Die Bestimmung der rheologischen Eigenschaften Selbstverdichtender Betone mit dem Kugelmesssystem

Florian Fleischmann

Fakultät Bauingenieurwesen, Labor für Baustoffe und Betontechnologie,
Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg,
Prüfeninger Straße 58, 93049 Regensburg, Deutschland

Zusammenfassung

Dieser Beitrag beschreibt die Entwicklung eines Rheometers zur Bestimmung der rheologischen Eigenschaften von Selbstverdichtenden Betonen, sowie die mit diesem Gerät erzielten Versuchsergebnisse. Die Motivation für diese Entwicklung gründet in den Schwächen am Markt befindlicher Betonrheometer. Als Grundlage für die Entwicklung diente das Betonrheometer BT2, das in mehreren Schritten modifiziert wurde. Da auch die Auswertmethode des BT2 schwächen zeigte, wurde das Kugel-Messsystem, welches bisher meist für Leime und Mörtel eingesetzt wurde, adaptiert und an die Eigenheiten des SVB angepasst. Die damit erzeugten Messwerte liefern zuverlässige Ergebnisse, die sich in vieler Hinsicht mit den Mörtel-Ergebnissen aus der Literatur decken.

1 Einleitung

Um die Frischbetoneigenschaften von Selbstverdichtenden Betonen (SVB) bestimmen zu können gibt es eine Vielzahl an Möglichkeiten. Am häufigsten werden so genannte Ein-Punkt-Versuche wie z.B. die Trichterauslaufzeit oder das Setzfließmaß angewandt. Diese liefern aber keine exakten Informationen über die rheologischen Eigenschaften. Um diese Eigenschaften bestimmen zu können kommen so genannte Rheometer zum Einsatz. Rheometer wurden entwickelt, um das Fließ- und Verformungsverhalten von Flüssigkeiten oder Festkörpern zu bestimmen. Sie werden z.B. in der Chemie, der Kunststoffverarbeitung oder der Lebensmittelindustrie eingesetzt. Im Gegensatz zu Polymeren oder anderen homogenen Substanzen ist die Bestimmung der rheologischen Eigenschaften von zementhaltigen Baustoffen schwieriger. Ein Grund hierfür ist zum einen die laufende Veränderung der Probe infolge der Hydratation und den interpartikulären Wechselwirkungskräften des Zementes. Ein weiteres Problem ist, dass es sich bei Beton um eine grobdisperse Suspension handelt, für welche die Modelle der Rheologie nur beschränkt gelten. Dennoch haben sich mehrere Betonrheometer, meist Rotationsrheometer, auf dem Markt etabliert, die aber oft bei gewissen Anwendungen prinzipielle Probleme haben. Tyrach [1] hatte diese Problem bereits erkannt und für Mörtel ein System entwickelt, bei dem sich eine Kugel auf einer Kreisbahn durch das Prüfgut bewegt und durch den gemessenen Widerstand auf die rheologischen Eigenschaften des Materials geschlossen werden kann. Auf dieser Grundlage versuchte man nun ein Messgerät zu entwickeln, dass auch für Selbstverdichtende Beton eingesetzt werden kann.

2 Die exzentrisch rotierende Kugel

2.1 Aufbau und Prinzip

Beim Kugelmesssystem (KMS) rotiert eine exzentrisch angebrachte Kugel mit einer definierten Geschwindigkeit in einem zylindrischen Behälter. Die Kugel ist dabei an einem dünnen Steg befestigt. Während der Bewegung der Kugel durch das Material wird an der Halterung das auftretende Widerstandsmoment gemessen. Dabei entsteht nicht wie bei Rotationsrheometern üblich einer laminare Schichtenströmung sondern eine Verdrängungsströmung. Bereits nach einer Umdrehung kann der Versuch erfolgreich beendet werden. Alle dabei gewonnen Ergebnisse resultieren aus den Messungen im ungescherten Material. Weitere Umdrehung liefern dagegen Ergebnisse von geschertem Probematerial. Um Aussagen über die Fließeigenschaften zu erhalten wird im Anschluss an die Messung eine Beziehung zwischen Geschwindigkeit und Widerstandsmoment und somit eine Beziehung zwischen Schergeschwindigkeit und Schubspannung hergestellt.

2.2 Vorteile gegenüber anderen Messsystemen

Das KMS bringt einige Vorteile gegenüber Rotationsrheometern mit sich. So wird zum einen das Wandgleiten und die Sedimentation infolge Scherung minimiert. Bei Rotationsrheometer mit Zylin-

dergeometrie entsteht meist ein Gleitfilm zwischen Material und Behälterwand, der die Ergebnisse stark beeinflusst. Durch die ständige Scherung des Materials werden auch die rheologischen Eigenschaften erheblich verändert. Dies kann sogar zur Sedimentation führen. Dies wird durch nur eine einzige Umdrehung beim KMS verhindert. Da die Messung nach einer Umdrehung abgeschlossen ist liegen bereits nach kurzer Zeit Ergebnisse vor.

2.3 Kritische Betrachtung des Kugel-Messsystems

Trotz der Vorteile des Kugelmesssystem gegenüber anderen Rheometern ist auch dieses Messsystem nicht frei von Schwachstellen. Blask [2] hat bei Mörteln festgestellt, dass das Kugel-Messsystem besonders bei geringen Scherraten eine gewisse Einregelzeit braucht, um bei konstanter Schergeschwindigkeit einen stabilen Messwert zu liefern. Dabei wurde ein „abknicken nach unten“ festgestellt. Ein anderes Phänomen hat dagegen Schatzmann [3] beobachtet: Um eine definierte Geschwindigkeit zu erreichen muss die Kugel erst beschleunigt werden, was ein zusätzliches Moment (Kraft) erfordert. Das zusätzliche Moment zu Beginn ist abhängig von der maximalen Geschwindigkeit und nur im geringen Ausmaß von den Materialeigenschaften. Im Anschluss an diesen „Peak“ stellt sich ein konstantes Widerstandsmoment ein. Aussagekräftige Daten können demnach erst in diesem konstanten Bereich gemessen werden. Das dabei gemessene Moment ist nur von den rheologischen Eigenschaften des Fluides abhängig und nicht wie das Anfangsmoment von der Beschleunigung. Nach Leemann [4] treten diese erwähnten Probleme jedoch nur bei hohen Geschwindigkeiten auf. Bei geringen Geschwindigkeiten ist der Einfluss der Beschleunigung nahezu vernachlässigbar. Auch bei der Erstellung von Fließkurven spielt die Beschleunigung eine wichtige Rolle. Schatzmann behauptet [5], dass innerhalb einer Umdrehung keine Fließkurve erzeugt werden kann, da die Beschleunigung Einfluss auf das Moment hat. Er empfiehlt daher mehrere Versuche bei unterschiedlichen, aber konstanten Geschwindigkeiten durchzuführen.

Ein weiteres Problem ist, dass bei hohen Geschwindigkeiten und niedriger Viskosität sich vor der Kugel eine Bugwelle bildet oder sich das Material an der Halterung aufstaut, was wiederum starke Einflüsse auf die gemessenen Werte hat. Größere Partikel führen zu einem komplexen Fließverhalten um die Kugel herum und können, wie auch bei Rotationsrheometern, immer wieder zu Streuungen der Messergebnisse und zu temporären Störungen führen.

Auch die Umwandlung der Messdaten in rheologische Absolut-Werte ist kritisch zu Bewerten. Zwar hat Tyrach [1] eine Methode entwickelt mit der dies möglich sein soll, allerdings wird dies vor allem bei inhomogenen grobdispersen Systemen mit Fließgrenze, wie es beim SVB der Fall ist, nach eigener Einschätzung kritisch gesehen.

3 Adaption des Kugel-Messsystems für Selbstverdichtenden Beton

Nachdem das Kugelmesssystem bereits erfolgreich für Leime eingesetzt wird und auch die eigenen Versuche am Mörtel vielversprechende Ergebnisse geliefert haben, sollte das KMS nun auch für Selbstverdichtende Betone eingesetzt werden. Dabei sollte sich ein Messkörper (Zylinder oder Kugel) innerhalb einer Umdrehung durch den Selbstverdichtenden Beton bewegen und eine vollständige Messung durchführen. Bei den Abmessungen des KMS ist darauf zu achten, dass die Abstände zwischen Kugel und Boden bzw. Behälterwand ausreichend groß sind. Es wird empfohlen einen Abstand vom fünffachen Partikeldurchmesser zu wählen. Um näherungsweise in einem quasi-homogenen Material zu messen, sollte der Durchmesser der Kugel etwa das Achtfache des Größtkorns betragen. Bei einem Größtkorn von 16 mm beträgt der Abstand zwischen Behälterwand und Kugel somit mindestens 80 mm und der Kugeldurchmesser mindestens 128 mm. Hätte man für die Laborversuche eine Kugel dieses Durchmessers verwendet, so wäre entweder der Abstand zwischen Kugel und Behälterboden zu klein geworden oder die Kugel hätte sich nicht mehr vollständig im Material befunden. Als Kompromiss aller Randbedingungen wurde daher ein Durchmesser von 95 mm gewählt. Um transiente Effekte zu vermeiden wurden bei den Versuchen eine niedrige Belastungsgeschwindigkeiten gewählt.

In Zusammenarbeit mit unserem Projektpartner Schleibinger Geräte Teubert und Greim GmbH wurden zwei Messgeräte entwickelt (Abb. 1). Im ersten Schritt wurde ein Laborrheometer entwickelt, das zur Qualitätskontrolle auf Baustellen eingesetzt werden kann (eBT2). Beim zweiten Messgerät handelt es sich um einen Prototypen, der später in den Mischer eines Betonwerks eingebaut werden soll. Beim zweiten Rheometer wurden Teile der Hard- und Software des Mörtelrheometers ViskomatXL übernommen. Die Aufnahme des Widerstandmoments erfolgt direkt oberhalb der Kugel. Somit können störende Einfluss infolge aufstauenden Materials an der Halterung größtenteils vernach-

lässigt werden. Beiden Rheometern liegt dasselbe Messprinzip des rotierenden Messkörpers zu Grunde. Unterschiede gibt es bei den Abmessungen und der verwendeten Antriebs- und Messtechnik. Da das zweite Rheometer, auch RheoCT bezeichnet, zur Zeit genauere Ergebnisse für Forschung und Entwicklung liefert, wird in diesem Beitrag nur auf diese Ergebnisse eingegangen.

Abb. 1 Entwickelte Messgeräte: Laborrheometer eBT2 (links) und Prototyp RheoCT (rechts)

4 Mess- und Auswertmethodik

4.1 Messprinzip

Wie bereits erwähnt bewegt sich die exzentrisch angebrachte Kugel bei vorgegebener Geschwindigkeit auf einer Kreisbahn durch den Beton. Dabei wird das Widerstandsmoment gemessen, das die Kugel dem SVB entgegensetzt. In dieser Arbeit wird zwischen zwei Mess-Profiltypen unterschieden (Abb. 2). Beim ersten Profil handelt es sich um ein Rampenprofil, bei dem die Kugel erst beschleunigt und anschließend wieder verlangsamt wird. In einem Diagramm angetragen, ergeben die Ergebnisse eine Fließkurve (Abb. 3). Beim zweiten Profil handelt es sich um ein Stufenprofil, bei dem eine konstante Geschwindigkeit vorgegeben wird. Als Ergebnis erhält man den Verlauf des Widerstandmomentes über die Zeit oder über einen Weg (Abb. 4).

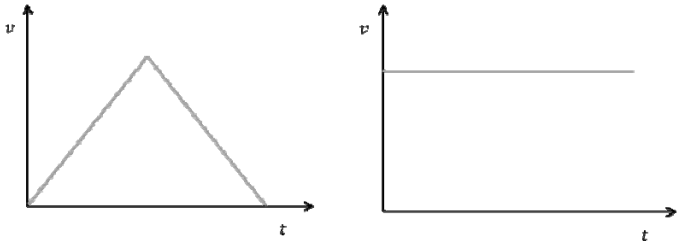

Abb. 2 Verwendete Messprofile: Rampenprofil (links) und Stufenprofil (rechts)

Da die Umwandlung der gemessenen Werte in absolute rheologische Werte kritisch betrachtet wird, wird hier auch darauf verzichtet. Die Angabe der Ergebnisse erfolgt daher als „Relativ-Werte“. Dies ist aber insofern kein Problem, da sich diese „relativ“ zu den absoluten Werten verhalten und ihr Kurvenverlauf somit vergleichbar ist.

4.2 Auswertung

4.2.1 Fließkurve

Bei zunehmender Geschwindigkeit (aufsteigender Ast der Fließkurve) können Aussagen über den Strukturaufbau und somit über die Thixotropie getroffen werden (Abb. 3). Zu Beginn ist der Verlauf der Kurve noch linear, bis eine Abnahme der Steigung eintritt. Bis zu diesem Punkt verhält sich der Beton elastisch. Der Knick in der Kurve ist ein Indiz für den auftretenden Strukturbruch und kann als relative (statische) Fließgrenze bezeichnet werden. Der absteigende Ast der erzeugten Fließkurve wird schließlich mit dem Bingham-Modell ausgewertet. Man erhält dadurch die relative Viskosität und die relative Fließgrenze. Es ist anzumerken, dass es sich bei der Viskosität in Wirklichkeit nicht um einen absoluten Viskositätswert handelt, sondern nur um einen berechneten Koeffizienten zur Kurvenanpassung. Besser wäre hier z.B. die Bezeichnung „Fließkoeffizient“, „Bingham-Fließkoeffizient“ oder „Bingham-Viskosität“ [6]. Auch die Bezeichnung Fließgrenze ist in diesem Fall nicht ganz korrekt, da

es sich um relativ-Werte handelt. Die Bezeichnung „Fließwiderstand“ wäre daher besser geeignet. Oft wird für die Fließgrenze auch die Bezeichnung „g“ und für die Viskosität die Bezeichnung „h“ verwendet.

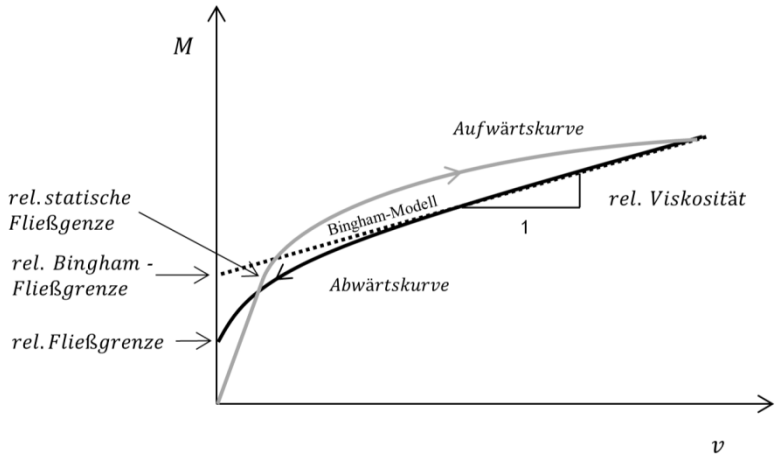

Abb. 3 Fließkurve inklusive Auswertung mit dem Bingham-Modell

Die Fläche zwischen auf- und absteigendem Ast der Fließkurve wird als Hysteresefläche oder Thixotropiefläche bezeichnet und liefert Aussagen über die thixotropen Eigenschaften des Materials. Während einer Ruhephase können sich durch Wechselwirkungskräfte innere Strukturen aufbauen. Während der Scherbelastung müssen diese Strukturen wieder abgebaut werden. Die Größe der Fläche ist ein Indiz für die Thixotropie des Materials. Mit zunehmender Ruhezeit des Materials mit reversiblen thixotropen Eigenschaften wird diese Fläche größer.

4.2.2 Widerstandsmoment bei konstanter Schergeschwindigkeit

Mit dieser Auswertmethode lassen sich die Statische und Dynamische Fließgrenze ermitteln. Die Ergebnisse sind auch hier wieder Relativ-Werte. Die Statische Fließgrenze, die zu Beginn gemessen wird, ist ein Indikator dafür, welche Kraft benötigt wird, um den Fließprozess zu starten. Dieser startet, sobald die agglomerierten Strukturen des Zementleims aufgebrochen sind. Die Dynamische Fließgrenze ist dagegen ein Indikator für die Kraft, die benötigt wird, um den Fließprozess mit einer definierten Geschwindigkeit zu erhalten. Mit Hilfe der Dynamischen Fließgrenze können z.B. Mischungen bezüglich Wassergehaltsschwankungen sehr gut kontrolliert werden.

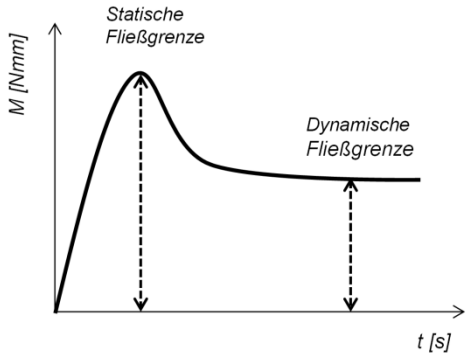

Abb. 4 Verlauf des Widerstandsmoments

In einer Diskussion wurde zur beschriebenen Auswertmethode angemerkt, dass die Statische Fließgrenze von transienten Effekten her ruht und keinerlei Aussagen über die Materialeigenschaften liefert. Eigene Versuche haben gezeigt, dass bei sehr langsamen Geschwindigkeiten tatsächlich keine Statische Fließgrenze auftritt. Bei sehr schnellen Geschwindigkeiten kann dagegen eine Statische Fließgrenze beobachtet werden. Der anschließende konstante Bereich ist hingegen schon besser für die Bewertung geeignet, wobei auch hier angemerkt wurde, dass bei der Angabe von Relativ-Werten keine wirklichen Aussagen gemacht werden können. Ob eine Umwandlung in absolute Werte Sinn macht und ob diese Umwandlung dann auch korrekt ist, kann ebenso diskutiert werden. Unabhängig davon,

ob die Ergebnisse in absolute Werte umgerechnet sind oder nicht, liefert die Literatur genügend Beispiele für den Erfolg dieser Auswertmethode [7][8][9][10][11].

5 Durchgeführte Versuche

Im Zuge der Entwicklung der beiden Rheometer wurden zahlreiche Versuche durchgeführt. Erste Versuche dienten zur Optimierung der mechanischen und elektronischen Bauteile. Im Anschluss wurde das Messprofil optimiert, indem unterschiedliche Geschwindigkeiten getestet wurden. Nachdem die optimalen Einstellungen gefunden waren, wurden Variationen in der Mischungszusammensetzung und dem Wassergehalt durchgeführt. Zudem wurden Versuche mit unterschiedlicher Scherbelastung und Standzeit (Wartezeit vom Mischen bis zum Messen) durchgeführt. Schließlich wurde noch die Geometrie der Messfühler verändert. In diesem Bericht liegt der Fokus auf der Auswertung der Fließkurve und des Widerstandmoments bei konstanter Scherbelastung.

6 Versuchsergebnisse

Abb. 5 zeigt die Fließkurve eines SVB vom Mehlkorntyp mit einem Setzfließmaß von 790 mm und einer Trichterauslaufzeit von 6,3 sec.

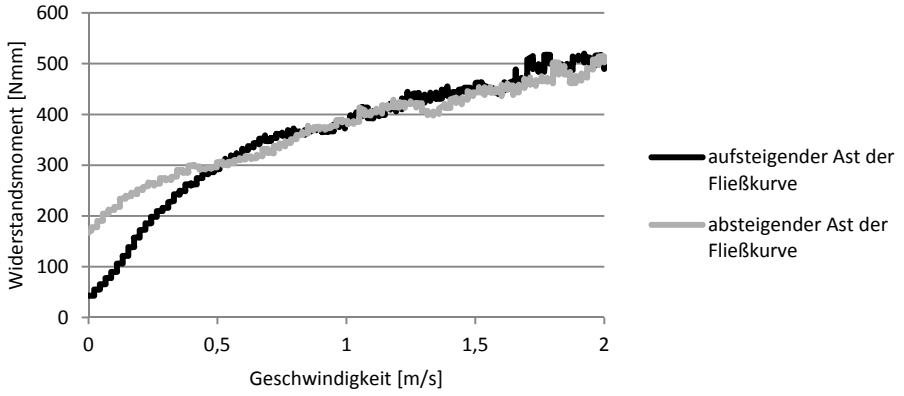

Abb. 5 Fließkurve eines SVB

Betrachtet man den aufsteigenden Ast der Fließkurve kann man im Anfangsbereich einen nahezu linearen Anstieg der Fließkurve feststellen. Mit zunehmender Geschwindigkeit wird die Kurve und somit die Viskosität immer flacher. Ab ca. 0,75 m/s ist in diesem Fall der Viskositätsverlauf konstant. Ein ähnliches Verhalten bei Mörtel hat auch Blask [2] festgestellt. Der Übergang erfolgt fließend und kann nicht exakt bestimmt werden. Eine Möglichkeit diesen Übergang auszuwerten wäre mit einer Kurvenanpassung. Dabei gibt es zwei Möglichkeiten. Bei der ersten wird eine Gerade an den linearen Anfangsbereich gelegt und dann festgehalten wo die Kurve von dieser Anpassungsgeraden abweicht. Beim der zweiten Möglichkeit wir zusätzlich zu der Geraden im linearen Bereich eine Gerade durch den plastischen Bereich gelegt. Der Schnittpunkt beider Geraden kann dann als statische Fließgrenze ausgewertet werden.

Beim absteigenden Ast der Fließkurve ist deutlich zu erkennen, dass sich die Kurve nicht linear verhält und die Viskosität im Bereich niedriger Scherraten zunimmt. Die Auswertung mit dem Bingham-Modell würde in diesem Fall eine höhere Fließgrenze liefern als die Tatsächliche.

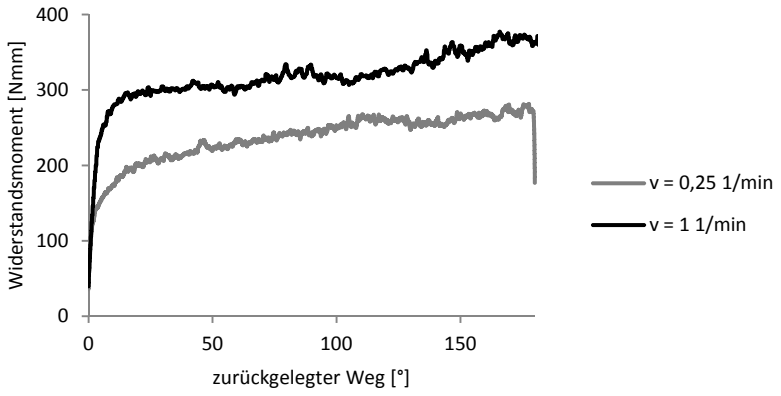

Abb. 6 Widerstandsmoment bei konstanter Schergeschwindigkeit – Darstellung über den zurückgelegten Weg bei zwei unterschiedlichen Geschwindigkeiten

In Abb. 6 ist das Widerstandsmoment infolge konstanter Belastung dargestellt. Es wurden dabei zwei verschiedene Geschwindigkeiten gegenüber gestellt. Das Rezept entspricht dem vorherigen. Beide Kurven haben einen steilen Anstieg mit anschließendem Übergang zum Plateau gemeinsam. Die Kurve des schnelleren Versuches liegt dabei über der langsameren, was den Gesetzen der Physik entspricht. In keinem der Fälle konnte eine statische Fließgrenze festgestellt werden. Bei Versuchen, bei denen das Material für jeweils eine und zehn Minuten in Ruhe gelassen wurde, konnte zum Zeitpunkt 10 min bei einer Geschwindigkeit von $v = 1\ min^{-1}$ eine statische Fließgrenze festgestellt werden. Bei einer Geschwindigkeit von $v = 0{,}25\ min^{-1}$ konnte nach zehn Minuten keine statische Fließgrenze festgestellt werden. Die Versuche haben gezeigt, dass die statische Fließgrenze sowohl vom Strukturaufbau als auch von der Prüfgeschwindigkeit beeinflusst wird.

Weitere Versuchsergebnisse zum Thema Wassergehaltsschwankungen, Variation des Fließmittelgehalts und dem Einfluss der Scherbelastung können [12] und [13] entnommen werden.

7 Fazit

Die Versuche mit dem Kugel-Messsystem haben sehr gute Ergebnisse geliefert und lassen zuverlässige Aussagen über das Fließverhalten unterschiedlicher SVB-Rezepturen zu. Durchgeführte Versuche am Mörtel haben vergleichbare Ergebnisse geliefert. Zudem konnten die in der Literatur erwähnten Ergebnisse für Mörtel größtenteils bestätigt werden. Mit Abschluss des Projekts sollen weitere Erkenntnisse vorliegen. Das entwickelte System eignet sich neben der Qualitätskontrolle auf der Baustelle auch sehr gut für den Einsatz in Forschung und Entwicklung.

Literatur

[1] Tyrach, J.: *Rheologische Charakterisierung von zementären Baustoffsystemen*. Dissertation, Technische Universität Erlangen-Nürnberg, 2000.

[2] Blask, O.: *Zur Rheologie von polymermodifizierter Bindemittelleimen und Mörtelsystemen*. Dissertation, Universität-Gesamthochschule Siegen, 2002.

[3] Schatzmann, M. et al.: *Rheometry for large-particulated fluids: analysis of the ball measuring system and comparison to debris flow rheometry*. Rheologica Acta, Volume: 48, Springer Verlag, Berlin, 2009.

[4] Leemann, A.; Winnefeld, F.: *The effect of viscosity modifying agents on mortar and concrete*. Cement and Concrete Composites, Volume: 27, Science Direct, 2007.

[5] Schatzmann, M.: *Rheometry for large particle fluids and debris flows*. In: Monor, H.-E. (Hrsg.) Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau und Hydrologie und Glaziologie der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zürich, Nummer 187, Eigenverlag, Zürich, 2005.

[6] Mezger, T. G.: *Das Rheologie Handbuch*. Vincentz Network, Hannover, 2010.

[7] Koehler, E. P.; Fowler, D. W.: *Summary of Concrete Workability Test Methods*. International Center for Aggregates Research, University of Texas at Austin, 2003.

[8] Koehler, E. P.; Fowler, D. W.: *Development of a Portable Rheometer for Fresh Portland Cement Concrete*. The University of Texas at Austin, International Center for Aggregates Research, 2004.

[9] Koehler, E. P.; Fowler, D. W.: *Static and Dynamic Yield Stress Measurement of SCC*. Proceedings of the Fourth North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete – SCC2008, Chicago, 2008.

[10] Lowke, D. et al.: *Optimization of Powder Fineness and Water/Powder Ratio to improve Segregation Resistance of SCC*. Proceedings of the Second International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete – SCC2009, Peking, 2009.

[11] Ovarlez, G.: *Introduction to the Rheometry of Complex Suspensions*. In: Roussel, N. (Hrsg.) Understanding the Rheology of Concrete. Woodhead Publishing, Oxford, 2012.

[12] Fleischmann, F., Kusterle, W.: *A new Concrete Rheometer for the Assessment of the Rheological Properties of Self-Compacting Concrete*. Proceedings of the Fifth North American Conference on the Design and Use of Self-Consolidating Concrete - SCC2013. Chicago, 2013.

[13] Fleischmann, F. et.al.: *The Assessment and Control of the Rheological Properties of Self-Compacting Concrete in an Concrete Mixer*. Proceedings of the 1st International RILEM Conference on Rheology and Processing of Construction Materials, Paris, 2013.

Zerstörungsfreie Bestimmung von heterogenen Widerstandsverteilungen an Stahlbetonbauteilen durch Tomographiemessungen

Kenji Reichling, Michael Raupach

Institut für Bauforschung,
RWTH Aachen University,
Schinkelstraße 3, 52062 Aachen, Deutschland

Zusammenfassung

Der spezifische elektrische Widerstand ist ein Betonkennwert, der mit unterschiedlichsten dauerhaftigkeitsrelevanten Parametern korreliert werden kann. Neben dem Wassergehalt zählen hierzu z. B. die Korrosionsgeschwindigkeit der Bewehrung und der Chloriddiffusionskoeffizient. Bei Bestandsbauwerken wird der Widerstandswert üblicherweise an Bohrkernen ermittelt, was mit einer Beeinträchtigung des Bauteils einhergeht. Alternativ kann der Wert zerstörungsfrei mithilfe einer Wenner-Sonde bestimmt werden, wobei für die Bestimmung des spezifischen Widerstandes ein homogener Halbraum zugrunde gelegt wird. In der Praxis liegen jedoch ausgeprägte Heterogenitäten vor (z.B. metallische Bewehrungen oder Feuchteunterschiede), die zu erheblichen Verzerrungen des elektrischen Feldes und somit zu Fehlinterpretationen führen können.

Bei der Widerstandstomographie werden anhand unterschiedlicher Elektrodenanordnungen und -abstände zunächst unter Zugrundelegung eines homogenen Halbraumes scheinbare spezifische Widerstandswerte ermittelt. Durch Inversionsberechnungen auf Basis iterativer numerischer Verfahren kann anschließend die tatsächliche Widerstandsverteilung im Beton berechnet werden. Das Ziel des Verfahrens besteht darin, den Einfluss von Heterogenitäten zu erfassem und so die Verteilung des tatsächlichen Betonwiderstandes abzubilden.

1 Einführung

Der elektrische Widerstand von Beton spielt im Bereich der Bauwerksdiagnostik eine immer zentralere Rolle. So konnte bspw. im Rahmen der von der DFG geförderten Forschergruppe 537 die maßgebliche Abhängigkeit der Korrosionsgeschwindigkeit der Bewehrung vom Betonwiderstand bestätigt werden [1]. Verschiedene Autoren verweisen ebenfalls auf die Korrelation mit weiteren dauerhaftigkeitsrelevanten Parametern, wie z. B. dem Wassergehalt, der Porosität sowie dem Chloriddiffusionskoeffizienten [2]-[5]. Hierbei sind die genauen Zusammenhänge aber noch nicht abschließend geklärt; die grundsätzliche Relevanz des elektrischen Betonwiderstandes ist jedoch unbestritten.

Grundsätzlich erfolgt die Bestimmung des elektrischen Widerstandes (R) über das Ohm´sche Gesetz, wobei der Quotient aus einer resultierenden Spannung (U) zu einem eingespeisten Strom (I) gebildet wird (siehe Gl. 1). Der elektrische Widerstand (R) ist jedoch maßgeblich von der Elektrodenanordnung und der Geometrie des zugrundeliegenden elektrischen Feldes abhängig. Aus diesem Grund wird der geometrieunabhängige spezifische Widerstand (ρ) als materialspezifischer Parameter betrachtet. Er entspricht dem Produkt aus dem Widerstand R und einem Geometriefaktor k (siehe Gl. 2).

$$R = \frac{U}{I} \tag{1}$$

$$\rho = k \cdot R \tag{2}$$

Prinzipiell kann zwischen Zwei- oder Vierelektrodenkonfigurationen unterschieden werden. Wird der Widerstand mittels Gleichstrommessung bestimmt, können die Ergebnisse einfach über das Ohm´sche Gesetz (Gl. 1) bestimmt werden. Bei Zwei-Elektrodenanordnungen können jedoch Polarisationseffekte an den Elektroden zu unbrauchbaren Ergebnissen führen. Um dies zu vermeiden, biete sich die Vier-Elektrodenanordnung an, bei der die Stromeinspeisung über andere Elektroden verläuft, als die Bestimmung des Potentialabfalls. Im Bauwesen kommt üblicherweise die Elektrodenkonfiguration nach Wenner [6] zum Einsatz (siehe Abb. 1).

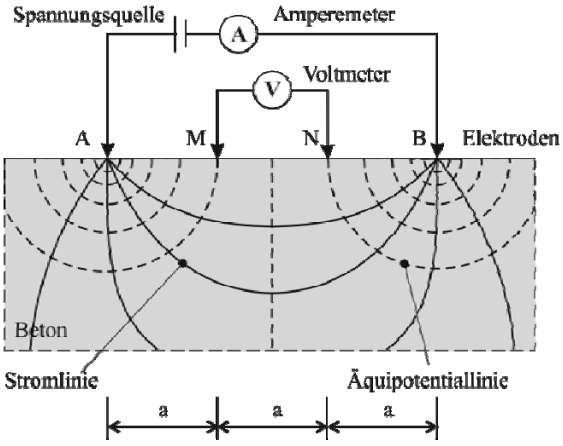

Abb. 1 Elektrodenaufbau nach Wenner; die Stromelektroden sind mit A und B, die Potentialelektroden mit M und N bezeichnet.

Hierbei sind vier Elektroden mit gleichem Abstand a in einer Reihe angeordnet. Der Strom wird über die äußeren Elektroden (A und B) eingespeist und der Spannungsabfall zwischen den beiden inneren Elektroden (M und N) gemessen. Der Geometriefaktor ergibt sich aus der Betrachtung der Potentialfeldausbreitung zweier Punktelektroden an der Grenzfläche eines homogenen Halbraumes [6]. Im Fall der Wenner-Konfiguration ist der Geometriefaktor für einen homogenen Halbraum nur vom Elektrodenabstand a abhängig (siehe Gl. 3).

$$k = 2 \cdot \pi \cdot a \qquad (3)$$

Bei der Anwendung des Wenner-Verfahrens an Stahlbetonbauteilen kann es aufgrund von Heterogenitäten im Beton zu Verzerrungen des elektrischen Feldes kommen. Dies kann z. B. auf die hohe Leitfähigkeit der Bewehrungsstäbe aus Baustahl, inhomogene Feuchteverteilungen im Beton oder karbonatisierte Betonbereiche zurückgeführt werden. Ferner kann die Bauteilgeometrie die Messergebnisse beeinflussen, so dass die Betrachtung eines Halbraums nicht zielführend ist. In diesen Fällen verliert Gl. 3 streng genommen ihre Gültigkeit. Die so ermittelten Werte werden daher als scheinbare spezifische Widerstände bezeichnet.

2 Elektrodenkonfigurationen

Das Ziel der elektrischen Widerstandstomographie liegt in der Berechnung der örtlichen Widerstandsverteilung, so dass bspw. Feuchteprofile erkannt, und Bereiche die durch die Bewehrung beeinflusst werden, eingegrenzt werden können. Das prinzipielle Verfahren kommt bereits im Bereich der Geophysik zum Einsatz [7]-[9]. Bei der Widerstandstomographie werden anhand unterschiedlicher Elektrodenanordnungen und -abstände zunächst scheinbare spezifische Widerstände ermittelt, die unterschiedliche Bereiche des Betonuntergrundes abbilden. Durch Inversionsberechnungen auf Basis numerischer Verfahren kann anschließend auf die tatsächliche Widerstandsverteilung im Beton geschlossen werden.

Durch gezielte Variation der Elektrodenpositionen und –abstände können Informationen zu parallel oder senkrecht zur Betonoberfläche verlaufenden Inhomogenitäten im Bauteil erfasst werden. Parallel zur Betonoberfläche verlaufende Widerstandsveränderungen, wie z. B. Beton- oder Spannstähle können durch eine Verschiebung der Elektroden lokalisiert werden, wohingegen durch Veränderung der Elektrodenabstände senkrecht zur Betonoberfläche verlaufende Widerstandsveränderungen, wie z. B. Feuchteprofile, besser erfasst werden können.

Die an der Betonoberfläche aufgesetzten Elektroden können verschieden angeordnet werden, wodurch unterschiedliche Messbereiche erzielt werden können. Neben der sogenannten Wenner-Alpha-Anordnung (siehe Abb. 1) gibt es unter anderem die Wenner Beta und Gamma, Schlumberger sowie Dipol-Dipol-Anordnungen (siehe Abb. 2), die allesamt verschiedene Vor- und Nachteile besitzen.

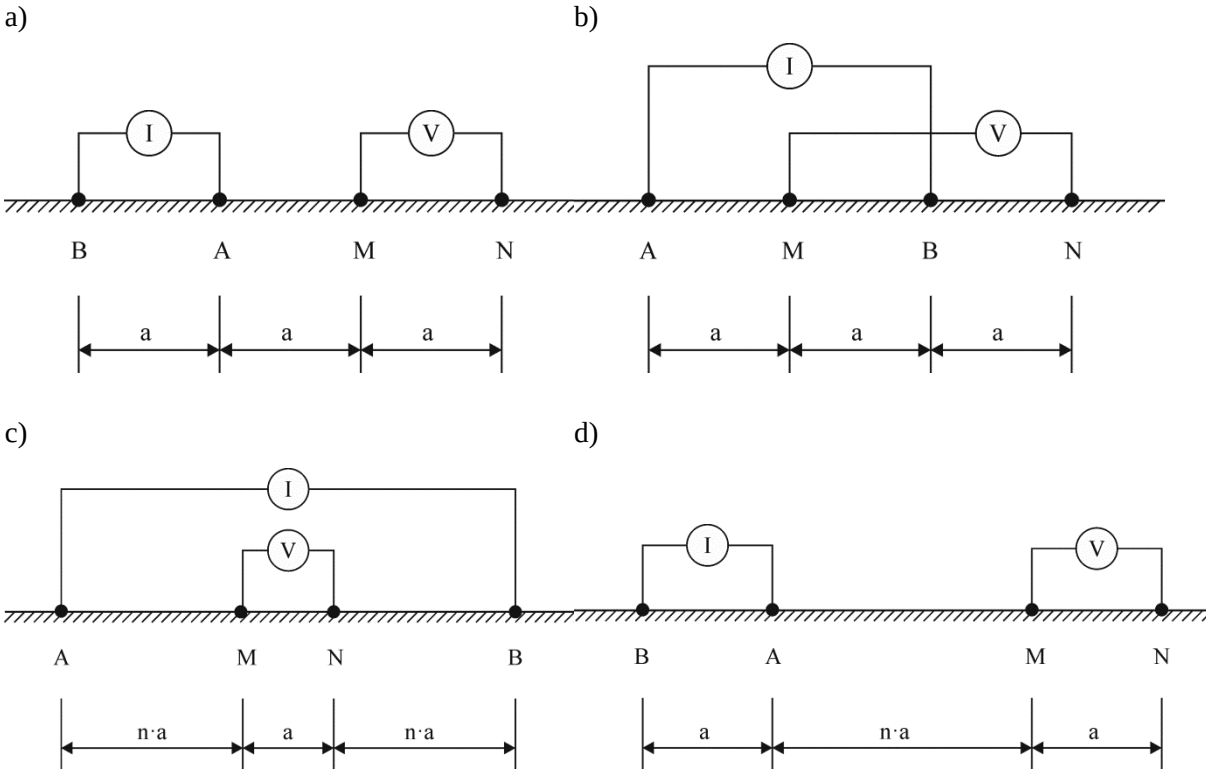

Abb. 2 Schematische Darstellung der Wenner Beta (a), Wenner Gamma (b), Schlumberger (c) und Dipol-Dipol (d) Elektrodenkonfigurationen

Die Unterschiede lassen sich über die Sensitivitätenverteilung erläutern [10]. Ein Sensitivitätswert beinhaltet eine Information über den Einfluss eines betrachteten Bereiches im Messobjekt auf den Messwert. Typischerweise weisen die elektrodennahen Bereiche die größten Sensitivitätswerte auf und haben somit den größten Einfluss auf den Messwert. Die Verteilung der Sensitivitäten im Messobjekt hängt maßgeblich von der Elektrodenkonfiguration und der vorliegenden Widerstandsverteilung ab. In Abb. 3 sind die Verteilungen für die Wenner-Alpha und die Dipol-Dipol-Konfiguration exemplarisch für einen homogenen Untergrund dargestellt. Die dunklen Bereiche weisen die höchsten Werte (positiv), Bereiche mit gestichelten Linien negative Werte auf. Befindet sich bei inhomogener Widerstandsverteilung ein leitfähiges Objekt in einem Bereich mit negativen Sensitivitäten, führt dies paradoxerweise zu einer Erhöhung des gemessenen scheinbaren Widerstandswertes. Dies wäre beispielsweise der Fall, wenn sich bei der Wenner-Alpha-Konfiguration ein Betonstahl mit sehr geringer Betondeckung zwischen einer Strom- und Potentialelektrode befindet.

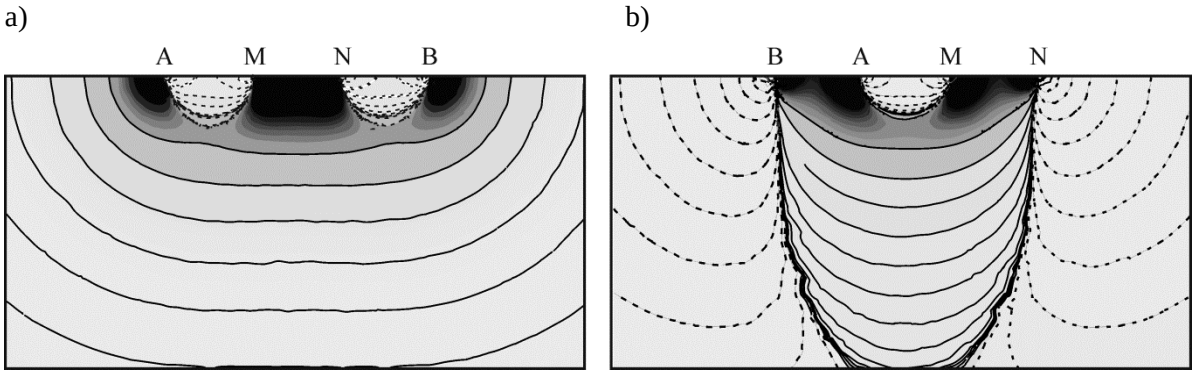

Abb. 3 Qualitative Darstellung der Sensitivitätenverteilung für die Wenner-Alpha- (a) und Dipol-Dipol-Konfiguration (b) bei homogenem Untergrund

Ferner geht aus Abb. 3 hervor, dass sich die Form der Bereiche mit hohen Sensitivitäten der Wenner- und der Dipol-Dipol-Anordnung deutlich unterscheiden, was sich im Abbildungsvermögen des Messobjektes widerspiegelt. Bei der letztgenannten Elektrodenkonfiguration kann ein wesentlich fokussierterer Bereich festgestellt werden, der mit einer größeren Messtiefe einhergeht.

Zur Bestimmung des scheinbaren spezifischen Widerstandes mittels Dipol-Dipol-Konfiguration muss der Geometriefaktor aus Gl. 4 berücksichtigt werden. Der Abstand zwischen den Elektrodendipolen beträgt hierbei ein Vielfaches (n) der Dipollängen (a).

$$k = \pi \cdot n \cdot (n+1) \cdot (n+2) \cdot a \qquad (4)$$

3 Elektrische Widerstandstomographie

Durch Variation der Abstände und Positionen der Elektroden soll mittels der elektrischen Widerstandstomographie ein Abbild der Widerstandsverteilung im Beton ermittelt werden. Um ein wiederholtes Umsetzen der Elektroden zu vermeiden, ist eine Mehrfachelektrodensonde mit 20 Elektroden für den Einsatz an Stahlbetonbauteilen entwickelt worden (siehe Abb. 4a).

a) b)

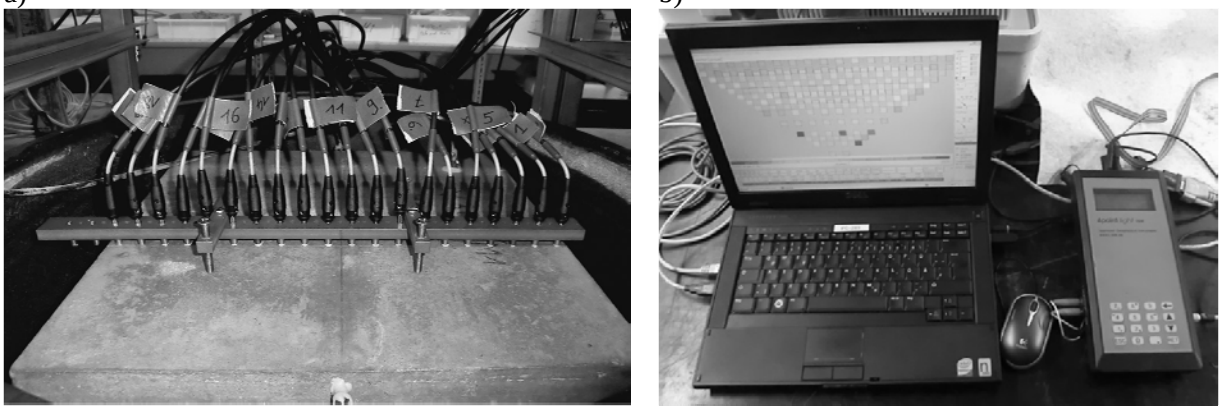

Abb. 4 Entwickelte Mehrfachelektrodensonde auf einem Betonprüfkörper (a) und rechnergestütztes Steuerungssystem (b)

Die vorgestellten Messungen wurden mit der Geoelektrik „4point light 10W“ der Fa. Lipmann [11] durchgeführt (siehe Abb. 4b). Die Apparatur erlaubt eine individuelle Schaltung der Elektroden um unterschiedliche Konfigurationen zu ermöglichen.

Nach der Messung liegt für jede Elektrodenschaltung, bestehend aus jeweils vier aktiven Elektroden, ein spezifischer scheinbarer Widerstandswert vor. Insgesamt werden üblicherweise mehrere Hundert Einzelwerte bei einem Messvorgang bestimmt. Diese Werte entsprechen nur im Fall eines homogenen Halbraumes, dem tatsächlichen Widerstand. Im vorliegenden inhomogenen Fall erfolgt die Berechnung der tatsächlichen Widerstandsverteilung numerisch, wobei ein inverses Randwertproblem zu lösen ist. Durch iteratives Vorgehen wird prinzipiell rückwärts, ausgehend von einer beobachteten Wirkung (Potentialverteilung), auf die Ursache (Widerstandsverteilung) geschlossen. Hierbei wird die Widerstandsverteilung eines Modellobjektes schrittweise angepasst und die durch Vorwärtsberechnung ermittelten synthetischen Messdaten mit den Messwerten verglichen. Sind die Abweichung beider Datensätze minimal, so kann von einer bestmöglichen Approximation unter den zugrundeliegenden Randbedingungen ausgegangen werden. Die Umsetzung erfolgt über die Laplace-Gleichung (Gl. 5) wobei die Stromeinspeisung über die Neumann-Randbedingung (Gl. 6) und die Potentialdifferenzen über die Dirichlet-Randbedingung (Gl. 7) berücksichtigt wird ([7]-[9]).

$$-\nabla \cdot \sigma \nabla \Phi = 0 \; in \; \Omega \qquad (5)$$

$$-\sigma \frac{\partial \Phi_{AB}}{\partial n} = j_{AB} \; auf \partial \Omega \qquad (6)$$

$$\nabla \Phi_{MN} = U_{MN} \; auf \partial \Omega \qquad (7)$$

Hierbei entspricht σ der elektrischen Leitfähigkeit, Φ der Potentialverteilung, j der Stromdichte und U der gemessenen Spannung. Bei den vorgestellten Untersuchungen sind die Inversionsberechnungen mithilfe des Programms RES2DINV [12] durchgeführt worden, das für geophysikalische Fragestellungen entwickelt wurde.

4 Ergebnisse

Zur Untersuchung des Einflusses der Elektrodenanordnung auf die ermittelte Widerstandsverteilung sind unter anderem vergleichende Messungen mit der Wenner-, sowie der Dipol-Dipol-Anordnung durchgeführt worden. Der Achsabstand der Elektroden betrug jeweils 20 mm. Die Messungen sind mit einer Frequenz von 25 Hz durchgeführt worden. Der Betonprüfkörper mit den Abmessungen von 40/40/20 cm wurde bis kurz vor der Messung wassergelagert. Mittig verläuft ein Betonstahl mit einem Durchmesser von 12 mm und einer Betondeckung von 10 mm. Die Mehrfachelektrodensonde wurde quer zum Betonstahl positioniert.

In Abb. 5 sind die ermittelten Widerstandsverteilungen dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Wenner-Konfiguration zu einer mangelhaften Abbildung der Bewehrung führt, wohingegen mit Hilfe der Dipol-Dipol-Konfiguration eine gute Lokalisierung erreicht werden kann. Dies ist in erster Linie auf die unterschiedlichen Sensitivitätenverteilungen aus Abb. 3 zurückzuführen. Aufgrund der deutlich fokussierteren Bereiche mit hohen Sensitivitätswerten kann mit der Dipol-Dipol-Anordnung ein besseres laterales Auflösungsvermögen erreicht werden.

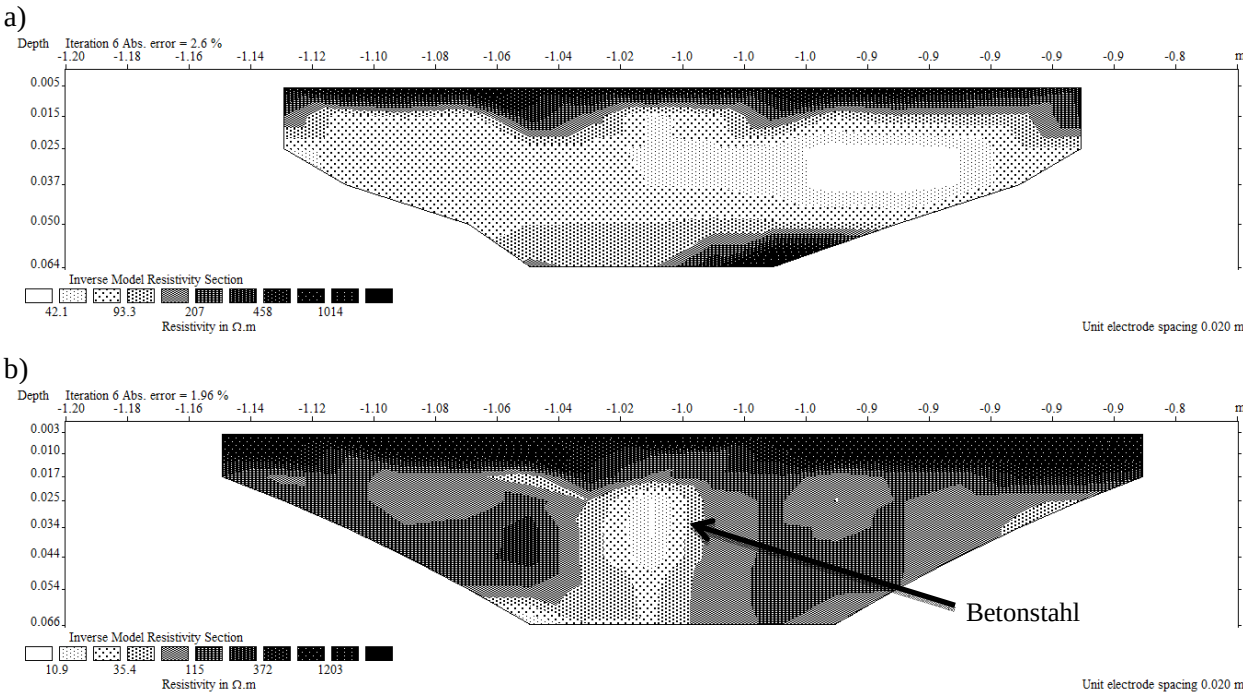

Abb. 5 Widerstandsverteilung gemessen mit Wenner-Alpha- (a) und Dipol-Dipol-Konfiguration (b)

An der Oberfläche kann zudem ein hoher Widerstandsgradient festgestellt werden. Durch ergänzende Messungen mittels Nuclear Magnetic Resonance Verfahren (NMR, [13]) konnte oberflächennah eine erhöhte Porosität festgestellt werden. Dies ist auf eine gestaffelte Gesteinskörnungsverteilung an geschalten Betonflächen zurückzuführen (z.B. [14]). Im wassergesättigten Fall liegt somit eine wenige Millimeter dicke Schicht mit einem niedrigeren spezifischen Widerstand vor. Mittels numerischer Analysen können aufgrund dieser Inhomogenität negative Sensitivitäten im oberflächennahen Bereich bestimmt werden, wodurch sich der Widerstandsanstieg erklären lässt. Zur Klärung dieses Randeffektes wurde die Oberfläche des Prüfkörpers abgeschliffen und die Messung wiederholt.

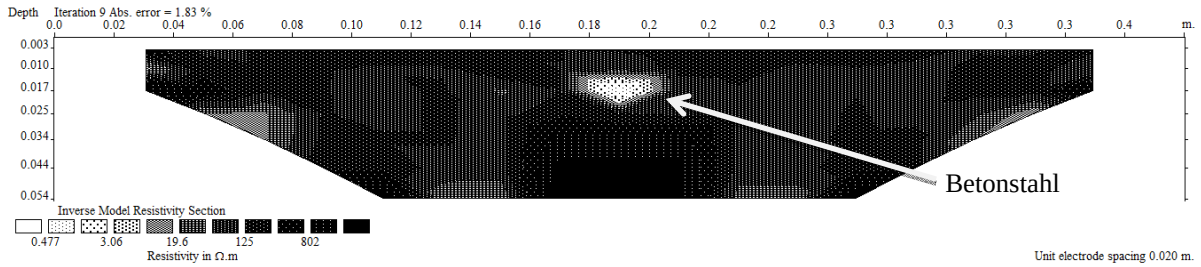

Abb. 6 Widerstandsverteilung gemessen mit Dipol-Dipol-Konfiguration

Das Ergebnis in Abb. 6 zeigt, dass der oberflächennahe Widerstandsgradient nahezu vollständig reduziert ist, wodurch die beschriebene Ursache bestätigt werden kann. Weitere Untersuchungen haben gezeigt, dass eine Berücksichtigung oberflächennaher Effekte im numerischen Modell ebenfalls zu adäquaten Ergebnissen führt.

5 Schlussfolgerungen

Mit der elektrischen Widerstandstomographie steht ein vielversprechendes Verfahren zur Verfügung, das im Vergleich zu den heute üblichen Verfahren eine präzisere und zuverlässigere Ermittlung des spezifischen Betonwiderstands erlaubt. Es konnte gezeigt werden, dass das Verfahren prinzipiell an Stahlbetonbauteilen angewendet werden kann. Durch die Berücksichtigung z. B. der vorhandenen Bewehrung wird nicht nur eine präzisere Bestimmung eines gemittelten Widerstandswertes des umgebenden Betons ermöglicht, sondern ebenfalls eine Ermittlung der örtlichen Verteilung des Widerstandes und damit korrelierender Eigenschaften, wie z. B. Wassersättigungsgrad, Chloriddiffusionswiderstand, Korrosionsgeschwindigkeit oder Porosität.

6 Danksagungen

Das Projekt wurde durch eine „Seed Fund“-Förderung seitens der RWTH Aachen University ermöglicht. Die Untersuchungen sind in Kooperation mit Herrn Prof. Christoph Clauser und Herrn Dr. Norbert Klitzsch vom „Institute for Applied Geophysics and Geothermal Energy“ der RWTH Aachen University durchgeführt worden. Großer Dank gilt den Herren Prof. Michael Raupach, Prof. Clauser, Dr. Klitzsch und Dr. Oliver Weichold für die angeregten Diskussionen sowie Herrn Udo Antons für die Hilfestellung bei den NMR Messungen.

Literatur

[1] Warkus, J.; Raupach, M.: *Modelling of Reinforcement Corrosion - Geometrical Effects on Macrocell Corrosion.* In: Materials and Corrosion 61 (2010), Nr. 6, S. 494-504 ISSN 0947-5117

[2] Raupach, M.: *Models for the Propagation Phase of Reinforcement Corrosion - an Overview*. In: Materials and Corrosion 57 (2006), Nr. 8, S. 605-613

[3] Andrade, C.; D'Andrea, R. ; Castillo, A. ; Castellote, M.: *The Use of Electrical Resistivity as NDT Method for the Specification of the Durability of Reinforced Concrete*. Paris : LCPC, 2009. - In: 7th International Symposium on Non Destructive Testing in Civil Engineering : Nantes, France, June 30th to July 3rd 2009, (Abraham, O. ; Derobert, X. (Eds.)), S. 497-502

[4] Weydert, R.; Gehlen, C.: *Electrolytic Resistivity of Cover Concrete: Relevance, Measurement and Interpretation*. Ottowa ; NRC Research Press, 1999. - In: Durability of Building Materials and Components, Proceedings of the Eight International Conference, Vancouver, May 30 - June 3,1999, (Lacasse, M.A. ; Vanier, D.J. (Ed.)), Vol 1, S. 409-419

[5] Castellote, M.; Andrade, C.: *Round-Robin Test on Methods for Determining Chloride Transport Parameters in Concrete.* In: Materials and Structures (RILEM) 39 (2006), Nr. 10, S. 955-990

[6] Wenner, F.: *A Method of Measuring Earth Resistivity*. In: Bulletin of the Bureau of Standards 12 (1915), S. 469-478

[7] Friedel, S. (2000). *Über die Abbildungseigenschaften der geoelektrischen Impedanztomographie unter Berücksichtigung von endlicher Anzahl und endlicher Genauigkeit der Meßdaten*: Shaker.

[8] Viergever, M. A. & Todd-Pokroper, A. E. (1987). *Mathematics and computer science in medical imaging*.

[9] Lines, L. R. & Treitel, S. (1984). *Tutorial - a Review of Least-Squares Inversion and Its Application to Geophysical Problems*. Geophysical Prospecting, 32(2), 159-186.

[10] Barker, R.D.: *Signal Contribution Sections and their Use in Resistivity Studies.* In: Geophysical Journal of Royal Astronomical Society 59 (1979), Nr. 1, S. 123-129

[11] Geotest v 2.39 (2012), Geophysik Dr. Rauen, http://geophysik-dr-rauen.de

[12] Geotomo Software Sdn. Bhd. (2011): RES2DINV v.3.5, www.geoelectrical.com

[13] Antons, U. ; Raupach, M.: *Zerstörungsfreie Visualisierung von hydrophob wirksamen Schichten in Beton. In: Restoration of Buildings and Monuments 18* (2012), Nr. 5, S. 287-302 ISSN 1864-7251

[14] Stoeckl, S. (1966). *Das unterschiedliche Verformungsverhalten der Rand- und Kernzone von Beton*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, (Heft 185). Berlin.