

**Zeitschrift:** Schweizer Ingenieur und Architekt  
**Herausgeber:** Verlags-AG der akademischen technischen Vereine  
**Band:** 105 (1987)  
**Heft:** 12

**Artikel:** Reib-Ermüdung einbetonierter Spannkabel  
**Autor:** Oertie, Jakob / Thürlimann, Bruno  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-76540>

### **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:** 05.04.2026

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

Händeklatschen sowie Mitwippen des Körpers animiert wird. Auch andere Bauwerke wie Tribünen von Sportstadien, wo solche Konzerte stattfinden, können derart beansprucht werden.

Die bei Tanz- und Konzertveranstaltungen auftretenden dynamischen Lasten sind verhältnismässig schlecht bekannt. Da in der Regel der Bodenkontakt stets vorhanden bleibt, sind die durch eine Person ausgeübten Lasten erheblich geringer als beim «Hüpfen an Ort». Andererseits ist die Flächenbelegung erheblich grösser, so dass insgesamt in der Frequenz der massgebenden 2. Harmonischen die Lastenwirkungen von ähnlicher Grössenordnung sind. In Tanzlokalen und Konzertsälen wird jedoch im Vergleich zu Turn- und Sporthallen bei den dynamischen Lasten der Frequenzbereich von 3 Hz bis 3,4 Hz normalerweise vermieden, so dass eine Hochabstimmung auf die Frequenz der 2. Harmonischen des zeitlichen Verlaufs der dynamischen Last zu kleineren erforderlichen Grundfrequenzen führt. Es wird das Einhalten der folgenden minimalen Grundfrequenzen empfohlen:

- Stahlbetonkonstruktionen  
 $f_1 > 6,5$  Hz
- Spannbetonkonstruktionen  
 $f_1 > 7,0$  Hz
- Verbundkonstruktionen (Stahlträger mit Ortsbetonplatte)  
 $f_1 > 7,5$  Hz

- Stahlbetonkonstruktionen (Stahlträger z.B. mit Decke aus mit Beton verfüllten Abkantblechen)  
 $f_1 > 8,0$  Hz

Die in der aufgeführten Reihenfolge zunehmenden Werte sind analog begründet wie bei den Turn- und Sporthallen. Für einen groben Anhaltswert gilt ebenfalls das dort Gesagte. Bei der Berechnung der Grundfrequenz ist die unter Umständen sehr erhebliche Masse der Personen in geeigneter Weise zu berücksichtigen [1].

## Folgerungen

Von Menschen induzierte Schwingungen können vor allem die Gebrauchstauglichkeit von Bauwerken erheblich beeinträchtigen. Massgebliche Einwirkungen können Gehen und Laufen, Hüpfen sowie Tanzen sein. Bei den hier kurz behandelten Bauwerksarten – Fussgängerbauwerke, Turn- und Sporthallen, Tanzlokale und Konzertsäle – sollten die Bauwerksfrequenzen in vertikaler und allenfalls in horizontaler Richtung in solcher Weise abgestimmt werden, dass die angegebenen Frequenzbedingungen eingehalten sind. In besonderen Fällen empfiehlt es sich, eine erzwungene Schwingung zu berechnen und die Ergebnisse anhand von Anhaltswerten zu beurteilen. Un-

ter Umständen, vor allem bei Sanierungen, können auch Sondermassnahmen wie z.B. das Anbringen von Schwingungstilgern zum Ziel führen.

Adresse des Autors: Prof. Dr. Hugo Bachmann, Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH-Hönggerberg, 8093 Zürich.

## Literatur

- [1] Bachmann, H.; Ammann, W. Schwingungsprobleme bei Bauwerken – Durch Menschen und Maschinen induzierte Schwingungen. Structural Engineering Documents Nr. 3. Internationale Vereinigung für Brückenbau und Hochbau (IVBH), Zürich, 1987.
- [2] Bachmann, H. Durch Menschen erregte Bauwerksschwingungen – am Beispiel einer Turnhalle. Schweizer Ingenieur und Architekt 101 (1983) H. 6, S. 104
- [3] Matsumoto, Y.; Nishioka, T.; Shiojiri, H.; Matsuzaki, K. Dynamic Design of Footbridges. IABSE-Proceedings, P-17/78, Aug. 1978. Internationale Vereinigung für Brückenbau und Hochbau (IVBH), Zürich
- [4] Schulze, H. Dynamische Einflüsse der Verkehrslast auf Fussgängerbrücken. Signal und Schiene. .. (1980) H. 2, S. 91-93 H. 3, S. 143-147.
- [5] Baumann, K; Bachmann, H. Durch Menschen verursachte dynamische Lasten und deren Auswirkungen auf Balkentragwerke. Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, Versuchsbericht Nr. 7501-3, erscheint 1987 im Birkhäuser Verlag, Basel.

# Reib-Ermüdung einbetonierter Spannkabel

Von Jakob Oertle und Bruno Thürlimann, Zürich

Ermüdungsversuche an teilweise vorgespannten Trägern zeigten ein unerwartet frühes Versagen der Kabel infolge von Reib-Ermüdung (fretting fatigue) im Vergleich zu Proben an nackten Spanndrähten und Spannlitzen. Die Vielfalt der einwirkenden Parameter wurde an Kleinkörper-Versuchen studiert. Die wichtigsten Ergebnisse sind hier zusammengefasst.

## Einleitung

Die Berücksichtigung der Ermüdung bei der Bemessung von Spannbetontragwerken hat infolge höherer Ausnutzung der Materialien, zunehmender Belastungsintensität sowie verschärfter Umwelteinflüsse an Bedeutung stark zugenommen. Eine genauere Untersuchung des Ermüdungsverhaltens drängte sich daher auf. Am Institut für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich sind entsprechende Untersuchungen seit einigen Jahren im Gange.

## Versuche an teilweise vorgespannten Trägern

Im Bericht «Fatigue Tests on Post-Tensioned Concrete Beams» (August 1985) sind die Resultate von Ermüdungsversuchen an 15 Balken von 6,7 m Länge zusammengestellt [1]. Es zeigte sich, dass das Ermüdungsverhalten einbetonierter, ausinjizierter Spannglieder bedeutend ungünstiger ist als dasjenige nackter Proben von Spanndrähten und -litzen. Ursache dieses unerwarteten Verhaltens ist hauptsächlich die Reib-

Ermüdung (fretting fatigue), die bisher im Spannbeton – ausgenommen bei Verankerungen – zu wenig beachtet worden ist. Ein Riss im Träger hat zur Folge, dass in seiner unmittelbaren Umgebung kleine Relativverschiebungen zwischen dem Kabel und dem Hüllrohr entstehen. Die dabei erzeugte Reibung induziert eine vorzeitige Ermüdung. Dieses Phänomen ist im Maschinenbau schon länger bekannt [2,3].

Die durchgeführten Versuche (Bild 1) waren nicht auf das Studium der überraschend aufgetretenen Reib-Ermüdung ausgelegt. Im besonderen war es nachträglich nicht mehr möglich, die Vielfalt der einwirkenden Parameter (Spannungsamplitude, Hüllrohrmaterial, Krümmungsradius, Querpressung, Gruppenwirkung, usw.) zu separieren. Folglich wäre es auch unverantwortlich gewesen, quantitative Angaben über den Abfall der Ermüdungsfestigkeit infolge von Reib-Ermüdung zu machen. In diesem Beitrag wird ferner darauf hingewiesen, dass die im Bericht [1] veröffentlichten Spannungsamplituden

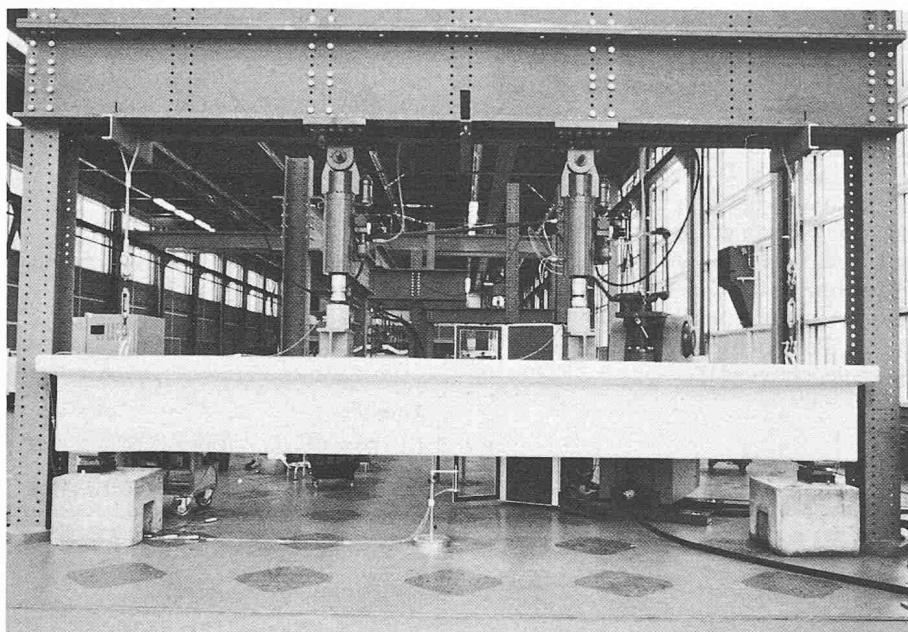


Bild 1. Ermüdungsversuch an einem teilweise vorgespannten Balken

einer genaueren Interpretation bedürfen, bevor die Resultate dieser Trägerversuche in der Bemessungspraxis angewendet werden können.

### Versuchsanlage für Kleinkörper

Um das Phänomen der festgestellten Reib-Ermüdung detailliert erfassen zu können, wurde eine neue Versuchsanlage entwickelt (Bild 2). Dabei wurde speziell darauf geachtet, dass der engere Versuchsbereich im Kleinkörper jener Zone des teilweise vorgespannten Trägers entspricht, in welcher Ermüdungsbrüche auftreten. Die statischen Verhältnisse sollten möglichst übersichtlich sein, damit der Kraftverlauf eindeutig festgestellt werden kann.

Schliesslich sollten Grösse, Geometrie und Einfachheit die Herstellung und Prüfung der Kleinkörper möglichst er-

leichtern, da eine grössere Serie für die Durchführung statistischer Untersuchungen benötigt wurde.

Diese Überlegungen führten schliesslich zum im Bild 3 gezeigten Kleinkörper von 1200 mm Länge und 200 x 350 mm Querschnitt. Ein nachträglich eingegossenes Stahl-Druckgelenk legt den inneren Hebelarm eindeutig fest, so dass die Spannungen im Spannstahl exakt bestimmt werden können. Der Riss im Betonquerschnitt wird durch eingelegte Dreikantaussparungen provoziert. Das nachträgliche Aufschrauben der Verankerungsplatten gewährleistet ein einfaches Herstellen der Betonkörper ohne spezielle Verankerungsstahlteile. Das Vorspannen erfolgt mittels Schrauben, wobei die Vorspannkraft beidseitig mittels Kraftmessdosen kontrolliert werden. Eine freie Aufhängung der gesamten Anlage gestattet eine zwangungsfreie Versuchsdurchführung.

Bild 2. Ermüdungsversuch an einem vorgespannten Kleinkörper

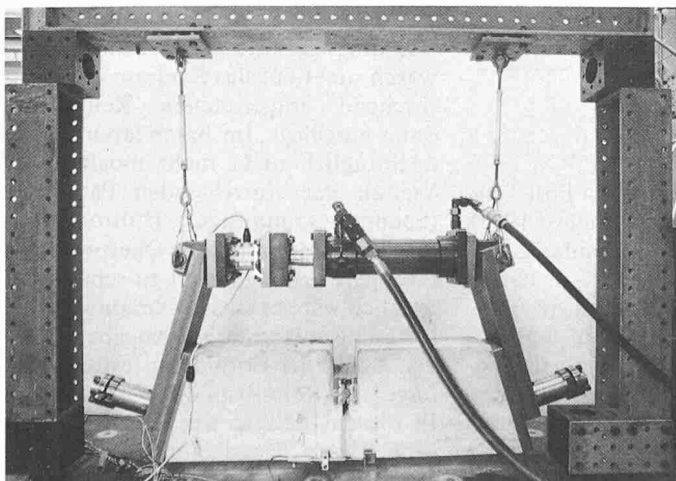
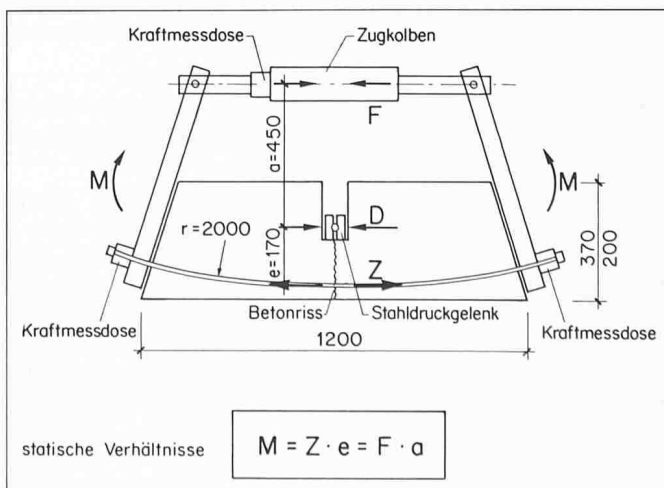


Bild 3. Schema des Versuchskörpers und der Belastung



Das Hüllrohr bleibt während der Betonierphase mit Hilfe eines vorgebogenen Führungsrohres fixiert, damit der Krümmungsradius und somit die Querspannungen auf den Spannstahl klar definiert sind. Unter Querspannung versteht man die zur Kabelachse normal gerichteten Druckkräfte  $Q$ , die infolge der Kabelkrümmung an den Kontaktstellen zwischen den Spanndrähten und den Rippen des Hüllrohrs entstehen (Bild 4). Gemäss Bild 5 stützen sich die einzelnen Drähte eines gekrümmten Paralleldrahtkabels gegenseitig aufeinander ab. Sind alle Drähte gleich gespannt, so lässt sich der relative Wert der Querspannung eines Drahtes am Hüllrohr durch den Kabelfaktor  $k$  darstellen:

$$(1) \quad k = Q/Q_1$$

wobei  $Q$  die Querspannung eines Drahtes des Kabels und  $Q_1$  die Querspannung eines Einzeldrahtes sind. Der Faktor  $k$  hängt vom Hüllrohrdurchmesser, der Anzahl Drähte im Kabel, dem Drahtdurchmesser und dem Kabeltyp (Paralleldraht-Kabel, Litze) ab. Im besonderen ist er auch durch die zufällige geometrische Lage der Drähte beeinflusst. Daher lassen sich nur durchschnittliche Werte bestimmen, wobei die Streuungen beträchtlich sind.

Die Querspannung in einem Kabel lässt sich damit wie folgt berechnen:

$$(2) \quad Q = k \cdot \frac{b}{r} \cdot \frac{Z_0}{n}$$

$b$  Abstand der Kontaktstellen (Bild 4),  
 $r$  Krümmungsradius des Spanngliedes,  
 $Z_0$  Obere Grenze der Kabelkraft,  
 $n$  Anzahl Einzeldrähte im Kabel.

In Zusammenarbeit mit der Abteilung Ermüdung und Spannungsanalyse der EMPA in Dübendorf (Leitung Dr. V. Esslinger) wurde ein Mess-System entwickelt, welches die Erfassung des Spannungsabfalls längs eines Spann-

drahtes und der Spannungsverteilung im Stahlquerschnitt unmittelbar beim Betonriss mit Hilfe von Dehnmessstreifen (DMS) erlaubte. Die Rissentwicklung im Betonkörper wurde durch statische und dynamische Messungen mit einem induktiven Weggeber verfolgt.

### Ergebnisse der Versuche an Kleinkörpern

Bisher (November 1986) wurden über 50 Versuche durchgeführt. Die Tabelle 1 zeigt eine Zusammenstellung der untersuchten Parameter. Eine detaillierte Berichterstattung über die Versuchsergebnisse wird in einem Versuchsbericht erfolgen [5]. Hier sollen nur die wichtigsten Ergebnisse aufgeführt werden.

Das Bild 6 zeigt die festgestellte Abnahme der Ermüdungsfestigkeit bei zunehmender Querpressung. Zwischen Litzen und Paralleldrähten ist kein nennenswerter Unterschied festzustellen, da zufällige Schwankungen der Querpressung, verursacht durch unkontrollierbare Variationen der Hüllrohr-Geometrie sowie der lokalen Krümmungsradien, überwiegen.

Ein sehr wichtiger Parameter ist die relative Verschiebung zwischen Spannglied und Hüllrohr. Versuche mit Stahlhüllrohren ohne Injektion weisen einen relativ grossen Reibweg auf. Dadurch entsteht ein lokaler Materialabtrag beim Spannstahl von bis zu 1 mm Tiefe. Die auftretenden Mikrorisse werden laufend abgerieben, was ein Versa-

Anzahl Versuchskörper	Spannglied	Höhe der Vorspannung	Hüllrohr	Radius [mm]	Injektion	DMS-Messungen direkt am Spannstahl
25	Einzeldraht $\phi 7$	$0.4 \div 0.65 \cdot f_{pt}$	5 Stk. Kunststoff 20 Stk. Stahl	2000	20 Stk. ja 5 Stk. nein	15 Stk. ja 10 Stk. nein
5	5 Drähte $\phi 7$	$0.55 \cdot f_{pt}$	Stahl	2000	ja	nein
17	1 Litze $\phi 0.6''$	$0.4 \div 0.65 \cdot f_{pt}$	4 Stk. Kunststoff 13 Stk. Stahl	2000	12 Stk. ja 5 Stk. nein	9 Stk. ja 8 Stk. nein

Tabelle 1. Zusammenstellung der Parameter der Kleinkörper-Versuche

gen infolge von Reib-Ermüdung verhindert. Ein frühes Versagen eines Drahtes infolge von Reib-Ermüdung tritt immer dann ein, wenn der Reibweg klein ist und nur ein relativ geringer Oberflächenabtrag des Spanndrahtes stattfindet. Wie Bild 5 zeigt, treten in einem mehrdrahtigen Kabel sehr verschiedene Beträge der Querpressung auf. Der erste Ermüdungsbruch tritt an jener Kontaktstelle auf, in welcher die Grösse der Querpressung und die Relativ-Verschiebung die ungünstigste Kombination in bezug auf Ermüdung ergeben. Im Versuch traten die ersten Brüche regelmässig an Kontaktstellen zwischen Draht und Hüllrohr auf.

Die Ermüdungsfestigkeit von Kabeln mit Kunststoffhüllrohr liegt beträchtlich höher als jene von Kabeln mit Stahlhüllrohr. Der Kunststoff eliminiert die schädigende Wirkung der Reib-Ermüdung an den Kontaktstellen zwischen dem Spannkabel und den Rippen des Hüllrohrs weitgehend. Wird das Kunststoffhüllrohr injiziert,

so reduziert sich die Relativverschiebung zwischen Kabel und Hüllrohr deutlich, und der Kunststoff wird im Laufe der Zeit weniger durchgerieben. Die Form der Hüllrohrwandung spielt bei Verwendung von Kunststoff eine wesentliche Rolle. Sie beeinflusst einerseits den Verbund zwischen dem Spannkabel und dem umgebenden Beton und andererseits die Verletzungsgefahr des Hüllrohrs während des Vorspannens.

### Phänomen der Reib-Ermüdung

Zum besseren Verständnis wird das Phänomen der Reib-Ermüdung kurz erklärt [2,3,4].

Bei der Reib-Ermüdung wirken in lokalen Bereichen, die sich im Kontakt befinden, mechanische und physikalisch-chemische Vorgänge zusammen. Zum Verständnis des Mechanismus der Reib-Ermüdung ist daher die Kenntnis

Bild 5 (rechts). Querpressung für einen Einzeldraht  $\phi 7$  mm und ein Paralleldrähtkabel mit 60 Drähten  $\phi 7$  mm

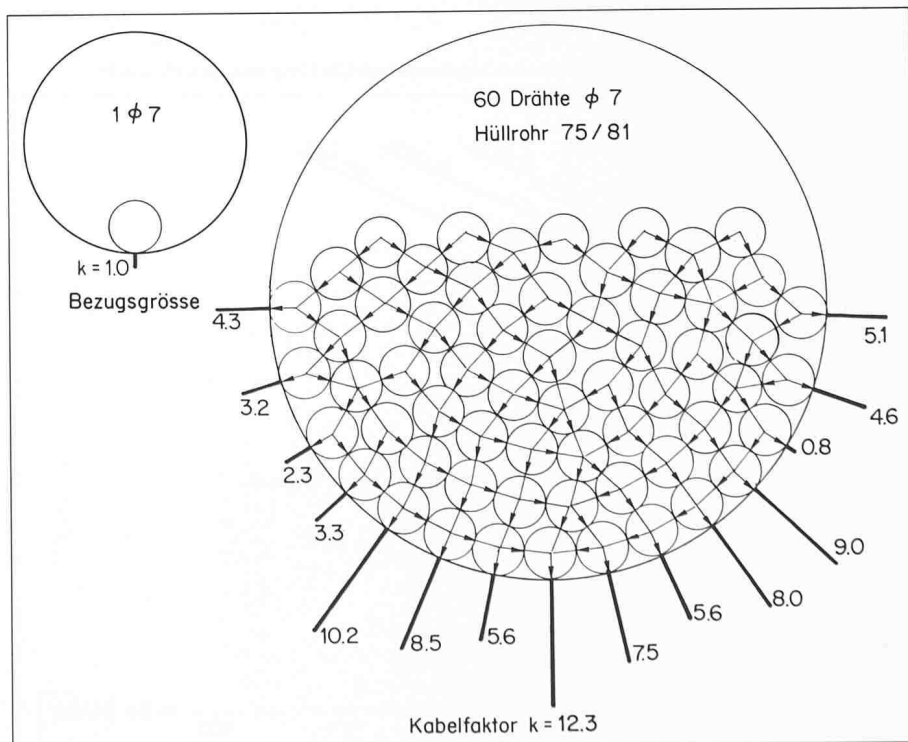
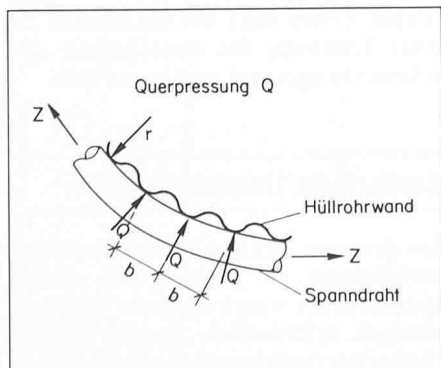


Bild 4. Querpressung Q infolge Kabelkrümmung an der Kontaktstelle Spanndraht-Rippe des Hüllrohrs



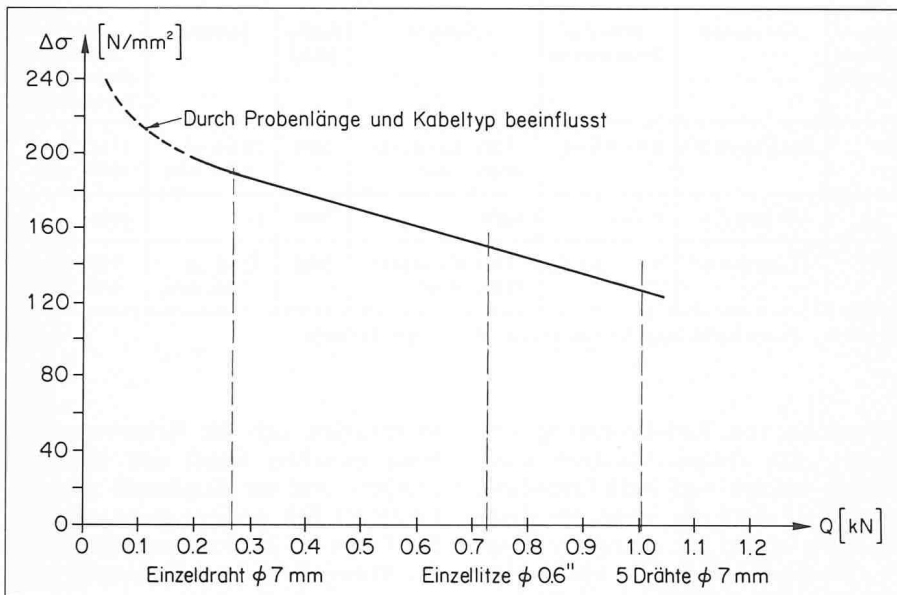


Bild 6. Ermüdungsfestigkeit für  $N = 2 \cdot 10^6$  Lastwechsel in Funktion der Querpressung  $Q$ . Gewelltes Stahlhüllrohr, ausinjiziert, Krümmungsradius  $r = 2000$  mm = konstant

Bild 8. Experimentell bestimmter Spannungsabfall eines Einzeldrahtes  $\phi$  7 mm bei der Startphase des Versuchs. Stahlhüllrohr 30/36 ausinjiziert, Krümmungsradius  $r = 2000$  mm

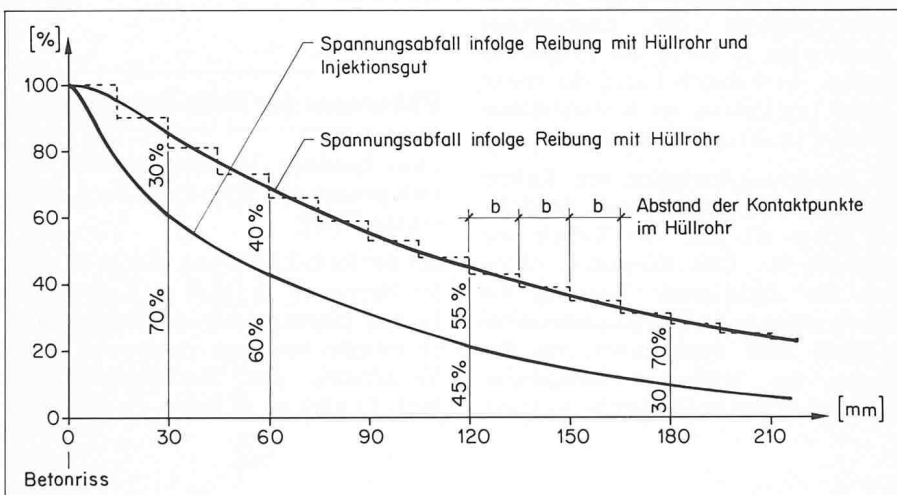


Bild 9. Spannungsamplitude  $D_s$  infolge Moment  $M$  bei verschiedenen Vorspannungsverlusten  $\Delta P$

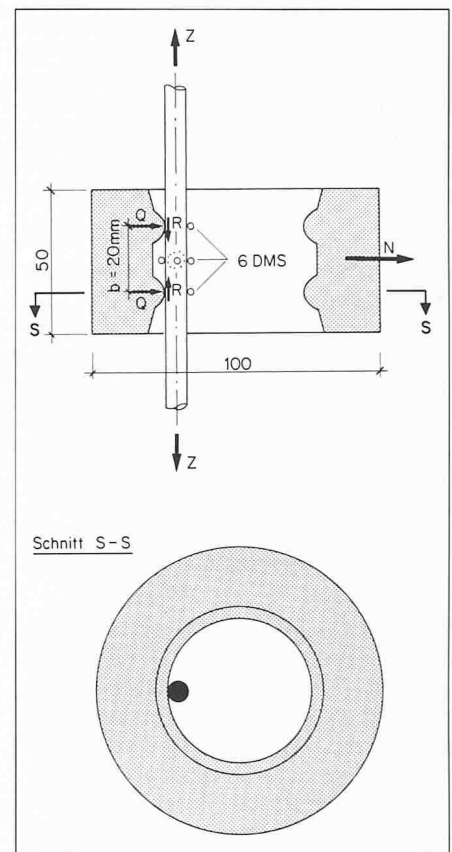
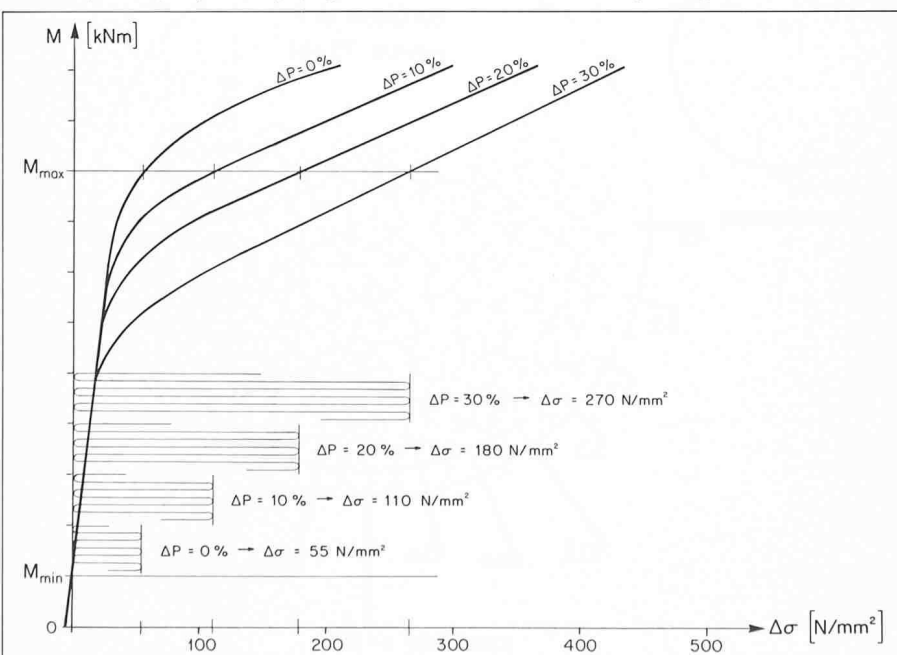


Bild 7. Schema des Reibversuchs mit Reibring

der Zusammenhänge erforderlich, welche die Reibung kennzeichnen. Selbst bei feinstpolierten Oberflächen zweier Festkörper werden die Querpressungen noch über die Spitzen von Unebenheiten (Mikrohgel) bertragen. Bei einer relativen Verschiebung werden diese Spitzen übereinander weggeschoben. Im unmittelbaren Kontaktbereich tritt eine sehr hohe Energiedissipation auf, die zu örtlichem Schmelzen des Materials führen kann, während gleichzeitig die tieferliegenden Bereiche plastisch oder elastisch verformt werden. Die Rauigkeitsspitzen werden kurzzeitig verschweisst. Die so entstandenen Schweissbrcken werden bei einer weiteren Verschiebung wieder abgeschert. Bei wiederholter Beanspruchung der gleichen Kontaktbereiche infolge kleiner Hin- und Herbewegungen der sich berührenden Oberflächen findet eine laufende Oxidation der chemisch aktivierten Zonen statt, die schliesslich zu einer Trennung des metallischen Zusammenhangs und zu Rissen führt.

### Zusätzliche Untersuchungen

Zur genaueren Abklärung der statischen Verhältnisse im Bereich des Ermdungsbruches waren spezielle Untersuchungen erforderlich. So galt es, die Grösse der örtlichen Reibung zwischen

Draht und Hüllrohr, die Verteilung der Querpressung bei Kabeln mit mehreren parallelen Drähten oder Litzen sowie den Spannungsabfall in einem Draht oder Kabel in Funktion der Distanz vom Riss festzustellen.

### Spezieller Reibversuch

Eine Kraftänderung in einem Spanndraht wird durch örtliche Reibungskräfte zwischen dem Draht und den Rippen des Hüllrohrs sowie durch Haftung und/oder verteilte Reibungskräfte zwischen Draht und Injektionsgut hervorgerufen.

Mit Hilfe eines speziell entwickelten Reibrings (Bild 7) konnte die Grösse der Reibkraft in Funktion der örtlichen Querpressung experimentell gemessen werden. Ein auf Zug beanspruchter Einzeldraht wird mit einem Stahlring, der die geometrischen Abmessungen eines Stahlhüllrohrs aufweist, mit der Horizontalkraft  $N$  ausgelenkt. Unter schwingender Zugbeanspruchung  $Z$  werden sämtliche Kraftgrössen sowie der lokale Spannungsverlauf zwischen den beiden Reibstellen gemessen. Daraus lässt sich die Reibkraft  $R$  berechnen.

### Verteilung der Querpressung im Paralleldraht-Kabel

Anhand einer theoretischen Untersuchung wurden für verschiedene Drahtbündel mit variierender Anzahl Einzeldrähte und entsprechendem Hüllrohrdurchmesser die Querpressung ermittelt (Bild 5). Bemerkenswert sind die sich zufällig bildenden Druckgewölbe, die eine unregelmässige Verteilung der Querpressung auf die einzelnen Drähte bewirken. Weiter ist ersichtlich, dass nicht nur die untersten Drähte einer grossen Querpressung ausgesetzt sind, sondern dass generell alle am Hüllrohr anliegenden Drähte beträchtliche Querpressungen aufweisen können.

### Spannungsabfall infolge Reibung und Verbund

Der Spannungsabfall eines Spannkabels setzt sich einerseits aus dem Einfluss der Reibung zwischen den Drähten und dem Hüllrohr und andererseits aus der Haftung am Injektionsgut zusammen. Die Unterscheidung ist bedeutsam, da die beiden Anteile sich in Funktion der Zeit und mit Zunahme der Anzahl Drähte im Spannglied gegenläufig ändern. Betrachtet man den Spannungsabfall in einem Einzeldraht (Bild 8), so hat anfänglich die Haftung am Injektionsgut infolge der grossen Verbundfläche einen beachtlichen Ein-

fluss. Infolge der Lockerung dieser Haftung nimmt die Verbundwirkung im Laufe der Zeit ab.

Den grössten Anteil des Spannungsabfalls in einem Spanndrahtbündel bewirkt jedoch die Reibung zwischen Spanndraht und Hüllrohr. Mit zunehmender Querpressung nimmt der Spannungsabfall der anliegenden Innendrähte zu. Dieser Effekt wird im Laufe der Zeit noch verstärkt, da der Reibungsbeiwert zwischen Spannkabel und Stahlhüllrohr bei kleinen Relativbewegungen erheblich anwachsen kann [4].

### Interpretation von Dehnungsmessungen

Im allgemeinen ist es äusserst schwierig, örtliche Dehnungsmessungen an Drähten von Spannkabeln durchzuführen, ohne die lokalen Verhältnisse in der näheren Umgebung zu stören. Daher werden solche Messungen über relativ grosse Basislängen indirekt auf dem umgebenden Beton oder auf einem zum Kabel parallelen Messdraht durchgeführt. Die übliche Basislänge von 200 bis 300 mm ist für solche Messungen im Verhältnis zum raschen Spannungsabfall viel zu gross und liefert daher lediglich einen Durchschnittswert, der die Spannungsspitze im Rissquerschnitt stark unterschätzt. Damit ist auch die Erklärung zum Hinweis gegeben, dass die im Bericht [1] veröffentlichten Spannungsamplituden einer genaueren Interpretation bedürfen. Sie wurden nämlich aus Dehnungsmessungen (Basislänge 200 mm) an einem zum Kabel parallel geführten Messdraht ermittelt.

### Rechnerische Abschätzung der Spannungsamplitude

Für den Ingenieur in der Praxis stellt sich die Frage, mit welcher Genauigkeit die Berechnung der Spannungsamplituden  $\Delta\sigma$  möglich ist. Wie bereits erwähnt, war die exakte Spannungsbestimmung beim Kleinkörperversuch nur deshalb möglich, weil der innere Hebelarm geometrisch eindeutig durch das Stahldruckgelenk definiert war. Bei der Berechnung eines Balkens mit teilweiser Vorspannung hängt die Grösse der Spannungsamplitude sehr stark von der Grösse der Vorspannkraft ab. Der Grund liegt darin, dass bei jedem Lastwechsel das Dekompressionsniveau durchfahren wird.

Im Bild 9 sind die Verhältnisse für einen im Bericht [1] beschriebenen Versuchsträger aufgezeichnet. Der untere Wert der Spannung wird durch das Dekompressionsmoment nicht beein-

flusst. Die Spannungsamplitude hängt jedoch sehr ausgeprägt vom Dekompressionsmoment und damit vom Vorspannverlust ab. Aus diesem Grund ist in der Praxis bei der Berechnung der Spannungsamplitude die Grösse der Vorspannkraft vorsichtig einzusetzen.

### Zusammenfassung

1. Im Ermüdungsverhalten einbetonierter Spannkabel aus Litzen oder parallelen Drähten zeigen sich keine ausgeprägten Unterschiede. Zufällige, nicht kontrollierbare Schwankungen der Querpressung, die selbst bei sorgfältig verlegten Hüllrohren auftreten können, verwischen mögliche Unterschiede.
2. Die Ermüdungsfestigkeit von Spannkabeln aus Litzen oder parallelen Drähten in ausinjizierten Stahlhüllrohren liegt im Bereich von  $\Delta\sigma = 120$  bis  $190 \text{ N/mm}^2$ . Sie ist vor-

#### Literatur

- [1] Rigon, C., Thürlimann, B. Fatigue Tests on Post-Tensioned Concrete Beams. Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, Versuchsbericht Nr. 8101-1, August 1985, Birkhäuser Verlag Basel
- [2] Waterhouse, R. B. Fretting Fatigue. Applied Publishers Ltd., London 1981
- [3] Julius, A. Zum Mechanismus des Reibdauerbruchs. Technische Hochschule Darmstadt, Fachbereich Maschinenbau, Diss. Mai 1981
- [4] Kreitner, L. Die Auswirkung von Reibkorrosion und von Reibdauerbeanspruchung auf die Dauerhaltbarkeit zusammengesetzter Maschinenteile. Diss. Darmstadt 1976
- [5] Oertle, J., Esslinger, V., Thürlimann, B. Versuche zur Reib-Ermüdung einbetonierter Spannkabel. Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, Versuchsbericht Nr. 8101-2, in Vorbereitung

#### Weitere Literatur

- Fernandez Canteli, A., Esslinger, V., Thürlimann, B. Ermüdungsfestigkeit von Bewehrungs- und Spannstählen. Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich, Versuchsbericht Nr. 8002-1 Birkhäuser Verlag Basel 1984
- Castillo, E., Fernandez Canteli, A., Esslinger, V., Thürlimann, B. Statistical Model for Fatigue Analysis of Wires, Strands and Cables. IABSE Periodica 1, 1985
- Cordes, H. und Lapp-Emden, M. Untersuchung zur Dauerfestigkeit von Spanngliedern für die besonderen Bedingungen der teilweisen Vorspannung. Technische Hochschule Aachen, Institut für Massivbau, Bericht Nr. 18/84, Juni 1984
- Cordes, H. Dauerhaftigkeit von Spanngliedern unter zyklischen Beanspruchungen. Technische Hochschule Aachen, Institut für Massivbau, Bericht Nr. 21/85, 1985
- Patzak, M. Weitegespannte Flächentragwerke. Universität Stuttgart, Sonderforschungsbereich 64, Mitteilungen 53/1978 Müller, H. H. Dauerfestigkeit von Spannstählen. Technische Universität München, Lehrstuhl für Massivbau, Heft V, Dezember 1985

wiegend abhängig von der Querpres-  
sung, die von der Vorspannkraft,  
dem Krümmungsradius und der geo-  
metrischen Beschaffenheit des Hüll-  
rohrs bestimmt wird (Bild 6).

3. Eine Reduktion der Querpres-  
sion führt zu einer Verbesserung der Er-  
müdungsfestigkeit. Dies kann durch  
eine Begrenzung der Kabelkrüm-  
mung und/oder durch eine günstige  
Formgebung der Wandung des  
Hüllrohrs erreicht werden. Je klei-  
ner ein Kabelradius gewählt wird,  
desto grösser wird die Gefahr loka-

ler Knick, die eine sehr ungünstige  
Wirkung auf die Ermüdungsfestig-  
keit eines Spannkabels haben könn-  
en. Insbesondere beim Stahlhüll-  
rohr ist auch bei sorgfältiger Fixie-  
rung des Kabels mit Unregelmäßig-  
keiten in der Kabelkrümmung zu  
rechnen.

4. Eine entscheidende Verbesserung  
der Ermüdungsfestigkeit ist bei Ver-  
wendung von Kunststoff-Hüllroh-  
ren zu erwarten.
5. Der Spannungsabfall in einem  
Spannkabel in der Risregion ent-

steht einerseits infolge Reibung zwi-  
schen Spannstahl und Hüllrohr und  
andererseits infolge Reibung mit  
dem Injektionsgut (Bild 8). Dieser  
Abfall ist so steil, dass nur eine Be-  
stimmung der Spannungsamplitude  
aus Dehnungsmessungen mit einer  
sehr kurzen Basislänge zutreffende  
Werte liefern kann.

Adresse der Verfasser: Jakob Oertle, dipl. Bauing.  
ETH, und Prof. Dr. Bruno Thürlimann, Institut für  
Baustatik und Konstruktion, ETH-Hönggerberg,  
8093 Zürich.

### Stahlbetonbrücken

Von Prof. Dr. Christian Menn 1986; Wien,  
New York: Springer-Verlag, XV + 533 Sei-  
ten, 514 Abbildungen. Preis DM 158.-, sFr.  
145.50.

Das im Dezember 1986 herausgekommene  
Buch vermittelt dem Brückeningenieur in  
umfassender Form einen Überblick über die  
Grundlagen des Entwurfs, der Projektierung  
und der Ausführung von Stahlbeton-  
brücken.

Der Inhalt umfasst nicht nur die Vorlesun-  
gen über Stahlbeton-Brückenbau, die an der  
Abteilung für Bauingenieurwesen der Eidge-  
nössischen Technischen Hochschule Zürich  
(ETHZ) im Diplom- und Nachdiplomstudium  
angeboten werden, sondern geht darüber  
hinaus.

Das Buch ist in folgende Hauptkapitel ge-  
gliedert:

1. Geschichtlicher Rückblick,
2. Entwurfsgrundlagen,
3. Entwurfsziele,
4. Grundlagen der Berechnung und der  
Bemessung,
5. Berechnung und Bemessung von  
Brückenträgern,
6. Lager, Fugen, Entwässerungen, Belag,
7. Entwurf, Konstruktion und Ausführung  
spezieller Tragsysteme,
8. Brückenunterbau.

Der Hauptschwerpunkt des Buches liegt ein-  
deutig beim Entwurf von Stahlbetonbrük-  
ken. Er ist für die Qualität und die Wirt-  
schaftlichkeit einer Brücke von ausschlagge-  
bender Bedeutung.

Nach dem geschichtlichen Rückblick sind in  
den zwei folgenden Kapiteln 2 und 3 die Ent-  
wurfsgrundlagen und die Entwurfsziele auf  
gut 40 Seiten eingehend dargestellt. Auch im  
Kapitel 7, das den Entwurf, die Konstruk-  
tion und die Ausführung der gebräuchlich-  
sten Tragsysteme behandelt, und das fast  
ein Drittel des ganzen Buches umfasst,  
werden für jeden Brückentyp jeweils die  
konzeptionellen Aspekte ausführlich und  
unterstützt mit einfachen und klaren Abbil-  
dungen einprägsam dargelegt.

Immer wieder weist C. Menn darauf hin,  
dass nicht subtile Optimierungen oder aus-  
geklügelte Berechnungsmethoden für den  
Erfolg eines Brückenprojektes massgebend  
sind, sondern das Gesamtkonzept. Er betont  
auch, dass übersichtliche und klare Berech-  
nungen, die auf einfachen Modellen beru-

hen, absolut genügen. In diesem Zusammen-  
hang empfiehlt er auch immer wieder die  
Anwendung von Fachwerkmodellen, die für  
die Beurteilung des Kräfteverlaufes sowohl  
bei ebenen als auch bei räumlichen Proble-  
men sehr leistungsfähig sind.

Einen zweiten Schwerpunkt des Buches bil-  
den die Kapitel 4 und 5 über die Grundlagen  
der Berechnung und Bemessung sowie die  
Berechnung und Bemessung von Brücken-  
trägern, die einen weiteren Drittel des Inhal-  
tes umfassen.

Modernen Normen entsprechend, basiert  
die Bemessung eines Tragwerks grundsätz-  
lich auf zwei getrennt geführten Nachwei-  
sen:

- dem Tragsicherheitsnachweis und
- dem Gebrauchsfähigkeitsnachweis.

Beim *Tragfähigkeitsnachweis* ist aufgrund  
des Bruchzustandes nachzuweisen, dass das  
in den Normen festgelegte Mass an Sicher-  
heit gewährleistet ist. Die Tragreserven, die  
sich durch das plastische Materialverhalten  
aktivieren lassen, sind zu berücksichtigen.  
Der Konstrukteur soll sich aber grundsätz-  
lich am elastischen, allenfalls gerissenen Zu-  
stand des Tragwerks orientieren und über-  
prüfen, ob ein ausreichendes plastisches Ver-  
formungsvermögen des Materials gewährlei-  
stet ist, und ob allenfalls Rückwirkungen auf  
den Tragwiderstand, das Verhalten im Ge-  
brauchszustand oder auf die Ermüdung zu  
erwarten sind.

Beim *Gebrauchsfähigkeitsnachweis* ist die  
Dauerhaftigkeit, die Funktionstüchtigkeit  
und das Aussehen des Tragwerkes während  
der vorgesehenen Nutzungsdauer durch  
materialtechnische, konstruktive und be-  
messungstechnische Kriterien zu gewährlei-  
sten. Auf die Anordnung der Bewehrung  
und die konstruktive Ausbildung der einzel-  
nen Teile weist in diesem Zusammenhang C.  
Menn ausführlich und mit guten Abbildun-  
gen immer wieder in eindringlicher Art hin.

Im Anhang sind die wichtigsten Diagramme  
zur Berechnung schlanker Druckglieder dar-  
gestellt. Sie ergänzen das Unterkapitel Brük-  
kenpfeiler des Hauptkapitels 8 «Brückenun-  
terbau». Die hauptsächlichsten Brückenfun-  
dationen sind nur in einem knappen Über-  
blick behandelt. Die Probleme der Bauaus-  
führung: Lehrgerüste, Vorbaugerüste, Vor-  
schubgerüste, Taktschiebeverfahren, Beto-  
niervorgänge usw., sind bei einzelnen Tragsy-  
stemen zum Teil knapp behandelt, im allge-  
meinen aber nur angedeutet.

Die Erfahrung hat gezeigt, dass sich die er-  
forderliche Qualität und Dauerhaftigkeit  
von Stahlbetonkonstruktionen mit sorgfälti-  
ger Berechnung und Bemessung allein nicht  
erreichen lassen.

Eine qualitativ gute Konstruktion muss viele  
Elemente berücksichtigen: Sicherheit, Ästhe-  
tik, Wirtschaftlichkeit, einfache Ausführ-  
barkeit, Gebrauchsfähigkeit, Nutzung, Un-  
terhalt.

Qualitativ gut konstruieren heisst, alle diese  
Elemente, die sich zum Teil widersprechen,  
in der angemessenen Gewichtung in die zu  
schaffende Konstruktion einbringen. Gut  
konstruieren ist eine höchst anspruchsvolle  
und schöpferische Tätigkeit und verlangt  
qualifizierte Ingenieure mit Sicht für das  
Ganze.

Die statische Berechnung dient dazu, die Si-  
cherheit der Konstruktion nachzuweisen.  
Sie ist ein Hilfsmittel des konstruierenden  
Ingenieurs und sollte nicht, wie dies häufig  
der Fall ist, überbewertet werden.

Es ist für den im konstruktiven Ingenieur-  
bau praktisch tätigen Ingenieur sehr erfreu-  
lich, dass C. Menn diese Grundhaltung in  
seinem Buch klar zum Ausdruck bringt.

Auch als vielgefragter Experte in Wett-  
bewerbsjüry und bei Ausführungen geht C.  
Menn immer von den grundsätzlichen Fra-  
gen aus, die er mit klaren und einfachen Mo-  
dellen angeht. Die starke Verbundenheit mit  
der Praxis durch seine frühere Tätigkeit als  
Inhaber eines Ingenieurbüros und durch die  
intensive Tätigkeit als Experte seit Übernah-  
me der Professur für Baustatik und Kon-  
struktion an der ETHZ widerspiegelt sich  
deutlich im vorliegenden Buch.

Charakteristisches und verdienstvolles Merk-  
mal der vorliegenden Arbeit von C. Menn  
ist, dass er sich überzeugend auf das Grund-  
sätzliche und Wesentliche beschränkt und  
nicht auf eine Vielzahl von Theorien und  
Methoden eingeht. Der in der Praxis stehen-  
de Ingenieur wird ja von einer Flut von Pu-  
blikationen überschwemmt, die ihm den  
Überblick und die Konzentration auf das  
Wesentliche erschweren. Das vorliegende  
praxisnahe Buch hilft ihm zur Vertiefung  
der wesentlichen Grundlagen.

D. J. Bänziger,  
dipl. Ing. ETH/SIA/ASIC  
Zürich/Richterswil