



Gleisbettschotteruntersuchung mit der Impulsradar Array-Technik

Thomas KIND, Ralf ARNDT,
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

Kurzfassung. Das ZfP Verfahren Impulsradar wird bei der Untersuchung des Schotterunterbaus von Schienenwegen unterstützend eingesetzt, um deren Struktur und Materialeigenschaften zu bestimmen. Eingesetzt werden kann dieses Verfahren sowohl für die Qualitätskontrolle beim Neubau von Schienenwegen als auch für die Bedarfsermittlung von Instandsetzungsarbeiten aufgrund von Schotterverunreinigungen. Kosten können eingespart werden durch eine Verlängerung der Reinigungszyklen und der Lebensdauer des Schotters. Ein Antennenarray für die Ermittlung der Ausbreitungsgeschwindigkeit wurde entwickelt und aufgebaut. Ergebnisse von Schottermessungen im Labor werden vorgestellt.

Einführung

Die Sicherheit des Rad-Schiene-Gleisbett-Systems wird durch Verschmutzung auf Dauer durch die Zunahme der Steifigkeit und der Scherfestigkeit des Eisenbahn-Schotterbettes verringert. Dabei können durch eine „schnelle“ Überwachung des Schotters die notwendigen Wartungskosten erheblich reduziert werden [1]. Impulsradar ist ein nützliches Werkzeug für die Gleisbett-Untersuchung, um Schichtgrenzen zwischen Schotter und Untergrund zu detektieren, aber auch um Materialeigenschaften zu bestimmen. Es kann für die Qualitätskontrolle beim Neubau von Schienenwegen und für die Bedarfsermittlung von Instandsetzungsarbeiten aufgrund von Schotterverunreinigungen eingesetzt werden [2-4, 7-14]. Durch eine Verlängerung der Reinigungszyklen und die damit verbundene Erhöhung der Lebensdauer des Schotterbettes können erhebliche Kosten eingespart werden. Mit dem Impulsradar werden sehr kurze elektromagnetische Impulswellen mit einer Sendeantenne in den Untergrund gesendet und Reflexionen der Impulswelle mit einer Empfangsantenne empfangen. Reflexionen entstehen an Schichtgrenzen, an denen sich die dielektrischen Materialeigenschaften ändern. Mit Hilfe der Reflexionen lassen sich Schichtstrukturen qualitativ untersuchen, wie z. B. der Schichtaufbau bei Schottergleisbetten. Bei der Verwendungen mehrere Empfangsantennen, die dieselbe Reflexion von unterschiedlichen Orten empfangen, kann die mittlere Ausbreitungsgeschwindigkeit der Impulswelle in einer Schicht durch Laufwegkorrektur bestimmt werden. Der Schichtaufbau kann somit direkt auch quantitativ bezüglich der Lage und Dicke bestimmt werden, ohne dass durch punktuelle Aufschlüsse im Schotterunterbau die Schichtdicke gemessen werden muss.

Für die Ermittlung der Ausbreitungsgeschwindigkeit wurde im EU Projekt „SafeRail“ ein Antennenarray entwickelt und aufgebaut. Ergebnisse von Schotterprüfungen im Labor werden vorgestellt.

1. Die Impulsradar-Array Technik

1.1 Grundlagen

Am Übergang von Schotter zum Untergrund entstehen aufgrund des Unterschieds in den dielektrischen Materialeigenschaften Reflexionen, die mit einem Empfänger gemessen werden und damit zur Bestimmung der Lage des Überganges herangezogen werden können. Bei bekannter und konstanter Ausbreitungsgeschwindigkeit v der elektromagnetischen Impulswelle berechnet sich aus der gemessenen Laufzeit t der Reflexion die Dicke d des Schotters nach:

$$d = v \cdot t / 2 \quad (1)$$

Mit zunehmendem Grad der Verschmutzung des Schotters sinkt jedoch die Ausbreitungsgeschwindigkeit v :

$$v = c / (\epsilon)^{1/2} \quad (2)$$

der elektromagnetischen Welle mit der Dielektrizitätskonstanten ϵ (c : Lichtgeschwindigkeit), da der Anteil der mit Luft gefüllten Zwischenräume abnimmt. Typische Werte für die Dielektrizitätskonstante von nicht verschmutztem Schotter liegen im Rahmen von 3 bis 3.5 und für verschmutzten Schotter zwischen 4 bis 38 [16]. Die vergrößerte Dielektrizitätskonstante von verschmutztem Schotter kann durch die Messung der Ausbreitungsgeschwindigkeit v mit Hilfe der CMP- Methode („common midpoint method“) ermittelt werden [5, 6]. In einer CMP-Messung werden Sender und Empfänger in entgegengesetzten Richtungen ausgehend von einem Mittelpunkt bewegt. Die Laufzeit t der Reflexion von Grenzflächen vergrößert sich mit vergrößertem Offset x zwischen Empfänger und Sender durch:

$$t = \sqrt{t_0^2 + \frac{x^2}{v^2}} \quad (3)$$

Die Laufzeit t_0 entspricht der Zeit, die eine reflektierte Welle braucht, wenn sich Sender und Empfänger theoretisch an der gleichen Stelle befinden und der Offset zwischen Sender und Empfänger somit null ist. Diese Gleichung ist auch für die Bewegung von nur einer Antenne gültig, wenn die Reflexion durch eine Schicht, die parallel zur Oberfläche verläuft, verursacht wird. Diese Antennen-Konfiguration wird als CRS („common reflection surface“) bezeichnet (siehe Abbildung 1).

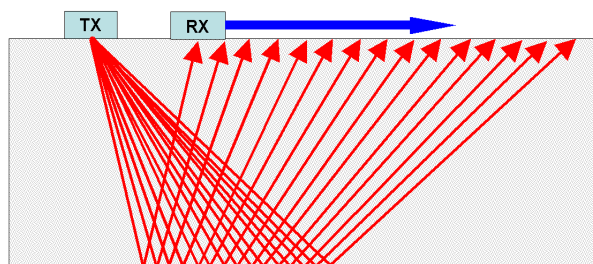


Abbildung 1: CRS Antennen-Konfiguration (TX: Sender, RX: Empfänger)

Mit Gleichung (3) lässt sich auch die Zunahme der Laufzeit t_{NMO} der elektromagnetischen Welle berechnen $t_{\text{NMO}} = t - t_0$ (NMO: „normal move out“), die durch die Vergrößerung des Abstandes zwischen Sender und Empfänger entsteht (siehe Abbildung 2). Der Laufzeitunterschied t_{NMO} kann aber nur richtig bestimmt werden, wenn in der Gleichung (3) auch die richtige Ausbreitungsgeschwindigkeit v verwendet wird. Ist die Geschwindigkeit v richtig gewählt, sind die korrigierten Laufzeiten $t^* = t - t_{\text{NMO}}$ einer Reflexion für eine CSR-Messung konstant.

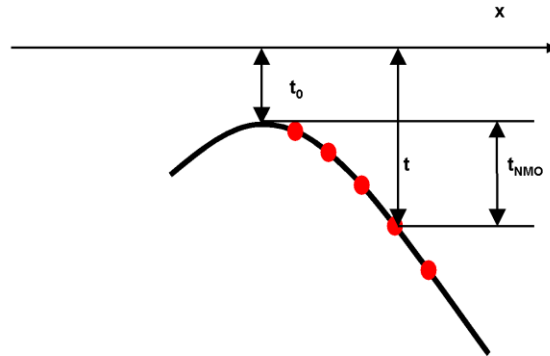


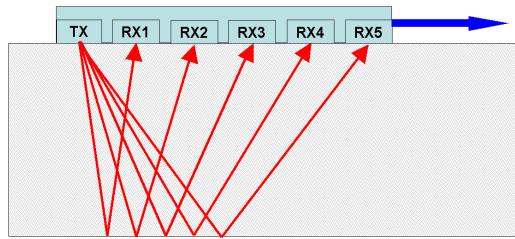
Abbildung 2: Diagramm einer CMP/CRS Messung; t_0 bezeichnet die minimale Laufzeit der Grenzschicht-Reflexion; die roten Punkte zeigen die aufgenommenen Reflexionen an fünf verschiedenen Antennen-Offsets und die schwarze Linie zeigt den theoretischen Verlauf der Messung

Das Überlagern der korrigierten CSR-Reflexionsdiagramme führt zu einer Zunahme der Reflexions-Amplitude für $t=t_0$, wenn die Geschwindigkeit richtig gewählt wird. Im Falle einer schlechten Auswahl der Geschwindigkeit liegen die Reflexions-Amplituden nach der Überlagerung zeitlich nebeneinander und führen nicht zu einer Zunahme der Amplitude. Die Eigenschaft, dass sich die Reflexions-Amplituden bei richtig gewählter Geschwindigkeit verstärken, wird benutzt, um in einem Geschwindigkeitspektrum die Ausbreitungsgeschwindigkeit v zu bestimmen. Ein Beispiel eines Geschwindigkeitspektrums und eines Vergleichs zwischen einem durch eine unterschiedliche Anzahl von CSR-Spuren berechneten Geschwindigkeitspektrum wird unten angeführt.

1.2 Entwicklung eines Impulsradar-Arrays im EU Projekt „Saferail“

Die Erarbeitung der Grundlagen für effiziente und bedarfsgerechte Instandsetzungsmaßnahmen an Schottergleisbetten war das Ziel des im Januar 2008 abgeschlossenen EU Projektes „SafeRail“. Entsprechend den Anforderungen der Netzbetreiber sollen Unterbrechungen des Schienenverkehrs während der Inspektionen weitgehend vermieden werden. Für eine automatisierte Bewertung der Vermischung des Schotters mit dem Untergrund sowie des Abnutzungszustandes des Schotters wurde ein Antennen-Array entwickelt, das bezüglich seiner Messgeometrie optimiert wurde. Das Array-Design ist linear, so dass ein Sender und bis zu fünf Empfänger in einer Reihe angeordnet sind (siehe Abbildung 3a und 3b).

Um die Umsetzbarkeit eines Multi-Offset Arrays im Voraus zu prüfen, ist eine Antennen-Reihe simuliert worden, indem zwei 500-MHz-Antennen (GSSI: SIR20) nacheinander in jeder Antennen-Position des Arrays platziert wurde.



a) b)
 Abbildung 3: CMP/CRS mit Linear-Array (a) und Prototyp des Linear-Arrays in "Saferail" (b)

2. Durchgeführte Untersuchungen

2.1 Messobjekt

Ein Schotterprobekörper mit den Abmessungen 4m x 4m wurde aufgebaut (Abbildung 4), um unterschiedliche Konfigurationen von Sende- und Empfangsantennen zu testen. Der Probekörper wurde mit vier Beton-Schwellen und zwei Schienen aufgebaut, um möglichst praxisnahe Test durchführen zu können und den Einfluss der Schwellen und Schienen auf die Radarmessung zu untersuchen. Die Höhe des Schotterbetts beträgt ca. 80cm. Der gesamte Aufbau des Probekörpers wurde in einer Halle durchgeführt, um reproduzierbare Messungen gewährleisten zu können.



Abbildung 4: Schotterprobekörper, aufgebaut in einer Versuchshalle der BAM [7]

2.2 Versuchsdurchführung

Für die Messungen wurde ein schienengebundener Messwagen mit Positionsrad verwendet (vergleiche Abbildung 5a). Die Sendeantenne wurde in einer festen Position 19 cm über dem Schotter befestigt. Die Empfangsantenne wurde auf dem Messwagen in derselben Höhe wie die Sendeantenne befestigt (siehe Abbildung 5b) und war dadurch beweglich gegenüber der Sendeantenne. Die Antennenmittenfrequenz betrug 500 MHz für alle

Messungen. Die Antennenpolarisation (Ausrichtung des elektrischen Feldes) wurde senkrecht zu den Schwellen und parallel zu den Schienen gewählt.



Abbildung 5: Multi-Off-Set Messaufbau mit einem statischen und einem beweglichen Sender auf einem Schotter-Probekörper der BAM

2.3 Ergebnisse

Für die Erstellung eines Geschwindigkeitsspektrums wurde das Radargramm aus Abbildung 6 verwendet. Das Radargramm wurde mit dem Messaufbau aus Abbildung 5 erzeugt. Das Radargramm wurde aus 400 Reflexionsdigrammen (A-Scans), dessen Amplituden farbskaliert sind (rot: positive Amplitude; blau: negative Amplitude), zusammengesetzt. Die Reflexionen von der Schotter-Oberfläche und von der Unterseite sind klar sichtbar. Es lässt sich nur ein geringer Einfluss der Bahnschwellen auf das Radargramm erkennen. Nur die Schotterunterseitenreflexion wird durch die Schwellen leicht beeinflusst.

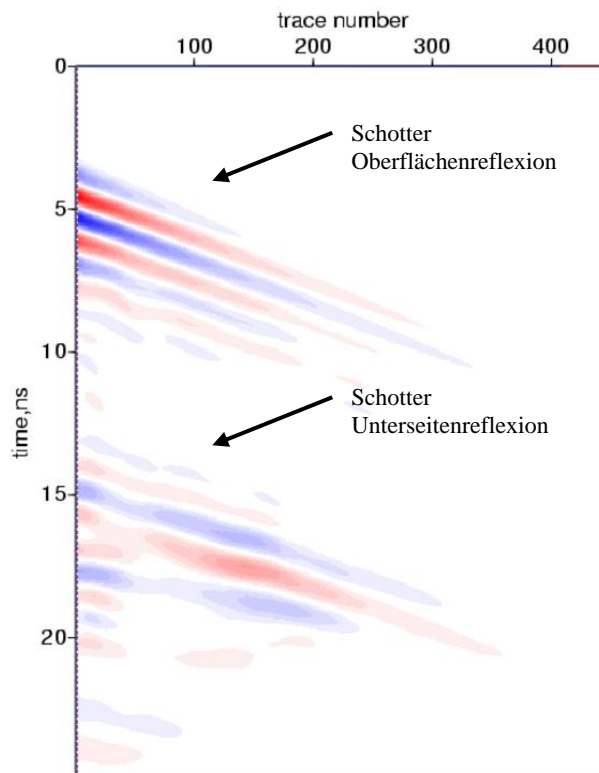


Abbildung 6: Radargramm mit statischem Sender und beweglichem Empfänger

Um die zutreffende Ausbreitungsgeschwindigkeit zu bestimmen, wurde das Geschwindigkeitsspektrum für eine Geschwindigkeitsreihe von $5 \times 10^7 - 3,5 \times 10^8$ m/s anhand des Radargramms aus der Abbildung 6 berechnet. Geschwindigkeiten größer als die Lichtgeschwindigkeit wurden nur verwendet, um eine gute Visualisierung des Geschwindigkeitsspektrums zu gewährleisten. Sie haben keinerlei praktischen Nutzen.

Das Geschwindigkeitsspektrum der aufsummierten und laufzeitkorrigierten Reflexionsdiagrammen ist in Abbildung 7a gezeigt. Darin sind zwei Bereiche mit großen Amplituden mit Geschwindigkeiten um 3×10^8 m/s in der oberen rechten Ecke und um 2×10^8 m/s im Zentrum des Radargramms zu erkennen. Der Bereich rechts oben in Abbildung 7a zeigt die Schotter-Oberflächenreflexion, und der Bereich im Zentrum kann als Schotterunterseitenreflexion gedeutet werden.

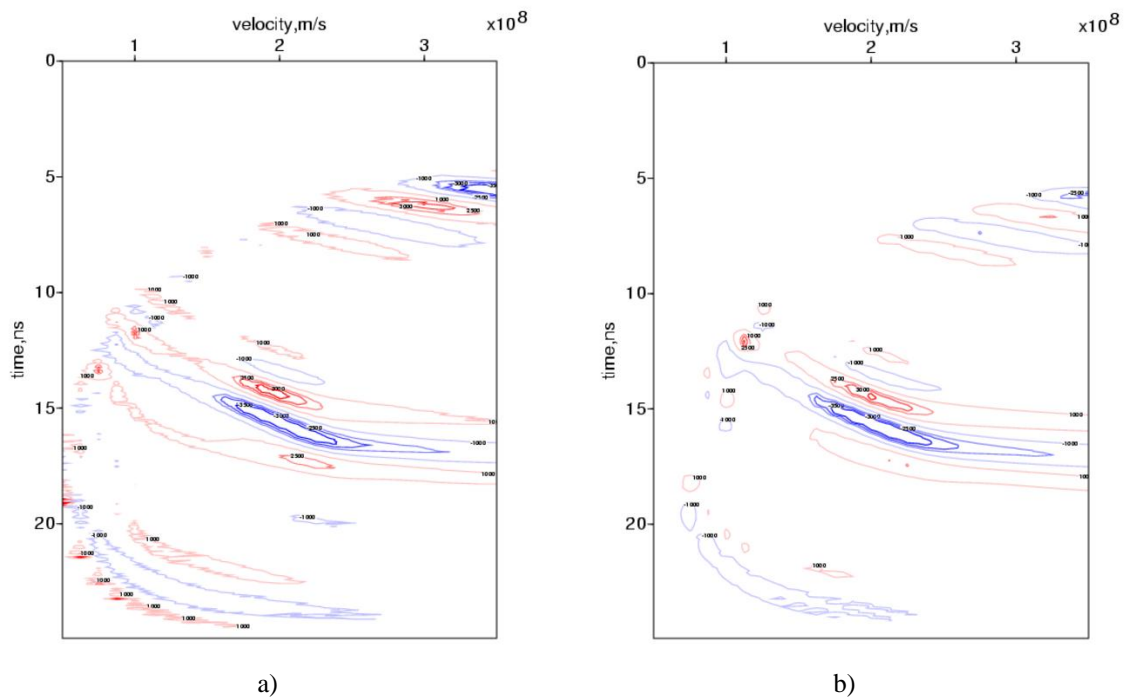
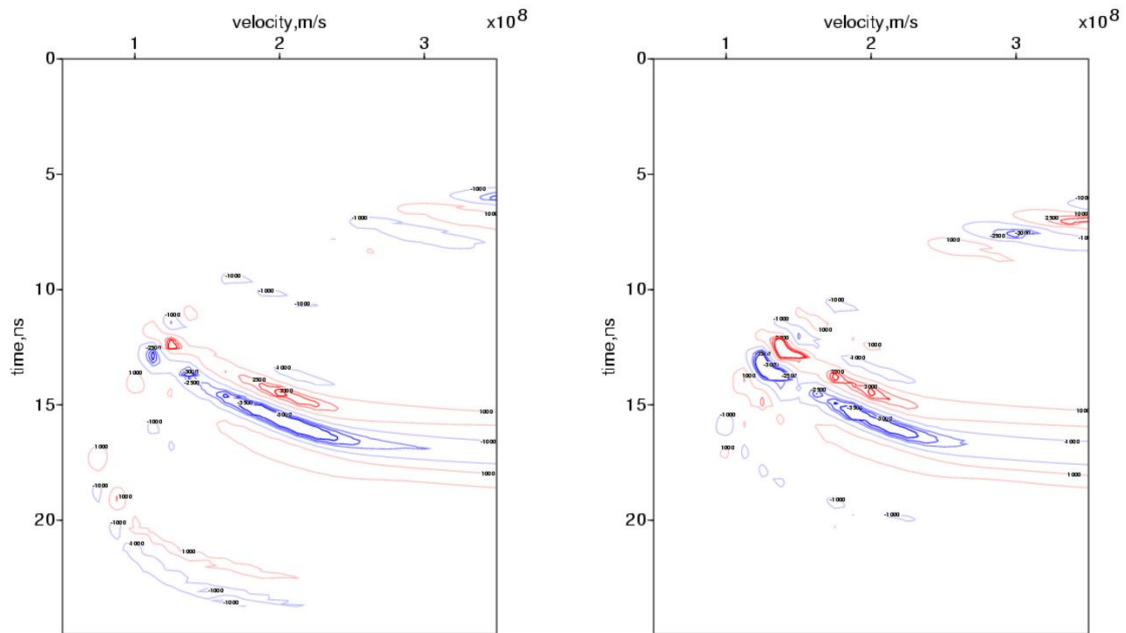


Abbildung 7: Geschwindigkeitsspektrum aller (a) und von acht Messspuren (b)

Diese Geschwindigkeitsanalyse zeigt, dass das Multi-Offset Verfahren zur Bestimmung der Ausbreitungsgeschwindigkeit innerhalb des Schotters als ein Hilfsmittel für die Bestimmung der Schotterbett-Verschmutzung verwendet werden kann. Für eine Multi-Offset-Antenne entspricht die Zahl der gemessenen Reflexionsdiagramme der Anzahl der Sender/Empfängerkombinationen. Wählt man einen Antennentyp mit einem Frequenzbereich von ungefähr 500-1000 MHz wird sich die Anzahl der Antennen innerhalb des Arrays auf 4 bis 10 pro Meter beschränken.

Um den Einfluss einer reduzierten Anzahl von Reflexionsdiagrammen auf die Qualität der Geschwindigkeitsanalyse zu prüfen, wurde sie auch für vier, sechs und acht äquidistante Reflexionsdiagramme durchgeführt. Hierbei wurde die Anzahl der Reflexionsdiagramme aus Abbildung 6 reduziert. Abbildung 7b zeigt das Radargramm mit dem Spektrum der Ausbreitungsgeschwindigkeit für acht Messspuren und Abbildung 8a und 8b für sechs und vier Reflexionsdiagramme. Es zeigt sich, dass bereits mit einer geringen Anzahl von Reflexionsdiagrammen eine Geschwindigkeitsanalyse möglich ist.



a) b)
Abbildung 8: Geschwindigkeitsspektrum von sechs (a) und von vier Messspuren (b)

3. Zusammenfassung der Ergebnisse und Ausblick

Eine herkömmliche Analyse der Ausbreitungsgeschwindigkeit kann zur Untersuchung von Gleisschotterbetten verwendet werden. Für eine schnelle Datenerfassung von einem fahrenden Inspektionszug aus kann ein Multi-Offset-Array verwendet werden, das die notwendigen Messspuren für die Geschwindigkeitsanalyse in einem Schritt und mit einem vernachlässigbaren Qualitätsverlust beim Ermitteln des Geschwindigkeitsspektrums aufnimmt. In dem im Januar 2008 abgeschlossenen EU-Projekt „SafeRail“ wurde weiterhin untersucht, ob verschmutzter Schotter zu einer signifikanten Abnahme der Ausbreitungsgeschwindigkeit und zu einer bedeutenden Verschiebung der hohen Amplituden im Geschwindigkeitsspektrum zu niedrigeren Geschwindigkeiten auf der linken Seite des Spektrums führt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung werden nach Abschluss der Auswertung veröffentlicht.

Danksagung

Die hier vorgestellte Arbeit ist ein Teil des im 6. Rahmenprogramm der Europäischen Union geförderten Projektes „SafeRail“...

Referenzen

- [1] Selig, E. T. Waters, J. M., Track Geotechnology and Substructure Management, Thomas Telford Publications, London, 1984.
- [2] Olhoeft, G R., Selig, E.T., Ground Penetrating Radar Evaluation of Railway Track Substructure Conditions, Proceedings of the Ninth International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR 2002), Santa Barbara, April 29 – May 2 2002, SPIE Volume 4758, S. 48-53.
- [3] Al-Nuaimy, W., Eriksen, A., Gasgoyne, J., Train-Mounted GPR for High-Speed Rail Trackbed Inspection, Proceedings of the Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR 2004), 21-24 June 2004, Delft, S. 631-634.
- [4] Hugenschmidt, J., Railway track inspection using GPR, Journal of Applied Geophysics 43, 2000, pp 147-155.
- [5] David J. Daniels, Ground Penetrating Radar, 2nd ed., IEE, London, 2004.
- [6] Merkblatt B10, Merkblatt über das Radarverfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen, DGZfP, 2001.
- [7] Kind, T., Maierhofer, Ch., Entwicklung eines Radarantennenarrays zur Untersuchung des Untergrundes im Schottergleisbett, Bauwerksdiagnose 2006, DGZfP, Berlin, 2006.
- [8] Al-Nuaimy, W., Eriksen, A., Gagoyne, J., Train-Mounted GPR for High-Speed Rail Trackbed Inspection, Tenth International Conference on Ground Penetrating Radar, Delft, NL, (2004).
- [9] Jack, R., Jackson, P., Imaging attributes of railway track formation and ballast using ground probing radar, NDT&E International, Elsevier, Vol. 32, pp. 457-462, (1999).
- [10] Clark, M., Gordon, M., Mike, F. , Issues over high-speed non-invasive monitoring of railway trackbed, NDT&E International, Elsevier, Vol. 37, pp. 131-139, (2004).
- [11] Sussmann, T.R., Selig, E. T., Hyslip, J. P., Railway track condition indicators from ground penetrating radar, NDT&E International, Elsevier, Vol. 36, pp. 157-167, (2003).
- [12] Gallagher, G.P., Leiper, Q., Williamson, R., Clark, M.R., Forde, M.C., The application of time domain ground penetrating radar to evaluate railway track ballast, NDT&E International, Elsevier, Vol. 32, pp. 463-468, (1999).
- [13] Kathage, A., Nissen, J., White, G., Bell N., Fast Inspection of Railway Ballast by Means of Impulse GPR Equipped with Horn Antennas, Railway Engineering-2005, London, UK (2005).
- [14] Smekal, A., Berggren, E., Hrubec, K., Track-Substructure Investigations Using GPR and Track Loading Vehicle, Railway Engineering-2003, London, UK (2003).
- [15] Saarenketo, T., Silvast, M., Noukka, J., Using GPR on Railways to Identify Frost Susceptible Areas, Railway Engineering-2003, London, UK (2003).
- [16] Clark, M.R., McCann, D.M., Forde, M.C., GPR as a Tool for the Characterisation of Ballast, Railway Engineering-2003, London, UK (2003).