

Möglichkeiten und Grenzen des Georadarmessverfahrens

FA 4.284

Forschungsstellen: Fachhochschule Münster, Fachbereich Bauingenieurwesen Verkehrswegebau (Prof. Dr.-Ing. H.-H. Weßelborg)

Ingenieurgesellschaft PTM Dortmund mbH, Dortmund

Hilgenroth Straßen, Tief- und Kanalbau GmbH & Co. KG, Sundern

Bearbeiter: Weßelborg, H.-H. / Hülsbömer, M. / Mörchen, S. / Gogolin, D.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn

Abschluss: Januar 2020

wesentliche Vorteil gegenüber der konventionellen zerstörenden Bohrkernentnahme die quasi-kontinuierliche Gewinnung von Messdaten in Längsrichtung ist.

Zum Zeitpunkt der Projektdurchführung bestand allerdings noch Unsicherheit hinsichtlich der tatsächlichen Detektionsmöglichkeiten von Substanzschädigungen und den dafür zweckmäßigen messtechnischen Einstellungen. Darüber hinaus gab es Bedarf hinsichtlich Aussagen der potenziellen Genauigkeit des Verfahrens bei der Wiedergabe von Schichtgrenzen sowie den Ursachen für Messunsicherheiten und Abweichungen. Darüber hinaus waren die Potenziale für Automatismen in der Datenauswertung und Dateninterpretation zu erforschen, um die Möglichkeiten der Minimierung des Unsicherheitsfaktors der manuellen Auswertung zu eruieren und die damit einhergehenden Risiken von Fehlinterpretationen zu reduzieren. Dieses zielte gleichermaßen auf die Möglichkeit der zukünftigen Etablierung einheitlicher Standards in der Datenauswertung und Dateninterpretation ab.

Das Projekt umfasste insgesamt sieben wesentliche Arbeitsschritte, welche in Form einer allgemeinen Projektskizze in dem nachfolgenden Bild 1 dargestellt sind.

1 Fragestellung und Zielsetzung

Das FE-Projekt zielt auf die Erforschung der Nutzbarkeit des Georadars für die Substanzuntersuchung von Asphaltbefestigungen außerorts ab. Als zerstörungsfreies Prüfverfahren wird es im Bereich des Straßenwesens zur Detektion von Substanzschädigungen und Substanzmerkmalen genutzt, wobei der

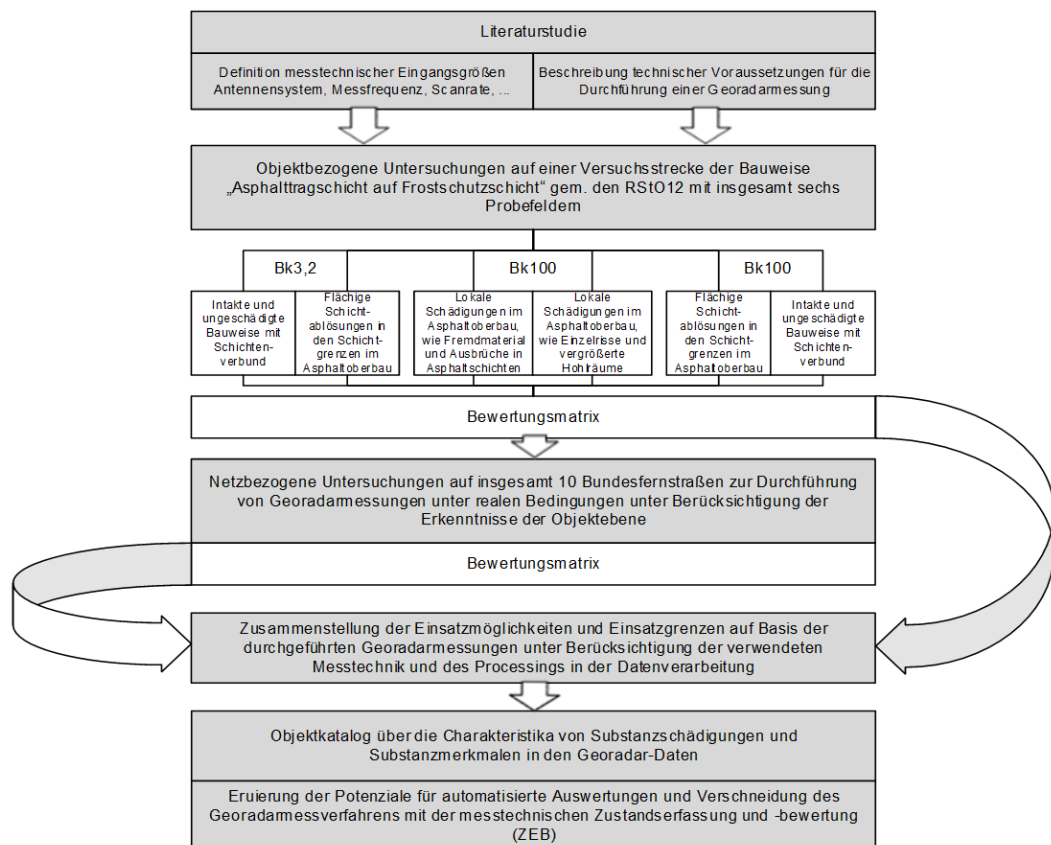


Bild 1: Allgemeine Projektskizze mit den wesentlichen Arbeitsschritten

2 Messtechnik

Die Untersuchungen mit dem Georadarmessverfahren wurden mit den Radarsteuerungen SIR 20® und SIR 30® des Herstellers GSSI durchgeführt. Es handelte sich um ein bistatisches Impulsradar, wobei mit zwei luftgekoppelten Hornantennen der Messfrequenzen 1 000 und 2 000 MHz gemessen wurde. Als zusätzliche Messinstrumente wurden ein Encoder zur Positionsmessung an der Fahrzeughinterachse und eine Videokamera zur Aufnahme der Straßenoberfläche durch die Fahrzeugfrontseite installiert. Auf Netzebene wurde darüber hinaus ein Globales Navigationssatellitensystem zur Positionsbestimmung (GPS) und auf Objektebene ein Randabstandsmesser zur Einhaltung der Randabstände sowie Reduzierung der Schwankungen im Fahrweg genutzt. Letzterer diente der Schaffung einer einheitlichen Grundlage für die Durchführung von Wiederholungsmessungen zur Untersuchung der Reproduzierbarkeit eines Messergebnisses und der Quantifizierung von potenziellen Messunsicherheiten.

Die Datenverarbeitung wurde aus Kompatibilitätsgründen mit der Software "Radar Data Analyzer" (RADAN®) des Herstellers GSSI durchgeführt. Die Auswertung und Interpretation der Messdaten im Rahmen des Post-Processings erfolgten durch das vorgegebene CSV-Datenausgabeformat in textverarbeitender und tabellenkalkulatorischer Software.

3 Versuchsprogramm

Das FE-Projekt umfasste insgesamt zwei Versuchsprogramme, welche sich in objekt- und netzbezogene Untersuchungen aufgliederten. Das Versuchsprogramm der Objektebene wurde in dem genannten Anwendungsfall durch eine idealisierte Versuchsstrecke im sauerländischen Sundern abgebildet, welche einer Straße im Bundesfernstraßennetz nachempfunden war. Dies galt sowohl für die Dimensionierung und den Konstruktionsaufbau in den Belastungsklassen Bk3,2 und Bk100 der Bauweise "Asphalttragschicht auf Frostschuttschicht" gemäß den RStO 12 als auch für die künstlich konstruierten Substanzschädigungen und Substanzmerkmale. Mit der Versuchsstrecke wurde das Ziel verfolgt, die Einsatzmöglichkeiten und Einsatzgrenzen des Georadarverfahrens unter weitestgehend kontrollierten Umgebungsbedingungen, ohne elektrische Störquellen und unter Ausschluss des Straßenverkehrs, systematisch zu untersuchen.

Die Versuchsstrecke bestand aus insgesamt sechs aufeinanderfolgenden Probefeldern, wobei jedes Probefeld spezifischen Konstruktionsdetails unterlag. Die ungeschädigten Bereiche der Versuchsstrecke dienten als Referenzbereiche für den Konstruktionsaufbau der jeweiligen Belastungsklasse. Die geschädigten Probefelder dienten wiederum der Erkennung von Substanzschädigungen, wobei der Schwerpunkt auf flächigen Schichtablösungen sowie lokalen Substanzschädigungen, wie lokal vergrößerte Hohlräume, Einzelrisse oder Fremdmaterial (Bild 2) lag. Hierbei lag der Fokus auf der Ableitung der visuellen

Charakteristika für einen systematisierten Interpretationsansatz.



Bild 2: Auswahl an künstlich hergestellten Substanzschädigungen auf der Versuchsstrecke

Die Georadarmessungen erfolgten auf der Versuchsstrecke entlang definierter Messlinien bei trockener Witterung, wobei eine vergleichende Studie hinsichtlich der Zweckmäßigkeit unterschiedlicher Messfrequenzen und Messpunktabstände durchgeführt wurde. Hierbei wurden die weiteren Messfrequenzen 300, 800, 1 600 sowie 2 600 MHz genutzt. Zur Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Datendichten auf das Messergebnis wurden die Messpunktabstände 10, 20, 50 und 100 Messpunkte/m unterschieden.

Zu Kontroll- und Kalibrierungszwecken wurde die Versuchsstrecke entlang der Messlinien der 2 000 MHz Radarantenne beprobt. Die entnommenen Bohrkern wurden dabei als unabhängige Korrelationsgröße in der Datenauswertung herangezogen. Aus jeder Messlinie wurden in diesem Zusammenhang 145 Bohrkern im 1-m-Raster entnommen (Bild 3). Insgesamt konnten auf diese Weise vergleichende Studien und Analysen auf Basis von 435 Bohrkernen durchgeführt werden.



Bild 3: Beprobung der Messlinien der 2 000 MHz Radarantenne mittels Bohrkernen im 1-m-Raster

Das Versuchsprogramm der Netzebene umfasste Georadarmessungen unter realen Praxisbedingungen auf insgesamt fünf Bundesautobahnen und fünf Bundesstraßen in den Bundesländern Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz und Sachsen-Anhalt. Ziel war es, die Übertragbarkeit der auf der Objektebene festgestellten Ergebnisse auf die Netzebene zu überprüfen und den Einfluss der dabei vorherrschenden Rahmenbedingungen zu untersuchen. Dies galt insbesondere für die Messumgebung, durch das Mitschwimmen im Straßenverkehr mit bis zu 80 km/h, sowie für den Umstand, dass der Konstruktionsaufbau der Untersuchungsstrecken im Gegensatz zur Objektebene eine unbekannte Größe darstellte. Die Gesamtlänge der Untersuchungs-

strecken betrug ca. 80 Kilometer, wobei die zur Auswertung genutzten Daten jeweils einen kleineren Teilbereich abdeckten.

4 Forschungsergebnisse

4.1 Detektion von Substanzmerkmalen und Substanzschädigungen

Um Substanzmerkmale und Substanzschädigungen in Georadar-Daten zu erkennen, bedarf es Systematisierungen in Bezug auf identifizierbare Charakteristika in Radargrammen, welche die Georadar-Daten in Form eines Längsprofils (B-Scan) visualisieren. Dazu wurde in einem ersten Schritt eine allgemeine visuelle Mustererkennung der verschiedenen künstlich hergestellten Substanzmerkmale und Substanzschädigungen durchgeführt und anschließend in Form eines Katalogs zusammengestellt. Dabei wurde zwischen längs und quer zur Messrichtung verlaufenden Schädigungen differenziert. So überwiegt bei in Messrichtung verlaufenden Schädigungen und Schichtgrenzen aufgrund der Ausprägung und Geometrie der Grenzflächen die Reflexion, sodass diese als fortlaufende horizontale Linien im Radargramm dargestellt werden, wobei geschädigte Bereiche durch eine abweichende Ausprägung und Phase der Amplituden der Reflexion visuell von ungeschädigten Bereichen abgrenzbar sind.

Quer zur Messrichtung verlaufende Substanzmerkmale und Substanzschädigungen werden durch die im Vergleich zur Wellenlänge der elektromagnetischen Impulse kleinere Ausprägung und Geometrie im Radargramm in Form von Diffraktionshyperbeln dargestellt, welche auf Beugungs- und Streueffekte zurückzuführen sind. Die hyperbelförmige Darstellung resultiert aus der räumlichen und kegelförmigen Abstrahlung der Georadarantennen in den Konstruktionsaufbau, sodass bereits Reflexionen von Objekten und Merkmalen registriert werden, welche einen horizontalen Abstand zur Antennenposition aufweisen. Bezogen auf die Antennenposition resultieren daraus verlängerte Laufzeiten der elektromagnetischen Wellen zum Reflektor. Durch eine Migration der Messdaten lassen sich entsprechende Diffraktionshyperbeln im Radargramm auf die korrekte Lage verschieben und hinsichtlich des Scheitelpunkts als kürzester vertikaler Abstand zwischen Reflektor und Radarantenne fokussieren. Im Rahmen der Datenanalyse konnte festgestellt werden, dass für eine adäquate Erkennbarkeit und Darstellung der Diffraktionshyperbeln im Radargramm Messpunktabstände von mindestens 20 Scans/m sachdienlich sind. Bezüglich der Messfrequenz zeigten die Auswertungen, dass Frequenzen $\geq 2\,000$ MHz zur Detektion von entsprechenden Substanzschädigungen und Substanzmerkmalen nutzbar sind. Für die alleinige Detektion des Konstruktionsaufbaus und der Straßensubstanz sind wiederum auch geringere Messfrequenzen von 1 000 MHz zweckmäßig, um sowohl den gebundenen als auch den ungebundenen Oberbau zu erfassen.

4.2 Untersuchung der Genauigkeit des Georadarmessverfahrens im vorliegenden Anwendungsfall

Die Untersuchung der Genauigkeit des Georadarmessverfahrens in Bezug auf die korrekte Angabe der Tiefe von Schichtgrenzen im Radargramm erfolgte im vorliegenden Anwendungsfall auf Basis eines Vergleichs dreier gängiger Berechnungsmethoden. Dabei war es das Ziel, die zweckmäßigste Vorgehensweise zu eruieren, welche die geringsten Abweichungen zu den aus der Versuchsstrecke entnommenen Bohrkernen aufwies. Zu den Berechnungsmethoden zählten wie folgt:

- Angabe der Tiefe der Reflexionen von Schichtgrenzen anhand von Tabellen- und Erfahrungswerten für die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit v und relative Permittivität ϵ_r .
- Berechnung der Tiefe der Reflexionen durch einen Algorithmus, welcher mittels der Reflexionsamplituden die Reflexionskoeffizienten der Schichtgrenzen iterativ ermittelt und auf diese Weise die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit in den einzelnen Asphaltsschichten bestimmt.
- Berechnung der Wellenausbreitungsgeschwindigkeit v und der relativen Permittivität ϵ_r durch stationsgereutes Kalibrieren der Radargramme mittels Schichtdickenbestimmung an entnommenen Bohrkernen.

Auf Basis statistischer Auswertungen konnte hierbei eine grundsätzliche Zunahme der Messabweichungen mit zunehmender Tiefe der Schichtgrenze im Konstruktionsaufbau unabhängig von der Berechnungsmethode festgestellt werden. Erwartungsgemäß führte eine Kalibrierung der Georadar-Daten zu den günstigsten Ergebnissen. Dabei betragen die Abweichungen unter Verwendung einer luftgekoppelten Hornantenne mit der Messfrequenz $f = 2\,000$ MHz minimal $\pm 1,5$ cm im Bereich der Asphaltdeckschicht bei einer Gesamtschichtdicke in Abhängigkeit von der Belastungsklasse von 2,5 beziehungsweise 4,0 cm und maximal $\pm 2,5$ cm für die weiteren Asphaltsschichten und für die Gesamtdicke der Asphaltbefestigung mit 22,0 cm (Bk3,2) beziehungsweise 34,0 cm (Bk100). Erwartungsgemäß wurden diese Abweichungen bei allen im Variantenvergleich der Georadarmessungen vorgesehenen Messpunktabständen festgestellt, sodass kein Zusammenhang zwischen der Messgenauigkeit und der Scanrate vorherrscht. Unter Verwendung der unkalibrierten Georadar-Daten, welche auf Tabellen- beziehungsweise Erfahrungswerten beruhen, wurden ungleich höhere Abweichungen bis zu $\pm 10,0$ cm festgestellt, sodass entsprechende Werte ausschließlich zur Abschätzung der Messtiefe herangezogen werden sollten. Ferner ermöglicht die Kalibrierung eine direkte Ansprache der Straßenbefestigung und materialtechnologische Analysen.

Gleichermaßen konnte festgestellt werden, dass die Asphaltdeckschichten durch die genutzte Messtechnik aufgrund des vertikalen Auflösungsvermögens nicht aufgelöst werden konnten. Hintergrund waren einerseits die dünnen Schichtdicken mit bis zu 4,0 cm und andererseits die messtechnischen

Einstellungen aus Messfrequenz und Impulsdauer sowie die vorherrschende relative Permittivität des Asphalts. Hierbei war somit die Bedeutung der Entnahme von Bohrkernen hervorzuheben, sodass die Dicke der Asphaltdeckschicht in situ festgestellt und als Interpretationsgrundlage für die Georadar-Daten genutzt wird.

Die relative Permittivität ist aufgrund des elektromagnetischen Eigenschaftsprofils des Asphalts in diesem Zusammenhang der wesentliche Materialparameter bei der Analyse und Interpretation von Georadar-Daten. Eine entsprechende Studie zur Abschätzung der Quantifizierung mittels statistischer Auswertungen bestätigte hierbei grundsätzlich den in der einschlägigen Literatur ausgewiesenen Wertebereich mit Werten zwischen 5,00 und 9,00 für alle analysierten Asphalt-schichten. Konkretere Festlegungen wurden aufgrund der vielfältigen Einflussgrößen, wie zum Beispiel die stoffliche Zusammensetzung des Asphalts, sowie der allgemein festgestellten Verteilung der Messwerte als nicht zielführend eingestuft.

5 Aspekte der Erhaltungsplanung und bauvertraglichen Anknüpfung

Auf Basis der in dem FE-Projekt durchgeführten Auswertungen und Analysen konnte keine einheitliche technische Grundlage abgeleitet werden, um eine bauvertragliche Verankerung des Messverfahrens zum aktuellen Zeitpunkt zuzulassen. Das Georadarmessverfahren befindet sich aufgrund der zu klärenden Sachverhalte in Bezug auf die systematischen Detektionsmöglichkeiten von Substanzschädigungen aus Sicht der Verfasser

aktuell weiterhin im Prozess der Erfahrungssammlung. Das Georadarmessverfahren ist somit zurzeit vordringlich als ergänzendes Instrument in der Steuerung und Kontrolle der Qualität von Baumaßnahmen in der Erhaltungsplanung beziehungsweise als Tool in der Bestandserfassung zu sehen. Im Zuge der Durchführung verpflichtender Kontrollprüfungen kann es durch die quasi-flächigen Messdaten als Hilfestellung für die gezieltere Festlegung von Bohrkernentnahmestellen sowie der korrespondierenden Teilflächen genutzt werden. Dieses Vorgehen ist gleichermaßen im Zuge der Eigenüberwachungsprüfungen des Auftragnehmers denkbar.

Im vorliegenden Anwendungsfall konnte ebenfalls gezeigt werden, dass insbesondere anhand der netzbezogenen Georadarmessungen eine Einteilung der Untersuchungsstrecken in homogene Abschnitte möglich ist. Hierzu wurden drei Homogenitätskriterien entwickelt, um korrelativ eine abschließende Definition von Aufbau- beziehungsweise Abschnittswechseln in der Straßensubstanz vorzunehmen. Bei den Homogenitätskriterien handelte es sich sowohl um eine quantitative Analyse der dimensionierungsrelevanten Asphaltgrenze zur Abschätzung der Belastungsklasse mittels fortlaufender Durchschnittswerte von längeren Auswerteabschnitten als auch um zwei strukturelle und qualitative Analysen. Diese beinhalteten die Analyse der Schichtenfolge und flächenhafter Substanzschädigungen, wie beispielsweise Schichtablösungen oder offenporige Asphalt-schichten (Bild 3).

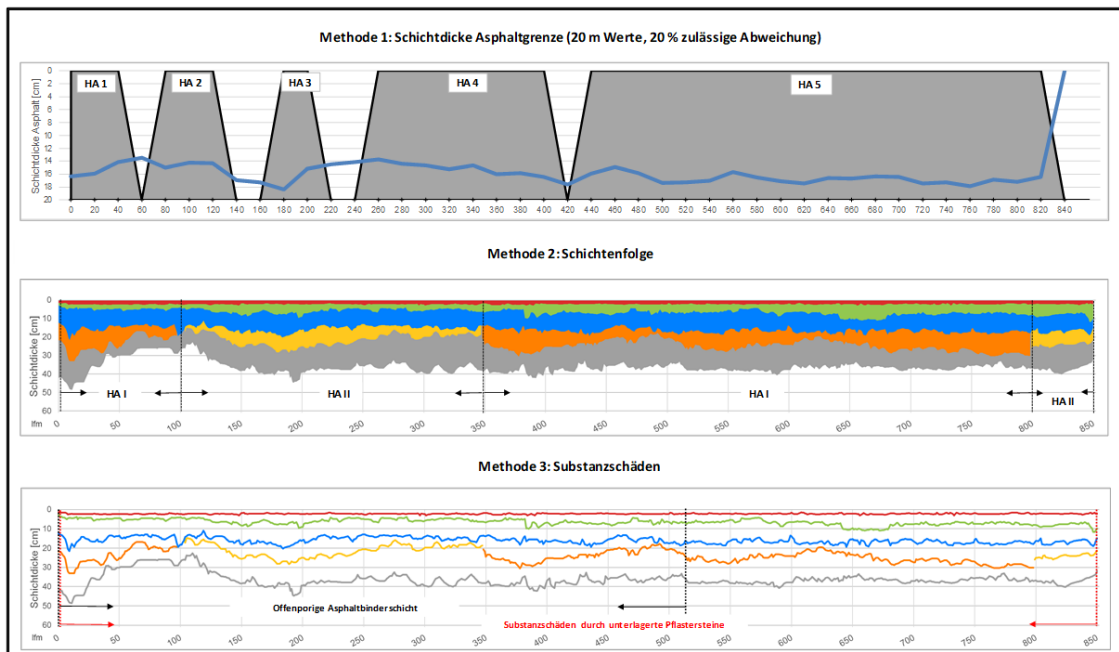


Bild 4: Beispielhafter Auszug einer abschließenden Darstellung der homogenen Abschnitte (HA) einer Untersuchungsstrecke (PTM Dortmund)

Die homogene Abschnittsbildung sowie die Generierung quasi-flächiger Messdaten durch das Georadarmessverfahren bieten die Möglichkeit der Verschneidung mit weiteren zerstörungsfreien Messsystemen. Dabei bietet sich insbesondere die messtechnische Zustandserfassung und -bewertung (ZEB) an, welche die Qualität und den Zustand der Straßenoberfläche als vorrangiges Messergebnis beinhaltet. Mit dem Georadarmessverfahren steht ein ergänzendes Messverfahren zur Verfügung, um die Qualität und den Aufbau der Straßensubstanz ergänzend zur Straßenoberfläche aufzunehmen und beispielsweise in der Erhaltungsplanung als quasi-flächigen Datensatz zu berücksichtigen. Mit der Verschneidung beider Messsysteme steht dadurch insgesamt ein größerer Datenpool zur Verfügung, um eine zielgerichtetere Ursachenforschung zu aufgetretenen Schäden an und in der Straße, zum Beispiel in der Erhaltungsplanung, zu betreiben. Eine entsprechende Visualisierung beider Messsysteme konnte innerhalb des FE-Projekts entwickelt werden.

6 Potenziale für automatisierte Datenauswertungen

Zur Vereinheitlichung der Auswertung von Georadar-Daten und Vergleichbarkeit verschiedener Georadarsysteme erscheinen Verfahrensstandardisierungen sinnvoll. Automatisierte Auswertungen sind dabei ein denkbarer Baustein. Dabei gilt es zwei wesentliche Teilbereiche zu unterscheiden. Der erste Teilbereich bezieht sich auf die grundlegende Aufnahme des Konstruktionsaufbaus durch die vorhandenen Schichtgrenzen. Hierbei ist eine Automatisierung denkbar, da die Reflexionen der Schichtgrenzen im zeitlichen Verlauf der Scans und deren Korrelation im Messprofil auf definierten Amplitudenverteilungen basieren. Der zweite Teilbereich umfasst die automatisierte Erkennung und Auswertung von Substanzschädigungen und Substanzmerkmalen. Dieser Aspekt wird aus Sicht der Verfasser als sehr komplex angesehen, da konkrete Zuordnungen zu den im Radargramm auftretenden Reflexionsmustern hergestellt werden müssen, welche auch tatsächlich eine entsprechende Schädigung beinhalten. Da dies anhand der Georadar-Daten nicht zweifelsfrei möglich ist, ist daher das Risiko von Fehlinterpretationen als erheblich einzustufen.