

## Analisis Stabilitas Tanggul Sungai Tondano, Kabupaten Minahasa, Sulawesi Utara

Ilham<sup>1</sup>, Redho Muktadir<sup>2</sup>, Fadhila Muhammad Libasut Taqwa<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Sains Bandung

<sup>2, 3</sup> Program Studi Teknik Sipil, Universitas Ibn Khaldun Bogor

Email: [ilham@itsb.ac.id](mailto:ilham@itsb.ac.id);\* [redhomuktadir@uika-bogor.ac.id](mailto:redhomuktadir@uika-bogor.ac.id); [fadhila.muhammad@uika-bogor.ac.id](mailto:fadhila.muhammad@uika-bogor.ac.id);

### ABSTRAK

Tanggul Sungai Tondano memiliki peran vital dalam melindungi kawasan permukiman dan lahan pertanian di Kabupaten Minahasa dari ancaman banjir. Namun, data Badan Penanggulangan Bencana Daerah (2022) mengindikasikan bahwa sekitar 30% segmen tanggul telah mengalami kerusakan struktural seperti retakan dan amblesan akibat rembesan air serta erosi pada lereng hilir. Studi ini bertujuan untuk mengevaluasi stabilitas tanggul pada enam penampang kritis (P54, P78, CP7, P126, CP24, P170) menggunakan perangkat lunak GEO5 2022 dengan metode Spencer dan Morgenstern-Price. Hasil analisis menunjukkan bahwa tanpa perkuatan, beberapa penampang memiliki faktor keamanan (FK) yang tidak memenuhi syarat ( $FK < 1,5$ ), dengan nilai terendah sebesar 0,67 pada CP7 dan 0,76 pada P126. Penerapan *sheet pile* tipe III-n dengan kedalaman 12 meter pada penampang P54 dan P126 masih menunjukkan deformasi yang melebihi kapasitas struktur, sehingga diperlukan tambahan perkuatan bronjong sebagai tahanan pasif. Kombinasi *sheet pile* dan bronjong berhasil meningkatkan FK menjadi 1,91 pada P54 dan 1,86 pada P126. Penelitian ini merekomendasikan tiga tipe desain: Tipe 1 (kombinasi *sheet pile* dan bronjong), Tipe 2 (*sheet pile* saja), dan Tipe 3 (tanpa perkuatan). Selain itu, pemasangan *riprap* disarankan pada seluruh lereng hilir untuk mengantisipasi potensi erosi lebih lanjut.

**Kata kunci:** Stabilitas Tanggul, Sheet Pile tipe III-n, Faktor Keamanan (FK), Motode Morgenstern-Price, Perkuatan Bronjong, Risiko Erosi.

### ABSTRACT

The Tondano River embankment serves a critical function in safeguarding residential areas and agricultural lands in Minahasa Regency against flood risks. However, according to data from the Regional Disaster Management Agency (2022), approximately 30% of the embankment segments have exhibited structural distress, including longitudinal cracking and subsidence, primarily triggered by internal seepage and toe erosion on the downstream slopes. This study evaluates the structural stability of the embankment at six critical cross-sections (P54, P78, CP7, P126, CP24, and P170) utilizing GEO5 2022 software, employing both the Spencer and Morgenstern-Price limit equilibrium methods. The analytical results indicate that under existing conditions, several sections failed to meet the minimum required safety factor ( $SF < 1.5$ ), with critical values falling as low as 0.67 at CP7 and 0.76 at P126. While the implementation of Type III-n sheet piles with a 12-meter penetration depth was modeled at P54 and P126, the resulting deformations exceeded the structural capacity, necessitating the integration of gabion structures to provide additional passive resistance. This combined reinforcement strategy successfully increased the safety factor to 1.91 for P54 and 1.86 for P126. Based on these findings, the study proposes three distinct design classifications: Type 1 (integrated sheet pile and gabion system), Type 2 (stand-alone sheet pile), and Type 3 (unreinforced). Additionally, the installation of riprap protection is highly recommended across all downstream slopes to mitigate long-term erosive effects.

**Keywords:** Embankment Stability, Type III-n Sheet Pile, Safety Factor (SF), Morgenstern-Price Method, Gabion Reinforcement

Submitted:	Reviewed:	Revised	Published:
5 Januari 2026	25 Januari 2026	03 Februari 2026	09 Februari 2026

### PENDAHULUAN

Tanggul Sungai Tondano berperan vital sebagai pelindung permukiman dan lahan pertanian di

Kab. Minahasa dari ancaman banjir. Berdasarkan pemantauan Badan Penanggulangan Bencana Daerah Kab. Minahasa (2022), 30% segmen

tanggul menunjukkan kerusakan struktural (retakan, amblasan) akibat rembesan air dan erosi lereng hilir. Desain eksisting menggabungkan dinding penahan (*cyclopean concrete*), *backfill*, dan *sheet pile*, namun belum optimal menanggulangi variasi parameter tanah antar penampang.

Stabilitas tanggul mengacu pada kemampuan struktur tanggul untuk tetap stabil dan tidak mengalami keruntuhan akibat berbagai gaya yang bekerja padanya.

Seperti halnya pondasi rumah yang harus kuat menahan beban bangunan, tanggul harus mampu menahan tekanan air sungai, berat material penyusunnya, serta gaya-gaya tambahan seperti rembesan air dan gempa. Stabilitas ini sangat tergantung pada kekuatan material tanah penyusun tanggul dan desain strukturnya.

Erosi tanggul adalah proses pengikisan material penyusun tanggul oleh aliran air sungai. Proses ini mirip dengan bagaimana air hujan dapat mengikis tanah di pekarangan rumah secara perlahan. Erosi biasanya dimulai dari bagian hilir tanggul yang langsung berhadapan dengan aliran air, terutama pada tikungan sungai dimana arus lebih deras. Jika tidak dicegah, erosi dapat membahayakan stabilitas seluruh struktur tanggul.

Sheet pile merupakan struktur baja berbentuk panel panjang yang ditancapkan ke dalam tanah sepanjang tanggul. Fungsinya mirip dengan tiang pancang yang memperkuat pondasi bangunan.

Sheet pile bekerja dengan cara menahan tekanan tanah dan mencegah pergerakan material tanggul, terutama pada bagian yang rentan longsor. Material baja yang digunakan dirancang khusus untuk tahan terhadap korosi akibat terus terendam air.

Bronjong adalah struktur anyaman kawat baja berbentuk kotak yang diisi dengan batu-batu kecil. Bayangkan seperti keranjang anyaman yang diisi batu, kemudian disusun sepanjang tanggul. Bronjong berfungsi ganda: sebagai penahan tanah sekaligus pelindung permukaan tanggul dari erosi. Keunggulannya adalah fleksibilitasnya dalam mengikuti kontur tanah dan kemampuannya menyerap energi aliran air. Riprap merupakan lapisan pelindung yang terdiri dari batu-batu besar yang disusun rapat di permukaan tanggul. Fungsinya seperti baju pelindung yang melindungi tubuh dari benturan.

Riprap sangat efektif mencegah erosi karena batu-batu besar ini mampu menahan gaya gesek aliran air sekaligus memecah energi arus sungai.

## GEO5

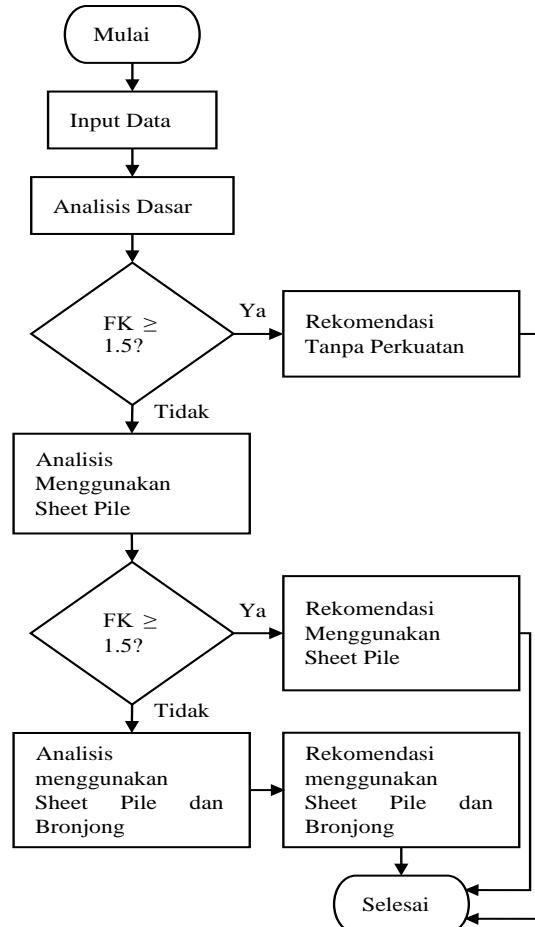
GEO5 adalah program komputer khusus yang digunakan para insinyur untuk menganalisis dan

merancang struktur geoteknik seperti tanggul. Software ini ibarat simulator canggih yang bisa memprediksi bagaimana tanggul akan berperilaku ketika menghadapi berbagai kondisi, mulai dari banjir hingga gempa bumi. GEO5 dapat dieprgunakan untuk menilai stabilitas berbagai model desain perkuatan sebelum benar-benar membangunnya di lapangan.

## METODOLOGI PENELITIAN

### Alur Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan analisis numerik berbasis perangkat lunak GEO5 2022 untuk mengevaluasi stabilitas tanggul Sungai Tondano. Analisis dilakukan pada 6 penampang kritis (P54, P78, CP7, P126, CP24, P170) yang dipilih berdasarkan riwayat kerusakan dan variasi geoteknik. Secara sistematis, tahapan penelitian dimulai dengan karakterisasi parameter tanah dan geometri tanggul untuk membangun model numerik yang merepresentasikan kondisi lapangan yang sebenarnya. Tahap selanjutnya adalah analisis stabilitas lereng eksisting untuk mengidentifikasi potensi keruntuhan berdasarkan nilai Faktor Keamanan (FK).



**Gambar 1** Bagan Alir Penelitian

Apabila hasil analisis menunjukkan kondisi tidak stabil ( $FK < 1,5$ ), maka dilakukan iterasi desain perkuatan secara bertahap, mulai dari pemasangan *sheet pile* tipe III-n hingga penambahan struktur bronjong sebagai pemberat atau tahanan pasif pada kaki lereng. Proses ini dilakukan berulang hingga diperoleh desain yang memenuhi kriteria keamanan struktural dan teknis. Seluruh rangkaian prosedur penelitian ini diringkas secara visual dalam diagram alir berikut.

### Parameter Tanah

Interpretasi parameter tanah yang digunakan dalam analisis stabilitas tanggul Sungai Tondano dilakukan menggunakan data *bore hole* (BH) dan *hand bore* (HB) yang sudah dilakukan. Interpretasi geoteknik terhadap parameter tanah juga mempertimbangkan korelasi-korelasi dari studi terdahulu. untuk memastikan akurasi nilai yang digunakan.

Penentuan parameter desain difokuskan pada nilai berat isi tanah ( $\gamma$ ), sudut geser dalam ( $\varphi$ ), dan kohesi (c) pada setiap lapisan tanah. Mengingat variasi jenis tanah di sepanjang bantaran sungai, klasifikasi lapisan tanah dilakukan untuk menentukan lapisan dominan yang berpengaruh terhadap bidang gelincir. Penggunaan data korelasi empiris dilakukan secara selektif untuk melengkapi parameter yang tidak tersedia dari uji laboratorium, sehingga model numerik yang dibangun memiliki tingkat validitas yang tinggi dalam merepresentasikan perilaku tanah asli terhadap beban hidrostatik dan beban struktural tanggul.

Stratifikasi parameter tanah pada cross section P54 diperlihatkan pada tabel di bawah ini.

**Tabel 1 Soil Layer Cross Section P54**

No	Soil Layer	Depth [m]	Thickness [m]	NSPT
1	Sandy Clay N=7	0	3	3,00
2	Sand N=9	3	10	7,00
3	Corally Sand N=21	10	14	4,00
4	Sand N=19	14	20	6,00
5	Gravelly Sand N=52	20	26	6,00

(Sumber: Hasil Hitungan)

Korelasi parameter tanah hasil uji SPT pada titik P54 diperlihatkan pada tabel di bawah ini.

**Tabel 2 Soil Type Cross Section P54**

No	Soil Type	$\gamma_{moist}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Su (kPa)	c' (kPa)	$\varphi'$ (°)	E <sub>oed</sub> (kPa)
Type	Sub Unit					
1	Clay	2,1	16,0	4,20	21,38	10.500
2	Sand	4,2	15,0	-	0,00	28,42 13.500
3	Sand	4,3	16,0	-	0,00	35,49 31.500
4	Sand	4,3	16,0	-	0,00	34,49 28.500
5	Sand	4,5	19,0	-	0,00	44,98 78.000

Stratifikasi parameter tanah pada cross section P78 diperlihatkan pada tabel di bawah ini.

**Tabel 3 Soil Layer Cross Section P78**

No	Soil Layer	Depth [m]	Thickness [m]	NSPT <sub>ave</sub>
1	Silty Clay N=5	0	4	4,00
2	Corally Sandy Clay N=10	4	8	4,00
3	Corally Sand Gravel N=13	8	12	4,00
4	Sandy Clayey Silt N=15	12	16	4,00
5	Clayey Silty Gravelly Sand N=31	16	26	10,00

Korelasi parameter tanah hasil uji SPT pada titik P78 diperlihatkan pada tabel di bawah ini.

**Tabel 4 Soil Type Cross Section P78**

No	Soil Type	$\gamma_{moist}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Su (kPa)	c' (kPa)	$\varphi'$ (°)	E <sub>oed</sub> (kPa)
Type	Sub Unit					
1	Clay	2,1	16,0	3,00	21,37	7.500
2	Clay	2,2	16,5	6,00	21,37	15.000
3	Sand	4,3	16,0	-	31,12	19.500
4	Clay	2,2	16,5	9,00	21,37	22.500
5	Sand	4,4	17,0	-	39,29	46.500

Stratifikasi parameter tanah pada cross section P7 diperlihatkan pada tabel di bawah ini.

**Tabel 5 Soil Layer Cross Section P7**

No	Soil Layer	Depth [m]	Thickness [m]	NSPT <sub>ave</sub>
1	Clay N=3	0	3	3,00
2	Slity Sand Coraly N=5	3	8	5,00
3	Sand Silty Clay N=17	8	12	4,00
4	Sand Gravel N=21	12	18	6,00
5	Clay Gravely Sand N=44	18	22	4,00

Korelasi parameter tanah hasil uji SPT pada titik P7 diperlihatkan pada tabel di bawah ini.

**Tabel 6 Soil Type Cross Section P7**

No	Soil Type	$\gamma_{moist}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	Su (kPa)	c' (kPa)	$\varphi'$ (°)	E <sub>oed</sub> (kPa)
Type	Sub Unit					
1	Clay	1,2	15,0	15,00	1,50	21,17 3.000
2	Sand	4,2	15,0	-	0,00	25,00 4.000
3	Sand	4,3	16,0	-	0,00	33,44 6.400
4	Sand	4,3	16,0	-	0,00	35,49 7.200
5	Sand	4,4	17,0	-	0,00	42,98 11.800

Stratifikasi parameter tanah pada cross section P126 diperlihatkan pada tabel di bawah ini.

**Tabel 7 Soil Layer Cross Section P126**

No	Soil Layer	Depth [m]	Thickness [m]	NSPT <sub>ave</sub>
1	Silt Clay N=4	0	5	5,00
2	Sand Silt N=9	5	12	7,00
3	Coraly Sily Gravelly Sand N=20	12	17	5,00
4	Coraly Silty Gravelly Sand N=50	17	22	5,00

Korelasi parameter tanah hasil uji SPT pada titik P126 diperlihatkan pada tabel di bawah ini.

**Tabel 8 Soil Type Cross Section P126**

No	Soil Type Type	Sub Unit	$\gamma_{moist}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	S <sub>u</sub> (kPa)	c' (kPa)	$\phi'$ (°)	E <sub>oed</sub> (kPa)
1	Sand	4.1	15.0	15.00	1.50	21,17	3.000
2	Sand	4.2	15.0	-	0.00	25,00	4.000
3	Sand	4.3	16.0	-	0.00	33,44	6.400
4	Sand	4.4	16.0	-	0.00	35,49	7.200

Stratifikasi parameter tanah pada cross section P24 diperlihatkan pada tabel di bawah ini.

**Tabel 9 Soil Layer Cross Section P24**

No	Soil Layer	Depth [m]	Thickness [m]	NSPT <sub>ave</sub>
1	Clay N=6	0	5	5,00
2	Sand N=15	5	10	5,00
3	Sand With Boulder N=4	10	24	14,00

Korelasi parameter tanah hasil uji SPT pada titik P24 dan P170 diperlihatkan pada tabel di bawah ini.

**Tabel 10 Soil Type Cross Section P24**

No	Soil Type Type	Sub Unit	$\gamma_{moist}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	S <sub>u</sub> (kPa)	c' (kPa)	$\phi'$ (°)	E <sub>oed</sub> (kPa)
1	Clay	2.1	16.0	36.00	3.60	21,38	7.200
2	Sand	4.3	15.0	-	0.00	32,32	6.000
3	Sand	4.4	17.0	-	0.00	42,72	11.600

**Tabel 11 Soil Layer Cross Section P170**

No	Soil Layer	Depth [m]	Thickness [m]	NSPT <sub>ave</sub>
1	Clay N=5	0	6	6
2	SandyClay N=13	6	14	8
3	Sand N=23	14	18	4
4	Sand With Gravel N=50	18	24	6

Korelasi parameter tanah hasil uji SPT pada titik P24 dan P170 diperlihatkan pada tabel di bawah ini.

**Tabel 12 Soil Type Cross Section P24**

No	Soil Type Type	Sub Unit	$\gamma_{moist}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	S <sub>u</sub> (kPa)	c' (kPa)	$\phi'$ (°)	E <sub>oed</sub> (kPa)
1	Clay	2.1	16.0	30	3.00	21.37	6,000
2	Clay	2.2	16.5	78	7.80	21.37	15,600
3	Sand	4.3	16.0	-	0.00	36.45	7,600
4	Sand	4.4	17.0	-	0.00	44.49	13,000

## HASIL DAN PEMBAHASAN

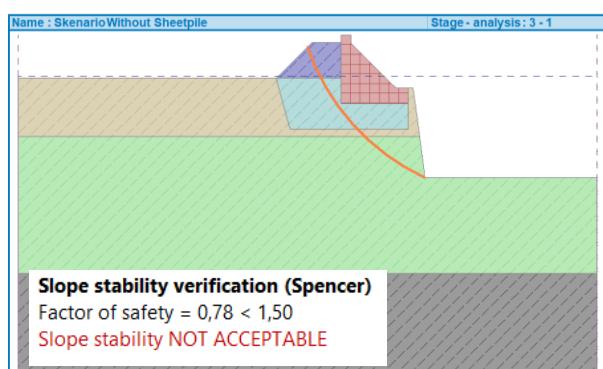
### Analisis Stabilitas Desain Tanggul Sungai Tondano Cross Section P54

#### Tanpa Sheet Pile

Pada Cross Section P54, dilakukan perhitungan menggunakan perangkat lunak GEO5 untuk mengevaluasi stabilitas lereng tanggul dalam kondisi asli atau sebelum diberikan perkuatan tambahan. Penampang P54 merupakan salah satu

titik tinjauan utama karena geometri lerengnya yang cukup terjal dan beban hidrostatik yang signifikan dari aliran sungai.

Hasil simulasi menunjukkan profil bidang gelincir yang terbentuk pada lereng tanggul. Berdasarkan analisis metode Morgenstern-Price, diperoleh nilai Faktor Keamanan (FK) yang mencerminkan tingkat kestabilan struktur terhadap potensi kelongsoran. Nilai FK pada kondisi tanpa perkuatan ini menjadi parameter banding utama untuk menentukan apakah struktur tanggul pada titik P54 memerlukan intervensi teknis berupa pemasangan *sheet pile* atau kombinasi perkuatan lainnya guna memenuhi standar keamanan yang ditetapkan dalam SNI 8460:2017. Adapun hasil perhitungan rinci menggunakan GEO5 pada penampang ini didapatkan hasil yang tidak memenuhi syarat, yaitu faktor keamanan 0,78 (syarat  $FK \geq 1.5$ ), oleh karena itu analisis berlanjut menggunakan Sheet Pile 12 m.



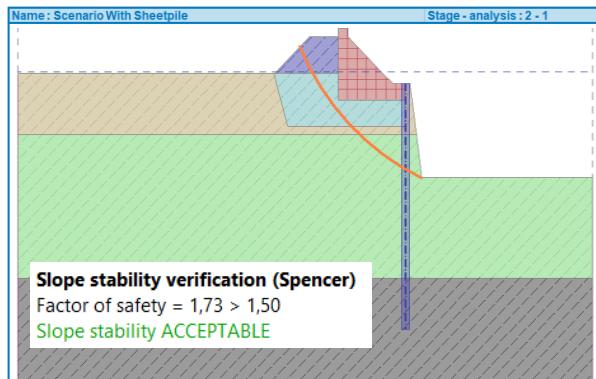
**Gambar 2** Analisis Stabilitas Tanggul Cross Section P54 Tanpa Sheet Pile  
(Sumber: Hasil Analisa)

#### Dengan Sheet Pile 12 m tipe III-n

Pada Cross Section P54, dilakukan simulasi perbaikan stabilitas dengan mengintegrasikan struktur perkuatan *Sheet Pile* tipe III-n sedalam 12 meter. Pemilihan kedalaman ini didasarkan pada upaya untuk mencapai lapisan tanah keras atau melewati bidang gelincir potensial yang ditemukan pada analisis sebelumnya. Pemasangan *sheet pile* bertujuan untuk meningkatkan gaya perlawan terhadap tekanan tanah lateral serta mengalihkan jalur rembesan air guna mengurangi tekanan pori pada tubuh tanggul.

Analisis menggunakan GEO5 pada tahap ini mengevaluasi interaksi antara tanah dan struktur perkuatan, di mana terlihat adanya peningkatan nilai Faktor Keamanan (FK) yang signifikan. Selain meninjau stabilitas global, simulasi ini juga memperhatikan deformasi yang terjadi pada struktur *sheet pile* untuk memastikan bahwa

kapasitas momen dan gaya lintang material tetap berada dalam batas izin yang aman.



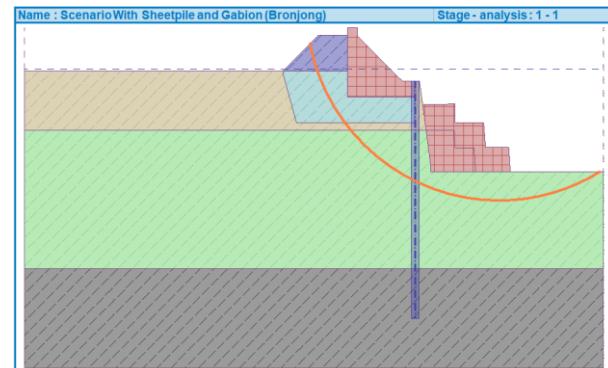
**Gambar 3** Analisis Stabilitas Tanggul *Cross Section* P54 Dengan Sheet Pile 12 m tipe III-n  
 (Sumber: Hasil Analisa)

Didapatkan hasil yang memenuhi syarat, yaitu faktor keamanan 1.73 (syarat  $FK \geq 1.5$ ), namun demikian secara perhitungan deformasi dan gaya dalam sheet pile tidak memenuhi kapasitas. Oleh karena itu analisis berlanjut menggunakan Sheet Pile 12 m dan Bronjong.

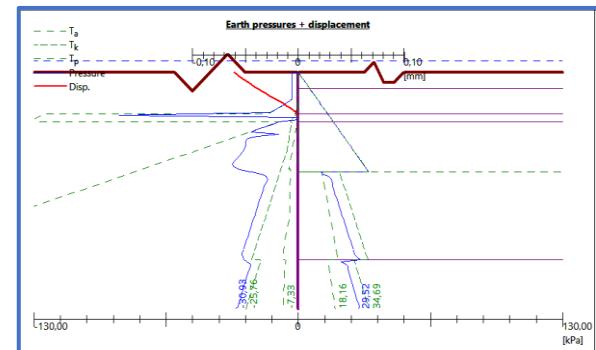
**Dengan Sheet Pile 12 m tipe III-n dan Bronjong**  
 Pada tahapan ini, dilakukan simulasi perkuatan optimal dengan mengombinasikan *Sheet Pile* tipe III-n sedalam 12 meter dan penambahan struktur bronjong pada kaki tanggul. Langkah ini diambil sebagai solusi untuk mengatasi keterbatasan kapasitas *sheet pile* tunggal dalam menahan deformasi yang terjadi pada penampang P54. Pemasangan bronjong di bagian kaki lereng berfungsi sebagai tahanan pasif (*counterweight*) yang memberikan gaya tekan tambahan untuk menahan massa tanah, sementara *sheet pile* bekerja memperdaglam bidang gelincir. Hasil analisis menggunakan GEO5 menunjukkan bahwa integrasi kedua elemen ini tidak hanya meningkatkan nilai Faktor Keamanan (FK) secara signifikan hingga memenuhi standar keamanan yang dipersyaratkan, tetapi juga secara efektif mereduksi tingkat deformasi struktur sehingga tanggul berada dalam kondisi stabil dan aman. Adapun detail hasil perhitungan gaya-gaya dalam dan nilai stabilitas akhir pada penampang P54 adalah sebagai berikut.

Berdasarkan simulasi tahap akhir dengan perkuatan kombinasi, didapatkan hasil yang memenuhi syarat, yaitu faktor keamanan sebesar 1,91 (melampaui syarat minimum  $FK \geq 1,5$ ) dan

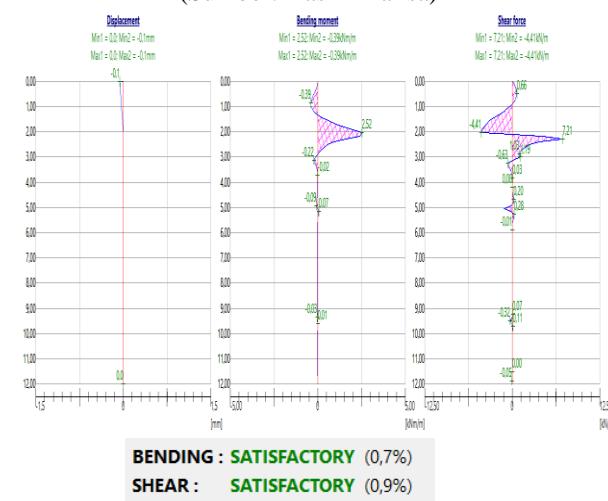
nilai deformasi pada *sheet pile* sebesar 0,1 mm (jauh di bawah batas izin deformasi < 1% dari panjang total *steel sheet pile*).



**Gambar 4** Analisis Stabilitas Tanggul *Cross Section* P54 Dengan Sheet Pile 12 m tipe III-n dan Bronjong



**Gambar 5** Distribusi Tekanan Tanah dan Displacement *Cross Section* P54  
 (Sumber: Hasil Analisa)



**Gambar 6** Gaya Internal dan Kinerja Struktur *Cross Section* P54  
 (Sumber: Hasil Analisa)

Pencapaian nilai ini mengonfirmasi bahwa integrasi antara *sheet pile* sebagai struktur penahan utama dan bronjong sebagai beban penyeimbang (*counterweight*) mampu bekerja secara sinergis dalam menstabilkan massa tanah tanggul. Dengan nilai deformasi yang sangat minimal, risiko kegagalan struktur akibat lentur atau pergeseran lateral dapat ditekan secara optimal. Oleh karena

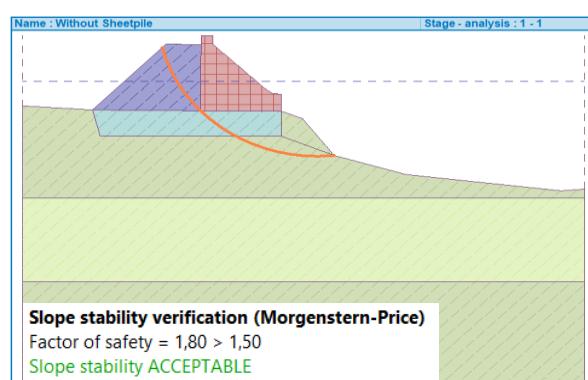
itu, konfigurasi desain ini dinyatakan sangat layak dan aman secara teknis untuk diterapkan pada segmen tanggul P49 hingga P65 sebagai solusi perlindungan jangka panjang terhadap ancaman kelongsoran.

### Analisis Stabilitas Desain Tanggul Sungai Tondano Cross Section P78

#### Tanpa Sheet Pile

Pada Cross Section P78, dilakukan evaluasi stabilitas menggunakan perangkat lunak GEO5 untuk meninjau kondisi keamanan lereng eksisting. Berbeda dengan titik sebelumnya, penampang P78 memiliki karakteristik geometri dan parameter tanah yang relatif lebih stabil, sehingga analisis ini bertujuan untuk memvalidasi apakah struktur eksisting sudah memenuhi standar keamanan tanpa memerlukan intervensi tambahan. Hasil simulasi numerik menunjukkan bahwa bidang gelincir yang terbentuk memiliki lintasan yang lebih dangkal dengan gaya penahan alami tanah yang cukup memadai. Berdasarkan perhitungan dengan metode Morgenstern-Price, nilai Faktor Keamanan (FK) yang diperoleh pada penampang ini telah melampaui ambang batas minimum 1,5 yang dipersyaratkan dalam SNI 8460:2017. Hal ini mengindikasikan bahwa distribusi tegangan di dalam tubuh tanggul masih berada dalam rentang aman terhadap beban hidrostatik sungai. Adapun rincian output grafis dan nilai Faktor Keamanan (FK) untuk penampang P78 adalah ditampilkan pada gambar 7.

Berdasarkan hasil pemodelan numerik, didapatkan hasil yang memenuhi syarat, yaitu faktor keamanan sebesar 1,80 (melampaui syarat minimum  $FK \geq 1,5$ ). Hasil ini menunjukkan bahwa pada titik P78, geometri lereng dan karakteristik lapisan tanah yang ada telah mampu memberikan perlawanan yang cukup terhadap beban internal maupun eksternal tanpa bantuan perkuatan struktural.



**Gambar 7** Analisis Stabilitas Tanggul Cross Section P78 Tanpa Sheet Pile  
(Sumber: Hasil Analisa)

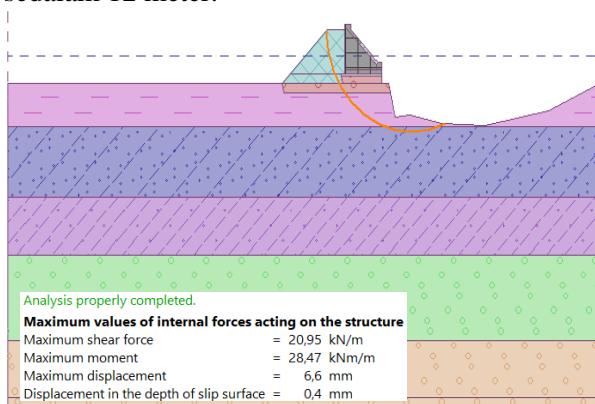
Karena nilai FK telah stabil di angka 1,80, maka penampang ini dikategorikan ke dalam Tipe 3 (Tanpa Sheet Pile). Keputusan untuk tidak menambahkan perkuatan pada segmen ini bertujuan untuk mengoptimalkan efisiensi biaya konstruksi tanpa mengesampingkan standar keamanan teknis. Meskipun demikian, pemantauan terhadap potensi erosi permukaan tetap disarankan agar stabilitas lereng tetap terjaga dalam jangka panjang.

### Analisis Stabilitas Desain Tanggul Sungai Tondano Cross Section P7

#### Tanpa Sheet Pile

Pada penampang CP7, dilakukan analisis stabilitas menggunakan perangkat lunak GEO5 untuk mengevaluasi kondisi eksisting tanggul. Titik ini merupakan salah satu lokasi paling kritis dalam studi ini karena memiliki geometri lereng yang curam dan parameter tanah yang lemah di bawah beban hidrostatik. Hasil simulasi menunjukkan bahwa gaya penahan internal tanah tidak cukup untuk mengimbangi gaya dorong lateral. Profil bidang gelincir yang terbentuk merupakan tipe keruntuhan rotasional yang dalam, yang mengindikasikan potensi longsor skala besar jika tidak dilakukan perkuatan. Berdasarkan perhitungan dengan metode Morgenstern-Price, kondisi ini menempatkan struktur tanggul pada risiko kegagalan tinggi.

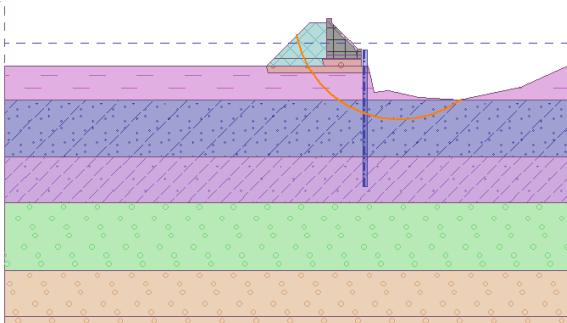
Dari model numerik yang diperlihatkan pada gambar 8, didapatkan hasil yang tidak memenuhi syarat, yaitu faktor keamanan (FK) hanya sebesar 0,67. Nilai ini berada jauh di bawah ambang batas minimum yang dipersyaratkan ( $FK \geq 1,5$ ), sehingga dinyatakan tidak aman secara teknis. Oleh karena itu, analisis dilanjutkan dengan mensimulasikan penggunaan perkuatan *Sheet Pile* sedalam 12 meter.



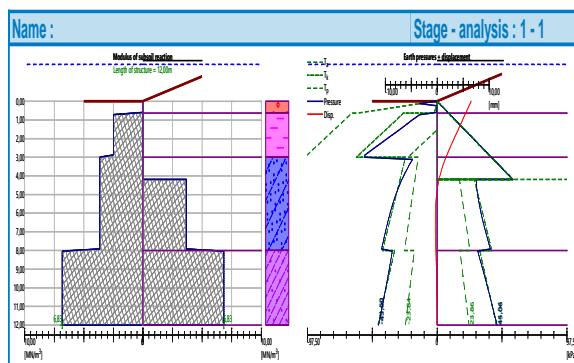
**Gambar 8** Analisis Stabilitas Tanggul Cross Section P7 Tanpa Sheet Pile  
(Sumber: Hasil Analisa)

### Dengan Sheet Pile 12 m tipe III-n

Mengingat kondisi eksisting pada penampang CP7 yang sangat tidak stabil, dilakukan upaya perbaikan stabilitas dengan mensimulasikan pemasangan struktur *steel sheet pile* tipe III-n sedalam 12 meter. Pemilihan panjang 12 meter ini bertujuan agar ujung *sheet pile* dapat mencapai lapisan tanah yang lebih kokoh untuk memberikan tahanan lateral yang optimal. Berdasarkan hasil analisis numerik menggunakan perangkat lunak GEO5, penggunaan *sheet pile* secara signifikan mengubah profil bidang gelincir dan meningkatkan daya dukung tanggul terhadap tekanan tanah serta beban air. Kehadiran struktur perkuatan ini memberikan gaya penahan tambahan yang cukup untuk menstabilkan massa tanah di area kritis. Setelah dilakukan pemodelan, diperoleh peningkatan nilai stabilitas yang cukup drastis dibandingkan kondisi sebelumnya tanpa perkuatan.

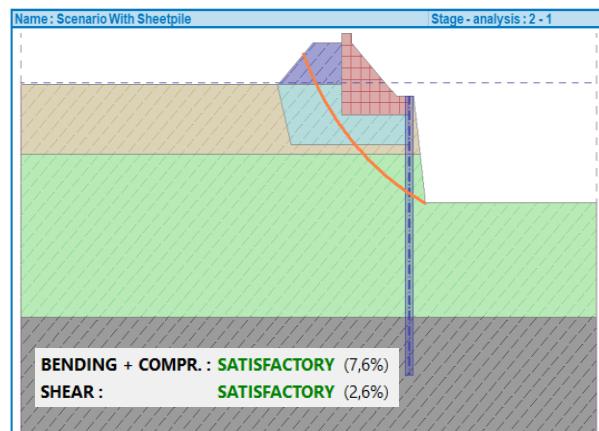


**Gambar 9** Analisis Stabilitas Tanggul *Cross Section* P7 Dengan Sheet Pile 12 m tipe III-n



**Gambar 10** Distribusi Tekanan Tanah dan Displacemen *Cross Section* P7 Dengan Sheet Pile 12 m tipe III-n

Didapatkan hasil yang memenuhi syarat, yaitu faktor keamanan 1,52 (syarat  $FK \geq 1,5$ ) dan nilai deformasi sheet pile 6,6 mm (syarat deformasi < 1% panjang steel sheet pile).

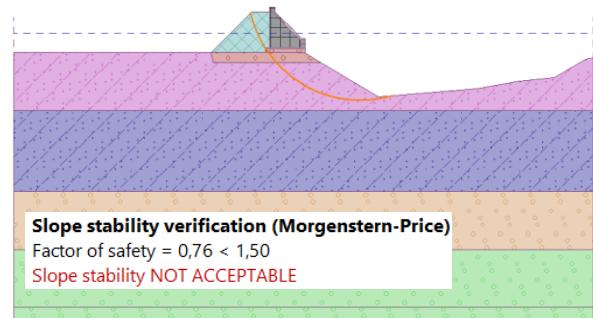


**Gambar 11** Gaya Internal dan Kinerja Struktur *Cross Section* P7  
 (Sumber: Hasil Analisa)

### Analisis Stabilitas Desain Tanggul Sungai Tondano *Cross Section* P126

#### Tanpa Sheet Pile

Analisis stabilitas pada penampang P126 dilakukan untuk mengevaluasi kekuatan tanggul dalam kondisi eksisting. Serupa dengan kondisi pada penampang CP7, titik P126 memiliki beban tekanan tanah lateral yang besar serta pengaruh rembesan air yang signifikan, sehingga memerlukan



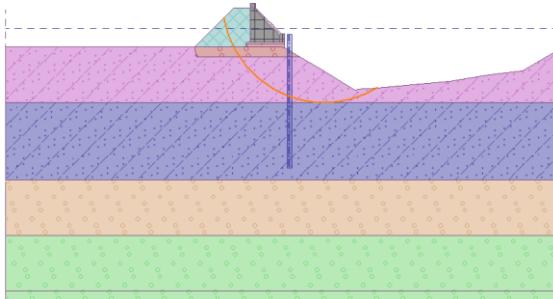
**Gambar 12** Analisis Stabilitas Tanggul *Cross Section* P126 Tanpa Sheet Pile  
 (Sumber: Hasil Analisa)

keterlitian dalam pemodelannya menggunakan GEO5. Hasil simulasi numerik menunjukkan profil stabilitas yang tidak memadai, di mana gaya penahan tanah asli berada jauh di bawah gaya pendorong yang bekerja. Bidang gelincir yang terbentuk memiliki radius yang lebar dan memotong badan tanggul secara signifikan, menandakan bahwa struktur eksisting sangat rentan terhadap kegagalan lereng total. Tanpa adanya intervensi perkuatan, kestabilan tanggul di titik ini berada dalam kategori berbahaya.

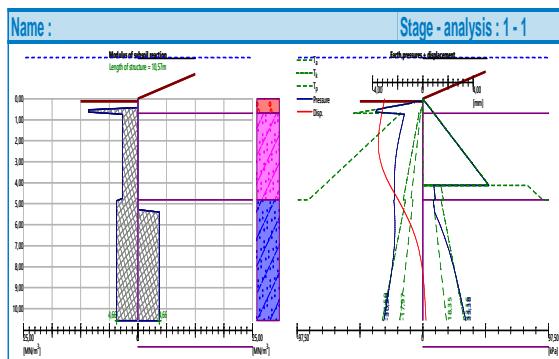
Didapatkan hasil yang tidak memenuhi syarat keamanan, yaitu faktor keamanan (FK) sebesar 0,76. Mengingat angka ini jauh di bawah batas minimum ( $FK < 1,5$ ), maka dipastikan bahwa penampang P126 membutuhkan struktur perkuatan tambahan. Oleh karena itu, analisis dilanjutkan dengan simulasi penggunaan *Sheet Pile* sedalam 12 meter.

### Dengan Sheet Pile 12 m tipe III-n

Sebagai langkah perbaikan terhadap kondisi eksisting yang kritis, dilakukan simulasi perkuatan menggunakan *sheet pile* tipe III-n dengan kedalaman 12 meter. Penempatan *sheet pile* ini bertujuan untuk meningkatkan nilai resistansi lereng dan mengalihkan bidang gelincir ke lapisan tanah yang lebih dalam dan stabil. Berdasarkan hasil pemodelan numerik, penggunaan perkuatan tunggal ini memberikan peningkatan yang cukup berarti pada ketahanan tanggul. Struktur *sheet pile* bekerja dengan menahan tekanan tanah lateral secara efektif, sehingga mampu menaikkan nilai Faktor Keamanan (FK) mendekati ambang batas yang ditentukan. Meskipun demikian, pada penampang P126 ini, evaluasi tetap difokuskan pada pemenuhan standar keamanan yang ketat mengingat beban tanah yang cukup besar di lokasi tersebut.



**Gambar 13** Analisis Stabilitas Tangul Cross Section P126 Dengan Sheet Pile 12 m tipe III-n



**Gambar 14** Distribusi Tekanan Tanah dan Displacement Cross Section P126 Dengan Sheet Pile 12 m tipe III-n  
(Sumber: Hasil Analisa)

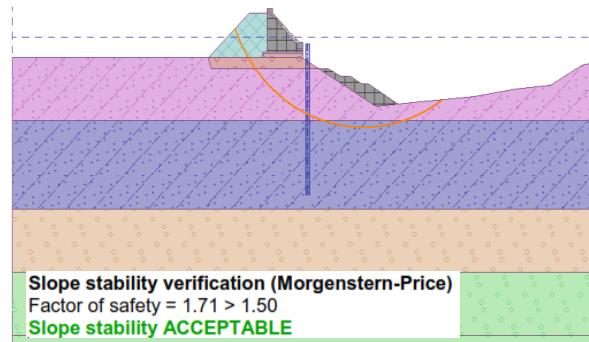
Didapatkan hasil yang tidak memenuhi syarat, yaitu faktor keamanan 1.43 (syarat  $FK \geq 1.5$ ). ) dan

nilai deformasi sheet pile 3,5 mm (syarat deformasi  $< 1\%$  panjang steel sheet pile). Oleh karena itu analisis berlanjut menggunakan Sheet Pile 12 m dan Bronjong.

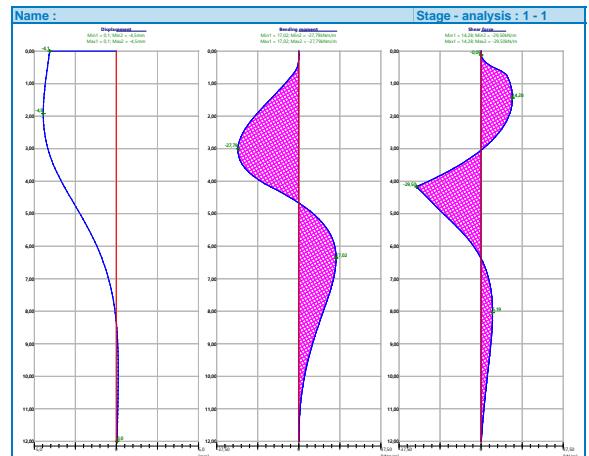
### Dengan Sheet Pile 12 m tipe III-n dan Bronjong

Untuk meningkatkan margin keamanan dan memberikan perlindungan ekstra terhadap erosi kaki lereng, dilakukan simulasi tambahan dengan mengombinasikan *Sheet Pile* 12 m dan struktur bronjong. Penambahan bronjong ini berfungsi sebagai beban penyeimbang (*counterweight*) sekaligus pelindung permukaan lereng bawah. Hasil analisis menunjukkan bahwa integrasi kedua struktur ini memberikan stabilitas yang jauh lebih kokoh dibandingkan penggunaan perkuatan tunggal. Penambahan bronjong secara efektif menekan bidang gelincir ke arah bawah dan meningkatkan nilai Faktor Keamanan (FK) secara signifikan. Kombinasi ini memastikan tanggul tetap stabil bahkan dalam kondisi beban hidrostatik yang ekstrem.

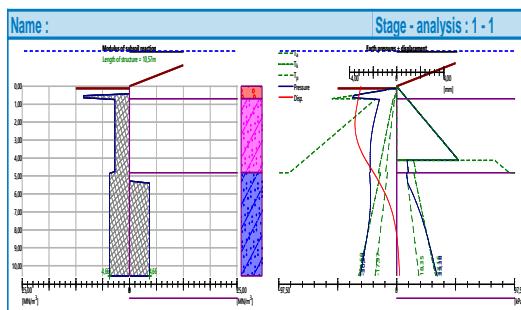
Didapatkan hasil yang sangat memuaskan, yaitu faktor keamanan (FK) sebesar 1,98 (melampaui syarat minimum  $FK \geq 1,5$ ). Dengan hasil ini, konfigurasi kombinasi pada penampang P126 dinyatakan sangat aman dan direkomendasikan untuk area dengan risiko gerusan air yang tinggi.



**Gambar 15** Analisis Stabilitas Tangul Cross Section P126 Dengan Sheet Pile 12 m tipe III-n dan Bronjong



**Gambar 16** Distribusi Tekanan Tanah dan Displacemen Cross Section P126 Dengan Sheet Pile 12 m tipe III-n dan Bronjong

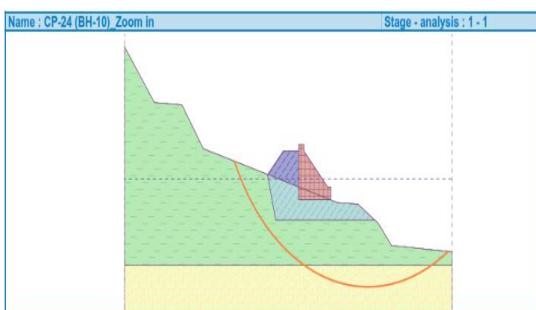


**Gambar 17** Gaya Internal dan Kinerja Struktur *Cross Section* P126 dengan Sheet Pile 12 m tipe III-n dan Bronjong  
(Sumber: Hasil Analisa)

### Analisis Stabilitas Desain Tanggul Sungai Tondano *Cross Section* CP24

#### Tanpa Sheet Pile

Analisis stabilitas pada penampang CP24 dilakukan untuk mengevaluasi kekuatan tanggul dalam kondisi eksisting. Lokasi ini memiliki karakteristik geometris yang menantang, di mana gaya pendorong dari massa tanah dan tekanan air tidak mampu diimbangi oleh kuat geser tanah asli secara mandiri. Hasil simulasi numerik menggunakan metode Morgenstern-Price menunjukkan bahwa bidang gelincir yang terbentuk sangat dangkal dan tidak stabil. Tanpa adanya perkuatan, lereng pada penampang ini berada dalam kondisi kritis yang sangat rentan terhadap kegagalan struktural akibat beban lateral yang bekerja secara terus-menerus.



**Gambar 18** Analisis Stabilitas Tanggul *Cross Section* CP24 Tanpa Sheet Pile  
(Sumber: Hasil Analisa)

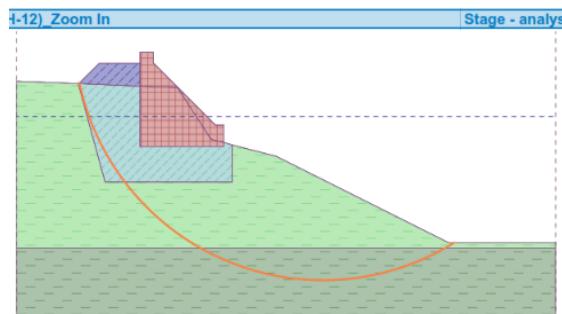
Didapatkan hasil yang tidak memenuhi syarat keamanan, yaitu faktor keamanan (FK) sebesar 0,81. Karena nilai tersebut berada jauh di bawah ambang batas minimum ( $FK < 1,5$ ), maka diperlukan intervensi perkuatan struktural untuk meningkatkan kestabilan tanggul.

### Analisis Stabilitas Desain Tanggul Sungai Tondano *Cross Section* P170

#### Tanpa Sheet Pile

Analisis pada penampang P170 dilakukan sebagai tahap evaluasi awal terhadap stabilitas lereng

eksisting. Penampang ini memiliki peran penting dalam sistem tanggul Sungai Tondano karena posisinya yang terpapar langsung oleh gaya dorong lateral tanah dan beban hidrostatik air sungai secara simultan. Hasil simulasi numerik menggunakan metode Morgenstern-Price menunjukkan bahwa ketahanan geser tanah pada lokasi ini tidak mencukupi untuk menahan beban yang bekerja. Bidang gelincir yang terdeteksi menunjukkan potensi keruntuhan yang signifikan, yang mengonfirmasi bahwa struktur tanggul dalam kondisi eksisting tidak memiliki cadangan keamanan yang memadai terhadap risiko longsor.



**Gambar 19** Analisis Stabilitas Tanggul *Cross Section* P170 Tanpa Sheet Pile  
(Sumber: Hasil Analisa)

Didapatkan hasil yang tidak memenuhi syarat keamanan, yaitu faktor keamanan (FK) sebesar 0,86. Mengingat angka ini berada jauh di bawah kriteria minimum ( $FK < 1,5$ ), maka diperlukan perkuatan struktural berupa *sheet pile* untuk memastikan kestabilan dan keamanan tanggul di masa mendatang.

## DISKUSI UMUM

### Analisis pada *Cross Section* P54, dan P126

Perbaikan struktur untuk peningkatan stabilitas pada potongan P54 dan P126 dapat dilakukan dengan menggunakan *sheetpile type III-N* hingga kedalaman 12 m dan penambahan bronjong sebagai tahanan pasif, yang dapat berfungsi untuk menahan adanya potensi gerusan atau erosi (desain type 1).

### Analisis pada *Cross Section* CP7, dan CP24

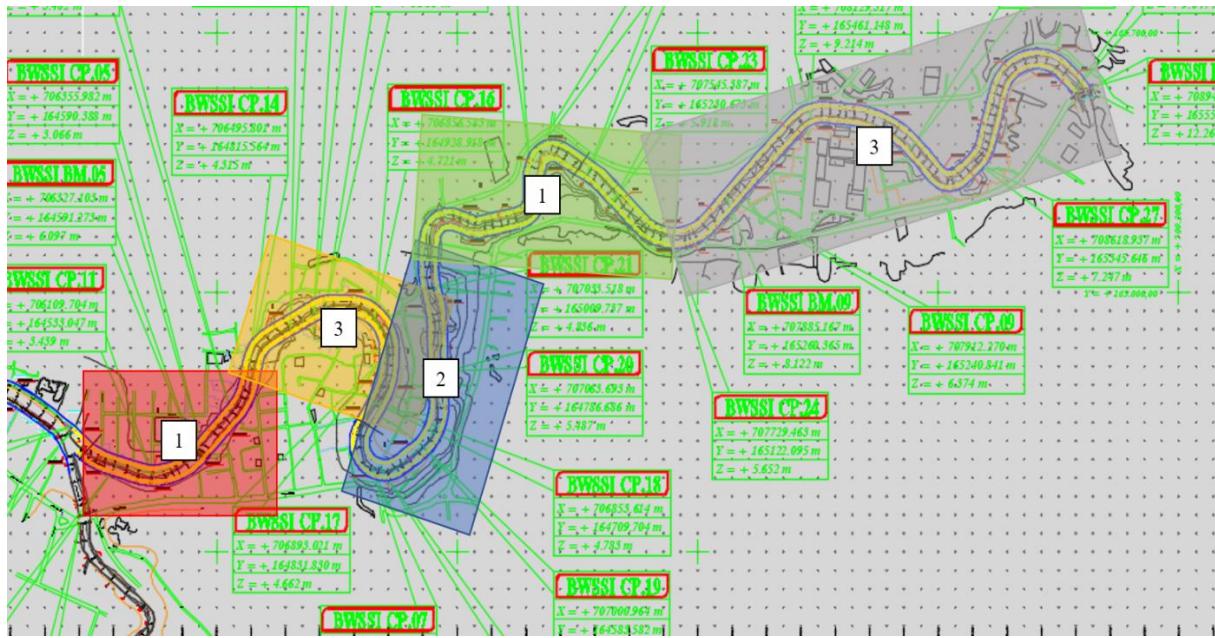
Perbaikan struktur untuk peningkatan Stabilitas pada potongan CP7 dan CP24, dapat dilakukan dengan menggunakan *sheetpile type III-N* hingga kedalaman 12 m. Untuk pencegahan adanya erosi tanah, disarankan untuk memasang *riprap* pada posisi lereng hilir (desain Type 2).

### Analisis pada *Cross Section* P78, CP24, dan P170

Potongan ini telah memiliki nilai stabilitas yang cukup tanpa perkuatan *sheetpile*, namun untuk pencegahan adanya erosi tanah, disarankan untuk

memasang *riprap* pada posisi lereng hilir (desain type 3).

Pembagian zonasi penggunaan perkuatan type 1, 2 dan 3 di sepanjang aliran sungai Tondano diperlihatkan pada gambar di bawah ini.



Gambar 20 Pembagian Zonasi Tipe Desain

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pemodelan stabilitas lereng sungai, dapat diperoleh kesimpulan bahwa tanpa perkuatan, beberapa penampang memiliki faktor keamanan (FK) yang tidak memenuhi syarat ( $FK < 1,5$ ), dengan nilai terendah sebesar 0,67 pada CP7 dan 0,76 pada P126. Penerapan *sheet pile* tipe III-n dengan kedalaman 12 meter pada penampang P54 dan P126 masih menunjukkan deformasi yang melebihi kapasitas struktur, sehingga diperlukan tambahan perkuatan bronjong sebagai tahanan pasif. Kombinasi *sheet pile* dan bronjong berhasil meningkatkan FK menjadi 1,91 pada P54 dan 1,86 pada P126. Penelitian ini merekomendasikan tiga tipe desain: Tipe 1 (kombinasi *sheet pile* dan bronjong), Tipe 2 (*sheet pile* saja), dan Tipe 3 (tanpa perkuatan). Selain itu, pemasangan *riprap* disarankan pada seluruh lereng hilir untuk mengantisipasi potensi erosi lebih lanjut.

Dalam penanggulangan terjadinya gerusan sebenarnya perlu dilakukan studi kecepatan aliran sungai yang terjadi sehingga kebutuhan *riprap* dapat diperhitungkan. Untuk mengatasi hal tersebut sebaiknya diberikan *riprap* pada lokasi yang berpotensi besar mengalami gerusan yakni pada bagian tikungan sungai.

## DAFTAR PUSTAKA

Afryansyah, A., Hariati, F., Taqwa, F. M. L., & Alimuddin, A. (2023). Analisis Stabilitas dan Biaya Perencanaan Dinding Penahan Tanah Tipe Bronjong di Sungai Ciliwung (Studi Kasus: Ruas Legok Nyenang Rt.01/03, Desa

Leuwimalang, Kecamatan Cisarua, Kabupaten Bogor). *Jurnal Komposit: Jurnal Ilmu-Ilmu Teknik Sipil*, 7(1), 11–16.

<https://doi.org/10.32832/komposit.v7i1.7369>

Assiddiqy, M. H., Syaiful, S., Alimuddin, A., Muktadir, R., & Taqwa, F. M. L. (2023). Analisis Stabilitas Dinding Penahan Tanah Saluran Irigasi Situ Bala, Desa Purwasari, Kecamatan Dramaga, Kabupaten Bogor. *Jurnal Komposit: Jurnal Ilmu-Ilmu Teknik Sipil*, 7(2), 195–203.

<https://doi.org/10.32832/komposit.v7i2.8295>

Badan Standardisasi Nasional. (2017). *SNI 8460-2017 Persyaratan Perancangan Geoteknik*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional

Bowles, J. E. (1996). *Foundation Analysis and Design* (5th ed). New York:McGraw-Hill

Das, B. M. (2015). *Principles of Geotechnical Engineering* (8th ed). Stamford: Cengage Learning.

Fine Software. (2022). *GEO5 2022 User Manual*. Praha: Fine Software.

Chayati, N., Wicaksono, M. H., & Taqwa, F. M. L. (2023). Analisis Stabilitas Lereng Bendungan terhadap Beban Gempa sebagai Upaya Pengurangan Bencana (Studi Kasus: Bendungan Jlantah). *Jurnal Ilmiah Universitas Batanghari Jambi*, 23(1), 1035–1042.

<http://dx.doi.org/10.33087/juibj.v23i1.2249>

Fadli, M., Hariati, F., Chayati, N., & Taqwa, F. M. L. (2022). Perlindungan Tebing Sungai

- Ciliwung dengan Dinding Kantilever Ruas Kampung Legok Nyenang, Kabupaten Bogor. *Jurnal Komposit: Jurnal Ilmu-ilmu Teknik Sipil*, 5(1), 17-23.  
<https://doi.org/10.32832/komposit.v5i1.4582>
- Ilham. (2025). Analisis Stabilitas Tanggul Sungai Citonjong Kabupaten Pangandaran. *Jurnal Komposit: Jurnal Ilmu-ilmu Teknik Sipil*, 9(2), 475-486.  
[https://doi.org/10.32832/komposit.v9i2.2114\\_6](https://doi.org/10.32832/komposit.v9i2.2114_6)
- Lutfi, M., Berangket, R., & Taqwa, F. M. L. (2022). Finite Element Method Modelling of Steel Sheet Pile Structure on Deep Foundation Excavation. *Astonjadro*, 11(2), 371–381.  
<https://doi.org/10.32832/astonjadro.v11i2.6302>
- Hudson, J.A., & Harrison, J.P. (2005). Engineering Rock Mechanics: An Introduction to the Principles. Oxford: Elsevier.
- Morgenstern, N.R., & Price, V.E. (1965). The Analysis of the Stability of General Slip Surfaces. *Geotechnique*, 15(1), 79-93.  
<https://doi.org/10.1680/geot.1965.15.1.79>
- Peck, R.B., & Hansen, W.H. (1969). *Foundation Engineering* (2nd ed.). New York: John Wiley & Sons.
- Pusat Gempa Nasional (PusGen). (2022). *Peta Percepatan Puncak di Batuan Dasar (SB) untuk Periode Ulang 100 Tahun*. Jakarta: Badan Meteorologi, Klimatologi, dan Geofisika.
- Taqwa, F. M. L. & Hariati, F. (2013). Studi Kelayakan Pembangunan Alur Pelayaran di Muara Sungai Ciujung Lama Kabupaten Serang. *Astonjadro*, 2(2), 29-43.  
<https://ejournal.uika-bogor.ac.id/index.php/astonjadro/article/view/796>
- Taqwa, F. M. L. (2017). Perencanaan Normalisasi Arus Sungai Cijere di Ds. Pasirmukti Kec. Citeureup Kab. Bogor. *Jurnal Komposit: Jurnal Ilmu-ilmu Teknik Sipil*, 1(2), 87–99.  
<https://doi.org/10.32832/komposit.v1i2.1544>
- Widjaja, O., & Makarim, C. A. (2020). Penggunaan Dinding Silang sebagai Tahan Lateral pada Galian Dalam di Tanah Sangat Lunak. *Jurnal Muara Sains, Teknologi, Kedokteran dan Ilmu Kesehatan*, 4(2), 257–268.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.24912/jmstik.v4i2.7090>