Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 101 (1983)
Heft: 7: Prof. Dr. Bruno Thürlimann zum 60. Geburtstag II.

Artikel: Brückenbrüstung, ein wichtiger Bauteil
Autor: Rösli, Alfred / Hächler, Alfred
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-75078

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 09.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Brückenbrüstung, ein wichtiger Bauteil

Von Alfred Rösli und Alfred Hächler, Zürich

Für den modernen Brückenbau wurden in den letzten Jahrzehnten vielfältige Grundlagen und Erfahrungen für den Entwurf, die Bemessung und die Ausführung erarbeitet. Es zeigt sich denn auch, dass – wenn trotzdem Schäden auftreten – diese weniger auf Gründe der Statik oder Festigkeit, als vielmehr auf ungenügende Beständigkeit zurückzuführen sind. Typische Beispiele dafür sind die den äusseren Einflüssen direkt ausgesetzten Brückenbrüstungen, an denen relativ häufig Schäden infolge Frost- und Korrosionseinwirkungen zu beobachten sind. Wohl beeinflussen vorerst solche Schäden kaum die Sicherheit eines Bauwerkes als Ganzes, doch können mit zunehmender Zerstörung schwere Folgeschäden auftreten, und eine Sanierung wird immer kostspieliger und schwieriger.

Die Erfahrung zeigt, dass für die Erstellung von Betonbrüstungen mit genügender Beständigkeit mindestens die gleiche Sorgfalt aller Beteiligten benötigt wird wie für die Erstellung der tragenden Bauteile. Es sind erprobte konstruktive und betontechnologische Massnahmen vorzusehen, der Beton muss von überdurchschnittlicher Gleichmässigkeit sein, und die Bauarbeiten sind von einer zuverlässigen, erfahrenen Equipe und nach einem überprüften Programm auszuführen. Auch eine sorgfältige Nachbehandlung, ein zuverlässiger Unterhalt und ein zweckmässiger Winterdienst tragen wesentlich zur Sicherung der Beständigkeit dieser Bauteile bei. Die damit verbundenen zusätzlichen Kosten einschliesslich jener für unentbehrliche, laufende Kontrollen von Material und Arbeit müssen eingeplant werden. Sie machen sich sicher bezahlt, wenn man an die grossen Aufwendungen für spätere Sanierungsarbeiten denkt, deren Erfolg ebenfalls stark von der Sorgfalt der Ausführung abhängt und über deren Langzeitverhalten bis jetzt noch wenig Erfahrung vorliegt.

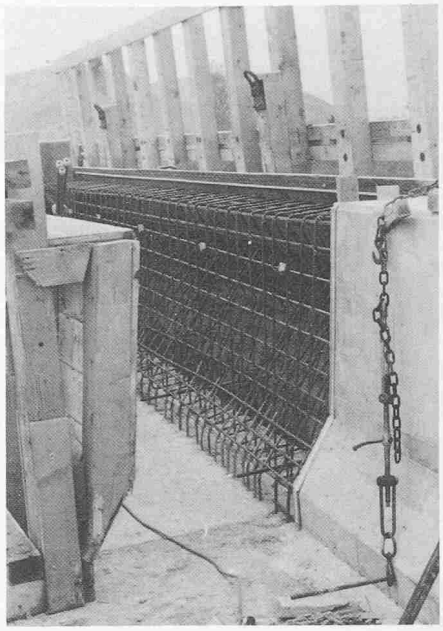


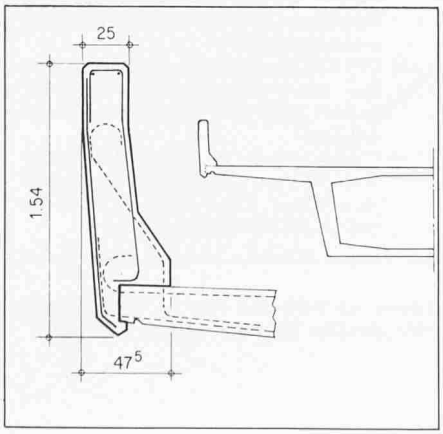
Bild 2. Stark bewehrte Brüstung mit teilweise geneigter Schalung wird nachträglich betoniert

Einführung

In den letzten Jahrzehnten wurden ausserordentliche Anstrengungen unternommen, um durch Forschung bessere Grundlagen für die Bemessung von Stahl- und Spannbetonbauteilen bereitzustellen. Durch die Verwendung von *Rechenanlagen für die statische Berechnung* gelingt es, auch komplizierte Tragwerke unter den verschiedensten Lasteinwirkungen wirklichkeitsnah zu untersuchen und diese dementsprechend optimal auszulegen.

Die Fortschritte auf dem Gebiet der *Baustofftechnik* ermöglichen es, die benötigten Materialien mit der erforderlichen hohen Qualität und Regelmässigkeit zu liefern. Aufgrund dieser Entwicklung und zusammen mit einer *hohen Mechanisierung, neuartigen Bauverfahren* und *weitgehender Rationalisierung* können immer kühnere Bauwerke errichtet werden, die auch hohe Anforderungen an die Bauausführung stellen. Dafür werden erfahrene, zuverlässige und vielseitige Mitarbeiter benötigt, die vorwiegend für die anspruchsvollen Bauaufgaben, d.h. für die als besonders wichtig erachteten Bauteile eingesetzt werden. Vielfach müssen daher die übrigen Bauteile und Fertigstellungsarbeiten von weniger erfahrenen, neu aufgestellten und häufig wechselnden Equipen ausgeführt werden. Für solche Mitarbeiter ist es oft schwierig, die Bedeutung ihrer Tätigkeit richtig einzuschätzen, und da Schäden aus gemachten Fehlern im allgemeinen erst später zu erkennen sind, fehlt auch der wichtige Prozess des direkten Lernens aus den eigenen Fehlern. Erschwerend kommt noch der meist vorhandene *Zeitdruck* hinzu, der ein Arbeiten bei jedem Wetter voraussetzt und dem vielfach die notwendige Überwachung und Kontrolle zum Opfer fällt. Die Folge davon ist, dass solche Bauteile besonders in den letzten Jahren vielfach *nicht mit der optimalen Qualität* hergestellt und verhältnismässig *bald schadhaft* wurden.

Bild 1. Typischer Querschnitt einer feingliedrigen, an der Fahrbahnplatte angehängten Brüstung



Typische Beispiele dafür sind die *Konsolen* und *Brüstungen von Strassenbrükken*. Es handelt sich dabei meistens um feingliedrige Bauteile, die im allgemeinen weit entfernt von der Neutralachse des Haupttragwerkes sind und deshalb oft grosse Biegebeanspruchungen aufzunehmen haben (Bild 1). Durch Temperatureinwirkungen, *Kriechen* und *Schwinden*, aber auch bedingt durch die *Bauweise*, z.B. infolge Altersunterschieden der einzelnen Bauteile, können grosse *Eigenspannungen* entstehen. Die Umwelteinflüsse wie *Niederschläge, Schmutz, Temperaturen, aggressive Luft* und damit auch *Frost* und *Frosttausalz* wirken auf diese exponierten Betonoberflächen. Auf der anderen Seite sind es meistens nicht besonders ausführungsfreundliche Bauteile, z.B. mit *geneigten Schalungen, konkaven Aussenflächen, enger und starker Armierung* sowie mit *zusätzlichen Aussparungen für Leitungen* usw. (Bild 2). Als angehängte Teile werden die Brüstungen nicht gleichzeitig mit den Haupttragteilen der Brücke hergestellt, sondern in einem späteren Arbeitsgang speziell betoniert. Wegen der komplizierten Form wird meistens eine kurze, *ausgeklügelte und leicht versetzbare Schalung*, oft als Schalungswagen ausgebildet, eingesetzt.

Die Optimierung von Aufwand und Leistung führt zur Herstellung der Brüstungen im streng geregelten *Taktverfahren*, und zwar in verhältnismässig *kurzen Abschnitten* von etwa 10 m bis 40 m und mit kleinen Betonkubaturen von 5 m³ bis 20 m³ täglich. Beim *Lehnenviadukt Beckenried* beispielsweise wurden die 12 300 Laufmeter Brüstungen in rund 340 Arbeitstagen betoniert [1].

Entscheidend für die Beständigkeit sind die Oberflächenbereiche des exponierten Betons. Nur schon durch die Verdrängung der gröberen Zuschlagstoffe durch die Schalungsfläche kommt es zu einer Anreicherung von feineren Bestandteilen und von Zementstein an der Oberfläche, die zu einem poröseren Be-

ton führen, der gefrierbares Wasser und Tausalzlösungen leichter aufnehmen kann (Bild 3). Auch sind die äusseren Schichten infolge ungleichmässiger Schwind-, Kriech- und Temperatureinflüsse einschliesslich der Einwirkungen des Temperaturschocks bei der Verwendung von Tausalz stärker gefährdet [2].

Auch bei der Herstellung, insbesondere durch das Vibrieren, kann es zu einer ungleichmässigen Verteilung der Luftporen kommen. Die Erfahrung zeigt daher, dass es äusserst schwierig ist, die geschalte Betonfläche mit genügender Beständigkeit herzustellen.

Schadenbildung

Insbesondere die Frost- und Frosttausalz-Schäden beginnen meist mit oberflächlichen Ablösungen von Feinstmörtelschichten. Durch das Gefrieren des dort reichlicher vorhandenen Porenwassers entsteht bei der Behinderung der damit verbundenen Ausdehnung ein allseitiger Druck, der bei Überwindung von Haftung und Zugfestigkeit des Mörtels zum Ablösen der Teilchen führt (Bild 4). Dieser Vorgang wird durch vorhandene *Mikrorisse* infolge Eigenspannungen begünstigt. Oft sind am Grund von kraterförmigen Abplatzungen grössere oder unbeständige, z.T. auch verschmutzte oder nicht gut umhüllte Zuschlagkörner oder auch Holzstücke zu erkennen.

Schäden können *schon im ersten Winter* auftreten, speziell wenn der Beton noch wenig erhärtet und ausgetrocknet ist. Mit der Zeit erweitern sich diese Ablösungen zu blättrigen Ausbrüchen und zu grösseren, flächenhaften Abschälungen. Zunehmend werden auch tiefere Betonschichten erfasst.

Eng verbunden mit den Zerstörungen des Betons durch diese Frosteinwirkungen sind oft auch die Schäden, die durch *Korrosion der Bewehrung* entstehen. Normalerweise werden sie durch das stark basische Milieu des Zementsteins (pH-Wert >12) geschützt. Durch das Eindringen von Kohlensäure bzw. Schwefelsäure der Luft und in Verbindung mit Wasser *karbonatisiert* der Beton von der Oberfläche her und verliert sukzessive seine Alkalität und damit die Rostschutzfähigkeit. Bei dichtem Beton schreitet die Karbonatisierung nur langsam voran und bleibt auf die oberflächennahen Schichten beschränkt. Bei weniger dichtem oder gerissenem Beton kann die Bewehrung mit ungenügender Überdeckung bald erreicht werden, und es kommt bei Anwesenheit von Sauerstoff und Wasser sowie insbesondere auch von Chloriden zu Korrosion. Die Umwandlung von Eisen zu *Rost* verursacht neben der Querschnittsabnahme der Stahlstäbe auch eine zwei- bis dreifache Volumenvergrösserung und führt zu der bekannten *Betonabsprengung*. Die zunehmende Luftverunreinigung der letzten Jahre insbesondere durch den Gehalt an Schwefelverbindungen beschleunigt diese Vorgänge (Bild 5).

Bewehrungsstähle können auch in alkalischem Beton korrodieren, und zwar vor allem mit Chloridionen von eindiffundierten Tausalzlösungen. Dies führt zu der lokalen, aber um so gefährlicheren *Lochfrasskorrosion*. Allerdings wird das freie Chlorid in begrenztem Masse durch die Hydratationskomponente des Zementsteins gebunden und damit inaktiviert. Nach eingehender Untersuchung können in einem dichten, nicht karbonatisierten Beton mit niedrigem W/Z-Faktor bis zu 0,4 Massenprozent Chlorid, bezogen auf den Zement, dauerhaft gebunden werden [3]. Allgemein wird somit ein Chloridgehalt bis zu 0,4% der Zementmasse für Stahlbeton und Spannbeton mit Spanngliedern in injizierten Hüllrohren noch als ungefährlich angesehen. Für Spannbeton nach dem Spannbettverfahren beträgt diese Grenze etwa 0,2 Massenprozent.

Soweit uns bekannt, wurden bis jetzt in der *Schweiz* stehende Betonteile wie Brückenbrüstungen usw. durch die eindiffundierten Chloride kaum stark beeinträchtigt. Hingegen traten schon mehrere ernsthafte Schäden durch Lochfrasskorrosion an der Bewehrung in liegenden Betonteilen auf. Besonders kritisch sind die Schäden infolge Eindringens von *Salzlösungen* durch undichte oder beschädigte Brückenisolationen unter den Fahrbahnbelägen, da ihre Auswirkungen vorgängig höchstens vermutet und ihr Ausmass erst nach Wegräumen von Belag und Isolation feststellbar wird (Bild 6).

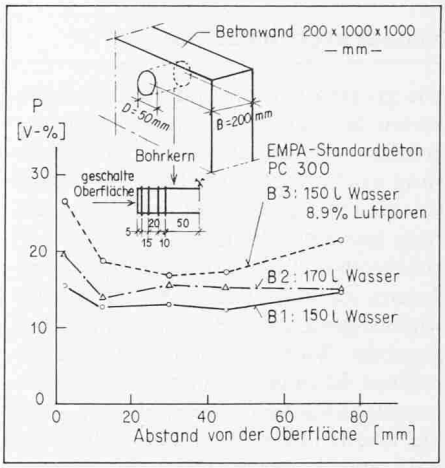


Bild 3. Gesamtporengehalt im Beton in Abhängigkeit des Oberflächenabstandes von im Laboratorium hergestellten Wänden

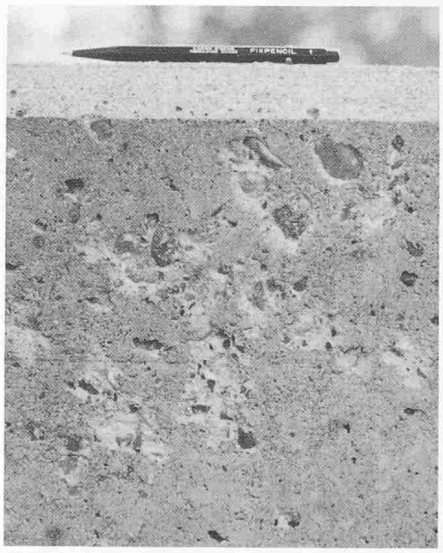


Bild 4. Erste Anzeichen von Frostschäden im Beton: Ablösen von oberflächlichen Feinstmörtelschichten besonders über grösseren Zuschlagkörnern

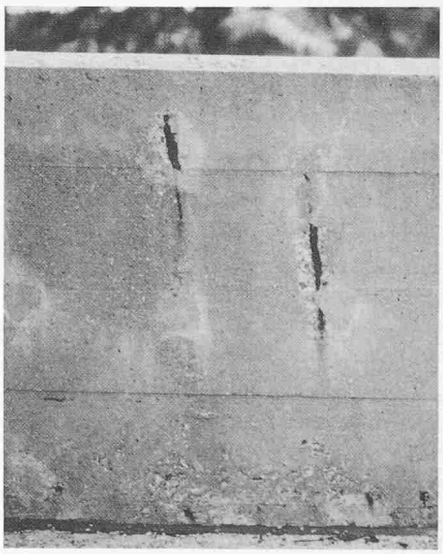
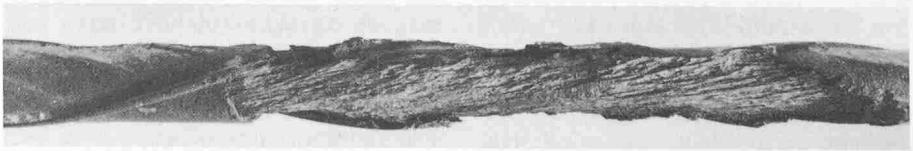


Bild 5. Korrosion von ungenügend überdeckter Bewehrung und damit verbundenen Betonabsprengungen

Bild 6. Korrosion an einem oberen Bewehrungsstab der Fahrbahnplatte einer achtjährigen Brücke infolge Eindringens von Salzlösungen durch undichte Brückenisolation



Schadenverhinderung

Die grossen Kosten und die Schwierigkeiten bei der Behebung rechtfertigen grösste Anstrengungen zur Verhinderung solcher Schäden. Dabei genügt es bei weitem nicht, von der Projektierung her einen beständigen Beton vorzuschreiben und dann ein luftporenbildendes Zusatzmittel einer für die Festigkeit geeigneten Betonmischung beizugeben. Vielmehr sind neben überprüften betontechnischen und ausführungstechnischen Massnahmen auch die konstruktive Ausbildung der Bauteile, der Unterhalt und der Winterdienst von entscheidender Bedeutung.

Zu den *konstruktiven Massnahmen* gehört insbesondere die Ausbildung der gefährdeten Bauteile derart, dass

- das fachgerechte und sorgfältige Betonieren gewährleistet ist,
- sie möglichst rissfrei bleiben,
- Regen- und Schneewasser nicht liegenbleibt, sondern rasch abfliesst,
- die Bewehrung eine reichliche Betonüberdeckung aufweist.

Die Bauteile sollen daher *möglichst einfache Querschnittsformen mit genügenden Abmessungen, zweckmässig angeordneter Bewehrung* und *keine Hohlräume oder Aussparungen* aufweisen. Durch Fugen oder durch Vorspannen sind sie so auszubilden, dass auch im Zusammenwirken mit dem ganzen Brückenquerschnitt möglichst keine Risse auftreten.

Von besonderer Bedeutung ist auch eine *genügende Betonüberdeckung der Bewehrung*. Die in den Normen vorgeschriebenen Werte sind *Mindestwerte*, die auch unter Berücksichtigung der Toleranzen, z.B. der Bügelabmessungen und der Verlegeungenauigkeiten, unbedingt eingehalten werden müssen. Für Bauteile, die direkt den Einwirkungen von Frost und Frost-Tausalz ausgesetzt sind, muss eine Mindestüberdekkung von 40 mm eingehalten werden.

Zu den *betontechnischen Massnahmen* gehört in erster Linie die Verwendung eines *sauberen, dichten, zweckmässig abgestuften und im ganzen Kornbereich frostbeständigen Zuschlagmaterials*. Zur Sicherung der Frost- und Frost-Tausalz-Beständigkeit muss der Beton mit mindestens 300 kg Zement je Kubikmeter fertigem Beton, einem möglichst kleinen Wasser/Zement-Faktor (etwa 0,45) und mit dem kontrollierten Einsatz eines überprüften porenbildenden Zusatzmittels für einen Luftporengehalt von 3% bis 5,5% im Frischbeton hergestellt werden. Der Beton muss *vollständig durchmischt* und die erforderliche Mischdauer von mindestens 60 s, oder besser mehr, genau eingehalten werden. Die Verwendung eines Luftporenzusatzmittels verlangt eine grössere Sorgfalt bezüglich Dauer und Gleichmässigkeit des Mischvorganges.

Die Hauptschwierigkeit besteht nun darin, über längere Zeit hinweg und unter den verschiedensten Wetterbedingungen täglich eine verhältnismässig kleine Kubatur von diesem Spezialbeton von überdurchschnittlicher Gleichmässigkeit herzustellen und einzubringen. Nur durch eine *intensive Frischbetonkontrolle* mit der Bestimmung der Betonkonsistenz (Werte nach *Walz* zwischen 1,12 und 1,18), der Betondichte und des Luftporengehaltes, und zwar kurz vor dem Einbringen des Betons in die Schalung, kann dieses Ziel erreicht werden.

Die bis jetzt vorliegenden Erfahrungen lassen vermuten, dass herkömmliche Holzschalungen sich wegen des Wassersaugvermögens für die Herstellung einer möglichst beständigen Betonoberfläche besser eignen als Stahl- oder Kunststoffschalungen.

Das *Einbringen und Verdichten des Betons* muss nach einem klar festgelegten und zweckmässigerweise durch Pilotversuche erprobten Arbeitsschema erfolgen und ist dementsprechend auch zu kontrollieren. Dem *Vibrieren* ist grösste Beachtung zu schenken; es darf vor allem nicht zu lang vibriert werden, damit in den schalungsnahen Schichten keine Entmischungen und kein Ausscheiden von Wasser und feinen Luftporen auftritt [4].

Unmittelbar nach dem Ausschalen sind die Betonoberflächen sorgfältig und konsequent nachzubehandeln, d.h. etwa mit feuchtigkeits- und wärmeisolierenden, dichten Matten abzudecken. Wichtig ist dabei auch, dass der exponierte Beton vor der ersten Frosteinwirkung genügend erhärten und vor der ersten Tausalzwirkung mindestens einmal möglichst austrocknen kann.

Durch zweckmässigen *Unterhalt und Winterdienst* kann wesentlich zur Erhaltung der Beständigkeit der gefährdeten Bauteile beigetragen werden. Die Taumittel zur Glatteisbekämpfung müssen unter Berücksichtigung der Witterungsentwicklung, der Bodentemperatur und der Erfahrung so sparsam wie möglich und gleichmässig verteilt eingesetzt werden. Dabei ist sicherzustellen, dass auch unter winterlichen Verhältnissen eine rasche Entwässerung der Betonoberflächen gewährleistet bleibt. Ferner sollten wenn immer möglich die Schneemahden rasch von den gefährdeten Bauteilen weggeräumt werden, damit die Betonbrüstungen nicht unmittelbar vor dem Gefrieren Tausalzlösung aufsaugen.

Alle diese Massnahmen und nicht zuletzt auch die erforderlichen Kontrollen beim Betonieren sind sehr aufwendig und erhöhen ganz wesentlich den Erstellungspreis dieser Bauteile. Das ist voll gerechtfertigt, wenn es damit gelingt, exponierte Betonoberflächen so herzustellen, dass sie während der vorgesehenen Lebensdauer keine oder höchstens kosmetische Schäden zeigen.

Schadenbehebung

Gefährdete oder schon beeinträchtigte Oberflächen können durch Imprägnierung oder Beschichtung vor weiterer Zerstörung geschützt werden. Selbstverständliche Voraussetzung für das Gelingen einer solchen Sanierung ist die Bedingung, dass der Kern des Betons gesund ist, d.h. eine genügende Dichte, Festigkeit und Beständigkeit aufweist.

Eine weitere entscheidende Voraussetzung ist auch die gründliche Vorbehandlung der Betonoberflächen durch *Sandstrahlen* oder *Hochdruckwasserstrahl* und die *Entfernung der äussersten Feinmörtelschicht* sowie aller losen und beschädigten Betonteile. Korrodierte Armierungseisen sind freizuspitzen, sorgfältig zu reinigen und mit einem Korrosionsschutz zu versehen. Sind Aufmörtelungen notwendig, um die ursprüngliche Querschnittsform wieder herzustellen, so sollen keine auf Null auslaufenden Mörtelschichten entstehen, und der Bildung von Schwindrissen ist entgegenzuwirken.

Vor allem als Präventivmassnahme lassen sich besonders liegende Flächen durch *Imprägnierung* schützen. Die Poren der oberflächennahen Schichten werden mit einer dünnen, wasserabstossenden Schicht überzogen. Die Saugfähigkeit und damit das Eindringen von Wasser und Salzlösung wird sehr stark herabgesetzt, und die Beständigkeit der Betonoberfläche kann für einige Zeit verbessert werden.

Bei der *Beschichtung* wird der Beton mit einer durchgehenden, dichten Schicht überzogen, die den Durchgang von Wasser und den darin gelösten Schadstoffen verhindert. Bei den verwendeten Produkten handelt es sich um Kunststoffe oder kunststoffvergütete, zementgebundene Mörtel, welche auf den entsprechend vorbehandelten Beton aufgebracht werden.

Für die einwandfreie Gewährung des Schutzes müssen diese Produkte

- dauerhaft sein; keine ungünstigen Veränderungen infolge Alterung und Umwelteinflüssen zeigen,

- gut auf der Betonoberfläche haften,
- vorhandene oder sich neu bildende Risse bis zu einer Breite von etwa 0,3 mm überbrücken,
- unter Baustellenbedingungen zuverlässig appliziert werden können,
- auf einfache Art repariert und allenfalls nach einigen Jahren erneuert werden können.

Die Forderung nach *guter Haftung* und zugleich *genügender Rissüberbrückung* ist schwer zu erfüllen, da es sich um zwei gegenläufige Eigenschaften handelt. Man beobachtet daher häufig, dass alte oder neue Betonrisse sich auch in dünnen, gut haftenden Beschichtungen zeigen und damit Ansätze neuer Schadstellen bilden (Bild 7). Auf der anderen Seite haben starke dehnungsfähige, rissüberbrückende Beschichtungen oft die Tendenz zu grösseren Ablösungen, die meist von einer mechanischen Beschädigung, etwa durch den *Schneepflug*, ausgeht.

Sowohl für Imprägnierungen wie auch für Beschichtungen besteht ein verhältnismässig grosses Angebot von Produkten, die sich zum überwiegenden Teil in Laborversuchen als geeignet erwiesen haben. Trotz diesen Ergebnissen sind nun leider die Erfahrungen in der Praxis nicht so eindeutig. Offenbar gilt auch hier, dass die Verwendung von qualitativ hochwertigen Materialien allein nicht genügt für den Erfolg einer solchen Sanierung. Vielmehr zeigt sich erneut sehr deutlich, dass auch eine gründliche Vorbehandlung der Betonoberfläche, die genaue Einhaltung der Anwendungsbedingungen (Feuchtigkeit des Betons, Temperatur usw.) und die äusserste Sorgfalt in der Applikation des Produkts entscheidende Faktoren sind, damit die Beständigkeit von gefährdeten Betonoberflächen über längere Zeit erhalten werden kann.

Literatur

[1] *Bänziger, D.J.* und andere (1981): «Der Lehnenviadukt Beckenried». Baufachverlag AG, Zürich

[2] *Rösli, A., Harnik, A.B.* (1979): «Zur Frost-Tausalz-Beständigkeit von Beton». Schweiz. Ingenieur und Architekt, Heft 46

[3] *Richartz, W.* (1969): «Die Bindung von Chlorid bei der Zementerhärtung». Zement-Kalk-Gips, Heft 10

[4] *Köppel, A.J.* (1982): «Versuche zum Betonieren von Brückenbrüstungen mit frosttausalzbeständigem Beton», D.J. Bänziger und A.J. Köppel, Ingenieurbüro Buchs, 1982

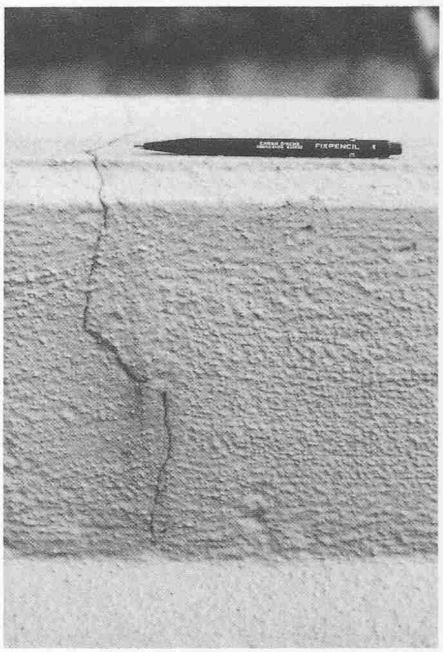


Bild 7. Rissbildung in gut haftender Beschichtung mit der Gefahr erneuter Schadenbildung

Adresse der Verfasser: Prof. Dr. *A. Rösli, A. Hächler*, dipl. Bauing. ETH, Institut für Baustoffe, Werkstoffchemie und Korrosion, ETH Hönggerberg, 8093 Zürich.

Biegewellen in Sandwich-Strukturen

Von Mahir Sayir, Zürich

Die Phasengeschwindigkeit von Biegewellen in stab- oder plattenartigen Strukturen mit homogenem Querschnitt ist von der Wellenlänge abhängig. Bei Wellenlängen, viel grösser als die Dicke der Struktur, ist die Phasengeschwindigkeit ziemlich genau proportional zur Wellenzahl (reziproke Wellenlänge · 2 π). Grosse Wellenlängen fahren langsamer; wegen dieses dispersiven Charakters der Welle ändert sich die Form eines nichtsinusoidalen Impulses während der Fortpflanzung. Bei Wellenlängen, die mit der Dicke vergleichbar sind, machen sich starke Schubeinflüsse bemerkbar (Timoshenko Balken), die Abhängigkeit der Phasengeschwindigkeit von der Wellenlänge wird schwächer, die Welle wirkt weniger dispersiv. Bei Sandwich-Strukturen mit einem weichen Kern und steifen Flanschen sind die Schubeinflüsse schon bei grossen Wellenlängen stark, die Wellenfortpflanzung weist je nach Grössenordnung der Wellenlänge eine eigentümliche Gestalt auf. Im folgenden Artikel wird ein theoretisches Modell beschrieben, das mit Hilfe von systematischen, sowohl mathematisch als auch physikalisch begründeten Approximationsschritten den experimentellen Beobachtungen qualitativ und quantitativ entsprechende Resultate ergibt. Insbesondere wird gezeigt, dass Querimpulse mit Wellenlängen, die zwischen zwei Referenzlängen λ_2, λ_1 liegen, sich praktisch als dispersionsfreie Schubwellen fortpflanzen.

The phase velocity of flexural waves in beam- or plate-like structures with homogeneous section depends on the wavelength. For wavelengths which are much greater than the thickness of the structure, the phase velocity is quite precisely proportional to the wave number (reciprocal wavelength · 2 π). Long waves travel slowly; because of this dispersive character, a nonsinusoidal impuls changes its shape while propagating. For wavelengths comparable with the thickness of the structure, strong shear effects are to be expected (Timoshenko beam), the dependence of the phase velocity on the wavelength gets weaker, the wave is less dispersive. In sandwich-structures with a soft core between stiff plates, the shear effects are strong even for long waves, the propagation of flexural wave is associated with characteristic features depending on the order of magnitude of the wavelength. In the following paper, a theoretical model is presented, based on approximation steps, which can be mathematically and physically justified. This model gives results confirming qualitatively and quantitatively experimental observations. It is shown in particular that lateral impulses with wavelengths lying between two reference lengths λ_2, λ_1 propagate practically as shear waves.

Biegewellen in homogenen Balken

Ein *Querstoss* verursacht an einem dünnen homogenen Balken eine Störung, die sich in Form einer Biegewelle fortpflanzt. Die zugehörige „Wellengleichung" kann aus der Gleichung der Biegelinie

(1) $v'' = M_b/EI$

(v = Querverschiebung, $()'$ = Ableitung nach der Längskoordinate, I = Flächenmoment 2. Grades, E = Elastizitätsmodul, M_b = Biegemoment) und aus der Gleichgewichtsbedingung mit Trägheitskraft

(2) $M_b'' = -\rho A \ddot{v}$

(ρ = Masse je Volumeneinheit, A = Querschnittsfläche, $\dot{()}$ = Ableitung nach der Zeit) hergeleitet werden. Man bekommt

(3) $\frac{EI}{\rho A} v'''' + \ddot{v} = 0$

Eine sinusoidale Störung mit gegebener Frequenz f und zugehöriger Wellenlänge λ pflanzt sich mit der Phasengeschwindigkeit

(4) $c = f\lambda$