

# Ermittlung und Beurteilung der Bewehrungskorrosion

Autor(en): **Menn, Christian**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **116 (1998)**

Heft 16/17

PDF erstellt am: **21.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-79484>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern. Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

**Massnahmen, 1997**

In einer ersten Phase wurden Instandsetzungsvarianten ausgearbeitet. Die Massnahmen mussten die von der Bauherrschaft formulierten Zielsetzungen erfüllen. Folgende vier Varianten wurden näher untersucht:

- Betonabtrag und Reprofilierung mit Spritzbeton
- Betonabtrag und Betonummantelung

- Kathodischer Korrosionsschutz
  - Elektrochemische Chloridentfernung
- Nach eingehender Abwägung der Vor- und Nachteile der einzelnen Instandsetzungsverfahren entschieden sich die Beteiligten dafür, den chloridhaltigen Beton zu entfernen und die Pfeiler mit Beton auf der ganzen Höhe zu ummanteln (Bilder 19 und 20).

Adresse der Verfasser:

*Rudolf Vögeli*, dipl. Bauing. ETH SIA, *Hugo Moretti*, dipl. Bauing. HTL, *Manuel Schmid*, dipl. Bauing. ETH SIA, Ernst Winkler + Partner AG, Rikonstrasse 4, 8307 Effretikon

Christian Menn, Chur

## Ermittlung und Beurteilung der Bewehrungskorrosion

**Korrosionsprobleme bei Stahlbetontragwerken wurden lange Zeit vernachlässigt. Es wurde angenommen, dass Bewehrungskorrosion mit expositionsabhängiger Dicke der Betonüberdeckung der Bewehrung, mit Rissverteilung und Rissbreitenbeschränkung vollständig vermieden werden könne. Inzwischen weiss man aber, dass damit ein dauerhaftes Verhalten von Stahlbeton nicht gewährleistet werden kann. Gravierende Schäden (vor allem infolge Salzeinwirkung), aufwendige Zustandserfassungen und sehr teure Instandsetzungsarbeiten rückten deshalb in den letzten Jahren die Probleme der Bewehrungskorrosion immer mehr in den Vordergrund.**

Vor 40 Jahren glaubte man, die Sicherheit und das Verhalten eines Bauwerks sei um so besser, je genauer die Spannungen ermittelt würden. Man wollte sich nicht mehr nur auf die seit Mörsch bekannten Eckwerte der Eisenbetonbauweise «Gleichgewicht und Fachwerkanalogie» verlassen und begnügte sich auch nicht mit einer Weiterentwicklung dieser einfachen Bemessungsgrundlagen. Auf der axiomatischen Voraussetzung elastischen Materialverhaltens (Elastizitätstheorie) wurden für Stab- und Flächentragwerke infolge Last, Zwang und Vorspannung (und unter Berücksichtigung von Schwinden und Kriechen) exakte Lösungen und Spannungen berechnet. Seit der Bemessung auf Tragsicherheit dienen solche Berechnungen (jedenfalls bei den meisten Ingenieuren) jedoch höchstens noch als Orientierungshilfen; man hat gelernt, dass bei erfülltem Gleichgewicht und einer generel-

len Überprüfung des elastischen Verhaltens im Gebrauchszustand keine statischen Nachteile zu erwarten sind. Unzählige nicht vorhersehbare Sekundäreinwirkungen insbesondere aus der Bauausführung bewirken, dass vermeintlich genaue Spannungsberechnungen ohnehin immer illusorisch sind. Andererseits muss nun aber die Dauerhaftigkeit vor allem mit konstruktiven Massnahmen gewährleistet werden, und bei Schäden und Instandsetzungsarbeiten müssen Ausmass und Auswirkung der Korrosion rechnerisch überprüft werden.

Auch bei der Untersuchung von Korrosionsproblemen gibt es zwei wichtige Eckwerte: die Depassivierung und die Korrosionsgeschwindigkeit. Unter Depassivierung versteht man die Beschädigung oder Zerstörung des Passivfilms auf der Bewehrung. Dadurch wird es möglich, dass der Korrosionsprozess (bei ausreichender Betonfeuchtigkeit und -porosität und genügendem Sauerstoffzutritt zur Bewehrung) überhaupt einsetzen kann. Als Korrosionsgeschwindigkeit wird der durchschnittliche Gewichts- oder Querschnittsverlust pro Zeiteinheit bezeichnet. Diese Eckwerte sind qualitativ seit einiger Zeit bekannt; aber wie beim Bemessungsproblem bemüht man sich heute nicht nur um ein vertieftes Verständnis dieser Grundlagen, man setzt sich offenbar das Ziel, genaue Lösungen für die Korrosionsvorgänge zu erarbeiten. Dies zeigen Sätze aus wissenschaftlichen Arbeiten wie z.B.: «Die Korrosionsgeschwindigkeiten sind momentane Werte, welche mit den Einwirkungen der Umwelt (Temperatur, Feuchtigkeit) schwanken. Für eine Lebensdauerberechnung bzw. Abschätzung des Zeitpunkts einer Instandsetzung sind jedoch gewichtete Angaben über den

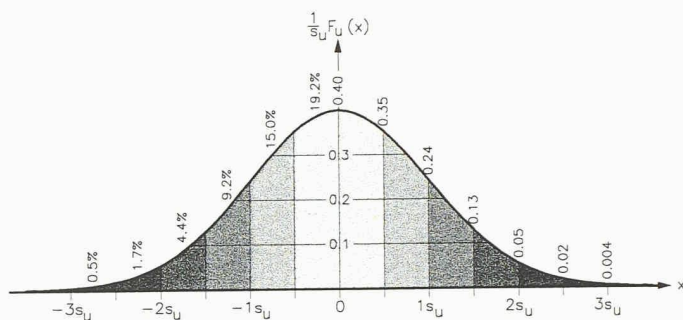
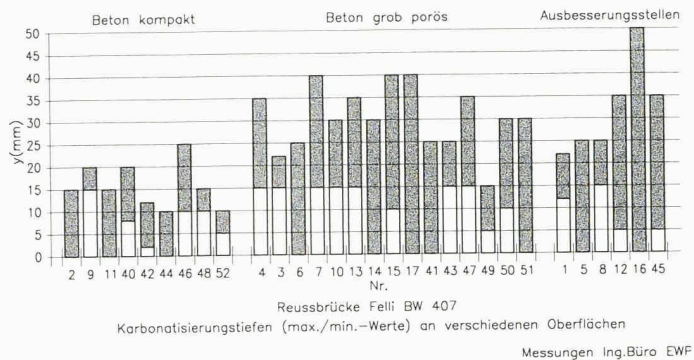
Querschnittsverlust pro Jahr erforderlich.» Mit Blick auf die grosse Streuung der für die Depassivierung und Korrosionsgeschwindigkeit primär massgebenden Parameter Betondeckung, Karbonisierungstiefe, Chloridgehalt, Dynamik des Feuchtigkeitsprofils im Beton, Betonporosität, Sauerstoffangebot, Temperatur usw. dürfte eine einigermaßen zuverlässige Prognostizierung des Querschnittsverlusts genau so unzuverlässig und illusorisch sein wie eine exakte Spannungsrechnung; ganz abgesehen davon, dass oft auch noch zeitabhängig wirksame Parameteränderungen durch Instandsetzungsarbeiten und Betonschutzmassnahmen zu berücksichtigen wären. Schliesslich müsste auch noch die Bewehrungsverteilung und die in einem künftigen Zeitpunkt zulässige Sicherheitseinbusse berücksichtigt werden, und die Grundlage dieser ausufernden Ermittlungen wäre eine entsprechend umfangreiche und aufwendige Zustandserfassung.

Es dürfte deshalb viel effizienter sein, von einer einfachen, die Korrosionseckwerte berücksichtigenden Methodik auszugehen und die Unschärfen dieser Methodik aufgrund gezielter wissenschaftlicher Untersuchungen abzubauen.

### Konzept für die Beurteilung der Bewehrungskorrosion

In der Regel ist es nicht so, dass die Bewehrung eines Bauwerks oder eines Bauteils rostet oder nicht rostet. Wegen der starken Streuung der Parameterwerte rostet im allgemeinen nur ein Teil der Bewehrung.

Die Ermittlung und Beurteilung der Bewehrungskorrosion ist deshalb mit Blick auf die ursächlichen, relativ stark streuenden und interdependenten Parameter ein probabilistisches Problem, das nicht im Sinne von zulässigen bzw. unzulässigen Parameterwerten gelöst werden kann.



1  
Karbonisierungstiefen. Messungen an der Fellbrücke

2  
Normalverteilung  $F_u$  einer Variablen  $u$

Das Ziel der Zustandsbeurteilung muss darin bestehen, mit einer möglichst einfachen wahrscheinlichkeitstheoretischen Berechnung zu überprüfen, ob der Anteil der depassivierten Bewehrung bzw. die Depassivierungswahrscheinlichkeit der Bewehrung unter Berücksichtigung der Korrosionsgeschwindigkeit und weiterer Begleitumstände bezüglich Tragsicherheit und eventuell Gebrauchstauglichkeit (Aussehen) zulässig ist oder nicht.

Es müssen somit aufgrund der Ergebnisse der Zustandserfassung in konstruktiv und korrosionsgefährdet ähnlichen Bereichen zunächst

- die Depassivierungswahrscheinlichkeit und
- die Korrosionsgeschwindigkeit ermittelt werden, wobei die Zuverlässigkeit dieser Ermittlung (aus der Sicht des Konstrukteurs) etwa so beschaffen sein sollte, dass das Schadenausmass höchstens mit einer Wahrscheinlichkeit von 10% un-

terschätzt und mit einer Wahrscheinlichkeit von ~30 bis 50% überschätzt wird.

### Ermittlung der Depassivierungswahrscheinlichkeit

Die Depassivierung erfolgt in den weitaus meisten Fällen durch die Zerstörung des Passivfilms auf der Bewehrung infolge Chlorideinwirkung oder Reduktion des pH-Werts des Porenwassers infolge Karbonatisierung.

Die Depassivierungswahrscheinlichkeit sollte immer für einzelne konstruktiv ähnliche Bauteilbereiche mit annähernd gleicher Korrosionsgefährdung (Chloridgehalt, Karbonatisierung, Betonfeuchtigkeit, Betonporosität usw.) ermittelt werden; z.B. bei Chlorideinwirkung Bereiche mit Kontaktwasser und intensivem Spritzwasser, Übergangszonen mit sporadischem Kontaktwasser und schwachem Spritzwasser, Bereiche mit Sprühnebel; oder bei Karbonatisierung berechnete Bereiche, trockene Bereiche, kompakte Betonflächen, grob poröse Betonflächen, ausgebesserte Kiesnester usw.

Man kann die Depassivierungswahrscheinlichkeit entweder mit zerstörungsfreien Potentialfeldmessungen oder auf Grund von Betonproben ermitteln. Die Interpretation der Potentialmessungen muss von erfahrenen Fachleuten durchgeführt werden, da die Messungen nicht nur von der aktiven Korrosion, sondern auch von der Chloridkonzentration und vom Feuchtegehalt im Beton abhängig sind. Der prozentuale Anteil der korrodierenden Bewehrung wird in der Regel aus der Summenhäufigkeit der Potentialwerte im Wahrscheinlichkeitsnetz bestimmt [1].

Da die Korrosionsgeschwindigkeit variabel ist, liefert die Potentialmessung (insbesondere in relativ trockenen, karbonatisierten Bauteilbereichen, wo die

Korrosion zeitweise ganz zum Stillstand kommt) nur einen unteren Grenzwert für die Depassivierungswahrscheinlichkeit.

### Depassivierung infolge Karbonatisierung

Die Depassivierung der Bewehrung erfolgt, wenn die Karbonatisierungstiefe grösser ist als die Betondeckung der Bewehrung. Die Depassivierungswahrscheinlichkeit infolge Karbonatisierung wird somit durch die beiden (streuenden) Parameter Karbonatisierungstiefe und Betondeckung der Bewehrung bestimmt. Für eine einfache, approximative Berechnung können beide Parameter gestützt auf die entsprechenden Messungen als «normalverteilt» angenommen werden.

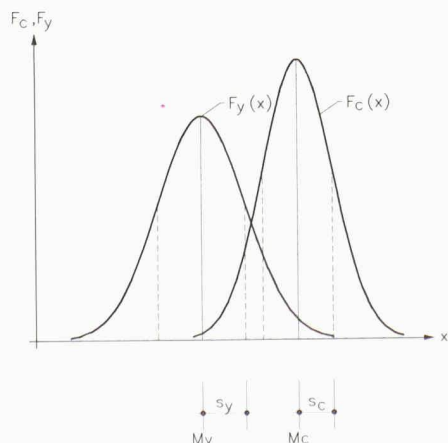
Die Messung der Karbonatisierungstiefe weist bereits an einem Bohrkern oder einer Spitzstelle beträchtliche Streuungen auf (Bild 1). Der zeitliche Verlauf der Karbonatisierungstiefe ist von dynamischen (zeitlich veränderlichen) Parametern (insbesondere Betonfeuchtigkeit und Betondurchlässigkeit) abhängig. Die Geschwindigkeit der Eindringtiefe nimmt i.a. wesentlich schneller ab als nach dem  $\sqrt{t}$ -Gesetz (stationäre Gesetzmässigkeit) [1][2].

Bei der Ermittlung des Spektrums der Karbonatisierungstiefe ist es sinnvoll, an jeder Messstelle den oberen und unteren Extremwert einfach und den Mittelwert vierfach zu berücksichtigen.

In Bild 2 ist - entsprechend der Häufigkeit  $F$  (Frequency) einer Variablen  $u$  - die aus dem Mittelwert  $M_u$  und der Standardabweichung  $s_u$  abgeleitete «normalisierte» Häufigkeits- bzw. Dichteverteilung (Gauss'sche Normalverteilung) dargestellt (Bild 2).

Die Depassivierungswahrscheinlichkeit infolge Karbonatisierung ergibt sich mit den Variablen  $y$  (Karbonisierungstiefe) und  $c$  (Betondeckung) aus der Be-

3  
Normalverteilte Variable  $y$  (Karbonisierungstiefe) und  $c$  (Betondeckung der Bewehrung)



dingung  $y > c$  (Bild 3). Aus den normalverteilten Spektren der

- Betondeckung der Bewehrung  $c$ 
    - mit dem Mittelwert  $M_c$
    - und der Standardabweichung  $s_c$
  - und der
  - Karbonatisierungstiefe  $y$ 
    - mit dem Mittelwert  $M_y$
    - und der Standardabweichung  $s_y$
- ergibt sich das Spektrum der Summe  $\Psi = c - y$
- mit dem Mittelwert  $M_\Psi = M_c - M_y$
  - und der Standardabweichung  $s_\Psi = \sqrt{s_c^2 + s_y^2}$ .

Die Depassivierungswahrscheinlichkeit  $p_d$  entspricht dem Anteil  $\Psi < 0$ , der sich aus

$$M_\Psi - \beta s_\Psi = 0 \quad \text{bzw.} \quad \beta = M_\Psi / s_\Psi$$

ermitteln lässt. Die entsprechenden Werte für  $p_d$  sind in der untenstehenden Tabelle angegeben:

$\beta$	$p_d$	$\beta$	$p_d$	$\beta$	$p_d$
0	0,5	1,0	0,16	2,5	0,01
0,25	0,40	1,5	0,07	3,0	0,002
0,75	0,23	2,0	0,02	3,5	0

### Depassivierung infolge Chlorideinwirkung

Bei der Ermittlung der Depassivierungswahrscheinlichkeit aus Chloridprofilen werden in massgebenden Stellen des jeweiligen Bereichs (z.B. bei Stützen oder Galeriewänden mit den Höhenbereichen 0-1,5 m: starkes Spritzwasser; 1,5-3,0 m: schwaches Spritzwasser; über 3,0 m: Sprühnebel, auf den Höhenlagen 0,1 m, 1,6 m und 3,1 m) Bohrkern entnommen und aus dem Chloridgehalt in zwei wichtigen Betontiefen  $x$  (etwa  $x = 15$  mm und  $x = 45$  mm) kann durch lineare Verbindung der beiden Messwerte das Chloridprofil bestimmt werden. An Stelle von Bohrkernen können auch Bohrmehlproben (Mittel aus Dreiergruppen) zur Bestimmung des Chloridgehalts verwendet werden [3].

Der kritische Chloridgehalt (für Depassivierung) beträgt bezogen auf das Zementgewicht etwa 0,4% [4], wobei zu beachten ist, dass der Zementgehalt des Betons insbesondere in den oberflächennahen Schichten sehr grosse Streuungen aufweisen kann [3]. Der approximative Wert von 0,4% wird somit zusätzlich relativiert, wenn er auf das theoretische bzw. mittlere Zementgewicht bezogen wird.

Bei jedem Chloridprofil wird die Betontiefe  $z$  bestimmt, die dem Chloridgehalt von 0,4% Z.-Gew. entspricht. Damit erhält man die Tiefenverteilung des kritischen Chloridgehalts von 0,4% Z.-Gew., die normalverteilt angenommen werden kann.

Aus den Parametern  $z$  (Betontiefe des kritischen Chloridgehalts) und  $c$  (Betondeckung) kann nun wieder wie bei der Depassivierung infolge Karbonatisierung die Depassivierungswahrscheinlichkeit berechnet werden. Sie ergibt sich wieder aus der Bedingung  $z > c$  bzw.  $\Psi = c - z$ .

Auf Grund persönlicher Erfahrungen bei der Zustandserfassung von Brücken der A2 im Kanton Uri ist es zuverlässiger, die Depassivierungswahrscheinlichkeit bei Depassivierung infolge Karbonatisierung aus den gemessenen Karbonatisierungstiefen und bei Depassivierung infolge Chlorideinwirkung aus Potentialmessungen zu ermitteln. Bei umfangreichen Instandsetzungsarbeiten lohnt sich natürlich die Ermittlung der Depassivierungswahrscheinlichkeit aus Potentialmessungen und Chloridproben, da für die Instandsetzung ohnehin Chloridprofile aufgenommen werden müssen.

### Korrosionsgeschwindigkeit

Die Korrosionsgeschwindigkeit ist hauptsächlich von der Korrosionsart (gleichmässige oder lokale Korrosion bzw. Lochfrasskorrosion), der elektrischen Leitfähigkeit des Betons (insbesondere Betonfeuchtigkeit, Mikroklima), Betonporosität und Zementsorte) und von der Temperatur abhängig. Wegen der unter Umständen starken Schwankung der Betonfeuchtigkeit ist die Korrosionsgeschwindigkeit variabel. Für eine generelle, langfristige Beurteilung der Korrosion spielt die Temperatur eine vernachlässigbare Rolle. In der Regel genügt es sogar, wenn man die Korrosionsgeschwindigkeit nur auf Grund der Leitparameter Korrosionsart und Betonfeuchtigkeit infolge Mikroklima beurteilt; denn aus bautechnischen Gründen ist eine Unterteilung in relativ kleine Bauteilbereiche mit leicht unterschiedlichem Korrosionszustand und verschiedenartigen Instandsetzungsmassnahmen heikel und unwirtschaftlich; und Instandsetzungsarbeiten können und dürfen wegen der Verkehrsbehinderungen und Nebenkosten (Installationen, Gerüste usw.) nur umfassend, in relativ grossen Zeitabständen durchgeführt werden.

Es genügt somit für den Konstrukteur vollauf, wenn die Korrosionsgeschwindigkeit nur mit drei Gradienten erfasst wird:

- Hohe Korrosionsgeschwindigkeit; massive Korrosionsnarben in 0 bis 15 Jahren nicht ausschliessbar
- Mittlere Korrosionsgeschwindigkeit; massive Korrosionsnarben im Zeitraum von 15 bis 50 Jahren nicht ausschliessbar

- Kleine Korrosionsgeschwindigkeit; massive Korrosionsnarben frühestens nach 50 Jahren zu erwarten

Unter Berücksichtigung des eingangs erwähnten Kriteriums, dass das Schaden ausmass höchstens mit einer Wahrscheinlichkeit von 10% unterschätzt und mit einer Wahrscheinlichkeit von ~30 bis 50% überschätzt werden darf, können die Korrosionsgeschwindigkeiten nach folgenden Kriterien festgelegt werden:

- Hohe Korrosionsgeschwindigkeit, wenn Lochfrass nicht ausgeschlossen werden kann: Hoher Chloridgehalt über 0,8% Z.-Gew. im Kontakt- und starken Spritzwasserbereich.
- Mittlere Korrosionsgeschwindigkeit, wenn Lochfrass mit etwa 90% Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden kann: Kleiner Chloridgehalt, karbonatisierte Bereiche beregnet oder oft in hoher Luftfeuchtigkeit
- Kleine Korrosionsgeschwindigkeit, bei karbonatisierten Bauteilbereichen ohne Beregung in normaler Luftfeuchtigkeit

### Zusätzliche Kriterien bei der Beurteilung der Bewehrungskorrosion

Bei der Festlegung des zulässigen Anteils der korrosionsgefährdeten Bewehrung bzw. der zulässigen Depassivierungswahrscheinlichkeit müssen nebst dem Leitparameter Korrosionsgeschwindigkeit noch andere Parameter in Betracht gezogen werden. Es sind dies:

- Sicherheitsrelevanz,
- Stabdurchmesser und
- Anordnung bzw. Konzentration der gefährdeten Bewehrung sowie
- Zeithorizont der Nutzungsdauer des Bauwerks und
- Aussehen der korrosionsgefährdeten Bauteilbereiche (insbesondere Sprengrisse und Abplatzungen).

Die Normen enthalten heute noch keine verbindlichen Angaben über die quantitative Bewertung der Bewehrungskorrosion, weil offenbar immer noch die Meinung besteht, man könne früher oder später auf Grund einer umfassenden Zustandserfassung und des Mikroklimas die (Korrosions-)Narbentiefe genau ermitteln bzw. prognostizieren und dann eine zulässige Sicherheitseinbusse normieren. Vorläufig muss deshalb der Konstrukteur eigenverantwortlich die zulässige Depassivierungswahrscheinlichkeit festlegen. Wenn dies in der vorgeschlagenen, transparenten Form erfolgt, kann dem Werk Eigentümer/Auftraggeber klar dargelegt werden, was ohne oder mit Instandsetzungsmassnahmen etwa zu erwarten ist.

**Instandsetzung durch Betonab- bzw. -auftrag**

Instandsetzungen durch Abtrag des karbonatisierten oder chloridkontaminierten Oberflächenbetons und Auftrag einer Neubetonerschicht sind zwar teuer, andererseits aber zuverlässig und dauerhaft. Der Abtrag erfolgt mit dem Hochdruckwasserstrahl, der Auftrag mit Spritzbeton oder mit einem gegossenen Vor- bzw. Überbeton. Der Abtrag ist mit einer gewissen Substanzschädigung verbunden. Diese ist aber abgesehen von Stützen in der Regel im Bewehrungsbereich (Zugzone) nicht von Bedeutung. Bei hochbeanspruchten Stützen ist im Blick auf die Substanzschädigung durch den Abtrag ein bewehrter Vorbeton in der Regel am zweckmässigsten.

Der Auftrag muss sorgfältig durchgeführt, und die freigelegte Bewehrung muss einwandfrei gereinigt werden. Durch den Abtrag ist eine ausreichende Rauigkeit der Altbetonfläche gewährleistet. Eine Verdübelung von Alt- und Neubeton ist insbesondere in den Endbereichen und in den Zugkrafteinleitungen erforderlich. Die Dübel können als «Zugdübel» bemessen werden [5]. Die Altbetonfläche muss beim Auftrag des Neubetons feuchtigkeitsgesättigt sein. Spritzbeton muss fachgemäss aufgetragen werden. Eine sorgfältige Nachbehandlung der Neubetonerschicht ist unbedingt notwendig, und der Neubeton sollte nach der Erhärtung einen kleineren E-Modul aufweisen als der Altbeton.

Es ist falsch, wenn vorgeschrieben wird, dass der Altbeton bis unter die Bewehrung abzutragen sei. Abtrag ist teuer. Lokale Depassivierung (sehr kleines Verhältnis von Anode zu Kathode) ist nach der Instandsetzung normalerweise nicht wahrscheinlicher als vor der Instandsetzung. Allenfalls kann für den Depassivierungsbereich nach der Instandsetzung mit hoher Korrosionsgeschwindigkeit gerechnet werden. Die Betondeckung kann unter Umständen wesentlich grösser sein als die planmässige; die Bewehrung befindet sich dann oft bereits tief im «gesunden» Beton. Es würden (bei Abtrag unter die Bewehrung) unnötige Kosten und Substanzschädigungen entstehen. Es ist auch unbedingt zu beachten, dass Bewehrungen, die über eine gewisse Länge freigelegt werden, in diesem Zustand meistens wirkungslos sind.

Die Dicke des Abtrags muss deshalb auf Grund der zulässigen Depassivierungswahrscheinlichkeit aus der Karbonisierungstiefe oder aus den Chloridprofilen berechnet werden.

**Berechnung der Abtragsdicke x<sub>0</sub> bei Karbonatisierung**

Nach dem Abtrag des Altbetons bis auf die Tiefe x = x<sub>0</sub> und dem Auftrag des Neubetons ist die Verteilungskurve der Karbonisierungstiefe nur noch im Altbeton gleich wie vorher. Im Neubeton ist die Karbonisierungstiefe (zunächst) Null; der frühere Verteilungsanteil der Karbonisierungstiefe y (im Abtrag) konzentriert sich vollständig auf die Oberfläche (x = 0).

Nach dem Ab- bzw. Auftrag befindet sich in der Regel ein Teil der Bewehrung mit dem der Betondeckung entsprechenden höchsten bzw. vordersten Punkt des Stabdurchmessers im Neubeton, mit dem tiefsten bzw. hintersten Punkt des Durchmessers jedoch in der nicht abgetragenen, karbonisierten Schicht des Altbetons. Es sind somit für die Berechnung der Depassivierungswahrscheinlichkeit zwei Bereiche zu unterscheiden:

Bereich 1, bei dem die Bewehrung teilweise, und höchstens mit der tiefsten Stelle des Stabumfangs vollständig über dem karbonisierten Altbeton liegt (Bewehrungsumfang berührt/schneidet Kontaktfläche x<sub>0</sub>):

$$x_0 - \phi < c < x_0 < y$$

Bereich 2, bei dem die höchste Stelle des Stabumfangs unter der Kontaktfläche x<sub>0</sub> (d.h. vollständig im Altbeton liegt):

$$x_0 < c < y \quad (\text{Bild 4})$$

Die Depassivierungswahrscheinlichkeit p<sub>d</sub> lässt sich mit (absolut) ausreichender Genauigkeit numerisch ermitteln. Es genügen dabei zwei bis höchstens drei Abschnitte auf der Betontiefe x (etwa entsprechend dem Bewehrungsdurchmesser ø oder der Standardabweichung s<sub>c</sub>).

Auf eine mögliche Berücksichtigung der Rekarbonatisierung des Altbetons durch den Neubeton kann verzichtet werden; die entsprechende, günstige Auswirkung auf die erforderliche Abtragsdicke ist unbedeutend im Vergleich zur Bau- bzw. Abtragungsgenauigkeit.

Im Bereich 1 beträgt die Depassivierungswahrscheinlichkeit

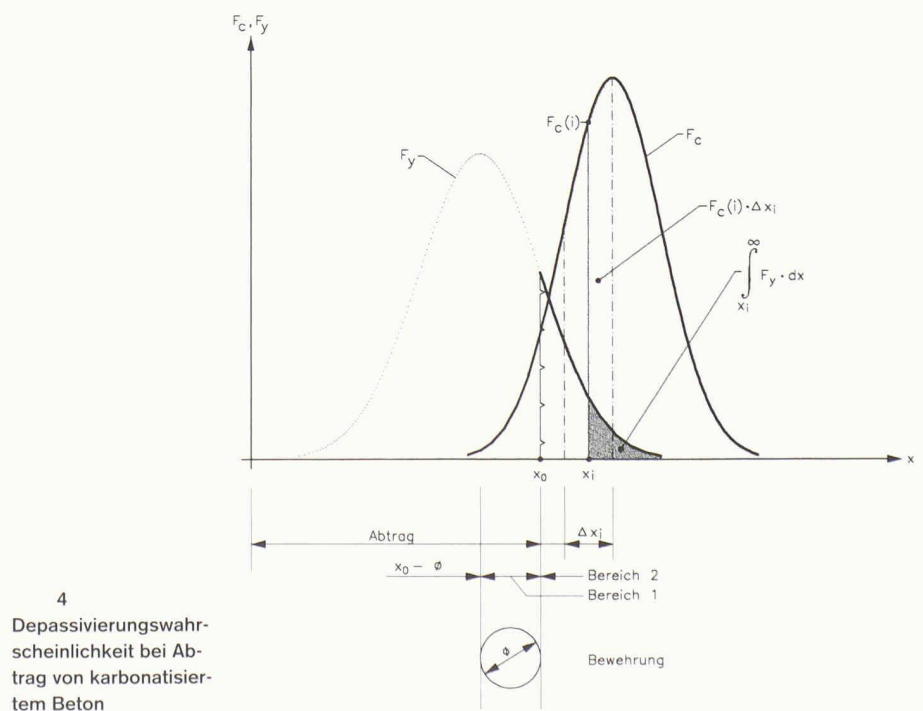
$$P_{d1} = \sum_{x_0 - \phi}^{x_0} \left[ F_c(i) \cdot \Delta x_i \int_{x_0}^{\infty} F_y \cdot dx \right]$$

Im Bereich 2 beträgt die Depassivierungswahrscheinlichkeit

$$P_{d2} = \sum_{x_0}^{\infty} \left[ F_c(i) \cdot \Delta x_i \int_{x_i}^{\infty} F_y \cdot dx \right]$$

Die gesamte Depassivierungswahrscheinlichkeit beträgt somit

$$P_d = P_{d1} + P_{d2}$$



**Berechnung der Abtragtiefe bei Chloridkontamination**

Chloride werden hauptsächlich mit dem («fliessenden») Porenwasser transportiert. Sofern ein Bauteil nicht kontinuierlich auf der einen Seite mit Chloridwasser beaufschlagt und auf der gegenüberliegenden Seite ausgetrocknet wird (was sehr selten vorkommt und aus den Chloridprofilen ersichtlich ist), sind Chloridkontaminationen praktisch nur in der oberflächennahen (Beton-)Feuchteschwanzungszone (Tiefe 5 bis 8 cm) zu erwarten. Die Chloridverteilung wird mit Chloridprofilen aufgezeichnet. Aus den Chloridprofilen ergibt sich die Verteilung der Variablen z mit dem kritischen Chloridgehalt von 0,4% Z.-Gew.

Bei der Instandsetzung von Fahrbahnplatten wird der Neubeton (Auftrag) vor dem Aufbringen der Fahrbahnplattenabdichtung ausgetrocknet, während der Altbeton (vor dem Auftrag) voll wassergesättigt sein muss. Das hat zur Folge, dass das Porenwasser (nach dem Aufbringen der Abdichtung) in den Neubeton aufsteigt und Chloride aus dem Altbeton in den Neubeton mitschleppt, wobei sich die Form des Restchloridprofils verändern kann. Bei der Ermittlung der Abtragtiefe muss deshalb mit einem wandernden Restchloridgehalt gerechnet werden, d.h., die Depassivierungswahrscheinlichkeit muss immer mit der für die Bewehrung (im Alt- oder Neubeton) ungünstigsten Position des (einfachheitshalber in der Form unveränderten) Restchloridgehalts berechnet werden.

Das Phänomen eines vom Alt- in den Neubeton wandernden Chloridgehalts ist nicht nur bei der Instandsetzung von Fahrbahnplatten, sondern auch bei andern Bauteilen, deren Oberfläche (zumindest temporär stark austrocknet) möglich. Es empfiehlt sich deshalb, vorsichtshalber bei allen Bauteilen mit wanderndem Chloridgehalt zu rechnen, sofern Porenwasser- bzw. Chloridverschiebungen nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden können.

Der anfänglich nur im Altbeton vorhandene Restchloridanteil unter der Abtragtiefe  $x_0$  wird bei der Ermittlung der Depassivierungswahrscheinlichkeit in die ungünstigste Stellung  $x_u$  verschoben, und in dieser Stellung sind wieder - wie bei der Karbonatisierung - die zwei analogen Bereiche zu unterscheiden:

$$x_u - \phi < c < x_u < z \quad \text{und}$$

$$x_u < c < z \quad (\text{Bild 5})$$

Dementsprechend beträgt die Depassivierungswahrscheinlichkeit (wie bei der Karbonatisierung) im Bereich 1:

$$P_{d1} = \sum_{x_u - \phi}^{x_u} \left[ F_c(i) \cdot \Delta x_i \int_{x_u}^{\infty} F_z \cdot dx \right]$$

und im Bereich 2:

$$P_{d2} = \sum_{x_u}^{\infty} \left[ F_c(i) \cdot \Delta x_i \int_{x_1}^{\infty} F_z \cdot dx \right]$$

Und die totale Depassivierungswahrscheinlichkeit beträgt wieder:

$$P_d = P_{d1} + P_{d2}$$

**Schlussbemerkungen**

Die in den letzten Jahren durchgeführten materialtechnischen Untersuchungen sind wissenschaftlich interessant, wichtig und wertvoll. Sie gehen aber in einigen Belangen weit über die Bedürfnisse (und das Sachverständnis) der Konstrukteure hinaus. Den Ingenieuren sollten aus den theoretischen Untersuchungen vermehrt praxisbezogene Erkenntnisse und weniger messtechnische Grundlagen vermittelt werden. Es wäre den Materialtechnologen z. B. durchaus möglich, mit dem heutigen Kenntnisstand die Grundlagen zur Festlegung der drei wichtigen Korrosionsgeschwindigkeiten genauer und umfassender zu definieren. In Zusammenarbeit mit den Konstrukteuren könnte dann auch die zulässige Depassivierungswahrscheinlichkeit normativ festgelegt werden.

Die hohen und zum Teil stark überhöhten Instandsetzungskosten bei vielen Bauwerken sind nicht auf fehlende materialtechnologische Erkenntnisse zurück-

**Bezeichnungen**

- c Dicke der Betonüberdeckung der Bewehrung
- t Zeit
- x Betontiefe ab Betonoberfläche
- $x_0$  Abtragtiefe
- $x_u$  Verschobene Kontakttiefe  $x_0$
- y Karbonatisierungstiefe
- z Betontiefe mit kritischem Chloridgehalt (0,4% Z.-Gew.)
- F Häufigkeit (Frequency)
- $F_c$  Normalverteilung von c
- $F_y$  Normalverteilung von y
- $F_z$  Normalverteilung von z
- $\Psi$  Summenhäufigkeit aus y und c bzw. z und c
- $p_d$  Depassivierungswahrscheinlichkeit

zuführen, sondern vor allem auf mangelhafte Bauwerkskontrollen, unsachgemäße Anwendung und Umsetzung des materialtechnologischen Wissensstands und nicht zuletzt auf unzuweckmässige und unausgereifte Instandsetzungsprojekte.

Adresse des Verfassers:

Christian Menn, dipl. Bauing. ETH SIA, Prof. Dr. Dr. h.c., Plantaweg 21, 7000 Chur

**Literatur**

- [1] Hunkeler F.: Grundlagen der Korrosion und der Potentialmessung bei Stahlbetonbauten. EVED, Bundesamt für Strassenbau, VSS-Bericht Nr. 510, 1994
- [2] Elsener B., Flückiger D., Wójtas H., Böhni H.: Methoden zur Erfassung von Korrosion von Stahl in Beton. EVED, Bundesamt für Strassenbau, VSS-Bericht Nr. 521, 1996
- [3] Keller T.: Dauerhaftigkeit von Stahlbetontragwerken: Transportmechanismen, Auswirkung von Rissen. EVED, Bundesamt für Strassenbau, VSS-Bericht Nr. 235, 1991
- [4] Flückiger D., Elsener B., Böhni H.: Chloride im Beton: Transport und Erfassung. EVED, Bundesamt für Strassenbau, VSS-Bericht Nr. 520, 1996
- [5] Brenni P., Keller T., Pellegrinelli L., Menn C.: Verbindung von altem und neuem Beton. Birkhäuser Verlag Basel, IBK-Bericht Nr. 193, 1992

**Dank**

Der Autor dankt Herrn dipl. Ing. ETH Heribert Huber, Brückeningenieur des Amts für Tiefbau Uri, für die Unterstützung bei der Aufarbeitung der langjährigen Erfahrungen mit der Zustandserfassung, Zustandsbeurteilung und Instandsetzung der A2-Brücken im Kanton Uri.

Besonderer Dank gebührt auch dem Ingenieurbüro Bänziger + Köppel + Brändli + Partner, Chur, insbesondere Herrn dipl. Ing. ETH Karl Baumann für wertvolle Hinweise, das Durchrechnen und die Überprüfung von Beispielen und die Zeichnungen des vorliegenden Berichts.

5  
Wandernder Restchloridbereich; ungünstige Position

