

Zerstörungsfreie Prüfungen im Zuge von Brückeninstandsetzungen

Michael WILLMES, Bilfinger Berger AG, Mannheim

Kurzfassung. Zerstörungsfreie Prüfungen finden bei Brückeninstandsetzungen zunehmend Anwendung und gewinnen dort an Bedeutung. Im vorliegenden Beitrag wird über die Anwendungsmöglichkeiten und Erfahrungen beim Einsatz von zerstörungsfreien Prüfungen im Zuge von Brückeninstandsetzungen berichtet. Anhand von Praxisbeispielen wird dargelegt, dass die zerstörungsfreien Prüfverfahren bereits bei der Bauwerksbegutachtung eine nutzbringende Ergänzung zu den konventionellen Untersuchungsmethoden darstellen und beispielsweise eine substanzschonende Probenahme ermöglichen. Die gewonnenen Daten präzisieren die Zustandsanalyse und geben anstehenden Instandsetzungen mehr Planungssicherheit. Bei der Ausführung von Instandsetzungsmaßnahmen trägt die präventive zerstörungsfreie Ortung von Spanngliedern im Vorfeld von Verankerungsbohrungen (z.B. für Arbeitsgerüste, Kappen, Ausgleichschichten oder Verstärkungsmaßnahmen) zum Schutz des bestehenden Bauwerks bei. Die Ausführung von Betondeckungs- und Potenzialfeldmessungen, ergänzt durch Chloridanalysen, ermöglicht eine klare Zustandsanalyse von Fahrbahntafeln und liefert die Basis für eine optimierte baubegleitende Instandsetzungsplanung. Zukünftige Aufgaben für Forscher, Anwender und Gerätehersteller werden die weitere Automatisierung der Messverfahren, die Kombination verschiedener Verfahren und die Entwicklung neuer Auswertemethoden, sowie deren Transfer in die Praxis sein. Hierdurch wird ein rationellerer Einsatz der zerstörungsfreien Prüfmethoden möglich und Qualität der Ergebnisse weiter verbessert.

1. Einführung

Der Großteil der ca. 38.000 Brücken im Bundesfernstraßennetz stammt aus den Jahren 1960 bis 1985 und ist mittlerweile zwischen 30 und 50 Jahren alt. Bedingt durch das Alter der Bauwerke, unzureichende Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen und zum Teil mangelnde Kenntnis über die eingesetzten Bauverfahren und Materialien hinsichtlich der Dauerhaftigkeit, werden zunehmend Schäden an den Bauwerken sichtbar. Weiterhin führt der wachsende Verkehr – insbesondere der überproportional ansteigende Güterverkehr – zu einer Beanspruchung, die oftmals weit über jener der ursprünglichen Planung liegt. Zur Zustands- und Schadenserfassung, sowie zur Bewertung der Brückenbauwerke, werden in regelmäßigen Abständen Bauwerksuntersuchungen durch erfahrene Bauwerksprüfingenieure durchgeführt. Sofern ein Schadensbild nicht eindeutig zuzuordnen ist, oder die Schadensursache unklar ist, werden weiterführende Untersuchungen entsprechend dem Leitfaden Objektbezogene Schadensanalyse (OSA-Leitfaden) durchgeführt. Hierbei finden zerstörungsfreie Prüfmethoden zunehmend Anwendung.

Für die Festlegung des erforderlichen Instandsetzungsbedarfs sowie zur Planung und Ausführung von Instandsetzungs- und Verstärkungsmaßnahmen liefern die zerstörungsfreien Prüfmethoden mittlerweile einen wichtigen Beitrag.

2. Zerstörungsfreie Prüfverfahren

Im Zuge von Brückeninstandsetzungen finden folgende zerstörungsfreie Prüfverfahren häufig Anwendung:

- Induktives Verfahren zur Betondeckungsmessung
- Radarverfahren
- Potenzialfeldverfahren
- Akustische Prüfverfahren wie z.B. Ultraschallecho

Auf eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Messverfahren kann an dieser Stelle nicht eingegangen werden. Stattdessen wird auf die sehr umfassenden Literaturstellen [1] und [2] verwiesen. Nachfolgend werden die einzelnen Verfahren kurz hinsichtlich dem physikalischen Grundprinzip und dem bevorzugten Einsatzzweck im Bereich der Brückeninstandsetzung vorgestellt.

Die klassischen Betondeckungsmessgeräte nutzen den Einfluss der Bewehrung als magnetischen Leiter auf die Induktivität einer- oder mehrerer Spulen, die im Prüfgerät angeordnet sind. Einen großen Einfluss auf die Genauigkeit der gemessenen Betondeckung haben Durchmesser- und Abstand der Bewehrungsstäbe. Eine Kalibrierung der Messergebnisse am Bauwerk ist stets zu empfehlen. Mit den konventionellen Geräten können Betondeckungen bis ca. 10 cm gemessen werden. Im Zuge von Brückeninstandsetzungen werden Betondeckungsmessungen häufig ausgeführt, um das Gefährdungspotential auf Bewehrungskorrosion abschätzen zu können. Dies erfolgt in der Regel begleitend zu Potenzialfeldmessungen oder der Ermittlung von Carbonatisierungstiefen und Chloridgehalten der Betonrandzone.

Das Radarverfahren ist ein elektromagnetisches Wellenverfahren bei dem der zeitliche Verlauf der Signalamplitude reflektierter, elektromagnetischer Impulse erfasst und ausgewertet wird. In Abhängigkeit von Antennenfrequenz und Bewehrungsgehalt sind in Stahlbetonbauteilen Tiefenreichweiten bis zu 80 cm möglich, übliche Untersuchungstiefen liegen bei 20-30 cm. Das Radarverfahren wird im Zuge von Brückeninstandsetzungen häufig zur Ortung von Spanngliedern eingesetzt, um diese bei Bohrarbeiten nicht zu beschädigen, oder Zwecks visueller Prüfung des Verpresszustandes bzw. zur Probenahme gezielt zu öffnen. Weiterhin ist mit dem Radarverfahren eine Ortung und Lageüberprüfung von Einbauteilen, wie z.B. Verdrängungsrohren möglich. In Kombination mit konventionellen magnetischen Ortungsverfahren ist mit dem Radarverfahren eine Zustandsbeurteilung von Betonfahrbahntafeln durch die Abdichtung und den Belag hindurch möglich. Diese Anwendung ist jedoch derzeit noch Gegenstand der Forschung.

Mit dem Potenzialfeldverfahren können Bereiche mit aktiver Bewehrungskorrosion lokalisiert werden. Dies erfolgt auf der Basis von Spannungsmessungen zwischen einer Bezugs Elektrode und der Bewehrung. Die Potenzialfeldmessungen werden üblicherweise an Brücken nach Abtrag der Abdichtung und des Belages flächig an den Betonoberflächen der Fahrbahnplatte ausgeführt. Eine begleitende Messung der Betondeckung und die Entnahme von Betonproben zur Chloridanalyse sind ebenso wie die Ausführung von Sondieröffnungen zur Auswertung der Potenzialfeldmessungen empfehlenswert.

Akustische Prüfverfahren wie das Ultraschallecho Verfahren werden an Brückenbauwerken zur Dickenbestimmung einseitig zugänglicher Bauteile und zur Überprüfung des Verpresszustandes von Hüllrohren eingesetzt. In Ausnahmefällen wird das Ultraschallecho-Verfahren auch zur Spanngliedortung eingesetzt. Beim Ultraschallecho wird der zeitliche Verlauf von reflektierten Ultraschallimpulsen erfasst und ausgewertet.

3. Anwendungsbeispiele

3.1 Bauwerksuntersuchungen / OSA

Zur Erstellung baustofftechnologischer Gutachten waren an zwei Talbrücken der A45 umfangreiche Untersuchungen durchzuführen. Das Gutachten bildete die Planungsgrundlage für Instandsetzungs- und Verstärkungsmaßnahmen. Es waren unter anderem über 300 Bohrkernentnahmen zur Bestimmung der Druckfestigkeit und der Chlorgehalte erforderlich. Die Bohrkernentnahmen waren aus der Fahrbahntafel und aus den Hohlkastenstegen zu entnehmen. Um eine Beschädigung der vorhandenen Spannglieder zu vermeiden, wurden an allen Kernbohrstellen zuvor die benachbarten Spannglieder mit Radar geortet. Zusätzlich wurden die schlaffen Bewehrungsseisen der oberen Bewehrung lokalisiert und ebenfalls auf der Bauteiloberfläche angezeichnet. Somit war eine substanzschonende Bohrkernentnahme möglich.

An zwei anderen Brückenbauwerken waren Risse im Asphaltbelag aufgetreten. Zur Ursachenfindung wurden Radarmessungen zur Ortung vorhandener Spannglieder und Verdrängungsrohre ausgeführt. Es kommt vor, dass sich Einbauteile wie Verdrängungsrohre oder auch Hüllrohre beim Betonieren in Folge mangelhafter Lagesicherung, verschieben.

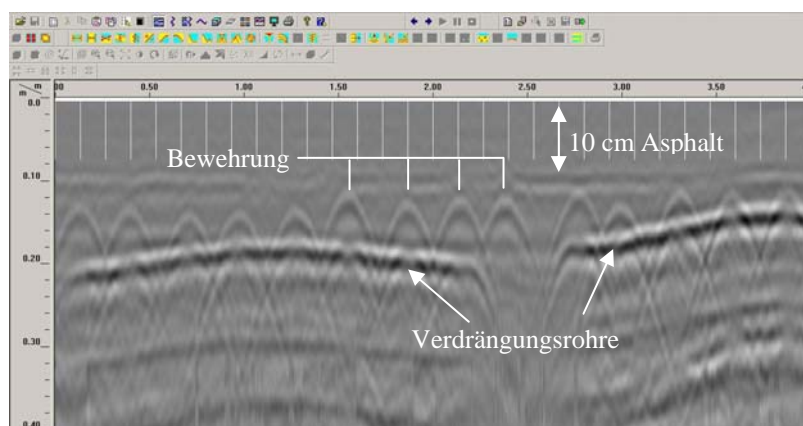


Abb. 1: Radargramm einer Messung im Bereich von Verdrängungsrohren

Zur Lagebestimmung der Verdrängungsrohre wurden zunächst Radarmessungen quer zu den Rohren ausgeführt, um deren genaue Lage zu ermitteln. Anschließend wurde die in Abb. 1 ausschnittsweise dargestellte Messung entlang der Verdrängungsrohre ausgeführt. Deutlich zu erkennen ist die stark schwankende Tiefenlage der Rohroberkante.

Von einer Brücke im Saarland lagen außer einer Übersichtszeichnung nur sehr wenige Angaben zur konstruktiven Durchbildung und den verwendeten Baustoffen vor. In den Bauwerksakten konnte man nachlesen, dass die Brücke in Quer- und in Längsrichtung vorgespannt worden war. Da es Verdachtsmomente auf die Verwendung von spannungsrisseempfindlichem Spannstahl gab, wurden umfangreiche Bauwerksuntersuchungen angeordnet. Es wurden unter anderem Radarmessungen zur Ortung der Spannbewehrung durchgeführt. Die Messungen an den Bogenscheiben ergaben ein klares Bild der Spanngliederführung (vgl. Abb. 2)

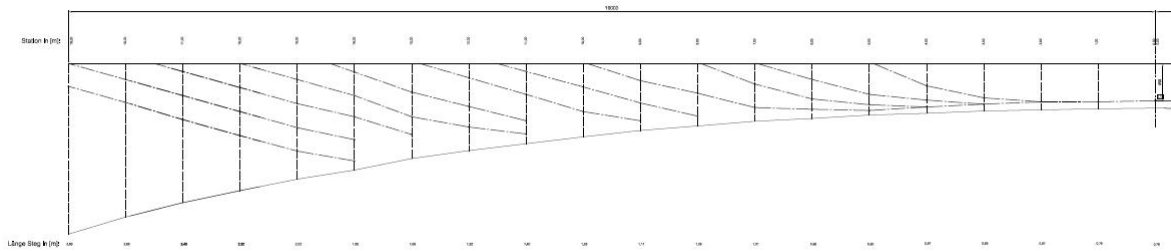


Abb. 2: Mit dem Radarverfahren ermittelter Spanngliedverlauf in den Bogenscheiben

Zur Überprüfung des Verpresszustandes wurden die Hüllrohre der Längsspannglieder in den Bogenscheiben und der Querspannglieder in der Fahrbahnplatte angebohrt und endoskopiert. Zahlreiche Querspannglieder wiesen einen unzureichenden Verfüllgrad der Hüllrohre auf und mussten saniert werden. Zur Klärung der Spannungsriss-Neigung des Spannstahls der Längsspannglieder wurden Proben für detaillierte Materialuntersuchungen entnommen.

An der Europabrücke in Frankfurt / Main wurden ebenfalls Radarmessungen zur Spanngliedortung durchgeführt, um durch Anbohren der Hüllrohre eine visuelle Überprüfung des Verfüllgrades zu ermöglichen. Die Untersuchungen umfassten die Längsspannglieder in der Bodenplatte, den Stegen und der Decke des Hohlkastens. Weiterhin die Schubnadeln in den Stegen und Stützenquerträgern sowie die Querspannglieder in den Stützenquerträgern und der Decke des Hohlkastens. Der Großteil der Hüllrohre konnte mit dem Radarverfahren geortet und zielsicher angebohrt werden. Es gab jedoch auch einzelne Bereiche, in denen aufgrund der Bewehrungsanordnung die Spanngliedortung deutlich erschwert und zum Teil auch unmöglich war. In der Bodenplatte lagen die Längsspannglieder sehr oberflächennah und teilweise direkt unter den schlaffen Bewehrungsseisen. Hierdurch war die Ortung erschwert, konnte jedoch mit einer sehr hochfrequenten Antenne (2,6 GHz) ermöglicht werden. In der Decke des Hohlkastens verliefen die achsnahen Längsspannglieder zur Stütze hin trichterförmig zusammen und wiesen dort lediglich noch einen Achsabstand von 16 cm, bzw. einen lichten Abstand von 6 cm zwischen den Hüllrohren auf. Die Ortung der Querspannglieder, die hinter der Längsvorspannung verliefen, war etwa nur bis zu einem lichten Abstand der Längshüllrohre von 7-8 cm möglich. Dies stellt in etwa auch den Grenzabstand von schlaffer Bewehrung dar, hinter der noch Spannglieder geortet werden können.

3.2 Instandhaltung / Grundhafte Erneuerung

Die einzelnen Teilbauwerke einer Brücke unterliegen unterschiedlichen Beanspruchungen und müssen daher hinsichtlich ihrer Lebensdauer und dem Instandhaltungsaufwand getrennt betrachtet werden. Häufig findet man eine grobe Unterteilung in Unterbau, Überbau und Verschleißbauteile wie z.B. Kappen, Belag, Abdichtung, und Übergangskonstruktionen. Diese Verschleißteile einer Brücke müssen während des Lebenszyklus instandgesetzt und erneuert werden. Häufig werden nach 15-25 Jahren sogenannte „Grundhafte Erneuerungen“ ausgeführt, bei denen Überbauten bis auf den Rohbauzustand rückgebaut und anschließend alle Verschleißbauteile erneuert werden.

Vor dem Abbruch der alten Brückenkappen müssen entlang der Brückenkrägarne Schutz- und Arbeitsgerüste installiert werden. Diese werden üblicherweise im Abstand von ca. 80 cm von unten in die bestehenden Brückenkrägarne verankert. Damit im Zuge der Instandhaltungsarbeiten die bestehende Bausubstanz nicht noch zusätzlich geschädigt wird, werden im Vorfeld der Bohrarbeiten zur Anbringung der Schutz- und Arbeitsgerüste die

Querspannglieder an der Kragarmunterseite mit dem Radarverfahren zerstörungsfrei geortet. Dies erfolgt üblicherweise von fahrbaren Hängegerüsten, unter Zuhilfenahme von Hubsteigern oder von Brückenuntersichtgeräten aus. Eine Ortung der Querspannglieder durch die bestehende Kappe hindurch ist üblicherweise aufgrund der schlaffen Bewehrung in der Kappe nicht möglich. Eine Ortung von der Fahrbahntafel aus, durch den Belag hindurch ist möglich, sofern in der Abdichtungsebene keine Metallkaschierungen verlegt sind und der Anteil an schlaffer Bewehrung dies zulässt.

An einer Brücke wurden beim Abbruch der alten Kappen die Spannköpfe der Querspannglieder beschädigt. Die Spannköpfe standen über das Kragarmende hinaus und wurden durch einen Sägeschnitt, der entlang des planmäßigen Kragarmendes geführt wurde, teilweise beschädigt. Es konnte rechnerisch nachgewiesen werden, dass die auftretenden Beanspruchungen selbst bei komplettem Ausfall des Spannkopfes allein über die Verbundwirkung zwischen Spannglied und Kragarmbeton aufgenommen bzw. übertragen werden können. Zur Überprüfung des Verpresszustandes der Hüllrohre wurden Radar- und Ultraschallmessungen ausgeführt. Zunächst wurde die genaue Lage der Spannglieder mit dem Radarverfahren bestimmt und an der Betonoberfläche markiert. Anschließend wurden Ultraschallmessungen mit unterschiedlichen Polarisationsrichtungen von der Kragarmoberseite und -unterseite aus im 2 cm Raster durchgeführt. Untersuchungen der BAM und eigene Versuche haben gezeigt, dass sich Verpressfehler in Hüllrohren durch unterschiedliche Indikatoren (Reflexionsintensität, Phasensprung, Tiefe, Rückwandreflexion) lokalisieren lassen. Die beschriebenen Bauwerksmessungen ergaben keine derartigen Verdachtsmomente auf unverpresste Bereiche.

Durch Schäden in der Abdichtung kann es zu einer Chloridkontamination des Überbaubetons im Bereich der Fahrbahntafel kommen. Nach dem Entfernen des Belages und der Abdichtung sollten daher zeitnah Untersuchungen zur Festlegung der weiteren Instandsetzungsmaßnahmen stattfinden. Hier können zerstörungsfreie Betondeckungsmessungen und Potentialfeldmessungen in Verbindung mit Bohrmehlentnahmen zwecks Chloridanalyse einen wertvollen Beitrag liefern.

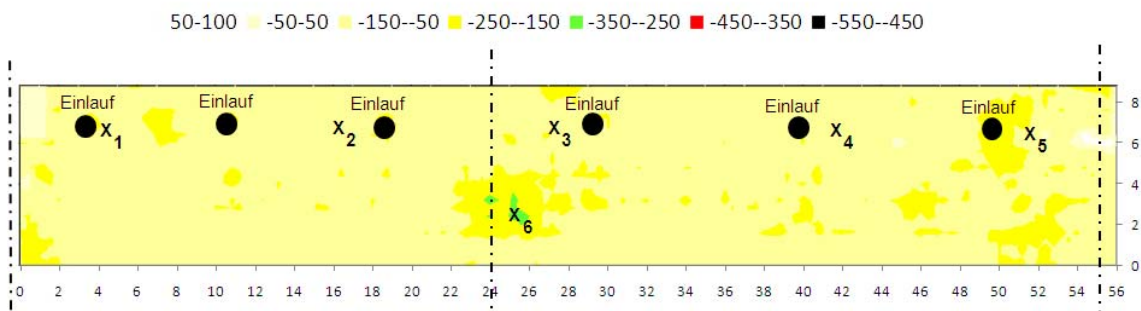


Abb. 3: Ergebnisdarstellung der Potentialfeldmessung mit Bohrmehlentnahmestellen (x_n)

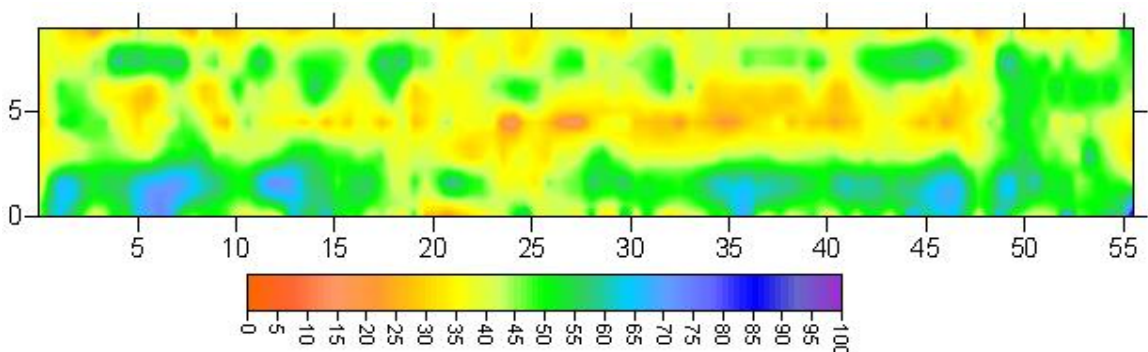


Abb. 4: Ergebnisdarstellung der Betondeckungsmessung

In den Abbildungen 3 und 4 sind beispielhaft die Ergebnisse der Potenzialfeldmessungen und der Betondeckungsmessungen eines Bauabschnittes der Odenwaldbrücke Wertheim dargestellt. Die Potentialfeldmessungen wiesen lediglich in der Mitte des Bauabschnittes (x_6) geringe Verdachtsmomente auf Bewehrungskorrosion hin. Daher wurden dort zusätzliche Bohrmehlproben entnommen und die obere Bewehrung zur visuellen Überprüfung freigelegt. Der Chloridgehalt des Betons war dort leicht erhöht, aber unkritisch ($<0,20M\%$). Die Bewehrung wies keinerlei Korrosion auf. Alle anderen Bohrmehlproben wurden im Bereich der Einläufe entnommen, da dort die Wahrscheinlichkeit einer Chloridkontamination i.d.R. am Höchsten ist. Lediglich an einer Stelle wurden oberflächennah kritische Chloridgehalte festgestellt. Abbildung 4 zeigt die flächenhafte Darstellung der Betondeckungen. Entlang der Längsachse des Bauabschnittes wurden in Teilbereichen Betondeckungen unter 30 mm ermittelt. Da die Betonrandzone keinerlei Schäden aufwies und eine Chloridkontamination in dem Bereich ausgeschlossen werden konnte, waren dort keine zusätzlichen Instandsetzungen erforderlich.

Analog zu den Ortungen der Querspannglieder an den Kragarmunterseiten vor Ausführung von Verankerungsbohrungen für Arbeitsgerüste, ist die Lokalisierung der Querspannglieder an der Oberseite der Kragarme vor Ausführung der Bohrungen für die Telleranker der neuen Kappen sinnvoll. In Abb. 5 ist exemplarisch ein Radargramm einer solchen Messaufgabe dargestellt.

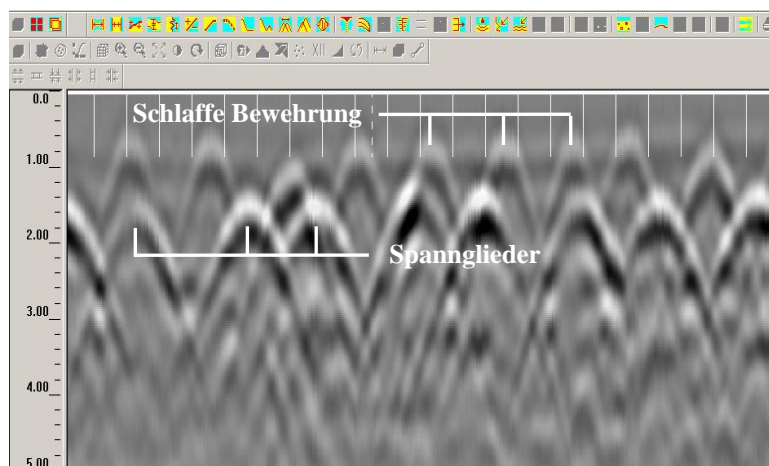


Abb. 5: Radargramm einer Messung an der Kragarmoberseite einer Brücke

Zur Ortung der Spannglieder war an dieser Brücke die Ausführung eines Suchschlitzes mittels Höchstdruckwasserstrahl ausgeschrieben. Die zerstörungsfreie Ortung mit Radar stellte in diesem Beispiel die technisch und wirtschaftlich sinnvollere Lösung dar.

3.3 Verstärkungsmaßnahmen

Bei der Ausführung von externer Vorspannung an Brücken müssen die Vorspannkkräfte über Anker und Querspannstäbe in die bestehende Konstruktion eingeleitet werden. Hierzu ist es erforderlich Bohrungen für Anker und Kernbohrungen für Querspannstäbe in Hohlkastenstegen auszuführen. Weiterhin müssen die externen Spannglieder durch Stützenquerträger hindurch geführt werden.

An der Salzachtalbrücke waren im Bereich der Endverankerungen Kernbohrungen durch die Hohlkastenstege auszuführen. Weiterhin erfolgten Kernbohrungen durch die Stützenquerträger und Verdübelungen der Umlenkstellen in die Feldquerträger. Im Bereich der Endverankerungen und in den Feldquerträgern konnte die Ortung der vorhandenen Spannglieder problemlos mit dem Radarverfahren erfolgen. In den Stützenquerträgern

erforderte es aufgrund des hohen Anteils an schlaffer Bewehrung deutlich mehr Aufwand den Verlauf der vorhandenen Spannglieder zweifelsfrei zu ermitteln.

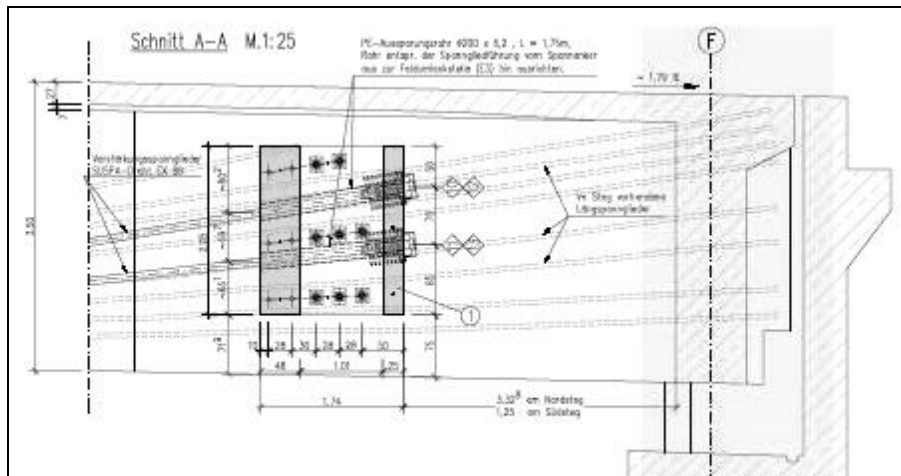


Abb. 5: Schnitt durch die Endverankerung mit Darstellung der vorhandenen Längsspannglieder

Zur Erhöhung der Schubtragfähigkeit von Brückenüberbauten werden Stahllaschen auf die Betonoberfläche aufgeklebt und verankert. Zur Verankerung müssen Kernbohrungen durch die Fahrbahnplatte hindurch ausgeführt werden. Auch hier kann die Lage der Querspannglieder mit dem Radarverfahren zerstörungsfrei ermittelt werden. Üblicherweise ist jedoch im Übergang vom Steg in die Fahrbahnplatte eine sehr dichte Bewehrung vorhanden. Hierdurch kann es erforderlich sein die Messungen etwas außerhalb des Stegbereiches auszuführen.

3.4 Rückbau

Beim Rückbau der Brücke über den Neckarkanal in Mannheim sollte der Stahlbetonbogen in Längsrichtung in ca. 2 m breite Streifen zersägt werden. Über spezielle Aushebekonstruktionen sollten die einzelnen Scheiben dann nach und nach entfernt werden. Zum Anbringen der Aushebekonstruktionen waren jeweils Kernbohrungen durch den 90 cm starken Stahlbetonbogen auszuführen. Da dieser ohnehin schon sehr schwach bewehrt war, durften keine Längsbewehrungsseisen beschädigt werden. Es wurden Radarmessungen von der Oberseite des Bogens aus durchgeführt.

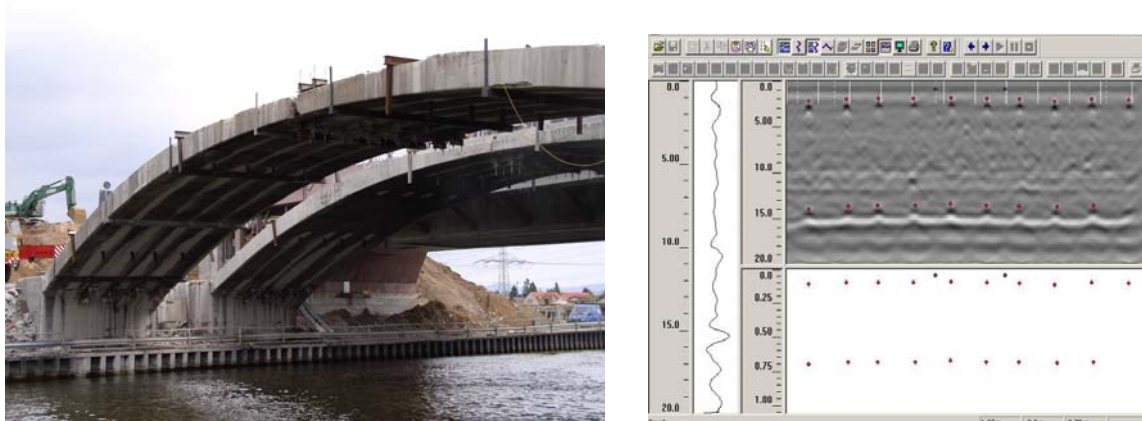


Abb. 6: Brücke über den Neckarkanal, Mannheim

Aufgrund des geringen Bewehrungsgehaltes war es möglich auch die Bewehrung auf der Unterseite des Bogens zu lokalisieren. Es stellte sich heraus, dass das vorgesehene Rückbaukonzept nicht mit ausreichender Sicherheit durchführbar war, da nachweislich zu viele Bewehrungsseile durchtrennt worden wären. Die Angriffspunkte der Aushebekonstruktion wurden auf Basis der Ergebnisse der Radarmessungen verschoben und der Rückbau des Brückenbogens konnte ohne Schwierigkeiten erfolgen.

Zusammenfassung und Ausblick

Zerstörungsfreie Prüfungen finden bei Brückeninstandsetzungen zunehmend Anwendung und gewinnen dort an Bedeutung. Bei der Bauwerksprüfung stellen sie eine sinnvolle Ergänzung zu den konventionellen Untersuchungsmethoden dar. Der schlechte Zustand einiger Brücken, die fehlenden finanziellen Mittel für einen Neubau, oder die langen Planungs- und Genehmigungszeiten für einen kompletten Neubau, erfordern zum Teil sehr kurzfristige Notinstandsetzungs- und Verstärkungsmaßnahmen. Um diese technisch- und wirtschaftlich optimiert planen und ausführen zu können, werden zerstörungsfreie Prüfverfahren bei Bauwerksuntersuchungen und begleitend zur Ausführung nutzbringend eingesetzt. Die gewonnenen Daten präzisieren die Zustandsanalyse und geben anstehenden Instandsetzungen mehr Planungssicherheit.

Im Rahmen von Objektbezogenen Schadensanalysen können die zerstörungsfreien Prüfverfahren z.B. durch Lokalisierung von Spanngliedern und Verdrängungsrohren zur Ermittlung von Schadensursachen herangezogen werden. Weiterführende Untersuchungen, wie z.B. detaillierte zerstörungsfreie Prüfungen, gezieltes Öffnen in Verbindung mit Endoskopie oder substanzschonende Probenahmen werden durch vorherige zerstörungsfreie Ortung von Konstruktionselementen oder Einbauteilen ermöglicht.

Bei der Ausführung von Instandsetzungsmaßnahmen trägt die präventive zerstörungsfreie Ortung von Spanngliedern im Vorfeld von Verankerungsbohrungen (z.B. für Arbeitsgerüste, Kappen, Ausgleichschichten oder Verstärkungsmaßnahmen) zum Schutz des bestehenden Bauwerks bei. Die Anwendung der zerstörungsfreien Prüfverfahren stellt hier zum Großteil auch einen wirtschaftlichen Vorteil gegenüber der konventioneller Vorgehensweise, wie z.B. das Anlegen von Suchschlitzen oder Verwendung von Bohrgeräten mit spezieller Abschaltautomatik, dar.

Die Ausführung von Betondeckungs- und Potenzialfeldmessungen, ergänzt durch Chloridanalysen, ermöglicht eine klare Zustandsanalyse von Fahrbahntafeln und liefert die Basis für eine optimierte baubegleitende Instandsetzungsplanung.

Zukünftige Aufgaben für Forscher, Anwender und Gerätehersteller werden die weitere Automatisierung der Messverfahren, die Kombination verschiedener Verfahren und die Entwicklung neuer Auswertemethoden, sowie deren Transfer in die Praxis sein. Hierdurch wird ein rationellerer Einsatz der zerstörungsfreien Prüfmethoden möglich und Qualität der Ergebnisse weiter verbessert.

Referenzen

- [1] Reinhardt et al.: Echo-Verfahren in der zerstörungsfreien Zustandsuntersuchung von Betonbauteilen; Betonkalender 2007, S. 481-595; Verlag Ernst & Sohn, Berlin
- [2] Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung DGZFP; Merkblattsammlung