

# Schnellfahrende Zustandsuntersuchung von Bahntrassen mit dem Georadar-Verfahren

Julia WOLF<sup>1</sup>, Daniela HOFMANN<sup>1</sup>, Jürgen NIESSEN<sup>1</sup>

<sup>1</sup> DB Engineering & Consulting GmbH Umwelt, Geotechnik & Geodäsie  
Technologiezentrum, Bremen

Kontakt E-Mail: julia.j.wolf@deutschebahn.com

**Kurzfassung.** Die Richtlinie RIL 821 der Bahn sieht Inspektionen der Bahntrassen in regelmäßigen Abständen vor. Die Regelinspektionen umfassen die visuelle Überprüfung der Strecken sowie den Einsatz von Gleismessfahrzeugen zur Prüfung der Gleisgeometrie. Direkte Untersuchungen zum Ober- und Unterbau der Eisenbahngleise erfolgen bei auftretenden Auffälligkeiten in Form von Aufschlüssen in regelmäßig platzierten Abständen. Eine zerstörungsfreie, lückenlose Untersuchung des Gleisaufbaus ohne Streckensperrung ist auf diese Art nicht möglich.

Das Georadar-Verfahren gehört heute zum Stand der Technik bei der Erkundung und Qualitätssicherung des Oberbaus und Unterbaus von Eisenbahngleisen. Es ermöglicht die lückenlose Dokumentation des Gleisaufbaus. Durch die Erhöhung der Messgeschwindigkeit, die Verbesserung der Mess- und Auswertetechnik sowie den Einsatz optimierter Analysesoftware konnte die Leistungsfähigkeit des Verfahrens gesteigert werden. Durch die Kombination mit zusätzlichen Sensoren wird eine exakte örtliche Zuordnung der Messdaten realisiert. Das Messsystem wird auf die Puffer einer Lok montiert. Zusammen mit einer schnellen und berührungslosen Datenerfassung ermöglicht dies Messgeschwindigkeiten von 80 km/h. Die Georadar-Messfahrten können sich dadurch in den Streckenfahrplan einpassen lassen. Der normale Zugverkehr bleibt dann unbeeinflusst.

Durch die Befahrung von Streckenabschnitten mit dem Georadar-Messsystem kann die Schadensursache objektiver erkannt, der Schadensverlauf besser beobachtet werden und es können bei Erreichen eines festgelegten Grenzwertes Instandhaltungsmassnahmen eingeleitet werden. Wegen der örtlichen Zuordnung der Messdaten, kann die Instandhaltung gezielt und konkret gestaltet werden, was Kosten und Streckensperrzeiten reduziert.

Eine Kombination der Georadar Messungen mit beispielsweise hochauflösenden Kameras, Lasern zur Gleislagenbestimmung und Wirbelstromgeräten würde die komplette Untersuchung der Trasse vom Unterbau über die Schwellen bis hin zu den Schienen mit nur einer Befahrung ermöglichen.

In dem Beitrag wird die Georadar-Messtechnik für Messungen entlang Bahntrassen an einem Anwendungsbeispiel der Schadensanalyse vorgestellt.

## Einführung

Das Georadarverfahren ist ein geophysikalisches Standardverfahren für die Erkundung des Untergrundes. Im Bauingenieurwesen wird es überwiegend verwendet um Einbauteile (Bewehrung, Spannkäme) in Betonbauteilen zu detektieren sowie deren Geometrie zu bestimmen. Der Vorteil des Georadar-Verfahrens ist, dass sich Objekte zerstörungsfrei, flächendeckend und kontinuierlich untersuchen lassen.

Bei der Bahn wird das Georadar-Verfahren zur Erfassung des Zustandes von Untergrund und Oberbau von Strecken eingesetzt. Hierbei geht es insbesondere um die Detektion von Verschmutzungen im Schotter, die Ortung von Hohlräumen, Feuchtigkeit/Entwässerung und sonstigen Inhomogenitäten sowie um die Bestimmung von Schichtmächtigkeiten und deren Verlauf.

Durch regelmäßige Messungen auf den Strecken lässt sich mit dem Verfahren die zeitliche Entwicklung von Schäden bewerten. Dadurch können Sanierungs- und Umbaumaßnahmen priorisiert werden.

Mit dem Einsatz des Georadar-Verfahrens auf Bahnstrecken, lassen sich Instandhaltungsmaßnahmen örtlich und zeitlich effizienter planen, was die gezielte Nutzung knapper Geldmittel fördert.

In diesem Beitrag wird kurz auf Methoden eingegangen mit denen der Oberbau durch die DB Netz AG überprüft wird. Ein Fallbeispiel mit Fehlern im Oberbau und deren Konsequenz soll zusätzlich die Notwendigkeit regelmäßiger Kontrollen verdeutlichen. Als nächstes wird der Einsatz vom Georadar-Verfahren für die Kontrolle von Bahnstrecken vorgestellt, insbesondere wird auf die verwendete Technik eingegangen. Übliche Untersuchungsziele bei der Anwendung des Georadar-Verfahrens werden benannt. Abgeschlossen wird mit den Anwendungsbeispielen Feuchtedetektion, Schadstellenidentifikation und Monitoring.

## Kontrolle des Oberbaus

### 1.1 Aufbau von Bahntrassen

Bahntrassen bestehen aus dem Oberbau, dem Unterbau und dem Untergrund (Abb. 1). Der Oberbau, bestehend aus Schienen, Schwellen, Schienenbefestigungen, Bettung und Schutzschicht (Planum), leitet die Kraftwirkung der Eisenbahnfahrzeuge in den Unterbau über. Der Unterbau fasst Dammschüttungen, verbesserte Untergründe, Durchlässe, Über- und Unterführungen zusammen. Ist der Oberbau gestört kann dessen Funktionsfähigkeit für das jeweilige Anforderungsprofil gefährdet sein.

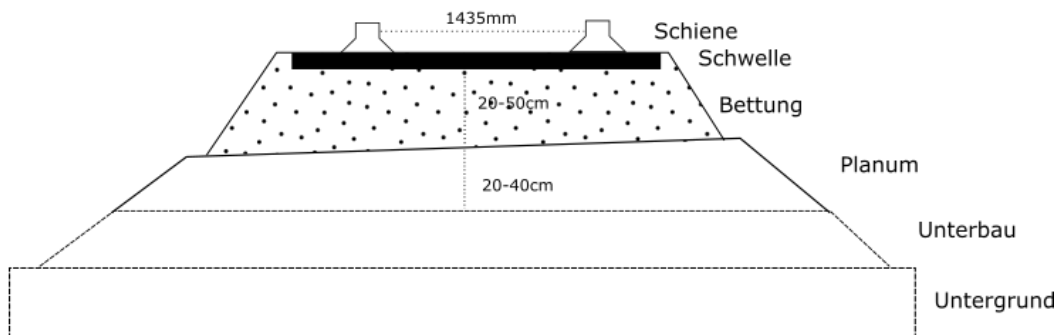


Abb. 1 Aufbau des Oberbaus, Unterbaus und Untergrunds einer Bahntrasse (Abbildung: DB E&C, UGG, I.TPU(T)).

## *1.2 Richtlinie 821 (RIL 821)*

Die Beanspruchung des Oberbaus durch den Eisenbahnbetrieb und Witterungseinflüsse verursachen materiellen Verschleiß, biologischen Zerfall und Veränderungen der Gleisgeometrie, die sich auf die Funktionsfähigkeit des Oberbaus auswirken. Bei der Richtlinie 821 (RIL 821) [1] der DB Netz AG geht es um die Einhaltung der Funktionsfähigkeit des Oberbaus für das jeweilige Anforderungsprofil. Ein Anforderungsprofil beinhaltet die Geschwindigkeit mit der ein Streckenabschnitt befahren wird und die Belastung die auf ihn wirkt. Die Belastung ist abhängig von der Achsenzahl der Züge, deren Masse und der Frequenz der Befahrung. Ist die Funktionsfähigkeit für ein bestimmtes Anforderungsprofil nicht mehr gegeben, muss das Anforderungsprofil verändert oder der Gleisabschnitt gesperrt werden [1].

Durch Inspektionen wird der Istzustand des Oberbaus festgestellt. Inspektionen werden regelmäßig in planbaren, festen Zeitabständen durchgeführt oder auch zusätzlich, wenn Schadstellen, Bauzustände, Auswirkungen von außergewöhnlichen Witterungsbedingungen oder erhöhte Beanspruchungen es erfordern [1]. Die Inspektionen, Inspektionsmittel und Abstände sind verschiedenartig und abhängig vom Anforderungsprofil der Bereiche. Die RIL 821 regelt die „Planung, Durchführung, Auswertung und Beurteilung“ der Inspektionen

- der Gleisgeometrie [2]
- der Fahrtechnik [3]
- der augenscheinlichen Begebenheiten [4] [5]

## *1.3 Störung des Oberbaus*

Ist der Oberbau gestört, kann dessen Funktionsfähigkeit für das jeweilige Anforderungsprofil eingeschränkt sein. Störungen können u.a. Fehler in der Gleisgeometrie und dem Fahrverhalten des Zuges verursachen.

Werden während der Inspektionen nach der RIL 821 Störungen im Oberbau detektiert, die die Funktionsfähigkeit einschränken könnten, wird zunächst das Anforderungsprofil des betroffenen Streckenabschnittes angepasst, d.h. die Befahrungsgeschwindigkeit, Frequenz der Befahrung und deren Masse können reduziert werden.

Zur weiteren Untersuchung des Streckenabschnittes werden die Inspektionsabstände verkürzt und zusätzliche Inspektionsmethoden veranlasst.

Die durchgeführten Inspektionen sind beschränkt auf die Detektion der Auswirkungen der Änderungen des Unterbaus auf die Oberfläche, wie veränderte Gleislage oder der Zustand des Schotters. Für Informationen über den Zustand der Bettung, des Planums oder des Unterbaus können äquidistante Aufschlüsse veranlasst werden. Diese Aufschlüsse ermöglichen jedoch keine lückenlose Kontrolle des Unterbaus. Für eine lückenlose Kontrolle des Unterbaus kann das Georadar-Verfahren hinzugezogen werden.

## **2. Georadar an Bahntrassen**

### *2.1 Georadar-Verfahren*

Das Georadarverfahren ist ein geophysikalisches Standardverfahren für die Erkundung des Untergrundes. Im Bauingenieurwesen wird es überwiegend verwendet, um Einbauteile (Bewehrung, Spannkäme, Dübel, ...) in Ingenieurbauten zu detektieren und um die

Bauteilgeometrie zu bestimmen ([6], [7]). Die Vorteile des Georadar-Verfahrens sind, dass sich Objekte zerstörungsfrei, flächendeckend und lückenlos untersuchen lassen.

Grundlage des Verfahrens bilden die unterschiedlichen dielektrischen Eigenschaften von Materialien. Radarantennen senden elektromagnetische Wellen in das Untersuchungsobjekt, diese werden an den Grenzflächen von Materialien, mit unterschiedlichen dielektrischen Eigenschaften gestreut und reflektiert und von Empfangsantennen wieder erfasst. Das Untersuchungsobjekt und die Aufgabenstellung bestimmen die Art der verwendeten Radarantennen und deren Frequenz. Die empfangenen Wellen werden als Funktion der Zeit bzw. Tiefe in sogenannten Radargrammen dargestellt ([6]).

Bei der Bahn wird mit dem Georadar-Verfahren der Zustand von Untergrund und Oberbau von Strecken erfasst. Hierbei geht es insbesondere, um die Detektion von Verschmutzungen im Schotter, um die Ortung von Hohlräumen, Feuchtigkeit und sonstigen Inhomogenitäten sowie um die Bestimmung von Schichtmächtigkeiten und deren Verlauf.

Durch regelmäßige Messungen auf den Strecken lässt sich mit dem Verfahren die zeitliche Entwicklung von Schäden bewerten. Dadurch können Sanierungs- und Umbaumaßnahmen priorisiert werden.

Mit dem Einsatz des Georadar-Verfahrens auf Bahnstrecken, lassen sich Instandhaltungsmaßnahmen örtlich und zeitlich effizienter planen, was die gezielte Nutzung knapper Geldmittel fördert.

## *2.2 Georadar an Bahntrassen*

Der Anbau der Hardware ist an verschiedenen Eisenbahnfahrzeugen möglich. Voraussetzung sind Puffer (Abb. 2 und Abb. 3) und eine Ladefläche für das Abstellen des Generators. An die Puffer vorn wird der Antennenadapter montiert (Abb. 2). An die hinteren Puffer wird der Weggeber befestigt (Abb. 3). Der Weggeber ist ein Dopplerradar, das Positionszuordnungen von +/- 1 m bei mehreren hundert Kilometern Messstrecke ermöglicht. Zusätzlich erfolgt eine Positionsaufnahme über GPS Koordinaten. Eine, mit den Radargrammen synchronisierte HD Videokamera nimmt zusätzlich die Messfahrt auf, um die Auswertung der Radargramme zu vereinfachen (Abb. 4). Für die Datenaufnahme wird eine 8-kanalige Messapparatur der Firma GSSI verwendet, die es ermöglicht, Messungen mit bis zu acht Antennen gleichzeitig durchzuführen. Die Antennen werden auf die Feldseite, Gleisachse und Bahnseite der Strecke verteilt. Verwendet werden, je nach Aufgabenstellung, 1000 MHz und 2000 MHz Hornantennen, sowie 400 MHz Schmetterlingsantennen (Abb. 5). Die Eindringtiefen liegen zwischen 0,5 m und 4 m. Die verwendete Messtechnik erlaubt Fahrgeschwindigkeiten von 80 km/h, was die Mitfahrt mit eigenem Streckenfahrplan im normalen Streckenverkehr ermöglicht und eine Streckensperrung unnötig macht.

Die Abb. 6 zeigt den fertigen Aufbau an der Vorderseite einer GAF, markiert sind: GPS-Antenne, HD-Kamera, Schmetterlingsantennen und Hornantennen.



Abb. 2 Anbau der Haltevorrichtung an die Puffer einer GAF (Foto: DB E&C, UGG, I.TPU(T)).



Abb. 3 Dopplerradar zur Wegaufzeichnung, befestigt an den hinteren Puffern der GAF (Foto: DB E&C, UGG, I.TPU(T)).



Abb. 4 Mit Radargrammen synchronisiertes HD Video (Foto: DB E&C, UGG, I.TPU(T)).

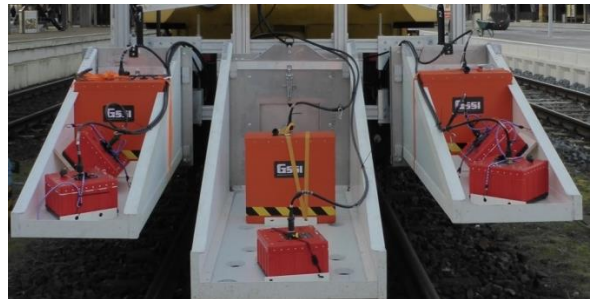


Abb. 5 Acht Radarantennen verschiedener Frequenzen: 2000 MHz, 1000 MHz und 400 MHz (Foto: DB E&C, UGG, I.TPU(T)).

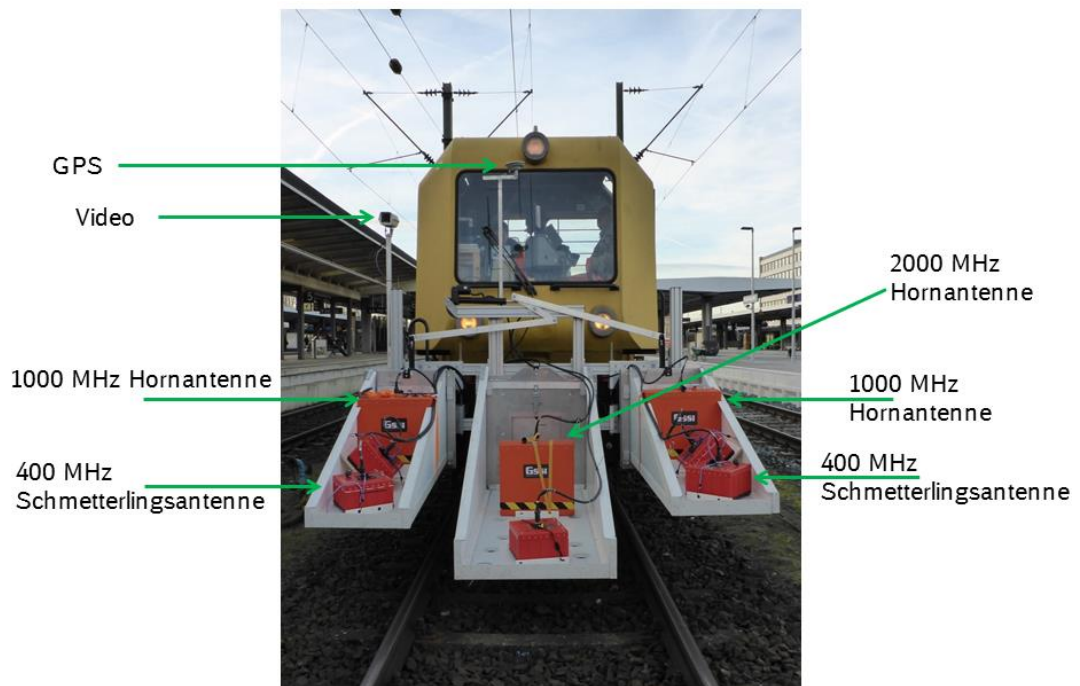


Abb. 6 Frontalansicht des Aufbaus für die Messungen von Bahntrassen mit dem Georadar-Verfahren. Die Pfeile markieren die einzelnen Hardware Komponenten (Foto: DB E&C, UGG, I.TPU(T)).



### *2.3 Untersuchungsziel*

Häufige Untersuchungen betreffen die Überprüfung des Schichtaufbaus. Insbesondere geht es um die Kontrolle des Schichtverlaufs und der Schichtmächtigkeiten. Auch ist die Detektion von Inhomogenitäten ein Untersuchungsziel. Inhomogenitäten können Verschmutzungen in der Schotterschicht sein, Schlammstellen, Schottersäcke oder Mulden, oder auch feuchte Stellen, die auf mangelhafte Entwässerung oder defekte Durchlässe schließen lassen.

### *2.4 Auswertung der Georadarmessungen*

Ausgewertet werden die Messungen mit hauseigener Software, die es ermöglicht die Radargramme zusammen mit dem synchronisierten Streckenvideo zu betrachten. Das Streckenvideo hilft bei der Auswertung der Radargramme. Falsche Interpretationen von Einflussfaktoren der Streckenumgebung (z.B. Masten, Zäune, etc.) lassen sich so leichter vermeiden. Mit der Software, von hier an als GeoInspector bezeichnet, lassen sich in den Radargrammen Schichten verfolgen und benennen, Inhomogenitäten markieren und, wenn möglich, bezeichnen. Die markierten Schichten und Auffälligkeiten lassen sich in einer 2-D Ansicht darstellen. Sind Aufschlüsse vorhanden, lassen sich die Tiefen kalibrieren. In der Regel werden die Feldseite, Gleisachse und Bahnseite übereinander dargestellt und zusammen ausgewertet. Die Abb. 7 zeigt die Radargramme der Feldseite, Gleisachse und Bahnseite zusammen mit dem Streckenvideo eines Streckenabschnittes der DB AG. Die Schichten „Unterkante Schotter“ (rot), „verschmutzter Schotter“ (weiß), „Unterkante Schutzschicht“ (blau) und „Erdkörper“ (braun) wurden bereits farbig nachgezogen und feuchte Stellen mit entsprechender Symbolik markiert. Die 2-D Darstellung in der Abb. 8 verdeutlicht den Schichtaufbau und ermöglicht die Verwendung spezifischer Symbolik zur Schichtbeschreibung.

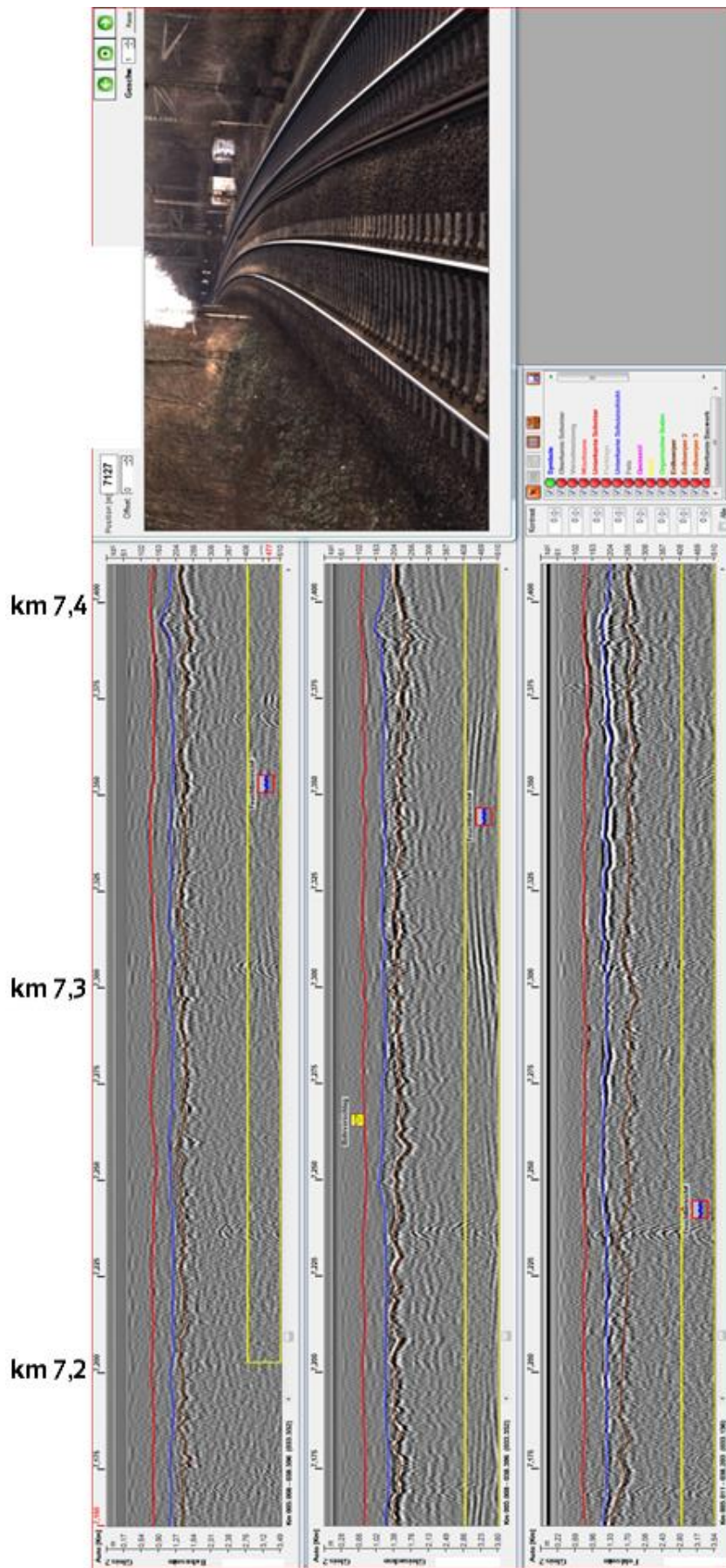


Abb. 7 Radargramme der Bahnseite (oben), Gleisachse (Mitte) und Feldseite (unten) mit Videobild des entsprechenden Streckenabschnittes. Die detektierten Schichtverläufe sind bereits farblich nachgezogen (Abbildung: DB E&C, UGG, I.TPU(T)).

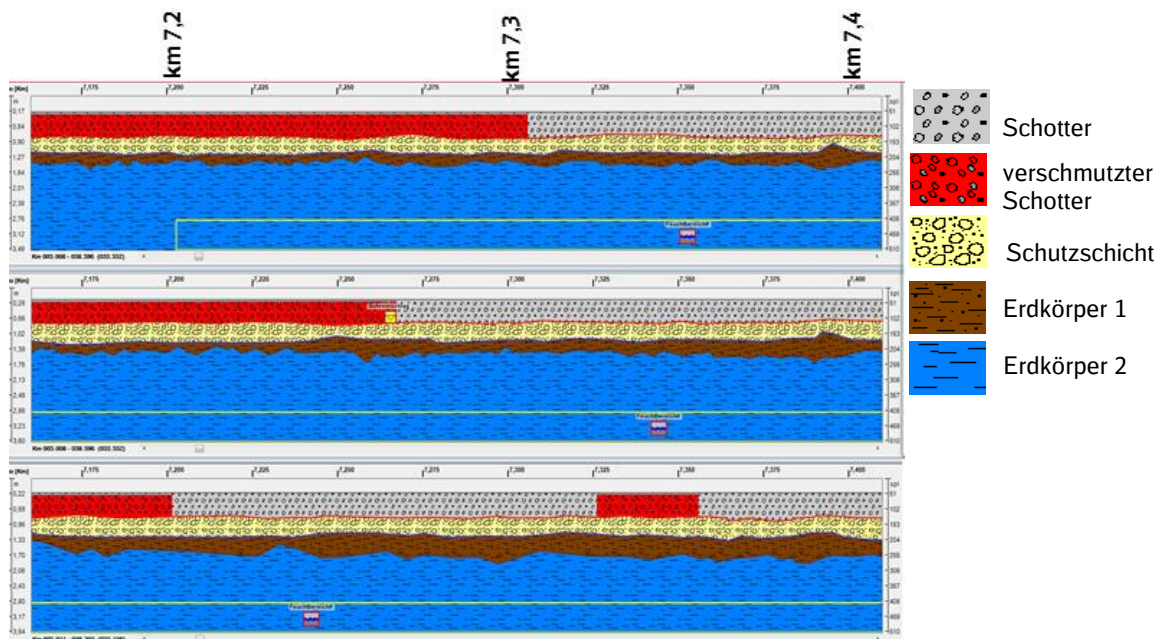


Abb. 8 2-D Darstellung der detektierten Schichtverläufe aus der Abb. 7. Nach einer Kalibrierung der Radargramme durch Aufschlüsse, lassen sich die Schichtmächtigkeiten bestimmen (Abbildung): DB E&C, UGG, I.TPU(T).

### 3. Anwendungsbeispiel

Als Anwendungsbeispiel werden Untersuchungen an einer Strecke der DB Netz AG vorgestellt. Reguläre Inspektionen zeigten Auffälligkeiten in der Gleisgeometrie, woraufhin das Inspektionsintervall verkürzt und Teilstreckenabschnitte ausgebessert wurden. Da die Auffälligkeiten in der Gleisgeometrie immer wieder auftraten und bei visuellen Inspektionen keine Ursachen detektiert werden konnten, wurde das Georadar-Verfahren für die Untersuchung der Strecke eingesetzt. Die Abb. 9 zeigt die Entwicklung der Längshöhenfehler zwischen dem km 33 und dem km 34 der betroffenen Strecke. Nach der Inspektion vom 01.02.2016 wurde der Bereich zwischen km 33,2 und 33,4 ausgebessert. Bis zur damals aktuellsten Kontrolle am 10.02.2017 wurde der Bereich jedoch wieder auffällig. Das Radargramm, in der Abbildung unten, gibt die dielektrischen Eigenschaften des Untergrundes dieses Streckenabschnittes über die Tiefe wieder. Gemessen wurde im Dezember 2016. Zwischen dem km 33,2 und km 33,4 ist eine eindeutige, fortgeschrittene Inhomogenität des Untergrundes zu sehen, die sich über 120 m aus 2 m Tiefe bis beinahe an die Schotteroberkante zieht.

Nach der Untersuchung mit dem Georadar-Verfahren wurden Aufschlüsse in ausgewählten Bereichen durchgeführt, um die Ergebnisse zu evaluieren, die Tiefenangaben zu kalibrieren und die Auffälligkeiten zu identifizieren. Neben Inhomogenitäten in unterschiedlichster Ausprägung, wurden bei der untersuchten Strecke feuchte Abschnitte detektiert, die auf eine ungenügende Entwässerung schließen ließen, Verschmutzungen im Schotter sowie Bereiche mit einer nicht mehr ausreichend vorhandenen Planumsschicht. Mit dieser Information konnte der Streckenabschnitt gezielt ausgebessert werden.



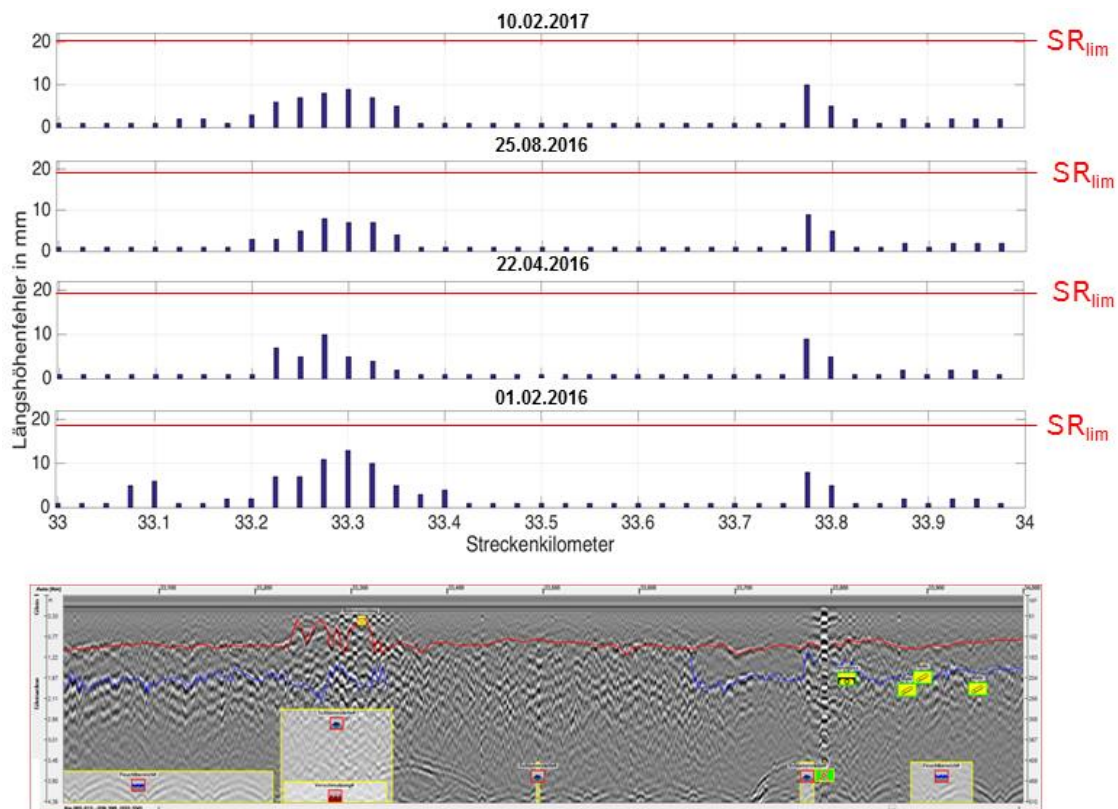


Abb. 9 Darstellung der Entwicklung von Längshöhenfehler (oben) in der Gleisgeometrie über das Radargramm der Gleisachse desselben Streckenabschnittes (unten) (Abbildung: DB E&C, UGG, I.TPU(T)).

### 3.3 Regelmäßige Kontrolle

Die folgende Abb. 10 zeigt Radargramme, jeweils aufgenommen in der Gleisachse, der Strecke zwischen dem km 32,95 bis km 33,4 aus den Jahren 1998, 2003 und 2016. Die Stelle zwischen km 33,2 und 33,3 ist 1998 noch unauffällig. 2003 werden mit dem Georadar-Verfahren bereits Inhomogenitäten über etwa 40 m Länge detektiert. 2016 ist diese Inhomogenität bereits dreimal so lang und führt zu Auffälligkeiten in der Gleisgeometrie.

Durch eine regelmäßige Kontrolle von Streckenabschnitten mit dem Georadar-Verfahren kann die Entwicklung von Inhomogenitäten beobachtet werden, wodurch sich Fehlstellen frühzeitig und gezielt ausbessern lassen.

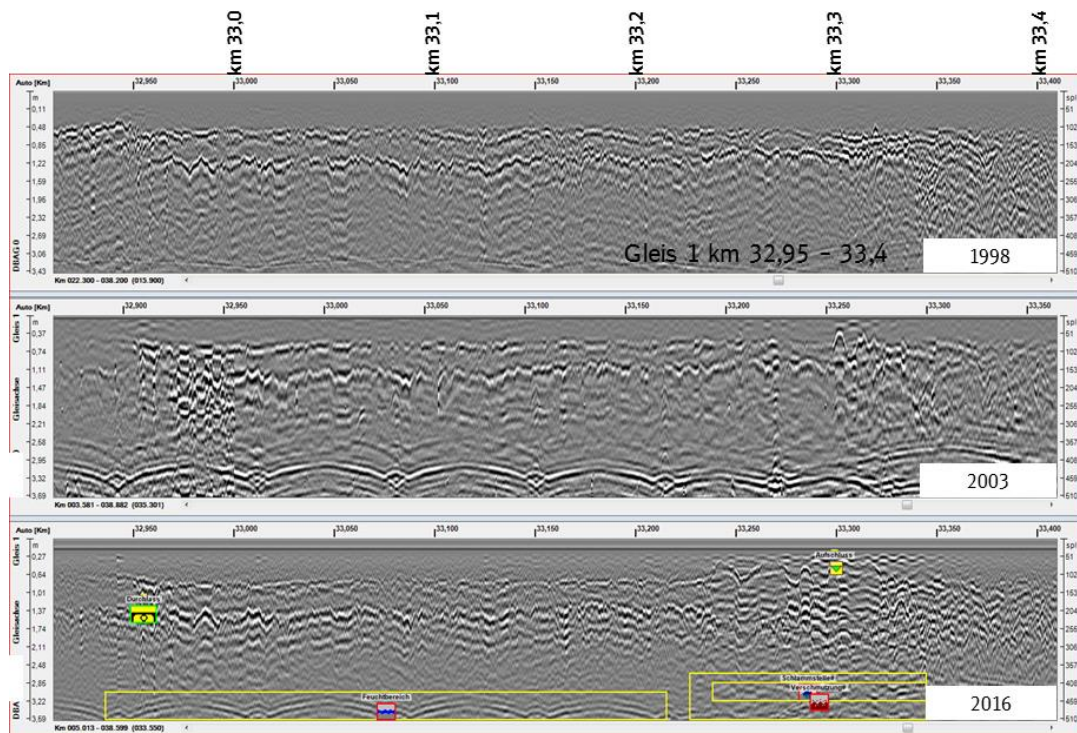


Abb. 10 Entwicklung der Inhomogenität über die Jahre 1998 (oben), 2003 (Mitte) und 2016 (unten), detektiert mit dem Georadar-Verfahren (Abbildung: DB E&C, UGG, I.TPU(T)).

#### 4. Zusammenfassung

Mit dem Georadar-Verfahren lässt sich der Zustand von Bahntrassen untersuchen. Das Verfahren ergänzt dabei die bestehenden Streckeninspektionen durch einen zerstörungsfreien, lückenlosen und kontinuierlichen Blick in den Untergrund. Dadurch lassen sich der Verlauf und die Mächtigkeit von Schichten im Unterbau untersuchen, Inhomogenitäten lokalisieren und Feuchtigkeit detektieren. Die Hardware ermöglicht die Aufnahme von mehreren parallelen Profilen, wodurch die Bahnseite, Gleisachse und Feldseite mit verschiedenen Antennenfrequenzen, und damit Untersuchungstiefen, erkundet werden können. Die Messungen lassen sich mit Fahrgeschwindigkeiten von über 80 km/h durchführen, was die Fahrt mit einem normalen Streckenfahrplan ermöglicht. Streckensperrungen sind bei Standarduntersuchungen in der Regel nicht notwendig. Durch die Verwendung von GPS Daten und einem Weggeber, lassen sich Fehlstellen auf bis zu einen Meter Genauigkeit lokalisieren. Bei der Messfahrt aufgenommene Videoaufnahmen ermöglichen eine zusätzliche visuelle Inspektion der Strecke. Die Datenauswertung erfolgt durch eine hausinterne Software, die das Markieren, die Bezeichnung und die Darstellung der Schichten ermöglicht. Streckenmerkmale wie Brücken, Durchlässe und Eisenbahnübergänge werden durch entsprechende Symbole markiert, ebenso Auffälligkeiten wie Inhomogenitäten, Feuchtigkeit, Mulden und Schottersäcke.

In dem Beitrag wurde gezeigt, wie das Georadar-Verfahren angewandt wird, um Inhomogenitäten im Unterbau einer Bahnstrecke zu lokalisieren und deren Ausmaße zu beurteilen. Basierend auf den Ergebnissen der Georadar Untersuchungen werden gezielt Aufschlüsse durchgeführt, um die Ergebnisse zu evaluieren, die Auffälligkeiten zu identifizieren und die Tiefenachse der Radargramme zu kalibrieren. Basierend auf den Ergebnissen werden die betroffenen Stellen zielgerichtet ausgebessert und die Entwässerung verbessert. Zudem wurde gezeigt, dass durch regelmäßige Messungen derselben Streckenabschnitte entstehende Fehlstellen beobachtet werden können, um diese frühzeitig und gezielt auszubessern.

## Referenzen

- [1] DB Netz AG, *Richtlinie 821.1000 - Grundlagen der Oberbauinspektion*, 2016a.
- [2] DB Netz AG, *Richtlinie 821.2001 - Prüfung der Gleisgeometrie mit Gleismessfahrzeugen*, 2016b.
- [3] DB Netz AG, *Richtlinie 821.2002 - Fahrtechnische Inspektion*, 2016c.
- [4] DB Netz AG, *Richtlinie 821.2003 - Gleisbegehung durchführen*, 2016d.
- [5] DB Netz AG, *Richtlinie 821.2004 - Gleisbefahrung durchführen*, 2016e.
- [6] H. W. Alexander Taffe, „Zerstörungsfreie Zustandsermittlung und Qualitätssicherung in der Betoninstandsetzung,“ *Beton- und Stahlbetonbau Spezial*, 2005.
- [7] DGZfP UA Radar, *Merkblatt für das radarverfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen*, DGZfP, 2008.