

Schrägseilbrücken

Autor(en): **Thul, Heribert**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH
Kongressbericht**

Band (Jahr): **9 (1972)**

PDF erstellt am: **21.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-9563>

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.

Schrägseilbrücken

Cable-Stayed Bridges

Ponts à câbles inclinés

HERIBERT THUL

Bundesverkehrsministerium Bonn, BRD

1. Geschichtliches

Herr Professor Leonhardt hat im Einführungsbericht das Wesentliche zu den Seilkonstruktionen und ihrer Anwendung in der Bundesrepublik Deutschland gesagt. Mit meinem Beitrag kann ich daher nur noch einige den Brückenbau betreffende Ergänzungen vortragen.

Die Schrägseilbrücke ist keine Erfindung unserer Zeit. Schon im Jahre 1617 stellte der venezianische Ingenieur Verantius eine Brücke mit mehreren parallelen schrägen Ketten dar, und im Jahre 1784 beschrieb der deutsche Immanuel Löcher eine hölzerne Brücke, die bereits alle Merkmale einer Schrägseilbrücke aufwies. Dieser neuartige konstruktive Gedanke wurde in England im Jahre 1817 mit der 1. eisernen Schrägseilbrücke für Fußgänger (Spannweite 34 m) wieder aufgegriffen. Auch in Frankreich entwarf Poyet 4 Jahre später eine hölzerne Balkenbrücke, die mit geraden Eisenstäben an hohen Masten aufgehängt werden sollte. Schließlich war es nochmals England, wo Hartley im Jahre 1840 das Projekt einer Brücke mit zueinander parallelen Abspannungen vorlegte. Von weiteren Versuchen mit diesem damals bereits über 2 Jahrhunderte alten Konstruktionsprinzip ist nichts überliefert worden.

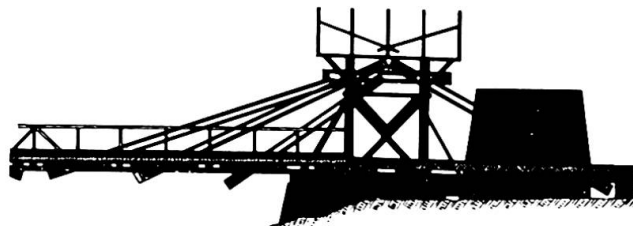


Bild 1: Alte Holzbrücke 1784;
Bauart Löscher

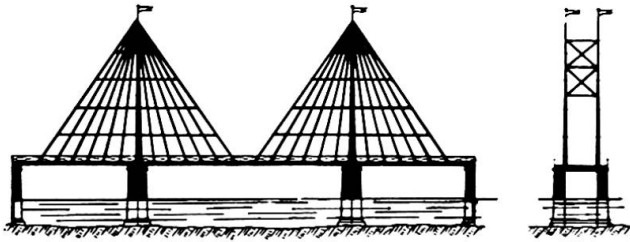


Bild 2: Brücke von 1821
Bauart Poyet



Bild 3: Kettenbrücke von 1840
Bauart Hatley



Bild 4: Schrägseilbrücke
Bauart Gisclard-
Anodin

Im modernen Brückenbau gewann die Seilkonstruktion erst wieder an Bedeutung, nachdem Material hoher Festigkeit zur Verfügung stand und das Kräftespiel der hochgradig statisch unbestimmten Systeme sowie eine wirtschaftliche Montage beherrscht wurden.

2. Systeme der Schrägseilbrücken

Grundsätzlich ist zwischen 1- und 2-wandigen Systemen zu unterscheiden.

Die Tragebene 1-wandiger Systeme liegt in der Regel über der Mittellinie des Bauwerkes. Der Versteifungsträger ist dabei als Hohlkasten ausgebildet, über den die aus der Exzentrizität der Lasten herrührenden Torsionsmomente abgetragen werden. Von besonderem Vorteil ist hierbei die Möglichkeit, die Abmessungen der Pfeiler klein zu halten.



Bild 5: Rheinbrücke Leverkusen;
einwandige Schrägseilbrücke

Bei den 2-wandigen Systemen können die Seiltragwände entweder innerhalb oder außerhalb der Geländer angeordnet werden. Im ersten Falle ist ein größerer Brückenquerschnitt, im zweiten Falle sind aufwendigere Konstruktionen für Verankerung und Pfeiler erforderlich. Die Seilebenen können senkrecht oder gegeneinander geneigt gewählt werden.

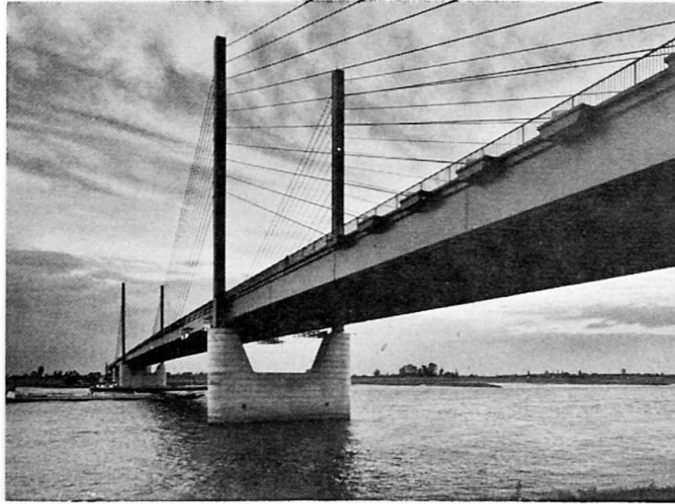


Bild 6: Rheinbrücke Rees;
zweiwandige Schrägseilbrücke

Beide Systeme, ein- und zweiwandige, können sich hinsichtlich der Zahl und Anordnung der Seile voneinander unterscheiden.

Ist die Brücke nur an wenigen Seilen aufgehängt, so wird deren Verankerung in Anbetracht der großen Kraftkonzentration schwierig. Erhebliche Verstärkungen der Hauptträger an den Einleitungspunkten sind dann nicht zu vermeiden. Demgegenüber kann beim Vielseilsystem mit Annäherung ein kontinuierlich unterstützter Träger auf elastischer Bettung angenommen werden, wobei die Gesamtheit der Tragglieder einer Kabelebene durch eine elastische Wand ersetzt wird.

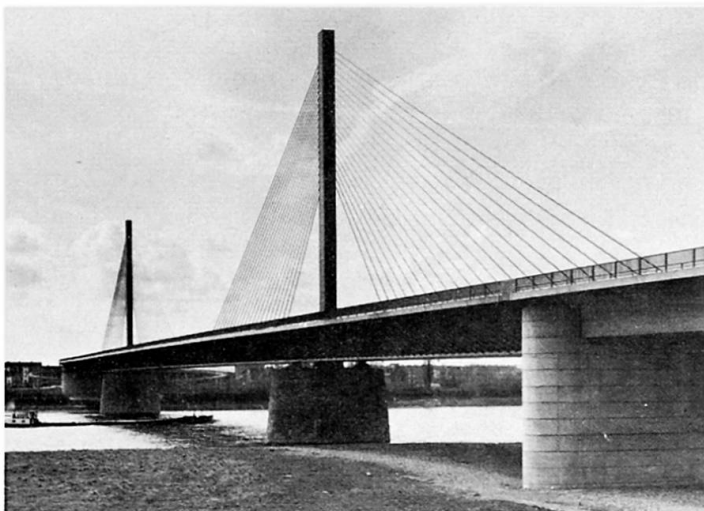


Bild 7: Friedrich-Ebert-Brücke über den Rhein in Bonn/Nord

Die Seiltragwände lassen sich in ein- oder zweihöftiger (symmetrischer) Bauweise ausführen, wobei die Seile in Büschel- oder Harfenform angeordnet werden können. Die einhöftige Ausführung erfordert zwar mehr Stahl, doch wird sie oft mit Rücksicht auf die vorgegebene Stellung der Pfeiler oder aber auch aus gestalterischen Gründen zu wählen sein.

Im allgemeinen werden die Seile im Pylonenkopf fest verankert; hierdurch wird eine große Steifigkeit des Systems erreicht. Die Seile können aber auch über Sattellager geführt werden. Die Entscheidung darüber, welche dieser beiden Konstruktionsarten vorzuziehen ist, hängt einmal von einem Wirtschaftlichkeitsvergleich ab, wird aber auch in starkem Maße von der ästhetischen Wirkung mitbestimmt.

Insgesamt stehen also eine Vielzahl von Variationsmöglichkeiten zur Verfügung, mit denen sowohl allen technischen Erfordernissen durch sachgemäße konstruktive Ausbildung wie auch allen Wünschen nach einer ansprechenden architektonischen Gestaltung Rechnung getragen werden kann.

3. Die Seile

In den vergangenen Jahren sind fast ausschließlich verschlossene Seile angewandt worden.

Diese haben gegenüber den aus Runddrähten zusammengesetzten Spiralseilen folgende Vorteile:

- Besserer Korrosionsschutz
- Größere Materialdichte (90% gegenüber 70% beim Normalseil)
- Höherer Elastizitätsmodul; dieser erreicht bereits nach wenigen Lastspielen im Verkehrslastbereich einen Wert von $1\ 700\ \text{Mp/cm}^2$. Das entspricht etwa dem Mittelwert der Elastizitätsmodulen, die für einfache Seile einerseits und normale Baustahlprofile andererseits gelten. Die für Umlenkungen notwendige Biogsamkeit bleibt bei verschlossenen Seilen trotz der hohen Steifigkeit aufgrund des spiralförmigen Aufbaues erhalten.
- Größere Unempfindlichkeit gegen Querpressung, weil sich die einzelnen Profildrahtlagen flächenhaft und nicht linienförmig wie bei normalen Seilen gegeneinander abstützen.

Nach der einschlägigen DIN-Vorschrift (Entwurf) dürfen verschlossene Seile mit 42% der rechnerischen Bruchlast beansprucht werden. Die Sicherheit, bezogen auf die wirkliche Bruchlast, die bis zu 8% unter die rechnerische Bruchlast sinken kann, beträgt dann wie bei Baustählen $\nu = 2,2$ während sich als Sicherheit gegenüber der technischen Streckgrenze der Wert $\nu = 1,5$ ergibt.

Aus zahlreichen Dauerschwingversuchen wurde deutlich, daß bei einer Oberlast von 35% der Bruchlast eine Schwingbreite von $1\ 500\ \text{kp/cm}^2$ und bei einer Unterlast von $0\ \text{kp/cm}^2$ eine Schwingbreite von $2\ 000\ \text{kp/cm}^2$ zugelassen werden kann.

Demzufolge gilt in der Bundesrepublik Deutschland folgendes:

- Für eine Oberspannung von 42% der rechnerischen Bruchlast ist eine Schwingbreite von $1\,500\text{ kp/cm}^2$, für die Ursprungfestigkeit eine solche von $2\,000\text{ kp/cm}^2$ zugelassen. Eine Zusammenstellung der auftretenden Seilkräfte bei einer repräsentativen Anzahl gebauter sowie geplanter Seilbrücken wie Hängebrücken, Zügelgurtbrücken und Schrägseilbrücken hat ergeben, daß mindestens 40% der rechnerischen Verkehrslast angesetzt werden können, ohne daß die Dauerfestigkeit für die Bemessung der Seilquerschnitte maßgebend wird.
- Eine zusätzliche Querpressung führt nicht zu einer Abminderung der Dauerfestigkeit verschlossener Seile, wenn die Größe der Querpressung auf 1 Mp/cm begrenzt wird bei Seilen, die direkt auf Stahl aufliegen, und auf $2,5\text{ Mp/cm}$, wenn zwischen Seil und Stahl eine Weichmetalleinlage von mindestens 1 mm Dicke liegt.

Die Steifigkeit einer Schrägseilbrücke hängt ganz wesentlich von der Steifigkeit der Schrägseile ab.

Der Einfluß des Durchhanges auf den E-Modul wurde im Einführungsbericht behandelt.

Durch Zwischenunterstützungen oder Aufhängungen kann eine Änderung des Seildurchhanges sehr langer Seile verhindert werden. In diesem Falle können auch Schrägseilsysteme mit sehr großen Seillängen wirtschaftlich sein und für Hängebrücken eine echte Konkurrenz werden. Gestalterische Probleme, die durch derartige Hilfskonstruktionen entstehen, lassen sich befriedigend lösen; die Kräfte, die in diesen Hilfsseilen auftreten, betragen nämlich nur etwa 4% der Kräfte in den Hauptseilen, so daß die Durchmesser der Hilfsseile verhältnismäßig klein gehalten werden können.

Es ist jedoch m.E. sehr optimistisch anzunehmen, daß es auch mit Schrägseilbrücken möglich werden könnte, größte Spannweiten zu überbrücken. Diese werden vorerst den Hängebrücken vorbehalten bleiben, zumal beachtliche Schwierigkeiten bei der Montage im Freivorbau sowie aus der Druckbeanspruchung des Versteifungsträgers zu erwarten sind, für die sich gute Lösungen z.Zt. nur schwer finden lassen.

Eine weitere Möglichkeit wirtschaftlicher Anwendung von Schrägseilsystemen bietet sich bei der Verwendung von Paralleldrähtbündeln. Die Vorteile parallel geführter Drähte sind folgende:

- Der E-Modul - ohne Berücksichtigung des Durchhanges - kann mit $2\,000\text{ Mp/cm}^2$ (gegenüber $1\,700\text{ Mp/cm}^2$) angesetzt werden.
- Die Dauerfestigkeitswerte liegen mit $2\,000\text{ Mp/cm}^2$ (gegenüber $1\,500\text{ Mp/cm}^2$) bzw. $2\,500\text{ Mp/cm}^2$ (gegenüber $2\,000\text{ Mp/cm}^2$)

höher als bei Spiralseilen.

- Ein Unterschied zwischen wirklicher und rechnerischer Bruchlast ist kaum feststellbar. Die in Bearbeitung befindliche Vorschrift sieht daher vor, die zul. Spannung auf 45% der Nennfestigkeit festzusetzen, gegenüber 42% bei verschlossenen Seilen.

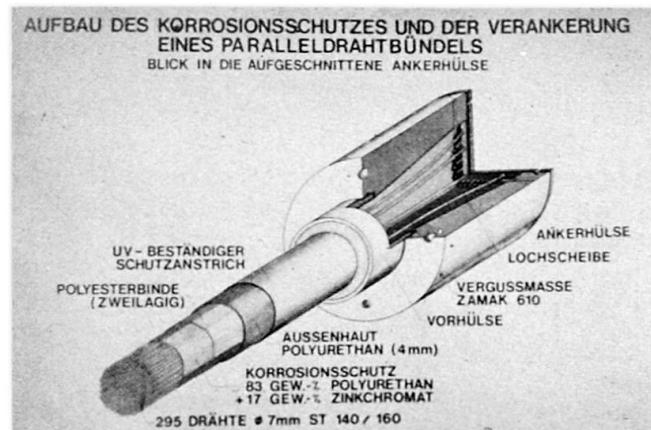


Bild 8: Beispiel für den Korrosionsschutz von Parallelseilen

Schwieriger gegenüber den verschlossenen Seilen sind jedoch der Korrosionsschutz sowie die Montage wegen der Empfindlichkeit gegen Biegung.

Neuartig sind Zugglieder in der Form *b e t o n u m - m a n t e l t e r S p a n n s t a h l b ü n d e l*, wie sie erst kürzlich erstmalig bei uns angewandt worden sind. Hier ist die Gefahr der Korrosion weitgehend gebannt, besonders dann, wenn das Spannstahlbündel durch eine Stahlhülle geschützt wird.

Bei der erwähnten erstmaligen Anwendung handelt es sich um eine seilverspannte Spannbeton-Brücke für kombinierten Eisenbahn- und Straßenverkehr. Die Seilbündel wurden an Ort und Stelle hergestellt, die Spannstähle für das Eigengewicht des Überbaues vorgespannt. Durch die nachträglich hergestellte Betonumhüllung wird ein Verbund zwischen den Spannstählen und der relativ stark dimensionierten Stahlhülle hergestellt. Gleichzeitig wird die Stahlhülle derart im Beton des Überbaues und des Pylonen verankert, daß alle weiteren Lasten nur noch über die nunmehr mittragende Stahlhülle in das Zugglied eingetragen werden. Dadurch wird erreicht, daß die Verkehrslasten vom gesamten Verbundquerschnitt des Seiles aufgenommen werden, während die einbetonierten Spannstähle zusätzlich das Eigengewicht der Konstruktion allein tragen.

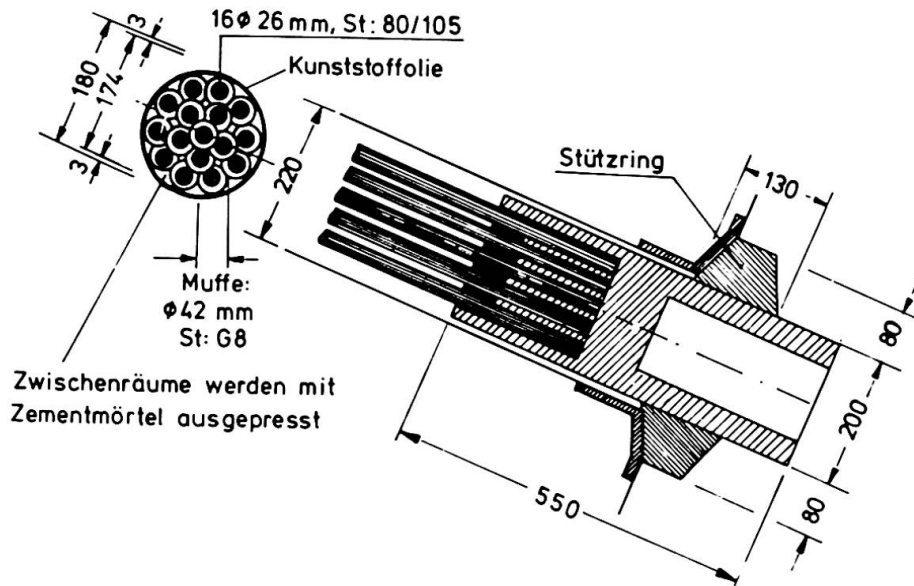


Bild 9: Betonummanteltes Spannstahlbündel

Da die Betonumhüllung von der allseits geschlossenen Stahlhülse geschützt wird, ist die Zugbeanspruchung des Betons im Hinblick auf den Korrosionsschutz der Spannstähle ohne Bedeutung. Die Einleitung der Verkehrslasten in den Verbundquerschnitt wurde durch Dauerschwingversuche geprüft. Es konnten hierbei keinerlei Schäden festgestellt werden. Allerdings muß mit Nachdruck darauf hingewiesen werden, daß es zwar schwierig, aber unbedingt erforderlich ist, den Spannstahl bis zur Fertigstellung der Betonumhüllung einwandfrei vor jedem Rost zu schützen. Daß es sich hierbei durchaus um längere Zeiträume handeln kann, läßt sich leider nicht ausschließen.

4. Seilkopfverguß

Im allgemeinen werden die Seilköpfe mit Feinzink (450°C) vergossen. Die Folge ist eine Abminderung der Dauerfestigkeit der Seile bzw. das Auftreten von Brüchen im oder in der Nähe des Seilkopfes. Um derartige Schäden zu vermeiden, haben wir beim Bau der Rheinbrücke Mannheim-Nord bei einigen Paralleldrahtbündeln erstmals einen Kaltverguß aus Stahlkugeln und einem Zinkstaub-Epoxydharzgemisch angewandt, wie er im Einleitungsbericht beschrieben ist.

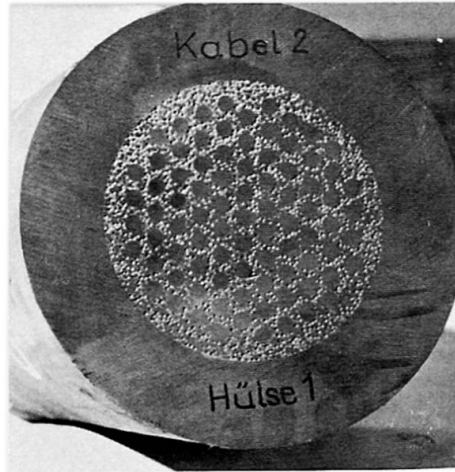


Bild 10: Querschnitt durch eine Ankerbrücke mit Kunststoff, Zinkstaub und Stahlkugeln.

Warm- und Kaltverguß wurden in Laborversuchen einander gegenübergestellt.

Im Zerreißversuch wurden bei den warmvergossenen Seilköpfen im Mittel etwa 11 mm Schlupf, bei den kaltvergossenen Seilköpfen dagegen nur 2,5 mm gemessen.

Auch im Dauerschwing- und Dauerstandsversuch wurden bei Kaltverguß bessere Ergebnisse erzielt. Drahtbrüche wurden nicht festgestellt. Die während des Dauerschwingversuches gemessene Schlupfzunahme von 0,3 mm bis auf 1,0 mm ist praktisch unbedeutend.

Bei der Dauerstandsbelastung kam der Schlupf schon nach wenigen Tagen zum Stillstand, so daß der Kriechvorgang nur mit einem geringen und für die Sicherheit des Bauwerkes unbedeutenden Endkriechwert in Rechnung zu stellen ist.

Über die Alterungsbeständigkeit des Kunststoffvergusses kann aber leider zur Zeit noch nichts Endgültiges ausgesagt werden.

5. Seilschäden

Abschließend sei noch ein Hinweis auf Seilschäden gestattet.

Verschiedentlich festgestellte Brüche von verzinkten Profildrähten in den äußeren Lagen von verschlossenen Seilen gaben Anlaß, den Ursachen dieser Schäden nachzugehen. Wir waren der Meinung, daß diese Bruchschäden auf die elektrolytische Verzinkung zurückzuführen seien, da wir hier die meisten Ausfälle hatten.

Im Grunde ist der Bruch eines einzelnen Drahtes nicht besonders gefährlich, da das Seil im Abstand von etwa 2 bis 3 Schlaglängen bereits wieder seine volle Tragkraft hat. Zudem lassen sich Bruchstellen meist sehr einfach zusammenlöten.

Die gerissenen Drähte zeigten ungewöhnlich raue Kanten, von denen die Brüche ausgegangen waren, sowie eine krokodilhautartige, narbige Oberfläche. Diese beiden Erscheinungen können jedoch nicht als alleinige Ursachen für die Brüche betrachtet werden.

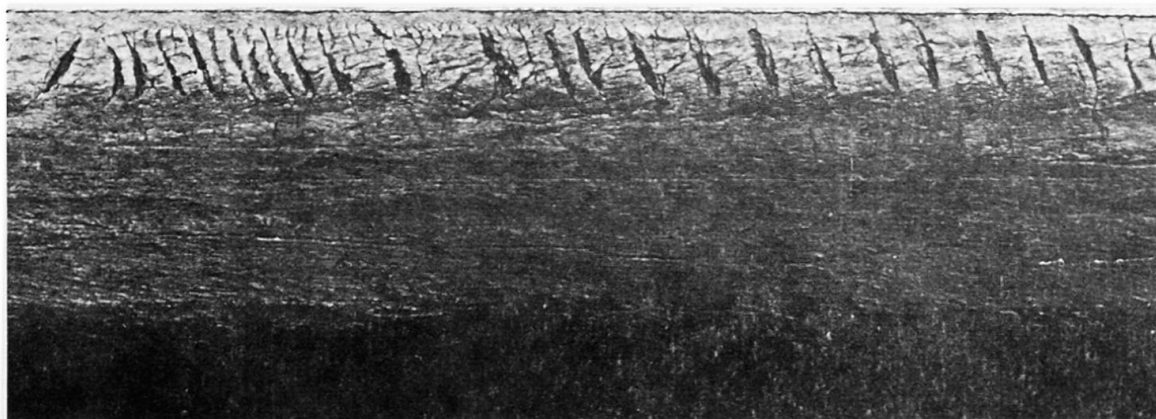


Bild 11: Verzinkter Draht mit örtlichen Aufreißungen.

An der Drahtoberfläche wurden dann auch zusätzlich schräg verlaufende Zerreißen festgestellt, die große Ähnlichkeit mit den in der Fachliteratur bereits beschriebenen Erscheinungen am Walzdraht haben. Ungewöhnlich aber ist, daß von diesen Zerreißen fast senkrecht zur Drahtoberfläche verlaufende ausgezackte Risse ausgingen.

Diese charakteristischen Beobachtungen könnten darauf hinweisen, daß Wasserstoff bei der Bildung der Risse mitgewirkt hat. Auch die Tatsache, daß die Drahtbrüche erst nach dem Verseilen, z.T. erst auf der Baustelle, gefunden wurden, läßt darauf schließen, daß eine Beziehung zu den verzögerten Brüchen durch Wasserstoff besteht.

Zur Klärung dieser Fragen haben wir in verschiedenen Versuchen die mechanischen Eigenschaften und Dauerfestig-

keitswerte von blanken, galvanisch verzinkten und feuerverzinkten Profildrähten - jeweils gezogen und gewalzt - einander gegenübergestellt. Diese Versuche sind noch nicht abgeschlossen, so daß eine definitive Beurteilung derzeit noch nicht möglich ist.

Aus den bisherigen Untersuchungsergebnissen läßt sich jedoch folgendes schließen:

- 1.) Hinsichtlich der Dauerfestigkeit besteht kaum ein Unterschied zwischen den beiden Drahtsorten und Verzinkungsarten. Die Dauerhaftigkeit dürfte somit kaum ein Kriterium für die Bewertung sein.
- 2.) Unterschiede sind in der Biege- und Verwindungsfähigkeit vorhanden, die im wesentlichen von der Drahtsorte, weniger aber von der Verzinkungsart abhängen. Gezogene Stähle zeigten sowohl in blanker als auch in verzinkter Form Vorteile.
- 3.) Die Frage, ob die elektrolytische Verzinkung die Gefahr der Wasserstoffversprödung in sich birgt, ist noch nicht zu beantworten.

6. Zusammenfassung

Schrägseilbrücken haben in den letzten Jahren mehr und mehr Eingang im Brückenbau gefunden. Durch entsprechende konstruktive Maßnahmen gelingt es, große Spannweiten zu überbrücken.

Neben verschlossenen Seilen werden zukünftig auch Paralleldrahtbündel und betonummantelte Spannstahlbündel häufiger zur Ausführung kommen. Gleiches gilt für die kaltvergossenen Ankerköpfe. Besondere Sorgfalt ist weiterhin auf den Korrosionsschutz und die Seilschäden zu legen.