

Bohrverfahren zur Bestimmung der Karbonatisierungstiefe und des Chlorid- gehaltes von Beton

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 17

bast

Bohrverfahren zur Bestimmung der Karbonatisierungstiefe und des Chlorid- gehaltes von Beton

von

Hans-Peter Gatz
Peter Gusia
Markus Kuhl

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 17

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines
B - Brücken- und Ingenieurbau
F - Fahrzeugtechnik
M- Mensch und Sicherheit
S - Straßenbau
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, daß die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Referat Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt beim Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bgm.-Smidt-Str. 74-76, D-27568 Bremerhaven, Telefon (04 71) 9 45 44 - 0, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in Kurzform im Informationsdienst **BASt-Info** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos abgegeben; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Referat Öffentlichkeitsarbeit.

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt 91 203:
Entwicklung eines Verfahrens zur kombinierten in-situ Bestimmung der Karbonatisierungstiefe und des Chloridgehaltes von Beton

Herausgeber:
Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon (0 22 04) 43 - 0
Telefax (0 22 04) 43 - 674

Redaktion:
Referat Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag:
Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10, D-27511 Bremerhaven
Telefon (04 71) 9 45 44 - 0
Telefax (04 71) 9 45 44 77

ISSN 0943-9293
ISBN 3-89701-071-2

Bergisch Gladbach, November 1997

Kurzfassung · Abstract · Résumé

Bohrverfahren zur Bestimmung der Karbonatisierungstiefe und des Chloridgehaltes von Beton

Erfahrungen mit Instandsetzungsmaßnahmen an Betonbauwerken aus der Vergangenheit haben deutlich gemacht, daß frühzeitiges Erkennen und Beseitigen von Betonschäden ganz wesentlich zur Kostenreduzierung beitragen können. Die auslösende Anregung zur Entwicklung des Bohrverfahrens resultierte daraus, daß es bisher kein baustellengerechtes und zerstörungsarmes Verfahren zur gemeinsamen Untersuchung der Karbonisierungstiefe und des Chloridgehaltes gab. Ziel des Projektes war, ein solches Verfahren zu entwickeln, mit dessen Hilfe durch vergleichende Beurteilung der Bausubstanz eine Dringlichkeitsreihung möglich wird, mit der die verfügbaren Geldmittel für Erhaltungsmaßnahmen gezielter und wirkungsvoller einzusetzen sind.

Das transportable und mobil einzusetzende Bohrverfahren erlaubt, unmittelbar aus dem beim Bohren entstehenden Bohrmehl Konzentrationsänderungen in der Bohrflüssigkeit zu bestimmen. Die Konzentrationsbestimmung kann direkt der Bohrtiefe zugeordnet werden. Derzeit können die für die oberflächennahe Betonsituation wichtigen Parameter pH-Wert und Chloridgehalt in den jeweiligen Tiefenhorizonten unmittelbar bestimmt werden. Anhand der unmittelbar nach der Messung ausgegebenen Meßprotokolle kann kurzfristig entschieden werden, ob ggf. in kritischen Bereichen zur statistischen Untermauerung der Stichprobenerhebungen weitere Bohrungen erforderlich sind. Hierbei wird ein im Durchmesser etwa 18 mm großes und rd. 50 mm tiefes Bohrloch erbohrt, so daß man von einem zerstörungsarmen Verfahren sprechen kann. Die Bestimmung der beiden Werte wird am Aufschluß des Bohrmehls aus dem gleichen Bohrloch vorgenommen.

Die Bohreinrichtung besteht aus Elementen, die ein kontinuierliches und schlagfreies Bohren in beliebig gerichtete Betonbauteile ermöglichen. Dabei transportiert eine Meßlösung das Bohrmehl in einem geschlossenen Kreislauf. Mit Hilfe spezieller Elektroden werden die Alkalität und der Chloridgehalt gemessen. Die Meßwerte werden elektrisch umgesetzt, digitalisiert, gespeichert und mittels eines DV-Programmes so bearbeitet, daß eine Darstellung des pH-Wertes sowie des Chloridgehaltes jeweils in Abhängigkeit von der Bohrtiefe nach dem Beenden der Bohrung in Form entsprechender Meßkurven erfolgen kann.

Drilling Procedure to Determine the Carbonatization Depth and Chloride Content of Concrete

Experience gained in the course of repairs to concrete structures has shown that the early recognition and elimination of damage to concrete can contribute substantially to reducing costs. The idea of developing the drilling process was stimulated by the realization that up to the present time there has been no process, which is suitable for use on-site and which can be considered to be low-destructive, for determining at the same time the depth of carbonatization and the chloride content. The objective of the project was therefore to develop such a process with the aid of which the substance of different structures could be compared and evaluated and then an order of priorities drawn up. This in turn would enable the funds available for maintenance measures to be spent in a more specifically aimed and effective manner.

The transportable drilling equipment, which can be used on site, permits the changes in concentration in the boring dust produced in the drilling and as transported in the drilling fluid to be determined directly. The concentrations as determined can be assigned in a precise manner to the depth of drilling. At the present time the parameters of pH and chloride content, which are important for assessing the condition of the concrete near the surface, can be determined directly for the particular depth of drilling. Using the measurement protocol which is issued immediately after each measurement, a rapid decision can be made as to whether further drillings should be carried out in critical areas to statistically substantiate the random tests. In the test a hole with a diameter of approx. 18 mm and a depth of around 50 mm is drilled so that one can truly speak of a low-destructive test. The determination of both values is made by examining the boring dust obtained from the same hole.

The drilling device consists of elements which permit continuous, non-impact drilling in concrete of any desired alignment. In the process a measurement solution transports the boring dust in a closed circuit. The alkalinity and chloride content are measured with the aid of special electrodes. The measured values are converted electrically, digitized and stored and are then processed with a computer program in such a way that the pH and chloride content can be represented in graphical form as a function of the depth of drilling as soon as the drilling has ended.

Procédé de perçage pour détermination de la profondeur de carbonatation et de la teneur en chlorure du béton

Les expériences faites dans le passé avec les mesures d'entretien d'ouvrages en béton ont mis en lumière qu'une réduction considérable des coûts est possible si les dégradations du béton sont détectées et réparées le plus tôt possible. L'idée du procédé de forage présenté dans ce rapport fut née parce qu'il n'existait pas, jusqu'alors, un procédé quasiment non-destructif et maniable dans les conditions de chantier, qui soit capable d'examiner simultanément la profondeur de carbonatation et la teneur en chlorure du béton. Ce projet s'est appliqué à mettre au point un tel procédé qui permette, à travers une évaluation comparative des ouvrages étudiés, d'aboutir à un classement des priorités de réparation, et d'attribuer ainsi de manière plus efficace et plus spécifique les ressources disponibles pour les mesures d'entretien.

A l'aide de cet appareil de forage transportable et mobile il est possible de mesurer immédiatement, dans le fluide de forage, les changements de concentration de la poussière de forage. On peut alors établir un rapport direct entre les résultats de cette mesure et la profondeur de forage. Les paramètres dont relève l'état du béton proche de la surface, notamment la valeur pH et la teneur en chlorure, peuvent aujourd'hui être déterminées directement dans les profondeurs respectives. A base des procès-verbaux de mesure immédiatement délivrés, on peut décider aussitôt s'il est nécessaire de procéder à d'autres forages aux endroits critiques pour appuyer statistiquement les observations d'échantillons déjà faites. Comme les dimensions des trous de forage ne dépassent pas les 18 mm environ de diamètre et les 50 mm environ de profondeur, on peut parler d'un procédé quasiment non-destructif. Les deux valeurs recherchées sont déterminées par l'analyse de la poussière provenant du même trou de forage.

Le dispositif de forage est conçu tel qu'il permet un forage continu et tournant rond dans des éléments de construction d'une orientation quelconque. La poussière de forage est introduite dans un fluide de mesure en circuit fermé. L'alcalinité et la teneur en chlorure sont déterminées à l'aide d'électrodes spéciales. Les résultats de mesure sont transformés électriquement, digitalisés, enregistrés et traités à l'aide d'un programme informatique, de telle sorte que la valeur pH et la teneur en chlorure peuvent être représentées sous forme de courbes, en fonction de la profondeur atteinte à la fin du forage.

Inhalt

1	Einleitung	7	5.4.2	Betoninhomogenitäten an den Zuschlags grenzflächen und ihr Einfluß auf das Ergebnis.....	30
2	Korrosion der Bewehrung im Beton	7	5.4.3	Grenzflächensituation zwischen Zuschlag, Bewehrung und Matrix.....	33
2.1	Allgemeines	7	5.5	Experimentelle Untersuchungen	35
3	Bohrverfahren	8	5.5.1	Allgemeines	35
3.1	Beschreibung des Bohrverfahrens	8	5.5.2	Darstellung der Meßergebnisse	35
3.2	Besonderheiten des Bohrverfahrens	11	5.5.3	Wiederfindungsrate für Chloride.....	36
3.3	Hydrozyklon einschließlich Entlüftungs- und Vorratsbehälter, Meßelektroden und Meßwertverarbeitung	13	6	Beurteilung der Meßergebnisse unter dem Gesichtspunkt der Feuchtwechsel in der oberflächennahen Betonzone	36
3.4	Meß- und Reinigungsflüssigkeit.....	14	6.1	Allgemeines	36
3.5	Bohrvorgang	15	6.2	Einwirktiefe der Feuchte	37
3.5.1	Einzelheiten zum Ablauf des Bohr- vorganges	15	7	Zusammenfassung und Ausblick	38
3.5.2	Ergänzende Anmerkungen zum Bohrverfahren	15	8	Literatur	39
4	Messung der pH-Werte zur Bestimmung der Karbonatisierungs- tiefe	16	Anhang	41	
4.1	Bekannte Verfahren zur Bestimmung der Karbonatisierungstiefe.....	16			
4.2	Bestimmung der Karbonatisierungstiefe mit dem Bohrverfahren	17			
4.3	Reproduzierbarkeit der pH-Wert-Meß- kurven	18			
4.4	Beurteilung und Interpretation der Meß- werte	20			
4.4.1	Betontechnologische und physikalische Grundlagen.....	20			
4.4.2	Folgerung für das Bohrverfahren.....	21			
4.4.3	Diskussion der pH-Wert -Kurve	21			
5	Chloridbestimmung in Beton	24			
5.1	Bestimmung des Chloridgehaltes mit bekannten Verfahren	24			
5.2	Chlorid-Gehalt-Bestimmung mit dem Bohrverfahren	25			
5.2.1	Theoretische Grundlagen	25			
5.3	Diskussion von Unstetigkeiten in den Chlorid-Wert-Kurven	28			
5.4	Auswirkungen der Inhomogenität des Betons auf die Meßergebnisse	29			
5.4.1	Allgemeines	29			

1 Einleitung

Im Jahre 1995 gab es in der Bundesrepublik Deutschland im Zuge von Bundesfernstraßen einen Bestand von 34.452 Brückenbauwerken in der Erhaltungslast des Bundes. Für die Erhaltung dieser Bauwerke mußten 1995 Gesamtausgaben in Höhe von rd. 723 Mio. DM getätigt werden. Dabei lag der Schwerpunkt des Erhaltungsaufwandes bei den Betonarbeiten, die sich mit insgesamt rd. 194 Mio. DM niedergeschlagen haben.

In der Dokumentation des Bundesministeriums für Verkehr „Schäden an Brücken und anderen Ingenieurbauwerken“ [1] wird festgestellt, daß die im Laufe der Jahre geschaffene Bausubstanz in zunehmendem Umfang einen wachsenden finanziellen und auch personellen Aufwand erfordert, um die Nutzbarkeit, Funktionsfähigkeit, Verkehrs- und Standsicherheit dieser Bauwerke auf Dauer gewährleisten zu können. Der Grund für diese Entwicklung wird nicht ausschließlich in der Zunahme von Schäden, die durch Fehler in der Planung, Konstruktion, Berechnung, Bauvorbereitung, Ausführung und Erhaltung bedingt sind, gesehen. Vielmehr ist der zunehmende Aufwand in wesentlichem Umfang mit dem nutzungsbedingten Verschleiß besonders intensiv beanspruchter Bauteile sowie mit der natürlichen Alterung und nicht zuletzt auch mit der Beaufschlagung durch schädigende Stoffe zu begründen. Einer sorgfältigen Bauwerksüberwachung und Bauwerksprüfung nach DIN 1076 kommt somit eine hohe Bedeutung zu. Dort erkannte Schäden sind umgehend zu beseitigen, und potentiellen Gefährdungen ist frühzeitig mit entsprechenden Maßnahmen zu begegnen.

Mit zunehmendem Alter bestehender Bauwerke und mit steigender Beanspruchung zum einen infolge des Verkehrs und andererseits infolge des Eindringens schädigender Stoffe (z. B. Chloridionen Cl^- und/oder Kohlendioxid CO_2), wird künftig mit einer erheblichen Zunahme an Instandsetzungs- und Erneuerungsarbeiten zu rechnen sein, denn die öffentliche Bauverwaltung ist verpflichtet, die Gesamtkosten eines Bauwerkes während seiner Lebensdauer zu minimieren und die Dauerhaftigkeit der Bauwerke über diesen Zeitraum sicher zu stellen. Erfahrungen mit Instandsetzungsmaßnahmen der Vergangenheit haben deutlich gemacht, daß möglichst frühzeitiges Erkennen und Beseitigen von Schäden ganz wesentlich zur Kostenreduzierung beiträgt [1]. Somit war eines der Ziele bei der Entwicklung des Bohrverfahrens die Unterstützung der Prioritätenreihung zur Instandsetzung von Betonbauwerken. Das Verfahren wird im weiteren als „Bohrverfahren“ bezeichnet. Es soll

dazu beitragen, daß die knapper werdenden Finanzmittel für Erhaltungsmaßnahmen gezielter und wirkungsvoller eingesetzt werden können. Im folgenden sollen die Grundlagen des Meßverfahrens gezeigt, die Aussagekraft des Verfahrens belegt sowie weiterführende Interpretationsmöglichkeiten aufgezeigt werden.

2 Korrosion der Bewehrung im Beton

2.1 Allgemeines

Neben den sichtbaren Schäden, die im Zuge der Bauwerksprüfung nach DIN 1076 aufgenommen und dem Instandsetzungskonzept zugrunde gelegt werden, stellen die Werte „Chloridgehalt“ und „Karbonatisierungstiefe“ ganz wesentliche Kriterien zur Beurteilung des Gefährdungszustandes eines Bauwerkes dar. Beide Werte lassen sich mit dem neuen Bohrverfahren einfach, rasch und zerstörungswarm ermitteln und bilden eine der Grundlagen für die Prioritätenreihung der an den Bauwerken vorzunehmenden Instandsetzungsmaßnahmen.

In einer Reihe von Veröffentlichungen werden die Korrosionsmechanismen der Bewehrung im Beton erläutert. [2] gibt einen Überblick über die für Ingenieurbauwerke relevanten Zusammenhänge. Im folgenden wird auf die bedeutsamen Kriterien für die Bildung von Korrosion kurz eingegangen.

Die sogenannte Passivschicht bildet sich im alkalischen Milieu an der Grenzfläche der Bewehrung oberhalb eines pH-Wertes von ca. 9,5. Sinkt der pH-Wert im Beton auf Werte unter 9,5 ab, beginnt die Depassivierung der Bewehrung. Die Alkalität im Beton reicht nicht mehr aus, den Betonstahl wirksam gegen Korrosion zu schützen. Der Vorgang der Depassivierung wird in Gang gesetzt durch das Eindringen von Kohlendioxid aus der Luft und die dadurch ausgelöste Karbonatisierung der Alkalien, d. h. im wesentlichen durch die chemische Umwandlung von Kalziumhydroxid in Kalziumkarbonat. In der Folge einer solchen Reaktion kann bei ausreichender Feuchte und hinreichendem Sauerstoffangebot Bewehrungs- bzw. Stahlkorrosion eintreten, die sich im allgemeinen durch flächigen Abtrag des Stahls bemerkbar macht, wobei die Korrosionsprodukte aufgrund ihres vergrößerten Volumens den Beton über der Bewehrung absprennen. Die korrodierte Bewehrung liegt schließlich frei und verliert infolge fortschreitender Korrosion ihre Funktion.

Beobachtungen haben gezeigt, daß Korrosionsschäden häufiger und ausgeprägter auf der besonnten Fläche eines Bauteils auftreten. Dies läßt sich damit erklären, daß der Beton dort im allgemeinen länger trocken ist als an anderen Flächen des Bauteils und damit mehr offener Porenraum für das Eindringen der Luftkohlendensäure zur Verfügung steht. Eine zwischenzeitliche Befeuchtung durch Regen liefert dann die erforderliche korrosionsrelevante Feuchte an der Bewehrungsgrenzfläche.

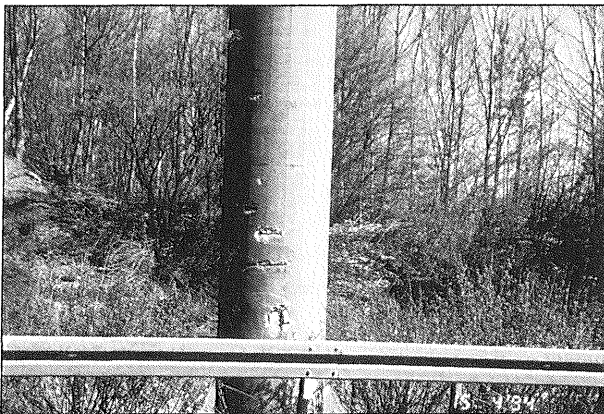


Abb. 1: Autobahnbrückenpfeiler; Korrosionsschaden auf der besonnten Seite

Eine andere Ursache für die Korrosion der Bewehrung, die unabhängig und unbeeinflusst von einer wirksamen Passivierungsschicht aus Kalziumhydroxid abläuft, ist die Chloridionen-induzierte Korrosion. Die Chloridionen stammen hierbei vorwiegend aus Auftaumitteln, die in Form von Streusalz aufgebracht werden. Sie dringen über den „Huckepack-Transport“ in den Beton ein. Daraus folgt, daß auch hier ein häufigerer Wechsel zwischen trockenem und feuchtem Zustand auf der besonnten Betonoberfläche – ähnlich wie im Falle der Karbonatisierung – korrosionsfördernd ist (siehe Abb. 1).

Beide Korrosionsformen, die kohlendioxidinduzierte und die chloridinduzierte Korrosion, können sowohl getrennt, als auch gemeinsam vorkommen. Voraussetzung für den Ablauf der Korrosion der Bewehrung sind ein ausreichendes Feuchte- und Sauerstoffangebot im Beton, ohne die der elektrochemische Korrosionsprozeß nicht stattfinden kann. Dies bedeutet, daß in einem karbonatisierten und/oder chloridbelasteten, jedoch trockenen, Beton praktisch keine Korrosion stattfinden kann. Korrosionsschäden, wie sie in Abb. 1 zu sehen sind, müssen behoben werden, um eine zunehmende Zerstörung der Betonoberfläche und der oberflächennahen Bewehrung zu verhindern. Frühzeitiges

Erkennen der Gefährdung, möglichst lange vor dem Auftreten der eigentlichen Korrosionsschäden, ist daher von erheblicher wirtschaftlicher Bedeutung, weil vorbeugende Maßnahmen im Bereich gefährdeter, aber noch nicht korrodierter Bewehrung, erheblich preiswerter sind als aufwendige Reparaturen von Korrosionsschäden.

In [3] wird ein Detektionssystem beschrieben, welches in das zu erstellende Betonbauwerk eingebaut werden kann und es so dem Bauwerksnutzer ermöglicht, den Korrosionsgefährdungszustand dauernd zerstörungsfrei zu beobachten und somit die aktuelle Korrosionsgefährdung abzuschätzen. Dieses System wurde für neue Bauwerke entwickelt. Unter dem Gesichtspunkt der Gefährdung bestehender Bauwerke durch Korrosion der Bewehrung im Beton, sind Prioritätenreihungen für Instandsetzungsmaßnahmen angesichts der immer knapper werdenden Geldmittel von erheblicher Bedeutung für die Baupraxis.

3 Bohrverfahren

3.1 Beschreibung des Bohrverfahrens

Die Bohreinrichtung selbst besteht aus (s. Abb. 2):

- einem Vakuumsaugfuß zum Fixieren der Bohreinrichtung auf der Betonoberfläche. Zur Abdichtung des beschriebenen Flüssigkeitskreislaufes gegen den Beton dienen spezielle Dichtungen. Auf diese Weise ist gewährleistet, daß der Kreislauf der Meßflüssigkeit geschlossen bleibt
- einer Führung des Bohrers im Gehäuse, um den Bohrer zu führen, zu zentrieren und gegen das Gehäuse abzudichten
- einer Hohlwelle mit auswechselbaren Hohl- bzw. Kernbohrer mit aufgesetzten Diamantbohrkrone
- einer Wegmeßeinrichtung, mit der kontinuierlich die Eindringtiefe des Bohrers in den Beton registriert werden kann
- einer Vorrichtung zum Antrieb des Bohrers mit einer Akku-Bohrmaschine
- einer Platine zur potentialfreien Stromversorgung der Einschübe und zur Potentialtrennung der Elektroden und der
- analogen Signalwandlung, die sich wiederum zusammensetzt aus den Einschüben zur Bestimmung der
 - pH-Werte
 - Cl^- -Werte
 - Bohrtiefe
 - Durchflußmenge

Während des Bohrvorganges wird in einem geschlossenen System eine Meßflüssigkeit mit Hilfe einer Pumpe umgewälzt. Sie wird dabei über folgende Stationen geführt:

- 1) Die Meßflüssigkeit wird in einem Schlauch von der Pumpe über einen Durchflußmesser dem Hohlbohrer zugeleitet und durchströmt ihn bis zur Bohrkronen; das beim Bohren entstehende Bohrklein wird in der Meßflüssigkeit über einen Rückflußschlauch zum
- 2) Entlüftungsbehälter transportiert. Die Meßflüssigkeit wird dort entlüftet und fließt in den Hydrozyklon.
- 3) Im Bereich zwischen äußerer Hydrozyklonwand und den konzentrisch angeordneten „Leitblechen“ wird die zu- und umlaufende Meßflüssigkeit in Rotation versetzt. Infolge der Zentrifugalkräfte streben die Bohrkleinpartikel der Wandung zu und sinken dort in den Absetzkonus des Hydrozyklons ab. Während dieser Zeit – zwischen dem sehr feinen Aufschließen des Betons durch den Diamantbohrer bis zum Abscheiden des Bohrkleins im Absetzkonus des Hydrozyklons – geht das im Beton vorhandene Cl^- in Lösung.
- 4) Nach dem Absetzen des groben und auf die Meßeinrichtung abrasiv wirkenden Bohrkleins im Absetzkonus umspült die Meßflüssigkeit im Hydrozyklon die Elektroden E_1 zur pH-Wert-Ermittlung und E_2 gemeinsam mit E_{Ref} zur Bestimmung des Gehaltes von Cl^- -Ionen.
- 5) Nach dem Durchströmen des Hydrozyklons wird die Meßflüssigkeit über den Durchflußmesser wieder dem Hohlbohrer zugeleitet und damit ist der Flüssigkeitskreislauf geschlossen.

Die Meßwertaufzeichnung erfolgt mit:

- den Platinen für die Weg-, pH-Wert-, Cl-Gehalt- und Durchflußmengenaufnahme;

alle Meßwerte: - Weg (Bohrtiefe),
- pH/ Cl^- und
- Durchflußmenge

sind während des Bohrvorganges aus entsprechenden Displays ablesbar;

- einer Datenaufzeichnungseinheit;
- einem A/D-Wandler;
- einem batteriebetriebenen Kleinrechner (Notebook) und einem Drucker.

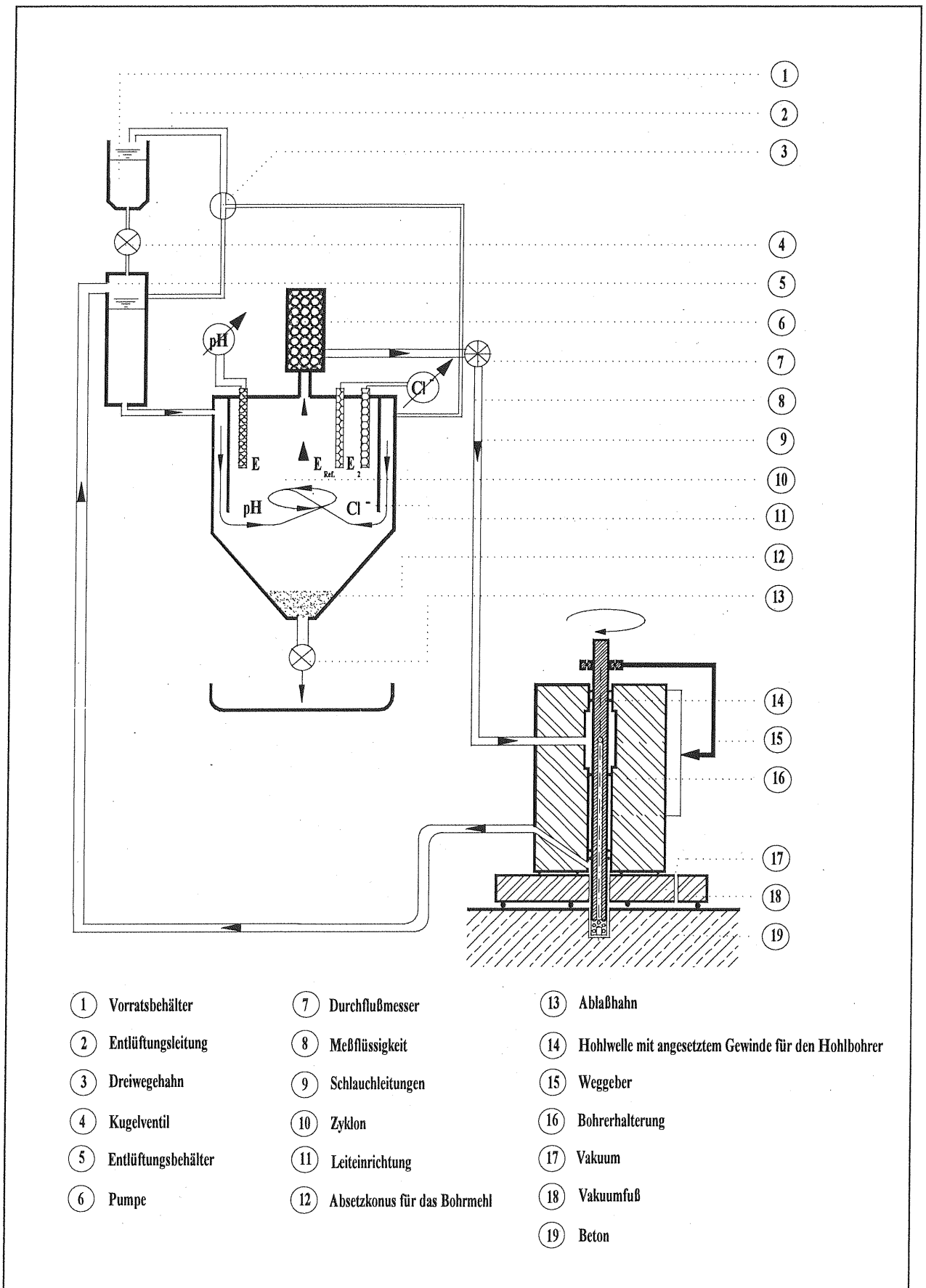


Abb. 2: Prinzipskizze des Bohrverfahrens

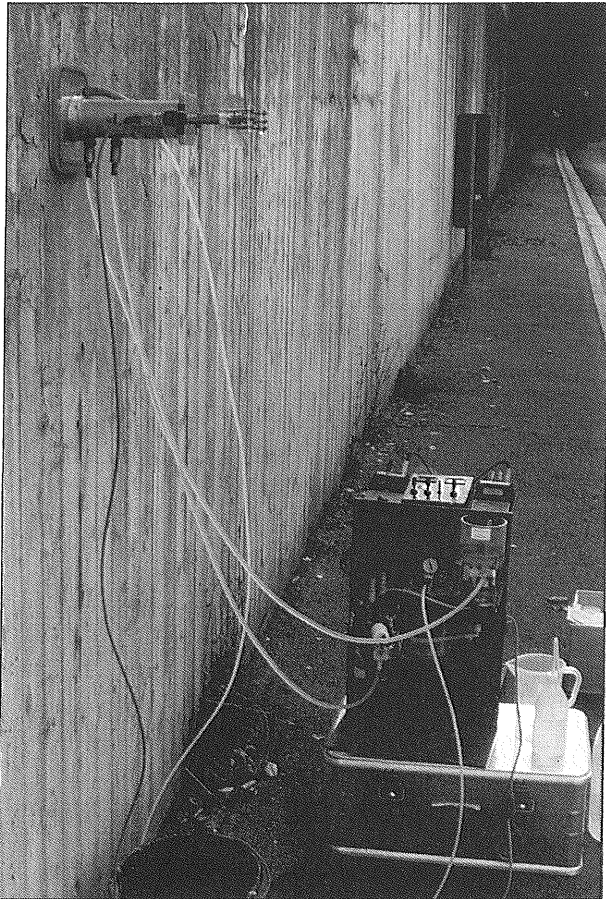


Abb. 3: Gesamtansicht des Versuchaufbaues am Bauwerk

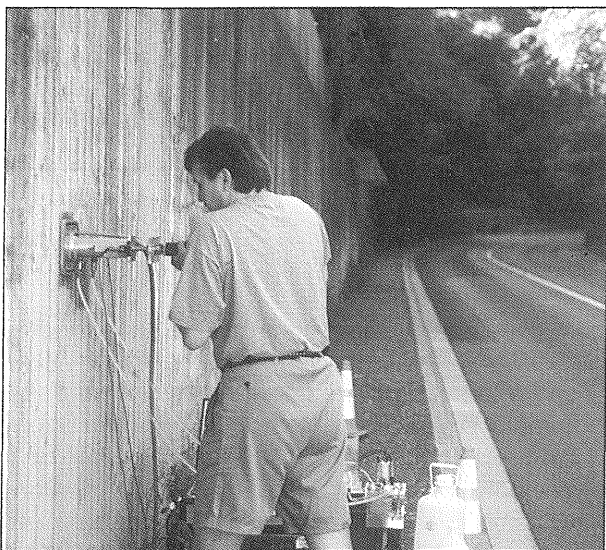


Abb. 4: Durchführung einer Bohrung am Bauwerk

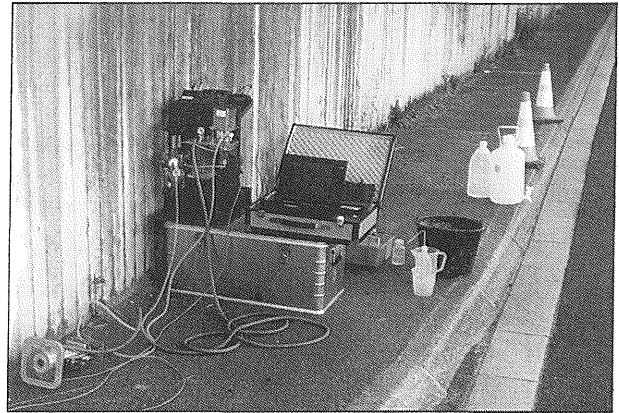


Abb. 5: Bohrgerät mit Datenerfassungskoffer auf einem Transportbehälter

3.2 Besonderheiten des Bohrverfahrens

- **Wegmessung**

Die ursprünglich ins Auge gefaßte Wegmessung mit induktiven Meßwertgebern konnte wegen der auf dem Gebergehäuse liegenden „Massepotentialänderung“ nicht gewählt werden. Es wurde daher auf eine isolierte und preiswertere Bauart nach dem Prinzip der Ohm'schen Widerstandsmessung zurückgegriffen.

- **Ionenselektiven Elektroden**

In ersten Versuchen zeigte sich, daß die „schwimmenden“ Spannungssignale aus dem pH-Meter und dem CF-Einschub nicht ohne weiteres gleichzeitig aufzuzeichnen sind. Um dennoch repräsentative Meßergebnisse zu erzielen, müssen bestimmte Bedingungen eingehalten werden (s. Abschn. 3.3)

- **Dichtungen im Vakuumfuß**

Die Abbildungen 6 und 7 zeigen das Prinzip und die Anordnung der Abdichtung unter dem Bohrfuß. Um das Bohrgehäuse auch auf rauher, unebener Betonoberfläche mit dem Bohrfuß fixieren zu können, wurden in die Unterseite der Acrylglaträgerplatte je zwei konzentrische Aufnahmeuten eingefräst, in die Dichtlippen aus Moosgummiprofilen eingeklebt wurden. Zur Messung auf gekrümmten Oberflächen besteht die Trägerplatte aus Hartgummi. An der Hartgummipatte sind Dichtlippen aus einem weicheren Gummi angegossen. Der Zwischenraum zwischen den beiden Dichtlippen wird mit einer dauerplastischen Masse ausgefüllt. Dieses dauerplastische Material bildet die eigentliche Abdichtung, da es sich infolge seiner plastischen Verformbarkeit lückenlos an den Untergrund anschmiegen kann.

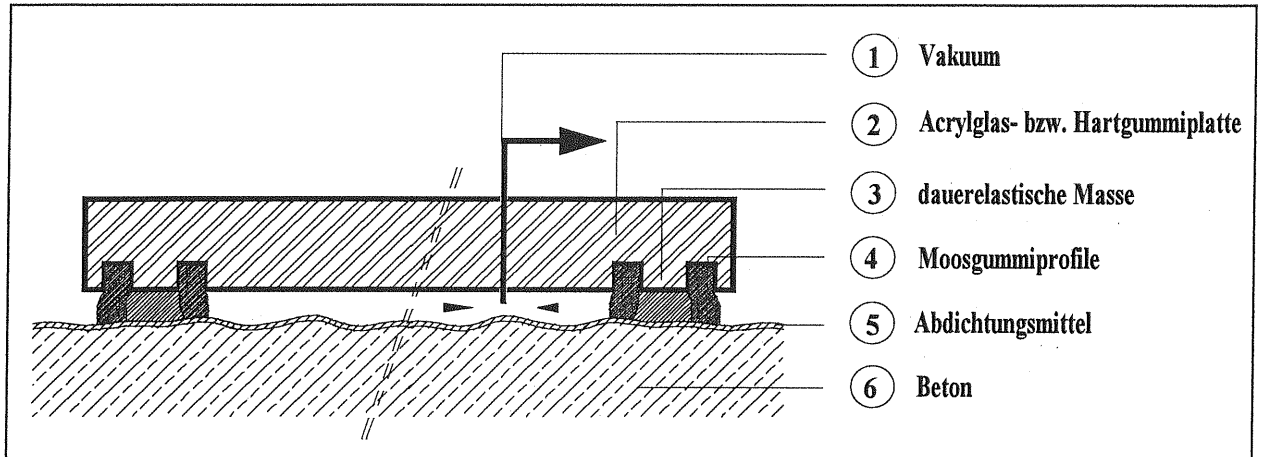


Abb. 6: Anordnung der Abdichtung des Bohrfußes; Querschnitt

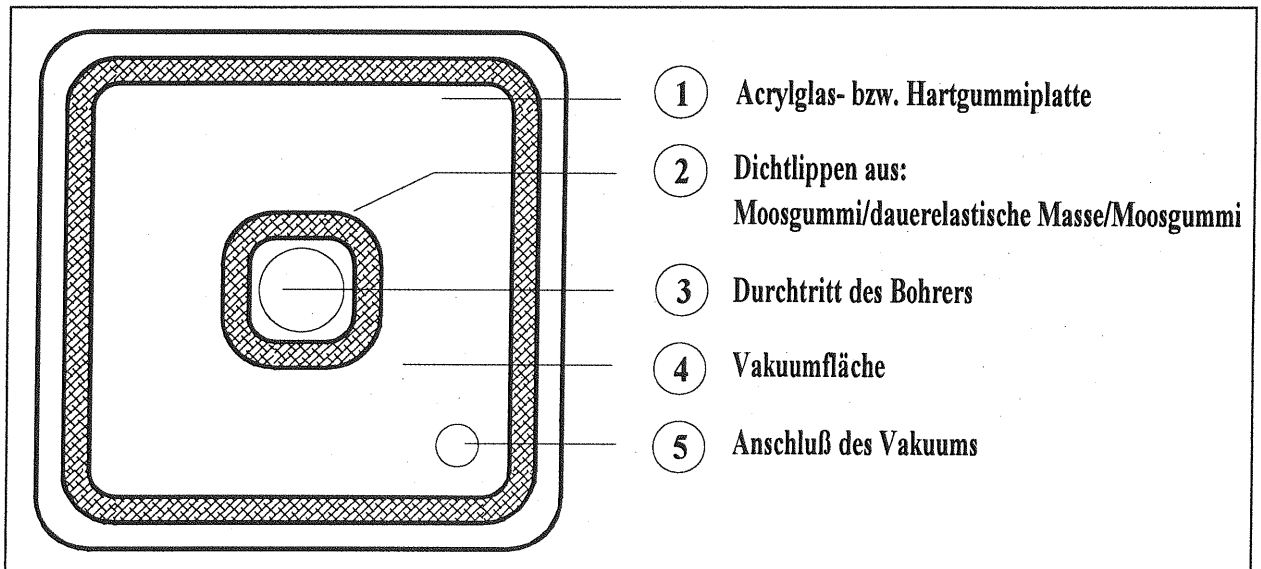


Abb. 7: Anordnung der Abdichtungen im Bohrfuß; Untersicht

Die Dichtlippen haben hierbei die Aufgabe einer variablen, elastischen, seitlichen Stützung. Die bei den Versuchen auf den Beton gepreßten Dichtlippen werden von Zeit zu Zeit mit einer Trennhilfe bestrichen, um ein „Ankleben“ an die Betonoberfläche zu verhindern.

• Diamant-Kleinkern-Bohrkrone

Die Diamantbohrkrone wurde in einer Kohlenstoff-Negativform gesintert. Die Form ergab sich aufgrund zahlreicher Untersuchungen mit handelsüblichen Diamant-Kleinkern-Bohrkronen. Handelsübliche Diamant-Kleinkern-Bohrkronen erfordern üblicherweise hohe Umdrehungszahlen, die beim hier beschriebenen Bohrverfahren

wegen Dichtungsprobleme im Bohrschaft vermieden werden müssen. Nach längerer Versuchs- und Entwicklungszeit ergab sich schließlich die in Abb. 8 dargestellte Form der Bohrkronen. Um die schnelle Austauschbarkeit des Verschleißteils „Diamantbohrkrone“ zu gewährleisten sowie einen leichteren Auswurf des erbohrten Kernes oder evtl. abgebrochener Kerne zu ermöglichen, wurde der in Abb. 8 dargestellte abschraubbare Teil des Hohlbohrers gewählt.

Als Schaftmaterial wird Edelstahl verwendet. Ebenso bestehen alle Metallteile, die mit der Meßflüssigkeit in Berührung kommen aus Edelstahl. Ansonsten sind die flüssigkeitsberührten Flächen aus Kunststoff. Die Meßflüssigkeit wird von der Pumpe über einen Schlauch durch den

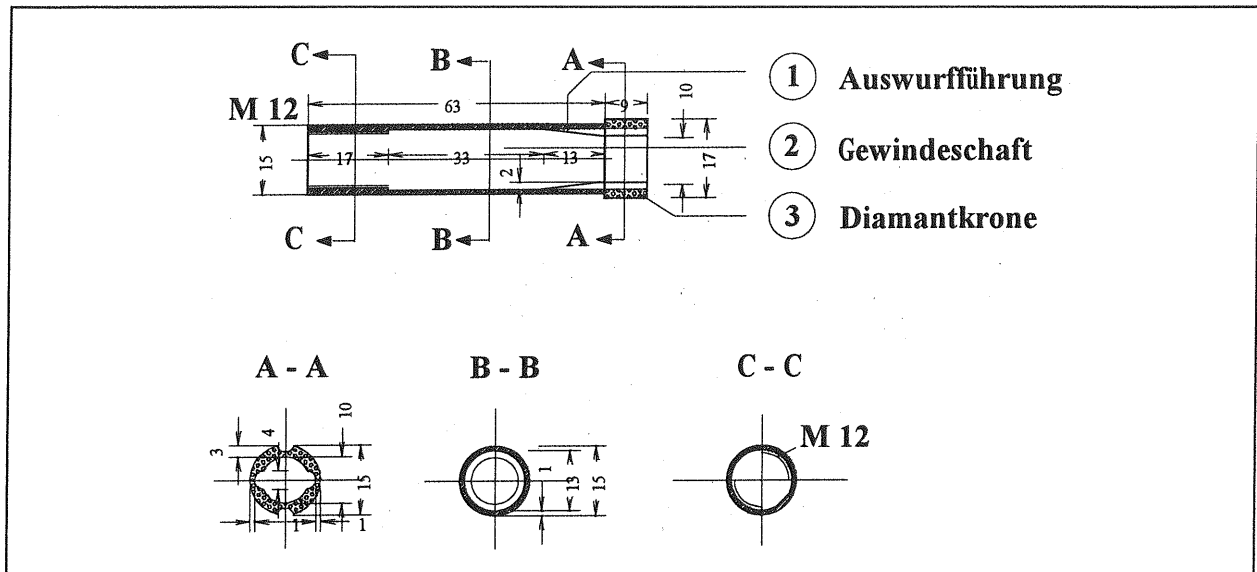


Abb. 8: Diamantbohrkrone mit Gewindeschaftansatz

hohlen Bohrschaft den zwei Innentaschen in der Diamantbohrkrone zugeleitet. Die Wasserzufuhr-Nuten ermöglichen ein permanentes und ungehindertes Zufießen zur rotierenden Kronenschneide. Durch die geringe Wanddicke der Bohrkrone im Bereich der Nuten entsteht dort zwangsläufig ein erhöhter Verschleiß an der Bohrkrone (siehe Abb. 9).

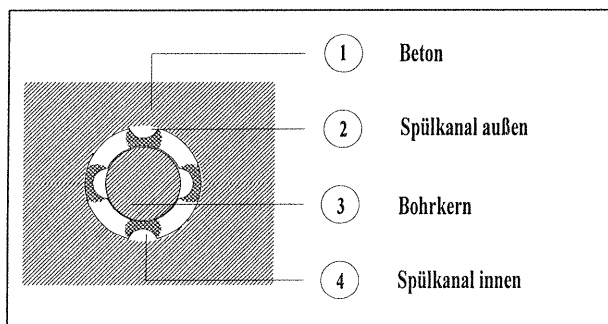


Abb. 9: Verschleißbereiche im Bohrquerschnitt (von unten gesehen)

Die bei gleicher Auflast infolge des Verschleißes entstandenen „kleinen Öffnungen“ im Bereich der Kronenaufstandsfläche bewirken, daß das erzeugte Bohrklein hier ständig zwangsläufig nach außen zur Bohrlochwandung fortgespült werden kann. Die mit Bohrklein versetzte Meßflüssigkeit wird über den äußeren Abflußkanal abgezogen. Durch diesen Vorgang wird eine gleichmäßige Bohrkleinqualität erzeugt, die den chemischen Aufschluß begünstigt. Es ist eine größere Anzahl von Bohrungen bis zu einer Tiefe von ca. 50 mm möglich.

Im Normalbeton üblicher Dichte ergibt sich eine Bohrgeschwindigkeit, von ca. 1 bis 2 cm Tiefe/min.

3.3 Hydrozyklon, Entlüftungs- und Vorratsbehälter, Meßelectroden und Meßwertverarbeitung

Da der pH-Wert und Cl^- -Gehalt im selben flüssigen Meßmedium gemessen werden sollten, waren folgende Voraussetzungen zu erfüllen:

- 1) Die „schwimmenden“ Ausgangssignale der beiden handelsüblichen Meßgeräte für pH- und Cl^- -Werte beeinflussen sich gegenseitig. Deshalb ist eine elektrische Trennung der Signale vorzunehmen.
- 2) Die Pumpe ist vor grobem und abrasivem Bohrklein zu schützen, um sie nicht zu beschädigen.
- 3) Die Cl^- -Elektroden (Cl^- -Elektrode und zugehörige Referenzelektrode) arbeiten nur unzureichend genau in „ruhenden Flüssigkeiten“; daher muß die sie umgebende Lösung einerseits immer in ausreichender Bewegung gehalten werden, aber andererseits grobpartikel- und luftblasenfrei sein.
- 4) Die Luftblasen im Hydrozyklon und im Kreislauf stören den Betrieb der Cl^- -Elektroden empfindlich. Daher ist es erforderlich einen gesonderten Entlüftungsbehälter vorzuschalten. Hierdurch werden weitere Vorteile erzielt, indem die Pumpe störungsfrei arbeitet und ein konstanter Durchfluß sowie eine automatische Entlüftung des Hydrozyklons erzielt werden.

Die ionenselektive Elektrode – auch Chlorid-Selektrode genannt – die bei den Versuchen benutzt wurde, gehört zum Typus der ionenselektiven Festkörperelektroden. Ihre Fühlelemente sind Membranen, die in Bezug auf ein spezifisches – hier Cl^- -Ion – hoch selektiv sind. Das einwirkende, im Wasser gelöste Cl^- -Ion, löst in der Elektrode einen elektrochemischen Vorgang analog dem der Metallkorrosion aus. Man kann daher die elektrischen Ausgangssignale dieser Elektroden in einer wässrigen Lösung mit der korrosiven Aktivität der Lösung – hier jedoch selektiv für Cl^- – direkt vergleichen; d. h. es wird die „ Cl^- -Korrosionsaktivität“ in der Lösung bestimmt.

Die Reaktion der Elektrode im Hydrozyklon wird wesentlich beeinflusst von:

- Luftblasen: Sie verändern die Reaktionsoberfläche des Sensors; bei Auftreten von Luftblasen wird zu wenig Cl^- angezeigt.
- Der Zähigkeit des Elektrolyts: Je zäher bzw. höher viskos der Elektrolyt ist, umso mehr werden die Cl^- -Ionen an der Reaktion mit der Membrane gehindert. (Die Wanderungsgeschwindigkeit des Cl^- nahe der Sensorgrenzfläche wird gebremst.)
- Der Strukturviskosität: Hierunter sollen Auswirkungen von gelösten Ionen verstanden werden, die die Struktur des Wassers beeinflussen. Als strukturbildend gelten u. a. Mg^{++} , Ca^{++} , Na^+ , Li^+ , H^+ und als strukturbrechend sind u. a. anzusehen: Cl^- , SO_4^{--} , HCO_3^- , H_2PO_4^- , K^+ [5]. Strukturbildende Cluster beeinträchtigen bzw. verringern die Reaktion des Silbers mit dem reaktiven Cl^- .
- Der Elektrodenanströmung: Je schneller die Elektrode oberhalb einer optimalen Geschwindigkeit angeströmt wird, umso geringer wird die „Reaktionshäufigkeit“, d. h., es werden zu geringe Meßwerte ermittelt. Je langsamer die Anströmung der Elektrode unterhalb des Optimums erfolgt, um so mehr „verarmt“ die Lösung an Cl^- -Ionen im Bereich der Sensorflächen und um so „kleiner“ werden die Meßergebnisse. Dieser Einfluß muß durch eine Pumpe mit Durchflußmesser geregelt werden, indem die Anströmgeschwindigkeit im Bereich der optimalen Geschwindigkeit konstant gehalten wird.
- Der Cl^- -Absorption bzw. der Absorption am Bohrklein: Bei dem korrosionswirksamen Chlorid muß davon ausgegangen werden, daß das Cl^- zu Bindungen mit den inneren Oberflächen des Zementsteins und hier mit dem mittransportierten Bohrklein befähigt ist. Dies kann ein Grund für den unterschiedlichen Anteil an wie-

dergefundenem Cl^- im beschriebenen Bohrverfahren gegenüber der potentiometrischen Titration sein (siehe Abschn. 5.5). Korrosionsbestimmend ist das ungebundene, auslaugbare bzw. frei verfügbare Cl^- . Mit dem Bohrverfahren werden diese Chloridanteile bestimmt. Die potentiometrische Titration hingegen bestimmt auch chemisch und/oder physikalisch gebundene Anteile, die zur Korrosion der Bewehrung jedoch nicht beitragen, weil sie im alkalischen Wasseraufschluß nicht in Lösung gehen.

Die Grenzflächenreaktion des Cl^- mit der reaktiven Membran der ionenselektiven Elektrode entspricht also in wesentlichen Punkten dem Korrosionsvorgang des reaktionsfähigen Stahls der Bewehrung. Die ionenselektive Elektrode detektiert das korrosionswirksame Chlorid, wenn Fehlereinflüsse, wie Luftblasen, nicht optimale Anströmungsgeschwindigkeit u. a. Einflüsse ausgeschaltet werden.

Die unter den genannten Bedingungen anschließend an Probekörpern mit Kalibrierflüssigkeiten durchgeführten Versuche zeigten, daß

- die Kalibrierkurve der Elektroden exakt wiedergefunden wurde und
- kein negativer Einfluß auf die Elektroden (Elektroden gift) aus dem Beton bzw. Zement festgestellt werden konnte.

Das bedeutet, daß die Elektroden während des gesamten Versuchszeitraumes in ihrer Wirkung konstant bleiben und daß die Beeinflussung durch die o. g. Parameter minimiert wurde.

3.4 Meß- und Reinigungsflüssigkeit

Bei der Messung mit ionenselektiven Elektroden ist darauf zu achten, daß immer eine ausreichende „Ionenstärke“ in der Meßflüssigkeit vorhanden ist. Die Einstellung der Ionenstärke der Meßflüssigkeit geschieht über eine Probenkonditionierlösung („Ionic Strength Adjustor“, abgekürzt ISA-Lösung). Bei dieser Einstellung waren die zusätzlichen Veränderungen der Leitfähigkeit, die unterschiedlich hoch durch das Bohrklein eluat hervorgerufen werden und Auswirkungen auf das Meßsignal haben, technisch vernachlässigbar.

Die chemischen Eigenschaften der Meßflüssigkeit kommen denen der Porenlösung des Betons nahe. Die Chloridgehalte, die hierbei gemessen werden, entsprechen weitgehend dem tatsächlichen Chloridgehalt der Porenlösung. Korrosionswirksam im Beton ist nur das freie Chlorid, welches in der Po-

renlösung vorliegt. Für die pH-Wert-Messung ist es erforderlich, mit einer leicht angesäuerten Meßflüssigkeit zu arbeiten, damit der Meßvorgang nicht durch „Reste“ mit hohem pH-Wert aus vorangegangenen Messungen beeinflusst wird. Nach dem Bohren wird daher das System mit einer leicht sauren Reinigungsflüssigkeit gespült. Die Säure hat auch die Aufgabe, eventuell im System befindliche Kalk- und auch Chloridreste zu lösen, so daß sie mit ausgespült werden. Es zeigte sich, daß nach dem Ablassen der Reinigungsflüssigkeit jeweils noch ein ausreichender Säurerest für die Ansäuerung der neuen Meßflüssigkeit im System verbleibt.

3.5 Bohrvorgang

3.5.1 Einzelheiten zum Ablauf des Bohrvorganges

Bei der Ermittlung der Meßwerte sind folgende Arbeitsschritte des Meßablaufes von Bedeutung und zu beachten:

- Um während des Bohrvorganges das Auswaschen von Chloriden und die Wanderung von Alkalien aus der Betonoberfläche in das Spülgut (Meßflüssigkeit mit dem Bohrklein) zu vermeiden, wird die Oberfläche des Betons vor dem Versuch mit einem speziellen Abdichtungsmaterial angestrichen und so vorübergehend abgedichtet. Vorversuche haben gezeigt, daß dieses Mittel nach etwa 1 Minute Ablüftszeit so diffusionsdicht ist, daß es den technischen Anforderungen an die Versuchsdurchführung genügt. Desweiteren ist das eingesetzte Dichtungsmaterial nicht gegen UV-Licht stabil, so daß es im Laufe der Zeit durch Sonnenbestrahlung abgebaut wird und die spätere Reinigung der Betonoberfläche praktisch entfallen kann. Es ist nach einem Sommermonat kaum noch sichtbar. Liegt der Prüfort im Schatten, ist der Film mit einer Stahlbürste leicht entfernbar.
- Die eingesetzte Meßflüssigkeit wird durch die Reste aus der Reinigungsflüssigkeit ausreichend angesäuert. Der pH-Wert soll beim Versuchsbeginn zwischen 5 und 6 liegen.
- Nachdem die Bohrhalterung auf dem Beton mit Hilfe des Vakuums fixiert und die Meßflüssigkeit in Umlauf gebracht worden ist, wird die Meßwerterfassung gestartet. Anschließend wird mit einigen Umdrehungen des Bohrers die unebene Betonoberfläche im Schneidebereich des Bohrers „angebohrt“ (Die aktuelle Tiefe der Bohrkronen ist auf der am Bohrfuß angebrachten Bohrtiefenanzeige sichtbar). Bei diesem „Glättungsvorgang“ wird die zuvor aufgetragene

Oberflächenabdichtung im Bohrbereich durchbohrt, und der pH-Wert steigt langsam an. Bei dieser Tiefe wird so lange angehalten, bis der pH-Wert sich stabilisiert hat (Der pH-Wert ist auf der Geräteanzeige direkt ablesbar). Durch diesen Vorgang wird die Meßflüssigkeit „konditioniert“. Ist ein stabiler pH-Wert erreicht, wird zügig in den Beton gebohrt. Nach ca. 50 mm Bohrtiefe wurde in der Erprobungsphase der Versuch im allgemeinen abgebrochen; im Ausdruckformular wurde aus Gründen der gleichmäßigen Darstellungsweise die Tiefe auf 35 mm begrenzt. Mit dem Erreichen der gewünschten Bohrtiefe wird der mechanische Bohrvorgang beendet; die Meßwertaufnahme ist damit abgeschlossen.

Nach Beendigung der einzelnen Schritte, Datensicherung und Erstellung der Diagramme aus den Meßwerten auf dem batteriebetriebenen Rechner mit angeschlossenen batteriebetriebenen Drucker wird das Diagramm als Funktion des pH-Wertes von der Tiefe ausgegeben. Gleiches gilt sinngemäß für die Messung des Chloridgehaltes.

- Nach Beendigung des Bohrvorganges wird das Spülgut aus dem Hydrozyklon abgelassen. Es kann, zur Überprüfung einzelner Ergebnisse, für weitere chemische Untersuchungen zurückgestellt werden. Anschließend wird das System mit der Reinigungsflüssigkeit (siehe Abschnitt 3.4) gereinigt. Die nach dem Ablassen der Reinigungsflüssigkeit verbleibenden sauren Reste im System reichen aus, um die für den neuen Bohrvorgang erforderliche Meßflüssigkeit wieder ausreichend anzusäuern. Zur Kontrolle für die ausreichende Reinigung sollte beim Meßbeginn der pH-Wert der Meßflüssigkeit ca. 5 bis 6 und die Cl^- -Anzeige weniger als 1 mg Cl^-/l anzeigen.
- Das System sollte in der ersten Zeit jede Woche einmal mit je 3 bis 4 „Kalibrierflüssigkeiten“ (ISA-Lösung mit definierten pH- und Chlorid-Werten) hinsichtlich des pH-Wertes und der Cl^- -Werte überprüft werden. Bei genügender Erfahrung kann diese Zeitspanne ausgedehnt werden.

3.5.2 Ergänzende Anmerkungen zum Bohrverfahren

Das Bohrverfahren ermöglicht am Bauwerk im on-line-Verfahren die Aufnahme der Meßwerte pH und Cl^- in Abhängigkeit von der Bohrtiefe zur Ermittlung sowohl der Karbonatisierungstiefe als auch der Cl^- -Verteilung.

Anhand der ausgedruckten Meßprotokolle kann jederzeit unmittelbar und kurzfristig entschieden werden, ob zur statistischen Untermuerung der Messungen weitere Bohrungen erforderlich sind. Da die Bohrungen mit einem Lochdurchmesser von rd. 18 mm zerstörungsarm und mit geringem Aufwand ausführbar sind, lassen sich erforderliche Zusatzbohrungen jederzeit durchführen.

Die in Form von Kurven ausgedruckten Meßergebnisse lassen eine Abschätzung des zeitlichen Fortschrittes der Karbonatisierungsfront zu. Ist die durchschnittliche Tiefenlage der oberen Bewehrung (Betondeckung) bekannt, kann abgeschätzt werden, wann unter diesen Bedingungen ein korrosionsbedingter Schaden eintreten könnte und ob beispielsweise vorbeugende Schutzmaßnahmen wirtschaftlich gerechtfertigt sind.

Eine der Ursachen für sehr rasche Karbonatisierung ist ein nicht ausreichend dichter Beton, hervorgerufen beispielsweise durch mangelhaften Kornaufbau des Betons, zu hohen Wasserzementwert, mangelhafte Verdichtung und mangelhafte Nachbehandlung. Diese Einflüsse können einzeln, aber auch gemeinsam zum frühzeitigen Korrosionsschaden infolge Karbonatisierung führen. Falls zusätzlich auch eine Cl^- -Belastung vorliegt, kann das mit dem Bohrverfahren ermittelte Cl^- -Tiefenprofil als Indikator für die Dichtigkeit des Betons gewertet werden.

Wenn es auf der Grundlage einer ausreichenden Anzahl an Untersuchungen mit dem Bohrverfahren gelingt, Grenzwerte oder -kurven für die Karbonatisierungstiefe und den Chloridgehalt in Abhängigkeit vom Alter der Bauteile festzulegen, wird es künftig möglich sein, jederzeit – insbesondere auch kurz vor Ablauf der Gewährleistungsfrist – anhand der aktuellen Betonqualität die Korrosionsgefährdung abzuschätzen. Hierzu sind aber weitere Untersuchungen notwendig.

4 Messung der pH-Werte zur Bestimmung der Karbonatisierungstiefe

4.1 Bekannte Verfahren

Im „einfachsten Fall“ erfolgt die Bestimmung der Karbonatisierungstiefe direkt an einem Bruchstück aus dem Bauwerkskörper bzw. durch Besprühen einer frischen Betonbruchfläche mit einer Indikatorflüssigkeit. In der Praxis hat sich dabei der Indikator Phenolphthalein bewährt und durchgesetzt.

Diese Flüssigkeit zeigt bei einem pH-Wert von $\leq 8,2$ eine farbliche Veränderung des Betons und bei einem pH-Wert $\geq 9,8$ einen Farbumschlag nach rot-violett. Die Karbonatisierungstiefe ist der Abstand zwischen der Farbumschlagzone und der Betonoberfläche. Die pH-Wert-Grenze die mit diesem Verfahren angezeigt wird, ist die untere Grenzlinie der Farbumschlagzone, die im Beton nicht geradlinig verläuft. Die Abweichungen von einer mittleren Karbonatisierungstiefe werden ausgelöst durch Inhomogenitäten in der Betonzusammensetzung, Risse, unterschiedliche Verdichtungsgrade u. a. [4]. Im Anschluß an die o. g. Bestimmung wird der zerstörte Oberflächenbereich wieder mit Füllmaterial geschlossen. Das optische Erscheinungsbild der Betonoberfläche ist jedoch gestört.

Eine weitere Möglichkeit, eine Aussage über den Grad der Karbonatisierung des Betons zu erhalten, besteht in der naßchemischen Bestimmung des pH-Wertes an einer gewonnenen Probe, die zerkleinert, gemahlen oder gemörsert und mit Wasser versetzt wird. Diese Messungen weisen nach [4] im karbonatisierten Beton häufig pH-Werte zwischen 10 und 11 auf. Im alkalischen (nicht karbonatisierten) Beton werden auf diese Weise dagegen pH-Werte zwischen 11,5 und 12,5 ermittelt. Der Unterschied zum Indikatorsprühtest besteht darin, daß bei der naßchemischen Analyse durch die Zerkleinerung des Zementsteins aus nicht hydratisierten Klinkerbestandteilen OH^- -Ionen freigesetzt werden, die den pH-Wert erhöhen.

Durch die stufenweise Probenahme wird nicht der Horizont, sondern der mittlere Wert für die jeweilige Tiefenstufe der Karbonatisierung ermittelt. Der Phenolphthaleintest beschreibt damit nicht eindeutig und tiefengenau den Karbonatisierungsgrad der Zementsteinsubstanz, sondern gibt einen Anhalt dafür, bis zu welcher Tiefe im Beton das CO_2 der Atmosphäre mit dem Kalziumhydroxid der Porenlösung bereits reagieren konnte. Die so gemessene Karbonatisierungstiefe ist ein Hinweis dafür, ob der Korrosionsschutz durch Passivierung der Bewehrungsstahlfläche noch gewährleistet oder bereits infolge Depassivierung gefährdet ist [4]. Mit dem Phenolphthaleintest wird dagegen der „Horizont“ als Grenzlinie zwischen karbonatisiertem und passiviertem Beton bestimmt; er gibt den jeweils zu einer bestimmten Zeit in einer bestimmten Tiefe aktuell vorherrschenden Karbonatisierungszustand für eine eng begrenzte Stelle der oberflächennahen Betonzone wieder (siehe Abb. 10).

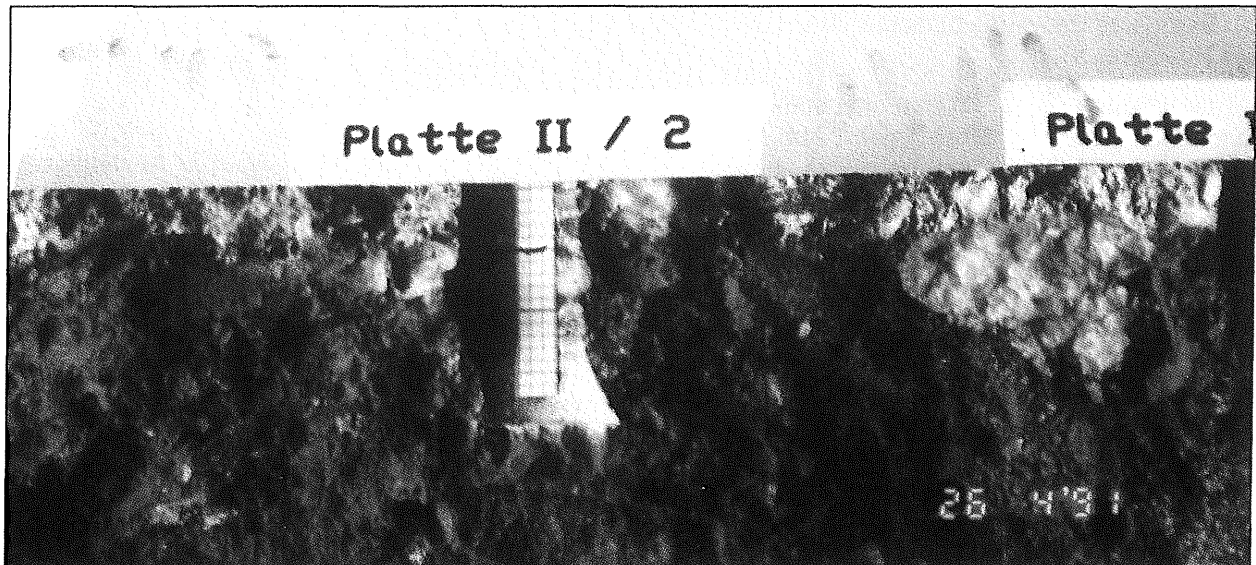


Abb. 10: Gebrochene, mit Phenolphthalein angesprühte Probe

4.2 Bestimmung der Karbonatisierungstiefe mit dem Bohrverfahren

Mit dem beschriebenen Bohrverfahren wird kontinuierlich der pH-Wert der im geschlossenen Kreislauf zirkulierenden Meßflüssigkeit in Abhängigkeit von der Bohrtiefe bestimmt. Damit wird eine tiefenabhängige pH-Wert-Kurve ermittelt. Die kleinen Bohrlöcher, welche beim Bohrverfahren entstehen, sind sauber, dauerhaft und ohne größere optische Störung verschleißbar. Dies geschieht mit einem leicht quellenden Spezialmörtel. Muß das Bauwerk über mehrere Jahre beobachtet werden, kann es hilfreich sein, die Bohrstellen mit einer „Ankermarke“, auf der die wesentlichen Meßgrößen eingraviert werden können, zu versehen.

Der Unterschied zwischen der „groben Meißelmethode“ mit anschließendem Phenolphthalein-Test und dem Bohrverfahren soll an folgendem Gedankenmodell deutlich gemacht werden (siehe Abb. 11).

An zwei gleich alten Bauwerken wird mit dem Phenolphthalein-Test dieselbe mittlere Karbonatisierungstiefe bei $\text{pH} = 9,5$ gefunden. Die Kurven a) und b) zeigen den pH-Wert in Abhängigkeit von der Bauteiltiefe. Mit der Bohrmethode wird am Bauwerk a) ein Übergang von der karbonatisierten zur passivierten Zone mit geringer Ausrundungskrümmung der Meßkurve gefunden; am Bauwerk b) dagegen erfolgt der Übergang mit relativ großer Ausrundungskrümmung der Kurve. Das bedeutet, daß im oberflächennahen Bereich am Bauwerk b) mit zunehmender Tiefe die Kurve stärker ansteigt als am Bauwerk a). Hieraus ergibt sich zwangsläufig, daß

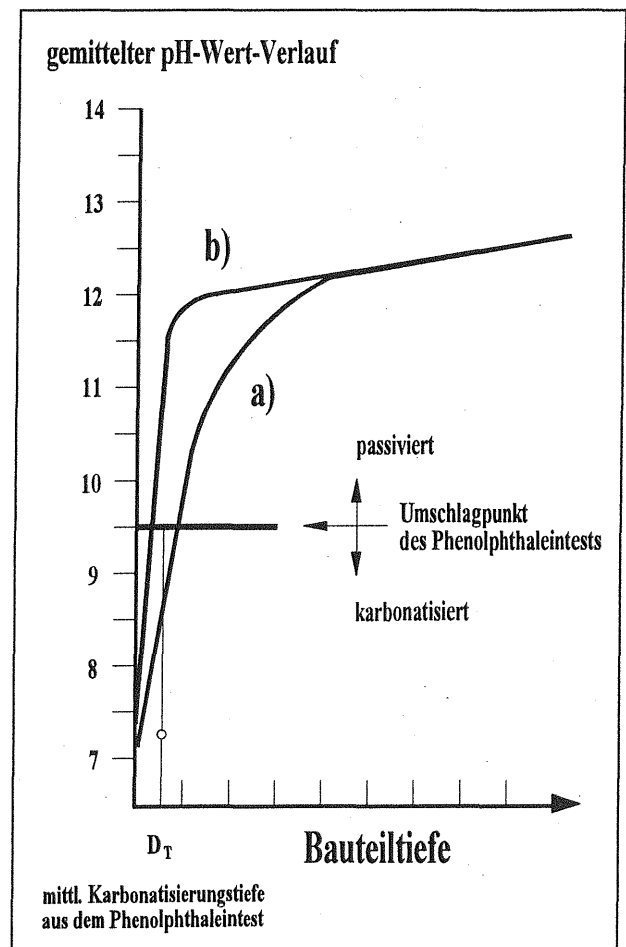


Abb. 11: Unterschiede der Ergebnisse zwischen dem Umschlagpunkt des Phenolphthalein-Tests und gemittelten Meßkurven aus mehreren Bohrungen mit dem Bohrverfahren

der Beton des Bauwerks b) dichter ist als der Beton des Bauwerks a).

Mit dem Bohrverfahren lassen sich somit aus den Kurvenläufen der pH-Werte (siehe Abb. 11) über die Betone der jeweiligen Bauwerke zusätzliche wichtige Informationen gewinnen. Entsprechend differenzierte Aussagen können aufgrund der „Meißelmethode“ oder des Phenolphthaleintest nur eingeschränkt getroffen werden. Infolge der sehr geringen Unterschiede in der Tiefenlage und dem sich überlagernden Streubereich der gezackt verlaufenden Trennlinie läßt sich bestenfalls eine mittlere Karbonatisierungstiefe feststellen. Da man wegen des höheren Zerstörungsgrades bei der Phenolphthalein-Methode nur wenige Versuche machen kann, bleibt die Aussagekraft stets eingeschränkt.

Die Diskussion der Meßwerte anhand der Abb. 11 ermöglicht folgende Zusatzinformationen:

- Der Beton des Bauwerkes b) ist dichter aufgebaut als der Beton des Bauwerkes a), weil der ausreagierte (karbonatisierte) Bereich bei b) dünner ist. Das bedeutet, daß das Bauwerk a) schneller karbonatisiert als Bauwerk b). Der korrosionsbedingte Schaden tritt voraussichtlich früher ein.
- Nach der „Meißelmethode“ werden solche Unterschiede in der Betonqualität nicht erkennbar, denn sie liegen bei dem Beispiel im Streubereich der Meßungenauigkeiten. Insbesondere sind wegen des nicht geradlinigen Verlaufes des Meßhorizontes der Tiefenablesenauigkeit enge Grenzen gesetzt.
- Würde man nach der „Meißelmethode“ den zukünftig zu erwartenden Karbonatisierungsverlauf über den Horizont von $\text{pH} = 9,5$ hinaus extrapolieren, müßte für beide Bauwerke die gleiche Prognose hinsichtlich ihrer Korrosionsgefährdung gestellt werden. Mit dem Bohrverfahren sind dagegen für die beiden Bauwerke, der wirklichen Betonqualität entsprechend, differenzierte Prognosen möglich.

Aus der Ausrundungskrümmung bzw. dem Krümmungsradius der Kurven im Übergangsbereich zwischen der schwachen und der starken Steigung läßt sich möglicherweise ein Maß und ein Bewertungskriterium für die Dichtigkeit normal bewitterter Betonoberflächen finden. Hierzu sind allerdings weitere systematische Untersuchungen erforderlich. Es wird außerdem angenommen, daß sich aus dem Kurvenverlauf auch Kriterien ablesen lassen, aus denen der Zeitpunkt des praktischen Stillstandes der Karbonatisierung hergeleitet werden kann.

4.3 Reproduzierbarkeit der pH-Wert-Meßkurven

Wie die Abb. 12 bis 16 im einzelnen belegen, lassen sich die pH-Wert-Messungen in Abhängigkeit von der Tiefe relativ gut reproduzieren. Die Übereinstimmung der mit dem Bohrverfahren bei $\text{pH} = 10$ einerseits und mit dem Phenolphthaleintest an den gebrochenen Platten bei $\text{pH} = 9,5$ andererseits ermittelten Tiefengrenzwerte der Karbonatisierung ist ebenfalls gut.

Bei sämtlichen nachfolgend dargestellten Untersuchungen wurde mit Phenolphthalein an der Bohrlochwandung eine Karbonatisierungstiefe $< 1 \text{ mm}$ festgestellt. Die Beschreibung der experimentellen Untersuchung erfolgt im Abschn. 5.5. Der geringfügige Unterschied zwischen den nach unterschiedlichen Verfahren ermittelten Grenzen ist darin begründet, daß die Indikatorlösung zwischen $\text{pH} = 9$ und $9,5$ farblich stark umschlägt und auch „etwas verläuft“. Im Bohrverfahren wurde der Karbonatisierungstiefenwert bei $\text{pH} = 10$ ermittelt (siehe Abb. 18).

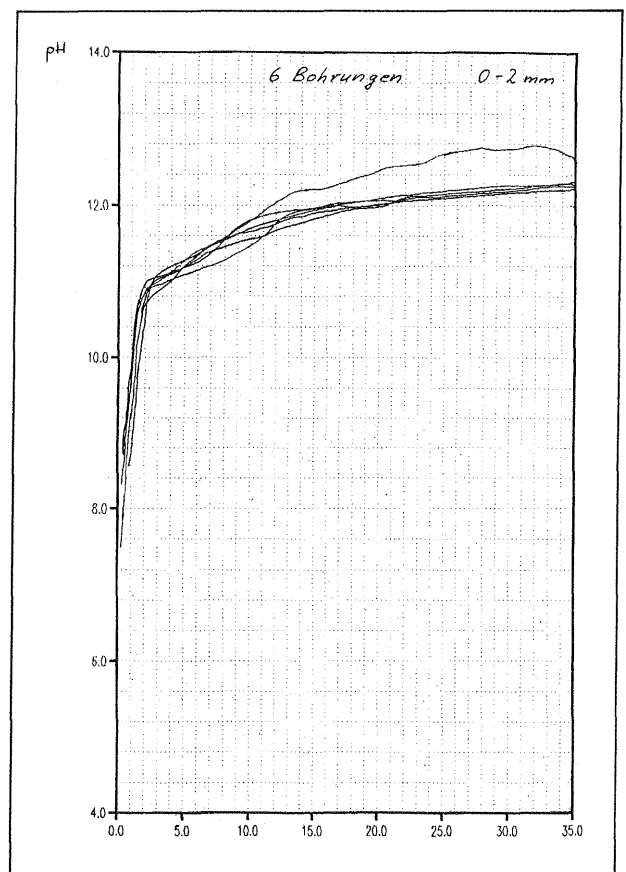


Abb. 12: Sieblinie 0 - 2 mm; 6 Bohrungen aus einer Platte $30 \times 30 \times 7,5 \text{ cm}^3$

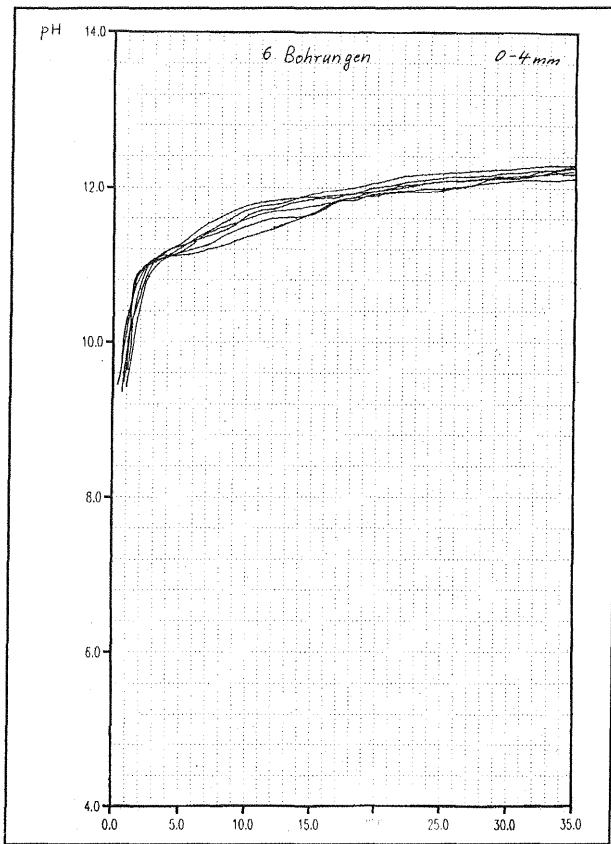


Abb. 13: Sieblinie 0 - 4 mm; 6 Bohrungen aus einer Platte 30 x 30 x 7,5 cm³

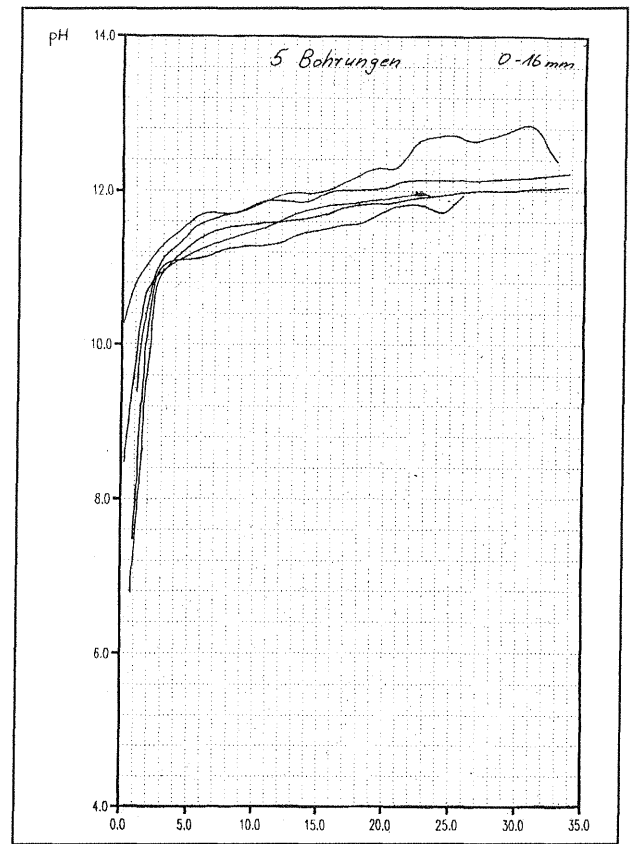


Abb. 15: Sieblinie 0 - 16 mm; 5 Bohrungen aus einer Platte 30 x 30 x 7,5 cm³

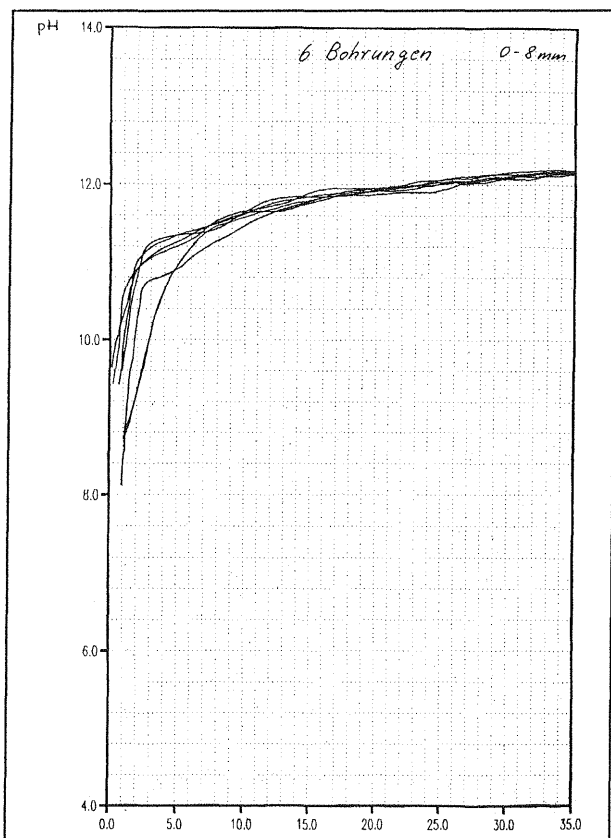


Abb. 14: Sieblinie 0 - 8 mm; 6 Bohrungen aus einer Platte 30 x 30 x 7,5 cm³

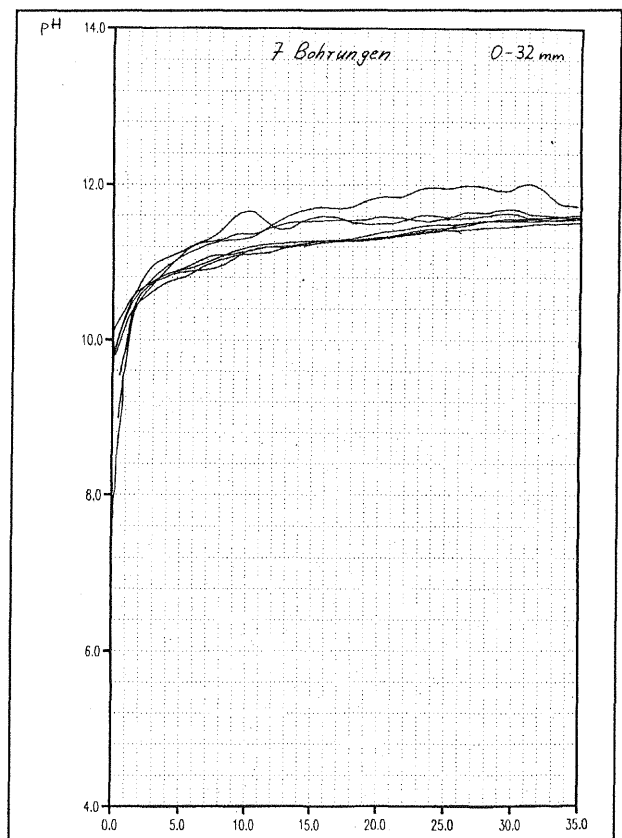


Abb. 16: Sieblinie 0 - 32 mm; 7 Bohrungen aus einer Platte 30 x 30 x 7,5 cm³

Bei unterschiedlich tief karbonatisierten Platten (alte Platten aus anderen Versuchen) sowie Bohrungen an Bauwerken, bei denen die Phenolphthaleingrenze bis maximal 20 mm reichte, ergaben sich mit dem Bohrverfahren Streuungen bei $\text{pH} = 10$ von maximal ± 1 mm. Im Phenolphthaleintests schwankte die abgelesene Tiefe (des Umschlaghorizontes) je nach Beobachter an der selben Probe signifikant stärker.

Befürchtungen, die Zuschläge mit großen Korndurchmessern würden sich störend auf eine Beurteilung der pH-Wert-Kurve des Betons auswirken, so daß die Kurve nicht mehr interpretierbar ist, werden durch die Ergebnisse widerlegt. Zwar nimmt die Streuung der Meßergebnisse mit Zunahme der Korngrößen zu, ist jedoch vergleichsweise gering. Darüberhinaus bleiben die Meßergebnisse reproduzierbar (siehe Abb. 12 bis 16). Die Eignung des Verfahrens zur Ermittlung reproduzierbarer pH-Werte wird auf der Grundlage der bisher gewonnenen Ergebnisse als gegeben angesehen.

4.4 Beurteilung und Interpretation der Meßwerte

4.4.1 Betontechnologische und physikalische Grundlagen

Während des Hydratisierungsvorganges des Zementes entsteht im Beton Kalziumhydroxid. Aus der Luft in die Betonporen eindringendes Kohlendioxid führt dazu, daß Kalziumhydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$ mit einem pH-Wert von rund 12,6 zu Kalziumkarbonat CaCO_3 mit einem pH-Wert $\leq 8,5$ chemisch umgesetzt wird. Dieser chemische Prozeß wird als Karbonatisierung bezeichnet. Die Karbonatisierung führt, wie bereits erwähnt, zur Depassivierung der Oberfläche des Bewehrungsstahls.

Kalziumhydroxid kann sich nur dort umsetzen, wo auch das CO_2 der Luft hingelangt; es müssen also offene Kapillaren für den Zutritt dieses Gases vorhanden sein. Hinsichtlich der Bedeutung der Feuchte für diesen Karbonatisierungsprozeß im Beton gelten folgende Zusammenhänge:

- Der wirksame Querschnitt der hydrophilen, offenen Beton-Kapillaren, die von CO_2 durchdrungen werden können, ist abhängig vom Feuchtegehalt dieser Kapillaren. Ihr Querschnitt kann durch das Porenwasser verändert werden, unter Umständen bis zur völligen Abdichtung infolge Wassersättigung. Die Karbonatisierung ist dann unterbunden.
- Die Wasserfilmdicke auf der Kapillarwand wird vom Feuchtegehalt des Betons bestimmt; sie stellt einen zusätzlichen Widerstand für die Karbonatisierungsreaktion dar. Geht man davon

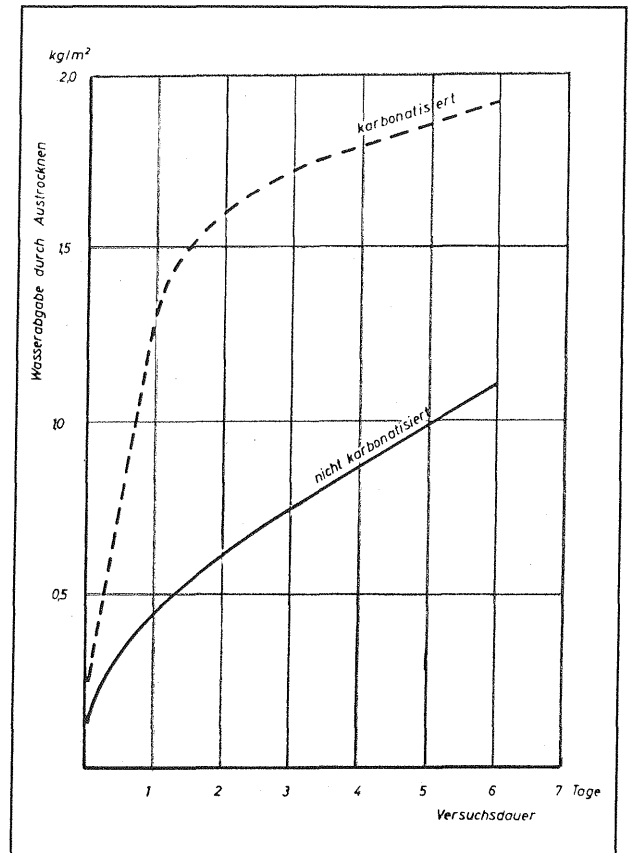


Abb. 17: Wasserabgabe von karbonatisiertem und nicht karbonatisiertem Beton beim Austrocknen in Luft von 18°C und 50 % rel. Luftfeuchtigkeit nach [11]

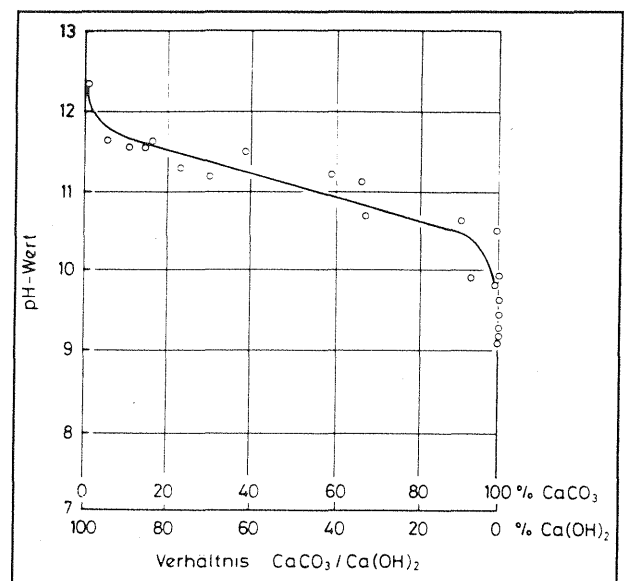
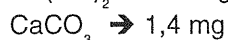


Abb. 18: Abhängigkeit des pH-Wertes vom Verhältnis $\text{Ca}(\text{OH})_2$ zu CaCO_3 , aus [11]

aus, daß das Alkali der Porenlösung in der Lage ist, die silicatischen Grenzflächen der Poren anzulösen und dort eine gelartige Struktur zu erzeugen, so wird die Umsetzrate des im Gel befindlichen $\text{Ca}(\text{OH})_2$ durch diesen „Prozeß“ mit hoher Wahrscheinlichkeit stark verringert. Gelartige Oberflächen – beispielsweise Wasserglasoberflächen – sind relativ dicht und verhindern das Austrocknen der darunterliegenden Bereiche. Die Austrocknungskurven, entnommen aus [11], in Abb. 17 belegen dies.

Für das Verständnis des meßtechnischen Ablaufs im Rahmen des Bohrverfahrens sind einige Konstanten bzw. Beziehungen von Bedeutung:

- Die Löslichkeit in jeweils 100 g vollentsalztem H_2O beträgt für



Bruchteile dieser Mengen reichen jeweils aus um den jeweiligen pH-Wert deutlich anzuheben.

- Die nach dem Bohrverfahren gemessenen pH-Werte sind abhängig vom jeweiligen Verhältnis zwischen $\text{Ca}(\text{OH})_2$ und CaCO_3 . Die graphische Darstellung dieser Beziehung zeigt Abb. 18, entnommen aus [11].
- Der gemessene pH-Wert einer wässrigen Aufschlämmung eines handelsüblichen Marmorpulvers (CaCO_3) ergab bei eigenen Laboruntersuchungen einen pH-Wert von 9,9; mit handelsüblich erworbenem Kalziumcarbonat ergab sich ein pH-Wert von 10,0. Wenn dieses Ergebnis durch weitere Untersuchungen bestätigt wird, sollte der Grenzwert für die Unterscheidung zwischen nicht karbonatisiertem und karbonatisiertem Beton mit $\text{pH} \geq 10$ angesetzt werden, anstatt wie in der Literatur häufig zu finden, im Bereich zwischen 9 und 9,5.
- Der pH-Endwert einer gesättigten Kalziumhydroxidlösung beträgt rund 12,5.
- Der pH-Endwert einer gesättigten Zementleimlösung bzw. eines gesättigten Zementsteineluates liegt in Abhängigkeit vom zusätzlichen Alkaligehalt (Na^+/K^+) zwischen 12,7 und 13,5. Die Mengen an NaOH und KOH sind gegenüber $\text{Ca}(\text{OH})_2$ relativ klein. Das NaOH -Äquivalent liegt üblicherweise bei höchstens 1,0 Gew-%, bezogen auf das Zementgewicht.
- Bei Verwendung von Portlandzement kann man nach [8] davon ausgehen, daß ca. $\frac{1}{4}$ des Zementgewichtes nach der Hydratation als Kalziumhydroxid im Beton vorliegt.

4.4.2 Folgerung für das Bohrverfahren

Für das Bohrverfahren ergibt sich aus den vorgeannten Werten und einer Bohrgeometrie z. B. $\varnothing_a = 17,0 \text{ mm}$ und $\varnothing_i = 10,0 \text{ mm}$ eine „Kreisring-Ausbohrfläche“ von $148,44 \text{ mm}^2$; daraus erhält man bei einer Bohrtiefe von 1 mm einen „Betonaufschluß“ von $148,44 \text{ mm}^3$. Mit beispielweise 300 kg Zement pro m^3 Beton entfällt auf 1 mm Bohrtiefe ein Zementgewicht von

$$300\,000\,000 \text{ mgZ} \cdot 148,44 \text{ mm}^3 / 1\,000\,000\,000 \text{ mm}^3 = 44,53 \text{ mgZ}$$

(Z = Zement; mm = Bohrtiefe)

Im nicht karbonatisierten Beton beträgt der Anteil an $\text{Ca}(\text{OH})_2$, rund 25 %. Folglich sind also in dem 1 mm tiefen Betonaufschluß insgesamt $44,53 \cdot 25 / 100 \cong 11 \text{ mg Ca}(\text{OH})_2$ enthalten. Wie die Abbildungen 16 und 21 zeigen, ist diese Menge von rd. 11 mg $\text{Ca}(\text{OH})_2$ pro mm Bohrtiefe in der Lage, den pH-Wert im geschlossenen Kreislauf mit rund 650 ml Reinigungsflüssigkeit nach weniger als 1 mm Bohrtiefe von rd. 6, auf mehr als 10 anzuheben. Werden dem System 5 cm^3 einer gesättigten $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Lösung, also rd. 8 mg $\text{Ca}(\text{OH})_2$ zugegeben, so steigt nach ca. 10 Sekunden der pH-Wert des Gemisches von rund 5,5 auf rund 11.

Ist die Bohrtiefe bekannt und der konstante Zeitverzug – resultierend aus der Fließzeit der Meßflüssigkeit im System vom Moment des Aufschlusses bis zum Erreichen und Ansprechen der pH-Elektrode – bestimmt, so läßt sich relativ einfach der pH-Wert des Betons dem entsprechenden Bohrhorizont bzw. der zugehörigen Bohrtiefe zuordnen. Aus diesem Grunde ist es sehr wichtig, daß die Fließgeschwindigkeit der Meßlösung im System konstant gehalten wird.

4.4.3 Diskussion der pH-Wert-Kurve

(1) Allgemeines

Der folgenden Kurvendiskussion wird die Prinzipskizze Abb. 19 zugrunde gelegt. In dieser Prinzipskizze können die einzelnen Abschnitte zwischen den Punkten 0 und 5 der pH-Wert-Kurve wie folgt interpretiert werden (Interpretation aufgrund bisheriger Bohrungen):

- **Kurvenabschnitt 0 bis 1:** In diesem Bereich ist der Beton bereits in karbonatisiertem Zustand ($\text{pH} \leq 9,5$).

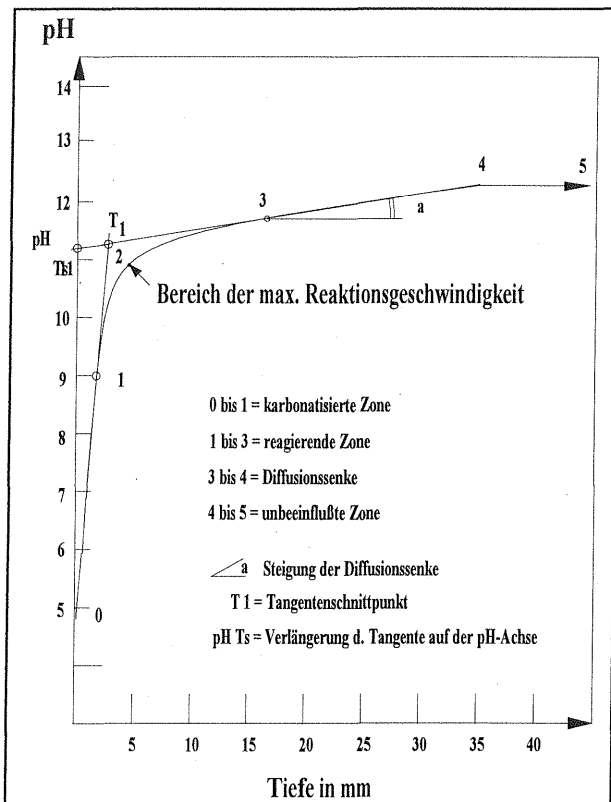


Abb. 19: Prinzipische Skizze der pH-Wert-Kurve

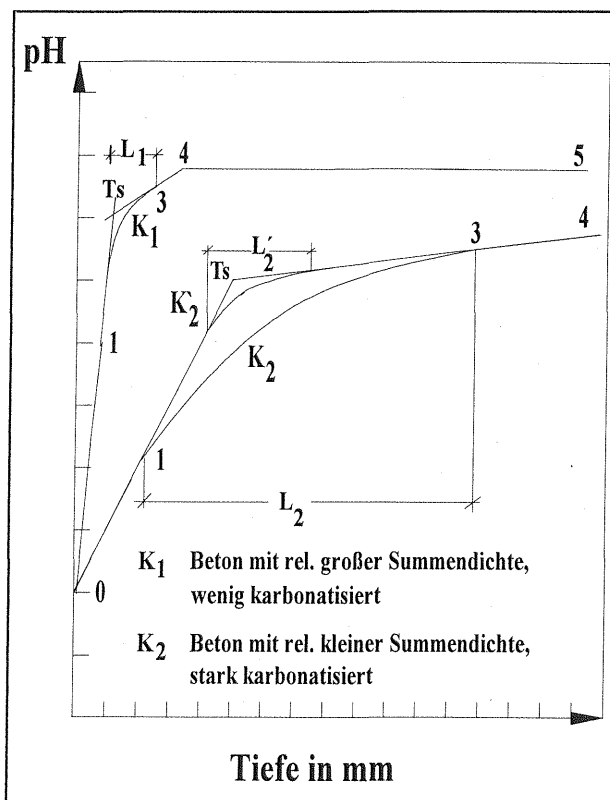


Abb. 20: Vergleich zweier Karbonatisierungskurven aufgrund theoretischer Überlegungen

- **Kurvenabschnitt 1 bis 3:** In diesem Bereich liegt die „reagierende Zone“ der Alkalien mit dem CO_2 . Ab Punkt 1 findet noch eine Reaktion zwischen dem eindringenden CO_2 und dem die Passivierung bewirkenden $\text{Ca}(\text{OH})_2$ statt. In der Umgebung des Punktes 2 der Kurve ist die größte Umsetzungsrage. Ab Punkt 2 fallen die Reaktionsgeschwindigkeit und Umsetzungsrage in Richtung Punkt 3 zunehmend ab.
- **Kurvenabschnitt 3 bis 4:** Aus dem Gesamtalkalivorrat des Betons diffundiert ein Teil der Alkalien wegen des Konzentrationsgefälles in Richtung des Reaktionsbereiches 3 und 2. Der Konzentrationsgefällebereich wird durch den Kurvenabschnitt 3 bis 4 beschrieben. Die Steigung der Kurve zwischen den Punkten 3 und 4, gekennzeichnet durch den Winkel α , hängt von der „Summen-Dichtheit“ des Betons, der „aktiven“ CO_2 Einwirkzeit, also dem Alter des Betons, und den Umgebungsbedingungen (trocken, wechselnde Durchfeuchtung etc.) ab.
- **Kurvenabschnitt 4 bis 5:** In diesem Bereich ist die Gesamtalkalität in ihrem ursprünglichen Zustand. Der Beton ist noch unbeeinflusst vom CO_2 , und der Karbonatisierungsvorgang hat noch nicht eingesetzt.

Hilfsgrößen der Karbonatisierungskurve stellen der Schnittpunkt der Tangenten T_1 in den Punkten 1 und 3, sowie der Schnittpunkt der über T_1 hinaus verlängerten Tangente mit der pH-Wertachse T_s dar (siehe Abb. 20).

Die Kurven K_1 und K_2 in Abb. 20 zeigen den Verlauf der pH-Meßwerte in Abhängigkeit von der Bohrtiefe für 2 Betone gleichen Alters. Bei der Kurve K_1 ist erkennbar, daß die Zone L_1 eine große Krümmung aufweist. Der Beton ist folglich relativ dicht, weil die Zone der „Reaktionsdicke“ relativ klein ist.

Dichter Beton karbonatisiert langsam, da die Feuchterückhaltung bzw. langsame Austrocknung infolge der Bildung von „Alkali-Gelen“ sowie die Kapillarkondensation, die in Poren mit kleinen Durchmessern besonders ausgeprägt ist, das Eindringen von CO_2 behindert. Liegt eine solche Form der Meßkurve vor, kann mit hoher Wahrscheinlichkeit vom baldigen Abklingen des Karbonatisierungsfortschrittes ausgegangen werden.

Die Kurve K_2 weist eine ausgeprägte „dicke“ reaktive Zone L_2 aus. Daraus kann gefolgert werden, daß der Beton als nicht so dicht wie bei der Kurve K_1 anzusehen ist. Denn grundsätzlich ist aber auch ein Kurvenverlauf K'_2 möglich, der durch einen ebenso flachen Kurvenabschnitt zwischen 0 und 1 wie bei Kurve K_2 gekennzeichnet ist, der jedoch ei-

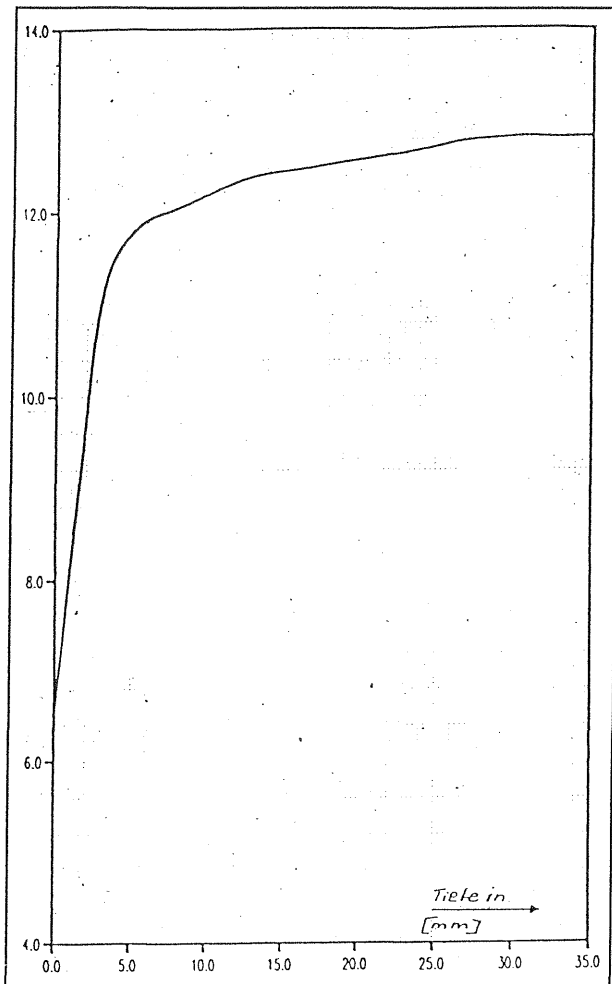


Abb. 21: Kurvendiskussion am Beispiel einer Karbonatisierung-Meßkurve

ne weniger „dick“ ausgeprägte Reaktionszone aufweist. Bei diesem Kurvenverlauf K'_2 dürfte die Karbonatisierung schon bald zum Stillstand kommen, jedenfalls früher als bei dem Beton mit dem Karbonatisierungsverlauf nach Kurve K_2 .

Zur Beantwortung der Frage, bei welcher Kurvenform der reaktiven Zone und in welcher Tiefe eine für die „Baupraxis endgültige“ Karbonatisierungstiefe erreicht ist, sind noch weitere Untersuchungen erforderlich.

Bei der Bewertung der pH-Wert-Meßkurve ist die Tiefenlage der Bewehrung bzw. die Betondeckung zu berücksichtigen. Wenn die Bewehrung in vollem Umfang im passivierten Bereich liegt, muß in einer Tiefe von etwa 5 mm oberhalb der Bewehrung ein pH-Wert von 10 angetroffen werden. Zur Abschätzung einer Mindestsicherheit gegen Korrosionsgefahr wird die geringste gemessene Betondeckung in die pH-Wert-Kurve eingetragen und dann geprüft, ob die Bewehrung tatsächlich nicht von der Karbonatisierungsfront erreicht werden kann.

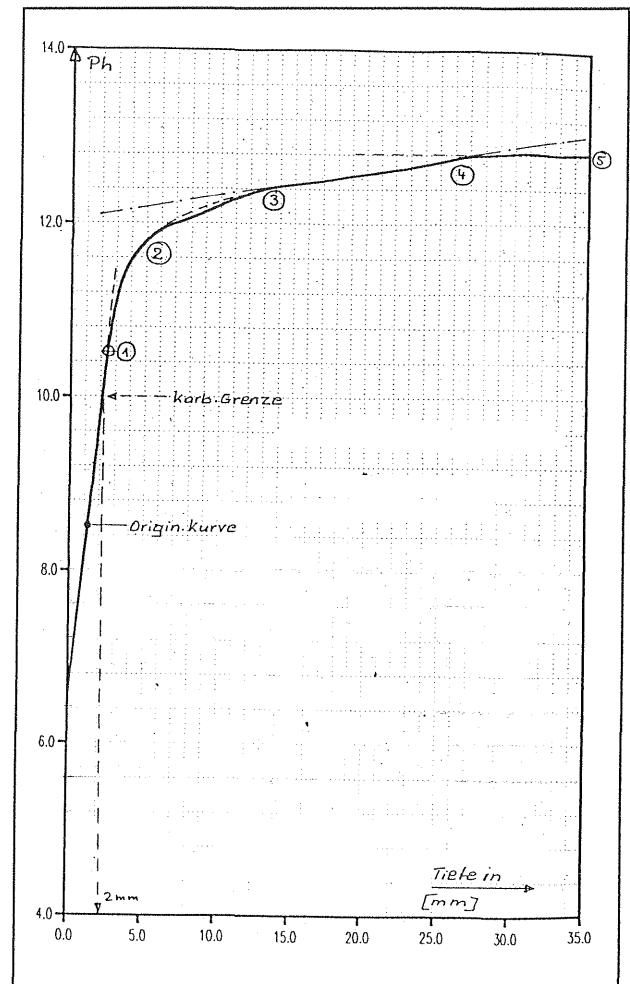


Abb. 22: Meßkurve der Karbonatisierung an Betonbauteil

Unter der üblichen Annahme, daß die Geschwindigkeit, mit der die Karbonatisierung fortschreitet, mit ausreichender Genauigkeit nach dem \sqrt{t} -Gesetz ermittelt werden kann, ist die Zeitdauer bis zum Erreichen der kritischen Karbonatisierungstiefe mit der Formel:

$$x = a \cdot \sqrt{t} \quad (1)$$

bestimmbar; darin bedeuten

x = Karbonatisierungstiefe

a = Faktor für die Betoneigenschaften in Abhängigkeit von der Dichtigkeit des Betons

t = Zeit in Jahren

Mit dem bekannten Alter des Betons, beispielsweise aus den Bauakten, und der im Bohrverfahren gewonnenen Karbonatisierungstiefe kann der Faktor a bestimmt werden:

$$a = x / \sqrt{t} \quad (2)$$

Mit dem Faktor a wird die Zeit, innerhalb der die maximal noch zu akzeptierende Karbonatisie-

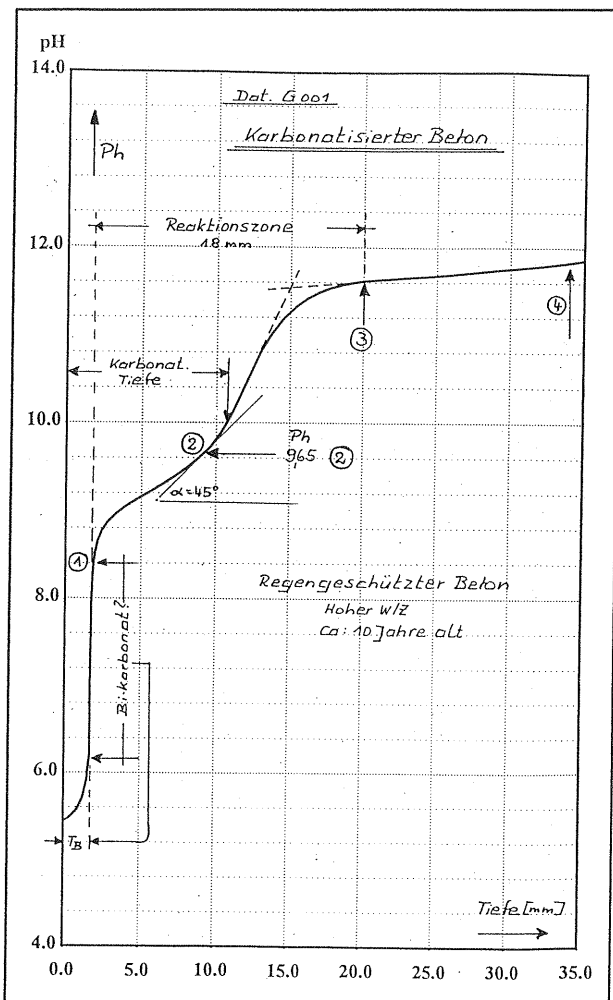


Abb. 23: Beispiel einer Kurvendiskussion

ungstiefe x_1 erreicht wird, bestimmt. Dabei bedeutet x_1 die Tiefenlage der Bewehrung abzüglich einem Sicherheitsabstand von 5 mm, der die vorhandenen Karbonatisierungsspitzen berücksichtigt:

$$t = (x_1/a)^2 \quad (3)$$

Aus der Differenz zwischen dem Zeitpunkt der Messung und dem Zeitpunkt des Erreichens der größten noch akzeptierbaren Karbonatisierungstiefe ergibt sich die Zeitdauer, die als eine der bestimmenden Größen für die Prioritätenlistung der Bauwerke herangezogen werden kann. Innerhalb dieser Zeitdauer müssen Oberflächenschutzmaßnahmen gegen das Fortschreiten der Karbonatisierung ergriffen werden. Sollte sich allerdings anhand der Karbonatisierungsmesskurve abzeichnen, daß die Karbonatisierungstiefe sich in Zukunft nur unwesentlich verändert, dann erübrigen sich die genannten Berechnungen zur Abschätzung der zu erwartenden Korrosionsgefährdung und somit auch entsprechend Schutzmaßnahmen.

(2) Diskussion von an Bauwerken aufgenommenen Kurven

Vorbemerkung: Die gestrichelte Kurve zwischen ② und ③ stellt zum besseren Verständnis eine manuelle Korrektur der Verfasser dar.

Ergebnis: Die Karbonatisierungsgrenze ($\text{pH} = 10$) liegt bei 2 mm unterhalb der Oberfläche des Betons. Die Krümmung in ② läßt auf ein baldiges Ende des Karbonatisierungsfortschrittes schließen, wenn keine zerstörenden Maßnahmen wie Fräsen, Flammstrahlen etc. erfolgen. Der Beton ist als „dicht“ anzusprechen. Dieser Beton bedarf hinsichtlich der Karbonatisierung z. Z. keines weiteren Schutzes.

Vorbemerkung: Der Beton wurde im Labor hergestellt und trocken gelagert.

Ergebnis: Die Karbonatisierungstiefe ($\text{pH} = 10$) liegt bei rd. 11 mm unterhalb der Oberfläche des Betons. Der Kurvenverlauf wird häufig entweder bei sehr offenporigen Betonen oder bei Betonen, die trocken gelagert wurden, gefunden; mit einem baldigen Stillstand der Karbonatisierung ist im allgemeinen nicht zu rechnen. Dieser Beton benötigt eine Karbonatisierungsbremse, wenn er nach der Trockenlagerung der natürlichen Bewitterung und Feuchtigkeit ausgesetzt werden soll.

5 Chloridbestimmung in Beton

5.1 Bestimmung des Chloridgehaltes mit bekannten Verfahren

Die Bestimmung des Chloridgehaltes von Beton kann sowohl naßchemisch als auch trocken erfolgen. Während bei den Trockenverfahren die Chloridbestimmung direkt an einer Probe erfolgt, muß bei den naßchemischen Verfahren das Chlorid aus der Betonprobe extrahiert werden.

Das wichtigste quantitative naßchemische Verfahren ist die potentiometrische Titration. Zu den wichtigsten qualitativen und halbqualitativen Analyseverfahren, die auch vor Ort eingesetzt werden, zählen folgende Verfahren:

- Quantab-Verfahren
- Chlorid-Testsets
- Silberchromat-Sprühverfahren (trocken)

Diese Verfahren zeigen an, ob und ggf. auch wieviel Chlorid im Beton enthalten ist, und sie geben in der Regel orientierende Hinweise für weitere Un-

tersuchungsschritte. Die Probenentnahme für diese Verfahren erfolgt in der Regel durch:

- Entnahme von Bohrkernen, im allgemeinen mit einem Kerndurchmesser von 50 mm, und Schneiden der Kerne in einzelne Scheiben zur schichtweisen Bestimmung der Cl^- -Gehalte anhand der erzeugten Pulver aus den Probenscheiben.
- Trockenbohren: Das anfallende Bohrklein wird schichtenweise abgezogen und aufgefangen. Der Durchmesser des Bohrers beträgt im allgemeinen zwischen 15 und 20 mm.

Der Cl^- -Gehalt im Bohrklein wird üblicherweise mit der potentiometrischen Titration bestimmt. Infolgedessen sind bei den genannten Verfahren auch nur „Schicht-Mittelwerte“ (sog. Schichtintegrale) bestimmbar. Eine detaillierte Beschreibung der hier aufgezählten Chlorid-Bestimmungsverfahren geben [5, 13] an.

5.2 Chlorid-Gehalt-Bestimmung mit dem Bohrverfahren

Die Cl^- -Wert-Bestimmung mit dem Bohrverfahren findet im selben Spülgut aus derselben Bohrung und zeitgleich mit der pH-Wert-Bestimmung statt; die Schädigung des Bauwerks wird möglichst gering gehalten. Der Cl^- -Gehalt im Spülgut wird mittels ionenselektiver Elektroden bestimmt. Da die jeweilige Bohrtiefe und damit auch das erbohrte Betonvolumen zum jeweiligen Zeitpunkt der Cl^- -Bestimmung bekannt sind (siehe Abschnitt 3.),

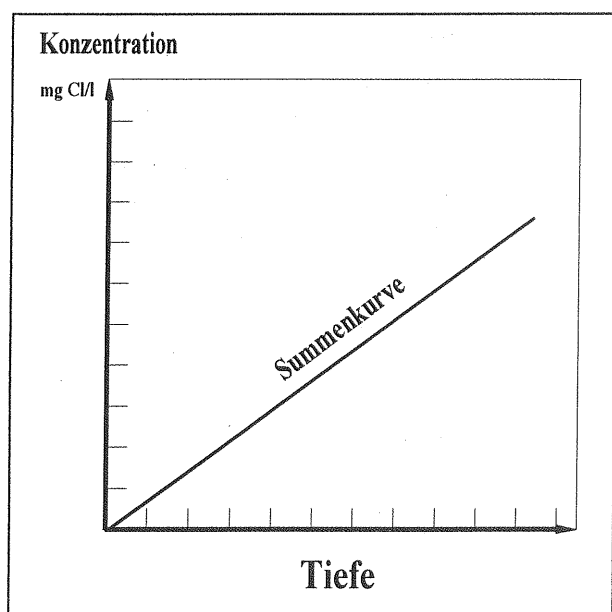


Abb. 24: Summenkurve

kann der Cl^- -Gehalt unmittelbar auf den Beton – und bei bekanntem Zementgehalt auf diesen – bezogen werden; das Verfahren erlaubt also eine kontinuierliche, tiefenabhängige Ermittlung des Cl^- -Gehaltes. Im Gegensatz dazu ist mit dem derzeit üblichen Schlagbohrverfahren bzw. an den Scheiben, die aus zersägten Bohrkernen gewonnen werden, lediglich eine schichtweise Bestimmung des mittleren Chloridgehaltes möglich.

Ein Vergleich der derzeit angewandten Bestimmungsverfahren mit dem Bohrverfahren sowie ergänzende theoretische Überlegungen dazu belegen, daß die herkömmlichen Verfahren zwar mittlere Cl^- -Gehalt-Meßgrößen liefern, jedoch eine differenzierte Beurteilung von zeit- und ortsabhängigen Ereignissen, Verläufen und Entwicklungen nicht zulassen.

5.2.1 Theoretische Grundlagen

Wie in der Prinzipskizze des Verfahrens (Abb. 2) gezeigt, wird die Meßflüssigkeit im geschlossenen Kreislauf umgepumpt. Die zu den späteren Meßzeitpunkten zusätzlich in Lösung gegangene Chloridmenge wird folglich aufsummiert, und die Werte werden in Form einer Summenkurve dargestellt. Für den theoretischen Fall eines sehr feinkörnigen, homogenen Betons, in dem die Chloride gleichmäßig verteilt sind, ergibt sich somit eine Gerade als Funktion des Chloridgehaltes von der Bohrtiefe (siehe Abb. 24).

Die mit dem Verfahren erbohrte Betonmenge, also das aufgeschlossene und in die Meßflüssigkeit eingegangene Betonvolumen, ergibt sich aus den geometrischen Daten der angebohrten Fläche und der Bohrtiefe. Differenziert man die theoretische Summenkurve nach der Bohrtiefe, so ergibt sich der Chloridgehalt in Abhängigkeit von der Tiefenlage (siehe Abb. 25).

Im vorliegenden (theoretischen) Fall ergibt die Differenzierung der Summenkurve eine Parallele zur Tiefen-Achse. Das bedeutet, daß man in diesem speziellen Fall in allen Tiefenlagen denselben Cl^- -Gehalt antrifft, wie in der obigen Annahme vorgegeben. Unter der weiteren theoretischen Annahme eines weitgehend homogen im Beton verteilten Zementes ist es möglich, den gemessenen Cl^- -Gehalt auf den Zementgehalt des Betons zu beziehen. Voraussetzung ist, daß der Zementgehalt im Beton bekannt ist.

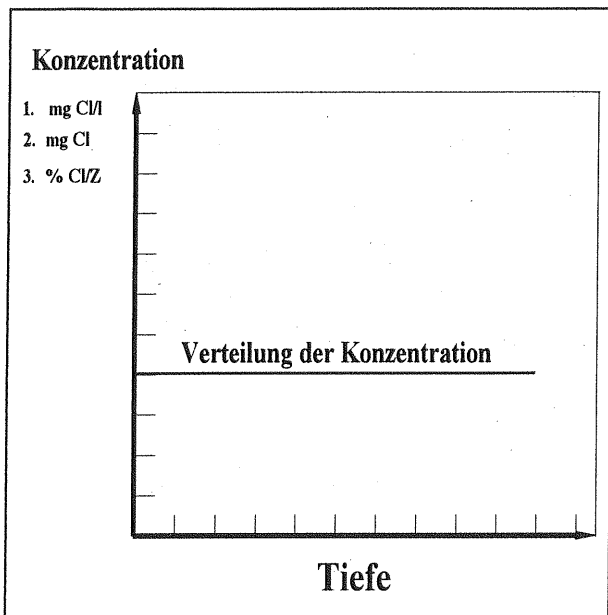


Abb. 25: Differenzierte Summenkurve (Chloridverteilung)

Bei dem hier vorgestellten Bohrverfahren wird der Chloridgehalt in mg Cl⁻ pro Liter Meßflüssigkeit als Meßwert ermittelt. Aus der im Umlauf des Systems befindlichen Menge an Meßflüssigkeit und ihrem Cl⁻-Gehalt wird auf die erbohrte Menge Chloridionen im Beton geschlossen. Das Volumen der Meßflüssigkeit ist eine versuchstechnische Konstante. Für beispielsweise 620 ml wäre der Meßwert mit dem konstanten Wert 0,62 zu multiplizieren, um auf die erbohrte Menge Chloridionen zu schließen. Es ist also grundsätzlich möglich, aus den Meßwerten, die mit der Cl⁻-Elektrode ermittelt wurden, und der Bohrtiefe den Cl⁻-Gehalt, bezogen auf den Beton bzw. den Zementgehalt, zu errechnen.

Grundsätzlich gelten die mit Hilfe des Auswerteprogrammes rechnerisch ermittelten Kurven. Um jedoch auch eine rasch nachvollziehbare Methode zur Veranschaulichung der Ergebnisse zu haben, wurde ein graphisches Verfahren entwickelt. Es wird im folgenden als Nomogramm bezeichnet und soll anhand der Summenkurve „Test 219“ (siehe Abb. 26 bis 28) dargestellt und erläutert werden. Die Summenkurve wird in einen Polygonzug mit

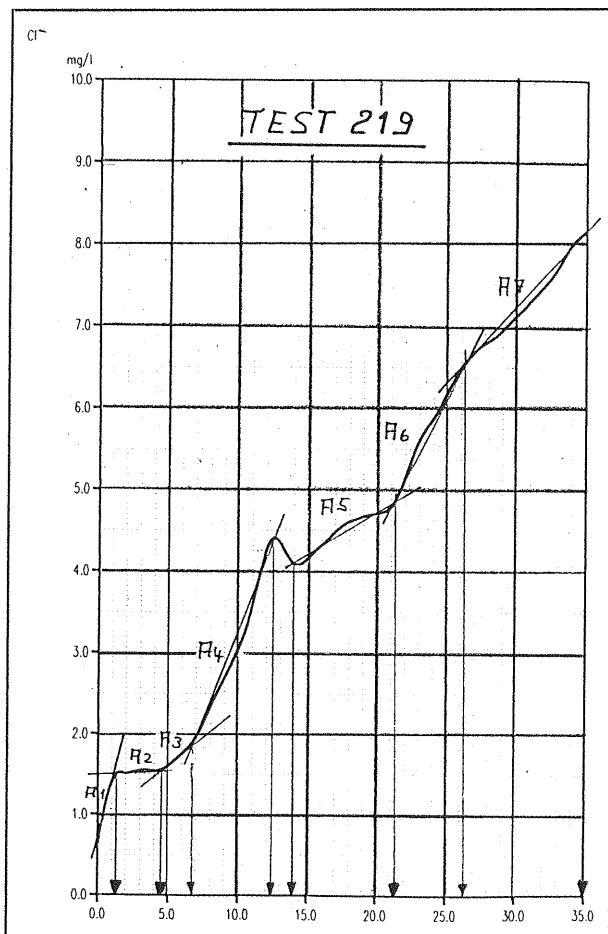


Abb. 26: Aufteilung der Summenkurve in einen Polygonzug mit geradlinigen Teilschnitten

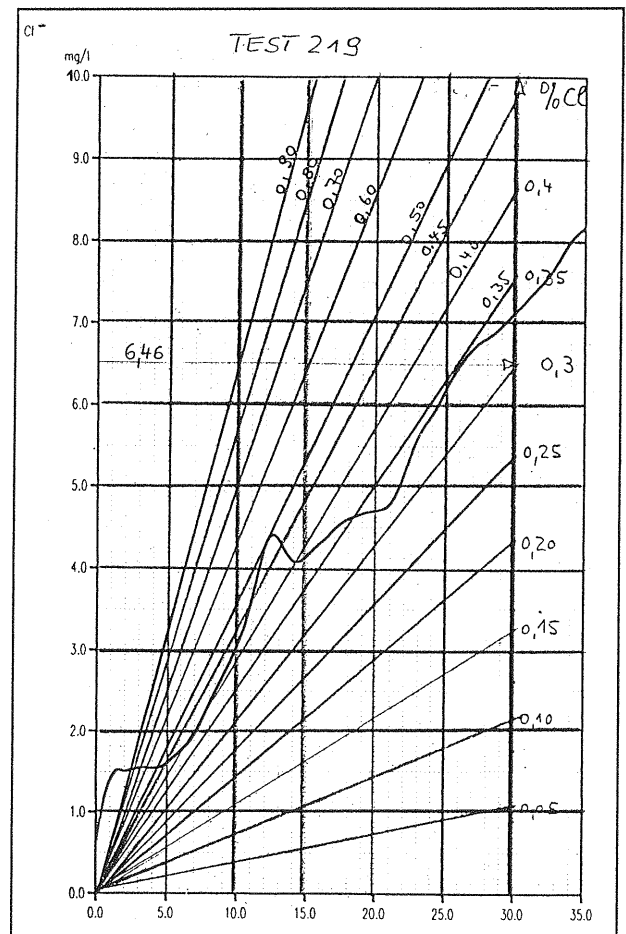


Abb. 27: Nomogramm zur Bestimmung der Cl⁻-Gehalte

geradlinigen Teilabschnitten aufgeteilt. Der Cl⁻-Gehalt wird nach folgendem Beispiel anhand der gradlinigen Kurvenäste ermittelt.

Für 1 mm Bohrtiefe bei einem Bohrdurchmesser $\varnothing_i = 10$ mm, $\varnothing_a = 17$ mm und einem Zementgehalt von 300 kg/m³ ergeben sich nach Abschnitt 4.4.2:

44,53 mg Z im Bohrklein pro mm Bohrtiefe.

Bei 1 % Cl⁻ im Beton, bezogen auf die obige Zementmenge, müßten

0,4453 mg Cl⁻ je mm Bohrtiefe

gefunden werden; umgerechnet auf die eingesetzte Flüssigkeitsmenge von 620 ml wären dies

0,718 mg Cl⁻ je mm Bohrtiefe in der Meßflüssigkeit.

Mit dem gewählten Kernbohrer und der vorgegebenen Bohrergeometrie müssen z. B. in 30 mm Bohrtiefe und mit 0,3 % Cl⁻-Gehalt, bezogen auf 300 kg Zement pro m³, 6,46 mg Cl⁻/l in der Meßflüssigkeit gefunden werden. Trägt man diesen Wert in das Diagramm der Abb. 27 ein, so ergibt sich eine Gerade mit einer bestimmten Steigung. Wie in Abb. 27 dargestellt, werden die Steigungen der Geraden mit zunehmendem Chloridgehalt größer.

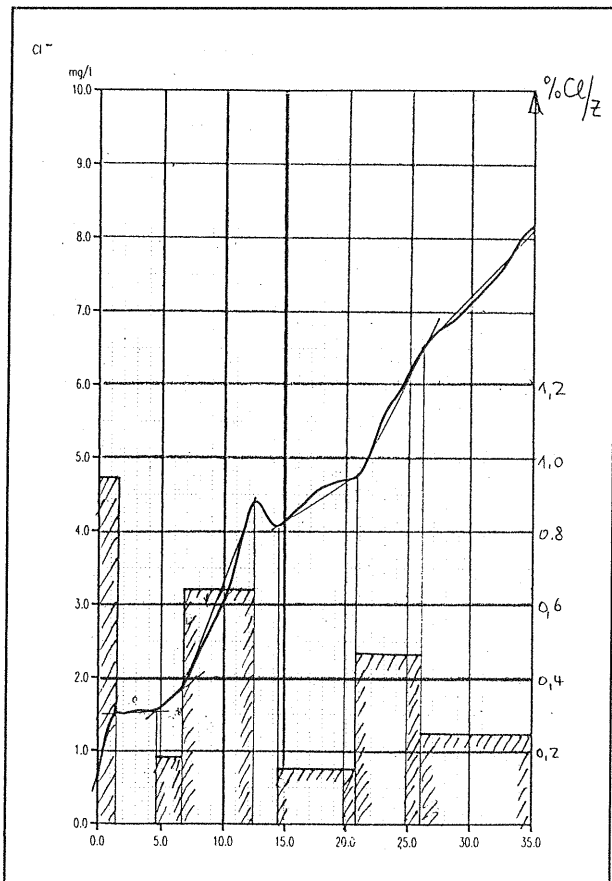


Abb. 28: Graphisch mit Nomogramm ermittelter Cl⁻-Gehalt, bezogen auf Zement

Trägt man die Steigungen, die sich aus den jeweiligen Chloridgehalten ergeben, als Nomogramm auf Transparentpapier oder Folie auf, lassen sich damit verhältnismäßig einfach durch das Auflegen des Nomogramms auf ermittelte Kurven die tatsächlich gemessenen Cl⁻-Gehalte bestimmen. Für Abb. 26 ist im vorliegenden Fall die Verteilung des Cl⁻-Gehaltes in Abhängigkeit von der Tiefe grafisch ermittelt worden.

Für den Ast A₁ (Abb. 26) beträgt z. B. bis zur Tiefe von ca. 1,5 mm der Cl⁻-Gehalt 0,95 %, bezogen auf 300 kg Zement pro m³. So lassen sich die Chloridgehalte, bezogen auf Zement, auch für die übrigen Kurvenäste A₂ bis A₇ bestimmen. Sie sind im einzelnen in Abb. 28 dargestellt. Während die graphisch ermittelten Cl⁻-Gehalte lediglich eine grobe Darstellung der Teilbeträge aus der Summenkurve 219 ergeben, zeigt die numerisch mit dem Rechner differenzierte Summenkurve die tatsächliche, inhomogene Cl⁻-Verteilung im Beton erheblich besser (s. Abb. 29).

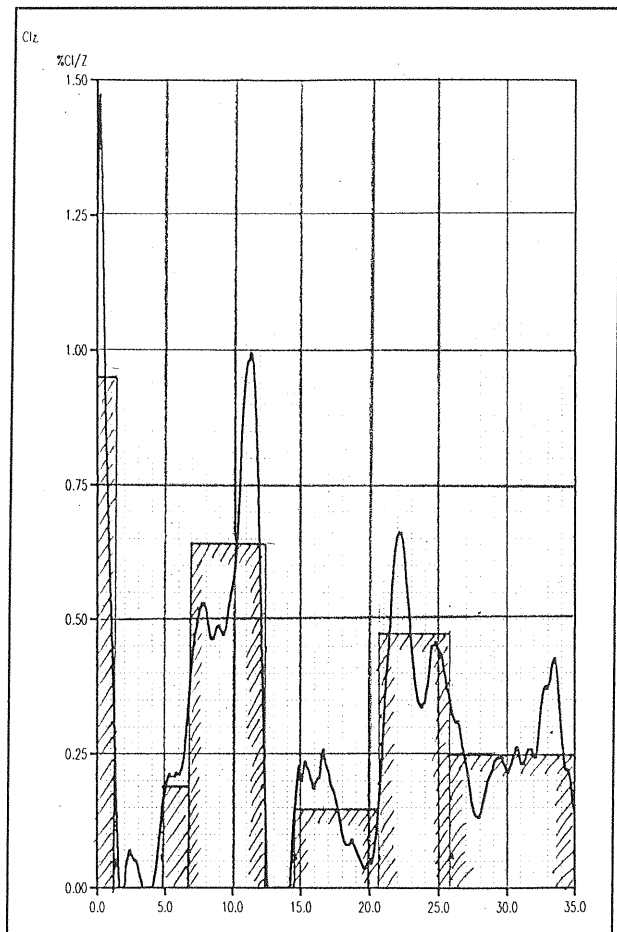


Abb. 29: Gegenüberstellung der mit einem Rechner-Programm ermittelten Cl⁻-Gehalt-Kurve und der graphisch ermittelten Cl⁻-Gehalte als Balkendiagramm

5.3 Diskussion von Unstetigkeiten in den Chlorid-Wert-Kurven

Am Beispiel der Abb. 30 sollen einige Besonderheiten der Chlorid-Summenkurven ($\text{mg Cl}^-/\text{l}$) erläutert werden. Nach der Definition einer Summenkurve kann es theoretisch keine fallenden Kurvenbereiche geben. Ein Abfall der Kurve, wie im Bereich „B“ der Abb. 30 erkennbar, dürfte also nicht vorkommen. Bei einem Nullzuwachs an Chloriden müßte die Kurve waagrecht verlaufen.

Die vorgestellte Summenkurve basiert auf Meßergebnissen aus einer Bohrung in einer Platte, die mit Normsand 0 - 2 mm hergestellt wurde. Das Cl^- wurde in Form von NaCl dem Anmachwasser beigegeben. Demnach kann eine Beeinflussung der Chloridverteilung, z. B. durch Zuschläge mit größerem Korndurchmesser, nicht auftreten, weil ein guter Misch- bzw. Homogenisierungsvorgang des Größtkorns (2 mm) beim Betonaufschluß im Bohrschneidenbereich stattfindet (Bohrschneidendicke $\sim 3,5$ mm).

Der vermutliche Grund für den tatsächlich gemessenen Abfall im Summen-Kurvenverlauf (Abb. 30) wird anhand der Prinzipskizze in Abb. 31 erläutert. Die Prinzipskizze stellt vereinfacht die Konzentrationsverhältnisse der Meßflüssigkeit im Hydrozyklon dar.

Für die Modellbetrachtung wird angenommen, daß sich im Hydrozyklon drei Flüssigkeitsschichten mit den unterschiedlichen Chloridkonzentrationen (C_N entspricht niedriger Konzentration, C_M entspricht mittlerer Konzentration und C_H entspricht hoher Konzentration) eingestellt haben. Im momentan betrachteten Zustand (s. Abb. 30) registriert die Cl^- -Elektrode bei einer Bohrtiefe von 12,5 mm eine hohe Konzentration (C_H) von 4,4 $\text{mg Cl}^-/\text{l}$. Die kontinuierlich arbeitende Pumpe fördert anschließend Spülgut mit niedriger Konzentration (C_N) in den Hydrozyklon.

Die Meßflüssigkeit im Hydrozyklon wird dadurch verdünnt und trifft mit einer geringeren Konzentration auf die Elektrode, die infolgedessen eine geringere Konzentration anzeigt. Da während dieses Vorganges auch die Bohrung tiefer wird, zeigt sich der Konzentrationsabfall auf 4,1 $\text{mg Cl}^-/\text{l}$ nunmehr bei einer Bohrtiefe von 14,5 mm. Der Grund für dieses Verhalten liegt in der nicht vollständig homogenen Durchmischung der gesamten Meßflüssigkeit während des Meßvorganges. Es ergeben sich stets kleine Konzentrationsunterschiede im Mischgefäß (Hydrozyklon), die sich in Einzelfällen so auswirken können, daß im Verlauf der Summenkurve auch ein relativer Abfall registriert werden kann. Weiterhin wird deutlich, daß die tatsäch-

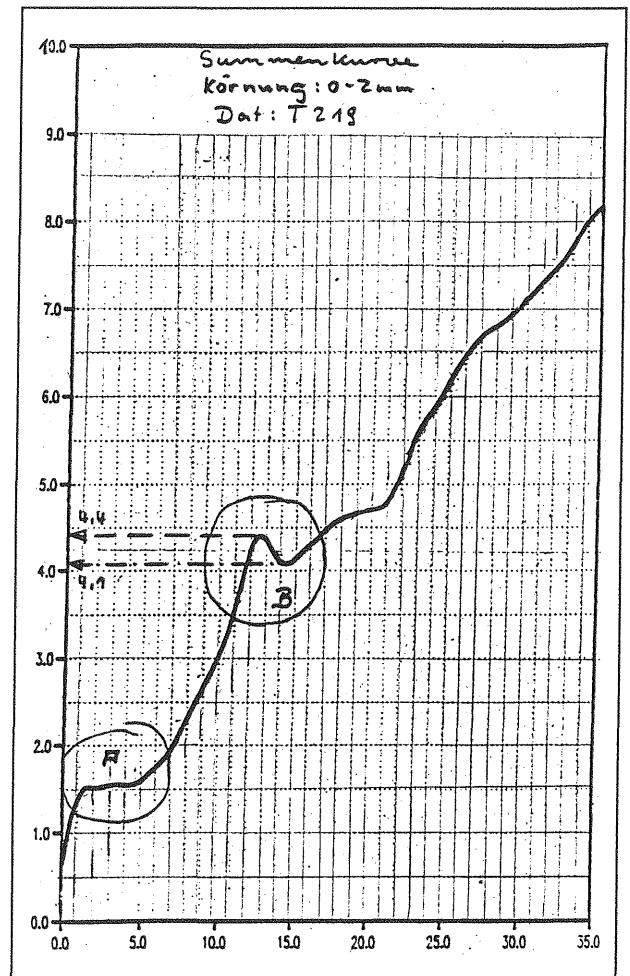


Abb. 30: Beispiel einer Summenkurve (Test 219)

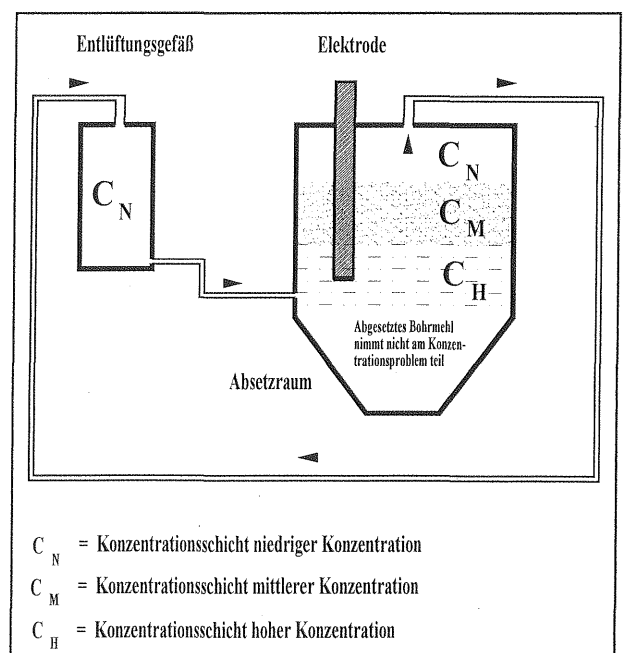


Abb. 31: Konzentrationsbereiche im Hydrozyklon

lichen Konzentrationsspitzen in der Regel nicht in ihrer vollen Höhe erfaßt werden; vielmehr wird stets eine etwas geringere als die örtliche tatsächlich vorhandene Konzentration im Beton erfaßt. Dennoch ist festzuhalten, daß das vorgestellte geschlossene Naßbohrverfahren die tatsächliche örtliche Chlorid-Konzentration besser wiedergibt als die bisherigen Verfahren zur Ermittlung des Chloridgehaltes von Beton, mit denen nur Mittelwerte für definierte Schichten angegeben werden können.

Dem Einwand, die anhand der Abb. 30 aufgezeigten Auswirkungen der unterschiedlichen Chloridkonzentrationen in verschiedenen Horizonten des Hydrozyklons (s. Abb 31) auf den Kurvenverlauf würden nicht so ausgeprägt auftreten, wenn der selektive Bereich der Elektroden weiter oben im Hydrozyklon und in der Nähe des Ansaugbereiches der Pumpe angebracht würde, ist entgegenzuhalten, daß dort die Elektroden nicht mehr in „ruhiger Umgebung“ arbeiten. Versuche haben belegt, daß die dort vorherrschende Unruhe im Meßablauf daher rührt, daß sich zwischen Referenzelektrode und Cl^- -Elektrode zu starke Turbulenzen und damit ebenfalls nennenswerte Konzentrationsunterschiede bilden können, die das Meßergebnis eher noch stärker beeinflussen als die gewählte Anordnung der Elektroden.

Ein solch geringer Einbruch von $0,3 \text{ mg Cl}^-/\text{l}$ in der Summenkurve (Abb. 30) wird als vertretbar angesehen. Der in diesem Bereich durch Differenzierung der Summenkurve entstehende negative Teil der Meßwertkurve wird mit Hilfe der Auswertesoftware weggeschnitten, weil er nicht der „Realität“ entspricht, und die Kurve wird an dieser Stelle entsprechend geglättet.

5.4 Auswirkungen der Inhomogenität des Betons auf die Meßergebnisse

5.4.1 Allgemeines

Ist der Größtkorndurchmesser im inhomogenen Beton mit homogener Cl^- -Verteilung ähnlich groß oder größer als der Bohrlochdurchmesser, so müßte sich in der Summenkurve eine erhebliche Streuung der bezogenen Chloridwerte zeigen. Ist das Größtkorn allerdings höchstens 2 mm , so dürfte sich auf Grund der Relation zwischen Größtkorndurchmesser und den geometrischen Abmessungen des Bohrers keine größere Streuung in den Meßwerten ergeben.

An einem aus Normsand im Labor hergestellten Probekörper wurden die Chloridwerte in 6 Bohrver-

suchen gemessen. Die dabei festgestellten Abweichungen voneinander bzw. Schwankungen lassen sich ausschließlich auf die inhomogene Chloridverteilung im Beton zurückführen (siehe Abb. 32). Solche Schwankungen finden sich mehr oder weniger ausgeprägt in allen Betonen, folglich auch in Betonen mit größerem Zuschlag (siehe Abb. 33). Wenn man die Einzelkurven mit einer oberen und einer unteren Geraden eingrenzt, so weichen die Endwerte der Chlorid-Summenkurve in einer Tiefe von 35 mm maximal um etwa $2 \text{ mg Cl}^-/\text{l}$ voneinander ab. Daß in Abb. 32 die Ausgleichsgeraden die Ordinate bei ca. $1 \text{ mg Cl}^-/\text{l}$ schneiden – und nicht bei $0 \text{ mg Cl}^-/\text{l}$ – ist auf die Wanderung des Chlorides zur Oberfläche infolge der Verdunstung von Feuchtigkeit zurückzuführen, wobei Cl^- ebenfalls zur Oberfläche transportiert wurde.

Unterteilt man in Abb. 32 die Meßwerte aus den 6 Bohrungen der Probenplatte mit einem Größtkorn $0 - 2 \text{ mm}$ (Normsand) in 2 Gruppen, so zeigt sich, daß zumindest zwei unterschiedlich hoch belastete Betonbereiche vorliegen, und zwar in den Tiefen $6 \text{ bis } 7 \text{ mm}$ und 13 mm . Ähnliche Unterschiede sind

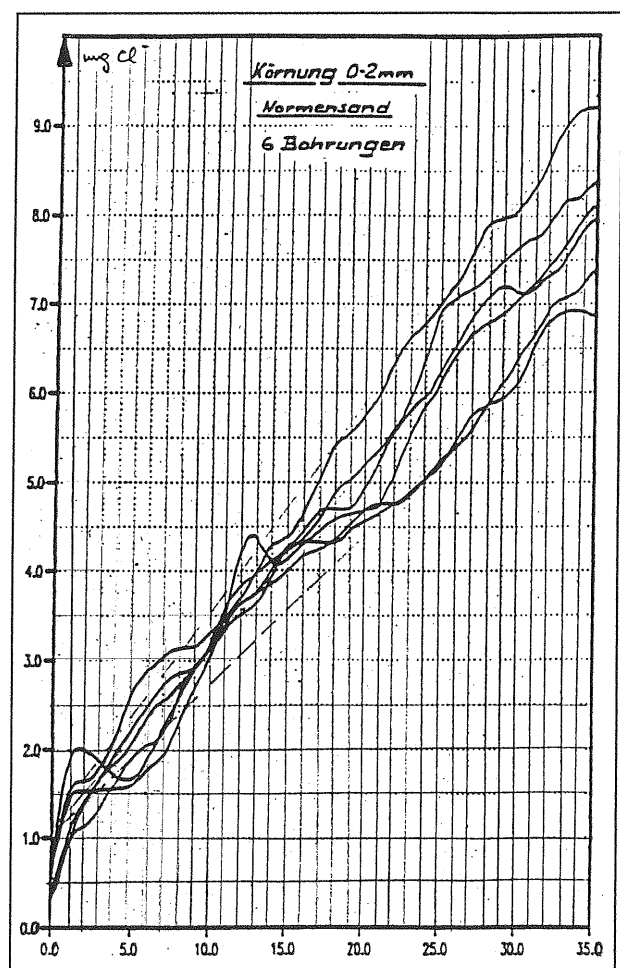


Abb. 32: Verlauf von 6 Chlorid-Summenkurven in einem Probekörper aus Normsand der Körnung $0-2 \text{ mm}$

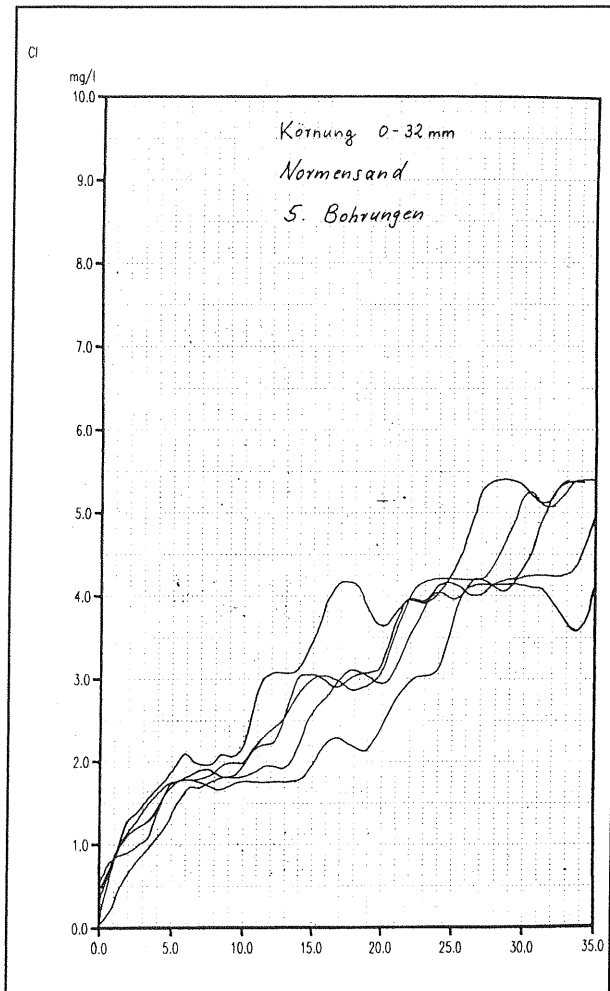


Abb. 33: Bohrversuche auf einer Probeplatte aus Beton 0-32 mm – 5 Summenkurven des Chloridgehaltes

auch bei Probeplatten, die mit der Körnung 0 - 4 mm hergestellt wurden, zu finden; auch hierbei kann der Einfluß des Größtkorns von 2 mm bzw. 4 mm praktisch als vernachlässigbar angesehen werden. Es konnte dagegen gezeigt werden, daß ähnliche Gruppen der Summenkurven von einer Platte immer jeweils einem örtlichen Bereich auf den Platten zuzuordnen waren. Das läßt den Schluß zu, daß sich trotz sorgfältiger Herstellung der Proben im Labor Bereiche unterschiedlicher Chlorid-Konzentration gebildet haben. Es wird vermutet, daß Inhomogenitäten im Beton eine nachträgliche Wanderung der Chloride in Bereiche erhöhter Porosität bewirkt haben. Anhand der Ergebnisse von Bohrungen auf Betonplatten mit 0 - 32 mm Größtkorn – diese Betonkörnung stellt den Normalfall in der Praxis dar – sollen die Ursachen für die unterschiedlichen Meßwerte eingehender interpretiert werden.

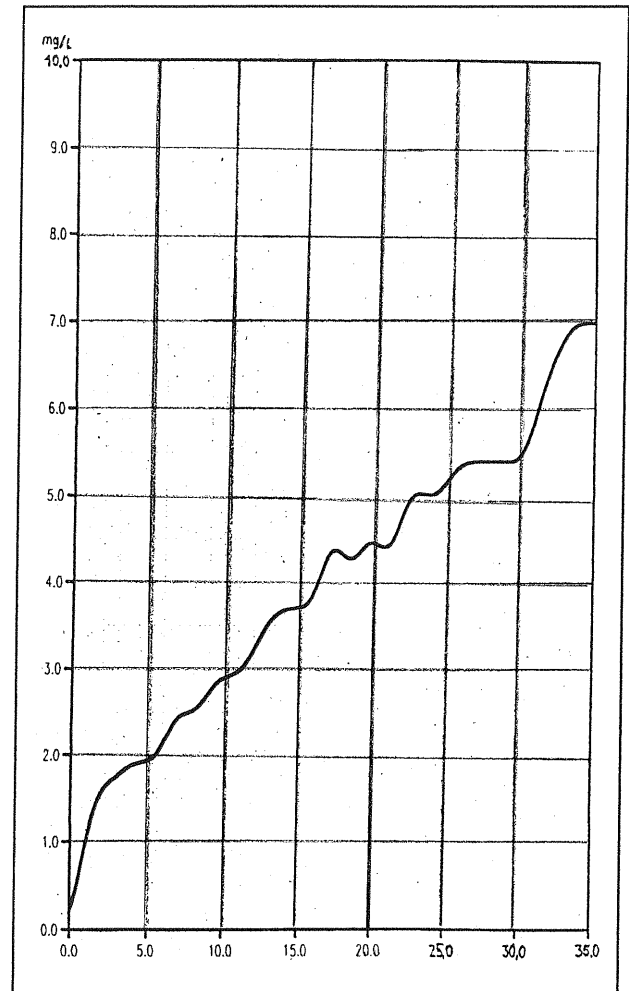


Abb. 34: Eine Summenkurve aus der Abb. 33 (Sieblinie der Zuschläge 0-32 mm)

5.4.2 Betoninhomogenitäten an den Zuschlagsgrenzflächen und ihr Einfluß auf das Ergebnis

Bei grobkörnigem Beton treten grundsätzlich 2 unterschiedliche Kurvenverläufe auf.

Das Ergebnis der in Abb. 34 gezeigten Summenkurve aus einer Bohrung stellt den Fall einer relativ gleichmäßigen Cl^- -Verteilung im Beton 0 - 32 mm dar.

Das Ergebnis der in Abb. 35 gezeigten gemittelten Summenkurve stellt den Fall einer relativ ungleichmäßigen Cl^- -Verteilung über die Bohrtiefe dar; die Kurve zeigt einen unruhigen und stark abgetrepten Verlauf.

Die Einzelkurven für Beton mit der Sieblinie 0 - 32 mm sind in der Regel stärker treppenförmig ausgeprägt als die für feinkörnigen Mörtel. Die Begründung dafür soll anhand der Abbildungen 36 bis 38 gegeben werden. Wie auf den Fotos der Abb. 39

und 40 zu sehen ist, liegt der Zementstein nicht immer dicht am Zuschlag an; vielmehr kann sich zwischen Zuschlag und Mörtel bzw. Zementstein eine mehr oder weniger stark ausgeprägte diffuse

und/oder poröse Zone in Form einer Flächenkapillare ausbilden.

Die Ursachen für eine jeweils gleichmäßige bzw. ungleichmäßige Chlorid-Verteilung werden in den beiden Prinzipskizzen der Abb. 36 und 37 schematisch dargestellt. Da Cl^- nach [5] im wesentlichen

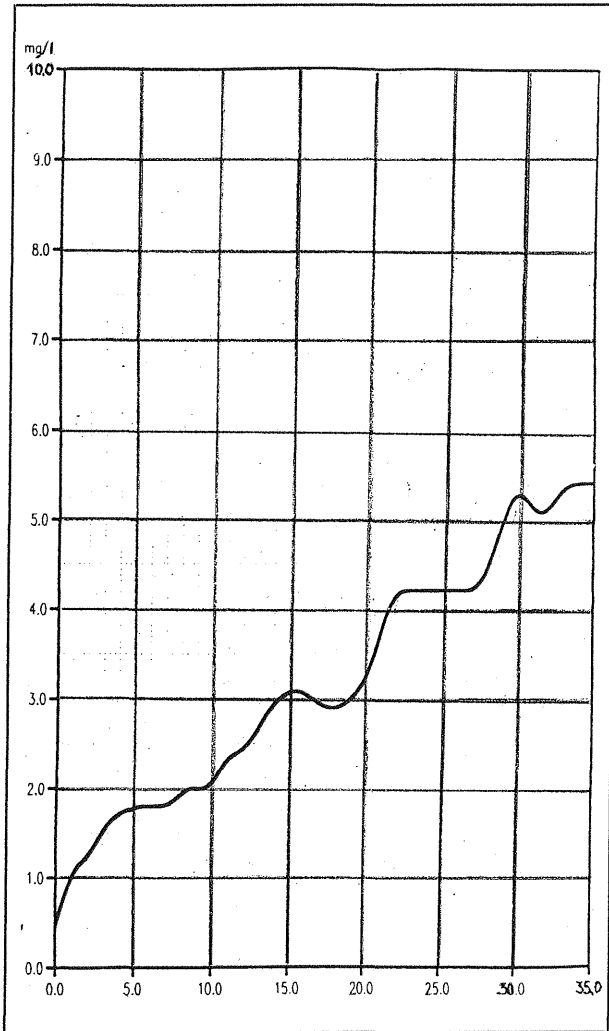


Abb. 35: Rechnerisch gemittelte Summenkurve aus den 5 Kurven in Abb. 33 (Sieblinie der Zuschläge 0-32 mm)

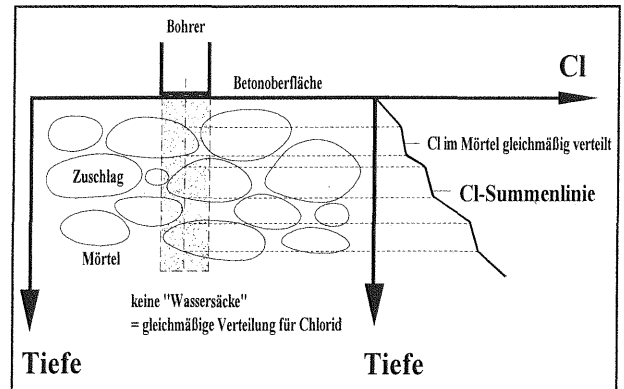


Abb. 37: Gleichmäßige Cl^- -Verteilung

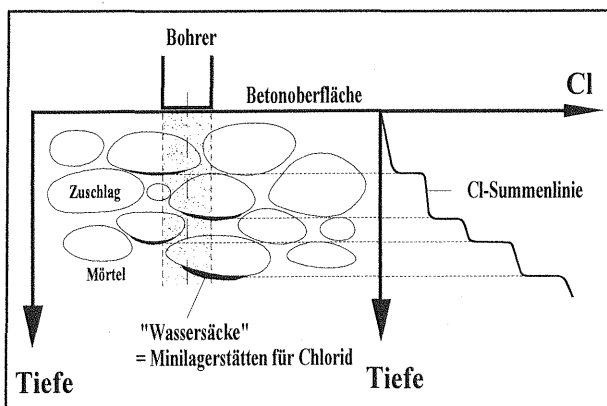


Abb. 36: Ungleichmäßige Cl^- -Verteilung

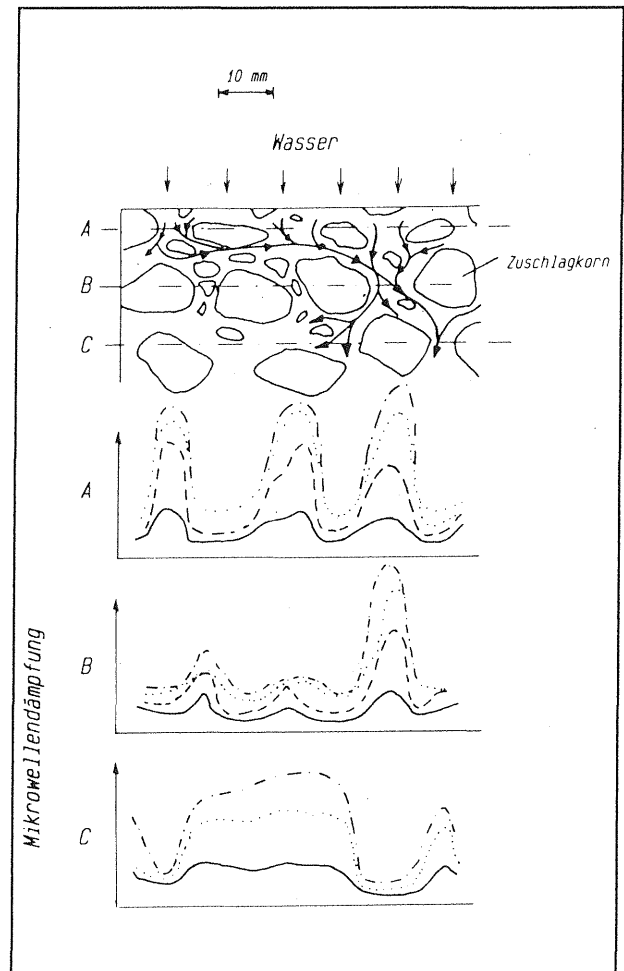


Abb. 38: Wasserwanderungswege im Beton; entnommen aus [5] A, B und C stellen Cl^- -Konzentrationen in unterschiedlichen Tiefen im Beton dar

über das Transportmedium Wasser in den Beton eingetragen wird (Abb. 38), sind die porösen und saugfähigen Bereiche des Betons auch die bevorzugten Transportbereiche des Chlorids, die schließlich nach dem Austrocknen des Betons die „Minilagerstätten“ der ausgefallenen Chloride bilden. Schneidet der Bohrer eine solche „Minilagerstätte“ (Abb. 36) an, so ist in diesem Bereich tatsächlich eine sehr hohe Cl^- -Konzentration vorhanden. Durch den jeweils sprunghaften Anstieg der Konzentration in der Summenkurve (treppenförmiger Verlauf) zeichnen sich bei der Chloridverteilung über der Bohrtiefe Spitzenwerte ab.

Literaturquellen, zusammengestellt in [5], die sich mit der Migration von Cl^- im Beton und den Inhomogenitäten des Betons befassen, stützen die dargestellte Begründung für die unterschiedlichen Ausprägungen der Kurvenverläufe.

Literaturquellen zusammengestellt in [5], weisen auf Unterschiede zwischen den Werten der einzelnen Summenkurven hin. Die Unterschiede sind in den entsprechenden wissenschaftlichen Untersuchungen jedoch weniger durch das Größtkorn bedingt, als vielmehr durch Einflüsse aus dem Eindring-, Wanderungs- und Verteilungsverhalten des Chlorids im Beton. In [5] werden die wesentlichen Einflüsse auf dem Transport von Chloriden im Beton zusammengestellt. Grundsätzlich gelangen Chloride über den „Huckepack-Transport“ mit dem Wasser in den Beton und lagern sich dort ein. Die Chloride dringen entlang von Zuschlagkorn Grenzen bzw. durch poröse Zuschläge, durch Risse und entlang von Bewehrungsstäben in größerer Menge ein. Über diese Transportwege werden im wesentlichen in Wasser gelöste Chloride im Zuge der allgemeinen Feuchtwechsel in den Beton transportiert. Die Chloride sind somit im Beton unregelmäßig verteilt und wechseln infolge der witterungsabhängigen Feuchtwechsel auch ihre jeweilige örtliche Konzentration. Abb. 38 aus [5] zeigt als Beispiel die Transportwege der Chloride im Beton und ihre Verteilung über die Tiefe, die durch Mikrowellenuntersuchungen gefunden wurde.

Die Aussagen der Abbildung 38 werden durch eigene Beobachtungen bestätigt, die anhand von mikroskopischen Aufnahmen von 2 verpreßten Betonen mit unterschiedlichen W/Z-Werten in Abb. 39 und 40 vorgestellt werden. Beide Aufnahmen zeigen die innere Situation des Betons nach der Verfüllung der Hohlräume mit Hilfe eines in der BAST entwickelten Verpreßverfahrens für Beton [7]. Hohlräume, Poren, Flächenkapillaren, Risse und andere Fehlstellen treten nach Verfüllung mit einem fluoreszenten Harz unter UV-Licht als gelb-grüne

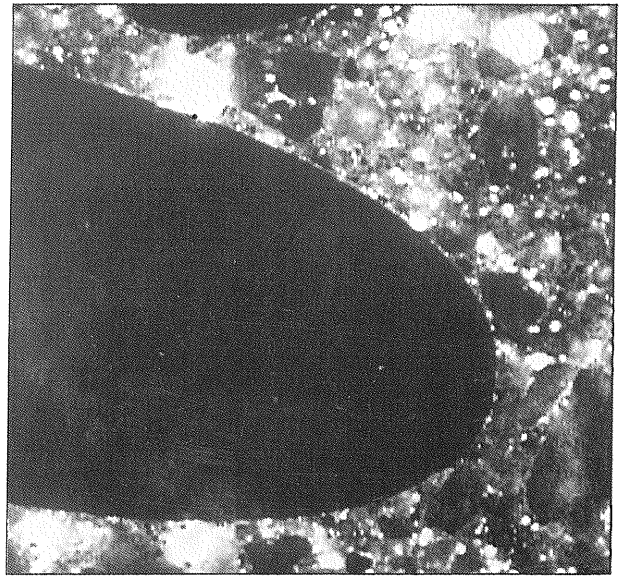


Abb. 39: Verpreßte Probe mit kleinem W/Z-Wert (W/Z ca. 0,45)

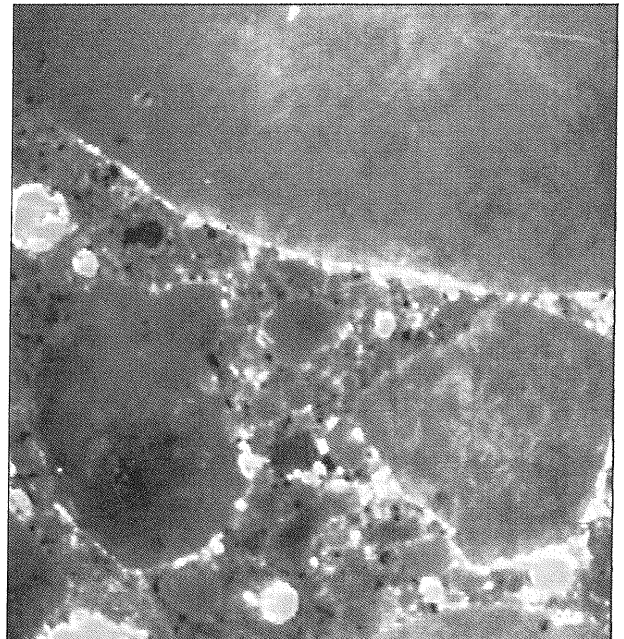


Abb. 40: Verpreßte Probe mit großen W/Z-Wert (W/Z ca. 0,55)

Verfärbung hervor. Die Proben wurden als ganze Bohrkern präpariert und dann geschnitten.

Die Aufnahmen wurden an Anschliffen gemacht und zeigen die angesägte Schnittoberfläche. Der Vergrößerungsmaßstab ist bei beiden Aufnahmen identisch.

In Abb. 39 wird Beton mit einem kleinen W/Z-Wert von ca. 0,45 dargestellt. Deutlich wird, daß die Zuschlagkorn-Grenzflächen und die Betonmatrix ohne Fehlstellen und Zwischenräume eng miteinander

verbunden sind. Somit liegt keine „diffuse Zementsteinzone“ vor (siehe auch Abb. 37).

In Abb. 40 sind die durch den höheren W/Z-Wert von ca. 0,55 entstandene „Flächenkapillaren“ im Bereich der Zuschlagkörner ersichtlich. Diese „Fehlstellensituation“ wird u. a. noch durch das „Setzen des Mörtels“ unterhalb der Zuschlagkörner vergrößert vor (siehe auch Abb. 36). Darüber hinaus begünstigt ein Beton mit einer schlecht aufgebauten Matrix nicht nur die Korrosion des Bewehrungsstahles, sondern beeinflusst u. a. auch den Frost-Tau-Widerstand und seine bruchmechanischen Eigenschaften.

Das Setzen des Mörtels unterhalb der größeren Zuschlagkörner und die daraus resultierende Bildung von „Minilagerstätten“ für Chloride wird wesentlich hervorgerufen durch das „Bluten“ des Frischbetons [8]. Aufgrund ihrer größeren Dichte neigen Feststoffanteile dazu, abzusinken, während das überschüssige Anmachwasser aufsteigt. Im Wasser enthalten sind dabei Feinanteile des Bindemittels. Die Anreicherung des Anmachwassers kann jedoch auch unter größeren sich gegenseitig abstützenden Zuschlagkörnern und an der Unterseite von Bewehrungsstäben erfolgen. Ein mögliches Ergebnis infolge Blutens ist in Abb. 41 aus [8] dargestellt.

Das Eindringen von Wasser in den Beton und damit der Chloridtransport durch die Kapillaren werden nach [5] zudem beeinflusst durch den jeweiligen Feuchtezustand des Betons sowie auch von Einwirkungen während der Betonherstellung (z. B. Nachbehandlung, siehe Abb. 42). Dagegen ist nach [5] weitestgehend ohne Einfluß auf den Chloridtransport, ob der Beton gegenüber der Saugflä-

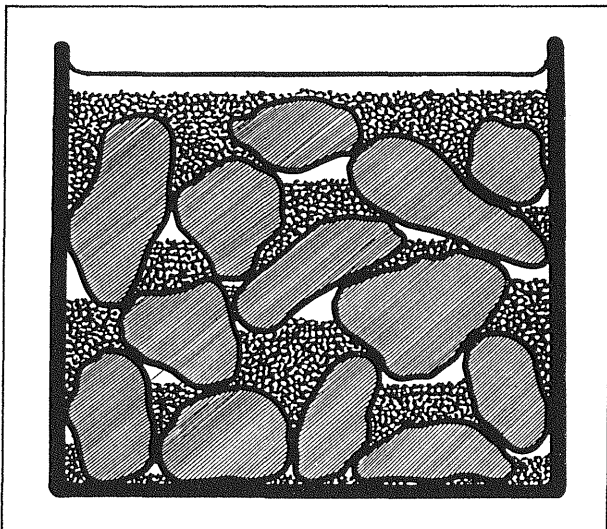


Abb. 41: Schematische Darstellung des „Blutens“ entnommen aus [8]

che abgedichtet ist oder nicht. Wie dortige Untersuchungen zeigen, kann der Anteil der Porenluft, deren Entweichen für den Feuchtigkeitstransport erforderlich ist, schon infolge kleiner Inhomogenitäten an der Oberfläche austreten bzw. sich im Beton verteilen oder aber als im Wasser gelöste Luft minimiert werden. Aufgrund der angesprochenen Einflüsse ist nach [5] zu erwarten, daß Chlorid im Beton sehr inhomogen verteilt sein muß.

Bei der Gegenüberstellung der Ergebnisse aus dem „Bohrverfahren“ und aus der Bestimmung der Chloridgehalte an Bohrkernscheiben oder Bohrkleinproben wird ein deutlicher Unterschied auftreten. Unter der Voraussetzung, daß der Beton im untersuchten Bereich eine ausgeprägte „Flächenkapillare“ entlang der Zuschlagkorngrenze („diffuse Zone“) aufweist, in der das Chlorid im wesentlichen durch die kapillaren Vorgänge im Zuge des „Huckepack-Transports“ deponiert ist, wird mit dem Bohrverfahren jeweils eine relativ hohe Konzentration an Chlorid in diesem Bereich gefunden werden.

Im Falle der herkömmlichen chemischen Chloriduntersuchungen im Labor wird ein relativ kleiner Mittelwert der Chloridgehalte ermittelt. Da sich solche Flächenkapillaren in ähnlicher Weise auch an der Bewehrung ausbilden, wird mit Hilfe der beiden Untersuchungsverfahren gegenüber dem Bohrverfahren ein zu geringer Gefährdungsgrad abgeschätzt (siehe auch [6] und Abb. 43). Betrachtet man nämlich die tatsächliche Cl^- -Tiefenverteilung und insbesondere die Spitzenwerte in bezug auf die Bewehrungsoberfläche, dann wird schnell ersichtlich, warum an der Bewehrung Cl^- -Lochfraß entsteht und warum tatsächlich weniger die Mittelwerte als vielmehr die Spitzenwerte dafür von Bedeutung sind.

5.4.3 Grenzflächensituation zwischen Zuschlag, Bewehrung und Matrix

Aus den mit dem Bohrverfahren erfaßten „Fehlstellenbereichen“ (Minilagerstätten für Chloride) gehen die dort abgelagerten Chloride in die Meßflüssigkeit über (Abb. 43). Die angeschnittenen Cl^- -Lagerstätten geben das vorhandene Cl^- teilweise und in unkontrollierter bzw. undefinierter Menge an die Meßflüssigkeit ab. Tatsächlich steht jedoch diese hohe gemessene Cl^- -Konzentration der Korrosionsreaktion an diesem Ort zur Verfügung.

Da sich mit dem für das Bohrverfahren gewählten Kernbohrer keine Bewehrungsstähle durchbohren lassen, wird angenommen, daß im Umfeld der Bewehrung die Situation ähnlich ist wie im Umfeld

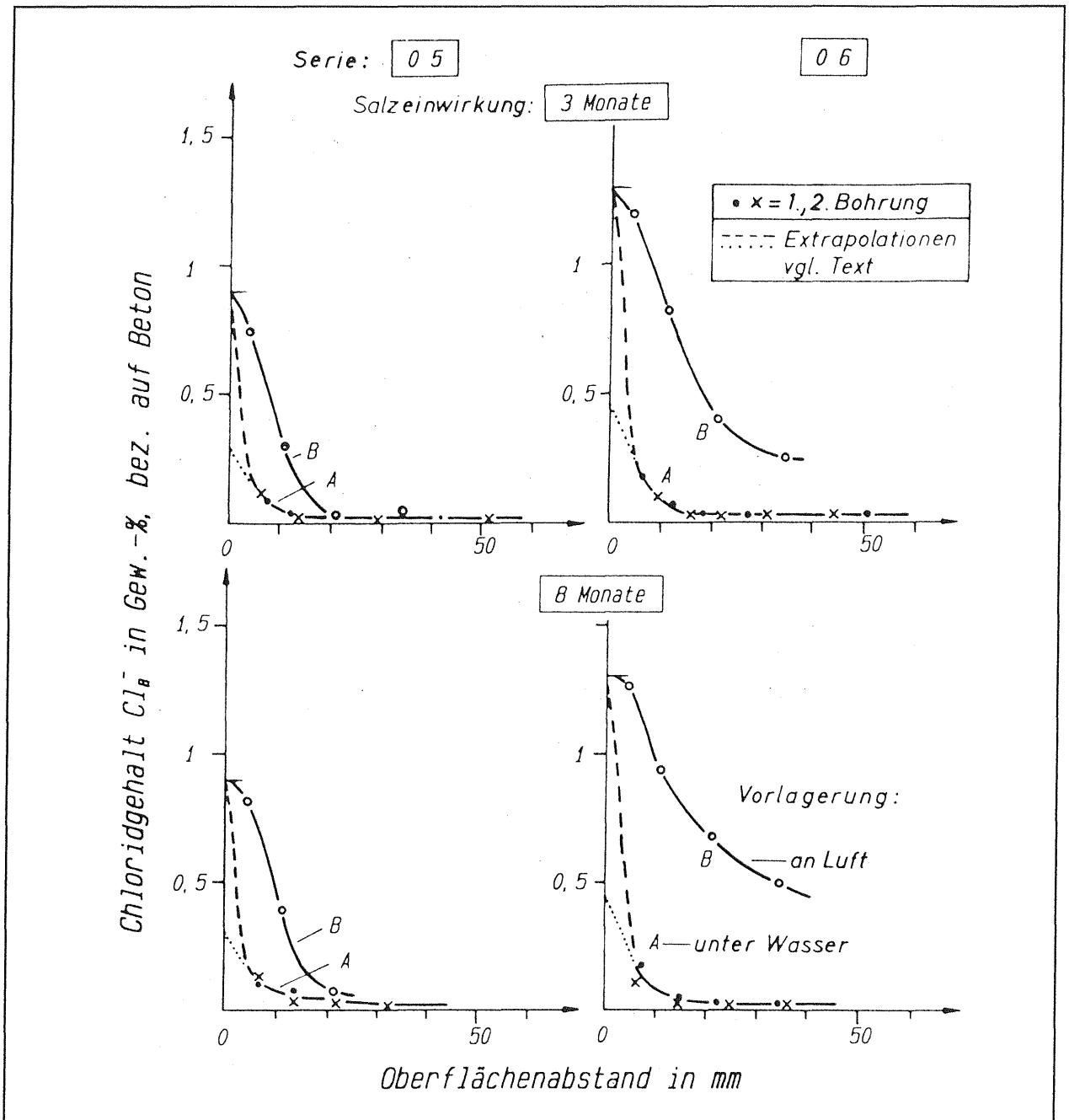


Abb. 42: Chloridverteilung in Betonen mit unterschiedlicher Nachbehandlung und anschließender Salzeinwirkung nach [5]

größerer Zuschläge (siehe hierzu auch Abb. 44). Diese Annahme wird indirekt in [6] bestätigt. An der Bewehrung in Abb. 44 ist eine ähnliche Situation beim Übergang zwischen Stahl zu Beton zu erkennen wie zwischen Zuschlag und Beton-Matrix (siehe Abb. 38). Für die chloridinduzierte Korrosion steht örtlich aus diesen Lagerstätten wegen der Auslaugung der Lagerstätte im allgemeinen eine erhöhte Menge Cl^- zur Verfügung. Das bedeutet, daß örtlich das nicht „physikalisch bzw. chemisch gebundene“ Cl^- mit dem Bohrverfahren besser erfaßt wird, als mit üblichen Methoden.

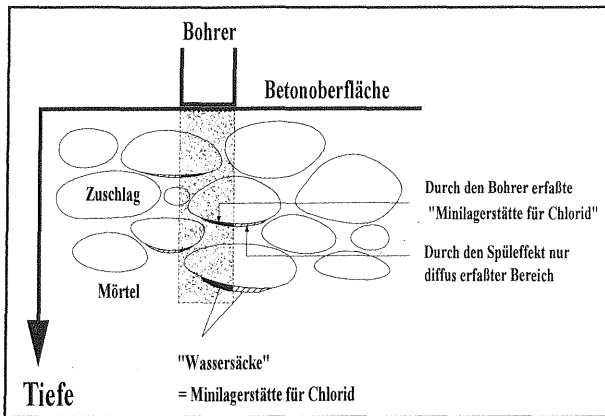


Abb. 43: Prinzipskizze einer Bohrung in einem Beton



Abb. 44: Chloridionenverteilung nach Sprühverfahren, Blauverfärbungen im Stahlbett mit Abdruck einer Korrosionsstelle, entnommen aus [6]

5.5 Experimentelle Untersuchungen

5.5.1 Allgemeines

Zur Erarbeitung von Kriterien für die Beurteilung und Interpretation der Meßergebnisse aus dem Bohrverfahren und zur Beurteilung seiner Reprä-

duzierbarkeit wurde ein enger begrenztes Versuchsprogramm durchgeführt. Dabei wurden Betonproben unterschiedlicher Zusammensetzung mit dem Bohrverfahren untersucht und die Ergebnisse mit denen aus den herkömmlichen Untersuchungsverfahren (Phenolphthalein-Test und potentiometrischen Titration) verglichen.

Der Versuchsablauf im einzelnen:

- Es wurden 8 unterschiedliche Betonproben mit den Sieblinien 0 - 2 bis 0 - 32 mm des Sieblinienbereichs A/B hergestellt. Der W/Z-Wert betrug 0,5. Chloride wurden in Form von Natriumchlorid (chemisch rein) dem Anmachwasser des Betons zugegeben. Weitere Angaben zur Betonzusammensetzung sind der Tab. 1 im Anhang zu entnehmen.
- Die Platten mit den Abmessungen 30 x 30 x 7 cm³ wurden auf einem Rütteltisch verdichtet und für ca. 6 Monate in Foliensäcken gelagert.
- Je Platte wurden im allgemeinen 6 Untersuchungen mit dem Bohrverfahren (Abschnitt 3) durchgeführt. Die durchschnittliche Bohrtiefe betrug zwischen 40 mm und 45 mm Tiefe. Dabei wurden kontinuierlich in Abhängigkeit von der Bohrtiefe die pH- und Chloridwerte gemessen.
- Im Anschluß an die Bohrversuche wurde die Meßflüssigkeit aufgefangen und der potentiometrischen Titration im Salpetersäureaufschluß zugeführt. Die Probekörper wurden nach den Versuchen gespalten, und mittels Phenolphthalein-Test wurde die Karbonatisierungstiefe bestimmt (siehe Abschnitt 4.1).

5.5.2 Darstellung der Meßergebnisse

Aus den Meßwerten, die während des Bohrvorganges gewonnen wurden, konnten die pH-Werte und Chloridgehalte in Abhängigkeit von der Bohrtiefe bestimmt werden. Die Kurven für die einzelnen Sieblinien aus den ermittelten pH-Werten sind in den Abb. 12 bis 16, und die Summen-Kurven der Chloridgehalte sind in den Abb. 32 und 33 dargestellt.

Die Einzelergebnisse der potentiometrischen Titration und der Phenolphthalein-Tests sind in Tab. 2 im Anhang aufgeführt. Diese Tabelle zeigt darüber hinaus den Endwert der Chloridkonzentration der einzelnen Bohrversuche, den mittleren Chloridgehalt in M-% bezogen auf Zement, den Zementgehalt und die Tiefenlage in [mm] im Probekörper, bei der sich in der Meßflüssigkeit der pH-Wert 10 einstellt (entspricht der Karbonatisierungstiefe). Die-

sen Meßwerten sind die Werte aus den Laboruntersuchungen der potentiometrischen Titration und der Phenolphthaleinmessung gegenübergestellt. Tab. 3 im Anhang enthält die für die einzelnen Platten gemittelten Meßwerte.

5.5.3 Wiederfindungsrate für Chloride

Zur Ermittlung der Wiederfindungsrate für Chloride wurden einige Platten nach dem Bohrverfahren untersucht. Anschließend wurde das gelöste Bohrklein mit Hilfe der potentiometrischen Titration im Labor untersucht. Die Ergebnisse der jeweils auf derselben Platte gefundenen Werte werden in der Tabelle 1 im Anhang gegenübergestellt. Dort sind im einzelnen enthalten in:

- Spalte 6:
Der im Bohrverfahren mit der ionenselektiven Elektrode gefundene Mittelwert des Cl^- -Gehaltes über 35 mm Tiefe.
- Spalte 7:
Wiedergefundener Cl^- -Gehalt mittels potentiometrischer Titration der aufgefangenen Meßflüssigkeit nach Beendigung der Bohrung. Die salpetersaure Titration wurde entweder sofort nach der Bohrung, zeitweise jedoch erst 1 bis 2 Wochen danach, durchgeführt. Sie erfolgte im angesäuerten Aufschluß. Damit wird auch gebundenes Chlorid erfaßt. Dagegen wurde beim Bohrverfahren der Chloridgehalt unmittelbar im alkalischen, wäßrigen Aufschluß bestimmt.
- Spalte 8:
Wiederfindungsrate [%]; Werte aus dem Bohrverfahren, bezogen auf die mit Hilfe der Titration, als der klassischen Referenzmethode, gewonnenen Werte.

Die deutlichen Abweichungen zwischen den Chloridgehalten aus potentiometrischer Titration und aus dem Bohrverfahren lassen sich wie folgt erklären:

- Bei der potentiometrischen Titration wird der Gesamtchloridgehalt erfaßt. Eventuell gebundenes Chlorid wird durch den salpetersauren Aufschluß mit der potentiometrischen Titration frei (Friedel'sches Salz).
- Bei dem Bohrverfahren wird nur das freie, wasserlösliche Cl^- beim jeweils vorliegenden Tiefenwert bestimmt (korrosionsaktives Cl^-).
- Strukturbildende Ionen (siehe Abschnitt 3.3), die die Korrosionsrate der Bewehrung beeinflussen, können auch das ionenselektive Meßergebnis beeinflussen. Die Strukturbildung vor der Sen-

sormembrane führt zur Strukturbildung vor oder in der Oxidhaut des Stahls. Es wird angenommen, daß diese strukturbildenden Ionen die hauptsächliche Ursache für die Passivierung sind. Diese Zusammenhänge sollen zu einem späteren Zeitpunkt noch genauer untersucht werden.

- Bei Proben, an denen größere Abweichungen zwischen den Ergebnissen aus dem Bohrverfahren mit der ionenselektiven Elektrode und der potentiometrischen Titration festgestellt worden, daß sich das Rückstellgut aus dem Bohrverfahren (Meßflüssigkeit) bei dem salpetersauren Aufschluß braun verfärbte. Dieses deutet auf zusätzliche korrosionsrelevante Einflüsse hin. Die Unterschiede sind erklärbar, bedürfen aber noch weiterer Untersuchungen.
- Da der Cl^- -Gehalt hinsichtlich des Untersuchungszieles „Bewehrungskorrosion“ nur eine indirekte Meßgröße darstellt, wäre eine wesentliche Verbesserung des Verfahrens die Entwicklung eines Sensors, der es ermöglicht, den Korrosionsstrom der Bewehrung in der Lösung direkt zu messen bzw. den Korrosionszustand anzuzeigen. Das Meßverfahren selbst – Bohren mit einer Meßflüssigkeit im geschlossenen Kreislauf – sollte allerdings beibehalten werden.
- Betrachtet man die im Bohrverfahren ermittelte Cl^- -Tiefenverteilung und insbesondere die Spitzenwerte in Relation zur Bewehrungsoberfläche, dann wird schnell ersichtlich, warum infolge der Chloridionen an der Bewehrung Lochfraß entsteht und warum tatsächlich weniger die Mittelwerte als vielmehr die Höchstwerte dafür von Bedeutung sind.

6 Beurteilung der Meßergebnisse unter dem Gesichtspunkt der Feuchtewechsel in der oberflächennahen Betonzone

6.1 Allgemeines

Voraussetzungen für den Korrosionsvorgang an Stahl im Beton sind:

- der Abbau der Passivierung infolge Eindringens von CO_2 , verbunden mit ausreichender Betonfeuchte und entsprechendem Sauerstoffangebot, und/oder
- das Vorhandensein von Ionen, die die Passivierung durchdringen (z. B. Chlorid-Ionen) gemeinsam mit der notwendigen Feuchte und ent-

sprechendem Sauerstoffangebot, damit der elektrolytische Korrosionsprozeß ablaufen kann.

Die beiden Größen – pH-Wert und Chloridgehalt – können mit dem vorgestellten Verfahren rasch und hinreichend genau bestimmt werden. Die erforderliche Menge an Feuchte für den Korrosionsprozeß kann zur Zeit nicht angegeben werden. Aus diesem Grunde ist es sinnvoll, bei der Beurteilung des Betons auf der Grundlage der Bohrdaten von einer Korrosionsgefährdung zu sprechen. Zur Darstellung des Feuchteinflusses werden zwei Beispiele als Gedankenmodelle betrachtet.

6.2 Einwirktiefe der Feuchte

Die Einwirktiefe der Feuchte infolge von Feuchte- wechseln, denen die Betonoberfläche durch Witterungseinflüsse stets ausgesetzt ist, läßt sich aus den Bohrergebnissen der Cl^- -Kurve abschätzen. Die beiden Beispiele in Abb. 45 und 46 sollen die Chloridverteilung in Abhängigkeit von Feuchte- wechsel verdeutlichen.

1. Beispiel: Es ist nur Eigenchlorid vorhanden; es ist kein zusätzliches Chlorid (Tausalz) von außen eingedrungen (siehe Abb. 45)

Unter den Annahmen, daß zum Zeitpunkt des Bohrens der Beton trocken sei und das Cl^- im Beton ursprünglich gleichmäßig verteilt gewesen ist, ergibt sich eine Verteilung des Cl^- -Gehalts gemäß

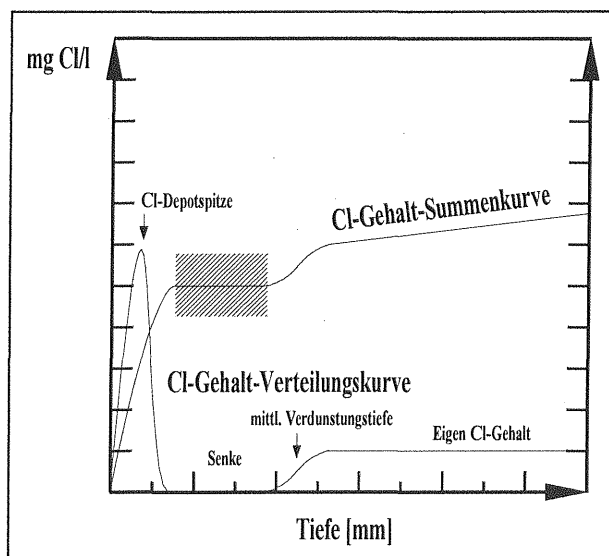


Abb. 45: Im Beton ist nur der Eigen-Chlorid-Gehalt vorhanden; die Summenkurve liegt im schraffierten Bereich parallel zur Tiefenachse; die Kurvenverläufe sind lediglich schematisch dargestellt

Abb. 45. Sie ist abhängig von der Eigenfeuchte, dem Feuchtenachschub aus dem Betoninneren, der Verdunstungsgeschwindigkeit und Kapillarität des Betons. Ein Teil der Chloride wird durch den Austrocknungsprozeß in die oberste Zone transportiert und kristallisiert dort aus (Depotspitze). Durch diesen Vorgang entsteht aber in einem tieferen Bereich eine „ Cl^- -Senke“.

Liegt eine solche temporäre Chloridverteilungskurve vor, kann davon ausgegangen werden, daß der Beton grundsätzlich trocken ist. Selbst wenn zusätzlich bereits eine große Karbonatisierungstiefe erreicht ist, muß nicht mit Korrosion gerechnet werden, da die Feuchte fehlt. Je weniger stark die „ Cl^- -Senke“ ausgeprägt ist, um so unsicherer ist die Aussage über den Trockenzustand.

2. Beispiel: Zusätzliches Chlorid wird von außen der Betonoberfläche angeboten und kann im Rahmen von Feuchte- wechseln eindiffundieren (siehe Abb. 46)

In diesem theoretischen Fall ist keine ausgeprägte Senke im Verlauf der Cl^- -Gehaltskurve infolge Austrocknung des chloridbehafteten Betons mehr erkennbar. Jedoch tritt in tieferen Zonen eine „Unregelmäßigkeit“ im Kurvenverlauf des mittleren Chloridgehalts auf. Diese „Unregelmäßigkeit“ stellt den Auslauf des eingedrungenen Chlorids in den Beton infolge des Huckepack-Transportes durch Wasser dar. In diesem Fall repräsentiert diese Stelle die Wassereindringtiefe. Liegt die Beweh-

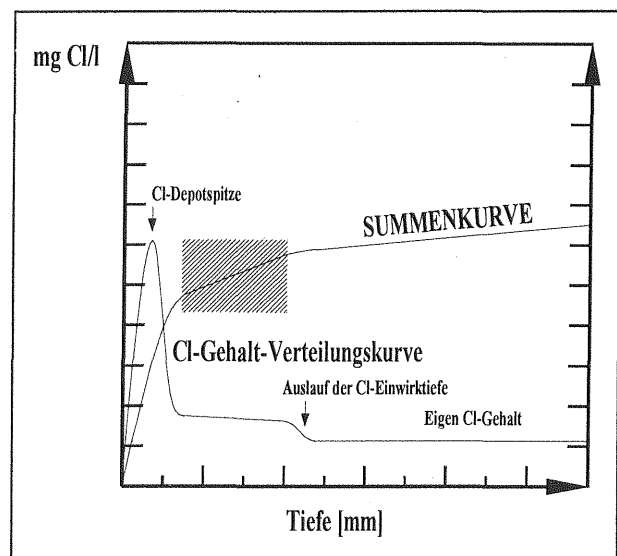


Abb. 46: Der Beton wird zusätzlich mit Chloriden beaufschlagt; im schraffierten Bereich zeigt die Summenkurve eine leichte Steigung gegenüber der Tiefenachse; die Kurvenverläufe sind lediglich schematisch dargestellt

rung in der Höhe der Wassereindringtiefe, so ist mit entsprechend mit der Korrosion zu rechnen. Liegt die Bewehrung tiefer, so ist der Korrosionsangriff zu diesen Zeitpunkt noch nicht zu erwarten.

Die vorgestellten Kurvenverläufe sind idealisiert dargestellt. Es bedarf einer gewissen Erfahrung, um anhand dieser idealisierten Kurvenverläufe die tatsächlich gemessenen Kurvenwerte sachgerecht interpretieren zu können.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Erfahrungen mit Instandsetzungsmaßnahmen in der Vergangenheit haben deutlich gemacht, daß möglichst frühzeitiges Erkennen und Beseitigen von Schäden ganz wesentlich zur Kostenreduzierung beiträgt. Bisher eingesetzte Prüfverfahren zur Bestimmung der Karbonatisierungstiefe und des Chloridgehaltes an Betonbauwerken reichen dazu oft nicht aus. Mit dem neu entwickelten Bohrverfahren läßt sich hingegen die Korrosionsgefährdung bereits zu einem Zeitpunkt abschätzen, da noch keine Schäden sichtbar sind. Deshalb wurde zur schnellen, aussagekräftigen und zerstörungsarmen Beschreibung der Korrosionsgefährdung das Bohrverfahren entwickelt, mit dem eine kombinierte In-Situ-Bestimmungen der Karbonatisierungstiefe und des Chloridgehaltes im Beton in Abhängigkeit von der Bohrtiefe vorgenommen werden kann.

Mit einem Diamanthohlbohrer, dessen Bohrtiefe kontinuierlich bestimmt wird, wird der Beton aufgeschlossen. Während dieses Vorganges wird eine Meßflüssigkeit durch den Hohlbohrer gepumpt und diese in einem Hydrozyklon von dem „groben“ Bohrklein getrennt. Die Meßflüssigkeit zirkuliert in einem geschlossenen Kreislauf. Sensoren messen kontinuierlich und zeitgleich den pH-Wert und Cl^- -Gehalt der Meßflüssigkeit im Hydrozyklon.

Bei kontinuierlicher Meßwerterfassung im Beton ist eine relativ ungleichmäßige Kurve der Cl^- -Verteilung zu erwarten. Sie erlaubt zusätzliche Interpretationsmöglichkeiten sowohl vor als auch während und nach einer Instandsetzungsmaßnahme. Dabei ist zu bedenken, daß jede Chloridmessung eine Momentaufnahme ist, da Cl^- nicht örtlich gebunden vorliegt, sondern durch Feuchtwechsel transportiert werden kann und auch wird. Bei den Cl^- -Untersuchungen an Bohrkernen und am Bohrklein mit den derzeit üblichen Methoden wird lediglich ein mittlerer Wert gefunden, der die tatsächliche örtliche Verteilung von Chlorid nicht erkennen läßt. Aus dem Vorhandensein bestimmter Chloridgehal-

te, die mit Hilfe des Bohrverfahrens in bestimmten Tiefen ermittelt worden sind, kann mit hinreichender Sicherheit nur auf einen mehr oder weniger hohen Gefährdungsgrad der Bewehrung geschlossen werden. Eine definitive Aussage über den Zusammenhang zwischen Chloridwert und Grad der Korrosionsgefährdung oder gar der Bewehrungskorrosion selbst ist nach dem derzeitigen Stand der Untersuchungstechnik noch nicht möglich.

Die Meßwerte werden mit Hilfe eines Kleinrechners aufbereitet und graphisch dargestellt. Die Meßergebnisse sind am Meßort sofort in Diagrammen verfügbar. Das Bohrgerät einschließlich des notwendigen Meßcomputers und des Druckers sind:

- zur Abschätzung des Risikos der Korrosionsbildung an Betonstahl und somit zur Abschätzung des aktuellen Zustandes eines Betonbauteils und
- zur Unterstützung vor Ort zu treffender Entscheidungen im Zusammenhang mit laufenden Instandsetzungsmaßnahmen geeignet.

Das Bohrverfahren kann, in Einzelfällen evtl. bereits bei der Bauwerksabnahme, zur Beurteilung der oberen Betonzone hinsichtlich zu erwartender Korrosionsgefährdung herangezogen werden. Weniger dichte Betone besitzen unterschiedlich stark ausgeprägte „Lagerstätten“ für Chloride aus dem Anmachwasser, die mit dem Verfahren gut detektierbar sind.

Das im Rahmen der bisherigen Untersuchungen entwickelte Verfahren berücksichtigt nur die Parameter pH-Wert im Hinblick auf die Karbonatisierung und Cl^- -Wert im Hinblick auf chloridinduzierte Korrosion. In dem Hydrozyklon können ohne Schwierigkeit jedoch auch andere ionenselektive Sensoren eingesetzt werden, mit denen beispielsweise im Rahmen des Denkmalschutzes die Beanspruchungen durch bauwerksschädliche Salze im erdnahen Bereich eines Bauwerkes bestimmt werden können. Trotz der genannten Einschränkungen stellen die mit dem Bohrverfahren gewonnenen Informationen eine wesentliche Unterstützung für die Fachwelt dar. Mit den Meßwerten sind der Bereich und die Art der Gefährdung beschreibbar, und zwar schon zu einem Zeitpunkt, da noch keine nennenswerte Korrosion eingetreten ist bzw. sichtbar ist. Mit einem solchen Verfahren zur Abschätzung der Korrosionsgefährdung des Betonstahls ist somit eine Prioritätenreihung der Bauwerke hinsichtlich erforderlicher Schutz- und Instandsetzungsmaßnahmen im Rahmen der verfügbaren finanziellen Mittel gut möglich.

8 Literatur

- [1] Schäden an Brücken und anderen Ingenieurbauwerken, Dokumentation 1994, Bundesministerium für Verkehr - Abteilung Straßenbau, Verkehrsblatt-Verlag 1994
- [2] BUDNIK, J., GROSSMANN, F.: Instandhaltung von Betonbauwerken, Praxiswissen für Ingenieure, Verlag TÜV Rheinland, Köln 1991
- [3] SCHIESSL, P., RAUPACH, M.: Sensorüberwachung der Bewehrung von Stahlbauwerken, Deutsche Bauzeitschrift, 12, 1994
- [4] JUNGWIRTH, D., BEYER, E., GRÜBEL, P.: Dauerhafte Betonbauwerke, Beton-Verlag, Düsseldorf 1986
- [5] VOLKWEIN, A.: Untersuchungen über das Eindringen von Wasser und Chlorid in Beton, Berichte aus dem Baustoffinstitut der TU München, Eigenverlag, Heft 1, 1991
- [6] LETSCH, R., SPRINGENSCHMID, R.: Chlorid- und Feuchteumverteilung in abgedichtetem Beton, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrssicherheit, Heft 591, S. 47, Herausgeber BMV, Bonn 1990
- [7] GATZ, H.-P., GUSIA, P. J.: Entwicklung eines Verpreßverfahrens mit fluoreszierendem Harz zur Strukturanalyse von Beton, Bundesanstalt für Straßenwesen, Abschlußbericht Juli 1996
- [8] CZERNIN, W. C.: Zementchemie für Bauingenieure, Bauverlag, Wiesbaden 1977
- [9] SCHRÖDER, F. et. al: Einfluß von Luftkohlen-säure und Feuchtigkeit auf die Beschaffenheit des Betons als Korrosionsschutz für Stahl-lagen, Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 182, Beuth-Verlag, Berlin 1967
- [10] BUNTE, D.: Zum karbonatisierungsbedingten Verlust der Dauerhaftigkeit von Außenbauteilen aus Stahlbeton, Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 436, S. 15, Beuth-Verlag, Berlin 1993
- [11] MEYER et. al.: Karbonatisierung von Schwerbeton, Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, (DAfStb) Heft 182, S. 8
- [12] Fa. Mettler Toledo, Anleitung zur ionenselektiven Messung, Steinbach/Ts
- [13] Anleitung zur Bestimmung des Chloridgehaltes von Beton, DAfStb, Heft 401

Anhang

Tab. 1: Zusammensetzung der einzelnen Betonprobekörper und gemittelte Meßwerte

Proben- Nr.	Korn [mm]	Zement [kg/m ³]	mittl. Cl ⁻ -Gehalt ¹⁾ [M-% bez. auf Zement]		Bohrverfahren Ø Cl ⁻ [mg/l]	pot. Titration Ø Cl ⁻ [mg/l]	Wiederfindungsrate [%]
			soll	ist			
1	2	3	4	5	6	7	8
1	0 - 2	500	0,25	0,19	8,4	10,5	80,8
2	0 - 4	460	0,50	0,37	12,2	16,2	75,1
3	0 - 8	430	0,25	0,15	3,6	5,5	65,7
4	0 - 16	390	0,50	0,37	8,5	11,4	74,8
5	0 - 32	350	0,50	0,34	3,9	5,3	74,1
6	0 - 32	350	0,10	0,13	3,5	4,2	85,4
7	0 - 32	350	0,20	0,14	4,8	5,8	83,6
8	0 - 32	350	0,50	0,38	5,9	7,6	77,9

¹⁾ Der in dieser Spalte angegebene Chloridgehalt ergibt sich ausschließlich aus der Chlorid-Zugabe zum Anmachwasser. Die Labor-Betonplatten wurden mit vollentsalztem Wasser, dem eine definierte Menge an Cl⁻ als chemisch reines Kochsalz (Na⁺Cl⁻) zugesetzt war, hergestellt. Der Eigenchloridgehalt des Zuschlages und des Zementes sowie dessen Umsetzung während der Hydratation wurden hierbei nicht berücksichtigt. Der Chlorid-Eigenanteil der Platten wurde an Referenzplatten ermittelt, jedoch bei der „Soll-Spalte“ nicht berücksichtigt.

An Zuschlägen wurden die Einzelkörnungen 0 - 2 mm, 2 - 4 mm, 4 - 8 mm, 8 - 16 mm und 16 - 32 mm verwendet. Die Platten wurden unter konstanten Bedingungen betoniert und gelagert. Der W/Z-Wert der Laborplatten betrug in allen Fällen 0,5.

Die Standardabweichungen s in den Tabellen 3 ff werden als $\bar{x}\sigma_n$ aufgeführt.

Die Platten der Versuchsreihen 1 bis 5 wurden am 01.07.1993 hergestellt und im Alter von 7 Monaten nach dem Bohrverfahren untersucht. Die Platten der Versuchsreihen 6 bis 8 wurden im Alter von 10 Monaten untersucht.

Tab. 2: Einzelwerte der Meßergebnisse an unterschiedlichen Betonproben
(Karbonatisierungstiefe ermittelt mit dem Bohrverfahren) ²⁾

Versuch	pH 10	Ø		Versuch	pH 10	Ø
Nr.	[mm]	[mm]		Nr.	[mm]	[mm]
1.1	1,1			5.1	< 1	
1.2	1,0			5.2	< 1	
1.3	1,1			5.3	< 1	
1.4	1,1	1,1		5.4	< 1	< 1
1.5	1,2			5.5	< 1	
1.6	1,2			5.6	< 1	
2.1	1,0			6.1	< 1	
2.2	< 1			6.2	1,0	
2.3	1,1			6.3	1,0	
2.4	1,0	1,1		6.4	1,0	1,0
2.5	1,3			6.5	1,0	
2.6	1,3			6.6	< 1	
3.1	1,7			7.1	< 1	
3.2	2,8			7.2	< 1	
3.3	1,0			7.3	< 1	
3.4	< 1	1,3		7.4	< 1	< 1
3.5	1,1			7.5	< 1	
3.6	< 1			7.6	< 1	
4.1	< 1			8.1	2,2	
4.2	< 1			8.2	< 1	
4.3	–			8.3	< 1	1,3
4.4	2,1	1,3		8.4	1,0	
4.5	1,2					

2) Hier ist zu beachten, daß die Indikatorlösung einen pH-Wert von ca. 9,5 hatte.

Die Platten wurden gezielt ausschließlich für die Chloriduntersuchung hergestellt. Die Platten der Versuchsreihen 1 bis 5 wurden am 01.07.1993 und im Alter von 7 Monaten nach dem Bohrverfahren untersucht. Die Platten der Versuchsreihen 6 bis 8 wurden im Alter von 10 Monaten untersucht. Die mit der Indikatorlösung ermittelte Karbonatisierungstiefe betrug in allen Fällen weniger als 1 mm bzw. ist nicht feststellbar. Die Ergebnisse des Bohrverfahrens liegen ebenfalls in diesem Bereich.

Tab. 3: Einzelwerte der Meßergebnisse an unterschiedlichen Betonproben (Karbonatisierungstiefe, ermittelt mit dem Bohrverfahren, an 10 alten Platten mit unterschiedlichen W/Z-Werten) 2)

Versuch Nr.	W/Z-Wert	pH 10	$\varnothing_{\text{pH 10}}$	Karbonatisierungsfront	$\varnothing_{\text{Karbonat-Front}}$	Phenolphthalein-Test
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
9.1	0,35	4,0	4,0	5,5	5,2	5 bis 6
9.2		5,8		7,0		
9.3		2,1		3,2		
9.4	0,40	2,7	2,6	7,6	6,5	7 bis 8
9.5		3,0		6,5		
9.6		2,2		5,4		
9.7	0,45	4,9	10,0	11,9	14,0	12 bis 16
9.8		15,1		16,0		
9.9	0,50	3,0	2,0	7,0	6,4	4 bis 8
9.10		1,5		3,8		
9.11		1,4		8,3		
9.12	0,60	6,0	5,4	9,0	9,3	15 bis 16
9.13		2,9		7,3		
9.14		7,4		11,7		
9.15	0,60	10,9	6,9	12,6	9,7	9-14
9.16		5,4		6,8		
9.17		4,5		9,8		
9.18	0,60	10,8	7,4	13,8	9,9	ca. 15
9.19		5,7		8,6		
9.20		5,8		7,2		
9.21	0,70	4,6	40	8,2	10,2	15 bis 17
9.22		3,4		12,2		
9.23	0,70	10,3	8,5	11,7	10,5	schräg verlaufend von 8 bis 18
9.24		6,9		8,6		
9.25		6,1		10,2		
9.26		10,8		11,4		

- 2) Hier ist zu beachten, daß im Phenolphthalein-Test auf frischer Bruchfläche, ein pH von ca. 9,5 anzeigt.

Tab. 4: Chloridgehalte nach potentiometrischer Titration und nach dem Bohrverfahren,
Platte aus Normsand 0 - 2 mm

Nr.	Bohrverfahren [mg/l]	Potent. Titration [mg/l]	Wiedergefunden mit dem Bohrverfahren [%]
1.1	9,6	10,6	90,7
1.2	8,9	10,6	83,9
1.3	8,2	10,6	77,3
1.4	8,5	10,6	80,2
1.5	7,6	10,2	74,6
1.6	7,9	10,2	77,5
∅	8,4 s = 0,66	10,5 s = 0,19	80,8

Bemerkungen: Platte 1 mit 500 kg/m³ Zementgehalt; im Mittel werden bei der Sieblinie 0 - 2 mm, bezogen auf die potentiometrische Titration, rd. 81 % der Chloride im alkal. Bereich erfaßt.

Tab. 5: Chloridgehalte nach potentiometrischer Titration und nach dem Bohrverfahren,
Platte aus Normsand 0 - 4 mm

Nr.	Bohrverfahren [mg/l]	Potent. Titration [mg/l]	Wiedergefunden mit dem Bohrverfahren [%]
2.1	12,0	16,8	71,3
2.2	12,4	16,1	75,5
2.3	10,7	16,4	65,3
2.4	12,8	16,2	79,1
2.5	13,5	16,4	82,3
2.6	12,0	15,5	77,4
∅	12,2 s = 0,86	16,2 s = 0,39	75,1

Bemerkungen: Platte 2 mit 460 kg/m³ Zementgehalt; im Mittel werden bei der Sieblinie 0 - 4 mm, bezogen auf die potentiometrische Titration, rd. 75 % der Chloride im alkal. Bereich erfaßt.

Tab. 6: Chloridgehalte nach potentiometrischer Titration und nach dem Bohrverfahren, Platte aus Normsand 0 - 8 mm

Nr.	Bohrverfahren [mg/l]	Potent. Titration [mg/l]	Wiedergefunden mit dem Bohrverfahren [%]
3.1	4,3	6,9	62,3
3.2	3,3	5,3	62,2
3.3	3,3	5,5	60,0
3.4	3,3	5,1	64,7
3.5	3,6	5,7	63,2
3.6	3,6	4,4	81,8
∅	3,6 s = 0,35	5,5 s = 0,75	65,7

Bemerkungen: Platte 3 mit 430 kg/m³ Zementgehalt; im Mittel werden bei der Sieblinie 0 - 8 mm, bezogen auf die potentiometrische Titration, rd. 66 % der Chloride im alkal. Bereich erfaßt.

Tab. 7: Chloridgehalte nach potentiometrischer Titration und nach dem Bohrverfahren, Platte aus Normsand 0 - 16 mm

Nr.	Bohrverfahren [mg/l]	Potent. Titration [mg/l]	Wiedergefunden mit dem Bohrverfahren [%]
4.1	8,8	12,4	71,0
4.2	10,0	13,3	75,2
4.3	8,6	11,0	78,2
4.4	9,2	11,4	80,8
4.5	6,0	8,7	69,0
∅	8,5 s = 1,35	11,4 s = 1,55	74,8

Die 6. Messung wurde nicht auf dieser Platte durchgeführt.

Bemerkungen: Platte 4 mit 390 kg/m³ Zementgehalt; im Mittel werden bei der Sieblinie 0 - 16 mm, bezogen auf die potentiometrische Titration, rd. 75 % der Chloride im alkal. Bereich erfaßt.

Tab. 8: Chloridgehalte nach potentiometrischer Titration und nach dem Bohrverfahren,
Platte aus Normsand 0 - 32 mm

Nr.	Bohrverfahren [mg/l]	Potent. Titration [mg/l]	Wiedergefunden mit dem Bohrverfahren [%]
5.1	5,0	6,4	78,1
5.2	4,0	5,7	70,2
5.3	4,1	5,6	73,2
5.4	3,6	4,4	81,8
5.5	3,0	4,7	63,8
5.6	3,8	4,9	77,6
∅	3,9 s = 0,60	5,3 s = 0,68	74,1

Bemerkungen: Platte 5 mit 350 kg/m³ Zementgehalt; im Mittel werden bei der Sieblinie 0 - 32 mm, bezogen auf die potentiometrische Titration, rd. 74 % der Chloride im alkal. Bereich erfaßt.

Tab. 9: Chloridgehalte nach potentiometrischer Titration und nach dem Bohrverfahren,
Platte aus Normsand 0 - 32 mm

Nr.	Bohrverfahren [mg/l]	Potent. Titration [mg/l]	Wiedergefunden mit dem Bohrverfahren [%]
6.1	3,2	5,3	60,4
6.2	3,2	3,5	91,4
6.3	3,2	3,5	91,4
6.4	3,7	3,7	100,0
6.5	3,5	3,9	89,7
6.6	4,2	5,3	79,3
∅	3,5 s = 0,37	4,2 s = 0,79	85,4

Bemerkungen: Platte 6 mit 350 kg/m³ Zementgehalt; im Mittel werden bei der Sieblinie 0 - 32 mm, bezogen auf die potentiometrische Titration, rd. 85 % der Chloride im alkal. Bereich erfaßt.

Tab. 10: Chloridgehalte nach potentiometrischer Titration und nach dem Bohrverfahren, Platte aus Normsand 0 - 32 mm

Nr.	Bohrverfahren [mg/l]	Potent. Titration [mg/l]	Wiedergefunden mit dem Bohrverfahren [%]
7.1	6,2	7,0	88,6
7.2	4,2	5,3	79,3
7.3	4,9	5,5	91,4
7.4	5,3	5,7	89,1
7.5	4,2	5,7	73,7
7.6	4,2	5,3	79,3
∅	4,8 s = 0,74	5,8 s = 0,58	83,6

Bemerkungen: Platte 7 mit 350 kg/m³ Zementgehalt, im Mittel werden bei der Sieblinie 0 - 32 mm, bezogen auf die potentiometrische Titration, rd. 84 % der Chloride im alkal. Bereich erfaßt.

Tab. 11: Chloridgehalte nach potentiometrischer Titration und nach dem Bohrverfahren, Platte aus Normsand 0 - 32 mm

Nr.	Bohrverfahren [mg/l]	Potent. Titration [mg/l]	Wiedergefunden mit dem Bohrverfahren [%]
8.1	7,0	9,1	76,9
8.2	4,4	6,2	71,0
8.3	6,9	7,1	97,2
8.4	5,3	8,0	66,3
∅	5,9 s = 1,10	7,6 s = 1,07	77,9

Die 5. und 6. Messung wurde nicht auf dieser Platte durchgeführt.

Bemerkungen: Platte 8 mit 350 kg/m³ Zementgehalt; im Mittel werden bei der Sieblinie 0 - 32 mm, bezogen auf die potentiometrische Titration, rd. 78 % der Chloride im alkal. Bereich erfaßt.

