

Zustandsanalyse von Spanngliedern in Spannbetonbauwerken

Bernd HILLEMEIER, Ingenieure für das Bauwesen Prof. Hillemeier & Knapp GmbH
(Potsdamer Str. 23/23, 14163 Berlin)

Kurzfassung. Spannbeton bei Hallenkonstruktionen, Brücken und Tankbehältern wird zerstörungsfrei mit dem Remanenzmagnetismus-Verfahren auf Spannstahlbrüche bis zu einer Tiefe von 30 cm gemessen. Das Verfahren lokalisiert die Lage der Spannglieder ohne separates Einmessen. Brüche werden während der Messung in einem grau skalierten Bild dargestellt. Querspannglieder in Brücken und Parkdecks werden mit einem selbstfahrenden Großmagneten in Schrittgeschwindigkeit messtechnisch abgefahren. Das Magnetverfahren wurde an der Lehigh-University in USA mit bestem Ergebnis evaluiert [11] [13].

1 Einführung

Die Pflege vorhandener Bausubstanz ist ökonomisch so bedeutsam, dass ihre Nichtbeachtung zu volkswirtschaftlichen Schäden ungeahnten Ausmaßes führen kann.

Der Beitrag beschreibt den Stand des Verfahrens der Spannstahlbruchortung, beispielhaft bei der Überprüfung von Dächern, Hallen, Brücken und Tankbehältern aus Spannbeton.

Ein neues Prüfverfahren durchläuft vier charakteristische Entwicklungsstufen. Stufe eins bedeutet bei Spannbetonkonstruktionen die Detektion gebrochener Spannglieder. Nach anfänglicher Freude, dass das neue Messverfahren im Labormaßstab funktioniert, folgt Stufe zwei, die Datenauswertung. Sie muss beschleunigt und die Gerätschaft praxistauglich werden. An dritter Stelle folgt das Personalproblem. Ideal wäre ein Bauingenieur mit Kenntnissen in Physik, Mathematik, Elektrotechnik und Computersoftware. Je besser das Verfahren dann funktioniert, umso unterforderter ist der Fachmann. In Stufe 4 wächst der Wunsch nach Steigerung der Geschwindigkeit zwecks Senkung der Kosten.

Der genutzte physikalische Effekt des Bruchdetektionsverfahrens ist der magnetische Streufluss. Das Verfahren nutzt dazu das remanente und das aktive Magnetfeld und wird in den Veröffentlichungen [5] bis [8] beschrieben.

Den Bedarf an dem Einsatz zerstörungsfreier Prüfverfahren steigern die von der Bauministerkonferenz (BMK) der Länder 2006 verabschiedeten „Hinweise für die Überprüfung der Standsicherheit von baulichen Anlagen durch den Eigentümer / Verfügungs-berechtigten“. Danach sind die zu überprüfenden Bauwerke Versammlungsstätten für mehr als 5000 Personen, bauliche Anlagen mit über 60 m Höhe, Gebäude mit Stützweiten über 12 m und Auskragungen über 6 m sowie großflächige Überdachungen oder exponierte Bauteile von Gebäuden mit besonderem Gefährdungspotential, wie Fernsehtürme, Hochhäuser, Hallenbäder, Einkaufsmärkte, Mehrzweckhallen, Kinos, Theater und Schulen.

Die folgenden Beispiele zeigen das Verfahren der Spannstahlbruchortung in den Stufen bis zu dem heutigen Stand.

2 Das Messen auf Dächern

Die Dachkonstruktion einer Sporthalle bestand aus 23 VT-Falten mit 16 m Stützweite. In den Untergurten der VT-Falten lagen 8 Spanndrähte. Zunächst wurde die Magneteinheit auf der Oberseite des Dachs über die Projektion der Spanndrähte geführt, anschließend die Sensoreinheit. Bei dem Spannstaahl handelte es sich um einen St 1400/1600 (oval, schräg gerippt, $A = 50 \text{ mm}^2$). In zwei Tagen wurden 7 Stück VT-Falten auf Spanndrahtbrüche untersucht. Die Daten wurden auf einem Rechner wegabhängig als magnetischer Streufluss in MilliTesla abgespeichert. Die Auswertung geschah zusammen mit der Ausfertigung des Untersuchungsberichts.



Bild 1. Messen von VT-Falten. Zunächst wurde die Magneteinheit auf der Oberseite des Dachs über die Projektion der Spanndrähte geführt, anschließend wurde wie im Bild gezeigt die Sensoreinheit über die Oberfläche geführt. Das zu einer integrierten Magnetisier- und Messeinheit weiterentwickelte Gerät zeigen die Bilder 2 bis 4.

3 Das Messen in Hallen

Die Dachkonstruktion einer Mehrzweckhalle, Baujahr 1971, bestand aus 8 vorgespannten Dachbindern in Form von Hyparschalen (HP-Schalen). Ein lasergestütztes Überwachungssystem ließ aufgrund gemessener Durchbiegungen vermuten, dass Spannstähe des Typs ST 1500/1700 gerissen sein könnten. Die 18 m langen, 2,70 m breiten und 10 cm dicken Schalen waren mit 30 Spanndrähten, die in zwei Spannbändern zu je 15 Drähten sich in der Mitte überkreuzten, vorgespannt. Der Durchmesser der Spanndrähte war 7,5 mm, ihr Abstand 30 mm. Die schwierigste Aufgabe war, das Messsystem an den gekrümmten Deckenträgern im engen Kontakt zur Oberfläche zu führen, Bild 2, links. Bildgebend werden die magnetischen Streuflüsse dargestellt, Bild 2, rechts. Der Wechsel des magnetischen Nordpols zum magnetischen Südpol an einer vermeintlichen Bruchstelle zeigt sich in einem scharfen Schwarzweiß-Übergang. Die spitze Ausprägung der Maxima der Pole zeigt jedoch, dass es sich nicht um einen Bruch handeln konnte. Ein kleines Metallstück, das bei der Herstellung des Fertigteilträgers auf der Schalung gelegen hatte, erzeugte den scharfen Peak.

In Schwimmhallen können die in der Atmosphäre aus der Desinfektion stammenden Chloride für Spannstähe kritisch werden. Ein unter Denkmalschutz stehendes Bauwerk aus dem Jahr 1969 sollte untersucht werden, obwohl keine Schäden zu erkennen waren. Voraussetzung für die Renovierung war eine vorher nachzuweisende Unversehrtheit der Spannbetonbinder. Der zeitaufwändige Umbau der Hilfskonstruktion von Binder zu Binder beschränkte die Messleistung, Bild 3. In Abstimmung mit dem Tragwerkplaner wurde nach

einer statistischen Auswahlmethode vorgegangen. Die Messung begann an den optisch auffälligsten Bindern. Werden keine Brüche nachgewiesen, erhöht sich mit jedem Binder die Wahrscheinlichkeit, dass auch die übrigen Binder nicht geschädigt sind. Selten wird deswegen eine Konstruktion vollständig gemessen.

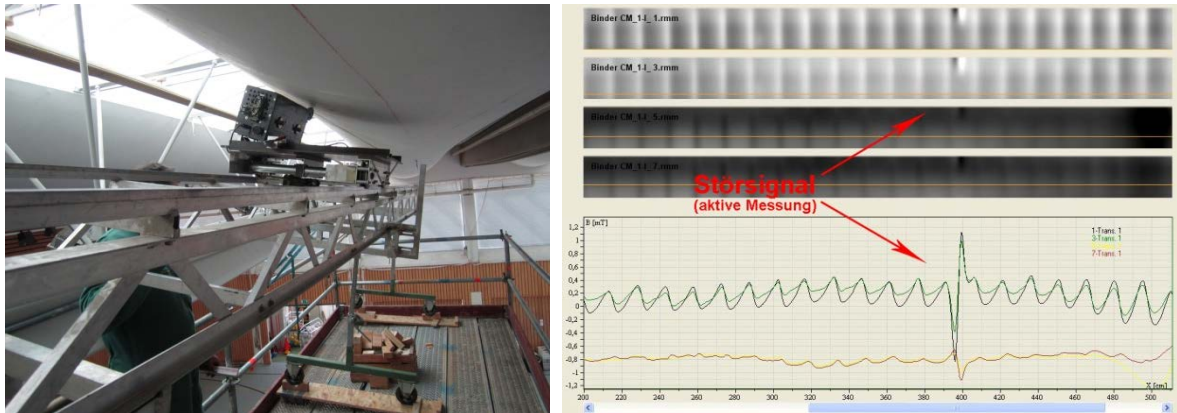


Bild 2. Links: Messsystem an den gekrümmten Deckenträgern (HP-Schalen) im engen Kontakt zur Oberfläche. Rechts: Bildgebend werden im oberen hell/dunkel-Band die magnetischen Streuflüsse dargestellt. Die spitze Ausprägung der Maxima zeigt, dass es sich nicht um einen Bruch handelt. Ein Metallstück wurde detektiert.



Bild 3. In Schwimmhallen können die in der Atmosphäre aus der Desinfektion stammenden Chloride für Spannstähle kritisch werden. Im Bild sind Magnet und Sensoreinheit auf einer Leichtmetallkonstruktion zur Messung des Binderuntergurts.

4 Das Messen von Spannbetonbrücken

4.1 Brücken in Deutschland

Von den etwa 35.000 Brücken in Deutschland sind ca. 70 % Spannbetonbrücken. Ihre Überwachung und Prüfung sind in der DIN 1076 "Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen, Überwachung und Prüfung" geregelt. Die Prüfzyklen sind 3 Jahre für die einfachen Prüfungen (EP) und 6 Jahre für die Hauptprüfungen (HP). Für die Standsicherheit entscheidend ist der Zustand der einbetonierten Spannglieder. Ihre Prüfung zählt zu den Sonderprüfungen (SP). Das Alter, die Spannstahlart oder eine erweiterte Nutzung der Brücke zählen zu Sonderanlässen, die Spannstähle zu untersuchen [14].

Gefährdeter als die Längsspannglieder sind die Querspannglieder einer Brücke. Sie verlaufen orthogonal zur Fahrtrichtung und relativ nah an der Oberfläche der Fahrbahntafel. Sie reichen über die Fahrbahnen seitlich hinaus und verankern die Schrammborde und Außenleitplanken, auf die bei Unfällen hohe Anpralllasten auftreffen. Die messtechnische Besonderheit bei den Längsspanngliedern ist, dass die Spanndrähte innerhalb eines metallischen Hüllrohrs hinter der Stahlbetonbewehrung geführt sind. Das Bild 4 zeigt die Anordnung der Führungsschiene, die dem parabelförmigen Verlauf des Spannglieds folgt.



Bild 4. Die typische Arbeitsweise an einem Spannbeton-Brückenträger ist das Magnetisieren entlang des parabelförmig verlaufenden Spannglieds mit der gleichzeitigen Messung der magnetischen Flussdichte im aktiven Feld und/oder mit einer zusätzlichen Messung im remanenten, das heißt bleibenden Feld.

Herausfordernd wegen der zu erbringenden Messleistung ist die Messung der Querspannglieder.

Bei den ersten Einsätzen auf Brücken wurden Magnet und Sensoreinheit in der gleichen Weise über die Spannglieder wie bei den Bindern geführt. Zuvor musste die Lage der Querspannglieder mit der Radartechnik geortet werden. Wegen des Zeitaufwands und wegen der Kosten beschränkte man sich auf ein punktuelles Prüfen [7]. Messungen mit der Potenzialmessmethode haben gezeigt, dass Brückentafeln meist bereichsweise schadhaft sind. Die Messung zufällig herausgegriffener Querspannglieder ist daher wenig informativ. Um sämtliche Querspannglieder zu erfassen, waren die Messgeschwindigkeit zu steigern und das Messsystem weiterzuentwickeln. Die Bilder 6 und 7 zeigen das heute vorliegende Resultat.

Es wurde ein selbstfahrender Magnetwagen mit Sensoreinheit gebaut. Der an der TU Berlin entwickelte Magnetwagen mit elektrohydraulischem Antrieb ist mit 3,50 m Breite auf eine Fahrbahnbreite abgestimmt, Bild 6. Die Fahrgeschwindigkeit richtet sich nach der Arbeitsvorbereitung auf der Brücke und kann bis zu 5 km/h betragen [8].

Die vom IZFP in Saarbrücken entwickelte Sensoreinheit wird hinter dem Magnetwagen mitgeführt und besteht aus einem Rotorscan mit 2 Umdrehungen pro Sekunde, an dessen Enden 5 Hallsensoren pro Rotationsarm eingebaut sind mit einem Auflösungsvermögen von $1\mu\text{T}$ bei 1 cm^2 Ortsauflösung [8]. 1.250 Spanngliedabschnitte pro Stunde oder 4.000 m^2 Verkehrsfläche pro Nacht können messtechnisch erfasst werden. Eine vorausgehende Lageermittlung der Spannglieder mit Georadar ist nicht erforderlich, da sie im Auswertungsprogramm automatisch magnetisch erkannt werden [10].

4.2 Kritische Spannstähle

Der bis 1965 hergestellte ölschlussvergütete Spannstahl ist empfindlich gegenüber Spannungsrissskorrosion. Deshalb wurde vom BMV im Jahr 1993 die Richtlinie „Empfehlung zur Überprüfung und Beurteilung von Brückenbauwerken, die mit vergütetem Spannstahl St145/160 Neptun N40 bis 1965 erstellt wurden“ herausgegeben [1]. Diese Empfehlungen wurden 2002 zunächst auf Sigma-Oval-Spannstähle der Produktion bis 1978 [2] und später auch auf die vergüteten Spannstähle aus dem Werk Hennigsdorf ausgeweitet [3].

Für Brücken berechnet man auf probabilistischer Grundlage die Wahrscheinlichkeit des Versagens ohne Ankündigung durch Reißen von Spanngliedern [4].

Die probabilistische Abschätzung des Gefährdungspotenzials ist sinnvoll. Eine zerstörungsfreie Untersuchung des Zustands der Spannglieder in einer Spannbetonkonstruktion erhöht aber die probabilistische Aussagesicherheit erheblich.

Schnell, zerstörungsfrei und ohne dass Spannstahlproben entnommen werden müssen, kann das Remanenzmagnetismus-Verfahren nachweisen, falls Brüche vorhanden sind, in welcher Zahl und flächigen Verteilung sie auftreten.

4.3 Das Remanenzmagnetismus Verfahren zur zerstörungsfreien Ortung von Spannstahlbrüchen

Das Verfahren nutzt die ferromagnetischen Eigenschaften des Spannstahls [5, 6, 8]. Das zu untersuchende Spannglied wird von der Betonoberfläche aus remanent magnetisiert. An Bruchstellen einzelner Spanndrähte bilden sich magnetische Streufelder, wie sie auch an Bruchstellen gebrochener Stabmagneten entstehen (Dipolbildung an der Bruchstelle), Bild 2 links.

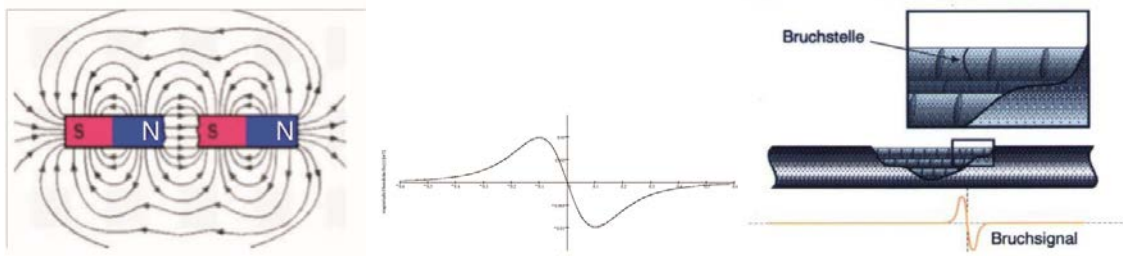


Bild 5. Das magnetische Streufeld an Spannstahlbrüchen ähnelt dem Streufeld an einem gebrochenen Stabmagneten (links). An der Bruchstelle liegen sich eng benachbart ein magnetischer Nordpol (N) und ein magnetischer Südpol (S) gegenüber. Das Messsignal zeigt einen charakteristischen Verlauf, wie er im Bild Mitte berechnet [12] und rechts in einem Hüllrohr gemessen dargestellt ist. Zwischen den beiden Polen (Extremwerten) befindet sich der Wendepunkt des Signalverlaufs, der exakt die Mitte der Bruchstelle anzeigt.

Der Schädigungsgrad eines Spannglieds wird anhand der Parameter Betondeckung, Spannstahlart und Stärke des Signals abgeschätzt. Zur Steigerung der Robustheit wurde ein neues System der Datenerfassung entwickelt. Das Bild 6 zeigt den neuartigen Linienscanner hinter dem Großmagneten auf einer Autobahnbrücke in Deutschland.



Bild 6. Messen der Querspannglieder mit dem 3 m breiten Linienscanner hinter dem Großmagneten auf einer Autobahnbrücke.

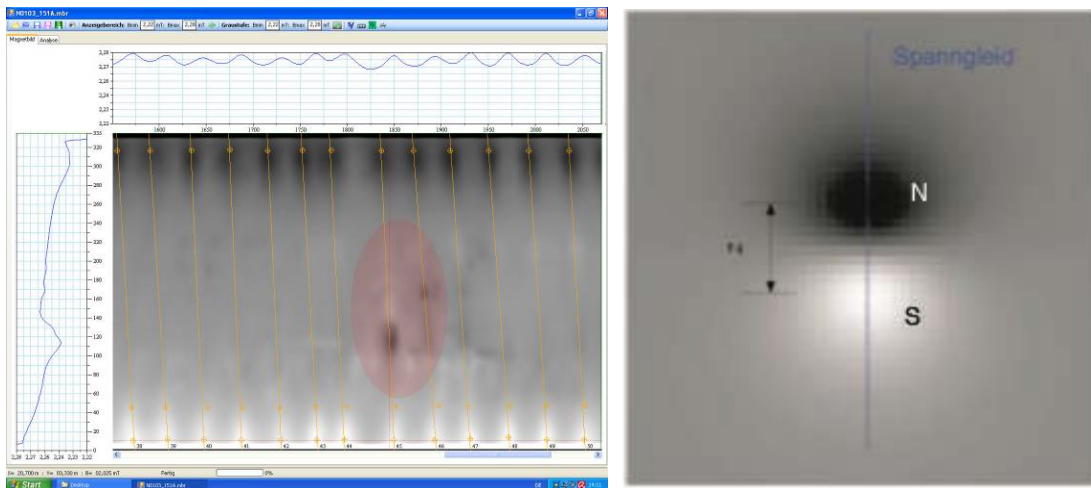


Bild 7. Der Rechner überträgt während der Messung die magnetischen Streuflüsse in ein grau skaliertes Bild. Die schwarzen Pole (nord) werden vom Rechner mit den weißen Polen (süd) durch eine Linie verbunden, linkes Bild. Nur der Wechsel der Polarität auf einer Verbindungslinie zeigt einen Bruch an.

5 Das Messen von Parkdecks

In den USA und in Kanada sind Parkdecks nach speziellen Methoden gebaut. Die teilweise nur 10 cm dicken Fahrbahnplatten sind mittig mit Spanndrahtlitzen vorgespannt. Abdichtungen sind nicht vorhanden, Tausalze werden gestreut, die Korrosionsgefahr ist erheblich. Der Großmagnet mit Messeinrichtung ist das geeignete Gerät, um komplette Parkdecks innerhalb weniger Tage zu 100% auf Spanndrahtbrüche zu überprüfen. Bild 8 zeigt einen solchen Einsatz auf einem Parkdeck in Toronto.



Bild 8. Messtechnik auf einem Parkdeck mit Rotationsscanner und Magnetwagen.

6 Das Messen von Spannbetonbehältern

Als Reservedepots für Öl, Benzin und Diesel dienen Spannbetontanks mit 6 m - 10 m Höhe und 20 m - 30 m Durchmesser. Zum Schutz des Bodens hat das Deutsche Institut für Bautechnik die Richtlinie für LAU-Anlagen (Lagern, Abfüllen, Umschlagen wasser-gefährdender Stoffe) für Auffangwannen und Behälter herausgegeben. Die absolute Dichtheit und die Nachprüfbarkeit der Dichtheit sind wesentliche Merkmale. Wird ein Tank leer gefahren, um gereinigt zu werden, wird auch die Innenabdichtung inspiziert. Dieser Zeitraum wird genutzt, um mit dem Magnetverfahren von innen die Spannglieder auf Rissefreiheit zu überprüfen. Das Verfahren ist in einem internen Bericht für die Bauaufsicht beschrieben. Das Bild 9 zeigt die Messtechnik innerhalb eines Spannbetontankbehälters.



Bild 9. Das Magnetverfahren innerhalb eines Spannbetontankbehälters zur Messung der horizontalen, ringförmig verlaufenden Spannglieder auf Rissefreiheit.

7 Ausblick

Die Beispiele zeigen, dass es jetzt besonders bei den Hilfskonstruktionen einen Bedarf für Weiterentwicklung gibt. Roboter, die Brückenuntersuchungen von der Seite her ermöglichen, vermeiden das Sperren des Verkehrs. Flexible Manipulatoren würden bei Hallenkonstruktionen den Zeitaufwand und die Kosten senken. Die weitere Entwicklung wird garantiert durch Forderungen aus dem Bestand existierender Bauwerke. Im Jahr 2012 wird diese Messtechnik in zwei Forschungsvorhaben zur Überprüfung von Verkehrsinfrastrukturen in den Vereinigten Staaten eingebracht, an der University of Delaware und an der Rutgers-University.

Die Messergebnisse sollen zukünftig sofort erklärbar werden, ähnlich wie der Arzt dem Patienten den Befund anschaulich auf dem Ultraschallbildschirm erläutert.

Referenzen

- [1] Empfehlungen zur Überprüfung und Beurteilung von Brückenbauwerken, die mit vergütetem Spannstahl St 145/160 Neptun N 40 bis 1965 erstellt wurden. Bundesverkehrsministerium, Juli 1993.
- [2] Bertram, D., Hartz, U., Isecke, B., et. al.: Gefährdung älterer Spannbetonbauwerke durch Spannungsrisskorrosion an vergütetem Spannstahl in nachträglichem Verbund. Beton- und Stahlbetonbau 97 (2002), H. 5.
- [3] Ehmann, R.: Spannungsrisskorrosion von Spannstählen. BAW- Brief Nr. 3, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, 2006.
- [4] Bauer, T., Müller, M., Patz, R., Wilhelm, T., Schwarz, J., Tue, N.: Stochastische Abschätzung der Versagenswahrscheinlichkeit von Spannbetontragwerken infolge Spannungsrisskorrosion unter Berücksichtigung verschiedener Schädigungsverteilungen. Bautechnik 87 (2010), Heft 7, Ernst & Sohn Verlag
- [5] Hillemeier, B.: "Assessment of Structural Stability of Prestressed Concrete by Non-Destructive Detection of Steel Fractures", Proceedings of the International Symposium 'Non-Destructive Testing in Civil Engineering' Vol. 1, 23 - 29, Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e. V., Berlin 1995
- [6] Scheel, H., Hillemeier, B.: "Capacity of the remanent magnetism method to detect fractures of steel in tendons embedded in prestressed concrete", NIDT&E International, Vol. 30, No. 4, 211 - 216, Elsevier Science Ltd., 1997
- [7] Sawade G. „Anwendung der Methode der magnetischen Streufeldmessung zur Ortung von Spannstahlbrüchen“, DGZfP-Fachtagung Bauwerksdiagnose 1999, München 1999, Berichtsband BB 66-CD
- [8] Szielasko, K., Kloster, A., Dobmann, G.; Scheel, H.; Hillemeier, B. „High-Speed, High- Resolution Magnetic Flux Leakage Inspection of Large Flat Surfaces“, European Conference on Nondestructive Testing, Berlin 2006
- [9] Taffe, A. ; Hillemeier, B.; Walther, A.; „Verifizierung moderner zerstörungsfreier Prüfverfahren an einem Abbruchbauwerk“, Beton- und Stahlbetonbau 105 (2010), Heft 12, S. 813-820
- [10] Taffe, A. ; Hillemeier, B.; Walther, A.; „Condition Assessment of a 45-year old prestressed concrete bridge using NDT and verification of the results“, NDE/NDT for Highways and Bridges: Structural Materials Technology (SMT) 2010, New York, 16-20 August, 2010
- [11] Lawrence J. Pessiki S., Naito C. Hodgson I. „Inspection Methods & Techniques to Determine Non Visible Corrosion of Prestressing Strands in Concrete Bridge Components“, ATLSS Report No. 09-09, veröffentlicht in der TRID Database 2011
- [12] Hillemeier, B., Pak, Chol-I: Magnetic Localization of Fractures of Broken Wires in Pre-stressing Cables of Bridges and Parking Decks. IABMAS 2012, 6th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, Lake Como, Italy, July 8-12, 2012, Proceedings (in print)
- [13] Hillemeier, B; Walther, A.: Die Überprüfung von Spannbetonkonstruktionen auf die Unversehrtheit der Spannglieder, Bautechnik 88, 2011, Heft 11, S. 805-810
- [14] Naumann, J.: Brückenertüchtigung jetzt – Ein wichtiger Beitrag zur Sicherung der Mobilität auf Bundesfernstraßen, Heft 22, Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein E.V., Berlin, 2011