

LIAISON LYON - TURIN / COLLEGAMENTO TORINO - LIONE

Partie commune franco-italienne
Section transfrontalière

Parte comune italo-francese
Sezione transfrontaliera

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

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

CUP C11J05000030001 – PROGETTO DEFINITIVO

GENIE CIVIL – OPERE CIVILI

TUNNEL DE BASE – TUNNEL DI BASE

**GALERIE DE LA MADDALENA – GALLERIA DELLA MADDALENA
GALERIE MADDALENA 1 – GENIE CIVIL – GALLERIA MADDALENA 1 – OPERE CIVILI**

NOTE DE CALCUL DES NICHES – RELAZIONE DI CALCOLO DELLE NICCHIE

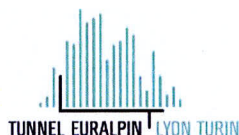
Indice	Date/ Data	Modifications / Modifiche	Etabli par / Concepito da	Vérifié par / Controllato da	Autorisé par / Autorizzato da
0	31/01/2013	Première diffusion / Prima emissione	L. PEANO (BG) E. GARIN (BG)	M. RUSSO C. OGNIBENE	L. CHANTRON M. PANTALEO
A	08/02/2013	Révision suite aux commentaires LTF / Revisione a seguito commenti LTF	L. PEANO (BG) E. GARIN (BG)	M. RUSSO C. OGNIBENE	L. CHANTRON M. PANTALEO
B	14/10/2016	Première émission PRV – intégration du retour d'expérience de la galerie de reconnaissance et rajout de la galerie de connexion 1 / Prima revisione PRV – integrazione del ritorno di esperienza della galleria geognostica e aggiunta galleria di connessione 1	M. JANUTOLO (BG) C. SALOT (BG) G.QUESTI (BG)	F. MAGNORFI C. OGNIBENE	L. CHANTRON A. MORDASINI
C	27/01/2017	Révision suite aux commentaires TELT / Revisione a seguito commenti TELT	M. JANUTOLO (BG) C. SALOT (BG) G.QUESTI (BG)	F. MAGNORFI C. OGNIBENE	L. CHANTRON A. MORDASINI
D	14/03/2017	Passage au statut AP / Passaggio allo stato AP	M. JANUTOLO (BG) C. SALOT (BG) G.QUESTI (BG)	F. MAGNORFI C. OGNIBENE	L. CHANTRON A. MORDASINI

CODE DOC	P	R	V	C	3	A	T	S	3	3	8	3	5	D
	Phase / Fase			Sigle étude / Sigla			Émetteur / Emittente			Numero			Indice	

A	P	N	O	T
Statut / Stato		Type / Tipo		

ADRESSE GED INDIRIZZO GED	C3A	//	//	26	48	20	10	03
------------------------------	------------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------	-----------

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	7
1.1 Generalità.....	7
1.2 Modifiche rispetto al Progetto Definitivo Approvato.....	7
2. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	7
2.1 Quadro normativo di riferimento.....	7
2.2 Documenti di progetto	8
3. QUADRO GEOLOGICO, IDROGEOLOGICO E GEOMECCANICO	8
3.1 Galleria Maddalena 1	8
3.2 Galleria di connessione 1	8
4. SEZIONI TIPO	8
4.1 Galleria Maddalena 1	8
4.2 Galleria di connessione 1	11
5. CALCOLO DELLE SOLLECITAZIONI SULLA STRUTTURA	11
5.1 Sezioni di calcolo.....	11
5.2 Parametri dell'ammasso roccioso	13
5.2.1 Sezione tipo S1-sezione allargata	13
5.2.2 Sezione tipo S2 -sezione allargata	14
5.2.3 Sezione tipo S2- ramo di inversione (piena sezione).....	14
5.2.4 Nicchia NS9 – sezione tipo S1.....	15
5.2.5 Nicchia NS9 - sezione tipo S2	15
5.3 Stato tensionale.....	16
5.4 Calcolo dei carichi su sostegni e rivestimenti.....	16
6. ANALISI CON IL METODO DELLE LINEE CARATTERISTICHE	17
6.1 Condizioni intrinseche	17
6.1.1 Maddalena 1, GSI=65	18
6.1.2 Maddalena 1, GSI=50	18
6.1.3 Nicchia NS9, GSI=60	20
6.1.4 Nicchia NS9, GSI=65	21
6.2 Messa in opera dei sostegni	21
6.2.1 Maddalena 1, sezione tipo S1, GSI=65.....	22
6.2.2 Maddalena 1, sezione tipo S2, GSI=50.....	23
6.2.3 Maddalena 1, sezione tipo S2, GSI=65 multilaminare	23
6.2.4 Connessione 1, nicchia NS9, sezione tipo S1, GSI=60	24
6.2.5 Connessione 1, nicchia NS9, sezione tipo S2, GSI=65	25
7. ANALISI CON IL MODELLO AD ELEMENTI FINITI	26
7.1 Descrizione del modello numerico	26
8. VERIFICA STRUTTURALE DEI SOSTEGNI	28
8.1 Materiali e resistenze di calcolo	28
8.2 Verifica dell'interazione M-N e verifica dei bulloni.....	29
8.2.1 Maddalena 1, sezione tipo S1, GSI=65.....	29
8.2.2 Maddalena 1, sezione tipo S2, GSI=50.....	34

8.2.3 Maddalena 1, sezione tipo S2, ramo di inversione, GSI=65, modello multilaminare	39
8.2.4 Connessione 1, nicchia NS9, sezione tipo S1, GSI=60	45
8.2.5 Connessione 1, nicchia NS9, sezione tipo S2, GSI=65, modello multilaminare	49
9. VERIFICA STRUTTURALE DEI RIVESTIMENTI.....	55
9.1 Materiali e resistenze di calcolo	55
9.2 Procedura di verifica.....	55
9.3 Verifiche	55
9.3.1 Maddalena 1, sezione tipo S2, GSI=50.....	55
9.3.2 Maddalena 1, sezione tipo S2, modello multilaminare.....	59
9.3.3 Connessione 1, nicchia NS9, GSI=65, modello multilaminare	62
10. CONCLUSIONI.....	65

LISTE DES FIGURES / INDICE DELLE FIGURE

Figura 1: Curva caratteristica comportamento intrinseco del ramo di inversione	18
Figura 2: Curva caratteristica del comportamento intrinseco della sezione allargata.....	19
Figura 3: Curva caratteristica del comportamento intrinseco della nicchia NS9, GSI=60	20
Figura 4: Curva caratteristica del comportamento intrinseco della nicchia NS9, GSI=65	21
Figura 5: Curva caratteristica del comportamento intrinseco della sezione allargata e del sostegno.....	22
Figura 6: Curva caratteristica del comportamento della sezione allargata con sostegno.....	23
Figura 7: Curva caratteristica del comportamento intrinseco della nicchia NS9 S1 e del sostegno.....	24
Figura 8: Curva caratteristica del comportamento intrinseco della nicchia NS9 S2 e del sostegno.....	25
Figura 9: Fasi di scavo per le sezioni allargate	26
Figura 10: Modello numerico del sostegno della nicchia NS9 S1 e S2	28
Figura 11: Modello numerico del rivestimento della nicchia NS9	28
Figura 12: Sollecitazione al momento, S1, GSI=65.....	30
Figura 13: Sollecitazione allo sforzo normale, S1, GSI=65.....	30
Figura 14: Sollecitazione allo sforzo di taglio, S1, GSI=65.....	30
Figura 15: Interazione M-N per la sezione di 10 cm di cls	31
Figura 16: Sforzi nei bulloni	32
Figura 17: Spostamenti assoluti per sezioni allargate, GSI=65	33
Figura 18: Zone plastiche per sezioni allargate, GSI=65	33
Figura 19: Sollecitazione al momento, S2, GSI=50.....	34
Figura 20: Sollecitazione allo sforzo normale, S2, GSI=50.....	34
Figura 21: Sollecitazione allo sforzo di taglio, S2, GSI=50.....	35
Figura 22: Interazione M-N per la sezione di 25 cm di cls	36
Figura 23: Interazione M-N per la sezione della centina HEB 180	37
Figura 24: Spostamenti assoluti per sezioni allargate, GSI=50	38
Figura 25: Zone plastiche per sezioni allargate, GSI=50	39
Figura 26: Sollecitazione al momento, S2, GSI=65, modello multilaminare	40
Figura 27: Sollecitazione allo sforzo normale, S2, GSI=65, modello multilaminare	40
Figura 28: Sollecitazione allo sforzo di taglio, S2, GSI=65, modello multilaminare.....	41
Figura 29: Interazione M-N per la sezione di 25 cm di cls	42

Note de calcul des niches / Relazione di calcolo delle nicchie

Figura 30: Interazione M-N per la sezione della centina HEB 180	43
Figura 31: Spostamenti assoluti per ramo di inversione, GSI=65, modello multilaminare	44
Figura 32: Zone plastiche per ramo di inversione, GSI=65, modello multilaminare.....	44
Figura 33: Sollecitazione al momento, S1, GSI=65.....	45
Figura 34: Sollecitazione allo sforzo normale, S1, GSI=65.....	45
Figura 35: Sollecitazione allo sforzo di taglio, S1, GSI=65.....	46
Figura 36: Diagramma di interazione M-N, 10 cm di cls proiettato	47
Figura 37: Sforzi nei bulloni	48
Figura 38: Spostamenti assoluti per ramo di inversione, GSI=65	48
Figura 39: Zone plastiche per sezioni allargate, GSI=65	49
Figura 40: Sollecitazione al momento, S2, GSI=65, modello multilaminare	50
Figura 41: Sollecitazione allo sforzo normale, S2, GSI=65, modello multilaminare	50
Figura 42: Sollecitazione allo sforzo di taglio, S2, GSI=65, modello multilaminare	51
Figura 43: Interazione M-N per la sezione di 25 cm di cls	52
Figura 44: Interazione M-N per la sezione della centina HEB 180	53
Figura 45: Spostamenti assoluti per ramo di inversione, GSI=65, modello multilaminare	54
Figura 46: Zone plastiche per ramo di inversione, GSI=65, modello multilaminare.....	55
Figura 47: Sollecitazione al momento del rivestimento definitivo, sezione allargata	56
Figura 48: Sollecitazione allo sforzo normale del rivestimento definitivo, sezione allargata ..	56
Figura 49: Sollecitazione allo sforzo di taglio del rivestimento definitivo, sezione allargata ..	57
Figura 50: Diagramma di interazione M-N, 50 cm di calcestruzzo	58
Figura 51: Schema per il calcolo della sollecitazione al taglio	59
Figura 52: Sollecitazione al momento del rivestimento definitivo, sezione tipo S2.....	59
Figura 53: Sollecitazione allo sforzo normale del rivestimento definitivo, sezione tipo S2....	60
Figura 54: Sollecitazione allo sforzo normale del rivestimento definitivo, sezione tipo S2....	60
Figura 55: Diagramma di interazione M-N, 50 cm di calcestruzzo	61
Figura 56: Sollecitazione al momento del rivestimento definitivo, nicchia NS9.....	62
Figura 57: Sollecitazione allo sforzo normale del rivestimento definitivo, nicchia NS9	62
Figura 58: Sollecitazione al taglio del rivestimento definitivo, nicchia NS9.....	63
Figura 59: Diagramma di interazione M-N, 50 cm di calcestruzzo	64

LISTE DES TABLEAUX / INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1: Sostegni di prima fase delle nicchie.....	11
Tabella 2: calcolo della distanza di messa in opera dei sostegni	22
Tabella 3: Caratteristiche meccaniche dei piani di scistosità.....	27
Tabella 4: Sollecitazioni nella sezione	31
Tabella 5: Verifica al taglio.....	32
Tabella 6: Sollecitazioni nella sezione mista	35
Tabella 7: Sollecitazioni nel cls	35
Tabella 8: Sollecitazioni nella centina	35
Tabella 9: Verifica al taglio.....	37
Tabella 10: Sollecitazioni nella sezione mista	41
Tabella 11: Sollecitazioni nel cls	41
Tabella 12: Sollecitazioni nella centina	41
Tabella 13: Verifica al taglio.....	43
Tabella 14: Sollecitazioni nella sezione	46
Tabella 15: Verifica al taglio.....	47
Tabella 16: Sollecitazioni nella sezione mista	51

Notes de calcul des niches / Relazione di calcolo delle nicchie

Tabella 17: Sollecitazioni nel cls	51
Tabella 18: Sollecitazioni nella centina	51
Tabella 19: Verifica al taglio.....	53
Tabella 20: Verifica del rivestimento al taglio.....	59
Tabella 21: Verifica al taglio.....	61
Tabella 22: Verifica al taglio.....	64
Tabella 23: Riassunto delle verifiche dei rivestimenti	65

RESUME / RIASSUNTO

La présente note décrit le dimensionnement et la vérification des soutènements et des revêtements des niches des galeries Maddalena 1 et de connexion 1.

Les niches présentent trois typologies de réalisation:

- Niches en élargissement de la section existante, réalisés par la démolition des soutènements de la galerie de reconnaissance de La Maddalena et élargissement de la section d'excavation.
- Niches creusées en pleine section. Il s'agit des rameaux de retournement de Maddalena 1 (orthogonaux par rapport à la galerie existante) et de la niche et de l'entonnement de de la galerie de connexion 1.
- Niches existantes, déjà creusées pendant la réalisation de la galerie de reconnaissance.

Les calculs ont été réalisés à l'aide du logiciel Zsoil, en tenant compte des deux typologies de phasage de creusement (élargissement ou pleine section).

La presente relazione descrive il dimensionamento e la verifica dei sostegni di prima fase e dei rivestimenti definitivi delle nicchie delle gallerie Maddalena 1 e di connessione 1.

Le nicchie presentano tre tipologie di realizzazione:

- Nicchie in allargo della sezione esistente, effettuate mediante la demolizione dei sostegni della galleria geognostica della Maddalena e l'allargo della sezione di scavo.
- Nicchie scavate in piena sezione. Si tratta dei rami di inversione in Maddalena 1 (ortogonali rispetto al cunicolo esistente) e della nicchia e della sezione di innesto della galleria di connessione 1.
- Nicchie esistenti, già scavate durante la realizzazione della galleria geognostica.

I calcoli sono stati realizzati con l'ausilio del software Zsoil, tenendo conto delle due tipologie di fasaggio di scavo (allargo o piena sezione).

1. Introduzione

1.1 Generalità

La galleria geognostica della Maddalena è un'opera realizzata ai fini di una migliore conoscenza geologica/geomeccanica/idrogeologica dell'ammasso roccioso. Dal portale situato alla Maddalena, in comune di Chiomonte, la galleria si avvicina al Tunnel di Base e successivamente si dispone tra le due canne del Tunnel di Base, in posizione superiore e correndo parallela ad esse, per una lunghezza di circa 4 km.

Nel Progetto Definitivo Approvato la galleria aveva la funzione di accesso dei veicoli bimodali e dei servizi di soccorso all'area di sicurezza di Clarea per tutta la sua lunghezza. La variante progettuale a seguito della prescrizione n. 235 in fase di approvazione del Progetto Definitivo da parte del CIPE porta allo spostamento dell'area di sicurezza e quindi all'utilizzo di solo una parte della galleria per l'accesso dei soccorsi. Per la restante tratta della galleria, si prevede la messa in deposito delle rocce verdi.

La galleria di connessione 1 permette di collegare la galleria Maddalena 1 al Tunnel di Base in corrispondenza dell'area di sicurezza.

In Maddalena 1, sono previste nicchie ogni 400 m circa, provviste di rivestimento definitivo per la tratta destinata all'accesso dei soccorsi, mentre senza rivestimento definitivo ma con ritombamento totale nella tratta destinata allo stoccaggio delle rocce verdi.

Nella galleria di connessione 1, è prevista una sola nicchia (NS9).

Inoltre vi è la sezione di innesto tra Maddalena 1 e connessione 1 (NS8), più grande rispetto alle rispettive sezioni correnti, e le due nicchie esistenti di Maddalena 1, NE1 e NE2.

Per maggiori dettagli relativi alle funzionalità ed alle sistemazioni interne si veda la relazione descrittiva PRV_C3A_3820_26-48-20.

L'obiettivo del presente documento è il dimensionamento dei sostegni di prima fase e dei rivestimenti definitivi (quando presenti) delle suddette nicchie.

1.2 Modifiche rispetto al Progetto Definitivo Approvato

Si elencano di seguito le variazioni rispetto allo stesso documento emesso nel Progetto Definitivo Approvato; si rimanda alla relazione PRV_C3A_3820_26-48-20 per la descrizione delle modifiche geometriche e funzionali della galleria della Maddalena.

- Sezioni tipo: si sono mantenute le stesse sezioni tipo di sostegno del Progetto Definitivo Approvato. Il rivestimento definitivo così come concepito nel Progetto Definitivo Approvato è mantenuto solo nella tratta di accesso dei servizi di soccorso.
- Integrazione ritorno di esperienza della Maddalena: si è integrato il ritorno di esperienza dello scavo per quanto riguarda gli aspetti geologici, geomeccanici e le sezioni tipo messe in opera.
- Aggiunta della galleria di connessione 1 e relativa nicchia, con sezione di innesto tra le due gallerie.
- Integrazione nicchie esistenti di Maddalena 1.

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 progetto

- PRV_C3A_3820_26-48-20 Relazione tecnica descrittiva
- PRV_C3A_3822_26-48-20 Nicchie NLS e NS1 a 7 – sezione tipo sostegno S1
- PRV_C3A_3823_26-48-20 Nicchie NLS e NS1 a 7 – sezione tipo sostegno S2
- PRV_C3A_3827_26-48-20 Carpenterie - Nicchie NS1 a 7
- PRV_C3A_7570_26-48-20 Zona di innesto, nicchia NS8 – sezione tipo sostegno S1
- PRV_C3A_7631_26-48-20 Zona di innesto, nicchia NS8 – sezione tipo sostegno S2
- PRV_C3A_7571_26-48-20 Carpenteria – zona di innesto con connessione 1
- PRV_C3A_7573_26-48-20 Rivestimento – nicchie NLS stoccaggio rocce verdi
- PRV_C3A_7574_26-48-20 Sostegno e rivestimento - nicchia NE1
- PRV_C3A_7575_26-48-20 Sostegno e rivestimento - nicchia NE2
- PRV_C3A_7629_26-48-22 Nicchia NS8 e NS9 – sezione tipo sostegno S1
- PRV_C3A_7630_26-48-22 Nicchia NS8 e NS9 – sezione tipo sostegno S2
- PRV_C3A_7633_26-48-22 Carpenteria – nicchia NS9
- PRV_C3A_7538_26-48-22 Carpenteria - Zona di innesto
- Cunicolo Esplorativo de La Maddalena – progetto Esecutivo (MAD_EXE_...)
- Cunicolo Esplorativo de La Maddalena – As built (MAD_EXE_..._AS BUILT).

3. Quadro geologico, idrogeologico e geomeccanico

3.1 Galleria Maddalena 1

Il ritorno di esperienza dello scavo del cunicolo della Maddalena viene descritto nella relazione PRV_C3B_7200_26-48-01. Si veda inoltre il profilo geomeccanico as built con applicazione delle sezioni tipo PRV_C3B_7206_26-48-01. Si rimanda a questi documenti per la descrizione del quadro geologico, idrogeologico e geomeccanico, del comportamento allo scavo osservato e dello stato tensionale ottenuto dalle prove effettuate.

3.2 Galleria di connessione 1

Per quanto riguarda la galleria di connessione 1, si veda il profilo geomeccanico PRV_C3B_7208_26-48-01. La galleria attraversa i micascisti e gneiss del complesso di Clarea. Si prevedono alcune zone con fratturazione spaziata e persistente ma nessuna zona di faglia e/o tettonizzata.

In corrispondenza della nicchia NS9 l'ammasso si presenta di buona qualità, con indice GSI nel range 55-65 ed indice RMR compreso tra 51 e 60 (RMR III).

I fenomeni di rilascio in calotta osservati nel cunicolo potrebbero riprodursi, sebbene questi fenomeni non siano stati di grande entità nella tratta di cunicolo corrispondente alla galleria in oggetto (si sono messi in opera dei centinini solo su circa 35% del lineare e non si sono mai messe in opera centine pesanti con pannellature) e considerando anche le differenze tra metodo tradizionale e meccanizzato descritte nella relazione dei sostegni dell'area di sicurezza di Clarea (documento PRV_C3A_3730_26-46-20).

Dal punto di vista idrogeologico, non si prevedono venute d'acqua importanti.

La copertura della galleria in corrispondenza della nicchia è pari a 1200 m circa.

4. Sezioni tipo

4.1 Galleria Maddalena 1

Dal punto di vista realizzativo, sono previste tre tipologie:

- 1) Sezioni realizzate in allargamento della sezione esistente, con demolizione dei sostegni esistenti della galleria geognostica della Maddalena (eccetto le bullonature). Tutte le nicchie NS e NLS presentano questa caratteristica.
- 2) Sezioni scavate a piena sezione. Si tratta dei rami di inversione delle nicchie NLS e della nicchia NS9 della galleria di connessione.
- 3) Sezioni esistenti, già scavate e provviste di sostegno. Si tratta delle nicchie NE1 e NE2, ovvero rispettivamente della nicchia per la vasca di rilancio (che include anche una nicchia per indagini geognostiche) e della nicchia per la vasca di accumulo (così come prevista dal Progetto Esecutivo del cunicolo). Entrambe le nicchie verranno linearizzate mediante allargamenti rispetto a quanto scavato/ previsto attualmente. Vi saranno quindi alcuni interventi di scavo e sostegno per queste nicchie.

Le sezioni delle **nicchie NS1 a NS7 e delle nicchie NLS**, sia per l'allargamento che per i rami di inversione, presentano tutte le stesse dimensioni. Si sono quindi definiti gli stessi interventi di sostegno. Si tratta delle sezioni tipo S1 e S2.

La sezione tipo S1 è applicata laddove le condizioni della roccia e lo stato tensionale non siano tali da comportare fenomeni di convergenza ($GSI \geq 60$) e laddove i fenomeni di instabilità in calotta durante lo scavo del cunicolo non sono stati molto intensi, considerando anche le differenze tra metodo tradizionale e meccanizzato descritte nella relazione dei sostegni dell'area di sicurezza di Clarea (documento PRV_C3A_3730_26-46-20). La bullonatura ha la sola funzione di cucitura dei blocchi di roccia instabili.

La sezione tipo S2 è applicata nel caso di ammassi di qualità da mediocre a discreta (GSI compreso tra 50 e 60), mediamente fratturata. La presenza di centine di tipo HEB 180 garantisce una certa pressione di confinamento nel caso di fenomeni di plasticità moderata nell'intorno dello scavo. Vengono inoltre applicate per i fenomeni di rilascio in calotta di una certa importanza osservati durante lo scavo della galleria geognostica.

Al fine di non complicare eccessivamente le operazioni di smontaggio delle pannellature (sezioni tipo F5 o F4) e di scavo, non si sono ubicate le nicchie nelle zone di faglia con GSI inferiore a 50. Quando le nicchie, rispettando l'interdistanza classica e le regole sulla visibilità, venivano a cadere in corrispondenza di una tratta con $GSI < 50$ osservata nel cunicolo, sono state spostate della distanza necessaria per portarsi in zone di roccia più competente. Si è verificato quest'aspetto per la tratta di cunicolo di cui si è a disposizione dei dati as-built. Per la tratta non ancora scavata, si adotterà quest'accorgimento laddove necessario.

Per la definizione delle percentuali di applicazione delle sezioni tipo S1 e S2, si sono considerate, oltre al GSI , le sezioni tipo messe in opera nella galleria geognostica, che esprimono l'intensità dei fenomeni di rilascio osservati. L'applicazione delle sezioni tipo F4 e F5 nel cunicolo determina unicamente la sezione tipo S2 nelle nicchie. Per le sezioni tipo F3c1 e FMV nel cunicolo, si è ripartito al 50% tra S1 e S2. Le altre sezioni tipo messe in opera nel cunicolo, senza centinature, determinano invece unicamente la sezione tipo S1. Per l'ultima tratta di cunicolo di cui non si dispone di dati, si è ipotizzata la messa in opera della sezione tipo FMV.

Sulla base dei criteri appena esposti, si è ottenuta la **ripartizione tra sezioni tipo S1 e S2 seguente: S1 (55%), S2 (45%)**.

Per la **sezione di innesto** (NS8) si sono definite due sezioni tipo. Si tratta delle seguenti:

- **Tipo S1:** si compone di cls proiettato e di bullonature di tipo Swellex Mn24. E' adatto per ammassi rocciosi di qualità medio-buona (GSI 55-70), senza fenomeni importanti di rilascio in calotta.
- **Tipo S2:** è adatta per ammassi rocciosi competenti in cui si sviluppano fenomeni di rilascio in calotta. Presenta delle centine HEB180 (associate a cls proiettato) che servono a sostenere l'ammasso roccioso disarticolato a causa della scistosità e dello stato tensionale. Queste centine possono risultare utili specialmente in prossimità della zona di intersezione.

La scelta di queste due sezioni tipo deriva dal fatto che nel cunicolo sono state messe in opera sia la sezione tipo F3c1, con centinino, che indica la presenza di fenomeni minori di rilascio, sia altre sezioni tipo che prevedono unicamente bulloni e in alcuni casi rete elettrosaldata.

Analogamente a quanto messo in opera nel cunicolo, considerate le differenze tra scavo con TBM aperta e scavo in tradizionale descritte nella relazione PRV_C3A_3730_26-46-20, si è stimata a **50%** l'applicazione della **sezione tipo S2** e quindi al restante **50%** l'applicazione della **sezione tipo S1**.

Per la **nicchia NE1**, lo scavo per linearizzare la geometria sarà confortato, come per quanto già scavato, da cls proiettato di spessore 10 cm, rete elettrosaldata e bulloni Swellex di lunghezza 3 m.

Analogamente, per la **nicchia NE2**, lo scavo sarà confortato da cls proiettato di spessore 10 cm, rete elettrosaldata e bulloni Swellex Mn24 di lunghezza 3.5 m.

Nella tratta di accesso dei servizi di soccorso, il rivestimento definitivo per tutte le nicchie presenta spessore minimo di 50 cm.

Nella tratta di stoccaggio delle rocce verdi, il rivestimento è composto da uno strato di cls proiettato di spessore 5 cm, con il solo fine di proteggere l'impermeabilizzazione dalle operazioni interne di movimentazione; quindi non è considerato un rivestimento definitivo.

La tabella seguente riassume le misure di sostegno delle nicchie.

Note de calcul des niches / Relazione di calcolo delle nicchie

NOME NICCHIA	SEZ. TIPO / VARIANTE	Bulloni radiali	Cls proiettato calotta	Cls proiettato fronte	Bulloni al fronte	Dosaggio fibre d'acciaio	Centine
NS1 a NS7, NLS1 a NLS15 (compresi rami di inversione)	Sez. tipo S1	Swellex Mn 24 (o equiv.), L= 5.0m, passo trasv. 1.5 m passo long. 2 m	10cm fibrorinf.+ 10cm con rete elettrosaldata (senza fibre)	5 cm fibrorinf.	-	35kg/m ³	-
NS1 a NS7, NLS1 a NLS15 (compresi rami di inversione)	Sez. tipo S2	-	5 cm fibrorinf.+ 20 cm con rete elettrosaldata (senza fibre)	10cm fibrorinf.	-	35kg/m ³	HEB 180 passo 1.00m
NS8 (sez. di innesto)	Sez. tipo S1	Swellex Mn 24 (o equiv.), L= 6.0m, passo trasv. 1.5 m passo long. 2 m	10 cm fibrorinf. + 10 cm con rete elettrosaldata (senza fibre)	10 cm fibrorinf.	Swellex Mn 24 (o equiv.) L=8.0 m Utile 4 m	35kg/m ³	-
NS8 (sez. di innesto)	Sez. tipo S2	-	5 cm fibrorinf. + 20 cm con rete elettrosaldata (senza fibre)	10 cm fibrorinf.	Swellex Mn 24 (o equiv.) L=7.2 m Utile 3.6 m	35kg/m ³	HEB180 passo 1.2 m
NE1	-	Swellex Mn 24 (o equiv.),* L=3.0 m passo trasv. 1.5 m passo long. 1.4 m	10 cm + rete elettrosaldata	-	-	-	-
NE2	-	Swellex Mn 24 (o equiv.),* L=3.5 m passo trasv. 1.5 m passo long. 1.4 m	10 cm + rete elettrosaldata	-	-	-	-

* I bulloni sono presenti solo nelle zone di maggiore scavo, non quando vi è unicamente una riprofilatura

Tabella 1: Sostegni di prima fase delle nicchie

4.2 Galleria di connessione 1

Le stesse misure di sostegno definite per la nicchia NS8 (sezione di innesto) sono state definite per la **nicchia NS9**, che è identica dal punto di vista geometrico e verrà scavata nella stessa litologia ed in un contesto geomeccanico molto simile. Si veda quindi il § 4.1 per la descrizione delle misure di sostegno e della loro applicazione.

La ripartizione tra le due sezioni tipo è la seguente: **S1 (50%), S2 (50%)**.

Si ha un'unica sezione tipo di carpenteria associata alle tre tipologie di sostegno.

Lo spessore minimo del rivestimento è pari a 50 cm (in calotta ed in corrispondenza al dreno laterale).

5. Calcolo delle sollecitazioni sulla struttura

5.1 Sezioni di calcolo

Galleria Maddalena 1 - Nicchie NS1 a NS7 e NLS

I calcoli sono effettuati per la sezione tipo S1, considerando la nicchia realizzata per allargamento del cunicolo, un GSI pari a 65 e la copertura massima della galleria (2000 m).

Note de calcul des niches / Relazione di calcolo delle nicchie

Per la sezione tipo S2 la verifica è stata effettuata sia per la sezione realizzata come allargamento del cunicolo che per il ramo di inversione, nel caso di maggior copertura della galleria (2000 m).

La verifica dei rivestimenti viene svolta solo per la sezione S2, dato che lo spessore dei rivestimenti è lo stesso e le condizioni geomeccaniche sono peggiori.

Nel caso dei rivestimenti definitivi (ovvero nella tratta di accesso dei servizi di soccorso) questo risulta conservativo in quanto la nicchia più profonda in questa tratta presenta una copertura di 560 m.

Nella zona di deposito delle rocce verdi il rivestimento non presenta un ruolo strutturale. Al momento del degrado dei sostegni esistenti, la sezione sarà già riempita di malta cementizia negli interstizi tra rivestimento e contenitori. Ciascun contenitore costituisce peraltro un blocco solido, composto da un conglomerato di smarino di rocce verdi ed addensante costituito da polimeri a catena lunga. Viene quindi a crearsi un confinamento radiale su tutto il contorno dello scavo che si oppone alla pressione dell'ammasso agente in precedenza sui sostegni, garantendone la stabilità.

L'assenza di drenaggio e la presenza di un'impermeabilizzazione totale non generano una pressione sulla sezione: le due canne del Tunnel di Base dal PM 3000 circa alla fine della galleria e la galleria di connessione 2 (dal PM 2245 al PM 3000 circa) si trovano infatti in prossimità ed al di sotto di Maddalena 1, per cui fungono da dreno. L'acqua circola nelle fessure dell'ammasso roccioso e, trovando impedita la via verso Maddalena 1, si crea un percorso fino alle gallerie sottostanti.

Alla luce di queste considerazioni, non sono necessari particolari calcoli per il rivestimento delle nicchie nella tratta di stoccaggio delle rocce verdi.

Galleria Maddalena 1 - Nicchie NE1 e NE2

Per le nicchie NE1 e NE2, l'allargamento della sezione, di dimensione peraltro limitata viene sostenuta alla stessa maniera di quanto già messo in opera/previsto. Non necessita dunque di verifiche particolari.

Per il rivestimento delle nicchie NE1 e NE2 valgono le considerazioni per le altre nicchie della tratta di stoccaggio delle rocce verdi.

Sezione di innesto (NS8)

Siccome la sezione di innesto (NS8) e la nicchia NS9 della galleria di connessione 1 presentano la stessa geometria e le stesse sezioni tipo, questa viene verificata tramite la nicchia NS9, che presenta maggior copertura.

Galleria di connessione 1 – nicchia NS9

Si sono effettuati calcoli specifici relativi ai sostegni sia per la sezione tipo S1 che per la sezione tipo S2. I calcoli considerano lo scavo della nicchia a piena sezione.

Il rivestimento viene verificato solo per la sezione tipo S2, in quanto presenta momenti più importanti.

Sintesi

In sintesi, sono state effettuate in questa relazione le seguenti verifiche:

- Maddalena 1, nicchie NS1 a NS7 e NLS, sezione tipo S1, sezione allargata (sostegno)
- Maddalena 1, nicchie NS1 a NS7 e NLS, sezione tipo S2, sezione allargata (sostegno+rivestimento)

- Maddalena 1, nicchie NS1 a NS7 e NLS, sezione tipo S2, ramo di inversione (sostegno+rivestimento)
- Connessione 1, nicchia NS9, sezione tipo S1 (sostegno)
- Connessione 1, nicchia NS9, sezione tipo S2 (sostegno + rivestimento).

5.2 Parametri dell'ammasso roccioso

Il calcolo dei carichi sui sostegni e sui rivestimenti è stato compiuto assumendo parametri relativi alle rocce del complesso di Clarea (Unità di Ambin), costituite da alternanze di micascisti e gneiss. Il ritorno di esperienza del cunicolo mostra che in tale unità il GSI si trova globalmente nel range 40-80, con valori in un'ampia maggioranza compresi nell'intervallo 60-70.

I parametri della roccia intatta sono relativi ai micascisti di Clarea, ovvero all'unità UGD(7) della classificazione geomeccanica generale (si veda la relazione PRV_C3B_0100_00-03-03), che sono stati sostanzialmente confermati dal ritorno di esperienza del cunicolo della Maddalena. Si considerano i valori medi di tali parametri.

Per la sezione tipo S1 si è considerato un GSI pari a 65 e comportamento omogeneo dell'ammasso roccioso.

Per la sezione tipo S2 sono state considerate due situazioni geomeccaniche, rappresentative dei due scenari di applicazione seguenti:

- Ammasso roccioso con indice GSI pari a 50, comportamento omogeneo dell'ammasso con criterio di Mohr-Coulomb, in modo da simulare il comportamento di una roccia mediamente fratturata (le nicchie non sono ubicate in zone con GSI < 50);
- Ammasso roccioso con indice GSI pari a 65 e modello multilaminare, al fine di simulare i fenomeni di distacco osservati durante lo scavo della galleria geognostica.

In un'ottica di razionalizzazione dei calcoli, si è effettuato il calcolo della sezione allargata per GSI 50 ed il calcolo del ramo di inversione per GSI 65.

Per la nicchia NS9 si sono considerate le situazioni seguenti:

- Sezione tipo S1: GSI pari a 60 e comportamento omogeneo dell'ammasso roccioso.
- Sezione tipo S2: ammasso roccioso con GSI pari a 65 e modello multilaminare.

Di seguito sono riportati i parametri di input relativi alla roccia intatta e all'ammasso roccioso, secondo i criteri di Hoek-Brown e di Mohr-Coulomb; questi ultimi derivano dalla linearizzazione del criterio di Hoek-Brown in funzione dello stato tensionale mediante il programma RocLab (Rocscience).

Il modulo elastico dell'ammasso roccioso è stato calcolato a partire dal modulo elastico della roccia intatta mediante la formulazione di Hoek & Diederichs (2006) implementata nel software RocLab (Rocscience).

5.2.1 Sezione tipo S1-sezione allargata

Stato tensionale:

- Peso specifico: $\gamma = 27.7 \text{ kN/m}^3$
- Copertura: $H = 2000 \text{ m}$
- Coefficiente di spinta orizzontale: $k_0=1.3$

Roccia intatta:

- Resistenza a compressione monoassiale: UCS = 97.9 MPa
- Geological Strength Index: GSI = 65
- Costante di Hoek-Brown: $m_i = 10$
- Fattore di disturbo: D = 0 (utilizzo di esplosivo controllato con microritardi)
- Modulo elastico: $E_i = 78$ GPa

Ammasso roccioso:

- Coesione: $c = 6847$ kPa
- Angolo di attrito: $\phi = 33.69^\circ$
- Modulo elastico: $E_{rm} = 49.27$ GPa

5.2.2 Sezione tipo S2 -sezione allargata

Stato tensionale:

- Peso specifico: $\gamma = 27.7$ kN/m³
- Copertura: H = 2000 m
- Coefficiente di spinta orizzontale: $k_0 = 1.0$

Roccia intatta:

- Resistenza a compressione monoassiale: UCS = 97.9 MPa
- Geological Strength Index: GSI = 50
- Costante di Hoek-Brown: $m_i = 10$
- Fattore di disturbo: D = 0 (utilizzo di esplosivo controllato con microritardi)
- Modulo elastico: $E_i = 78$ GPa

Ammasso roccioso:

- Coesione: $c = 5274$ kPa
- Angolo di attrito: $\phi = 29.52^\circ$
- Modulo elastico: $E_{rm} = 23.96$ GPa.

5.2.3 Sezione tipo S2- ramo di inversione (piena sezione)

Stato tensionale:

- Peso specifico: $\gamma = 27.7$ kN/m³
- Copertura: H = 2000 m

Note de calcul des niches / Relazione di calcolo delle nicchie

- Coefficiente di spinta orizzontale: $k_0=1.3$

Roccia intatta:

- Resistenza a compressione monoassiale: $UCS = 97.9 \text{ MPa}$
- Geological Strength Index: $GSI = 65$
- Costante di Hoek-Brown: $m_i = 10$
- Fattore di disturbo: $D = 0$ (utilizzo di esplosivo controllato con microritardi)
- Modulo elastico: $E_i = 78 \text{ GPa}$

Ammasso roccioso:

- Coesione: $c = 6853 \text{ kPa}$
- Angolo di attrito: $\phi = 33.71^\circ$
- Modulo elastico: $E_{rm} = 49.27 \text{ GPa}$

I parametri specifici al modello multilaminare sono forniti al § 7.1.

5.2.4 Nicchia NS9 – sezione tipo S1

Stato tensionale:

- Peso specifico: $\gamma = 27.7 \text{ kN/m}^3$
- Copertura: $H = 1350 \text{ m}$
- Coefficiente di spinta orizzontale: $k_0=1.3$

Roccia intatta:

- Resistenza a compressione monoassiale: $UCS = 97.9 \text{ MPa}$
- Geological Strength Index: $GSI = 60$
- Costante di Hoek-Brown: $m_i = 10$
- Fattore di disturbo: $D = 0$ (utilizzo di esplosivo controllato con microritardi)
- Modulo elastico: $E_i = 78 \text{ GPa}$

Ammasso roccioso:

- Coesione: $c = 4983 \text{ kPa}$
- Angolo di attrito: $\phi = 35.4^\circ$
- Modulo elastico: $E_{rm} = 40.56 \text{ GPa}$

5.2.5 Nicchia NS9 - sezione tipo S2

Stato tensionale:

Note de calcul des niches / Relazione di calcolo delle nicchie

- Peso specifico: $\gamma = 27.7 \text{ kN/m}^3$
- Copertura: $H = 1350 \text{ m}$
- Coefficiente di spinta orizzontale: $k_0=1.3$

Roccia intatta:

- Resistenza a compressione monoassiale: $UCS = 97.9 \text{ MPa}$
- Geological Strength Index: $GSI = 65$
- Costante di Hoek-Brown: $m_i = 10$
- Fattore di disturbo: $D = 0$ (utilizzo di esplosivo controllato con microritardi)
- Modulo elastico: $E_i = 78 \text{ GPa}$

Ammasso roccioso:

- Coesione: $c = 5513 \text{ kPa}$
- Angolo di attrito: $\phi = 36.78^\circ$
- Modulo elastico: $E_{rm} = 49.27 \text{ MPa}$

I parametri specifici al modello multilaminare sono forniti al § 7.1.

5.3 Stato tensionale

Si considera un rapporto tra tensione orizzontale e tensione verticale k_0 pari a 1 nel caso di $GSI=50$ e pari a 1.3 nel caso degli altri modelli. Per i modelli multilaminari questo permette di mettere in evidenza ulteriormente l'anisotropia dell'ammasso.

La tensione verticale considerata corrisponde alla geostatica.

5.4 Calcolo dei carichi su sostegni e rivestimenti

Le verifiche statiche sono eseguite a partire dai risultati dei modelli numerici con il programma ZSoil nei quali vengono modellati sia i sostegni che i rivestimenti.

In un primo momento si effettua un'analisi tramite il metodo delle linee caratteristiche del comportamento dell'ammasso roccioso in condizioni intrinseche (senza sostegno) e poi con la messa in opera del sostegno. Quest'analisi permette di prevedere le convergenze in entrambi i casi nonché di calcolare il tasso di deconfinamento λ da inserire nel modello FEM.

I carichi considerati sul rivestimento sono i seguenti:

- Peso proprio, con $\gamma_c=25 \text{ kN/m}^3$
- Pressione dell'ammasso roccioso.

Non si considera il carico idraulico in quanto tutte le nicchie vengono drenate con dreni posti ai piedritti. Il carico al di sotto di essi non risulta dimensionante per la struttura.

Non vi sono altri carichi in quanto non sono presenti strutture interne.

Conformemente alle NTC, la combinazione delle azioni impiegata per gli stati limite ultimi (SLU) è la seguente:

$$\gamma_{G1} G_1$$

Con:

γ_{G1} : coefficiente parziale dei carichi permanenti, pari a 1.3;

G_1 : carichi permanenti, ovvero peso proprio del rivestimento definitivo e pressione dell'ammasso.

Non vi sono carichi variabili.

Il quadro normativo di riferimento ed in particolare 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") stabiliscono di applicare i coefficienti parziali sugli effetti delle azioni (sollecitazioni) anziché sulle azioni stesse. Questo permette di simulare in Zsoil la situazione effettiva, senza coefficienti moltiplicatori. La gravità e la pressione dell'ammasso roccioso sono considerate direttamente nella simulazione Zsoil. Le sollecitazioni sono in seguito moltiplicate per il coefficiente γ pari a 1.3.

Per la verifica del rivestimento definitivo, sulla base di quanto espresso nella raccomandazione dell'AFTES GT7, si esegue solo la verifica a SLU. La raccomandazione infatti dice che l'attitudine all'esercizio che corrisponde allo stato limite d'esercizio è generalmente garantita dalla concezione stessa del rivestimento: condizioni di messa in opera, geometria studiata per evitare problemi di instabilità di forma (cerchi o archi di cerchio), impermeabilizzazione.

6. Analisi con il metodo delle linee caratteristiche

6.1 Condizioni intrinseche

Il metodo delle linee caratteristiche (o di convergenza-confinamento) si basa sull'ipotesi di una sezione perfettamente circolare sottoposta ad una pressione idrostatica. Al fine di adattare le condizioni reali alle ipotesi del metodo, si effettuano i seguenti artifici di calcolo:

- Raggio della sezione: $R = R_{calotta} = 5.5 \text{ m}$
Nicchie Maddalena 1 $R = R_{calotta} = 5.5 \text{ m}$
Nicchia connessione 1 $R = R_{calotta} = 7.7 \text{ m}$
- Copertura equivalente: $H_{eq} = H \frac{1+k_0}{2}$

6.1.1 Maddalena 1, GSI=65

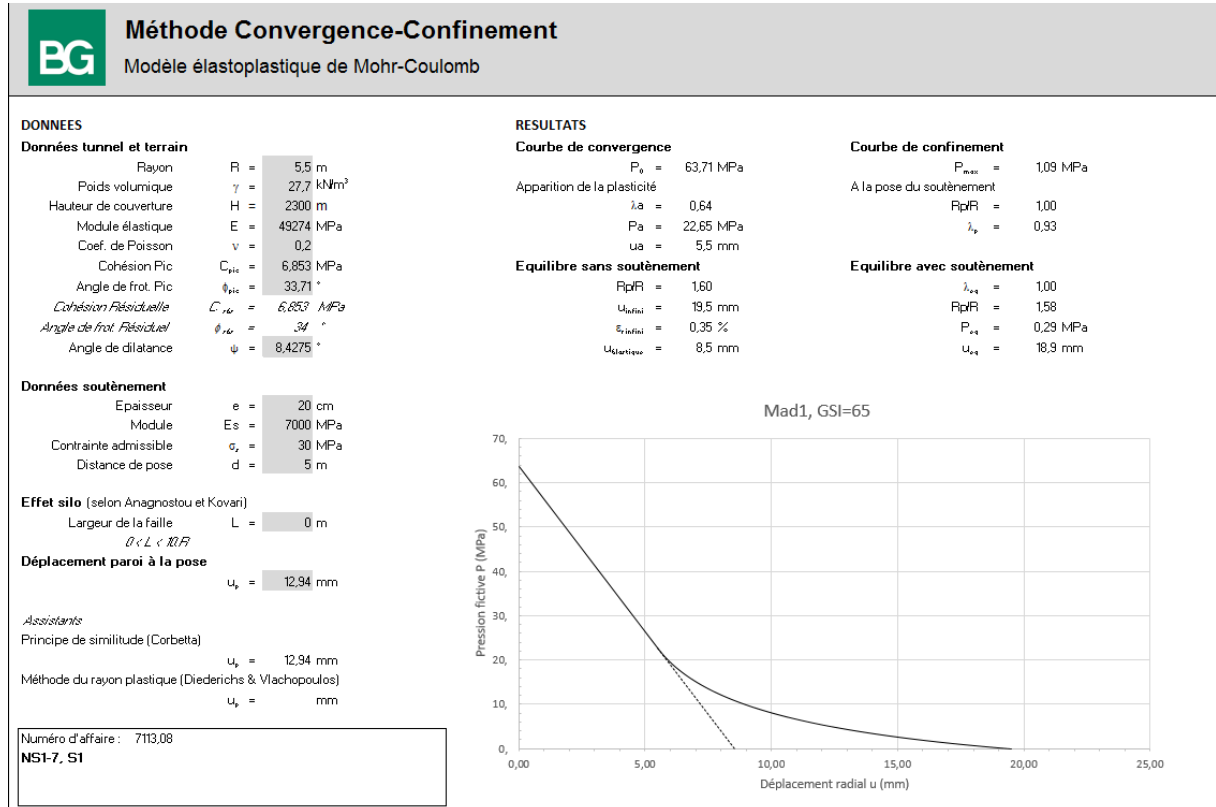


Figura 1: Curva caratteristica comportamento intrinseco del ramo di inversione

Lo spostamento radiale in assenza di sostegni è pari a $u_{\infty} = 1.95$ cm.

Il raggio plastico è pari a 8.8 m (corrispondente ad una fascia plastica di 3.3 m).

6.1.2 Maddalena 1, GSI=50

Il comportamento dell'ammasso in condizioni intrinseche è presentato nella figura seguente:

Note de calcul des niches / Relazione di calcolo delle nicchie

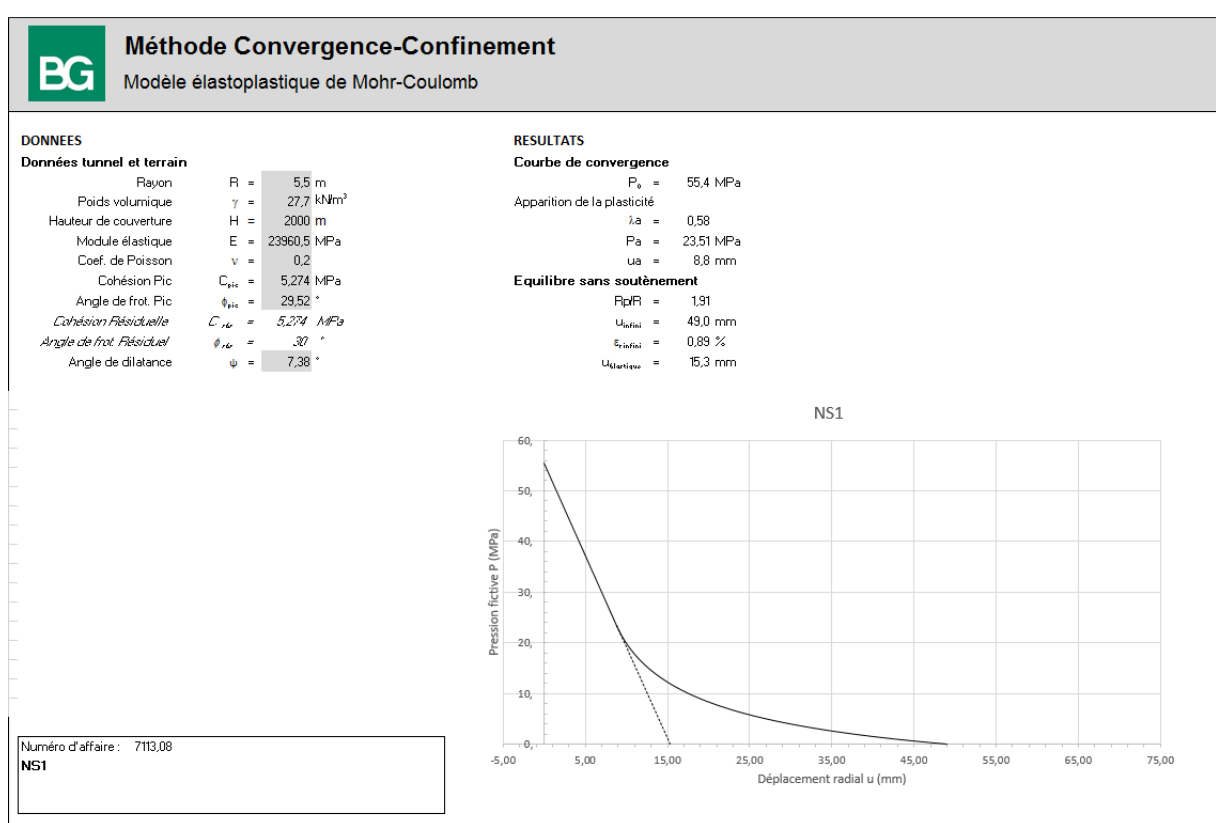


Figura 2: Curva caratteristica del comportamento intrinseco della sezione allargata

Lo spostamento radiale in assenza di sostegni è pari a $u_{\infty} = 4.9$ cm.

Il raggio plastico è pari a 10.5 m (corrispondente ad una fascia plastica di 5 m).

Note de calcul des niches / Relazione di calcolo delle nicchie

6.1.3 Nicchia NS9, GSI=60

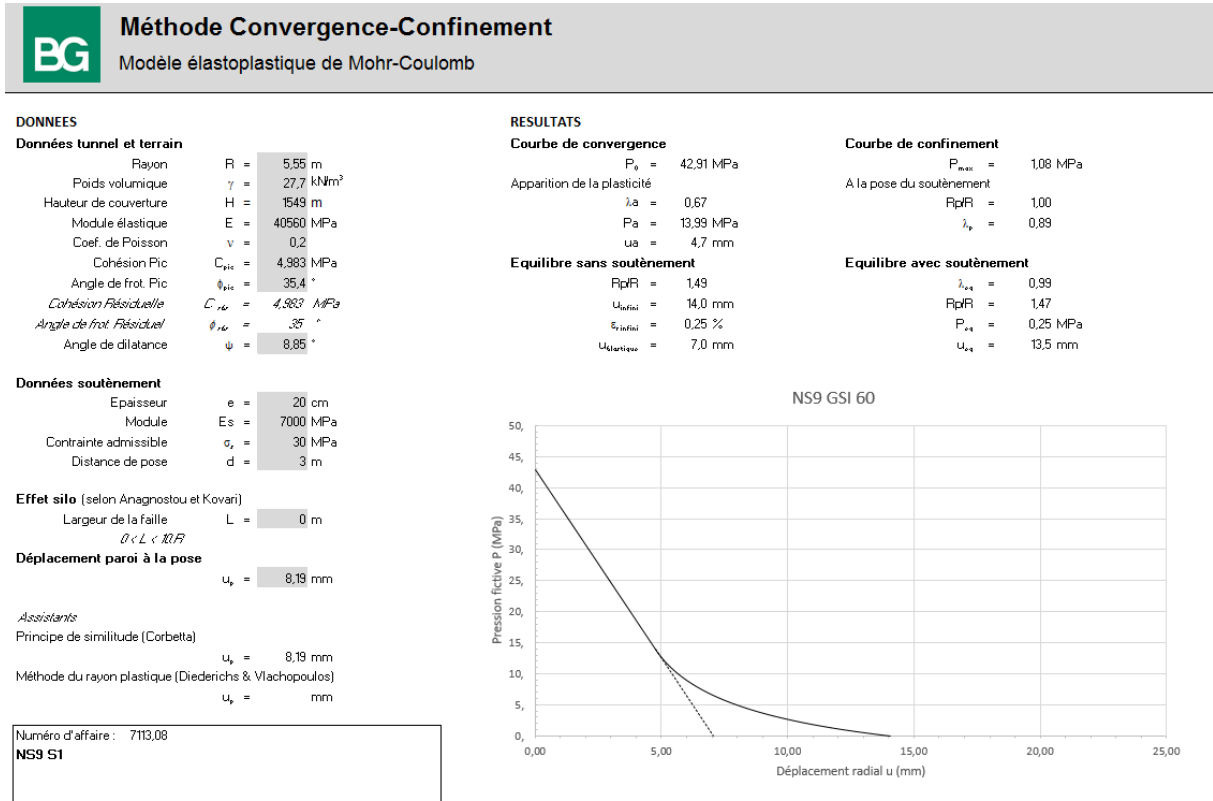


Figura 3: Curva caratteristica del comportamento intrinseco della nicchia NS9, GSI=60

Lo spostamento radiale in assenza di sostegni è pari a $u_\infty = 1.4$ cm.

Il raggio plastico è pari a 8.2 m (corrispondente ad una fascia plastica di 2.7 m).

6.1.4 Nicchia NS9, GSI=65

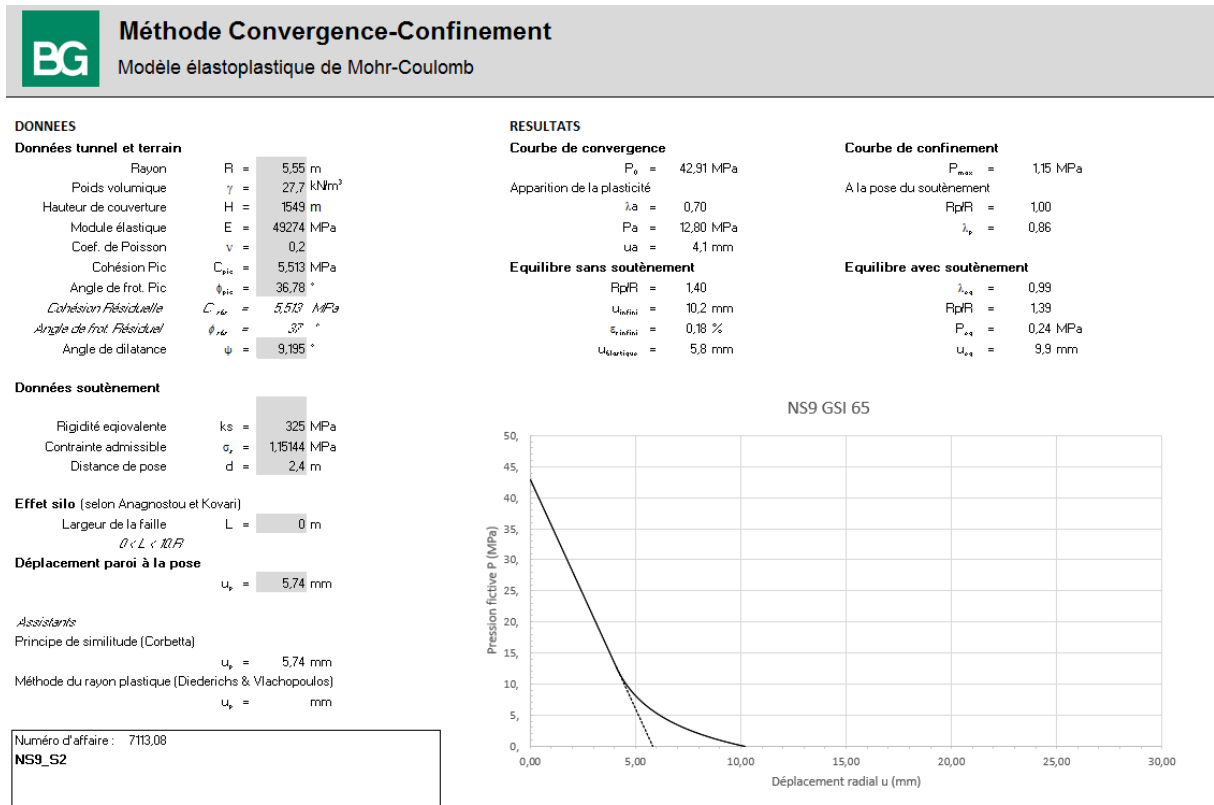


Figura 4: Curva caratteristica del comportamento intrinseco della nicchia NS9, GSI=65

Lo spostamento radiale in assenza di sostegni è pari a $u_{\infty} = 1$ cm.

Il raggio plastico è pari a 7.7 m (corrispondente ad una fascia plastica di 2.2 m).

6.2 Messa in opera dei sostegni

Quando il sostegno è composto solo da cls proiettato e bullonature, la distanza di applicazione è calcolata tramite la formula seguente:

$$d_{calcolo} = (d_1 + d_2)$$

con:

d_1 distanza indicata nella tabella seguente

d_2 passo di scavo (volata)

Nel caso della messa in opera di centine, la distanza di posa dal fronte è stata calcolata mediante la formula seguente:

$$d_{calcolo} = (d_1 + d_2) / 2$$

con:

d_1 distanza indicata nella tabella seguente

$$d_2 = p + d_1$$

p= passo tra le centine.

La distanza di posa considerata per ciascuna sezione di calcolo è indicata nella tabella seguente.

Note de calcul des niches / Relazione di calcolo delle nicchie

Sezione calcolata	tipo	d ₁	Ubicazione di d ₁	p	d ₂	d _{calcolo}
Maddalena 1 – S1		1 m	Preso del 1° strato di cls proiettato	-	4 m	5 m
Maddalena 1 – S2		4.5 m	Preso del 2° strato di cls proiettato tra centine	1 m	5.5 m	5 m
Connessione 1 – S1		1 m	Preso del 1° strato di cls proiettato	-	2 m	3 m
Connessione 1 – S2		0.6 m	Distanza di applicazione della centina dal fronte	1.2 m	1.8 m	1.2 m

Tabella 2: calcolo della distanza di messa in opera dei sostegni

6.2.1 Maddalena 1, sezione tipo S1, GSI=65

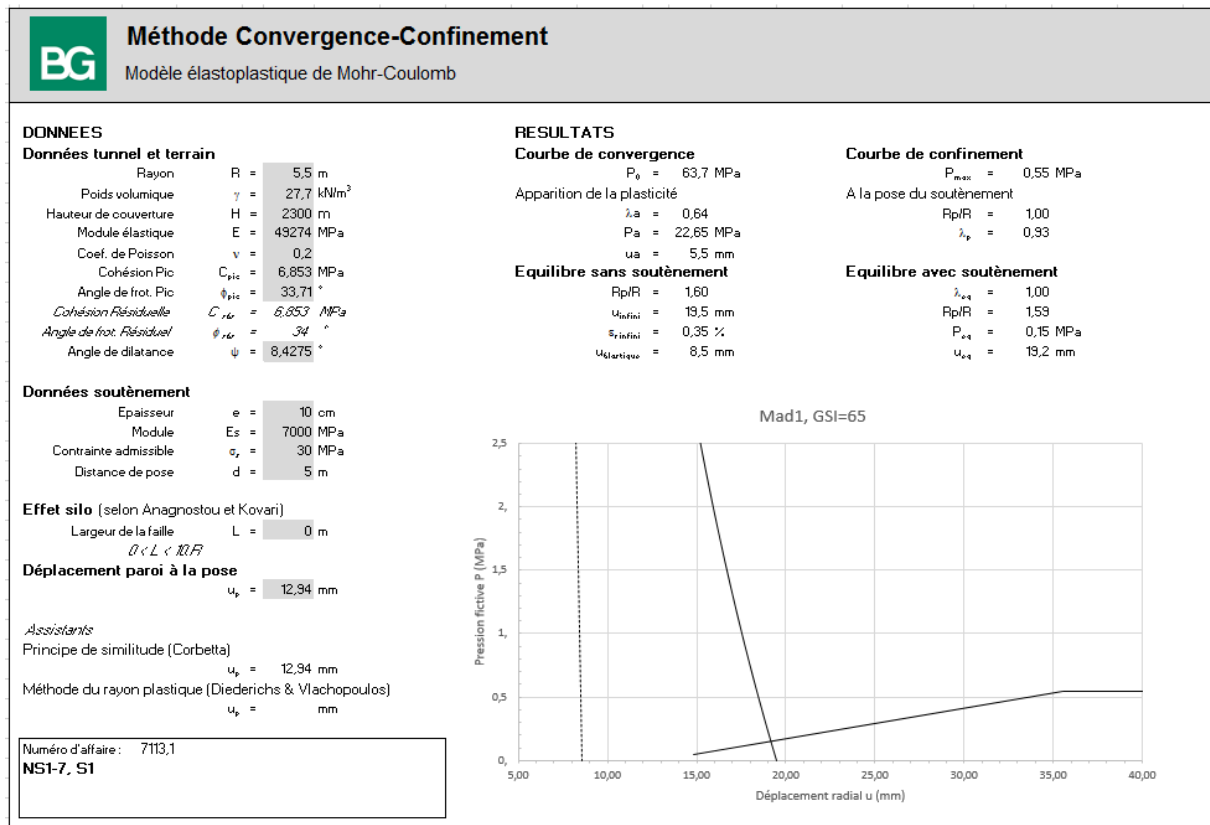


Figura 5: Curva caratteristica del comportamento intrinseco della sezione allargata e del sostegno

All'equilibrio, si ottengono uno spostamento radiale $u_{eq}=1.9$ cm ed un raggio plastico di 8.7 m (corrispondente ad una fascia plastica di 3.2 m).

Il tasso di deconfinamento è pari a $\lambda=0.93$.

6.2.2 Maddalena 1, sezione tipo S2, GSI=50

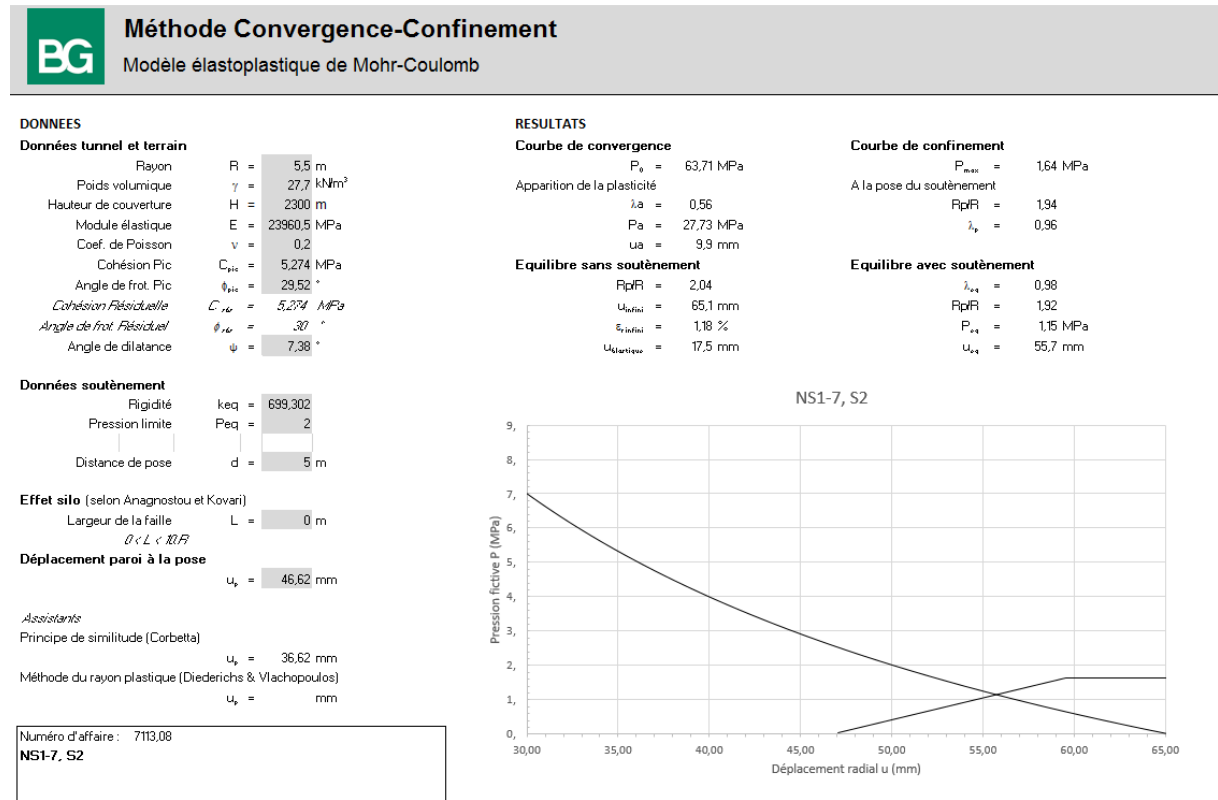


Figura 6: Curva caratteristica del comportamento della sezione allargata con sostegno

All'equilibrio, si ottengono uno spostamento radiale $u_{eq}=5.6$ cm ed un raggio plastico di 10.6 m (corrispondente ad una fascia plastica di 5.1 m).

Come si può osservare, i sostegni si attivano quando gran parte della deformazione è già avvenuta. Il tasso di deconfinamento è infatti pari a $\lambda=0.96$. Il fenomeno è tipico di gallerie molto profonde.

6.2.3 Maddalena 1, sezione tipo S2, GSI=65 multilaminare

Si rimanda al § 6.2.1. Il comportamento anisotropico dell'ammasso non è rappresentabile con il metodo delle linee caratteristiche, esso verrà implementato nel modello numerico al § 8.2.3.

6.2.4 Connessione 1, nicchia NS9, sezione tipo S1, GSI=60

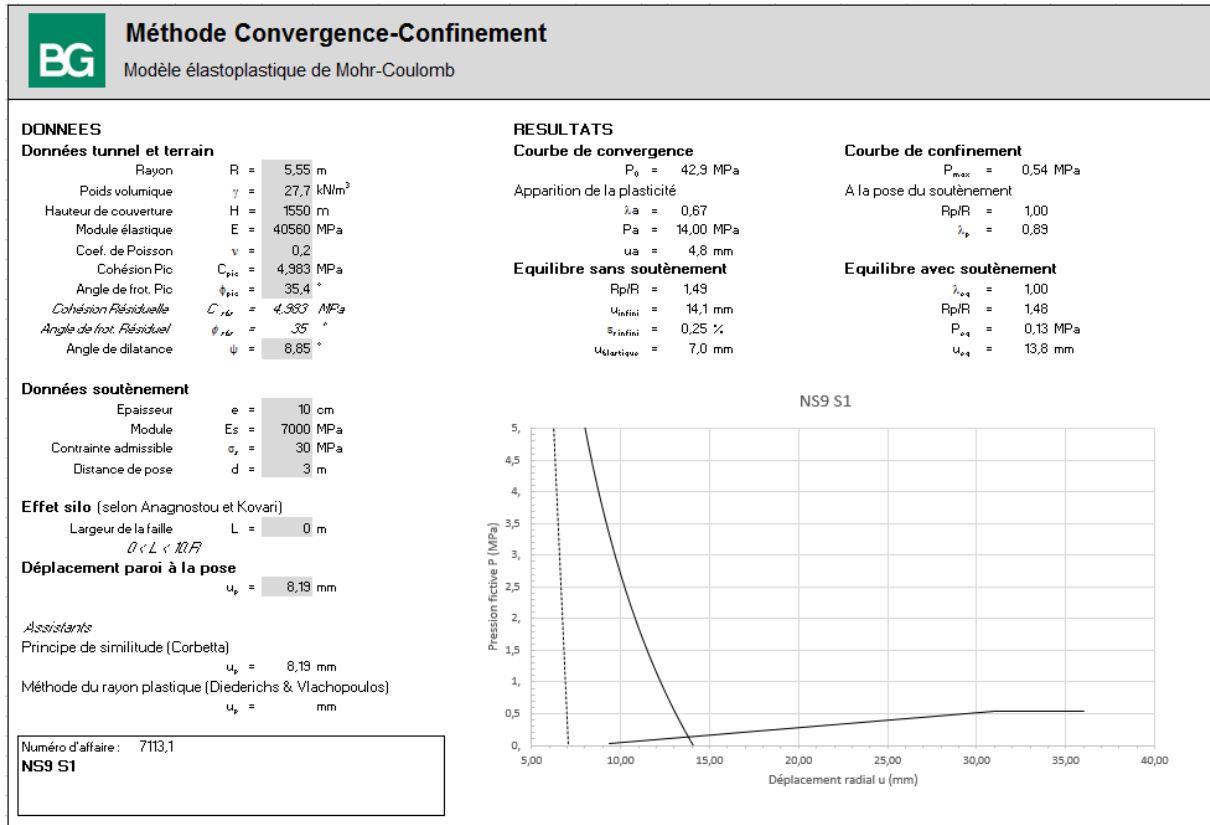


Figura 7: Curva caratteristica del comportamento intrinseco della nicchia NS9 S1 e del sostegno

All'equilibrio, si ottengono uno spostamento radiale $u_{eq}=1.38$ cm ed un raggio plastico di 8.21 m (corrispondente ad una fascia plastica di 2.66 m).
 Il tasso di deconfinamento inserito nel modello FEM2D è di $\lambda=0.89$.

6.2.5 Connessione 1, nicchia NS9, sezione tipo S2, GSI=65

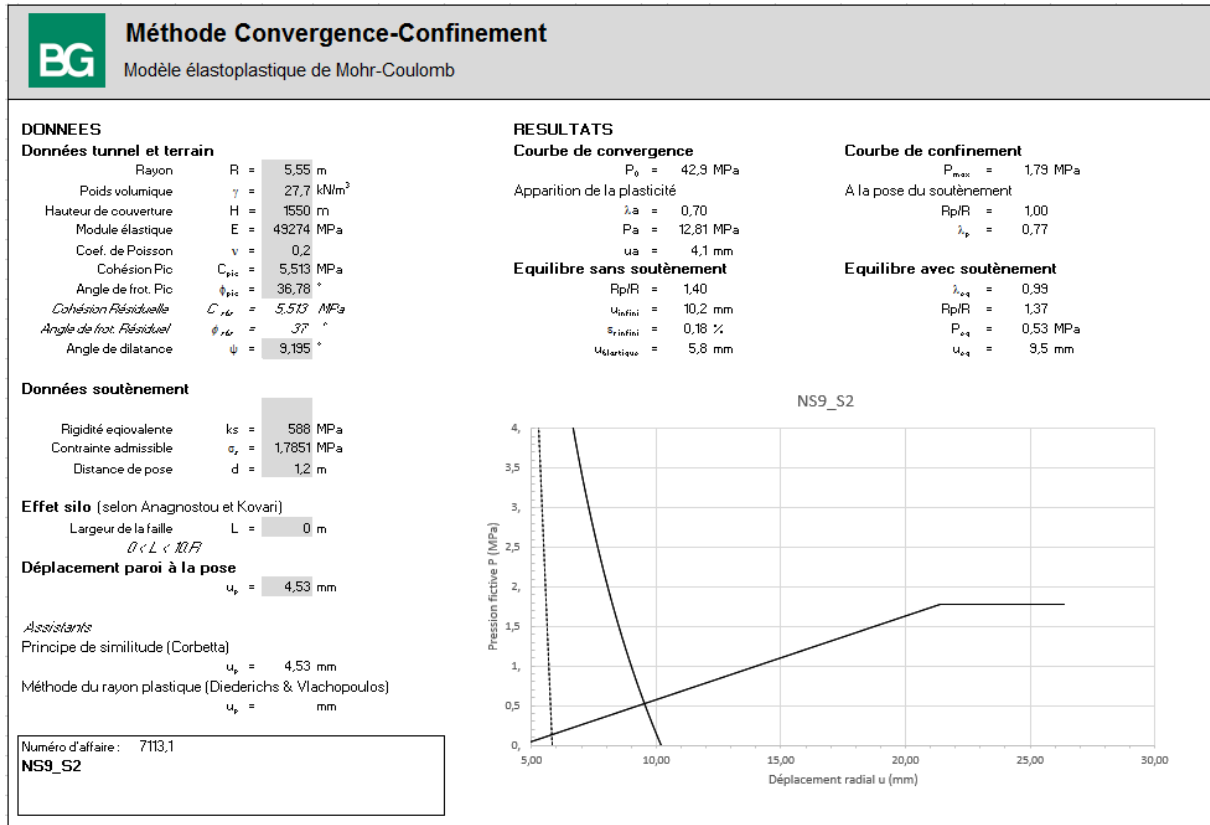


Figura 8: Curva caratteristica del comportamento intrinseco della nicchia NS9 S2 e del sostegno

All'equilibrio, si ottengono uno spostamento radiale $u_{eq}=0.95$ cm ed un raggio plastico di 7.6 m (corrispondente ad una fascia plastica di 2.05 m).

Il tasso di deconfinamento inserito nel modello FEM2D è di $\lambda=0.77$.

7. Analisi con il modello ad elementi finiti

7.1 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).

A differenza del metodo delle linee caratteristiche, l'analisi FEM 2D permette di simulare le fasi di scavo.

Per quanto riguarda le nicchie realizzate in allargamento della sezione corrente (in Maddalena 1) è dunque stato rappresentato dapprima lo scavo della galleria geognostica (sezione di raggio 3.15 m con sostegno) e poi l'allargamento della nicchia (vedi figura seguente).

Per la galleria geognostica (sezione corrente) si è considerata la sezione tipo F5, che è la più pesante e che è stata effettivamente messa in opera in corrispondenza delle tratte che presentano un GSI=50.

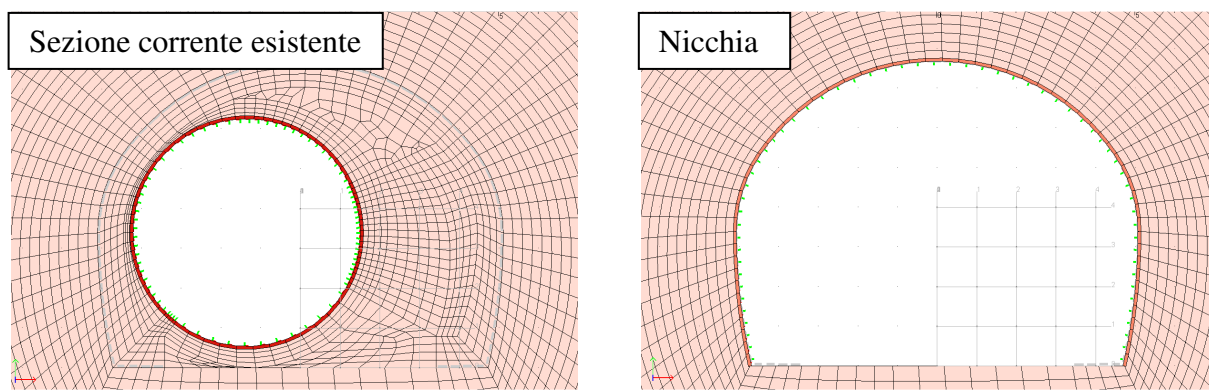


Figura 9: Fasi di scavo per le sezioni allargate

Per il ramo di inversione e la nicchia NS9 si considera la sezione scavata in una sola fase.

La legge costitutiva utilizzata è elastica-perfettamente plastica, con i criteri di rottura seguenti:

- Maddalena 1, sezione tipo S1: Hoek e Brown;
- Maddalena 1, sezione tipo S2, sezione allargata: Mohr-Coulomb, a causa della maggiore fratturazione dell'ammasso (GSI=50) e per motivi di calcolo numerico;
- Maddalena 1, sezione tipo S2, ramo di inversione: Hoek e Brown con modello multilaminare;
- Nicchia NS9, sezione tipo S1: Hoek e Brown;
- Nicchia NS9, sezione tipo S2: Hoek e Brown con modello multilaminare.

I parametri utilizzati sono quelli elencati al § 5.2.

Il modello multilaminare permette di rappresentare meglio i fenomeni di rilascio osservati nella galleria di Maddalena. Esso 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) mentre le altre discontinuità presenti nella roccia sono rappresentate grazie al GSI.

Per quanto riguarda i parametri attribuiti ai giunti, il ritorno di esperienza della Maddalena (relazione PRV_C3B_7200_26-48-01) ha permesso di definire l'angolo di resistenza al taglio e la coesione indicati nella tabella seguente. La dilatanza è stata assunta pari a $2/3 \phi$.

ϕ [°]	ψ [°]	c [MPa]
31	20	0.5

Tabella 3: Caratteristiche meccaniche dei piani di scistosità

L'ammasso roccioso è stato modellato con una maglia quadrilatera.

Per il sostegno sono utilizzati elementi "BEAM". Per gli ancoraggi sono utilizzati elementi "NAIL".

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 13 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.

Il tasso di deconfinamento λ inserito nel programma è quello ottenuto tramite il metodo di convergenza-confinamento. In questo modo si tiene conto dello 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.

Per quanto riguarda la sezione tipo S2 in Maddalena 1, la sezione resistente è composta dal cls proiettato e dalle centine HEB 180. Una sezione equivalente è stata inserita nel programma di calcolo, tramite elementi di tipo "BEAM" caratterizzati dai parametri seguenti (modello elastico):

$$t_{eq} = 0.29 \text{ m}$$

$$E_{eq} = 12470 \text{ MPa}$$

In modo conservativo, la presenza di fibre non è stata presa in conto né nei calcoli né nella verifica.

Nel caso della sezione tipo S2 della nicchia NS9, in prima fase vengono modellizzati 5 cm di calcestruzzo proiettato e le centine tramite elementi "BEAM" caratterizzati da:

$$t_{eq} = 0.23 \text{ m}$$

$$E_{eq} = 6410 \text{ MPa}$$

In seconda fase vengono aggiunti 20 cm di calcestruzzo, i parametri della sezione equivalente costituita da 25 cm di cls e dalle centine sono dunque:

$$t_{eq} = 0.26 \text{ m}$$

$$E_{eq} = 11500 \text{ MPa}$$

In tutti gli altri casi gli elementi "BEAM" hanno un comportamento elastico.

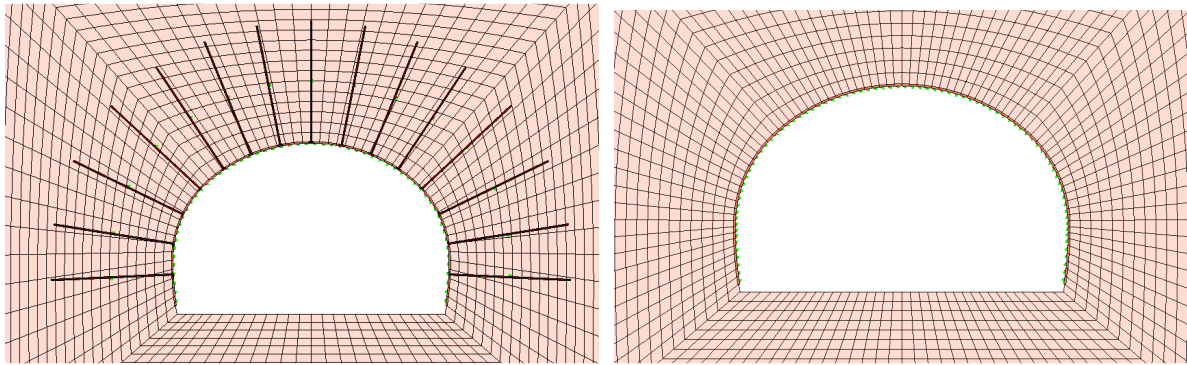


Figura 10: Modello numerico del sostegno della nicchia NS9 S1 e S2

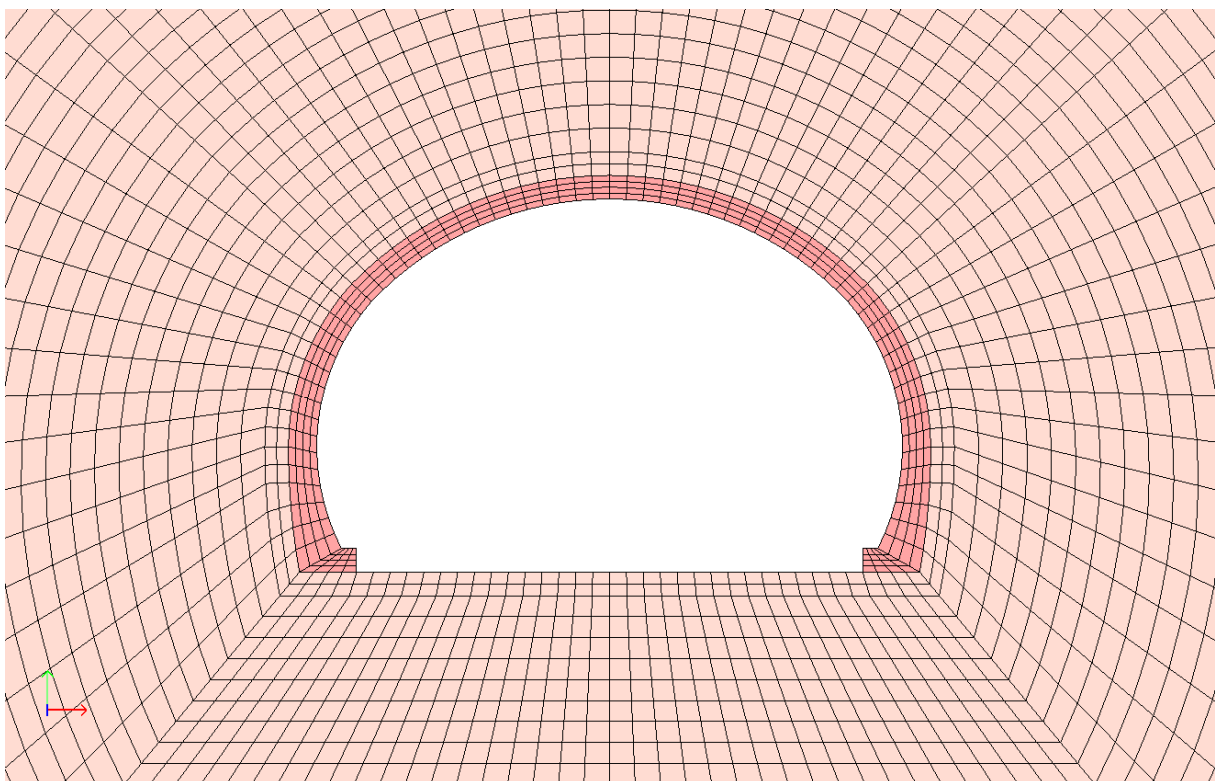


Figura 11: Modello numerico del rivestimento della nicchia NS9

8. Verifica strutturale dei sostegni

8.1 Materiali e resistenze di calcolo

Di seguito sono riportati i materiali impiegati e le resistenze di calcolo considerate per i sostegni.

Calcestruzzo proiettato C25/30, spessore 25 cm:

$$f_{ck} = 25 \text{ MPa}$$

$$f_{cd} = \frac{f_{ck}}{1.5} = 16.7 \text{ MPa}$$

Centine in acciaio S355, HEB 180:

$$f_{yk} = 355 \text{ MPa}$$

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{1.05} = 338 \text{ MPa}$$

Bulloni Swellex Mn24

$$N_R = 200 \text{ kN}$$

8.2 Verifica dell'interazione M-N e verifica dei bulloni

Per la verifica all'interazione a pressoflessione dei sostegni si considerano le tre sezioni determinanti che presentano:

1. Valore assoluto del momento massimo e sforzo normale presente nella medesima sezione.
2. Sforzo normale massimo e momento presente nella medesima sezione.
3. Sforzo normale minimo e momento presente nella medesima sezione.

Per quanto riguarda la bullonatura, si verificano resistenza a trazione e deformazione limite. I bulloni utilizzati sono del tipo Swellex Mn24:

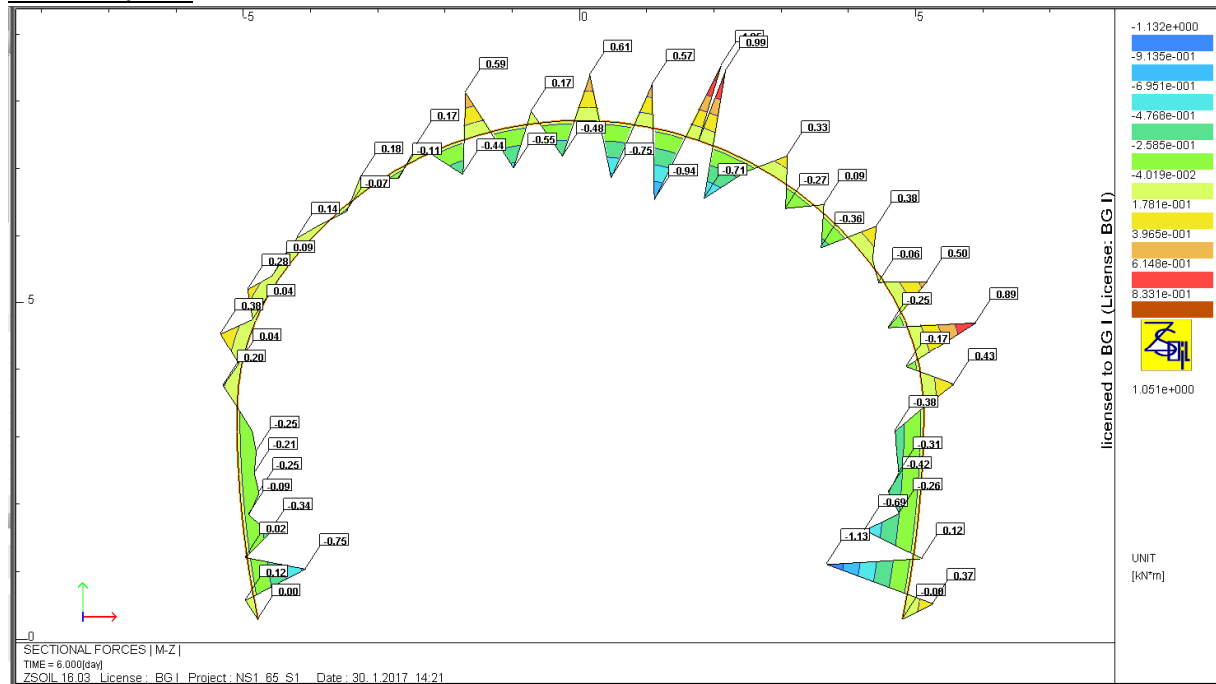
$$N_{Ed} \leq \frac{N_R}{\gamma_{M0}} = \frac{200 \text{ kN}}{1.05} = 190.5 \text{ kN}$$

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

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

8.2.1 Maddalena 1, sezione tipo S1, GSI=65

Sollecitazioni:



Note de calcul des niches / Relazione di calcolo delle nicchie

Figura 12: Sollecitazione al momento, S1, GSI=65

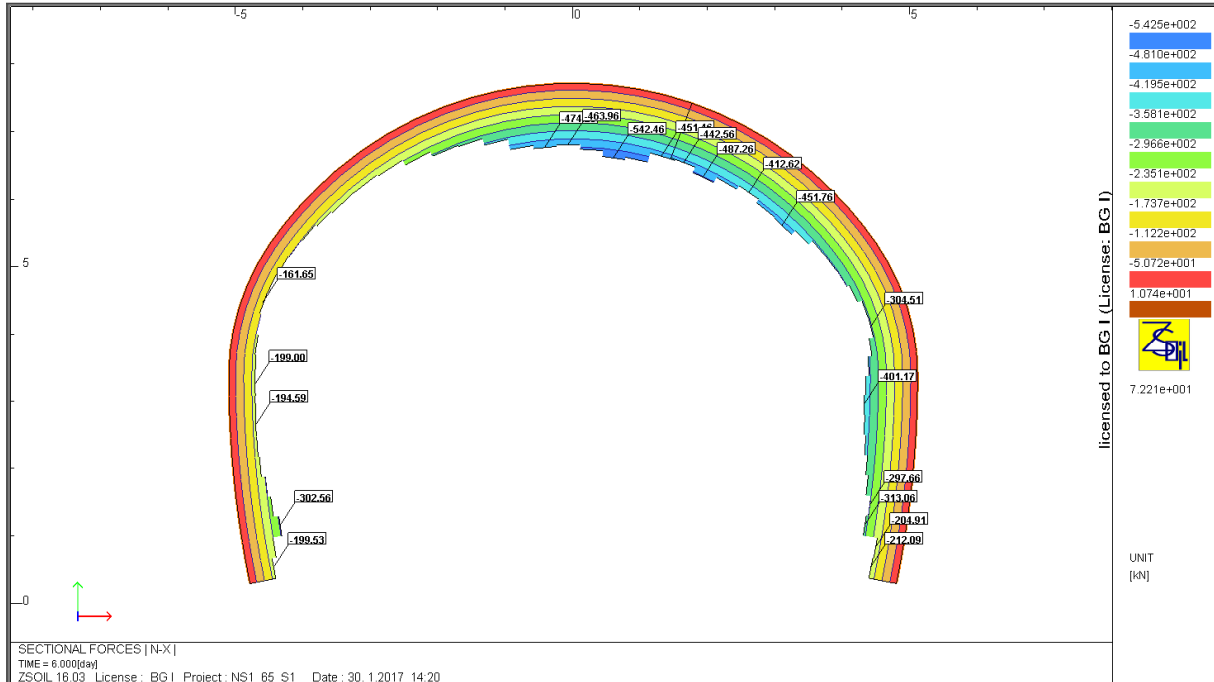


Figura 13: Sollecitazione allo sforzo normale, S1, GSI=65

Si può notare come, a causa del fasaggio di scavo, le sollecitazioni nella sezione sono asimmetriche.

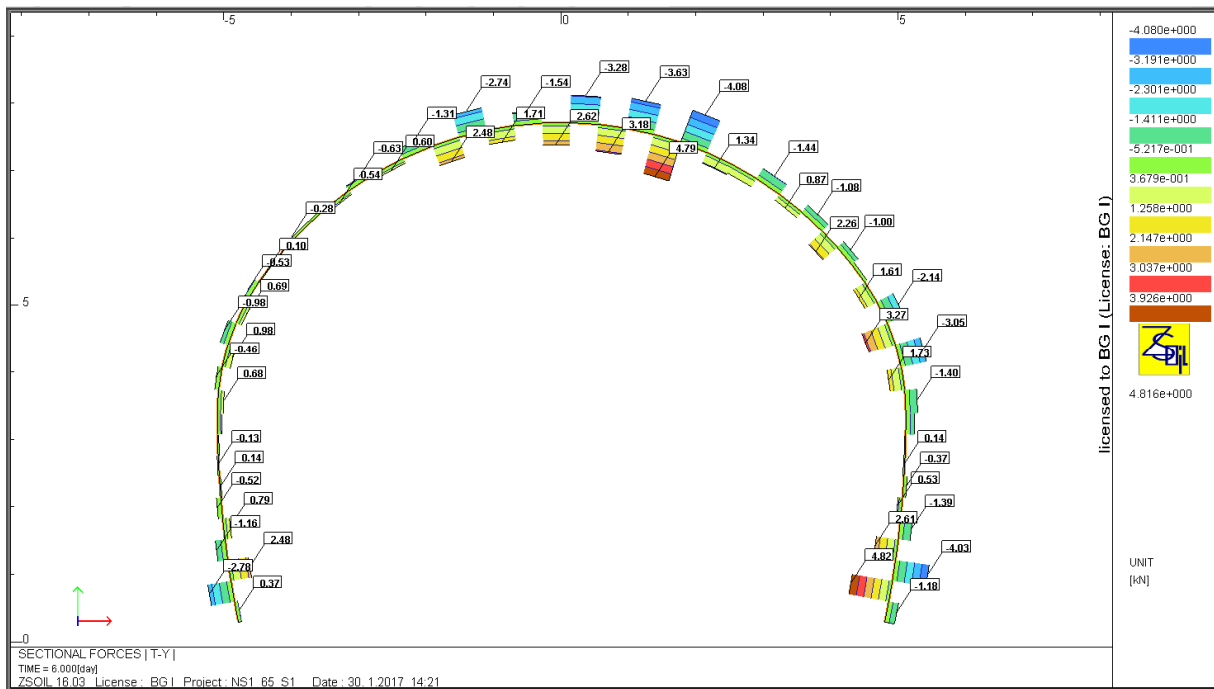


Figura 14: Sollecitazione allo sforzo di taglio, S1, GSI=65

Note de calcul des niches / Relazione di calcolo delle nicchie

Combinazione	Sforzi			Sforzi di calcolo		
	M _{EELS}	N _{EELS}	V _{EELS}	M _{ELU}	N _{ELU}	V _{ELU}
	[kNm]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kN]	[kN]
M _{min/max} , N, V	-1,13	212,00	4,8	-1,47	275,6	6,24
M, N _{max} , V _{max}	0,99	543,00	4,8	1,29	705,9	6,24

Tabella 4: Sollecitazioni nella sezione



Calcul de la courbe d'interaction du béton non fibré

selon les recommandations de l'AFTES "utilisation du béton non armé en tunnel"
 et "compatibilité avec les Eurocodes"

BG - 2014

Données

Largeur section b =	1 m
Epaisseur section h _w =	0,1 m
Résistance du béton à la compression f _{ck} =	25 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

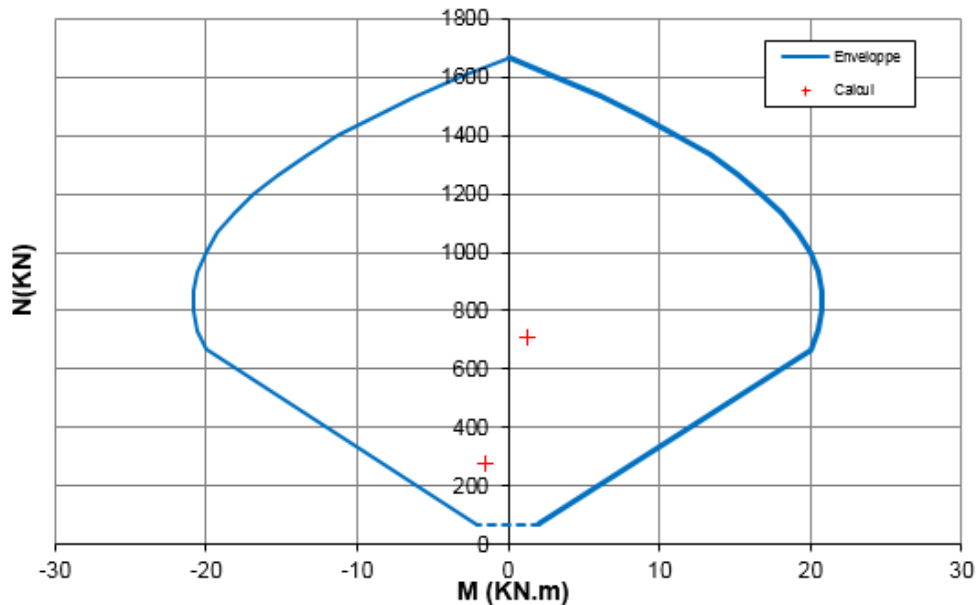


Figura 15: Interazione M-N per la sezione di 10 cm di cls

La sezione in calcestruzzo proiettato è verificata a pressoflessione con un fattore di sicurezza pari a FS=2.25.

Verifica all'interazione N+V:

Note de calcul des niches / Relazione di calcolo delle nicchie

V_{Ed} [kN]	x [m]	τ_{cp} [MPa]	σ_{cp} [MPa]	f_{ctd} [MPa]	σ_{clim} [MPa]	f_{cvd} [MPa]	Verifica	FS
6,24	0,10	0,09	2,76	1,20	7,42	2,18	OK	23,2
6,24	0,10	0,09	7,06	1,20	7,42	3,14	OK	33,6

Tabella 5: Verifica al taglio

La sezione in calcestruzzo proiettato è verificata all'interazione N+V.

Sollecitazioni nei bulloni:

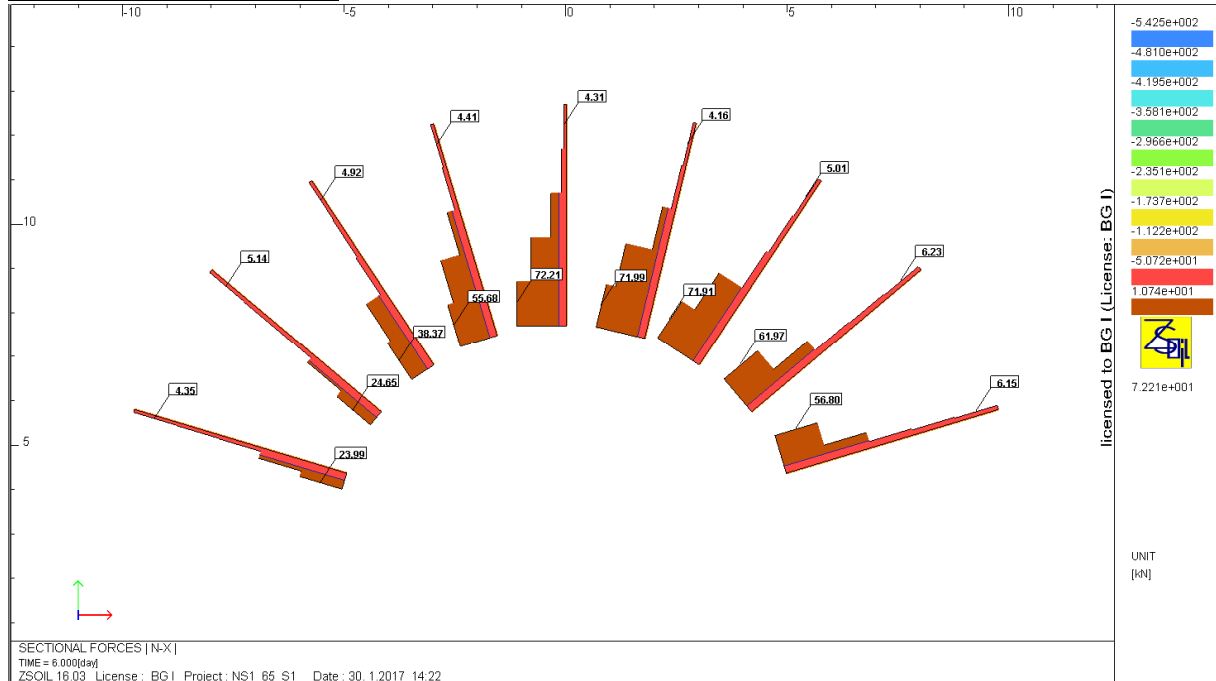


Figura 16: Sforzi nei bulloni

Per il bullone più sollecitato:

$$72 \text{ kN} \cdot 1.3 = 93.6 \text{ kN} < 190.5 \text{ kN}$$

$$FS = \frac{190.5}{93.6} = 2.04$$

$$0.23\% < 7 - 10\%$$

Note de calcul des niches / Relazione di calcolo delle nicchie

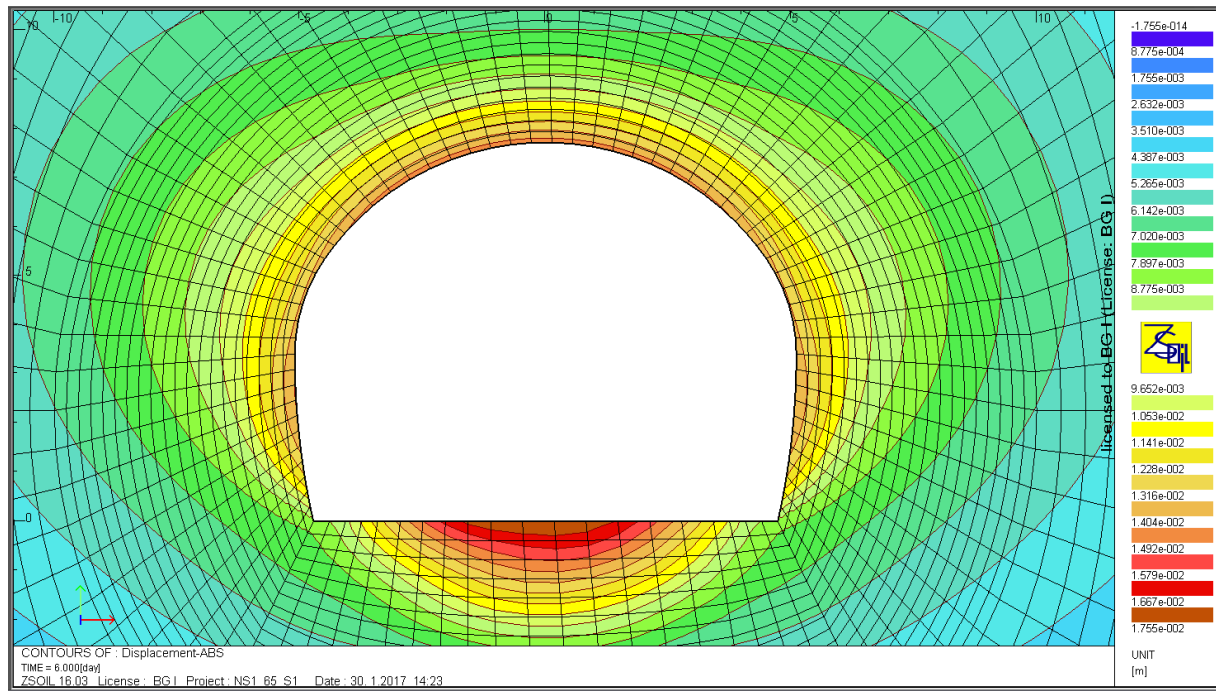


Figura 17: Spostamenti assoluti per sezioni allargate, GSI=65

Gli spostamenti radiali massimi sono in platea e pari a 1.8 cm. In calotta e nei piedritti lo spostamento radiale è di 1.5 cm.

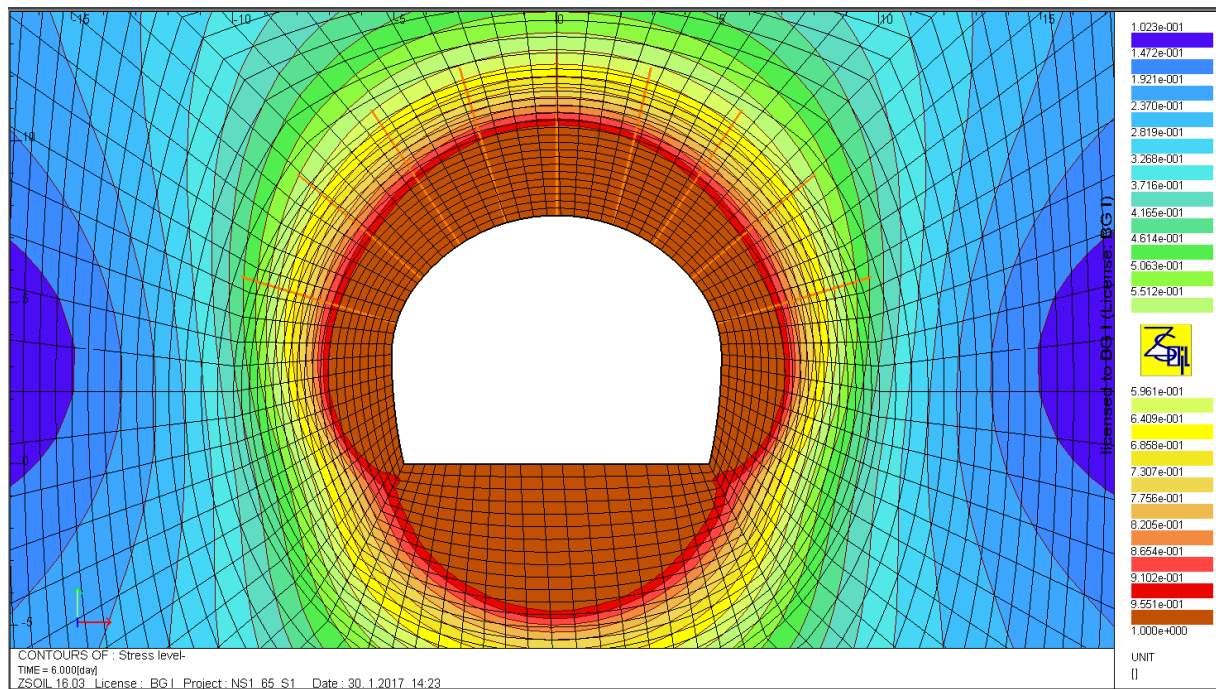


Figura 18: Zone plastiche per sezioni allargate, GSI=65

Lo spessore della banda plastica è di 2.7m in calotta, 1.9 m nei piedritti e 4.6 m in platea.

8.2.2 Maddalena 1, sezione tipo S2, GSI=50

Sollecitazioni

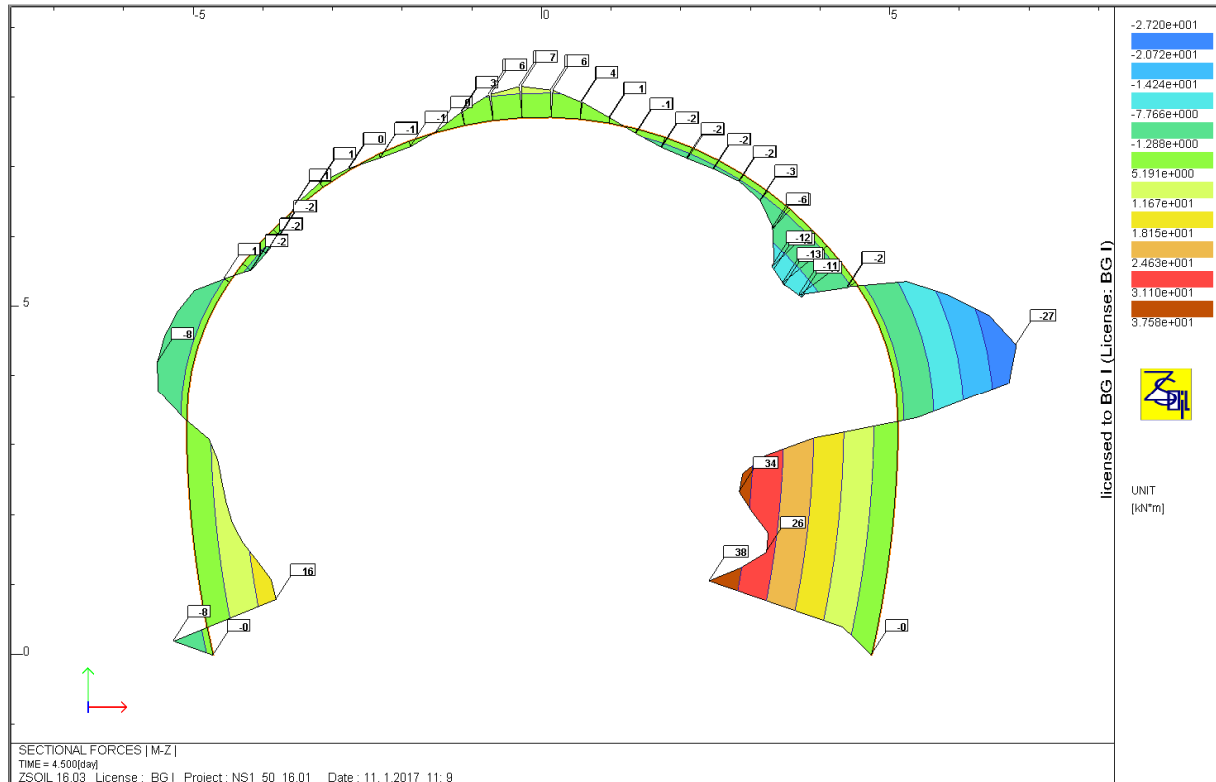


Figura 19: Sollecitazione al momento, S2, GSI=50

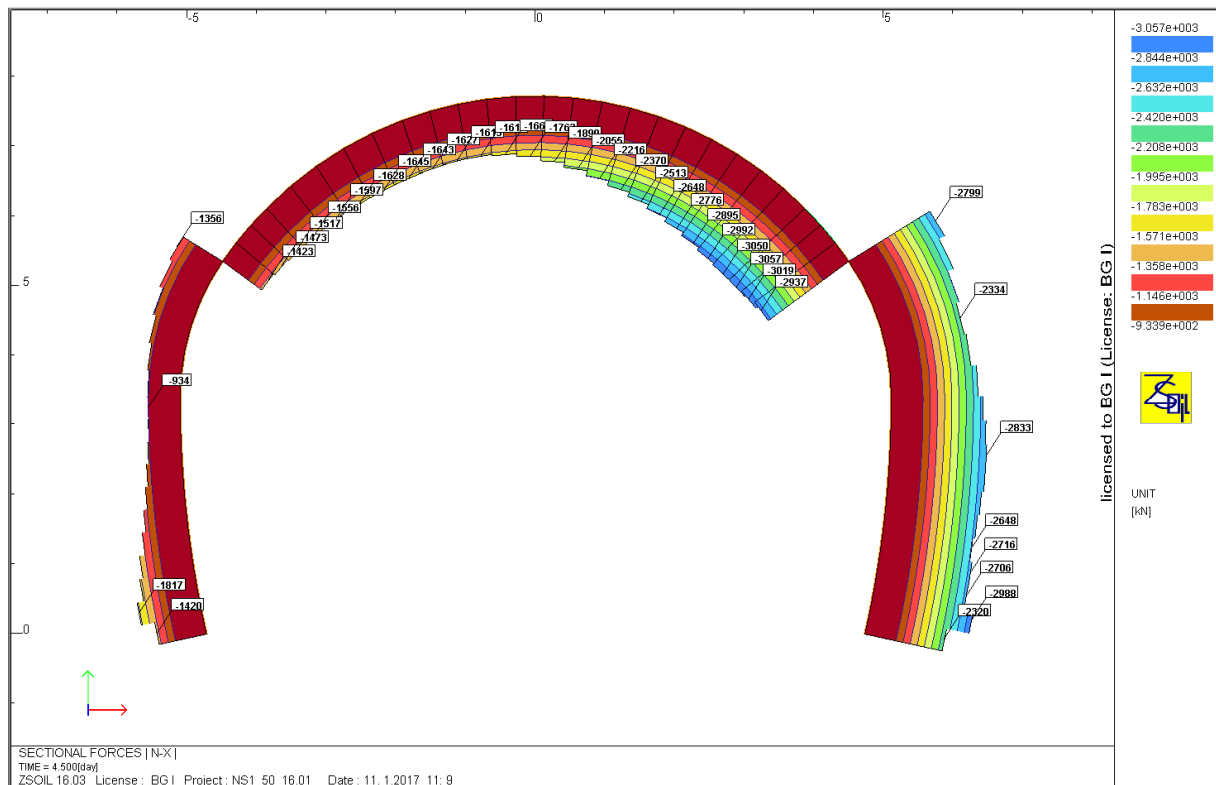


Figura 20: Sollecitazione allo sforzo normale, S2, GSI=50

Note de calcul des niches / Relazione di calcolo delle nicchie

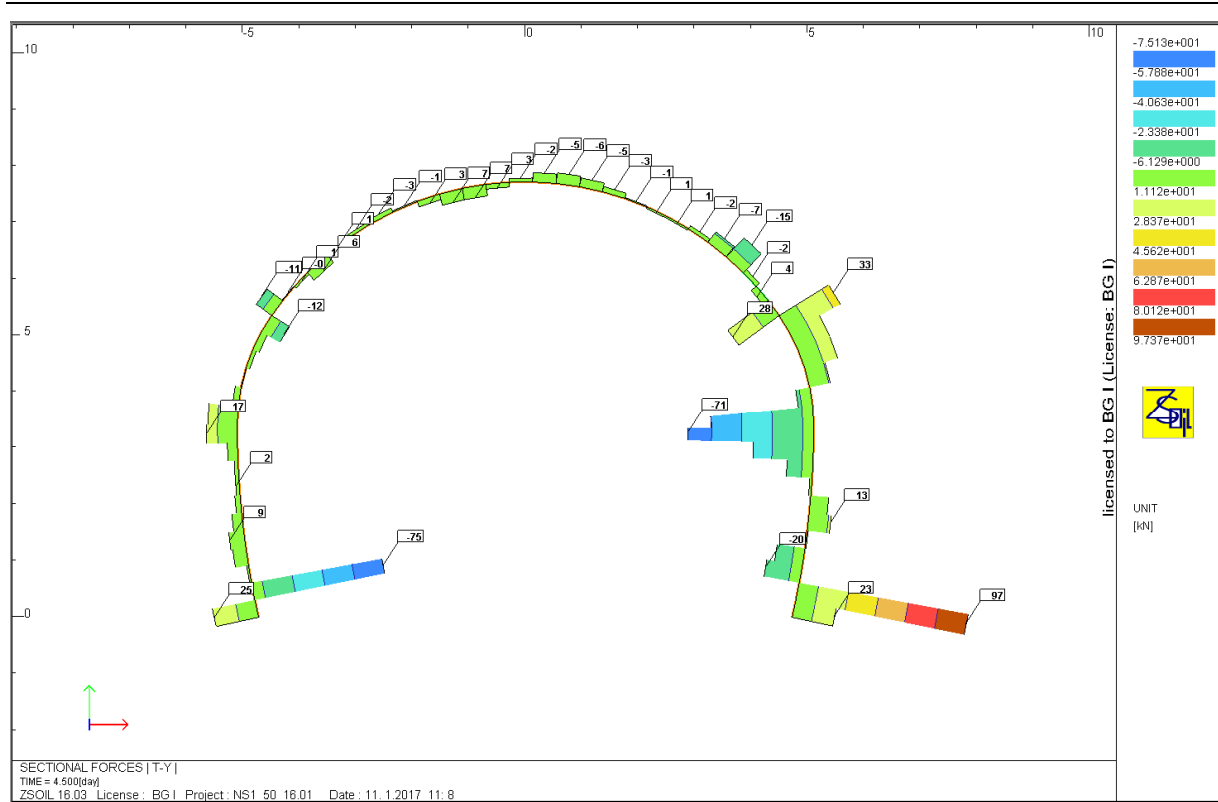


Figura 21: Sollecitazione allo sforzo di taglio, S2, GSI=50

Si può notare come, a causa del fasaggio di scavo, le sollecitazioni nella sezione sono asimmetriche.

Combinazione	M_{eq} [kNm]	N_{eq} [kN]	V_{eq} [kN]
$M_{max}, N_{max}, V_{max}$	-13,0	3057,0	4,0
M, N_{min}, V	38,0	2988,0	97,0

Tabella 6: Sollecitazioni nella sezione mista

Gli sforzi nella sezione equivalente si redistribuiscono tra centine e calcestruzzo:

Sforzi nel CLS					
$N_{b,SLS}$ [kN]	$M_{b,SLS}$ [kNm]	$V_{b,SLS}$ [kN]	$N_{b,SLU}$ [kN]	$M_{b,SLU}$ [kNm]	$V_{b,SLU}$ [kN]
1868,7	-8,7	2,7	2429,4	-11,3	3,5
1827,1	25,4	64,9	2375,2	33,0	84,4

Tabella 7: Sollecitazioni nel cls

Sforzi nella centina					
$N_{a,SLS}$ [kN]	$M_{a,SLS}$ [kNm]	$V_{a,SLS}$ [kN]	$N_{a,SLU}$ [kN]	$M_{a,SLU}$ [kNm]	$V_{a,SLU}$ [kN]
1188,3	-4,3	1,3	1544,7	-5,6	1,7
1160,9	12,6	32,1	1509,2	16,4	41,7

Tabella 8: Sollecitazioni nella centina

Verifica a pressoflessione

Note de calcul des niches / Relazione di calcolo delle nicchie

La verifica è svolta con il diagramma di interazione definito dalle raccomandazioni AFTES GT29 e GT7.

Données

Largeur section b =	1 m
Epaisseur section h_w =	0,25 m
Résistance du béton à la compression f_{ck} =	25 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

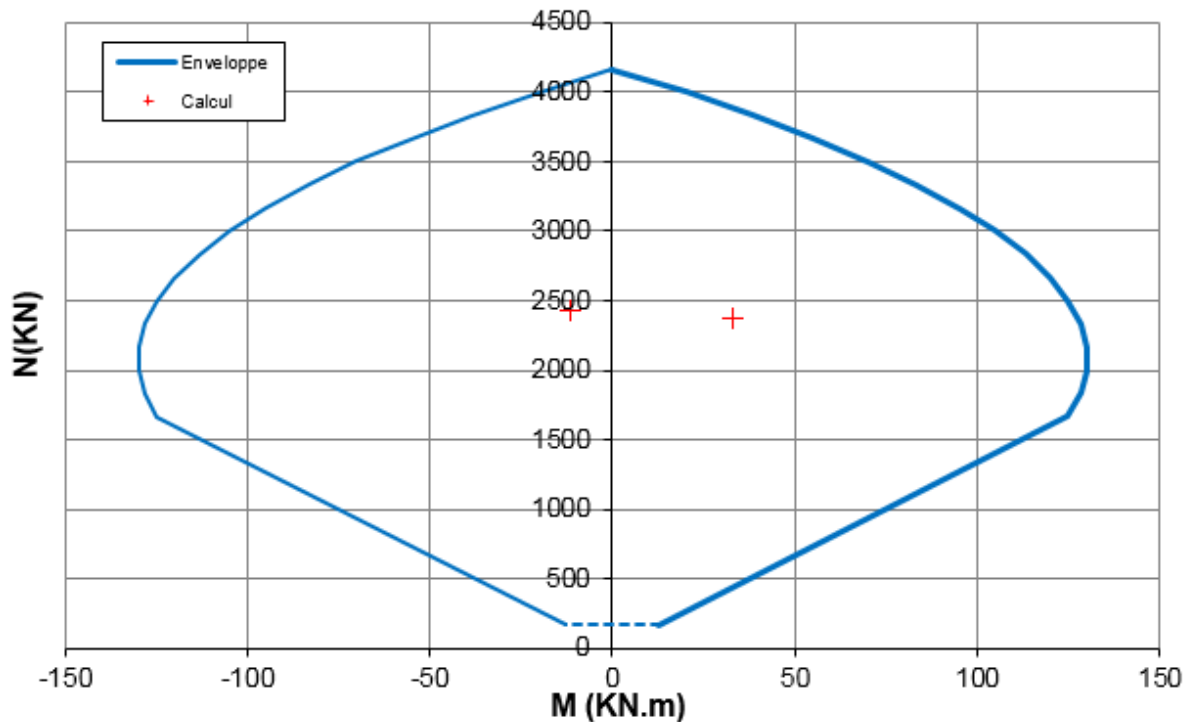


Figura 22: Interazione M-N per la sezione di 25 cm di cls

Il calcestruzzo progettato è verificato con un fattore di sicurezza pari a $FS=1.55$.

Note de calcul des niches / Relazione di calcolo delle nicchie

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

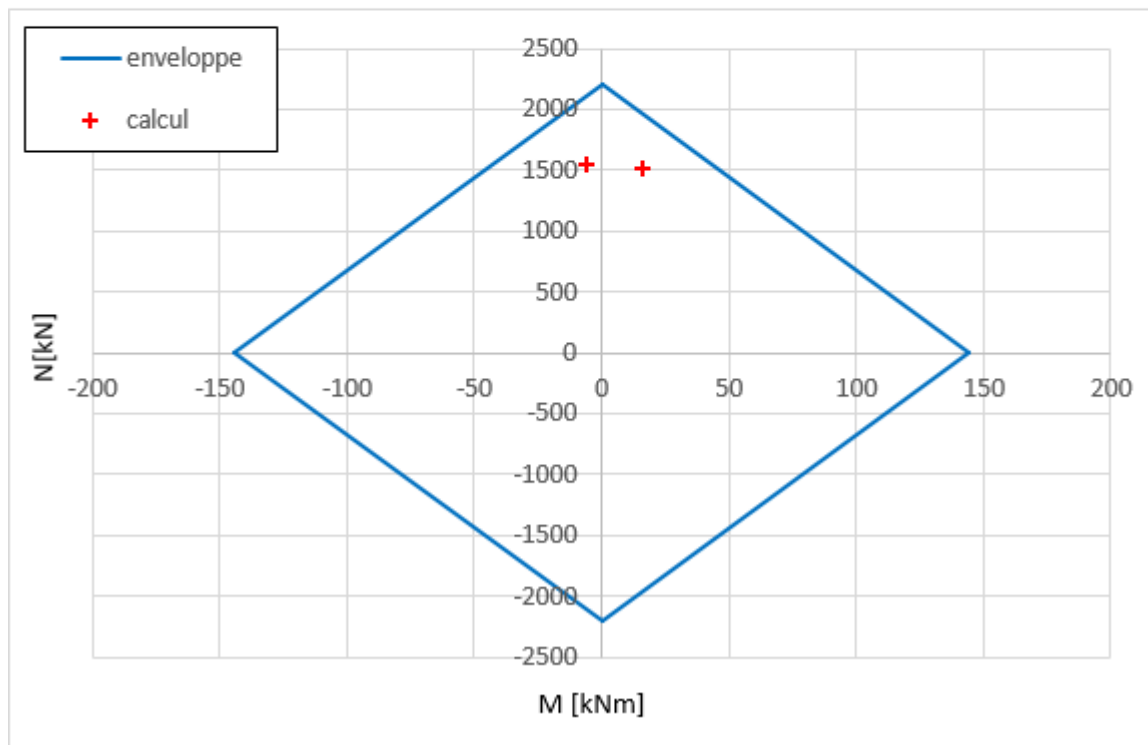


Figura 23: Interazione M-N per la sezione della centina HEB 180

La centina è verificata con un fattore di sicurezza pari a FS=1.25.

Verifica all'interazione N+V:

Calcestruzzo:

V_{Ed} [kN]	x [m]	τ_{cp} [MPa]	σ_{cp} [MPa]	f_{ctd} [MPa]	σ_{clim} [MPa]	f_{cvd} [MPa]	Verifica	FS
3,48	0,25	0,0	9,72	1,20	7,42	3,43	OK	164,18
84,36	0,25	0,51	9,50	1,20	7,42	3,42	OK	6,76

Tabella 9: Verifica al taglio

Centina:

Note de calcul des niches / Relazione di calcolo delle nicchie

$$V_{ELU,max} = 41.7 \text{ kN} < V_{Rd,HEB180} = 395 \text{ kN}$$

La sezione in calcestruzzo proiettato è verificata all'interazione N+V.

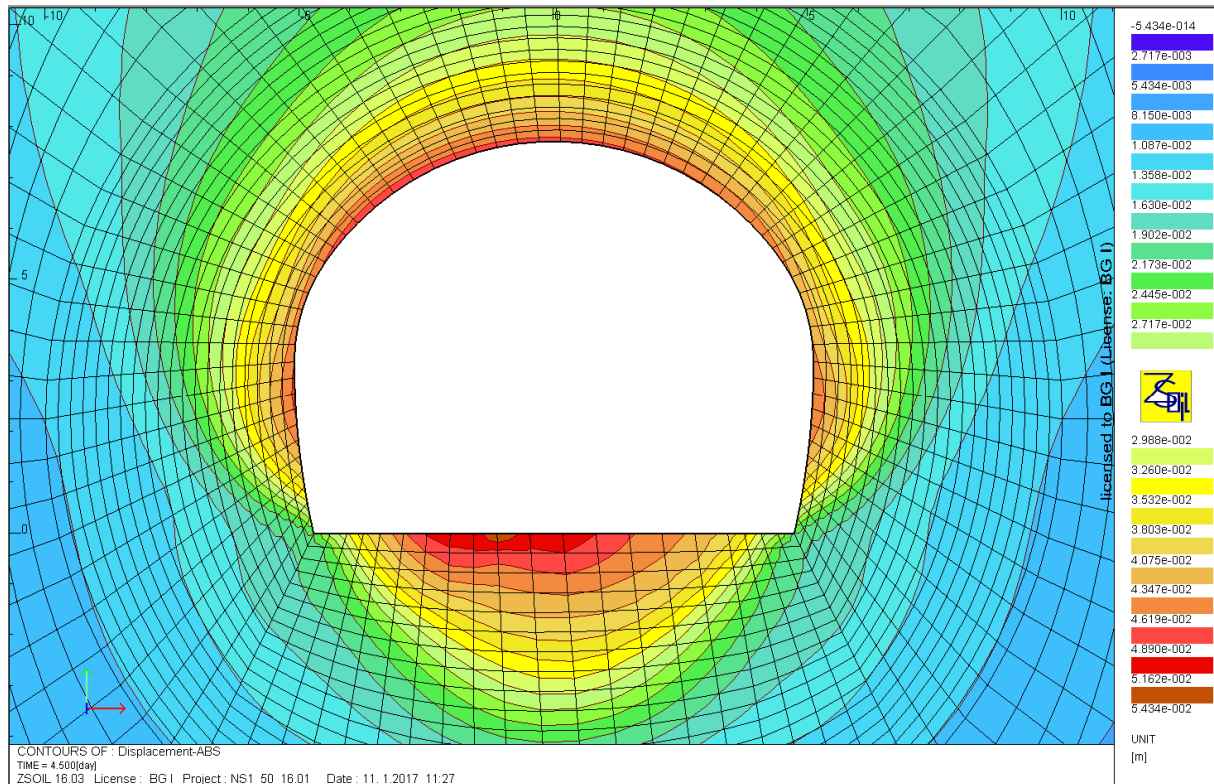


Figura 24: Spostamenti assoluti per sezioni allargate, GSI=50

Lo spostamento radiale massimo è nella zona della platea ed è pari a circa 5.4 cm.
In calotta e piedritti lo spostamento massimo è di circa 4.6 cm.

Note de calcul des niches / Relazione di calcolo delle nicchie

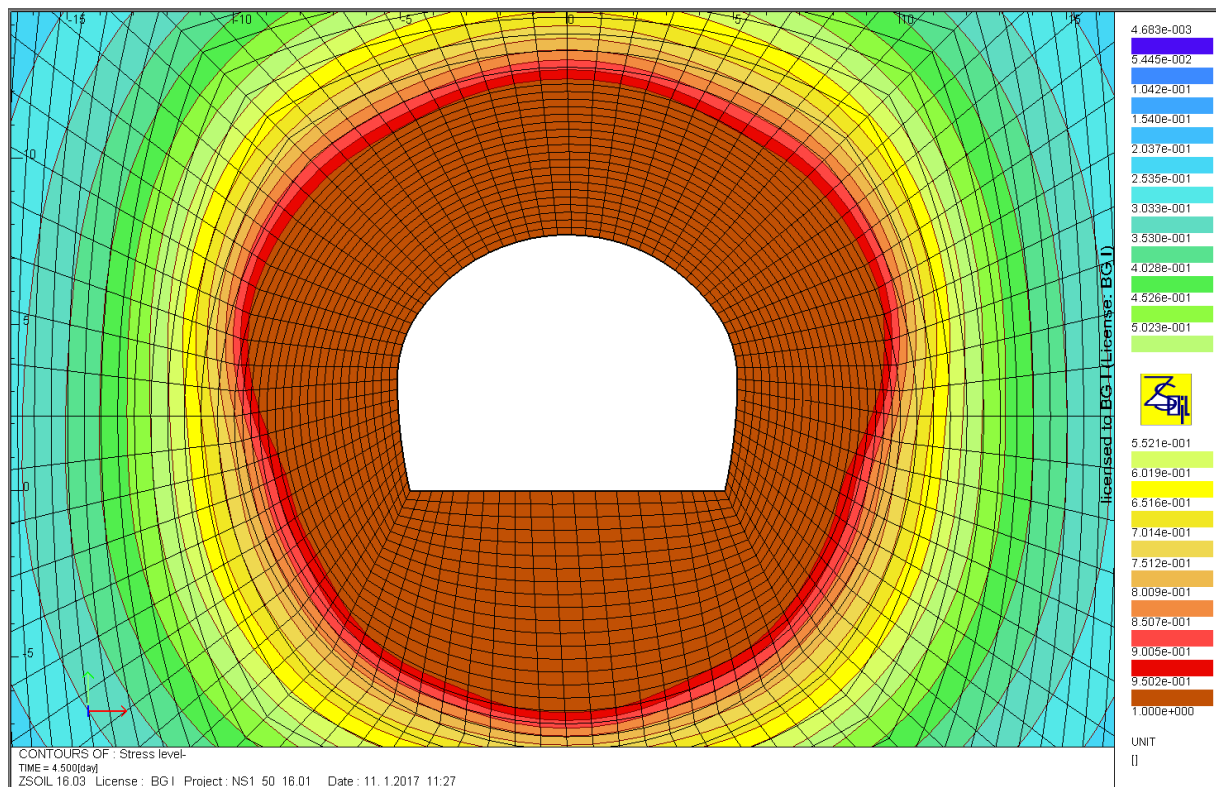


Figura 25: Zone plastiche per sezioni allargate, GSI=50

La banda plastica è costante sul contorno ed ha uno spessore di circa 5 m. Sotto la platea raggiunge i 6.6 m.

8.2.3 Maddalena 1, sezione tipo S2, ramo di inversione, GSI=65, modello multilaminare
Sollecitazioni

Note de calcul des niches / Relazione di calcolo delle nicchie

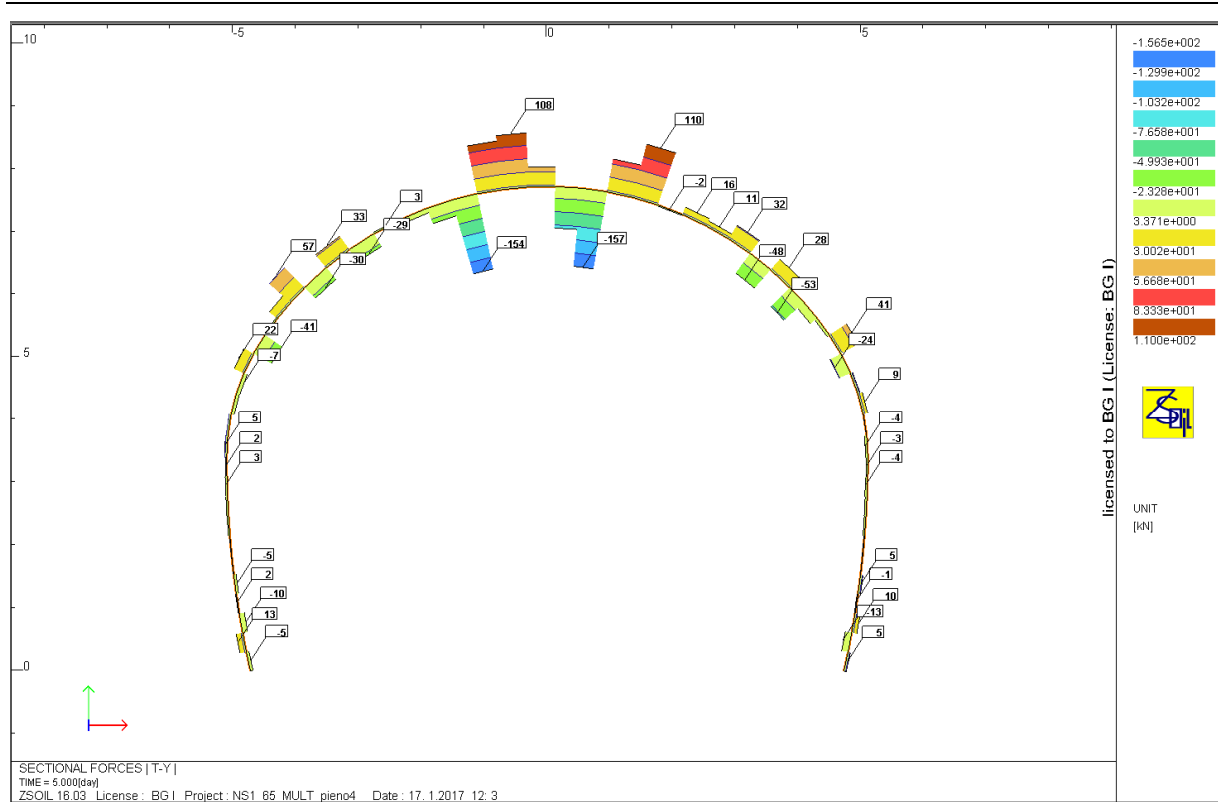


Figura 28: Sollecitazione allo sforzo di taglio, S2, GSI=65, modello multilaminare

	N_{eq} [kNm]	M_{eq} [kN]	V_{eq} [kN]
M, N_{max}, V	3573,0	21,4	108,0
M_{max}, N, V	1573,0	70,0	-154,0
M, N_{min}, V	26,0	0	-3,0

Tabella 10: Sollecitazioni nella sezione mista

Gli sforzi nella sezione equivalenti si redistribuiscono tra centine e calcestruzzo:

Sforzi nel CLS					
$N_{b,SLS}$ [kN]	$M_{b,SLS}$ [kNm]	$V_{b,SLS}$ [kN]	$N_{b,SLU}$ [kN]	$M_{b,SLU}$ [kNm]	$V_{b,SLU}$ [kN]
2001,9	11,3	57,2	2602,5	14,7	74,4
881,0	37,1	-81,6	1145,3	48,2	-106,1
14,6	0,0	-1,6	18,9	0,0	-2,1

Tabella 11: Sollecitazioni nel cls

Sforzi nella centina					
$N_{a,SLS}$ [kN]	$M_{a,SLS}$ [kNm]	$V_{a,SLS}$ [kN]	$N_{a,SLU}$ [kN]	$M_{a,SLU}$ [kNm]	$V_{a,SLU}$ [kN]
1571,1	10,1	50,8	2042,4	13,1	66,0
692,0	32,9	-72,4	899,6	42,8	-94,1
11,4	0,0	-1,4	14,9	0,0	-1,8

Tabella 12: Sollecitazioni nella centina

Verifica dell'interazione M e N

Note de calcul des niches / Relazione di calcolo delle nicchie

Données

Largeur section $b =$	1 m
Epaisseur section $h_w =$	0,25 m
Résistance du béton à la compression $f_{ck} =$	25 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

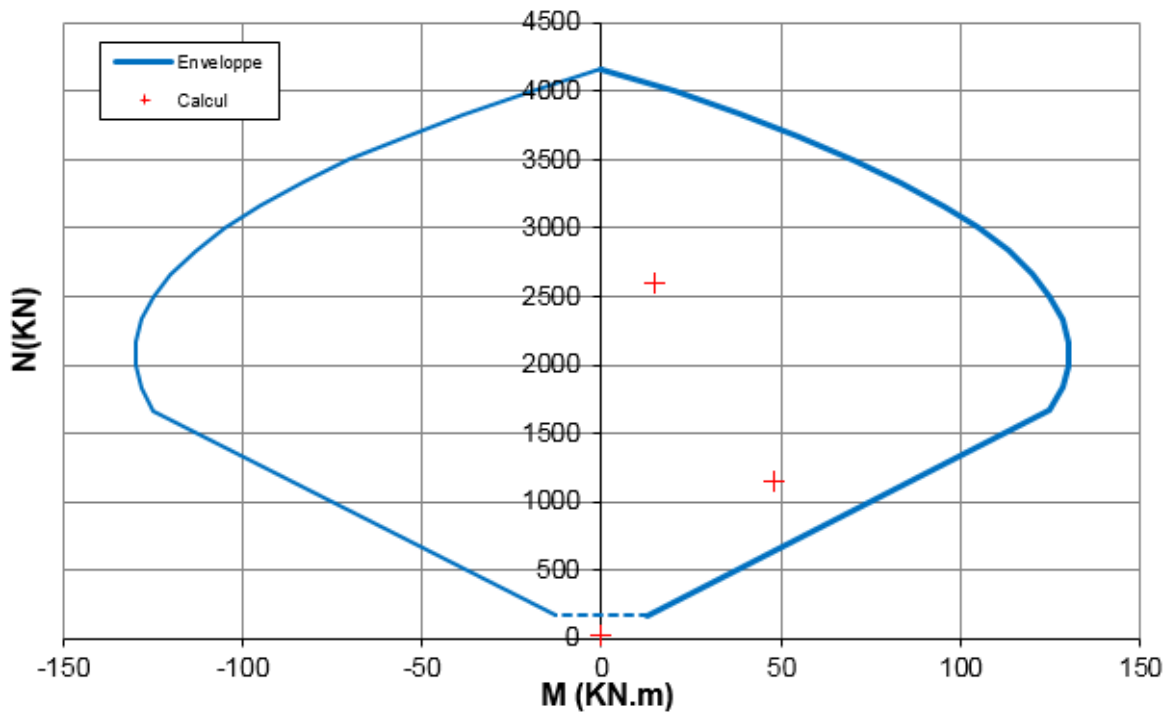


Figura 29: Interazione M-N per la sezione di 25 cm di cls

Il calcestruzzo progettato è verificato con un fattore di sicurezza pari a FS=1.5.

Note de calcul des niches / Relazione di calcolo delle nicchie

Données

Surface A =	7,00E-03 m ²
Moment d'inertie I =	3,83E-05 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

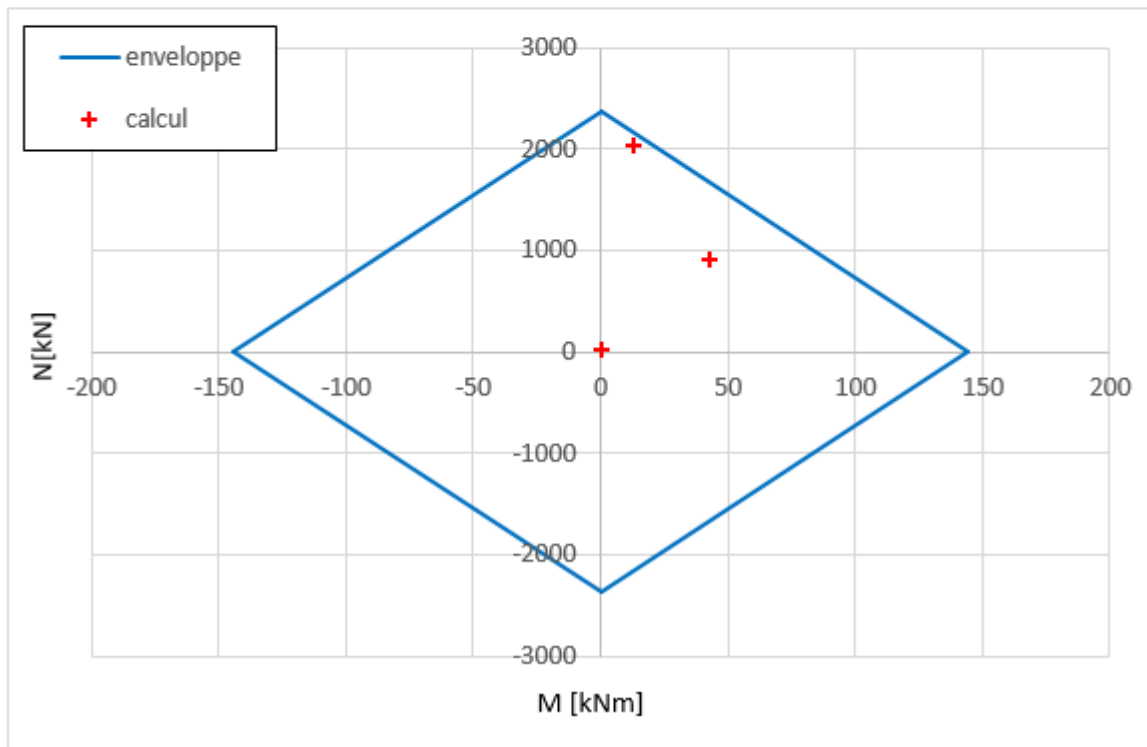


Figura 30: Interazione M-N per la sezione della centina HEB 180

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

Verifica all'interazione N+V:

Calcestruzzo:

V_{Ed} [kN]	x [m]	τ_{cp} [MPa]	σ_{cp} [MPa]	f_{ctd} [MPa]	σ_{clim} [MPa]	f_{cvd} [MPa]	Verifica	FS
74,42	0,25	0,4	10,41	1,20	7,42	3,41	OK	7,65
-106,11	0,21	-0,77	5,53	1,20	7,42	2,84	OK	3,69
-2,07	0,25	-0,01	0,08	1,20	7,42	1,23	OK	99,52

Tabella 13: Verifica al taglio

Note de calcul des niches / Relazione di calcolo delle nicchie

Centina:

$$|V_{ELU,max}| = 94.0 \text{ kN} < V_{Rd,HEB180} = 395 \text{ kN}$$

La sezione in calcestruzzo proiettato è verificata all'interazione N+V.

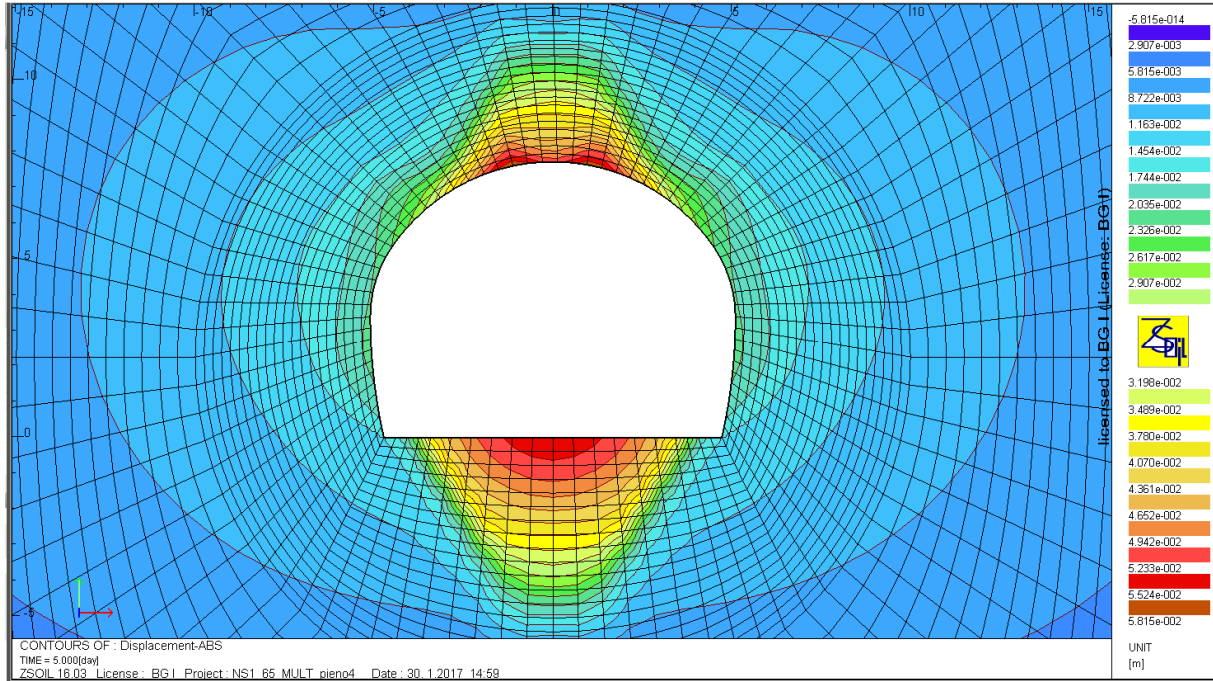


Figura 31: Spostamenti assoluti per ramo di inversione, GSI=65, modello multilaminare

Lo spostamento radiale massimo è in calotta ed è pari a circa 5.8 cm.

Nei piedritti lo spostamento è di circa 2.3 cm e in platea lo spostamento massimo di circa 5.5 cm.

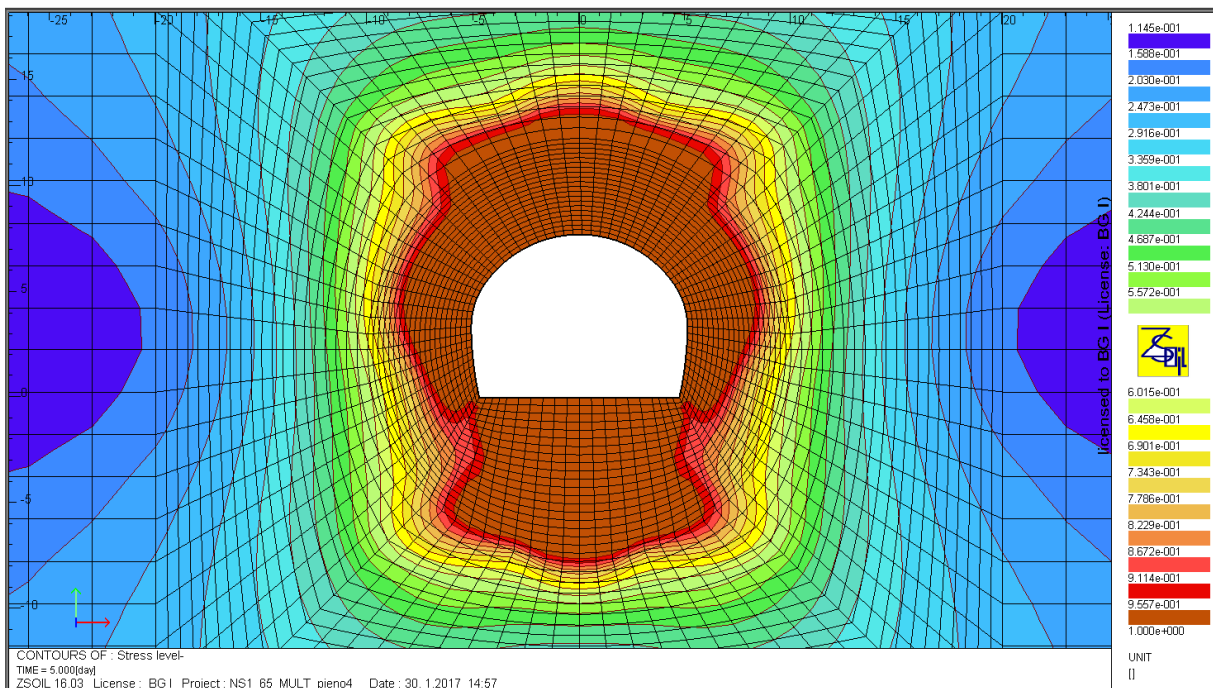


Figura 32: Zone plastiche per ramo di inversione, GSI=65, modello multilaminare

Note de calcul des niches / Relazione di calcolo delle nicchie

La zona plastica in chiave di volta ha una profondità di 5.5 m.
 In platea lo spessore arriva ad un massimo di 5.5 m.
 Nei piedritti la banda ha uno spessore di circa 3.5 m.

8.2.4 Connessione 1, nicchia NS9, sezione tipo S1, GSI=60

Sollecitazioni:

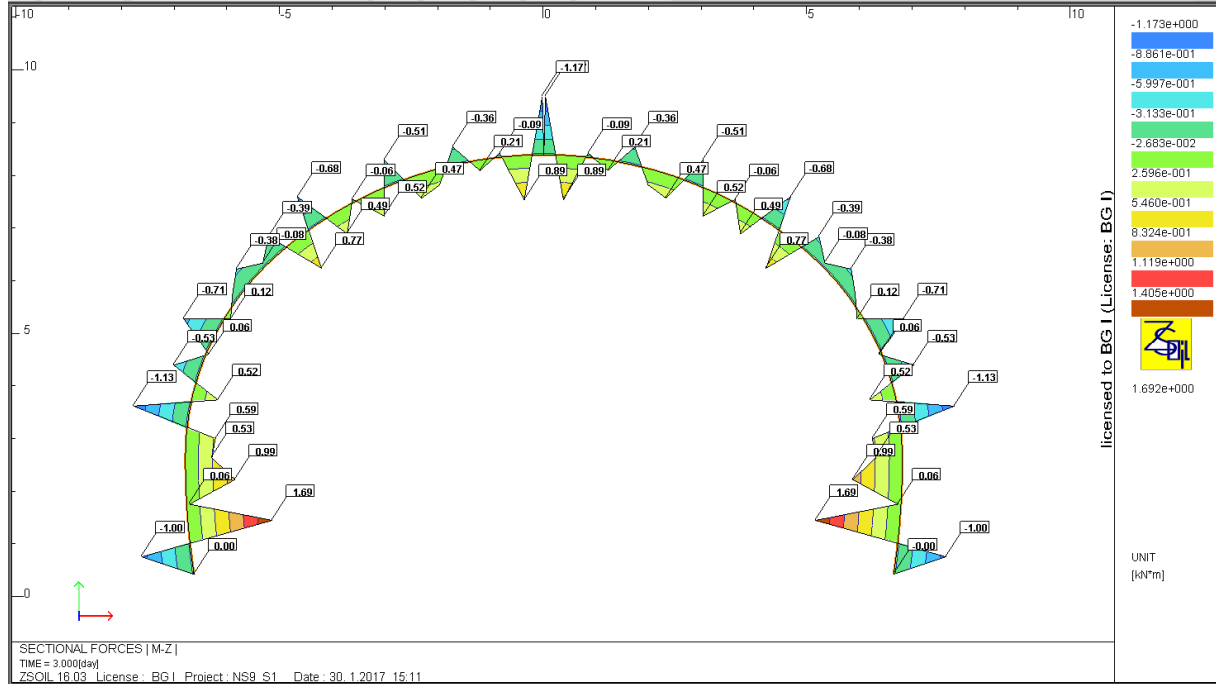


Figura 33: Sollecitazione al momento, S1, GSI=65

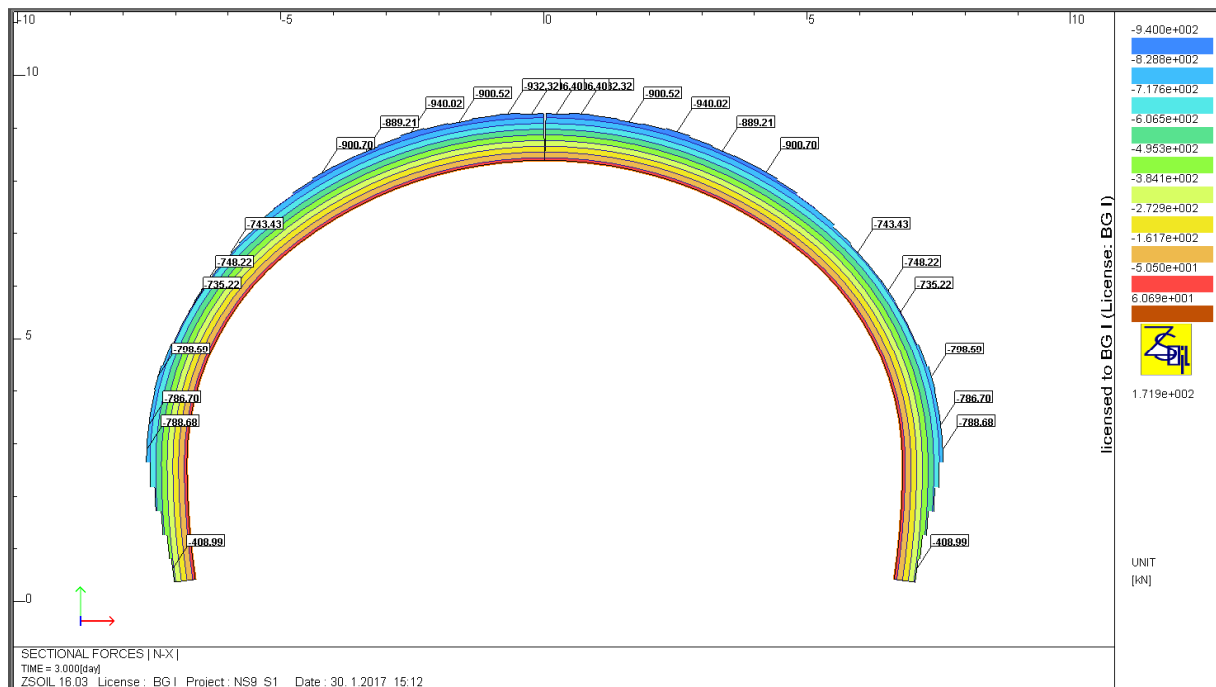


Figura 34: Sollecitazione allo sforzo normale, S1, GSI=65

Note de calcul des niches / Relazione di calcolo delle nicchie

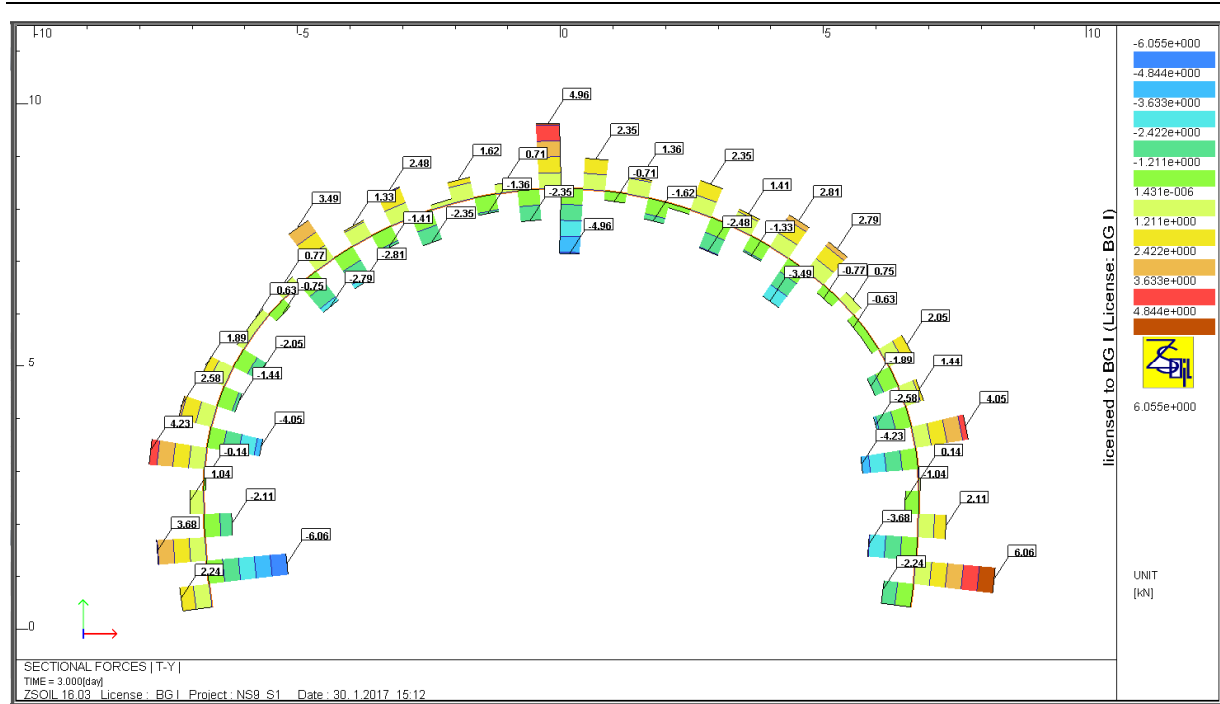


Figura 35: Sollecitazione allo sforzo di taglio, S1, GSI=65

Combinazioni	Sforzi			Sforzi di calcolo		
	M	N	V	M_{Ed}	N_{Ed}	V_{Ed}
	[kNm]	[kN]	[kN]	[kNm]	[kN]	[kN]
M, N_{max}	1,69	273	6,06	2,20	354,90	7,88
$M_{min/max}, N$	0,47	940	-2,35	0,61	1222,00	-3,06

Tabella 14: Sollecitazioni nella sezione

Verifica a pressoflessione:



Calcul de la courbe d'interaction du béton non fibré

selon les recommandations de l'AFTES "utilisation du béton non armé en tunnel"
 et "compatibilité avec les Eurocodes"

BG - 2014

Données

Largeur section $b =$	1 m
Epaisseur section $h_w =$	0,1 m
Résistance du béton à la compression $f_{ck} =$	25 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

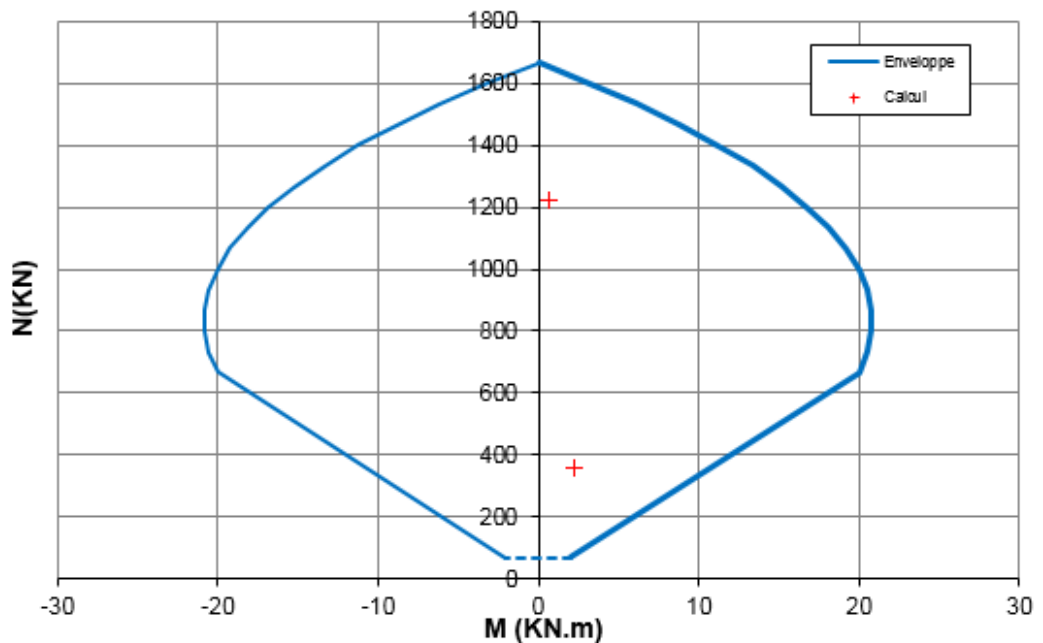


Figura 36: Diagramma di interazione M-N, 10 cm di cls proiettato

Il calcestruzzo proiettato è verificato con un fattore di sicurezza pari $FS=1.35$.

Verifica all'interazione N+V:

V_{Ed} [kN]	x [m]	τ_{cp} [MPa]	σ_{cp} [MPa]	f_{ctd} [MPa]	σ_{clim} [MPa]	f_{cvd} [MPa]	Verifica	FS
7,88	0,10	0,12	3,55	1,20	7,42	2,38	OK	20,2
-3,06	0,10	-0,05	12,22	1,20	7,42	3,21	OK	70,0

Tabella 15: Verifica al taglio

Note de calcul des niches / Relazione di calcolo delle nicchie

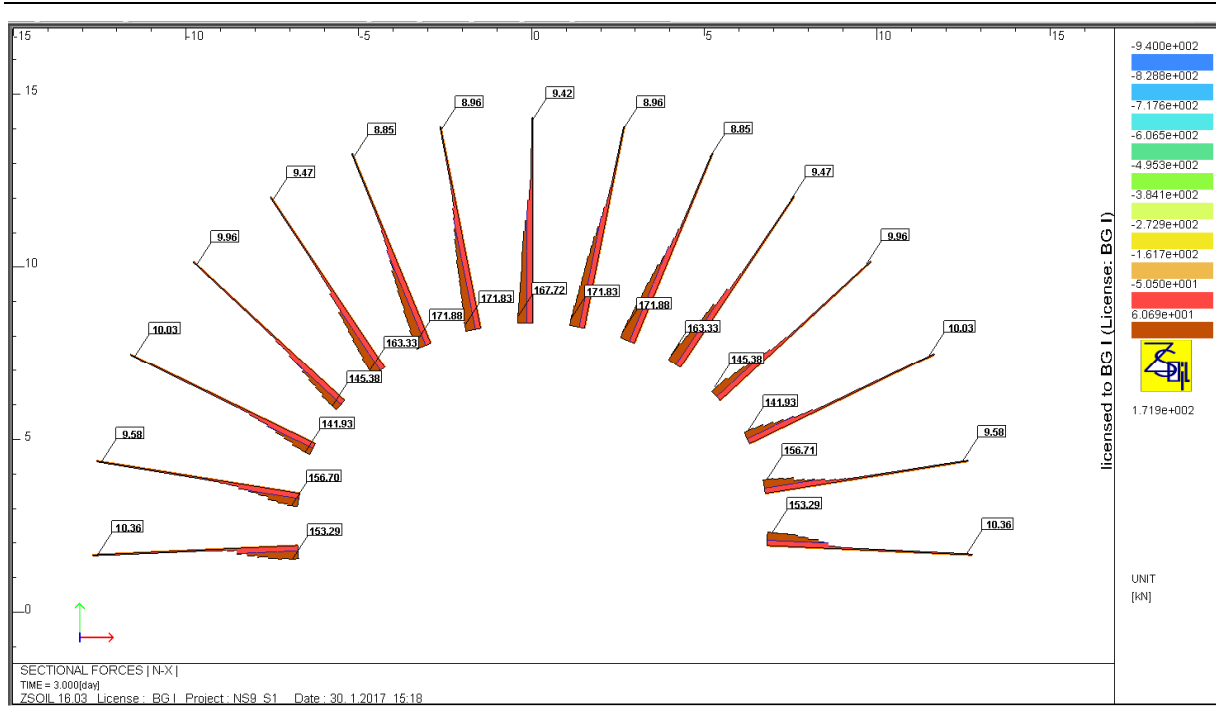


Figura 37: Sforzi nei bulloni

Per il bullone più sollecitato:

$$\frac{171 \text{ kN}}{2} \cdot 1.3 = 111.15 \text{ kN} < 190.5 \text{ kN}$$

$$FS = \frac{190.5}{111.15} = 1.71$$

La deformazione massima è:

$$0.33\% < 7 - 10\%$$

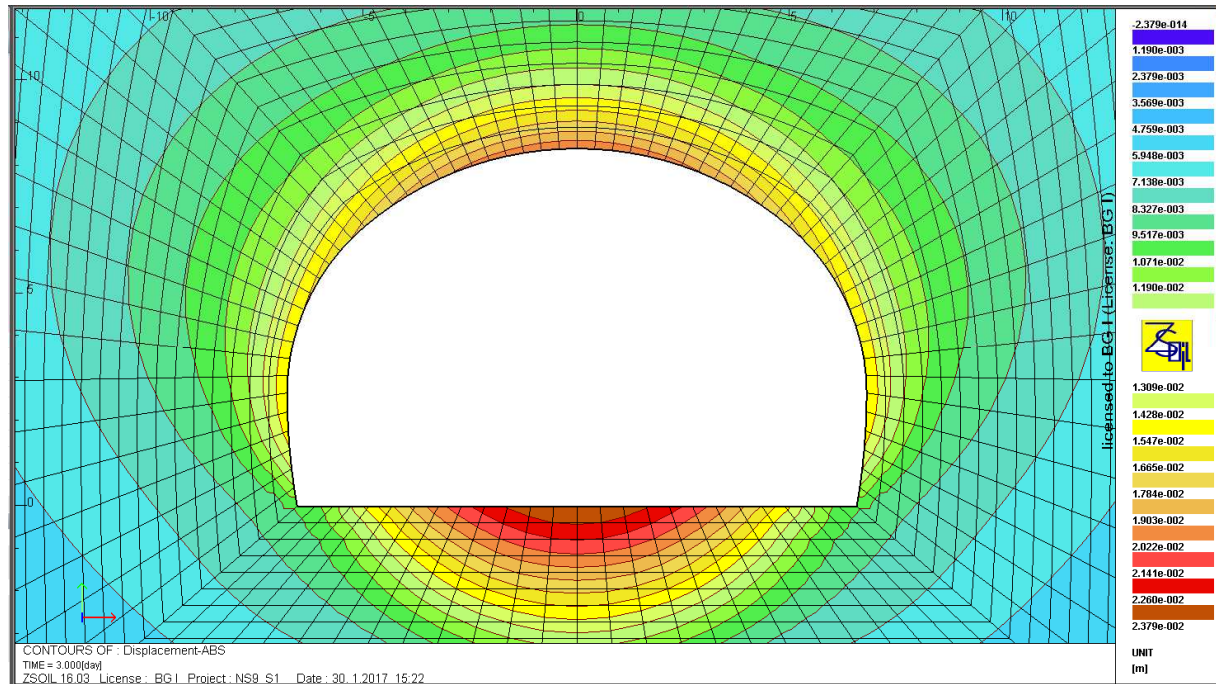


Figura 38: Spostamenti assoluti per ramo di inversione, GSI=65

Lo spostamento massimo è in platea e pari a 2.38 cm. In calotta lo spostamento è di 2.0 cm e nei piedritti di massimo 1.55 cm.

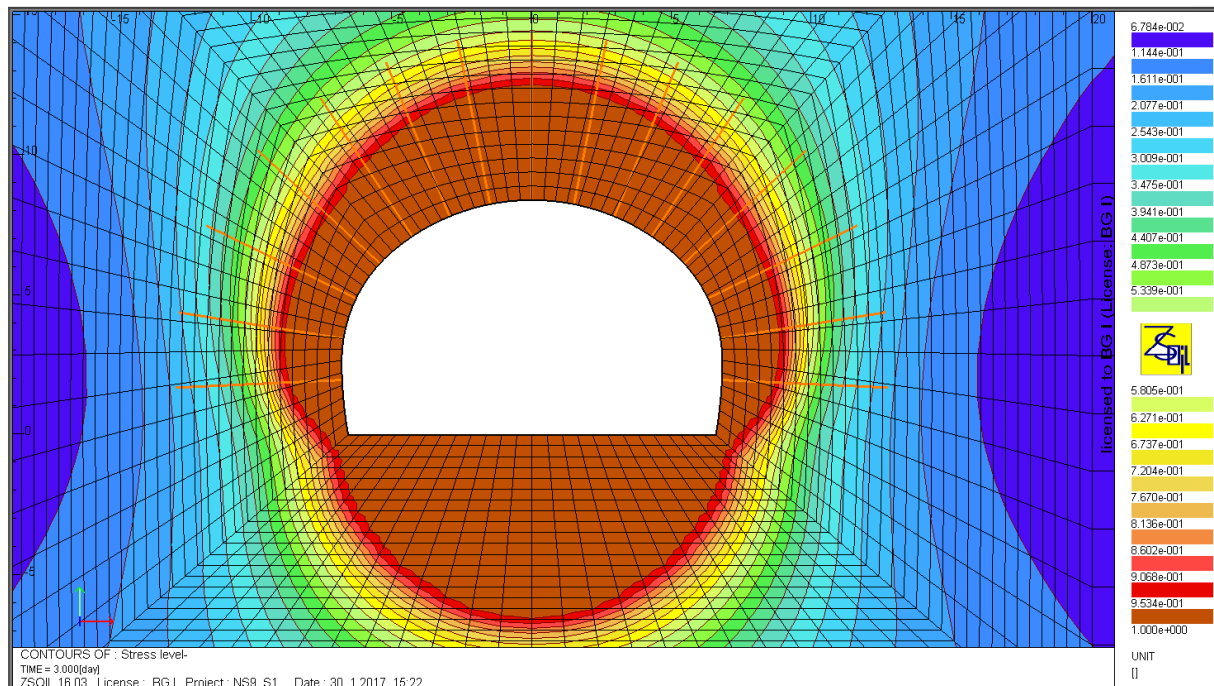


Figura 39: Zone plastiche per sezioni allargate, GSI=65

La banda plastica ha uno spessore di 4 m in calotta, 2.5 m nei piedritti e di 6.6 m in platea.

8.2.5 Connessione 1, nicchia NS9, sezione tipo S2, GSI=65, modello multilaminare

Sollecitazioni:

Note de calcul des niches / Relazione di calcolo delle nicchie

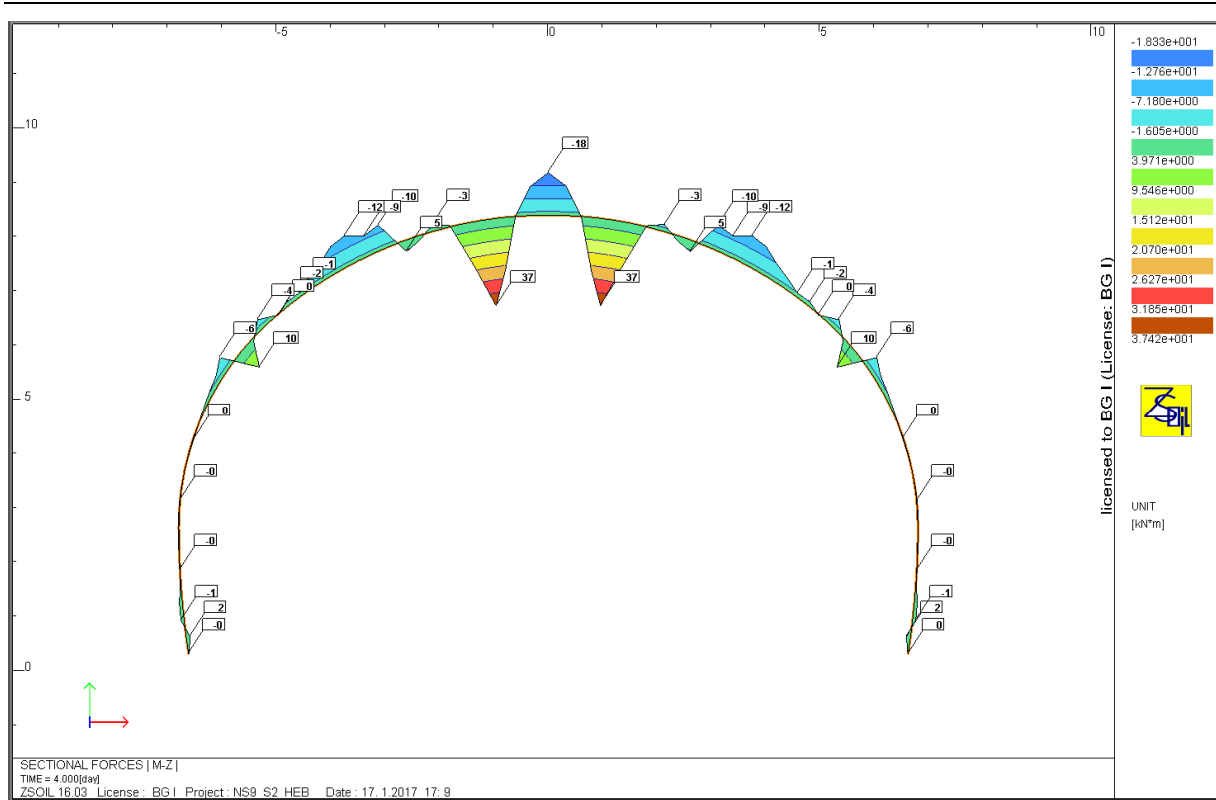


Figura 40: Sollecitazione al momento, S2, GSI=65, modello multilaminare

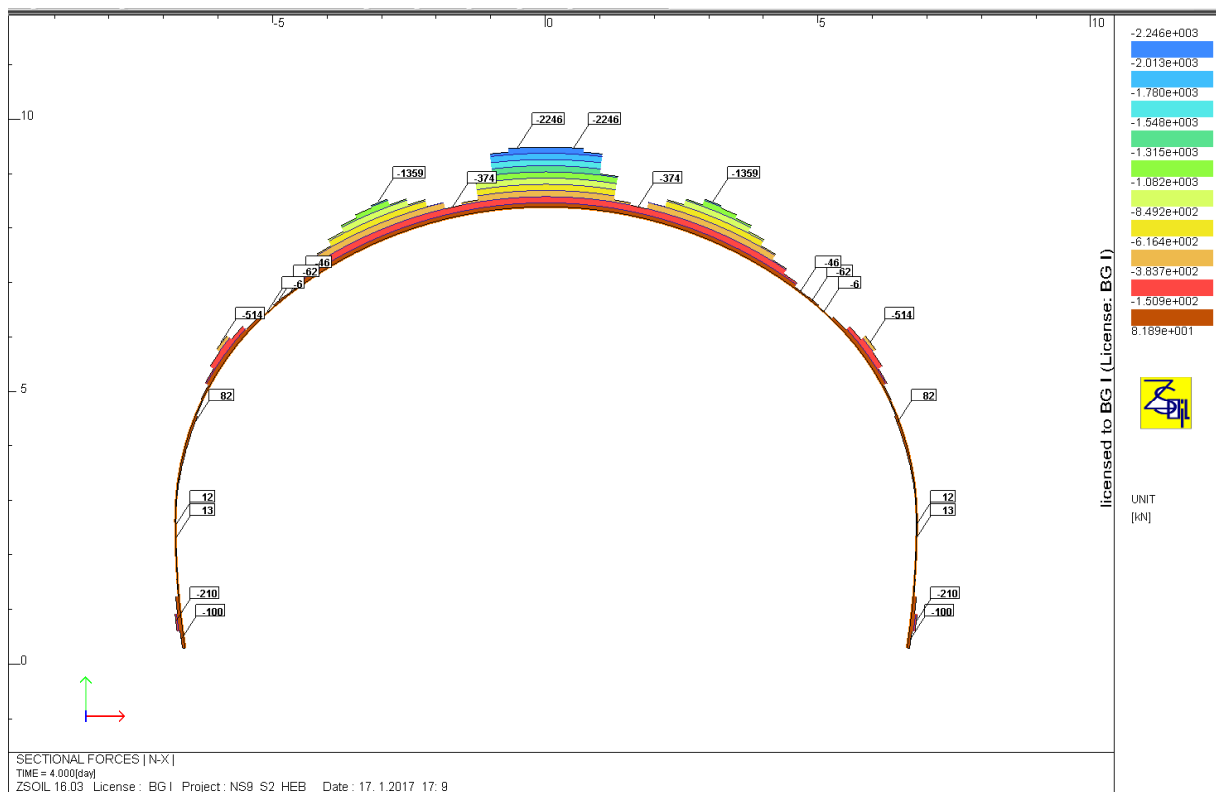


Figura 41: Sollecitazione allo sforzo normale, S2, GSI=65, modello multilaminare

Note de calcul des niches / Relazione di calcolo delle nicchie

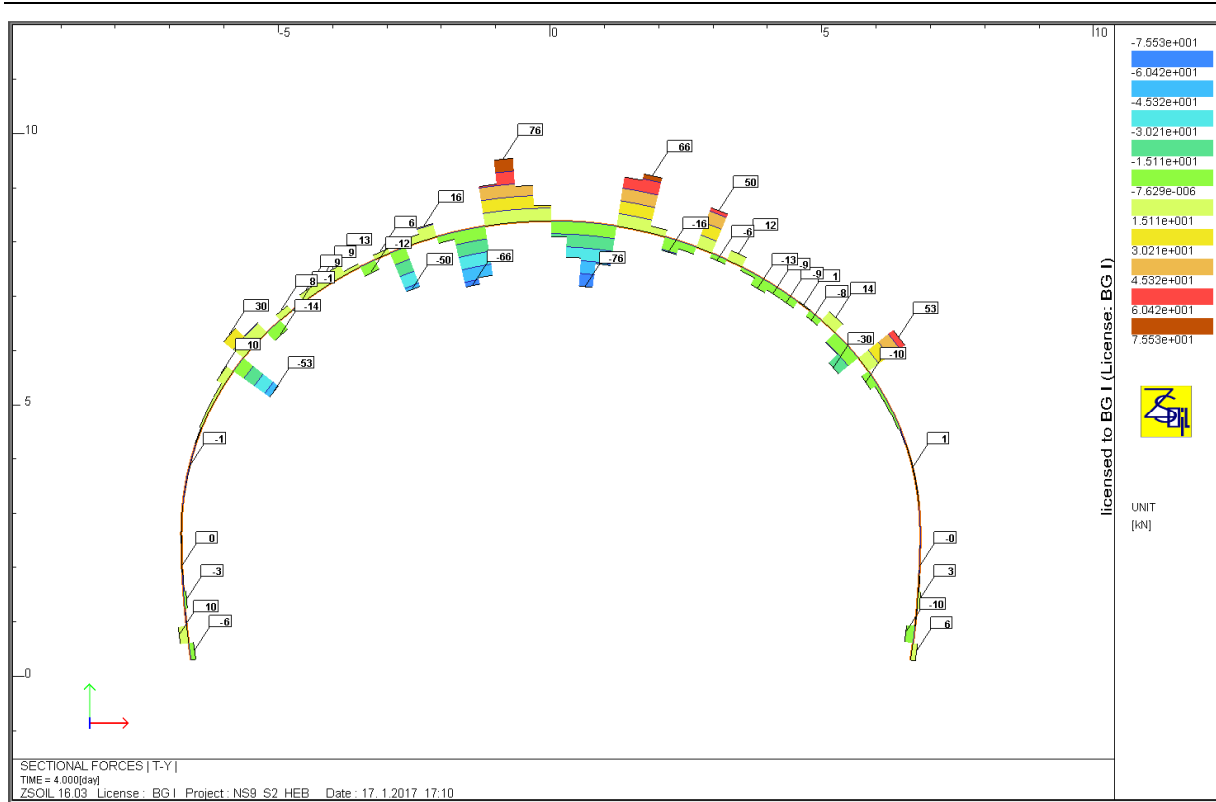


Figura 42: Sollecitazione allo sforzo di taglio, S2, GSI=65, modello multilaminare

	N_{eq} [kNm]	M_{eq} [kN]	V_{eq} [kN]
M, N_{max}, V	2246,0	-18,0	0,0
M_{max}, N, V	616,4	37,0	76,0

Tabella 16: Sollecitazioni nella sezione mista

Gli sforzi nella sezione equivalenti si redistribuiscono tra centine e calcestruzzo:

Sforzi nel CLS					
$N_{b,SLS}$ [kN]	$M_{b,SLS}$ [kNm]	$V_{b,SLS}$ [kN]	$N_{b,SLU}$ [kN]	$M_{b,SLU}$ [kNm]	$V_{b,SLU}$ [kN]
1360,5	-10,4	0,0	1768,6	-13,5	0,0
373,2	21,3	43,8	485,1	27,7	56,9

Tabella 17: Sollecitazioni nel cls

Sforzi nella centina					
$N_{a,SLS}$ [kN]	$M_{a,SLS}$ [kNm]	$V_{a,SLS}$ [kN]	$N_{a,SLU}$ [kN]	$M_{a,SLU}$ [kNm]	$V_{a,SLU}$ [kN]
885,5	-7,6	0,0	1151,2	-9,9	0,0
243,2	15,7	32,2	316,2	20,4	41,9

Tabella 18: Sollecitazioni nella centina

Verifica dell'interazione M e N

Note de calcul des niches / Relazione di calcolo delle nicchie

Données

Largeur section $b =$	1,2 m
Epaisseur section $h_w =$	0,25 m
Résistance du béton à la compression $f_{ck} =$	25 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

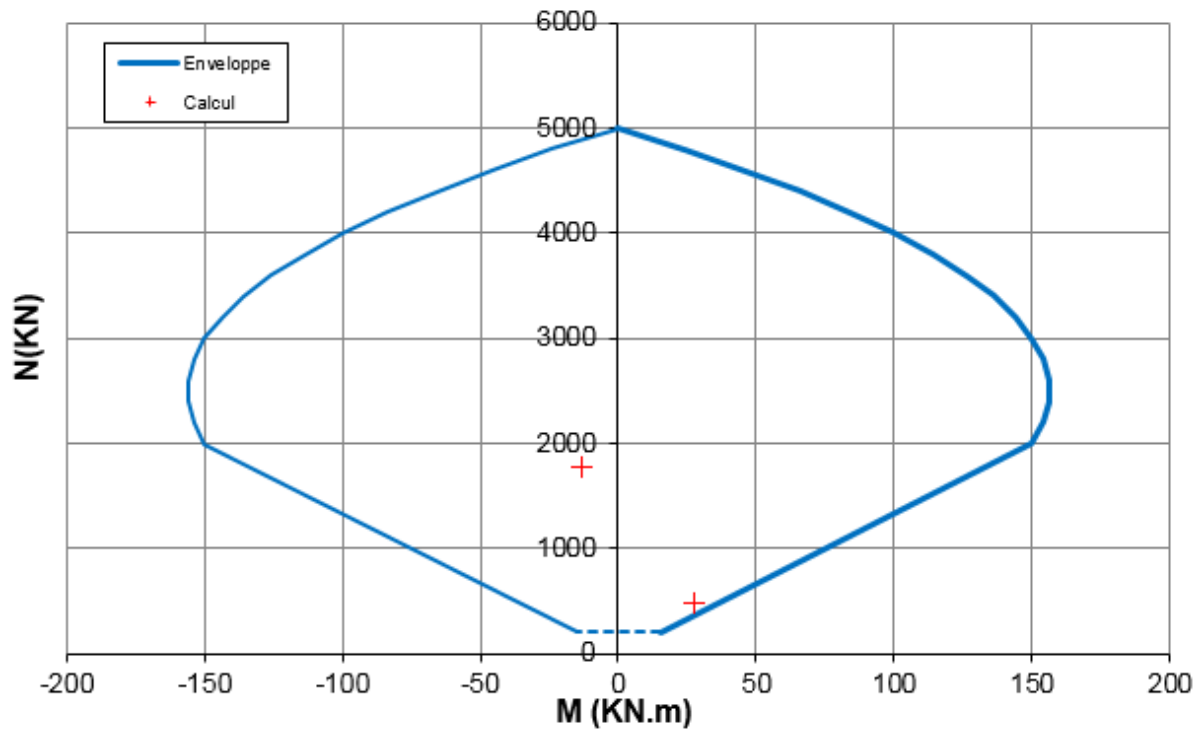


Figura 43: Interazione M-N per la sezione di 25 cm di cls

Il calcestruzzo progettato è verificato con un fattore di sicurezza pari a FS=2.65.

Note de calcul des niches / Relazione di calcolo delle nicchie

Données

Surface A =	7,00E-03 m ²
Moment d'inertie I =	3,83E-05 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

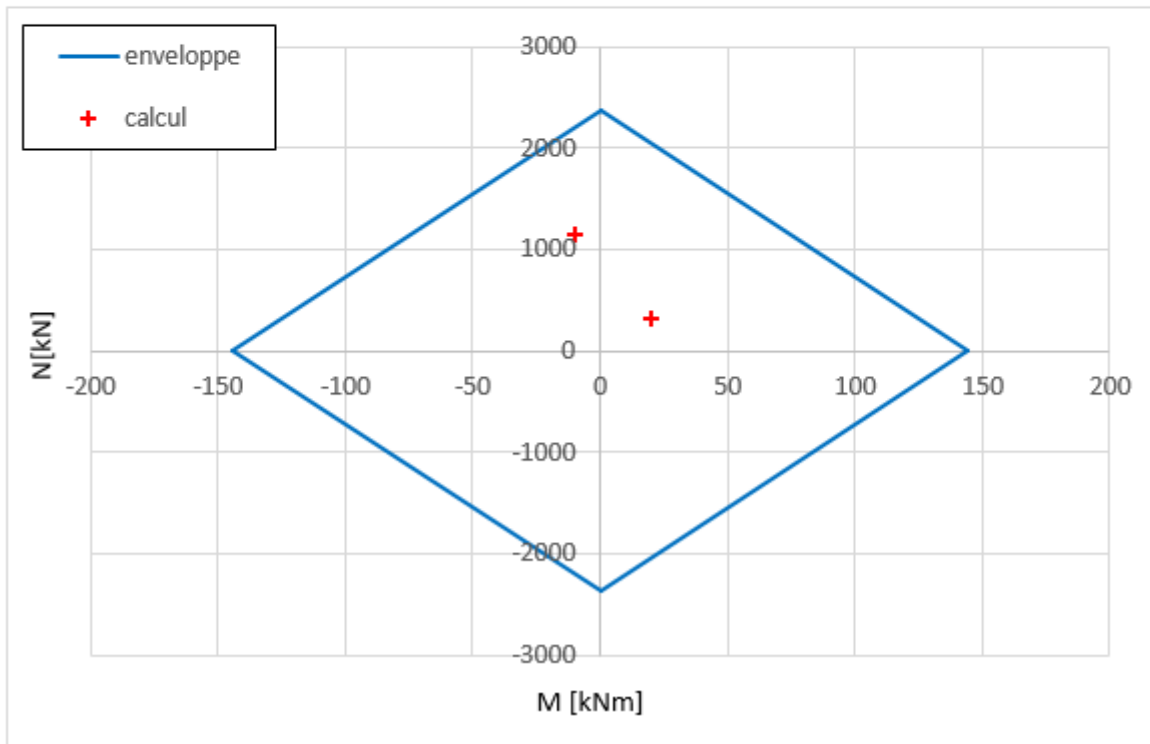


Figura 44: Interazione M-N per la sezione della centina HEB 180

La centina è verificata con un fattore di sicurezza pari a FS=1.8.

Verifica all'interazione N+V:

Calcestruzzo:

V _{Ed} [kN]	x [m]	τ _{cp} [MPa]	σ _{cp} [MPa]	f _{ctd} [MPa]	σ _{clim} [MPa]	f _{cvd} [MPa]	Verifica	FS
43,80	0,17	0,42	2,38	1,20	7,42	2,07	OK	4,94

Tabella 19: Verifica al taglio

Centina:

$$|V_{ELU,max}| = 41.9 \text{ kN} < V_{Rd,HEB180} = 395 \text{ kN}$$

Note de calcul des niches / Relazione di calcolo delle nicchie

La sezione in calcestruzzo proiettato è verificata all'interazione N+V.

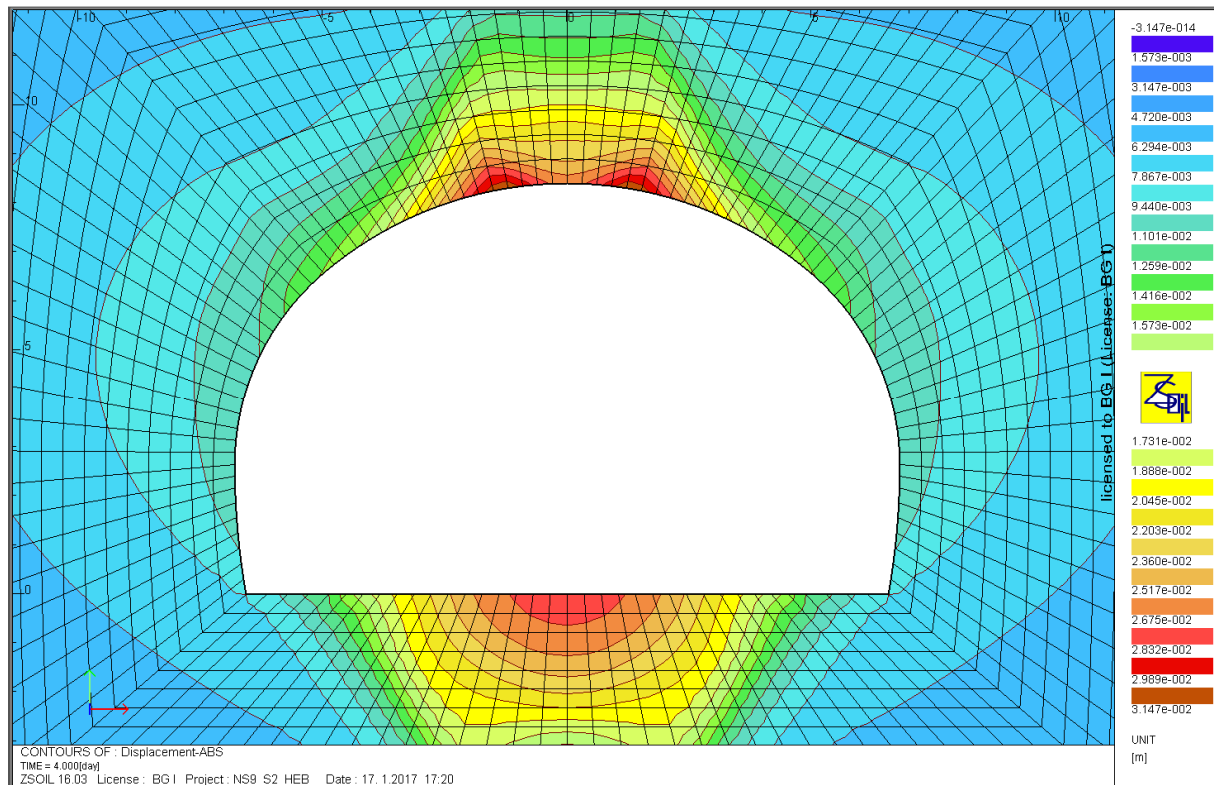


Figura 45: Spostamenti assoluti per ramo di inversione, GSI=65, modello multilaminare

Lo spostamento radiale massimo è in calotta ed è pari a circa 3.15 cm.

Nei piedritti lo spostamento è di circa 1.0 cm e in platea lo spostamento massimo di circa 2.83 cm.

Note de calcul des niches / Relazione di calcolo delle nicchie

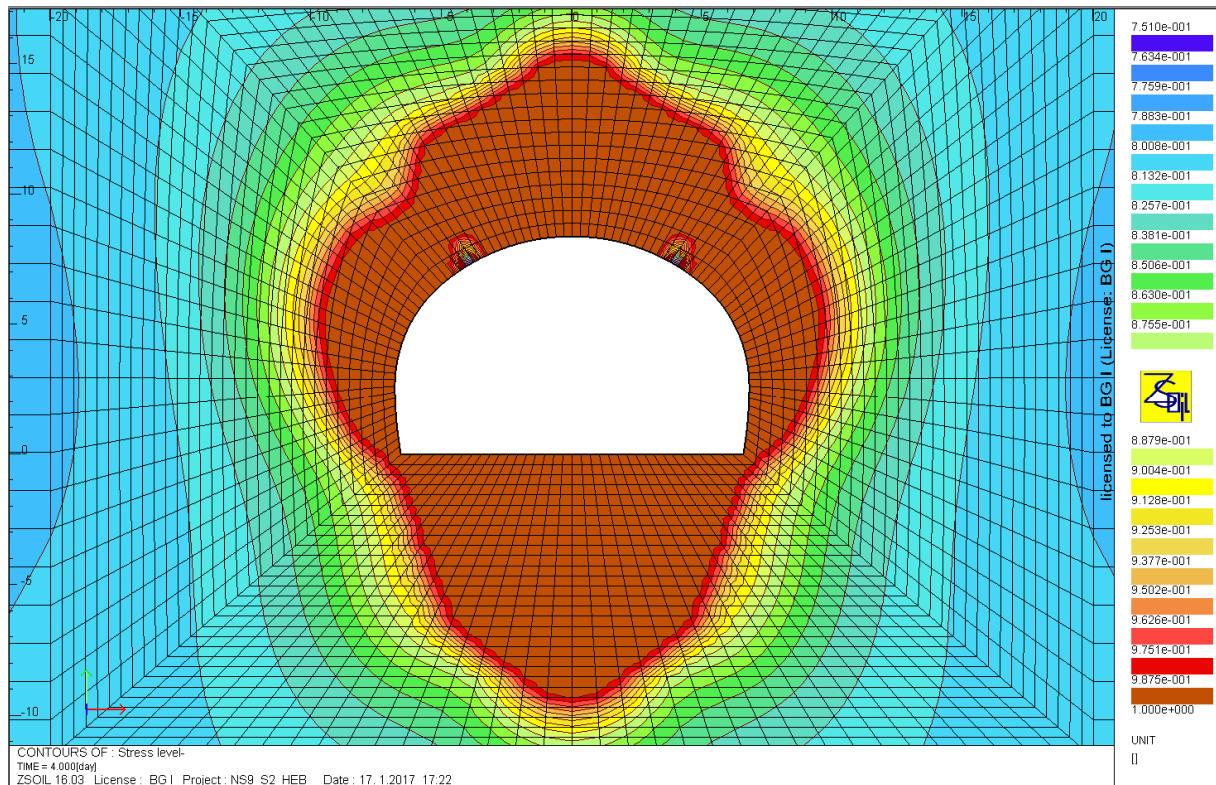


Figura 46: Zone plastiche per ramo di inversione, GSI=65, modello multilaminare

La zona plastica in chiave di volta ha una profondità di 7.0 m.
 In platea lo spessore arriva ad un massimo di 9.2 m.
 Nei piedritti la banda ha uno spessore di circa 3.2 m.

9. Verifica strutturale dei rivestimenti

9.1 Materiali e resistenze di calcolo

Di seguito sono riportati i materiali impiegati e le resistenze di calcolo considerate per i sostegni.

Calcestruzzo C30/37, spessore min. 50 cm:

$$f_{ck} = 30 \text{ MPa}$$

$$f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} \cdot f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{0.85 \cdot 30 \text{ MPa}}{1.5} = 17 \text{ MPa}$$

9.2 Procedura di verifica

Per la verifica all'interazione a pressoflessione si prendono in considerazione tutte le coppie.
 Per la verifica al taglio si considera la coppia determinante N+V, ossia quella dalla quale risulta il fattore di sicurezza minore.

9.3 Verifiche

9.3.1 Maddalena 1, sezione tipo S2, GSI=50

Note de calcul des niches / Relazione di calcolo delle nicchie

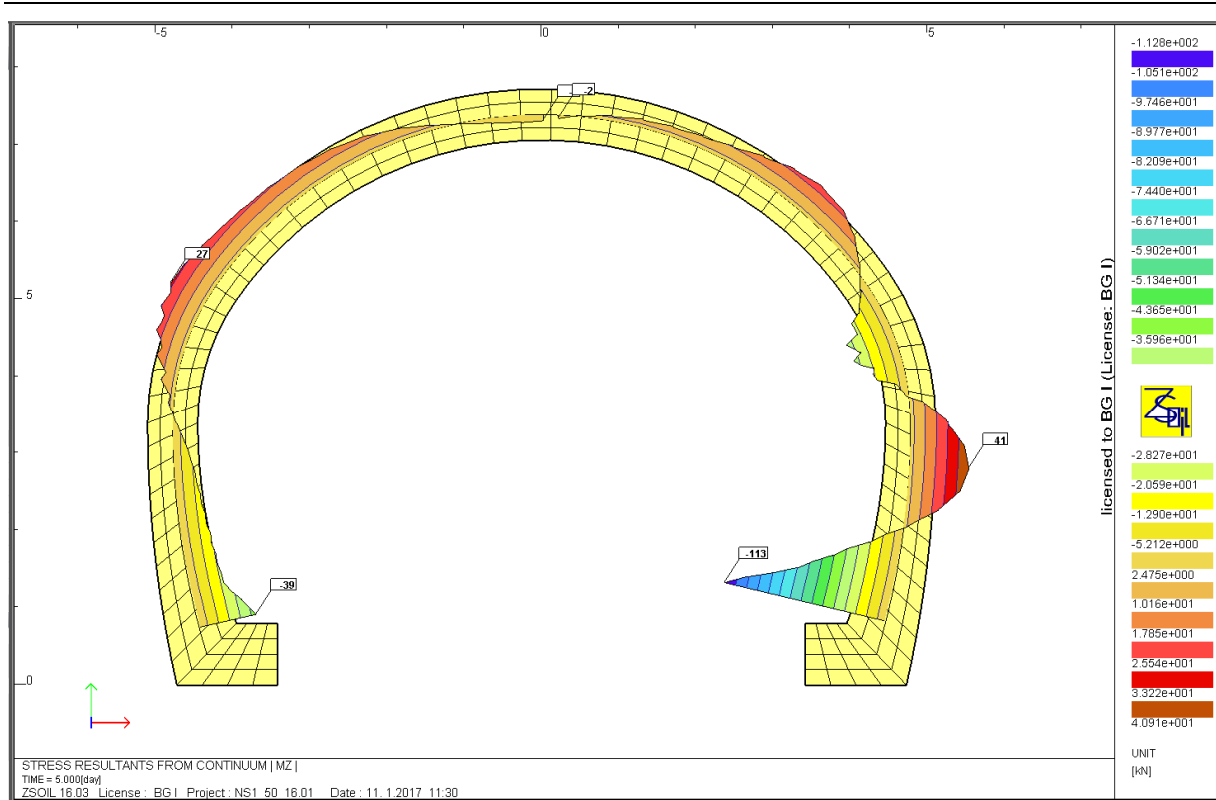


Figura 47: Sollecitazione al momento del rivestimento definitivo, sezione allargata

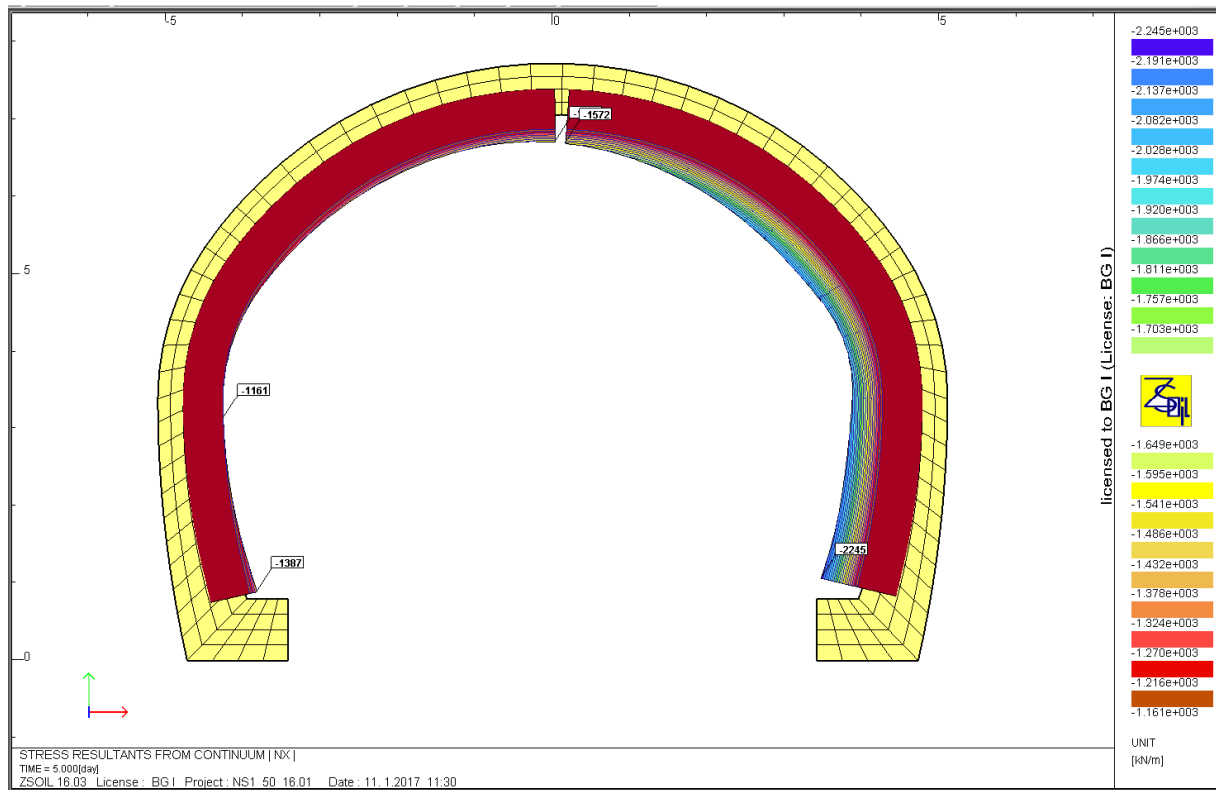


Figura 48: Sollecitazione allo sforzo normale del rivestimento definitivo, sezione allargata

Note de calcul des niches / Relazione di calcolo delle nicchie

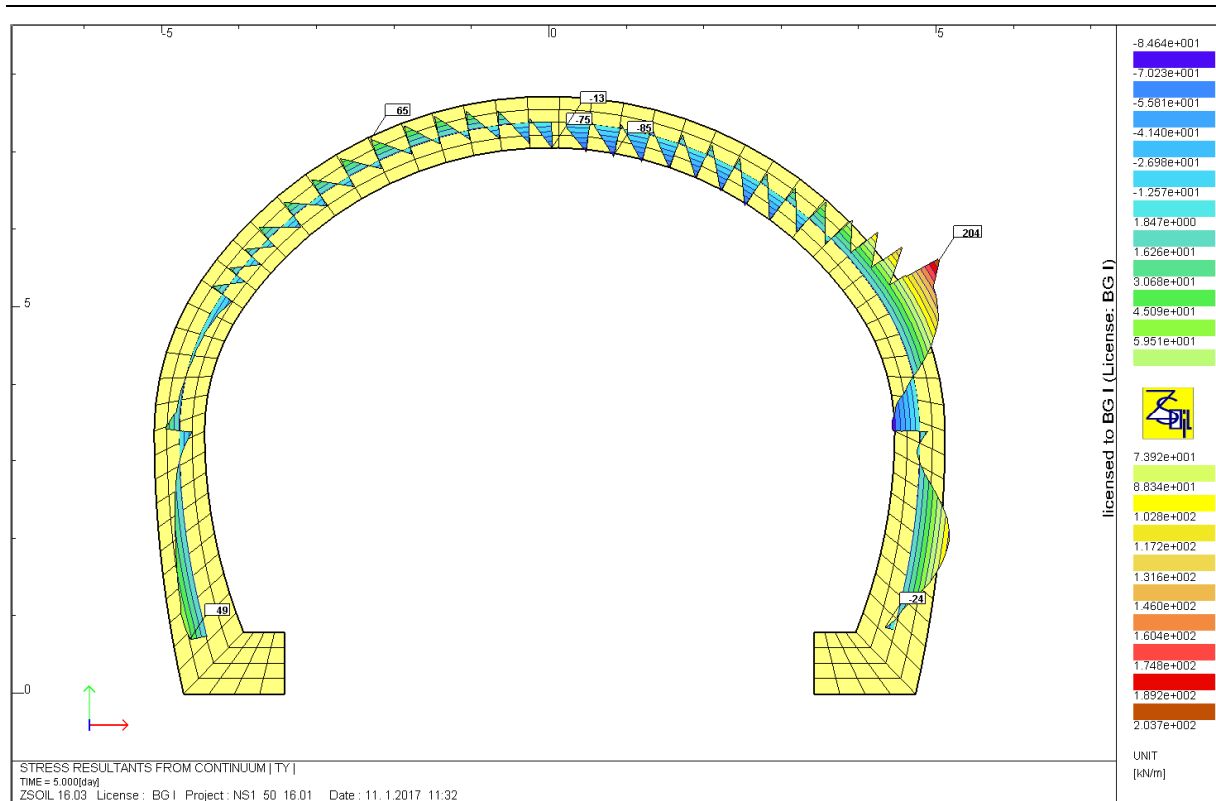


Figura 49: Sollecitazione allo sforzo di taglio del rivestimento definitivo, sezione allargata

Verifica all'interazione M+N

Il diagramma di interazione segue la raccomandazione AFTES GT29.

Note de calcul des niches / Relazione di calcolo delle nicchie

Données

Largeur section b =	1 m
Epaisseur section h _w =	0,5 m
Résistance du béton à la compression f _{ck} =	30 MPa
Coefficient effets à long terme α _{cc,pl} et α _{ct,pl} =	0,85
Facteur de sécurité (marge) =	1
Coefficient partiel relatif au béton γ _c =	1,5
Coefficient relatif aux actions γ _{ELU} =	1,3

Résultats

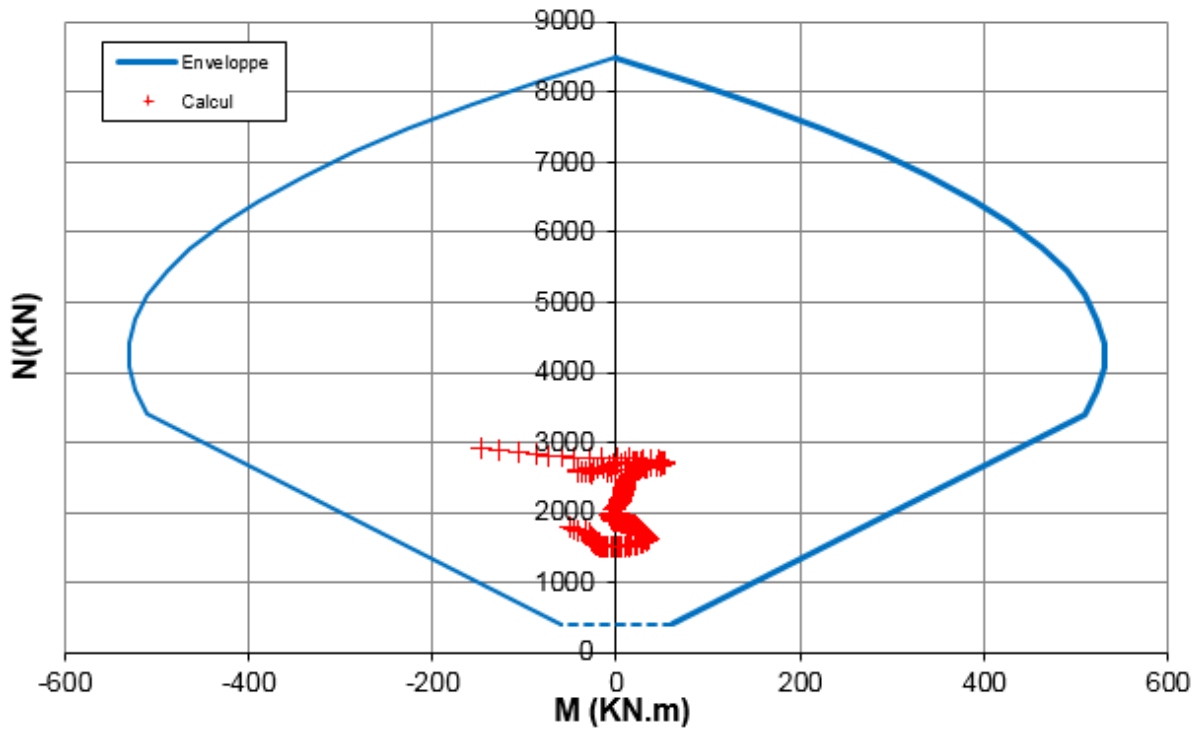


Figura 50: Diagramma di interazione M-N, 50 cm di calcestruzzo

La sezione è verificata a pressoflessione con un fattore di sicurezza pari a FS=2.3.

Verifica dell'interazione N+V

Per rivestimenti non armati, la resistenza al taglio si valuta secondo la raccomandazione AFTES GT29 con:

$$\tau_{cp} \leq f_{cvt}$$

- Sollecitazione

$$\tau_{cp} = 1.5 \frac{V_{Ed}}{A_{cc}}$$

$$A_{cc} = b \cdot x$$

x: spessore compresso secondo la figura 51

Note de calcul des niches / Relazione di calcolo delle nicchie

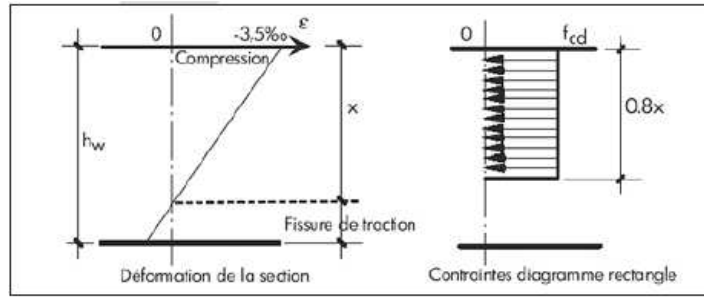


Figura 51: Schema per il calcolo della sollecitazione al taglio

- Resistenza

$$f_{cvd} = \sqrt{f_{ctd}^2 + \sigma_{cp} f_{ctd}} \quad \text{se} \quad \sigma_{cp} \leq \sigma_{c,lim}$$

$$f_{cvd} = \sqrt{f_{ctd}^2 + \sigma_{cp} f_{ctd} - \left(\frac{\sigma_{cp} - \sigma_{c,lim}}{2}\right)^2} \quad \text{se} \quad \sigma_{cp} > \sigma_{c,lim}$$

$$\sigma_{c,lim} = f_{cd} - 2\sqrt{f_{ctd}(f_{ctd} + f_{cd})}$$

V _{SLU} [kN]	x [m]	τ_{cp} [MPa]	σ_{cp} [MPa]	f_{ctd} [MPa]	$\sigma_{c,lim}$ [MPa]	f_{cvd} [MPa]	Verifica	FS
264,76	0,5	0,794	5,311	1,149	7,867	2,724	OK	3,43

Tabella 20: Verifica del rivestimento al taglio

Conclusion

Nessuna armatura è necessaria, la sezione in calcestruzzo è verificata.

9.3.2 Maddalena 1, sezione tipo S2, modello multilaminare

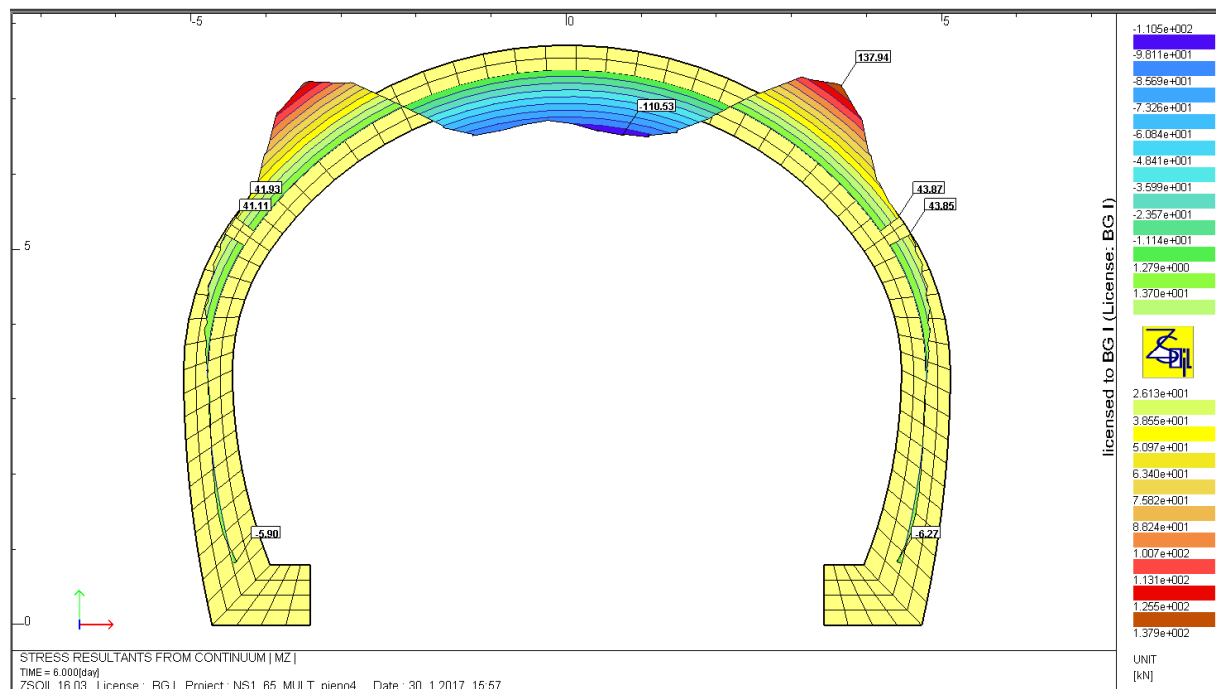


Figura 52: Sollecitazione al momento del rivestimento definitivo, sezione tipo S2

Note de calcul des niches / Relazione di calcolo delle nicchie

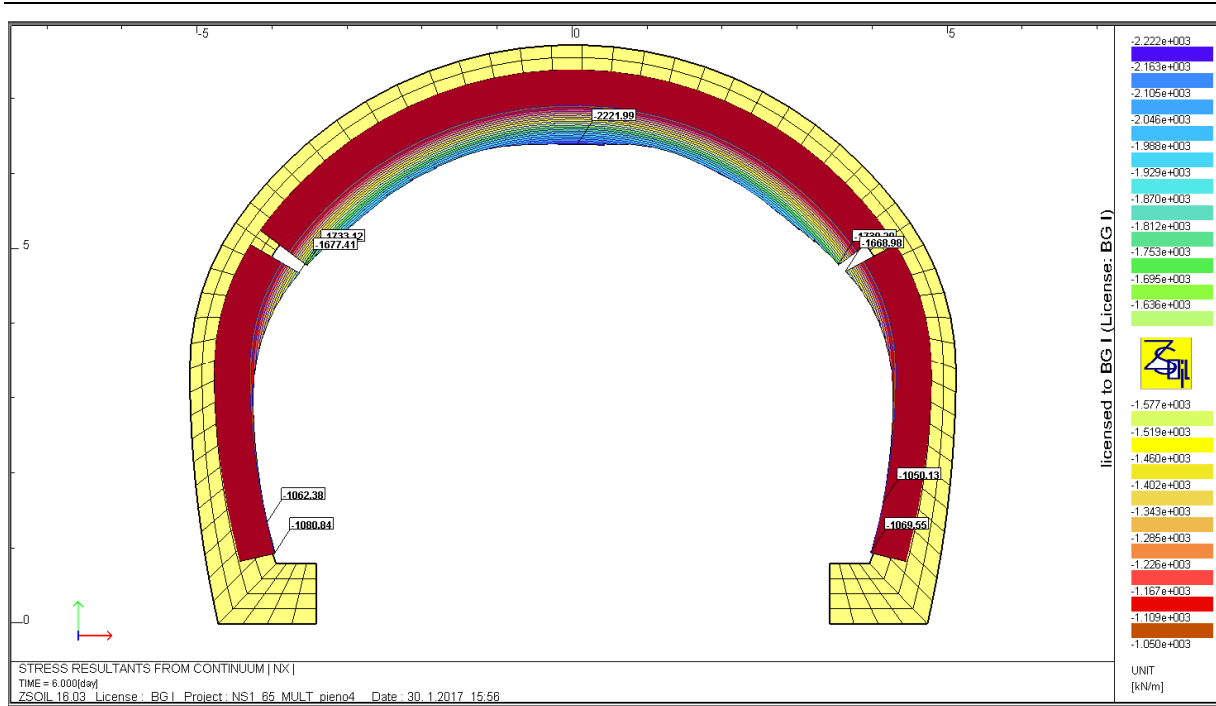


Figura 53: Sollecitazione allo sforzo normale del rivestimento definitivo, sezione tipo S2

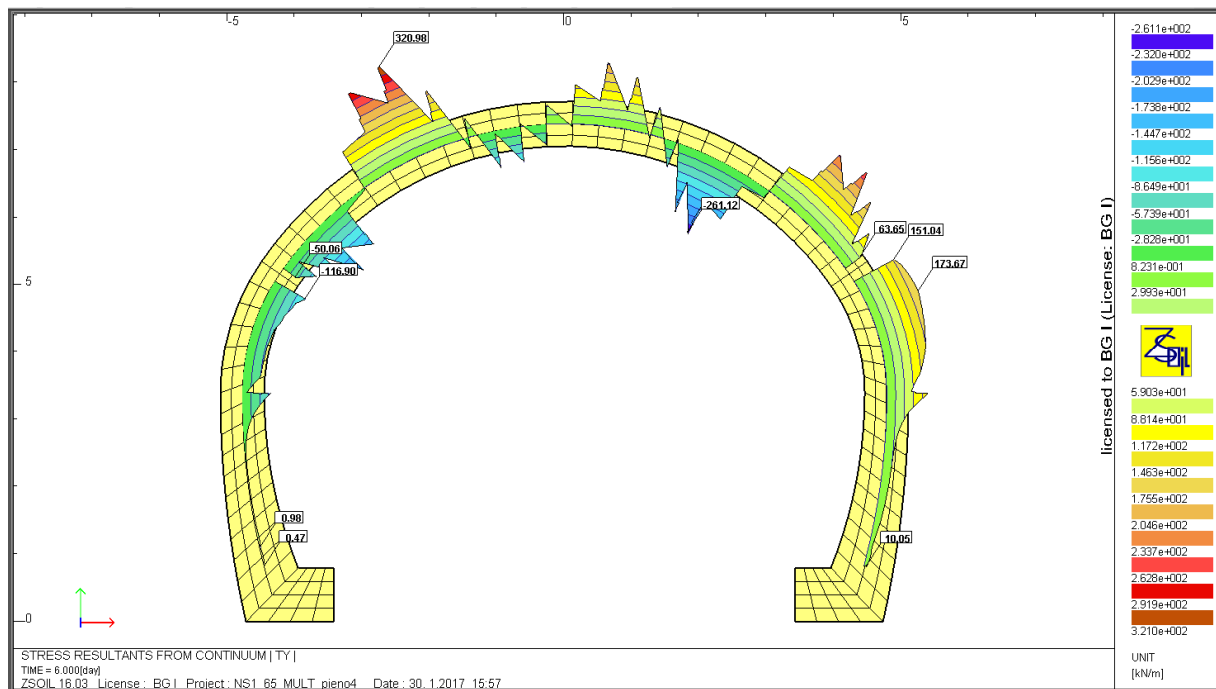


Figura 54: Sollecitazione allo sforzo normale del rivestimento definitivo, sezione tipo S2

Note de calcul des niches / Relazione di calcolo delle nicchie

Données

Largeur section b =	1 m
Epaisseur section h_w =	0,5 m
Résistance du béton à la compression f_{ck} =	30 MPa
Coefficient effets à long terme $\alpha_{cc,pl}$ et $\alpha_{ct,pl}$ =	0,85
Facteur de sécurité (marge) =	1
Coefficient partiel relatif au béton γ_c =	1,5
Coefficient relatif aux actions γ_{ELU} =	1,3

Résultats

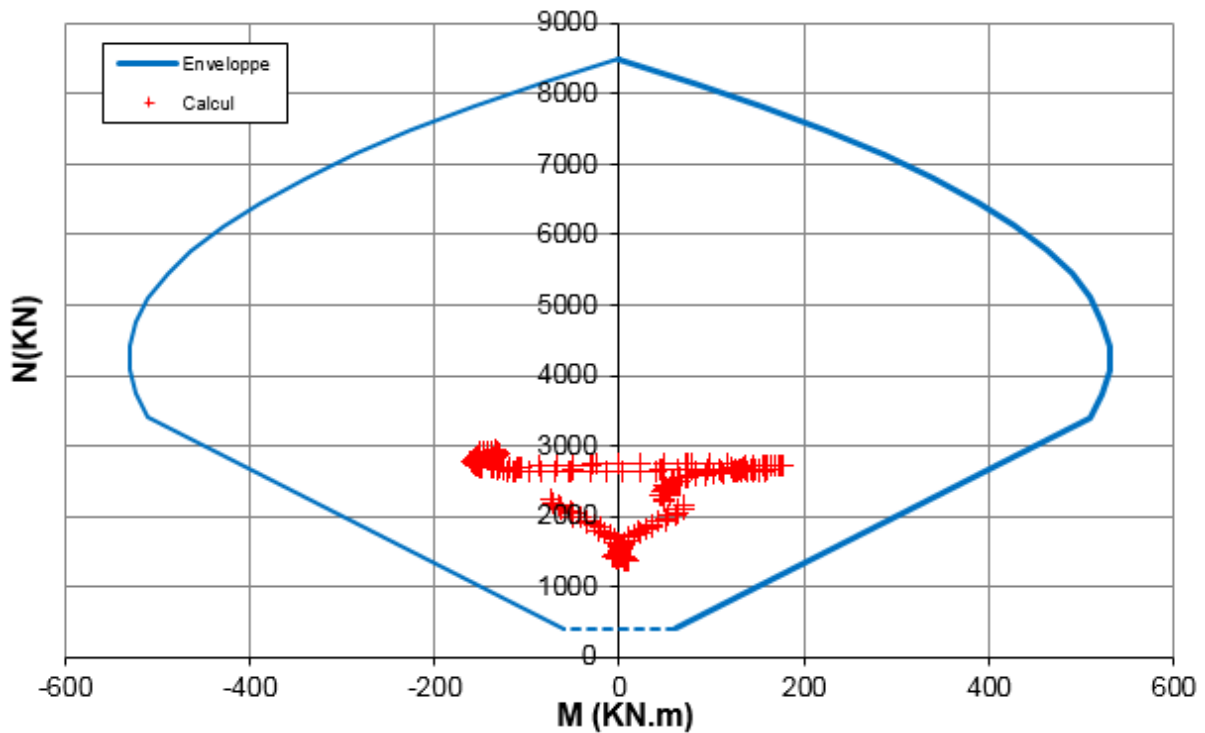


Figura 55: Diagramma di interazione M-N, 50 cm di calcestruzzo

Il calcestruzzo di rivestimento è verificato con un fattore di sicurezza pari a FS=2.3.

Verifica dell'interazione N+V

V_{SLU} [kN]	x [m]	τ_{cp} [MPa]	σ_{cp} [MPa]	f_{ctd} [MPa]	σ_{clim} [MPa]	f_{cvd} [MPa]	Verifica	FS
420,56	0,5	1,26	5,29	1,15	7,87	2,72	OK	2,16

Tabella 21: Verifica al taglio

Conclusion

Nessuna armatura è necessaria, la sezione in calcestruzzo è verificata.

Note de calcul des niches / Relazione di calcolo delle nicchie

9.3.3 Connessione 1, nicchia NS9, GSI=65, modello multilaminare

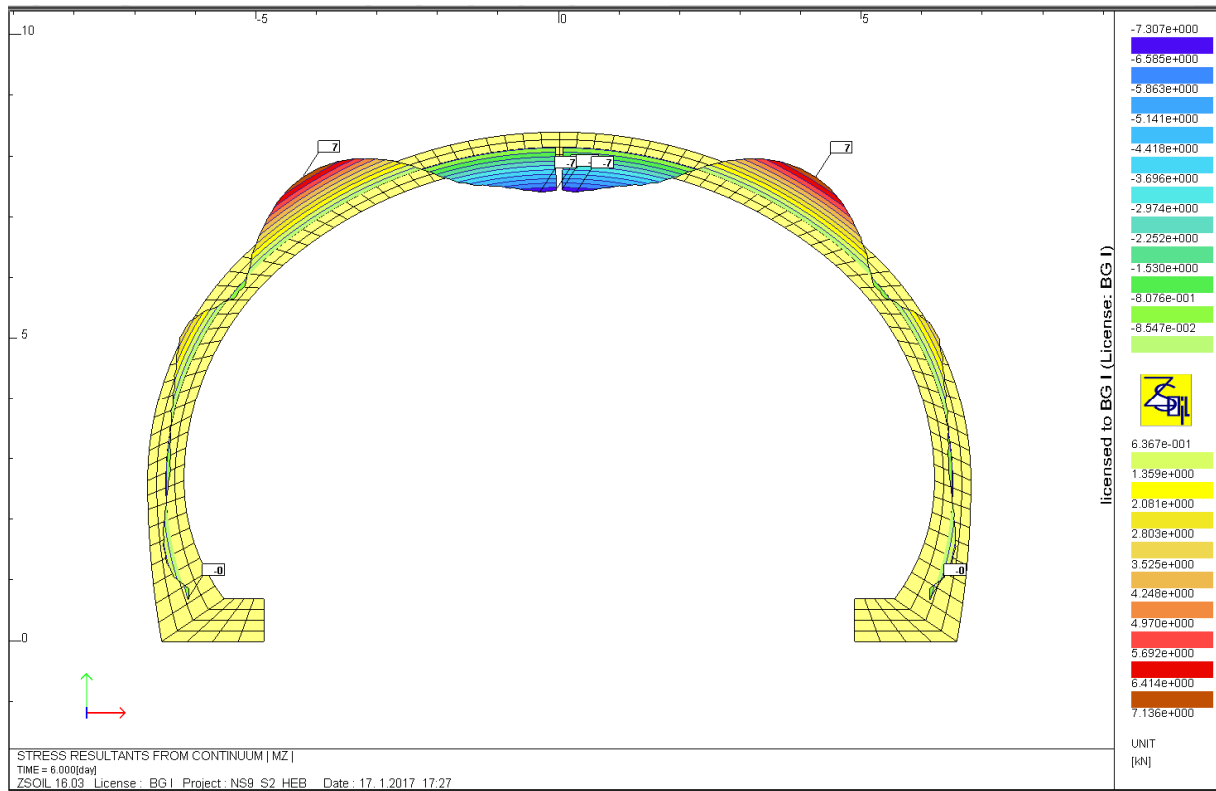


Figura 56: Sollecitazione al momento del rivestimento definitivo, nicchia NS9

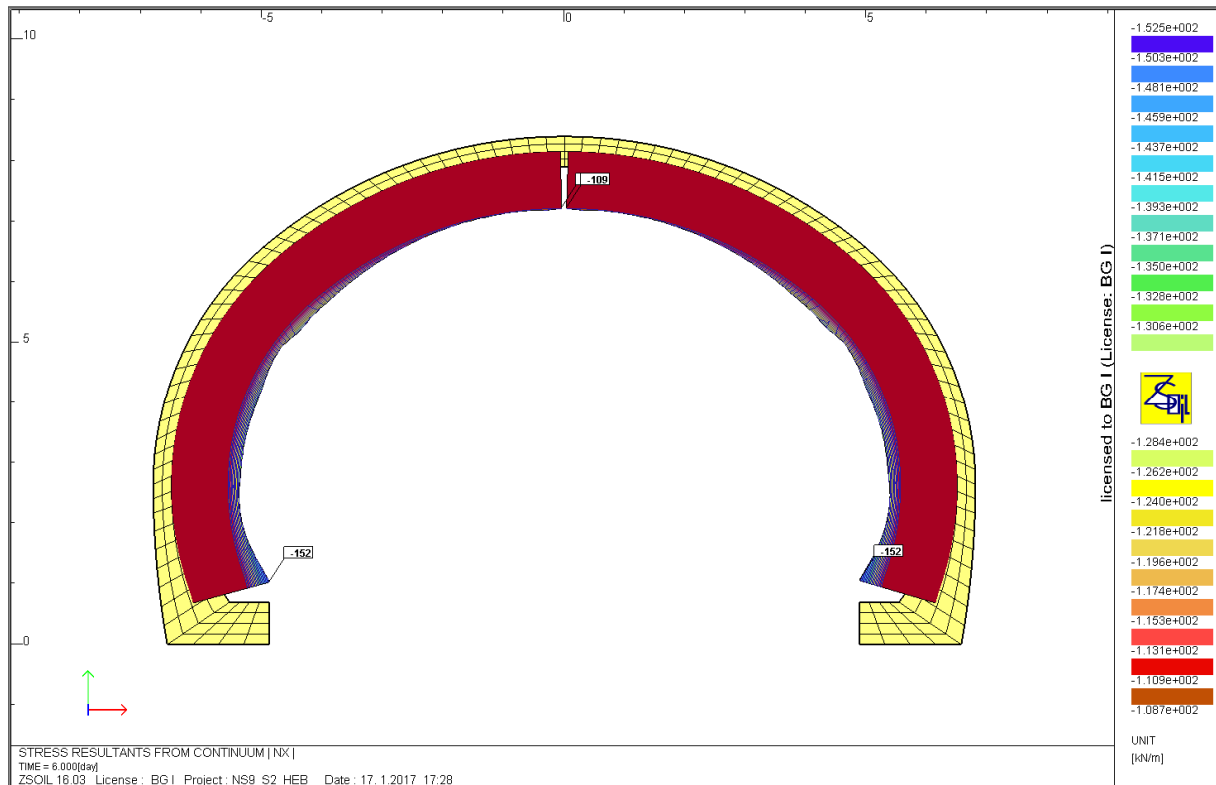


Figura 57: Sollecitazione allo sforzo normale del rivestimento definitivo, nicchia NS9

Note de calcul des niches / Relazione di calcolo delle nicchie

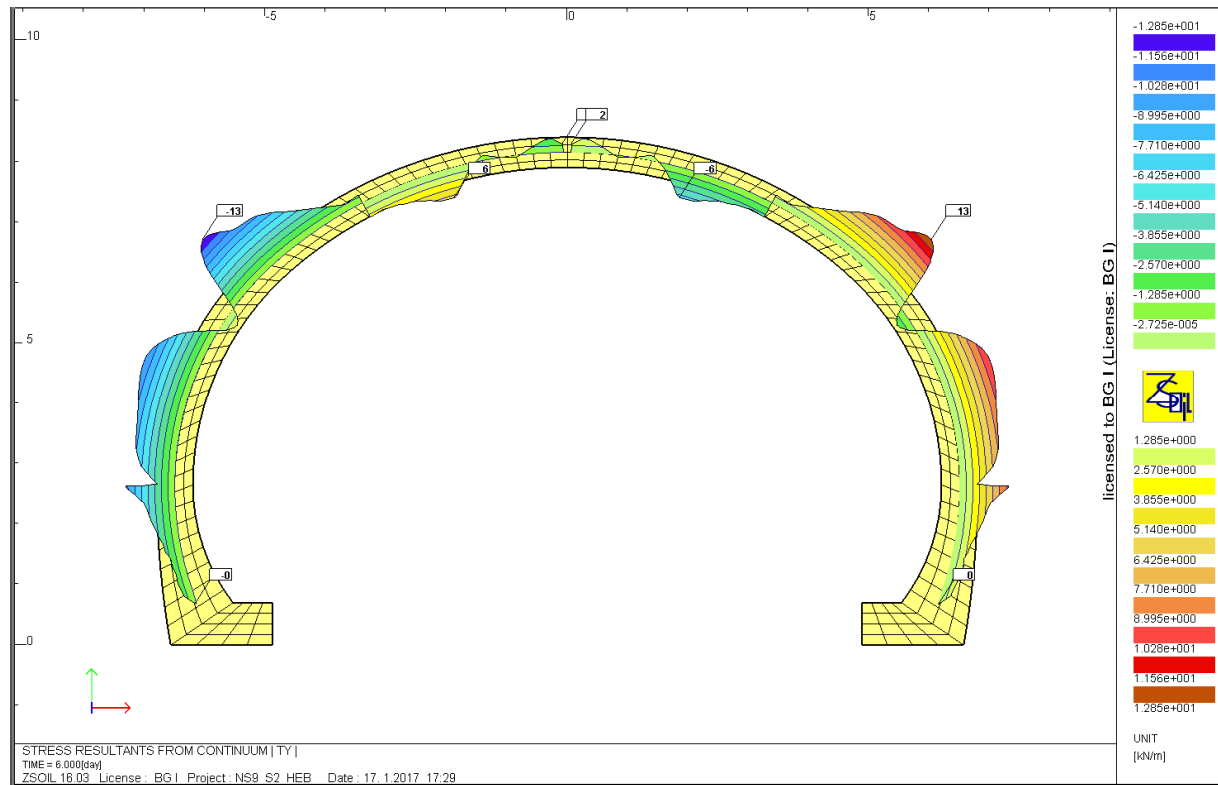


Figura 58: Sollecitazione al taglio del rivestimento definitivo, nicchia NS9

Verifica dell'interazione N+M

Note de calcul des niches / Relazione di calcolo delle nicchie

Données

Largeur section b =	1 m
Epaisseur section h_w =	0,5 m
Résistance du béton à la compression f_{ck} =	30 MPa
Coefficient effets à long terme $\alpha_{cc,pl}$ et $\alpha_{ct,pl}$ =	0,85
Facteur de sécurité (marge) =	1
Coefficient partiel relatif au béton γ_c =	1,5
Coefficient relatif aux actions γ_{ELU} =	1,3

Résultats

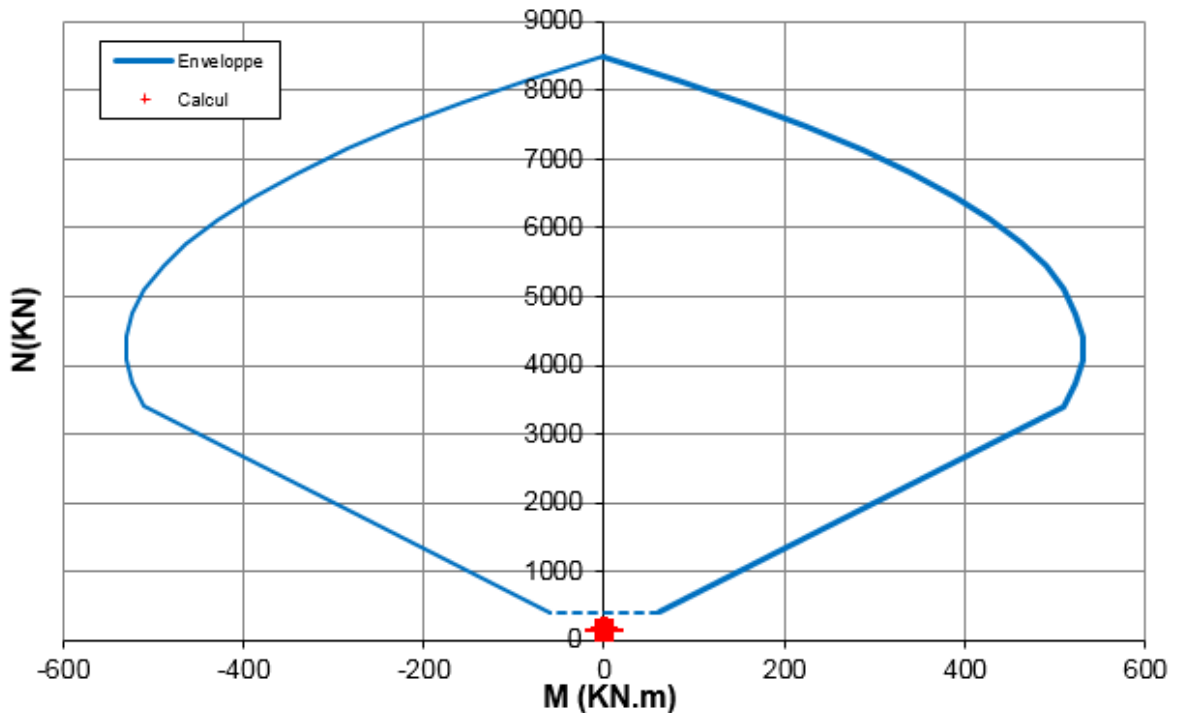


Figura 59: Diagramma di interazione M-N, 50 cm di calcestruzzo

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.

Verifica dell'interazione N+V

V_{SLU} [kN]	x [m]	τ_{cp} [MPa]	σ_{cp} [MPa]	f_{ctd} [MPa]	σ_{clim} [MPa]	f_{cvd} [MPa]	Verifica	FS
-16,70	0,50	-0,05	0,34	1,15	7,87	1,31	OK	26,10

Tabella 22: Verifica al taglio

Conclusione

Nessuna armatura è necessaria, la sezione in calcestruzzo è verificata.

10. Conclusioni

La presente relazione descrive il dimensionamento e la verifica dei sostegni e dei rivestimenti definitivi delle sezioni allargate e dei rami di inversione della galleria Maddalena 1, della nicchia NS9 della galleria di connessione 1 e della sezione di innesto tra connessione 1 e Maddalena 1 (nicchia NS8).

Tutte le verifiche compiute risultano soddisfatte.

Nella tabella seguente sono riassunti gli sforzi maggiori nei rivestimenti ed il fattore di sicurezza risultante dalla verifica. I rivestimenti non necessitano di essere armati per nessuna opera.

Ubicazione	Sostegno	Res. di calcolo cls	Res. di calcolo acciaio (quando presente)	Sezione resistente considerata nei calcoli [cm]	Sforzi massimi allo SLU		FS
		f_{cd} [MPa]	f_{yd} [MPa]		Nmax [kN/m]	Mmax[kNm/m]	
Maddalena 1	S2	17	-	50	2222	138	2.3
Connessione 1	S2	17	-	50	152	7	>>1

Tabella 23: Riassunto delle verifiche dei rivestimenti