



Analisis Kinerja Struktur Tunnel Batubara pada Fondasi dengan Lapisan Pasir Longgar di Bawah Timbunan Menggunakan Metode Elemen Hingga

Fikri Alami ^{a*}, Aminudin Syah^a

^a Jurusan Teknik Sipil, Universitas Lampung, Jl. Soemantri Brojonegoro No. 1 Bandar Lampung, 35145, Indonesia

HIGHLIGHTS

- Simulasi numerik menggunakan PLAXIS 2D berhasil menggambarkan respons tanah dan struktur tunnel batubara yang ditimbun di atas pasir longgar terhadap beban statik dan dinamis.
- Lapisan pasir longgar di bawah tanah timbunan terbukti rentan mengalami keruntuhan massa tanah (*soil body collapse*) saat terjadi gempa dengan percepatan puncak
- Perkuatan dengan tiang pancang secara signifikan menurunkan penurunan tanah dan meningkatkan kestabilan struktur *tunnel*

INFO ARTIKEL

Kata kunci:
batubara, pasir longgar, Plaxis, tiang pancang, keruntuhan tanah.

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja struktur *tunnel* batubara yang dibangun di atas lapisan pasir longgar dengan kondisi tanah timbunan dan *stockpile* batubara di atasnya. Kondisi ini umum dijumpai di kawasan pesisir Indonesia yang rawan terhadap penurunan dan keruntuhan tanah, terutama saat dikenai beban dinamis seperti gempa. Pemodelan numerik dilakukan menggunakan metode elemen hingga berbasis perangkat lunak Plaxis 2D. Simulasi dilakukan untuk dua kondisi fondasi: tanpa perkuatan dan dengan perkuatan tiang pancang. Beban yang diterapkan meliputi beban statik dari timbunan dan beban dinamis berupa percepatan gempa sebesar 0,25 g. Hasil simulasi menunjukkan bahwa dalam kondisi tanpa perkuatan, terjadi keruntuhan massa tanah (*soil body collapse*) yang berdampak signifikan terhadap sistem pelapis *tunnel*. Gaya dalam yang terbentuk menunjukkan momen lentur maksimum sebesar -187,9 kNm dan gaya geser maksimum sebesar -423 kN, melebihi kapasitas rencana struktur. Penggunaan tiang pancang secara signifikan mampu mengurangi penurunan dan deformasi tanah, serta meningkatkan kestabilan sistem. Penelitian ini memberikan rekomendasi teknis terhadap perlunya sistem perkuatan fondasi pada struktur *tunnel* yang dibangun di atas pasir longgar, terutama dalam kondisi pembebanan kombinasi statik dan dinamis.

Diterbitkan oleh Jurusan Teknik Sipil Universitas Lampung

1. Pendahuluan

Struktur *tunnel* batubara yang dibangun di atas permukaan dan kemudian ditimbun ke dalam tanah banyak digunakan dalam infrastruktur pertambangan di wilayah pesisir Indonesia seperti Lampung dan Bengkulu. Kawasan pesisir ini umumnya terdiri dari tanah pasir lepas (*loose sand*) dengan ketebalan mencapai puluhan meter. Jenis tanah ini memiliki densitas relatif rendah, modulus elastisitas kecil, serta potensi deformasi tinggi, yang menjadikannya sangat rentan terhadap permasalahan geoteknik seperti penurunan (*settlement*) dan likuifaksi, terlebih pada kondisi dinamis seperti getaran alat berat atau gempa bumi.

Parameter geoteknik seperti sudut geser dalam (ϕ'), modulus deformasi, dan sifat drainase tanah menjadi krusial dalam mengevaluasi stabilitas fondasi di atas pasir lepas [1]. Beban vertikal dari timbunan tanah pada struktur *tunnel*

meningkatkan tegangan efektif pada tanah dasar yang berpotensi memicu penurunan maupun *creep* secara signifikan. Penurunan ini umumnya dihubungkan dengan mekanisme likuifaksi dan sand boils [2]; [3]; [4].

Tanah pasir longgar rentan terhadap penurunan dan likuifaksi, sehingga memerlukan metode perkuatan yang tepat. Vibro-kompaksi dan vibroflotasi efektif dalam meningkatkan kepadatan tanah granular [5], sementara *grouting* memperbaiki tanah dengan menyuntikkan bahan pengikat yang mengurangi porositas dan meningkatkan konsistensi [6]; [7]; [8]. Untuk lereng atau timbunan, *soil nailing* digunakan untuk memperkuat massa tanah dan mencegah kegagalan akibat likuifaksi statik [9].

* Penulis koresponden.

Alamat E-mail: fikri.alami@eng.unila.ac.id (F. Alami).

Peer review dibawah tanggung-jawab Jurusan Teknik Sipil Universitas Lampung.

Metode lain yang banyak digunakan untuk mengatasi permasalahan ini adalah penggunaan fondasi dalam seperti tiang pancang. Tiang pancang mampu mentransfer beban ke lapisan tanah yang lebih dalam dan lebih stabil. Simulasi numerik berbasis PLAXIS dapat dilakukan untuk menganalisis deformasi, evaluasi daya dukung kelompok tiang dan interaksi tanah-tiang [10]; [11]; [12]. Penelitian ini mengevaluasi penggunaan tiang pancang (*pile*) sebagai metode alternatif yang lebih praktis dalam meningkatkan stabilitas fondasi *tunnel* batubara di atas pasir longgar

2. Metode Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kinerja struktur *tunnel* batubara yang dibangun di atas lapisan pasir longgar dengan kondisi timbunan tanah di atasnya. Studi dilakukan secara numerik menggunakan metode elemen hingga berbasis perangkat lunak PLAXIS 2D, yang telah terbukti efektif dalam menganalisis interaksi tanah-struktur secara mendalam [13]. Fokus utama penelitian adalah mengevaluasi pengaruh variasi kekuatan fondasi—dengan dan tanpa tiang pancang—serta variasi beban berupa beban timbunan dan beban dinamis terhadap penurunan, deformasi, dan kestabilan tanah.

Pendekatan yang digunakan adalah pendekatan kuantitatif berbasis simulasi numerik. Metode elemen hingga dipilih karena mampu merepresentasikan perilaku nonlinier tanah serta deformasi besar yang umum terjadi pada pasir. Perangkat lunak PLAXIS digunakan karena kemampuannya dalam menganalisis deformasi, tekanan pori, dan stabilitas secara simultan.

2.1 Objek dan Lokasi Model Penelitian

Objek penelitian adalah struktur *tunnel* batubara yang tidak dibangun melalui ekskavasi, melainkan ditimbun tanah setinggi ± 3 meter di atasnya. Struktur ini ditempatkan di atas lapisan pasir longgar, yang umum dijumpai di kawasan pesisir Indonesia seperti Lampung dan Aceh, dengan karakteristik densitas rendah, permeabilitas tinggi, dan rentan terhadap likuifaksi [14]. Ketebalan lapisan pasir longgar dimodelkan sekitar 15–20 meter, mengikuti data geoteknik dari proyek-proyek reklamasi pesisir Lampung.

2.2 Data dan Parameter Material

Parameter tanah yang digunakan mencakup: berat isi (γ), sudut geser dalam (ϕ), kohesi (c), modulus Young (E), dan rasio Poisson (ν). Nilai-nilai ini diperoleh dari kombinasi data laboratorium, literatur, dan hasil uji lapangan dari proyek-proyek sejenis. Tanah pasir dimodelkan dengan model konstitutif Mohr-Coulomb untuk analisis awal. Material beton *tunnel* dan tiang pancang diasumsikan bersifat linier elastis.

2.3 Tahapan Penelitian

Penelitian ini diawali dengan studi literatur dan pengumpulan data yang relevan mengenai karakteristik teknis tanah pasir longgar, metode kekuatan fondasi seperti *grouting* dan tiang pancang, serta pendekatan numerik menggunakan metode elemen hingga. Data geoteknik juga dikumpulkan dari proyek-proyek reklamasi pesisir di Indonesia, sebagai acuan dalam penentuan parameter input simulasi.

Setelah pengumpulan data, dilakukan pemodelan geometri menggunakan perangkat lunak PLAXIS 2D. Model disusun dalam bidang dua dimensi dan mencakup tiga komponen utama: lapisan pasir longgar sebagai tanah dasar, struktur *tunnel* yang ditimbun, dan timbunan tanah setinggi ± 3 meter sebagai beban statik. Untuk skenario kekuatan,

dimasukkan elemen tiang pancang vertikal dari baja. Kondisi batas bawah dimodelkan sebagai tidak dapat tergeser (*fixed*), sedangkan sisi-sisi lateral dimodelkan tidak dapat bergerak secara horizontal, sebagaimana direkomendasikan dalam panduan pemodelan PLAXIS.

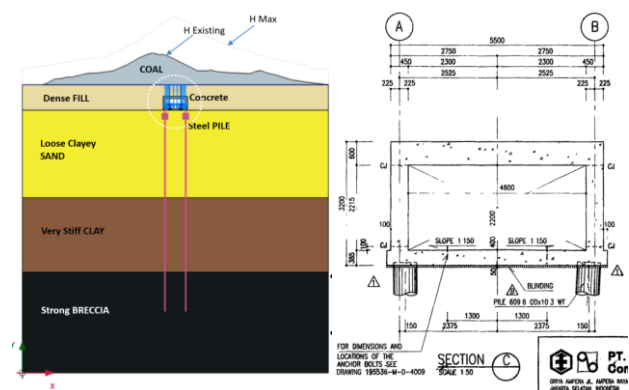
Setelah geometri model dibuat, dilakukan penerapan beban secara bertahap. Beban timbunan diaplikasikan sebagai beban statik, sedangkan beban dinamis dimodelkan dalam bentuk gelombang harmonik untuk merepresentasikan efek getaran dari aktivitas alat berat maupun gempa. Tujuan dari pemodelan beban dinamis ini adalah untuk mengamati respon tanah dan struktur terhadap perubahan tekanan pori dan kemungkinan terjadinya likuifaksi. Studi sebelumnya menunjukkan bahwa beban dinamis dapat memicu likuifaksi dan gaya angkat yang signifikan pada struktur bawah tanah.

Simulasi numerik dilakukan pada dua skenario utama: pertama, tanpa kekuatan fondasi, dan kedua, dengan kekuatan tiang pancang. Hasil simulasi dianalisis dari aspek penurunan vertikal struktur (*settlement*), deformasi lateral tanah, serta faktor keamanan. Hasil tersebut divisualisasikan dalam bentuk kontur deformasi.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Review Geoteknik

Tunnel berbentuk segi empat yang terbuat dari plat beton dengan tebal 60 cm (atas) dan 45 cm (dinding kiri-kanan) berada di atas lapisan pasir berlempung yang tidak padat, lempung sangat kaku dan breksi (Gambar 1). Disisi kiri dan kanan *tunnel* adalah tanah timbunan yang dipadatkan dan di bagian atasnya adalah *stockpile* batubara yang didesain sampai ketinggian 15 m. Keberadaan lapisan pasir longgar dengan tebal ± 20 m ini berpotensi mengakibatkan keruntuhan, kehilangan kuat geser, likuifaksi jika menerima beban dinamis. Oleh karena itu peran steel pile yang dipancang hingga mencapai batuan (*strong breccia*) sangat vital dan harus dipastikan tidak mengalami penurunan fungsi, terutama integritas antara *pile* dan *tunnel* beton.



Gambar 1 Profil bawah permukaan dan penampang kekuatan *tunnel*

3.2 Pemodelan Tunnel menggunakan Plaxis

Pemodelan ini didasarkan pada parameter teknis yang mencerminkan kondisi lapangan, meliputi karakteristik tanah, properti material struktural (beton dan baja), serta beban-beban kerja yang relevan. Rincian parameter yang digunakan dijelaskan sebagai berikut:

1. Parameter Tanah

Stratigrafi tanah pada lokasi studi terdiri atas lima lapisan berbeda berdasarkan kedalaman, masing-masing dengan karakteristik mekanik dan fisik tersendiri:

- Lapisan *COAL* (kedalaman 19 hingga 4 meter): Memiliki berat volume (γ) 0,90 kN/m³ yang mengindikasikan material ringan dan berpori. Nilai kohesi (c) adalah 0 kPa dengan sudut geser dalam (ϕ) sebesar 37°, menandakan sifat material granular. Modulus elastisitas (E) adalah 2.000 MPa dan rasio Poisson (ν) sebesar 0,35.
- Lapisan *Dense FILL* (4 hingga -1 meter): Material timbunan padat dengan berat volume (γ) 17,00 kN/m³, nilai c sebesar 5 kPa, dan ϕ sebesar 30°. Modulus elastisitas E adalah 30 MPa dan rasio Poisson ν adalah 0,3.
- Lapisan *Loose Clayey SAND* (-1 hingga -20 meter): Memiliki berat volume (γ) 16,50 kN/m³, tanpa kohesi ($c = 0$ kPa), dan sudut geser dalam tinggi ($\phi = 37^\circ$). Nilai E sebesar 10 MPa dan $\nu = 0,3$ menunjukkan kondisi tanah pasir lepas bercampur lempung.
- Lapisan *Very Stiff CLAY* (-20 hingga -37 meter): Tanah lempung sangat kaku dengan berat volume (γ) 17,00 kN/m³, kohesi tinggi (110 kPa), dan $\phi = 0^\circ$. Karakteristik ini menggambarkan tanah kohesif dengan dominasi kekuatan geser dari kohesi. Nilai E adalah 50 MPa dan $\nu = 0,3$.
- Lapisan *Slightly Weathered BRECCIA* (lebih dari -37 meter): Merupakan batuan keras dengan berat volume (γ) 22,00 kN/m³, UCS sebesar 7.500 kPa (menggunakan kriteria Hoek–Brown), modulus elastisitas 180 MPa, dan rasio Poisson 0,3.

2. Parameter Material Beton

Struktur pelapis (*lining*) *tunnel* diasumsikan terbuat dari beton bertulang dengan parameter sebagai berikut:

- Kekuatan tekan satu aksial (UCS) = 14 MPa
- Berat jenis = 21 kN/m/m
- Modulus elastisitas (E) = 17.590 MPa
- Rasio Poisson (ν) = 0,15

3. Parameter Tiang Baja (Steel Pile)

Untuk perkuatan tambahan pada struktur terowongan, digunakan elemen tiang baja dengan spesifikasi berikut:

- Lateral Resistance = 1.575 kN
- Berat jenis = 78,5 kN/m/m
- Modulus elastisitas (E) = 200.000 MPa
- Diameter = 0,6096 meter
- Ketebalan = 0,0103 meter

4. Beban (*Dead Load* dan *Live Load*)

Beban yang dikenakan pada struktur *tunnel* terdiri atas:

- Concentrated Dead Load* = 5 kN
- Concentrated Live Load* = 9 kN
- Distributed Live Load* = 2,5 kN/m²

Parameter-parameter di atas dimasukkan ke dalam perangkat lunak PLAXIS sebagai dasar untuk menganalisis stabilitas struktur, distribusi tegangan, dan pola deformasi, baik dalam kondisi normal maupun setelah kejadian ekstrem. Pemilihan parameter dilakukan dengan

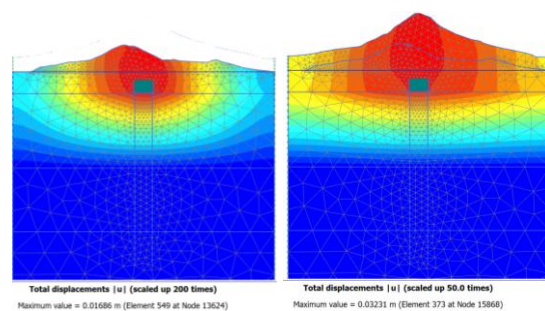
mempertimbangkan data lapangan, literatur teknis, serta nilai konservatif untuk menjamin keamanan desain

5. Evaluasi Hasil Simulasi PLAXIS

Berdasarkan pemodelan numerik menggunakan PLAXIS dengan parameter tanah dan struktur yang telah dijelaskan sebelumnya, diperoleh hasil sebagai berikut:

Kondisi Statis (Tanpa Tiang Pancang)

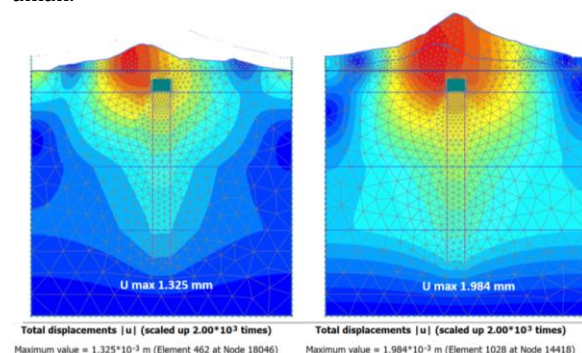
Pada kondisi statis tanpa adanya tiang pancang, hasil simulasi menunjukkan bahwa penurunan tanah (*displacement*) yang terjadi tergolong besar dan di luar batas aman <10 mm [15]. Nilai penurunan maksimal untuk tinggi timbunan batubara 8 m dan 15 m secara berturut-turut adalah 16,86 mm dan 32,31 mm (Gambar 2). Ini mengindikasikan bahwa struktur *tunnel* pada kondisi tidak aman.



Gambar 2 Penurunan maksimum struktur *tunnel* tanpa tiang pancang

Kondisi Statis (Perkuatan Tiang Pancang)

Pada kondisi statis dengan perkuatan tiang pancang, hasil simulasi menunjukkan bahwa penurunan tanah (*displacement*) yang terjadi sudah kecil dan memenuhi standar <10 mm [15]. Nilai penurunan maksimal untuk tinggi timbunan batubara 8 m dan 15 m secara berturut-turut adalah 1,32 mm dan 1,98 mm (Gambar 3). Ini mengindikasikan bahwa struktur *tunnel* pada kondisi tidak aman.



Gambar 3 Penurunan maksimum struktur *tunnel* dengan tiang pancang

Analisis gaya dalam pada beton juga menunjukkan hasil yang konservatif. Nilai maksimum gaya geser (*shear force*) yang bekerja adalah sebesar 122 kN/m, dan momen lentur (*bending moment*) maksimum tercatat sebesar 70 kNm/m. Nilai-nilai ini masih berada di bawah kapasitas rencana struktur, sehingga tidak menimbulkan risiko kegagalan lokal.

Dari segi kestabilan global, nilai Faktor Keamanan (*Safety Factor*/SF) yang diperoleh adalah 1,74, yang berarti struktur dan sistem pendukung tanah masih memiliki margin keamanan yang mencukupi terhadap potensi keruntuhan.

Kondisi Dinamis (Perkuatan Tiang Pancang)

Jika diasumsikan bahwa struktur tunnel mengalami pembebanan dinamis akibat gempa dengan percepatan puncak (PGA) sebesar 0,25 g, hasil pemodelan menunjukkan terjadinya keruntuhan massa tanah (*soil body collapse*) yang berdampak langsung terhadap integritas sistem pelapis terowongan. Analisis gaya dalam pada kondisi ini menunjukkan peningkatan yang signifikan, dengan momen lentur maksimum mencapai -187,9 kNm dan gaya geser maksimum mencapai -423 kN. Nilai-nilai ini melampaui kapasitas rencana struktur, sehingga menimbulkan risiko kerusakan serius, terutama apabila mutu beton pelapis telah menurun akibat degradasi atau faktor lingkungan.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pemodelan numerik menggunakan PLAXIS 2D, dapat disimpulkan bahwa keberadaan lapisan pasir longgar secara signifikan mempengaruhi stabilitas dan deformasi struktur tunnel. Pada kondisi tanpa perkuatan, penurunan yang terjadi melebihi ambang batas aman, baik untuk timbunan setinggi 8 m maupun 15 m, yang menunjukkan bahwa struktur tidak layak beroperasi dalam kondisi tersebut. Sebaliknya, penggunaan tiang pancang baja yang tertanam hingga mencapai lapisan batuan keras terbukti sangat efektif dalam mengendalikan deformasi dan meningkatkan stabilitas sistem. Nilai penurunan yang jauh lebih kecil serta faktor keamanan global yang memadai memperlihatkan bahwa sistem perkuatan memberikan perlindungan struktural yang signifikan dalam kondisi statis.

Namun demikian, hasil analisis juga menunjukkan bahwa dalam kondisi pembebanan dinamis, seperti gempa dengan percepatan puncak 0,25 g, terjadi keruntuhan massa tanah dan peningkatan gaya dalam yang ekstrem. Gaya geser dan momen lentur yang melampaui kapasitas desain struktur mengindikasikan bahwa sistem tunnel berisiko mengalami kerusakan serius, terutama jika tidak disertai penguatan tambahan atau modifikasi desain. Oleh karena itu, mitigasi risiko seismik dan evaluasi ulang terhadap kapasitas pelapis beton perlu menjadi perhatian utama dalam desain tunnel di atas tanah berlapis pasir longgar.

5. Pustaka

- [1] Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil Mechanics in Engineering Practice* (3rd ed.). New York: John Wiley & Sons.
- [2] Gao, Y., Shi, X., Yuan, Q., Sun, L., & Sun, K. (2024). Particle breakage and uneven settlement characteristics of calcareous sand foundation. *Journal of Building Engineering*, 96, 111662. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111662>
- [3] Tsai, C.-C., Lin, W.-C., Chu, M.-C., & Chi, C.-C. (2022). Experimental study on the mechanism of sand boils and associated settlements due to soil liquefaction in loose sand. *Engineering Geology*, 306, 106708. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2022.106708>
- [4] Zeybek, A., & Madabhushi, G. S. P. (2023). Assessment of soil parameters during post-liquefaction reconsolidation of loose sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 164, 107611. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2022.107611>
- [5] Gouw, T.-L. (2020, November 10–12). *Vibro-Kompaksi: Perancangan, pelaksanaan dan studi kasus*. Paper presented at the 24th Annual National Conference on Geotechnical Engineering, Jakarta, Indonesia.
- [6] Sayehvand, S., & Kalantari, B. (2012). Use of grouting method to improve soil stability against liquefaction—A review. *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 17.
- [7] Rahardjo, P. P., & Sadisun, I. A. (2023). Laboratory study of grouting method to improve loose sand against liquefaction. *Indonesian Geotechnical Journal*, August 2023.
- [8] Gallagher, P. M., & Mitchell, J. K. (2002). Influence of colloidal silica grout on liquefaction potential and cyclic undrained behavior of loose sand. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 22(9–12), 1017–1026. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(02\)00126-4](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(02)00126-4)
- [9] Ng, C. W. W., Crous, P. A., Zhang, M., & Shakeel, M. (2022). Static liquefaction mechanisms in loose sand fill slopes. *Computers and Geotechnics*, 141, 104525. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2021.104525>
- [10] Tung, S., Mukherjee, S., Alsabhan, A. H., Gupta, N., Kumar, A., Berwal, P., Goyal, R., Khan, M. A., Khan, W. A., Sehgal, L., & Kishore, K. (2025). Evaluation and analysis of pullout strength in pile group embedded in sandy soil using PLAXIS 3D. *Canadian Journal of Soil Science*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1139/cjss-2024-0092>
- [11] Chang, D.-W., Cheng, S.-H., Chiu, M.-C., & Ge, L. (2025). A study on subsoil and pile reactions of embedded piled raft foundations in sandy soils under vertical loads. *KSCE Journal of Civil Engineering*. Advance online publication. <https://doi.org/10.1016/j.kscej.2025.100230>
- [12] Patil, H., Deshmukh, R., & Salunke, P. J. (2022). Analysis of sheet pile in dense and loose soil using finite element method. *Materials Today: Proceedings*, 72, 2226–2232. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.11.285>
- [13] Brinkgreve, R. B. J., Kumarswamy, S., & Swolfs, W. M. (2021). *PLAXIS 2D 2021 Material Models Manual*. Delft: Bentley Systems.
- [14] Gouw, T.L., Irsyam, M., & Gunawan, A. 2013. The Application of Ground Improvement Techniques in Indonesia. (Keynote lecture) Singapore: 18th South East Asian Geotechnical Conference.
- [15] Deutsches Institut für Normung (DIN): DIN 1054:2010-12 – Subsoil – Verification of the safety of earthworks and foundations. Berlin: Beuth Verlag, 2010.