



DGZfP-Berichtsband 66 CD

Vortrag 3

Neue Methoden der zerstörungsfreien Prüfung im Stahlbeton- und Spannbetonbau

B. Hillemeier, H. Scheel, Berlin

Zusammenfassung

Die Zahl zerstörungsfreier Meßverfahren ist groß. Die Suche nach besseren Methoden läßt nicht nach. Tieferer Einblick, einfachere Handhabung und sicherere Interpretation sind die Ziele. Über vier neue besonders gesuchte Verfahren zum Nachweis von Fehlstellen, Rissen oder Brüchen wird nachfolgend berichtet. Sie haben sich alle bereits in der Praxis bewährt:

Ein Ultraschallverfahren zum Erkennen von Hohlstellen, ein piezoelektrisches Akustikverfahren zum Nachweis von flächenhaften Materialablösungen, ein faseroptisches Meßverfahren zur Erfassung von Störungen im Gefüge von Bauteilen und ein magnetisches Prüfverfahren für mehr Sicherheit im Spannbetonbau [HIL1].

Daß aber nicht nur auf dem Gebiet der Fehlstellenerkennung Fortschritte erzielt worden sind, zeigt abschließend das erfolgreich eingesetzte Anoden-Leiter-System, mit der Depassivierungsfronten in Betonbauwerken ermittelt werden.

Ultraschall zum Nachweis von orthogonal zur Oberfläche sich Erstreckenden Hohlstellen

Hohlstellen, deren Hauptausdehnung orthogonal zur Betonoberfläche liegt, können mit einem speziellen Ultraschall-Verfahren nachgewiesen werden. Ultraschall wird häufig eingesetzt, wo Hohlstellen in Beton zu orten sind. Haben die zu erwartenden Fehlstellen jedoch nur eine kleine Ausdehnung parallel zur Betonoberfläche, so ist das reflektierte Signal zu schwach und insbesondere zu unscharf, um sie nachzuweisen. Hohlstellen dieser Art können beispielsweise aufgrund mangelhafter Verdichtung im Bereich von Arbeitsfugen oder auch bei Mauerwerk zwischen Stein und Mörtel auftreten.

Gelöst wurde das Prüfproblem durch eine Anordnung des Ultraschallsenders und des Empfängers auf der Betonoberfläche in der Weise, daß die mögliche Hohlstelle übergriffen wird. (Abb. 1, Abb. 2). Bei dieser Meßmethode wird eine Welleneigenschaft des Ultraschalls



Abb. 1: In der Arbeitsfuge dieses Balkenfertigteils wird eine Hohlstelle vermutet. Transmitter und Empfänger werden so plaziert, daß sie diesen Bereich übergreifen.

genutzt, nämlich daß sich die Energie nicht geradlinig ausbreitet, sondern jeder Punkt der Welle Ausgangspunkt einer Elementarwelle ist (Huygens). Als Transmitter und Empfänger werden sogenannte Exponentialhörner verwendet, die eine nahezu radialsymmetrische Abstrahlcharakteristik besitzen.

Eine hauptsächlich orthogonal zur Betonoberfläche ausgedehnte Hohlstelle führt dazu, daß ein Teil der vom Sender emittierten Energie des Ultraschalls den Empfänger nicht erreicht. Das Empfangssignal wird nach einer numerischen Operation auf einem Oszilloskop zeitabhängig dargestellt (Abb. 3). Eine Fehlstelle macht sich dadurch bemerkbar, daß die transmittierende Intensität geschwächt wird (Abb. 2). Es fehlt der Anteil des Pulses, der wegen der Fehlstelle nicht vom Sender zum Empfänger transmittiert.

Im Vortrag werden Anwendungsbeispiele aus der Praxis gezeigt.

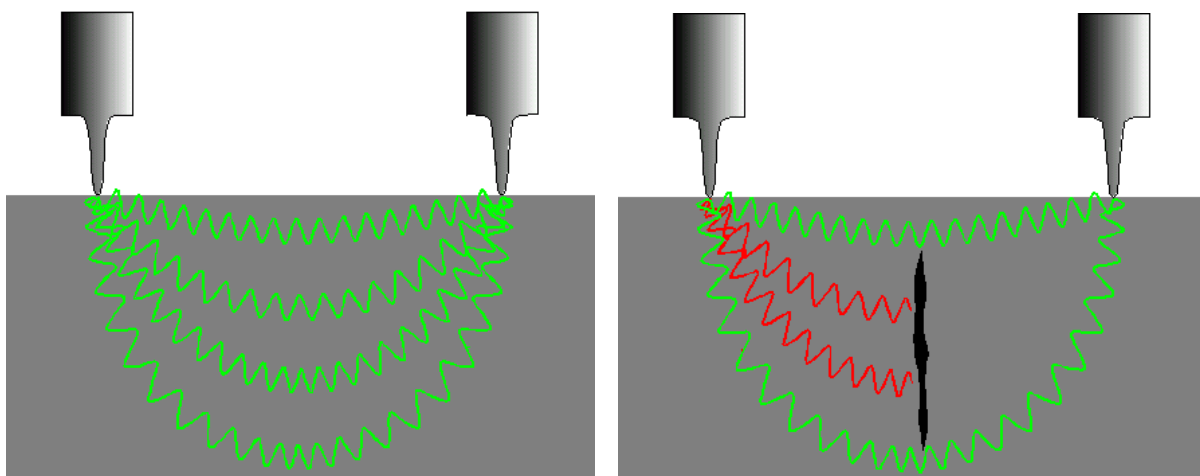


Abb. 2: Schematische Darstellung der Schallausbreitung. Ist keine Fehlstelle vorhanden (links), so transmittiert eine deutlich höhere Intensität, als wenn eine Fehlstelle zwischen Transmitter und Empfänger liegt (rechts).

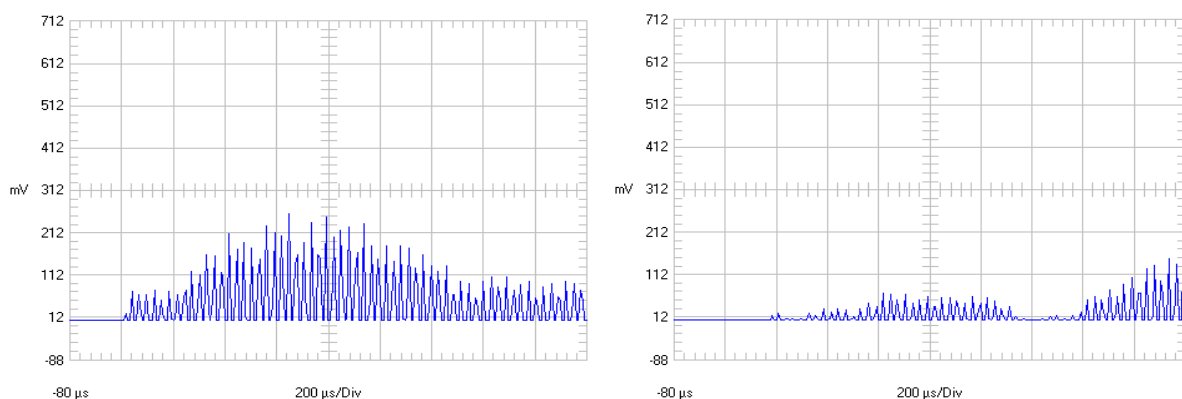


Abb. 3: Die Darstellung der transmittierten Intensität auf dem Oszilloskop. Links ist die Transmission deutlich stärker. Es liegt keine Fehlstelle vor. Rechts ist die Transmission durch eine Fehlstelle geschwächt.

In der Basilika San Francesco in Assisi wurde das Verfahren ebenfalls eingesetzt, um Hohlstellen in den Fugen des Mauerwerks der Gewölbe zu erkennen. Bohrungen bestätigten die zerstörungsfrei erkannten Hohlstellen und dienen gleichzeitig als

Öffnungen für Injektionen im Rahmen der Instandsetzung. Der Verpreßerfolg kann anschließend mit demselben Verfahren zerstörungsfrei nachgewiesen werden.

Messung der Ablösung von Baustoffschichten durch akustische Anregung

Häufig ist es sinnvoll, auch einfache Prüfungen zu technisieren. Ein Beispiel ist das Auffinden von Stellen eines Putzes mit mangelhaftem Haftverbund zum Untergrund. Eine derartige Prüfung ist auch mit einfachen Hilfsmitteln möglich. Hohlliegende Stellen kann man durch Abklopfen oder durch Überstreichen mit einem Gegenstand entdecken, der sich leicht zu Eigenschwingungen anregen läßt.

Nicht einsetzbar sind solche einfachen Methoden bei empfindlichen Oberflächen, oder wenn in den geprüften oder angrenzenden Räumen Menschen die Geräusche als störend empfinden.

Für die Prüfung des Haftverbunds wurde ein Prüfgerät entwickelt (Abb. 4), bestehend aus einem piezoelektrischen Impulsgeber, einem Mikrophon mit Verstärker und einem Voltmeter. Die zu untersuchende Schicht wird mit dem Impulsgeber zu kleinen Schwingungen angeregt, die ihrerseits Luftschall erzeugen, den das Mikrophon in eine elektrische Spannung wandelt. In Zonen ohne Haftverbund kann die Bauteilschicht mit dem gleichen Energieeintrag zu stärkeren Schwingungen angeregt werden, woraus wiederum eine höhere Intensität des Luftschalls resultiert, die von dem Mikrophon in Meßsignale übertragen wird.

Das Verfahren arbeitet mit Schallintensitäten, die in benachbarten Räumen nicht hörbar sind. Auch weiche Oberflächen werden nicht beschädigt.



Abb. 4: Ortung von Bereichen, in denen der Gipsputz keinen Verbund mit dem Untergrund hat.

Glasfaseroptische Messfühler für Mikroverformungen und Gefügeänderungen

Eine empfindliche Verformungsmessung kann der Schlüssel zur Erkennung von Ursachen für Risse und den Aufbau von Eigenspannungen sein. Mikroverformungsmessungen haben deshalb Bedeutung für Sicherheit, Zuverlässigkeit und Gebrauchstauglichkeit von Baukonstruktionen.

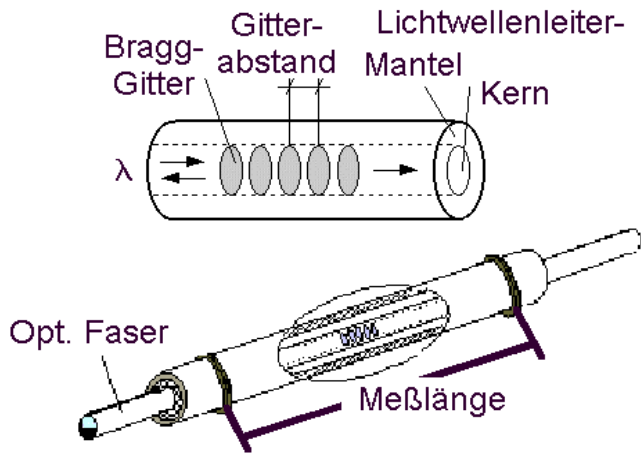


Abb. 5: Meßstab mit integriertem Faser-Bragg-Gitter-Sensor

Ein in Beton eingegossener Faser-Bragg-Gitter-Sensor ermöglicht die Überwachung des integralen Verformungsverhaltens von Bauteilabschnitten.

Die Funktionsweise ist wie folgt (Abb. 5):

Laserlicht eines relativ breiten Wellenlängenbereichs wird in eine Glasfaser eingestrahlt. In die Faser sind äquidistante Reflexionsebenen eingearbeitet. Das reflektierte Licht interferiert konstruktiv, wenn die Wellenlänge dem doppelten

Ebenenabstand entspricht oder ein Vielfaches davon ist.

Wird der Teil der Faser, in dem sich die Reflexionsebenen, das Bragg-Gitter, befinden, gedehnt, so ändert sich der Gitterabstand. Die konstruktiv reflektierte Wellenlänge verschiebt sich.

Umgekehrt läßt sich aus der Wellenlängenverschiebung des reflektierten Lichts auf die Änderung des Gitterabstands bzw. die Längenänderung der Meßbasis und damit auf die Dehnung des Werkstoffs schließen.

Die Sensorik zeichnet sich dadurch aus, daß sie unempfindlich gegen elektromagnetische Einflüsse ist und dadurch, daß jederzeit nach Einbau des Sensors Absolutwerte der Längenänderungen abgefragt werden können, indem Licht eines geeigneten Wellenlängenbereichs eingestrahlt wird und das reflektierte Licht spektral analysiert wird.

Die Glasfasern mit den Bragg-Gittern lassen sich sowohl parallel als auch seriell bzw. kombiniert anordnen (Abb. 6).

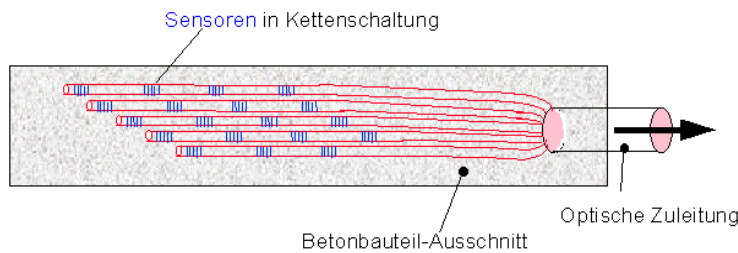


Abb. 6: Sensorkette in kombinierter paralleler und serieller Anordnung.

Große Bauwerkabschnitte lassen sich so mit einer einzigen optischen Zuleitung überwachen. Abbildung 7 zeigt einen Vorschlag für die Anordnung der Bragg-Gitter zur Messung der Verformungen eines Kühlturms.

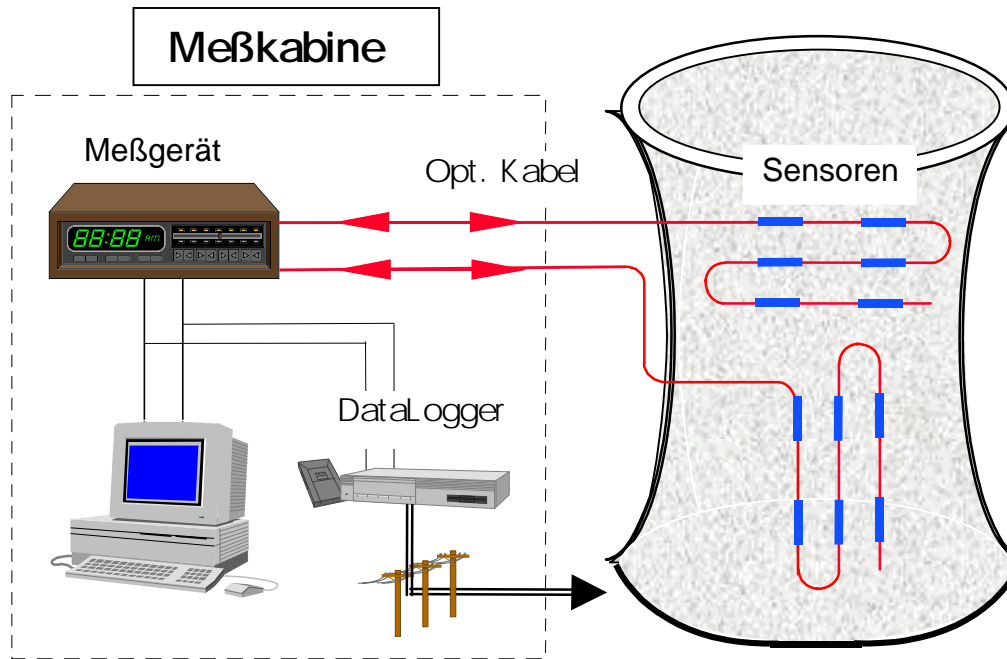


Abb. 7: Vorschlag zur Verformungsmessung an einem Kühlturm mit Bragg-Gitter-Sensoren.

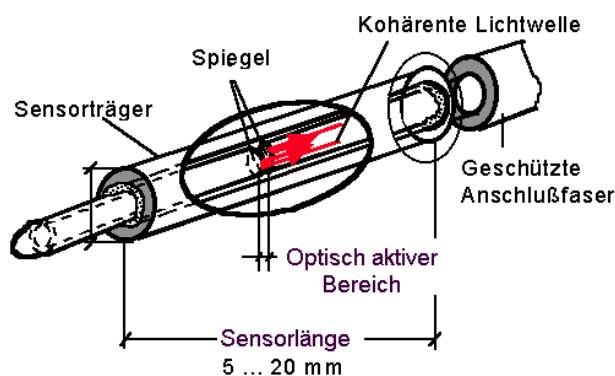


Abb. 8: Faseroptischer Sensor zur Messung kleinster Dehnungen.

Das Prinzip zur Messung sehr kleiner Verformungen zeigt Abb. 8. Die Glasfaser ist an einer Stelle geteilt. Die sich gegenüberliegenden Oberflächen bilden den optisch aktiven Bereich. Die Spaltbreite zwischen den beiden Oberflächen ist auf die zu erwartenden Verformungen abgestimmt. Durch Reflexion an den hintereinander angeordneten Spiegeln entstehen zwei Strahlungsanteile, die eine stehende Welle bilden. Ändert sich die Spaltbreite und damit die Phasenverschiebung zwischen den beiden Strahlungsanteilen, so verschiebt sich die stehende Welle. Durch Abzählen der aufgetretenen Maxima der stehenden Welle erhält man die Verschiebung der Trennflächen gegeneinander in Einheiten der halben Wellenlänge des eingesetzten Lichts. Durch eine Analyse der Phasenlage der stehenden Welle sind sogar wesentlich kleinere Längenänderungen meßbar. Die derzeit auflösbare Dehnung liegt bei 10^{-7} [HAB].

Das Remanenzmagnetismusverfahren

Mit dem Remanenzmagnetismus-Verfahren werden Bruchstellen von Spanndrähten in Spannbeton mit direktem oder mit nachträglichem Verbund geortet. Die Spannstähle werden von der Betonoberfläche aus magnetisiert. An Bruchstellen bilden sich Streufelder, die an der Betonoberfläche mit einem Hallsonden-Array nachgewiesen werden. Die magnetische Flußdichte wird entlang dem Spannglied wegababhängig gemessen und in einem Meßrechner gespeichert.

Während es unter Laborbedingungen gelungen ist, mit hochempfindlichen Superconducting Quantum Interference Devices (SQUIDs) die Bruchstelle eines einzelnen Spanndrahts in einem Bündel bestehend aus 50 Drähten in einem Abstand von 50 cm zu orten [SAW], kann diese Empfindlichkeit unter Praxisbedingungen leider nicht genutzt werden. Die Restfeldmagnetisierung der ebenfalls ferromagnetischen Stahlbetonbewehrung erzeugt Störsignale, die die Nachweisgrenze für die Brüche oder auch Anbrüche einzelner Drähte beschränken.

Um die Magnetisierung der Stahlbetonbewehrung und die anderer ferromagnetischer Einbauteile möglichst klein zu halten, wird eine spezielle Magnetisierungstechnik eingesetzt [SCHE1]. Es gelingt inzwischen derart zu magnetisieren, daß die unvermeidlichen Störsignale selbst in sehr schwierigen Bewehrungskonstellationen beherrschbar bleiben [HIL2][SCHE3].

Aus der Stärke des Bruchsignals läßt sich das Schadensausmaß, also die Anzahl der in einem Bereich gebrochenen Drähte, abschätzen [SCHE2].



Abb. 9 Das Remanenzmagnetismus-Verfahren im Praxiseinsatz. Links: Überprüfung einer Spannbetonbrücke. Rechts: Überprüfung eines Spannbetonbinders.

Korrosionsüberwachungssysteme für neue und bestehende Stahlbetonbauwerke

Die Beherrschung der Korrosion ist neben der Beherrschung der Rißbildung das andere große Thema zur Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauwerken. Das Anoden-Leiter-System wird seit 1990 weltweit als Einbausensor in Großprojekten eingesetzt. Eine neuere Entwicklung, das Anoden-Spreizring-System, das in Bohrlöcher eingesetzt, durch einen Spreizmechanismus elektrisch an den Beton angekoppelt wird.



Abb. 10: Das Anoden-Leiter-System (links). Vor dem Betonieren wird das Anoden-Leiter-System an der Bewehrung befestigt (rechts). [nach SEN]

Zwei von Schießl entwickelte neue Korrosionssensoren werden kurz vorgestellt.

Abbildung 10 zeigt einen Sensor, das Anoden-Leiter-System, bestehend aus sechs Schwarzstahlelektroden. Der Sensor wird vor dem Betonieren auf die Bewehrung aufgebracht. Zusätzlich wird eine Kathode aus Edelstahl mit einbetoniert und optional eine elektrische Verbindung zur Bewehrung. Die Betondeckung der äußeren Anode beträgt meist 10 mm bis 15 mm, während die innere Elektrode die gleiche Deckung wie die Stahlbetonbewehrung erhält.

Der Strom bzw. die Potentialdifferenz zwischen Kathode und Anode kann nach dem Einbau in beliebigen Zeitabständen oder kontinuierlich gemessen werden. Übersteigt der Strom bzw. die Spannung zwischen der Kathode und einer Anode kritische Werte, so hat diese Anode wegen eingedrungener Chloride oder aufgrund der Carbonatisierung des Betons ihre Passivität verloren. In der entsprechenden Tiefe ist mit Korrosion zu rechnen. Die geometrische Anordnung der Anoden ermöglicht eine Überwachung des Voranschreitens einer Depassivierungsfront bevor diese die Stahlbetonbewehrung erreicht, so daß im Falle einer Korrosionsgefährdung rechtzeitig geeignete Maßnahmen ergriffen werden können.

Das Anoden-Spreizring-System kann auch nachträglich eingesetzt werden. Es ist in seinem Aufbau mit der Multi-Ring-Elektrode [SCH1] vergleichbar. Der Einbausensor ist aus abwechselnd übereinander angeordneten Stahl- und Isolierringen aufgebaut. Die Stahlringe bilden wie die Leitern im Anoden-Leiter-System die Anoden. Die Anschlußkabel werden im Inneren der Elektrode geführt. Der Anodenring wird in ein gebohrtes Loch mit einem Durchmesser von 56 mm und einer Tiefe von 80 mm eingesetzt. Zusätzlich wird ein Kathodenstab in ein Loch mit einem Durchmesser von 16 mm eingebaut. Über einen Spreizmechanismus werden die beiden Elektroden fest an den Beton angekoppelt.

Das Korrosionsrisiko wird wie bei dem Anoden-Leiter-System gemessen.

Während das Anoden-Spreiz-System bisher nur zu Testzwecken eingesetzt wurde, ist das Anoden-Leiter-System in vielen wichtigen Bauwerken eingebaut, darunter der Tunnel und die Brücken des großen Belts in Dänemark. Die Sensor-Systeme werden kommerziell vertrieben [SEN].

Alle anderen Verfahren bieten die Verfasser an [HIL3].

Literatur

- [HAB] Habel, W. R.; Hofmann, D; Hillemeier, B.: 'Deformation Measurements of Mortars at Early Ages and of Large Concrete Components on Site by Means of Embedded Fiber-optic Microstrain Sensors', Cement and Concrete Composites, Vol. 19, pp. 81-102,1997, Elsevier Science Ltd., 1997
- [HIL1] Hillemeier, B.: 'Das Erkennen von Spanndrahtbrüchen an einbetonierten Spannstählen', Vorträge Betontag 1993, Deutscher Beton-Verein E. V., 1993
- [HIL2] Hillemeier, B.; Scheel, H.: 'Magnetic Detection of Prestressing Steel Fractures', Materials and Corrosion, Vol. 11, 1998, Wiley-VCH Verlag, 1998
- [HIL3] Hillemeier, B.: <http://beta.bv.tu-berlin.de/>
- [SAW] Sawade, G.: Zitiert in 'Magnetblick ins Innere einer Brücke' von Gerhard Lammel, Süddeutsche Zeitung vom 20.11.1997
- [SCHE1] Scheel, H.; Hillemeier B.: 'Capacity of the remanent magnetism method to detect fractures of steel in tendons embedded in prestressed concrete', NDT&E International, Vol. 30, No. 4, pp. 211-216, 1997, Elsevier Science Ltd., 1997
- [SCHE2] Scheel, H.: 'Spannstahlbruchortung an Spannbetonbauteilen mit nachträglichem Verbund unter Ausnutzung des Remanenzmagnetismus', Dissertation Technische Universität Berlin, 1997
- [SCHE3] Scheel, H.: 'Bauwerkeinsatz des Remanenzmagnetismus-Verfahrens: Spanndrahtbruchortung in Spanngliedern einer Fahrbahnplatte der Autobahnbrücke bei Michelsrombach', Poster 16 der Tagung 'Bauwerksdiagnose – Praktische Anwendungen Zerstörungsfreier Prüfungen', 1999, <http://www.dgzfp.de/ZfPbau>, 1999
- [SCHI] Schießl, P.; Souchon, T.; Breit, W.: 'Berechnungsmodell zur Bestimmung von Feuchtigkeitsgehalten aus Widerstandsmeßwerten der Multi-Ring-Elektrode ermittelt in der Betonrandzone mittels Einbausensoren', Forschungsbericht F538, Institut für Bauforschung Aachen, 1997
- [SEN] S+R Sortec GmbH: <http://www.sortec.de>