



SURAT KETERANGAN
MELAKUKAN KEGIATAN PENGABDIAN KEPADA MASYARAKAT
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL
No. 625/C.02.01/LP2M/IX/2019

Yang bertanda tangan di bawah ini,

Nama : Dr. Tarsisius Kristyadi, S.T., M.T.
Jabatan : Kepala
Unit Kerja : LP2M-Itenas
JL. P.K.H. Mustafa No.23 Bandung

Menerangkan bahwa,

Nama	NPP	Jabatan
Dr.techn. Indra Noer Hamdhan, S.T., M.T.	20030105	Tenaga Ahli

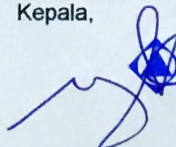
Telah melakukan kegiatan Pengabdian kepada Masyarakat sebagai berikut :

Nama Kegiatan : Review Desain Tunnel-1 Kereta Cepat Jakarta - Bandung (High Speed Rail Jakarta Bandung)
Tempat : Jakarta
Waktu : 23 Mei - 14 Agustus 2019
Sumber Dana : PT. LAPI ITB

Demikian surat keterangan ini dibuat untuk dapat dipergunakan sebagaimana mestinya.

Bandung, 04 September 2019

Lembaga Penelitian dan Pengabdian
kepada Masyarakat (LP2M) Itenas
Kepala,

 **itenas**
L P P M

Dr. Tarsisius Kristyadi, S.T., M.T.
NPP 960604

Daftar Isi

Jakarta to Bandung High Speed Railway

1. DESKRIPSI PEKERJAAN.....	1
2. LINGKUP PEKERJAAN TEROWONGAN.....	1
3. STANDAR-STANDAR YANG DIGUNAKAN.....	2
4. TUNNEL MATERIAL SPECIFICATION.....	3
5. PENGUJIAN TEROWONGAN	4
6. KRITERIA DEFORMASI	8
7. METODE KONSTRUKSI TEROWONGAN	9
8. STABILITAS MUKA TEROWONGAN (<i>TUNNEL FACE STABILITY</i>) DALAM TEROWONGAN MEKANIS.....	10
9. KONDISI TANAH DI LOKASI PEMBANGUNAN TEROWONGAN	12
10. STRATIFIKASI TANAH DAN PEMODELAN GEOMETRI KONDISI EKSISTENSI.....	12
11. PEMODELAN TUNNEL TBM	32
12. ANALISIS PEMODELAN TUNNEL TBM	33
13. HASIL ANALISIS PEMODELAN TUNNEL TBM	45
14. PEMODELAN TUNNEL TBM TERHADAP BEBAN GEMPA	70
15. PERHITUNGAN VOLUME LOSS.....	90
16. ANALISIS PENURUNAN DI PERMUKAAN	90
17. MONITORING DI LAPANGAN	98
18. DESAIN PENULANGAN TEROWONGAN	104
19. EMERGENCY EVACUATION PLAN OF TUNNEL 1	104

LAMPIRAN A STRATIFIKASI TANAH

LAMPIRAN B *LAYOUT* LOKASI PEKERJAAN TUNNEL 1

LAMPIRAN C *VOLUME LOSS*

LAMPIRAN D *LAYOUT* DAN POTONGAN MELINTANG MONITORING

LAMPIRAN E PERHITUNGAN DESAIN PENULANGAN

Laporan Review Tunnel 1

Jakarta to Bandung High Speed Railway

1. DESKRIPSI PEKERJAAN

Rute pekerjaan berawal dari stasiun Halim menuju ke arah selatan jalan, dan kemudian berlanjut menuju Kawasan Industri Karawang, Pusat administrasi perencanaan kabupaten Walini, Padalarang, kemudian diarahkan secara paralel menuju kota Bandung, diakhiri menuju Gedebage yang merupakan jalur dari terminal.

Panjang segmen JKT-BDG HSR yaitu 142.3 km, termasuk 102.24 km jembatan dan terowongan. Sepanjang jalur terdapat 4 stasiun yang direncanakan, yaitu terdiri dari Stasiun Halim, Stasiun Karawang, Stasiun Walini dan Stasiun Tegal Luar.

2. LINGKUP PEKERJAAN TEROWONGAN

Kereta api cepat Jakarta-Bandung merencanakan 13 jalur ganda untuk terowongan pada jalur utamanya, dengan panjang total sebesar 16.82 km. Terowongan terpanjang merupakan terowongan No. 6, dengan panjang total 4478 m. Desain terowongan terpendek merupakan terowongan DK99~DK100 dengan panjang 208 m. Detail data terowongan dapat dilihat pada **Tabel 1** dan **Tabel 2**.

Tabel 1 Rentang dan Panjang Terowongan

S/N	Tunnel Name	Chainage		Center Chainage	length
		Entrance	Exit		
1	NO.1 Tunnel	DK2+540	DK4+425	DK3+482.5	1885
2	NO.2 Tunnel	DK74+020	DK75+050	DK74+535.0	1030
3	NO.3 Tunnel	DK75+540	DK76+275	DK75+907.5	735
4	NO.4 Tunnel	DK76+935	DK78+250	DK77+592.5	1315
5	NO.5 Tunnel	DK86+535	DK86+957	DK86+746.0	422
6	NO.6 Tunnel	DK88+867	DK93+345	DK91+106.0	4478
7	NO.7 Tunnel	DK93+640	DK94+895	DK94+267.5	1255
8	Walini Tunnel	DK95+472	DK96+080	DK95+776.0	608
9	NO.8 Tunnel	DK97+320	DK99+510	DK98+415.0	2190
10	DK99~DK100 Tunnel	DK99+842	DK100+050	DK99+946.0	208
11	NO.9 Tunnel	DK102+275	DK102+660	DK102+467.5	385
12	NO.10 Tunnel	DK107+070	DK108+300	DK107+685.0	1230
13	NO.11 Tunnel	DK113+390	DK114+491	DK113+940.5	1101

Tabel 2 Panjang Terowongan

Section	Tunnel length	Double-tracked tunnel length and number	
		Length (m)	Number
Main Line	$L \leq 1000$	2358	5
	$1000 < L \leq 2000$	7816	6
	$2000 < L \leq 3000$	2190	1
	$3000 < L \leq 5000$	4478	1
	Total	16842	13

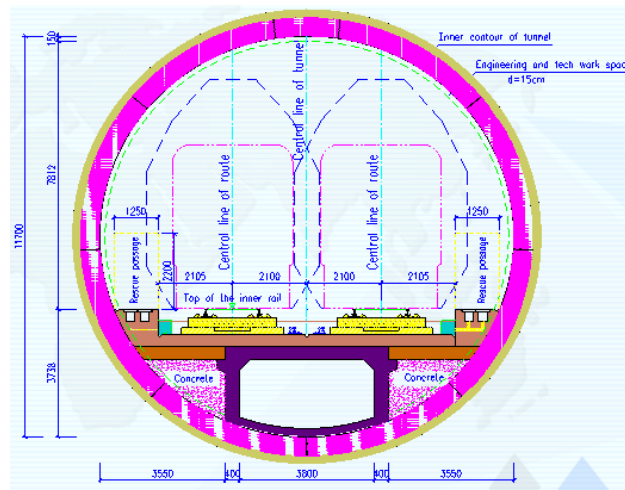
Pada laporan ini, terowongan yang akan dianalisis yaitu Terowongan No. 1 (No. 1 Tunnel).

3. STANDAR-STANDAR YANG DIGUNAKAN

Standar yang digunakan dalam pengujian material desain terowongan adalah sebagai berikut:

- TB1000005-2010 : Code for Durability Design on Concrete Structure of Railway
- TB10621-2014 : Code for Design of High Speed Railway
- GB50111-2006 : Code for Seismic Design of Railway Engineering
- GB50111-2005 : Code for Design on Railway Tunnel
- GB50010-2010 : Code for Design of Concrete Structure
- GB/T 8074-2008 : Testing Method for Specific Surface of Cement-Blaine Method
- GB/T 1346-2011 : Test Methods for Water Requirement of Normal Consistency, Setting Time and Soundness of The Portland Cement
- GB/T 17671-1999: Method of Testing Cements--Determination of Strength
- GB/T 176-2017 : Methods for Chemical Analysis of Cement
- GB/T 21372-2008: Portland Cement Clinker
- GB/T 14684-2011: Sand for Construction
- TB/T 3275-2011 : Concrete for Railway Construction
- GB/T14685-2011 : Pebble and Crushed Stone for Contruction
- TB/T 3275-2011 : Concrete for Railway Construction
- GB/T 8077-2012 : Methods for Testing Uniformity of Cincrete Admixture
- GB 8076-2008 : Concrete Admixture
- GB 1499.1-2017 : Steel for The Reinforcement of Concrete—Part 1:Hot Rolled Round Bars
- GB 1499.2-2018 : Steel for The Reinforcement of Concrete—Part 2:Hot Rolled Ribbed Bars
- GB/T 228.1-2010 : Metallic Materials-Tensile Testing- Part 1:Method of Test at Room Temperature
- GB/T 232-2010 : Metallic Materials-Bend Tedt.
- SNI 2052:2017 : Indonesianconcrete Reinforcement Standard Specification.

4. TUNNEL MATERIAL SPECIFICATION



Gambar 1 Desain struktur terowongan – desain segmen shield

Diameter dalam : 11.7 m
Ketebalan : 550 mm
Lebar segmen : 2 m
Busur yang berdekatan dihubungkan dengan 50 M36 longitudinal oblique baut
Balok yang berdekatan dihubungkan oleh 2 baut oblique lingkaran

Material bangunan

Beton segmen : C50
Tulangan : BJTP30 ($\phi \leq 10$ mm)
BJTS40 ($\phi > 10$ mm)
Bottom filling terowonga : Beton C25
Ditch and cable duct : Beton C30
Pelindung plat : C35 dengan tulangan

A. Concrete material

Semen Portland digunakan untuk beton, akan tetapi semen pada kekuatan awal tidak disarankan.

Kandungan alkali (Na_2O) tidak boleh lebih dari 0.6%

Keseragaman, level kestabilan tingkat 1 fly ash perlu digunakan

Blast furnace slag sebaiknya tidak kurang dari 350m²/kg.

Pemasok harus memberikan jumlah campuran beton yang direkomendasikan dan laju pengurangan air yang sesuai, nama kimia dari komponen, *chloridion ratio*, *alkalinity*, dan catatan konstruksi seperti efek samping, metode pencampuran dan lainnya.

B. Proposi Campuran

Chloridion ration dalam RC harus tidak lebih dari 0.1%, dan maksimum *alkalinity* pada beton harus concrete shall be 3.0kg/m³. Bahan pengikat beton harus tidak lebih dari 80 kg/m³, rasio pengikat air maksimum adalah 0,40; penggunaan minimum dari bahan pengikat adalah 340 kg/m³.

C. Daya Tahan Beton

Concrete electric flux: 56d (C) < 1000.

D. Pengukuran Struktural

Kekuatan dan kepadatan alas tidak boleh kurang dari beton segmen. Penutup *stirrup* dan *rebar* harus 40 mm, penutup tulangan detail tidak boleh kurang dari 25 mm, dan tulangan utama adalah 50 mm.

E. Serat polypropylene retikulasi harus ditambahkan ke segmen beton, dengan 1.8kg / m³.

Retikulasi sifat serat polypropylene:

- Kuat tarik: $\geq 500\text{MPa}$;
- Modulus elastisitas: $> 3790\text{ MPa}$;
- Resistance: $> 1.2\text{G}\Omega$;
- Toughness index: $I[5] \geq 3.0$;
- Density: 0.91g/cm^3 ;
- Panjang: 12-19mm;
- Melting point: $160\text{-}176^\circ\text{C}$;
- Acid, alkaline resistance: Strong;

F. Persyaratan material yang lebih terperinci, silakan merujuk pada <Kode untuk Desain Daya Tahan Struktur Beton Kereta Api>.

5. PENGUJIAN TEROWONGAN

Pengujian terowongan dilakukan berdasarkan beberapa kriteria, yaitu *production requirements*, *Three-ring assembly test*, dan *Segment Leakage Inspection*.

A. Production Requirements

- 1) Produksi serta pemasangan perlu memenuhi beberapa akurasi kriteria berikut:

Width: $\pm 1\text{mm}$ (6 measuring points)

Thickness: $\begin{smallmatrix} +3 \\ -1 \end{smallmatrix}\text{mm}$ (8 measuring points)

Arc/chord length: $\begin{smallmatrix} +1 \\ -1 \end{smallmatrix}\text{mm}$

Segment inner radius: $\begin{smallmatrix} +1 \\ -1 \end{smallmatrix}\text{mm}$

Segment outer radius: $\begin{smallmatrix} +2 \\ 0 \end{smallmatrix}\text{mm}$

Bolt hole diameter and position: $\begin{smallmatrix} +1 \\ -1 \end{smallmatrix}\text{mm}$

Axial radius of elastic gasket groove: $\begin{smallmatrix} +1 \\ -1 \end{smallmatrix}\text{mm}$

Axial radius of longitudinal rebate: $\begin{smallmatrix} +1 \\ -1 \end{smallmatrix}\text{mm}$

Flatness of radial joint: 0.1mm to theoretical face, local deviation rate no more than 0.6mm/m.

Flatness of circular joint: 0.3mm to theoretical face, local deviation rate no more than 0.6mm/m.

Full ring assembly allowance (three segments) :

The gap between adjacent segments shall be no more than 2.0mm;

The gap between longitudinal adjacent segments: $\begin{smallmatrix} +2 \\ 0 \end{smallmatrix}\text{mm}$;

Inner radial of ring: $\begin{smallmatrix} +1 \\ -1 \end{smallmatrix}\text{mm}$;

Outer radial of ring: $\begin{smallmatrix} +3 \\ -1 \end{smallmatrix}\text{mm}$;

Different axials of circular bolt no less than 1mm;

RC cover allowance: $\pm 5\text{mm}$.

- 2) Sebelum diproduksi, pemeriksaan dibutuhkan untuk model baja, dapat dilakukan perubahan jika diperlukan atau tidak masuk dalam kriteria yang diizinkan. Selama masa produksi, pemeriksaan serta pemeliharaan juga diperlukan.
- 3) Permukaan lining harus padat, bersih, rata dan tidak mengalami kerusakan.
- 4) Minimum pelindung segmen harus tidak kurang dari 50 mm, dengan nilai koreksi $\pm 5\text{mm}$.
- 5) Indikasi (jumlah dan arah) harus ditandai pada bagian dalam lengkung segmen.
- 6) Pipa pemeriksaan harus dibutuhkan untuk pekerjaan pre-grouting, pelindung yang digunakan setebal 50 mm.
- 7) Sebelum pemasangan, pemeriksaan diperlukan untuk memastikan tidak yang jatuh, cacat alur dan sudut, penambalan harus digunakan untuk menutup bagian alur dan sudut.
- 8) Pengujian pemasangan dibutuhkan setiap 100 segmen yang diproduksi
- 9) Selama produksi perkuatan, spasi tulangan yang diizinkan yaitu $\pm 10\text{mm}$, the stirrup spacing allowance is $\pm 10\text{mm}$, the distribution bar allowance is $\pm 5\text{mm}$, and the length, with and height allowance is $\pm 5\text{mm}$.

B. Three-ring assembly test

- 1) Tujuan pengujian

Pengujian diutamakan untuk: the inner diameter, outer diameter, circular seam clearance, longitudinal seam clearance, longitudinal (ring) direction bolt penetration, etc.

- 2) Test frequency: 200 rings/time.
- 3) Test instrument: steel tape and feeler.

Tabel 3 Inspection items and allowable deviation table for horizontal assembly dimension of three-ring pipe segments

No.	Inspection items	Allowable deviation	Monitoring frequency	Inspection tools
1	Inner diameter after ring formation	$\pm 1\text{mm}$	Measure 4 items (without cushion)	Steel tape
2	Outer diameter after ring formation	$\pm 3\text{mm}$	Measure 4 items (without cushion)	Steel tape
3	Circumferential clearance	$\leq 2\text{mm}$	Measure 6 points per seam	feeler
4	Longitudinal clearance	$\leq 2\text{mm}$	Measure 2 points per seam	feeler
5	Longitudinal and circumferential bolts are all penetrate	$\leq 1\text{mm}$	Clearance between bolt and hole	Wire insertion



Gambar 2 Photo 1 of three-ring assembly test



Gambar 3 Photo 2 of three-ring assembly test

C. Segment Leakage Inspection

1) Test purposes

Tekanan air diberikan secara bertahap pada bagian luar lapisan melengkung untuk mensimulasikan kebocoran pada bagian dalam permukaan melengkung segmen terhadap tekanan rembesan muka air tanah di sekitar terowongan. Kemampuan segmen dalam upaya menangani rembesan dievaluasi dan kepadatan bentuk dari segmen dipantulkan dari satu sisi.

2) Technical requirement

Tingkat impermeabilitas: P12. Pressurize untuk mendesain tekanan impermeable sebesar 1.2 mpa dan menstabilas selama 2 jam. Tidak terjadi kebocoran pada bagian dalam permukaan melengkung segmen, dan tinggi dari tekanan lateral tidak lagi lebih dari 50 mm.

3) Frekuensi pengujian: 200 rings/time.

4) Inspection Instruments:

Rigid bracket, inspection bracket steel plate with rubber sealing pad, transverse pressure parts, fastening screw, nut, pressurized water intake, drainage hole and pressure pump for test.



Gambar 4 Pictures of Pipe Leakage Inspection Test

D. Pemeriksaan Tahanan Lentur pada Segmen

1) Kebutuhan teknis

Setelah dibebani selama 30 menit, dan tidak ditemukan adanya retakan di bagian dalam permukaan segmen atau retakan yang terjadi kurang dari 0.2 mm

2) Frekuensi pemeriksaan

Pengambilan contoh dan pemeriksaan ulang ditentukan berdasarkan jenis desain segmen

3) Instrumen pemeriksaan

100t test reaction frame, 50t jack; pressure gauge dengan rentang 0 Mpa – 60 MPa, level akurasi 1; range 0mm-30mm percentile meter. Crack observation reading microscope, Jack and pressure gauge.

Tabel 4 Hierarchical Loading Table

Load classification	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4	Level 5	Level 6	Level 7
Design Load with Graded Loading Value	20%	20%	20%	20%	10%	5%	5%
Cumulative Load Value Design Load	20%	40%	60%	80%	90%	95%	100%



Gambar 5 Pictures of test for bending resistance of segment

Gripper pulling test & Thrust test tidak dilakukan pengujian dikarenakan Gripper dan shield jack merupakan peralatan yang digunakan berdasarkan pabrikasi. Produk pabrik akan dilampirkan dengan instruksi inspeksi produk guna memastikan keamanan saat dipergunakan.

6. KRITERIA DEFORMASI

Monitoring serta kriteria deformasi pada struktur yang berdiri di atas galian terowongan Tunnel 1 ditunjukkan pada **Tabel 5**.

Tabel 5 Monitoring items and control values for tunnel surrounding environment

No.	Monitoring objects	Monitoring items and its control values
1	Highway pavement	Accumulative pavement settlement amount: $\leq 20\text{mm}$; Settlement rate: $\leq 2\text{mm/d}$. For risk sensitive point, the control values shall be determined according to the specific situation.
2	Light rail	Accumulative abutment settlement: $\leq 16\text{mm}$; Settlement rate: $\leq 1.5\text{mm/d}$; Accumulative differential settlement of adjacent abutments: $\leq 4\text{mm}$; Differential settlement of single abutment (lateral direction) : $\leq 3\text{mm}$; Absolute rotation angle of beam end: $\leq 0.8 \times 10^{-3}/\text{rad}$; Relative rotation angle of beam end: $\leq 1.6 \times 10^{-3}/\text{rad}$; Concrete crack width: $\leq 0.2\text{mm}$.
3	Frame pier of Light rail bridge	Accumulative abutment settlement: $\leq 16\text{mm}$; Settlement rate: $\leq 1.5\text{mm/d}$; Accumulative differential settlement of adjacent frame pier: $\leq 4\text{mm}$ (longitudinal direction) ; Differential settlement of single frame pier: $\leq 6\text{mm}$; Concrete crack width: $\leq 0.2\text{mm}$ (for pre-stressed structure, cracking is forbidden) .
4	Pedestrian overbridge	Accumulative abutment settlement: $\leq 30\text{mm}$; Differential settlement of adjacent abutment of simple supported beam (longitudinal direction) : $\leq 8\text{mm}$; Differential settlement of abutment under stairs structure: $\leq 3\text{mm}$; Differential settlement of single abutment (lateral direction) : $\leq 4\text{mm}$; Horizontal displacement of pier cap: $\leq 4\text{mm}$; Settlement rate: $\leq 3\text{mm/d}$; Concrete cracking width: $\leq 0.2\text{mm}$.
5	Surface buildings	Structure inclination rate: $\leq 1/1000$; Accumulative settlement amount: $\leq 20\text{mm}$; Structure differential settlement amount: $\leq 1\%L$ (Where L denotes the centre spacing of adjacent base) ; Structure deformation rate: $\leq 1.5\text{mm/d}$; Maximum concrete crack width: $\leq 0.2\text{mm}$.
6	Highway interchange bridge	Accumulative abutment settlement amount: $\leq 20\text{mm}$; Settlement rate: $\leq 1.5\text{mm/d}$; Accumulative differential settlement of adjacent abutments (longitudinal direction) : $\leq 6\text{mm}$; Differential settlement of single abutment: $\leq 3\text{mm}$; Absolute rotation angle of beam end: $\leq 0.8 \times 10^{-3}/\text{rad}$; Relative rotation angle of beam end: $\leq 1.6 \times 10^{-3}/\text{rad}$; Concrete crack width: $\leq 0.2\text{mm}$ (for pre-stressed structure, cracking is forbidden) .
Notes: 1. All surface buildings located within in the major construction influence range must be monitored. Buildings located within in the secondary construction influence range could be monitored. 2. Monitoring must be conducted on major underground pipelines, such as gas pipeline with medium or high pressure, major water pipeline, water source pipeline, concrete pipe with spigot joints, electricity pipeline with the voltage higher than 220KV, military optical cable and etc.		

Deformasi izin pada monitoring terhadap penurunan di permukaan serta potensi mengembang (heave).

Tabel 6 Control Values of Monitoring Items on Ground Settlement and Heave (Shield Tunnel)

Monitoring Items and Soil Types		Cumulative value (mm)	Rate of Change (mm/d)
Ground settlement	Hard ~ Medium hard Soil	10~20	3
	Medium soft ~ Soft Soil	15~25	3

Ground heave	10	3
--------------	----	---

Pada masa operasional, deformasi izin pada *track* kereta cepat mengacu pada QCR9230-2016 dimana besar deformasi izinnnya sebesar 15 mm. Sedangkan pada konstruksi, deformasi izin pada terowongan dapat dilihat pada **Tabel 7**.

Tabel 7 Control values of Monitoring Items on vertical displacement and clearance convergence (shield tunnel)

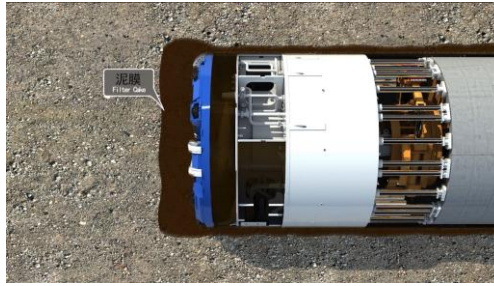
Monitoring Items and Soil Types		Cumulative value (mm)	Rate of Change (mm/d)
Shield segment settlement	Hard ~ Medium hard Soil	10~20	2
	Medium soft ~ Soft Soil	20~30	3
Segment differential settlement		0.04%Ls	—
Tunnel clearance convergence		0.2%D	3
Notes: Ls denotes the longitudinal spacing of monitoring points along the tunnel D denotes the diameter of the tunnel excavation contour			

7. METODE KONSTRUKSI TEROWONGAN

Shield tunneling method: No.1 tunnel merupakan terowongan dalam kota, dimana akan dikonstruksi dibawah jalan raya yang telah ada dan berlokasi di area yang padat akan bangunan. Standar pengendalian yang tinggi pada saat tahap konstruksi seperti getaran perlu diperhatikan. Metode shield tunneling telah diadopsi sebagai metode konstruksi yang optimal setelah analisis komprehensif dilakukan terhadap kondisi strata, jadwal konstruksi, rekayasa ekonomi dll.

Shield tunneling method merupakan merupakan metode *full-mechanized construction*. Metode ini menggunakan mesin dengan pelindung yang didorong ke depan sepanjang sumbu terowongan dan secara bersamaan tanah digali menggunakan pemotong yang ditempatkan di depan mesin pelindung. Konstruksi baja dari mesin pelindung akan menahan rongga atau lubang galian hingga bagian segmen terpasang. Sistem pengangkut khusus digunakan guna memindahkan material hasil galian pada bagian muka mesin menuju bagian luar dari terowongan. Mesin instalasi segmen digunakan untuk pemasangan segmen pre-cast pada pelindung. Gaya dorong diberikan menggunakan jack yang ditempatkan pada bagian ujung belakang mesin pelindung, berguna untuk menekan segmen yang telah terpasang. Metode konstruksi menggunakan *shield tunneling method* ditunjukkan pada **Gambar 6** di bawah ini.





Gambar 6 Metode konstruksi terowongan menggunakan TBM

8. STABILITAS MUKA TEROWONGAN (*TUNNEL FACE STABILITY*) DALAM TEROWONGAN MEKANIS

Tujuan dari analisis stabilitas muka terowongan adalah untuk menyelidiki tekanan air tanah dan tekanan tanah yang bekerja pada muka terowongan dan untuk menganalisis kapasitas dukung muka terowongan. Jika kapasitas *self-bearing* dari muka terowongan tidak cukup, dukungan muka (*face support*) terowongan harus disediakan. Dalam hal ini, *support medium* harus melawan tekanan tanah dan air tanah untuk menstabilkan permukaan terowongan.

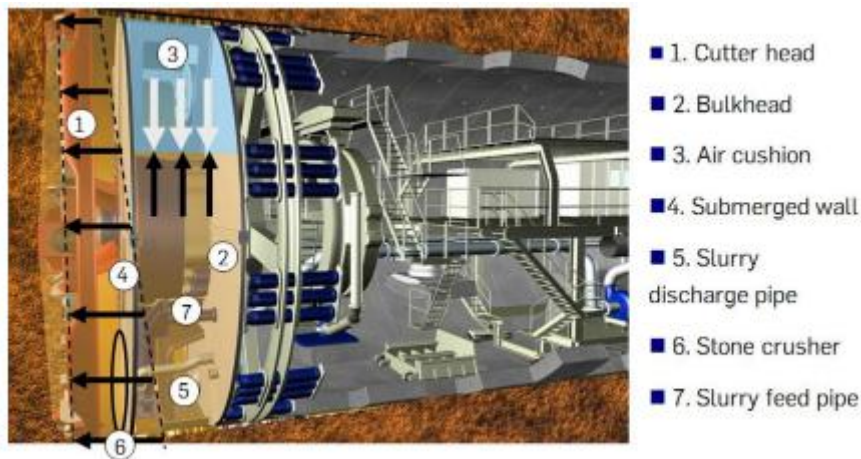
Jenis pendukung muka terowongan (*tunnel face support*) sangat penting khususnya untuk penerowongan mekanis di tanah lunak. Oleh karena itu, Rekomendasi DAUB untuk memilih dan mengevaluasi Mesin Bor Tuning [DAUB, 2010] mengklasifikasikan mesin pelindung tanah lunak berdasarkan jenis dukungan permukaan terowongan. Beberapa mesin pelindung tanah untuk terowongan, yaitu sebagai berikut:

- *Shield machines with no face support*
- *Shield machines with mechanical face support*
- *Shield machines with compressed air support*
- *Shield machines with slurry face support*
- *Shield machines with earth pressure face support*

Adapun jenis mesin pelindung yang digunakan pada pekerjaan tunnel 1 ini yaitu mesin pelindung menggunakan dukungan *slurry* (*Shield Machines with Slurry Face Support*).

Pada metode *Shield Machines with Slurry Face Support*, terdapat dua ruang (*chamber*) yang memiliki fungsi berbeda. Ruang galian/ *excavation chamber* (depan) dan ruang kerja/ *working chamber* (belakang) dari mesin pelindung menggunakan *slurry*. *Slurry* yang digunakan yaitu gabungan partikel air dan bentonit (bentonit sebagian besar terdiri dari mineral lempung montmorillonit) dan juga digunakan dalam teknologi dinding diafragma. *Excavation chamber* dan *working chamber* dipisahkan dengan dinding terendam (*submerged wall*). Aliran antara dua *chamber* dipastikan dengan lubang di bagian bawah dinding *submerged*.

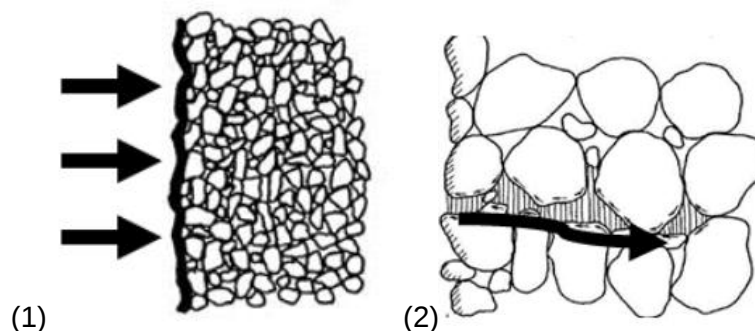
Excavation chamber sepenuhnya diisi dengan bentonit, sedangkan level bentonit di *work chamber* biasanya disesuaikan sedikit di atas sumbu mesin. Tekanan pendukung (*support pressure*) di *excavation chamber* dikontrol dengan mengatur tekanan reservoir udara terkompresi (juga disebut bantalan udara atau gelembung udara) di ruang tekanan/ *pressure chamber*. Tanah yang digali dicampur dengan bentonit dan dipompa melalui lubang hisap dan pipa pembuangan *slurry* ke tempat pemisahan di permukaan tanah. Bagian dari *slurry shielded machine* ditunjukkan pada **Gambar 7** di bawah ini.



Gambar 7 Slurry shield mechine

Interaksi antara bentonit dan lapisan tanah sangat penting untuk terowongan yang digerakkan dengan mesin penggali dengan dukungan *slurry*. Tekanan *slurry* akan melawan tekanan tanah dan air untuk menstabilkan permukaan terowongan. Sementara penyeimbang terhadap tekanan air pada dasarnya diamankan, tekanan lumpur berlebih (*excess slurry pressure*) harus ditransfer ke kerangka tanah untuk menetralkan tekanan tanah. Beberapa teori dapat ditemukan dalam literatur untuk menjelaskan transfer tekanan dukungan ke kerangka tanah (mis. Müller-Kirchenbauer, 1977; Broere & van Tol, 2000 atau Bezuijen et al., 2001). Saat ini teori dominan dalam praktik pembuatan terowongan *slurry* diambil dari teknologi dinding diafragma (Müller-Kirchenbauer, 1977) dan dirangkum dalam DIN 4126 (2004).

Transfer tekanan dapat dicapai dengan dua cara (**Gambar 8**), yaitu (1) dengan membran atau (2) zona penetrasi. Membran (1), juga disebut *cake filter*, menciptakan lapisan tipis kedap air langsung pada permukaan terowongan, dan memungkinkan transformasi tekanan lumpur berlebih (*excess slurry pressure*) menjadi tegangan pendukung yang efektif. Dalam kasus pembentukan zona penetrasi (2), tekanan lumpur berlebih ditransfer ke kerangka tanah sepanjang kedalaman penetrasi keseluruhan dengan tegangan geser antara bentonit dan butiran tanah.



Gambar 8 Tekanan *slurry* berlebih pada tanah melalui membrane (1) dan zona penetrasi (2)

Oleh karena itu, ada hubungan umum antara mekanisme transfer tekanan dan perilaku penetrasi suspensi bentonit ke lapisan tanah (Mueller-Kirchenbauer, 1977). Di satu sisi, hubungan antara ukuran partikel bentonit dalam suspensi dan ukuran pori-pori di tanah lunak sangat menentukan. Di sisi lain, kekuatan leleh suspensi bentonit adalah faktor penentu lebih lanjut.

9. KONDISI TANAH DI LOKASI PEMBANGUNAN TEROWONGAN

Lokasi pembangunan terowongan dengan menggunakan metode konstruksi *Shield Tunneling Method* berada di DK2+540 sampai DK4+425. Adapun potongan memanjang dari lokasi tersebut ditunjukkan pada **Gambar 9** dan untuk lebih jelasnya ada pada **Lampiran A**. Analisis yang dilakukan, yaitu lokasi pekerjaan terowongan yang berada di dalam kotak merah. Bagian tersebut kemudian dibagi menjadi per 100 m dan dianalisis dengan menggunakan bor log yang terdekat.



Gambar 9 Potongan memanjang dan stratifikasi tanah pemodelan.

Setelah penentuan lokasi yang akan ditinjau dari **Gambar 9**, selanjutnya menentukan data tanah yang akan digunakan dengan cara meninjau borlog terdekat. Rekapitulasi lokasi yang akan di analisis dan borlog terdekat ditunjukkan pada **Tabel 8** di bawah ini.

Tabel 8 Panjang Terowongan

No. Potongan	Lokasi	ID Borlog
1	DK 2+539.77	17-ZD-008
2	DK 2+609.97	17-ZD-012
3	DK 2+730.06	16-ZD-726
4	DK 2+823.23	16-ZD-727
5	DK 2+919.39	16-ZD-730
6	DK 3+049.27	16-ZD-733
7	DK 3+156.51	16-ZD-735
8	DK 3+218.66	16-ZD-737
9	DK 3+348.67	16-ZD-033
10	DK 3+417.56	16-ZD-742
11	DK 3+517.09	16-ZD-744
12	DK 3+624.35	16-ZD-034
13	DK 3+705.55	16-ZD-750
14	DK 3+821.34	16-ZD-753
15	DK 3+931.25	16-ZD-755
16	DK 4+041.14	16-ZD-758
17	DK 4+151.15	16-ZD-760
18	DK 4+248.81	16-ZD-477
19	DK 4+330.56	16-ZD-767
20	DK 4+446.31	16-ZD-770

10. STRATIFIKASI TANAH DAN PEMODELAN GEOMETRI KONDISI EKSISTING

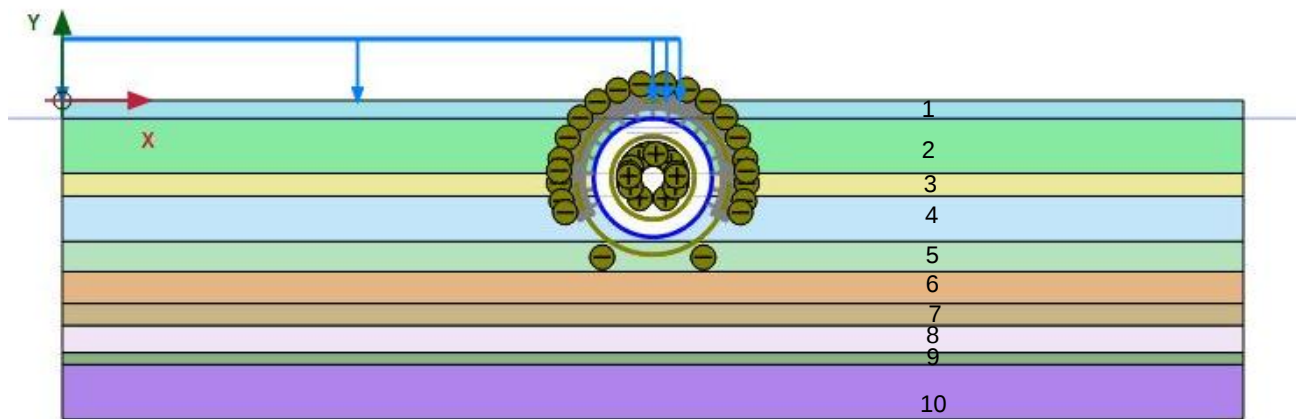
Berdasarkan nilai SPT yang didapatkan dari pengujian di lapangan, nilai SPT desain digunakan dalam menentukan parameter tanah asli di lapangan. Parameter tanah didapatkan berdasarkan hasil korelasi pendekatan.

Data tanah berupa perlapisan tanah eksisting didapatkan berdasarkan pengujian investigasi tanah di lapangan. Geometri perlapisan tanah dan parameter untuk 20 titik yang digunakan

dalam analisis model 2D dapat dilihat pada **Gambar 10** hingga **Gambar 29** dan pada **Tabel 9** hingga **Tabel 48**.

Pada bagian permukaan tanah, dimodelkan beban lalu lintas dengan asumsi 15 kPa dan beban gedung sebesar 20 kPa.

A. Terowongan TBM di DK2+539.77



Gambar 10 Stratifikasi dan parameter pemodelan tanah untuk analisis tunnel TBM di DK2+539.77

Tabel 9 Parameter Tanah untuk terowongan TBM di DK2+539.77

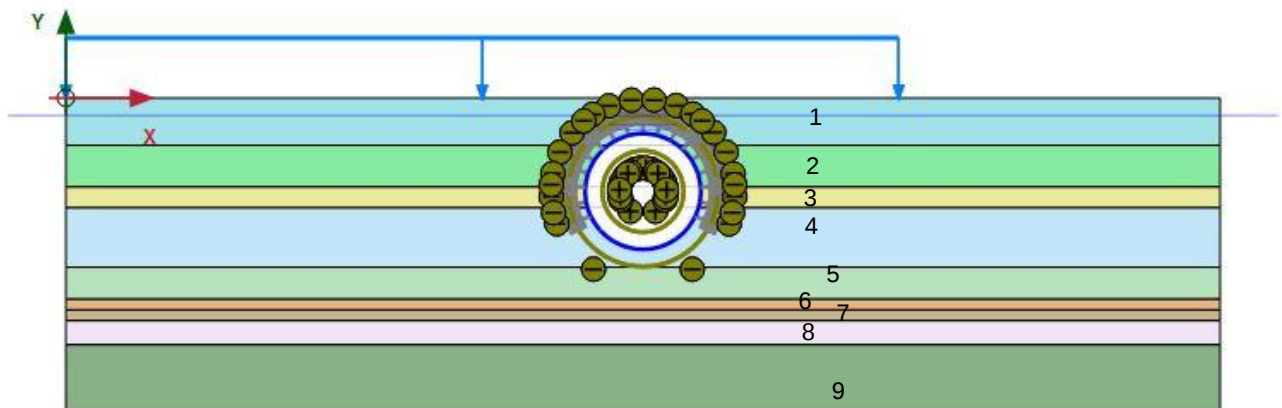
Lapis	Ketebalan	NSPT	Jenisc Tanah	γ_{unsat}	γ_{sat}	c'(kPa) (Hand Book of Geotechnical Investigation and Design)	ϕ'	k(m/day)
1	2	4	gravel	19	20	-	23	0.08640
2	4	18	Clay	16	17	20	29	0.00086
3	2,5	33	Sand	17	18	-	30	0.08640
4	5	36	Clay	17	18	30	30	0.00086
5	3,3	50	Clay	18	19	50	31	0.00086
6	3,5	50	Sand	18	19	-	31	0.08640
7	2,4	50	Clay	18	19	50	31	0.00086
8	3	50	Sand	18	19	-	31	0.08640
9	1,3	50	Clay	18	19	50	31	0.00086
10	6	23	Clay	17	18	23	30	0.00086

Tabel 10 Nilai Modulus Tanah untuk Model Hardening Soil Pada Analisis Tunnel TBM di DK2+539.77

Lapis	NSPT	Jenis Tanah	E50 (kN/m ²)	Eoed (kN/m ²)	Eur (kN/m ²)
1	4	gravel	30000	24000	90000
2	18	Clay	27000	21600	81000
3	33	Sand	40000	32000	120000
4	36	Clay	54000	43200	162000
5	50	Clay	75000	60000	225000
6	50	Sand	60000	48000	180000
7	50	Clay	75000	60000	225000
8	50	Sand	60000	48000	180000

9	50	Clay	75000	60000	225000
10	23	Clay	35000	28000	105000

B. Terowongan TBM di DK2+609.97



Gambar 11 Stratifikasi dan parameter pemodelan tanah untuk analisis tunnel TBM di DK2+609.97

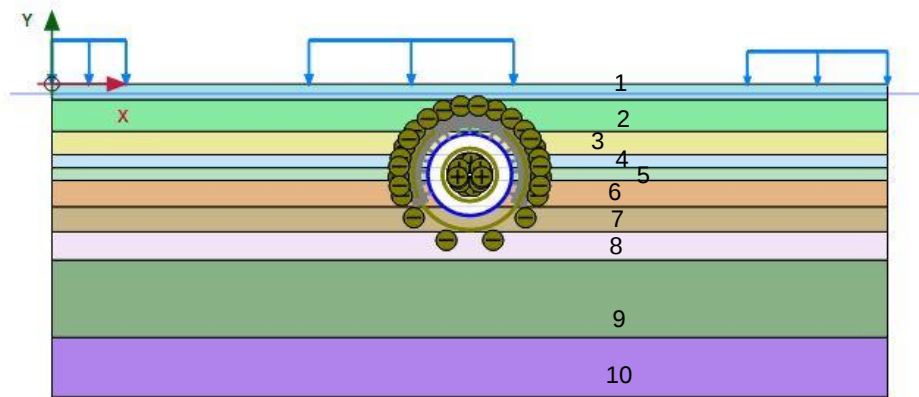
Tabel 11 Parameter Tanah untuk terowongan TBM di DK2+609.97

Lapis	Ketebalan	NSPT	Jenis Tanah	γ_{unsat}	γ_{sat}	c'(kPa) (Hand Book of Geotechnical Investigation and Design)	ϕ'	k(m/day)
1	5,3	5	Clay	16	17	6	24	0.00086
2	4,7	33	Clay	18	19	28	30	0.00086
3	2,3	39	Sand	19	20	-	30	0.08640
4	6,7	45	Clay	19	20	40	31	0.00086
5	3,6	50	Sand	19	20	-	31	0.08640
6	1,2	50	gravel	20	22	-	31	0.08640
7	1,2	50	Clay	19	20	50	31	0.00086
8	20,7	50	Sand	19	20	-	31	0.08640
9	7,3	22	Clay	17	18	20	30	0.00086

Tabel 12 Nilai Modulus Tanah untuk Model Hardening Soil Pada Analisis Tunnel TBM di DK2+609.97

Lapis	Ketebalan	NSPT	Jenis Tanah	E50 (kN/m2)	Eoed (kN/m2)	Eur (kN/m2)
1	5,3	5	Clay	15000	12000	45000
2	4,7	33	Clay	50000	40000	150000
3	2,3	39	Sand	45000	36000	135000
4	6,7	45	Clay	68000	54400	204000
5	3,6	50	Sand	60000	48000	180000
6	1,2	50	gravel	70000	56000	210000
7	1,2	50	Clay	75000	60000	225000
8	20,7	50	Sand	60000	48000	180000
9	7,3	22	Clay	33000	26400	99000

C. Terowongan TBM di DK2+730.06



Gambar 12 Stratifikasi dan parameter pemodelan tanah untuk analisis tunnel TBM di DK2+730.06

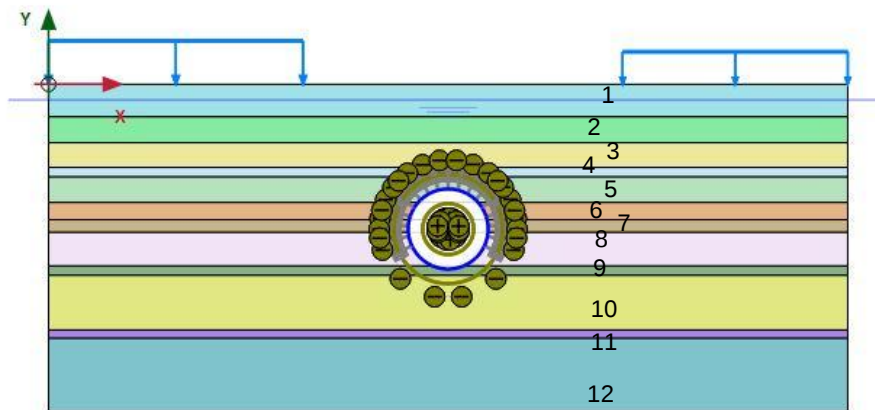
Tabel 13 Parameter Tanah untuk terowongan TBM di DK2+730.06

Lapis	Ketebalan	NSPT	Jenis Tanah	γ_{unsat}	γ_{sat}	c'(kPa) (Hand Book of Geotechnical Investigation and Design)	ϕ'	k(m/day)
1	2,5	50	Clay	19	20	50	31	0.00086
2	5,1	32	Clay	19	20	27	30	0.00086
3	3,7	42	Sand	19	20	-	31	0.08640
4	2,1	50	Clay	19	20	50	31	0.00086
5	2	33	Sand	17	18	-	30	0.08640
6	4,2	45	Clay	19	20	40	31	0.00086
7	4	50	gravel	21	22	-	31	0.08640
8	4,5	50	Sand	19	20	-	31	0.08640
9	12,4	47	Clay	19	20	42	31	0.00086
10	59.95	50	Clay	19	20	50	31	0.00086

Tabel 14 Nilai Modulus Tanah untuk Model Hardening Soil Pada Analisis Tunnel TBM di DK2+730.06

Lapis	Ketebalan	NSPT	Jenis Tanah	E50 (kN/m ²)	Eoed (kN/m ²)	Eur (kN/m ²)
1	2,5	50	Clay	75000	60000	225000
2	5,1	32	Clay	48000	38400	144000
3	3,7	42	Sand	35000	28000	105000
4	2,1	50	Clay	75000	60000	225000
5	2	33	Sand	40000	32000	120000
6	4,2	45	Clay	67000	53600	201000
7	4	50	gravel	70000	56000	210000
8	4,5	50	Sand	60000	48000	180000
9	12,4	47	Clay	73000	58400	219000
10	59.95	50	Clay	75000	60000	225000

D. Terowongan TBM di DK2+823.23



Gambar 13 Stratifikasi dan parameter pemodelan tanah untuk analisis tunnel TBM di DK2+823.23

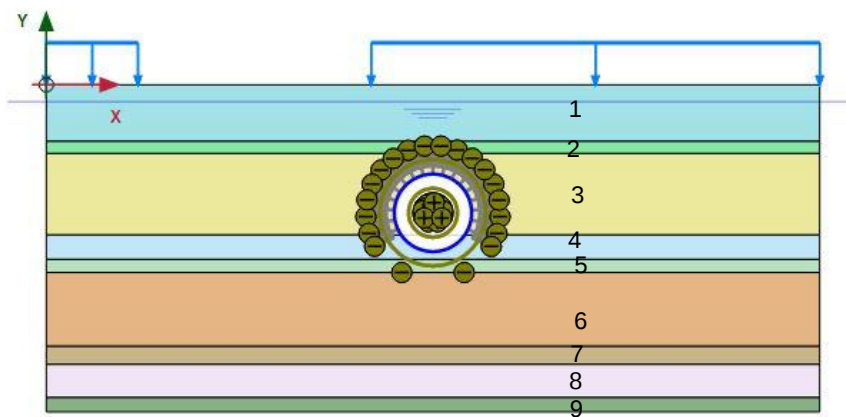
Tabel 15 Parameter Tanah untuk terowongan TBM di DK2+823.23

Lapis	Ketebalan	NSPT	Jenis Tanah	γ_{unsat}	γ_{sat}	c'(kPa) (Hand Book of Geotechnical Investigation and Design)	ϕ'	k(m/day)
1	5,3	11	Clay	17	18	10	28	0,000864
2	4,2	19	Clay	18	19	20	29	0,000864
3	4	44	Sand	19	20	-	31	0,0864
4	1,5	32	Clay	19	20	27	30	0,000864
5	4,2	50	Sand	19	20	-	30	0,0864
6	2,8	50	Clay	19	20	50	31	0,000864
7	2	50	sand	19	20	-	31	0,0864
8	5,5	50	Clay	19	20	50	31	0,000864
9	1,5	37	Sand	19	20	-	30	0,0864
10	8,9	30	Clay	19	20	25	30	0,000864
11	1,3	50	Sand	19	20	-	31	0,0864
12	11,95	40	Clay	19	20	35	30	0,000864

Tabel 16 Nilai Modulus Tanah untuk Model Hardening Soil Pada Analisis Tunnel TBM di DK2+823.23

Lapis	Ketebalan	NSPT	Jenis Tanah	E50 (kN/m ²)	Eoed (kN/m ²)	Eur (kN/m ²)
1	5,3	11	Clay	25000	20000	75000
2	4,2	19	Clay	50000	40000	150000
3	4	44	Sand	52000	41600	156000
4	1,5	32	Clay	48000	38400	144000
5	4,2	50	Sand	60000	48000	180000
6	2,8	50	Clay	75000	60000	225000
7	2	50	sand	60000	48000	180000
8	5,5	50	Clay	75000	60000	225000
9	1,5	37	Sand	44000	35200	132000
10	8,9	30	Clay	45000	36000	135000
11	1,3	50	Sand	60000	48000	180000
12	11,95	40	Clay	60000	48000	180000

E. Terowongan TBM di DK2+919.39



Gambar 14 Stratifikasi dan parameter pemodelan tanah untuk analisis tunnel TBM di DK2+919.39

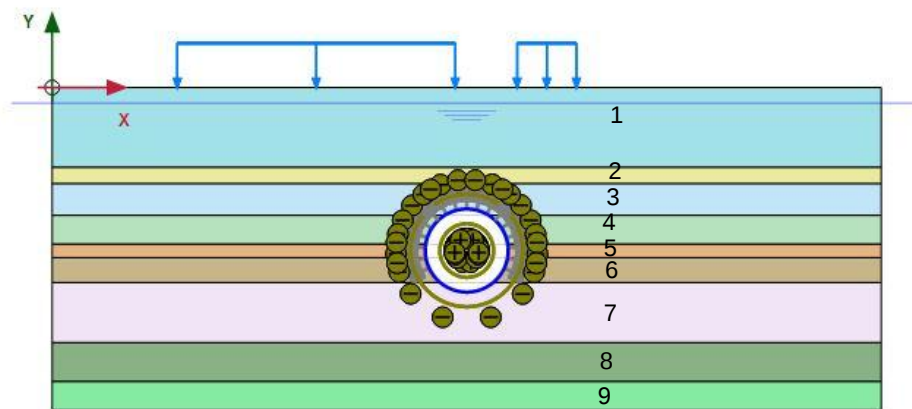
Tabel 17 Parameter Tanah untuk terowongan TBM di DK2+919.39

Lapis	Ketebalan	NSPT	Jenis Tanah	γ_{unsat}	γ_{sat}	c' (kPa) (Hand Book of Geotechnical Investigation and Design)	ϕ'	k (m/day)
1	9,5	12	Clay	17	18	11	28	0,000864
2	2	26	Clay	19	20	23	30	0,000864
3	13,7	50	Sand	19	20	-	31	0,0864
4	4,1	50	Clay	19	20	50	31	0,000864
5	2,2	50	Sand	19	20	-	31	0,0864
6	12,4	39	Clay	19	20	35	30	0,000864
7	3	50	sand	19	20	-	31	0,0864
8	5,6	50	Clay	19	20	50	31	0,000864
9	2,4	50	Sand	19	20	-	31	0,0864

Tabel 18 Nilai Modulus Tanah untuk Model Hardening Soil Pada Analisis Tunnel TBM di DK2+919.39

Lapis	Ketebalan	NSPT	Jenis Tanah	E50 (kN/m ²)	Eoed (kN/m ²)	Eur (kN/m ²)
1	9,5	12	Clay	25000	20000	75000
2	2	26	Clay	40000	32000	120000
3	13,7	50	Sand	60000	48000	180000
4	4,1	50	Clay	75000	60000	225000
5	2,2	50	Sand	60000	48000	180000
6	12,4	39	Clay	58000	46400	174000
7	3	50	sand	60000	48000	180000
8	5,6	50	Clay	75000	60000	225000
9	2,4	50	Sand	60000	48000	180000

F. Terowongan TBM di DK3+049.27



Gambar 15 Stratifikasi dan parameter pemodelan tanah untuk analisis tunnel TBM di DK3+049.27

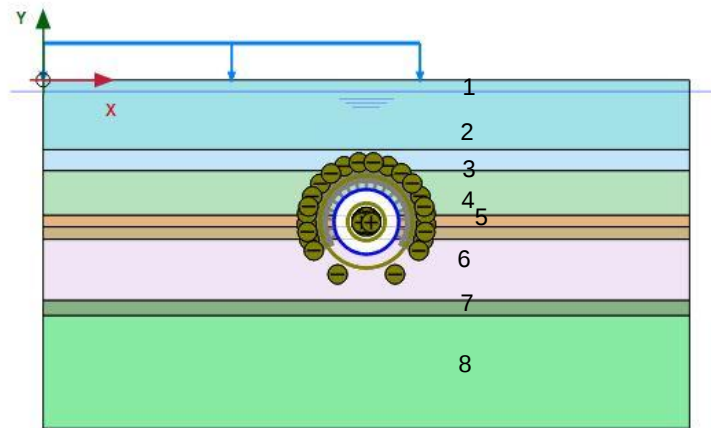
Tabel 19 Parameter Tanah untuk terowongan TBM di DK3+049.27

Lapis	Ketebalan	NSPT	Jenis Tanah	γ_{unsat}	γ_{sat}	$c'(\text{kPa})$ (Hand Book of Geotechnical Investigation and Design)	ϕ'	$k(\text{m/day})$
1	12,5	6	Clay	18	19	6	24	0,000864
2	2,5	50	Sand	19	20		31	0,0864
3	5	50	Clay	19	20	50	31	0,000864
4	4,5	50	Sand	19	20		31	0,0864
5	2,1	50	Clay	19	20	50	31	0,000864
6	3,9	50	sand	19	20		31	0,0864
7	9,4	31	Clay	19	20	26	30	0,000864
8	6,1	50	Sand	19	20		31	0,0864
9	4,45	25	Clay	19	20	22	30	0,000864

Tabel 20 Nilai Modulus Tanah untuk Model Hardening Soil Pada Analisis Tunnel TBM di DK3+049.27

Lapis	Ketebalan	NSPT	Jenis Tanah	E50 (kN/m ²)	Eoed (kN/m ²)	Eur (kN/m ²)
1	12,5	6	Clay	17000	13600	51000
2	2,5	50	Sand	60000	48000	180000
3	5	50	Clay	75000	60000	225000
4	4,5	50	Sand	60000	48000	180000
5	2,1	50	Clay	75000	60000	225000
6	3,9	50	sand	60000	48000	180000
7	9,4	31	Clay	46500	37200	139500
8	6,1	50	Sand	60000	48000	180000
9	4,45	25	Clay	38000	30400	114000

G. Terowongan TBM di DK3+156.51



Gambar 16 Stratifikasi dan parameter pemodelan tanah untuk analisis **tunnel TBM di DK3+156.51**

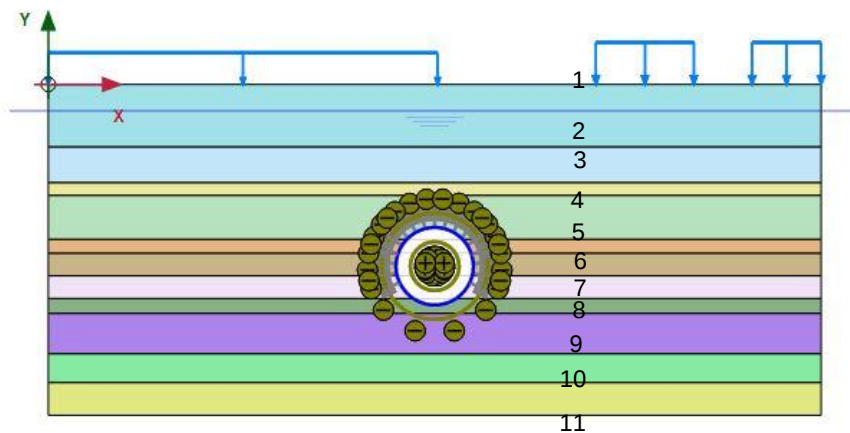
Tabel 21 Parameter Tanah untuk terowongan TBM di DK3+156.51

Lapis	Ketebalan	NSPT	Jenis Tanah	γ_{unsat}	γ_{sat}	$c'(\text{kPa})$ (Hand Book of Geotechnical Investigation and Design)	ϕ'	$k(\text{m/day})$
1	14	13	Clay	17	18	12	29	0,000864
2	4,2	50	Clay	19	20	50	31	0,000864
3	9	37	Sand	18	19	-	30	0,0864
4	2,3	50	Clay	19	20	50	31	0,000864
5	2,5	50	Sand	19	20	-	31	0,0864
6	12,3	24	Clay	18	19	22	30	0,000864
7	3	50	Sand	19	20	-	31	0,0864
8	2,7	32	Sand	17	18	-	30	0,0864

Tabel 22 Nilai Modulus Tanah untuk Model Hardening Soil Pada Analisis Tunnel TBM di DK3+156.51

Lapis	Ketebalan	NSPT	Jenis Tanah	E50 (kN/m^2)	Eoed (kN/m^2)	Eur (kN/m^2)
1	14	13	Clay	25000	20000	75000
2	4,2	50	Clay	75000	60000	225000
3	9	37	Sand	45000	36000	135000
4	2,3	50	Clay	75000	60000	225000
5	2,5	50	Sand	60000	48000	180000
6	12,3	24	Clay	36000	28800	108000
7	3	50	Sand	60000	48000	180000
8	2,7	32	Sand	38000	30400	114000

H. Terowongan TBM di DK3+218.66



Gambar 17 Stratifikasi dan parameter pemodelan tanah untuk analisis tunnel TBM di DK3+218.66

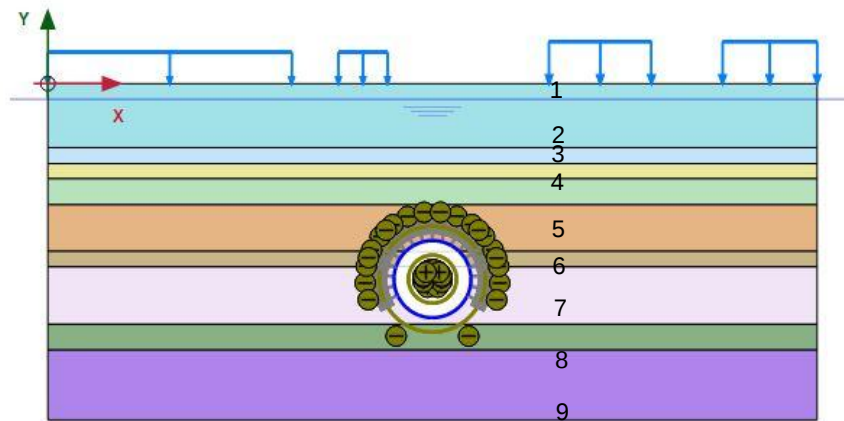
Tabel 23 Parameter Tanah untuk terowongan TBM di DK3+218.66

Lapis	Ketebalan	NSPT	Jenis Tanah	γ_{unsat}	γ_{sat}	$c'(\text{kPa})$ (Hand Book of Geotechnical Investigation and Design)	ϕ'	$k(\text{m/day})$
1	10,5	5	Clay	16	17	5	24	0,000864
2	6	18	Clay	17	18	17	29	0,000864
3	2,1	50	Clay	19	20	50	31	0,000864
4	7,4	50	Sand	19	20	-	31	0,0864
5	2,3	50	Clay	19	20	50	31	0,000864
6	3,8	50	Sand	19	20	-	31	0,0864
7	3,8	27	Clay	19	20	25	31	0,000864
8	2,5	37	Sand	17	18	-	30	0,0864
9	6,8	32	Clay	19	20	27	30	0,000864
10	4,8	50	Sand	19	20	-	31	0,0864
11	5,5	23	Clay	18	19	22	30	0,000864

Tabel 24 Nilai Modulus Tanah untuk Model Hardening Soil Pada Analisis Tunnel TBM di DK3+218.66

Lapis	Ketebalan	NSPT	Jenis Tanah	E50 (kN/m ²)	Eoed (kN/m ²)	Eur (kN/m ²)
1	10,5	5	Clay	15000	12000	45000
2	6	18	Clay	50000	40000	150000
3	2,1	50	Clay	75000	60000	225000
4	7,4	50	Sand	60000	48000	180000
5	2,3	50	Clay	75000	60000	225000
6	3,8	50	Sand	60000	48000	180000
7	3,8	27	Clay	40000	32000	120000
8	2,5	37	Sand	45000	36000	135000
9	6,8	32	Clay	48000	38400	144000
10	4,8	50	Sand	60000	48000	180000
11	5,5	23	Clay	34000	27200	102000

I. Terowongan TBM di DK3+348.67



Gambar 18 Stratifikasi dan parameter pemodelan tanah untuk analisis tunnel TBM di DK3+348.67

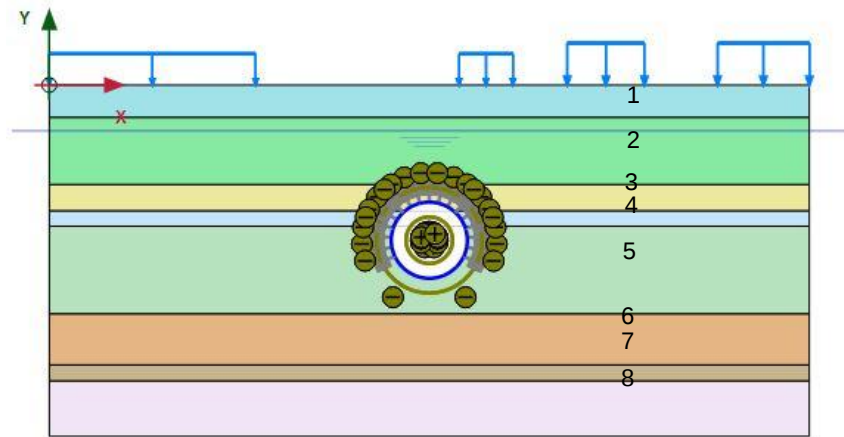
Tabel 25 Parameter Tanah untuk terowongan TBM di DK3+348.67

Lapis	Ketebalan	NSPT	Jenis Tanah	γ_{unsat}	γ_{sat}	c' (kPa) (Hand Book of Geotechnical Investigation and Design)	ϕ'	k (m/day)
1	10,8	5	Clay	16	17	5	24	0,000864
2	2,7	18	Clay	17	18	17	29	0,000864
3	2,5	50	Clay	19	20	50	31	0,000864
4	4,4	50	Sand	19	20	-	31	0,0864
5	7,9	50	Clay	19	20	50	31	0,000864
6	2,6	46	Sand	19	20	-	31	0,0864
7	9,7	27	Clay	19	20	25	30	0,000864
8	4,3	37	Sand	18	19	-	30	0,0864
9	11,85	32	Clay	19	20	27	30	0,000864

Tabel 26 Nilai Modulus Tanah untuk Model Hardening Soil Pada Analisis Tunnel TBM di DK3+348.67

Lapis	Ketebalan	NSPT	Jenis Tanah	E50 (kN/m ²)	Eoed (kN/m ²)	Eur (kN/m ²)
1	10,8	5	Clay	15000	12000	45000
2	2,7	18	Clay	50000	40000	150000
3	2,5	50	Clay	75000	60000	225000
4	4,4	50	Sand	60000	48000	180000
5	7,9	50	Clay	75000	60000	225000
6	2,6	46	Sand	55000	44000	165000
7	9,7	27	Clay	40000	32000	120000
8	4,3	37	Sand	45000	36000	135000
9	11,85	32	Clay	48000	38400	144000

J. Terowongan TBM di DK3+438



Gambar 19 Stratifikasi dan parameter pemodelan tanah untuk analisis tunnel TBM di DK3+438

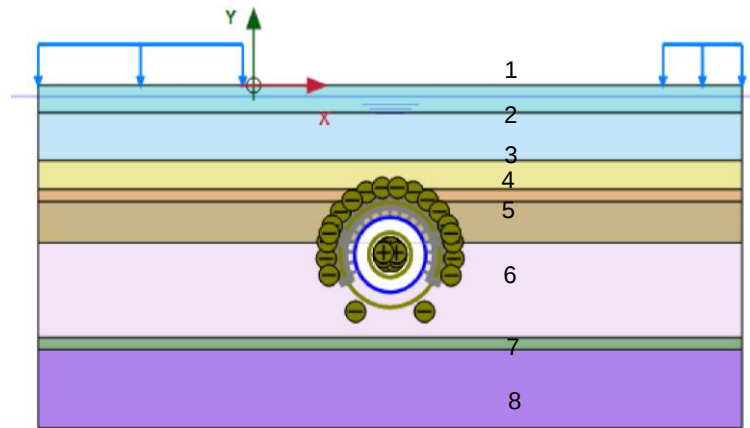
Tabel 27 Parameter Nilai Modulus Elastisitas untuk terowongan TBM di DK3+438

Lapis	Ketebalan	NSPT	Jenis Tanah	γ_{unsat}	γ_{sat}	$c'(\text{kPa})$	ϕ'	$k(\text{m/day})$
1	5.5	3	Clay	16	17	10	28	0.000864
2	11.5	18	Clay	17	18	10	29	0.000864
3	4.5	50	Clay	20	21	50	31	0.000864
4	2.6	50	Sand	21	22	-	31	0.0864
5	15	42	Clay	19	20	50	31	0.000864
6	8.7	28	Clay	18	19	30	30	0.000864
7	2.7	50	Sand	21	22	-	31	0.0864
8	6.8	28	Clay	18	19	30	30	0.000864

Tabel 28 Parameter Nilai Modulus Elastisitas untuk terowongan TBM di DK3+438

Lapis	Ketebalan	NSPT	Jenis Tanah	E' (kN/m ²)	E_{50} (kN/m ²)	E_{oed} (kN/m ²)	E_{ur} (kN/m ²)
1	5.5	3	Clay	15000	9000	7200	27000
2	11.5	18	Clay	50000	12000	9600	36000
3	4.5	50	Clay	75000	75000	60000	225000
4	2.6	50	Sand	60000	38300	30640	114900
5	15	42	Clay	75000	63000	50400	189000
6	8.7	28	Clay	60000	42000	33600	126000
7	2.7	50	Sand	60000	38300	30640	114900
8	6.8	28	Clay	42000	42000	33600	126000

K. Terowongan TBM di DK3+517.09



Gambar 20 Stratifikasi dan parameter pemodelan tanah untuk analisis tunnel TBM di DK3+517.09

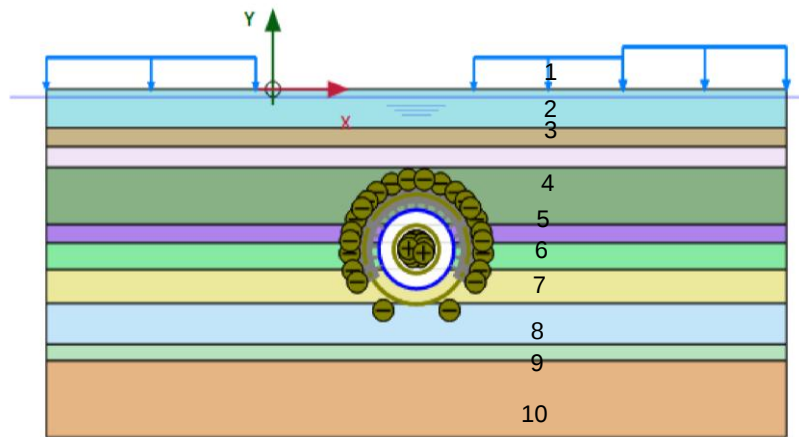
Tabel 29 Parameter Tanah untuk terowongan TBM di DK3+517.09

Lapis	Ketebalan	NSPT	Jenis Tanah	γ_{unsat}	γ_{sat}	$c'(\text{kPa})$ (Hand Book of Geotechnical Investigation and Design)	ϕ'	$k(\text{m/day})$
1	4.7	9	Clay	17	18	7	27	0,000864
2	8.4	40	Clay	19	20	38	30	0,000864
3	5	50	Clay	19	20	50	31	0,000864
4	2.1	29	Clay	19	20	26	30	0,0864
5	7.2	50	Sand	19	20	-	31	0,000864
6	16.5	50	Clay	19	20	50	31	0,0864
7	2.1	50	Sand	19	20	-	31	0,000864
8	13.7	50	Clay	19	20	50	31	0,0864

Tabel 30 Nilai Modulus Tanah untuk Model Hardening Soil Pada Analisis Tunnel TBM di DK3+517.09

Lapis	Ketebalan	NSPT	Jenis Tanah	E50 (kN/m^2)	Eoed (kN/m^2)	Eur (kN/m^2)
1	4.7	9	Clay	17000	13600	51000
2	8.4	40	Clay	60000	48000	180000
3	5	50	Clay	75000	60000	225000
4	2.1	29	Clay	44000	35200	132000
5	7.2	50	Sand	60000	48000	180000
6	16.5	50	Clay	75000	60000	225000
7	2.1	50	Sand	60000	48000	180000
8	13.7	50	Clay	75000	60000	225000

L. Terowongan TBM di DK3+624.35



Gambar 21 Stratifikasi dan parameter pemodelan tanah untuk analisis tunnel TBM di DK3+624.35

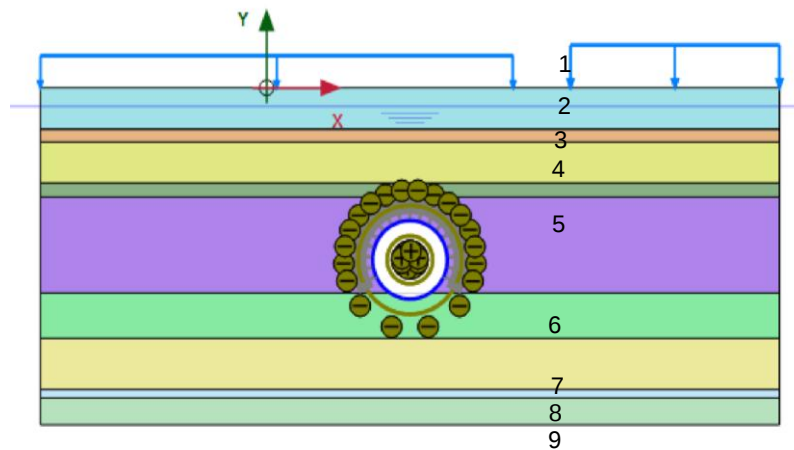
Tabel 31 Parameter Tanah untuk terowongan TBM di DK3+624.35

Lapis	Ketebalan	NSPT	Jenis Tanah	γ_{unsat}	γ_{sat}	$c'(\text{kPa})$ (Hand Book of Geotechnical Investigation and Design)	ϕ'	$k(\text{m/day})$
1	6,4	17	Clay	18	19	15	29	0,000864
2	3,1	50	Sand	19	20	-	31	0,0864
3	3,4	37	Clay	19	20	31	30	0,000864
4	9,5	39	Sand	18	19	-	30	0,0864
5	3	30	Clay	19	20	27	30	0,000864
6	4,4	46	Clay	19	20	40	31	0,000864
7	5,6	25	Clay	19	20	23	30	0,000864
8	6,8	35	Clay	19	20	29	30	0,000864
9	2,7	50	Clay	19	20	50	31	0,000864
10	12.7	38	Clay	19	20	32	30	0,000864

Tabel 32 Nilai Modulus Tanah untuk Model Hardening Soil Pada Analisis Tunnel TBM di DK3+624.35

Lapis	Ketebalan	NSPT	Jenis Tanah	E_{50} (kN/m^2)	E_{oed} (kN/m^2)	E_{ur} (kN/m^2)
1	6,4	17	Clay	50000	40000	150000
2	3,1	50	Sand	60000	48000	180000
3	3,4	37	Clay	55000	44000	165000
4	9,5	39	Sand	47000	37600	141000
5	3	30	Clay	45000	36000	135000
6	4,4	46	Clay	69000	55200	207000
7	5,6	25	Clay	37000	29600	111000
8	6,8	35	Clay	52000	41600	156000
9	2,7	50	Clay	75000	60000	225000
10	12.7	38	Clay	57000	45600	171000

M. Terowongan TBM di DK3+705.55



Gambar 22 Stratifikasi dan parameter pemodelan tanah untuk analisis tunnel TBM di DK3+705.55

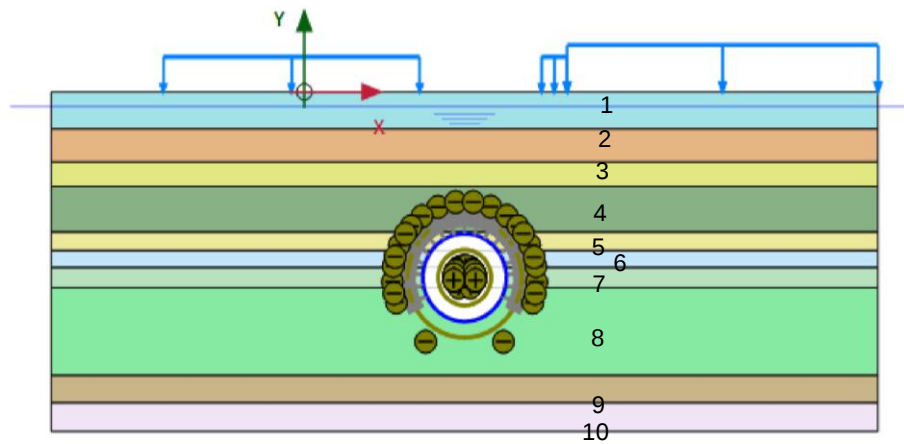
Tabel 33 Parameter Tanah untuk terowongan TBM di DK3+705.55

Lapis	Ketebalan	NSPT	Jenis Tanah	γ_{unsat}	γ_{sat}	$c'(\text{kPa})$ (Hand Book of Geotechnical Investigation and Design)	ϕ'	$k(\text{m/day})$
1	6,9	7	Clay	17	18	6	25	0,000864
2	2,1	25	Clay	18	19	23	30	0,000864
3	6,8	50	Clay	19	20	50	31	0,000864
4	2,3	39	Sand	18	19	-	30	0,0864
5	15,9	43	Clay	19	20	38	31	0,000864
6	7,5	40	Clay	19	20	37	30	0,000864
7	8,5	50	Sand	19	20	-	31	0,0864
8	1,4	50	Clay	19	20	50	31	0,000864
9	4,45	50	Sand	19	20	-	31	0,0864

Tabel 34 Nilai Modulus Tanah untuk Model Hardening Soil Pada Analisis Tunnel TBM di DK3+705.55

Lapis	Ketebalan	NSPT	Jenis Tanah	E50 (kN/m^2)	Eoed (kN/m^2)	Eur (kN/m^2)
1	6,9	7	Clay	30000	24000	90000
2	2,1	25	Clay	50000	40000	150000
3	6,8	50	Clay	75000	60000	225000
4	2,3	39	Sand	47000	37600	141000
5	15,9	43	Clay	65000	52000	195000
6	7,5	40	Clay	60000	48000	180000
7	8,5	50	Sand	60000	48000	180000
8	1,4	50	Clay	75000	60000	225000
9	4,45	50	Sand	75000	60000	225000

N. Terowongan TBM di DK3+821.34



Gambar 23 Stratifikasi dan parameter pemodelan tanah untuk analisis tunnel TBM di DK3+821.34

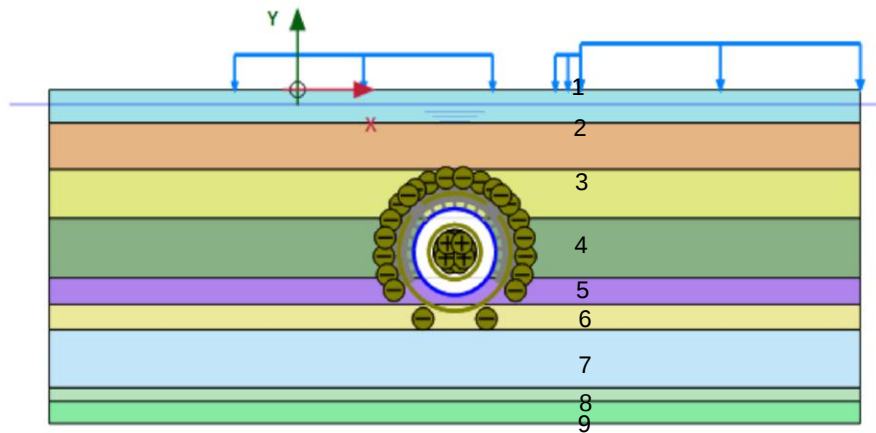
Tabel 35 Parameter Tanah untuk terowongan TBM di DK3+821.34

Lapis	Ketebalan	NSPT	Jenis Tanah	γ_{unsat}	γ_{sat}	$c'(kPa)$ (Hand Book of Geotechnical Investigation and Design)	ϕ'	k(m/day)
1	5,5	7	Clay	17	18	6	25	0.000864
2	4,9	30	Clay	19	20	27	30	0.000864
3	3,6	50	Clay	19	20	50	31	0.000864
4	6,8	39	Sand	18	19	-	30	0.0864
5	1,2	50	Clay	19	20	50	31	0.000864
6	1,5	50	Sand	19	20	-	31	0.0864
7	2,5	42	Clay	19	20	38	31	0.000864
8	3	50	Sand	19	20	-	31	0.0864
9	13	50	Clay	19	20	50	31	0.000864
10	4	50	Sand	19	20	-	31	0.0864
11	4,3	50	Clay	19	20	50	31	0.000864

Tabel 36 Nilai Modulus Tanah untuk Model Hardening Soil Pada Analisis Tunnel TBM di DK3+821.34

Lapis	Ketebalan	NSPT	Jenis Tanah	E50 (kN/m ²)	Eoed (kN/m ²)	Eur (kN/m ²)
1	5,5	7	Clay	25000	20000	75000
2	4,9	30	Clay	50000	40000	150000
3	3,6	50	Clay	75000	60000	225000
4	6,8	39	Sand	47000	37600	141000
5	1,2	50	Clay	75000	60000	225000
6	1,5	50	Sand	60000	48000	180000
7	2,5	42	Clay	63000	50400	189000
8	3	50	Sand	60000	48000	180000
9	13	50	Clay	75000	60000	225000
10	4	50	Sand	60000	48000	180000
11	4,3	50	Clay	75000	60000	225000

O. Terowongan TBM di DK3+931.25



Gambar 24 Stratifikasi dan parameter pemodelan tanah untuk analisis tunnel TBM di DK3+931.25

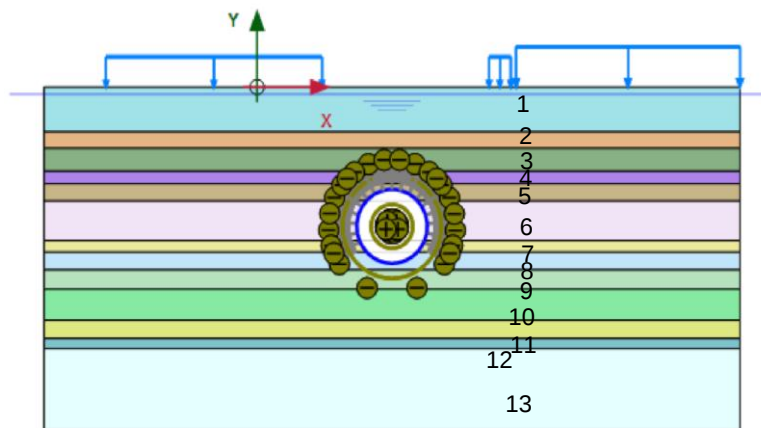
Tabel 37 Parameter Tanah untuk terowongan TBM di DK3+931.25

Lapis	Ketebalan	NSPT	Jenis Tanah	γ_{unsat}	γ_{sat}	c'(kPa) (Hand Book of Geotechnical Investigation and Design)	ϕ'	k(m/day)
1	5	3	Clay	15	16	5	22	0.000864
2	7	30	Clay	19	20	27	30	0.000864
3	7,4	41	Clay	19	20	37	31	0.000864
4	9	39	Sand	18	19	-	30	0.0864
5	4	50	Clay	19	20	50	31	0.000864
6	3,8	50	Sand	19	20	-	31	0.0864
7	8.8	28	Clay	19	20	24	30	0.000864
8	2	38	Sand	18	19	-	30	0.0864
9	3.4	50	Clay	19	20	50	31	0.000864

Tabel 38 Nilai Modulus Tanah untuk Model Hardening Soil Pada Analisis Tunnel TBM di DK3+931.25

Lapis	Ketebalan	NSPT	Jenis Tanah	E50 (kN/m ²)	Eoed (kN/m ²)	Eur (kN/m ²)
1	5	3	Clay	15000	12000	45000
2	7	30	Clay	50000	40000	150000
3	7,4	41	Clay	62000	49600	186000
4	9	39	Sand	47000	37600	141000
5	4	50	Clay	75000	60000	225000
6	3,8	50	Sand	60000	48000	180000
7	8.8	28	Clay	42000	33600	126000
8	2	38	Sand	46000	36800	138000
9	3.4	50	Clay	75000	60000	225000

P. Terowongan TBM di DK4+041.14



Gambar 25 Stratifikasi dan parameter pemodelan tanah untuk analisis tunnel TBM di DK4+041.14

Tabel 39 Parameter Tanah untuk terowongan TBM di DK4+041.14

Lapis	Ketebalan	NSPT	Jenis Tanah	γ_{unsat}	γ_{sat}	$c'(\text{kPa})$	ϕ'	$k(\text{m/day})$
1	7,9	13	Clay	17	18	12	29	0.000864
2	2,8	33	Clay	19	20	28	30	0.000864
3	4,1	50	Sand	19	20	-	31	0.0864
4	2,2	50	Clay	19	20	50	31	0.000864
5	3	50	Clay	19	20	50	31	0.000864
6	7	41	Clay	19	20	37	31	0.000864
7	2	50	Sand	19	20	-	31	0.0864
8	3,1	50	Clay	19	20	50	31	0.000864
9	3.4	50	Sand	19	20	-	31	0.0864
10	5.5	28	Clay	19	20	24	30	0.000864
11	3.2	50	Sand	19	20	-	31	0.0864
12	1.8	43	Sand	18	19	-	31	0.0864
13	14.4	27	Clay	19	20	24	30	0.000864

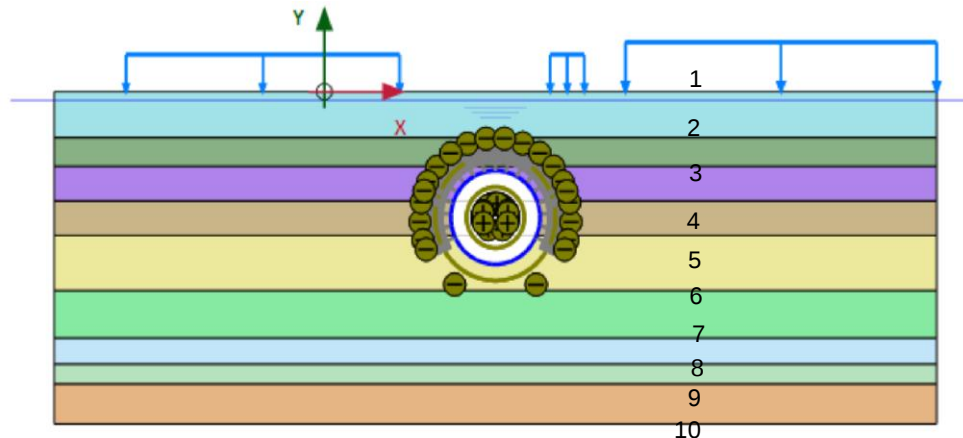
Tabel 40 Nilai Modulus Tanah untuk Model Hardening Soil Pada Analisis Tunnel TBM di DK4+041.14

Lapis	Ketebalan	NSPT	Jenis Tanah	E50 (kN/m ²)	Eoed (kN/m ²)	Eur (kN/m ²)
1	7,9	13	Clay	35000	28000	105000
2	2,8	33	Clay	50000	40000	150000
3	4,1	50	Sand	60000	48000	180000
4	2,2	50	Clay	75000	60000	225000
5	3	50	Clay	75000	60000	225000
6	7	41	Clay	61000	48800	183000
7	2	50	Sand	60000	48000	180000
8	3,1	50	Clay	75000	60000	225000
9	3.4	50	Sand	60000	48000	180000
10	5.5	28	Clay	42000	33600	126000
11	3.2	50	Sand	60000	48000	180000

Tabel 35 Nilai Modulus Tanah untuk Model Hardening Soil Pada Analisis Tunnel TBM di DK4+041.14 (lanjutan)

Lapis	Ketebalan	NSPT	Jenis Tanah	E50 (kN/m ²)	Eoed (kN/m ²)	Eur (kN/m ²)
12	1.8	43	Sand	32938	26350	98814
13	14.4	27	Clay	40500	32400	121500

Q. Terowongan TBM di DK4+151.15



Gambar 26 Stratifikasi dan parameter pemodelan tanah untuk analisis tunnel TBM di DK4+151.15

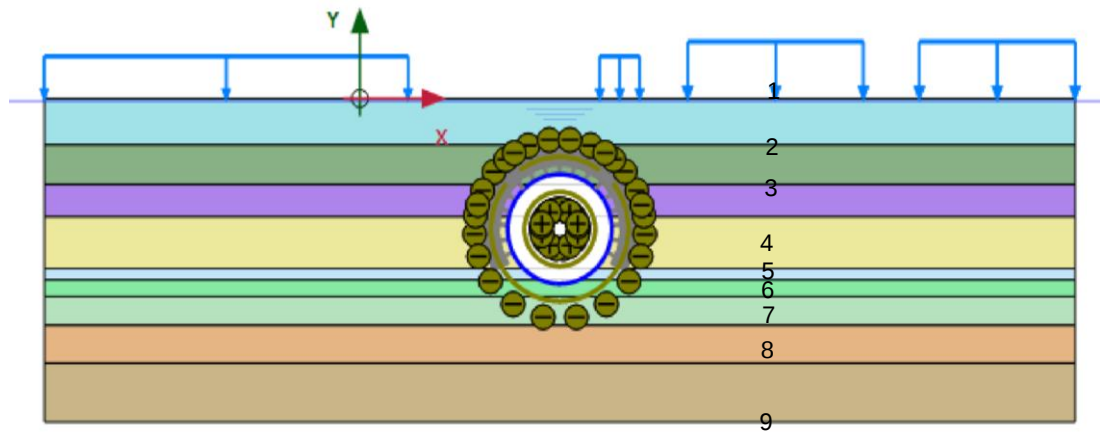
Tabel 41 Parameter Tanah untuk terowongan TBM di DK4+151.15

Lapis	Ketebalan	NSPT	Jenis Tanah	γ_{unsat}	γ_{sat}	$c'(\text{kPa})$	ϕ'	$k(\text{m/day})$
1	6,4	14	Clay	17	18	13	29	0.000864
2	4	50	Sand	19	20	-	31	0.0864
3	4,8	50	Clay	19	20	50	31	0.000864
4	4,8	26	Clay	19	20	23	30	0.000864
5	7,7	50	Sand	19	20	-	31	0.0864
6	6,6	30	Sand	17	18	-	30	0.0864
7	3,6	50	Clay	19	20	50	31	0.000864
8	2,7	33	Sand	18	19	-	30	0.0864
9	5.6	50	Sand	19	20	-	31	0.0864

Tabel 42 Nilai Modulus Tanah untuk Model Hardening Soil Pada Analisis Tunnel TBM di DK4+151.15

Lapis	Ketebalan	NSPT	Jenis Tanah	E50 (kN/m ²)	Eoed (kN/m ²)	Eur (kN/m ²)
1	6,4	14	Clay	38000	30400	114000
2	4	50	Sand	60000	48000	180000
3	4,8	50	Clay	75000	60000	225000
4	4,8	26	Clay	39000	31200	117000
5	7,7	50	Sand	60000	48000	180000
6	6,6	30	Sand	36000	28800	108000
7	3,6	50	Clay	75000	60000	225000
8	2,7	33	Sand	40000	32000	120000
9	5.6	50	Sand	60000	48000	180000

R. Terowongan TBM di DK4+248.51



Gambar 27 Stratifikasi dan parameter pemodelan tanah untuk analisis tunnel TBM di DK4+248.51

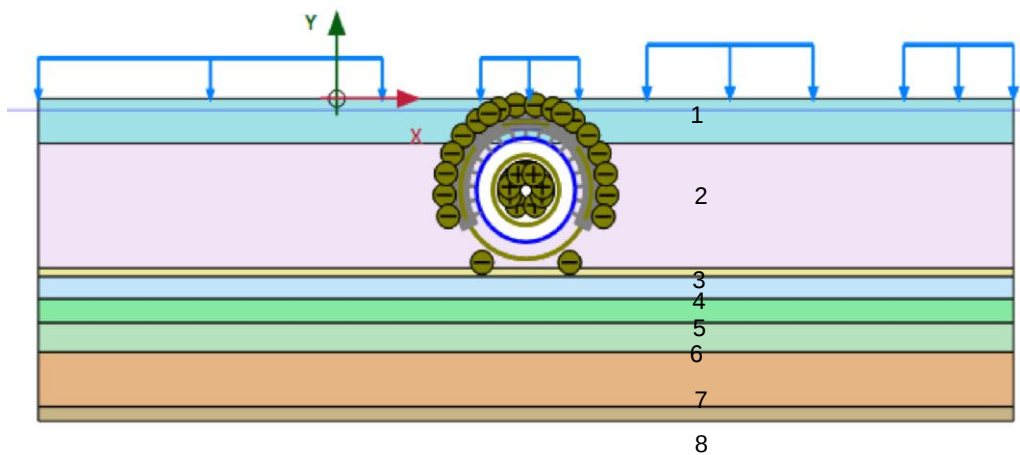
Tabel 43 Parameter Tanah untuk terowongan TBM di DK4+248.51

Lapis	Ketebalan	NSPT	Jenis Tanah	γ_{unsat}	γ_{sat}	$c'(\text{kPa})$	ϕ'	$k(\text{m/day})$
1	5,5	9	Clay	17	18	8	27	0.000864
2	4,7	16	Sand	16	17	-	29	0.0864
3	3,8	50	Clay	19	20	50	31	0.000864
4	6,2	33	Sand	17	18	-	30	0.0864
5	1,3	50	Clay	19	20	50	31	0.000864
6	2	50	Sand	19	20	-	31	0.0864
7	3.4	29	Clay	19	20	25	30	0.000864
8	4,5	50	Clay	19	20	50	31	0.000864
9	7	26	Clay	19	20	23	30	0.000864

Tabel 44 Nilai Modulus Tanah untuk Model Hardening Soil Pada Analisis Tunnel TBM di DK4+248.51

Lapis	Ketebalan	NSPT	Jenis Tanah	E_{50} (kN/m^2)	E_{oed} (kN/m^2)	E_{ur} (kN/m^2)
1	5,5	9	Clay	27000	21600	81000
2	4,7	16	Sand	35000	28000	105000
3	3,8	50	Clay	75000	60000	225000
4	6,2	33	Sand	50000	40000	150000
5	1,3	50	Clay	75000	60000	225000
6	2	50	Sand	60000	48000	180000
7	3.4	29	Clay	45000	36000	135000
8	4,5	50	Clay	75000	60000	225000
9	7	26	Clay	39000	31200	117000

S. Terowongan TBM di DK4+330.56



Gambar 28 Stratifikasi dan parameter pemodelan tanah untuk analisis tunnel TBM di DK4+330.56

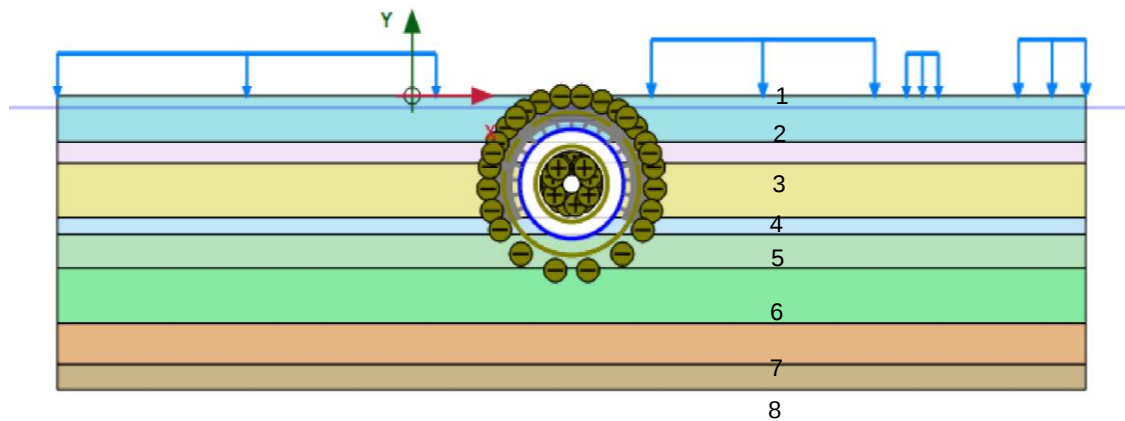
Tabel 45 Parameter Tanah untuk terowongan TBM di DK4+330.56

Lapis	Ketebalan	NSPT	Jenis Tanah	γ_{unsat}	γ_{sat}	$c'(\text{kPa})$	ϕ'	$k(\text{m/day})$
1	5,6	5	Clay	16	17	5	24	0.000864
2	15,7	50	Clay	19	20	50	31	0.000864
3	1	50	Sand	19	20	-	31	0.0864
4	2,8	50	Clay	19	20	50	31	0.000864
5	3	50	Sand	19	20	-	31	0.0864
6	3,7	50	Clay	19	20	50	31	0.000864
7	6.9	33	Clay	19	20	28	30	0.000864
8	1,8	50	Clay	19	20	50	31	0.000864

Tabel 46 Nilai Modulus Tanah untuk Model Hardening Soil Pada Analisis Tunnel TBM di DK4+330.56

Lapis	Ketebalan	NSPT	Jenis Tanah	E50 (kN/m ²)	Eoed (kN/m ²)	Eur (kN/m ²)
1	5,6	3	Clay	15000	12000	45000
2	15,7	30	Clay	77000	61600	231000
3	1	41	Clay	60000	48000	180000
4	2,8	39	Sand	75000	60000	225000
5	3	50	Clay	60000	48000	180000
6	3,7	50	Sand	75000	60000	225000
7	6.9	28	Clay	50000	40000	150000
8	1,8	38	Sand	75000	60000	225000

T. Terowongan TBM di DK4+446.31



Gambar 29 Stratifikasi dan parameter pemodelan tanah untuk analisis tunnel TBM di DK4+446.31

Tabel 47 Parameter Tanah untuk terowongan TBM di DK4+446.31

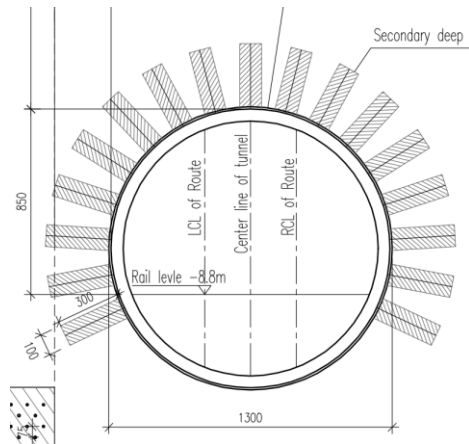
Lapis	Ketebalan	NSPT	Jenis Tanah	γ_{unsat}	γ_{sat}	$c'(\text{kPa})$	ϕ'	$k(\text{m/day})$
1	5,5	5	Clay	16	17	5	24	0.000864
2	2,5	21	Clay	18	19	19	30	0.000864
3	6,5	50	Sand	19	20	-	31	0.0864
4	2	34	Clay	19	20	29	30	0.000864
5	4	50	Clay	19	20	50	31	0.0864
6	6,6	50	Sand	19	20	-	31	0.000864
7	4.9	50	Clay	19	20	50	31	0.000864
8	3	37	Clay	19	20	31	30	0.000864

Tabel 48 Nilai Modulus Tanah untuk Model Hardening Soil Pada Analisis Tunnel TBM di DK4+446.31

Lapis	Ketebalan	NSPT	Jenis Tanah	E_{50} (kN/m^2)	E_{oed} (kN/m^2)	E_{ur} (kN/m^2)
1	5,5	5	Clay	15000	12000	45000
2	2,5	21	Clay	50000	40000	150000
3	6,5	50	Sand	60000	48000	180000
4	2	34	Clay	51000	40800	153000
5	4	50	Clay	75000	60000	225000
6	6,6	50	Sand	60000	48000	180000
7	4.9	50	Clay	75000	60000	225000
8	3	37	Clay	55000	44000	165000

11. PEMODELAN TUNNEL TBM

Model terowongan yang dilakukan disesuaikan dengan desain seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 25**. Terowongan memiliki bentuk lingkaran dengan diameter 12.8 m. Terowongan diperkuat dengan *forepoling* dengan panjang 3 m serta ketebalan *lining* dimodelkan dengan tebal 0.55 m.



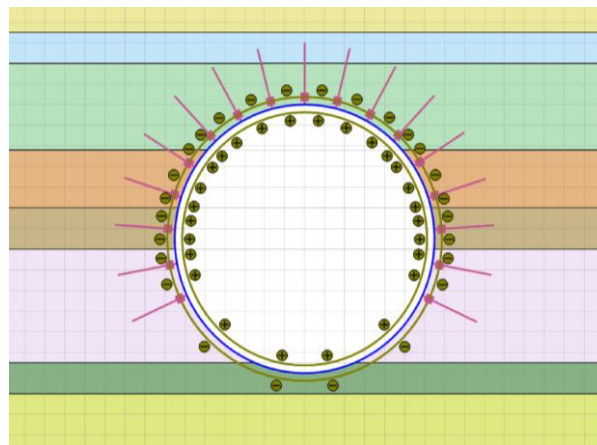
Gambar 30 Struktur tunnel dan dimensinya.

Tabel 49 Parameter Lining (plate)

ID	Value	Unit
Material	C50 Reinforced concrete	-
Tebal Lining	0.55	m
Unit weight (γ)	26	kN/m ³
Elasticity modulus (E)	3.4554×10^7	kPa

Tabel 50 Parameter forepoling (embedded beam)

ID	Value	Unit
Diameter	0.12	m
Panjang	3	m
E	25.74E6	kN/m ²
γ	24	kN/m ³

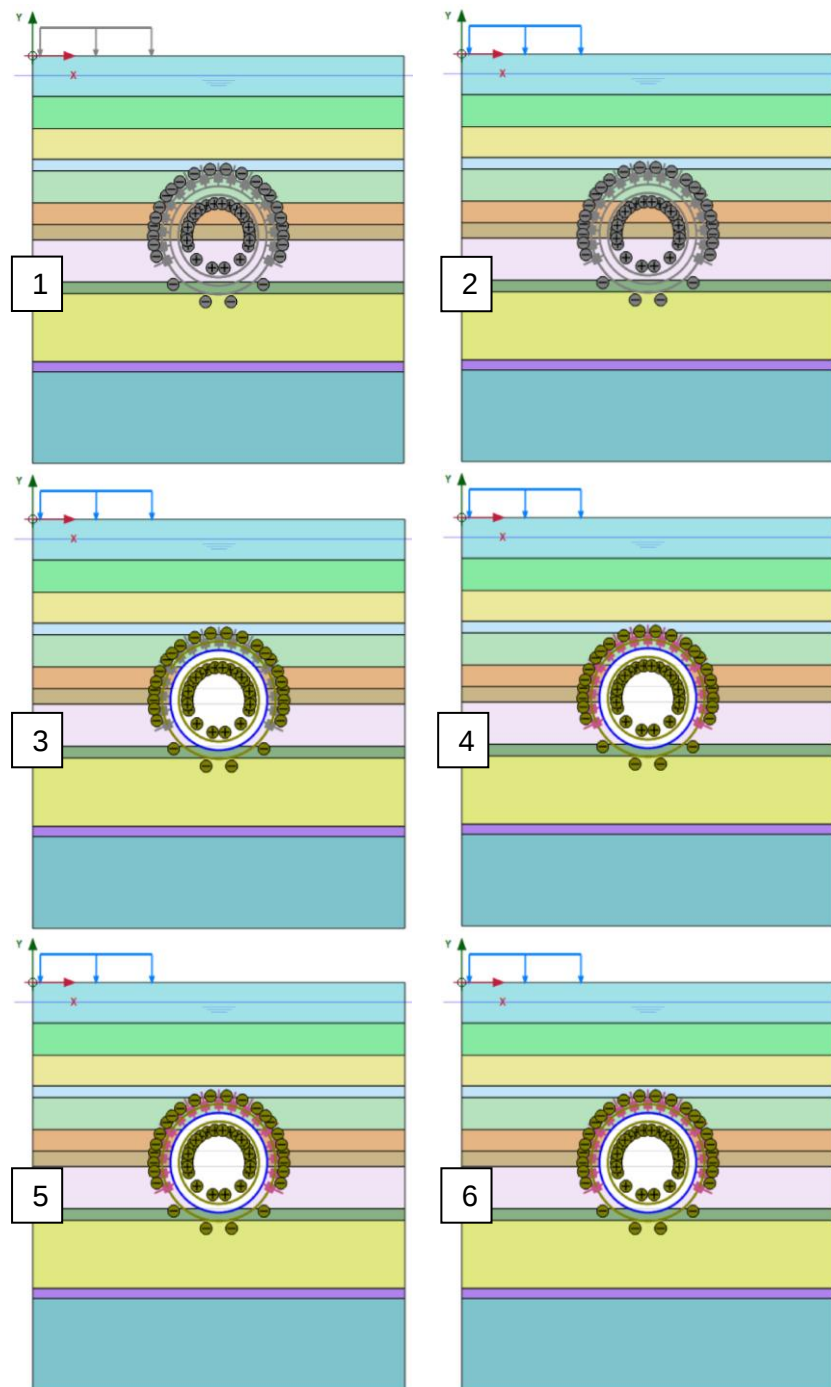


Gambar 31 Pemodelan tunnel TBM di DK2+823.23 (potongan 4)

12. ANALISIS PEMODELAN TUNNEL TBM

Analisis galian terowongan yang dilakukan pada program numerik 2D terdiri dari 3 tahap konstruksi. Tahap pemodelan terowongan diawali dengan pemberian beban di permukaan **Gambar 32(2)**, selanjutnya melakukan galian awal terhadap seluruh penampang terowongan dan lining diaktifkan seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 32(3)**.

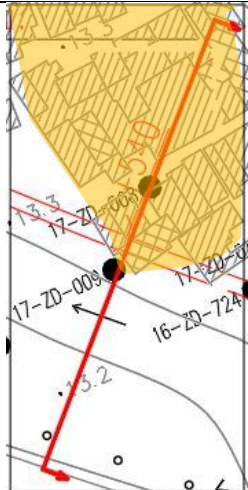
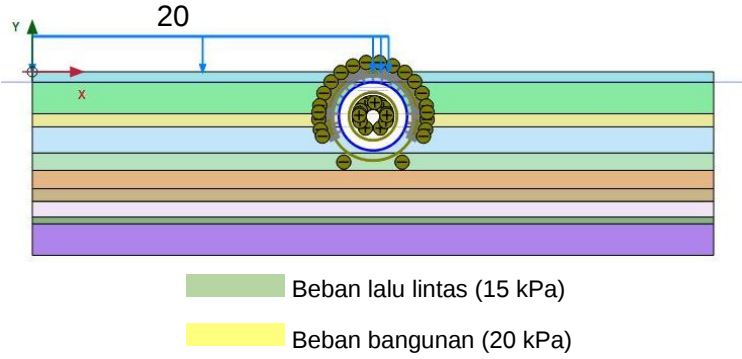
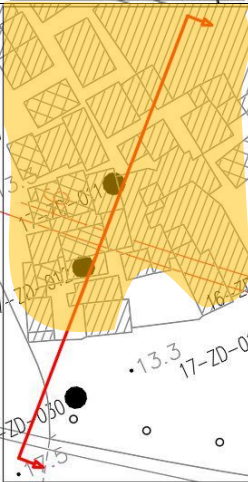
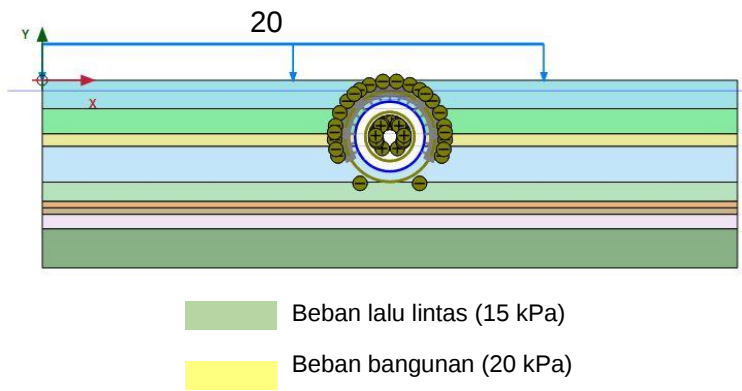
Tahap selanjutnya adalah pengaktifan forepoling pada bagian muka terowongan seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 32(4)**. Pada **Gambar 32(5)** dan **Gambar 32(6)** merupakan analisis pada kondisi *minimum excess pore pressure* dan kondisi dengan beban gempa.

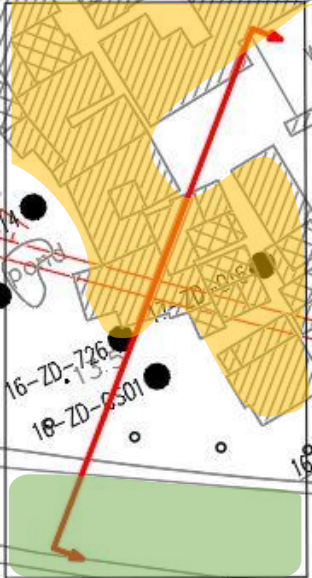
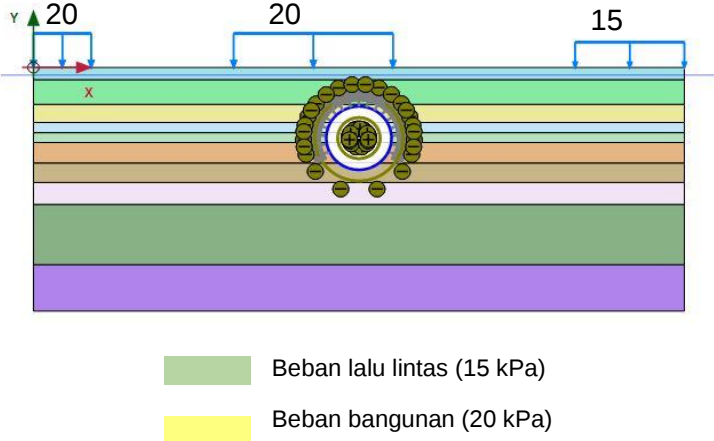
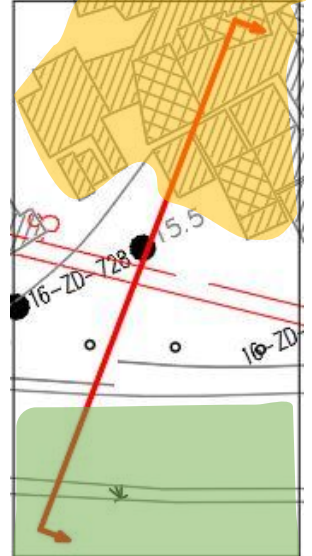
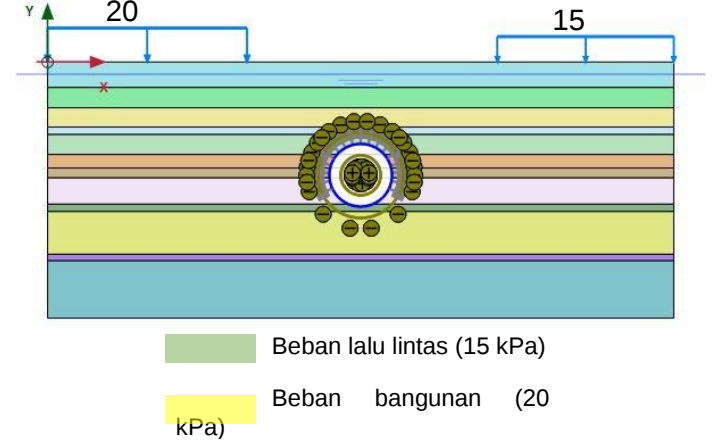


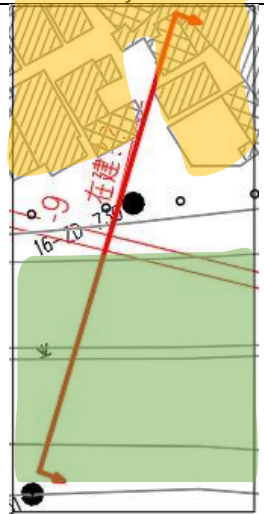
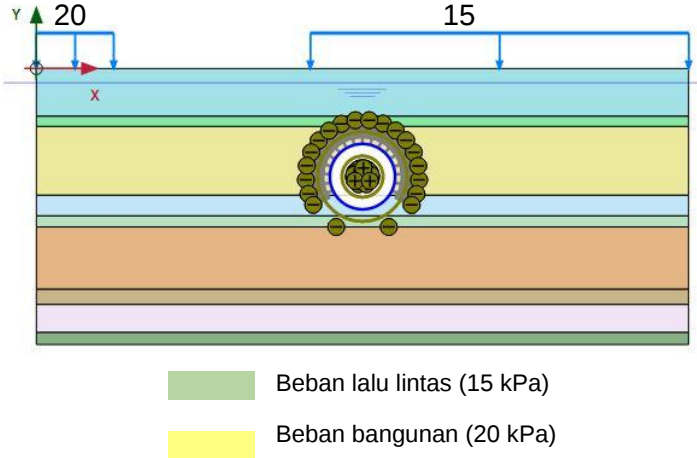
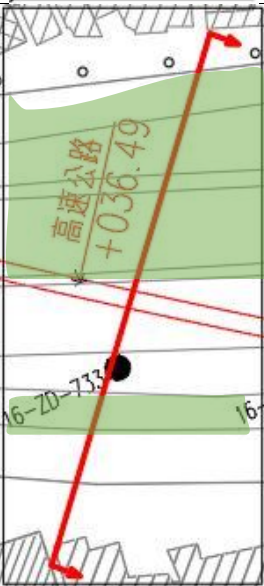
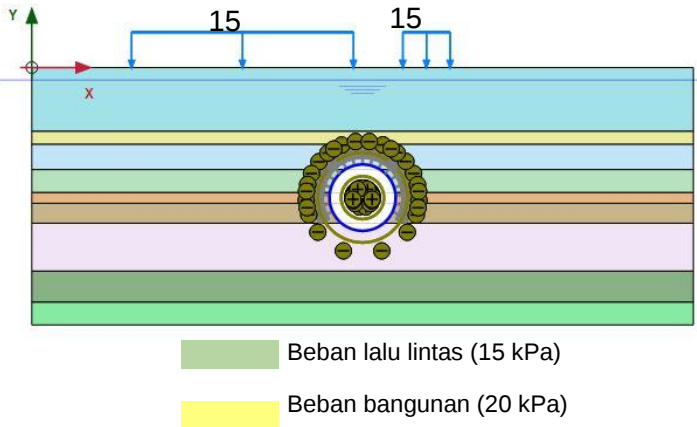
Gambar 32 Tahapan konstruksi tunnel TBM di DK2+823.23 (potongan 4)

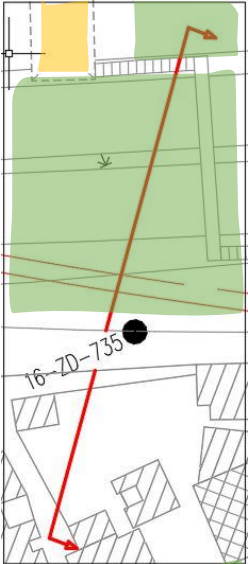
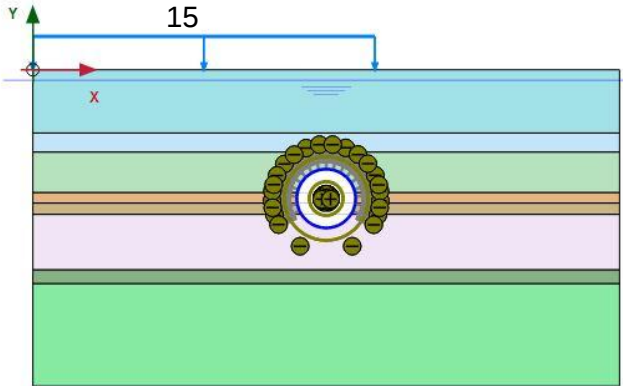
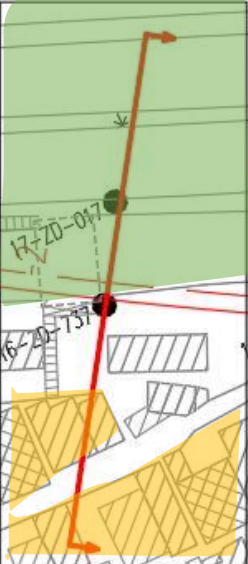
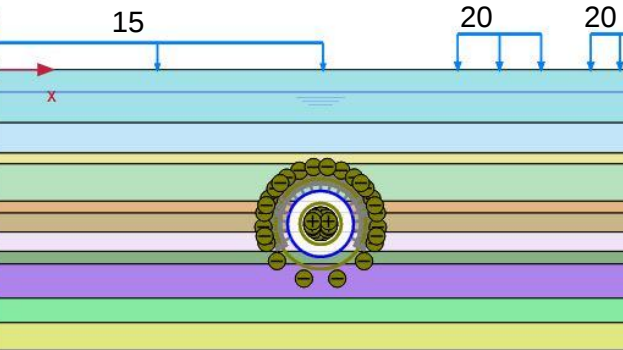
Analisis deformasi pada pemodelan terowongan dilakukan dengan mempertimbangkan beban eksisting yang bekerja pada permukaan tanah. Beban-beban yang bekerja diakibatkan oleh beberapa hal seperti beban lalu lintas maupun beban struktur berupa gedung atau sejenisnya. Dalam pemodelan, beban lalu lintas diasumsikan memiliki nilai sebesar 15 kPa, sedangkan beban yang bekerja akibat struktur gedung dan sejenisnya diasumsikan sebesar 20 kPa. Layout serta potongan melintang yang dilakukan dalam pemodelan dapat dilihat pada **Tabel 46** dan untuk gambar layout dapat dilihat pada **Lampiran B**.

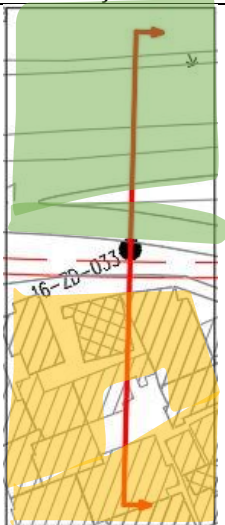
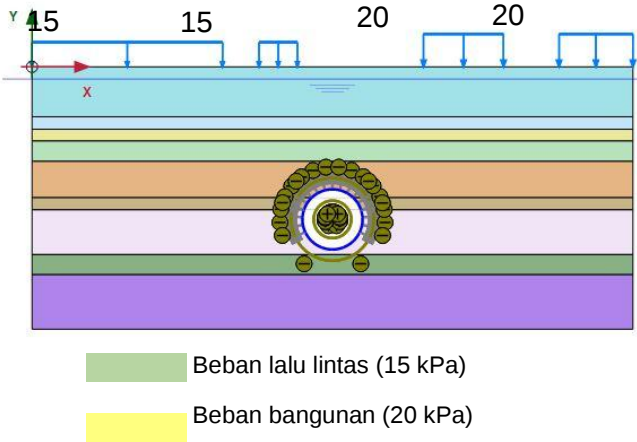
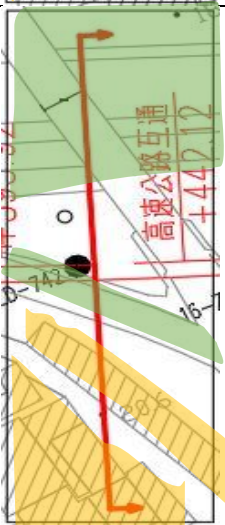
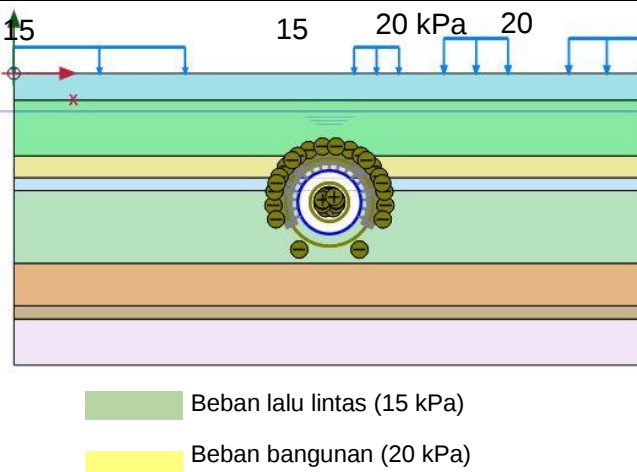
Tabel 51 Model Analisis Terowongan 2D dengan Mempertimbangkan Beban yang Bekerja di Permukaan

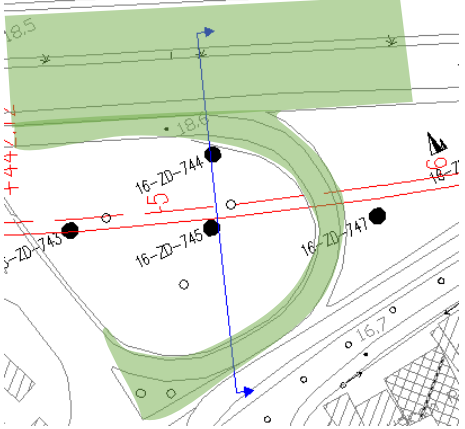
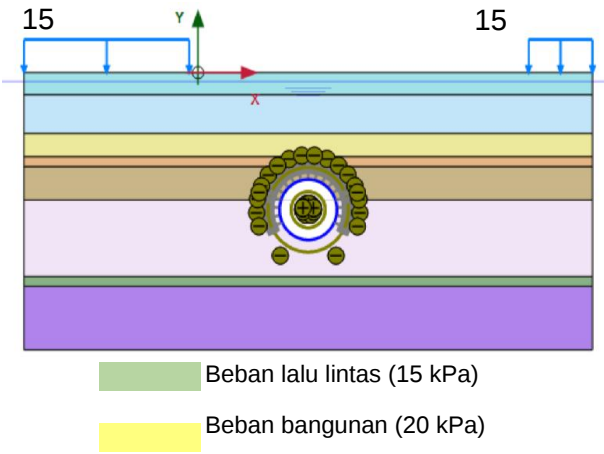
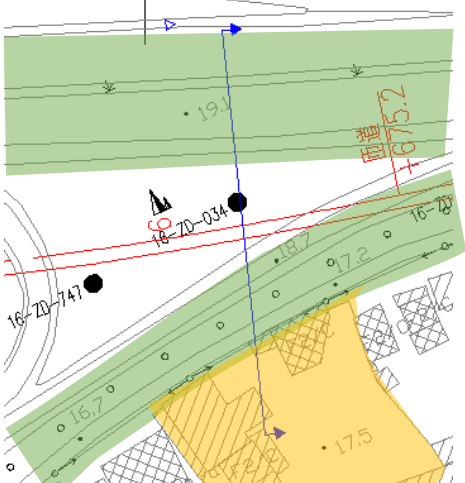
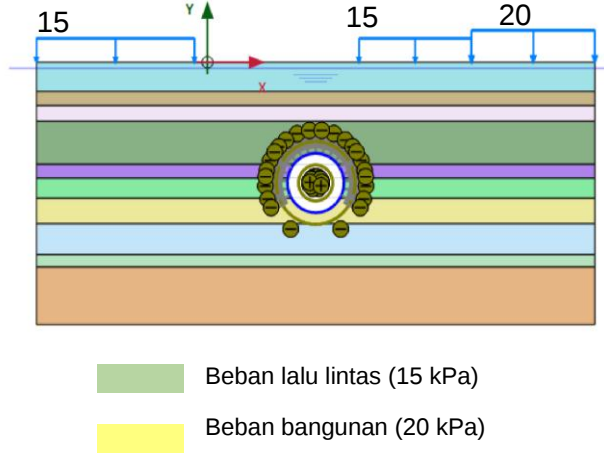
No. Potongan	Layout	Potongan Melintang	Keterangan
Potongan 1 (DK 2+539.77)		 Beban lalu lintas (15 kPa) Beban bangunan (20 kPa)	Beban yang dimodelkan akibat beban struktur bangunan terhitung dari bagian ujung kiri hingga tepat di atas terowongan
Potongan 2 (DK 2+609.97)		 Beban lalu lintas (15 kPa) Beban bangunan (20 kPa)	Beban yang dimodelkan akibat beban struktur bangunan terhitung dari bagian ujung kiri hingga tepat di atas terowongan

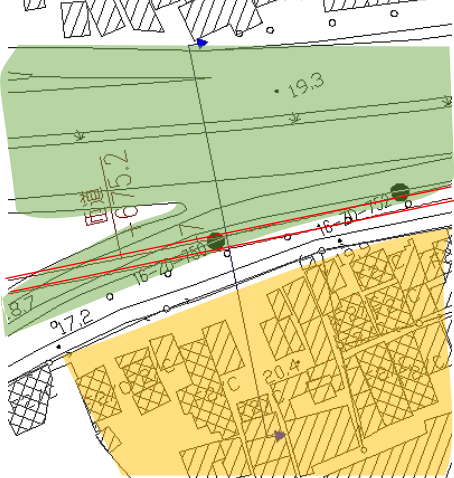
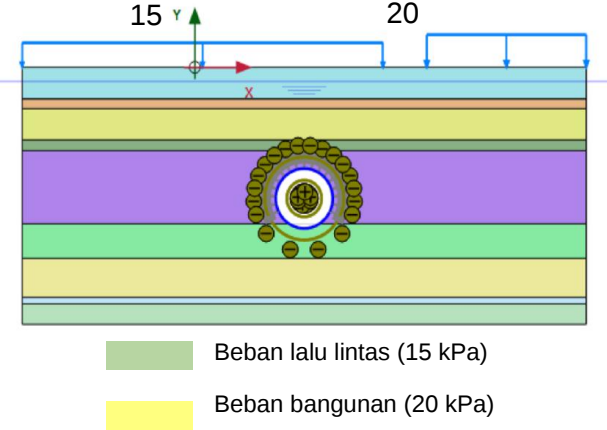
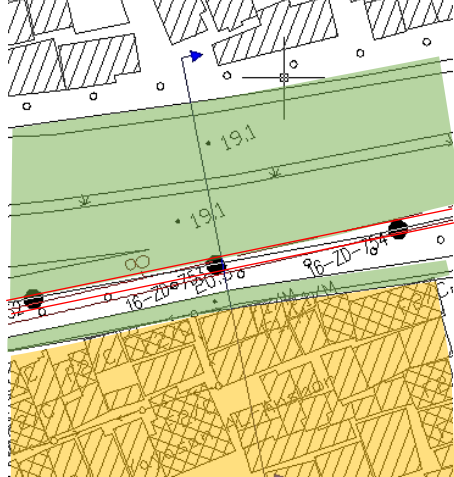
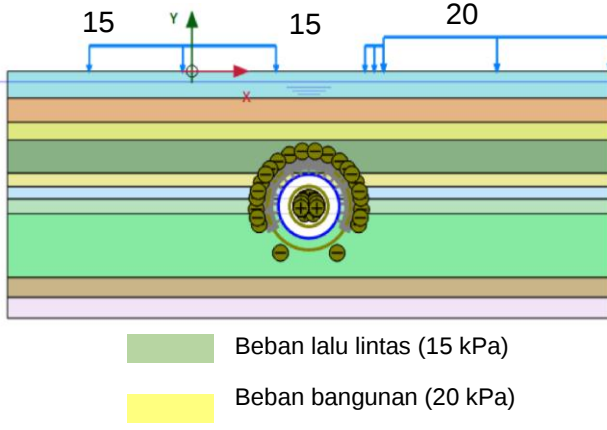
No potongan	Layout	Potongan Melintang	Keterangan
No potongan Potongan 3 (DK 2+730.06)			Beban yang dimodelkan akibat beban struktur bangunan terletak di sebelah kiri terhitung ± 50 m dari terowongan dan tepat di bagian atas terowongan Pada bagian permukaan sebelah kanan terdapat beban lalu lintas terhitung ± 40 m dari sisi kanan terowongan
Potongan 4 (DK 2+823.23)			Beban yang dimodelkan akibat beban struktur bangunan terletak di sebelah kiri terhitung ± 20 m dari sisi kiri terowongan Pada bagian permukaan sebelah kanan terdapat beban lalu lintas terhitung ± 30 m dari terowongan

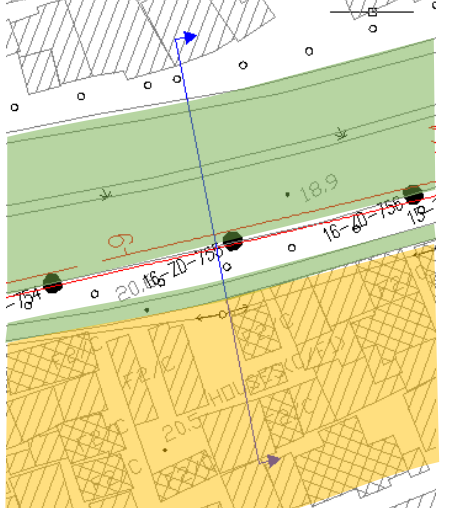
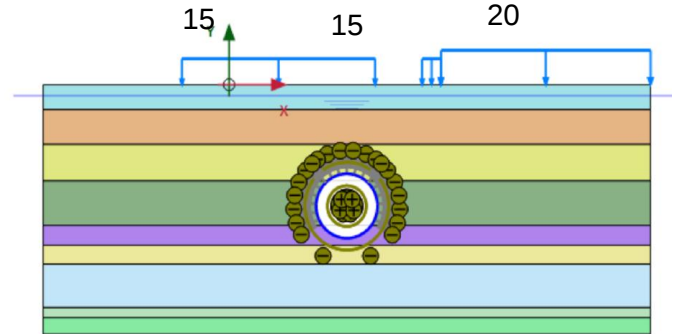
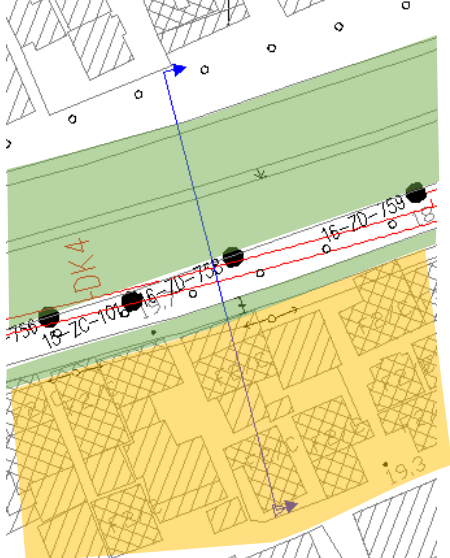
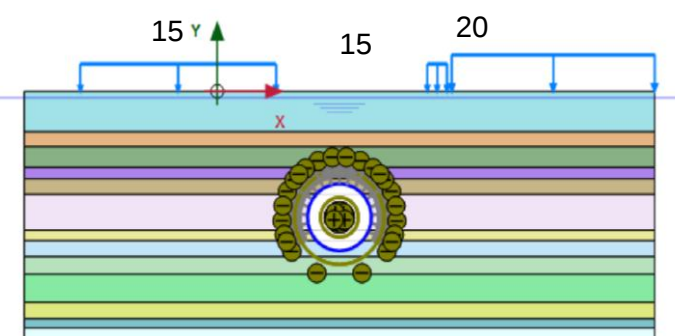
No potongan	Layout	Potongan Melintang	Keterangan
Potongan 5 (DK 2+919.39)		 20 15 Y X 15 kPa 20 kPa Beban lalu lintas (15 kPa) Beban bangunan (20 kPa)	Beban yang dimodelkan akibat beban struktur bangunan terletak di sebelah kiri terhitung ± 40 m dari sisi kiri terowongan Pada bagian permukaan sebelah kanan terdapat beban lalu lintas dari ujung kanan hingga tepat di atas terowongan
Potongan 6 (DK 3+049.27)		 15 15 Y X 15 kPa 20 kPa Beban lalu lintas (15 kPa) Beban bangunan (20 kPa)	Beban yang dimodelkan akibat beban lalu lintas terletak di sebelah kiri dan kanan tepat di atas terowongan

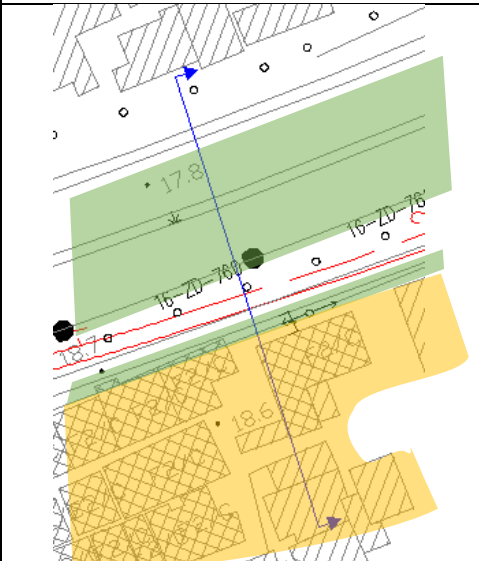
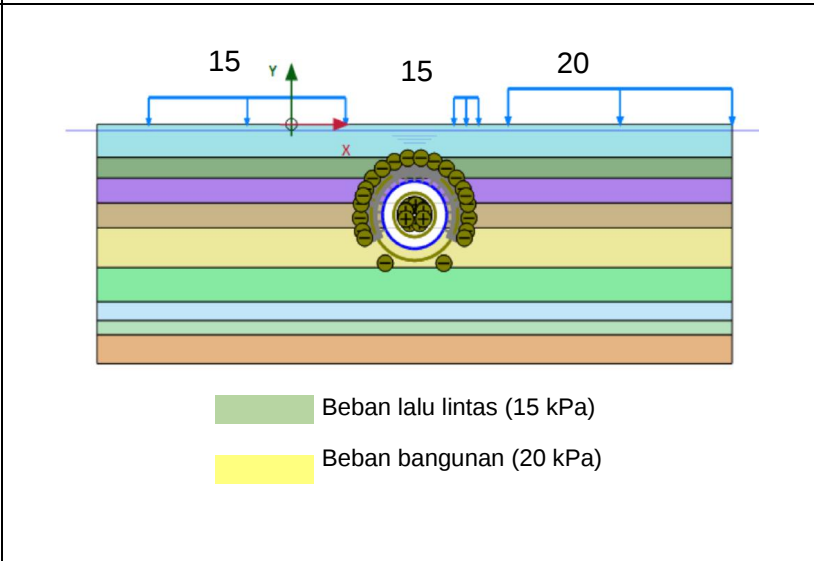
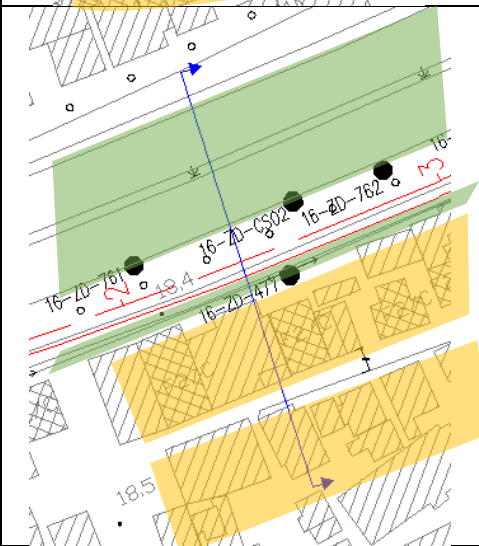
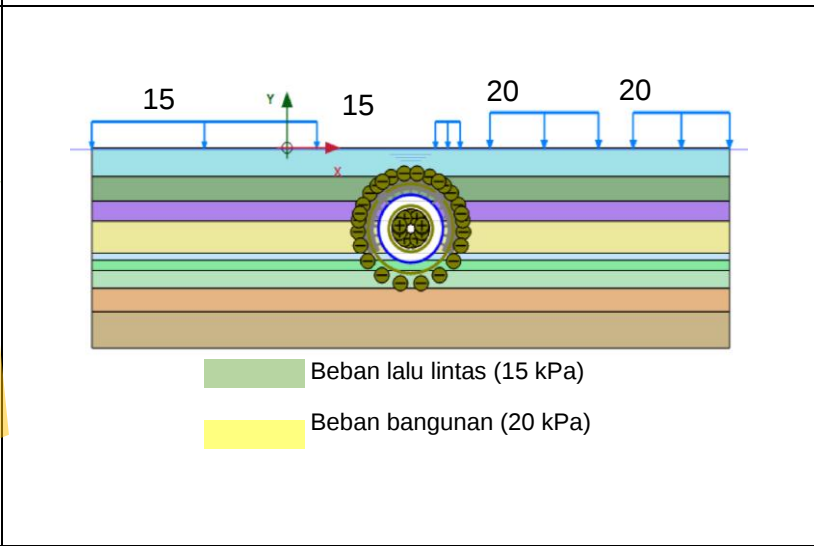
No potongan	Layout	Potongan Melintang	Keterangan
Potongan 7 (DK 3+156.51)		 Beban lalu lintas (15 kPa) Beban bangunan (20 kPa)	Beban yang dimodelkan akibat beban lalu lintas terhitung dari bagian ujung kiri hingga tepat di atas terowongan
Potongan 8 (DK 3+218.66)		 Beban lalu lintas (15 kPa) Beban bangunan (20 kPa)	Beban yang dimodelkan akibat beban lalu lintas terhitung dari bagian ujung kiri hingga tepat di atas terowongan Pada bagian permukaan sebelah kanan terdapat beban struktur bangunan terhitung ± 20 m dan ± 50 m dari sisi kanan terowongan

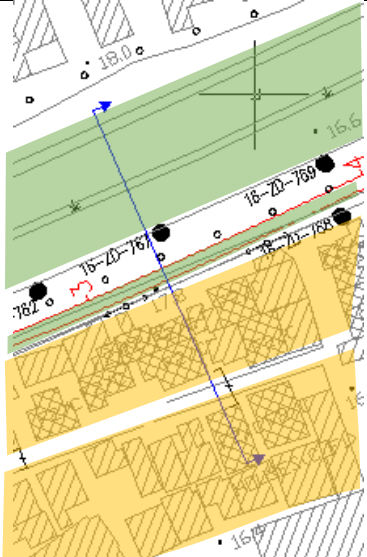
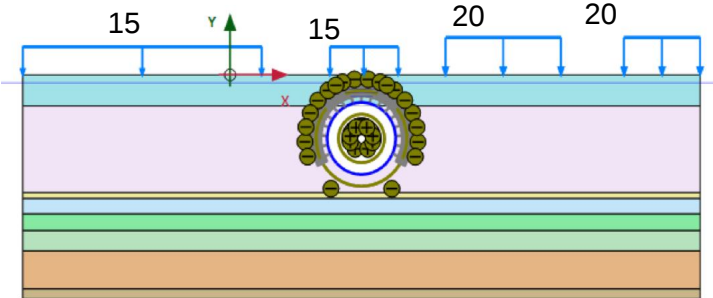
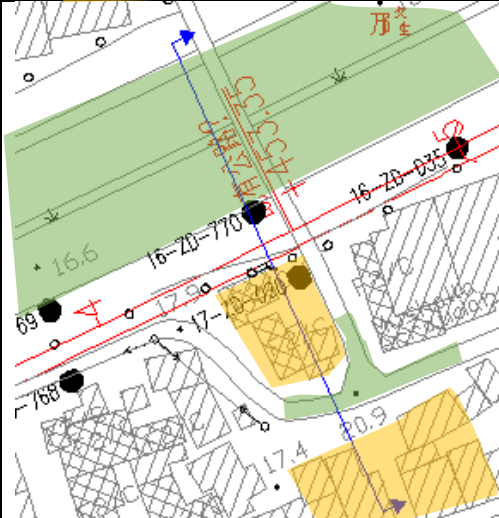
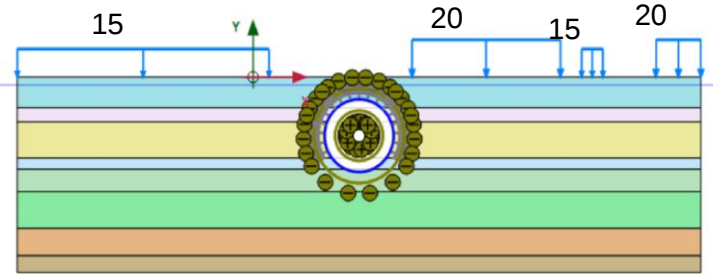
No potongan	Layout	Potongan Melintang	Keterangan
Potongan 9 (DK 3+348.67)		 Beban lalu lintas (15 kPa) Beban bangunan (20 kPa)	Beban yang dimodelkan akibat beban lalu lintas terhitung dari bagian ujung kiri hingga tepat di atas terowongan Pada bagian permukaan sebelah kanan terdapat beban struktur bangunan terhitung ± 15 m dan ± 40 m dari sisi kanan terowongan
Potongan 10 (DK 3+417.56)		 Beban lalu lintas (15 kPa) Beban bangunan (20 kPa)	Beban yang dimodelkan akibat beban lalu lintas terletak di sebelah kiri terhitung ± 20 m dari terowongan dan di sebelah kanan atas terowongan

No. Potongan	Layout	Potongan Melintang	Keterangan
Potongan 11 (DK 3+517.09)		 15 15 Beban lalu lintas (15 kPa) Beban bangunan (20 kPa)	Beban yang dimodelkan akibat beban lalu lintas ± 20 m di kiri dan ± 40 m di kanan dari terowongan
Potongan 12 (DK 3+624.35)		 15 15 20 Beban lalu lintas (15 kPa) Beban bangunan (20 kPa)	Beban dimodelkan akibat beban lalu lintas ± 21 m di kiri terowongan. Di bagian kanan model terdapat kombinasi beban jalan dan beban bangunan, terhitung pada jarak ± 4 m dari terowongan

No potongan	Layout	Potongan Melintang	Keterangan
Potongan 13 (DK 3+705.55)		 15 y 20 15 kPa 20 kPa Beban lalu lintas (15 kPa) Beban bangunan (20 kPa)	Beban lalu lintas dimodelkan dari batas kiri model hingga berada tepat di atas terowongan Beban struktur dimodelkan pada jarak ± 20 m
Potongan 14 (DK 3+705.55)		 15 y 15 20 15 kPa 20 kPa Beban lalu lintas (15 kPa) Beban bangunan (20 kPa)	Akibat beban lalu lintas ± 1 m di kiri terowongan Di bagian kanan model terdapat kombinasi beban jalan dan beban bangunan, terhitung pada jarak ± 6 m dari terowongan

No potongan	Layout	Potongan Melintang	Keterangan
Potongan 15 (DK 3+705.55)		Potongan Melintang  Beban lalu lintas (15 kPa) Beban bangunan (20 kPa)	Beban yang bekerja pada model berupa beban lalu lintas sebesar 15 kPa hingga di atas terowongan Pada bagian kanan model terdapat kombinasi beban lalu lintas dan beban bangunan
Potongan 16 (DK 4+041.14)		 Beban lalu lintas (15 kPa) Beban bangunan (20 kPa)	Beban dimodelkan akibat beban lalu lintas ± 6 m di kiri terowongan Di bagian kanan model terdapat kombinasi beban jalan dan beban bangunan, terhitung pada jarak ± 12 m dari terowongan

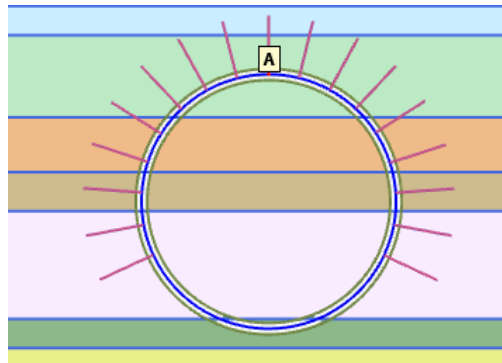
No potongan	Layout	Potongan Melintang	Keterangan
Potongan 17 (DK) 4+151.15)			Pada bagian kiri model terdapat beban lalu lintas pada jarak ± 12 m Pada bagian kanan model terdapat kombinasi beban lalu lintas dan beban bangunan
Potongan 18 (DK) 4+248.51)			Pada model terdapat kombinasi beban berupa beban lalu lintas dan beban bangunan

No potongan	Layout	Potongan Melintang	Keterangan
Potongan 19 (DK 4+330.56)		 Beban lalu lintas (15 kPa) Beban bangunan (20 kPa)	Pada bagian kiri dan bagian atas terowongan terdapat beban lalu lintas Pada bagian kanan model terdapat beban bangunan
Potongan 20 (DK 4+446.31)		 Beban lalu lintas (15 kPa) Beban bangunan (20 kPa)	Beban lalu lintas dimodelkan pada bagian kiri dan kanan model Beban lalu lintas pada bagian kanan model terdapat di antara beban bangunan

13. HASIL ANALISIS PEMODELAN TUNNEL TBM

A. Deformasi arah Aksial

Berdasarkan hasil analisis numerik dengan menggunakan program Plaxis 2D, didapatkan hasil berupa penurunan. Penurunan dicatat terhadap titik tinjau yang telah ditentukan (**titik A**). Titik tinjau yang telah ditentukan terletak pada bagian atas terowongan seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 33**.

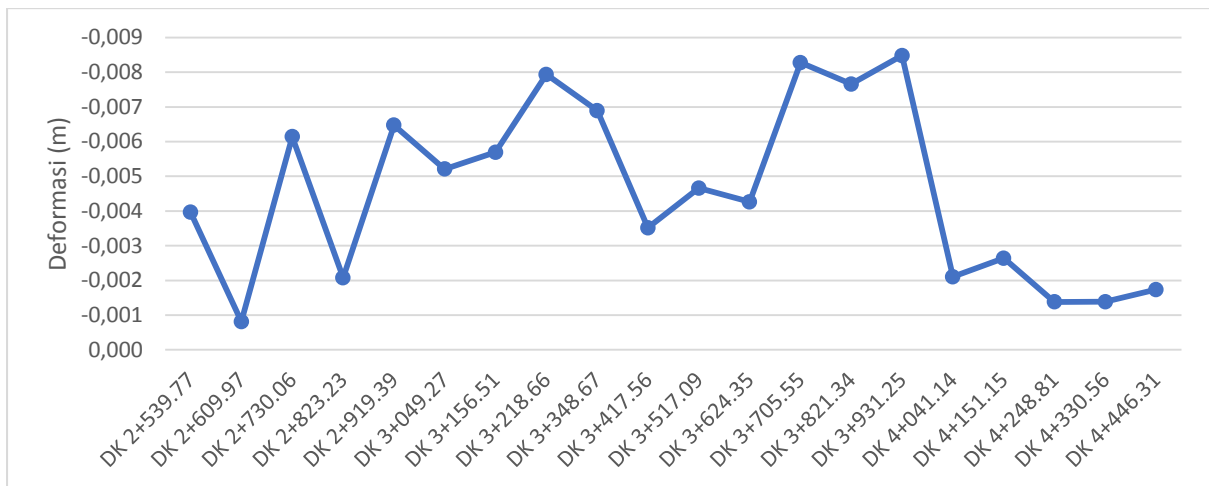


Gambar 33 Titik tinjau pada analisis 2D

Deformasi total aksial arah vertikal (U_y) yang terjadi pada titik tinjau A dicatat pada tahap konstruksi forepoling telah terpasang (**Tahap 3**). Data hasil analisis berupa deformasi aksial pada 20 lokasi dapat dilihat pada **Tabel 52**. Sedangkan hasil analisis berupa grafik ditunjukkan pada **Gambar 34**.

Tabel 52 Deformasi Total yang Terjadi pada Setiap Tahap Galian Berdasarkan Titik Tinjau (Titik A)

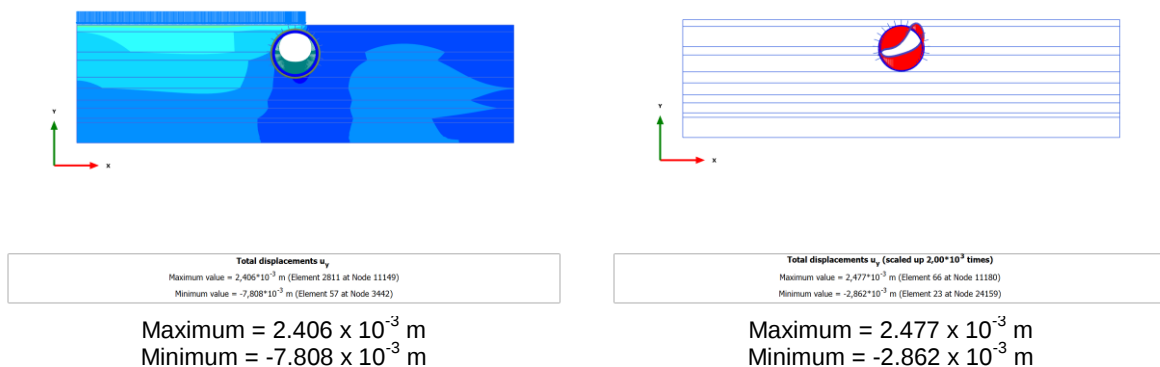
No. Potongan	Lokasi	Id Borlog	Beban Diatas Terowongan			Deformasi Tunnel (m)	Deformasi Izin (m)		Keterangan
			Kiri	Tengah	Kanan		China Code	Indonesia Code	
1	DK 2+539.77	17-ZD-008	Gedung		-	-0.005	0.02	0.1	Ok
2	DK 2+609.97	17-ZD-012	Gedung		-	-0.002			Ok
3	DK 2+730.06	16-ZD-726	Gedung		Jalan	-0.007			Ok
4	DK 2+823.23	16-ZD-727	Gedung	-	Jalan	-0.004			Ok
5	DK 2+919.39	16-ZD-730	Gedung	Jalan		-0.007			Ok
6	DK 3+049.27	16-ZD-733	Jalan		-	-0.005			Ok
7	DK 3+156.51	16-ZD-735	Jalan		-	-0.006			Ok
8	DK 3+218.66	16-ZD-737	Jalan		Gedung	-0.009			Ok
9	DK 3+348.67	16-ZD-033	Jalan		Gedung	-0.008			Ok
10	DK 3+417.56	16-ZD-742	Jalan		Gedung	-0.006			Ok
11	DK 3+517.09	16-ZD-744	Jalan	-	Jalan	-0.005			Ok
12	DK 3+624.35	16-ZD-034	Jalan	-	Gedung	-0.006			Ok
13	DK 3+705.55	16-ZD-750	Jalan		Gedung	-0.009			Ok
14	DK 3+821.34	16-ZD-753	Jalan		Gedung	-0.007			Ok
15	DK 3+931.25	16-ZD-755	-	Jalan	Gedung	-0.009			Ok
16	DK 4+041.14	16-ZD-758	Jalan		Gedung	-0.004			Ok
17	DK 4+151.15	16-ZD-760	Jalan		Gedung	-0.003			Ok
18	DK 4+248.81	16-ZD-477	Jalan		Gedung	-0.001			Ok
19	DK 4+330.56	16-ZD-767	Jalan		Gedung	-0.001			Ok
20	DK 4+446.31	16-ZD-770	Jalan		Gedung	-0.001			Ok



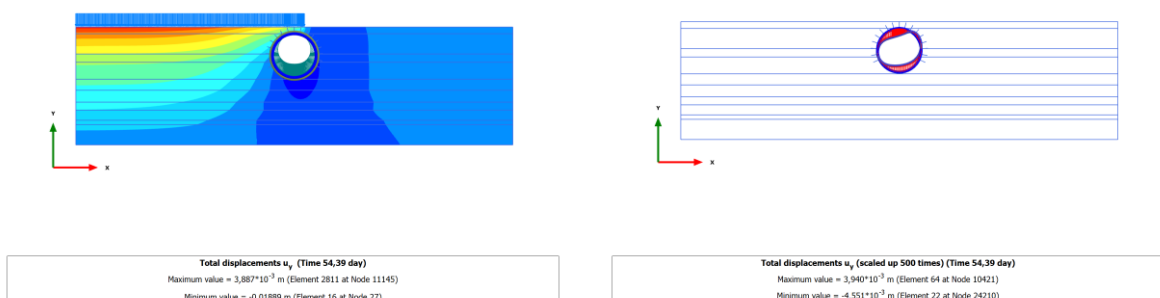
Gambar 34 Deformasi total aksial pada titik tinjau A

Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan pada program numerik 2D, penurunan terbesar pada terowongan yang terjadi yaitu sebesar -0.009 m pada lokasi potongan 13 (DK 3+705.55). Rata-rata besaran peningkatan deformasi aksial yang terjadi pada setiap lokasi potongan di titik tinjau menunjukkan nilai sebesar 0.005 m.

Hasil analisis berupa diagram deformasi di setiap potongan pada kondisi setelah forepoling terpasang dan ketika kondisi *minimum excess pore pressure* ditunjukkan pada gambar di bawah ini.



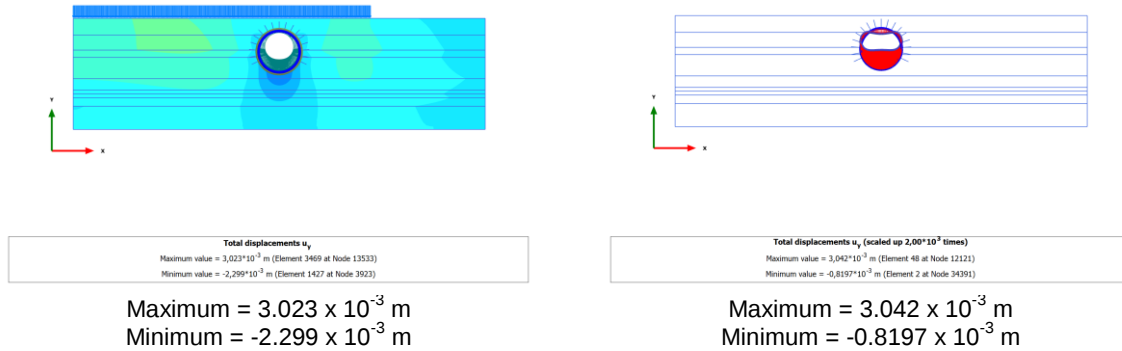
Gambar 35 Hasil analisis deformasi terowongan tunnel TBM DK2+539.77 (potongan 1)



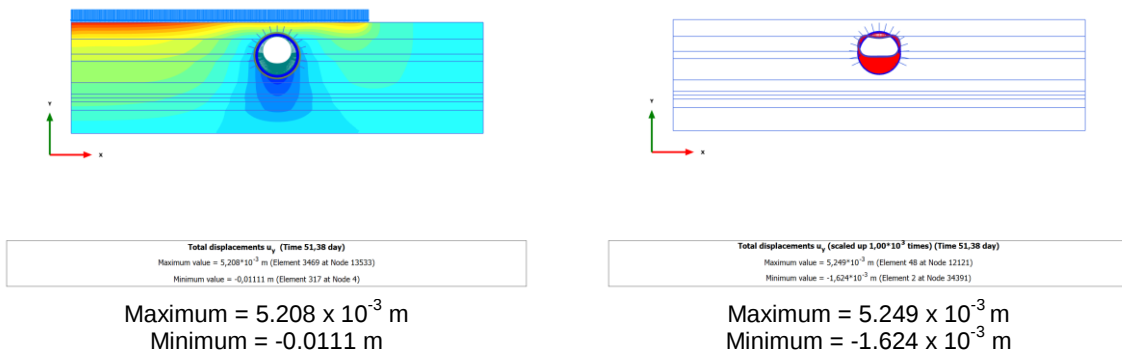
Maximum = 3.887×10^{-3} m
Minimum = -0.01889 m

Maximum = 3.940×10^{-3} m
Minimum = -4.551×10^{-3} m

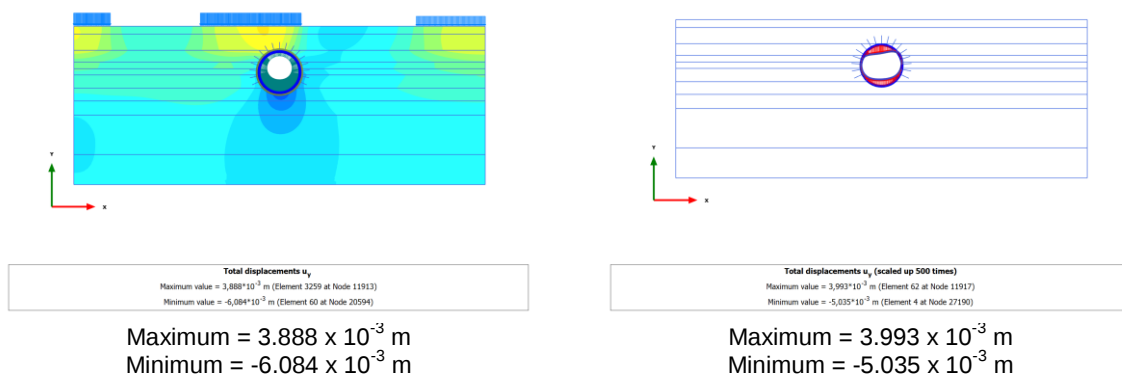
Gambar 36 Hasil analisis deformasi kondisi konsolidasi minimum excess pore persurre di tunnel TBM DK2+539.77 (potongan 1)



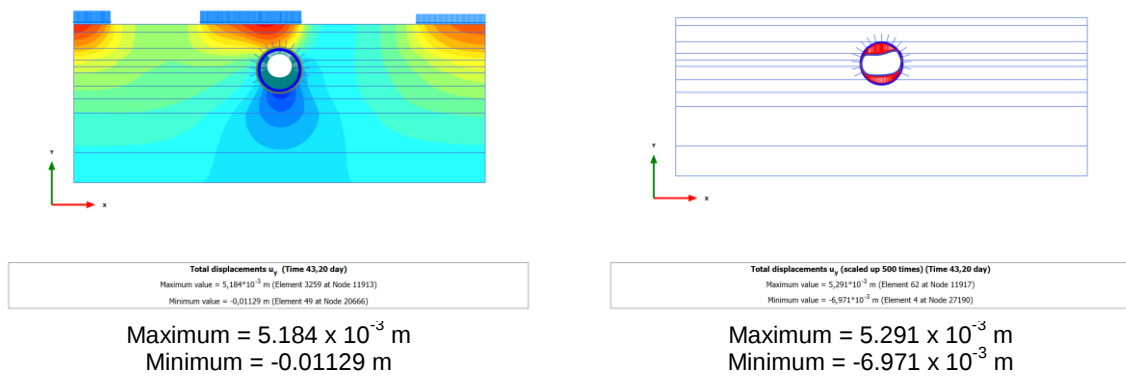
Gambar 37 Hasil analisis deformasi terowongan tunnel TBM DK2+609.97 (potongan 2)



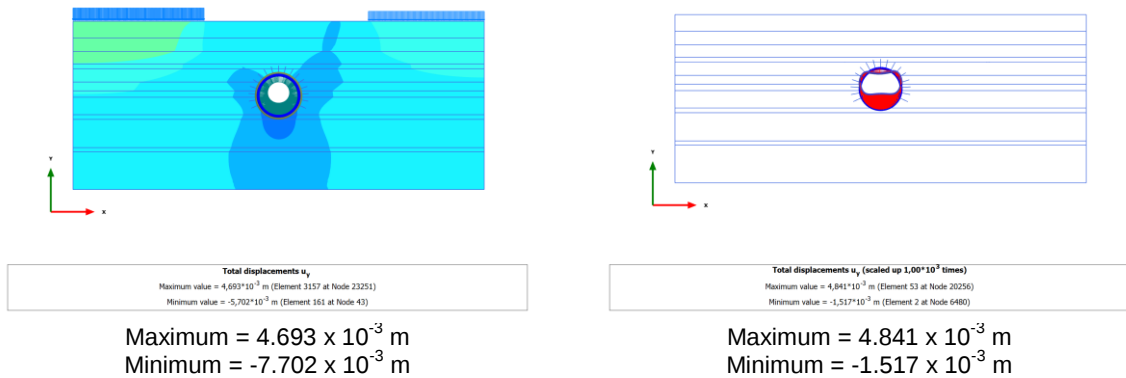
Gambar 38 Hasil analisis deformasi kondisi konsolidasi minimum excess pore persurre di tunnel TBM DK2+609.97 (potongan 2)



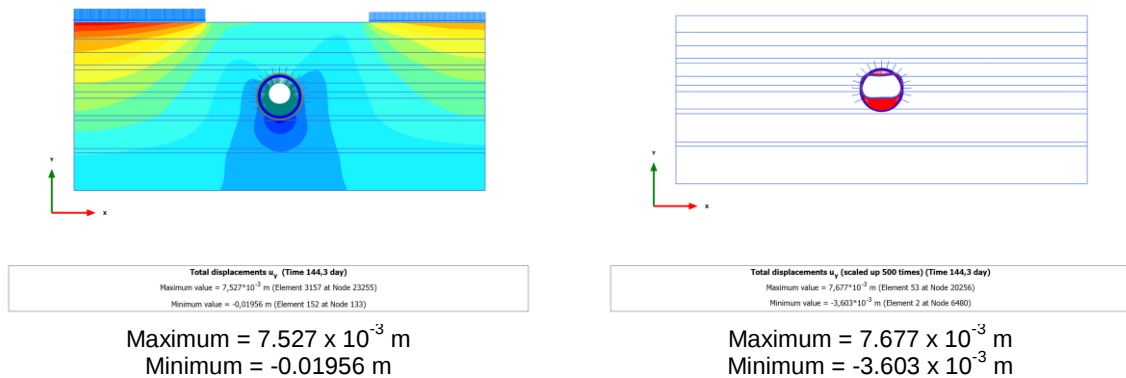
Gambar 39 Hasil analisis deformasi terowongan tunnel TBM DK2+730.06 (potongan 3).



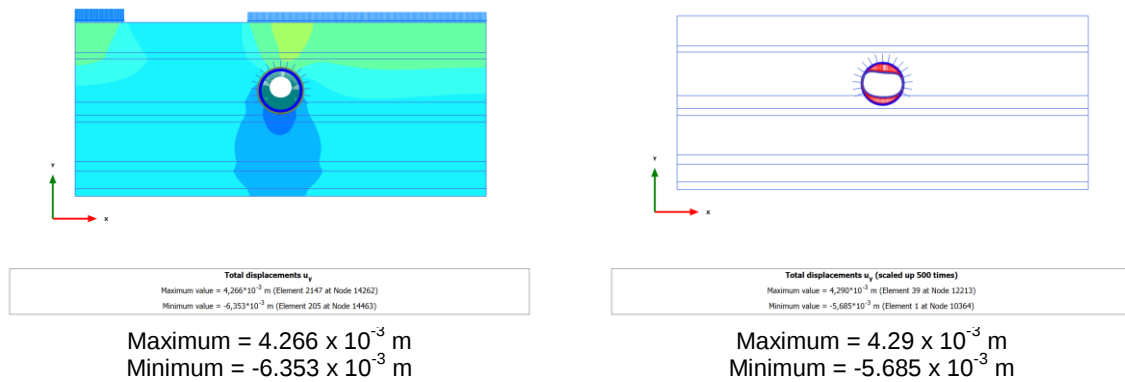
Gambar 40 Hasil analisis deformasi kondisi konsolidasi minimum excess pore persurre di tunnel TBM DK2+730.06 (potongan 3)



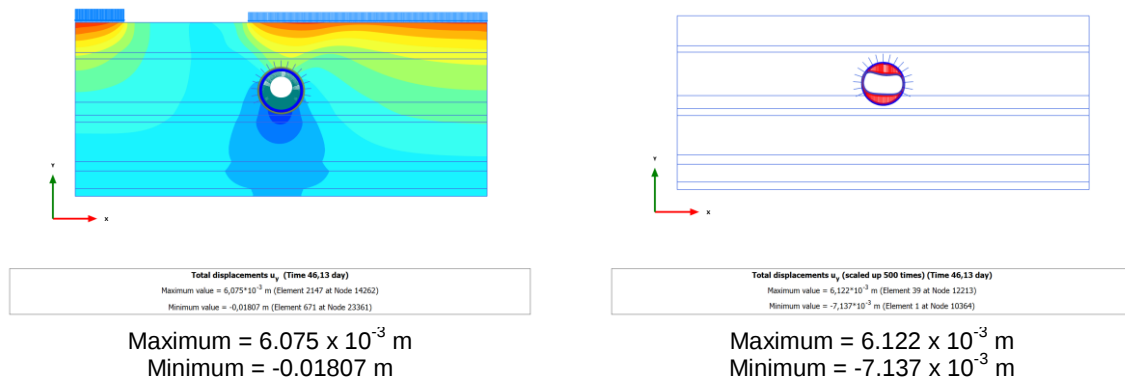
Gambar 41 Hasil analisis deformasi terowongan tunnel TBM DK2+823.23 (potongan 4)



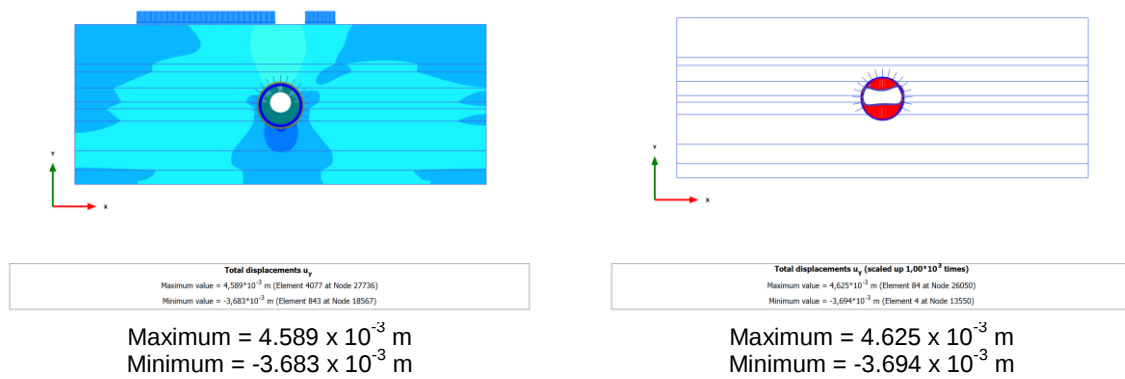
Gambar 42 Hasil analisis deformasi kondisi konsolidasi minimum excess pore persurre di tunnel TBM DK2+823.23 (potongan 4)



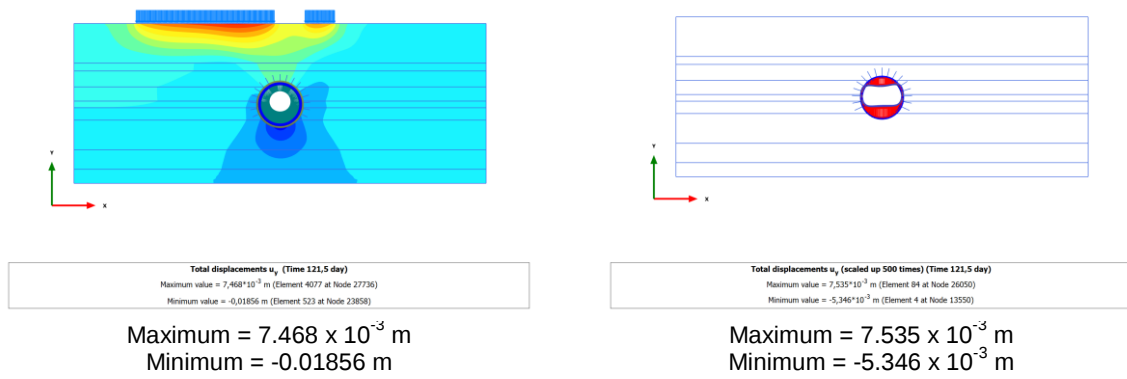
Gambar 43 Hasil analisis deformasi terowongan tunnel TBM DK2+919.39 (potongan 5)



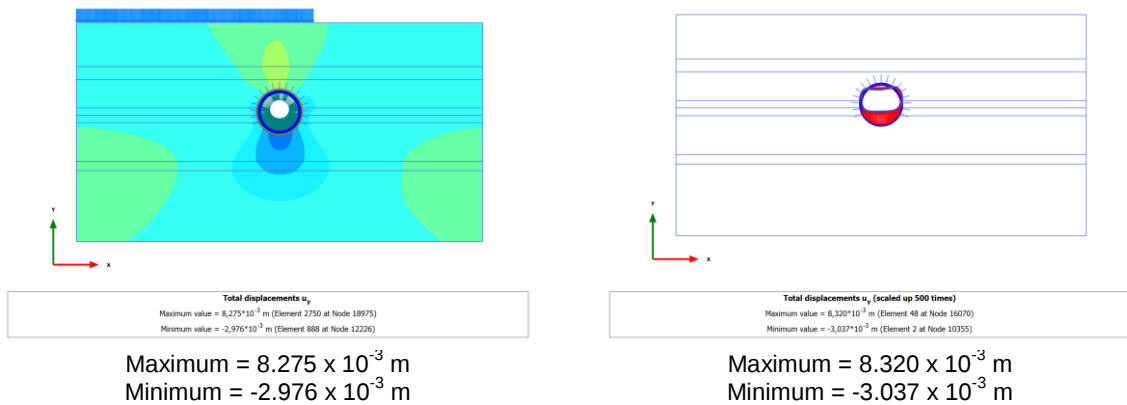
Gambar 44 Hasil analisis deformasi kondisi konsolidasi *minimum excess pore persurre* di tunnel TBM DK2+919.39 (potongan 5)



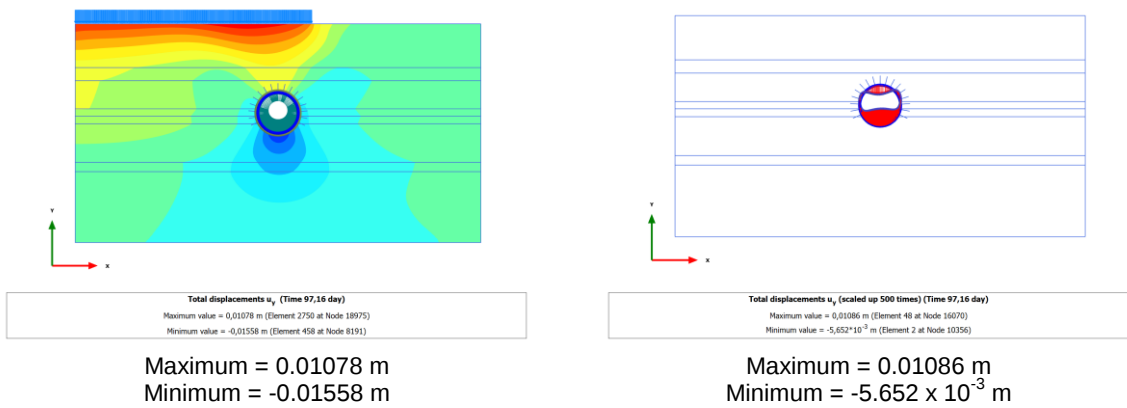
Gambar 45 Hasil analisis deformasi terowongan tunnel TBM DK3+049.27 (potongan 6)



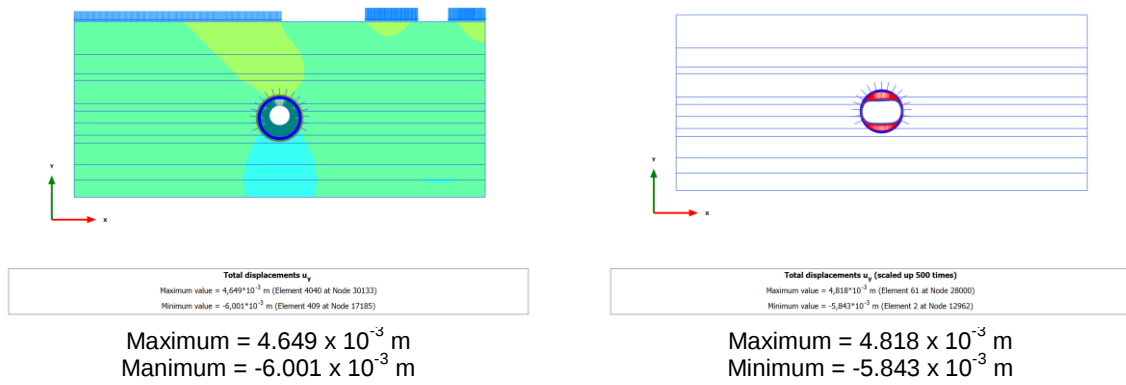
Gambar 46 Hasil analisis deformasi kondisi konsolidasi minimum excess pore persurre di tunnel TBM DK3+049.27 (potongan 6)



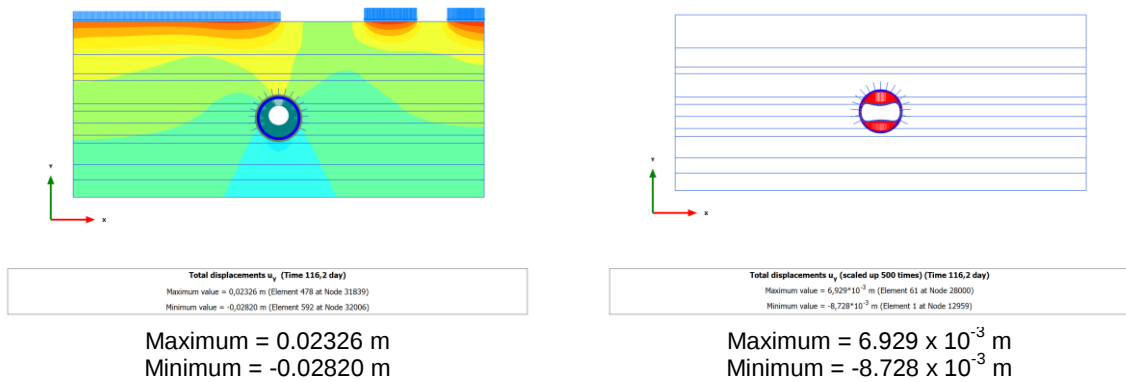
Gambar 47 Hasil analisis deformasi terowongan tunnel TBM DK3+156.51 (potongan 7)



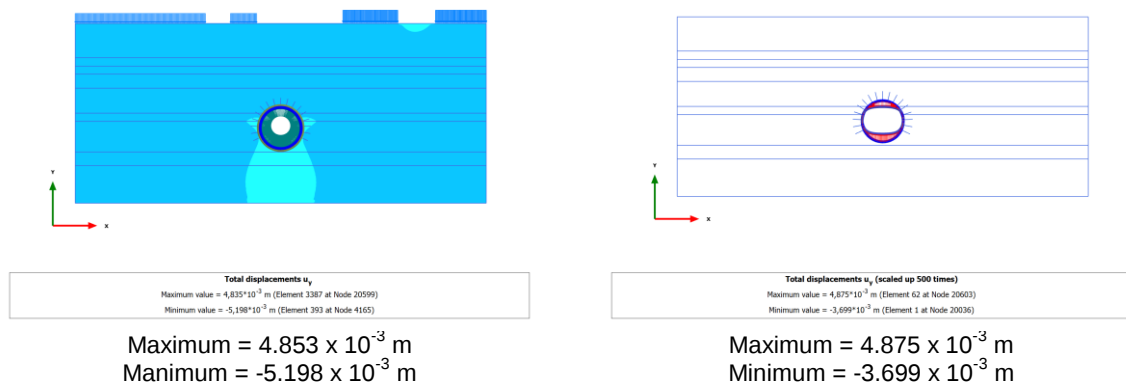
Gambar 48 Hasil analisis deformasi kondisi konsolidasi minimum excess pore persurre di tunnel TBM DK3+156.51 (potongan 7)



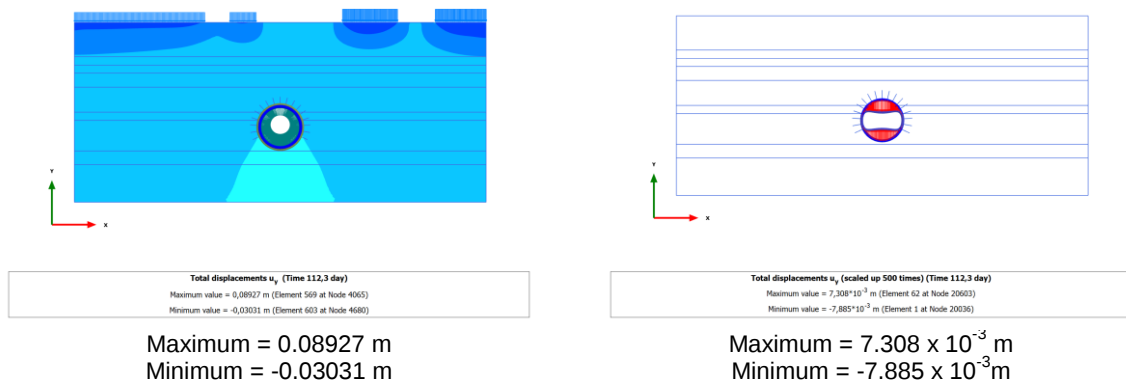
Gambar 49 Hasil analisis deformasi terowongan tunnel TBM DK3+218.66 (potongan 8)



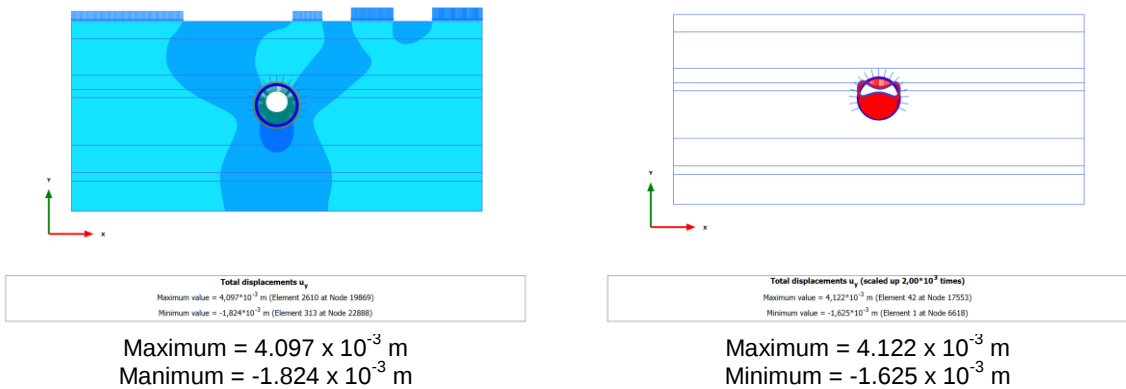
Gambar 50 Hasil analisis deformasi kondisi konsolidasi *minimum excess pore persurre* di tunnel TBM DK3+218.66 (potongan 8)



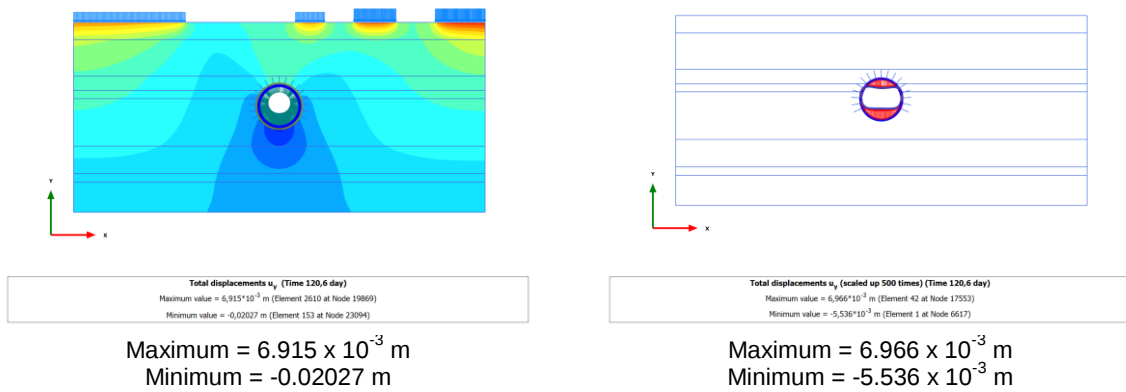
Gambar 51 Hasil analisis deformasi terowongan tunnel TBM DK3+348.67 (potongan 9)



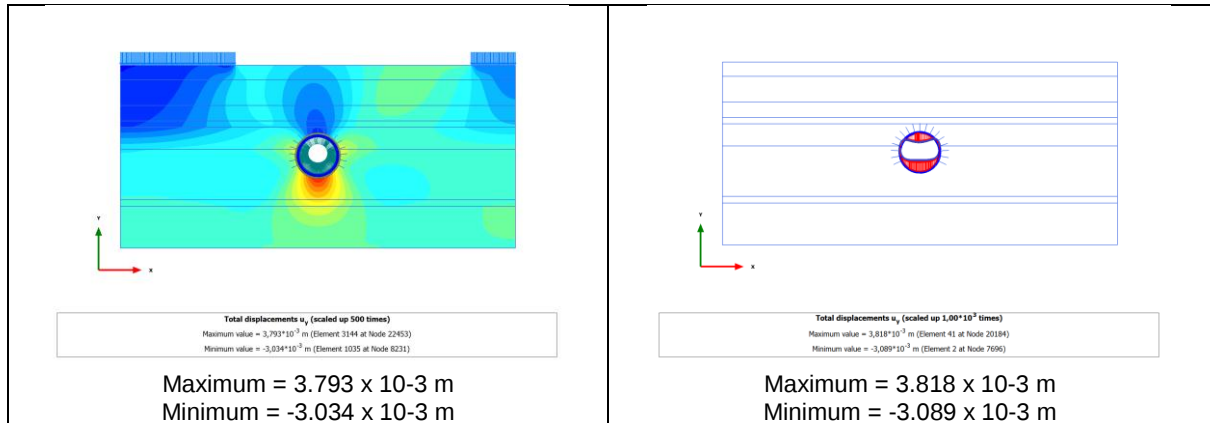
Gambar 52 Hasil analisis deformasi kondisi konsolidasi *minimum excess pore persurre* di tunnel TBM DK3+348.67 (potongan 9)



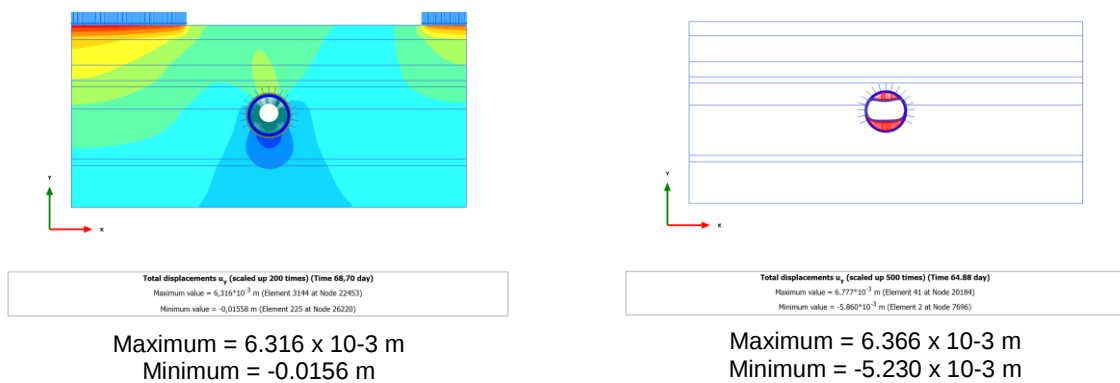
Gambar 53 Hasil analisis deformasi terowongan tunnel TBM DK3+438 (potongan 10)



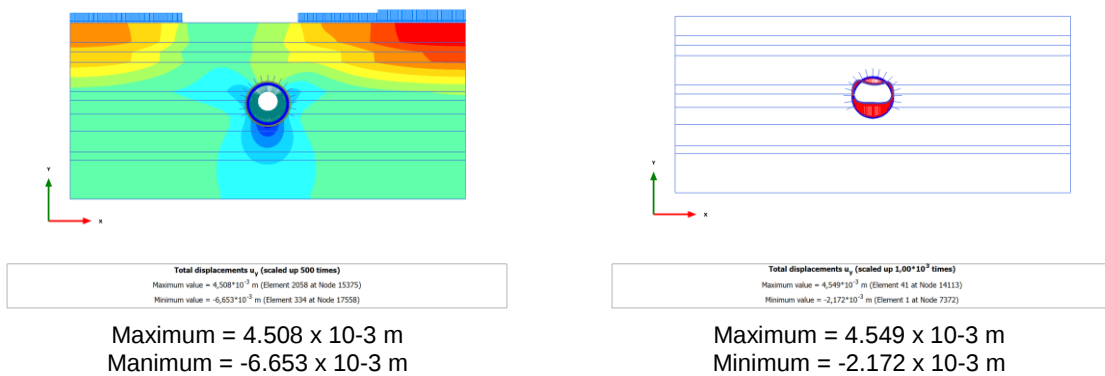
Gambar 54 Hasil analisis deformasi kondisi konsolidasi *minimum excess pore persurre* di tunnel TBM DK3+438 (potongan 10)



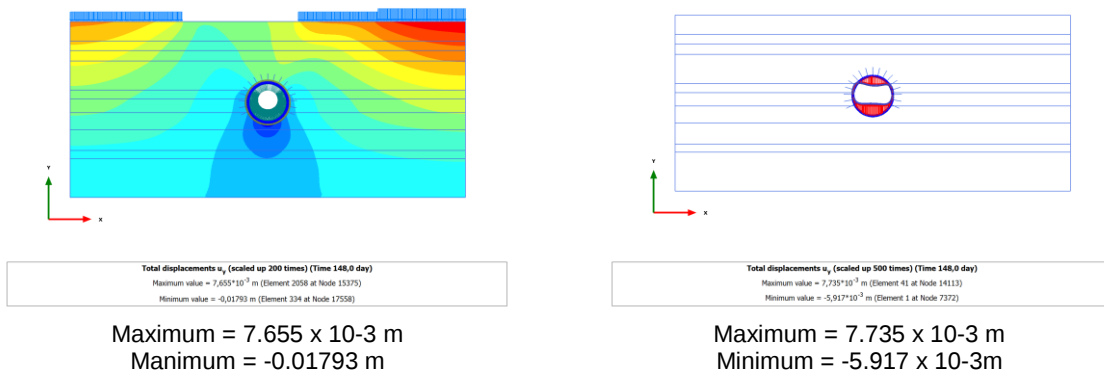
Gambar 55 Hasil analisis deformasi terowongan tunnel TBM DK3+517.09 (potongan 11)



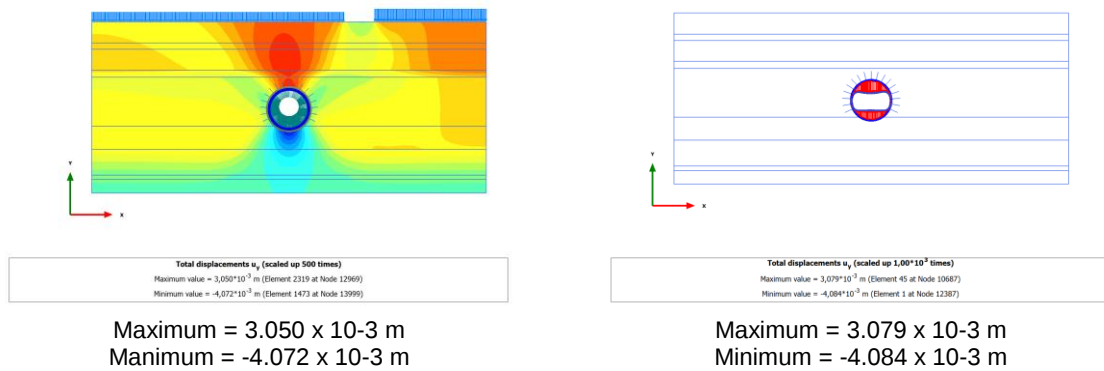
Gambar 56 Hasil analisis deformasi kondisi konsolidasi minimum excess pore persurre di tunnel TBM DK3+517.09 (potongan 11)



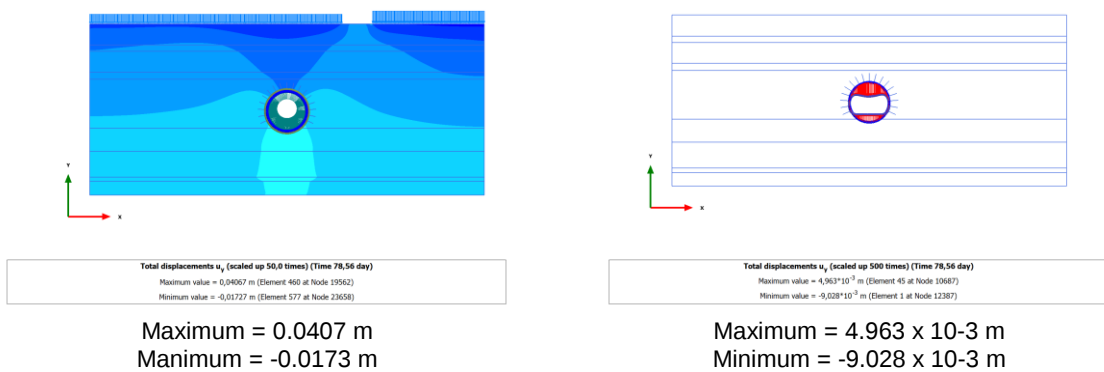
Gambar 57 Hasil analisis deformasi terowongan tunnel TBM DK3+624.35 (potongan 12)



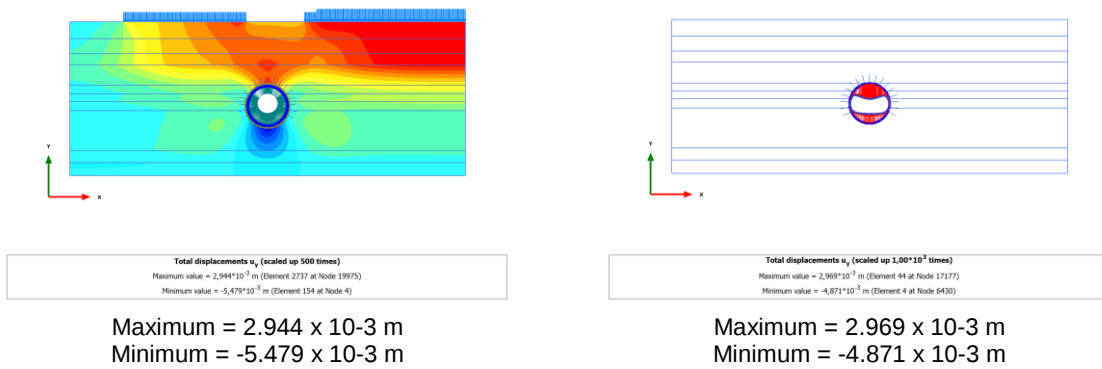
Gambar 58 Hasil analisis deformasi kondisi konsolidasi *minimum excess pore persurre* di tunnel TBM DK3+624.35 (potongan 12)



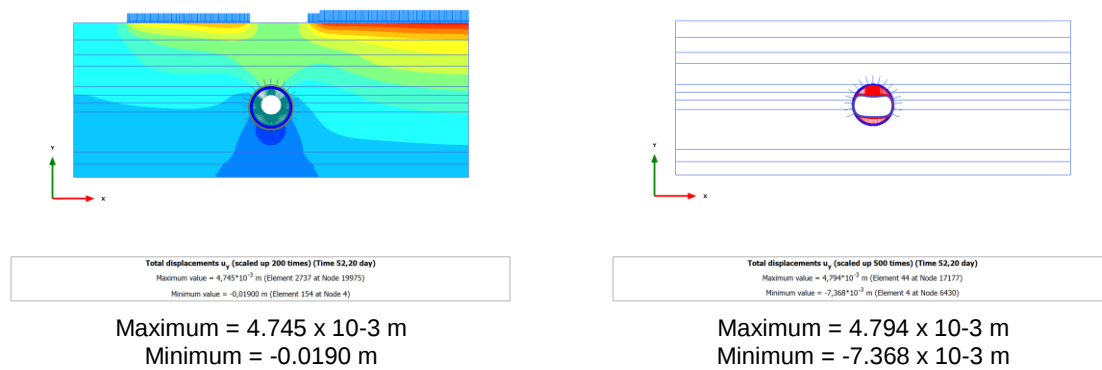
Gambar 59 Hasil analisis deformasi terowongan tunnel TBM DK3+705.55 (potongan 13)



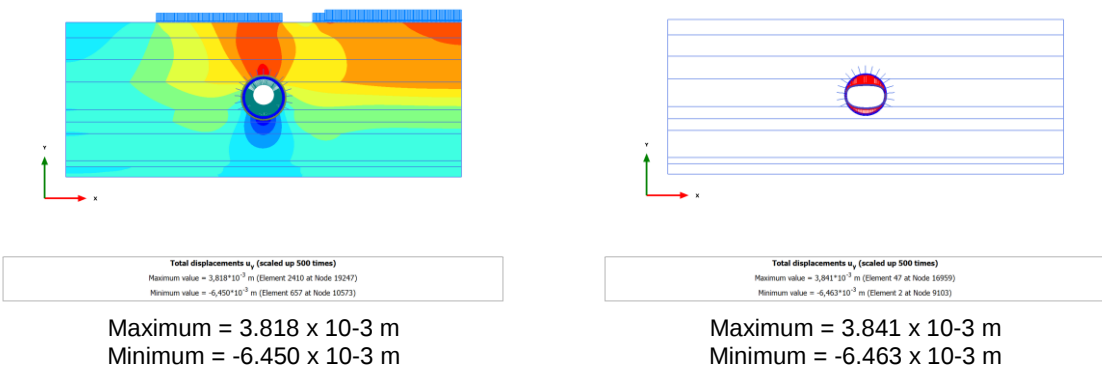
Gambar 60 Hasil analisis deformasi kondisi konsolidasi *minimum excess pore persurre* di tunnel TBM DK3+705.55 (potongan 13)



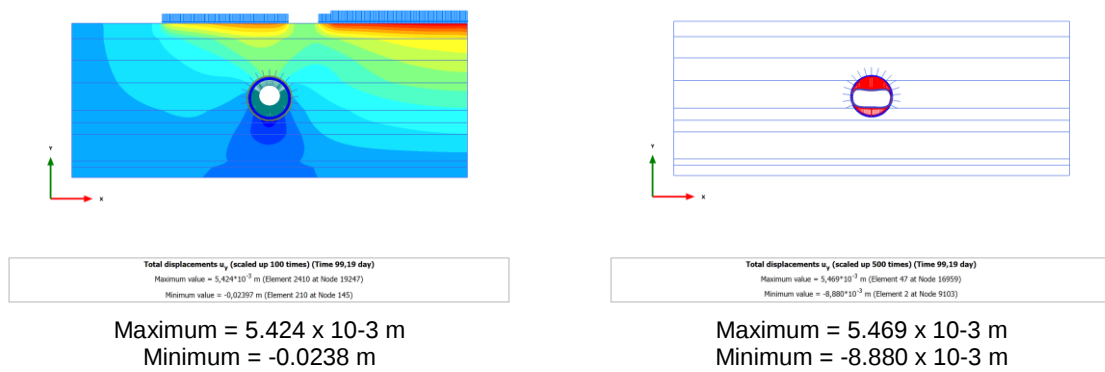
Gambar 61 Hasil analisis deformasi terowongan tunnel DK3 + 821.34 (potongan 14)



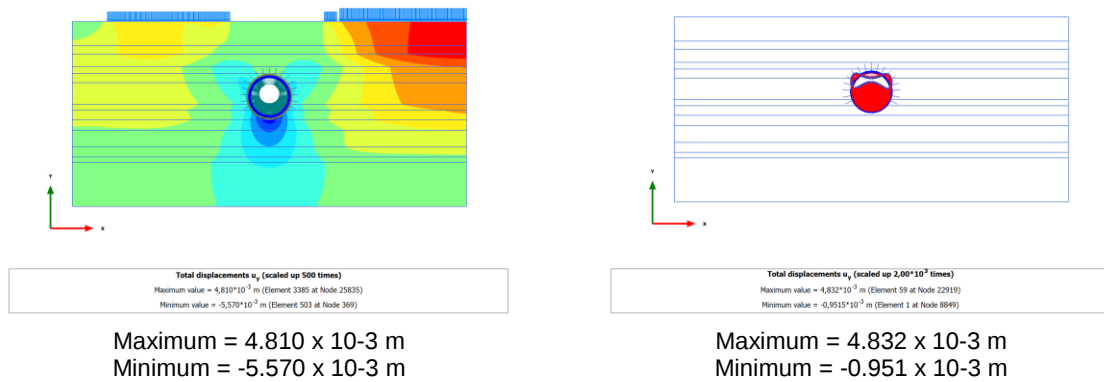
Gambar 62 Hasil analisis deformasi kondisi konsolidasi *minimum excess pore persurre* di tunnel DK3 + 821.34 (potongan 14)



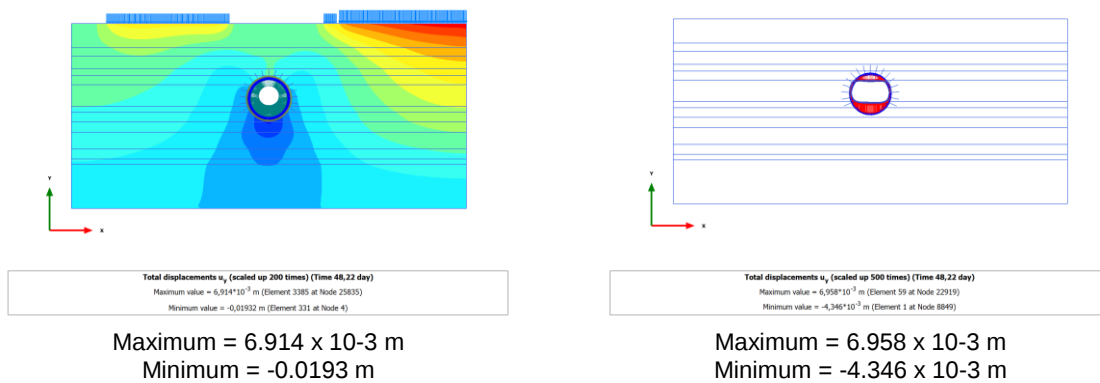
Gambar 63 Hasil analisis deformasi terowongan tunnel DK3 + 931.25 (potongan 15)



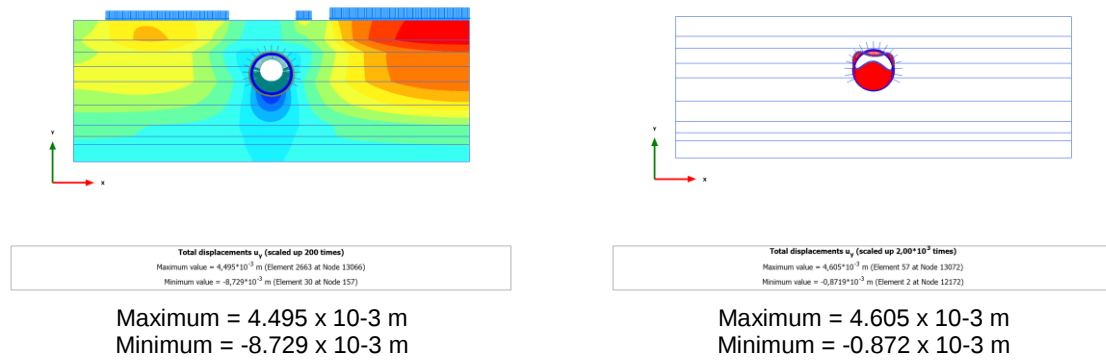
Gambar 64 Hasil analisis deformasi kondisi konsolidasi *minimum excess pore persurre* di tunnel DK3 + 931.25 (potongan 15)



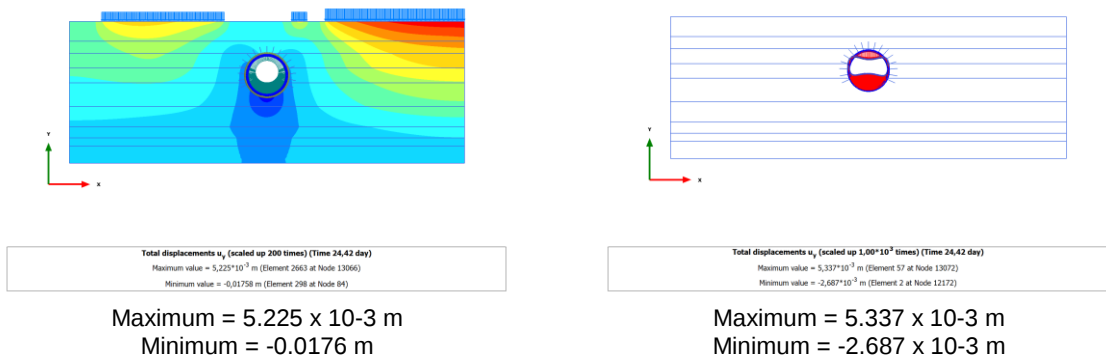
Gambar 65 Hasil analisis deformasi terowongan tunnel DK4 + 041.14 (potongan 16)



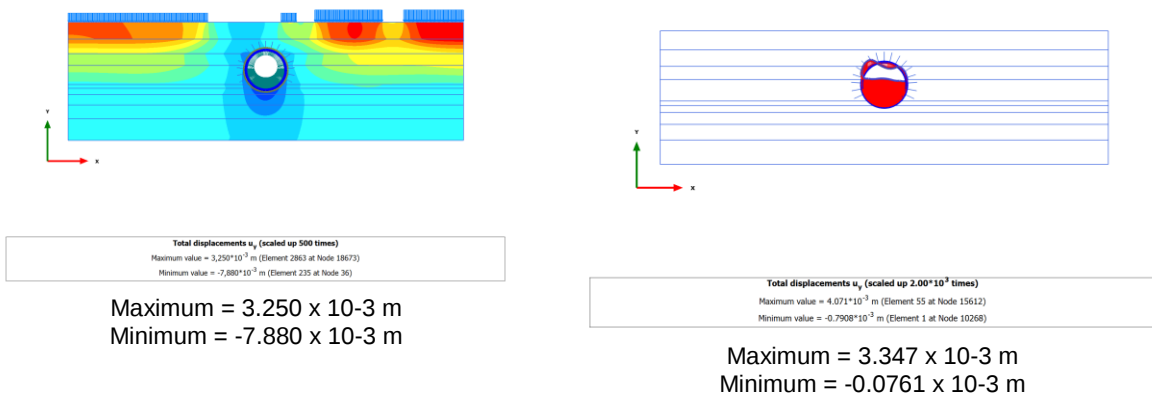
Gambar 66 Hasil analisis deformasi kondisi konsolidasi *minimum excess pore persurre* di tunnel DK4 + 041.14 (potongan 16)



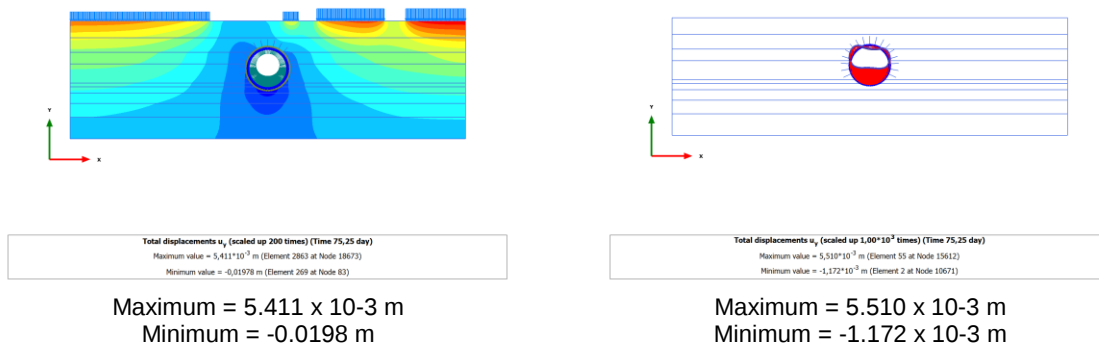
Gambar 67 Hasil analisis deformasi terowongan tunnel DK4 + 151.15 (potongan 17)



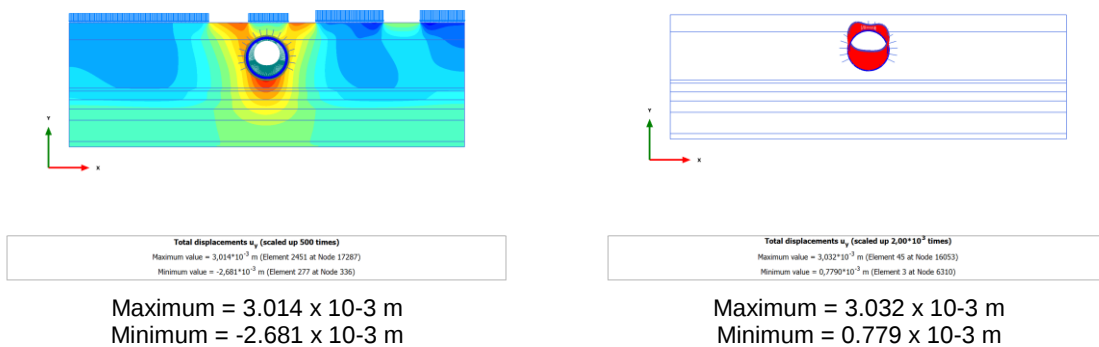
Gambar 68 Hasil analisis deformasi kondisi konsolidasi minimum excess pore persurre di tunnel DK4 + 151.15 (potongan 17)



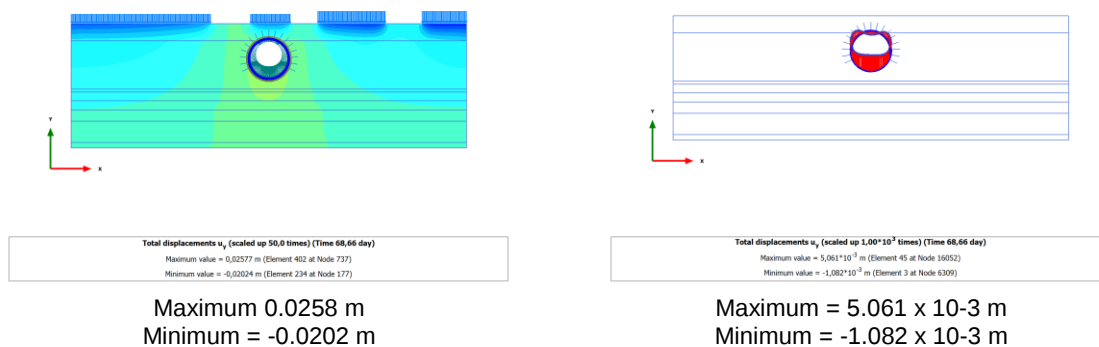
Gambar 69 Hasil analisis deformasi terowongan tunnel DK4 + 248.51 (potongan 18)



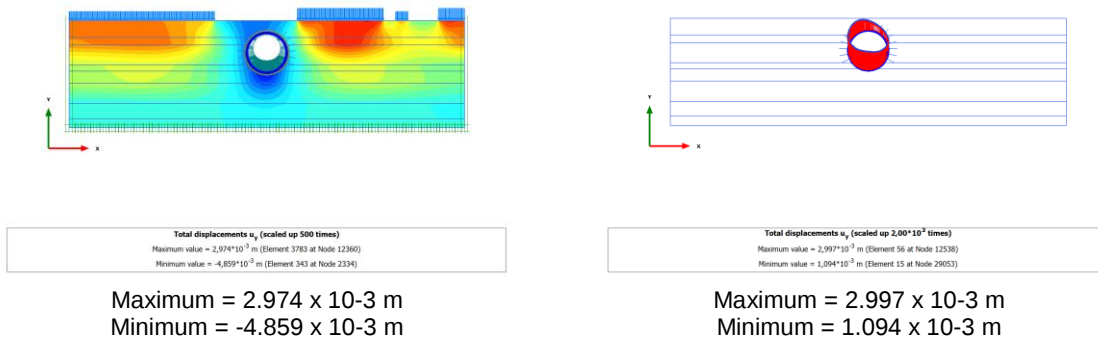
Gambar 70 Hasil analisis deformasi kondisi konsolidasi minimum excess pore persurre di tunnel DK4 + 248.51 (potongan 18)



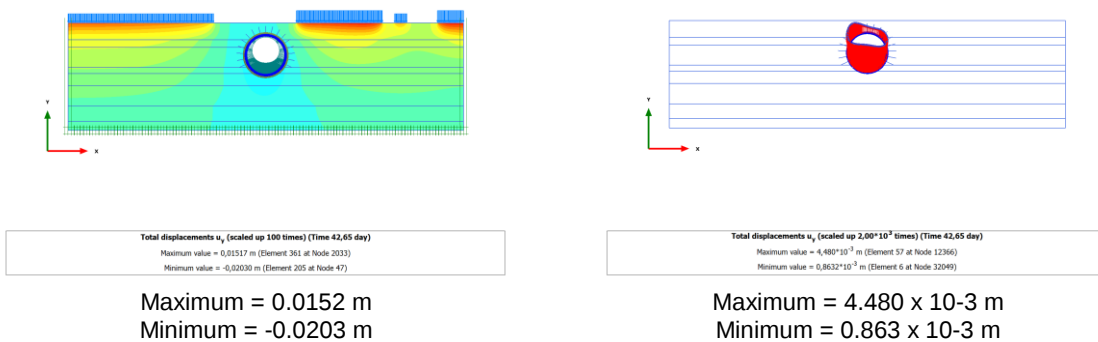
Gambar 71 Hasil analisis deformasi terowongan tunnel DK4 + 330.56 (potongan 19)



Gambar 72 Hasil analisis deformasi kondisi konsolidasi minimum excess pore persurre di tunnel DK4 + 330.56 (potongan 19)



Gambar 73 Hasil analisis deformasi terowongan tunnel DK4 + 446.31 (potongan 20)

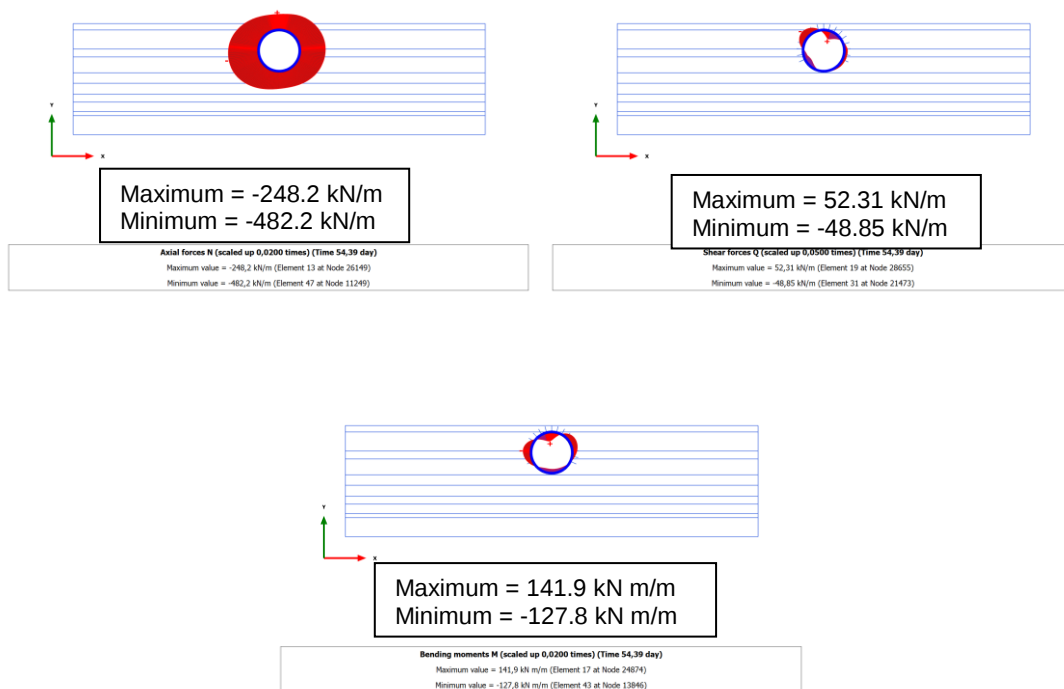


Gambar 74 Hasil analisis deformasi kondisi konsolidasi *minimum excess pore persurre* di tunnel DK4 + 446.31 (potongan 20)

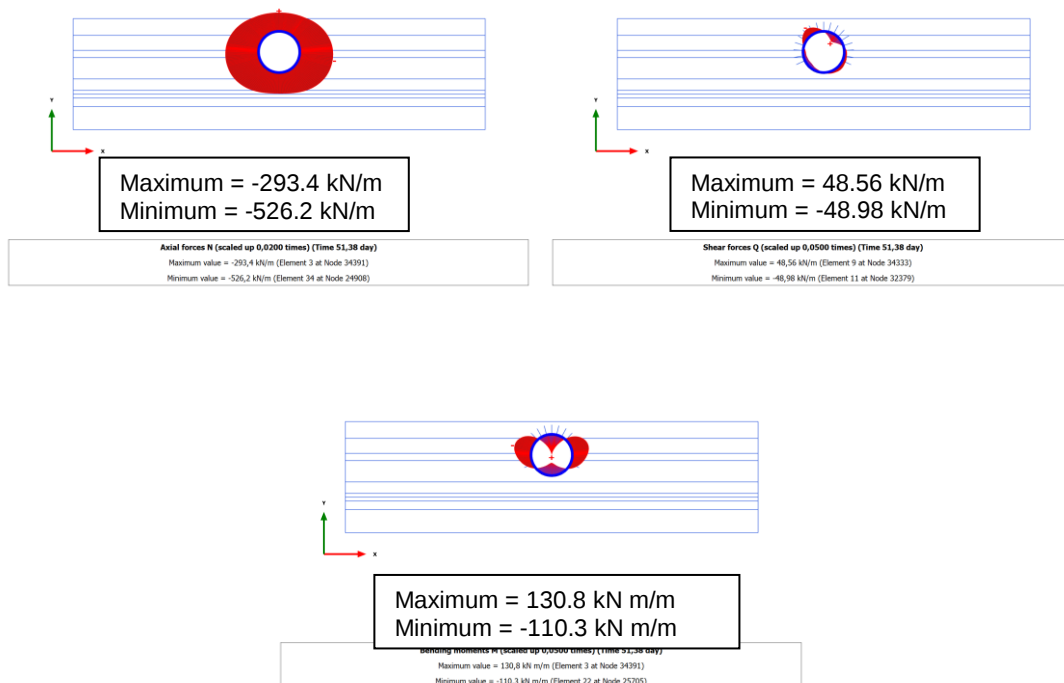
Berdasarkan tinjauan secara global, deformasi aksial terbesar yang terjadi yaitu 0.030 cm, namun jika ditinjau pada lining tunnel, maka deformasi aksial terbesar yang terjadi yaitu sebesar 0.008 m. Berdasarkan SNI 8460 tahun 2017, belum disebutkan kriteria penurunan maksimum dari suatu konstruksi terowongan.

B. Gaya Dalam pada Lining Terowongan

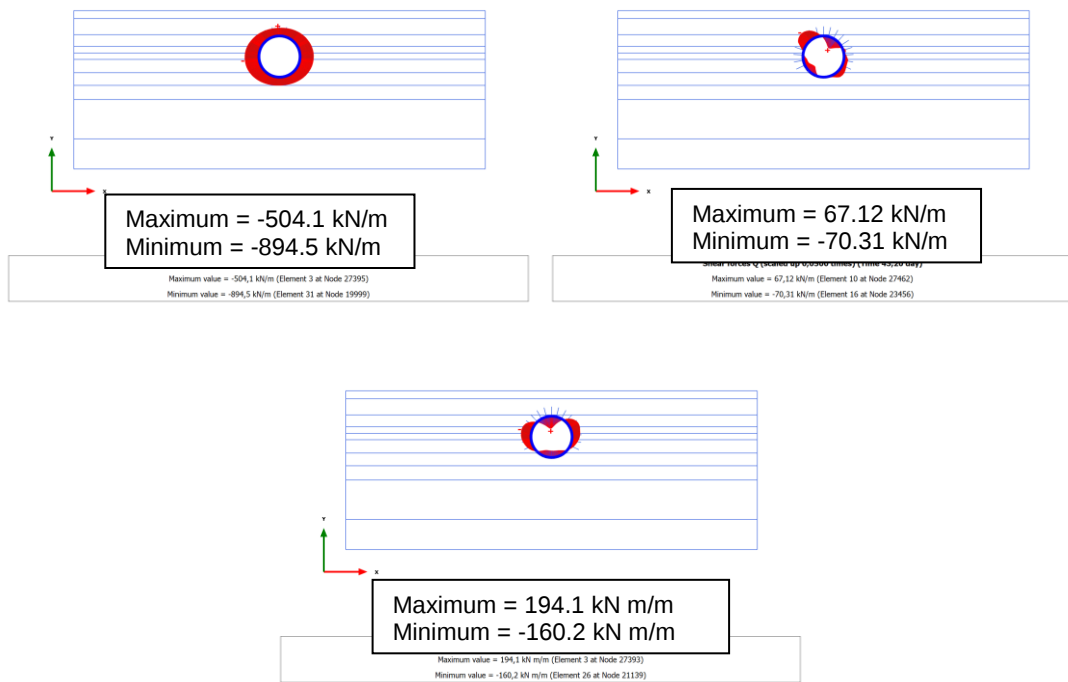
Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan dengan model numerik, gaya dalam yang bekerja pada lining terowongan dapat diperiksa. Gaya yang bekerja pada lining terowongan diantaranya gaya aksial, gaya geser dan momen lentur. Gaya-gaya yang bekerja pada hasil analisis pemodelan dapat dilihat pada **Gambar 75** sampai **Gambar 94**.



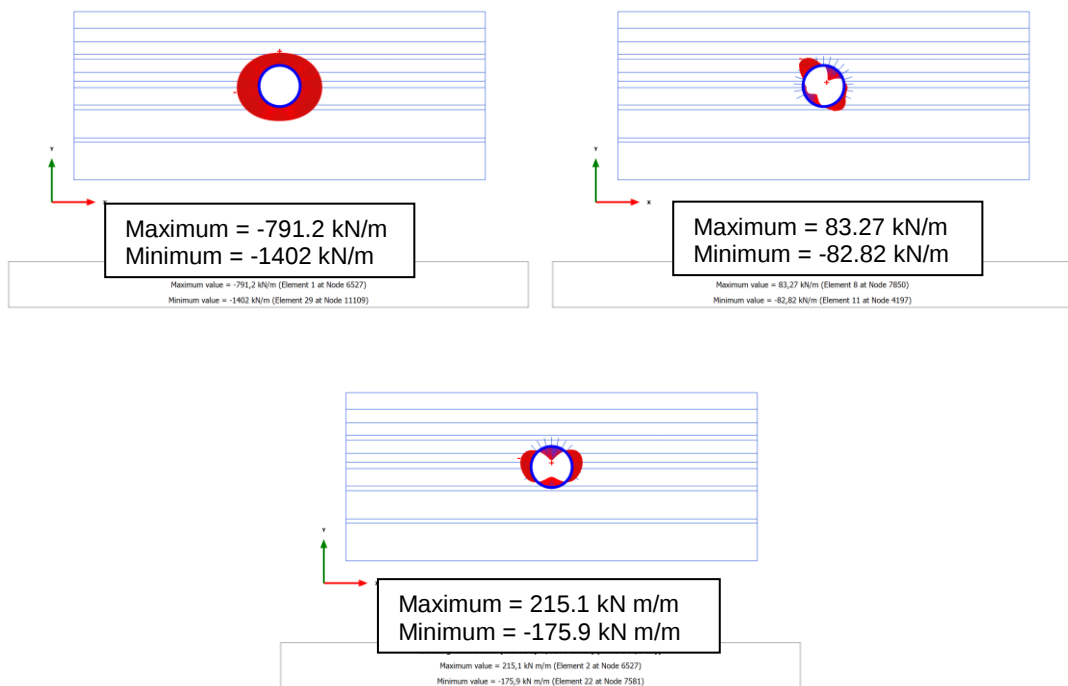
Gambar 75 Hasil analisis gaya dalam terowongan tunnel TBM DK2+539.77 (potongan 1)



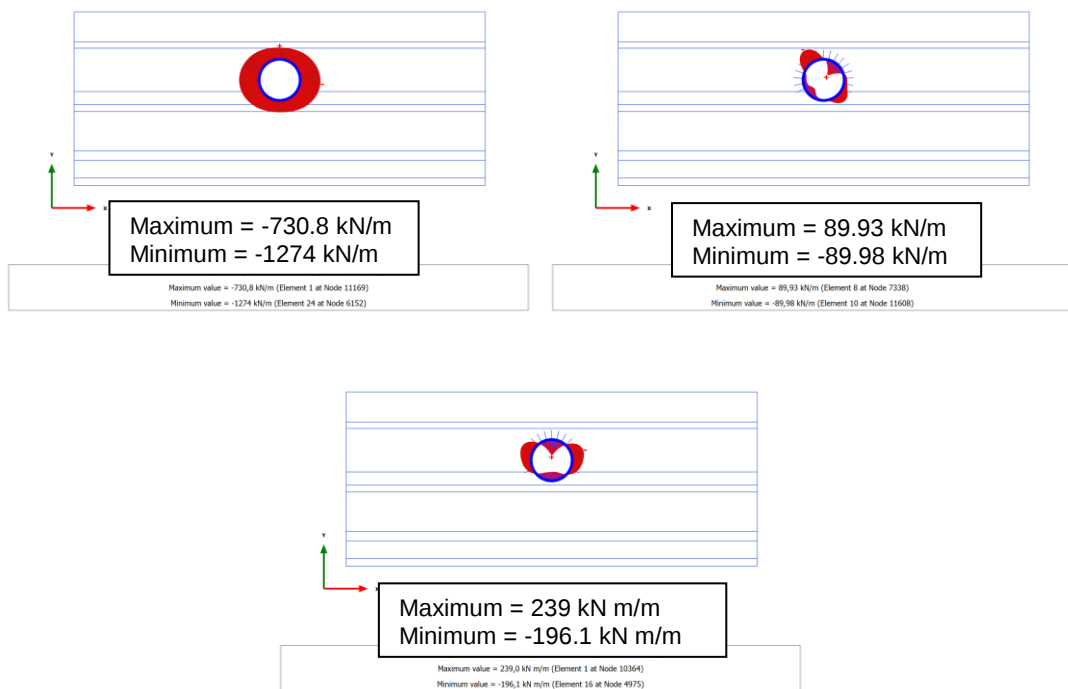
Gambar 76 Hasil analisis gaya dalam terowongan tunnel TBM DK2+609.97 (potongan 2)



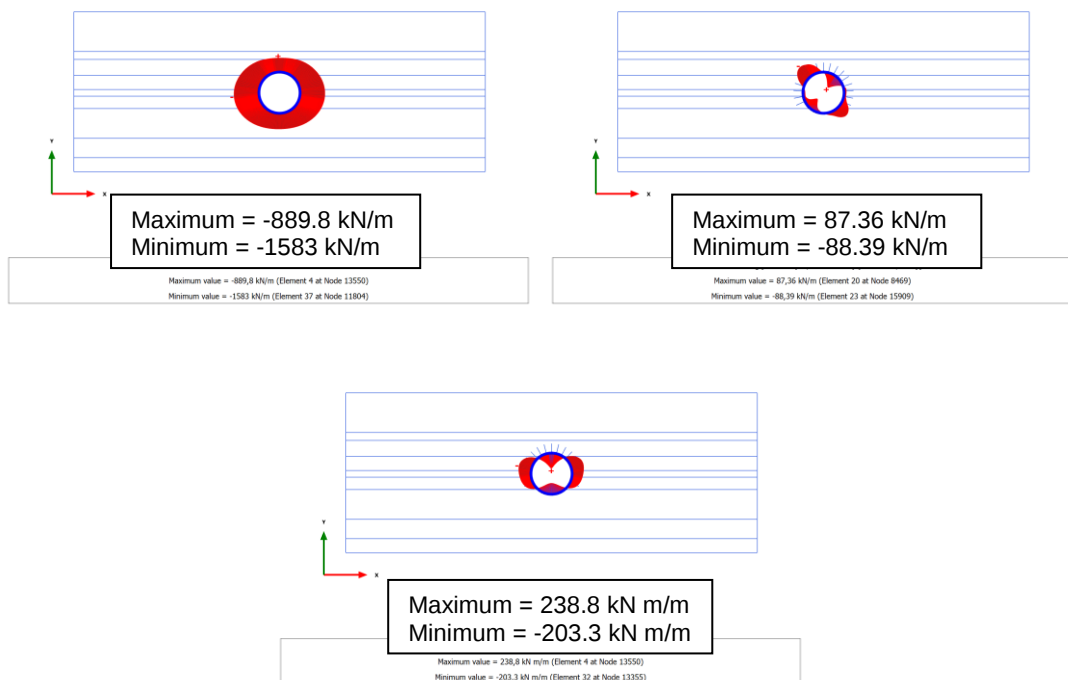
Gambar 77 Hasil analisis gaya dalam terowongan tunnel TBM DK2+730.06 (potongan 3).



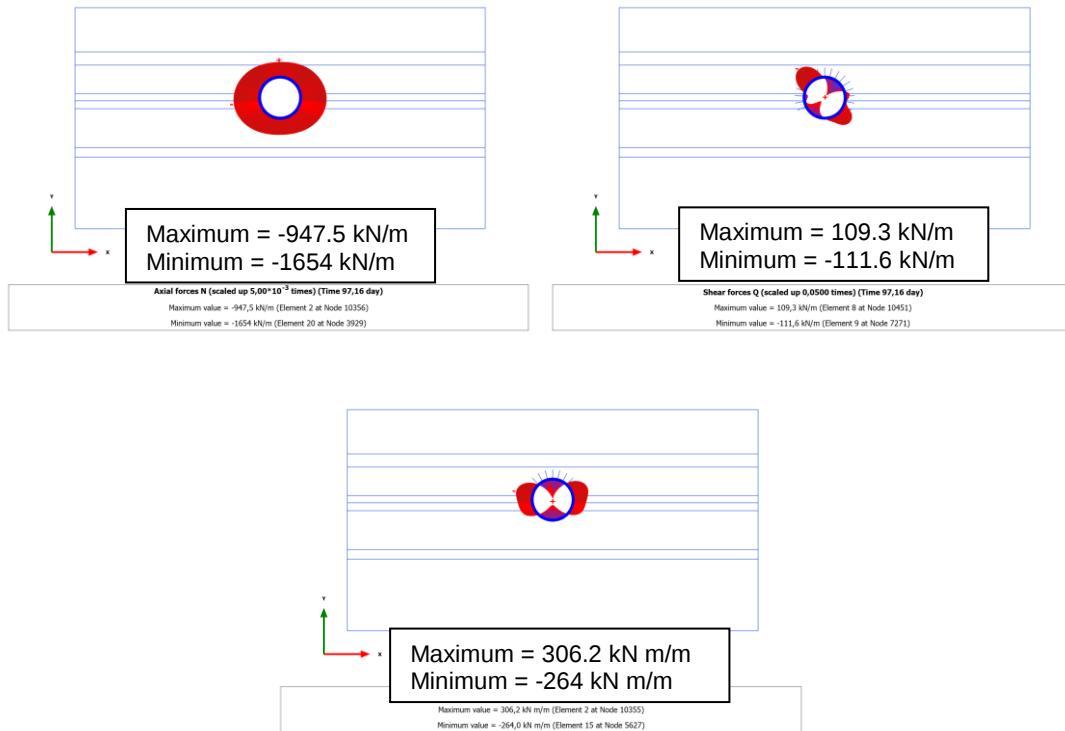
Gambar 78 Hasil analisis gaya dalam terowongan tunnel TBM DK2+823.23 (potongan 4)



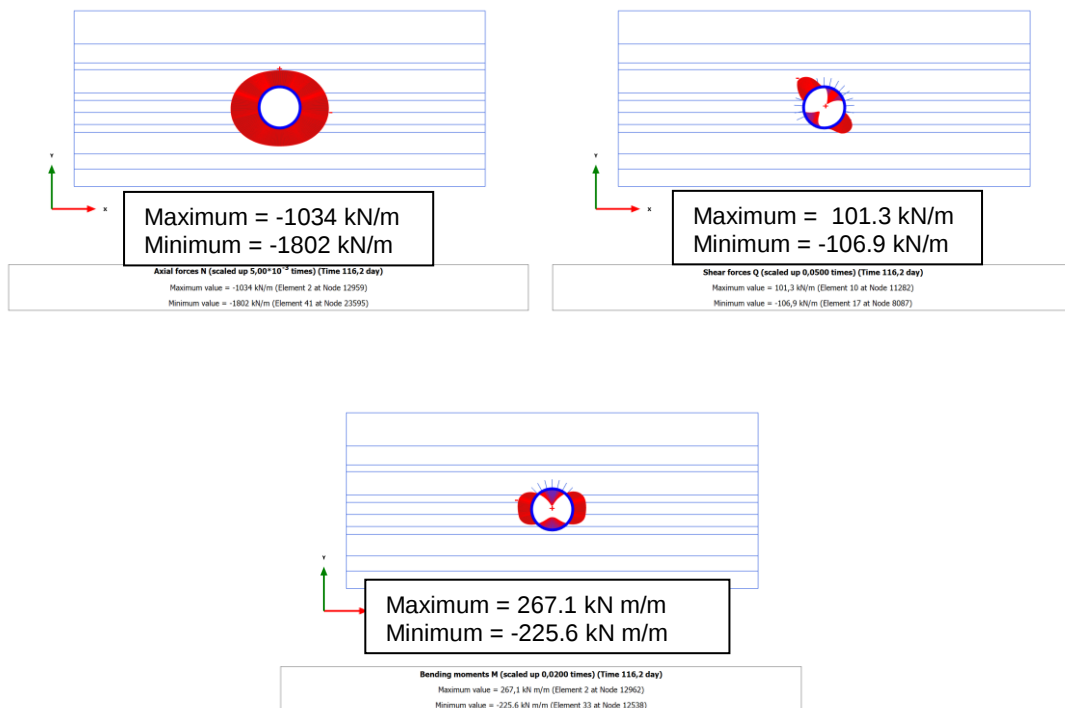
Gambar 79 Hasil analisis gaya dalam terowongan tunnel TBM DK2+919.39 (potongan 5)



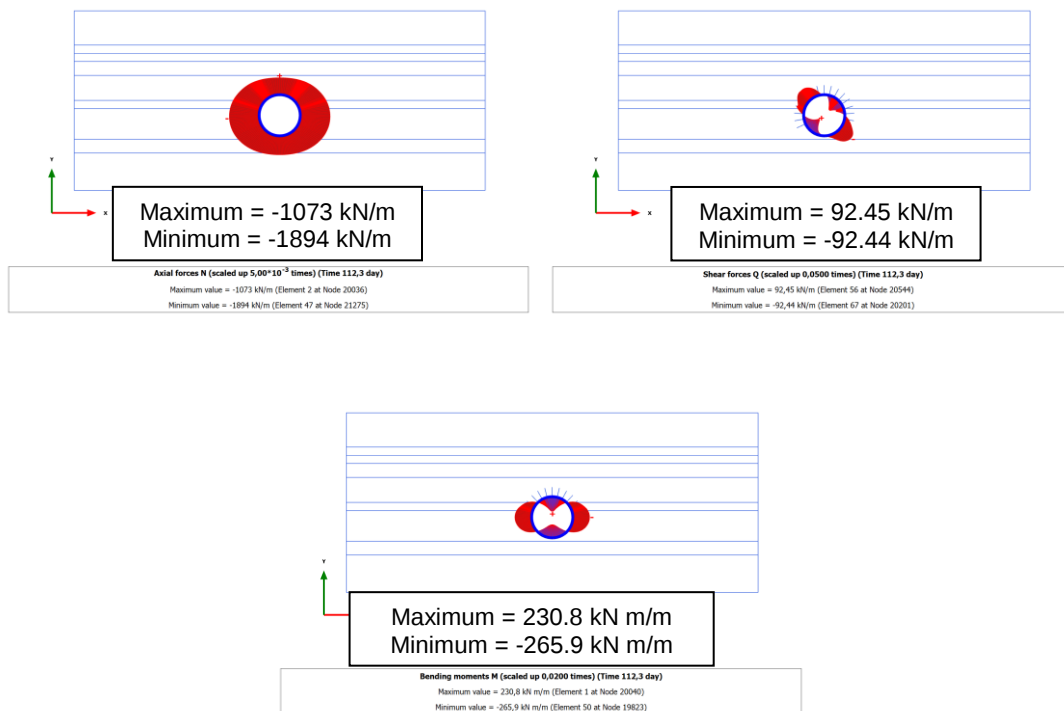
Gambar 80 Hasil analisis gaya dalam terowongan tunnel TBM DK3+049.27 (potongan 6)



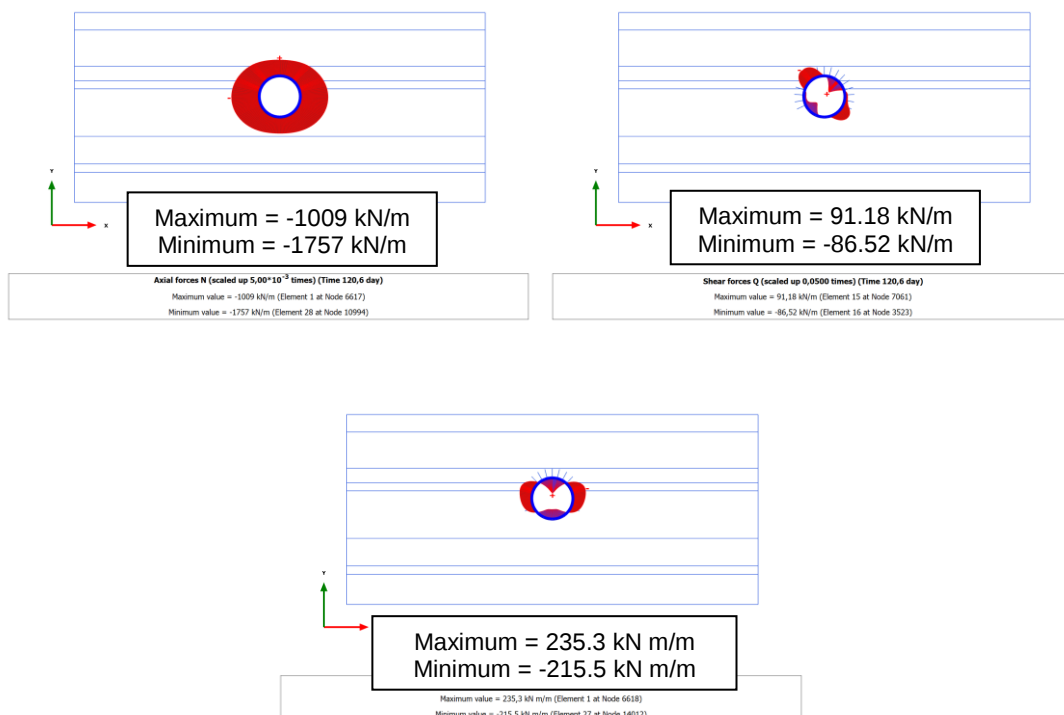
Gambar 81 Hasil analisis gaya dalam terowongan tunnel TBM DK3+156.51 (potongan 7)



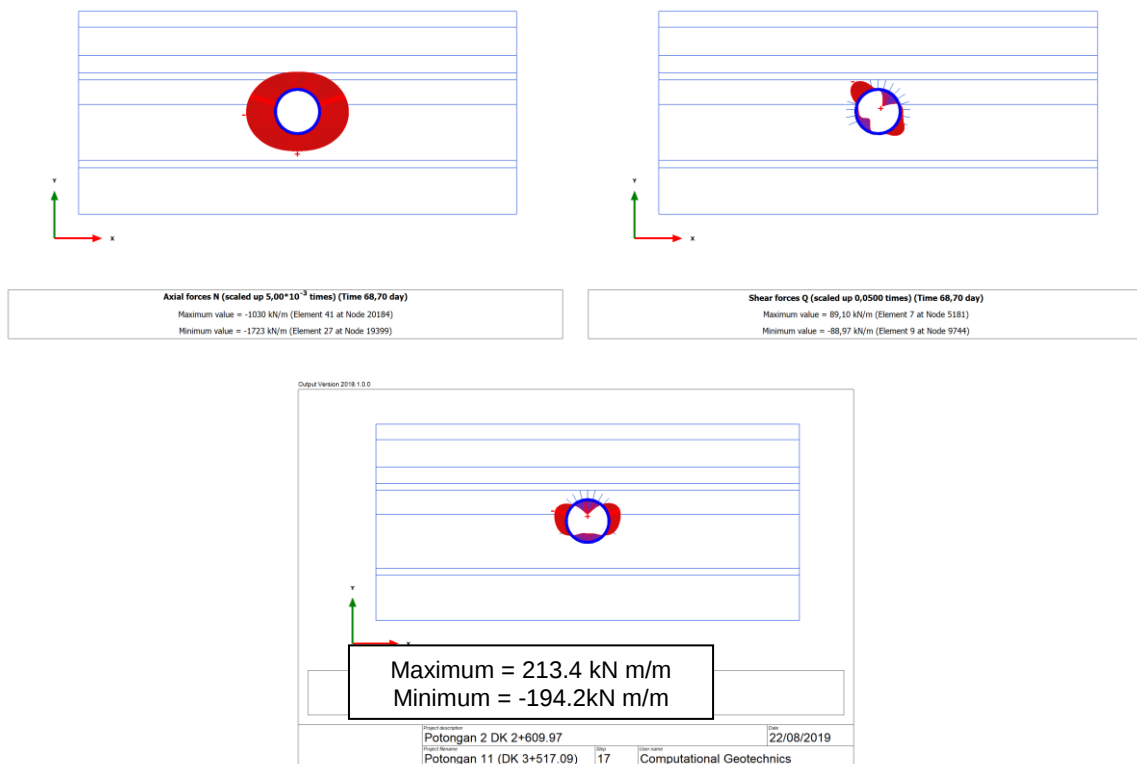
Gambar 82 Hasil analisis deformasi terowongan tunnel TBM DK3+218.66 (potongan 8)



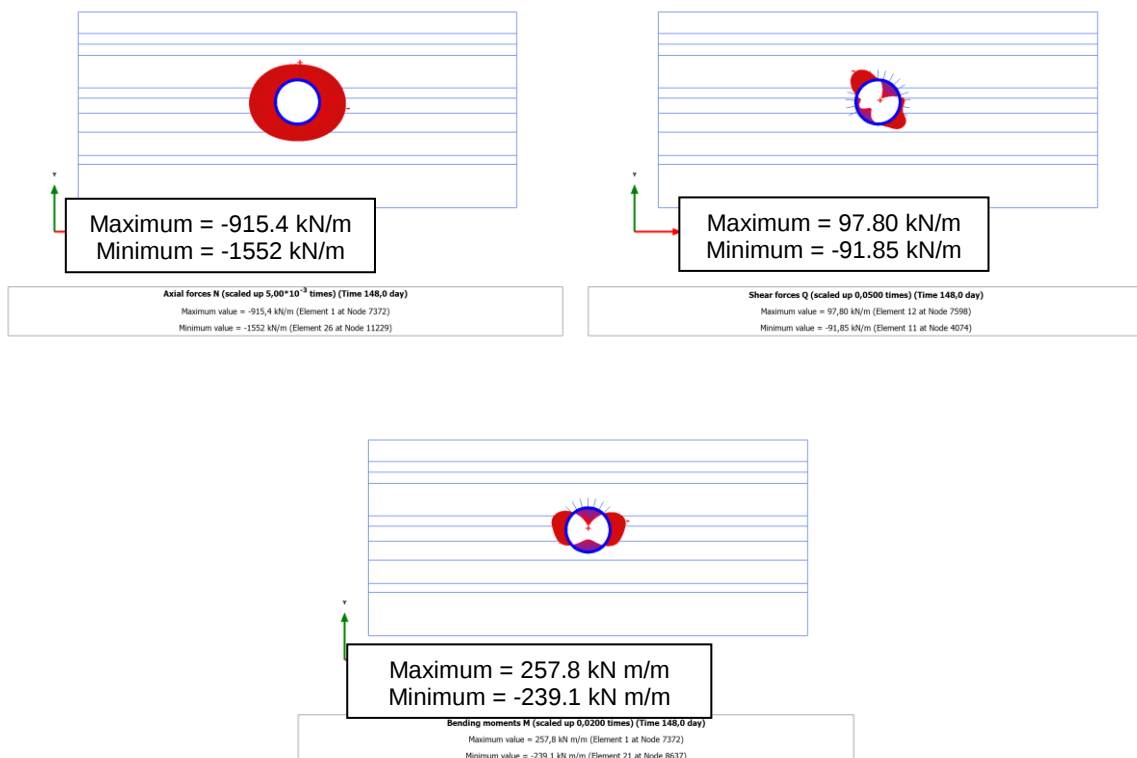
Gambar 83 Hasil analisis gaya dalam terowongan tunnel TBM DK3+348.67 (potongan 9)



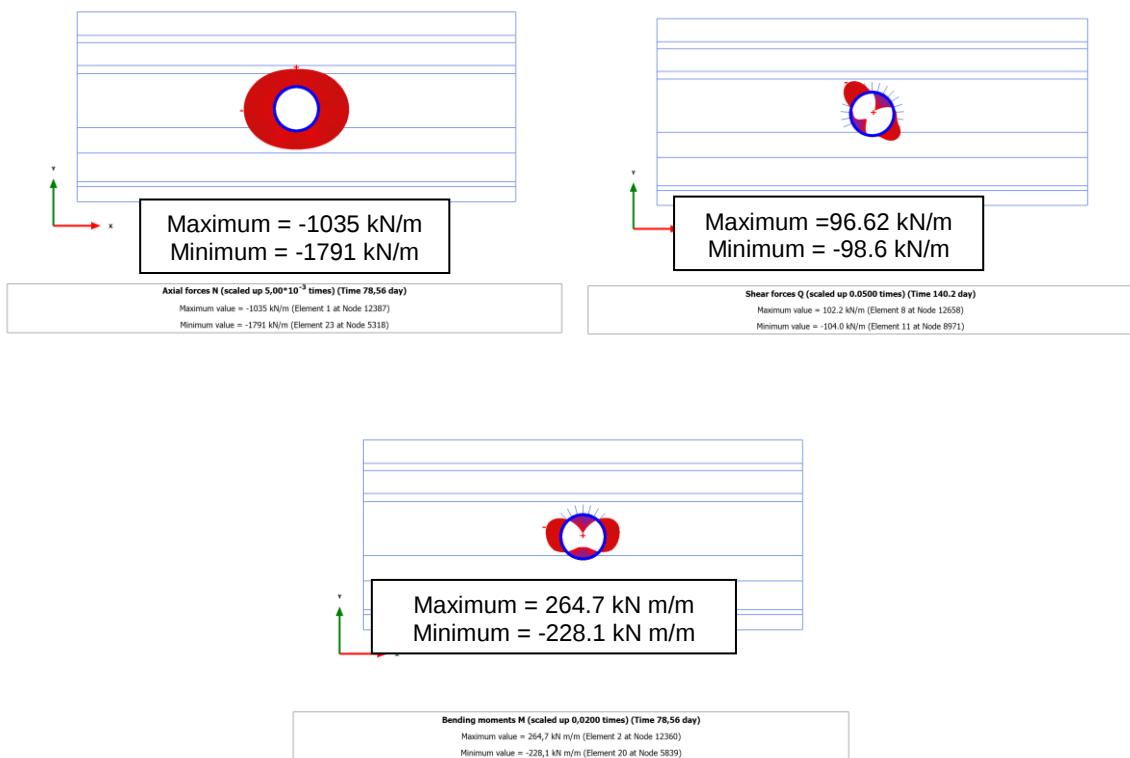
Gambar 84 Hasil analisis gaya dalam terowongan tunnel TBM DK3+438 (potongan 10)



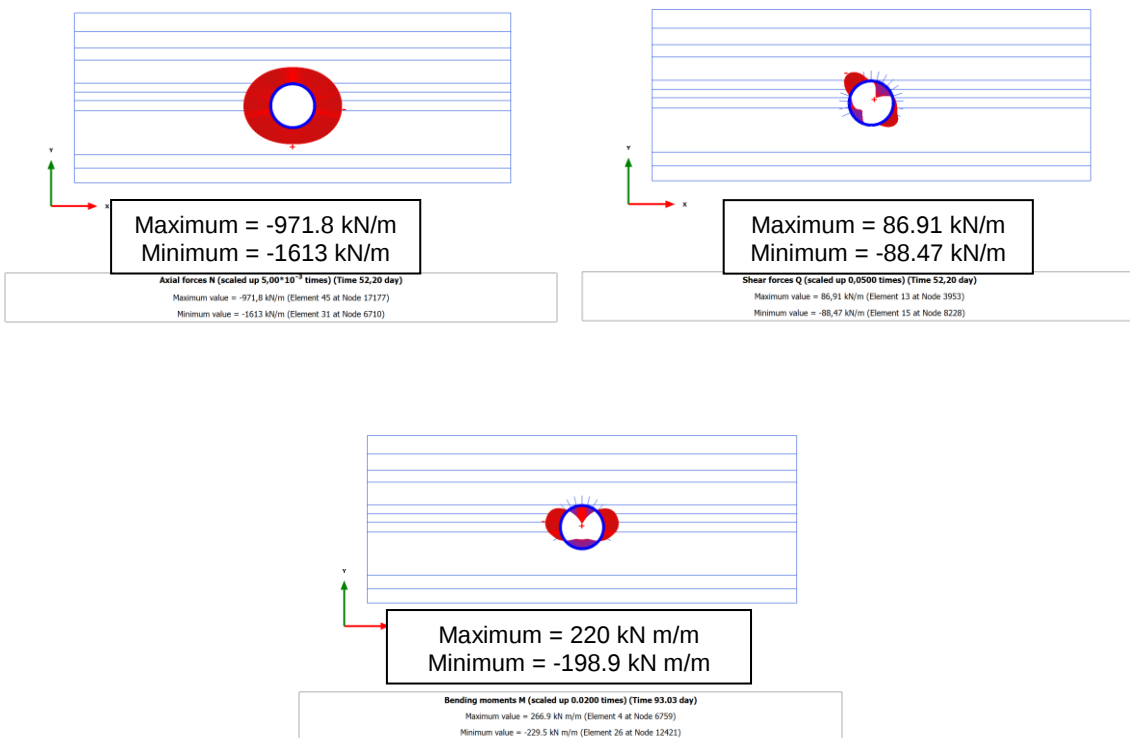
Gambar 85 Hasil analisis gaya dalam terowongan tunnel TBM DK3+517.09 (potongan 11)



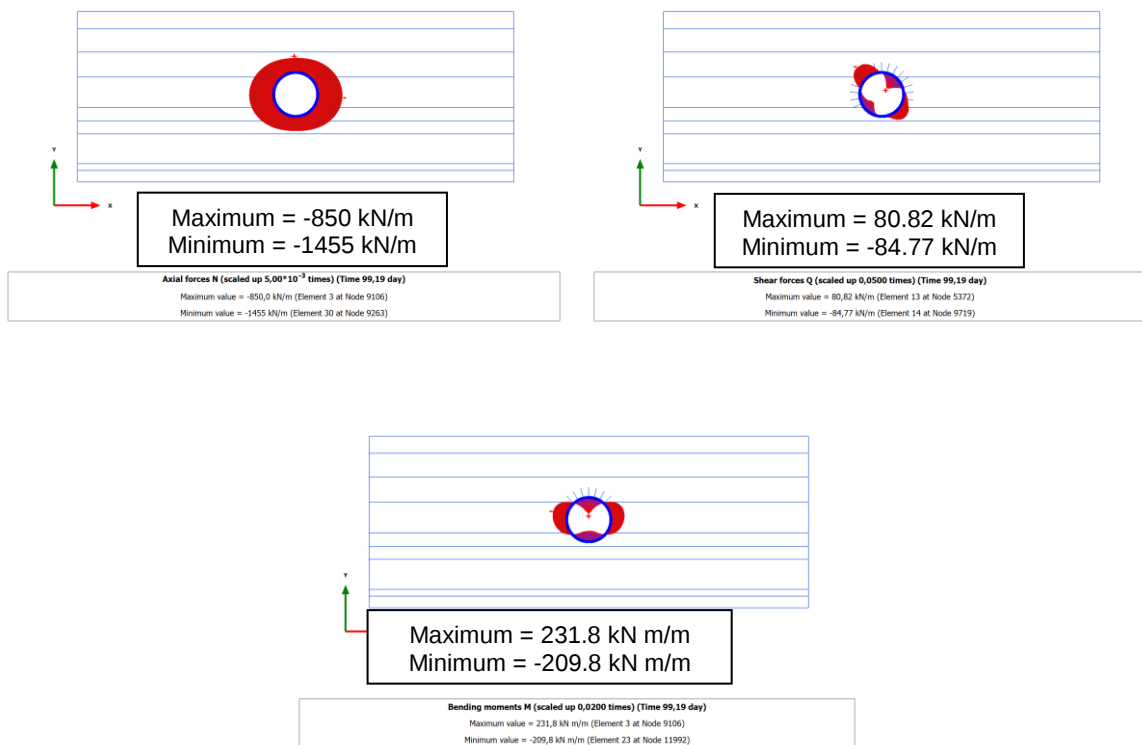
Gambar 86 Hasil analisis gaya dalam terowongan tunnel TBM DK3+624.35 (potongan 12)



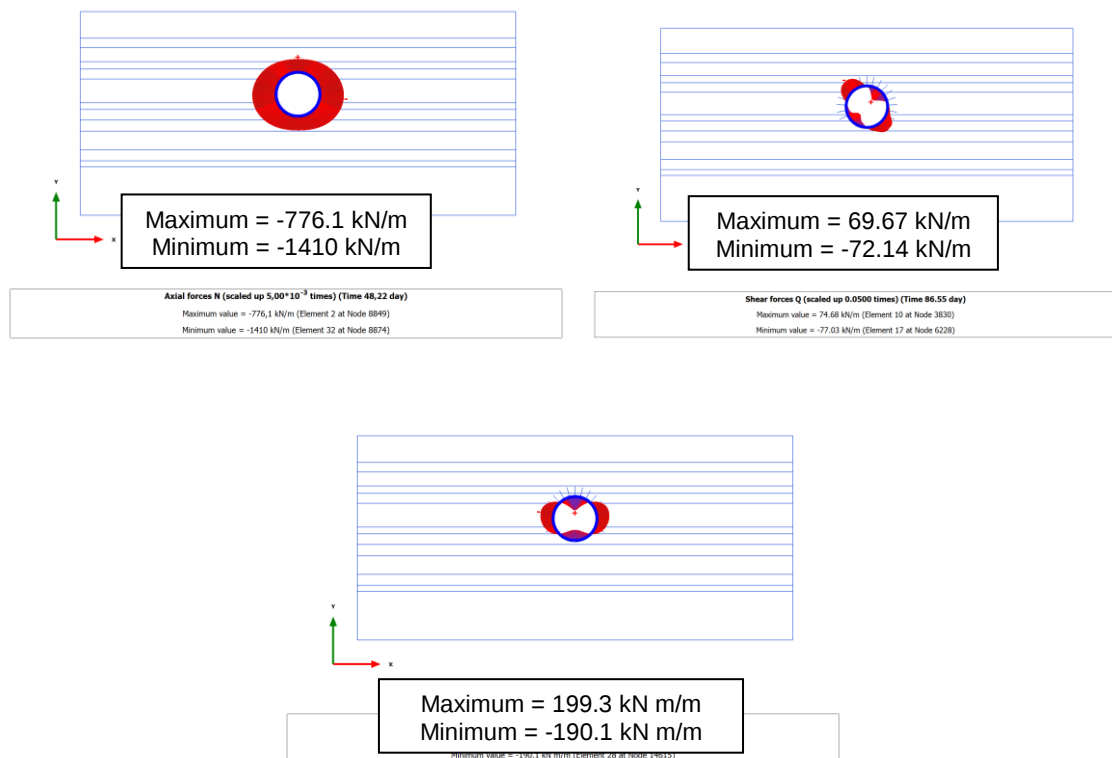
Gambar 87 Hasil analisis gaya dalam terowongan tunnel TBM DK3+705.55 (potongan 13)



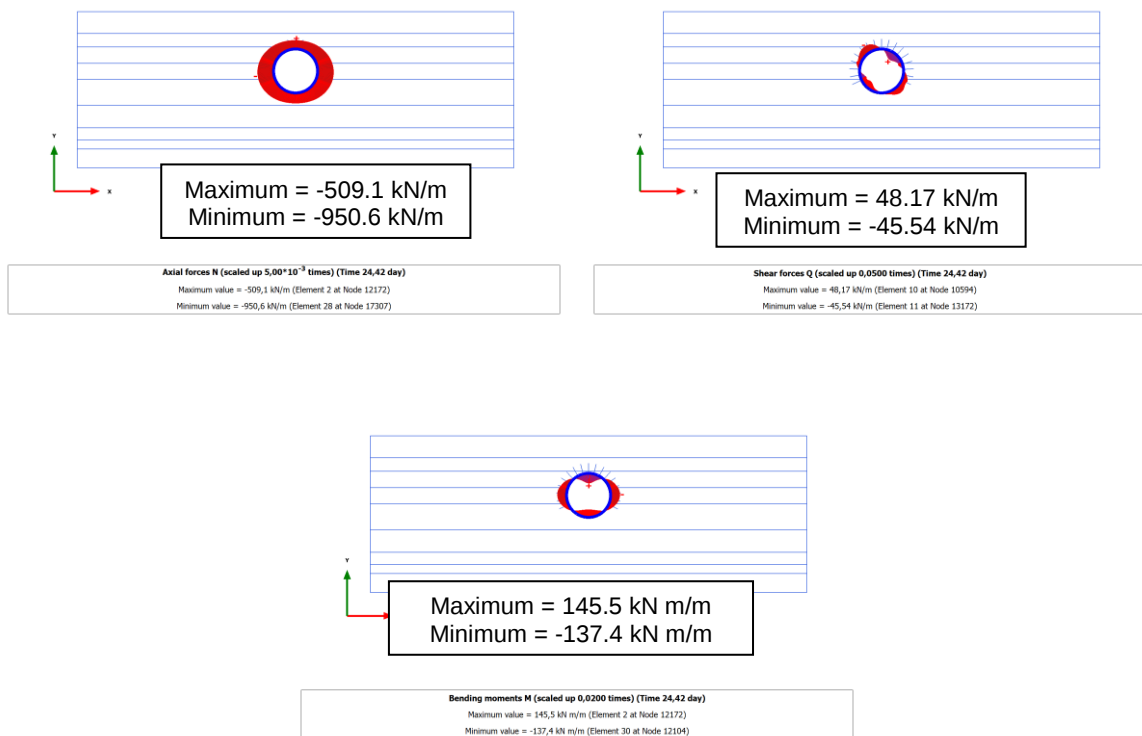
Gambar 88 Hasil analisis gaya dalam terowongan tunnel DK3 + 821.34 (potongan 14)



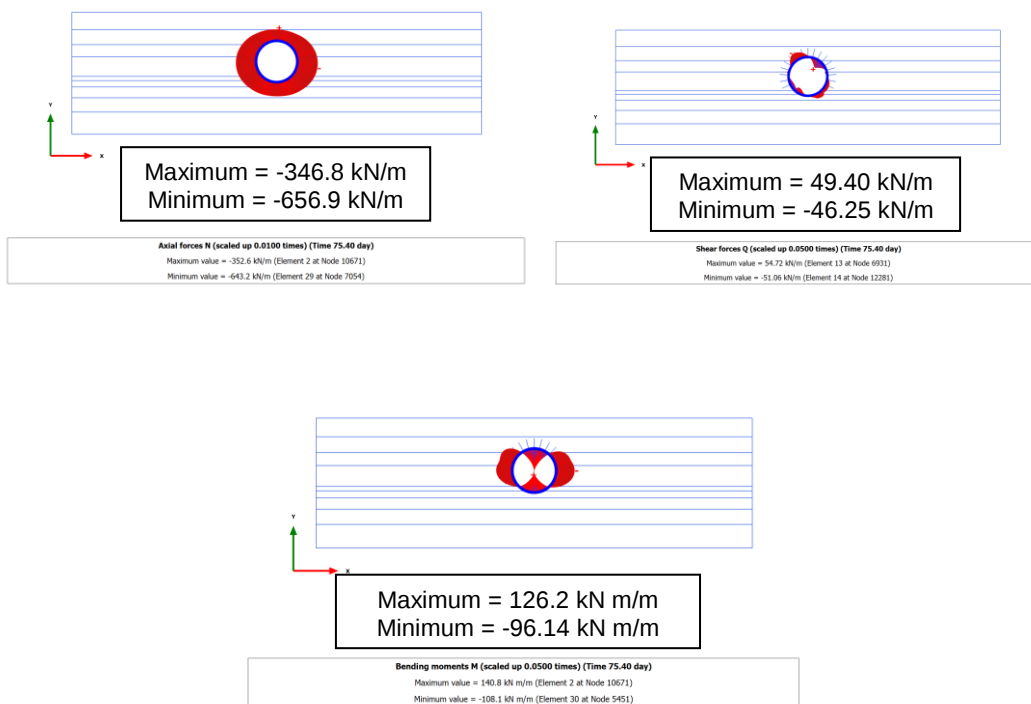
Gambar 89 Hasil analisis gaya dalam terowongan tunnel DK3 + 931.25 (potongan 15)



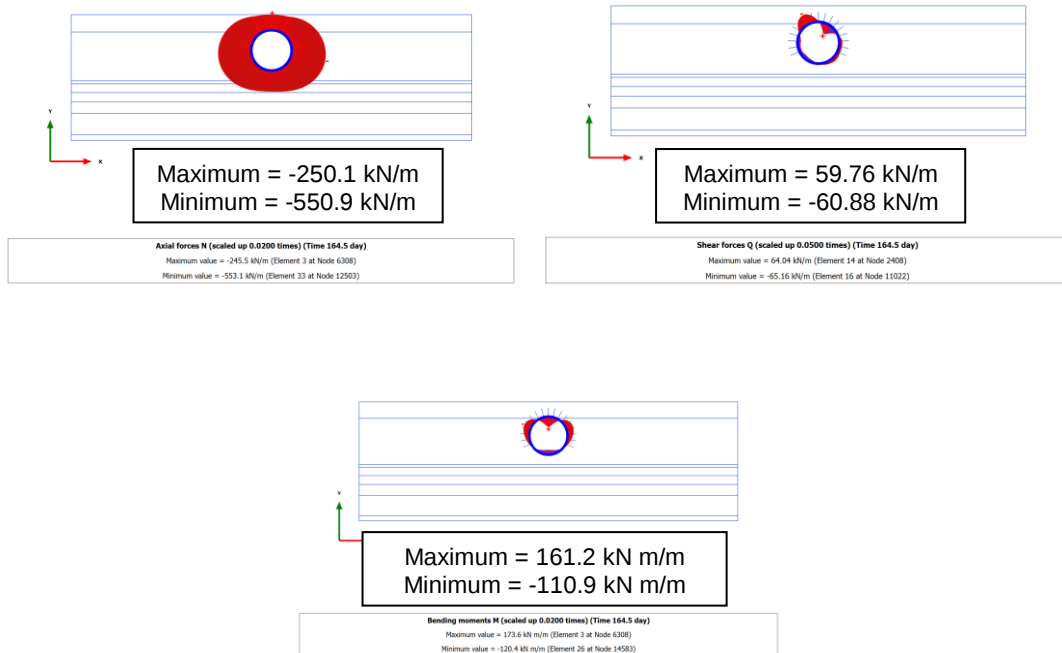
Gambar 90 Hasil analisis gaya dalam terowongan tunnel DK4 + 041.14 (potongan 16)



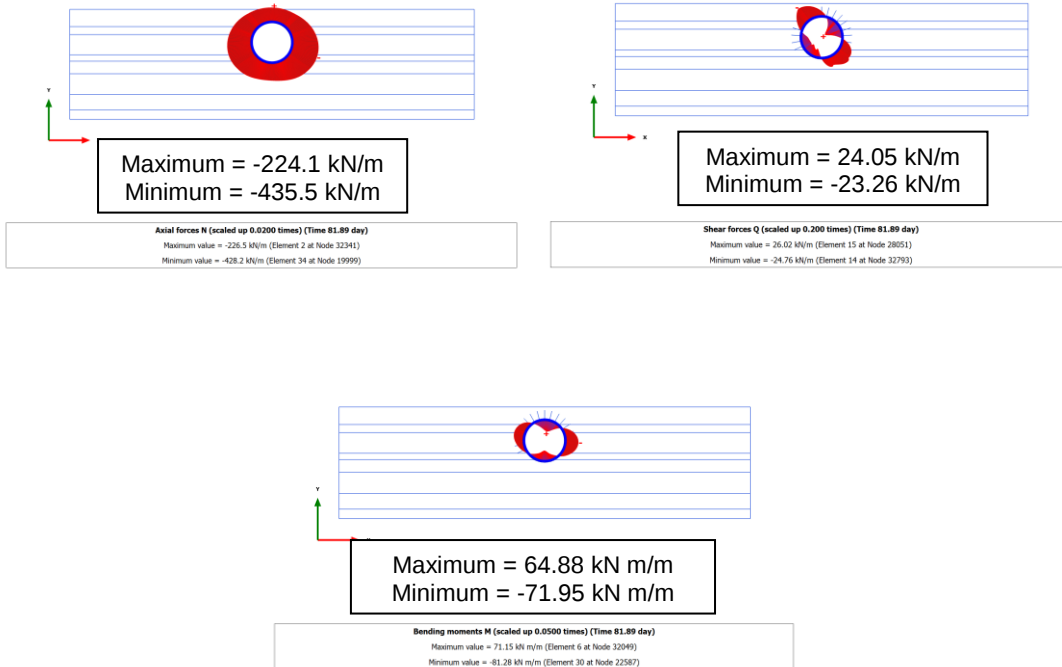
Gambar 91 Hasil analisis gaya dalam terowongan tunnel DK4 + 151.15 (potongan 17)



Gambar 92 Hasil analisis gaya dalam terowongan tunnel DK4 + 248.51 (potongan 18)



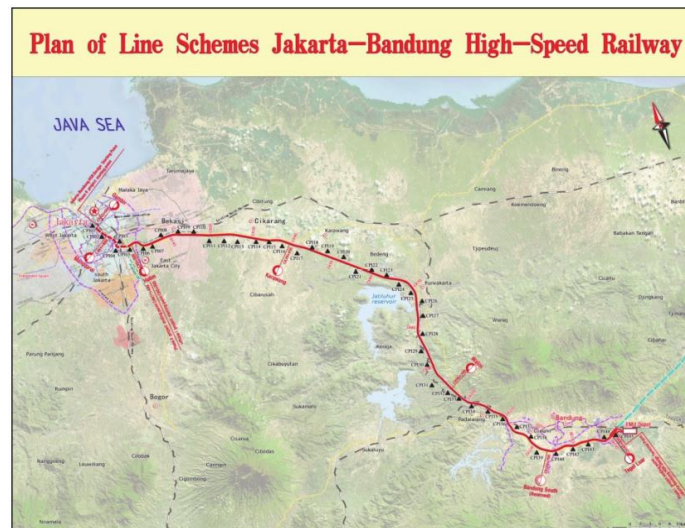
Gambar 93 Hasil analisis gaya dalam terowongan tunnel DK4 + 330.56 (potongan 19)



Gambar 94 Hasil analisis gaya dalam terowongan tunnel DK4 + 446.31 (potongan 20)

14. PEMODELAN TUNNEL TBM TERHADAP BEBAN GEMPA

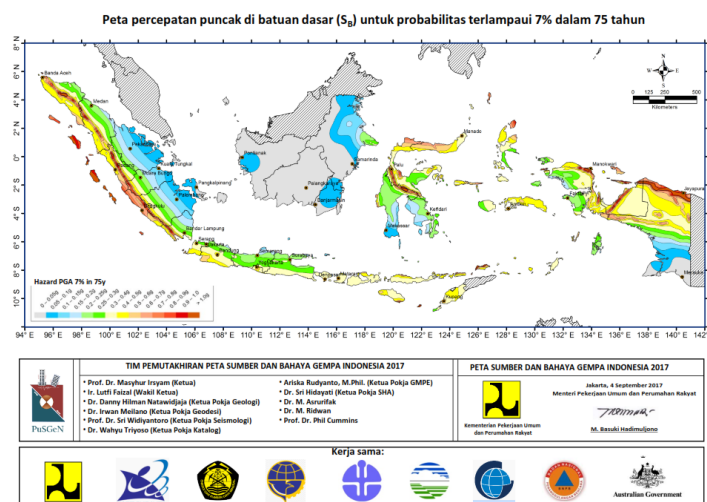
Analisis deformasi aksial dilakukan dengan menambahkan beban gempa berdasarkan peta gempa 2017. Percepatan tanah puncak gempa maksimum yang dipertimbangkan untuk bangunan bawah seperti yang tertera dalam SNI 8460 tahun 2017 (Bab 12), percepatan tanah puncak dengan 2% kemungkinan terlampaui dalam kurun waktu 50 tahun dapat digunakan sebagai acuan. Lokasi jalur kereta cepat Jakarta-Bandung dapat dilihat pada **Gambar 91**.



Gambar 95 Lokasi jalur kereta cepat Bandung – Jakarta

Berdasarkan rencana jalur kereta api cepat Jakarta – Bandung seperti yang tercantum pada **Gambar 95**, selanjutnya dilakukan penentuan nilai PGA berdasarkan peta gempa 2017 seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 96**.

Berdasarkan peta gempa 2017, dipilih nilai PGA sesuai dengan lokasi pekerjaan. Nilai PGA untuk lokasi yang ditinjau berada pada zona kuning dengan nilai **PGA 0.3-0.4**. Analisis beban gempa pada program numerik Plaxis 3D dilakukan dengan pemodelan pseudo-static, dengan input yang diperlukan yaitu nilai percepatan puncak di permukaan. Nilai percepatan didapatkan dengan menentukan kelas situs, faktor amplifikasi, dan SPT desain rata-rata.



Gambar 96 Peta gempa 2017 untuk periode ulang 1000 tahun.

A. Perhitungan NSPT desain rata-rata

$$\overline{N}_{60} = \frac{\sum di}{\sum \frac{di}{N}}$$

dimana: di merupakan ketebalan lapisan dan N merupakan nilai SPT setiap ketebalan lapisan

Tabel 53 NSPT Desain untuk Menentukan SPT Rata-rata di Tunel DK3+438

DI	N	DI/N
12	3	4
23	8	3
28	50	1
4	50	0
13	42	0
18	28	1
5	50	0
37	28	1
140	Total	10

$$\overline{N}_{60} = \frac{140}{10} = 14$$

B. Penentuan Klasifikasi Situs berdasarkan NSPT rata-rata

Tabel 54 Klasifikasi situs berdasarkan SNI 8460

Klasifikasi Situs	$\overline{v}_s$ (m/detik)	$\overline{N}_{SPT}$ atau $\overline{N}_{SPT_{th}}$	$\overline{s}_u$ (kPa)
SA (batuan keras)	>1.500	N/A	N/A
SB (batuan dasar)	750 sampai 1.500	N/A	N/A
SC (tanah keras, sangat padat, dan batuan lunak)	350 sampai 750	>50	≥ 100
SD (tanah sedang)	175 sampai 350	15 sampai 50	50 sampai 100
SE (tanah lunak)	<175	<15	<50
	Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 m dengan karakteristik sebagai berikut:		
	1. Indeks Plastisitas, $PI > 20$, 2. Kadar air, $(w) \geq 40\%$, dan 3. Kuat geser niralir, $\overline{s}_u < 25$ kPa		
SF (tanah khusus, yang membutuhkan penyelidikan geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik-situs)	Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik seperti: - Rawan dan berpotensi gagal atau runtuh akibat beban gempa seperti mudah likuifaksi, lempung sangat sensitif, tanah tersementasi lemah - Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan, $H > 3$ m) - Lempung berplastisitas tinggi (ketebalan, $H > 7,5$ m dengan Indeks Plastisitas, $PI > 75$) - Lapisan lempung lunak/setengah teguh dengan ketebalan $H > 35$ m dengan $\overline{s}_u < 50$ kPa		

Keterangan: N/A = tidak dapat dipakai

C. Faktor Amplifikasi

Berdasarkan kelas situs yang didapat yaitu **Tanah Lunak (SE)**, didapatkan faktor amplifikasi sebagai berikut:

Tabel 55 Faktor amplifikasi berdasarkan SNI 8460

Kelas situs	$PGA \leq 0,1$ $S_s \leq 0,25$	$PGA = 0,2$ $S_s = 0,5$	$PGA = 0,3$ $S_s = 0,75$	$PGA = 0,4$ $S_s = 1,0$	$PGA \geq 0,5$ $S_s \geq 1,25$
Batuan keras (SA)	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Batuan (SB)	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Tanah keras (SC)	1,2	1,2	1,1	1,0	1,0
Tanah sedang (SD)	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0
Tanah lunak (SE)	2,5	1,7	1,2	0,9	0,9
Tanah khusus (SF)	SS	SS	SS	SS	SS

Keterangan: Untuk nilai-nilai antara dapat dilakukan interpolasi linear

Faktor amplifikasi (F_{PGA}) yang didapat berdasarkan tabel di atas, menunjukkan nilai **$F_{PGA} = 1.2$** (untuk $PGA = 0.3$)

D. Percepatan Puncak

Nilai percepatan puncak di permukaan diambil dengan mengalikan terhadap koefisien horizontal yang didapat dengan persamaan $kh = (1.45-PGA)*PGA$ (Choukier,1997) sehingga didapat:

$$\text{Untuk } PGA \text{ } 0.3 \rightarrow a = 0.3 \times 1.2 \times ((1.45 - 0.3) \times 0.3) = 0.1242 \text{ g}$$

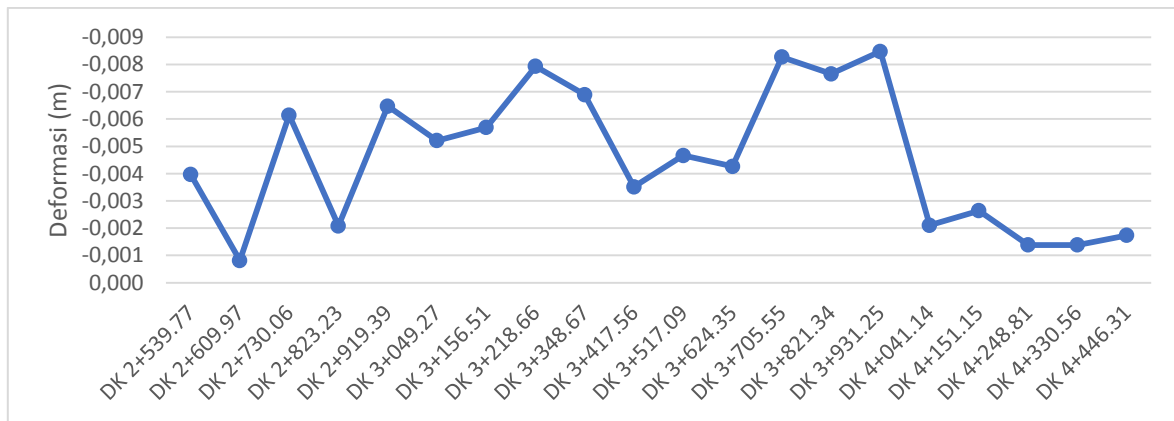
E. Deformasi Arah Aksial Akibat Beban Gempa

Berdasarkan hasil analisis dengan menambahkan beban gempa, didapatkan deformasi aksial seperti yang ditunjukkan pada **Tabel 56**.

Tabel 56 Rekapitulasi Deformasi pada Terowongan Bagian Atas (Crown) Akibat Beban Gempa

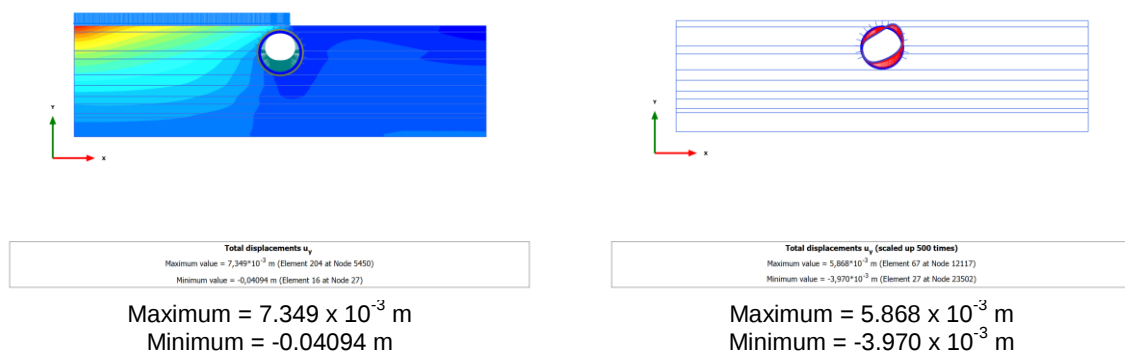
No. Potongan	Lokasi	Id Borlog	Beban Diatas Terowongan			Deformasi Tunnel
			Kiri	Tengah	Kanan	
1	DK 2+539.77	17-ZD-008	Gedung		-	-0.004
2	DK 2+609.97	17-ZD-012	Gedung		-	-0.001
3	DK 2+730.06	16-ZD-726	Gedung		Jalan	-0.006
4	DK 2+823.23	16-ZD-727	Gedung	-	Jalan	-0.002
5	DK 2+919.39	16-ZD-730	Gedung	Jalan		-0.006
6	DK 3+049.27	16-ZD-733	Jalan		-	-0.005
7	DK 3+156.51	16-ZD-735	Jalan		-	-0.006
8	DK 3+218.66	16-ZD-737	Jalan		Gedung	-0.008
9	DK 3+348.67	16-ZD-033	Jalan		Gedung	-0.007
10	DK 3+417.56	16-ZD-742	Jalan		Gedung	-0.004
11	DK 3+517.09	16-ZD-744	Jalan	-	Jalan	-0.005
12	DK 3+624.35	16-ZD-034	Jalan	-	Gedung	-0.004
13	DK 3+705.55	16-ZD-750	Jalan		Gedung	-0.008
14	DK 3+821.34	16-ZD-753	Jalan		Gedung	-0.008
15	DK 3+931.25	16-ZD-755	-	Jalan	Gedung	-0.008
16	DK 4+041.14	16-ZD-758	Jalan		Gedung	-0.002
17	DK 4+151.15	16-ZD-760	Jalan		Gedung	-0.003
18	DK 4+248.81	16-ZD-477	Jalan		Gedung	-0.001
19	DK 4+330.56	16-ZD-767	Jalan		Gedung	-0.001
20	DK 4+446.31	16-ZD-770	Jalan		Gedung	-0.002

Analisis numerik 2D dengan menambahkan beban gempa sesuai dengan nilai PGA yang tercantum dalam peta gempa 2017 dilakukan terhadap nilai PGA minimum dan maksimum pada zona tersebut. Besarnya deformasi aksial yang terjadi pada titik tinjau tidak menunjukkan perbedaan yang signifikan. Besarnya deformasi aksial yang terjadi pada analisis dengan nilai PGA 0.3, menunjukkan angka maksimum sebesar 0.008 m.

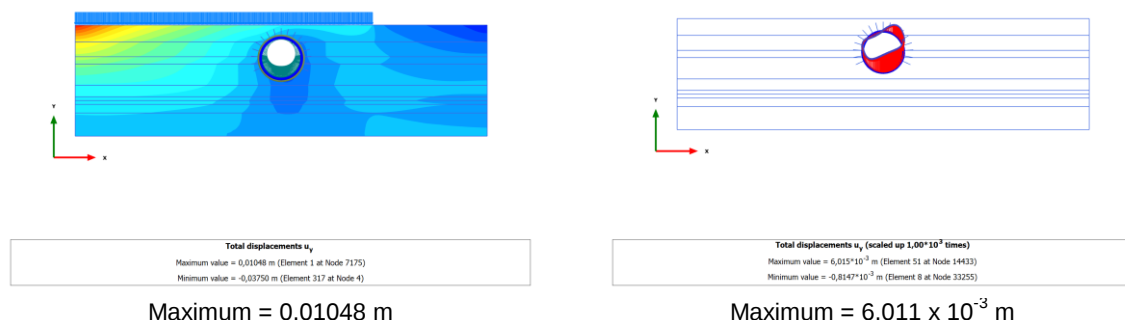


Gambar 97 Deformasi total aksial pada titik tinjau A akibat gempa.

Deformasi kritis yang direncanakan yaitu sebesar 0.07 m, sehingga hasil analisis menunjukkan bahwa besarnya deformasi aksial yang terjadi belum menyentuh nilai kritisnya. Hasil analisis berupa gambar deformasi akibat gempa dengan PGA 0.3 ditunjukkan pada **Gambar 93** hingga **Gambar 117** di bawah ini.



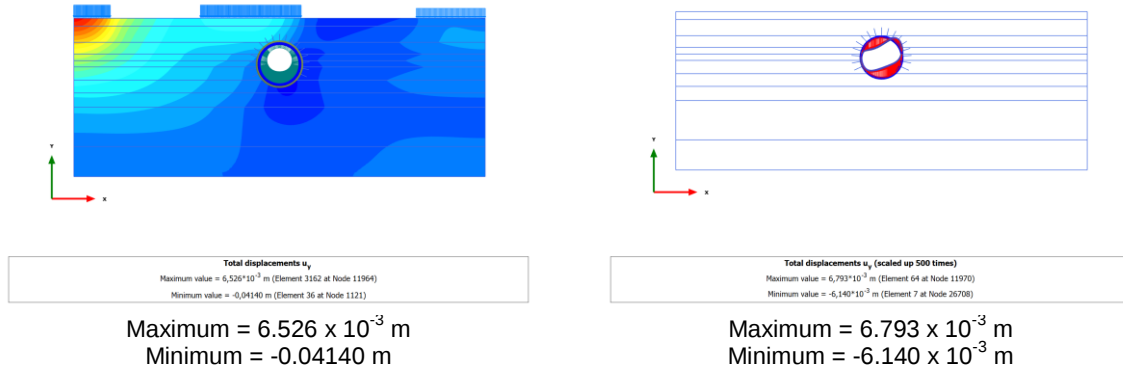
Gambar 98 Hasil analisis deformasi kondisi dengan gempa PGA 0.3g di tunnel TBM DK2+539.77 pada konsolidasi minimum *excess pore presurre* (potongan 1)



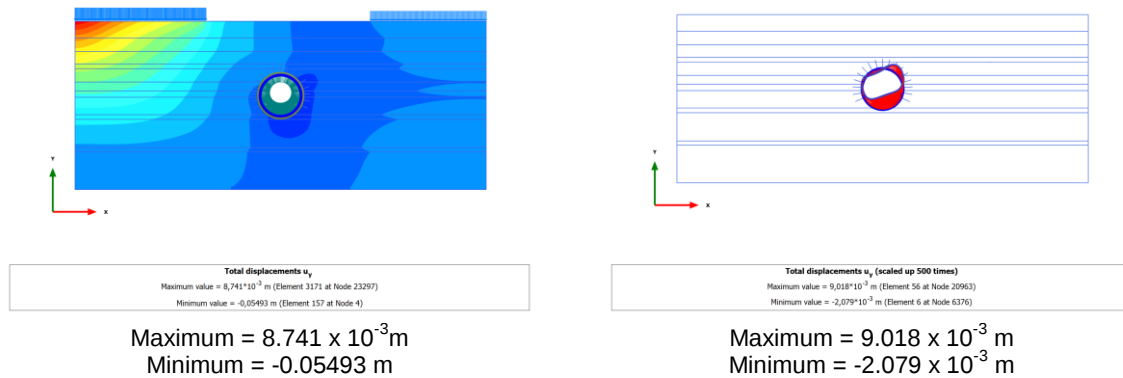
Minimum = -0.0375 m

Minimum = -0.8147×10^{-3} m

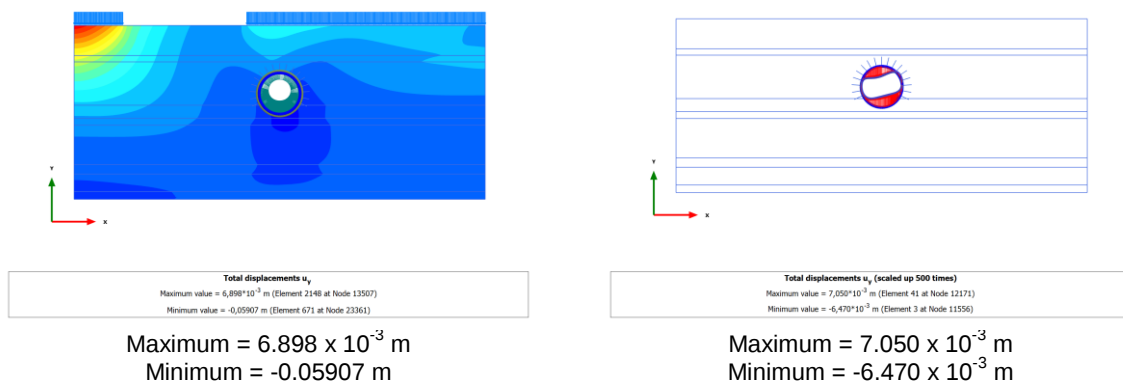
Gambar 99 Hasil analisis deformasi kondisi dengan gempa PGA 0.3g di tunnel TBM DK2+609.97 pada konsolidasi *minimum excess pore persurre* (potongan 2)



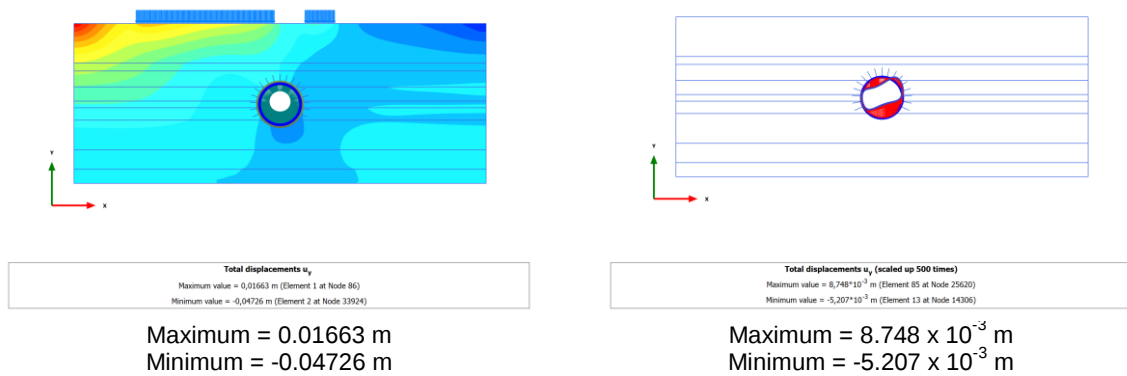
Gambar 100 Hasil analisis deformasi kondisi dengan gempa PGA 0.3g di tunnel TBM DK2+730.06 pada konsolidasi *minimum excess pore presurre* (potongan 3)



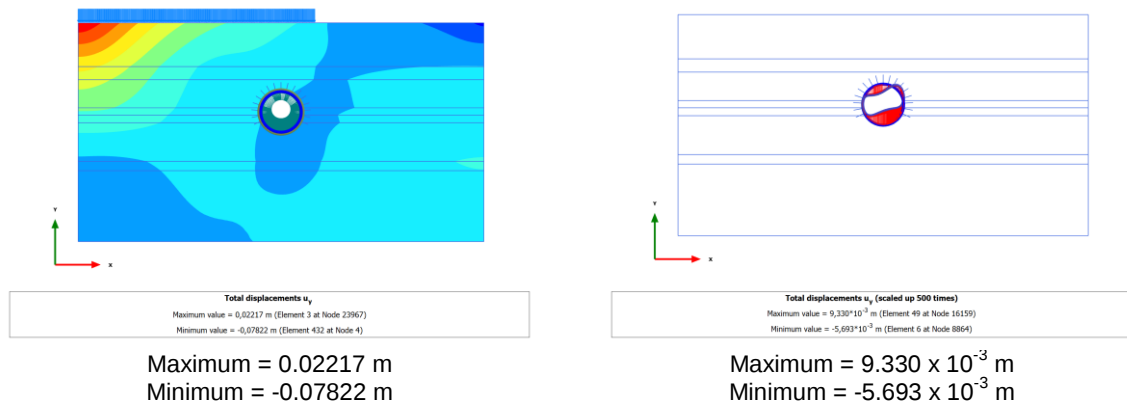
Gambar 101 Hasil analisis deformasi kondisi dengan gempa PGA 0.3g di tunnel TBM DK2+823.23 pada konsolidasi *minimum excess pore presurre* (potongan 4)



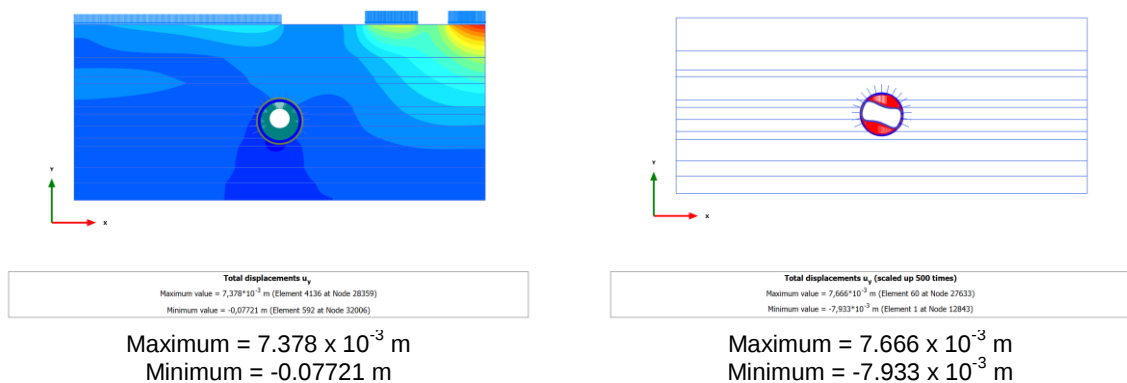
Gambar 102 Hasil analisis deformasi kondisi dengan gempa PGA 0.3g di tunnel TBM DK2+919.39 pada konsolidasi *minimum excess pore presurre* (potongan 5)



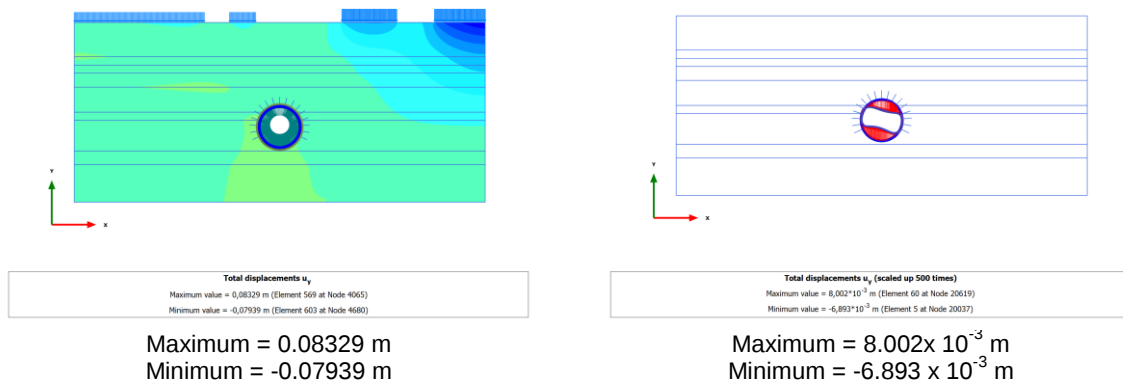
Gambar 103 Hasil analisis deformasi kondisi dengan gempa PGA 0.3g di tunnel TBM DK3+049.27 pada konsolidasi *minimum excess pore presurre* (potongan 6)



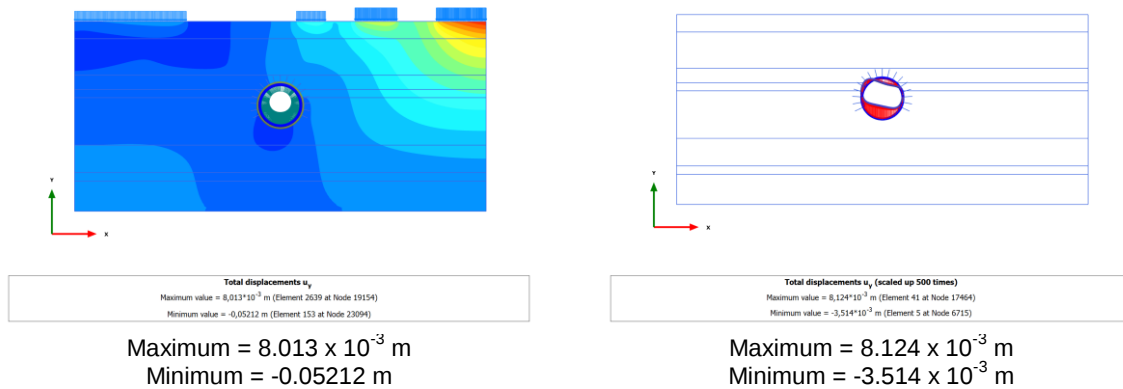
Gambar 104 Hasil analisis deformasi kondisi dengan gempa PGA 0.3g di tunnel TBM DK3+156.51 pada konsolidasi *minimum excess pore presurre* (potongan 7)



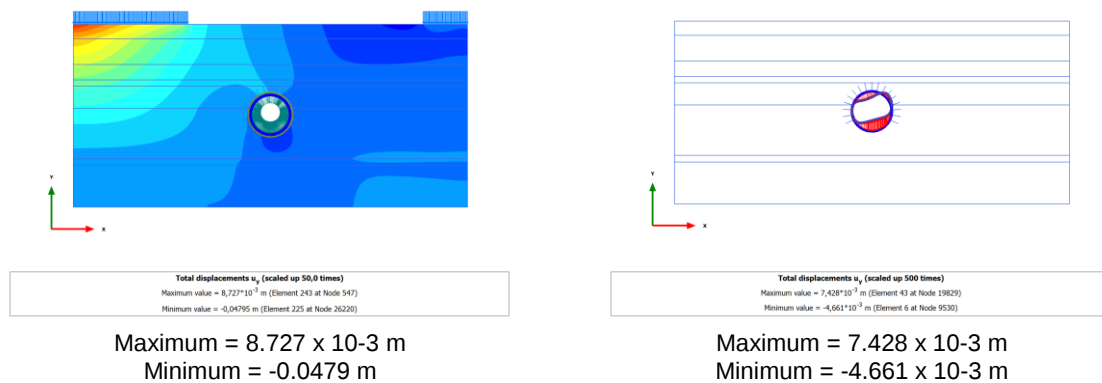
Gambar 105 Hasil analisis deformasi kondisi dengan gempa PGA 0.3g di tunnel TBM DK3+218.66 pada konsolidasi *minimum excess pore presurre* (potongan 8)



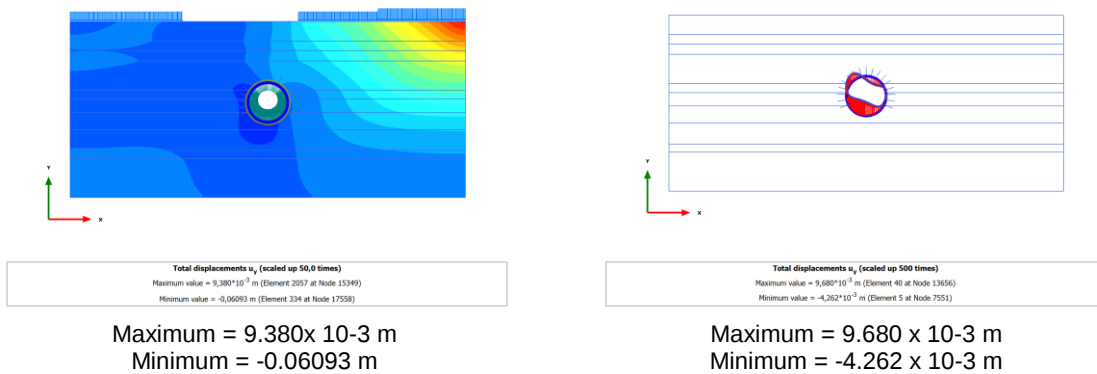
Gambar 106 Hasil analisis deformasi kondisi dengan gempa PGA 0.3g di tunnel TBM DK3+348.67 pada konsolidasi *minimum excess pore presurre* (potongan 9)



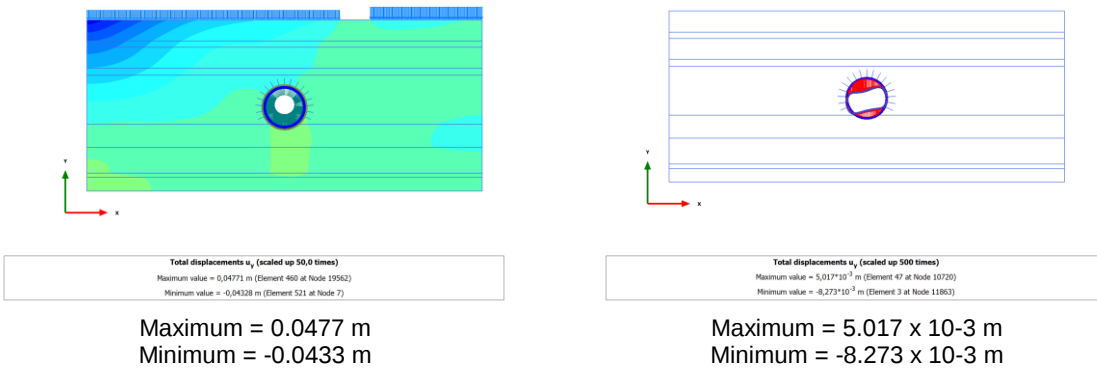
Gambar 107 Hasil analisis deformasi kondisi dengan gempa PGA 0.3g di tunnel TBM DK3+438 pada konsolidasi *minimum excess pore presurre* (potongan 10)



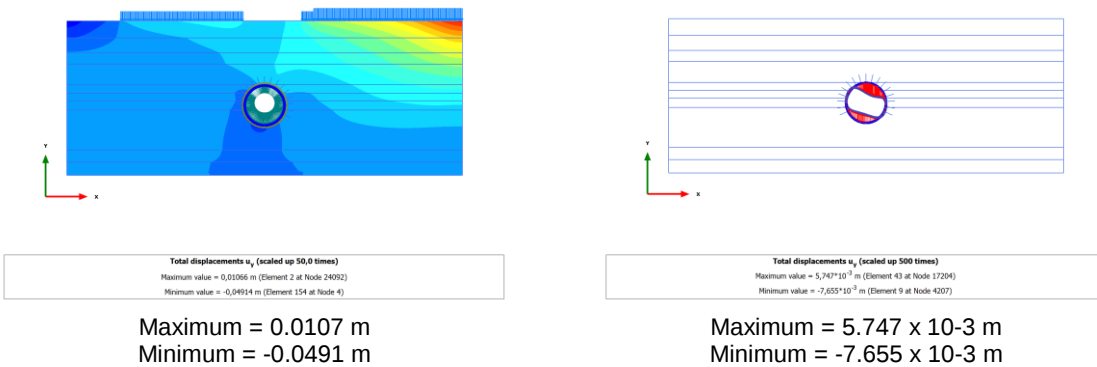
Gambar 108 Hasil analisis deformasi kondisi dengan gempa PGA 0.3g di tunnel TBM DK3+517.09 pada konsolidasi *minimum excess pore presurre* (potongan 11)



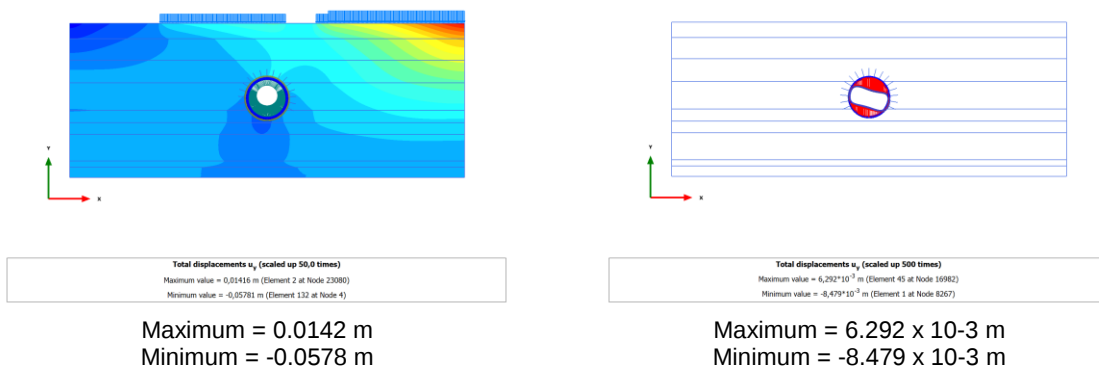
Gambar 109 Hasil analisis deformasi kondisi dengan gempa PGA 0.3g di tunnel TBM DK3+624.35 pada konsolidasi *minimum excess pore presurre* (potongan 12)



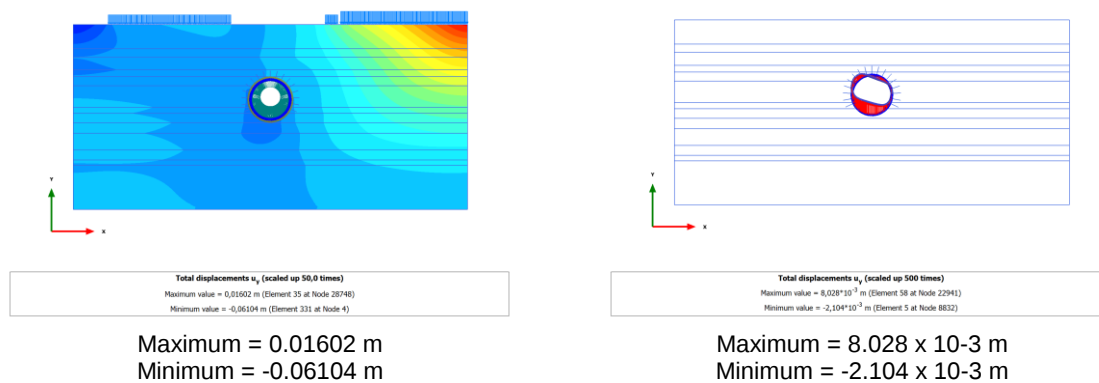
Gambar 110 Hasil analisis deformasi kondisi dengan gempa PGA 0.3g di tunnel TBM DK3+705.55 pada konsolidasi *minimum excess pore presurre* (potongan 13)



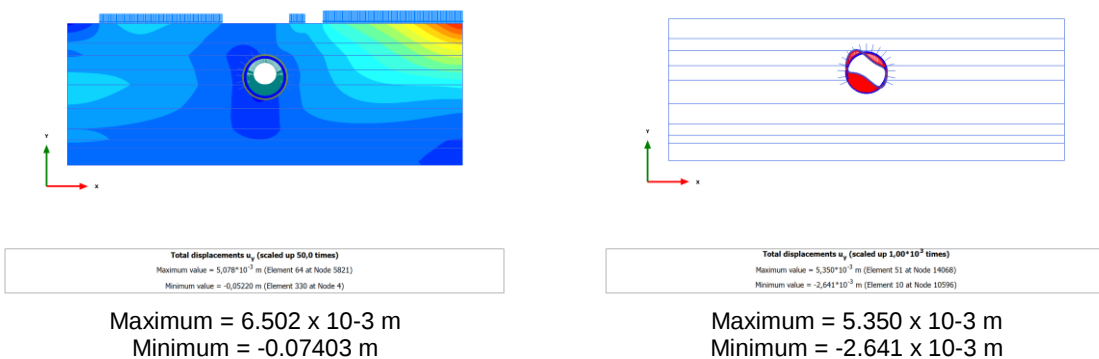
Gambar 111 Hasil analisis deformasi kondisi dengan gempa PGA 0.3g di tunnel DK3 + 821.34 pada konsolidasi *minimum excess pore presurre* (potongan 14)



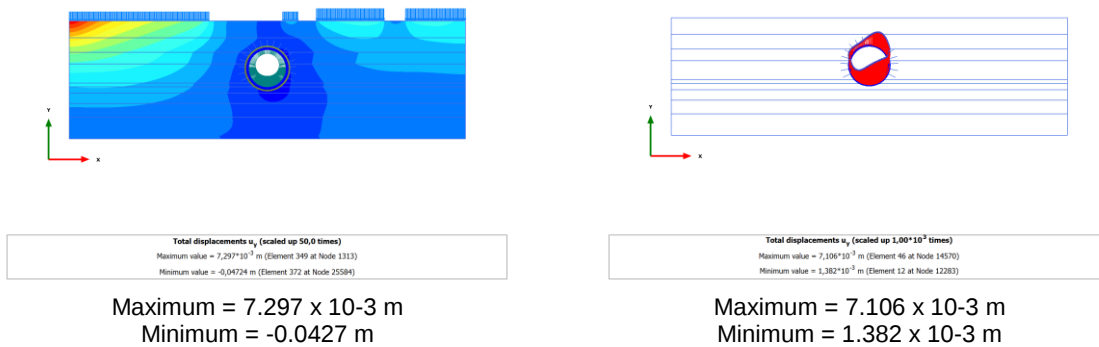
Gambar 112 Hasil analisis deformasi kondisi dengan gempa PGA 0.3g di tunnel DK3 + 931.25 pada konsolidasi minimum excess pore pressure (potongan 15)



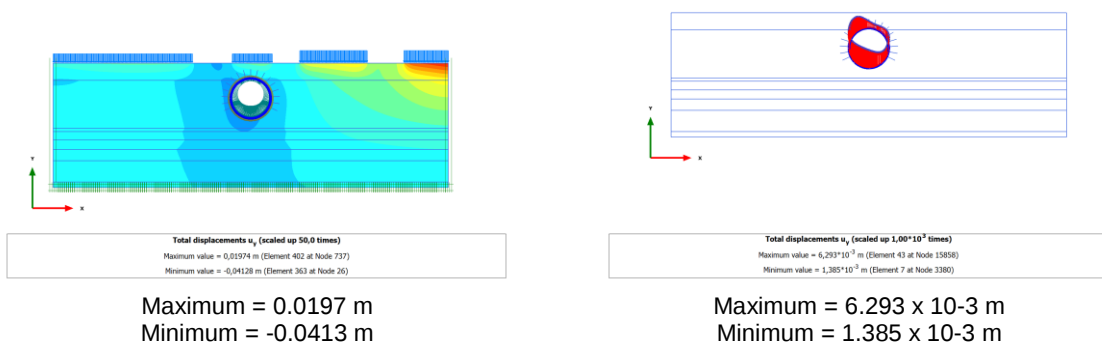
Gambar 113 Hasil analisis deformasi kondisi dengan gempa PGA 0.3g di tunnel DK4 + 041.14 pada konsolidasi minimum excess pore pressure (potongan 16)



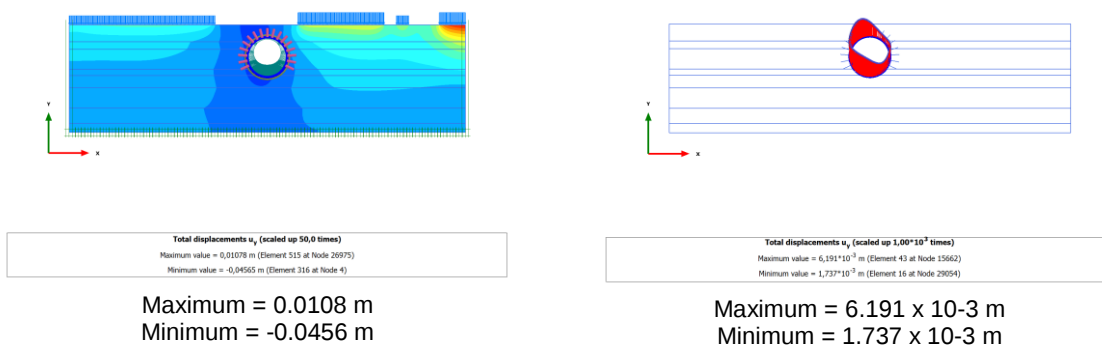
Gambar 114 Hasil analisis deformasi kondisi dengan gempa PGA 0.3g di tunnel DK4 + 151.15 pada konsolidasi minimum excess pore pressure (potongan 17)



Gambar 115 Hasil analisis deformasi kondisi dengan gempa PGA 0.3g di tunnel DK4 + 248.51 pada konsolidasi *minimum excess pore persurre* (potongan 18)



Gambar 116 Hasil analisis deformasi kondisi dengan gempa PGA 0.3g di tunnel DK4 + 330.56 pada konsolidasi *minimum excess pore persurre* (potongan 19)

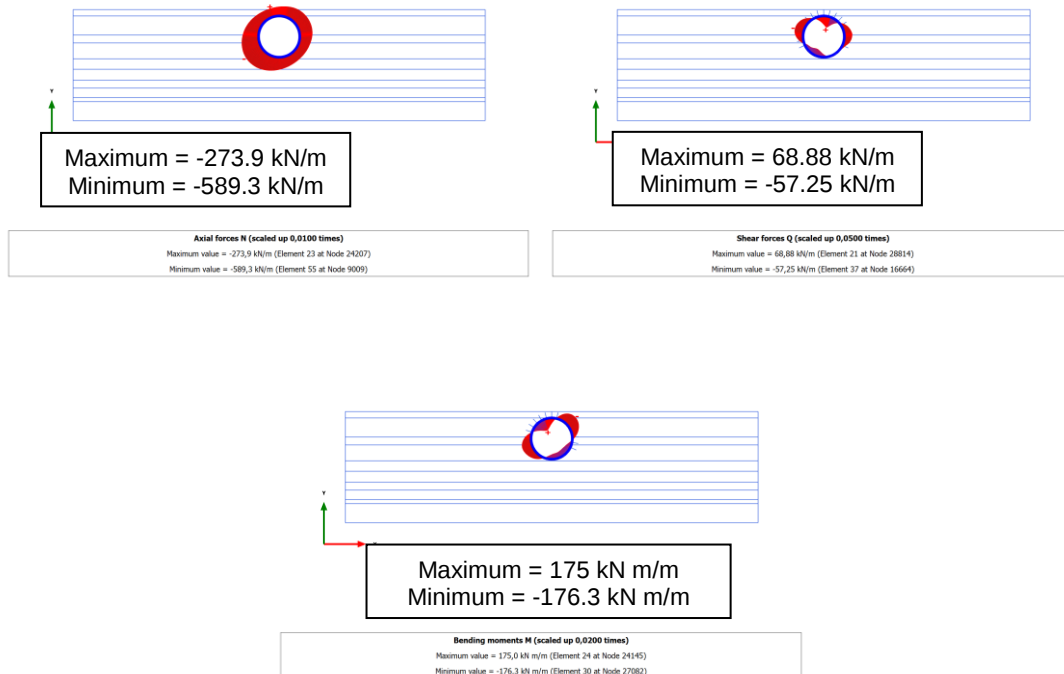


Gambar 117 Hasil analisis deformasi kondisi dengan gempa PGA 0.3g di tunnel DK4 + 446.31 pada konsolidasi *minimum excess pore persurre* (potongan 20)

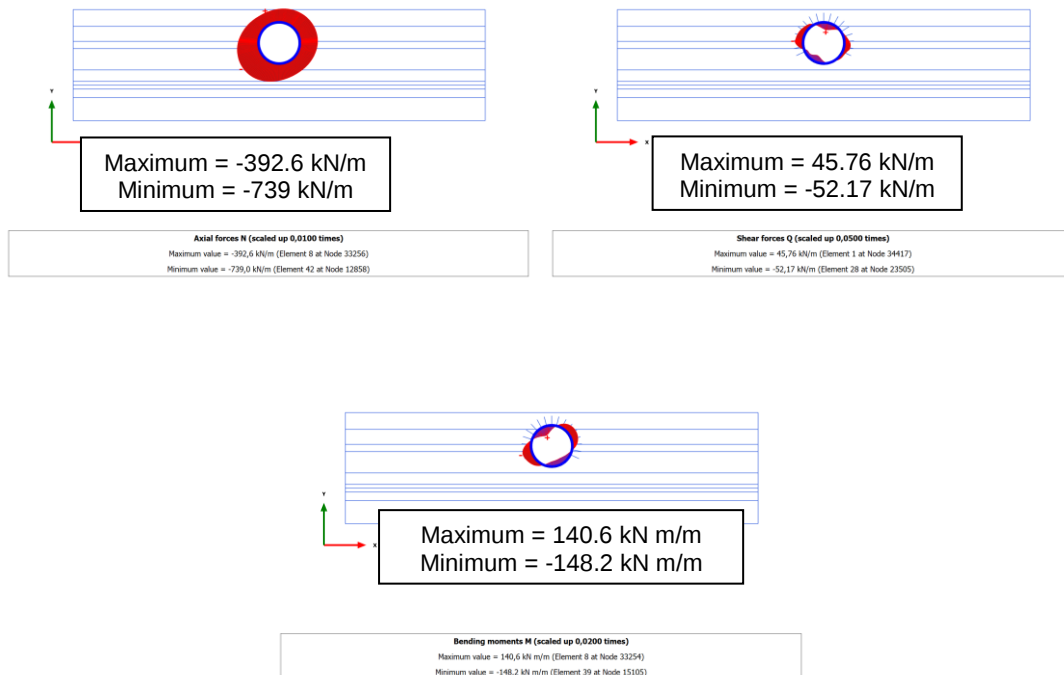
F. Gaya Dalam Kondisi Gempa

Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan dengan model numerik memperhitungkan beban gempa, gaya dalam yang bekerja pada lining terowongan dapat diperiksa. Gaya yang bekerja pada lining terowongan diantaranya gaya aksial, gaya geser dan momen lentur.

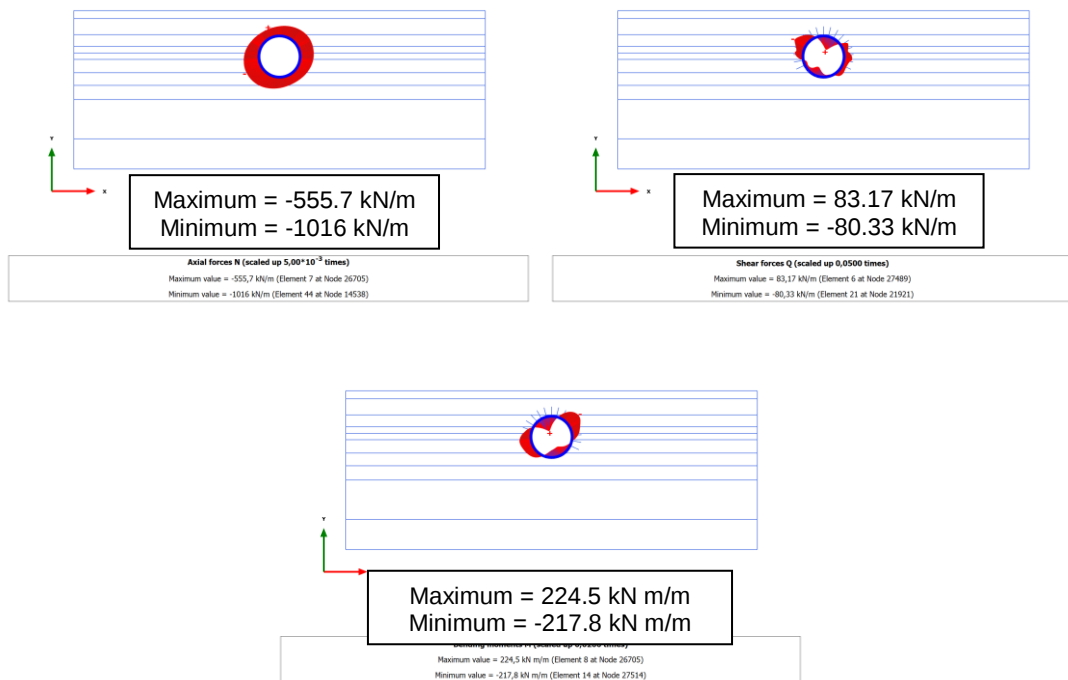
Gaya-gaya yang bekerja pada hasil analisis pemodelan dengan kondisi beban gempa dapat dilihat pada **Gambar 118** sampai dengan **Gambar 137**.



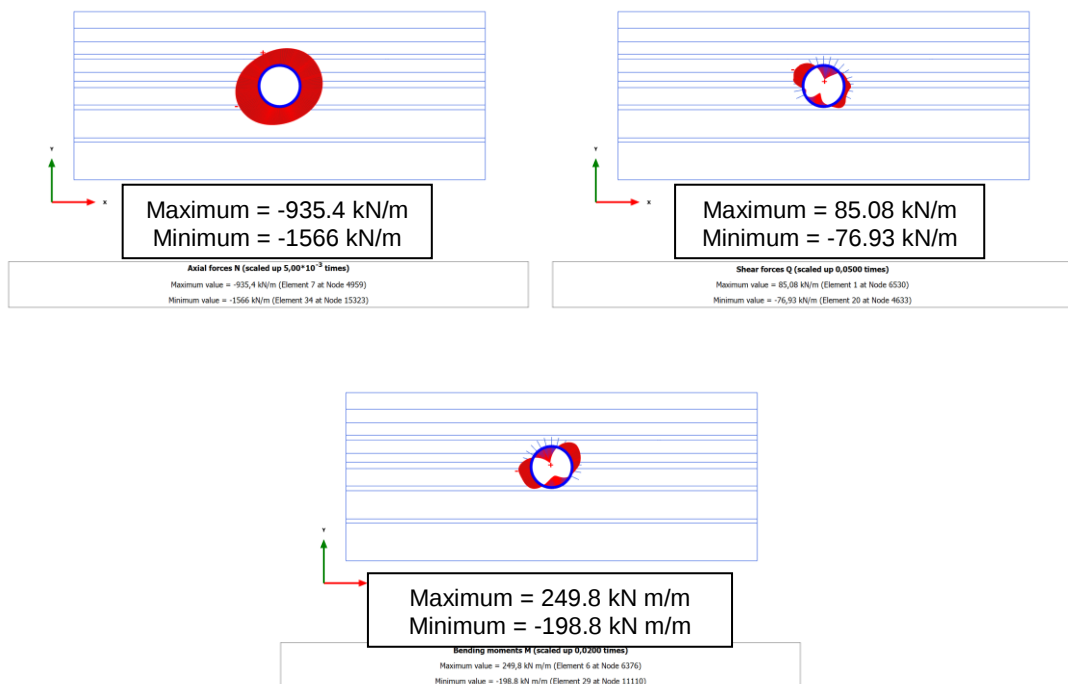
Gambar 118 Hasil analisis gaya dalam terowongan tunnel TBM DK2+539.77 kondisi gempa (potongan 1)



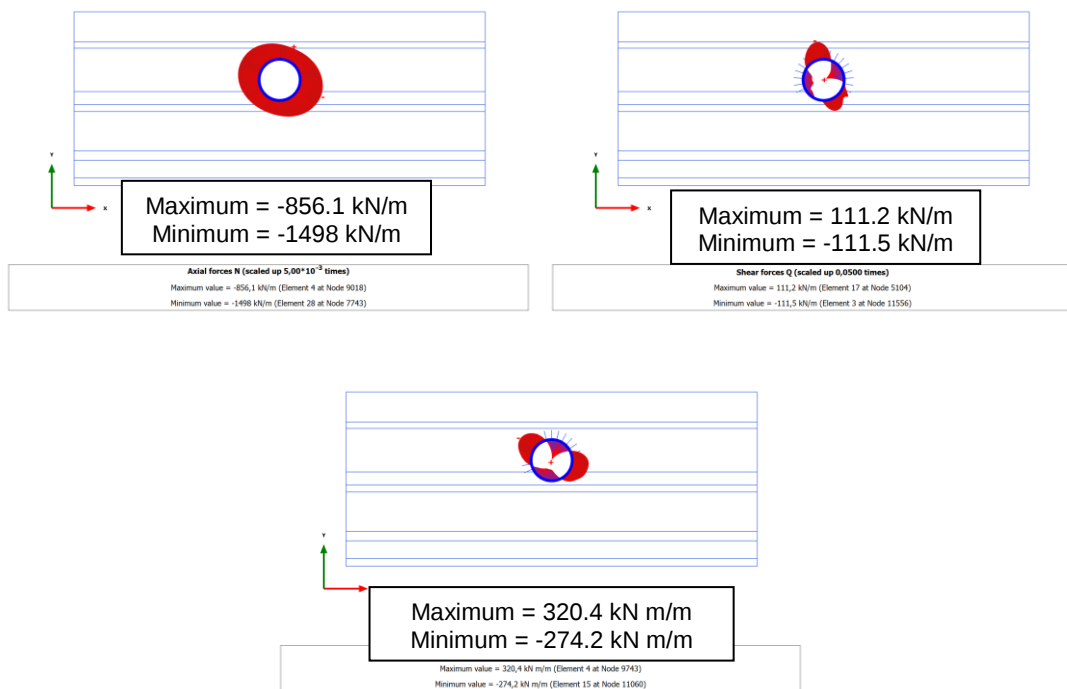
Gambar 119 Hasil analisis gaya dalam terowongan tunnel TBM DK2+609.97 kondisi gempa (potongan 2)



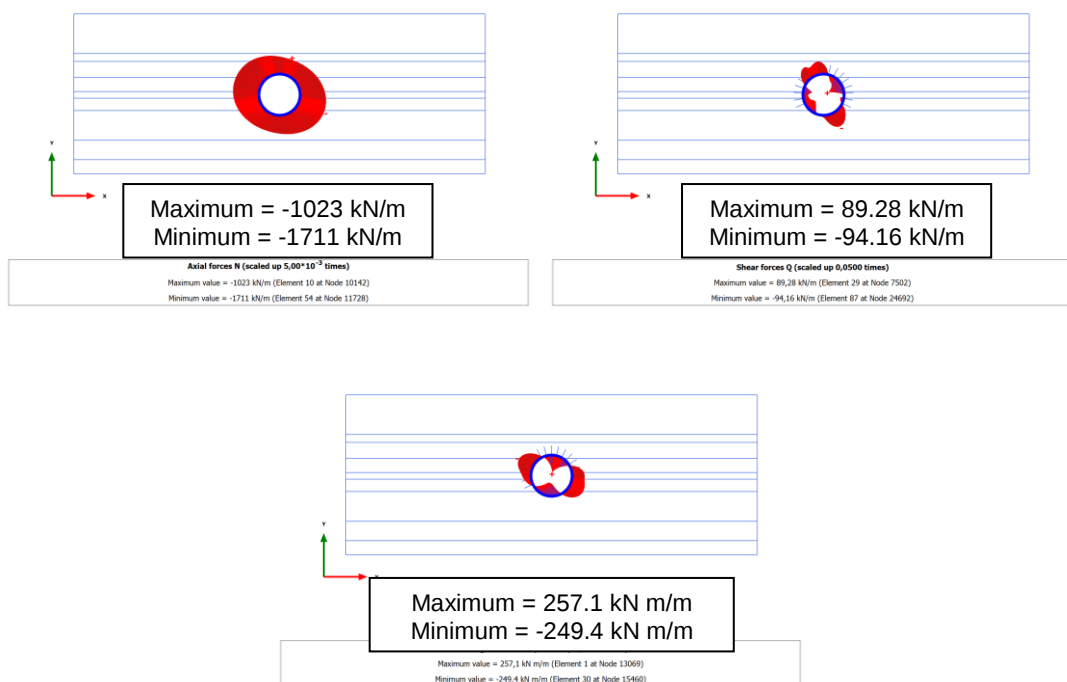
Gambar 120 Hasil analisis gaya dalam terowongan tunnel TBM DK2+730.06 kondisi gempa (potongan 3).



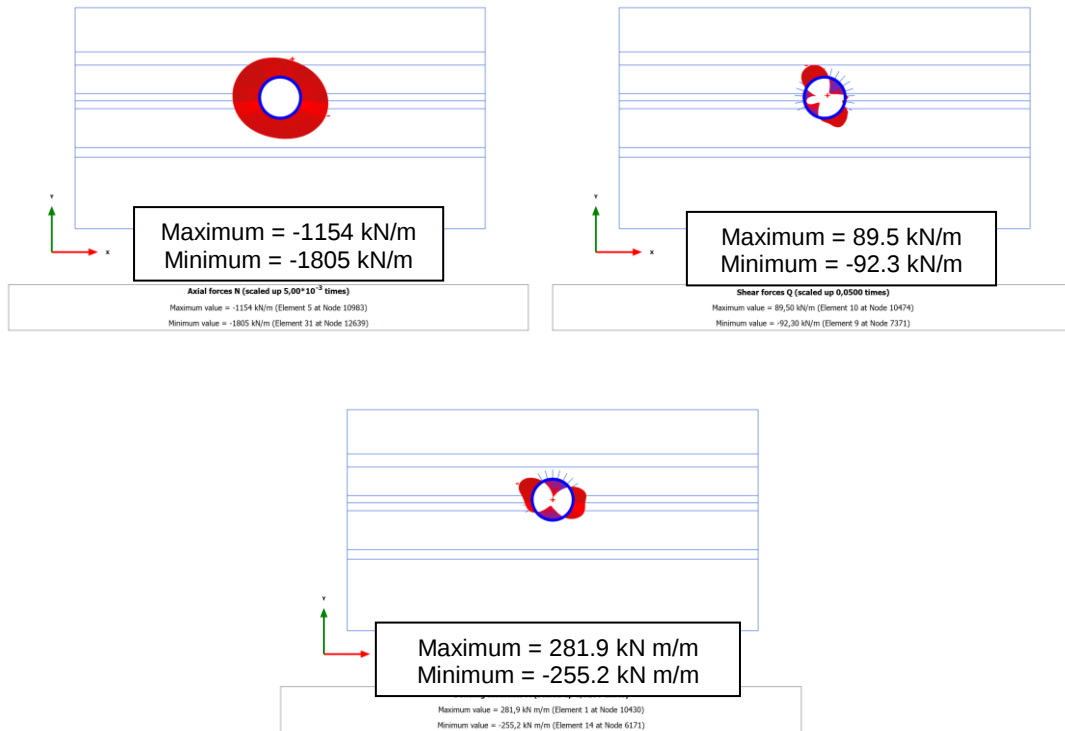
Gambar 121 Hasil analisis gaya dalam terowongan tunnel TBM DK2+823.23 kondisi gempa (potongan 4)



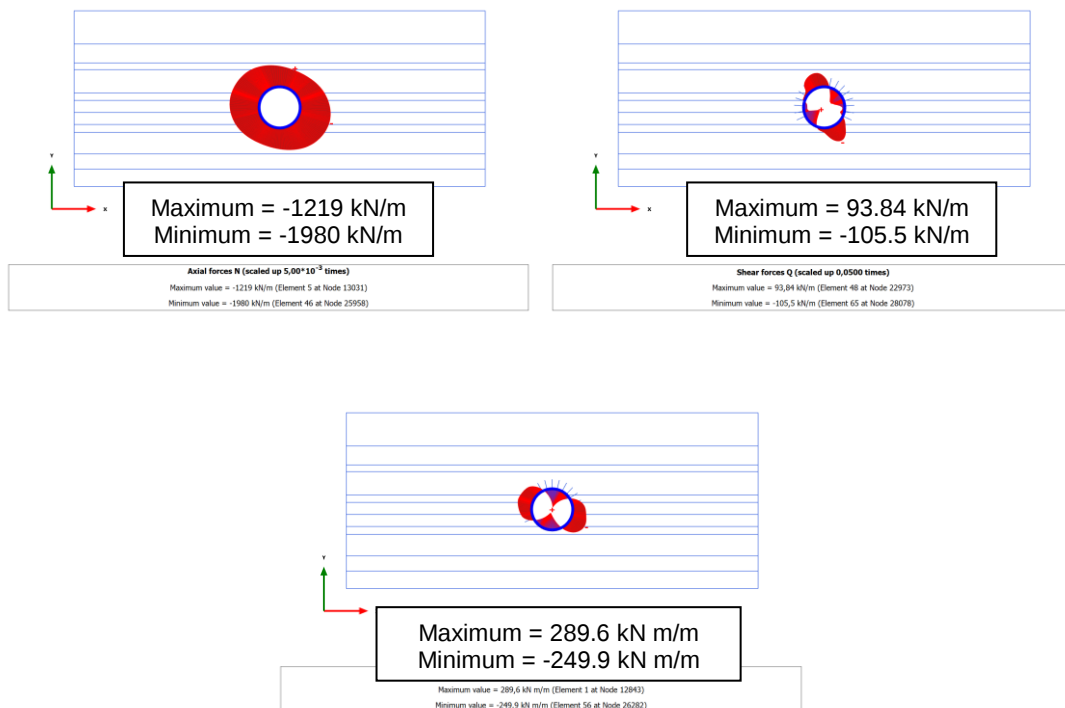
Gambar 122 Hasil analisis gaya dalam terowongan tunnel TBM DK2+919.39 kondisi gempa (potongan 5)



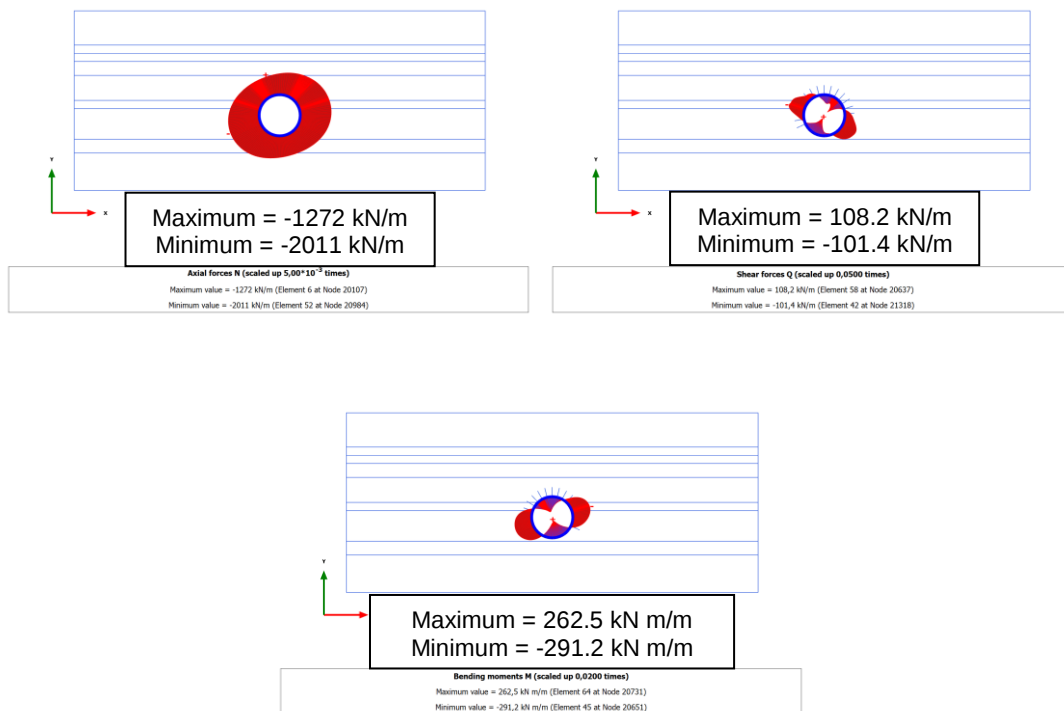
Gambar 123 Hasil analisis gaya dalam terowongan tunnel TBM DK3+049.27 kondisi gempa (potongan 6)



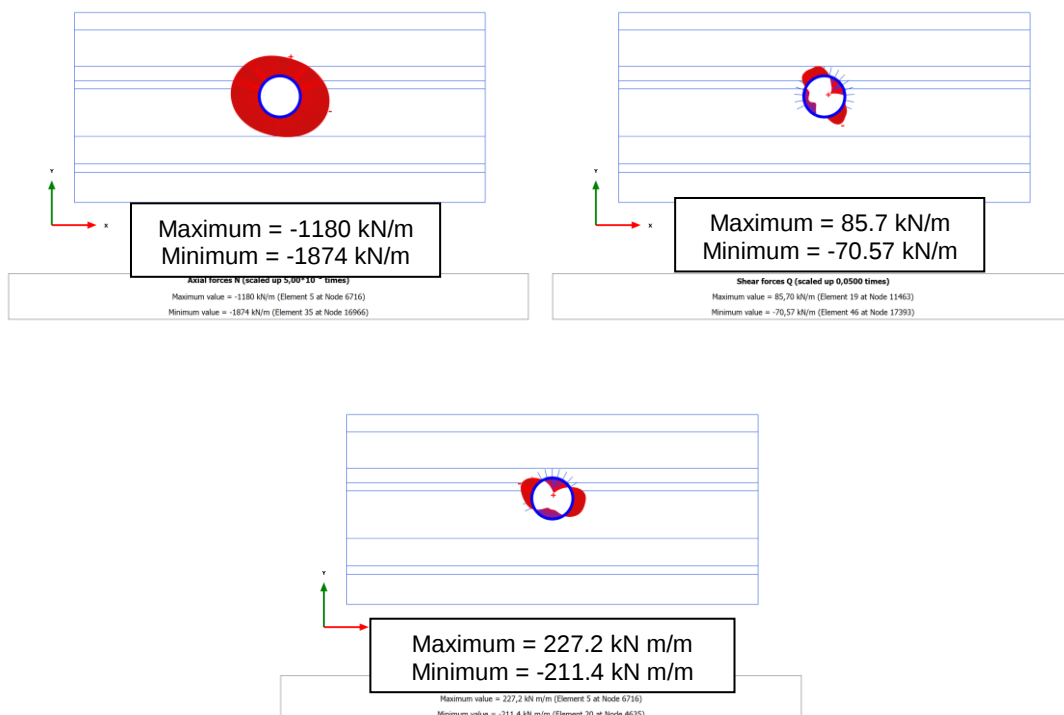
Gambar 124 Hasil analisis gaya dalam terowongan tunnel TBM DK3+156.51 kondisi gempa (potongan 7)



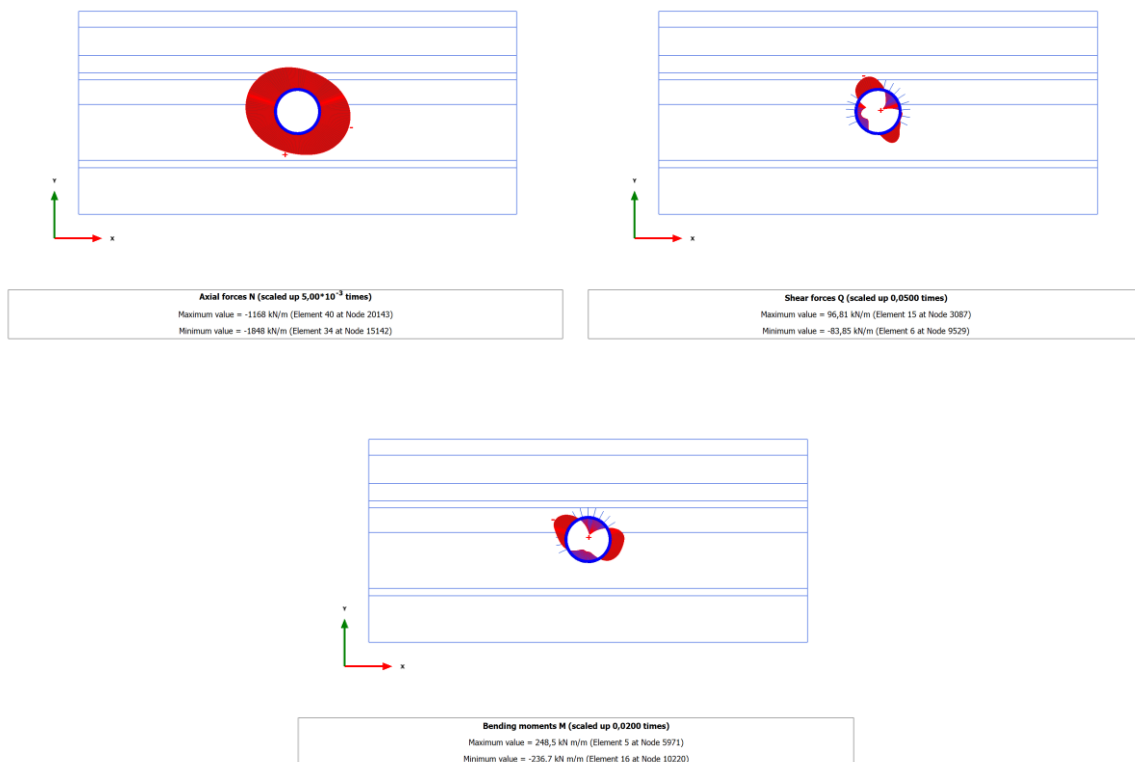
Gambar 125 Hasil analisis gaya dalam terowongan tunnel TBM DK3+218.66 kondisi gempa (potongan 8)



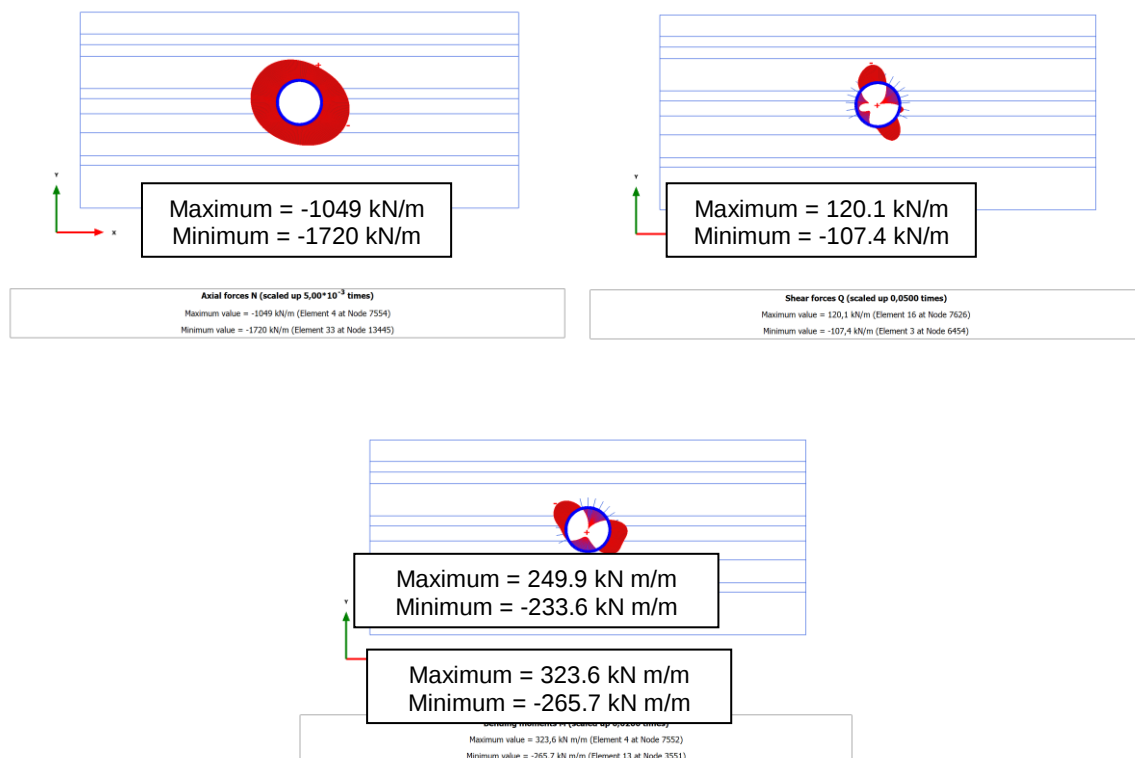
Gambar 126 Hasil analisis gaya dalam terowongan tunnel TBM DK3+348.67 kondisi gempa (potongan 9)



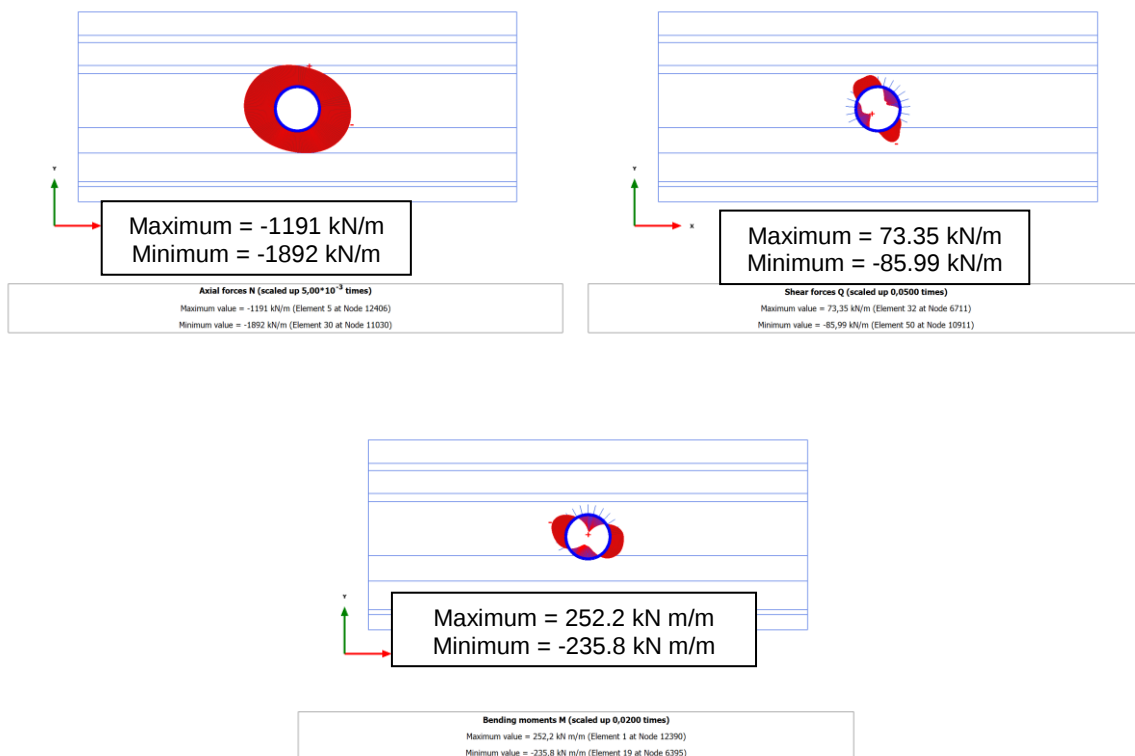
Gambar 127 Hasil analisis gaya dalam terowongan tunnel TBM DK3+438 kondisi gempa (potongan 10)



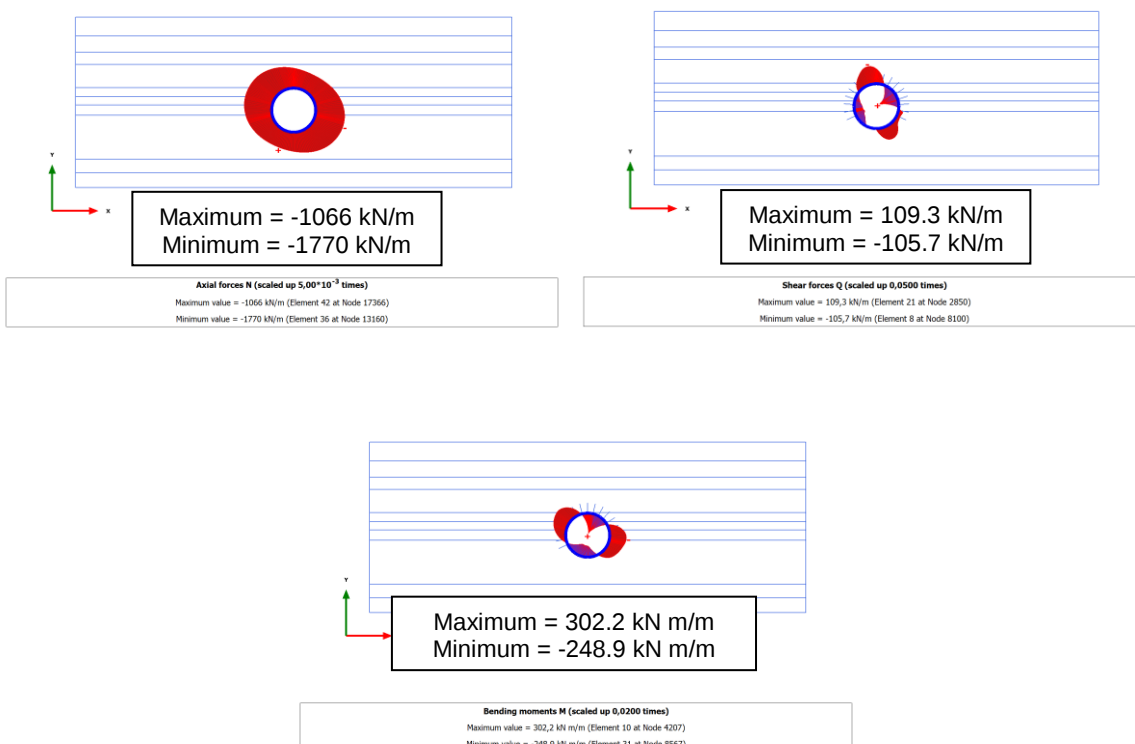
Gambar 128 Hasil analisis gaya dalam terowongan tunnel TBM DK3+517.09 kondisi gempa (potongan 11)



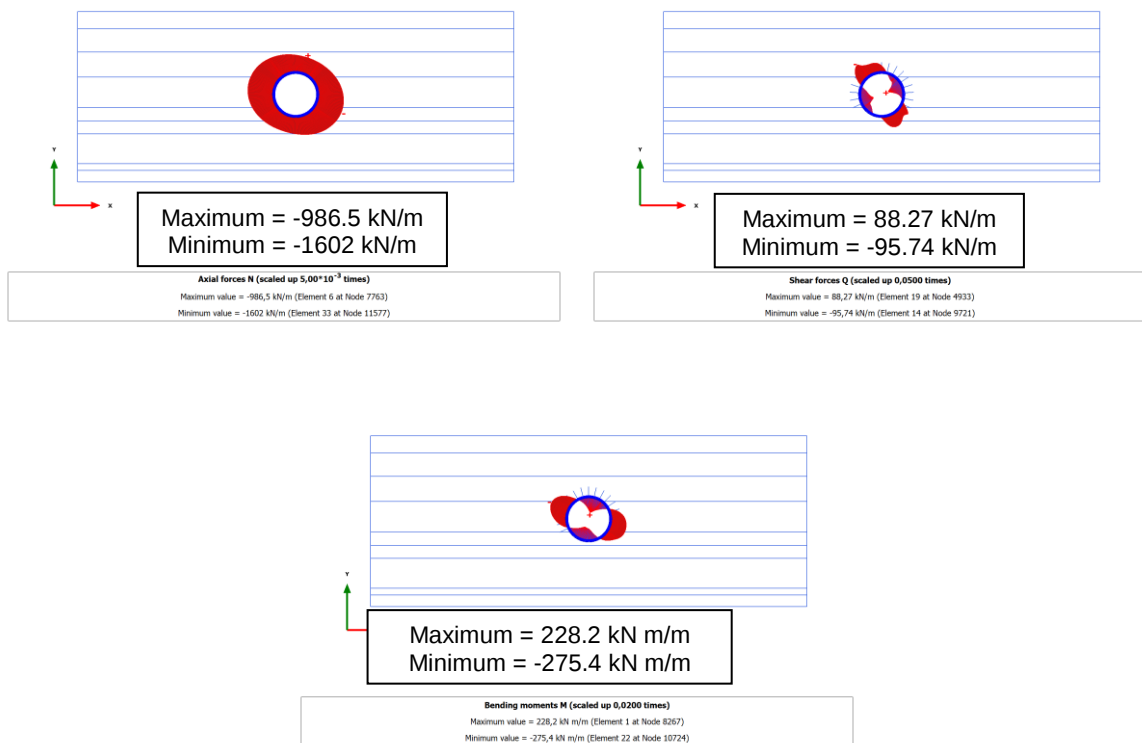
Gambar 129 Hasil analisis gaya dalam terowongan tunnel TBM DK3+624.35 kondisi gempa (potongan 12)



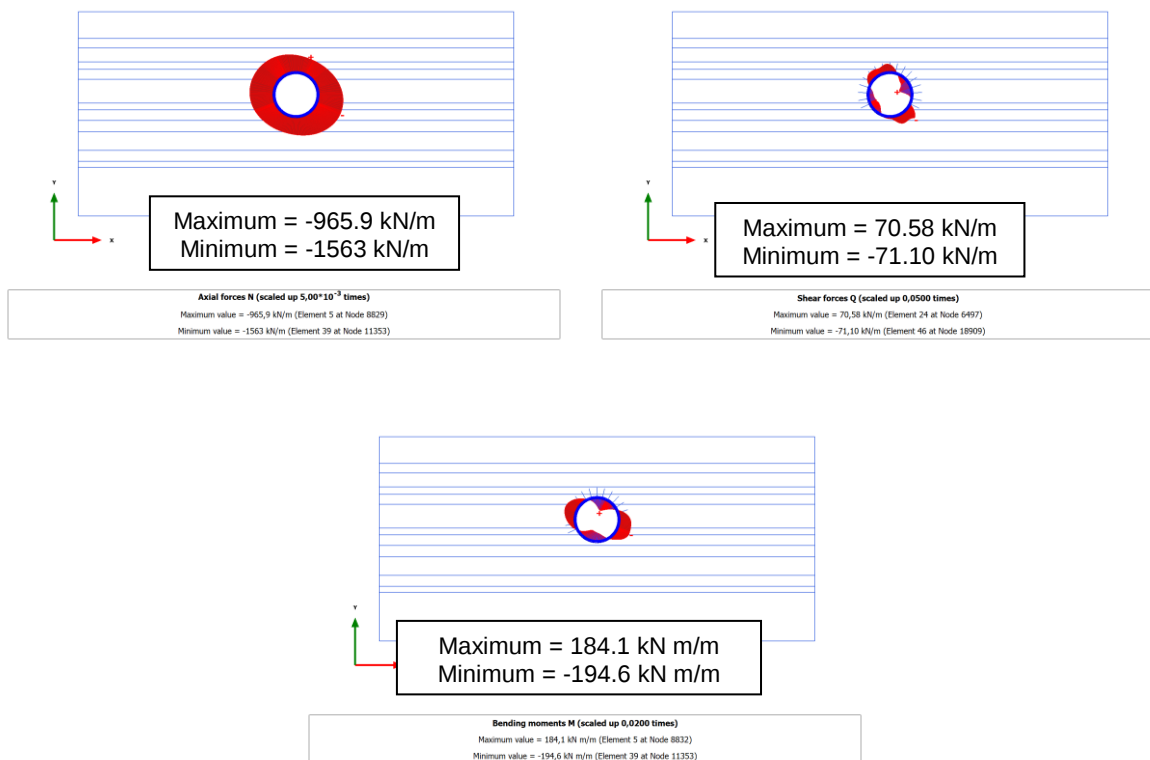
Gambar 130 Hasil analisis gaya dalam terowongan tunnel TBM DK3+705.55 kondisi gempa (potongan 13)



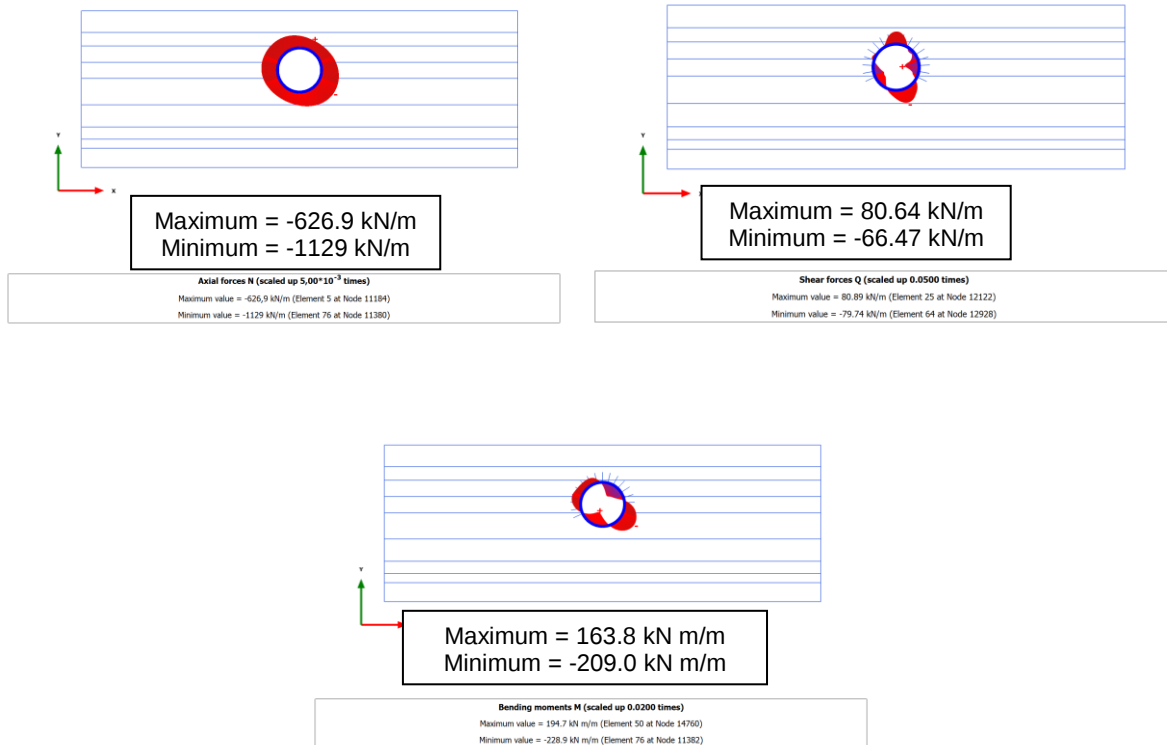
Gambar 131 Hasil analisis gaya dalam terowongan tunnel DK3 + 821.34 kondisi gempa (potongan 14)



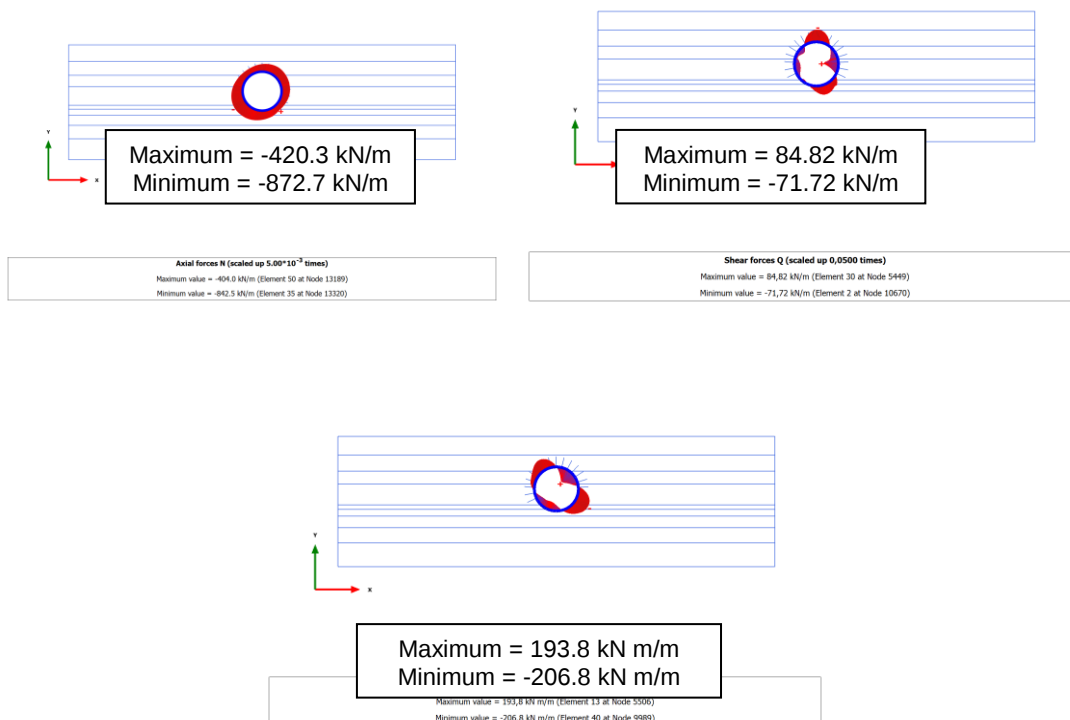
Gambar 132 Hasil analisis gaya dalam terowongan tunnel DK3 + 931.25 kondisi gempa (potongan 15)



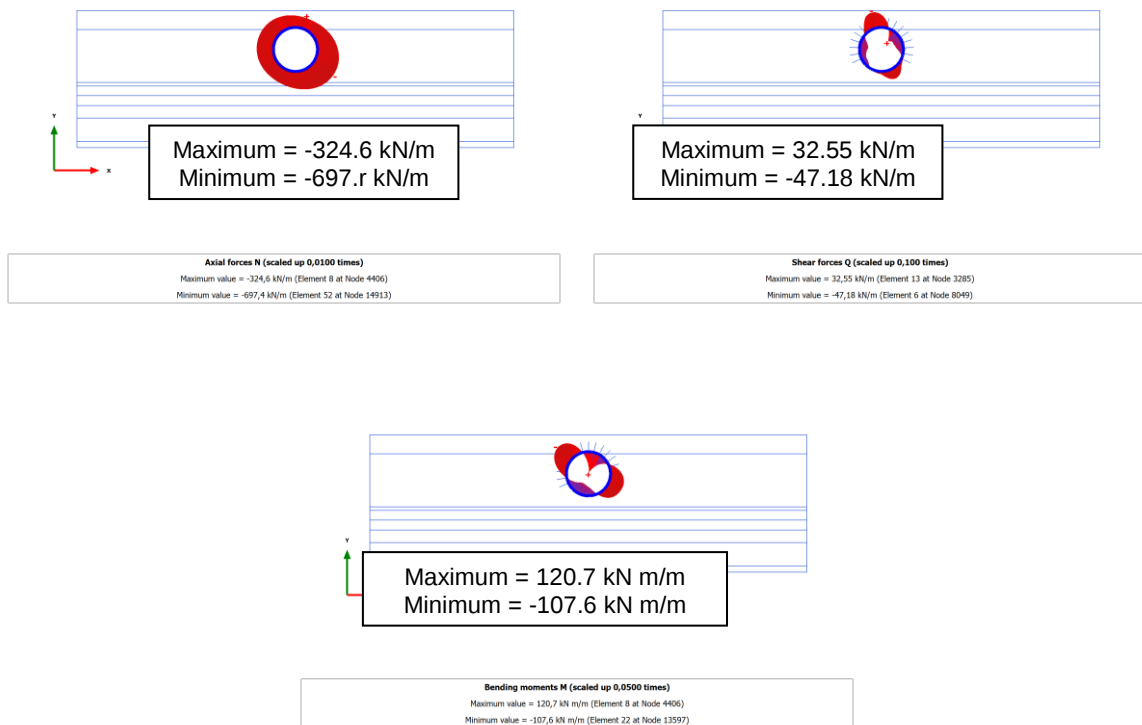
Gambar 133 Hasil analisis gaya dalam terowongan tunnel DK4 + 041.14 kondisi gempa (potongan 16)



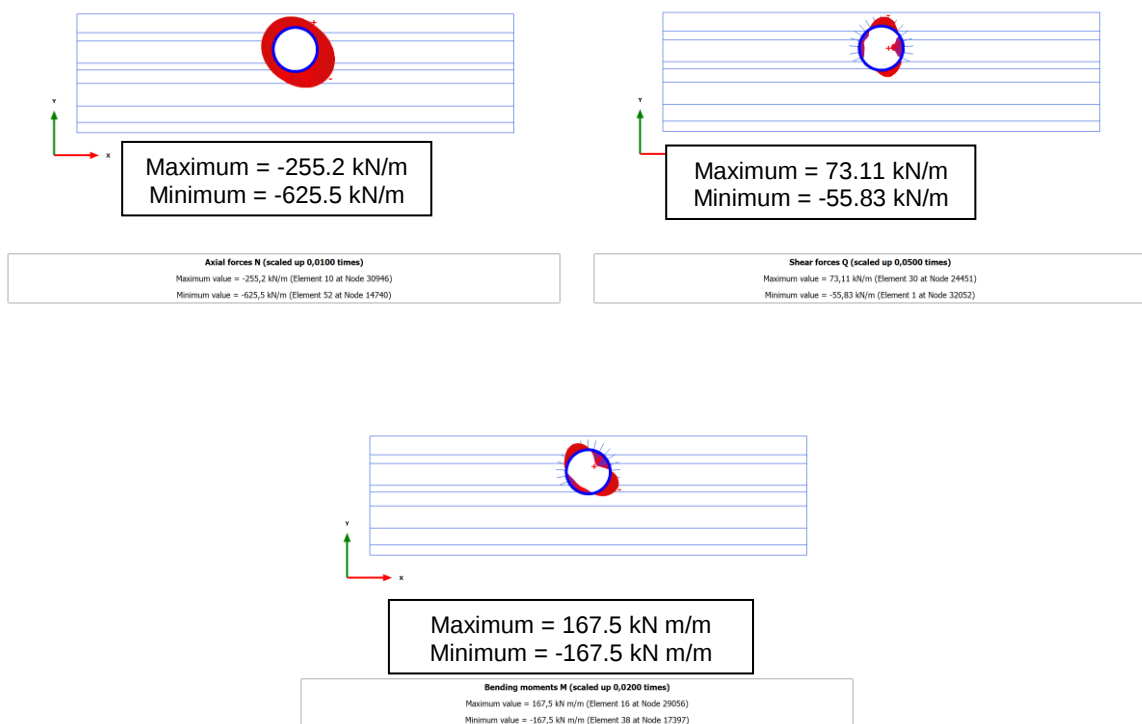
Gambar 134 Hasil analisis gaya dalam terowongan tunnel DK4 + 151.15 kondisi gempa (potongan 17)



Gambar 135 Hasil analisis gaya dalam terowongan tunnel DK4 + 248.51 kondisi gempa (potongan 18)



Gambar 136 Hasil analisis gaya dalam terowongan tunnel DK4 + 330.56 kondisi gempa (potongan 19)



Gambar 137 Hasil analisis gaya dalam terowongan tunnel DK4 + 446.31 kondisi gempa (potongan 20)

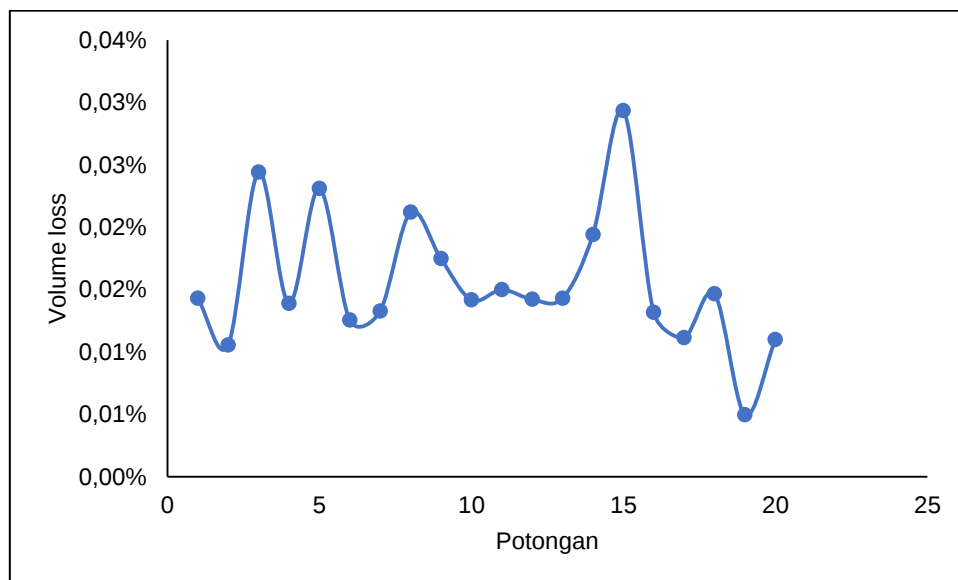
15. PERHITUNGAN VOLUME LOSS

Perhitungan volume loss pada permukaan biasanya dilakukan dengan mengasumsikan kurva penurunan Gauss, pengukuran deformasi maksimum yang terjadi di permukaan, mengukur kedalaman terhadap terowongan dan memperkirakan parameter K. Perhitungan volume loss dilakukan dengan menggunakan spreadsheet berdasarkan hasil analisis yang dilakukan pada program Plaxis.

Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan, perhitungan volume loss dilakukan pada seluruh potongan yang dianalisis. Rekapitulasi hasil perhitungan volume loss berdasarkan hasil analisis dapat dilihat pada **Tabel 57**.

Tabel 57 Penurunan *Volume Loss*

No. Potongan	Volume Loss	No. Potongan	Volume Loss
1	0.01%	11	0.01%
2	0.01%	12	0.01%
3	0.02%	13	0.01%
4	0.01%	14	0.02%
5	0.02%	15	0.03%
6	0.01%	16	0.01%
7	0.01%	17	0.01%
8	0.02%	18	0.01%
9	0.02%	19	0.00%
10	0.01%	20	0.01%



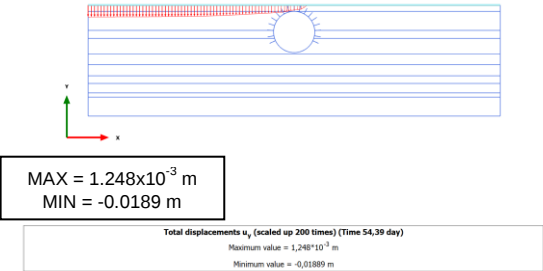
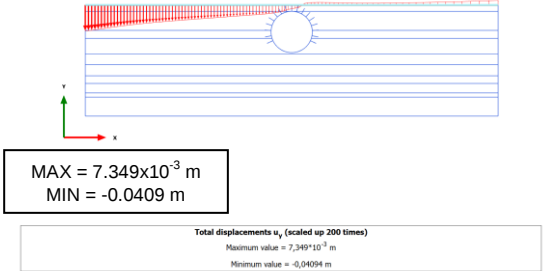
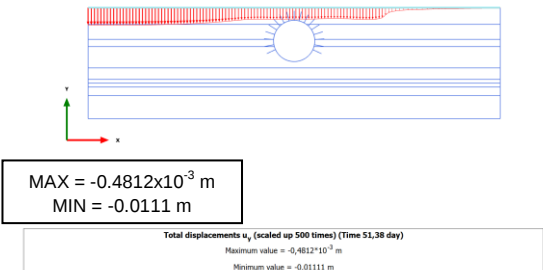
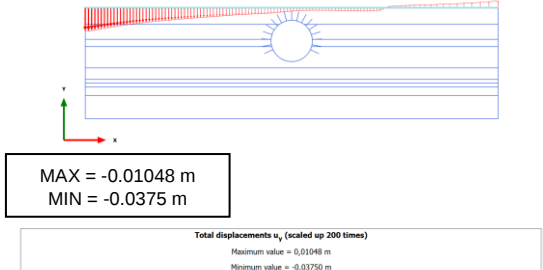
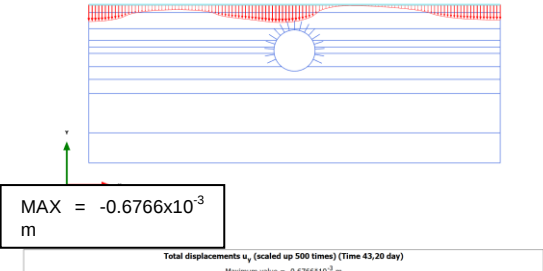
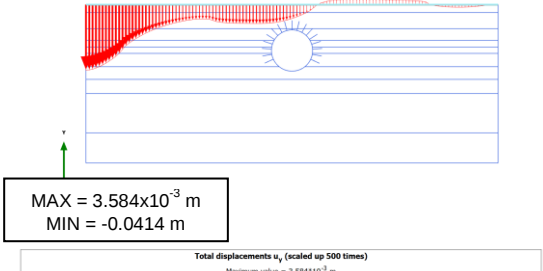
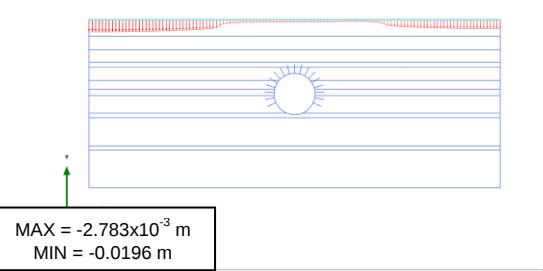
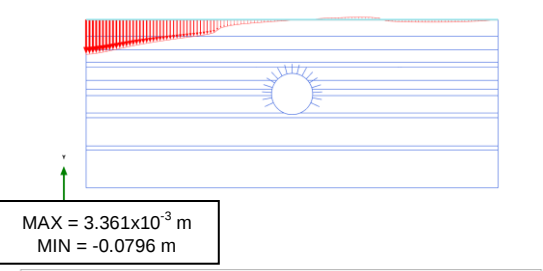
Gambar 138 Hasil analisis volume loss

16. ANALISIS PENURUNAN DI PERMUKAAN

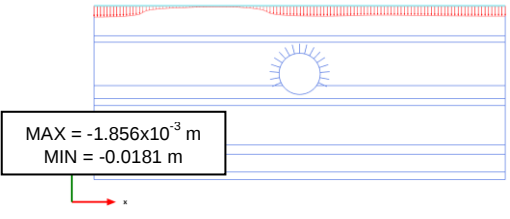
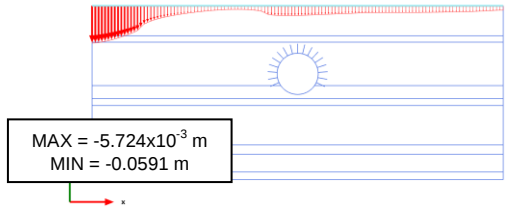
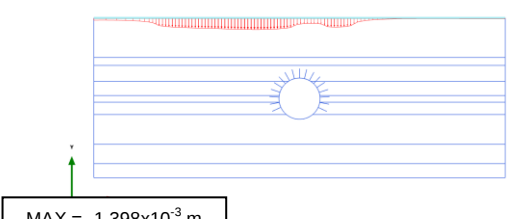
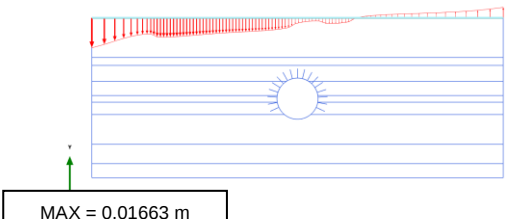
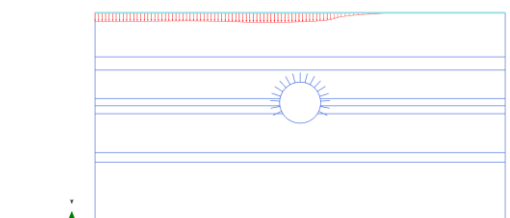
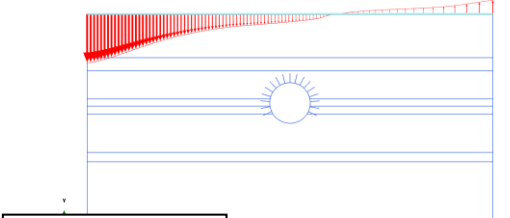
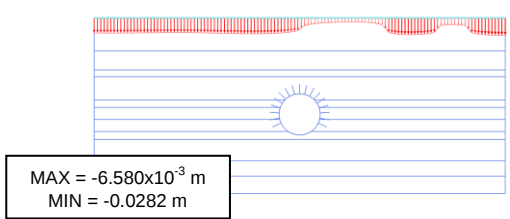
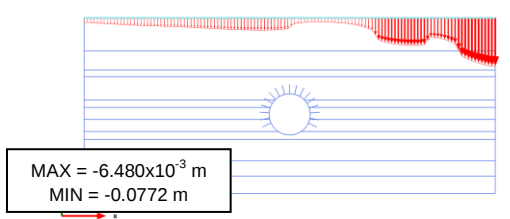
Deformasi aksial tidak hanya diperiksa pada bagian atas dari terowongan, melainkan juga dilakukan pemeriksaan terhadap deformasi aksial yang terjadi di permukaan tanah asli. Penurunan pada tanah asli dilakukan untuk memeriksa pengaruh dari konstruksi terowongan terhadap elevasi bangunan eksisting di permukaan tanah. Pemeriksaan

terhadap penurunan tanah asli dilakukan pada kondisi tanpa gempa dan setelah terjadi gempa dengan hasil yang disajikan pada **Tabel 58** dan rekapitulasi penurunan di permukaan ditunjukkan pada **Tabel 59** dan **Gambar 139**.

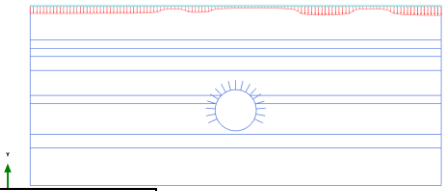
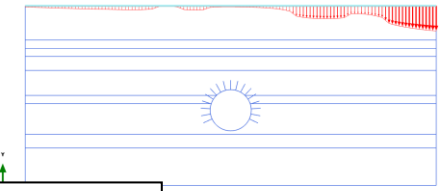
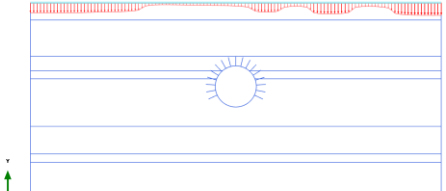
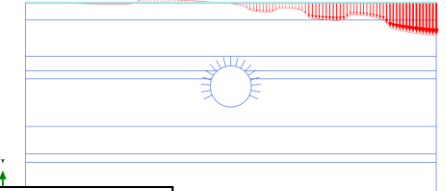
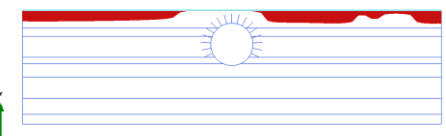
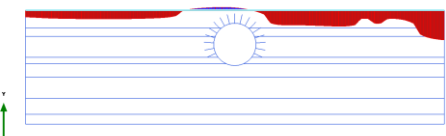
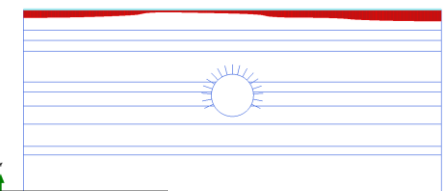
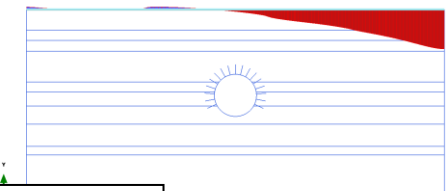
Tabel 58 Penurunan di Permukaan Tanah

No	Sebelum Gempa	Sesudah Gempa
1		
2		
3		
4		

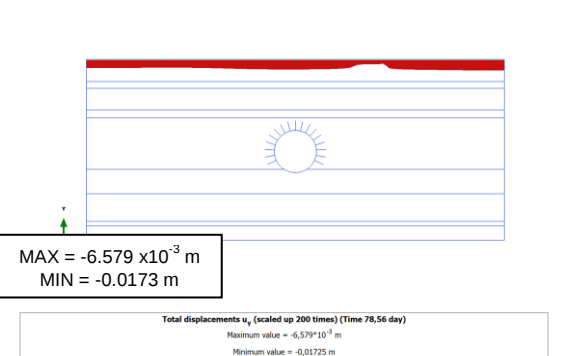
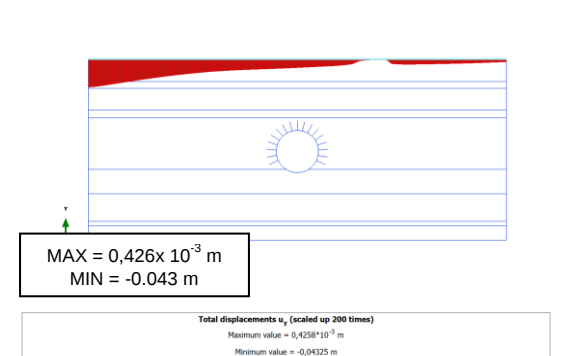
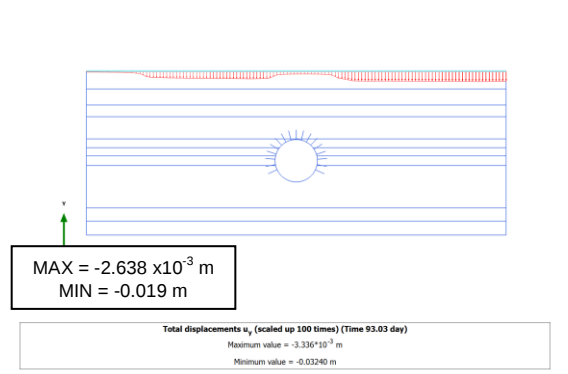
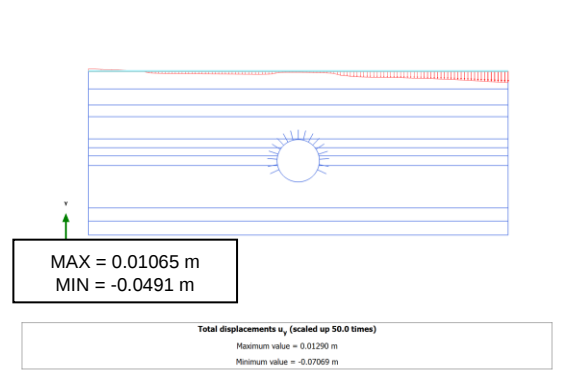
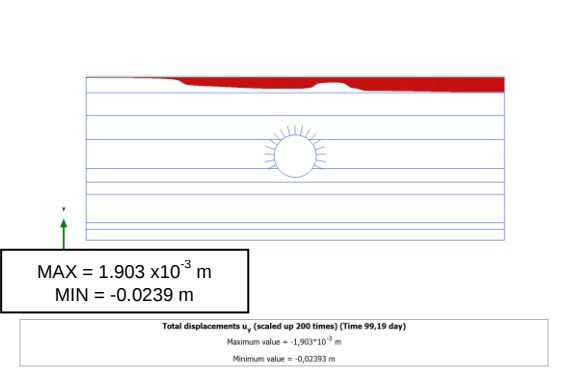
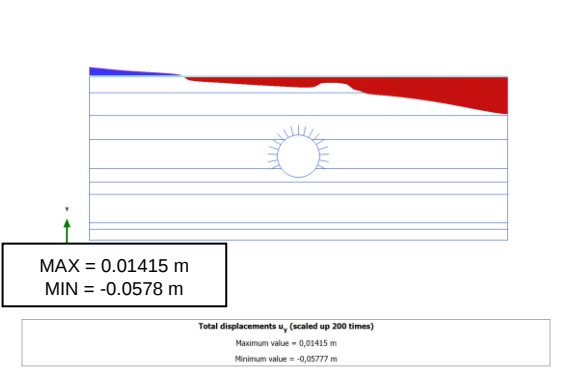
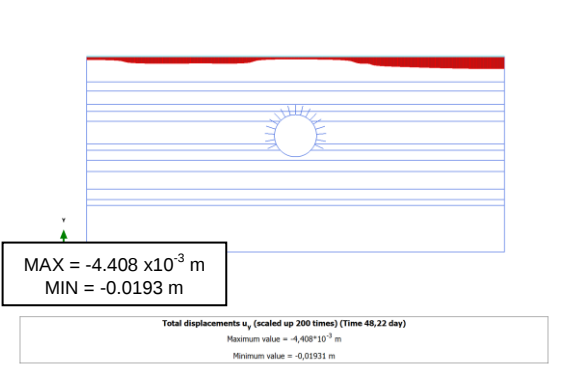
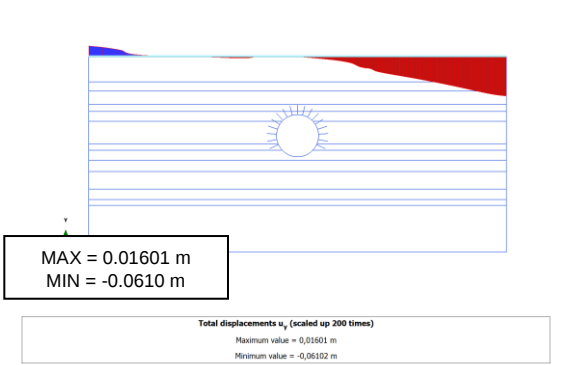
Tabel 58 Penurunan di Permukaan Tanah (lanjutan)

No	Sebelum Gempa	Sesudah Gempa
5	 MAX = -1.856×10^{-3} m MIN = -0.0181 m Total displacements u_y (scaled up 200 times) (Time 46,13 day) Maximum value = $-1,856 \times 10^{-3}$ m Minimum value = -0,01807 m	 MAX = -5.724×10^{-3} m MIN = -0.0591 m Total displacements u_y (scaled up 200 times) Maximum value = $-5,724 \times 10^{-3}$ m Minimum value = -0,05907 m
6	 MAX = -1.398×10^{-3} m MIN = -0.0186 m Total displacements u_y (scaled up 200 times) (Time 121,5 day) Maximum value = $-1,398 \times 10^{-3}$ m Minimum value = -0,01855 m	 MAX = 0.01663 m MIN = -0.0473 m Total displacements u_y (scaled up 200 times) Maximum value = 0,01663 m Minimum value = -0,04726 m
7	 MAX = -0.5687×10^{-3} m MIN = -0.0156 m Total displacements u_y (scaled up 200 times) (Time 97,16 day) Maximum value = $-0,5687 \times 10^{-3}$ m Minimum value = -0,01558 m	 MAX = 0.02217 m MIN = -0.0782 m Total displacements u_y (scaled up 200 times) Maximum value = 0,02217 m Minimum value = -0,07822 m
8	 MAX = -6.580×10^{-3} m MIN = -0.0282 m Total displacements u_y (scaled up 200 times) (Time 116,2 day) Maximum value = $-6,580 \times 10^{-3}$ m Minimum value = -0,02820 m	 MAX = -6.480×10^{-3} m MIN = -0.0772 m Total displacements u_y (scaled up 200 times) Maximum value = $-6,480 \times 10^{-3}$ m Minimum value = -0,07721 m

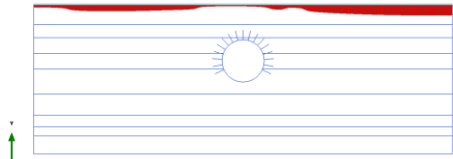
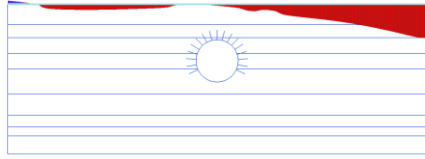
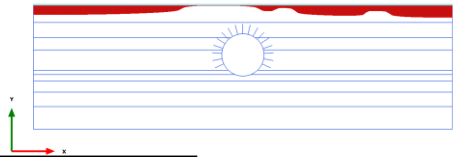
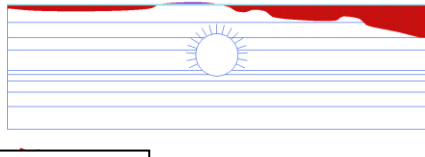
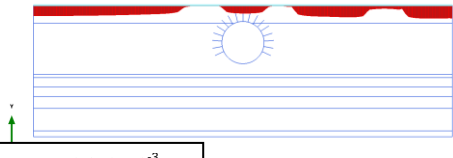
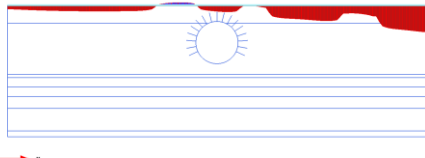
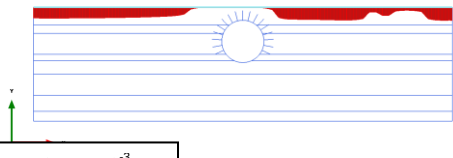
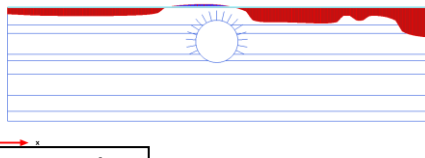
Tabel 58 Penurunan di Permukaan Tanah (lanjutan)

No	Sebelum Gempa	Sesudah Gempa
9	 MAX = -7.043×10^{-3} m MIN = -0.0303 m Total displacements u_y (scaled up 100 times) (Time 112,3 day) Maximum value = $-7,043 \times 10^{-3}$ m Minimum value = -0,03031 m	 MAX = -1.675×10^{-3} m MIN = -0.0794 m Total displacements u_y (scaled up 100 times) Maximum value = $-1,657 \times 10^{-3}$ m Minimum value = -0,07939 m
10	 MAX = -3.334×10^{-3} m MIN = -0.0203 m Total displacements u_y (scaled up 200 times) (Time 120,6 day) Maximum value = $-3,334 \times 10^{-3}$ m Minimum value = -0,02027 m	 MAX = 6.134×10^{-3} m MIN = -0.0521 m Total displacements u_y (scaled up 200 times) Maximum value = $6,134 \times 10^{-3}$ m Minimum value = -0,05212 m
11	 MAX = 0.7738×10^{-3} m MIN = -0.0202 m Total displacements u_y (scaled up 200 times) (Time 42,65 day) Maximum value = $0,7738 \times 10^{-3}$ m Minimum value = -0,02024 m	 MAX = 4.874×10^{-3} m MIN = -0.0456 m Total displacements u_y (scaled up 200 times) Maximum value = $4,874 \times 10^{-3}$ m Minimum value = -0,04559 m
12	 MAX = -4.203×10^{-3} m MIN = -0.0179 m Total displacements u_y (scaled up 200 times) (Time 148,0 day) Maximum value = $-4,203 \times 10^{-3}$ m Minimum value = -0,01793 m	 MAX = 3.833×10^{-3} m MIN = -0.0609 m Total displacements u_y (scaled up 200 times) Maximum value = $3,833 \times 10^{-3}$ m Minimum value = -0,06092 m

Tabel 58 Penurunan di Permukaan Tanah (lanjutan)

No	Sebelum Gempa	Sesudah Gempa
13		
14		
15		
16		

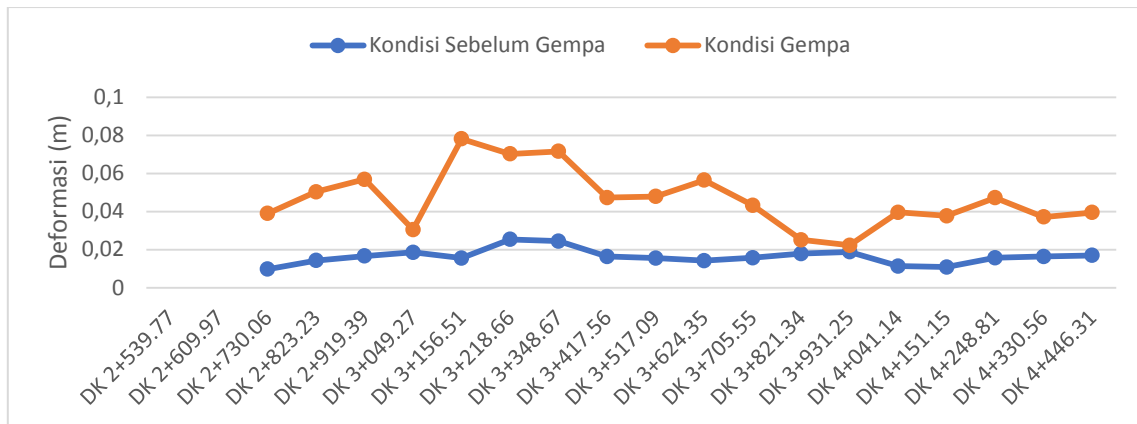
Tabel 58 Penurunan di Permukaan Tanah (lanjutan)

No	Sebelum Gempa	Sesudah Gempa
17	 MAX = -3.123×10^{-3} m MIN = -0.0176 m Total displacements u_y (scaled up 200 times) (Time 24,42 day) Maximum value = $-3,123 \times 10^{-3}$ m Minimum value = -0,01757 m	 MAX = 5.062×10^{-3} m MIN = -0.0522 m Total displacements u_y (scaled up 200 times) Maximum value = $5,062 \times 10^{-3}$ m Minimum value = -0,05217 m
18	 MAX = -1.514×10^{-3} m MIN = -0.0198 m Total displacements u_y (scaled up 200 times) (Time 75,25 day) Maximum value = $-1,514 \times 10^{-3}$ m Minimum value = -0,01976 m	 MAX = 3.414×10^{-3} m MIN = -0.0512 m Total displacements u_y (scaled up 200 times) Maximum value = $3,414 \times 10^{-3}$ m Minimum value = -0,05120 m
19	 MAX = -0.249×10^{-3} m MIN = -0.0202 m Total displacements u_y (scaled up 200 times) (Time 68,66 day) Maximum value = $0,2492 \times 10^{-3}$ m Minimum value = -0,02018 m	 MAX = 4.240×10^{-3} m MIN = -0.0412 m Total displacements u_y (scaled up 200 times) Maximum value = $4,240 \times 10^{-3}$ m Minimum value = -0,04122 m
20	 MAX = 0.774×10^{-3} m MIN = -0.0202 m Total displacements u_y (scaled up 200 times) (Time 42,65 day) Maximum value = $0,7738 \times 10^{-3}$ m Minimum value = -0,02024 m	 MAX = 4.874×10^{-3} m MIN = -0.0456 m Total displacements u_y (scaled up 200 times) Maximum value = $4,874 \times 10^{-3}$ m Minimum value = -0,04559 m

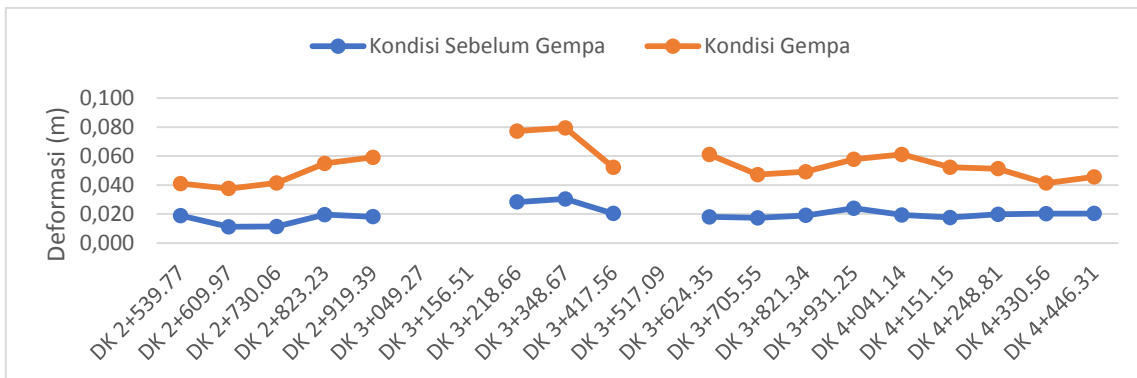
Tabel 59 Rekapitulasi Penurunan di Permukaan

No. potongan	Lokasi	Beban Diatas Terowongan			Deformasi permukaan (meter)				Indonesia Code		China Code		Keterangan
					Di bawah jalan	Di bawah bangunan	Di bawah jalan kondisi gempa	Di bawah bangunan kondisi gempa	Deformasi izin		Deformasi izin		
		Kiri	Tengah	Kanan					Di bawah jalan	Di bawah bangunan	Di bawah jalan	Di bawah bangunan	
1	DK 2+539.77	Gedung		-	-	0.019	-	0.041	-	ok	-	ok	
2	DK 2+609.97	Gedung		-	-	0.011	-	0.038	-	ok	-	ok	
3	DK 2+730.06	Gedung		Jalan	0.010	0.011	0.039	0.041	ok	ok	ok	ok	
4	DK 2+823.23	Gedung	-	Jalan	0.014	0.020	0.050	0.055	ok	ok	ok	ok	
5	DK 2+919.39	Gedung	Jalan		0.017	0.018	0.057	0.059	ok	ok	ok	ok	
6	DK 3+049.27	Jalan		-	0.019	-	0.031	-	ok	-	ok	-	
7	DK 3+156.51	Jalan		-	0.016	-	0.078	-	ok	-	ok	-	
8	DK 3+218.66	Jalan		Gedung	0.025	0.028	0.070	0.077	ok	ok	not ok	not ok	Perlu Perkuatan
9	DK 3+348.67	Jalan		Gedung	0.024	0.030	0.072	0.079	ok	ok	not ok	not ok	Perlu Perkuatan
10	DK 3+417.56	Jalan		Gedung	0.016	0.020	0.047	0.052	ok	ok	ok	ok	
11	DK 3+517.09	Jalan	-	Jalan	0.016	-	0.048	-	ok	-	ok	-	
12	DK 3+624.35	Jalan	-	Gedung	0.014	0.018	0.057	0.061	ok	ok	ok	ok	
13	DK 3+705.55	Jalan		Gedung	0.016	0.017	0.043	0.047	ok	ok	ok	ok	
14	DK 3+821.34	Jalan		Gedung	0.018	0.019	0.025	0.049	ok	ok	ok	ok	
15	DK 3+931.25	-	Jalan	Gedung	0.019	0.024	0.022	0.058	ok	ok	ok	not ok	Perlu Perkuatan
16	DK 4+041.14	Jalan		Gedung	0.011	0.019	0.040	0.061	ok	ok	ok	ok	
17	DK 4+151.15	Jalan		Gedung	0.011	0.018	0.038	0.052	ok	ok	ok	ok	
18	DK 4+248.81	Jalan		Gedung	0.016	0.020	0.047	0.051	ok	ok	ok	ok	
19	DK 4+330.56	Jalan		Gedung	0.016	0.020	0.037	0.041	ok	ok	ok	ok	
20	DK 4+446.31	Jalan		Gedung	0.017	0.020	0.040	0.046	ok	ok	ok	ok	

	Deformasi izin (m)	
	Di bawah Jalan	Di bawah Bangunan
China Code	0.02	0.02
Indonesia Code	0.1	0.15



Gambar 139 Penurunan di permukaan tanah asli dibawah jalan sebelum dan setelah ada gempa.



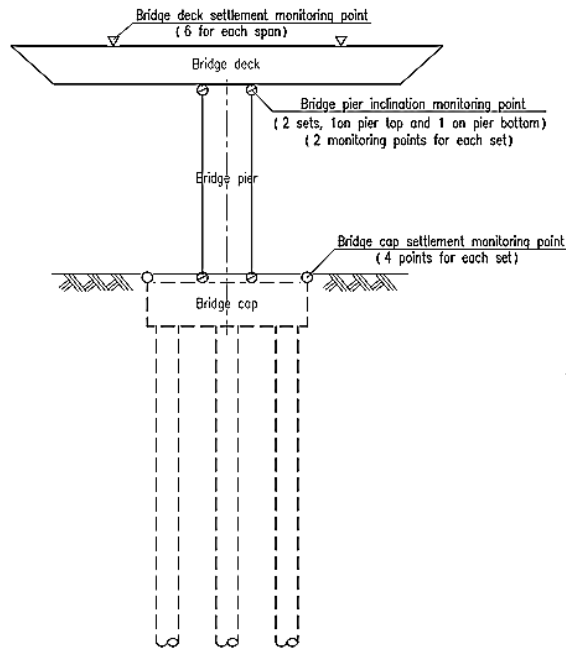
Gambar 140 Penurunan di permukaan tanah asli di bawah bangunan gedung sebelum dan setelah ada gempa.

17. MONITORING DI LAPANGAN

Instrumentasi di lapangan dipasang guna mengetahui pergerakan yang terjadi di beberapa titik tinjau akibat adanya konstruksi terowongan. Titik pengamatan dipasang di beberapa lokasi seperti:

1. Jembatan

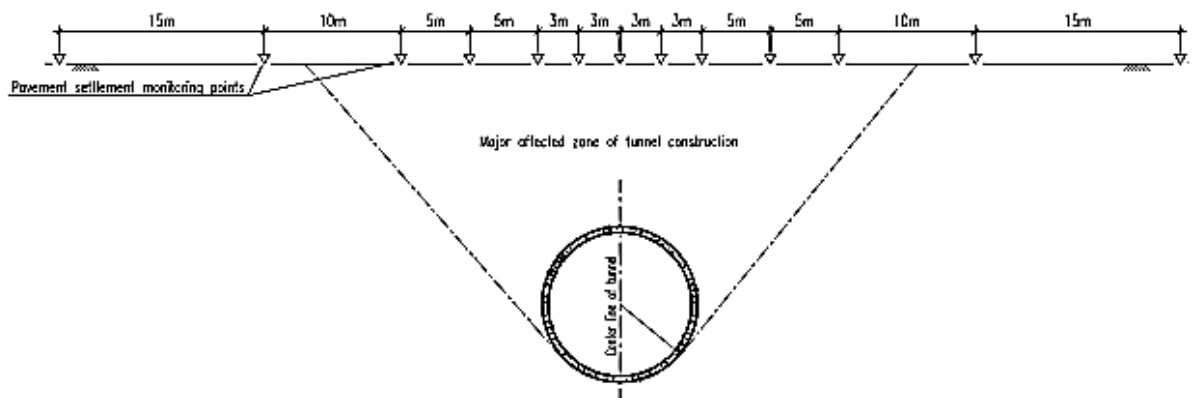
Pada bagian jembatan eksisting yang berada di sekitar konstruksi terowongan, monitoring dipasang pada beberapa titik seperti pada bridge deck dan bridge cap. Skema pemasangan titik monitoring dapat dilihat pada **Gambar 141**.



Gambar 141 Skema pemasangan titik monitoring pada jembatan

2. Pavement

Konstruksi galian terowongan yang dilakukan berada di sekitar jalan tol sehingga perlu dipasang titik monitoring di bagian perkerasan jalan dan sekitarnya guna mengetahui besar penurunan yang mungkin terjadi di permukaan jalan. Skema pemasangan titik monitoring pada bagian pavement jalan dapat dilihat pada **Gambar 142**.



Gambar 142 Skema pemasangan titik monitoring pada pavement

3. Struktur Gedung

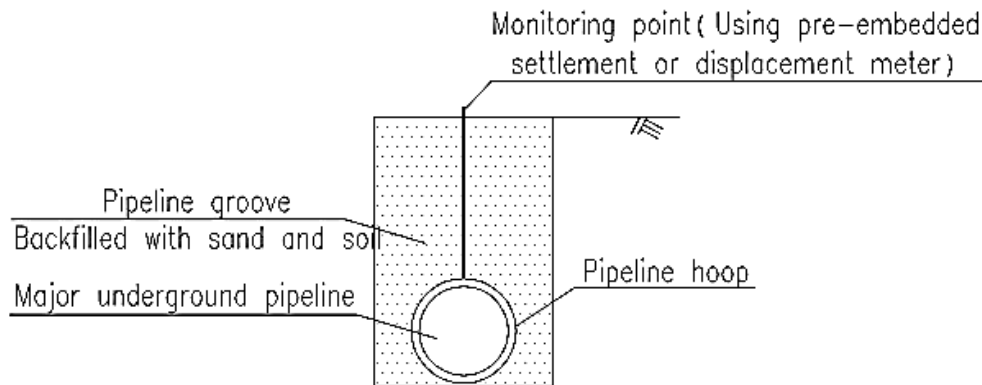
Titik monitoring yang dipasang pada bagian struktur Gedung di sekitar area konstruksi terowongan dipasang untuk mengetahui penurunan yang mungkin terjadi pada gedung. Titik monitoring pada Gedung dipasang pada bagian kaki Gedung dengan skema pemasangan seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 143**.



Gambar 143 Skema pemasangan titik monitoring pada struktur Gedung

4. Bawah tanah

Deformasi yang terjadi di dalam tanah di sekitar konstruksi terowongan dilakukan dengan memasang instrument pipeline untuk memonitor pergerakan yang terjadi. Skema pemasangan titik monitoring di dalam tanah dapat dilihat pada **Gambar 144**.



Gambar 144 Skema pemasangan titik monitoring pada tanah di sekitar terowongan

Layout monitoring dan detail keterangan monitoring dapat dilihat pada **Lampiran D**.

Tabel 60 Monitoring dan Indikator control terhadap deformasi serta respon yang dapat dilakukan

Monitoring project	Daily change rate control value	Cumulative control value	Overrun response
Surface subsidence	3mm/d	20mm	Reduce the ground load around the foundation pit
Surface uplift	1mm/d	10mm	Reduce the pressure difference. When the sidewall is grouted, there is a grouting pressure, and the overall gravity increases, and the consolidation time is long, which is unfavorable to the stability of the foundation pit. Unloading can reduce the load, which is conducive to stability and control of deformation. Accelerating excavation will result in greater deformation and unfavorable stability. Pile up the soil in front of the bottom wall of the pit, increase the earth pressure in the pit, reduce the pressure difference, and help stabilize
Surrounding water level	0.500m/d	1.000m	Pumping and drainage according to the actual water level
Wall force	—	1158KN	Reduce the ground load around the foundation pit

Wall top displacement	1.5mm/d	15mm	Reduce the ground load around the foundation pit
Deep horizontal displacement of the wall	3mm/d	30mm	Reduce the ground load around the foundation pit
Wall top, column settlement	2mm/d	15mm	Reduce the ground load around the foundation pit
Supporting axial force	—	See Detail	Increase the cross support according to the actual situation

Tabel 60 Monitoring dan Indikator control terhadap deformasi serta respon yang dapat dilakukan (lanjutan)

Monitoring projects and geotechnical types		Cumulative value (mm)	Rate of change (mm·d-1)	Overrun response
Surface subsidence	Hard~ Medium hard soil	10~20	3	Adjust the excavation parameters appropriately and increase the pressure on the face
	Medium soft~ Soft soil	15~25	3	Adjust the excavation parameters appropriately and increase the pressure on the face
Surface uplift		10	3	Adjust the excavation parameters appropriately and increase the pressure on the face

Tabel 60 Monitoring dan Indikator control terhadap deformasi serta respon yang dapat dilakukan (lanjutan)

Monitoring projects and geotechnical types		Cumulative value (mm)	Rate of change (mm·d-1)	Overrun response
Segmental structure settlement	Hard~ Medium hard soil	10~20	2	Secondary grouting reinforcement in the tunnel
	Hard~ Medium hard soil	20~30	3	Secondary grouting reinforcement in the tunnel
Segmental structure differential settlement		0.04%Ls	-	Secondary grouting reinforcement in the tunnel
Segment structure clearance		0.2%D	3	Secondary grouting reinforcement in the tunnel

Tabel 60 Monitoring dan Indikator control terhadap deformasi serta respon yang dapat dilakukan (lanjutan)

Monitoring Item	Cumulative value	Displacement average rate control value	Rate of change	Overrun response
Segment convergence	26mm	1mm/d	3mm/d	Secondary grouting reinforcement in the tunnel
Surface building Settlement	20mm	0.5mm/d	1.5mm/d	Secondary grouting reinforcement in the tunnel, and ground grouting reinforcement at the same time
Highway pavement	20mm	0.7mm/d	2mm/d	Secondary grouting reinforcement in the tunnel, and ground grouting reinforcement at the same time
Light Rail	16mm	0.5mm/d	1.5mm/d	Secondary grouting reinforcement in the tunnel, and ground grouting reinforcement at the same time
Light rail frame pier	16mm	0.5mm/d	1.5mm/d	Secondary grouting reinforcement in the tunnel, and ground grouting reinforcement at the same time
Pedestrian bridge	30mm	1mm/d	3mm/d	Secondary grouting reinforcement in the tunnel, and ground grouting reinforcement at the same time
Interworking abutment	20mm	0.5mm/d	1.5mm/d	Secondary grouting reinforcement in the tunnel, and ground grouting reinforcement at the same time
Building settlement, tilt	Masonry load-bearing structure : 0.002 ; Construction and construction of the framework : 0.002。 Multi-storey and high-rise buildings:0.004 (Height≤24m) , 0.003 (24m<Height≤60m) 。			
Pipeline displacement settlement	Various pipeline management departments or regulatory requirements			

Sejak dimulainya pembangunan pada Oktober 2018, pekerjaan pemantauan konstruksi telah berkembang dengan baik. Pembangunan proyek telah terkendali dengan baik. Fluktuasi data pemantauan menunjukkan nilai yang kecil, struktur bangunan di sekitar terbilang stabil dan tidak ditemukan keanehan selama konstruksi.

Kesimpulan: Data pemantauan masing-masing proyek pemantauan menunjukkan hasil yang stabil, rata-rata perubahan harian dan variasi kumulatif masih menunjukkan nilai dalam kisaran desain yang diperbolehkan, jumlah kumulatif relatif kecil, dan dasar sumur pondasi berada dalam keadaan stabil dan dapat dikendalikan serta tegangan yang terjadi pada struktur secara keseluruhan terbilang stabil.

Berdasarkan hasil monitoring di lapangan, besar deformasi yang terjadi dapat dilihat pada **Tabel 61**

Tabel 61 Hasil monitoring saat ini

Monitoring Item	Single maximum change	Cumulative maximum change		Design control value
Surface subsidence	1.41mm/d	8.51mm		20mm
Surface uplift	0.64mm/d	2.27mm		10mm
Groundwater level	0.341m/d	0.615m		1.000m
Wall force	8.2KN/d	44.4KN		1158KN
Wall top displacement	0.87mm/d	5.76mm		15mm
Deep horizontal displacement of the wall	1.62mm/d	16.41mm		30mm
Wall top, column settlement	0.71mm/d	4.02mm		15mm
Supporting axial force	First road	50.8KN/d	449.03 KN	See the table below
	Second road	35.9KN/d	1430.2 KN	
	Third road	28.4KN/d	871.6 KN	
	First road	50.8KN/d	449.03 KN	

Tabel 62 Support axial force control index

Phase Mileage	First steel pipe support	Second steel pipe support	Third steel pipe support
	Design axial force value (KN)	Design axial force value (KN)	Design axial force value (KN)
DK2+539.1~DK2+580.8	795	1185	—
DK2+580.8~DK2+637.2	1225	1630	—
DK2+637.2~DK2+667.3	1590	1350	—
DK2+667.3~DK2+715.4	1725	1985	—
DK2+715.4~DK2+745.4	2090	2295	2665
DK2+745.4~DK2+772.6	3020	3480	4725

18. DESAIN PENULANGAN TEROWONGAN

Desain penulangan pada terowongan diperhitungkan terhadap beberapa kondisi dengan detail perhitungan yang dapat dilihat pada **Lampiran E**.

19. EMERGENCY EVACUATION PLAN OF TUNNEL 1

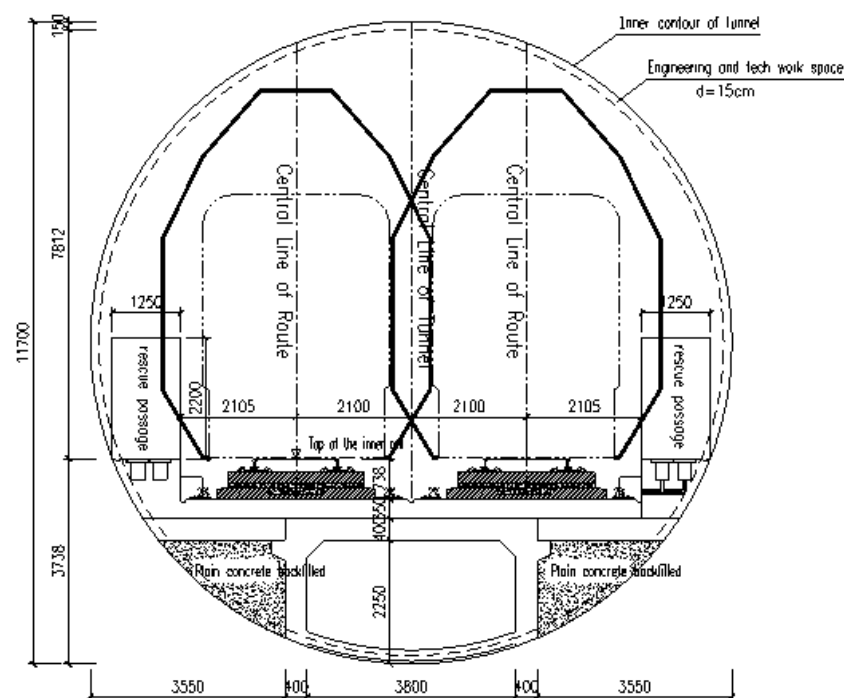
Prinsip pedoman evakuasi darurat dari terowongan China yaitu ketika terjadi kebakaran di dalam terowongan, maka kereta perlu dikendalikan untuk keluar dari dalam terowongan sehingga dapat dilakukan proses evakuasi.

- Banyaknya material tahan api yang digunakan pada kereta api cepat China, dimana dapat mengurangi potensi kebakaran
- Kecepatan sisa dari kereta yang terbakar. Mengacu pada "High-speed Railway Design Code", setelah kehilangan seperempat dari kemampuan dari EMU, kereta bisa tetap mempertahankan kecepatan lebih dari 100 km/jam dan jika dihitung terhadap kondisi terburuk maka kereta masih dapat melaju dengan kecepatan 80 km/jam
- Waktu yang tersisa dari kereta yang terbakar. Waktu yang tersisa setelah kereta mengalami kebakaran yaitu 15 hingga 20 menit. Kereta dapat berpindah dalam waktu 15 menit dengan kecepatan 80 km/jam sejauh 20 km

Rescue channel

Mengacu pada spesifikasi, tunnel rescue yang didesain untuk kecepatan 200 km/jam yaitu memiliki lebar 1.25 m dan tinggi 2.2 m. rescue channel ditunjukkan dengan tanda pada setiap 100 m, yang mengindikasikan jarak menuju portal terowongan, serta dilengkapi dengan penunjuk arah yang jelas.

No. 1 Tunnel didesain untuk kecepatan 180 km/jam. Sehingga, rescue channel dipasang pada kedua belah sisi pada Tunnel 1. Rescue channel memiliki lebar 1.25 m dan tinggi 2.2 m.



Gambar 145 Inner contour of shield tunnel

Tabel 63 Comparison of rescue channels widths of railway tunnels in different countries

country	China	Japan	International Railway Union	EU	United States
rescue channels widths	>0.75m	No	>0.7m	>0.8m	>0.61m

Fasilitas evakuasi penyelamatan

Berdasarkan penelitian yang dilakukan pada model nyata dan simulasi numerik untuk kecelakaan atau kebakaran pada kereta api cepat yang dilakukan oleh institusi China, disimpulkan bahwa apabila panjang terowongan 20 km, probabilitas keselamatan berkendara dengan terowongan sebesar 99.99%; sedangkan apabila panjang terowongan 12 km, probabilitas keselamatan berkendara dengan terowongan sebesar 99.9975%.

Berdasarkan dari penelitian di atas, mengacu pada "Code for Design of Railway Tunnels", terowongan terdiri dari satu silinder dengan panjang $\leq 5\text{km}$, disarankan untuk mengkombinasikan konstruksi ruangan yang dapat membantu mengatur jalur atau ruangan untuk berkumpul saat proses evakuasi; Jika terowongan memiliki panjang $\geq 10\text{km}$, perlu lebih dari satu jalur darurat atau ruangan berkumpul saat proses evakuasi di dalam terowongan. Dengan kondisi panjang terowongan Jakarta-Bandung $\leq 5\text{km}$, maka jalur darurat tidak dibuat secara