

**ANALISIS PENGARUH MODEL KONSTITUTIF BATUAN TERHADAP
STABILITAS DAN DEFORMASI PADA DESAIN TEROWONGAN
STUDI KASUS: TEROWONGAN HEADRACE 1 BENDUNGAN
CISOKAN**



TUGAS AKHIR

Diajukan untuk memenuhi sebagian syarat untuk memperoleh gelar Sarjana
Teknik Sipil

Oleh:

Muhammad Hafizh Muhsin Amin

2102752

PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL

FAKULTAS PENDIDIKAN TEKNIK DAN INDUSTRI

UNIVERSITAS PENDIDIKAN INDONESIA

2025

**ANALISIS PENGARUH MODEL KONSTITUTIF BATUAN TERHADAP
STABILITAS DAN DEFORMASI PADA DESAIN TEROWONGAN
STUDI KASUS: TEROWONGAN HEADRACE 1 BENDUNGAN
CISOKAN**

Oleh
Muhammad Hafizh Muhsin Amin

Sebuah skripsi yang diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana
Teknik pada Fakultas Pendidikan Teknik dan Industri

© Muhammad Hafizh Muhsin Amin 2025
Universitas Pendidikan Indonesia
Agustus 2025

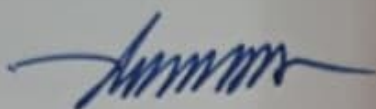
Hak Cipta dilindungi undang-undang.
Skripsi ini tidak boleh diperbanyak seluruhnya atau sebagian,
dengan dicetak ulang, difoto kopi, atau cara lainnya tanpa ijin dari penulis.

MUHAMMAD HAFIZH MUHSIN AMIN

**ANALISIS PENGARUH MODEL KONSTITUTIF BATUAN TERHADAP
STABILITAS DAN DEFORMASI PADA DESAIN TEROWONGAN
STUDI KASUS: TEROWONGAN HEADRACE 1 BENDUNGAN
CISOKAN**

Disetujui dan disahkan oleh pembimbing:

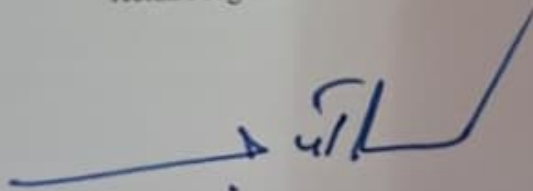
Pembimbing I



Dr. Ir. Herwan Dermawan, M.T., IPM., ASEAN.Eng.
NIP. 198001282008121001

Mengetahui

Ketua Program Studi Teknik Sipil



Dr. T. Ir. Juang Akbardin, MT., IPM., ASEAN.Eng.
NIP. 197703072008121001

PERNYATAAN BEBAS PLAGIARISME

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Muhammad Hafizh Muhsin Amin
NIM : 2102752
Program Studi : Teknik Sipil
Judul Karya : Analisis Pengaruh Model Konstitutif Batuan Terhadap Stabilitas Dan Deformasi Pada Desain Terowongan Studi Kasus: Terowongan Headrace 1 Bendungan Cisokan

Dengan ini menyatakan bahwa karya tulis ini merupakan hasil kerja saya sendiri. Saya menjamin bahwa seluruh isi karya ini, baik sebagian maupun keseluruhan, bukan merupakan plagiarisme dari karya orang lain, kecuali pada bagian yang telah dinyatakan dan disebutkan sumbernya dengan jelas.

Jika di kemudian hari ditemukan pelanggaran terhadap etika akademik atau unsur plagiarisme, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku di Universitas Pendidikan Indonesia.

Bandung, 08 Agustus 2025

Tanda tangan: _____
Muhammad Hafizh Muhsin Amin

KATA PENGANTAR

Segala puji dan rasa syukur penulis panjatkan kepada Allah subhanahu wa ta'ala atas limpahan rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul “Analisis Pengaruh Model Konstitutif Batuan Terhadap Stabilitas dan Deformasi Pada Desain Terowongan”. Tugas akhir ini disusun sebagai salah satu syarat memperoleh gelar Sarjana Teknik Sipil, serta sebagai bentuk tanggung jawab penulis atas ilmu yang diperoleh semasa menjalani studi di Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Pendidikan Teknik dan Industri, Universitas Pendidikan Indonesia.

Penulis menyadari bahwa karya tulis ilmiah ini tidak dapat penulis selesaikan seorang diri sehingga tidak terlepas dari bantuan dan dukungan berbagai pihak. Oleh karena itu penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih sebesar-besarnya kepada:

1. Dr. Ir. Herwan Dermawan, M.T., IPM., ASEAN.Eng selaku dosen pembimbing, atas bimbingan dan arahan selama proses penyusunan tugas akhir ini.
2. Ir. Muhammad Riza H., M.T., IPM., ASEAN.Eng., APEC.Eng selaku dosen pembimbing atas ilmu, pengalaman, dan wawasan praktis yang sangat membantu dalam memperdalam pemahaman penulis.
3. Dr. Ir. Juang Akbardin, S.T., M.T., IPM., ASEAN Eng. selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil yang telah memberikan kesempatan untuk penulis menyelesaikan Tugas Akhir ini.
4. Drs. Budi Kudwadi, M.T., selaku dosen wali akademik atas bimbingan, arahan, dan bantuan selama masa studi penulis.
5. Kedua orang tua tercinta serta keluarga yang senantiasa memberikan doa, dukungan, dan semangat tanpa henti.
6. Seluruh dosen dan staf di Program Studi Teknik Sipil UPI yang telah memberikan ilmu, fasilitas, dan bantuan selama masa studi.
7. Semua asisten dosen yang telah memberikan arahan dan bimbingan dalam pengerjaan tugas-tugas akademik.

8. Rekan-rekan GeoSol atas segala kebersamaan dalam segala pengalaman diskusi dan kompetisi, kemengangan maupun kekalahan.
9. Teman-teman magang Cisoka atas diskusi, tawa, dan kerja sama yang menjadi bagian penting dalam proses belajar penulis.
10. Semua pihak yang telah berjasa dalam proses penulisan tugas akhir ini yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Semoga Allah subhanahu wa ta'ala memberikan balasan kebaikan yang berlipat ganda kepada semuanya.

Penulis menyadari bahwa penulisan karya tulis tugas akhir ini masih memiliki banyak kekurangan. Oleh karena itu, penulis terbuka atas segala kritik dan saran yang membangun demi perbaikan di masa mendatang. Semoga karya tulis ini dapat memberikan manfaat dan kontribusi dalam pengembangan ilmu teknik sipil, khususnya di bidang geoteknik dan rekayasa terowongan.

Bandung, 08 Agustus 2025

Penulis

ANALISIS PENGARUH MODEL KONSTITUTIF BATUAN TERHADAP STABILITAS DAN DEFORMASI PADA DESAIN TEROWONGAN

Muhammad Hafizh Muhsin Amin, Herwan Dermawan¹

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Pendidikan Teknik dan Industri, Universitas Pendidikan Indonesia

E-mail: hafizhmuhsin@upi.edu

herwand@gmail.com

ABSTRAK

Analisis numerik menggunakan Metode Elemen Hingga merupakan standar untuk menilai stabilitas terowongan, tetapi akurasi sangat bergantung pada model konstitutif batuan yang dipilih dan dimensi analisis (2D vs 3D). Perbedaan yang signifikan antara hasil 2D dan 3D, yang belum sepenuhnya terkuantifikasi di seluruh model, menimbulkan risiko yang cukup besar karena analisis 2D yang disederhanakan dapat menyebabkan estimasi beban struktural yang tidak aman. Penelitian ini secara sistematis membandingkan model Mohr-Coulomb (M-C), Hoek-Brown (H-B), dan Drucker-Prager (D-P) dengan menggunakan simulasi FEM 2D dan 3D. Terowongan tapal kuda standar dianalisis untuk mengetahui deformasi, faktor keamanan (FK), kekuatan internal, dan sensitivitas terhadap parameter utama. Temuan utama mengungkapkan analisis 3D memprediksi beban yang jauh lebih tinggi, dengan gaya aksial liner hingga 25 kali lebih besar dari prediksi 2D karena efek lengkungan 3D. Pemilihan model lebih penting dalam 3D, di mana M-C menghasilkan gaya liner 30% lebih tinggi daripada H-B. Model H-B menunjukkan sensitivitas yang lebih besar, memprediksi stabilitas yang lebih rendah dalam analisis 2D. Penelitian ini memberikan bukti kuantitatif bahwa analisis regangan bidang 2D tidak aman untuk desain akhir karena meremehkan beban puncak secara masif. Temuan ini memberikan panduan praktis bagi para insinyur mengenai dampak kuantitatif dari pemilihan model dalam konteks 3D, yang berkontribusi pada praktik rekayasa terowongan yang lebih aman dan andal.

Kata kunci: Terowongan, mekanika batuan, model konstitutif, kekuatan massa batuan, metode elemen hingga

¹Dosen pembimbing

THE EFFECT OF ROCK CONSTITUTIVE MODEL ON STABILITY AND DEFORMATION IN TUNNEL DESIGN

Muhammad Hafizh Muhsin Amin, Herwan Dermawan

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Industry Education,
Indonesia University of Education

E-mail: hafizhmuhsin@upi.edu

herwand@gmail.com

ABSTRACT

Numerical analysis using the Finite Element Method (FEM) is standard for assessing tunnel stability, but its accuracy depends heavily on the chosen rock constitutive model and analysis dimension (2D vs. 3D). Significant discrepancies between 2D and 3D results, not yet fully quantified across models, pose a considerable risk as simplified 2D analyses can lead to unsafe estimations of structural loads. This study systematically compares the Mohr-Coulomb (M-C), Hoek-Brown (H-B), and Drucker-Prager (D-P) models using 2D and 3D FEM simulations. A standard horseshoe tunnel was analyzed for deformation, factor of safety (FoS), internal forces, and sensitivity to key parameters. Key findings reveal 3D analysis predicts substantially higher loads, with liner axial forces up to 25 times greater than 2D predictions due to the 3D arching effect. Model choice is more critical in 3D, where M-C yielded liner forces 30% higher than H-B. The H-B model showed greater sensitivity, predicting lower stability in the 2D analysis. This research provides quantitative evidence that 2D plane-strain analysis is unsafe for final design as it massively underestimates peak loads. The findings offer engineers practical guidance on the quantitative impact of model selection in a 3D context, contributing to safer, more reliable tunnel engineering practices.

Keywords: Tunnel, rock mechanics, constitutive models, rock mass strength, finite element method

¹Thesis Supervisor

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	I
DAFTAR ISI	V
DAFTAR GAMBAR	X
DAFTAR TABEL.....	XV
DAFTAR LAMPIRAN	XVII
1 BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	4
1.5 Ruang Lingkup Penelitian.....	4
2 BAB II KAJIAN PUSTAKA	6
2.1 Terowongan.....	6
2.2 Batuan	9
2.2.1 Model Konstitutif Batuan.....	9
2.3 Parameter Batuan	16
2.3.1 Berat Isi	16
2.3.2 Modulus Elastisitas	17
2.3.3 Poisson's Ratio.....	17

2.3.4	Kuat Tekan dan Tarik.....	17
2.4	Klasifikasi Massa Batuan	18
2.4.1	Rock Quality Designation (RQD).....	18
2.4.2	Geological Strength Index (GSI)	19
2.5	Metode Elemen Hingga.....	20
2.5.1	Analisis Stabilitas.....	22
2.5.2	Gaya Dalam Perkuatan.....	23
2.6	Penelitian Terdahulu	25
2.6.1	Analyses on face stability of shallow tunnel considering different constitutive models (Chunyu et al., 2023)	25
2.6.2	Estimation of the equivalent Mohr-Coulomb parameters using the Hoek-Brown criterion and its application in slope analysis (Wei et al., 2021)	26
2.6.3	Investigation of Rock Mass Stability Around the Tunnels in an Underground Mine in USA Using Three-Dimensional Numerical Modeling (Xing et al., 2018)	27
3	BAB III METODE PENELITIAN.....	30
3.1	Desain Penelitian.....	30
3.2	Lokasi Penelitian.....	30
3.3	Prosedur Penelitian.....	31
3.3.1	Studi Literatur	32

3.3.2	Pengumpulan Data	32
3.3.3	Pemodelan Terowongan.....	32
3.3.4	Simulasi Numerik	34
3.3.5	Analisis Hasil	35
3.4	Teknik Analisis Data.....	35
4	BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....	36
4.1	Kondisi Geoteknik	36
4.1.1	Struktur Geologi.....	36
4.1.2	Penyelidikan Batuan.....	37
4.2	Parameter Batuan	38
4.2.1	Berat Isi	38
4.2.2	Modulus Deformasi.....	39
4.2.3	Poisson's Ratio.....	39
4.2.4	Tegangan Batuan.....	40
4.3	Klasifikasi Massa Batuan.....	41
4.4	Kriteria Runtuh Hoek-Brown.....	41
4.5	Kriteria Runtuh Mohr-Coulomb	41
4.6	Kriteria Runtuh Drucker-Prager.....	42
4.7	Simulasi Dua Dimensi	43

4.7.1	Geometri Terowongan	43
4.7.2	Ekskavasi dan Sistem Perkuatan Terowongan.....	46
4.7.3	Tahapan Simulasi	46
4.7.4	Model Mohr-Coulomb	50
4.7.5	Model Hoek-Brown	51
4.7.6	Model Drucker-Prager	53
4.7.7	Perbandingan Hasil Simulasi 2D Antar Model Konstitutif.....	55
4.8	Simulasi Tiga Dimensi.....	62
4.8.1	Tahapan Simulasi 3D	62
4.8.2	Model Mohr-Coulomb	67
4.8.3	Model Hoek-Brown	69
4.8.4	Perbandingan Hasil Simulasi 3D Antar Model.....	71
4.9	Perbandingan Hasil Simulasi 2D dan 3D.....	75
4.10	Analisis Sensitivitas	79
4.10.1	Initial Stress Ratio	79
4.10.2	Uniaxial Compression Strength	82
5	BAB V PENUTUP.....	85
5.1	Kesimpulan	85
5.2	Saran.....	86

DAFTAR PUSTAKA	88
LAMPIRAN	91

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Terowongan pada Bendungan.....	6
Gambar 2.2. Sistem Perkuatan pada Terowongan (Shotcrete, Steel Ribs, dan Rockbolt berturut-turut)	7
Gambar 2.3. Metode ekskavasi terowongan (Drill and blast, Cut and cover, NATM, TMB secara berturut-turut)	8
Gambar 2.4. Lingkaran Keruntuhan Mohr.....	10
Gambar 2.5. Perbandingan garis keruntuhan Mohr-Coulomb dengan Hoek-Brown	10
Gambar 2.6. Yield Surface model Mohr-Coulomb dan Drucker-Prager dalam ruang principal stress Sumber: (Fleischmann, 2020).....	14
Gambar 2.7. Rock Quality Design (RQD)	18
Gambar 2.8. Grafik GSI (Marinos & Hoek, 2002) Sumber: (Marinos, 2017).....	20
Gambar 2.9. Model Metode Elemen Hingga	21
Gambar 2.10. Analisis Terowongan menggunakan FEM.....	21
Gambar 2.11. Representasi Nilai Strength Factor.....	23
Gambar 2.12. Persentase perbedaan nilai faktor keamanan pada tiap model dengan variasi nilai tekanan perkuatan terowongan Sumber: (Chunyu et al., 2023)	26
Gambar 2.13. Deformasi horizontal terowongan pada berbagai kasus dengan variasi nilai K_0 Sumber: (Xing et al., 2018)	28
Gambar 2.14. Sebaran zona plastis pada terowongan dan deformasi ketika kondisi statis dan dinamis Sumber: (Upadhyaya et al., 2023).....	29

Gambar 3.1. Lokasi Penelitian	30
Gambar 3.2. Diagram Alir Penelitian	31
Gambar 4.1. Struktur Geologi Headrace Tunnel No. 1 Bendungan Cisokan Sumber: PLN UPP JBT 1	37
Gambar 4.2. Stratifikasi Batuan pada lokasi Penelitian	38
Gambar 4.3 Layout Terowongan Headrace Bendungan Cisokan Sumber: Dokumen Proyek UCPSPP	44
Gambar 4.4 Potongan Memanjang Terowongan Headrace Sumber: Dokumen Proyek UCPSPP	44
Gambar 4.5 Cross Section Terowongan Headrace Sumber: Dokumen Proyek UCPSPP	45
Gambar 4.6 Profil Geologi sepanjang Terowongan Headrace Sumber: Dokumen Proyek UCPSPP	45
Gambar 4.7. Model Terowongan Dua Dimensi	46
Gambar 4.8. Fase Inisialisasi Tegangan Awal	47
Gambar 4.9. Staging Ekskavasi	48
Gambar 4.10. Pemasangan Sistem Perkuatan	49
Gambar 4.11. Analisis Stabilitas (Strength Factor)	49
Gambar 4.12. Diagram Deformasi Terowongan dengan Model Mohr-Coulomb. 51	
Gambar 4.13. Distribusi Tegangan pada Terowongan Model Mohr-Coulomb 51	
Gambar 4.14. Diagram Deformasi Terowongan dengan Model Hoek-Brown 52	

Gambar 4.15. Distribusi Tegangan pada Model Hoek-Brown	53
Gambar 4.16. Diagram Deformasi Terowongan dengan Model Drucker-Prager.	54
Gambar 4.17. Distribusi Tegangan pada Model Drucker-Prager	55
Gambar 4.18. Grafik Deformasi Terowongan Tiap Model Konstitutif	57
Gambar 4.19. Grafik Nilai Stabilitas Maksimum Terowongan Tiap Model Konstitutif	57
Gambar 4.20. Grafik Nilai Stabilitas Minimum Terowongan Tiap Model Konstitutif	58
Gambar 4.21. Gaya aksial pada rockbolt	59
Gambar 4.22. Gaya aksial pada Liner	59
Gambar 4.23. Bending moment pada Liner	60
Gambar 4.24. Gaya geser pada Liner	60
Gambar 4.25. Hasil Analisis Gaya Dalam Perkuatan Terowongan 2 Dimensi	61
Gambar 4.26. Model 3D Terowongan	63
Gambar 4.27. Inisialisasi Tegangan Awal Pada Lapisan Batuan.....	63
Gambar 4.28. Model Geometri dan Sistem Perkuatan Terowongan	64
Gambar 4.29. Tahapan Ekskavasi Terowongan 3D.....	65
Gambar 4.30. Tahap Pemasangan Sistem Perkuatan pada Terowongan	66
Gambar 4.31. Analisis Stabilitas Global pada Terowongan	67
Gambar 4.32. Diagram Deformasi Maksimum Terowongan Model 3D Mohr-Coulomb	68

Gambar 4.33. Bentuk Deformasi Terowongan 3D Model Mohr-Coulomb.....	69
Gambar 4.34. Diagram Deformasi Maksimum Terowongan Model 3D Hoek-Brown.....	70
Gambar 4.35. Bentuk Deformasi Terowongan Model 3D Hoek-Brown	71
Gambar 4.36. Grafik Perbandingan Displacement antar Model terhadap Panjang Ekskavasi	72
Gambar 4.37. Grafik Perbandingan Safety Factor antar Model terhadap Panjang Ekskavasi	73
Gambar 4.38. Hasil Analisis Gaya Dalam Perkuatan Terowongan 3 Dimensi	75
Gambar 4.39. Grafik Perbandingan Displacement 2D vs 3D terhadap Panjang Ekskavasi	77
Gambar 4.40. Grafik Perbandingan Displacement 2D vs 3D terhadap Safety Factor	78
Gambar 4.41. Grafik Perbandingan Variasi Initial Stress Ratio terhadap Displacement Berbagai Model.....	81
Gambar 4.42. Grafik Perbandingan Variasi Initial Stress Ratio terhadap Max Strength Factor Berbagai Model	81
Gambar 4.43. Grafik Perbandingan Variasi Initial Stress Ratio terhadap Min Strength Factor Berbagai Model	82
Gambar 4.44. Grafik Perbandingan Variasi UCS terhadap Displacement Berbagai Model	83
Gambar 4.45. Grafik Perbandingan Variasi Initial Stress Ratio terhadap Max Strength Factor Berbagai Model	84

Gambar 4.46. Grafik Perbandingan Variasi Initial Stress Ratio terhadap Min Strength Factor Berbagai Model	84
--	----

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1. Temuan penelitian (Wei et al., 2021).....	27
Tabel 4.1. Nilai Berat Isi	38
Tabel 4.2. Nilai Modulus Deformasi.....	39
Tabel 4.3. Nilai Poisson's Ratio.....	40
Tabel 4.4 Nilai Tegangan Batuan.....	40
Tabel 4.5 Parameter Kriteria Hoek Brown	41
Tabel 4.6 Parameter Kriteria GMC	42
Tabel 4.7. Nilai Parameter Kriteria GDP IT-4.....	43
Tabel 4.8. Hasil Analisis 2D Model Mohr-Coulomb.....	50
Tabel 4.9. Hasil Analisis 2D Model Hoek-Brown.....	52
Tabel 4.10. Hasil Analisis 2D Model Drucker-Prager	53
Tabel 4.11. Ringkasan Perbandingan Antar Model Konstitutif.....	56
Tabel 4.12. Hasil analisis gaya dalam pada perkuatan terowongan.....	61
Tabel 4.13. Hasil Analisis 3D Model Mohr-Coulomb.....	67
Tabel 4.14. Hasil Analisis 3D Model Hoek-Brown.....	69
Tabel 4.15. Perbandingan Hasil Simulasi 3D antar Model Batuan	72
Tabel 4.16. Hasil Analisis Gaya dalam perkuatan terowongan 3D	74
Tabel 4.17. Perbandingan Hasil Analisis 2D vs 3D.....	76

Tabel 4.18. Hasil Analisis Sensitivitas Model Konstitutif Terhadap Parameter Initial Stress Ratio	80
Tabel 4.19. Hasil Analisis Sensitivitas Model Konstitutif terhadap UCS	83

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Geoteknik Lokasi Terowongan Headrace 1 Bendungan Cisokan	91
Lampiran 2. Desain Terowongan Headrace 1 Bendungan Cisokan	97
Lampiran 3. Hasil Analisis Dua Dimensi	99
Lampiran 4. Hasil Analisis Tiga Dimensi.....	109
Lampiran 5. Surat Persetujuan Judul Tugas Akhir	113
Lampiran 6. Surat Tugas Pembimbing Tugas Akhir	114
Lampiran 7. Surat Pelaksanaan Seminar Proposal.....	115
Lampiran 8. Surat Permohonan Data Penelitian	116
Lampiran 9. Surat Pelaksanaan Seminar Hasil	118
Lampiran 10. Lembar Asistensi Tugas Akhir	119

DAFTAR PUSTAKA

- Alejano, L. R., & Bobet, A. (2012). Drucker-Prager criterion. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 45(6), 995–999. <https://doi.org/10.1007/s00603-012-0278-2>
- Brady, B. H. G., & Brown, E. T. (2004). *Rock Mechanics for Underground Mining* (3rd ed.). Springer.
- Cai, M. (2010). Practical estimates of tensile strength and Hoek-Brown strength parameter m_i of brittle rocks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 43(2), 167–184. <https://doi.org/10.1007/s00603-009-0053-1>
- Chen, X., He, P., Yan, D., & Nie, A. (2020). Face Stability and Reinforcement of the Tunnel in Weak Surrounding Rock. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(5), 5511–5521. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01380-9>
- Chunyu, L., Zhengpeng, J., Zhi, L., Kefeng, X., & Bohan, W. (2023). Analyses on face stability of shallow tunnel considering different constitutive models. *Frontiers in Materials*, 9. <https://doi.org/10.3389/fmats.2022.1112425>
- Deere, U. D., & Deere, D. W. (1988). The Rock Quality Designation (RQD) in Practice. *American Society for Testing and Materials*, 91–101.
- Erharter, G. H., Bar, N., Hansen, T. F., Jain, S., & Marcher, T. (2024). International Distribution and Development of Rock Mass Classification: A Review. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s00603-024-04215-8>
- Fleischmann, J. A. (2020). Micromechanical Exploration of the Lade–Duncan Yield Surface by the Discrete Element Method. *Geotechnical and Geological Engineering*, 38(5), 5409–5431. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-01374-7>

- Gercek, H. (2007). Poisson's ratio values for rocks. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* (Vol. 44, Issue 1, pp. 1–13). Elsevier BV. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2006.04.011>
- Hoek, E. (2023). *PRACTICAL ROCK ENGINEERING*. Rocscience.
- Hoek, E., Carranza-Torres, C., Corkum, B., Hoek, E., & Carranza-Torres, C. (2002). *Hoek-Brown failure criterion-2002 Edition* (Vol. 1). www.rocscience.com.
- Marinos, V. (2017). A revised, geotechnical classification GSI system for tectonically disturbed heterogeneous rock masses, such as flysch. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78(2), 899–912. <https://doi.org/10.1007/s10064-017-1151-z>
- Potts, D. M., & Zdravkovic, L. (2001). *Finite element analysis in geotechnical engineering*. Thomas Telford.
- Rafiei Renani, H., & Martin, C. D. (2020). Slope Stability Analysis using Equivalent Mohr–Coulomb and Hoek–Brown criteria. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 53(1), 13–21. <https://doi.org/10.1007/s00603-019-01889-3>
- Rai, M. A., Kramadibrata, S., & Wattimena, R. K. (2014). *Mekanika Batuan*. Penerbit ITB.
- Rani, S. R., Prasad, N. K., & Krishna, S. T. (2014). APPLICABILITY OF MOHR-COULOMB & DRUCKER-PRAGER MODELS FOR ASSESSMENT OF UNDRAINED SHEAR BEHAVIOUR OF CLAYEY SOILS. In *International Journal of Civil Engineering and Technology* (Vol. 5, Issue 10). www.jifactor.com
- Schreter, M., Neuner, M., Unteregger, D., & Hofstetter, G. (2018). On the importance of advanced constitutive models in finite element simulations of deep tunnel advance. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 80, 103–113. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2018.06.008>

- Singh Yadav, J., Kumar, A., Sharma, V., Singh, K., & Sihag, P. (2023). Stability Analysis of Different shapes of Tunnel in Cohensionless Soils. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1110(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1110/1/012086>
- Upadhyaya, M., Paudel, S., & Subedi, S. (2023). *A Study on the Influence of Discontinuities Orientations on Seismic Response of Shallow Rock Tunnel, using Phase2 Proceedings of 12 th IOE Graduate Conference A Study on the Influence of Discontinuities Orientations on Seismic Response of Shallow Rock Tunnel, using Phase2.* 12. <https://www.researchgate.net/publication/371305025>
- Wei, Y., Fu, W., & Ye, F. (2021). Estimation of the equivalent Mohr–Coulomb parameters using the Hoek–Brown criterion and its application in slope analysis. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 25(4), 599–617. <https://doi.org/10.1080/19648189.2018.1538904>
- Wyllie, D. C., & Mah, C. W. (2004). *Rock Slope Engineering* (4th ed.).
- Xing, Y., Kulatilake, P. H. S. W., & Sandbak, L. A. (2018). Investigation of Rock Mass Stability Around the Tunnels in an Underground Mine in USA Using Three-Dimensional Numerical Modeling. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 51(2), 579–597. <https://doi.org/10.1007/s00603-017-1336-6>
- Zienkiewicz, O. C., Taylor, R. L., & Zhu, J. Z. (2005). *The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals Sixth edition.* www.cimne.upc.es