Zeitschrift: Schweizerische Bauzeitung
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 87 (1969)
Heft: 21

Artikel: Korrosion der Stähle, insbesondere der hochwertigen, spannbaren Baustähle: Vortrag
Autor: Müller, H.R.
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-70696

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: 14.07.2025

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

HERAUSGEGEBEN VON DER VERLAGS-AKTIENGESELLSCHAFT DER AKADEMISCHEN TECHNISCHEN VEREINE, ZÜRICH

Korrosion der Stähle, insbesondere der hochwertigen, spannbaren Baustähle

Von **H. R. Müller**, dipl. Ing. ETH, Zürich

DK 620.19:691.714

Vortrag, gehalten in Zürich am 20. Oktober 1967 vor der Schweiz. Gesellschaft für Bodenmechanik und Fundationstechnik

1. Allgemeines

Durch Korrosion werden täglich grosse Mengen von Stahl zernagt, aufgefressen, vernichtet. Bekannt ist diese Erscheinung insbesondere als Rost des Stahles. Diese Korrosionsart treffen wir im praktischen Bereich überall dort, wo ungeschützte Stahloberflächen mit dem umgebenden Sauerstoff (in der Luft oder im Boden) in eine chemische Verbindung treten und der Stahl oxydiert, insbesondere, wenn Feuchtigkeit dazutritt. Die sich dabei bildende Oxydschicht verhindert oder erschwert zum mindesten den weiteren Zutritt von Sauerstoff, es tritt eine Selbsthemmung der Oxydation ein. Die Oberfläche so angefressener Stähle befindet sich nicht mehr im ursprünglichen Zustand, wie etwa poliert oder blank gedreht, sondern ist rauh, kraterförmig und mit Spalten und Furchen durchsetzt. Die Tiefe der Ausfressungen ist örtlich meist verschieden. Sie hängt ab von den äusseren Bedingungen der chemischen Reaktion (Temperatur, Feuchtigkeit, Vorhandensein anderer Elemente) und von der Beschaffenheit der Stahloberfläche (Struktur, Kristallaufbau, Bearbeitung). Die Gestalt der Oberfläche eines Stahles hat auf das Verhalten schlanker Stäbe unter Zug- und Biegebeanspruchung eine besondere Bedeutung, auf die weiter unten eingetreten wird.

Gefährlicher als dieser einfache Oxydationsvorgang des Anrostens an der sichtbaren Oberfläche sind die elektrochemischen Korrosionsprozesse, die meist unter den oberflächlich oxydierten Stellen auftreten. Sie beruhen auf dem bekannten galvanischen Effekt, der bei Vorhandensein eines Elektrolyten und zweier Metalle (Anode und Kathode) entsteht, wenn diese Metalle verschiedene Elektronenpotentiale besitzen. Solche galvanischen Elemente können sich sehr leicht längs der Oberfläche eines Stahlstabes bilden, wobei sowohl der metallische Leiter, die Anode und die Kathode aus dem nämlichen Stab bestehen und nur noch ein Elektrolyt hinzuzutreten braucht (Bild 1). Als Elektrolyt kann jede Lösung dienen, in welcher Hydroxylionen vorhanden sind [1]. Die elektrochemische Korrosion [1]) hat nun einen perfiden Lochfrass zur Folge, welcher im allgemeinen nicht auf den ersten Blick erkennbar ist. Bei gewissen elektrochemischen Korrosionen ist ausserdem der Umstand unangenehm, dass allenfalls atomarer Wasserstoff an der Kathode entsteht. Dieser diffundiert in das Metall und verursacht Sprengwirkungen.

[1]) Vergleiche auch *A. Bukowiecki*, Über das Korrosionsverhalten von Metallen im Bauwesen, «Schweizerische Bauzeitung» 1968, H. 48, S. 856—859. *Red.*

2. Versuche

Über grundlegende Untersuchungen an Spannbetonstählen liegen nur wenige Berichte vor. Man hat die speziellen Probleme des hochwertigen Stahles erst in der Folge von Schäden, welche insbesondere in Deutschland bekannt geworden sind, in der Fachwelt zu diskutieren begonnen [2], [3], [4], [5].

In der Schweiz wurden in den Jahren 1959 und 1960 durch das Büro BBR [6] grundsätzliche Korrosionsuntersuchungen an der EMPA in Auftrag gegeben, über welche im folgenden berichtet werden soll.

Das Ziel dieser Arbeiten kann etwa wie folgt umrissen werden:

- Abklärung von vergleichenden Versuchsverfahren für die Bestimmung der Korrosionsanfälligkeit von hochwertigen, hochfesten Stählen, insbesondere Drähten. Prüfung des Anlieferungszustandes und Verhalten nach verschiedener korrosiver Behandlung.
- Bestimmung des Einflusses der praktisch vorkommenden Korrosionsmedien auf die Schädigung der Stähle.
- Einfluss der Herstellungsart und allenfalls der chemischen Zusammensetzung der Stähle auf den Korrosionsangriff.

Zur Verfügung standen Materialien (Spannbetondrähte ∅ 5 mm) aus vier verschiedenen Herstellerwerken. Ein Werk lieferte zwei verschiedene Sorten, nämlich kalt gezogene sowie kalt gezogene und anschliessend angelassene Drähte. Die Festigkeit der Materialien lag bei 160 bis 180 kg/mm².

Die Untersuchungen umfassten die folgenden Korrosionsbehandlungen:

a) Lagerung in feuchter Luft, *schwache Korrosion;*

b) Lagerung in feuchter Luft und wöchentliches Eintauchen der Proben während zehn Minuten in destilliertem Wasser, *mittlere Korrosion;*

Bild 1. Schematische Darstellung des anodischen Angriffes

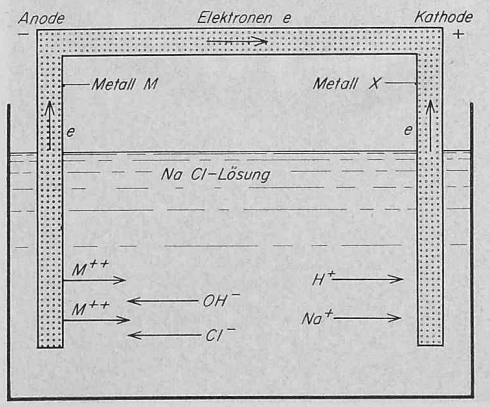
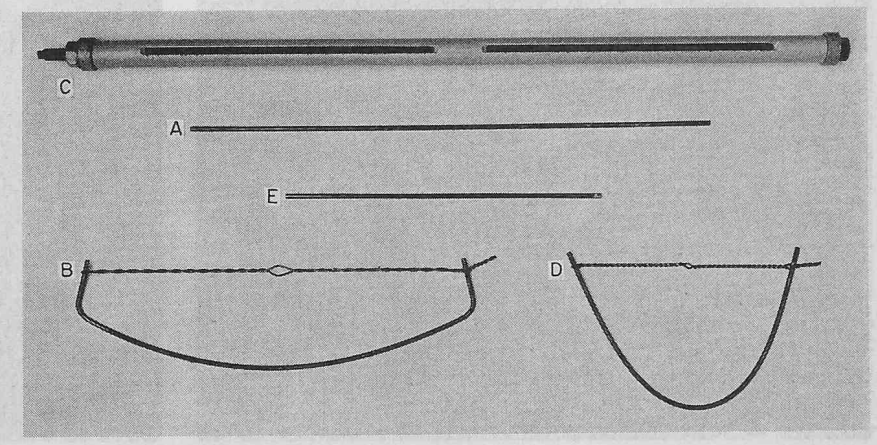
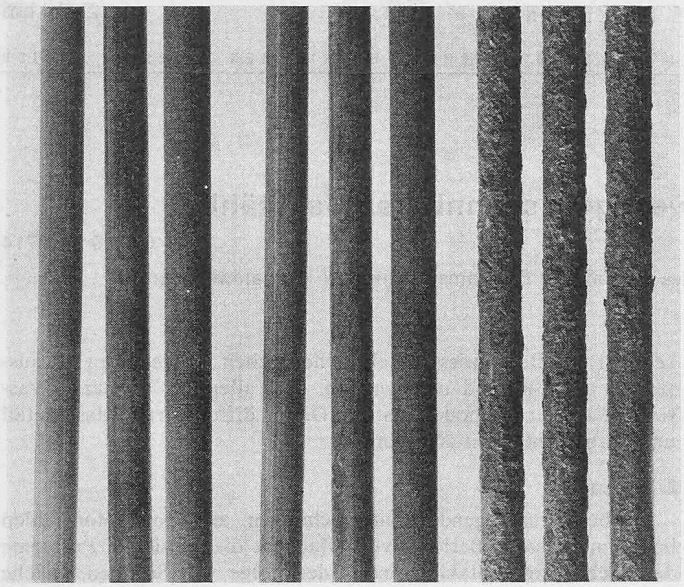


Bild 2. Die verschiedenen Probenformen, welche zur Kennzeichnung der Korrosionseinwirkung herangezogen wurden

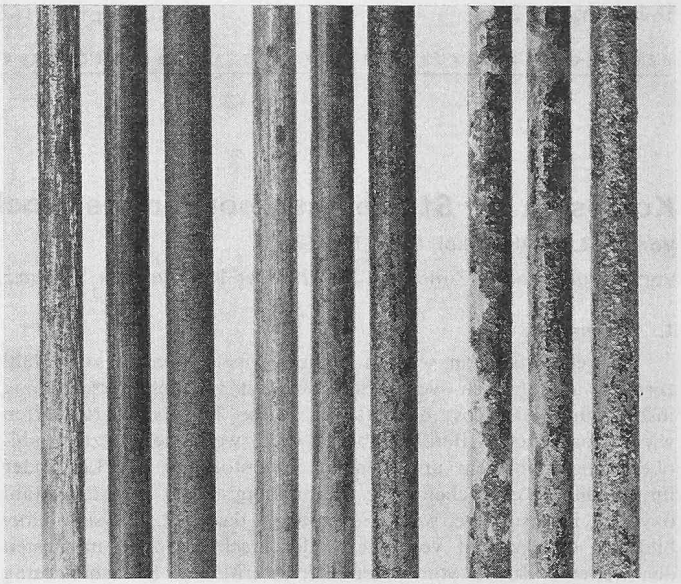
A, E gerader, ungespannter Stab l = 50 cm/30 cm
B EMPA-Bügelprobe
C gespannte Zugprobe im Gehäuse mit durchbrochener Wandung
D Bügelprobe nach DB





a) schwache K. b) mittlere K. c) starke K.

Bild 3. Versuche mit geraden Stäben (Probenform E), Aussehen nach vier Wochen Korrosionseinwirkung



a) schwache K. b) mittlere K. c) starke K.

Bild 4. Versuche mit geraden Stäben (Probenform E), Aussehen nach zwölf Wochen Korrosionseinwirkung

c) wie b), jedoch wöchentliches Eintauchen der Proben während 10 Minuten in 3 %-Kochsalzlösung, *starke Korrosion;*
d) Kochversuch in Nitratlösung.

Die Probenformen entsprachen den Beanspruchungsarten im Spannbeton (Bild 2):

A) gerader, ungespannter Stab von 50 cm Länge;
B) EMPA-Bügelprobe, eine Probenform, welche anlässlich der Vorversuche erarbeitet wurde;
C) EMPA-Zugprobe, gerader, gespannter Stab in Gehäuse mit durchbrochener Wandung, Verankerung mit BBRV-Köpfchen, Spannung 0,8 β_z;
D) Bügelprobe nach Muster der Deutschen Bundesbahn;
E) Gerader, ungespannter Stab von 30 cm Länge.

Die Behandlungsdauer wurde auf 4, 8 und 12 Wochen festgelegt. Bei der Kochprobe, welche als Zeitraffer-Methode angewandt wird, kamen Stunden oder Tage in Betracht. Nach der Behandlung von vier bzw. zwölf Wochen hatten die Proben das in den Bildern 3 und 4 gezeigte Aussehen.

Zur Kennzeichnung der Korrosionsschädigung zog man die Unterschiede im mechanisch-technologischen Verhalten der Proben im Vergleich zum Anlieferungszustand herbei, ausserdem stellte man die Gewichtsverluste fest.

Als wirksamste Prüfung stellte sich erwartungsgemäss die Umschlagbiegung ein. Die Faltbiegeprobe erwies sich ebenfalls als aufschlussreich. Hingegen zeigten sich keine wesentlichen Einbussen bei der Ermüdungsprüfung – ein an sich erfreuliches, aber dennoch unerwartetes Ergebnis.

Man stellte fest, dass bei der stärksten korrosiven Beanspruchung nach zölf Wochen die Umschlagbiegezahlen, gemittelt über alle Versuche, um 37 % absanken. Bei der mittleren Korrosion betrug der Abfall 9 % und bei der schwächsten 6 %. Ähnliche Ergebnisse lieferten die Faltbiegeproben, nämlich 23, 13 und 15 % Abfall gegenüber dem Anlieferungszustand. Auffallend war, dass bei den nach dem Zieh-Verfahren hergestellten Drähten keine Unterschiede in den technologischen Prüfverfahren festgestellt werden konnten, wenn man die Proben in *ungespanntem* oder *gespanntem* Zustand der Korrosion unterwarf. Lediglich beim Herstellungsverfahren durch Walzen und thermische Behandlung (sog. Schlussvergüten) stellte man Brüche der gespannten Proben nach sechs und bei einer Probe nach zwölf Wochen fest (Korrosionsart b). Eine Erklärung für dieses Verhalten und auch für das allgemein festgestellte Absinken der Umschlagbiegezahl bei allen fünf untersuchten Stahlsorten ergibt sich bei Betrachtung der Stahlstruktur und des Oberflächenzustandes. Die durch den Loch-

Bild 5. Mikrogefüge (200fache Vergrösserung) Probenform B. Starke Korrosion, patentierter gezogener Draht, nicht angelassen

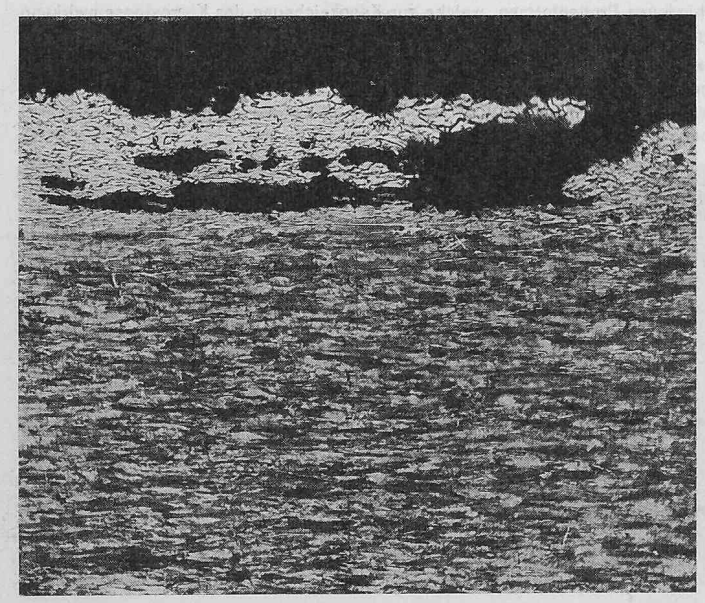
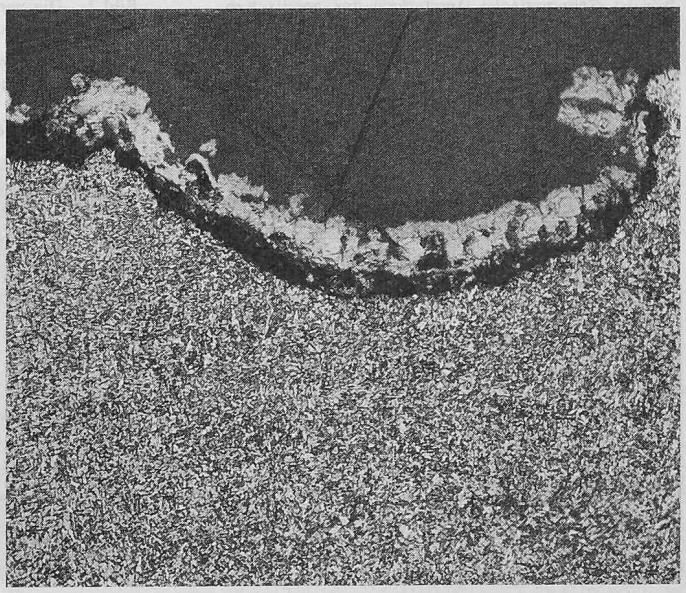


Bild 6. Mikrogefüge (200fache Vergrösserung) Probenform B. Starke Korrosion, schlussvergüteter Draht



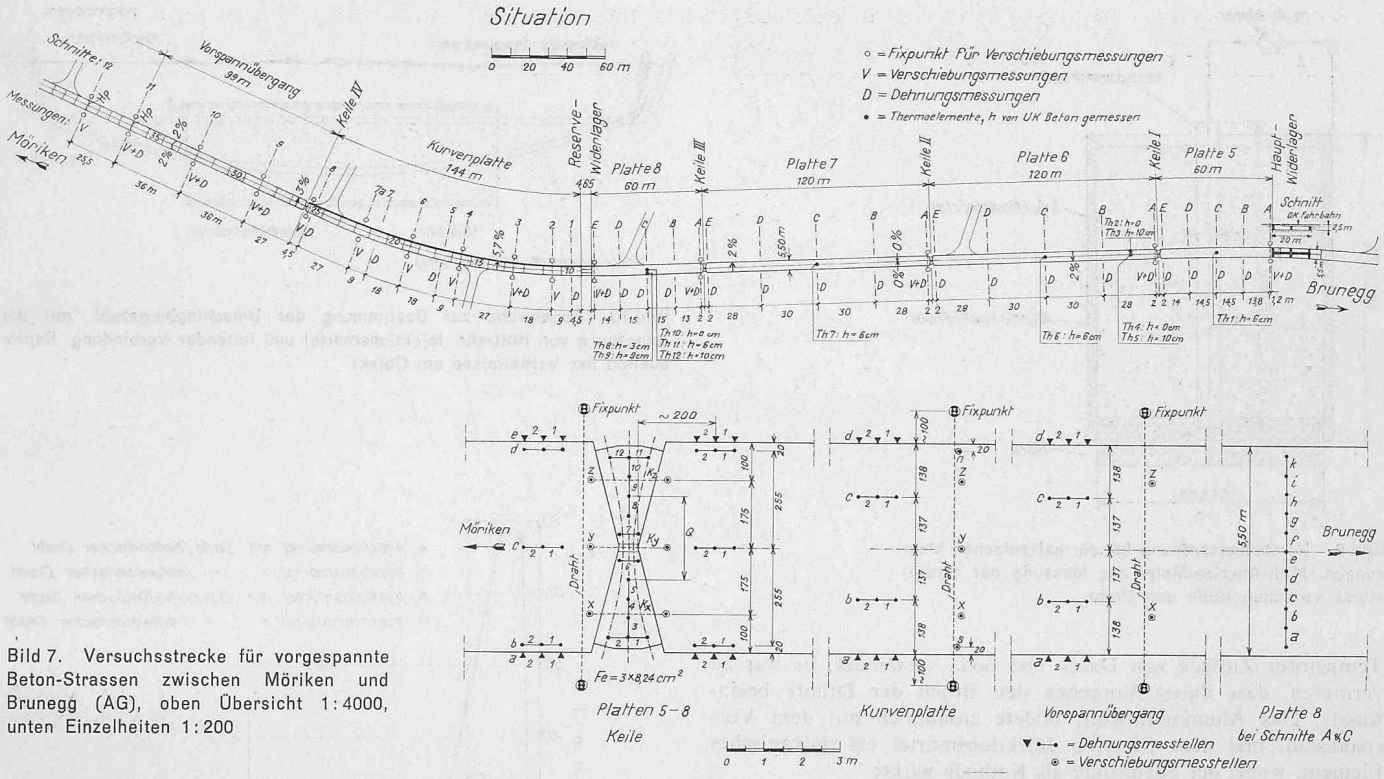


Bild 7. Versuchsstrecke für vorgespannte Beton-Strassen zwischen Möriken und Brunegg (AG), oben Übersicht 1:4000, unten Einzelheiten 1:200

frass verursachten Kerben begünstigen den unter hoher Biegebeanspruchung erfolgenden Bruch infolge der hohen örtlichen Spannung in der Kerbe. Bild 5 zeigt in 200facher Vergrösserung die Kornstruktur des gezogenen, mechanisch verformten Drahtes mit typischen, längsorientierten Kristallen. Die fein verteilten, gleichmässigen Körner des durch thermische Behandlung erzeugten hochwertigen Stahles lassen eine Verzweigung der Anrisse im allgemeinen nicht zu. Es kann festgestellt werden, dass sich der Korrosionsangriff dieser Struktur entsprechend anpasst (Bild 6).

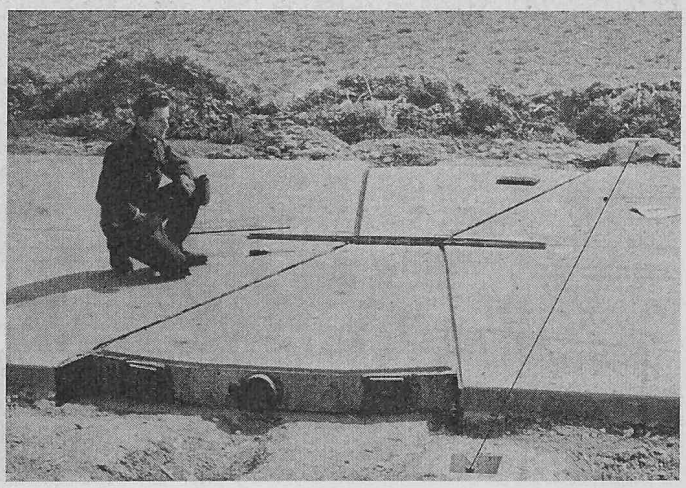
Hier sei noch auf den Begriff der Spannungskorrosion eingegangen, welcher bei dauernd unter Spannung stehenden Stählen vorwiegend zur Diskussion steht. Aus den bisherigen Betrachtungen geht hervor, dass verschiedenes Verhalten der Prüflinge bei Korrosion in schlaffem oder gespanntem Zustand nicht nachgewiesen werden konnte. Hingegen ist zu beachten, dass durch die mechanische Zugbeanspruchung eines gekerbten Stabes hohe örtliche Spannungsspitzen am Kerbgrund auftreten. Werden nun diese Kerben durch Korrosionsabtrag vertieft, so stellt sich eine höhere Beanspruchung des Restquerschnittes ein, und, wenn noch zusätzlich innere Spannungen durch Wasserstoffdiffusion hinzukommen (atomarer Wasserstoff), so kann leicht eingesehen werden, dass es sich bei der Spannungskorrosion vorwiegend um ein mechanisches Problem handelt.

3. Schadenfälle

Korrosionsrisse an ungeschützt im Boden verlegten Spannstählen zeigten sich an einer *Versuchsstrecke für vorgespannte Betonstrassen* [7]. Die Vorspannung erfolgte mittels jeweils paarweise angeordneten Betonkeilen im Abstand von 120 bzw. 205 m. Die Keilkraft wurde mit je drei Vorspannkabeln zu jeweils 42 Drähten ∅ 5 mm erzeugt (Bilder 7 und 8). Damit eine langdauernde Federwirkung dieser Kabel gewährleistet war, wurden die Kabel ohne Injektion in den vorgesehenen Öffnungen belassen. Ein besonderer Korrosionsschutz wurde nicht angeordnet. Die Kabel sind dem Strassenwasser und dem Oberflächenwasser der Randstellen ausgesetzt. Im Jahre 1965, nach etwa achtjähriger Betriebszeit, ergab eine Inspektion der Kabel, dass bei zwei Keilen 15 % der Drähte gebrochen waren. Die restlichen 85 % waren noch intakt. Sämtliche Kabel wurden alsdann ersetzt, und es besteht die Möglichkeit des späteren weiteren Ersatzes. Ich möchte mit diesem Beispiel darauf hinweisen, dass es durchaus möglich ist und fallweise auch wirtschaftlich vertretbar sein kann, mit einer beschränkten Betriebszeit infolge Korrosion bewusst zu rechnen.

Am folgenden Fall kann die Reproduzierbarkeit der elektrochemischen Korrosion im Versuch nachgewiesen werden. Beim Bau einer *Brücke in Holland,* Ende 1965 in Betrieb genommen, wurden grosse Betonpfähle vom Durchmesser 4,25 m und Längen bis zu 50 m verwendet. Die Pfähle, je drei pro Auflager, wurden in einzelnen Schüssen von 6 m Länge vorfabriziert, dann auf einer Helling liegend zusammengebaut und mit Durchschubkabeln vorgespannt. Bei den üblichen Endkontrollen stellte man an einem Pfahl einzelne Drahtbrüche in einem Kabel fest. Diese Brüche mussten zwischen 12 und 36 Stunden nach der Injektion der vollständig gerade geführten Kabel eingetreten sein. Eine Erklärung konnte vorerst nicht gefunden werden. Die Brüche waren, nachdem das Kabel freigespitzt worden war, auf eine bestimmte Zone lokalisierbar, etwa 80 bis 100 cm hinter der Verankerung. Üblicherweise werden für Vorspannkabel Hüllrohre aus Tiefziehblech verwendet. Das war auch für die Pfähle dieser Brücke der Fall. Jedoch war beim erwähnten Pfahl ein Rohrstück aus Aluminium von etwa 50 cm Länge eingefügt. Auf der Baustelle erwies sich, dass die Anpassung an das Endstück durch Aufbördeln mit einem Aluminium-Rohr sich besser bewerkstelligen liess. Die Brüche lagen nun alle im Bereich dieser Aluminium-Umhüllung. Als Injektionshilfsmittel wurden wegen der tiefen

Bild 8. Die Betonkeile der vorgespannten Versuchs-Strasse, welche mit drei Vorspannkabeln zusammengespannt sind



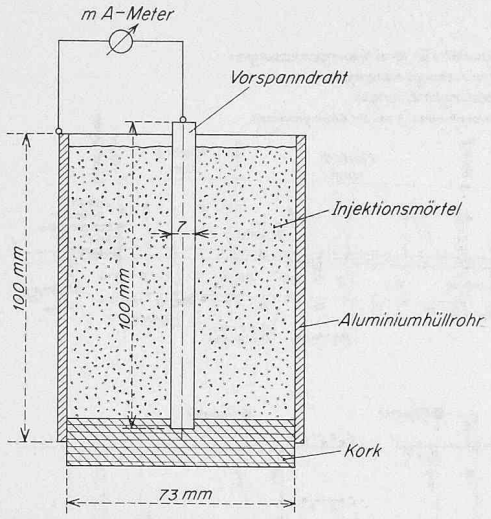


Bild 9. Versuchsanordnung für die galvanischen Messungen. Milli-Ampère-Meter zur Messung der Stromstärke zwischen Hülle und Draht

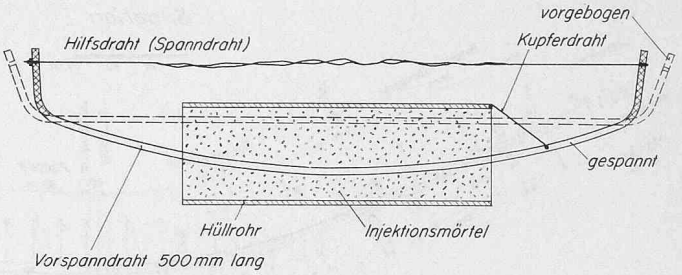


Bild 10. Bügelprobe zur Bestimmung der Umschlagbiegezahl, mit der Anordnung von Hüllrohr, Injektionsmörtel und leitender Verbindung. Reproduktion der Verhältnisse am Objekt

Temperatur Zusätze von Darex und Soda verwendet. Es war zu vermuten, dass dieses Vorgehen den Bruch der Drähte beeinflusste. Das Aluminium-Rohr bildete zusammen mit dem Vorspannstahl und dem flüssigen Injektionsmörtel ein galvanisches Element, wobei der Spannstahl als Kathode wirkte.

Nun wurden *Labor-Versuche* mit den gleichen Voraussetzungen an der EMPA durchgeführt. In einem einseitig mit einem Kork verschlossenen Rohrabschnitt aus Anticorodal B wurde ein Drahtabschnitt in vertikaler Lage befestigt und der Zwischenraum mit frisch zubereitetem Injektionsmörtel gefüllt. Unmittelbar nach dem Einfüllen wurde der Rohrabschnitt über ein Milli-Ampèremeter mit dem Draht kurz geschlossen (Bild 9) und der von diesem galvanischen Element gelieferte Strom in periodischen Zeitabständen gemessen. Die Richtung des fliessenden Stromes deutete darauf hin, dass der Vorspanndraht stets Kathode, und das Hüllrohr aus Aluminium stets Anode war.

Man hat festgestellt, dass der verwendete Draht in Verbindung mit dem Al-Rohr eine merkliche Versprödung, also einen Abfall der Umschlagbiegezahl erleidet (Bild 10). Vergleiche mit normalen Hüllrohren aus Tiefziehblech zeigten bei Drahtmaterial

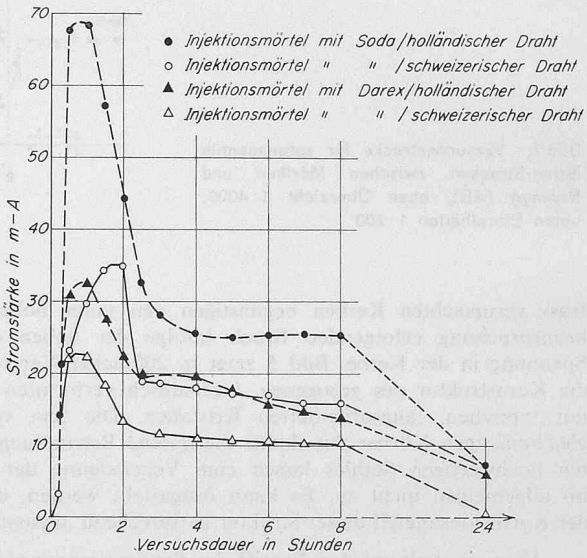


Bild 11. Galvanische Messungen am System Hüllrohr, Injektionsmörtel, Vorspannstahl. Verlauf der Stromstärken innerhalb 24 Stunden bei verschiedenen Rezepten für den Mörtel und verschiedenen Spannstählen

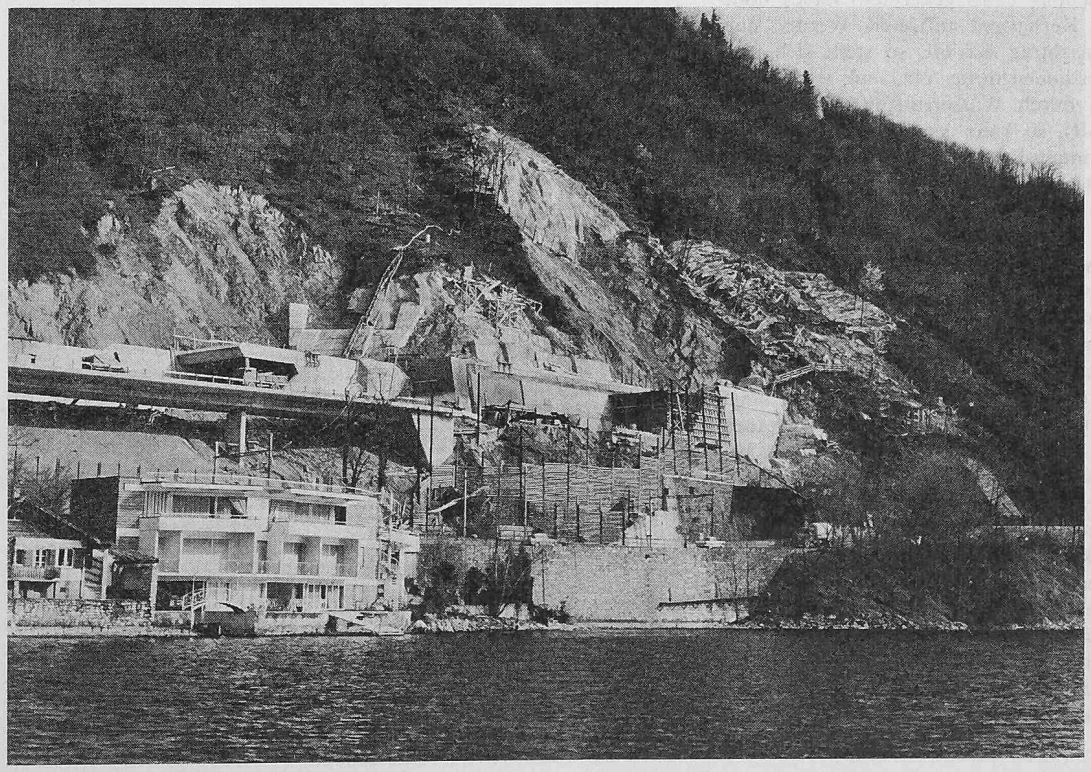


Bild 12. Übersicht über den Hang bei Bissone TI. Oben Portale der Autobahn, unten Portal der Schweizerischen Bundesbahnen. Die kritische Zone ist die rechte obere Bildhälfte

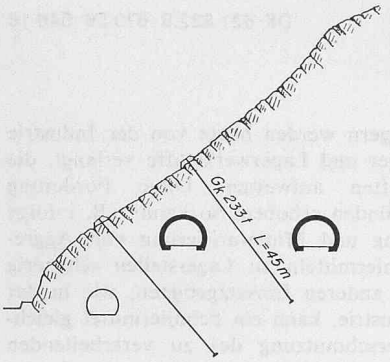


Bild 13. Schnitt 1:2000 durch die kritische Zone des Hanges bei Bissone

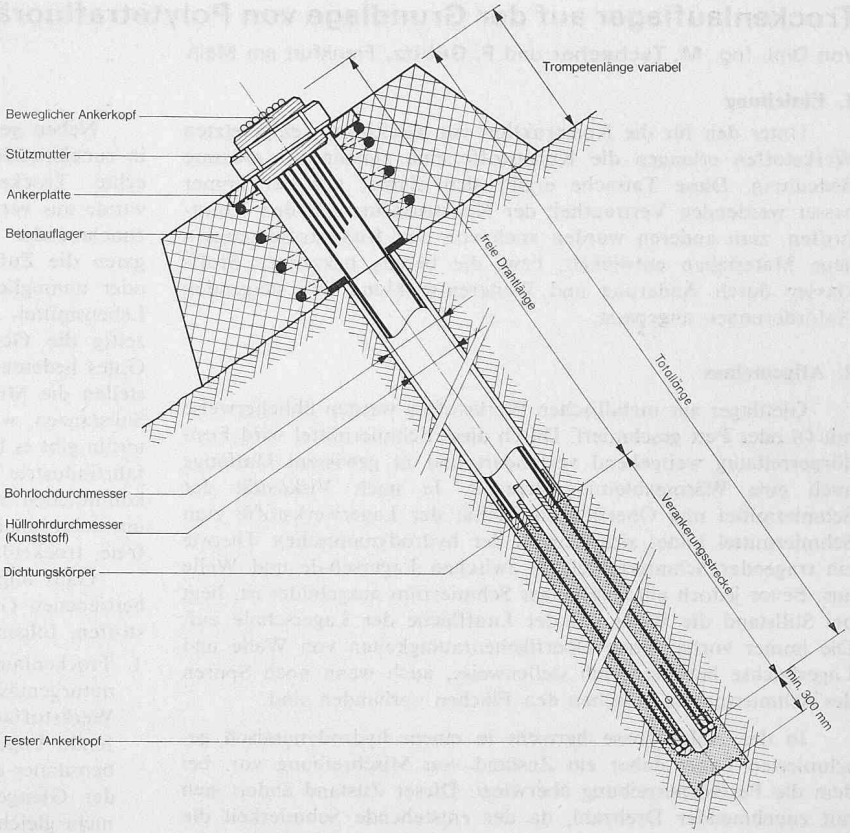


Bild 14 (rechts). Gründungsanker BBRV, Spezialausführung für die Konsolidierung in Bissone. Dauernde Erhaltung der Nachstellbarkeit, Korrosions-Schutz mit plastischer Masse

schweizerischer Herkunft, dass keine wesentliche Versprödung auftritt. Hingegen ergaben bei dieser Untersuchung die Prüfstäbe in Verbindung mit Al-Rohren ebenfalls Reduktionen der Umschlagbiegezahl. Die Verwendung von Al-Rohren wurde natürlich nicht weitergeführt. Nach Abbinden des Mörtels sind weiterhin keine neuen Brüche zu erwarten, wie dies aus dem Verlauf der Stromstärkekurven gut ersichtlich ist (Bild 11).

Es wird über diese Fälle berichtet in der Überzeugung, dass nur durch offene Darlegung von Schwierigkeiten Fortschritte und Entwicklungen zu Verbesserungen möglich sind.

4. Schutzmassnahmen

Zum Schluss seien noch einige Ausführungen über die Verhütung der Korrosion gemacht. Bei den hochwertigen gespannten Stahlelementen sind diesbezüglich verschiedene Möglichkeiten offen. Auch hier hat zur Verhütung die Pille Eingang gefunden. Blanke Stahldrähte, insbesondere Spanndrähte in Rohren frei geführt, können merklich gegen Oberflächenkorrosion geschützt werden, wenn in die umgebende Luft ein Inhibitor eingeführt wird, welcher auf der Metalloberfläche einen Schutzfilm erzeugt. Diese Methode, mit dem Namen VPI bezeichnet, hat sich seit längerer Zeit bewährt. VPI bedeutet: vapor phase inhibitor, zu deutsch etwa über die Dampfphase wirkender Inhibitor. Das Mittel stammt von der Shell-Corporation und wird in Form von weissem Pulver oder in Pillenform geliefert. Seine Anwendung wurde vor allem bekannt während des letzten Krieges, als amerikanisches Kriegsmaterial (Geschütze, Fahrzeuge, Motorenteile) für Wasserüberfahrt und Lagerhaltung zu schützen war. Als chemische Wirksubstanz wird eine Stickstoffverbindung, das Dicyclohexylaminnitrit, verwendet. Zur Sättigung eines Luftraumes von 1 m^3 werden bei 25 ° C 2 mg reine Substanz benötigt. Eine Tablette kostet etwa 40 Rappen und schützt einen Hohlraum von 25 l.

Es wurden unter anderem folgende Proben durchgeführt: Während 14 Monaten wurden Drähte in Blechrohren von 3 m Länge und 3 cm Durchmesser gelagert. Zwei Rohre waren offen, Lagerung in einem Raum mit 85 bis 95 % Luftfeuchtigkeit und Zimmertemperatur. Die anderen beiden Rohre waren verschlossen und enthielten je eine kleine Prise VPI-Pulver. Die ungeschützten Drähte hatten ein ähnliches Aussehen wie Bild 4. Bei den mit VPI geschützten Drähten war kein merklicher Unterschied gegenüber dem Anlieferungszustand festzustellen.

Auf die Möglichkeiten des kathodischen Schutzes mittels künstlich erzeugter Gegenpotentiale wird hier nicht weiter eingetreten. Sie erlangen grössere Bedeutung bei im Boden verlegten Stahlbehältern.

Endlich sei noch ein Beispiel des erfolgreichen Korrosionsschutzes mit Bitumen-Füllung des Kabelrohres erwähnt. Diese Methode hat bei Gründungsankern und Auflager-Zugkabeln Eingang gefunden. Die Füllungen erlauben einen Korrosionsschutz bei Erhaltung der dauernden Federwirkung gespannter Zugelemente.

Beim Bau der Autobahntunnels der N 2 in Bissone wurde die Konsolidierung des Hanges dringend notwendig. Diese ist mit sehr langen BBRV-Gründungsankern von 250 t Kapazität ausgeführt worden. Um die Federkraft der Anker dauernd zu kontrollieren und allenfalls im Laufe der Zeit ändern zu können, musste von der üblichen Füllinjektion mit Zementmörtel abgesehen werden. Es kamen daher freie Dehnstrecken mit Kunststoff-Umhüllung und Inertol-Füllung zur Anwendung (Bilder 12 bis 14).

Bei Beachtung der chemischen und mechanischen Einwirkungen und Anwendung von geeigneten Schutzmassnahmen können hochwertige Stahldrähte, welche dauernd unter Spannung stehen, zuverlässig gegen Korrosion geschützt werden.

Adresse des Verfassers: *H. R. Müller,* dipl. Ing. ETH, Stv. Direktor der Stahlton AG, 8034 Zürich, Riesbachstrasse 57.

Literaturverzeichnis

[1] Aus «Korrosion und Korrosionsschutzmittel», 1954, Shell Switzerland, Zürich.

[2] *A. Bäumel* und *H.-J. Engell,* Düsseldorf, Korrosion von Stahl in Beton, «Archiv für das Eisenhüttenwesen», 30. Jahrg., S. 417—428.

[3] *M. R. Roš,* Spannbeton-Korrosionsprobleme und Schutzmassnahmen, «Neue Zürcher Zeitung», Beilage Technik, Nr. 1715—1718, vom 22. April 1964.

[4] Dr.-Ing. *G. Rehm,* Schäden an Spannbetonbauteilen, die mit Tonerdeschmelzzement hergestellt wurden, «Betonstein-Zeitung», Heft 12, 1963, S. 651—661.

[5] Bericht der RILEM-IABSE-Kommission über Korrosionsfragen beim Spannbeton, 5. Kongress der FIP, 1966 Paris.

[6] Büro BBR (Ing. *Birkenmaier, Brandestini* und *Roš*), Lizenzgeber für das BBRV-Verfahren, 8034 Zürich, Riesbachstrasse 57.

[7] Dr. *A. Voellmy,* a. Sektionschef der EMPA, Beton-Versuchs-Strasse Möriken—Brunegg.