

Schutzmassnahmen für Stahlbeton: imprägnierte Betonüberdeckung und zementgebundene Beschichtungen zum Schutz und zur Instandhaltung von Stahlbetonbauwerken

Autor(en): **Martinola, Giovanni / Wittmann, Folker H. / Sadouki, Hamid**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **118 (2000)**

Heft 24

PDF erstellt am: **23.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-79935>

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.

Giovanni Martinola, Folker H. Wittmann, Hamid Sadouki und Andreas Gerdes, Zürich

Schutzmassnahmen für Stahlbeton

Imprägnierte Betonüberdeckung und zementgebundene Beschichtungen zum Schutz und zur Instandhaltung von Stahlbetonbauwerken

Stahlbetontragwerke können durch Hydrophobieren oder das Auftragen einer zementgebundenen Beschichtung gegen das Eindringen aggressiver Substanzen geschützt und ihre wartungsfreie Nutzungsdauer erheblich verlängert werden. Schutzbeschichtungen können ausserdem im Rahmen von Instandsetzungsmassnahmen aufgebracht werden.

Eine der heute wichtigsten Herausforderungen im Bauwesen ist der Unterhalt und das Instandsetzen bestehender Bauwerke. Nach dem Bauboom der Sechziger- und Siebzigerjahre ist jetzt eine grosse Zahl von Betonbauwerken instandsetzungsbedürftig. Auch eher jüngere Betonkonstruktionen müssen oft genug schon nach wenigen Nutzungsjahren wegen grossflächiger Korrosionserscheinungen mit enormen Kosten saniert werden.

Die Bautätigkeit in Europa hat sich in den letzten Jahren mehr und mehr in Richtung Erneuerung und Instandsetzung entwickelt. Der Grund für die damit verbundene Kostenexplosion liegt nicht nur in der Zunahme immer älterer Bausubstanz, sondern auch in Planungs- und Bemessungsfehlern und insbesondere in einer mangelhaften konstruktiven Ausführung, die zu vorhersehbaren Schäden führte. In diesem Zusammenhang ist eine Reihe zentraler Fragen zu beantworten: Wie kann man die stetig steigenden Kosten begrenzen, oder anders formuliert, wie können neue Stahlbetonbauten dauerhafter gebaut werden, damit während der vorbestimmten Lebensdauer keine umfangreichen Instandsetzungsmassnahmen durchzuführen sind? Wie kann der Aufwand für den noch erforderliche Instandsetzungsmassnahmen auf ein Minimum reduziert werden? Wie kann beispielsweise die Nutzungsdauer eines instandsetzungsbedürftigen Stahlbetonbauwerks mit einer hinreichenden Wahrscheinlichkeit um weitere 50 Jahre erhöht werden?

Um die Dauerhaftigkeit zu verbessern, besteht heute die Tendenz, in erster Linie die Betonüberdeckung zu erhöhen. Das ist ein Schritt in die richtige Richtung, aber grundsätzlich bleibt das Problem da-

durch ungelöst. Mit dieser konstruktiven Massnahme werden die Korrosionserscheinungen - wenn überhaupt - nur zeitlich um einige Jahre verschoben. Auch im Fall einer höheren Überdeckung (bis 10 cm sind in einigen Literaturstellen genannt) bleibt die Dauerhaftigkeit sogar unter Anwendung von sehr dichtem Beton beschränkt, weil durch den grösseren Abstand von Betonoberfläche zu Bewehrungsstahl die Rissverteilungswirkung der Armierung bedeutend reduziert wird. Auch aus statischen Gründen ist wegen der Gefahr von Abplatzungen eine massive Erhöhung der Überdeckung eher zu vermeiden. Bild 1 zeigt eine schematische Darstellung der möglichen Überdeckungsvarianten. Bei der klassischen Variante beträgt die Dicke der Überdeckung 30 bis 40 mm (Bild 1a). Risse im Überdeckungs-beton sind unter normalen klimatischen Bedingungen unvermeidbar. Aufgrund des Vorhandenseins von Rissen in der Bauwerksoberfläche und vor allem wegen der relativ hohen Streuung der Armierungslage sowie der Eigenschaften des Überdeckungs-betons können die in Wasser gelösten Schadstoffe örtlich schon nach relativ kurzer Zeit an die Bewehrung von Stahlbetonbauteilen gelangen, und somit können auch bei hinreichenden Mittelwerten der Überdeckung und der Betonqualität je nach Beanspruchungsintensität nach wenigen Jahren Nutzung Korrosionserscheinungen auftreten. Das konventionelle Überdeckungskonzept garantiert nicht unbedingt einen effizienten Schutz der Armierung, wie die zu häufigen Schadensbilder in der Praxis überzeugend be-stätigen.

Bei der Erhöhung der Überdeckung (Bild 1b) können die im Laufe der Nutzung auftretenden Risse breiter werden als bei der Variante in Bild 1a, und zwar aufgrund der höheren Entfernung der Armierung von der Oberfläche. In einer getrennten Arbeit wird die Wirkung einer überhöhten Überdeckung im Einzelnen untersucht. Unter Anwendung der DIN 1045 [2] und in Anlehnung an Heft 400 des DAfStb [3] kann man bei der Dimensionierung eines bestimmten Stahlbetonträgers (beispielsweise mit einer Länge von 8 m und einer Höhe von 90 cm) im Zu-

stand II die Rissbreite w_{cal} berechnen. So beträgt nach der Berechnung in diesem Fall mit 3 cm Überdeckung w_{cal} 0,17 mm. Wenn man die Betonüberdeckung auf 8 cm erhöht, steigt die berechnete Rissbreite auf 0,27 mm. Bei der Dimensionierung dieses Balkens für Zwangsbeanspruchungen (z.B. Schwinden) wird die Änderung der Rissbreite bei Erhöhung der Überdeckung mit demselben Faktor $d/(d-h)$ (in diesem Beispiel 59%) berücksichtigt, wobei h die statische Nutzhöhe und d die Höhe des Balkens ist. Dies ist nicht notwendigerweise eine konservative Annahme. Allgemein führt gemäss [3] eine Erhöhung der Betonüberdeckung im günstigsten Fall zu gleichen, häufig jedoch zu grösseren Rissbreiten. Bei der Bemessung nach Eurocode 2 [4] oder mit dem Zuggurtmodell [5] kann bei höherer Betonüberdeckung der Armierungsgehalt ρ angepasst werden, und daraus resultieren Rissabstände und Rissbreite. Mit den erwähnten Modellen können Rissentwicklung und -geometrie bei ausserordentlicher Erhöhung der Überdeckung nicht ausreichend vorhergesagt werden. In einigen Fällen kann die Rissbreite an der Oberfläche unterschätzt werden.

Ein erster Ansatz zur Bemessung von Bauwerken unter der expliziten Berücksichtigung der Dauerhaftigkeit wurde im CEB-Bulletin 238 [6] vorgeschlagen. Bei der Bemessung der Dauerhaftigkeit wurde ein Modell beschrieben, mit dessen Hilfe die karbonatisierungsinduzierte Korrosionsgefahr vermieden werden soll. In diesem Modell wird entweder die Zusammensetzung des Betons optimiert oder in einigen Fällen ein Schutzsystem, bestehend aus einer oder mehreren Beschichtungen, zum Schutz des Bauwerks vorgeschlagen. Ein ähnlicher Weg zur Herstellung dauerhafter Bauwerke wurde von Wittmann in [7] vorgeschlagen. Dabei wird insbesondere darauf eingegangen, dass bei der Bemessung von Bauwerken neben dem Tragverhalten die Dauerhaftigkeit getrennt berücksichtigt werden sollte.

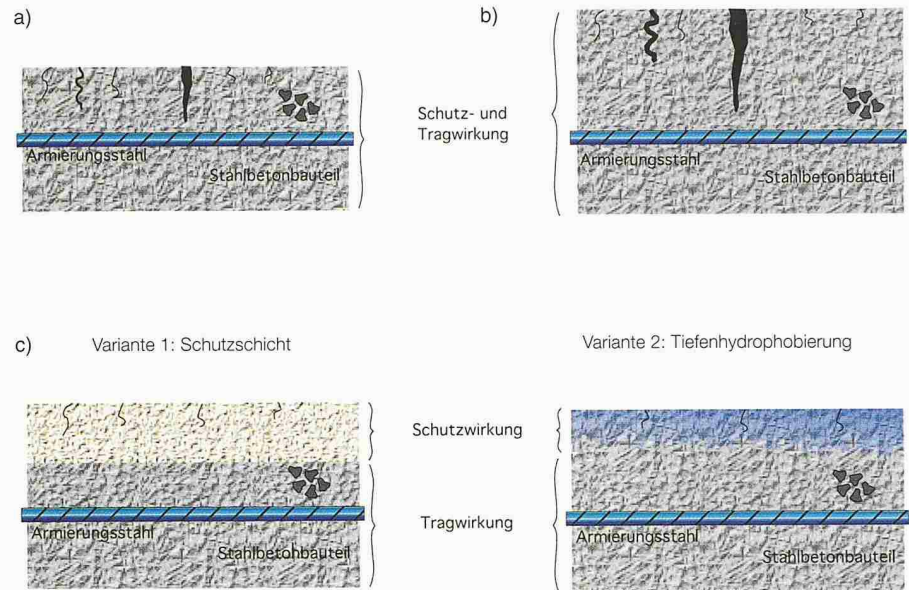
Bis heute wird in den wenigsten Fällen dieser Aspekt der Trennung der Aufgaben ingenieurmässig betrachtet. Im Allgemeinen wird davon ausgegangen, dass der Beton zwei Aufgaben übernimmt. Zum einen den Korrosionsschutz der Armierung und zum anderen die tragende Funktion, die darin besteht, die Stabilität und Steifigkeit des Bauwerks zu garantieren.

Die Lebensdauer von Bauwerken aus Stahlbeton kann auch durch nicht technische Vorgänge nachhaltig beeinflusst wer-

1

Schematische Darstellung unterschiedlicher Überdeckungskonzepte:

- a) Konventionelle Überdeckung
 b) Erhöhung der Überdeckung
 c) Zweischichtige Überdeckung mit getrennten Funktionen



den. Dazu müssen allerdings die Investitionspolitik und somit das Entscheidungskriterium für die Wahl einer Ausführungsvariante geändert werden. Heutzutage wird normalerweise die «günstigste» Offerte für die Ausführung der Bauarbeiten gewählt. Bei der Budgetierung wird nahezu ausschliesslich auf die Baukosten geachtet und nur selten ein Betrag für die Qualitätskontrolle oder den Unterhalt eingeplant. Erforderlich wird eine umfassende Life-Cycle-Kostenanalyse eines jeden Objekts [8]. Dadurch können all die vorhersehbaren Kosten (Instandhaltung) während der geplanten Lebensdauer des Bauwerks realistisch berücksichtigt werden.

Konzept der Trennung der Aufgaben

Wenn man die ökonomischen und ökologischen Aspekte gesamthaft betrachtet, ist die Bemessung der Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauwerken von ähnlicher Bedeutung wie diejenige der Tragfähigkeit. Wie bereits erwähnt wurde, werden in der Praxis die Anforderungen an die Dauerhaftigkeit bei der Bemessung selten hinreichend überprüft. Die Druckfestigkeit des Betons ist für das Tragverhalten eines Stahlbetonbauteils sicher eine notwendige Grösse, sie ist aber eher von untergeordneter Bedeutung für die Dauerhaftigkeit. Umgekehrt kann ein sehr dauerhafter zementgebundener Werkstoff unter Umständen die statischen Anforderungen nicht erfüllen. Aus diesem Grund ist es schwierig, einen Werkstoff (eine bestimmte Betonsorte) zu finden, der beide

Aufgaben auch unter kritischen Beanspruchungen gleichzeitig erfüllen kann. Also ist die Trennung dieser völlig unterschiedlichen Funktionen sinnvoll. Bild 1c zeigt, wie ein Stahlbetonbauteil mit einer Schutzschicht geschützt werden kann. Das Schutzschichtvolumen ist relativ klein im Vergleich zu demjenigen des gesamten Betonelements. Daher kann diese Schutzschicht mit ausgewählten Zusatzmitteln und aufwendigen Technologien optimiert werden, um einen hohen Widerstand gegen das Eindringen von Schadstoffen gezielt und ökonomisch zu gewährleisten.

Es gibt mindestens zwei Möglichkeiten zur Realisierung einer funktionstüchtigen Schutzschicht. Bei der ersten Variante wird eine zementgebundene Beschichtung appliziert. Bei der Variante 2 wird die rund 40 mm dicke Betonüberdeckung mit einem Hydrophobierungsmittel nachträglich tief imprägniert. Somit wird eine resistente externe «Bauteilhaut» erzeugt, die eine hohe Dauerhaftigkeit und Nutzungsdauer des Bauwerks zu garantieren vermag. Beispielsweise kann je nach den vorliegenden Umgebungsbedingungen eine Chloridbarriere für die geplante Nutzungsdauer hergestellt werden.

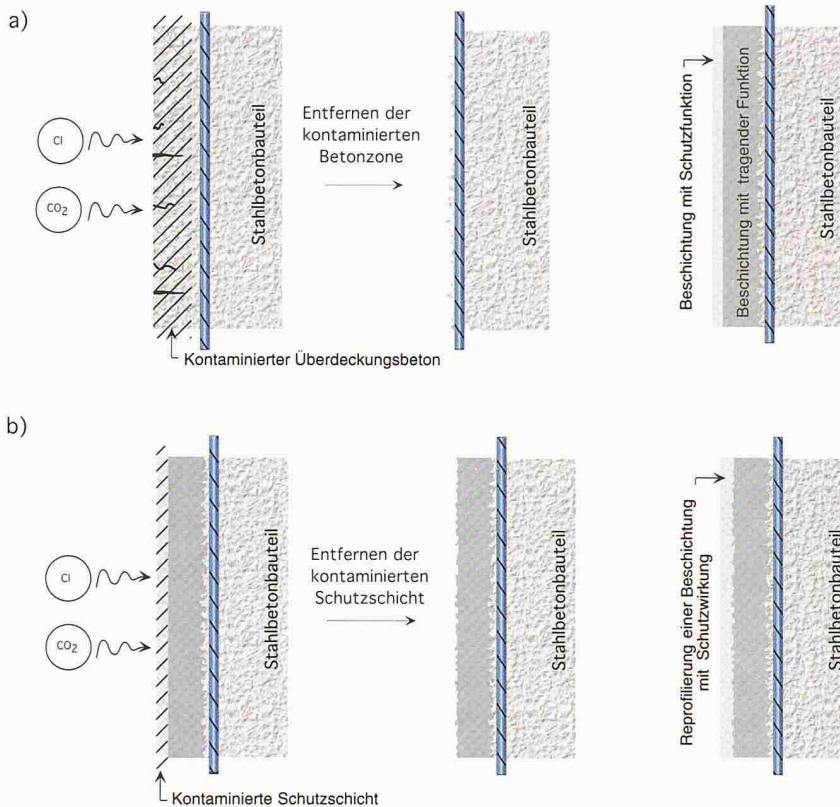
Mit der Trennung der zwei unterschiedlichen Aufgaben können die Eigenschaften des tragenden Betons und diejenigen der Schutzschicht getrennt und gezielt optimiert werden.

Zementgebundene Schutzschicht

In Bild 2a ist nochmals das Konzept der Trennung der Funktionen schematisch

dargestellt. Bei der Bemessung eines tragenden Stahlbetonelements kann für die Masse ein relativ billiger Beton ausgewählt werden, der dann auch nur die statische Anforderung erfüllen muss. In einer zweiten Stufe kann eine zementgebundene Schutzschicht unter Berücksichtigung der extern vorliegenden aggressiven Bedingungen bemessen werden. Diese Schutzschicht wird auf alle offenen Oberflächen des Bauteils appliziert. Bei der Bemessung dieser Schutzschicht werden ein hoher Widerstand gegen das Eindringen aggressiver Schadstoffe (z.B. Chloride, Sulfate oder Kohlendioxid) sowie eine hohe Frost- und Frosttausalzbeständigkeit gewährleistet. Das Eindringen der im Wasser gelösten oder suspendierten Schadstoffe durch die Poren der Oberfläche des Bauteils geschieht einerseits über kapillares Saugen, Diffusion oder Permeation in das Porensystem des oberflächennahen zementgebundenen Werkstoffs. Andererseits dringen Schadstoffe tief über vorhandene Risse ein.

Eine Steigerung der Dauerhaftigkeit ist also in vielen Fällen mit einer Reduktion des Wassereindringvermögens verbunden. Dieses Ziel kann durch die richtige Wahl eines zementgebundenen Werkstoffs erreicht werden, der ein besonders geringes kapillares Saugen aufweist. Ein geringes kapillares Saugen kann neben der Reduktion des W/Z-Werts auch durch eine Masshydrophobierung dieser zementgebundenen Beschichtungswerkstoffe, beispielsweise mit Calciumstearat oder Silan erreicht werden [9]. In [9] wurde gezeigt, dass massenhydrophobierte Beschichtungen nur 10% der Chloridlö-



2

Konzept der Trennung der Aufgaben für ein neues Stahlbetonbauwerk

a) Die statisch-tragende Funktion wird von der Stahlbetonkonstruktion übernommen, die Dauerhaftigkeit wird durch die Schutzschicht gewährleistet

b) Nach der geplanten Nutzungsdauer (abhängig von der Art der aggressiven Einwirkung) wird die kontaminierte Schutzschicht ersetzt

sung aufnehmen, die gleiche Beschichtungen ohne Hydrophobierungsmittel absorbieren. Durch die Verwendung solcher Zusatzmittel können auch die mechanischen Eigenschaften in einem weiten Bereich variiert werden. Auch der Karbonatisierungswiderstand massenhydrophobierter Beschichtungen ist niedriger als bei Standardbeschichtungen.

Eine weitere Anforderung an diese zementgebundene Schutzschicht ist eine gute Verbindung mit dem Untergrundbeton. Risse in dieser externen «Bauteilhaut» vermindern die Dauerhaftigkeit des Bauwerks, weshalb Rissfreiheit und ein hinreichendes Rissüberbrückungsvermögen während der geplanten Nutzungsdauer weitere Eigenschaften sind, die derartige Beschichtungen aufweisen müssen.

Die Beschichtung hat zusätzlich die Aufgabe, den tragenden Teil des Bauwerks vor gefährlichen thermischen und hygri-schen Gradienten, die sich an der oberflächennahen Zone des Bauteils konzentrieren, zu schützen. Wenn dies gelingt, bleibt das darunterliegende Bauteil während der geplanten Lebensdauer unkontaminiert und rissfrei.

Die Überwachung des Objekts spielt auch in diesem Konzept eine entscheidende Rolle. In regelmässigen Zeitabständen sollen die Karbonatisierungstiefe oder gegebenenfalls der Chloridgehalt gemessen werden. Wenn die Beschichtung während

der geplanten Nutzung nicht mehr in der Lage ist, die Chloridionen zurückzuhalten, soll sie unverzüglich ersetzt werden. Dabei ist sehr wichtig, dass der Untergrundbeton möglichst wenig beschädigt, unkontaminiert und somit dauerhaft bleibt. Der Einbau von Sonden kann an besonders exponierten Stellen eine sinnvolle Ergänzung darstellen; Bild 2b zeigt dieses Vorgehen. Nach der Entfernung der kontaminierten Schutzschicht wird eine neue appliziert. Mit diesem Vorgehen wird die Dauerhaftigkeit des Bauwerks für die ganze geplante Lebensdauer kostengünstig garantiert.

Imprägnierung der Betonüberdeckung

In der Variante 2 (Bild 1c) wird die etwa 40 mm dicke Betonüberdeckung mit einem Hydrophobierungsmittel tief imprägniert. Mit einer effizienten Applikationstechnik können Eindringtiefen von 10 mm auch bei Betons mit niedrigem W/Z-Wert erreicht werden [10]. Diese Oberflächenschutzmassnahme reduziert die durch den Feuchtaustausch mit der Umgebung hygri-sch induzierten Spannungen, wodurch die Schwindrissbildung an der Betonoberfläche während des Austrocknungsprozesses stark vermindert wird [11]. Durch die Verlangsamung des

Austrocknungsprozesses wird der Beton besser nachbehandelt.

Aufgrund der begrenzten Lebensdauer von Hydrophobierungsmitteln im alkalischen Milieu sollte die Imprägnierung alle 10 bis 15 Jahre wiederholt werden. Im Vergleich zur Schutzschichtvariante wird der imprägnierte Beton trotz der Hydrophobierung kleine Chloridmengen absorbieren. Besonders exponierte Betonelemente müssen wahrscheinlich nach 50 bis 60 Jahren trotz einer Imprägnierung instandgesetzt werden. Damit ist aber bereits sehr viel erreicht. Bei der konsequenten Anwendung der zementgebundenen Schutzschichtvariante wird der Untergrundbeton nicht karbonatisieren und chloridfrei bleiben.

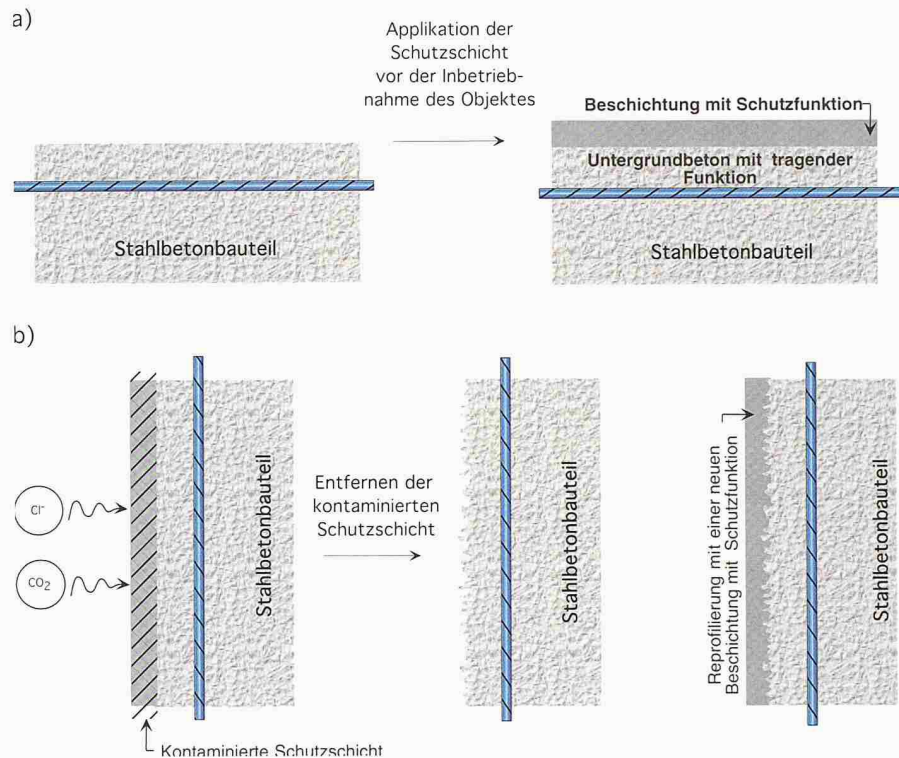
Sanierungskonzept

Das geschilderte Konzept kann auch als Instandsetzungsstrategie angewendet werden. Nach einer Instandsetzung haben der Untergrundbeton und die neue zementgebundene Schicht zwei völlig unterschiedliche Funktionen zu übernehmen. Der Untergrundbeton wird als tragendes Element betrachtet und muss eine bestimmte Steifigkeit und Festigkeit aufweisen. Die Beschichtung dagegen muss in erster Linie die Armierungsstäbe vor Korrosion schützen und erst in zweiter Linie,

3

Konzept der Trennung der Aufgaben für die Sanierung eines Stahlbetonbauwerks

- a) Sanierung des Bauwerks mit zwei unterschiedlichen Beschichtungen mit getrennten Aufgaben
 b) Nach der geplanten Nutzungsdauer wird nur die Schutzschicht ersetzt



falls überhaupt notwendig, eine tragende Funktion übernehmen. Falls die Beschichtung eine tragende Funktion übernehmen muss, wird die in Bild 3 schematisch dargestellte Lösung vorgeschlagen. Nach dem Betonabtrag wird zuerst eine Beschichtung appliziert, die bei der statischen Aufgabe des Bauwerks mitwirkt. Der E-Modul dieser Beschichtung soll dabei demjenigen des Untergrunds angepasst werden. Die Schutzfunktion wird dann durch eine zweite, auf der ersten aufgetragene Beschichtung gewährleistet. Wenn der Chloridgehalt in der zweiten Schicht zu hoch wird oder die Karbonatisierungstiefe die Schichtdicke erreicht, kann die Schutzschicht kostengünstig ersetzt werden, ohne das tragende System zu schwächen.

Als Schutzschicht (auch Opferschicht genannt) ist in vielen Fällen ein massenhydrophobierter zementgebundener Mörtel mit einer Schichtdicke von rund 20 mm zu empfehlen. Der Vorteil zementgebundener Mörtel im Vergleich zu dünnen Kunststoffbeschichtungen (Acrylate, Polyurethane usw.) liegt darin, dass anorganische Baustoffe witterungsbeständiger und weniger empfindlich in Bezug auf Alterung sind als organische Verbindungen, die keine Pufferwirkung aufweisen. Infolge kaum vermeidbarer Applikationsmängel (z.B. eine zu geringe Mindestschichtdicke) können wassergelöste Schadstoffe

rasch bis zum Untergrund vordringen. Mit zementgebundenen Opferschichten dagegen kann eine Nutzungsdauer von 50 Jahren ohne Instandsetzungseingriff erreicht werden.

Zu den offenen Fragen vieler Ingenieure und Werkstoffentwickler zählt, warum und unter welchen Bedingungen, besonders bei instandgesetzten Bauteilen und neuen Beschichtungssystemen, Risse auftreten. Nur eine umfassende Analyse zeigt auf, welche Prozesse zur Rissbildung im Instandsetzungssystem führen und wie solche Beschichtungen korrekt dimensioniert werden können.

Beschichtungssysteme sind unterschiedlichen Phänomenen (z.B. thermische und hygrische Gradienten oder autogenes Schwinden) unterworfen, die zu komplexen Spannungszuständen (Zwangs- und Eigenspannungen) im System Beschichtung - Untergrund führen. Diese können schon nach wenigen Jahren zu Rissen und der Ablösung einer Beschichtung führen. Die Bemessung solcher Beschichtungen muss sorgfältig und unter Berücksichtigung realistischer Werkstoffgesetze erfolgen.

In [12] wurde ein Ansatz zur korrekten und ingenieurmässigen Bemessung von Beschichtungssystemen vorgeschlagen. Bei diesem Ansatz werden die Spannungszustände und die Rissbildung unter unterschiedlichen Beanspruchungen und

Randbedingungen mit Hilfe eines numerischen Modells berechnet. Auf dieser Basis wurden Anforderungen an Beschichtungssysteme in Abhängigkeit der probabilistischen Eigenschaften eines beschädigten Bauteils formuliert. Somit kann das Versagensrisiko minimiert werden.

Folgerungen

Relativ oft kann die geplante Nutzungsdauer moderner Stahlbetonbauwerke nur mit sehr aufwendigen Instandsetzungsmassnahmen erreicht werden. Ein Hauptproblem dabei ist, dass der Überdeckungsbeton nicht in der Lage ist, effizient und zuverlässig die Bewehrungsstäbe vor Korrosion zu schützen.

In diesem Beitrag wird ein Prinzip der Trennung der Aufgaben vorgeschlagen. Es ist vergleichsweise einfach Beton herzustellen, der langfristig die geforderten mechanischen Eigenschaften behält. Eben dieser Beton ist aber eher selten in der Lage die Dauerhaftigkeit und insbesondere den wirksamen Schutz der Bewehrung in aggressiver Umgebung zu garantieren.

Es ist heute möglich, eine zementgebundene Beschichtung zu formulieren, die einen langfristigen Schutz eines Stahlbetonbauteils gewährleistet. Diese Schutzschicht ist in der Regel nicht in der Lage, eine tragende Funktion zu übernehmen.

Um Rissbildung in der Schutzschicht und deren Ablösen zu vermeiden, ist eine umfassende Analyse des Zusammenwirkens von Schutzschicht und Untergrund erforderlich. Hierzu werden numerische Modelle eingesetzt.

Schutz- bzw. Opferschicht können auch im Rahmen einer Instandsetzungsmassnahme eine sinnvolle Lösung darstellen.

Durch das Trennen der Aufgaben von Schutzschicht und tragendem Bauteil können Stahlbetonkonstruktionen für nahezu beliebige Nutzungsdauern kostengünstig erstellt werden.

Adresse der Verfasser:

Giovanni Martinola, dipl. Werkstoffing. ETH, Dr. sc. techn., *Folker H. Wittmann*, dipl. Phys., Prof. Dr. Dr.-Ing., *Hamid Sadouki*, dipl. Phys. ETH, Dr. ès. sc., *Andreas Gerdes*, dipl. Chem., Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion, ETH Hönggerberg, 8093 Zürich

Literatur

- [1] *Martinola G., Sadouki H., Horsch T. und Wittmann F.H.*: Einfluss der Überdeckung auf die Rissbildung im Beton. Int. Journal for Restoration of Buildings and Monuments, Aedificatio Verlag, Freiburg i.Br. (wird demnächst erscheinen), 2000
- [2] DIN 1045/07.88: Beton und Stahlbeton.
- [3] *Schiessel P.*: Grundlagen der Neuregelung zur Beschränkung der Rissbreite. Schriftenreihe Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 400, Berlin, 1989
- [4] Eurocode 2: Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken, Teil 1: Grundlage und Anwendungsregeln für den Hochbau. Europäische Norm, 1992
- [5] *Alvarez M.*: Einfluss des Verbundverhaltens auf das Verformungsvermögen von Stahlbeton, Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, IBK-Bericht Nr. 236, Birkhäuser Verlag, Basel 1998
- [6] CEB Bulletin no. 238: New Approach to Durability Design. Comité Euro-International du Béton (CEB), EPF Lausanne 1997
- [7] *Wittmann F.H.*: Separation of Assignments: A New Approach Towards More Durable Reinforced Concrete Structures. Durable reinforced Concrete Structures, Aedificatio Verlag, Freiburg i.Br., p. 151-159, 1998
- [8] *Narayanan R.S., Dhir R.K. and Paine K.A.* (Hrsg.): Thomas Telford Publishing, London UK, p. 1-13, 1999
- [9] *Gerdes A.*: Protective Coatings of Concrete Structures for High Durability. Proceedings of a RILEM-WTA-Seminar on High Performance of Cement-Based Materials, WTA-Report Series 15, p. 157-165, 1997
- [10] *Gerdes A.*: Application of the Box Technology for Surface Impregnation in Durable Reinforced Concrete Structures. Aedificatio Verlag, Freiburg i.Br., p. 221-234, 1998
- [11] *Sadouki H., Wittmann F.H.*: Influence of Water Repellent Treatment on Drying Concrete, Water Repellent Treatment of Building Materials. Hydrophobe II, F.H. Wittmann editor, Aedificatio Verlag, Freiburg i.Br., p. 177-188, 1998
- [12] *Martinola G.*: Rissbildung und Ablösung zementgebundener Beschichtungen auf Beton. PhD Thesis no. 13520, Institut für Baustoffe, ETH Zürich (2000). (Erscheint auch als Building Materials Report No. 12)