



CLAF
Centro Latinoamericano de Física
Rio de Janeiro
Brasil

LABORATORIO SUBTERRÁNEO ANDES

Ingeniería Básica de Anteproyecto



Informe geotécnico

6198.1-R-04

0.2	15.05.2019	LoA/PR	Gub/CG
0.1	28.02.2019	LoA/PR	Gub/CG
Versión	Fecha	Redactado	Verificado

Lombardi SA Ingenieros Consultores
 Via R. Simen 19, C.P. 97, CH-6648 Minusio
 Teléfono +41(0)91 735 31 00, Fax +41 (0)91 743 97 37
 www.lombardi.ch, info@lombardi.ch

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objeto	1
1.2 Finalidad y alcance del informe	1
2. BASES Y ANTECEDENTES	3
2.1 Documentos Laboratorio ANDES	3
2.2 Documentos Túnel de Agua Negra (TAN)	3
3. NORMATIVAS APLICADAS	6
4. MATERIALES	7
4.1 Hormigón	7
4.2 Acero	10
4.3 Bulones de conexión	11
4.4 Anclajes en roca	11
4.5 Tubos de drenaje	12
4.6 Anclajes de vidrio resina	12
5. TIPOS DE SOSTENIMIENTOS PREVISTOS EN LAS GALERIAS DEL LABORATORIO	13
5.1 Introducción	13
5.2 Galería de entrada y salida -Sala ventilación – Sala climatización – Sala Tratamiento retención agua –Medidas de sostenimiento – Clases I - III	14
5.3 Galería zona de tránsito y estacionamiento – Sala técnica – Sala de emergencia comedor– Medidas de sostenimiento – Clases I - III	15
5.4 Galería de conexión – Sala limpia – Sala experimental – Laboratorio de biología – Medidas de sostenimiento – Clases I - III	16
5.5 Galería de escape y acceso al fondo del pozo – Medidas de sostenimiento – Clases I - III	17
5.6 Galería de acceso al sector geofísica – Salas de instrumentos D-E-G-H-K – Medidas de sostenimiento – Clases I - III	18

6.	GALERIAS – VERIFICACIONES ESTÁTICAS DE LOS SOSTENIMIENTOS INICIALES	19
6.1	Introducción	19
6.2	Hipótesis de base	19
6.3	Aproximación discontinua– Verificación de la estabilidad de cuñas de roca	20
6.4	Enfoque continuo equivalente - Estudio mediante líneas características	27
7.	GALERIAS – VERIFICACIONES ESTÁTICAS DE LOS REVESTIMIENTOS DEFINITIVOS	32
7.1	Introducción	32
7.2	Hipótesis de base	32
7.3	Verificación revestimiento final Galería zona de tránsito y estacionamiento – Galería de conexión central – Galería de entrada y de salida – Sala técnica – Sala de emergencia y comedor – Sala climatización – Sala tratamiento retención de agua – Sala de ventilación- CS3	36
7.4	Verificación revestimiento final Galería de escape y acceso al fondo del pozo – Sala limpia – Sala experimental adicional – Laboratorio de biología – Galería de acceso sector de geofísica – Sala instrumentos D-E-F-G-H-K – CS3	39
8.	TIPOS DE SOSTENIMIENTO CAVERNA PRINCIPAL – CAVERNA SECUNDARIA	42
8.1	Introducción	42
8.2	Medidas de sostenimiento Caverna principal - Clases I - III	42
8.3	Medidas de sostenimiento Caverna Secundaria - Clases I - III	43
9.	VERIFICACIONES ESTÁTICAS DE LOS SOSTENIMIENTOS DE LA CAVERNA PRINCIPAL Y SECUNDARIA	44
9.1	Introducción	44
9.2	Hipótesis de base	45
9.3	Análisis a corto plazo	45
9.4	Análisis a largo plazo revestimiento final Caverna principal y secundaria CS1-CS2	47
9.5	Verificaciones estructurales CS1-CS2	48
9.6	Modelación numérica caverna principal y caverna secundaria CS3	56
9.7	Verificaciones estructurales CS3	60

10. VERIFICACIONES SÍSMICAS DE LOS REVESTIMIENTOS DEFINITIVOS DE LA CAVERNA PRINCIPAL Y SECUNDARIA	64
10.1 Introducción	64
10.2 Datos sísmicos disponibles	64
10.3 Solicitaciones sísmicas	66
10.4 Sismo TON	69
10.5 Sismo TS	71
10.6 Verificación Caverna principal y secundaria – Sismo TS	74
10.7 Verificación revestimiento Túnel Zona de tránsito y estacionamiento – Galería de conexión central – Galería de entrada y salida – Sala técnica – Sala de emergencia y comedor – Sala climatización – Sala tratamiento retención de agua – Sala ventilación – Sismo TS	79
10.8 Verificación revestimiento Galería de escape y acceso al fondo del pozo – Sala limpia – Sala experimental adicional – Laboratorio de biología – Galería de acceso al sector geofísica -Sala instrumentos D-E-F-G-H-K – Sismo TS	81
11. POZO SOSTENIMIENTO INICIAL Y REVESTIMIENTO FINAL	83
11.1 Introducción	83
11.2 Medidas de sostenimiento inicial – Pozo - CS1 - 3	84
11.3 Verificación de los sostenimientos previstos para la cúpula del pozo a corto plazo	86
11.4 Verificación de los sostenimientos previstos para las paredes del pozo a corto plazo	87
11.5 Verificación de los revestimientos definitivos de la cúpula del pozo a largo plazo	91
11.6 Verificaciones estructurales cúpula a largo plazo	92
11.7 Verificación de los revestimientos definitivos de las paredes del pozo a largo plazo	97
11.8 Verificaciones estructurales paredes a largo plazo	99
11.9 Verificación Sísmica de los sostenimientos previstos para el pozo	105
11.10 Verificación Pozo – Sismo TS	106
12. CONCLUSIONES	109
13. BIBLIOGRAFIA	111

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Objeto

El Laboratorio ANDES (Agua Negra Deep Experiment Site) es un laboratorio subterráneo cuya construcción está prevista en el ámbito de la realización del Túnel carretero de Agua Negra de interconexión internacional entre Argentina y Chile (TAN) (ver **Figura 1.1**). Una vez construido será el primero y único laboratorio subterráneo del hemisferio Sur. Gracias a su alta cobertura de roca, sus espacios estarán protegidos de la radiación cósmica y ofrecerán las condiciones ideales para llevar a cabo numerosos experimentos científicos en diferentes temas específicos, tanto latinoamericanos como internacionales.



Figura 1.1: Ubicación del proyecto

El objetivo de la fase de proyecto actual es la modificación parcial y la optimización de la Ingeniería Básica de Proyecto (IBA) desarrollando los conceptos presentados en el Nuevo Estudio Conceptual (NEC).

1.2 Finalidad y alcance del informe

En este informe se ilustrarán sintéticamente los resultados de los cálculos geomecánicos y estructurales realizados para definir las principales características geométricas de las obras

subterráneas y para verificar los sostenimientos preliminares y definitivos propuestos para las diferentes partes de la obra.

El nivel de detalle que se ha alcanzado en los cálculos es el que corresponde, a juicio de los redactores, el nivel de Proyecto Preliminar, destinado a definir los informes de Licitación de la obra.

Como base para los cálculos ilustrados a continuación se ha adoptado en todo el modelo geológico-geotécnico a lo largo del trazado de la obra, que había sido proporcionado en el de Ingeniería Básica (1). También los datos geológicos de base, para la parametrización de los litotipos esperados en la excavación, han sido tomados de las campañas geotécnicas realizadas en la fase de Ingeniería Básica. La síntesis de los datos de base adoptados se resume en los informes 6188.2-R-001 (para el TAN) y 6198.1-R-02 específico para el área del laboratorio ANDES al cual se remite para los detalles.

La estructura del presente informe es la siguiente:

- **Capítulo 2:** se enumera la documentación de base que se tomó en consideración como dato para la redacción del presente informe;
- **Capítulo 3:** se enumeran las referencias normativas adoptadas;
- **Capítulo 4:** se enumeran las características mínimas consideradas en los cálculos para los materiales de construcción a emplear en la realización de los túneles y del pozo;
- **Capítulo 5:** se proporciona una descripción sintética de las medidas de sostenimiento previstas para los túneles en las diferentes condiciones de calidad del macizo rocoso;
- **Capítulo 6:** describe las verificaciones estáticas efectuadas sobre los sostenimientos preliminares de los túneles del Laboratorio;
- **Capítulo 7:** describe las verificaciones estáticas efectuadas sobre los revestimientos definitivos de los túneles del Laboratorio;
- **Capítulo 8:** se proporciona una descripción sintética de las medidas de sostenimiento previstas para las cavernas en las diferentes condiciones de calidad del macizo rocoso;
- **Capítulo 9:** describe las verificaciones estáticas efectuadas sobre los sostenimientos preliminar de las cavernas principales (Principal y Secundaria);
- **Capítulo 10:** describe las verificaciones sísmicas para los revestimientos definitivos de la caverna principal y secundaria;
- **Capítulo 11:** describe las verificaciones estáticas y sísmica efectuadas sobre los sostenimientos preliminares y los revestimientos definitivos del pozo;
- **Capítulo 12:** recoge las observaciones y recomendaciones conclusivas del informe;
- **Capítulo 13:** bibliografía de referencia adoptada en los cálculos.

2. BASES Y ANTECEDENTES

2.1 Documentos Laboratorio ANDES

Los antecedentes considerados en la elaboración de la Ingeniería Básica de Anteproyecto (IBA) y de la Documentación Técnica de Licitación (DTL) son los siguientes:

- [1] Obra Civil del Laboratorio ANDES en el Túnel Agua Negra, documento y planos,
- [2] Assessment of the Civil Plan for the Andes Lab, Tony Noble, Queen's University, Canada, 02.2014,
- [3] Respuestas elaboradas por la coordinación del proyecto ANDES al Memo de Lombardi SA LO/28.10.2014, Ref: INF/14-012, Bariloche, Argentina 24.11.2014,
- [4] Nuevo Estudio Conceptual del Laboratorio Subterráneo ANDES, 6198.0-R-01 - Informe Técnico, Lombardi SA, Minusio, Suiza, 16.01.2015,
- [5] Considerations for a geophysical section of the ANDES laboratory, A. Rietbrock & T. Forbriger, Black Forest Observatory (BFO), Geophysical Institute Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Alemania, 21.03.2018, RevA,
- [6] Documento "Espacio Investigaciones Biológicas del Dr. L. Mongiat, del 29.08.2017,
- [7] Respuestas al documento de Lombardi SA "6198.1-Memo instalaciones electromecánicas", H. Asorey, X. Bertou, M. Gómez Berisso, Rev. 1, febrero 2018,
- [8] Documento "Modificaciones propuestas al Nuevo Estudio Conceptual del laboratorio subterráneo ANDES", Comité de coordinación ANDES, 25.03.2018
- [9] Minuta de reunión "IBA y DTL del Laboratorio ANDES" del 11.04.2018 en Buenos Aires – Casa de San Juan, Argentina.
- [10] Technical ANDES Note TAN-2018-002 "Muon flux estimation at the ANDES deep underground laboratory, Xavier Bertou, Centro Atómico Bariloche, Argentina, 07.05.2018

2.2 Documentos Túnel de Agua Negra (TAN)

Se consideran además los siguientes documentos del proyecto del Túnel de Agua Negra:

- [11] Túnel de Agua Negra de interconexión internacional entre Argentina y Chile, Informes y Planos del dossier de la Ingeniería Básica de Anteproyecto (IBA), Lombardi SA, Minusio, Suiza, 20.10.2014,
- [12] Túnel de Agua Negra de interconexión internacional entre Argentina y Chile, dossier Documentación Técnica de Licitación (DTL), Lombardi SA, Minusio, Suiza, 20.10.2014,
- [13] Informe interpretativo de geología previo a la etapa III de exploración – Informe de geología – IB-TAN-A-T00-GL-I001-A01 – 01.08.2011 – Con Anexos;
- [14] Estudio preliminar del estado de paleoesfuerzos – Nota-TIAN-CV-039-revA – 05.10.2012.

- [15] Túnel internacional de agua Negra – Aspectos Cinemáticos: estudio de fallas y diaclasas - Presentación PPT;
- [16] Caverna de ventilación oeste – Sostenimiento primario – Memoria de cálculo – IB-TAN-A-TCA-ST-MC01-A1 – 30.10.2011;
- [17] Caverna de ventilación este – Sostenimiento primario – Memoria de cálculo – IB-TAN-A-TCA-ST-MC11-A1 – 30.10.2011;
- [18] Galerías de conexión vehiculares y peatonales – Sostenimiento primario – Memoria de cálculo – IB-TAN-A-TGT-ST-MC01-A1 – 15.11.2011;
- [19] Bahías de estacionamiento y galerías para salas eléctricas – Sostenimiento primario – Memoria de cálculo – IB-TAN A-TGT-ST-MC11-A1 – 15.11.2011;
- [20] Túnel principal NATM sectores 1 y 6 – Sostenimiento primario – Memoria de cálculo – IB-TAN-A-TPC-ST-MC01-A5 – 21.11.2011;
- [21] Túnel principal TBM sectores 1 a 5 – Sostenimiento primario – Memoria de cálculo – IB-TAN-A-TPM-ST-MC01-A3 - 20.12.2011;
- [22] Pozo de ventilación – Sostenimiento primario – Memoria de cálculo – IB-TAN-A-TPV-ST-MC01-A1 – 22.11.2011;
- [23] Túnel de ventilación – Sostenimiento primario – Memoria de cálculo – IB-TAN-A-TVN-ST-MC01-A1 – 31.10.2011;
- [24] Túnel de ventilación – Sección típica – Revestimiento definitivo – Memoria de cálculo – IB-TAN-A-TVN-TU-MC01-A1 – 31.10.2011;
- [25] Túneles y obras subterráneas – Excavación y sostenimiento – especificaciones técnicas - Informe – IB-TAN-A-T00-TU-ET01-A1 – 30.11.2011;
- [26] Túneles y obras subterráneas – Informe de criterios de diseño –Informe – IB-TAN-A-T00-TU-I001-B2 -22.12.2011;
- [27] Caverna de ventilación oeste – Revestimiento definitivo – Memoria de cálculo – IB-TAN-A-TCA-TU-MC01-A1 – 30.11.2011;
- [28] Caverna de ventilación este – Revestimiento definitivo – Memoria de cálculo – IB-TAN-A-TCA-TU-MC11-A1 – 30.11.2011;
- [29] Tramo en túnel – Estudio de factibilidad para el empleo de máquina tunelera – Informe – IB-TAN-A-TGE-TU-I001B – 02.08.2011;
- [30] Túnel principal NATM – Sectores 1 y 6 – Sección Típica – Revestimiento definitivo – Memoria de cálculo – IB-TAN-A-TPC-TUI-MC01-A1 – 21.09.2011;
- [31] Túnel principal TBM – Sectores 1 a 5 – Sección típica – Revestimiento definitivo – Memoria de Calculo – IB-TAN-A-TPM-TU-MC01-A1 – 21.09.2011;
- [32] Túnel Agua Negra de interconexión internacional entre Argentina y Chile – Nuevo estudio conceptual – Fase I – Informe Fase I del Nuevo Estudio Conceptual

- [33] “Evaluación de la Amenaza sísmica para el Proyecto del túnel Internacional de Agua Negra – San Juan Argentina - noviembre 2011” redactado por el estudio de consultores Consultoría WA SA;
- [34] IB-TAN-A-GPO-PO-MC03-A2 Memoria de cálculo de estabilidad de los taludes de los portales argentino y chileno.
- [35] ÜNAL, E. 1992. Rock reinforcement design and its application in mining. Proc. Int. Symp. Rock Support, (eds. P.K. Kaiser & D.R. McCreath). 541-546. Sudbury, Canada

3. NORMATIVAS APLICADAS

Para la redacción de los cálculos que se describen a continuación se ha hecho referencia al siguiente cuadro normativo.

Para las prescripciones correspondientes a las metodologías de verificación de los elementos estructurales se ha hecho referencia a los Eurocódigos y en particular:

- EN 1992-1-1: 2005 – Part 1:1 – Eurocode 2: design of concrete structures.
- EN 1997-1: 2005 – Part 1 – Eurocode 7: geotechnical design.

Para la definición de las condiciones ambientales de referencia y para la definición de las características de los hormigones se ha hecho referencia a la norma europea:

- EN 206 Concrete: 2006 – Part 1: Specification, performance, production and conformity

Para la definición de las características mínimas de las fibras metálicas para el refuerzo de los hormigones se ha hecho referencia a la norma europea:

- EN 14889-1 - Fibres for concrete. Part 1: *Steel fibres - Definitions, specifications and conformity.*

Para la definición de la seguridad contra incendios de las estructuras de revestimiento de las obras subterráneas se ha hecho referencia a las líneas guía de la norma austriaca:

- Richtlinien für das Entwerfen von Bahnanlagen an Hochleistungsstrecken – Anlage 4 - Baulicher Brandschutz – Objektschutz – en unterirdischen Verkehrsbauten von Eisenbahn-Hochleistungsstrecken

4. MATERIALES

Los materiales considerados para esta fase de proyecto tienen las características mínimas que se enumeran a continuación.

4.1 Hormigón

4.1.1 Elección de la clase mínima de resistencia

Como se ilustra en el informe 6188.2-R-001 par. 6.6 la mineralización de algunos cursos de agua identificados a lo largo del trazado del túnel coloca la agresividad ambiental en clase XA1 o XA2 según la norma EN 206-1.

La norma EN 206-1 en caso de presencia de aguas agresivas que lleven a colocar el medioambiente en clase XA1 o XA2 impone que se respeten algunas características mínimas para el hormigón a usar:

- $R_{ck\ min} \geq 37$ MPa: resistencia a la compresión monoaxial en probetas cubicas ≥ 37 MPa;
- $A/C\ máx. = 0.55$ si XA1 o $= 0.50$ si XA2: máxima relación agua/cemento;
- Mínimo dosaje de cemento = $300\ kg/m^3$ si XA1 o $320\ kg/m^3$ si XA2;
- Uso de cementos resistentes a sulfatos si XA2.

Vistas las incertidumbres sobre la posibilidad de encontrar afloramientos de aguas agresivas a lo largo de todo el trazado del túnel, se recomienda el uso de un hormigón que tenga las características indicadas para la clase XA2 en toda la longitud del túnel

4.1.2 Características del hormigón no fibro-reforzado

El hormigón no armado (proyectado o vertido en obra) para la realización de sostenimientos y definitivos tiene las características enumeradas en la siguiente Tabla 4.1 de conformidad con la norma europea EN 206-1:

Tipo de hormigón	R_{ck} [N/mm ²]	f_{ck} [N/mm ²]	f_{cd} [N/mm ²]	f_{ctk} [N/mm ²]	f_{ctm} [N/mm ²]	E_{cm} [GPa]
C 30/37	37.0	30.0	20.0	2.0	2.9	33.0
C 50/60	60	50	33.3	2.9	4.1	37.0

Tabla 4.1: Valores de las características de resistencia y elasticidad del hormigón adoptado.

donde:

R_{ck} : valor característico de la resistencia a compresión monoaxial en probeta cubica;

f_{ck} : valor característico de la resistencia a compresión monoaxial en su probeta cilíndrica;

f_{cd} : valor de cálculo de la resistencia a compresión monoaxial (evaluado adoptando el factor parcial $\gamma_c=1.5$) (para los casos en que el comportamiento del hormigón sea considerado

a largo plazo, se debe considerar un ulterior factor reductor $\alpha_{cc} = 0.85$ que llevaría el valor de f_{cd} a 17.0 N/mm^2);

f_{ctk} : valor característico de la resistencia a tracción (cuantil 5%);

f_{ctm} : valor medio de la resistencia a interacción;

E_{cm} : valor medio del módulo elástico del material.

En las verificaciones STR que se describen a continuación no se toma en cuenta la resistencia a tracción del hormigón no fibro-reforzado.

Las características de diámetro máximo de los inertes y % de aditivos y otros detalles serán definidos en las especificaciones técnicas del proyecto que serán elaboradas en las fases sucesivas de proyecto.

Para elaboraciones secundarias como capas de nivelación, rellenos u otros, obviamente se podrán utilizar clases inferiores de hormigón.

4.1.3 Características del hormigón fibro-reforzado proyectado

Por razones de seguridad en la fase de construcción, pero también por razones estáticas podrá ser necesario el uso de fibras metálicas para reforzar los revestimientos de hormigón.

El dosaje mínimo para la mezcla de las fibras metálicas se sugiere que sea de 35 kg/m^3 y las fibras deben respetar las prescripciones definidas en la normativa EN 14889-1.

Las fibras consideradas en los cálculos tienen las siguientes características mínimas (Tabla 4.2)
Características dimensionales y de resistencia de las fibras metálicas a emplear.

L [mm]	D [mm]	L/D [-]	$R_{m \text{ nom}}$ [N/mm ²]
35	0.55	65	1345

Tabla 4.2: Características dimensionales y de resistencia de las fibras metálicas a emplear.

donde:

L : longitud de las fibras;

D : diámetro de las fibras;

L/D : relación geométrica característica (relación de aspecto);

$R_{m \text{ nom}}$: resistencia a tracción de las fibras.

Por lo que se refiere a la resistencia a tracción por flexión del hormigón fibro-reforzado (f_{Ftu}), se ha hecho referencia a la siguiente referencia bibliográfica:

- Vanderwalle, M. (2005) "Tunneling is an Art" – Bekaert – Reference book for application of steel fibres en tunnel construction proposed by Bekaert.

Según esta referencia las características de resistencia del hormigón fibro-reforzado se pueden calcular según las siguientes correlaciones:

$$f_e = \frac{R_e \cdot f_u}{100}$$

donde:

$$R_e = \frac{180}{1 + \frac{3600}{\text{dos.} \cdot (l/d) \cdot d^{1/3}}}$$

f_e : resistencia flexional equivalente en caso de análisis en campo elástico;

f_u : resistencia flexional última del hormigón ($f_{cfm} = 1.2 f_{ctm}$);

R_e : factor de resistencia residual;

l : longitud de las fibras de acero;

d : diámetro de las fibras de acero;

dos : dosaje de las fibras (kg/m^3).

La resistencia a tracción por flexión que se obtiene para el hormigón clase C30/37 fibro-reforzado es de $f_e = 1.9 \text{ MPa}$.

Para el cálculo de la resistencia final por flexión del hormigón se ha considerado un dosaje eficaz de las fibras del 85% tomando en cuenta de esta manera un porcentaje de rebote de las fibras del 15%.

Para el cálculo SLU en el campo elasto-plástico el valor de la resistencia a tracción por flexión f_e se reduce con un factor de 0.37 según el indicado por la Dramix para los hormigones proyectados fibro reforzados. El valor de cálculo característico para la resistencia flexional en el campo elasto-plástico, por el tanto es:

$$f_{Ftu,k} = 0.37 \cdot f_e = 0.70 \text{ MPa}$$

Para obtener el valor de resistencia de cálculo a este valor se las aplica además el factor de reducción $\gamma_F = 1.50$ y en el caso de que se considere el comportamiento a largo plazo del material, se tiene en cuenta el factor de reducción α para tomar en cuenta el envejecimiento del hormigón ($\alpha_{cc} = 0.85$). El valor de cálculo para la resistencia flexional resultaría por el tanto en última instancia:

$$f_{Ftu,d} = f_{Ftu,k} \cdot \alpha_{cc} / \gamma_F = 0.40 \text{ MPa}$$

Para comprobar si se han alcanzado los requisitos propuestos en términos de f_e será necesario evaluarlo en fase de construcción mediante pruebas según el standard EFNARC – *Three point bending test on square panel with notch* – June 2011 o análogo.

En base a esas pruebas será necesario eventuales ajustes en el dosaje de fibras y en el diseño de la mezcla del hormigón proyectado, a fin de obtener el valor de prueba mínimo requerido.

4.1.4 Características del hormigón fibro-reforzado vertido en obra

El hormigón fibro-reforzado vertido en obra debe ser siempre de clase C30/37.

Con fórmulas análogas a las ilustradas en el capítulo anterior se calcula el valor de f_e sin tomar en cuenta el % de rebote.

De esta manera el valor de f_e pasa a ser: 2.1 MPa y por el tanto $f_{Fu,k} = 0.80$ MPa y $f_{Fu,d} = 0.45$ MPa.

4.1.5 Fibras de polipropileno para la seguridad contra incendio

Se ha previsto, para limitar el fenómeno del descascaramiento explosivo, el uso de 2 kg/m³ de fibras polipropilénicas con las características mínimas que se presentan en la Tabla 4.3

Característica [-]	Valor de referencia [-]
material [%]	100% polipropileno virgen
tipo de fibra [-]	monofilamento
peso específico [kg/m ³]	910
punto de fusión [°C]	160
resistencia a tracción [MPa]	400-600
alargamiento a rotura [%]	>20%
longitud [mm]	6-12
diámetro [μm]	18

Tabla 4.3: Características dimensionales y de resistencia de las fibras polipropilénicas a emplear

La cantidad exacta de fibras que se deben agregar a la mezcla de hormigón se debe determinar por medio de pruebas de dimensiones reales o en probetas, según los requerimientos específicos del Comitente.

4.2 Acero

Para los cálculos de verificación se han adoptado las siguientes tipologías de aceros para la formación de revestimientos (Tabla 4.4):

Uso [-]	Clasificación [-]	f_{yk} [N/mm ²]	f_{yd} [N/mm ²]	f_{tk} [N/mm ²]
Acero estructural (conexiones, etc. ...)	A37-24ES	235	235	363
Acero para armadura (red, cadena de conexión)	A63-42H	420	365	630
Acero para cerchas reticulares	S500	500	435	-

Tabla 4.4: Características de los aceros empleados en las verificaciones

donde:

f_{yk} : resistencia característica a fluencia;

f_{yd} : resistencia de cálculo a fluencia (evaluada considerando un factor reductor $\gamma_s=1.15$ para los hierros de armadura y $\gamma_s=1.00$ para el acero estructural);

f_{tk} : valor característico de la resistencia a tracción.

4.3 Bulones de conexión

Los bulones de conexión entre los diversos elementos de las cerchas deben tener las siguientes características mínimas:

- Bulones tipo M24 – grado de acero 8.8.

Los bulones deben tener las siguientes características mínimas (**Tabla 4.5**):

Grado del acero	f_{yk} [N/mm ²]	f_{tk} [N/mm ²]
Grado 8.8	640	800

Tabla 4.5: Características del acero empleado para los pernos de conexión.

Se prescribe una pretensión sistemática de tales bulones a 400 Nm.

4.4 Anclajes en roca

Para el clavado de la bóveda y de las paredes del túnel se aplicarán anclajes inyectados en toda la longitud, permanentes, con las siguientes características mínimas (**Tabla 4.6**):

Anclaje tipo	$\phi_{nom.}$ [mm]	Carga de fluencia [kN]	Carga de rotura [kN]
Pernos en roca	28	350	420
Pernos en roca	25	246	270
Pernos en roca	20	157	173

Tabla 4.6: Características mínimas de los anclajes permanentes en galería.

donde:

$\phi_{nom.}$: diámetro nominal de la barra.

Para realizar eventuales operaciones de “spiling” durante la excavación (**Tabla 4.7**).

Anclaje tipo	$\phi_{nom.}$ [mm]	Carga de fluencia [kN]	Carga de rotura [kN]
Dywidag Dywi Drill R32-280 (o equivalente)	32	220	280

Tabla 4.7: Características mínimas de los anclajes para las operaciones de spiling en construcción.

Estos anclajes también pueden ser utilizados como anclajes auto-perforantes con cabeza perdida para eventuales pernos radiales en los hastiales de los tramos con cerchas.

Para realizar estabilizaciones temporales de bloques en el frente de excavación, o como pernos principales en las mejores clases de roca:

Anclaje tipo	Carga de fluencia [kN]	Carga de rotura [kN]
Atlas Copco Swellex Pm24 (o equivalente)	200	240

Tabla 4.8: Características mínimas para las eventuales intervenciones de Bulonaje en el frente de excavación.

4.5 Tubos de drenaje

Los drenajes radiales para las secciones deben ser realizados con materiales con las siguientes características mínimas:

Dren tipo [-]	Diámetro interno [mm]	Espesor [mm]	N° fresado [-]
Tubo tipo Sireg Durvinil RFS (o equivalente)	55	3.5	≥ 2

Tabla 4.9: Características mínimas de los tubos de drenaje.

4.6 Anclajes de vidrio resina

Cuando sea necesario para la estabilización del frente de excavación en el túnel pueden emplearse elementos con las siguientes características mínimas:

Anclaje tipo	Tipo [-]	Ancho [mm]	Espesor [mm]	Resistencia a la tracción [kN]
Sireg DURGLASS FL (o equivalente)	ES60	40	5	600

Tabla 4.10: Características para las eventuales intervenciones de anclaje en el frente de excavación con elementos en vidrio resina

5. TIPOS DE SOSTENIMIENTOS PREVISTOS EN LAS GALERIAS DEL LABORATORIO

Es importante resaltar que todas las consideraciones presentadas en este documento se basan en una hipótesis “**la clase mínima de rocas, en las cuales será posible ejecutar el laboratorio, es la “III”**”. En el caso en que las investigaciones, que se ejecutaran antes del comienzo de la excavación del laboratorio, no confirmaran estas hipótesis se deberá estudiar una nueva posición del laboratorio ANDES a lo largo del trazado del TAN o modificar las clases de soporte necesarias.

5.1 Introducción

En el presente Capítulo se describen sintéticamente las intervenciones de sostenimiento propuestas para:

- Túneles de entrada y salida (conexión con el TAN)
- Túnel de conexión central
- Túnel de estacionamiento y tránsito
- Túnel de escape y acceso al fondo del pozo
- Túnel de acceso al sector geofísica
- Las cavernas de las salas técnicas del Laboratorio
- Las cavernas de biología y experimental adicional

Las intervenciones de sostenimiento preliminares están subdivididas en diferentes *Clases de Soporte* (CS) que se identifican con un número progresivo de 1 a 3 que señala un progresivo refuerzo de las medidas a instalar.

Para las clases de roca I – III (Bieniawski 1989) se deberá distinguir entre la presencia o menos de riesgo de spalling /rock-burst.

En los próximos párrafos se verifican las condiciones determinantes para la definición de cada una de las clases en las condiciones que hoy se definen como más severas. En fase de realización las medidas de sostenimiento se deberán adecuar a las condiciones de variabilidad local de las condiciones del macizo. El proyecto ha previsto una aplicación de las CS adecuada a las condiciones que, superando las que determinan la clase anterior, se hacen cada vez más onerosas que lo que se ha calculado y escrito en los diseños de proyecto. Si se llegara a presentar un ulterior empeoramiento de las condiciones geológico-geotécnicas, se ha previsto el pasaje a la clase superior en términos de medidas de sostenimiento y modalidades operativas.

5.2 Galería de entrada y salida -Sala ventilación – Sala climatización – Sala Tratamiento retención agua –Medidas de sostenimiento – Clases I - III

Para las tres clases de rocas consideradas en las hipótesis iniciales (clases I – III Bieniawski 1989) se proponen los siguientes tipos de sostenimiento que se describen en el plano **6198.1-P-051**.

– CS1:

- 5+5 cm de hormigón proyectado reforzados con fibras de acero (dosaje mínimo 35 kg/m³) aplicado en la bóveda para cubrir un ángulo total de 120°;
- Bulonaje para fijar eventuales bloques inestables después de las operaciones de voladura realizada Pernos inyectados, Ø 25 mm, 245 kN, tipo Gewi (o equiv.) @ 2.00 - 2.00, L = 3.0 - 4.0 m
- Bulonaje de la zona de los hastiales con anclajes tipo “cone bolts” (o equivalentes); – límite de fluencia = 200 kN – n° 1-2 @ 1.5-2.0 m – longitud L = 3.0 m
- Instalación de malla electrosoldada con malla romboidal tipo Inchalam tipo MFI 3500-75 (o equivalente) fijada a las cabezas de los anclajes para contener eventuales fragmentos de roca expulsados por los fenómenos de spalling/rock-burst.

– CS2:

- 5+10 cm de hormigón proyectado reforzados con fibras de acero (dosaje mínimo 35 kg/m³) aplicado en la bóveda para cubrir un ángulo total de 180°;
- Bulonaje para fijar eventuales bloques inestables después de las operaciones de voladura realizada Pernos inyectados, Ø 25 mm, 245 kN, tipo Gewi (o equiv.) @ 2.00 – 2.00, L = 3.0 - 4.0 m
- Eventual aplicación de hormigón proyectado (esp. 5 cm) en el frente de excavación (min. 50% de la superficie – parte alta) con fibras de acero (min. 35 kg/m³);
- Bulonaje de la zona de los hastiales con anclajes tipo “cone bolts” (o equivalentes) – límite de fluencia = 200 kN – n° 1-2 @ 1.0-2.0 m – longitud L = 3.0 m
- Instalación de malla electrosoldada a malla romboidal tipo Inchalam tipo MFI 3500-75 (o equivalente) fijada a las cabezas de los anclajes para contener eventuales fragmentos de roca creados por fenómenos de spalling/rock-burst.

– CS3:

- 20 cm de hormigón proyectado del cual los 5 cm primeros reforzados con fibras de acero (dosaje mínimo 35 kg/m³) aplicado en la bóveda y hastiales. Los últimos 15 cm reforzados con una malla electrosoldada $\Phi = 6$ mm – 15X15 cm fijada con una doble placa a la cabeza de los anclajes;
- Bulonaje sistemático del borde de excavación realizado con anclajes inyectados sobre la longitud total Pernos inyectados, Ø 25 mm, 245 kN, tipo Gewi (o equiv.) n° 4-5 @ 1.5-1.5 m – longitud L = 4.0 m;
- Aplicación de hormigón proyectado (esp. 5 cm) en el frente de excavación con fibras de acero (min. 35 kg/m³).

5.3 Galería zona de tránsito y estacionamiento – Sala técnica – Sala de emergencia comedor– Medidas de sostenimiento – Clases I - III

Para las tres clases de rocas consideradas en las hipótesis iniciales (clases I – III Bieniawski 1989) se proponen los siguientes tipos de sostenimiento que se describen en el plano **6198.1-P-051**.

– CS1:

- 5+5 cm de hormigón proyectado reforzados con fibras de acero (dosaje mínimo 35 kg/m³) aplicado en la bóveda para cubrir un ángulo total de 120°;
- Bulonaje esporádico para fijar eventuales bloques inestables después de las operaciones de voladura realizada. Pernos inyectados, Ø 25 mm, 245 kN, tipo Gewi (o equiv.) @ 2.0 - 2.00, L = 4.0 - 5.0 m
- Bulonaje de la zona de los hastiales con anclajes tipo “cone bolts” (o equivalentes); – límite de fluencia = 200 kN – n° 1-2 @ 1.5-2.0 m – longitud L = 4.0 m
- Instalación de malla electrosoldada con malla romboidal tipo Inchalam tipo MFI 3500-75 (o equivalente) fijada a las cabezas de los anclajes para contener eventuales fragmentos de roca expulsados por los fenómenos de spalling/rock-burst.

– CS2:

- 5+10 cm de hormigón proyectado reforzados con fibras de acero (dosaje mínimo 35 kg/m³) aplicado en la bóveda para cubrir un ángulo total de 180°;
- Bulonaje esporádico para fijar eventuales bloques inestables después de las operaciones de voladura realizada Pernos inyectados, Ø 25 mm, 245 kN, tipo Gewi (o equiv.) @ 2.00 – 2.00, L = 4.0 - 5.0 m
- Eventual aplicación de hormigón proyectado (esp. 5 cm) en el frente de excavación (min. 50% de la superficie – parte alta) con fibras de acero (min. 35 kg/m³);
- Bulonaje de la zona de los hastiales con anclajes tipo “cone bolts” (o equivalentes) – límite de fluencia = 200 kN – n° 1-2 @ 1.0-2.0 m – longitud L = 4.0 m
- Instalación de malla electrosoldada a malla romboidal tipo Inchalam tipo MFI 3500-75 (o equivalente) fijada a las cabezas de los anclajes para contener eventuales fragmentos de roca creados por fenómenos de spalling/rock-burst.

– CS3:

- 20 cm de hormigón proyectado del cual los 5 cm primeros reforzados con fibras de acero (dosaje mínimo 35 kg/m³) aplicado en la bóveda y hastiales. Los últimos 15 cm reforzados con una malla electrosoldada $\Phi = 6$ mm – 15X15 cm fijada con una doble placa a la cabeza de los anclajes;
- Bulonaje sistemático del borde de excavación realizado con anclajes inyectados sobre la longitud total. Pernos inyectados, Ø 25 mm, 245 kN, tipo Gewi (o equiv.) n° 4-5 @ 1.5-1.5 m – longitud L = 5.0 m;
- Aplicación de hormigón proyectado (esp. 5 cm) en el frente de excavación con fibras de acero (min. 35 kg/m³).

5.4 Galería de conexión – Sala limpia – Sala experimental – Laboratorio de biología – Medidas de sostenimiento – Clases I - III

Para las tres clases de rocas consideradas en las hipótesis iniciales (clases I – III Bieniawski 1989) se proponen los siguientes tipos de sostenimiento que se describen en el plano **6198.1-P054**.

– CS1:

- 5+5 cm de hormigón proyectado reforzados con fibras de acero (dosaje mínimo 35 kg/m³) aplicado en la bóveda para cubrir un ángulo total de 120°;
- Bulonaje para fijar eventuales bloques inestables después de las operaciones de voladura. Pernos inyectados, Ø 25 mm, 245 kN, tipo Gewi (o equiv.) @ 2.00 - 2.00, L = 4.0 - 5.0 m
- Bulonaje de la zona de los hastiales con anclajes tipo “cone bolts” (o equivalentes); – límite de fluencia = 200 kN – n° 1-2 @ 1.5-2.0 m – longitud L = 3.0 m
- Instalación de malla electrosoldada con malla romboidal tipo Inchalam tipo MFI 3500-75 (o equivalente) fijada a las cabezas de los anclajes para contener eventuales fragmentos de roca expulsados por los fenómenos de spalling/rock-burst.

– CS2:

- 5+10 cm de hormigón proyectado reforzados con fibras de acero (dosaje mínimo 35 kg/m³) aplicado en la bóveda para cubrir un ángulo total de 180°;
- Bulonaje sistemático del borde de excavación. Pernos inyectados, Ø 25 mm, 245 kN, tipo Gewi (o equiv.) @ 2.00 - 2.00, L = 4.0 - 5.0 m:
- Eventual aplicación de hormigón proyectado (esp. 5 cm) en el frente de excavación (min. 50% de la superficie – parte alta) con fibras de acero (min. 35 kg/m³);
- Bulonaje de la zona de los hastiales con anclajes tipo “cone bolts” (o equivalentes) – límite de fluencia = 200 kN – n° 1-2 @ 1.0-2.0 m – longitud L = 3.0 m
- Instalación de malla electrosoldada a malla romboidal tipo Inchalam tipo MFI 3500-75 (o equivalente) fijada a las cabezas de los anclajes para contener eventuales fragmentos de roca creados por fenómenos de spalling/rock-burst.

– CS3:

- 20 cm de hormigón proyectado del cual los 5 cm primeros reforzados con fibras de acero (dosaje mínimo 35 kg/m³) aplicado en la bóveda y hastiales. Los últimos 15 cm reforzados con una malla electrosoldada $\Phi = 6$ mm – 15X15 cm fijada con una doble placa a la cabeza de los anclajes;
- Bulonaje sistemático del borde de excavación realizado con anclajes inyectados sobre la longitud total tipo Dywidag Gewi Bar (o equivalentes) – $\Phi = 25$ mm – límite de fluencia = 246 kN – n° 6-7 @ 1.5-1.5 m – longitud L = 5.0 m;
- Aplicación de hormigón proyectado (esp. 5 cm) en el frente de excavación con fibras de acero (min. 35 kg/m³).

5.5 Galería de escape y acceso al fondo del pozo – Medidas de sostenimiento – Clases I - III

Para las tres clases de rocas consideradas en las hipótesis iniciales (clases I – III Bieniawski 1989) se proponen los siguientes tipos de sostenimiento que se describen en el plano **6198.1-P054**.

– CS1:

- 5+5 cm de hormigón proyectado reforzados con fibras de acero (dosaje mínimo 35 kg/m³) aplicado en la bóveda para cubrir un ángulo total de 120°;
- Bulonaje para fijar eventuales bloques inestables después de las operaciones de voladura. Pernos inyectados, Ø 20 mm, 157 kN, tipo Gewi (o equiv.) @ 2.00 - 2.00, L = 2.5 - 3.0 m
- Bulonaje de la zona de los hastiales con anclajes tipo “cone bolts” (o equivalentes); – límite de fluencia = 200 kN – n° 1-2 @ 1.5-2.0 m – longitud L = 2.0 m
- Instalación de malla electrosoldada con malla romboidal tipo Inchalam tipo MFI 3500-75 (o equivalente) fijada a las cabezas de los anclajes para contener eventuales fragmentos de roca expulsados por los fenómenos de spalling/rock-burst.

– CS2:

- 10 cm de hormigón proyectado reforzados con fibras de acero (dosaje mínimo 35 kg/m³) aplicado en la bóveda para cubrir un ángulo total de 180°;
- Bulonaje sistemático del borde de excavación realizada con pernos inyectados, 20 mm, 157 kN, tipo Gewi (o equiv.) @ 2.00 - 2.00, L = 2.5 - 3.0 m
- Eventual aplicación de hormigón proyectado (esp. 5 cm) en el frente de excavación (min. 50% de la superficie – parte alta) con fibras de acero (min. 35 kg/m³);
- Bulonaje de la zona de los hastiales con anclajes tipo “cone bolts” (o equivalentes) – límite de fluencia = 200 kN – n° 1-2 @ 1.0-2.0 m – longitud L = 1.5-2.0 m
- Instalación de malla electrosoldada a malla romboidal tipo Inchalam tipo MFI 3500-75 (o equivalente) fijada a las cabezas de los anclajes para contener eventuales fragmentos de roca creados por fenómenos de spalling/rock-burst.

– CS3:

- 15 cm de hormigón proyectado del cual los 5 cm primeros reforzados con fibras de acero (dosaje mínimo 35 kg/m³) aplicado en la bóveda y hastiales. Los últimos 15 cm reforzados con una malla electrosoldada $\Phi = 6$ mm – 15X15 cm fijada con una doble placa a la cabeza de los anclajes;
- Bulonaje sistemático del borde de excavación realizado con anclajes inyectados sobre la longitud total tipo Dywidag Gewi Bar (o equivalentes) – 20 mm, 157 kN – n° 6-7 @ 1.5 -1.5 m – longitud L = 3.0 m;
- Aplicación de hormigón proyectado (esp. 5 cm) en el frente de excavación con fibras de acero (min. 35 kg/m³).

5.6 Galería de acceso al sector geofísica – Salas de instrumentos D-E-G-H-K – Medidas de sostenimiento – Clases I - III

Para las tres clases de rocas consideradas en las hipótesis iniciales (clases I – III Bieniawski 1989) se proponen los siguientes tipos de sostenimiento que se describen en el plano **6198.1-P-054**.

– CS1:

- 5+5 cm de hormigón proyectado reforzados con fibras de acero (dosaje mínimo 35 kg/m³) aplicado en la bóveda para cubrir un ángulo total de 120°;
- Bulonaje para fijar eventuales bloques inestables después de las operaciones de voladura. Pernos inyectados, 20 mm, 157 kN, tipo Gewi (o equiv.) @ 2.00 - 2.00, L = 2.5 - 3.0 m
- Bulonaje de la zona de los hastiales con anclajes tipo “cone bolts” (o equivalentes); – límite de fluencia = 200 kN – n° 1-2 @ 2.0-2.0 m – longitud L = 2.0 m
- Instalación de malla electrosoldada con malla romboidal tipo Inchalam tipo MFI 3500-75 (o equivalente) fijada a las cabezas de los anclajes para contener eventuales fragmentos de roca expulsados por los fenómenos de spalling/rock-burst.

– CS2:

- 10 cm de hormigón proyectado reforzados con fibras de acero (dosaje mínimo 35 kg/m³) aplicado en la bóveda para cubrir un ángulo total de 180°;
- Bulonaje sistemático del borde de excavación realizada con pernos inyectados, 20 mm, 157 kN, tipo Gewi (o equiv.) @ 2.00 – 2.00, L = 2.5 - 3.0 m
- Eventual aplicación de hormigón proyectado (esp. 5 cm) en el frente de excavación (min. 50% de la superficie – parte alta) con fibras de acero (min. 35 kg/m³);
- Bulonaje de la zona de los hastiales con anclajes tipo “cone bolts” (o equivalentes) – límite de fluencia = 200 kN – n° 1-2 @ 2.0-2.0 m – longitud L = 1.5-2.0 m
- Instalación de malla electrosoldada a malla romboidal tipo Inchalam tipo MFI 3500-75 (o equivalente) fijada a las cabezas de los anclajes para contener eventuales fragmentos de roca creados por fenómenos de spalling/rock-burst.

– CS3:

- 10 cm de hormigón proyectado del cual los 5 cm primeros reforzados con fibras de acero (dosaje mínimo 35 kg/m³) aplicado en la bóveda y hastiales. Los últimos 15 cm reforzados con una malla electrosoldada $\Phi = 6$ mm – 15X15 cm fijada con una doble placa a la cabeza de los anclajes;
- Bulonaje sistemático del borde de excavación realizado con anclajes inyectados sobre la longitud total tipo Dywidag Gewi Bar (o equivalentes) – 20 mm, 157 kN – n° 6-7 @ 1.5-1.5 m – longitud L = 2.5-3.0 m;
- Aplicación de hormigón proyectado (esp. 5 cm) en el frente de excavación con fibras de acero (min. 35 kg/m³).

6. GALERIAS – VERIFICACIONES ESTÁTICAS DE LOS SOSTENIMIENTOS INICIALES

6.1 Introducción

En el presente capítulo se ilustran los cálculos de verificación efectuados. Los métodos de verificación adoptados corresponden a prácticas comúnmente adoptadas en el ámbito internacional y utilizados en muchos de los proyectos realizados por Lombardi SA.

Los conceptos básicos adoptados para estas verificaciones se extenderán a las otras partes de obras análogas (cavernas del Laboratorio, pozo principal y las salas técnicas del Laboratorio).

6.2 Hipótesis de base

6.2.1 Estado de esfuerzo natural

Dada la incertidumbre que todavía existe sobre la naturaleza distensiva o compresiva de la tectónica presente en el área del proyecto, y a falta de mediciones puntuales de la situación real del estado de esfuerzo en la zona, y caracterizándose el túnel en la mayor parte del trazado por coberturas relevantes, se ha elegido adoptar, cuando sea necesario, un estado tensional con relación k_0 entre las tensiones principales de 1.0.

Según la experiencia de Lombardi SA este tipo de hipótesis se deben considerar representativas para las condiciones geológicas que actualmente son esperables. Solo a la luz de datos más puntuales, en las siguientes fases de proyecto, se podrán adoptar estados tensionales diferentes.

6.2.2 Modelos geológicos y parámetros del macizo rocoso

Los escenarios geológicos previstos, así como los parámetros geomecánicos adoptados, derivan de los datos de base proporcionados por el Comitente. El informe **6198.1-R-02** contiene una síntesis razonada de estos datos.

La amplitud y la tipología de la falla corresponden a las que se describen en el informe IB-TAN-A-T00-GL-I001-A01 – “Informe interpretativo de geología previo a la Etapa III de exploración”.

La calidad de las informaciones geológico-geotécnicas de base lamentablemente resulta en muchos aspectos, debido a las dificultades ambientales presentes, con muchas lagunas y por lo tanto las consideraciones que se plantean a continuación se deben interpretar como consideraciones preliminares basadas en datos que hoy se presumen. En las fases de proyecto Definitivo y Ejecutivo se deben llevar a cabo nuevas profundizaciones, lo mismo que en la fase de construcción, para poder lograr una optimización de la fase de proyecto.

6.2.3 Presión de agua en los sostenimientos iniciales

Analizando los tipos de sostenimiento que se describen en los planos **6198.1-P-050 hasta 6198.1-P-060** se observa que para las clases CS1 ÷ CS2 el revestimiento preliminar no resulta continuo en todo el perímetro de perforación porque falta un cerramiento en la contrabóveda. Esto, unido al hecho de que la presencia de hormigón proyectado en el frente resulta eventual o parcial, hace que los revestimientos se puedan considerar drenantes. En el caso de los revestimientos de las clases CS3 serán previstos drenajes para evitar cargas hidráulicas.

6.3 Aproximación discontinua– Verificación de la estabilidad de cuñas de roca

Para las clases de macizo rocoso I – III el principal escenario de carga identificado es el de una cuña de roca que se crea por la intersección de la línea de perforación con las discontinuidades naturales o inducidas presentes en el macizo rocoso.

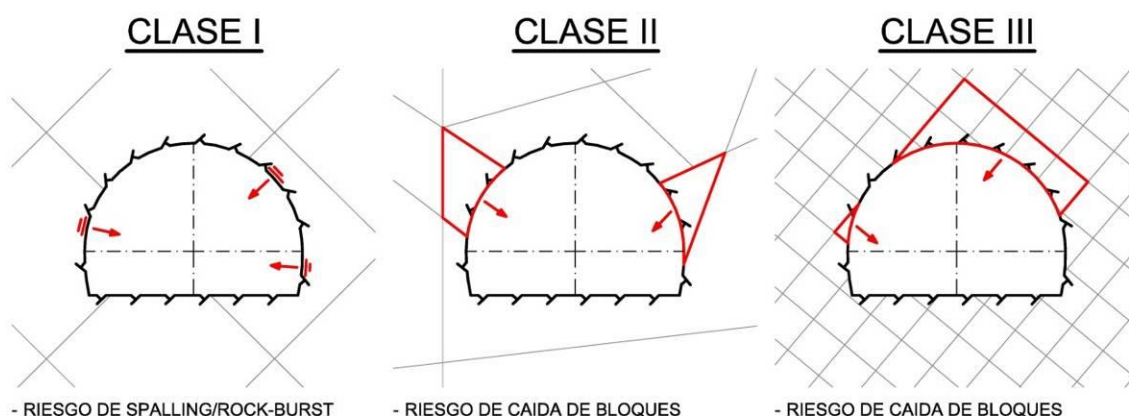


Figura 6.1: Concepto de comportamiento del macizo para las clases I – III.

Dada la relevante cobertura presente por encima del laboratorio y la falta de informaciones de detalle, sobre la real ubicación de las discontinuidades presentes, se ha adoptado una aproximación de cálculo independiente de la ubicación y orientación de las estructuras. Por lo dicho se adoptó un modelo que considera solamente las dimensiones de la excavación y las posibles características de resistencia de las discontinuidades evaluando en esta manera la situación más crítica para la obra en análisis. Por lo dicho el modelo de cálculo adoptado puede ser considerado como conservador.

Se han realizado los análisis con el método de cálculo desarrollada por Lombardi SA en el cual el modelo bidimensional asume que el bloque analizado se apoya en los otros potenciales bloques a lo largo del eje del túnel, que también son potencialmente inestables. Gracias a esta consideración el modelo bidimensional se puede considerar como conservador porque no toma en cuenta la resistencia en las juntas en la tercera dimensión (**Figura 6.2**).

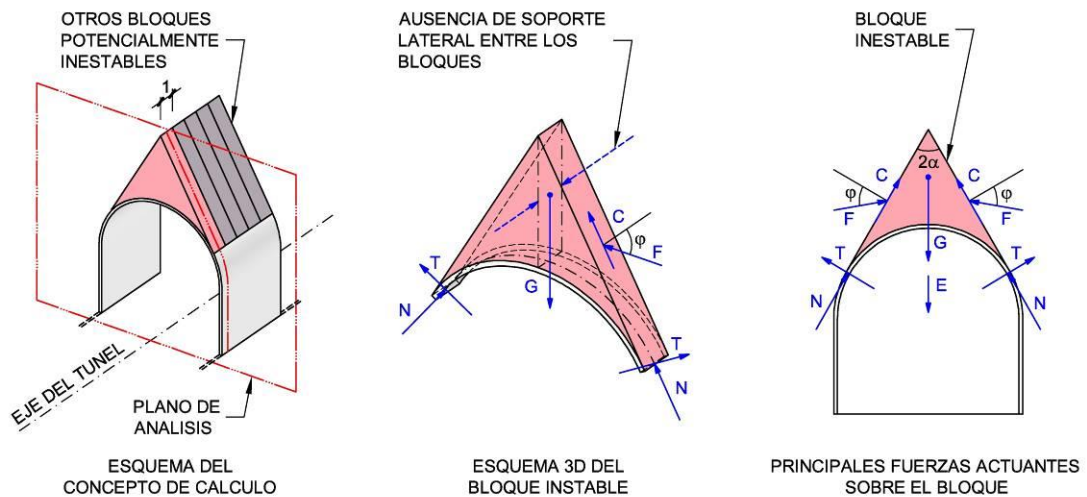


Figura 6.2: Esquema conceptual del modelo de cálculo adoptado – Ver Figura 6.3 para el significado de los símbolos.

El modelo considera una bóveda circular de la cavidad y analiza la estabilidad de cualquier bloque caracterizado por un cinematismo posible, y buscando entre estos el más crítico (factor de seguridad F_s menor). El modelo no está vinculado a determinadas ubicaciones y por lo tanto permite considerar la situación más desfavorable independientemente de la posibilidad de determinar las ubicaciones críticas. Para simplificar el cálculo el modelo analiza un bloque simétrico.

La evaluación de la estabilidad se hace considerando las características de resistencia asignadas a las posibles discontinuidades en la zona en estudio.

Con respecto a un modelo de cálculo con orientación definida de las fisuras el modelo empleado permite analizar el grado de seguridad de la bóveda de la obra en un rango de posibilidades más amplio.

La verificación se efectúa estudiando las fuerzas activas y las fuerzas resistentes agentes que actúan sobre el bloque (**Figura 6.3**). Las fuerzas activas son las siguientes:

- Peso del bloque y de la eventual capa de hormigón proyectado (G);
- Eventual presión del agua en el interior de las discontinuidades (U);
- Acción sísmica (entendida como incremento de la fuerza peso desestabilizante de bloque y revestimiento (S).

Las fuerzas resistentes son:

- Fuerza resistente axial (N) y fuerza resistente de corte (T) agentes en el revestimiento;
- Presión ejercida por los anclajes (p) que considera la longitud total y la longitud de anclaje de los anclajes;
- Resistencia por empuje a lo largo de las discontinuidades (F), que considera el estado tensional agente en el macizo rocoso;

- Resistencia cohesiva a lo largo de las discontinuidades (C).

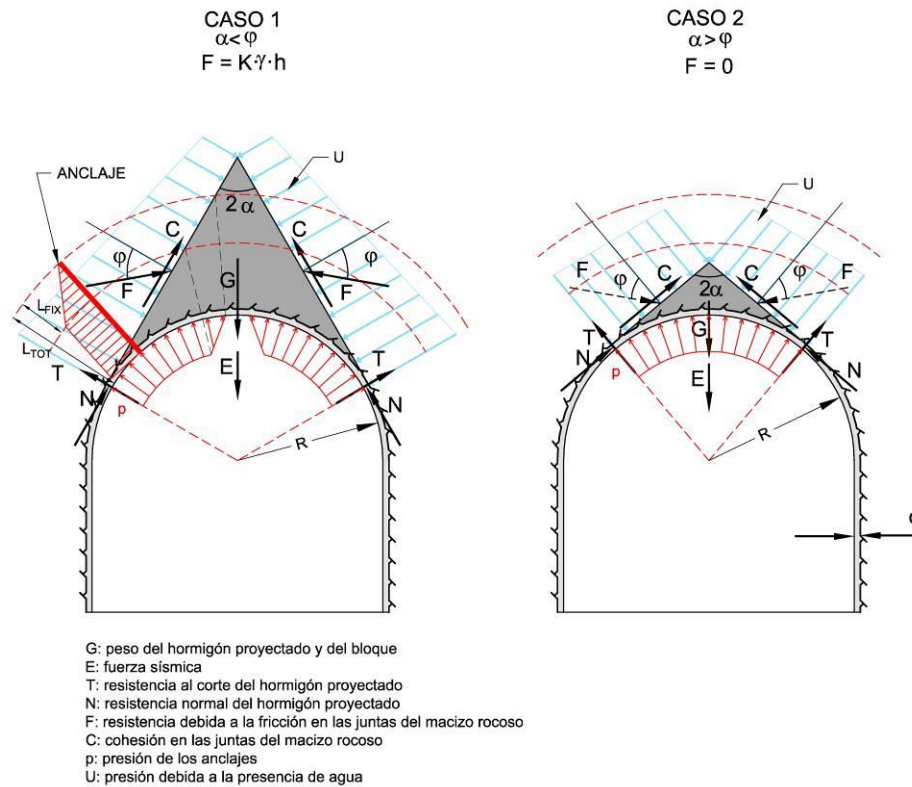


Figura 6.3: Representación esquemática de las fuerzas agentes y resistentes en el modelo de cálculo Lombardi SA.

El modelo considera el estado tensional en el macizo de manera simplificada. La fuerza F actúa a lo largo de las discontinuidades que delimitan el bloque analizado con un ángulo equivalente al ángulo de fricción reducido de un factor de seguridad. Con este propósito se deben distinguir 2 casos (**Figura 6.3**):

- caso en que el ángulo α es menor que el ángulo de fricción en el cual la fuerza F resulta ser una fuerza estabilizante;
- caso en que el ángulo en el vértice α es mayor o igual que el ángulo de empuje, la fuerza F pasa a ser una fuerza activa y se asume igual a 0 en cuanto la junta tiende a abrirse apenas el bloque tiende a movilizarse.

La fuerza F se calcula considerando el estado tensional vertical ligado a la cobertura en clave de bóveda ($\sigma_v = \gamma \cdot h$) multiplicado por un factor reductor k . En los cálculos que aquí se presentan se ha considerado un factor multiplicativo k de 1.0.

Se considera que el hormigón pueda soportar tanto un esfuerzo axial como un esfuerzo de corte. El esfuerzo de corte se evalúa teniendo en cuenta la resistencia del material y de su espesor efectivo. Para el esfuerzo axial en cambio se considera un espesor eficaz reducido del revestimiento, para tomar en cuenta de alguna manera las inevitables irregularidades del perfil de perforación (Figura 6.4).

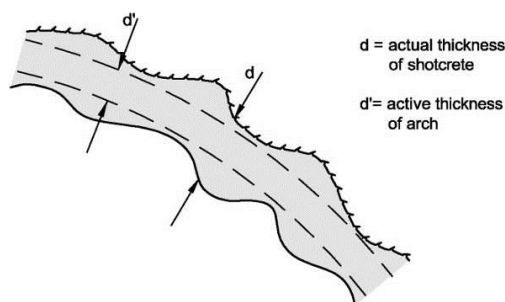


Figura 6.4: representación esquemática del espesor de hormigón dentro del cual se puede desarrollar/producir una acción de compresión.

6.3.1 Análisis desarrollados y parámetros adoptados

En el área de Laboratorio se han identificado las condiciones de cobertura y litotipos que, para cada una de las clases de sostenimiento, lleva a tener el menor ángulo de empuje, correspondiente al bloque más crítico (dimensiones mayores). En la tabla se muestra un resumen de las principales características de los dos principales litotipos “roca intacta”.

Litotipos	γ [kN/m ³]	UCS [MPa]	m_i [-]	E_i [GPa]
Riolita porfirica	26.4	100	25	40
Dacita	26.9	80	25	33

Tabla 6.1: Parámetros mecánico de la roca intacta en el área del laboratorio.

Los parámetros característicos que se han considerado en los cálculos se resumen en la tabla:

TMR	Descripción	Cobertura [m]	GSI	$\sigma_{c,m}$ [MPa]	ϕ_k [°]	C_k [MPa]	E_m [GPa]	ν [-]
TMR 2a	Bueno	1750	70	42	53	10	25	0.24
TMR 2b	Medio	1750	60	33	50	8.75	17	0.24
TMR 2c	Malo	1750	50		45	7.5	15	0.24

Tabla 6.2: Parámetros mecánico de los litotipos presentes en el área del laboratorio.

A falta de datos directos sobre la resistencia a lo largo de las discontinuidades de los diversos litotipos se han asumido los valores característicos del ángulo de fricción (ϕ) para el macizo rocoso calculado para las coberturas elegidas, aplicando a éste un factor de seguridad de 1.25 sobre el valor de la tangente. El aporte cohesivo siempre se ha considerado prudencialmente nulo a lo largo de las discontinuidades.

Los parámetros adoptados se resumen en la **Tabla 6.3:**

Tipo de roca [-]	Clase macizo rocoso [-]	Clase de soporte [-]	Cobertura. [m]	$\phi_{caráct.}$ [°]	$\phi_{cálculo}$ [°]	$C_{cálculo}$ [kPa]
Riolita - Dacita	I	CS1	1750	56/50	47	0
Riolita - Dacita	I	CS2	1750	51/50	44	0
Riolita - Dacita	II	CS3	1750	43/39	40	0

Tabla 6.3: Parámetros de resistencia para las discontinuidades adoptados en los cálculos.

donde:

$\phi_{\text{caract.}}$: ángulo de fricción característico para el material considerado;

$\phi_{\text{cálculo}}$: ángulo de fricción de cálculo (considerando factor FS = 1.25 sobre la tangente de ϕ);

$c_{\text{cálculo}}$: cohesión de cálculo considerada.

Los análisis efectuados son los siguientes:

- *Análisis a corto plazo*: para las diferentes tipologías de roca y cobertura se ha realizado un análisis considerando solamente los primeros 5 cm de hormigón proyectado los parámetros de resistencia a corto plazo del hormigón proyectado y la ausencia de sismo. Dado el exiguo espesor de hormigón proyectado que se ha considerado en los cálculos, no se ha considerado ningún efecto arco.
- *Análisis a largo plazo*: para las diferentes tipologías de roca y cobertura se ha realizado un análisis considerando el espesor total del soporte inicial, la completa maduración del hormigón y el consiguiente aumento de resistencia. En este caso a título prudencial se ha considerado también la presencia de una sollicitación sísmica. Esta hipótesis se asume, a título prudencial, considerando que un eventual desprendimiento de bloques relacionado con la acción sísmica sería para las secciones tipo CS1 ÷ CS3, de tipo “frágil” y por lo tanto riesgoso para los trabajadores. La sollicitación sísmica ha sido considerada como un incremento del peso de volumen del bloque considerando un factor $k_v = 0.15$. El efecto “arco” en el hormigón proyectado se ha considerado solo para la clase CS3 en la cual efectivamente se completará un arco hasta el nivel del umbral del túnel, para las clases CS1 y CS2 este efecto se ha descuidado. En los análisis para las secciones CS1 ÷ CS3, a título prudencial, se ha considerado también un potencial de carga hidráulica límite a lo largo de las superficies de los bloques. Esta carga, prudencialmente considerada, representa una potencial acumulación de agua en las discontinuidades, antes de que se pueda desarrollar un drenaje del macizo rocoso.

Para el corto plazo la resistencia al corte se ha reducido con un factor de 1.5 (aplicado a la resistencia a compresión f_{ck} , y a la resistencia a corte τ).

Los parámetros adoptados para la resistencia del revestimiento para las diferentes clases están reunidos en la Tabla 6.4

Clase [-]	Corto Plazo				Largo plazo			
	esp. [cm]	esp. arco [cm]	τ_{cd} [MPa]	σ_{cd} [MPa]	esp. [cm]	esp. arco [cm]	τ_{cd} [MPa]	σ_{cd} [MPa]
CS1	5	0	0.73	-	10	0	1.1	20
CS2	5	0	0.73	-	15*	0	1.1	20
CS3	5	0	0.73	-	20**	0	1.1	20
*10 cm para la galería de acceso al fondo del pozo y galería sector de geofísica								
**15 cm para la galería de acceso al fondo del pozo y galería sector de geofísica								

Tabla 6.4: Parámetros de resistencia para los revestimientos adoptados en los cálculos.

donde:

σ_{cd} : resistencia a compresión de cálculo del hormigón;

τ_{cd} : resistencia a corte de cálculo del hormigón;

esp. : espesor del revestimiento considerado resistente a corte;

esp. arco : espesor de revestimiento en el cual se ha considerado una contribución a compresión.

Los anclajes se modelan teniendo en cuenta su longitud total y su longitud de anclaje. La presión aportada por los anclajes se considera nula en el caso de que el anclaje esté completamente comprimido dentro del bloque considerado. Se define una zona de intersección en el tramo donde la superficie del bloque interseca el tramo de fundación del anclaje, dentro de esta zona la presión ejercida por el anclaje crece hasta el valor nominal.

La acción ejercida por el anclaje es la menor entre la fuerza de arrancamiento de este y su resistencia nominal subdivididas por el espaciamiento entre los anclajes.

Las características de resistencia que se asumen para los anclajes están resumidas.

Galería de entrada y salida – Ventilación y climatización – Tratamiento retención aguas							
Clase [-]	Q_s [MPa]	ϕ_d [mm]	T_k [kN]	T_d [kN]	L [m]	$i_{long.}$ [m]	$i_{tras.}$ [m]
CS1	1.00	65.00	245.00	181.48	3.00	2.00	2.00
CS2	1.00	65.00	245.00	181.48	3.00	2.00	2.00
CS3	0.70	65.00	245.00	181.48	4.00	1.50	1.50

Galería de estacionamiento y transito - Sala técnica – Sala emergencia comedor							
Clase [-]	Q_s [MPa]	ϕ_d [mm]	T_k [kN]	T_d [kN]	L [m]	$i_{long.}$ [m]	$i_{tras.}$ [m]
CS1	1.0	65.00	245.00	181.48	4.00	2.00	2.00
CS2	1.0	65.00	245.00	181.48	4.00	2.00	2.00
CS3	0.7	65.00	245.00	181.48	5.00	1.50	1.50

Galería de acceso al pozo y de escape							
Clase [-]	Q_s [MPa]	ϕ_d [mm]	T_k [kN]	T_d [kN]	L [m]	$i_{long.}$ [m]	$i_{tras.}$ [m]
CS1	1.0	60.00	157.00	116.29	2.50	2.00	2.00
CS2	1.0	60.00	157.00	116.29	2.50	2.00	2.00
CS3	0.7	60.00	157.00	116.29	3.00	1.50	1.50

Galería de conexión central -Sala Limpia – Sala experimental adicional -Laboratorio de biología							
Clase [-]	Q _s [MPa]	φ _d [mm]	T _k [kN]	T _d [kN]	L [m]	i _{long.} [m]	i _{tras.} [m]
CS1	1.0	65.00	245.00	181.48	4.00	2.00	2.00
CS2	1.0	65.00	245.00	181.48	4.00	2.00	2.00
CS3	0.7	65.00	245.00	181.48	5.00	1.50	1.50

Galería sector de geofísica – Salas de instrumentos D-E-G-H-K							
Clase [-]	Q _s [MPa]	φ _d [mm]	T _k [kN]	T _d [kN]	L [m]	i _{long.} [m]	i _{tras.} [m]
CS1	1.0	60.00	157.00	116.29	2.50	2.00	2.00
CS2	1.0	60.00	157.00	116.29	2.50	2.00	2.00
CS3	0.7	60.00	157.00	116.29	2.50	1.50	1.50

Tabla 6.5: Parámetros de resistencia para los anclajes adoptados en los cálculos.

donde:

Q_s : valor de adherencia entre el anclaje y la matriz rocosa;

φ_d : diámetro mínimo de perforación;

T_k : resistencia última característica del anclaje;

T_d : resistencia última de cálculo del anclaje considerando un F_s = 1.35;

L : longitud del anclaje;

i_{long.} : intereje longitudinal medio de los anclajes;

i_{trans.} : intereje transversal medio de los anclajes.

El valor de Q_s se ha calculado en base a las indicaciones de bibliografía proporcionadas por Bustamante [1]. Para los análisis se ha considerado prudencialmente el valor mayor de espaciamiento entre los anclajes.

En el análisis la relación entre las fuerzas resistentes y las fuerzas agentes representa el factor de seguridad calculado:

$$F_s = \frac{R_d}{E_d}$$

El valor del factor de seguridad calculado de esta manera debe ser ≥ 1 porque los factores parciales de seguridad ya han sido asumidos tanto para las acciones resistentes como para las acciones solicitantes.

Los resultados de los cálculos efectuados se resumen en la Tabla 6.1 y en el **Anexo A:**

Condición	Clase de sostenimiento [-]					
	Corto plazo			Largo plazo		
	CS1	CS2	CS3	CS1	CS2	CS3
Galería de entrada y salida*	3.0 ✓	2.5 ✓	2.7 ✓	1.8 ✓	1.9 ✓	2.2 ✓
Galería de estacionamiento y tránsito*	1.8 ✓	1.5 ✓	1.8 ✓	1.1 ✓	1.3 ✓	1.5 ✓
Galería de acceso al pozo y de escape	2.8 ✓	2.3 ✓	2.3 ✓	1.6 ✓	1.6 ✓	1.9 ✓
Galería de conexión central*	2.4 ✓	2.0 ✓	2.3 ✓	1.5 ✓	1.6 ✓	1.6 ✓
Galería sector de geofísica*	3.7 ✓	3.1 ✓	2.1 ✓	2.2 ✓	2.0 ✓	2.0 ✓

Tabla 6.6: Parámetros de resistencia para las discontinuidades adoptados en los cálculos.

: Resultados de los cálculos efectuados con el método Lombardi SA.

Analizando los resultados reunidos en la tabla anterior adecuados. La indicación de valores de factor de seguridad en algunos casos inferiores en las condiciones a “largo plazo” es imputable a la inserción de las solicitaciones sísmica e hidráulica.

Considerado que el revestimiento tiene que funcionar también a largo plazo (100 años) se debe garantizar que el recubrimiento sea suficiente para evitar problemas de corrosión. Teniendo en cuenta las indicaciones internacionales (SIA – AICAP – ISRM) se deberá garantizar un recubrimiento mínimo de 20mm y la definición de la mezcla de la lechada también tendrá que ser diseñada para el plazo de 100 años. Además de esto en todo el laboratorio se deberán efectuar controles periódicos en los revestimientos para asegurar que el comportamiento de los anclajes se desarrolle conforme a las hipótesis de diseño.

6.4 Enfoque continuo equivalente - Estudio mediante líneas características

Para las clases de calidad del macizo rocoso tipo III se ha adoptado un enfoque de cálculo de tipo continuo equivalente.

Las verificaciones se han realizado calculando la presión que transmite el macizo rocoso mediante el método de cálculo de las Líneas Características (G. Lombardi 1973 [3, 4], G. Lombardi 1974 [5], F. Amberg 2011 [6]). El método permite tomar en cuenta las características de deformabilidad y resistencia del macizo rocoso, así como la cobertura insistente sobre la cavidad en estudio. El método permite evaluar la evolución de las deformaciones de la cavidad al disminuir una presión interna ficticia que representa la progresión de las operaciones de perforación. Los revestimientos del túnel se modelan con su rigidez (función de su módulo elástico y de sus dimensiones geométricas) tomando también en consideración la efectiva posición respecto del frente donde son instalados.

El criterio de resistencia adoptado para la modelación del comportamiento del macizo rocoso es el de Mohr-Coulomb cuyos parámetros han sido obtenidos linealizando el criterio de resistencia de Hoek-Brown en un oportuno estado tensional de confinamiento.

6.4.1 Parámetros adoptados y análisis efectuados

Con el método de las líneas características se han analizado las condiciones más desfavorables para cada sección de túnel presente en el laboratorio.

A continuación, en la Tabla 4.1 **Tabla 6.7**, si enumeran las principales características de resistencia adoptadas.

Roca [-]	H [m]	GSI [-]	Clase [-]	γ [kN/m ³]	c_p [kPa]	ϕ_p [°]	c_r [kPa]	ϕ_r [°]	E_m [GPa]	ν [-]
TMR 2c	1750.0	50.0	III	27.0	7000	45.3	7000	45.3	8.8	0.24

Tabla 6.7: Parámetros para el macizo rocoso adoptados en los cálculos con líneas características.

donde:

γ : peso por unidad de volumen del material;

c_p : cohesión pico del material;

ϕ_p : ángulo de fricción pico del material;

c_r : cohesión residual del material;

ϕ_r : ángulo de fricción residual del material;

E_m : módulo elástico del macizo rocoso;

ν : coeficiente de Poisson.

Los resultados de los cálculos están contenidos en la **Tabla 6.8** y en detalle en el **Anexo B**.

Condición	Cobertura H [m]	$r_{excav.}$ [m]	d_{max} [m]	$\varepsilon = d_{max}/R$ [%]	r_{pl} [m]
Galería de entrada *	1750.00	3.44	2.8	0.80	4.1
Galería de salida*		4.14	3.3	0.80	4.9
Galería de estacionamiento y tránsito*		4.75	3.8	0.80	5.6
Galería de acceso al pozo y de escape		2.95	2.4	0.80	3.5
Galería de conexión central*		3.95	3.2	0.80	4.7
Galería sector de geofísica*		2.46	2.0	0.80	2.9

Tabla 6.8: Resultados del cálculo con las líneas características en términos de convergencia y extensión de la capa de rotura.

donde:

$R_{excav.}$: radio de perforación considerado en los cálculos;

d_{max} : máximo desplazamiento de la cavidad con presión nula;

R_{pl} : radio plástico (extensión de la capa plástica calculada a partir del centro de la perforación).

Los desplazamientos se mantienen por debajo de los 10 cm (máx. 3.8 cm) con una extensión de la capa plastificada alrededor de la cavidad que supera por poco una dimensión equivalente al radio de ésta (máx. 5.6 m).

Para evaluar la deformación correspondiente al punto de instalación del revestimiento se ha hecho referencia a la teoría de Sulem y Panet (1987, [7]).

Los resultados de los cálculos efectuados están contenidos en la Tabla 6.4.

Condición	$E_{rev.}$ [GPa]	$d_{rev.}$ [m]	X_{frente} [m]	d_0 [cm]	gap [cm]	P_{rad} [kPa]	σ_c [MPa]
Galería de entrada*	15.0	20.0	6	0.9	1.8	408	1.2
Galería de salida*	15.0	20.0	6	1.1	2.0	202.3	4.2
Galería de estacionamiento y tránsito*	15.0	20.0	8	1.3	2.4	140.2	3.3
Galería de acceso al pozo y de escape	15.0	15.0	5	0.8	1.6	23.3	0.5
Galería de conexión central*	15.0	20.0	8	1.1	2.1	37.0	0.7
Galería sector de geofísica*	15.0	15.0	2.5	0.7	1.2	293	4.8

Tabla 6.9: Resultados del cálculo mediante las líneas características en términos de solicitaciones en los sostenimientos.

donde:

$E_{rev.}$: módulo elástico del revestimiento considerado (el valor de 15 GPa permite tomar en cuenta la no completa maduración del hormigón al progresar la perforación);

$d_{rev.}$: espesor del revestimiento;

X_{frente} : distancia del frente de excavación donde supuestamente se produce el completamiento del revestimiento preliminar;

d_0 : convergencia en el frente (máximo valor del desplazamiento que se produce adelante del frente de excavación). Esto representa el efecto de la deformación de la roca aguas arriba del frente de excavación idealmente incluida en el perfil de la futura excavación. Esta convergencia (d_0) se calcula con una línea característica exactamente en la progresiva del frente de excavación. Esta línea considera el efecto positivo de la desviación de las tensiones en la zona del frente que ejerce una presión de contraste a la deformación libre del borde de excavación.

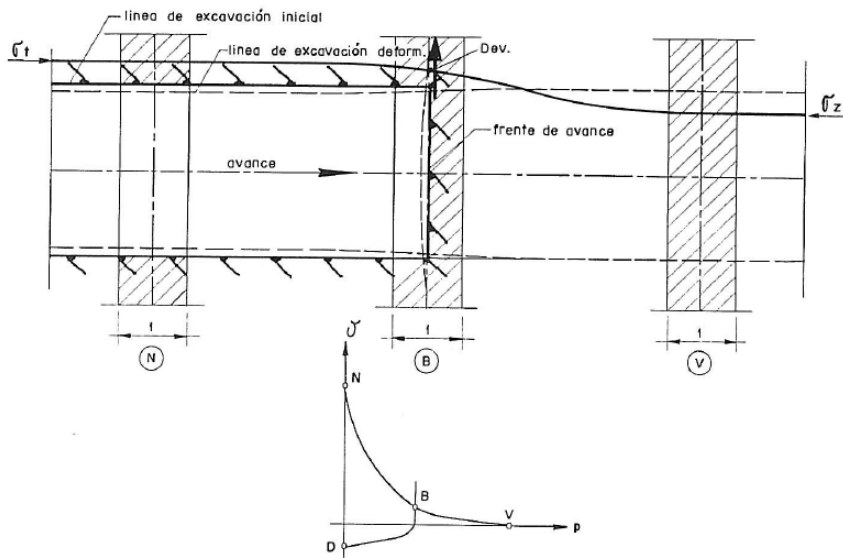


Figura 6.5: Representación esquemática de la deformación de la roca aguas arriba del frente (extracto de Lombardi (1973 [4])).

gap : deformación radial libre permitida en el borde de excavación antes de la ejecución del revestimiento. Esta es la deformación del borde de excavación que puede desarrollarse desde el frente (adonde la deformación d_0 se ha ya desarrollado) hasta la posición x_{frente} . Esta deformación radial libre fue estimada de acuerdo a las formulaciones de Sulem y Panet ([7]) y de acuerdo a la experiencia de Lombardi en trabajos similares.

Evolución de las convergencias [Sulem Panet (1987)]

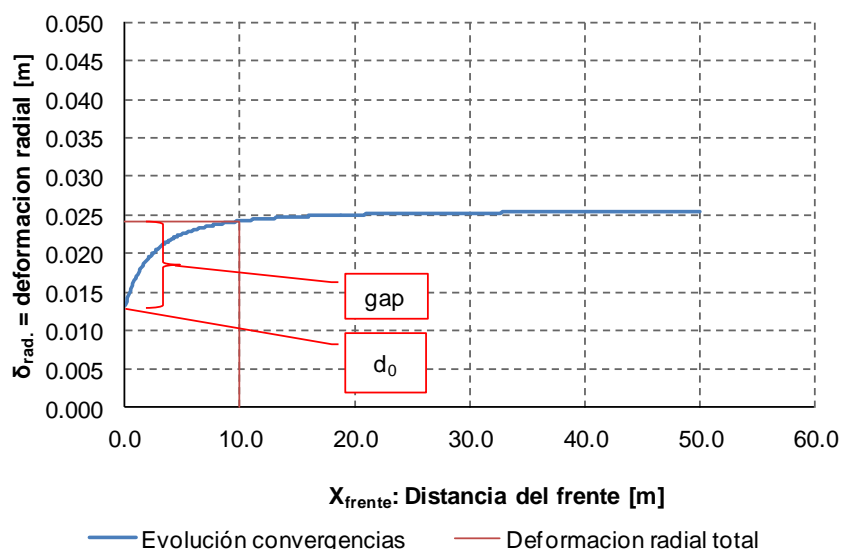


Figura 6.6: Ejemplo del cálculo de la deformación radial libre (gap).

$P_{rad.}$: presión radial que grava sobre el revestimiento cuando ha alcanzado el equilibrio.

$\delta_{rad.rev.eq.}$: desplazamiento radial absorbido por el revestimiento completo en equilibrio. Este desplazamiento se calcula tomando en cuenta la rigidez del revestimiento ($E_{rev.}$).

σ_c : tensión de compresión media en el revestimiento. Esta se calcula sobre la base del espesor medio del soporte (d_{rev}).

Según la experiencia de Lombardi resulta oportuno limitar la tensión media en el interior de los revestimientos (σ_c) a aproximadamente $0.5 \cdot f_{cd}$ y en este caso entonces a 10 MPa a fin de poder tener una reserva suficiente de resistencia para poder absorber los eventuales efectos flexionales.

Analizando los resultados se puede notar que, si el sostenimiento inicial completo (20 cm de espesor), se cerrara ya después de 3 m del frente de excavación en algunas condiciones de cobertura y características del macizo rocoso si obtendrían valores de tensión media de compresión (σ_c) en el interior de los revestimientos demasiado elevados. Los cálculos muestran sin embargo que si en cambio se cierra el revestimiento entre los 8-10 m del frente de excavación las solicitaciones que éste soporta resultan compatibles con la resistencia.

Los resultados de los cálculos a “corto plazo” que se describen en el apartado 6.3.1 muestran que los revestimientos formados de los primeros 5 cm de hormigón proyectado armado con fibras metálicas, unido a la presencia de los anclajes, es suficiente para garantizar la estabilidad de la cavidad en las primeras fases de construcción. Para las clases de macizo rocoso I a III el es oportuno completar el sostenimiento inicial hasta 10-15m del frente de excavación.

Obviamente las convergencias de la cavidad en esta fase de “no completo cerramiento” deberán ser oportunamente monitoreadas a fin de evitar que se produzcan comportamientos anormales.

7. GALERIAS – VERIFICACIONES ESTÁTICAS DE LOS REVESTIMIENTOS DEFINITIVOS

7.1 Introducción

En el presente capítulo se verán ilustrados en mayor detalle los cálculos de verificación de los revestimientos definitivos desarrollados para las galerías y salas técnicas.

7.2 Hipótesis de base

Para las galerías y salas se han considerado como definitivos los sostenimientos presentados en los apartados 5, 6.

En particular para las clases de sostenimiento CS1-CS2 que no prevén el revestimiento de todo el perímetro de excavación, a largo plazo, se ha considerado que el hormigón proyectado con fibra sea extendido hasta los hastiales. En todas las secciones se ha considerado la solera con revestimiento en hormigón armado vertido en obra.

7.2.1 Concepto de análisis

En el presente capítulo se describen los cálculos estáticos efectuados considerando esquemáticamente los revestimientos finales que se describen en los planos 6198.1-P-055 y 6189.1-P056. Las solicitaciones sísmicas serán consideradas en los cálculos que se describen en el Capítulo 10.

Los revestimientos serán verificados en las condiciones que se consideran más desfavorables, en base a los conocimientos geológicos actualmente disponibles

Como se trata de la fase de Proyecto Preliminar los esquemas de armaduras consideradas en los cálculos se deben asumir como una indicación de las armaduras mínimas necesarias a flexocompresión. No se consideran la presencia de armaduras a corte y armaduras constructivas, porque simplemente se propone determinar las cantidades de armadura que se deben calcular y verificar la factibilidad de las soluciones constructivas propuestas.

7.2.2 Secciones analizadas

Los cálculos se han efectuado para los revestimientos finales correspondientes a los sostenimientos más solicitados:

7.2.3 Cargas adoptadas

El concepto utilizado para el análisis ha sido verificar si los revestimientos colocados en obra están en condiciones de soportar las cargas a las que están sometidos.

Como está previsto un sistema de drenaje continuo a lo largo de todo el laboratorio con tubos de recolección de las aguas en la base de los hastiales, y juntas abiertas en cada ranura, en los cálculos no se ha tomado en cuenta la carga hidráulica sobre los revestimientos.

7.2.4 Cargas adoptadas y combinaciones consideradas

Las cargas que se asumen para la verificación de la sección son las siguientes:

- 1) Peso propio de la estructura.
- 2) Presión del macizo rocoso correspondiente a las condiciones de máxima cobertura que se pueden encontrar (1750 m) y en condiciones de calidad del macizo rocoso correspondientes a la clase III de Bieniawski (**Figura 7.1**). La presión se ha calculado mediante el programa de las líneas características y el resultado se ilustra en **Anexo C, Figura 7.1**.

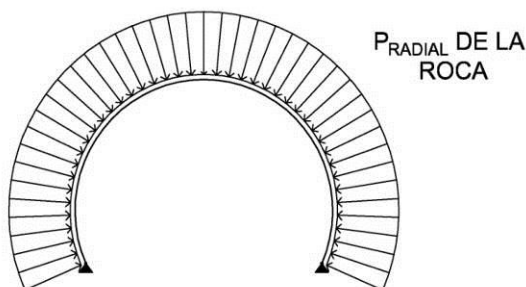


Figura 7.1: Esquema de la carga correspondiente a la presión del macizo rocoso.

- 3) Presión de un bloque simétrico en bóveda con espesor máximo calculado según Unal [35] (ver **Anexo C**) (**Figura 7.2**).

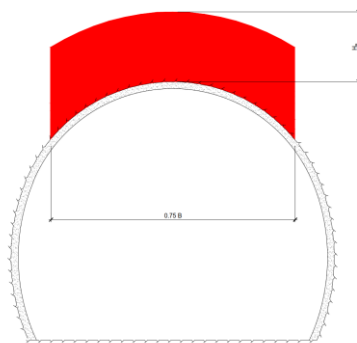


Figura 7.2: Esquema de la carga correspondiente a la presencia de un bloque simétrico en bóveda.

- 4) Presión de un bloque asimétrico en bóveda con espesor calculado según Unal [35] (ver **Anexo C**) (**Figura 7.3**).

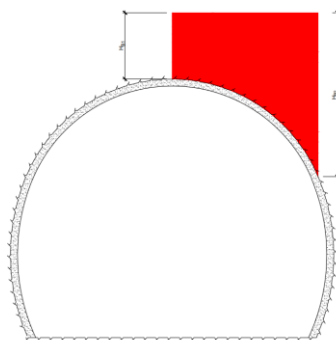


Figura 7.3: Esquema de la carga correspondiente a la presencia de un bloque asimétrico en bóveda.

Estas cargas se han considerado después en las siguientes combinaciones:

- Para la condición de estado límite ultimo (ELU):

Combinación de carga	1	2	3	4
Comb. 1	1.35	1.35	-	-
Comb. 2	1.35	-	1.35	-
Comb. 3	1.35	-	-	1.35

Tabla 7.1: Combinación de carga ELU.

- Par la condición de estado límite de servicio (ELS):

Combinación de carga	1	2	3	4
Comb. 4	1.00	1.00	-	-
Comb. 5	1.00	-	1.00	-
Comb. 6	1.00	-	-	1.00

Tabla 7.2: Combinación de carga ELS.

7.2.5 Modelo de cálculo adoptado

Para los cálculos estructurales se ha adoptado el software STATIK-7 (CUBUS AG, CH).

El modelo de cálculo adoptado consiste en una serie de elementos mono dimensionales que representan la línea de eje del elemento analizado que apoya sobre resortes no lineales dispuestos en modo radial y activos solamente a compresión.

En la **Figura 7.4** se esquematizan los modelos de cálculo adoptado para la tipología de soporte considerada.

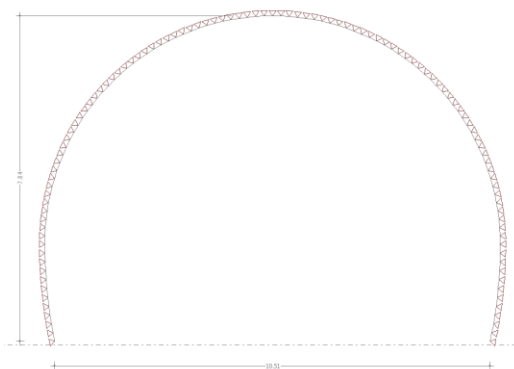


Figura 7.4: Modelo de cálculo adoptado para la sección de revestimiento definitivo para la clase III.

Los valores de rigidez adoptados para la sección están contenidos en la siguiente Tabla 9.4

Análisis	E (GPa)	Radio bóveda (m)	Radio Hastiales (m)	Longitud elementos (m)	Rigidez resorte bóveda (MN/m)	Rigidez resorte bóveda (MN/m)	Espesor revestimiento (m)	Modulo deformabilidad hormigón (GPa)
Zona de tránsito y estacionamiento	8.8	5.50	11.30	~ 0.20	321.4	167.0	0.25	33
Galería de escape y acceso al fondo del pozo	8.8	3.05	9.32	~ 0.20	588.1	191.8	0.15	33
$E_{\text{cálculo}} = 0.5 \cdot E_{\text{hormigón no fisurado}}$								

Tabla 7.3: Parámetros modelo de cálculo.

En los cálculos estáticos se ha considerado una rigidez flexional de los elementos estructurales ($E \cdot J$) de 50% para considerar la presencia de una micro-fisura en el interior de los revestimientos mismos que reduce precisamente su rigidez flexional.

7.3 Verificación revestimiento final Galería zona de tránsito y estacionamiento – Galería de conexión central – Galería de entrada y de salida – Sala técnica – Sala de emergencia y comedor – Sala climatización – Sala tratamiento retención de agua –Sala de ventilación- CS3

7.3.1 Verificaciones estructurales ELU

En las tablas siguiente se muestran las solicitaciones en el revestimiento definitivo según las combinaciones de cargas de la **Tabla 7.1** y **Tabla 7.2** de la galería de tránsito y estacionamiento.

Combinación		N [kN]	M [kNm]	V [kN]	e (M/N) [m]
ELU Comb.1	N _{max}	-1277.0	0.0	98.8	0.000
	M _{max+}	-1259.6	76.4	1.4	-0.061
	M _{max-}	-1246.4	-29.6	-2.1	0.024
	M/N _{max+}	-1245.8	-29.6	4.9	0.024
	M/N _{max-}	-1259.6	76.4	1.4	-0.061
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max+}	-1259.6	76.4	1.4	-0.061
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max-}	-1246.4	-29.6	-2.1	0.024
	V _{max}	-1277.0	0.0	98.8	0.000
ELU Comb.2	N _{max}	-1296.4	0.0	-22.2	0.000
	M _{max+}	-978.8	39.0	3.1	-0.040
	M _{max-}	-1139.9	-31.6	-3.2	0.028
	M/N _{max+}	-1139.9	-31.6	-3.2	0.028
	M/N _{max-}	-978.8	39.0	3.1	-0.040
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max+}	-978.8	39.0	3.1	-0.040
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max-}	-1159.0	-30.9	-3.2	0.027
	V _{max}	-1215.3	-13.4	-39.9	0.011
ELU Comb.3	N _{max}	-1484.4	0.0	-25.3	0.000
	M _{max+}	-839.7	61.2	-5.0	-0.073
	M _{max-}	-821.4	-55.2	-11.2	0.067
	M/N _{max+}	-820.7	-55.2	17.1	0.067
	M/N _{max-}	-839.7	61.2	-5.0	-0.073
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max+}	-851.3	60.9	8.2	-0.072
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max-}	-1128.3	-40.8	7.4	0.036
	V _{max}	-814.1	8.3	-101.4	-0.010

Tabla 7.4: Solicitaciones para el revestimiento definitivo de la galería de tránsito y estacionamiento.

Los factores de eficiencia para los efectos de flexión (M) y esfuerzo normal (N) obtenidos para las secciones consideradas están contenidos en la **Tabla 7.9**. Para todos los detalles de los cálculos ver **Anexo C**

	ELU Comb.1	ELU Comb.2	ELU Comb.3
N_{max}	0.30	0.31	0.35
M_{max+}	0.59	0.35	0.49
M_{max-}	0.37	0.35	0.43
M/N_{max+}	0.37	0.35	0.43
M/N_{max-}	0.59	0.35	0.49
$[M/(N-1.2*N_{max})]_{max+}$	0.59	0.35	0.48
$[M/(N-1.2*N_{max})]_{max-}$	0.37	0.36	0.38
V_{max}	0.30	0.32	0.21

Tabla 7.5: Verificación ELU revestimiento definitivo de la galería de tránsito y estacionamiento.

7.3.2 Verificaciones estructurales ELS

La verificación según el EC2 se ha llevado a cabo verificando que:

- Las tensiones de compresión en el hormigón sean $\sigma_c < 0.6 \cdot f_{ck} = 30 \text{ MPa}$
- Las tensiones de tracción en el acero sean $\sigma_s < 0.8 \cdot f_{yk} = 336 \text{ MPa}$
- El ancho de las fisuras sea $w_k < 0.3 \text{ mm}$

Combinación		N [kN]	M [kNm]	V [kN]	e (M/N) [m]
ELS Comb.1	N_{max}	-945.9	0.0	73.2	0.000
	M_{max+}	-933.0	56.6	1.0	-0.061
	M_{max-}	-922.8	-22.0	-3.6	0.024
	M/N_{max+}	-922.8	-22.0	-3.6	0.024
	M/N_{max-}	-933.0	56.6	1.0	-0.061
	$[M/(N-1.2*N_{max})]_{max+}$	-933.0	56.6	1.0	-0.061
	$[M/(N-1.2*N_{max})]_{max-}$	-923.2	-22.0	1.5	0.024
	V_{max}	-945.9	0.0	73.2	0.000
ELS Comb.2	N_{max}	-960.3	0.0	-16.4	0.000
	M_{max+}	-725.0	28.9	2.3	-0.040
	M_{max-}	-844.4	-23.4	-2.3	0.028
	M/N_{max+}	-844.4	-23.4	-2.3	0.028
	M/N_{max-}	-725.0	28.9	2.3	-0.040
	$[M/(N-1.2*N_{max})]_{max+}$	-725.0	28.9	2.3	-0.040
	$[M/(N-1.2*N_{max})]_{max-}$	-858.5	-22.9	-2.3	0.027
	V_{max}	-900.2	-10.0	-29.5	0.011
ELS Comb.3	N_{max}	-1099.6	0.0	-18.8	0.000
	M_{max+}	-622.0	45.4	-3.7	-0.073
	M_{max-}	-608.4	-40.9	-8.3	0.067
	M/N_{max+}	-607.9	-40.9	12.7	0.067
	M/N_{max-}	-622.0	45.4	-3.7	-0.073
	$[M/(N-1.2*N_{max})]_{max+}$	-630.6	45.1	6.0	-0.072
	$[M/(N-1.2*N_{max})]_{max-}$	-835.8	-30.2	5.5	0.036
	V_{max}	-603.0	6.1	-75.1	-0.010

Tabla 7.6: Solicitaciones para el revestimiento definitivo de la galería de tránsito y estacionamiento.

				σ_c		
	N	M	V	Max	Limit	Check
	[kN]	[kNm]	[kN]	[MPa]	[MPa]	[-]
ELS Comb.1	-945.9	0.0	73.2	-3.5	-18.0	✓
	-933.0	56.6	1.0	-9.7	-18.0	✓
	-922.8	-22.0	-3.6	-5.8	-18.0	✓
	-922.8	-22.0	-3.6	-5.8	-18.0	✓
	-933.0	56.6	1.0	-9.7	-18.0	✓
	-933.0	56.6	1.0	-9.7	-18.0	✓
	-923.2	-22.0	1.5	-5.8	-18.0	✓
	-945.9	0.0	73.2	-3.5	-18.0	✓
ELS Comb.2	-960.3	0.0	-16.4	-3.8	-18.0	✓
	-725.0	28.9	2.3	-5.7	-18.0	✓
	-844.4	-23.4	-2.3	-5.6	-18.0	✓
	-844.4	-23.4	-2.3	-5.6	-18.0	✓
	-725.0	28.9	2.3	-5.7	-18.0	✓
	-725.0	28.9	2.3	-5.7	-18.0	✓
	-858.5	-22.9	-2.3	-5.6	-18.0	✓
	-900.2	-10.0	-29.5	-4.4	-18.0	✓
ELS Comb.3	-1099.6	0.0	-18.8	-4.3	-18.0	✓
	-622.0	45.4	-3.7	-8.0	-18.0	✓
	-608.4	-40.9	-8.3	-7.0	-18.0	✓
	-607.9	-40.9	12.7	-7.0	-18.0	✓
	-622.0	45.4	-3.7	-8.0	-18.0	✓
	-630.6	45.1	6.0	-7.9	-18.0	✓
	-835.8	-30.2	5.5	-6.2	-18.0	✓
	-603.0	6.1	-75.1	-2.7	-18.0	✓

Tabla 7.7: Verificación ELS.

Las verificaciones son válidas también para: galería de entrada y salida, sala técnica, sala de emergencia y comedor, sala climatización, sala tratamiento retención de agua y sala de ventilación

7.4 Verificación revestimiento final Galería de escape y acceso al fondo del pozo – Sala limpia – Sala experimental adicional – Laboratorio de biología – Galería de acceso sector de geofísica – Sala instrumentos D-E-F-G-H-K – CS3

En las tablas siguiente se muestran las solicitaciones en el revestimiento definitivo según las combinaciones de cargas de la **Tabla 7.1** y **Tabla 7.2**. para la geometría de la galería de escape.

Combinación		N [kN]	M [kNm]	V [kN]	e (M/N) [m]
ELU Comb.1	N _{max}	-191.5	0.0	-11.0	0.000
	M _{max+}	-185.3	7.2	-0.6	-0.039
	M _{max-}	-177.0	-5.3	-5.2	0.030
	M/N _{max+}	-177.0	-5.3	-5.2	0.030
	M/N _{max-}	-185.0	7.2	-0.6	-0.039
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max+}	-185.3	7.2	-0.6	-0.039
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max-}	-178.2	-5.3	0.0	0.030
	V _{max}	-179.2	-2.0	13.4	0.011
ELU Comb.2	N _{max}	-431.4	0.0	4.9	0.000
	M _{max+}	-317.9	8.7	0.0	-0.027
	M _{max-}	-376.2	-7.2	-2.3	0.019
	M/N _{max+}	-376.2	-7.2	-2.3	0.019
	M/N _{max-}	-317.9	8.7	0.0	-0.027
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max+}	-317.9	8.7	0.0	-0.027
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max-}	-388.2	-6.7	2.4	0.017
	V _{max}	-344.4	-1.8	13.3	0.005
ELU Comb.3	N _{max}	-474.1	0.0	-5.5	0.000
	M _{max+}	-257.5	13.2	-1.6	-0.051
	M _{max-}	-250.3	-10.9	-0.1	0.043
	M/N _{max+}	-249.6	-10.9	15.6	0.044
	M/N _{max-}	-257.5	13.2	-1.6	-0.051
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max+}	-257.5	13.2	-1.6	-0.051
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max-}	-365.5	-8.8	1.8	0.024
	V _{max}	-247.8	5.5	-33.4	-0.022

Tabla 7.8: Solicitaciones para el revestimiento definitivo de la galería de escape.

7.4.1 Verificaciones estructurales ELU

Los factores de eficiencia para los efectos de flexión (M) y esfuerzo normal (N) obtenidos para las secciones consideradas están contenidos en la **Tabla 7.9**.

	ELU Comb.1	ELU Comb.2	ELU Comb.3
N _{max}	0.08	0.17	0.19
M _{max+}	0.15	0.20	0.33
M _{max-}	0.12	0.20	0.24
M/N _{max+}	0.12	0.20	0.24
M/N _{max-}	0.15	0.20	0.33
[M/(N-1.2*N _{max})] _{max+}	0.15	0.20	0.33
[M/(N-1.2*N _{max})] _{max-}	0.12	0.20	0.22
V _{max}	0.08	0.15	0.14

Tabla 7.9: Verificación ELU revestimiento definitivo de la galería de escape.

7.4.2 Verificaciones estructurales ELS

La verificación según el EC2 se ha llevado a cabo verificando que:

- Las tensiones de compresión en el hormigón sean $\sigma_c < 0.6 \cdot f_{ck} = 30 \text{ MPa}$
- Las tensiones de tracción en el acero sean $\sigma_s < 0.8 \cdot f_{yk} = 336 \text{ MPa}$
- El ancho de las fisuras sea $w_k < 0.3 \text{ mm}$

Combinación		N [kN]	M [kNm]	V [kN]	e (M/N) [m]
ELS Comb.1	N _{max}	-141.8	0.0	-8.1	0.000
	M _{max+}	-137.2	5.4	-0.4	-0.039
	M _{max-}	-131.1	-3.9	-3.8	0.030
	M/N _{max+}	-131.1	-3.9	-3.8	0.030
	M/N _{max-}	-137.2	5.4	-0.4	-0.039
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max+}	-137.2	5.4	-0.4	-0.039
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max-}	-132.0	-3.9	0.0	0.030
	V _{max}	-132.7	-1.5	9.9	0.011
ELS Comb.2	N _{max}	-319.6	0.0	3.6	0.000
	M _{max+}	-235.5	6.5	0.0	-0.027
	M _{max-}	-278.7	-5.3	-1.7	0.019
	M/N _{max+}	-278.7	-5.3	-1.7	0.019
	M/N _{max-}	-235.5	6.5	0.0	-0.027
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max+}	-235.5	6.5	0.0	-0.027
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max-}	-287.5	-5.0	1.7	0.017
	V _{max}	-255.1	-1.3	9.8	0.005
ELS Comb.3	N _{max}	-351.2	0.0	-4.1	0.000
	M _{max+}	-190.8	9.7	-1.2	-0.051
	M _{max-}	-185.4	-8.1	-0.1	0.043
	M/N _{max+}	-184.9	-8.1	11.6	0.044
	M/N _{max-}	-190.8	9.7	-1.2	-0.051
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max+}	-190.8	9.7	-1.2	-0.051
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max-}	-270.7	-6.5	1.3	0.024
	V _{max}	-183.5	4.1	-24.7	-0.022

Tabla 7.10: Solicitaciones para el revestimiento definitivo de la galería de escape.

				σ_c		
	N	M	V	Max	Limit	Check
	[kN]	[kNm]	[kN]	[MPa]	[MPa]	[-]
ELS Comb.1	-474.1	0.0	-5.5	-3.1	-18.0	✓
	-257.5	13.2	-1.6	-7.2	-18.0	✓
	-250.3	-10.9	-0.1	-5.3	-18.0	✓
	-249.6	-10.9	15.6	-5.5	-18.0	✓
	-257.5	13.2	-1.6	-7.2	-18.0	✓
	-257.5	13.2	-1.6	-7.2	-18.0	✓
	-365.5	-8.8	1.8	-4.8	-18.0	✓
	-247.8	5.5	-33.4	-2.9	-18.0	✓
ELS Comb.2	-474.1	0.0	-5.5	-3.1	-18.0	✓
	-257.5	13.2	-1.6	-7.2	-18.0	✓
	-250.3	-10.9	-0.1	-5.3	-18.0	✓
	-249.6	-10.9	15.6	-5.5	-18.0	✓
	-257.5	13.2	-1.6	-7.2	-18.0	✓
	-257.5	13.2	-1.6	-7.2	-18.0	✓
	-365.5	-8.8	1.8	-4.8	-18.0	✓
	-247.8	5.5	-33.4	-2.9	-18.0	✓
ELS Comb.3	-351.2	0.0	-4.1	-2.3	-18.0	✓
	-190.8	9.7	-1.2	-5.3	-18.0	✓
	-185.4	-8.1	-0.1	-3.9	-18.0	✓
	-184.9	-8.1	11.6	-4.1	-18.0	✓
	-190.8	9.7	-1.2	-5.3	-18.0	✓
	-190.8	9.7	-1.2	-5.3	-18.0	✓
	-270.7	-6.5	1.3	-3.5	-18.0	✓
	-183.5	4.1	-24.7	-2.2	-18.0	✓

Tabla 7.11: Verificación ELS.

Las verificaciones son válidas también para: galería de escape y acceso al fondo del pozo Sala limpia – Sala experimental adicional – laboratorio de biología de acceso sector de geofísica – Sala instrumentos D-E-F-G-H-K

Para todos los detalles de los cálculos ver **Anexo D**.

8. TIPOS DE SOSTENIMIENTO CAVERNA PRINCIPAL – CAVERNA SECUNDARIA

8.1 Introducción

En el presente Capítulo se describirán sintéticamente las intervenciones de sostenimiento propuestas para:

- La caverna principal del Laboratorio
- La caverna secundaria del Laboratorio

Así como descrito en los capítulos las intervenciones de sostenimiento preliminares están subdivididas en diferentes Clases de Soporte (CS) que se identifican con un número progresivo de 1 a 3 que señala un progresivo refuerzo de las medidas a instalar.

Para las clases de roca I – III (Bieniawski 1989) se deberá distinguir entre la presencia o menos de riesgo de spalling /rock-burst.

Para el revestimiento definitivo, en el caso los cálculos los requieran, se indicarán genéricamente los espesores y la eventual presencia de armadura de refuerzo.

8.2 Medidas de sostenimiento Caverna principal - Clases I - III

Para las tres clases de rocas consideradas en las hipótesis iniciales (clases I – III Bieniawski 1989) se proponen los siguientes tipos de sostenimiento que se describen en el plano **6198.1-P053**

- CS1-CS2:
 - 5cm de hormigón proyectado reforzados con fibras de acero (dosaje mínimo 35 kg/m³) C30/37
 - Bulonaje para fijar eventuales bloques inestables después de las operaciones de voladura.
Pernos inyectados, Ø 28 mm, 350 kN, tipo Dywidag R35-420 (o equiv.) @ 2.00 - 2.00, L = 8.0m
 - Instalación de malla electrosoldada tipo Ø8mm/150-150 (o equivalente)
 - 20 cm de hormigón proyectado reforzados con fibras de acero (dosaje mínimo 35 kg/m³) C30/37
 - Instalación de malla electrosoldada tipo Ø8mm/150-150 (o equivalente)
 - 5cm de hormigón proyectado reforzados con fibras de acero (dosaje mínimo 35 kg/m³) C30/37
 - Eventuales 5 cm de hormigón proyectado con fibras de acero (dosaje mínimo 35 kg/m³) en la frente de excavación
- CS3:
 - 5cm de hormigón proyectado reforzados con fibras de acero (dosaje mínimo 35 kg/m³) C30/37

- Bulonaje para fijar eventuales bloques inestables después de las operaciones de voladura.
Pernos inyectados, Ø 28 mm, 350 kN, tipo Dywidag R35-420 (o equiv.) @ 1.50 – 1.50, L = 10.0m
- Instalación de malla electrosoldada tipo $\phi 8\text{mm}/150-150$ (o equivalente)
- Instalación cercha reticular a tipo 4G-180/22 (o equiv.)
- 25 cm de hormigón proyectado reforzados con fibras de acero (dosaje mínimo 35 kg/m³) C30/37
- Eventuales 5 cm de hormigón proyectado con fibras de acero (dosaje mínimo 35 kg/m³) en la frente de excavación

8.3 Medidas de sostenimiento Caverna Secundaria - Clases I - III

Para las tres clases de rocas consideradas en las hipótesis iniciales (clases I – III Bieniawski 1989) se proponen los siguientes tipos de sostenimiento que se describen en el plano **6198.1-P053**

– CS1-CS2:

- 5cm de hormigón proyectado reforzados con fibras de acero (dosaje mínimo 35 kg/m³) C30/37
- Bulonaje para fijar eventuales bloques inestables después de las operaciones de voladura.
Pernos inyectados, Ø 28 mm, 350 kN, tipo Dywidag R35-420 (o equiv.) @ 2.00 - 2.00, L = 6.0m
- Instalación de malla electrosoldada tipo $\phi 8\text{mm}/150-150$ (o equivalente)
- 15 cm de hormigón proyectado reforzados con fibras de acero (dosaje mínimo 35 kg/m³) C30/37
- Instalación de malla electrosoldada tipo $\phi 8\text{mm}/150-150$ (o equivalente)
- 5cm de hormigón proyectado reforzados con fibras de acero (dosaje mínimo 35 kg/m³) C30/37
- Eventuales 5 cm de hormigón proyectado con fibras de acero (dosaje mínimo 35 kg/m³) en la frente de excavación

– CS3:

- 5cm de hormigón proyectado reforzados con fibras de acero (dosaje mínimo 35 kg/m³) C30/37
- Bulonaje para fijar eventuales bloques inestables después de las operaciones de voladura.
Pernos inyectados, Ø 28 mm, 350 kN, tipo Dywidag R35-420 (o equiv.) @ 1.50 - 1.50, L = 6.0m
- Instalación de malla electrosoldada tipo $\phi 8\text{mm}/150-150$ (o equivalente)
- Instalación cercha reticular a tipo 3G-130/20/30 (o equiv.)
- 25 cm de hormigón proyectado reforzados con fibras de acero (dosaje mínimo 35 kg/m³) C30/37
- Eventuales 5 cm de hormigón proyectado con fibras de acero (dosaje mínimo 35 kg/m³) en la frente de excavación

9. VERIFICACIONES ESTÁTICAS DE LOS SOSTENIMIENTOS DE LA CAVERNA PRINCIPAL Y SECUNDARIA

9.1 Introducción

La caverna principal es el uno de los espacios principales del Laboratorio, donde se llevarán a cabo los experimentos científicos de gran tamaño. La caverna se encuentra a unos 90 m de distancia de la entrada al brazo principal del Laboratorio, sobre el lado derecho. Es accesible a través del túnel de conexión central que entra y sale de la caverna a su extremidad. Las dimensiones principales son:

- longitud total de casi 60 m
- ancho de 21 m
- altura de 22 m.

Su sección transversal tiene una superficie de excavación de 518 m².

La caverna secundaria es un espacio para experimentos de tamaño medio y para instalaciones técnicas secundarias del Laboratorio, se encuentra a unos 35 m de distancia de la entrada al brazo principal del Laboratorio. Las dimensiones principales son:

- longitud total de casi 50 m
- ancho de 16 m
- altura de 14 m.

Su sección transversal tiene una superficie de excavación de 233 m².

Para asegurar una segunda vía de escape, la otra extremidad de la caverna es conectada a la caverna principal mediante una galería de escape de aproximadamente 40 m de longitud

Las hipótesis de cálculo para las cavernas son las mismas descritas en los apartados 6.1 - 6.4. Teniendo en cuenta el gran tamaño de las excavaciones necesarias para las cavernas principal y secundaria se han desarrollado por el caso de calidad del macizo rocoso tipo III unos análisis numéricos cuyos detalles serán presentados en los siguientes párrafos y en los **Anexos G, H e I**.

El revestimiento de la caverna es de hormigón proyectado. Con una solera de hormigón de 30 cm de espesor. Eventuales infiltraciones de agua del macizo son captadas por medio de perfiles de media caña y láminas tipo Delta-drain que descargan directamente en las canaletas laterales previstas en la solera. Gracias a una pendiente transversal y longitudinal del 0.5%, el agua es evacuada y llevada por gravedad en los colectores previstos en el túnel de conexión central.

9.2 Hipótesis de base

Así como descripto en el apartado 6.2 en el área de Laboratorio se han identificado las condiciones de cobertura y litotipos típicas. Los parámetros de la roca intacta son definidos en la Tabla 6.1 mientras los parámetros característicos que se han considerado en los cálculos se resumen en la Tabla 6.2.

A falta de datos directos sobre la resistencia a lo largo de las discontinuidades de los diversos litotipos se han asumido los valores característicos del ángulo de fricción (φ) para el macizo rocoso calculado para las coberturas elegidas, aplicando a éste un factor de seguridad de 1.25 sobre el valor de la tangente. El aporte cohesivo siempre se ha considerado prudencialmente nulo a lo largo de las discontinuidades los parámetros adoptados son resumido en la Tabla 6.3.

Debido al gran tamaño de la excavación y la longitud relativamente reducida de las excavaciones no se presentan verificaciones distintas para el soporte inicial y el revestimiento final.

En estos párrafos se presentarán análisis a corto plazo, análisis a largo plazo. Las verificaciones sísmicas se mostrarán en un capítulo específico.

9.3 Análisis a corto plazo

Para las diferentes tipologías de roca y cobertura se ha realizado un análisis considerando solamente los primeros 5 cm de hormigón proyectado los parámetros de resistencia a corto plazo del hormigón proyectado y la ausencia de sismo. Dado el exiguo espesor de hormigón proyectado que se ha considerado en los cálculos, no se ha considerado ningún efecto arco.

Para el corto plazo la resistencia al corte se ha reducido con un factor de 1.5 (aplicado a la resistencia a compresión f_{ck} , y a la resistencia a corte τ).

Los parámetros adoptados para la resistencia del revestimiento para las diferentes clases están reunidos en la Tabla 9.1:

Clase [-]	Corto Plazo			
	esp. [cm]	esp. arco [cm]	τ_{cd} [MPa]	σ_{cd} [MPa]
CS1	5	0	0.73	-
CS2	5	0	0.73	-
CS3	5	0	0.73	-

Tabla 9.1: Parámetros de resistencia para los revestimientos adoptados en los cálculos.

donde:

σ_{cd} : resistencia a compresión de cálculo del hormigón;

τ_{cd} : resistencia a corte de cálculo del hormigón;

esp. : espesor del revestimiento considerado resistente a corte;

esp. arco : espesor de revestimiento en el cual se ha considerado una contribución a compresión.

Los anclajes se modelan teniendo en cuenta su longitud total y su longitud de anclaje. La presión aportada por los anclajes se considera nula en el caso de que el anclaje esté completamente contenido dentro del bloque considerado. Se define una zona de intersección en el tramo donde la superficie del bloque interseca el tramo de fundación del anclaje, dentro de esta zona la presión ejercida por el anclaje crece hasta el valor nominal.

La acción ejercida por el anclaje es la menor entre la fuerza de arrancamiento de este y su resistencia nominal subdivididas por el espaciamiento entre los anclajes.

Las características de resistencia que se asumen para los anclajes están resumidas.

Caverna Principal							
Clase [-]	Q_s [MPa]	ϕ_d [mm]	T_k [kN]	T_d [kN]	L [m]	$i_{long.}$ [m]	$i_{tras.}$ [m]
CS1	1.0	68	350	259	8	2.0	2.0
CS2	1.0	68	350	259	8	2.0	1.5
CS3	0.7	68	350	259	10	1.5	1.5

Caverna Secundaria							
Clase [-]	Q_s [MPa]	ϕ_d [mm]	T_k [kN]	T_d [kN]	L [m]	$i_{long.}$ [m]	$i_{tras.}$ [m]
CS1	1.0	68	350	259	6	2.0	2.0
CS2	1.0	68	350	259	6	2.0	2.0
CS3	0.7	68	350	259	6	1.5	1.5

Tabla 9.2 : Parámetros de resistencia para los anclajes adoptados en los cálculos.

donde:

Q_s : valor de adherencia entre el anclaje y la matriz rocosa;

ϕ_d : diámetro mínimo de perforación;

T_k : resistencia ultima característica del anclaje;

T_d : resistencia ultima de cálculo del anclaje considerando un $F_s = 1.35$;

L : longitud del anclaje;

$i_{long.}$: intereje longitudinal medio de los anclajes;

$i_{trans.}$: intereje transversal medio de los anclajes.

El valor de Q_s se ha calculado en base a las indicaciones de bibliografía proporcionadas por Bustamante [1]. Para los análisis se ha considerado prudencialmente el valor mayor de espaciamiento entre los anclajes.

En el análisis la relación entre las fuerzas resistentes y las fuerzas agentes representa el factor de seguridad calculado:

$$F_s = \frac{R_d}{E_d}$$

El valor del factor de seguridad calculado de esta manera debe ser ≥ 1 porque los factores parciales de seguridad ya han sido asumidos tanto para las acciones resistentes como para las acciones solicitantes.

Los resultados de los cálculos efectuados se resumen en la Tabla 9.3 y en el **Anexo E**:

Condición	Clase de sostenimiento		
	Corto plazo		
	CS1	CS2	CS3
Caverna Principal	1.1	1.2	1.2
Caverna Secundaria	1.4	1.2	1.4

Tabla 9.3: Resultados de los cálculos efectuados con el método Lombardi SA

Analizando los resultados a corto plazo los sostenimientos propuestos comportan factores de seguridad adecuados. El revestimiento considerado deberá ser verificado también a largo plazo (100 años) por ende debe ser verificado que el recubrimiento sea suficiente para evitar problemas de corrosión. Teniendo en cuenta las indicaciones internacionales (SIA – AICAP – ISRM –EC) se deberá garantizar un recubrimiento mínimo de 50mm y la definición de la mezcla de la lechada también tendrá que ser diseñada para el plazo de 100 años. Además de esto en todo el laboratorio se deberán efectuar controles periódicos en los revestimientos para asegurar que el comportamiento de los anclajes se desarrolle conforme a las hipótesis de diseño.

9.4 Análisis a largo plazo revestimiento final Caverna principal y secundaria CS1-CS2

Para los cálculos se han considerado 2 diferentes secciones resistentes:

- revestimiento definitivo de 30 cm de espesor en hormigón proyectado (clase C30/37) armado con malla ($\varnothing 8$ @150) para la caverna principal;
- revestimiento definitivo de 25 cm de espesor en hormigón proyectado (clase C30/37) armado con malla ($\varnothing 8$ @150) para la caverna secundaria;

En los cálculos que siguen se muestra como estas 2 configuraciones de revestimiento están en condiciones de soportar cargas de bloques asimétricos de dimensiones diferentes.

Análisis	E (GPa)	Radio bóveda (m)	Radio Hastiales (m)	Longitud elementos (m)	Rigidez resorte bóveda (MN/m)	Rigidez resorte bóveda (MN/m)	Espesor revestimiento (m)	Modulo deformabilidad hormigón (GPa)
Caverna principal	17.0	11.88	21.30	~ 0.50	726.9	402.6	0.30	33
Caverna secundaria	17.0	9.07	11.67	~ 0.20	377.2	293.9	0.25	33

Tabla 9.4: rigidez de los resortes adoptados en los cálculos.

En los cálculos estáticos se ha considerado una rigidez flexional de los elementos estructurales (E-J) de 50% para considerar la presencia de una micro-fisura en el interior de los revestimientos mismos que reduce precisamente su rigidez flexional.

9.5 Verificaciones estructurales CS1-CS2

La verificación estructural de los revestimientos se ha evaluado comparando la resistencia de proyecto de la sección con las acciones de cálculo consideradas. Los detalles de las verificaciones efectuados se informan en el **Anexo F**. Los factores parciales adoptados en las verificaciones del SLU están contenidos en la siguiente Tabla 9.5:

Límites de deformación			Factores de seguridad parciales			Inclinación de las bielas comprimidas
ε_{c2} [‰]	ε_{cu3} [‰]	ε_{ud} [‰]	α_{cc} [-]	γ_c [-]	γ_s [-]	θ [°]
-2.0	-3.5	20.0	0.85	1.50	1.15	45.0

Tabla 9.5: Parámetros adoptados para las verificaciones del SLU

Tratándose de un revestimiento definitivo el factor α_{cc} relacionado con la verificación a largo plazo de los materiales se ha considerado de 0.85. Las características de sollicitación consideradas en los cálculos se resumen en la **Tabla 9.7**.

Las cargas presentadas en el **Anexo F** se han considerado después en las siguientes combinaciones:

- Para la condición de estado limite ultimo (ELU):

Combinación de carga	1*	2*	3*	4*
Comb. 1	1.35	1.35	-	-
Comb. 2	1.35	-	1.35	-
Comb. 3	1.35	-	-	1.35

Tabla 9.6: Combinación de carga ELU.

- Par la condición de estado límite de ejecución (ELS):

Combinación de carga	1	2	3	4
Comb. 4	1.00	1.00	-	-
Comb. 5	1.00	-	1.00	-
Comb. 6	1.00	-	-	1.00

Tabla 9.7: Combinación de carga ELS.

*1: peso propio

*2: peso de los bloques (simétrico)

*3: peso de los bloques (asimétricos)

*4: empuje del macizo.

	Clase sostenimiento 1 - 2 – Caverna secundaria revestimiento definitivo (25 cm)				
Combinación		N [kN]	M [kNm]	V [kN]	e (M/N) [m]
ELU Comb.1	N _{max}	-1799.4	0.0	-24.3	0.000
	M _{max+}	-1345.6	50.8	1.9	-0.038
	M _{max-}	-1496.5	-42.3	-1.3	0.028
	M/N _{max+}	-1496.5	-42.3	-1.3	0.028
	M/N _{max-}	-1345.6	50.8	1.9	-0.038
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max+}	-1345.6	50.8	1.9	-0.038
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max-}	-1510.7	-42.0	-1.3	0.028
	V _{max}	-1576.5	-14.6	-44.7	0.009
ELU Comb.2	N _{max}	-2146.7	0.0	-28.8	0.000
	M _{max+}	-1369.1	93.3	-0.8	-0.068
	M _{max-}	-1322.4	-92.7	-1.6	0.070
	M/N _{max+}	-1320.5	-92.7	26.0	0.070
	M/N _{max-}	-1369.1	93.3	-0.8	-0.068
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max+}	-1369.1	93.3	-0.8	-0.068
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max-}	-1322.4	-92.7	-1.6	0.070
	V _{max}	-1322.2	-11.4	-119.6	0.009
ELU Comb.3	N _{max}	-2867.9	0.0	2.8	0.000
	M _{max+}	-2813.6	29.2	-0.2	-0.010
	M _{max-}	-2749.7	-42.2	-7.4	0.015
	M/N _{max+}	-2748.1	-42.2	3.4	0.015
	M/N _{max-}	-2813.6	29.2	-0.2	-0.010
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max+}	-2816.2	29.2	0.8	-0.010
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max-}	-2749.7	-42.2	-7.4	0.015
	V _{max}	-2733.7	-26.6	45.6	0.010

Tabla 9.8: Características de sollicitación consideradas en los cálculos (Revestimiento. Final).

Clase sostenimiento 1 - 2 – Caverna principal revestimiento definitivo (30cm)					
Combinación		N [kN]	M [kNm]	V [kN]	e (M/N) [m]
ELU Comb.1	N _{max}	-3850.6	0.0	-24.5	0.000
	M _{max+}	-2669.7	138.3	0.0	-0.052
	M _{max-}	-2987.8	-117.7	-11.4	0.039
	M/N _{max+}	-2987.8	-117.7	-11.4	0.039
	M/N _{max-}	-2669.7	138.3	0.0	-0.052
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max+}	-2669.7	138.3	0.0	-0.052
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max-}	-2992.4	-117.7	15.8	0.039
	V _{max}	-3148.7	-45.1	-86.4	0.014
ELU Comb.2	N _{max}	-3522.0	0.0	-22.5	0.000
	M _{max+}	-2305.6	210.8	4.9	-0.091
	M _{max-}	-2219.0	-205.5	-82.9	0.093
	M/N _{max+}	-2217.1	-205.5	6.8	0.093
	M/N _{max-}	-2305.6	210.8	4.9	-0.091
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max+}	-2305.6	210.8	4.9	-0.091
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max-}	-2893.5	-143.3	13.3	0.050
	V _{max}	-2216.5	23.3	-195.1	-0.011
ELU Comb.3	N _{max}	-3646.9	0.0	-11.2	0.000
	M _{max+}	-3527.1	45.1	-0.8	-0.013
	M _{max-}	-3444.3	-87.7	-16.5	0.025
	M/N _{max+}	-3441.4	-87.7	42.7	0.025
	M/N _{max-}	-3527.1	45.1	-0.8	-0.013
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max+}	-3533.8	44.9	1.4	-0.013
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max-}	-3444.3	-87.7	-16.5	0.025
	V _{max}	-3431.8	-66.0	88.9	0.019

Tabla 9.9: Características de sollicitación consideradas en los cálculos (Revestimiento. Final).

En la última columna de la tabla se indican las máximas deformaciones esperadas en los revestimientos bajo la acción de las cargas. La indicación de la deformada del revestimiento se representa en el **Anexo F**.

9.5.1 Verificaciones estructurales para acción normal y acción flexional - ELU

Los detalles de las verificaciones efectuadas se presentan en el **Anexo F**. Los factores de eficiencia para los efectos de flexión (M) y esfuerzo normal (N) obtenidos para las secciones consideradas están contenidos en las Tabla 9.10 y Tabla 9.11.

Clase sostenimiento 1 - 2 – Caverna secundaria revestimiento definitivo (25cm)			
	ELU Comb.1	ELU Comb.2	ELU Comb.3
N_{max}	0.40	0.48	0.64
M_{max+}	0.44	0.65	0.70
M_{max-}	0.44	0.64	0.72
M/N_{max+}	0.44	0.64	0.72
M/N_{max-}	0.44	0.65	0.70
$[M/(N-1.2 \cdot N_{max})]_{max+}$	0.44	0.65	0.70
$[M/(N-1.2 \cdot N_{max})]_{max-}$	0.45	0.64	0.72
V_{max}	0.39	0.32	0.68

Tabla 9.10: Factores de eficiencia a SLU obtenidos en los revestimientos definitivos para la clase 1 y 2.

Clase sostenimiento 1 - 2 – Caverna principal revestimiento definitivo (30cm)			
	ELU Comb.1	ELU Comb.2	ELU Comb.3
N_{max}	0.70	0.64	0.67
M_{max+}	0.76	0.96	0.72
M_{max-}	0.76	0.93	0.78
M/N_{max+}	0.76	0.93	0.78
M/N_{max-}	0.76	0.96	0.72
$[M/(N-1.2 \cdot N_{max})]_{max+}$	0.76	0.96	0.72
$[M/(N-1.2 \cdot N_{max})]_{max-}$	0.76	0.80	0.78
V_{max}	0.65	0.45	0.74

Tabla 9.11: Factores de eficiencia a SLU obtenidos en los revestimientos definitivos para la clase 1 y 2.

En todos los casos considerados, los factores de eficiencia se mantienen por debajo del valor límite de 1.0 indicando que las soluciones propuestas resultan adecuadas.

9.5.2 Verificaciones estructurales para acción normal y acción flexional - ELS

Los detalles de las verificaciones efectuadas se presentan en el **Anexo F**. Los factores parciales adoptados en las verificaciones al ELS están contenidos en la siguiente Tabla:

Límites de deformación			Factores de seguridad parciales			Inclinación de las bielas comprimidas	Factor de creep
ε_{c2} [‰]	ε_{cu3} [‰]	ε_{ud} [‰]	α_{cc} [-]	γ_c [-]	γ_s [-]	θ [°]	Φ [-]
-2.0	-3.5	20.0	1.00	1.00	1.00	45.0	2.00

Tabla 9.12 : Parámetros adoptados para las verificaciones al ELS.

La verificación según el EC2 se ha llevado a cabo verificando que:

- Las tensiones de compresión en el hormigón sean $\sigma_c < 0.6 \cdot f_{ck} = 30 \text{ MPa}$
- Las tensiones de tracción en el acero sean $\sigma_s < 0.8 \cdot f_{yk} = 336 \text{ MPa}$
- El ancho de las fisuras sea $w_k < 0.3 \text{ mm}$

Las características de sollicitación consideradas en los cálculos se resumen en las siguientes tablas. En la última columna de la tabla se indican las máximas deformaciones esperadas en los revestimientos bajo la acción de las cargas. La indicación de la deformada se reporta en el **Anexo F**.

Clase sostenimiento 1 - 2 – Caverna secundaria revestimiento definitivo (25 cm)					
Combinación		N [kN]	M [kNm]	V [kN]	e (M/N) [m]
ELS Comb.4	N _{max}	-1332.9	0.0	-18.0	0.000
	M _{max+}	-996.7	37.6	1.4	-0.038
	M _{max-}	-1108.5	-31.3	-1.0	0.028
	M/N _{max+}	-1108.5	-31.3	-1.0	0.028
	M/N _{max-}	-996.7	37.6	1.4	-0.038
	$[M/(N-1.2*N_{max})]_{max+}$	-996.7	37.6	1.4	-0.038
	$[M/(N-1.2*N_{max})]_{max-}$	-1119.0	-31.1	-1.0	0.028
	V _{max}	-1167.8	-10.8	-33.1	0.009
ELS Comb.5	N _{max}	-1590.1	0.0	-21.4	0.000
	M _{max+}	-1014.1	69.1	-0.6	-0.068
	M _{max-}	-979.6	-68.7	-1.2	0.070
	M/N _{max+}	-978.2	-68.7	19.3	0.070
	M/N _{max-}	-1014.1	69.1	-0.6	-0.068
	$[M/(N-1.2*N_{max})]_{max+}$	-1014.1	69.1	-0.6	-0.068
	$[M/(N-1.2*N_{max})]_{max-}$	-979.6	-68.7	-1.2	0.070
	V _{max}	-979.4	-8.4	-88.6	0.009
ELS Comb.6	N _{max}	-2124.4	0.0	2.1	0.000
	M _{max+}	-2084.1	21.7	-0.1	-0.010
	M _{max-}	-2036.8	-31.2	-5.5	0.015
	M/N _{max+}	-2035.6	-31.2	2.5	0.015
	M/N _{max-}	-2084.1	21.7	-0.1	-0.010
	$[M/(N-1.2*N_{max})]_{max+}$	-2086.1	21.6	0.6	-0.010
	$[M/(N-1.2*N_{max})]_{max-}$	-2036.8	-31.2	-5.5	0.015
	V _{max}	-2025.0	-19.7	33.7	0.010

Tabla 9.13 : Parámetros adoptados para las verificaciones al SLE.

Clase sostenimiento 1 - 2 – Caverna principal revestimiento definitivo (30 cm)					
Combinación		N [kN]	M [kNm]	V [kN]	e (M/N) [m]
ELS Comb.4	N _{max}	-2852.3	0.0	-18.2	0.000
	M _{max+}	-1977.6	102.5	0.0	-0.052
	M _{max-}	-2213.2	-87.2	-8.4	0.039
	M/N _{max+}	-2213.2	-87.2	-8.4	0.039
	M/N _{max-}	-1977.6	102.5	0.0	-0.052
	$[M/(N-1.2*N_{max})]_{max+}$	-1977.6	102.5	0.0	-0.052
	$[M/(N-1.2*N_{max})]_{max-}$	-2216.6	-87.2	11.7	0.039
	V _{max}	-2332.3	-33.4	-64.0	0.014
ELS Comb.5	N _{max}	-2608.9	0.0	-16.6	0.000
	M _{max+}	-1707.9	156.1	3.6	-0.091
	M _{max-}	-1643.7	-152.2	-61.4	0.093
	M/N _{max+}	-1642.3	-152.2	5.1	0.093
	M/N _{max-}	-1707.9	156.1	3.6	-0.091
	$[M/(N-1.2*N_{max})]_{max+}$	-1707.9	156.1	3.6	-0.091
	$[M/(N-1.2*N_{max})]_{max-}$	-2143.3	-106.1	9.9	0.050
	V _{max}	-1641.8	17.3	-144.5	-0.011
ELS Comb.6	N _{max}	-2701.4	0.0	-8.3	0.000
	M _{max+}	-2612.7	33.4	-0.6	-0.013
	M _{max-}	-2551.4	-64.9	-12.3	0.025
	M/N _{max+}	-2549.2	-64.9	31.6	0.025
	M/N _{max-}	-2612.7	33.4	-0.6	-0.013
	$[M/(N-1.2*N_{max})]_{max+}$	-2617.6	33.3	1.0	-0.013
	$[M/(N-1.2*N_{max})]_{max-}$	-2551.4	-64.9	-12.3	0.025
	V _{max}	-2542.0	-48.9	65.8	0.019

Tabla 9.14 : Parámetros adoptados para las verificaciones al SLE.

Clase sostenimiento 1 - 2 – Caverna secundaria revestimiento definitivo (25 cm)												
	N	M	V	σ_c			σ_s			w_k		
				Max	Limit	Check	Max	Limit	Check	Max	Limit	Check
	[kN]	[kNm]	[kN]	[MPa]	[MPa]	[-]	[MPa]	[MPa]	[-]	[mm]	[mm]	[-]
ELS Comb.4	-1332.9	0.0	-18.0	-5.2	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.3	✓
	-996.7	37.6	1.4	-7.5	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.3	✓
	-1108.5	-31.3	-1.0	-7.3	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.3	✓
	-1108.5	-31.3	-1.0	-7.3	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.3	✓
	-996.7	37.6	1.4	-7.5	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.3	✓
	-996.7	37.6	1.4	-7.5	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.3	✓
	-1119.0	-31.1	-1.0	-7.4	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.3	✓
	-1167.8	-10.8	-33.1	-5.5	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.3	✓
ELS Comb.5	-1590.1	0.0	-21.4	-6.2	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.3	✓
	-1014.1	69.1	-0.6	-11.7	-18.0	✓	9.9	336.0	✓	0.02	0.3	✓
	-979.6	-68.7	-1.2	-11.7	-18.0	✓	12.6	336.0	✓	0.02	0.3	✓
	-978.2	-68.7	19.3	-11.7	-18.0	✓	14.7	336.0	✓	0.02	0.3	✓
	-1014.1	69.1	-0.6	-11.7	-18.0	✓	9.9	336.0	✓	0.02	0.3	✓
	-1014.1	69.1	-0.6	-11.7	-18.0	✓	9.9	336.0	✓	0.02	0.3	✓
	-979.6	-68.7	-1.2	-11.7	-18.0	✓	12.6	336.0	✓	0.02	0.3	✓
	-979.4	-8.4	-88.6	-4.3	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.3	✓
ELS Comb.5	-2124.4	0.0	2.1	-8.4	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.3	✓
	-2084.1	21.7	-0.1	-10.3	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.3	✓
	-2036.8	-31.2	-5.5	-11.0	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.3	✓
	-2035.6	-31.2	2.5	-11.0	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.3	✓
	-2084.1	21.7	-0.1	-10.3	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.3	✓
	-2086.1	21.6	0.6	-10.3	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.3	✓
	-2036.8	-31.2	-5.5	-11.0	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.3	✓
	-2025.0	-19.7	33.7	-9.7	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.3	✓

Tabla 9.15 : Verificación ELS.

Clase sostenimiento 1 - 2 – Caverna principal revestimiento definitivo (30 cm)												
				σ_c			σ_s			w_k		
	N	M	V	Max	Limit	Check	Max	Limit	Check	Max	Limit	Check
	[kN]	[kNm]	[kN]	[MPa]	[MPa]	[-]	[MPa]	[MPa]	[-]	[mm]	[mm]	[-]
ELS Comb.4	-2852.3	0.0	-18.2	-9.3	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.3	✓
	-1977.6	102.5	0.0	-13.2	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.3	✓
	-2213.2	-87.2	-8.4	-12.9	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.3	✓
	-2213.2	-87.2	-8.4	-12.9	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.3	✓
	-1977.6	102.5	0.0	-13.2	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.3	✓
	-1977.6	102.5	0.0	-13.2	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.3	✓
	-2216.6	-87.2	11.7	-12.9	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.3	✓
	-2332.3	-33.4	-64.0	-9.6	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.3	✓
ELS Comb.5	-2608.9	0.0	-16.6	-8.5	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.3	✓
	-1707.9	156.1	3.6	-18.6	-18.0	✗	38.9	336.0	✓	0.06	0.3	✓
	-1643.7	-152.2	-61.4	-18.5	-18.0	✗	48.8	336.0	✓	0.07	0.3	✓
	-1642.3	-152.2	5.1	-18.2	-18.0	✗	41.0	336.0	✓	0.06	0.3	✓
	-1707.9	156.1	3.6	-18.6	-18.0	✗	38.9	336.0	✓	0.06	0.3	✓
	-1707.9	156.1	3.6	-18.6	-18.0	✗	38.9	336.0	✓	0.06	0.3	✓
	-2143.3	-106.1	9.9	-13.9	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.3	✓
	-1641.8	17.3	-144.5	-6.0	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.3	✓
ELS Comb.5	-2701.4	0.0	-8.3	-8.8	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.3	✓
	-2612.7	33.4	-0.6	-10.7	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.3	✓
	-2551.4	-64.9	-12.3	-12.6	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.3	✓
	-2549.2	-64.9	31.6	-12.5	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.3	✓
	-2612.7	33.4	-0.6	-10.7	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.3	✓
	-2617.6	33.3	1.0	-10.7	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.3	✓
	-2551.4	-64.9	-12.3	-12.6	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.3	✓
	-2542.0	-48.9	65.8	-11.3	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.3	✓

Tabla 9.16 : Verificación ELS.

La verificación para la caverna secundaria resulta totalmente cumplida, en el caso de la caverna principal, en la combinación 5, se supera el límite de tensión (apenas 0.2-0.6MPa). Teniendo en cuenta las hipótesis conservadoras hechas en la elección de los bloques que cargaran el revestimiento y teniendo en cuenta que en estas verificaciones no se han considerado el efecto estabilizante de los pernos se consideran las verificaciones satisfechas (ver **Anexo F**).

9.6 Modelación numérica caverna principal y caverna secundaria CS3

En la hipótesis de excavación de las cavernas en el macizo rocoso tipo 2c se han realizado análisis numéricos bidimensionales con parámetros de resistencia y deformabilidad equivalentes para analizar las condiciones de excavación las solicitaciones en los revestimientos y la eventual interacción entre las diferentes excavaciones.

9.6.1 Análisis efectuados

Los análisis numéricos efectuados son los siguientes:

- **Análisis 1:** Verificación de la interacción entre las cavernas – cobertura 1750 m;
- **Análisis 2:** Caverna principal – cobertura 1750 m.
- **Análisis 3** Caverna secundaria – cobertura 1750 m.

A continuación, se describen las fases de cálculo modeladas. Estas describen de manera simplificada el proceso de excavación:

1. Inicialización del estado tensional en el modelo de acuerdo con la cobertura hipotética;
2. Excavación a sección parcializada de las cavernas en diferentes etapas.
3. Revestimiento de las cavernas.

El macizo rocoso se ha modelado como un medio continuo equivalente con comportamiento elasto-plástico lineal según el criterio de resistencia de Mohr-Coulomb.

Los parámetros de resistencia a deformabilidad considerados para el macizo rocoso están contenidos en la Tabla 9.17

Cobertura [m]	Roca [-]	E_{rm} [GPa]	c [kPa]	Φ [°]
1750	TMR 2c	8.8	7000	45.3

Tabla 9.17: Parámetros de resistencia y deformabilidad utilizados para el macizo rocoso

Los parámetros de deformabilidad asumidos para los elementos del modelo son los siguientes (Tabla 9.18):

Cobertura [m]	Roca [-]	K [GPa]	G [GPa]
1750	TMR 2c	5.64	3.55

Tabla 9.18: Parámetros de deformabilidad utilizados para los elementos que simulan el macizo rocoso.

donde:

K : Bulk modulus – módulo de deformación volumétrica;

G : Shear modulus – módulo de deformación a corte.

El estado tensional que se adopta en el modelo es de tipo geostático con relación k_0 entre las tensiones principales = 1.0.

La excavación se ha simulado a través de una fase de “relajamiento”, así se ha simulado el “cerramiento” del macizo rocoso antes de instalar el sostenimiento.

Las características de estos elementos se describen en la Tabla 9.19.

Tipo elemento [-]	Espesor [m]	Longitud [m]	E ^{“fresco”} [GPa]	E ^{“largo plazo”} [GPa]	v [-]
liner	0.30	1.00	5	15	0.2

Tabla 9.19 : Parámetros utilizados para la modelación de los revestimientos.

Los elementos liner se han relacionado con el macizo rocoso mediante elementos interfaz con las siguientes características:

Cobertura [m]	Roca [-]	K _n [GPa/m]	K _s [GPa/m]	c [kPa]	φ [°]	t _{bond} [kPa]
1750	TMR 2c	345/520	345/520	0	30	0

Tabla 9.20: Parámetros utilizados para la modelación de las interfaces entre los revestimientos y el macizo rocoso Caverna principal/Caverna secundaria.

donde:

K_n : rigidez normal de los elementos de interfaz;

K_s : rigidez a corte de los elementos de interfaz;

t_{bond} : resistencia a tracción en la interfaz.

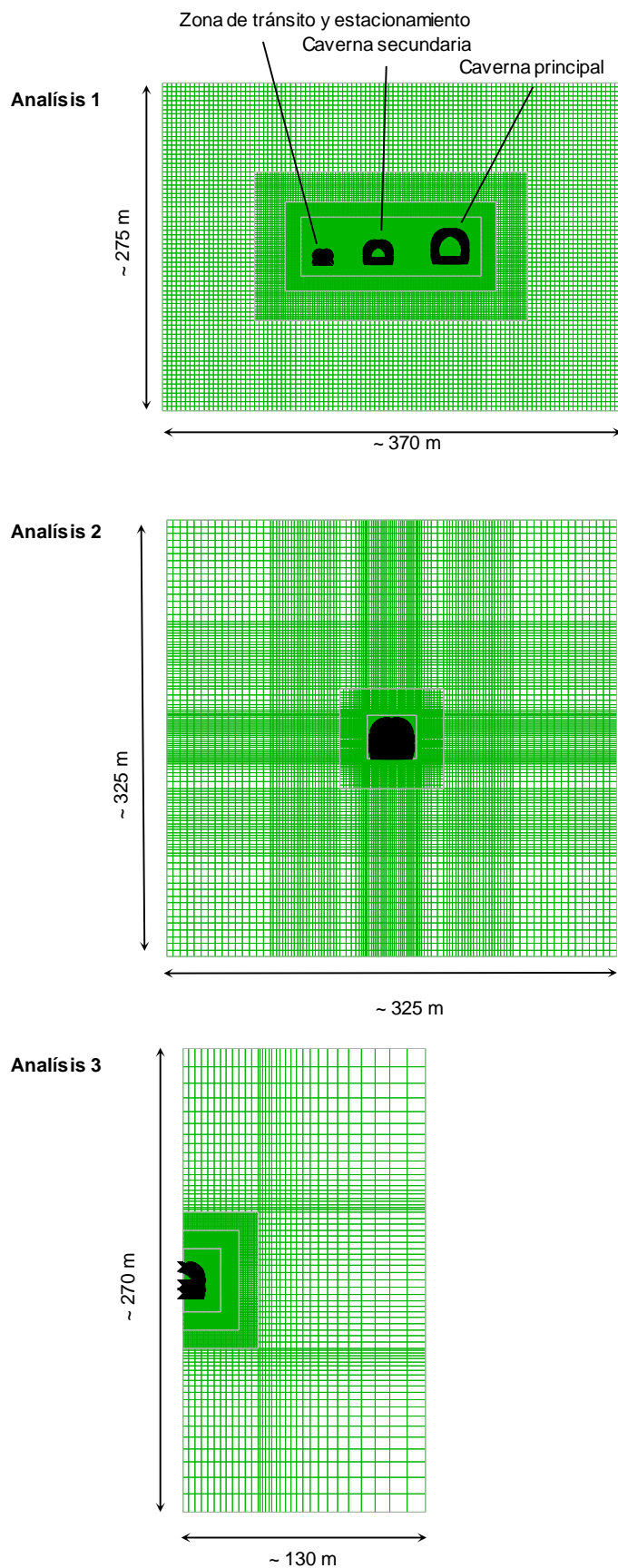


Figura 9.1: Retículos de cálculo de los análisis numéricos desarrollados.

9.6.2 Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos correspondientes al Análisis 1 están contenidos en el **Anexo G**, los correspondientes al Análisis 2 se describen en el **Anexo H** y lo del Análisis 3 en el **Anexo I**.

Se muestran los principales resultados del **Análisis 1** con las figuras de la extensión de las áreas plásticas.

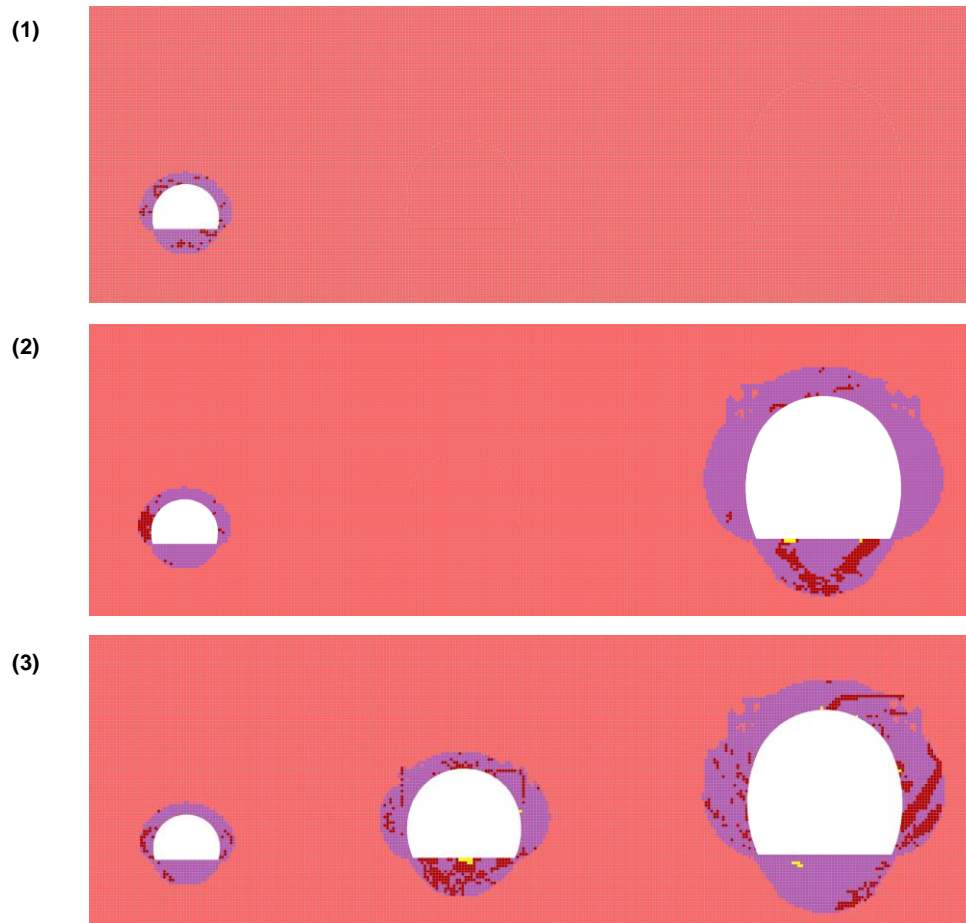


Figura 9.2: Áreas plastificadas.

Los resultados de los análisis numéricos muestran que para la condición peor (clase III) la distancia entre las cavernas es suficiente para no tener interacción. Se pueden ver que las zonas plásticas resultan ser reducida a pesar del elevado estado tensional actuante. Los resultados arriba mostrados permiten afirmar que es posible dimensionar los revestimientos finales por medio de modelos que no tenga en cuenta la interacción entre las diferentes partes del Laboratorio.

9.7 Verificaciones estructurales CS3

En este apartado se describen las verificaciones estáticas efectuadas sobre los sostenimientos de la clase CS3.

Tal sección tipo de soporte ha sido verificada considerando las características de sollicitación que derivan de la modelación numérica que describen el apartado 9.6, en la cual se han verificado el estado limite ultimo (ELU) y en el estado límite de servicio (ELS).

Las combinaciones de cargas consideradas son las siguientes:

Combinación de carga CS3	FLAC
Comb. 1 ELU- CS3	1.35
Comb. 1 ELS- CS3	1.00

Tabla 9.21: Combinación de carga ELU ELS.

9.7.1 Verificaciones estructurales para acción normal y acción flexional - ELU

La verificación estructural de los revestimientos se ha evaluado comparando la resistencia de proyecto de la sección con las acciones de cálculo consideradas. Los detalles de las verificaciones efectuadas se presentan en el **Anexo I**.

Las características de sollicitación consideradas en los cálculos están resumidas en la Tabla 9.22 y Tabla 9.23.

Clase sostenimiento 3 – Caverna secundaria revestimiento definitivo (30 cm)					
Combinación		N [kN]	M [kNm]	V [kN]	e (M/N) [m]
Comb. 1 ELU- CS3	N _{max}	-3230.6	-30.2	3.4	0.009
	M _{max+}	-3101.0	134.9	320.4	-0.044
	M _{max-}	-2463.8	-182.5	-10.5	0.074
	M/N _{max+}	-2463.8	-182.5	-10.5	0.074
	M/N _{max-}	-3101.0	134.9	320.4	-0.044
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max+}	-3101.0	134.9	320.4	-0.044
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max-}	-2463.8	-182.5	-10.5	0.074
	V _{max}	-3101.0	134.9	320.4	-0.044

Tabla 9.22: Características de sollicitación consideradas en los cálculos.

Combinación	Clase sostenimiento 3 – Caverna principal revestimiento definitivo (30 cm)				
		N [kN]	M [kNm]	V [kN]	e (M/N) [m]
Comb. 1 ELU- CS3	N _{max}	-3380.4	-119.0	-86.6	0.035
	M _{max+}	-2859.3	198.7	191.4	-0.069
	M _{max-}	-3314.3	-186.6	-21.9	0.056
	M/N _{max+}	-2867.4	-176.9	-155.4	0.062
	M/N _{max-}	-2859.3	198.7	191.4	-0.069
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max+}	-3173.9	150.5	142.2	-0.047
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max-}	-3314.3	-186.6	-21.9	0.056
	V _{max}	-3245.4	56.8	239.5	-0.018

Tabla 9.23: Características de sollicitación consideradas en los cálculos.

Los factores de eficiencia para los efectos de flexión (M) y esfuerzo normal (N) obtenidos para las secciones consideradas están contenidos en la Tabla 9.24.

	Clase sostenimiento 3 – Caverna secundaria revestimiento definitivo (30 cm)	Clase sostenimiento 3 – Caverna principal revestimiento definitivo (30 cm)
N _{max}	0.62	0.78
M _{max+}	0.8	0.89
M _{max-}	0.83	0.91
M/N _{max+}	0.83	0.83
M/N _{max-}	0.8	0.89
[M/(N-1.2*N _{max})] _{max+}	0.8	0.91
[M/(N-1.2*N _{max})] _{max-}	0.83	0.66
V _{max}	0.8	0.78

Tabla 9.24: Factores de eficiencia obtenidos para los análisis efectuados.

En todos los casos considerados, evaluados en condiciones de máxima cobertura posible, se mantienen por debajo del valor límite de 1.0 indicando que las soluciones propuestas son adecuadas.

9.7.2 Verificaciones estructurales para acción normal y acción flexional - ELS

Los detalles de las verificaciones efectuadas se presentan en el **Anexo H e I**. Los factores parciales adoptados en las verificaciones al ELS están contenidos en la siguiente Tabla:

Límites de deformación			Factores de seguridad parciales			Inclinación de las bielas comprimidas	Factor de creep
ε _{c2} [‰]	ε _{cu3} [‰]	ε _{ud} [‰]	α _{cc} [-]	γ _c [-]	γ _s [-]	θ [°]	Φ [-]
-2.0	-3.5	20.0	1.00	1.00	1.00	45.0	2.00

Tabla 9.25 : Parámetros adoptados para las verificaciones al ELS.

La verificación según el EC2 se ha llevado a cabo verificando que:

- Las tensiones de compresión en el hormigón sean $\sigma_c < 0.6 \cdot f_{ck} = 30 \text{ MPa}$
- Las tensiones de tracción en el acero sean $\sigma_s < 0.8 \cdot f_{yk} = 336 \text{ MPa}$
- El ancho de las fisuras sea $w_k < 0.3 \text{ mm}$

Las características de sollicitación consideradas en los cálculos se resumen en las siguientes tablas. En la última columna de la tabla se indican las máximas deformaciones esperadas en los revestimientos bajo la acción de las cargas (**Anexo H e I**).

Clase sostenimiento 3 – Caverna secundaria revestimiento definitivo (30 cm)					
Combinación		N [kN]	M [kNm]	V [kN]	e (M/N) [m]
Comb. 1 ELS CS3	N _{max}	-2393.0	-22.4	2.5	0.009
	M _{max+}	-2297.0	99.9	237.3	-0.044
	M _{max-}	-1825.0	-135.2	-7.8	0.074
	M/N _{max+}	-1825.0	-135.2	-7.8	0.074
	M/N _{max-}	-2297.0	99.9	237.3	-0.044
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max+}	-2297.0	99.9	237.3	-0.044
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max-}	-1825.0	-135.2	-7.8	0.074
	V _{max}	-2297.0	99.9	237.3	-0.044

Tabla 9.26: Características de sollicitación consideradas en los cálculos.

Clase sostenimiento 3 – Caverna principal revestimiento definitivo (30 cm)					
Combinación		N [kN]	M [kNm]	V [kN]	e (M/N) [m]
Comb. 1 ELS CS3	N _{max}	-5709.5	-93.9	-64.1	0.016
	M _{max+}	-5323.5	152.9	141.8	-0.029
	M _{max-}	-5660.5	-143.9	-16.2	0.025
	M/N _{max+}	-5329.5	-136.7	-115.1	0.026
	M/N _{max-}	-5323.5	152.9	141.8	-0.029
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max+}	-5323.5	152.9	141.8	-0.029
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max-}	-5660.5	-143.9	-16.2	0.025
	V _{max}	-5609.5	47.8	177.4	-0.009

Tabla 9.27: Características de sollicitación consideradas en los cálculos.

Clase sostenimiento 3 – Caverna secundaria revestimiento definitivo (30 cm)											
			σ_c			σ_s			w_k		
N	M	V	Max	Limit	Check	Max	Limit	Check	Max	Limit	Check
[kN]	[kNm]	[kN]	[MPa]	[MPa]	[-]	[MPa]	[MPa]	[-]	[mm]	[mm]	[-]
-2393.0	-22.4	2.5	-9.2	-18.0	✓	0.0	400	✓	0.00	0.4	✓
-2297.0	99.9	237.3	-13.2	-18.0	✓	0.0	400	✓	0.00	0.4	✓
-1825.0	-135.2	-7.8	-15.6	-18.0	✓	4.7	400	✓	0.01	0.4	✓
-1825.0	-135.2	-7.8	-15.6	-18.0	✓	4.7	400	✓	0.01	0.4	✓
-2297.0	99.9	237.3	-13.2	-18.0	✓	0.0	400	✓	0.00	0.4	✓
-2297.0	99.9	237.3	-13.2	-18.0	✓	0.0	400	✓	0.00	0.4	✓
-1825.0	-135.2	-7.8	-15.6	-18.0	✓	4.7	400	✓	0.01	0.4	✓
-2297.0	99.9	237.3	-13.2	-18.0	✓	0.0	400	✓	0.00	0.4	✓

Tabla 9.28 : Verificación ELS.

Clase sostenimiento 3 – Caverna principal revestimiento definitivo (30 cm)											
			σ_c			σ_s			w_k		
N	M	V	Max	Limit	Check	Max	Limit	Check	Max	Limit	Check
[kN]	[kNm]	[kN]	[MPa]	[MPa]	[-]	[MPa]	[MPa]	[-]	[mm]	[mm]	[-]
-2504.0	-88.2	-64.1	-13.5	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓
-2118.0	147.2	141.8	-16.7	-18.0	✓	17.9	400.0	✓	0.02	0.4	✓
-2455.0	-138.2	-16.2	-16.7	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓
-2124.0	-131.0	-115.1	-15.1	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓
-2118.0	147.2	141.8	-16.7	-18.0	✓	17.9	400.0	✓	0.02	0.4	✓
-2351.0	111.5	105.3	-14.5	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓
-2455.0	-138.2	-16.2	-16.7	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓
-2404.0	42.1	177.4	-10.0	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓

Tabla 9.29 : Verificación ELS.

Las verificaciones resultan cumplidas.

10. VERIFICACIONES SÍSMICAS DE LOS REVESTIMIENTOS DEFINITIVOS DE LA CAVERNA PRINCIPAL Y SECUNDARIA

10.1 Introducción

El presente capítulo expone las verificaciones sísmicas de los revestimientos del laboratorio Andes.

Los principales datos referidos a la sismicidad se encuentran en el **Apartado 2**.

En el **Apartado 3** se presentan las metodologías de cálculo de las solicitaciones sísmica.

En el **Apartado 4** se exponen las definiciones de los parámetros de un terremoto de normal operación (TON). Los parámetros de un terremoto de seguridad (TS) se presentan en el **Apartado 5** en el **Apartado 6** se presentan las verificaciones estructurales.

10.2 Datos sísmicos disponibles

10.2.1 Datos de base disponibles

En la documentación de base proporcionada se ha puesto a disposición el informe “*Evaluación de la Amenaza sísmica para el Proyecto del túnel Internacional de Agua Negra – San Juan Argentina - Noviembre 2011*” redactado por el estudio de consultores Consultoría WA.

En este informe se realiza una evaluación detallada de la peligrosidad sísmica de la zona del túnel de Agua Negra.

En el informe se analiza el riesgo sísmico para el túnel de Agua Negra en términos de probabilidad de superación de una cierta intensidad sísmica durante la vida útil de la obra.

Con este fin se definen 2 niveles de verificación:

- *Terremoto de Normal Operación* (TON): evento que debe poder ser sin anular la operatividad de la obra;
- *Terremoto de Seguridad* (TS): terremoto que puede llevar a la necesidad de interrumpir o abandonar la operatividad de la obra, pero que no debe implicar el colapso total de la misma.

10.2.2 Nivel de riesgo

El empleo de dos niveles de riesgo sísmico, definidos como TON (Terremoto de Operación Normal) y TS (Terremoto de Seguridad), es una práctica establecida para centrales nucleares, presas y otras obras de gran envergadura. El Informe de WA sigue el criterio de adopción de niveles de riesgo comúnmente empleado para presas. En el caso de Túneles, se considera más apropiado adoptar el criterio de el Manual de la FHWA (FHWA-NHI-10-034), el cual establece los siguientes niveles:

- TON: 50% en 75 años;

- TS: 3% en 75 años (equivalente a 2% en 50 años).

10.2.3 Evaluación probabilística de la amenaza sísmica

La evaluación probabilista se definió mediante la metodología recomendada por la FHWA (2009), considerando los siguientes niveles de riesgo:

- TON: 50% en 75 años (Periodo de retorno = 108 años)
- TS: 3% en 75 años (Periodo de retorno = 2475 años)

Considerando el modelo desarrollado por WA, adaptado para tomar en cuenta los diferentes períodos de retorno considerados en el presente informe, los valores espectrales resultantes están ilustrados en la **Figura 10.1**.

Cabe remarcar que **estos valores de aceleración se corresponden a un afloramiento rocoso y no consideran el efecto de la profundidad para estructuras enterradas ni posibles modificaciones debido a la presencia de estratos de suelos blandos**.

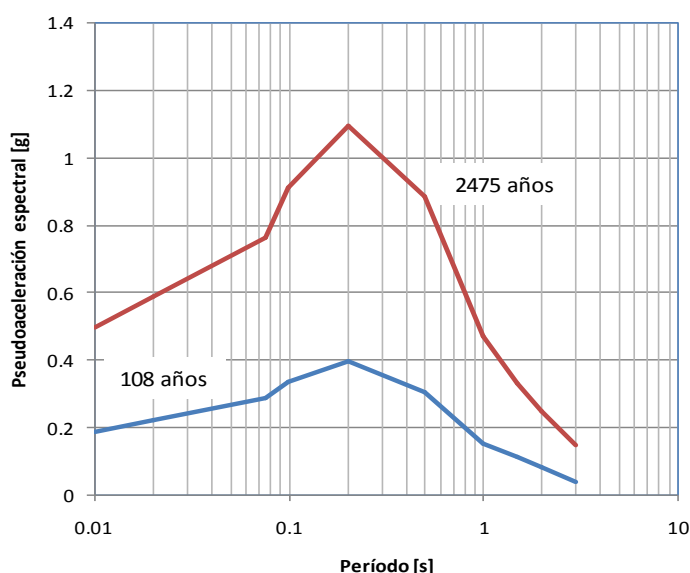


Figura 10.1: Espectros de riesgo uniforme en base a curvas de riesgo de Informe WA, adaptado para tomar en cuenta los diferentes períodos de retorno considerados en el presente informe.

Los valores de velocidad de partícula pico para los períodos de recurrencia de 108 (TON) y 2475 (TS) resultan:

- TON (Frec. anual de excedencia = 0.0093): PGV = 18 cm/s
- TS (Frec. anual de excedencia = 0.0004): PGV = 71 cm/s

Terremoto [-]	T_r [años]	N [-]	PSA [g]			V_{max} [cm/s]
			$T_0 = 0.01 \text{ sec.}$	$T_0 = 0.2 \text{ sec.}$	$T_0 = 1.0 \text{ sec.}$	
TON	108	0.0093	0.18	0.5	0.18	18.0
TS	2475	0.0004	0.49	1.10	0.42	71.0

Tabla 10.1: Movimientos sísmicos de verificación.

10.2.4 Factores de atenuación sísmica con la profundidad

Según Hashash et Al. (2001 – [16]) es posible tomar en cuenta los efectos de atenuación en la propagación de las ondas sísmicas en el suelo en función de la profundidad.

A falta de datos específicos se pueden aplicar factores de reducción a la velocidad de desplazamiento de las partículas del suelo (V_{\max}) y de consecuencia también a las aceleraciones (PSA) según lo que ilustra la **Tabla 10.1**:

Profundidad [m]	Relación entre el movimiento del terreno en superficie y el movimiento a una determinada profundidad [-]
≤ 6	1.0
$6 \div 15$	0.9
$15 \div 30$	0.8
> 30	0.7

Tabla 10.1: Factores de reducción de los movimientos del terreno con la profundidad.

En base a lo expuesto para las partes en subterráneo del túnel de Agua Negra y del Laboratorio Andes será posible reducir los valores de PSA y de V_{\max} identificados al 70% tomando en cuenta la cobertura existente por encima del túnel.

10.3 Solicitaciones sísmicas

Las acciones internas debidas a la distorsión a corte del terreno se han calculado con las fórmulas presentadas más adelante, que derivan de formulaciones presentadas por diversos Autores.

Para su evaluación si pueden asumir dos condiciones:

- *No slip*: perfecta adherencia entre revestimiento y terreno (ausencia de desplazamiento relativo entre revestimiento y terreno);
- *Full slip*: perfecto desplazamiento entre revestimiento y terreno (ausencia de esfuerzos de corte en la interfaz entre revestimiento y terreno).

La condición *Full slip* proporciona las variaciones de acción axial más bajas, mientras la condición *No slip* las más altas. Las acciones sísmicas resultantes de las fórmulas se deben entender como variaciones respecto a la sollicitación estática.

Las formulaciones consideradas son las siguientes:

Penzien, Wu [10], Wang [14] – Full slip

$$\begin{cases} N = G_T \cdot D \cdot K \cdot \gamma_{s\max} \sin 2\theta \\ M = \frac{1}{2} \cdot G_T \cdot D^2 \cdot K \cdot \gamma_{s\max} \sin 2\theta \\ V = 2 \cdot G_T \cdot D \cdot K \cdot \gamma_{s\max} \cos 2\theta \end{cases}$$

Penzien, Wu [10] – Full slip

$$\begin{cases} N = 2 \cdot G_T \cdot D \cdot K' \cdot \gamma_{s\max} \sin 2\theta \\ M = \frac{1}{2} \cdot G_T \cdot D^2 \cdot K' \cdot \gamma_{s\max} \sin 2\theta \\ V = 2 \cdot G_T \cdot D \cdot K' \cdot \gamma_{s\max} \cos 2\theta \end{cases}$$

Wang [14] – No slip

$$\begin{cases} N = \frac{1}{2} \cdot G_T \cdot D \cdot (1 + a_2) \cdot \gamma_{s\max} \sin 2\theta \\ M = \frac{1}{8} \cdot G_T \cdot D^2 \cdot (1 - a_2 - 2 \cdot a_3) \cdot \gamma_{s\max} \sin 2\theta \end{cases}$$

Penzien [11] – Full slip

$$\begin{cases} N = -\frac{12 \cdot E_R \cdot I \cdot R \cdot \gamma_{s\max}}{2 \cdot D^2 \cdot (1 - \nu_R^2)} \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right) \\ M = -\frac{6 \cdot E_R \cdot I \cdot R \cdot \gamma_{s\max}}{2 \cdot D \cdot (1 - \nu_R^2)} \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right) \\ V = -\frac{24 \cdot E_R \cdot I \cdot R \cdot \gamma_{s\max}}{2 \cdot D^2 \cdot (1 - \nu_R^2)} \sin 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right) \end{cases}$$

Penzien [11] – No slip

$$\begin{cases} N = -\frac{24 \cdot E_R \cdot I \cdot R \cdot \gamma_{s\max}}{2 \cdot D^2 \cdot (1 - \nu_R^2)} \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right) \\ M = -\frac{6 \cdot E_R \cdot I \cdot R \cdot \gamma_{s\max}}{2 \cdot D \cdot (1 - \nu_R^2)} \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right) \\ V = -\frac{24 \cdot E_R \cdot I \cdot R \cdot \gamma_{s\max}}{2 \cdot D^2 \cdot (1 - \nu_R^2)} \sin 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right) \end{cases}$$

Bobet [15] – No slip

$$\begin{cases} N = \frac{1}{2} \cdot G_T \cdot D \cdot (1 - C_3) \cdot \gamma_{s\max} \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right) \\ M = \frac{1}{8} \cdot G_T \cdot D^2 \cdot (1 + C_2 + C_3) \cdot \gamma_{s\max} \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right) \end{cases}$$

Los parámetros que se encuentran en las fórmulas anteriores tienen los siguientes significados:

- E_R es el módulo elástico del revestimiento;
- ν_R es el coeficiente de Poisson del revestimiento;
- D es el diámetro del revestimiento;
- $\gamma_{s\max}$ es la máxima deformación a corte del terreno;
- θ es la coordenada angular a lo largo del revestimiento;
- I es el momento de inercia de la sección longitudinal del revestimiento.

Los coeficientes K , K' , R , a_2 y a_3 toman en consideración la interacción entre terreno y estructura, modificando la entidad de la sollicitación. Para evaluarlos se utilizaron las siguientes fórmulas:

$$K = \frac{1 - \nu_T}{F + 2.5 - 3 \cdot \nu_T}$$

$$K' = \frac{1 - \nu_T}{F + 3 - 4 \cdot \nu_T}$$

$$R = \frac{4 \cdot (1 - \nu_T)}{\alpha + 1}$$

$$a_2 = \frac{F \cdot (1 - 2 \cdot \nu_T) \cdot (1 - C) - 0.5 \cdot (1 - 2 \cdot \nu_T)^2 + 2}{a_0}$$

$$a_3 = \frac{F \cdot [C \cdot (1 - 2 \cdot \nu_T) + 1] - 0.5 \cdot C \cdot (1 - 2 \cdot \nu_T) - 2}{a_0}$$

$$a_0 = F \cdot [(3 - 2 \cdot \nu_T) + (1 - 2 \cdot \nu_T) \cdot C] + C \cdot (2.5 - 8 \cdot \nu_T + 6 \cdot \nu_T^2) + 6 - 8 \cdot \nu_T$$

$$C_2 = -2 \cdot \frac{(1 - \nu_T)^2 \cdot C^* + (1 - \nu_T) - [(1 - \nu_T) \cdot C^* + 4] \cdot 3 / F^*}{(1 - \nu_T)^2 \cdot C^* + (1 - \nu_T) \cdot (3 - 2 \cdot \nu_T) + [(1 - \nu_T) \cdot (5 - 6 \cdot \nu_T) \cdot C^* + 4 \cdot (3 - 4 \cdot \nu_T)] \cdot 3 / F^*}$$

$$C_3 = \frac{1}{3} \cdot \frac{(1 - \nu_T) \cdot C^* - 2 - C_2 \cdot [(1 - \nu_T) \cdot C^* + 4 \cdot \nu_T]}{(1 - \nu_T) \cdot C^* + 2}$$

En estas fórmulas F y F^* representan la relación entre la rigidez a corte del terreno y la del revestimiento y se puede calcular con las fórmulas:

$$F = \frac{G_T \cdot (1 - \nu_R^2) \cdot D^3}{24 \cdot E_R \cdot l} \quad \text{Penzien, Wu [10], Wang [14], Penzien [11]}$$

$$F^* = \frac{E_T \cdot (1 - \nu_R^2) \cdot D^3}{8 \cdot E_R \cdot l \cdot (1 - \nu_T^2)} \quad \text{Bobet [15]}$$

C y C^* son la relación entre la compresibilidad del terreno y la del revestimiento:

$$C = \frac{G_T \cdot (1 - \nu_R^2) \cdot D}{E_R \cdot s \cdot (1 - 2 \cdot \nu_T)} \quad \text{Penzien, Wu [10], Wang [14], Penzien [11]}$$

$$C^* = \frac{E_T \cdot (1 - \nu_R^2) \cdot D}{2 \cdot E_R \cdot s \cdot (1 - \nu_T^2)} \quad \text{Bobet [15]}$$

donde s es el espesor del revestimiento.

El parámetro α representa en cambio la relación entre la rigidez a corte del revestimiento y la del terreno y se puede calcular con las fórmulas:

$$\alpha = \frac{12 \cdot E_R \cdot I \cdot (5 - 6 \cdot \nu_T)}{G_T \cdot (1 - \nu_R^2) \cdot D^3} \quad (\text{Full slip})$$

$$\alpha = \frac{24 \cdot E_R \cdot I \cdot (3 - 4 \cdot \nu_T)}{G_T \cdot (1 - \nu_R^2) \cdot D^3} \quad (\text{No slip})$$

Las acciones sísmicas máximas calculadas según las formulaciones arriba expuestas serán combinadas con las solicitaciones de las combinaciones de carga estáticas presentadas en los capítulos anteriores. Para las combinaciones de cargas y los factores de seguridad ver tablas en los párrafos siguientes.

10.4 Sismo TON

10.4.1 Premisa

Se ha definido el *Terremoto de Normal Operación* (TON), considerando las acciones internas en los revestimientos originadas por un sismo debido a la distorsión a corte del material en el que está excavada la galería.

Para determinar las acciones sísmicas se han aplicado algunas formulaciones analíticas proporcionadas por la Literatura. Este enfoque es el que se adopta comúnmente para calcular los revestimientos de túneles. Para mayores detalles sobre el método, véase [9]÷[16].

10.4.2 Parámetros del terremoto

El TON es un evento que debe poder ser absorbido sin anular la operatividad de la obra.

Se caracteriza por una probabilidad de superación del 50% en la vida de la obra, lo que corresponde a un período de retorno de 144 años. La aceleración máxima en el suelo es de 0.18 g.

Para tomar en consideración que el movimiento sísmico en profundidad es reducido con respecto al que se registra en la superficie, se ha considerado un factor reductor sobre la aceleración sísmica de 0.7 (v. **Tabla 10.1**).

Este factor se sugiere en Hashash et Al. ([16]) para profundidades superiores a 30 m. De esta manera se obtiene una aceleración sísmica de:

$$a_g = 0.13 \text{ g}$$

La velocidad máxima del terreno (PGV, peak ground velocity) se ha obtenido a partir de la aceleración sísmica por medio de un coeficiente que depende de la distancia entre la fuente sísmica y la obra y de la magnitud del sismo, como sugiere Hashash. Se ha considerado un coeficiente de 1.52 m/s/g vale decir el máximo valor sugerido por Hashash para un material rocoso. Esta consideración se hace en favor de la seguridad, por cuanto la solicitación sísmica aumenta a medida que aumenta la PGV. La PGV obtenida es de:

$$PGV = 0.197 \text{ m/s}$$

Tal valor está referido a la profundidad de la obra porque considera un factor de reducción de la aceleración sísmica de 0.7.

Los detalles de las verificaciones se deberán desarrollar en las siguientes etapas de diseño, para esta fase los revestimientos se han verificado considerando el sismo TS, los detalles Se muestran en los párrafos siguientes.

10.5 Sismo TS

10.5.1 Premisa

Los revestimientos del Laboratorio han sido verificados confrontándolos con las acciones sísmicas que derivan de un *Terremoto de Seguridad* (TS). Se han considerado las acciones internas en los revestimientos originadas en un sismo debido a la distorsión a corte del material en el que está excavada la galería.

10.5.2 Parámetros del terremoto

El TS es un evento que puede hacer necesaria la interrupción o el abandono de la operatividad de la obra, pero que no debe comportare el colapso total de la misma.

Se caracteriza por una probabilidad de superación del 2% en la vida de la obra, que corresponde a un periodo de retorno de 2475 años. La aceleración máxima en el suelo es de 0.49 g.

Para tomar en cuenta que el movimiento sísmico en profundidad es más reducido que el que se registra en superficie, se ha considerado un factor reductivo sobre la aceleración sísmica de 0.7 (ver **Tabla 10.1**). Tal factor es sugerido por Hashash et Al. ([16]) para profundidades superiores a 30 m. De esta manera se obtiene una aceleración sísmica de:

$$a_g = 0.34 \text{ g}$$

La velocidad máxima del terreno (PGV, peak ground velocity) se ha obtenido a partir de la aceleración sísmica por medio de un coeficiente que depende de la distancia entre la fuente y la obra, y de la magnitud del sismo, como sugiere Hashash. Se ha considerado un coeficiente de 1.52 m/s/g, vale decir el máximo valor sugerido por Hashash para un material rocoso. Esto se hace para favorecer la seguridad, visto que la sollicitación sísmica aumenta a medida que aumenta la PGV.

La PGV obtenida es de:

$$PGV = 0.51 \text{ m/s}$$

Este valor está en referencia con la profundidad de la obra porque considera un factor de reducción de la aceleración sísmica de 0.7.

10.5.3 Parámetros de la roca

Las verificaciones se efectuaron sobre los revestimientos tipo CS3 por cuanto se los considera representativos de las soluciones límite de soporte previsto.

Un parámetro fundamental para la definición de las sollicitaciones sísmicas, según el enfoque que se ha adoptado, es la máxima distorsión a corte del terreno ($\gamma_{s,\max}$). Ésta se calcula con la siguiente fórmula:

$$\gamma_{s,\max} = \frac{PGV}{V_s}$$

donde:

- PGV es la velocidad máxima del terreno;
- V_s es la velocidad de las ondas de corte, vale decir $\sqrt{\frac{G}{\rho}}$ (G = módulo de corte del terreno, ρ = densidad del terreno).

10.5.4 Concepto de cálculo

Las solicitaciones sísmicas resultantes de las fórmulas presentadas arriba están contenidas en el **Anexo J** para los casos considerados.

Las verificaciones estructurales se realizaron combinando las acciones estáticas derivadas de las presiones del macizo rocoso (determinadas con los factores de amplificación de las cargas equivalente a 1) con las sísmicas, según los siguientes criterios:

- Las solicitaciones sísmicas (acción axial y momento) consideradas en las verificaciones son las máximas obtenidas con las diversas formulaciones;
- para todas las combinaciones estáticas, el signo del momento flector sísmico se ha elegido a fin de incrementar, en valor absoluto, el momento flector estático;
- para la combinación estática que proporciona la máxima acción axial de compresión, la acción axial sísmica se ha considerado de compresión. Para las otras combinaciones estáticas, la acción axial sísmica ha sido considerada tanto de interacción (reducción de la compresión estática) como de compresión (aumento de la compresión estática).

10.5.5 Secciones resistentes consideradas

Las características de las secciones resistentes analizadas para cada caso son las mismas que se usaron para las verificaciones estáticas en estado límite último (ELU) y en estado límite de servicio (ELS) de los revestimientos definitivos para cada parte del Laboratorio.

Dado el nivel de proyecto preliminar las armaduras se deben considerarse como indicativas de las cuantías mínimas que se deben prever en las fases de cómputo de las secciones. Verificaciones y cálculos más detallados se requieren en las sucesivas fases de proyecto.

10.5.6 Factores de cálculo adoptados en las verificaciones

La verificación estructural de los revestimientos se ha evaluado comparando la resistencia de proyecto de la sección con las acciones de cálculo consideradas. Los detalles de las verificaciones se encuentran en el **Anexo K**.

Los factores parciales adoptados en las verificaciones en caso de presencia de armaduras están contenidos en la siguiente Tabla 10.2.

Límites de las tensiones	Factores de seguridad parciales			Inclinación de las bielas comprimidas	Factor de creep
σ_s [N/mm ²]	α_{cc} [-]	γ_c [-]	γ_s [-]	θ [°]	Φ [-]
420.0	1.00	1.00	1.00	45.0	2.00

Tabla 10.2: Parámetros adoptados para las verificaciones sísmicas en caso de presencia de armadura

En cambio, en caso de ausencia de armaduras los factores parciales que se asumen son los siguientes (Tabla 10.3):

Límites de deformación			Factores de seguridad parciales			Inclinación de las bielas comprimidas	Factor de creep
ϵ_{c2} [‰]	ϵ_{cu3} [‰]	ϵ_{ud} [‰]	α_{cc} [-]	γ_c [-]	γ_s [-]	θ [°]	Φ [-]
-2.0	-3.5	20.0	1.00	1.00	1.00	45.0	2.00

Tabla 10.3: Parámetros adoptados para las verificaciones sísmicas en caso de ausencia de armadura.

La combinación de carga consideradas para las verificaciones sísmicas de los revestimientos finales CS1 y 2 son las siguientes (ELU-SISMO), los casos de cargas indicado en la tabla son detallados en el párrafo 7.2.3:

Combinación de carga CS1-2	1	2	3	4	Sismo
Comb. 1 - ELU-SISMO	1.00	1.00	-	-	1.00
Comb. 2 - ELU-SISMO	1.00	-	1.00		1.00
Comb. 3 - ELU-SISMO	1.00	-	-	1.00	1.00

Tabla 10.4: Combinación de carga ELU-SISMO.

La combinación de carga consideradas para las verificaciones sísmicas son las siguientes (ELU-SISMO):

Combinación de carga CS3	FLAC	Sismo
Comb. 1 - FLAC-SISMO	1.00	1.00

Tabla 10.5: Combinación de carga ELU-SISMO.

10.6 Verificación Caverna principal y secundaria – Sismo TS

En las siguientes tablas, para cada una de las secciones consideradas, se informan las características de sollicitación consideradas en las verificaciones y las correspondientes tasas de explotación (E_{eff}) obtenidas.

Revestimiento definitivo Caverna principal					
Solicitaciones sísmicas					
N _{max} sismo [kN]		M _{max} sismo [kNm]		V _{max} sismo [kN]	
*CS1-2	2456.8	4.1		-	
Características de sollicitación consideradas					
Clase		N [kN]	M [kNm]	V [kN]	e (M/N) [m]
CS1-2 – revestimiento final Comb. 1 - ELU-SISMO	N _{max}	-5309.1	4.1	-18.2	0.00
	M _{max+}	-4434.4	106.6	0.0	-0.02
	M _{max-}	-4670.0	-91.3	-8.4	0.02
	M/N _{max+}	-4670.0	-91.3	-8.4	0.02
	M/N _{max-}	-4434.4	106.6	0.0	-0.02
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max+}	-4434.4	106.6	0.0	-0.02
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max-}	-4673.4	-91.3	11.7	0.02
	V _{max}	-4789.1	-37.5	-64.0	0.01
Características de sollicitación consideradas					
Clase		N [kN]	M [kNm]	V [kN]	e (M/N) [m]
CS1-2 – revestimiento final Comb. 2 - ELU-SISMO	N _{max}	-5065.7	4.1	-16.6	0.00
	M _{max+}	-4164.7	160.2	3.6	-0.04
	M _{max-}	-4100.5	-156.3	-61.4	0.04
	M/N _{max+}	-4099.1	-156.3	5.1	0.04
	M/N _{max-}	-4164.7	160.2	3.6	-0.04
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max+}	-4164.7	160.2	3.6	-0.04
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max-}	-4600.1	-110.2	9.9	0.02
	V _{max}	-4098.6	21.4	-144.5	-0.01
Características de sollicitación consideradas					
Clase		N [kN]	M [kNm]	V [kN]	e (M/N) [m]
CS1-2 – revestimiento final Comb. 3 - ELU-SISMO	N _{max}	-5158.2	4.1	-8.3	0.00
	M _{max+}	-5069.5	37.5	-0.6	-0.01
	M _{max-}	-5008.2	-69.0	-12.3	0.01
	M/N _{max+}	-5006.0	-69.0	31.6	0.01
	M/N _{max-}	-5069.5	37.5	-0.6	-0.01
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max+}	-5074.4	37.4	1.0	-0.01
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max-}	-5008.2	-69.0	-12.3	0.01
	V _{max}	-4998.8	-53.0	65.8	0.01

*los valores indicados corresponden al incremento máximo de esfuerzo normal, para los detalles de los outputs de todos los métodos de caculos detallados en el párrafo 10.3 ver el **ANEXO J**

Tabla 10.2: Características de sollicitación consideradas en las verificaciones.

Revestimiento definitivo Caverna principal					
Solicitaciones sísmicas					
N _{max} sismo [kN]		M _{max} sismo [kNm]		V _{max} sismo [kN]	
*CS3	3205.5	5.6		-	
Características de sollicitación consideradas					
Clase		N [kN]	M [kNm]	V [kN]	e (M/N) [m]
CS3 – revestimiento final Comb. 1 - FLAC-SISMO	N _{max}	-5709.5	-93.9	-64.1	0.016
	M _{max+}	-5323.5	152.9	141.8	-0.029
	M _{max-}	-5660.5	-143.9	-16.2	0.025
	M/N _{max+}	-5329.5	-136.7	-115.1	0.026
	M/N _{max-}	-5323.5	152.9	141.8	-0.029
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max+}	-5323.5	152.9	141.8	-0.029
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max-}	-5660.5	-143.9	-16.2	0.025
	V _{max}	-5609.5	47.8	177.4	-0.009

*los valores indicados corresponden al incremento máximo de esfuerzo normal, para los detalles de los outputs de todos los métodos de cálculos detallados en el párrafo 10.3 ver el **ANEXO J**

Tabla 10.3: Características de sollicitación consideradas en las verificaciones.

Revestimiento definitivo Caverna secundaria					
Solicitaciones sísmicas					
N _{max} sismo [kN]		M _{max} sismo [kNm]		V _{max} sismo [kN]	
*CS1-2	2013.2	3.6		-	
Características de sollicitación consideradas					
Clase		N [kN]	M [kNm]	V [kN]	e (M/N) [m]
CS1-2 – revestimiento final Comb. 1 - ELU-SISMO	N _{max}	-3346.1	3.6	-18.0	0.00
	M _{max+}	-3009.9	41.2	1.4	-0.01
	M _{max-}	-3121.7	-34.9	-1.0	0.01
	M/N _{max+}	-3121.7	-34.9	-1.0	0.01
	M/N _{max-}	-3009.9	41.2	1.4	-0.01
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max+}	-3009.9	41.2	1.4	-0.01
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max-}	-3132.2	-34.7	-1.0	0.01
	V _{max}	-3181.0	-14.4	-33.1	0.00
Características de sollicitación consideradas					
Clase		N [kN]	M [kNm]	V [kN]	e (M/N) [m]
CS1-2 – revestimiento final Comb. 2 - ELU-SISMO	N _{max}	-3603.3	3.6	-21.4	0.00
	M _{max+}	-3027.3	72.7	-0.6	-0.02
	M _{max-}	-2992.8	-72.3	-1.2	0.02
	M/N _{max+}	-2991.4	-72.3	19.3	0.02
	M/N _{max-}	-3027.3	72.7	-0.6	-0.02
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max+}	-3027.3	72.7	-0.6	-0.02
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max-}	-2992.8	-72.3	-1.2	0.02
	V _{max}	-2992.6	-12.0	-88.6	0.00
Características de sollicitación consideradas					
Clase		N [kN]	M [kNm]	V [kN]	e (M/N) [m]
CS1-2 – revestimiento final Comb. 3 - ELU-SISMO	N _{max}	-4137.6	3.6	2.1	0.00
	M _{max+}	-4097.3	25.3	-0.1	-0.01
	M _{max-}	-4050.0	-34.8	-5.5	0.01
	M/N _{max+}	-4048.8	-34.8	2.5	0.01
	M/N _{max-}	-4097.3	25.3	-0.1	-0.01
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max+}	-4099.3	25.2	0.6	-0.01
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max-}	-4050.0	-34.8	-5.5	0.01
	V _{max}	-4038.2	-23.3	33.7	0.01

*los valores indicados corresponden al incremento máximo de esfuerzo normal, para los detalles de los outputs de todos los métodos de caculos detallados en el párrafo 10.3 ver el **ANEXO J**

Tabla 10.4: Características de sollicitación consideradas en las verificaciones.

Revestimiento definitivo Caverna secundaria					
Solicitaciones sísmicas					
N _{max} sismo [kN]		M _{max} sismo [kNm]		V _{max} sismo [kN]	
*CS3	3017.2	8.6		-	
Características de sollicitación consideradas					
Clase		N [kN]	M [kNm]	V [kN]	e (M/N) [m]
CS3 – revestimiento final Comb. 1 - FLAC-SISMO	N _{max}	-5410.5	-31.0	2.5	0.006
	M _{max+}	-5314.5	108.5	237.3	-0.020
	M _{max-}	-4842.5	-143.8	-7.8	0.030
	M/N _{max+}	-4842.5	-143.8	-7.8	0.030
	M/N _{max-}	-5314.5	108.5	237.3	-0.020
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max+}	-5314.5	108.5	237.3	-0.020
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max-}	-4842.5	-143.8	-7.8	0.030
	V _{max}	-5314.5	108.5	237.3	-0.020

*los valores indicados corresponden al incremento máximo de esfuerzo normal, para los detalles de los outputs de todos los métodos de caculos detallados en el párrafo 10.3 ver el **ANEXO J**

Tabla 10.5: Características de sollicitación consideradas en las verificaciones.

Los factores de eficiencia para los efectos de flexión (M) y esfuerzo normal (N) obtenidos para las secciones consideradas están contenidos en la tabla siguiente:

	CS1-2 – revestimiento final			CS3 – revestimiento final
	Comb. 1 – ELU-SISMO	Comb. 2 – ELU-SISMO	Comb. 3 – ELU-SISMO	Comb. 1 FLAC-SISMO
	[-]	[-]	[-]	[-]
N _{max}	0.84	0.8	0.82	0.99
M _{max+}	0.86	0.9	0.85	1.02 X
M _{max-}	0.87	0.89	0.89	1.05 X
M/N _{max+}	0.87	0.89	0.89	0.99
M/N _{max-}	0.86	0.9	0.85	1.02 X
[M/(N-1.2*N _{max})] _{max+}	0.86	0.9	0.85	1.02 X
[M/(N-1.2*N _{max})] _{max-}	0.87	0.89	0.89	1.05 X
V _{max}	0.81	0.68	0.86	0.92

Tabla 10.6: Factores de eficiencia obtenidos para los análisis efectuados (Caverna Principal).

	CS1-2 – revestimiento final			CS3 – revestimien to final
	Comb. 1 – ELU-SISMO	Comb. 2 – ELU-SISMO	Comb. 3 – ELU-SISMO	Comb. 1 FLAC-SISMO
	[-]	[-]	[-]	[-]
N_{max}	0.76	0.81	0.93	0.87
M_{max+}	0.78	0.86	0.98	0.98
M_{max-}	0.79	0.85	0.99	0.95
M/N_{max+}	0.79	0.85	0.99	0.95
M/N_{max-}	0.78	0.86	0.98	0.98
$[M/(N-1.2*N_{max})]_{max+}$	0.78	0.86	0.98	0.98
$[M/(N-1.2*N_{max})]_{max-}$	0.79	0.85	0.99	0.95
V_{max}	0.75	0.7	0.96	0.98

Tabla 10.7: Factores de eficiencia obtenidos para los análisis efectuados (caverna secundaria).

Para todos los casos considerados los factores de eficiencia en los revestimientos tipo 1 y 2, se mantienen por debajo del valor límite de 1.0 indicando que las soluciones propuestas son adecuadas.

En el caso del sostenimiento de tipo 3 de la caverna principal los valores son próximos a 1 o ligeramente superiores, teniendo en cuenta las hipótesis conservadoras relativas a los parámetros geomecánicos y los métodos de cálculos adoptados se consideran las verificaciones cumplidas. También para la caverna secundaria se consideran las verificaciones cumplidas (**Anexo K**).

10.7 Verificación revestimiento Túnel Zona de tránsito y estacionamiento – Galería de conexión central – Galería de entrada y salida – Sala técnica – Sala de emergencia y comedor – Sala climatización – Sala tratamiento retención de agua – Sala ventilación – Sismo TS

En las siguientes tablas, para cada una de las secciones consideradas, se informan las características de sollicitación consideradas en las verificaciones y las correspondientes tasas de explotación (E_{eff}) obtenidas, solo para la roca tipo III.

Revestimiento definitivo					
Solicitaciones sísmicas					
N _{max} sismo [kN]		M _{max} sismo [kNm]		V _{max} sismo [kN]	
*CS3	2305.9	8.5		-	
Características de sollicitación consideradas					
Clase		N [kN]	M [kNm]	V [kN]	e (M/N) [m]
CS3 – revestimiento final Comb. 1 - ELU-SISMO	N _{max}	-3250.9	9.0	73.2	0.00
	M _{max+}	-3238.0	65.6	1.0	-0.02
	M _{max-}	-3227.8	-31.0	-3.6	0.01
	M/N _{max+}	-3227.8	-31.0	-3.6	0.01
	M/N _{max-}	-3238.0	65.6	1.0	-0.02
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max+}	-3238.0	65.6	1.0	-0.02
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max-}	-3228.2	-31.0	1.5	0.01
	V _{max}	-3250.9	9.0	73.2	0.00
Clase		N [kN]	M [kNm]	V [kN]	e (M/N) [m]
CS3 – revestimiento final Comb. 2 - ELU-SISMO	N _{max}	-3266.2	9.0	-16.4	0.00
	M _{max+}	-3030.9	37.9	2.3	-0.01
	M _{max-}	-3150.3	-32.4	-2.3	0.01
	M/N _{max+}	-3150.3	-32.4	-2.3	0.01
	M/N _{max-}	-3030.9	37.9	2.3	-0.01
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max+}	-3030.9	37.9	2.3	-0.01
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max-}	-3164.4	-31.9	-2.3	0.01
	V _{max}	-3206.1	-19.0	-29.5	0.01
Clase		N [kN]	M [kNm]	V [kN]	e (M/N) [m]
CS3 – revestimiento final Comb. 3 - ELU-SISMO	N _{max}	-3405.5	9.0	-18.8	0.00
	M _{max+}	-2927.9	54.4	-3.7	-0.02
	M _{max-}	-2914.3	-49.9	-8.3	0.02
	M/N _{max+}	-2913.8	-49.9	12.7	0.02
	M/N _{max-}	-2927.9	54.4	-3.7	-0.02
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max+}	-2936.5	54.1	6.0	-0.02
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max-}	-3141.7	-39.2	5.5	0.01
	V _{max}	-2908.9	15.1	-75.1	-0.01

*los valores indicados corresponden al incremento máximo de esfuerzo normal, para los detalles de los outputs de todos los métodos de caculos detallados en el párrafo 10.3 ver el **ANEXO J**.

Tabla 10.8: Características de sollicitación consideradas en las verificaciones.

Los factores de eficiencia para los efectos de flexión (M) y esfuerzo normal (N) obtenidos para las secciones consideradas están contenidos en la tabla siguiente:

	CS3 – revestimiento final		
	Comb. 1 – ELU-SISMO	Comb. 2 – ELU-SISMO	Comb. 3 – ELU-SISMO
	[-]	[-]	[-]
N_{max}	0.79	0.79	0.82
M_{max+}	0.93	0.81	0.83
M_{max-}	0.84	0.82	0.82
M/N_{max+}	0.84	0.82	0.82
M/N_{max-}	0.93	0.81	0.83
$[M/(N-1.2*N_{max})]_{max+}$	0.93	0.81	0.83
$[M/(N-1.2*N_{max})]_{max-}$	0.84	0.82	0.84
V_{max}	0.79	0.8	0.72

Tabla 10.9: Factores de eficiencia obtenidos en las verificaciones.

Las verificaciones realizadas resultan satisfactorias (**Anexo K**).

10.8 Verificación revestimiento Galería de escape y acceso al fondo del pozo – Sala limpia – Sala experimental adicional – Laboratorio de biología – Galería de acceso al sector geofísica – Sala instrumentos D-E-F-G-H-K – Sismo TS

En las siguientes tablas, para cada una de las secciones consideradas, se informan las características de sollicitación consideradas en las verificaciones y las correspondientes tasas de explotación (E_{eff}) obtenidas, solo para la roca tipo III.

Revestimiento definitivo					
Solicitaciones sísmicas					
N _{max} sismo [kN]		M _{max} sismo [kNm]		V _{max} sismo [kN]	
*CS3	1397.4	2.9		-	
Características de sollicitación consideradas					
Clase		N [kN]	M [kNm]	V [kN]	e (M/N) [m]
CS3 – revestimiento final Comb. 1 - ELU-SISMO	N _{max}	-1539.2	3.1	-8.1	0.00
	M _{max+}	-1534.6	8.5	-0.4	-0.01
	M _{max-}	-1528.5	-7.0	-3.8	0.00
	M/N _{max+}	-1528.5	-7.0	-3.8	0.00
	M/N _{max-}	-1534.6	8.5	-0.4	-0.01
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max+}	-1534.6	8.5	-0.4	-0.01
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max-}	-1529.4	-7.0	0.0	0.00
	V _{max}	-1530.1	-4.6	9.9	0.00
Clase		N [kN]	M [kNm]	V [kN]	e (M/N) [m]
CS3 – revestimiento final Comb. 2 - ELU-SISMO	N _{max}	-1871.5	3.1	-5.5	0.00
	M _{max+}	-1654.9	16.3	-1.6	-0.01
	M _{max-}	-1647.7	-14.0	-0.1	0.01
	M/N _{max+}	-1647.0	-14.0	15.6	0.01
	M/N _{max-}	-1654.9	16.3	-1.6	-0.01
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max+}	-1654.9	16.3	-1.6	-0.01
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max-}	-1762.9	-11.9	1.8	0.01
	V _{max}	-1645.2	8.6	-33.4	-0.01
Clase		N [kN]	M [kNm]	V [kN]	e (M/N) [m]
CS3 – revestimiento final Comb. 3 - ELU-SISMO	N _{max}	-1748.6	3.1	-4.1	0.00
	M _{max+}	-1588.2	12.8	-1.2	-0.01
	M _{max-}	-1582.8	-11.2	-0.1	0.01
	M/N _{max+}	-1582.3	-11.2	11.6	0.01
	M/N _{max-}	-1588.2	12.8	-1.2	-0.01
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max+}	-1588.2	12.8	-1.2	-0.01
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max-}	-1668.1	-9.6	1.3	0.01
	V _{max}	-1580.9	7.2	-24.7	0.00

*los valores indicados corresponden al incremento máximo de esfuerzo normal, para los detalles de los outputs de todos los métodos de caculos detallados en el párrafo 10.3 ver el **ANEXO J**.

Tabla 10.10: Características de sollicitación consideradas en las verificaciones.

Los factores de eficiencia para los efectos de flexión (M) y esfuerzo normal (N) obtenidos para las secciones consideradas están contenidos en la tabla siguiente:

	CS3 – revestimiento final		
	Comb. 1 – ELU-SISMO	Comb. 2 – ELU-SISMO	Comb. 3 – ELU-SISMO
	[-]	[-]	[-]
N_{max}	0.63	0.76	0.71
M_{max+}	0.66	0.77	0.71
M_{max-}	0.65	0.75	0.7
M/N_{max+}	0.65	0.75	0.7
M/N_{max-}	0.66	0.77	0.71
$[M/(N-1.2*N_{max})]_{max+}$	0.66	0.77	0.71
$[M/(N-1.2*N_{max})]_{max-}$	0.65	0.78	0.72
V_{max}	0.63	0.71	0.67

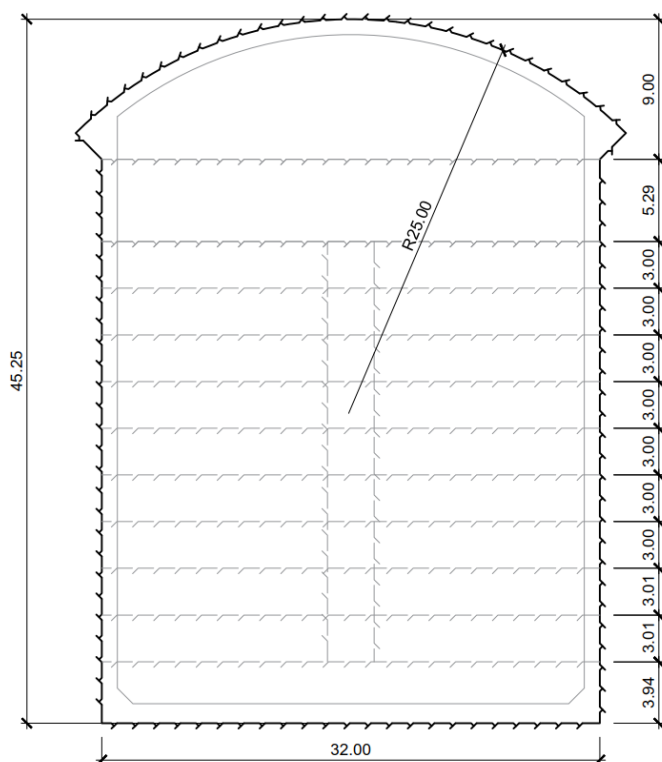
Tabla 10.11: Factores de eficiencia obtenidos en las verificaciones.

Las verificaciones realizadas resultan satisfactorias (**Anexo K**).

11.1 Introducción

Se prevé de realizar la excavación con las siguientes macro etapas:

- La posición actual del pozo deberá ser confirmada durante la ejecución por medio de sondeos que permitan de confirmar las hipótesis de diseño asumidas.



Para los detalles ver los planos **6198.1-P-058 a 60** y **6198.1-P-052**.

11.2 Medidas de sostenimiento inicial – Pozo - CS1 - 3

Para las tres clases de rocas consideradas en las hipótesis iniciales (clases I – III Bieniawski 1989) se proponen los siguientes tipos de sostenimiento que se describen en el plano **6198.1-P058-60**

– CS1 inicial cúpula:

- 10 cm de hormigón proyectado reforzados con fibras de acero (dosaje mínimo 35 kg/m³) C30/37
- Bulonaje para fijar eventuales bloques inestables después de las operaciones de voladura. Pernos inyectados, 350 kN, tipo Dywidag R38-420 (o equiv.) @ 2.00 - 2.00, L = 10.0m
- Instalación de malla electrosoldada ϕ 8 150x150mm (o equivalente)
- 20 cm de hormigón proyectado reforzados con fibras de acero (dosaje mínimo 35 kg/m³)

– CS2 inicial cúpula:

- 10 cm de hormigón proyectado reforzados con fibras de acero (dosaje mínimo 35 kg/m³) C30/37.
- Bulonaje para fijar eventuales bloques inestables después de las operaciones de voladura. Pernos inyectados, 350 kN, tipo Dywidag R38-420 (o equiv.) @ 2.00 - 2.00, L = 10.0m
- Instalación de malla electrosoldada tipo ϕ 8 150x150mm (o equivalente)
- 20 cm de hormigón proyectado reforzados con fibras de acero (dosaje mínimo 35 kg/m³)

– CS3 inicial cúpula:

- 10 cm de hormigón proyectado reforzados con fibras de acero (dosaje mínimo 35 kg/m³) C30/37.
- Bulonaje para fijar eventuales bloques inestables después de las operaciones de voladura. Pernos inyectados, 350 kN, tipo Dywidag R38-420 (o equiv.) @ 1.50 – 1.50, L = 12.0m
- Instalación de malla electrosoldada tipo ϕ 8 150x150mm (o equivalente)
- 20 cm de hormigón proyectado reforzados con fibras de acero (dosaje mínimo 35 kg/m³)

– CS1 -CS2- CS3 inicial paredes:

- 10 cm de hormigón proyectado reforzados con fibras de acero (dosaje mínimo 35 kg/m³) C30/37
- Bulonaje “local” para fijar eventuales bloques inestables después de las operaciones de voladura durante la excavación. Pernos inyectados 250 kN, tipo Dywidag R32-320 (o equiv.) @ 3.00 - 3.00, L = 5.0m
- Bulonaje “global” para fijar bloques inestables antes de la construcción del revestimiento definitivo. Pernos inyectados, 350 kN, tipo Dywidag R38-420 (o equiv.) @ 3.00 - 3.00, L = 8.0m
- Instalación de malla electrosoldada tipo ϕ 8 150x150mm (o equivalente)
- 20 cm de hormigón proyectado reforzados con fibras de acero (dosaje mínimo 35 kg/m³)

11.2.1 Análisis desarrollados y parámetros adoptados

En el área de Laboratorio se han identificado las condiciones de cobertura y litotipos que, para cada una de las clases de sostenimiento, lleva a tener el menor ángulo de empuje, correspondiente al bloque más crítico (dimensiones mayores). En la tabla se muestra un resumen de las principales características de los dos principales litotipos “roca intacta”.

Litotipos	γ [kN/m ³]	UCS [MPa]	m_i [-]	E_i [GPa]
Riolita porfírica	26.4	100	25	40
Dacita	26.9	80	25	33

Tabla 11.1: Parámetros mecánico de la roca intacta en el área del laboratorio.

Los parámetros característicos que se han considerado en los cálculos se resumen en la tabla:

TMR	Descripción	Cobertura [m]	GSI	$\sigma_{c,m}$ [MPa]	ϕ_k [°]	C_k [MPa]	E_m [GPa]	ν [-]
TMR 2a	Bueno	1750	70	42	53.3	10	25	0.24
TMR 2b	Medio	1750	60	33	50.4	8.75	17	0.24
TMR 2c	Malo	1750	50	-	45.3	7.0	8.8	0.24

Tabla 11.2: Parámetros mecánico de los litotipos presentes en el área del laboratorio.

A falta de datos directos sobre la resistencia a lo largo de las discontinuidades de los diversos litotipos se han asumido los valores característicos del ángulo de fricción (ϕ) para el macizo rocoso calculado para las coberturas elegidas, aplicando a éste un factor de seguridad de 1.25 sobre el valor de la tangente. El aporte cohesivo siempre se ha considerado prudencialmente nulo a lo largo de las discontinuidades.

Los parámetros adoptados se resumen en la **Tabla 11.3**:

Tipo de roca [-]	Clase macizo rocoso [-]	Clase de soporte [-]	Cobertura. [m]	$\phi_{caráct.}$ [°]	$\phi_{cálculo}$ [°]	$C_{cálculo}$ [kPa]
Riolita - Dacita	TMR 2a	CS1	1750	56/50	47	8.0
Riolita - Dacita	TMR 2b	CS2	1750	51/50	44	7.0
Riolita - Dacita	TMR 2c	CS3	1750	43/39	40	5.6

Tabla 11.3: Parámetros de resistencia para los anclajes adoptados en los cálculos.

donde:

$\phi_{caráct.}$: ángulo de fricción característico para el material considerado;

$\phi_{cálculo}$: ángulo de fricción de cálculo (considerando factor FS = 1.25 sobre la tangente de ϕ);

$C_{cálculo}$: cohesión de cálculo considerada.

Los análisis efectuados son los siguientes:

Revestimiento de la cúpula del pozo:

- *Análisis a corto plazo:* inestabilidad de bloques durante las etapas de excavación

- *Análisis a largo plazo*: Empuje de la roca alterada en consecuencia de las operaciones de excavación (STATIK) y modelo numérico FLAC 2D

Revestimiento de las paredes

- *Análisis a corto plazo*: inestabilidad de bloques durante las etapas de excavación
- *Análisis a largo plazo*: Análisis global por medio de curvas características, empuje de la roca alterada en consecuencia de las operaciones de excavación (STATIK) y modelos numéricos FLAC 2D,

Análisis global

- Análisis numérico axisimetrica per medio del programa de cálculo a las diferencias finitas FLAC 2D
- Verificación sísmica de los revestimientos;
- Modelo estructural en fase de ejercicio (pozo con revestimiento definitivo y agua en el interior) (STATIK)

11.3 Verificación de los sostenimientos previstos para la cúpula del pozo a corto plazo

Para la descripción de los detalles de los revestimientos previsto para la excavación del pozo ver plano **6198.1-R-058-60**.

Los parámetros adoptados para la resistencia del revestimiento para las diferentes clases están reunidos en la Tabla 6.4.

Las características de resistencia de los sostenimientos de la cúpula que se asumen para los anclajes están resumidas.

Cúpula Pozo principal							
Clase [-]	Q _s [MPa]	φ _d [mm]	T _k [kN]	T _d [kN]	L [m]	l _{long.} [m]	l _{tras.} [m]
CS1	1.00	28.00	350.00	259.26	10.00	2.00	2.00
CS2	1.00	28.00	350.00	259.26	10.00	2.00	2.00
CS3	0.70	28.00	350.00	259.26	12.00	1.50	1.50

Tabla 11.4: Resultados de los cálculos efectuados con el método Lombardi SA

Los parámetros adoptados para la resistencia del revestimiento para las diferentes clases están reunidos en la Tabla 11.5.

Corto Plazo				
Clase [-]	esp. [cm]	esp. arco [cm]	τ _{cd} [MPa]	σ _{cd} [MPa]
CS1	30	10	1.1	-
CS2	30	10	1.1	-
CS3	30	10	1.1	-

Tabla 11.5: Parámetros de resistencia para los revestimientos adoptados en los cálculos.

Los resultados de los cálculos efectuados se resumen en la Tabla 11.6 y en el **Anexo L**:

Condición	Clase de sostenimiento [-]		
	Corto plazo		
	CS1	CS2	CS3
Cúpula Pozo principal	1.5	1.2	1.0

Tabla 11.6: Resultados de los cálculos efectuados con el método Lombardi SA

Analizando los resultados a corto plazo los revestimientos propuestos comportan factores de seguridad adecuados.

El revestimiento considerado deberá ser verificado también a largo plazo (100 años) por ende debe ser verificado que el recubrimiento sea suficiente para evitar problemas de corrosión. Teniendo en cuenta las indicaciones internacionales (SIA – AICAP – ISRM) se deberá garantizar un recubrimiento mínimo de 20mm y la definición de la mezcla de la lechada también tendrá que ser diseñada para el plazo de 100 años. Además de esto en todo el laboratorio se deberán efectuar controles periódicos en los revestimientos para asegurar que el comportamiento de los anclajes se desarrolle conforme a las hipótesis de diseño.

11.4 Verificación de los sostenimientos previstos para las paredes del pozo a corto plazo

Los parámetros adoptados para la resistencia del revestimiento de las paredes para las diferentes clases están reunidos en la Tabla 11.7.

Las características de resistencia de los sostenimientos de las paredes que se asumen para los anclajes están resumidas.

Cúpula Pozo principal							
Clase [-]	Q _s [MPa]	φ _d [mm]	T _k [kN]	T _d [kN]	L [m]	i _{long.} [m]	i _{tras.} [m]
CS1-CS2-CS3 "local"	0.7	60.00	250.00	185.18	5.00	3.00	3.00
CS1-CS2-CS3 global	0.7	60.00	350.00	259.26	8.00	3.00	3.00

Tabla 11.7: Resultados de los cálculos efectuados con el método Lombardi SA

La estabilidad de las paredes a corto plazo se ha determinado por medio de análisis de estabilidad de las cunas 3D (UNWEDGE). Se presentan los cálculos para los pernos "cortos" necesarios para la estabilidad local durante la excavación

Teniendo en cuenta la escasa cantidad de datos se ha considerado una distribución casual de juntas:

Distribución casual juntas			
#	Dip / Dip dir	#	Dip / Dip dir
1	79 / 181	13	23 / 108
2	77 / 220	14	46 / 113
3	54 / 183	15	79 / 62
4	54 / 232	16	77 / 27
5	79 / 254	17	49 / 45
6	86 / 294	18	17 / 23
7	67 / 285	19	68 / 330
8	33 / 279	20	83 / 334
9	19 / 202	21	87 / 133
10	65 / 144	22	68 / 312
11	76 / 119	23	33 / 337
12	76 / 97	24	68 / 351

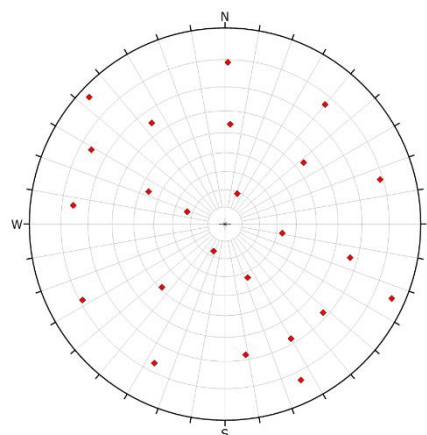


Tabla 11.8: Distribución juntas consideradas en las paredes del pozo – corto plazo.

Los factores de seguridad para los casos determinantes se muestran en la Tabla 11.9.

Combinación	Junta A	Junta B	Junta C	Factor de Seguridad
1	5	19	24	1.002
2	15	19	22	1.09
3	5	7	19	1.114

Tabla 11.9: Resultados de los cálculos efectuados con el método UNWEDGE.

Se presentan los cálculos para los pernos necesarios para la estabilidad “global” de las paredes del pozo. Las hipótesis de cálculo son las mismas resumidas en el apartado anterior.

Los factores de seguridad para los casos determinantes se muestran en la Tabla 11.10.

Combinación	Junta A	Junta B	Junta C	Factor de Seguridad
1	5	7	20	1.104
2	1	12	15	1.208
3	5	20	22	1.285

Tabla 11.10: Resultados de los cálculos efectuados con el método UNWEDGE.

Analizando los resultados a corto plazo los revestimientos propuestos comportan factores de seguridad adecuados.

Además de verificar la estabilidad de la excavación se ha verificado las tensiones que se desarrollaron en el soporte inicial (30cm) no sean superiores a las tensiones admisibles para el hormigón proyectado.

La verificación se ha llevado a cabo por medio de las curvas características considerando la condición relativa al TM2c. En la figura se muestra la curva características del macizo por medio del programa de cálculo desarrollando por Lombardi SA (Lombardi 1974).

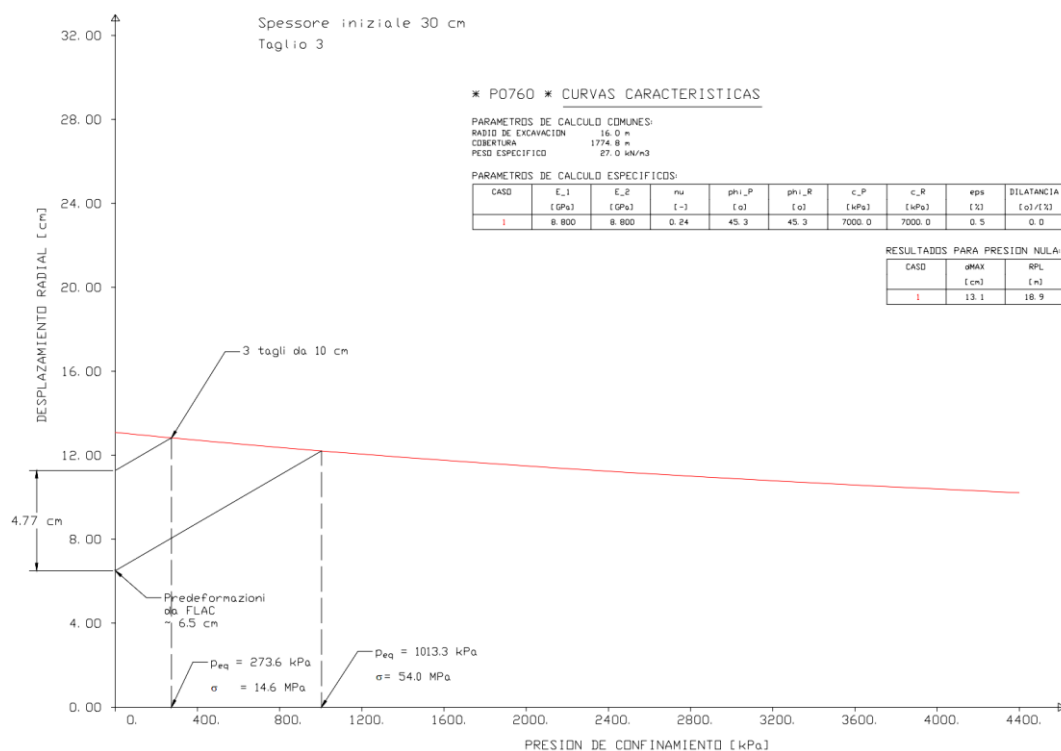


Figura 11.2: Curva característica pozo.

Las deformaciones antes de la instalación del revestimiento (**Figura 11.3**) derivan del análisis numérico FLAC (para los detalles ver **ANEXO M**)

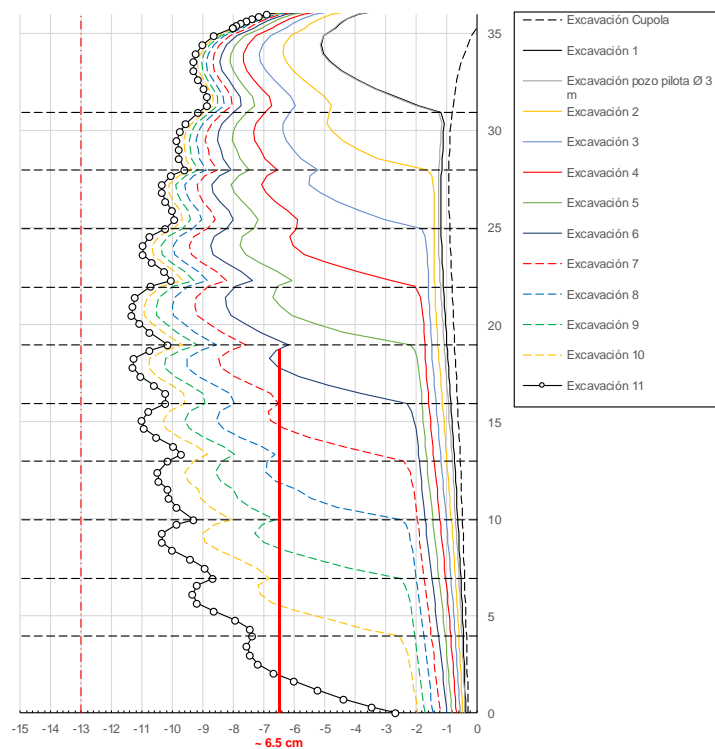


Figura 11.3: Deformaciones de las paredes del pozo evaluadas por medio de análisis numérico FLAC.

Las tensiones evaluadas por medio de los análisis numéricos muestran que el espesor de 30cm no es suficiente:

$$\sigma = 54.0 \text{ MPa} \gg 20 \text{ MPa} = f_{cd}$$

Por esta razón se deberá:

- a) Prever cortes en el macizo para baja el estado tensional durante la excavación del pozo
- b) Prever elementos deformables en el soporte inicial

Se ha evaluado que con la solución b (3 cortes de ancho 10cm) la tensión máxima en el revestimiento resulta ser:

$$\sigma = 14.6 < 20 \text{ MPa} = f_{cd}.$$

Compatible con la resistencia a compresión del hormigón. En este caso se acepta que el valor de tensión de compresión sea $> 10\text{MPa}$ en cuanto siendo un pozo circular los efectos de flexión pueden considerarse poco significativos.

11.5 Verificación de los revestimientos definitivos de la cúpula del pozo a largo plazo

11.5.1 Concepto de calculo

En el presente capítulo se describen los cálculos estáticos efectuados para el revestimiento definitivo de la cúpula del pozo a largo plazo. Los revestimientos serán verificados en las condiciones que se consideran más desfavorables, en base a los conocimientos geológicos actualmente disponibles

Como se trata de la fase de Proyecto Preliminar los esquemas de armaduras consideradas en los cálculos se deben asumir como una indicación de las armaduras mínimas necesarias a flexocompresión. No se consideran la presencia de armaduras a corte y armaduras constructivas, porque simplemente se propone determinar las cantidades de armadura que se deben calcular y verificar la factibilidad de las soluciones constructivas propuestas.

El concepto que se adoptó para el análisis ha sido verificar si los revestimientos colocados en obra están en condiciones de soportar las cargas a las que están sometidos los sostenimientos. Se asume que a largo plazo los sostenimientos deban de resistir las cargas de la roca.

Como está previsto un sistema de drenaje continuo a lo largo de todo el laboratorio en los cálculos no se ha tomado en cuenta la carga hidráulica externa sobre los revestimientos.

Las cargas que se asumen para la verificación de la sección son las siguientes:

- 1) Peso propio de la estructura (**Figura 11.4**) (ver **Anexo N**).

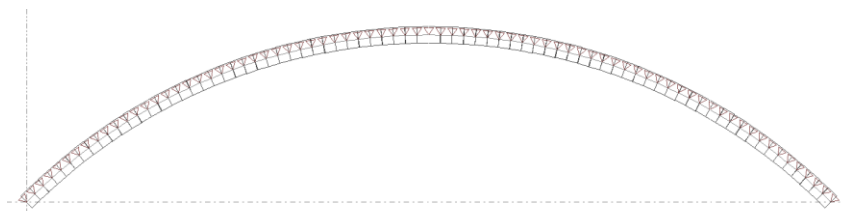


Figura 11.4: Esquema de la carga correspondiente a la presión del macizo rocoso.

- 2) Presión de un bloque simétrico en bóveda con espesor máximo calculado según Unal [35] (ver **Anexo N**).

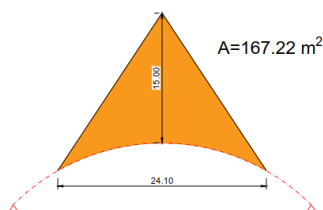


Figura 11.5: Esquema de la carga correspondiente a la presencia de un bloque simétrico en bóveda.

- 3) Presión de un bloque asimétrico en bóveda con espesor calculado según Unal [35] (ver **Anexo N**).

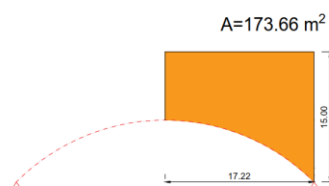


Figura 11.6: Esquema de la carga correspondiente a la presencia de un bloque asimétrico en bóveda.

Para los cálculos se han considerado:

- revestimiento definitivo de 70 cm de espesor en hormigón (clase C50/60) armado con malla ($\varnothing 20 @ 150$);

En los cálculos que siguen se muestra como estas 2 configuraciones de revestimiento están en condiciones de soportar cargas de bloques asimétricos de dimensiones diferentes.

Análisis	E (GPa)	Radio bóveda (m)	Longitud elementos (m)	Rigidez resorte bóveda (MN/m)	Espesor revestimiento (m)	Modulo deformabilidad hormigón (GPa)
Cúpula pozo	8.8	24.35	~ 0.50	181.9	0.70	37

Tabla 11.11: rigidez de los resortes adoptados en los cálculos.

En los cálculos estáticos se ha considerado una rigidez flexional de los elementos estructurales (E·J) de 50% para considerar la presencia de una micro-fisura en el interior de los revestimientos mismos que reduce precisamente su rigidez flexional.

11.6 Verificaciones estructurales cúpula a largo plazo

11.6.1 Verificaciones estructurales para acción normal y acción flexional - ELU

La verificación estructural de los revestimientos se ha evaluado comparando la resistencia de proyecto de la sección con las acciones de cálculo consideradas. Los detalles de las verificaciones efectuados se informan en el **Anexo N**. Los factores parciales adoptados en las verificaciones del SLU están contenidos en la siguiente tabla:

Límites de deformación			Factores de seguridad parciales			Inclinación de las bielas comprimidas
ϵ_{c2} [‰]	ϵ_{cu3} [‰]	ϵ_{ud} [‰]	α_{cc} [-]	γ_c [-]	γ_s [-]	θ [°]
-2.0	-3.5	20.0	0.85	1.50	1.15	45.0

Tabla 11.12: Parámetros adoptados para las verificaciones del SLU

Tratándose de un revestimiento definitivo el factor α_{cc} relacionado con la verificación a largo plazo de los materiales se ha considerado de 0.85. Las características de sollicitación consideradas en los cálculos se resumen en la **Tabla 11.15**.

Las cargas presentadas en el apartado 11.5.1 se han considerado después en las siguientes combinaciones:

- Para la condición de estado límite ultimo (ELU):

Combinación de carga	1	2	3
Comb. 1	1.35	1.35	-
Comb. 2	1.35	-	1.35

Tabla 11.13: Combinación de carga ELU.

- Par la condición de estado límite de ejecución (ELS):

Combinación de carga	1	2	3
Comb. 3	1.00	1.00	-
Comb. 4	1.00	-	1.00

Tabla 11.14: Combinación de carga ELS.

Combinación	Revestimiento definitivo Cúpula (70 cm)				
		N [kN]	M [kNm]	V [kN]	e (M/N) [m]
ELU Comb.1	N _{max}	-6945.9	0.0	-169.4	0.000
	M _{max+}	-6033.2	523.3	7.2	-0.087
	M _{max-}	-6756.6	-408.4	-22.6	0.060
	M/N _{max+}	-6701.5	-405.5	5.9	0.061
	M/N _{max-}	-6033.2	523.3	7.2	-0.087
	$[M/(N-1.2*N_{max})]_{max+}$	-6033.2	523.3	7.2	-0.087
	$[M/(N-1.2*N_{max})]_{max-}$	-6814.7	-397.0	-22.6	0.058
	V _{max}	-6937.6	-85.3	169.4	0.012
ELU Comb.2	N _{max}	-9255.1	0.0	-411.2	0.000
	M _{max+}	-7025.9	1055.6	-19.7	-0.150
	M _{max-}	-6860.7	-1035.1	-106.4	0.151
	M/N _{max+}	-6859.1	-1035.1	23.5	0.151
	M/N _{max-}	-7025.9	1055.6	-19.7	-0.150
	$[M/(N-1.2*N_{max})]_{max+}$	-7070.4	1055.0	21.8	-0.149
	$[M/(N-1.2*N_{max})]_{max-}$	-8779.6	-639.8	-48.3	0.073
	V _{max}	-6840.7	-160.3	-533.0	0.023

Tabla 11.15: Características de sollicitación consideradas en los cálculos (Revestimiento. Final).

Los factores de eficiencia para los efectos de flexión (M) y esfuerzo normal (N) obtenidos para las secciones consideradas están contenidos en la tabla siguiente:

	Revestimiento definitivo Cúpula	
	Comb. 1 – ELU	Comb. 2 – ELU
	[-]	[-]
N_{max}	0.33	0.44
M_{max+}	0.39	0.57
M_{max-}	0.4	0.55
M/N_{max+}	0.39	0.55
M/N_{max-}	0.39	0.57
$[M/(N-1.2 \cdot N_{max})]_{max+}$	0.39	0.57
$[M/(N-1.2 \cdot N_{max})]_{max-}$	0.4	0.54
V_{max}	0.34	0.35

Tabla 11.16: Factores de eficiencia obtenidos en las verificaciones.

Las verificaciones realizadas resultan satisfactorias.

Se consideran las armaduras definida como cuantía mínima según EC2:

$$A_{s,min} = 0.26 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{y,k}} \cdot b_t \cdot d = 1650 \frac{mm^2}{m^l}$$

f_{ctm} Resistencia a la tracción hormigón (4.1 MPa para hormigón H 50/60)

$f_{y,k}$ Resistencia a tracción acero (420 MPa)

b_t Base sección resistente (1 m)

d Altura útil sección resistente ($d = 0.7 - 0.05 = 0.65$ m)

Armadura elegida:

$$a_s = 1884 \text{ mm}^2/\text{m}$$

Para los detalles de las verificaciones ver **Anexo N** (FAGUS).

11.6.2 Verificaciones estructurales para acción normal y acción flexional - ELS

Los factores parciales adoptados en las verificaciones al ELS están contenidos en la siguiente Tabla:

Límites de deformación			Factores de seguridad parciales			Inclinación de las bielas comprimidas	Factor de creep
ϵ_{c2} [‰]	ϵ_{cu3} [‰]	ϵ_{ud} [‰]	α_{cc} [-]	γ_c [-]	γ_s [-]	θ [°]	Φ [-]
-2.0	-3.5	20.0	1.00	1.00	1.00	45.0	2.00

Tabla 11.17 : Parámetros adoptados para las verificaciones al ELS.

La verificación según el EC2 se ha llevado a cabo verificando que:

- Las tensiones de compresión en el hormigón sean $\sigma_c < 0.6 \cdot f_{ck} = 30 \text{ MPa}$
- Las tensiones de tracción en el acero sean $\sigma_s < 0.8 \cdot f_{yk} = 336 \text{ MPa}$
- El ancho de las fisuras sea $w_k < 0.3 \text{ mm}$

Las características de sollicitación consideradas en los cálculos se resumen en las siguientes tablas. En la última columna de la tabla se indican las máximas deformaciones esperadas en los revestimientos bajo la acción de las cargas. La indicación de la deformada se reporta en el **Anexo N**.

Revestimiento definitivo Cúpula (70 cm)					
Combinación		N [kN]	M [kNm]	V [kN]	e (M/N) [m]
Comb. 3 ELS	N _{max}	-5145.1	0.0	-125.5	0.000
	M _{max+}	-4469.1	387.6	5.4	-0.087
	M _{max-}	-5004.9	-302.5	-16.8	0.060
	M/N _{max+}	-4964.0	-300.4	4.3	0.061
	M/N _{max-}	-4469.1	387.6	5.4	-0.087
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max+}	-4469.1	387.6	5.4	-0.087
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max-}	-5047.9	-294.1	-16.8	0.058
	V _{max}	-5145.1	0.0	-125.5	0.000
Comb. 4 ELS	N _{max}	-6855.6	0.0	-304.6	0.000
	M _{max+}	-5204.3	781.9	-14.6	-0.150
	M _{max-}	-5082.0	-766.7	-78.8	0.151
	M/N _{max+}	-5080.8	-766.7	17.4	0.151
	M/N _{max-}	-5204.3	781.9	-14.6	-0.150
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max+}	-5237.4	781.5	16.1	-0.149
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max-}	-6503.4	-473.9	-35.8	0.073
	V _{max}	-5067.2	-118.7	-394.8	0.023

Tabla 11.18: Características de sollicitación consideradas en los cálculos.

Revestimiento definitivo Cúpula (70 cm)											
Comb. 3 ELS			σ_c			σ_s			w_k		
N	M	V	Max	Limit	Check	Max	Limit	Check	Max	Limit	Check
[kN]	[kNm]	[kN]	[MPa]	[MPa]	[-]	[MPa]	[MPa]	[-]	[mm]	[mm]	[-]
-5145.1	0.0	-125.5	-6.6	-30.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.5	✓
-4469.1	387.6	5.4	-9.9	-30.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.5	✓
-5004.9	-302.5	-16.8	-9.7	-30.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.5	✓
-4964.0	-300.4	4.3	-9.7	-30.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.5	✓
-4469.1	387.6	5.4	-9.9	-30.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.5	✓
-4469.1	387.6	5.4	-9.9	-30.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.5	✓
-5047.9	-294.1	-16.8	-9.7	-30.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.5	✓
-5145.1	0.0	-125.5	-6.6	-30.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.5	✓

Tabla 11.19 : Verificación ELS.

Revestimiento definitivo Cúpula (70 cm)											
Comb. 4 ELS			σ_c			σ_s			w_k		
N	M	V	Max	Limit	Check	Max	Limit	Check	Max	Limit	Check
[kN]	[kNm]	[kN]	[MPa]	[MPa]	[-]	[MPa]	[MPa]	[-]	[mm]	[mm]	[-]
-6855.6	0.0	-304.6	-8.7	-30.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.5	✓
-5204.3	781.9	-14.6	-15.1	-30.0	✓	4.8	336.0	✓	0.01	0.5	✓
-5082.0	-766.7	-78.8	-14.7	-30.0	✓	7.2	336.0	✓	0.01	0.5	✓
-5080.8	-766.7	17.4	-14.7	-30.0	✓	5.4	336.0	✓	0.01	0.5	✓
-5204.3	781.9	-14.6	-15.1	-30.0	✓	4.8	336.0	✓	0.01	0.5	✓
-5237.4	781.5	16.1	-15.1	-30.0	✓	3.8	336.0	✓	0.00	0.5	✓
-6503.4	-473.9	-35.8	-13.5	-30.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.5	✓
-5067.2	-118.7	-394.8	-7.4	-30.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.5	✓

Tabla 11.20 : Verificación ELS.

Las verificaciones resultan totalmente cumplidas.

11.7 Verificación de los revestimientos definitivos de las paredes del pozo a largo plazo

11.7.1 Concepto de calculo

En el presente capítulo se describen los cálculos estáticos efectuados para los revestimientos definitivos de las paredes del pozo a largo plazo. Los revestimientos serán verificados en las condiciones que se consideran más desfavorables, en base a los conocimientos geológicos actualmente disponibles

Como se trata de la fase de Proyecto Preliminar los esquemas de armaduras consideradas en los cálculos se deben asumir como una indicación de las armaduras mínimas necesarias a flexocompresión. No se consideran la presencia de armaduras a corte y armaduras constructivas, porque simplemente se propone determinar las cantidades de armadura que se deben calcular y verificar la factibilidad de las soluciones constructivas propuestas.

El concepto que se adoptó para el análisis ha sido verificar si los revestimientos colocados en obra están en condiciones de soportar las cargas a las que están sometidos los sostenimientos. Se asume que a largo plazo los sostenimientos deban de resistir las cargas de la roca.

Como está previsto un sistema de drenaje continuo a lo largo de todo el laboratorio en los cálculos no se ha tomado en cuenta la carga hidráulica externa sobre los revestimientos.

Las cargas que se asumen para la verificación de la sección son las siguientes:

- 1) Presión del macizo rocoso (bloque lateral 90°) calculado por medio análisis con UNWEDGE resultando una presión $p=140\text{kPa}$ (**Figura 11.7**). Los detalles de los cálculos se muestran en el **Anexo O y P**.

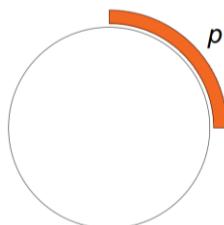


Figura 11.7: Esquema de la carga correspondiente a la presencia de un bloque lateral de 90°.

- 2) Presión del macizo rocoso (bloque lateral 45°) $p=140\text{kPa}$ (**Figura 11.8**). Los detalles de los cálculos se muestran en el **Anexo P**.

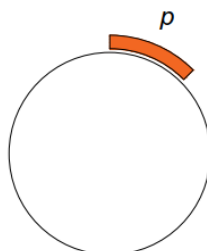


Figura 11.8: Esquema de la carga correspondiente a la presencia de un bloque lateral de 45°.

- 3) Presión del macizo rocoso (bloque lateral 180°) $p=140\text{kPa}$ (**Figura 11.9**). Los detalles de los cálculos se muestran en el **Anexo P**.

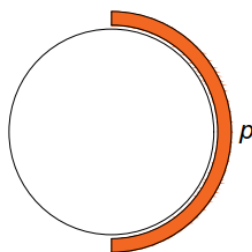


Figura 11.9: Esquema de la carga correspondiente a la presencia de un bloque lateral de 180°.

- 4) Presión del macizo rocoso (bloque lateral 22.5°) $p=140\text{kPa}$ (**Figura 11.10**). Los detalles de los cálculos se muestran en el **Anexo P**.

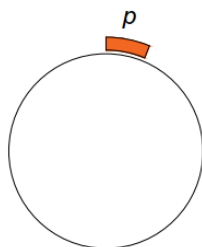


Figura 11.10: Esquema de la carga correspondiente a la presencia de un bloque lateral de 22.5°.

- 5) Presión del agua interna al pozo (Hidrostática) $p_w=0\text{-}250\text{kPa}$ (**Figura 11.11**).

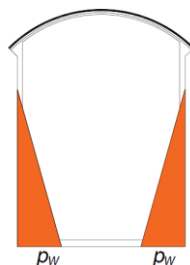


Figura 11.11: Esquema de la carga correspondiente a presión hidrostática interna.

Para los cálculos se han considerado revestimiento definitivo de 70 cm de espesor en hormigón (clase C30/37) armado ($\varnothing 20 @ 150\text{mm}$);

Análisis	E (GPa)	Radio (m)	Rigidez resorte (MN/m)	Espesor revestimiento (m)	Modulo deformabilidad hormigón (GPa)
Pozo paredes	8.80	16.00	276.4.9	0.70	33

Tabla 11.21: rigidez de los resortes adoptados en los cálculos.

En los cálculos estáticos se ha considerado una rigidez flexional de los elementos estructurales (E·J) de 50% para considerar la presencia de una micro-fisura en el interior de los revestimientos mismos que reduce precisamente su rigidez flexional.

11.8 Verificaciones estructurales paredes a largo plazo

11.8.1 Verificaciones estructurales para acción normal y acción flexional - ELU

La verificación estructural de los revestimientos se ha evaluado comparando la resistencia de proyecto de la sección con las acciones de cálculo consideradas. Los detalles de las verificaciones efectuados se informan en el **Anexo x**. Los factores parciales adoptados en las verificaciones del SLU están contenidos en la siguiente Tabla 9.5:

Límites de deformación			Factores de seguridad parciales			Inclinación de las bielas comprimidas
ε_{c2} [‰]	ε_{cu3} [‰]	ε_{ud} [‰]	α_{cc} [-]	γ_c [-]	γ_s [-]	θ [°]
-2.0	-3.5	20.0	0.85	1.50	1.15	45.0

Tabla 11.22: Parámetros adoptados para las verificaciones del SLU

Tratándose de un revestimiento definitivo el factor α_{cc} relacionado con la verificación a largo plazo de los materiales se ha considerado de 0.85. Las características de sollicitación consideradas en los cálculos se resumen en la **Tabla 11.15**.

Las cargas presentadas en el **Anexo x** se han considerado después en las siguientes combinaciones:

- Para la condición de estado limite ultimo (ELU):

Combinación de carga	1	2	3	4	5
Comb. 1	1.35	-	-	-	-
Comb. 2	-	1.35	-	-	-
Comb. 3	-	-	1.35	-	-
Comb. 4	-	-	-	1.35	-
Comb. 5	-	-	-	-	1.35

Tabla 11.23: Combinación de carga ELU.

- Par la condición de estado límite de ejecución (ELS):

Combinación de carga	1	2	3	4	5
Comb. 6	1.00	-	-	-	-
Comb. 7	-	1.00	-	-	-
Comb. 8	-	-	1.00	-	-
Comb. 9	-	-	-	1.00	-
Comb. 10	-	-	-	-	1.00

Tabla 11.24: Combinación de carga ELS.

Combinación	Revestimiento definitivo paredes pozo (70 cm)				
		N [kN]	M [kNm]	V [kN]	e (M/N) [m]
ELU Comb.1	N _{max}	-2962.6	119.24	0.964	-0.0402
	M _{max+}	-2962.6	125.45	0.964	-0.0423
	M _{max-}	-2935.28	-217.71	-10.76	0.0742
	M/N _{max+}	-2931.54	-217.71	78.21	0.0743
	M/N _{max-}	-2962.6	125.45	0.964	-0.0423
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max+}	-2962.6	125.45	0.964	-0.0423
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max-}	-2935.28	-217.71	-10.76	0.0742
	V _{max}	-2926	-178.4	106.01	0.0610
ELU Comb.2	N _{max}	-2457.48	-385.04	-115.93	0.1567
	M _{max+}	-2425.25	449.78	0.008	-0.1855
	M _{max-}	-2457.41	-462.77	-38.71	0.1883
	M/N _{max+}	-2454.84	-462.77	-38.51	0.1885
	M/N _{max-}	-2425.25	449.78	0.008	-0.1855
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max+}	-2425.25	449.78	0.008	-0.1855
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max-}	-2457.41	-462.77	-38.71	0.1883
	V _{max}	-2450.21	-288.07	222.592	0.1176
ELU Comb.3	N _{max}	-3033.93	-16.56	-0.1	0.0055
	M _{max+}	-3003.22	26.02	-0.28	-0.0087
	M _{max-}	-2971.16	-79.27	12.91	0.0267
	M/N _{max+}	-2971.16	-79.27	12.91	0.0267
	M/N _{max-}	-3003.22	26.02	-0.28	-0.0087
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max+}	-3004.99	26	0.33	-0.0087
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max-}	-2971.81	-79.27	-23.338	0.0267
	V _{max}	-2965.64	-55.11	39.16	0.0186
ELU Comb.4	N _{max}	-2505.34	-584.47	-53.8	0.2333
	M _{max+}	-2431.37	896.06	0.008	-0.3685
	M _{max-}	-2505.34	-611.52	-53.8	0.2441
	M/N _{max+}	-2502.99	-611.5	-24.88	0.2443
	M/N _{max-}	-2431.37	896.06	0.008	-0.3685
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max+}	-2431.37	896.06	0.008	-0.3685
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max-}	-2505.34	-611.52	-53.8	0.2441
	V _{max}	-2478.06	143.05	-446.04	-0.0577
ELU Comb.5	N _{max}	758.72	6.92	0.162	0.0091
	M _{max+}	763.17	7.17	0.028	0.0094
	M _{max-}	758.72	-3.7	0.162	-0.0049
	M/N _{max+}	758.82	7.13	0.012	0.0094
	M/N _{max-}	758.72	-3.7	0.162	-0.0049
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max+}	763.25	-3.66	-0.29	-0.0048
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max-}	763.22	7.17	-0.058	0.0094
	V _{max}	763.25	7.07	-0.29	0.0093

Tabla 11.25: Características de sollicitación consideradas en los cálculos (Revestimiento Final).

Los factores de eficiencia para los efectos de flexión (M) y esfuerzo normal (N) obtenidos para las secciones consideradas están contenidos en la tabla siguiente:

	Revestimiento definitivo paredes pozo				
	Comb. 1 – ELU	Comb. 2 – ELU	Comb. 3 – ELU	Comb. 4 – ELU	Comb. 5 – ELU
	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
N_{max}	0.27	0.33	0.24	0.46	0.85
M_{max+}	0.27	0.37	0.24	0.9	0.86
M_{max-}	0.3	0.38	0.26	0.48	0.84
M/N_{max+}	0.3	0.38	0.26	0.48	0.85
M/N_{max-}	0.27	0.37	0.24	0.9	0.84
$[M/(N-1.2*N_{max})]_{max+}$	0.27	0.37	0.24	0.9	0.85
$[M/(N-1.2*N_{max})]_{max-}$	0.3	0.38	0.26	0.48	0.86
V_{max}	0.28	0.29	0.25	0.24	0.86

Tabla 11.26: Factores de eficiencia obtenidos en las verificaciones.

Las verificaciones realizadas resultan satisfactorias.

Se consideran las armaduras definida como cuantía mínima según EC2:

$$A_{s,min} = 0.26 \cdot \frac{f_{ctm}}{f_{y,k}} \cdot b_t \cdot d = 1650 \frac{mm^2}{m^l}$$

f_{ctm} Resistencia a la tracción hormigón (4.1 MPa para hormigon H 50/60)

$f_{y,k}$ Resistencia a tracción acero (420 MPa)

b_t Base sección resistente (1 m)

d Altura útil sección resistente ($d = 0.7 - 0.05 = 0.65$ m)

Armadura elegida:

$$a_s = 1884 \text{ mm}^2/\text{m}$$

Para los detalles de las verificaciones ver **Anexo P** (FAGUS).

11.8.2 Verificaciones estructurales para acción normal y acción flexional - ELS

Los factores parciales adoptados en las verificaciones al ELS están contenidos en la siguiente Tabla:

Límites de deformación			Factores de seguridad parciales			Inclinación de las bielas comprimidas	Factor de creep
ε_{c2} [‰]	ε_{cu3} [‰]	ε_{ud} [‰]	α_{cc} [-]	γ_c [-]	γ_s [-]	θ [°]	Φ [-]
-2.0	-3.5	20.0	1.00	1.00	1.00	45.0	2.00

Tabla 11.27 : Parámetros adoptados para las verificaciones al ELS.

La verificación según el EC2 se ha llevado a cabo verificando que:

- Las tensiones de compresión en el hormigón sean $\sigma_c < 0.6 \cdot f_{ck} = 30 \text{ MPa}$
- Las tensiones de tracción en el acero sean $\sigma_s < 0.8 \cdot f_{yk} = 336 \text{ MPa}$
- El ancho de las fisuras sea $w_k < 0.3 \text{ mm}$

Las características de sollicitación consideradas en los cálculos se resumen en las siguientes tablas. En la última columna de la tabla se indican las máximas deformaciones esperadas en los revestimientos bajo la acción de las cargas. La indicación de la deformada se reporta en el **Anexo P**.

Combinación	Revestimiento definitivo paredes pozo (70 cm)				
		N [kN]	M [kNm]	V [kN]	e (M/N) [m]
Comb. 6 ELS	N _{max}	-2194.5	88.3	0.7	-0.040
	M _{max+}	-2194.5	92.9	0.7	-0.042
	M _{max-}	-2174.3	-161.3	-8.0	0.074
	M/N _{max+}	-2171.5	-161.3	57.9	0.074
	M/N _{max-}	-2194.5	92.9	0.7	-0.042
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max+}	-2194.5	92.9	0.7	-0.042
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max-}	-2174.3	-161.3	-8.0	0.074
	V _{max}	-2167.4	-132.2	78.5	0.061
Comb. 7 ELS	N _{max}	-1820.4	-285.2	-85.9	0.157
	M _{max+}	-1796.5	333.2	0.0	-0.185
	M _{max-}	-1820.3	-342.8	-28.7	0.188
	M/N _{max+}	-1818.4	-342.8	-28.5	0.189
	M/N _{max-}	-1796.5	333.2	0.0	-0.185
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max+}	-1796.5	333.2	0.0	-0.185
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max-}	-1820.3	-342.8	-28.7	0.188
	V _{max}	-1815.0	-213.4	164.9	0.118
Comb. 8 ELS	N _{max}	-2247.4	-12.3	-0.1	0.005
	M _{max+}	-2224.6	19.3	-0.2	-0.009
	M _{max-}	-2200.9	-58.7	9.6	0.027
	M/N _{max+}	-2200.9	-58.7	9.6	0.027
	M/N _{max-}	-2224.6	19.3	-0.2	-0.009
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max+}	-2225.9	19.3	0.2	-0.009
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max-}	-2201.3	-58.7	-17.3	0.027
	V _{max}	-2196.8	-40.8	29.0	0.019
Comb. 9 ELS	N _{max}	-1855.8	-432.9	-39.9	0.233
	M _{max+}	-1801.0	663.8	0.0	-0.369
	M _{max-}	-1855.8	-453.0	-39.9	0.244
	M/N _{max+}	-1854.1	-453.0	-18.4	0.244
	M/N _{max-}	-1801.0	663.8	0.0	-0.369
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max+}	-1801.0	663.8	0.0	-0.369
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max-}	-1855.8	-453.0	-39.9	0.244
	V _{max}	-1835.6	106.0	-330.4	-0.058
Comb. 10 ELS	N _{max}	562.0	5.1	0.1	0.009
	M _{max+}	565.3	5.3	0.0	0.009
	M _{max-}	562.0	-2.7	0.1	-0.005
	M/N _{max+}	562.1	5.3	0.0	0.009
	M/N _{max-}	562.0	-2.7	0.1	-0.005
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max+}	565.4	-2.7	-0.2	-0.005
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max-}	565.3	5.3	0.0	0.009
	V _{max}	565.4	5.2	-0.2	0.009

Tabla 11.28: Características de sollicitación consideradas en los cálculos.

En las siguientes tablas se muestran las verificaciones para las combinaciones de carga 9 y 10 (más significativas) para las demás verificaciones.

Revestimiento definitivo paredes pozo (70 cm)											
Comb. 9 ELS			σ_c			σ_s			w_k		
N	M	V	Max	Limit	Check	Max	Limit	Check	Max	Limit	Check
[kN]	[kNm]	[kN]	[MPa]	[MPa]	[-]	[MPa]	[MPa]	[-]	[mm]	[mm]	[-]
-1855.8	-432.9	-39.9	-8.1	-18.0	✓	72.5	336.0	✓	0.10	0.50	✓
-1801.0	663.8	0.0	-13.1	-18.0	✓	286.9	336.0	✓	0.41	0.50	✓
-1855.8	-453.0	-39.9	-8.5	-18.0	✓	86.2	336.0	✓	0.12	0.50	✓
-1854.1	-453.0	-18.4	-8.5	-18.0	✓	83.6	336.0	✓	0.12	0.50	✓
-1801.0	663.8	0.0	-13.1	-18.0	✓	286.9	336.0	✓	0.41	0.50	✓
-1801.0	663.8	0.0	-13.1	-18.0	✓	286.9	336.0	✓	0.41	0.50	✓
-1855.8	-453.0	-39.9	-8.5	-18.0	✓	86.2	336.0	✓	0.12	0.50	✓
-1835.6	106.0	-330.4	-3.2	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.50	✓

Revestimiento definitivo paredes pozo (70 cm)											
Comb. 10 ELS			σ_c			σ_s			w_k		
N	M	V	Max	Limit	Check	Max	Limit	Check	Max	Limit	Check
[kN]	[kNm]	[kN]	[MPa]	[MPa]	[-]	[MPa]	[MPa]	[-]	[mm]	[mm]	[-]
562.0	5.1	0.1	0.0	-18.0	✓	230.5	336.0	✓	0.33	0.50	✓
565.3	5.3	0.0	0.0	-18.0	✓	232.0	336.0	✓	0.33	0.50	✓
562.0	-2.7	0.1	0.0	-18.0	✓	227.3	336.0	✓	0.32	0.50	✓
562.1	5.3	0.0	0.0	-18.0	✓	230.7	336.0	✓	0.33	0.50	✓
562.0	-2.7	0.1	0.0	-18.0	✓	227.3	336.0	✓	0.32	0.50	✓
565.4	-2.7	-0.2	0.0	-18.0	✓	228.6	336.0	✓	0.33	0.50	✓
565.3	5.3	0.0	0.0	-18.0	✓	232.0	336.0	✓	0.33	0.50	✓
565.4	5.2	-0.2	0.0	-18.0	✓	232.0	336.0	✓	0.33	0.50	✓

Tabla 11.29 : Verificación ELS.

Las verificaciones resultan totalmente cumplidas

11.9 Verificación Sísmica de los sostenimientos previstos para el pozo

11.9.1 Concepto de cálculo

Las solicitaciones sísmicas resultantes de las fórmulas presentadas en el Apartado 10.3 están contenidas en el **Anexo Q** para los casos considerados.

Las verificaciones estructurales se realizaron combinando las acciones estáticas derivadas de las presiones del macizo rocoso como descriptas en el Apartado 11.7.1 (determinadas con los factores de amplificación de las cargas equivalente a 1) con las sísmicas, según los siguientes criterios:

- Las solicitaciones sísmicas (acción axial y momento) consideradas en las verificaciones son las máximas obtenidas con las diversas formulaciones;
- para todas las combinaciones estáticas, el signo del momento flector sísmico se ha elegido a fin de incrementar, en valor absoluto, el momento flector estático;
- para la combinación estática que proporciona la máxima acción axial de compresión, la acción axial sísmica se ha considerado de compresión. Para las otras combinaciones estáticas, la acción axial sísmica ha sido considerada tanto de interacción (reducción de la compresión estática) como de compresión (aumento de la compresión estática).

11.9.2 Secciones resistentes consideradas

Las características de las secciones resistentes analizadas para cada caso son las mismas que se usaron para las verificaciones estáticas en estado límite último (ELU) y en estado límite de servicio (ELS) de los revestimientos definitivos para cada parte del Laboratorio.

Dado el nivel de proyecto preliminar las armaduras se deben considerar como indicativas de las cuantías mínimas que se deben prever en las fases de cómputo de las secciones. Verificaciones y cálculos más detallados se requieren en las sucesivas fases de proyecto.

11.9.3 Factores de cálculo adoptados en las verificaciones

La verificación estructural de los revestimientos se ha evaluado comparando la resistencia de proyecto de la sección con las acciones de cálculo consideradas. Los detalles de las verificaciones se encuentran en el **Anexo R**.

Los factores parciales adoptados en las verificaciones en caso de presencia de armaduras están contenidos en la siguiente Tabla 11.30 Tabla 10.2.

Límites de las tensiones σ_s [N/mm ²]	Factores de seguridad parciales			Inclinación de las bielas comprimidas θ [°]	Factor de creep Φ [-]
	α_{cc} [-]	γ_c [-]	γ_s [-]		
420.0	1.00	1.00	1.00	45.0	2.00

Tabla 11.30: Parámetros adoptados para las verificaciones sísmicas en caso de presencia de armadura

En cambio, en caso de ausencia de armaduras los factores parciales que se asumen son los siguientes (Tabla 11.31):

Límites de deformación			Factores de seguridad parciales			Inclinación de las bielas comprimidas	Factor de creep
ε_{c2} [‰]	ε_{cu3} [‰]	ε_{ud} [‰]	α_{cc} [-]	γ_c [-]	γ_s [-]	θ [°]	Φ [-]
-2.0	-3.5	20.0	1.00	1.00	1.00	45.0	2.00

Tabla 11.31: Parámetros adoptados para las verificaciones sísmicas en caso de ausencia de armadura.

La combinación de carga consideradas para las verificaciones sísmicas de los revestimientos de las paredes es indicada en la siguiente tabla:

Combinación de carga	1	2	3	4	5
Comb. 1 - ELU-SISMO	1.00	-	-	-	-
Comb. 2 - ELU-SISMO	-	1.00	-	-	-
Comb. 3 - ELU-SISMO	-	-	1.00	-	-
Comb. 4 - ELU-SISMO	-	-	-	1.00	-
Comb. 5 - ELU-SISMO	-	-	-	-	1.00

Tabla 11.32: Combinación de carga ELU-SISMO.

11.10 Verificación Pozo – Sismo TS

En las siguientes tablas, para cada una de las secciones consideradas, se informan las características de sollicitación consideradas en las verificaciones y las correspondientes tasas de explotación (E_{eff}) obtenidas.

Revestimiento definitivo paredes pozo					
Solicitaciones sísmicas					
		N [kN]	M [kNm]	V [kN]	e (M/N) [m]
Comb. 1 - ELU-SISMO	N _{max}	-8930.22	146.73	0.7	-0.040
	M _{max+}	-8930.22	151.33	0.7	-0.042
	M _{max-}	-8909.98	-219.67	-8.0	0.074
	M/N _{max+}	-8907.21	-219.66	57.9	0.074
	M/N _{max-}	-8930.22	151.33	0.7	-0.042
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max+}	-8930.22	151.33	0.7	-0.042
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max-}	-8909.98	-219.67	-8.0	0.074
	V _{max}	-8903.11	-190.55	78.5	0.061
		N [kN]	M [kNm]	V [kN]	e (M/N) [m]
Comb. 2 - ELU-SISMO	N _{max}	-8556.06	-343.61	-85.9	0.157
	M _{max+}	-8532.18	391.57	0.0	-0.185
	M _{max-}	-8556	-401.19	-28.7	0.188
	M/N _{max+}	-8554.1	-401.19	-28.5	0.189
	M/N _{max-}	-8532.18	391.57	0.0	-0.185
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max+}	-8532.18	391.57	0.0	-0.185
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max-}	-8556	-401.19	-28.7	0.188
	V _{max}	-8550.67	-271.78	164.9	0.118
		N [kN]	M [kNm]	V [kN]	e (M/N) [m]
Comb. 3 - ELU-SISMO	N _{max}	-8983.1	-70.67	-0.1	0.005
	M _{max+}	-8960.31	77.67	-0.2	-0.009
	M _{max-}	-8936.56	-117.12	9.6	0.027
	M/N _{max+}	-8936.56	-117.12	9.6	0.027
	M/N _{max-}	-8960.31	77.67	-0.2	-0.009
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max+}	-8961.62	77.66	0.2	-0.009
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max-}	-8937.04	-117.12	-17.3	0.027
	V _{max}	-8932.47	-99.22	29.0	0.019
		N [kN]	M [kNm]	V [kN]	e (M/N) [m]
Comb. 4 - ELU-SISMO	N _{max}	-8591.51	-491.34	-39.9	0.233
	M _{max+}	-8536.72	722.15	0.0	-0.369
	M _{max-}	-8591.51	-511.38	-39.9	0.244
	M/N _{max+}	-8589.76	-511.36	-18.4	0.244
	M/N _{max-}	-8536.72	722.15	0.0	-0.369
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max+}	-8536.72	722.15	0.0	-0.369
	[M/(N-1.2*N _{max})] _{max-}	-8591.51	-511.38	-39.9	0.244
	V _{max}	-8571.3	164.36	-330.4	-0.058
		N [kN]	M [kNm]	V [kN]	e (M/N) [m]
Comb. 5 - ELU-SISMO	N _{max}	-6173.69	63.53	0.1	0.009
	M _{max+}	-6170.39	63.71	0.0	0.009
	M _{max-}	-6173.69	-61.14	0.1	-0.005

	$M/N_{\max+}$	-6173.61	63.68	0.0	0.009
	$M/N_{\max-}$	-6173.69	-61.14	0.1	-0.005
	$[M/(N-1.2*N_{\max})]_{\max+}$	-6170.33	-61.11	-0.2	-0.005
	$[M/(N-1.2*N_{\max})]_{\max-}$	-6170.36	63.71	0.0	0.009
	V_{\max}	-6170.33	63.63	-0.2	0.009

*los valores indicados corresponden al incremento máximo de esfuerzo normal, para los detalles de los outputs de todos los métodos de cálculos detallados en el párrafo 10.3 ver el **ANEXO Q**.

Tabla 11.33: Características de sollicitación consideradas en las verificaciones.

Los factores de eficiencia para los efectos de flexión (M) y esfuerzo normal (N) obtenidos para las secciones consideradas están contenidos en la tabla siguiente:

	revestimiento final				
	Comb. 1 – ELU-SISMO	Comb. 2 – ELU-SISMO	Comb. 3 – ELU-SISMO	Comb. 4 – ELU-SISMO	Comb. 5 – ELU-SISMO
	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
N_{\max}	0.74	0.77	0.72	0.82	0.5
$M_{\max+}$	0.74	0.78	0.72	0.89	0.5
$M_{\max-}$	0.76	0.79	0.73	0.83	0.5
$M/N_{\max+}$	0.76	0.79	0.73	0.83	0.5
$M/N_{\max-}$	0.74	0.78	0.72	0.89	0.5
$[M/(N-1.2*N_{\max})]_{\max+}$	0.74	0.78	0.72	0.89	0.5
$[M/(N-1.2*N_{\max})]_{\max-}$	0.76	0.79	0.73	0.83	0.5
V_{\max}	0.75	0.75	0.73	0.72	0.5

Tabla 11.34: Factores de eficiencia obtenidos para los análisis efectuados.

Para todos los casos considerados los factores de eficiencia en los revestimientos, se mantienen por debajo del valor límite de 1.0 indicando que las soluciones propuestas son adecuadas.

12. CONCLUSIONES

El presente informe describe las verificaciones y las consideraciones efectuadas en el ámbito de la fase de Ingeniería Básica de Anteproyecto para el Laboratorio Subterráneo Andes (*Agua Negra Deep Experiment Site*) entre Chile y Argentina.

Todas las consideraciones que se hacen parten de los datos de base disponibles, constituidos por el modelo geológico redactado en la fase de Ingeniería Básica y la correspondiente caracterización geotécnica de las formaciones rocosas encontradas.

A partir de estas bases el proyectista ha definido un proyecto basado en la aplicación de tecnologías simples y comprobadas, tratando de reducir costos y tiempos de realización de la obra con el objetivo irrenunciable de un adecuado grado de seguridad en el ámbito de las hipótesis de base formuladas.

Para todos los elementos que constituyen el Laboratorio (túneles, cavernas y pozo), se ha efectuado una serie de verificaciones para determinar la aplicabilidad de los sostenimientos preliminares y definitivos propuestos.

Para la verificación de los sostenimientos propuestos se han analizado las condiciones mínimas, en el estado actual de los conocimientos, para la factibilidad en función de la cobertura y de condiciones del macizo rocoso.

En base a los resultados de los análisis efectuados se ha definido un criterio de aplicabilidad de las diferentes clases de sostenimiento en base la calidad de la roca.

Una vez definidos los cálculos estáticos de las estructuras se han realizado verificaciones considerando la acción sísmica.

Como dato sísmico de base se asume lo que se describe en el trabajo desarrollado por la Consultora WA, entregado por el Comitente, que llevó a cabo un estudio de detalle con definición de las aceleraciones características en el suelo considerando dos sismos de referencia: un sismo denominado terremoto de Operación Normal (TON), con tiempo de retorno de 144 años, para el cual se requiere que la estructura no sufra daños graves y pueda conservar su funcionalidad, y un sismo denominado Terremoto de Seguridad (TS), con un tiempo de retorno de 2475 años, para el cual se admiten daños graves en la estructura que impliquen también la reconstrucción de amplios tramos, pero no el colapso total de la obra.

Para el sismo TS se han realizado, para cada una de las secciones típicas previstas, verificaciones estructurales simplificadas basadas en la teoría de la distorsión inducida por las ondas sísmicas formulada por Hashash.

Por lo que se refiere a la resistencia al fuego de las estructuras no se han presentado verificaciones específicas. La evaluación del impacto de un eventual incendio deberá ser verificada en las siguientes etapas de diseño teniendo en cuenta la diferente exposición al riesgo de las diferentes partes del Laboratorio.

Túneles y cavernas se han considerado drenantes, tanto en los sostenimientos primarios como en los definitivos. En las sucesivas fases de proyecto y en particular en la fase de construcción se debe prestar gran atención a los afloramientos de agua durante las fases de excavación.

Las Cavernas principal y secundaria serán excavada después de la realización de los túneles de acceso salida y conexión. La excavación, debido al gran tamaño de las secciones, se ha previsto por etapas, es decir se deberán realizar túneles de acceso a la calota y sucesivas excavaciones hacia la parte de la solera con instalación progresiva de los revestimientos previsto. Todas las obras han sido verificadas para el corto y largo plazo y considerando los efectos del sismo.

Se ha supuesto que el pozo, luego de la realización de la cúpula, se excavará en drill&blast desde arriba hacia abajo y que se realice un pozo central (diámetro 3.0m) con la técnica tipo raise-drill que permita la gestión del material de excavación desde el túnel de acceso al fondo del pozo. Durante la excavación el pozo será drenado, se prevé un sistema de drenaje también a largo plazo así que no se han considerados presiones externas de aguas en el revestimiento interno por lo cual se han considerado las solicitaciones que derivan de la carga interna de agua y de las solicitaciones sísmica, para la cual se han efectuado verificaciones estructurales específicas.

La necesidad de profundizar los conocimientos geológico - geotécnicos vale en todo caso para todo el trazado del túnel Agua Negra y también en el caso del Laboratorio Andes. Esta profundización se deberá realizar gradualmente en las sucesivas fases de proyecto y también en el curso de la obra, con la aplicación sistemática del relevamiento geológico de las condiciones de los frentes de excavación para controlar la correspondencia con las condiciones previstas, y en los tramos críticos con sistemáticas perforaciones de sondeo en el frente.

Así como indicado en el informe geológico y en el presente informe, teniendo en cuenta las incertidumbres en la caracterización geomecánica de la zona de excavación del Laboratorio, será necesario realizar antes de empezar las operaciones de excavación sondeos horizontales desde el túnel para confirmar la hipótesis de base asumida en el diseño de las excavaciones y sostenimientos presentados.

Minusio, Mayo de 2019

Ing. Giovanni Como

Ing. Gabriele Gubler

PhD Ing. Antonio Logarzo

Ing. Raffaele Poggiati

Ing. Davide Vietti

13. BIBLIOGRAFIA

1. Bustamante, M., Doix, B. (1985) "Une méthode pour le calcul des tirants et des micropieux injectés"
2. Li, C., Håkansson, U. (1999) "Performance of the Swellex bolt in hard and soft rocks"
3. Lombardi, G. (1973) "Dimensionamiento del revestimiento de tuneles"
4. Lombardi, G. (1973) "Nuevos conceptos acerca de la estatica de los tuneles"
5. Lombardi, G. (1974) "Nociones generales sobre la estatica de los tuneles"
6. Amberg, F. (2011) "For a correct interpretation of the ground reaction curves"
7. Sulem, J. et al. (1987) "Closure Analysis in Deep Túnels"
8. Theiler, A. et al. (2013) "Gotthard Base túnel, sector Sedrun - real scale testing of gliding steel ring beams"
9. AFPS/AFTES. *Guidelines on Earthquake Design and Protection of Underground Structures*. Version 1, 15 May 2001
10. Penzien, J., Wu, C., 1998. *Stresses in linings of bored túnels*. Int J. Earthquake Eng. Struct. Dyn. 27, 283-300.
11. Penzien, J., 2000. *Seismically –induced racking of túnel linings*. Int J. Earthquake Eng. Struct. Dyn. 29, 683-691.
12. St. John, C.M., Zahrah, T.F., 1987. *Aseismic design of underground structures*. Túneling Underground Space Technol. 2 (2), 165-197.
13. U.S. Federal Highway association. *Seismic Retrofitting Manuals For Highway Systems*. Chapter 4 - Túnels
14. Wang, J.-N., 1993. *Seismic Design of Túnels: A State-of-the-Art Approach*, Monograph, monograph 7. Parsons, Brinckerhoff, Quade and Douglas Inc, New Bork.
15. Bobet, A., 2003 Effect of pore water pressure on túnel support during static and seismic loading, Túneling and Underground Space Technology, 18, 377-393
16. Hashash, M. A. B., Park, D., Bao, J. I.-C., 2005, Ovaling deformations of circular túnels under seismic loading, an update on seismic design and analysis of underground structures, Túneling and Underground Space Technology, 20 (5), 435-441
17. Anagnostou, G., Serafeimidis, K. (2007): "The dimensioning of túnel face reinforcement".
18. Hoek, E., Brown, E.T. (1980) "Underground excavations in rock".
19. Richtlinien für das Entwerfen von Bahnanlagen an Hochleistungsstrecken – Anlage 4 - Baulicher Brandschutz – Objektschutz – in unterirdischen Verkehrsbauten von Eisenbahn-Hochleistungsstrecken.
20. Bray, J. D., Travarasrou, T., 2009 Pseudostatic Coefficient for Use in Simplified Seismic Slope Stability Evaluation
21. Amberg, W., Russo, M. 2001, "Seismic Design of underground structures - The Bolu Túnel",

22. Amberg, W., Russo, M. and Germani, G. 2002, "Design and construction of large túnel through active faults: A Recent Application" DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO CIVIL
23. Ubicación y conexión con el Túnel de Agua Negra

Anexo A

Galería de entrada y salida

INPUT

Roof of section	
Radius	3.55 [m]

Rock	
Unit weight	27.0 [kN/m ³]
Overburden	1750.00 [m]
Coefficient K	1.00 [-]
Friction	53.3 [°]
SF Friction	1.25 [-]
Cohesion	0.0 [kPa]
SF Cohesion	1.00 [-]

Friction	47.0 [°]
Cohesion	0.0 [kPa]

Earthquake	
kV	0.00 [-]

Water	
Unit weight	10.0 [kN/m ³]
Head	0.00 [m]
Water coeff top	0.00 [-]
Water coeff bottom	0.00 [-]

Shotcrete	
Thickness	5 [cm]
Unit weight	25.0 [kN/m ³]
Shear strength	1.1 [MPa]
Compressive strength	20.0 [MPa]
SF	1.50 [-]
Thickness (arch effect)	0.00 [cm]

Shear force	36.7 [kN/m]
Axial force	0.0 [kN/m]
Normal stress	0.0 [MPa]

Anchor	
Bar diameter	25 [mm]
Yielding	499 [MPa]
SF	1.35 [-]
in plane	2.00 [m]
out of plane	2.00 [m]
Anchor length	3.0 [m]
Boring diameter	50 [mm]
Bond strength	1.000 [MPa]

Anchoring length	1.6 [m]
Force	181.5 [kN]
A	4.0 [m ²]
Pressure	45.4 [kPa]
R1	5.0 [m]
R2	6.6 [m]

CONTROLS

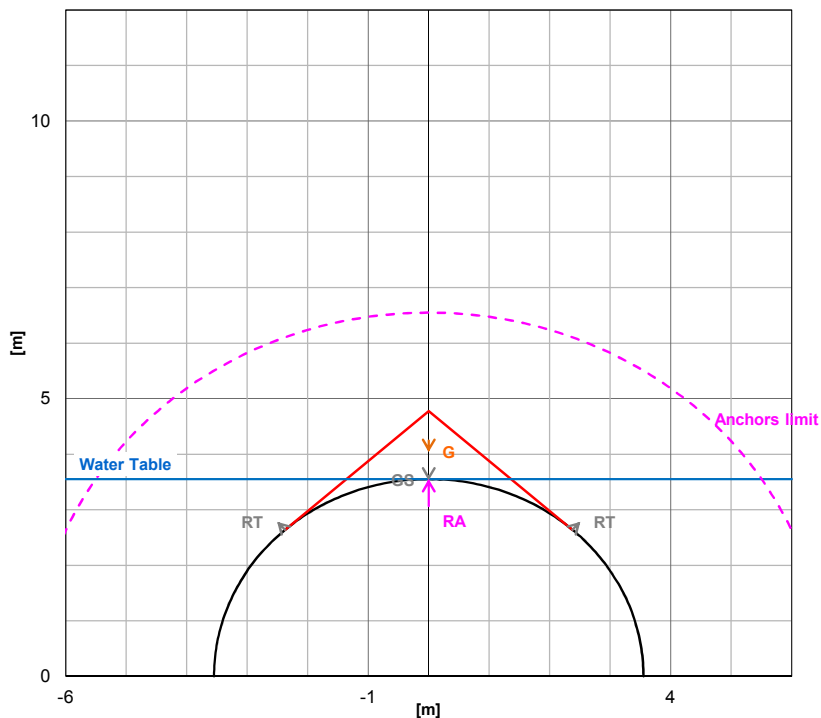
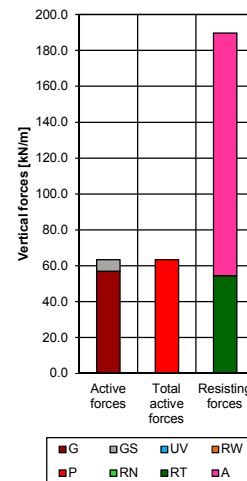
Shotcrete	d_arch < d_actual ... - 5 cm	
	Normal stress < 10 MPa	

Anchors	Lopt	4.0 [m]	
	Lmin	3.2 [m]	WARNING: bolt length is quite short
	Lmax	4.8 [m]	
	L_anchoring < L_bolt		

Bearing factor	SF_min	3.0 [-]	Bearing capacity > 1 OK
----------------	--------	---------	-------------------------

CALCULATION RESULTS - DETERMINANT WEDGE

Geometry	alfa	Critical [-]	Wedge top angle (graphic)
	alfa	48 [°]	Wedge top angle (critical value)
	alfa	52 [°]	Wedge top angle (user defined value)
	H	1.23 [m]	Wedge height
	h*	1.23 [m]	Wedge height limited by ground level
Active forces	G	56.9 [kN/m]	Wedge weight [vertical direction, + downward]
	N	86612.8 [kN/m]	Total field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U	0.0 [kN/m]	Water pressure [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U _v	0.0 [kN/m]	Water pressure [vertical direction, + downward]
	N'	86612.8 [kN/m]	Effective field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	T _c	0.0 [kN/m]	Cohesive resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	T _f	92959.9 [kN/m]	Friction resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	R _w	0.0 [kN/m]	N' + T _c + T _f resultant [vertical direction, + upward, 0 if downward]
	G _s	6.5 [kN/m]	Shotcrete weight [vertical direction, + downward]
	P	63.5 [kN/m]	Total active forces $G + G_s + 2 \cdot U_v - 2 \cdot R_w$ [vertical direction, + downward, 0 if upward]
Resisting forces	R _N	0.0 [kN/m]	Shotcrete compressive strength [vertical direction, + upward]
	R _T	54.5 [kN/m]	Shotcrete shear strength [vertical direction, + upward]
	A	135.2 [kN/m]	Anchor resistance [vertical direction, + upward]
	R	189.7 [kN/m]	Total resisting forces $R_N + R_T + A$ [vertical direction, + upward]
Bearing factor	SF	3.0 [-]	Bearing factor R / P



ZOOM -

ZOOM +

Galería de entrada y salida

INPUT

Roof of section	
Radius	3.55 [m]

Rock	
Unit weight	27.0 [kN/m ³]
Overburden	1750.00 [m]
Coefficient K	1.00 [-]
Friction	53.3 [°]
SF Friction	1.25 [-]
Cohesion	0.0 [kPa]
SF Cohesion	1.00 [-]

Friction	47.0 [°]
Cohesion	0.0 [kPa]

Earthquake	
kV	0.15 [-]

Water	
Unit weight	10.0 [kN/m ³]
Head	2.00 [m]
Water coeff top	1.00 [-]
Water coeff bottom	1.00 [-]

Shotcrete	
Thickness	10 [cm]
Unit weight	25.0 [kN/m ³]
Shear strength	1.1 [MPa]
Compressive strength	20.0 [MPa]
SF	1.00 [-]
Thickness (arch effect)	0.00 [cm]

Shear force	110.0 [kN/m]
Axial force	0.0 [kN/m]
Normal stress	0.0 [MPa]

Anchor	
Bar diameter	25 [mm]
Yielding	499 [MPa]
SF	1.35 [-]
in plane	2.00 [m]
out of plane	2.00 [m]
Anchor length	3.0 [m]
Boring diameter	50 [mm]
Bond strength	1.000 [MPa]

Anchoring length	1.6 [m]
Force	181.5 [kN]
A	4.0 [m ²]
Pressure	45.4 [kPa]
R1	5.0 [m]
R2	6.6 [m]

CONTROLS

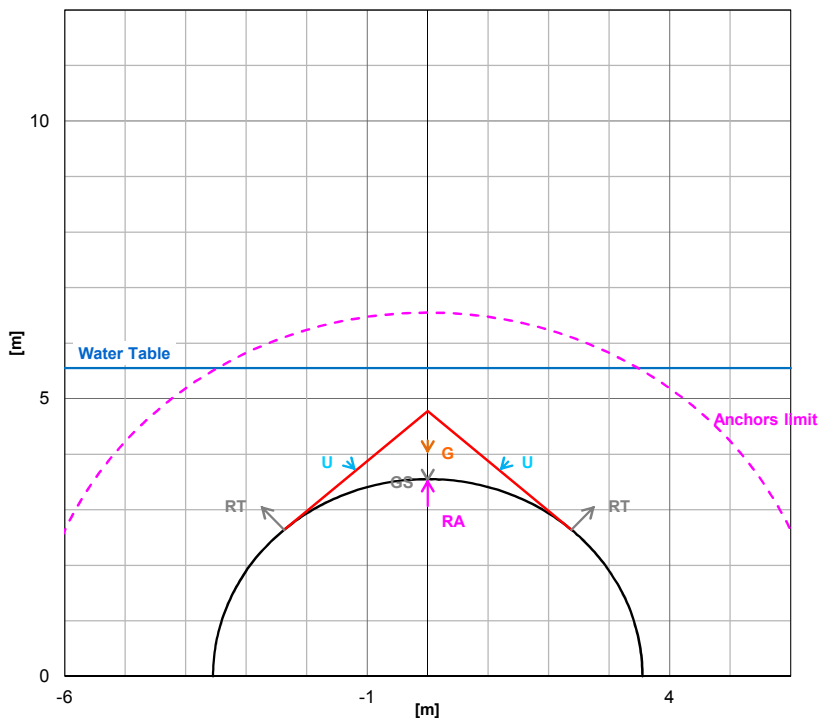
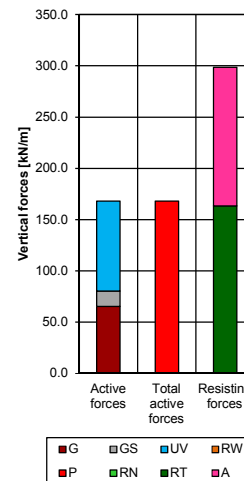
Shotcrete	d_arch < d_actual ... - 5 cm	
	Normal stress < 10 MPa	

Anchors	Lopt	4.0 [m]	
	Lmin	3.2 [m]	WARNING: bolt length is quite short
	Lmax	4.8 [m]	
	L_anchoring < L_bolt		

Bearing factor	SF_min	1.8 [-]	Bearing capacity > 1 OK
----------------	--------	---------	-------------------------

CALCULATION RESULTS - DETERMINANT WEDGE

Geometry	alfa	Critical [-]	Wedge top angle (graphic)
	alfa	48 [°]	Wedge top angle (critical value)
	alfa	52 [°]	Wedge top angle (user defined value)
	H	1.23 [m]	Wedge height
	h*	1.23 [m]	Wedge height limited by ground level
Active forces	G	65.5 [kN/m]	Wedge weight [vertical direction, + downward]
	N	86612.8 [kN/m]	Total field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U	58.9 [kN/m]	Water pressure [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U _v	43.8 [kN/m]	Water pressure [vertical direction, + downward]
	N'	86553.9 [kN/m]	Effective field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	T _c	0.0 [kN/m]	Cohesive resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	T _f	92896.7 [kN/m]	Friction resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	R _w	0.0 [kN/m]	N' + T _c + T _f resultant [vertical direction, + upward, 0 if downward]
	G _s	15.0 [kN/m]	Shotcrete weight [vertical direction, + downward]
	P	168.0 [kN/m]	Total active forces $G + G_s + 2 \cdot U_v - 2 \cdot R_w$ [vertical direction, + downward, 0 if upward]
Resisting forces	R _N	0.0 [kN/m]	Shotcrete compressive strength [vertical direction, + upward]
	R _T	163.5 [kN/m]	Shotcrete shear strength [vertical direction, + upward]
	A	135.2 [kN/m]	Anchor resistance [vertical direction, + upward]
	R	298.7 [kN/m]	Total resisting forces $R_N + R_T + A$ [vertical direction, + upward]
Bearing factor	SF	1.8 [-]	Bearing factor R / P



ZOOM -

ZOOM +

Galería de entrada y salida - CS2 corto plazo

INPUT

Roof of section	
Radius	3.60 [m]

Rock	
Unit weight	27.0 [kN/m3]
Overburden	1750.00 [m]
Coefficient K	1.00 [-]
Friction	50.4 [°]
SF Friction	1.25 [-]
Cohesion	0.0 [kPa]
SF Cohesion	1.00 [-]

Friction	44.0 [°]
Cohesion	0.0 [kPa]

Earthquake	
kV	0.00 [-]

Water	
Unit weight	10.0 [kN/m3]
Head	0.00 [m]
Water coeff top	0.00 [-]
Water coeff bottom	0.00 [-]

Shotcrete	
Thickness	5 [cm]
Unit weight	25.0 [kN/m3]
Shear strength	1.1 [MPa]
Compressive strength	20.0 [MPa]
SF	1.50 [-]
Thickness (arch effect)	0.00 [cm]

Shear force	36.7 [kN/m]
Axial force	0.0 [kN/m]
Normal stress	0.0 [MPa]

Anchor	
Bar diameter	25 [mm]
Yielding	499 [MPa]
SF	1.35 [-]
in plane	2.00 [m]
out of plane	2.00 [m]
Anchor length	3.0 [m]
Boring diameter	50 [mm]
Bond strength	1.000 [MPa]

Anchoring length	1.6 [m]
Force	181.5 [kN]
A	4.0 [m2]
Pressure	45.4 [kPa]
R1	5.0 [m]
R2	6.6 [m]

CONTROLS

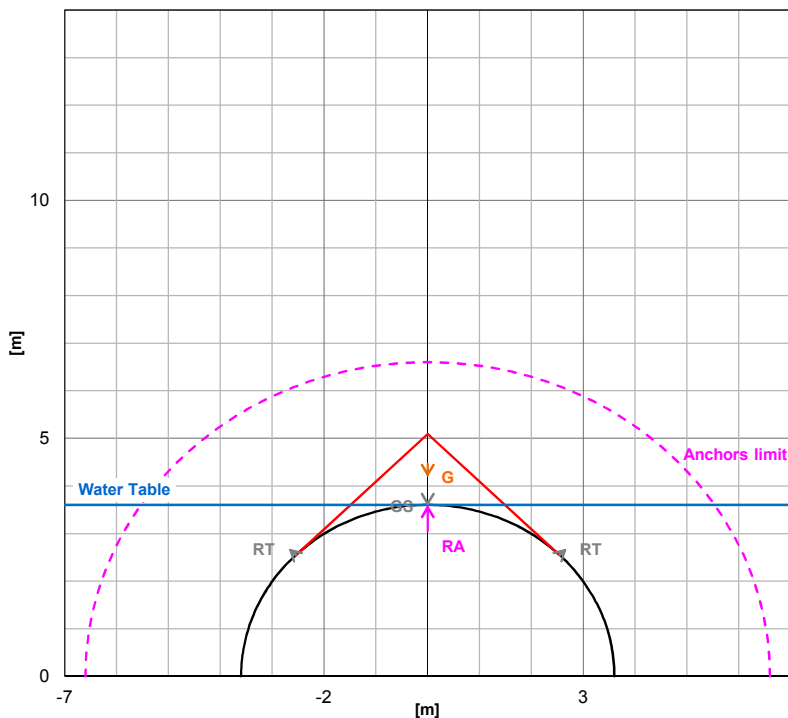
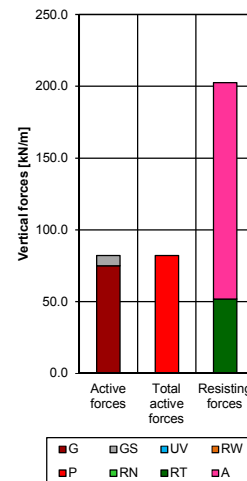
Shotcrete	d_arch < d_actual ... - 5 cm	
	Normal stress < 10 MPa	

Anchors	Lopt	4.0 [m]	
	Lmin	3.2 [m]	WARNING: bolt length is quite short
	Lmax	4.8 [m]	
	L_anchoring < L_bolt		

Bearing factor	SF_min	2.5 [-]	Bearing capacity > 1 OK
----------------	--------	---------	-------------------------

CALCULATION RESULTS - DETERMINANT WEDGE

Geometry	alfa	Critical [-]	Wedge top angle (graphic)
	alfa	45 [°]	Wedge top angle (critical value)
	alfa	50 [°]	Wedge top angle (user defined value)
	H	1.49 [m]	Wedge height
	h*	1.49 [m]	Wedge height limited by ground level
Active forces	G	75.1 [kN/m]	Wedge weight [vertical direction, + downward]
	N	99599.8 [kN/m]	Total field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U	0.0 [kN/m]	Water pressure [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U _v	0.0 [kN/m]	Water pressure [vertical direction, + downward]
	N'	99599.8 [kN/m]	Effective field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	T _c	0.0 [kN/m]	Cohesive resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	T _f	96316.4 [kN/m]	Friction resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	R _w	0.0 [kN/m]	N' + T _c + T _f resultant [vertical direction, + upward, 0 if downward]
	G _s	7.1 [kN/m]	Shotcrete weight [vertical direction, + downward]
	P	82.2 [kN/m]	Total active forces $G + G_s + 2 \cdot U_v - 2 \cdot R_w$ [vertical direction, + downward, 0 if upward]
Resisting forces	R _N	0.0 [kN/m]	Shotcrete compressive strength [vertical direction, + upward]
	R _T	51.9 [kN/m]	Shotcrete shear strength [vertical direction, + upward]
	A	150.7 [kN/m]	Anchor resistance [vertical direction, + upward]
	R	202.6 [kN/m]	Total resisting forces $R_N + R_T + A$ [vertical direction, + upward]
Bearing factor	SF	2.5 [-]	Bearing factor R / P



ZOOM -

ZOOM +

Galería de entrada y salida - CS2 largo plazo

INPUT

Roof of section	
Radius	3.60 [m]

Rock	
Unit weight	27.0 [kN/m3]
Overburden	1750.00 [m]
Coefficient K	1.00 [-]
Friction	50.4 [°]
SF Friction	1.25 [-]
Cohesion	0.0 [kPa]
SF Cohesion	1.00 [-]

Friction	44.0 [°]
Cohesion	0.0 [kPa]

Earthquake	
kV	0.15 [-]

Water	
Unit weight	10.0 [kN/m3]
Head	2.00 [m]
Water coeff top	1.00 [-]
Water coeff bottom	1.00 [-]

Shotcrete	
Thickness	15 [cm]
Unit weight	25.0 [kN/m3]
Shear strength	1.1 [MPa]
Compressive strength	20.0 [MPa]
SF	1.00 [-]
Thickness (arch effect)	0.00 [cm]

Shear force	165.0 [kN/m]
Axial force	0.0 [kN/m]
Normal stress	0.0 [MPa]

Anchor	
Bar diameter	25 [mm]
Yielding	499 [MPa]
SF	1.35 [-]
in plane	2.00 [m]
out of plane	2.00 [m]
Anchor length	3.0 [m]
Boring diameter	50 [mm]
Bond strength	1.000 [MPa]

Anchoring length	1.6 [m]
Force	181.5 [kN]
A	4.0 [m2]
Pressure	45.4 [kPa]
R1	5.0 [m]
R2	6.6 [m]

CONTROLS

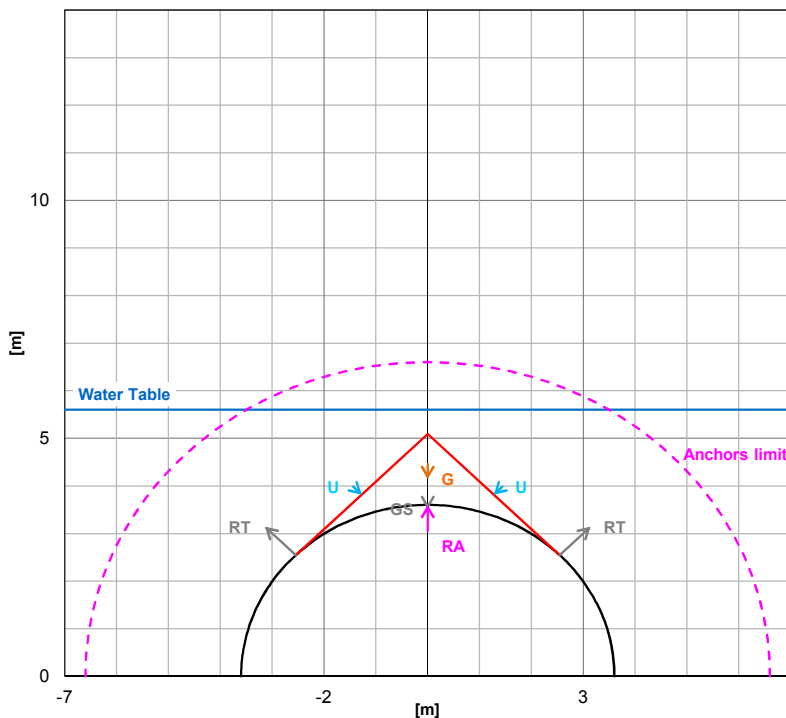
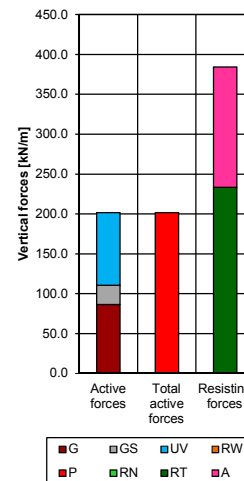
Shotcrete	d_arch < d_actual ... - 5 cm	
	Normal stress < 10 MPa	

Anchors	Lopt	4.0 [m]	
	Lmin	3.2 [m]	WARNING: bolt length is quite short
	Lmax	4.8 [m]	
	L_anchoring < L_bolt		

Bearing factor	SF_min	1.9 [-]	Bearing capacity > 1 OK
----------------	--------	---------	-------------------------

CALCULATION RESULTS - DETERMINANT WEDGE

Geometry	alfa	Critical [-]	Wedge top angle (graphic)
	alfa	45 [°]	Wedge top angle (critical value)
	alfa	50 [°]	Wedge top angle (user defined value)
	H	1.49 [m]	Wedge height
	h*	1.49 [m]	Wedge height limited by ground level
Active forces	G	86.4 [kN/m]	Wedge weight [vertical direction, + downward]
	N	99599.8 [kN/m]	Total field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U	64.1 [kN/m]	Water pressure [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U _v	45.4 [kN/m]	Water pressure [vertical direction, + downward]
	N'	99535.7 [kN/m]	Effective field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	T _c	0.0 [kN/m]	Cohesive resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	T _f	96254.4 [kN/m]	Friction resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	R _w	0.0 [kN/m]	N' + T _c + T _f resultant [vertical direction, + upward, 0 if downward]
	G _s	24.4 [kN/m]	Shotcrete weight [vertical direction, + downward]
	P	201.4 [kN/m]	Total active forces $G + G_s + 2 \cdot U_v - 2 \cdot R_w$ [vertical direction, + downward, 0 if upward]
Resisting forces	R _N	0.0 [kN/m]	Shotcrete compressive strength [vertical direction, + upward]
	R _T	233.3 [kN/m]	Shotcrete shear strength [vertical direction, + upward]
	A	150.7 [kN/m]	Anchor resistance [vertical direction, + upward]
	R	384.1 [kN/m]	Total resisting forces $R_N + R_T + A$ [vertical direction, + upward]
Bearing factor	SF	1.9 [-]	Bearing factor R / P



ZOOM -

ZOOM +

Galería de entrada y salida - CS3, corto plazo

INPUT

Roof of section	
Radius	3.65 [m]

Rock	
Unit weight	27.0 [kN/m ³]
Overburden	1750.00 [m]
Coefficient K	1.00 [-]
Friction	45.3 [°]
SF Friction	1.25 [-]
Cohesion	0.0 [kPa]
SF Cohesion	1.00 [-]

Friction	39.0 [°]
Cohesion	0.0 [kPa]

Earthquake	
kV	0.00 [-]

Water	
Unit weight	10.0 [kN/m ³]
Head	0.00 [m]
Water coeff top	0.00 [-]
Water coeff bottom	0.00 [-]

Shotcrete	
Thickness	5 [cm]
Unit weight	25.0 [kN/m ³]
Shear strength	1.1 [MPa]
Compressive strength	20.0 [MPa]
SF	1.50 [-]
Thickness (arch effect)	0.00 [cm]

Shear force	36.7 [kN/m]
Axial force	0.0 [kN/m]
Normal stress	0.0 [MPa]

Anchor	
Bar diameter	25 [mm]
Yielding	499 [MPa]
SF	1.35 [-]
in plane	1.50 [m]
out of plane	1.50 [m]
Anchor length	4.0 [m]
Boring diameter	50 [mm]
Bond strength	0.700 [MPa]

Anchoring length	2.2 [m]
Force	181.5 [kN]
A	2.3 [m ²]
Pressure	80.7 [kPa]
R1	5.4 [m]
R2	7.7 [m]

CONTROLS

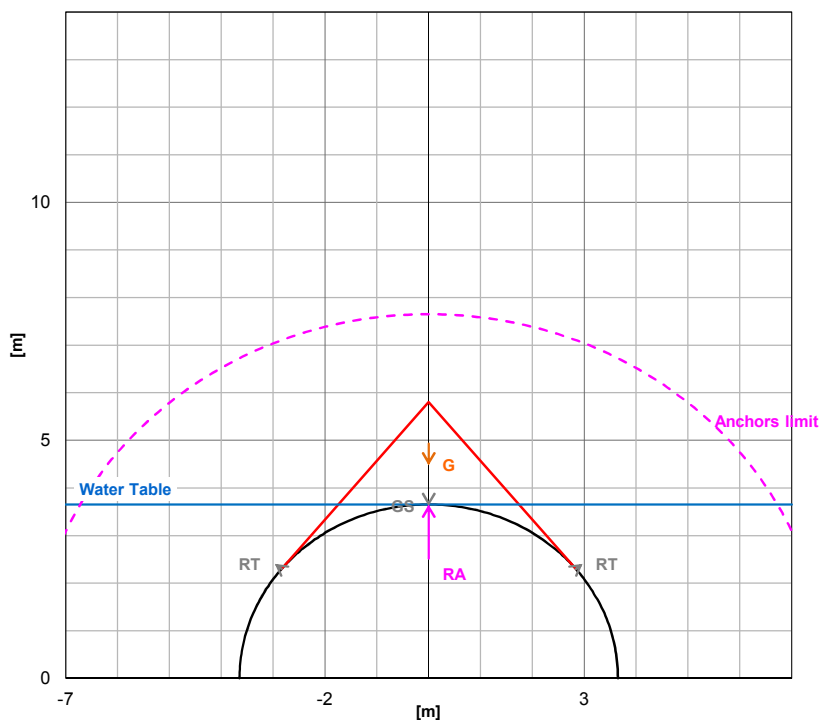
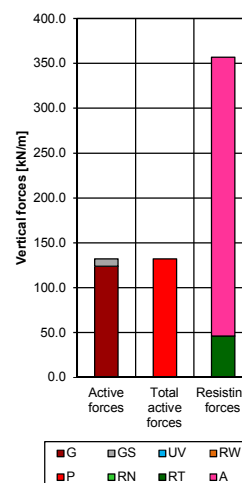
Shotcrete	d_arch < d_actual ... - 5 cm	
	Normal stress < 10 MPa	

Anchors	Lopt	4.0 [m]	Bolt length OK
	Lmin	3.2 [m]	
	Lmax	4.8 [m]	
	L_anchoring < L_bolt		

Bearing factor	SF_min	2.7 [-]	Bearing capacity > 1 OK
----------------	--------	---------	-------------------------

CALCULATION RESULTS - DETERMINANT WEDGE

Geometry	alfa	Critical [-]	Wedge top angle (graphic)
	alfa	39 [°]	Wedge top angle (critical value)
	alfa	39 [°]	Wedge top angle (user defined value)
	H	2.15 [m]	Wedge height
	h*	2.15 [m]	Wedge height limited by ground level
Active forces	G	124.0 [kN/m]	Wedge weight [vertical direction, + downward]
	N	130632.8 [kN/m]	Total field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U	0.0 [kN/m]	Water pressure [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U _v	0.0 [kN/m]	Water pressure [vertical direction, + downward]
	N'	130632.8 [kN/m]	Effective field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	T _c	0.0 [kN/m]	Cohesive resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	T _f	105606.4 [kN/m]	Friction resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	R _w	0.0 [kN/m]	N' + T _c + T _f resultant [vertical direction, + upward, 0 if downward]
	G _s	8.1 [kN/m]	Shotcrete weight [vertical direction, + downward]
	P	132.1 [kN/m]	Total active forces $G + G_s + 2 \cdot U_v - 2 \cdot R_w$ [vertical direction, + downward, 0 if upward]
Resisting forces	R _N	0.0 [kN/m]	Shotcrete compressive strength [vertical direction, + upward]
	R _T	46.2 [kN/m]	Shotcrete shear strength [vertical direction, + upward]
	A	310.6 [kN/m]	Anchor resistance [vertical direction, + upward]
	R	356.8 [kN/m]	Total resisting forces $R_N + R_T + A$ [vertical direction, + upward]
Bearing factor	SF	2.7 [-]	Bearing factor R / P



ZOOM -

ZOOM +

Galería de entrada y salida - CS3, Largo plazo

INPUT

Roof of section	
Radius	3.65 [m]

Rock	
Unit weight	27.0 [kN/m3]
Overburden	1750.00 [m]
Coefficient K	1.00 [-]
Friction	45.3 [°]
SF Friction	1.25 [-]
Cohesion	0.0 [kPa]
SF Cohesion	1.00 [-]

Friction	39.0 [°]
Cohesion	0.0 [kPa]

Earthquake	
kV	0.15 [-]

Water	
Unit weight	10.0 [kN/m3]
Head	2.00 [m]
Water coeff top	1.00 [-]
Water coeff bottom	1.00 [-]

Shotcrete	
Thickness	20 [cm]
Unit weight	25.0 [kN/m3]
Shear strength	1.1 [MPa]
Compressive strength	20.0 [MPa]
SF	1.00 [-]
Thickness (arch effect)	0.00 [cm]

Shear force	220.0 [kN/m]
Axial force	0.0 [kN/m]
Normal stress	0.0 [MPa]

Anchor	
Bar diameter	25 [mm]
Yielding	499 [MPa]
SF	1.35 [-]
in plane	1.50 [m]
out of plane	1.50 [m]
Anchor length	4.0 [m]
Boring diameter	50 [mm]
Bond strength	0.700 [MPa]

Anchoring length	2.2 [m]
Force	181.5 [kN]
A	2.3 [m2]
Pressure	80.7 [kPa]
R1	5.4 [m]
R2	7.7 [m]

CONTROLS

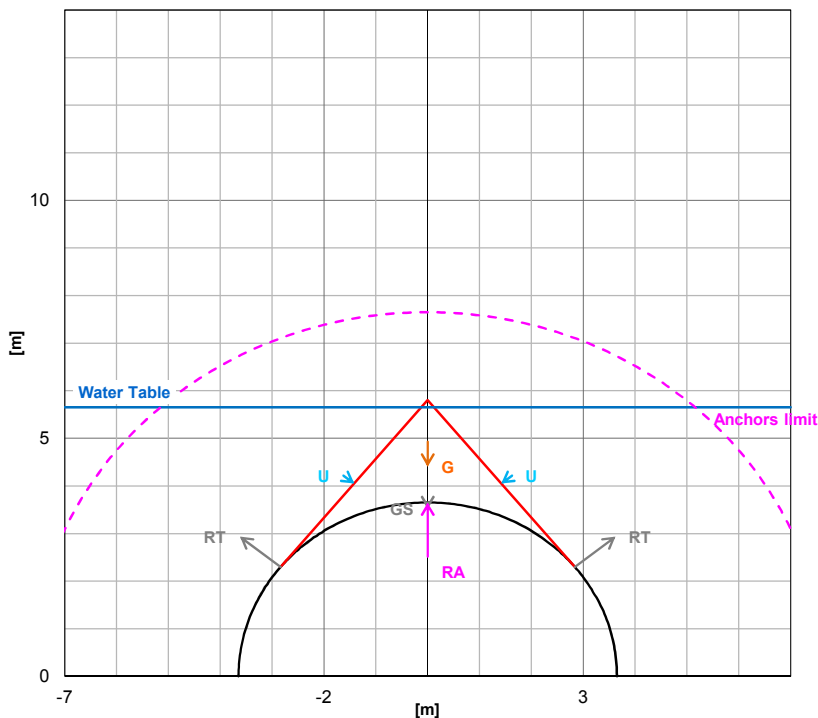
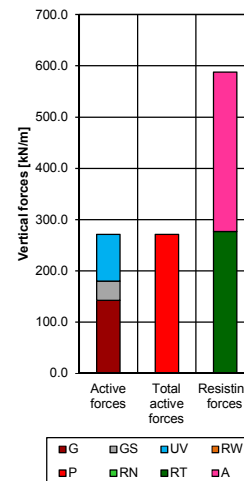
Shotcrete	d_arch < d_actual ... - 5 cm	
	Normal stress < 10 MPa	

Anchors	Lopt 4.0 [m]	Bolt length OK
	Lmin 3.2 [m]	
	Lmax 4.8 [m]	
	L_anchoring < L_bolt	

Bearing factor	SF_min 2.2 [-]	Bearing capacity > 1 OK
----------------	----------------	-------------------------

CALCULATION RESULTS - DETERMINANT WEDGE

Geometry	alfa	Critical [-]	Wedge top angle (graphic)
	alfa	39 [°]	Wedge top angle (critical value)
	alfa	39 [°]	Wedge top angle (user defined value)
	H	2.15 [m]	Wedge height
	h*	2.15 [m]	Wedge height limited by ground level
Active forces	G	142.6 [kN/m]	Wedge weight [vertical direction, + downward]
	N	130632.8 [kN/m]	Total field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U	72.3 [kN/m]	Water pressure [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U _v	45.5 [kN/m]	Water pressure [vertical direction, + downward]
	N'	130560.4 [kN/m]	Effective field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	T _c	0.0 [kN/m]	Cohesive resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	T _f	105547.9 [kN/m]	Friction resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	R _w	0.0 [kN/m]	N' + T _c + T _f resultant [vertical direction, + upward, 0 if downward]
	G _s	37.4 [kN/m]	Shotcrete weight [vertical direction, + downward]
	P	271.0 [kN/m]	Total active forces $G + G_s + 2 \cdot U_v - 2 \cdot R_w$ [vertical direction, + downward, 0 if upward]
Resisting forces	R _N	0.0 [kN/m]	Shotcrete compressive strength [vertical direction, + upward]
	R _T	276.9 [kN/m]	Shotcrete shear strength [vertical direction, + upward]
	A	310.6 [kN/m]	Anchor resistance [vertical direction, + upward]
	R	587.5 [kN/m]	Total resisting forces $R_N + R_T + A$ [vertical direction, + upward]
Bearing factor	SF	2.2 [-]	Bearing factor R / P



ZOOM -

ZOOM +

Galería de estacionamiento y transito - CS1, corto plazo

INPUT

Roof of section	
Radius	5.40 [m]

Rock	
Unit weight	27.0 [kN/m3]
Overburden	1750.00 [m]
Coefficient K	1.00 [-]
Friction	53.3 [°]
SF Friction	1.25 [-]
Cohesion	0.0 [kPa]
SF Cohesion	1.00 [-]

Friction	47.0 [°]
Cohesion	0.0 [kPa]

Earthquake	
kV	0.00 [-]

Water	
Unit weight	10.0 [kN/m3]
Head	0.00 [m]
Water coeff top	0.00 [-]
Water coeff bottom	0.00 [-]

Shotcrete	
Thickness	5 [cm]
Unit weight	25.0 [kN/m3]
Shear strength	1.1 [MPa]
Compressive strength	20.0 [MPa]
SF	1.50 [-]
Thickness (arch effect)	0.00 [cm]

Shear force	36.7 [kN/m]
Axial force	0.0 [kN/m]
Normal stress	0.0 [MPa]

Anchor	
Bar diameter	25 [mm]
Yielding	499 [MPa]
SF	1.35 [-]
in plane	2.00 [m]
out of plane	2.00 [m]
Anchor length	4.0 [m]
Boring diameter	50 [mm]
Bond strength	1.000 [MPa]

Anchoring length	1.6 [m]
Force	181.5 [kN]
A	4.0 [m2]
Pressure	45.4 [kPa]
R1	7.8 [m]
R2	9.4 [m]

CONTROLS

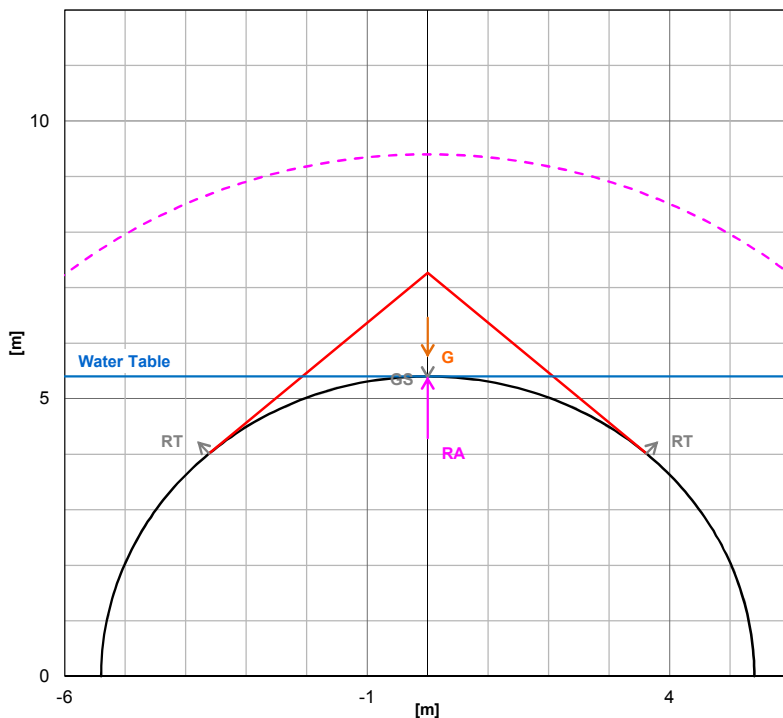
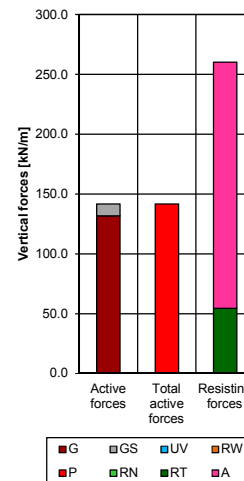
Shotcrete	d_arch < d_actual ... - 5 cm	
	Normal stress < 10 MPa	

Anchors	Lopt 5.0 [m]	Bolt length OK
	Lmin 4.0 [m]	
	Lmax 6.0 [m]	
	L_anchoring < L_bolt	

Bearing factor	SF_min 1.8 [-]	Bearing capacity > 1 OK
----------------	----------------	-------------------------

CALCULATION RESULTS - DETERMINANT WEDGE

Geometry	alfa	Critical [-]	Wedge top angle (graphic)
	alfa	48 [°]	Wedge top angle (critical value)
	alfa	53.3 [°]	Wedge top angle (user defined value)
	H	1.87 [m]	Wedge height
	h*	1.87 [m]	Wedge height limited by ground level
Active forces	G	131.8 [kN/m]	Wedge weight [vertical direction, + downward]
	N	131724.9 [kN/m]	Total field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U	0.0 [kN/m]	Water pressure [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U _v	0.0 [kN/m]	Water pressure [vertical direction, + downward]
	N'	131724.9 [kN/m]	Effective field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	T _c	0.0 [kN/m]	Cohesive resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	T _f	141378.0 [kN/m]	Friction resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	R _w	0.0 [kN/m]	N' + T _c + T _f resultant [vertical direction, + upward, 0 if downward]
	G _s	9.9 [kN/m]	Shotcrete weight [vertical direction, + downward]
	P	141.7 [kN/m]	Total active forces $G + G_s + 2 \cdot U_v - 2 \cdot R_w$ [vertical direction, + downward, 0 if upward]
Resisting forces	R _N	0.0 [kN/m]	Shotcrete compressive strength [vertical direction, + upward]
	R _T	54.5 [kN/m]	Shotcrete shear strength [vertical direction, + upward]
	A	205.6 [kN/m]	Anchor resistance [vertical direction, + upward]
	R	260.1 [kN/m]	Total resisting forces $R_N + R_T + A$ [vertical direction, + upward]
Bearing factor	SF	1.8 [-]	Bearing factor R / P



ZOOM -

ZOOM +

Galería de estacionamiento y tránsito - CS1, largo plazo

INPUT

Roof of section	
Radius	5.40 [m]

Rock	
Unit weight	27.0 [kN/m ³]
Overburden	1750.00 [m]
Coefficient K	1.00 [-]
Friction	50.4 [°]
SF Friction	1.25 [-]
Cohesion	0.0 [kPa]
SF Cohesion	1.00 [-]

Friction	44.0 [°]
Cohesion	0.0 [kPa]

Earthquake	
kV	0.15 [-]

Water	
Unit weight	10.0 [kN/m ³]
Head	2.00 [m]
Water coeff top	1.00 [-]
Water coeff bottom	1.00 [-]

Shotcrete	
Thickness	10 [cm]
Unit weight	25.0 [kN/m ³]
Shear strength	1.1 [MPa]
Compressive strength	20.0 [MPa]
SF	1.00 [-]
Thickness (arch effect)	0.00 [cm]

Shear force	110.0 [kN/m]
Axial force	0.0 [kN/m]
Normal stress	0.0 [MPa]

Anchor	
Bar diameter	25 [mm]
Yielding	499 [MPa]
SF	1.35 [-]
in plane	2.00 [m]
out of plane	2.00 [m]
Anchor length	4.0 [m]
Boring diameter	50 [mm]
Bond strength	1.000 [MPa]

Anchoring length	1.6 [m]
Force	181.5 [kN]
A	4.0 [m ²]
Pressure	45.4 [kPa]
R1	7.8 [m]
R2	9.4 [m]

CONTROLS

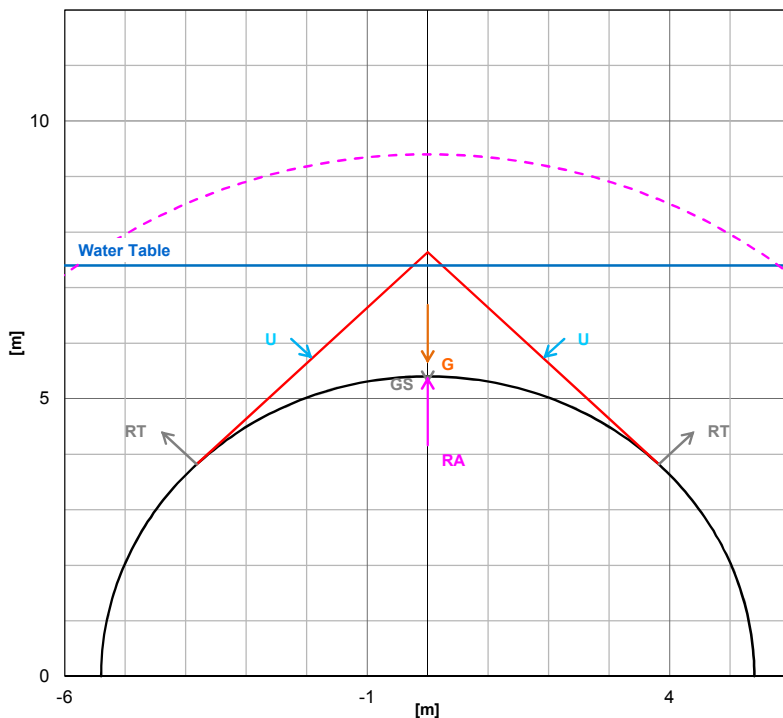
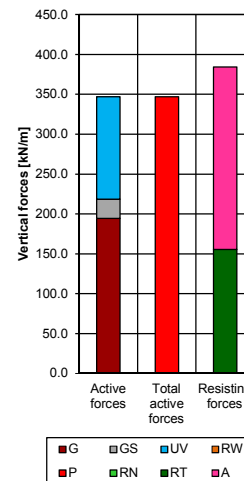
Shotcrete	d_arch < d_actual ... - 5 cm	
	Normal stress < 10 MPa	

Anchors	Lopt 5.0 [m]	Bolt length OK
	Lmin 4.0 [m]	
	Lmax 6.0 [m]	
	L_anchoring < L_bolt	

Bearing factor	SF_min 1.1 [-]	Bearing capacity > 1 OK
----------------	----------------	-------------------------

CALCULATION RESULTS - DETERMINANT WEDGE

Geometry	alfa	Critical [-]	Wedge top angle (graphic)
	alfa	45 [°]	Wedge top angle (critical value)
	alfa	50 [°]	Wedge top angle (user defined value)
	H	2.24 [m]	Wedge height
	h*	2.24 [m]	Wedge height limited by ground level
Active forces	G	194.3 [kN/m]	Wedge weight [vertical direction, + downward]
	N	149367.9 [kN/m]	Total field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U	90.7 [kN/m]	Water pressure [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U _v	64.1 [kN/m]	Water pressure [vertical direction, + downward]
	N'	149277.2 [kN/m]	Effective field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	T _c	0.0 [kN/m]	Cohesive resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	T _f	144356.1 [kN/m]	Friction resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	R _w	0.0 [kN/m]	N' + T _c + T _f resultant [vertical direction, + upward, 0 if downward]
	G _s	24.4 [kN/m]	Shotcrete weight [vertical direction, + downward]
	P	347.0 [kN/m]	Total active forces $G + G_s + 2 \cdot U_v - 2 \cdot R_w$ [vertical direction, + downward, 0 if upward]
Resisting forces	R _N	0.0 [kN/m]	Shotcrete compressive strength [vertical direction, + upward]
	R _T	155.6 [kN/m]	Shotcrete shear strength [vertical direction, + upward]
	A	228.6 [kN/m]	Anchor resistance [vertical direction, + upward]
	R	384.2 [kN/m]	Total resisting forces $R_N + R_T + A$ [vertical direction, + upward]
Bearing factor	SF	1.1 [-]	Bearing factor R / P



ZOOM -

ZOOM +

Galería de estacionamiento y transito - CS2 corto plazo

INPUT

Roof of section		
Radius	5.45	[m]

Rock	
Unit weight	27.0 [kN/m ³]
Overburden	1750.0 [m]
Coefficient K	1.00 [-]
Friction	50.4 [°]
SF Friction	1.25 [-]
Cohesion	0.0 [kPa]
SF Cohesion	1.00 [-]

Friction	44.0 [°]
Cohesion	0.0 [kPa]

Earthquake		
kV	0.00	[-]

Water		
Unit weight	10.0	[kN/m ³]
Head	0.00	[m]
Water coeff top	0.00	[-]
Water coeff bottom	0.00	[-]

Shotcrete	
Thickness	5 [cm]
Unit weight	25.0 [kN/m ³]
Shear strength	1.1 [MPa]
Compressive strength	20.0 [MPa]
SF	1.50 [-]
Thickness (arch effect)	0.00 [cm]

Shear force	36.7	[kN/m]
Axial force	0.0	[kN/m]
Normal stress	0.0	[MPa]

Anchor		
Bar diameter	25	[mm]
Yielding	499	[MPa]
SF	1.35	[-]
in plane	2.00	[m]
out of plane	2.00	[m]
Anchor length	4.0	[m]
Boring diameter	50	[mm]
Bond strength	1.000	[MPa]

Anchoring length	1.6 [m]
Force	181.5 [kN]
A	4.0 [m ²]
Pressure	45.4 [kPa]
R1	7.9 [m]
R2	9.5 [m]

CONTROLS	
----------	--

Shotcrete	d_arch < d_actual ... - 5 cm	
	Normal stress < 10 MPa	

Anchors	Lopt	5.0 [m]	Bolt length OK
	Lmin	4.0 [m]	
	Lmax	6.0 [m]	
	L_anchoring < L_bolt		

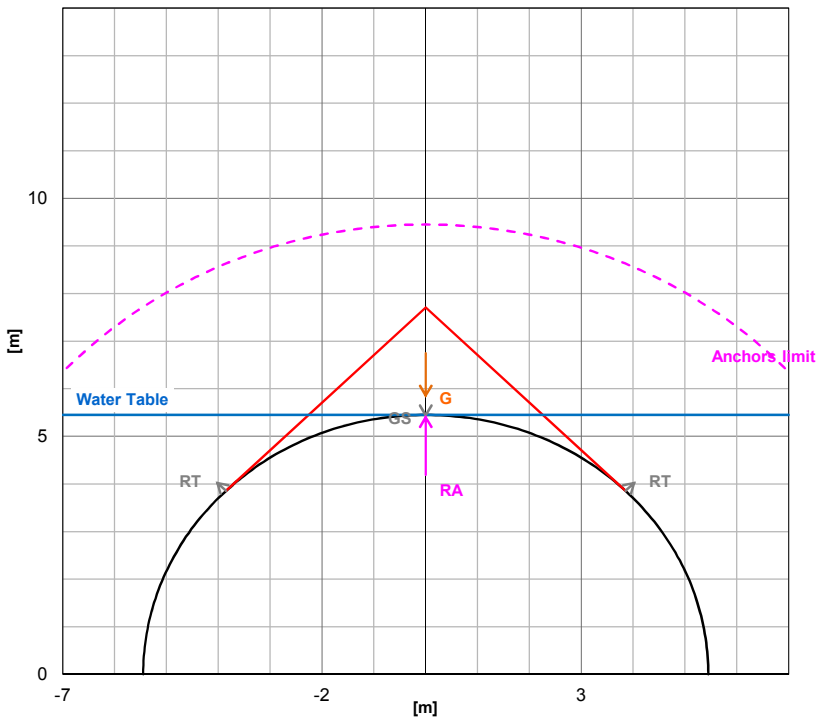
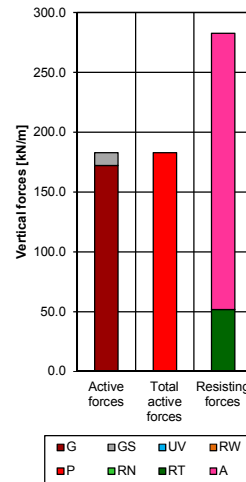
Bearing factor	SF_min	1.5 [-]	Bearing capacity > 1 OK
-----------------------	--------	---------	-------------------------

CALCULATION RESULTS - DETERMINANT WEDGE	
1	1
2	2
3	3
4	4
5	5
6	6
7	7
8	8
9	9
10	10
11	11
12	12
13	13
14	14
15	15
16	16
17	17
18	18
19	19
20	20
21	21
22	22
23	23
24	24
25	25
26	26
27	27
28	28
29	29
30	30
31	31
32	32
33	33
34	34
35	35
36	36
37	37
38	38
39	39
40	40
41	41
42	42
43	43
44	44
45	45
46	46
47	47
48	48
49	49
50	50
51	51
52	52
53	53
54	54
55	55
56	56
57	57
58	58
59	59
60	60
61	61
62	62
63	63
64	64
65	65
66	66
67	67
68	68
69	69
70	70
71	71
72	72
73	73
74	74
75	75
76	76
77	77
78	78
79	79
80	80
81	81
82	82
83	83
84	84
85	85
86	86
87	87
88	88
89	89
90	90
91	91
92	92
93	93
94	94
95	95
96	96
97	97
98	98
99	99
100	100

Geometry			
alfa	Critical	[°]	Wedge top angle (graphic)
alfa	45	[°]	Wedge top angle (critical value)
alfa	45	[°]	Wedge top angle (user defined value)
H	2.26	[m]	Wedge height
h*	2.26	[m]	Wedge height limited by ground level
Active forces			
G	172.1	[kN/m]	Wedge weight [vertical direction, + downward]
N	150750.0	[kN/m]	Total field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
U	0.0	[kN/m]	Water pressure [normal to discontinuity, + toward wedge]
U _v	0.0	[kN/m]	Water pressure [vertical direction, + downward]
N'	150750.0	[kN/m]	Effective field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
T _c	0.0	[kN/m]	Cohesive resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
T _f	145780.4	[kN/m]	Friction resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
R _w	0.0	[kN/m]	N' + T _c + T _f resultant [vertical direction, + upward, 0 if downward]
G _s	10.7	[kN/m]	Shotcrete weight [vertical direction, + downward]
P	182.8	[kN/m]	Total active forces G + G _s + 2·U _v - 2·R _w [vertical direction, + downward, 0 if upward]

Resisting forces	R_N	0.0 [kN/m]	Shotcrete compressive strength [vertical direction, + upward]
	R_T	51.9 [kN/m]	Shotcrete shear strength [vertical direction, + upward]
	A	230.7 [kN/m]	Anchor resistance [vertical direction, + upward]
	R	282.6 [kN/m]	Total resisting forces $R_N + R_T + A$ [vertical direction, + upward]

Bearing factor	SF	1.5	[-]	Bearing factor R/P
----------------	----	-----	-----	----------------------



ZOOM –

ZOOM +

Galería de estacionamiento y transito - CS2 largo plazo

INPUT

Roof of section		
Radius	5.45	[m]

Rock	
Unit weight	27.0 [kN/m ³]
Overburden	1750.0 [m]
Coefficient K	1.00 [-]
Friction	50.4 [°]
SF Friction	1.25 [-]
Cohesion	0.0 [kPa]
SF Cohesion	1.00 [-]

Friction	44.0 [°]
Cohesion	0.0 [kPa]

Earthquake		
kV	0.15	[-]

Water		
Unit weight	10.0	[kN/m ³]
Head	2.00	[m]
Water coeff top	1.00	[-]
Water coeff bottom	1.00	[-]

Shotcrete	
Thickness	15 [cm]
Unit weight	25.0 [kN/m ³]
Shear strength	1.1 [MPa]
Compressive strength	20.0 [MPa]
SF	1.00 [-]
Thickness (arch effect)	0.00 [cm]

Shear force	165.0	[kN/m]
Axial force	0.0	[kN/m]
Normal stress	0.0	[MPa]

Anchor		
Bar diameter	25	[mm]
Yielding	499	[MPa]
SF	1.35	[-]
in plane	2.00	[m]
out of plane	2.00	[m]
Anchor length	4.0	[m]
Boring diameter	50	[mm]
Bond strength	1.000	[MPa]

Anchoring length	1.6 [m]
Force	181.5 [kN]
A	4.0 [m ²]
Pressure	45.4 [kPa]
R1	7.9 [m]
R2	9.5 [m]

CONTROLS	
----------	--

Shotcrete	d_arch < d_actual ... - 5 cm	
	Normal stress < 10 MPa	

Anchors	Lopt	5.0 [m]	Bolt length OK
	Lmin	4.0 [m]	
	Lmax	6.0 [m]	
	L_anchoring < L_bolt		

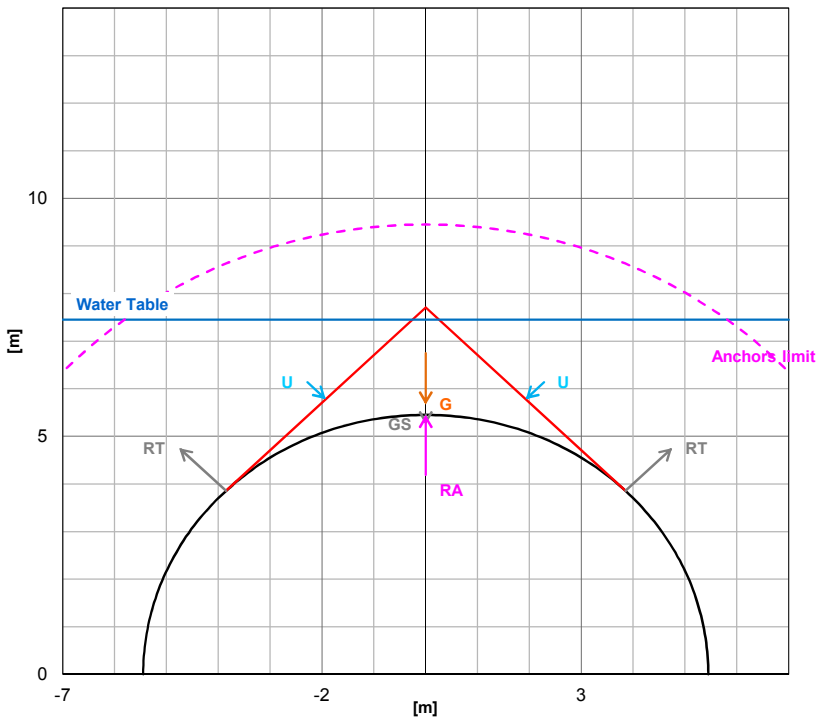
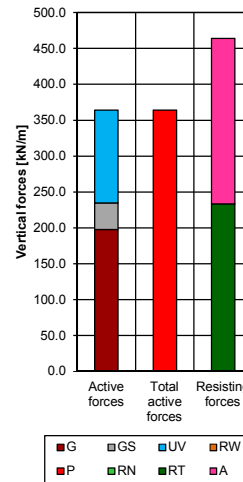
Bearing factor	SF_min	1.3 [-]	Bearing capacity > 1 OK
-----------------------	--------	---------	-------------------------

CALCULATION RESULTS - DETERMINANT WEDGE	
1	1
2	2
3	3
4	4
5	5
6	6
7	7
8	8
9	9
10	10
11	11
12	12
13	13
14	14
15	15
16	16
17	17
18	18
19	19
20	20
21	21
22	22
23	23
24	24
25	25
26	26
27	27
28	28
29	29
30	30
31	31
32	32
33	33
34	34
35	35
36	36
37	37
38	38
39	39
40	40
41	41
42	42
43	43
44	44
45	45
46	46
47	47
48	48
49	49
50	50
51	51
52	52
53	53
54	54
55	55
56	56
57	57
58	58
59	59
60	60
61	61
62	62
63	63
64	64
65	65
66	66
67	67
68	68
69	69
70	70
71	71
72	72
73	73
74	74
75	75
76	76
77	77
78	78
79	79
80	80
81	81
82	82
83	83
84	84
85	85
86	86
87	87
88	88
89	89
90	90
91	91
92	92
93	93
94	94
95	95
96	96
97	97
98	98
99	99
100	100

Geometry	alfa	Critical	[°]	Wedge top angle (graphic)
	alfa	45	[°]	Wedge top angle (critical value)
	alfa	45	[°]	Wedge top angle (user defined value)
	H	2.26	[m]	Wedge height
	h*	2.26	[m]	Wedge height limited by ground level
Active forces	G	197.9	[kN/m]	Wedge weight [vertical direction, + downward]
	N	150750.0	[kN/m]	Total field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U	91.5	[kN/m]	Water pressure [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U _v	64.7	[kN/m]	Water pressure [vertical direction, + downward]
	N'	150658.6	[kN/m]	Effective field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	T _c	0.0	[kN/m]	Cohesive resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	T _f	145692.0	[kN/m]	Friction resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	R _w	0.0	[kN/m]	N' + T _c + T _f resultant [vertical direction, + upward, 0 if downward]
	G _s	36.9	[kN/m]	Shotcrete weight [vertical direction, + downward]
	P	364.2	[kN/m]	Total active forces G + G _s + 2·U _v - 2·R _w [vertical direction, + downward, 0 if upward]

Resisting forces	R_N	0.0 [kN/m]	Shotcrete compressive strength [vertical direction, + upward]
	R_T	233.3 [kN/m]	Shotcrete shear strength [vertical direction, + upward]
	A	230.7 [kN/m]	Anchor resistance [vertical direction, + upward]
	R	464.1 [kN/m]	Total resisting forces $R_N + R_T + A$ [vertical direction, + upward]

Bearing factor	SF	1.3	[-]	Bearing factor R/P
----------------	----	-----	-----	----------------------



ZOOM –

ZOOM +

Galería de estacionamiento y transito - CS3 corto plazo

INPUT

Roof of section		
Radius	5.50	[m]

Rock	
Unit weight	27.0 [kN/m ³]
Overburden	1750.0 [m]
Coefficient K	1.00 [-]
Friction	45.3 [°]
SF Friction	1.25 [-]
Cohesion	0.0 [kPa]
SF Cohesion	1.00 [-]

Friction	39.0 [°]
Cohesion	0.0 [kPa]

Earthquake		
kV	0.00	[-]

Water		
Unit weight	10.0	[kN/m ³]
Head	0.00	[m]
Water coeff top	0.00	[-]
Water coeff bottom	0.00	[-]

Shotcrete	
Thickness	5 [cm]
Unit weight	25.0 [kN/m ³]
Shear strength	1.1 [MPa]
Compressive strength	20.0 [MPa]
SF	1.50 [-]
Thickness (arch effect)	0.00 [cm]

Shear force	36.7	[kN/m]
Axial force	0.0	[kN/m]
Normal stress	0.0	[MPa]

Anchor		
Bar diameter	25	[mm]
Yielding	499	[MPa]
SF	1.35	[-]
in plane	1.50	[m]
out of plane	1.50	[m]
Anchor length	5.0	[m]
Boring diameter	50	[mm]
Bond strength	0.700	[MPa]

Anchoring length	2.2 [m]
Force	181.5 [kN]
A	2.3 [m ²]
Pressure	80.7 [kPa]
R1	8.3 [m]
R2	10.5 [m]

CONTROLS

Shotcrete	d_arch < d_actual ... - 5 cm	
	Normal stress < 10 MPa	

Anchors	Lopt	5.0 [m]	Bolt length OK
	Lmin	4.0 [m]	
	Lmax	6.0 [m]	
	L_anchoring < L_bolt		

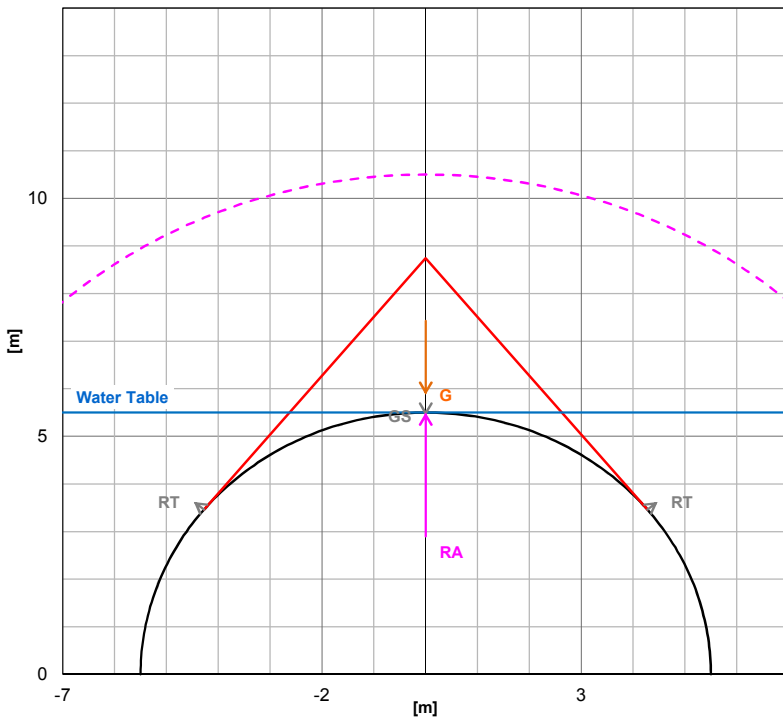
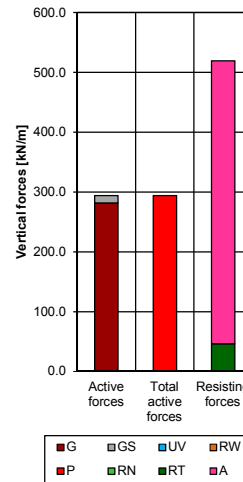
Bearing factor	SF_min	1.8 [-]	Bearing capacity > 1 OK
-----------------------	--------	---------	-------------------------

CALCULATION RESULTS - DETERMINANT WEDGE

Geometry			
	alfa	Critical	[°]
	alfa	39	[°]
	alfa	45	[°]
	H	3.24	[m]
	h*	3.24	[m]
Active forces	G	281.6	[kN/m]
	N	196782.6	[kN/m]
	U	0.0	[kN/m]
	U _v	0.0	[kN/m]
	N'	196782.6	[kN/m]
	T _c	0.0	[kN/m]
	T _f	159083.3	[kN/m]
	R _w	0.0	[kN/m]
	G _s	12.2	[kN/m]
	P	293.8	[kN/m]

Resisting forces	R_N	0.0 [kN/m]	Shotcrete compressive strength [vertical direction, + upward]
	R_T	46.2 [kN/m]	Shotcrete shear strength [vertical direction, + upward]
	A	473.0 [kN/m]	Anchor resistance [vertical direction, + upward]
	R	519.1 [kN/m]	Total resisting forces $R_N + R_T + A$ [vertical direction, + upward]

Bearing factor	SF	1.8	[-]	Bearing factor R/P
----------------	----	-----	-----	----------------------



ZOOM –

ZOOM +

Galería de estacionamiento y transito - CS3 largo plazo

INPUT

Roof of section		
Radius	5.50	[m]

Rock	
Unit weight	27.0 [kN/m ³]
Overburden	1750.0 [m]
Coefficient K	1.00 [-]
Friction	45.3 [°]
SF Friction	1.25 [-]
Cohesion	0.0 [kPa]
SF Cohesion	1.00 [-]

Friction	39.0 [°]
Cohesion	0.0 [kPa]

Earthquake		
kV	0.15	[-]

Water		
Unit weight	10.0	[kN/m ³]
Head	2.00	[m]
Water coeff top	1.00	[-]
Water coeff bottom	1.00	[-]

Shotcrete	
Thickness	20 [cm]
Unit weight	25.0 [kN/m ³]
Shear strength	1.1 [MPa]
Compressive strength	20.0 [MPa]
SF	1.00 [-]
Thickness (arch effect)	0.00 [cm]

Shear force	220.0	[kN/m]
Axial force	0.0	[kN/m]
Normal stress	0.0	[MPa]

Anchor		
Bar diameter	25	[mm]
Yielding	499	[MPa]
SF	1.35	[-]
in plane	1.50	[m]
out of plane	1.50	[m]
Anchor length	5.0	[m]
Boring diameter	50	[mm]
Bond strength	0.700	[MPa]

Anchoring length	2.2 [m]
Force	181.5 [kN]
A	2.3 [m ²]
Pressure	80.7 [kPa]
R1	8.3 [m]
R2	10.5 [m]

CONTROLS

Shotcrete	d_arch < d_actual ... - 5 cm	
	Normal stress < 10 MPa	

Anchors	Lopt	5.0 [m]	Bolt length OK
	Lmin	4.0 [m]	
	Lmax	6.0 [m]	
	L_anchoring < L_bolt		

Bearing factor	SF_min	1.5 [-]	Bearing capacity > 1 OK
-----------------------	--------	---------	-------------------------

CALCULATION RESULTS - DETERMINANT WEDGE

Geometry			
	alfa	Critical	[°]
	alfa	39	[°]
	alfa	45	[°]
	H	3.24	[m]
	h*	3.24	[m]
Active forces	G	323.8	[kN/m]
	N	196782.6	[kN/m]
	U	104.9	[kN/m]
	U _v	66.0	[kN/m]
	N'	196677.6	[kN/m]
	T _c	0.0	[kN/m]
	T _f	158998.5	[kN/m]
	R _w	0.0	[kN/m]
	G _s	56.3	[kN/m]
	P	512.2	[kN/m]

Wedge top angle (graphic)

Wedge top angle (critical value)

Wedge top angle (user defined value)

Wedge height

Wedge height limited by ground level

Wedge height [vertical direction, + downward]

Total field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]

Water pressure [normal to discontinuity, + toward wedge]

Water pressure [vertical direction, + downward]

Effective field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]

Cohesive resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]

Friction resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]

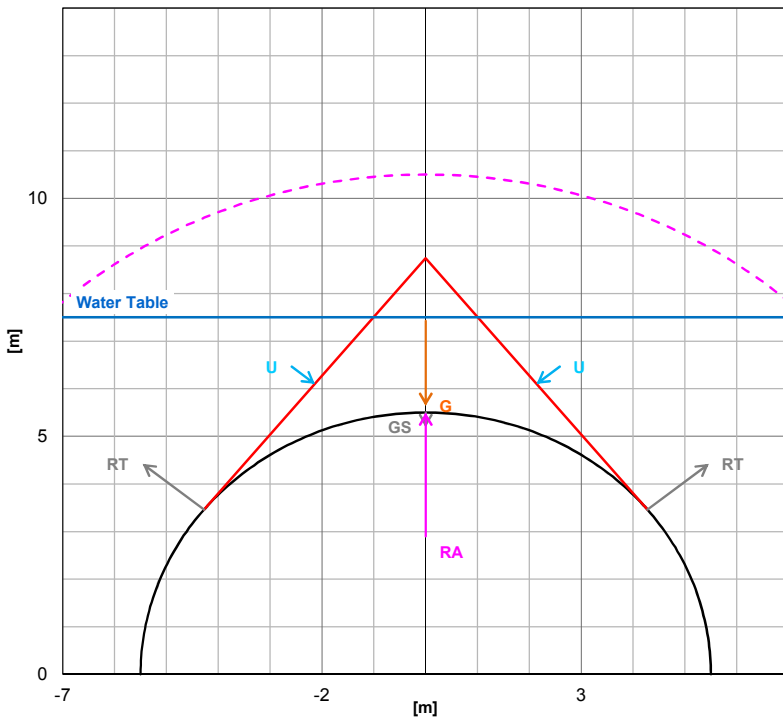
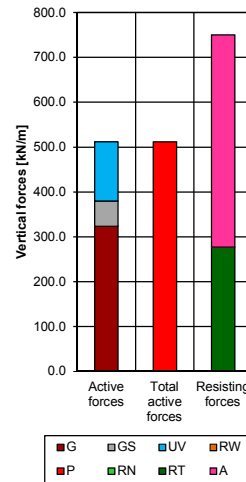
N' + T_c + T_f resultant [vertical direction, + upward, 0 if downward]

Shotcrete weight [vertical direction, + downward]

Total active forces G + G_s + 2·U_v - 2·R_w [vertical direction, + downward, 0 if upward]

Resisting forces	R_N	0.0 [kN/m]	Shotcrete compressive strength [vertical direction, + upward]
	R_T	276.9 [kN/m]	Shotcrete shear strength [vertical direction, + upward]
	A	473.0 [kN/m]	Anchor resistance [vertical direction, + upward]
	R	749.9 [kN/m]	Total resisting forces $R_N + R_T + A$ [vertical direction, + upward]

Bearing factor	SF	1.5	[-]	Bearing factor R/P
----------------	----	-----	-----	----------------------



ZOOM –

ZOOM +

Galería de acceso al pozo y de escape - CS1 corto plazo

INPUT

Roof of section	
Radius	3.00 [m]

Rock	
Unit weight	27.0 [kN/m3]
Overburden	1750.00 [m]
Coefficient K	1.00 [-]
Friction	53.3 [°]
SF Friction	1.25 [-]
Cohesion	0.0 [kPa]
SF Cohesion	1.00 [-]

Friction	47.0 [°]
Cohesion	0.0 [kPa]

Earthquake	
kV	0.00 [-]

Water	
Unit weight	10.0 [kN/m3]
Head	0.00 [m]
Water coeff top	0.00 [-]
Water coeff bottom	0.00 [-]

Shotcrete	
Thickness	5 [cm]
Unit weight	25.0 [kN/m3]
Shear strength	1.1 [MPa]
Compressive strength	20.0 [MPa]
SF	1.50 [-]
Thickness (arch effect)	0.00 [cm]

Shear force	36.7 [kN/m]
Axial force	0.0 [kN/m]
Normal stress	0.0 [MPa]

Anchor	
Bar diameter	20 [mm]
Yielding	500 [MPa]
SF	1.35 [-]
in plane	2.00 [m]
out of plane	2.00 [m]
Anchor length	2.5 [m]
Boring diameter	50 [mm]
Bond strength	1.000 [MPa]

Anchoring length	1.0 [m]
Force	116.3 [kN]
A	4.0 [m2]
Pressure	29.1 [kPa]
R1	4.5 [m]
R2	5.5 [m]

CONTROLS

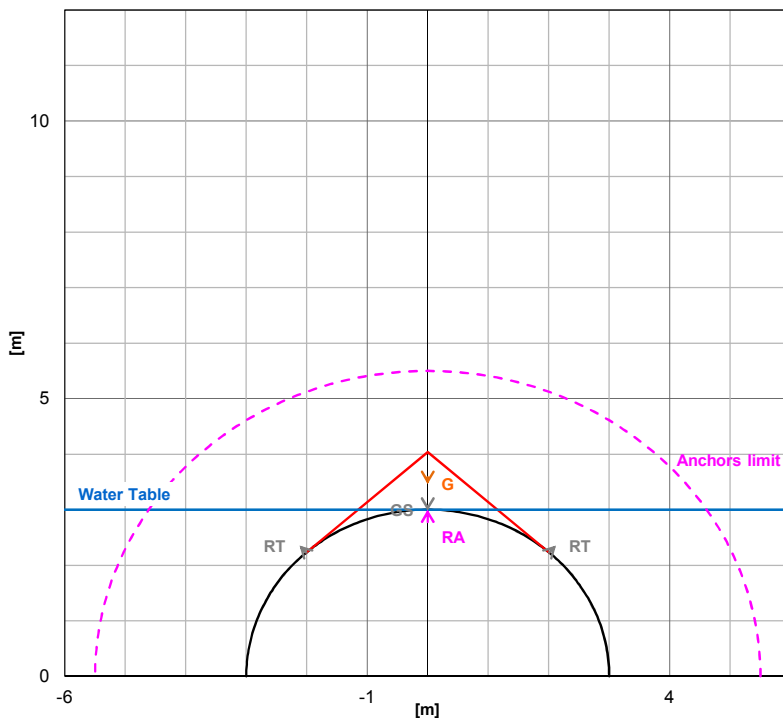
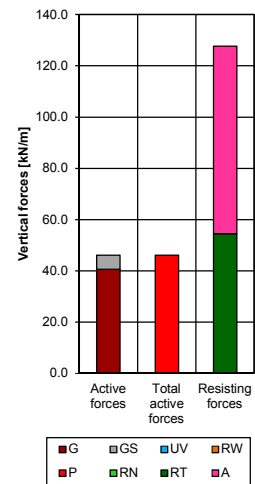
Shotcrete	d_arch < d_actual ... - 5 cm	
	Normal stress < 10 MPa	

Anchors	Lopt	3.6 [m]	
	Lmin	2.9 [m]	WARNING: bolt length is quite short
	Lmax	4.3 [m]	
	L_anchoring < L_bolt		

Bearing factor	SF_min	2.8 [-]	Bearing capacity > 1 OK
----------------	--------	---------	-------------------------

CALCULATION RESULTS - DETERMINANT WEDGE

Geometry	alfa	Critical [-]	Wedge top angle (graphic)
	alfa	48 [°]	Wedge top angle (critical value)
	alfa	50 [°]	Wedge top angle (user defined value)
	H	1.04 [m]	Wedge height
	h*	1.04 [m]	Wedge height limited by ground level
Active forces	G	40.7 [kN/m]	Wedge weight [vertical direction, + downward]
	N	73197.9 [kN/m]	Total field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U	0.0 [kN/m]	Water pressure [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U _v	0.0 [kN/m]	Water pressure [vertical direction, + downward]
	N'	73197.9 [kN/m]	Effective field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	T _c	0.0 [kN/m]	Cohesive resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	T _f	78562.0 [kN/m]	Friction resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	R _w	0.0 [kN/m]	N' + T _c + T _f resultant [vertical direction, + upward, 0 if downward]
	G _s	5.5 [kN/m]	Shotcrete weight [vertical direction, + downward]
	P	46.2 [kN/m]	Total active forces $G + G_s + 2 \cdot U_v - 2 \cdot R_w$ [vertical direction, + downward, 0 if upward]
Resisting forces	R _N	0.0 [kN/m]	Shotcrete compressive strength [vertical direction, + upward]
	R _T	54.5 [kN/m]	Shotcrete shear strength [vertical direction, + upward]
	A	73.2 [kN/m]	Anchor resistance [vertical direction, + upward]
	R	127.7 [kN/m]	Total resisting forces $R_N + R_T + A$ [vertical direction, + upward]
Bearing factor	SF	2.8 [-]	Bearing factor R / P



ZOOM -

ZOOM +

Galería de acceso al pozo y de escape - CS1 largo plazo

INPUT

Roof of section	
Radius	3.00 [m]

Rock	
Unit weight	27.0 [kN/m3]
Overburden	1750.00 [m]
Coefficient K	1.00 [-]
Friction	53.3 [°]
SF Friction	1.25 [-]
Cohesion	0.0 [kPa]
SF Cohesion	1.00 [-]

Friction	47.0 [°]
Cohesion	0.0 [kPa]

Earthquake	
kV	0.15 [-]

Water	
Unit weight	10.0 [kN/m3]
Head	2.00 [m]
Water coeff top	1.00 [-]
Water coeff bottom	1.00 [-]

Shotcrete	
Thickness	10 [cm]
Unit weight	25.0 [kN/m3]
Shear strength	1.1 [MPa]
Compressive strength	20.0 [MPa]
SF	1.00 [-]
Thickness (arch effect)	0.00 [cm]

Shear force	110.0 [kN/m]
Axial force	0.0 [kN/m]
Normal stress	0.0 [MPa]

Anchor	
Bar diameter	20 [mm]
Yielding	500 [MPa]
SF	1.35 [-]
in plane	2.00 [m]
out of plane	2.00 [m]
Anchor length	2.5 [m]
Boring diameter	50 [mm]
Bond strength	1.000 [MPa]

Anchoring length	1.0 [m]
Force	116.3 [kN]
A	4.0 [m2]
Pressure	29.1 [kPa]
R1	4.5 [m]
R2	5.5 [m]

CONTROLS

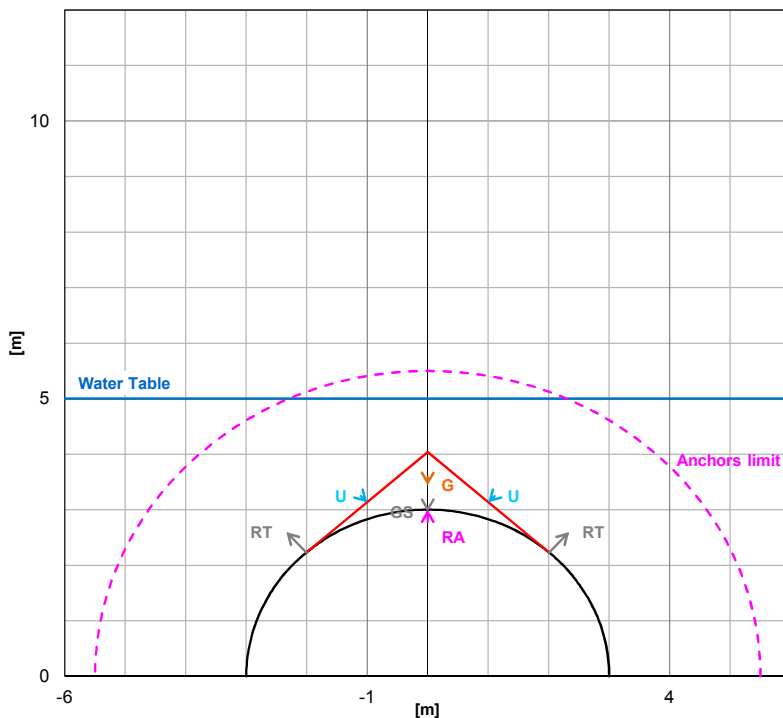
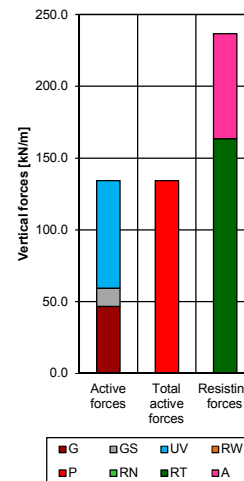
Shotcrete	d_arch < d_actual ... - 5 cm	
	Normal stress < 10 MPa	

Anchors	Lopt	3.6 [m]	
	Lmin	2.9 [m]	WARNING: bolt length is quite short
	Lmax	4.3 [m]	
	L_anchoring < L_bolt		

Bearing factor	SF_min	1.8 [-]	Bearing capacity > 1 OK
----------------	--------	---------	-------------------------

CALCULATION RESULTS - DETERMINANT WEDGE

Geometry	alfa	Critical [-]	Wedge top angle (graphic)
	alfa	48 [°]	Wedge top angle (critical value)
	alfa	50 [°]	Wedge top angle (user defined value)
	H	1.04 [m]	Wedge height
	h*	1.04 [m]	Wedge height limited by ground level
Active forces	G	46.8 [kN/m]	Wedge weight [vertical direction, + downward]
	N	73197.9 [kN/m]	Total field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U	50.4 [kN/m]	Water pressure [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U _v	37.5 [kN/m]	Water pressure [vertical direction, + downward]
	N'	73147.4 [kN/m]	Effective field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	T _c	0.0 [kN/m]	Cohesive resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	T _f	78507.8 [kN/m]	Friction resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	R _w	0.0 [kN/m]	N' + T _c + T _f resultant [vertical direction, + upward, 0 if downward]
	G _s	12.6 [kN/m]	Shotcrete weight [vertical direction, + downward]
	P	134.4 [kN/m]	Total active forces $G + G_s + 2 \cdot U_v - 2 \cdot R_w$ [vertical direction, + downward, 0 if upward]
Resisting forces	R _N	0.0 [kN/m]	Shotcrete compressive strength [vertical direction, + upward]
	R _T	163.5 [kN/m]	Shotcrete shear strength [vertical direction, + upward]
	A	73.2 [kN/m]	Anchor resistance [vertical direction, + upward]
	R	236.7 [kN/m]	Total resisting forces $R_N + R_T + A$ [vertical direction, + upward]
Bearing factor	SF	1.8 [-]	Bearing factor R / P



ZOOM -

ZOOM +

Galería de acceso al pozo y de escape - CS2 corto plazo

INPUT

Roof of section	
Radius	3.00 [m]

Rock	
Unit weight	27.0 [kN/m3]
Overburden	1750.00 [m]
Coefficient K	1.00 [-]
Friction	50.4 [°]
SF Friction	1.25 [-]
Cohesion	0.0 [kPa]
SF Cohesion	1.00 [-]

Friction	44.0 [°]
Cohesion	0.0 [kPa]

Earthquake	
kV	0.00 [-]

Water	
Unit weight	10.0 [kN/m3]
Head	0.00 [m]
Water coeff top	0.00 [-]
Water coeff bottom	0.00 [-]

Shotcrete	
Thickness	5 [cm]
Unit weight	25.0 [kN/m3]
Shear strength	1.1 [MPa]
Compressive strength	20.0 [MPa]
SF	1.50 [-]
Thickness (arch effect)	0.00 [cm]

Shear force	36.7 [kN/m]
Axial force	0.0 [kN/m]
Normal stress	0.0 [MPa]

Anchor	
Bar diameter	20 [mm]
Yielding	500 [MPa]
SF	1.35 [-]
in plane	2.00 [m]
out of plane	2.00 [m]
Anchor length	2.5 [m]
Boring diameter	50 [mm]
Bond strength	1.000 [MPa]

Anchoring length	1.0 [m]
Force	116.3 [kN]
A	4.0 [m2]
Pressure	29.1 [kPa]
R1	4.5 [m]
R2	5.5 [m]

CONTROLS

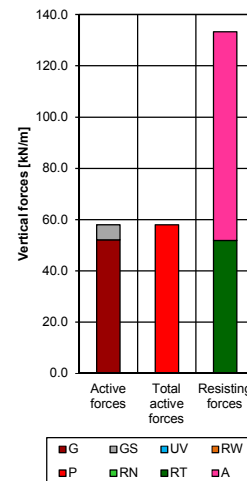
Shotcrete	d_arch < d_actual ... - 5 cm	
	Normal stress < 10 MPa	

Anchors	Lopt	3.6 [m]	
	Lmin	2.9 [m]	WARNING: bolt length is quite short
	Lmax	4.3 [m]	
	L_anchoring < L_bolt		

Bearing factor	SF_min	2.3 [-]	Bearing capacity > 1 OK
----------------	--------	---------	-------------------------

CALCULATION RESULTS - DETERMINANT WEDGE

Geometry	alfa	Critical [-]	Wedge top angle (graphic)
	alfa	45 [°]	Wedge top angle (critical value)
	alfa	50 [°]	Wedge top angle (user defined value)
	H	1.24 [m]	Wedge height
	h*	1.24 [m]	Wedge height limited by ground level
Active forces	G	52.1 [kN/m]	Wedge weight [vertical direction, + downward]
	N	83005.7 [kN/m]	Total field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U	0.0 [kN/m]	Water pressure [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U _v	0.0 [kN/m]	Water pressure [vertical direction, + downward]
	N'	83005.7 [kN/m]	Effective field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	T _c	0.0 [kN/m]	Cohesive resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	T _f	80269.4 [kN/m]	Friction resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	R _w	0.0 [kN/m]	N' + T _c + T _f resultant [vertical direction, + upward, 0 if downward]
	G _s	5.9 [kN/m]	Shotcrete weight [vertical direction, + downward]
	P	58.0 [kN/m]	Total active forces $G + G_s + 2 \cdot U_v - 2 \cdot R_w$ [vertical direction, + downward, 0 if upward]
Resisting forces	R _N	0.0 [kN/m]	Shotcrete compressive strength [vertical direction, + upward]
	R _T	51.9 [kN/m]	Shotcrete shear strength [vertical direction, + upward]
	A	81.4 [kN/m]	Anchor resistance [vertical direction, + upward]
	R	133.2 [kN/m]	Total resisting forces $R_N + R_T + A$ [vertical direction, + upward]
Bearing factor	SF	2.3 [-]	Bearing factor R / P



ZOOM -

ZOOM +

Galería de acceso al pozo y de escape - CS2 largo plazo

INPUT

Roof of section	
Radius	3.00 [m]

Rock	
Unit weight	27.0 [kN/m3]
Overburden	1750.00 [m]
Coefficient K	1.00 [-]
Friction	50.4 [°]
SF Friction	1.25 [-]
Cohesion	0.0 [kPa]
SF Cohesion	1.00 [-]

Friction	44.0 [°]
Cohesion	0.0 [kPa]

Earthquake	
kV	0.15 [-]

Water	
Unit weight	10.0 [kN/m3]
Head	2.00 [m]
Water coeff top	1.00 [-]
Water coeff bottom	1.00 [-]

Shotcrete	
Thickness	10 [cm]
Unit weight	25.0 [kN/m3]
Shear strength	1.1 [MPa]
Compressive strength	20.0 [MPa]
SF	1.00 [-]
Thickness (arch effect)	0.00 [cm]

Shear force	110.0 [kN/m]
Axial force	0.0 [kN/m]
Normal stress	0.0 [MPa]

Anchor	
Bar diameter	20 [mm]
Yielding	500 [MPa]
SF	1.35 [-]
in plane	2.00 [m]
out of plane	2.00 [m]
Anchor length	2.5 [m]
Boring diameter	50 [mm]
Bond strength	1.000 [MPa]

Anchoring length	1.0 [m]
Force	116.3 [kN]
A	4.0 [m2]
Pressure	29.1 [kPa]
R1	4.5 [m]
R2	5.5 [m]

CONTROLS

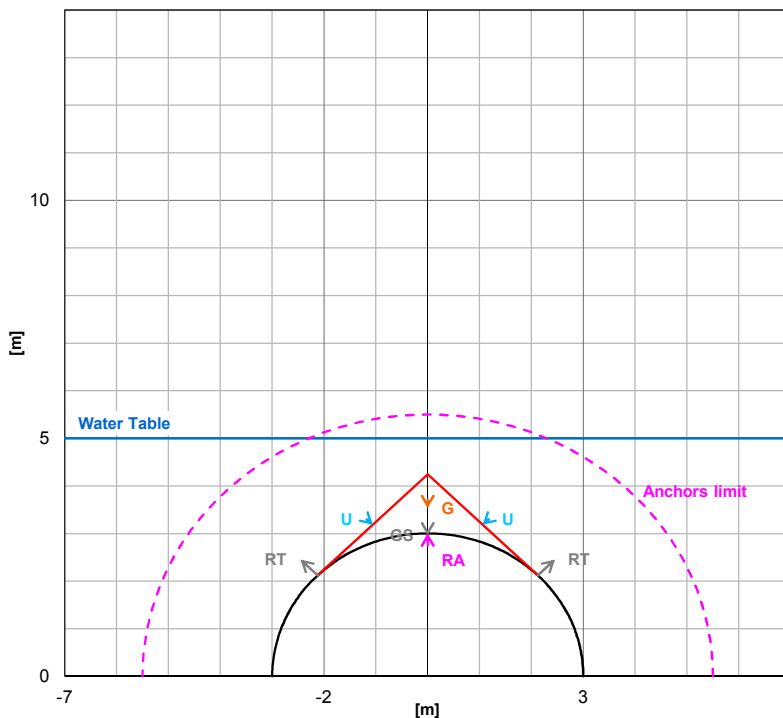
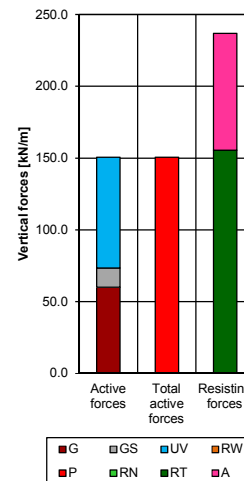
Shotcrete	d_arch < d_actual ... - 5 cm	
	Normal stress < 10 MPa	

Anchors	Lopt	3.6 [m]	
	Lmin	2.9 [m]	WARNING: bolt length is quite short
	Lmax	4.3 [m]	
	L_anchoring < L_bolt		

Bearing factor	SF_min	1.6 [-]	Bearing capacity > 1 OK
----------------	--------	---------	-------------------------

CALCULATION RESULTS - DETERMINANT WEDGE

Geometry	alfa	Critical	[-]	Wedge top angle (graphic)
	alfa	45	[°]	Wedge top angle (critical value)
	alfa	50	[°]	Wedge top angle (user defined value)
	H	1.24	[m]	Wedge height
	h*	1.24	[m]	Wedge height limited by ground level
Active forces	G	60.0	[kN/m]	Wedge weight [vertical direction, + downward]
	N	83005.7	[kN/m]	Total field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U	54.5	[kN/m]	Water pressure [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U _v	38.6	[kN/m]	Water pressure [vertical direction, + downward]
	N'	82951.2	[kN/m]	Effective field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	T _c	0.0	[kN/m]	Cohesive resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	T _f	80216.6	[kN/m]	Friction resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	R _w	0.0	[kN/m]	N' + T _c + T _f resultant [vertical direction, + upward, 0 if downward]
	G _s	13.5	[kN/m]	Shotcrete weight [vertical direction, + downward]
	P	150.7	[kN/m]	Total active forces $G + G_s + 2 \cdot U_v - 2 \cdot R_w$ [vertical direction, + downward, 0 if upward]
Resisting forces	R _N	0.0	[kN/m]	Shotcrete compressive strength [vertical direction, + upward]
	R _T	155.6	[kN/m]	Shotcrete shear strength [vertical direction, + upward]
	A	81.4	[kN/m]	Anchor resistance [vertical direction, + upward]
	R	236.9	[kN/m]	Total resisting forces $R_N + R_T + A$ [vertical direction, + upward]
Bearing factor	SF	1.6	[-]	Bearing factor R / P



ZOOM -

ZOOM +

Galería de acceso al pozo y de escape - CS3 corto plazo

INPUT

Roof of section	
Radius	3.05 [m]

Rock	
Unit weight	27.0 [kN/m3]
Overburden	1750.00 [m]
Coefficient K	1.00 [-]
Friction	45.3 [°]
SF Friction	1.25 [-]
Cohesion	0.0 [kPa]
SF Cohesion	1.00 [-]

Friction	39.0 [°]
Cohesion	0.0 [kPa]

Earthquake	
kV	0.00 [-]

Water	
Unit weight	10.0 [kN/m3]
Head	0.00 [m]
Water coeff top	0.00 [-]
Water coeff bottom	0.00 [-]

Shotcrete	
Thickness	5 [cm]
Unit weight	25.0 [kN/m3]
Shear strength	1.1 [MPa]
Compressive strength	20.0 [MPa]
SF	1.50 [-]
Thickness (arch effect)	0.00 [cm]

Shear force	36.7 [kN/m]
Axial force	0.0 [kN/m]
Normal stress	0.0 [MPa]

Anchor	
Bar diameter	20 [mm]
Yielding	500 [MPa]
SF	1.35 [-]
in plane	1.50 [m]
out of plane	1.50 [m]
Anchor length	3.0 [m]
Boring diameter	50 [mm]
Bond strength	0.700 [MPa]

Anchoring length	1.4 [m]
Force	116.3 [kN]
A	2.3 [m2]
Pressure	51.7 [kPa]
R1	4.6 [m]
R2	6.1 [m]

CONTROLS

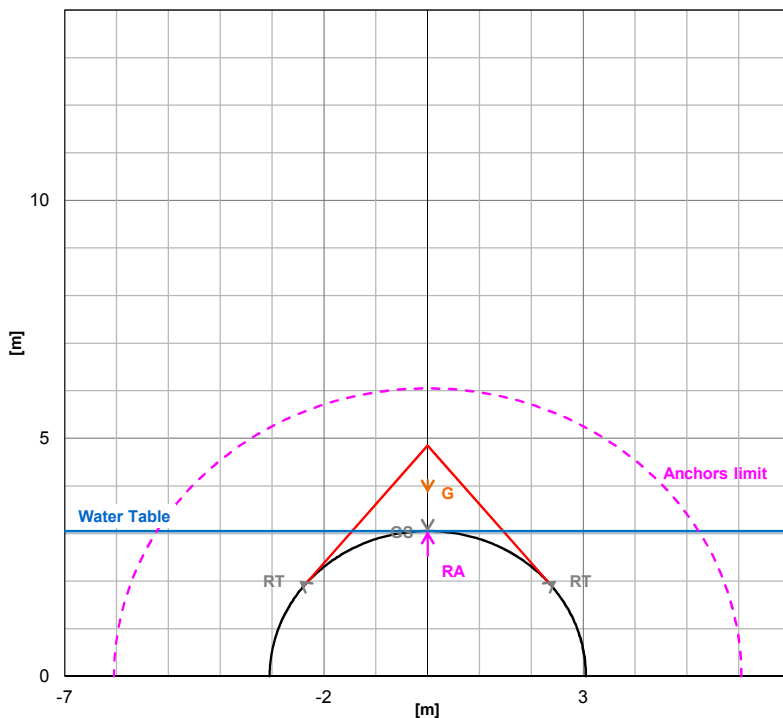
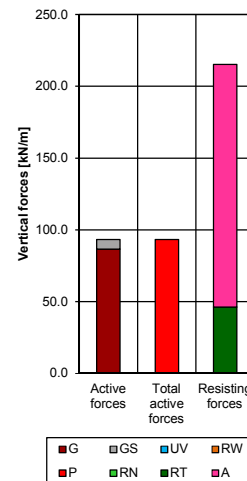
Shotcrete	d_arch < d_actual ... - 5 cm	
	Normal stress < 10 MPa	

Anchors	Lopt	3.7 [m]	Bolt length OK
	Lmin	2.9 [m]	
	Lmax	4.4 [m]	
	L_anchoring < L_bolt		

Bearing factor	SF_min	2.3 [-]	Bearing capacity > 1 OK
----------------	--------	---------	-------------------------

CALCULATION RESULTS - DETERMINANT WEDGE

Geometry	alfa	Critical [-]	Wedge top angle (graphic)
	alfa	39 [°]	Wedge top angle (critical value)
	alfa	5.0 [°]	Wedge top angle (user defined value)
	H	1.80 [m]	Wedge height
	h*	1.80 [m]	Wedge height limited by ground level
Active forces	G	86.6 [kN/m]	Wedge weight [vertical direction, + downward]
	N	109169.9 [kN/m]	Total field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U	0.0 [kN/m]	Water pressure [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U _v	0.0 [kN/m]	Water pressure [vertical direction, + downward]
	N'	109169.9 [kN/m]	Effective field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	T _c	0.0 [kN/m]	Cohesive resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	T _f	88255.3 [kN/m]	Friction resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	R _w	0.0 [kN/m]	N' + T _c + T _f resultant [vertical direction, + upward, 0 if downward]
	G _s	6.8 [kN/m]	Shotcrete weight [vertical direction, + downward]
	P	93.4 [kN/m]	Total active forces $G + G_s + 2 \cdot U_v - 2 \cdot R_w$ [vertical direction, + downward, 0 if upward]
Resisting forces	R _N	0.0 [kN/m]	Shotcrete compressive strength [vertical direction, + upward]
	R _T	46.2 [kN/m]	Shotcrete shear strength [vertical direction, + upward]
	A	169.1 [kN/m]	Anchor resistance [vertical direction, + upward]
	R	215.3 [kN/m]	Total resisting forces $R_N + R_T + A$ [vertical direction, + upward]
Bearing factor	SF	2.3 [-]	Bearing factor R / P



ZOOM -

ZOOM +

Galería de acceso al pozo y de escape - CS3 largo plazo

INPUT

Roof of section	
Radius	3.05 [m]

Rock	
Unit weight	27.0 [kN/m3]
Overburden	1750.00 [m]
Coefficient K	1.00 [-]
Friction	45.3 [°]
SF Friction	1.25 [-]
Cohesion	0.0 [kPa]
SF Cohesion	1.00 [-]

Friction	39.0 [°]
Cohesion	0.0 [kPa]

Earthquake	
kV	0.15 [-]

Water	
Unit weight	10.0 [kN/m3]
Head	2.00 [m]
Water coeff top	1.00 [-]
Water coeff bottom	1.00 [-]

Shotcrete	
Thickness	15 [cm]
Unit weight	25.0 [kN/m3]
Shear strength	1.1 [MPa]
Compressive strength	20.0 [MPa]
SF	1.00 [-]
Thickness (arch effect)	0.00 [cm]

Shear force	165.0 [kN/m]
Axial force	0.0 [kN/m]
Normal stress	0.0 [MPa]

Anchor	
Bar diameter	20 [mm]
Yielding	500 [MPa]
SF	1.35 [-]
in plane	1.50 [m]
out of plane	1.50 [m]
Anchor length	3.0 [m]
Boring diameter	50 [mm]
Bond strength	0.700 [MPa]

Anchoring length	1.4 [m]
Force	116.3 [kN]
A	2.3 [m2]
Pressure	51.7 [kPa]
R1	4.6 [m]
R2	6.1 [m]

CONTROLS

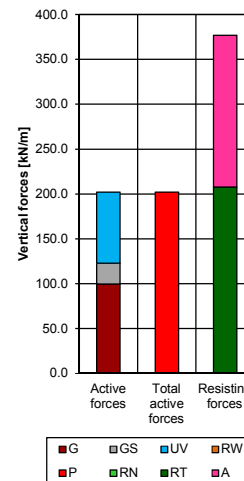
Shotcrete	d_arch < d_actual ... - 5 cm	
	Normal stress < 10 MPa	

Anchors	Lopt 3.7 [m]	Bolt length OK
	Lmin 2.9 [m]	
	Lmax 4.4 [m]	
	L_anchoring < L_bolt	

Bearing factor	SF_min 1.9 [-]	Bearing capacity > 1 OK
----------------	----------------	-------------------------

CALCULATION RESULTS - DETERMINANT WEDGE

Geometry	alfa	Critical [-]	Wedge top angle (graphic)
	alfa	39 [°]	Wedge top angle (critical value)
	alfa	5.5 [°]	Wedge top angle (user defined value)
	H	1.80 [m]	Wedge height
	h*	1.80 [m]	Wedge height limited by ground level
Active forces	G	99.6 [kN/m]	Wedge weight [vertical direction, + downward]
	N	109169.9 [kN/m]	Total field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U	62.8 [kN/m]	Water pressure [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U _v	39.5 [kN/m]	Water pressure [vertical direction, + downward]
	N'	109107.1 [kN/m]	Effective field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	T _c	0.0 [kN/m]	Cohesive resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	T _f	88204.6 [kN/m]	Friction resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	R _w	0.0 [kN/m]	N' + T _c + T _f resultant [vertical direction, + upward, 0 if downward]
	G _s	23.4 [kN/m]	Shotcrete weight [vertical direction, + downward]
	P	202.0 [kN/m]	Total active forces $G + G_s + 2 \cdot U_v - 2 \cdot R_w$ [vertical direction, + downward, 0 if upward]
Resisting forces	R _N	0.0 [kN/m]	Shotcrete compressive strength [vertical direction, + upward]
	R _T	207.7 [kN/m]	Shotcrete shear strength [vertical direction, + upward]
	A	169.1 [kN/m]	Anchor resistance [vertical direction, + upward]
	R	376.8 [kN/m]	Total resisting forces $R_N + R_T + A$ [vertical direction, + upward]
Bearing factor	SF	1.9 [-]	Bearing factor R / P



ZOOM -

ZOOM +

Galería de conexión central - CS1 corto

INPUT

Roof of section	
Radius	4.25 [m]

Rock	
Unit weight	27.0 [kN/m3]
Overburden	1750.00 [m]
Coefficient K	1.00 [-]
Friction	53.3 [°]
SF Friction	1.25 [-]
Cohesion	0.0 [kPa]
SF Cohesion	1.00 [-]

Friction	47.0 [°]
Cohesion	0.0 [kPa]

Earthquake	
kV	0.00 [-]

Water	
Unit weight	10.0 [kN/m3]
Head	0.00 [m]
Water coeff top	0.00 [-]
Water coeff bottom	0.00 [-]

Shotcrete	
Thickness	5 [cm]
Unit weight	25.0 [kN/m3]
Shear strength	1.1 [MPa]
Compressive strength	20.0 [MPa]
SF	1.50 [-]
Thickness (arch effect)	0.00 [cm]

Shear force	36.7 [kN/m]
Axial force	0.0 [kN/m]
Normal stress	0.0 [MPa]

Anchor	
Bar diameter	25 [mm]
Yielding	499 [MPa]
SF	1.35 [-]
in plane	2.00 [m]
out of plane	2.00 [m]
Anchor length	4.0 [m]
Boring diameter	50 [mm]
Bond strength	1.000 [MPa]

Anchoring length	1.6 [m]
Force	181.5 [kN]
A	4.0 [m2]
Pressure	45.4 [kPa]
R1	6.7 [m]
R2	8.3 [m]

CONTROLS

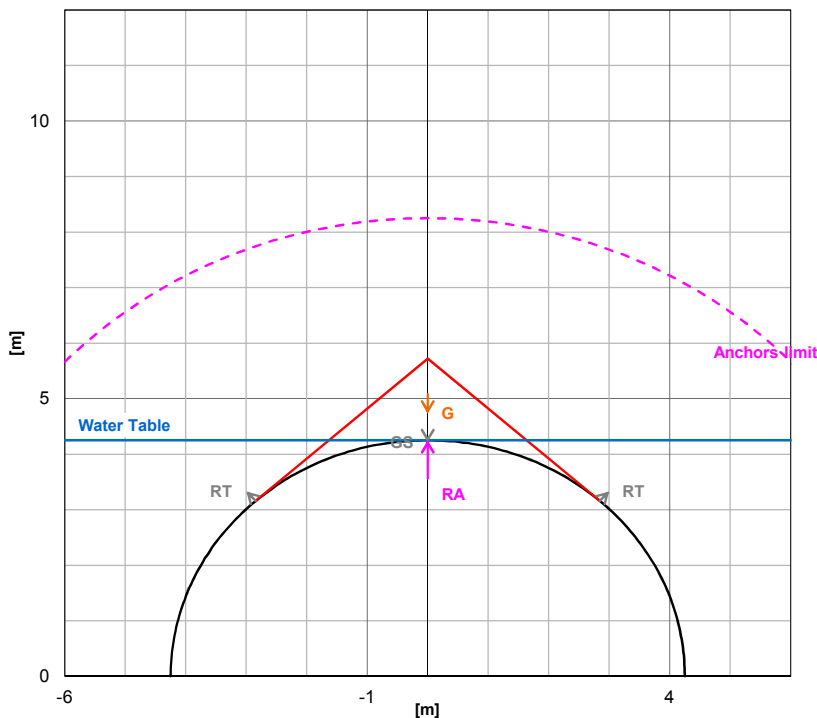
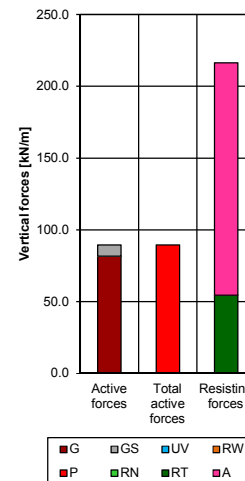
Shotcrete	d_arch < d_actual ... - 5 cm	
	Normal stress < 10 MPa	

Anchors	Lopt 4.4 [m]	Bolt length OK
	Lmin 3.5 [m]	
	Lmax 5.2 [m]	
	L_anchoring < L_bolt	

Bearing factor	SF_min 2.4 [-]	Bearing capacity > 1 OK
----------------	----------------	-------------------------

CALCULATION RESULTS - DETERMINANT WEDGE

Geometry	alfa	Critical [-]	Wedge top angle (graphic)
	alfa	48 [°]	Wedge top angle (critical value)
	alfa	50 [°]	Wedge top angle (user defined value)
	H	1.47 [m]	Wedge height
	h*	1.47 [m]	Wedge height limited by ground level
Active forces	G	81.6 [kN/m]	Wedge weight [vertical direction, + downward]
	N	103684.2 [kN/m]	Total field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U	0.0 [kN/m]	Water pressure [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U _v	0.0 [kN/m]	Water pressure [vertical direction, + downward]
	N'	103684.2 [kN/m]	Effective field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	T _c	0.0 [kN/m]	Cohesive resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	T _f	111282.4 [kN/m]	Friction resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	R _w	0.0 [kN/m]	N' + T _c + T _f resultant [vertical direction, + upward, 0 if downward]
	G _s	7.8 [kN/m]	Shotcrete weight [vertical direction, + downward]
	P	89.4 [kN/m]	Total active forces $G + G_s + 2 \cdot U_v - 2 \cdot R_w$ [vertical direction, + downward, 0 if upward]
Resisting forces	R _N	0.0 [kN/m]	Shotcrete compressive strength [vertical direction, + upward]
	R _T	54.5 [kN/m]	Shotcrete shear strength [vertical direction, + upward]
	A	161.8 [kN/m]	Anchor resistance [vertical direction, + upward]
	R	216.3 [kN/m]	Total resisting forces $R_N + R_T + A$ [vertical direction, + upward]
Bearing factor	SF	2.4 [-]	Bearing factor R / P



ZOOM -

ZOOM +

Galería de conexión central - CS1 largo plazo

INPUT

Roof of section	
Radius	4.25 [m]

Rock	
Unit weight	27.0 [kN/m3]
Overburden	1750.00 [m]
Coefficient K	1.00 [-]
Friction	53.3 [°]
SF Friction	1.25 [-]
Cohesion	0.0 [kPa]
SF Cohesion	1.00 [-]

Friction	47.0 [°]
Cohesion	0.0 [kPa]

Earthquake	
kV	0.15 [-]

Water	
Unit weight	10.0 [kN/m3]
Head	2.00 [m]
Water coeff top	1.00 [-]
Water coeff bottom	1.00 [-]

Shotcrete	
Thickness	10 [cm]
Unit weight	25.0 [kN/m3]
Shear strength	1.1 [MPa]
Compressive strength	20.0 [MPa]
SF	1.00 [-]
Thickness (arch effect)	0.00 [cm]

Shear force	110.0 [kN/m]
Axial force	0.0 [kN/m]
Normal stress	0.0 [MPa]

Anchor	
Bar diameter	20 [mm]
Yielding	780 [MPa]
SF	1.35 [-]
in plane	2.00 [m]
out of plane	2.00 [m]
Anchor length	4.0 [m]
Boring diameter	50 [mm]
Bond strength	1.000 [MPa]

Anchoring length	1.6 [m]
Force	181.5 [kN]
A	4.0 [m2]
Pressure	45.4 [kPa]
R1	6.7 [m]
R2	8.3 [m]

CONTROLS

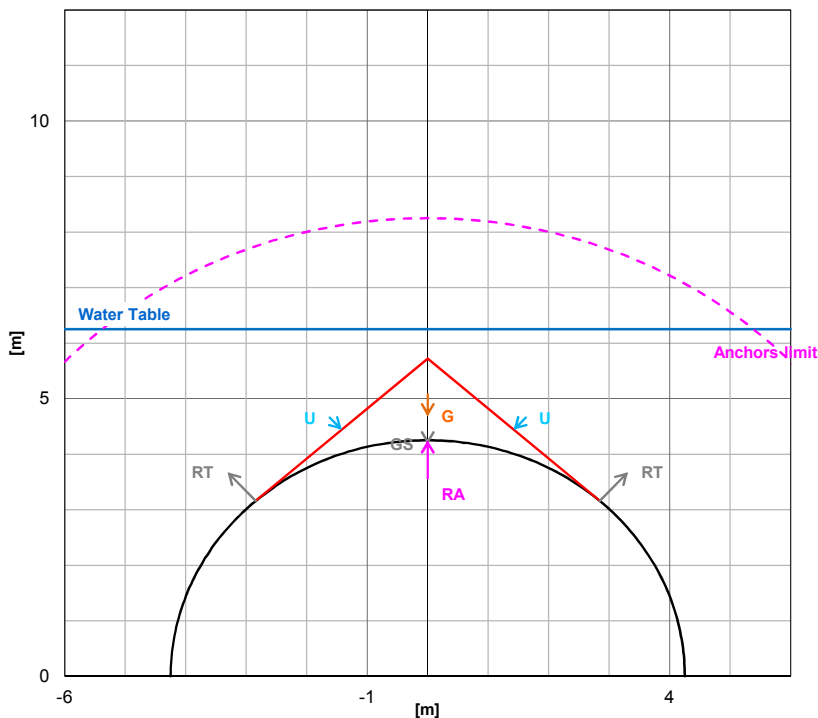
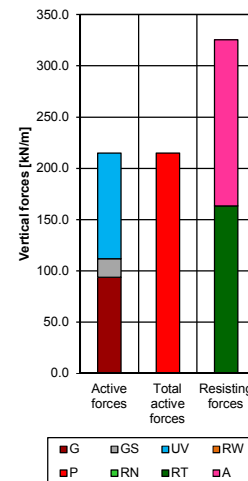
Shotcrete	d_arch < d_actual ... - 5 cm	
	Normal stress < 10 MPa	

Anchors	Lopt 4.4 [m]	Bolt length OK
	Lmin 3.5 [m]	
	Lmax 5.2 [m]	
	L_anchoring < L_bolt	

Bearing factor	SF_min 1.5 [-]	Bearing capacity > 1 OK
----------------	----------------	-------------------------

CALCULATION RESULTS - DETERMINANT WEDGE

Geometry	alfa	Critical [-]	Wedge top angle (graphic)
	alfa	48 [°]	Wedge top angle (critical value)
	alfa	52 [°]	Wedge top angle (user defined value)
	H	1.47 [m]	Wedge height
	h*	1.47 [m]	Wedge height limited by ground level
Active forces	G	93.9 [kN/m]	Wedge weight [vertical direction, + downward]
	N	103684.2 [kN/m]	Total field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U	69.3 [kN/m]	Water pressure [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U _v	51.5 [kN/m]	Water pressure [vertical direction, + downward]
	N'	103614.8 [kN/m]	Effective field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	T _c	0.0 [kN/m]	Cohesive resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	T _f	111208.0 [kN/m]	Friction resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	R _w	0.0 [kN/m]	N' + T _c + T _f resultant [vertical direction, + upward, 0 if downward]
	G _s	17.9 [kN/m]	Shotcrete weight [vertical direction, + downward]
	P	214.8 [kN/m]	Total active forces $G + G_s + 2 \cdot U_v - 2 \cdot R_w$ [vertical direction, + downward, 0 if upward]
Resisting forces	R _N	0.0 [kN/m]	Shotcrete compressive strength [vertical direction, + upward]
	R _T	163.5 [kN/m]	Shotcrete shear strength [vertical direction, + upward]
	A	161.8 [kN/m]	Anchor resistance [vertical direction, + upward]
	R	325.3 [kN/m]	Total resisting forces $R_N + R_T + A$ [vertical direction, + upward]
Bearing factor	SF	1.5 [-]	Bearing factor R / P



ZOOM -

ZOOM +

Galería de conexión central - CS2 corto plazo

INPUT

Roof of section	
Radius	4.30 [m]

Rock	
Unit weight	27.0 [kN/m3]
Overburden	1750.00 [m]
Coefficient K	1.00 [-]
Friction	50.4 [°]
SF Friction	1.25 [-]
Cohesion	0.0 [kPa]
SF Cohesion	1.00 [-]

Friction	44.0 [°]
Cohesion	0.0 [kPa]

Earthquake	
kV	0.00 [-]

Water	
Unit weight	10.0 [kN/m3]
Head	0.00 [m]
Water coeff top	0.00 [-]
Water coeff bottom	0.00 [-]

Shotcrete	
Thickness	5 [cm]
Unit weight	25.0 [kN/m3]
Shear strength	1.1 [MPa]
Compressive strength	20.0 [MPa]
SF	1.50 [-]
Thickness (arch effect)	0.00 [cm]

Shear force	36.7 [kN/m]
Axial force	0.0 [kN/m]
Normal stress	0.0 [MPa]

Anchor	
Bar diameter	25 [mm]
Yielding	499 [MPa]
SF	1.35 [-]
in plane	2.00 [m]
out of plane	2.00 [m]
Anchor length	4.0 [m]
Boring diameter	50 [mm]
Bond strength	1.000 [MPa]

Anchoring length	1.6 [m]
Force	181.5 [kN]
A	4.0 [m2]
Pressure	45.4 [kPa]
R1	6.7 [m]
R2	8.3 [m]

CONTROLS

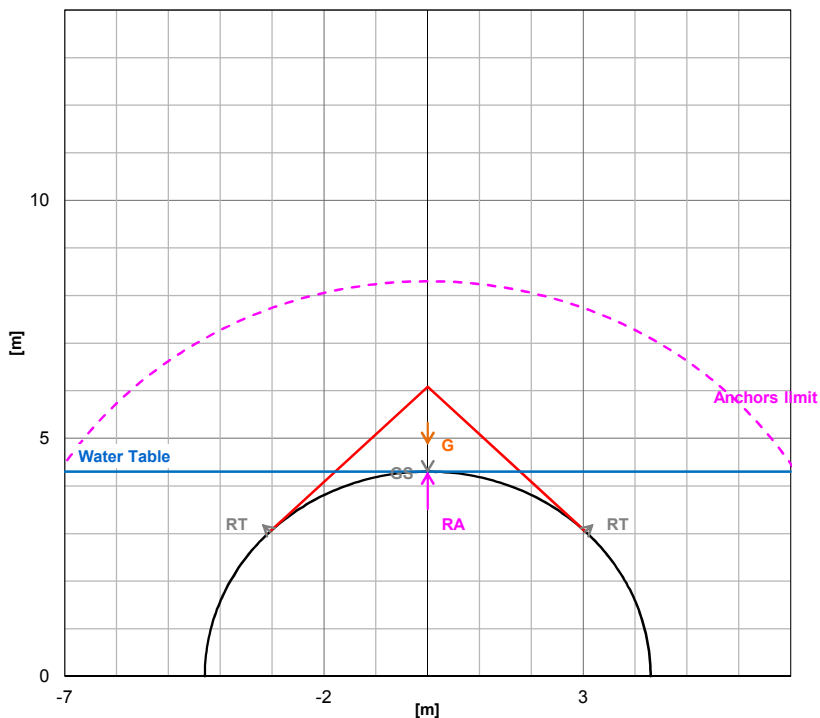
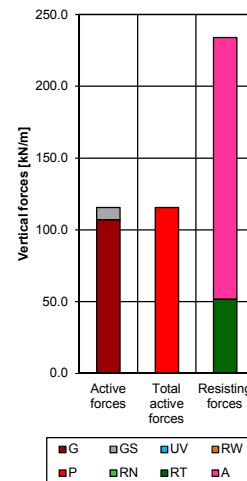
Shotcrete	d_arch < d_actual ... - 5 cm	
	Normal stress < 10 MPa	

Anchors	Lopt 4.4 [m]	Bolt length OK
	Lmin 3.5 [m]	
	Lmax 5.3 [m]	
	L_anchoring < L_bolt	

Bearing factor	SF_min 2.0 [-]	Bearing capacity > 1 OK
----------------	----------------	-------------------------

CALCULATION RESULTS - DETERMINANT WEDGE

Geometry	alfa	Critical [-]	Wedge top angle (graphic)
	alfa	45 [°]	Wedge top angle (critical value)
	alfa	52 [°]	Wedge top angle (user defined value)
	H	1.78 [m]	Wedge height
	h*	1.78 [m]	Wedge height limited by ground level
Active forces	G	107.1 [kN/m]	Wedge weight [vertical direction, + downward]
	N	118956.6 [kN/m]	Total field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U	0.0 [kN/m]	Water pressure [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U _v	0.0 [kN/m]	Water pressure [vertical direction, + downward]
	N'	118956.6 [kN/m]	Effective field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	T _c	0.0 [kN/m]	Cohesive resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	T _f	115035.1 [kN/m]	Friction resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	R _w	0.0 [kN/m]	N' + T _c + T _f resultant [vertical direction, + upward, 0 if downward]
	G _s	8.4 [kN/m]	Shotcrete weight [vertical direction, + downward]
	P	115.6 [kN/m]	Total active forces G + G _s + 2·U _v - 2·R _w [vertical direction, + downward, 0 if upward]
Resisting forces	R _N	0.0 [kN/m]	Shotcrete compressive strength [vertical direction, + upward]
	R _T	51.9 [kN/m]	Shotcrete shear strength [vertical direction, + upward]
	A	182.0 [kN/m]	Anchor resistance [vertical direction, + upward]
	R	233.9 [kN/m]	Total resisting forces R _N + R _T + A [vertical direction, + upward]
Bearing factor	SF	2.0 [-]	Bearing factor R / P



ZOOM -

ZOOM +

Galería de conexión central - CS2 largo plazo

INPUT

Roof of section	
Radius	4.30 [m]

Rock	
Unit weight	27.0 [kN/m3]
Overburden	1750.00 [m]
Coefficient K	1.00 [-]
Friction	50.4 [°]
SF Friction	1.25 [-]
Cohesion	0.0 [kPa]
SF Cohesion	1.00 [-]

Friction	44.0 [°]
Cohesion	0.0 [kPa]

Earthquake	
kV	0.15 [-]

Water	
Unit weight	10.0 [kN/m3]
Head	2.00 [m]
Water coeff top	1.00 [-]
Water coeff bottom	1.00 [-]

Shotcrete	
Thickness	15 [cm]
Unit weight	25.0 [kN/m3]
Shear strength	1.1 [MPa]
Compressive strength	20.0 [MPa]
SF	1.00 [-]
Thickness (arch effect)	0.00 [cm]

Shear force	165.0 [kN/m]
Axial force	0.0 [kN/m]
Normal stress	0.0 [MPa]

Anchor	
Bar diameter	25 [mm]
Yielding	499 [MPa]
SF	1.35 [-]
in plane	2.00 [m]
out of plane	2.00 [m]
Anchor length	4.0 [m]
Boring diameter	50 [mm]
Bond strength	1.000 [MPa]

Anchoring length	1.6 [m]
Force	181.5 [kN]
A	4.0 [m2]
Pressure	45.4 [kPa]
R1	6.7 [m]
R2	8.3 [m]

CONTROLS

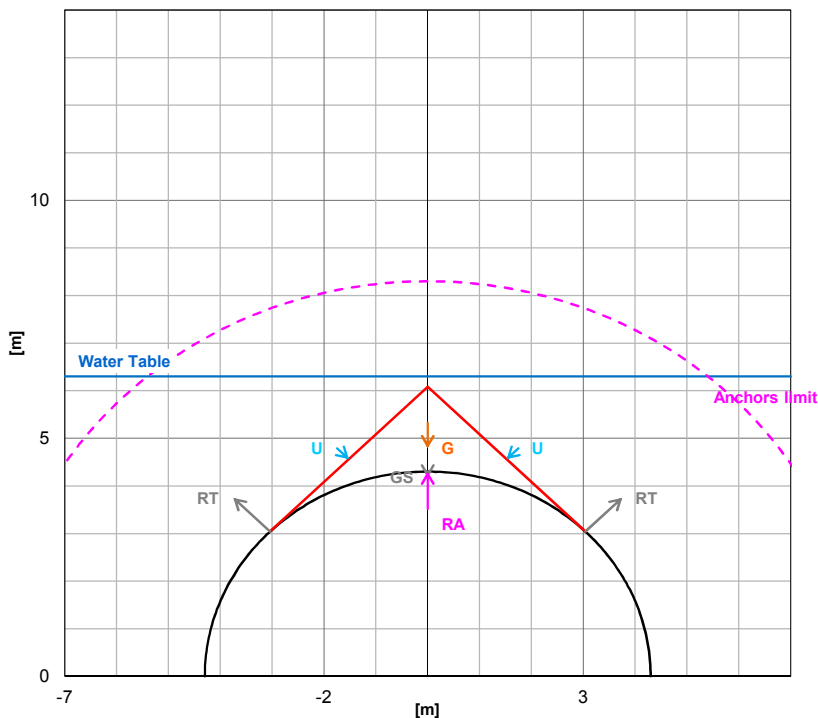
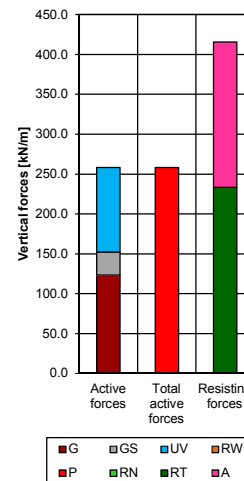
Shotcrete	d_arch < d_actual ... - 5 cm	
	Normal stress < 10 MPa	

Anchors	Lopt 4.4 [m]	Bolt length OK
	Lmin 3.5 [m]	
	Lmax 5.3 [m]	
	L_anchoring < L_bolt	

Bearing factor	SF_min 1.6 [-]	Bearing capacity > 1 OK
----------------	----------------	-------------------------

CALCULATION RESULTS - DETERMINANT WEDGE

Geometry	alfa	Critical [-]	Wedge top angle (graphic)
	alfa	45 [°]	Wedge top angle (critical value)
	alfa	50 [°]	Wedge top angle (user defined value)
	H	1.78 [m]	Wedge height
	h*	1.78 [m]	Wedge height limited by ground level
Active forces	G	123.2 [kN/m]	Wedge weight [vertical direction, + downward]
	N	118956.6 [kN/m]	Total field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U	74.8 [kN/m]	Water pressure [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U _v	52.9 [kN/m]	Water pressure [vertical direction, + downward]
	N'	118881.8 [kN/m]	Effective field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	T _c	0.0 [kN/m]	Cohesive resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	T _f	114962.7 [kN/m]	Friction resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	R _w	0.0 [kN/m]	N' + T _c + T _f resultant [vertical direction, + upward, 0 if downward]
	G _s	29.1 [kN/m]	Shotcrete weight [vertical direction, + downward]
	P	258.1 [kN/m]	Total active forces $G + G_s + 2 \cdot U_v - 2 \cdot R_w$ [vertical direction, + downward, 0 if upward]
Resisting forces	R _N	0.0 [kN/m]	Shotcrete compressive strength [vertical direction, + upward]
	R _T	233.3 [kN/m]	Shotcrete shear strength [vertical direction, + upward]
	A	182.0 [kN/m]	Anchor resistance [vertical direction, + upward]
	R	415.4 [kN/m]	Total resisting forces $R_N + R_T + A$ [vertical direction, + upward]
Bearing factor	SF	1.6 [-]	Bearing factor R / P



ZOOM -

ZOOM +

Galería de conexión central - CS3 corto plazo

INPUT

Roof of section	
Radius	4.35 [m]

Rock	
Unit weight	27.0 [kN/m3]
Overburden	1750.00 [m]
Coefficient K	1.00 [-]
Friction	45.3 [°]
SF Friction	1.25 [-]
Cohesion	0.0 [kPa]
SF Cohesion	1.00 [-]

Friction	39.0 [°]
Cohesion	0.0 [kPa]

Earthquake	
kV	0.00 [-]

Water	
Unit weight	10.0 [kN/m3]
Head	0.00 [m]
Water coeff top	0.00 [-]
Water coeff bottom	0.00 [-]

Shotcrete	
Thickness	5 [cm]
Unit weight	25.0 [kN/m3]
Shear strength	1.1 [MPa]
Compressive strength	20.0 [MPa]
SF	1.50 [-]
Thickness (arch effect)	0.00 [cm]

Shear force	36.7 [kN/m]
Axial force	0.0 [kN/m]
Normal stress	0.0 [MPa]

Anchor	
Bar diameter	25 [mm]
Yielding	499 [MPa]
SF	1.35 [-]
in plane	1.50 [m]
out of plane	1.50 [m]
Anchor length	5.0 [m]
Boring diameter	50 [mm]
Bond strength	0.700 [MPa]

Anchoring length	2.2 [m]
Force	181.5 [kN]
A	2.3 [m2]
Pressure	80.7 [kPa]
R1	7.1 [m]
R2	9.4 [m]

CONTROLS

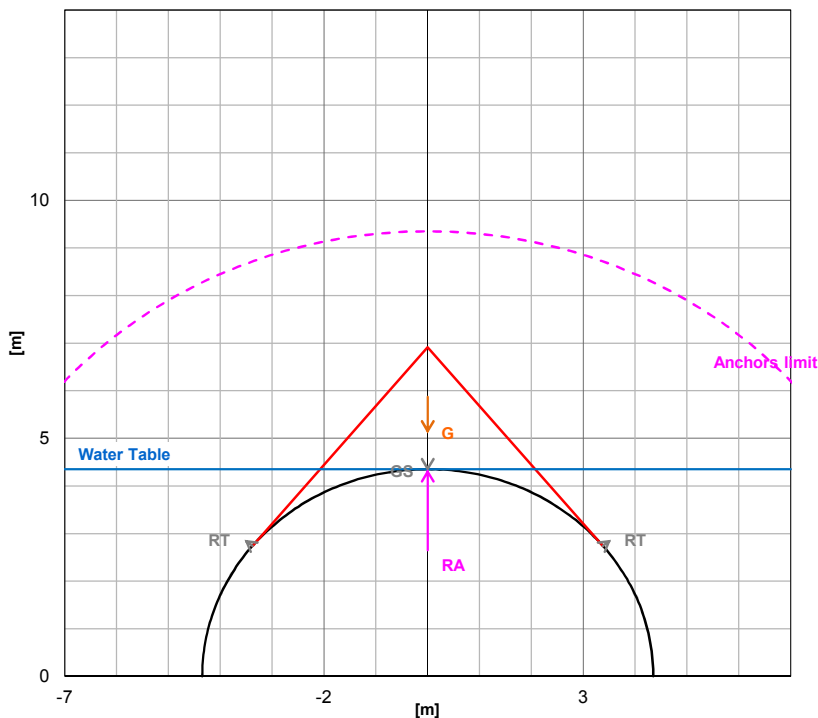
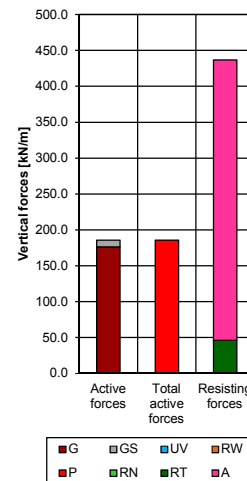
Shotcrete	d_arch < d_actual ... - 5 cm	
	Normal stress < 10 MPa	

Anchors	Lopt 4.4 [m]	Bolt length OK
	Lmin 3.5 [m]	
	Lmax 5.3 [m]	
	L_anchoring < L_bolt	

Bearing factor	SF_min 2.3 [-]	Bearing capacity > 1 OK
----------------	----------------	-------------------------

CALCULATION RESULTS - DETERMINANT WEDGE

Geometry	alfa	Critical [-]	Wedge top angle (graphic)
	alfa	39 [°]	Wedge top angle (critical value)
	alfa	2.7 [°]	Wedge top angle (user defined value)
	H	2.56 [m]	Wedge height
	h*	2.56 [m]	Wedge height limited by ground level
Active forces	G	176.2 [kN/m]	Wedge weight [vertical direction, + downward]
	N	155667.3 [kN/m]	Total field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U	0.0 [kN/m]	Water pressure [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U _v	0.0 [kN/m]	Water pressure [vertical direction, + downward]
	N'	155667.3 [kN/m]	Effective field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	T _c	0.0 [kN/m]	Cohesive resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	T _f	125844.8 [kN/m]	Friction resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	R _w	0.0 [kN/m]	N' + T _c + T _f resultant [vertical direction, + upward, 0 if downward]
	G _s	9.7 [kN/m]	Shotcrete weight [vertical direction, + downward]
	P	185.8 [kN/m]	Total active forces $G + G_s + 2 \cdot U_v - 2 \cdot R_w$ [vertical direction, + downward, 0 if upward]
Resisting forces	R _N	0.0 [kN/m]	Shotcrete compressive strength [vertical direction, + upward]
	R _T	46.2 [kN/m]	Shotcrete shear strength [vertical direction, + upward]
	A	390.5 [kN/m]	Anchor resistance [vertical direction, + upward]
	R	436.6 [kN/m]	Total resisting forces $R_N + R_T + A$ [vertical direction, + upward]
Bearing factor	SF	2.3 [-]	Bearing factor R / P



ZOOM -

ZOOM +

Galería de conexión central - CS3 largo plazo

INPUT

Roof of section	
Radius	4.35 [m]

Rock	
Unit weight	27.0 [kN/m3]
Overburden	1750.00 [m]
Coefficient K	1.00 [-]
Friction	45.3 [°]
SF Friction	1.25 [-]
Cohesion	0.0 [kPa]
SF Cohesion	1.00 [-]

Friction	39.0 [°]
Cohesion	0.0 [kPa]

Earthquake	
kV	0.15 [-]

Water	
Unit weight	10.0 [kN/m3]
Head	2.00 [m]
Water coeff top	1.00 [-]
Water coeff bottom	1.00 [-]

Shotcrete	
Thickness	20 [cm]
Unit weight	25.0 [kN/m3]
Shear strength	1.1 [MPa]
Compressive strength	20.0 [MPa]
SF	1.00 [-]
Thickness (arch effect)	0.00 [cm]

Shear force	220.0 [kN/m]
Axial force	0.0 [kN/m]
Normal stress	0.0 [MPa]

Anchor	
Bar diameter	25 [mm]
Yielding	499 [MPa]
SF	1.35 [-]
in plane	1.50 [m]
out of plane	1.50 [m]
Anchor length	5.0 [m]
Boring diameter	50 [mm]
Bond strength	0.700 [MPa]

Anchoring length	2.2 [m]
Force	181.5 [kN]
A	2.3 [m2]
Pressure	80.7 [kPa]
R1	7.1 [m]
R2	9.4 [m]

CONTROLS

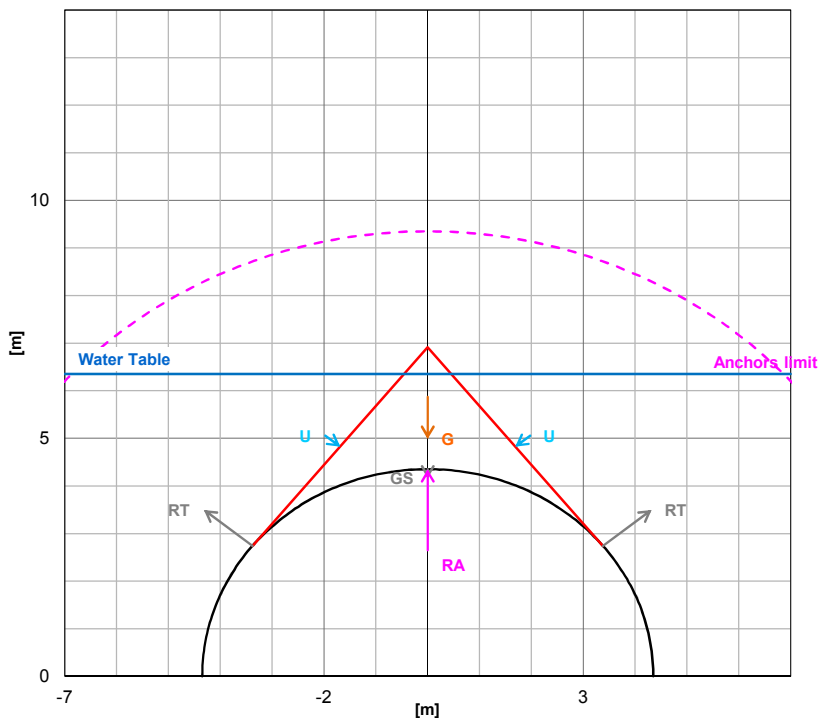
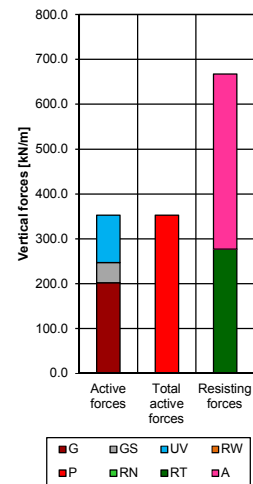
Shotcrete	d_arch < d_actual ... - 5 cm	
	Normal stress < 10 MPa	

Anchors	Lopt 4.4 [m]	Bolt length OK
	Lmin 3.5 [m]	
	Lmax 5.3 [m]	
	L_anchoring < L_bolt	

Bearing factor	SF_min 1.9 [-]	Bearing capacity > 1 OK
----------------	----------------	-------------------------

CALCULATION RESULTS - DETERMINANT WEDGE

Geometry	alfa	Critical [-]	Wedge top angle (graphic)
	alfa	39 [°]	Wedge top angle (critical value)
	alfa	2.5 [°]	Wedge top angle (user defined value)
	H	2.56 [m]	Wedge height
	h*	2.56 [m]	Wedge height limited by ground level
Active forces	G	202.6 [kN/m]	Wedge weight [vertical direction, + downward]
	N	155667.3 [kN/m]	Total field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U	84.0 [kN/m]	Water pressure [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U _v	52.8 [kN/m]	Water pressure [vertical direction, + downward]
	N'	155583.3 [kN/m]	Effective field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	T _c	0.0 [kN/m]	Cohesive resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	T _f	125776.9 [kN/m]	Friction resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	R _w	0.0 [kN/m]	N' + T _c + T _f resultant [vertical direction, + upward, 0 if downward]
	G _s	44.5 [kN/m]	Shotcrete weight [vertical direction, + downward]
	P	352.8 [kN/m]	Total active forces $G + G_s + 2 \cdot U_v - 2 \cdot R_w$ [vertical direction, + downward, 0 if upward]
Resisting forces	R _N	0.0 [kN/m]	Shotcrete compressive strength [vertical direction, + upward]
	R _T	276.9 [kN/m]	Shotcrete shear strength [vertical direction, + upward]
	A	390.5 [kN/m]	Anchor resistance [vertical direction, + upward]
	R	667.4 [kN/m]	Total resisting forces $R_N + R_T + A$ [vertical direction, + upward]
Bearing factor	SF	1.9 [-]	Bearing factor R / P



ZOOM -

ZOOM +

Galería sector de geofísica - CS1 corto plazo

INPUT

Roof of section	
Radius	2.40 [m]

Rock	
Unit weight	27.0 [kN/m3]
Overburden	1750.00 [m]
Coefficient K	1.00 [-]
Friction	53.3 [°]
SF Friction	1.25 [-]
Cohesion	0.0 [kPa]
SF Cohesion	1.00 [-]

Friction	47.0 [°]
Cohesion	0.0 [kPa]

Earthquake	
kV	0.00 [-]

Water	
Unit weight	10.0 [kN/m3]
Head	0.00 [m]
Water coeff top	0.00 [-]
Water coeff bottom	0.00 [-]

Shotcrete	
Thickness	5 [cm]
Unit weight	25.0 [kN/m3]
Shear strength	1.1 [MPa]
Compressive strength	20.0 [MPa]
SF	1.50 [-]
Thickness (arch effect)	0.00 [cm]

Shear force	36.7 [kN/m]
Axial force	0.0 [kN/m]
Normal stress	0.0 [MPa]

Anchor	
Bar diameter	20 [mm]
Yielding	500 [MPa]
SF	1.35 [-]
in plane	2.00 [m]
out of plane	2.00 [m]
Anchor length	2.5 [m]
Boring diameter	50 [mm]
Bond strength	1.000 [MPa]

Anchoring length	1.0 [m]
Force	116.3 [kN]
A	4.0 [m2]
Pressure	29.1 [kPa]
R1	3.9 [m]
R2	4.9 [m]

CONTROLS

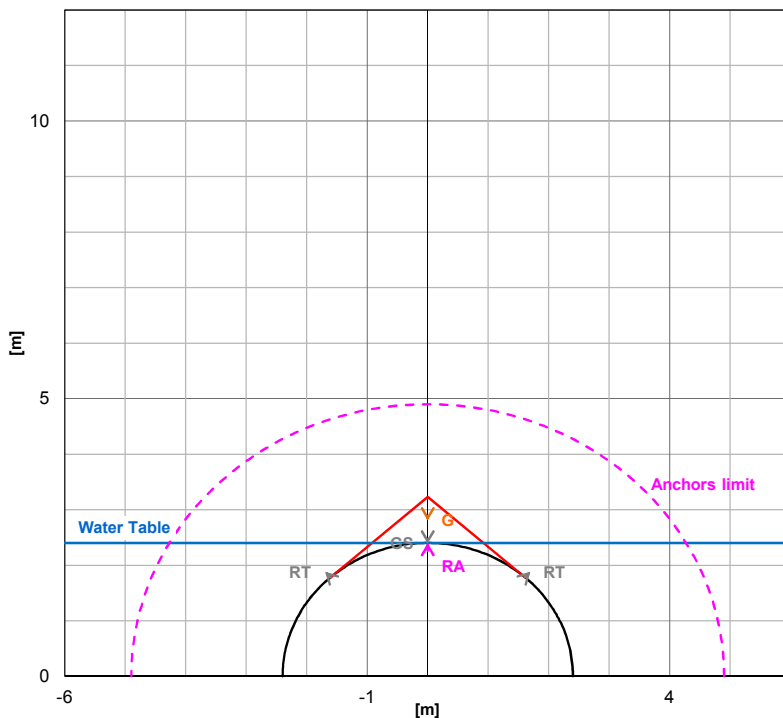
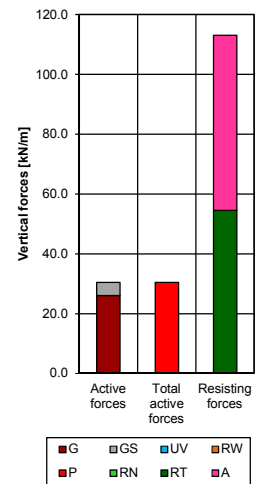
Shotcrete	d_arch < d_actual ... - 5 cm	
	Normal stress < 10 MPa	

Anchors	Lopt	3.2 [m]	
	Lmin	2.6 [m]	WARNING: bolt length is quite short
	Lmax	3.9 [m]	
	L_anchoring < L_bolt		

Bearing factor	SF_min	3.7 [-]	Bearing capacity > 1 OK
----------------	--------	---------	-------------------------

CALCULATION RESULTS - DETERMINANT WEDGE

Geometry	alfa	Critical [-]	Wedge top angle (graphic)
	alfa	48 [°]	Wedge top angle (critical value)
	alfa	53.3 [°]	Wedge top angle (user defined value)
	H	0.83 [m]	Wedge height
	h*	0.83 [m]	Wedge height limited by ground level
Active forces	G	26.0 [kN/m]	Wedge weight [vertical direction, + downward]
	N	58561.8 [kN/m]	Total field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U	0.0 [kN/m]	Water pressure [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U _v	0.0 [kN/m]	Water pressure [vertical direction, + downward]
	N'	58561.8 [kN/m]	Effective field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	T _c	0.0 [kN/m]	Cohesive resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	T _f	62853.3 [kN/m]	Friction resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	R _w	0.0 [kN/m]	N' + T _c + T _f resultant [vertical direction, + upward, 0 if downward]
	G _s	4.4 [kN/m]	Shotcrete weight [vertical direction, + downward]
	P	30.4 [kN/m]	Total active forces $G + G_s + 2 \cdot U_v - 2 \cdot R_w$ [vertical direction, + downward, 0 if upward]
Resisting forces	R _N	0.0 [kN/m]	Shotcrete compressive strength [vertical direction, + upward]
	R _T	54.5 [kN/m]	Shotcrete shear strength [vertical direction, + upward]
	A	58.6 [kN/m]	Anchor resistance [vertical direction, + upward]
	R	113.1 [kN/m]	Total resisting forces $R_N + R_T + A$ [vertical direction, + upward]
Bearing factor	SF	3.7 [-]	Bearing factor R / P



ZOOM -

ZOOM +

Galería sector de geofísica - CS1 corto plazo

INPUT

Roof of section	
Radius	2.40 [m]

Rock	
Unit weight	27.0 [kN/m3]
Overburden	1750.00 [m]
Coefficient K	1.00 [-]
Friction	53.3 [°]
SF Friction	1.25 [-]
Cohesion	0.0 [kPa]
SF Cohesion	1.00 [-]

Friction	47.0 [°]
Cohesion	0.0 [kPa]

Earthquake	
kV	0.00 [-]

Water	
Unit weight	10.0 [kN/m3]
Head	0.00 [m]
Water coeff top	0.00 [-]
Water coeff bottom	0.00 [-]

Shotcrete	
Thickness	5 [cm]
Unit weight	25.0 [kN/m3]
Shear strength	1.1 [MPa]
Compressive strength	20.0 [MPa]
SF	1.50 [-]
Thickness (arch effect)	0.00 [cm]

Shear force	36.7 [kN/m]
Axial force	0.0 [kN/m]
Normal stress	0.0 [MPa]

Anchor	
Bar diameter	20 [mm]
Yielding	500 [MPa]
SF	1.35 [-]
in plane	2.00 [m]
out of plane	2.00 [m]
Anchor length	2.5 [m]
Boring diameter	50 [mm]
Bond strength	1.000 [MPa]

Anchoring length	1.0 [m]
Force	116.3 [kN]
A	4.0 [m2]
Pressure	29.1 [kPa]
R1	3.9 [m]
R2	4.9 [m]

CONTROLS

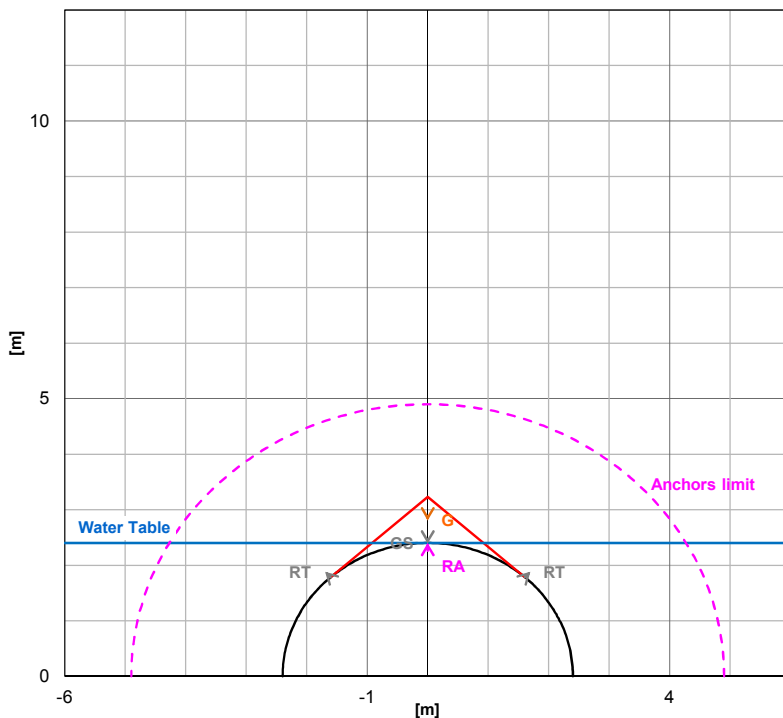
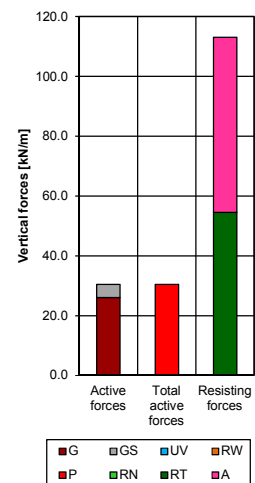
Shotcrete	d_arch < d_actual ... - 5 cm	
	Normal stress < 10 MPa	

Anchors	Lopt	3.2 [m]	
	Lmin	2.6 [m]	WARNING: bolt length is quite short
	Lmax	3.9 [m]	
	L_anchoring < L_bolt		

Bearing factor	SF_min	3.7 [-]	Bearing capacity > 1 OK
----------------	--------	---------	-------------------------

CALCULATION RESULTS - DETERMINANT WEDGE

Geometry	alfa	Critical [-]	Wedge top angle (graphic)
	alfa	48 [°]	Wedge top angle (critical value)
	alfa	53.3 [°]	Wedge top angle (user defined value)
	H	0.83 [m]	Wedge height
	h*	0.83 [m]	Wedge height limited by ground level
Active forces	G	26.0 [kN/m]	Wedge weight [vertical direction, + downward]
	N	58561.8 [kN/m]	Total field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U	0.0 [kN/m]	Water pressure [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U _v	0.0 [kN/m]	Water pressure [vertical direction, + downward]
	N'	58561.8 [kN/m]	Effective field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	T _c	0.0 [kN/m]	Cohesive resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	T _f	62853.3 [kN/m]	Friction resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	R _w	0.0 [kN/m]	N' + T _c + T _f resultant [vertical direction, + upward, 0 if downward]
	G _s	4.4 [kN/m]	Shotcrete weight [vertical direction, + downward]
	P	30.4 [kN/m]	Total active forces $G + G_s + 2 \cdot U_v - 2 \cdot R_w$ [vertical direction, + downward, 0 if upward]
Resisting forces	R _N	0.0 [kN/m]	Shotcrete compressive strength [vertical direction, + upward]
	R _T	54.5 [kN/m]	Shotcrete shear strength [vertical direction, + upward]
	A	58.6 [kN/m]	Anchor resistance [vertical direction, + upward]
	R	113.1 [kN/m]	Total resisting forces $R_N + R_T + A$ [vertical direction, + upward]
Bearing factor	SF	3.7 [-]	Bearing factor R / P



ZOOM -

ZOOM +

Galería sector de geofísica - CS1 largo plazo

INPUT

Roof of section	
Radius	2.40 [m]

Rock	
Unit weight	27.0 [kN/m3]
Overburden	1750.00 [m]
Coefficient K	1.00 [-]
Friction	53.3 [°]
SF Friction	1.25 [-]
Cohesion	0.0 [kPa]
SF Cohesion	1.00 [-]

Friction	47.0 [°]
Cohesion	0.0 [kPa]

Earthquake	
kV	0.15 [-]

Water	
Unit weight	10.0 [kN/m3]
Head	2.00 [m]
Water coeff top	1.00 [-]
Water coeff bottom	1.00 [-]

Shotcrete	
Thickness	10 [cm]
Unit weight	25.0 [kN/m3]
Shear strength	1.1 [MPa]
Compressive strength	20.0 [MPa]
SF	1.00 [-]
Thickness (arch effect)	0.00 [cm]

Shear force	110.0 [kN/m]
Axial force	0.0 [kN/m]
Normal stress	0.0 [MPa]

Anchor	
Bar diameter	20 [mm]
Yielding	500 [MPa]
SF	1.35 [-]
in plane	2.00 [m]
out of plane	2.00 [m]
Anchor length	2.5 [m]
Boring diameter	50 [mm]
Bond strength	1.000 [MPa]

Anchoring length	1.0 [m]
Force	116.3 [kN]
A	4.0 [m2]
Pressure	29.1 [kPa]
R1	3.9 [m]
R2	4.9 [m]

CONTROLS

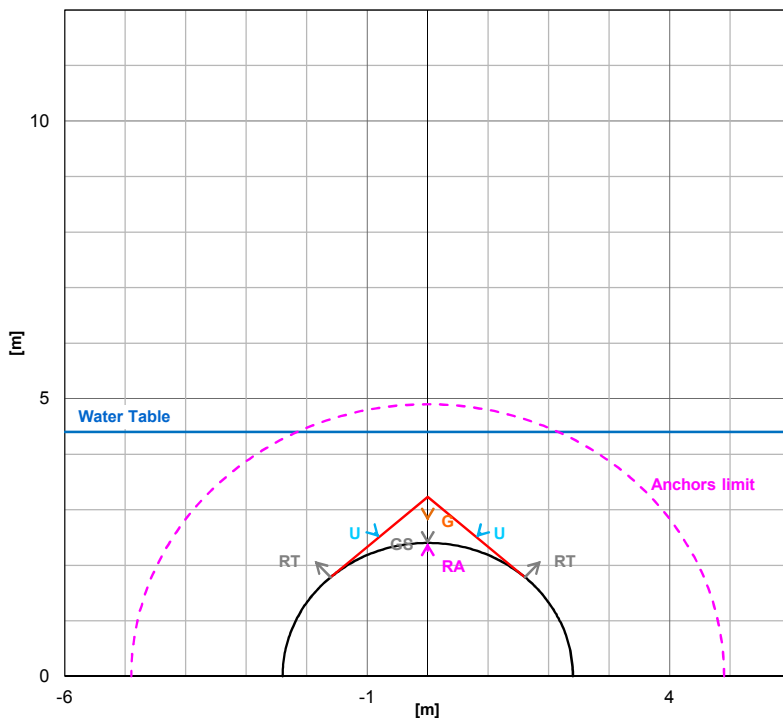
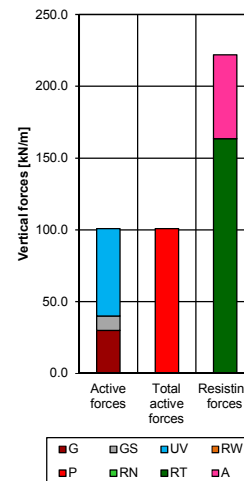
Shotcrete	d_arch < d_actual ... - 5 cm	
	Normal stress < 10 MPa	

Anchors	Lopt	3.2 [m]	
	Lmin	2.6 [m]	WARNING: bolt length is quite short
	Lmax	3.9 [m]	
	L_anchoring < L_bolt		

Bearing factor	SF_min	2.2 [-]	Bearing capacity > 1 OK
----------------	--------	---------	-------------------------

CALCULATION RESULTS - DETERMINANT WEDGE

Geometry	alfa	Critical [-]	Wedge top angle (graphic)
	alfa	48 [°]	Wedge top angle (critical value)
	alfa	52 [°]	Wedge top angle (user defined value)
	H	0.83 [m]	Wedge height
	h*	0.83 [m]	Wedge height limited by ground level
Active forces	G	29.9 [kN/m]	Wedge weight [vertical direction, + downward]
	N	58561.8 [kN/m]	Total field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U	40.9 [kN/m]	Water pressure [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U _v	30.4 [kN/m]	Water pressure [vertical direction, + downward]
	N'	58520.8 [kN/m]	Effective field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	T _c	0.0 [kN/m]	Cohesive resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	T _f	62809.4 [kN/m]	Friction resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	R _w	0.0 [kN/m]	N' + T _c + T _f resultant [vertical direction, + upward, 0 if downward]
	G _s	10.1 [kN/m]	Shotcrete weight [vertical direction, + downward]
	P	100.9 [kN/m]	Total active forces $G + G_s + 2 \cdot U_v - 2 \cdot R_w$ [vertical direction, + downward, 0 if upward]
Resisting forces	R _N	0.0 [kN/m]	Shotcrete compressive strength [vertical direction, + upward]
	R _T	163.5 [kN/m]	Shotcrete shear strength [vertical direction, + upward]
	A	58.6 [kN/m]	Anchor resistance [vertical direction, + upward]
	R	222.1 [kN/m]	Total resisting forces $R_N + R_T + A$ [vertical direction, + upward]
Bearing factor	SF	2.2 [-]	Bearing factor R / P



ZOOM -

ZOOM +

Galería sector de geofísica - CS2 corto plazo

INPUT

Roof of section	
Radius	2.40 [m]

Rock	
Unit weight	27.0 [kN/m3]
Overburden	1750.00 [m]
Coefficient K	1.00 [-]
Friction	50.4 [°]
SF Friction	1.25 [-]
Cohesion	0.0 [kPa]
SF Cohesion	1.00 [-]

Friction	44.0 [°]
Cohesion	0.0 [kPa]

Earthquake	
kV	0.00 [-]

Water	
Unit weight	10.0 [kN/m3]
Head	0.00 [m]
Water coeff top	0.00 [-]
Water coeff bottom	0.00 [-]

Shotcrete	
Thickness	5 [cm]
Unit weight	25.0 [kN/m3]
Shear strength	1.1 [MPa]
Compressive strength	20.0 [MPa]
SF	1.50 [-]
Thickness (arch effect)	0.00 [cm]

Shear force	36.7 [kN/m]
Axial force	0.0 [kN/m]
Normal stress	0.0 [MPa]

Anchor	
Bar diameter	20 [mm]
Yielding	500 [MPa]
SF	1.35 [-]
in plane	2.00 [m]
out of plane	2.00 [m]
Anchor length	2.5 [m]
Boring diameter	50 [mm]
Bond strength	1.000 [MPa]

Anchoring length	1.0 [m]
Force	116.3 [kN]
A	4.0 [m2]
Pressure	29.1 [kPa]
R1	3.9 [m]
R2	4.9 [m]

CONTROLS

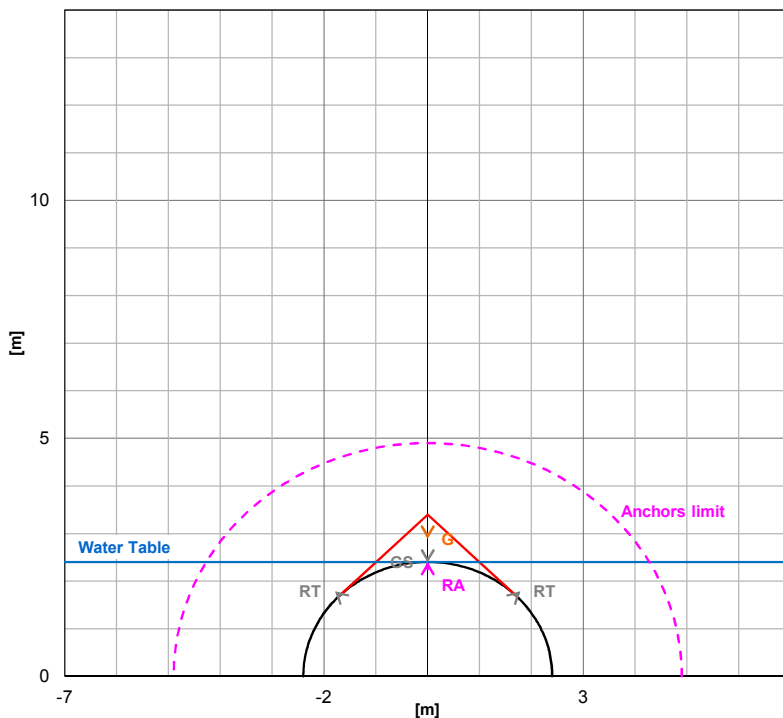
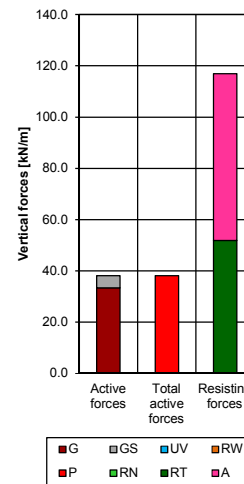
Shotcrete	d_arch < d_actual ... - 5 cm	
	Normal stress < 10 MPa	

Anchors	Lopt	3.2 [m]	
	Lmin	2.6 [m]	WARNING: bolt length is quite short
	Lmax	3.9 [m]	
	L_anchoring < L_bolt		

Bearing factor	SF_min	3.1 [-]	Bearing capacity > 1 OK
----------------	--------	---------	-------------------------

CALCULATION RESULTS - DETERMINANT WEDGE

Geometry	alfa	Critical [-]	Wedge top angle (graphic)
	alfa	45 [°]	Wedge top angle (critical value)
	alfa	50 [°]	Wedge top angle (user defined value)
	H	0.99 [m]	Wedge height
	h*	0.99 [m]	Wedge height limited by ground level
Active forces	G	33.4 [kN/m]	Wedge weight [vertical direction, + downward]
	N	66409.3 [kN/m]	Total field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U	0.0 [kN/m]	Water pressure [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U _v	0.0 [kN/m]	Water pressure [vertical direction, + downward]
	N'	66409.3 [kN/m]	Effective field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	T _c	0.0 [kN/m]	Cohesive resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	T _f	64220.1 [kN/m]	Friction resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	R _w	0.0 [kN/m]	N' + T _c + T _f resultant [vertical direction, + upward, 0 if downward]
	G _s	4.7 [kN/m]	Shotcrete weight [vertical direction, + downward]
	P	38.1 [kN/m]	Total active forces $G + G_s + 2 \cdot U_v - 2 \cdot R_w$ [vertical direction, + downward, 0 if upward]
Resisting forces	R _N	0.0 [kN/m]	Shotcrete compressive strength [vertical direction, + upward]
	R _T	51.9 [kN/m]	Shotcrete shear strength [vertical direction, + upward]
	A	65.1 [kN/m]	Anchor resistance [vertical direction, + upward]
	R	117.0 [kN/m]	Total resisting forces $R_N + R_T + A$ [vertical direction, + upward]
Bearing factor	SF	3.1 [-]	Bearing factor R / P



ZOOM -

ZOOM +

Galería sector de geofísica - CS2 largo plazo

INPUT

Roof of section	
Radius	2.40 [m]

Rock	
Unit weight	27.0 [kN/m3]
Overburden	1750.00 [m]
Coefficient K	1.00 [-]
Friction	50.4 [°]
SF Friction	1.25 [-]
Cohesion	0.0 [kPa]
SF Cohesion	1.00 [-]

Friction	44.0 [°]
Cohesion	0.0 [kPa]

Earthquake	
kV	0.15 [-]

Water	
Unit weight	10.0 [kN/m3]
Head	2.00 [m]
Water coeff top	1.00 [-]
Water coeff bottom	1.00 [-]

Shotcrete	
Thickness	10 [cm]
Unit weight	25.0 [kN/m3]
Shear strength	1.1 [MPa]
Compressive strength	20.0 [MPa]
SF	1.00 [-]
Thickness (arch effect)	0.00 [cm]

Shear force	110.0 [kN/m]
Axial force	0.0 [kN/m]
Normal stress	0.0 [MPa]

Anchor	
Bar diameter	20 [mm]
Yielding	500 [MPa]
SF	1.35 [-]
in plane	2.00 [m]
out of plane	2.00 [m]
Anchor length	2.5 [m]
Boring diameter	50 [mm]
Bond strength	1.000 [MPa]

Anchoring length	1.0 [m]
Force	116.3 [kN]
A	4.0 [m2]
Pressure	29.1 [kPa]
R1	3.9 [m]
R2	4.9 [m]

CONTROLS

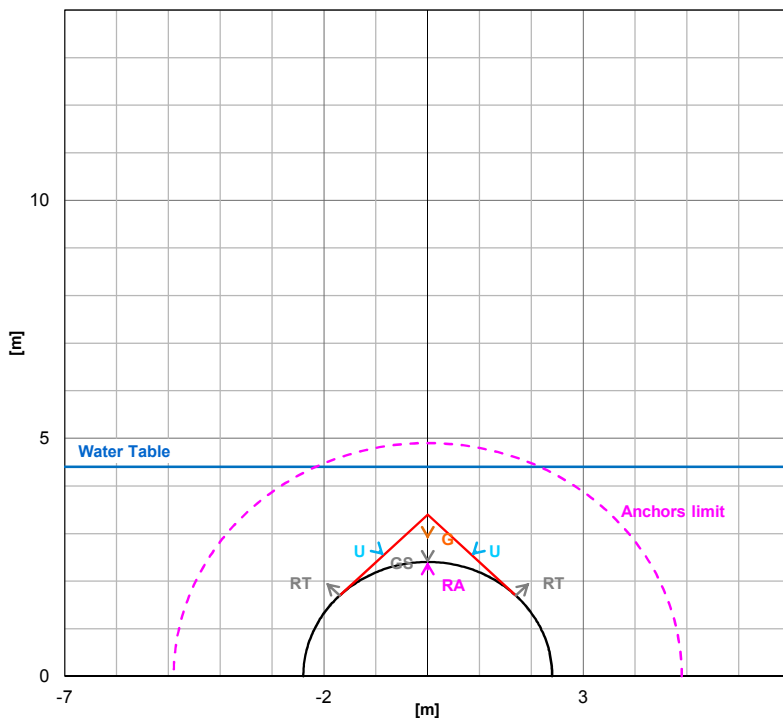
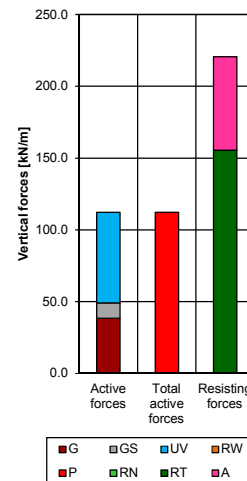
Shotcrete	d_arch < d_actual ... - 5 cm	
	Normal stress < 10 MPa	

Anchors	Lopt	3.2 [m]	
	Lmin	2.6 [m]	WARNING: bolt length is quite short
	Lmax	3.9 [m]	
	L_anchoring < L_bolt		

Bearing factor	SF_min	2.0 [-]	Bearing capacity > 1 OK
----------------	--------	---------	-------------------------

CALCULATION RESULTS - DETERMINANT WEDGE

Geometry	alfa	Critical [-]	Wedge top angle (graphic)
	alfa	45 [°]	Wedge top angle (critical value)
	alfa	50 [°]	Wedge top angle (user defined value)
	H	0.99 [m]	Wedge height
	h*	0.99 [m]	Wedge height limited by ground level
Active forces	G	38.4 [kN/m]	Wedge weight [vertical direction, + downward]
	N	66409.3 [kN/m]	Total field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U	44.5 [kN/m]	Water pressure [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U _v	31.5 [kN/m]	Water pressure [vertical direction, + downward]
	N'	66364.8 [kN/m]	Effective field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	T _c	0.0 [kN/m]	Cohesive resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	T _f	64177.0 [kN/m]	Friction resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	R _w	0.0 [kN/m]	N' + T _c + T _f resultant [vertical direction, + upward, 0 if downward]
	G _s	10.8 [kN/m]	Shotcrete weight [vertical direction, + downward]
	P	112.2 [kN/m]	Total active forces $G + G_s + 2 \cdot U_v - 2 \cdot R_w$ [vertical direction, + downward, 0 if upward]
Resisting forces	R _N	0.0 [kN/m]	Shotcrete compressive strength [vertical direction, + upward]
	R _T	155.6 [kN/m]	Shotcrete shear strength [vertical direction, + upward]
	A	65.1 [kN/m]	Anchor resistance [vertical direction, + upward]
	R	220.7 [kN/m]	Total resisting forces $R_N + R_T + A$ [vertical direction, + upward]
Bearing factor	SF	2.0 [-]	Bearing factor R / P



ZOOM -

ZOOM +

Galería sector de geofísica - CS3 corto plazo

INPUT

Roof of section	
Radius	2.40 [m]

Rock	
Unit weight	27.0 [kN/m3]
Overburden	1750.00 [m]
Coefficient K	1.00 [-]
Friction	45.3 [°]
SF Friction	1.25 [-]
Cohesion	0.0 [kPa]
SF Cohesion	1.00 [-]

Friction	39.0 [°]
Cohesion	0.0 [kPa]

Earthquake	
kV	0.00 [-]

Water	
Unit weight	10.0 [kN/m3]
Head	0.00 [m]
Water coeff top	0.00 [-]
Water coeff bottom	0.00 [-]

Shotcrete	
Thickness	5 [cm]
Unit weight	25.0 [kN/m3]
Shear strength	1.1 [MPa]
Compressive strength	20.0 [MPa]
SF	1.50 [-]
Thickness (arch effect)	0.00 [cm]

Shear force	36.7 [kN/m]
Axial force	0.0 [kN/m]
Normal stress	0.0 [MPa]

Anchor	
Bar diameter	20 [mm]
Yielding	500 [MPa]
SF	1.35 [-]
in plane	2.00 [m]
out of plane	2.00 [m]
Anchor length	3.0 [m]
Boring diameter	50 [mm]
Bond strength	0.700 [MPa]

Anchoring length	1.4 [m]
Force	116.3 [kN]
A	4.0 [m2]
Pressure	29.1 [kPa]
R1	4.0 [m]
R2	5.4 [m]

CONTROLS

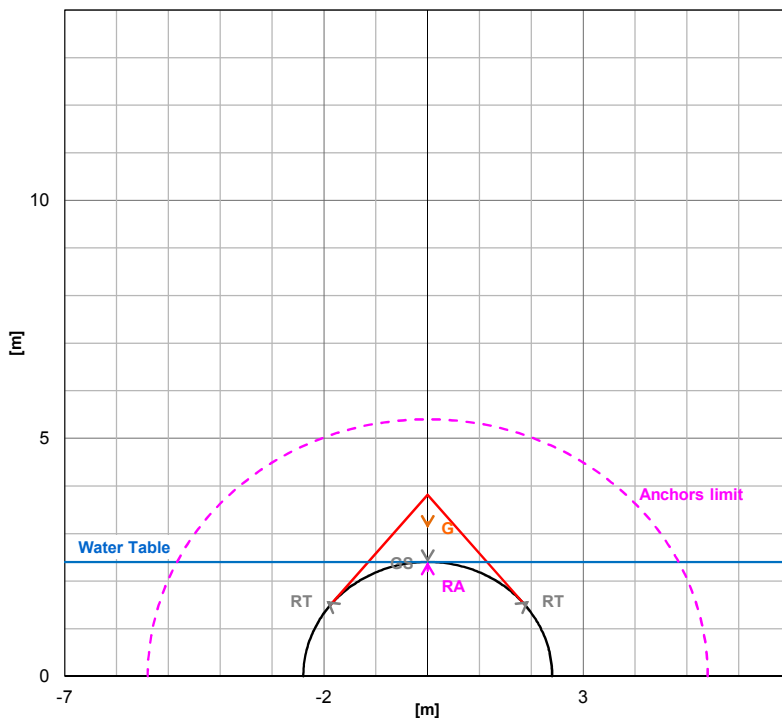
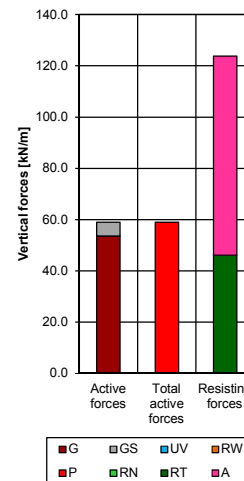
Shotcrete	d_arch < d_actual ... - 5 cm	
	Normal stress < 10 MPa	

Anchors	Lopt 3.2 [m]	Bolt length OK
	Lmin 2.6 [m]	
	Lmax 3.9 [m]	
	L_anchoring < L_bolt	

Bearing factor	SF_min 2.1 [-]	Bearing capacity > 1 OK
----------------	----------------	-------------------------

CALCULATION RESULTS - DETERMINANT WEDGE

Geometry	alfa	Critical [-]	Wedge top angle (graphic)
	alfa	39 [°]	Wedge top angle (critical value)
	alfa	50 [°]	Wedge top angle (user defined value)
	H	1.41 [m]	Wedge height
	h*	1.41 [m]	Wedge height limited by ground level
Active forces	G	53.6 [kN/m]	Wedge weight [vertical direction, + downward]
	N	85913.6 [kN/m]	Total field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U	0.0 [kN/m]	Water pressure [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U _v	0.0 [kN/m]	Water pressure [vertical direction, + downward]
	N'	85913.6 [kN/m]	Effective field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	T _c	0.0 [kN/m]	Cohesive resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	T _f	69454.4 [kN/m]	Friction resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	R _w	0.0 [kN/m]	N' + T _c + T _f resultant [vertical direction, + upward, 0 if downward]
	G _s	5.3 [kN/m]	Shotcrete weight [vertical direction, + downward]
	P	59.0 [kN/m]	Total active forces $G + G_s + 2 \cdot U_v - 2 \cdot R_w$ [vertical direction, + downward, 0 if upward]
Resisting forces	R _N	0.0 [kN/m]	Shotcrete compressive strength [vertical direction, + upward]
	R _T	46.2 [kN/m]	Shotcrete shear strength [vertical direction, + upward]
	A	77.7 [kN/m]	Anchor resistance [vertical direction, + upward]
	R	123.8 [kN/m]	Total resisting forces $R_N + R_T + A$ [vertical direction, + upward]
Bearing factor	SF	2.1 [-]	Bearing factor R / P



ZOOM -

ZOOM +

Galería sector de geofísica - CS3 largo plazo

INPUT

Roof of section	
Radius	2.40 [m]

Rock	
Unit weight	27.0 [kN/m3]
Overburden	1750.00 [m]
Coefficient K	1.00 [-]
Friction	45.3 [°]
SF Friction	1.25 [-]
Cohesion	0.0 [kPa]
SF Cohesion	1.00 [-]

Friction	39.0 [°]
Cohesion	0.0 [kPa]

Earthquake	
kV	0.15 [-]

Water	
Unit weight	10.0 [kN/m3]
Head	2.00 [m]
Water coeff top	1.00 [-]
Water coeff bottom	1.00 [-]

Shotcrete	
Thickness	15 [cm]
Unit weight	25.0 [kN/m3]
Shear strength	1.1 [MPa]
Compressive strength	20.0 [MPa]
SF	1.00 [-]
Thickness (arch effect)	0.00 [cm]

Shear force	165.0 [kN/m]
Axial force	0.0 [kN/m]
Normal stress	0.0 [MPa]

Anchor	
Bar diameter	20 [mm]
Yielding	500 [MPa]
SF	1.35 [-]
in plane	2.00 [m]
out of plane	2.00 [m]
Anchor length	3.0 [m]
Boring diameter	50 [mm]
Bond strength	0.700 [MPa]

Anchoring length	1.4 [m]
Force	116.3 [kN]
A	4.0 [m2]
Pressure	29.1 [kPa]
R1	4.0 [m]
R2	5.4 [m]

CONTROLS

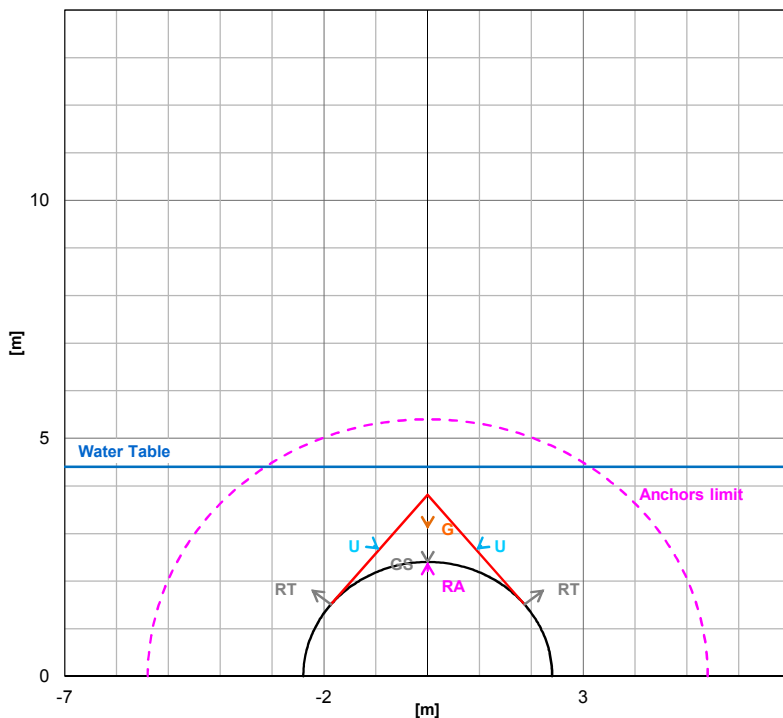
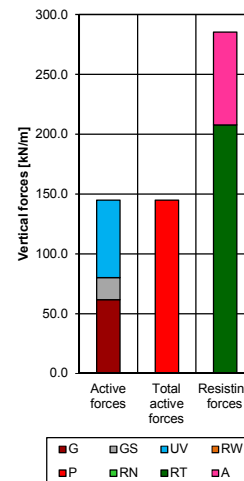
Shotcrete	d_arch < d_actual ... - 5 cm	
	Normal stress < 10 MPa	

Anchors	Lopt 3.2 [m]	Bolt length OK
	Lmin 2.6 [m]	
	Lmax 3.9 [m]	
	L_anchoring < L_bolt	

Bearing factor	SF_min 2.0 [-]	Bearing capacity > 1 OK
----------------	----------------	-------------------------

CALCULATION RESULTS - DETERMINANT WEDGE

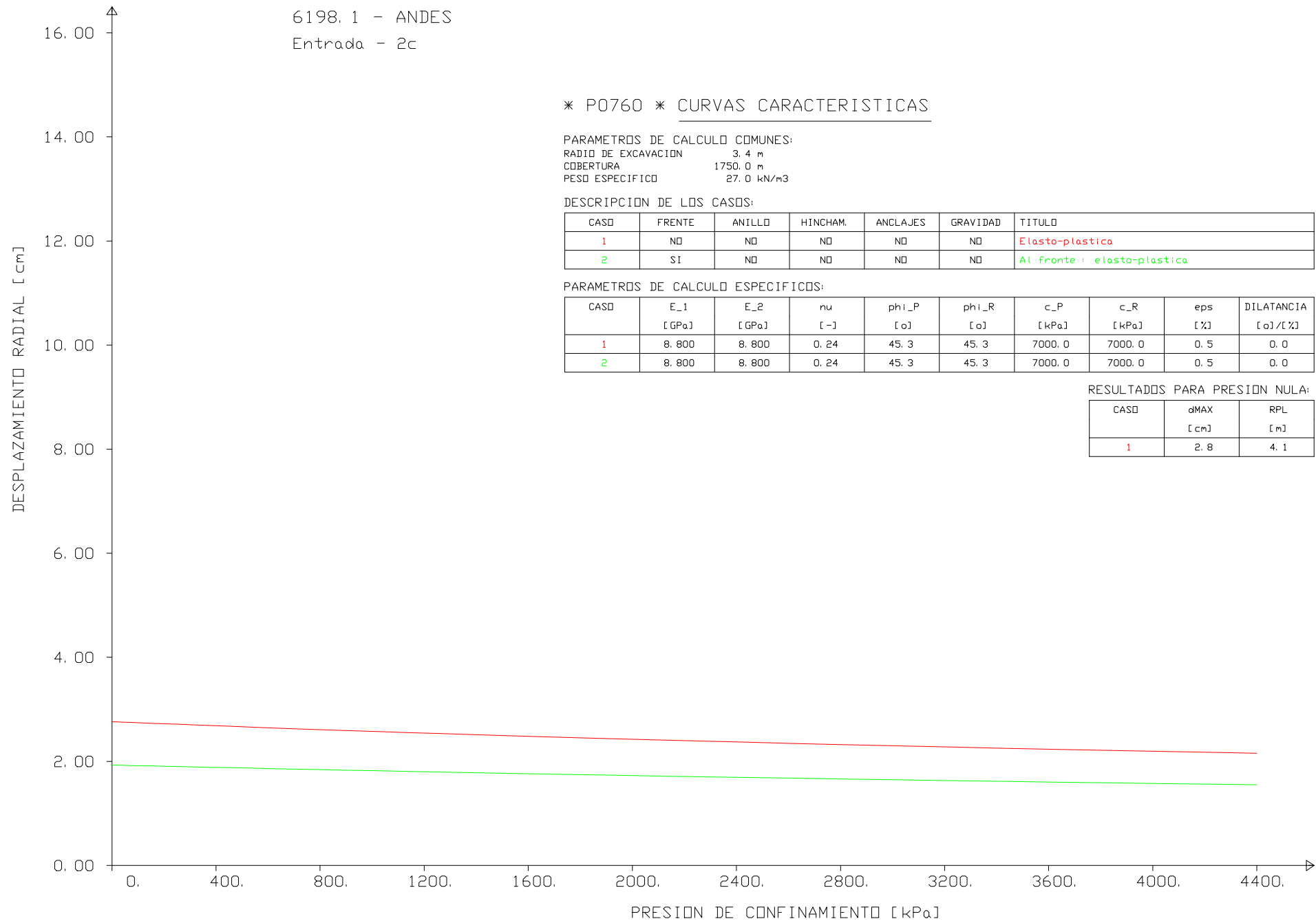
Geometry	alfa	Critical [-]	Wedge top angle (graphic)
	alfa	39 [°]	Wedge top angle (critical value)
	alfa	1.25 [°]	Wedge top angle (user defined value)
	H	1.41 [m]	Wedge height
	h*	1.41 [m]	Wedge height limited by ground level
Active forces	G	61.7 [kN/m]	Wedge weight [vertical direction, + downward]
	N	85913.6 [kN/m]	Total field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U	51.5 [kN/m]	Water pressure [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U _v	32.4 [kN/m]	Water pressure [vertical direction, + downward]
	N'	85862.1 [kN/m]	Effective field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	T _c	0.0 [kN/m]	Cohesive resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	T _f	69412.8 [kN/m]	Friction resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	R _w	0.0 [kN/m]	N' + T _c + T _f resultant [vertical direction, + upward, 0 if downward]
	G _s	18.4 [kN/m]	Shotcrete weight [vertical direction, + downward]
	P	144.9 [kN/m]	Total active forces $G + G_s + 2 \cdot U_v - 2 \cdot R_w$ [vertical direction, + downward, 0 if upward]
Resisting forces	R _N	0.0 [kN/m]	Shotcrete compressive strength [vertical direction, + upward]
	R _T	207.7 [kN/m]	Shotcrete shear strength [vertical direction, + upward]
	A	77.7 [kN/m]	Anchor resistance [vertical direction, + upward]
	R	285.3 [kN/m]	Total resisting forces $R_N + R_T + A$ [vertical direction, + upward]
Bearing factor	SF	2.0 [-]	Bearing factor R / P



ZOOM -

ZOOM +

Anexo B



General data

Title 1 6198.1 - ANDES
Title 2 Entrada - 2c

Dati generali di calcolo

R [m] 3.44 Excavation radius
 γ [kN/m³] 27 Specific weight of rock
H [m] 1750 Overburden

Select ground reaction curves

GRC Elasto-plastica
GRC at face Al fronte : elasto-plastica

Equilibrium at the excavation face

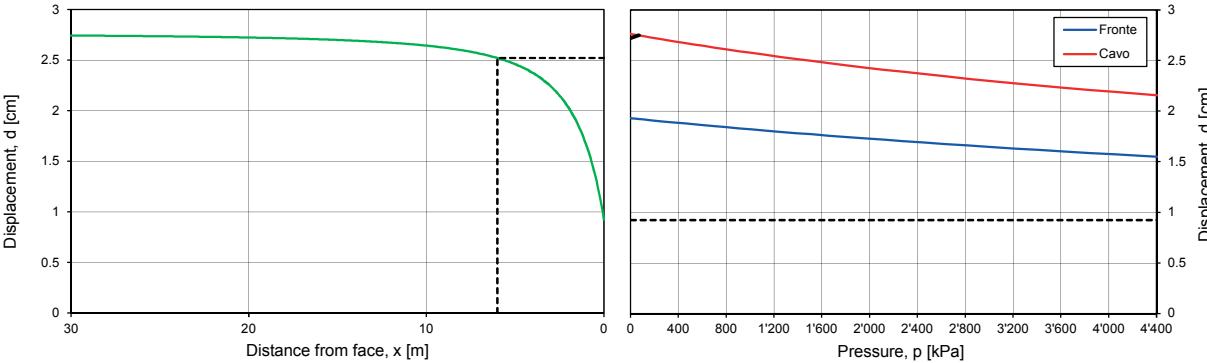
p_{FRONTE} [kPa] 0 Support pressure at tunnel face
 R_{SN} [kPa] 17025.4 Resistance of the core
 d_{FRONTE} [cm] 0.9 Displacements at the tunnel face

Parameters of the support

x [m] 6 Distance from the face where the support is installed
 Δ [cm] 0.2 Built tolerance of the support
gap [cm] 1.797 Gap between rock and support - Panet, Guenot (1982) Analysis of convergence behind the face of a tunnel (compresa tolleranza di pos
d [cm] 20 Thickness of the liner
E [GPa] 15 E-Modulus of the liner
0 Calcolo iterativo? (1=si, 0=no)

Equilibrio finale

p_{EQ} [kPa] 69.4 Final equilibrium pressure
 d_{EQ} [cm] 2.7 Displacement at the equilibrium pressure
 R_{PL} [m] 4.1 Plastic radius at the final equilibrium pressure
 d_{INI} [cm] 2.7 initial displacement
 p_{INI} [kPa] 206.1 initial pressure





General data

Title 1 6198.1 - ANDES
Title 2 Salida - 2c

Dati generali di calcolo

R [m] 4.14 Excavation radius
 γ [kN/m³] 27 Specific weight of rock
H [m] 1750 Overburden

Select ground reaction curves

GRC Elasto-plastica
GRC at face Al fronte : elasto-plastica

Equilibrium at the excavation face

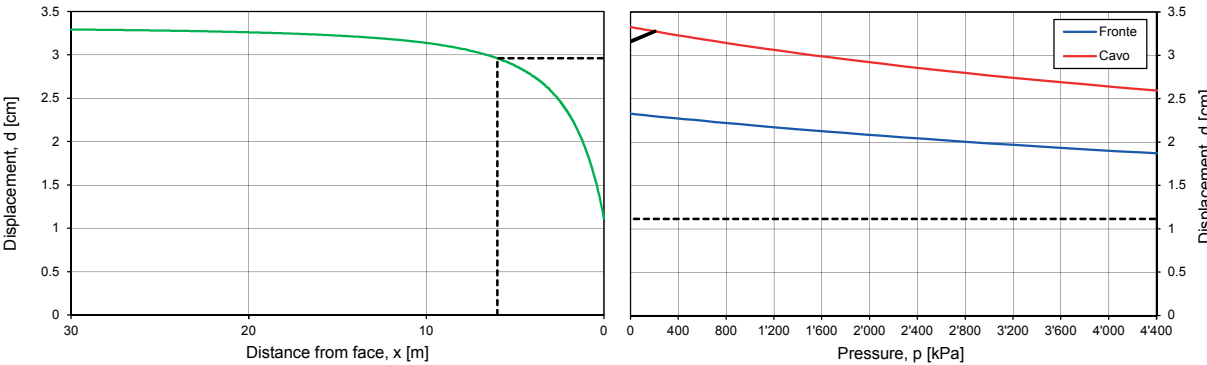
p_{FRONTE} [kPa] 0 Support pressure at tunnel face
 R_{SN} [kPa] 17025.4 Resistance of the core
 d_{FRONTE} [cm] 1.1 Displacements at the tunnel face

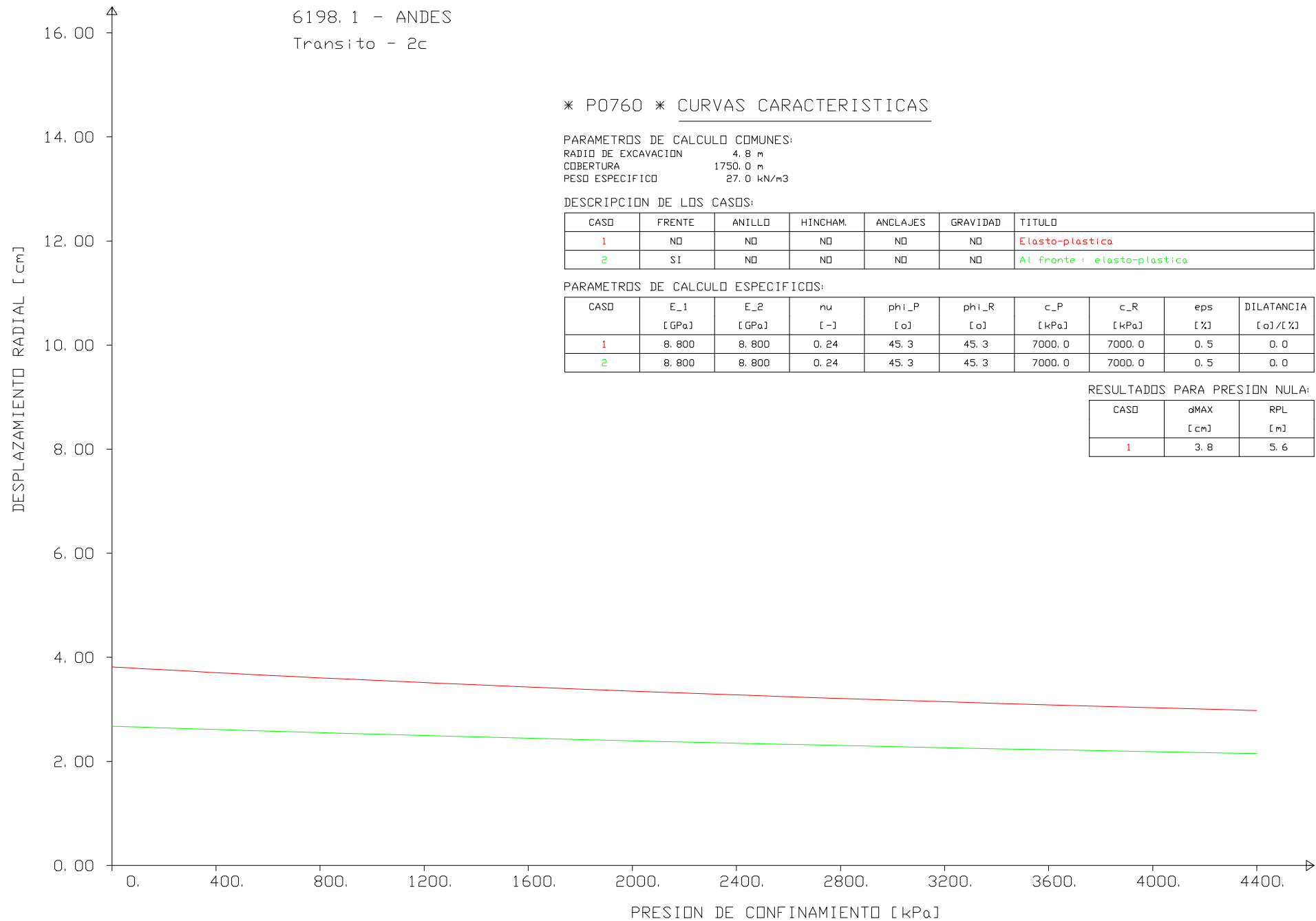
Parameters of the support

x [m] 6 Distance from the face where the support is installed
 Δ [cm] 0.2 Built tolerance of the support
gap [cm] 2.0 Gap between rock and support - Panet, Guenot (1982) Analysis of convergence behind the face of a tunnel (compresa tolleranza di pos
d [cm] 20 Thickness of the liner
E [GPa] 15 E-Modulus of the liner
0 Calcolo iterativo? (1=si, 0=no)

Equilibrio finale

p_{EQ} [kPa] 202.3 Final equilibrium pressure
 d_{EQ} [cm] 3.3 Displacement at the equilibrium pressure
 R_{PL} [m] 4.9 Plastic radius at the final equilibrium pressure
 d_{INI} [cm] 3.2 initial displacement
 p_{INI} [kPa] 715.3 initial pressure





General data

Title 1 6198.1 - ANDES
Title 2 Transito - 2c

Dati generali di calcolo

R [m] 4.75 Excavation radius
 γ [kN/m³] 27 Specific weight of rock
H [m] 1750 Overburden

Select ground reaction curves

GRC Elasto-plastica
GRC at face Al fronte : elasto-plastica

Equilibrium at the excavation face

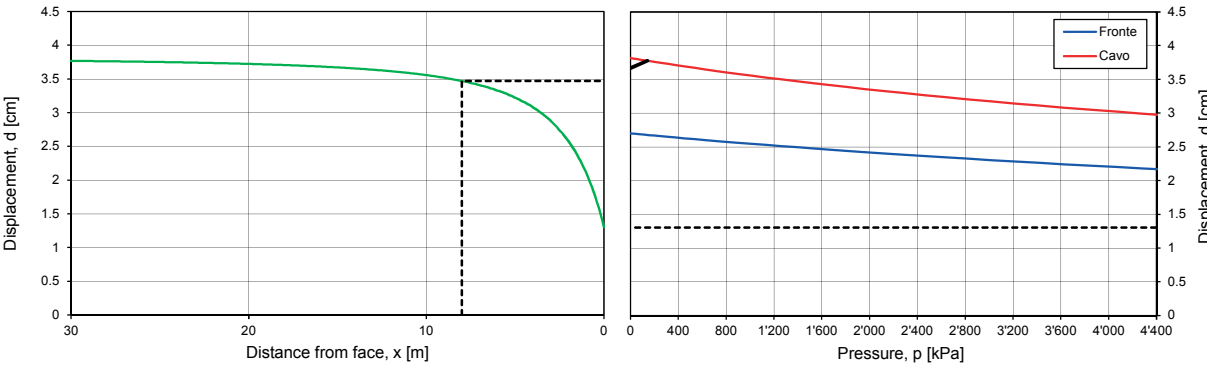
p_{FRONTE} [kPa] 0 Support pressure at tunnel face
 R_{SN} [kPa] 17025.4 Resistance of the core
 d_{FRONTE} [cm] 1.3 Displacements at the tunnel face

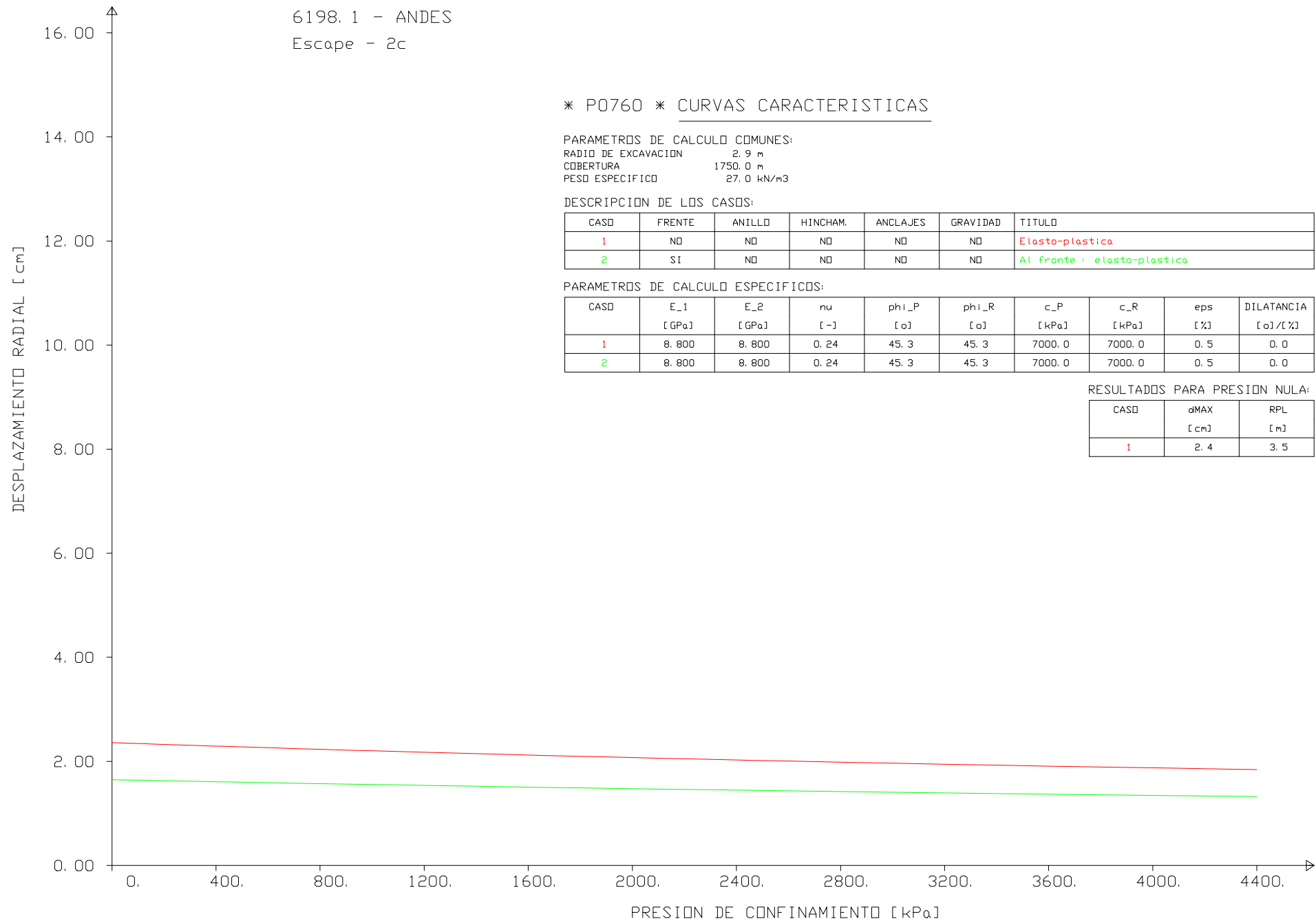
Parameters of the support

x [m] 8 Distance from the face where the support is installed
 Δ [cm] 0.2 Built tolerance of the support
gap [cm] 2.4 Gap between rock and support - Panet, Guenot (1982) Analysis of convergence behind the face of a tunnel (compresa tolleranza di pos
d [cm] 20 Thickness of the liner
E [GPa] 15 E-Modulus of the liner
0 Calcolo iterativo? (1=si, 0=no)

Equilibrio finale

p_{EQ} [kPa] 140.2 Final equilibrium pressure
 d_{EQ} [cm] 3.8 Displacement at the equilibrium pressure
 R_{PL} [m] 5.6 Plastic radius at the final equilibrium pressure
 d_{INI} [cm] 3.7 initial displacement
 p_{INI} [kPa] 537.9 initial pressure





General data

Title 1 6198.1 - ANDES
Title 2 Escape - 2c

Dati generali di calcolo

R [m] 2.94 Excavation radius
 γ [kN/m³] 27 Specific weight of rock
H [m] 1750 Overburden

Select ground reaction curves

GRC Elasto-plastica
GRC at face Al fronte : elasto-plastica

Equilibrium at the excavation face

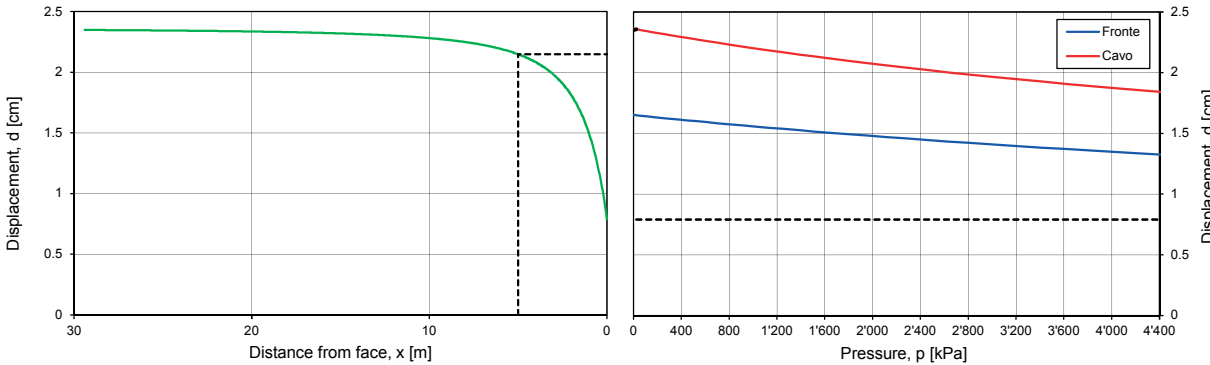
p_{FRONTE} [kPa] 0 Support pressure at tunnel face
 R_{SN} [kPa] 17025.4 Resistance of the core
 d_{FRONTE} [cm] 0.8 Displacements at the tunnel face

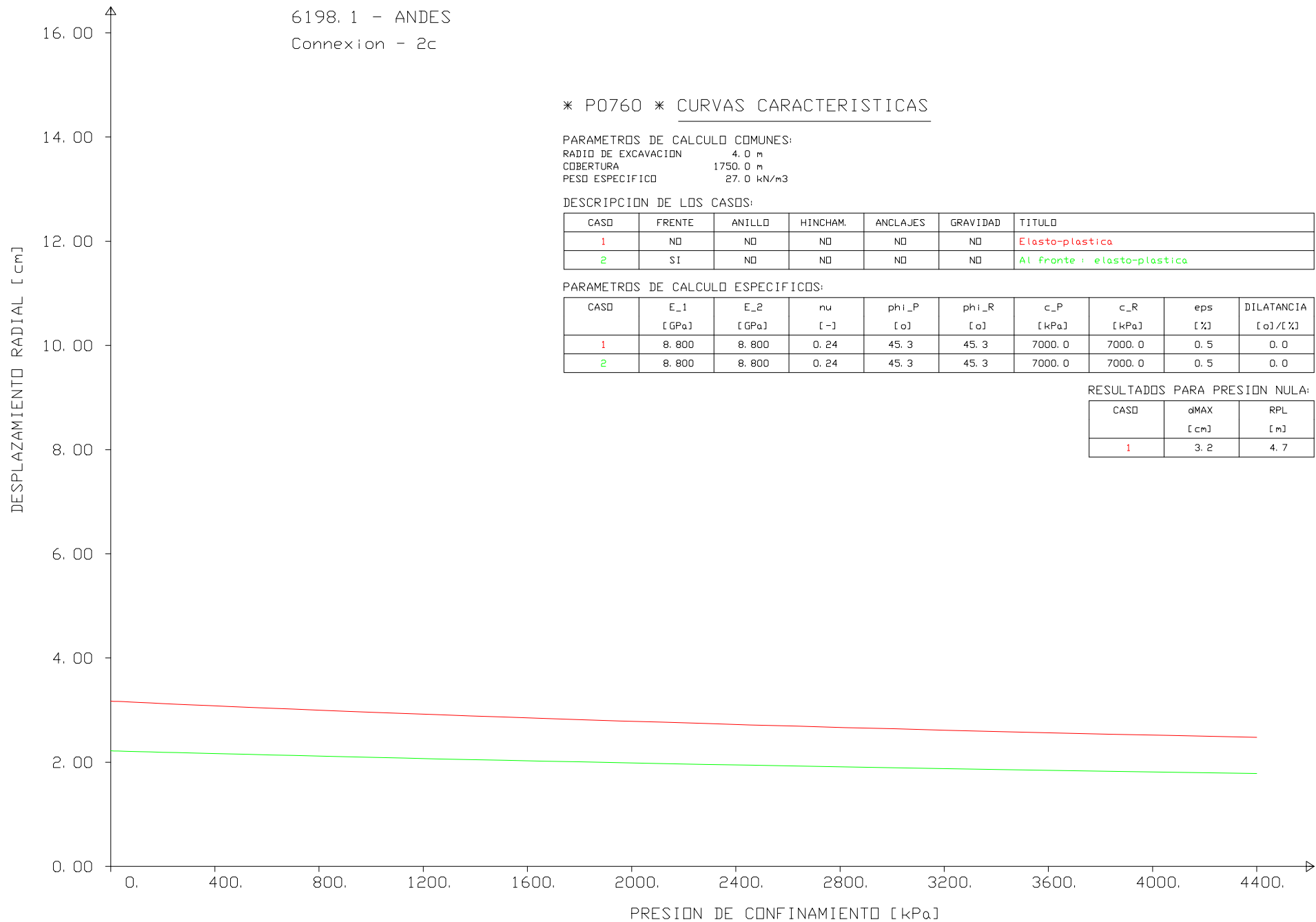
Parameters of the support

x [m] 5 Distance from the face where the support is installed
 Δ [cm] 0.2 Built tolerance of the support
gap [cm] 1.6 Gap between rock and support - Panet, Guenot (1982) Analysis of convergence behind the face of a tunnel (compresa tolleranza di pos
d [cm] 15 Thickness of the liner
E [GPa] 15 E-Modulus of the liner
0 Calcolo iterativo? (1=si, 0=no)

Equilibrio finale

p_{EQ} [kPa] 23.3 Final equilibrium pressure
 d_{EQ} [cm] 2.4 Displacement at the equilibrium pressure
 R_{PL} [m] 3.5 Plastic radius at the final equilibrium pressure
 d_{INI} [cm] 2.3 initial displacement
 p_{INI} [kPa] 74.3 initial pressure





General data

Title 1 6198.1 - ANDES
Title 2 Connexion - 2c

Dati generali di calcolo

R [m] 3.95 Excavation radius
 γ [kN/m³] 27 Specific weight of rock
H [m] 1750 Overburden

Select ground reaction curves

GRC Elasto-plastica
GRC at face Al fronte : elasto-plastica

Equilibrium at the excavation face

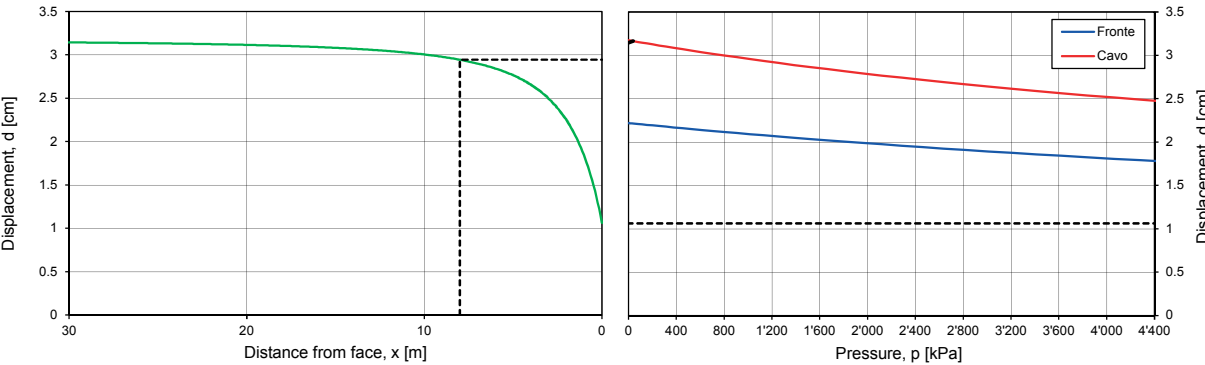
p_{FRONTE} [kPa] 0 Support pressure at tunnel face
 R_{SN} [kPa] 17025.4 Resistance of the core
 d_{FRONTE} [cm] 1.1 Displacements at the tunnel face

Parameters of the support

x [m] 8 Distance from the face where the support is installed
 Δ [cm] 0.2 Built tolerance of the support
gap [cm] 2.1 Gap between rock and support - Panet, Guenot (1982) Analysis of convergence behind the face of a tunnel (compresa tolleranza di pos
d [cm] 20 Thickness of the liner
E [GPa] 15 E-Modulus of the liner
0 Calcolo iterativo? (1=si, 0=no)

Equilibrio finale

p_{EQ} [kPa] 37.0 Final equilibrium pressure
 d_{EQ} [cm] 3.2 Displacement at the equilibrium pressure
 R_{PL} [m] 4.7 Plastic radius at the final equilibrium pressure
 d_{INI} [cm] 3.1 initial displacement
 p_{INI} [kPa] 119.1 initial pressure



General data

Title 1 6198.1 - ANDES
Title 2 Geofisica

Dati generali di calcolo

R [m] 2.46 Excavation radius
 γ [kN/m³] 27 Specific weight of rock
H [m] 1750 Overburden

Select ground reaction curves

GRC Elasto-plastica
GRC at face Al fronte : elasto-plastica

Equilibrium at the excavation face

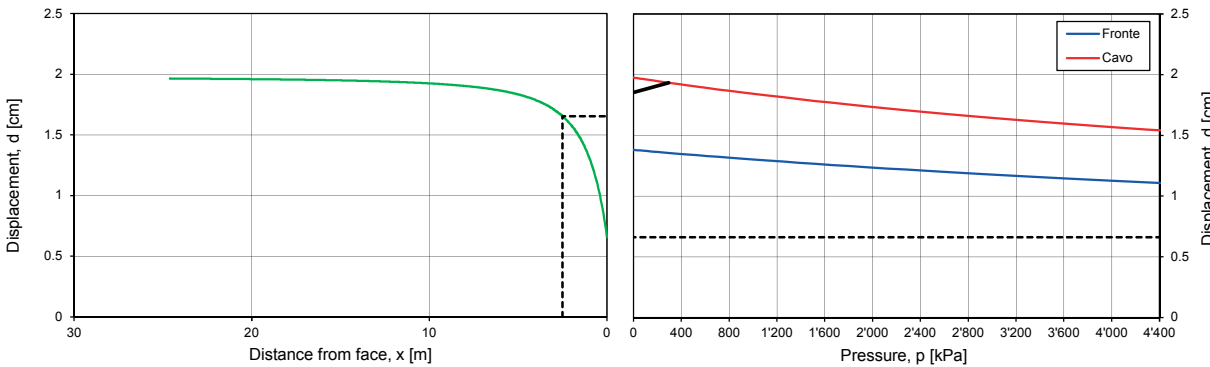
p_{FRONTE} [kPa] 0 Support pressure at tunnel face
 R_{SN} [kPa] 17025.4 Resistance of the core
 d_{FRONTE} [cm] 0.7 Displacements at the tunnel face

Parameters of the support

x [m] 2.5 Distance from the face where the support is installed
 Δ [cm] 0.2 Built tolerance of the support
gap [cm] 1.2 Gap between rock and support - Panet, Guenot (1982) Analysis of convergence behind the face of a tunnel (compresa tolleranza di pos
d [cm] 15 Thickness of the liner
E [GPa] 15 E-Modulus of the liner
0 Calcolo iterativo? (1=si, 0=no)

Equilibrio finale

p_{EQ} [kPa] 293.2 Final equilibrium pressure
 d_{EQ} [cm] 1.9 Displacement at the equilibrium pressure
 R_{PL} [m] 2.9 Plastic radius at the final equilibrium pressure
 d_{INI} [cm] 1.9 initial displacement
 p_{INI} [kPa] 899.2 initial pressure



6198.1 - ANDES
Geofisica

* P0760 * CURVAS CARACTERISTICAS

PARAMETROS DE CALCULO COMUNES:
RADIO DE EXCAVACION 2.5 m
COBERTURA 1750.0 m
PESO ESPECIFICO 27.0 kN/m3

DESCRIPCION DE LOS CASOS:

CASO	FRENTE	ANILLO	HINCHAM.	ANCLAJES	GRAVIDAD	TITULO
1	NO	NO	NO	NO	NO	Elasto-plastica
2	SI	NO	NO	NO	NO	Al frente : elasto-plastica

PARAMETROS DE CALCULO ESPECIFICOS:

CASO	E_1 [GPa]	E_2 [GPa]	nu [-]	phi_P [o]	phi_R [o]	c_P [kPa]	c_R [kPa]	eps [%]	DILATANCIA [o]/[%]
1	8.800	8.800	0.24	45.3	45.3	7000.0	7000.0	0.5	0.0
2	8.800	8.800	0.24	45.3	45.3	7000.0	7000.0	0.5	0.0

RESULTADOS PARA PRESION NULA:

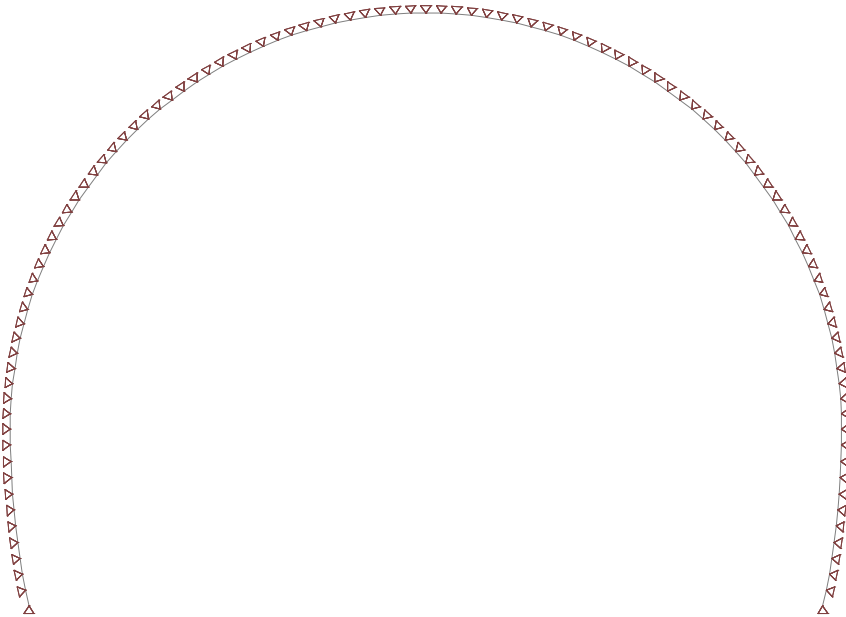
CASO	dMAX [cm]	RPL [m]
1	2.0	2.9



Anexo C

Estructura

Scale 1:100.0



STRUCTURE 2D

Cross section: Geometry

Name	Variant	Materials	Type	Dimensions [m]
D020_C3037		CC	S-R	B=1.00, H=0.25 y _t =-0.50, y _R =0.50, z _B =-0.13, z _T =0.13

Materials : s. table 'Materials'

Cross section: CS stiffness

Name	Variant	β [°]	EA _x GA _z [kN]	EJ _y [kNm ²]	e _z [m]	CS mass Additional mass [t/m]	Materials
D020_C3037		0	8250000.00 2499990.00	42968.75	0	0.63	CC

β : Angle between member Y axis and first principal axis of cross section
e_z : Distance center of gravity-axis point
Materials : s. table 'Materials'

Cross sections, cross section values

Cross section		Materials E _{ref} G _{ref}	Ideal cross section values					
Name	Variants		A _{x,id} = EA _x /E _{ref} [m ²]	J _{y,id} = EJ _y /E _{ref} [m ⁴]	J _{z,id} = EJ _z /E _{ref} [m ⁴]	J _{x,id} = GJ _x /G _{ref} [m ⁴]	A _{y,id} = GA _y /G _{ref} [m ²]	A _{z,id} = GA _z /G _{ref} [m ²]
D020_C3037		CC	0.2500	0.001302	0.020833	0.004388	0.2083	0.2083

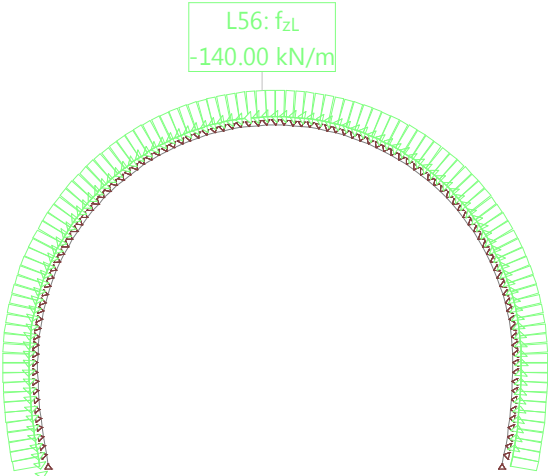
Materials : s. table 'Materials'

Materials

ID	Type	Member	E [kN/mm ²]	G [kN/mm ²]	ν	ρ [t/m ³]	α [‰]	Class	f [N/mm ²]	
CC	Concrete	Column	33	12	0.17	2.5	0.010	C30/37	-30.00000	-f _{ck,cyl}
S	Construction	(general)	210	81	0.30	8.0	0.012	S235	235.00000	f _{yk}

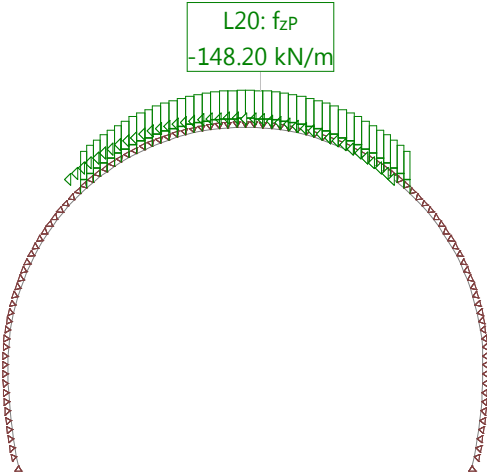
Loading LC1: Presion Macizo Rocoso

Scale 1 :175.0



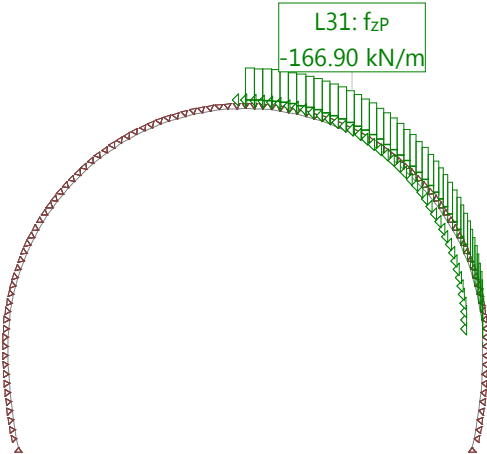
Loading LC2: Presion Bloque simetrico

Scale 1 :175.0



Loading LC3: Presion bloque asimetrico

Scale 1 :175.0



Loading combination 'C1': ELU Comb1**Combined loading**

Loading	Factor	Title
LC1	1.350	Presion Macizo Rocosó
SW	1.350	Self weight

combination 'C2': ELU Comb2**Combined loading**

Loading	Factor	Title
LC2	1.350	Presion Bloque simetrico
SW	1.350	Self weight

combination 'C3': ELU Comb3**Combined loading**

Loading	Factor	Title
LC3	1.350	Presion bloque asimetrico
SW	1.350	Self weight

combination 'C4': ELS Comb1**Combined loading**

Loading	Factor	Title
LC1	1.000	Presion Macizo Rocosó
SW	1.000	Self weight

combination 'C5': ELS Comb2**Combined loading**

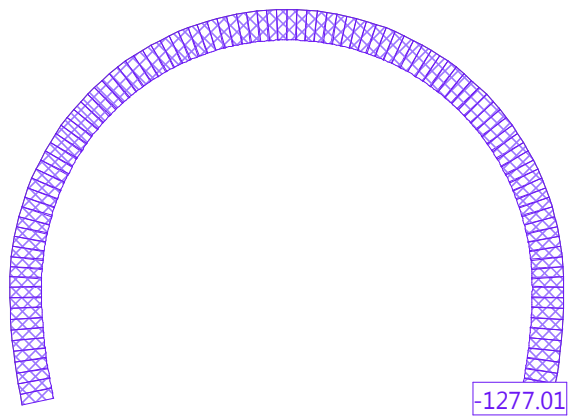
Loading	Factor	Title
LC2	1.000	Presion Bloque simetrico
SW	1.000	Self weight

combination 'C6': ELS Comb3**Combined loading**

Loading	Factor	Title
LC3	1.000	Presion bloque asimetrico
SW	1.000	Self weight

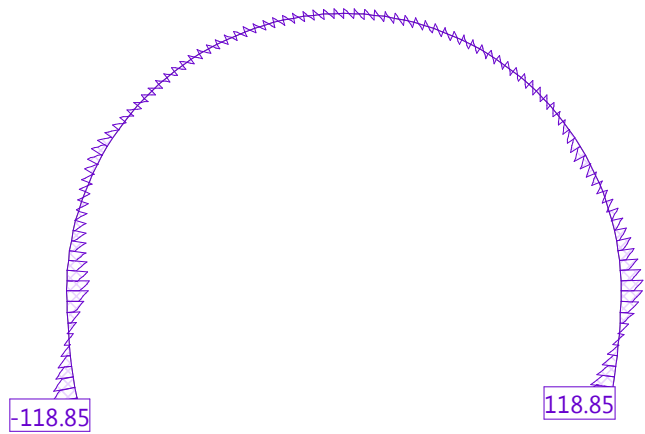
Section force N [kN] for: C1_N1

Scale 1 :150.0



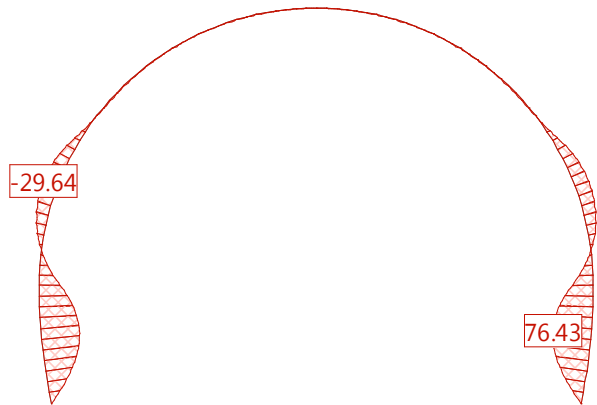
Section force Vz [kN] for: C1_N1

Scale 1 :150.0



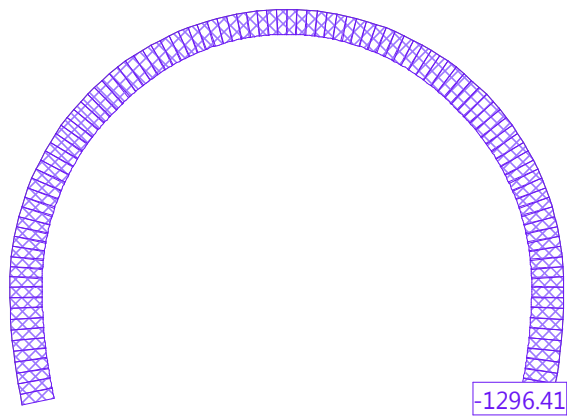
Section force My [kNm] for: C1_N1

Scale 1 :150.0



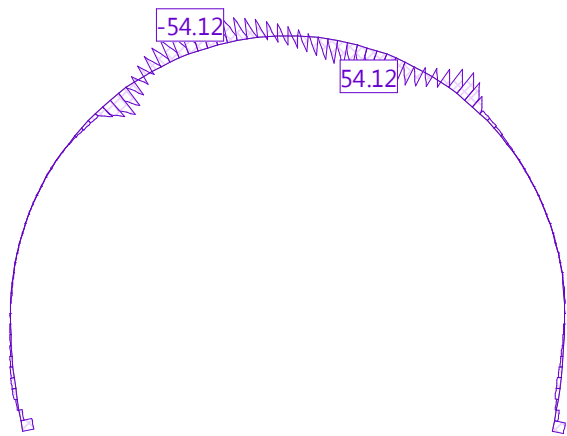
Section force N [kN] for: C2_N1

Scale 1 :150.0



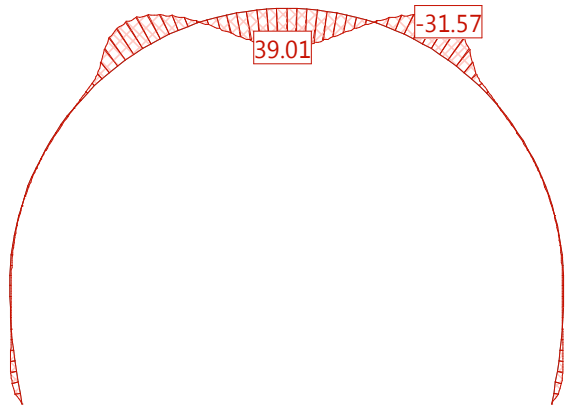
Section force Vz [kN] for: C2_N1

Scale 1 :150.0



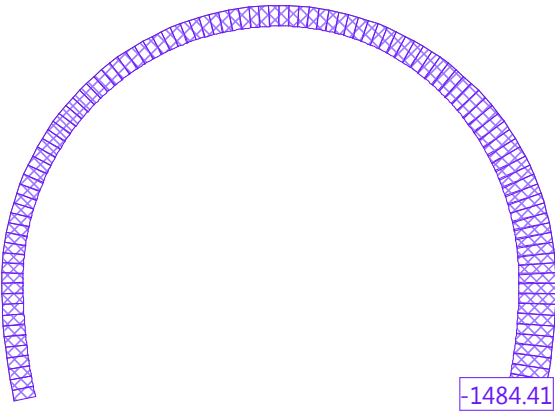
Section force My [kNm] for: C2_N1

Scale 1 :150.0



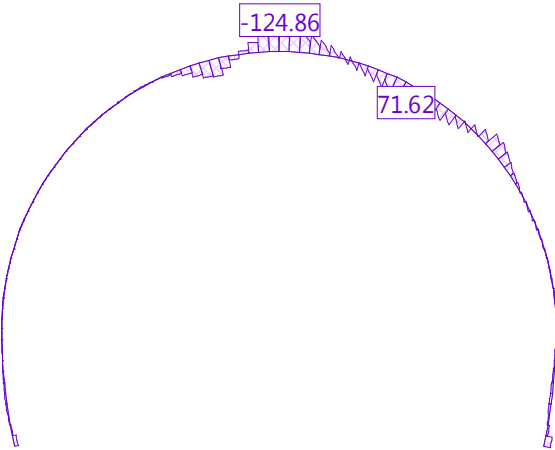
Section force N [kN] for: C3_N1

Scale 1 :150.0



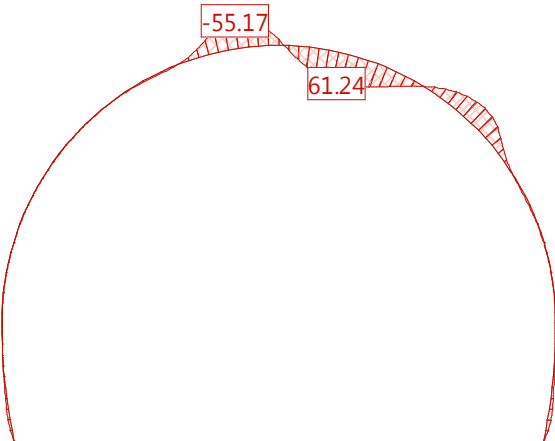
Section force Vz [kN] for: C3_N1

Scale 1 :150.0



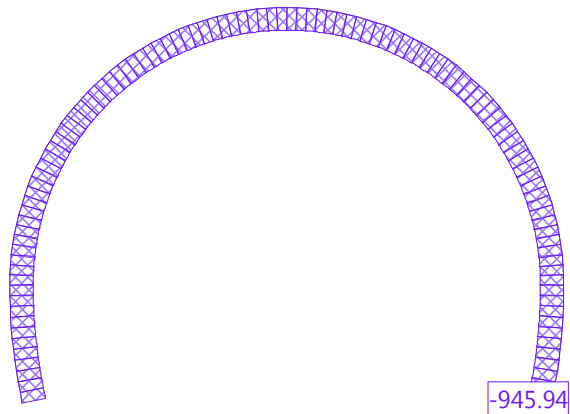
Section force My [kNm] for: C3_N1

Scale 1 :150.0



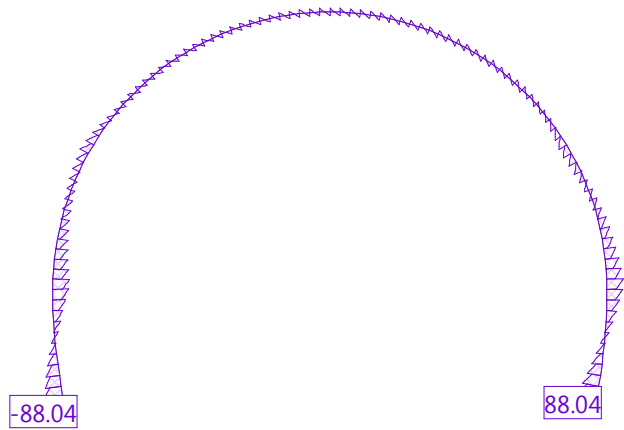
Section force N [kN] for: C4_N1

Scale 1 :150.0



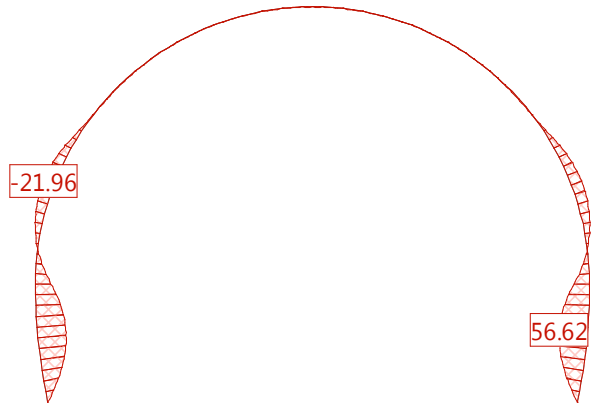
Section force Vz [kN] for: C4_N1

Scale 1 :150.0



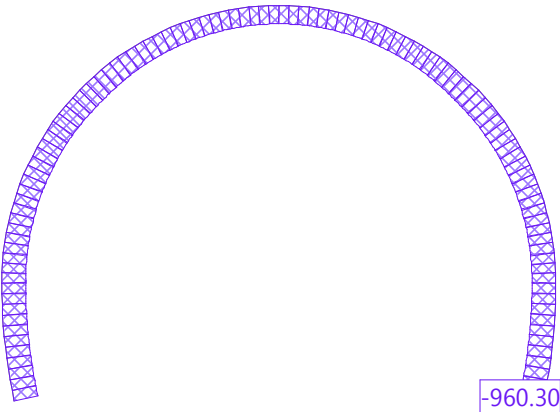
Section force My [kNm] for: C4_N1

Scale 1 :150.0



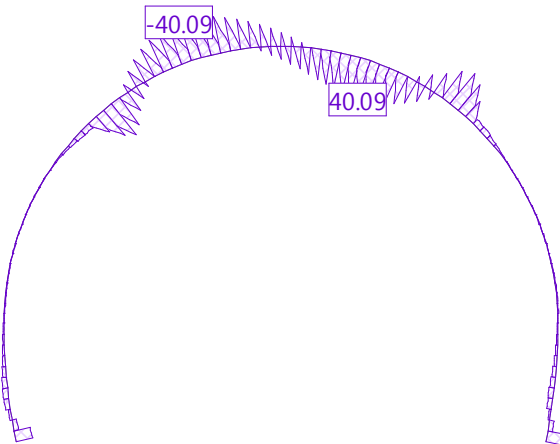
Section force N [kN] for: C5_N1

Scale 1 :150.0



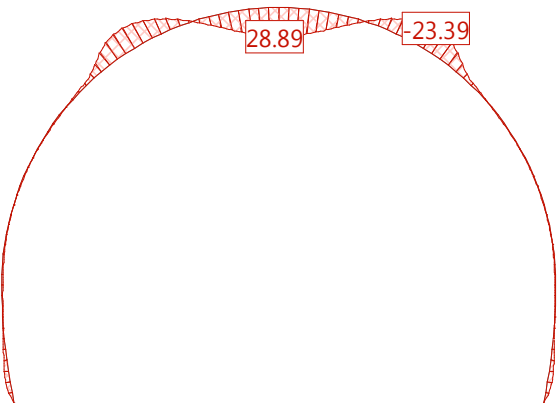
Section force Vz [kN] for: C5_N1

Scale 1 :150.0



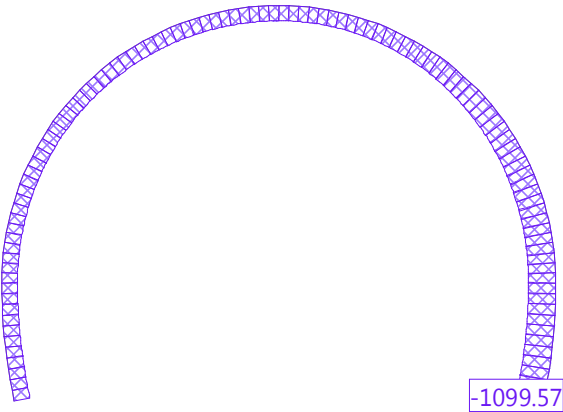
Section force My [kNm] for: C5_N1

Scale 1 :150.0



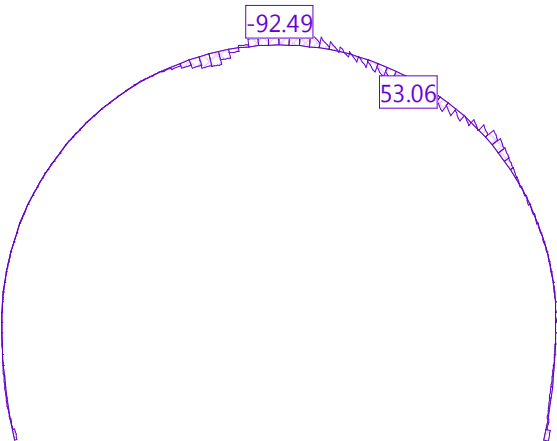
Section force N [kN] for: C6_N1

Scale 1 :150.0



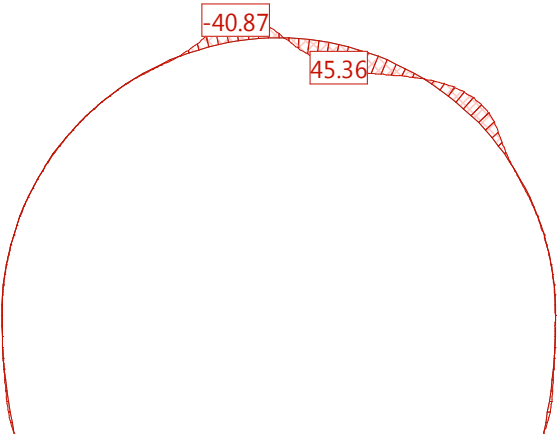
Section force Vz [kN] for: C6_N1

Scale 1 :150.0



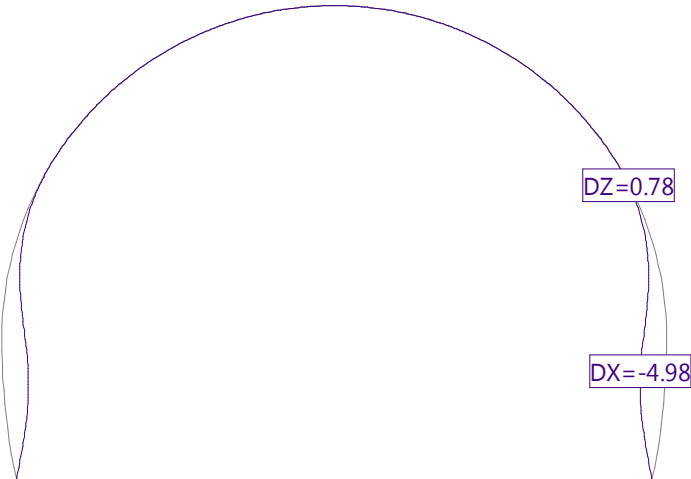
Section force My [kNm] for: C6_N1

Scale 1 :150.0



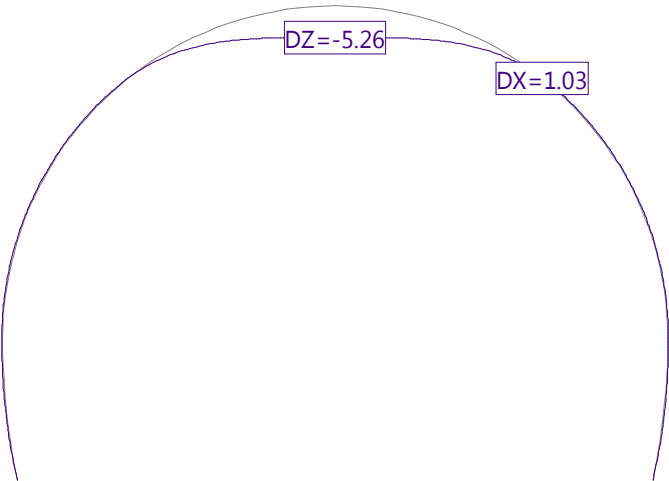
DISPLACEMENTS D for: C1_N1 [mm], Scaling factor: 84.7

Scale 1 :125.0



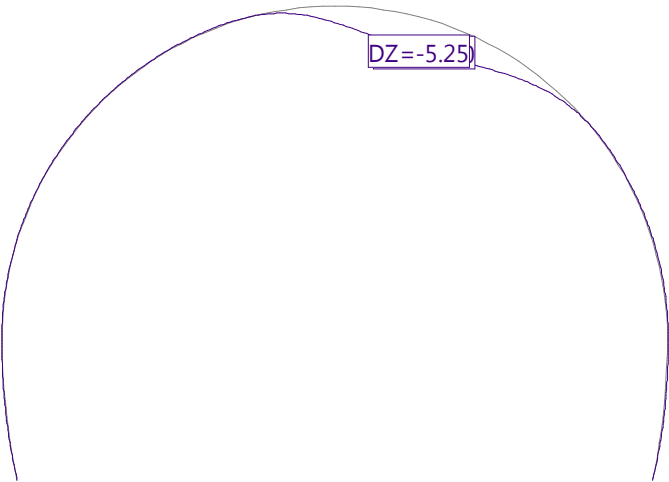
DISPLACEMENTS D for: C2_N1 [mm], Scaling factor: 100.0

Scale 1 :125.0



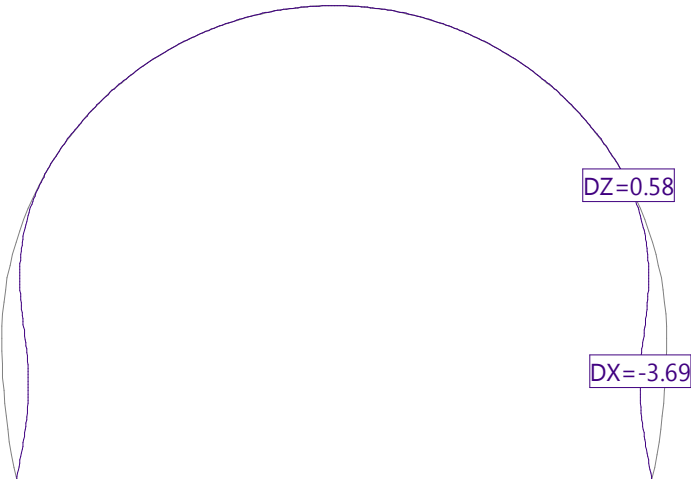
DISPLACEMENTS D for: C3_N1 [mm], Scaling factor: 100.0

Scale 1 :125.0



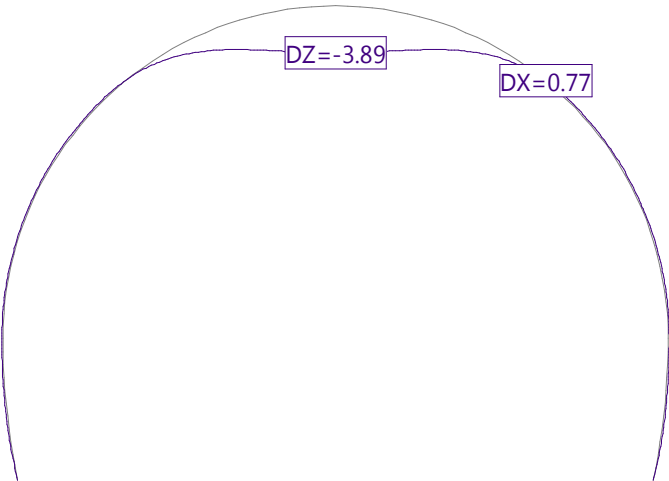
DISPLACEMENTS D for: C4_N1 [mm], Scaling factor: 114.3

Scale 1 :125.0



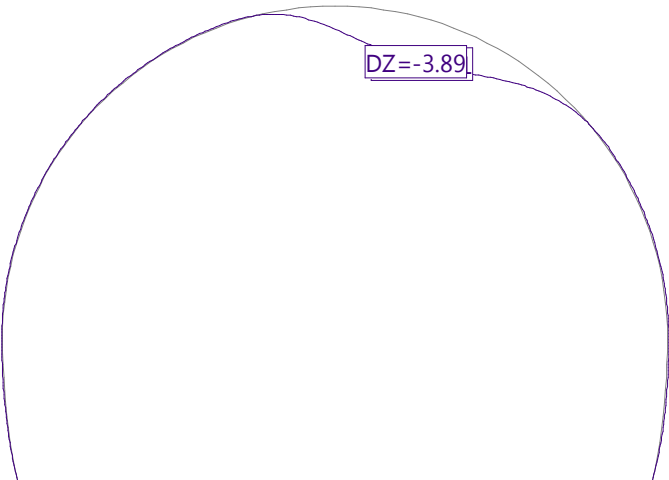
DISPLACEMENTS D for: C5_N1 [mm], Scaling factor: 200.0

Scale 1 :125.0



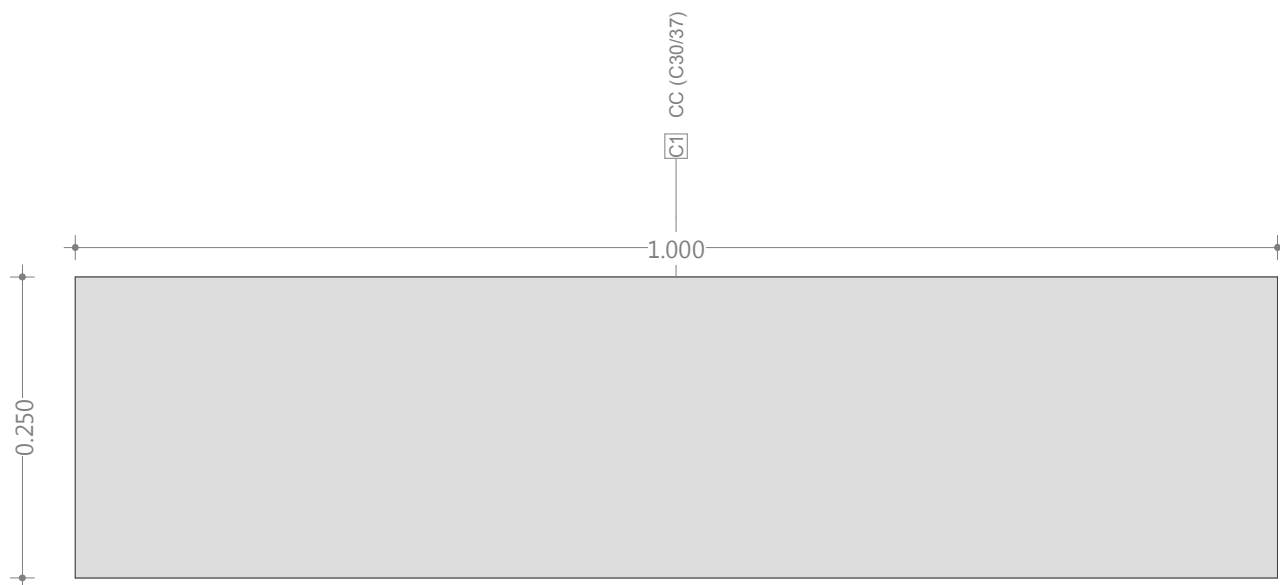
DISPLACEMENTS D for: C6_N1 [mm], Scaling factor: 181.9

Scale 1 :125.0



Cross-section QS (C30/37): Outline

Scale 1:6.3



Cross section (column): QS

Geometrical definition of cross section

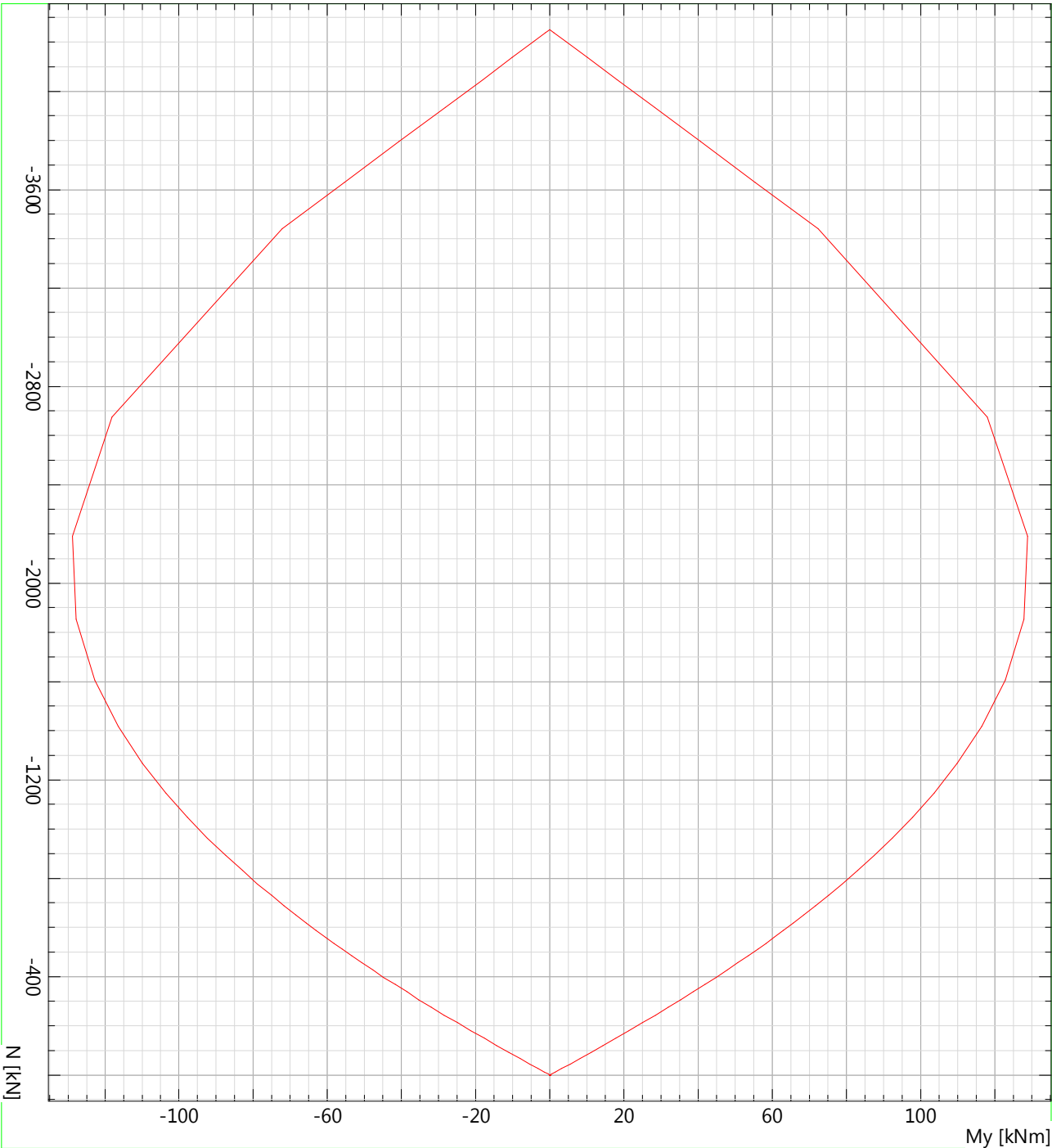
Name	Material	Class	Type	No.	y_q [m]	z_q [m]	No.	y_q [m]	z_q [m]
C1	CC	C30/37	Polygon	1 3	0 1.000	0 0.250	2 4	1.000 0	0 0.250

Section properties: (reference material: CC)

	Area [m ²]		Moment of inertia [m ⁴]		C.G., Angle [m]				Mass [kg/m]
A_x	0.2500	I_x	0.004388	ys	0.500			M_{CS}	625.0
A_y	(=A_x)	I_y	0.001302	zs	0.125				
A_z	(=A_x)	I_z	0.020833	β	0 [°]				

Nr.:

M-N-Interaction diagram Cross section (column): QS
!ULS / Reinforcement percentage: $\rho = 0$ o/o



Ultimate strength analysis Cross section (column): QS

Action forces / Efficiency: $\text{eff}(M,N) = 0.59$ OK

No.	AP	P	Bending and axial force			$\text{eff}(M,N)$ [-]	Shear forces and torsion			$\text{eff}(V,T)$ [-]	Complete CS $\text{eff}(M,N,V,T)$ [-]
			N [kN]	M_y [kNm]	M_z [kNm]		V_y [kN]	V_z [kN]	T [kNm]		
1	!ULS		-1277.0	0	-	0.30	-	98.8	-	0.00	
2	!ULS		-1259.6	76.40000	-	0.59	-	1.4	-	0.00	
3	!ULS		-1246.4	-2.96E+1	-	0.37	-	-2.1	-	0.00	
4	!ULS		-1245.8	-2.96E+1	-	0.37	-	4.9	-	0.00	
5	!ULS		-1259.6	76.40000	-	0.59	-	1.4	-	0.00	
6	!ULS		-1259.6	76.40000	-	0.59	-	1.4	-	0.00	
7	!ULS		-1246.4	-2.96E+1	-	0.37	-	-2.1	-	0.00	
8	!ULS		-1277.0	0	-	0.30	-	98.8	-	0.00	
9	!ULS		-1296.4	0	-	0.31	-	-22.2	-	0.00	
10	!ULS		-978.8	39.00000	-	0.35	-	3.1	-	0.00	
11	!ULS		-1139.9	-3.16E+1	-	0.35	-	-3.2	-	0.00	
12	!ULS		-1139.9	-3.16E+1	-	0.35	-	-3.2	-	0.00	
13	!ULS		-978.8	39.00000	-	0.35	-	3.1	-	0.00	
14	!ULS		-978.8	39.00000	-	0.35	-	3.1	-	0.00	
15	!ULS		-1159.0	-3.09E+1	-	0.36	-	-3.2	-	0.00	
16	!ULS		-1215.3	-1.34E+1	-	0.32	-	-39.9	-	0.00	
17	!ULS		-1484.4	0	-	0.35	-	-25.3	-	0.00	
18	!ULS		-839.7	61.20000	-	0.49	-	-5.0	-	0.00	
19	!ULS		-821.4	-5.52E+1	-	0.43	-	-11.2	-	0.00	
20	!ULS		-820.7	-5.52E+1	-	0.43	-	17.1	-	0.00	
21	!ULS		-839.7	61.20000	-	0.49	-	-5.0	-	0.00	
22	!ULS		-851.3	60.90000	-	0.48	-	8.2	-	0.00	
23	!ULS		-1128.3	-4.08E+1	-	0.38	-	7.4	-	0.00	
24	!ULS		-814.1	8.30000	-	0.21	-	-101.4	-	0.00	

- : Calculation with uniaxial bending (neutral axis is horizontal)!!

Analysis-Parameters "ULS" Standard: Eurocode EN

ID	Diagram σ - ϵ			Strain Limits			σ_s [N/mm ²]	Partial safety factor				Various parameters			
	c	s		ϵ_{c2} [‰]	ϵ_{cu3} [‰]	ϵ_{ud} [‰]		α_{cc} [-]	γ_c [-]	γ_s [-]		θ [-]	ϕ [-]		
!ULS	2/0	1		-2.000	-3.500	2.000E		0.85	1.50	1.15		45.00	0		

θ : Inclination of diagonal in compression
 ϕ : Creep coefficient

Work
Object

Serviceability limit state verification according to EN 1992-1-1 (Eurocode 2)

Section geometry

h	[cm]	25	Total section height
b	[cm]	100	Section width

Section forces

N	[kN]	-933.0	Axial force (- = compression)
M	[kNm]	56.6	Bending moment (+ = lower fiber in traction)
V	[kN]	1.0	Shear force

Concrete input

Type		C 30/37	Concrete type
γ_c	[-]	1.0	Partial safety factor on concrete strength
f_{ck}	[MPa]	30.0	Characteristic value of concrete compressive strength
f_{cd}	[MPa]	30.0	Design value of concrete compressive strength
f_{ctm}	[MPa]	2.9	Concrete mean tensile strength
E_c	[GPa]	33.0	Concrete elastic modulus
Φ	[-]	2.0	Creep coefficient (0 = no creep, 2 = creep)
$\sigma_{c,max}$	[-]	0.60	Maximum compressive stress ($\cdot f_{ck}$)

Reinforcement input - Upper layer

d_s	[mm]	0	Bar diameter
s_s	[cm]	15	Bar spacing
c_s	[mm]	53	Bar cover (with respect to bar axis)
A_{ss}	[mm ²]	0	Steel area

Crack calculation input

k_t	[-]	0.4	Factor of load duration (0.4 = long term, 0.6 short term)
$f_{ct,eff}/f_{ctm}$	[-]	1	$f_{ct,eff}/f_{ctm}$ ratio (Default = 1)
$w_{lim,u}$	[mm]	0.40	Maximum crack opening (upper layer)
$w_{lim,l}$	[mm]	0.40	Maximum crack opening (lower layer)

Main results

	Maximum	Limit	Check
σ_c	-9.7	-18.0	✓
σ_s	0.0	400.0	✓
w_k	0.00	0.4	✓

WARNING: EC formulation not applicable for crack width calculation
Zilch, Zehetmaier formulation used

Shear force

Shear	[0/1]	1	Include shear force as inner longitudinal force (1 = yes, 0 = no)
θ	[°]	45	Inclination of compr. diagonal (22.5° - 60°)
α	[°]	90	Inclination of stirrups (vertical = 90°)

N	[kN]	-932.0	Axial force, calculation value (- = compression)
M	[kNm]	56.6	Bending moment, calculation value (+ = upper fiber in traction)

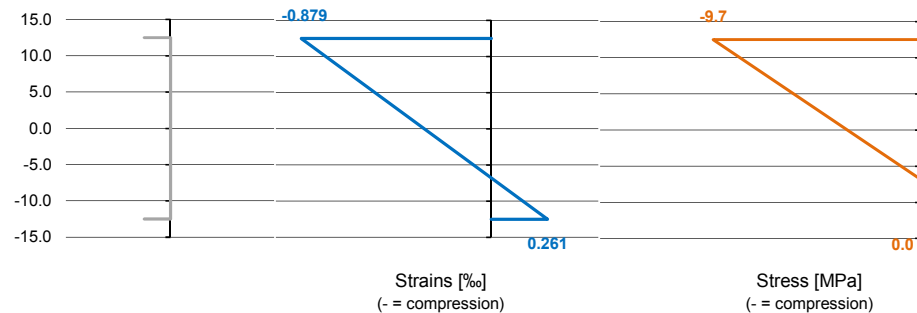
Steel input

Type		B 500 B	Steel type
γ_s	[-]	1.0	Partial safety factor on concrete strength
f_{yk}	[MPa]	500.0	Characteristic value of steel tensile strength
f_{yd}	[MPa]	500.0	Design value of steel tensile strength
E_s	[GPa]	200.0	Steel elastic modulus
$\sigma_{s,max}$	[-]	0.8	Maximum tensile stress ($\cdot f_{yk}$)

Reinforcement input - Lower layer

\emptyset_l	[mm]	0	Bar diameter
s_l	[cm]	15	Bar spacing
c_l	[mm]	53	Bar cover (with respect to bar axis)
A_{sl}	[mm ²]	0	Steel area

k_1	[-]	0.8	Bond properties of reinforcing steel (ribbed: 0.8; plain: 1.6)
k_2	[-]	0.5	Strain coefficient (bending: 0.5; pure tension: 1.0)
k_3	[-]	3.4	Coefficient ($k_3 = 3.4$)
k_4	[-]	0.425	Coefficient ($k_4 = 0.425$)



Work
Object

Calculation details

Section results

ϵ_0	[‰]	-0.31	Section mean strain	-309.1	0.1
χ	[km ⁻¹]	4.56	Section curvature	4558.1	0.0
y_{AN}	[cm]	-6.8	Neutral axis position		0.1

Calculated internal forces

N	[kN]	-932.0	Axial force (- = compression)
M	[kN]	56.6	Bending moment (+ = upper fiber in traction)

Extreme stresses and strains

Concrete

y_{cs}	[cm]	12.5	Upper fiber position	y_{cl}	[cm]	-12.5	Lower fiber position
ϵ_{cs}	[‰]	-0.879	Upper fiber strain	ϵ_{cl}	[‰]	0.261	Lower fiber strain
σ_{cs}	[MPa]	-9.7	Upper fiber stress	σ_{cl}	[MPa]	0.0	Lower fiber stress
F_c^*	[kN]	-932.0	Concrete force				
ΔF_{ss}	[kN]	0.0	Upper reinf. force to be removed from concrete				
ΔF_{sl}	[kN]	0.0	Lower reinf. force to be removed from concrete				
F_c	[kN]	-932.0	Concrete force (reinforcement area excluded)				
b_c	[cm]	6.1	Force lever arm				

Reinforcement

y_{ss}	[cm]	7.2	Upper reinf. position	y_{sl}	[cm]	-7.2	Lower reinf. position
ϵ_{ss}	[‰]	-0.637	Upper reinf. strain	ϵ_{sl}	[‰]	0.019	Lower reinf. strain
σ_{ss}	[MPa]	0.0	Upper reinf. stress	σ_{sl}	[MPa]	0.0	Lower reinf. stress
F_{ss}	[kN]	0.0	Upper reinf. force	F_{sl}	[kN]	0.0	Lower reinf. force
b_{ss}	[cm]	7.2	Upper reinf. lever arm	b_{sl}	[cm]	-7.2	Lower reinf. lever arm

Crack calculation

α_e	[-]	6.06	E_s/E_c ratio
x	[cm]	0.00	Compression zone (cracked section)
d	[mm]	197.0	Static height
c	[mm]	53.0	Bar cover (with respect to bar border)
$h_{c,eff}$	[mm]	83.3	Effective tensile concrete area height
$A_{c,eff}$	[mm ²]	83333	Effective tensile concrete area
A_s	[mm ²]	0	Reinforcement area (in tensile area)
$\rho_{p,eff}$	[-]	0.000	ratio of tensile reinforcement to concrete zone in tension
σ_s	[MPa]	0.0	Stress in reinforcement
$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}$	[‰]	n.a.	difference of strain
\varnothing_{eq}	[mm]	0.0	Equivalent diameter
$s_{r,max}$	[cm]	32.5	max. crack spacing
w_k	[mm]	n.a.	max. crack width
f_{bd}	[MPa]	4.6	Bond strength (good adherence and $\varnothing < 32$ mm)
w_k	[mm]	0.00	max. crack width (acc. to Zilch, Zehetmaier "Bemessung im konstruktiven Betonbau", used only if EC is not applicable)
		0.00	

Results

N	M	V	M/N	θ	Φ	σ_c			σ_s			w_k		
						Max	Limit	Check	Max	Limit	Check	Max	Limit	Check
[kN]	[kNm]	[kN]	[m]	[°]	[-]	[MPa]	[MPa]	[-]	[MPa]	[MPa]	[-]	[mm]	[mm]	[-]
-945.9	0.0	73.2	0.0	45.0	2.0	-3.5	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓
-933.0	56.6	1.0	-0.1	45.0	2.0	-9.7	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓
-922.8	-22.0	-3.6	0.0	45.0	2.0	-5.8	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓
-922.8	-22.0	-3.6	0.0	45.0	2.0	-5.8	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓
-933.0	56.6	1.0	-0.1	45.0	2.0	-9.7	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓
-933.0	56.6	1.0	-0.1	45.0	2.0	-9.7	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓
-923.2	-22.0	1.5	0.0	45.0	2.0	-5.8	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓
-945.9	0.0	73.2	0.0	45.0	2.0	-3.5	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓
-960.3	0.0	-16.4	0.0	45.0	2.0	-3.8	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓
-725.0	28.9	2.3	0.0	45.0	2.0	-5.7	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓
-844.4	-23.4	-2.3	0.0	45.0	2.0	-5.6	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓
-844.4	-23.4	-2.3	0.0	45.0	2.0	-5.6	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓
-725.0	28.9	2.3	0.0	45.0	2.0	-5.7	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓
-725.0	28.9	2.3	0.0	45.0	2.0	-5.7	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓
-858.5	-22.9	-2.3	0.0	45.0	2.0	-5.6	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓
-900.2	-10.0	-29.5	0.0	45.0	2.0	-4.4	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓
-1099.6	0.0	-18.8	0.0	45.0	2.0	-4.3	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓
-622.0	45.4	-3.7	-0.1	45.0	2.0	-8.0	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓
-608.4	-40.9	-8.3	0.1	45.0	2.0	-7.0	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓
-607.9	-40.9	12.7	0.1	45.0	2.0	-7.0	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓
-622.0	45.4	-3.7	-0.1	45.0	2.0	-8.0	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓
-630.6	45.1	6.0	-0.1	45.0	2.0	-7.9	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓
-835.8	-30.2	5.5	0.0	45.0	2.0	-6.2	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓
-603.0	6.1	-75.1	0.0	45.0	2.0	-2.7	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓

Legend:

N = Axial force

M = Bending moment

V = Shear force

M/N = Eccentricity

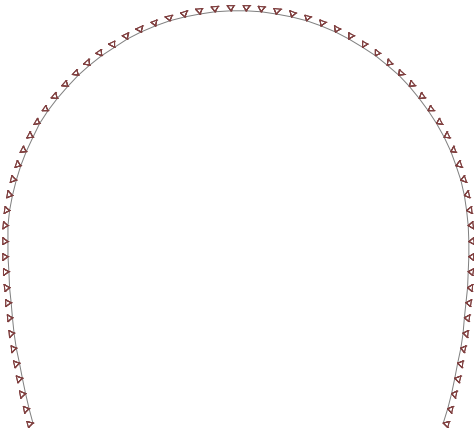
θ = Inclination of compr. diagonal (22.5° - 60°)

Φ = Creep coefficient (0 = no creep, 2 = creep)

Anexo D

Structure

Scale 1:100.0



STRUCTURE 2D

Cross section: Geometry

Name	Variant	Materials	Type	Dimensions [m]
S-R		CC	S-R	B=1.00, H=0.15 y _L =-0.50, y _R =0.50, z _B =-0.07, z _T =0.07

Materials : s. table 'Materials'

Cross section: CS stiffness

Name	Variant	β	EA _x GA _z [kN]	EJ _y [kNm ²]	e _z [m]	CS mass Additional mass [t/m]	Materials
S-R		0	5040000.00 1794992.82	9450.00	0	0.38	CC

β : Angle between member Y axis and first principal axis of cross section
e_z : Distance center of gravity-axis point
Materials : s. table 'Materials'

Cross sections, cross section values

Name	Cross section Variants	Materials E _{ref} G _{ref}	Ideal cross section values					
			A _{x,id} = EA _x /E _{ref} [m ²]	J _{y,id} = EJ _y /E _{ref} [m ⁴]	J _{z,id} = EJ _z /E _{ref} [m ⁴]	J _{x,id} = GJ _x /G _{ref} [m ⁴]	A _{y,id} = GA _y /G _{ref} [m ²]	A _{z,id} = GA _z /G _{ref} [m ²]
S-R		CC	0.1500	0.000281	0.012500	0.001019	0.1250	0.1250

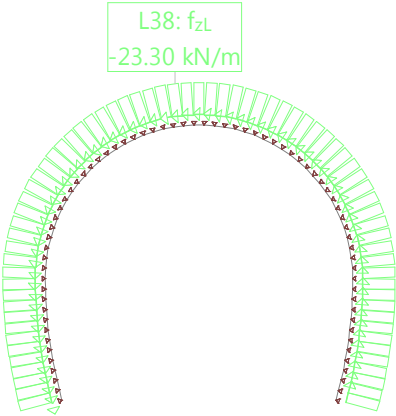
Materials : s. table 'Materials'

Materials

ID	Type	Member	E [kN/mm ²]	G [kN/mm ²]	ν	ρ [t/m ³]	α [‰]	Class	f [N/mm ²]	
CC	Concrete	Column	34	14	0.17	2.5	0.010	C30/37	-30.00000	-η _{fc} f _{ck}
S	Construction	(general)	210	81	0.30	8.0	0.012	S235	235.00000	f _y

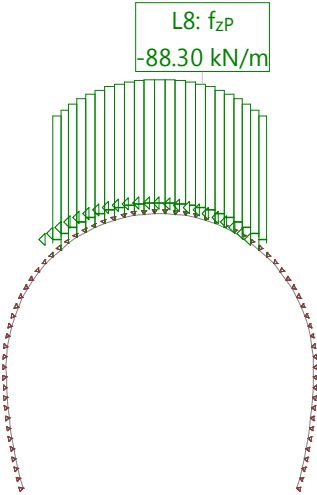
Loading LC1: Earth pressure

Scale 1 :150.0



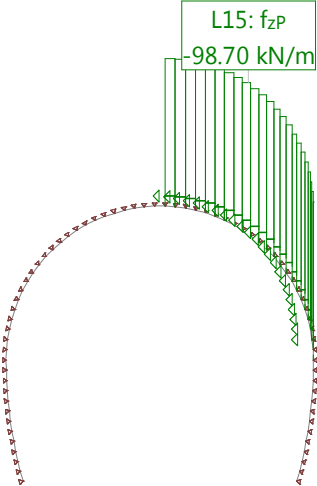
Loading LC2: Block central

Scale 1 :150.0



Loading LC3: Block lateral

Scale 1 :150.0



Loading combination 'C1': ELU COMB1**Combined loading**

Loading	Factor	Title
LC1	1.350	Earth pressure
SW	1.350	Self weight

combination 'C2': ELU COMB 2

Combined loading

Loading	Factor	Title
LC2	1.350	Block central
SW	1.350	Self weight

combination 'C3': ELU COMB 3

Combined loading

Loading	Factor	Title
LC3	1.350	Block lateral
SW	1.350	Self weight

combination 'C4': ELS COMB1

Combined loading

Loading	Factor	Title
LC1	1.000	Earth pressure
SW	1.000	Self weight

combination 'C5': ELS COMB2

Combined loading

Loading	Factor	Title
LC2	1.000	Block central
SW	1.000	Self weight

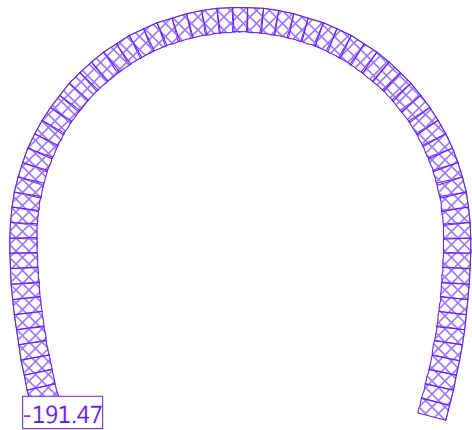
combination 'C6': ELS COMB3

Combined loading

Loading	Factor	Title
LC3	1.000	Block lateral
SW	1.000	Self weight

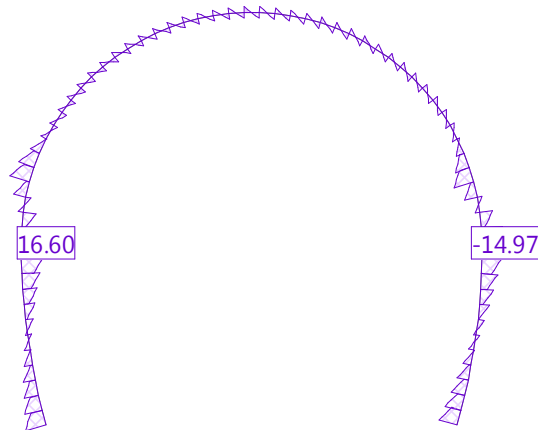
Section force N [kN] for: C1_N1

Scale 1 :100.0



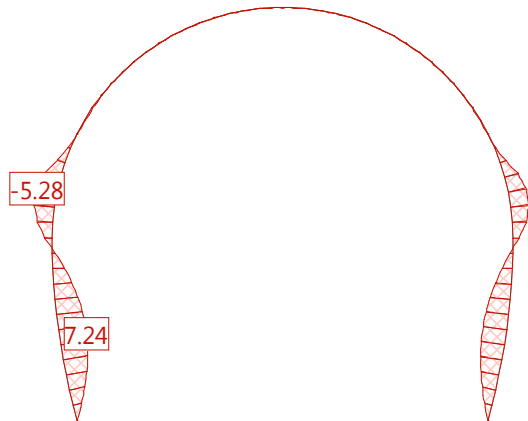
Section force Vz [kN] for: C1_N1

Scale 1 :100.0



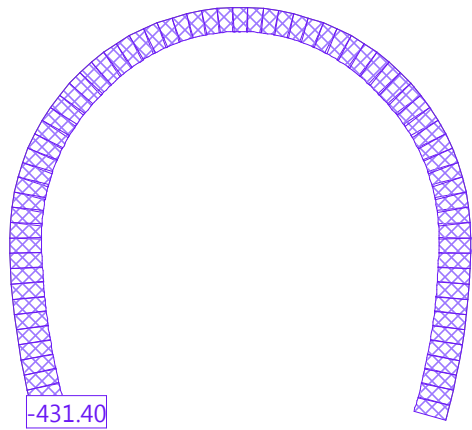
Section force My [kNm] for: C1_N1

Scale 1 :100.0



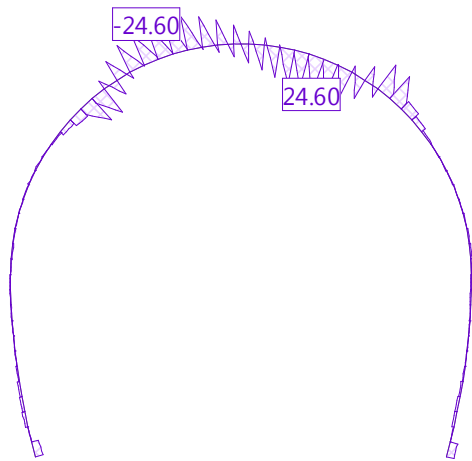
Section force N [kN] for: C2_N1

Scale 1 :100.0



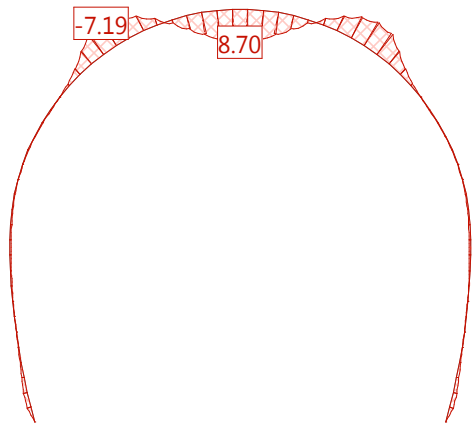
Section force Vz [kN] for: C2_N1

Scale 1 :100.0



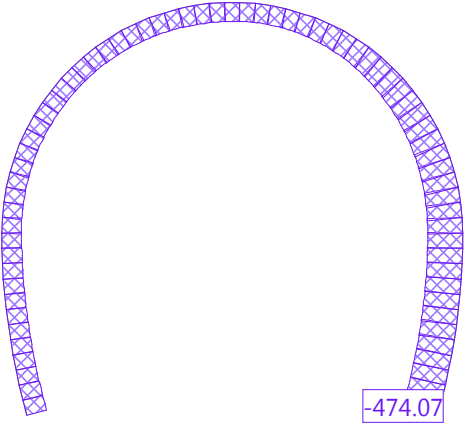
Section force My [kNm] for: C2_N1

Scale 1 :100.0



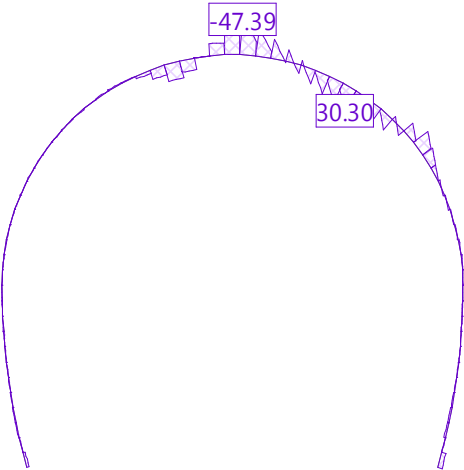
Section force N [kN] for: C3_N1

Scale 1:100.0



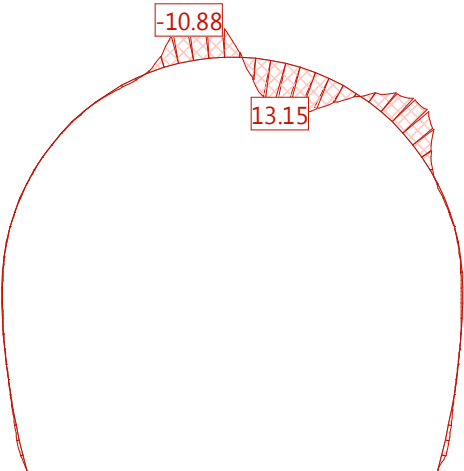
Section force Vz [kN] for: C3_N1

Scale 1:100.0



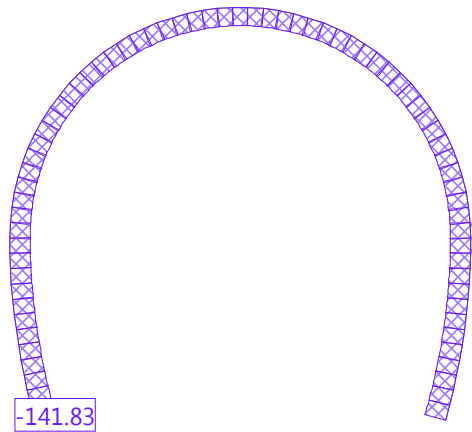
Section force My [kNm] for: C3_N1

Scale 1:100.0



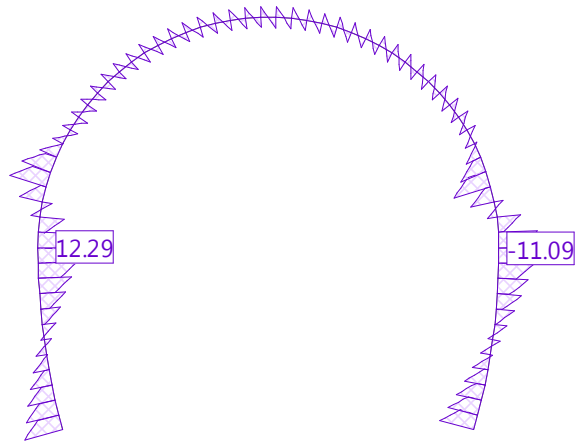
Section force N [kN] for: C4_N1

Scale 1 :100.0



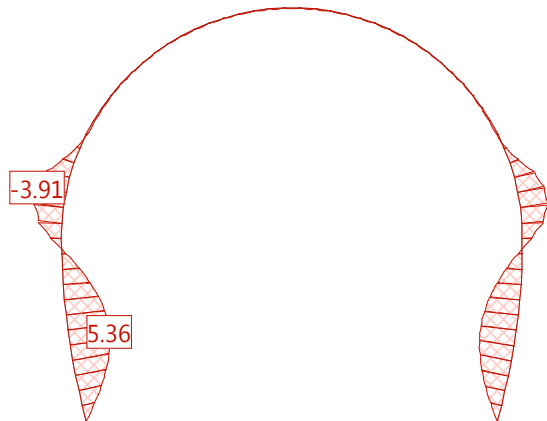
Section force Vz [kN] for: C4_N1

Scale 1 :100.0



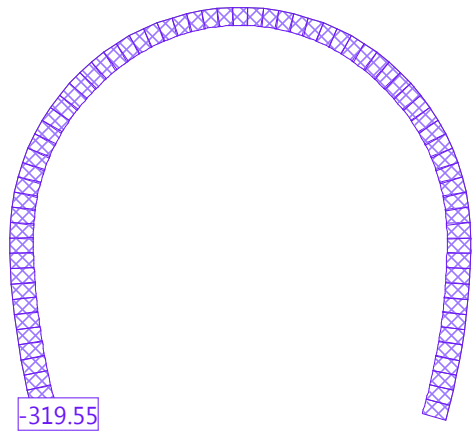
Section force My [kNm] for: C4_N1

Scale 1 :100.0



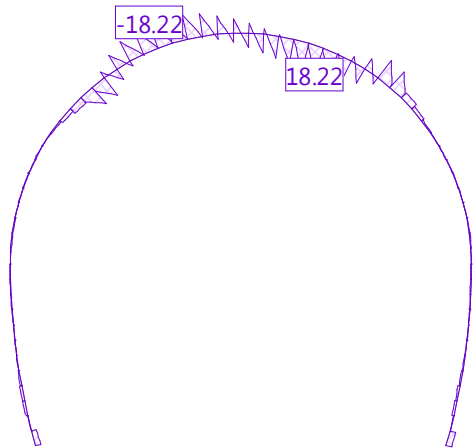
Section force N [kN] for: C5_N1

Scale 1 :100.0



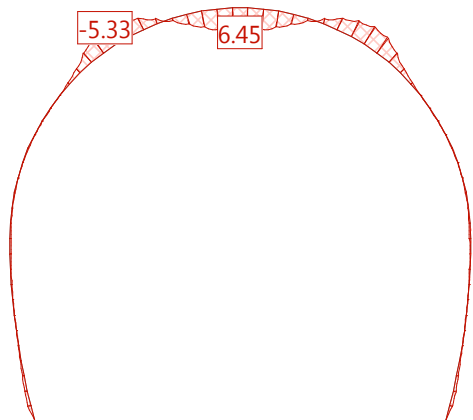
Section force Vz [kN] for: C5_N1

Scale 1 :100.0



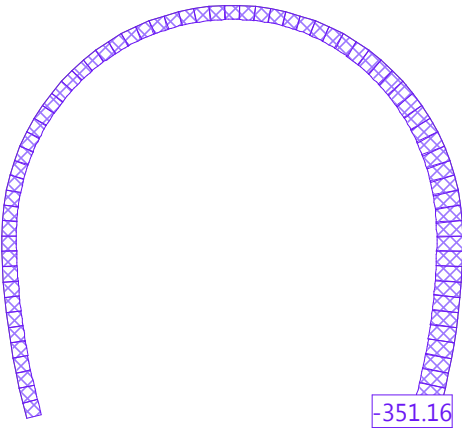
Section force My [kNm] for: C5_N1

Scale 1 :100.0



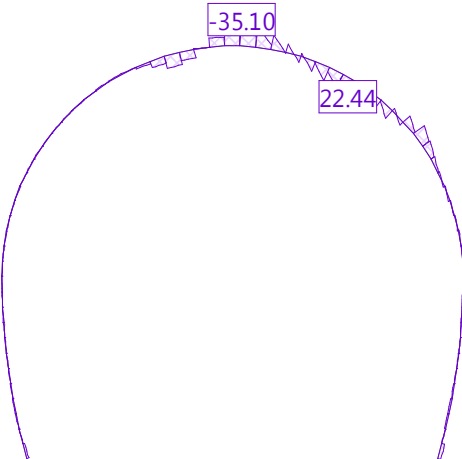
Section force N [kN] for: C6_N1

Scale 1 :100.0



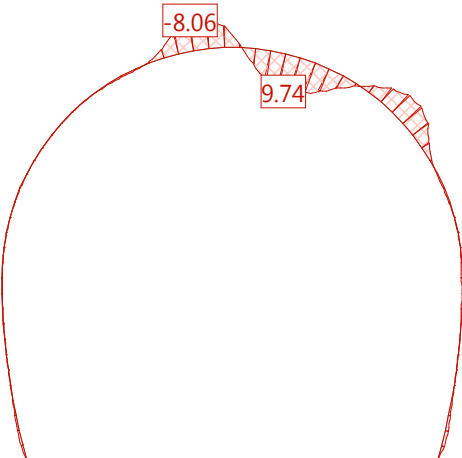
Section force Vz [kN] for: C6_N1

Scale 1 :100.0



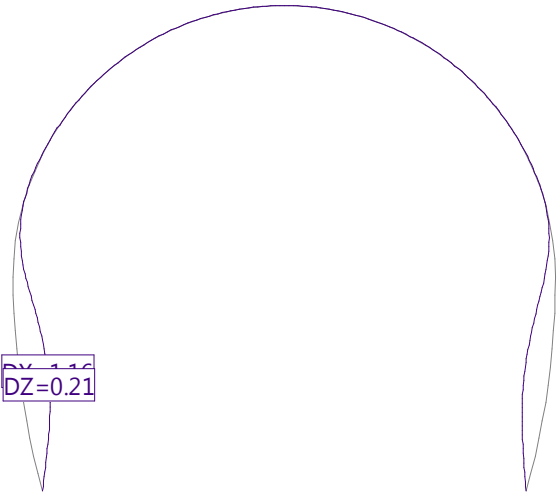
Section force My [kNm] for: C6_N1

Scale 1 :100.0



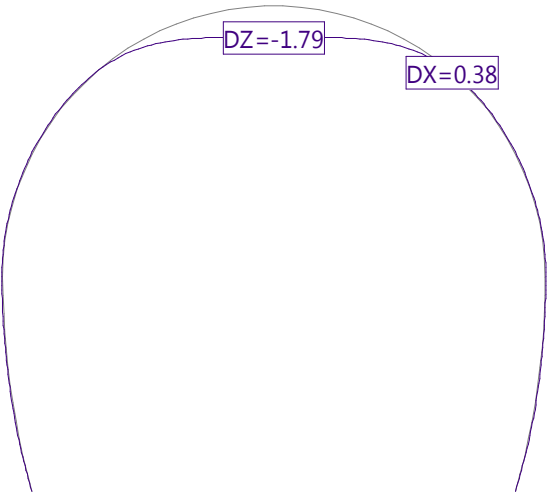
DISPLACEMENTS D for: C1_N1 [mm], Scaling factor: 272.7

Scale 1 :85.0



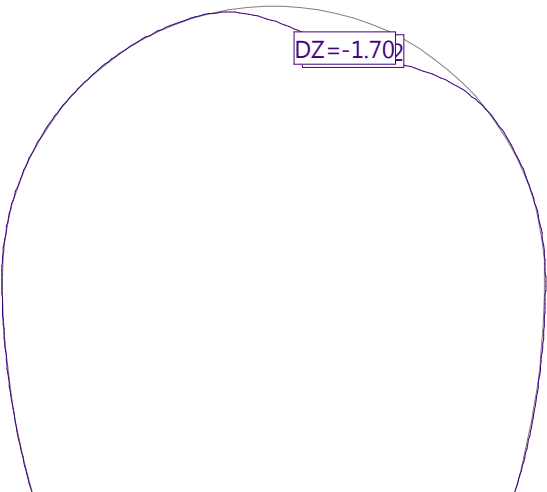
DISPLACEMENTS D for: C2_N1 [mm], Scaling factor: 200.0

Scale 1 :85.0



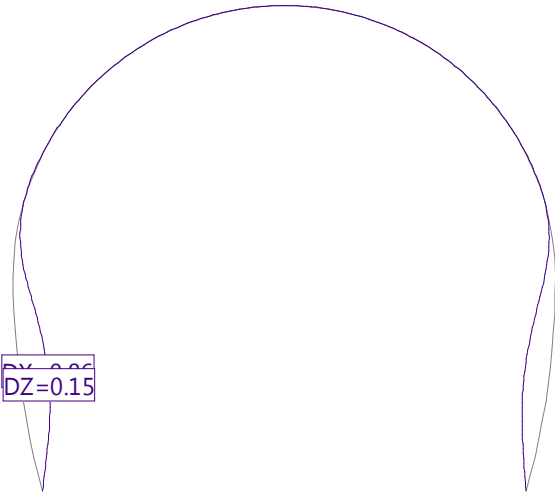
DISPLACEMENTS D for: C3_N1 [mm], Scaling factor: 200.0

Scale 1 :85.0



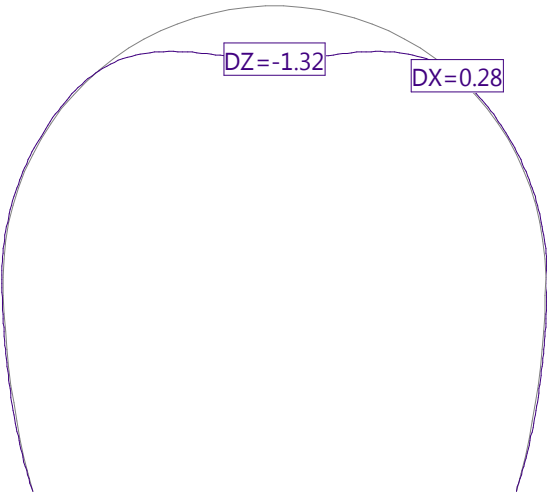
DISPLACEMENTS D for: C4_N1 [mm], Scaling factor: 368.2

Scale 1 :85.0



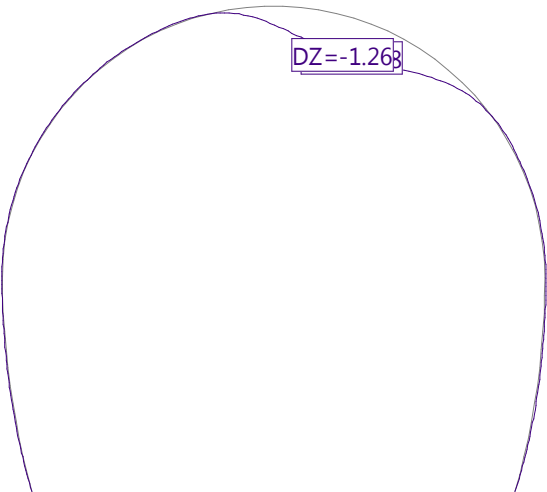
DISPLACEMENTS D for: C5_N1 [mm], Scaling factor: 452.8

Scale 1 :85.0



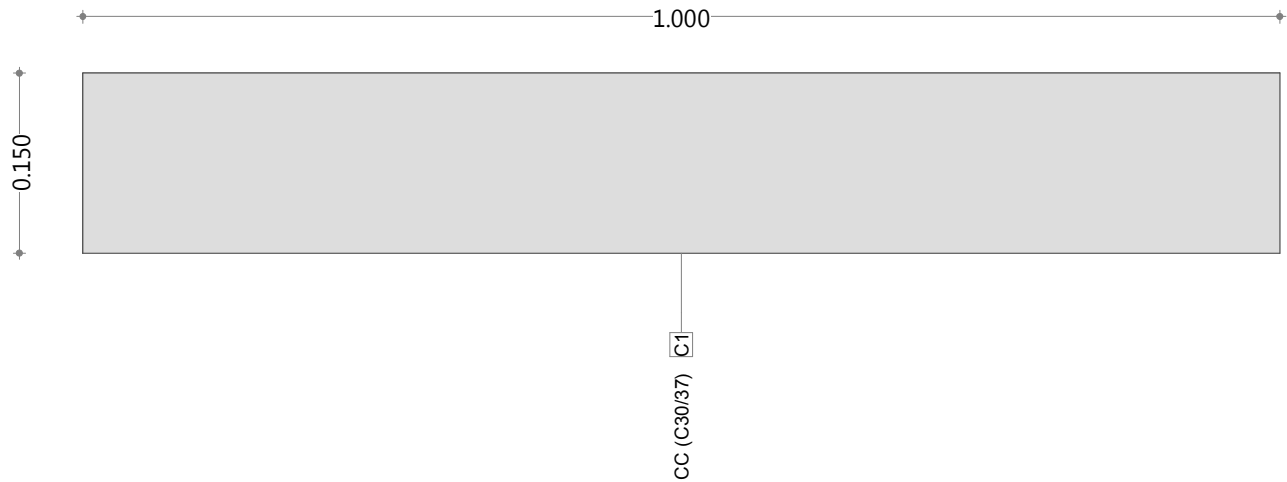
DISPLACEMENTS D for: C6_N1 [mm], Scaling factor: 329.3

Scale 1 :85.0



Cross-section QS (C30/37): Outline

Scale 1 :6.3



Cross section (column): QS

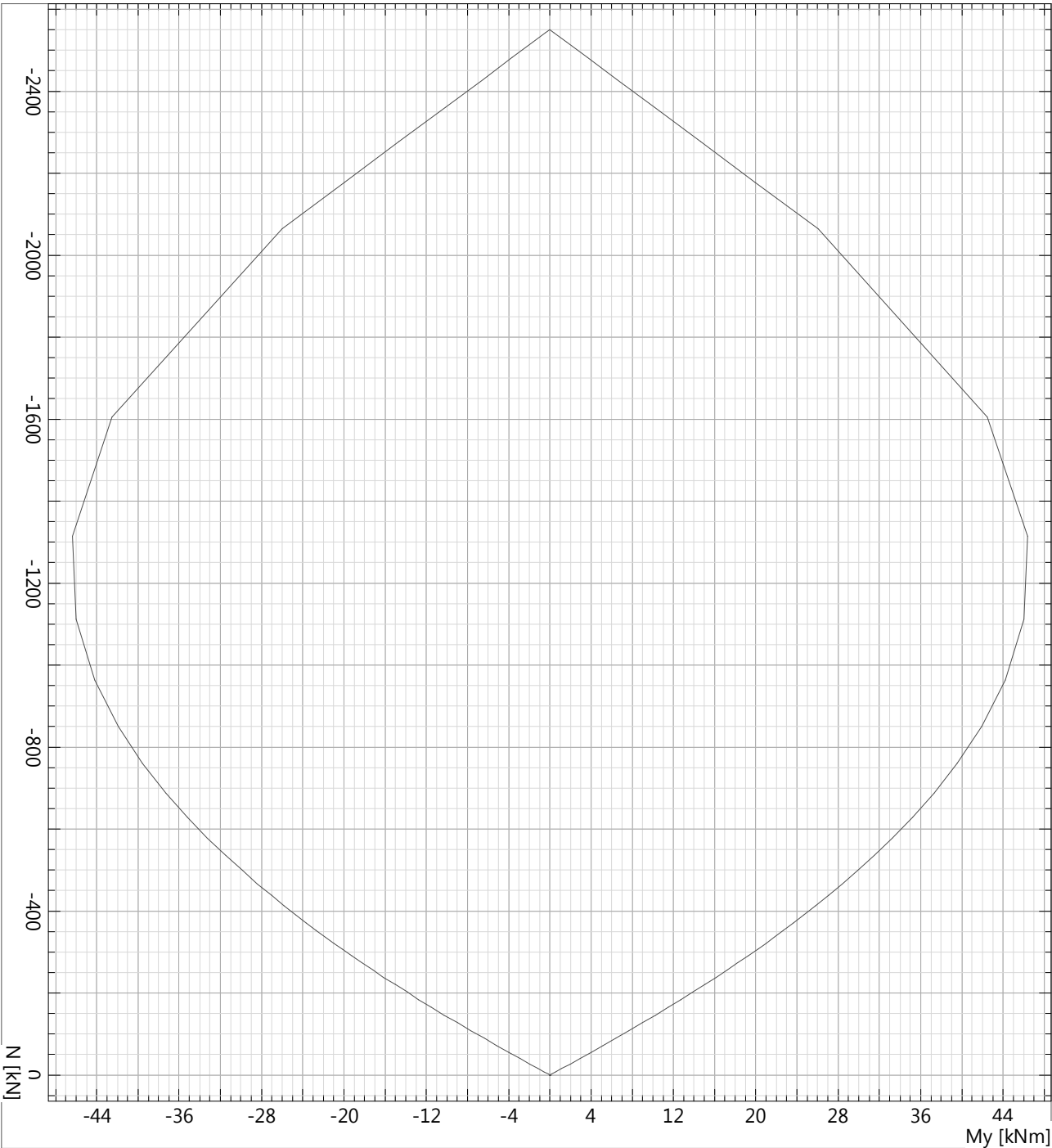
Geometrical definition of cross section

Name	Material	Class	Type	No.	y_q [m]	z_q [m]	No.	y_q [m]	z_q [m]
C1	CC	C30/37	Polygon	1 3	0 1.000	0 0.150	2 4	1.000 0	0 0.150

Section properties: (reference material: CC)

	Area [m²]		Moment of inertia [m⁴]		C.G., Angle [m]				Mass [kg/m]
Ax	0.1500	Ix	0.001019	ys	0.500			Mcs	375.0
Ay	(=Ax)	Iy	0.000281	zs	0.075				
Az	(=Ax)	Iz	0.012500	β	0 [°]				

M-N-Interaction diagram Cross section (column): QS
!ULS / Reinforcement percentage: $\rho = 0$ o/o



Ultimate strength analysis Cross section (column): QS**Action forces / Efficiency: eff(M,N) = 0.33 OK**

No.	AP	P	Bending and axial force				Shear forces and torsion				Complete CS eff(M,N,V,T) [-]
			N [kN]	M _y [kNm]	M _z [kNm]	eff(M,N) [-]	V _y [kN]	V _z [kN]	T [kNm]	eff(V,T) [-]	
1	!ULS		-191.5	0	-	0.08	-	-11.0	-	***	
2	!ULS		-185.3	7.20000	-	0.15	-	-0.6	-	***	
3	!ULS		-177.0	-5.30000	-	0.12	-	-5.2	-	***	
4	!ULS		-177.0	-5.30000	-	0.12	-	-5.2	-	***	
5	!ULS		-185.0	7.20000	-	0.15	-	-0.6	-	***	
6	!ULS		-185.3	7.20000	-	0.15	-	-0.6	-	***	
7	!ULS		-178.2	-5.30000	-	0.12	-	-	-		
8	!ULS		-179.2	-2.00000	-	0.08	-	13.4	-	***	
9	!ULS		-431.4	0	-	0.17	-	4.9	-	***	
10	!ULS		-317.9	8.70000	-	0.20	-	-	-		
11	!ULS		-376.2	-7.20000	-	0.20	-	-2.3	-	***	
12	!ULS		-376.2	-7.20000	-	0.20	-	-2.3	-	***	
13	!ULS		-317.9	8.70000	-	0.20	-	-	-		
14	!ULS		-317.9	8.70000	-	0.20	-	-	-		
15	!ULS		-388.2	-6.70000	-	0.20	-	2.4	-	***	
16	!ULS		-344.4	-1.80000	-	0.15	-	13.3	-	***	
17	!ULS		-474.1	0	-	0.19	-	-5.5	-	***	
18	!ULS		-257.5	13.20000	-	0.33	-	-1.6	-	***	
19	!ULS		-250.3	-1.09E+1	-	0.24	-	-0.1	-	***	
20	!ULS		-249.6	-1.09E+1	-	0.24	-	15.6	-	***	
21	!ULS		-257.5	13.20000	-	0.33	-	-1.6	-	***	
22	!ULS		-257.5	13.20000	-	0.33	-	-1.6	-	***	
23	!ULS		-365.5	-8.80000	-	0.22	-	1.8	-	***	
24	!ULS		-247.8	5.50000	-	0.14	-	-33.4	-	***	

- : Calculation with uniaxial bending (neutral axis is horizontal)!!

Analysis-Parameters "!ULS" Standard: Eurocode EN

ID	Diagram σ - ϵ			Strain Limits			σ_s [N/mm ²]	Partial safety factor				Various parameters			
	C	S		ϵ_{c2} [‰]	ϵ_{cu3} [‰]	ϵ_{ud} [‰]		α_{cc} [-]	γ_c [-]	γ_s [-]		θ [-]	ϕ [-]		
!ULS	2/0	1		-2.000	-3.500	2.000E		0.85	1.50	1.15		45.00	0		

 θ : Inclination of diagonal in compression ϕ : Creep coefficient

Work
Object

Serviceability limit state verification according to EN 1992-1-1 (Eurocode 2)

Section geometry

h	[cm]	15	Total section height
b	[cm]	100	Section width

Section forces

N	[kN]	-190.0	Axial force (- = compression)
M	[kNm]	9.7	Bending moment (+ = lower fiber in traction)
V	[kN]	-1.2	Shear force

Concrete input

Type		C 30/37	Concrete type
γ_c	[-]	1.0	Partial safety factor on concrete strength
f_{ck}	[MPa]	30.0	Characteristic value of concrete compressive strength
f_{cd}	[MPa]	30.0	Design value of concrete compressive strength
f_{ctm}	[MPa]	2.9	Concrete mean tensile strength
E_c	[GPa]	33.0	Concrete elastic modulus
Φ	[-]	2.0	Creep coefficient (0 = no creep, 2 = creep)
$\sigma_{c,max}$	[-]	0.60	Maximum compressive stress ($\cdot f_{ck}$)

Reinforcement input - Upper layer

d_s	[mm]	0	Bar diameter
s_s	[cm]	15	Bar spacing
c_s	[mm]	53	Bar cover (with respect to bar axis)
A_{ss}	[mm ²]	0	Steel area

Crack calculation input

k_t	[-]	0.4	Factor of load duration (0.4 = long term, 0.6 short term)
$f_{ct,eff}/f_{ctm}$	[-]	1	$f_{ct,eff}/f_{ctm}$ ratio (Default = 1)
$w_{lim,u}$	[mm]	0.40	Maximum crack opening (upper layer)
$w_{lim,l}$	[mm]	0.40	Maximum crack opening (lower layer)

Main results

	Maximum	Limit	Check
σ_c	-5.3	-18.0	✓
σ_s	0.0	400.0	✓
w_k	0.00	0.4	✓

WARNING: EC formulation not applicable for crack width calculation
Zilch, Zehetmaier formulation used

Shear force

Shear	[0/1]	1	Include shear force as inner longitudinal force (1 = yes, 0 = no)
θ	[°]	45	Inclination of compr. diagonal (22.5° - 60°)
α	[°]	90	Inclination of stirrups (vertical = 90°)

N	[kN]	-188.8	Axial force, calculation value (- = compression)
M	[kNm]	9.7	Bending moment, calculation value (+ = upper fiber in traction)

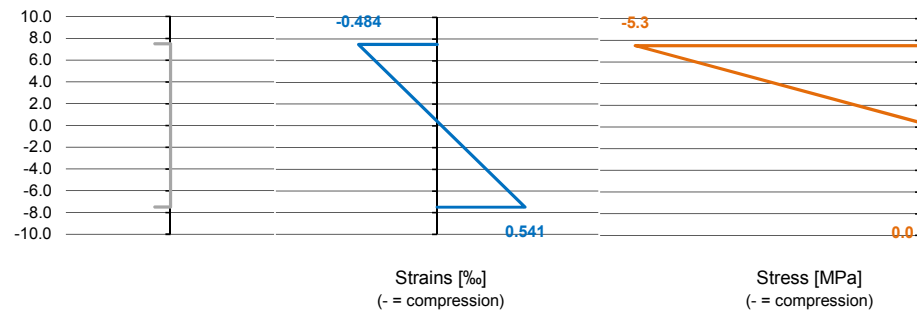
Steel input

Type		B 500 B	Steel type
γ_s	[-]	1.0	Partial safety factor on concrete strength
f_{yk}	[MPa]	500.0	Characteristic value of steel tensile strength
f_{yd}	[MPa]	500.0	Design value of steel tensile strength
E_s	[GPa]	200.0	Steel elastic modulus
$\sigma_{s,max}$	[-]	0.8	Maximum tensile stress ($\cdot f_{yk}$)

Reinforcement input - Lower layer

\emptyset_l	[mm]	0	Bar diameter
s_l	[cm]	15	Bar spacing
c_l	[mm]	53	Bar cover (with respect to bar axis)
A_{sl}	[mm ²]	0	Steel area

k_1	[-]	0.8	Bond properties of reinforcing steel (ribbed: 0.8; plain: 1.6)
k_2	[-]	0.5	Strain coefficient (bending: 0.5; pure tension: 1.0)
k_3	[-]	3.4	Coefficient ($k_3 = 3.4$)
k_4	[-]	0.425	Coefficient ($k_4 = 0.425$)



Work
Object

Calculation details

Section results

ϵ_0	[‰]	0.03	Section mean strain	28.4	0.1
χ	[km ⁻¹]	6.84	Section curvature	6838.4	0.0
y_{AN}	[cm]	0.4	Neutral axis position		0.1

Calculated internal forces

N	[kN]	-188.8	Axial force (- = compression)
M	[kN]	9.7	Bending moment (+ = upper fiber in traction)

Extreme stresses and strains

Concrete

y_{cs}	[cm]	7.5	Upper fiber position	y_{cl}	[cm]	-7.5	Lower fiber position
ϵ_{cs}	[‰]	-0.484	Upper fiber strain	ϵ_{cl}	[‰]	0.541	Lower fiber strain
σ_{cs}	[MPa]	-5.3	Upper fiber stress	σ_{cl}	[MPa]	0.0	Lower fiber stress
F_c^*	[kN]	-188.8	Concrete force				
ΔF_{ss}	[kN]	0.0	Upper reinf. force to be removed from concrete				
ΔF_{sl}	[kN]	0.0	Lower reinf. force to be removed from concrete				
F_c	[kN]	-188.8	Concrete force (reinforcement area excluded)				
b_c	[cm]	5.1	Force lever arm				

Reinforcement

y_{ss}	[cm]	2.2	Upper reinf. position	y_{sl}	[cm]	-2.2	Lower reinf. position
ϵ_{ss}	[‰]	-0.122	Upper reinf. strain	ϵ_{sl}	[‰]	0.179	Lower reinf. strain
σ_{ss}	[MPa]	0.0	Upper reinf. stress	σ_{sl}	[MPa]	0.0	Lower reinf. stress
F_{ss}	[kN]	0.0	Upper reinf. force	F_{sl}	[kN]	0.0	Lower reinf. force
b_{ss}	[cm]	2.2	Upper reinf. lever arm	b_{sl}	[cm]	-2.2	Lower reinf. lever arm

Crack calculation

α_e	[-]	6.06	E_s/E_c ratio
x	[cm]	0.00	Compression zone (cracked section)
d	[mm]	97.0	Static height
c	[mm]	53.0	Bar cover (with respect to bar border)
$h_{c,eff}$	[mm]	50.0	Effective tensile concrete area height
$A_{c,eff}$	[mm ²]	50000	Effective tensile concrete area
A_s	[mm ²]	0	Reinforcement area (in tensile area)
$\rho_{p,eff}$	[-]	0.000	ratio of tensile reinforcement to concrete zone in tension
σ_s	[MPa]	0.0	Stress in reinforcement
$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}$	[‰]	n.a.	difference of strain
\varnothing_{eq}	[mm]	0.0	Equivalent diameter
$s_{r,max}$	[cm]	19.5	max. crack spacing
w_k	[mm]	n.a.	max. crack width
f_{bd}	[MPa]	4.6	Bond strength (good adherence and $\varnothing < 32$ mm)
w_k	[mm]	0.00	max. crack width (acc. to Zilch, Zehetmaier "Bemessung im konstruktiven Betonbau", used only if EC is not applicable)
		0.00	

Results

N	M	V	M/N	θ	Φ	σ_c			σ_s			w_k		
						Max	Limit	Check	Max	Limit	Check	Max	Limit	Check
[kN]	[kNm]	[kN]	[m]	[°]	[-]	[MPa]	[MPa]	[-]	[MPa]	[MPa]	[-]	[mm]	[mm]	[-]
-141.8	0.0	-8.1	0.000	45.0	2.0	-0.9	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓
-137.2	5.4	-0.4	-0.039	45.0	2.0	-2.5	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓
-131.1	-3.9	-3.8	0.030	45.0	2.0	-1.9	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓
-131.1	-3.9	-3.8	0.030	45.0	2.0	-1.9	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓
-137.2	5.4	-0.4	-0.039	45.0	2.0	-2.5	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓
-137.2	5.4	-0.4	-0.039	45.0	2.0	-2.5	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓
-132.0	-3.9	0.0	0.030	45.0	2.0	-1.9	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓
-132.7	-1.5	9.9	0.011	45.0	2.0	-1.2	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓
-319.6	0.0	3.6	0.000	45.0	2.0	-2.1	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓
-235.5	6.5	0.0	-0.027	45.0	2.0	-3.3	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓
-278.7	-5.3	-1.7	0.019	45.0	2.0	-3.3	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓
-278.7	-5.3	-1.7	0.019	45.0	2.0	-3.3	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓
-235.5	6.5	0.0	-0.027	45.0	2.0	-3.3	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓
-235.5	6.5	0.0	-0.027	45.0	2.0	-3.3	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓
-287.5	-5.0	1.7	0.017	45.0	2.0	-3.2	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓
-255.1	-1.3	9.8	0.005	45.0	2.0	-2.0	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓
-351.2	0.0	-4.1	0.000	45.0	2.0	-2.3	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓
-190.8	9.7	-1.2	-0.051	45.0	2.0	-5.3	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓
-185.4	-8.1	-0.1	0.043	45.0	2.0	-3.9	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓
-184.9	-8.1	11.6	0.044	45.0	2.0	-4.1	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓
-190.8	9.7	-1.2	-0.051	45.0	2.0	-5.3	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓
-190.8	9.7	-1.2	-0.051	45.0	2.0	-5.3	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓
-270.7	-6.5	1.3	0.024	45.0	2.0	-3.5	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓
-183.5	4.1	-24.7	-0.022	45.0	2.0	-2.2	-18.0	✓	0.0	400.0	✓	0.00	0.4	✓

Legend:

N = Axial force

M = Bending moment

V = Shear force

M/N = Eccentricity

θ = Inclination of compr. diagonal (22.5° - 60°)

Φ = Creep coefficient (0 = no creep, 2 = creep)

Anexo E

Caverna Principal - CS1 - Corto plazo

INPUT

Roof of section	
Radius	11.88 [m]

Rock	
Unit weight	27.0 [kN/m ³]
Overburden	1750.00 [m]
Coefficient K	1.00 [-]
Friction	53.3 [°]
SF Friction	1.25 [-]
Cohesion	0.0 [kPa]
SF Cohesion	1.00 [-]

Friction	47.0 [°]
Cohesion	0.0 [kPa]

Earthquake	
kV	0.00 [-]

Water	
Unit weight	10.0 [kN/m ³]
Head	0.00 [m]
Water coeff top	0.00 [-]
Water coeff bottom	0.00 [-]

Shotcrete	
Thickness	5 [cm]
Unit weight	25.0 [kN/m ³]
Shear strength	1.1 [MPa]
Compressive strength	20.0 [MPa]
SF	1.50 [-]
Thickness (arch effect)	0.00 [cm]

Shear force	36.7 [kN/m]
Axial force	0.0 [kN/m]
Normal stress	0.0 [MPa]

Anchor	
Bar diameter	30 [mm]
Yielding	495.1 [MPa]
SF	1.35 [-]
in plane	2.00 [m]
out of plane	2.00 [m]
Anchor length	8.0 [m]
Boring diameter	61 [mm]
Bond strength	1.000 [MPa]

Anchoring length	1.8 [m]
Force	259.3 [kN]
A	4.0 [m ²]
Pressure	64.8 [kPa]
R1	18.1 [m]
R2	19.9 [m]

CONTROLS

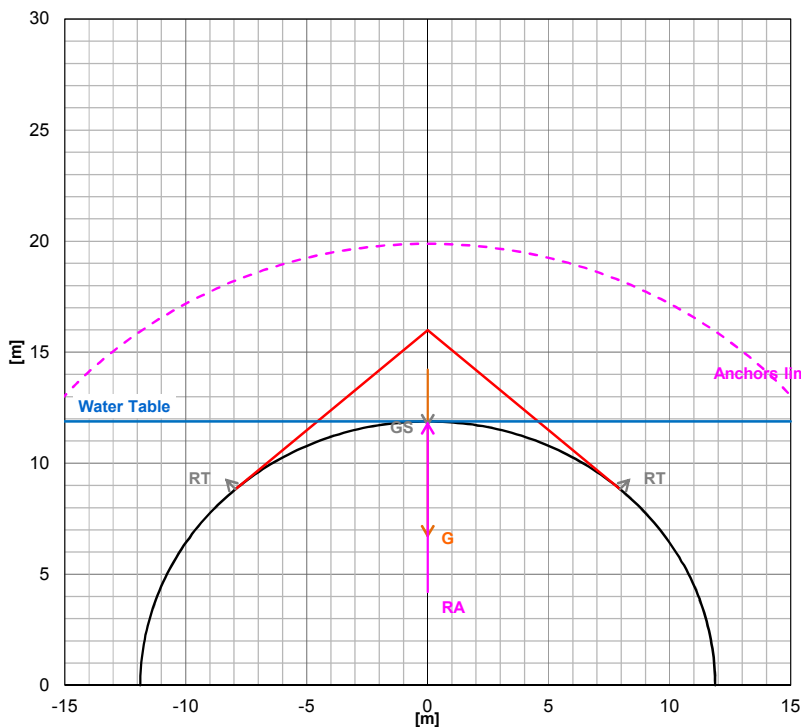
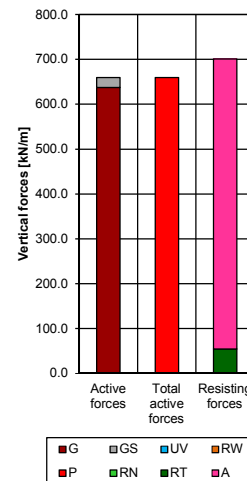
Shotcrete	d_arch < d_actual ... - 5 cm	
	Normal stress < 10 MPa	

Anchors	Lopt	7.6 [m]	Bolt length OK
	Lmin	6.1 [m]	
	Lmax	9.1 [m]	
	L_anchoring < L_bolt		

Bearing factor	SF_min	1.1 [-]	Bearing capacity > 1 OK
----------------	--------	---------	-------------------------

CALCULATION RESULTS - DETERMINANT WEDGE

Geometry	alfa	Critical	[-]	Wedge top angle (graphic)
	alfa	48	[°]	Wedge top angle (critical value)
	alfa	50	[°]	Wedge top angle (user defined value)
	H	4.11	[m]	Wedge height
	h*	4.11	[m]	Wedge height limited by ground level
Active forces	G	637.8	[kN/m]	Wedge weight [vertical direction, + downward]
	N	289609.2	[kN/m]	Total field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U	0.0	[kN/m]	Water pressure [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U _v	0.0	[kN/m]	Water pressure [vertical direction, + downward]
	N'	289609.2	[kN/m]	Effective field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	T _c	0.0	[kN/m]	Cohesive resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	T _f	310832.5	[kN/m]	Friction resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	R _w	0.0	[kN/m]	N' + T _c + T _f resultant [vertical direction, + upward, 0 if downward]
	G _s	21.8	[kN/m]	Shotcrete weight [vertical direction, + downward]
	P	659.5	[kN/m]	Total active forces $G + G_s + 2 \cdot U_v - 2 \cdot R_w$ [vertical direction, + downward, 0 if upward]
Resisting forces	R _N	0.0	[kN/m]	Shotcrete compressive strength [vertical direction, + upward]
	R _T	54.5	[kN/m]	Shotcrete shear strength [vertical direction, + upward]
	A	646.2	[kN/m]	Anchor resistance [vertical direction, + upward]
	R	700.7	[kN/m]	Total resisting forces $R_N + R_T + A$ [vertical direction, + upward]
Bearing factor	SF	1.1	[-]	Bearing factor R / P



ZOOM -

ZOOM +

Caverna Principal - CS2 - Corto plazo

INPUT

Roof of section	
Radius	11.88 [m]

Rock	
Unit weight	27.0 [kN/m ³]
Overburden	1750.00 [m]
Coefficient K	1.00 [-]
Friction	50.4 [°]
SF Friction	1.25 [-]
Cohesion	0.0 [kPa]
SF Cohesion	1.00 [-]

Friction	44.0 [°]
Cohesion	0.0 [kPa]

Earthquake	
kV	0.00 [-]

Water	
Unit weight	10.0 [kN/m ³]
Head	0.00 [m]
Water coeff top	0.00 [-]
Water coeff bottom	0.00 [-]

Shotcrete	
Thickness	5 [cm]
Unit weight	25.0 [kN/m ³]
Shear strength	1.1 [MPa]
Compressive strength	20.0 [MPa]
SF	1.50 [-]
Thickness (arch effect)	0.00 [cm]

Shear force	36.7 [kN/m]
Axial force	0.0 [kN/m]
Normal stress	0.0 [MPa]

Anchor	
Bar diameter	30 [mm]
Yielding	495.1 [MPa]
SF	1.35 [-]
in plane	2.00 [m]
out of plane	1.50 [m]
Anchor length	8.0 [m]
Boring diameter	61 [mm]
Bond strength	1.000 [MPa]

Anchoring length	1.8 [m]
Force	259.3 [kN]
A	3.0 [m ²]
Pressure	86.4 [kPa]
R1	18.1 [m]
R2	19.9 [m]

CONTROLS

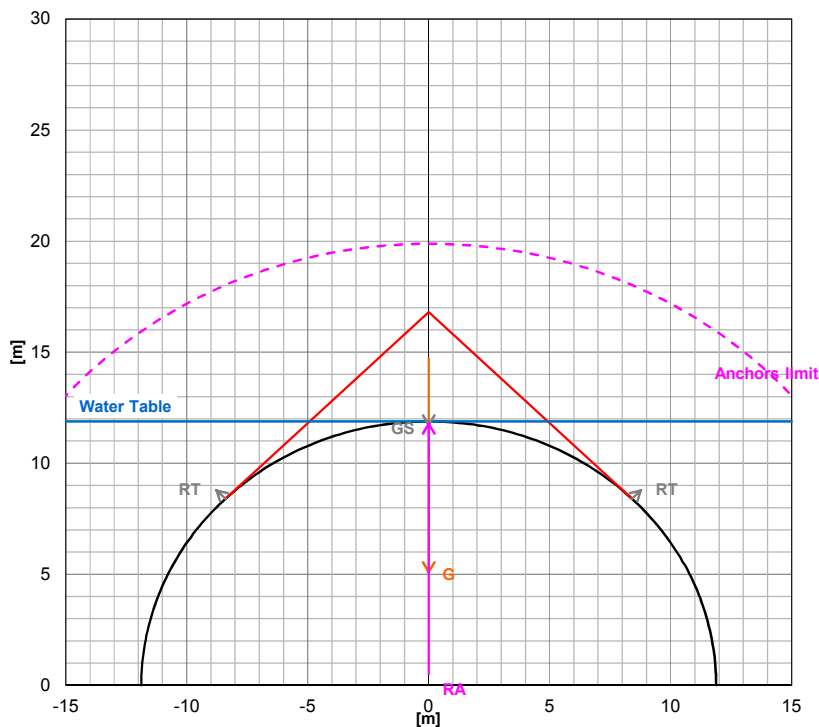
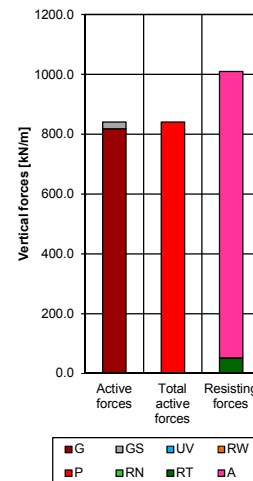
Shotcrete	d_arch < d_actual ... - 5 cm	
	Normal stress < 10 MPa	

Anchors	Lopt	7.6 [m]	Bolt length OK
	Lmin	6.1 [m]	
	Lmax	9.1 [m]	
	L_anchoring < L_bolt		

Bearing factor	SF_min	1.2 [-]	Bearing capacity > 1 OK
----------------	--------	---------	-------------------------

CALCULATION RESULTS - DETERMINANT WEDGE

Geometry	alfa	Critical [-]	Wedge top angle (graphic)
	alfa	45 [°]	Wedge top angle (critical value)
	alfa	45 [°]	Wedge top angle (user defined value)
	H	4.92 [m]	Wedge height
	h*	4.92 [m]	Wedge height limited by ground level
Active forces	G	817.8 [kN/m]	Wedge weight [vertical direction, + downward]
	N	328357.2 [kN/m]	Total field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U	0.0 [kN/m]	Water pressure [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U _v	0.0 [kN/m]	Water pressure [vertical direction, + downward]
	N'	328357.2 [kN/m]	Effective field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	T _c	0.0 [kN/m]	Cohesive resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	T _f	317532.5 [kN/m]	Friction resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	R _w	0.0 [kN/m]	N' + T _c + T _f resultant [vertical direction, + upward, 0 if downward]
	G _s	23.3 [kN/m]	Shotcrete weight [vertical direction, + downward]
	P	841.1 [kN/m]	Total active forces $G + G_s + 2 \cdot U_v - 2 \cdot R_w$ [vertical direction, + downward, 0 if upward]
Resisting forces	R _N	0.0 [kN/m]	Shotcrete compressive strength [vertical direction, + upward]
	R _T	51.9 [kN/m]	Shotcrete shear strength [vertical direction, + upward]
	A	958.0 [kN/m]	Anchor resistance [vertical direction, + upward]
	R	1009.8 [kN/m]	Total resisting forces $R_N + R_T + A$ [vertical direction, + upward]
Bearing factor	SF	1.2 [-]	Bearing factor R / P



ZOOM -

ZOOM +

Caverna Principal - CS3 - corto plazo

INPUT

Roof of section		
Radius	11.88	[m]

Rock		
Unit weight	27.0	[kN/m ³]
Overburden	1750.00	[m]
Coefficient K	1.00	[-]
Friction	45.3	[°]
SF Friction	1.25	[-]
Cohesion	0.0	[kPa]
SF Cohesion	1.00	[-]

Friction	39.0 [°]
Cohesion	0.0 [kPa]

Earthquake		
kV	0.00	[-]

Water		
Unit weight	10.0	[kN/m ³]
Head	0.00	[m]
Water coeff top	0.00	[-]
Water coeff bottom	0.00	[-]

Shotcrete	
Thickness	5 [cm]
Unit weight	25.0 [kN/m ³]
Shear strength	1.1 [MPa]
Compressive strength	20.0 [MPa]
SF	1.50 [-]
Thickness (arch effect)	0.00 [cm]

Shear force	36.7	[kN/m]
Axial force	0.0	[kN/m]
Normal stress	0.0	[MPa]

Anchor		
Bar diameter	30	[mm]
Yielding	495.1	[MPa]
SF	1.35	[-]
in plane	1.50	[m]
out of plane	1.50	[m]
Anchor length	10.0	[m]
Boring diameter	61	[mm]
Bond strength	0.700	[MPa]

Anchoring length	2.6 [m]
Force	259.3 [kN]
A	2.3 [m ²]
Pressure	115.2 [kPa]
R1	19.3 [m]
R2	21.9 [m]

CONTROLS	
----------	--

Shotcrete	d_arch < d_actual ... - 5 cm	
	Normal stress < 10 MPa	

Anchors	Lopt	7.6 [m]	
	Lmin	6.1 [m]	
	Lmax	9.1 [m]	WARNING: bolt length is quite long
	L_anchoring < L_bolt		

Bearing factor	SF_min	1.2 [-]	Bearing capacity > 1 OK
-----------------------	--------	---------	-------------------------

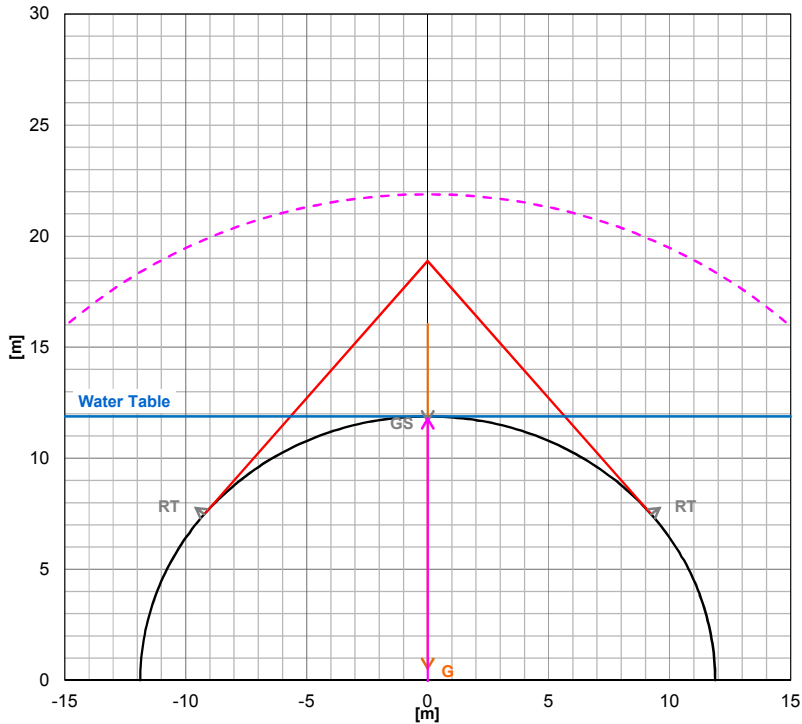
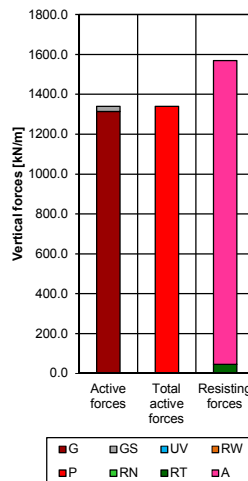
CALCULATION RESULTS - DETERMINANT WEDGE

Geometry	alfa	Critical	[-]	Wedge top angle (graphic)
	alfa	39	[°]	Wedge top angle (critical value)
	alfa	45	[°]	Wedge top angle (user defined value)
	H	7.00	[m]	Wedge height
	h*	7.00	[m]	Wedge height limited by ground level

Active forces			
G	1313.8	[kN/m]	Wedge weight [vertical direction, + downward]
N	424593.6	[kN/m]	Total field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
U	0.0	[kN/m]	Water pressure [normal to discontinuity, + toward wedge]
U _v	0.0	[kN/m]	Water pressure [vertical direction, + downward]
N'	424593.6	[kN/m]	Effective field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
T _c	0.0	[kN/m]	Cohesive resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
T _f	343250.7	[kN/m]	Friction resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
R _w	0.0	[kN/m]	N' + T _c + T _f resultant [vertical direction, + upward, 0 if downward]
G _s	26.4	[kN/m]	Shotcrete weight [vertical direction, + downward]
P	1340.3	[kN/m]	Total active forces G + G _s + 2·U _v - 2·R _w [vertical direction, + downward, 0 if upward]

Resisting forces	R_N	0.0 [kN/m]	Shotcrete compressive strength [vertical direction, + upward]
	R_T	46.2 [kN/m]	Shotcrete shear strength [vertical direction, + upward]
	A	1523.4 [kN/m]	Anchor resistance [vertical direction, + upward]
	R	1569.6 [kN/m]	Total resisting forces $R_N + R_T + A$ [vertical direction, + upward]

Bearing factor	SF	1.2	[-]	Bearing factor R/P
----------------	----	-----	-----	----------------------



ZOOM –

ZOOM +

Caverna Secundaria - CS1 - corto plazo

INPUT

Roof of section	
Radius	9.07 [m]

Rock	
Unit weight	27.0 [kN/m ³]
Overburden	1750.00 [m]
Coefficient K	1.00 [-]
Friction	53.3 [°]
SF Friction	1.25 [-]
Cohesion	0.0 [kPa]
SF Cohesion	1.00 [-]

Friction	47.0 [°]
Cohesion	0.0 [kPa]

Earthquake	
kV	0.00 [-]

Water	
Unit weight	10.0 [kN/m ³]
Head	0.00 [m]
Water coeff top	0.00 [-]
Water coeff bottom	0.00 [-]

Shotcrete	
Thickness	5 [cm]
Unit weight	25.0 [kN/m ³]
Shear strength	1.1 [MPa]
Compressive strength	20.0 [MPa]
SF	1.50 [-]
Thickness (arch effect)	0.00 [cm]

Shear force	36.7 [kN/m]
Axial force	0.0 [kN/m]
Normal stress	0.0 [MPa]

Anchor	
Bar diameter	30 [mm]
Yielding	495.1 [MPa]
SF	1.35 [-]
in plane	2.00 [m]
out of plane	2.00 [m]
Anchor length	6.0 [m]
Boring diameter	61 [mm]
Bond strength	1.000 [MPa]

Anchoring length	1.8 [m]
Force	259.3 [kN]
A	4.0 [m ²]
Pressure	64.8 [kPa]
R1	13.2 [m]
R2	15.1 [m]

CONTROLS

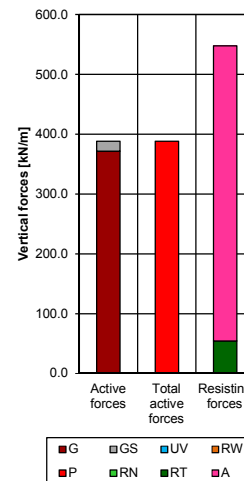
Shotcrete	d_arch < d_actual ... - 5 cm	
	Normal stress < 10 MPa	

Anchors	Lopt	6.6 [m]	Bolt length OK
	Lmin	5.3 [m]	
	Lmax	7.9 [m]	
	L_anchoring < L_bolt		

Bearing factor	SF_min	1.4 [-]	Bearing capacity > 1 OK
----------------	--------	---------	-------------------------

CALCULATION RESULTS - DETERMINANT WEDGE

Geometry	alfa	Critical [-]	Wedge top angle (graphic)
	alfa	48 [°]	Wedge top angle (critical value)
	alfa	52 [°]	Wedge top angle (user defined value)
	H	3.13 [m]	Wedge height
	h*	3.13 [m]	Wedge height limited by ground level
Active forces	G	371.7 [kN/m]	Wedge weight [vertical direction, + downward]
	N	221168.8 [kN/m]	Total field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U	0.0 [kN/m]	Water pressure [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U _v	0.0 [kN/m]	Water pressure [vertical direction, + downward]
	N'	221168.8 [kN/m]	Effective field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	T _c	0.0 [kN/m]	Cohesive resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	T _f	237376.6 [kN/m]	Friction resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	R _w	0.0 [kN/m]	N' + T _c + T _f resultant [vertical direction, + upward, 0 if downward]
	G _s	16.6 [kN/m]	Shotcrete weight [vertical direction, + downward]
	P	388.4 [kN/m]	Total active forces $G + G_s + 2 \cdot U_v - 2 \cdot R_w$ [vertical direction, + downward, 0 if upward]
Resisting forces	R _N	0.0 [kN/m]	Shotcrete compressive strength [vertical direction, + upward]
	R _T	54.5 [kN/m]	Shotcrete shear strength [vertical direction, + upward]
	A	493.4 [kN/m]	Anchor resistance [vertical direction, + upward]
	R	547.9 [kN/m]	Total resisting forces $R_N + R_T + A$ [vertical direction, + upward]
Bearing factor	SF	1.4 [-]	Bearing factor R / P



ZOOM -

ZOOM +

Caverna Secundaria - CS2 - corto plazo

INPUT

Roof of section	
Radius	9.07 [m]

Rock	
Unit weight	27.0 [kN/m ³]
Overburden	1750.00 [m]
Coefficient K	1.00 [-]
Friction	50.4 [°]
SF Friction	1.25 [-]
Cohesion	0.0 [kPa]
SF Cohesion	1.00 [-]

Friction	44.0 [°]
Cohesion	0.0 [kPa]

Earthquake	
kV	0.00 [-]

Water	
Unit weight	10.0 [kN/m ³]
Head	0.00 [m]
Water coeff top	0.00 [-]
Water coeff bottom	0.00 [-]

Shotcrete	
Thickness	5 [cm]
Unit weight	25.0 [kN/m ³]
Shear strength	1.1 [MPa]
Compressive strength	20.0 [MPa]
SF	1.50 [-]
Thickness (arch effect)	0.00 [cm]

Shear force	36.7 [kN/m]
Axial force	0.0 [kN/m]
Normal stress	0.0 [MPa]

Anchor	
Bar diameter	30 [mm]
Yielding	495.1 [MPa]
SF	1.35 [-]
in plane	2.00 [m]
out of plane	2.00 [m]
Anchor length	6.0 [m]
Boring diameter	61 [mm]
Bond strength	1.000 [MPa]

Anchoring length	1.8 [m]
Force	259.3 [kN]
A	4.0 [m ²]
Pressure	64.8 [kPa]
R1	13.2 [m]
R2	15.1 [m]

CONTROLS

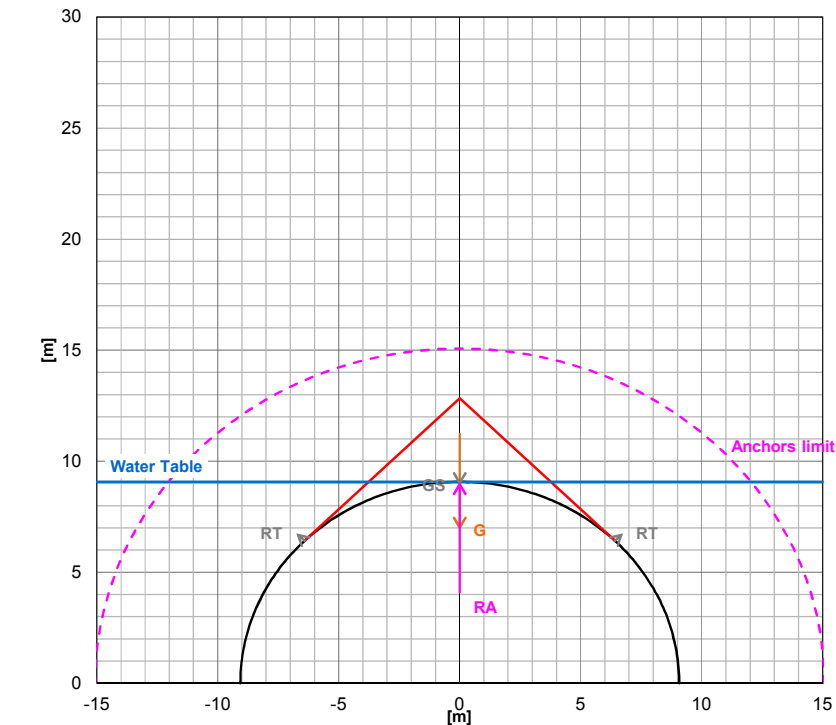
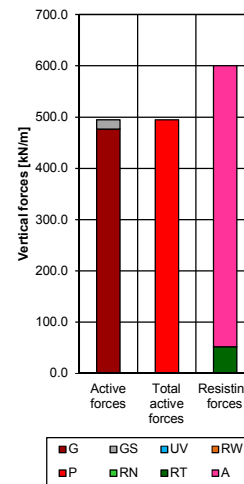
Shotcrete	d_arch < d_actual ... - 5 cm	
	Normal stress < 10 MPa	

Anchors	Lopt	6.6 [m]	Bolt length OK
	Lmin	5.3 [m]	
	Lmax	7.9 [m]	
	L_anchoring < L_bolt		

Bearing factor	SF_min	1.2 [-]	Bearing capacity > 1 OK
----------------	--------	---------	-------------------------

CALCULATION RESULTS - DETERMINANT WEDGE

Geometry	alfa	Critical [-]	Wedge top angle (graphic)
	alfa	45 [°]	Wedge top angle (critical value)
	alfa	50 [°]	Wedge top angle (user defined value)
	H	3.76 [m]	Wedge height
	h*	3.76 [m]	Wedge height limited by ground level
Active forces	G	476.7 [kN/m]	Wedge weight [vertical direction, + downward]
	N	250773.7 [kN/m]	Total field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U	0.0 [kN/m]	Water pressure [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U _v	0.0 [kN/m]	Water pressure [vertical direction, + downward]
	N'	250773.7 [kN/m]	Effective field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	T _c	0.0 [kN/m]	Cohesive resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	T _f	242506.7 [kN/m]	Friction resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	R _w	0.0 [kN/m]	N' + T _c + T _f resultant [vertical direction, + upward, 0 if downward]
	G _s	17.8 [kN/m]	Shotcrete weight [vertical direction, + downward]
	P	494.5 [kN/m]	Total active forces $G + G_s + 2 \cdot U_v - 2 \cdot R_w$ [vertical direction, + downward, 0 if upward]
Resisting forces	R _N	0.0 [kN/m]	Shotcrete compressive strength [vertical direction, + upward]
	R _T	51.9 [kN/m]	Shotcrete shear strength [vertical direction, + upward]
	A	548.5 [kN/m]	Anchor resistance [vertical direction, + upward]
	R	600.4 [kN/m]	Total resisting forces $R_N + R_T + A$ [vertical direction, + upward]
Bearing factor	SF	1.2 [-]	Bearing factor R / P



ZOOM -

ZOOM +

Caverna Secundaria - CS3 - corto plazo

INPUT

Roof of section	
Radius	9.07 [m]

Rock	
Unit weight	27.0 [kN/m ³]
Overburden	1750.00 [m]
Coefficient K	1.00 [-]
Friction	45.3 [°]
SF Friction	1.25 [-]
Cohesion	0.0 [kPa]
SF Cohesion	1.00 [-]

Friction	39.0 [°]
Cohesion	0.0 [kPa]

Earthquake	
kV	0.00 [-]

Water	
Unit weight	10.0 [kN/m ³]
Head	0.00 [m]
Water coeff top	0.00 [-]
Water coeff bottom	0.00 [-]

Shotcrete	
Thickness	5 [cm]
Unit weight	25.0 [kN/m ³]
Shear strength	1.1 [MPa]
Compressive strength	20.0 [MPa]
SF	1.50 [-]
Thickness (arch effect)	0.00 [cm]

Shear force	36.7 [kN/m]
Axial force	0.0 [kN/m]
Normal stress	0.0 [MPa]

Anchor	
Bar diameter	32 [mm]
Yielding	435.2 [MPa]
SF	1.35 [-]
in plane	1.50 [m]
out of plane	1.50 [m]
Anchor length	6.0 [m]
Boring diameter	61 [mm]
Bond strength	0.700 [MPa]

Anchoring length	2.6 [m]
Force	259.3 [kN]
A	2.3 [m ²]
Pressure	115.2 [kPa]
R1	12.5 [m]
R2	15.1 [m]

CONTROLS

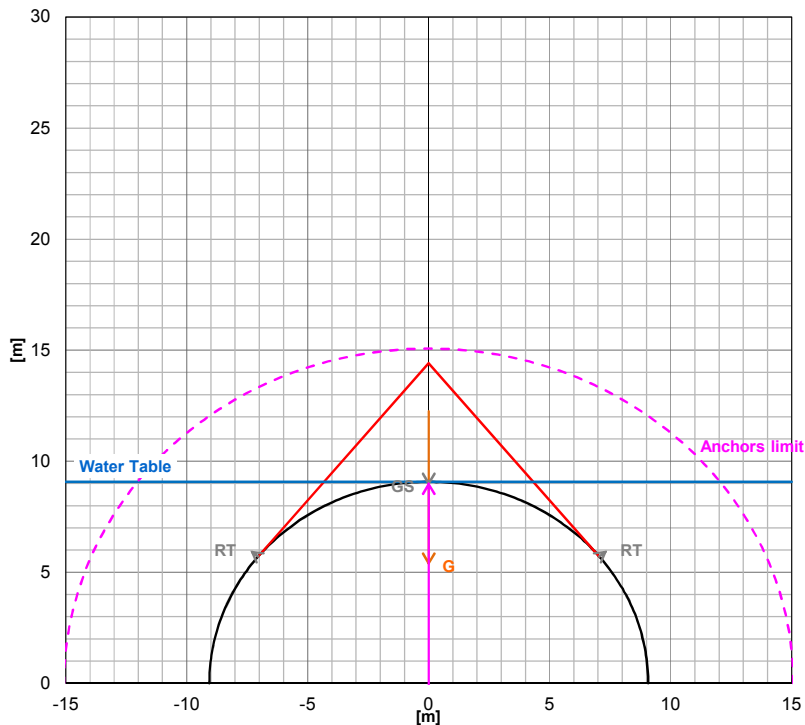
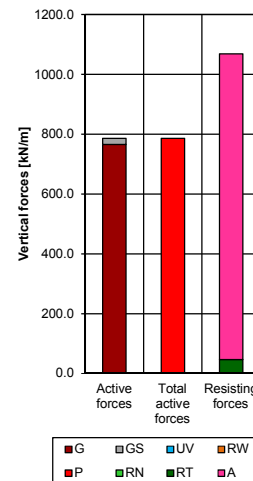
Shotcrete	d_arch < d_actual ... - 5 cm	
	Normal stress < 10 MPa	

Anchors	Lopt	6.6 [m]	Bolt length OK
	Lmin	5.3 [m]	
	Lmax	7.9 [m]	
	L_anchoring < L_bolt		

Bearing factor	SF_min	1.4 [-]	Bearing capacity > 1 OK
----------------	--------	---------	-------------------------

CALCULATION RESULTS - DETERMINANT WEDGE

Geometry	alfa	Critical [-]	Wedge top angle (graphic)
	alfa	39 [°]	Wedge top angle (critical value)
	alfa	5.7 [°]	Wedge top angle (user defined value)
	H	5.34 [m]	Wedge height
	h*	5.34 [m]	Wedge height limited by ground level
Active forces	G	765.8 [kN/m]	Wedge weight [vertical direction, + downward]
	N	324317.2 [kN/m]	Total field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U	0.0 [kN/m]	Water pressure [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U _v	0.0 [kN/m]	Water pressure [vertical direction, + downward]
	N'	324317.2 [kN/m]	Effective field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	T _c	0.0 [kN/m]	Cohesive resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	T _f	262185.1 [kN/m]	Friction resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	R _w	0.0 [kN/m]	N' + T _c + T _f resultant [vertical direction, + upward, 0 if downward]
	G _s	20.2 [kN/m]	Shotcrete weight [vertical direction, + downward]
	P	786.0 [kN/m]	Total active forces $G + G_s + 2 \cdot U_v - 2 \cdot R_w$ [vertical direction, + downward, 0 if upward]
Resisting forces	R _N	0.0 [kN/m]	Shotcrete compressive strength [vertical direction, + upward]
	R _T	46.2 [kN/m]	Shotcrete shear strength [vertical direction, + upward]
	A	1022.9 [kN/m]	Anchor resistance [vertical direction, + upward]
	R	1069.1 [kN/m]	Total resisting forces $R_N + R_T + A$ [vertical direction, + upward]
Bearing factor	SF	1.4 [-]	Bearing factor R / P



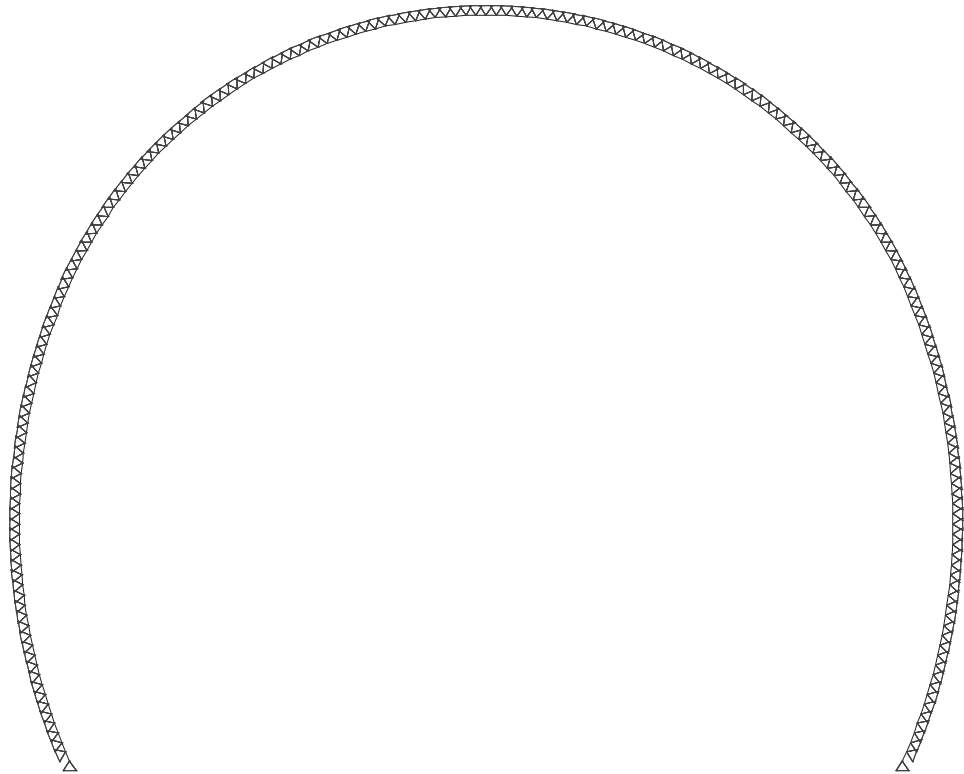
ZOOM -

ZOOM +

Anexo F

Structure

Scale 1:150.0



STRUCTURE 2D

Cross section: Geometry

Name	Variant	Materials	Type	Dimensions [m]
S-R		CP	S-R	$B=1.00$, $H=0.25$ $y_L=-0.50$, $y_R=0.50$, $z_B=-0.13$, $z_T=0.13$

Materials : s. table 'Materials'

Cross section: CS stiffness

Name	Variant	β [°]	EA_x GA_z [kN]	EJ_y [kNm ²]	e_z [m]	CS mass Additional mass [t/m]	Materials
S-R		0	8250000.00 2499990.00	42968.75	0	0.63	CP

β : Angle between member Y axis and first principal axis of cross section
 e_z : Distance center of gravity-axis point
Materials : s. table 'Materials'

Cross sections, cross section values

Cross section		Materials E_{ref} G_{ref}	Ideal cross section values					
Name	Variants		$A_{x,id} =$ EA_x/E_{ref} [m ²]	$J_{y,id} =$ EJ_y/E_{ref} [m ⁴]	$J_{z,id} =$ EJ_z/E_{ref} [m ⁴]	$J_{x,id} =$ GJ_x/G_{ref} [m ⁴]	$A_{y,id} =$ GA_y/G_{ref} [m ²]	$A_{z,id} =$ GA_z/G_{ref} [m ²]
S-R		CP	0.2500	0.001302	0.020833	0.004388	0.2083	0.2083

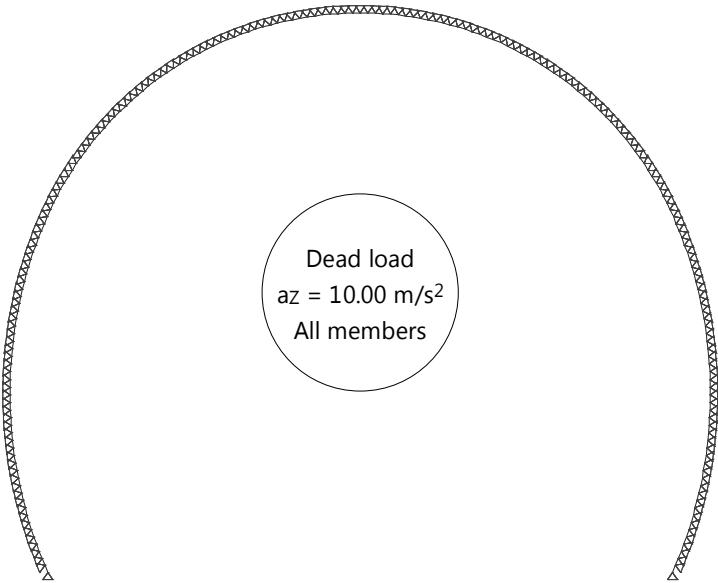
Materials : s. table 'Materials'

Materials

ID	Type	Member	E [kN/mm ²]	G [kN/mm ²]	ν	ρ [t/m ³]	α [‰]	Class	f [N/mm ²]	
CP	Concrete	Pile	33	12	0.17	2.5	0.010	C30/37	-30.00000	$-f_{ck,cyl}$
S	Construction	(general)	210	81	0.30	8.0	0.012	S235	235.00000	f_{yk}

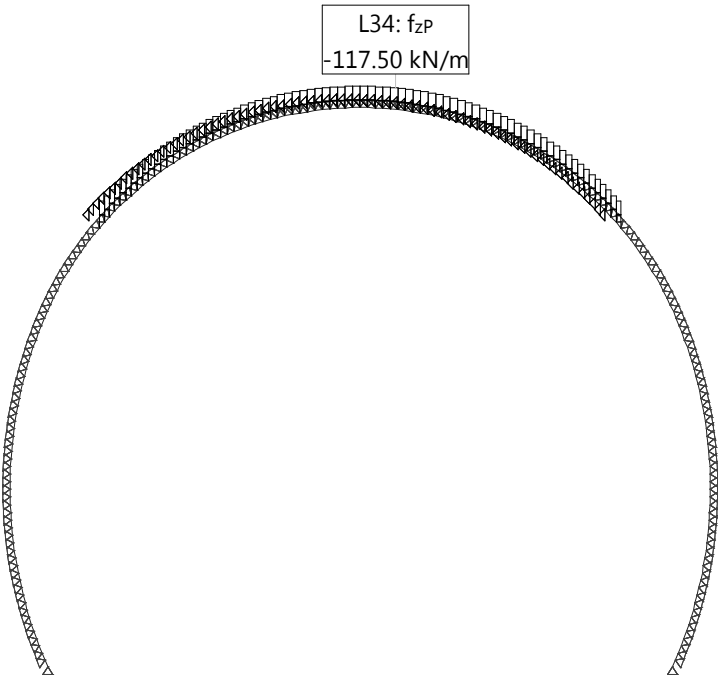
Loading SW: 1. Self weight

Scale 1 :200.0



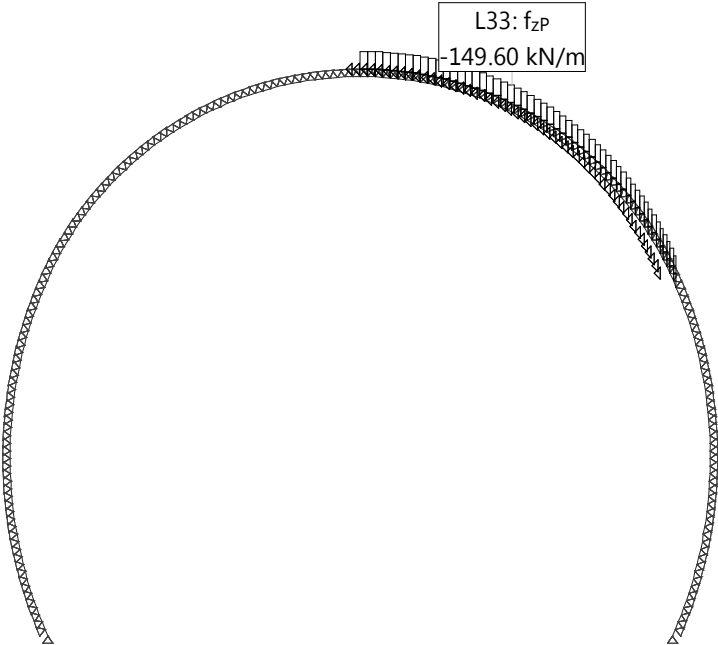
Loading LC2: 2 - Block pressure (central)

Scale 1 :200.0



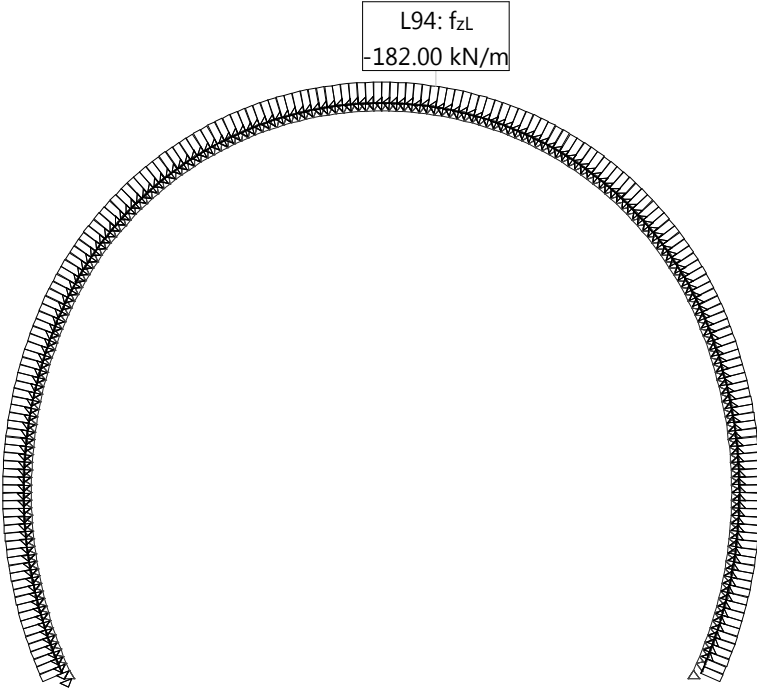
Loading LC3: 3 - Block pressure (lateral)

Scale 1 :200.0



Loading LC4: 4 - Earth pressure

Scale 1 :200.0



Loading combination 'C2': ELU Comb1

Combined loading

Loading	Factor	Title
LC2	1.350	2 - Block pressure (central)
SW	1.350	1. Self weight

combination 'C3': ELU Comb2

Combined loading

Loading	Factor	Title
LC3	1.350	3 - Block pressure (lateral)
SW	1.350	1. Self weight

combination 'C4': ELU Comb3

Combined loading

Loading	Factor	Title
LC4	1.350	4 - Earth pressure
SW	1.350	1. Self weight

combination 'SLS2': ELS Comb4

Combined loading

Loading	Factor	Title
LC2	1.000	2 - Block pressure (central)
SW	1.000	1. Self weight

combination 'SLS3': ELS Comb5

Combined loading

Loading	Factor	Title
LC3	1.000	3 - Block pressure (lateral)
SW	1.000	1. Self weight

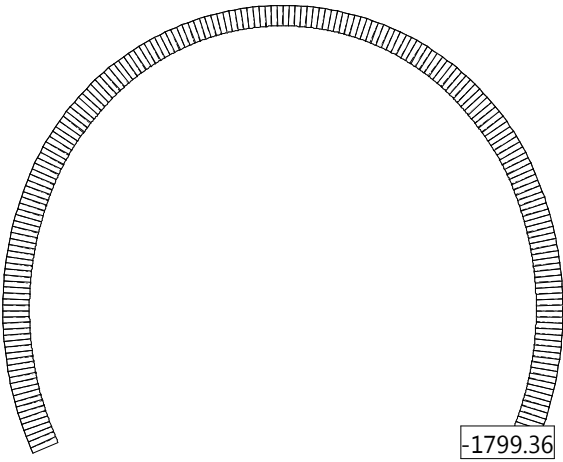
combination 'SLS4': ELS Comb6

Combined loading

Loading	Factor	Title
LC4	1.000	4 - Earth pressure
SW	1.000	1. Self weight

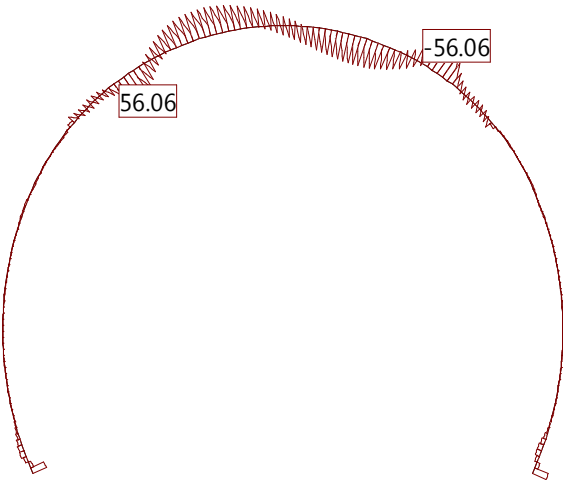
Section force N [kN] for: C2_N1

Scale 1 :250.0



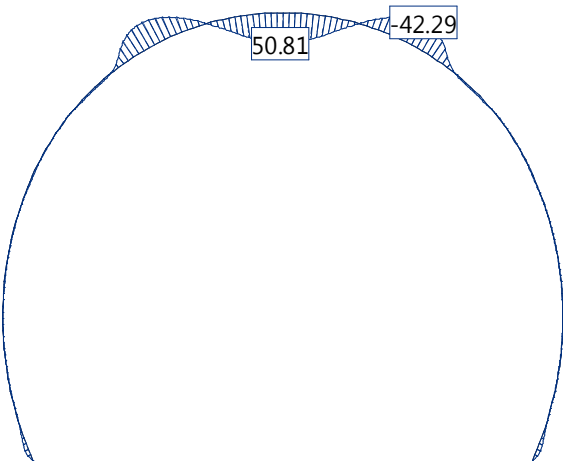
Section force Vz [kN] for: C2_N1

Scale 1 :250.0



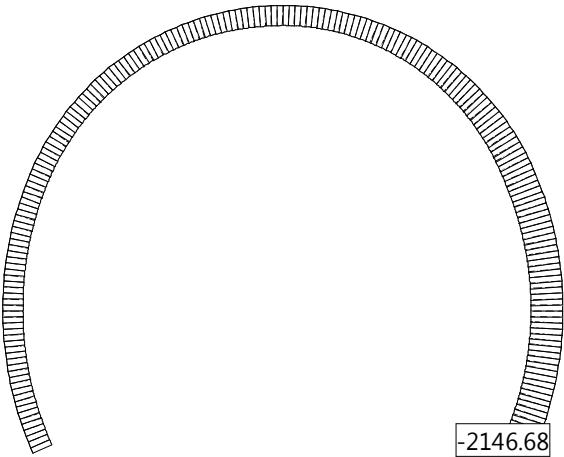
Section force My [kNm] for: C2_N1

Scale 1 :250.0



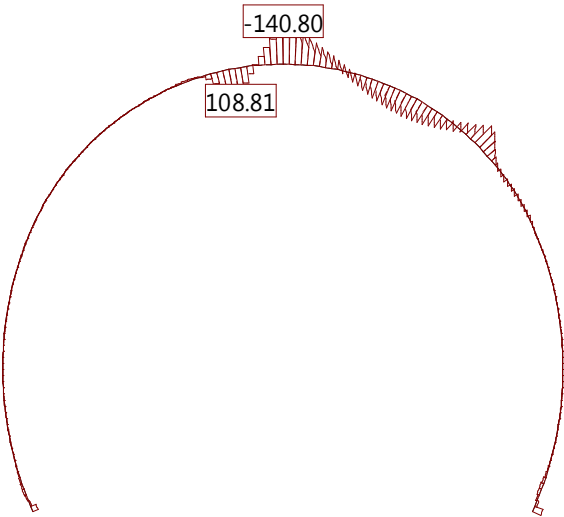
Section force N [kN] for: C3_N1

Scale 1 :250.0



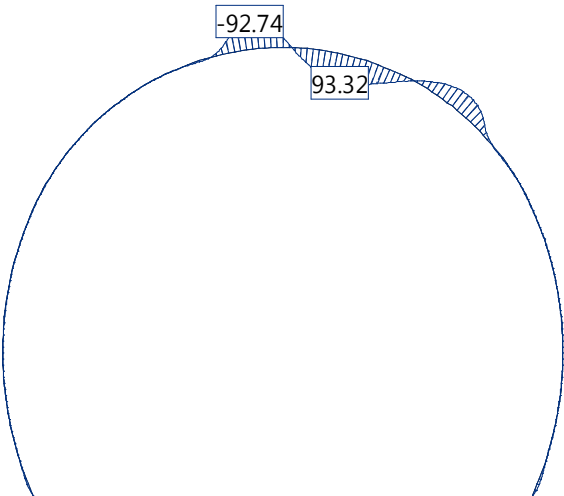
Section force Vz [kN] for: C3_N1

Scale 1 :250.0



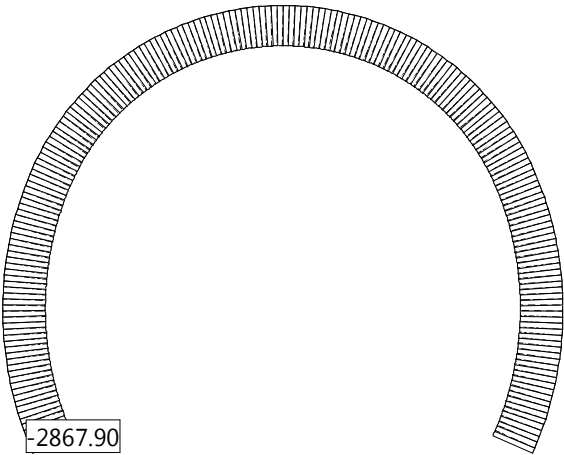
Section force My [kNm] for: C3_N1

Scale 1 :250.0



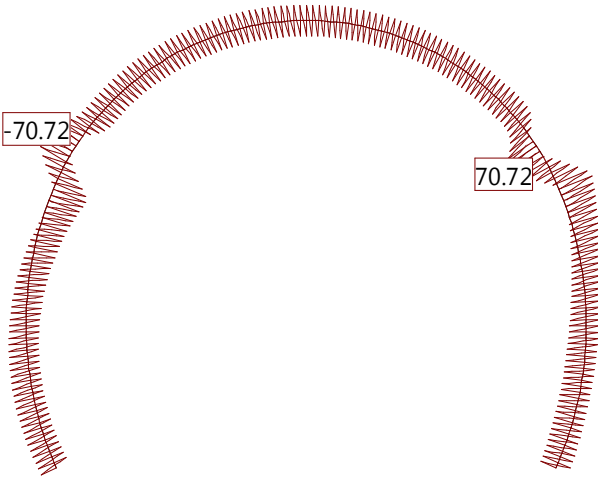
Section force N [kN] for: C4_N1

Scale 1 :250.0



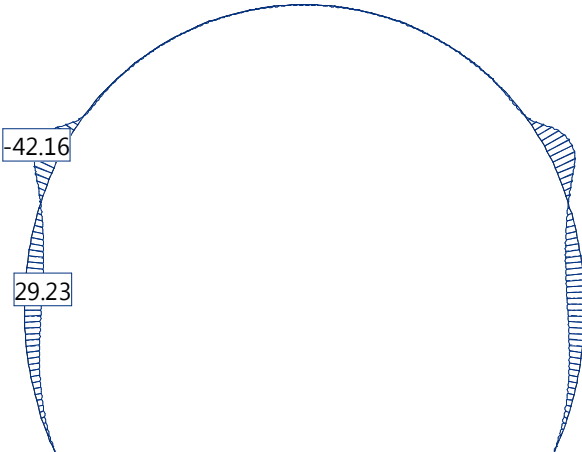
Section force Vz [kN] for: C4_N1

Scale 1 :250.0



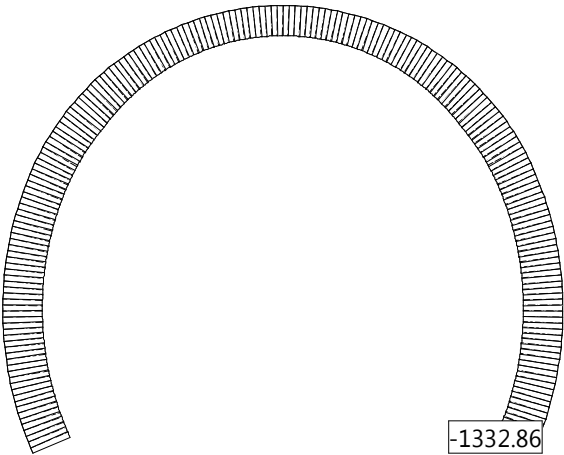
Section force My [kNm] for: C4_N1

Scale 1 :250.0



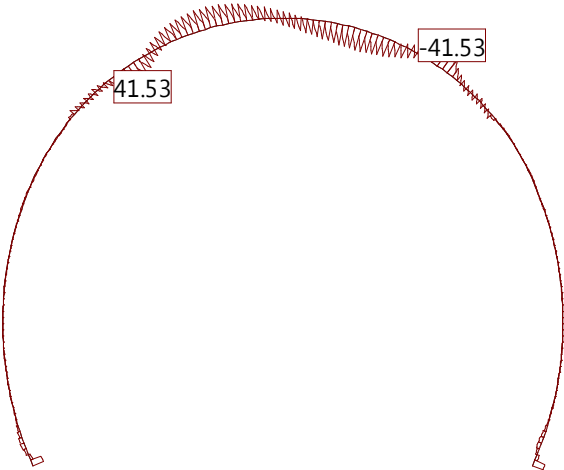
Section force N [kN] for: SLS2_N1

Scale 1 :250.0



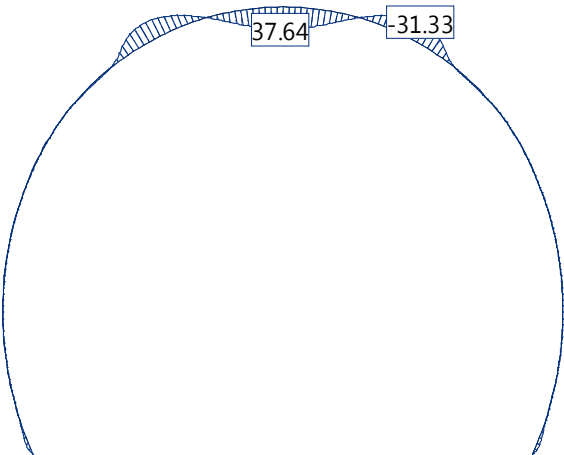
Section force Vz [kN] for: SLS2_N1

Scale 1 :250.0



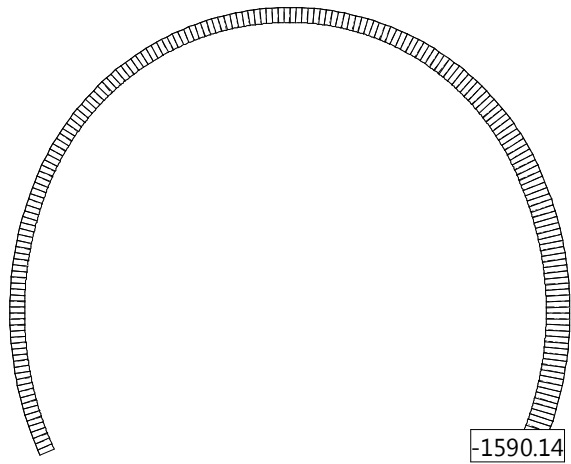
Section force My [kNm] for: SLS2_N1

Scale 1 :250.0



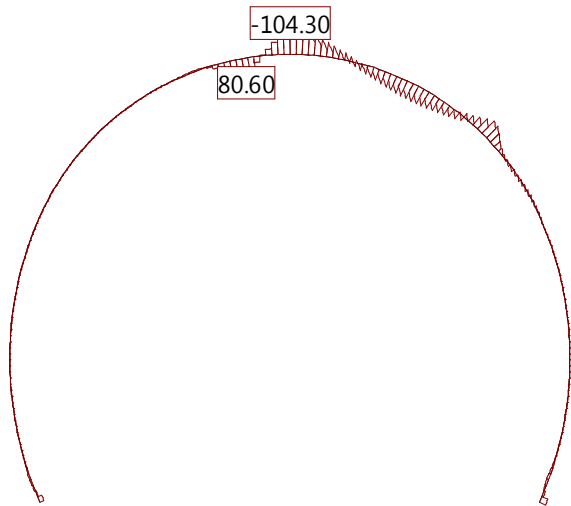
Section force N [kN] for: SLS3_N1

Scale 1 :250.0



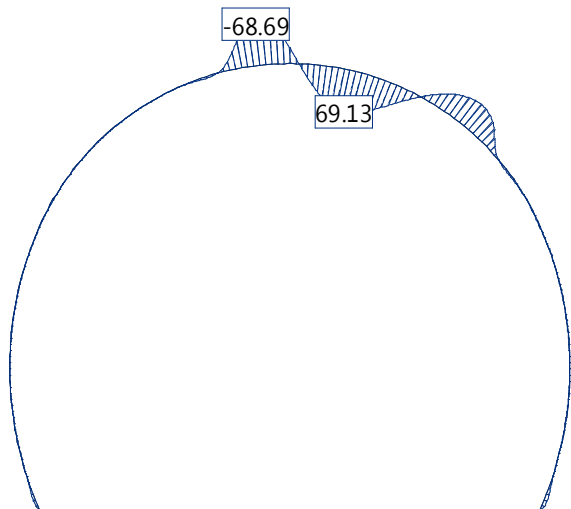
Section force Vz [kN] for: SLS3_N1

Scale 1 :250.0



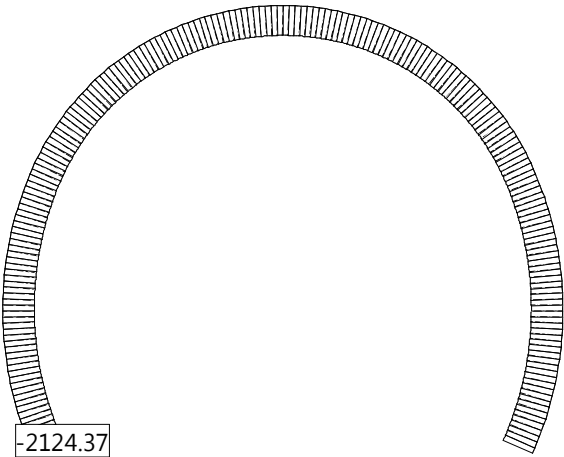
Section force My [kNm] for: SLS3_N1

Scale 1 :250.0



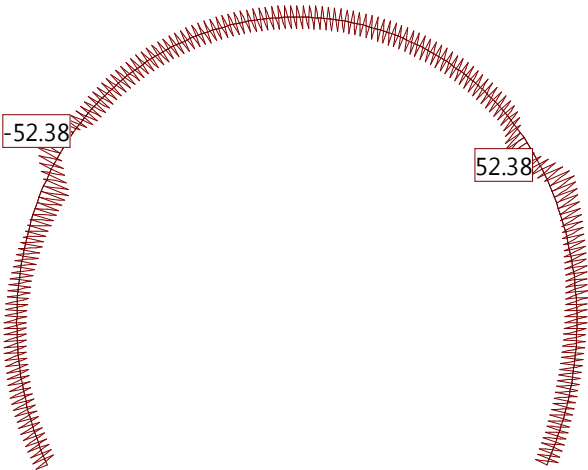
Section force N [kN] for: SLS4_N1

Scale 1 :250.0



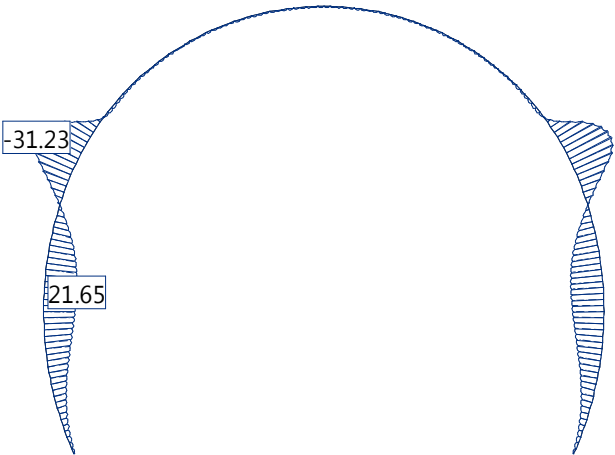
Section force Vz [kN] for: SLS4_N1

Scale 1 :250.0



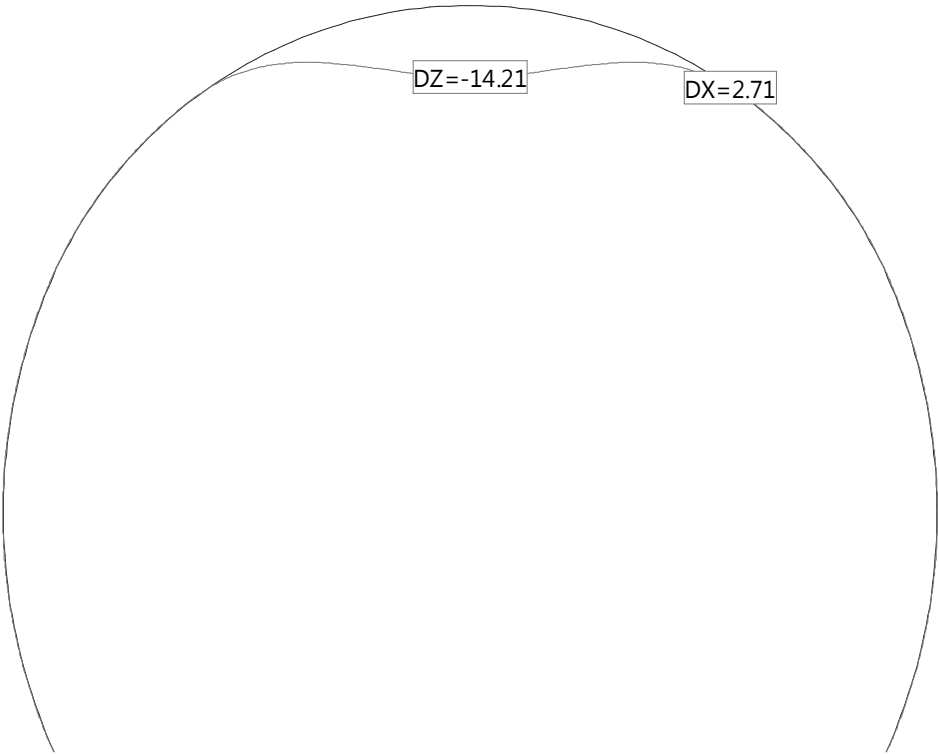
Section force My [kNm] for: SLS4_N1

Scale 1 :250.0



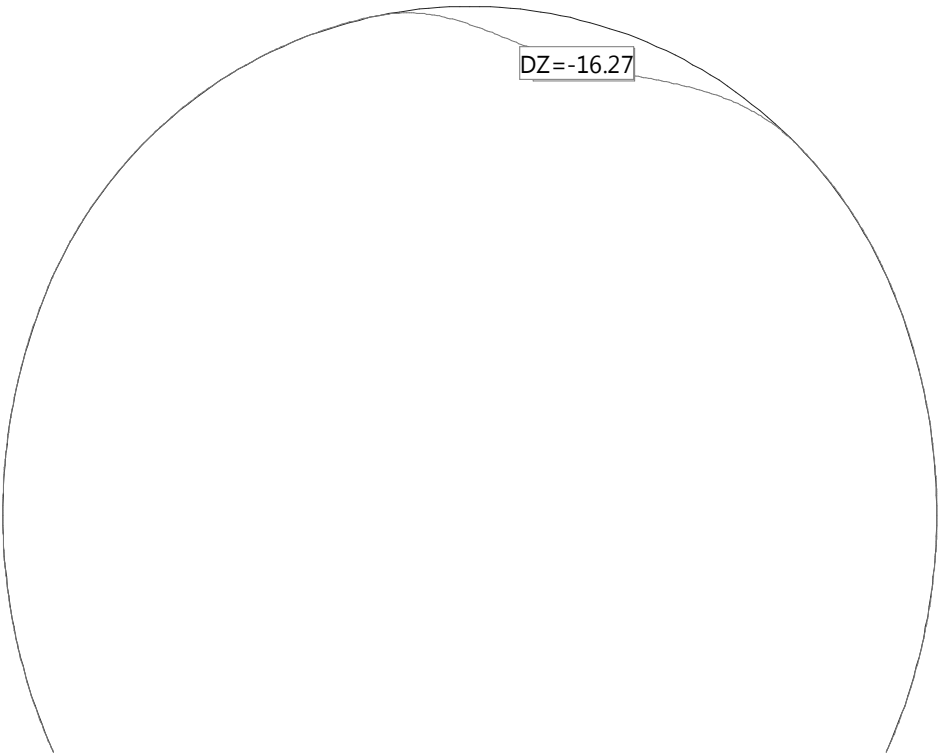
DISPLACEMENTS D for: C2_N1 [mm], Scaling factor: 100.0

Scale 1 :150.0



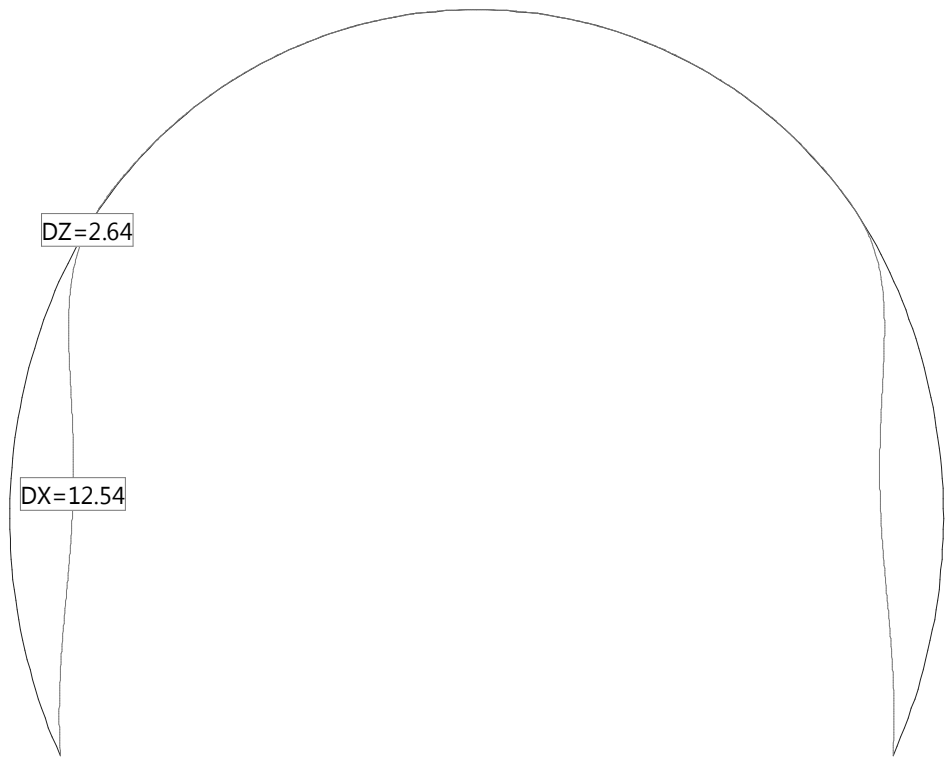
DISPLACEMENTS D for: C3_N1 [mm], Scaling factor: 50.0

Scale 1 :150.0



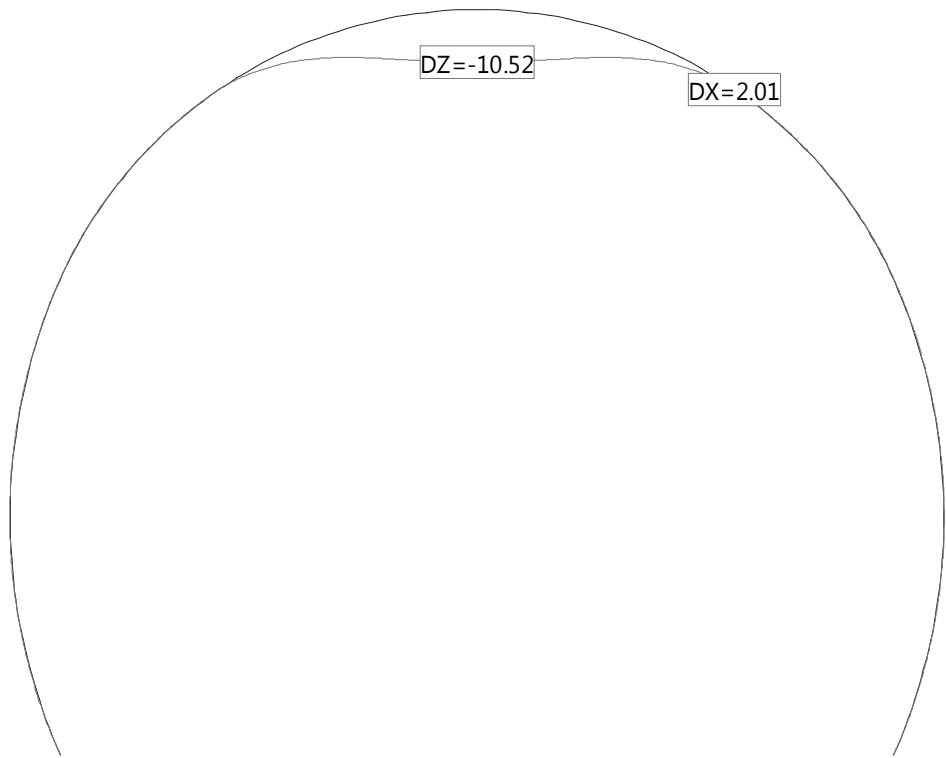
DISPLACEMENTS D for: C4_N1 [mm], Scaling factor: 100.0

Scale 1 :150.0



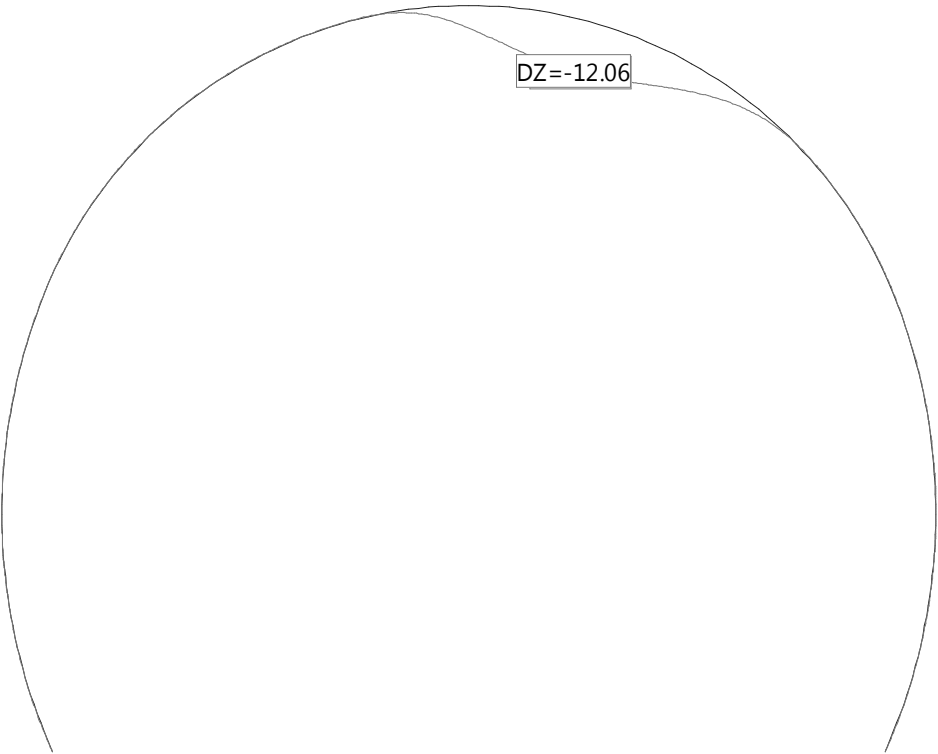
DISPLACEMENTS D for: SLS2_N1 [mm], Scaling factor: 100.0

Scale 1 :150.0



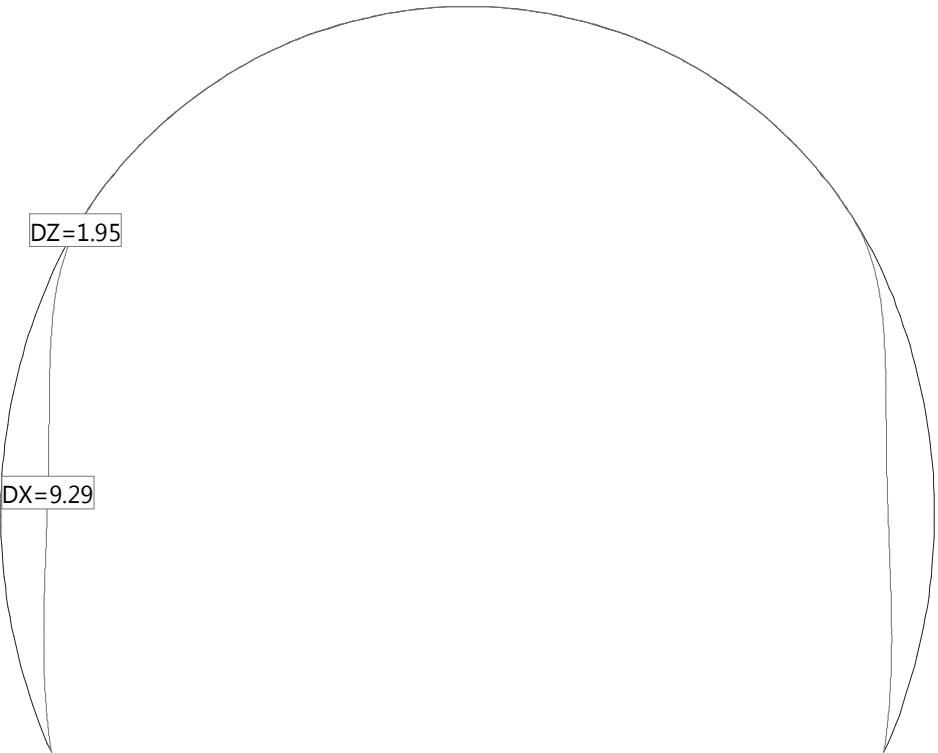
DISPLACEMENTS D for: SLS3_N1 [mm], Scaling factor: 81.9

Scale 1 :150.0



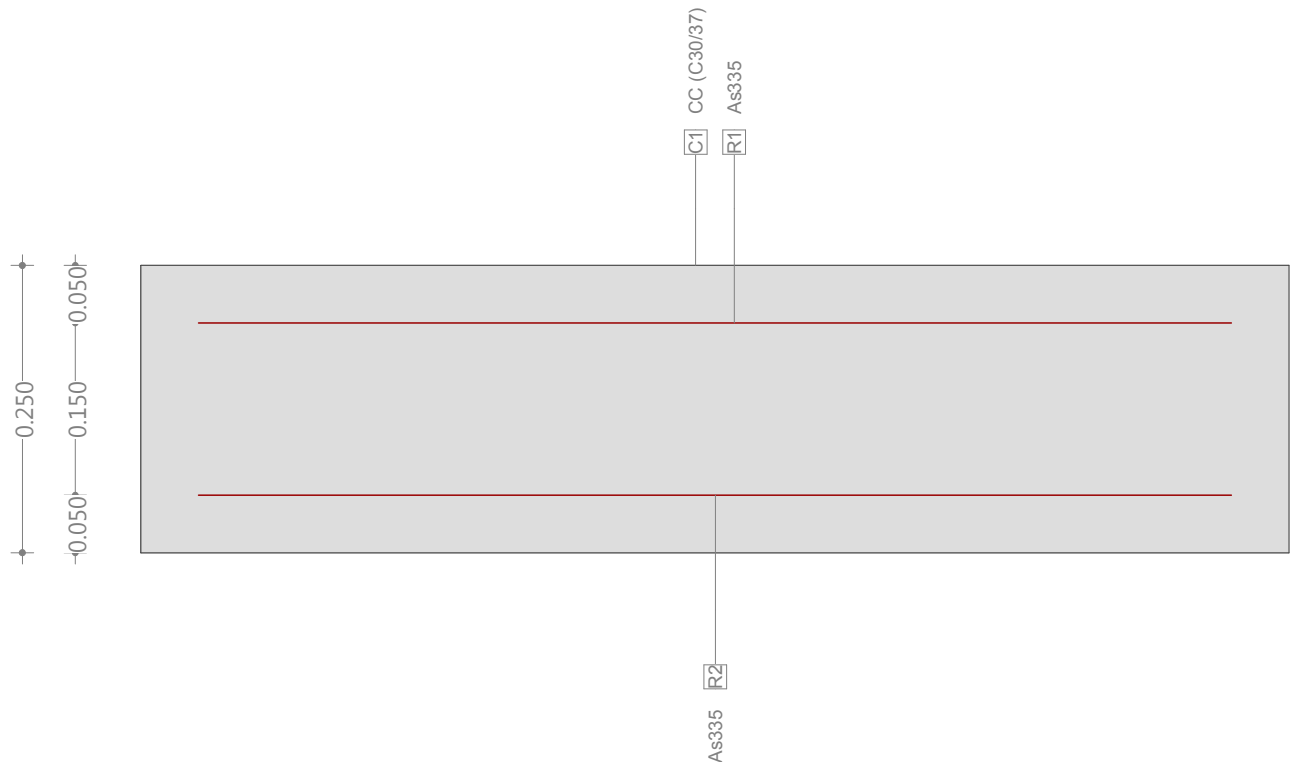
DISPLACEMENTS D for: SLS4_N1 [mm], Scaling factor: 100.0

Scale 1 :150.0



Cross-section QS (C30/37;S420): Outline, Reinforcements

Scale 1 : 6.6

**Cross section (column): QS****Geometrical definition of cross section**

Name	Material	Class	Type	No.	y_q [m]	z_q [m]	No.	y_q [m]	z_q [m]
C1	CC	C30/37	Polygon	1	0	0	2	1.000	0
				3	1.000	0.250	4	0	0.250

Section properties: (reinforcement not considered, reference material: CC)

Area [m²]		Moment of inertia [m⁴]		C.G.,Angle [m]		Mass [kg/m]	
Ax	0.2500	Ix	0.004388	ys	0.500	MCS	625.0
Ay	(=Ax)	Iy	0.001302	zs	0.125		
Az	(=Ax)	Iz	0.020833	β	0 [°]		

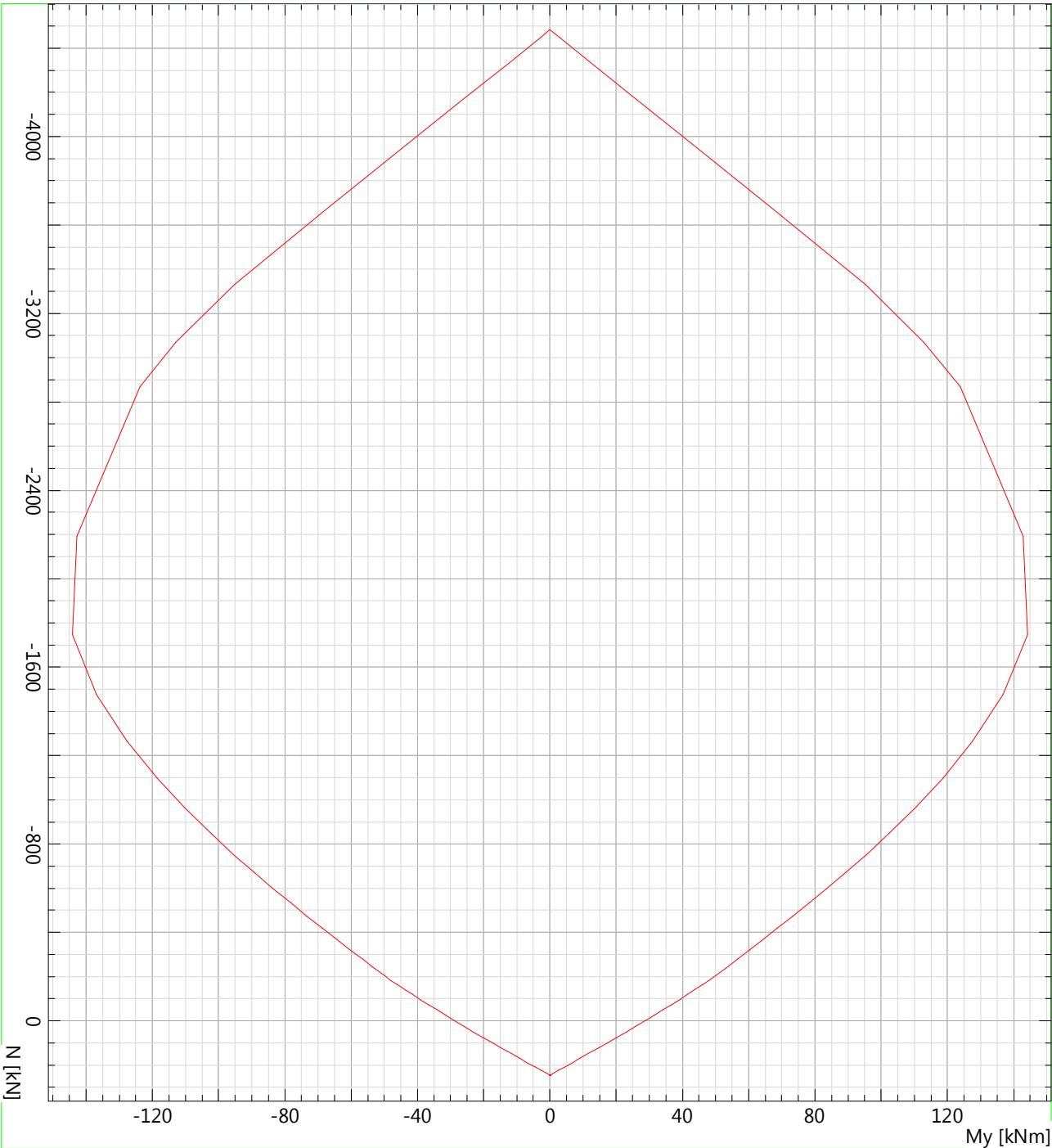
Cross section (column): QS**Mild reinforcement G0** $\Sigma A_s = 670 \text{ mm}^2$, $\rho = 0.268000 \%$

Name	Material	Class	BC	Type	y_{1q} [m]	z_{1q} [m]	y_{2q} [m]	z_{2q} [m]	n, Ø	exist A_s [mm ²]
R1	R2	S420	1	L	0.050	0.200	0.950	0.200		335
R2				L	0.050	0.050	0.950	0.050		335

BC : BC: 0=constant area, 1=adapt always, 2=adapt area in tension zone

Type : Definition of reinforcement: P = Point, L = Line, R = Ring

M-N-Interaction diagram Cross section (column): QS
!ULS / Reinforcement percentage: $\rho = 0.268000$ o/o



Ultimate strength analysis Cross section (column): QS**Action forces / Efficiency: $\text{eff}(M,N) = 0.72$ OK**

No.	AP	P	Bending and axial force			$\text{eff}(M,N)$ [-]	Shear forces and torsion			$\text{eff}(V,T)$ [-]	Complete CS $\text{eff}(M,N,V,T)$ [-]
			N [kN]	M_y [kNm]	M_z [kNm]		V_y [kN]	V_z [kN]	T [kNm]		
1	!ULS		-1799.4	0	0.00000	0.40	0.0	-24.3	0	0.00	
2	!ULS		-1345.6	50.80000	0.00000	0.44	0.0	1.9	0	0.00	
3	!ULS		-1496.5	-4.23E+1	0.00000	0.44	0.0	-1.3	0	0.00	
4	!ULS		-1496.5	-4.23E+1	0.00000	0.44	0.0	-1.3	0	0.00	
5	!ULS		-1345.6	50.80000	0.00000	0.44	0.0	1.9	0	0.00	
6	!ULS		-1345.6	50.80000	0.00000	0.44	0.0	1.9	0	0.00	
7	!ULS		-1510.7	-4.20E+1	0.00000	0.45	0.0	-1.3	0	0.00	
8	!ULS		-1576.5	-1.46E+1	0.00000	0.39	0.0	-44.7	0	0.00	
9	!ULS		-2146.7	0	0.00000	0.48	0.0	-28.8	0	0.00	
10	!ULS		-1369.1	93.30000	0.00000	0.65	0.0	-0.8	0	0.00	
11	!ULS		-1322.4	-9.27E+1	0.00000	0.64	0.0	-1.6	0	0.00	
12	!ULS		-1320.5	-9.27E+1	0.00000	0.64	0.0	26.0	0	0.00	
13	!ULS		-1369.1	93.30000	0.00000	0.65	0.0	-0.8	0	0.00	
14	!ULS		-1369.1	93.30000	0.00000	0.65	0.0	-0.8	0	0.00	
15	!ULS		-1322.4	-9.27E+1	0.00000	0.64	0.0	-1.6	0	0.00	
16	!ULS		-1322.2	-1.14E+1	0.00000	0.32	0.0	-119.6	0	0.00	
17	!ULS		-2867.9	0	0.00000	0.64	0.0	2.8	0	0.00	
18	!ULS		-2813.6	29.20000	0.00000	0.70	0.0	-0.2	0	0.00	
19	!ULS		-2749.7	-4.22E+1	0.00000	0.72	0.0	-7.4	0	0.00	
20	!ULS		-2748.1	-4.22E+1	0.00000	0.72	0.0	3.4	0	0.00	
21	!ULS		-2813.6	29.20000	0.00000	0.70	0.0	-0.2	0	0.00	
22	!ULS		-2816.2	29.20000	0.00000	0.70	0.0	0.8	0	0.00	
23	!ULS		-2749.7	-4.22E+1	0.00000	0.72	0.0	-7.4	0	0.00	
24	!ULS		-2733.7	-2.66E+1	0.00000	0.68	0.0	45.6	0	0.00	

Analysis-Parameters "ULS" Standard: Eurocode EN

ID	Diagram σ - ε			Strain Limits			σ_s [N/mm ²]	Partial safety factor				Various parameters			
	C	S		ε_{c2} [‰]	ε_{cu3} [‰]	ε_{ud} [‰]		α_{cc} [-]	γ_c [-]	γ_s [-]		θ [-]	ϕ [-]		
!ULS	2/0	1		-2.000	-3.500	2.000E		0.85	1.50	1.15		45.00	0		

 θ : Inclination of diagonal in compression ϕ : Creep coefficient

Work
Object

Serviceability limit state verification according to EN 1992-1-1 (Eurocode 2)

Section geometry

h	[cm]	25	Total section height
b	[cm]	100	Section width

Section forces

N	[kN]	-979.0	Axial force (- = compression)
M	[kNm]	-68.7	Bending moment (+ = lower fiber in traction)
V	[kN]	-1.2	Shear force

Concrete input

Type	C 30/37	Concrete type
γ_c	[-]	1.0 Partial safety factor on concrete strength
f_{ck}	[MPa]	30.0 Characteristic value of concrete compressive strength
f_{cd}	[MPa]	30.0 Design value of concrete compressive strength
f_{ctm}	[MPa]	2.9 Concrete mean tensile strength
E_c	[GPa]	33.0 Concrete elastic modulus
Φ	[-]	0.0 Creep coefficient (0 = no creep, 2 = creep)
$\sigma_{c,max}$	[-]	0.60 Maximum compressive stress ($\cdot f_{ck}$)

Reinforcement input - Upper layer

d_s	[mm]	8	Bar diameter
s_s	[cm]	15	Bar spacing
c_s	[mm]	54	Bar cover (with respect to bar axis)
A_{ss}	[mm ²]	335	Steel area

Crack calculation input

k_t	[-]	0.4	Factor of load duration (0.4 = long term, 0.6 short term)
$f_{ct,eff}/f_{ctm}$	[-]	1	$f_{ct,eff}/f_{ctm}$ ratio (Default = 1)
$w_{lim,u}$	[mm]	0.40	Maximum crack opening (upper layer)
$w_{lim,l}$	[mm]	0.40	Maximum crack opening (lower layer)

Main results

	Maximum	Limit	Check
σ_c	-11.7	-18.0	✓
σ_s	12.7	336.0	✓
w_k	0.02	0.4	✓



Shear force

Shear	[0/1]	1	Include shear force as inner longitudinal force (1 = yes, 0 = no)
θ	[°]	45	Inclination of compr. diagonal (22.5° - 60°)
α	[°]	90	Inclination of stirrups (vertical = 90°)

N	[kN]	-977.8	Axial force, calculation value (- = compression)
M	[kNm]	-68.7	Bending moment, calculation value (+ = upper fiber in traction)

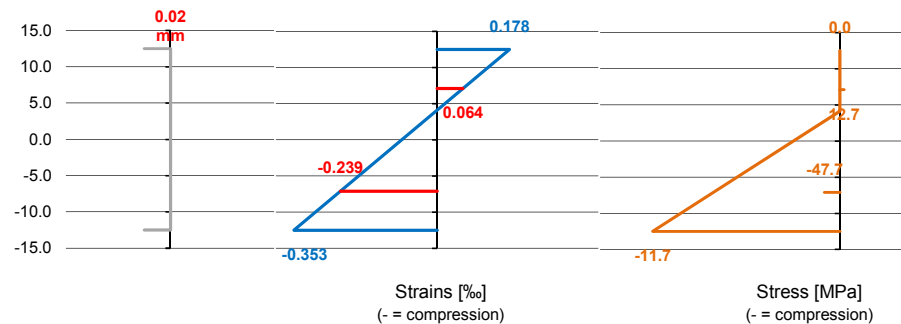
Steel input

Type	B 500 B	Steel type
γ_s	[-]	1.0 Partial safety factor on concrete strength
f_{yk}	[MPa]	420.0 Characteristic value of steel tensile strength
f_{yd}	[MPa]	420.0 Design value of steel tensile strength
E_s	[GPa]	200.0 Steel elastic modulus
$\sigma_{s,max}$	[-]	0.8 Maximum tensile stress ($\cdot f_{yk}$)

Reinforcement input - Lower layer

\emptyset_l	[mm]	8	Bar diameter
s_l	[cm]	15	Bar spacing
c_l	[mm]	54	Bar cover (with respect to bar axis)
A_{sl}	[mm ²]	335	Steel area

k_1	[-]	0.8	Bond properties of reinforcing steel (ribbed: 0.8; plain: 1.6)
k_2	[-]	0.5	Strain coefficient (bending: 0.5; pure tension: 1.0)
k_3	[-]	3.4	Coefficient ($k_3 = 3.4$)
k_4	[-]	0.425	Coefficient ($k_4 = 0.425$)



Work
Object

Calculation details

Section results

ϵ_0	[‰]	-0.09	Section mean strain	-87.5	0.1
χ	[km ⁻¹]	-2.13	Section curvature	-2127.6	0.0
y_{AN}	[cm]	4.1	Neutral axis position		0.1

Calculated internal forces

N	[kN]	-977.8	Axial force (- = compression)
M	[kN]	-68.7	Bending moment (+ = upper fiber in traction)

Extreme stresses and strains

Concrete

y_{cs}	[cm]	12.5	Upper fiber position	y_{cl}	[cm]	-12.5	Lower fiber position
ϵ_{cs}	[‰]	0.178	Upper fiber strain	ϵ_{cl}	[‰]	-0.353	Lower fiber strain
σ_{cs}	[MPa]	0.0	Upper fiber stress	σ_{cl}	[MPa]	-11.7	Lower fiber stress
F_c^*	[kN]	-968.7	Concrete force				
ΔF_{ss}	[kN]	0.0	Upper reinf. force to be removed from concrete				
ΔF_{sl}	[kN]	-2.6	Lower reinf. force to be removed from concrete				
F_c	[kN]	-966.1	Concrete force (reinforcement area excluded)				
b_c	[cm]	-7.0	Force lever arm				

Reinforcement

y_{ss}	[cm]	7.1	Upper reinf. position	y_{sl}	[cm]	-7.1	Lower reinf. position
ϵ_{ss}	[‰]	0.064	Upper reinf. strain	ϵ_{sl}	[‰]	-0.239	Lower reinf. strain
σ_{ss}	[MPa]	12.7	Upper reinf. stress	σ_{sl}	[MPa]	-47.7	Lower reinf. stress
F_{ss}	[kN]	4.3	Upper reinf. force	F_{sl}	[kN]	-16.0	Lower reinf. force
b_{ss}	[cm]	7.1	Upper reinf. lever arm	b_{sl}	[cm]	-7.1	Lower reinf. lever arm

Crack calculation

α_e	[-]	6.06	E_s/E_c ratio
x	[cm]	0.00	Compression zone (cracked section)
d	[mm]	196.0	Static height
c	[mm]	50.0	Bar cover (with respect to bar border)
$h_{c,eff}$	[mm]	83.3	Effective tensile concrete area height
$A_{c,eff}$	[mm ²]	83333	Effective tensile concrete area
A_s	[mm ²]	335	Reinforcement area (in tensile area)
$\rho_{p,eff}$	[-]	0.004	ratio of tensile reinforcement to concrete zone in tension
σ_s	[MPa]	12.7	Stress in reinforcement
$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}$	[‰]	0.038	difference of strain
\varnothing_{eq}	[mm]	8.0	Equivalent diameter
$s_{r,max}$	[cm]	50.8	max. crack spacing
w_k	[mm]	0.02	max. crack width
f_{bd}	[MPa]	4.6	Bond strength (good adherence and $\varnothing < 32$ mm)
w_k	[mm]	0.00	max. crack width (acc. to Zilch, Zehetmaier "Bemessung im konstruktiven Betonbau", used only if EC is not applicable)
		0.02	

N	M	V	M/N	θ	Φ	σ_c			σ_s			w_k		
						Max	Limit	Check	Max	Limit	Check	Max	Limit	Check
[kN]	[kNm]	[kN]	[m]	[°]	[-]	[MPa]	[MPa]	[-]	[MPa]	[MPa]	[-]	[mm]	[mm]	[-]
-1332.9	0.0	-18.0	0.0	45.0	0.0	-5.2	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.4	✓
-996.7	37.6	1.4	0.0	45.0	0.0	-7.5	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.4	✓
-1108.5	-31.3	-1.0	0.0	45.0	0.0	-7.3	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.4	✓
-1108.5	-31.3	-1.0	0.0	45.0	0.0	-7.3	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.4	✓
-996.7	37.6	1.4	0.0	45.0	0.0	-7.5	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.4	✓
-996.7	37.6	1.4	0.0	45.0	0.0	-7.5	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.4	✓
-1119.0	-31.1	-1.0	0.0	45.0	0.0	-7.4	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.4	✓
-1167.8	-10.8	-33.1	0.0	45.0	0.0	-5.5	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.4	✓
-1590.1	0.0	-21.4	0.0	45.0	0.0	-6.2	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.4	✓
-1014.1	69.1	-0.6	-0.1	45.0	0.0	-11.7	-18.0	✓	9.9	336.0	✓	0.02	0.4	✓
-979.6	-68.7	-1.2	0.1	45.0	0.0	-11.7	-18.0	✓	12.6	336.0	✓	0.02	0.4	✓
-978.2	-68.7	19.3	0.1	45.0	0.0	-11.7	-18.0	✓	14.7	336.0	✓	0.02	0.4	✓
-1014.1	69.1	-0.6	-0.1	45.0	0.0	-11.7	-18.0	✓	9.9	336.0	✓	0.02	0.4	✓
-1014.1	69.1	-0.6	-0.1	45.0	0.0	-11.7	-18.0	✓	9.9	336.0	✓	0.02	0.4	✓
-979.6	-68.7	-1.2	0.1	45.0	0.0	-11.7	-18.0	✓	12.6	336.0	✓	0.02	0.4	✓
-979.4	-8.4	-88.6	0.0	45.0	0.0	-4.3	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.4	✓
-2124.4	0.0	2.1	0.0	45.0	0.0	-8.4	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.4	✓
-2084.1	21.7	-0.1	0.0	45.0	0.0	-10.3	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.4	✓
-2036.8	-31.2	-5.5	0.0	45.0	0.0	-11.0	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.4	✓
-2035.6	-31.2	2.5	0.0	45.0	0.0	-11.0	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.4	✓
-2084.1	21.7	-0.1	0.0	45.0	0.0	-10.3	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.4	✓
-2086.1	21.6	0.6	0.0	45.0	0.0	-10.3	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.4	✓
-2036.8	-31.2	-5.5	0.0	45.0	0.0	-11.0	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.4	✓
-2025.0	-19.7	33.7	0.0	45.0	0.0	-9.7	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.4	✓

Legend:

N = Axial force

M = Bending moment

V = Shear force

M/N = Eccentricity

θ = Inclination of compr. diagonal (22.5° - 60°)

Φ = Creep coefficient (0 = no creep, 2 = creep)

6198.1 LAB. ANDES

Caverna principal revestimiento definitivo (30cm)

Page 1

30.05.19, 17:59

Lombardi AG, 6648 Minusio-Locarno

PR

STATIK-7 - Version 1.00

Structure

Scale 1 :250.0

STRUCTURE 2D

Cross section: Geometry

Name	Variant	Materials	Type	Dimensions [m]
S-R		CC	S-R	B=1.00, H=0.30 y_L=-0.50, y_R=0.50, z_B=-0.15, z_T=0.15

Materials : s. table 'Materials'

Cross section: CS stiffness

Name	Variant	β [°]	EA _x GA _z [kN]	EJ _y [kNm ²]	e _z [m]	CS mass Additional mass [t/m]	Materials
S-R		0	9900000.00 2999988.00	74250.00	0	0.75	CC

β : Angle between member Y axis and first principal axis of cross section

e_z : Distance center of gravity-axis point

Materials : s. table 'Materials'

Cross sections, cross section values

Cross section		Materials E _{ref} G _{ref}	Ideal cross section values					
Name	Variants		A _{x,id} = EA _x /E _{ref} [m ²]	J _{y,id} = EJ _y /E _{ref} [m ⁴]	J _{z,id} = EJ _z /E _{ref} [m ⁴]	J _{x,id} = GJ _x /G _{ref} [m ⁴]	A _{y,id} = GA _y /G _{ref} [m ²]	A _{z,id} = GA _z /G _{ref} [m ²]
S-R		CC	0.3000	0.002250	0.025000	0.007300	0.2500	0.2500

Materials : s. table 'Materials'

Materials

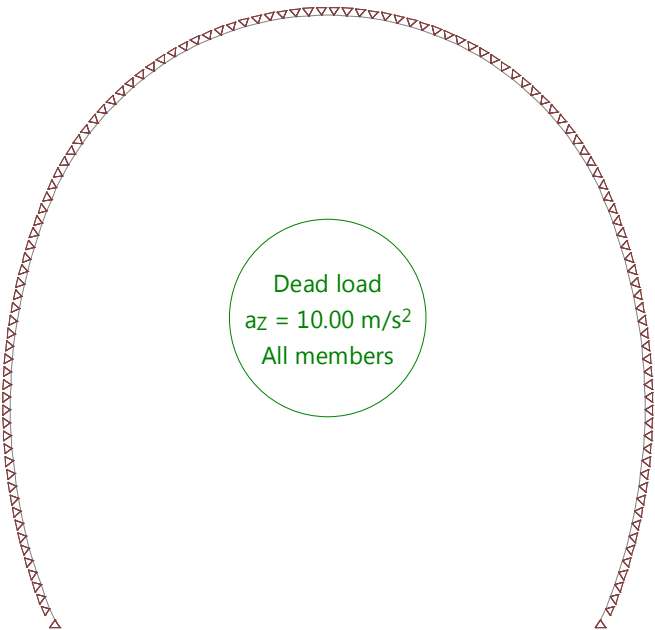
ID	Type	Member	E [kN/mm ²]	G [kN/mm ²]	v	ρ [t/m ³]	α [‰]	Class	f [N/mm ²]	
CC	Concrete	Column	33	12	0.17	2.5	0.010	C30/37	-30.00000	-f _{ck,cyl}
S	Construction	(general)	210	81	0.30	8.0	0.012	S235	235.00000	f _{yk}

Nr.:

L:\Minusio\Incarichi\100-6999\6198.1-ANDES - IBA y DTL\4 - Rapporti\4.1-Lav\Lo14\01_Cartella di lavoro PR\04_Caverna Principale\le_CUBUS\Cav_PRINC_TMR2b.S7P

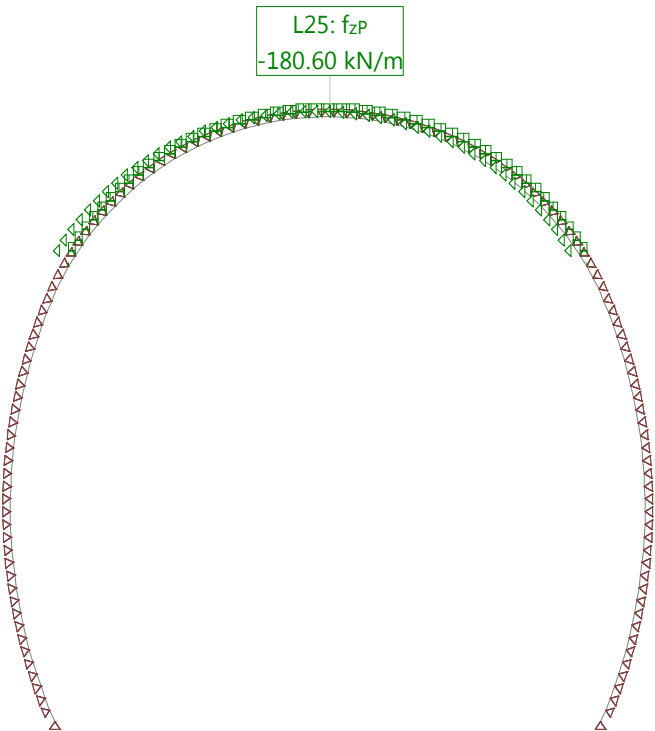
Loading SW: 1 - Self weigth

Scale 1 :300.0



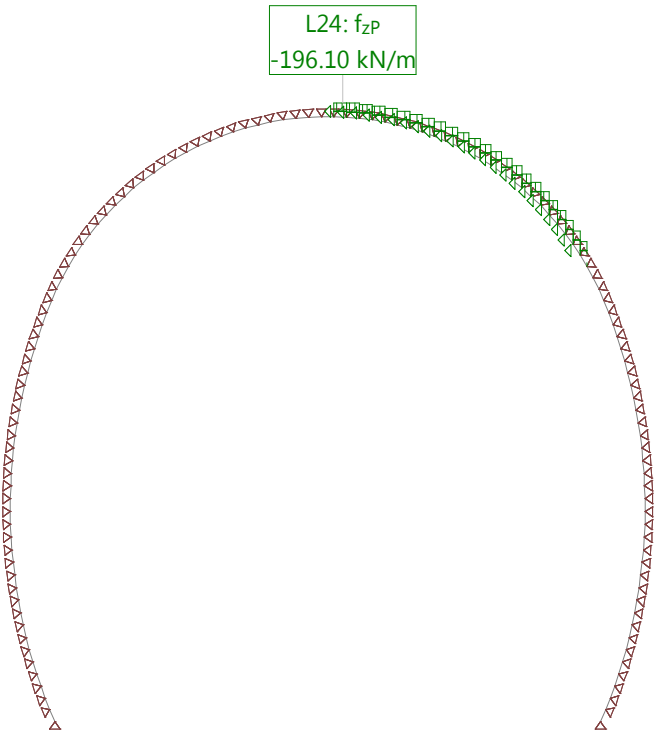
Loading LC2: 2 - Block pressure (central)

Scale 1 :300.0



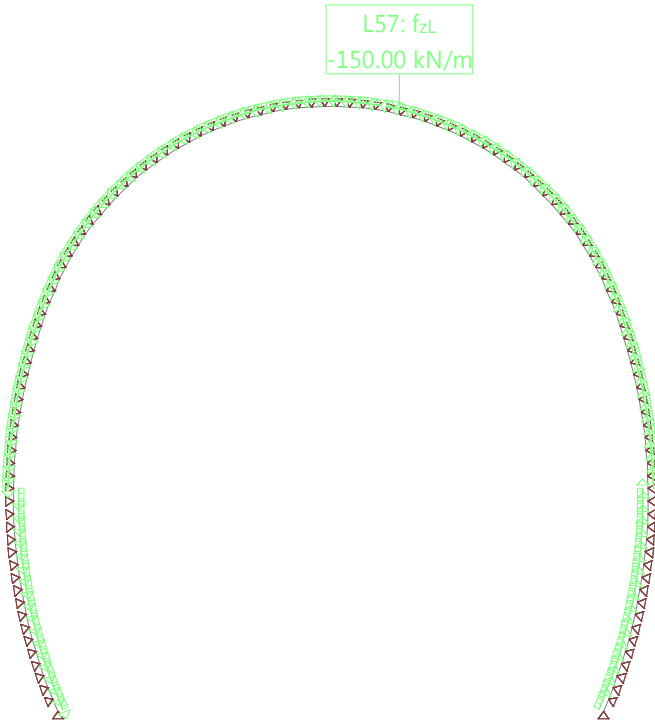
Loading LC3: 3 - Block pressure (lateral)

Scale 1 :300.0



Loading LC4: 4 - Earth pressure

Scale 1 :300.0



Loading combination 'C2': ELU Comb1

Combined loading

Loading	Factor	Title
LC2	1.350	2 - Block pressure (central)
SW	1.350	1 - Self weigth

combination 'C3': ELU Comb2

Combined loading

Loading	Factor	Title
LC3	1.350	3 - Block pressure (lateral)
SW	1.350	1 - Self weigth

combination 'C4': ELU Comb3

Combined loading

Loading	Factor	Title
LC4	1.350	4 - Earth pressure
SW	1.350	1 - Self weigth

combination 'SLS2': ELS Comb4

Combined loading

Loading	Factor	Title
LC2	1.000	2 - Block pressure (central)
SW	1.000	1 - Self weigth

combination 'SLS3': ELS Comb 5

Combined loading

Loading	Factor	Title
LC3	1.000	3 - Block pressure (lateral)
SW	1.000	1 - Self weigth

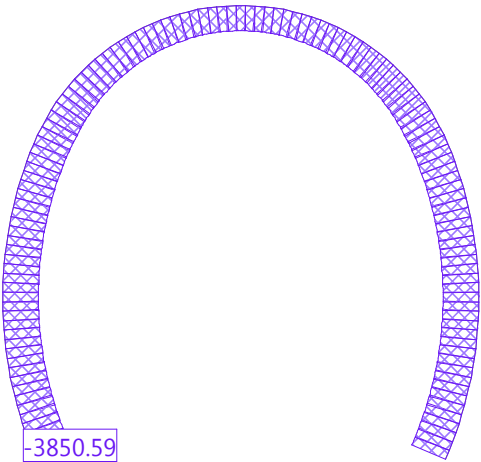
combination 'SLS4': ELS Comb6

Combined loading

Loading	Factor	Title
LC4	1.000	4 - Earth pressure
SW	1.000	1 - Self weigth

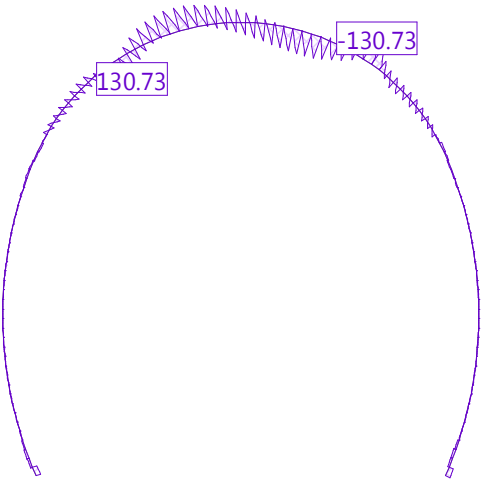
Section force N [kN] for: C2_N1

Scale 1 :400.0



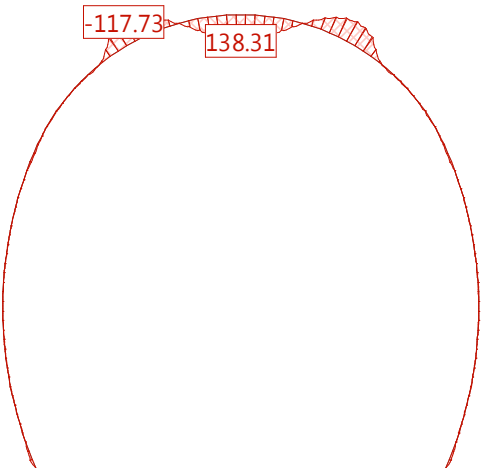
Section force Vz [kN] for: C2_N1

Scale 1 :400.0



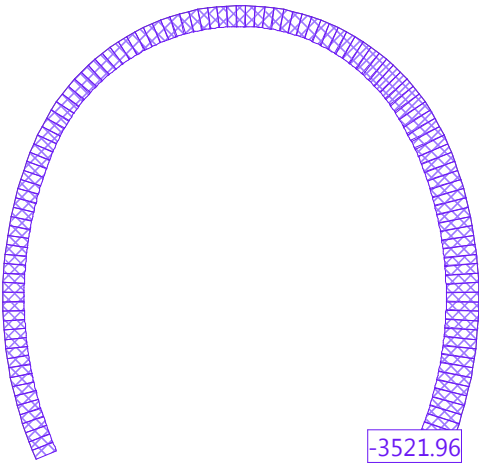
Section force My [kNm] for: C2_N1

Scale 1 :400.0



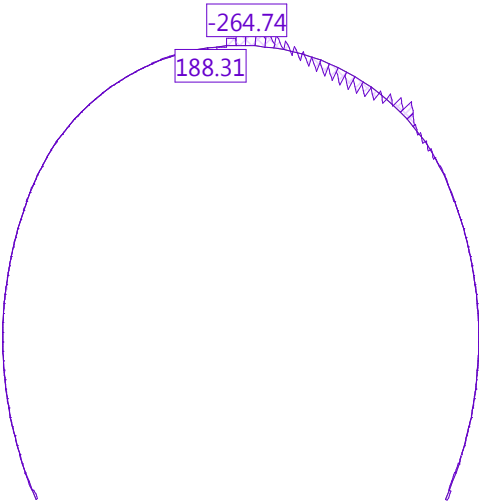
Section force N [kN] for: C3_N1

Scale 1 :400.0



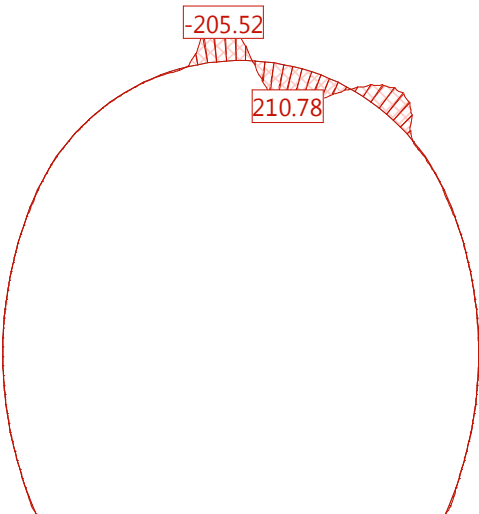
Section force Vz [kN] for: C3_N1

Scale 1 :400.0



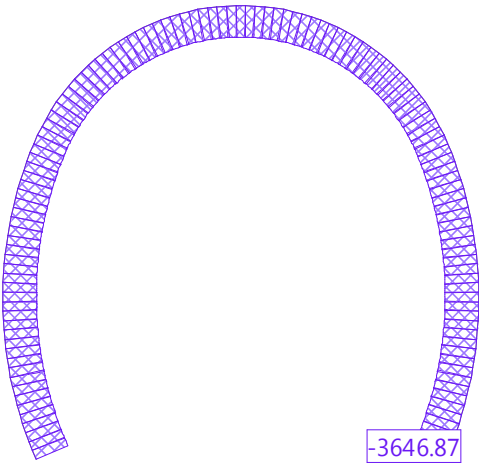
Section force My [kNm] for: C3_N1

Scale 1 :400.0



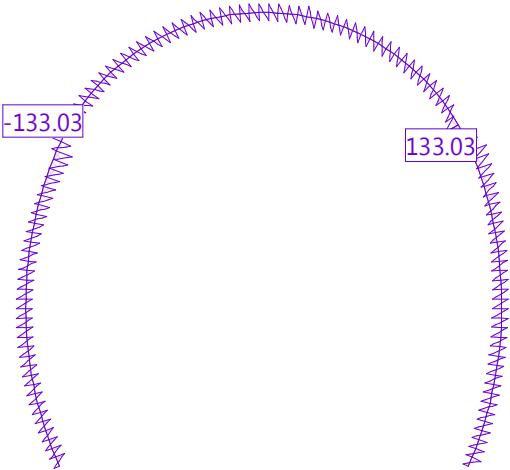
Section force N [kN] for: C4_N1

Scale 1 :400.0



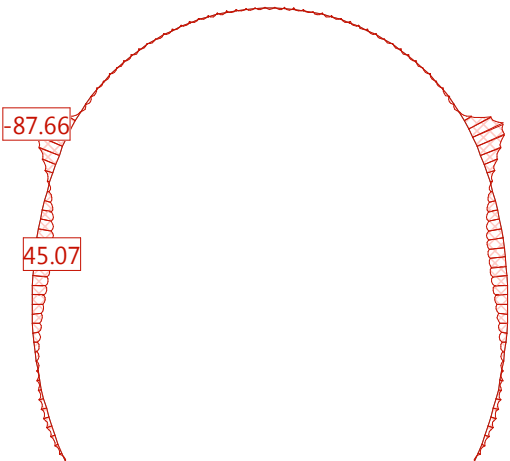
Section force Vz [kN] for: C4_N1

Scale 1 :400.0



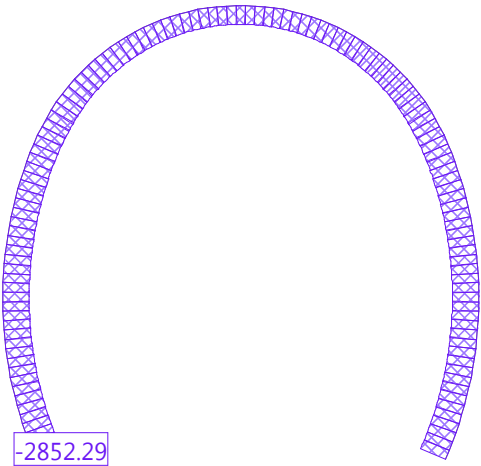
Section force My [kNm] for: C4_N1

Scale 1 :400.0



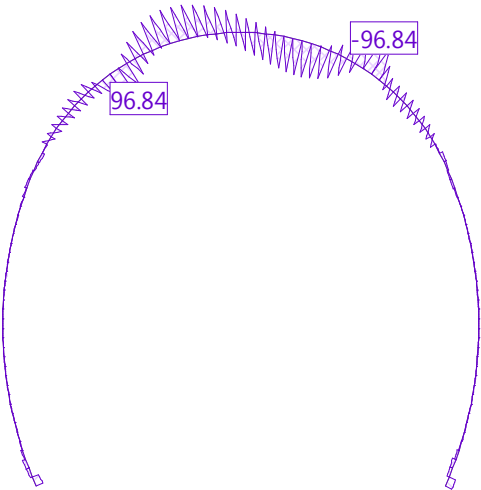
Section force N [kN] for: SLS2_N1

Scale 1 :400.0



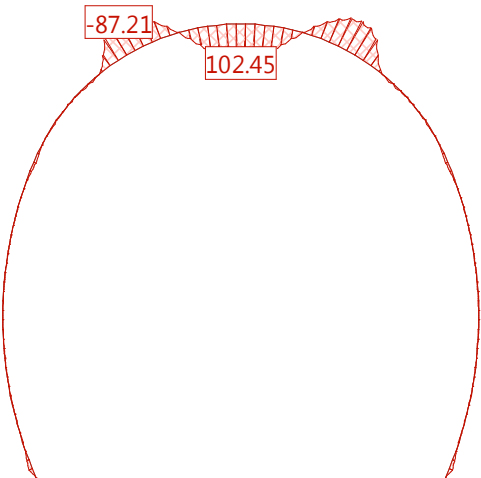
Section force Vz [kN] for: SLS2_N1

Scale 1 :400.0



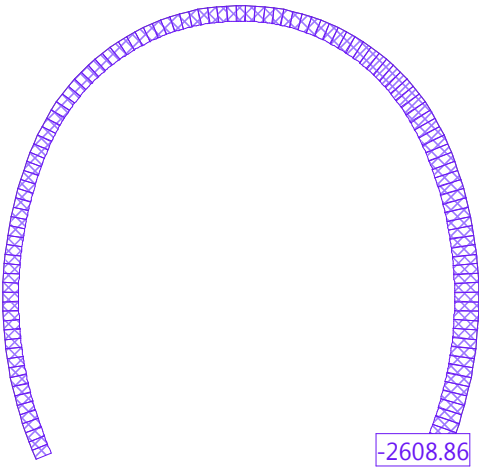
Section force My [kNm] for: SLS2_N1

Scale 1 :400.0



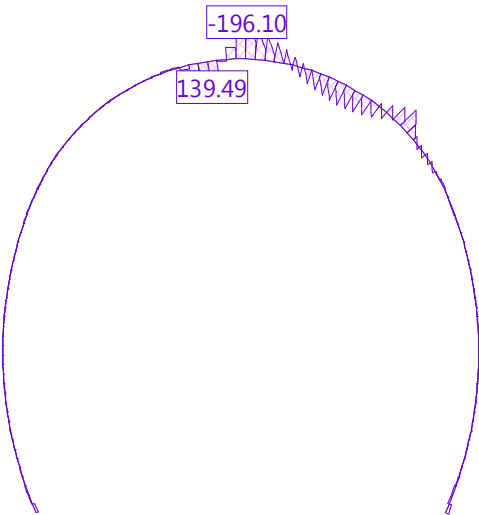
Section force N [kN] for: SLS3_N1

Scale 1 :400.0



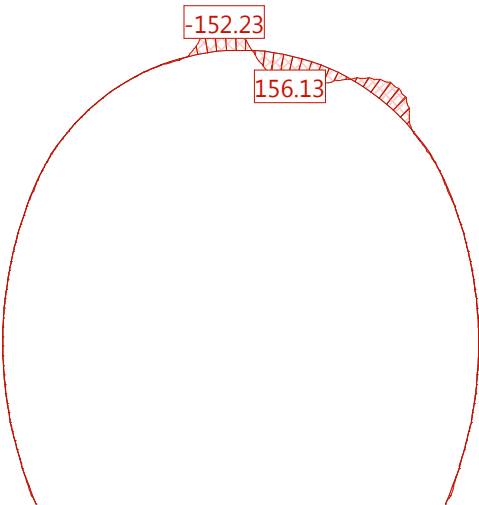
Section force Vz [kN] for: SLS3_N1

Scale 1 :400.0



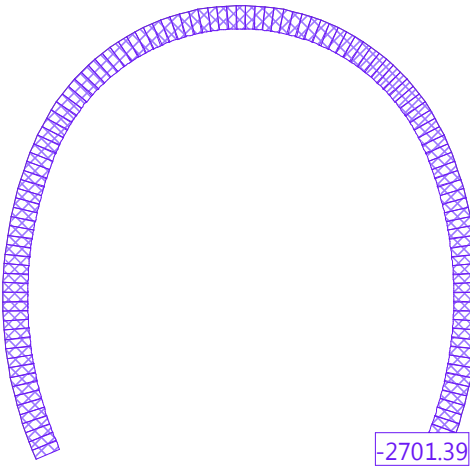
Section force My [kNm] for: SLS3_N1

Scale 1 :400.0



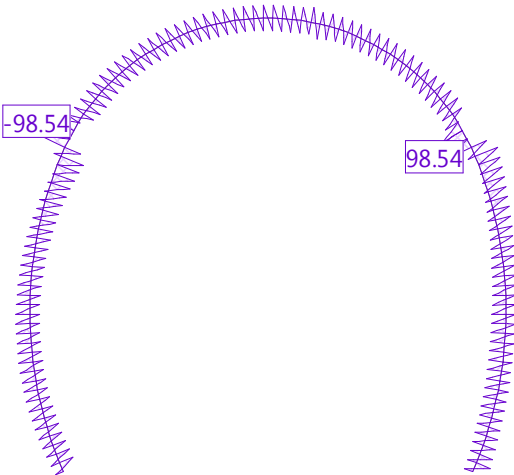
Section force N [kN] for: SLS4_N1

Scale 1 :400.0



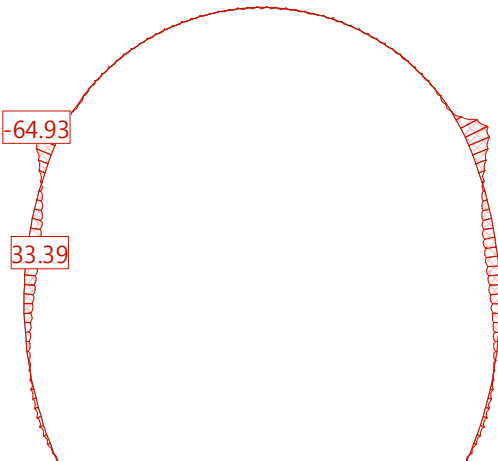
Section force Vz [kN] for: SLS4_N1

Scale 1 :400.0



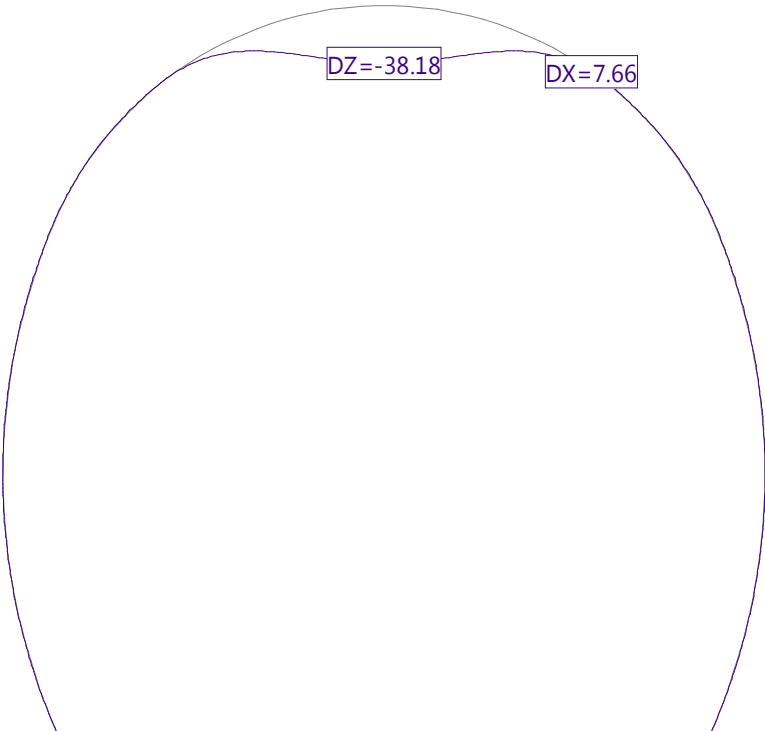
Section force My [kNm] for: SLS4_N1

Scale 1 :400.0



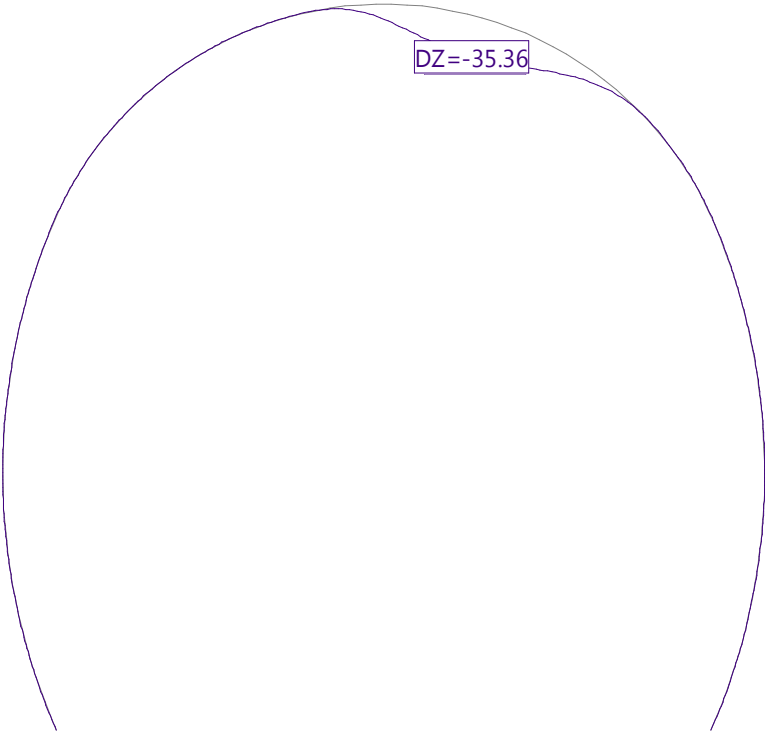
DISPLACEMENTS D for: C2_N1 [mm], Scaling factor: 50.0

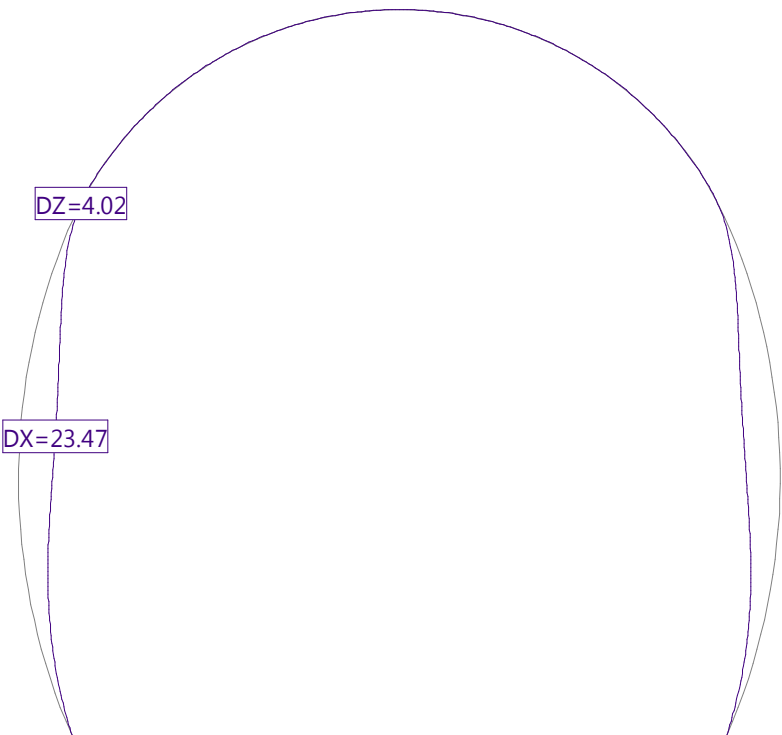
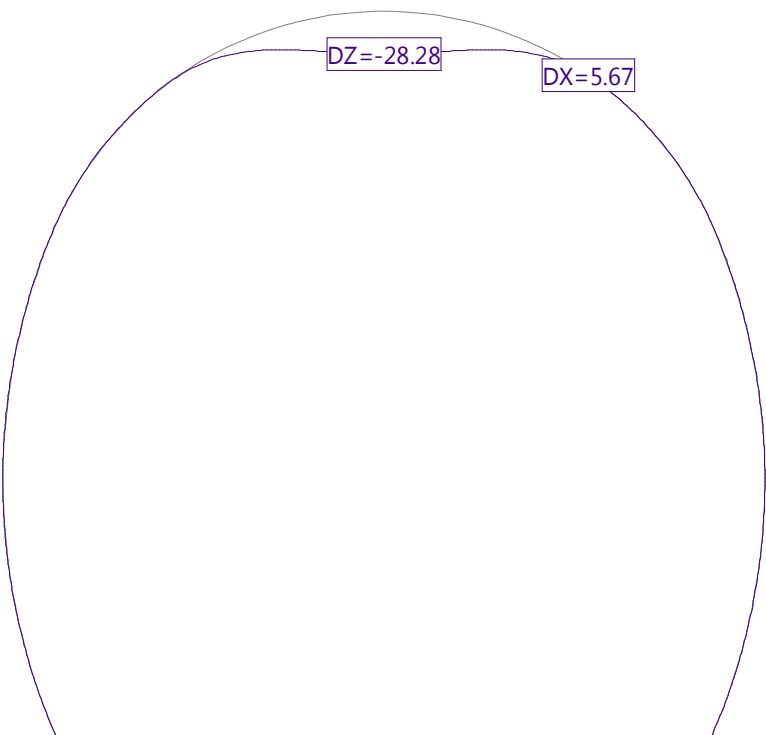
Scale 1 :250.0



DISPLACEMENTS D for: C3_N1 [mm], Scaling factor: 36.1

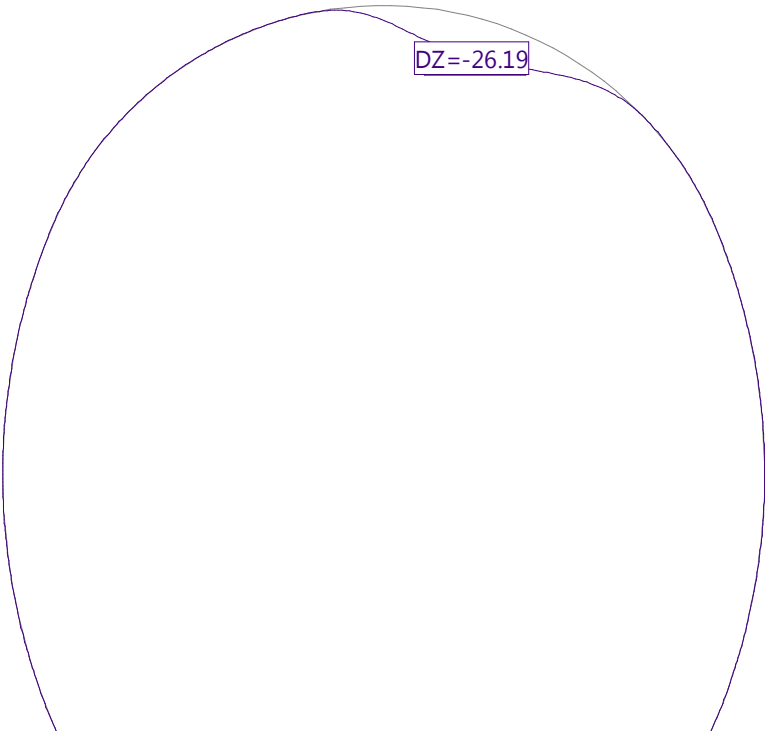
Scale 1 :250.0



6198.1 LAB. ANDES		Page 12
Caverna principal revestimiento definitivo (30cm)		30.05.19, 17:59
Lombardi AG, 6648 Minusio-Locarno	PR	STATIK-7 - Version 1.00
<div>DISPLACEMENTS D for: C4_N1 [mm], Scaling factor: 50.0</div> <div>Scale 1 :250.0</div>  <div>DISPLACEMENTS D for: SLS2_N1 [mm], Scaling factor: 50.0</div> <div>Scale 1 :250.0</div> 		
		Nr.:

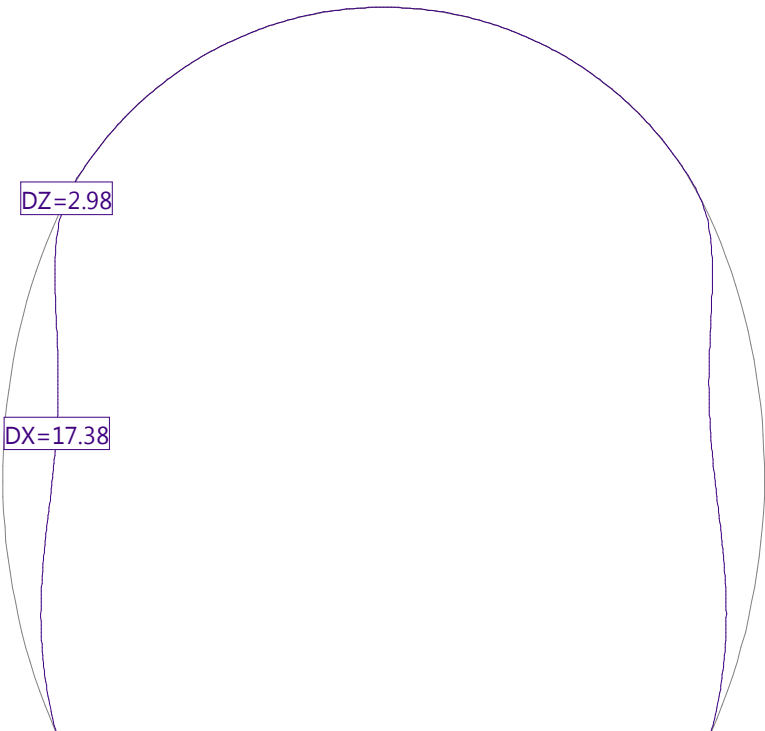
DISPLACEMENTS D for: SLS3_N1 [mm], Scaling factor: 48.8

Scale 1 :250.0



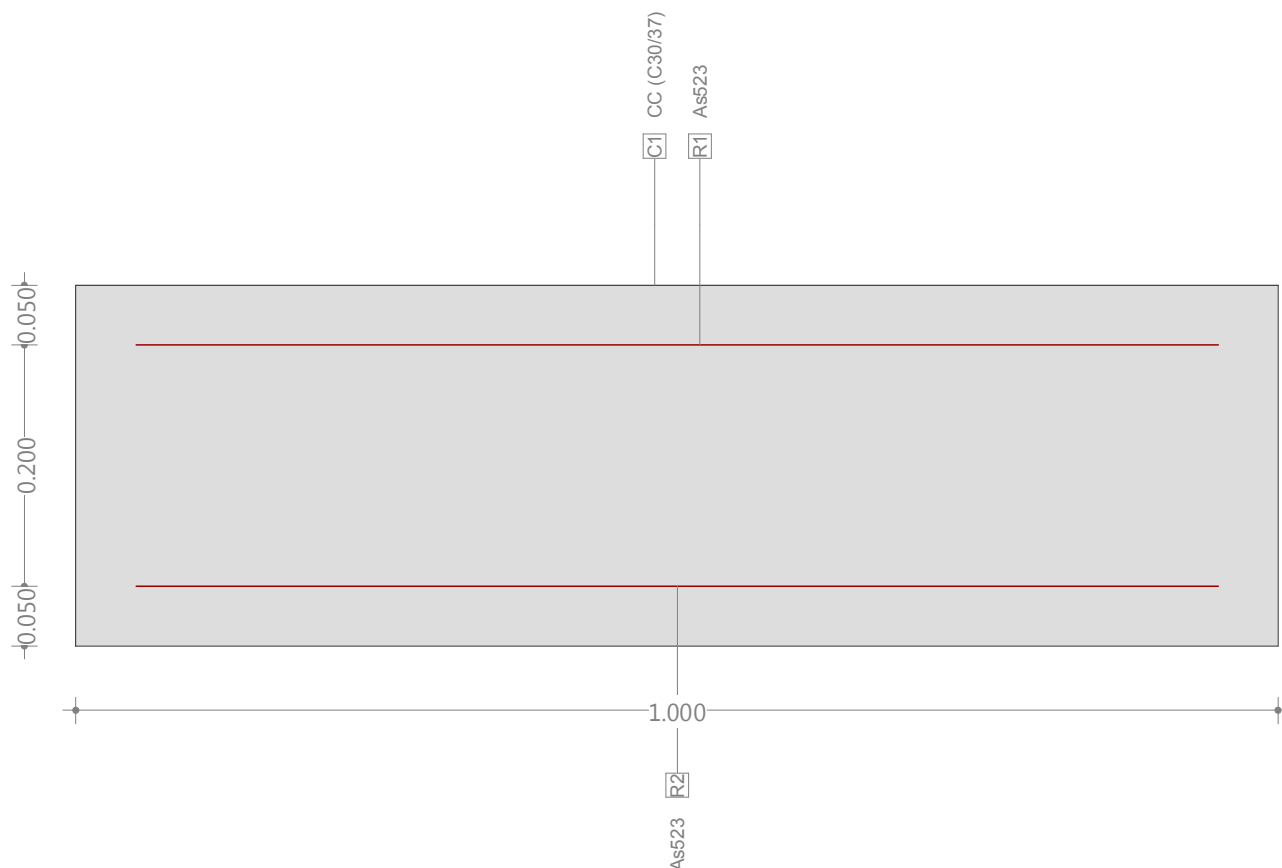
DISPLACEMENTS D for: SLS4_N1 [mm], Scaling factor: 100.0

Scale 1 :250.0



Cross-section QS (C30/37;S420): Outline, Reinforcements

Scale 1 : 6.3



Cross section (column): QS

Geometrical definition of cross section

Name	Material	Class	Type	No.	y _q [m]	z _q [m]	No.	y _q [m]	z _q [m]
C1	CC	C30/37	Polygon	1	0	0	2	1.000	0
				3	1.000	0.300	4	0	0.300

Section properties: (reinforcement not considered, reference material: CC)

	Area [m ²]		Moment of inertia [m ⁴]		C.G., Angle [m]				Mass [kg/m]
A _x	0.3000	I _x	0.007300	ys	0.500			M _{CS}	750.0
A _y	(=A _x)	I _y	0.002250	zs	0.150				
A _z	(=A _x)	I _z	0.025000	β	0 [°]				

Cross section (column): QS

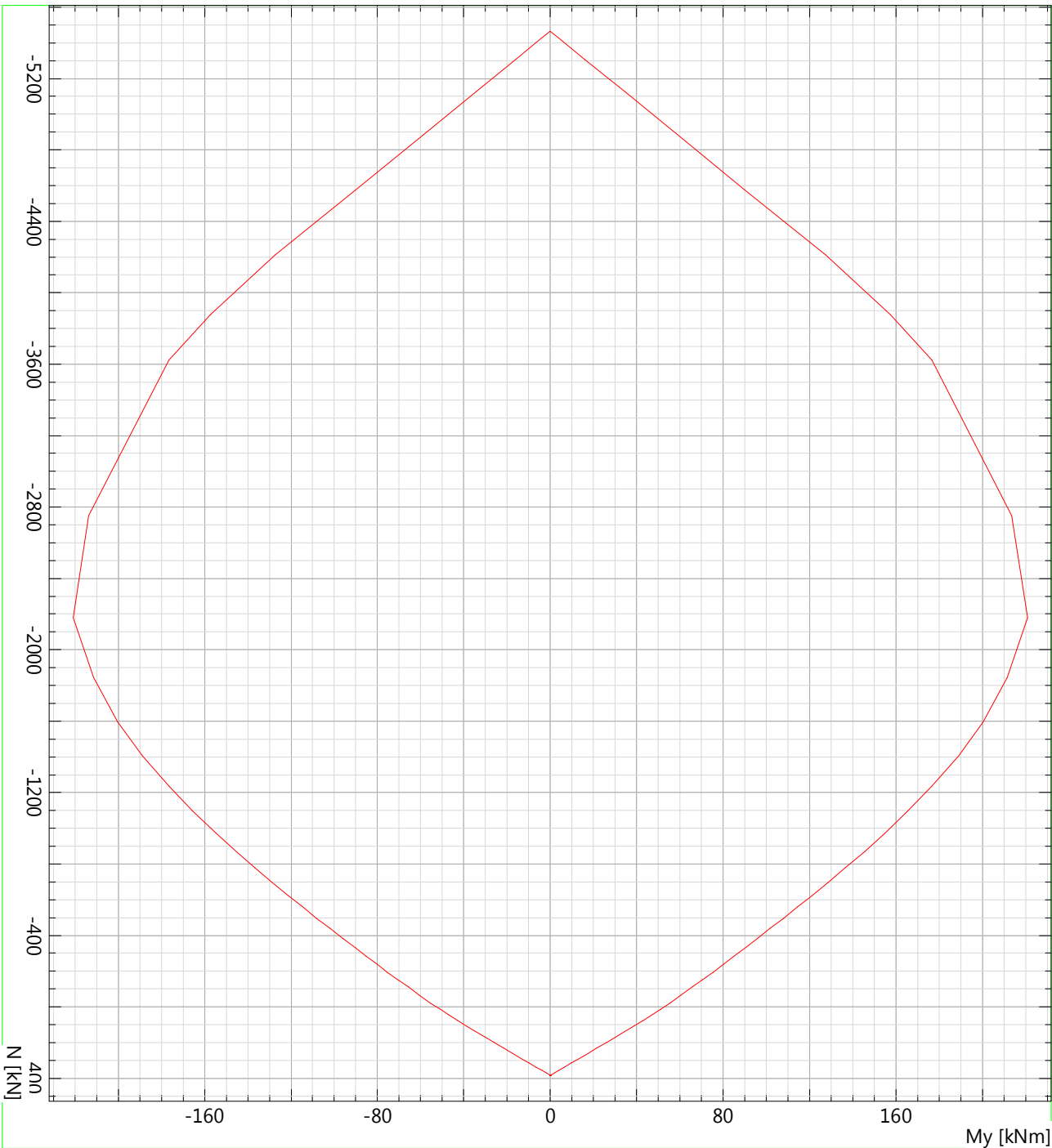
Mild reinforcement G0 $\Sigma A_s = 1046 \text{ mm}^2$, $\rho = 0.348667 \%$

Name	Material	Class	BC	Type	y _{1q} [m]	z _{1q} [m]	y _{2q} [m]	z _{2q} [m]	n, Ø	exist A _s [mm ²]
R1	R2	S420	1	L	0.050	0.250	0.950	0.250		523
R2				L	0.050	0.050	0.950	0.050		523

BC : BC: 0=constant area, 1=adapt always, 2=adapt area in tension zone
Type : Definition of reinforcement: P = Point, L= Line, R = Ring

Nr.:

M-N-Interaction diagram Cross section (column): QS
!ULS / Reinforcement percentage: $\rho = 0.348667$ o/o



Ultimate strength analysis Cross section (column): QS

Action forces / Efficiency: $\text{eff}(M,N) = 0.96$ OK

No.	AP	P	Bending and axial force			$\text{eff}(M,N)$ [-]	Shear forces and torsion			$\text{eff}(V,T)$ [-]	Complete CS $\text{eff}(M,N,V,T)$ [-]
			N [kN]	M_y [kNm]	M_z [kNm]		V_y [kN]	V_z [kN]	T [kNm]		
1	!ULS		-3850.6	0	-	0.70	-	-24.5	-	0.00	
2	!ULS		-2669.7	1.383E+2	-	0.76					
3	!ULS		-2987.8	-1.18E+2	-	0.76	-	-11.4	-	0.00	
4	!ULS		-2987.8	-1.18E+2	-	0.76	-	-11.4	-	0.00	
5	!ULS		-2669.7	1.383E+2	-	0.76					
6	!ULS		-2669.7	1.383E+2	-	0.76					
7	!ULS		-2992.4	-1.18E+2	-	0.76	-	15.8	-	0.00	
8	!ULS		-3148.7	-4.51E+1	-	0.65	-	-86.4	-	0.00	
9	!ULS		-3522.0	0	-	0.64	-	-22.5	-	0.00	
10	!ULS		-2305.6	2.108E+2	-	0.96	-	4.9	-	0.00	
11	!ULS		-2219.0	-2.06E+2	-	0.93	-	-82.9	-	0.00	
12	!ULS		-2217.1	-2.06E+2	-	0.93	-	6.8	-	0.00	
13	!ULS		-2305.6	2.108E+2	-	0.96	-	4.9	-	0.00	
14	!ULS		-2305.6	2.108E+2	-	0.96	-	4.9	-	0.00	
15	!ULS		-2893.5	-1.43E+2	-	0.80	-	13.3	-	0.00	
16	!ULS		-2216.5	23.30000	-	0.45	-	-195.1	-	0.00	
17	!ULS		-3646.9	0	-	0.67	-	-11.2	-	0.00	
18	!ULS		-3527.1	45.10000	-	0.72	-	-0.8	-	0.00	
19	!ULS		-3444.3	-8.77E+1	-	0.78	-	-16.5	-	0.00	
20	!ULS		-3441.4	-8.77E+1	-	0.78	-	42.7	-	0.00	
21	!ULS		-3527.1	45.10000	-	0.72	-	-0.8	-	0.00	
22	!ULS		-3533.8	44.90000	-	0.72	-	1.4	-	0.00	
23	!ULS		-3444.3	-8.77E+1	-	0.78	-	-16.5	-	0.00	
24	!ULS		-3431.8	-6.60E+1	-	0.74	-	88.9	-	0.00	

- : Calculation with uniaxial bending (neutral axis is horizontal)!!

Analysis-Parameters "ULS" Standard: Eurocode EN

ID	Diagram σ - ϵ			Strain Limits			σ_s [N/mm ²]	Partial safety factor				Various parameters			
	c	s		ϵ_{c2} [‰]	ϵ_{cu3} [‰]	ϵ_{ud} [‰]		α_{cc} [-]	γ_c [-]	γ_s [-]		θ [-]	ϕ [-]		
!ULS	2/0	1		-2.000	-3.500	2.000E		0.85	1.50	1.15		45.00	0		

θ : Inclination of diagonal in compression
 ϕ : Creep coefficient

Work
Object

Serviceability limit state verification according to EN 1992-1-1 (Eurocode 2)

Section geometry

h	[cm]	30	Total section height
b	[cm]	100	Section width

Section forces

N	[kN]	-1642.3	Axial force (- = compression)
M	[kNm]	-152.2	Bending moment (+ = lower fiber in traction)
V	[kN]	5.1	Shear force

Concrete input

Type		C 30/37	Concrete type
γ_c	[-]	1.0	Partial safety factor on concrete strength
f_{ck}	[MPa]	30.0	Characteristic value of concrete compressive strength
f_{cd}	[MPa]	30.0	Design value of concrete compressive strength
f_{ctm}	[MPa]	2.9	Concrete mean tensile strength
E_c	[GPa]	33.0	Concrete elastic modulus
Φ	[-]	0.0	Creep coefficient (0 = no creep, 2 = creep)
$\sigma_{c,max}$	[-]	0.60	Maximum compressive stress ($\cdot f_{ck}$)

Reinforcement input - Upper layer

d_s	[mm]	10	Bar diameter
s_s	[cm]	15	Bar spacing
c_s	[mm]	55	Bar cover (with respect to bar axis)
A_{ss}	[mm ²]	524	Steel area

Crack calculation input

k_t	[-]	0.4	Factor of load duration (0.4 = long term, 0.6 short term)
$f_{ct,eff}/f_{ctm}$	[-]	1	$f_{ct,eff}/f_{ctm}$ ratio (Default = 1)
$w_{lim,u}$	[mm]	0.40	Maximum crack opening (upper layer)
$w_{lim,l}$	[mm]	0.40	Maximum crack opening (lower layer)

Main results

	Maximum	Limit	Check
σ_c	-18.2	-18.0	✗
σ_s	40.9	336.0	✓
w_k	0.06	0.4	✓



Shear force

Shear	[0/1]	1	Include shear force as inner longitudinal force (1 = yes, 0 = no)
θ	[°]	45	Inclination of compr. diagonal (22.5° - 60°)
α	[°]	90	Inclination of stirrups (vertical = 90°)

N	[kN]	-1637.2	Axial force, calculation value (- = compression)
M	[kNm]	-152.2	Bending moment, calculation value (+ = upper fiber in traction)

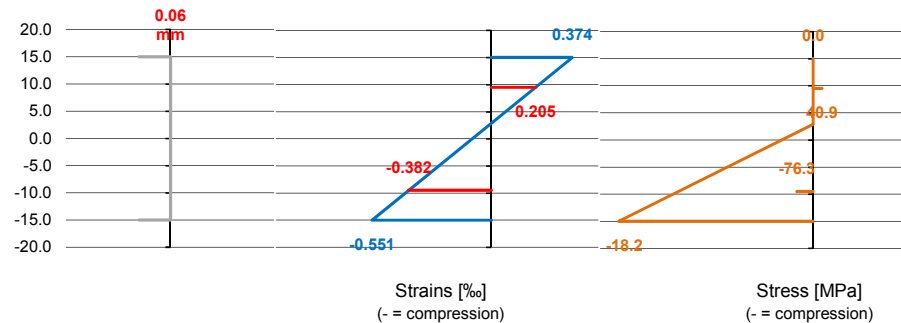
Steel input

Type		B 500 B	Steel type
γ_s	[-]	1.0	Partial safety factor on concrete strength
f_{yk}	[MPa]	420.0	Characteristic value of steel tensile strength
f_{yd}	[MPa]	420.0	Design value of steel tensile strength
E_s	[GPa]	200.0	Steel elastic modulus
$\sigma_{s,max}$	[-]	0.8	Maximum tensile stress ($\cdot f_{yk}$)

Reinforcement input - Lower layer

\emptyset_l	[mm]	10	Bar diameter
s_l	[cm]	15	Bar spacing
c_l	[mm]	55	Bar cover (with respect to bar axis)
A_{sl}	[mm ²]	524	Steel area

k_1	[-]	0.8	Bond properties of reinforcing steel (ribbed: 0.8; plain: 1.6)
k_2	[-]	0.5	Strain coefficient (bending: 0.5; pure tension: 1.0)
k_3	[-]	3.4	Coefficient ($k_3 = 3.4$)
k_4	[-]	0.425	Coefficient ($k_4 = 0.425$)



Work
Object

Calculation details

Section results

ϵ_0	[‰]	-0.09	Section mean strain	-88.5	0.1
χ	[km ⁻¹]	-3.09	Section curvature	-3085.6	0.0
y_{AN}	[cm]	2.9	Neutral axis position		0.1

Calculated internal forces

N	[kN]	-1637.2	Axial force (- = compression)
M	[kN]	-152.2	Bending moment (+ = upper fiber in traction)

Extreme stresses and strains

Concrete

y_{cs}	[cm]	15.0	Upper fiber position	y_{cl}	[cm]	-15.0	Lower fiber position
ϵ_{cs}	[‰]	0.374	Upper fiber strain	ϵ_{cl}	[‰]	-0.551	Lower fiber strain
σ_{cs}	[MPa]	0.0	Upper fiber stress	σ_{cl}	[MPa]	-18.2	Lower fiber stress
F_c^*	[kN]	-1625.3	Concrete force				
ΔF_{ss}	[kN]	0.0	Upper reinf. force to be removed from concrete				
ΔF_{sl}	[kN]	-6.6	Lower reinf. force to be removed from concrete				
F_c	[kN]	-1618.7	Concrete force (reinforcement area excluded)				
b_c	[cm]	-9.0	Force lever arm				

Reinforcement

y_{ss}	[cm]	9.5	Upper reinf. position	y_{sl}	[cm]	-9.5	Lower reinf. position
ϵ_{ss}	[‰]	0.205	Upper reinf. strain	ϵ_{sl}	[‰]	-0.382	Lower reinf. strain
σ_{ss}	[MPa]	40.9	Upper reinf. stress	σ_{sl}	[MPa]	-76.3	Lower reinf. stress
F_{ss}	[kN]	21.4	Upper reinf. force	F_{sl}	[kN]	-40.0	Lower reinf. force
b_{ss}	[cm]	9.5	Upper reinf. lever arm	b_{sl}	[cm]	-9.5	Lower reinf. lever arm

Crack calculation

α_e	[-]	6.06	E_s/E_c ratio
x	[cm]	0.00	Compression zone (cracked section)
d	[mm]	245.0	Static height
c	[mm]	50.0	Bar cover (with respect to bar border)
$h_{c,eff}$	[mm]	100.0	Effective tensile concrete area height
$A_{c,eff}$	[mm ²]	100000	Effective tensile concrete area
A_s	[mm ²]	524	Reinforcement area (in tensile area)
$\rho_{p,eff}$	[-]	0.005	ratio of tensile reinforcement to concrete zone in tension
σ_s	[MPa]	40.9	Stress in reinforcement
$\epsilon_{sm} - \epsilon_{cm}$	[‰]	0.123	difference of strain
\varnothing_{eq}	[mm]	10.0	Equivalent diameter
$s_{r,max}$	[cm]	49.5	max. crack spacing
w_k	[mm]	0.06	max. crack width
f_{bd}	[MPa]	4.6	Bond strength (good adherence and $\varnothing < 32$ mm)
w_k	[mm]	0.01	max. crack width (acc. to Zilch, Zehetmaier "Bemessung im konstruktiven Betonbau", used only if EC is not applicable)
		0.06	

N	M	V	M/N	θ	Φ	σ_c			σ_s			w_k		
						Max	Limit	Check	Max	Limit	Check	Max	Limit	Check
[kN]	[kNm]	[kN]	[m]	[°]	[-]	[MPa]	[MPa]	[-]	[MPa]	[MPa]	[-]	[mm]	[mm]	[-]
-2852.3	0.0	-18.2	0.0	45.0	0.0	-9.3	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.4	✓
-1977.6	102.5	0.0	-0.1	45.0	0.0	-13.2	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.4	✓
-2213.2	-87.2	-8.4	0.0	45.0	0.0	-12.9	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.4	✓
-2213.2	-87.2	-8.4	0.0	45.0	0.0	-12.9	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.4	✓
-1977.6	102.5	0.0	-0.1	45.0	0.0	-13.2	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.4	✓
-1977.6	102.5	0.0	-0.1	45.0	0.0	-13.2	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.4	✓
-2216.6	-87.2	11.7	0.0	45.0	0.0	-12.9	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.4	✓
-2332.3	-33.4	-64.0	0.0	45.0	0.0	-9.6	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.4	✓
-2608.9	0.0	-16.6	0.0	45.0	0.0	-8.5	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.4	✓
-1707.9	156.1	3.6	-0.1	45.0	0.0	-18.6	-18.0	✗	38.9	336.0	✓	0.06	0.4	✓
-1643.7	-152.2	-61.4	0.1	45.0	0.0	-18.5	-18.0	✗	48.8	336.0	✓	0.07	0.4	✓
-1642.3	-152.2	5.1	0.1	45.0	0.0	-18.2	-18.0	✗	41.0	336.0	✓	0.06	0.4	✓
-1707.9	156.1	3.6	-0.1	45.0	0.0	-18.6	-18.0	✗	38.9	336.0	✓	0.06	0.4	✓
-1707.9	156.1	3.6	-0.1	45.0	0.0	-18.6	-18.0	✗	38.9	336.0	✓	0.06	0.4	✓
-2143.3	-106.1	9.9	0.0	45.0	0.0	-13.9	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.4	✓
-1641.8	17.3	-144.5	0.0	45.0	0.0	-6.0	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.4	✓
-2701.4	0.0	-8.3	0.0	45.0	0.0	-8.8	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.4	✓
-2612.7	33.4	-0.6	0.0	45.0	0.0	-10.7	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.4	✓
-2551.4	-64.9	-12.3	0.0	45.0	0.0	-12.6	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.4	✓
-2549.2	-64.9	31.6	0.0	45.0	0.0	-12.5	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.4	✓
-2612.7	33.4	-0.6	0.0	45.0	0.0	-10.7	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.4	✓
-2617.6	33.3	1.0	0.0	45.0	0.0	-10.7	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.4	✓
-2551.4	-64.9	-12.3	0.0	45.0	0.0	-12.6	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.4	✓
-2542.0	-48.9	65.8	0.0	45.0	0.0	-11.3	-18.0	✓	0.0	336.0	✓	0.00	0.4	✓

Legend:

N = Axial force

M = Bending moment

V = Shear force

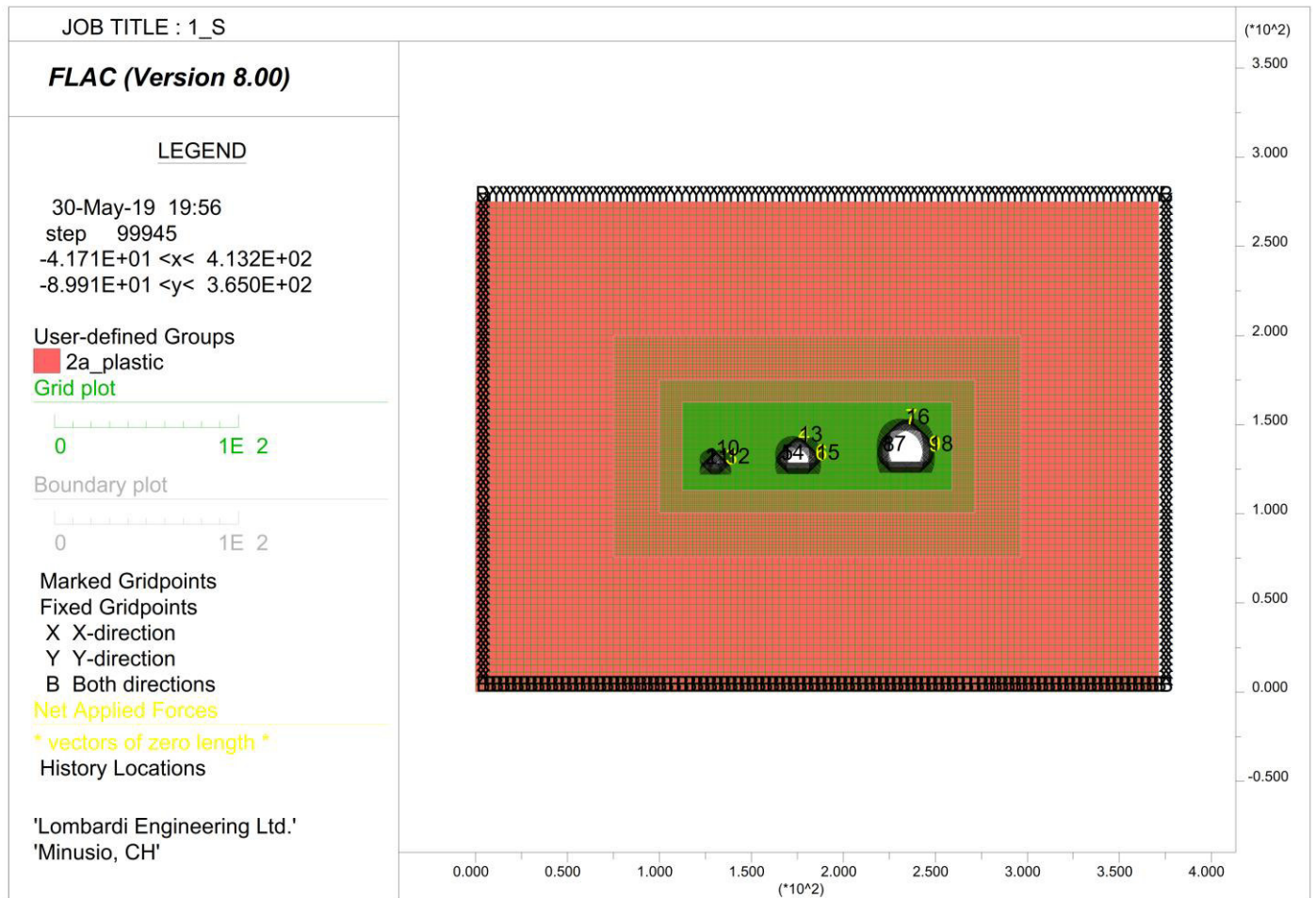
M/N = Eccentricity

θ = Inclination of compr. diagonal (22.5° - 60°)

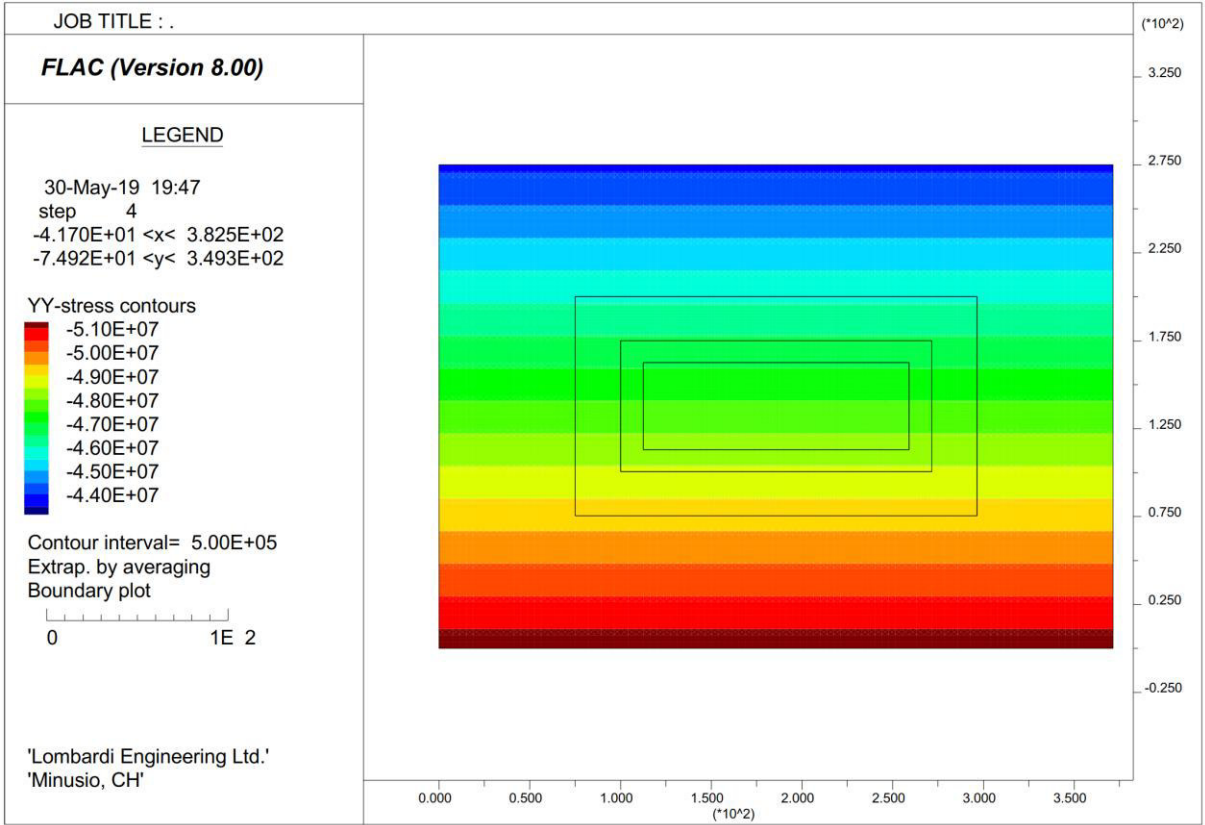
Φ = Creep coefficient (0 = no creep, 2 = creep)

Anexo G

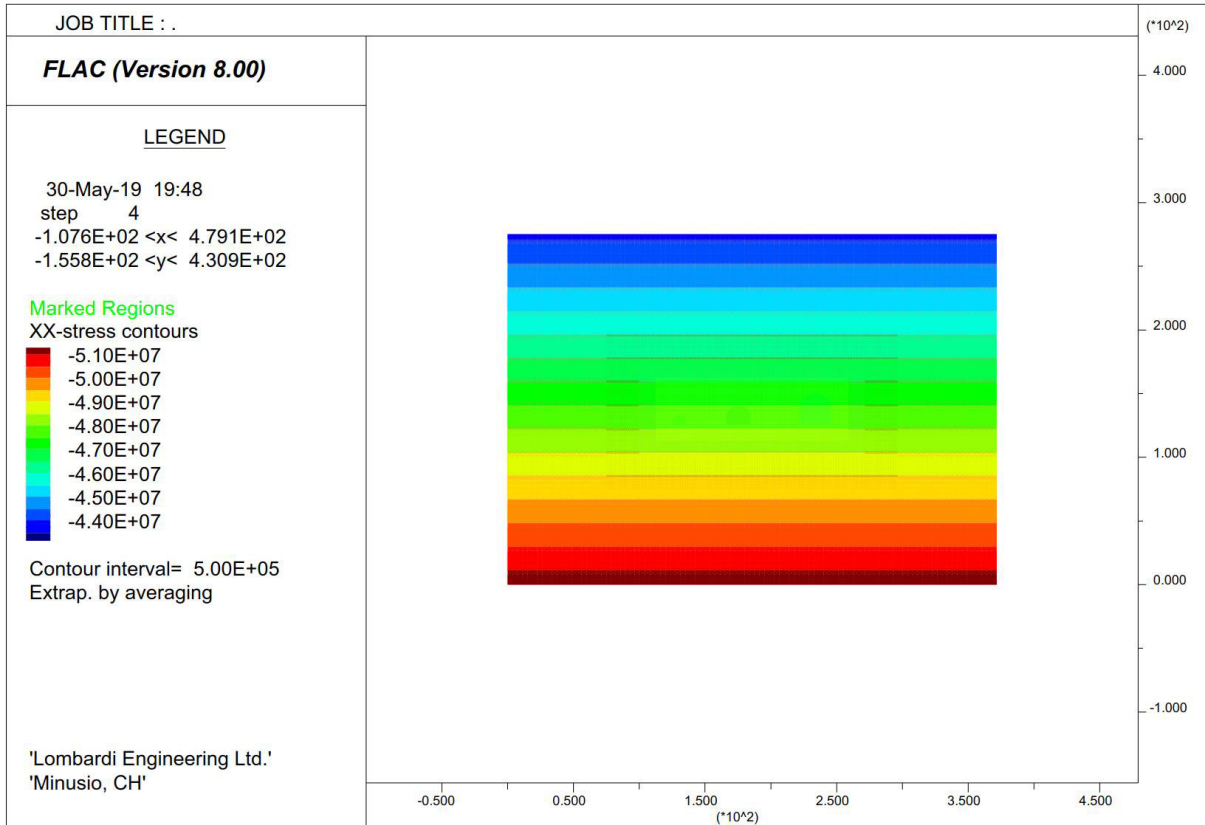
GEOMETRY OF THE MODEL



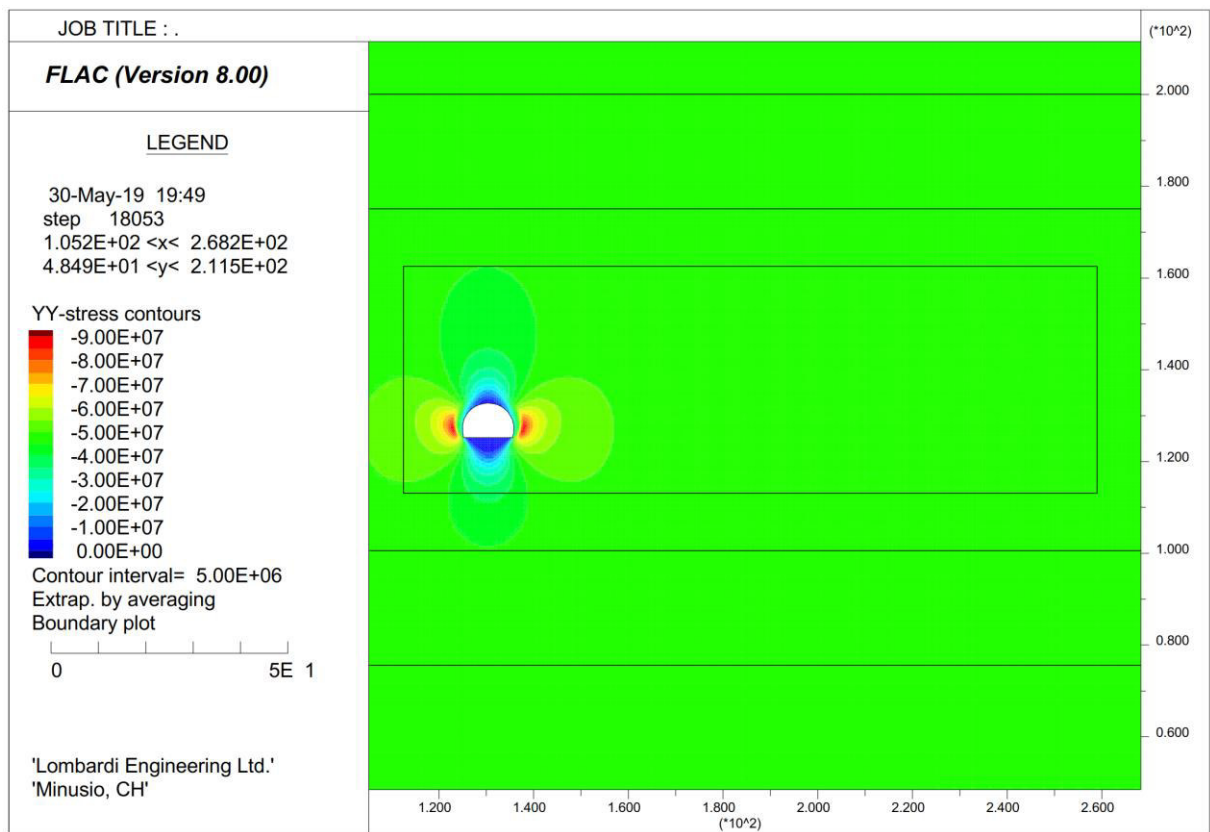
INITIAL VERTICAL STRESS



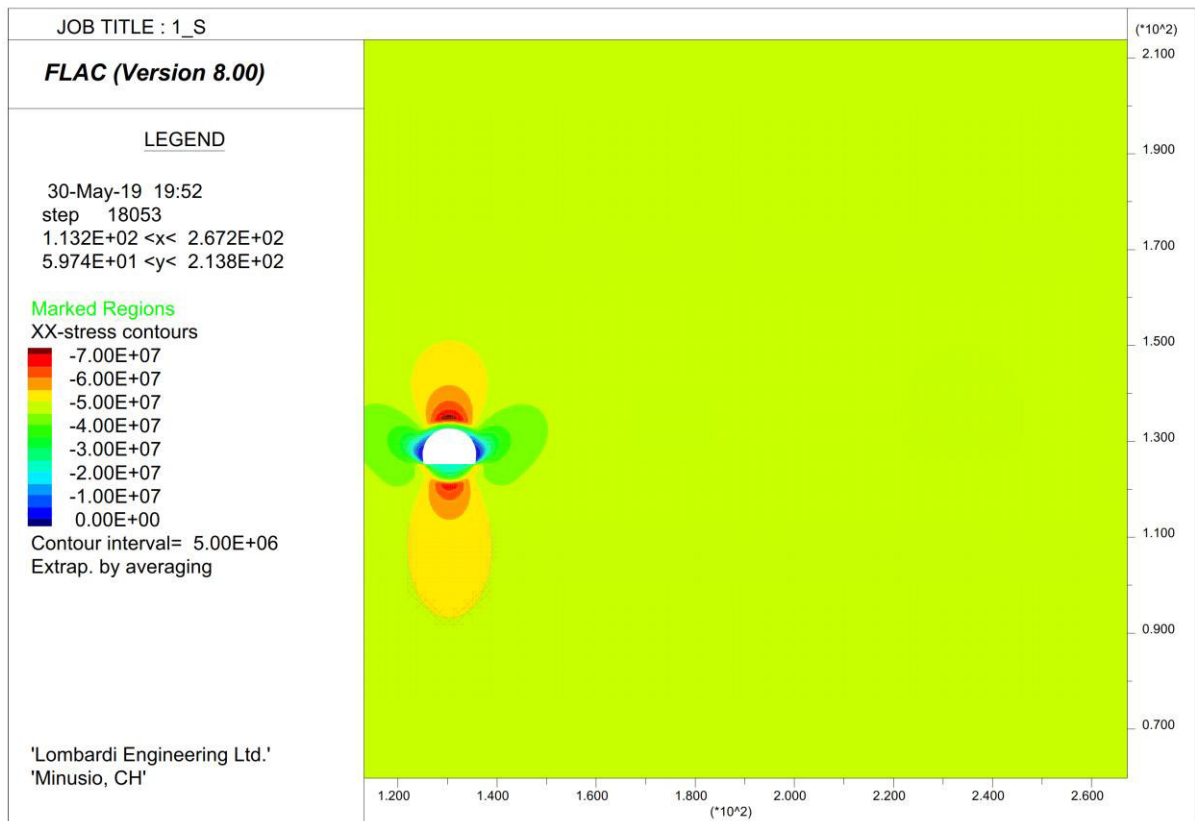
INITIAL HORIZONTAL STRESS



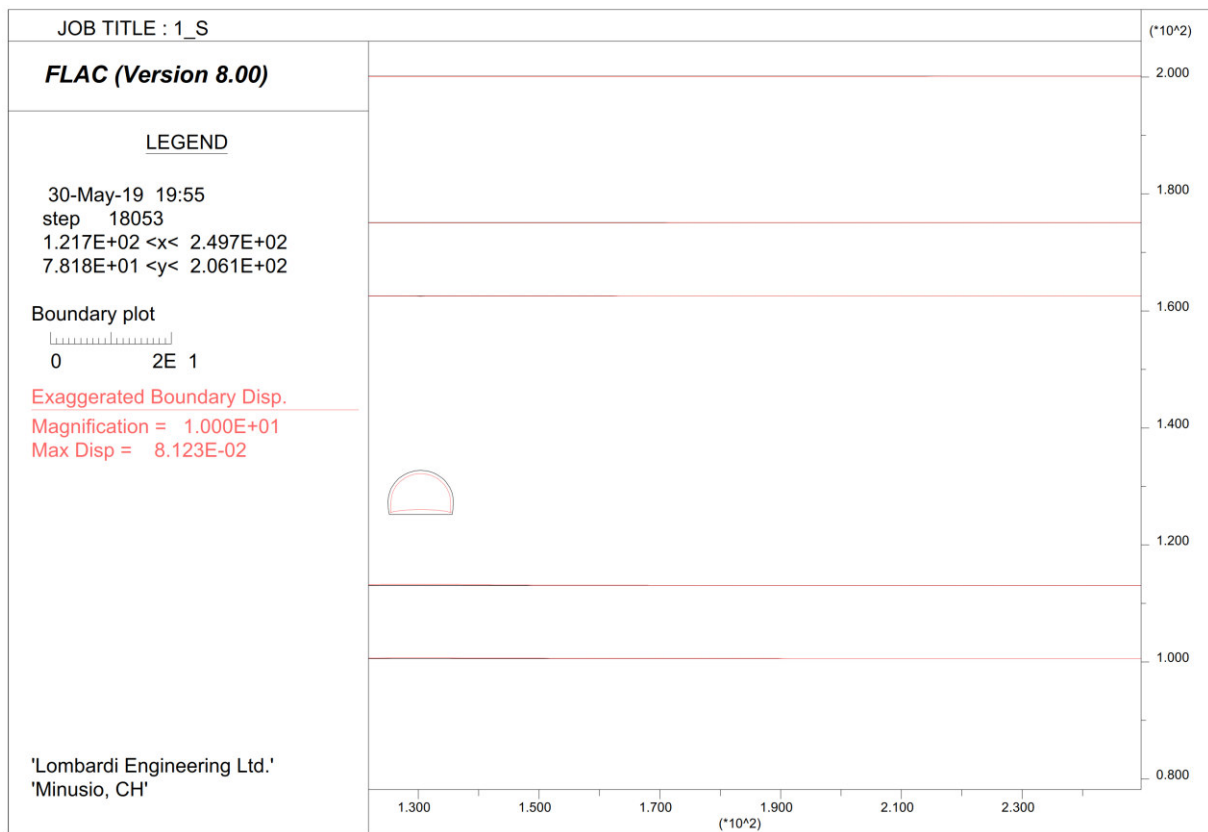
EXCAVATION PHASE 1 : VERTICAL STRESS



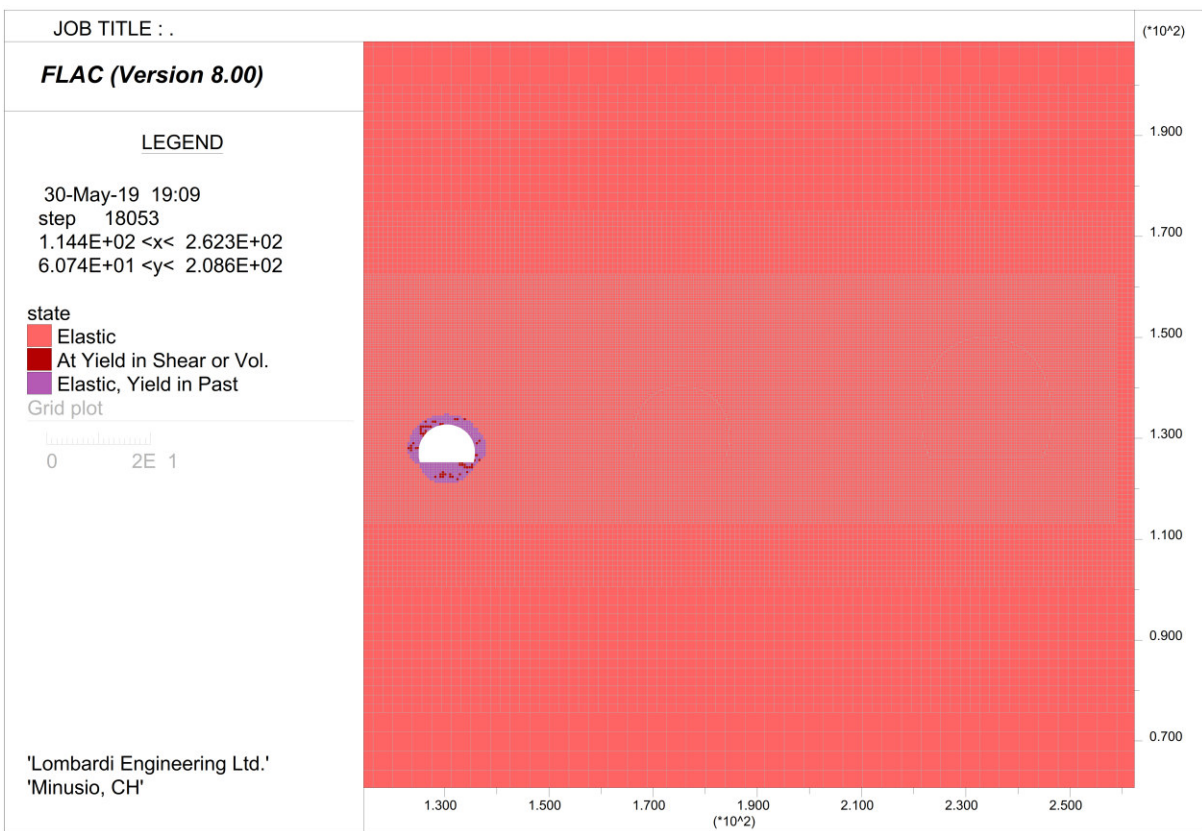
EXCAVATION PHASE 1 : HORIZONTAL STRESS



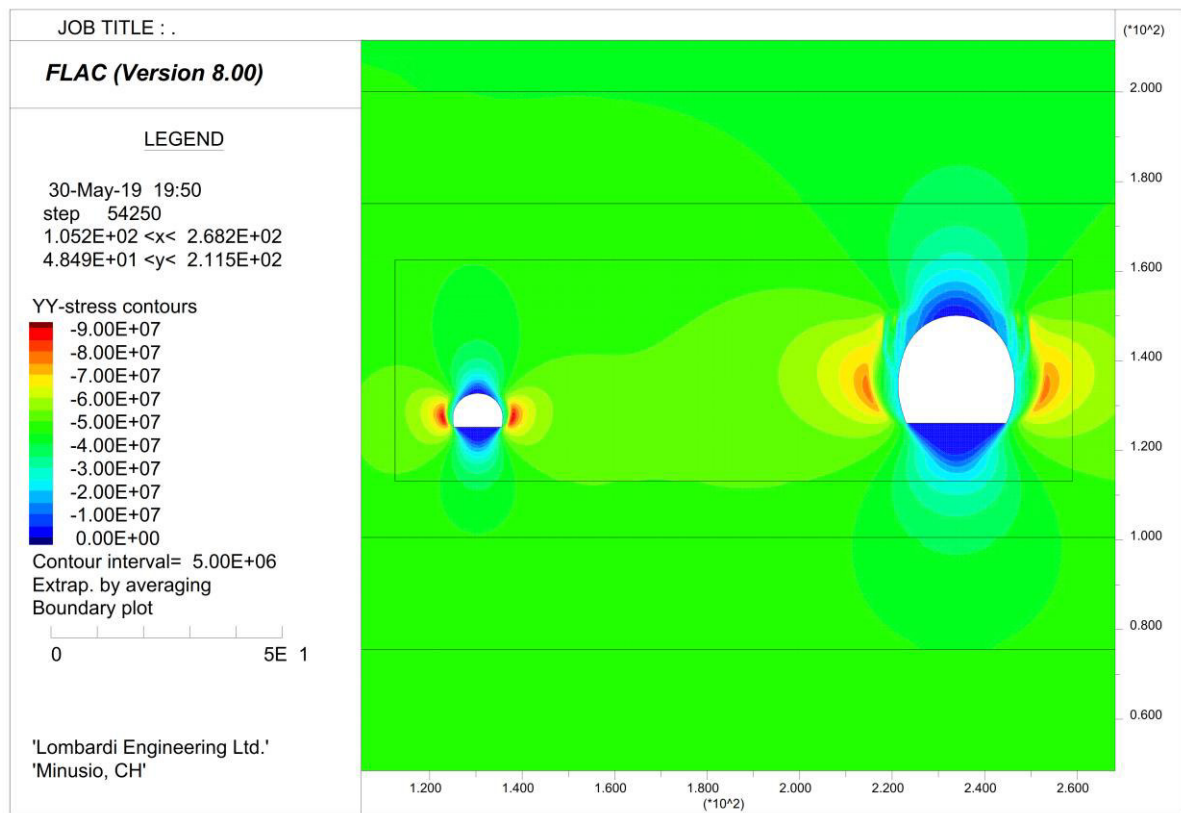
EXCAVATION PHASE 1 DISPLACEMENTS



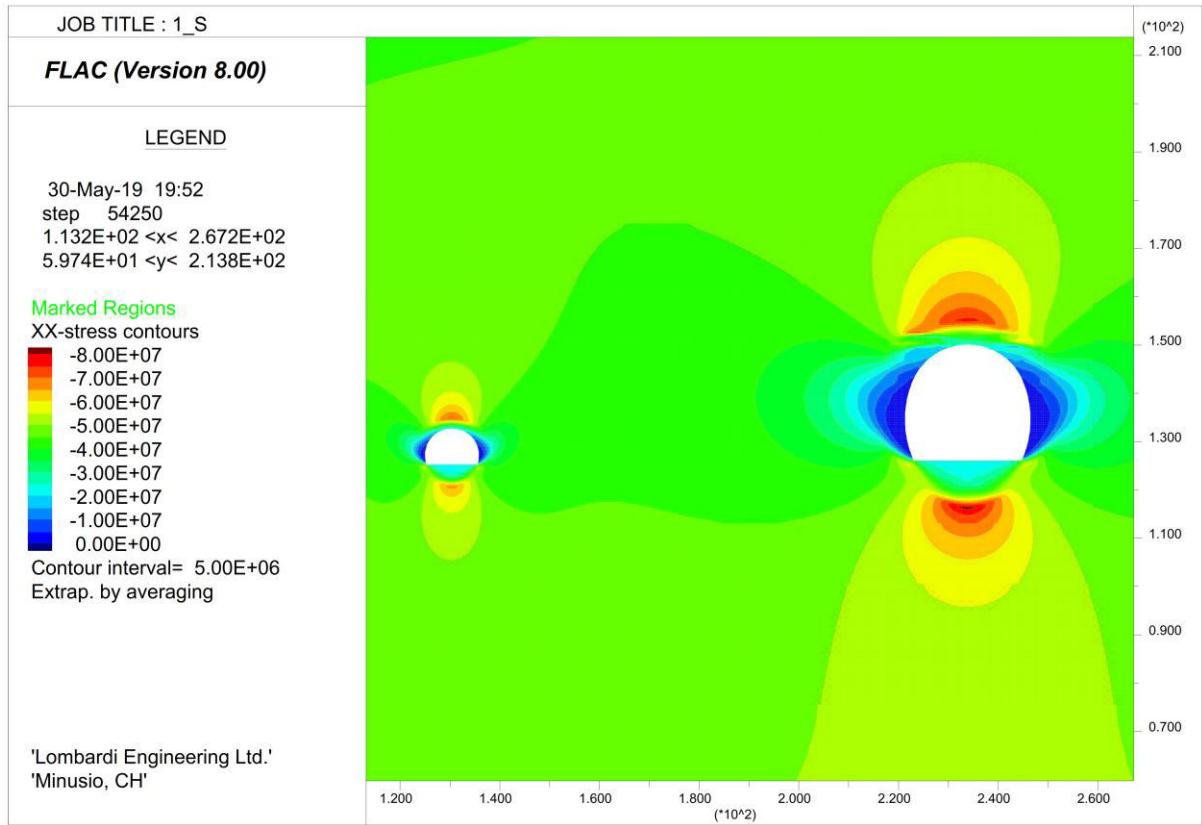
EXCAVATION PHASE 1 PLASTIC ZONE



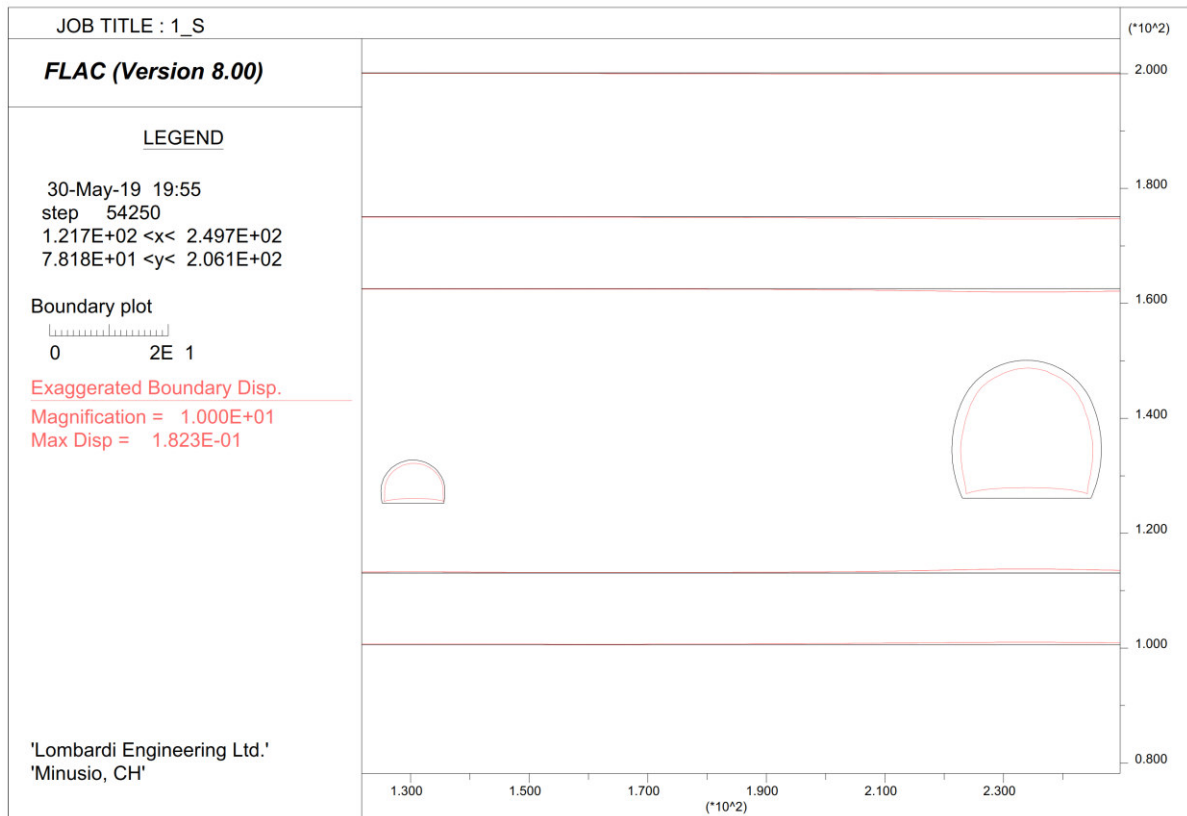
EXCAVATION PHASE 2 VERTICAL STRESS



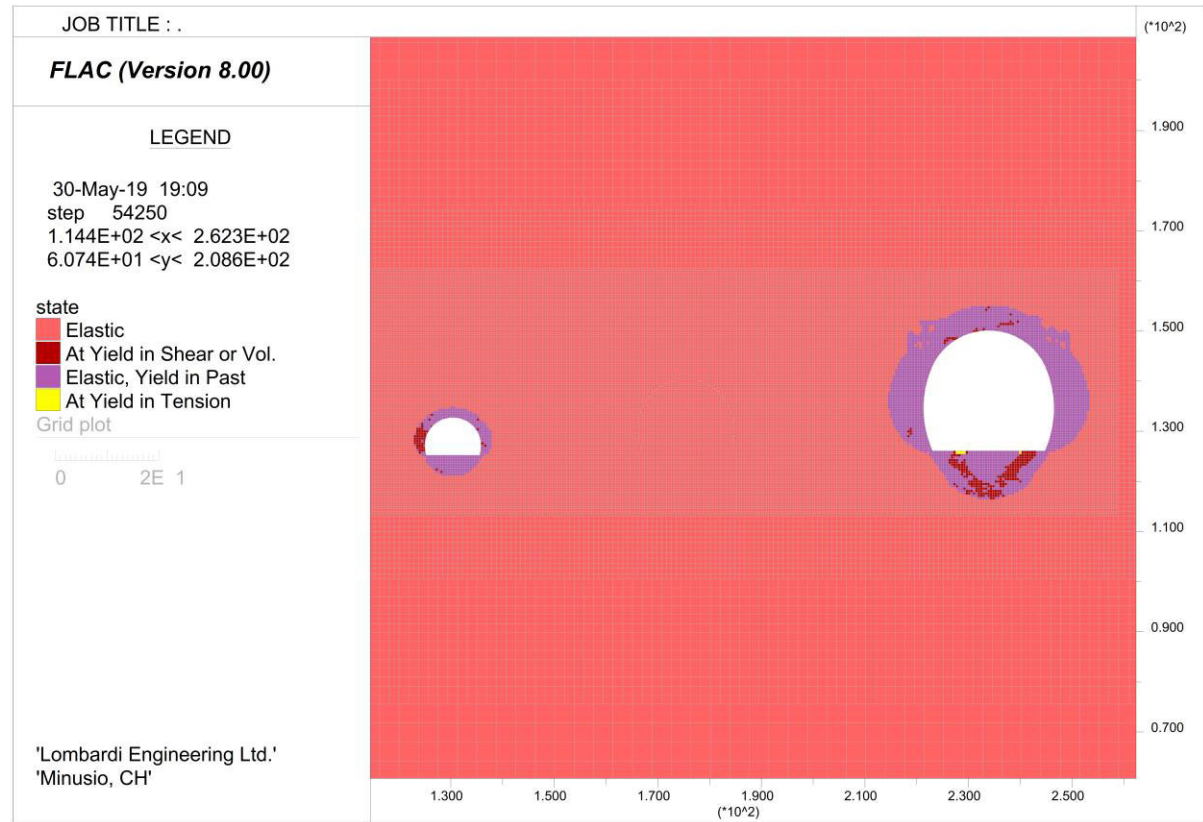
EXCAVATION PHASE 2 HORIZONTAL STRESS



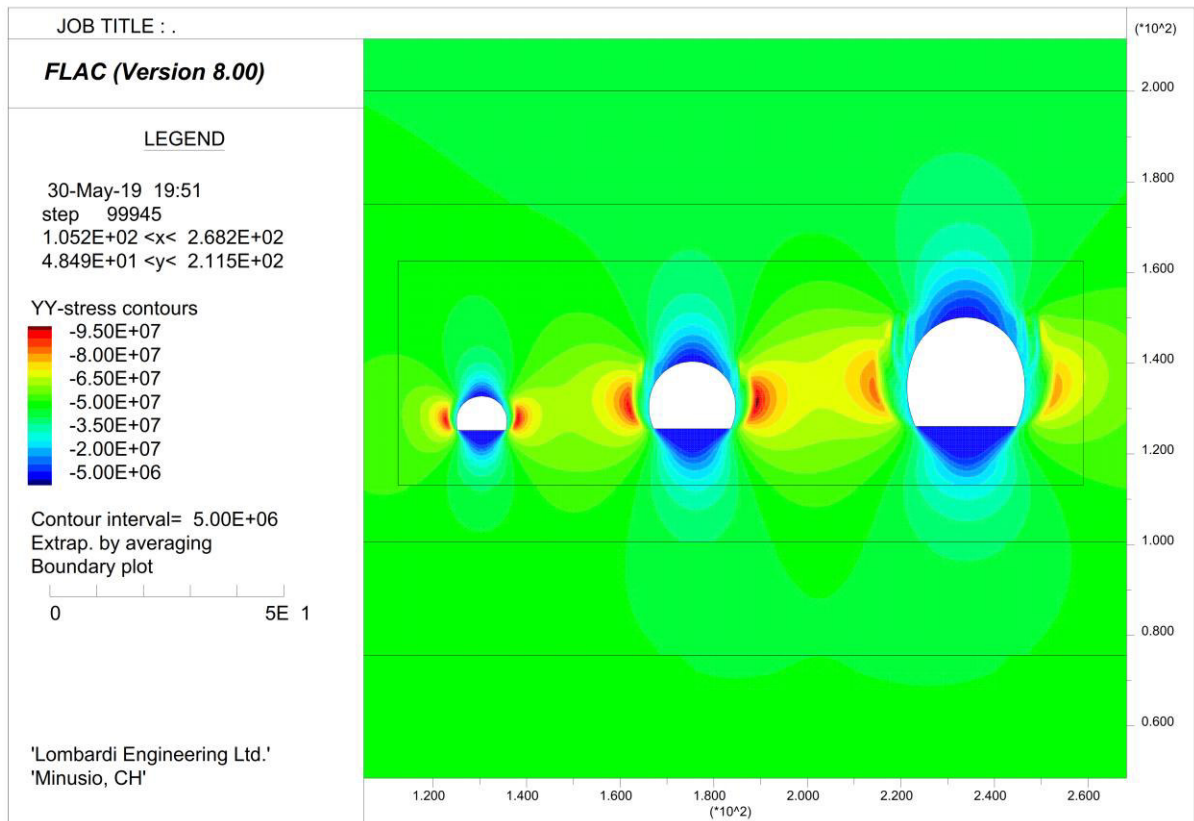
EXCAVATION PHASE 2 DISPLACEMENTS



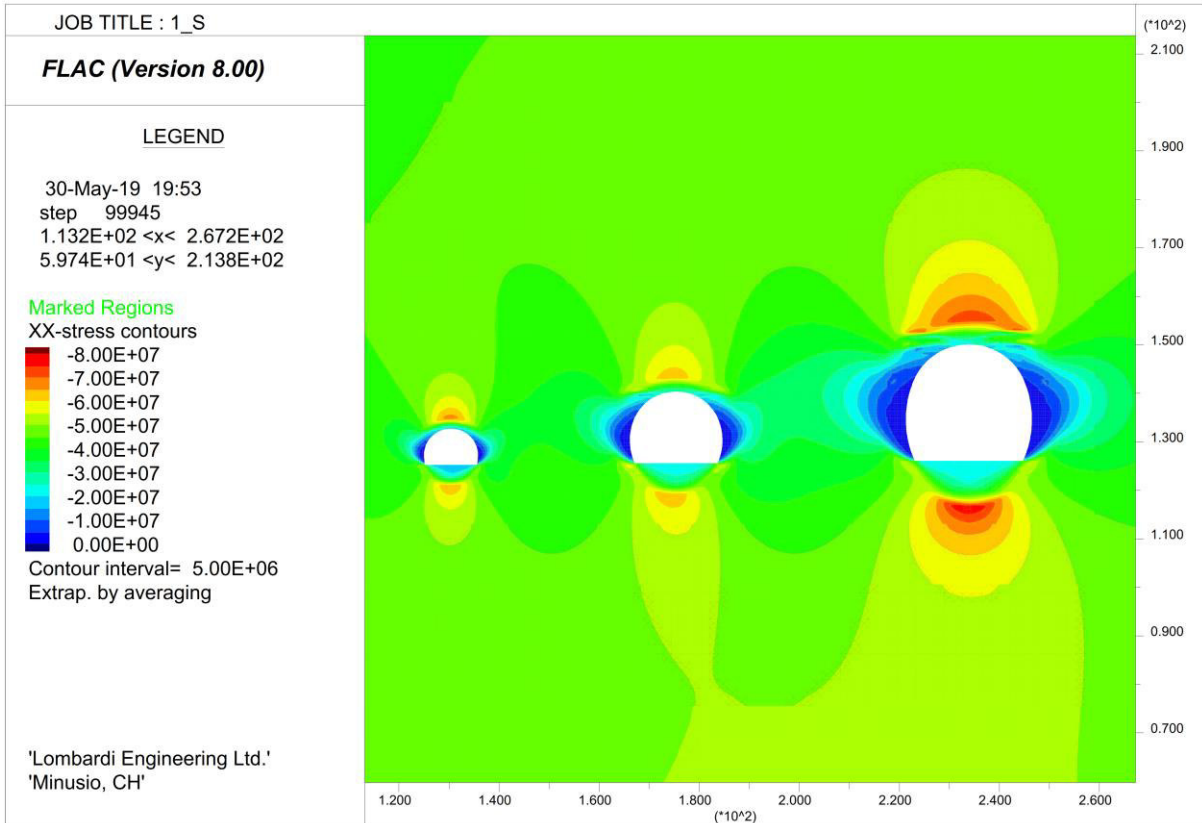
EXCAVATION PHASE 2 PLASTIC ZONE



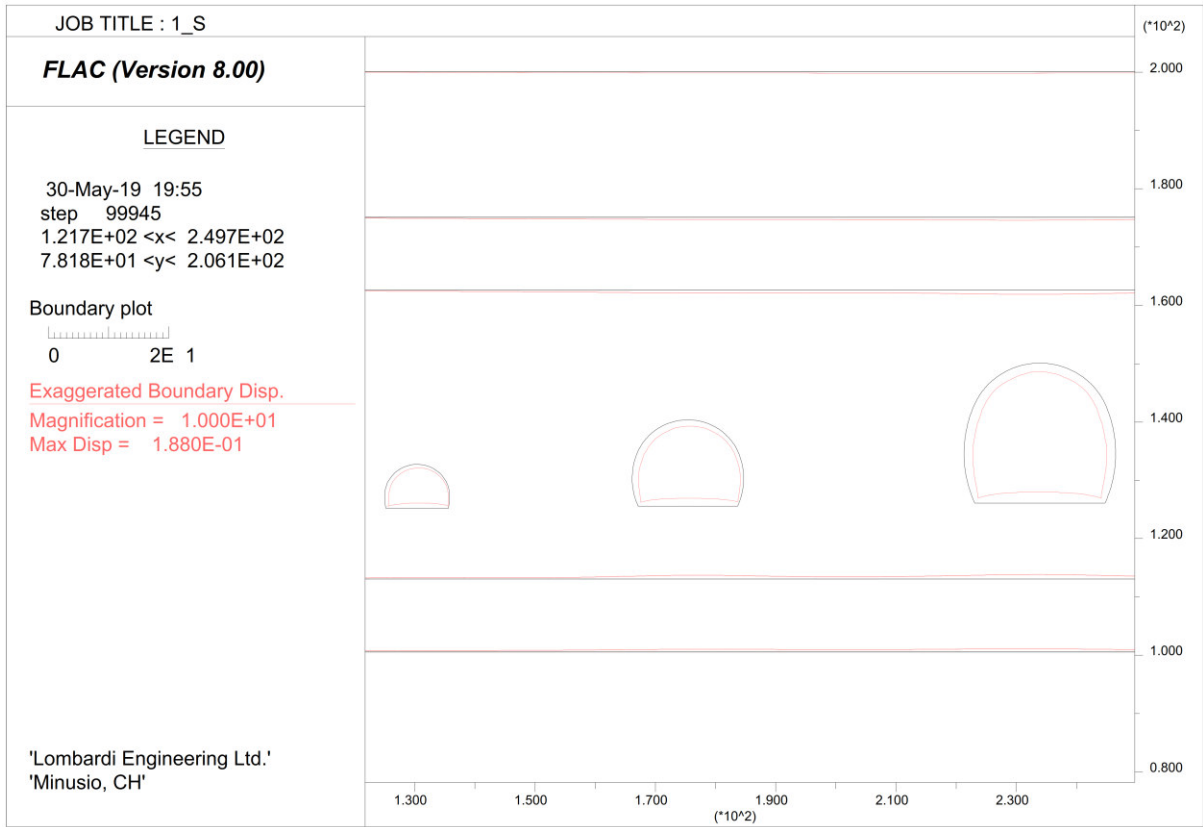
EXCAVATION PHASE 3 VERTICAL STRESS



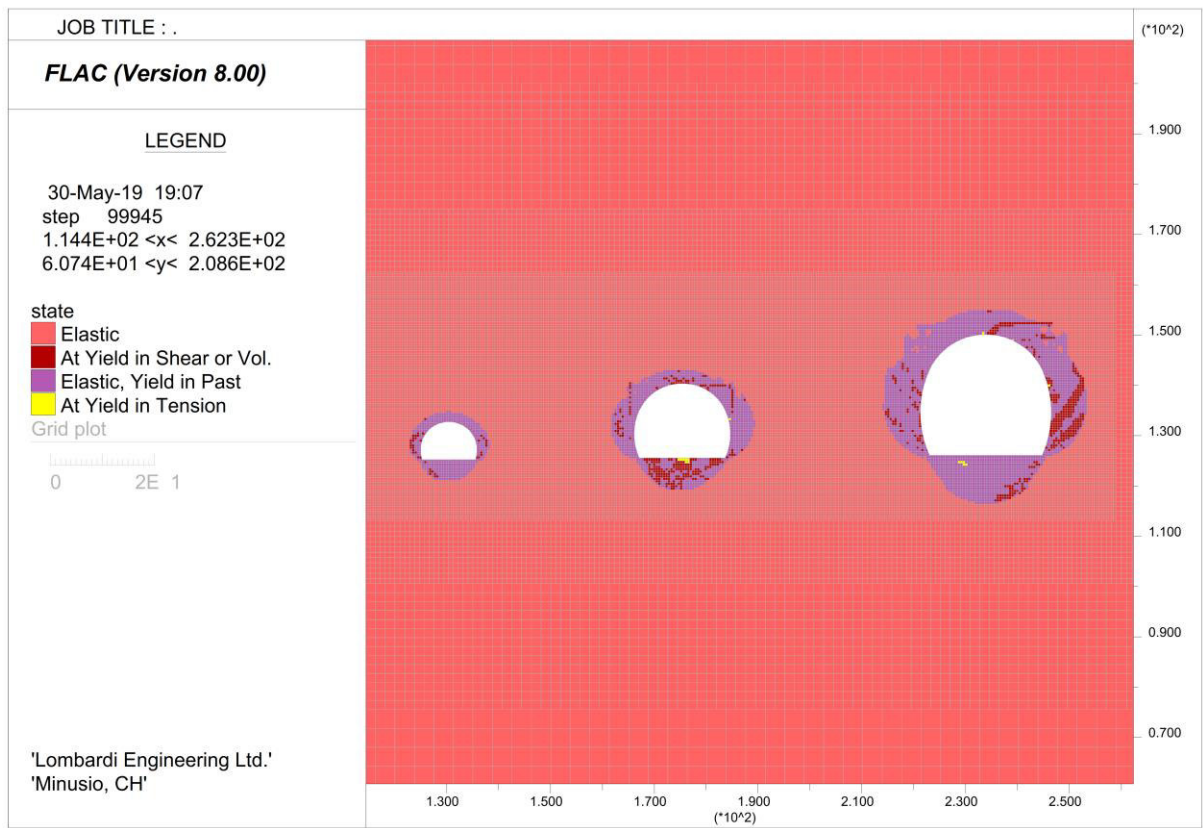
EXCAVATION PHASE 3 HORIZONTAL STRESS



EXCAVATION PHASE 3 DISPLACEMENTS

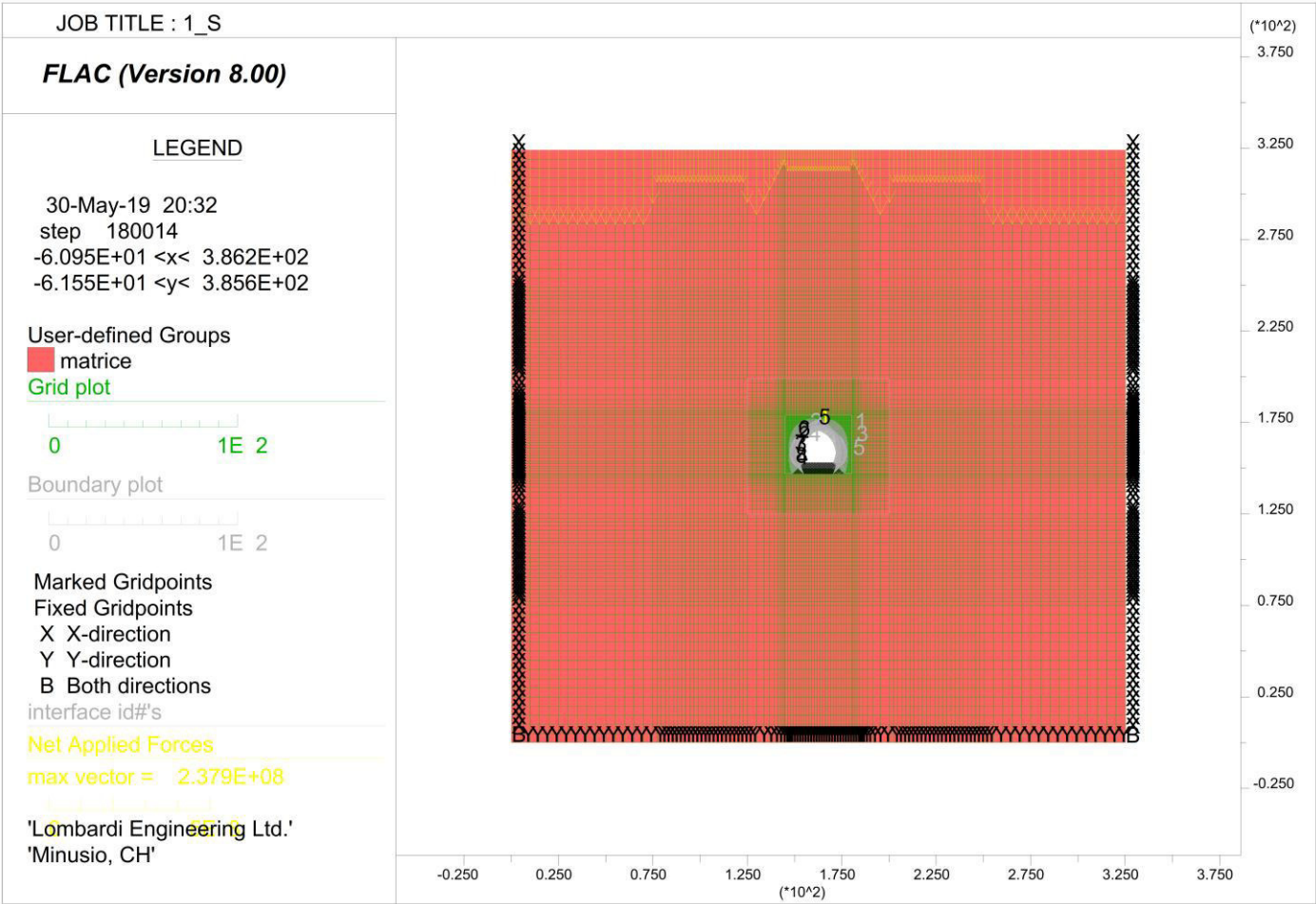


EXCAVATION PHASE 3 PLASTIC ZONE

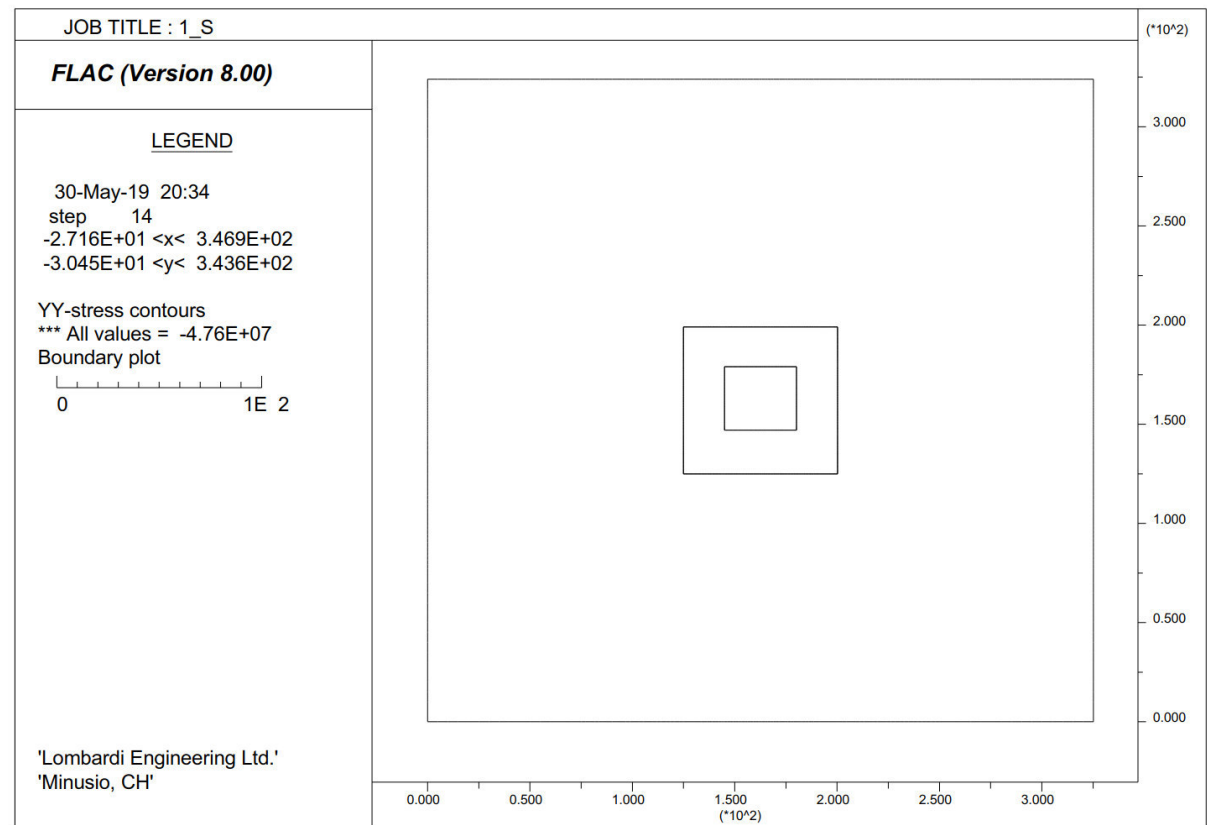


Anexo H

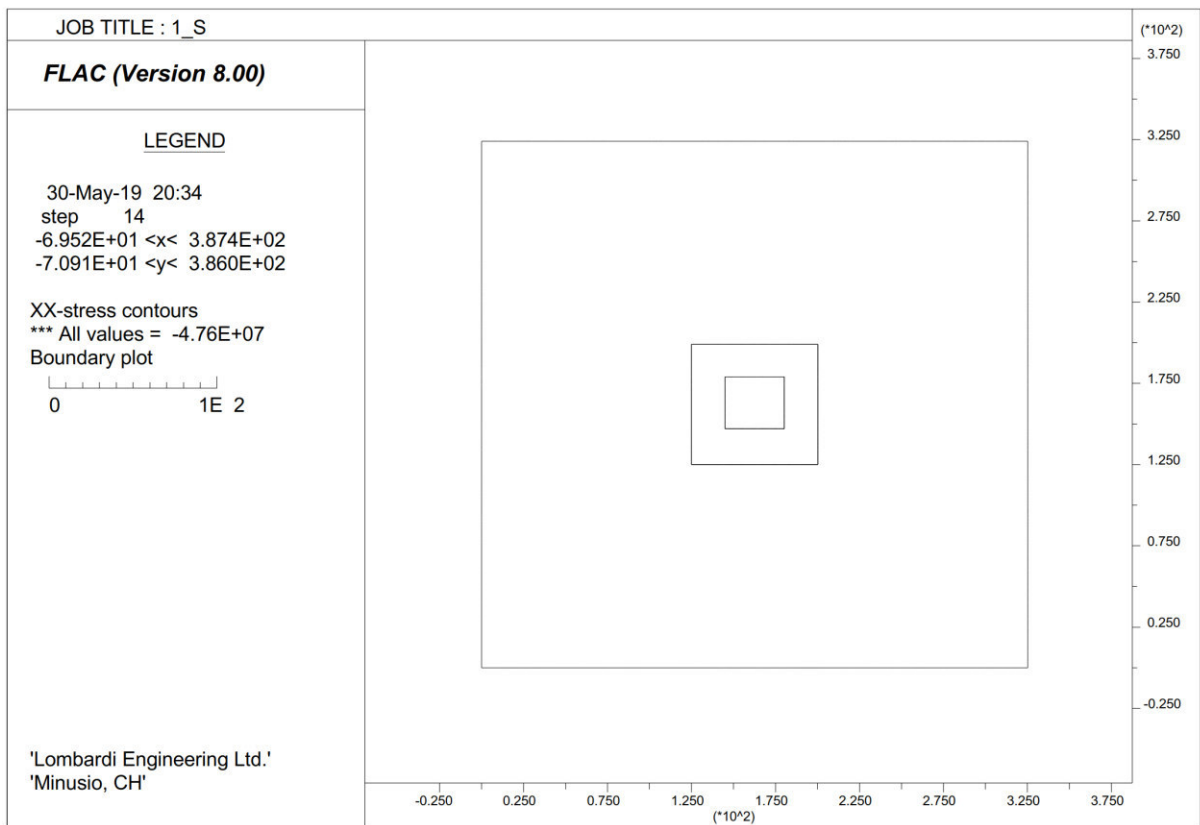
GEOMETRY OF THE MODEL



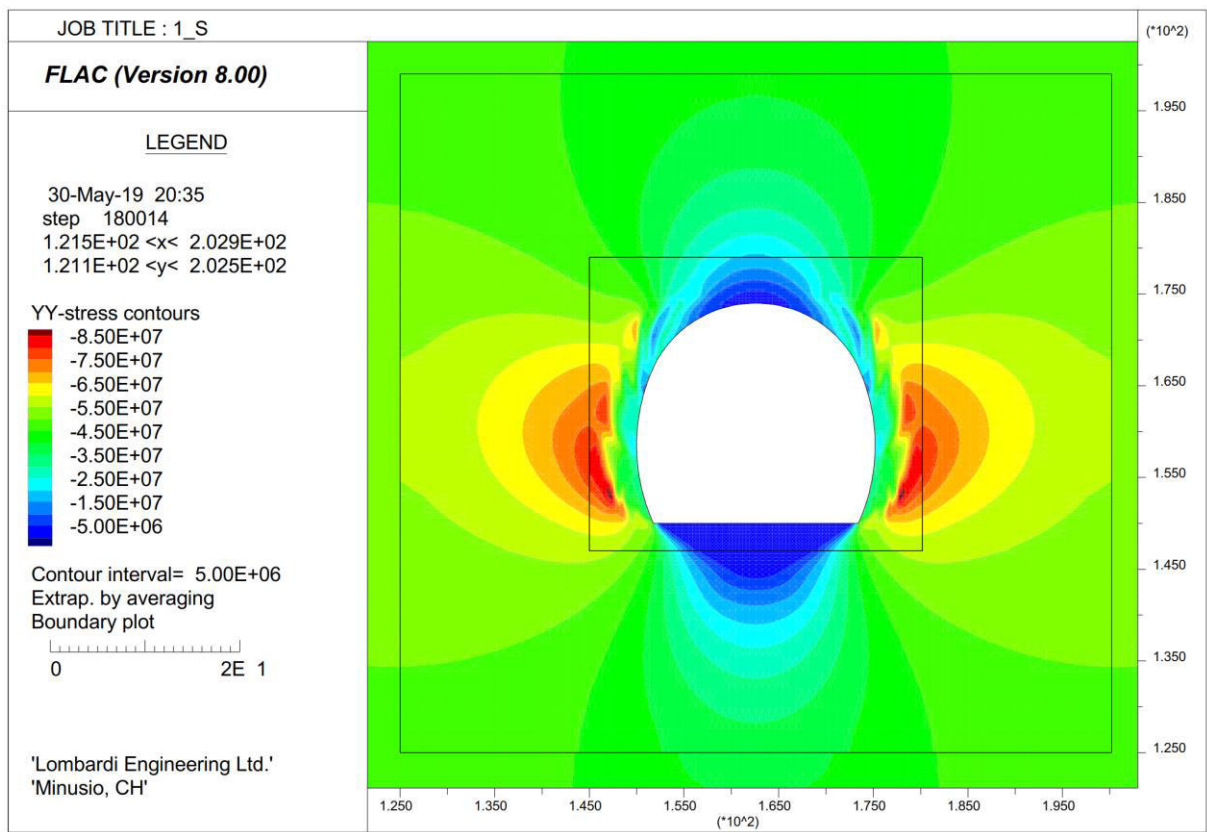
INITIAL VERTICAL STRESS



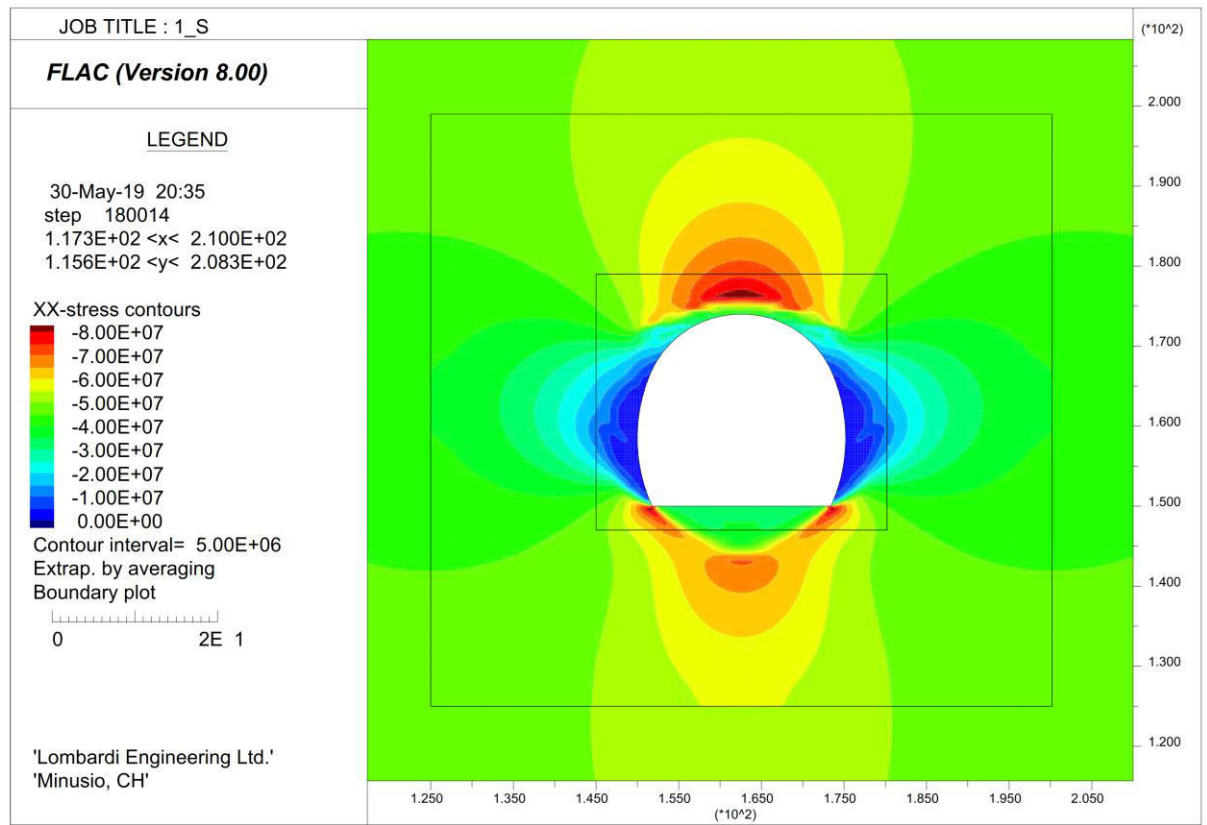
INITIAL HORIZONTAL STRESS



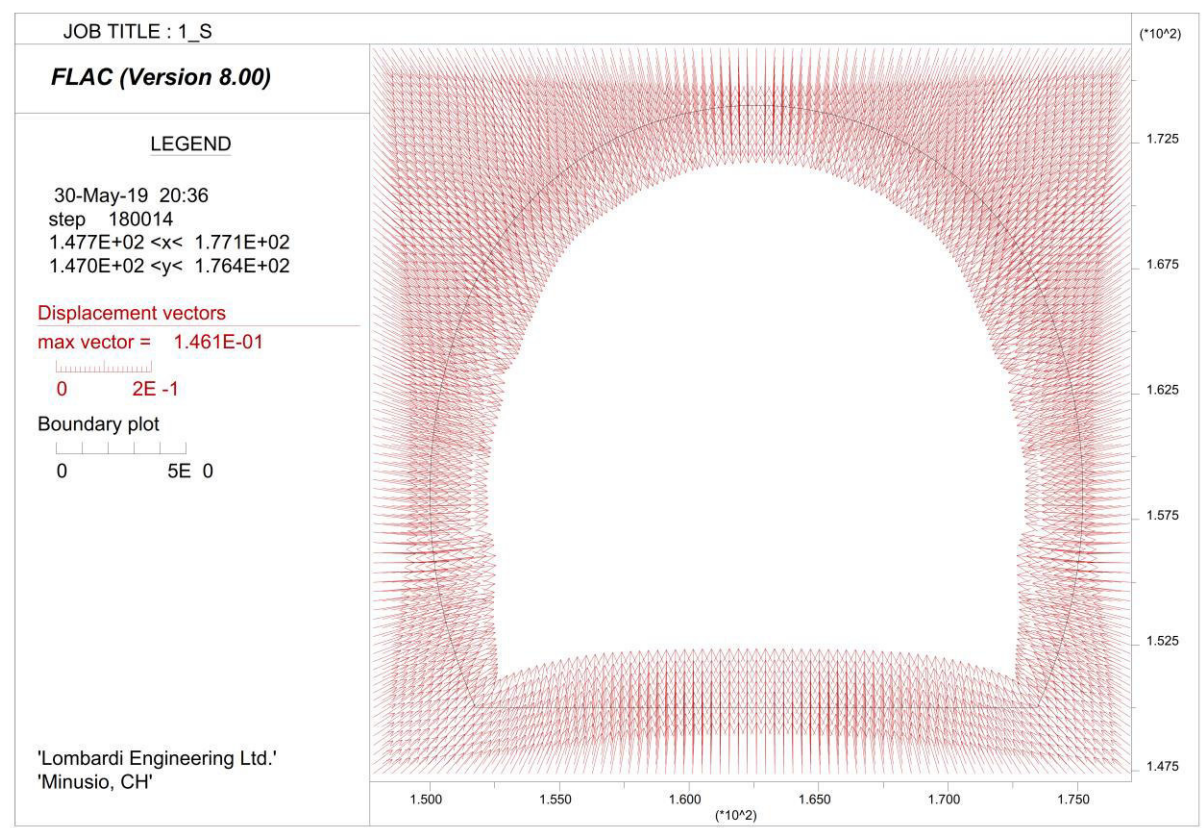
FINAL COMPUTATIONAL STEP : VERTICAL STRESS



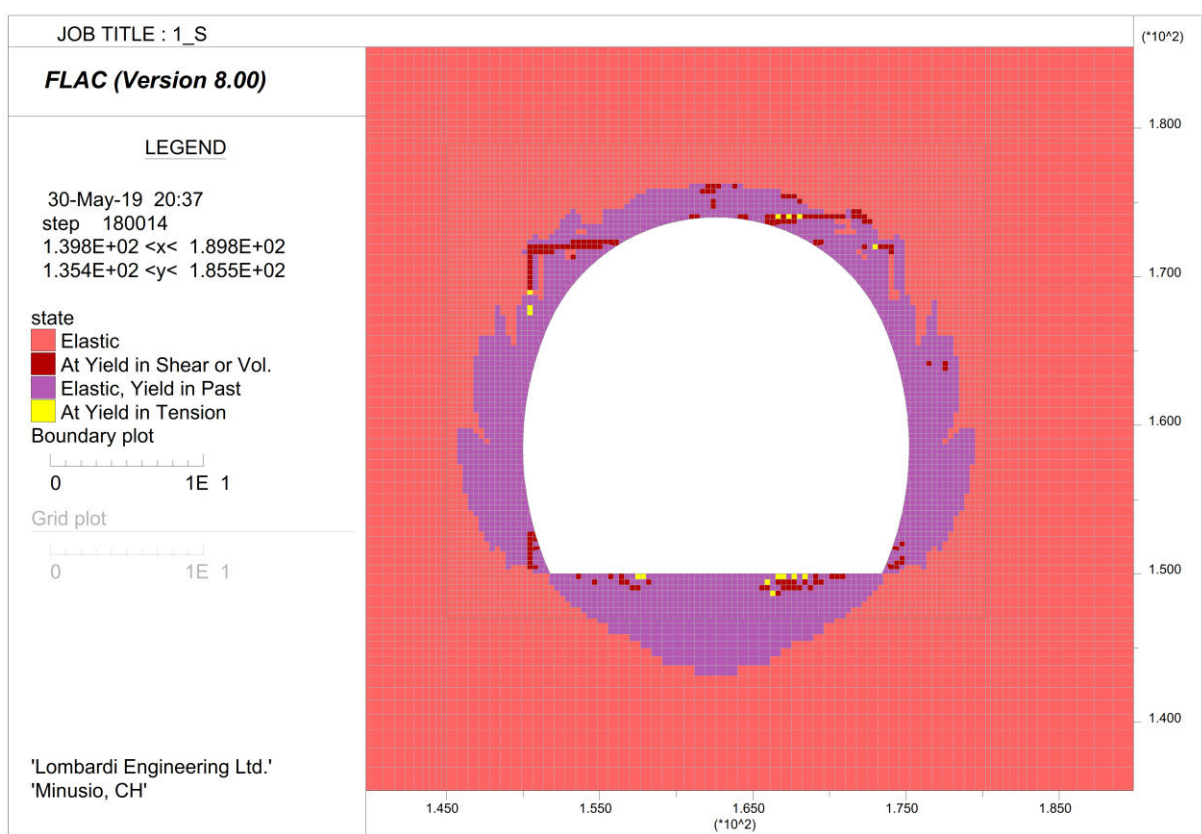
FINAL COMPUTATIONAL STEP : HORIZONTAL STRESS



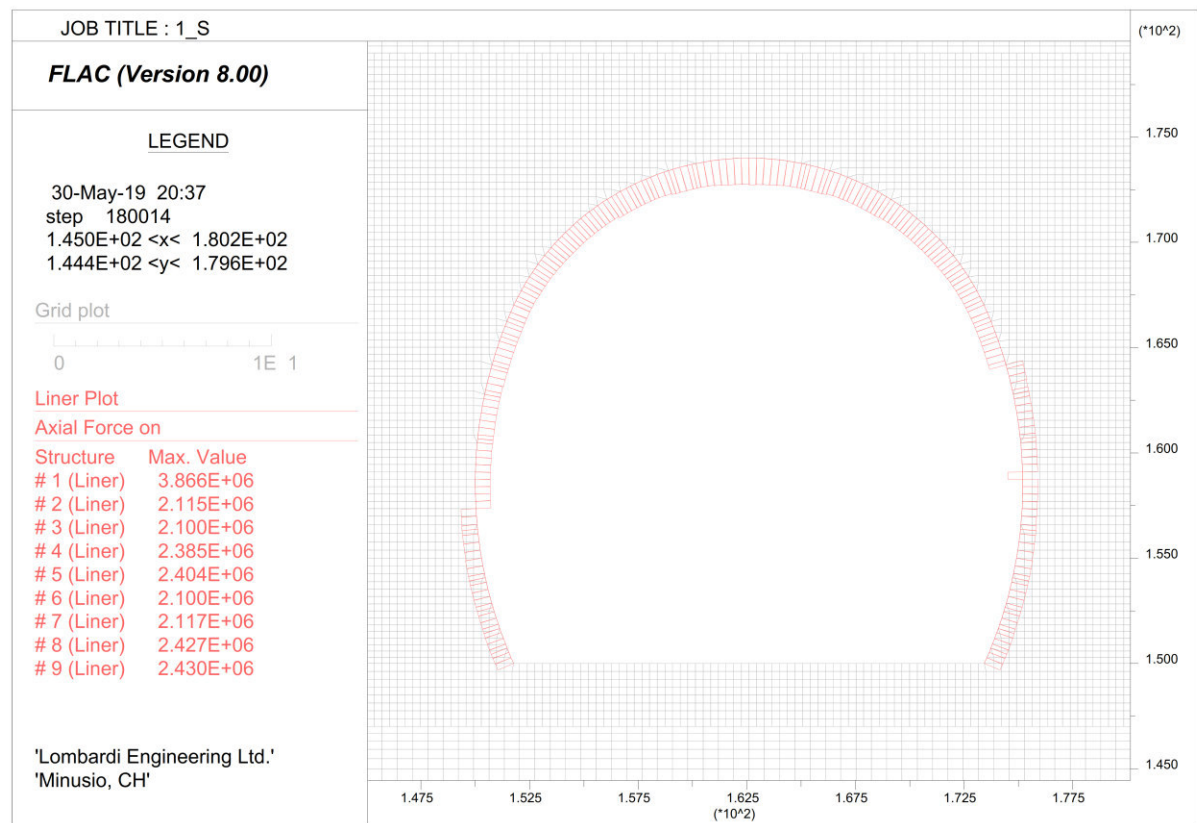
FINAL COMPUTATIONAL STEP DISPLACEMENTS



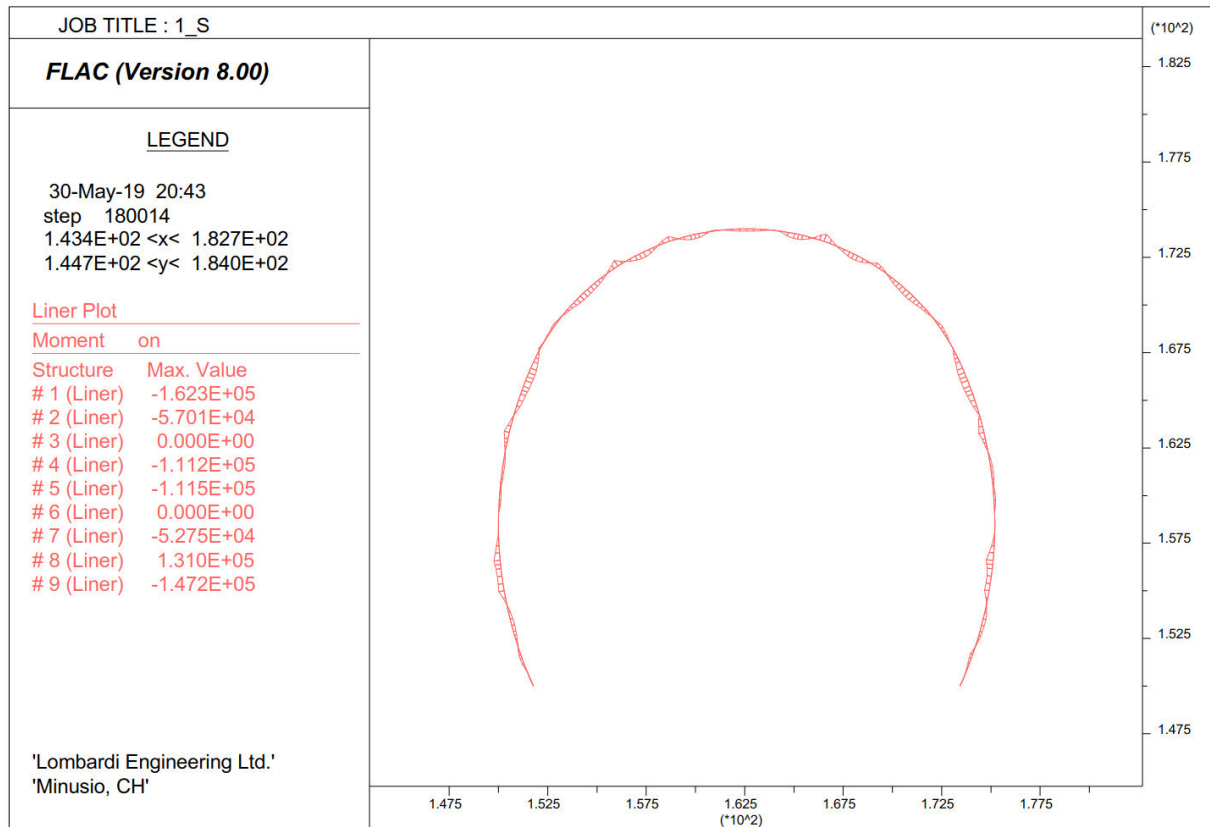
FINAL COMPUTATIONAL STEP PLASTIC ZONE



FINAL COMPUTATIONAL STEP AXIAL FORCE

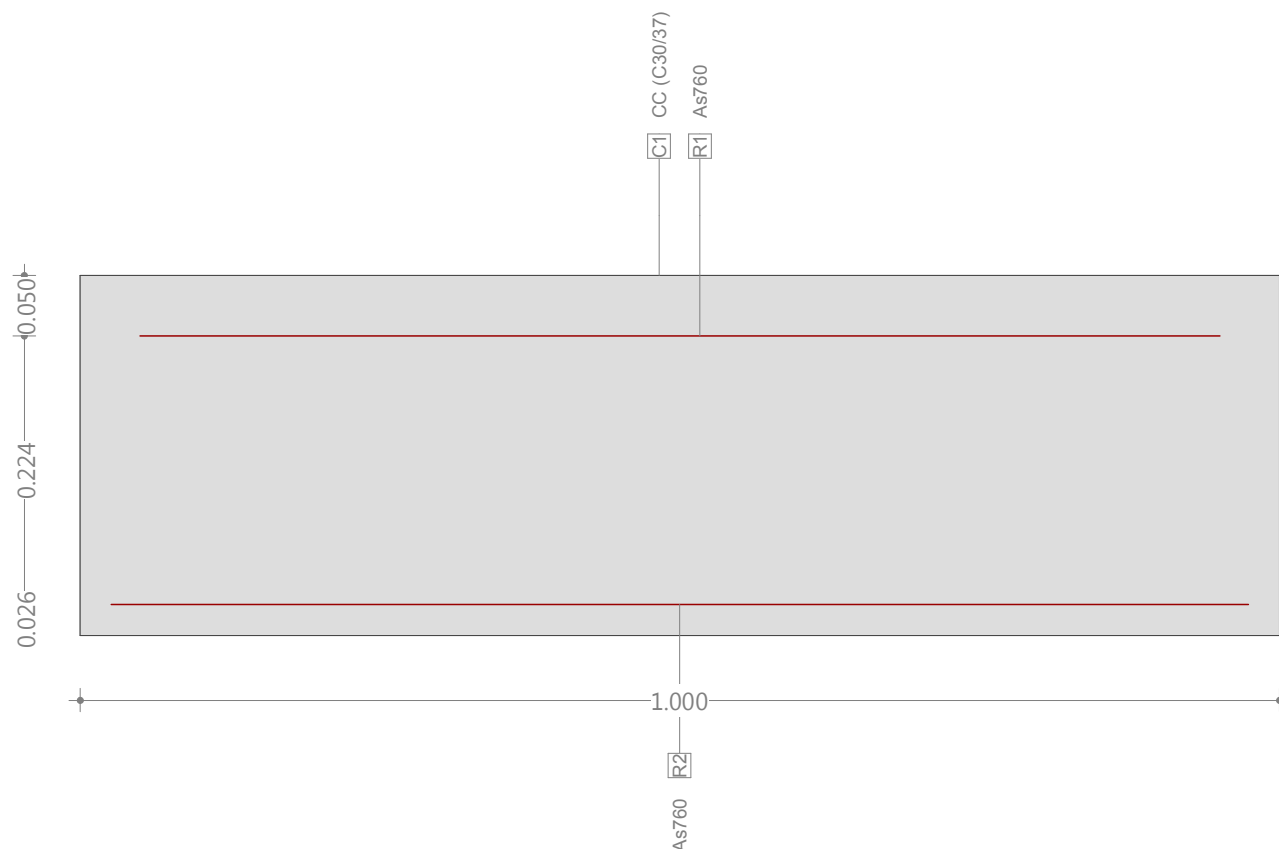


FINAL COMPUTATIONAL STEP BENDING MOMENT



Cross-section QS (C30/37;B500B): Outline, Reinforcements

Scale 1 : 6.3

**Cross section (column): QS****Geometrical definition of cross section**

Name	Material	Class	Type	No.	y_q [m]	z_q [m]	No.	y_q [m]	z_q [m]
C1	CC	C30/37	Polygon	1	0	0	2	1.000	0
				3	1.000	0.300	4	0	0.300

Section properties: (reinforcement not considered, reference material: CC)

	Area [m ²]		Moment of inertia [m ⁴]		C.G., Angle [m]				Mass [kg/m]
A_x	0.3000	I_x	0.007300	y_s	0.500			M_{CS}	750.0
A_y	(=A_x)	I_y	0.002250	z_s	0.150				
A_z	(=A_x)	I_z	0.025000	β	0 [°]				

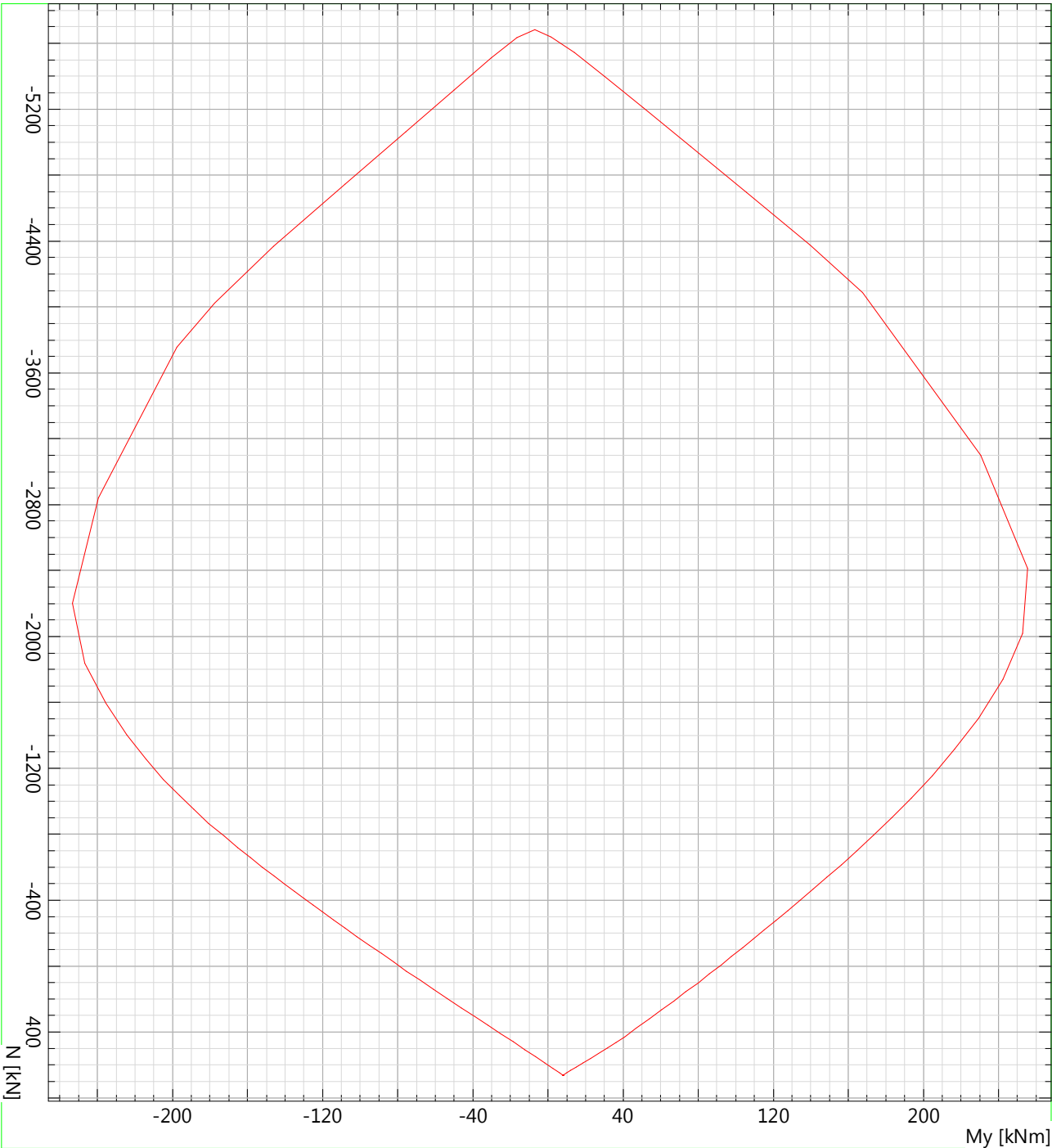
Cross section (column): QS**Mild reinforcement G0** $\Sigma A_s = 1520 \text{ mm}^2$, $\rho = 0.506667 \%$

Name	Material	Class	BC	Type	y_{1q} [m]	z_{1q} [m]	y_{2q} [m]	z_{2q} [m]	n, ∅	exist A_s [mm ²]
R1	R	B500B	1	L	0.050	0.250	0.950	0.250		760
R2				L	0.026	0.026	0.974	0.026		760

BC : BC: 0=constant area, 1=adapt always, 2=adapt area in tension zone

Type : Definition of reinforcement: P = Point, L= Line, R = Ring

M-N-Interaction diagram Cross section (column): QS
!ULS / Reinforcement percentage: $\rho = 0.506667$ o/o



Ultimate strength analysis Cross section (column): QS**Action forces / Efficiency: $\text{eff}(M,N) = 0.91$ OK**

No.	AP	P	Bending and axial force				Shear forces and torsion				Complete CS $\text{eff}(M,N,V,T)$ [-]
			N [kN]	M_y [kNm]	M_z [kNm]	$\text{eff}(M,N)$ [-]	V_y [kN]	V_z [kN]	T [kNm]	$\text{eff}(V,T)$ [-]	
1	!ULS		-3380.4	-1.19E+2	-	0.78	-	-86.6	-	0.00	
2	!ULS		-2859.3	1.987E+2	-	0.89	-	191.4	-	0.00	
3	!ULS		-3314.3	-1.87E+2	-	0.91	-	-21.9	-	0.00	
4	!ULS		-2867.4	-1.77E+2	-	0.83	-	-155.4	-	0.00	
5	!ULS		-2859.3	1.987E+2	-	0.89	-	191.4	-	0.00	
6	!ULS		-3314.3	-1.87E+2	-	0.91	-	-21.9	-	0.00	
7	!ULS		-3245.4	56.80000	-	0.66	-	239.5	-	0.00	

- : Calculation with uniaxial bending (neutral axis is horizontal)!!

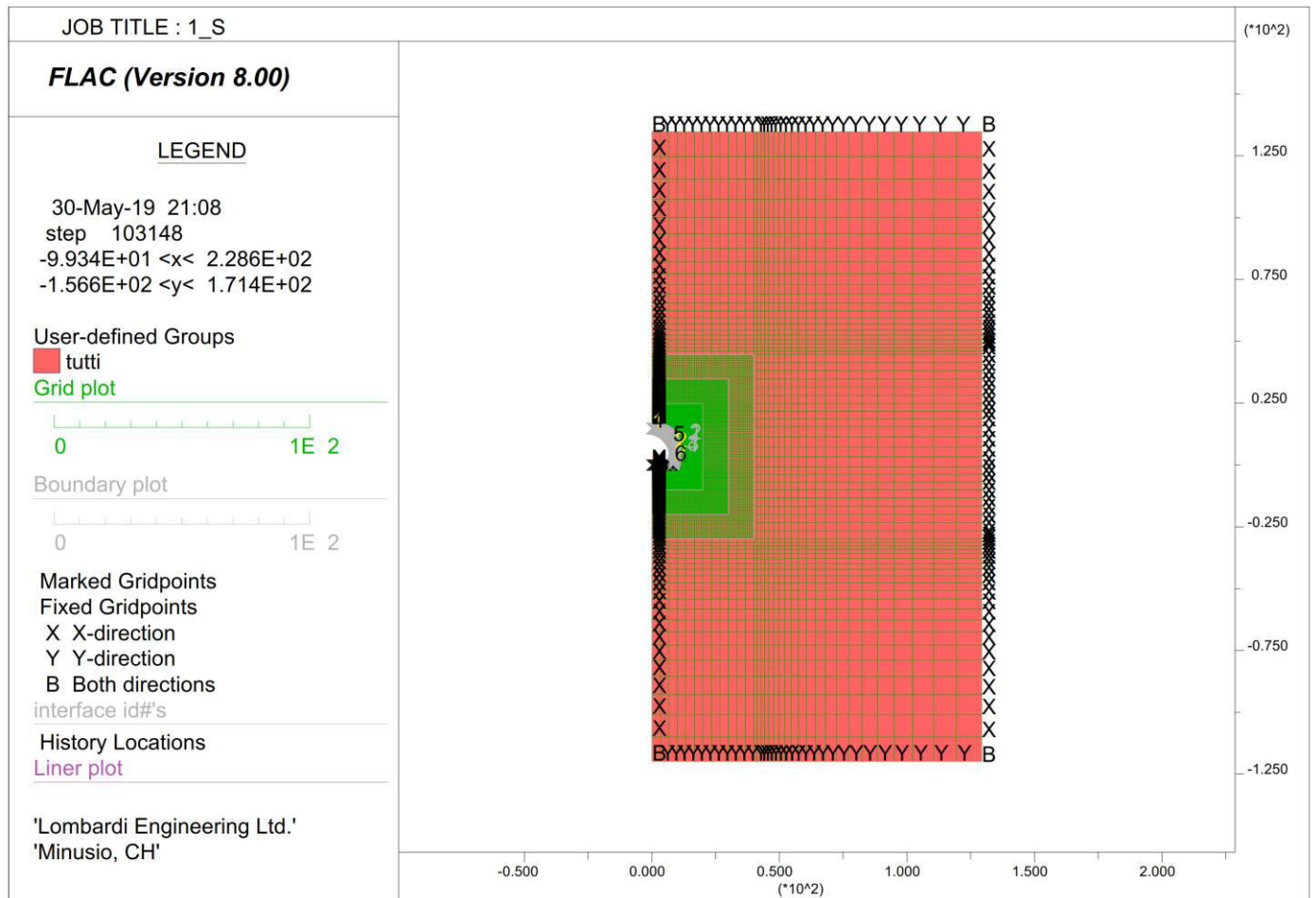
Analysis-Parameters "ULS" Standard: Eurocode EN

ID	Diagram σ - ϵ			Strain Limits			σ_s [N/mm ²]	Partial safety factor				Various parameters			
	C	S		ϵ_{c2} [‰]	ϵ_{cu3} [‰]	ϵ_{ud} [‰]		α_{cc} [-]	γ_c [-]	γ_s [-]		θ [-]	ϕ [-]		
!ULS	2/0	1		-2.000	-3.500	2.000E		0.85	1.50	1.15		45.00	0		

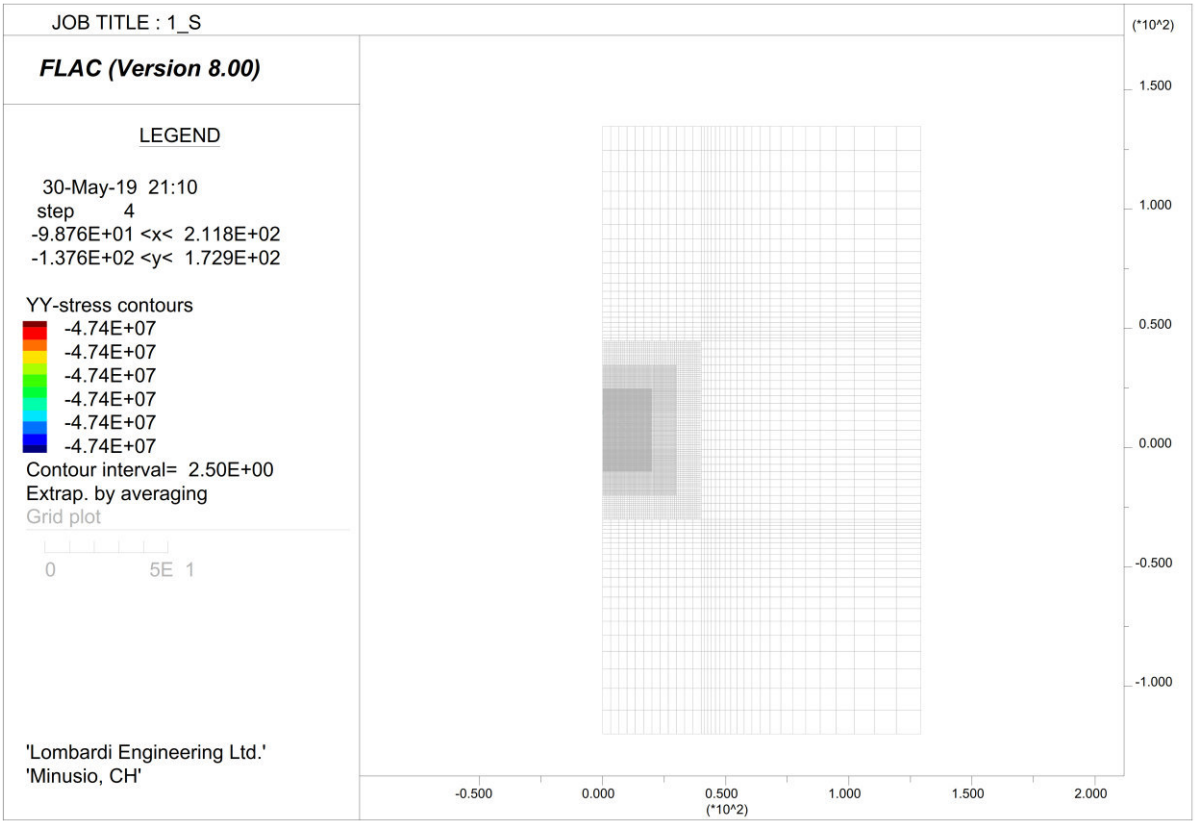
 θ : Inclination of diagonal in compression ϕ : Creep coefficient

Anexo I

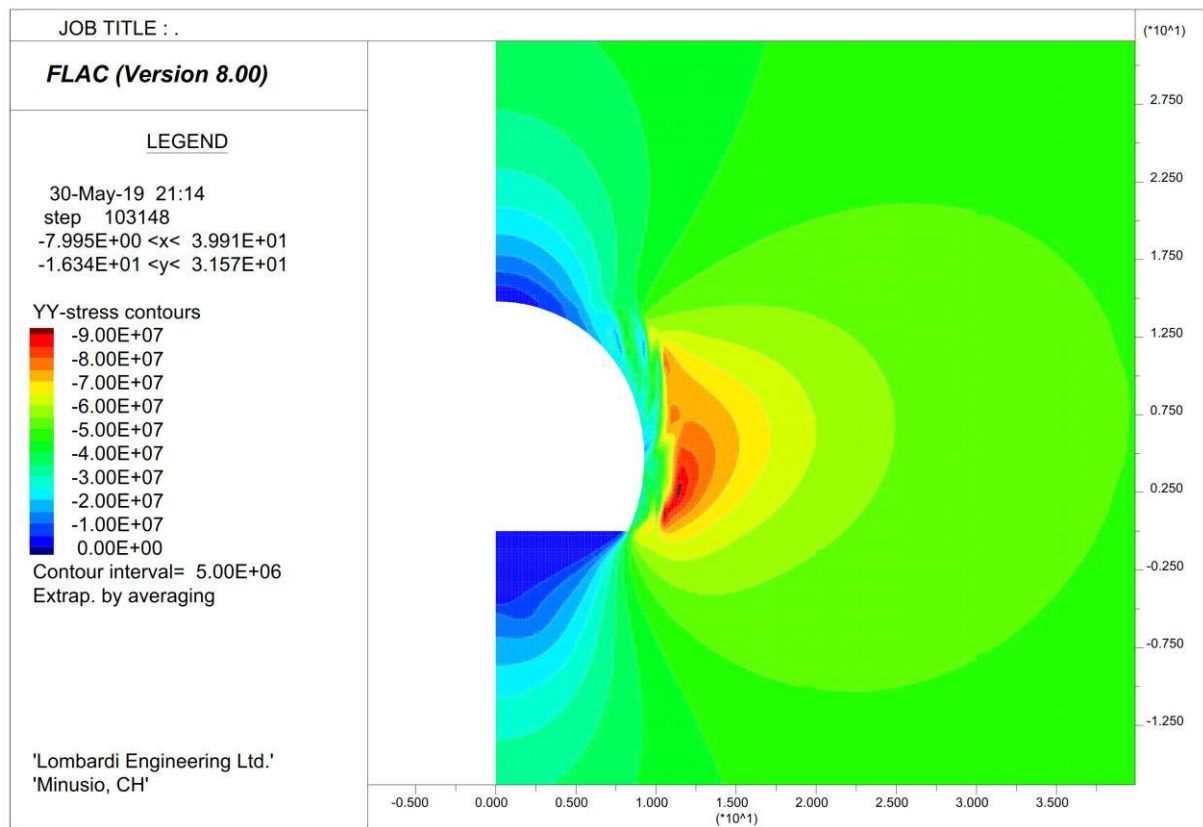
GEOMETRY OF THE MODEL



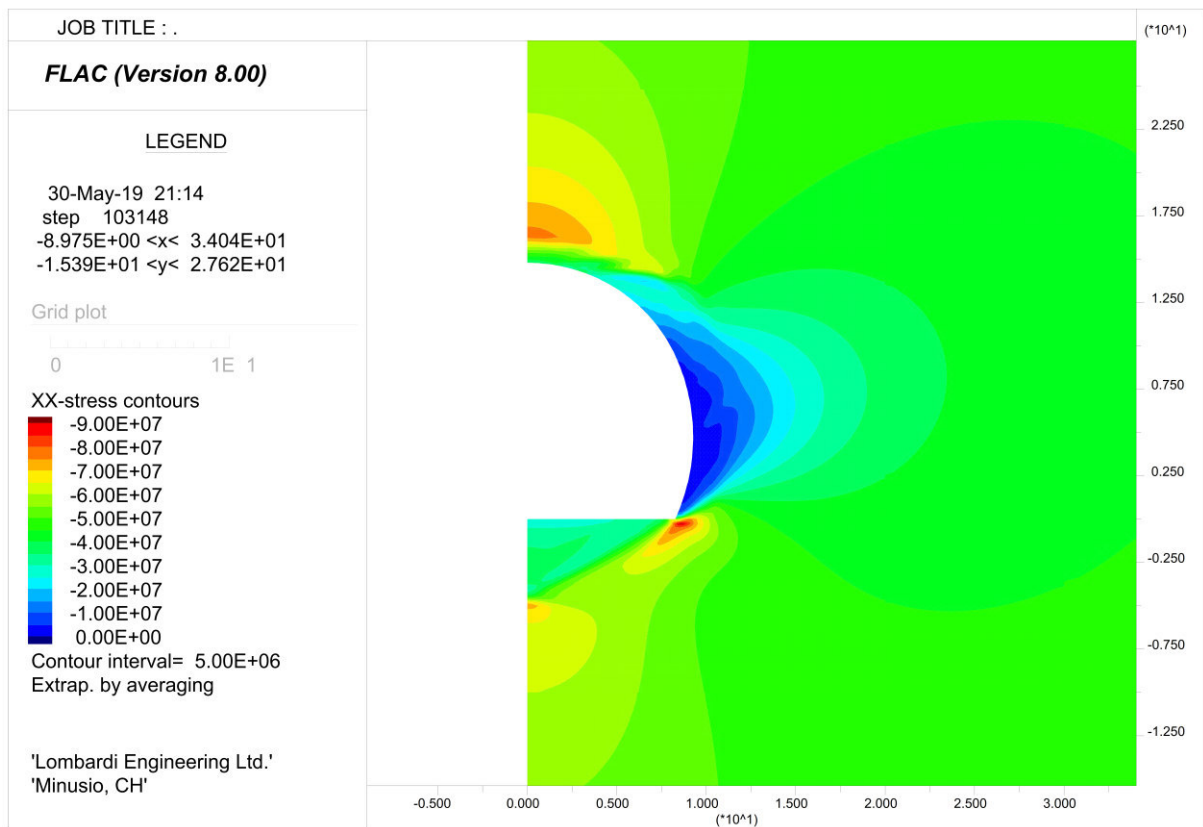
INITIAL VERTICAL STRESS



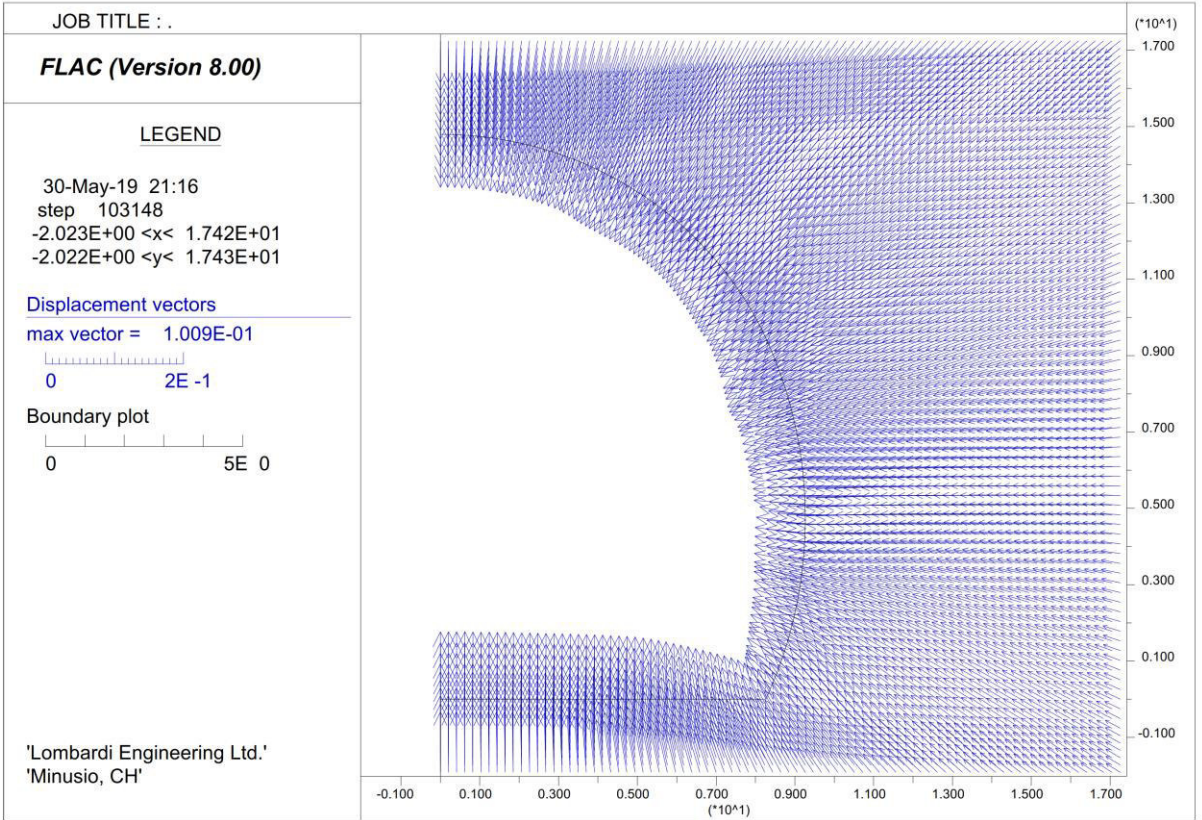
FINAL COMPUTATIONAL STEP : VERTICAL STRESS



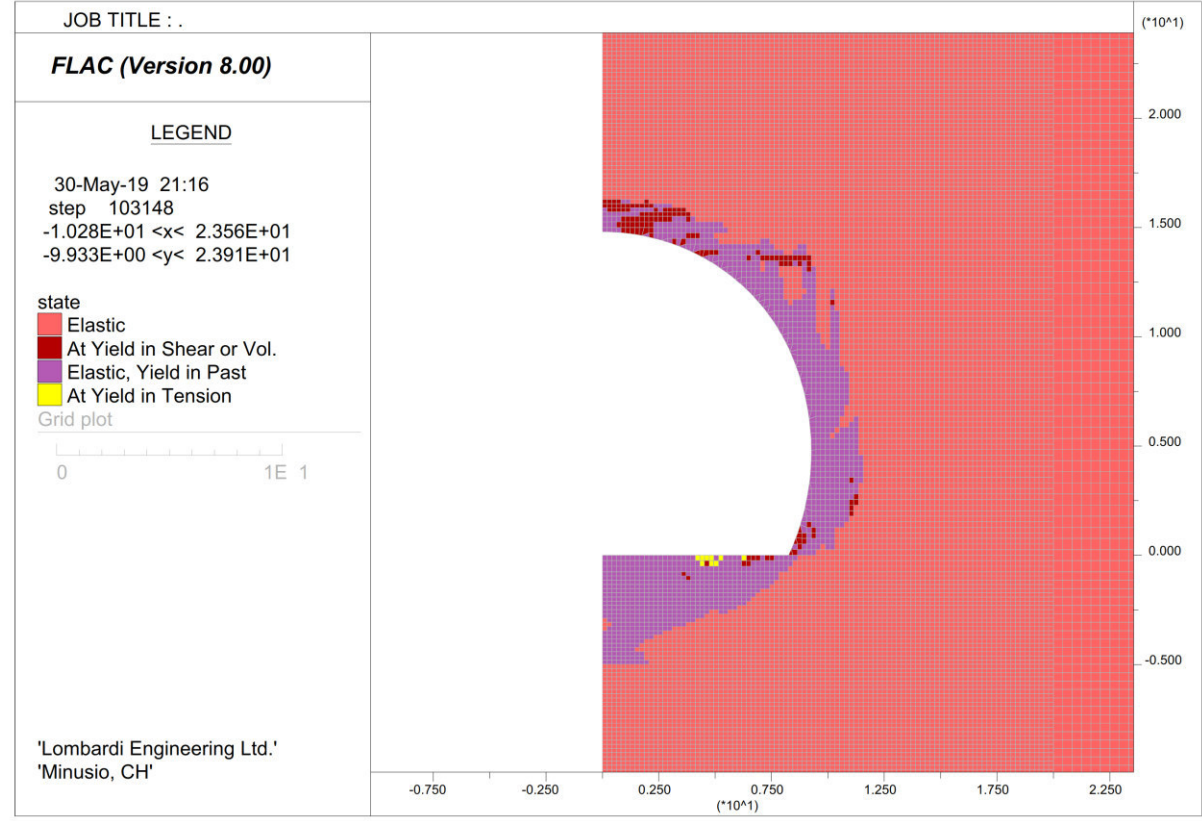
FINAL COMPUTATIONAL STEP : HORIZONTAL STRESS



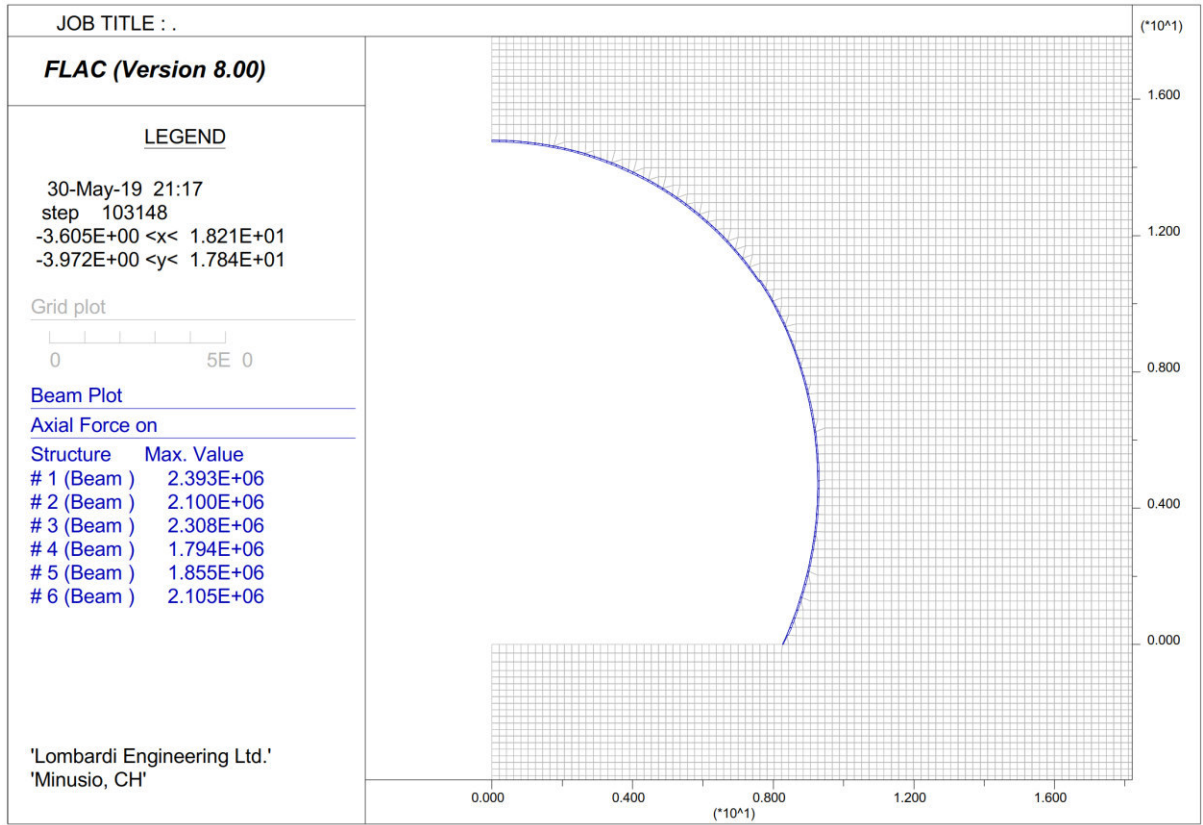
FINAL COMPUTATIONAL STEP DISPLACEMENTS



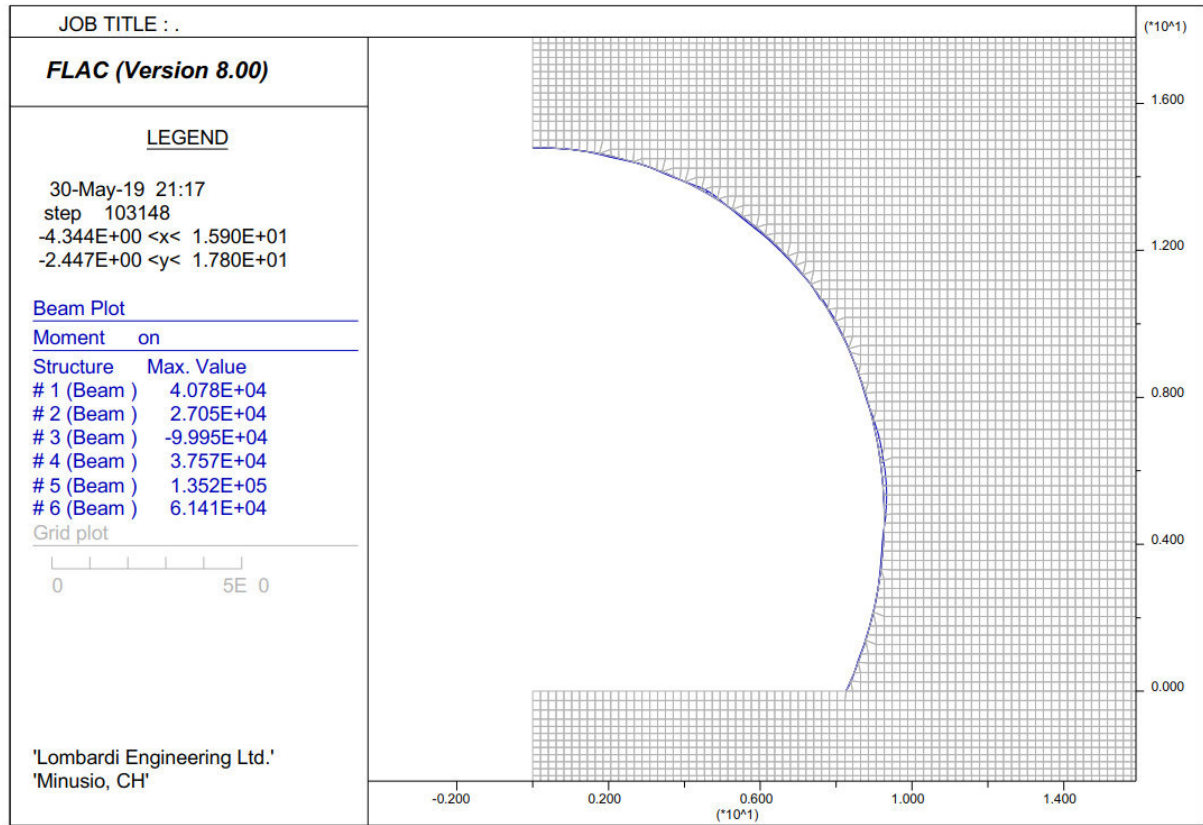
FINAL COMPUTATIONAL STEP PLASTIC ZONE



FINAL COMPUTATIONAL STEP AXIAL FORCE

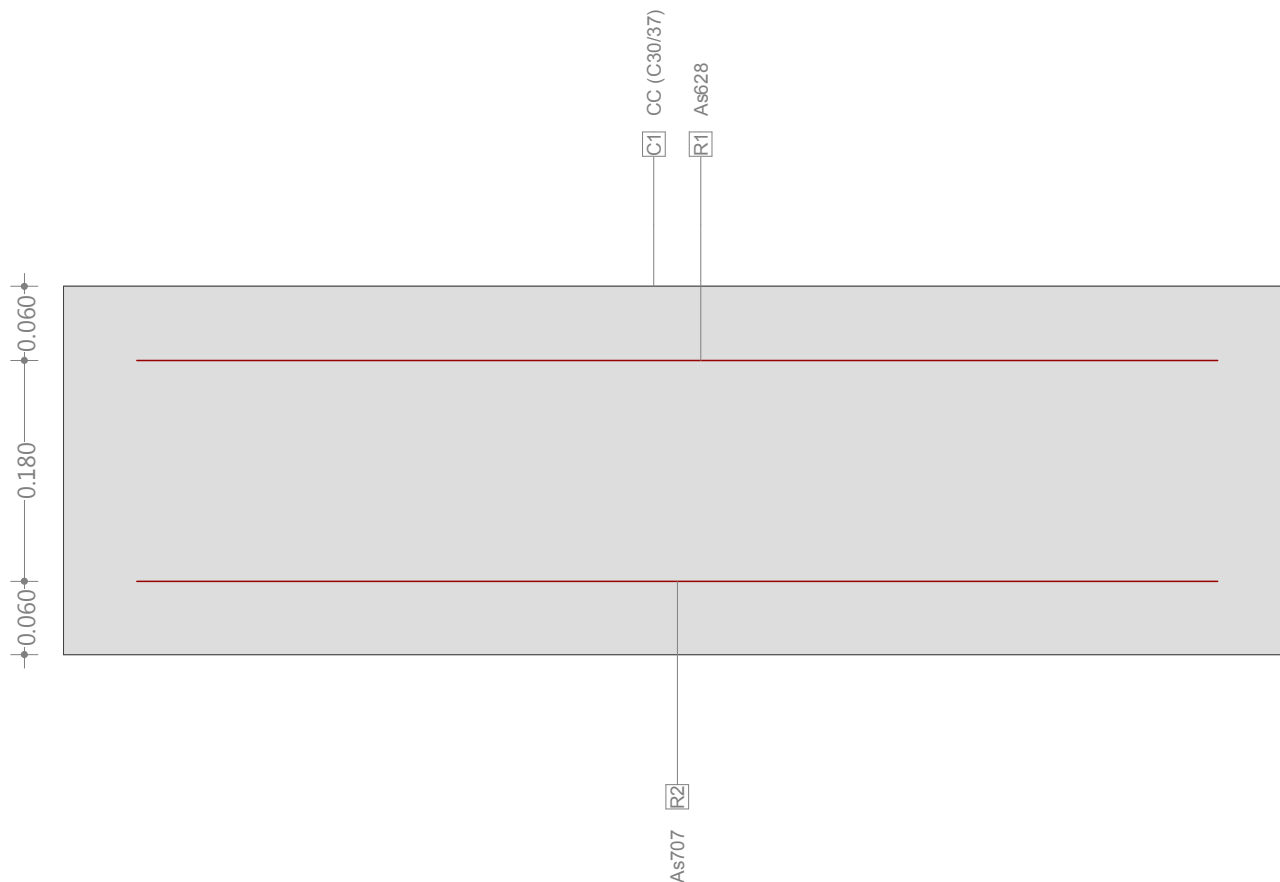


FINAL COMPUTATIONAL STEP BENDING MOMENT



Cross-section QS (C30/37;B500B): Outline, Reinforcements

Scale 1 : 6.2



Cross section (column): QS

Geometrical definition of cross section

Name	Material	Class	Type	No.	y_q [m]	z_q [m]	No.	y_q [m]	z_q [m]
C1	CC	C30/37	Polygon	1	0	0	2	1.000	0
				3	1.000	0.300	4	0	0.300

Section properties: (reinforcement not considered, reference material: CC)

	Area [m ²]		Moment of inertia [m ⁴]		C.G., Angle [m]				Mass [kg/m]
A_x	0.3000	I_x	0.007300	y_s	0.500			M_{CS}	750.0
A_y	(=A _x)	I_y	0.002250	z_s	0.150				
A_z	(=A _x)	I_z	0.025000	β	0 [°]				

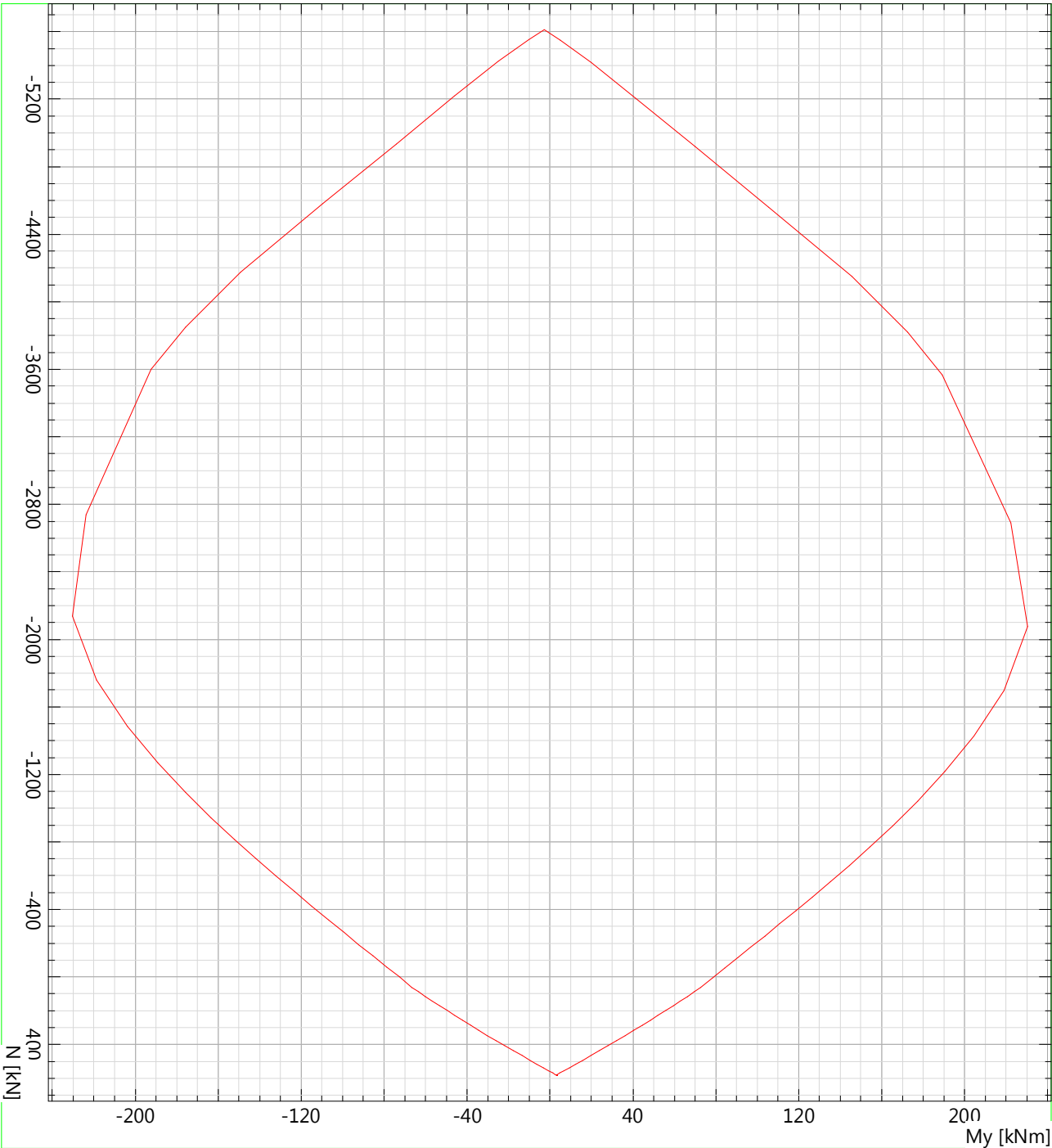
Cross section (column): QS

Mild reinforcement G0 $\Sigma A_s = 1335 \text{ mm}^2$, $\rho = 0.445067 \%$

Name	Material	Class	BC	Type	y_{1q} [m]	z_{1q} [m]	y_{2q} [m]	z_{2q} [m]	n, Ø	exist A_s [mm ²]
R1	R	B500B	1	L	0.060	0.240	0.940	0.240		628
R2				L	0.060	0.060	0.940	0.060		707

BC : BC: 0=constant area, 1=adapt always, 2=adapt area in tension zone
 Type : Definition of reinforcement: P = Point, L= Line, R = Ring

M-N-Interaction diagram Cross section (column): QS
!ULS / Reinforcement percentage: $\rho = 0.445067$ o/o



Ultimate strength analysis Cross section (column): QS

Action forces / Efficiency: $\text{eff}(M,N) = 0.83$ OK

No.	AP	P	Bending and axial force			$\text{eff}(M,N)$ [-]	Shear forces and torsion			$\text{eff}(V,T)$ [-]	Complete CS $\text{eff}(M,N,V,T)$ [-]
			N [kN]	M_y [kNm]	M_z [kNm]		V_y [kN]	V_z [kN]	T [kNm]		
1	!ULS		-3230.6	-3.02E+1	-	0.62	-	3.4	-	0.00	
2	!ULS		-3101.0	1.349E+2	-	0.80	-	320.4	-	0.00	
3	!ULS		-2463.8	-1.83E+2	-	0.83	-	-10.5	-	0.00	
4	!ULS		-2463.8	-1.83E+2	-	0.83	-	-10.5	-	0.00	
5	!ULS		-3101.0	1.349E+2	-	0.80	-	320.4	-	0.00	
6	!ULS		-3101.0	1.349E+2	-	0.80	-	320.4	-	0.00	
7	!ULS		-2463.8	-1.83E+2	-	0.83	-	-10.5	-	0.00	
8	!ULS		-3101.0	1.349E+2	-	0.80	-	320.4	-	0.00	

- : Calculation with uniaxial bending (neutral axis is horizontal)!!

Analysis-Parameters "ULS" Standard: Eurocode EN

ID	Diagram σ - ϵ			Strain Limits			σ_s [N/mm ²]	Partial safety factor				Various parameters			
	c	s		ϵ_{c2} [‰]	ϵ_{cu3} [‰]	ϵ_{ud} [‰]		α_{cc} [-]	γ_c [-]	γ_s [-]		θ [-]	ϕ [-]		
!ULS	2/0	1		-2.000	-3.500	2.000E		0.85	1.50	1.15		45.00	0		

θ : Inclination of diagonal in compression
 ϕ : Creep coefficient

Anexo J

Input data - properties of rock mass and lining, ground motion parameters

Properties of rock mass/soil

E_G	[MPa]	17000	Young's modulus of ground
G_G	[MPa]	6855	shear modulus of ground
ν_G	[-]	0.24	coefficient of Poisson
V_S	[m/s]	1578	propagation velocity of shear waves
γ_G	[kN/m ³]	27	unit weight of ground

Coefficients of interface ground/lining

C	[-]	72.205	compressibility ratio
F	[m ⁻¹]	137510.262	flexibility ratio
C*	[-]	44.022	compressibility ratio
F*	[m ⁻¹]	1085607.331	flexibility ratio

Properties of the lining

E_L	[MPa]	15000	Young's modulus of lining
G_L	[MPa]	6250	shear modulus of lining
ν_L	[-]	0.2	coefficient of Poisson
I	[m ⁴]	0.00225	moment of inertia of lining cross-section
I_T	[m ⁴]	1'925	moment of inertia of tunnel cross-section
D/2	[m]	12.8377	external radius of lining
t	[m]	0.300	thickness of lining
A	[m ²]	23.9	area of lining
γ_{red}	[-]	1.0	reduction factor stiffness of cracked x-section
I_{crack}	[m ⁴]	0.00225	cracked moment of inertia of lining cross-section
$I_{T,crack}$	[m ⁴]	1'925	cracked moment of inertia of tunnel cross-section

Parameters of ground motion

a_{gd}	[g]	0.490	PGA (Peak Ground Acceleration)
R_a	[-]	0.7	reduction factor PGA with depth
	[-]	152.0	PGV/PGA ratio
PGV	[m/s]	0.521	PGV (Peak Ground Velocity)
g	[m/s ²]	9.81	gravity
M	[-]	6.5	magnitude
D_{epi}	[km]	50-100	distance from epicenter
$\gamma_{s,max}$	[-]	0.00033	max. shear distortion

Ovalization of cross-section due to S-waves

WANG 1993 "Seismic Design of Tunnels: A State-of-the-Art Approach"

Full-slip condition

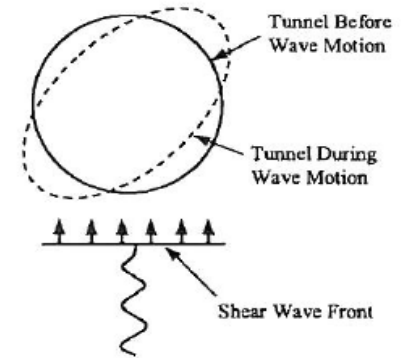
K	[-]	5.52679E-06	full-slip coefficient
---	-----	-------------	-----------------------

θ	[°]	0	15	30	45	60	75	90
N_{max}	[kN/m]	0.0	0.2	0.3	0.3	0.3	0.2	0.0
M_{max}	[kN/m]	0.0	2.1	3.6	4.1	3.6	2.1	0.0
V_{max}	[kN/m]	0.6	0.6	0.3	0.0	-0.3	-0.6	-0.6

No-slip condition

a_2	[-]	-0.924
a_3	[-]	0.962
a_0	[-]	5509670.035

θ	[°]	0	15	30	45	60	75	90
N_{max}	[kN/m]	0.0	1103.1	1910.6	2206.1	1910.6	1103.1	0.0
M_{max}	[kN/m]	0.0	1.9	3.2	3.7	3.2	1.9	0.0



PENZIEN, WU 1998 "Stresses in linings of bored tunnels"

Full-slip condition

K	[-]	0.00001	full-slip coefficient
---	-----	---------	-----------------------

θ	[°]	0	15	30	45	60	75	90
N_{max}	[kN/m]	0.0	0.2	0.3	0.3	0.3	0.2	0.0
M_{max}	[kN/m]	0.0	2.1	3.6	4.1	3.6	2.1	0.0
V_{max}	[kN/m]	0.6	0.6	0.3	0.0	-0.3	-0.6	-0.6

No-slip condition

K'	[-]	0.00001	no-slip coefficient
----	-----	---------	---------------------

θ	[°]	0	15	30	45	60	75	90
N_{max}	[kN/m]	0.0	0.3	0.6	0.6	0.6	0.3	0.0
M_{max}	[kN/m]	0.0	2.1	3.6	4.1	3.6	2.1	0.0
V_{max}	[kN/m]	0.6	0.6	0.3	0.0	-0.3	-0.6	-0.6

Tunnel depth (m)	Ratio of ground motion at tunnel depth to motion at ground surface
≤ 6	1.0
6–15	0.9
15–30	0.8
> 30	0.7

PENZIEN 2000 "Seismically induced racking of tunnel linings"

Full-slip condition

R	[-]	3.040	
α	[-]	0.00001	<i>full-slip coefficient</i>

θ	[°]	0	15	30	45	60	75	90
N_{max}	[kN/m]	0.0	0.2	0.3	0.3	0.3	0.2	0.0
M_{max}	[kN/m]	0.0	2.1	3.6	4.1	3.6	2.1	0.0
V_{max}	[kN/m]	0.6	0.6	0.3	0.0	-0.3	-0.6	-0.6

No-slip condition

R	[-]	3.040	
α	[-]	0.00001	<i>full-slip coefficient</i>

θ	[°]	0	15	30	45	60	75	90
N_{max}	[kN/m]	0.0	0.3	0.6	0.6	0.6	0.3	0.0
M_{max}	[kN/m]	0.0	2.1	3.6	4.1	3.6	2.1	0.0
V_{max}	[kN/m]	0.6	0.6	0.3	0.0	-0.3	-0.6	-0.6

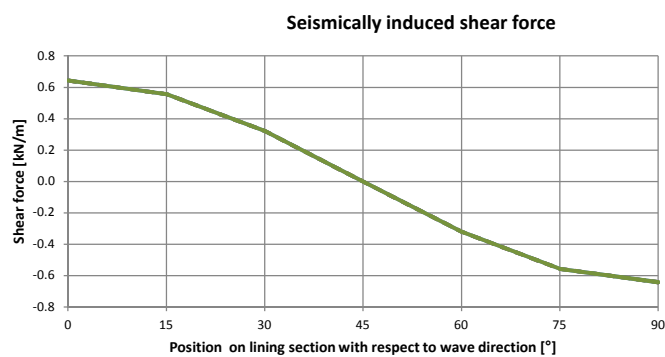
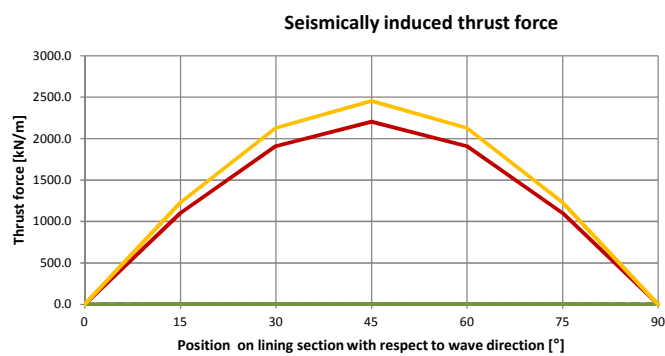
Moment magnitude (M_w)	Ratio of peak ground velocity (cm/s) to peak ground acceleration (g)		
	Source-to-site distance (km)		
	0–20	20–50	50–100
Rock ^a			
6.5	66	76	86
7.5	97	109	97
8.5	127	140	152
Stiff soil ^b			
6.5	94	102	109
7.5	140	127	155
8.5	180	188	193
Soft soil ^b			
6.5	140	132	142
7.5	208	165	201
8.5	269	244	251

BOBET 2003 "Effect of pore water pressure on tunnel support during static and seismic loading"

No-slip condition

C_2	[-]	-1.915
C_3	[-]	0.915
τ	[-]	2264.6

θ	[°]	0	15	30	45	60	75	90
N_{max}	[kN/m]	0.0	1228.4	2127.7	2456.8	2127.7	1228.4	0.0
M_{max}	[kN/m]	0.0	2.0	3.5	4.1	3.5	2.0	0.0



Summary of seismically induced forces due to ovalization

		N_{max} [kN/m]	M_{max} [kNm/m]	V_{max} [kN/m]
WANG 1993	full-slip	0.3	4.1	0.6
WANG 1993	no-slip	2206.1	3.7	-
PENZIEN/WU 1998	full-slip	0.3	4.1	0.6
PENZIEN/WU 1998	no-slip	0.6	4.1	0.6
PENZIEN 2000	full-slip	0.3	4.1	0.6
PENZIEN 2000	no-slip	0.6	4.1	0.6
BOBET 2003	no-slip	2456.8	4.1	-

Input data - properties of rock mass and lining, ground motion parameters

Properties of rock mass/soil

E_G	[MPa]	8800	Young's modulus of ground
G_G	[MPa]	3548	shear modulus of ground
ν_G	[-]	0.24	coefficient of Poisson
V_S	[m/s]	1135	propagation velocity of shear waves
γ_G	[kN/m ³]	27	unit weight of ground

Coefficients of interface ground/lining

C	[-]	37.377	compressibility ratio
F	[m ⁻¹]	71181.783	flexibility ratio
C*	[-]	22.788	compressibility ratio
F*	[m ⁻¹]	561961.442	flexibility ratio

Properties of the lining

E_L	[MPa]	15000	Young's modulus of lining
G_L	[MPa]	6250	shear modulus of lining
ν_L	[-]	0.2	coefficient of Poisson
I	[m ⁴]	0.00225	moment of inertia of lining cross-section
I_T	[m ⁴]	1'925	moment of inertia of tunnel cross-section
D/2	[m]	12.8377	external radius of lining
t	[m]	0.300	thickness of lining
A	[m ²]	23.9	area of lining
γ_{red}	[-]	1.0	reduction factor stiffness of cracked x-section
I_{crack}	[m ⁴]	0.00225	cracked moment of inertia of lining cross-section
$I_{T,crack}$	[m ⁴]	1'925	cracked moment of inertia of tunnel cross-section

Parameters of ground motion

a_{gd}	[g]	0.490	PGA (Peak Ground Acceleration)
R_a	[-]	0.7	reduction factor PGA with depth
	[-]	152.0	PGV/PGA ratio
PGV	[m/s]	0.521	PGV (Peak Ground Velocity)
g	[m/s ²]	9.81	gravity
M	[-]	6.5	magnitude
D_{epi}	[km]	50-100	distance from epicenter
$\gamma_{s,max}$	[-]	0.00046	max. shear distortion

Ovalization of cross-section due to S-waves

WANG 1993 "Seismic Design of Tunnels: A State-of-the-Art Approach"

Full-slip condition

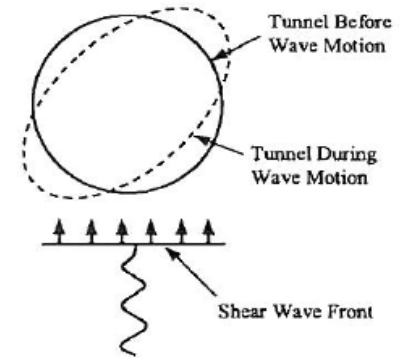
K	[-]	1.06766E-05	full-slip coefficient
---	-----	-------------	-----------------------

θ	[°]	0	15	30	45	60	75	90
N_{max}	[kN/m]	0.0	0.2	0.4	0.4	0.4	0.2	0.0
M_{max}	[kN/m]	0.0	2.9	5.0	5.7	5.0	2.9	0.0
V_{max}	[kN/m]	0.9	0.8	0.4	0.0	-0.4	-0.8	-0.9

No-slip condition

a_2	[-]	-0.862
a_3	[-]	0.931
a_0	[-]	1562906.019

θ	[°]	0	15	30	45	60	75	90
N_{max}	[kN/m]	0.0	1448.3	2508.5	2896.5	2508.5	1448.3	0.0
M_{max}	[kN/m]	0.0	2.6	4.5	5.2	4.5	2.6	0.0



PENZIEN, WU 1998 "Stresses in linings of bored tunnels"

Full-slip condition

K	[-]	0.00001	full-slip coefficient
---	-----	---------	-----------------------

θ	[°]	0	15	30	45	60	75	90
N_{max}	[kN/m]	0.0	0.2	0.4	0.4	0.4	0.2	0.0
M_{max}	[kN/m]	0.0	2.9	5.0	5.7	5.0	2.9	0.0
V_{max}	[kN/m]	0.9	0.8	0.4	0.0	-0.4	-0.8	-0.9

No-slip condition

K'	[-]	0.00001	no-slip coefficient
----	-----	---------	---------------------

θ	[°]	0	15	30	45	60	75	90
N_{max}	[kN/m]	0.0	0.4	0.8	0.9	0.8	0.4	0.0
M_{max}	[kN/m]	0.0	2.9	5.0	5.7	5.0	2.9	0.0
V_{max}	[kN/m]	0.9	0.8	0.4	0.0	-0.4	-0.8	-0.9

Tunnel depth (m)	Ratio of ground motion at tunnel depth to motion at ground surface
≤ 6	1.0
6–15	0.9
15–30	0.8
> 30	0.7

PENZIEN 2000 "Seismically induced racking of tunnel linings"

Full-slip condition

R	[-]	3.040	
α	[-]	0.00003	full-slip coefficient

θ	[°]	0	15	30	45	60	75	90
N_{max}	[kN/m]	0.0	0.2	0.4	0.4	0.4	0.2	0.0
M_{max}	[kN/m]	0.0	2.9	5.0	5.7	5.0	2.9	0.0
V_{max}	[kN/m]	0.9	0.8	0.4	0.0	-0.4	-0.8	-0.9

No-slip condition

R	[-]	3.040	
α	[-]	0.00003	<i>full-slip coefficient</i>

θ	[°]	0	15	30	45	60	75	90
N_{max}	[kN/m]	0.0	0.4	0.8	0.9	0.8	0.4	0.0
M_{max}	[kN/m]	0.0	2.9	5.0	5.7	5.0	2.9	0.0
V_{max}	[kN/m]	0.9	0.8	0.4	0.0	-0.4	-0.8	-0.9

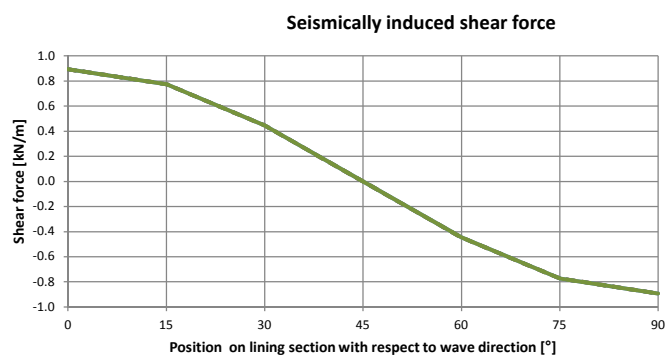
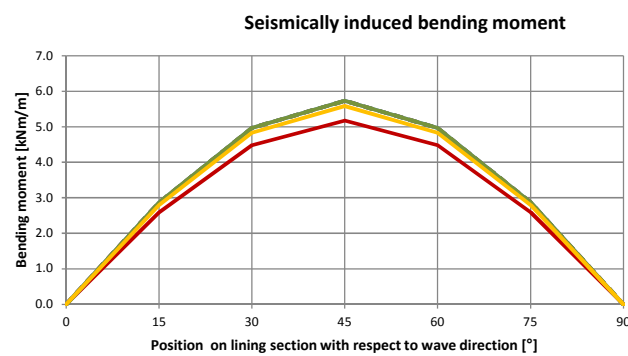
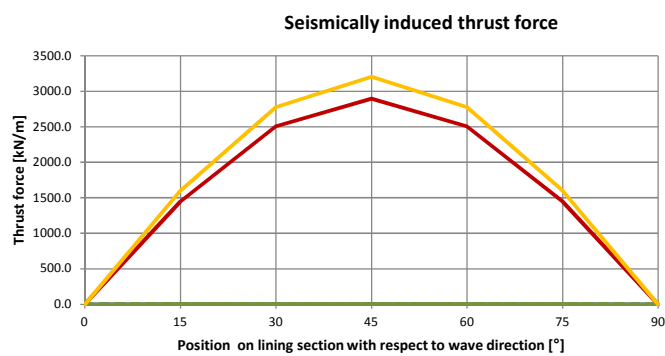
Moment magnitude (M_w)	Ratio of peak ground velocity (cm/s) to peak ground acceleration (g)		
	Source-to-site distance (km)		
	0–20	20–50	50–100
Rock ^a			
6.5	66	76	86
7.5	97	109	97
8.5	127	140	152
Stiff soil ^b			
6.5	94	102	109
7.5	140	127	155
8.5	180	188	193
Soft soil ^b			
6.5	140	132	142
7.5	208	165	201
8.5	269	244	251

BOBET 2003 "Effect of pore water pressure on tunnel support during static and seismic loading"

No-slip condition

C_2	[-]	-1.847
C_3	[-]	0.847
τ	[-]	1629.3

θ	[°]	0	15	30	45	60	75	90
N_{max}	[kN/m]	0.0	1602.8	2776.1	3205.5	2776.1	1602.8	0.0
M_{max}	[kN/m]	0.0	2.8	4.8	5.6	4.8	2.8	0.0



Summary of seismically induced forces due to ovalization

		N_{max} [kN/m]	M_{max} [kNm/m]	V_{max} [kN/m]
WANG 1993	full-slip	0.4	5.7	0.9
WANG 1993	no-slip	2896.5	5.2	-
PENZIEN/WU 1998	full-slip	0.4	5.7	0.9
PENZIEN/WU 1998	no-slip	0.9	5.7	0.9
PENZIEN 2000	full-slip	0.4	5.7	0.9
PENZIEN 2000	no-slip	0.9	5.7	0.9
BOBET 2003	no-slip	3205.5	5.6	-

Input data - properties of rock mass and lining, ground motion parameters

Properties of rock mass/soil

E_G	[MPa]	17000	Young's modulus of ground
G_G	[MPa]	6855	shear modulus of ground
ν_G	[-]	0.24	coefficient of Poisson
V_S	[m/s]	1578	propagation velocity of shear waves
γ_G	[kN/m ³]	27	unit weight of ground

Coefficients of interface ground/lining

C	[-]	58.079	compressibility ratio
F	[m ⁻¹]	71560.412	flexibility ratio
C*	[-]	35.409	compressibility ratio
F*	[m ⁻¹]	564950.621	flexibility ratio

Properties of the lining

E_L	[MPa]	15000	Young's modulus of lining
G_L	[MPa]	6250	shear modulus of lining
ν_L	[-]	0.2	coefficient of Poisson
I	[m ⁴]	0.001302	moment of inertia of lining cross-section
I_T	[m ⁴]	479	moment of inertia of tunnel cross-section
D/2	[m]	8.60502	external radius of lining
t	[m]	0.250	thickness of lining
A	[m ²]	13.3	area of lining
γ_{red}	[-]	1.0	reduction factor stiffness of cracked x-section
I_{crack}	[m ⁴]	0.001302	cracked moment of inertia of lining cross-section
$I_{T,crack}$	[m ⁴]	479	cracked moment of inertia of tunnel cross-section

Parameters of ground motion

a_{gd}	[g]	0.490	PGA (Peak Ground Acceleration)
R_a	[-]	0.7	reduction factor PGA with depth
	[-]	152.0	PGV/PGA ratio
PGV	[m/s]	0.521	PGV (Peak Ground Velocity)
g	[m/s ²]	9.81	gravity
M	[-]	6.5	magnitude
D_{epi}	[km]	50-100	distance from epicenter
$\gamma_{s,max}$	[-]	0.00033	max. shear distortion

Ovalization of cross-section due to S-waves

WANG 1993 "Seismic Design of Tunnels: A State-of-the-Art Approach"

Full-slip condition

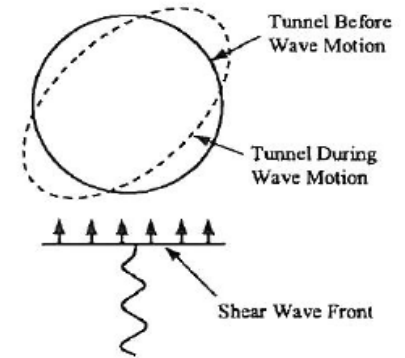
K	[-]	1.06201E-05	full-slip coefficient
---	-----	-------------	-----------------------

θ	[°]	0	15	30	45	60	75	90
N_{max}	[kN/m]	0.0	0.2	0.4	0.4	0.4	0.2	0.0
M_{max}	[kN/m]	0.0	1.8	3.1	3.6	3.1	1.8	0.0
V_{max}	[kN/m]	0.8	0.7	0.4	0.0	-0.4	-0.7	-0.8

No-slip condition

a_2	[-]	-0.907
a_3	[-]	0.954
a_0	[-]	2341574.941

θ	[°]	0	15	30	45	60	75	90
N_{max}	[kN/m]	0.0	905.4	1568.3	1810.9	1568.3	905.4	0.0
M_{max}	[kN/m]	0.0	1.6	2.8	3.2	2.8	1.6	0.0



PENZIEN, WU 1998 "Stresses in linings of bored tunnels"

Full-slip condition

K	[-]	0.00001	full-slip coefficient
---	-----	---------	-----------------------

θ	[°]	0	15	30	45	60	75	90
N_{max}	[kN/m]	0.0	0.2	0.4	0.4	0.4	0.2	0.0
M_{max}	[kN/m]	0.0	1.8	3.1	3.6	3.1	1.8	0.0
V_{max}	[kN/m]	0.8	0.7	0.4	0.0	-0.4	-0.7	-0.8

No-slip condition

K'	[-]	0.00001	no-slip coefficient
----	-----	---------	---------------------

θ	[°]	0	15	30	45	60	75	90
N_{max}	[kN/m]	0.0	0.4	0.7	0.8	0.7	0.4	0.0
M_{max}	[kN/m]	0.0	1.8	3.1	3.6	3.1	1.8	0.0
V_{max}	[kN/m]	0.8	0.7	0.4	0.0	-0.4	-0.7	-0.8

Tunnel depth (m)	Ratio of ground motion at tunnel depth to motion at ground surface
≤ 6	1.0
6–15	0.9
15–30	0.8
> 30	0.7

PENZIEN 2000 "Seismically induced racking of tunnel linings"

Full-slip condition

R	[-]	3.040	
α	[-]	0.00002	full-slip coefficient

θ	[°]	0	15	30	45	60	75	90
N_{max}	[kN/m]	0.0	0.2	0.4	0.4	0.4	0.2	0.0
M_{max}	[kN/m]	0.0	1.8	3.1	3.6	3.1	1.8	0.0
V_{max}	[kN/m]	0.8	0.7	0.4	0.0	-0.4	-0.7	-0.8

No-slip condition

R	[-]	3.040	
α	[-]	0.00003	<i>full-slip coefficient</i>

θ	[°]	0	15	30	45	60	75	90
N_{max}	[kN/m]	0.0	0.4	0.7	0.8	0.7	0.4	0.0
M_{max}	[kN/m]	0.0	1.8	3.1	3.6	3.1	1.8	0.0
V_{max}	[kN/m]	0.8	0.7	0.4	0.0	-0.4	-0.7	-0.8

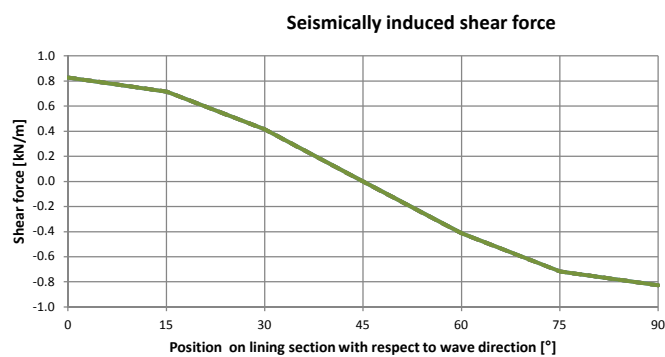
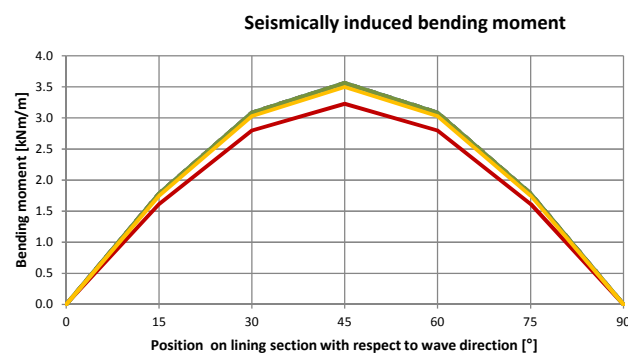
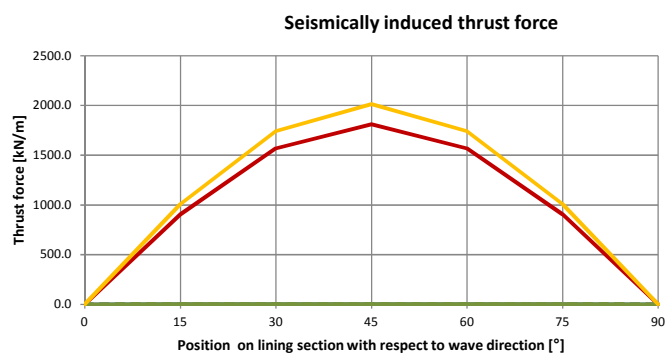
Moment magnitude (M_w)	Ratio of peak ground velocity (cm/s) to peak ground acceleration (g)		
	Source-to-site distance (km)		
	0–20	20–50	50–100
Rock^a			
6.5	66	76	86
7.5	97	109	97
8.5	127	140	152
Stiff soil^b			
6.5	94	102	109
7.5	140	127	155
8.5	180	188	193
Soft soil^b			
6.5	140	132	142
7.5	208	165	201
8.5	269	244	251

BOBET 2003 "Effect of pore water pressure on tunnel support during static and seismic loading"

No-slip condition

C_2	[-]	-1.897
C_3	[-]	0.897
τ	[-]	2264.6

θ	[°]	0	15	30	45	60	75	90
N_{max}	[kN/m]	0.0	1006.6	1743.5	2013.2	1743.5	1006.6	0.0
M_{max}	[kN/m]	0.0	1.7	3.0	3.5	3.0	1.7	0.0



Summary of seismically induced forces due to ovalization

		N_{max} [kN/m]	M_{max} [kNm/m]	V_{max} [kN/m]
WANG 1993	full-slip	0.4	3.6	0.8
WANG 1993	no-slip	1810.9	3.2	-
PENZIEN/WU 1998	full-slip	0.4	3.6	0.8
PENZIEN/WU 1998	no-slip	0.8	3.6	0.8
PENZIEN 2000	full-slip	0.4	3.6	0.8
PENZIEN 2000	no-slip	0.8	3.6	0.8
BOBET 2003	no-slip	2013.2	3.5	-

Input data - properties of rock mass and lining, ground motion parameters

Properties of rock mass/soil

E_G	[MPa]	8800	Young's modulus of ground
G_G	[MPa]	3548	shear modulus of ground
ν_G	[-]	0.24	coefficient of Poisson
V_S	[m/s]	1135	propagation velocity of shear waves
γ_G	[kN/m ³]	27	unit weight of ground

Coefficients of interface ground/lining

C	[-]	25.053	compressibility ratio
F	[m ⁻¹]	21436.943	flexibility ratio
C*	[-]	15.275	compressibility ratio
F*	[m ⁻¹]	169239.020	flexibility ratio

Properties of the lining

E_L	[MPa]	15000	Young's modulus of lining
G_L	[MPa]	6250	shear modulus of lining
ν_L	[-]	0.2	coefficient of Poisson
I	[m ⁴]	0.00225	moment of inertia of lining cross-section
I_T	[m ⁴]	570	moment of inertia of tunnel cross-section
D/2	[m]	8.60502	external radius of lining
t	[m]	0.300	thickness of lining
A	[m ²]	15.9	area of lining
γ_{red}	[-]	1.0	reduction factor stiffness of cracked x-section
I_{crack}	[m ⁴]	0.00225	cracked moment of inertia of lining cross-section
$I_{T,crack}$	[m ⁴]	570	cracked moment of inertia of tunnel cross-section

Parameters of ground motion

a_{gd}	[g]	0.490	PGA (Peak Ground Acceleration)
R_a	[-]	0.7	reduction factor PGA with depth
	[-]	152.0	PGV/PGA ratio
PGV	[m/s]	0.521	PGV (Peak Ground Velocity)
g	[m/s ²]	9.81	gravity
M	[-]	6.5	magnitude
D_{epi}	[km]	50-100	distance from epicenter
$\gamma_{s,max}$	[-]	0.00046	max. shear distorsion

Ovalization of cross-section due to S-waves

WANG 1993 "Seismic Design of Tunnels: A State-of-the-Art Approach"

Full-slip condition

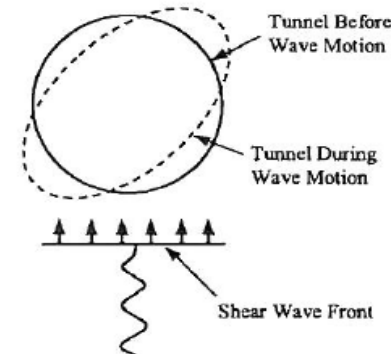
K	[-]	3.54499E-05	full-slip coefficient
---	-----	-------------	-----------------------

θ	[°]	0	15	30	45	60	75	90
N_{max}	[kN/m]	0.0	0.5	0.9	1.0	0.9	0.5	0.0
M_{max}	[kN/m]	0.0	4.3	7.4	8.6	7.4	4.3	0.0
V_{max}	[kN/m]	2.0	1.7	1.0	0.0	-1.0	-1.7	-2.0

No-slip condition

a_2	[-]	-0.804
a_3	[-]	0.902
a_0	[-]	333324.8917

θ	[°]	0	15	30	45	60	75	90
N_{max}	[kN/m]	0.0	1371.2	2374.9	2742.3	2374.9	1371.2	0.0
M_{max}	[kN/m]	0.0	3.8	6.7	7.7	6.7	3.8	0.0



PENZIEN, WU 1998 "Stresses in linings of bored tunnels"

Full-slip condition

K	[-]	0.00004	full-slip coefficient
---	-----	---------	-----------------------

θ	[°]	0	15	30	45	60	75	90
N_{max}	[kN/m]	0.0	0.5	0.9	1.0	0.9	0.5	0.0
M_{max}	[kN/m]	0.0	4.3	7.4	8.6	7.4	4.3	0.0
V_{max}	[kN/m]	2.0	1.7	1.0	0.0	-1.0	-1.7	-2.0

No-slip condition

K'	[-]	0.00004	no-slip coefficient
----	-----	---------	---------------------

θ	[°]	0	15	30	45	60	75	90
N_{max}	[kN/m]	0.0	1.0	1.7	2.0	1.7	1.0	0.0
M_{max}	[kN/m]	0.0	4.3	7.4	8.6	7.4	4.3	0.0
V_{max}	[kN/m]	2.0	1.7	1.0	0.0	-1.0	-1.7	-2.0

Tunnel depth (m)	Ratio of ground motion at tunnel depth to motion at ground surface
------------------	--

≤ 6	1.0
6–15	0.9
15–30	0.8
> 30	0.7

PENZIEN 2000 "Seismically induced racking of tunnel linings"

Full-slip condition

R	[-]	3.040	
α	[-]	0.00008	full-slip coefficient

θ	[°]	0	15	30	45	60	75	90
N_{max}	[kN/m]	0.0	0.5	0.9	1.0	0.9	0.5	0.0
M_{max}	[kN/m]	0.0	4.3	7.4	8.6	7.4	4.3	0.0
V_{max}	[kN/m]	2.0	1.7	1.0	0.0	-1.0	-1.7	-2.0

No-slip condition

R	[-]	3.040	
α	[-]	0.00010	full-slip coefficient

θ	[°]	0	15	30	45	60	75	90
N_{max}	[kN/m]	0.0	1.0	1.7	2.0	1.7	1.0	0.0
M_{max}	[kN/m]	0.0	4.3	7.4	8.6	7.4	4.3	0.0
V_{max}	[kN/m]	2.0	1.7	1.0	0.0	-1.0	-1.7	-2.0

Moment magnitude (M_w)	Ratio of peak ground velocity (cm/s) to peak ground acceleration (g)		
	Source-to-site distance (km)		
	0–20	20–50	50–100

Rock ^a			
6.5	66	76	86
7.5	97	109	97
8.5	127	140	152

Stiff soil ^b			
6.5	94	102	109
7.5	140	127	155
8.5	180	188	193

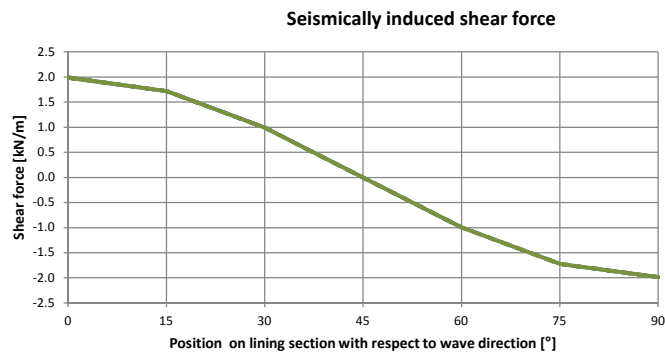
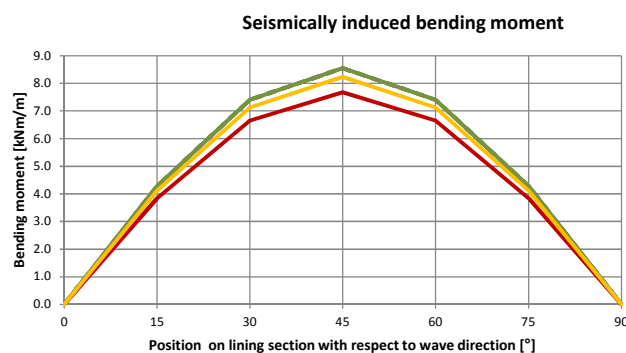
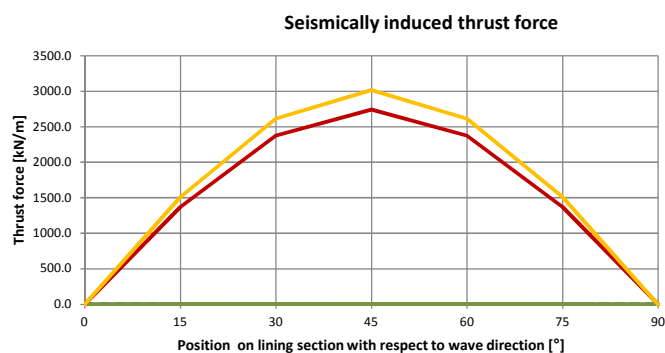
Soft soil ^b			
6.5	140	132	142
7.5	208	165	201
8.5	269	244	251

BOBET 2003 "Effect of pore water pressure on tunnel support during static and seismic loading"

No-slip condition

C_2	[-]	-1.785
C_3	[-]	0.785
τ	[-]	1629.3

θ	[°]	0	15	30	45	60	75	90
N_{max}	[kN/m]	0.0	1508.7	2613.2	3017.5	2613.2	1508.7	0.0
M_{max}	[kN/m]	0.0	4.1	7.1	8.2	7.1	4.1	0.0



Summary of seismically induced forces due to ovalization

		N_{max} [kN/m]	M_{max} [kNm/m]	V_{max} [kN/m]
WANG 1993	full-slip	1.0	8.6	2.0
WANG 1993	no-slip	2742.3	7.7	-
PENZIEN/WU 1998	full-slip	1.0	8.6	2.0
PENZIEN/WU 1998	no-slip	2.0	8.6	2.0
PENZIEN 2000	full-slip	1.0	8.6	2.0
PENZIEN 2000	no-slip	2.0	8.6	2.0
BOBET 2003	no-slip	3017.5	8.2	-

Input data - properties of rock mass and lining, ground motion parameters

Properties of rock mass/soil			
E_G	[MPa]	8800	Young's modulus of ground
G_G	[MPa]	3548	shear modulus of ground
ν_G	[-]	0.24	coefficient of Poisson
V_S	[m/s]	1135	propagation velocity of shear waves
γ_G	[kN/m³]	27	unit weight of ground
Coefficients of interface ground/lining			
C	[-]	16.596	compressibility ratio
F	[m ⁻¹]	6230.627	flexibility ratio
C*	[-]	10.118	compressibility ratio
F*	[m ⁻¹]	49189.161	flexibility ratio

Properties of the lining			
E_L	[MPa]	15000	Young's modulus of lining
G_L	[MPa]	6250	shear modulus of lining
ν_L	[-]	0.2	coefficient of Poisson
I	[m ⁴]	0.001302	moment of inertia of lining cross-section
I_T	[m ⁴]	78	moment of inertia of tunnel cross-section
D/2	[m]	4.75	external radius of lining
t	[m]	0.250	thickness of lining
A	[m²]	7.3	area of lining
γ_{red}	[-]	1.0	reduction factor stiffness of cracked x-section
I_{crack}	[m ⁴]	0.001302	cracked moment of inertia of lining cross-section
$I_{T,crack}$	[m ⁴]	78	cracked moment of inertia of tunnel cross-section

Parameters of ground motion			
a_{gd}	[g]	0.490	PGA (Peak Ground Acceleration)
R_a	[-]	0.7	reduction factor PGA with depth
	[-]	152.0	PGV/PGA ratio
PGV	[m/s]	0.521	PGV (Peak Ground Velocity)
g	[m/s²]	9.81	gravity
M	[-]	6.5	magnitude
D_{epi}	[km]	50-100	distance from epicenter
$\gamma_{s,max}$	[-]	0.00046	max. shear distorsion

Ovalization of cross-section due to S-waves

WANG 1993 "Seismic Design of Tunnels: A State-of-the-Art Approach"

Full-slip condition

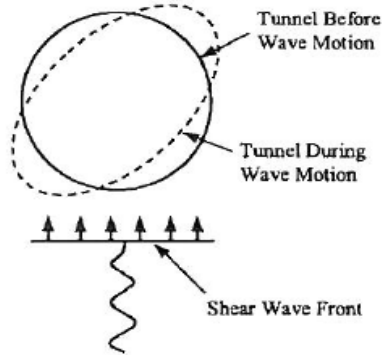
K	[-]	0.000121943	full-slip coefficient
---	-----	-------------	-----------------------

θ	[°]	0	15	30	45	60	75	90
N_{max}	[kN/m]	0.0	0.9	1.6	1.9	1.6	0.9	0.0
M_{max}	[kN/m]	0.0	4.5	7.8	9.0	7.8	4.5	0.0
V_{max}	[kN/m]	3.8	3.3	1.9	0.0	-1.9	-3.3	-3.8

No-slip condition

a_2	[-]	-0.727
a_3	[-]	0.863
a_0	[-]	69488.92308

θ	[°]	0	15	30	45	60	75	90
N_{max}	[kN/m]	0.0	1055.9	1829.0	2111.9	1829.0	1055.9	0.0
M_{max}	[kN/m]	0.0	4.0	6.9	8.0	6.9	4.0	0.0



PENZIEN, WU 1998 "Stresses in linings of bored tunnels"

Full-slip condition

K	[-]	0.00012	full-slip coefficient
---	-----	---------	-----------------------

θ	[°]	0	15	30	45	60	75	90
N_{max}	[kN/m]	0.0	0.9	1.6	1.9	1.6	0.9	0.0
M_{max}	[kN/m]	0.0	4.5	7.8	9.0	7.8	4.5	0.0
V_{max}	[kN/m]	3.8	3.3	1.9	0.0	-1.9	-3.3	-3.8

No-slip condition

K'	[-]	0.00012	no-slip coefficient
----	-----	---------	---------------------

θ	[°]	0	15	30	45	60	75	90
N_{max}	[kN/m]	0.0	1.9	3.3	3.8	3.3	1.9	0.0
M_{max}	[kN/m]	0.0	4.5	7.8	9.0	7.8	4.5	0.0
V_{max}	[kN/m]	3.8	3.3	1.9	0.0	-1.9	-3.3	-3.8

Tunnel depth (m)	Ratio of ground motion at tunnel depth to motion at ground surface
≤ 6	1.0
6–15	0.9
15–30	0.8
> 30	0.7

PENZIEN 2000 "Seismically induced racking of tunnel linings"

Full-slip condition

R	[-]	3.039	
α	[-]	0.00029	full-slip coefficient

θ	[°]	0	15	30	45	60	75	90
N_{max}	[kN/m]	0.0	0.9	1.6	1.9	1.6	0.9	0.0
M_{max}	[kN/m]	0.0	4.5	7.8	9.0	7.8	4.5	0.0
V_{max}	[kN/m]	3.8	3.3	1.9	0.0	-1.9	-3.3	-3.8

No-slip condition

R	[-]	3.039	
α	[-]	0.00033	full-slip coefficient

θ	[°]	0	15	30	45	60	75	90
N_{max}	[kN/m]	0.0	1.9	3.3	3.8	3.3	1.9	0.0
M_{max}	[kN/m]	0.0	4.5	7.8	9.0	7.8	4.5	0.0
V_{max}	[kN/m]	3.8	3.3	1.9	0.0	-1.9	-3.3	-3.8

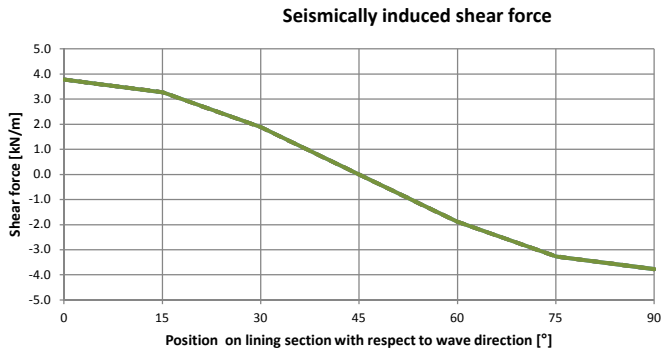
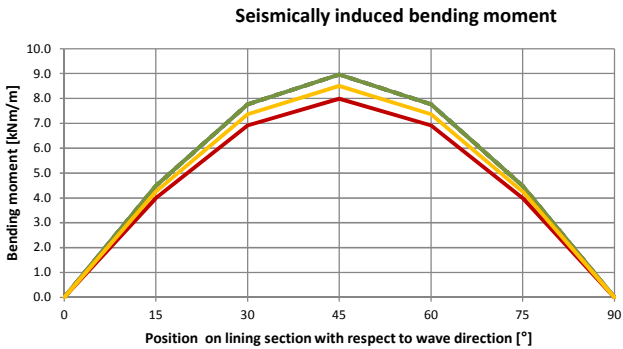
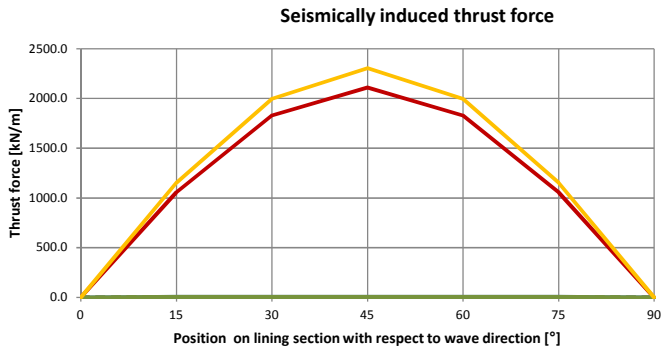
Moment magnitude (M_w)	Ratio of peak ground velocity (cm/s) to peak ground acceleration (g)		
	Source-to-site distance (km)		
	0–20	20–50	50–100
Rock ^a			
6.5	66	76	86
7.5	97	109	97
8.5	127	140	152
Stiff soil ^b			
6.5	94	102	109
7.5	140	127	155
8.5	180	188	193
Soft soil ^b			
6.5	140	132	142
7.5	208	165	201
8.5	269	244	251

BOBET 2003 "Effect of pore water pressure on tunnel support during static and seismic loading"

No-slip condition

C_2	[-]	-1.702
C_3	[-]	0.702
τ	[-]	1629.3

θ	[°]	0	15	30	45	60	75	90
N_{max}	[kN/m]	0.0	1153.0	1997.0	2305.9	1997.0	1153.0	0.0
M_{max}	[kN/m]	0.0	4.3	7.4	8.5	7.4	4.3	0.0



Summary of seismically induced forces due to ovalization

		N_{max} [kN/m]	M_{max} [kNm/m]	V_{max} [kN/m]
WANG 1993	full-slip	1.9	9.0	3.8
WANG 1993	no-slip	2111.9	8.0	-
PENZIEN/WU 1998	full-slip	1.9	9.0	3.8
PENZIEN/WU 1998	no-slip	3.8	9.0	3.8
PENZIEN 2000	full-slip	1.9	9.0	3.8
PENZIEN 2000	no-slip	3.8	9.0	3.8
BOBET 2003	no-slip	2305.9	8.5	-

Input data - properties of rock mass and lining, ground motion parameters

Properties of rock mass/soil

E_G	[MPa]	8800	Young's modulus of ground
G_G	[MPa]	3548	shear modulus of ground
ν_G	[-]	0.24	coefficient of Poisson
V_S	[m/s]	1135	propagation velocity of shear waves
γ_G	[kN/m³]	27	unit weight of ground

Coefficients of interface ground/lining

C	[-]	17.294	compressibility ratio
F	[m ⁻¹]	7051.257	flexibility ratio
C*	[-]	10.544	compressibility ratio
F*	[m ⁻¹]	55667.816	flexibility ratio

Properties of the lining

E_L	[MPa]	15000	Young's modulus of lining
G_L	[MPa]	6250	shear modulus of lining
ν_L	[-]	0.2	coefficient of Poisson
I	[m ⁴]	0.000281	moment of inertia of lining cross-section
I_T	[m ⁴]	11	moment of inertia of tunnel cross-section
D/2	[m]	2.97	external radius of lining
t	[m]	0.150	thickness of lining
A	[m²]	2.7	area of lining
γ_{red}	[-]	1.0	reduction factor stiffness of cracked x-section
I_{crack}	[m ⁴]	0.000281	cracked moment of inertia of lining cross-section
$I_{T,crack}$	[m ⁴]	11	cracked moment of inertia of tunnel cross-section

Parameters of ground motion

a_{gd}	[g]	0.490	PGA (Peak Ground Acceleration)
R_a	[-]	0.7	reduction factor PGA with depth
	[-]	152.0	PGV/PGA ratio
PGV	[m/s]	0.521	PGV (Peak Ground Velocity)
g	[m/s²]	9.81	gravity
M	[-]	6.5	magnitude
D_{epi}	[km]	50-100	distance from epicenter
$\gamma_{s,max}$	[-]	0.00046	max. shear distortion

Ovalization of cross-section due to S-waves

WANG 1993 "Seismic Design of Tunnels: A State-of-the-Art Approach"

Full-slip condition

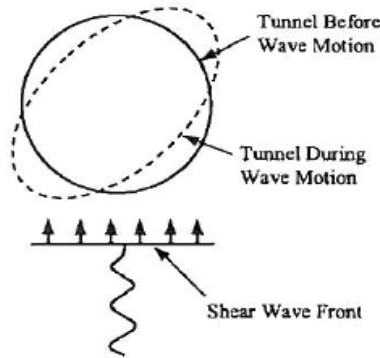
K	[-]	0.000107755	full-slip coefficient
---	-----	-------------	-----------------------

θ	[°]	0	15	30	45	60	75	90
N_{max}	[kN/m]	0.0	0.5	0.9	1.0	0.9	0.5	0.0
M_{max}	[kN/m]	0.0	1.5	2.7	3.1	2.7	1.5	0.0
V_{max}	[kN/m]	2.1	1.8	1.0	0.0	-1.0	-1.8	-2.1

No-slip condition

a_2	[-]	-0.736
a_3	[-]	0.868
a_0	[-]	81201.43382

θ	[°]	0	15	30	45	60	75	90
N_{max}	[kN/m]	0.0	639.4	1107.4	1278.7	1107.4	639.4	0.0
M_{max}	[kN/m]	0.0	1.4	2.4	2.8	2.4	1.4	0.0



PENZIEN, WU 1998 "Stresses in linings of bored tunnels"

Full-slip condition

K	[-]	0.00011	full-slip coefficient
---	-----	---------	-----------------------

θ	[°]	0	15	30	45	60	75	90
N_{max}	[kN/m]	0.0	0.5	0.9	1.0	0.9	0.5	0.0
M_{max}	[kN/m]	0.0	1.5	2.7	3.1	2.7	1.5	0.0
V_{max}	[kN/m]	2.1	1.8	1.0	0.0	-1.0	-1.8	-2.1

No-slip condition

K'	[-]	0.00011	no-slip coefficient
----	-----	---------	---------------------

θ	[°]	0	15	30	45	60	75	90
N_{max}	[kN/m]	0.0	1.0	1.8	2.1	1.8	1.0	0.0
M_{max}	[kN/m]	0.0	1.5	2.7	3.1	2.7	1.5	0.0
V_{max}	[kN/m]	2.1	1.8	1.0	0.0	-1.0	-1.8	-2.1

Tunnel depth (m)	Ratio of ground motion at tunnel depth to motion at ground surface
≤ 6	1.0
6–15	0.9
15–30	0.8
> 30	0.7

PENZIEN 2000 "Seismically induced racking of tunnel linings"

Full-slip condition

R	[-]	3.039	
α	[-]	0.00025	full-slip coefficient

θ	[°]	0	15	30	45	60	75	90
N_{max}	[kN/m]	0.0	0.5	0.9	1.0	0.9	0.5	0.0
M_{max}	[kN/m]	0.0	1.5	2.7	3.1	2.7	1.5	0.0
V_{max}	[kN/m]	2.1	1.8	1.0	0.0	-1.0	-1.8	-2.1

No-slip condition

R	[-]	3.039	
α	[-]	0.00029	full-slip coefficient

θ	[°]	0	15	30	45	60	75	90
N_{max}	[kN/m]	0.0	1.0	1.8	2.1	1.8	1.0	0.0
M_{max}	[kN/m]	0.0	1.5	2.7	3.1	2.7	1.5	0.0
V_{max}	[kN/m]	2.1	1.8	1.0	0.0	-1.0	-1.8	-2.1

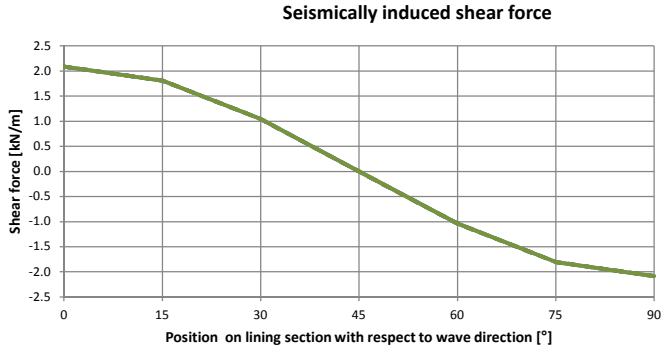
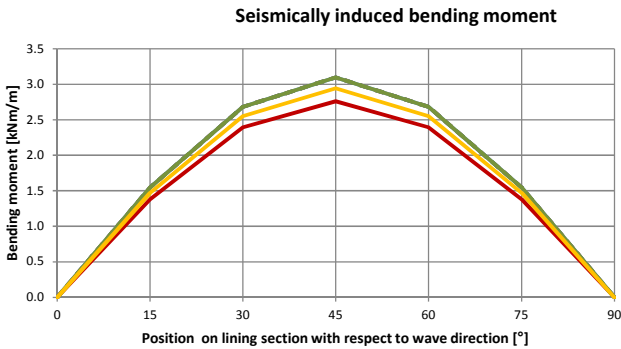
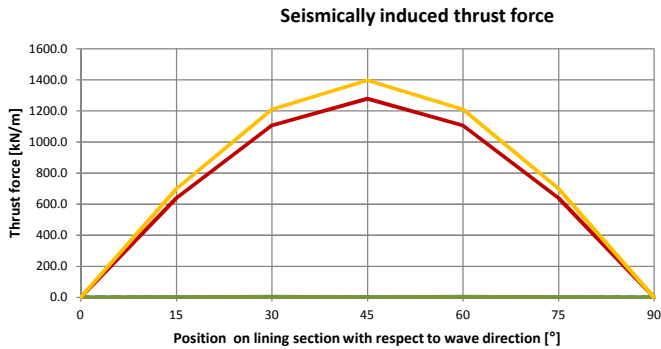
Moment magnitude (M_w)	Ratio of peak ground velocity (cm/s) to peak ground acceleration (g)		
	Source-to-site distance (km)		
	0–20	20–50	50–100
Rock ^a			
6.5	66	76	86
7.5	97	109	97
8.5	127	140	152
Stiff soil ^b			
6.5	94	102	109
7.5	140	127	155
8.5	180	188	193
Soft soil ^b			
6.5	140	132	142
7.5	208	165	201
8.5	269	244	251

BOBET 2003 "Effect of pore water pressure on tunnel support during static and seismic loading"

No-slip condition

C_2	[-]	-1.711
C_3	[-]	0.711
τ	[-]	1629.3

θ	[°]	0	15	30	45	60	75	90
N_{max}	[kN/m]	0.0	698.7	1210.2	1397.4	1210.2	698.7	0.0
M_{max}	[kN/m]	0.0	1.5	2.5	2.9	2.5	1.5	0.0



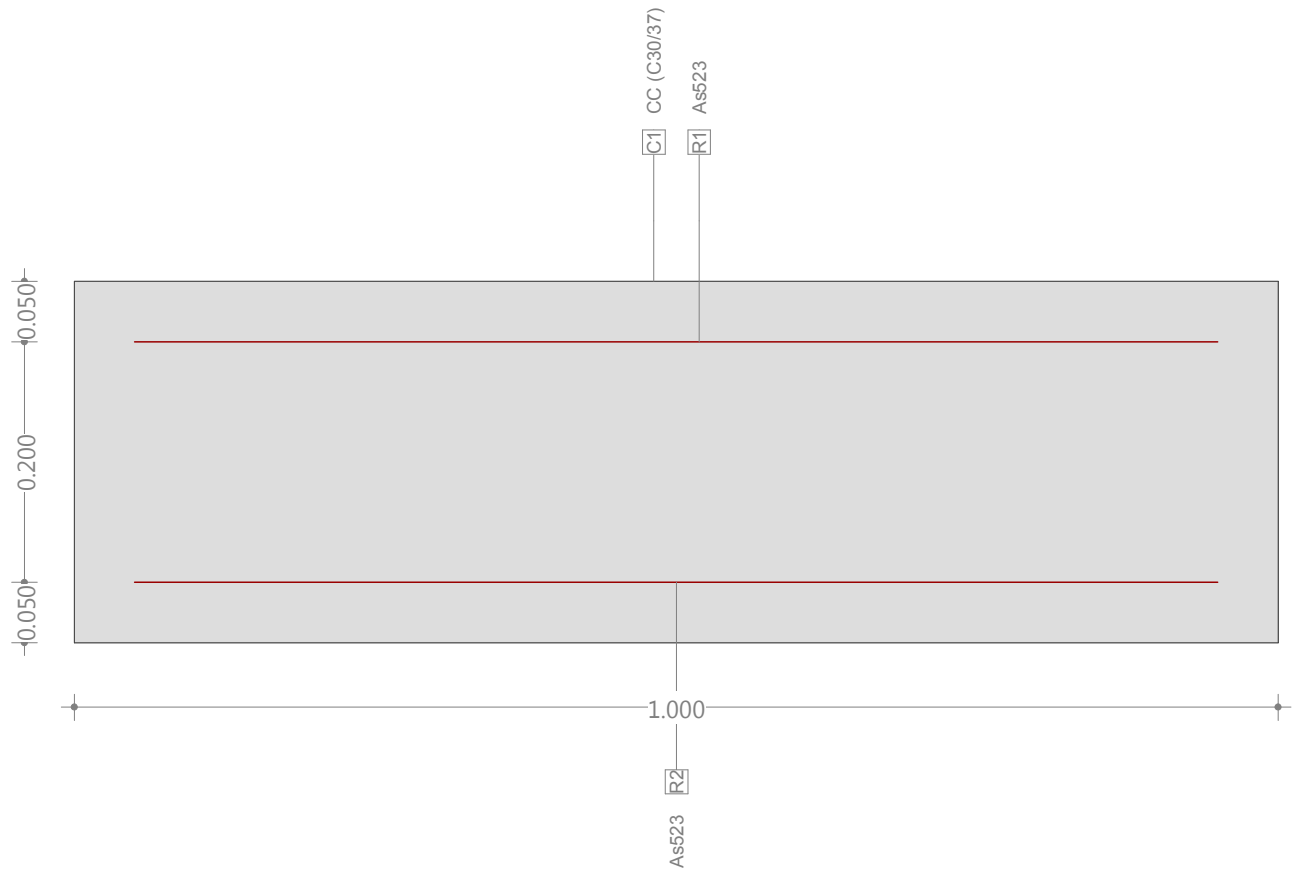
Summary of seismically induced forces due to ovalization

		N_{max} [kN/m]	M_{max} [kNm/m]	V_{max} [kN/m]
WANG 1993	full-slip	1.0	3.1	2.1
WANG 1993	no-slip	1278.7	2.8	-
PENZIEN/WU 1998	full-slip	1.0	3.1	2.1
PENZIEN/WU 1998	no-slip	2.1	3.1	2.1
PENZIEN 2000	full-slip	1.0	3.1	2.1
PENZIEN 2000	no-slip	2.1	3.1	2.1
BOBET 2003	no-slip	1397.4	2.9	-

Anexo K

Cross-section QS (C30/37;S420): Outline, Reinforcements

Scale 1 : 6.3



Cross section (column): QS

Geometrical definition of cross section

Name	Material	Class	Type	No.	y _q [m]	z _q [m]	No.	y _q [m]	z _q [m]
C1	CC	C30/37	Polygon	1	0	0	2	1.000	0
				3	1.000	0.300	4	0	0.300

Section properties: (reinforcement not considered, reference material: CC)

	Area [m ²]	Moment of inertia [m ⁴]	C.G., Angle [m]			Mass [kg/m]
A _x	0.3000	I _x	0.007300	ys	0.500	M _{CS}
A _y	(=A _x)	I _y	0.002250	zs	0.150	750.0
A _z	(=A _x)	I _z	0.025000	β	0 [°]	

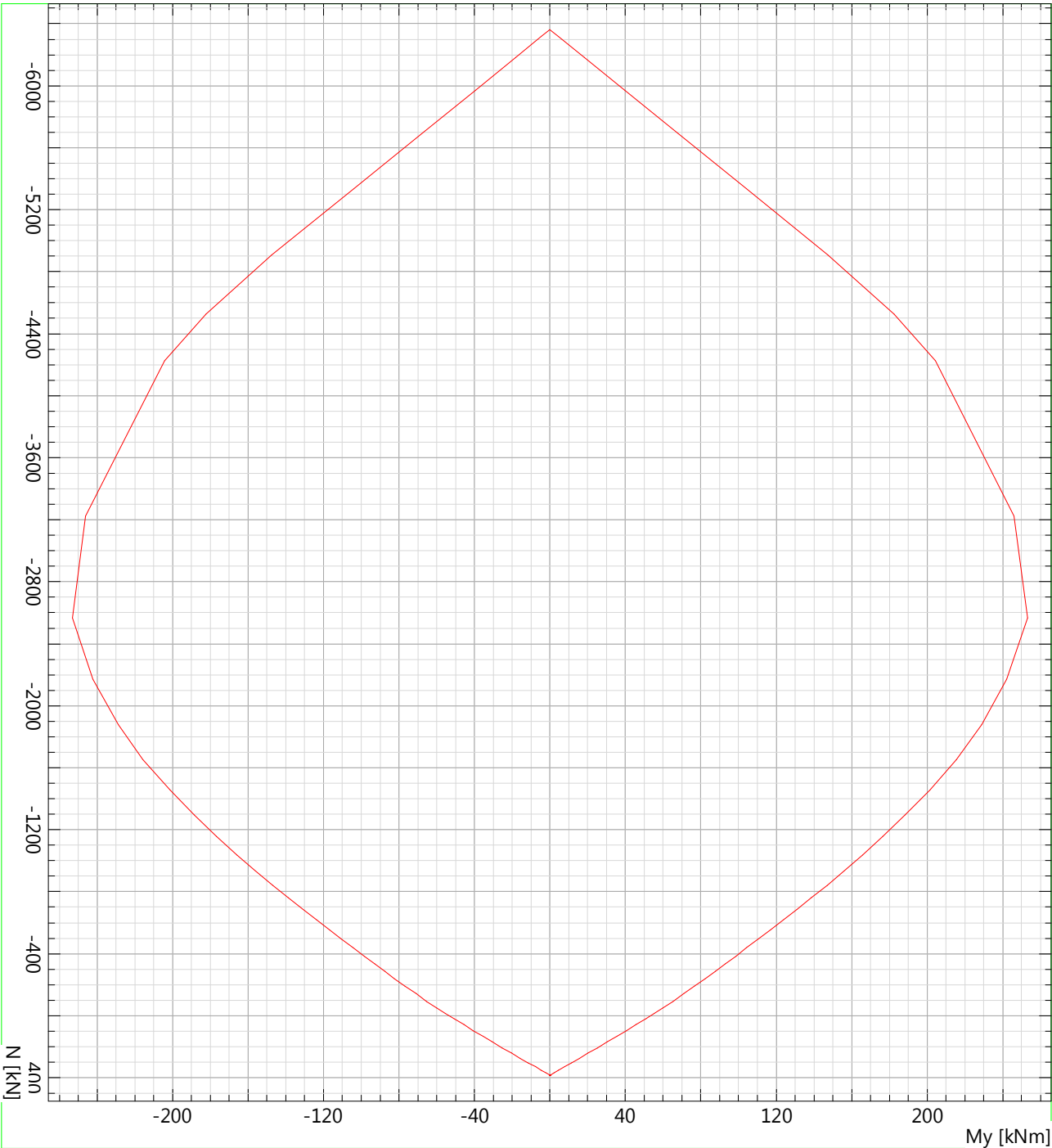
Cross section (column): QS

Mild reinforcement G0 $\Sigma A_s = 1046 \text{ mm}^2$, $\rho = 0.348667 \%$

Name	Material	Class	BC	Type	y _{1q} [m]	z _{1q} [m]	y _{2q} [m]	z _{2q} [m]	n, Ø	exist A _s [mm ²]
R1	R2	S420	1	L	0.050	0.250	0.950	0.250		523
R2				L	0.050	0.050	0.950	0.050		523

BC : BC: 0=constant area, 1=adapt always, 2=adapt area in tension zone
Type : Definition of reinforcement: P = Point, L= Line, R = Ring

M-N-Interaction diagram Cross section (column): QS
!ULS / Reinforcement percentage: $\rho = 0.348667$ o/o



Lombardi AG, 6648 Minusio-Locarno

Ultimate strength analysis Cross section (column): QS

Action forces / Efficiency: $\text{eff}(M,N) = 0.90$ OK

No.	AP	P	Bending and axial force			$\text{eff}(M,N)$ [-]	Shear forces and torsion			$\text{eff}(V,T)$ [-]	Complete CS $\text{eff}(M,N,V,T)$ [-]
			N [kN]	M_y [kNm]	M_z [kNm]		V_y [kN]	V_z [kN]	T [kNm]		
1	!ULS		-5309.1	4.10000	-	0.84					
2	!ULS		-4434.4	1.066E+2	-	0.86					
3	!ULS		-4670.0	-9.13E+1	-	0.87					
4	!ULS		-4670.0	-9.13E+1	-	0.87					
5	!ULS		-4434.4	1.066E+2	-	0.86					
6	!ULS		-4434.4	1.066E+2	-	0.86					
7	!ULS		-4673.4	-9.13E+1	-	0.87					
8	!ULS		-4789.1	-3.75E+1	-	0.81					
9	!ULS		-5065.7	4.10000	-	0.80					
10	!ULS		-4164.7	1.602E+2	-	0.90					
11	!ULS		-4100.5	-1.56E+2	-	0.89					
12	!ULS		-4099.1	-1.56E+2	-	0.89					
13	!ULS		-4164.7	1.602E+2	-	0.90					
14	!ULS		-4164.7	1.602E+2	-	0.90					
15	!ULS		-4600.1	-1.10E+2	-	0.89					
16	!ULS		-4098.6	21.40000	-	0.68					
17	!ULS		-5158.2	4.10000	-	0.82					
18	!ULS		-5069.5	37.50000	-	0.85					
19	!ULS		-5008.2	-6.90E+1	-	0.89					
20	!ULS		-5006.0	-6.90E+1	-	0.89					
21	!ULS		-5069.5	37.50000	-	0.85					
22	!ULS		-5074.4	37.40000	-	0.85					
23	!ULS		-5008.2	-6.90E+1	-	0.89					
24	!ULS		-4998.8	-5.30E+1	-	0.86					

- : Calculation with uniaxial bending (neutral axis is horizontal)!!

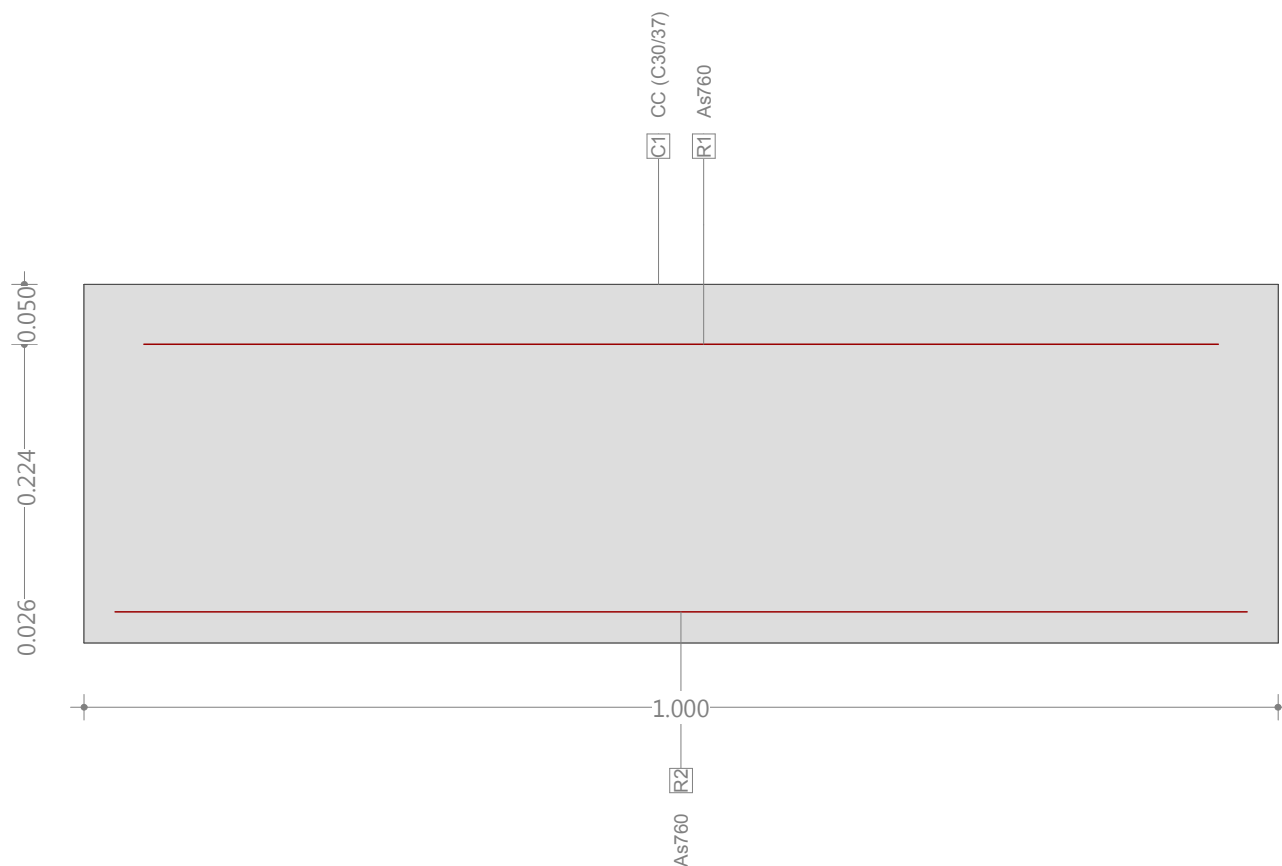
Analysis-Parameters "ULS" Standard: Eurocode EN

ID	Diagram σ - ϵ			Strain Limits			σ_s [N/mm ²]	Partial safety factor				Various parameters			
	c	s		ϵ_{c2} [‰]	ϵ_{cu3} [‰]	ϵ_{ud} [‰]		α_{cc} [-]	γ_c [-]	γ_s [-]		θ [-]	ϕ [-]		
!ULS	2/0	1		-2.000	-3.500	2.000E		1.00	1.50	1.15		45.00	0		

θ : Inclination of diagonal in compression
 ϕ : Creep coefficient

Cross-section QS (C30/37;B500B): Outline, Reinforcements

Scale 1 : 6.3



Cross section (column): QS

Geometrical definition of cross section

Name	Material	Class	Type	No.	Y_q [m]	Z_q [m]	No.	Y_q [m]	Z_q [m]
C1	CC	C30/37	Polygon	1	0	0	2	1.000	0
				3	1.000	0.300	4	0	0.300

Section properties: (reinforcement not considered, reference material: CC)

	Area [m ²]	Moment of inertia [m ⁴]	C.G. Angle [m]		Mass [kg/m]
Ax	0.3000	Ix	0.007300	ys	0.500
Ay	(=Ax)	Iy	0.002250	zs	0.150
Az	(=Ax)	Iz	0.025000	β	0 [°]
					M_{CS}
					750.0

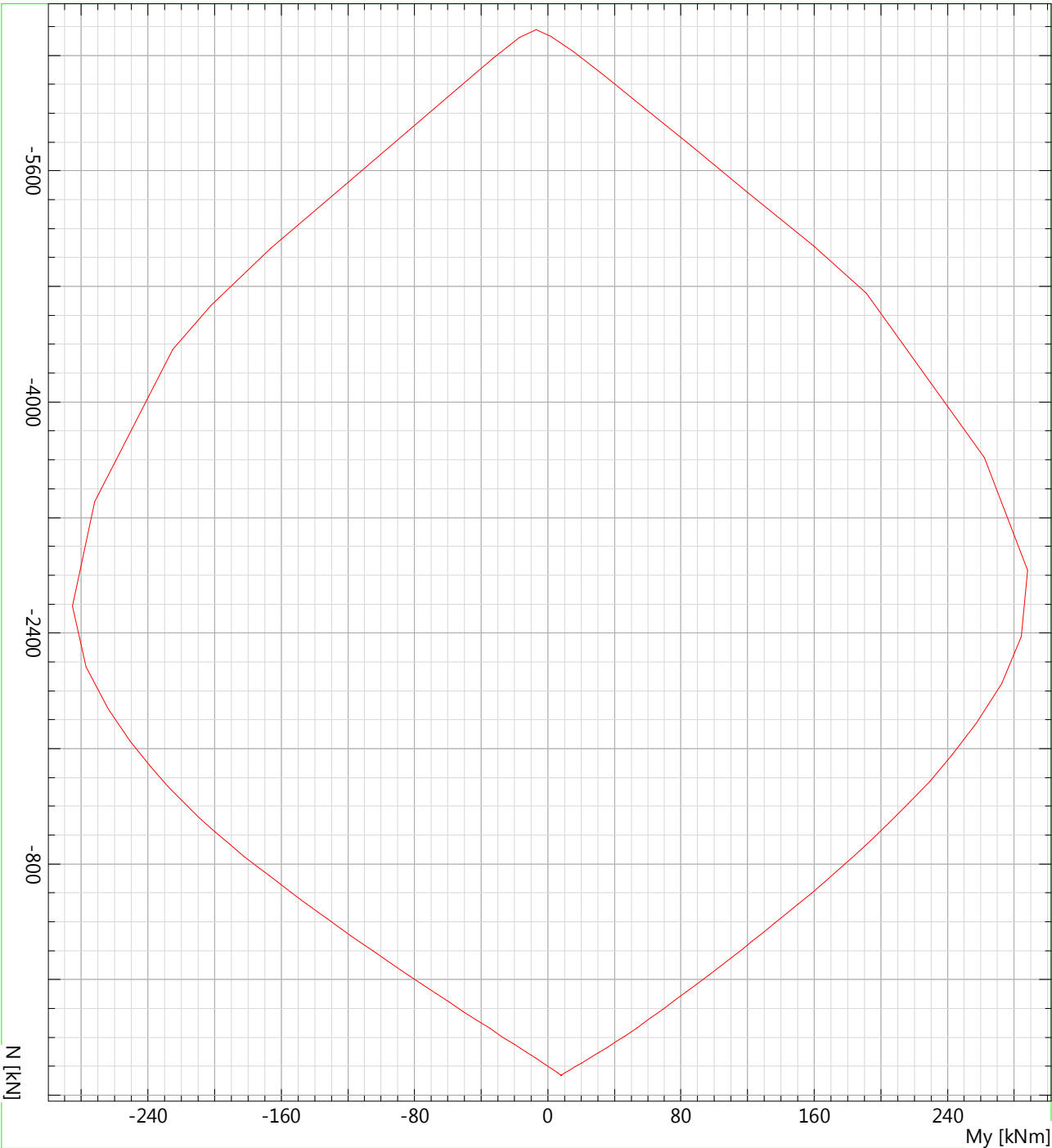
Cross section (column): QS

Mild reinforcement G0 $\Sigma A_s = 1520 \text{ mm}^2$, $\rho = 0.506667 \%$

Name	Material	Class	BC	Type	Y_{1q} [m]	Z_{1q} [m]	Y_{2q} [m]	Z_{2q} [m]	n, Ø	exist A_s [mm ²]
R1	R	B500B	1	L	0.050	0.250	0.950	0.250		760
R2				L	0.026	0.026	0.974	0.026		760

BC : BC: 0=constant area, 1=adapt always, 2=adapt area in tension zone
Type : Definition of reinforcement: P = Point, L= Line, R = Ring

M-N-Interaction diagram Cross section (column): QS
!ULS / Reinforcement percentage: $\rho = 0.506667$ o/o



Ultimate strength analysis Cross section (column): QS

Action forces / Efficiency: $\text{eff}(M,N) = 1.05 > 1.00$ not OK

No.	AP	P	Bending and axial force				Shear forces and torsion				Complete CS eff(M,N,V,T) [-]
			N [kN]	M _y [kNm]	M _z [kNm]	eff(M,N) [-]	V _y [kN]	V _z [kN]	T [kNm]	eff(V,T) [-]	
1	!ULS		-5709.5	-9.39E+1	-	0.99	-	-64.1	-	0.00	
2	!ULS		-5323.5	1.529E+2	-	1.02	-	141.8	-	0.00	
3	!ULS		-5660.5	-1.44E+2	-	1.05	-	-16.2	-	0.00	
4	!ULS		-5329.5	-1.37E+2	-	0.99	-	-115.1	-	0.00	
5	!ULS		-5323.5	1.529E+2	-	1.02	-	141.8	-	0.00	
6	!ULS		-5323.5	1.529E+2	-	1.02	-	141.8	-	0.00	
7	!ULS		-5660.5	-1.44E+2	-	1.05	-	-16.2	-	0.00	
8	!ULS		-5609.5	47.80000	-	0.92	-	177.4	-	0.00	

- : Calculation with uniaxial bending (neutral axis is horizontal)!!

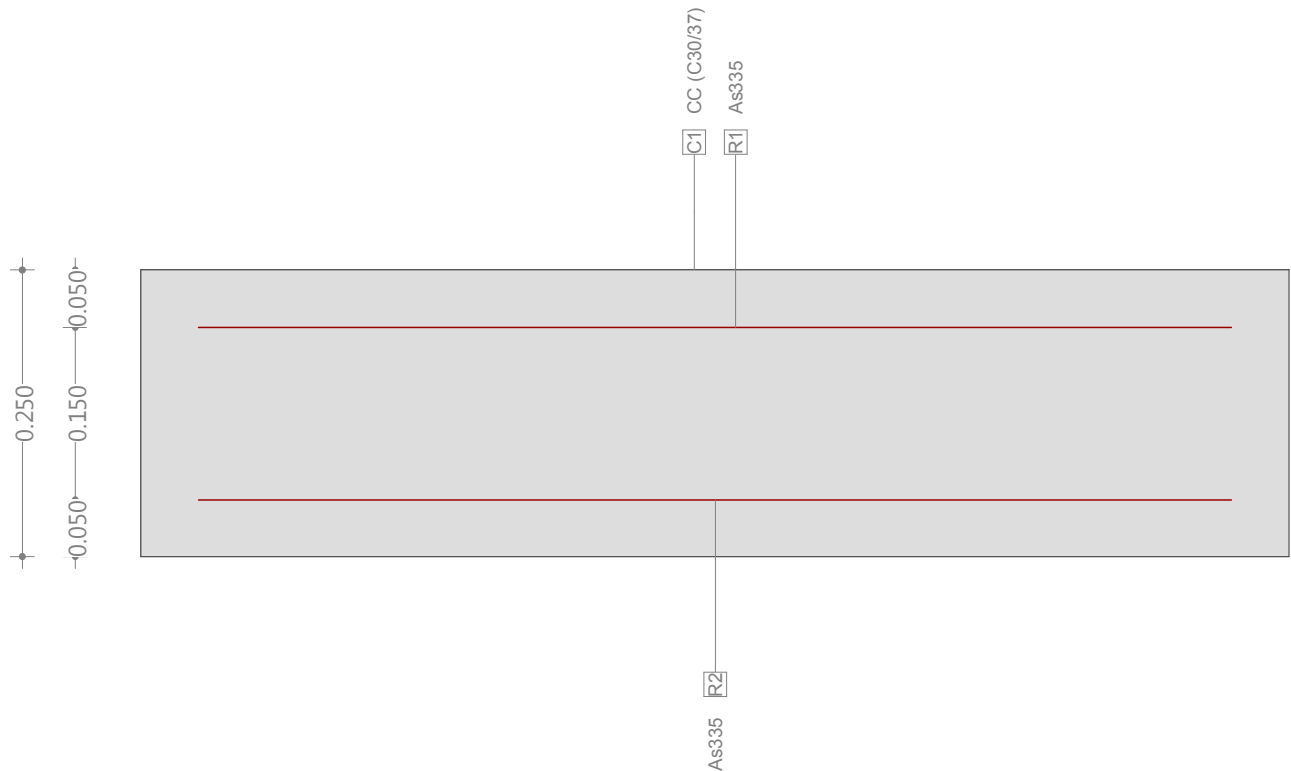
Analysis-Parameters "ULS" Standard: Eurocode EN

ID	Diagram σ - ϵ			Strain Limits			σ_s [N/mm ²]	Partial safety factor				Various parameters			
	c	s		ϵ_{c2} [‰]	ϵ_{cu3} [‰]	ϵ_{ud} [‰]		α_{cc} [-]	γ_c [-]	γ_s [-]		θ [-]	ϕ [-]		
!ULS	2/0	1		-2.000	-3.500	2.000E		1.00	1.50	1.15		45.00	0		

θ : Inclination of diagonal in compression
 ϕ : Creep coefficient

Cross-section QS (C30/37;S420): Outline, Reinforcements

Scale 1 : 6.6

**Cross section (column): QS****Geometrical definition of cross section**

Name	Material	Class	Type	No.	y_q [m]	z_q [m]	No.	y_q [m]	z_q [m]
C1	CC	C30/37	Polygon	1	0	0	2	1.000	0
				3	1.000	0.250	4	0	0.250

Section properties: (reinforcement not considered, reference material: CC)

	Area [m ²]	Moment of inertia [m ⁴]	C.G., Angle [m]			Mass [kg/m]
A_x	0.2500	I_x	0.004388	ys	0.500	M_{CS}
A_y	(=A_x)	I_y	0.001302	zs	0.125	625.0
A_z	(=A_x)	I_z	0.020833	β	0 [°]	

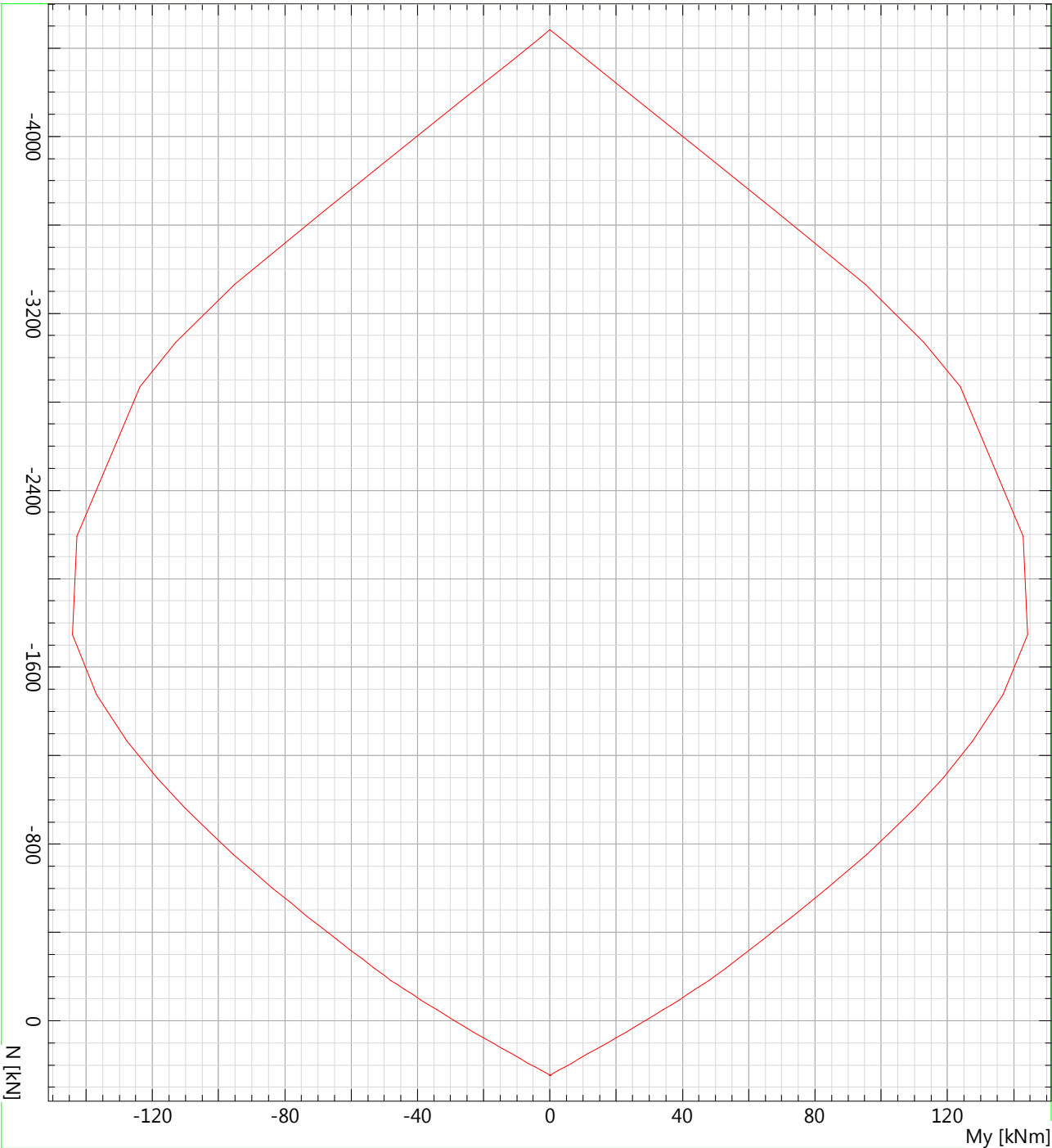
Cross section (column): QS**Mild reinforcement G0** $\Sigma A_s = 670 \text{ mm}^2$, $\rho = 0.268000 \%$

Name	Material	Class	BC	Type	y_{1q} [m]	z_{1q} [m]	y_{2q} [m]	z_{2q} [m]	n, Ø	exist A_s [mm ²]
R1	R2	S420	1	L	0.050	0.200	0.950	0.200		335
R2				L	0.050	0.050	0.950	0.050		335

BC : BC: 0=constant area, 1=adapt always, 2=adapt area in tension zone

Type : Definition of reinforcement: P = Point, L= Line, R = Ring

M-N-Interaction diagram Cross section (column): QS
!ULS / Reinforcement percentage: $\rho = 0.268000$ o/o



Lombardi AG, 6648 Minusio-Locarno

Ultimate strength analysis Cross section (column): QS

Action forces / Efficiency: $\text{eff}(M,N) = 0.99$ OK

No.	AP	P	Bending and axial force			$\text{eff}(M,N)$ [-]	Shear forces and torsion			$\text{eff}(V,T)$ [-]	Complete CS $\text{eff}(M,N,V,T)$ [-]
			N [kN]	M_y [kNm]	M_z [kNm]		V_y [kN]	V_z [kN]	T [kNm]		
1	!ULS		-3346.1	3.60000	-	0.76					
2	!ULS		-3009.9	41.20000	-	0.78					
3	!ULS		-3121.7	-3.49E+1	-	0.79					
4	!ULS		-3121.7	-3.49E+1	-	0.79					
5	!ULS		-3009.9	41.20000	-	0.78					
6	!ULS		-3009.9	41.20000	-	0.78					
7	!ULS		-3132.2	-3.47E+1	-	0.79					
8	!ULS		-3181.0	-1.44E+1	-	0.75					
9	!ULS		-3603.3	3.60000	-	0.81					
10	!ULS		-3027.3	72.70000	-	0.86					
11	!ULS		-2992.8	-7.23E+1	-	0.85					
12	!ULS		-2991.4	-7.23E+1	-	0.85					
13	!ULS		-3027.3	72.70000	-	0.86					
14	!ULS		-3027.3	72.70000	-	0.86					
15	!ULS		-2992.8	-7.23E+1	-	0.85					
16	!ULS		-2992.6	-1.20E+1	-	0.70					
17	!ULS		-4137.6	3.60000	-	0.93					
18	!ULS		-4097.3	25.30000	-	0.98					
19	!ULS		-4050.0	-3.48E+1	-	0.99					
20	!ULS		-4048.8	-3.48E+1	-	0.99					
21	!ULS		-4097.3	25.30000	-	0.98					
22	!ULS		-4099.3	25.20000	-	0.98					
23	!ULS		-4050.0	-3.48E+1	-	0.99					
24	!ULS		-4038.2	-2.33E+1	-	0.96					

- : Calculation with uniaxial bending (neutral axis is horizontal)!!

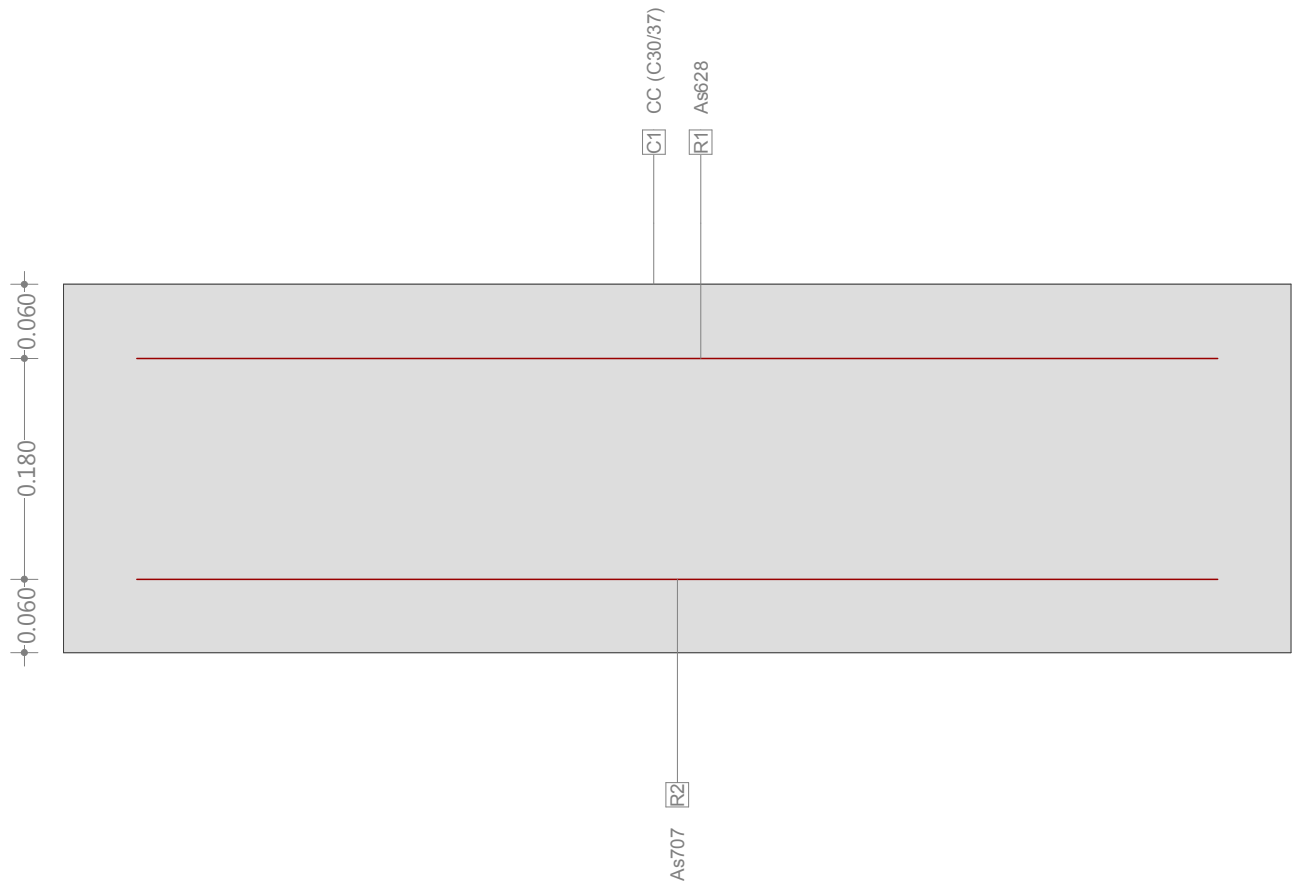
Analysis-Parameters "ULS" Standard: Eurocode EN

ID	Diagram σ - ϵ			Strain Limits			σ_s [N/mm ²]	Partial safety factor				Various parameters			
	c	s		ϵ_{c2} [‰]	ϵ_{cu3} [‰]	ϵ_{ud} [‰]		α_{cc} [-]	γ_c [-]	γ_s [-]		θ [-]	ϕ [-]		
!ULS	2/0	1		-2.000	-3.500	2.000E		0.85	1.50	1.15		45.00	0		

θ : Inclination of diagonal in compression
 ϕ : Creep coefficient

Cross-section QS (C30/37;B500B): Outline, Reinforcements

Scale 1 : 6.2



Cross section (column): QS

Geometrical definition of cross section

Name	Material	Class	Type	No.	y_q [m]	z_q [m]	No.	y_q [m]	z_q [m]
C1	CC	C30/37	Polygon	1	0	0	2	1.000	0
				3	1.000	0.300	4	0	0.300

Section properties: (reinforcement not considered, reference material: CC)

	Area [m ²]	Moment of inertia [m ⁴]	C.G., Angle [m]				Mass [kg/m]
A_x	0.3000	I_x	0.007300	y_s	0.500	M_{CS}	750.0
A_y	(=A _x)	I_y	0.002250	z_s	0.150		
A_z	(=A _x)	I_z	0.025000	β	0 [°]		

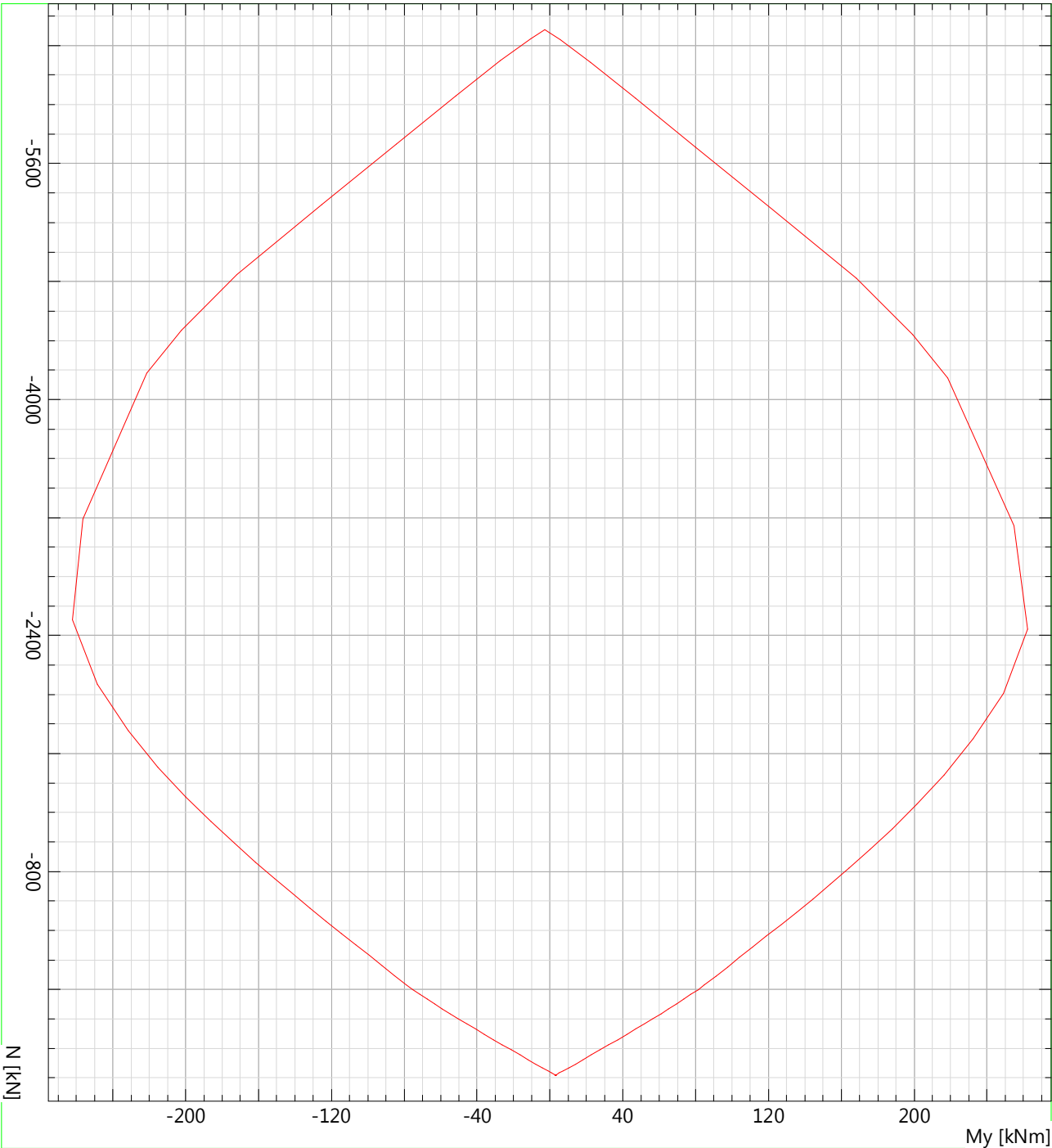
Cross section (column): QS

Mild reinforcement G0 $\Sigma A_s = 1335 \text{ mm}^2$, $\rho = 0.445067 \%$

Name	Material	Class	BC	Type	y_{1q} [m]	z_{1q} [m]	y_{2q} [m]	z_{2q} [m]	n, Ø	exist A_s [mm ²]
R1	R	B500B	1	L	0.060	0.240	0.940	0.240		628
R2				L	0.060	0.060	0.940	0.060		707

BC : BC: 0=constant area, 1=adapt always, 2=adapt area in tension zone
Type : Definition of reinforcement: P = Point, L= Line, R = Ring

M-N-Interaction diagram Cross section (column): QS
!ULS / Reinforcement percentage: $\rho = 0.445067$ o/o



Ultimate strength analysis Cross section (column): QS

Action forces / Efficiency: $\text{eff}(M,N) = 0.98$ OK

No.	AP	P	Bending and axial force				Shear forces and torsion				Complete CS eff(M,N,V,T) [-]
			N [kN]	M _y [kNm]	M _z [kNm]	eff(M,N) [-]	V _y [kN]	V _z [kN]	T [kNm]	eff(V,T) [-]	
1	!ULS		-5410.5	-3.10E+1	-	0.87	-	2.5	-	0.00	
2	!ULS		-5314.5	1.085E+2	-	0.98	-	237.3	-	0.00	
3	!ULS		-4842.5	-1.44E+2	-	0.95	-	-7.8	-	0.00	
4	!ULS		-4842.5	-1.44E+2	-	0.95	-	-7.8	-	0.00	
5	!ULS		-5314.5	1.085E+2	-	0.98	-	237.3	-	0.00	
6	!ULS		-5314.5	1.085E+2	-	0.98	-	237.3	-	0.00	
7	!ULS		-4842.5	-1.44E+2	-	0.95	-	-7.8	-	0.00	
8	!ULS		-5314.5	1.085E+2	-	0.98	-	237.3	-	0.00	

- : Calculation with uniaxial bending (neutral axis is horizontal)!!

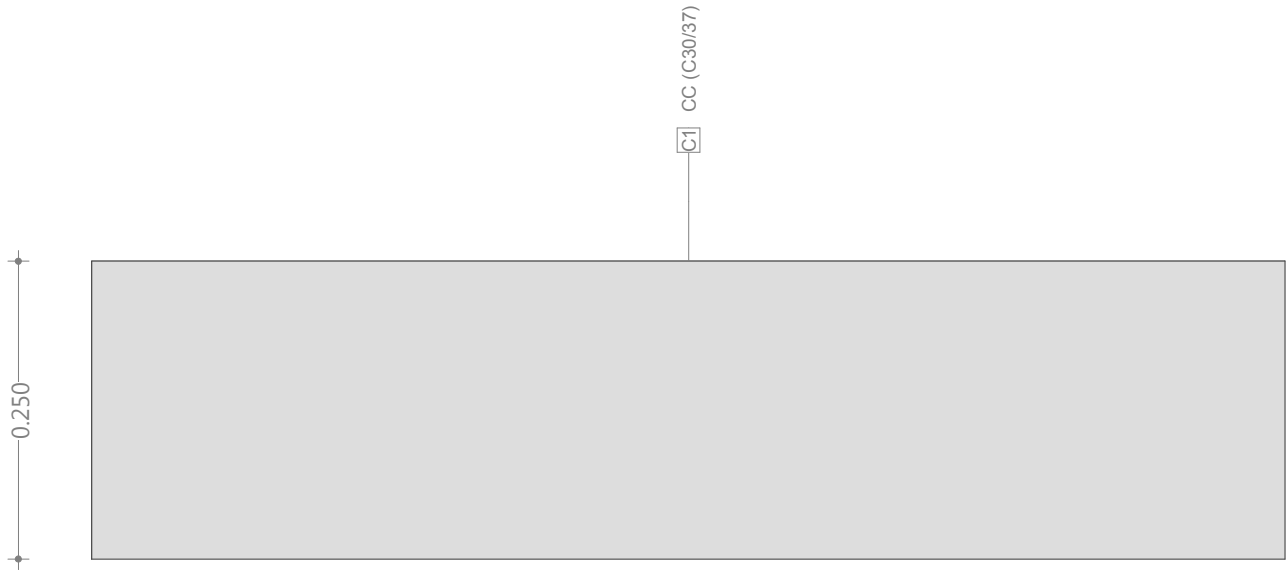
Analysis-Parameters "ULS" Standard: Eurocode EN

ID	Diagram σ - ϵ			Strain Limits			σ_s [N/mm ²]	Partial safety factor				Various parameters			
	c	s		ϵ_{c2} [‰]	ϵ_{cu3} [‰]	ϵ_{ud} [‰]		α_{cc} [-]	γ_c [-]	γ_s [-]		θ [-]	ϕ [-]		
!ULS	2/0	1		-2.000	-3.500	2.000E		1.00	1.50	1.15		45.00	0		

θ : Inclination of diagonal in compression
 ϕ : Creep coefficient

Cross-section QS (C30/37): Outline

Scale 1 :6.3



Cross section (column): QS

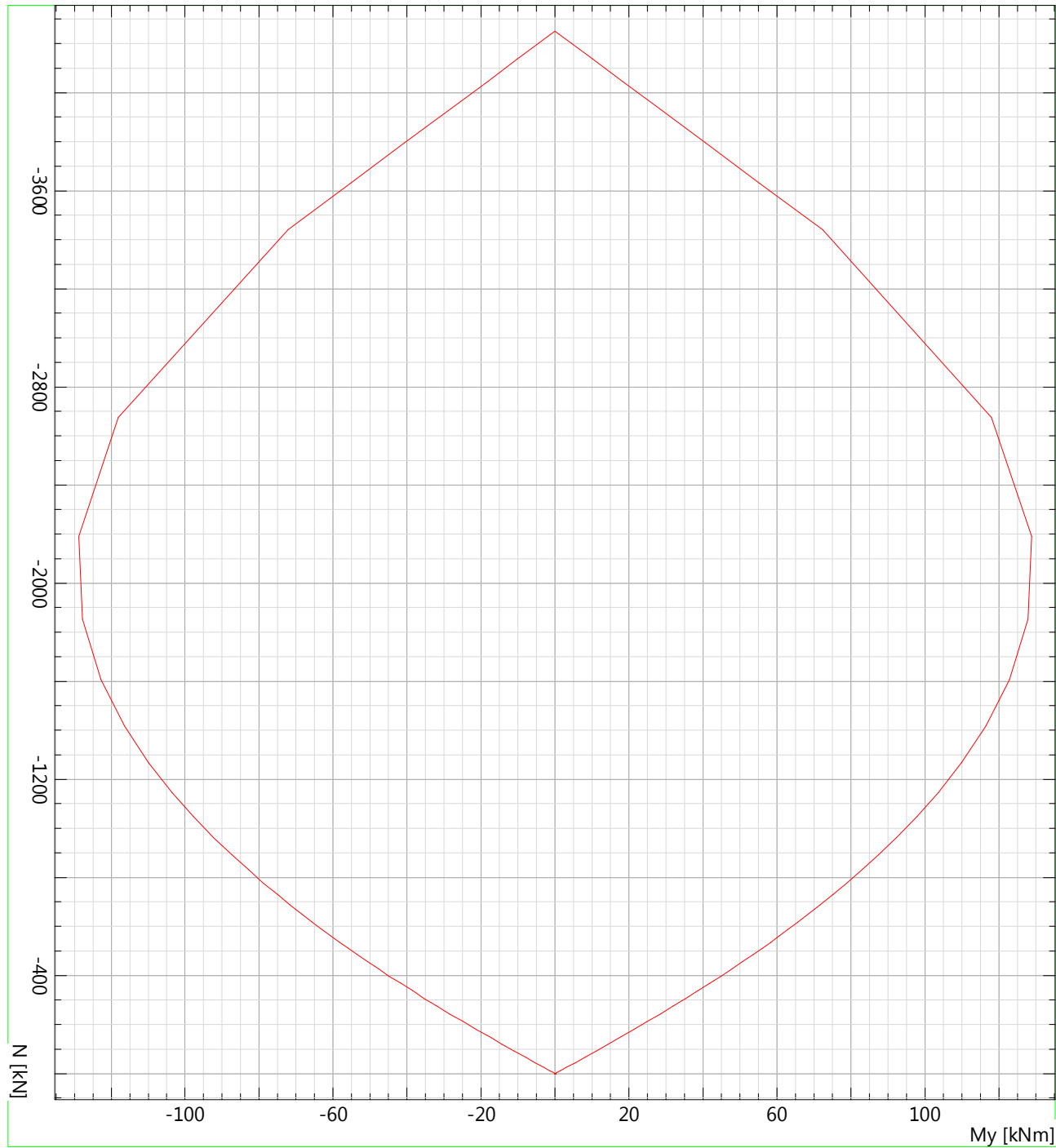
Geometrical definition of cross section

Name	Material	Class	Type	No.	y_q [m]	z_q [m]	No.	y_q [m]	z_q [m]
C1	CC	C30/37	Polygon	1 3	0 1.000	0 0.250	2 4	1.000 0	0 0.250

Section properties: (reference material: CC)

Area [m ²]		Moment of inertia [m ⁴]		C.G. Angle [m]		Mass [kg/m]	
A_x	0.2500	I_x	0.004388	y_s	0.500	M_{CS}	625.0
A_y	(=A_x)	I_y	0.001302	z_s	0.125		
A_z	(=A_x)	I_z	0.020833	β	0 [°]		

M-N-Interaction diagram Cross section (column): QS
!ULS / Reinforcement percentage: $\rho = 0$ o/o



6198.1 LAB ANDES										Page 3	
Zona de tránsito - Revestimiento definitivo - CS3 SISMO										30.05.19, 22:52	
Lombardi AG, 6648 Minusio-Locarno										PR	FAGUS-7 - Version 1.00

Ultimate strength analysis Cross section (column): QS

Action forces / Efficiency: eff(M,N) = 0.93 OK

No.	AP	P	Bending and axial force				Shear forces and torsion			Complete CS eff(M,N,V,T) [-]
			N [kN]	M _y [kNm]	M _z [kNm]	eff(M,N) [-]	V _y [kN]	V _z [kN]	T [kNm]	
1	!ULS		-3250.9	9.00000	-	0.79				
2	!ULS		-3238.0	65.60000	-	0.93				
3	!ULS		-3227.8	-3.10E+1	-	0.84				
4	!ULS		-3227.8	-3.10E+1	-	0.84				
5	!ULS		-3238.0	65.60000	-	0.93				
6	!ULS		-3238.0	65.60000	-	0.93				
7	!ULS		-3228.2	-3.10E+1	-	0.84				
8	!ULS		-3250.9	9.00000	-	0.79				
9	!ULS		-3266.2	9.00000	-	0.79				
10	!ULS		-3030.9	37.90000	-	0.81				
11	!ULS		-3150.3	-3.24E+1	-	0.82				
12	!ULS		-3150.3	-3.24E+1	-	0.82				
13	!ULS		-3030.9	37.90000	-	0.81				
14	!ULS		-3030.9	37.90000	-	0.81				
15	!ULS		-3164.4	-3.19E+1	-	0.82				
16	!ULS		-3206.1	-1.90E+1	-	0.80				
17	!ULS		-3405.5	9.00000	-	0.82				
18	!ULS		-2927.9	54.40000	-	0.83				
19	!ULS		-2914.3	-4.99E+1	-	0.82				
20	!ULS		-2913.8	-4.99E+1	-	0.82				
21	!ULS		-2927.9	54.40000	-	0.83				
22	!ULS		-2936.5	54.10000	-	0.83				
23	!ULS		-3141.7	-3.92E+1	-	0.84				
24	!ULS		-2908.9	15.10000	-	0.72				

- : Calculation with uniaxial bending (neutral axis is horizontal)!!

Analysis-Parameters "ULS" Standard: Eurocode EN

ID	Diagram σ-ε			Strain Limits			σ _s [N/mm ²]	Partial safety factor				Various parameters			
	C	S		ε _{c2} [‰]	ε _{cu3} [‰]	ε _{ud} [‰]		α _{cc} [-]	γ _c [-]	γ _s [-]		θ [-]	φ [-]		
!ULS	2/0	1		-2.000	-3.500	2.000E		0.85	1.50	1.15		45.00	0		

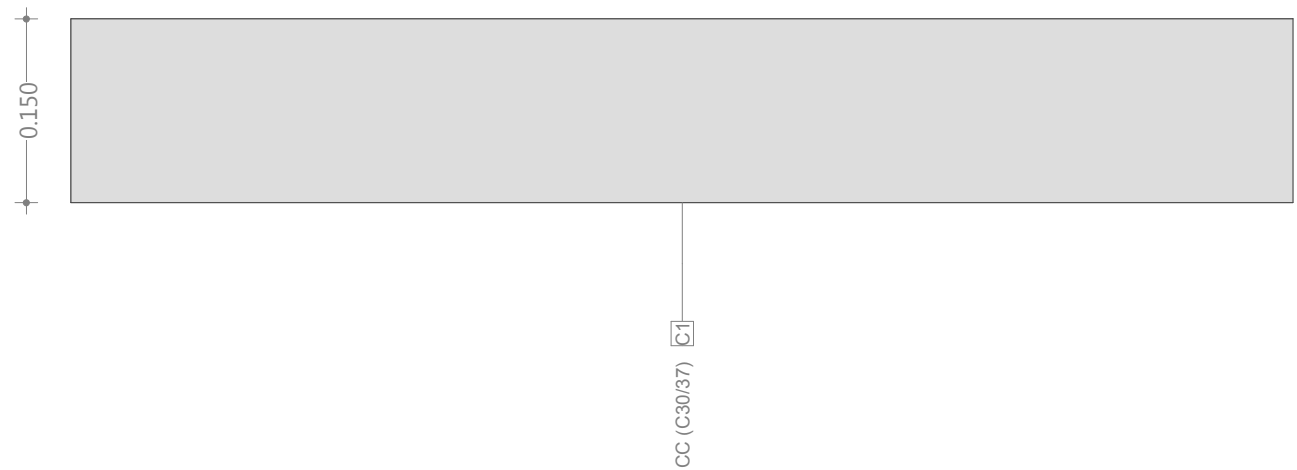
θ : Inclination of diagonal in compression

φ : Creep coefficient

Nr.:

Cross-section QS (C30/37): Outline

Scale 1 :6.2



Cross section (column): QS

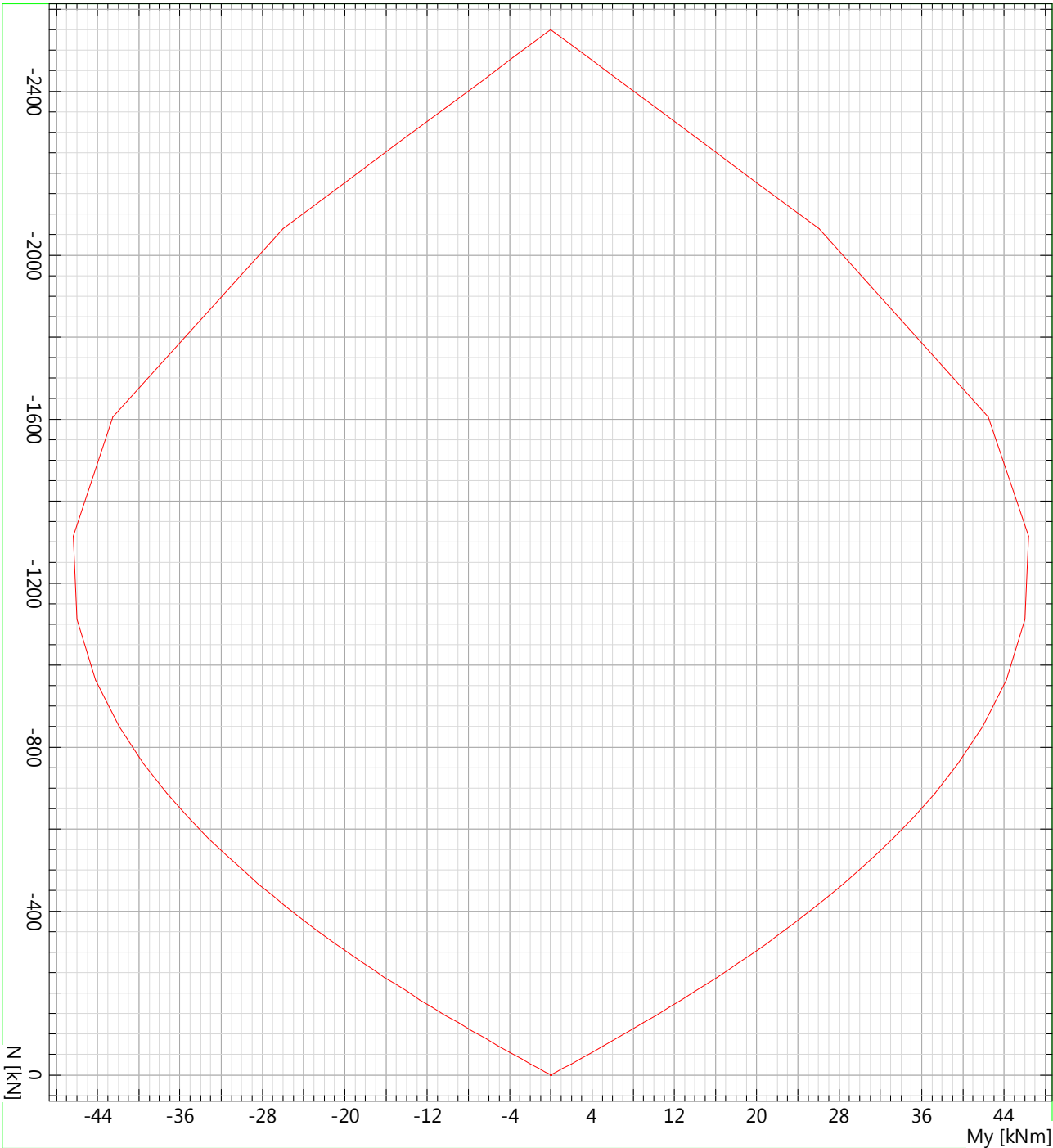
Geometrical definition of cross section

Name	Material	Class	Type	No.	y _q [m]	z _q [m]	No.	y _q [m]	z _q [m]
C1	CC	C30/37	Polygon	1	0	0	2	1.000	0
				3	1.000	0.150	4	0	0.150

Section properties: (reference material: CC)

	Area [m ²]		Moment of inertia [m ⁴]		C.G.,Angle [m]				Mass [kg/m]
A _x	0.1500	I _x	0.001019	ys	0.500			M _{CS}	375.0
A _y	(=A _x)	I _y	0.000281	zs	0.075				
A _z	(=A _x)	I _z	0.012500	β	0 [°]				

M-N-Interaction diagram Cross section (column): QS
!ULS / Reinforcement percentage: $\rho = 0$ o/o



6198.1 LAB ANDES										Page 3					
Galería de escape -Revestimiento definitivo - CS3 SISMO										30.05.19, 22:58					
Lombardi AG, 6648 Minusio-Locarno										PR	FAGUS-7 - Version 1.00				
Ultimate strength analysis Cross section (column): QS															
Action forces / Efficiency: eff(M,N) = 0.78 OK															
No.	AP	P	Bending and axial force				Shear forces and torsion			Complete CS eff(M,N,V,T) [-]					
			N [kN]	M _y [kNm]	M _z [kNm]	eff(M,N) [-]	V _y [kN]	V _z [kN]	T [kNm]						
1	!ULS		-1539.2	3.10000	-	0.63									
2	!ULS		-1534.6	8.50000	-	0.66									
3	!ULS		-1528.5	-7.00000	-	0.65									
4	!ULS		-1528.5	-7.00000	-	0.65									
5	!ULS		-1534.6	8.50000	-	0.66									
6	!ULS		-1534.6	8.50000	-	0.66									
7	!ULS		-1529.4	-7.00000	-	0.65									
8	!ULS		-1530.1	-4.60000	-	0.63									
9	!ULS		-1871.5	3.10000	-	0.76									
10	!ULS		-1654.9	16.30000	-	0.77									
11	!ULS		-1647.7	-1.40E+1	-	0.75									
12	!ULS		-1647.0	-1.40E+1	-	0.75									
13	!ULS		-1654.9	16.30000	-	0.77									
14	!ULS		-1654.9	16.30000	-	0.77									
15	!ULS		-1762.9	-1.19E+1	-	0.78									
16	!ULS		-1645.2	8.60000	-	0.71									
17	!ULS		-1748.6	3.10000	-	0.71									
18	!ULS		-1588.2	12.80000	-	0.71									
19	!ULS		-1582.8	-1.12E+1	-	0.70									
20	!ULS		-1582.3	-1.12E+1	-	0.70									
21	!ULS		-1588.2	12.80000	-	0.71									
22	!ULS		-1588.2	12.80000	-	0.71									
23	!ULS		-1668.1	-9.60000	-	0.72									
24	!ULS		-1580.9	7.20000	-	0.67									
- : Calculation with uniaxial bending (neutral axis is horizontal)!!															
Analysis-Parameters "!"ULS" Standard: Eurocode EN															
ID	Diagram σ-ε			Strain Limits			σ _s [N/mm²]	Partial safety factor				Various parameters			
	C	S		ε _{c2} [‰]	ε _{cu3} [‰]	ε _{ud} [‰]		α _{cc} [-]	γ _c [-]	γ _s [-]		θ [-]	φ [-]		
!ULS	2/0	1		-2.000	-3.500	2.000E		0.85	1.50	1.15		45.00	0		
θ : Inclination of diagonal in compression															
φ : Creep coefficient															
												Nr.:			

Anexo L

Cúpula Pozo principal - CS1 - corto plazo

INPUT

Roof of section	
Radius	25.00 [m]

Rock	
Unit weight	27.0 [kN/m3]
Overburden	1750.00 [m]
Coefficient K	1.00 [-]
Friction	53.3 [°]
SF Friction	1.25 [-]
Cohesion	0.0 [kPa]
SF Cohesion	1.00 [-]

Friction	47.0 [°]
Cohesion	0.0 [kPa]

Earthquake	
kV	0.00 [-]

Water	
Unit weight	10.0 [kN/m3]
Head	0.00 [m]
Water coeff top	0.00 [-]
Water coeff bottom	0.00 [-]

Shotcrete	
Thickness	30 [cm]
Unit weight	25.0 [kN/m3]
Shear strength	1.1 [MPa]
Compressive strength	20.0 [MPa]
SF	1.00 [-]
Thickness (arch effect)	10.00 [cm]

Shear force	330.0 [kN/m]
Axial force	2000.0 [kN/m]
Normal stress	6.7 [MPa]

25.00

Anchor	
Bar diameter	32 [mm]
Yielding	435.2 [MPa]
SF	1.35 [-]
in plane	2.00 [m]
out of plane	2.00 [m]
Anchor length	10.0 [m]
Boring diameter	61 [mm]
Bond strength	1.000 [MPa]

Anchoring length	1.8 [m]
Force	259.3 [kN]
A	4.0 [m2]
Pressure	64.8 [kPa]
R1	33.2 [m]
R2	35.0 [m]

CONTROLS

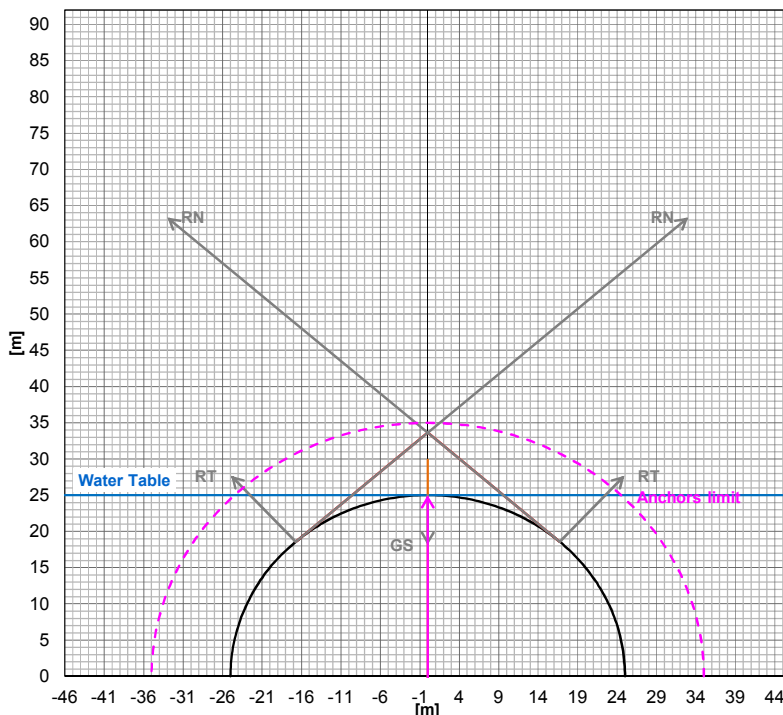
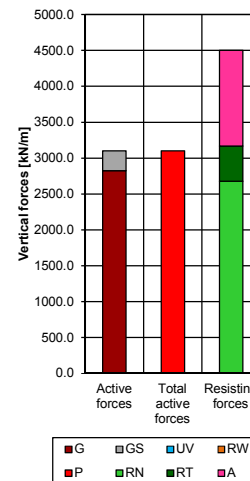
Shotcrete	d_arch < d_actual ... - 5 cm	
	Normal stress < 10 MPa	

Anchors	Lopt	11.4 [m]	Bolt length OK
	Lmin	9.1 [m]	
	Lmax	13.6 [m]	
	L_anchoring < L_bolt		

Bearing factor	SF_min	1.5 [-]	Bearing capacity > 1 OK
----------------	--------	---------	-------------------------

CALCULATION RESULTS - DETERMINANT WEDGE

Geometry	alfa	Critical [-]	Wedge top angle (graphic)
	alfa	48 [°]	Wedge top angle (critical value)
	alfa	50 [°]	Wedge top angle (user defined value)
	H	8.64 [m]	Wedge height
	h*	8.64 [m]	Wedge height limited by ground level
Active forces	G	2824.3 [kN/m]	Wedge weight [vertical direction, + downward]
	N	608656.5 [kN/m]	Total field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U	0.0 [kN/m]	Water pressure [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U _v	0.0 [kN/m]	Water pressure [vertical direction, + downward]
	N'	608656.5 [kN/m]	Effective field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	T _c	0.0 [kN/m]	Cohesive resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	T _f	653260.3 [kN/m]	Friction resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	R _w	0.0 [kN/m]	N' + T _c + T _f resultant [vertical direction, + upward, 0 if downward]
	G _s	274.9 [kN/m]	Shotcrete weight [vertical direction, + downward]
	P	3099.2 [kN/m]	Total active forces $G + G_s + 2 \cdot U_v - 2 \cdot R_w$ [vertical direction, + downward, 0 if upward]
Resisting forces	R _N	2676.5 [kN/m]	Shotcrete compressive strength [vertical direction, + upward]
	R _T	490.5 [kN/m]	Shotcrete shear strength [vertical direction, + upward]
	A	1334.3 [kN/m]	Anchor resistance [vertical direction, + upward]
	R	4501.3 [kN/m]	Total resisting forces $R_N + R_T + A$ [vertical direction, + upward]
Bearing factor	SF	1.5 [-]	Bearing factor R / P



ZOOM -

ZOOM +

Cúpula Pozo principal - CS2 - corto plazo

INPUT

Roof of section	
Radius	25.00 [m]

Rock	
Unit weight	27.0 [kN/m3]
Overburden	1750.00 [m]
Coefficient K	1.00 [-]
Friction	50.4 [°]
SF Friction	1.25 [-]
Cohesion	0.0 [kPa]
SF Cohesion	1.00 [-]

Friction	44.0 [°]
Cohesion	0.0 [kPa]

Earthquake	
kV	0.00 [-]

Water	
Unit weight	10.0 [kN/m3]
Head	0.00 [m]
Water coeff top	0.00 [-]
Water coeff bottom	0.00 [-]

Shotcrete	
Thickness	30 [cm]
Unit weight	25.0 [kN/m3]
Shear strength	1.1 [MPa]
Compressive strength	20.0 [MPa]
SF	1.00 [-]
Thickness (arch effect)	10.00 [cm]

Shear force	330.0 [kN/m]
Axial force	2000.0 [kN/m]
Normal stress	6.7 [MPa]

Anchor	
Bar diameter	32 [mm]
Yielding	435.2 [MPa]
SF	1.35 [-]
in plane	2.00 [m]
out of plane	2.00 [m]
Anchor length	10.0 [m]
Boring diameter	61 [mm]
Bond strength	1.000 [MPa]

Anchoring length	1.8 [m]
Force	259.3 [kN]
A	4.0 [m2]
Pressure	64.8 [kPa]
R1	33.2 [m]
R2	35.0 [m]

CONTROLS

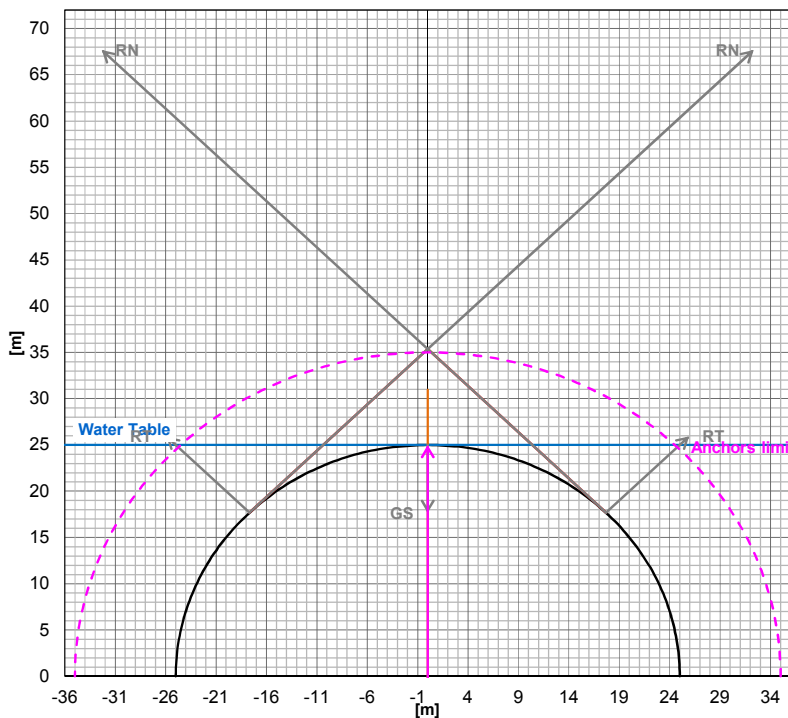
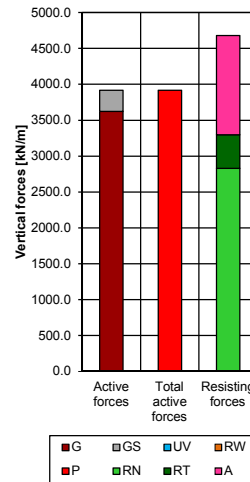
Shotcrete	d_arch < d_actual ... - 5 cm	
	Normal stress < 10 MPa	

Anchors	Lopt	11.4 [m]	Bolt length OK
	Lmin	9.1 [m]	
	Lmax	13.6 [m]	
	L_anchoring < L_bolt		

Bearing factor	SF_min	1.2 [-]	Bearing capacity > 1 OK
----------------	--------	---------	-------------------------

CALCULATION RESULTS - DETERMINANT WEDGE

Geometry	alfa	Critical [-]	Wedge top angle (graphic)
	alfa	45 [°]	Wedge top angle (critical value)
	alfa	50 [°]	Wedge top angle (user defined value)
	H	10.36 [m]	Wedge height
	h*	10.36 [m]	Wedge height limited by ground level
Active forces	G	3621.4 [kN/m]	Wedge weight [vertical direction, + downward]
	N	689912.9 [kN/m]	Total field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U	0.0 [kN/m]	Water pressure [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U _v	0.0 [kN/m]	Water pressure [vertical direction, + downward]
	N'	689912.9 [kN/m]	Effective field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	T _c	0.0 [kN/m]	Cohesive resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	T _f	667169.2 [kN/m]	Friction resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	R _w	0.0 [kN/m]	N' + T _c + T _f resultant [vertical direction, + upward, 0 if downward]
	G _s	294.5 [kN/m]	Shotcrete weight [vertical direction, + downward]
	P	3915.9 [kN/m]	Total active forces $G + G_s + 2 \cdot U_v - 2 \cdot R_w$ [vertical direction, + downward, 0 if upward]
Resisting forces	R _N	2828.4 [kN/m]	Shotcrete compressive strength [vertical direction, + upward]
	R _T	466.7 [kN/m]	Shotcrete shear strength [vertical direction, + upward]
	A	1385.1 [kN/m]	Anchor resistance [vertical direction, + upward]
	R	4680.2 [kN/m]	Total resisting forces $R_N + R_T + A$ [vertical direction, + upward]
Bearing factor	SF	1.2 [-]	Bearing factor R / P



ZOOM -

ZOOM +

Cúpula Pozo principal - CS3 - corto plazo

INPUT

Roof of section	
Radius	25.00 [m]

Rock	
Unit weight	27.0 [kN/m3]
Overburden	1750.00 [m]
Coefficient K	1.00 [-]
Friction	45.3 [°]
SF Friction	1.25 [-]
Cohesion	0.0 [kPa]
SF Cohesion	1.00 [-]

Friction	39.0 [°]
Cohesion	0.0 [kPa]

Earthquake	
kV	0.00 [-]

Water	
Unit weight	10.0 [kN/m3]
Head	0.00 [m]
Water coeff top	0.00 [-]
Water coeff bottom	0.00 [-]

Shotcrete	
Thickness	30 [cm]
Unit weight	25.0 [kN/m3]
Shear strength	1.1 [MPa]
Compressive strength	20.0 [MPa]
SF	1.00 [-]
Thickness (arch effect)	10.00 [cm]

Shear force	330.0 [kN/m]
Axial force	2000.0 [kN/m]
Normal stress	6.7 [MPa]

Anchor	
Bar diameter	32 [mm]
Yielding	435.2 [MPa]
SF	1.35 [-]
in plane	1.50 [m]
out of plane	1.50 [m]
Anchor length	12.0 [m]
Boring diameter	61 [mm]
Bond strength	0.700 [MPa]

Anchoring length	2.6 [m]
Force	259.3 [kN]
A	2.3 [m2]
Pressure	115.2 [kPa]
R1	34.4 [m]
R2	37.0 [m]

CONTROLS

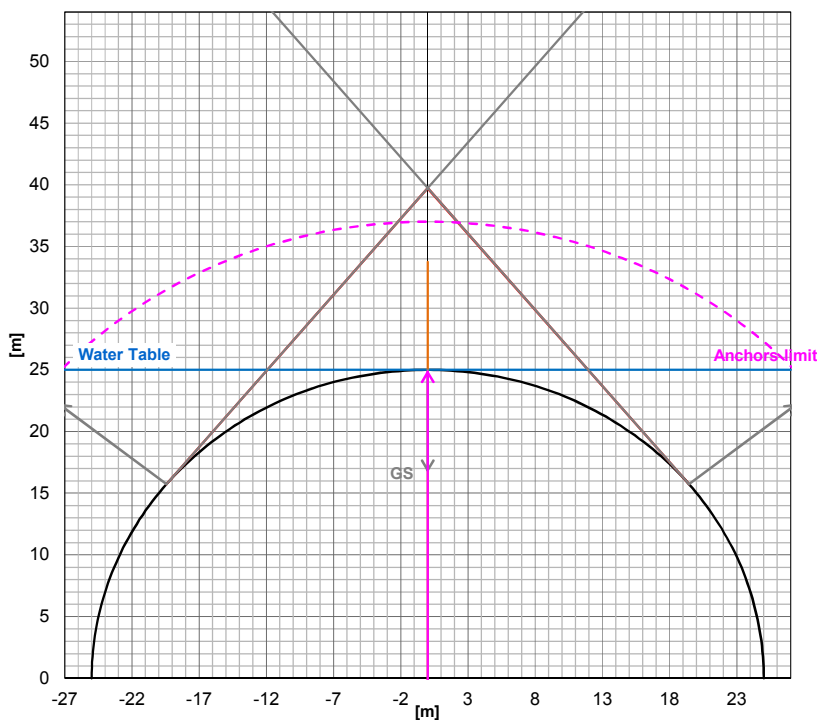
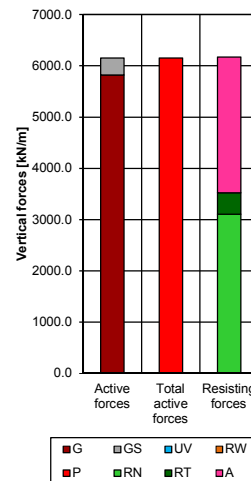
Shotcrete	d_arch < d_actual ... - 5 cm	
	Normal stress < 10 MPa	

Anchors	Lopt	11.4 [m]	Bolt length OK
	Lmin	9.1 [m]	
	Lmax	13.6 [m]	
	L_anchoring < L_bolt		

Bearing factor	SF_min	1.0 [-]	Bearing capacity > 1 OK
----------------	--------	---------	-------------------------

CALCULATION RESULTS - DETERMINANT WEDGE

Geometry	alfa	Critical [-]	Wedge top angle (graphic)
	alfa	39 [°]	Wedge top angle (critical value)
	alfa	52 [°]	Wedge top angle (user defined value)
	H	14.73 [m]	Wedge height
	h*	14.73 [m]	Wedge height limited by ground level
Active forces	G	5818.1 [kN/m]	Wedge weight [vertical direction, + downward]
	N	891528.2 [kN/m]	Total field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U	0.0 [kN/m]	Water pressure [normal to discontinuity, + toward wedge]
	U _v	0.0 [kN/m]	Water pressure [vertical direction, + downward]
	N'	891528.2 [kN/m]	Effective field stress [normal to discontinuity, + toward wedge]
	T _c	0.0 [kN/m]	Cohesive resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	T _f	720730.8 [kN/m]	Friction resistance [parallel to discontinuity, + toward wedge apex]
	R _w	0.0 [kN/m]	N' + T _c + T _f resultant [vertical direction, + upward, 0 if downward]
	G _s	333.8 [kN/m]	Shotcrete weight [vertical direction, + downward]
	P	6151.9 [kN/m]	Total active forces $G + G_s + 2 \cdot U_v - 2 \cdot R_w$ [vertical direction, + downward, 0 if upward]
Resisting forces	R _N	3108.6 [kN/m]	Shotcrete compressive strength [vertical direction, + upward]
	R _T	415.4 [kN/m]	Shotcrete shear strength [vertical direction, + upward]
	A	2647.2 [kN/m]	Anchor resistance [vertical direction, + upward]
	R	6171.1 [kN/m]	Total resisting forces $R_N + R_T + A$ [vertical direction, + upward]
Bearing factor	SF	1.0 [-]	Bearing factor R / P



ZOOM -

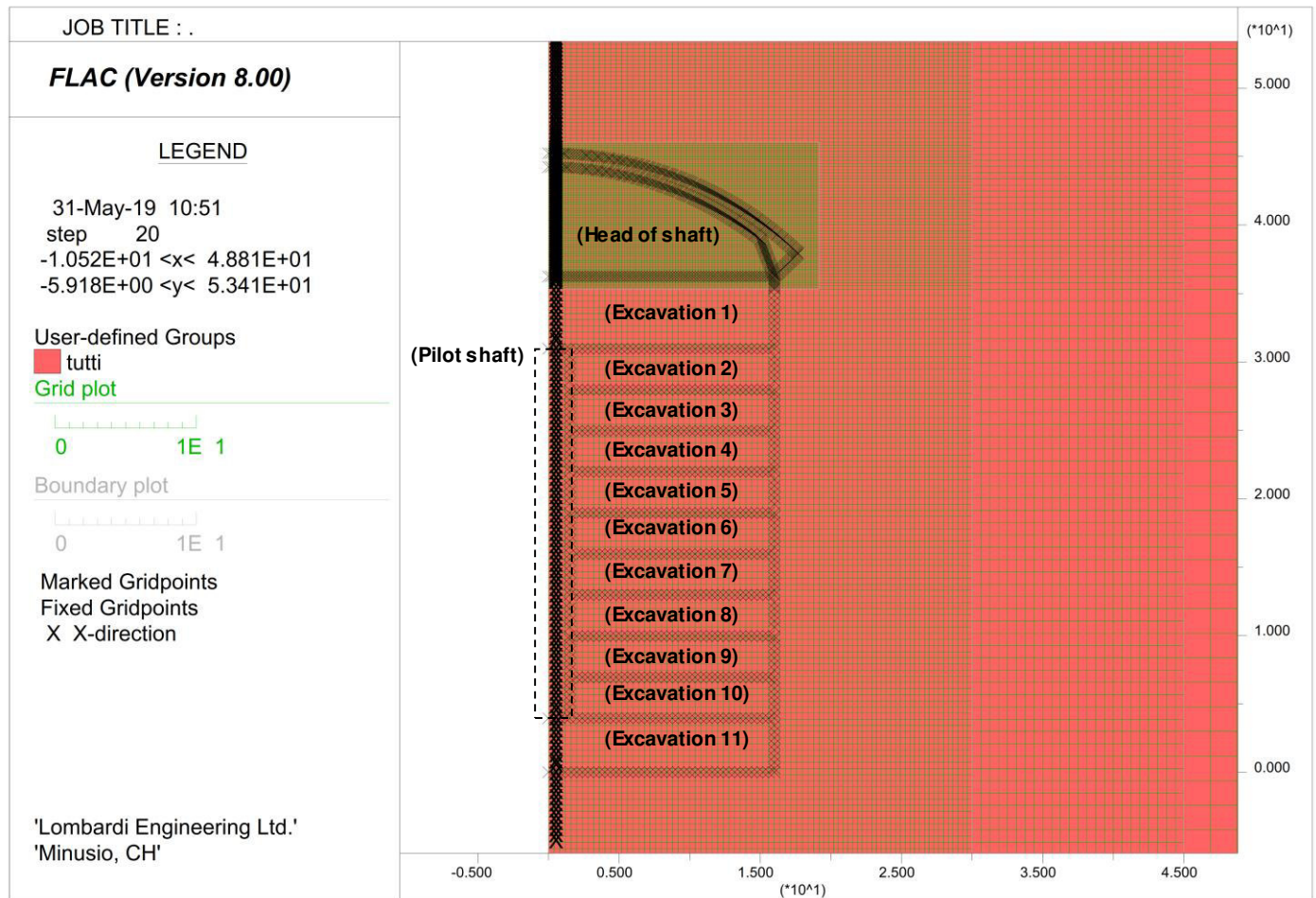
ZOOM +

Anexo M

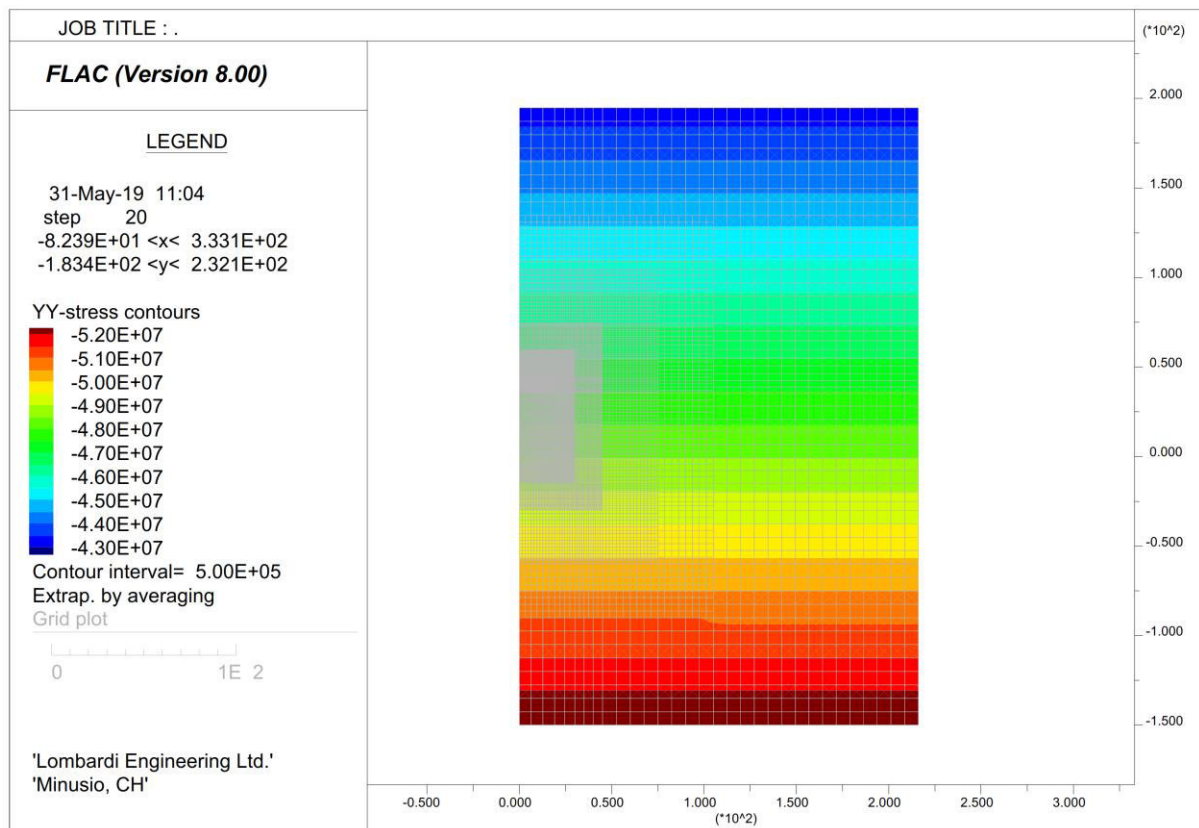
GENERAL :

- Axial-Symmetric Model
- Excavation phases :
 - o Excavation of the head of the shaft
 - o Excavation 1
 - o Excavation of the pilot shaft (Ø3m)
 - o Excavation 2-11

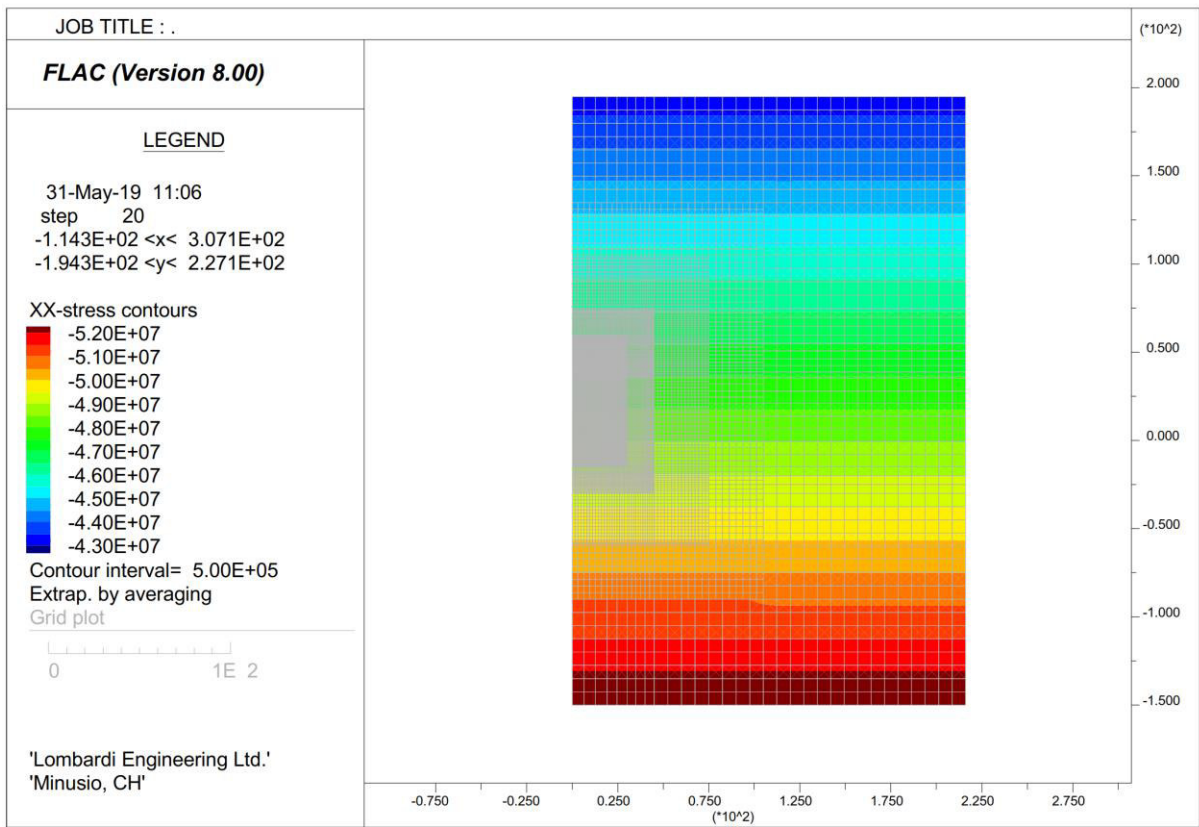
MODEL



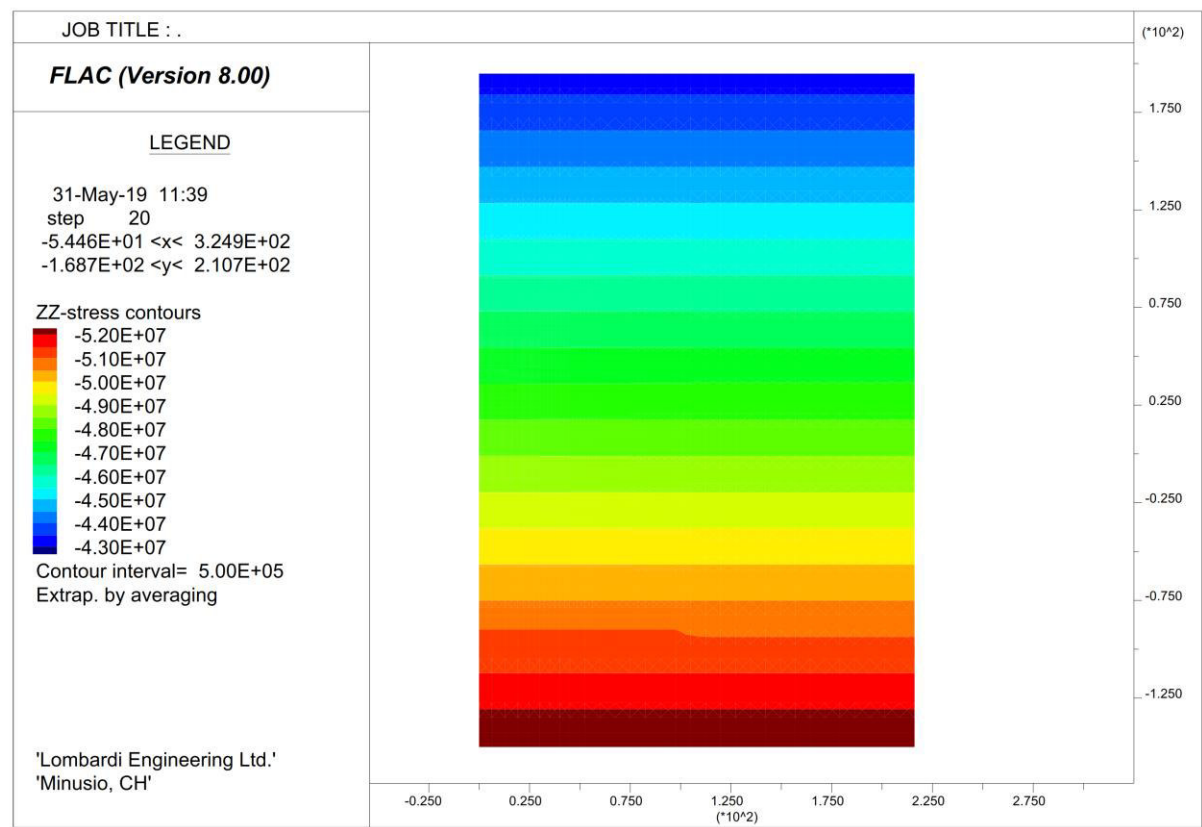
INITIAL VERTICAL STRESS (Y)



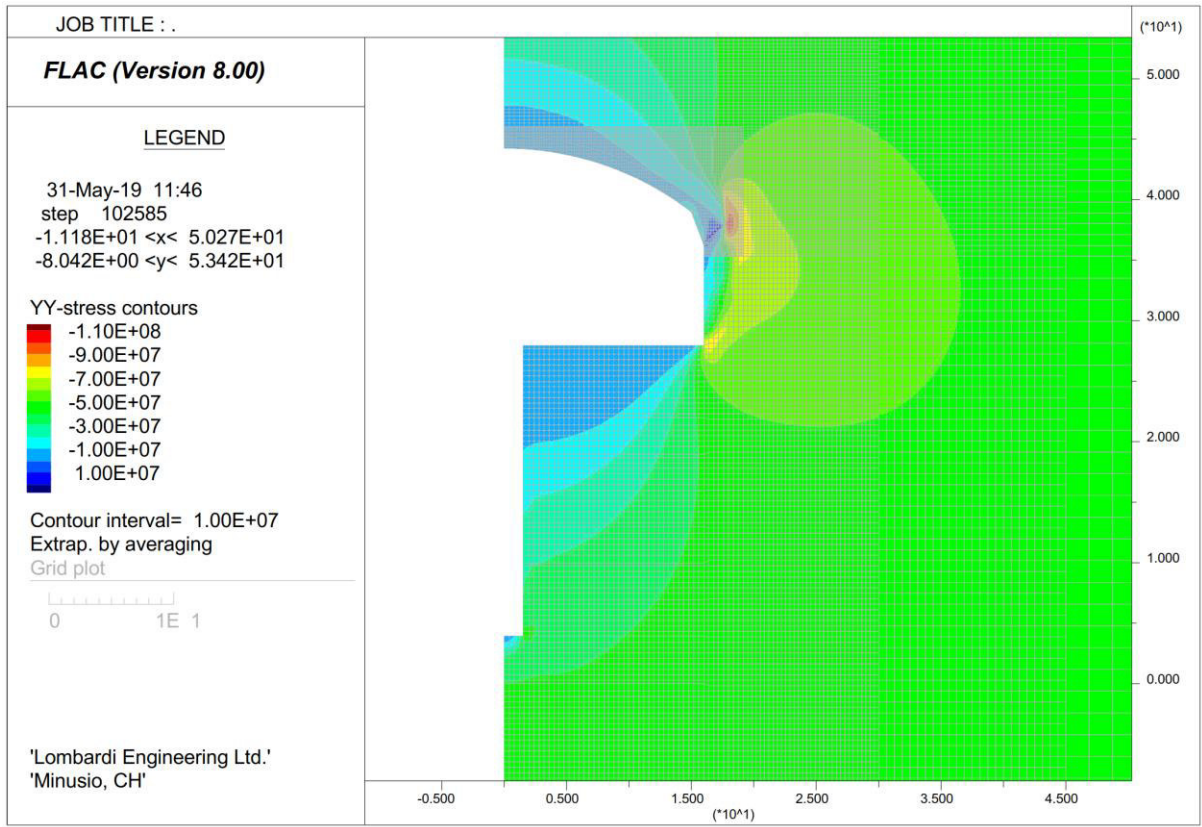
INITIAL HORIZONTAL STRESS (X)



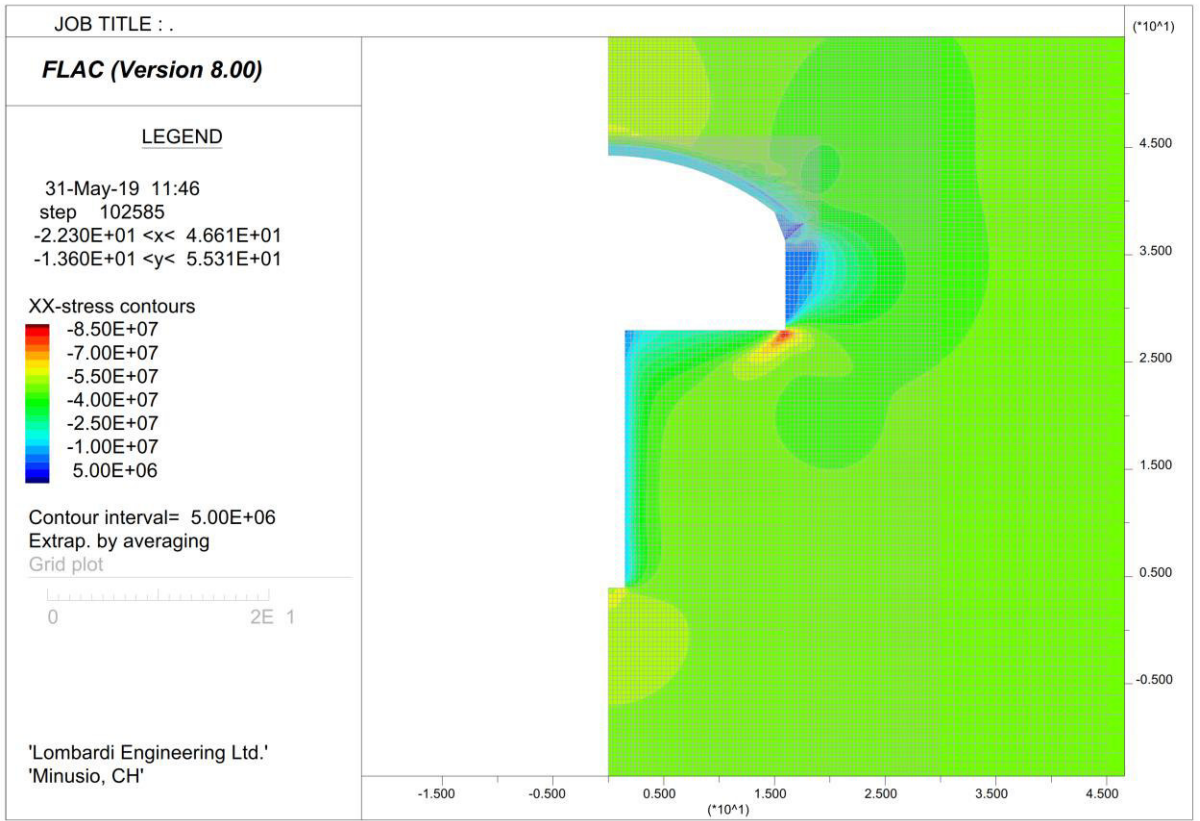
INITIAL HORIZONTAL STRESS (Z)



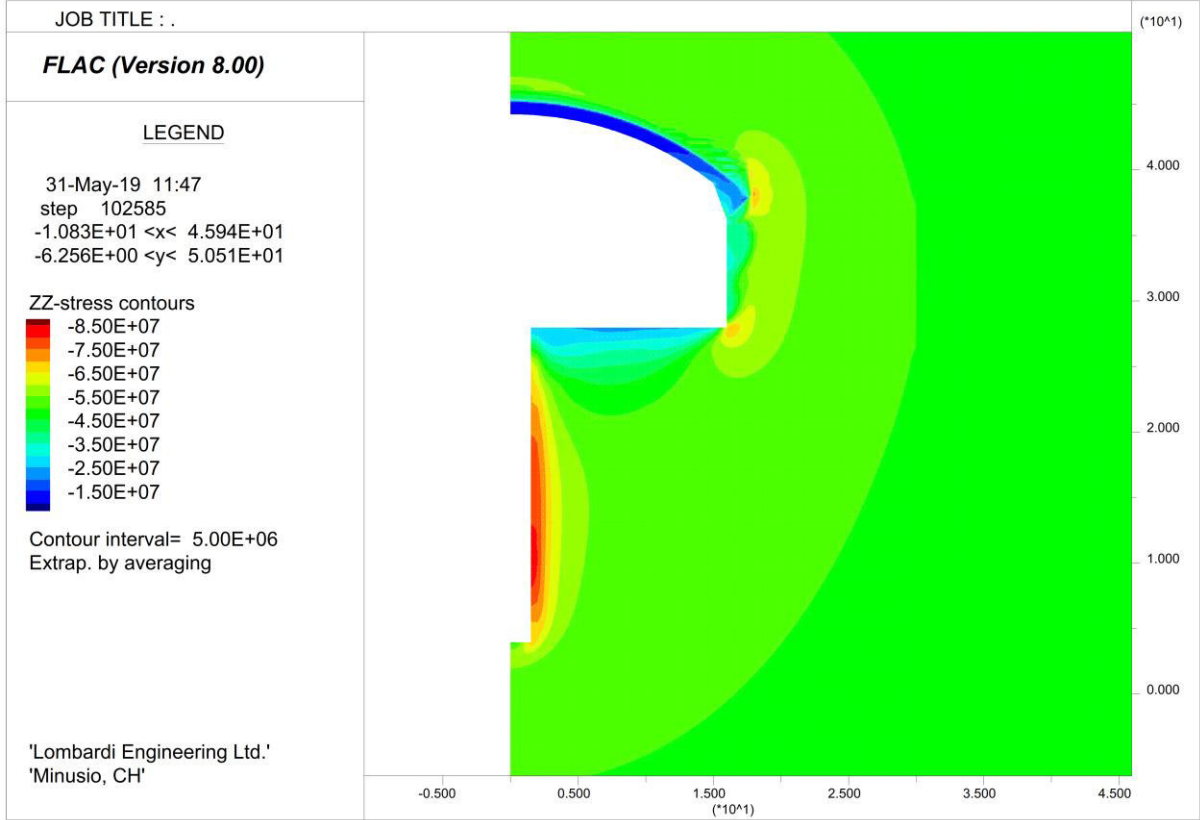
EXCAVATION 2 : VERTICAL STRESS (Y)



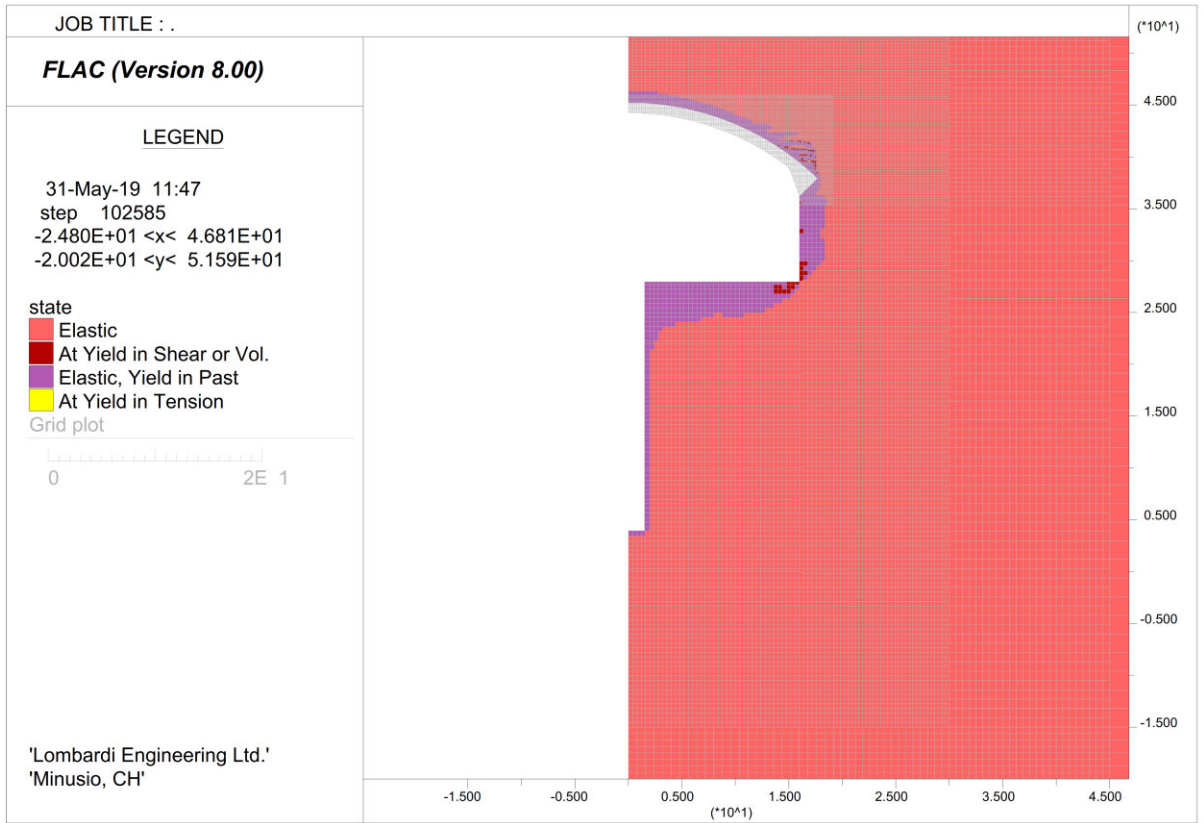
EXCAVATION 2 : HORIZONTAL STRESS (X)



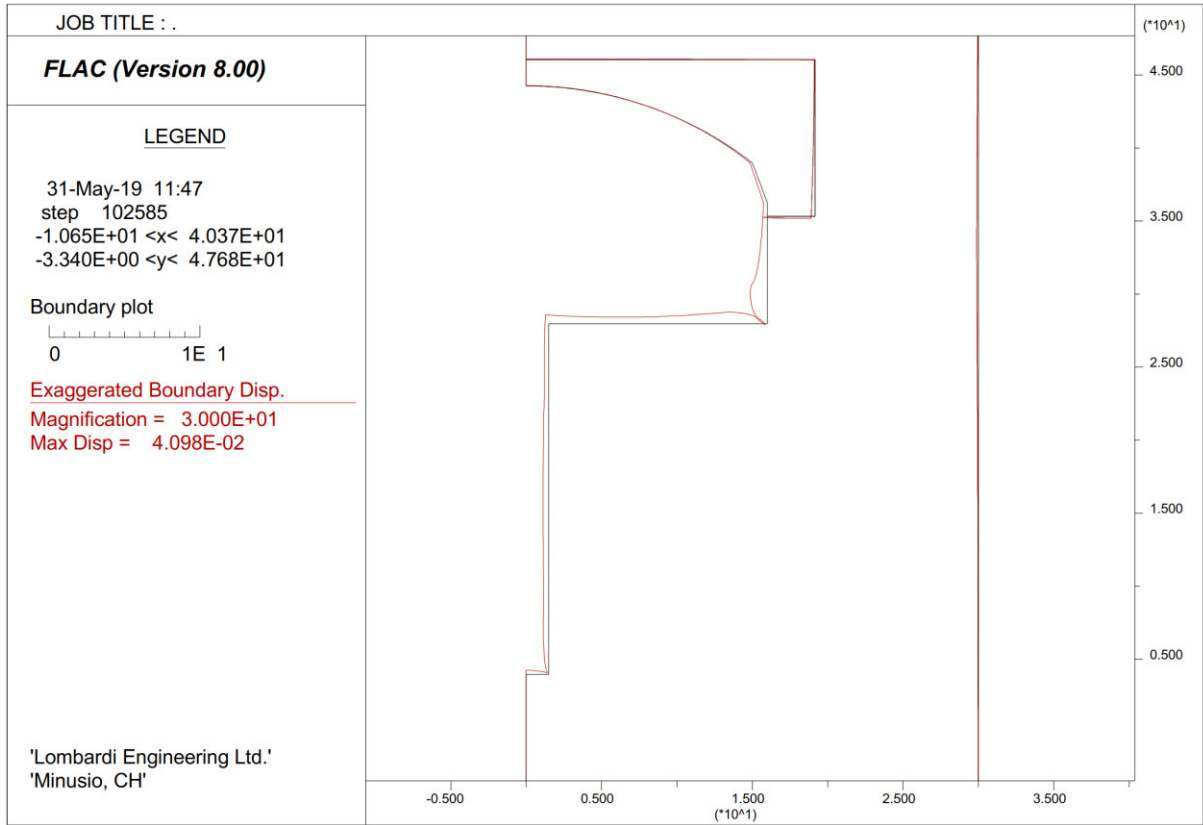
EXCAVATION 2 : HORIZONTAL STRESS (Z)



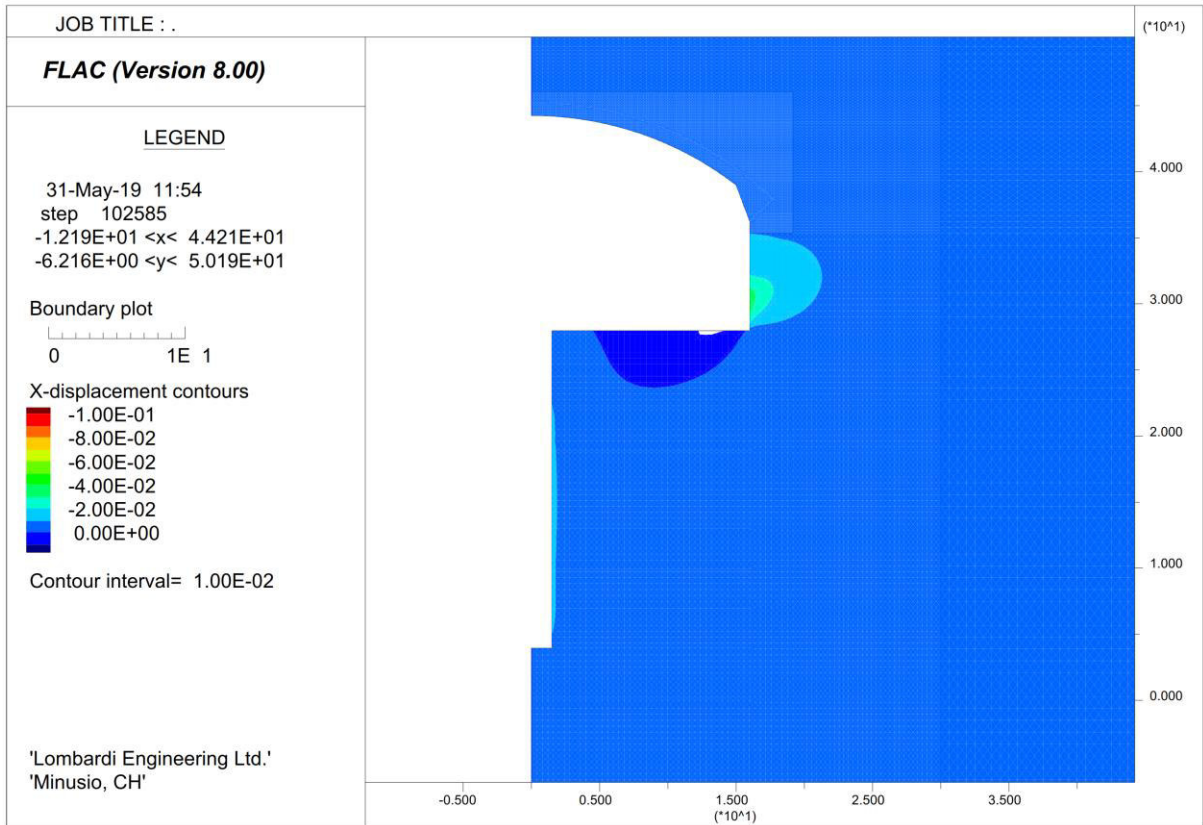
EXCAVATION 2 : PLASTIC ZONE



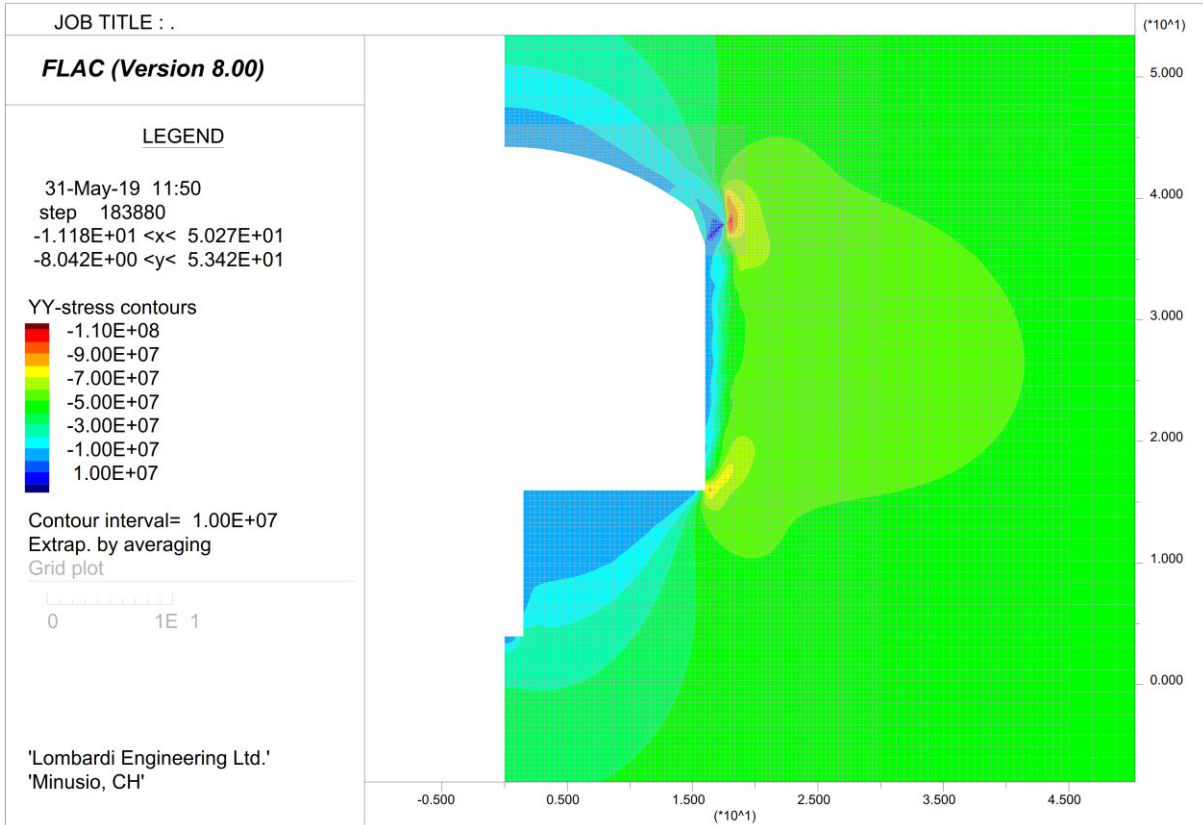
EXCAVATION 2 : DISPLACEMENT



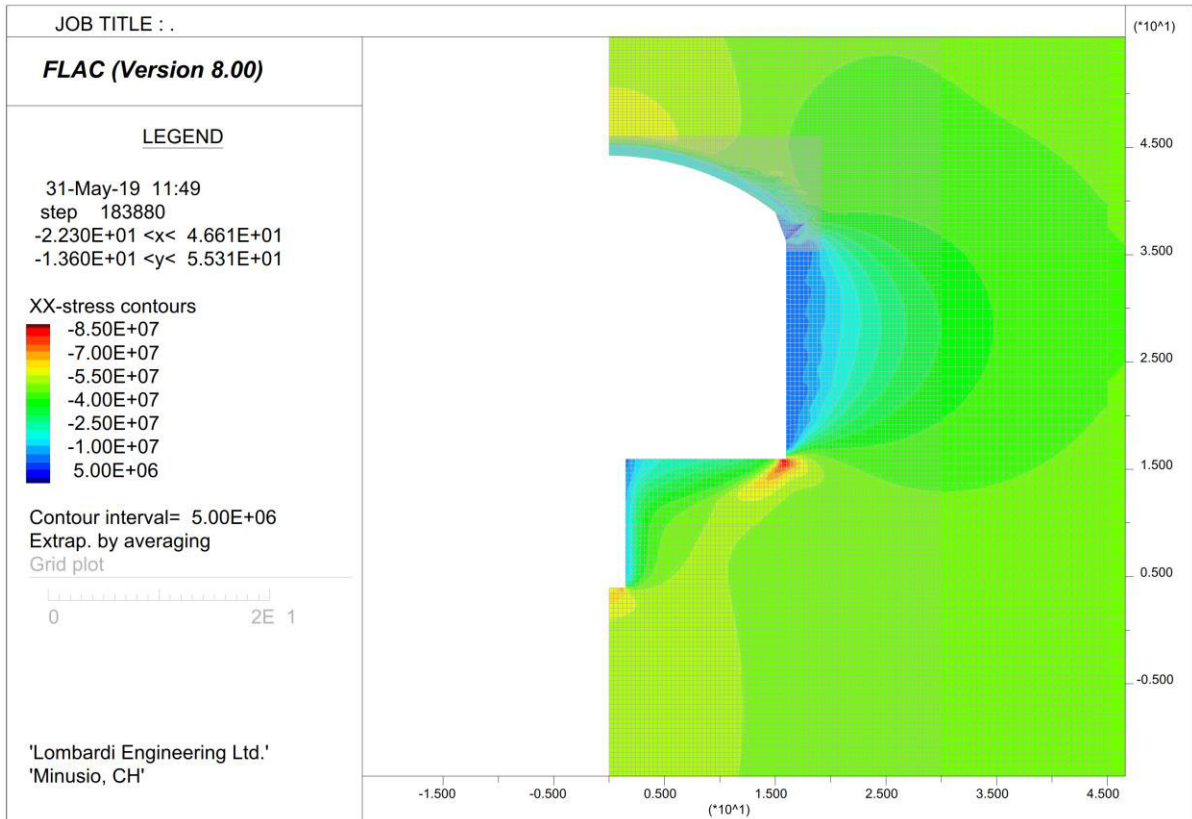
EXCAVATION 2 : DISPLACEMENT X



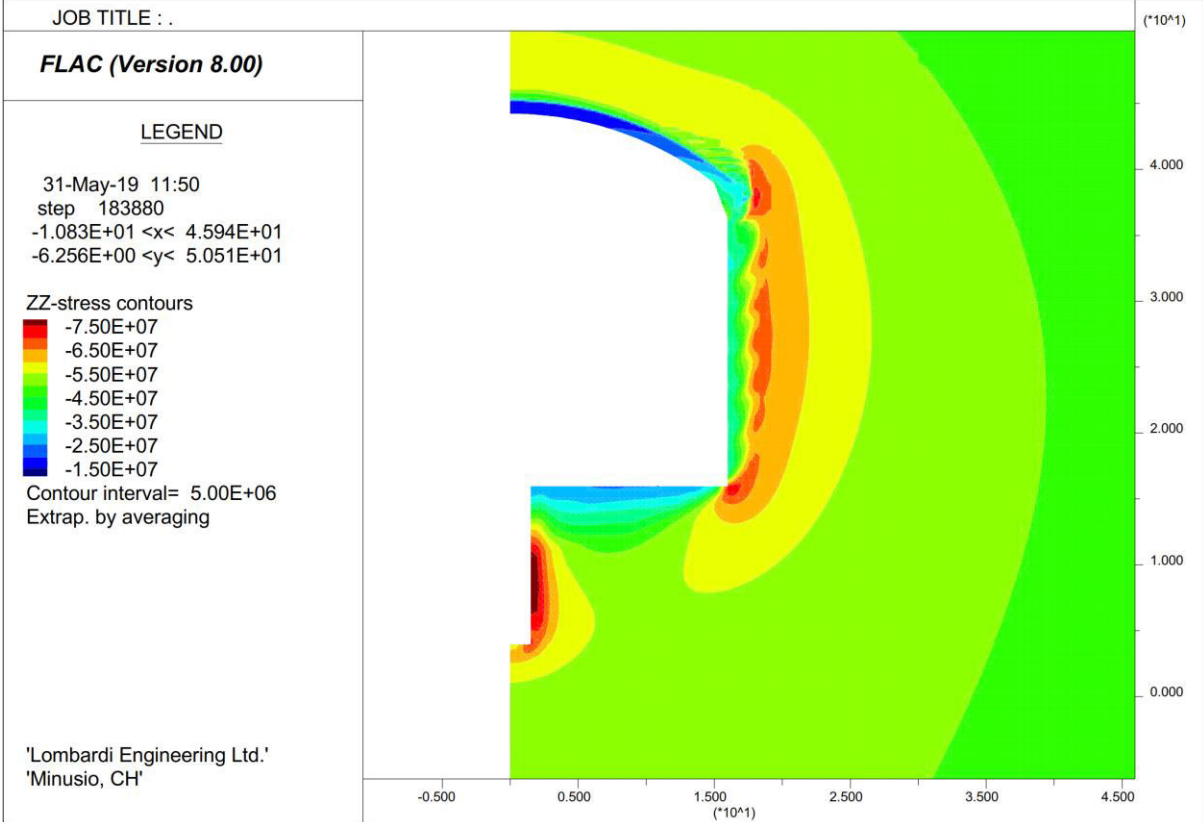
EXCAVATION 6 : VERTICAL STRESS (Y)



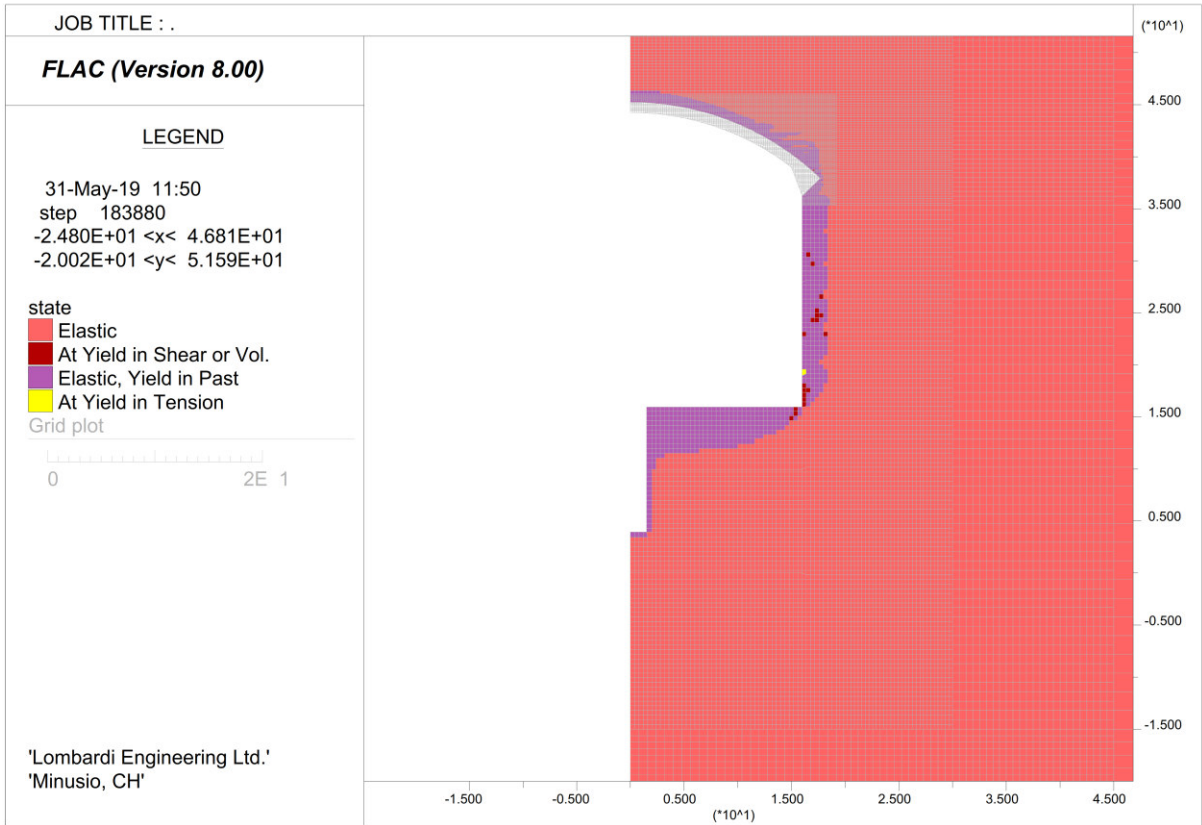
EXCAVATION 6 : HORIZONTAL STRESS (X)



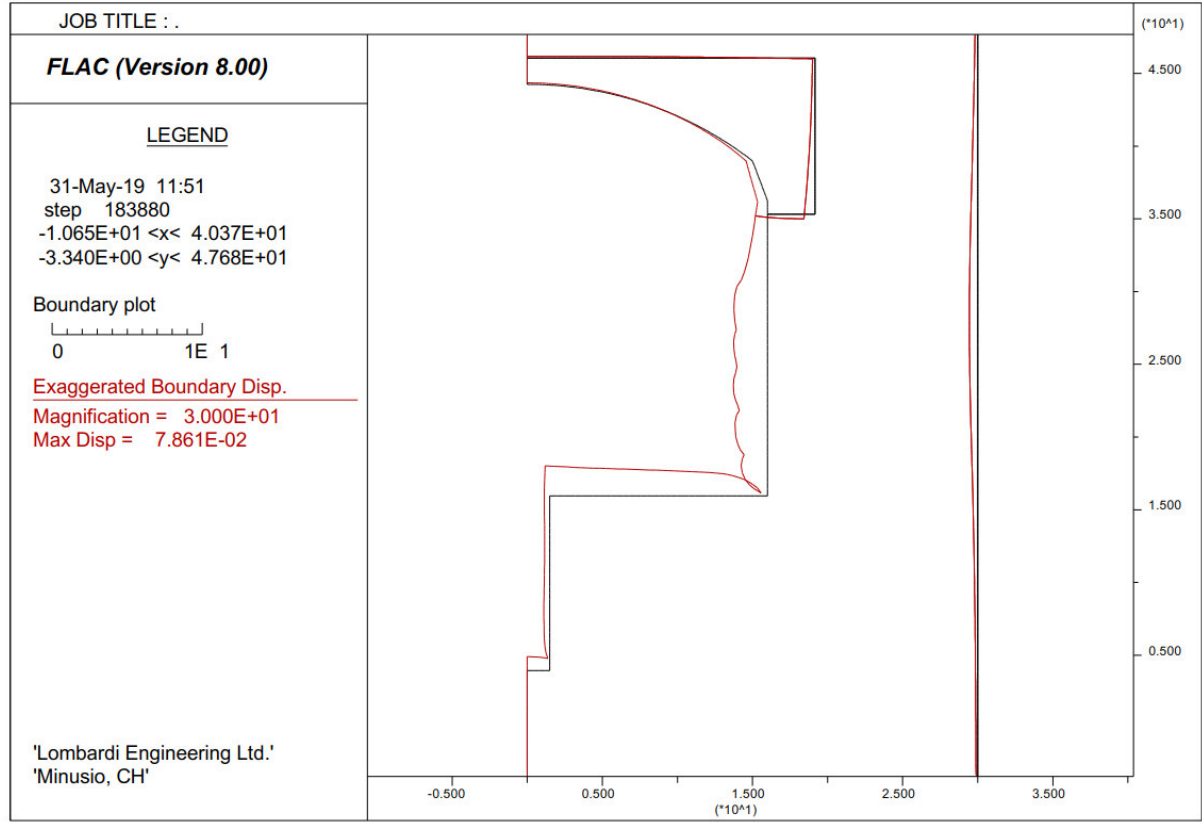
EXCAVATION 6 : HORIZONTAL STRESS (Z)



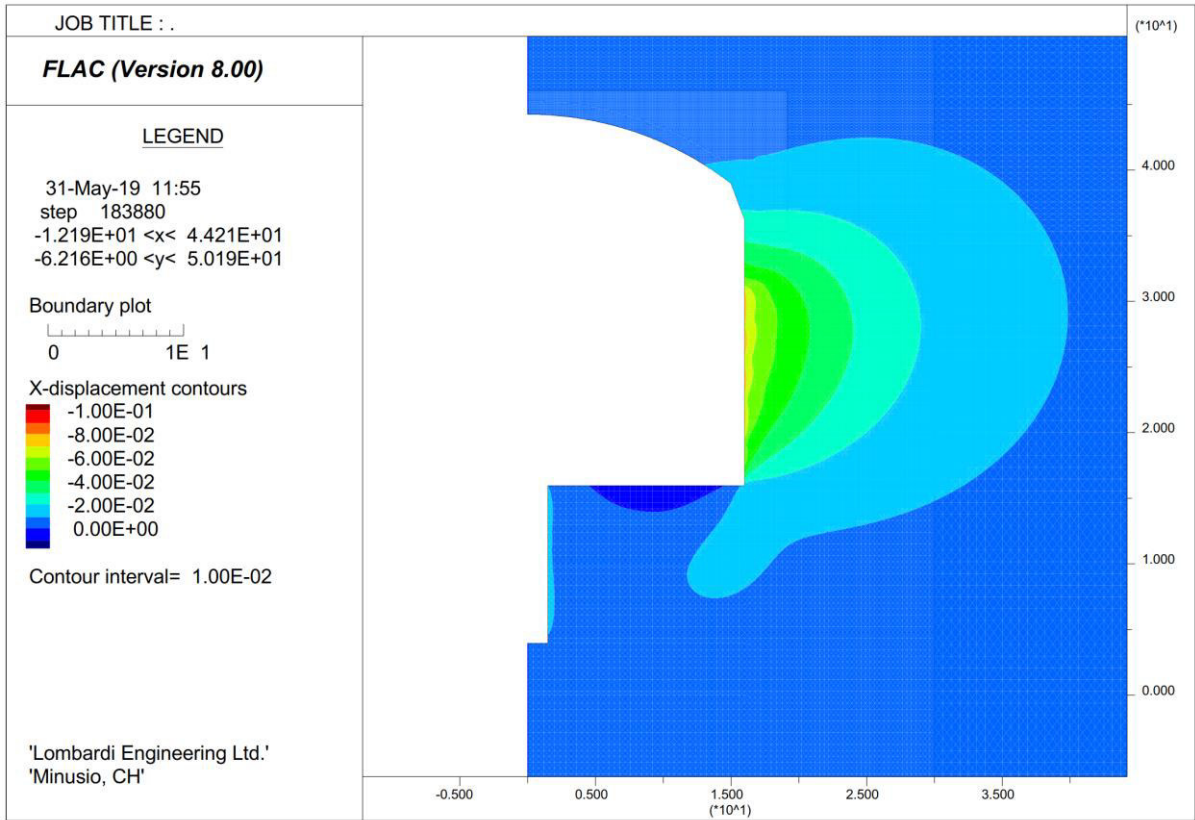
EXCAVATION 6 : PLASTIC ZONE



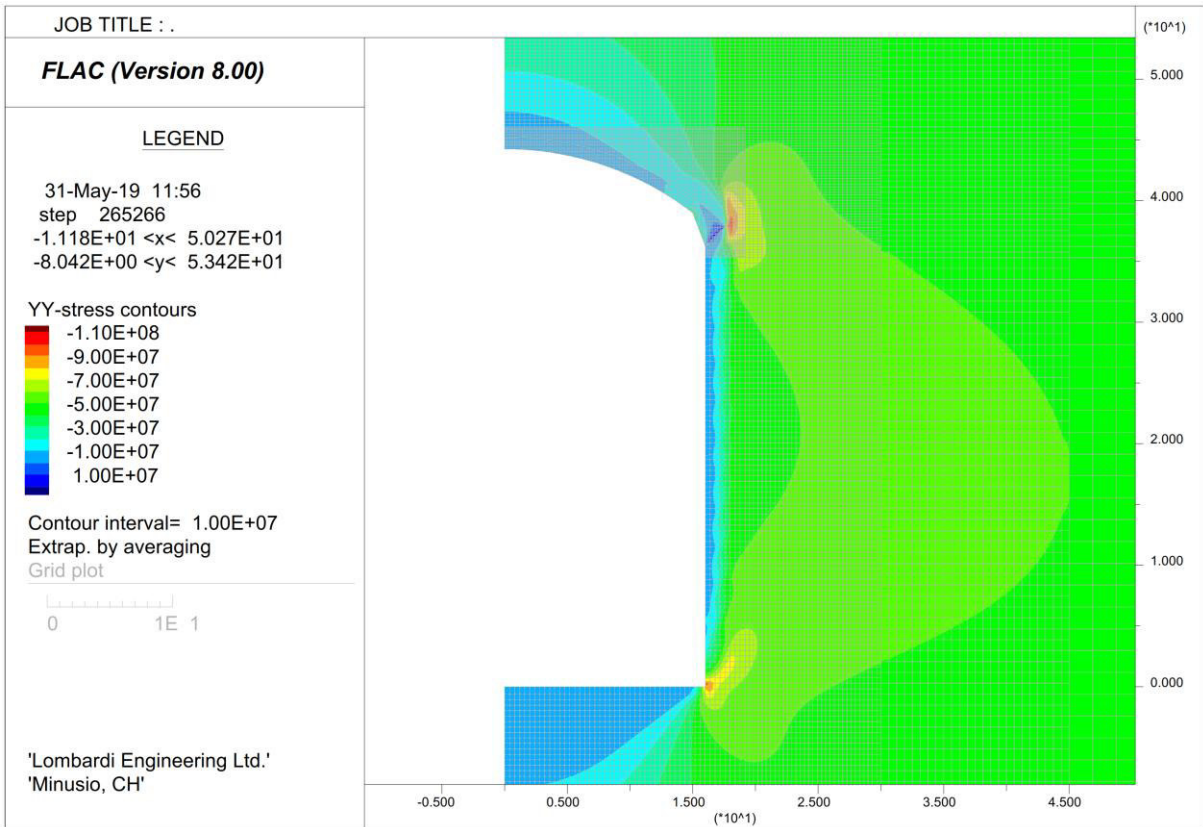
EXCAVATION 6 : DISPLACEMENT



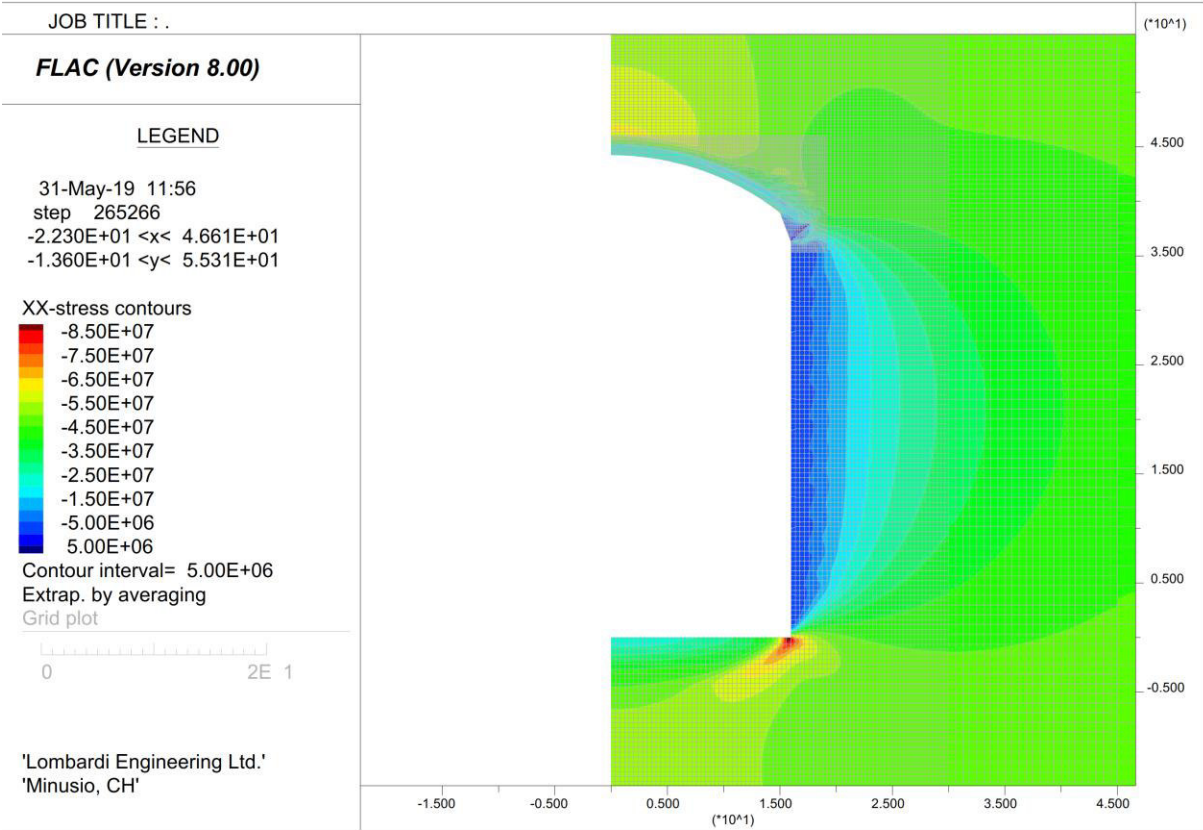
EXCAVATION 6 : DISPLACEMENT X



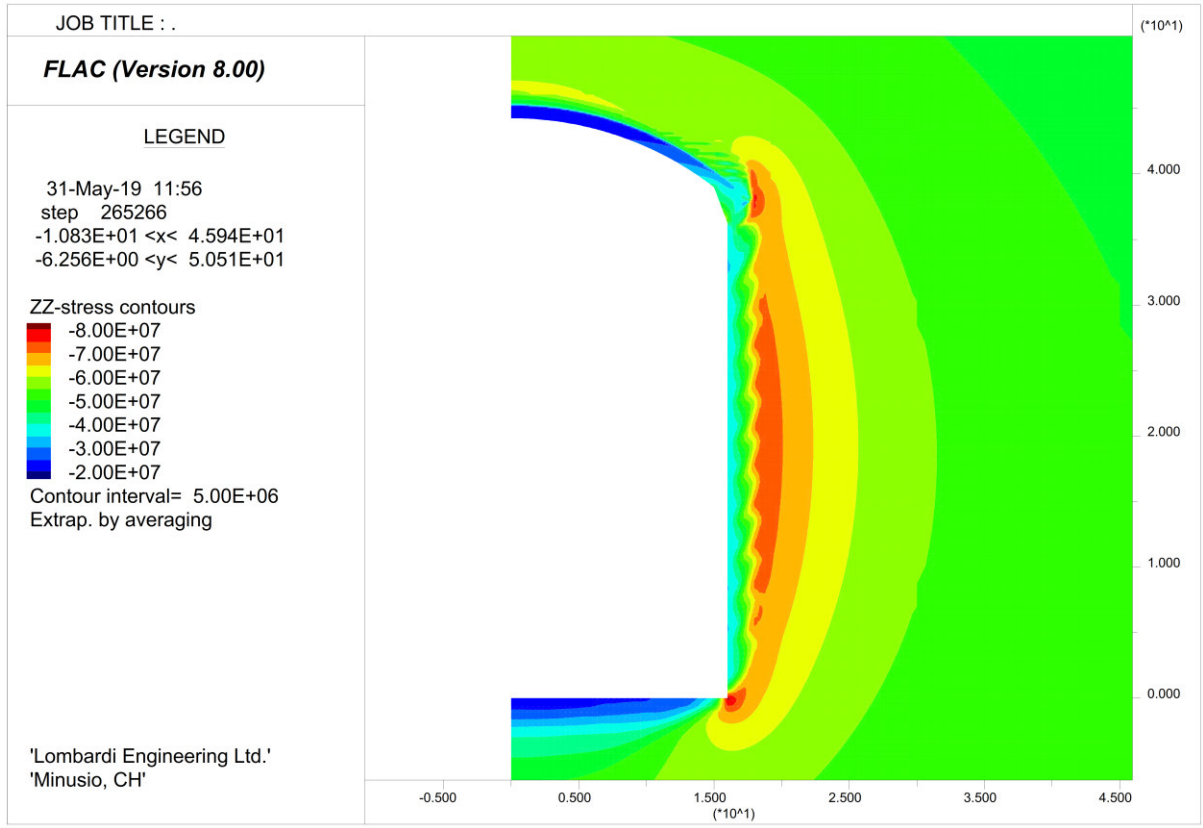
EXCAVATION 11 : VERTICAL STRESS (Y)



EXCAVATION 11: HORIZONTAL STRESS (X)



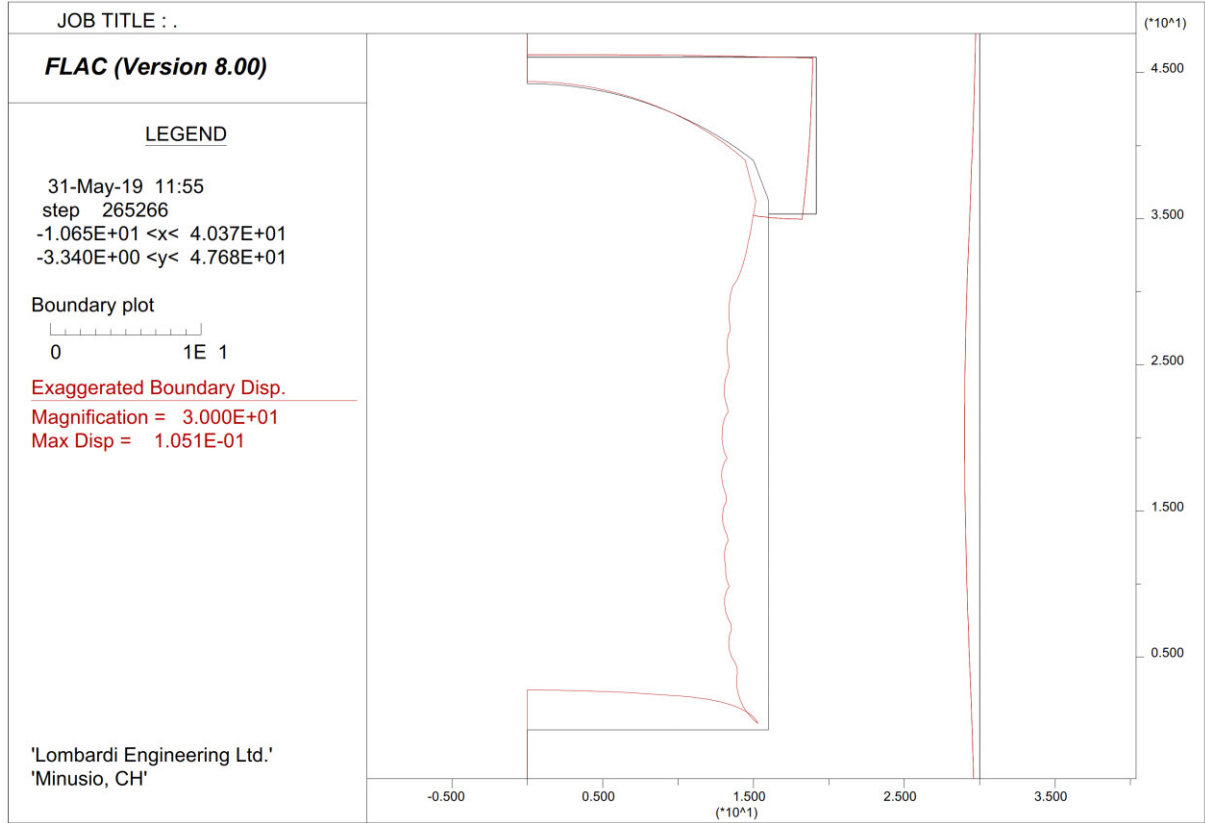
EXCAVATION 11: HORIZONTAL STRESS (Z)



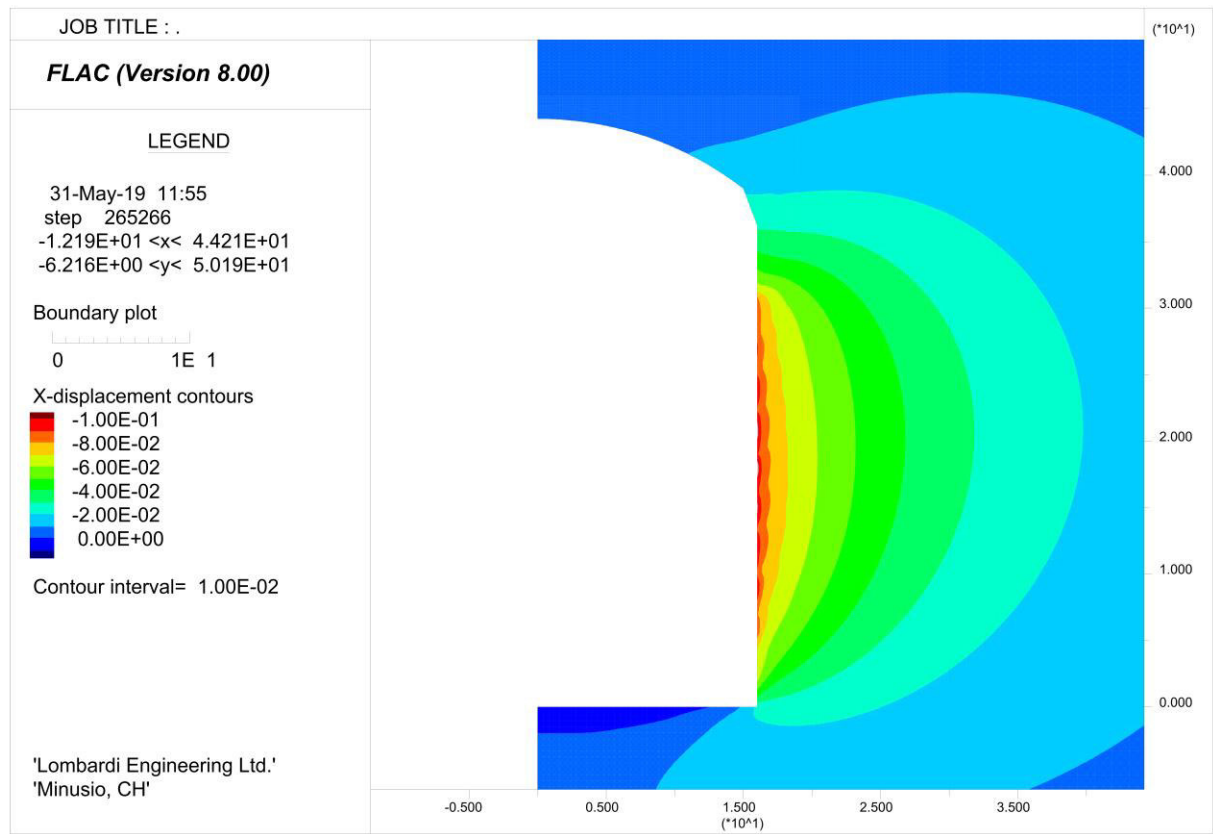
EXCAVATION 11: PLASTIC ZONE



EXCAVATION 11: DISPLACEMENT



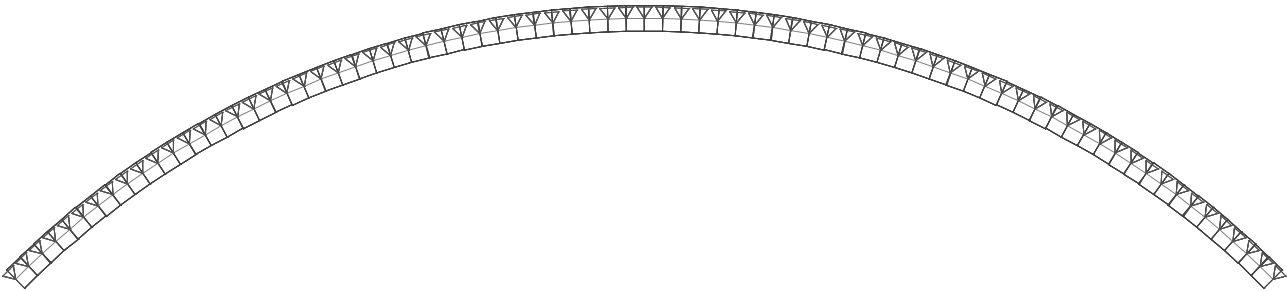
EXCAVATION 11: DISPLACEMENT X



Anexo N

Structure

Scale 1 :206.9



STRUCTURE 2D

Cross section: Geometry

Name	Variant	Materials	Type	Dimensions [m]
S-R		CB2	S-R	B=1.000000, H=0.700000 y _L =-0.50000, y _R =0.50000, z _B =-0.35000, z _T =0.35000

Materials : s. table 'Materials'

Cross section: CS stiffness

Name	Variant	β [°]	EA _x GA _z [kN]	EJ _y [kNm ²]	e _z [m]	CS mass Additional mass [t/m]	Materials
S-R		0	25900000.00 9333296.00	1057583.33	0	1.75	CB2

β : Angle between member Y axis and first principal axis of cross section
e_z : Distance center of gravity-axis point
Materials : s. table 'Materials'

Cross sections, cross section values

Cross section		Materials E _{ref} G _{ref}	Ideal cross section values					
Name	Variants		A _{x,id} = EA _x /E _{ref} [m ²]	J _{y,id} = EJ _y /E _{ref} [m ⁴]	J _{z,id} = EJ _z /E _{ref} [m ⁴]	J _{x,id} = GJ _x /G _{ref} [m ⁴]	A _{y,id} = GA _y /G _{ref} [m ²]	A _{z,id} = GA _z /G _{ref} [m ²]
S-R		CB2	0.7000	0.028583	0.058333	0.064912	0.5833	0.5833

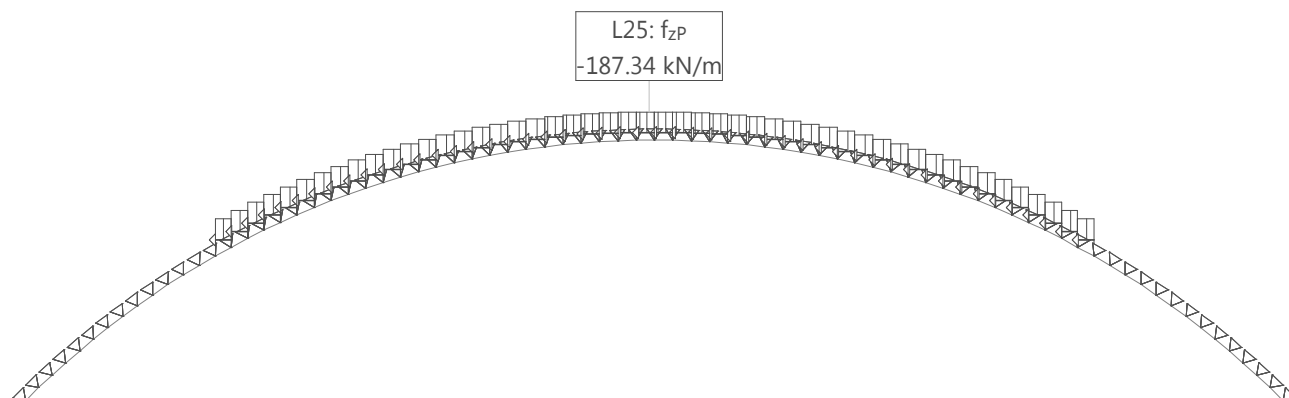
Materials : s. table 'Materials'

Materials

ID	Type	Member	E [kN/mm ²]	G [kN/mm ²]	ν	ρ [t/m ³]	α [‰]	Class	f [N/mm ²]	
CB2	Concrete	Beam	37	16	0.17	2.5	0.010	C50/60	-50.00000	-f _{ck,cyl}
S	Construction	(general)	210	81	0.30	8.0	0.012	S235	235.00000	f _{yk}

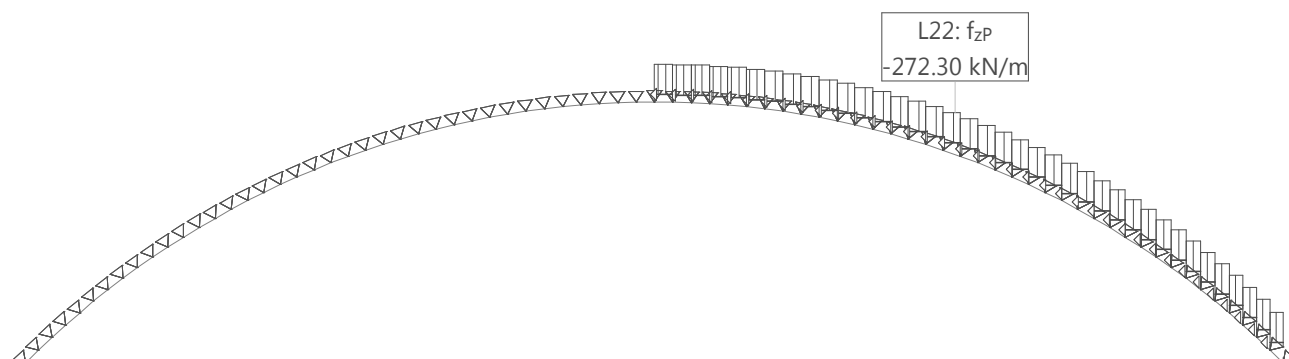
Loading LF1: 2 - Presión de un bloque simétrico en bóveda

Scale 1 :206.9



Loading LF2: 3 - Presión de un bloque asimétrico en bóveda

Scale 1 :206.9



Loading combination 'C1': ELU Comb1

Combined loading

Loading	Factor	Title
EG	1.350	1- Peso propio
LF1	1.350	2 - Presión de un bloque simétrico en bóveda

combination 'C2': ELU Comb2

Combined loading

Loading	Factor	Title
EG	1.350	1- Peso propio
LF2	1.350	3 - Presión de un bloque asimétrico en bóveda

combination 'C3': ELS Comb3

Combined loading

Loading	Factor	Title
EG	1.000	1- Peso propio
LF1	1.000	2 - Presión de un bloque simétrico en bóveda

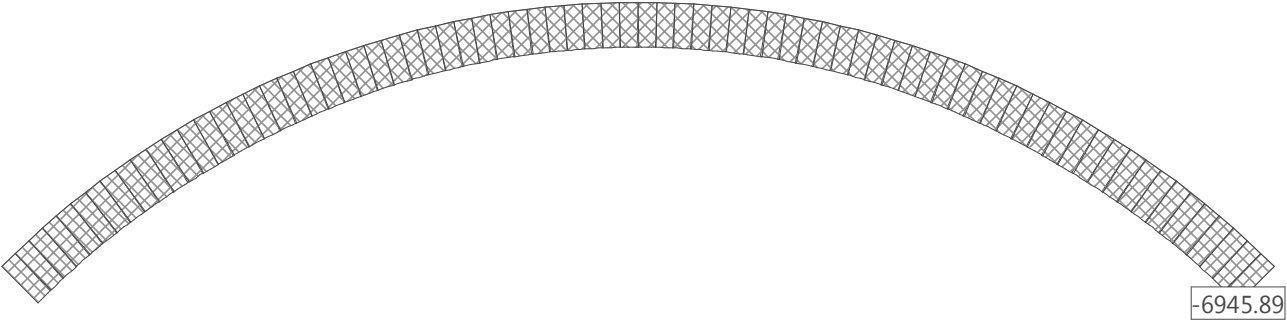
combination 'C4': ELS Comb4

Combined loading

Loading	Factor	Title
EG	1.000	1- Peso propio
LF2	1.000	3 - Presión de un bloque asimétrico en bóveda

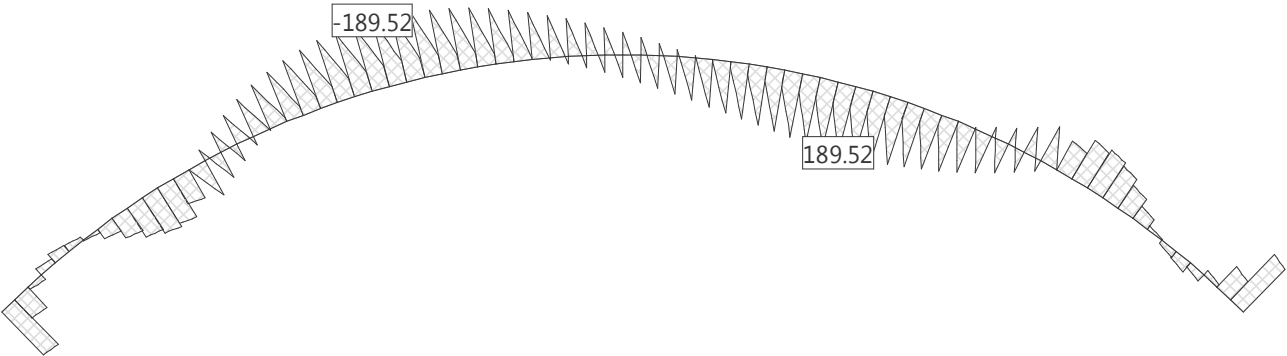
Section force N [kN] for: C1_N1

Scale 1 :204.5



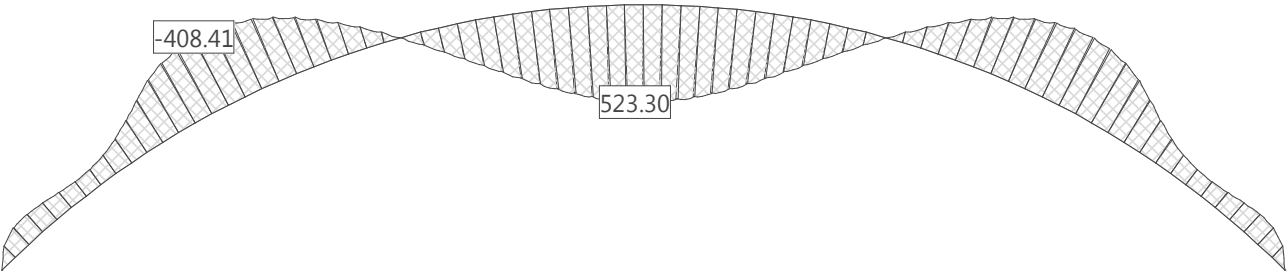
Section force Vz [kN] for: C1_N1

Scale 1 :209.6



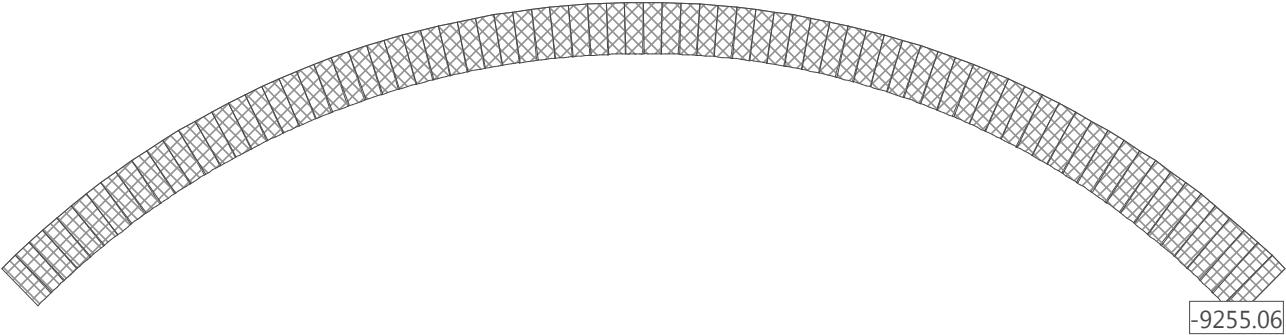
Section force My [kNm] for: C1_N1

Scale 1 :202.8



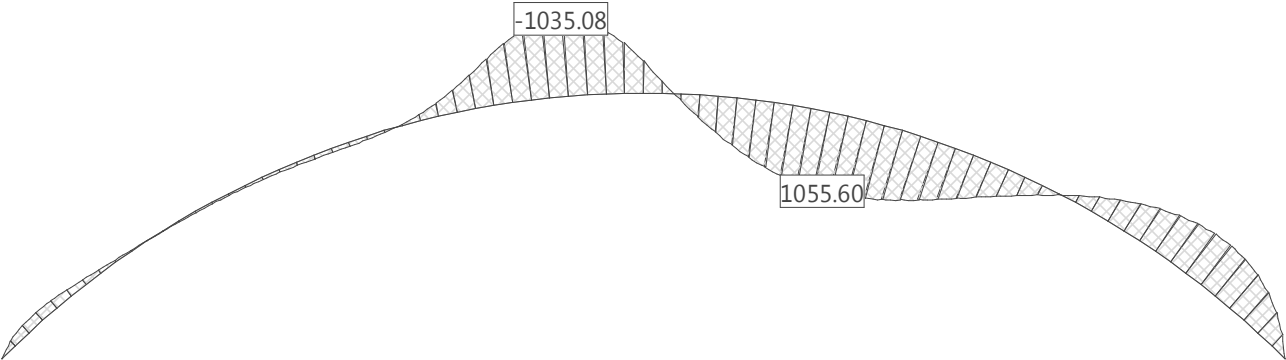
Section force N [kN] for: C2_N1

Scale 1 :202.8



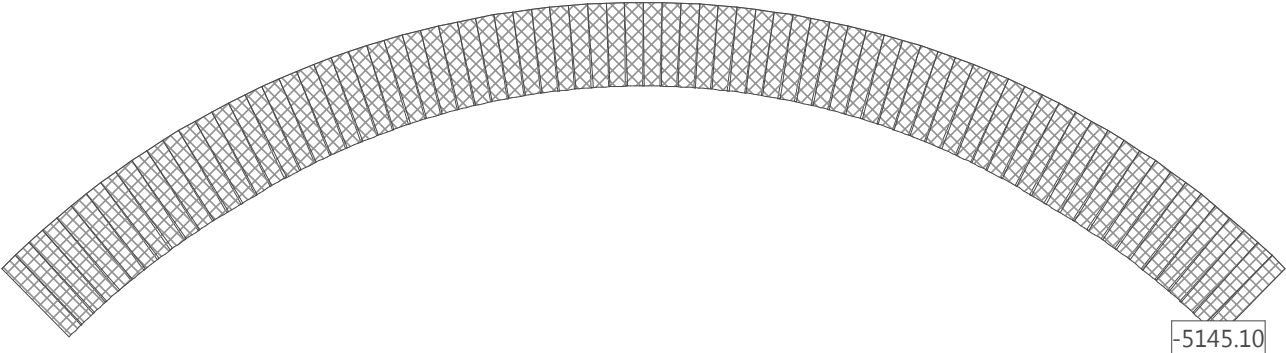
Section force My [kNm] for: C2_N1

Scale 1 :202.8



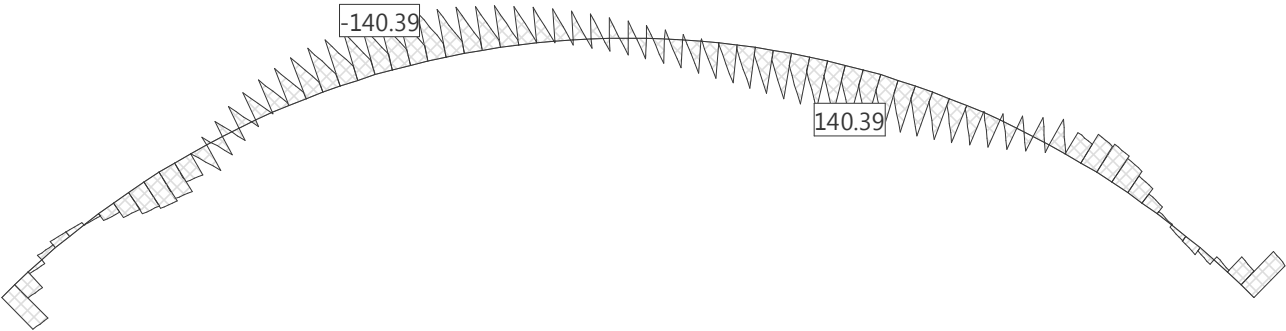
Section force N [kN] for: C3_N1

Scale 1 :202.8



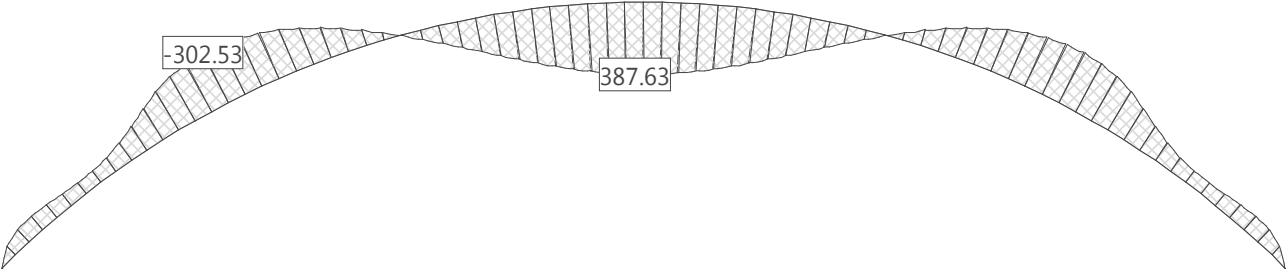
Section force Vz [kN] for: C3_N1

Scale 1 :207.8



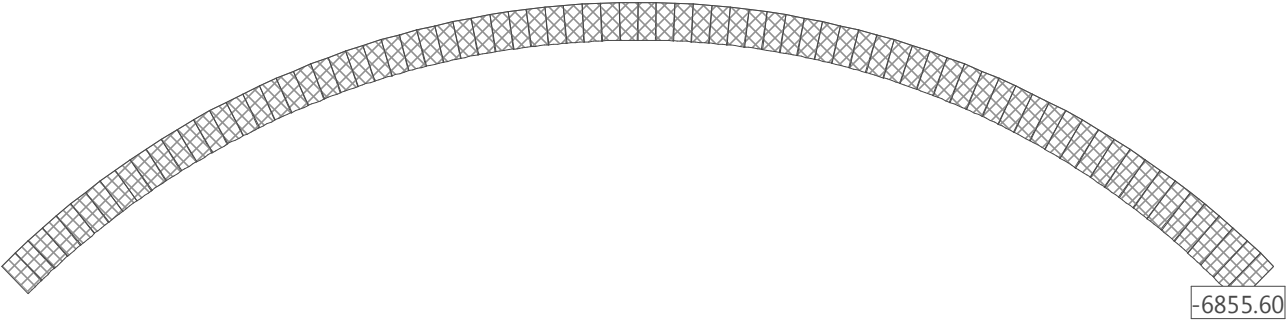
Section force My [kNm] for: C3_N1

Scale 1 :202.8



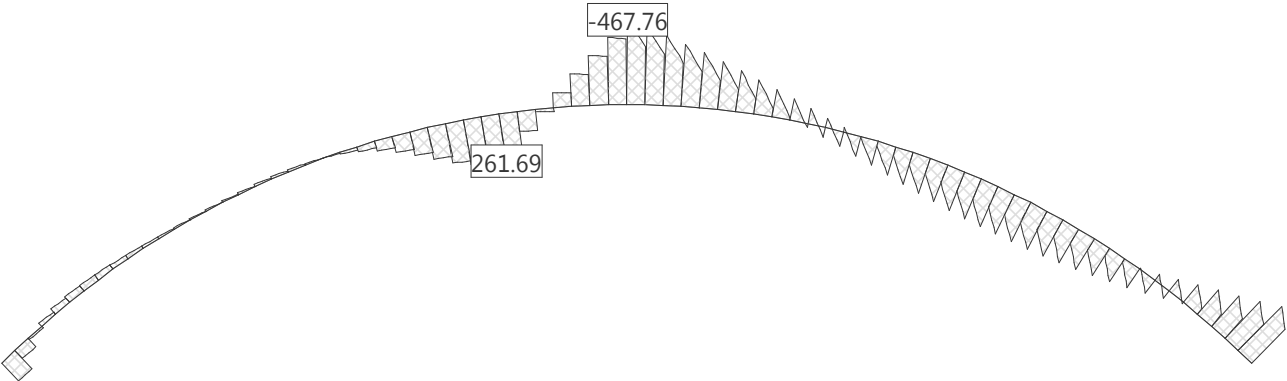
Section force N [kN] for: C4_N1

Scale 1 :204.6



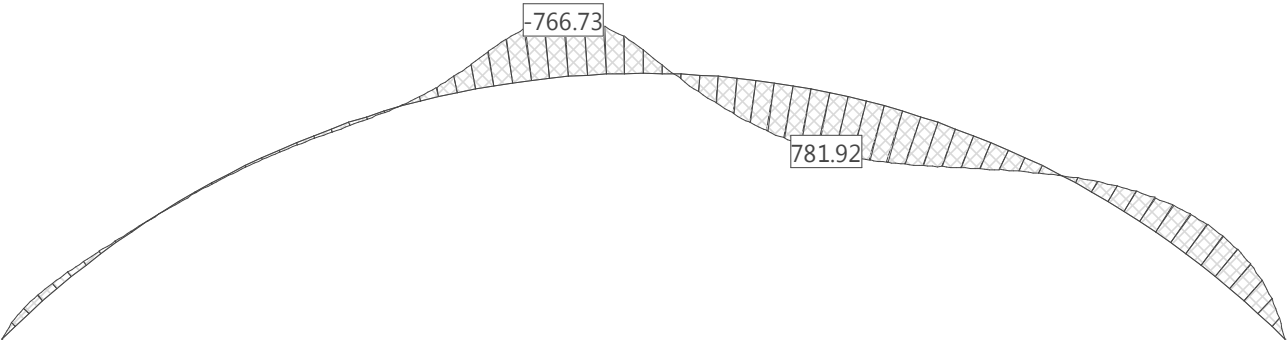
Section force Vz [kN] for: C4_N1

Scale 1 :208.3



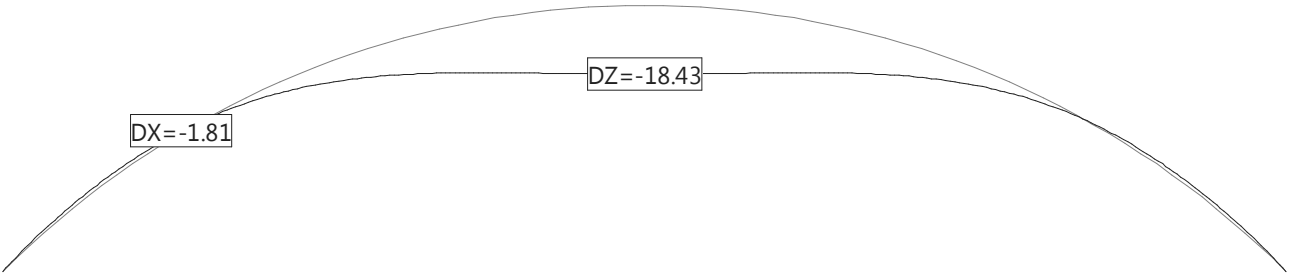
Section force My [kNm] for: C4_N1

Scale 1 :202.8



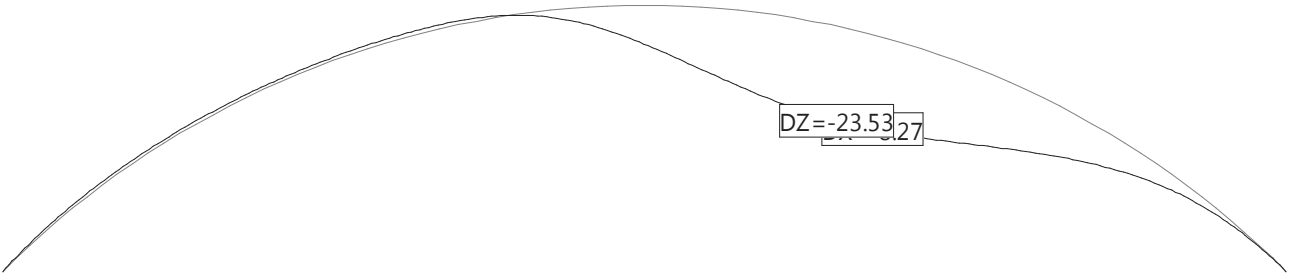
DISPLACEMENTS D for: C1_N1 [mm], Scaling factor: 100.0

Scale 1 :202.8



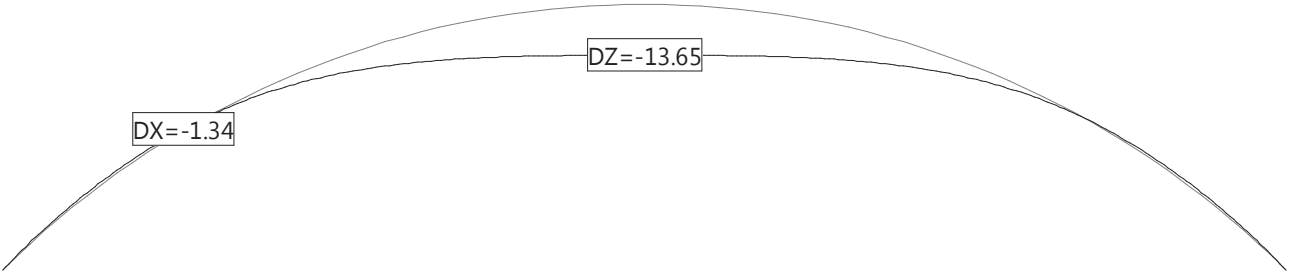
DISPLACEMENTS D for: C2_N1 [mm], Scaling factor: 100.0

Scale 1 :202.8



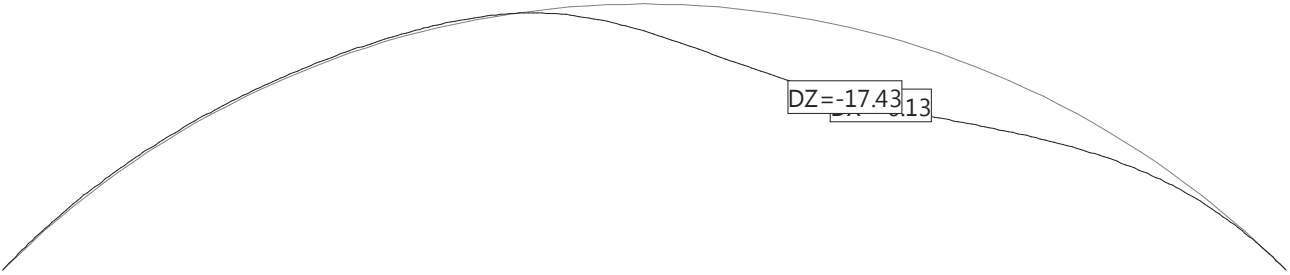
DISPLACEMENTS D for: C3_N1 [mm], Scaling factor: 100.0

Scale 1 :202.8



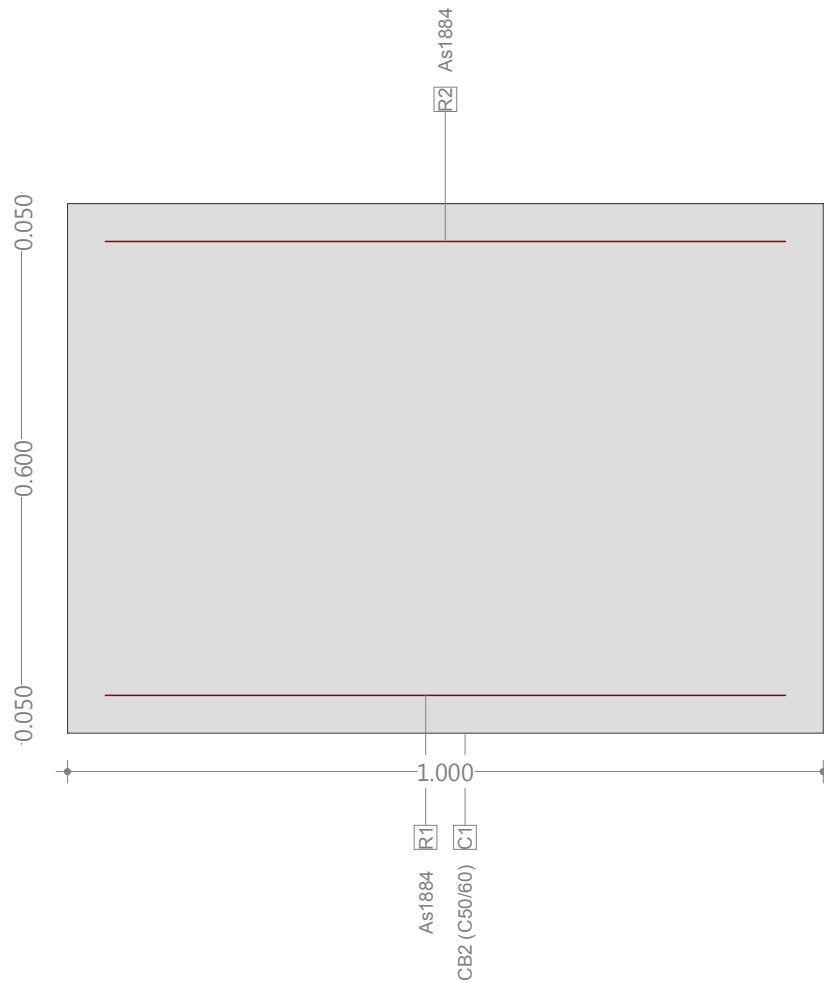
DISPLACEMENTS D for: C4_N1 [mm], Scaling factor: 100.0

Scale 1 :202.8



Cross-section QS (C50/60;S420): Outline, Reinforcements

Scale 1 :10.0



Cross section (column): QS

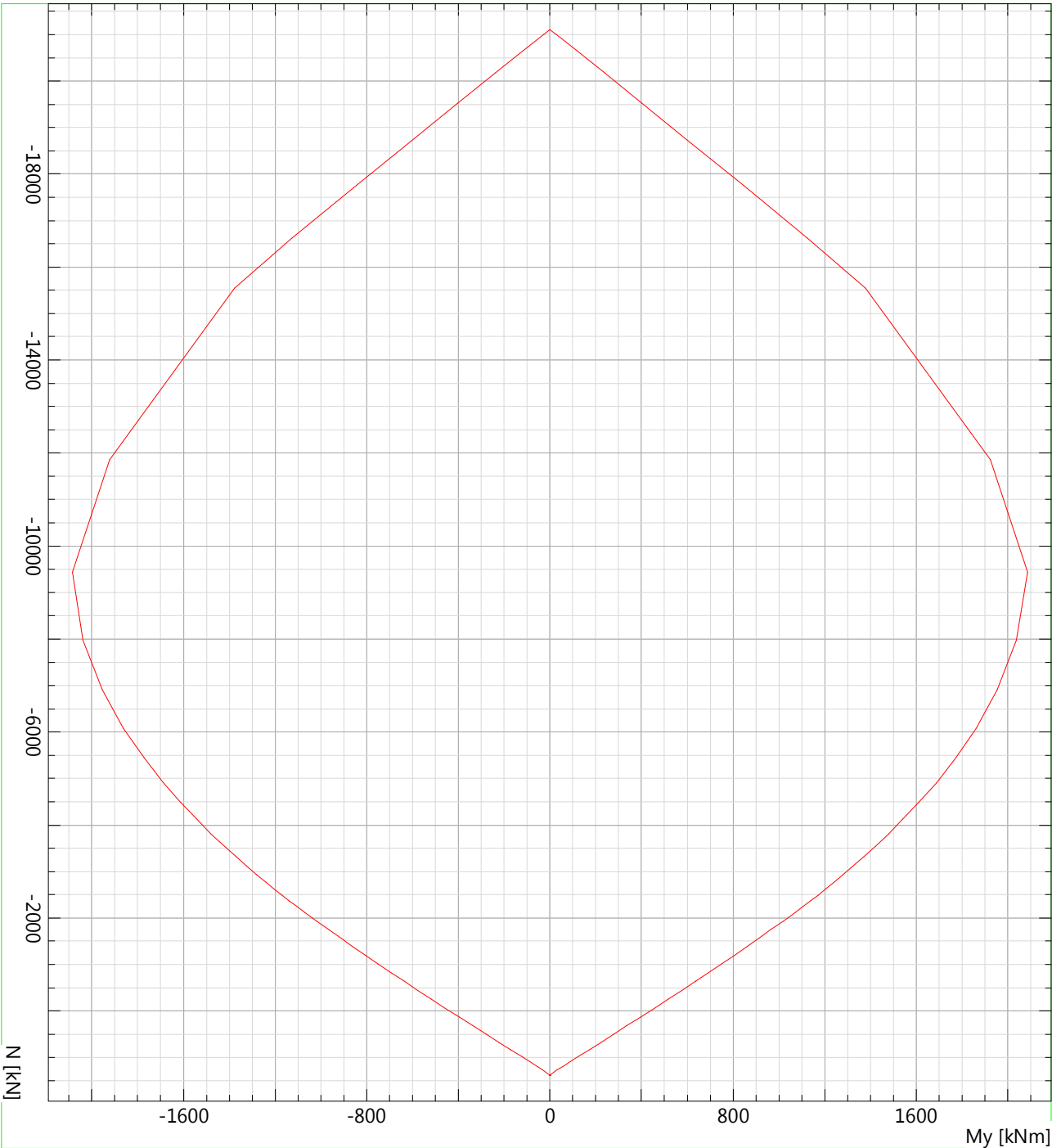
Geometrical definition of cross section

Name	Material	Class	Type	No.	y_q [m]	z_q [m]	No.	y_q [m]	z_q [m]
C1	CB2	C50/60	Polygon	1 3	0 1.000	0 0.700	2 4	1.000 0	0 0.700

Section properties: (reinforcement not considered, reference material: CB2)

	Area [m ²]	Moment of inertia [m ⁴]	C.G. Angle [m]				Mass [kg/m]
Ax	0.7000	Ix	0.064912	ys	0.500		M _{CS}
Ay	(=Ax)	Iy	0.028583	zs	0.350		
Az	(=Ax)	Iz	0.058333	β	0 [°]		
							1750.0

M-N-Interaction diagram Cross section (column): QS
!ULS / Reinforcement percentage: $\rho = 0.538286$ o/o



Ultimate strength analysis Cross section (column): QS

Action forces / Efficiency: $\text{eff}(M,N) = 0.57$ OK

No.	AP	P	Bending and axial force				Shear forces and torsion				Complete CS $\text{eff}(M,N,V,T)$ [-]
			N [kN]	M_y [kNm]	M_z [kNm]	$\text{eff}(M,N)$ [-]	V_y [kN]	V_z [kN]	T [kNm]	$\text{eff}(V,T)$ [-]	
1	!ULS		-6945.9	0	-	0.33					
2	!ULS		-6033.2	5.233E+2	-	0.39					
3	!ULS		-6756.6	-4.08E+2	-	0.40					
4	!ULS		-6701.5	-4.06E+2	-	0.39					
5	!ULS		-6033.2	5.233E+2	-	0.39					
6	!ULS		-6033.2	5.233E+2	-	0.39					
7	!ULS		-6814.7	-3.97E+2	-	0.40					
8	!ULS		-6937.6	-8.53E+1	-	0.34					
9	!ULS		-9255.1	0	-	0.44					
10	!ULS		-7025.9	1.056E+3	-	0.57					
11	!ULS		-6860.7	-1.04E+3	-	0.55					
12	!ULS		-6859.1	-1.04E+3	-	0.55					
13	!ULS		-7025.9	1.056E+3	-	0.57					
14	!ULS		-7070.4	1.055E+3	-	0.57					
15	!ULS		-8779.6	-6.40E+2	-	0.54					
16	!ULS		-6840.7	-1.60E+2	-	0.35					

- : Calculation with uniaxial bending (neutral axis is horizontal)!!

Analysis-Parameters "ULS" Standard: Eurocode EN

ID	Diagram σ - ϵ			Strain Limits			σ_s [N/mm ²]	Partial safety factor				Various parameters			
	C	S		ϵ_{c2} [‰]	ϵ_{cu3} [‰]	ϵ_{ud} [‰]		α_{cc} [-]	γ_c [-]	γ_s [-]		θ [-]	ϕ [-]		
!ULS	2/0	1		-2.000	-3.500	2.000E		0.85	1.50	1.15		45.00	0		

θ : Inclination of diagonal in compression
 ϕ : Creep coefficient

Anexo O

Unwedge Analysis Information

Document Name

File Name: ParetiVerticaliPozzo_noBolts.weg

Project Settings

Project Title: Stability Analysis of Wedges for Underground Excavations
Wedges Computed: Perimeter Wedges
Units: Metric, stress as MPa

General Input Data

Tunnel Axis Orientation:
Trend: 0°
Plunge: 90°
Design Factor of Safety: 1.000
Unit Weight of Rock: 0.027 MN/m3
Unit Weight of Water: 0.010 MN/m3

Seismic Forces

Not Used

Scale Wedges Settings

North wedge [2]
Scale Apex Height: 15.00 m
Scale Out Of Plane Length: 36.20 m

East wedge [3]
Scale Apex Height: 15.00 m
Scale Out Of Plane Length: 36.20 m

North East wedge [4]
Scale Apex Height: 15.00 m
Scale Out Of Plane Length: 36.20 m

South West wedge [5]
Scale Apex Height: 15.00 m
Scale Out Of Plane Length: 36.20 m

West wedge [6]
Scale Apex Height: 15.00 m
Scale Out Of Plane Length: 36.20 m

South West wedge [7]
Scale Apex Height: 15.00 m
Scale Out Of Plane Length: 36.20 m

Joint Orientations

Joint 1
Dip: 79°
Dip Direction: 181°

Joint 2
Dip: 76°
Dip Direction: 097°

Joint 3
Dip: 79°
Dip Direction: 062°

Joint Properties

Joint Properties 1
Water Pressure
Constant: 0 MPa
Waviness: 0°
Shear Strength Model: Mohr-Coulomb
Phi: 39°

Cohesion: 0 MPa
Tensile Strength: 0 MPa

Bolt Properties

Bolt Property 1

Bolt Type: Grouted Dowel
Tensile Capacity: 0.259 MN
Plate Capacity: 0.1 MN
Bond Strength: 0.13194 MN/m
Bond Length: 100% of Bolt Length
Shear Strength: Unused
Bolt Orientation Efficiency: Used
Method: Cosine Tension/Shear

Shotcrete Properties

Shotcrete Property 1

Shear Strength: 1.10 MPa
Unit Weight: 0.026 MN/m3
Thickness: 30.00 cm

Support Summary

Summary of Perimeter Shotcrete

No Shotcrete on Perimeter

Summary of Perimeter Support Pressure

No Support Pressure on Perimeter

Summary of Perimeter Bolt Patterns

No Bolt Patterns on Perimeter

Summary of End Bolt Patterns

No Bolt Pattern on Ends

Summary of End Support Pressure

No Support Pressure on Ends

Summary of End Shotcrete

No Shotcrete on Ends

Wedge Information

North wedge [2]

Factor of Safety: 0.319
Wedge Volume: 0.222 m3
Wedge Weight: 0.006 MN
Wedge z-Length: 18.95 m
Excavation Face Area: 2.94 m2
Support Pressure: 0.00 MPa
Apex Height: 0.30 m
Sliding Mode: wedge sliding along line of intersection of joints 1 and 12

East wedge [3]

Factor of Safety: stable
Wedge Volume: 456.413 m3
Wedge Weight: 12.323 MN
Wedge z-Length: 33.37 m
Excavation Face Area: 111.22 m2
Support Pressure: 0.00 MPa
Apex Height: 15.00 m
Sliding Mode: unconditionally stable wedge

North East wedge [4]

Factor of Safety: 0.157
Wedge Volume: 0.001 m3
Wedge Weight: 0.000 MN
Wedge z-Length: 10.04 m
Excavation Face Area: 0.13 m2
Support Pressure: 0.00 MPa
Apex Height: 0.01 m

Sliding Mode: wedge sliding on joint 1

South West wedge [5]

Factor of Safety: 0.202

Wedge Volume: 0.059 m³

Wedge Weight: 0.002 MN

Wedge z-Length: 8.85 m

Excavation Face Area: 1.42 m²

Support Pressure: 0.00 MPa

Apex Height: 0.12 m

Sliding Mode: wedge sliding on joint 12

West wedge [6]

Factor of Safety: 0.246

Wedge Volume: 437.192 m³

Wedge Weight: 11.804 MN

Wedge z-Length: 29.90 m

Excavation Face Area: 104.29 m²

Support Pressure: 0.14 MPa

Apex Height: 15.00 m

Sliding Mode: wedge sliding along line of intersection of joints 12 and 15

South West wedge [7]

Factor of Safety: 0.157

Wedge Volume: 0.302 m³

Wedge Weight: 0.008 MN

Wedge z-Length: 21.21 m

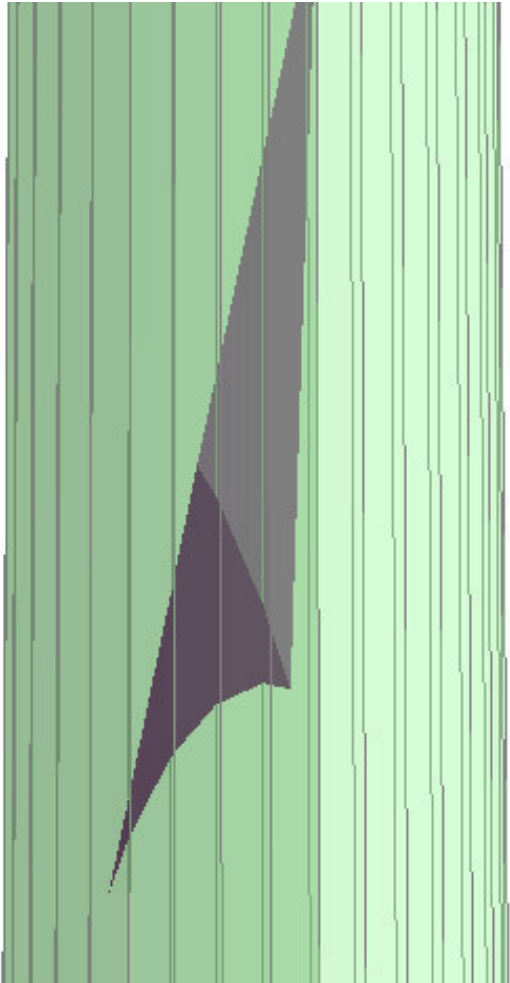
Excavation Face Area: 3.33 m²

Support Pressure: 0.00 MPa

Apex Height: 0.30 m

Sliding Mode: wedge sliding on joint 15

6s



Wedge Information

West wedge [6]

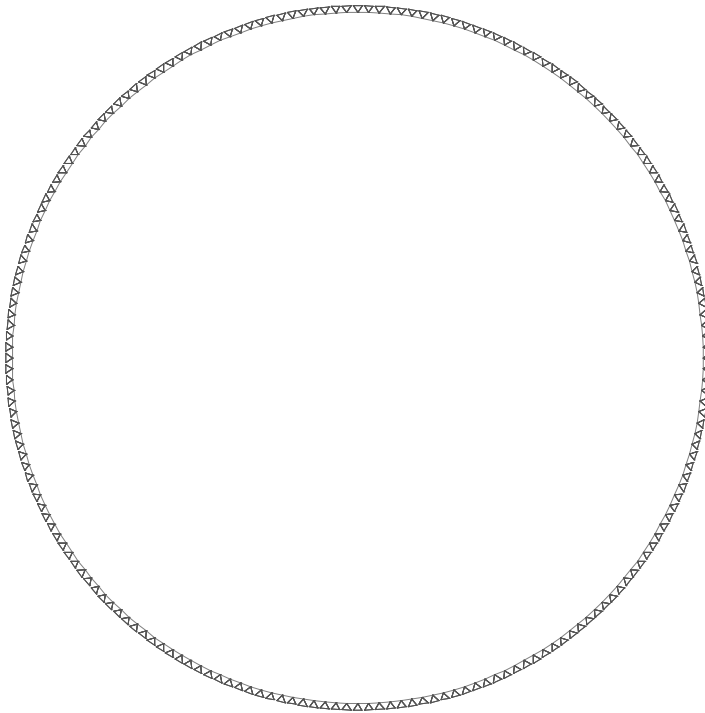
Factor of Safety: 0.246
Wedge Volume: 437.192 m3
Wedge Weight: 11.804 MN
Wedge z-Length: 29.90 m
Excavation Face Area: 104.29 m2
Support Pressure: 0.14 MPa
Apex Height: 15.00 m
Sliding Mode: wedge sliding along
line of intersection of joints 12 and 15

Anexo P

Lombardi AG, 6648 Minusio-Locarno

Structure

Scale 1:350.0



STRUCTURE 2D

Cross section: Geometry

Name	Variant	Materials	Type	Dimensions [m]
D70		CP	S-R	B=1.000000, H=0.700000 y _L =-0.50000, y _R =0.50000, z _B =-0.35000, z _T =0.35000

Materials : s. table 'Materials'

Cross section: CS stiffness

Name	Variant	β [°]	EA _x GA _z [kN]	EJ _y [kNm ²]	e _z [m]	CS mass Additional mass [t/m]	Materials
D70		0	23100000.00 6999972.00	943250.00	0	1.75	CP

β : Angle between member Y axis and first principal axis of cross section
e_z : Distance center of gravity-axis point
Materials : s. table 'Materials'

Cross sections, cross section values

Cross section		Materials E _{ref} G _{ref}	Ideal cross section values					
Name	Variants		A _{x,id} = EA _x /E _{ref} [m ²]	J _{y,id} = EJ _y /E _{ref} [m ⁴]	J _{z,id} = EJ _z /E _{ref} [m ⁴]	J _{x,id} = GJ _x /G _{ref} [m ⁴]	A _{y,id} = GA _y /G _{ref} [m ²]	A _{z,id} = GA _z /G _{ref} [m ²]
D70		CP	0.7000	0.028583	0.058333	0.064912	0.5833	0.5833

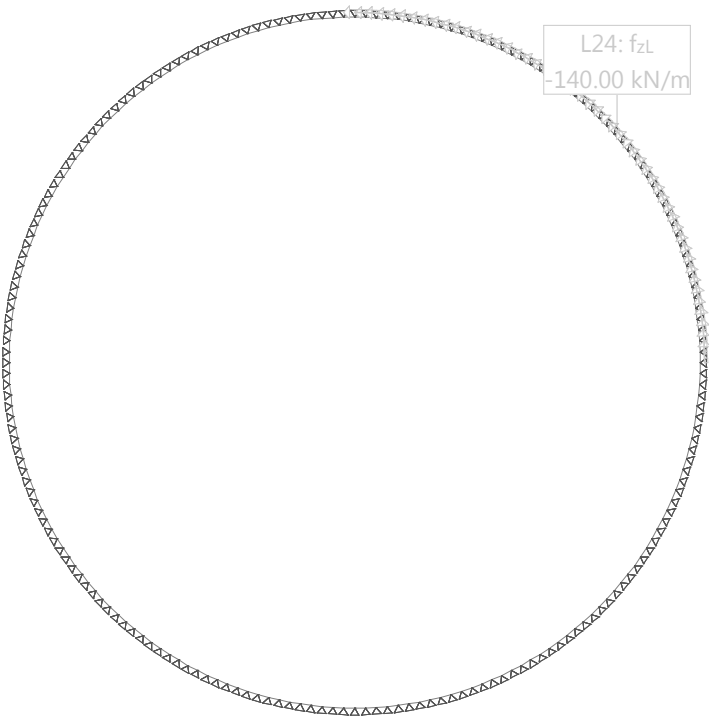
Materials : s. table 'Materials'

Materials

ID	Type	Member	E [kN/mm ²]	G [kN/mm ²]	ν	ρ [t/m ³]	α [%]	Class	f [N/mm ²]	
CP	Concrete	Pile	33	12	0.17	2.5	0.010	C30/37	-30.00000	-f _{ck, cyl}
S	Construction	(general)	210	81	0.30	8.0	0.012	S235	235.00000	f _{yk}

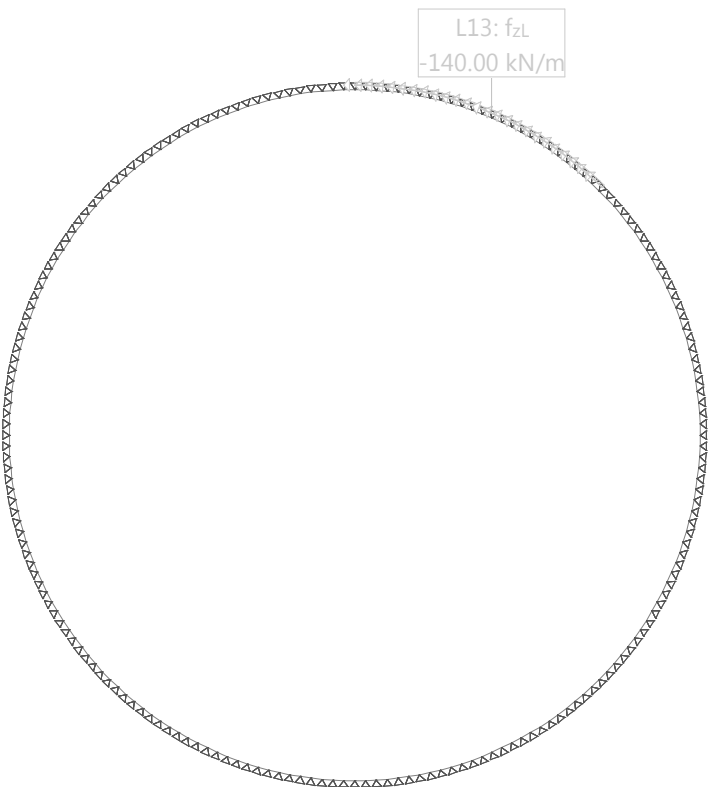
Loading B1: (1) Presión del macizo rocoso (bloque lateral 90°)

Scale 1 :350.0



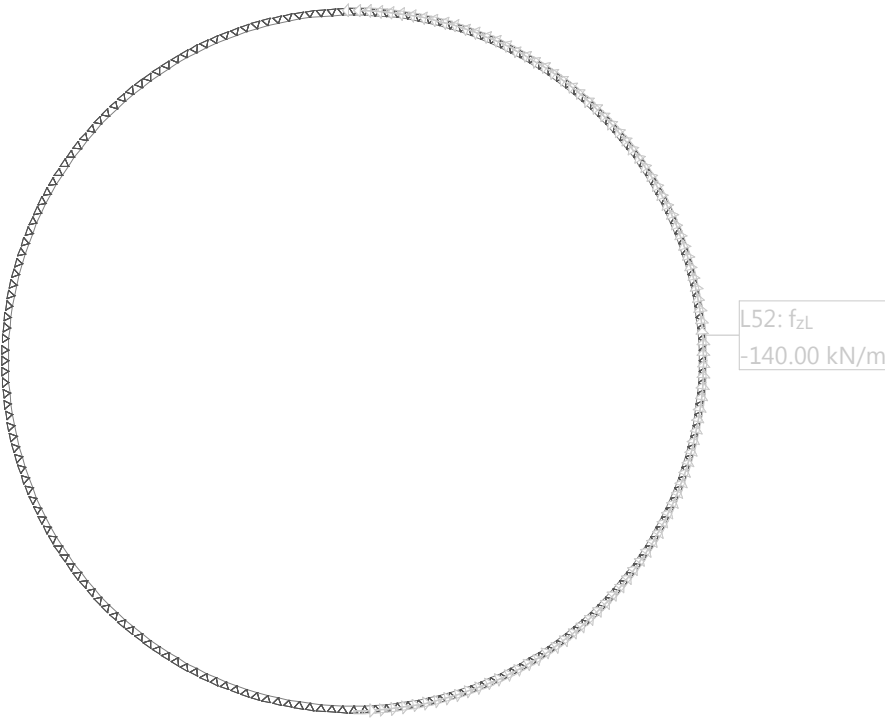
Loading B2: (2) Presión del macizo rocoso (bloque lateral 45°)

Scale 1 :350.0



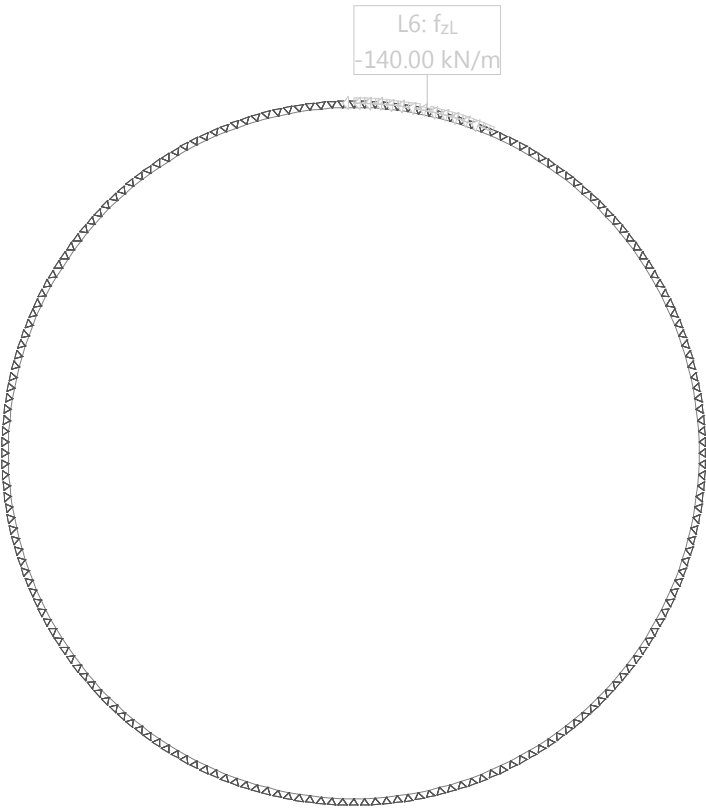
Loading B3: (3) Presión del macizo rocoso (bloque lateral 180°)

Scale 1 :350.0



Loading B4: (4) Presión del macizo rocoso (bloque lateral 22.5°)

Scale 1 :350.0



Loading WPi: (5) Presión del agua interna al pozo (Hidrostática) pw=0-250kPa

Scale 1 :350.0



Loading combination 'C1': Comb1

Combined loading

Loading	Factor	Title
B1	1.350	(1) Presión del macizo rocoso (bloque lateral 90°)

combination 'C2': Comb2

Combined loading

Loading	Factor	Title
B2	1.350	(2) Presión del macizo rocoso (bloque lateral 45°)

combination 'C3': Comb3

Combined loading

Loading	Factor	Title
B3	1.350	(3) Presión del macizo rocoso (bloque lateral 180°)

combination 'C4': Comb4

Combined loading

Loading	Factor	Title
B4	1.350	(4) Presión del macizo rocoso (bloque lateral 22.5°)

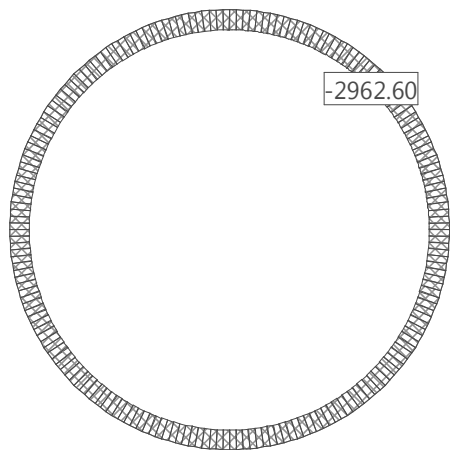
combination 'C5': Comb5

Combined loading

Loading	Factor	Title
WPi	1.350	(5) Presión del agua interna al pozo (Hidrostática) pw=0-250kPa

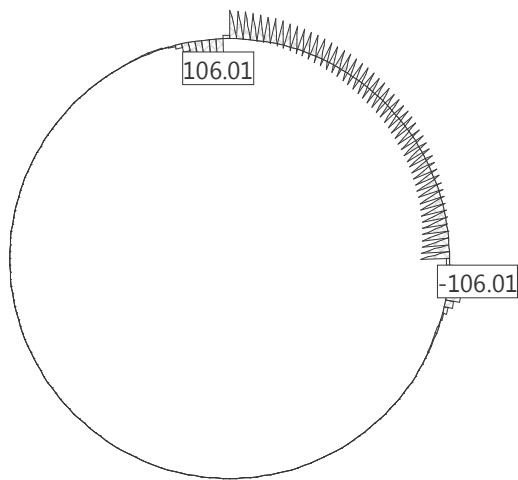
Section force N [kN] for: C1_N1

Scale 1 :550.0



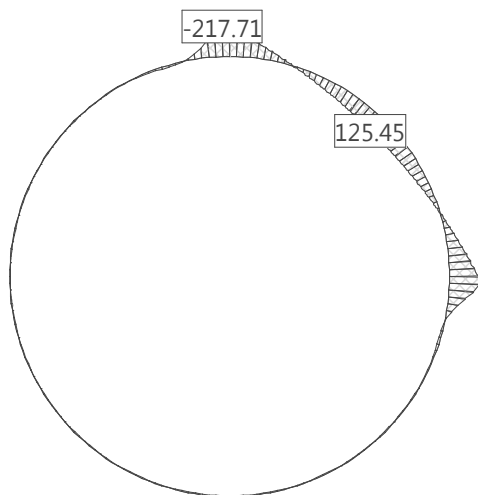
Section force Vz [kN] for: C1_N1

Scale 1 :550.0



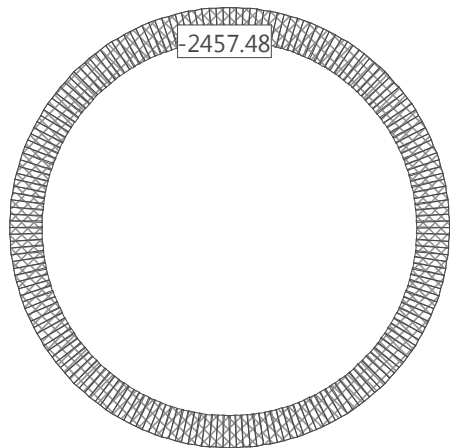
Section force My [kNm] for: C1_N1

Scale 1 :550.0



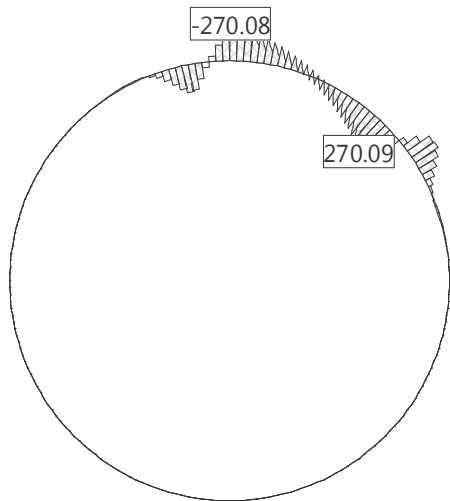
Section force N [kN] for: C2_N1

Scale 1 :550.0



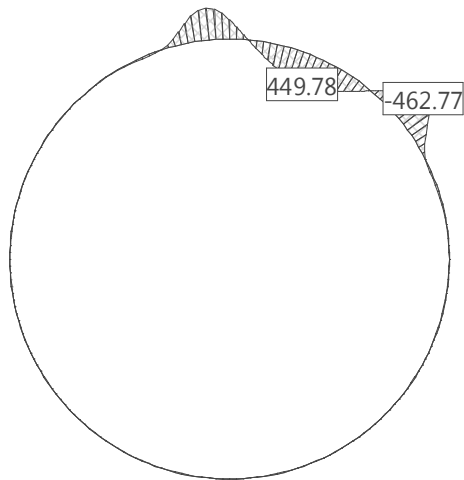
Section force Vz [kN] for: C2_N1

Scale 1 :550.0



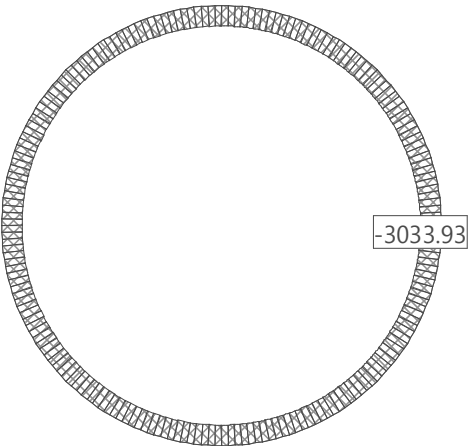
Section force My [kNm] for: C2_N1

Scale 1 :550.0



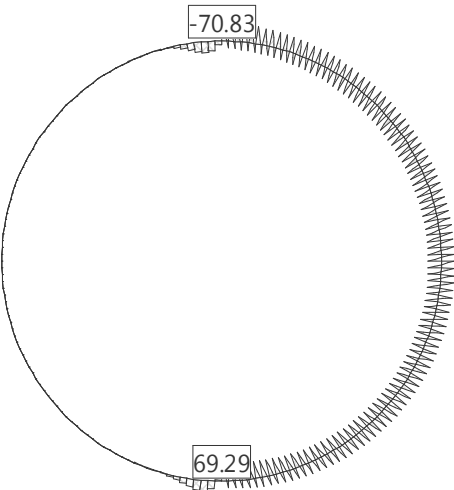
Section force N [kN] for: C3_N1

Scale 1 :550.0



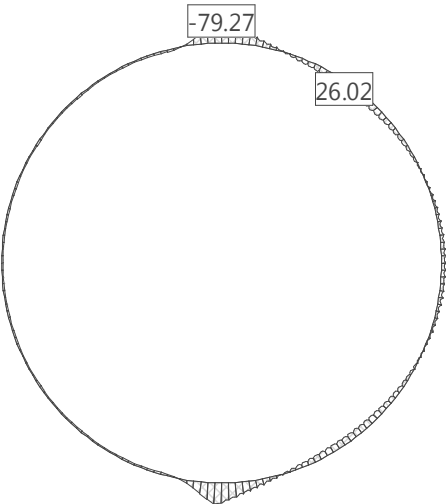
Section force Vz [kN] for: C3_N1

Scale 1 :550.0



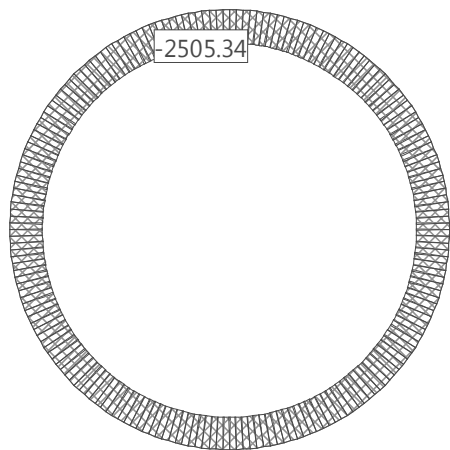
Section force My [kNm] for: C3_N1

Scale 1 :550.0



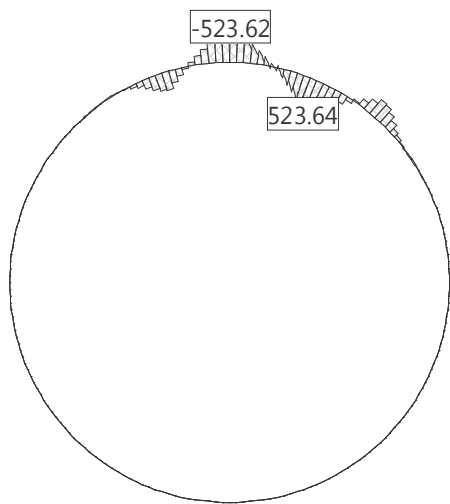
Section force N [kN] for: C4_N1

Scale 1 :550.0



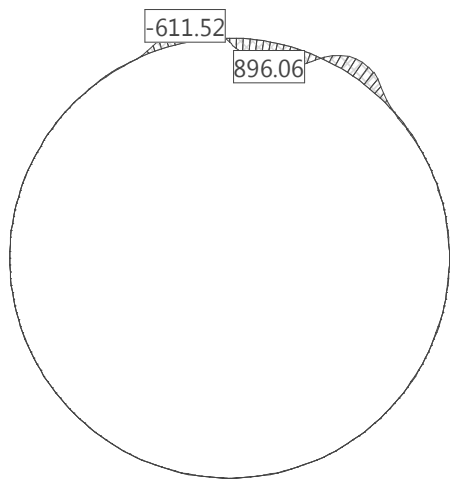
Section force Vz [kN] for: C4_N1

Scale 1 :550.0



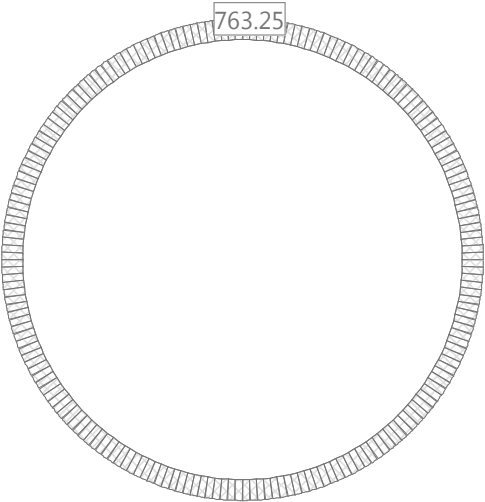
Section force My [kNm] for: C4_N1

Scale 1 :550.0



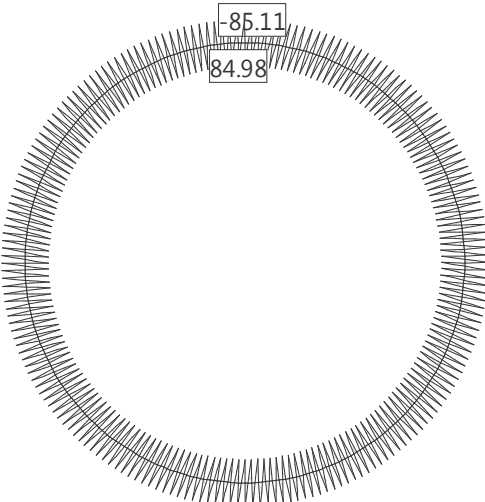
Section force N [kN] for: C5_N1

Scale 1 :550.0



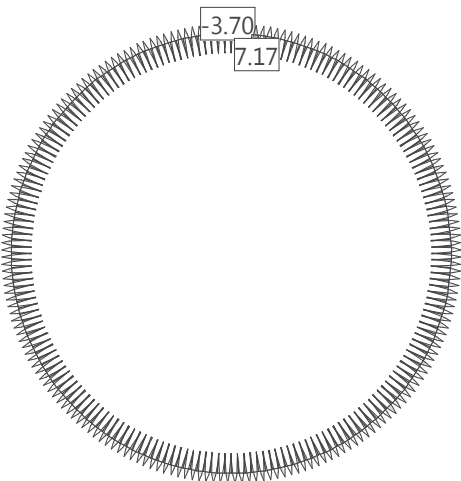
Section force Vz [kN] for: C5_N1

Scale 1 :550.0



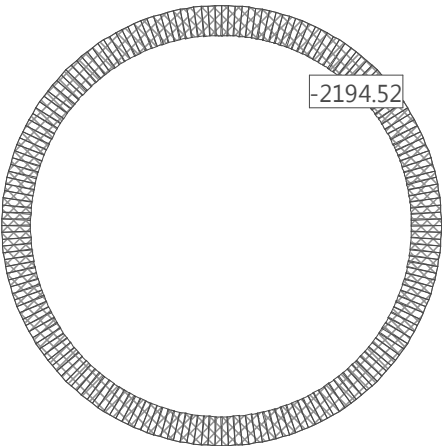
Section force My [kNm] for: C5_N1

Scale 1 :550.0



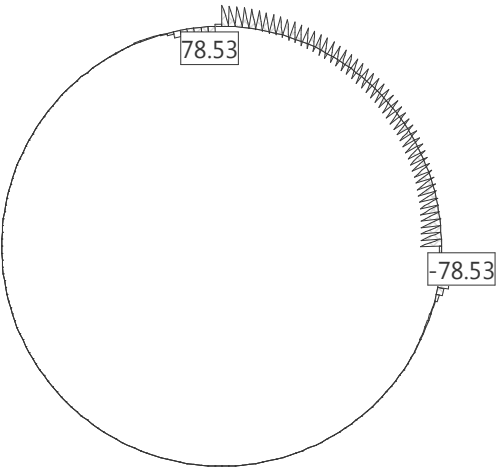
Section force N [kN] for: B1_N1

Scale 1 :550.0



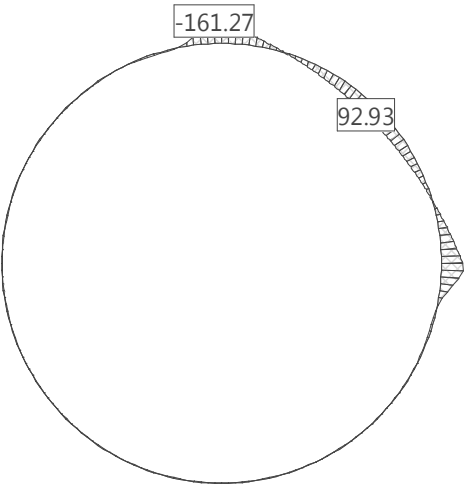
Section force Vz [kN] for: B1_N1

Scale 1 :550.0



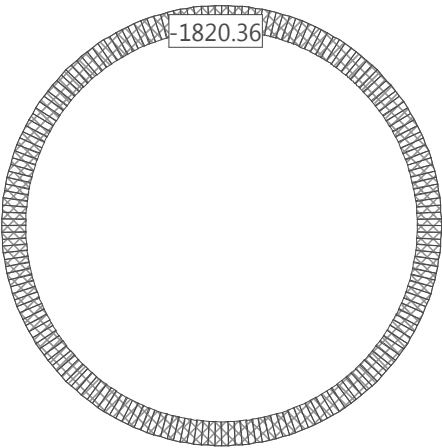
Section force My [kNm] for: B1_N1

Scale 1 :550.0



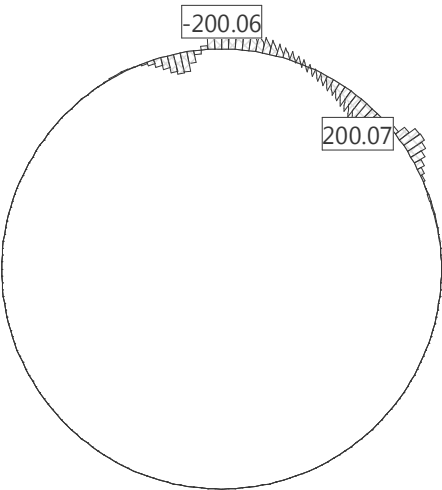
Section force N [kN] for: B2_N1

Scale 1 :550.0



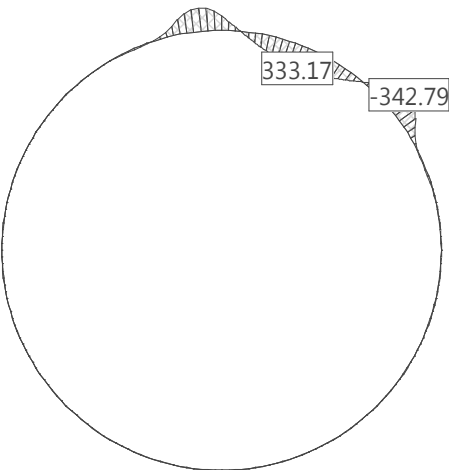
Section force Vz [kN] for: B2_N1

Scale 1 :550.0



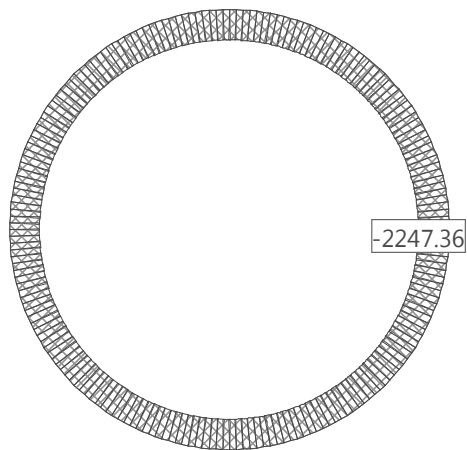
Section force My [kNm] for: B2_N1

Scale 1 :550.0



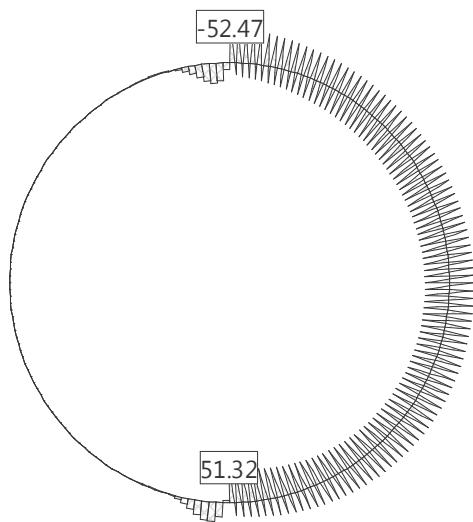
Section force N [kN] for: B3_N1

Scale 1 :550.0



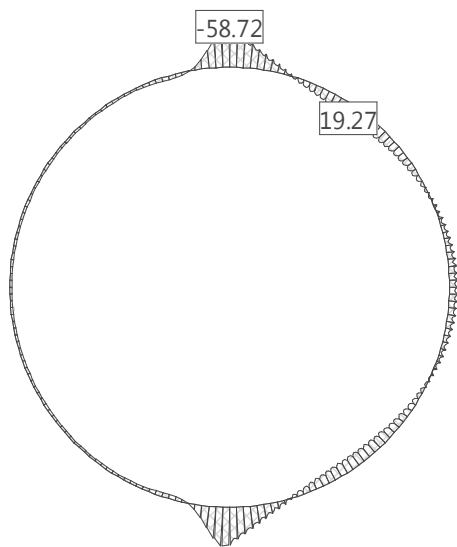
Section force Vz [kN] for: B3_N1

Scale 1 :550.0



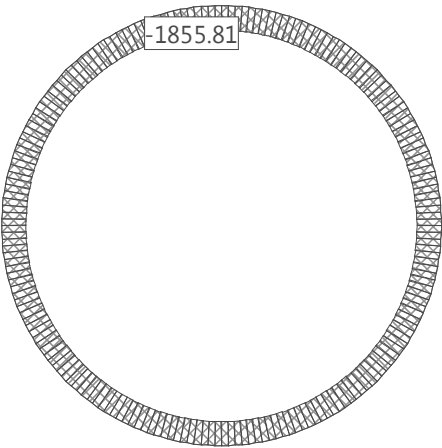
Section force My [kNm] for: B3_N1

Scale 1 :550.0



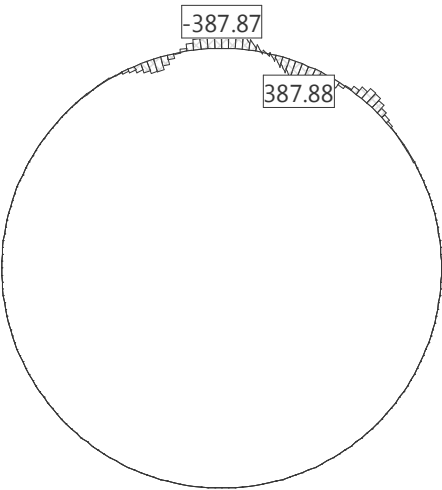
Section force N [kN] for: B4_N1

Scale 1 :550.0



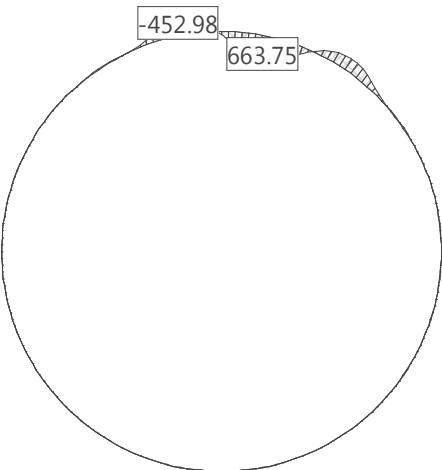
Section force Vz [kN] for: B4_N1

Scale 1 :550.0



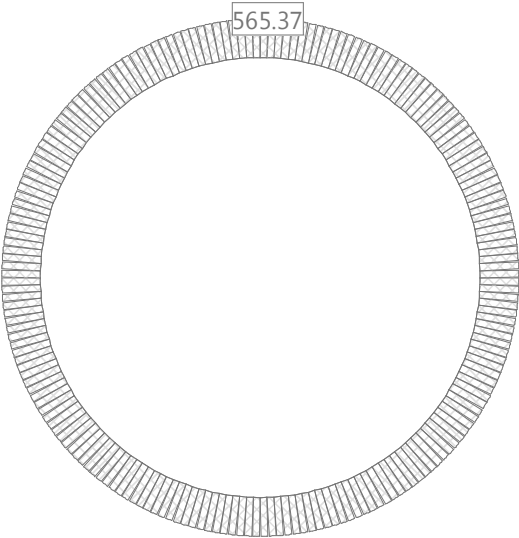
Section force My [kNm] for: B4_N1

Scale 1 :550.0



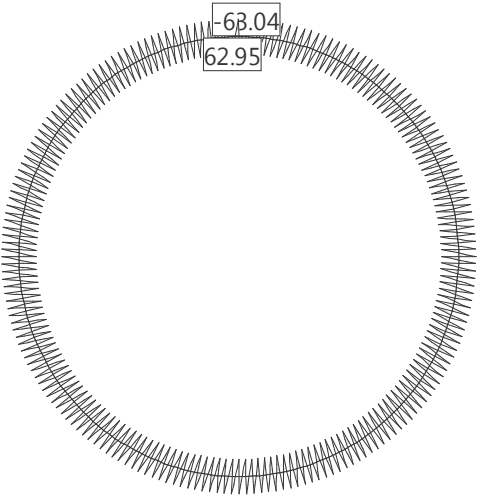
Section force N [kN] for: WPI_N1

Scale 1 :550.0



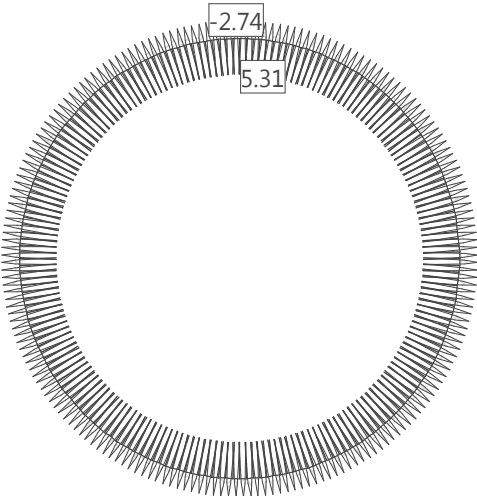
Section force Vz [kN] for: WPI_N1

Scale 1 :550.0



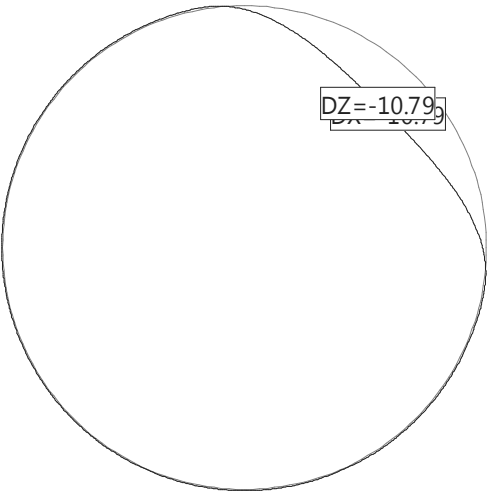
Section force My [kNm] for: WPI_N1

Scale 1 :550.0



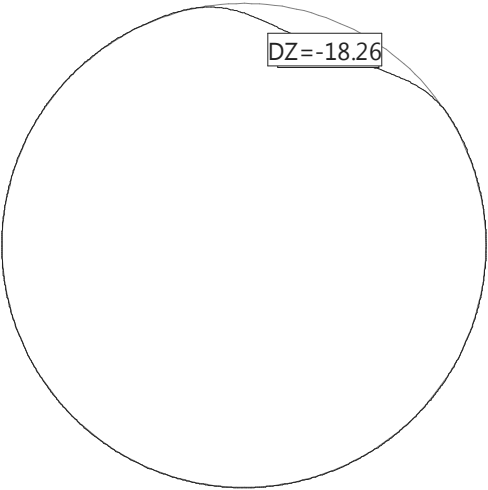
DISPLACEMENTS D for: C1_N1 [mm], Scaling factor: 200.0

Scale 1 :500.0



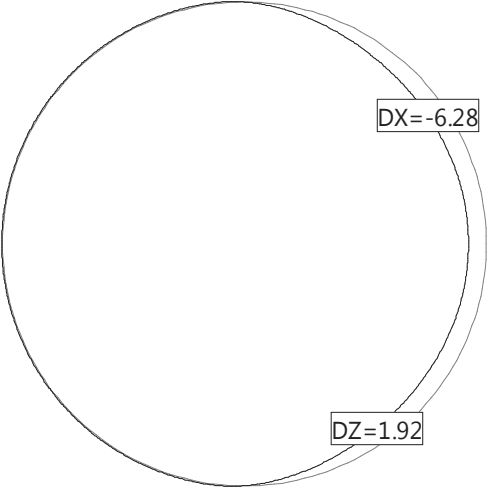
DISPLACEMENTS D for: C2_N1 [mm], Scaling factor: 100.0

Scale 1 :500.0



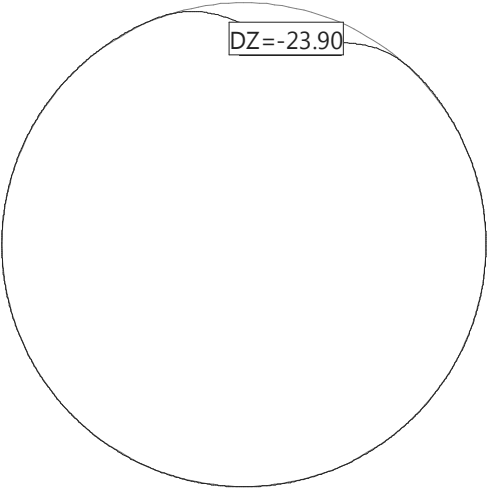
DISPLACEMENTS D for: C3_N1 [mm], Scaling factor: 200.0

Scale 1 :500.0



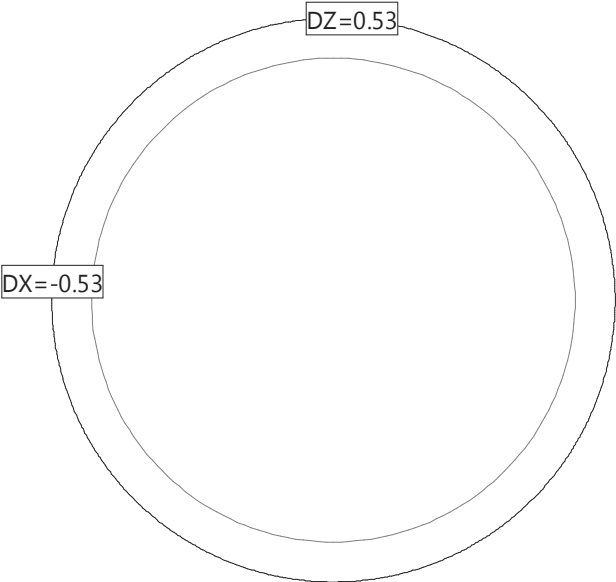
DISPLACEMENTS D for: C4_N1 [mm], Scaling factor: 85.1

Scale 1 :500.0



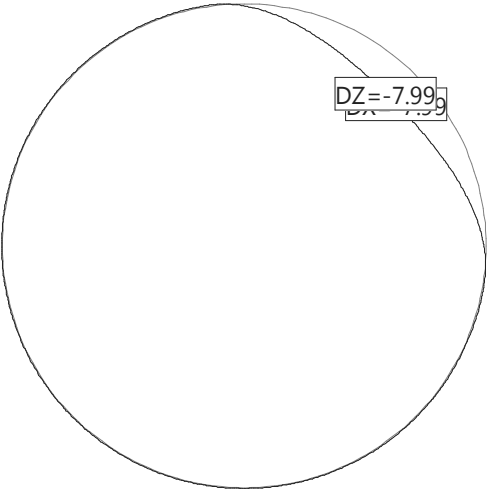
DISPLACEMENTS D for: C5_N1 [mm], Scaling factor: 5000.0

Scale 1 :500.0



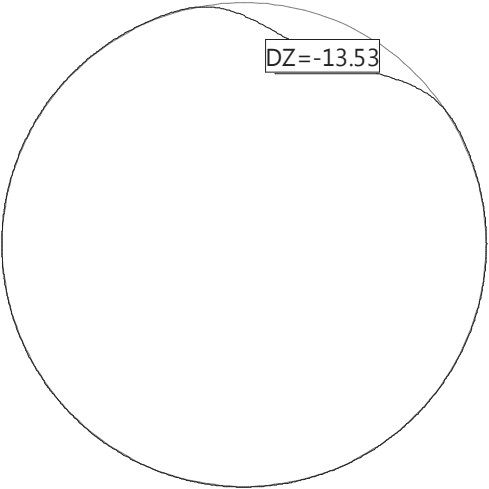
DISPLACEMENTS D for: B1_N1 [mm], Scaling factor: 200.0

Scale 1 :500.0



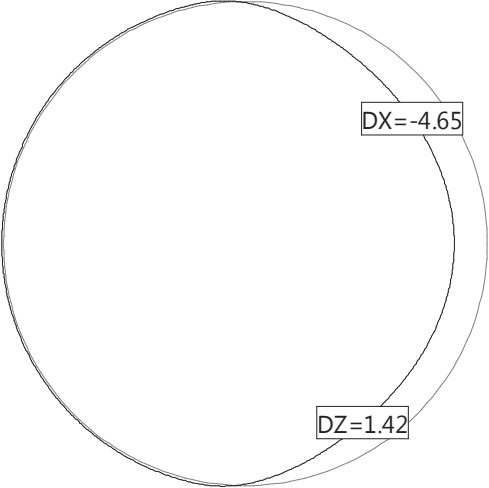
DISPLACEMENTS D for: B2_N1 [mm], Scaling factor: 170.7

Scale 1 :500.0



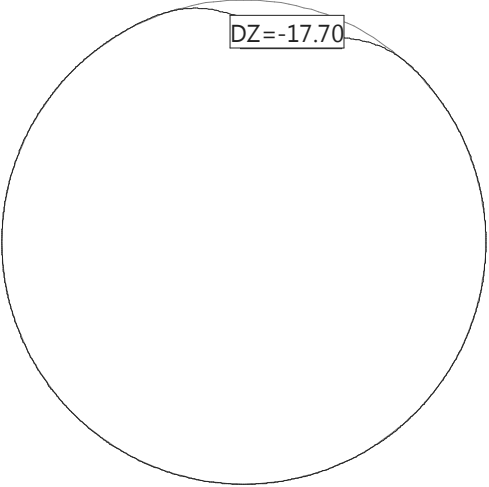
DISPLACEMENTS D for: B3_N1 [mm], Scaling factor: 500.0

Scale 1 :500.0



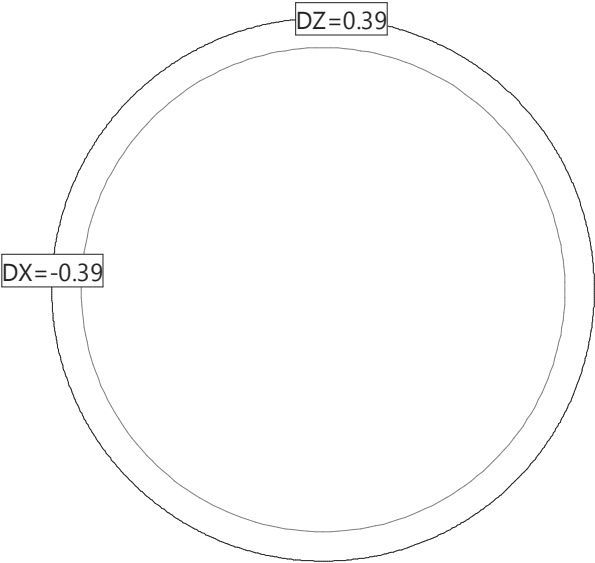
DISPLACEMENTS D for: B4_N1 [mm], Scaling factor: 100.0

Scale 1 :500.0



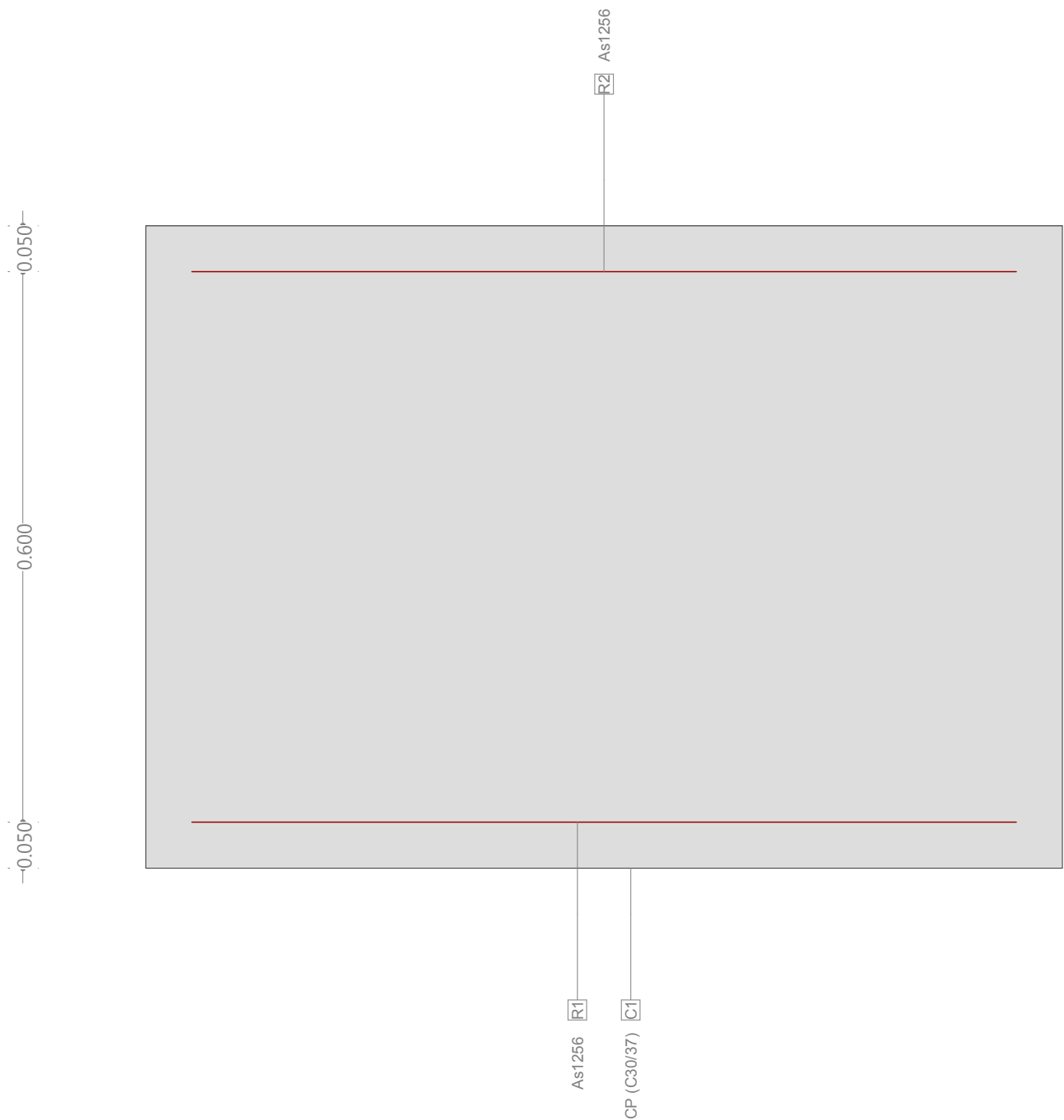
DISPLACEMENTS D for: WPI_N1 [mm], Scaling factor: 5000.0

Scale 1 :500.0



Cross-section QS (C30/37;S420): Outline, Reinforcements

Scale 1 :6.8



Cross section (column): QS

Geometrical definition of cross section

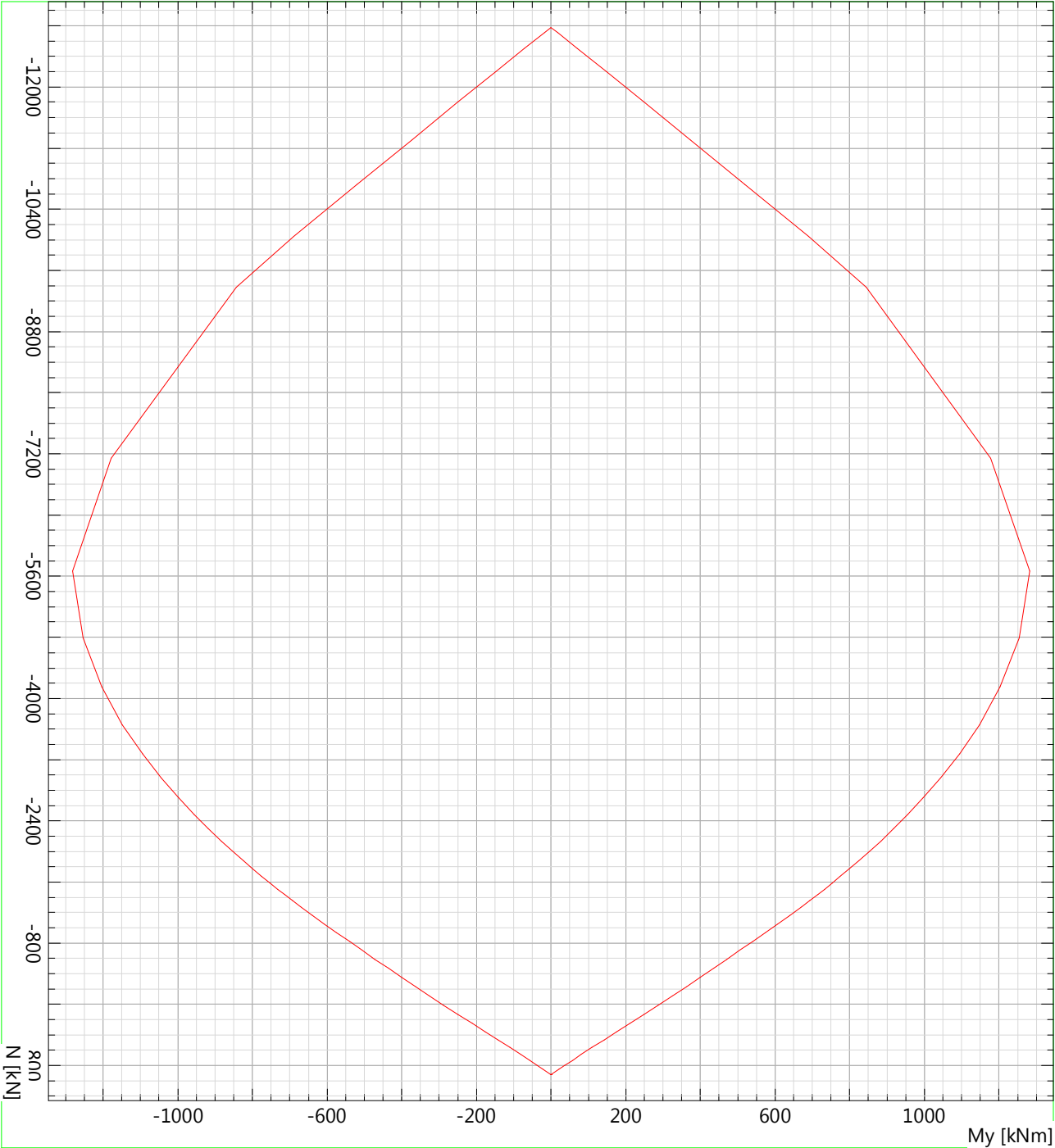
Name	Material	Class	Type	No.	Y _q [m]	Z _q [m]	No.	Y _q [m]	Z _q [m]
C1	CP	C30/37	Polygon	1	0	0	2	1.000	0
				3	1.000	0.700	4	0	0.700

Section properties: (reinforcement not considered, reference material: CP)

	Area [m²]		Moment of inertia [m⁴]		C.G.,Angle [m]				Mass [kg/m]
Ax	0.7000	Ix	0.064912	ys	0.500			Mcs	1750.0
Ay	(=Ax)	Iy	0.028583	zs	0.350				
Az	(=Ax)	Iz	0.058333	β	0 [°]				

M-N-Interaction diagram Cross section (column): QS

!ULS / Reinforcement percentage: ρ = 0.35857 o/o



Ultimate strength analysis Cross section (column): QS

Action forces / Efficiency: $\text{eff}(M,N) = 0.90$ OK

No.	AP	P	Bending and axial force				Shear forces and torsion				Complete CS $\text{eff}(M,N,V,T)$ [-]
			N [kN]	M_y [kNm]	M_z [kNm]	$\text{eff}(M,N)$ [-]	V_y [kN]	V_z [kN]	T [kNm]	$\text{eff}(V,T)$ [-]	
1	!ULS		-2962.6	1.192E+2	-	0.27					
2	!ULS		-2962.6	1.255E+2	-	0.27					
3	!ULS		-2935.3	-2.18E+2	-	0.30					
4	!ULS		-2931.5	-2.18E+2	-	0.30					
5	!ULS		-2962.6	1.255E+2	-	0.27					
6	!ULS		-2962.6	1.255E+2	-	0.27					
7	!ULS		-2935.3	-2.18E+2	-	0.30					
8	!ULS		-2926.0	-1.78E+2	-	0.28					
9	!ULS		-2457.5	-3.85E+2	-	0.33					
10	!ULS		-2425.3	4.498E+2	-	0.37					
11	!ULS		-2457.4	-4.63E+2	-	0.38					
12	!ULS		-2454.8	-4.63E+2	-	0.38					
13	!ULS		-2425.3	4.498E+2	-	0.37					
14	!ULS		-2425.3	4.498E+2	-	0.37					
15	!ULS		-2457.4	-4.63E+2	-	0.38					
16	!ULS		-2450.2	-2.88E+2	-	0.29					
17	!ULS		-3033.9	-1.66E+1	-	0.24					
18	!ULS		-3003.2	26.02000	-	0.24					
19	!ULS		-2971.2	-7.93E+1	-	0.26					
20	!ULS		-2971.2	-7.93E+1	-	0.26					
21	!ULS		-3003.2	26.02000	-	0.24					
22	!ULS		-3005.0	26.00000	-	0.24					
23	!ULS		-2971.8	-7.93E+1	-	0.26					
24	!ULS		-2965.6	-5.51E+1	-	0.25					
25	!ULS		-2505.3	-5.84E+2	-	0.46					
26	!ULS		-2431.4	8.961E+2	-	0.90					
27	!ULS		-2505.3	-6.12E+2	-	0.48					
28	!ULS		-2503.0	-6.12E+2	-	0.48					
29	!ULS		-2431.4	8.961E+2	-	0.90					
30	!ULS		-2431.4	8.961E+2	-	0.90					
31	!ULS		-2505.3	-6.12E+2	-	0.48					
32	!ULS		-2478.1	1.431E+2	-	0.24					
33	!ULS		758.7	6.92000	-	0.85					
34	!ULS		763.2	7.17000	-	0.86					
35	!ULS		758.7	-3.70000	-	0.84					
36	!ULS		758.8	7.13000	-	0.85					
37	!ULS		758.7	-3.70000	-	0.84					
38	!ULS		763.3	-3.66000	-	0.85					
39	!ULS		763.2	7.17000	-	0.86					
40	!ULS		763.3	7.07000	-	0.86					

- : Calculation with uniaxial bending (neutral axis is horizontal)!!

Analysis-Parameters "ULS" Standard: Eurocode EN

ID	Diagram σ - ϵ			Strain Limits			σ_s [N/mm ²]	Partial safety factor				Various parameters			
	C	S		ϵ_{c2} [‰]	ϵ_{cu3} [‰]	ϵ_{ud} [‰]		α_{cc} [-]	γ_c [-]	γ_s [-]		θ [-]	ϕ [-]		
!ULS	2/0	1		-2.000	-3.500	2.000E		0.85	1.50	1.15		45.00	0		

θ : Inclination of diagonal in compression
 ϕ : Creep coefficient

Anexo Q

Input data - properties of rock mass and lining, ground motion parameters

Properties of rock mass/soil			
E_G	[MPa]	8800	Young's modulus of ground
G_G	[MPa]	3548	shear modulus of ground
ν_G	[-]	0.24	coefficient of Poisson
V_S	[m/s]	1135	propagation velocity of shear waves
γ_G	[kN/m³]	27	unit weight of ground
Coefficients of interface ground/lining			
C	[-]	19.965	compressibility ratio
F	[m ⁻¹]	10847.678	flexibility ratio
C*	[-]	12.172	compressibility ratio
F*	[m ⁻¹]	85639.563	flexibility ratio

Properties of the lining			
E_L	[MPa]	15000	Young's modulus of lining
G_L	[MPa]	6250	shear modulus of lining
ν_L	[-]	0.2	coefficient of Poisson
I	[m ⁴]	0.028583	moment of inertia of lining cross-section
I_T	[m ⁴]	8'434	moment of inertia of tunnel cross-section
D/2	[m]	16	external radius of lining
t	[m]	0.700	thickness of lining
A	[m²]	68.8	area of lining
γ_{red}	[-]	1.0	reduction factor stiffness of cracked x-section
I_{crack}	[m ⁴]	0.028583	cracked moment of inertia of lining cross-section
$I_{T,crack}$	[m ⁴]	8'434	cracked moment of inertia of tunnel cross-section

Parameters of ground motion			
a_{gd}	[g]	0.490	PGA (Peak Ground Acceleration)
R_a	[-]	0.7	reduction factor PGA with depth
	[-]	152.0	PGV/PGA ratio
PGV	[m/s]	0.521	PGV (Peak Ground Velocity)
g	[m/s²]	9.81	gravity
M	[-]	6.5	magnitude
D_{epi}	[km]	50-100	distance from epicenter
$\gamma_{s,max}$	[-]	0.00046	max. shear distortions

Ovalization of cross-section due to S-waves

WANG 1993 "Seismic Design of Tunnels: A State-of-the-Art Approach"

Full-slip condition

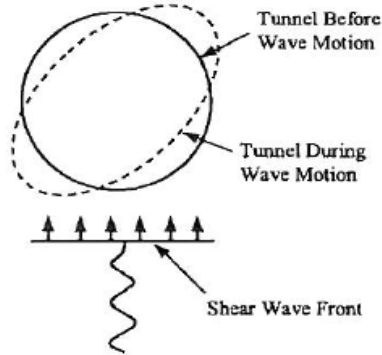
K	[-]	7.00496E-05	full-slip coefficient
---	-----	-------------	-----------------------

θ	[°]	0	15	30	45	60	75	90
N_{max}	[kN/m]	0.0	1.8	3.2	3.7	3.2	1.8	0.0
M_{max}	[kN/m]	0.0	29.2	50.6	58.4	50.6	29.2	0.0
V_{max}	[kN/m]	7.3	6.3	3.7	0.0	-3.7	-6.3	-7.3

No-slip condition

a_2	[-]	-0.764
a_3	[-]	0.882
a_0	[-]	139974.6015

θ	[°]	0	15	30	45	60	75	90
N_{max}	[kN/m]	0.0	3073.1	5322.7	6146.2	5322.7	3073.1	0.0
M_{max}	[kN/m]	0.0	26.1	45.3	52.3	45.3	26.1	0.0



PENZIEN, WU 1998 "Stresses in linings of bored tunnels"

Full-slip condition

K	[-]	0.00007	full-slip coefficient
---	-----	---------	-----------------------

θ	[°]	0	15	30	45	60	75	90
N_{max}	[kN/m]	0.0	1.8	3.2	3.7	3.2	1.8	0.0
M_{max}	[kN/m]	0.0	29.2	50.6	58.4	50.6	29.2	0.0
V_{max}	[kN/m]	7.3	6.3	3.7	0.0	-3.7	-6.3	-7.3

No-slip condition

K'	[-]	0.00007	no-slip coefficient
----	-----	---------	---------------------

θ	[°]	0	15	30	45	60	75	90
N_{max}	[kN/m]	0.0	3.7	6.3	7.3	6.3	3.7	0.0
M_{max}	[kN/m]	0.0	29.2	50.6	58.4	50.6	29.2	0.0
V_{max}	[kN/m]	7.3	6.3	3.7	0.0	-3.7	-6.3	-7.3

Tunnel depth (m)	Ratio of ground motion at tunnel depth to motion at ground surface
≤ 6	1.0
6–15	0.9
15–30	0.8
> 30	0.7

PENZIEN 2000 "Seismically induced racking of tunnel linings"

Full-slip condition

R	[-]	3.040	
α	[-]	0.00016	full-slip coefficient

θ	[°]	0	15	30	45	60	75	90
N_{max}	[kN/m]	0.0	1.8	3.2	3.7	3.2	1.8	0.0
M_{max}	[kN/m]	0.0	29.2	50.6	58.4	50.6	29.2	0.0
V_{max}	[kN/m]	7.3	6.3	3.7	0.0	-3.7	-6.3	-7.3

No-slip condition

R	[-]	3.039	
α	[-]	0.00019	full-slip coefficient

θ	[°]	0	15	30	45	60	75	90
N_{max}	[kN/m]	0.0	3.7	6.3	7.3	6.3	3.7	0.0
M_{max}	[kN/m]	0.0	29.2	50.6	58.4	50.6	29.2	0.0
V_{max}	[kN/m]	7.3	6.3	3.7	0.0	-3.7	-6.3	-7.3

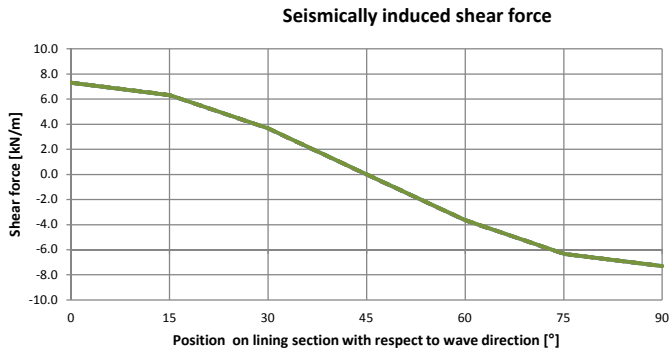
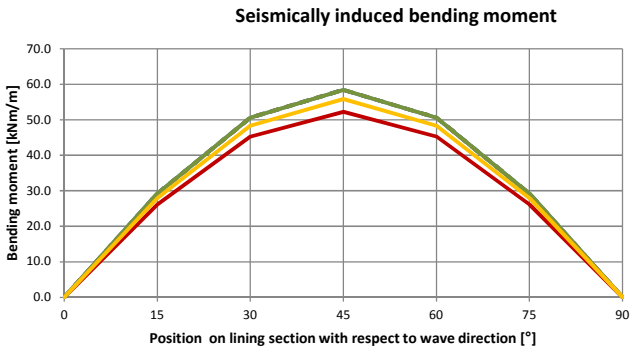
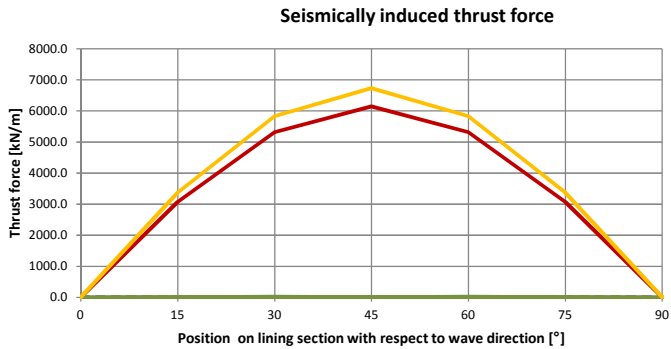
Moment magnitude (M_w)	Ratio of peak ground velocity (cm/s) to peak ground acceleration (g)		
	Source-to-site distance (km)		
	0–20	20–50	50–100
Rock ^a			
6.5	66	76	86
7.5	97	109	97
8.5	127	140	152
Stiff soil ^b			
6.5	94	102	109
7.5	140	127	155
8.5	180	188	193
Soft soil ^b			
6.5	140	132	142
7.5	208	165	201
8.5	269	244	251

BOBET 2003 "Effect of pore water pressure on tunnel support during static and seismic loading"

No-slip condition

C_2	[-]	-1.741
C_3	[-]	0.742
τ	[-]	1629.3

θ	[°]	0	15	30	45	60	75	90
N_{max}	[kN/m]	0.0	3367.9	5833.3	6735.7	5833.3	3367.9	0.0
M_{max}	[kN/m]	0.0	27.9	48.4	55.9	48.4	27.9	0.0



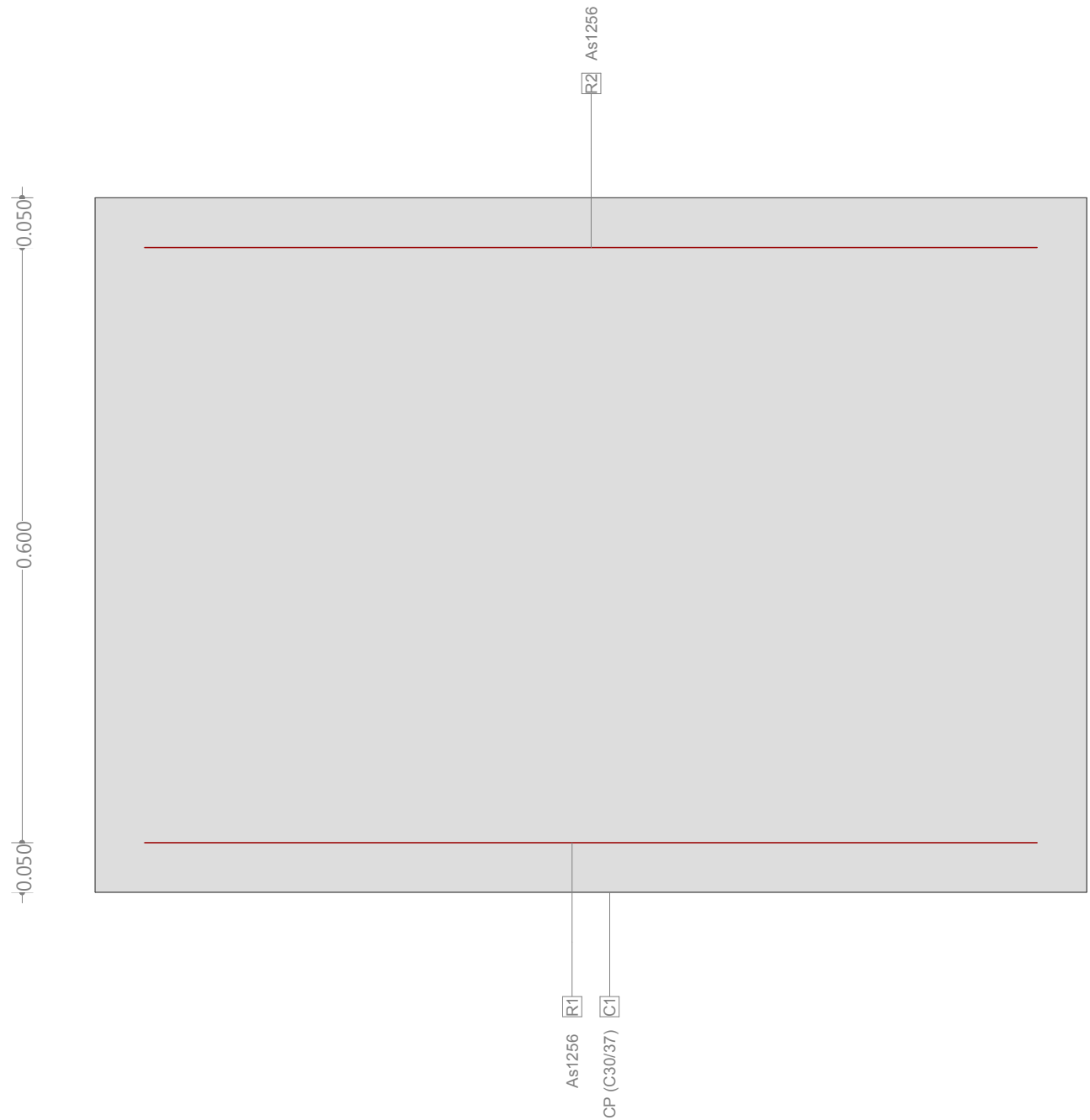
Summary of seismically induced forces due to ovalization

		N_{max} [kN/m]	M_{max} [kNm/m]	V_{max} [kN/m]
WANG 1993	full-slip	3.7	58.4	7.3
WANG 1993	no-slip	6146.2	52.3	-
PENZIEN/WU 1998	full-slip	3.7	58.4	7.3
PENZIEN/WU 1998	no-slip	7.3	58.4	7.3
PENZIEN 2000	full-slip	3.7	58.4	7.3
PENZIEN 2000	no-slip	7.3	58.4	7.3
BOBET 2003	no-slip	6735.7	55.9	-

Anexo R

Cross-section QS (C30/37;S420): Outline, Reinforcements

Scale 1 :6.4



Cross section (column): QS

Geometrical definition of cross section

Name	Material	Class	Type	No.	y_q [m]	z_q [m]	No.	y_q [m]	z_q [m]
C1	CP	C30/37	Polygon	1	0	0	2	1.000	0
				3	1.000	0.700	4	0	0.700

Lombardi AG, 6648 Minusio-Locarno

Section properties: (reinforcement not considered, reference material: CP)

	Area [m ²]		Moment of inertia [m ⁴]		C.G.,Angle [m]				Mass [kg/m]
A_x	0.7000	I_x	0.064912	y_s	0.500			M_{CS}	1750.0
A_y	(=A_x)	I_y	0.028583	z_s	0.350				
A_z	(=A_x)	I_z	0.058333	β	0 [°]				

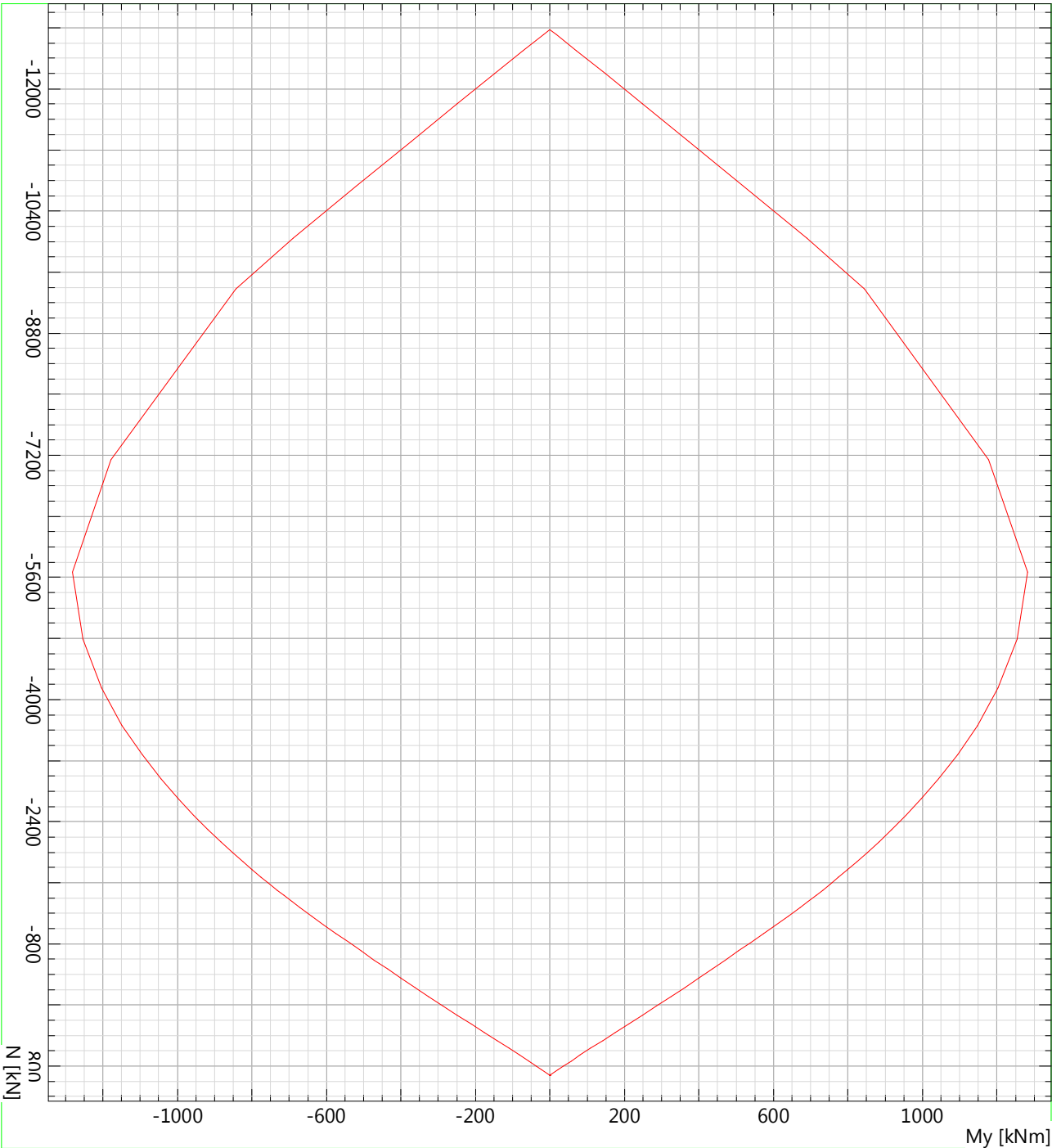
Cross section (column): QS

Mild reinforcement G0 $\Sigma A_s = 2512 \text{ mm}^2$, $\rho = 0.358857 \%$

Name	Material	Class	BC	Type	y _{1q} [m]	z _{1q} [m]	y _{2q} [m]	z _{2q} [m]	n,Ø	exist A _s [mm ²]
R2	R4	S420	1	L	0.050	0.650	0.950	0.650		1256
R1				L	0.050	0.050	0.950	0.050		1256

BC : BC: 0=constant area, 1=adapt always, 2=adapt area in tension zone
Type : Definition of reinforcement: P = Point, L= Line, R = Ring

M-N-Interaction diagram Cross section (column): QS
!ULS / Reinforcement percentage: $\rho = 0.358857$ o/o



Lombardi AG, 6648 Minusio-Locarno

Ultimate strength analysis Cross section (column): QS

Action forces / Efficiency: $\text{eff}(M,N) = 0.89$ OK

No.	AP	P	Bending and axial force				Shear forces and torsion				Complete CS $\text{eff}(M,N,V,T)$ [-]
			N [kN]	M_y [kNm]	M_z [kNm]	$\text{eff}(M,N)$ [-]	V_y [kN]	V_z [kN]	T [kNm]	$\text{eff}(V,T)$ [-]	
1	!ULS		-8930.2	1.467E+2	-	0.74					
2	!ULS		-8930.2	1.513E+2	-	0.74					
3	!ULS		-8910.0	-2.20E+2	-	0.76					
4	!ULS		-8907.2	-2.20E+2	-	0.76					
5	!ULS		-8930.2	1.513E+2	-	0.74					
6	!ULS		-8930.2	1.513E+2	-	0.74					
7	!ULS		-8910.0	-2.20E+2	-	0.76					
8	!ULS		-8903.1	-1.91E+2	-	0.75					
9	!ULS		-8556.1	-3.44E+2	-	0.77					
10	!ULS		-8532.2	3.916E+2	-	0.78					
11	!ULS		-8556.0	-4.01E+2	-	0.79					
12	!ULS		-8554.1	-4.01E+2	-	0.79					
13	!ULS		-8532.2	3.916E+2	-	0.78					
14	!ULS		-8532.2	3.916E+2	-	0.78					
15	!ULS		-8556.0	-4.01E+2	-	0.79					
16	!ULS		-8550.7	-2.72E+2	-	0.75					
17	!ULS		-8983.1	-7.07E+1	-	0.72					
18	!ULS		-8960.3	77.67000	-	0.72					
19	!ULS		-8936.6	-1.17E+2	-	0.73					
20	!ULS		-8936.6	-1.17E+2	-	0.73					
21	!ULS		-8960.3	77.67000	-	0.72					
22	!ULS		-8961.6	77.66000	-	0.72					
23	!ULS		-8937.0	-1.17E+2	-	0.73					
24	!ULS		-8932.5	-9.92E+1	-	0.73					
25	!ULS		-8591.5	-4.91E+2	-	0.82					
26	!ULS		-8536.7	7.222E+2	-	0.89					
27	!ULS		-8591.5	-5.11E+2	-	0.83					
28	!ULS		-8589.8	-5.11E+2	-	0.83					
29	!ULS		-8536.7	7.222E+2	-	0.89					
30	!ULS		-8536.7	7.222E+2	-	0.89					
31	!ULS		-8591.5	-5.11E+2	-	0.83					
32	!ULS		-8571.3	1.644E+2	-	0.72					
33	!ULS		-6173.7	63.53000	-	0.50					
34	!ULS		-6170.4	63.71000	-	0.50					
35	!ULS		-6173.7	-6.11E+1	-	0.50					
36	!ULS		-6173.6	63.68000	-	0.50					
37	!ULS		-6173.7	-6.11E+1	-	0.50					
38	!ULS		-6170.3	-6.11E+1	-	0.50					
39	!ULS		-6170.4	63.71000	-	0.50					
40	!ULS		-6170.3	63.63000	-	0.50					

- : Calculation with uniaxial bending (neutral axis is horizontal)!!

Analysis-Parameters "ULS" Standard: Eurocode EN

ID	Diagram σ - ϵ			Strain Limits			σ_s [N/mm ²]	Partial safety factor				Various parameters			
	C	S		ϵ_{c2} [‰]	ϵ_{cu3} [‰]	ϵ_{ud} [‰]		α_{cc} [-]	γ_c [-]	γ_s [-]		θ [-]	φ [-]		
!ULS	2/0	1		-2.000	-3.500	2.000E		0.85	1.50	1.15		45.00	0		

θ : Inclination of diagonal in compression
 φ : Creep coefficient