Die Behandlung der Vorspannung und des Zwangs aus planmäßiger Systemänderung beim Nachweis ausreichender Gebrauchs- und Tragfähigkeit von Stahlbeton, Spannbeton- und Verbundtragwerken

2. Zwischenbericht

T 1233

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

Vervielfältigung, auch auszugsweise, nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

#### Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

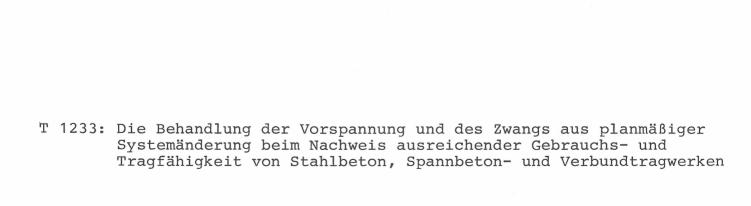
Postfach 80 04 69 70504 Stuttgart

Nobelstraße 12 70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00 Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de



# 2. Zwischenbericht zum Forschungsvorhaben

"Die Behandlung der Vorspannung und des Zwangs aus planmäßiger Systemänderung beim Nachweis ausreichender Gebrauchs- und Tragfähigkeit von Stahlbeton, Spannbeton- und Verbundtragwerken" Kurzbezeichnung: Vorspannung, Az.: IV/1-5-333/82

Institut für Massivbau
Technische Hochschule Darmstadt

Oktober 1983

# Inhalt

# A. Definition von Vorspannung

Definition nach Johnson

Definition nach Scheer

Definition nach Rüsch

Definition neu

# Diskussion der verschiedenen Ansätze

- 1. System Hülse-Bolzen
- 2. Abgespannte Maste
- 3. Schrägkabelbrücke
- 4. Verbundträger, Spannbeton

#### Resumee

# B. Vorspannung im Spannbetonträger

Kontrolle der eingetragenen Vorspannung

Spannen nach Ziehweg oder Spannkraft gemäß Spannprotokoll

Anspannen auf Soll-Ziehweg

Anspannen auf Soll-Spannkraft

Einfluß des Systems auf die Fehlerempfindlichkeit beim

Vorspannen

Zusammenfassungen

Literaturverzeichnis

Literatursammlung

# A. Definition von Vorspannung

Als Grundlage für künftige Normungsarbeiten wurden 1981 die baustoffund bauartübergreifenden "Grundlagen zur Festlegung von Sicherheitsanforderungen für bauliche Anlagen" [1] herausgegeben. Eine übergreifende Darstellung der Behandlung von Vorspannung wurde wegen des Fehlens einer zufriedenstellenden allgemeingültigen Definition des Begriffs "Vorspannung" darin nicht eingefügt. Im folgenden sollen drei Ansätze von Johnson [2] , Scheer [3] und Rüsch [4] einem neuen Ansatz zur Definition der Vorspannung gegenübergestellt werden.

## Definition nach Johnson

Im Zusammenhang mit Schrägkabelbrücken definiert Johnson wie folgt: Kräfte aus Vorspannung sind diejenigen Kräfte, die in einer Struktur verbleiben würden, wenn nach Fertigstellung der Struktur die Erdbeschleunigung und Effekte aus Schwinden (u. Kriechen), Temperatur und Auflagerbewegungen nicht wirksam wären [2].

#### Definition nach Scheer

Scheer untersucht in [3] mehrere Definitionsvarianten. Für das System Hülse-Bolzen mit bilinearer elasto-plastischer Kraft-Verformungslinie des Zugbolzens, definiert er die Vorspannung als einen eingeprägten Gleichgewichtszustand der

- a) von der äußeren Belastung und Belastungsgeschichte unabhängig ist  $F_{B,0} = -F_{H,0}$
- b) von der äußeren Belastung unabhängig, von der Belastungsgeschichte jedoch abhängig ist

$$F_{B,i} = -F_{H,i}$$

c) von sowohl der äußeren Belastung als auch von der Belastungsgeschichte abhängig ist

$$(F_{B,i} + \Delta F_B) - F = -(F_{H,i} + \Delta F_H).$$

Dabei ist F die äußere Last;  $\Delta F_H$ ,  $\Delta F_B$  sind die von Hülse und Bolzen getragenen Lastanteile;  $F_{H,0}$ ,  $F_{B,0}$  sind die anfänglich eingeprägten Kräfte und  $F_{H,i}$ ,  $F_{B,i}$  sind die nach plastischer Verformung und Entlastung verbleibenden eingeprägten Kräfte.

## Definition nach Rüsch

In seinem Lehrbuch "Stahlbeton Spannbeton" [4] definiert Rüsch: Mit Vorspannung wird der in einem Bauteil mit Hilfe von aufgezwungenen Verformungen erzeugte Spannungszustand bezeichnet, der den Lastspannungen mit der Absicht überlagert wird, das Spannungsbild in den einzelnen Querschnitten oder das Verhalten der ganzen Konstruktion in einem gewollten Sinn zu beeinflussen.

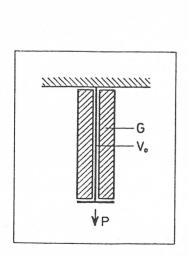
### Definition neu

Vorspannung ist derjenige Anteil eines Spannungszustands, der durch gezielt erzeugte und kontrollierte Verformungen bzw. kontrollierte Belastungen entstanden ist, und der im Vergleich zu Spannungen aus äußeren Lasten schwach streut.

# Diskussion der verschiedenen Ansätze

# System Hülse-Bolzen

Zur Erprobung der Definitionen werden diese auf das System nach Bild Al angewandt, es ist dies ein auf [3] aufbauendes System "Hülse-Bolzen", jedoch



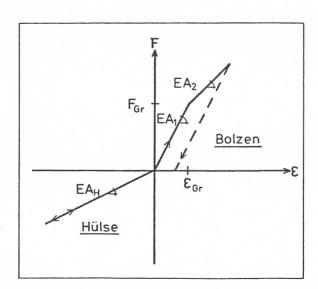


Bild Al System "Hülse-Bolzen" mit eingeprägter Kraft  $V_0$ , Eigenlast G und Verkehrslast P

mit Unterscheidung der Belastung in die eingeprägte Kraft  $V_{o}$ , Eigenlast G und Verkehrslast P. Die Arbeitslinie der Hülse ist linear-elastisch, die des Bolzens ist bilinear elasto-plastisch mit dem Knickpunkt  $\epsilon_{Gr}$ ,  $F_{Gr}$ . G sei auf den untersten Punkt der Hülse konzentriert, die auch schon vor dem Auftreten von G ihre Steifigkeit habe. Aus  $V_{o}$  sei die Dehnung des Bolzens  $\epsilon_{B}^{Vo}$  und die der Hülse  $\epsilon_{H}^{Vo}$  (negativ). Die Verteilung der inneren Schnittkräfte  $F_{H}$ ,  $F_{B}$  auf Hülse und Bolzen ist von den erreichten Dehnungen abhängig, ebenso die nach Wegnahme von G und P verbleibenden eingeprägten Kräfte V'. Drei der verschiedenen Fälle sind in Tabelle Al aufgelistet.

<u>G wirksam nach V</u> o			G wirksam vor V <sub>o</sub>
	ε <sub>B</sub> ≤ ε <sub>Gr</sub>	und	ε <sub>H</sub> <sup>≤</sup> 0
$F_B = V_o + (G+P) \cdot C_1$ $F_H = -V_o + (G+P) \cdot C_2$ $V' = V_o$			$F_{B} = V_{o} + G + P \cdot C_{1}$ $F_{H} = V_{o} + P \cdot C_{2}$ $V' = V_{o}$
	ε <sub>B</sub> > ε <sub>Gr</sub>	und	ε <sub>H</sub> ≤ 0
$F_B = V_o \cdot (1-C_3) + (G+P)$ $F_H = -V_o \cdot (1-C_3) + (G+P)$ $V' = V_o \cdot (1-C_3) + (G+P)$	) . c <sub>6</sub> - c <sub>5</sub>		$F_B = (V_0 + G) \cdot (1 - C_3) + P \cdot C_4 + C_5$ $F_H = -V_0 \cdot (1 - C_3) + G \cdot C_3 + P \cdot C_6 - C_5$ $V' = V_0 \cdot (1 - C_3) - G \cdot C_3 + P \cdot C_7 + C_5$
	ε <sub>B</sub> > ε <sub>Gr</sub>	und	$\varepsilon_{\text{H}} > 0  (V' \stackrel{>}{=} 0)$
$F_B = G + P$ $F_H = 0$ $V' = V_0 - (G+P) \cdot C_8 + C_8$	<b>2</b> 9		$F_B = G + P$ $F_H = 0$ $V' = V_0 - (G+P) \cdot C_8 + C_9$

## Tabelle A1

Innere Schnittkräfte  $F_H$ ,  $F_B$  von Hülse und Bolzen nach Bild A1, sowie verbleibende innere Kraft V' nach Entlastung

Die Faktoren C sind abhängig von den Steifigkeiten des Systems und dem Knickpunkt in der Arbeitslinie des Bolzens Bereits der erste Fall im linear-elastischen Bereich (Tab. A1) zeigt wesentliche Unterschiede zwischen den Definitionen auf. Entfernt man nach Johnson die äußeren Einwirkungen G und P am Gesamtsystem, so erhält man – sofern G nach  $V_{\rm O}$  wirksam wurde – als "Vorspannung" im Bolzen

$$F_{B} = V_{O} + (G+P) \cdot C_{1} - (G+P) \cdot C_{1} = V_{O}$$
 G1. 1

wenn G jedoch vor  $V_{O}$  wirksam wurde, ist

$$F_B = V_O + G + P \cdot C_1 - (G+P) \cdot C_1 = V_O + G \cdot (1-C_1) \cdot C_1 < 1$$
 G1. 2.

Im System Hülse-Bolzen nach Scheer tritt eine äußere Last erst nach Einprägen der Kraft  $V_0$  auf. In seinen Definitionen bleibt daher der Fall "G vor  $V_0$ " unberücksichtigt. Nach den Varianten a) und b) ist die Vorspannung im Bolzen

$$F_B = V_O$$
 G1. 3,

als der eingeprägte, von der Belastung unabhängige Gleichgewichtszustand. Er entspricht dem durch aufgezwungene Verformungen erzeugten Spannungszustand nach Rüsch.

Variante c) macht die Vorspannung von der äußeren Belastung abhängig. Es wird

$$F_B = V_o + (G+P) \cdot C_1 - (G+P) = V_o - (G+P) \cdot (1-C_1) \cdot C_1 < 1$$
 G1. 4.

Bei sinngemäßer Anwendung der Definition auf den Fall G vor  $V_0$  bleibt G im linear-elastischen Bereich unberücksichtigt und die Vorspannung wird

$$F_B = V_o + P \cdot C_1 - P = V_o - P \cdot (1-C_1)$$
  $C_1 < 1$  G1. 5.

Der neue Definitionsansatz fragt nach der Kontrolle. Sofern G erst nach  $V_0$  auftritt, seine Abweichungen infolge Streuung also nicht erkannt werden, wird entsprechend Variante a) von Scheer

$$F_B = V_O + (G+P) \cdot C_1 - (G+P) \cdot C_1 = V_O$$
 G1. 6.

Ist G jedoch bei Erzeugung der Kraft  $V_0$  bereits wirksam, ist zum einen denkbar, daß man den Bolzen verkürzt, ohne die auftretenden Kräfte zu messen. Bei bekannten Steifigkeiten kann dann über die Verkürzung die entstehende Kraft  $V_0$  bestimmt werden, ohne die Kraft G zu kennen. Demnach ist die Vorspannung

$$F_B = V_o + G + P \cdot C_1 - (G + P \cdot C_1) = V_o$$
 G1. 7

Spannt man den Bolzen kraftgesteuert, so daß die Kraft G (am Bauteil) bei  $V_{\rm O}$  = O ebenfalls durch Messung einer Kontrolle unterliegt, wird

$$F_B = V_O + G + P \cdot C_1 - P \cdot C_1 = V_O + G$$
 G1. 8

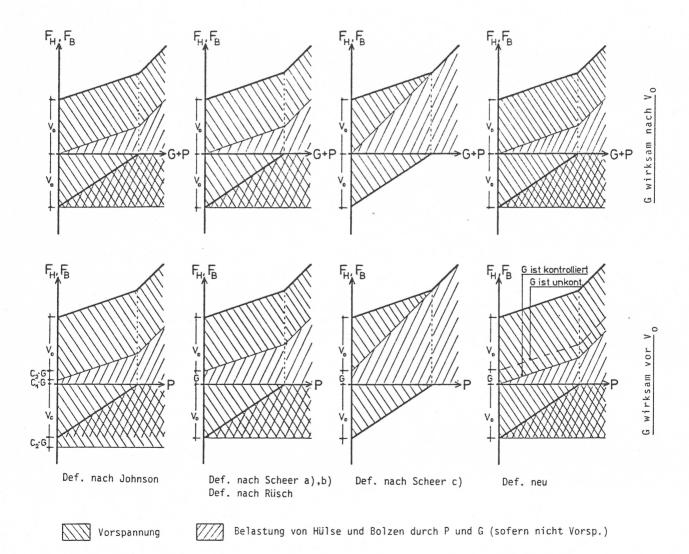


Bild A2 Vergleich der verschiedenen "Vorspannungen" im linear-elastischen Bereich des Systems Hülse-Bolzen; G wird vor, bzw. erst nach Einprägen von  $V_0$  wirksam

Eine graphische Darstellung der Gleichung findet sich in Bild A2. Sofern G nach  $V_0$  wirksam wird (obere Reihe Bild A2), unterscheiden sich die "Vorspannungen" nach Johnson, nach Scheer Varianten a), b), nach Rüsch und nach der neuen Definition nicht. Sie halten die eingeprägte Kraft Vo unabhängig von der äußeren Last als Vorspannung fest, während Variante c) von Scheer die Vorspannung mit wachsender äußerer Last kleiner werden läßt. Gegen die drei erstgenannten Definitionen spricht nach Scheer, daß sie zwar einen Zustand geringer Streuung als Vorspannung festhalten, dieser aber nichts mit einem Zustand unter großen Lasten zu tun hat. Das ist in soweit richtig, als der Bolzen bei großen Lasten G+P genau eine resultierende Kraft G+P unabhängig von  $V_{\Omega}$  tragen muß; andererseits kann aber argumentiert werden, daß zwar ein System mit veränderlicher Gliederung vorliegt, der Bolzen aber - für alle G+P - belastet wird durch die Vorspannung und einen Anteil der äußeren Last; die Hülse beteiligt sich entsprechend an der Lastabtragung und nimmt einen Teil der äußeren Last bis zu | V | auf (vergl. Bild A2). Variante c) ist nach Scheer nicht empfehlenswert, da es viele "Vorspannungen" gibt. Tatsächlich ist diese Definition in Hinblick auf das Konzept der Teilsicherheitsbeiwerte unbrauchbar, denn eine Kopplung der "Vorspannung" mit den äußeren Lasten läßt eine eigenständige Behandlung der Vorspannung nicht zu.

Sofern G bereits vor Einprägen der Kraft  $V_0$  wirksam war (untere Reihe Bild A2), zeigen alle Definitionen Unterschiede. Scheer a), b) und Rüsch sind dabei zusammengefaßt, sie ignorieren eine Kontrolle der Last G und sind damit im Vergleich zur neuen Definition konservativer, die die kontrollierte Last G ebenso wie  $V_0$  zur Vorspannung zählt. Die daraus resultierenden Unterschiede sind am Bild A2 nicht abzulesen, denn die Ordinaten G+ $V_0$  sind in beiden Fällen gleich. Bei einer Bemessung des Bolzens müßte jedoch, auch wenn die Streuung des Eigengewichts G durch Kontrolle diejenige von  $V_0$  nicht übersteigt, nach Scheer a), b) und Rüsch mit den Teilsicherheitsbeiwerten  $\gamma_{\rm G} > \gamma_{\rm V}$  ein größerer Bolzenquerschnitt als nach der neuen Definition vorgehalten werden. Die Definition nach Johnson liefert zwar Unterschiede für die Vorspannung mit G vor  $V_0$  gegenüber G nach  $V_0$ , sie liefert aber – in Hinblick auf Teilsicherheitsbeiwerte – keine zwangsläufig schwach streuenden Ergebnisse, da im Fall G vor  $V_0$  ein nur von den Steifigkeitsverhältnissen abhängiger Teil von G zur Vorspannung zählt, auch wenn G unkontrolliert bleibt und damit in der Regel

stärker als die kontrolliert eingeprägte Kraft streut. Als weiteren Schwachpunkt der Definition entnimmt man Bild A2, daß sich u.U. nur schwer ein Zusammenhang zwischen "Vorspannung" und Schnittgrößen des vorgespannten Querschnittsteils herstellen läßt. Variante c) von Scheer ist für G vor  $V_0$  aus den gleichen Überlegungen wie unter G nach  $V_0$  für eine Bemessung mit Teilsicherheitsbeiwerten unbrauchbar.

Verläßt man den linear-elastischen Bereich, so fällt in Tab. Al auf, daß die nach der Entlastung verbleibenden eingeprägten Kräfte V' von den zuvor erreichten äußeren Lasten G+P abhängig sind. Variante b) von Scheer definiert diese Kräfte V' als Vorspannung. Variante a) und Rüsch halten weiterhin  $V_0$  als Vorspannung fest. Beide Möglichkeiten sind für eine von den einzelnen Streuungen (der Einwirkungen und Widerstände) abhängige Bemessung ungeeignet, denn bei einer erneuten Belastung wäre in die "Vorspannung" der streuende Einfluß der zuvor erreichten Lasten G+P einzurechnen. Nach der neuen Definition geht infolge der streuenden Einflüße von G+P der Status von "Vorspannung" verloren.

Da die Definitionen nach Johnson und Variante c) von Scheer ihre Nachteile beibehalten, bleibt als gangbarer Weg für eine übergreifende Definition der "Vorspannung" einzig die den bisherigen Definitionen hinzugefügte neue Definition. Indem sie alle kontrollierten, schwach streuenden Einflüsse zur "Vorspannung" zusammenfaßt, geht sie über die gängigen Definitionen nach Scheer Variante a) und Rüsch hinaus, andererseits begrenzt sie jedoch die "Vorspannung" in Hinblick auf die Belastungsgeschichte.

# 2. Abgespannte Maste

Wie Scheer in [3] bereits feststellt, liegt für die Definition von Vorspannung der wesentliche Unterschied der Systeme "abgespannter Mast" und "Hülse-Bolzen" in ihrer Gliederung. Gegenüber dem System Hülse-Bolzen liegt nun beim abgespannten Mast ein System ohne veränderliche Gliederung vor. Die für die Vorspannung von Hülse und Bolzen getroffenen Feststellungen gelten entsprechend. Das Eigengewicht des Systems geht jedoch mit Ausnahme der Vorspannung nach Johnson bei dem abgespannten Mast nur mittelbar in die Problematik der Vorspannung ein, wenn über den Seildurchhang mit Ansatz des Seileigengewichts die Seilkraft bestimmt werden soll. Für

die Vorspannung nach Johnson zeigt Scheer in [3] anhand der bekannten Seilgleichung, daß durch das Beseitigen der Erdbeschleunigung die Seilkraft zu einem unbestimmten Ausdruck wird, da sowohl das Seilgewicht(im Zähler) als auch der Seildurchhang (im Nenner) zu Null werden. Entsprechend Bild A2 ist in Bild A3 die Vorspannung gemäß der neuen Definition unter einer Horizontalkraft F aufgetragen, dabei wird vorausgesetzt, daß die eingeprägte Kraft  $S_0$  eine schwach streuende Größe ist. Da im Gegensatz zu beispielsweise der Spannbetonbauweise mit verpreßten Spanngliedern eine Kontrolle der Vorspannung über die gesamte Lebensdauer des abgespannten Mastes (in festen Zeitabständen und nach hoher Belastung) möglich ist, kann u.U. einem erhöhten Kontrollaufwand durch Teilsicherheitsbeiwerte nahe 1,0 für die kontrollierte Größe Rechnung getragen werden.

# 3. Schrägkabelbrücke

Zur Prüfung der Definitionen von "Vorspannung" haben Johnson und Scheer stark vereinfachte Modelle von Schrägkabelbrücken untersucht. Wie verhält sich nun die Vorspannung nach der neuen Definition?

Das Modell nach Johnson (Bild A4) besteht aus einem masselosen Kragarm dessen Spitze eine konzentrierte Masse trägt. An der Spitze ist weiterhin eine Feder angebracht, die sich an der Abtragung der Vertikallasten beteiligt. Als Ver-

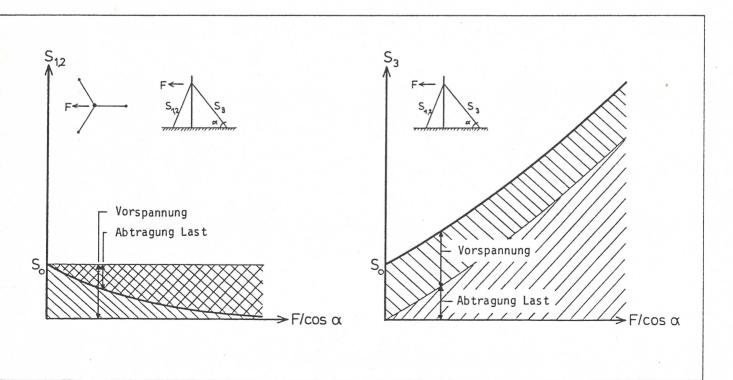


Bild A3 Abgespannter Mast Seilkräfte und Vorspannung nach neuer Definition

kehrslast wirkt auf den Kragarm die Einzellast Q. Sofern die Verkehrslast zu Null gesetzt wird, ist nach Johnson die Vorspannung in der Feder

$$V = Z - \alpha \cdot G$$

dabei ist Z die Federkraft unter Brückeneigengewicht und  $\alpha$  ein vom Steifigkeitsverhältnis Kragarm-Feder abhängiger Beiwert. Es zeigt sich für die Allgemeingültigkeit der Definition ein weiterer Nachteil (vergl. [3]): Sofern Z klein genug ist, weil z.B. die Feder an dem mit G belasteten Kragarm nur zum Abtragen von Verkehrslasten schlaff angehängt ist, wird die "Vorspannung" negativ.

Nach der neuen Definition gibt es im Falle der schlaff angehängten Feder keine Vorspannung. Das gleiche gilt für den Fall, daß zunächst das spannungsfreie System erstellt wird, und dann das Eigengewicht wirksam wird. Die Vorspannung ist einzig die kontrollierte schwach streuende (Feder-)Kraft, es interessiert dabei nicht, ob diese Kraft gleich der Eigenlast oder der Verkehrslast oder ein Vielfaches dieser Lasten ist.

In einem Rechenbeispiel argumentiert Johnson gegen ähnliche Definitionen. Ist z.B. die Zugkraft der Feder ohne Verkehrslast die "Vorspannung", und wird diese so eingestellt, daß |M| des Kragarms im Gebrauchszustand minimiert wird, ist

$$V = G + \frac{1}{2} (1-\alpha) \cdot Q$$

Mit den Teilsicherheitsbeiwerten  $\gamma_{G}=1,35$  für Eigenlast und  $\gamma_{V}=1,2$  für Vorspannung – die Höhe der Teilsicherheitsbeiwerte soll hier nicht diskutiert werden – muß die Feder für eine Bruchlast von  $0,35\cdot\alpha\cdot G$  und gleichzeitig für  $1,2\cdot G$  aus Vorspannung bemessen werden. Dies erscheint Johnson nicht konsequent, die Bemessung ist jedoch schlüssig, wenn man davon ausgeht, daß die Spannkraft V "willkürlich" gewählt und in das System eingeprägt wurde, mithin also ursächlich nichts mit G gemein hat.  $\gamma_{G}$  steht für Unsicherheiten in der Annahme der Eigenlast.  $\gamma_{V}$  steht für die Streuung der am Bauwerk eingetragenen Vorspannung, die in diesem Beispiel planmäßig den Wert  $G+(1-\alpha)\cdot Q/2$  annehmen soll.

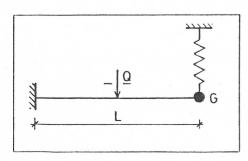


Bild A4 Modell einer Schrägkabelbrücke nach Johnson

Das Beispiel entspricht dem Fall der nicht kontrollierten Eigenlast nach der neuen Definition. Ist durch Messungen die Kraft aus Eigengewicht in der Feder bekannt, so entfällt der Term  $0,35\cdot\alpha\cdot G$ . Die Anwendung dieser Definition wird demnach ein wirtschaftliches Bauen ermöglichen, bei der Ermittlung der zusätzlichen, nach dem Spannen auftretenden Lasten wie Fahrbahnbelag etc. wird man jedoch einen höheren Aufwand treiben oder eine größere Sicherheit einrechnen müssen, da deren Streuung stärker als bisher ins Gewicht fällt.

Das Modell von Scheer (Bild A5) besteht aus einem gelenkig gelagerten Einfeldträger, in dessen Mitte eine Abspannung angebracht wird – Bauweise a) –. Alternativ untersucht Scheer den Träger bei Herstellung nach Bauweise b): Herstellen einer Trägerhälfte auf Lehrgerüst, Abspannen, Herstellen der zweiten Hälfte. Diese Bauweise verdeutlicht gut den Kern der neuen Definition: Auch wenn die Definition nach Johnson für das nach b) gebaute System Vorspannwerte ungleich Null liefert, wird man der sich statisch bestimmt einstellenden Federkraft  $g \cdot L/2$  – oder Teilen davon – keinen Vorspanncharakter zusprechen, denn die Kraft bleibt unkontrolliert.

Bei Bauweise a) kann das Eigengewicht des Balkens kontrolliert und dadurch die Streuung eliminiert werden. Eigenlast und eingestellte Seilkraft sollten also mit dem gleichen Teilsicherheitsbeiwert behaftet werden. Scheer sieht darin einen Konflikt und stellt die eingeprägte Kraft als Vorspannung in Frage, während die neue Definition folgerichtig das kontrollierte Eigengewicht zur Vorspannung zählt.

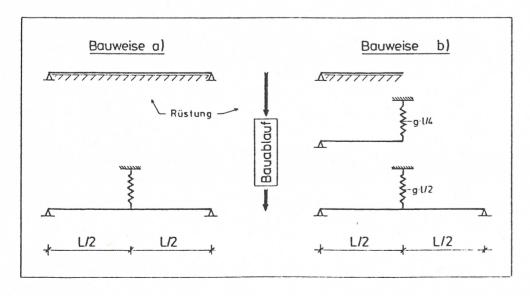


Bild A5 Modell einer Schrägkabelbrücke nach Scheer mit verschiedenen Bauweisen

Beim Freivorbau mit für den Endzustand voreingestellten Seilkräften unterliegt die Seilkraft aus Eigengewicht nicht zwangsläufig einer Kontrolle. Bild A6 zeigt schematisch die unterschiedliche Bemessung für Freivorbau und Bau auf Lehrgerüst mit Kontrolle des Eigengewichts. Auch wenn planmäßig im Endzustand in beiden Bauwerken dieselben Schnittkräfte wirken, muß wegen unterschiedlicher Streuung der Eigenlast die Bemessung mit verschieden hohen Bemessungswerten F durchgeführt werden. Die neue Definition erfordert demnach im Vergleich zu den anderen Definitionen eine genaue Kenntnis vom Bauablauf schon bei der Bemessung, sie trägt dadurch den Risiken aus Abweichungen von den Rechenannahmen besser Rechnung.

## 4. Verbundträger, Spannbeton

Verbundträger eignen sich besonders gut zum Einprägen von Spannungen, da das endgültige Verbund-System in der Regel aus einem bereits eingeschränkt belastbaren Stahl-System entsteht. Die dazwischen liegenden Arbeitsgänge ermöglichen eine Vielzahl verschiedener Eigenspannungs- bzw. Zwängungszustände des Gesamtsystems. Sind diese Spannungszustände gemäß der neuen Definition "Vorspannung"? Bereits am Einfeldträger nach Bild A7 lassen sich die typischen Fälle aufzeigen.

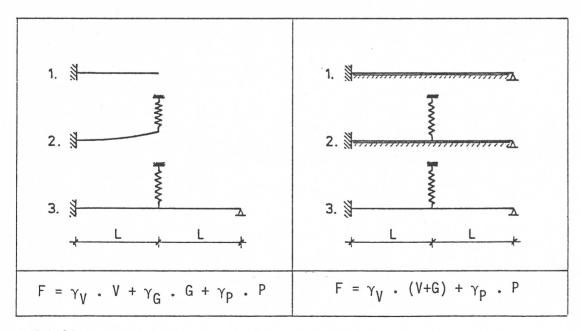


Bild A6
Prinzipielle Bemessung einer Schrägkabelbrücke, Herstellung mit
Freivorbau und auf Rüstung: Seilkraft F, Kraft aus Seilverkürzung V,
Eigenlast aus 2. Feld G, Verkehrslast P (Seilkräfte)

Die Definition nach Johnson liefert nur im Fall a) des Bildes A7 keine Vorspannung. Da die Eigengewichtsanteile an der Vorspannung nur dann zu Null werden, wenn das gesamte Eigengewicht erst am endgültigen System wirksam wird, gibt es nach Johnson auch bei Bauweise a) und c) Vorspannung, auch wenn – z.B. nach den deutschen Normen – weder das Eigengewicht eines vergleichbaren Stahlträgers noch das Eigengewicht eines Stahlbetonträgers den Status von Vorspannung hat.

Die Verformungen und Spannungen in den Fällen a) bis c) stellen sich – beeinflußt von der Stützung im Bauzustand – als Folge des streuenden Eigengewichts von selbst ein, so daß nach Rüsch und Definition neu nur im Fall
d) eine Vorspannung entsteht. Es zeigt sich eine Ähnlichkeit der Definitionen,
sofern aufgezwungene Verformungen auch kontrollierte Verformungen sind. Im
Bild A7 wird impliziert, daß Fall d) durch kontrollierte Auflagerbewegungen
– sprich Verformungen – entsteht, es ist jedoch ebenso denkbar, daß die dem
Stahlträger aufgezwungenen Verformungen aus kontrollierten Kräften resultieren,
folgerichtig schließt Definition neu beide Möglichkeiten zur kontrollierten
Beeinflußung des Tragverhaltens ein.

Eine weitere Möglichkeit das Spannungsbild zu beeinflussen ist im Verbundbau wie im Spannbetonbau das kontrollierte Spannen von hochfesten Stählen, die kraftschlüssig mit dem System verbunden sind. Die daraus resultierenden Eigenspannungen und Zwängungen sind sowohl nach Rüsch als auch nach Definition neu "Vorspannung". Damit entsprechen beide Definitionen den Vorstellungen die den derzeitigen Richtlinien für Stahlverbundträger und DIN 4227 zugrunde gelegt wurden.

	System Stahlträger		System beim	Betonieren	System Verbundträger
a)	Δ	Y	Ā	Δ	
b)	Δ	<del></del> }	<u> </u>	<u></u>	
c)	Ā	<u></u>	Δ	λ	
d)	Δ	Δ	ΔΔΔ	AAA	Z/////////////////////////////////////

Bild A7 Herstellung von Verbundträgern

#### Resumee

Johnson stellt in [2]eine Definition von Vorspannung vor, die "geeicht" ist an den heutigen Bemessungsgrundlagen für Schrägkabelbrücken. Als allgemeingültige Definition ist sie unbrauchbar, da sie in verschiedenen Fällen Lastanteile als Vorspannung deklariert, die sich in Streuung, Kontrolle und gezielter bzw. ungezielter Eintragung nicht von den verbleibenden Anteilen unterscheiden.

Die Definitionsvarianten nach Scheer mit Vorspannung abhängig von der Belastung bzw. Belastungsgeschichte sind dann schwierig zu handhaben, wenn für eine Bemessung mit Teilsicherheitsbeiweren eine Trennung von Last und Vorspannung erforderlich ist.

Variante a) von Scheer mit der eingeprägten Kraft als Vorspannung und die Definition von Rüsch sind in ihrer Allgemeingültigkeit begrenzt, wenn beispielsweise durch plastische Verformungen der ursprüngliche Spannungszustand verloren geht. Die beiden Definitionen werden durch eine neue Definition präzisiert, indem diese die Vorspannung zurückführt nicht auf eine eingeprägte Kraft oder Verformung, sondern einen Schritt weiter auf die Kontrolle und die geringe Streuung. Damit ist es in allen genannten Beispielen möglich, sinnvoll einen besonderen Anteil des Spannungszustands zu benennen, der in einem Bemessungskonzept separat zu behandeln ist.

Wie im Einzelnen eine Bemessung mit Vorspannung nach der neuen Definition erfolgen könnte, ob z.B. die Beiwerte der Art der Vorspannung anzupassen sind, ob z.B. im Spannbetonbau wegen unzureichender Kontrollierbarkeit Einschränkungen bei den vorzuspannenden Systemen nötig sind, soll nachfolgend untersucht werden.

# B. Vorspannung im Spannbetonträger

Kontrolle der eingetragenen Vorspannung im Spannbetonbau

Im Spannbetonbau stehen im allgemeinen beim Vorspannen zwei Meßwerte zur Kontrolle der Vorspannung zur Verfügung:

- Ziehweg und
- Spannkraft,

beide Werte gemessen am Spannanker. In einigen Fällen kann auch die Vorspannung an dem – dem Spannanker gegenüber liegenden – Ende des Spannglieds gemessen werden.

Welche Spanne sich aus den beiden Meßwerten für die Kontrollschärfe und damit für die Streuung der Spannkraft ergibt, wird im folgenden näher untersucht.

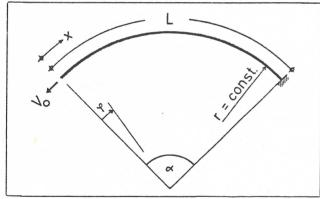


Bild B1 Spanngliedführung mit Bezeichnungen

Ausgehend von einem Spannglied konstanter Krümmung (Bild B 1), d.h. ohne ungewollte Umlenkungen, wird die Vorspannung  $V_{\Upsilon}$  an der Stelle  $\Upsilon$  gemäß der Euler'schen Seilreibungsgleichung

$$V_{(\Upsilon)} = V_o \cdot e^{-\mu \cdot \Upsilon}$$
oder entsprechend
 $V_{(X)} = V_o \cdot e^{-\mu \cdot \alpha} \frac{X}{L}$ 

Die Vorspannung  $\mathbf{V}_{\mathbf{F}}$  am Festanker ist demnach

$$V_E = V_o \cdot e^{-\mu \cdot \alpha}$$

 $V_0$  ist dabei die Spannkraft an der Stelle  $\Psi$  = 0 bzw. x = 0, der Reibungsbeiwert  $\mu$  ist eine ortsunabhängige, über die Spanngliedlänge konstante Größe. Die Abwicklung des Spannglieds hat für den Gesamtumlenkwinkel  $\alpha$  die Länge L.

Mit dem Elastizitätsmodul E und dem Querschnitt A des Spannglieds wird unter Zuhilfenahme des Hooke'schen Gesetzes die Spanngliedverlängerung  $\Delta 1$ 

$$\Delta 1 = \int_{0}^{L} \frac{V(x)}{E(x) \cdot A(x)} dx$$

Bei konstanter Steifigkeit  $E_{(x)}$ . $A_{(x)} = const. = EA$  wird

$$\Delta \gamma = \frac{V_0}{EA} \int_0^L e^{-\mu \cdot \frac{X}{L} \cdot \alpha} dx$$

$$= \frac{V_0 \cdot L}{EA} \cdot \frac{1 - e^{-\mu \cdot \alpha}}{\mu \cdot \alpha} \qquad \alpha \text{ im Bogenmaß}$$

Sofern am Festanker beim Spannen kein Schlupf auftritt – z.B. durch Vorverkeilen des Spannglieds – und  $EA_{Beton} \gg EA_{Spannstahl}$  ist, entspricht  $\Delta l$  etwa dem Ziehweg beim Spannen. Setzt man die wirksame Spanngliedlänge L als bekannt voraus, so ist zunächst durch Messung von Ziehweg  $\Delta l$  und Spannkraft  $V_0$  nur das Verhältnis EA zu  $\mu \cdot \alpha$  bekannt. Noch geringer wird die Aussagefähigkeit der Messwerte, wenn man die wirksame Spanngliedlänge als unsichere Größe (Verstopfer etc.) ansieht.

# Spannen nach Ziehweg oder Spannkraft gemäß Spannprotokoll

Abweichung der Spannkraft im Spannglied von den errechneten Sollwerten lassen sich also bei einseitigem Spannen nicht ausschließen. Es stellt sich deshalb die Frage, ob bei kleinen Abweichungen der Parameter EA bzw.  $\mu\text{-}\alpha$  eine Vorspannung nach dem Soll-Ziehweg oder aber nach der Soll-Spannkraft kleinere Fehler für die Kraft im Spannglied liefert. Dazu werden am gleichen Beispiel des Spannglieds mit konstanter Krümmung die aus den planmäßigen Werten  $\mu\alpha$   $^{Soll}$ , EA  $^{Soll}$  und die aus den abweichenden, am Bauteil tatsächlich auftretenden Werten  $\mu\alpha$   $^{Ist}$ , EA  $^{Ist}$  resultierenden Spannkräfte am Festanker  $V_E^{Soll}$ ,  $V_E^{Ist}$  verglichen.

# Anspannen auf Soll-Ziehweg Δl Soll

Aus  $\triangle$ 1 Soll =  $\triangle$ 1 Ist folgt

$$\frac{v_o^{\text{Ist}}}{\text{EA}^{\text{Ist}}} \cdot \frac{1 - e^{-\mu \alpha^{\text{Ist}}}}{\mu \alpha^{\text{Ist}}} = \frac{v_o^{\text{Soll}}}{\text{EA}^{\text{Soll}}} \cdot \frac{1 - e^{-\mu \alpha^{\text{Soll}}}}{\mu \alpha^{\text{Soll}}}$$

durch Einsetzen von  $V_E = V_o$  .  $e^{\mu \alpha}$  erhält man nach Umformung

$$V_{E}^{\text{Ist}}/V_{E}^{\text{Soll}} = \frac{EA^{\text{Ist}}}{EA^{\text{Soll}}} \cdot \frac{e^{\mu \alpha^{\text{Soll}}}}{e^{\mu \alpha^{\text{Ist}}}} \cdot \frac{1 - e^{-\mu \alpha^{\text{Soll}}}}{1 - e^{-\mu \alpha^{\text{Ist}}}} \cdot \frac{\mu \alpha^{\text{Ist}}}{\mu \alpha^{\text{Soll}}}$$

mit Einführung der Fehlerfaktoren s und r für Steifigkeit und Reibung

$$s = \frac{EA^{Ist}}{EA^{Soll}} \qquad r = \frac{\mu \alpha^{Ist}}{\mu \alpha^{Soll}}$$

wird

$$V_E^{\text{Ist}}/V_E^{\text{Soll}} = s \cdot r \cdot \frac{e^{\mu \alpha^{\text{Soll}}} - 1}{e^{r \cdot \mu \alpha^{\text{Soll}}} - 1}$$

# Anspannen auf Soll-Spannkraft VSoll

$$V_{E}^{\text{Ist}}/V_{E}^{\text{Soll}} = \frac{V_{o}^{\text{Soll}} \cdot e^{-\mu \alpha} \text{Ist}}{V_{o}^{\text{Soll}} \cdot e^{-\mu \alpha} \text{Soll}} =$$

$$= e^{-r \cdot \mu \alpha} \text{Soll} \cdot e^{\mu \alpha} \text{Soll} =$$

$$= e^{\mu \alpha} \text{Soll} \cdot (1 - r)$$

Die Abhängigkeit der Kraft am Festanker von den – gleichzeitig auftretenden – Fehlern r und s ist nach den obigen Gleichungen in den Bildern B2 und B3 dargestellt. Um den Einfluß der Fehler besonders deutlich werden zu lassen, ist hier  $\mu\,\alpha^{\,\text{Soll}}\,$  zu 0,40 gesetzt, das entspricht etwa einem Umlenkwinkel von 60° bei einem Reibungsbeiwert von 0,4. Bei kleinen Werten  $\mu\,\alpha^{\,\text{Soll}}\,$  wirken sich die Fehler weniger stark aus. Der Vergleich beider Bilder zeigt

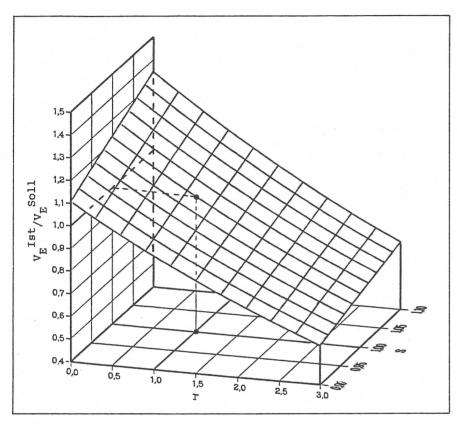


Bild B2 Spannen nach Sollziehweg,  $\mu\alpha^{\text{Soll}} = 0.4$ 

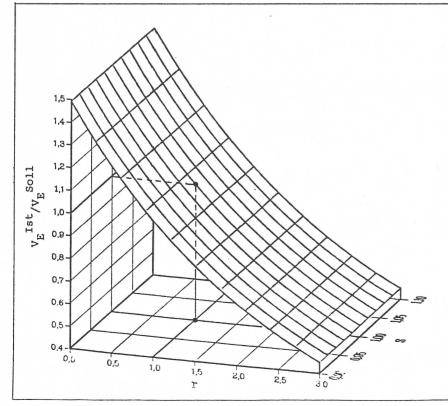
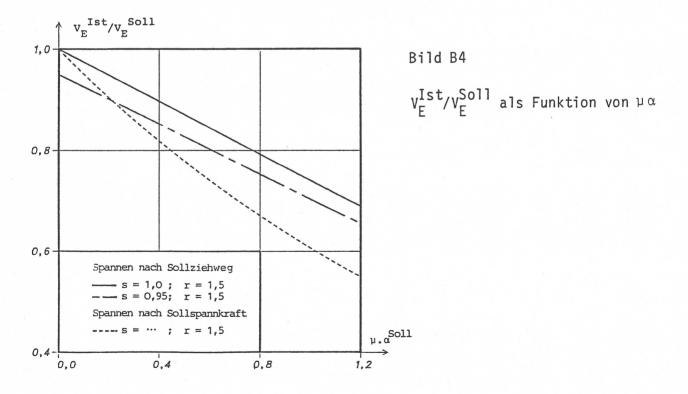


Bild B3 Spannen nach Sollspannkraft,  $\mu \alpha^{\text{Soll}} = 0,4$ 

als Vorteil des Spannens nach Sollspannkraft die Unabhängigkeit der Kraft am Festanker von Abweichungen der Querschnittswerte, beim Spannen nach Sollziehweg können sich Fehler von s und r ungünstig überlagern. Trotzdem wird man dem Spannen nach Sollziehweg den Vorzug geben: Zum einen werden die Querschnittswerte des Spannstahls überwacht, und werden daher im Vergleich zur Reibung nur schwach streuen, so daß die Unabhängigkeit der Spannkraft  $V_{\rm E}$  von möglichen Querschnittsfehlern kaum einen Vorteil bringt. Zum anderen geht aus der Neigung der in Bild B2 und B3 aufgespannten Flächen recht anschaulich hervor, daß die Empfindlichkeit gegenüber Fehlern bei dem Spannen nach Sollspannkraft.

Da in das Verhältnis  $V_E^{\rm Ist}/V_E^{\rm Soll}$  nicht nur die Variablen r und s sondern auch die Größe  $\mu$   $\alpha$  soll eingeht, ist in Bild B4  $V_E^{\rm Ist}/V_E^{\rm Soll}$  als Funktion von  $\mu$   $\alpha$  soll für zwei konstante Fehlerkombinationen r und s aufgetragen: Infolge Flugrostes kann sich der Reibungsbeiwert mehr als verdoppeln, so daß der Ansatz von r = 1,5 für einen außerplanmäßigen Reibungsbeiwert noch repräsentativ erscheint. E-Modul und Querschnittsfläche des Spannstahls können bis zu 5 % streuen, als Abschätzung für einen Fehler von E · A wird s = 0,95 gesetzt.



Es zeigt sich für große Werte  $\mu$   $\alpha^{Soll}$  wieder ein günstiges Ergebnis für das Spannen nach Sollziehweg, für kleine Umlenkwinkel und Reibungsbeiwerte – insbesondere für gerade Spannglieder – ist jedoch das Erreichen der Sollspannkraft beim Spannen zu empfehlen.

Sowohl beim Spannen nach Sollziehweg als auch beim Spannen nach Sollspannkraft wird das Verhältnis  $V_E^{\mbox{Ist}}/V_E^{\mbox{Soll}}$  mit wachsendem  $\mu$   $\alpha$   $^{\mbox{Soll}}$  ungünstiger. Um die Streuung der Spannkraft am Ende des Spannglieds klein zu halten, ist es erforderlich, nicht nur die Schwankungen der Reibung (und des Umlenkwinkels) und die der Querschnittswerte klein zu halten, sondern auch die Systeme auf ihre Empfindlichkeit gegenüber Abweichungen bei den Einflußgrößen zu untersuchen und gegebenfalls einzuschränken. Läßt man durch entsprechende Teilsicherheitsbeiwerte abgesicherte Schwankungen von z.B. 10 % um  $V_F^{Soll}$  zu, und stellt man sicher, daß in der Regel (d.h. im statistischen Sinn "mit ausreichend hoher Wahrscheinlichkeit") erkannt wird, wenn  $\mu$   $\alpha$ bzw. E A mehr als 50 bzw. 5 % vom Sollwert abweichen, so sind nach Bild B4 Systeme mit  $\mu \alpha < 0.2$  sicher. Bei einem planmäßigen Reibungsbeiwert von  $\mu$  = 0,2 können dann Umlenkwinkel einschließlich ungewollter Umlenkung bis etwa  $\alpha = 60^{\circ}$  zugelassen werden. Zu beachten ist dabei, daß eine ausreichende Überspannbarkeit vorausgesetzt wurde. Sie ist erforderlich, um z.B. bei erhöhter Reibung noch den planmäßigen Ziehweg zu erreichen.

# Einfluß des Systems auf die Fehlerempfindlichkeit beim Vorspannen

Inwieweit bei verschiedenen Systemen ein Fehler gut bzw. weniger gut erkannt werden kann, ist anhand eines konkreten Zahlenbeispiels in den Bildern B5a bis d zu erkennen. Die Diagramme sind so aufgebaut, daß sie allgemein eine Abschätzung der Auswirkung von Differenzen zwischen Sollund Ist-Werten beim Spannen erlauben. Aufbauend auf den Herleitungen für konstante Spanngliedkrümmung wird jetzt unterschieden in Spannglieder mit Krümmung in der vorderen (dem Spannanker zugewandten) Hälfte, in der hinteren Hälfte, in der Mitte (die Länge der Krümmung entspricht ebenfalls der halben Spanngliedlänge) und wiederum mit Krümmung über die gesamte Spanngliedlänge. Aus den bezogenen Werten für Spanngliedlängung  $\Delta l/L$  und Spannkraft  $V_{0}/EA$  erhält man über die Reibung  $\mu\alpha$  die bezogene Kraft am Festanker.

Das Beispiel wurde nach der z.Z. gültigen Zulassung eines Spannverfahrens berechnet. Mit einem Reibungsbeiwert von  $\mu$  = 0,26 und einem Umlenkwinkel  $\alpha$  =  $60^{O}$  wird bei einem rechnerischen ungewollten Umlenkwinkel von  $\beta$  = 0  $^{O}$ /m  $\mu\alpha$  = 0,26  $\cdot$   $\pi/3$  = 0,27. Infolge Flugrostes und außerplanmäßigen Umlenkwinkels sei der tatsächliche Wert  $\mu\alpha$  = 2  $\cdot$  0,27. Am Spannanker wird eine Kraft entsprechend 0,59 .  $\beta_{z}$  (>0,55 .  $\beta_{z}$ ; <0,65 .  $\beta_{z}$ ) eingeleitet. Bei einem Stahl St 1420/1570 mit dem E-Modul E = 2,05 .  $10^{5}$  MN/m² wird demnach  $V_{O}$ /EA = 4,5  $^{O}$ /oo.

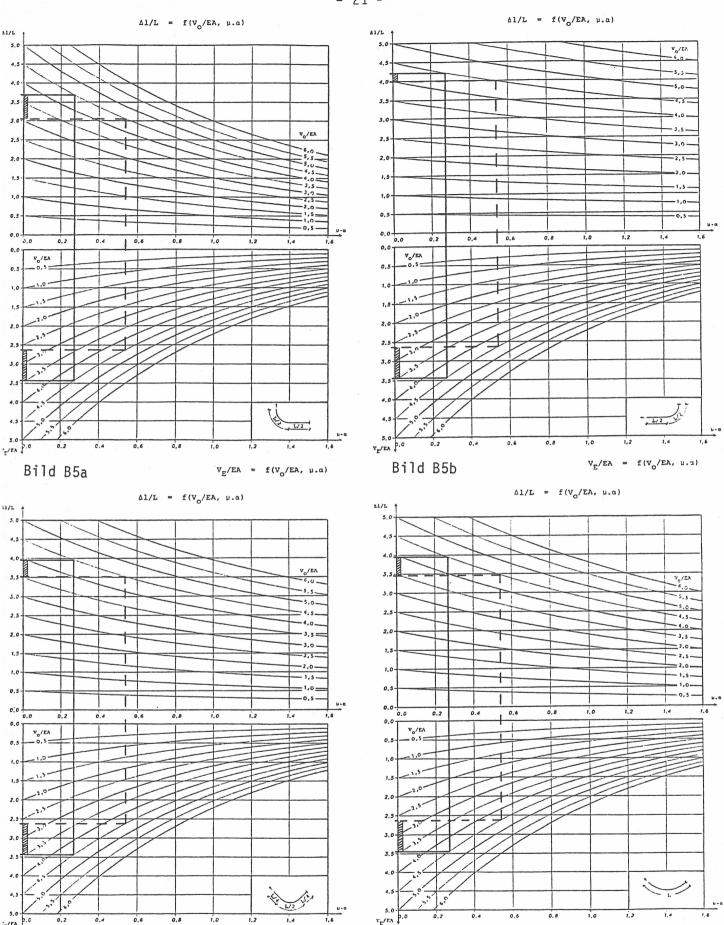


Bild B5a bis d Spanngliedlängung  $\Delta$ l/L und Festankerkraft  $V_E$ /EA als Funktion von  $V_o$ /EA und  $\mu\alpha$ ;  $\Delta$ l/L,  $V_E$ /EA,  $V_o$ /EA in  $^O$ /oo Beispiel:  $V_o$ /EA = 4,5  $^O$ /oo, — $\mu$   $\alpha$  = 0,27, --- $\mu$   $\alpha$  = 0,54

Bild B5d

 $V_E/EA = f(V_O/EA, \mu.\alpha)$ 

Bild B5c

 $V_E/EA = f(V_O/EA, \nu.\alpha)$ 

Während bei allen vier Systemen am Festanker der gleiche Fehler von 23,8 % gegenüber dem planmäßigen Wert auftritt, ist die Abweichung in der Spanngliedlängung in einem Fall 17,3 %, in einem anderen Fall aber mit 5,5 % nur knapp über der nach DIN 4227 zulässigen Toleranz.

Besonders anschaulich zeigen sich die Unterschiede der Systeme in der Darstellung nach Bild B6. Das System mit Krümmung am Spannanker (Bild B6a) ist für die Erkennung der Abweichung von  $\mu\alpha$  unkritisch, die Steigung der Kurven in etwa 1/1,3, so daß sich Fehler von  $V_E$ /EA deutlich im Ziehweg niederschlagen. Beim System nach Bild B6b mit Krümmung im hinteren Bereich verlaufen die Kurven sehr flach mit einer Steigung von etwa 1/4: Schwankungen von  $V_E$ /EA beeinflussen den Ziehweg also nur schwach.

Bezeichnet man den auf die Spanngliedlänge bezogenen Abstand des "Krümmungsschwerpunkts" zum Festanker mit s, so zeigt sich für kleine  $\mu\alpha$  eine gute Übereinstimmung zwischen s und der Steigung der Kurven. Mit dem Ziehweg

$$\Delta 1/L = V_0/EA \left[ \frac{1 - e^{-\mu \alpha}}{\mu \alpha} . 0,5 + e^{-\mu \alpha} (s - 0,25) + 0,75 - s \right]$$

und der Kraft am Festanker

$$V_E/EA = V_o/EA \cdot e^{-\mu \alpha}$$

wird die Ableitung der Kontrollgröße  $\Delta l/L$  nach der zu kontrollierenden Größe  $V_F/EA$  als Maß für die Kontrollschärfe

$$\frac{\partial \Delta 1/L}{\partial V_F/EA} = 0.5 \frac{e^{\mu \alpha} - (1 + \mu \alpha)}{(\mu \alpha)^2} + s - 0.25$$

Mit Entwicklung der Exponentialfunktion in ihre Potenzreihe wird unter Vernachlässigung der verbleibenden nichtlinearen Terme

$$\frac{\partial \Delta 1/L}{\partial V_F/EA} \stackrel{\sim}{=} s + \frac{\mu \alpha}{12}$$
 (für  $\mu \alpha \lesssim 0,5$ )

Die Kontrollschärfe ist demnach dem bezogenen Abstand s des Krümmungsschwerpunkts zum Festanker direkt proportional. Das gleiche gilt näherungsweise auch für  $\mu$   $\alpha$ ,jedoch ist der Einfluß von  $\mu\,\alpha$ um eine Zehnerpotenz kleiner.

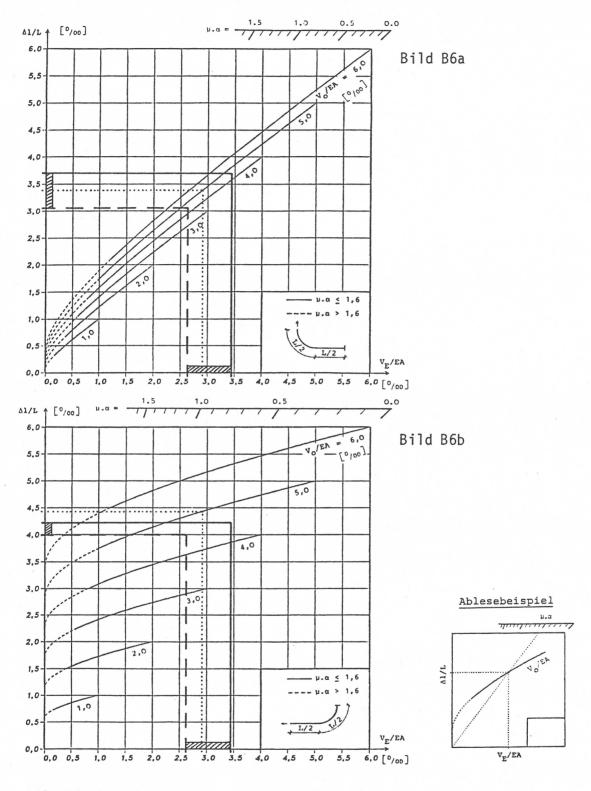


Bild B6a bis d

Beziehung zwischen Spanngliedlängung  $\Delta$ 1/L, Spannkraft  $V_{o}$ /EA, Kraft am Festanker  $V_{E}$ /EA und  $\mu\alpha$ ;  $\Delta$ 1/L,  $V_{o}$ /EA,  $V_{E}$ /EA in  $^{O}$ /oo Beispiel:—  $V_{o}$ /EA = 4,5  $^{O}$ /oo  $\triangleq$  0,59  $\beta_{z}$ ,  $\mu\alpha$  = 0,27 ---  $V_{o}$ /EA = 4,5  $^{O}$ /oo  $\triangleq$  0,59  $\beta_{z}$ ,  $\mu\alpha$  = 0,54 ...  $V_{o}$ /EA = 5,0  $^{O}$ /oo  $\triangleq$  0,65  $\beta_{z}$ ,  $\mu\alpha$  = 0,54

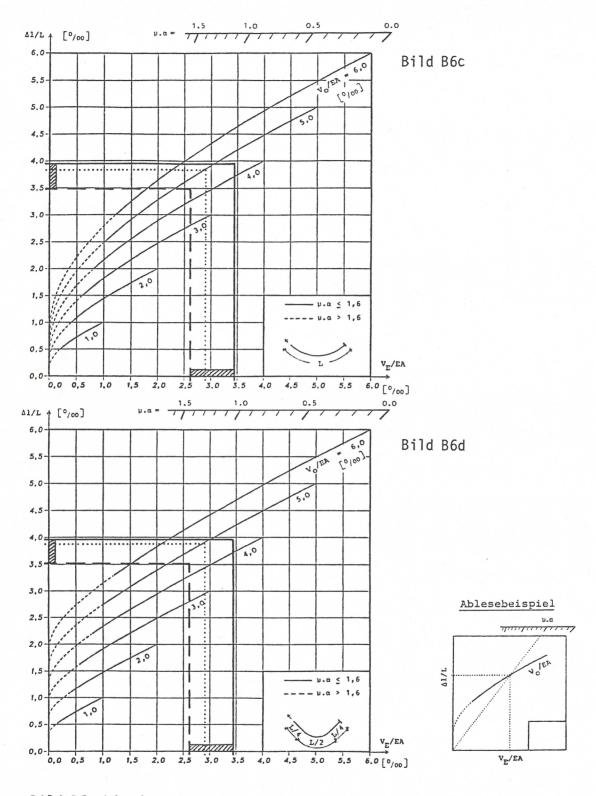


Bild B6a bis d

Beziehung zwischen Spanngliedlängung  $\Delta$ 1/L, Spannkraft  $V_{o}$ /EA, Kraft am Festanker  $V_{E}$ /EA und  $\mu\alpha$ ;  $\Delta$ 1/L,  $V_{o}$ /EA,  $V_{E}$ /EA in  $^{O}$ /oo Beispiel:—  $V_{o}$ /EA = 4,5  $^{O}$ /oo  $\triangleq$  0,59  $\beta_{z}$ ,  $\mu\alpha$  = 0,27 ---  $V_{o}$ /EA = 4,5  $^{O}$ /oo  $\triangleq$  0,59  $\beta_{z}$ ,  $\mu\alpha$  = 0,54 ...  $V_{o}$ /EA = 5,0  $^{O}$ /oo  $\triangleq$  0,65  $\beta_{z}$ ,  $\mu\alpha$  = 0,54

Wie das Zahlenbeispiel in den Bildern B6c und B6d verdeutlicht, reicht die grobe Einteilung der Systeme durchaus zur Abschätzung von Reibungsfehlern auch bei andersartig gekrümmten Systemen aus, sofern die planmäßigen Werte μα die des Beispiels nicht wesentlich überschreiten: Für  $\mu$   $\alpha$  = 0,54 ist  $\Delta$ 1/L nach Bild B6c 3,48 0/oonach Bild B6d 3,52 0/oo. Die Ausdehnung des gekrümmten Bereiches ist im Vergleich zur Lage des Krümmungs-"Schwerpunkts" von untergeordneter Bedeutung. Zur sinnvollen Anwendung der Diagramme müssen weder Abweichungen vom Reibungsbeiwert und ungewollten Umlenkwinkel konstant über den gekrümmten Bereich verlaufen, noch muß die Krümmung im jeweiligen Abschnitt konstant sein, sondern der Schwerpunkt von Abweichung und planmäßiger Krümmung soll lediglich am planmäßigen Krümmungsschwerpunkt des Diagramms liegen. Es ist zu erwarten, daß das Spannglied über seine gesamte Länge (ohne Kopplung) das Reibungsverhalten gleichmäßig bzw. mit gleicher Streuung beidseitig des Krümmungsschwerpunkts ändert, der Schwerpunkt also seine Lage infolge verändertem Reibungsbeiwert kaum verändert. Infolge des ungewollten Umlenkwinkels ist bei kleinen planmäßigen Umlenkungen jedoch eine merkliche Verschiebung möglich, da in den heute üblichen Rechenannahmen der ungewollte Umlenkwinkel β im Bereich der planmäßigen Krümmungen überschätzt wird (DAfStb Heft 282). Da die Systeme mit kleinen Umlenkungen in der Regel nur kleine Reibungsverluste haben und deshalb wenig empfindlich auf Fehler von  $\mu \alpha$ reagieren, sind die Diagramme zur Abschätzung großer Abweichungen infolge Reibung durchaus geeignet. Bei einer praktischen Anwendung ist jedoch keine Kontrolle möglich, um festzustellen, daß die Abweichung tatsächlich durch μαund nicht durch Steifigkeitsveränderung des Spannglieds entstanden ist. Dies wäre auf anderem Wege zu prüfen.

Das Beispiel läßt erkennen, daß es nicht ausreicht, nur zulässige Toleranzen für die Meßwerte vorzugeben, um eine "Vorspannung" gemäß Kapitel A sicherzustellen, sondern es sollte zum einen ein "Automatismus" zur – beschränkten – Fehlerkorrektur verankert werden, indem bei gekrümmten Spanngliedern nach Ziehweg gespannt werden muß. Zum anderen ist es erforderlich, der unterschiedlichen Kontrollierbarkeit von Abweichungen gegenüber den planmäßigen Werten Rechnung zu tragen. Ein Ansatzpunkt dafür ist nicht die Reibung oder ein Querschnittswert, denn deren Streuung soll durch die Kontrolle klein gehalten werden, sondern der Kontrollwert selbst. Zur Vorausberechnung der Auswirkung einer Abweichung des Ziehwegs um 3 % (Ziehweg zu klein) ist in

den Bildern B7 und B8 ein Korrekturglied dargestellt. Die Größe s gibt wieder den auf die Spanngliedlänge bezogenen Abstand des Krümmungsschwerpunkts vom Festanker an. Das Korrekturglied setzt an der Reibung – d.h. an  $\mu\alpha$  – an, da alle anderen Einflußgrößen gegenüber der Reibung von untergeordneter Bedeutung, bzw. gesondert kontrolliert seien.

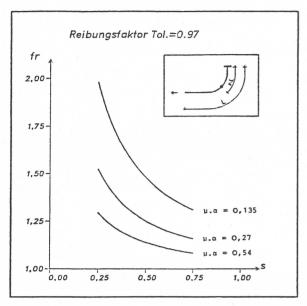
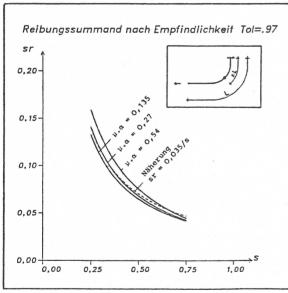


Bild B7 Faktor fr zu  $\mu$   $\alpha$ , so daß  $\Delta 1/L (\text{fr . } \mu \ \alpha) = 0.97 \ \Delta 1/L (\mu \ \alpha)$ 



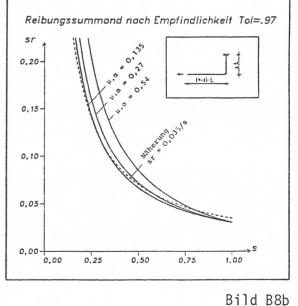


Bild B8a,b Bild B8a Summand sr zu  $\mu\alpha$ , so daß  $\Delta l/L_{(\mu\alpha+sr)} = 0.97 \Delta l/L_{(\mu\alpha)}$ 

Ein additives Glied sr zum Reibungswert  $\mu\alpha$  hat gegenüber dem Faktor fr den Vorteil äußerst praktikabel durch einen einfachen nur von s abhängigen Ausdruck genähert werden zu können. Andererseits kann der Wert sr ein Vielfaches von  $\mu\alpha$  sein. Für kleine  $\mu\alpha$  hält man dann eine unwirtschaftlich hohe Sicherheit vor.

## Zusammenfassung

Mit dem Ziel für künftige Normungsaufgaben eine baustoffund bauartübergreifende Definition von Vorspannung zu
finden, werden verschiedene Definitionen anhand von
Systemen wie einer von einem Bolzen vorgedrückten Hülse,
Schrägkabelbrücken etc. untersucht. Dabei werden den angegebenen Literaturstellen zu entnehmende Definitionen
einer neuen Definition gegenübergestellt. Es zeigt sich,
daß einzig diese neue Definition in allen untersuchten
Fällen sinnvolle Ergebnisse liefert, indem sie Vorspannung
zurückführt auf "gezielt erzeugte und kontrollierte
Verformungen oder kontrollierte Belastungen die schwach
streuen".

Anhand der Vorspannung im Spannbeton mit stark unterschiedlichen Kontrollierbarkeiten der Vorspannung wird der Begriff Kontrollschärfe eingeführt. Es ist dies die Ableitung der Kontrollgröße nach der zu kontrollierenden Größe. Am Beispiel der Spanngliedreibung bei Vorspannung mit nachträglichem Verbund wird gezeigt, daß Sicherheitsbeiwerte für Vorspannung nach der neuen Definition wesentlich durch die Kontrollierbarkeit geprägt sein werden. Da die Streuung der Vorspannung durch Kontrolle klein gehalten werden soll, genügt es unter Umständen, nur den Abweichungen aus streuender Kontrolle Rechnung zu tragen, die sich jedoch entsprechend der Kontrollschärfe stark oder weniger stark auf die Streuung der Vorspannung auswirken.

#### Summary

For future standardization work a definition of prestress should be introduced which is independent of material and system of construction. The objective is to obtain the same margin of safety in different prestressed systems. In order to find a universal definition several systems for example a jacket pressed by a bolt or cable-stayed bridges were delt with. Definitions to be found in literature are compared with the new one. The only reasonnable definition in all cases treated is the new definition explaining prestress by deformation or stresses (loads) which are controlled and exhibit a small amount of scatter.

Since the controlling measures especially of prestressing tendons in concrete structures show a wide range of degree of accuracy in checking the pressing force (depending on the system) a new term is introduced, which gives an idea of the precision of checking. It is the derivative of the checking quantity to the prestressing force being checked. With the example of the prestressing of tendons it is shown that partial safety factors mainly will depend on the exactitude of controlling. Variation of prestressing force will just be allowed in a small range by control, so it might be sufficient to take into account only a deviation of prestressing force caused by a deviation of controll. The functional connection depends on the derivation mentioned above.

## Résumé

Avec le but de trouver pour l'avenir une définition de précontrainte générale, on a éxaminé des diverses définitions,
par éxamples une enveloppe pressé par un boulon . Plusieurs
définitions indiquées dans la liste litéraire ont été confronté
avec une nouvelle définition. Il se montre que seule cette
nouvelle définition en tout cas fournit des résultats
raisonnables en ramenant la tension initiale à "une déformation évoqué visé et controllé (ou une charge évoqué visé) qui
disperse faiblement.

Car les mesurages de contrôle en particulier dans la tension initiale dans les constructions en béton montre une largeur de l'éxactitude qui dépend au système, une nouvelle définition a été introduit. C'est la dérivation du facteur qui controle le facteur à controller. L'éxample du frottement d'une armature de précontrainte avec une adhérance suivant montre que le coefficient de sécurité de la nouvelle définition sera influencer très fort. Le variation de la force de tension initiale sera resté petit par la contrôle. Il suffirait de tenir compte seulement une déviation de tension initiale, causé d'une déviation de contrôle. La connexion functionelle dépend de la dérivation cité en haut.

# 

1 DIM

#### Themenschwerpunkt: Definition von Vorspannung

Johnson, R.P.

Design Philosophy for Cable-Stayed Bridges

Technical Paper No.B/49, 4.Sept. 78

European Joint Committee for Composite Structures

Johnson, R.P. ; Roik, K.-H.

Discussion by Roik and Johnson of Technical Paper B/49

Technical Paper No.B/50, 4.Sept. 78

European Joint Committee for Composite Structures

Example:Partial Safety Factors for a Cable-Stayed Structure

Technical Paper No.B/51, 4.Sept. 78

European Joint Committee for Composite Structures

Zur Definition von Vorspannung

Festschrift Marguerre, Darmstadt 1980, S.235-247

Gedanken zur baustoffunabhaensisen Behandluns von Zwans

bei Nachweisen der Trasfaehiskeit.

Ausarbeitung vom 12.9.80, unveroeffentlicht

Johnson, R.F. ; Roik, K.; Woelfel, E.

Limite State Design of Prestressed Composite Structures

Journal of Constructional Steel Research, Vol.1, No. 3, 1981

Vorspannuns

Ausarbeituns, unveroeffentlicht, 9.3.1979

Stablbeton Spannbeton , Band 1

Werkstoffeisenschaften, Bemessunssverfahren

Werner-Verlas, Duesseldorf, 1972

#### Themenschwerpunkt: Spannbetontraeser

Beton- u. Stahlbeton, Berlin, Jun 54, H. 6

Woelfel, E. Grundlase fuer die Sicherheit im Bauwesen -Vorspannuns Ausarbeitung von 12.8.81, unveroeffentlicht **\*\*\*** Koenis, G. Zur Vorseannuns Tischvorlage NABau 3.5.79, Sicherheit von Bauwerken Trost, H. Teilweise Vorspannuns: Generalbericht und allsemeine Frobleme Vortras Betontas 79 Woelfel, E. Vorspannung ohne Verbund - Besonderheiten der Bemessung Beton u. Stahlbetonbau 9/81, S. 209-215 Mirza, S.A., Kikuchi, D.K., Mac Gresor, J.G. Flexual Strenath Reduction Factor for Bonded Prestressed Concrete Reams ACI J., Juli/Aus. 80, S.237-246 Rieve, J.J. Zum CEB-Entwurf 117: Mustervorschrift fuer Traswerke aus Stahl- und Spannbeton Die Bautechnik 11/1977 Bachmann, H. Teilweise Vorspannung – Erfahrungen in der Schweiz – und Fragen der Remessure Betontas 79 Wicker M. Zur Anwendung der Flastizitaetstheorie im Massiybau Zement u. Beton, 1982, H.4, S.161-166 Naaman, A.E., Siriaksorn, A. Serviceability Based Design of Fartially Prestressed Beams PCI Journal, Nr. 2+3, S.64-89 + S.40-60, 1979 Koerner, C. Betriebsfestiskeitsberechnung von Spannbetonquerschnitten Berechnung auf der Grundlage der Methode der Grenzzustaende Bauplanuns-Bautechnik 32, Heft 2, Feb. 1978 Muehe, L. Kraftverlauf im Spannslied bei veraenderlicher Reibungszahl Beton- u. Stahlbeton, Berlin, Okt. 55, H. 10 Voelter, O. Die Reibuns im Spannbeton

```
Voelter, O.
```

Zur Technik des Vorspannens und Auspressens Erwaesunsen beim Bau der Schleusenbruecke Stuttsart-Hofen Beton- u. Stahlbeton, Berlin, Aus. 56, H. 8

Die messtechnische Ueberpruefuns der reibungsbedingten Spannkraftverluste an der Vorlandbruecke zur Rheinbruecke Speser Beton- u. Stahlbeton, Berlin, Maerz 57, H. 3

Vorschlaese zur senaueren Erfassuns der reibunssbedinsten Spannknaftverluste in seragen und sekruemmten Spannsliedern

Erfahrungen bei Dehnwegmessungen an Spannbetonbauwerken VDI-Z. 100 (1958) Nr. 2

Teilweise Vorssannung

Vorsespannter Beton der Schweiz, Techn. Forschungs- u. Beratungsstelle der Schweiz. Zementindustie, Wildess, 82

Versuche an schiefen Flatten aus vorsespanntem Mikrobeton Vorsespannter Beton der Schweiz, Techn. Forschungs- u. Beratungsstelle der Schweiz. Zementindustie, Wildess, 82

Zur Berechnuns und Bemessuns vorsespannter flatten Schweizer Insenieur und Architekt, 7/83

Zur Frase der Zwansschnittkraefte aus Vorspannuns und deren Einfluss auf die Sicherheit der Traswerke

Beton- u. Stahlbeton, Berlin, Okt. 83, H. 3

Eintrasuns der Spannkraft - Einflusssroessen bei Entwurf und Ausfuehruns

Mitteilungen IfBt 2/1983

Quality Assurance And Quality Control For Concret Structures CEB Bulletin D'Information No 157

Qualitaetssicherung bei Vorspannarbeiten

Vortras Beton-Verein, Berlin Dez. 82

Unterstuetzuns des Spannens von Spannsliedern mit nachtraeslichem Verbund durch Heisswasser

IX. Internat. Spannoetonkonsress Stockholm 1982

Junswirth, D.

Denkanstoesse zur Qualitaetsverbesseruns im Spannbetonbau Spannbeton in der Bundesrepublik Deutschland 1978-1982

Deutscher Betonverein -Deutsche Gruppe der FIF-

Guide for Design of Prestressed Concrete Poles

PCI Journal, May-June 1983

Zur Statistik der Lase und Groesse der Vorspannbewehruns Berichte zur Zuverlaessiskeitstheorie der Bauwerke, SFB 96, Heft 23, 1978

Vorausbestimmung der Spannkraftverluste infolge Dennungsbehinderung DAfStb Heft 282

Grossmodellversuche zur Spannsliedreibuns

DAfStb Heft 325

Zur Zuverlaessiskeit statisch bestimmt und unbestimmt selaserter Stahl- und Spannbetontraeser

Diss. 7U Muenchen, Lehrstuhl f. Massivbau, 1982

#### Themenschwerpunkt: Schraeskabelbruecke

Dittmann, G. # Bondre, K.G.

Die neue Rheinbruecke Duesseldorf-Flehe/Neuss-Wedesheim Bauins. 54 (1979), S. 59-66

Zuschrift ueber Rheinbruecke Duesseldorf-Flehe unveroeffentlicht

Design Philosophy for Cable-Stayed Bridges

Technical Paper No.B/49, 4.Sept. 78

European Joint Committee for Composite Structures

Discussion by Roik and Johnson of Technical Paper B/49

Technical Paper No.B/50, 4.Sept. 78

European Joint Committee for Composite Structures

Johnson, R.F.

Example: Partial Safety Factors for a Cable-Stayed Structure Technical Paper No. B/51, 4. Sept. 78

European Joint Committee for Composite Structures

Bezwijkberekenins van een voorsespannten tuibrus

Cement XXXIV (1982), Nr.2

Die Entwicklung von Beton-Schraeskapelbruecken

Bauingenieur 58 (1983), S. 5,6

Die neue Tjoernbruecke

Bauingenieur 57 (1982), S. 379-388

IX. Internat. Spannbetonkonsress Stockholm 1982; 12 Brueckenbau Beton- u. Stahlbetonbau 1/1983; S. 16-24

Ueberspannungen aus Stanlseilen – Konstruktionskomponenten fuer den modernen Grossbrueckenbau

Bauinsenieur 51 (1976), S. 357-369

Zur Behandluns des Lastfalls "staendise Last" beim Trassionerheitsnachweis von Schraeskabelbruecken

Bauinsenieur 58 (1983), S. 329-335

The Evolution of Concrete Cable-Stayed Bridses

Concrete International, Aus. 1981

Hasenzieker, H.; Kaptijn, N.

Tweede stadsbrus over de IJssel bij Kampen

Cement, Nr. 8, 1983, S. 491-499

Themenschwerpunkt: Absespannter Mast

Scheer, J.

Absespannte Maste - Lastansaetze fuer Wind und Vorspannuns TU Braunschweis, Inst. f. Stahlpau, Bericht Nr. 6076, 1981 \* Scheer, J.

Anmerkunsen zum Bau absespannter Maste

Schriftenreihe des Instituts fuer Stahlbau, Universitäet Hannover, Heft 11, 1982

NABau

NABau

Antennentraswerke aus Stahi, Norm-Vorlase Mai 1983

Beuth Verlas, Berlin, Koeln, 1983

Zur Berechnuns absespannter Maste

Bauingenieur 53, 1978, S. 43-50

Absesmannte Maste und Schornsteine, Statik und Dynamik

Baueinsenieur-Praxis, Heft 76

Verlas W. Ernst & Sohn, Berlin, Muenchen, Duesseldorf, 1970

#### Themenschwerpunkt: Verbundbauweise

Johnson, R.P. ; Roik, K.; Woelfel, E.

Limite State Design of Prestressed Composite Structures Journal of Constructional Steel Research, Vol.1, No. 3, 1981

Erlaeuterungen zu den "Richtlinien fuer Bemessung und Ausfuehrung von Stahlverbundtraegern"

Anwendungsbeisriele

Inst. f. Konstuktiven Insenieurbau, Ruhr-Universitaet Bochum Mitt. Nr. 75-11, Sept. 1975

Composite Structures

The Construction Press, 1981, London, New York

#### Themenschwerpunkt: H-V-Verbinduns

Hawranek, R.

Zur Sicherheit von statisch beanspruchten HV-Verbindunsen Berichte zur Sicherheitstheorie der Bauwerke

SFB 96, Heft 9/75

#### Themenschwerpunkt: Sicherheitstheorie

TIN

Grundlasen zur Festlesuns von Sicherheitsanforderunsen

fuer bauliche Anlasen

Beuth Verlag, Berlin, Koeln, 1981

Koenis, G.; Hosser, D.

The Simplified Level II Method and its Application on the

Derivation of Safety Elements for Level I

CEB Bull. Nr. 147

Koenis, G.; Hosser, D.; Schobbe, W.

Sicherheitsanforderunsen fuer die Bemessuns von baulichen Anlasen

nach den Empfehlunsen des NABau - eine Erlaeuteruns

Bauinsenieur 57(1982) 69-78

Koenis, G.; Hosser, D.; Schobbe, W.

Praktische Beissiele und Hinweise zur Festlesuns von

Sicherheitsanforderungen fuer bauliche Anlagen nach den

Empfehlunsen des NABau

Bauinsenieur 57(1982) 459-467

Nishino, F., Hasewasa, A., Miki, C., Fujino, Y.

A Fractile-Based Reliability Structural Design

Coll. Papers Vol. 21, 1983, Department of Civil Engineering,

Faculty of Ensineerins, University of Tokyo

IfBt

Sicherheit im Insenieurbau

-Grundlasen fuer die Beurteiluns-

Institut fuer Bautechnik

Shinozuka, M.

Basic Analysis Of Structural Safety

Journal Of Structural Enseneerins, Vol. 109 No. 3. Mar.83