

Überwachung der Korrosionsgefahr für die Bewehrung bei Trägern mit geringer Betonüberdeckung mittels Einbausensoren

T 2644

T 2644

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

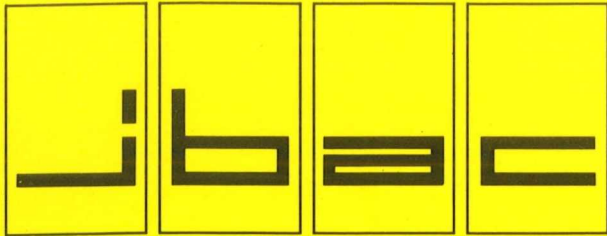
Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

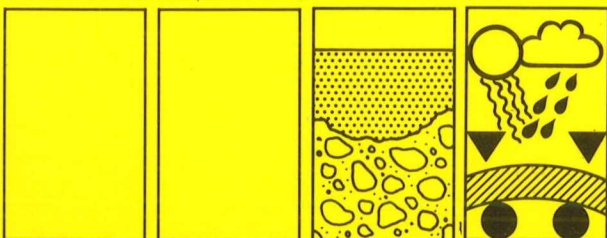
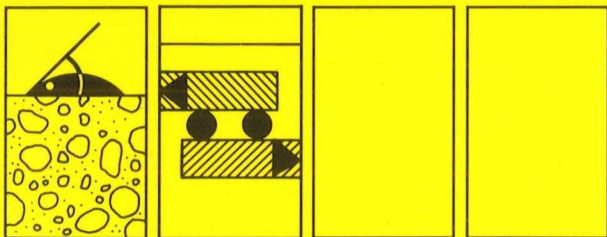
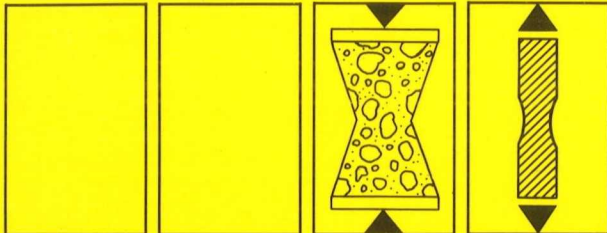
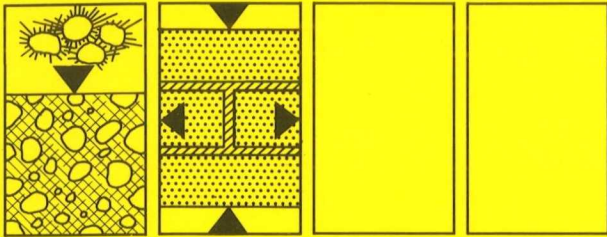
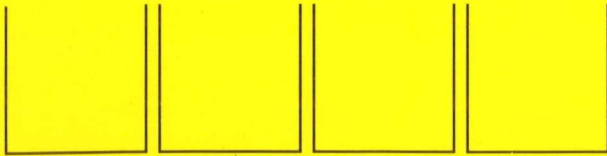
Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

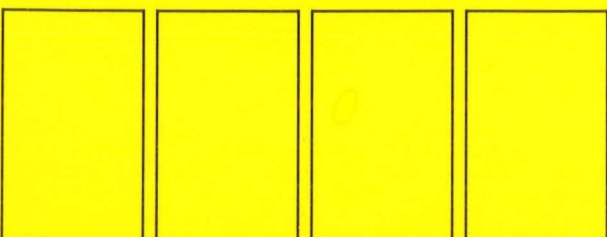


Institut für Bauforschung Aachen
 Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule



Baustoff · Bauteil · Bauwerk

**Forschung · Entwicklung
 Überwachung
 Prüfung · Beratung**

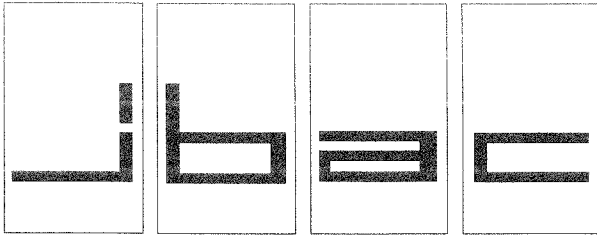


Überwachung der Korrosionsgefahr für die
 Bewehrung bei Trägern mit geringer
 Betonüberdeckung mittels Einbausensoren

ABSCHLUSSBERICHT

F 389
 vom 20.04.1994

Postfach · D-52056 Aachen
 Schinkelstr. 3 · D-52062 Aachen (Direktzustellung)
 Tel. (02 41) 80-5100 · Telex 832 704 THACD
 Telefax (02 41) 80-5120



INSTITUT FÜR BAUFORSCHUNG
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

Direktoren: Professor Dr.-Ing. H. R. Sasse · Professor Dr.-Ing. P. Schießl

Schinkelstraße 3, D-52056 Aachen

Telefon (02 41) 80-51 00 · Telex 8 32 704 thac d · Telefax (02 41) 8888-139

Bre/Fk

THEMA

Überwachung der Korrosionsgefahr für die
Bewehrung bei Trägern mit geringer
Betonüberdeckung mittels Einbausensoren

ABSCHLUSSBERICHT

Forschungsbericht Nr.

F 389
vom 20.04.1994

Projektleiter

Prof. Dr.-Ing. P. Schießl

Sachbearbeiter

Dipl.-Ing. W. Breit
Dipl.-Ing. T. Souchon

Auftraggeber/
Förderer

Deutsches Institut für Bautechnik
Reichpietschufer 74-76

10785 Berlin

Auftragsdatum
Aktenzeichen

12.02.1991
IV 1-5-582/89

Dieser Bericht umfaßt 68 Seiten, davon 68 Textseiten.
Soweit Versuchsmaterial nicht verbraucht ist, wird es nach 4 Wochen vernichtet.
Eine längere Aufbewahrung bedarf einer schriftlichen Vereinbarung.
Die auszugsweise Veröffentlichung dieses Berichtes, seine Verwendung für Werbezwecke sowie die inhaltliche Übernahme in Literaturdatenbanken bedürfen der Genehmigung des ibac.

<u>INHALTSVERZEICHNIS</u>		Seite
1	EINFÜHRUNG.....	1
1.1	Problemstellung.....	1
1.2	Ziel der Untersuchungen.....	1
2	GRUNDLAGEN.....	2
2.1	Allgemeines.....	2
2.2	Elektrolytischer Widerstand.....	2
2.3	Betontechnologische Einflußgrößen auf den Elektrolytwiderstand.....	4
2.3.1	Betonalter (Hydratationsgrad).....	4
2.3.2	Wasserzementwert des Betons.....	5
2.3.3	Zementart und Zusatzstoffe.....	7
2.3.4	Zuschlagsieblinie und Zementsteingehalt.....	8
2.3.5	Nachbehandlungsdauer.....	9
2.4	Lagerungsbedingte Einflußgrößen auf den Elektrolytwiderstand.....	9
2.4.1	Temperatur.....	9
2.4.2	Umgebungsfeuchte.....	10
2.4.3	Karbonatisierung.....	10
2.4.4	Chloridcontamination.....	10
3	MESSVERFAHREN.....	12
3.1	Grundlagen.....	12
3.2	Meßprinzip und Meßgerät.....	13
4	MULTI-RING-ELEKTRODE.....	15
4.1	Weiterentwicklung der Multi-Ring-Elektrode.....	17
4.2	Kontaktfläche Multi-Ring-Elektrode zum Beton.....	18
5	VERSUCHSBESCHREIBUNG.....	19
5.1	Aufbau der Prüfkörper und Versuchsparameter.....	19

<u>INHALTSVERZEICHNIS</u>		Seite
5.2	Lagerungsbedingungen.....	23
5.2.1	Laborklima.....	23
5.2.2	Lagerung im Freien	24
5.3	Nachbehandlung mit Heißluft.....	24
5.4	Beaufschlagung mit Kohlendioxid.....	26
6	AUSWERTUNG	26
6.1	Darstellung der Ergebnisse	26
6.1.1	Skalierung der Widerstandsprofile.....	26
6.1.2	Ungenauer Einbau der Multi-Ring-Elektroden.....	27
6.2	Versuchsergebnisse	28
6.2.1	Einfluß des Betonalters.....	28
6.2.2	Einfluß des Wasserzementwertes.....	29
6.2.3	Einfluß der Zementart und der Zusatzstoffe.....	31
6.2.4	Einfluß der Zuschlagsieblinie	33
6.2.5	Einfluß der Nachbehandlung	34
6.2.6	Einfluß der Umgebungsbedingungen (Temperatur und Feuchtigkeit)	36
6.2.7	Ergebnis der Wasserbeaufschlagung	37
6.2.8	Ergebnis der Schnellkarbonatisierung.....	39
7	NACHTRÄGLICHER EINBAU	41
7.1	Zielsetzung und Problematik	41
7.2	Ankopplungsmedium.....	41
7.2.1	Anforderungen	41
7.2.2	Ummantelung der Multi-Ring-Elektrode	42
7.2.2.1	Injektionsfähigkeit der Mörtel bzw. Zementleime.....	42
7.2.2.2	Leitfähigkeit der Mörtel bzw. Zementleime.....	44
7.2.2.3	Bewertung der Ummantelten Multi-Ring-Elektrode	46
7.2.3	Leitfähigkeit geeigneter Produkte nach dem Einbau	49
7.2.4	Empfehlung für Ankopplungsmedien	52

<u>INHALTSVERZEICHNIS</u>		Seite
7.3	Ankopplungsverfahren	53
7.3.1	Bohrlochmaße	53
7.3.2	Montageanleitung	54
8	ZUSAMMENFASSUNG	62
9	AUSBLICK.....	63
10	LITERATUR.....	63

1 EINFÜHRUNG

1.1 Problemstellung

In den 60er Jahren wurden in größerem Umfang Spannbeton-Träger mit kleinen Querschnitten und geringer Betonüberdeckung im Spannbettverfahren hergestellt. In bestimmten Einbausituationen, wie z. B. in Viehställen, sind die Stähle besonders korrosionsfördernden Einflüssen ausgesetzt. In Süddeutschland führten verformungslose Spannstahlbrüche zum Einsturz mehrerer Deckenkonstruktionen; eine Vielzahl von Viehställen gilt als besonders gefährdet.

Wenn die Stalldecken nach der Prüfung als schadensfrei eingestuft wurden oder wenn bestimmte Korrosionsschutzmaßnahmen (z. B. Betonoberflächenbeschichtungen) getroffen wurden, stellt sich die Frage nach der Dauerhaftigkeit der Instandsetzungsmaßnahme. Diese Frage könnte durch Einbau einfacher Sensoren beantwortet werden, die anzeigen, ob unter den gegebenen Bedingungen die Korrosion der Bewehrung überhaupt möglich ist. Bei frühzeitigem Erkennen der Korrosionsgefahr z. B. infolge eines Nachlassens der Wirksamkeit einer Schutzmaßnahme (z. B. Oberflächenbeschichtung) können Schäden durch entsprechend frühzeitig einzuleitende Schutzmaßnahmen verhindert werden.

1.2 Ziel der Untersuchungen

Die in den letzten Jahren am Institut für Bauforschung der RWTH Aachen (ibac) durchgeführten intensiven Untersuchungen zur Meßbarkeit von Korrosionsvorgängen bei Stahl im Beton haben unter anderem zur Entwicklung der Multi-Ring-Elektrode geführt, mit der durch Widerstandsmessungen in der Betonrandzone die Betonfeuchte indirekt bestimmt und damit die Korrosionsgefährdung der Bewehrung abgeschätzt werden kann. Insbesondere bei Bewehrungslagen mit geringer Betonüberdeckung oder bei Maßnahmen zur Reduzierung des Wassergehaltes ist zur Beurteilung der Korrosionsgefahr die Feuchteverteilung in den oberflächennahen Schichten von Bedeutung. Allerdings wurden mit der Multi-Ring-Elektrode bisher nur Grundsatzuntersuchungen zur prinzipiellen Eignung als Korrosions- bzw. Feuchtesensor durchgeführt. Für die Verwendung z. B. in Viehstalldecken muß der Sensor noch weiterentwickelt werden, um eine möglichst einfache und sichere Handhabung zu gewährleisten. Insbesondere muß ein baustellengeeignetes Verfahren entwickelt werden, das den nachträglichen Einbau der Multi-Ring-Elektroden in bestehende Bauwerke ermöglicht.

2 GRUNDLAGEN

2.1 Allgemeines

Der Feuchtegehalt des Betons hat maßgeblichen Einfluß auf die meisten bautechnischen Eigenschaften dieses Baustoffes wie die Wärmeleitfähigkeit, den Diffusions-, den Frost- und den Verformungswiderstand (E-Modul) oder das Kriechen. Auch die Korrosion in Stahlbetonbauwerken ist als elektrochemischer Vorgang an einen Stromtransport gebunden, der vom Feuchtegehalt des Betons bestimmt wird.

Einen exakten Feuchtegehalt des Betons liefert der Gewichtsverlust durch Trocknen einer Betonprobe. Für die Baupraxis interessant sind jedoch solche zerstörungsfreien oder zerstörungsarmen Prüfmethode, bei denen über feuchtigkeitsabhängige Betonkennwerte ein Feuchteprofil im Beton erstellt werden kann.

Eine solche zerstörungsarme Prüfmethode ist die elektrische Widerstandsmessung. Das Verfahren ist einfach zu handhaben und erfordert einen geringen Kostenaufwand.

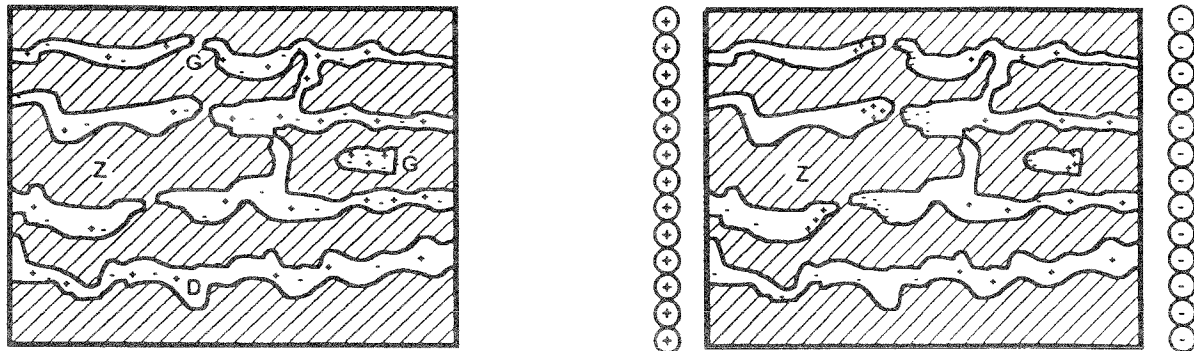
2.2 Elektrolytischer Widerstand

Beton stellt im Grundsatz ein Zweikomponentensystem aus Zuschlag und erhärtetem Bindemittel (i. d. R. Zementstein) dar.

Trockene Natursteine besitzen einen hohen spezifischen Widerstand. Hieraus kann abgeleitet werden, daß der Zuschlag auf die Leitfähigkeit von Beton praktisch keinen Einfluß hat (z. B. Quarz 10^{11} - 10^{13} Ωm , Kalkstein 10^4 - 10^6 Ωm /1, 2/). Im Zementstein finden sich in Abhängigkeit des Feuchtegehaltes unterschiedliche Formen der Elektrizitätsleitung, die in /3/ beschrieben sind.

Der Stromtransport im erhärteten, wassergesättigten Beton ist ein elektrolytischer Prozeß und erfolgt über die im Beton vorhandene wässrige Phase, also hauptsächlich über die wassergefüllten Kapillarporen des Zementsteins /4/. Der spezifische Widerstand für wassergesättigte Betone liegt bei etwa 10^2 Ωm /1/.

Der Ladungstransport findet in einer Lösung (Elektrolyt) statt, die bei der Reaktion von Wasser mit den leicht löslichen Bestandteilen des Zements entsteht. Die in dieser Porenlösung vorhandenen positiv und negativ geladenen Ionen stehen, homogen verteilt, als frei bewegliche Ladungsträger zum Ladungstransport zur Verfügung (Bild 1a).



a) Stromloser Zustand

b) Wirkung eines elektrischen Gleichstromfeldes

Bild 1: Verteilung positiv und negativ geladener Ionen ohne und mit Wirkung eines elektrischen Gleichstromfeldes nach /5/
 mit Z = Poren im Zementgel,
 D = durchgehende Kapillarporen,
 G = geschlossene, nicht durchgehende Poren.

Bei Anlegen eines elektrischen Feldes, z. B. über zwei mit einer Gleichspannungsquelle verbundene Elektroden, werden die Ionen in Richtung der Elektroden beschleunigt. In durchgehenden Kapillarporen wandern sie mit konstanter Geschwindigkeit zu den Elektroden, und zwar die positiv geladenen Ionen (Kationen) zur Kathode und die negativ geladenen Ionen (Anionen) zur Anode (Bild 1b). An den Elektroden entladen sich die Ionen. Dieser gerichtete Massentransport wird als Migration oder Ionenwanderung bezeichnet (Transport elektrischer Ladung in eine Vorzugsrichtung als elektrischer Strom).

Bei halbfeuchten Betonen ($> 70\%$ r.F.) kann die Ionenleitung auch über Wasserfilme erfolgen, die sich durch Anlagerung von Wassermolekülen an der Oberfläche der Kapillarporen bilden /3/. Der spezifische Widerstand liegt zwischen 10^2 und $10^5 \Omega\text{m}$.

Wird das verdampfbare Porenwasser im Zementstein etwa durch Trocknen bei 105°C ausgetrieben, steigt der spezifische Widerstand auf Werte deutlich über $10^5 \Omega\text{m}$ (z. B. /3, 6/). Der trockene Beton wirkt wie ein Isolator.

Der Widerstand, den der Beton dem Durchgang des Stroms entgensetzt, ist demnach abhängig von der Betonfeuchte, also der Menge des verdampfbareren Wassers in den Kapillarporen und dessen chemischer Zusammensetzung (Ionenkonzentration), aber auch ganz entscheidend von der Porenstruktur, dem Weg, den die Ionen durch die Kapillaren zurücklegen müssen.

2.3 Betontechnologische Einflußgrößen auf den Elektrolytwiderstand

2.3.1 Betonalter (Hydratationsgrad)

Die Abhängigkeit von der Menge verdampfbaren Kapillarwassers und der Geldichte (bzw. der verbleibenden, durchgehenden Kapillaren) erklärt den Anstieg des elektrolytischen Widerstandes mit zunehmendem Alter, d. h. mit zunehmendem Hydratationsgrad.

Bis die Hydratation abgeschlossen ist, wird der Anteil an freiem Wasser mit zunehmendem Alter fortlaufend reduziert (z. B. von 60 Vol.-% beim Anmachen auf 20 Vol.-% nach abgeschlossener Hydratation /2/). Das gebundene Wasser steht für den Stromtransport nicht mehr zur Verfügung, der elektrische Widerstand des Betons steigt an.

Zusätzlich wird mit fortschreitender Hydratation der Raum zwischen den Zementteilchen mit Zementgel ausgefüllt und somit der zunächst vorhandene Kapillarraum verringert. Der Einfluß zunehmender Geldichte (abnehmender Kapillarporosität) auf den Widerstand des Betons wird ersichtlich, wenn man den tatsächlichen Anstieg des Widerstandes mit dem vergleicht, der sich aus dem Verbrauch des Wassers bei der Hydratation errechnen läßt /1, 4/. Wieviele Kapillaren nach abgeschlossener Hydratation im Zementstein verbleiben, wird durch den Wasserzementwert bestimmt.

Der Verlauf des elektrolytischen Widerstandes in Abhängigkeit vom Alter wird in /1, 4, 7/ dargestellt. Die Hydratationsgeschwindigkeit nimmt mit zunehmendem Alter laufend ab, ebenso der Anstieg des Widerstandes. In /7/ wird ein rapider Anstieg des Widerstandes von Zementleim bzw. Zementstein in den ersten 20 Tagen nach Herstellung mit Portlandzement gemessen (Bild 2). Nach 30 Tagen hat der Widerstand des Zementsteins mit einem Wasserzementwert von 0,8 etwa 90 % seines 128-Tage-Wertes erreicht. Nach 128 Tagen kann die Hydratation als weitestgehend abgeschlossen betrachtet werden.

Es ist deutlich zu erkennen, daß die Hydratationsgeschwindigkeit in Abhängigkeit vom Wasserzementwert variiert. Der Zementstein mit dem Wasserzementwert 0,5 benötigt etwa 70 Tage zum Erreichen von 90 % seines Widerstandes nach 128 Tagen. Einen Überblick über den Verlauf des Hydratationsgrades in Abhängigkeit von der Zeit und dem Wasserzementwert liefert z. B. /1/.

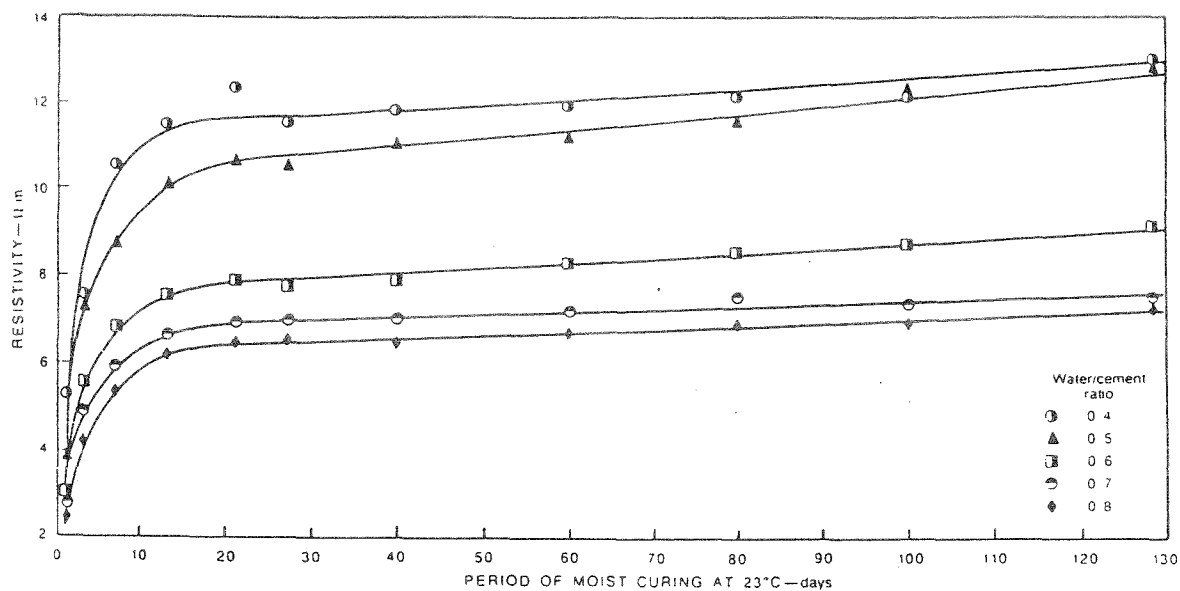


Bild 2: Zeitlicher Verlauf des elektrischen Widerstands von Zementstein nach /7/

2.3.2 Wasserzementwert des Betons

Zur vollständigen Hydratation des Zementes sind ungefähr 40 % des Zementgewichts an Wasser ($w/z = 0,4$) erforderlich. Enthält der Zementleim eine größere Wassermenge, verteilt sich das überschüssige Wasser als Kapillarwasser im erhärteten Beton.

Für wassergesättigte Betone ergibt sich hieraus die Folgerung, daß mit steigendem Wasserzementwert ($> 0,4$) die Kapillarporosität und der Gehalt an Kapillarwasser steigt und damit der elektrische Widerstand sinkt.

Umgekehrt steigt der Widerstand mit steigendem Wasserzementwert für Betone, die nach Herstellung und sachgemäßer Nachbehandlung luftgelagert werden und austrocknen können (etwa bei einem Laborklima von 20 °C und 40 % r.F., Bild 3). Hierfür können zwei Gründe aufgeführt werden:

- Die Menge an Wasser, die bis zu einer bestimmten Reife (Alter) im Zementstein chemisch gebunden ist, hängt von der Hydratationsgeschwindigkeit und damit von der Zementart und dem Wasserzementwert ab. Bei gleichem Anmachwassergehalt ist die Menge an chemisch gebundenem Wasser um so größer, je höher der Wasserzementwert ist. Nach /8/ können Unterschiede von bis zu 4 % (bezogen auf den Zementgehalt) auftreten.

- Aus einem Beton mit einem höheren Wassergehalt, d. h. mit einem höheren Wasserzementwert, kann in gleicher Zeit mehr Wasser aus dem Zementstein verdunsten, eine Tatsache, die sich bekanntlich auch auf das Endschwindmaß von Zementstein auswirkt /8/.

In trockenem Zustand enthält demnach der Beton mit höherem Wasserzementwert weniger (oder kein) für den Stromtransport notwendiges Kapillarwasser.

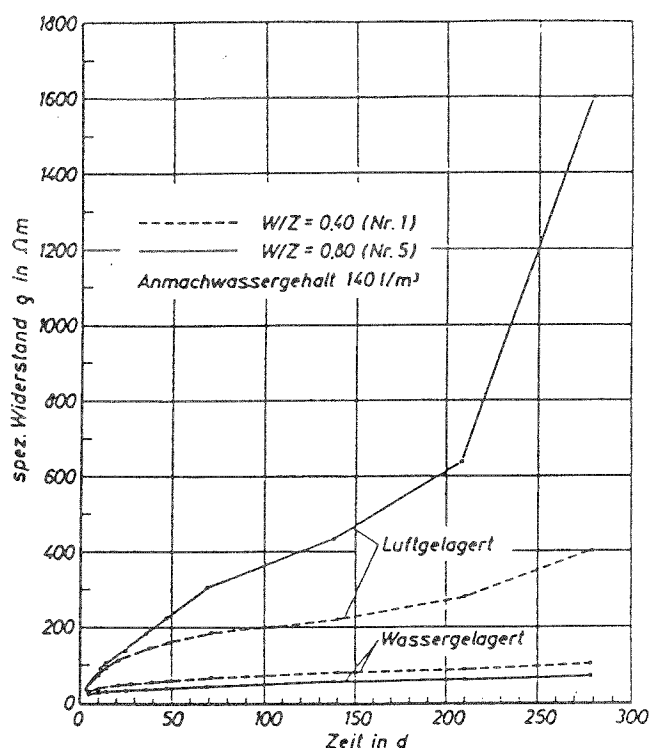


Bild 3: Einfluß der Lagerung auf den spezifischen Widerstand nach /1/

Dies entspricht dem Ergebnis von /1/, nach dem die Differenz der Menge verdunstbaren Wassers zwischen zwei Betonen ($w/z = 0,4$ bzw. $0,8/w = 140 \text{ kg/m}^3$) nach 250 Tagen trockener Lagerung 16 l/m^3 betrug (Bild 4).

Bei welchen Umgebungsbedingungen der geringe Elektrolytgehalt gegenüber der großen Kapillarporosität bezüglich des elektrolytischen Widerstandes überwiegt, d. h. der Beton mit höherem Wasserzementwert einen größeren Widerstand besitzt, ist noch nicht vollständig geklärt. Sicher scheint dies für ständig sehr trockene Bedingungen unterhalb einer Luftfeuchtigkeit von 75 % r.F. der Fall zu sein /9/.

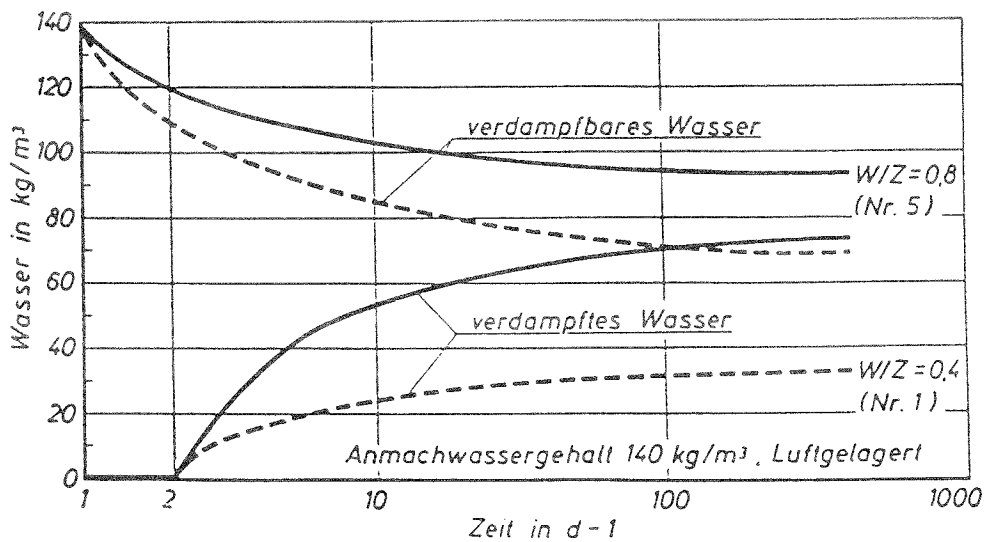


Bild 4: Zeitabhängigkeit der Wasserverteilung im Beton bei Austrocknung nach /1/

2.3.3 Zementart und Zusatzstoffe

Von allen, die Betonqualität bestimmenden Parametern ist der Einfluß der Zementart auf den Widerstand am größten.

Die im Bauwesen verwendeten Zemente entstehen im wesentlichen durch Mahlen von Portlandzementklinker und Gips oder auch weiteren reaktionsfähigen Komponenten, den Zumahlstoffen. Diese beeinflussen die chemischen und physikalischen Eigenschaften des Zementsteins und damit auch seine elektrolytische Leitfähigkeit.

Gebäuchlicher Zumahlstoff ist Hüttensand, von zunehmendem Interesse sind Flugaschen und Silicastaub. Alle drei Produkte können unter bestimmten Bedingungen auch als Betonzusatzstoff nach DIN 1045 verwendet, d. h. beim Mischen zugegeben werden.

Hüttensand entsteht durch schnelles Abkühlen von Hochofenschlacke, die bei der Roheisengewinnung anfällt. Der Hüttensand zählt zu den latent hydraulischen Stoffen, d. h. er kann in Verbindung mit Wasser hydraulisch erhärten. Hüttenzemente haben gegenüber den Portlandzementen in hohem Alter einen größeren Anteil an chemisch gebundenem Wasser und einen größeren Anteil Gelporen am Gesamtporenvolumen /8/. Beide Eigenschaften führen zu einer Erhöhung des elektrolytischen Widerstands.

Steinkohlenflugaschen sind Verbrennungsrückstände, die bei der Erzeugung elektrischer Energie in Kohlekraftwerken anfallen. Die Steinkohlenflugaschen gehören zur Gruppe der Puzzolane, Stoffe, die mit Wasser und Kalkhydrat zementsteinähnliche Produkte bilden. Die Auswirkung von Flugaschezusätzen auf den elektrischen Widerstand des Festbetons liegt in der Reduzierung des Kapillarporengehaltes durch die puzzolanische Reaktion des Flugascheanteils im Zement und der damit verbundenen Einschränkung der Ionenleitfähigkeit. Nach /10/ ist der elektrolytische Widerstand von Zementstein, der mit Flugasche hergestellt wurde, gegenüber Portlandzementstein bei gleichen Bedingungen 3- bis 4mal höher.

Silicastaub ist ebenfalls ein industrielles Nebenprodukt, das bei der Herstellung von Ferro-Silicium-Legierungen anfällt. Aufgrund seiner hohen Feinheit und extrem starken puzzolanischen Wirkung werden auch feinste Porenräume im Zementstein gefüllt und die Kapillarporosität verringert. Hieraus ergibt sich schon sehr früh ein hoher elektrolytischer Widerstand.

Der Elektrolytwiderstand kann demnach durch folgende Maßnahmen bei der Zement- bzw. Betonzusammensetzung vergrößert werden /9/:

- Hüttensandgehalt im Zement (EPZ, HOZ, HOZ-NW/HS) möglichst hoch wählen,
- Steinkohlenflugasche oder Silikastaub zugeben.

Über den Einfluß des C_3A Gehaltes von Zement auf den Elektrolytwiderstand liegen widersprüchliche Ergebnisse vor /9, 11, 12/.

2.3.4 Zuschlagsieblinie und Zementsteingehalt

Die elektrische Leitfähigkeit des Betons kann allein dem Zementstein zugeschrieben werden.

Bei gleichem Zementsteingehalt ist also die elektrolytische Leitfähigkeit unabhängig von der Sieblinie des Zuschlags bzw. unabhängig vom Größtkorn.

Für einen Beton mit vorgeschriebener Druckfestigkeit ergibt sich der Zementbedarf und damit der Zementsteingehalt aus dem Wasserzementwert und der Kornzusammensetzung des Zuschlags bzw. dessen Wasseranspruch. Grobkörniger Zuschlag hat einen geringeren Wasseranspruch und damit einen geringeren Zementbedarf, weshalb der elektrische Wi-

derstand eines Betons mit Sieblinie A32 größer ist als etwa der mit Sieblinie A/B16 /9/, sofern keine Fließmittel verwendet wurden.

Der Einfluß von Zusatzmitteln wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhabens nicht untersucht.

2.3.5 Nachbehandlungsdauer

Die Auswirkung unterschiedlicher Nachbehandlung auf den elektrischen Widerstand des Betons ist noch nicht systematisch untersucht worden.

Die Dauer der Nachbehandlung beeinflusst entscheidend die Hydratation der Betonrandzone. Fehlt an der Betonoberfläche das für die Hydratation notwendige Feuchtigkeitsangebot (> 80 % r.F.), wird der Kapillarraum nicht mehr durch Hydratationsprodukte gefüllt und bleibt durchlässig.

Für einen im Gebrauchszustand ständig trocken gelagerten Beton bedeutet dies einen hohen elektrischen Widerstand bis in große Tiefen von der Oberfläche.

Aufgrund der hohen Kapillarporosität haben oberflächennahe Schichten bei nachträglicher Durchfeuchtung dann aber einen vergleichbar geringen Elektrolytwiderstand.

2.4 Lagerungsbedingte Einflußgrößen auf den Elektrolytwiderstand

2.4.1 Temperatur

Die Ionenwanderung im Elektrolyten ist eine Bewegung kleiner Teilchen in einem reibungsbehafteten Medium. Mit zunehmender Temperatur nimmt die innere Reibung (Viskosität) und damit auch der elektrische Widerstand ab.

Der Einfluß der Temperatur auf den elektrischen Widerstand kann durch folgende Gleichung berücksichtigt werden:

$$R_{el} = R_{el,0} \cdot e^{b(1/T - 1/T_0)} \quad (1)$$

R_{el} = Elektrolytwiderstand bei Temperatur T

T, T_0 = Absolute Temperaturen in K

$R_{el,0}$ = Elektrolytwiderstand bei Temperatur T_0

b = Konstante in K

Für den Wert der Temperaturkonstante b finden sich folgende Angaben, z. B. /9/:

$b = 2872$ K bei 70 % r.F.

$b = 2971$ K bei 88 % r.F.

2.4.2 Umgebungsfeuchte

Die Umgebungsfeuchte (Regen, Luftfeuchte, zeitlicher Ablauf) bestimmt die Feuchtigkeitsabgabe bzw. -aufnahme des Betons, insbesondere in oberflächennahen Schichten.

Bei ständig sehr trockenen Bedingungen unterhalb einer Luftfeuchtigkeit von 75 % r.F. kommt es zu einer starken Verdunstung des Kapillarwassers und folglich zu einem Anstieg des elektrolytischen Widerstandes in der Betonrandzone.

Der Einfluß der Umgebungsfeuchte auf den Widerstand nimmt mit zunehmendem Abstand von der Oberfläche ab.

2.4.3 Karbonatisierung

Das mit der Luft in den Beton eindringende Kohlendioxid wandelt bei bestimmten Feuchtigkeitsverhältnissen das in der Porenflüssigkeit vorhandene Calciumhydroxid zu kristallinem Calciumcarbonat um, wodurch der Porenraum verringert wird. Diesen Vorgang nennt man Karbonatisierung.

Eine deutliche Reduktion der Kapillarporosität tritt bei Portlandzement auf, während bei Hochofenzementen die Reduktion durch Karbonatisierung mit steigendem Hüttensandgehalt abnimmt und eine Vergrößerung der Porenstruktur zur Folge hat.

2.4.4 Chloridcontamination

Je nach Umgebungs- und Nutzungsbedingungen können in Beton- und Stahlbetonkonstruktionen Chloride eindringen. Quellen von Chloriden sind insbesondere Tausalzlösungen und Meerwasser. Aber auch das Eindringen von Industrieabwässern oder von PVC-Brandgasen kann eine Chloridcontamination zur Folge haben.

Chloride können über die Kapillarporen des Zementsteins oder über Mikrorisse in den Beton gelangen. Der Transport erfolgt dabei sowohl durch Ionendiffusion im Porenwasser als auch durch kapillares Saugen /14/.

Die Leitfähigkeit von Beton beruht auf der Anwesenheit von gelösten Salzen im kapillaren Porenwasser. Entsprechend steigt die Leitfähigkeit mit zunehmender Salz(Ionen)konzentration an, d. h. der elektrolytische Widerstand sinkt.

Bild 5 zeigt den Einfluß einer Chloridbeaufschlagung auf den elektrolytischen Widerstand von Beton. Der Abstand zwischen den Widerstandsprofilen der zwei Prüfkörper verringert sich mit abnehmender Chloridkonzentration. Ab einer Tiefe von etwa 26 mm konnte kein Unterschied mehr festgestellt werden.

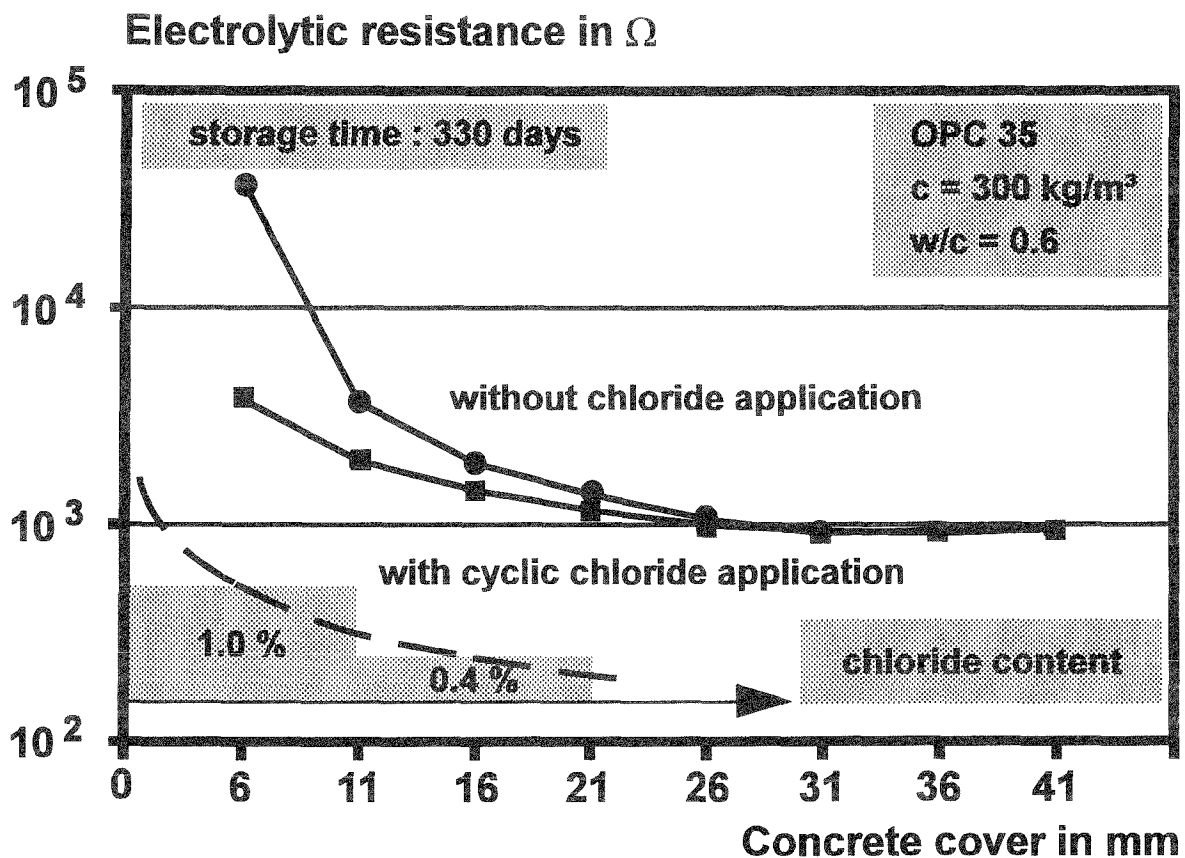


Bild 5: Einfluß einer Chloridbeaufschlagung auf den elektrolytischen Widerstand von Beton nach /13/

3 MESSVERFAHREN

3.1 Grundlagen

Der Widerstand eines Leiters hängt von dessen Größe und Form ab, insbesondere aber auch von der elektrischen Leitfähigkeit des Materials. Den Kehrwert der elektrischen Leitfähigkeit bezeichnet man als spezifischen elektrischen Widerstand. Er ist eine geometrieunabhängige Materialkenngröße.

Die gebräuchlichsten Verfahren zur Bestimmung des spezifischen Widerstandes sind die Zwei- und die Vier-Elektroden-Methode. Hierbei setzt die Zwei-Elektroden-Methode voraus, daß die vom Strom durchquerte Fläche bekannt ist /7, 9, 16, 17/. Sie findet deshalb ihren Einsatz vor allem bei Anwendung von Plattenelektroden.

Grundsätzlich kann der elektrolytische Widerstand von Beton mit Gleich- oder Wechselstromwiderstandsmessungen bestimmt werden.

Leitet man Gleichstrom durch einen Elektrolyten, kann es im Bereich der Elektroden zu Zersetzungserscheinungen kommen. Beide Elektroden werden mit einer Gasschicht beladen, die ihrerseits mit dem Elektrolyten ein Galvanisches Element darstellen. Es fließt ein sogenannter Polarisationsstrom, der dem ursprünglich angelegten Strom entgegengesetzt gerichtet ist. Der Widerstand des Elektrolyten wird hierdurch scheinbar vergrößert, da die sekundäre Polarisationsspannung die primäre Spannung vermindert und den Strom herabsetzt /11, 15/.

Verwendet man Wechselstrom mit geeigneter Meßfrequenz, so können diese Polarisations-effekte vermieden werden. Durch den ständigen Polwechsel werden die beweglichen Ionen in Schwingung versetzt und die Ausbildung einer elektrolytischen Polarisation wird verhindert. Aus diesem Grund werden überwiegend Wechselstrommessungen durchgeführt.

Für die Widerstandsmessung ergibt sich hieraus eine Frequenzabhängigkeit. Untersuchungen über den Einfluß verschiedener Wechselstromfrequenzen auf den Widerstand von Beton findet man z. B. bei /1, 6, 9/. Zur Vermeidung von Polarisations-effekten sind Frequenzen zwischen 50 Hz und 1 kHz geeignet.

3.2 Meßprinzip und Meßgerät

Der elektrolytische Widerstand der Laboruntersuchungen wurde mit einem Handmeßgerät, das am ibac entwickelt wurde, bestimmt. Das Meßprinzip ist in Bild 6 schematisch dargestellt.

Aus dem Generator G fließt ein sinusförmiger Wechselstrom I_m (max. 10 mA) mit einer Meßfrequenz von $f = 108$ Hz über zwei Elektroden an den Punkten I_H und I_L in den Beton. Der Stromkreis ist geschlossen. Die angelegte Meßspannung beträgt max. 1 V. Neben dem Beton stellen auch der Leiter und die Elektroden Widerstände dar. Ihre Größen sind jedoch gegenüber dem Betonwiderstand vernachlässigbar gering.

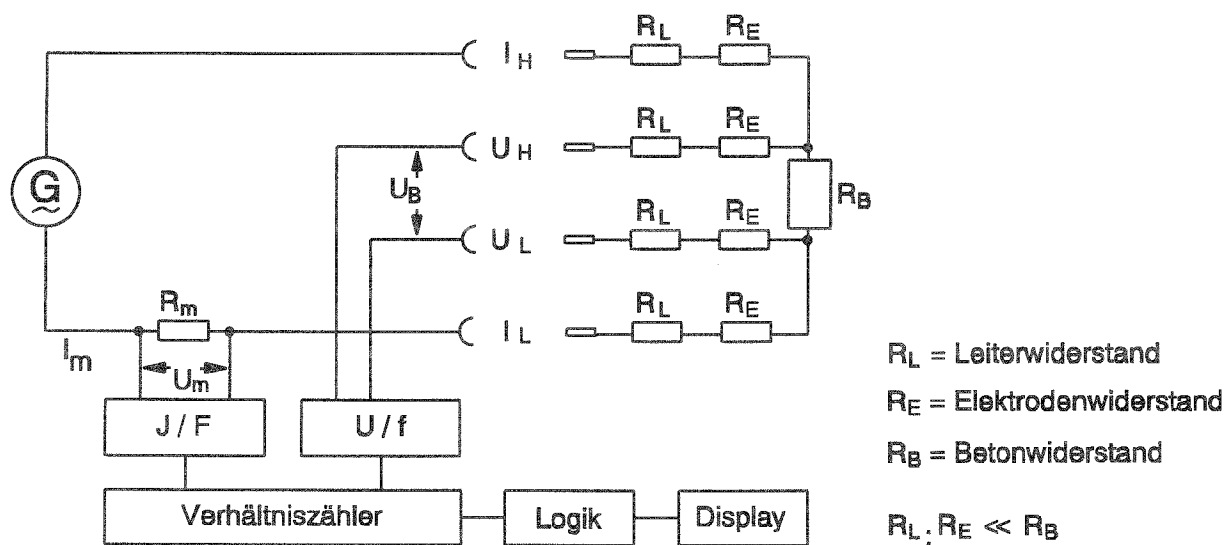


Bild 6: Meßprinzip des entwickelten Widerstandmeßgerätes

Der Meßstrom ruft in einem Abschnitt des Stromkreises (zwischen den Punkten U_H und U_L) den Spannungsabfall U_B hervor. Über zwei Kontakte an den Punkten U_H und U_L wird die Spannung abgegriffen. Die Wechselspannung wird gleichgerichtet und mit einem Spannungs-Frequenz-Wandler in eine zu diesem proportionale Frequenz umgewandelt.

Der den Stromkreis durchfließende Wechselstrom wird indirekt über den Widerstand R_m von 100 Ω bzw. 10 k Ω gemessen (Ohmsches Gesetz: $U = R \cdot I$) und nach Gleichrichtung über einen Strom-Frequenz-Wandler ebenfalls in eine Frequenz umgesetzt.

Das Verhältnis der Impulse in einem definierten Zeitintervall wird über einen Verhältnis-zähler (Quotientenmesser) bestimmt und so die beiden Signale miteinander verknüpft. Das verbleibende Signal wird in der Logik weiterverarbeitet. Das Meßergebnis und die Dimension (Ω , $k\Omega$) werden auf einem LCD angezeigt. Die obere Grenze des Meßbereiches liegt bei $200\text{ k}\Omega$.

Zur Erfassung der Widerstände unmittelbar zwischen zwei Elektroden können jeweils die Punkte I_H und U_H sowie I_L und U_L gebrückt werden. Dieses Meßprinzip findet auch bei der Multi-Ring-Elektrode Anwendung. Mittels Multiplexer können nacheinander bis zu 12 Meßstellen abgefragt werden. Bild 7 zeigt eine fotografische Abbildung des Meßgerätes.

Um die Widerstände auch kontinuierlich und automatisch erfassen zu können, wurde die dem Handmeßgerät zugrundeliegende Meßtechnik erweitert und auf eine computergesteuerte Erfassung umgestellt.

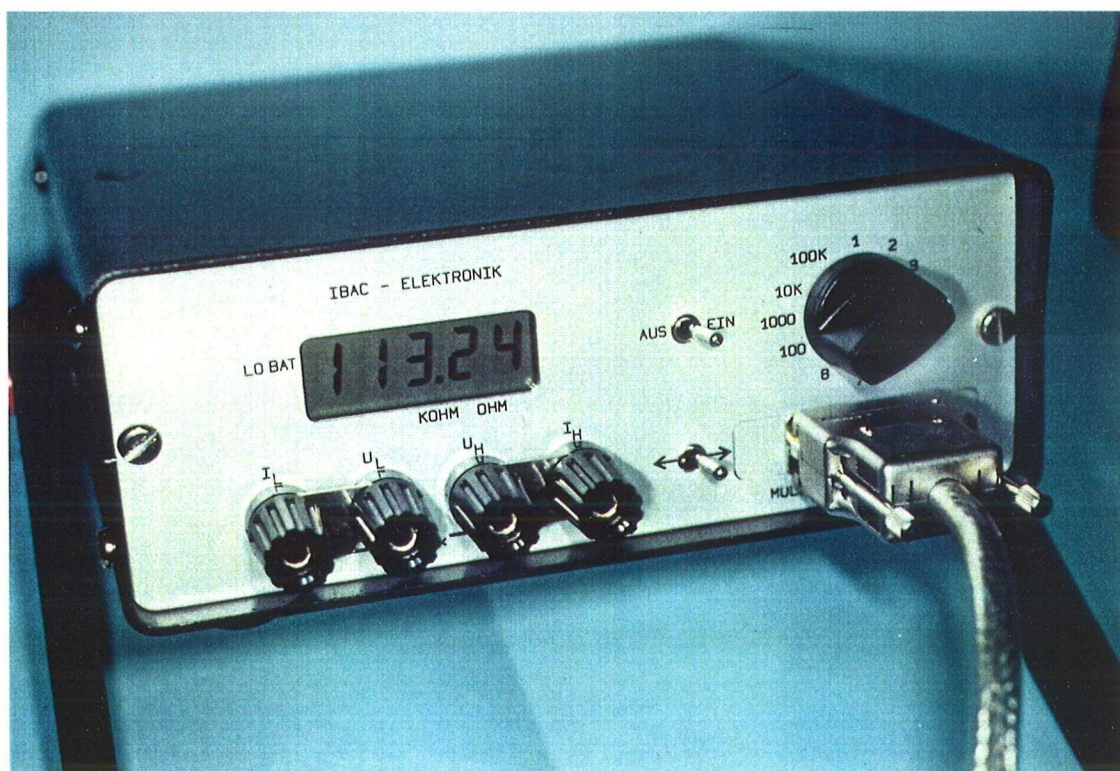


Bild 7: Widerstandsmeßgerät (ibac-Elektronik)

4 MULTI-RING-ELEKTRODE

Die Multi-Ring-Elektrode wurde am ibac zur Bestimmung der Feuchteverteilung in der Betonrandzone entwickelt. Sie besteht aus mehreren Edelmetallringen, die in definierten Abständen übereinanderliegend angeordnet sind (Bilder 8 und 9). Die Ringe werden mit Kabeln verbunden, die im Inneren der Elektrode herausgeführt werden, so daß durch die Kabelführung keine Beeinflussung des umgebenden Betons (Meßbereich) entsteht. In speziell hergestellten Formen werden die Zwischenräume der Elektroden mit einem Epoxidharz verfüllt. Die hinsichtlich der Geometrie optimierte Version des Sensors hat einen Durchmesser von 20 mm und verfügt durch neun Edelmetallringe über acht Meßstellen. Die Breite der Edelmetallringe und der Abstand von Ring zu Ring betragen jeweils 2,5 mm. Hieraus ergibt sich ein Tiefenprofil über ca. 50 mm mit Meßwerten im Abstand von 5 mm. Der Aufbau der Multi-Ring-Elektrode ist in Bild 8 schematisch dargestellt.

Die Multi-Ring-Elektroden werden so einbetoniert, daß sich der oberste Ring im Abstand einer Isolierschicht, d. h. 2,5 mm von der Betonoberfläche entfernt, befindet. Damit ist auch die Lage aller weiteren Ringe definiert. Zwischen jeweils zwei benachbarten Edelmetallringen kann nun von außen der elektrolytische Widerstand des Betons mit einem Widerstandsmeßgerät bestimmt werden, bis schließlich ein Widerstandsprofil vorliegt.

Bei den Laborversuchen wurde das unter Abschnitt 3.2 beschriebene Meßgerät benutzt, wobei jeweils zwei Kontakte zusammengelegt wurden (Zwei-Elektroden-Messung).

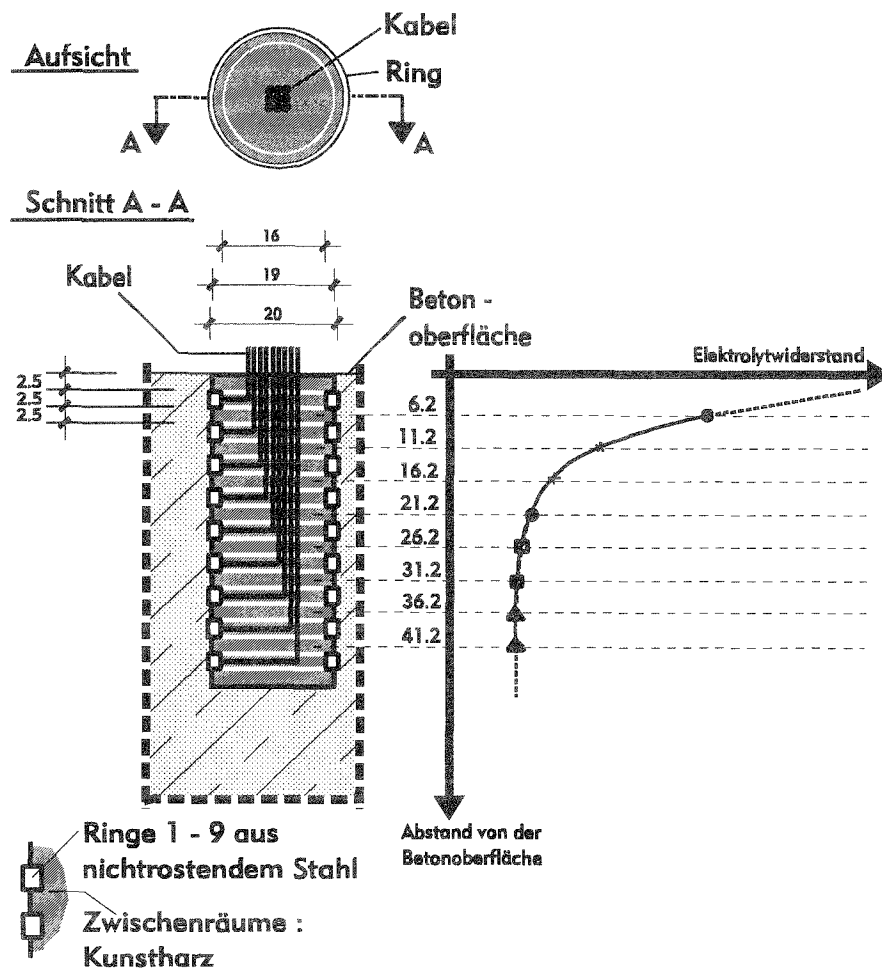


Bild 8: Schematische Darstellung der Multi-Ring-Elektrode und qualitative Darstellung der Meßwerte

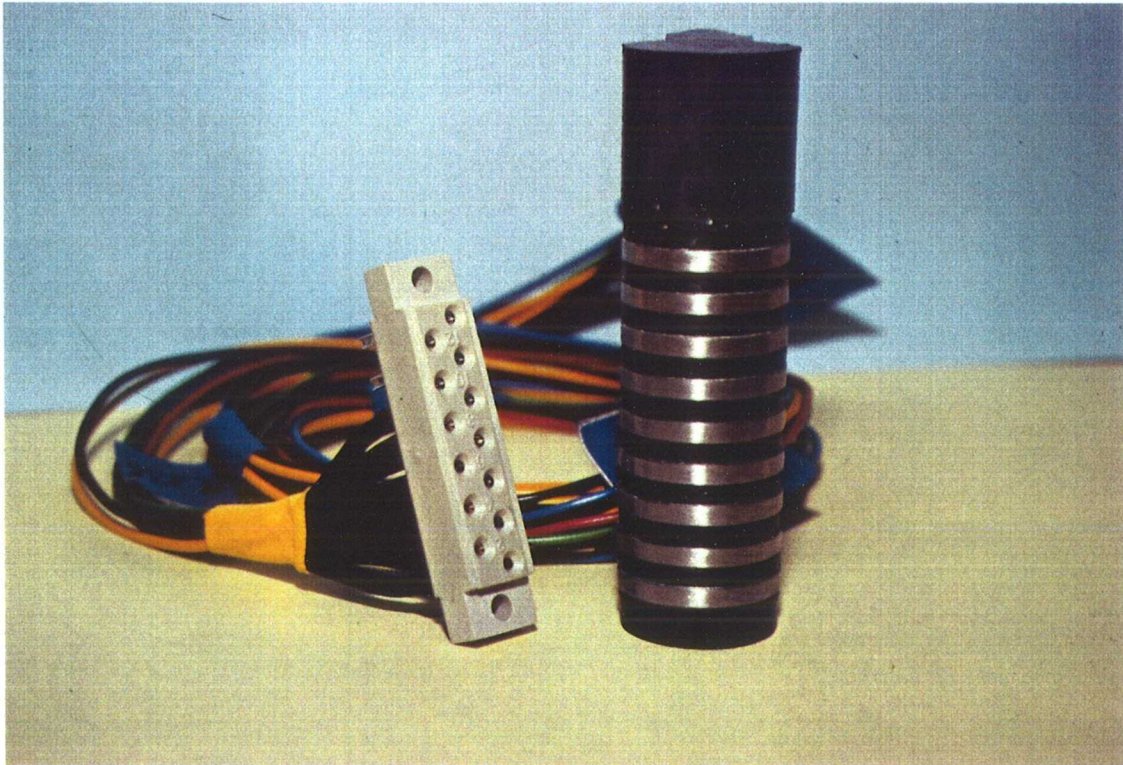


Bild 9: Multi-Ring-Elektrode

4.1 Weiterentwicklung der Multi-Ring-Elektrode

Eine weiterentwickelte Version der Multi-Ring-Elektrode wurde in Steckbauweise konzipiert, um die Anzahl der Ringe beliebig variieren zu können (Bild 10). Zudem wird die Herstellung des Sensors wesentlich vereinfacht, bei einer zusätzlichen Steigerung der Qualität.

Die Geometrie des Sensors bleibt gegenüber der ursprünglichen Version unverändert. Die nach dem Zusammenbau der Einzelteile verbleibenden Hohlräume werden mit einem Epoxidharz verfüllt.

Der elektrische Anschluß der Ring-Elektroden erfolgt durch Kabel, die außerhalb der Multi-Ring-Elektrode in einer flexiblen Steuerleitung mit Gesamtabschirmung zusammengefaßt sind. Der Steckanschluß am anderen Ende des Kabels ermöglicht eine Verbindung mit den Meßgeräten zur computergesteuerten Erfassung der Widerstände.

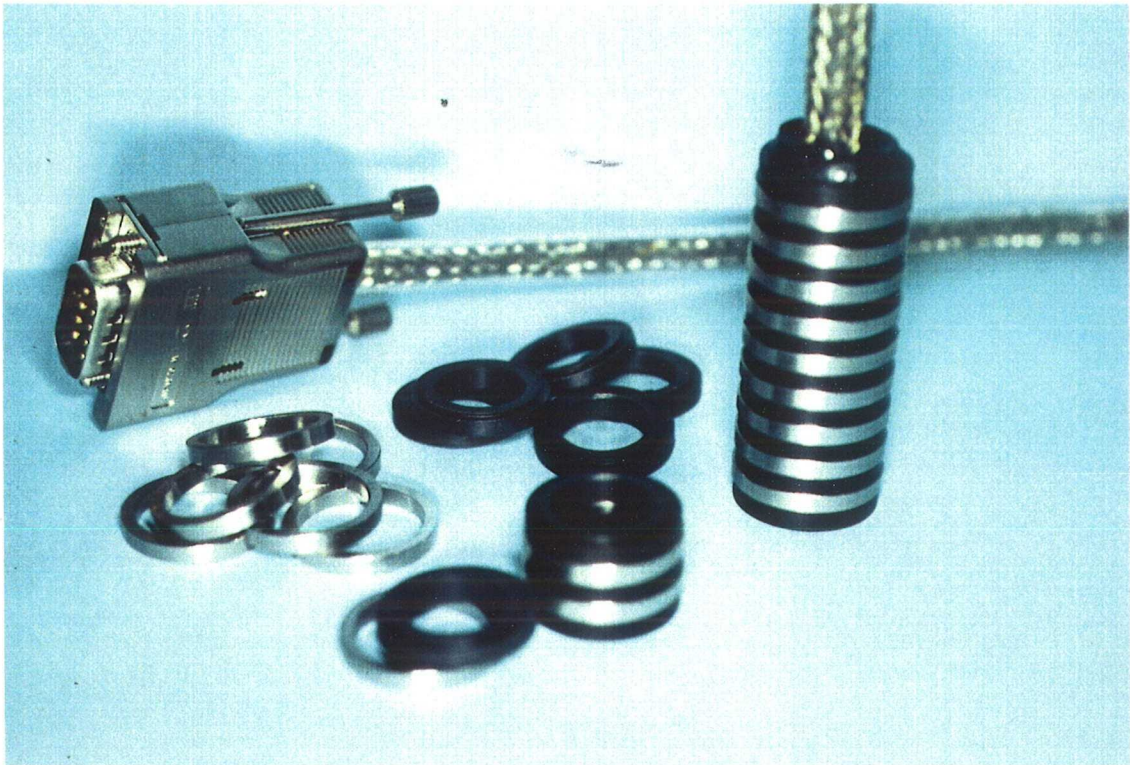


Bild 10: Weiterentwicklung der Multi-Ring-Elektrode

4.2 Kontaktfläche Multi-Ring-Elektrode zum Beton

Bei der Herstellung der Prüfkörper kann nicht ausgeschlossen werden, daß sich beim Verdichten des Betons unkontrollierbare Hohlräume an der Kontaktfläche zur Multi-Ring-Elektrode bilden, die den Widerstand beeinflussen. Weiterhin besteht die Gefahr einer Rißbildung entlang der Außenkante der Multi-Ring-Elektrode, durch die Wasser im Vergleich zum Beton wesentlich schneller eindringen kann.

Zur Quantifizierung dieser Fehlermöglichkeit wurden zwei Prüfkörper hergestellt, bei denen die Multi-Ring-Elektrode herausgesägt und der Übergang zum Beton unter dem Mikroskop untersucht wurden (Bild 11).

Beide Proben wiesen an der Kontaktfläche Multi-Ring-Elektrode zum Beton weder eine Entmischung des Betons noch vermehrte Luftporen auf. Eine Rißbildung entlang der Multi-Ring-Elektrode wurde nicht beobachtet. Eine Beeinflussung der Meßergebnisse durch diese möglichen Fehlerquellen konnte daher ausgeschlossen werden.

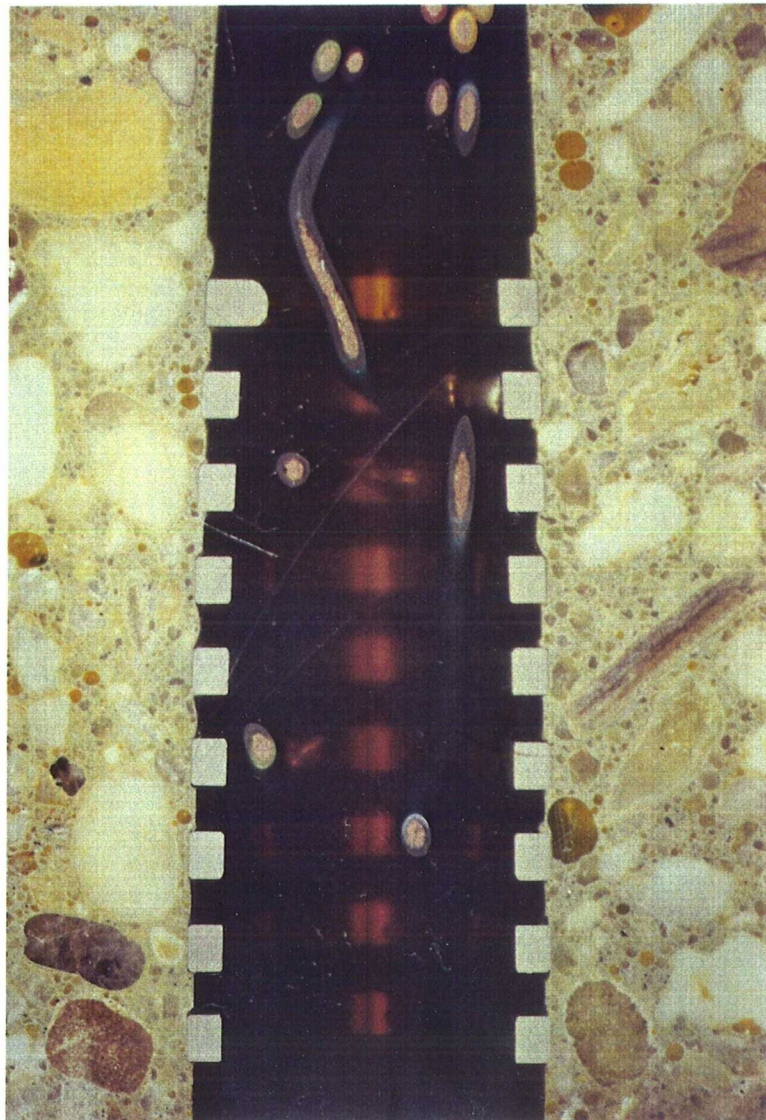


Bild 11: Übergang von der Multi-Ring-Elektrode zum Beton

5 VERSUCHSBESCHREIBUNG

5.1 Aufbau der Prüfkörper und Versuchsparameter

Zur Untersuchung der Einflüsse auf den Elektrolytwiderstand von Beton wurden Prüfkörper hergestellt, bei denen Zementart, Wasserzementwert, Sieblinie, Nachbehandlung, Lagerungsart sowie verschiedene Beaufschlagungen variiert wurden. In Tabelle 1 sind die Versuchsparameter zusammengefaßt.

Die Prüfkörper haben die Maße $b \times d \times h = 350 \times 270 \times 230 \text{ mm}^3$. Als Schalung dienten Kunststoffbehälter, in denen die Prüfkörper auch nach dem Erstarren verblieben und gelagert wurden. Auf diese Weise ist eine Wasserabgabe nur über eine definierte Fläche von $270 \times 350 \text{ mm}^2$, die simulierte Bauteiloberfläche, möglich. Je Prüfkörper wurde eine Multi-Ring-Elektrode zentrisch an der unversiegelten Oberfläche angeordnet und direkt mit einbetoniert (Bild 12).

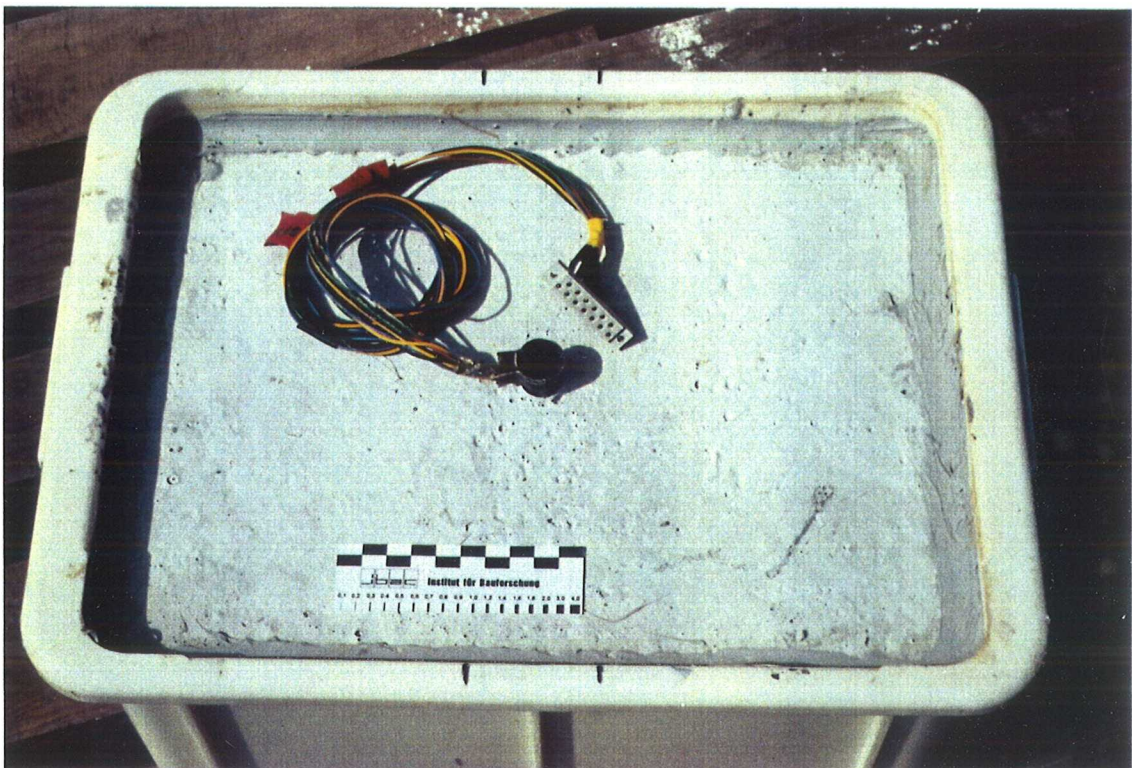


Bild 12: Prüfkörper mit einbetonierter Multi-Ring-Elektrode

Tabelle 1: Versuchsparameter

Prüfkörper Nr.	Zementart	Wassercementwert	Sieblinie	Nachbehandlung	Lagerung																																																																	
1	2	3	4	5	6																																																																	
1	PZ 35 F	0,5	B16	2 Tage Feuchteraum ¹⁾	Labor ³⁾																																																																	
2		0,6			B16	2 Tage Feuchteraum ¹⁾	Im Freien																																																															
3								0,6	B16	2 Tage Feuchteraum ¹⁾																																																												
4											0,6	B16	2 Tage Feuchteraum ¹⁾																																																									
5														0,6	B16	2 Tage Feuchteraum ¹⁾																																																						
6							0,6										B16	2 Tage Feuchteraum ¹⁾																																																				
7																			0,6	B16	2 Tage Feuchteraum ¹⁾																																																	
8																						0,6	B16	2 Tage Feuchteraum ¹⁾																																														
9																									0,6	B16	2 Tage Feuchteraum ¹⁾																																											
10																												0,6	B16	2 Tage Feuchteraum ¹⁾																																								
11			0,6	B16																											2 Tage Feuchteraum ¹⁾																																							
12		0,6			B16	2 Tage Feuchteraum ¹⁾																																																																
13								0,6	B16	2 Tage Feuchteraum ¹⁾																																																												
14											0,6	B16	2 Tage Feuchteraum ¹⁾																																																									
15														0,6	B16	2 Tage Feuchteraum ¹⁾																																																						
16	0,7						B16										2 Tage Feuchteraum ¹⁾																																																					
17																		0,7	B16	2 Tage Feuchteraum ¹⁾																																																		
18																					0,7	B16	2 Tage Feuchteraum ¹⁾																																															
19																								0,7	B16	2 Tage Feuchteraum ¹⁾																																												
20																											0,7	B16	2 Tage Feuchteraum ¹⁾																																									
21			0,7	B16																										2 Tage Feuchteraum ¹⁾																																								
22		0,7			B16	2 Tage Feuchteraum ¹⁾																																																																
23								0,7	B16	2 Tage Feuchteraum ¹⁾																																																												
24											0,7	B16	2 Tage Feuchteraum ¹⁾																																																									
25														0,7	B16	2 Tage Feuchteraum ¹⁾																																																						
26	0,7						B16										2 Tage Feuchteraum ¹⁾																																																					
27																		0,7	B16	2 Tage Feuchteraum ¹⁾																																																		
28																					0,7	B16	2 Tage Feuchteraum ¹⁾																																															
29																								0,7	B16	2 Tage Feuchteraum ¹⁾																																												
30																											0,7	B16	2 Tage Feuchteraum ¹⁾																																									
31			0,7	B16																										2 Tage Feuchteraum ¹⁾																																								
16		HOZ 35 L			0,6	B16																									2 Tage Feuchteraum ¹⁾	Im Freien																																						
17								HOZ 35 L	0,6	B16																							2 Tage Feuchteraum ¹⁾	Im Freien																																				
18											HOZ 35 L	0,6	B16																						2 Tage Feuchteraum ¹⁾	Im Freien																																		
19														HOZ 35 L	0,6	B16																					2 Tage Feuchteraum ¹⁾	Im Freien																																
20	HOZ 35 L						0,6										B16																						2 Tage Feuchteraum ¹⁾	Im Freien																														
21																		HOZ 35 L	0,6	B16																					2 Tage Feuchteraum ¹⁾	Im Freien																												
22																					HOZ 35 L	0,6	B16																				2 Tage Feuchteraum ¹⁾	Im Freien																										
23																								HOZ 35 L	0,6	B16																			2 Tage Feuchteraum ¹⁾	Im Freien																								
24																											HOZ 35 L	0,6	B16																		2 Tage Feuchteraum ¹⁾	Im Freien																						
25			HOZ 35 L	0,6																										B16																			2 Tage Feuchteraum ¹⁾	Im Freien																				
26																																																			HOZ 35 L	0,6	B16	2 Tage Feuchteraum ¹⁾	Im Freien															
27																																																								HOZ 35 L	0,6	B16	2 Tage Feuchteraum ¹⁾	Im Freien										
28																																																													HOZ 35 L	0,6	B16	2 Tage Feuchteraum ¹⁾	Im Freien					
29																																																																		HOZ 35 L	0,6	B16	2 Tage Feuchteraum ¹⁾	Im Freien
30																																																																						
31		HOZ 35 L			0,6	B16																									2 Tage Feuchteraum ¹⁾	Im Freien																																						
16								FAZ 35	0,6	B16																							2 Tage Feuchteraum ¹⁾	Im Freien																																				
17											FAZ 35	0,6	B16																						2 Tage Feuchteraum ¹⁾	Im Freien																																		
18														FAZ 35	0,6	B16																					2 Tage Feuchteraum ¹⁾	Im Freien																																
19	FAZ 35						0,6										B16																						2 Tage Feuchteraum ¹⁾	Im Freien																														
20																		FAZ 35	0,6	B16																					2 Tage Feuchteraum ¹⁾	Im Freien																												
21																					FAZ 35	0,6	B16																				2 Tage Feuchteraum ¹⁾	Im Freien																										
22																								FAZ 35	0,6	B16																			2 Tage Feuchteraum ¹⁾	Im Freien																								
23																											FAZ 35	0,6	B16																		2 Tage Feuchteraum ¹⁾	Im Freien																						
24			FAZ 35	0,6																										B16																			2 Tage Feuchteraum ¹⁾	Im Freien																				
25																																																			FAZ 35	0,6	B16	2 Tage Feuchteraum ¹⁾	Im Freien															
26																																																								FAZ 35	0,6	B16	2 Tage Feuchteraum ¹⁾	Im Freien										
27																																																													FAZ 35	0,6	B16	2 Tage Feuchteraum ¹⁾	Im Freien					
28																																																																		FAZ 35	0,6	B16	2 Tage Feuchteraum ¹⁾	Im Freien
29																																																																						
30		FAZ 35			0,6	B16																									2 Tage Feuchteraum ¹⁾	Im Freien																																						
31								FAZ 35	0,6	B16																							2 Tage Feuchteraum ¹⁾	Im Freien																																				
16											FAZ 35	0,7	B16																						Heißluft ²⁾	Labor ³⁾																																		
17														FAZ 35	0,7	B16																					Heißluft ²⁾	Labor ³⁾																																
18	FAZ 35						0,7										B16																						Heißluft ²⁾	Labor ³⁾																														
19																		FAZ 35	0,7	B16																					Heißluft ²⁾	Labor ³⁾																												
20																					FAZ 35	0,7	B16																				Heißluft ²⁾	Labor ³⁾																										
21																								FAZ 35	0,7	B16																			Heißluft ²⁾	Labor ³⁾																								
22																											FAZ 35	0,7	B16																		Heißluft ²⁾	Labor ³⁾																						
23			FAZ 35	0,7																										B16																			Heißluft ²⁾	Labor ³⁾																				
24																																																			FAZ 35	0,7	B16	Heißluft ²⁾	Labor ³⁾															
25																																																								FAZ 35	0,7	B16	Heißluft ²⁾	Labor ³⁾										
26																																																													FAZ 35	0,7	B16	Heißluft ²⁾	Labor ³⁾					
27																																																																		FAZ 35	0,7	B16	Heißluft ²⁾	Labor ³⁾
28																																																																						
29		FAZ 35			0,7	B16																									Heißluft ²⁾	Labor ³⁾																																						
30								FAZ 35	0,7	B16																							Heißluft ²⁾	Labor ³⁾																																				
31											FAZ 35	0,7	B16																						Heißluft ²⁾	Labor ³⁾																																		

Tabelle 1: Fortsetzung; 2 Hochfeste Betone

Prüfkörper Nr.	Zementart	Wasserzementwert	Sieblinie	Nachbehandlung	Lagerung
1	2	3	4	5	6
32	PZ 35 F	s. Tabelle 3	A/B16	2 Tage Feuchteraum ¹⁾	Labor ³⁾
33	HOZ 35 L				

- 1) Klimaraum mit selbsttätiger Klimaregelung: 20 °C, 95 % r.F.
- 2) 24 h Nachbehandlung im Klimaraum, anschließend 24 h Wärmebehandlung mit Heißluft
- 3) Das Laborklima betrug 20 ± 1 °C und 75 ± 5 % r.F.
- 4) Im Anschluß an die Nachbehandlung wurden die Prüfkörper zunächst in einem Klimaschrank mit 3 Vol.-% CO₂ beaufschlagt

Die Betonzusammensetzung ist den Tabellen 2 und 3 zu entnehmen. Mit Ausnahme der Prüfkörper Nr. 15, 25 und 31 entspricht der Zementgehalt den Mindestanforderungen für Außenbauteile nach DIN 1045 von ≥ 300 kg/m³ bei einem Wasserzementwert $\leq 0,6$. Als Zuschlag wurde Rheinkiessand und Rheinkies verwendet, Kornzusammensetzung nach DIN 1045.

Tabelle 2: Zusammensetzung der Betone

Wasserzementwert	Zementgehalt	Zuschlaggehalt	Wassergehalt
	kg/m ³		
1	2	3	4
0,5	330	1867	165
0,6	300	1854	180
0,7	260	1882	182

Tabelle 3: Zusammensetzung der Hochfesten Betone

Prüfkörper Nr.	Zementart/-gehalt	Zusatzstoffe	Wasser/Bindemittel Wert	Sieblinie	Zusatzmittel
1	2	3	4	5	6
32	PZ 35 F 340 kg/m ³	Flugasche : $\frac{f}{f+s+z} = 0,40$ Silicastaub : $\frac{s}{f+s+z} = 0,15$	0,23	A/B16	3,5 M.-% v. z
33	HOZ 35 L 340 kg/m ³	Silicastaub : $\frac{s}{s+z} = 0,25$	0,34	A/B16	3,5 M.-% v. z

Die Druckfestigkeit der Betone entsprach der Festigkeitsklasse B 35, bei den hochfesten Betonen der Festigkeitsklasse B 85. Das angestrebte Konsistenzmaß KP konnte bei einigen Betonen nur unter Zugabe von Fließmittel, bei dem Prüfkörper Nr. 13 erwartungsgemäß gar nicht erreicht werden.

Die Betone wurden nach dem Einbringen auf einem Rütteltisch verdichtet und anschließend zwei Tage lang im Feuchteraum nachbehandelt (mit Ausnahme der Prüfkörper Nr. 10, 24 und 30, Tabelle 1). Die weitere Lagerung der Prüfkörper erfolgte gemäß Tabelle 1 entweder im klimatisierten Laborraum oder zur Untersuchung des Einflusses wechselnder Umgebungsbedingungen im Freien.

5.2 Lagerungsbedingungen

5.2.1 Laborklima

Die Temperatur im Labor betrug 20 ± 1 °C bei einer relativen Luftfeuchte von 75 ± 5 %. Die Klimadaten wurden kontinuierlich aufgezeichnet, um auftretende Klimaschwankungen erkennen und bei der Auswertung der Ergebnisse berücksichtigen zu können.

5.2.2 Lagerung im Freien

Zur Untersuchung des Einflusses von verschiedenen Umgebungsbedingungen wurde ein Teil der Prüfkörper im Freien gelagert. Die unversiegelten Flächen standen dabei senkrecht und nach den Himmelsrichtungen ausgerichtet (Bild 13). Die Prüfkörper waren ungeschützt der Wirkung von Sonneneinstrahlung, Windeinwirkung und Niederschlag ausgesetzt, wobei auch hier die Klimadaten kontinuierlich registriert wurden.



Bild 13: Lagerung der Prüfkörper im Freien

5.3 Nachbehandlung mit Heißluft

In der Baupraxis wird die Nachbehandlung als Schutzmaßnahme gegen das frühzeitige Austrocknen des jungen Betons trotz widriger Umgebungsbedingungen häufig vernachlässigt. Die bei fehlender Nachbehandlung je nach Art und Festigkeitsklasse des Zements erhöhte Wasserabgabe muß sich auf den Hydratationsgrad und damit auf die Porenstruktur insbesondere in oberflächennahen Bereichen auswirken.

Die Prüfkörper Nr. 10, 24 und 30 simulieren Bauteile, die zu früh ausgeschalt wurden und anschließend einer starken Sonneneinstrahlung, einer niedrigen Luftfeuchte und einer starken Windeinwirkung ausgesetzt waren (hohe Temperaturen und trockene, bewegte Luft).

Zu diesem Zweck wurden die Prüfkörper 24 Stunden nach ihrer Herstellung aus dem Klimaraum entnommen und mit ihrer unversiegelten Oberfläche im Abstand von etwa 30 cm vor einem Heißlüfter aufgestellt. Es folgte eine 24stündige Nachbehandlung der Prüfkörper mit heißer Luft.

Da eine gute Nachbehandlung die Betonqualität - je nach Bauteilabmessung insbesondere die Qualität in einer Tiefe von 0 - 17 mm von der Oberfläche - beeinflusst /17/, wurde zur Kontrolle der simulierten schlechten Nachbehandlung die Temperaturentwicklung in einer Tiefe von 10 mm von der Oberfläche gemessen (Bild 14). Von einer Erhöhung der Temperatur kann dabei auf eine verstärkte Wasserabgabe aus dieser Schicht geschlossen werden, was durch die Widerstandsmessungen bestätigt wurde.

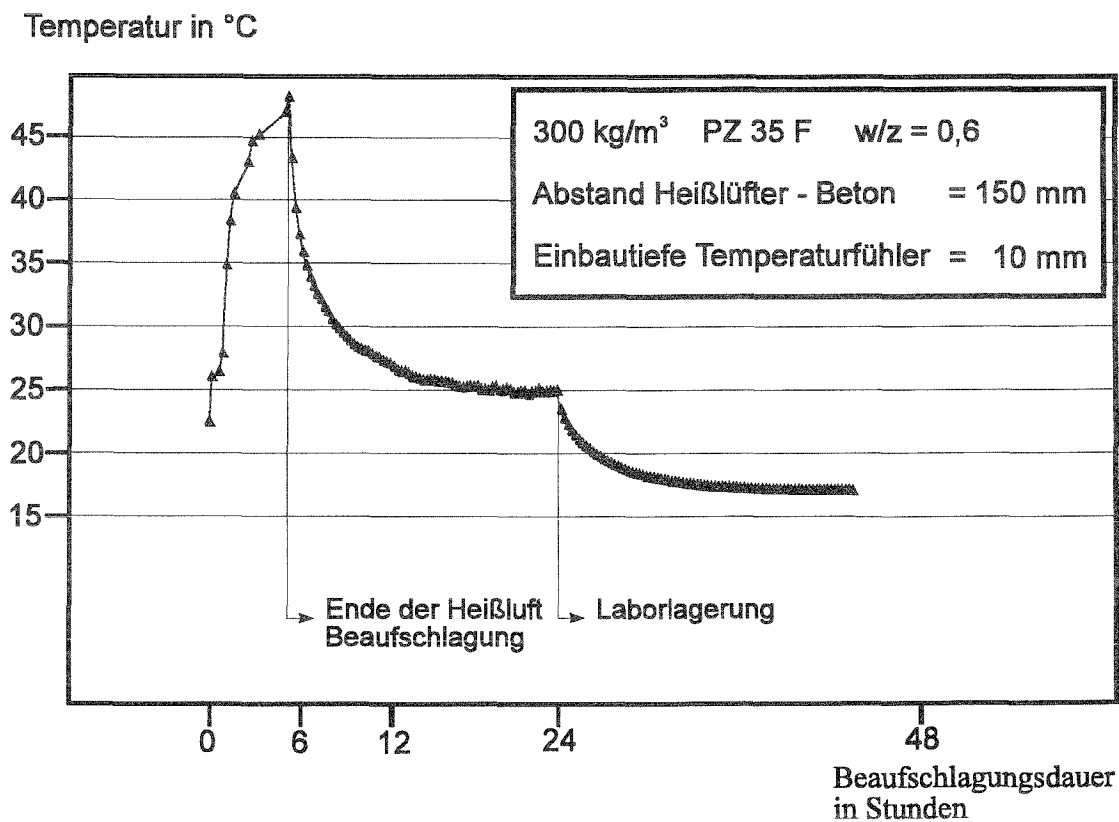


Bild 14: Temperaturentwicklung bei Heißluftbeaufschlagung

5.4 Beaufschlagung mit Kohlendioxid

Zur Untersuchung des Einflusses der Karbonatisierung auf den elektrolytischen Widerstand wurden insgesamt vier Prüfkörper in einem Klimaschrank bei 3 Vol.-% CO₂ schnellkarbonatisiert. Das Fortschreiten der Karbonatisierung wurde regelmäßig an den jeweiligen Referenzprüfkörpern durch Besprühen mit 0,375 %iger Phenolphthaleinlösung sichtbar gemacht und gemessen. Nach einer Dauer von 75 Tagen bzw. einer Karbonatisierungstiefe von 35 mm (Prüfkörper Nr. 20 und 21) und 15 mm (Prüfkörper Nr. 8 und 9) wurde die Schnellkarbonatisierung abgebrochen und die Prüfkörper weiter im Labor gelagert.

6 AUSWERTUNG

6.1 Darstellung der Ergebnisse

Die Multi-Ring-Elektrode dient als Sensor zur Ermittlung der Feuchteverteilung in der Betonrandzone. Um einen funktionalen Zusammenhang zwischen einer Feuchteverteilung bzw. einem Feuchteprofil und den gemessenen Widerständen herstellen zu können, wurden die Widerstände i. d. R. über dem Abstand von der Betonoberfläche aufgetragen und liefern somit Widerstandsprofile.

6.1.1 Skalierung der Widerstandsprofile

Die Betonschicht der ersten 10 mm von der Oberfläche ist in besonderem Maße den Umwelteinflüssen unterworfen und liefert Meßwerte, die vom Verlauf der Meßwerte der tieferliegenden Meßstellen abweichen. Die gemessenen Widerstände können weder einem bestimmten Umwelteinfluß eindeutig zugeordnet werden noch sind sie reproduzierbar. Einfluß auf diesen Bereich haben:

- Karbonatisierung und
- kurzfristige Klimaschwankungen.

Auch bei guter Nachbehandlung weicht der Beton der oberflächennahen Schicht vom Bauteilinneren ab, weil

- durch Wasserabsonderung beim Einbringen und Verdichten eine andere Zusammensetzung entsteht,
- in der Schalungszone (etwa das 0,6fache des Größtkorns) die Matrix-Zuschlag-Verteilung nicht homogen verteilt vorliegt (Randeffekt) und
- bei Lagerung an der Luft in oberflächennahen Schichten Hydratationsgrade von nur 40 - 70 % zu erwarten sind /17/.

Zum anderen nehmen die Widerstände i. d. R. mit wachsender Nähe zu der Betonoberfläche eine Größenordnung an, die sich an der oberen Grenze oder bereits außerhalb des Meßbereiches befindet.

Aus diesen Gründen bleiben die ersten 10 mm von der Betonoberfläche bei der Auswertung der Meßergebnisse unberücksichtigt.

Der **Abstand von der Betonoberfläche** wird auf der Abszisse aufgetragen. Der gemessene **Widerstand in Ω** wird auf der Ordinate aufgetragen und beträgt maximal $10^5 \Omega$.

Größere Widerstände sind prinzipiell ebenfalls, jedoch

- nur mit technischem Mehraufwand zu messen (zusätzliche zwischengeschaltete Widerstände),
- bei der derzeitigen Konfiguration mit hohen Meßfehlern behaftet und
- vor allem zur Erfassung der Feuchteverteilung unter realistischen Klimabedingungen (r.F. ≥ 50 %) oder auch zur Beurteilung der Korrosionswahrscheinlichkeit nicht notwendig.

6.1.2 Ungenauer Einbau der Multi-Ring-Elektroden

Beim Einbau der Multi-Ring-Elektroden kam es zu geringen Abweichungen des planmäßigen Abstandes zwischen der ersten Ring-Elektrode und der Betonoberfläche (2,5 mm). Die dadurch bedingte Verschiebung der Widerstände wurde in der Darstellung der Widerstandsprofile berücksichtigt und durch eine Änderung der Einbautechnik für zukünftige Anwendungen der Multi-Ring-Elektrode ausgeschlossen.

Die zunächst unbeabsichtigte Verschiebung der Widerstandsprofile erwies sich für die Kalibrierung des Sensors als äußerst nützlich, weil sich anhand der gegeneinander verschobenen Profile der Verlauf des Widerstandes über die Tiefe besser interpretieren läßt (s. z. B. Bilder 21, 29 bis 33).

Die Bestätigung der Widerstandsprofile unabhängig von der Einbautiefe des Sensors zeigt, daß ein sehr präziser Einbau der Multi-Ring-Elektrode nicht notwendig ist, wenn man den Abstand zwischen der Betonoberfläche und der ersten Ring-Elektrode kennt und bei der Auswertung der Ergebnisse berücksichtigt.

6.2 Versuchsergebnisse

6.2.1 Einfluß des Betonalters

Die zeitliche Entwicklung der Elektrolytwiderstände in verschiedenen Abständen von der Betonoberfläche ist beispielhaft in Bild 15 dargestellt. Alle Kurven zeigen einen starken Anstieg des elektrolytischen Widerstandes innerhalb der ersten Wochen nach dem Betonieren. Die Widerstandszunahme ist um so größer, je kleiner der Abstand der Meßstelle von der Betonoberfläche ist. Während für die oberflächennahen Meßpunkte i. w. der Austrocknungsprozeß beobachtet werden kann, wird die Widerstandserhöhung in den tieferliegenden Meßstellen ausschließlich durch die Hydratation verursacht.

Weil der Anstieg der Widerstände auch vom Verlauf der Hydratation abhängt, ist der Widerstandsverlauf der Festigkeitsentwicklung sehr ähnlich. Eine direkte Korrelation zwischen Festigkeits- und Widerstandsentwicklung wurde jedoch bisher noch nicht hergestellt.

Je nach Abstand von der Betonoberfläche hat auch der Widerstand des Betons nach etwa 28 Tagen den Hauptanteil seines Endwertes erreicht. Ähnlich der Festigkeit steigt der Widerstand auch nach nahezu abgeschlossener Hydratation (etwa nach 100 Tagen) noch leicht an, verläuft aber spätestens nach 300 Tagen annähernd horizontal.

Alle Prüfkörper wurden etwa 100 Tage nach Herstellung mit 3 cm aufstehendem Wasser über einen Zeitraum von weiteren 100 Tagen beaufschlagt. Die Beaufschlagung führte zu einem starken Abfall der Widerstände, worauf in Abschnitt 6.2.7 näher eingegangen wird. Nach Beendigung der Wasserbeaufschlagung wurde bereits nach etwa einem Monat die ursprüngliche Widerstandsverteilung wieder erreicht.

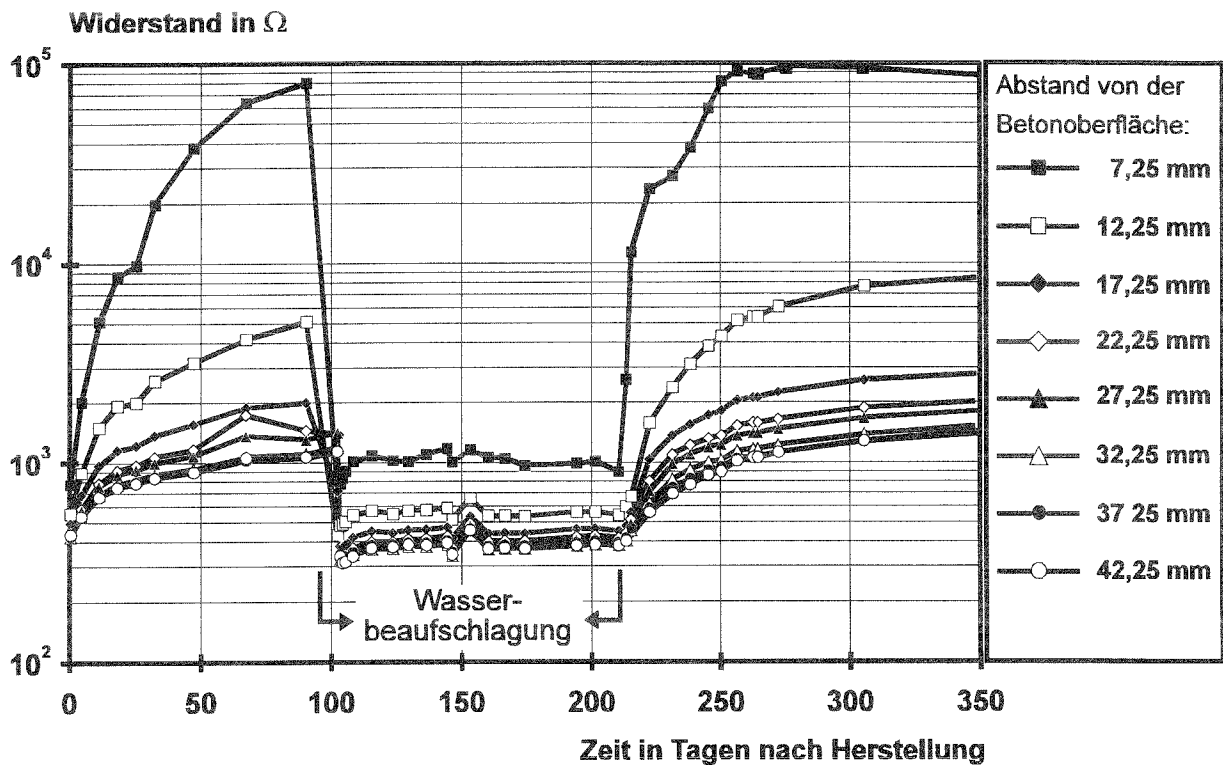


Bild 15: Zeitliche Entwicklung des Widerstandes eines Betons (PZ 35 F, w/z 0,6, Lagerung bei 20 °C und 70 % r.F.)

6.2.2 Einfluß des Wasserzementwertes

Eine Erhöhung des Wasserzementwertes bewirkt eine Steigerung der Kapillarporosität. Damit verändern sich das Austrocknungsverhalten bzw. die Wasseraufnahmefähigkeit des Betons insbesondere in oberflächennahen Schichten.

Um diesen Zusammenhang zu verdeutlichen, wurde für die Darstellung in Bild 16 der Verlauf der Widerstände für einen Betonoberflächenabstand von 11,25 mm gewählt. Bis zu einem Alter von 100 Tagen nach der Herstellung des Betons scheint der Feuchtegehalt der Betone in diesem Abstand von der Betonoberfläche unabhängig vom Wasserzementwert etwa gleich zu sein. In dieser Tiefe ist kein Unterschied im Austrocknungsverhalten der Betone zu erkennen.

Erst die unterschiedlichen Widerstände während der Wasserbeaufschlagung, etwa 100 Tage nach Herstellung des Betons, machen den Unterschied in der Wasseraufnahmefähigkeit und damit in der Porenstruktur der Betone sichtbar. Daraus ergibt sich folgende Feststellung:

- Je höher der Wasserzementwert, um so mehr Wasser nimmt der Beton in dieser Schicht auf und um so niedriger ist der elektrolytische Widerstand.

Nach der Wasserbeaufschlagung steigen die Widerstände zwar unterschiedlich schnell an, haben aber schon etwa 50 Tage nach Beendigung der Wasserbeaufschlagung wieder dieselbe Größenordnung erreicht. Mit zunehmendem Alter scheint der Beton mit einem Wasserzementwert von 0,7, etwas schneller auszutrocknen, der Unterschied zu den Betonen, hergestellt mit den Wasserzementwerten 0,5 und 0,6, ist jedoch zu diesem Zeitpunkt vernachlässigbar gering.

Abschließend kann festgestellt werden, daß die dargelegten Zusammenhänge zwischen dem Wasserzementwert eines Betons und seinem elektrolytischen Widerstand auch durch diese Messungen nachgewiesen wurden. Auf Grund des sehr langsamen Austrocknens eines Betons ist der Einfluß jedoch bereits in einem Abstand von 11,25 mm von der Betonoberfläche mit der Multi-Ring-Elektrode kaum noch meßbar. Nur bei einer deutlichen Veränderung der Umgebungsfeuchte des Betons zeigt sich eine Beeinflussung des Widerstandes durch den Wasserzementwert.

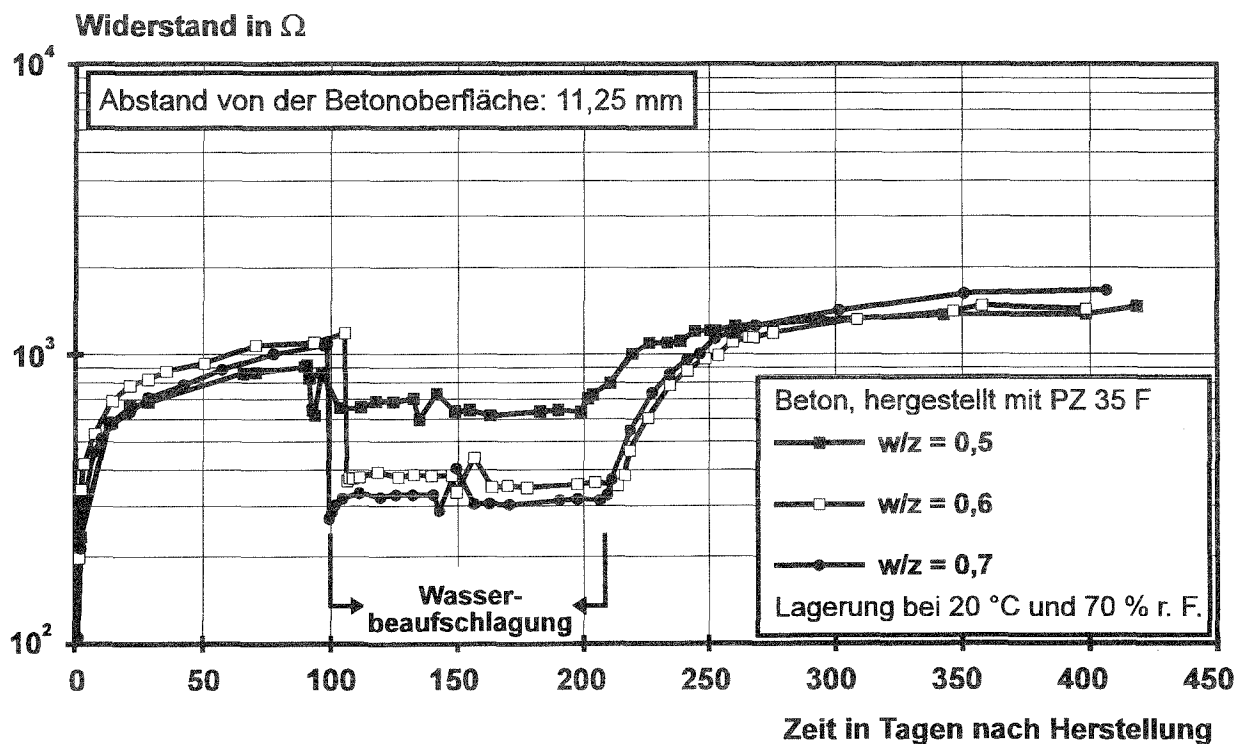


Bild 16: Einfluß des Wasserzementwertes auf den zeitlichen Verlauf des Widerstandes von Beton

6.2.3 Einfluß der Zementart und der Zusatzstoffe

Der elektrolytische Widerstand eines Betons ist von der Menge an chemisch gebundenem Wasser und damit von dem Hydratationsgrad abhängig. Weil auch die Festigkeitsentwicklung eines Betons direkt vom Verlauf der Hydratation abhängt, ist die zeitliche Entwicklung des Widerstandes dem Erhärtungsverlauf ähnlich und wie dieser für verschiedene Zementarten charakteristisch. Bild 17 zeigt den Einfluß der Zementart auf die zeitliche Entwicklung des Widerstandes von Beton.

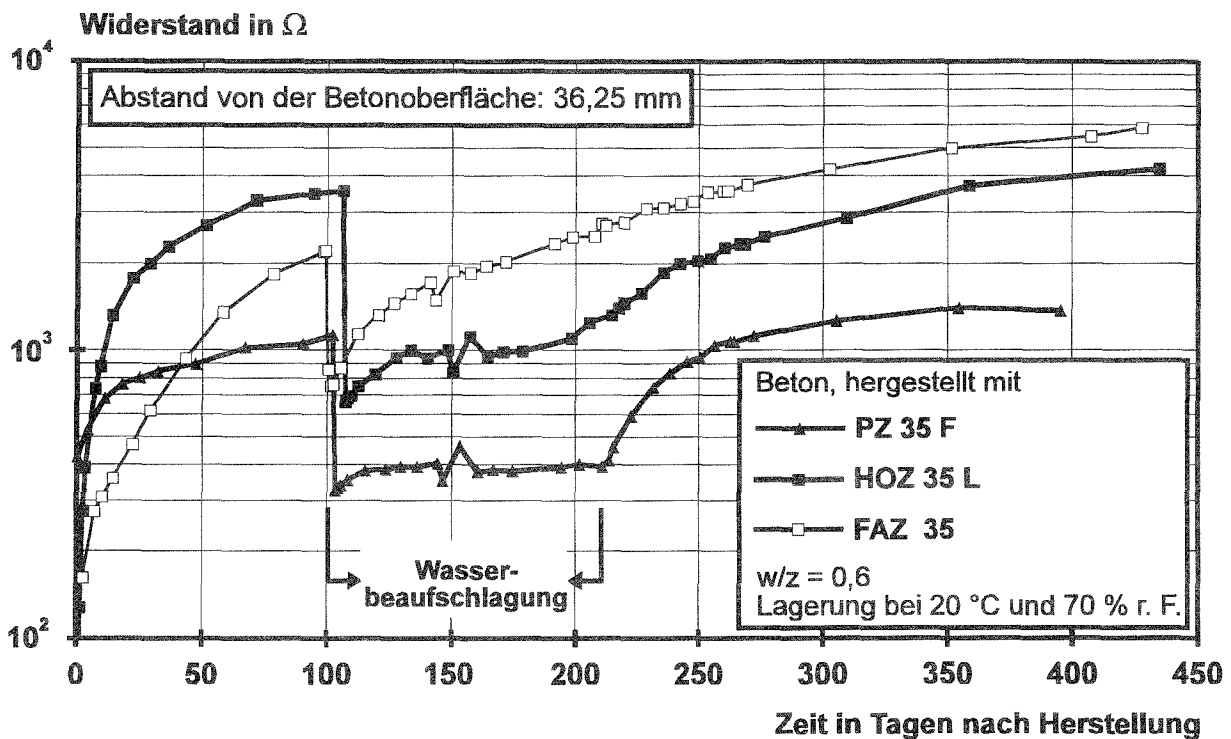


Bild 17: Einfluß der Zementart auf die zeitliche Entwicklung des Widerstandes von Beton

Um die Ähnlichkeit mit dem Erhärtungsverlauf der Betone zu verdeutlichen, wurde für die Darstellung der Widerstände bewußt ein Abstand von 36,25 mm von der Betonoberfläche gewählt. Je nach Zementart kann man bei Abständen $\geq 30 - 40$ mm von der Betonoberfläche mit Kernfeuchte rechnen. In diesem Bereich ist keine Beeinflussung der Widerstandsverläufe durch das unterschiedliche Austrocknungsverhalten der Betone zu erwarten. Die Betone können vollständig hydratisieren.

Aufgrund der trägeren Reaktion des Hüttensandes steigt der Widerstand des mit HOZ hergestellten Betons langsamer an als der Widerstand des Betons, der mit PZ hergestellt wurde. Die Reaktionsfähigkeit des verwendeten FAZ ist noch langsamer als die des HOZ. Die Wasserbeaufschlagung nach ca. 100 Tagen zeigt, daß für den mit PZ hergestellten Beton während der Beaufschlagung keine signifikanten Änderungen mehr zu beobachten sind, d. h. für diesen Prüfkörper scheint die Hydratation weitgehend abgeschlossen zu sein. Im Gegensatz hierzu zeigen sowohl der mit HOZ als auch der mit FAZ hergestellte während der Wasserbeaufschlagung einen deutlichen Widerstandsanstieg, der sich aus der fortschreitenden Hydratation ergibt.

Nach abgeschlossener Hydratation ist der Anteil an chemisch gebundenem Wasser bei den mit HOZ und FAZ hergestellten Betonen jedoch größer, weshalb auch der elektrolytische Widerstand dieser Betone größer ist als der Widerstand des Betons, hergestellt mit PZ.

Bild 18 zeigt die zeitliche Entwicklung der Widerstände eines hochfesten Betons. Die Widerstände wurden durch die Zugabe von Silicastaub und Steinkohlenflugasche, insbesondere in größeren Abständen von der Betonoberfläche, gegenüber Beton mit $w/z = 0,6$ (vgl. Bild 15) enorm gesteigert (z. T. um zwei Zehnerpotenzen). Die Widerstandsverläufe lassen 250 Tage nach Herstellung kein eindeutiges Tiefenprofil mehr erkennen.

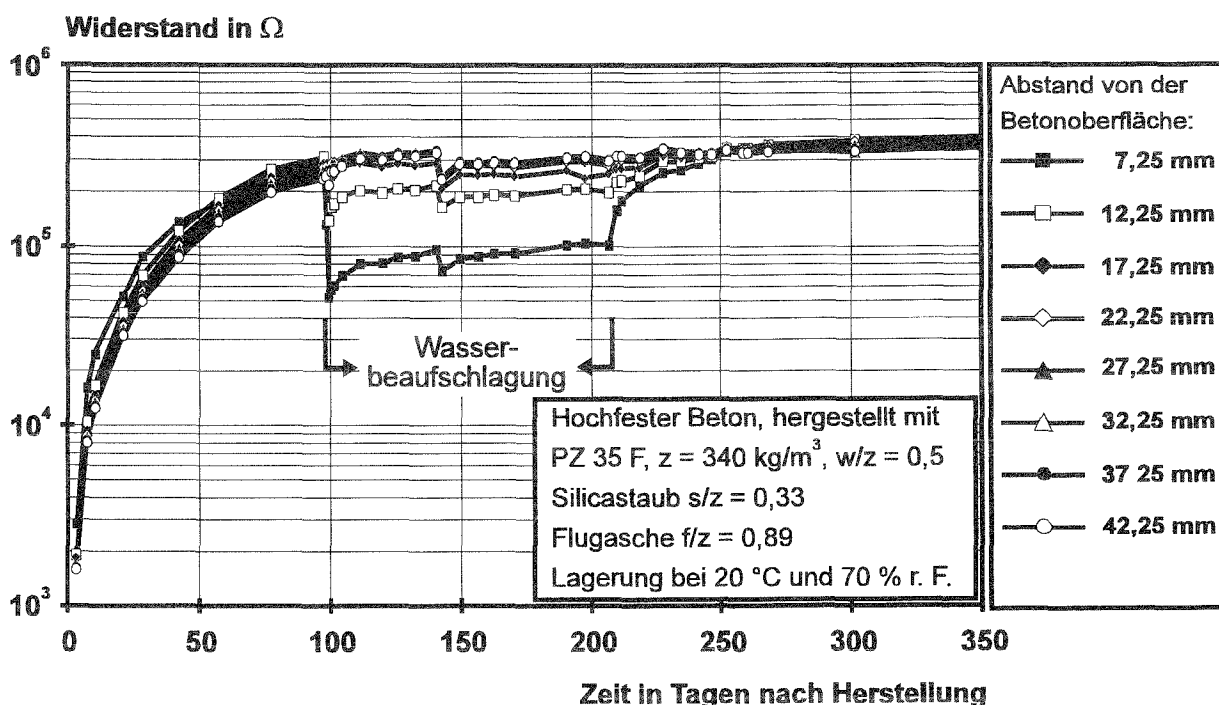


Bild 18: Zeitliche Entwicklung der Elektrolytwiderstände eines hochfesten Betons

6.2.4 Einfluß der Zuschlagsieblinie

Bild 19 zeigt den Verlauf der Widerstände von Betonen, bei denen die Zuschlagsieblinie variiert wurde. Mit Ausnahme des Betons, der mit einem Zuschlaggemisch nach Sieblinie A 16 hergestellt wurde, ergeben sich erwartungsgemäß keine signifikanten Unterschiede zwischen den Widerstandsverläufen.

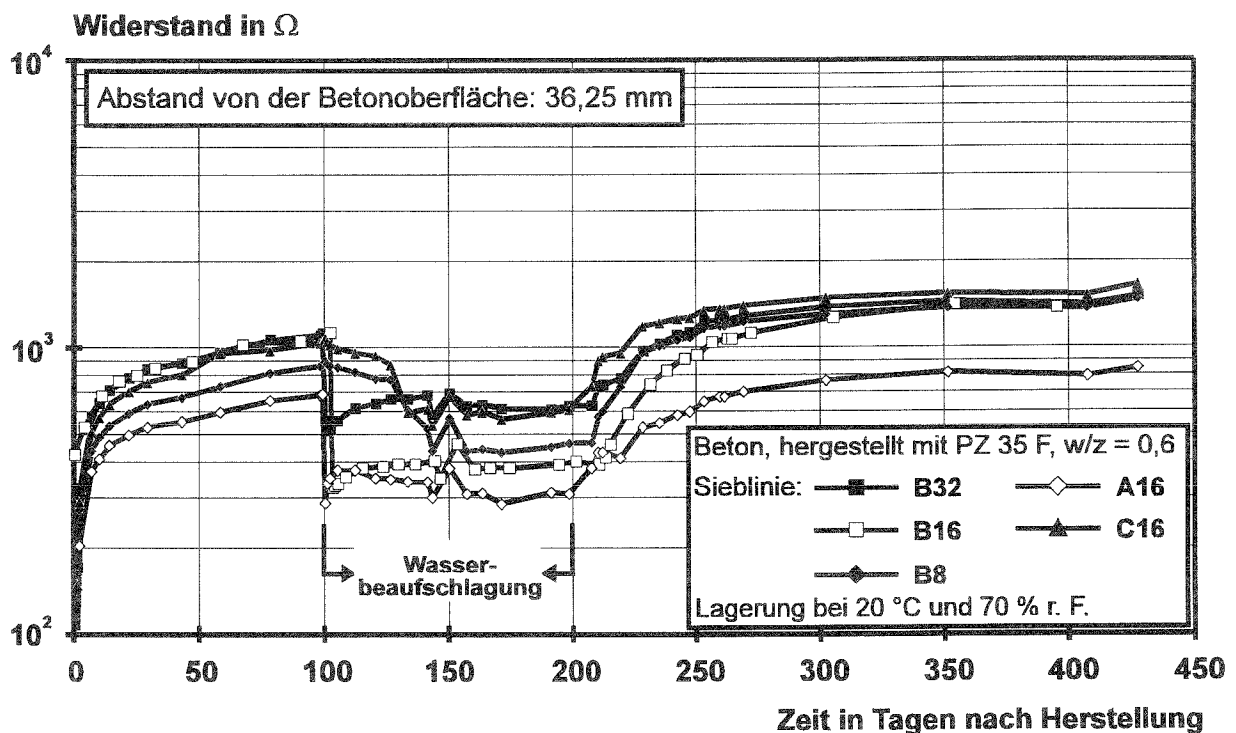


Bild 19: Einfluß der Zuschlagsieblinie auf die zeitliche Entwicklung des Widerstandes von Beton

In Abschnitt 5.1 wurde bereits erwähnt, daß bei dem Beton, der mit einem Korngemisch nach Sieblinie A 16 hergestellt wurde, das Konsistenzmaß KP überschritten wurde. Die angestrebte Festigkeitsklasse B 35 konnte nicht erreicht werden. Der Beton hatte nach 28 Tagen eine Serienfestigkeit $\beta_{ws} = 33,2 \text{ N/mm}^2$ und lag damit deutlich unter der in DIN 1045 geforderten Druckfestigkeit von $\beta_{ws} = 40 \text{ N/mm}^2$.

Aus der niedrigeren Druckfestigkeit kann auf einen erhöhten Luftporenanteil infolge unzureichender Verdichtung geschlossen werden, da eine Fehldosierung bei trockenem Zuschlag praktisch auszuschließen ist. Mit zunehmendem Anteil an groben Poren nehmen die Druckfestigkeit des Betons ab, aber auch die Permeabilität zu. Diese Durchlässigkeit hätte eine

verstärkte Austrocknung und einen damit verbundenen Anstieg des Widerstandes zur Folge, der aber auch in kleineren Abständen von der Betonoberfläche nicht beobachtet wird.

Für den niedrigen Widerstand des Betons kann aber auch ein Entmischen an der Betonoberfläche bzw. im Bereich der Multi-Ring-Elektrode die Ursache sein. In diesem Bereich kommt es aufgrund des veränderten Wassorzementwertes zu einem Anstieg der Kapillarporosität und zu einer größeren Menge an überschüssigem Wasser, die den Widerstand des Betons verringert.

Die Wasserbeaufschlagung der Betone etwa 100 Tage nach Herstellung zeigt, daß die Wasseraufnahmefähigkeit der Betone mit der Kornzusammensetzung nach den Sieblinien B8 und C16 zeitlich verzögert abläuft. Der Widerstand dieser Betone im Abstand von 36,25 mm von der Betonoberfläche reagiert vergleichsweise sehr langsam auf die geänderte Umgebungsfeuchte. Ein dichtes Porengefüge des Betons mit dem Zuschlaggemisch nach Sieblinie C 16 war auch aufgrund der hohen Serienfestigkeit $\beta_{ws} = 43 \text{ N/mm}^2$ zu erwarten.

6.2.5 Einfluß der Nachbehandlung

Den Einfluß einer schlechten Nachbehandlung auf die zeitliche Entwicklung des Widerstandes von Beton zeigt beispielhaft Bild 20.

Da eine schlechte Nachbehandlung insbesondere die oberflächennahe Schicht eines Betons beeinflusst, wurde für die Darstellung des Widerstandsverlaufes die Betonschicht im Abstand 21,25 mm von der Betonoberfläche gewählt, deren Widerstand gerade noch im meßbaren Bereich liegt (s. auch Bild 21).

Entsprechend dem in Abschnitt 2.4 beschriebenen Einfluß der Lagerungsbedingungen steigt der Widerstand des Betons mit schlechter Nachbehandlung innerhalb der ersten Tage infolge der Heißluftbehandlung stark an. Anschließend verlaufen die Widerstände der Betone unterschiedlicher Nachbehandlung annähernd parallel.

Bei dem mit HOZ hergestellten Beton reicht der Einfluß der schlechten Nachbehandlung anfänglich bis in die untersten Schichten. Nach der Wasserbeaufschlagung ist die Differenz der Widerstände der Betone im Abstand von 21,25 mm von der Betonoberfläche nur noch gering (Bilder 20 und 21).

Dies ist sicherlich auf die langsamer ablaufende Hydratation zurückzuführen. Der anfängliche Unterschied des Hydratationsgrades, der durch den Feuchtigkeitsentzug der Heißluftbehandlung verursacht wurde, wird durch die erneute Bereitstellung von Wasser infolge der Beaufschlagung verringert.

Für den mit PZ hergestellten Beton ist der Einfluß der schlechten Nachbehandlung im Gegensatz zu HOZ-Betonen trotz Wasserbeaufschlagung noch bis in einem Abstand von ca. 20 mm von der Betonoberfläche deutlich ausgeprägt (Bild 21).

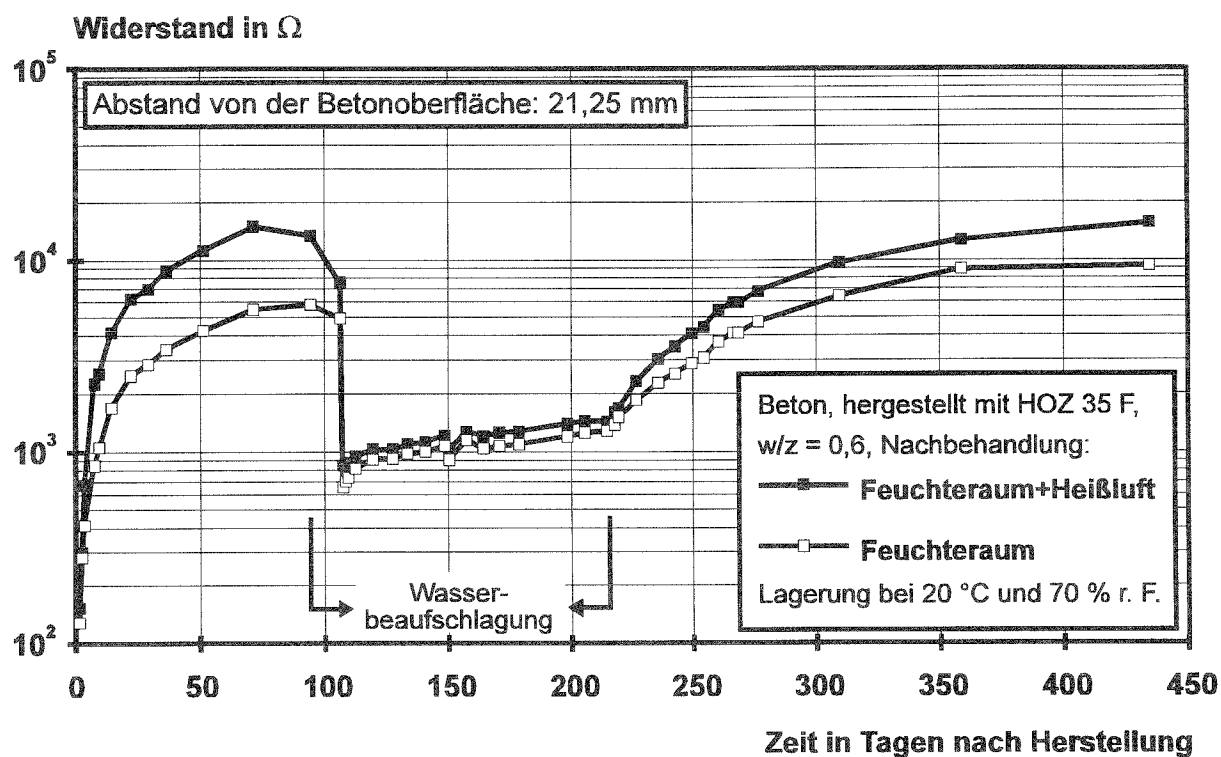


Bild 20: Einfluß einer schlechten Nachbehandlung auf die zeitliche Entwicklung des Widerstandes eines Betons vor und nach Wasserbeaufschlagung

Die schlechte Nachbehandlung macht sich während der Wasserbeaufschlagung der Betone kaum bemerkbar. Die Widerstände der Betone sind unabhängig von der Nachbehandlung etwa gleich hoch.

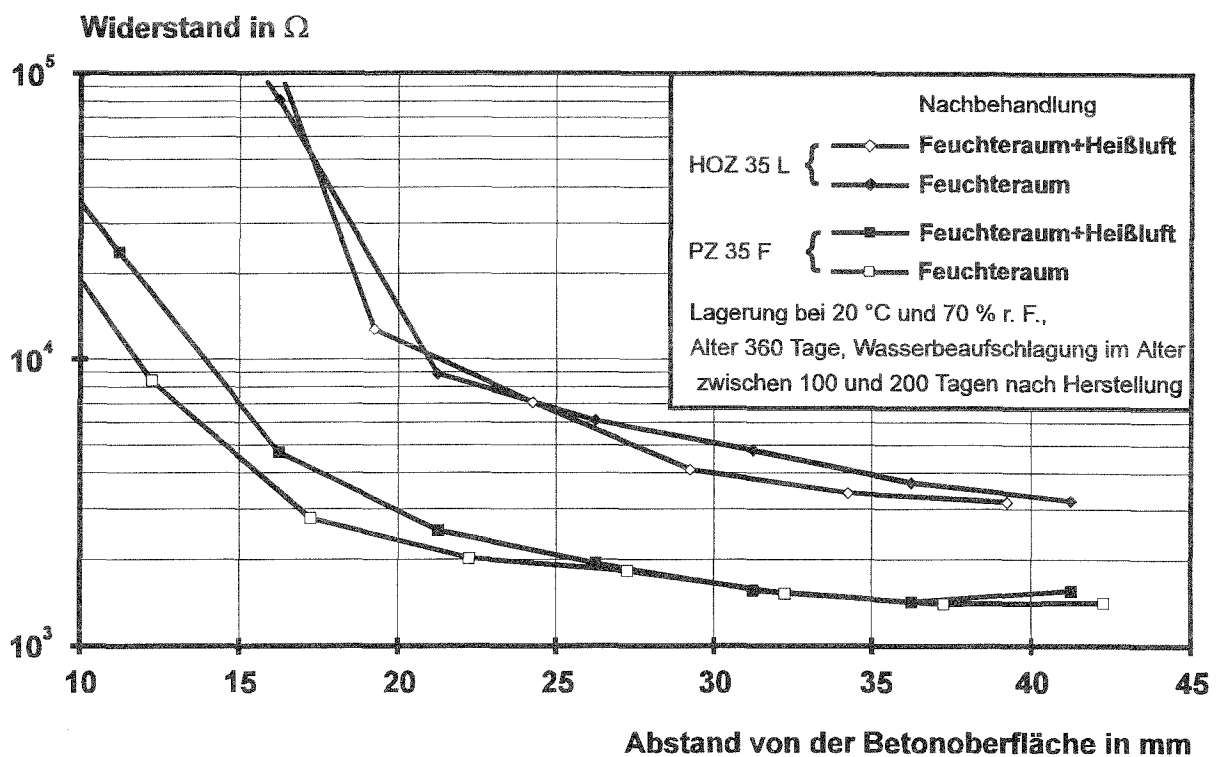


Bild 21: Einfluß einer schlechten Nachbehandlung auf das Widerstandsprofil eines Betons

Der Einfluß einer schlechten Nachbehandlung auf den Widerstand eines mit FAZ hergestellten Betons entspricht in etwa dem Einfluß auf den Widerstand des Betons, der mit HOZ hergestellt wurde.

6.2.6 Einfluß der Umgebungsbedingungen (Temperatur und Feuchtigkeit)

Der Einfluß der Umgebungsbedingungen auf den elektrolytischen Widerstand von Beton ist in Bild 22 dargestellt.

Für die Darstellung wurde ein Abstand von 36,25 mm von der Betonoberfläche gewählt um zu verdeutlichen, daß die Schwankungen der Umgebungsfeuchte bzw. -temperatur den Widerstand bis in den Bereich der Kernfeuchte beeinflussen und registriert werden.

Der Vergleich mit dem laborgelagerten Beton zeigt, daß die Entwicklung der Widerstände ähnlich verläuft. Unabhängig von den Umgebungsbedingungen streben die Widerstände der Betone, wie in Bild 22 gezeigt, etwa demselben Endwert entgegen. Berücksichtigt man die

Tatsache, daß die mittlere Umgebungsfeuchte im Freien sicherlich $\geq 80\%$ r.F. beträgt, erklärt sich auch die geringe Differenz im Anstieg der Widerstände.

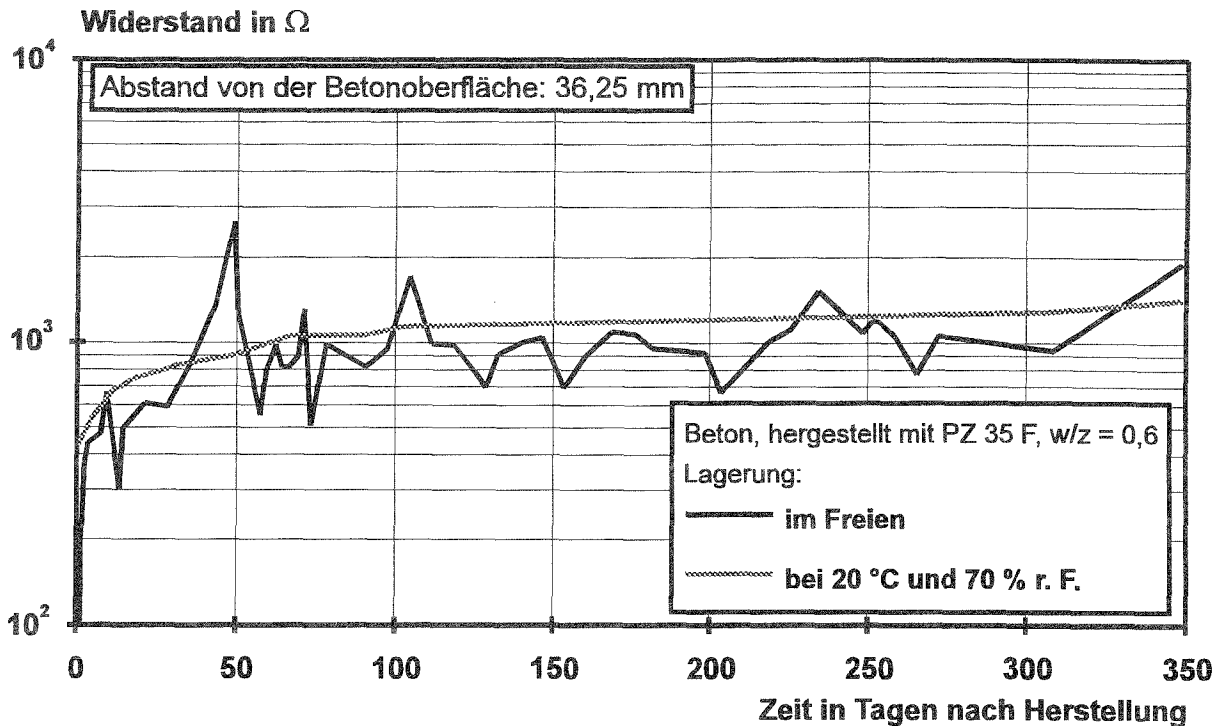


Bild 22: Einfluß der Umgebungsbedingungen auf den Widerstand von Beton

6.2.7 Ergebnis der Wasserbeaufschlagung

Um die Betontemperatur bei der Wasserbeaufschlagung möglichst nicht zu beeinflussen, wurde das Wasser vor der Beaufschlagung auf Umgebungstemperatur gebracht. Die Differenz zwischen der Labortemperatur und dem Wasser wurde ständig registriert und kann als vernachlässigbar gering angesehen werden.

Die zeitliche Entwicklung der Widerstände eines Betons nach Wasserbeaufschlagung zeigen die Bilder 23 und 24.

Bei Beaufschlagung der Betonoberfläche mit herkömmlichem Leitungswasser sinkt der Widerstand zeitverzögert entsprechend den Abständen von der Oberfläche in allen Schichten. In einem Abstand bis zu 12 mm von der Betonoberfläche trat unmittelbar nach der Wasserbeaufschlagung eine erhebliche Reduzierung des Elektrolytwiderstandes auf etwa 1 % des Ausgangswertes auf, während sich die Widerstände in den größeren Tiefenlagen zunehmend langsamer und nicht so stark änderten.

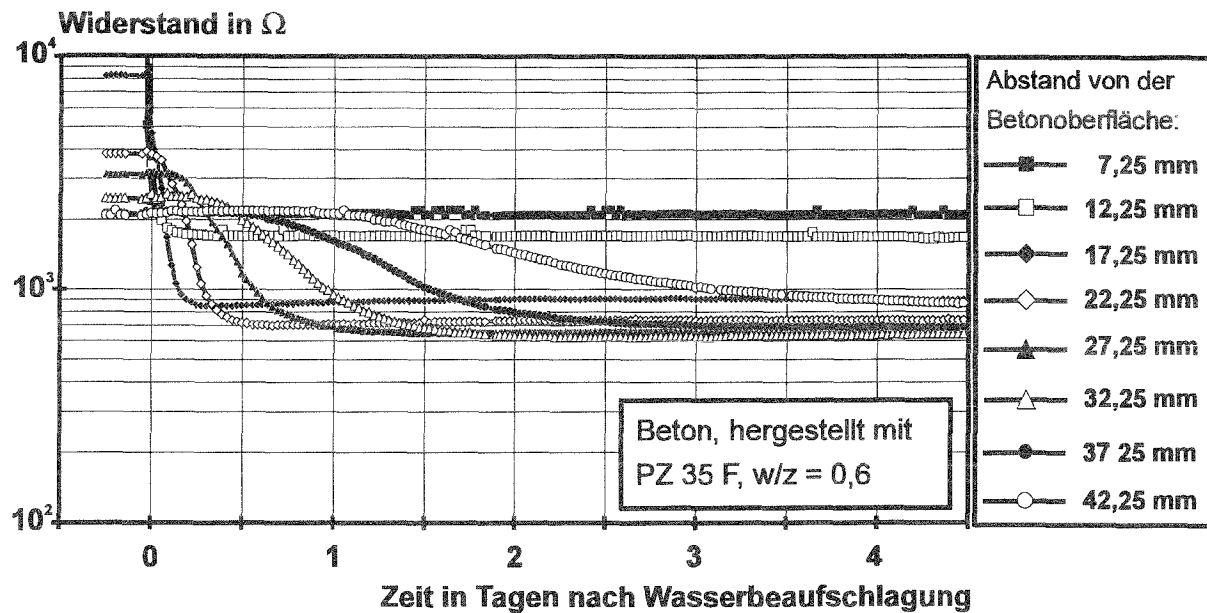


Bild 23: Zeitliche Entwicklung der Widerstände eines Betons nach Wasserbeaufschlagung

Demnach dringt die Wasserfront nach anfänglichem kapillarem Saugen nur langsam in den Beton ein und führt in der Tiefenlage der Bewehrung erst mit z. T. starker zeitlicher Verzögerung von mehreren Stunden zu einem Minimum des Elektrolytwiderstandes /9/.

Dabei kann sich das Tiefenprofil anfänglich umdrehen, die Widerstände der oberen Schichten liegen dann unter denen der unteren Schichten. Dieses Ereignis ist aufgrund der hohen Kapillarporosität in den oberflächennahen Schichten durchaus zu erwarten.

Die Widerstände der ersten beiden Meßstellen im Abstand von 7,25 bzw. 12,25 mm liegen zum Ende der Wasserbeaufschlagung deutlich höher als die Widerstände in tieferen Schichten. Diese Differenz kann auf eine Veränderung der Porenstruktur im oberflächennahen Bereich zurückgeführt werden. Der Beton war zum Zeitpunkt der Messungen auf einer Tiefe von etwa 7 - 9 mm karbonatisiert.

Nach Beendigung der Wasserbeaufschlagung steigen die Widerstände in den obersten Schichten infolge der Austrocknung des Betons sofort an (s. z. B. Bild 15). Mit zunehmendem Abstand von der Betonoberfläche erfolgt der Anstieg des Widerstandes langsamer.

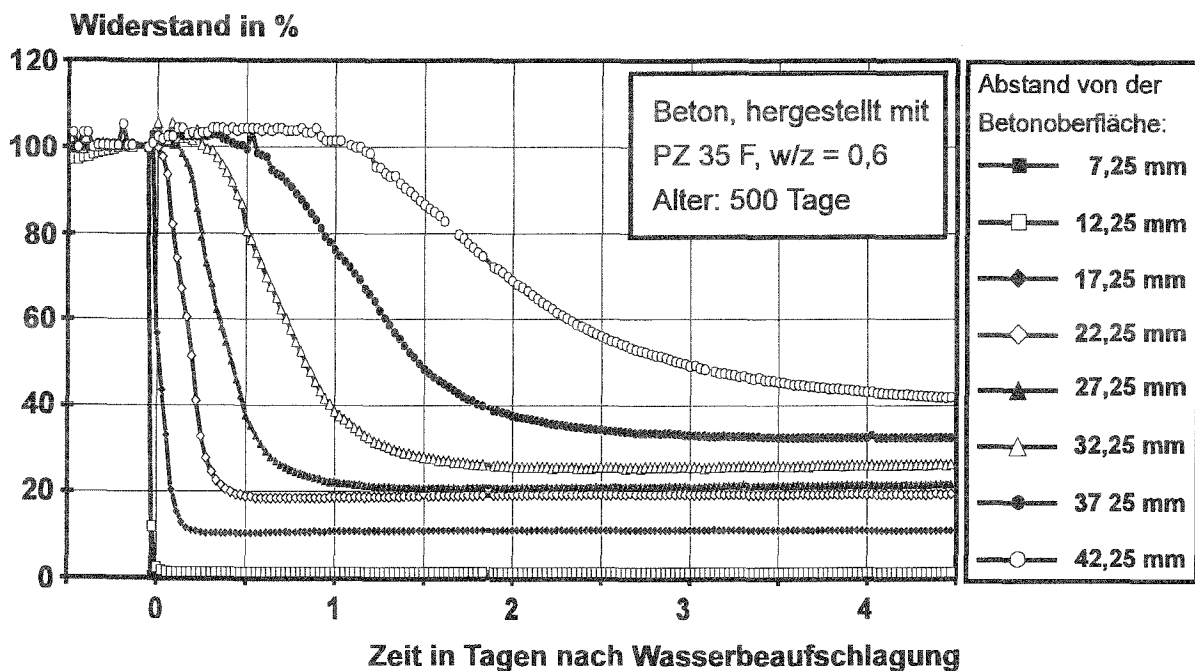


Bild 24: Zeitliche Entwicklung der Widerstände eines Betons in % bezogen auf den Meßwert vor Wasserbeaufschlagung

Anders verhalten sich die Widerstände eines hochfesten Betons bei Wasserbeaufschlagung (s. Bild 18). Die Feuchtigkeit ist nicht in der Lage, tiefer als etwa 20 mm in den Beton einzudringen. Lediglich die obersten Ring-Elektroden registrieren einen sinkenden Widerstand infolge zunehmender Feuchtigkeit, und dieser Widerstand ist immer noch vergleichsweise hoch. Bedingt durch die Porenstruktur kommt es zu einem hohen Kapillarzug, der jedoch nur geringe Mengen an Wasser eindringen läßt. Die hochfesten Betone scheinen "wasserundurchlässig" zu sein.

6.2.8 Ergebnis der Schnellkarbonatisierung

Für die Karbonatisierung von Beton sind relative Luftfeuchten zwischen 50 und 70 % r.F. am günstigsten. Um eine Schnellkarbonatisierung zu ermöglichen, erfolgte die Lagerung der Betone deshalb bei einer Luftfeuchte von etwa 60 - 65 % r.F.

Aus diesem Grund wurde der Anstieg der Widerstände infolge fortschreitender Karbonatisierung insbesondere in oberflächennahen Schichten durch den Einfluß sehr trockener Luft überlagert. Besonders in einer Phase, in der die Hydratation des Betons noch nicht abgeschlossen ist, führt die geringe Umgebungsfeuchte zu einer vorzeitigen Austrocknung des Betons und damit zu einem enormen Anstieg der Widerstände.

Bild 25 zeigt den Einfluß der Karbonatisierung auf den elektrolytischen Widerstand eines Betons hergestellt mit Portlandzement. Die Prüfkörper wurden zwischen dem 3. und 70. Tag nach Herstellung mit 3 bis 5 Vol.-% Kohlendioxid beaufschlagt.

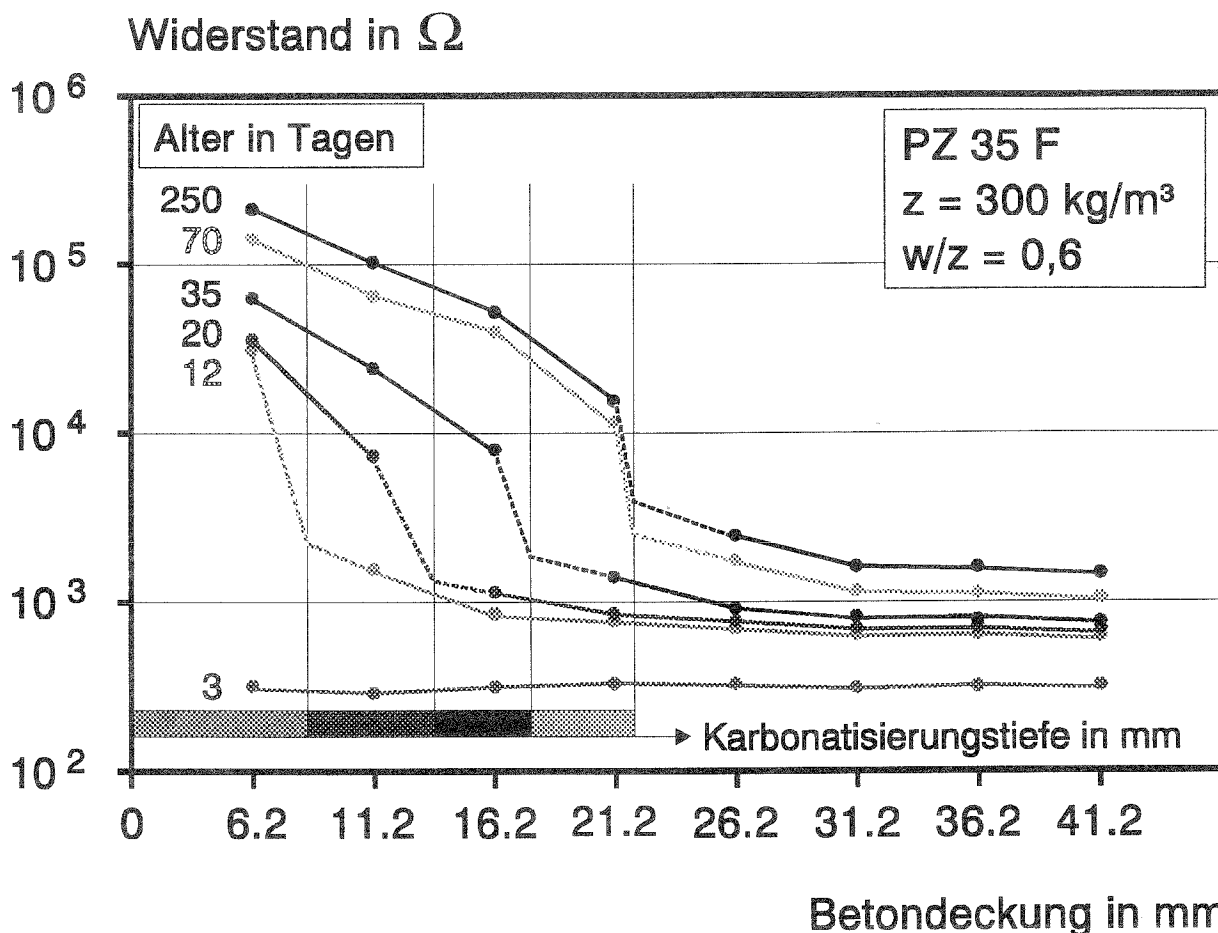


Bild 25: Einfluß der Karbonatisierung auf den elektrolytischen Widerstand von Beton

Das vor der Schnellkarbonatisierung im Alter von 3 Tagen ermittelte Widerstandsprofil weist gleiche Widerstände für alle Tiefenlagen auf. Dies zeigt deutlich, daß die Multi-Ring-Elektrode einwandfrei eingebaut wurde und fehlerfrei arbeitet. Die Schnellkarbonatisierung führt zu einer erheblichen Widerstandserhöhung in den oberflächennahen Bereichen, die im Beaufschlagungszeitraum bis in eine Tiefe von ca. 20 mm beobachtet wurde (Bild 25). Die an Vergleichsbalken ermittelten Karbonatisierungstiefen bestätigen, daß der Fortschritt der Karbonatisierung durch einen steilen Anstieg im Widerstandsprofil, ermittelt mit der Multi-Ring-Elektrode, bestimmt werden kann. In tieferen Lagen kann der Einfluß der Hydratation gemessen werden.

7 NACHTRÄGLICHER EINBAU

7.1 Zielsetzung und Problematik

Neben dem direkten Einbau in neue Bauteile wurde die Multi-Ring-Elektrode als Sensor auch dazu konzipiert, die Feuchteverteilung in der Randzone eines sanierten Betons zu überwachen. Das setzt die Möglichkeit voraus, den Sensor auch nachträglich in ein bestehendes Bauwerk einbauen und an den Beton ankoppeln zu können.

Dazu mußte zum einen ein **Ankopplungsverfahren** entwickelt werden, das auch in der Baupraxis ein einfaches, aber dennoch präzises Einsetzen des Sensors in das bestehende Bauwerk ermöglicht, zum anderen galt es, ein **Ankopplungsmedium** zu finden, das den eingesetzten Sensor mit dem umgebenden Beton elektrolytisch leitend verbindet.

Grundsätzlich besteht die Möglichkeit, die elektrolytisch leitende Verbindung zwischen der Multi-Ring-Elektrode und dem Bauwerk vor Ort herzustellen oder eine bereits ummantelte Multi-Ring-Elektrode einzusetzen. Letztere ermöglicht für alle Elektroden einen definierten konstanten Übergangsbereich zwischen Sensor und der ihn unmittelbar umgebenden Schicht. Die Ankopplung an den Beton erfolgt vor Ort.

7.2 Ankopplungsmedium

7.2.1 Anforderungen

Für den nachträglichen Einbau der Multi-Ring-Elektrode in bestehende Bauteile mußte ein kapillarleitendes Material ausgewählt werden, das die Elektrode mit dem umgebenden Beton verbindet, ohne die Widerstandsmessungen negativ zu beeinflussen oder gar zu verfälschen. Zusätzlich muß dieses Material eine Verarbeitbarkeit besitzen, die eine Injektion in einen möglichst schmalen Übergangsbereich zwischen dem Sensor und dem umgebenden Beton ermöglicht.

Auf ihre Eignung geprüft wurden Zementleime bzw. Feinmörtel, sowohl Fertigprodukte als auch eigene Mischungen, für die sich folgende Anforderungen ergaben:

- Größtkorndurchmesser ≤ 1 mm,
- flüssige Konsistenz und
- eine Leitfähigkeit im erhärteten Zustand, die in etwa der des vorhandenen Betons entspricht.

Fertigmörtel bieten den Vorteil, in ihrer Zusammensetzung konstant gehalten und ständig überwacht zu werden. Damit können gleichbleibende elektrolytische Eigenschaften der Mörtel erreicht bzw. vorausgesetzt werden.

Die Mischung und Verarbeitung der Fertigmörtel erfolgte nach Anleitung der jeweiligen Technischen Merkblätter. Dabei wurde die jeweils größte zulässige Menge Anmachwasser verwendet, um eine möglichst flüssige Konsistenz zu erzielen.

Die elektrolytischen Eigenschaften eines Zementsteins variieren zwar nach Herkunft und Zusammensetzung des Zements, kommen den elektrolytischen Eigenschaften des jeweiligen, umgebenden Betons aber am nächsten. Den Zementleimen wurde ein Quellmittel hinzugegeben, um die Reißneigung durch Schwinden zu verringern.

Insgesamt wurden sechs Fertigprodukte (Injektions- und Vergußmörtel) und drei eigene Mischungen (Zementleime mit Quellmittel) auf ihre Eignung geprüft.

7.2.2 Ummantelung der Multi-Ring-Elektrode

Um Fehlstellen im Übergangsbereich zwischen dem Beton und der Multi-Ring-Elektrode auch für den nachträglichen Einbau auszuschließen, wurden einige der Sensoren schon vorab mit einer 2 mm dicken Mörtelschicht ummantelt. Diese Voruntersuchungen sollten zum einen Informationen über die Injektionsfähigkeit der Mörtelmischungen geben, zum anderen konnte im erhärteten Zustand die Leitfähigkeit der Ummantelung ermittelt werden.

7.2.2.1 Injektionsfähigkeit der Mörtel bzw. Zementleime

Die Ummantelung erfolgte in einer für diesen Zweck angefertigten Kunstoffschalung (Bild 26). Darin wurde die Multi-Ring-Elektrode an einem Ende fixiert und der seitlich verbleibende Zwischenraum zur Schalung durch die Injektion von Mörtel bzw. Zementleim aufgefüllt.

Dieses Verfahren simulierte gleichzeitig das spätere Einbringen dieses Mediums in den Übergangsbereich zwischen dem eingesetzten Sensor und dem bestehenden Bauwerk und diente zur Beurteilung der Injektionsfähigkeit bzw. der Verarbeitbarkeit.

Insbesondere bei den Feinmörteln mußte darauf geachtet werden, daß die gleichmäßige Verteilung in dem Zwischenraum ohne zusätzliche Verdichtung zustandekommt. Mußte ein Mörtel dennoch auf dem Rütteltisch verdichtet werden, wurde seine Fließfähigkeit als "schlecht" bewertet und seine weitere Verwendung zum nachträglichen Einbau von Multi-Ring-Elektroden ausgeschlossen.

Von den sechs Fertigprodukten konnten die Produkte 1 bis 3 als sehr gut eingestuft werden, die Produkte 4 bis 6 mußten bezüglich ihrer Injektionsfähigkeit als schlecht beurteilt werden. Die drei Zementleime mit Quellmittel (entwickelte Rezepturen, Mischungen 7 bis 9) konnten als gut bis sehr gut klassifiziert werden (vgl. Tabelle 4, Abschnitt 7.2.4).

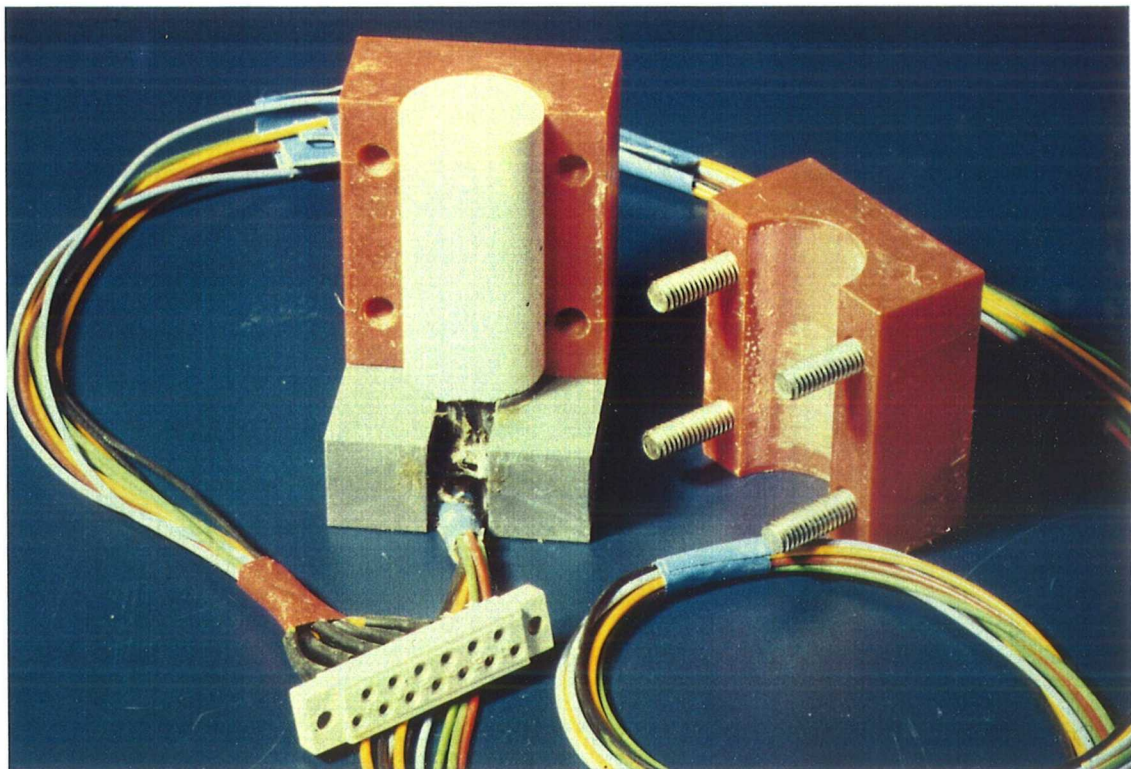


Bild 26: Ummantelte Multi-Ring-Elektrode in der zur Herstellung verwendeten Kunststoffschalung

Die ummantelten Multi-Ring-Elektroden wurden 24 Stunden lang in der Schalung belassen und bei 90 % r.F. und 20 °C gelagert. Auch nach dem Ausschalen verblieben sie weitere sieben Tage in diesem Klima, um Schwindrisse zu verhindern. Acht Tage nach ihrer Herstellung wurden die ummantelten Elektroden in ein Klima von 70 % r.F. und 20 °C umgelagert.

7.2.2.2 Leitfähigkeit der Mörtel bzw. Zementleime

Eine erste Beurteilung der Leitfähigkeit der Mörtel bzw. der Zementleime erfolgte bei den ummantelten Multi-Ring-Elektroden. Die Leitfähigkeit im erhärteten Zustand wurde 14 Tage nach Herstellung geprüft. Hierzu wurden die ummantelten Multi-Ring-Elektroden in Leitungswasser getaucht und der Widerstandsverlauf kontinuierlich aufgezeichnet und ausgewertet (Bild 27). Entscheidende Kriterien waren die Zeit, die vergeht, bis die Widerstände auf die geänderte Feuchte reagieren (Reaktionszeit), sowie die Höhe der gemessenen Widerstände.

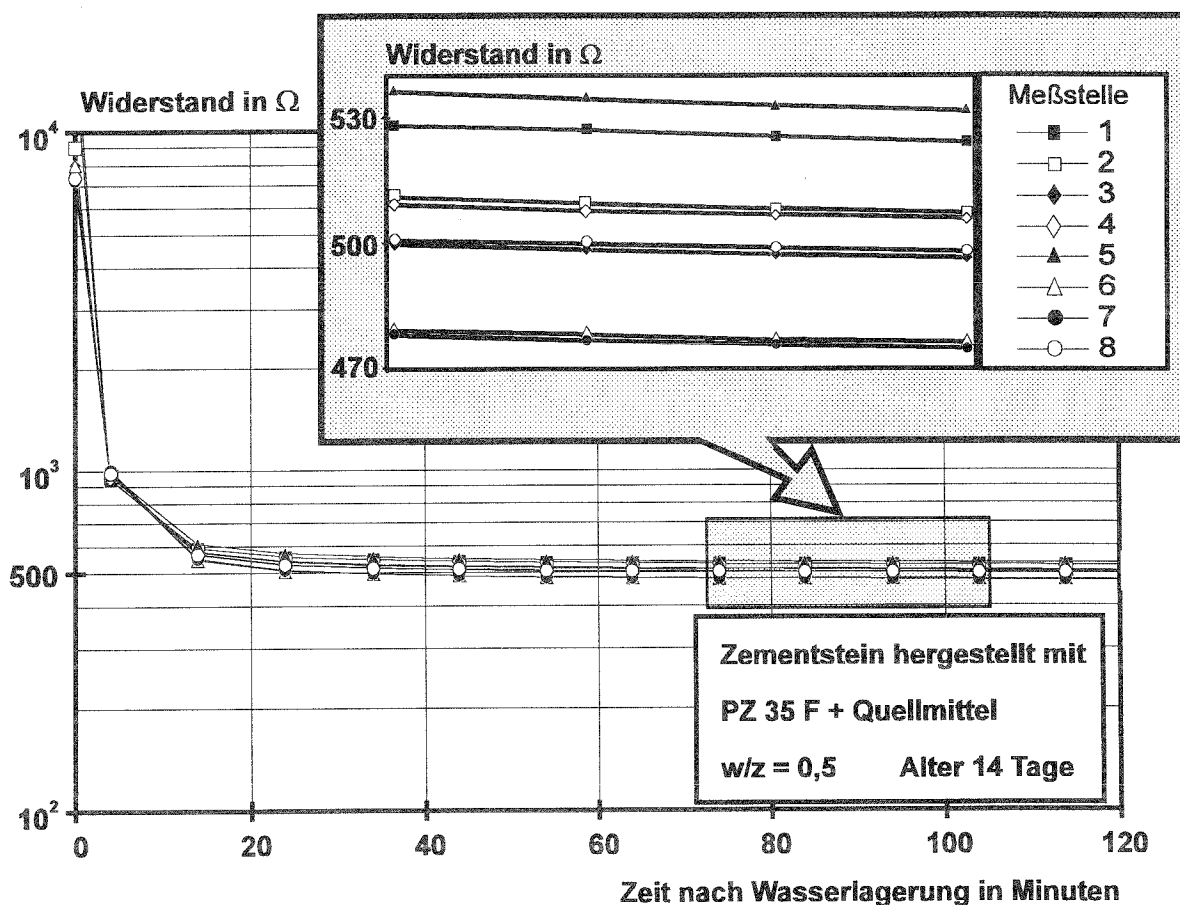


Bild 27: Kontrollmessung einer ummantelten Multi-Ring-Elektrode während der Wasserlagerung

Die Reaktionszeit dient dem Nachweis der Wasseraufnahmefähigkeit. Bei einigen der verwendeten Mörtel (Injektions- bzw. Vergußmörtel) konnte nicht ausgeschlossen werden, daß diese die Multi-Ring-Elektrode aufgrund möglicher Kunststoffzusätze nahezu "wasserundurchlässig" umgeben und damit die Tauglichkeit des Sensors stark herabsetzen. Schon wegen der geringen Schichtdicke von 1 - 3 mm trat dieser Effekt nicht ein, die Multi-Ring-Elektrode reagierte bei allen getesteten Mörteln innerhalb von wenigen Minuten auf die Wasserbeaufschlagung.

Die Bandbreite der Widerstände ist eine Kontrolle für die Gleichmäßigkeit der Mörtel. Durch unvermeidbare Ungenauigkeiten in der Geometrie der Multi-Ring-Elektrode bzw. durch Fettreste auf den Ring-Elektroden kann es zu geringen Abweichungen der Widerstände voneinander kommen. Die Differenz zwischen dem größten und dem kleinsten Meßwert sollte erfahrungsgemäß 15 % des größten Meßwertes nicht überschreiten. Größere Abweichungen lassen auf eine inhomogene Ummantelung bzw., wenn es sich um eine einzelne Schicht handelt, auf Hohlräume oder Fehlstellen im Mörtel bzw. Zementstein der betreffenden Schicht schließen. Der vergrößerte Ausschnitt in Bild 27 zeigt die Differenz zwischen größtem und kleinstem Widerstand von etwa $537 - 478 = 59 \Omega$. Das entspricht einer Differenz von etwa 11 % und liegt damit im Toleranzbereich.

Eine bestimmte, nach Meßstellen geordnete Reihenfolge der Widerstände, wie sie ein Tiefenprofil eines eingebauten Sensors liefert, ist bei diesem Versuch nicht zu erwarten und wäre rein zufällig (vergrößerter Ausschnitt Bild 27).

Die Höhe der gemessenen Widerstände wurde zunächst mit denjenigen Widerständen verglichen, die mit der jeweiligen Elektrode vor der Ummantelung mit Mörtel beim Eintauchen in gewöhnliches Leitungswasser gemessen wurden. Aufgrund der im Porenwasser gelösten Alkalien mußten die Widerstände der ummantelten Elektrode jetzt deutlich niedriger liegen.

Als Referenz galten die Widerstände eines Betons aus PZ im Alter von 100 Tagen und bei Wasserbeaufschlagung, die im Bereich von 500Ω liegen. Bild 28 gibt einen Überblick über die mittleren gemessenen Widerstände der ummantelten Elektroden. Es ist deutlich zu erkennen, daß der mittlere Widerstand der Produkte 2, 5 und 6 deutlich über dem der Referenz liegt. Ihre Leitfähigkeit wurde als "ungünstig" bewertet (vgl. Tabelle 4, Abschnitt 7.2.4).

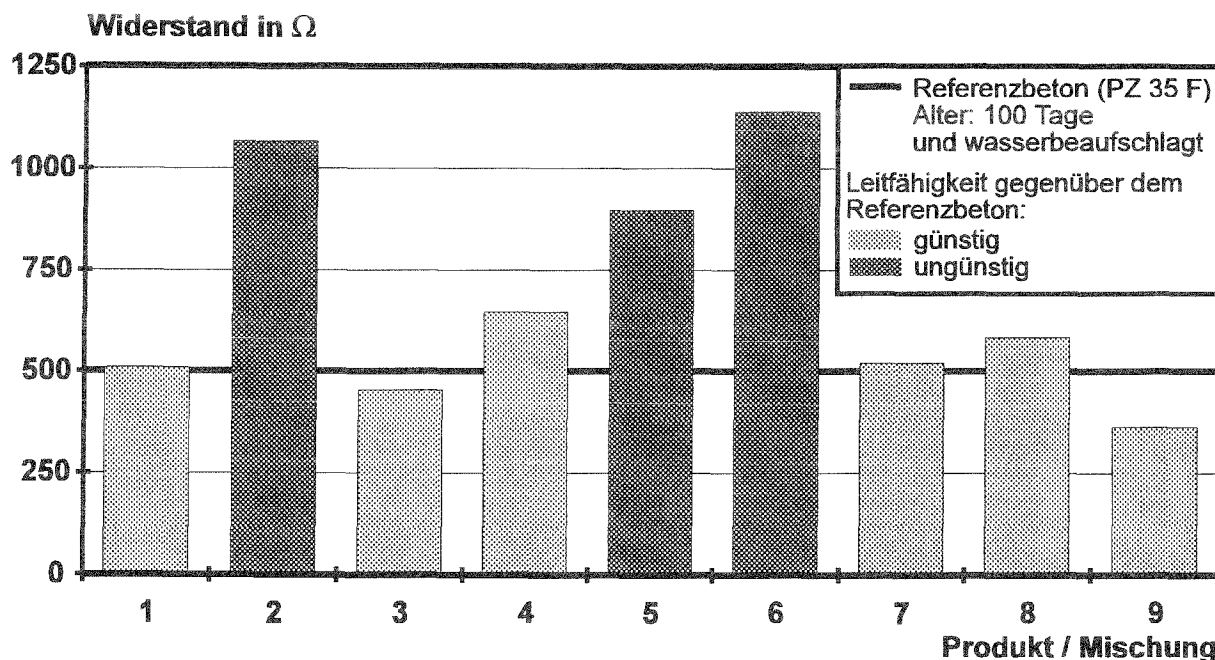


Bild 28: Mittlere Widerstände der Mörtel bzw. Zementleime im Alter von 14 Tagen bei Wasserlagerung

Nach der Beurteilung der baupraktischen Verarbeitbarkeit (Konsistenz) und Handhabung wurden zwei Fertigmörtel (Produkte 1 und 2) sowie ein Zementleim (Mischung 8) für die Versuche zum nachträglichen Einbau der Multi-Ring-Elektroden ausgewählt.

7.2.2.3 Bewertung der Ummantelten Multi-Ring-Elektrode

Die Herstellung der Ummantelung der Multi-Ring-Elektrode stellt gegenüber der nicht ummantelten Elektrode zum einen einen erheblichen zusätzlichen Arbeitsaufwand dar, zum anderen konnten hinsichtlich des Ankopplungsverfahrens an den Altbeton keine verfahrenstechnische Vorteile erzielt werden.

Die Bilder 29 und 30 zeigen beispielhaft die Widerstandsprofile eines Prüfkörpers, gemessen mit drei Multi-Ring-Elektroden, die sich in ihrer Art bzw. in der Art ihres Einbaus (direkt einbetoniert, nachträglich eingebaut und nicht ummantelt, nachträglich eingebaut und ummantelt) unterscheiden.

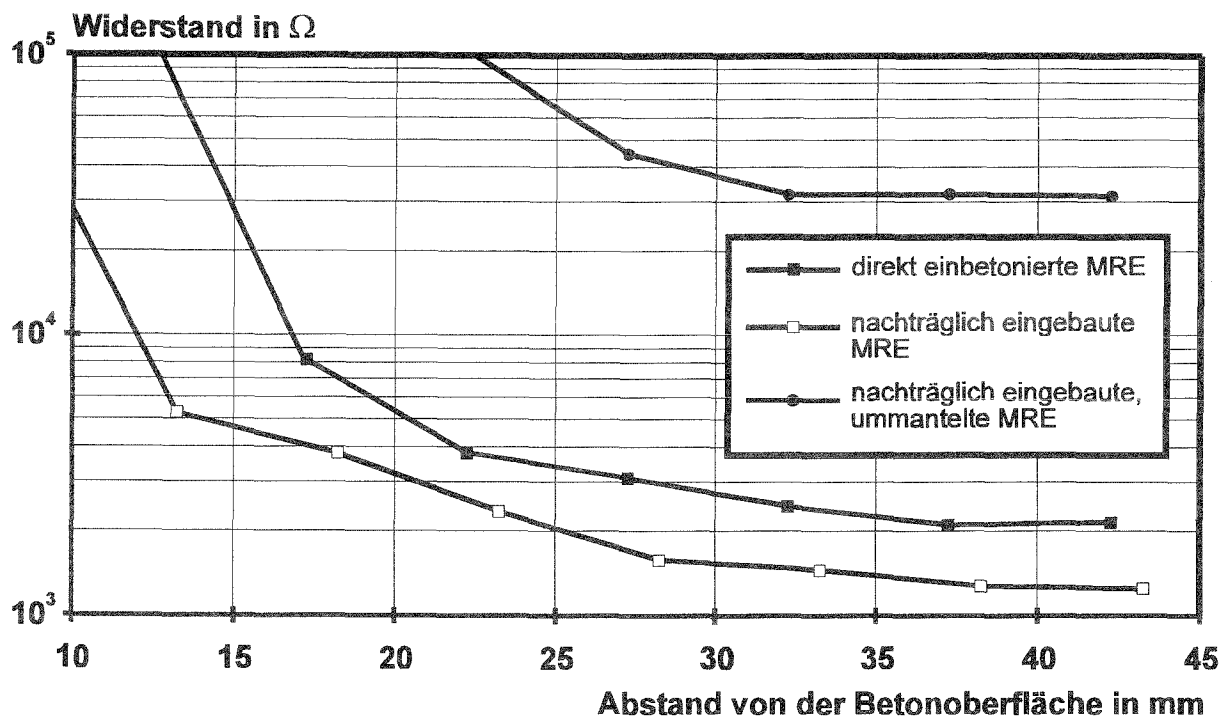


Bild 29: Widerstandsprofile eines Prüfkörper, hergestellt mit PZ 35 F, im Alter von 530 Tagen; Ummantelung und nachträglicher Einbau der Multi-Ring-Elektroden im Alter von 420 Tagen mit Zementleim, hergestellt aus PZ 35 F, unter Zugabe von Quellmittel (Mischung 8)

Bei den Messungen an trocken gelagerten Prüfkörpern lagen die Widerstände der nachträglich eingebauten ummantelten Multi-Ring-Elektroden stets wesentlich höher als die Widerstände der direkt einbetonierten Referenzelektroden oder auch der nachträglich eingebauten, nicht ummantelten Elektroden. Damit wurde die zum Ziel gesetzte Verbesserung des Übergangsbereiches zwischen Beton und Sensor zwar erreicht, die Meßergebnisse lagen dadurch aber auf der unsicheren Seite.

Ein Widerstandsprofil wird als "auf der sicheren Seite liegend" bezeichnet, wenn die Widerstände, gemessen mit der nachträglich eingebauten Elektrode, ab einer Tiefe von etwa 20 mm, also im Bereich einer möglichen Bewehrung, niedriger lagen als die Widerstände der direkt einbetonierten Elektrode. Für die Bauwerksüberwachung ist es sicherer, wenn aus niedrigeren Widerständen auf einen höheren Feuchtegehalt geschlossen wird, als wenn der Sensor durch zu hohe Widerstände einen niedrigen Feuchtegehalt vortäuscht.

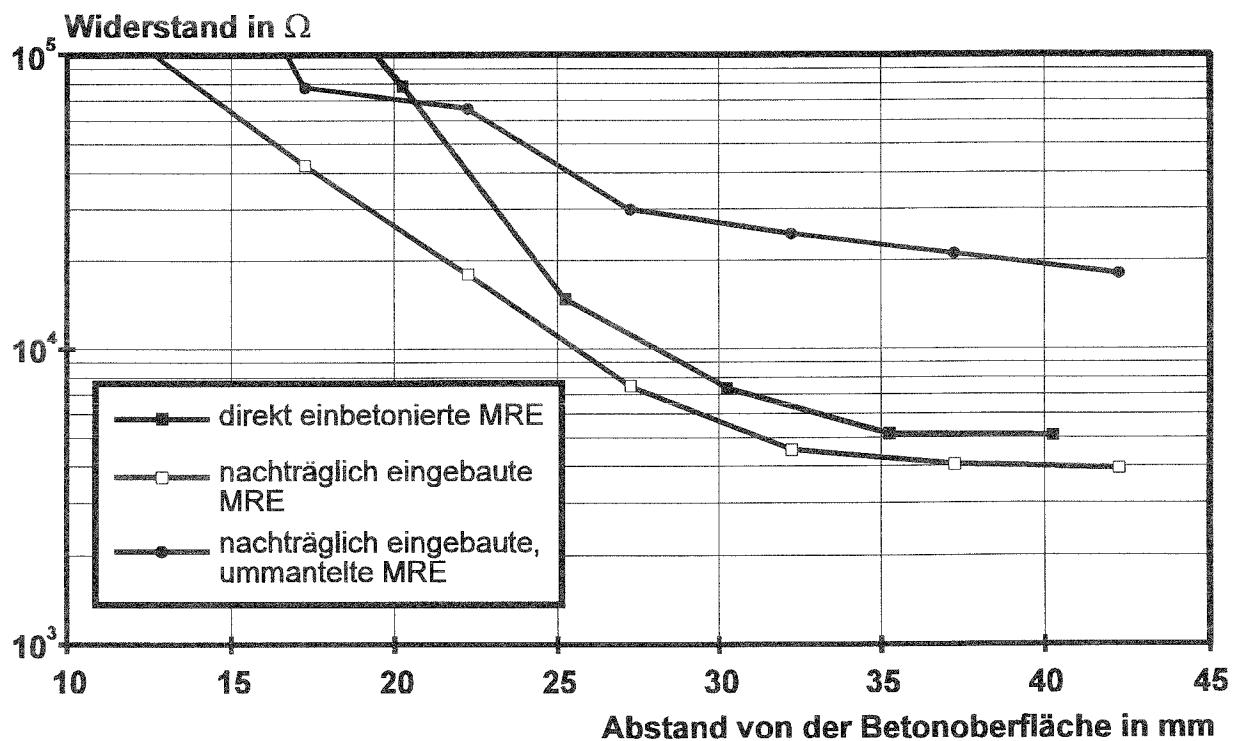


Bild 30: Widerstandsprofile eines Prüfkörpers, hergestellt mit PZ 35 F, im Alter von 530 Tagen, wasserbeaufschlagt; Ummantelung und nachträglicher Einbau der Multi-Ring-Elektroden im Alter von 420 Tagen mit einem Fertigmörtel (Produkt 1)

Die höheren Widerstände der ummantelten gegenüber den nicht ummantelten Multi-Ring-Elektroden lassen sich auf die folgenden Einflüsse zurückführen, die, jeder für sich, eine Verringerung des Porenvolumens bewirken:

- Bei der Ummantelung der Elektroden in der Kunststoffschalung wird eine gleichmäßigere Verteilung und eine bessere Verdichtung des umgebenden Mörtels bzw. des Zementleimes erreicht.
- Durch die Nachbehandlung in einem Klimaraum bei einer relativen Feuchte von 90 % wird ein frühzeitiges Austrocknen des Mörtels bzw. des Zementsteins verhindert. Die Hydratisierung erreicht einen höheren Grad.
- Die ummantelten Multi-Ring-Elektroden sind bis zu ihrem Einbau dem CO₂ der Umgebungsluft ausgesetzt, was unter ungünstigen Bedingungen zu einer Karbonatisierung des Mörtels bzw. des Zementsteins führen kann.

Neben der Unsicherheit, die durch überhöhte Widerstände einer Messung mit einer ummantelten Multi-Ring-Elektrode, z. B. bei der Beurteilung des Feuchtegehaltes eines Betons, entsteht, stellt auch die Empfindlichkeit einer solchen Elektrode vor dem Einbau ein Problem dar.

Abschließend ist festzustellen, daß sich der nachträgliche Einbau von ummantelten Multi-Ring-Elektroden hinsichtlich der Meßergebnisse als ungünstig und außerdem für die Anwendung auch als unpraktisch erwiesen hat.

7.2.3 Leitfähigkeit geeigneter Produkte nach dem Einbau

Eine abschließende Beurteilung der Eignung der zwei ausgewählten Fertigmörtel (Produkte 1 und 2) bzw. des ausgewählten Zementleims (Mischung 8) (Abschnitt 7.2.2.2), insbesondere hinsichtlich der Leitfähigkeit, erfolgte nach dem Einbau.

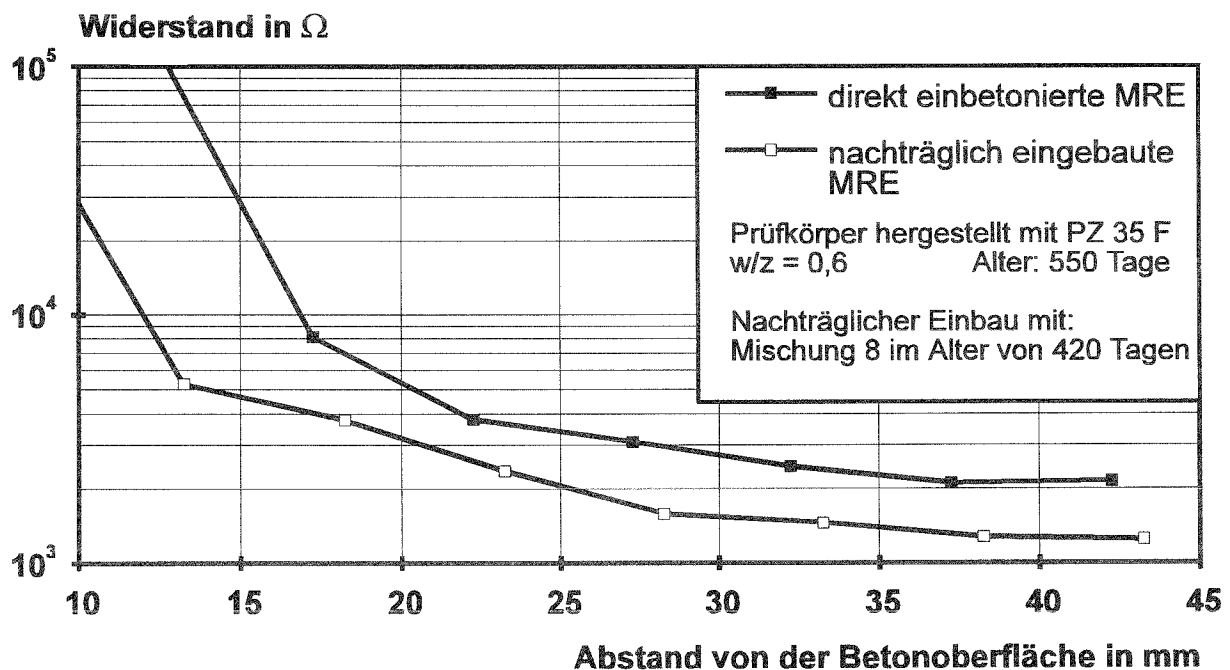


Bild 31: Vergleich zwischen direkt einbetonierter und nachträglich eingebauter Multi-Ring-Elektrode

Bild 31 zeigt zwei Widerstandsprofile eines Prüfkörpers, hergestellt mit PZ, und gelagert bei 20 °C und 70 % r.F. Die Widerstände der mit dem Zementleim (Mischung 8) angekoppeelten Multi-Ring-Elektrode liegen ab einer Tiefe von etwa 20 mm in der gleichen Größenordnung wie die der direkt einbetonierten Referenzelektrode und auf der sicheren Seite. Die Übergangsschicht aus Zementleim besitzt demnach in etwa die elektrischen Eigenschaften des umgebenden Betons (vgl. Bild 28).

Bild 32 zeigt ebenfalls zwei Widerstandsprofile eines Prüfkörpers. Die Herstellung und Lagerung entspricht der des Prüfkörpers in Bild 31, was durch den nahezu identischen Verlauf der Widerstandsprofile, gemessen mit den Referenzelektroden, deutlich wird. Der nachträgliche Einbau der Multi-Ring-Elektrode erfolgte hier mit einem Fertigmörtel (Produkt 1). Die Widerstände liegen in diesem Fall auf der unsicheren Seite und weit über denen, die mit der Referenzelektrode gemessen wurden.

Die Übergangsschicht stellt einen zu hohen Widerstand dar, der wahrscheinlich auf das geringere Porenvolumen des Fertigmörtels und seine nicht auszuschließenden Kunststoffbestandteile zurückzuführen ist. Diese ungünstige Entwicklung des Widerstandes war nach 14 Tagen (s. Bild 28) noch nicht absehbar.

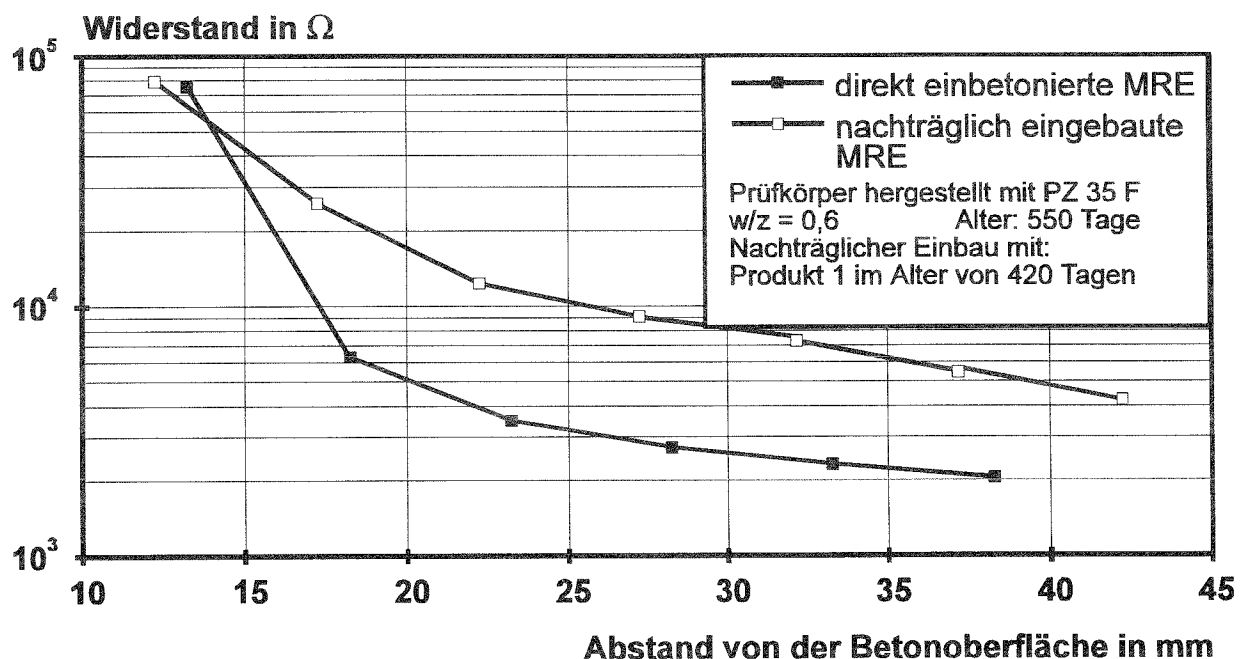


Bild 32: Vergleich zwischen direkt einbetonierter und nachträglich eingebauter Multi-Ring-Elektrode

Bild 33 zeigt die Widerstandsprofile eines Prüfkörpers, der aus HOZ hergestellt wurde und ebenfalls bei 20 °C und 70 % r.F. lagerte. Der Widerstandsverlauf, der mit der nachträglich eingebauten Multi-Ring-Elektrode (angekoppelt mit Produkt 2) gemessen wurde, entspricht in etwa dem Verlauf der Widerstände in Bild 32, ebenfalls gemessen mit der nachträglich eingebauten Elektrode (angekoppelt mit Produkt 1). Die beiden Fertigmörtel scheinen demnach bei nahezu vollständiger Hydratation - und im Gegensatz zu den Ergebnissen nach Bild 28 - in etwa die gleichen elektrischen Eigenschaften zu besitzen.

Da für einen Beton, hergestellt mit HOZ, im Vergleich zu einem mit PZ hergestellten Beton höhere Widerstände ermittelt werden, liegt in diesem Fall das mit der nachträglich eingebauten Multi-Ring-Elektrode gemessene Widerstandsprofil dennoch auf der sicheren Seite. In einem Bereich tiefer als 20 mm von der Oberfläche verlaufen die Widerstände sogar parallel und in geringem Abstand zu denen der Referenzelektrode.

Der Einfluß der Übergangsschicht auf die Widerstandsmessung wird hier besonders deutlich. Entscheidend für die Höhe der Widerstände scheint weniger der umgebende Beton als der zur Ankopplung verwendete Mörtel zu sein.

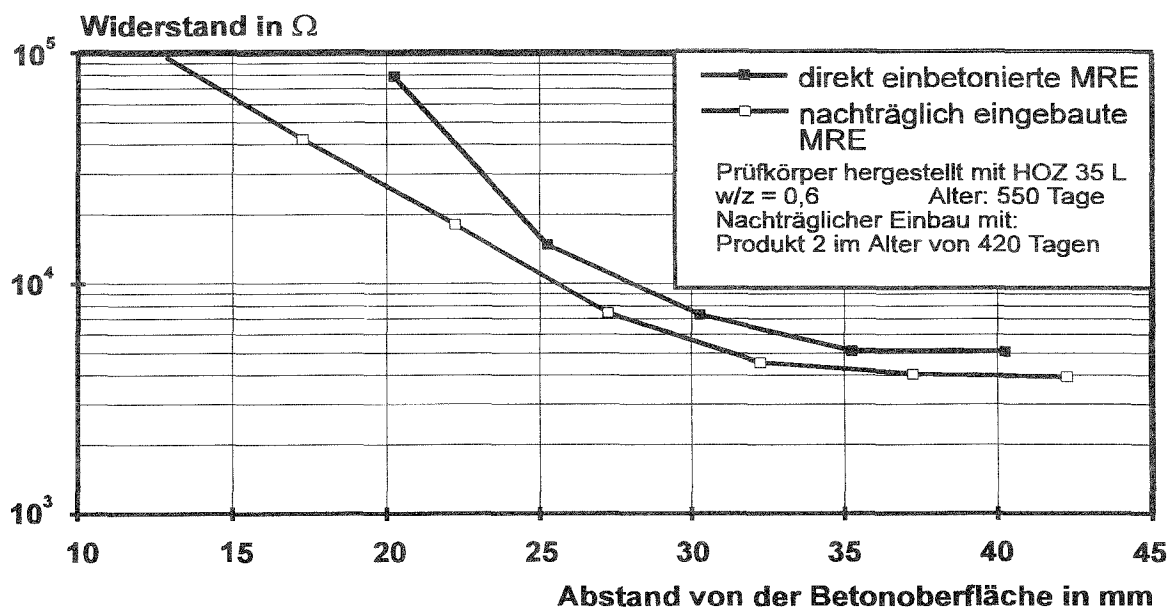


Bild 33: Vergleich zwischen direkt einbetonierter und nachträglich eingebauter Multi-Ring-Elektrode

Bei Wasserbeaufschlagung der Prüfkörper liefern alle nachträglich eingebauten Multi-Ring-Elektroden unabhängig von dem Ankopplungsmörtel bzw. -zementleim Widerstandsprofile, die in etwa denen der Referenzelektroden entsprechen.

7.2.4 Empfehlung für Ankopplungsmedien

Tabelle 4 gibt einen Überblick über die geprüften Zementleime bzw. Feinmörtel und eine Wertung hinsichtlich der für diese Art der Anwendung entscheidenden Kriterien.

Es hat sich gezeigt, daß es Fertigmörtel gibt, die in ihren elektrischen Eigenschaften einem bestimmten Beton nahekommen (Bild 33). Im allgemeinen erfordert die Verwendung eines Fertigmörtels zum Ankoppeln der Multi-Ring-Elektrode allerdings eine zusätzliche Kalibrierung der Meßwerte.

Für den nachträglichen Einbau der Multi-Ring-Elektroden in den Beton eines Bauwerks eignet sich deshalb ein Zementleim am besten. Der Zement sollte dem entsprechen, der für die Herstellung des umgebenden Betons verwendet wurde. Der Wassermenge-Wert des Zementleims sollte ebenfalls möglichst nahe dem gewählt werden, der bei der Herstellung des umgebenden Betons verwendet wurde. Zur Vermeidung bzw. zur Verringerung des Schwindens des Zementsteins sollte dem Zementleim ein Quellmittel zugegeben werden.

Die besten Ergebnisse wurden bei den durchgeführten Untersuchungen mit Mischung 8 erzielt.

Tabelle 4: Zusammenstellung und Bewertung der geprüften Zementleime bzw. Mörtel

Nr.	Produkt/Mischung	Injektionsfähigkeit	Leitfähigkeit im erhärteten Zustand	Bemerkung
1	2	3	4	5
1	Fertigprodukte (Injektions- bzw. Vergußmörtel verschiedener Firmen)	sehr gut	ungünstig	keine
2			günstig	Starkes Fröhschwinden und dadurch bedingte Risse
3		schlecht		Größtkorn entgegen dem Technischen Merkblatt > 1 mm
4				ungünstig
5		gut		günstig
6			sehr gut	
7	Zementleimmischungen aus PZ 35 F			
8	unterschiedlicher Herkunft, mit unterschiedlichen Quellmitteln, w/z = 0,5			
9				

7.3 Ankopplungsverfahren

7.3.1 Bohrlochmaße

Die Multi-Ring-Elektrode wird beim Einbau in ein bestehendes Bauwerk in ein Bohrloch eingesetzt. Zur Untersuchung einer möglichen Beeinflussung des Bohrlochdurchmessers und der damit unterschiedlichen Übergangsschicht auf die Widerstandsmessung wurden Multi-Ring-Elektroden in Bohrlöcher verschiedener Durchmesser eingebaut. Bild 34 zeigt beispielhaft ein Ergebnis der Untersuchungen.

Die Widerstandsprofile bei unterschiedlichem Bohrlochdurchmesser unterscheiden sich nur geringfügig. Das Injizieren des Mörtels bzw. des Zementleims in ein Bohrloch mit dem Durchmesser 22 mm gestaltet sich jedoch schwierig. Zudem erfordern kleine Bohrlochdurchmesser ein nahezu zur Betonoberfläche rechtwinkliges Bohrloch, weil die Multi-Ring-Elektrode aufgrund des geringen Platzangebotes kaum zentriert werden kann.

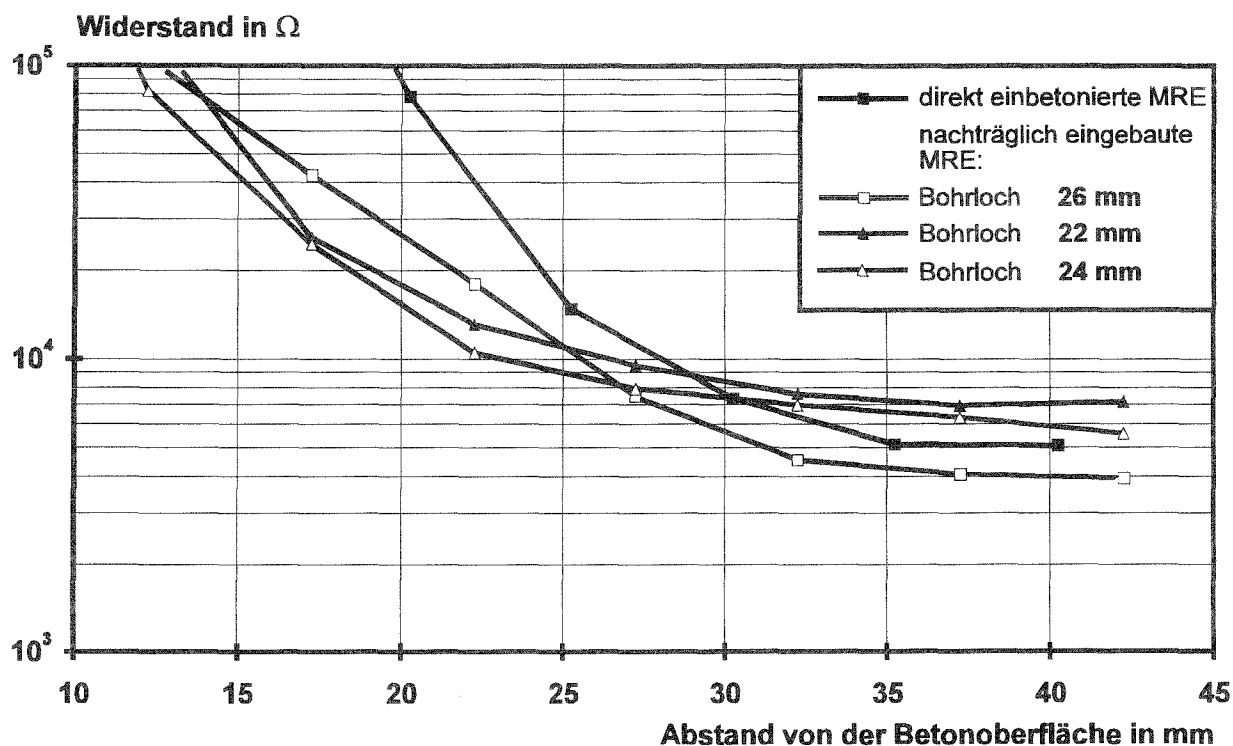


Bild 34: Einfluß des Bohrlochdurchmessers auf die Widerstandsverteilung beim nachträglichen Einbau

Aus diesem Grund wird für den nachträglichen Einbau der Multi-Ring-Elektroden ein Bohrlochdurchmesser von 26 mm empfohlen.

Die Bohrlochtiefe sollte 70 mm betragen, um die seitliche Beweglichkeit der Elektrode im Bohrloch vor dem Ankoppeln zu gewährleisten. Diese Beweglichkeit ist zur Feinausrichtung der Elektrode nötig und wird bei geringeren Bohrlochtiefen durch die Steifigkeit des Kabels behindert.

7.3.2 Montageanleitung

Zum nachträglichen Ankoppeln der Multi-Ring-Elektrode an den Beton eines bestehenden Bauwerkes wurde ein für die Baupraxis geeignetes Verfahren entwickelt, das im folgenden beschrieben werden soll. Als Beispiel wird der Einbau in ein vertikales Bauteil beschrieben, der in Bild 35 schematisch dargestellt ist.

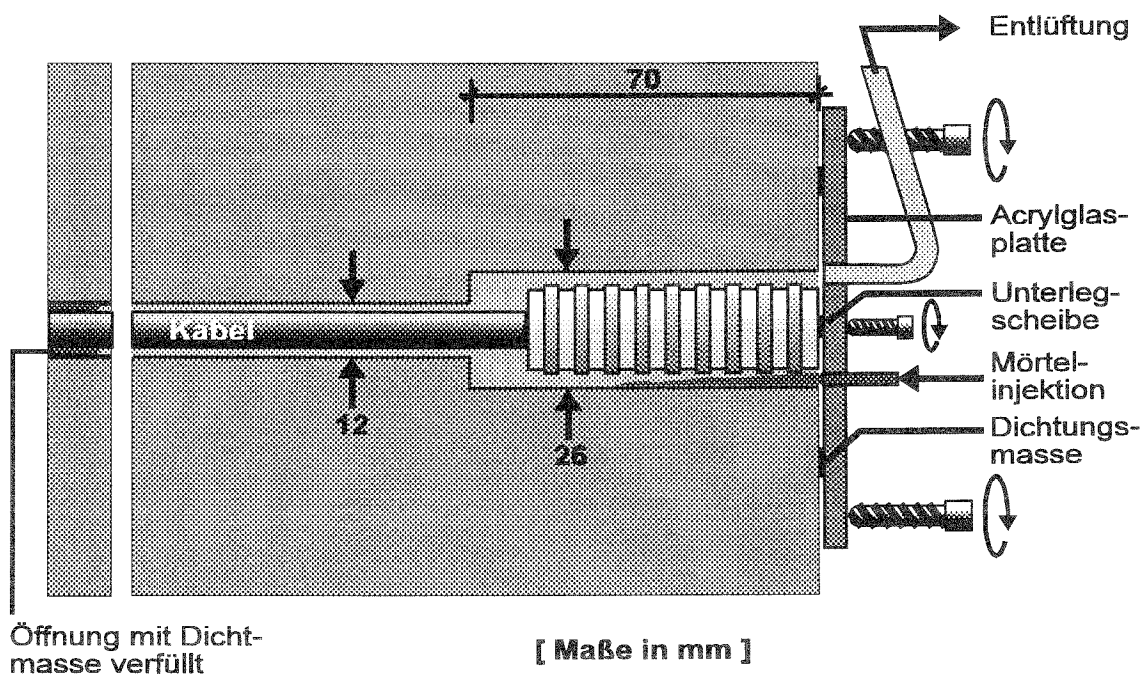


Bild 35: Einbau der Multi-Ring-Elektrode in vertikale Gebäudeteile

Zunächst wird ein Loch mit einem Durchmesser von 12 mm durch das Bauwerk gebohrt. Dieses dient später der Kabelführung. An der Bauwerksseite, an der die Elektrode angeordnet werden soll, wird das Bohrloch bis in eine Tiefe von 70 mm auf einen Durchmesser von 26 mm aufgeweitet. Diese Bohrung bestimmt die grobe Orientierung der Elektrode und sollte möglichst im rechten Winkel zur Bauwerksoberfläche gesetzt werden.

Eine Acrylglasscheibe dient zur Feinausrichtung und Fixierung der Elektrode. Für ihre Befestigung werden vier Löcher mit einem Durchmesser von 6 mm erstellt und entsprechende Kunststoffdübel eingesetzt.

Anschließend wird das Kabel durch das Bohrloch geführt. Vor dem Einsetzen der Multi-Ring-Elektrode in das Bohrloch ist dieses unbedingt mit Wasser zu befeuchten (s. Bild 37), weil eine trockene Bohrlochwandung dem später eingepressten Mörtel die Feuchtigkeit entzieht. Dies kann zu einer unvollständigen Hydratisierung und zu starken Schwindrissen im Mörtel führen und damit die Messung des elektrolytischen Widerstandes negativ beeinflussen.

Mit einer Schraube wird die Multi-Ring-Elektrode an der Acrylglasscheibe befestigt (s. Bild 38) und von eventuell vorhandenen Fettresten befreit. Die Acrylglasscheibe wird zunächst locker an die Betonoberfläche geschraubt (s. Bild 39). Ein Spiel der vier Befestigungsschrauben in den Aussparungen der Scheibe erlaubt eine genaue Positionierung der Multi-Ring-Elektrode im Bohrloch. Eine Dichtmasse bzw. ein Dichtring sorgt für einen Ausgleich zwischen der glatten Acrylglasscheibe und der rauhen Betonoberfläche und verhindert ein Entweichen des injizierten Mörtels.

Sobald die Multi-Ring-Elektrode mittig positioniert und die Acrylglasscheibe festgeschraubt sind, werden der Entlüftungsschlauch und der Injektionsschlauch auf die Scheibe aufgesteckt (s. Bild 40). Auf der Rückseite des Bauwerkes können jetzt der Stecker an das Kabel gelötet und die Kabelöffnung mit einer Dichtmasse auf einer Tiefe von etwa 10 - 20 mm abgedichtet werden. Die Verwendung von Dichtmasse ermöglicht einen Ausbau der Multi-Ring-Elektrode nach negativer Kontrollmessung (s. unten).

Über den Injektionsschlauch wird ein Feinmörtel bzw. Zementleim (s. Abschnitt 7.2) in das Bohrloch injiziert (s. Bild 41). Benötigt werden etwa 20 cm³ Injektionsgut zur Ummantelung der Elektrode und etwa 0,6 cm³ Injektionsgut pro cm Bauteildicke zum Verfüllen des Kabelschachtes.

Die Luft aus dem Bohrloch entweicht über den Entlüftungsschlauch bis auch dort der Feinmörtel bzw. Zementleim aufsteigt. Die Standhöhe sollte mindestens 5 - 6 cm betragen, damit auch nach abgeschlossener Injektion noch Injektionsgut in das Bohrloch nachlaufen kann. Dies wird nötig, wenn trotz des Injektionsdruckes zunächst noch Fehlstellen in der Umgebung des Bohrloches (z. B. Kiesnester) unausgefüllt bleiben und das Injektionsgut erst zeitlich versetzt eindringt. Nach Abschluß wird der Injektionsschlauch mit einem Pfropfen verschlossen.

Noch vor dem Abbinden des Feinmörtels bzw. des Zementleimes sollte eine erste Messung der Widerstände erfolgen. Hierdurch kann die Funktionstüchtigkeit der Multi-Ring-Elektrode nach dem Einbau kontrolliert und die gleichmäßige Ummantelung mit Injektionsgut bestätigt werden. Die gemessenen Widerstände liegen zu diesem Zeitpunkt erfahrungsgemäß zwischen 20 und 200 Ω , je nach Zusammensetzung und Temperatur des verwendeten Injektionsgutes. Die Differenz zwischen dem höchsten und dem niedrigsten gemessenen Widerstand sollte nicht mehr als 15 % des höchsten Widerstandes betragen (Abschnitt 7.2).

Nach etwa 24 Stunden wird die Acrylglasscheibe zuerst von der Multi-Ring-Elektrode und dann von der Betonoberfläche abgeschraubt. Der Mörtel bzw. der Zementleim sollte mindestens weitere 24 Stunden feucht gehalten werden.

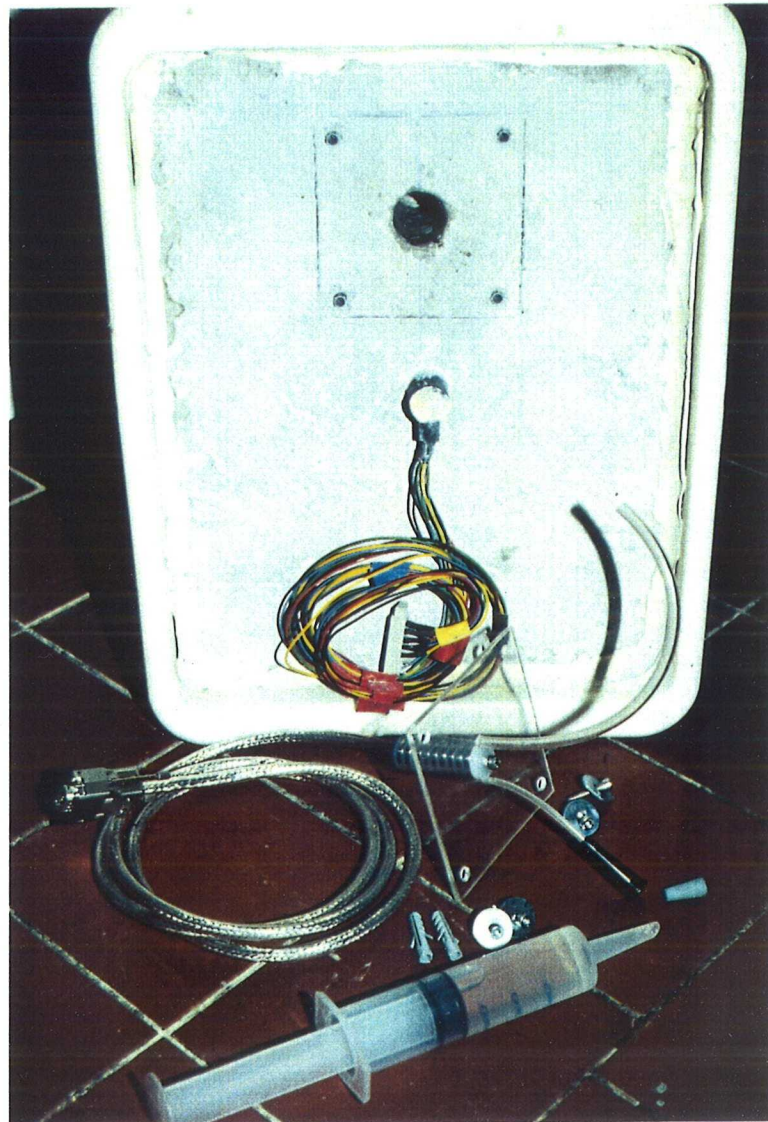


Bild 36: Prüfkörper mit Bohrloch und alle, zum nachträglichen Einbau der Multi-Ring-Elektrode, notwendigen Bestandteile

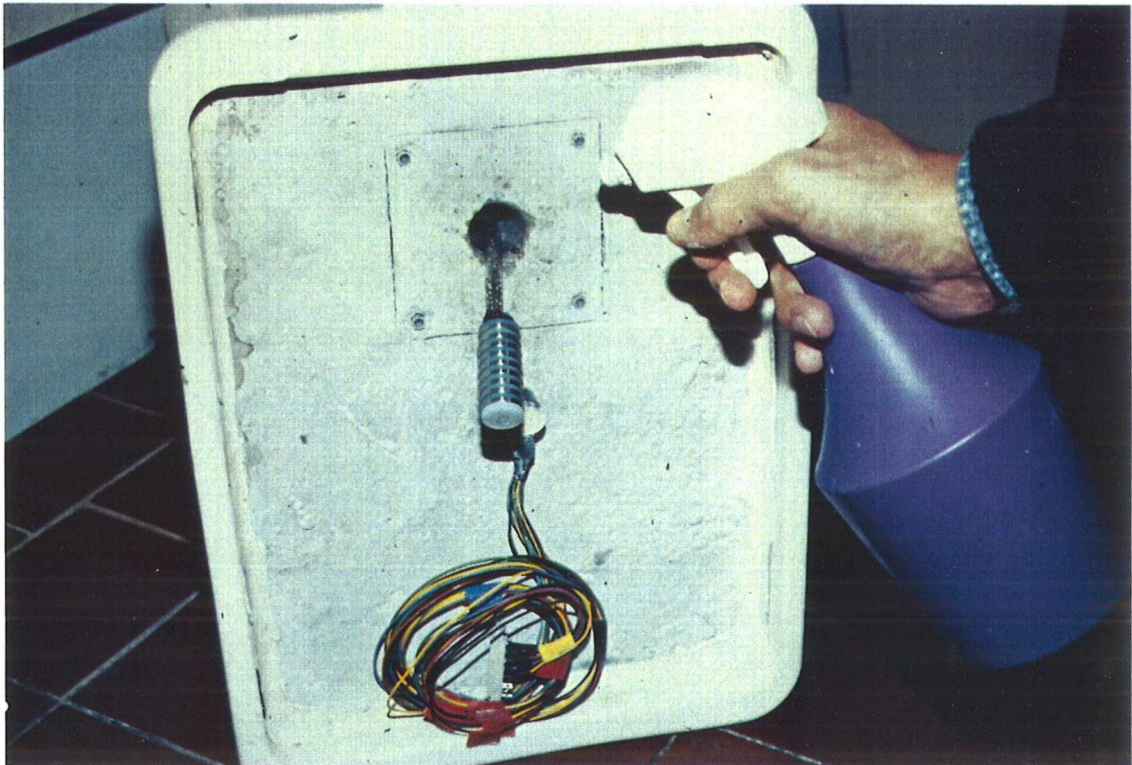


Bild 37: Befeuchten des Bohrloches mit Wasser

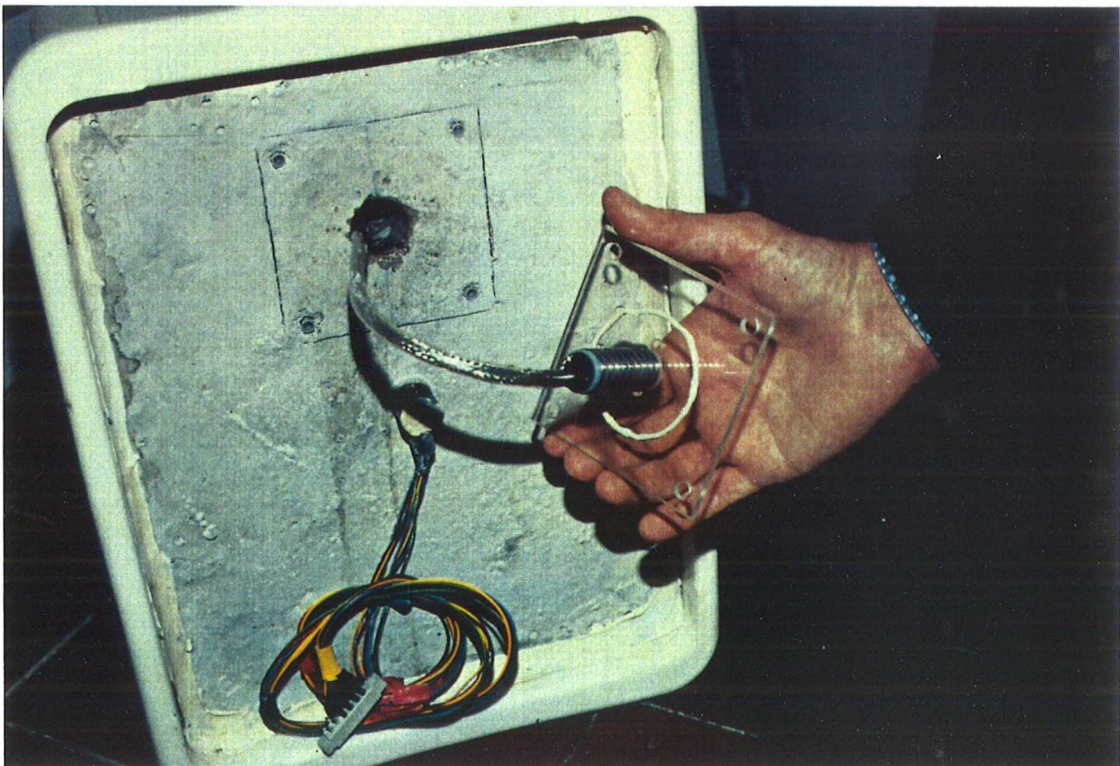


Bild 38: Multi-Ring-Elektrode mit geschraubter Acrylglascheibe mit Dichtmasse

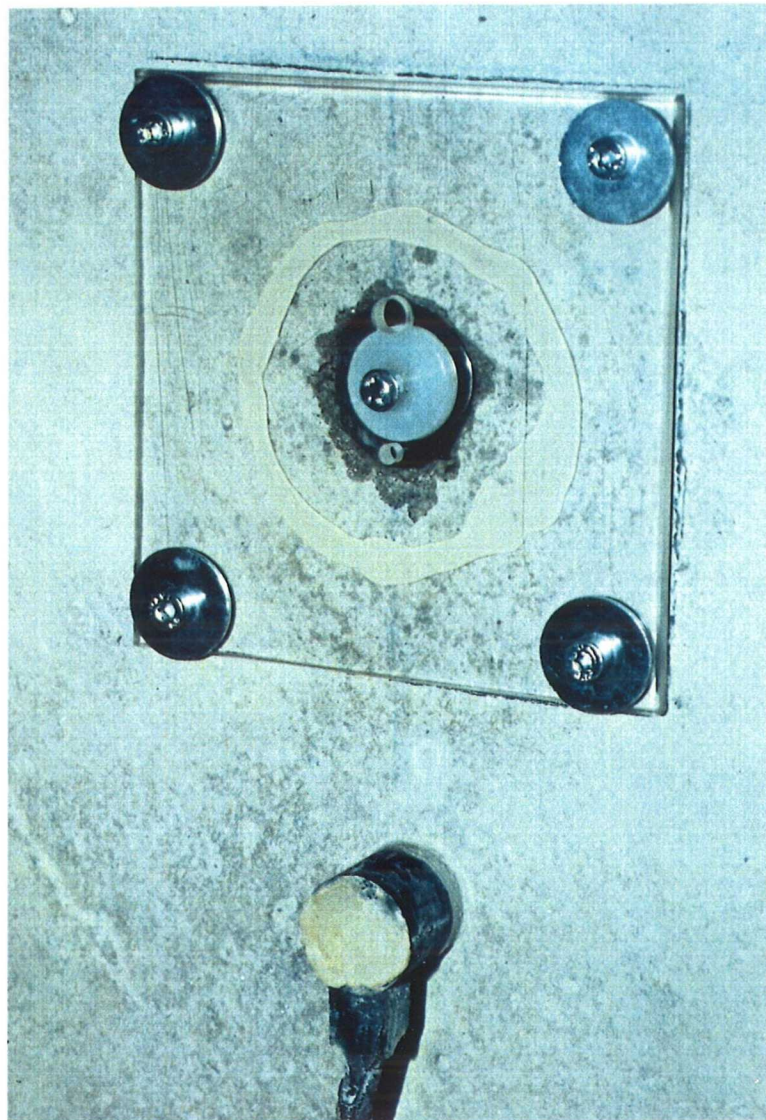


Bild 39: Eingesetzte und ausgerichtete Multi-Ring-Elektrode

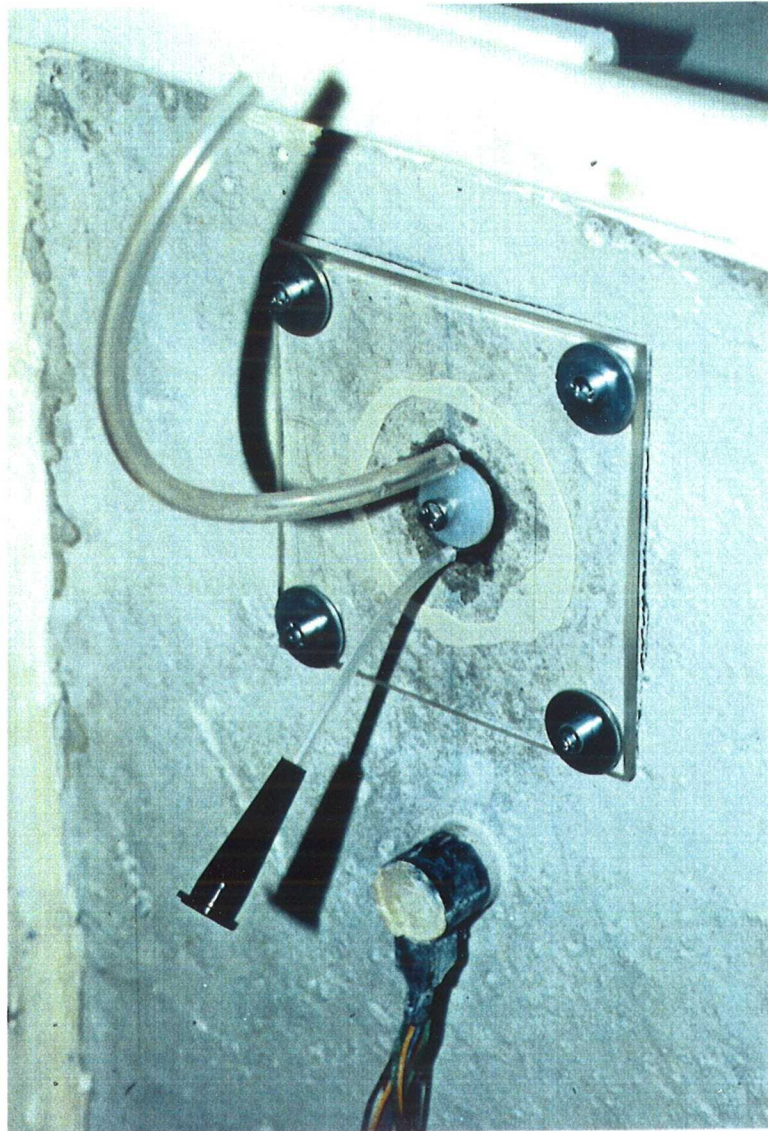


Bild 40: Injektions- und Entlüftungsschlauch

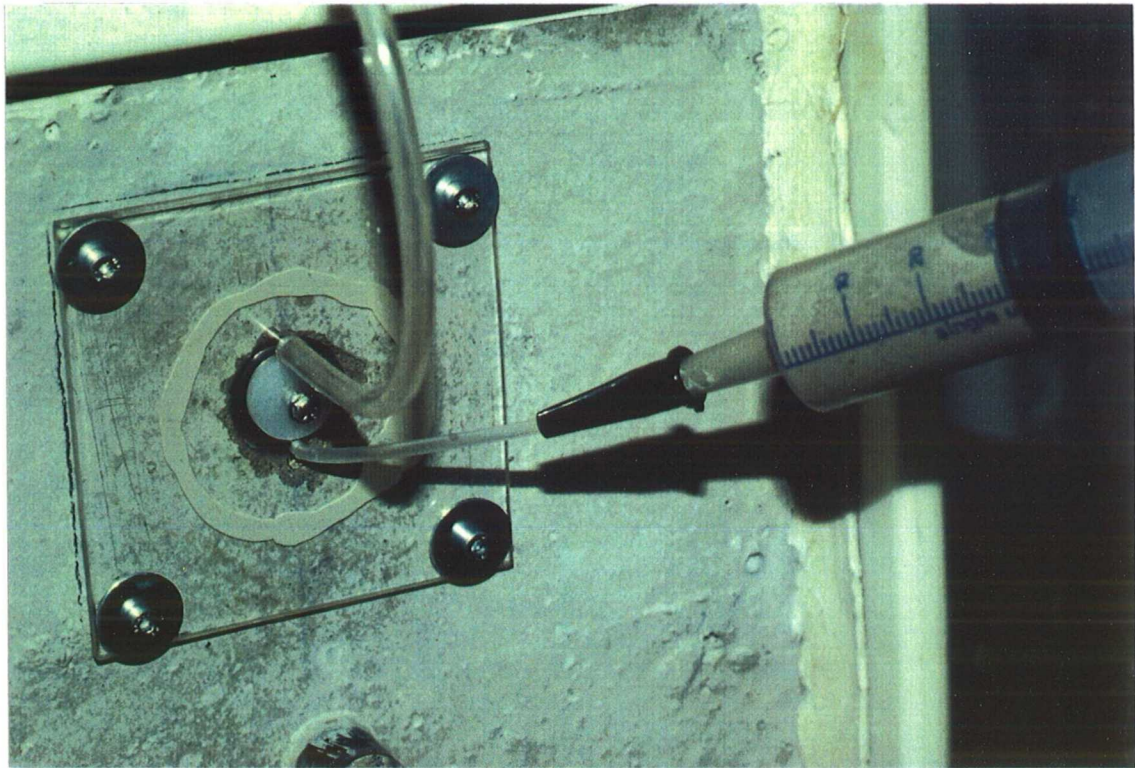


Bild 41: Injizieren des Zementleims in das Bohrloch

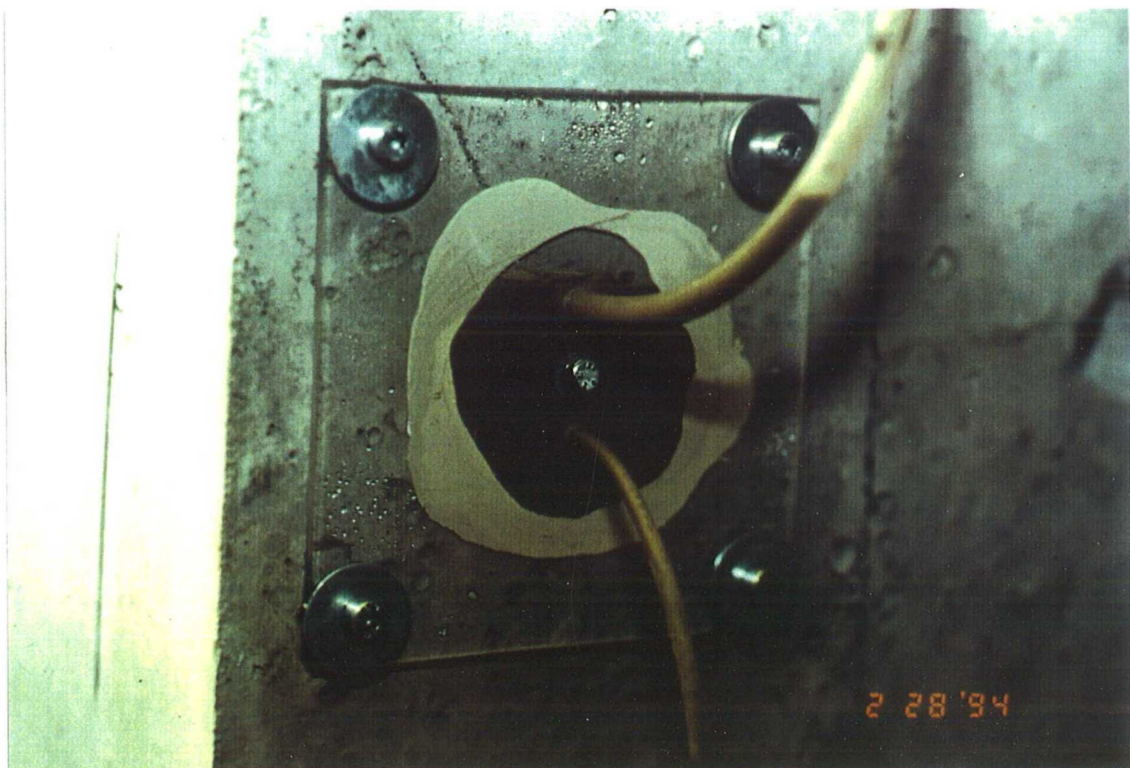


Bild 42: Aufsteigen des Injektionsgutes in dem Entlüftungsschlauch

8 ZUSAMMENFASSUNG

Mit Hilfe der Multi-Ring-Elektrode konnte der Verlauf des elektrolytischen Widerstandes von Beton als Parameter für dessen Feuchteverteilung bezüglich einer Vielzahl von Einflußgrößen gemessen werden. Die Auswertung der Meßergebnisse ergab eine gute Übereinstimmung mit dem in der Literatur beschriebenen zeitlichen Verlauf des elektrolytischen Widerstandes von Beton.

Darüber hinaus konnte anhand der Widerstandsprofile auch die Tiefenwirkung einzelner betontechnologischen Parameter beschrieben und beurteilt werden.

So wurde z. B. festgestellt, daß der Wasserzementwert ($0,5 \leq w/z \leq 0,6$) den Widerstand von trockenem Beton in den ersten 10 mm von der Betonoberfläche deutlich beeinflußt. Der Einfluß nimmt aber mit zunehmendem Abstand von der Betonoberfläche ab und ist bei Messungen mit der Multi-Ring-Elektrode schon ab einer Tiefe > 10 mm von der Betonoberfläche kaum noch meßbar.

Für einen nachträglichen Einbau der Multi-Ring-Elektrode in bestehende Bauteile wurde ein geeignetes Verfahren entwickelt. Dabei hat sich herausgestellt, daß ein Zementleim, hergestellt mit der gleichen Zementart und gleicher oder geringerer Zementfestigkeitsklasse, der für das umgebende Bauteil verwendet wurde, dazu geeignet ist, eine optimale Verbindung zwischen dem Sensor und dem Bauwerk herzustellen.

Die Lagerung von Prüfkörpern im Freien hat gezeigt, daß die Oberfläche des Betons im Bereich der eingebauten Multi-Ring-Elektrode teilweise Verwitterungserscheinungen aufweist. Es wird daher empfohlen,

- den Sensor tiefer einzubauen und mit einer Betonschicht zu überdecken.

Als Maß für die Überdeckungsschicht bietet sich eine Dicke von etwa 4 mm an. Bei Berücksichtigung des Abstandes zur ersten Meßstelle wird damit lediglich der Bereich der ersten 10 mm von der Betonoberfläche bei den Messungen nicht erfaßt. Die Auswertung der Laboruntersuchungen hat ergeben, daß die Widerstände des Betons in diesem Bereich nicht von großem Interesse sind.

9 AUSBLICK

Mit Hilfe der Multi-Ring-Elektrode können Widerstandsprofile in der Betonrandzone für eine Vielzahl von Einflußgrößen erstellt werden. Bisher ist es jedoch nur möglich, anhand der Widerstandsprofile Aussagen, z. B. über den Feuchtegehalt des Betons zu treffen.

Ziel sollte es sein, durch Kalibrierung des Meßverfahrens den Widerständen entsprechende Betonfeuchten zuzuordnen. So könnten Betonfeuchteprofile aufgestellt werden und z. B. hinsichtlich der Korrosionsgefahr beurteilt werden.

Hierzu sind fortführende Untersuchungen an den bestehenden Prüfkörpern erforderlich.

10 LITERATUR

- /1/ Catharin, P. ; Federspiel, H.: Der elektrische Widerstand des Betons. In: Elektrotechnik und Maschinenbau 89 (1972), Nr. 10, S. 399-407
- /2/ Whittington, H.W. ; McCarter, J. ; Forde, M.C.: The Conduction of Electricity Through Concrete. In: Magazine of Concrete Research 33 (1981), Nr. 114, S. 48-60
- /3/ Schulte, Ch. ; Mader, H. ; Wittmann, F.H.: Elektrische Leitfähigkeit des Zementsteins bei unterschiedlichem Feuchtigkeitsgehalt. In: Cement and Concrete Research 8 (1978), Nr. 3, S. 359-368
- /4/ Elsener, B.: Ionenmigration und Elektrische Leitfähigkeit im Beton. Zürich : Schweizerischer Ingenieur- und ArchitektenVerein, 1990 - In: Korrosion und Korrosionsschutz. Tl 5: Elektrochemische Schutzverfahren für Stahlbetonbauwerke, Studientagung 15. November 1990, S. 51-59
- /5/ McCarter, W.J. ; Garvin, S.: Dependence of Electrical Impedance of Cement-Based Materials on their Moisture Condition. In: Journal of Applied Physics Series D: Applied Physics 22 (1989), Nr. 11, S. 1773-1776
- /6/ Monfore, G.E.: The Electrical Resistivity of Concrete. In: Journal of the PCA Research and Development Laboratories 10 (1968), Nr. 2, S. 35-48
- /7/ McCarter, W.J. ; Forde, M.C. ; Whittington, H.W.: Resistivity Characteristics of Concrete. In: Proceedings Institution of Civil Engineering 71 (1981), Nr. March, S. 107-117
- /8/ Wesche, K.: Baustoffe für tragende Bauteile. Bd. 2: Beton, Mauerwerk. 3. Aufl. Wiesbaden : Bauverlag, 1993

- /9/ Raupach, M.: Zur chloridinduzierten Makroelementkorrosion von Stahl in Beton. Berlin : Beuth. - In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (1992), Nr. 433, Dissertation
- /10/ Polder, R.B. ; Ketelaars, M.B.G.: Electrical Resistance of Blast Furnace Slag Cement and Ordinary Portland Cement Concretes. London : Elsevier Applied Science, 1991. - In: International Conference on Blended Cements in Construction, Held at the University of Sheffield 9-12 September 1991 (Swamy, R.N. (Ed)), S. 401-415
- /11/ Hansson, I.L.H. ; Hansson, C.M.: Electrical Resistivity Measurements of Portland Cement Based Materials. In: Cement and Concrete Research 13 (1983), Nr. 5, S. 675-683
- /12/ Page, C.L. ; Short, N.R. ; El Tarras, A.: Diffusion of Chloride Ions in Hardened Cement Pastes. In: Cement and Concrete Research 11 (1981), Nr. 3, S. 395-406
- /13/ Schießl, P. ; Breit, W. ; Raupach, M.: Investigations into the Effect of Coatings on Water Distribution in Concrete using Multi-Ring-Electrodes. In: International Symposium on the Condition Assessment, Protection, Repair and Rehabilitation of Concrete Bridges Exposed to Aggressive Environments, Minneapolis, November 7-12, 1993
- /14/ Eibl, J.: Betonkalender, 1992, Teile I und II. 81. Aufl. Berlin : Ernst & Sohn, 1992
- /15/ Bergmann, L. ; Schaefer, C.: Lehrbuch der Experimentalphysik. Bd. 2: Elektrizität und Magnetismus. 7. Aufl., 1987
- /16/ Wenner, F.: A Method of Measuring Earth Resistivity. In: Bulletin of the Bureau of Standards 12 (1915), S. 469-478
- /17/ Weigler, H. ; Karl, S. ; Kupfer, H.: Handbuch für Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonbau ; Beton : Arten - Herstellung - Eigenschaften. Berlin : Ernst & Sohn, 1989
- /18/ Tritthart, J.: Änderungen des elektrischen Widerstandes in austrocknendem Beton. In: Zement Und Beton 30 (1985), Nr. 1, S. 23-28
- /19/ ASTM G 57-78(1984). Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method Philadelphia : American Society for Testing and Materials, 1984. - In: Annual Book of ASTM Standards, Volume 03.02, 04.08
- /20/ DIN 1045 07.88. Beton und Stahlbeton; Bemessung und Ausführung
- /21/ DIN 1164 Teil 1 03.90. Portland-, Eisenportland-, - Hochofen- und Traßzement; Begriffe, Bestandteile, Anforderungen, Lieferung

Telefon:
Vermittlung (02 41) 80-51 00
Durchwahl (02 41) 80-51 39

Datum 16.05.1994
Br/Fk-F 389
(f-389kff.doc)

RESUME

"Suivi du risque de corrosion de l'armature des poutres à faible recouvrement à l'aide des sondes spéciales" - F 389 -

Forschungsförderer: Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin; Az IV 1-5-582/89

Pour des constructions en béton armé susceptibles à la corrosion, la question de la durabilité se pose aussi bien pour des constructions nouvelles que pour des constructions après réparation et remise en état (p. ex. traitements de surfaces).

Cette question peut être partiellement éclairée à l'aide de sondes emplacements dans le béton, capables d'indiquer si la corrosion de l'acier est possible ou non. Etant capable de prévoir à temps une menace pour l'armature p. ex. si les effets bénéfiques d'un traitement de surface disparaissent, des dégâts peuvent être évités en renouvelant les mesures de protection.

De nombreux essais ont été effectués sur les méthodes de suivi de la corrosion des armatures dans le béton et ont mené au développement de la "Multi-Ring-Elektrode" qui permet de déterminer l'humidité du béton par l'intermédiaire de la résistance électrolytique du béton dans les couches extérieures. Cette sonde permet ainsi de suivre les changements d'humidité du béton après traitement des surfaces, elle peut être installée dans des constructions nouvelles ainsi qu'anciennes.

De nombreuses recherches ont été menées sur la résistance électrolytique du béton comme indicateur de l'humidité et de la teneur en eau du béton. Le lien étroit entre résistance et humidité a été étudié en fonction des nombreux facteurs influençants.

Pour les installations dans des anciennes constructions, le problème majeur à résoudre était d'assurer le bon contact entre la sonde et le béton entourant. Une méthode a été mise au point qui permet à l'aide d'une suspension de ciment un emplacement de la sonde dans des constructions existantes. Le type de ciment doit être comparable à celui utilisé lors de la réalisation du béton entourant.

Telefon:
Vermittlung (02 41) 80-51 00
Durchwahl (02 41) 80-51 39

Datum 16.05.1994
Bre/Fk-F 389
(f-389kfe.doc)

ABSTRACT

Research Project: "The Use of Integrated Sensors to Monitor the Reinforcement Corrosion Risk on Girders with a Thin Concrete Cover" - F 389 -

Sponsor: Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin; Az IV 1-5-582/89

If components of a structure exposed to a corrosion risk have been classified as undamaged after testing or if specific corrosion protection measures (e.g. concrete surface coatings) have been undertaken, the question of the durability of the repair measures becomes relevant. This question could be answered by incorporating simple sensors to indicate whether corrosion of the reinforcement is possible under the prevailing conditions. Early detection of a corrosion risk caused, for example, by the diminished efficacy of a protective measure (e.g. surface coating) means that damage can be prevented by taking the necessary steps at an early stage.

In recent years, results of intensive research at ibac into the measurability of corrosion of steel in concrete have included development of the multi-ring-electrode, which can be used for indirect determination of the concrete moisture in the surface zone and hence for estimation of the reinforcement corrosion risk. In addition to its use as a directly integrated component in new structures, the multi-ring-electrode has been designed as a sensor for monitoring moisture distribution in the surface zones of rehabilitated structures. This assumes the possibility of retrofitting the sensor in an existing structure and coupling it to the concrete.

Apart from fundamental research evaluating the time- and depth-dependent electrolytic resistance curves for concrete as a parameter for moisture distribution in relation to a wide range of influencing variables, a suitable method of retrofitting the multi-ring-electrode in existing structures was devised. It was found that a hardened cement paste produced using the same cement type and a cement strength class identical to or lower than that employed for the surrounding component of the structure is suitable for producing an optimum joint between the sensor and the structure.