Jurnal Sains dan Edukasi Sains
Vol.6, No.2, Agustus 2023: 51-64
https://doi.org/10.24246/juses.v6i2p51-64

Penerapan Metode GPR dan Geoteknik pada Kajian Jalan, Jembatan, dan Lereng : *Review*

Selly Feranie[1,*], Adrin Tohari[2], Ila Karmila[1], Agustina Dwi Puspitasari[1]

[1]Program Studi Fisika, Fakultas Pendidikan Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Pendidikan Indonesia
[2]Pusat Penelitian Geoteknologi, Badan Riset dan Inovasi Nasional

[*]email korespondensi : feranie@upi.edu

Received: 27 Februari 2023; ***Revised***: 21 Maret 2023; ***Accepted***: 22 Juni 2023; ***Published***: 1 Agustus 2023

ABSTRAK

Pengujian dan diagnosis non-destruktif sangat populer, karena efektif untuk investigasi atau inspeksi bawah permukaan untuk dapat melakukan pemantauan, prediksi, dan pengelolaan dengan lebih tepat seperti halnya pemantauan kualitas dan kondisi jalan dan jembatan, hingga prediksi kestabilan, dan potensi longsor pada lereng. Pada penelitian ini banyak penelitian menggunakan metode Ground Penetrating Radar (GPR) karena kehandalannya dalam mencitrakan struktur lapisan dengan resolusi tinggi sesuai dengan frekuensi yang dibutuhkan. Artikel ini bertujuan mengkaji penerapan metode GPR dan Geoteknik untuk dapat mendeteksi kerusakan infrastruktur dan potensi longsor dengan berfokus pada penelitian terbaru dari tahun 2012 – 2022 yang dipublikasikan di jurnal internasional. Dalam dekade terakhir ini telah banyak dilakukan penelitian tentang evaluasi infrastruktur publik dengan karakteristik struktur lapisan jalan dan jembatan, deteksi retakan, dan stabilitas potensial, sedangkan pada penelitian longsor telah ditentukan parameter fisik dan bidang gelincir untuk menghitung faktor keamanan dan jangkauan jarak menggunakan metode geofisika, geoteknik dan kombinasi keduanya. Dalam studi kasus terbaru, para peneliti telah menggunakan kombinasi metode untuk mencapai hasil yang maksimal, karena metode yang digunakan akan saling melengkapi. Salah satunya menggunakan metode geoteknik dengan menggunakan data bor serta uji laboratorium berupa uji kuat geser, uji oedometer IL, uji triaksial CIU, dan CID untuk mendapatkan potensi longsor yang baik. Sedangkan untuk penilaian infrastruktur publik digunakan metode geoteknik berupa analisis numerik dan uji laboratorium sebagai data pendukung hasil yang diperoleh.

Kata-kata kunci: geoteknik; *Ground Penetrating Radar*; longsor; stabilitas jalan; stabilitas jembatan

PENDAHULUAN

Metode geofisika merupakan metode yang diyakini memiliki efektivitas waktu dan dapat diulang untuk pengambilan data karena tidak merusak permukaan tanah (Zajícová & Chuman, 2019). Oleh karena itu, metode ini banyak digunakan dalam berbagai disiplin ilmu kebumian. Keunggulan lain dari metode geofisika adalah bersifat multi-informatif yaitu dapat menggambarkan media geologi dalam berbagai jenis informasi pelengkap. Kedalaman tembus pada metode geofisika ini bervariasi tergantung dari metode geofisika yang digunakan. Metode geofisika ini memiliki resolusi yang berbeda-beda sesuai dengan metode geofisika yang digunakan. Metode dasar geofisika terbagi menjadi metode *Ground Penetrating Radar* (GPR), metode seismik, metode geolistrik, metode gravitasi, dan metode magnetik (Pilecki, 2017). Pada artikel ulasan disini, dilakukan pembahasan lebih mendalam mengenai metode GPR dalam berbagai aspek.

Metode *Ground Penetrating Radar* (GPR) merupakan metode geofisika yang menggunakan analisis refleksi gelombang elektromagnetik berdasarkan perbedaan sifat dielektrik benda di bawah permukaan. Metode pencitraan bawah permukaan *non-invasif* ini dapat digunakan untuk mengkarakterisasi stratigrafi pada lapisan-lapisan di bawah permukaan bumi (Borecka et al., 2015). Metode GPR ini dikenal sebagai metode non-destruktif yang efektif untuk menentukan citra bawah permukaan yang dangkal (0 – 10 m) dengan resolusi yang baik. Teknik akuisisi data GPR dapat dilakukan secara portabel dan cepat dengan menyediakan data yang kompak dan akurat dengan resolusi yang lebih tinggi dibandingkan dengan pendekatan geofisika lainnya (Solla et al., 2021). Kedalaman penetrasi GPR dipengaruhi oleh frekuensi sumber sinyal/antena dimana frekuensi antena yang tinggi akan menghasilkan resolusi data yang tinggi namun dengan penetrasi yang dangkal (Siregara et al., 2016).

Metode GPR dan geoteknik telah digunakan dalam aplikasi teknik sipil seperti untuk inspeksi lapisan perkerasan jalan. Untuk penilaian jalan, aplikasi utamanya adalah menyimpulkan variabilitas kandungan air volumetrik di *sub-base* atau *sub-grade* sehingga pemantauan area stabilitas tanah dapat dilakukan (Benedetto et al., 2011), sedangkan aplikasi dalam penilaian rel kereta api dinilai menggunakan GPR yang terdiri dari pengukuran indeks bias, konduktivitas lapisan struktural, ketebalan lapisan, deteksi perubahan struktur atau sifat material, penilaian kondisi *ballast*, dan untuk deteksi kantong *ballast* (*ballast bag detection*) (Fontul et al., 2016; Khakiev et al., 2014).

Dalam studi penilaian jembatan, metode GPR digunakan untuk mendeteksi korosi internal tulangan baja pada beton yang merupakan indikator buruknya ikatan *overlay* atau delaminasi pada tingkat tulangan. GPR dalam aplikasi jembatan juga digunakan untuk menangkap geometri yang tersisa di bagian dalam jembatan, seperti lengkungan tersembunyi dan profil kuno untuk membantu restorasi dan distribusi pengisian pada pasangan bata (Simi et al., 2012; Solla et al., 2014). Selain bidang infrastruktur transportasi, metode GPR dan geoteknik saat ini populer diterapkan pada studi longsor, untuk mengidentifikasi potensi longsor pada lereng dengan menginterpretasikan bidang gelincir sehingga stabilitas lereng dan analisis jarak longsor dapat dilakukan dengan menggunakan faktor keamanan.

Metode GPR seperti halnya metode geofisika pada umumnya yang memiliki keunggulan multi informasi, sehingga diperlukan data pendukung untuk dapat memvalidasi data tersebut, yaitu dengan menggunakan data geoteknik. Data geoteknik ini, biasanya menggunakan data geoteknik konvensional dengan menggunakan data bor dan uji penetrasi (Jongmans & Garambois, 2007).

Artikel ulasan ini berfokus pada karya-karya sepuluh tahun terakhir (2012-2022) yang membahas infrastruktur jalan, jembatan dan tanah longsor, dan dipublikasikan di jurnal internasional yang tersedia *online*. Tujuan utama artikel ini adalah untuk menganalisis GPR dan metode geoteknik yang digunakan dalam aspek infrastruktur dan juga tanah longsor untuk kebutuhan mitigasi bencana.

Prinsip sistem GPR adalah memancarkan gelombang elektromagnetik melalui antena pemancar dan menerimanya dengan antena penerima. Secara umum, GPR memiliki dua jenis antena, yaitu antena *ground coupled shielded* yang kontak langsung hingga beberapa sentimeter di atas permukaan dan antena *air-coupled horn* yang dirancang untuk mendapatkan data dari jarak beberapa puluh sentimeter, hingga lebih dari satu meter di atas permukaan. Unit GPR juga dibagi menjadi unit dengan antena *transmitter* dan *receiver* yang dapat dipisahkan dan unit antena akan diikat bersama pada jarak yang tidak dapat diubah.

Metode GPR banyak diterapkan pada survei tanah dengan menggunakan antena dengan frekuensi antena melebihi 500 MHz yang memungkinkan hasil resolusi yang sangat baik. Resolusi ini bergantung pada frekuensi antena, yaitu panjang gelombang elektromagnetiknya. Batas lapisan harus dapat dideteksi oleh gelombang elektromagnetik yang dipantulkan jika $W/\lambda \leq 0{,}3$, di mana W adalah lebar batas dan λ adalah panjang gelombang elektromagnetik.

Keluaran dari metode GPR yang sering ditampilkan berupa radargram 2D dan dapat diedit menggunakan algoritma pengolahan citra, antara lain dengan menerapkan filter frekuensi. Untuk membuat gambar yang sesuai dengan skala realistis bawah permukaan, kecepatan rambat gelombang elektromagnetik harus diketahui. Pengolahan data menggunakan metode numerik yang lebih objektif. Pendekatan pemodelan numerik menggunakan data yang diperoleh dengan menggunakan pengaturan antena *multi-offset*, dengan antena *transmitter* dan *receiver* dipisahkan pada jarak yang berbeda. Selain pencitraan 2D pada GPR, terkadang model 3D juga diperlukan untuk memberikan interpretasi stratigrafi profil yang lebih detail, termasuk penentuan ketebalan dan perhitungan volume (Zajícová & Chuman, 2019).

APLIKASI GPR DAN GEOTEKNIK UNTUK SURVEI JALAN, JEMBATAN, DAN LERENG

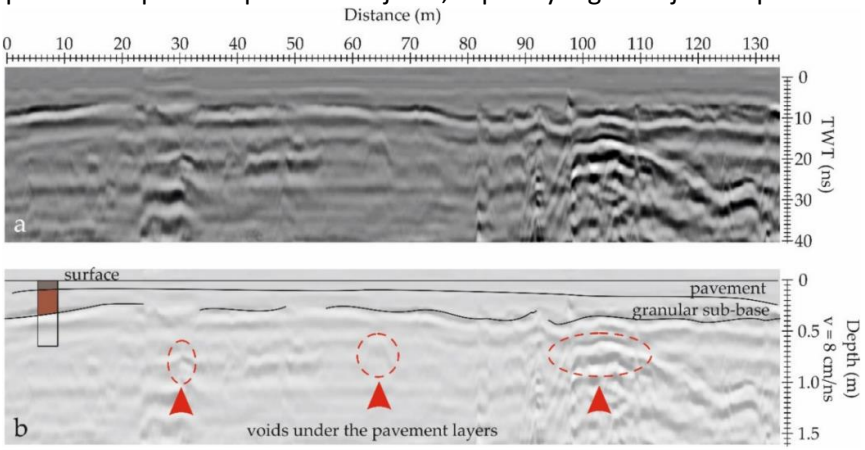
1. Aplikasi GPR dan Geoteknik Untuk Pemantauan di Jalan Raya

1.1 Aplikasi GPR

Transportasi darat seperti jalan raya merupakan prasarana yang sangat penting dalam perkembangan industri dan kota karena menunjang kegiatan. Keamanan dan efisiensi jalan membutuhkan perawatan yang terperinci. Kerusakan jalan dipengaruhi oleh usia, lalu lintas, dan kejadian meteorologis yang sering terjadi seperti badai, hujan lebat, dan musim kemarau yang berkepanjangan, konsekuensi paling kritisnya adalah stabilitas geoteknik dan kerugian finansial yang signifikan. Dengan demikian, strategi pemeliharaan jalan harus diperhatikan dengan sangat hati-hati.

Struktur perkerasan pada jalan terdiri dari beberapa lapisan antara lain lapisan permukaan yang merupakan lapisan aspal atau lapisan beton, lapisan pondasi yang biasanya berupa lapisan pondasi

aspal, dan lapisan *subbase* yang merupakan lapisan agregat tak terikat. Struktur ini ditopang oleh lapisan tanah dasar (Solla et al., 2021). Struktur perkerasan ini terdiri dari perkerasan kaku, lentur, dan semi kaku. Perkerasan kaku biasanya memiliki struktur lapisan permukaan dengan pelat beton bertulang diletakkan di atas lapisan beton bertulang, sedangkan jika lapisan permukaan berupa pelat beton bertulang yang dilapisi dengan lapisan aspal maka dikategorikan sebagai perkerasan semi kaku. Dalam kasus perkerasan lentur, lapisan permukaannya adalah aspal. Perbedaan struktur perkerasan mengakibatkan perbedaan perilaku perkerasan jalan, seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 1**.



Gambar 1. Deteksi rongga di bawah struktur perkerasan jalan dengan frekuensi 400 MHz. Panah merah menunjukkan lokasi anomali yang terkait dengan rongga di bawah *subbase granular* (a) Radargram (b) Interpretasi data. Dicetak ulang dari "Review of GPR application on transport infrastructures: Troubleshooting and best practices" (Solla et al., 2021).

Dalam banyak kasus survei dilakukan dengan menggunakan metode non-destruktif sehingga dapat memperkirakan ketebalan perkerasan menerus secara cepat dan tidak mengganggu fungsi jalan, termasuk metode survei evaluasi GPR untuk mengetahui kondisi struktur perkerasan jalan, mendeteksi keretakan, kelembaban dan perubahan kadar air pada struktur jalan. Kelebihan menggunakan frekuensi yang tinggi ini adalah dapat memperoleh data dengan lebih rinci pada kedalaman yang relatif dangkal sehingga tepat digunakan untuk pemantauan kualitas jalan.

1.1.1 Studi GPR Untuk Estimasi Ketebalan, Sifat Mekanik, dan Kelembaban Jalan

Studi tentang penerapan GPR dalam memperkirakan ketebalan perkerasan jalan untuk inspeksi kuantitatif perkerasan aspal dengan mengukur permitivitas dielektrik telah dilakukan oleh Liu & Sato (2014). Dalam hal ini, ketebalan dan permitivitas dielektrik aspal diperoleh dengan akurasi tinggi. Permitivitas dielektrik ini diupayakan untuk dapat memantau struktur perkerasan, karena permeabilitas sangat erat kaitannya dengan sifat material seperti kadar air, kerapatan, dan medium (Liu & Sato, 2014).

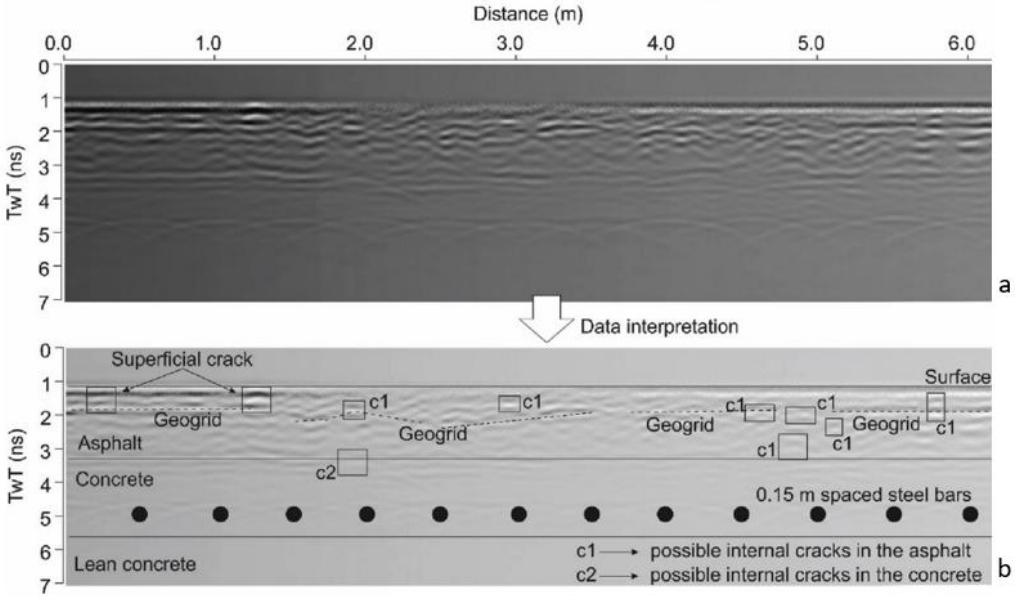
Penilaian kepadatan dan kadar air pelat campuran aspal digunakan untuk memastikan integritas perkerasan oleh Fernandes *et al.* (2017) menggunakan pengujian *Ground Penetrating Radar*. Dalam hal ini, dengan menggunakan enam buah campuran aspal yang dihasilkan dengan gradasi agregat dan jenis aspal yang sama dengan variasi kandungan bahan pengikat, maka berat jenis campuran aspal dapat diprediksi dengan baik oleh model bias kompleks karena air dalam aspal tidak mudah untuk menilai karena pola konektivitas rongga udara di dalamnya (Fernandes et al., 2017).

Kombinasi metode pemodelan kuantitatif dan kualitatif berdasarkan pemodelan perkerasan kaku dikembangkan untuk penilaian kekakuan perkerasan lentur dan identifikasi dini kerusakan dan kehilangan daya dukung pada perkerasan lentur menggunakan metode *Ground Penetrating Radar* (GPR) dengan antena *horn* 2 GHz dan *Light Falling Weight Deflectometer* (LFWD) oleh Tosti *et al.* (2018). Data GPR dalam hal ini memberikan informasi mengenai atribut geometrik fisik dan struktur perkerasan sehingga dilakukan validasi kuantitatif terhadap viabilitas model di sepanjang bentang jalan (Tosti et al., 2018).

Penggunaan metode GPR merupakan solusi yang tepat untuk pemantauan perkerasan pada jalan dan dapat membantu dalam melakukan analisis mekanisme kerusakan jalan kemudian menghitung dan memverifikasi atribut geometrik fisik untuk perkerasan jalan serta kondisi kelembabannya. Dengan kehandalan dari metode GPR ini maka pemantauan jalan dapat dilakukan dengan mudah dan tidak merusak.

1.1.2 Studi GPR Untuk Mendeteksi Retakan di Jalan Raya

Keberhasilan infrastruktur jalan yang baik bergantung pada kualitas perkerasan jalan yang kokoh, fungsionalitas dan perhatian terhadap keselamatan. Seiring bertambahnya usia, perubahan suhu dan kepadatan aktivitas lalu lintas, pondasi jalan mengalami penurunan sehingga dapat muncul retakan yang merupakan modus gangguan utama pada perkerasan jalan. Retakan jalan menyebabkan hilangnya kapasitas struktural, konsekuensi parah yang dapat menyebabkan infiltrasi air ke *sub-base* dan *sub-grade* yang menyebabkan kegagalan struktural yang lebih serius. Identifikasi awal retakan perkerasan untuk memungkinkan pemeliharaan dan rehabilitasi guna meningkatkan umur perkerasan dan mengurangi biaya pemeliharaan dilakukan oleh Rasol *et al.* (2022) menggunakan GPR dengan antena *ground coupled* frekuensi sentral 2,3 GHz seperti **Gambar 2** berikut (Rasol et al., 2020).



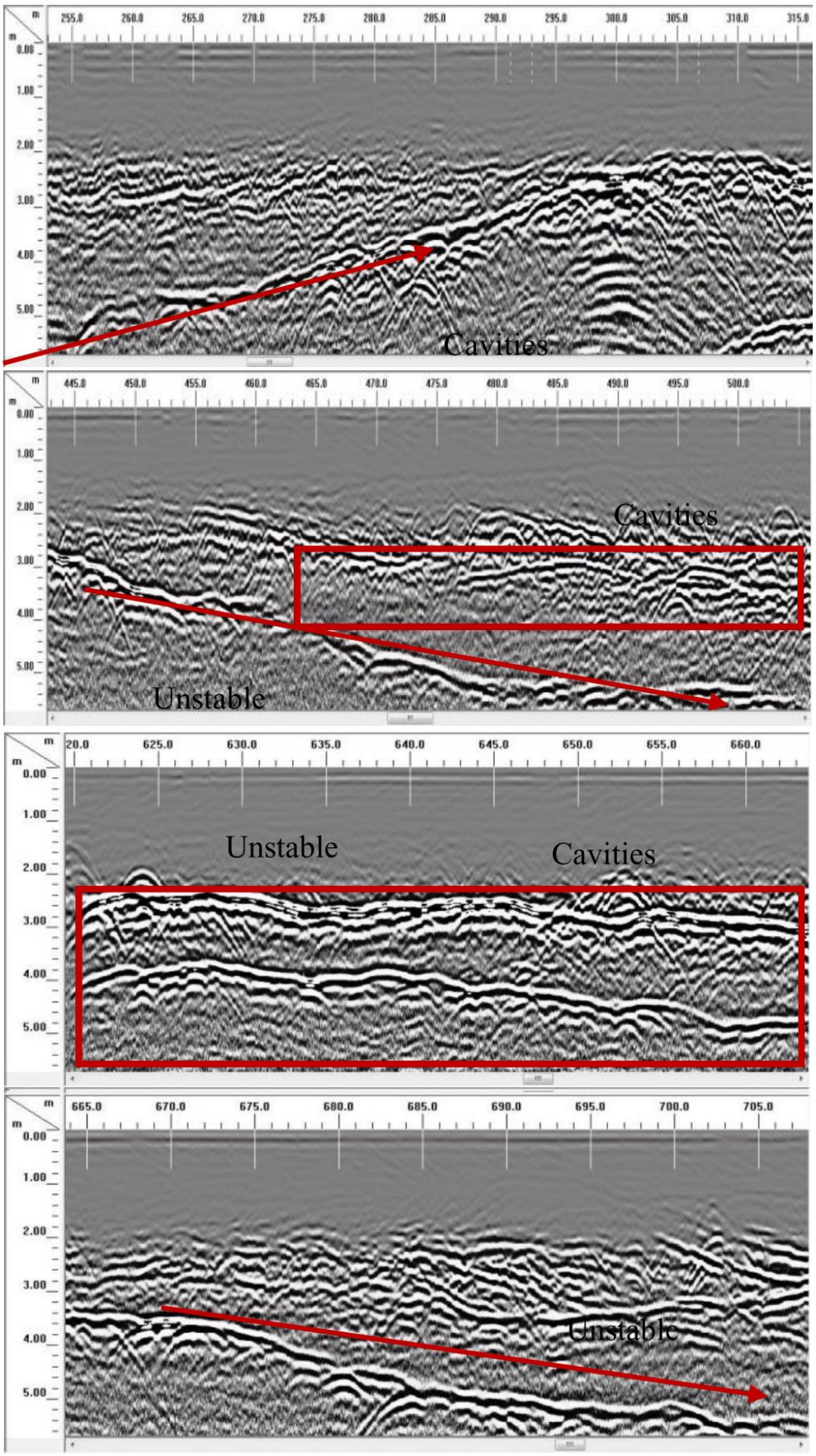
Gambar 2. Profil GPR jalan raya diperoleh dengan *dipol antenna* yang tegak lurus terhadap garis radar. a) B-scan. b) Interpretasi data radar. Dicetak ulang dari "An experimental and numerical approach to combine Ground Penetrating Radar and computational modeling for the identification of early cracking in cement concrete pavements" (Rasol et al., 2020).

Pada studi kasus lainnya, pengembangan penilaian kondisi otomatis dalam survei dan pengolahan data telah populer dipraktikkan, seperti yang dilakukan oleh Torbaghan *et al.* (2020) mengenai pendeteksian otomatis retakan pada jalan yaitu berupa retakan permukaan dengan menggunakan GPR, dengan batas potensial mengenai ukuran retakan, sehingga dapat dideteksi terlepas dari kondisi fisik yang disimulasikan menunjukkan bahwa metodologi GPR dapat diterapkan untuk mendeteksi retakan secara otomatis dengan andal. Metode pendeteksian otomatis dalam hal ini memberikan informasi tambahan yang jelas dan signifikan dengan mampu mendeteksi retakan visual jauh lebih baik dari pendeteksian terlepas dari kondisi simulasi daripada dari gambar yang diperoleh dari data mentah GPR (Torbaghan et al., 2020).

Infrastruktur seperti jalan ini harus dilakukan pengecekan secara berkala, karena bertambahnya usia dan juga pemakaian jalan yang tidak menentu dapat menyebabkan suatu kerusakan. Dengan menggunakan metode GPR berfrekuensi tinggi ini dapat mendeteksi suatu retakan pada perkerasan aspal dan beton secara lebih rinci dan dapat mengidentifikasi retakan dini pada perkerasan aspal dan beton. Hasil dari metode GPR ini merupakan suatu radargram yang dapat mengetahui suatu kedalaman retakan dan panjang dari retakan pada aspal dan beton.

1.1.3 Kajian GPR Untuk Analisis Potensi Longsor Pada Ruas Jalan

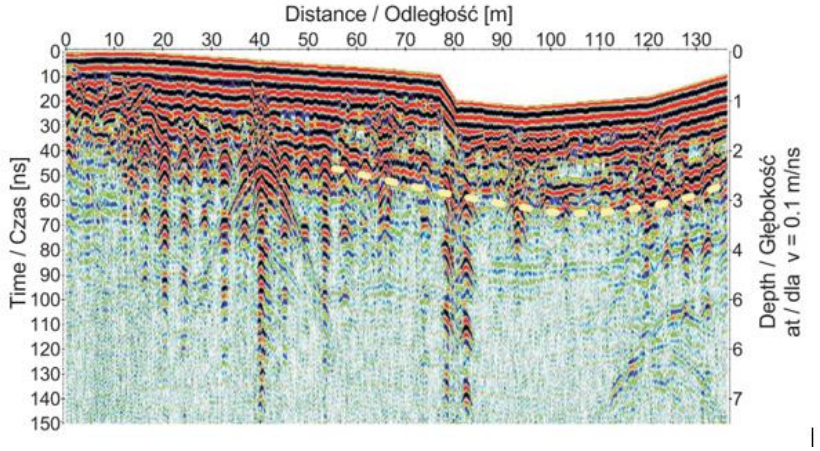
Aktivitas penggunaan lahan seperti jalan dapat memicu potensi longsor. Alsharahi *et al.* (2019) memfokuskan studi eksperimennya mengenai investigasi longsoran di jalan raya menggunakan metode *Ground Penetrating Radar* dengan antena 200 MHz. Pada penelitian ini ditelaah beberapa distorsi dan kemiringan pada lapisan tanah bawah jalan yang berpotensi kerusakan di kemudian hari, diperoleh batas antara kedua lapisan, perubahan dan retakan pada jalan karena adanya beberapa rongga dan kemiringan antar lapisan, seperti pada **Gambar 3** berikut (Alsharahi et al., 2019).



Gambar 3. Bidang miring di bawah permukaan. Dicetak ulang dari "GPR Application for Risks Detection in Subsurface Engineering Construction Projects" (Alsharahi et al., 2019).

Penerapan GPR untuk kasus-kasus yang berkaitan dengan investigasi longsoran pada area jalan, yakni pada material longsoran yang jenuh membentuk struktur jalan yang memungkinkan endapan *loess*, sehingga mengganggu struktur alaminya pada saat pembangunan jalan akibatnya mengalami deformasi. Hal tersebut dikarenakan terdapat celah tanah longsor tua di atas bukit di sisi jalan. Penelitian

ini dilakukan oleh Zielinski *et al.* (2016) yang menghasilkan indikasi kelongsoran dangkal pada kedalaman 2 – 3 m yang akan meluncur ke bawah dan menimbulkan kerusakan besar, pengaruh kelongsoran tersebut hanya terbatas pada pemadatan sedimen akibat keruntuhan, seperti **Gambar 4** berikut (Zieliński et al., 2016).



Gambar 4. Interpretasi GPR. Dicetak ulang dari "Use of GPR Method For Investigation of The Mass Movements Development On The Basis Of The Landslide In Ka£Ków" (Zieliński et al., 2016).

Pada **Gambar 4** menunjukkan suatu hiperbola kecil yang diciptakan oleh gelombang yang dipantulkan oleh tiang logam penghalang di pinggir jalan. Pada 40 rm (*running meter)* terdapat suatu anomali vertikal dengan tanda hiperbola yang dikaitkan dengan utilitas yang terkubur. Sebuah stratum rusak memanjang dari 60 rm ke batas rekaman. Dan pada kedalaman 2 meter yang asalnya dapat dihubungkan ke Sebagian permukaan longsoran. Kesalahan ini kemungkinan besar diwakili oleh anomali yang terlihat antara 78 dan 120 rm dari garis melintang. Sebab itu, lapisan patahan yang dimulai pada 60 rm sebagian berasosiasi dengan tanah longsor, dan sebagian lagi dapat mengindikasikan area pergerakan potensial di bawah gaya gravitasi.

Diketahui bahwa tanah longsor merupakan bencana geologi yang serius, tanah longsor ini disebabkan oleh beberapa faktor, salah satunya akibat perubahan geometri lereng pada saat pembangunan jalan. Dengan demikian, sulit untuk mengevaluasi faktor utama yang menyebabkan ketidakstabilan di suatu daerah. Maka untuk memahami penyebab ketidakstabilan lereng, telah dilakukan kajian terpadu parameter geologi, geomorfologi, geoteknik, dan geofisika oleh Tandon *et al.* (2020). Parameter geofisika yang diperoleh dari eksplorasi lapangan dengan menggunakan teknik geofisika merupakan informasi struktur internal termasuk posisi permukaan potensial bidang gelincir dan aliran air tanah di dalam dan sekitar longsoran. Survei *Ground Penetrating Radar* dalam studi kasus ini menegaskan bahwa jalan yang diteliti tidak stabil, terutama pada titik-titik jalan yang berada di atas lapisan batu lumpur atau pada tanah berpasir yang tebal dan tidak kohesif (Tandon *et al.*., 2021).

Berbeda dengan pemanfaatan GPR untuk pemantauan jalan yang menggunakan frekuensi yang tinggi guna mendapatkan citra yang teliti, pada tujuan ini digunakan antena dengan frekuensi yang rendah agar dapat mencapai lapisan tanah dibawah perkerasan jalan. Kestabilan lapisan tanah tersebut dianalisis untuk mengetahui apakah lapisan tanah tersebut dapat mengganggu struktur alami jalan atau bahkan mengakibatkan kerusakan yang signifikan hingga kelongsoran.

1.2 Aplikasi Geoteknik Untuk Pemantauan Stabilitas Jalan

Investigasi dan pemantauan stabilitas infrastruktur transportasi darat berupa jalan juga telah banyak dilakukan oleh para peneliti sebelumnya dalam bentuk penilaian stabilitas lereng tanggul dengan memperoleh hasil interpretasi dalam kasus struktur jalan secara khusus. Batog *et al.* (2018) membahas penilaian kestabilan lereng pada kasus tanggul menurut *Eurocode 7* yang berbeda dengan metode *Fellenius* dimana menurut *Eurocode 7* memperkenalkan kondisi yang tidak dapat diterima dalam penyelesaian pemukiman, yang dalam metode ini menggunakan faktor keamanan atau FK sebagai parameter dasar untuk penilaian stabilitas margin, berdasarkan parameter kekuatan tanah dan variabel beban. Dalam penelitiannya, diperoleh demonstrasi permasalahan terkait objek infrastruktur transportasi yang menunjukkan pembangunan jaringan jalan dengan permasalahan yang muncul karena bersifat linier (Batog & Stilger-Szydł, 2018).

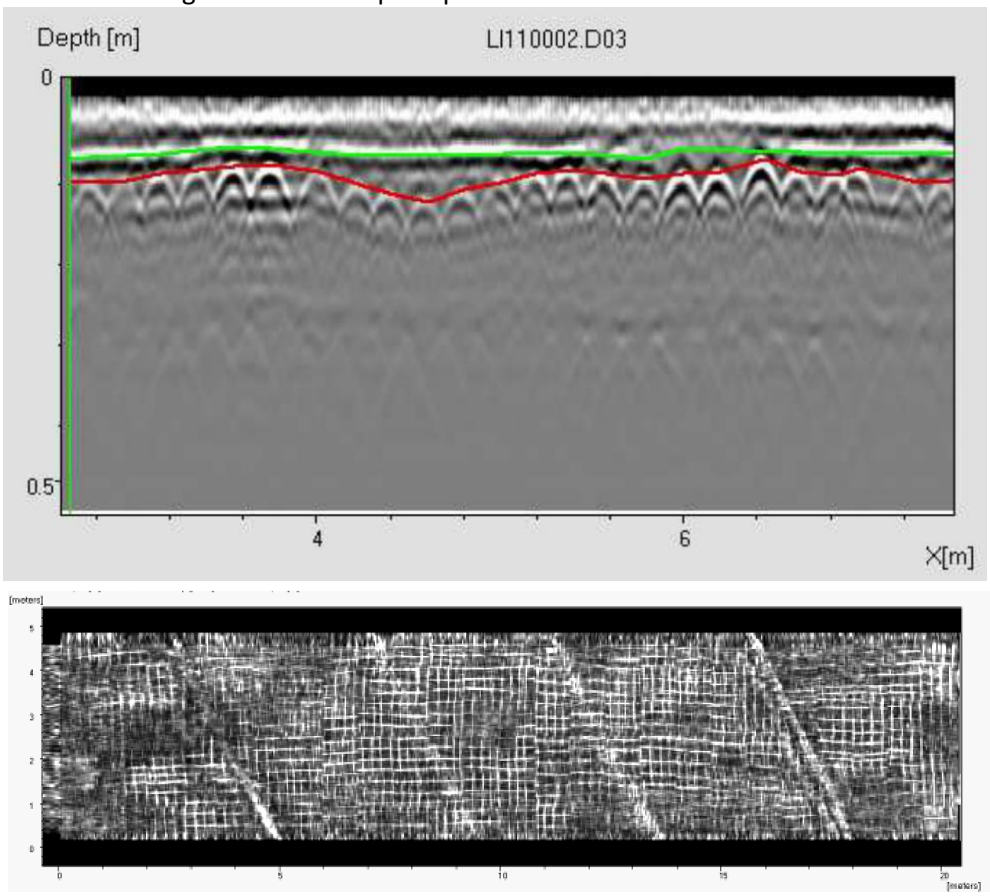
Analisis numerik untuk evaluasi deformasi termal pada perkerasan jalan telah dilakukan oleh Bartlewska-Urban & Zombron (2016). Dalam studinya, disajikan perhitungan numerik untuk memprediksi dampak perubahan temperatur pada proses distorsi medium dengan representasi persamaan konsolidasi *Biot* dan kerangka *Kelvin-Voight* serta mempertimbangkan deformasi *subgrade* pada jalan raya. Analisis perilaku jalan tol terkait beban dinamis dari aktivitas lalu lintas dilakukan untuk mendapatkan distribusi temperatur dan deformasi tanah asli dan pada permukaan jalan yang dimodelkan. Semakin tinggi temperatur, semakin besar deformasi yang mungkin terjadi (Bartlewska-Urban & Zombron, 2016).

Terjadinya suatu deformasi pada jalan akan membuat suatu lapisan dari jalan itu sendiri menjadi tidak stabil atau pondasi jalan mengalami penurunan kualitas. Dengan menggunakan metode geoteknik untuk kestabilan suatu jalan dapat menggunakan pendekatan penilaian stabilitas *Eurocode 7* untuk mengetahui suatu faktor keamanan dengan menghitung suatu parameter kekuatan tanah, variabel beban dan juga kohesi tanah. Dilakukan juga suatu analisis beban dinamis untuk mengetahui distribusi temperatur dan deformasi tanah dengan menganalisis suatu banyaknya aktivitas di jalan tersebut.

2. Penerapan GPR dan Geoteknik Untuk Pemantauan di Jembatan

2.1 Studi GPR Untuk Penyelidikan Struktur, Keretakan, dan Stabilitas Jembatan

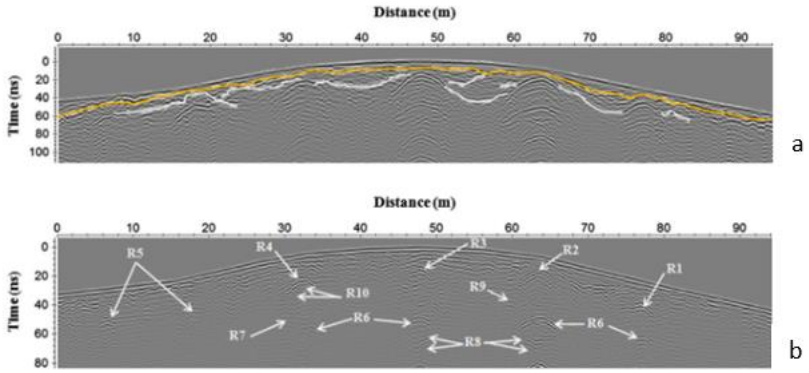
Pada penelitian yang dilakukan oleh Simi *et al.* (2012) dengan menggunakan GPR, antena frekuensi 2 GHz, didapatkan hasil ketebalan dan kekerasan beton, pendeteksian daerah lembab dan kerusakan beton, serta letak tulangan dan saluran pada pelat beton.



Gambar 5. (a) Hasil radargram mendeteksi antarmuka dan tulangan (b) Tomografi untuk deteksi tulangan. Dicetak ulang dari "Bridge deck survey with high resolution Ground Penetrating Radar" (Simi et al., 2012).

Simi *et al.* (2012) mengidentifikasi antarmuka aspal-beton yang diwarnai dengan garis berwarna hijau dan lapisan tulangan yang ditandai dengan warna merah pada hasil radargram yang diperoleh di **Gambar 5(a)**. Dari radargram tersebut kemudian dilakukan C-Scan seperti pada **Gambar 5(b)** untuk mengetahui kondisi struktur bawah permukaan untuk memeriksa keberadaan dan kedalaman tulangan-tulangan. Faktor utama kerusakan lapisan beton ini adalah korosi tulangan baja atau delaminasi dengan proses *high density radar profile* (Simi et al., 2012).

Penelitian mengenai jembatan juga telah dilakukan oleh Solla *et al.* (2014) di Spanyol dengan menggunakan metode GPR dengan meneliti stabilitas jembatan pada jembatan kuno di wilayah Galicia Spanyol dengan frekuensi antena 250 MHz dan 500 MHz. Penelitian tersebut menghasilkan area yang relatif homogen, yang menunjukkan ketebalan cincin melengkung. Kemudian diperoleh nilai kecepatan terendah yang berpotensi untuk menggambarkan daerah berlubang pada jembatan (Solla et al., 2014).



Gambar 6. (a) Radargam yang diperoleh dengan antena 250 MHz garis-garisnya menunjukan antarmuka lapisan (b) Radargram dari data GPR yang diperoleh dari antena 500 MHz yang menunjukkan interpretasi reflektor utama yang diidentifikasi (rangkuman, R1-R5 merupakan lengkungan, R6-R7 masing-masing adalah antar muka udara-air dan udara-tanah, R8 mewakili refleksi sudut. Dicetak ulang dari "Ancient Stone Bridge Surveying by Ground-Penetrating Radar and Numerical Modeling Methods" (Solla et al., 2014).

Pada tahun 2013 telah dilakukan penelitian oleh Alani *et al.* (2013) yang meneliti jembatan *forth road* dekat Edinburgh, Skotlandia yakni pada kerusakan tulangan struktur dan kandungan uap air pada lokasi dek jembatan. Penelitian ini dilakukan juga di jembatan di jalan Pentagon di Chatham, Kent, Inggris dengan metode GPR, dengan frekuensi antena 2 GHz, sehingga diidentifikasi retakan yang ditemukan termasuk retak struktural dengan tata letak posisi tulangan di seluruh jembatan. Hasil metode GPR ini efektif dan konklusif jika digunakan dengan benar dan tepat serta tidak merusak sehingga metode ini cocok digunakan untuk penelitian jembatan (Alani et al., 2013).

Pemanfaatan metode GPR dari konstanta dielektrik permukaan dan atenuasi dapat digunakan untuk melakukan deteksi kerusakan dan kestabilan jembatan melalui pengukuran atribut geometriknya seperti ketebalan, celah udara, kekerasan dan struktur tulangan jembatan, atribut tersebut merupakan informasi penting untuk pemeliharaan jembatan agar tetap mempertahankan fungsionalitasnya dengan baik.

2.2 Studi Geoteknik Untuk Penyelidikan Struktur Jembatan

Analisis numerik proses konsolidasi tanah kekuatan rendah dan dampaknya terhadap penurunan tanggul jalan dilakukan oleh Batog & Stilger-Szydło (2019) untuk mendapatkan solusi yang efektif dalam tahap desain dan kinerja yang mengarah pada meminimalkan masalah terkait sambungan struktur tanggul dalam rangka meningkatkan mutu dan keselamatan pengguna jembatan. Dalam metode tersebut, uji investigasi lapisan bawah tanah dan analisis varian dari proses konsolidasi digunakan untuk menjelaskan penyebab penurunan struktur. Dengan mempertimbangkan hasil uji verifikasi serta nilai parameter geoteknik yang ditentukan di laboratorium, diperoleh nilai ukuran total tiang, laju konsolidasi dan prediksi penurunan (Batog & Stilger-Szydło, 2019).

3. Penerapan GPR dan Geoteknik Untuk Monitoring Potensi Longsor Pada Lereng

Longsor merupakan salah satu fenomena alam yang sangat berbahaya, longsor sendiri merupakan fenomena alam dimana suatu massa tanah atau batuan pada suatu lereng longsor (Jongmans & Garambois, 2007). Pergerakan tanah ke bawah dipengaruhi oleh beberapa faktor, yaitu akibat material geologi (batuan/tanah, batuan buatan atau kombinasi keduanya), curah hujan, gempa bumi, dan aktivitas antropogenik (Innocenti et al., 2022).

Longsor menyebabkan banyak kerugian termasuk kerusakan berskala besar dan ribuan korban jiwa. Hal ini mendukung pernyataan bahwa tanah longsor merupakan bahaya global yang signifikan, 14% dari total jumlah korban bencana alam disebabkan oleh longsoran lereng (Froude & Petley, 2018). Pada periode 2004-2016, terjadi 4.862 longsor fatal non-seismik dengan total korban jiwa 55.997 jiwa, sebagian besar peristiwa

tersebut terjadi di kawasan Asia, yaitu di sepanjang Himalaya, India, Cina Tenggara, negara tetangga Laos, Bangladesh, Myanmar, dan pulau-pulau yang membentuk india dan Filipina. 95% dari peristiwa ini melibatkan kegagalan lereng tunggal (Froude & Petley, 2018).

Dari kasus-kasus tersebut, untuk melakukan pencegahan dan mitigasi, diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai tanah longsor, seperti karakteristik lereng, kestabilan lereng berdasarkan titik kritis yang disebabkan oleh gaya-gaya yang melawan gerakan seperti sudut geser, gravitasi, gaya normal, kohesi, dan gaya yang menyebabkan pergerakan tanah atau batuan (Innocenti et al., 2022).

Dalam nomenklatur longsoran, material lereng umumnya diklasifikasi tipe pergerakan tanahnya dan mekanismenya (mis. *Rock fall, Earth fal*l). Ketika dua atau lebih mekanisme keruntuhan terjadi, maka disebut longsoran kompleks. Penyebab terjadinya tanah longsor ditentukan oleh faktor internal dan faktor eksternal. Faktor internal dapat dikonfirmasi dengan eksplorasi fisik dan dapat dibagi menjadi (1) Material lereng yang tidak stabil dan (2) Struktur geologi. Material lereng yang tidak stabil yang menyebabkan kelongsoran biasanya berupa tanah Lempung yang memiliki daya serap yang tinggi dan merupakan salah satu faktor utama penghambat kestabilan lereng yang disebabkan oleh daya serap permukaan tanah lempung.

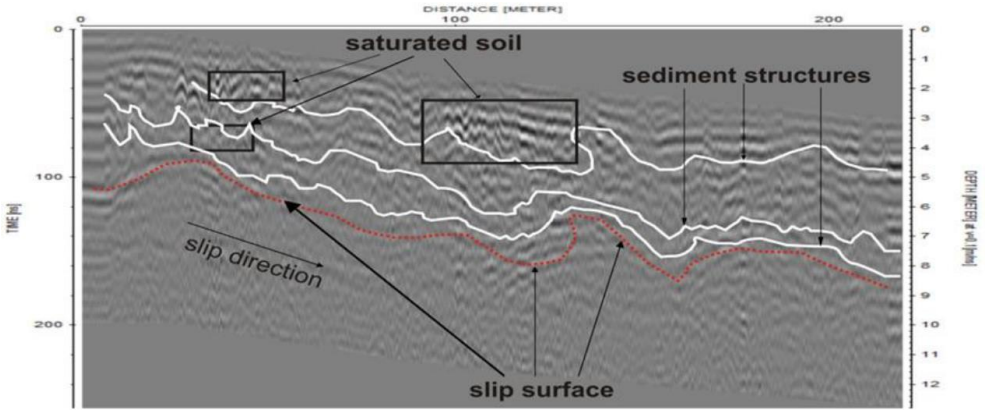
3.1 Metode GPR

Borecka *et al.* (2015) telah melakukan penelitian menggunakan metode GPR dengan frekuensi 100 MHz dengan potensi *slip plane* pada kisaran 3-10 m di bawah permukaan. Metode GPR dilakukan untuk interpretasi area bidang gelincir potensial dan hasil yang diperoleh tersebut secara signifikan terkait dengan hasil uji geoteknik yang dilakukan (Borecka et al., 2015). Penelitian yang hanya menggunakan metode GPR dinilai kurang efektif dalam menentukan potensi longsor, sehingga perlu dibarengi dengan metode pendukung lainnya untuk memverifikasi struktur bawah permukaan dengan baik.

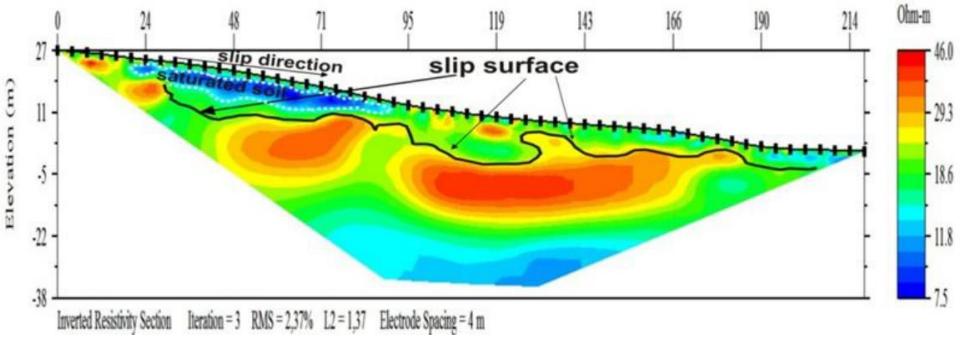
3.2 Metode GPR dengan Metode Lain

Hu & Shan (2015) telah melakukan penelitian di bagian barat laut pegunungan Khingan, China, dengan menggunakan kombinasi metode *High Density Resistivity* (HDR), *Ground Penetrating Radar* (GPR), dan data bor. Hasil dari semua metode tersebut menghasilkan posisi permukaan tanah longsor yang sama dan kecepatan geser yang sama untuk setiap metode (Hu & Shan, 2016).

Siregar *et al.* (2016) telah mengidentifikasi potensi longsor di Kecamatan Abang, Kabupaten Karangasem Bali – Indonesia dengan kedalaman bidang gelincir pada 2 – 5 meter menggunakan metode GPR frekuensi 200 MHz dan Geolistrik dengan konfigurasi *dipole-dipole*. Berdasarkan kedua metode tersebut, didapatkan hasil bahwa bidang gelincir terdeteksi pada kedalaman 5 - 8 meter, dengan material batas plastisitas dan batas cair tinggi (34,50 - 30,00), seperti **Gambar 7** berikut (Siregar et al., 2016)**.**



Gambar 7. Profil radargram di Banjar Buayang. Dicetak ulang dari "Ground Penetrating Radar And 2-D Geoelectricity Application For Detecting Landslide In Abang District, Karangasem Regency, Bali" (Siregar et al., 2016).



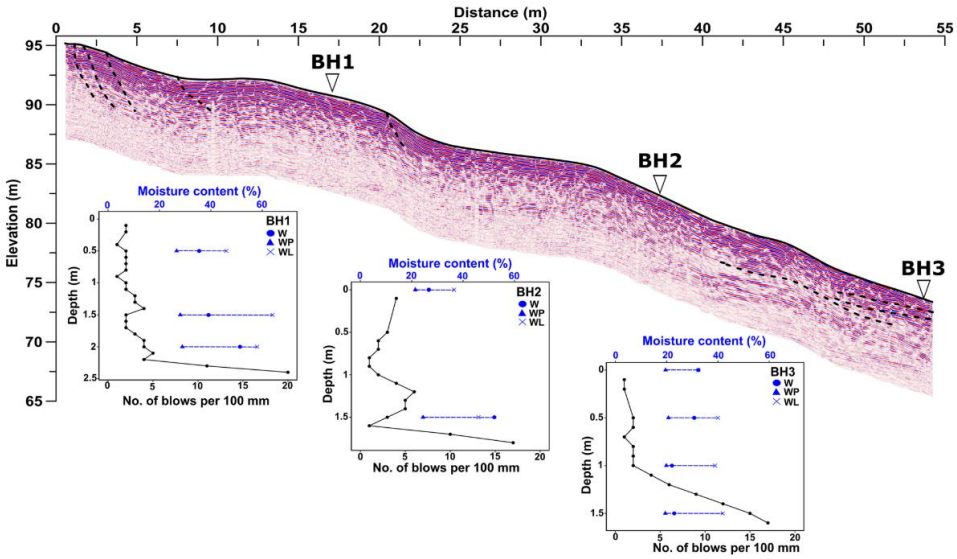
Gambar 8. Profil *resistivity* di Bandar Buayang. Dicetak ulang dari "Ground Penetrating Radar And 2-D Geoelectricity Application For Detecting Landslide In Abang District, Karangasem Regency, Bali" (Siregar et al., 2016).

Popescu *et al.* (2016) menyelidiki tanah longsor di Rumania di perbukitan Lipovei dan Apold Couloir, menggunakan metode 2 - D *Electric Resistivity Tomography* (ERT) menggunakan konfigurasi *Wenner, Schlumberger* dan *dipole - dipole* serta metode *Ground Penetrating Radar* (GPR) dengan frekuensi 100 MHz. Hasil kedalaman bidang gelincir yang diperoleh bervariasi seperti menggunakan *dipole – dipole* 23 – 25 meter, *Schlumberger* 14 – 15 meter, Wenner 2 – 5 meter, dan GPR 5 meter (Popescu et al., 2016).

Penelitian juga dilakukan oleh Husain *et al.* (2019) yang menyelidiki tanah longsor di Sobradinho, Brazil dengan metode GPR menggunakan antena frekuensi 400 MHz, ERT dengan konfigurasi dipol – dipol dengan jarak spasi 5 meter, dan seismik dengan 24 saluran *geophone* vertikal frekuensi 14 Hz. Semua metode tersebut menghasilkan longsoran *debris* dan *quarter* deposit serta mendeteksi permukaan bidang gelincir (Hussain et al., 2019).

Kannaujiya *et al.* (2019) telah melakukan penelitian di Kunjethi (Kalimath), Garhwal Himalayas, India, dengan menggunakan metode ERT konfigurasi dipol – dipol dan interval 2,5 meter, kemudian metode GPR antena 100 MHz, dan metode penginderaan jauh. Dari penelitian tersebut menghasilkan potensi longsor dengan gerakan kecepatan lambat yang disebabkan oleh curah hujan yang tinggi dengan perkiraan kedalaman bidang gelincir sekitar 15 meter hingga 19 meter (Kannaujiya et al., 2019).

Penelitian lanjutan oleh Widodo (2022) dilakukan di Desa Cikahuripan, Kecamatan Parongpong, Bandung – Indonesia dengan menggunakan *shielded* GPR dengan frekuensi antena 100 MHz dan *Direct Current Resistivity* (DCR) dengan konfigurasi *dipole – dipole*. Kedua metode tersebut menghasilkan bidang gelincir dengan tanah lempung dan kedalaman 30 dari 4 - 16 meter di bawah permukaan (Widodo, 2022).



Gambar 9. Transek GPR di tengah-tengah longsoran, menunjukkan lokasi lubang *hand auger.* Garis putus-putus hitam menunjukkan fitur-fitur utama di bawah permukaan seperti retakan tegangan, blok miring ke belakang, dan retakan pada reflector menunjukkan perubahan stratigrafi dengan kedalaman di dekat kaki lereng pada area studi tersebut. Dalam hal ini *Borehole (BH)* atau data bor digunakan untuk membantu identifikasi lapisan tanah agar tepat. Dicetak ulang dari "Engineering geomorphological and InSAR investigation of an urban landslide, Gisborne, New Zealand" (Cook et al., 2022).

Telah dilakukan penelitian serupa di daerah perkotaan Gisborne, Selandia Baru oleh Cook *et al.* (2022) menggunakan teknik penginderaan jauh, GPR, dan menggunakan data bor. GPR yang digunakan adalah GPR *shielded* dengan antena berfrekuensi 160 MHz. Dari metode tersebut diperoleh hasil lereng yang kurang stabil pada daerah yang disebabkan oleh *deforestasi*, karena mengalami percepatan laju deformasi, seperti gambar berikut (Cook et al., 2022).

3.3 Metode GPR dan Geoteknik

Bednarczyk (2014) telah melakukan penelitian tentang pemantauan bahaya tanah longsor secara online selama delapan tahun di Carpathians Polandia, menggunakan metode geoteknik dan geofisika. Metode geoteknik yang dilakukan berupa uji laboratorium seperti uji ukuran tanah, kadar air, batas plastis dan cair, berat isi, berat jenis butir, dan kandungan bahan organik. Jenis pengujian lainnya adalah pengujian kekuatan geser, pengujian IL oedometer, pengujian triaksial CIU dan CID. Hasil uji laboratorium diperoleh material berupa *colluvium* yang mewakili lempung berdebu, lempung, lempung berkerikil, batu lempung, dan batu pasir dengan kadar air yang tinggi berkisar antara 18 - 37%, konsistensinya adalah 6,5 - 10 kPa, dengan sudut gesekan internal 11° - 15°. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang menggunakan *shielded* GPR, penelitian ini menggunakan *unshielded* GPR dengan antena 100 MHz. Penelitian ini menghasilkan prediksi longsor yang lebih andal dan memberikan kontrol longsor yang lebih baik pada kontrol stabilitas tanah (Bednarczyk, 2014).

3.4 Pendekatan Multi-Instrumental

Strategi penerapan multi-instrumen dalam melakukan evaluasi dan monitoring kelongsoran merupakan strategi baru yang digunakan untuk memperoleh multi-informasi data sehingga mendukung penyelidikan dilakukan secara akurat. Penerapan ini telah dilakukan Sestras *et al.* (2022) dalam melakukan monitoring pada lereng yang rentan. Metode yang digunakan dalam pendekatan multi-instrumentalnya meliputi survei topo-geodetik, pemodelan UAV 3D, analisis spasial GIS, investigasi *Ground Penetrating Radar*, dan penilaian geoteknik untuk mengidentifikasi pola pergerakan lereng serta informasi kondisi struktur lereng sehingga dapat dianalisis strategi mitigasi yang efektif.

Setras *et al.* (2022) dengan penerapan multi-instrumental ini, memperoleh korelasi pergerakan lereng dari metode-metode yang digunakan dan memperkirakan bahwa pergerakan lereng disebabkan oleh longsoran tanah dalam. Dengan demikian, pendekatan multi-instrumental menggunakan survei topo-geodetik, pemodelan UAV 3D, GPR dan geoteknik ini merupakan metode yang efektif dan dapat diandalkan dalam monitoring lereng. Survei topo-geodetik mengukur pergerakan lereng secara presisi, informasi yang didapatkan berupa arah dan rotasi pergerakan lereng. Pemodelan UAV 3D membuat representasi visual lereng dan mengidentifikasi pola erosi di permukaan, dari metode ini diperoleh perubahan erosi yang terjadi. Survei GPR memindai lapisan di bawah permukaan sehingga dari survei berkala dapat mengidentifikasi perubahan struktur yang terjadi. Sedangkan penilaian geoteknik dilakukan untuk dapat menganalisis kestabilan lereng secara numerik (Sestras et al., 2022).

KESIMPULAN

Penerapan metode geofisika *Ground Penetrating Radar* (GPR) dalam kajian terkait infrastruktur publik dan investigasi potensi longsor semakin dipercaya kehandalan dan keberhasilannya untuk diterapkan untuk beberapa tujuan sebagaimana dibahas dalam artikel. Metode *Ground Penetrating Radar* memberikan informasi dari data dalam jumlah besar tanpa mengganggu permukaan tanah (*non-destructive*). Dalam pengukuran dan pengolahan data, frekuensi antena yang digunakan perlu disesuaikan dengan tujuan survei dan kondisi nyata di lapangan.

Pada eksplorasi yang sangat dangkal seperti jalan dan jembatan, peneliti fokus pada penggunaan GPR dengan frekuensi sangat tinggi (dalam Giga Hz) untuk mengkarakterisasi struktur lapisan jalan dan jembatan, sifat fisik, deteksi retakan dan evaluasi stabilitas potensial sebagai kontrol kondisi dan pemantauan kualitas, sehingga aspek fungsionalitas dan keamanan tetap terjaga.

Penerapan metode *Ground Penetrating Radar* (GPR) saat ini juga banyak digunakan untuk mengetahui potensi kelongsoran pada lereng melalui parameter fisik dan penentuan bidang gelincir. Eksplorasi ini termasuk eksplorasi yang cukup dalam dibandingkan eksplorasi investigasi jalan dan jembatan, sehingga mayoritas peneliti menggunakan frekuensi yang tidak terlalu tinggi yaitu sekitar 100 – 500 MHZ. Dari pemodelan yang dilakukan diperoleh perhitungan faktor keamanan dan prediksi jarak longsoran dengan

sangat baik. Penggunaan metode GPR perlu didukung dengan metode lain seperti metode geofisika lainnya dan juga metode geoteknik untuk validasi struktur bawah permukaan yang tepat.

Pada studi kasus terbaru, peneliti menggunakan kombinasi metode dan penerapan multi-instrumental untuk mencapai hasil yang maksimal, karena metode yang digunakan akan saling melengkapi. Diantaranya menggunakan metode geoteknik dengan menggunakan data bor atau uji laboratorium berupa uji kuat geser, uji oedometer IL, uji triaksial CIU, dan CID untuk mendapatkan potensi longsor yang baik. Sedangkan untuk penilaian infrastruktur publik digunakan metode geoteknik berupa analisis numerik dan uji laboratorium sebagai data pendukung hasil yang diperoleh. Instrumen lain yang dapat digunakan adalah melalui metode *Geographic Information System* (GIS) seperti penginderaan jarak jauh, topo-geodetik, dan pemodelan UAV 3D untuk memonitoring perubahan struktur permukaan berdasarkan representasi visualisasinya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penelitian ini didanai oleh Kementerian Riset, Teknologi, dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia dalam program penelitian "Penelitian Dasar Kemenristekdikti" 010/E4/AK.04.PTNBH/2021 dan 1537/UN40.LP/PT.01.03/2021 bekerja sama dengan Pusat Penelitian Geoteknologi, Badan Riset dan Inovasi Nasional, Bandung, Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

Alani, A. M., Aboutalebi, M., & Kilic, G. (2013). Applications of ground penetrating radar (GPR) in bridge deck monitoring and assessment. *Journal of Applied Geophysics*, *97*, 45–54. https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2013.04.009

Alsharahi, G., Faize, A., Maftei, C., & Driouach, A. (2019). GPR Application for Risks Detection in Subsurface Engineering Construction Projects. *Ovidius University Annals of Constanta - Series Civil Engineering*, *21*(1), 51–58. https://doi.org/10.2478/ouacsce-2019-0006

Bartlewska-Urban, M., & Zombron, M. (2016). Numerical analysis of road pavement thermal deformability, based on biot viscoelastic model of porous medium. *Studia Geotechnica et Mechanica*, *38*(1), 15–22. https://doi.org/10.1515/sgem-2016-0002

Batog, A., & Stilger-Szydł, E. (2018). Stability of road earth structures in the complex and complicated ground conditions. *Studia Geotechnica et Mechanica*, *40*(4), 300–312. https://doi.org/10.2478/sgem-2018-0028

Batog, A., & Stilger-Szydło, E. (2019). Geotechnical Problems of the Foundation of Road Embankments by the Bridge Structures. *Studia Geotechnica et Mechanica*, *41*(4), 272–281. https://doi.org/10.2478/sgem-2019-0036

Bednarczyk, Z. (2014). Landslide Geohazard Monitoring, Early Warning and Stabilization Control Methods. *Studia Geotechnica et Mechanica*, *36*(1), 3–13. https://doi.org/10.2478/sgem-2014-0001

Benedetto, A., Tosti, F., Schettini, G., & Twizere, C. (2011). Evaluation of geotechnical stability of road using GPR. *2011 6th International Workshop on Advanced Ground Penetrating Radar, IWAGPR 2011*, 1–6. https://doi.org/10.1109/IWAGPR.2011.5963858

Borecka, A., Herzig, J., & Durjasz-Rybacka, M. (2015). Ground Penetrating Radar Investigations of Landslides: A Case Study in a Landslide in Radziszów. *Studia Geotechnica et Mechanica*, *37*(3), 11–18. https://doi.org/10.1515/sgem-2015-0028

Cook, M. E., Brook, M. S., Hamling, I. J., Cave, M., Tunnicliffe, J. F., Holley, R., & Alama, D. J. (2022). Engineering geomorphological and InSAR investigation of an urban landslide, Gisborne, New Zealand. *Landslides*, *19*(10), 2423–2437. https://doi.org/10.1007/s10346-022-01938-z

Fernandes, F. M., Fernandes, A., & Pais, J. (2017). Assessment of the density and moisture content of asphalt

mixtures of road pavements. *Construction and Building Materials*, *154*, 1216–1225. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.06.119

Fontul, S., Fortunato, E., De Chiara, F., Burrinha, R., & Baldeiras, M. (2016). Railways Track Characterization Using Ground Penetrating Radar. *Procedia Engineering*, *143*(Ictg), 1193–1200. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.120

Froude, M. J., & Petley, D. N. (2018). Global fatal landslide occurrence from 2004 to 2016. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, *18*(8), 2161–2181. https://doi.org/10.5194/nhess-18-2161-2018

Hu, Z., & Shan, W. (2016). Landslide investigations in the northwest section of the lesser Khingan range in China using combined HDR and GPR methods. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, *75*(2), 591–603. https://doi.org/10.1007/s10064-015-0805-y

Hussain, Y., Cardenas-Soto, M., Martino, S., Moreira, C., Borges, W., Hamza, O., Prado, R., Uagoda, R., Rodríguez-Rebolledo, J., Silva, R. C., & Martinez-Carvajal, H. (2019). Multiple geophysical techniques for investigation and monitoring of Sobradinho Landslide, Brazil. *Sustainability (Switzerland)*, *11*(23). https://doi.org/10.3390/su11236672

Innocenti, A., Pazzi, V., Borselli, L., Nocentini, M., Lombardi, L., Gigli, G., & Fanti, R. (2022). Reconstruction of the evolution phases of a landslide by using multi-layer back-analysis methods. *Landslides*, *2022*(March). https://doi.org/10.1007/s10346-022-01971-y

Jongmans, D., & Garambois, S. (2007). Geophysical investigation of landslides: A review. *Bulletin de La Societe Geologique de France*, *178*(2), 101–112. https://doi.org/10.2113/gssgfbull.178.2.101

Kannaujiya, S., Chattoraj, S. L., Jayalath, D., Champati ray, P. K., Bajaj, K., Podali, S., & Bisht, M. P. S. (2019). Integration of satellite remote sensing and geophysical techniques (electrical resistivity tomography and ground penetrating radar) for landslide characterization at Kunjethi (Kalimath), Garhwal Himalaya, India. *Natural Hazards*, *97*(3), 1191–1208. https://doi.org/10.1007/s11069-019-03695-0

Khakiev, Z., Shapovalov, V., Kruglikov, A., & Yavna, V. (2014). GPR determination of physical parameters of railway structural layers. *Journal of Applied Geophysics*, *106*, 139–145. https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.04.017

Liu, H., & Sato, M. (2014). In situ measurement of pavement thickness and dielectric permittivity by GPR using an antenna array. *NDT and E International*, *64*, 65–71. https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2014.03.001

Pilecki, Z. (2017). Basic principles for the identification of landslides using geophysical methods. *E3S Web of Conferences*, *24*. https://doi.org/10.1051/e3sconf/20172401001

Popescu, M., Şerban, R. D., Urdea, P., & Onaca, A. (2016). Conventional geophysical surveys for landslide investigations: Two case studies from Romania. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, *11*(1), 281–292.

Rasol, M. A., Pérez-Gracia, V., Solla, M., Pais, J. C., Fernandes, F. M., & Santos, C. (2020). An experimental and numerical approach to combine Ground Penetrating Radar and computational modeling for the identification of early cracking in cement concrete pavements. *NDT and E International*, *115*(May). https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2020.102293

Sestras, P., Bilașco, Ștefan, Roșca, S., Veres, I., Ilies, N., Hysa, A., Spalević, V., & Cîmpeanu, S. M. (2022). Multi-Instrumental Approach to Slope Failure Monitoring in a Landslide Susceptible Newly Built-Up Area: Topo-Geodetic Survey, UAV 3D Modelling and Ground-Penetrating Radar. *Remote Sensing*, *14*(22). https://doi.org/10.3390/rs14225822

Simi, A., Manacorda, G., & Benedetto, A. (2012). Bridge deck survey with high resolution Ground Penetrating Radar. *14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)*, 489–495.

https://doi.org/10.1109/icgpr.2012.6254915

Siregar, R. N., Sinarta, I. N., Mohammad, & Sismanto Ervan. (2016). Ground Penetrating Radar And 2-D Geoelectricity Application For Detecting Landslide In Abang District, Karangasem Regency, Bali. *Int. Journal of Engineering Research and Application Www.Ijera.Com*, *6*(2), 51–55. www.ijera.com

Solla, M., Pérez-Gracia, V., & Fontul, S. (2021). Review of GPR application on transport infrastructures: Troubleshooting and best practices. *Remote Sensing*, *13*(4), 1–5. https://doi.org/10.3390/rs13040672

Solla, M., Riveiro, B., Lorenzo, H., & Armesto, J. (2014). Ancient Stone Bridge Surveying by Ground-Penetrating Radar and Numerical Modeling Methods. *Journal of Bridge Engineering*, *19*(1), 110–119. https://doi.org/10.1061/(asce)be.1943-5592.0000497

Torbaghan, M. E., Li, W., & Metje, N. (2020). Automated detection of cracks in roads using ground penetrating radar. *Journal of Applied Geophysics*, *179*, 104118. https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2020.104118

Tosti, F., Bianchini Ciampoli, L., D'Amico, F., Alani, A. M., & Benedetto, A. (2018). An experimental-based model for the assessment of the mechanical properties of road pavements using ground-penetrating radar. *Construction and Building Materials*, *165*, 966–974. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.179

Widodo, W. (2022). *Landslide Investigations Using Direct Current Resistivity and Ground Penetrating Radar Methods : Case study Cikahuripan Vilage , Bandung*.

Zajícová, K., & Chuman, T. (2019). Application of ground penetrating radar methods in soil studies: A review. *Geoderma*, *343*(January), 116–129. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.02.024

Zieliński, A., Mazurkiewicz, E., Łyskowski, M., & Wieczorek, D. (2016). Use of GPR method for investigation of the mass movements development on the basis of the landslide in kałków. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, *15*(1), 61–70. https://doi.org/10.7409/rabdim.016.004