

Effiziente Gleisinstandhaltung mit Ground Penetrating Radar

Einsatzmöglichkeiten der präzisen Zustandsbewertung für nachhaltige Instandsetzung und Neubauprojekte

STEFAN BIEDERMANN | JANINA MOSER

Angesichts des steigenden Passagieraufkommens, des schienengebundenen Güterverkehrs und der erhöhten Taktung der Züge gewinnt die effiziente und zeitsparende Instandhaltung und Instandsetzung von Streckenabschnitten zunehmend an Bedeutung. Auch die Sicherheitsanforderungen an das Schotterbett sind gestiegen. Der Einsatz von Bodenradar kann dabei helfen, diesen Ansprüchen gerecht zu werden, den finanziellen sowie den zeitlichen Aufwand zu begrenzen und faktenbasiert zustandsgerechte Instandsetzungsmaßnahmen zu wählen. Dabei können der Zustand des Schotterbettes und der Tragschichten, die Entwässerungsqualität, der Verschmutzungsgrad, die Schichtwelligkeit und Verlehmungen zerstörungsfrei und mit vergleichsweise geringem Zeitaufwand evaluiert werden.

Über Ground Penetrating Radar

Die geophysikalische Prospektion ist ein wertvolles Werkzeug für nicht-invasive Untersuchungen. Insbesondere hat sich Ground Penetrating Radar (GPR), auch Bodenradar genannt, als flexibles und leistungsfähiges Instrument für die oberflächennahe Erkundung etabliert. Dabei werden die Reflexionen von in den Boden gesendeten Radarwellen erfasst und analysiert. GPR findet so bereits Anwendung im Ingenieurwesen, der archäologischen Prospektion und den Umweltwissenschaften. Auch im Bereich des Eisenbahningenieurwesens wird das Bodenradar erfolgreich eingesetzt, insbesondere bei der Zustandsanalyse und im Qualitätsmanagement des Schotterbettes.

Da sich der Einsatz von GPR bei der Prospektion des Schotterbettes bewährt hat, wird diese Technologie zunehmend zur Qualitätsüberprüfung herangezogen. Im Folgenden werden ausgewählte Erfolgsgeschichten und Anwendungsbeispiele präsentiert und erläutert, die stellvertretend für die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten und qualitativ hochwertigen Ergebnisse des Bodenradars stehen. Zudem erfolgt eine Betrachtung des Datenmanagements sowie der wesentlichen Stärken des GPR, zu denen unter anderem eine deutlich verbesserte Wirtschaftlichkeit von Instandsetzungsmaßnahmen sowie vorausschauende Wartungsmaßnahmen gehören.

Anwendungsfelder von GPR im System Bahn

Zustandserhebung für Gleisinfrastruktur nach Naturereignissen

Weltweit nehmen Schäden infolge von Starkregenereignissen zu. Diese stellen eine erhebliche Belastung für die Bahninfrastruktur dar. Nach einem solchen Ereignis ist es wichtig, den Zustand von betroffenen Gebieten rasch zu analysieren und entsprechende Maßnahmen einzuleiten, um den Bahnverkehr schnell und sicher wiederaufnehmen zu können. Besonders geeignet hierfür ist der Einsatz des Georadarverfahrens, da neben offensichtlichen Problembereichen wie Hangrutschungen oder Überschwemmungen auch Unterspülungen zu nicht sichtbaren Hohlräumen im Schotterbett führen können.

Während des Hochwasserereignisses im Sommer 2024, das weite Teile Europas betraf, gab es vielerorts Schäden an der Bahninfrastruktur. GPR wurde eingesetzt, um einen Streckenabschnitt von rund 2 km Länge, der sowohl überals auch unterspült wurde, zu untersuchen. Entlang dieser Strecke sind auch Teile des Hangs abgerutscht, wodurch Schwellen teilweise keinen Bodenkontakt mehr hatten (Abb. 1).

Bereits kurz nach diesem Ereignis wurde intensiv daran gearbeitet, den betroffenen Streckenabschnitt wieder befahrbar zu machen. Der Einsatz eines kleinen Handmesswagens, ausgestattet mit einem Georadarsystem, war in dieser Situation die ideale Lösung. Der Handmesswagen lässt sich schnell ein- und ausgleisen, wodurch parallel arbeitende Baustellenfahrzeuge ungehindert arbeiten können. Darüber hinaus erfolgte neben der Messung innerhalb des Lichtraumprofils mittels einer verlängerten Spannweite auch die Erfassung des Bereichs zwischen den Gleisen.

Neben den offensichtlichen Schäden hat die Georadarkerkundung gezeigt, dass es auch unterhalb der Schotteroberfläche Bereiche gab, in denen die Daten auf Hohlräume hindeuten. Diese sind anhand typischer Signalstrukturen im Radargramm zu erkennen. Abb. 2 zeigt zwei Bereiche, welche für Hohlräume typische Diffraktionshyperbeln enthalten.

Qualitätsmanagement von Neubauten und Sanierungen

Ein weiteres wichtiges Anwendungsfeld des Georadars liegt in der Qualitätssicherung. Die Abnahme von Neubauten sowie die Überprüfung von Sanierungsmaßnahmen gehören



Abb. 1: Von Starkregenereignis betroffener Streckenabschnitt, welcher mit dem Georadar untersucht wurde

Quelle aller Abb.: RTA

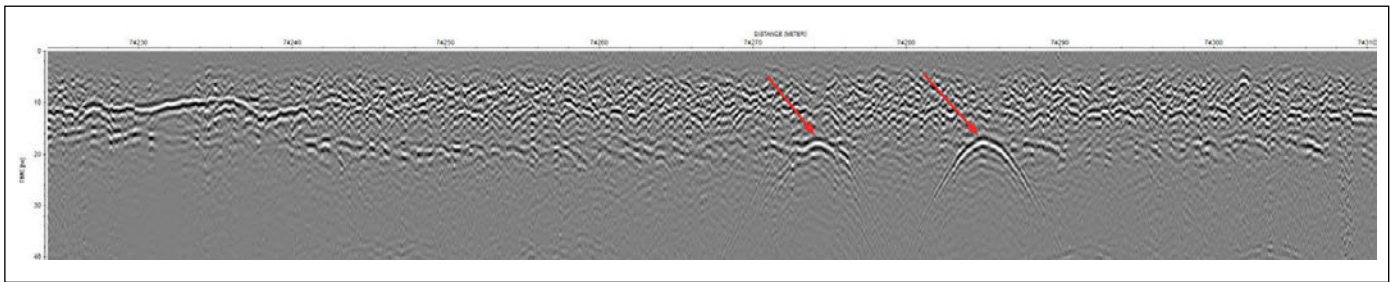


Abb. 2: Bearbeitetes Radargramm, das Hohlräume aufzeigt

hier zu den Standardbeispielen, bei welchen das Georadar einen Mehrwert bietet. Beim Bau einer Strecke in Wüstenregionen gilt es beispielsweise sicherzustellen, dass es während der Bauarbeiten nicht zu einem zu hohen Eintrag von Sand in den Schotter gekommen ist. Durch eine Kombination von GPR-Daten und einigen wenigen Bohrungen zur Kalibrierung kann der Sandanteil über die gesamte Strecke bestimmt und somit festgestellt werden, ob dieser unter dem vom Streckenbetreiber geforderten Grenzwert liegt. Mittels GPR kann der Zustand vor, während und nach einer Sanierungsmaßnahme erfasst werden, um somit die Auswirkung der Sanierung zu dokumentieren. Eine solche vergleichende Darstellung wird immer wieder von Bahninfrastrukturmanagern angefordert. Ein Beispiel dafür ist die Durchführung einer Bodenradarmessung, die vor der Sanierung eine Stelle mit Stauwasser und Schlamm in der Bettung eindeutig identifiziert hat. Nach Umsetzung der Maßnahmen gab es eine weitere

Messung, und es konnte kein Stauwasser oder Schlamm mehr identifiziert werden. Die Sanierungsmaßnahmen führten somit zu einer erfolgreichen Entwässerung der Bettung und zur Bereinigung der Schlammstellen.

Optimierte Instandhaltungsplanung

Für eine optimierte Instandhaltungsplanung ist es unerlässlich, künftige Maßnahmen bereits Jahre im Voraus genau zu definieren. Wiederholte Georadarmessungen ermöglichen die Dokumentation des Verschlechterungsprozesses des Schotters. Darüber hinaus lässt sich aus dem Zeitverlauf der gemessenen Daten ableiten, wann eine Instandhaltungsmaßnahme erforderlich ist. Streckenmonitoring auf diese Art ist bereits im Einsatz und wird vermehrt angefragt. Für eine dieser Strecken fand die Erstmessung 2020 statt, die Folgemessung wurde im Jahr 2024 durchgeführt. Bewertet wurde, wie sich die Schotterverschmutzung über die Zeit änderte. Setzt man diese Daten in Zusammenhang mit der

Entwicklung der Streckenauslastung, so kann der Streckenverantwortliche eine Aussage darüber treffen, wann der Schotteraustausch erfolgen soll.

Ein weiteres Beispiel für den Einsatz einer optimierten Instandhaltungsplanung sind Minen. Diese liegen oftmals fernab von bewohnten Gebieten, und die Minengesellschaften müssen daher eine Bahnstrecke betreiben, um die geschürften Güter zu einem Anschlusspunkt zu transportieren. Besonders in Minen, welche Schüttgut wie Kohle transportieren, ist der Eintrag von Feinanteilen aus den Waggonen in den Schotter groß. Eine GPR-Messung liefert auch hier Aussagen über den aktuellen Zustand und bei wiederholten Messungen auch einen Ausblick, wie lange die Strecke noch unbedenklich genutzt werden kann, bevor Maßnahmen getroffen werden müssen.

Weitere Anwendungsfelder

Neben der Schotterverschmutzung spielt die Information, wie viel Schotter ausgetauscht

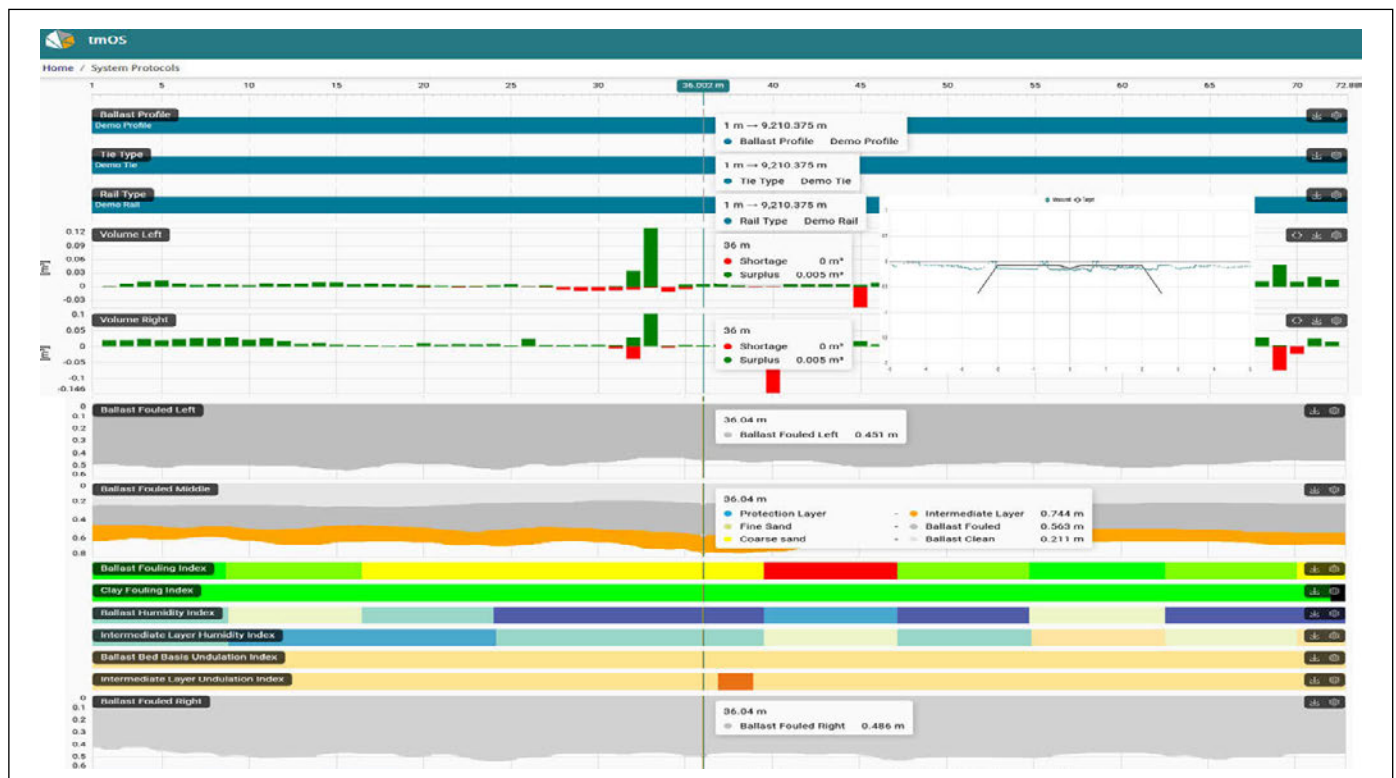


Abb. 3: Beispiel der Datendarstellung aus verschiedenen Messungen in der Software tmOS

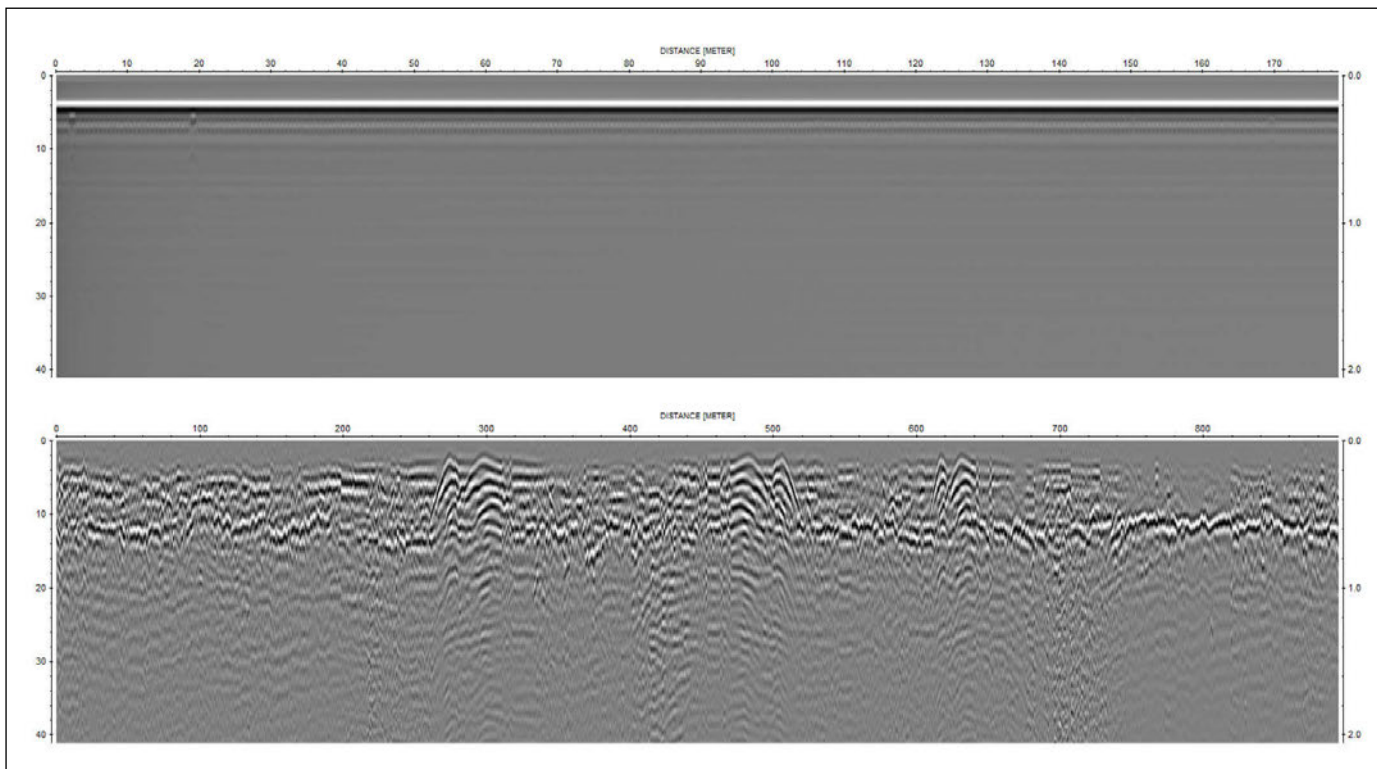


Abb. 4: Radargramme: Beispiel der GPR Rohdaten und deren Bearbeitung

werden muss, eine wichtige Rolle. Durch die Bestimmung der Schotterunterkante mit dem Georadar kann eine genauere Kalkulation für die Schotterbestellung erfolgen, was eine reibungslosere Umsetzung des Austauschs sowie einen sparsamen Einsatz der wertvollen Ressource Schotter ermöglicht. Korrelierte Zusatzinformationen einer Schotterprofilmessung lassen die Bedarfsberechnung noch verfeinern. Ein etwas selteneres, anekdotisch klingendes, aber tatsächlich relevantes Anwendungsgebiet ist es, durch Tiere verursachte Hohlräume zu detektieren. Liegt eine Bahnstrecke auf einem Damm in der Nähe von Gewässern, so kann es vorkommen, dass Biber sich in den Schotter graben, wodurch Hohlräume entstehen. Auch hier bietet das Georadar eine Lösung, um Bereiche zu definieren, in welchen sich Biberbauten befinden könnten. In solchen Fällen kommt ein Handmesswagen zum Einsatz, da es sich meist um kurze Strecken von ca. 1 km handelt.

Integration von GPR in digitale Instandhaltungsstrategien

Vorausschauende Wartung mit GPR-Daten

Um die Potenziale der Schotterbettanalyse mittels GPR vollständig auszuschöpfen, ist ein Umdenken erforderlich: Reaktive Analysen, bei denen erst nach dem Auftreten sichtbarer und spürbarer Schäden Maßnahmen ergriffen werden, sollten durch vorausschauende Instandhaltungsmaßnahmen ersetzt werden. Anstatt auf die veränderte Gleisgeometrie oder andere Schäden zu reagieren, was häufig

Langsamfahrstellen oder Streckensperrungen zur Reparatur mit sich bringt, können dann Erneuerungsarbeiten lange im Voraus geplant werden. Zudem werden auch versteckte Schäden in tieferen Schotterschichten erkannt, bevor sie den Schienenverkehr beeinflussen. Infrastrukturbetreiber profitieren von vorausschauenden Instandhaltungsmaßnahmen, da sie Planungssicherheit hinsichtlich des Zeitpunkts und der Lokalisation der Maßnahmen gewinnen, Dauer und Kosten besser abschätzen können und den tatsächlichen Zustand des Schotterbetts kennen. Wie am Beispiel im Absatz „Optimierte Instandhaltungsplanung“ beschrieben, wird dieser Ansatz schon vermehrt angewendet.

Vernetzung von GPR mit anderen Messsystemen

Eine weitere Option zur optimalen Nutzung von Bodenradardaten ist die Kombination mit anderen Datensätzen. Mit Sondierungen an ausgewählten Stellen können außerdem nicht nur qualitative, sondern auch quantitative Aussagen zum Zustand des Schotterbetts getroffen werden. Dabei werden die durchgehend aufgezeichneten GPR-Daten mit einzelnen Datenpunkten von Bohrungen, Schürflungen oder ähnlichen Verfahren kombiniert, um die beiden Datensätze zu einer kontinuierlichen Abschätzung des Untergrundes zu vereinen. Zusätzlich können GPR-Daten mit Ergebnissen der Gleisgeometriemessung, einer Fotoaufzeichnung der Strecke oder Schotterprofilmessung kombiniert werden. Durch diese Datenzusammenführung wird die Information

über den Zustand des Schotterbetts gesamtseitlich, wodurch sich noch zielgerichtetere und somit kostenoptimierte Wartungsmaßnahmen festlegen lassen.

Datenmanagement

Um die erlangten Daten nach einer GPR-Messung visuell aufzubereiten und auszuwerten, ist ein effizientes und strukturiertes Datenmanagement essenziell. Dazu gehören die Visualisierung in anwenderfreundlicher Software, die Nutzung branchenüblicher Dateiformate sowie eine strukturierte Archivierung, die die Zuordnung und Wiederverwertung von Daten unterschiedlicher Typen und Erfassungszeitpunkte ermöglicht.

Im Bereich der Datenvisualisierung findet eine Umstellung auf cloudbasierte Schnittstellen im Browser statt. Dadurch entfällt die Notwendigkeit einer lokalen Softwareinstallation, und die Daten können von verschiedenen Endgeräten aus problemlos abgerufen werden. Wichtig dabei ist es, Dateiformate zu wählen oder als Exportoption zur Verfügung zu stellen, die auch mit anderen gängigen Programmen geöffnet werden können. Dies ermöglicht eine detailliertere Analyse der Ergebnisse durch die Streckenbetreibenden und vereinfacht die Integration zusätzlicher Messverfahren sowie den Vergleich mit anderen Datensätzen. Ebenso wichtig ist die präzise Archivierung und Einarbeitung in Datenbankmanagementsysteme, sodass die erlangten Erkenntnisse auch in Zukunft wieder gefunden und verwendet werden können. Die Software tmOS (Abb. 3) bietet eine vergleichende synchronisierte Darstellung von Geora-

dardaten mit Gleisgeometriedaten und Schotterprofil. Durch eine solche Ansicht können sowohl das Gleis als auch der Unterbau besser dargestellt und Problembereiche besser analysiert werden.

Die Darstellung der Rohdaten der Radargramme oder auch die Ansicht nach deren Filterung und Verstärkung (Abb. 4) ist hingegen nur für Expertenaugen aussagekräftig.

Ausblick

GPR hat sich bereits bei einigen Bahninfrastrukturbetreibern als wertvolles Instrument in der Bau- und Instandhaltungsplanung etabliert. Neben der signifikanten Reduktion der notwendigen Schürfeinsätze bietet die Technologie ein umfassendes Bild des Streckenzustands. Dies ermöglicht eine präzisere Planung und effizientere Durchführung von Maßnahmen. Die Anerkennung von GPR als Technologie für den Regeleinsatz unterstreicht ihren Mehrwert und trägt zur stetigen Verbreitung bei.

Die effektive Nutzung von GPR erfordert eine enge interdisziplinäre Zusammenarbeit zwi-

schen Geophysik, Bauingenieurwesen und Informatik. Besonders in Kombination mit Gleisgeometriemessungen entfaltet GPR sein volles Potenzial: Auffälligkeiten, die bei regelmäßigen Gleisgeometriemessungen erkannt werden, können durch GPR detailliert untersucht und die Ursachen unterhalb des Gleises identifiziert werden. Diese frühzeitige Erkennung und Behebung von Problemstellen entlang der Strecke trägt wesentlich dazu bei, die Instandhaltungskosten schnell zu minimieren. Die regelmäßige Befahrung des Streckennetzes mit GPR und die Speicherung der Ergebnisse in einer Bahn-Infrastrukturdatenbank eröffnen neue Möglichkeiten. Die daraus resultierenden Zeitreihen bieten wertvolle Informationen über die Abnutzung und den Zustand des Gleiskörpers. Dieser Ansatz schafft die Grundlage für eine vorrausschauende Instandhaltungsplanung, steigert die Netzverfügbarkeit und unterstützt eine nachhaltige und zukunftsorientierte Infrastrukturentwicklung. GPR wird damit zu einem unverzichtbaren Baustein moderner Bahninstandhaltung. ■



Stefan Biedermann, M.Sc.

Measurement Engineer
stefan.biedermann
@railtrackanalyzer.com



Janina Moser, M.Sc.

Data Analyst und
Measurement Engineer
janina.moser@railtrackanalyzer.com

Beide Autoren:
Rail Track Analyzer GmbH, München