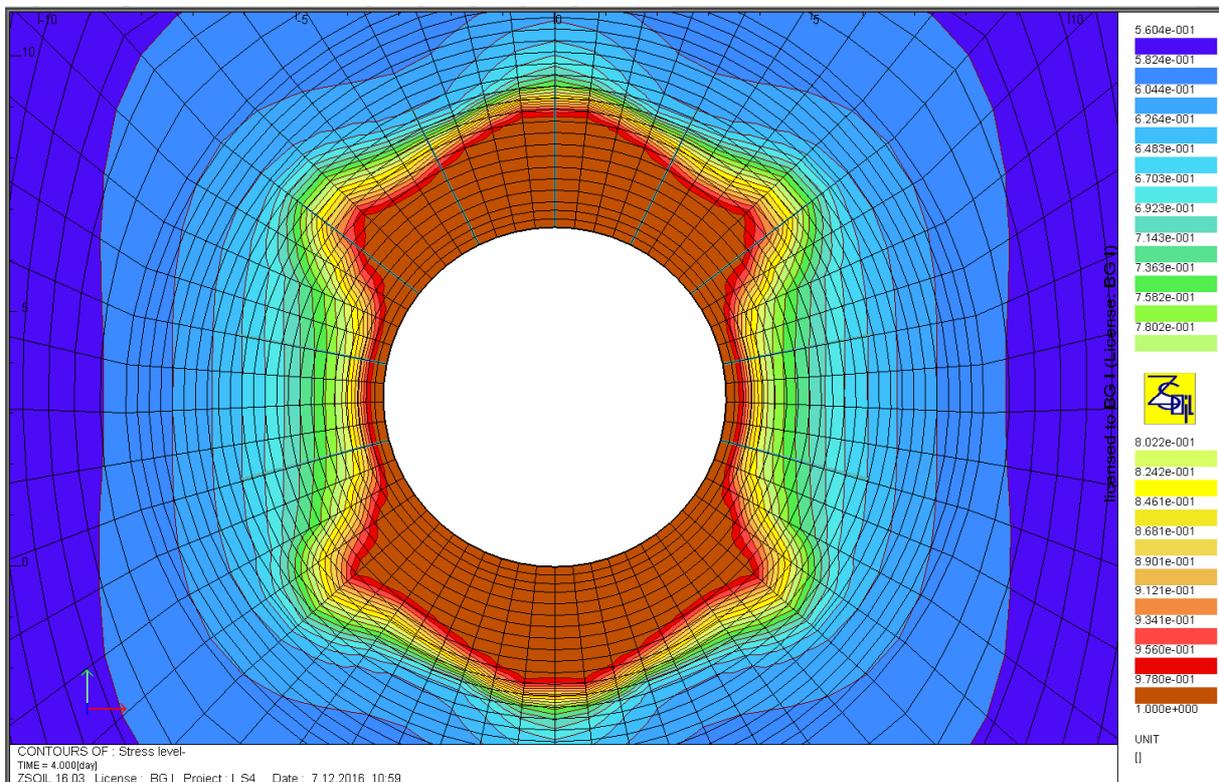


Figura 133: Zone plastiche "Stress Level" I-I, sostegno S4

La banda plastica è di circa 0.35 m nelle pareti e 2 m in calotta e arco rovescio.

8. Parametri equivalenti per l'ammasso roccioso molto fratturato

Come descritto al §5.1, al fine di considerare l'effetto 3D della lunghezza finita dalla faglia nel modello 2D, si calcola un miglioramento delle condizioni dell'ammasso in termini di GSI.

Si effettua dunque un'analisi della curva di convergenza e si determina per quali valori di GSI su lunghezza infinita si ottiene lo stesso comportamento dell'ammasso di GSI 33 su una lunghezza di 17m, in termini di spostamenti radiali finali in condizioni intrinseche.

Si ottengono i seguenti valori:

Sezione	GSI	u [mm]	GSI	u [mm]
A-A	33	40,6	41	39,3
E-E	33	41,1	41	41,2
I-I	33	33,4	37	34

Tabella 33 – GSI equivalente per i sostegni S3

I parametri equivalenti sono dunque:

Sezione tipo	GSI [-]	UCS [MPa]	D [-]	m _i [-]	c [MPa]	φ [°]	ψ [°]	E _i [GPa]	E _{rm} [GPa]	v [-]	γ [kN/m ³]	k _o	H [m]
A-A	41	97,9	0	10	2,81	32,9	8,23	78	13,33	0.3	26.5	1	1100
E-E	41	97,9	0	10	2,81	32,9	8,23	78	13,33	0.3	26.5	1	1100
I-I	37	97,9	0	10	2,68	31,3	7,83	78	10,14	0.3	26.5	1	1100

Tabella 34 – Parametri dell'ammasso roccioso equivalente

9. Verifica del sostegno nell'ammasso roccioso molto fratturato

9.1 Metodo di convergenza-confinamento

La rigidezza del sostegno equivale alla somma della rigidezza della centine e dello strato di calcestruzzo, vale lo stesso per la pressione limite.

Calcestruzzo proiettato

- Rigidezza $k_c = \frac{E_c \cdot [R^2 - (R-t)^2]}{(1+\nu_c) \cdot [(1-2\nu_c)R^2 + (R-t)^2]} \cdot \frac{1}{R}$ [MPa/m]
- Pressione limite $p_{lim,c} = \frac{t}{R} f_{cd}$ [MPa]

Centine

- Rigidezza $k_s = \frac{E_s \cdot A_s}{d \cdot \left(R - \frac{h_s}{2}\right)^2}$ [MPa/m]
- Pressione limite $p_{lim,a} = \frac{f_{sd} \cdot A_s}{R \cdot d}$ [MPa]

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

Sezione equivalente

- Rigidezza $k_{eq} = (k_c + k_s)R$ [MPa]
- Pressione limite $p_{lim,eq} = p_{lim,c} + p_{lim,a}$ [MPa]

t : spessore dello strato di calcestruzzo

d : distanza tra le centine

L'attivazione del sostegno avviene quando il calcestruzzo viene proiettato tra le centine (2° strato di cls proiettato), di spessore 22 cm per le sezioni "medio-grandi", 18 cm per le sezioni "medie" e 15 cm per le sezioni "piccole". Il primo strato di cls proiettato ha infatti spessore di soli 10 cm (per tutte le categorie) ed inoltre, prima della messa in opera del 2° strato (quindi appena dopo la sua messa in opera) presenta basso modulo elastico. Quanto alle centine, esse sono posate a terra e quindi possono presentare un gioco di posa fino a che non sono legate tra loro e conglobate nel cls proiettato.

Per determinare la distanza di applicazione da considerare nei calcoli si è considerata la formula seguente:

$$d_{calcolo} = (d_1 + d_2) / 2 = 6,1 \text{ m}$$

con:

$d_1 = 5,6 \text{ m}$ distanza tra la posa del 2° strato di cls proiettato ed il fronte, prima dell'avanzamento

$d_2 = p + d_1 = 6,6 \text{ m}$ distanza tra la posa del 2° strato di cls proiettato ed il fronte, dopo l'avanzamento.

$p = 1 \text{ m}$ passo di scavo.

Ecco i risultati ottenuti:

Sezione	Tipo	GSI	Pressione di equilibrio	Portanza sostegno	FS	Spostamento	λ
			[MPa]	[MPa]	[-]	[cm]	[-]
A-A	S3	41	0.88	2.10	2.39	3.20	0.97
E-E	S3	41	0.79	1.79	2.27	3.42	0.97
I-I	S3	37	0.66	2.49	3.77	2.88	0.98

Tabella 35 – Risultati dell'analisi delle linee caratteristiche

Secondo l'analisi delle linee caratteristiche il sostegno confina l'ammasso senza raggiungere la sua pressione limite di resistenza. Il fattore di sicurezza è superiore a 1 per tutte le sezioni.

Un'ulteriore verifica deve essere effettuata applicando i coefficienti di sicurezza secondo le NTC e realizzando un modello ad elementi finiti.

9.2 Analisi numerica FEM 2D

L'analisi viene effettuata come nel capitolo 7, implementando i parametri dell'ammasso roccioso equivalenti indicati nella tabella 34.

9.2.1 Sezione tipo A-A, tipo di sostegno S3, GSI=41

Gli sforzi sono massimi alla fine dello scavo, quando i sostegni in L2 sono già presenti ed hanno le seguenti caratteristiche equivalenti:

$$t_{eq} = 0.38 \text{ m}$$

$$E_{eq} = 16'420 \text{ MPa}$$

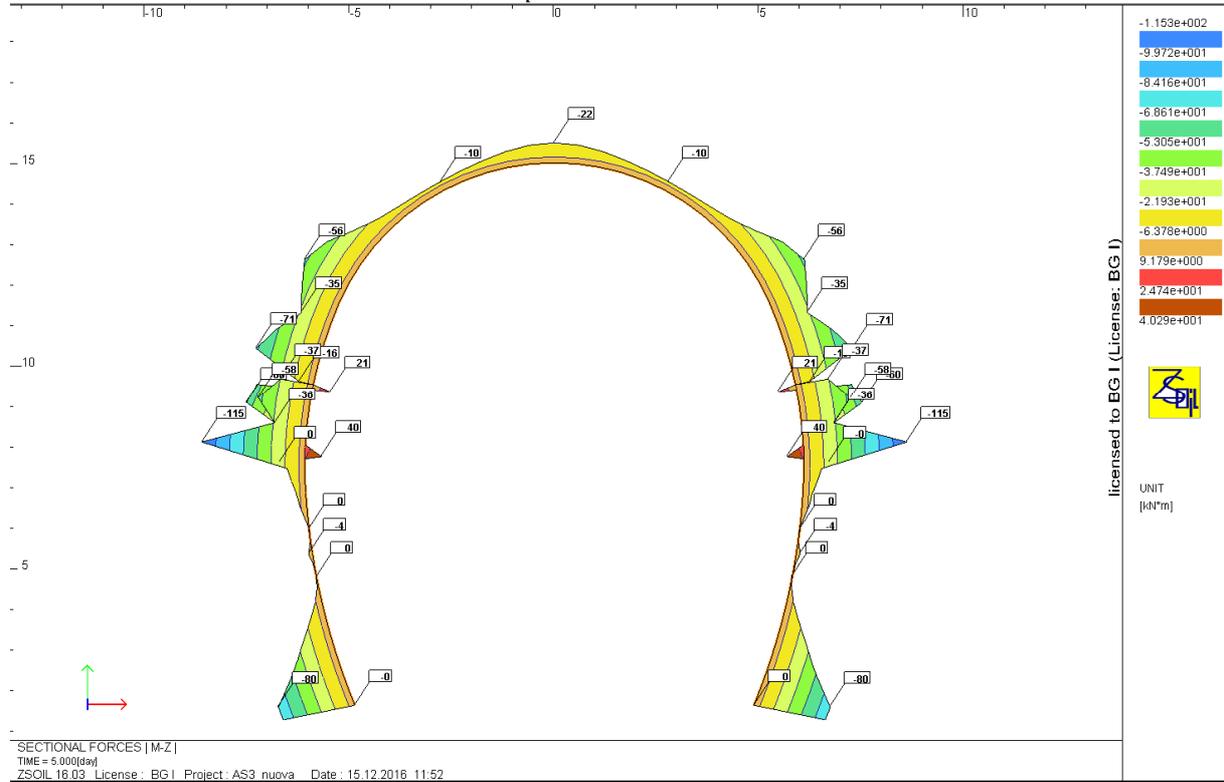


Figura 134: Diagramma dei momenti sezione A-A, sostegno S3

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

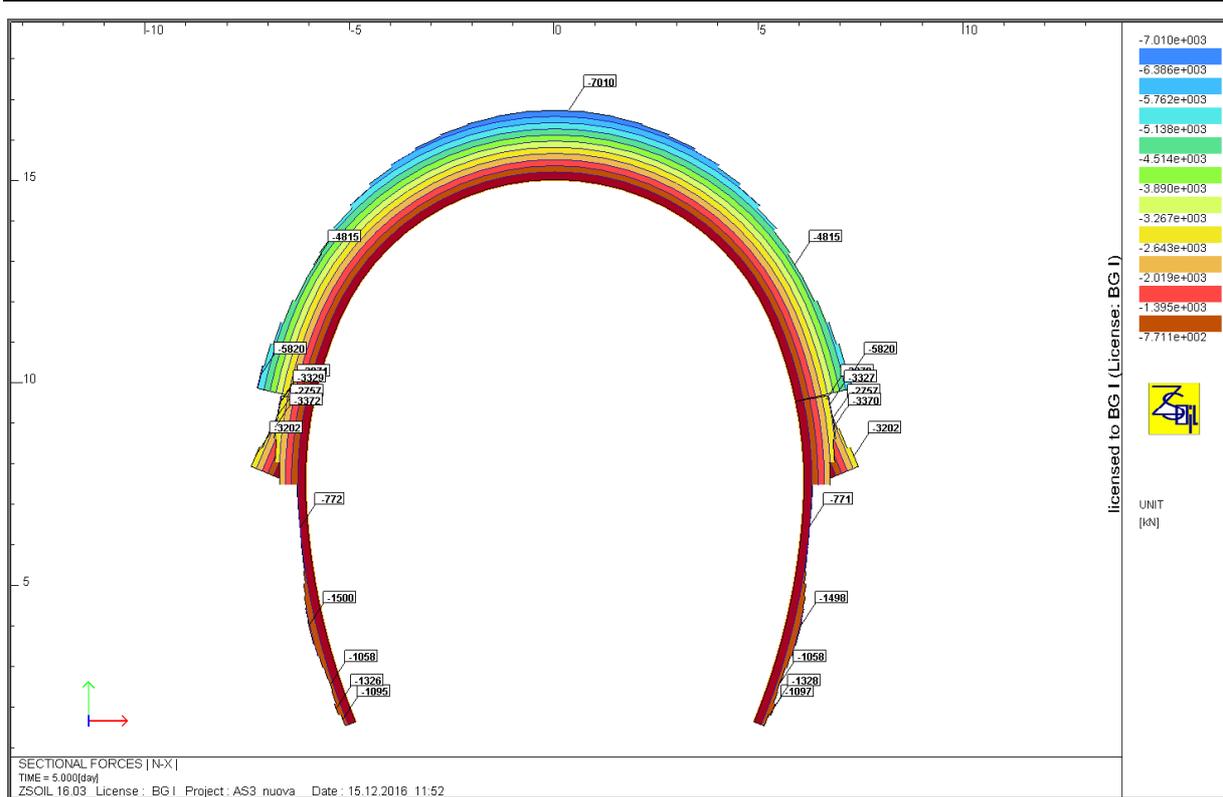


Figura 135: Diagramma degli sforzi normali sezione A-A, sostegno S3

Combinazione	Sforzi nella sezione equivalente	
	M	N
	[kNm]	[kN]
N _{max} , M	-10,0	7010,0
M _{min/max} , N	-115,0	3372,0

Tabella 36 – Sforzi nelle sezioni critiche, sezione A-A, sostegno S3

Combinazione	Sforzi nel cls		Sforzi di calcolo	
	M	N	M _{Ed}	N _{Ed}
	[kNm]	[kN]	[kNm]	[kN]
N _{max} , M	-7,7	4827,9	-10,0	6276,3
M _{min/max} , N	-88,5	2320,8	-115,1	3017,0

Tabella 37 – Sforzi nelle sezioni critiche di cls, sezione A-A, sostegno S3

Combinazione	Sforzi nella centina		Sforzi di calcolo	
	M	N	M _{Ed}	N _{Ed}
	[kNm]	[kN]	[kNm]	[kN]
N _{max} , M	-2,3	2182,1	-3,0	2836,7
M _{min/max} , N	-26,5	1051,2	-34,4	1366,6

Tabella 38 – Sforzi nelle sezioni critiche della centina, sezione A-A, sostegno S3

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

Données

Largeur section $b =$	1 m
Epaisseur section $h_w =$	0,4 m
Résistance du béton à la compression $f_{ck} =$	30 MPa
Coefficient effets à long terme $\alpha_{cc,pl}$ et $\alpha_{ct,pl} =$	1
Facteur de sécurité (marge) =	1
Coefficient partiel relatif au béton $\gamma_c =$	1,5
Coefficient relatif aux actions $\gamma_{ELU} =$	1,3

Résultats

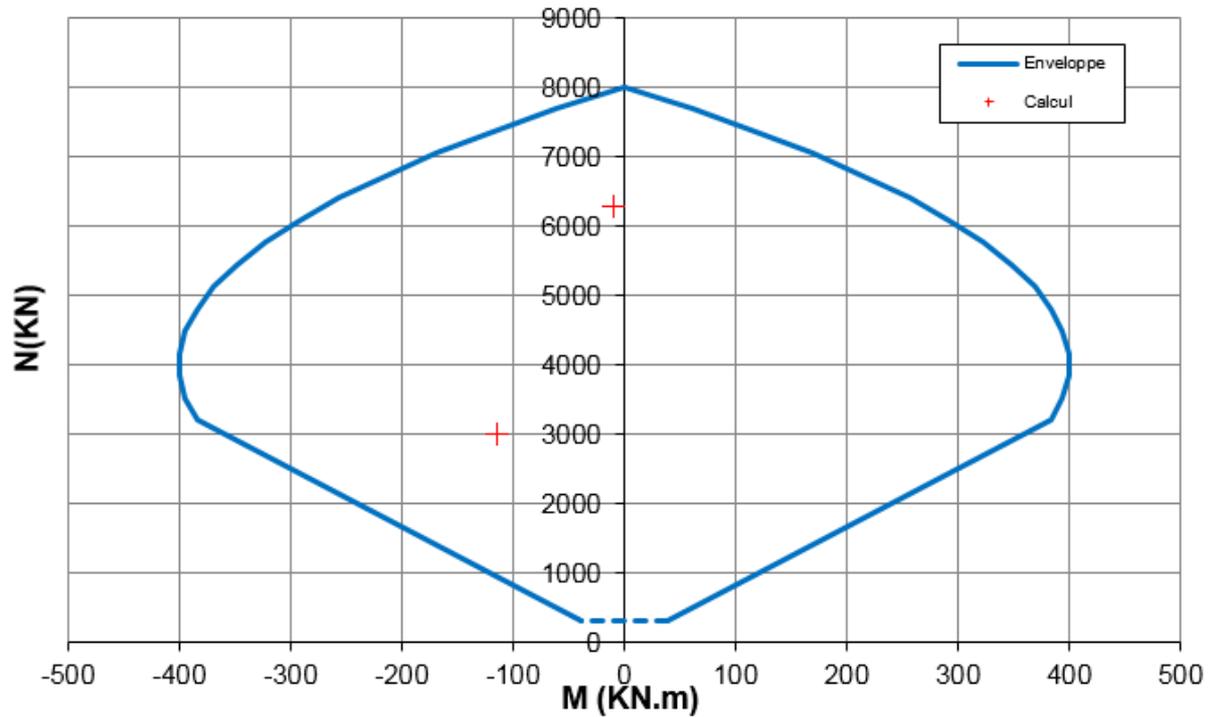


Figura 136: Diagramma di interazione di 40 cm di cls proiettato

La sezione in cls proiettato è verificata con un fattore di sicurezza pari a $FS=1.26$.

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

Données

Surface A =	0,0091 m ²
Moment d'inertie I =	0,0000809 m ⁴
Hauteur de la section h =	0,22 m
Résistance caractéristique de l'acier f_{yk} =	355 MPa
Facteur de sécurité (marge) =	1
Coefficient partiel relatif à l'acier γ_s =	1,05
Coefficient relatif aux actions γ_{ELU} =	1,3

Résultats

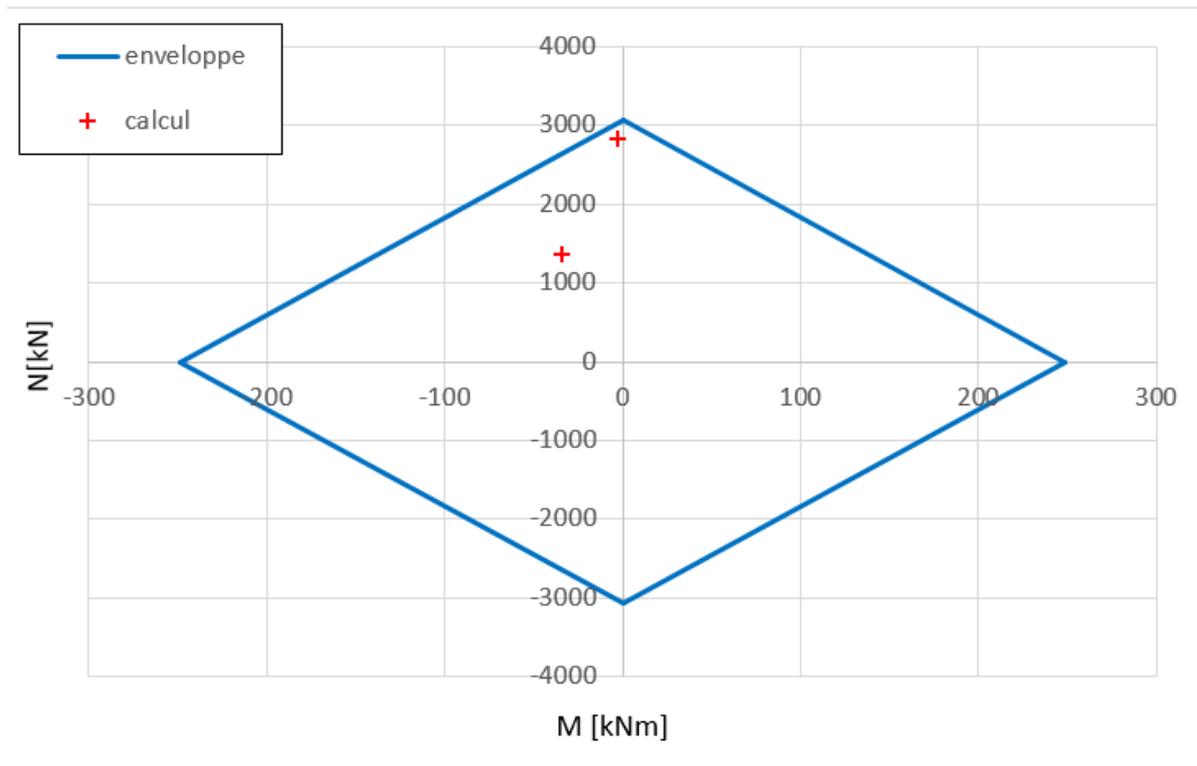


Figura 137: Diagramma di interazione della centina HEB 220

La centina è verificata con un fattore di sicurezza pari a FS=1.05.

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

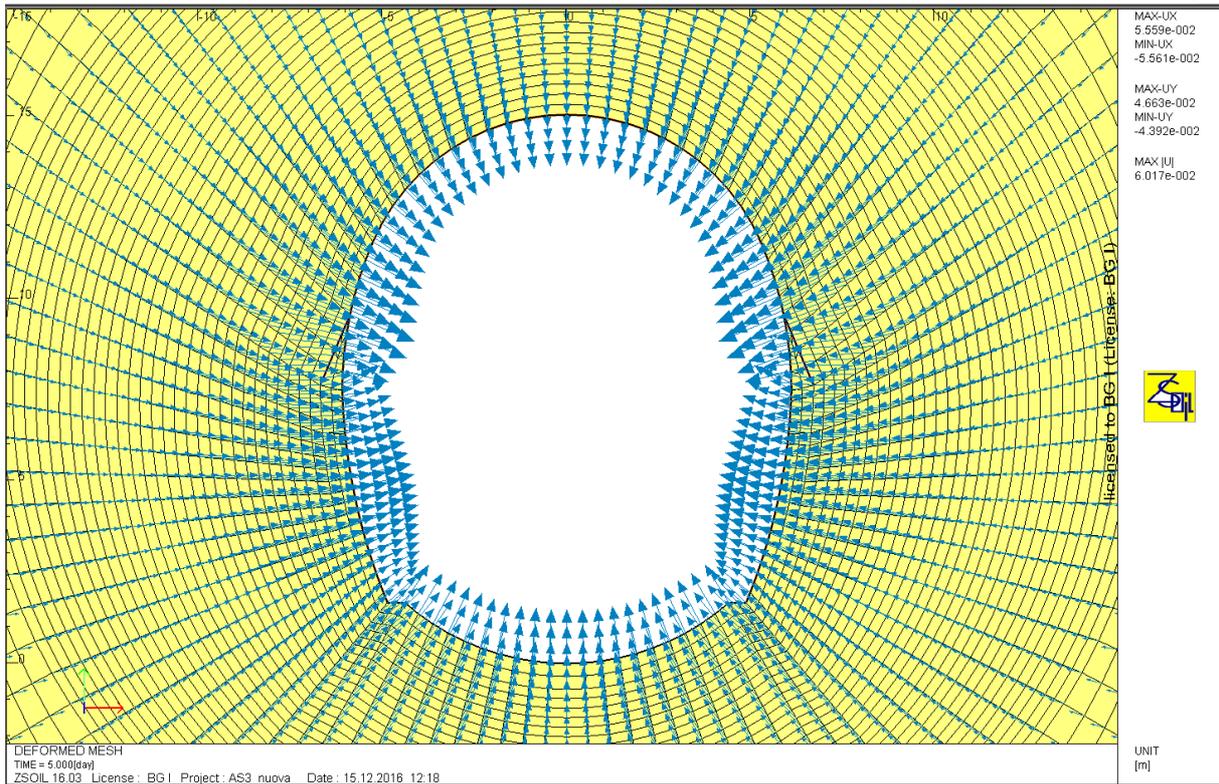


Figura 138: Vettori di spostamento sezione A-A, sostegno S4

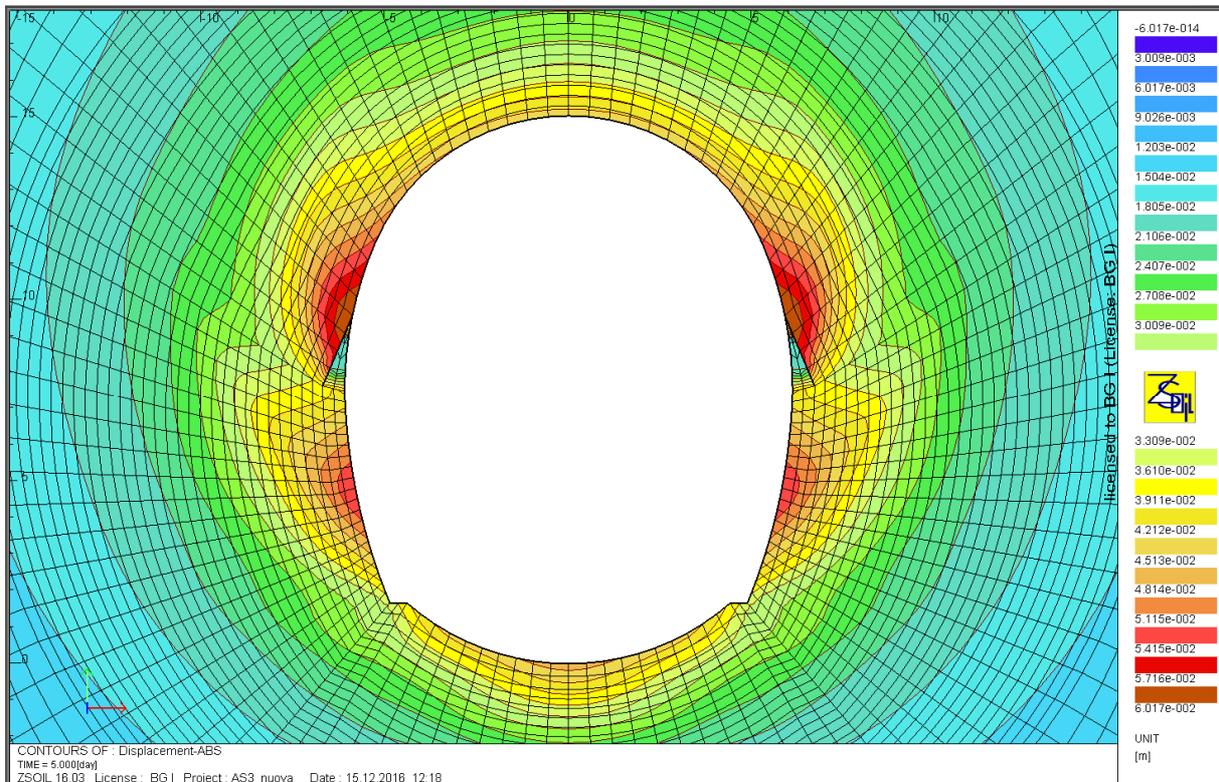


Figura 139: Spostamenti assoluti sezione A-A, sostegno S4

Gli spostamenti massimi si hanno nei piedritti nella parte superiore e sono pari a 6 cm.

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

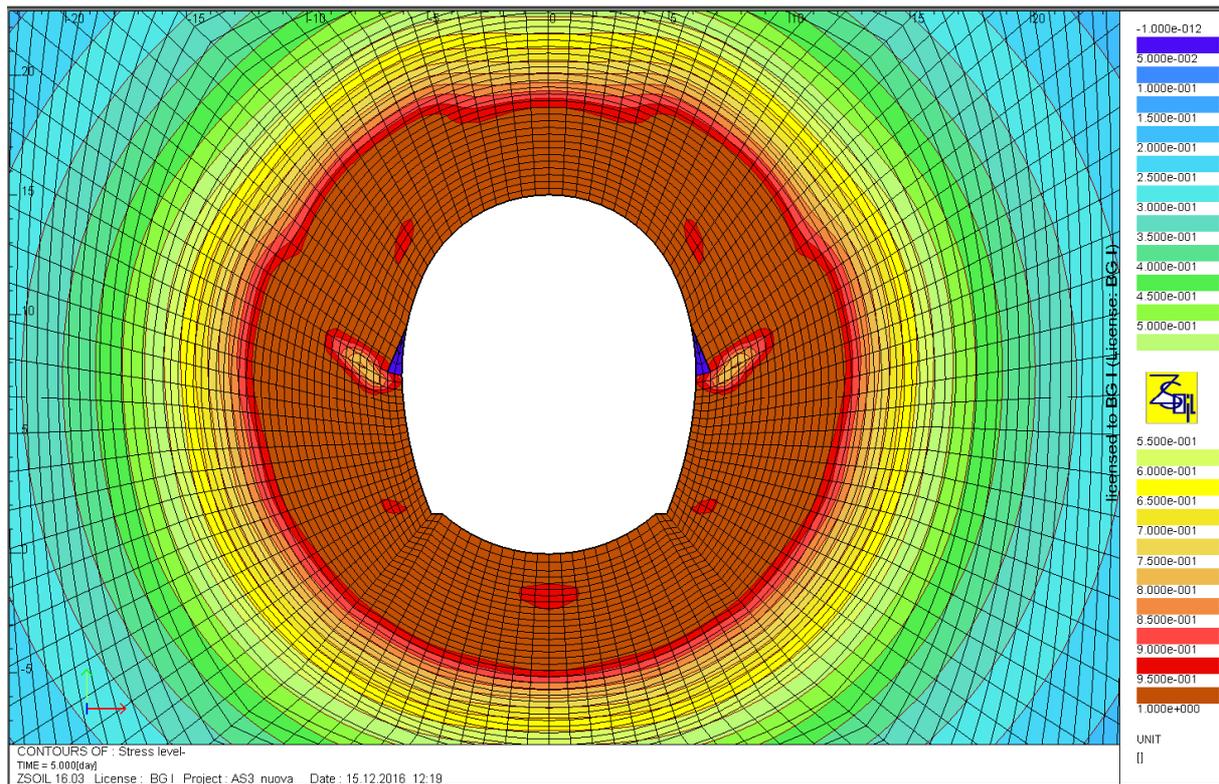


Figura 140: Zone plastiche "Stress Level" A-A, sostegno S4

La banda plastica è di circa 6.20 m nelle pareti e 3.65 m in calotta, in arco rovescio raggiunge i 4.90 m.

9.2.2 Sezione tipo E-E, tipo di sostegno S3, GSI=41

Caratteristiche equivalenti del sostegno in L1:

$$t_{eq} = 0.28m$$

$$E_{eq} = 15'950 MPa$$

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

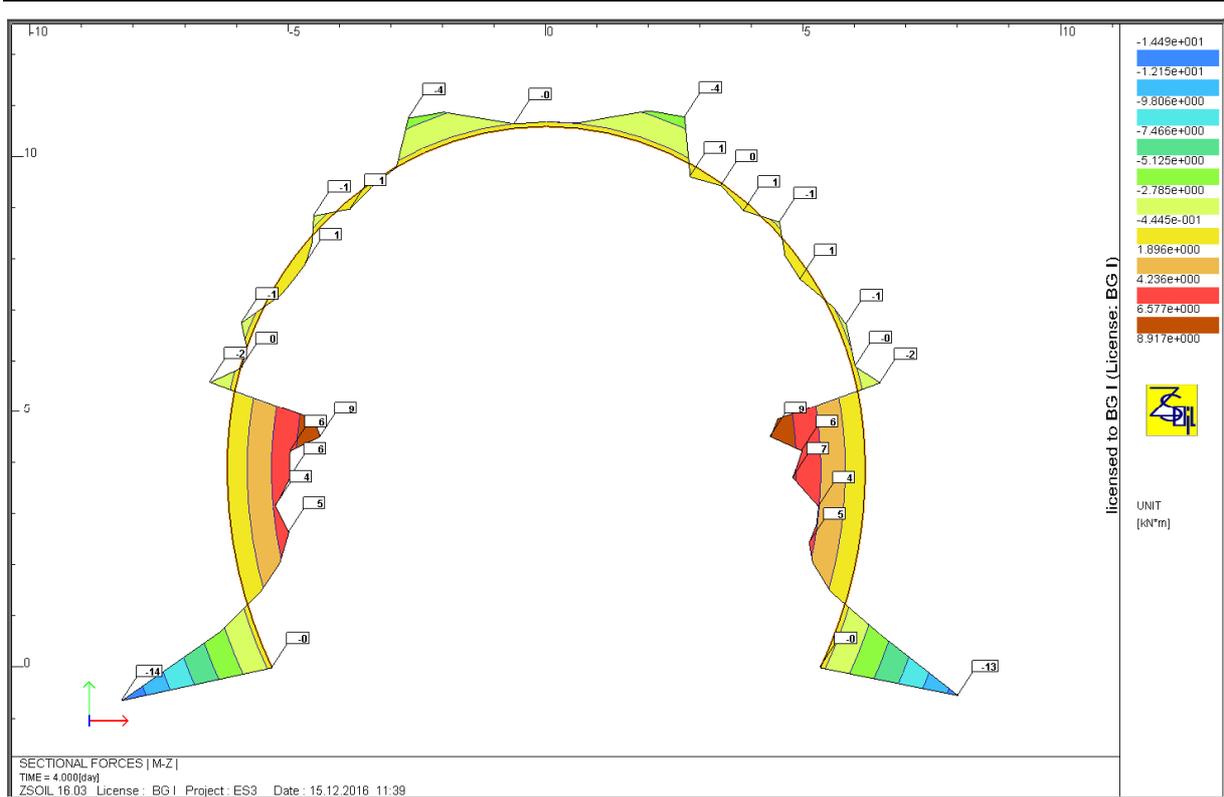


Figura 141: Diagramma dei momenti sezione E-E, sostegno S3

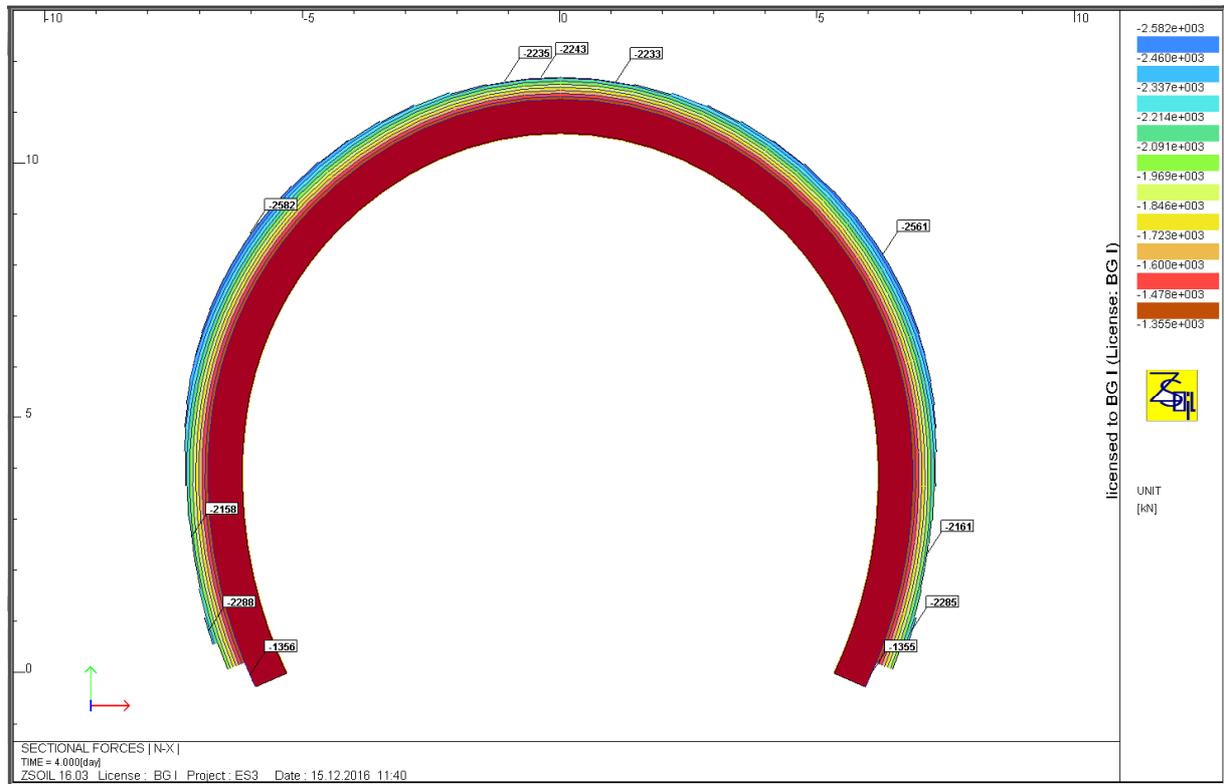


Figura 142: Diagramma degli sforzi normali sezione E-E, sostegno S3

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

Combinazione	Sforzi nella sezione equivalente	
	M	N
	[kNm]	[kN]
N _{max} , M	1,0	2582,0
M _{min/max} , N	-14,0	1356,0

Tabella 39 – Sforzi nelle sezioni critiche, sezione E-E, sostegno S3

Combinazione	Sforzi nel cls		Sforzi di calcolo	
	M	N	M _{Ed}	N _{Ed}
	[kNm]	[kN]	[kNm]	[kN]
N _{max} , M	0,7	1764,2	0,9	2293,5
M _{min/max} , N	-9,9	926,5	-12,9	1204,4

Tabella 40 – Sforzi nelle sezioni critiche di cls, sezione E-E, sostegno S3

Combinazione	Sforzi nella centina		Sforzi di calcolo	
	M	N	M _{Ed}	N _{Ed}
	[kNm]	[kN]	[kNm]	[kN]
N _{max} , M	0,3	817,8	0,4	1063,1
M _{min/max} , N	-4,1	429,5	-5,3	558,4

Tabella 41 – Sforzi nelle sezioni critiche della centina, sezione E-E, sostegno S3

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

Données

Largeur section $b =$	1 m
Epaisseur section $h_w =$	0,28 m
Résistance du béton à la compression $f_{ck} =$	30 MPa
Coefficient effets à long terme $\alpha_{cc,pl}$ et $\alpha_{ct,pl} =$	1
Facteur de sécurité (marge) =	1
Coefficient partiel relatif au béton $\gamma_c =$	1,5
Coefficient relatif aux actions $\gamma_{ELU} =$	1,3

Résultats

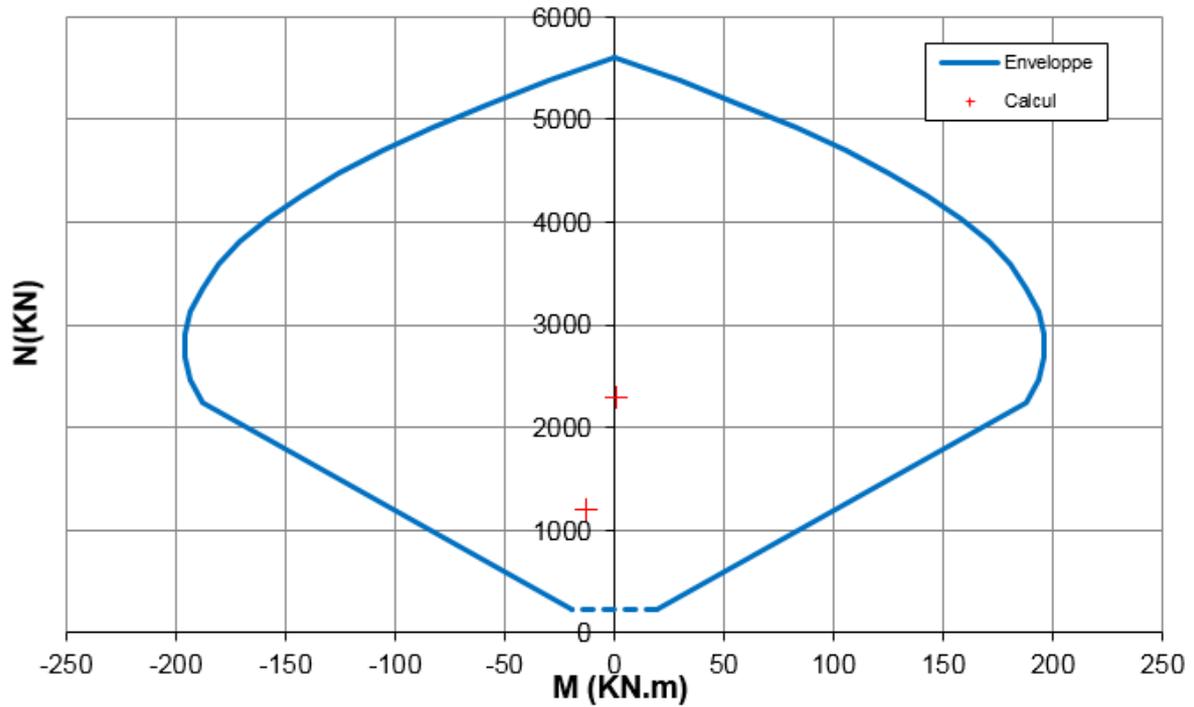


Figura 143: Diagramma di interazione di 28 cm di cls proiettato

La sezione in cls proiettato è verificata con un fattore di sicurezza pari a $FS=2.4$.

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

Données

Surface A =	0,00653 m ²
Moment d'inertie I =	0,0000383 m ⁴
Hauteur de la section h =	0,18 m
Résistance caractéristique de l'acier f_{yk} =	355 MPa
Facteur de sécurité (marge) =	1
Coefficient partiel relatif à l'acier γ_s =	1,05
Coefficient relatif aux actions γ_{ELU} =	1,3

Résultats

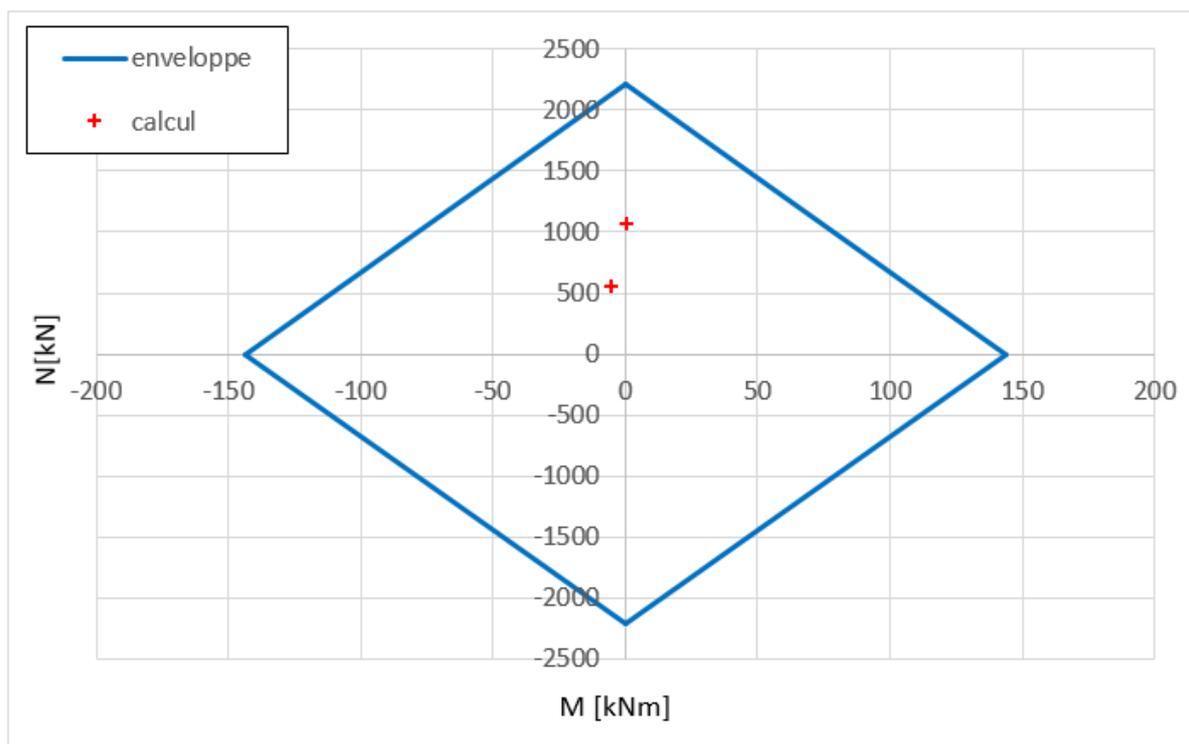


Figura 144: Diagramma d'interazione centina HEB 180

La centina è verificata con un fattore di sicurezza pari a FS=2.0.

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

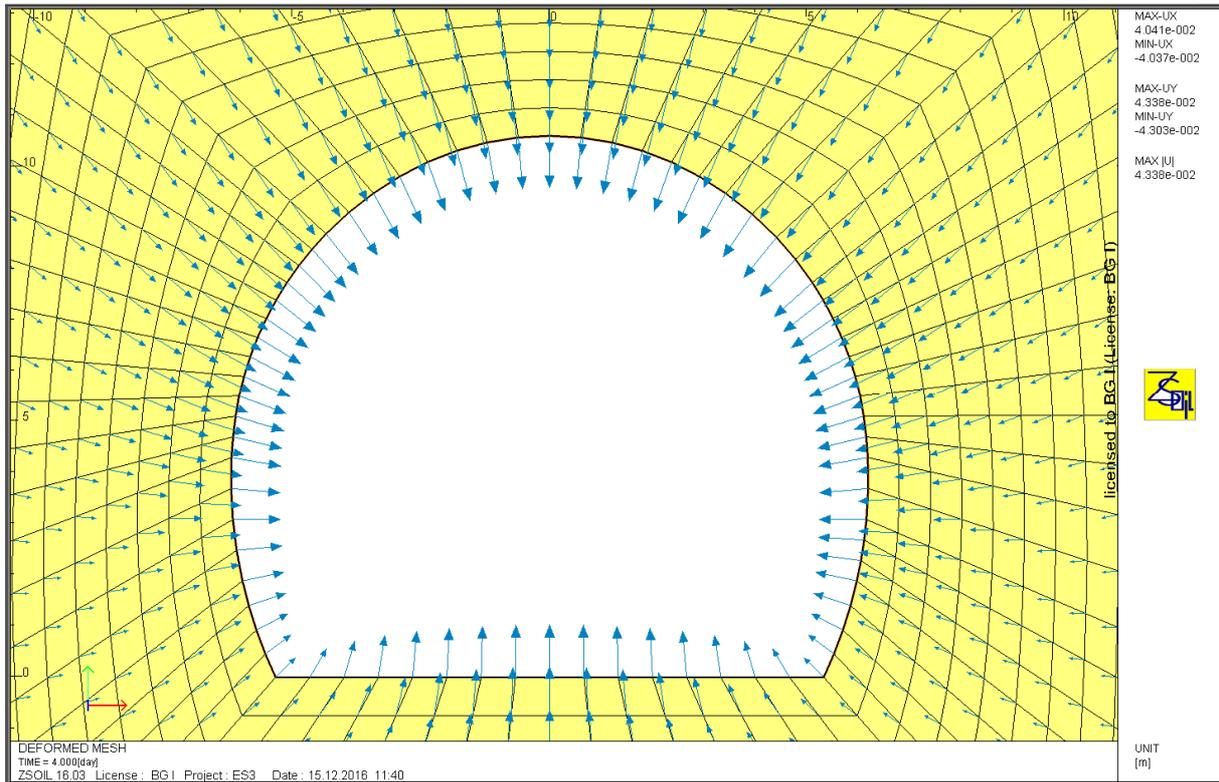


Figura 145: Vettori di spostamento sezione E-E, sostegno S3

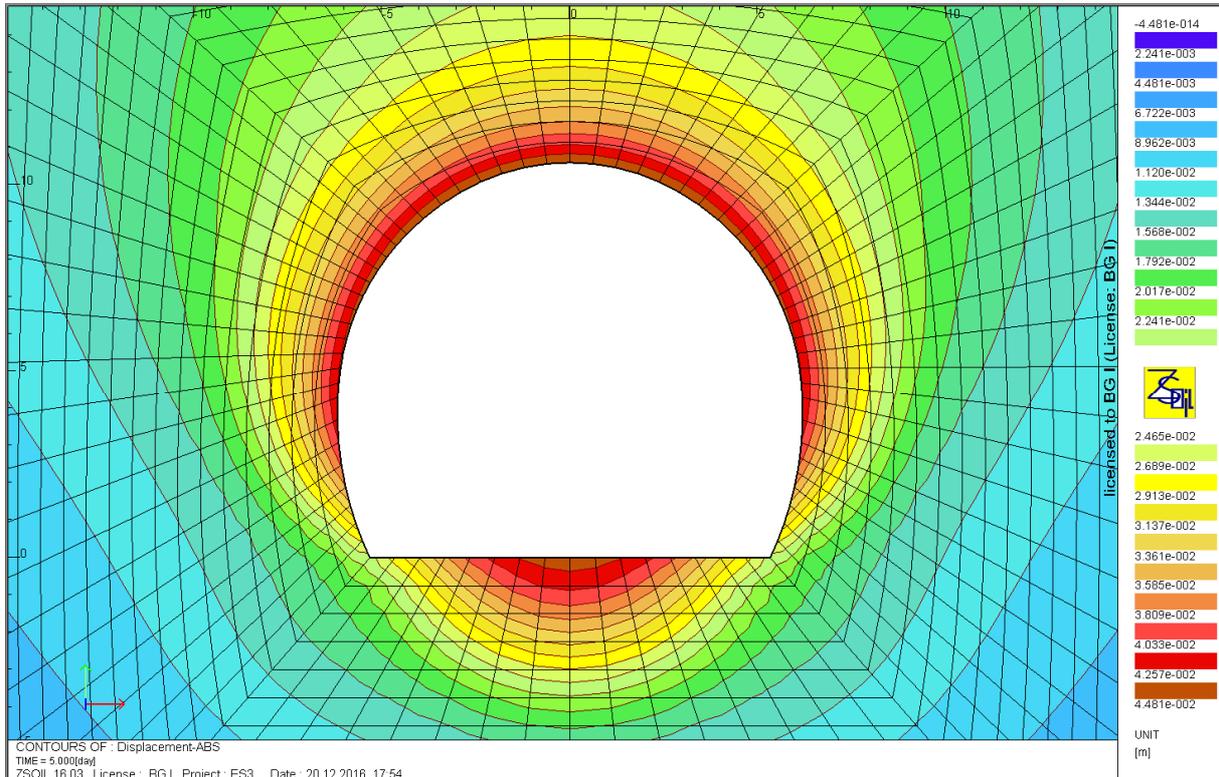


Figura 146: Spostamenti assoluti sezione E-E, sostegno S3

Gli spostamenti in calotta e in platea sono massimi e pari a 4.48 cm. Nelle pareti gli spostamenti raggiungono i 4.26 cm.

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

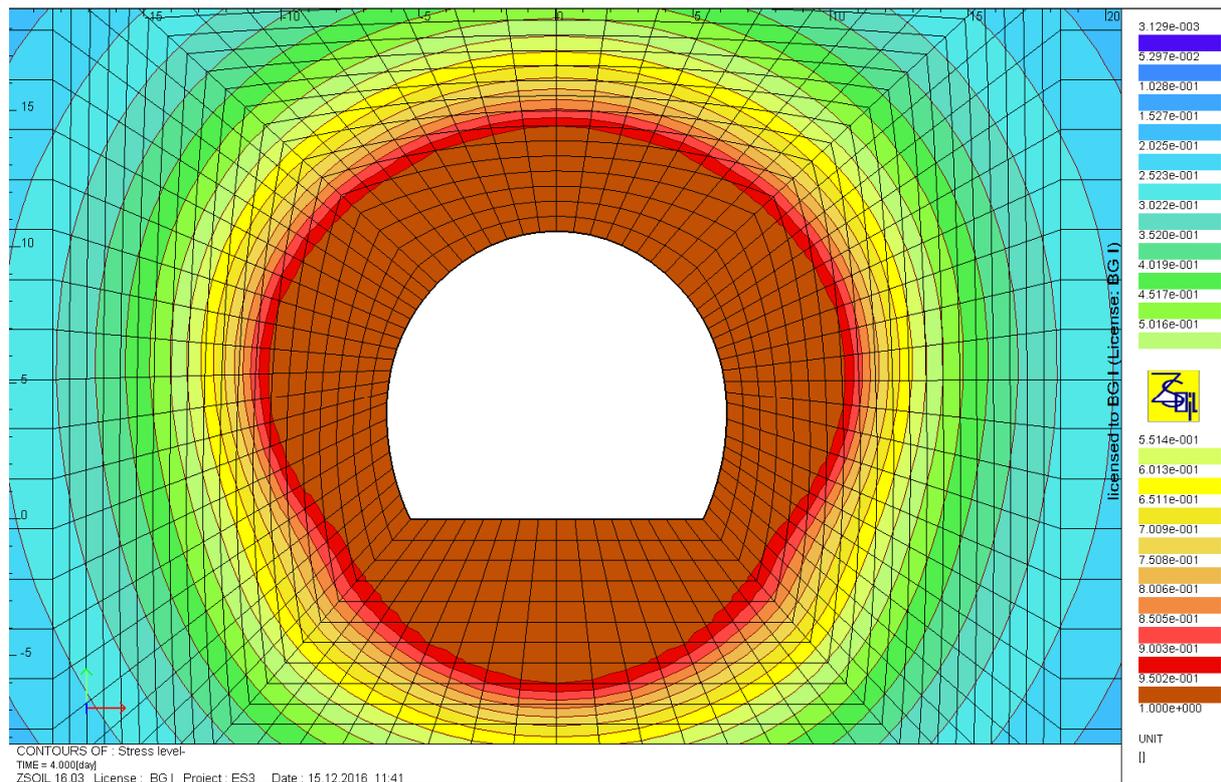


Figura 147: Zone plastiche "Stress Level" E-E, sostegno S3

La banda plastica è di circa 4.40 m nelle pareti e 3.80 m in calotta, in arco rovescio raggiunge i 6.0 m.

9.2.3 Sezione tipo I-I, tipo di sostegno S3, GSI=37

Proprietà equivalenti del sostegno in L1:

$$t_{eq} = 0.28m$$

$$E_{eq} = 15'950 MPa$$

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

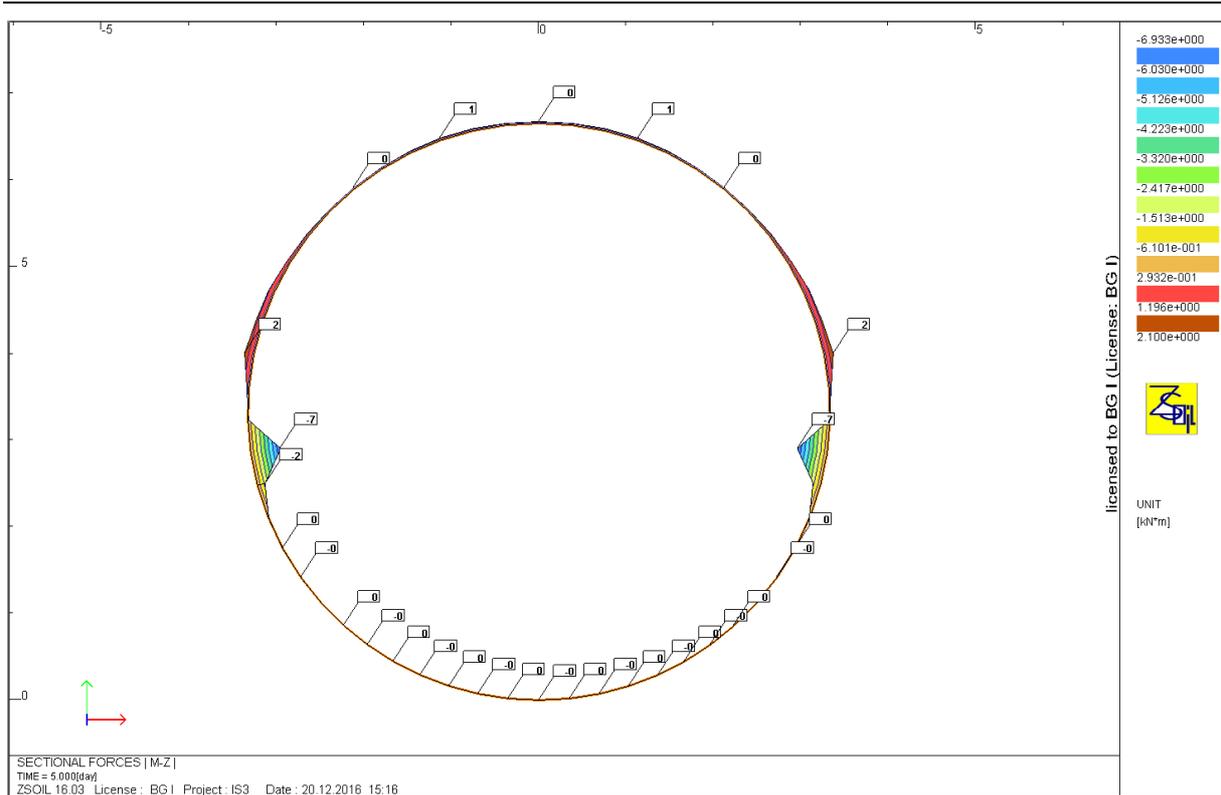


Figura 148: Diagramma dei momenti sezione I-I, sostegno S3

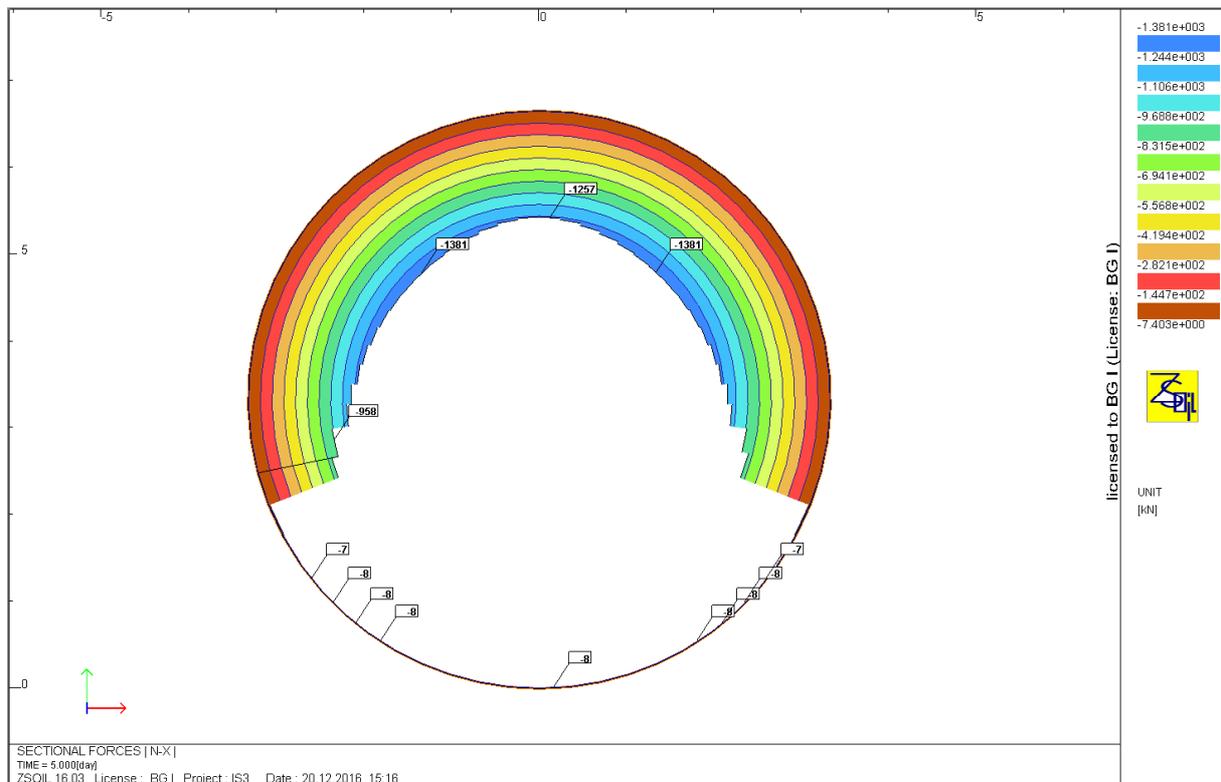


Figura 149: Diagramma degli sforzi normali sezione I-I, sostegno S3

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

Come si vede dai diagrammi, il sostegno dell'arco rovescio è poco sollecitato. Si effettua la verifica per la sezione mista:

Combinazione	Sforzi nella sezione equivalente	
	M	N
	[kNm]	[kN]
N_{max}, M	1,0	1381
$M_{min/max}, N$	-7	700

Tabella 42 – Sforzi nelle sezioni critiche, sezione I-I, sostegno S3

Combinazione	Sforzi nel cls		Sforzi di calcolo	
	M	N	M_{Ed}	N_{Ed}
	[kNm]	[kN]	[kNm]	[kN]
N_{max}, M	0,1	970,1	0,1	1261,1
$M_{min/max}, N$	-5,8	491,5	-7,6	638,9

Tabella 43 – Sforzi nelle sezioni critiche di cls, sezione I-I, sostegno S3

Combinazione	Sforzi nella centina		Sforzi di calcolo	
	M	N	M_{Ed}	N_{Ed}
	[kNm]	[kN]	[kNm]	[kN]
N_{max}, M	0,0	410,9	0,0	534,2
$M_{min/max}, N$	-1,2	208,5	-1,6	271,1

Tabella 44 – Sforzi nelle sezioni critiche della centina, sezione I-I, sostegno S3

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

Données

Largeur section b =	1 m
Epaisseur section h_w =	0,25 m
Résistance du béton à la compression f_{ck} =	30 MPa
Coefficient effets à long terme $\alpha_{cc,pl}$ et $\alpha_{ct,pl}$ =	1
Facteur de sécurité (marge) =	1
Coefficient partiel relatif au béton γ_c =	1,5
Coefficient relatif aux actions γ_{ELU} =	1,3

Résultats

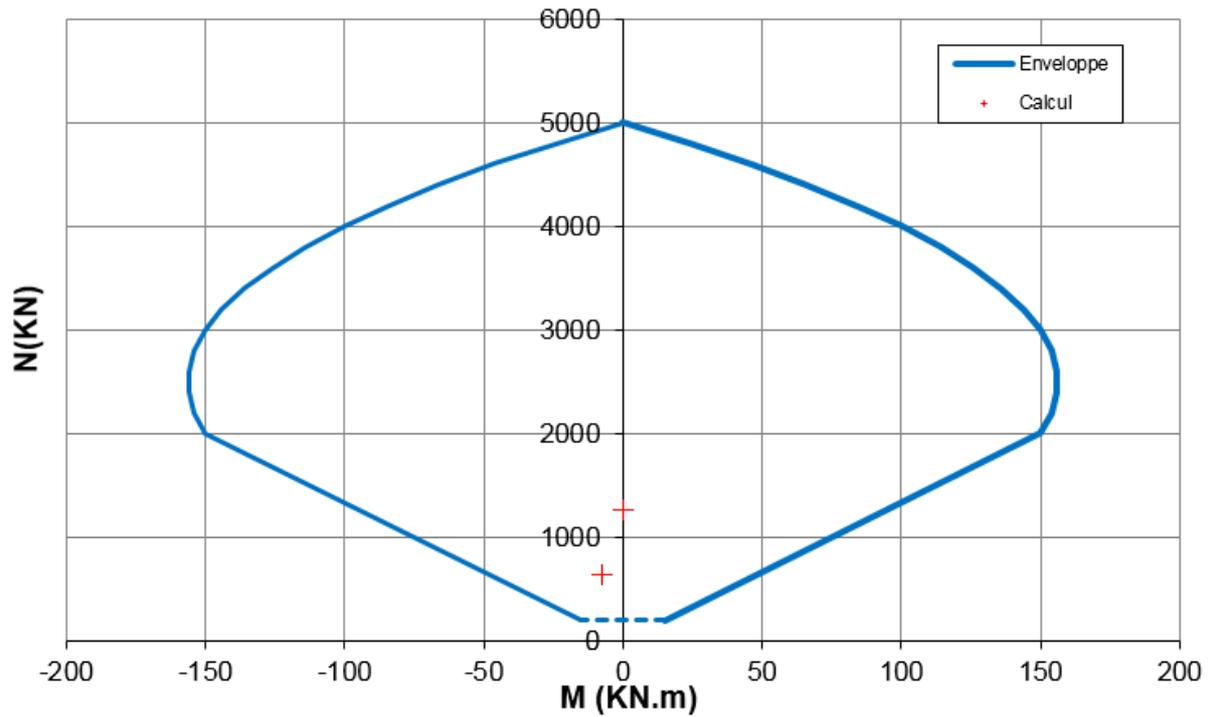


Figura 150: Diagramma di interazione di 25 cm di cls proiettato

Il calcestruzzo è verificato con un fattore di sicurezza pari a FS=3.9.

Données

Surface A =	0,0043 m ²
Moment d'inertie I =	0,0000151 m ⁴
Hauteur de la section h =	0,14 m
Résistance caractéristique de l'acier f_{yk} =	355 MPa
Facteur de sécurité (marge) =	1
Coefficient partiel relatif à l'acier γ_s =	1,05
Coefficient relatif aux actions γ_{ELU} =	1,3

Résultats

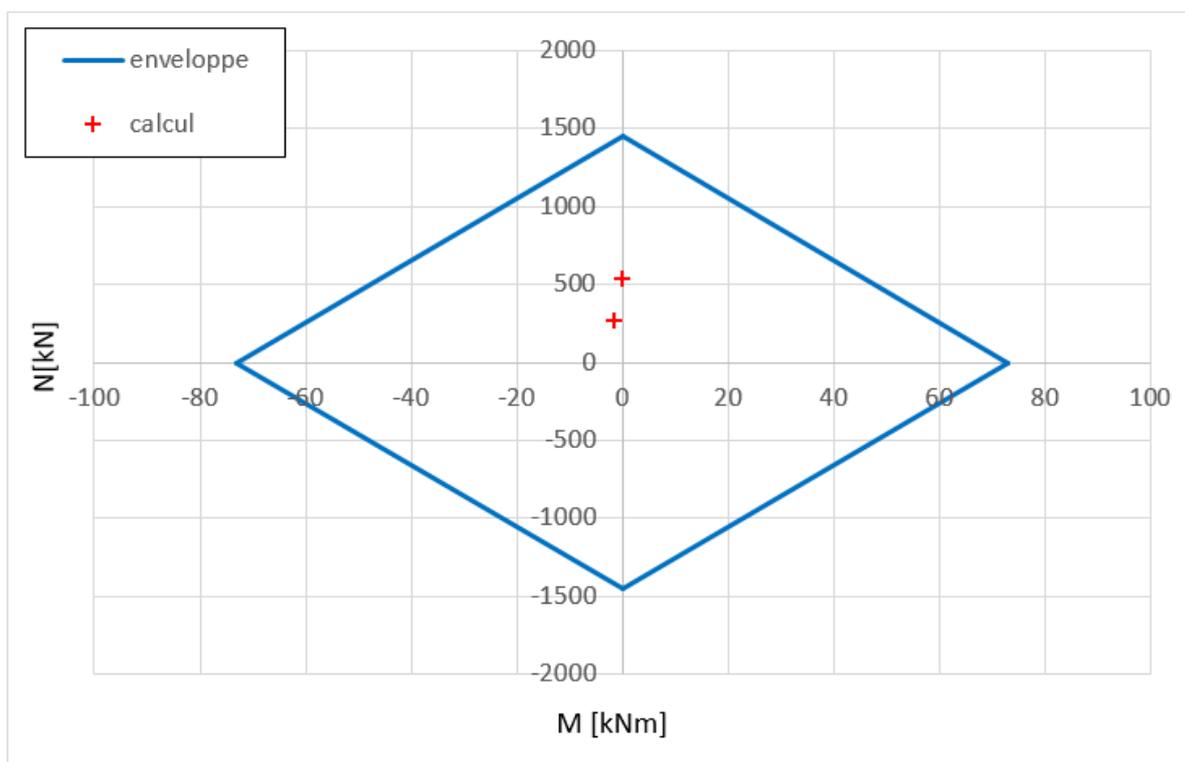


Figura 151: Diagramma d'interazione centina HEB 140

La cantina è verificata con un fattore di sicurezza pari a FS=2.7.

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

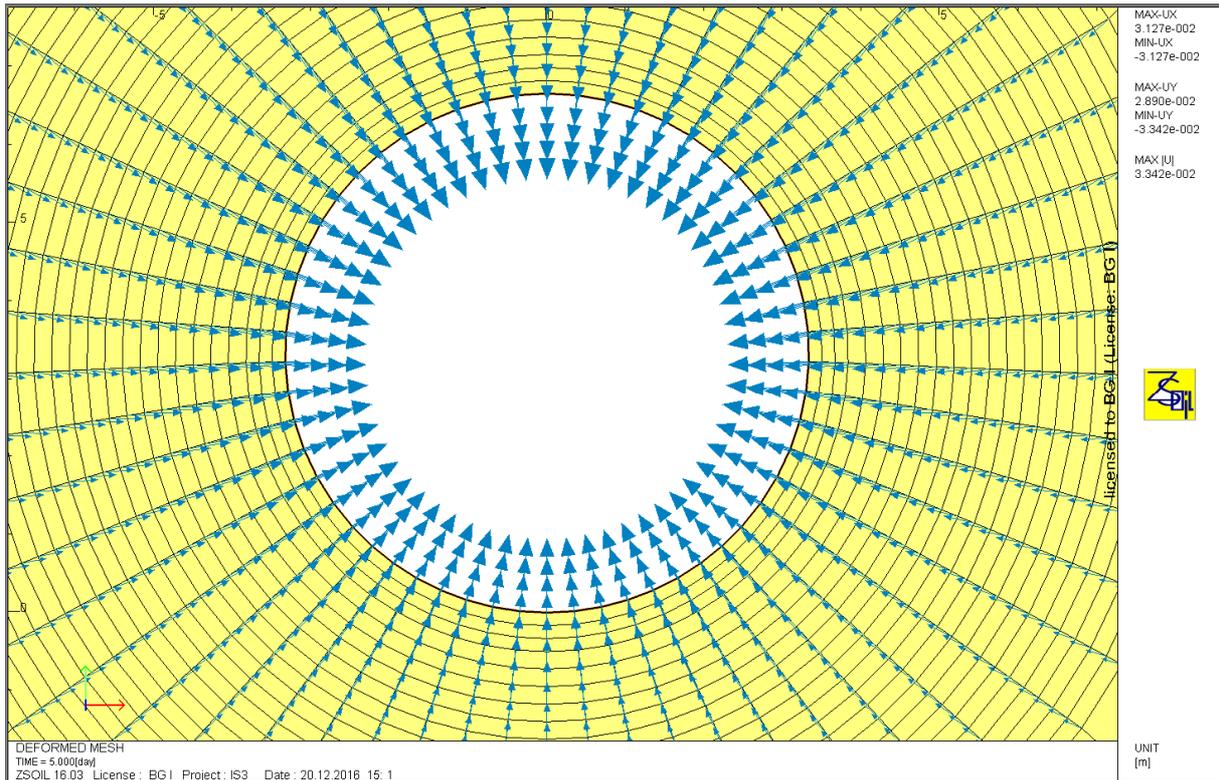


Figura 152: Vettori di spostamento sezione I-I, sostegno S3

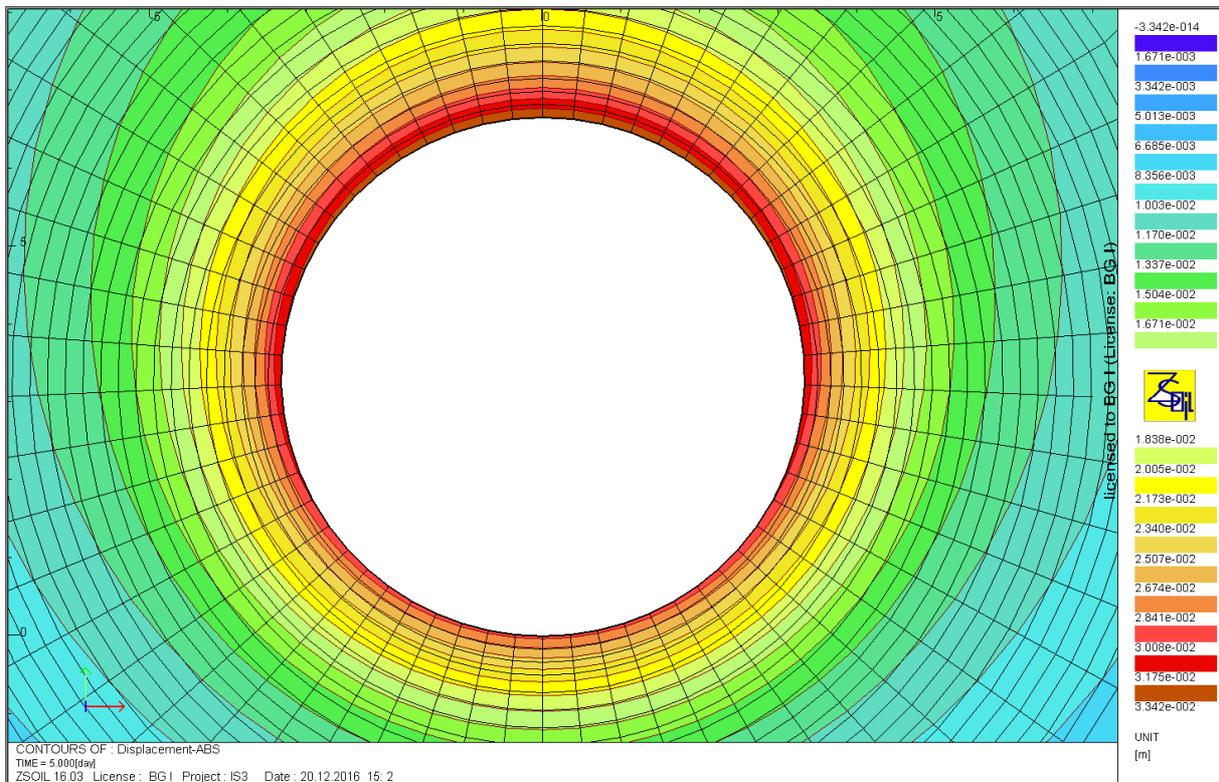


Figura 153: Spostamenti assoluti sezione I-I, sostegno S3

Gli spostamenti massimi si trovano in calotta e sono pari a 3.3 cm.

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

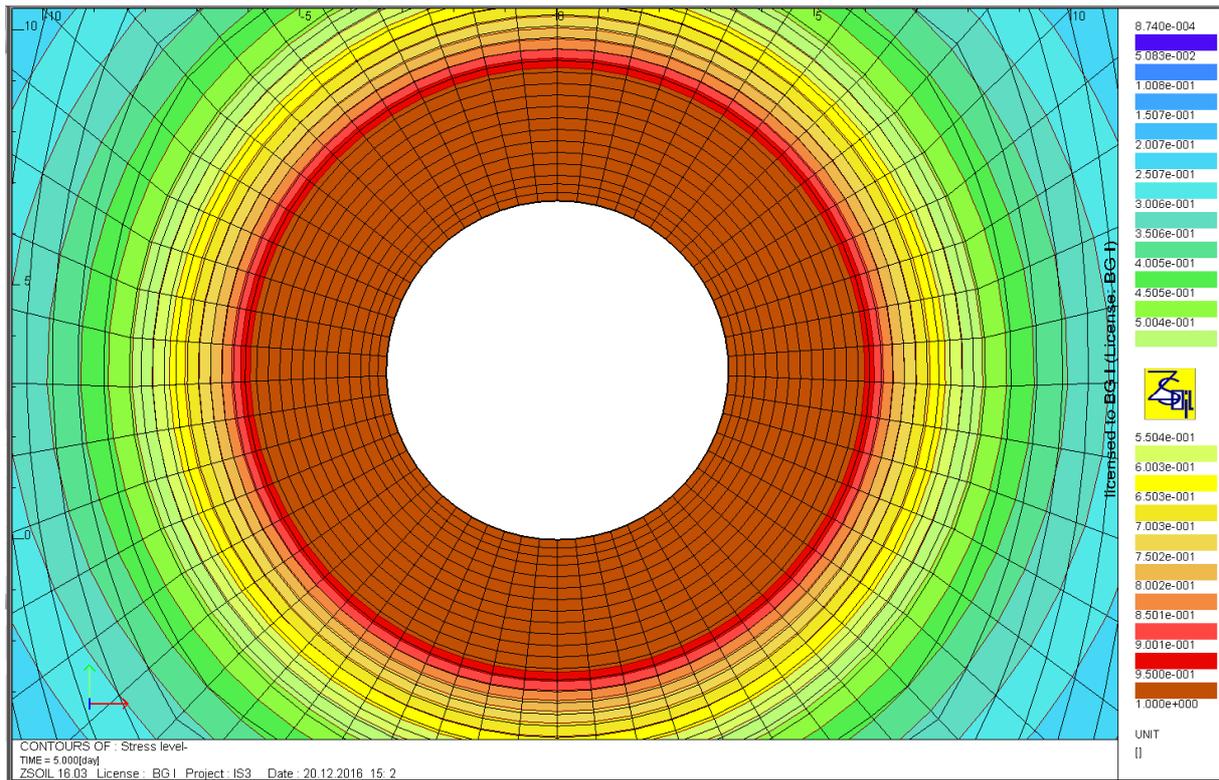


Figura 154: Zone plastiche "Stress Level" I-I, sostegno S3

La banda plastica ha spessore costante e pari a 2.75m.

9.3 Verifica della stabilità del fronte di scavo

La pressione verticale sul fronte di scavo del tunnel si valuta mediante il modello analitico di Terzaghi, basato sulla teoria del silo (vedi figura 155).

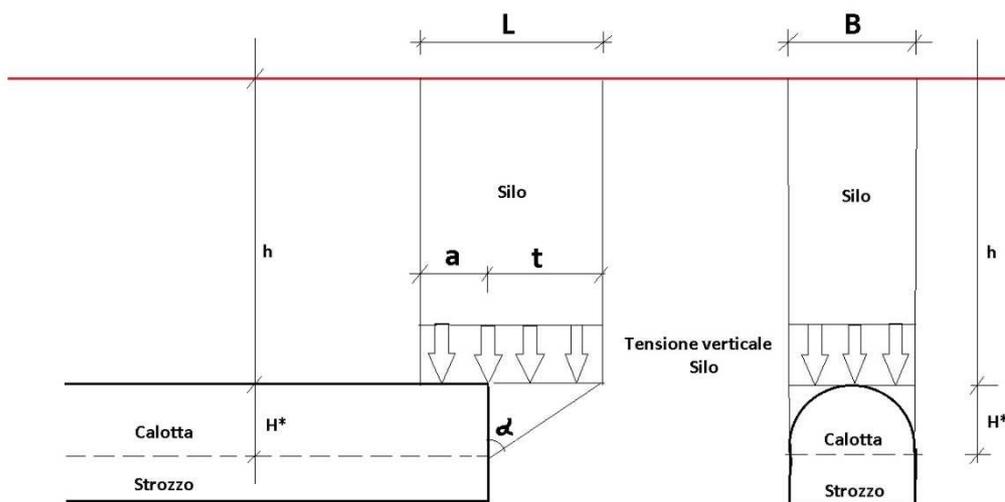


Figura 155: Modello di calcolo della pressione sul fronte di scavo del tunnel

La soluzione analitica per diversi strati di materiale che permette la valutazione della pressione verticale alla base di ogni strato si calcola utilizzando la seguente equazione:

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

$$\sigma_n = \frac{\gamma_n - \frac{c'_{d,n} U}{A}}{K_{\text{Silo}} \frac{U}{A} \tan \varphi} \cdot \left(1 - e^{-K_{\text{Silo}} \frac{U}{A} \tan \varphi'_{d,n} h_n} \right) + \sigma_{n-1} \cdot e^{-K_{\text{Silo}} \frac{U}{A} \tan \varphi'_{d,n} h_n}$$

dove:

- n indice del numero di strato;
- σ_n pressione verticale alla base dello strato n;
- σ_{n-1} pressione verticale al limite superiore dello strato n;
- γ_n peso della roccia;
- $c'_{d,n}$ coesione;
- $\varphi'_{d,n}$ angolo di attrito;
- k_{Silo} coefficiente di spinta laterale;
- h_n altezza dello strato n;
- A area del silo;
- U perimetro del silo.

In questo caso si ha un solo strato di roccia (micascisti di Clarea) al di sopra della galleria.

La pressione verticale che agisce al livello della calotta si indica con $\sigma_{v\text{Silo}}$ nella relazione, come indicato nella figura 95.

Per valutare l'area del perimetro, la lunghezza L si definisce con $L = a + t$ (vedi fig. 95), dove:

- a lunghezza della volata
- $t = h \cdot \tan \alpha$ profondità dell'angolo

La larghezza B del silo corrisponde alla larghezza di scavo.

La pressione orizzontale p_H necessaria a stabilizzare il fronte del tunnel è dunque determinata secondo lo schema illustrato alla figura seguente.

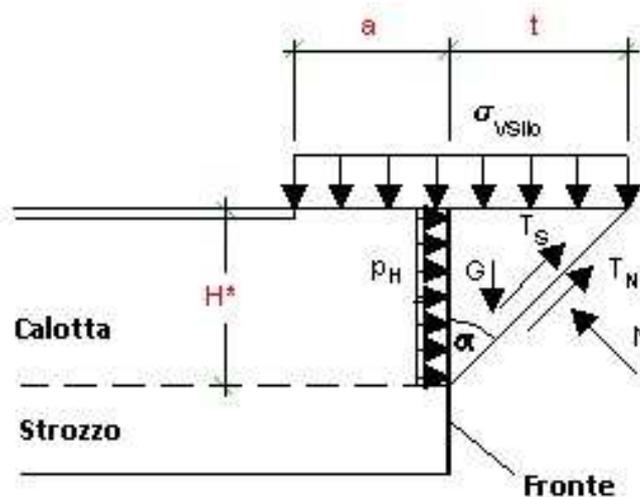


Figura 156: Schema delle forze che agiscono sul fronte

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

L'altezza H^* dell'angolo corrisponde all'altezza di scavo, come si può vedere nella figura 95. L'altezza H^* deve essere ridotta nel caso di una suddivisione del fronte in calotta e strozzo.

La forza di attrito ai lati dell'angolo si calcola come segue:

$$T_S = H^{*2} \tan \alpha \cdot \left(c' + K_{\text{Wedge}} \cdot \tan \varphi' \cdot \frac{2\sigma_{V,\text{Silo}} + H^* \cdot \gamma}{3} \right)$$

Nel caso di sezioni scavate in un ammasso roccioso molto fratturato si ammette un coefficiente $K_{\text{Wedge}} = 0.1$.

Il carico verticale V del silo si calcola come segue:

$$V = \sigma_{V,\text{Silo}} \cdot B \cdot (H^* \cdot \tan \alpha + a)$$

Il carico permanente G dell'angolo è definito dalla formula seguente:

$$G = \gamma \cdot \frac{H^{*2}}{2} \cdot \tan \alpha \cdot B$$

La relazione tra T_N e N si definisce mediante il criterio di Mohr-Coulomb:

$$T_N = N \cdot \tan \varphi' + c' \cdot \frac{H^*}{\cos \alpha} \cdot B$$

L'equilibrio delle forze permette di calcolare la forza orizzontale necessaria al fronte di scavo del tunnel.

$$S = \frac{(G+V) \cdot (\cos \alpha - \sin \alpha \cdot \tan \varphi') - \frac{c' \cdot H^* \cdot B}{\cos \alpha} - T_S}{\sin \alpha + \cos \alpha \cdot \tan \varphi'}$$

La pressione orizzontale necessaria alla stabilizzazione del fronte è dunque:

$$p_H = \frac{S}{A_{\text{fronte}}}$$

Le analisi di stabilità del fronte di scavo si effettuano per tutte le sezioni rappresentative nelle zone di faglia (non per le sezioni "piccole" in quanto non si prevedono bullonature al fronte).

Si utilizza un valore molto ridotto della coesione al fine di tener conto di eventuali zone di ammasso roccioso che presentano diminuzioni locali della coesione al fronte. Si considera precauzionalmente il valore reale di GSI (33) e non quello equivalente.

Sezione A-A, tipo di sostegno S3, GSI=33

Dati di base

Coesione	c'	=	20 kPa
Angolo di attrito	φ	=	30.4°
Peso specifico	γ	=	26.5 kN/m ³
Larghezza di scavo	B	=	12 m

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

Altezza dell'angolo	H*	=	7,5m
Copertura	h	=	1'100 m
Area del fronte di scavo	A	=	72,9 m ²
Lunghezza della volata	t	=	1 m
Lunghezza dei bulloni VTR	L	=	12 m (utile: 6 m)

Pressione necessaria

Pressione di stabilizzazione necessaria:

$$p_{Hnec} = 19.5 \text{ kPa}$$

Pressione stabilizzante

Per la sezione A-A con tipo di sostegno S3 sono previsti 36 bulloni in fibra di vetro.

La pressione stabilizzante è la seguente:

$$p_H = \frac{n_{VTR} \cdot F_{VTR}}{A_{fronte}}$$

Con:

n_{VTR} numero di elementi strutturali in vetroresina;

A_{fronte} area della sezione di scavo;

F_{VTR} è la forza applicata dal singolo elemento in vetroresina pari al minimo tra il valore di carico ammissibile per rottura a sfilamento della barra dal terreno (F_{sfil}) e quello corrispondente alla rottura per trazione della singola barra (F_{snerv}).

La resistenza a trazione della barra è pari a 750 kN.

Sulla base di quanto proposto nelle raccomandazioni AFTES GT30 "Recommandations relatives à la conception et au dimensionnement du boulonnage radial" nel caso di rocce tenere/medie, si definisce l'attrito limite dell'interfaccia tra il bullone iniettato e la roccia pari a:

$$q_s = 700 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

La resistenza a sfilamento è pari a:

$$F_{sfil} = q_s \cdot \phi \cdot \pi \cdot L_{utile} = 700 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 0.06\text{m} \cdot \pi \cdot 6\text{m} = 791.7 \text{ kN} \geq 750 \text{ kN}$$

La resistenza a trazione è dunque determinante.

Si ha quindi: $p_H = 370.4 \text{ kPa}$

Il fattore di sicurezza è:

$$FS = \frac{p_H}{p_{Hnec}} = 18.99$$

Sezione E-E, tipo di sostegno S3, GSI=33

Dati di base

Coesione	c'	=	20 kPa
Angolo di attrito	ϕ	=	30.4°
Peso specifico	γ	=	26.5 kN/m ³

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

Larghezza di scavo	B	=	12.4 m
Altezza dell'angolo	H*	=	10.8m
Copertura	h	=	1'100 m
Area del fronte di scavo	A	=	112.6 m ²
Lunghezza della volata	t	=	1 m
Lunghezza dei bulloni VTR	L	=	12 m (utile: 6 m)

Pressione necessaria

Pressione di stabilizzazione necessaria:

$$p_{Hnec} = 36.8 \text{ kPa}$$

Pressione stabilizzante

Per la sezione E-E con tipo di sostegno S3 sono previsti 31 bulloni in fibra di vetro.

La pressione stabilizzante è la seguente:

$$p_H = \frac{n_{VTR} \cdot F_{VTR}}{A_{fronte}}$$

Con:

n_{VTR} numero di elementi strutturali in vetroresina;

A_{fronte} area della sezione di scavo;

F_{VTR} è la forza applicata dal singolo elemento in vetroresina pari al minimo tra il valore di carico ammissibile per rottura a sfilamento della barra dal terreno (F_{sfil}) e quello corrispondente alla rottura per trazione della singola barra (F_{snerv}).

La resistenza a trazione della barra è pari a 750 kN.

Sulla base di quanto proposto nelle raccomandazioni AFTES GT30 "Recommandations relatives à la conception et au dimensionnement du boulonnage radial" nel caso di rocce tenere/medie, si definisce l'attrito limite dell'interfaccia tra il bullone iniettato e la roccia pari a:

$$q_s = 700 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2}$$

La resistenza a sfilamento è pari a:

$$F_{sfil} = q_s \cdot \Phi \cdot \pi \cdot L_{utile} = 700 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot 0.06\text{m} \cdot \pi \cdot 6\text{m} = 791.7 \text{ kN} \geq 750 \text{ kN}$$

La resistenza a trazione è dunque determinante.

Si ha quindi: $p_H = 206.5 \text{ kPa}$

Il fattore di sicurezza è:

$$FS = \frac{p_H}{p_{Hnec}} = 5.6$$

10. Ripartizione delle sezioni tipo

Per la definizione delle sezioni tipo, sulla base delle linee guida descritte al § 4.1 e tenendo conto delle differenze tra metodo di scavo tradizionale e metodo meccanizzato con TBM aperta esposte al § 3.3, si sono considerati i criteri sintetizzati nella tabella seguente. Il criterio del GSI

prevale sul criterio della sezione tipo applicata nel cunicolo. Il rinforzo alle intersezioni con la sezione tipo S3 si applica invece indipendentemente dal GSI.

Sezione tipo	GSI rilevata nella tratta corrispondente del cunicolo della Maddalena	Sezione tipo applicata nel cunicolo della Maddalena	Altri criteri di applicazione
S1	> 60	F3c 50 % F3c_1	-
S2	55-60	F3c F3c_1 F4 F5	-
S3	≤ 55	F4 F5	<ul style="list-style-type: none"> • 5 m prima e dopo le intersezioni con opere grandi, medio-grandi o medie • Per la sezione B-B, nel caso in cui la S4 sia insufficiente (50 % dei casi)
S4	> 60	50 % F3c_1 F4 F5	-

Tabella 45 – Criteri di applicazione delle sezioni tipo

La ripartizione delle sezioni tipo per ciascuna opera che compone l'area di sicurezza è mostrata nell'allegato 3 e riassunta qui di seguito:

- **Sezioni A-A, C-C, D-D, J-J, P-P e R-R: S1 (20%), S2 (30%), S3 (20%), S4 (30%)**
- **Sezione B-B: S1 (30%), S2 (20%), S3 (35%), S4 (15%)**
- **Sezione E-E: S2 (15%), S3 (20%), S4 (65%)**
- **Sezione F-F: S1 (30%), S2 (20%), S3 (30%), S4 (20%)**
- **Sezione G-G: S4 (70%), S3 (30%)**
- **Sezione H-H: S1 (35%), S2 (30%), S3 (10%), S4 (25%)**
- **Sezione I-I: S4 (100%).**

11. Conclusioni

L'obiettivo della presente relazione è stato quello di calcolare il sostegno di prima fase dell'area di sicurezza di Clarea.

Il comportamento dell'ammasso roccioso è stato analizzato in condizioni intrinseche (assenza di interventi di sostegno dello scavo), per le varie condizioni geomeccaniche previste, alla luce del ritorno di esperienza dello scavo del cunicolo esplorativo della Maddalena situato in prossimità.

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

Successivamente la verifica dei sistemi di sostegno previsti è stata effettuata diversificando le verifiche ai vari comportamenti allo scavo previsti ed in particolare nel caso di ammassi rocciosi competenti o più fratturati. Le simulazioni sono state realizzate con modelli agli elementi finiti 2D in condizioni di deformazione piana.

Le analisi svolte dimostrano la compatibilità dei sistemi di sostegno previsti con il comportamento dell'ammasso roccioso.

Allegati

Allegato 1: Curve caratteristiche di ammasso e sostegno

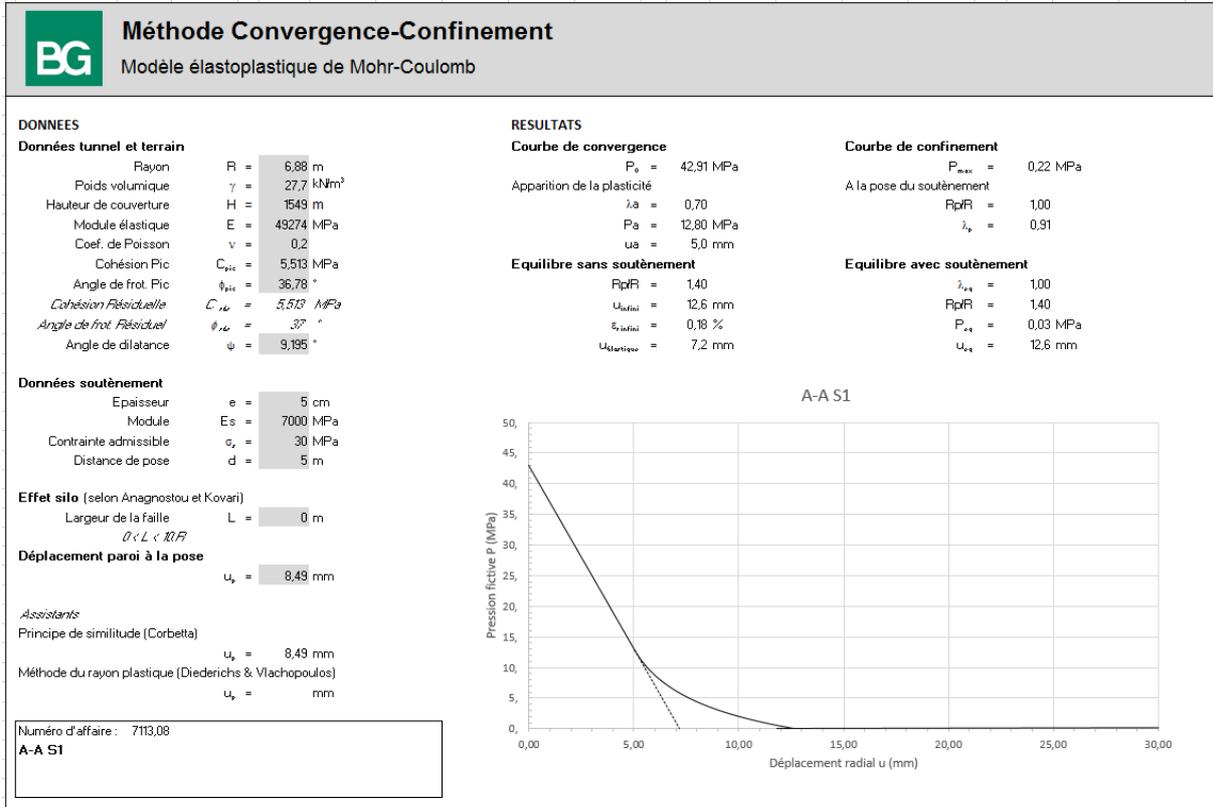


Figura 157: Curve caratteristiche sezione A-A, sostegno S1

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

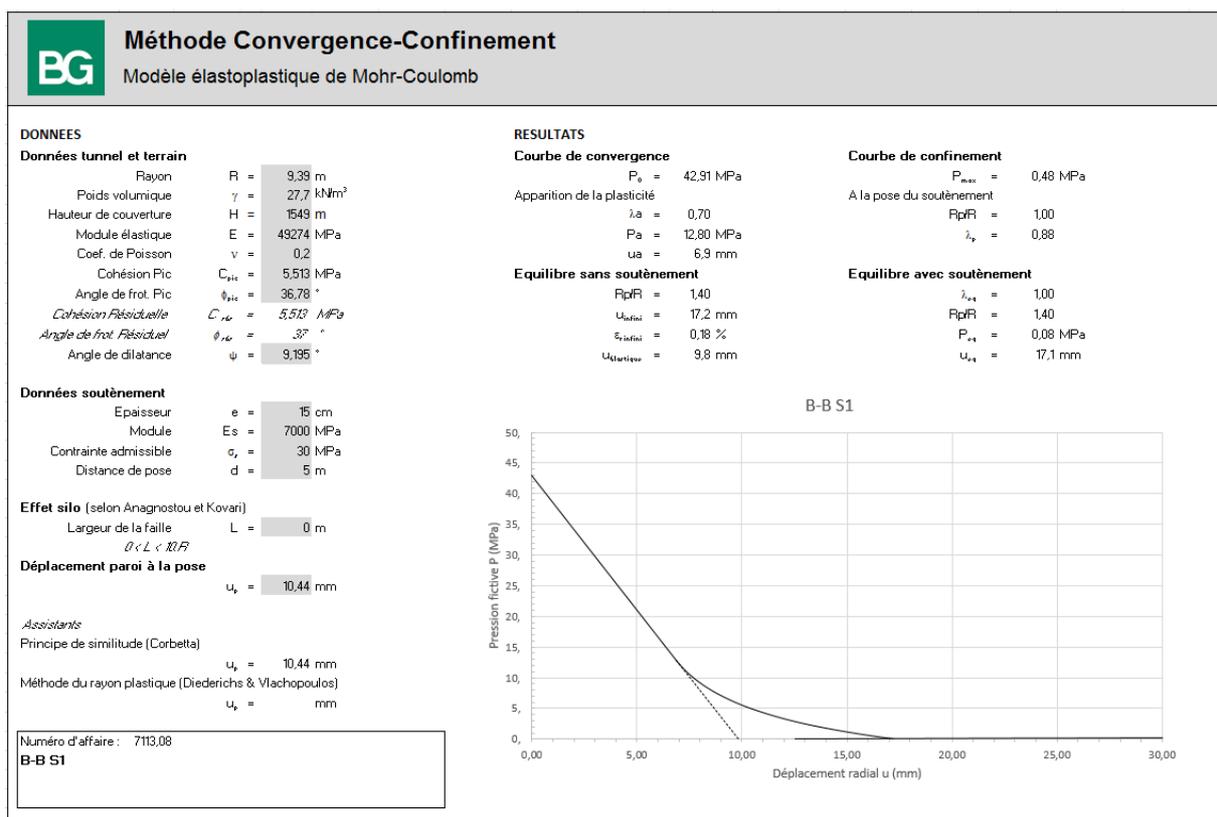


Figura 158: Curve caratteristiche sezione B-B, sostegno S1

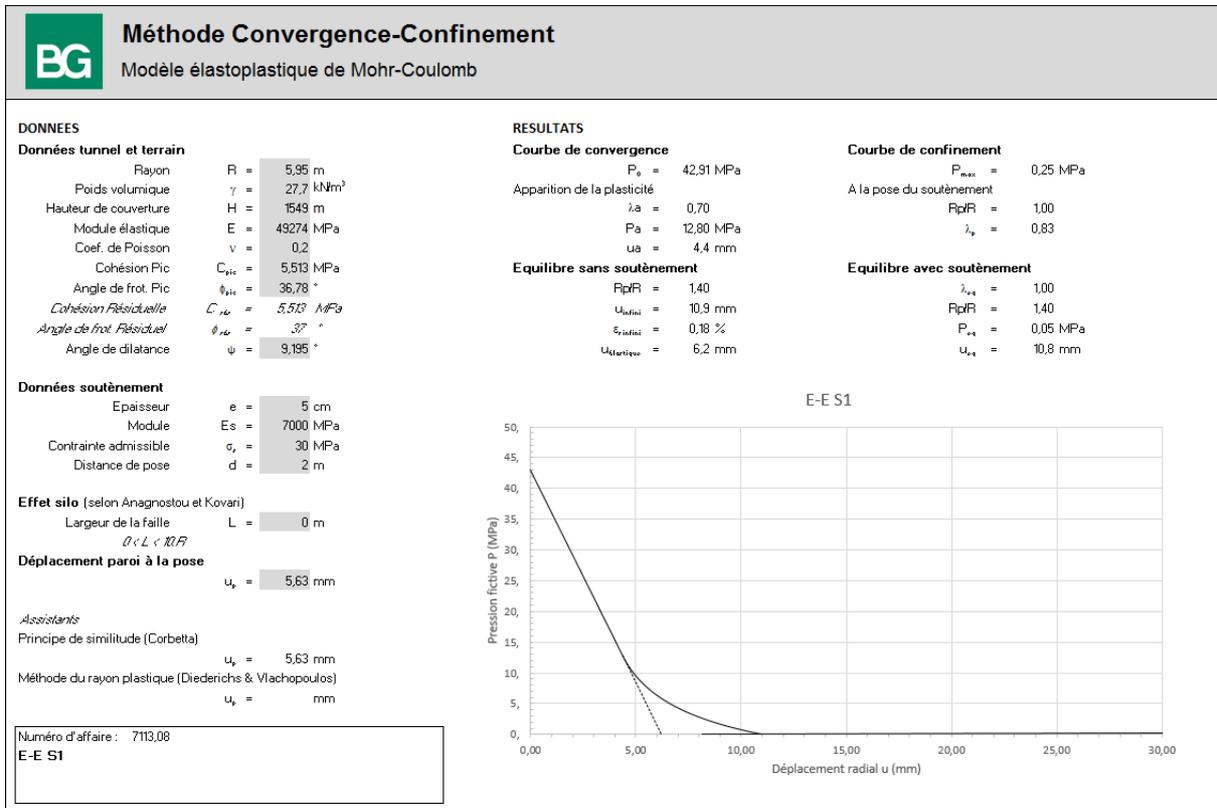


Figura 159: Curve caratteristiche sezione E-E, sostegno S1

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

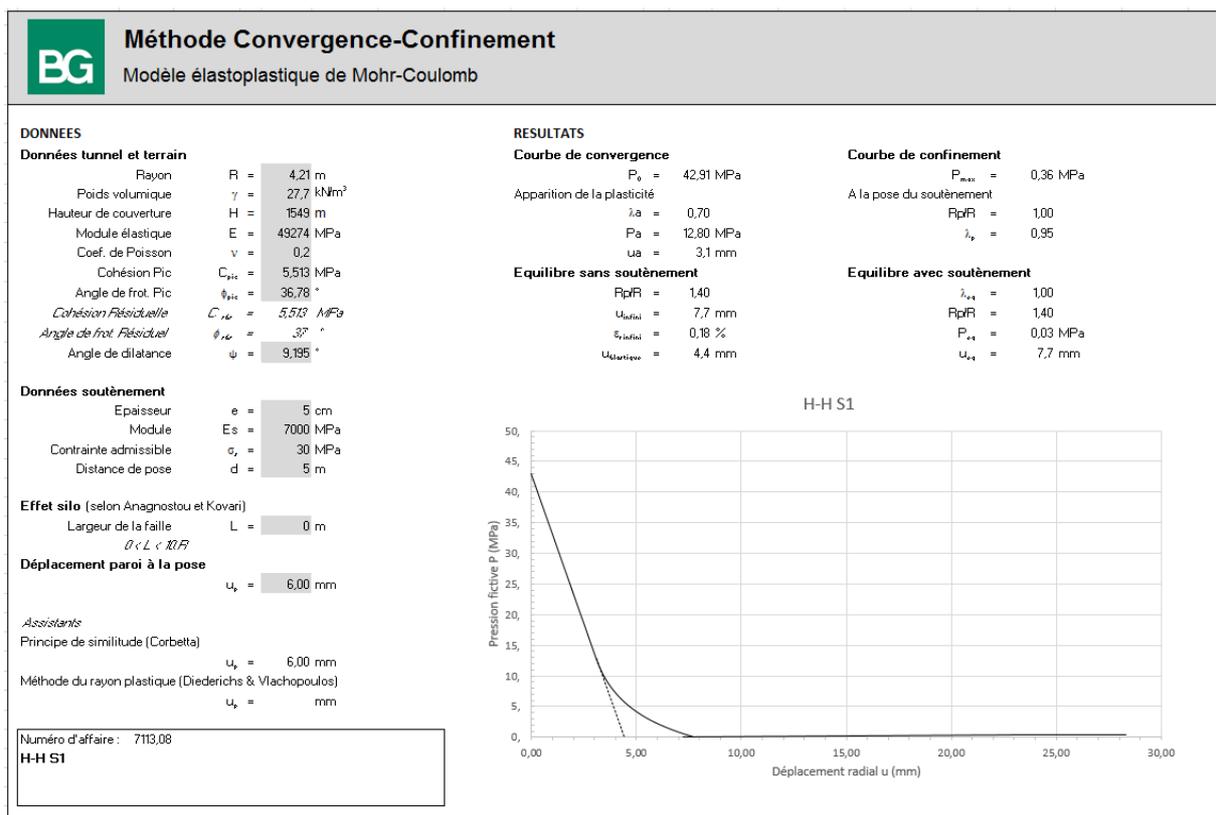


Figura 160: Curve caratteristiche sezione H-H, sostegno S1

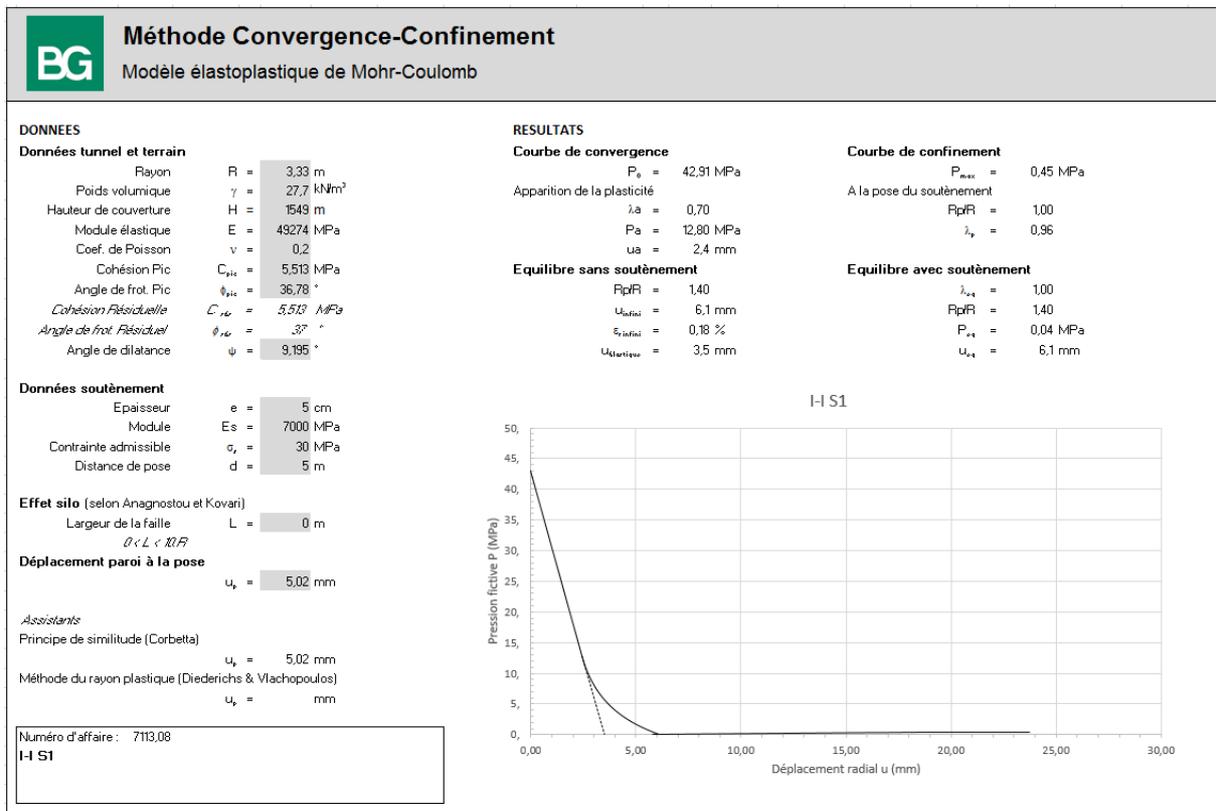


Figura 161: Curve caratteristiche sezione I-I, sostegno S1

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

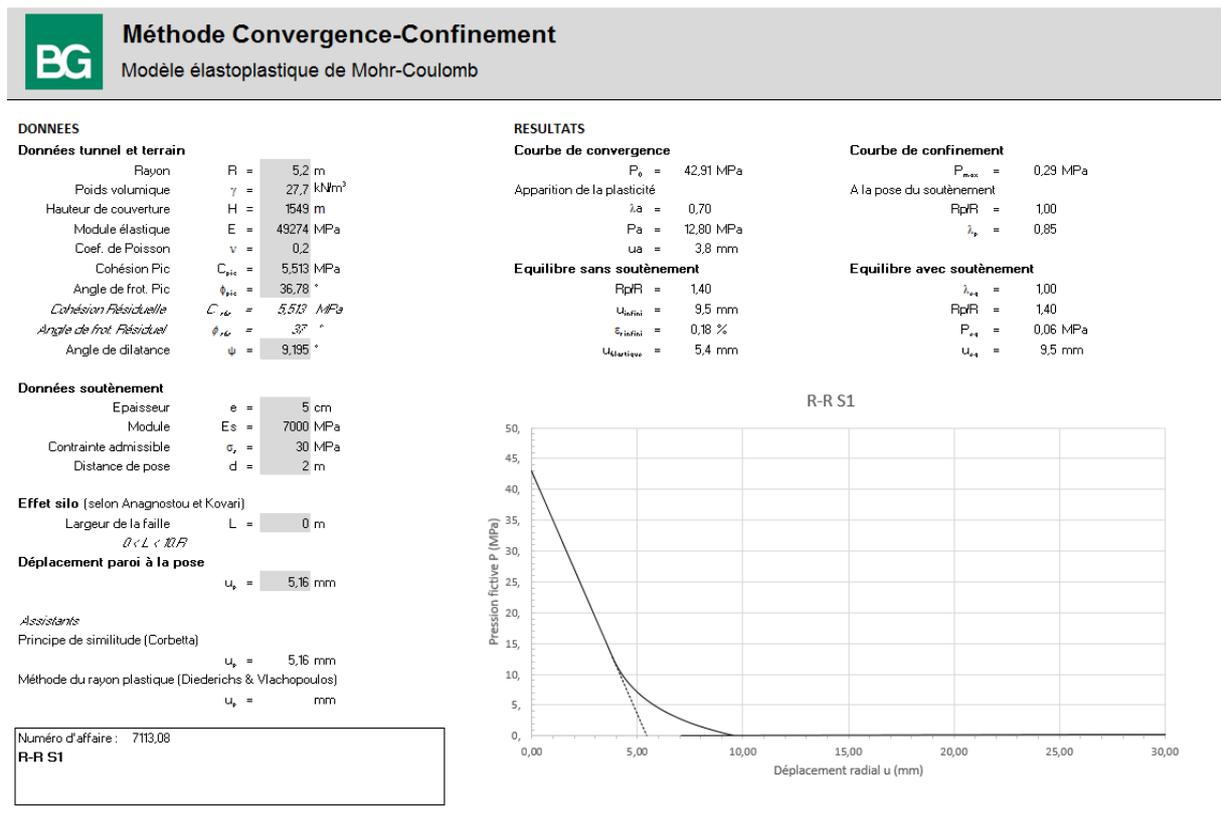


Figura 162: Curve caratteristiche sezione R-R, sostegno S1

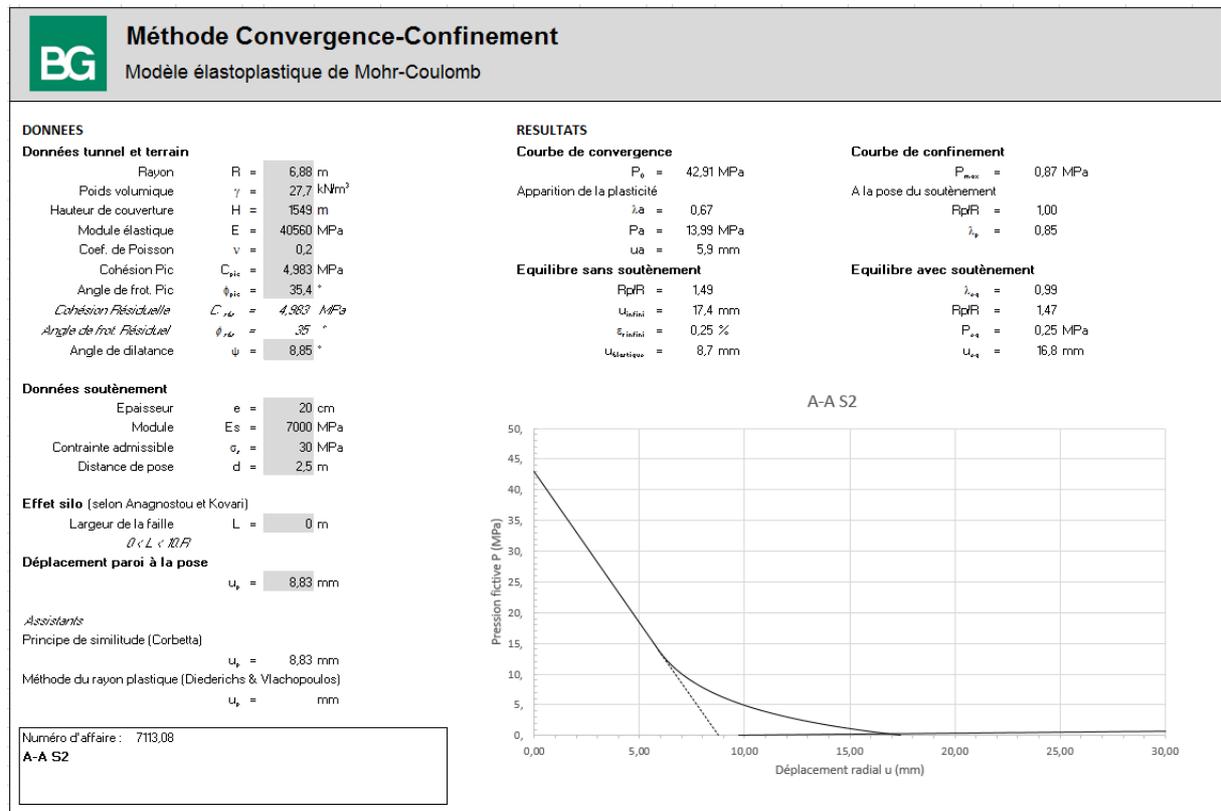


Figura 163: Curve caratteristiche sezione A-A, sostegno S2

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

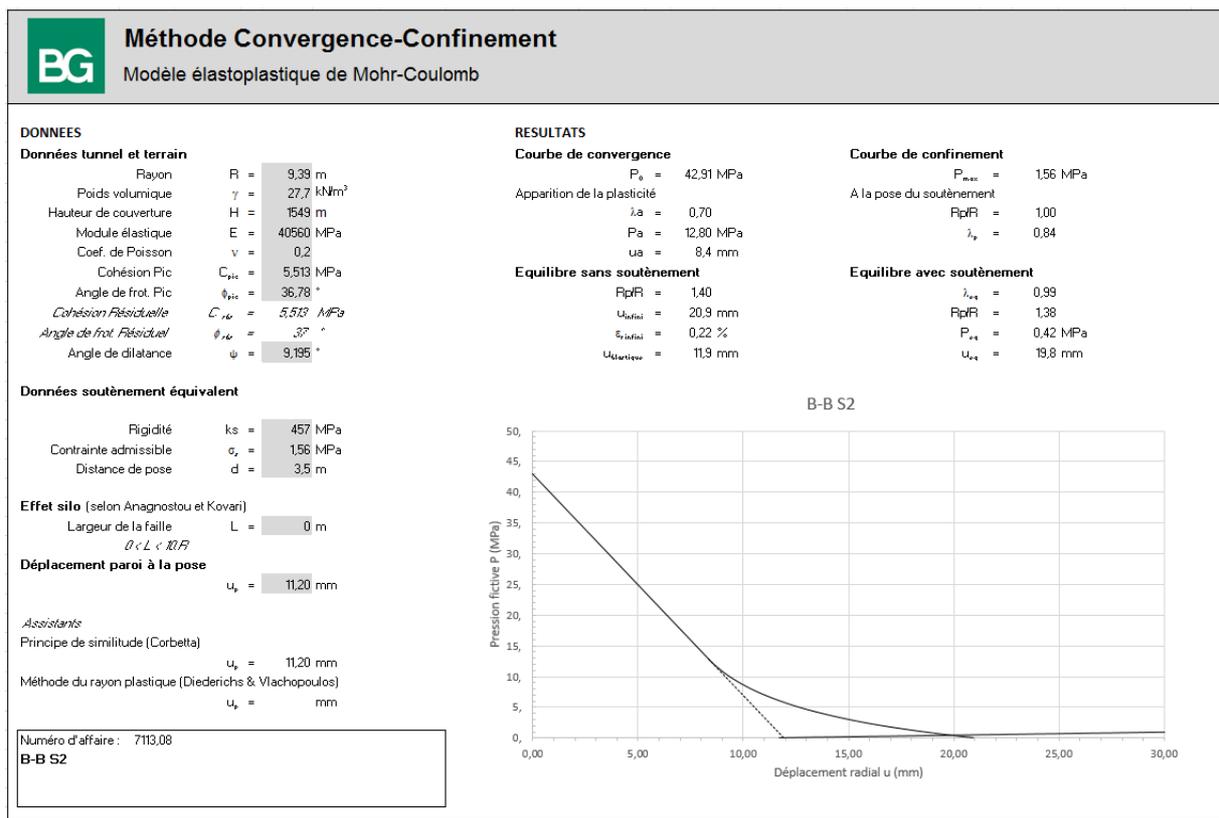


Figura 164: Curve caratteristiche sezione B-B, sostegno S2

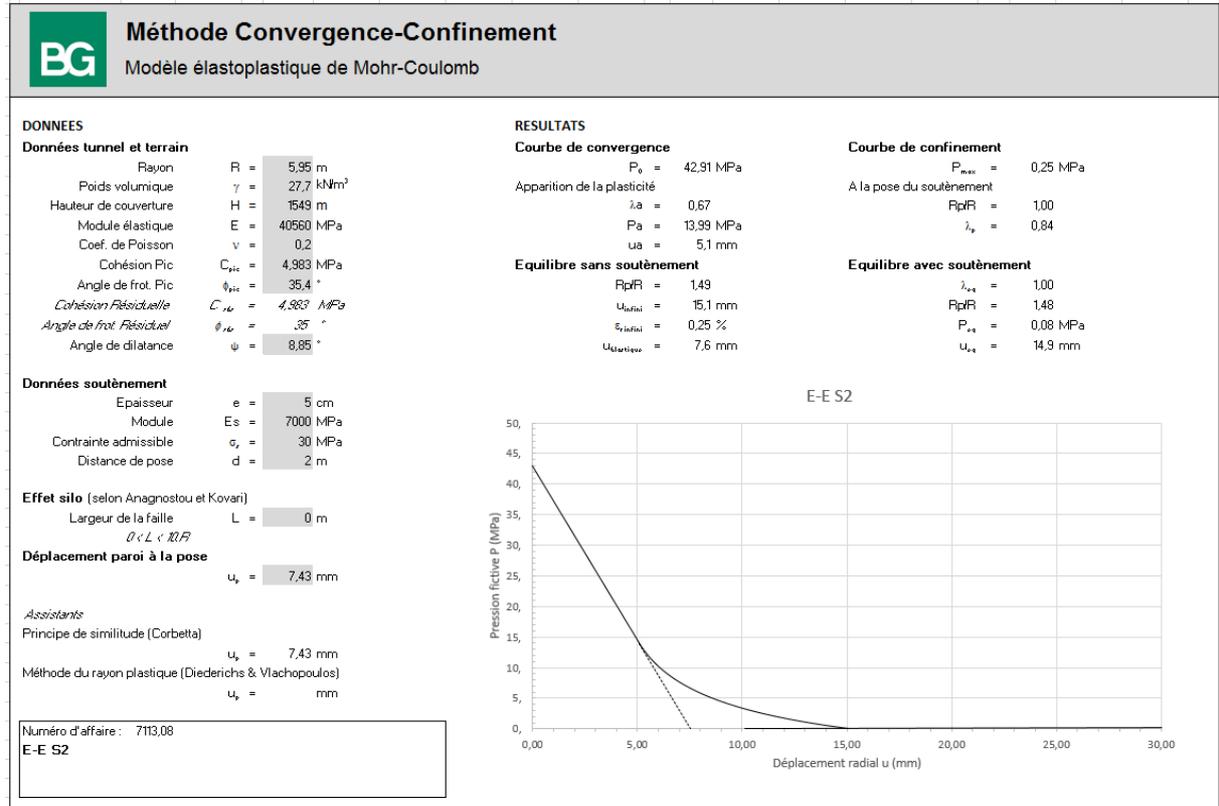


Figura 165: Curve caratteristiche sezione E-E, sostegno S2

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

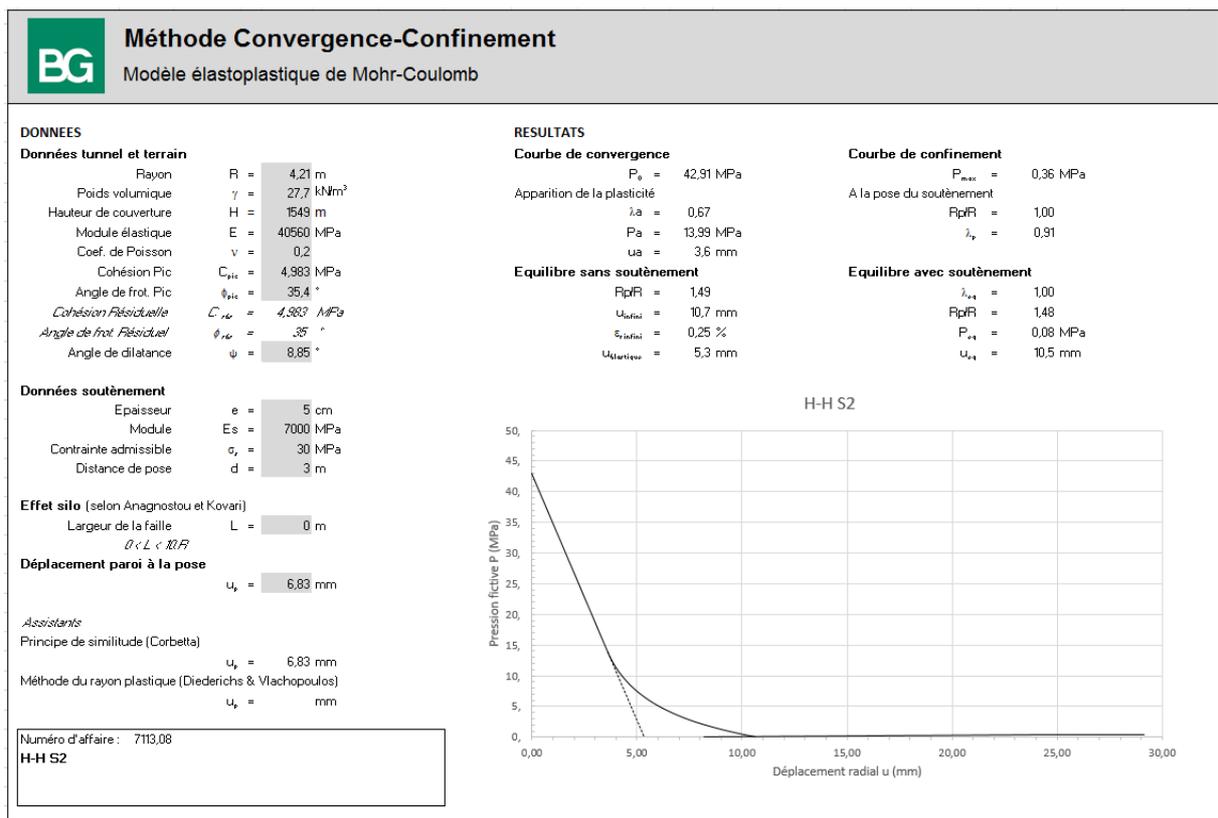


Figura 166: Curve caratteristiche sezione H-H, sostegno S2

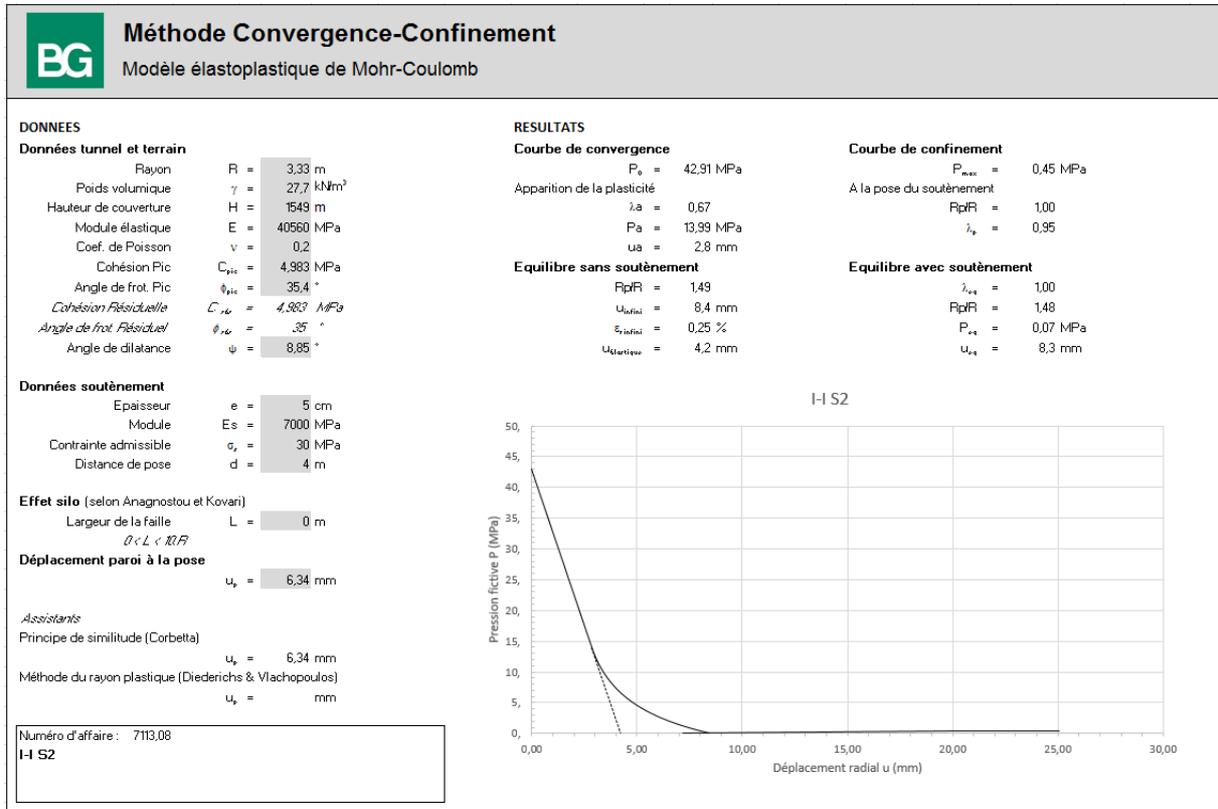


Figura 167: Curve caratteristiche sezione I-I, sostegno S2

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

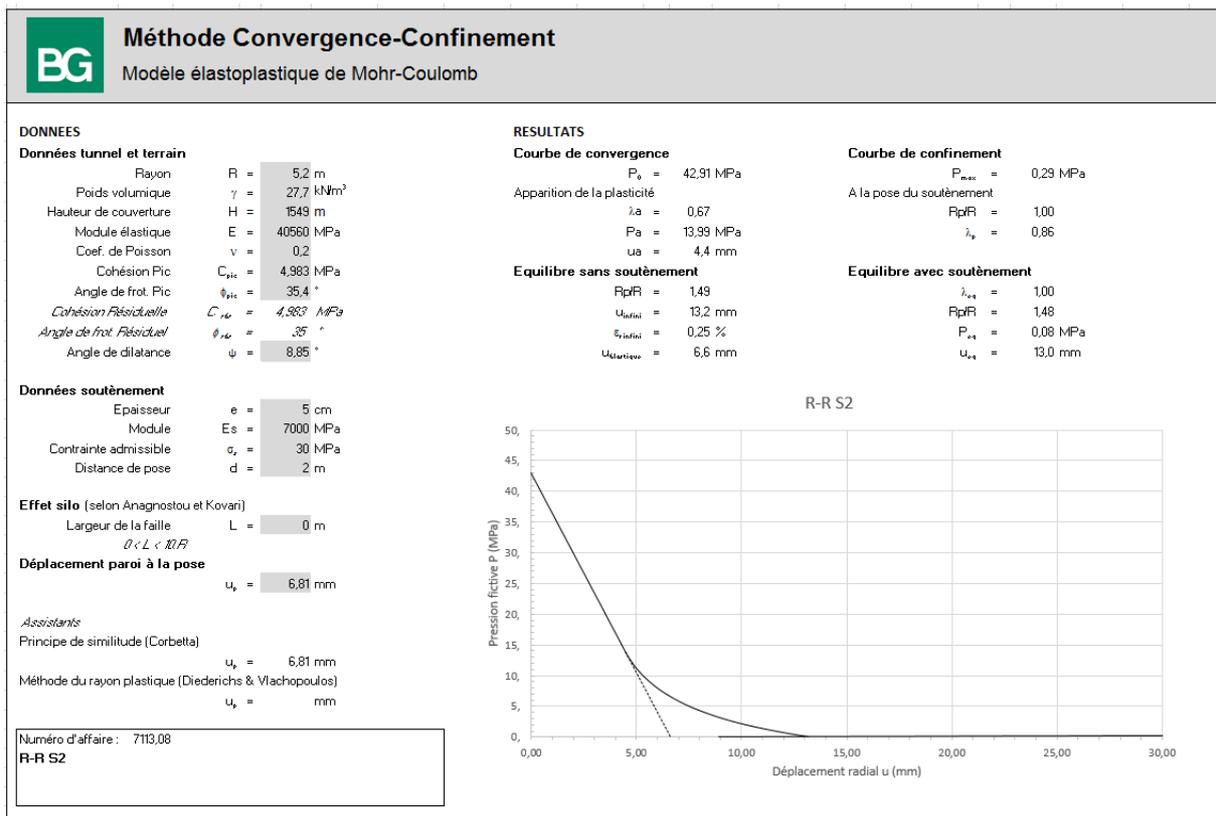


Figura 168: Curve caratteristiche sezione R-R, sostegno S2

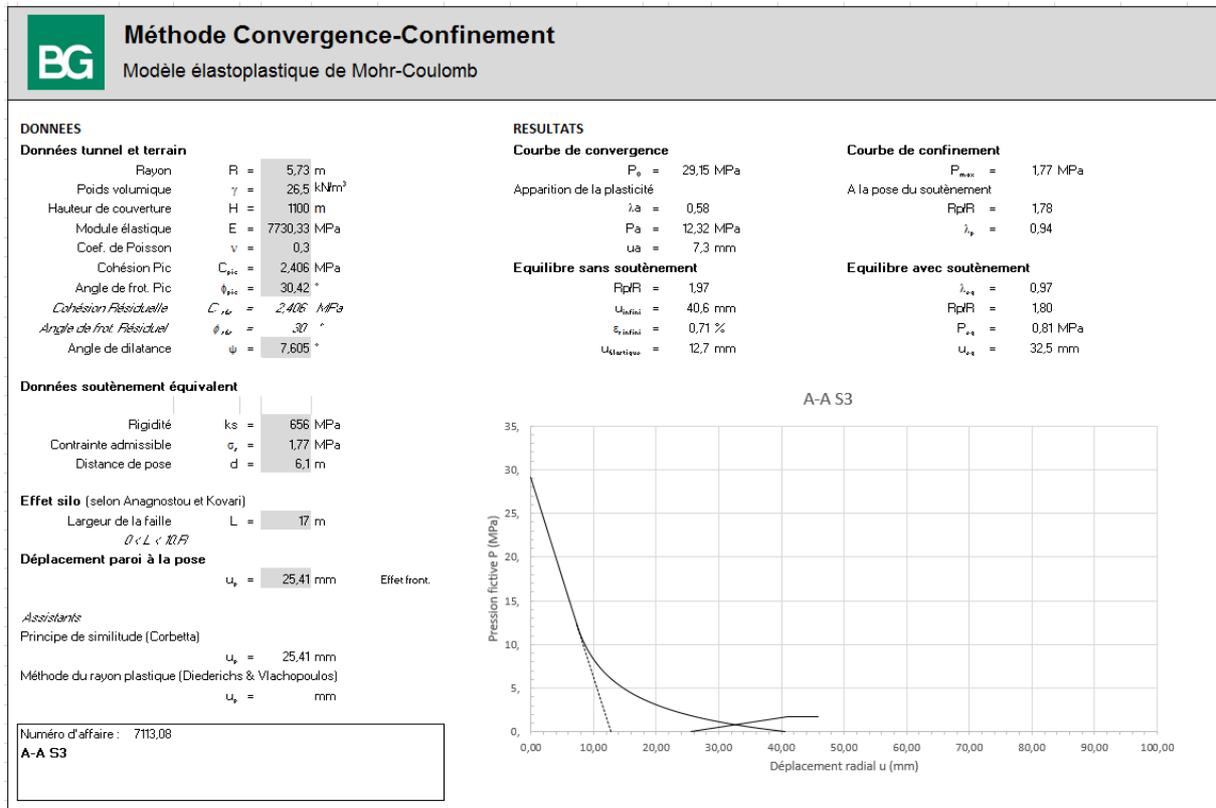


Figura 169: Curve caratteristiche sezione A-A, sostegno S3

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

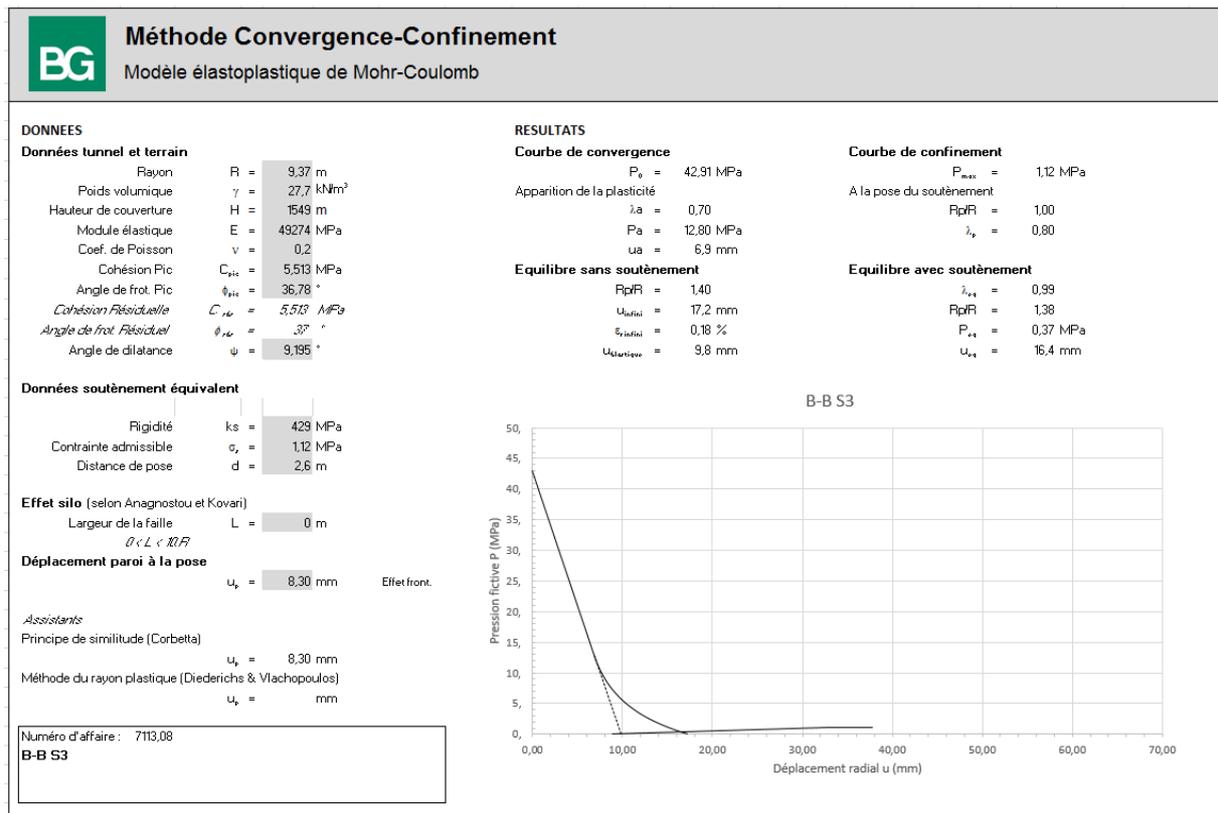


Figura 170: Curve caratteristiche sezione B-B, sostegno S3

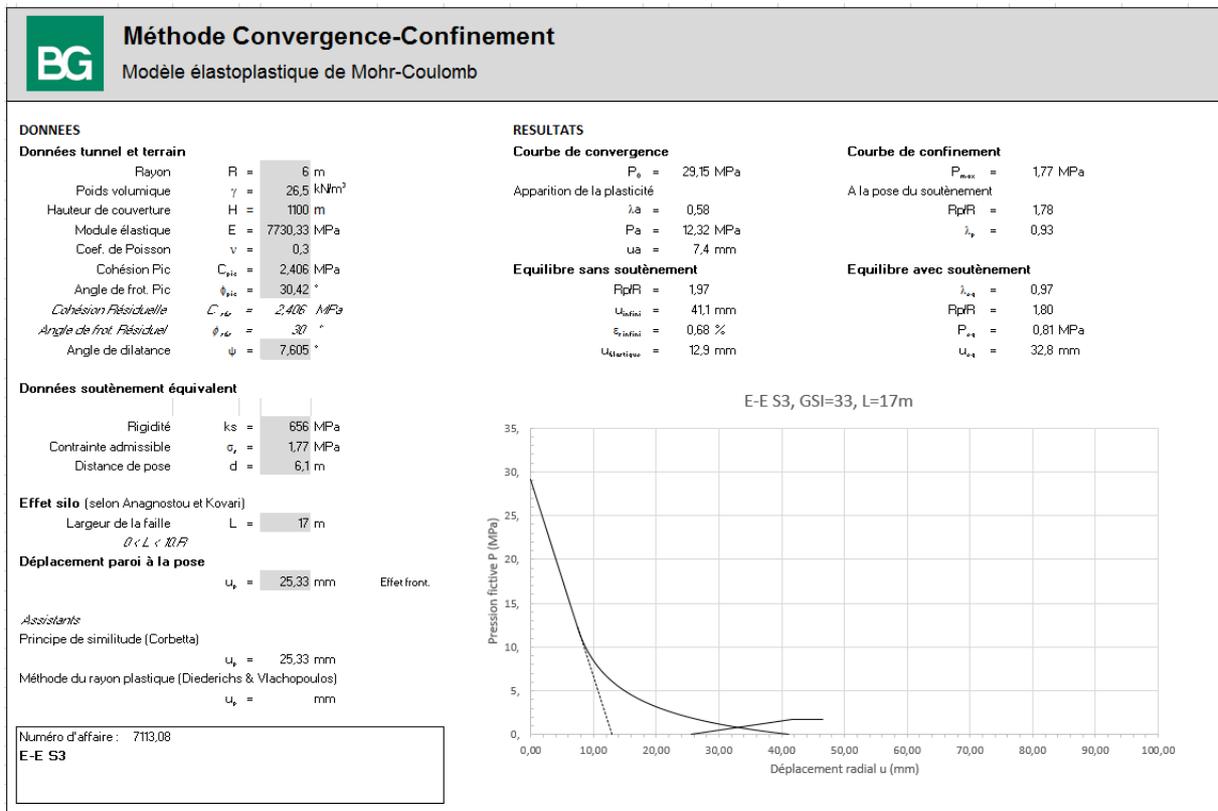


Figura 171: Curve caratteristiche sezione E-E, sostegno S3

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

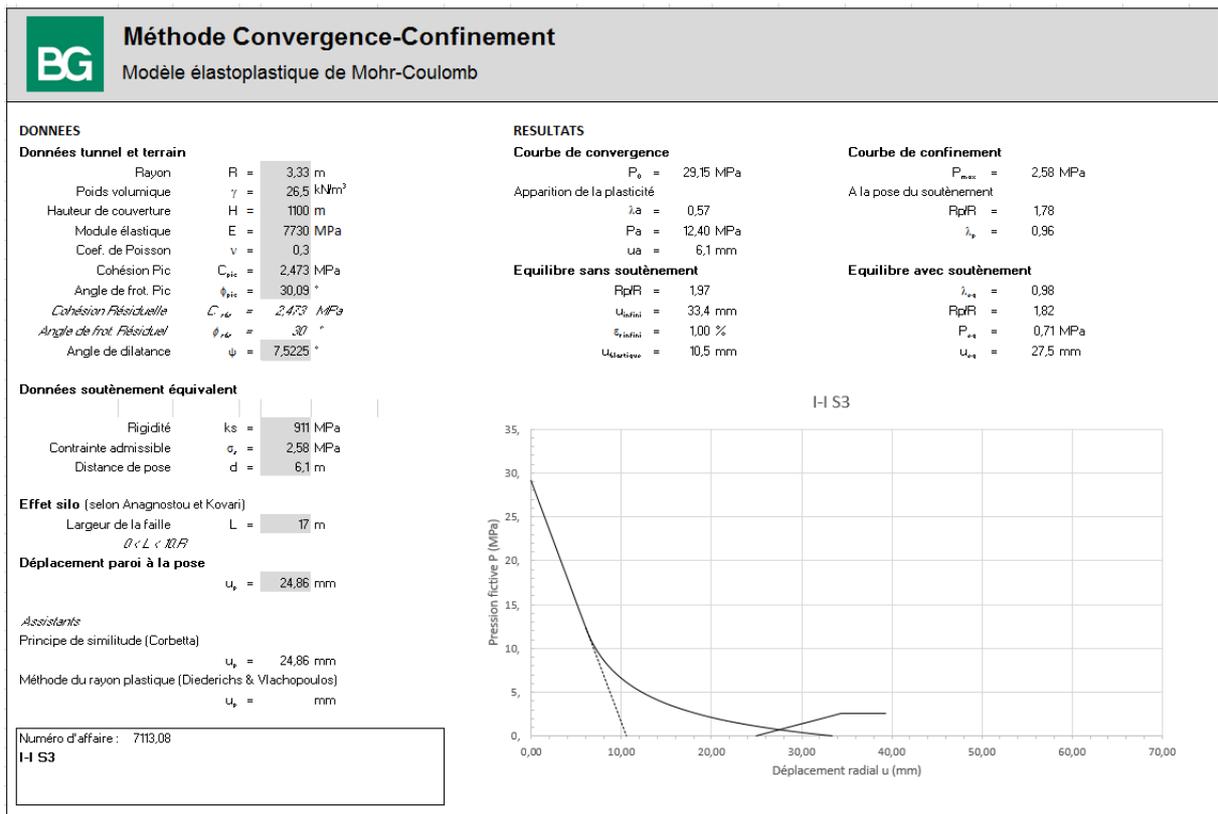


Figura 172: Curve caratteristiche sezione I-I, sostegno S3

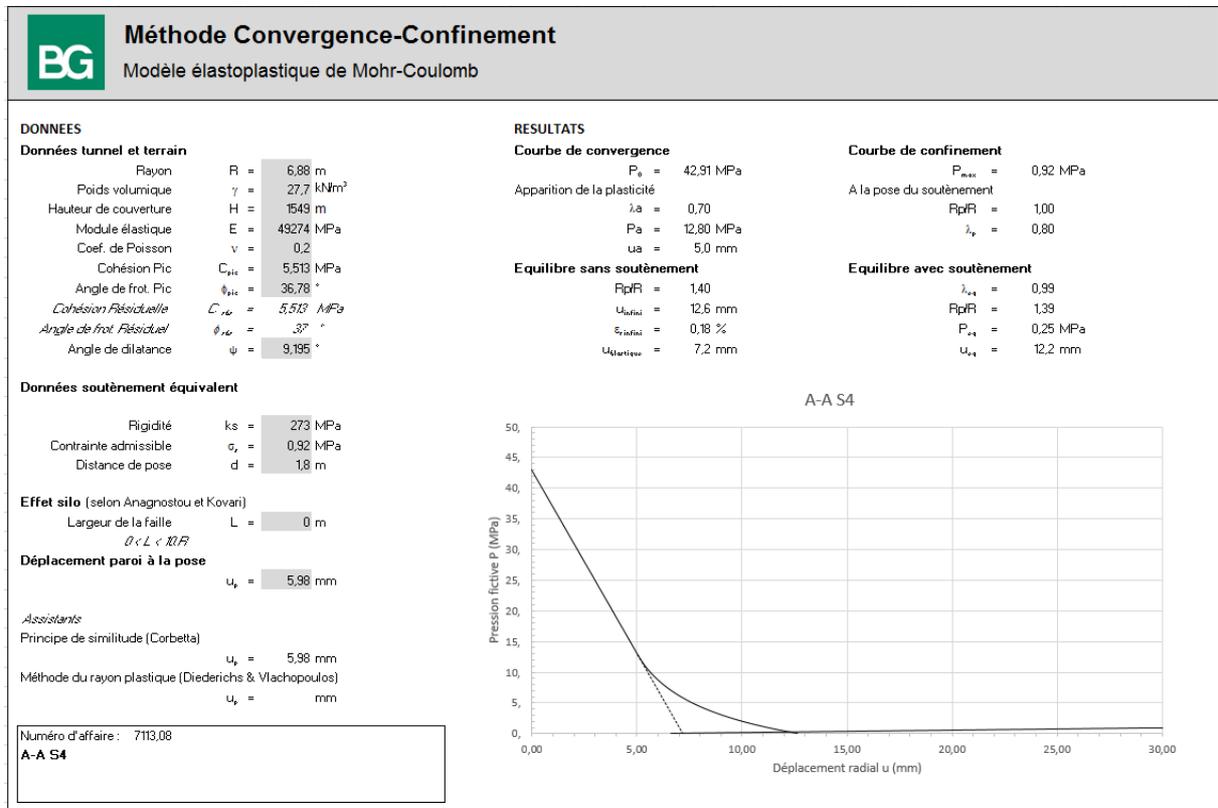


Figura 173: Curve caratteristiche sezione A-A, sostegno S4

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

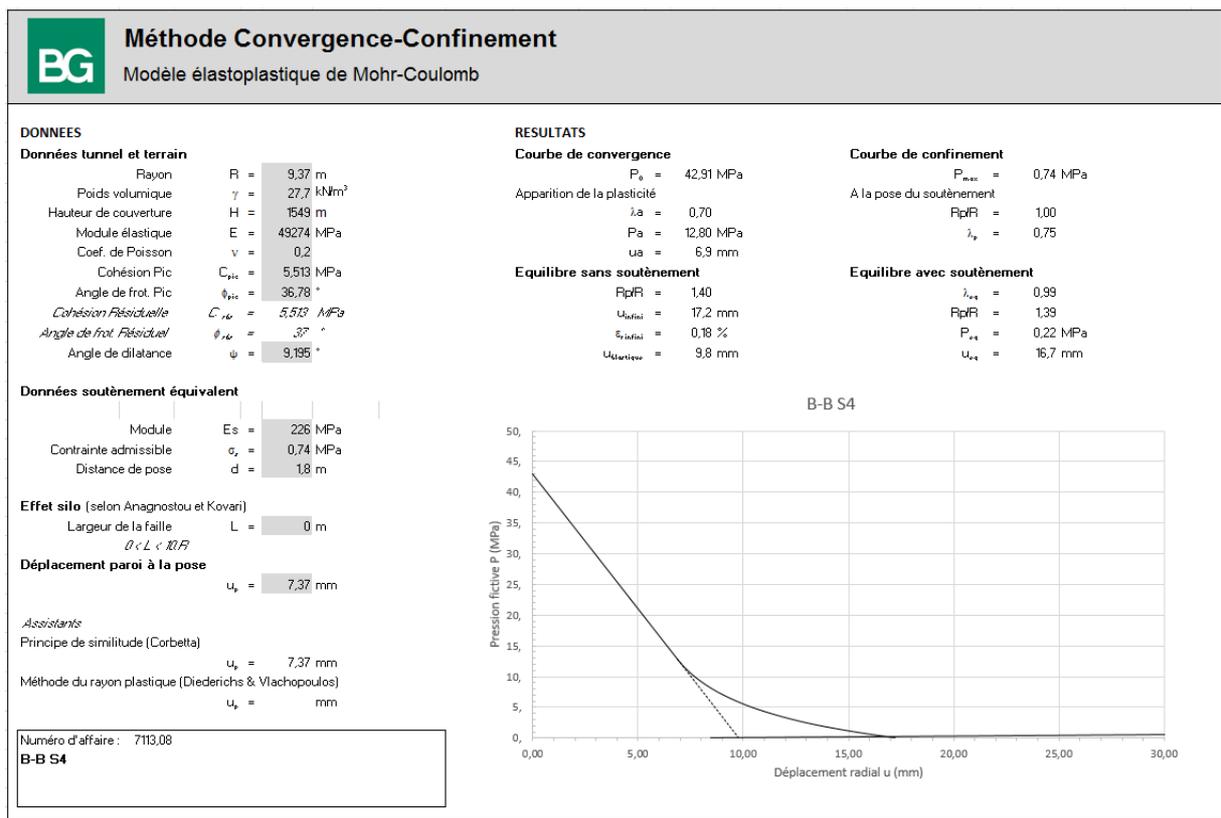


Figura 174: Curve caratteristiche sezione B-B, sostegno S4

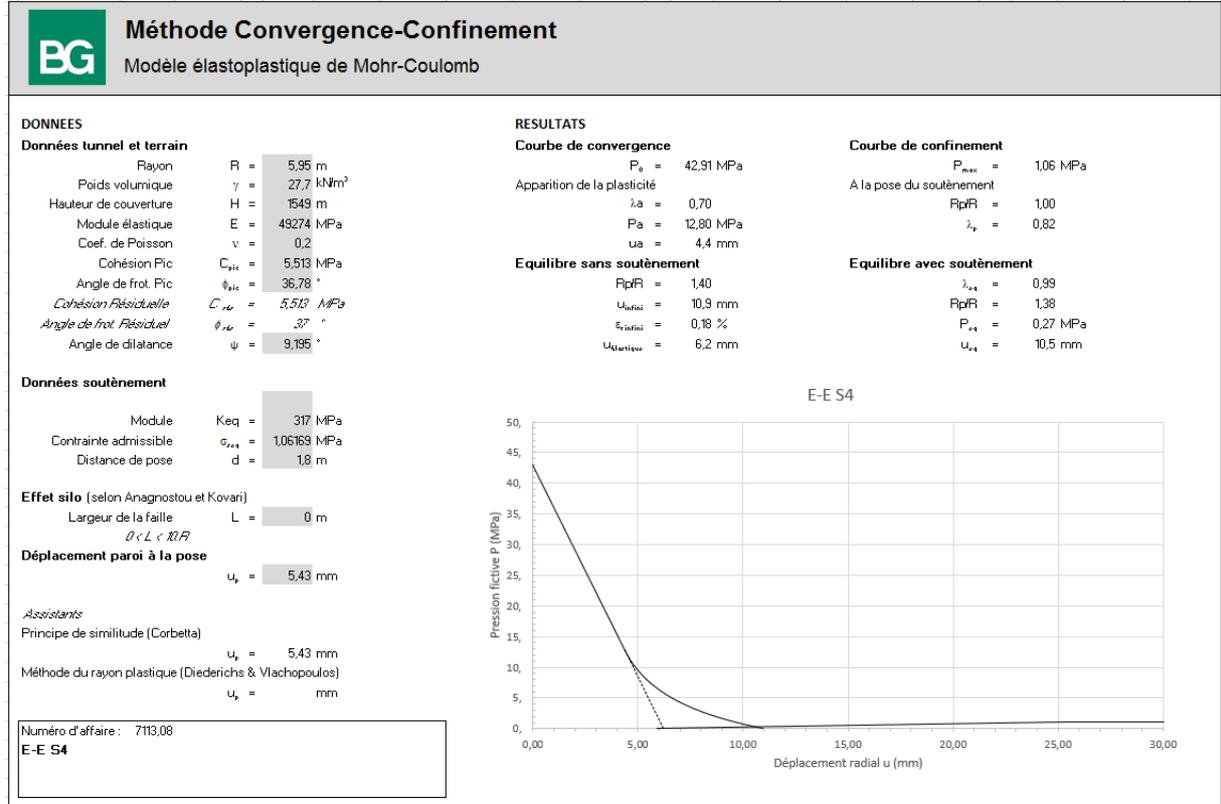


Figura 175: Curve caratteristiche sezione E-E, sostegno S4

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

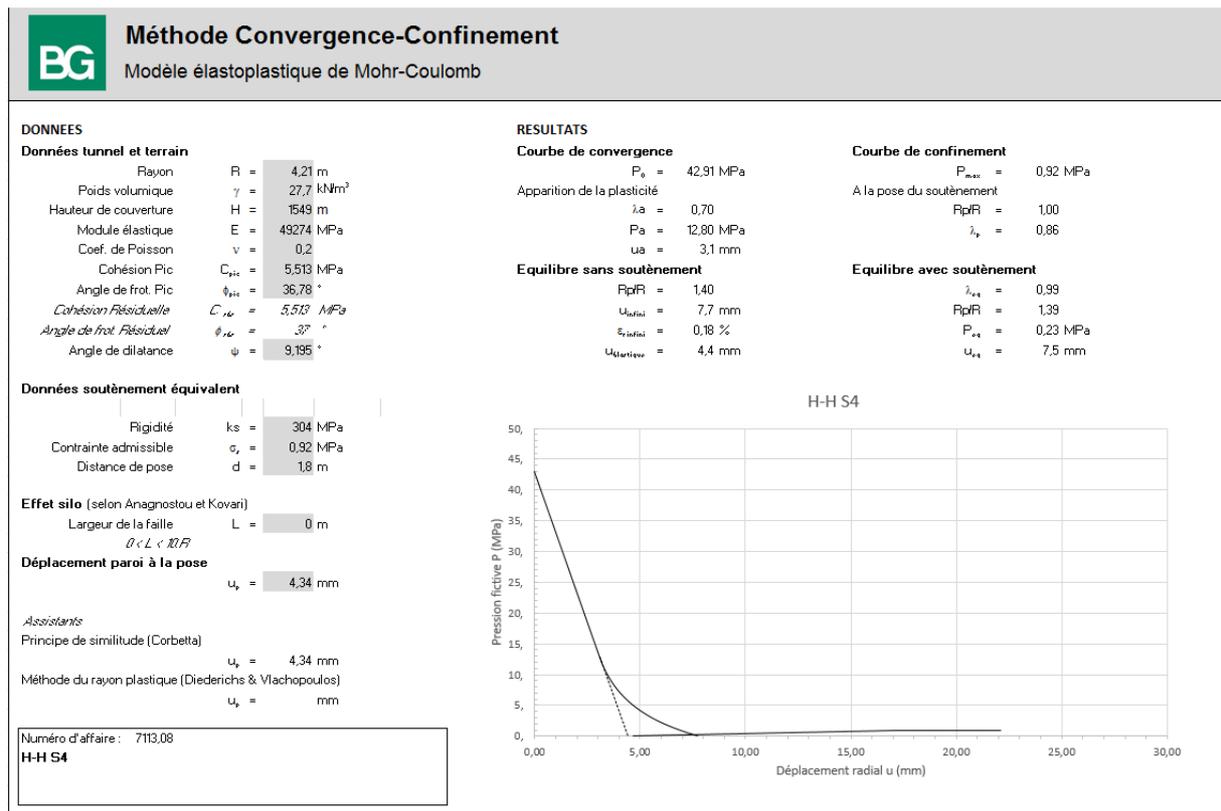


Figura 176: Curve caratteristiche sezione H-H, sostegno S4

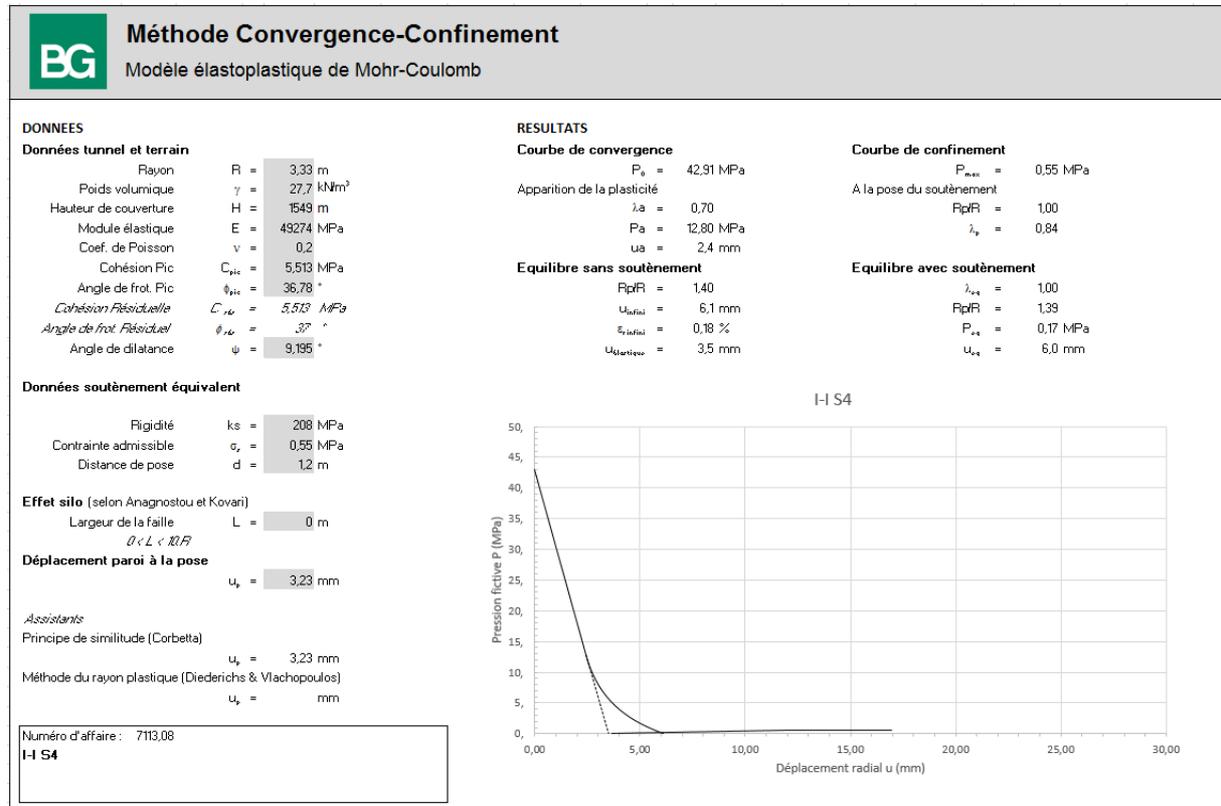


Figura 177: Curve caratteristiche sezione I-I, sostegno S4

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

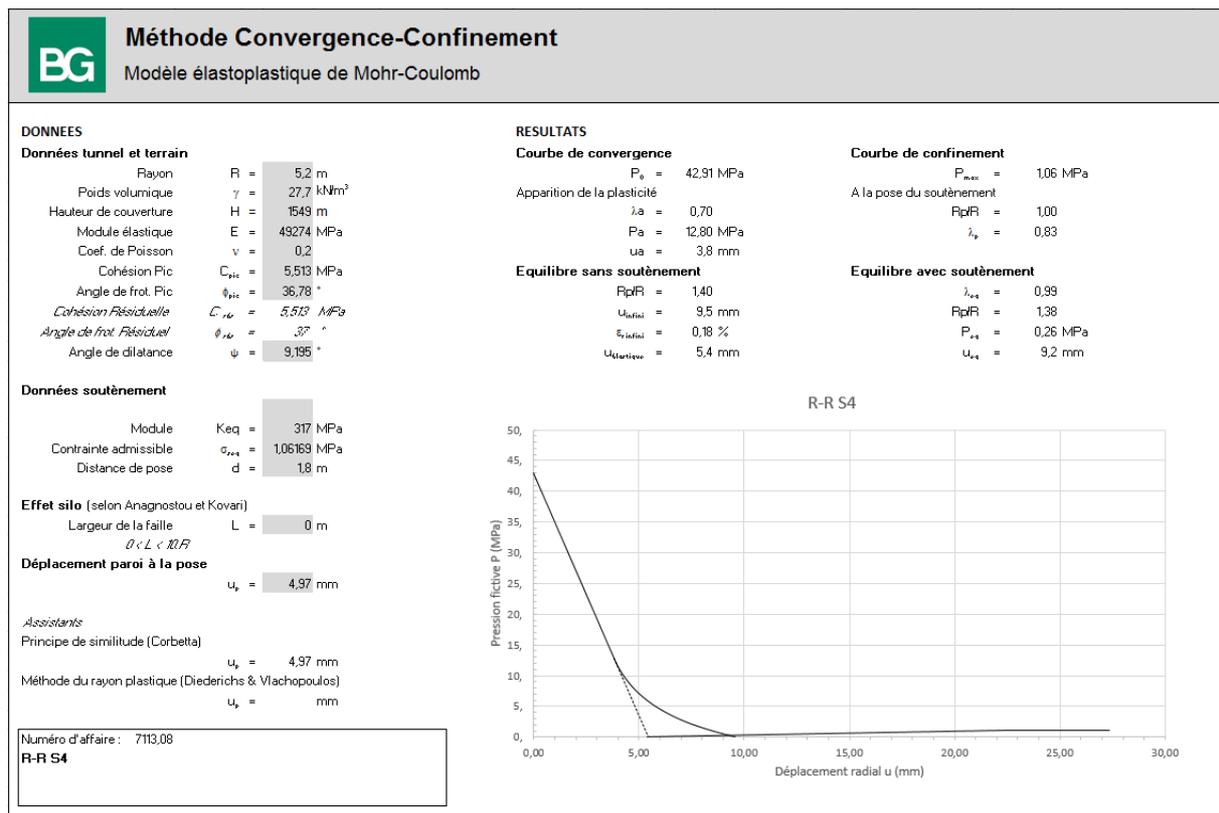


Figura 178: Curve caratteristiche sezione R-R, sostegno S4

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

Allegato 2: Curve caratteristiche GSI equivalente

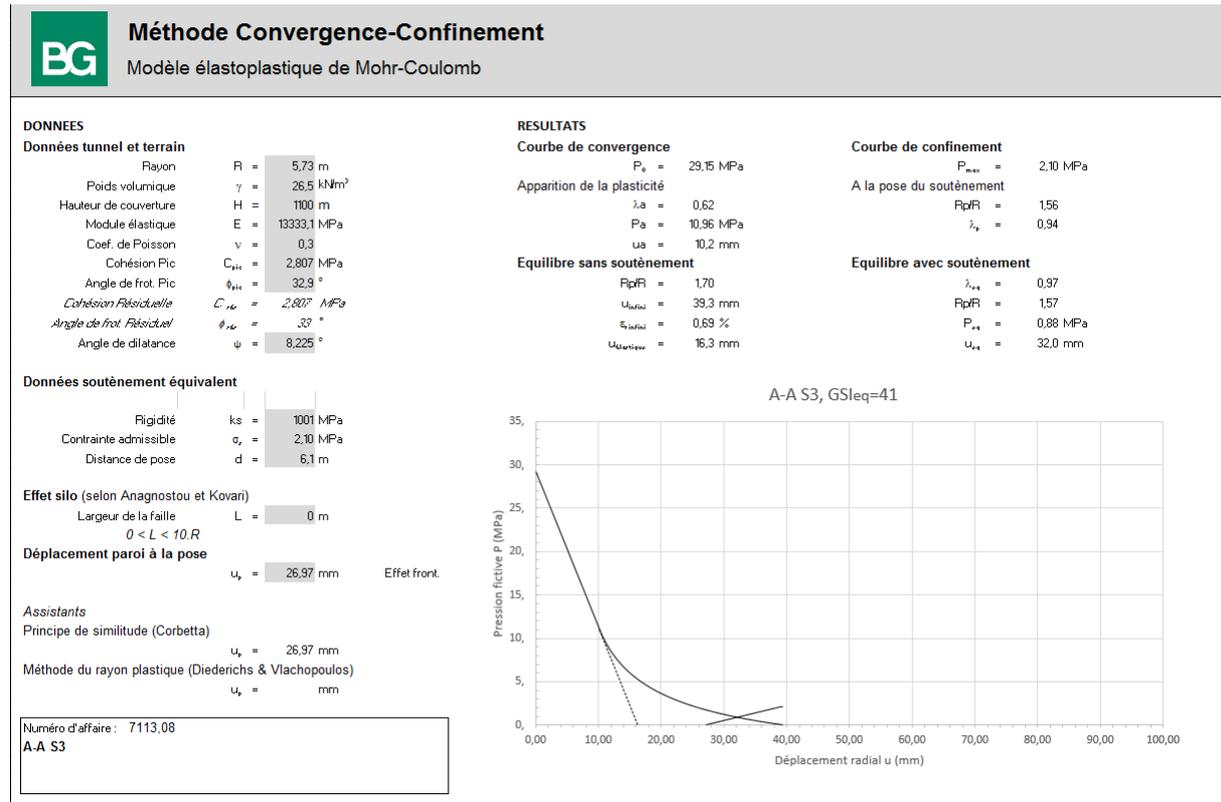


Figura 179: Curve caratteristiche sezione A-A, sostegno S3

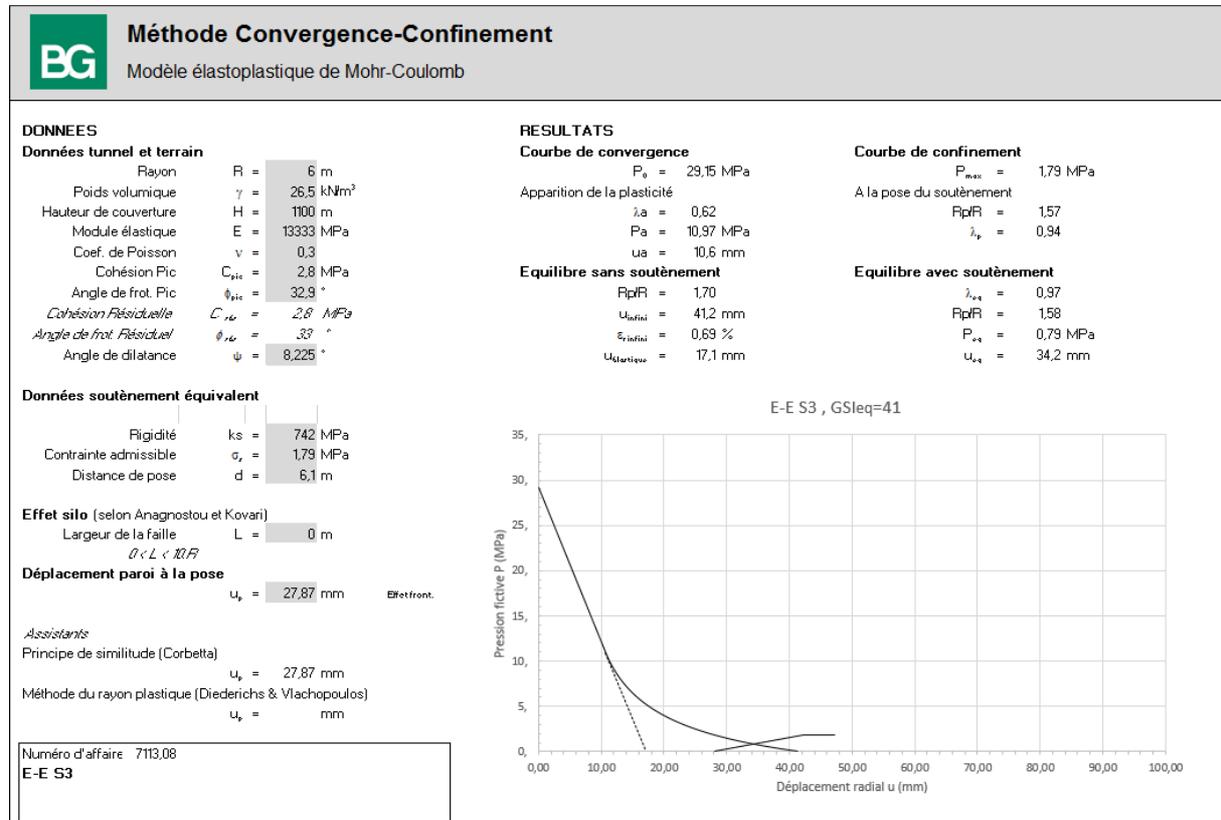


Figura 180: Curve caratteristiche sezione E-E, sostegno S3

Rapport technique et de calcul des soutènements / Relazione tecnica e di calcolo dei sostegni

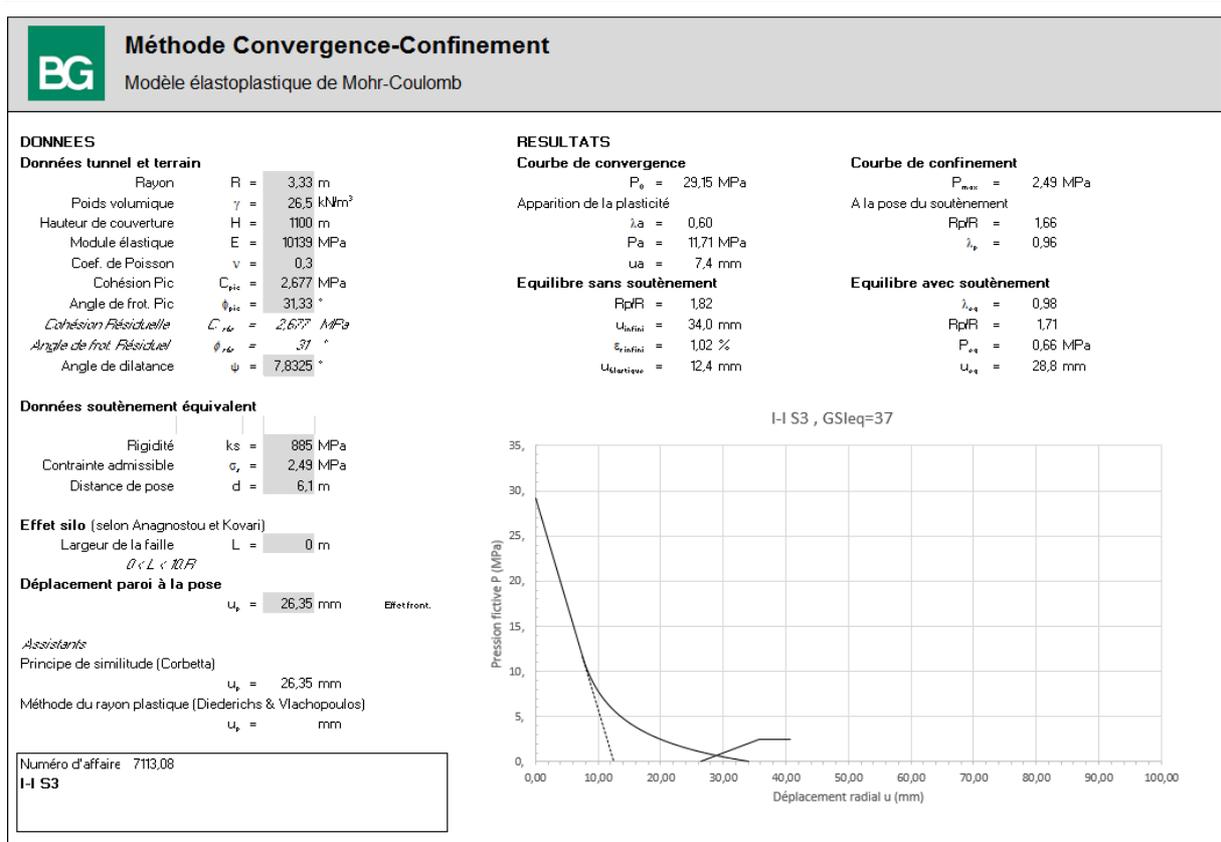
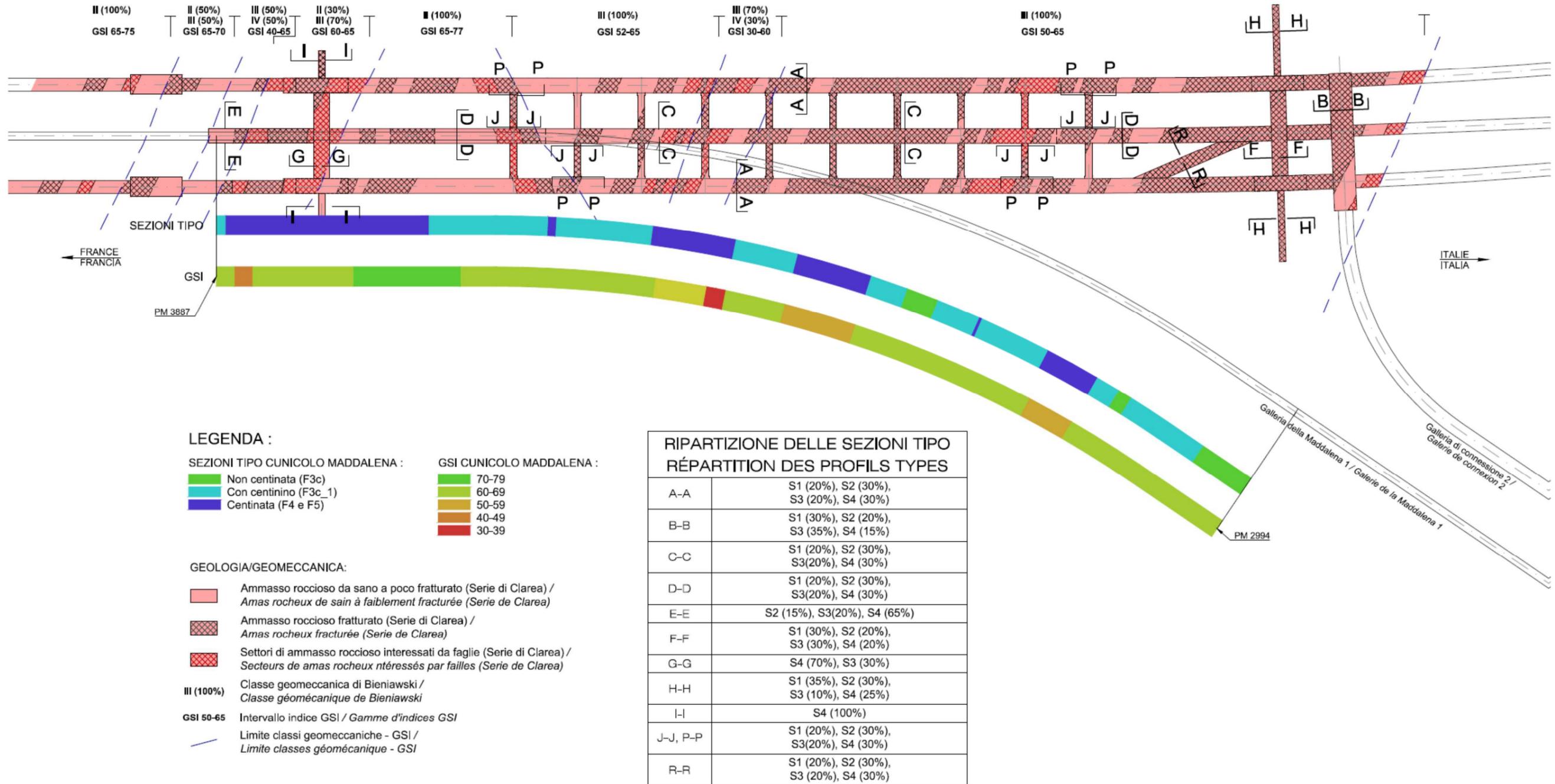


Figura 181: Curve caratteristiche sezione I-I, sostegno S3

Allegato 3: Distribuzione delle sezioni tipo nell'area di sicurezza in fz. della geomeccanica e del ritorno di esperienza del cunicolo della Maddalena



Allegato 4: estratto della norma svizzera SIA 198 (2004)

8.1.8 Secteurs de travail

8.1.8.1 L'excavation et la mise en place du soutènement se perturbent mutuellement. Le type, l'importance et la zone de mise en place des moyens de soutènement influencent les cadences d'avancement, raison pour laquelle on fait la distinction entre les divers secteurs de travail à partir du front de taille.

Les secteurs de travail énumérés ci-après sont valables pour les méthodes d'avancement en rocher.

8.1.8.2 Les secteurs de travail en tunnel sont désignés comme suit:

L1: secteur du front de taille, ou secteur de la machine pour un avancement au tunnelier (TBM)

L2: secteur de l'avancement, ou secteur du train suiveur pour un avancement au tunnelier (TBM)

L3: secteur arrière; il s'étend jusqu'à 200 m derrière le train suiveur pour un avancement au tunnelier (TBM).

8.1.8.3 Le secteur de travail L1 est mesuré à partir du front de taille et les secteurs L2 et L3 se succèdent immédiatement derrière (figure 3).

Figure 3: Secteurs de travail pour un avancement en rocher



8.1.8.4 Les secteurs de travail seront fixés dans les documents de soumission. En l'absence d'autres dispositions, les valeurs indicatives données aux tableaux 5 et 12 sont réputées contractuelles.

Tableau 5: Secteurs de travail pour les tunnels excavés à l'explosif

Longueurs des secteurs de travail			
Largeur d'excavation ¹⁾	Secteur du front de taille L1	Secteur de l'avancement L2	Secteur arrière L3
3 m	2 m	15 m	150 m
6 m	4 m	20 m	200 m
12 m	5 m	25 m	250 m
15 m	5 m	35 m	300 m

¹⁾ largeur de la section excavée