

# Von der Theorie zur Praxis – neue Möglichkeiten mit automatisierten Verfahren in der Bauwerkserhaltung von Tiefgaragen

Dr.-Ing. Martin MANGOLD

IBB Ingenieurgesellschaft für Bauwerkserhaltung und Bauüberwachung Mangold mbH,  
Keplerstr. 8-10, 10589 Berlin, 030/3982049-0

**Kurzfassung.** ZfP-Verfahren haben sich in der Baupraxis etabliert. Die Anwendung dieser Verfahren ist bisweilen jedoch zeit- und kostenintensiv, so dass nur stichprobenhafte, orientierende Messungen durchgeführt werden. Automatisierte Verfahren bieten neue Anwendungsmöglichkeiten bei Fragestellungen, die mit herkömmlichen Verfahren nicht bzw. nur unzureichend beantwortet werden können. Der vorliegende Beitrag zeigt am Beispiel einer Tiefgarage, wie der sachkundige Planer in der Bauwerkserhaltung automatisierte ZfPBau-Verfahren sinnvoll nutzen kann. Dargestellt werden Praxiserfahrungen bei der Nutzung der mobilen Messplattform BetoScan und des Radar-Impulsverfahrens.

## 1. Einführung

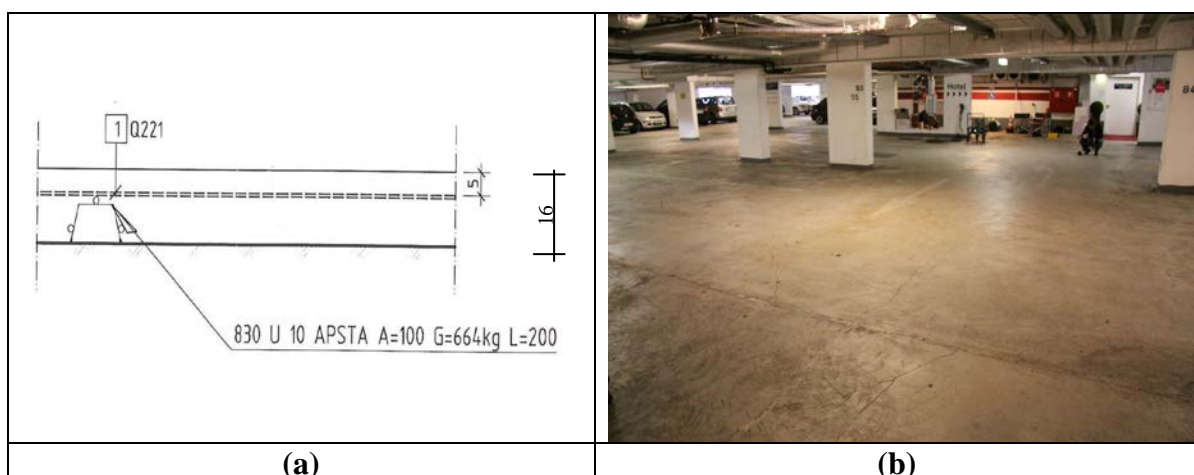
Durch die Automatisierung von zerstörungsfreien Prüfverfahren im Bauwesen (ZfPBau-Verfahren) erschliessen sich neue Möglichkeiten der Praxisanwendung. ZfPBau-Verfahren, die für übliche Anwendungsfälle bislang zu zeit-, personal- und kostenintensiv waren, werden durch Automatisierung des Messablaufes und standardisierte Auswerterroutinen praxistgerechter und können dem sachkundigen Ingenieur in der Bauwerkserhaltung wertvolle Eingangsinformationen liefern. Dies gilt in besonderem Maße bei der Ermittlung des Ist-Zustandes eines Bauwerkes und der Ursachenfindung von Mängeln und Schäden. Der vorliegende Beitrag beschreibt die Anwendung von zwei automatisierten zerstörungsfreien Messsystemen, die in einer Tiefgarage großflächig zum Einsatz kamen. Ziel und Zweck der Untersuchungen war es, die Ursachen für eine ausgeprägte Rissbildung in der Bodenplatte der Tiefgarage zu ermitteln, die im Laufe der bereits mehrjährigen Nutzung festzustellen war. Auf Grundlage der durchgeführten Messungen war die Gebrauchstauglichkeit und die Dauerhaftigkeit der Tiefgarage zu beurteilen und Instandhaltungs- bzw. Instandsetzungsmassnahmen zu erarbeiten.

Die untersuchte Tiefgarage befindet sich im Untergeschoss eines Gebäudekomplexes, dessen Lasten mit einer Tiefgründung (Bohrpfähle mit Pfahlköpfen) in den Untergrund geleitet werden. Ursache für diese Art der Gründung ist die Tatsache, dass der Baugrund bis zu 3 m mächtige Schlammablagerungen aufweist. Ein Teilbereich der Tiefgarage wurde über einem ehemaligen Bachbett errichtet. In tieferen Baugrundhorizonten befindet sich ein Grundwasserleiter mit artesisch gespanntem Grundwasser. Um eine Beaufschlagung der Tiefgaragensohle durch drückendes Grundwasser auszuschliessen, wurde auf dem verdichteten Planum eine rd. 30 cm dicke Dränageschicht angeordnet. Hierauf wurde eine PE-Folie (1-lagig) ausgebreitet und eine planmäßig 5 cm dicke Sauberkeitsschicht aufgebracht. Auf die Sauberkeitsschicht wurde in

einem zeitlichen Abstand von mehreren Wochen die Bodenplatte ohne weitere Trennlage aufbetoniert. Die Bodenplatte wird nicht zur Aussteifung bzw. zum Lastabtrag der Bauteile herangezogen und ist somit nicht als tragendes Bauteil im Sinne der DIN 1045-1 einzustufen. Bei der Planung des Objektes wurde die Tiefgaragensohle in Form einer schwimmend zwischen den Pfahlköpfen gelagerten Bodenplatte konzipiert, die ohne Abdichtungsfunktion mit Pressfugen an die aufgehenden Ortbetonstützen und -wände stößt. Die Bodenplatte ist planmäßig 16 cm dick und im oberen Plattendrittel mit einer Betonstahlmatte Q 221 konstruktiv bewehrt (Abbildung 1a). Die Gesamtfläche der Bodenplatte beträgt rd. 3.500 m<sup>2</sup>, sie wurde fugenlos hergestellt. In Abbildung 1(a) ist der Aufbau der Bodenplatte im Querschnitt dargestellt.

Zum Zeitpunkt der Untersuchungen befand sich die Tiefgarage rd. 8 Jahre in Nutzung. In diesem Zeitraum trat eine ausgeprägte Rissbildung an dem Tiefgaragenboden auf mit bis zu rd. 1 mm breiten Rissen (Abbildung 1b). Auch nach dem Verfüllen mit Zementsuspension bzw. Epoxidharz öffnete sich ein Teil der Risse immer wieder. Zur Klärung der Ursachen für die Rissbildung war u.a. zu untersuchen, ob und ggf. in welchen Bereichen die Bodenplatte zu dünn ausgeführt wurde. Berechnungen zeigten, dass unter Berücksichtigung der Spaltzugfestigkeit des verwendeten Betons und der Dübelwirkung der Bewehrung für den Lastabtrag eine Mindestdicke der Bodenplatte von 15 cm ( $d_{\min} \geq 15$  cm) erforderlich ist.

Bei ersten orientierenden Messungen wurde die vorhandene Ist-Dicke der Bodenplatte zerstörungsfrei mit dem Ultraschall-Handgerät „A1220 Monolith“ der Firma Acsys bestimmt. Unter der Annahme einer gleichbleibend 5 cm dicken Sauberkeitsschicht und homogenem Verbund zwischen Sauberkeitsschicht und Bodenplatte ließen die Messwerte der Handmessung auf Bereiche der Bodenplatte schließen, in denen die Dicke bereichsweise geringer war als 10 cm. Somit wurde es erforderlich, die Bodenplattendicke systematisch und vollflächig zu untersuchen. Zum einen waren im Hinblick auf die Tragfähigkeit die vorhandenen Ist-Dicken der Bodenplatte vollflächig zu messen und ggf. vorhandene Bereiche, in denen der Mindestwert von 15 cm unterschritten wurde, zu detektieren. Zum anderen wurde in Teilbereichen der Feuchtegehalt des Betons an der Plattenoberseite und –unterseite gemessen. Diese Messungen sollten Hinweise auf eine eventuell unplanmäßig auftretende Beaufschlagung der Bodenplatte durch Grundwasser geben.



**Abbildung 1:** (a) Querschnitt der Bodenplatte (b) Tiefgaragensohle mit Rissen

## 2. Messverfahren

Für die großflächige Bestimmung der tatsächlich vorhandenen Dicke der Tiefgaragensohle wurde ZfPBau-Verfahren eingesetzt, die nachfolgend beschrieben werden. Die Kalibrierung der zerstörungsfreien Messverfahren auf die vorliegenden Randbedingungen erfolgte an 5 Messstellen, bei denen die Dicke der Bodenplatte bekannt war. Wesentliche Randbedingung für die Messungen war es, dass die Tiefgarage durchgehend nutzbar bleiben musste. Insoweit durften Teilflächen nur kurzzeitig gesperrt werden. Als Messzeitraum standen 3 Tage incl. Rüstzeiten zur Verfügung.

### 2.1 BetoScan

Bei dem BetoScan-System handelt es sich um eine selbstfahrende und selbstnavigierende Roboterplattform, die für Sensoren und Messgeräte konzipiert wurde um großflächige Bauteile autonom zu befahren und zerstörungsfrei zu untersuchen [1]. Für die vorliegende Aufgabenstellung wurde das BetoScan-System mit Ultraschallprüfköpfen und Mikrowellensensoren bestückt. Die Plattform ist in Abbildung 2(a) im Messeinsatz dargestellt.

Mit dem Ultraschallverfahren können die Bauteildicke, Hohllagen sowie ggf. vorhandene Fehlstellen (wie z.B. Kiesnester) lokalisiert werden, wenn sie großflächig auftreten bzw. eine größere Ausdehnung als die gewählte Messpunktdichte besitzen. Zum Einsatz kam das Gerät der Firma Acsys „A1220Monolith“. Diese Ultraschallprüfköpfe benötigen zum Ankoppeln an die Oberfläche kein Koppelmittel. Der Messkopf wird bei Stillstand der Plattform mit einer pneumatischen Vorrichtung automatisch an die Oberfläche der Bodenplatte gedrückt.

Zur Bestimmung der Feuchtigkeitsverteilung über den Querschnitt der Tiefgaragensohle kamen Mikrowellensensoren zum Einsatz. Es wurden die Sensortypen „Moist PP“ und „MoistRP“ der Firma HF-Sensor verwendet. Vorteile des Verfahrens bestehen in dem geringen Einfluss des Salzgehaltes auf die Ergebnisse und in der Möglichkeit der kontaktlosen Messung zur Datenaufnahme während der Fahrt.

Vor Messbeginn wurde mit der BetoScan-Messplattform eine Orientierungsfahrt durchgeführt. Mit einem an der Vorderseite angebrachten Laserscanner wurden Wände, Stützen und andere markante Orientierungspunkte in eine grafische Oberfläche eingetragen. Hierüber wird der mäanderförmige Fahrweg innerhalb des definierten Prüfbereichs festgelegt.

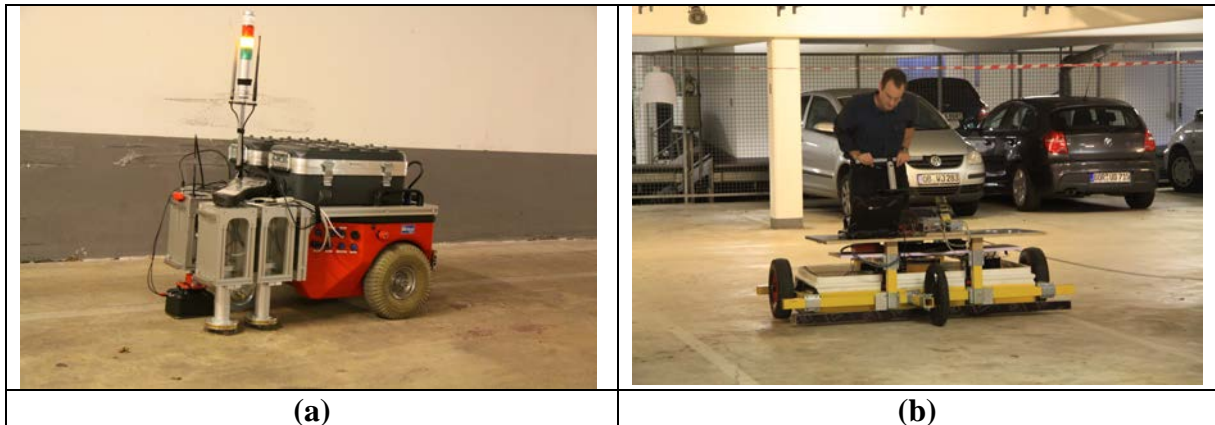
Innerhalb des zur Verfügung stehenden Messzeitraumes wurden mit der BetoScan-Messplattform etwa 40% der Gesamtfläche erfasst. Es wurden rd. 3000 Einzelmessungen in zwei ausgesuchten Bereichen aufgenommen. Das Messraster betrug dabei rd. 0,5m – 1,0 m.

### 2.2 Impulsradar

Der verwendete Messaufbau besteht aus einem Rollwagen, auf den ein Datenerfassungsgerät mit Antennenanschlüssen sowie ein auswechselbares Antennensystem montiert ist. Die Antenne wird über die Oberfläche des zu untersuchenden Bauteils geführt und sendet dabei sehr kurze elektromagnetische Impulse (zeitliche Dauer eines Impulses:  $1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$ ) aus. Diese Impulse werden an der Oberfläche zum Teil reflektiert, der größere Anteil dringt jedoch in das Bauteil ein und wird dort an weiteren Grenzflächen von Materialien mit unterschiedlicher Dielektrizitätszahl, wie z.B. Hohlstellen, metallischen Einschlüssen (Bewehrung, Kabel, Leitungen) und an Schichtgrenzen reflektiert.

Die reflektierten Impulse werden von der Antenne wieder empfangen, mit der Datenerfassung verarbeitet und gespeichert und simultan auf einem Notebook-Monitor dargestellt. Aus der Laufzeit der reflektierten Impulse kann bei bekannter Ausbreitungsgeschwindigkeit auf die Tiefe des Reflektors geschlossen werden. Eine weitergehende Beschreibung des Radarverfahrens ist [2] und [3] zu entnehmen.

Für die Durchführung der Radarmessungen wurde für den vorliegenden Anwendungsfall das kommerziell erhältliche Radargerät SIR-20 der Firma GSSI (USA) und das Mira Flächenarray der Firma Mala Geosience (S) parallel eingesetzt. Beide Geräte waren in einem handgeführten Rollwagen montiert (Abbildung 2(b)). Zur Triggerung der Messung und damit zur Wegaufnahme diente ein am Rollwagen montiertes Messrad.



**Abbildung 2:** (a) BetoScan-System im Messeinsatz (b) Rollwagen mit Radarantennen bei der Messung

Aufgrund der hohen Messgeschwindigkeit konnte in der zur Verfügung stehenden Zeit die gesamte Fläche der Tiefgarage meßtechnisch erfasst werden, Um die Lage der Bewehrung möglichst vollständig mit beiden Polarisationen zu erfassen, wurden Messspuren sowohl in Längs- als auch in Querrichtung angeordnet. (Abbildung 3).



**Abbildung 3:** Grundriss der Tiefgarage mit Messspuren in Längs- und Querrichtung

### 3. Messergebnisse

#### 3.1 BetoScan

Mit der in Abschnitt 2.1 beschriebenen Instrumentierung konnte die Dicke der Bodenplatte sowie die Feuchteverteilung im Beton mit dem BetoScan-System hinreichend genau ermittelt werden. Es zeigte sich, daß die Frage des Verbundes zwischen der Bodenplatte und der Sauberkeitsschicht ganz wesentlich ist für die Auswertung und ingenieurtechnische Bewertung der Messergebnisse. Je nach der Qualität des Verbundes waren in den A-Bildern der Ultraschallmessungen nur 1 bzw. 2 Reflexionshorizonte feststellbar: Der erste Reflexionshorizont, d.h. das erste Echo, befindet sich in der Verbundzone zwischen Bodenplatte und Sauberkeitsschicht. Der zweite Reflexionshorizont befindet sich an der Unterseite der Sauberkeitsschicht und gibt somit die Dicke des Gesamtaufbaus wieder. Bei homogenem, festem Verbund zwischen Bodenplatte und Sauberkeitsschicht tritt das erste Echo nicht auf. Bei Einzelmessungen wird in diesem Fall die Laufzeit des Gesamtaufbaus ermittelt und die Dicke der Bodenplatte zu groß eingeschätzt. Im anderen Extrem, d.h. bei fehlendem Verbund zwischen Bodenplatte und Sauberkeitsschicht, ist die Reflexion in der Verbundebene so groß, dass die zweite Reflexion nicht mehr detektierbar ist. Wird dies bei der Auswertung nicht erkannt, so wird die Dicke der Bodenplatte als zu gering ermittelt [4]. Analog wirkten sich breite Risse im Messquerschnitt aus.

Abbildung 4 zeigt ein Pseudo-B-Bild mit zwei Reflexionshorizonten. Das B-Bild setzt sich aus allen A-Bildern eines Messbereiches zusammen (hier: rd. 1.300 Einzelmessungen), die der Reihenfolge nach geordnet aufgetragen wurden. Die Vielzahl von Messungen gibt einen guten Überblick über die Gesamtsituation, wie er durch Einzelmessungen allein nicht möglich wäre.

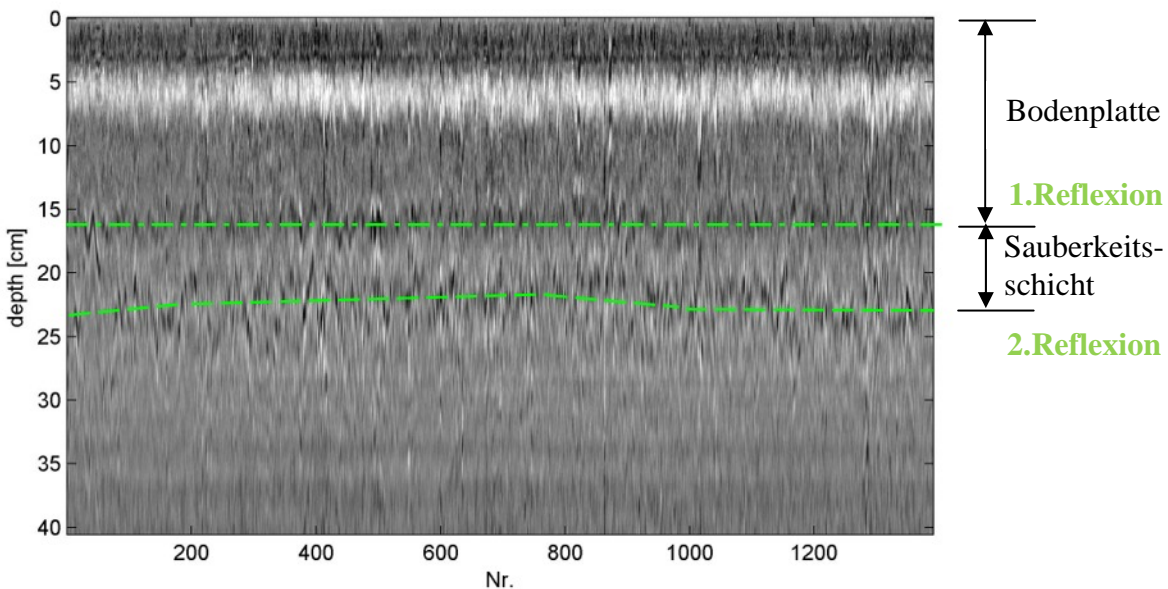


Abbildung 4: Pseudo-B-Bild mit zwei ermittelten Reflexionshorizonten bei der Dickenmessung [4]

Die o.g. Zusammenhänge wurden anhand von orientierend entnommenen Bohrkernen verifiziert (Abbildung 5). In situ vorgefunden wurde:

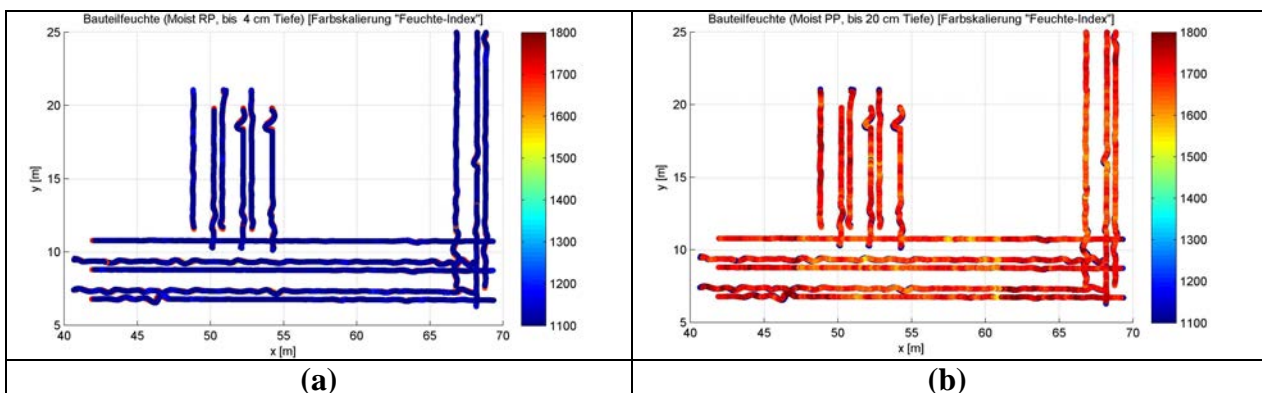
- fester homogener Verbund zwischen Bodenplatte und Sauberkeitsschicht
- schwacher Verbund zwischen den Schichten (Schlamm-anreicherungen)
- keinerlei Verbund zwischen Bodenplatte und Sauberkeitsschicht sowie

- keilförmig verlaufende Risse, Risswurzel überwiegend in der oberen, teilweise aber auch in der unteren Querschnittshälfte der Bodenplatte (abhängig von der Lage der Bewehrung)



**Abbildung 5:** Reflexionshorizonte des Ultraschall-Echos, dargestellt an den entnommenen Bohrkernen für die Fälle von schwachem (Bohrkern 1), fehlendem (Bohrkern 2) bzw. homogenem (Bohrkern 3) Verbund zwischen Bodenplatte und Sauberkeitsschicht sowie im Falle von gestörten Messungen bei sehr breiten Rissen (Bohrkern 4)

Die in Teilbereichen qualitativ („Feuchteindex“) ermittelte Feuchteverteilung des Betons der Tiefgaragensohle ist exemplarisch für einen Messabschnitt in Abbildung 6 dargestellt. Abbildung 6 a zeigt die gemessene Bauteilfeuchte bis in 4 cm Tiefe, d.h. im oberflächennahen Bereich der Tiefgaragensohle. Abbildung 6 b zeigt die Bauteilfeuchte bis in rd. 20 cm Tiefe, d.h. im unteren Randbereich der Sohle. Es ist offensichtlich, dass die Unterseite der Tiefgaragensohle zumindest zeitweise durch Grundwasser beaufschlagt wird. Wie die orientierend durchgeführte Bohrkernentnahme bestätigte, stand zum Zeitpunkt der Messung Grundwasser an der Tiefgaragensohle an (Abbildung 8a).



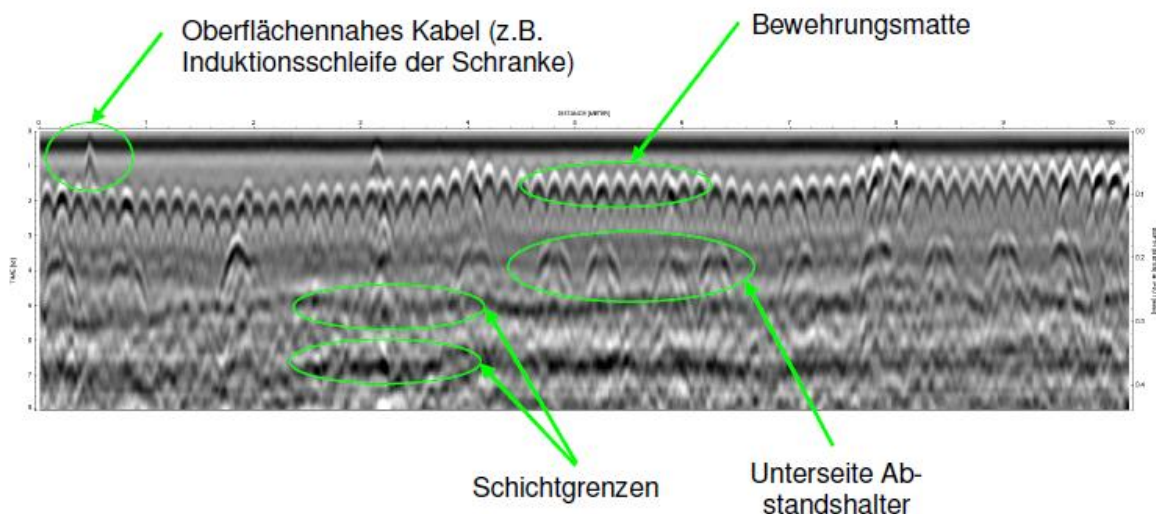
**Abbildung 6:** gemessener Feuchteindex als Maß für die Bauteilfeuchte bis in eine Tiefe von (a) 4cm und (b) 20 cm

### 3.2 Impulsradar

Die Auswertung der Radargramme zeigte, dass

- die Lage der Bewehrungsmatten
- die Unterkante der Abstandhalter der Bewehrung und
- teilweise einzelne Schichtgrenzen

durch Reflexionen geortet werden können. Beispielhaft wird dies an einer 10 m langen Messspur in Abbildung 7 gezeigt. Abbildung 7 zeigt einen Schnitt durch die Bodenplatte inklusive der Abstandhalter, die sich auch in dem Radargramm zeigten.



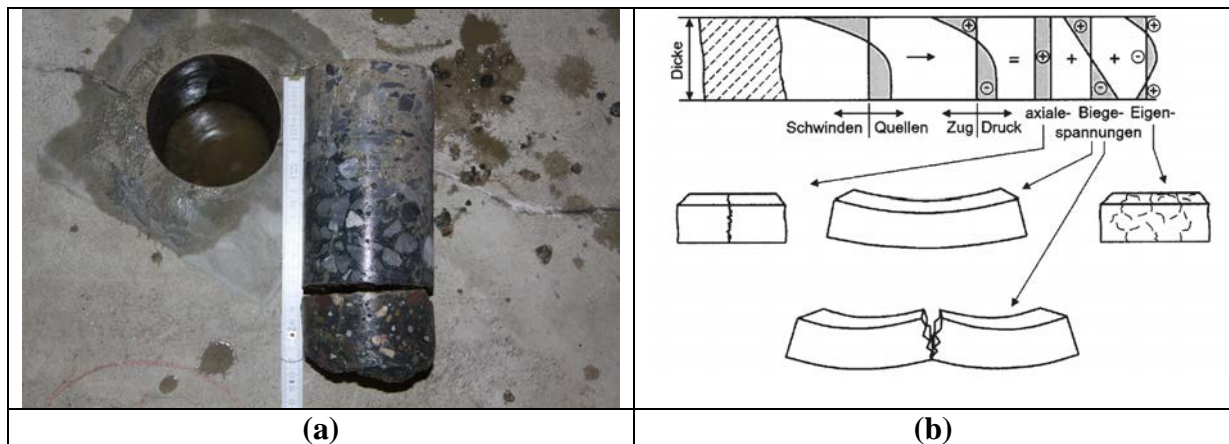
**Abbildung 7:** Radargramm der Bodenplatte (Messspur Länge 10 m; 1,5 GHz)

Die Schichtgrenze Platte/Sauberkeitsschicht war mit der geforderten Genauigkeit nur indirekt, nämlich durch die Reflexion der auf der Sauberkeitsschicht verlegten Abstandhalter der Bewehrung zu orten. Die durch die Lage der Abstandhalter ermittelte Dicke der Bodenplatte variierte im Bereich von 15 cm bis 20 cm. Diese Werte korrelierten gut mit den mit Ultraschall ermittelten Werten. Die Unterkante der Sauberkeitsschicht ließ sich nur in Teilbereichen orten. Unterhalb der Sauberkeitsschicht sind teilweise starke Reflexionshorizonte zu erkennen. Diese können durch Auffüllmaterial und/oder durch den Grundwasserstand verursacht sein.

Die Betonüberdeckung der Bewehrungsmatte wurde anhand der Laufzeit der Reflexion an der Bewehrung und mit Hilfe einer angenommenen mittleren Ausbreitungsgeschwindigkeit von 11 cm pro ns berechnet. Es war festzustellen, dass die Betondeckung der Bewehrungsmatten sehr stark variierte. Bei den Messungen wurden Werte von 2 cm bis 15 cm ermittelt. Dies bedeutete, dass die Bewehrung sich bereichsweise nicht in der planmäßigen Soll-Lage befand. Eine Beschränkung der Rissbreiten an der Bauteiloberfläche war in den betreffenden Bereichen nicht bzw. eingeschränkt gegeben, wodurch sich die teilweise sehr breiten keilförmigen Risse bilden konnten.

In der Zusammenfassung aller durchgeführter Messungen war festzustellen, dass die für den Lastabtrag erforderliche Mindestdicke der Bodenplatte eingehalten wurde. Mit den Ergebnissen der Feuchtegehaltsbestimmungen ließ sich nachweisen, dass eine unplanmäßige, jahreszeitlich veränderliche Beaufschlagung von Teilbereichen der Tiefgaragensohle durch Grundwasser zu zeitlich veränderlichem Schwinden und Quellen

des Betons führt. Dabei werden hygrische Spannungen in der Bodenplatte hervorgerufen, die ihrerseits wiederum zu Rissen führen können. Abbildung 8(b) typisiert die auftretenden Spannungskomponenten und die durch sie hervorgerufenen Rissbilder.



**Abbildung 8:** (a) nach Bohrkernentnahme anstehendes Grundwasser (b) Hygrische Spannungen im Beton

#### 4. Zusammenfassung

Um die Ursachen der Rissbildung in der Bodenplatte einer Tiefgarage festzustellen, wurde die Ist-Dicke der Bodenplatte mit automatisierten ZfPBau-Verfahren vollflächig gemessen. Zum Einsatz kamen Ultraschallmessungen mit dem BetoScan-System und parallel hierzu Messungen mit dem Radar-Impulsverfahren. Beide Messverfahren wiesen übereinstimmend nach, dass die für die Tragfähigkeit erforderliche Mindestdicke der Bodenplatte eingehalten wurde. Es zeigte sich, dass die Frage des Verbundes der Bodenplatte mit der darunter befindlichen Sauberkeitsschicht eine wichtige Rolle bei der Auswertung der Messdaten und der ingenieurmäßigen Bewertung spielt.

Eine großflächige zerstörungsfreie Bestimmung der Feuchte des Betons am luftseitigen und am baugrundseitigen Randbereich der Bodenplatte zeigte, dass es bereichsweise zu einem unplanmäßigen Andrang von Grundwasser unter der Bodenplatte kommt. Dies führt zu hygrischen Spannungen und entsprechender Rissbildung in der Tiefgaragensohle. Durch die Anwendung automatisierter ZfPBau-Verfahren konnten die für die Ursachenfindung und Massnahmenplanung relevanten Kennwerte im erforderlichen Umfang und wirtschaftlich ermittelt werden.

#### Referenzen

- [1] Reichling, K., Raupach, M., Wiggenhauser, H., Stoppel, M., Dobman, G., Kurz, J.: BETOSCAN – Robot controlled non-destructive diagnosis of reinforced concrete decks, Non-Destructive Testing in Civil Engineering, Nantes, France, 2009
- [2] Kind, T. und Maierhofer, C.: Das Impulsverfahren – ein Verfahren zur zerstörungsfreien Strukturaufklärung in Bauwerken, in: Cziesielski, E. (Hrsg.); Bauphysik-Kalender 2004, Berlin: Ernst und Sohn (2004) Kap.C1, 2 Strukturaufklärung, Abschn. 2.3, S.333-341
- [3] Merkblatt über das Radarverfahren zur zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen (B10), DGZfP Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung (2008)
- [4] Zoëga, A., Stoppel, M. und Feldmann, R.: Automatisierte Multisensorsysteme zur Zustandsbewertung, DGZfP Fachtagung Bauwerksdiagnose – Praktische Anwendungen Zerstörungsfreier Prüfungen und Zukunftsaufgaben, Berlin, Februar 2012