

# Vordimensionierung der Haupttragwerkproportionen von Schrägseilbrücken

Gerhard Girmscheid \*)

Im internationalen Großbrückenbau haben sich Stahlbeton- und Verbundschrägseilbrücken als besonders konkurrenzfähig herausgestellt. Zur Vordimensionierung der Stützweiten- und Pylonhöhenverhältnisse unter dem Gesichtspunkt der Kostenoptimierung werden Diagramme angegeben. Diese Diagramme wurden für Preisverhältnisse mit großer Variationsbreite ermittelt. Dadurch lassen sich individuelle Kostenrelationen für den speziellen Markt bei einem Entwurf berücksichtigen. Die systematische Gliederung der optimalen Querschnittsgestaltung wurde in einem vorhergehenden Aufsatz abgehandelt.

Pre-dimensioning of the main loadbearing member proportions of stayed girder bridges. Reinforced concrete and composite stayed girder bridges have proved to be particularly competitive for the construction of large bridges internationally. Diagrams are provided for pre-dimensioning the effective span and pylon height ratios with a view to cost optimisation. These diagrams were produced for a wide variety of price ratios. This enables consideration to be given to individual cost relations for the market in question at the design phase. The system employed for optimum design of the cross-section was outlined in a previous paper.

## 1 Einleitung

Die Wahl der Abmessungsproportionen hat auf die ästhetische und ökonomische Gestaltung einer Schrägseilbrücke einen entscheidenden Einfluß. Eine große Schrägseilbrücke dient nicht nur der Überwindung großer Hindernisse, sondern hat für eine Stadt oder eine Region eine herausragende gestalterische Bedeutung.

Um die systemimmanenten ästhetischen und wirtschaftlichen Vorzüge einer Schrägseilbrücke gegenüber anderen konkurrierenden Systemen voll zur Geltung zu bringen, muß man die Abmessungsverhältnisse

- Seitenöffnung zur Hauptöffnung:  $l_1/l_m$  und
- Pylonhöhe zur Hauptöffnung:  $h/l_m$

unter dem Gesichtspunkt der Gesamtoptimierung des Bauwerks wählen.

Die ökonomische Optimierung ist ein einseitiger deterministischer Aspekt. Die sich daraus ergebenden Proportionen bilden meist schon eine harmonische Abstimmung des Tragwerks. Der Ingenieur muß jedoch das Tragwerk auf seine Umweltverträglichkeit überprüfen. Dabei sind die ökonomischen Aspekte Entwurfsgrundlage, sie können jedoch niemals die Abstimmung mit den Umweltpportionen ersetzen [1]. Jedes isoliert gestaltete Bauwerk mag für sich harmonisch sein, jedoch erst in der Anpassung an die Umgebung erfährt es seine ästhetische Wirkung. Der Maßstab der Umwelt spielt eine wesentliche Rolle für den Entwurf.

Die nachfolgenden Überlegungen dienen zur Vordimensionierung der Hauptabmessungsverhältnisse. Die genaue statische Berechnung unter Berücksichtigung aller relevanten Steifigkeiten kann eine geringe Modifizierung erfordern.

## 2 Länge der Seitenfelder

Das Rückhalte­kabel beim Fächer und modifizierten Fächer verbindet den Pylon mit dem Widerlager bzw. Pfeiler des Seitenfelds. Für die Steifigkeit des Gesamtsystems fällt dem Rückhalte­seil eine dominierende Aufgabe zu. Das Rückhalte­kabel steift den Pylon bei Verkehrsbelastungen der großen Hauptöffnung ganz entscheidend aus, dadurch werden die Durchbiegungen in der Hauptöffnung und die Biegemomente im Pylon reduziert. Um das

Rückhalte­kabel ausreichend steif bzw. wirtschaftlich zu gestalten, darf das Verhältnis  $\kappa$  von Unter- zu Oberspannung nicht zu klein sein. Durch Variation des Öffnungsverhältnisses  $l_1/l$  kann man das Verhältnis von  $\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$  in diesem Rückhalte­kabel beeinflussen.

Die Rückhalte­kräfte  $\min S_R$  und  $\max S_R$  zur Bestimmung der ungefähren Seiten-Hauptfeldproportionen ergeben sich aus der in Bild 1 gezeigten Belastungskonfiguration. Zur überschlägigen Berechnung dieser Seilkräfte werden einige Berechnungsvereinfachungen eingeführt, die das Ergebnis für den Vorentwurf nur unwesentlich beeinflussen.

Annahmen:

1. Belastung und System symmetrisch,
2. Gelenke im Versteifungsträger an den Knotenpunkten der Seilbefestigung.

Die 2. Annahme ist immer dann gerechtfertigt, wenn der Versteifungsträger relativ weich ist. Wird er sehr steif, wie dies bei Eisenbahnbrücken der Fall ist, dann ist es wirtschaftlich, die Biegesteifigkeit zu berücksichtigen. Aufgrund dieser Annahmen braucht man nur das halbe System zu betrachten. Aus einer einfachen

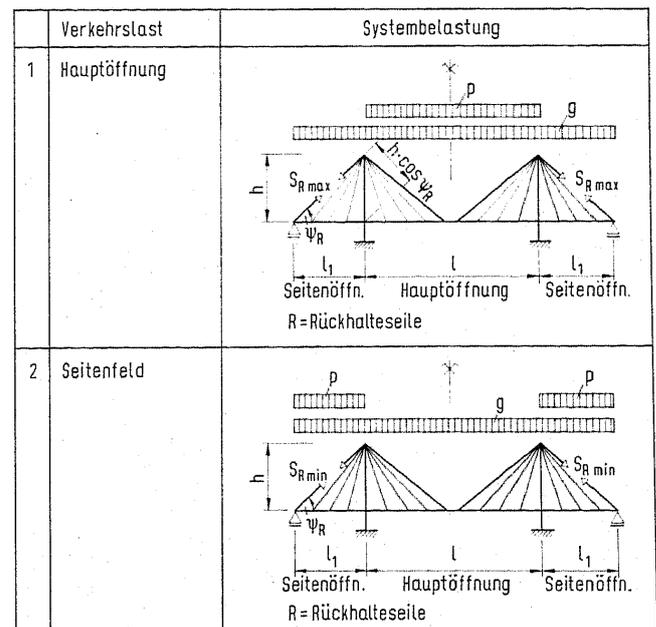


Bild 1. Belastungskonfiguration zur Ermittlung der maximalen und minimalen Rückhalte­kräfte

\*) Dr.-Ing. Gerhard Girmscheid, Bilfinger + Berger Bau AG, Auslandsbereich, Postfach 15 09, 6200 Wiesbaden 1

Tabelle 1. Seilkräfte der Rückhaltekel und Unter-Oberspannungsverhältnis  $\alpha$

| System   | $\chi_1$ -System   | 0-System  |
|--|--|---|
|  |  |   |
| Schnittgrößen  | $M_1^1 = 1 \cdot \cos \psi \cdot h$<br>$M_2^1 = 1 \cdot \cos \psi \cdot H$<br>$S_R^1 = 1$<br>$S_I^1 = 0$ | $M_1^0 = 1/2(L_1 \cdot l_1 - L_2 \cdot l_m)$<br>$M_2^0 = H/(2h) \cdot [L_1 \cdot l_1 - L_2 \cdot l_m]$<br>$S_R^0 = 0$<br>$S_I^0 \neq 0$ |
| Verformungen   | $\delta_{11} = \frac{\cos^2 \psi}{3EI} H^3 + \frac{1}{EA} \cdot \frac{l_1}{\cos \psi}$                   | $\delta_{10} = \frac{1}{EI} \cdot \frac{H^3}{2h} \cdot [L_1 \cdot l_1 - L_2 \cdot l_m]$   |
| Lasten   | $\chi_1^1$ Verkehr im Seitenfeld<br>$\chi_2^2$ Verkehr im Hauptfeld                                      | $L_1^1 = (g + p) l_1$<br>$L_2^1 = (g) l_m$<br>$L_1^2 = (g) l_1$<br>$L_2^2 = (g + p) l_m$  |
| Unter - Oberspannungsverhältnis $\alpha$ :<br>$\alpha = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = \frac{\chi_1^1}{\chi_2^2} = \frac{\delta_{10}^1 / \delta_{11}}{\delta_{10}^2 / \delta_{11}} = \frac{4(g+p)l_1^2 - g l^2}{4g l^2 - (g+p)l^2}$<br>$\beta = l_1/l = 1/2 \sqrt{\frac{(1-\alpha) - \alpha(p/g)}{(1-\alpha) + (p/g)}}$ |  |   |

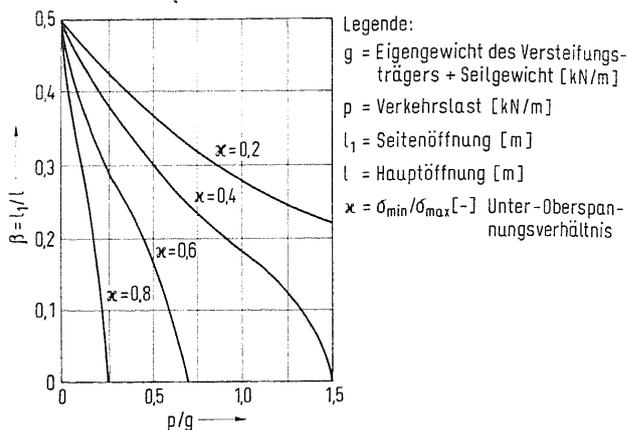


Bild 2. Seiten-Hauptöffnungsverhältnis  $\beta$  in Abhängigkeit vom Lastverhältnis  $p/g$  und dem Spannungsverhältnis  $\alpha$

### 3 Höhe des Pylons

Die statische Ausnutzung der Seile hängt beim Fächer- wie beim Harfensystem ganz entscheidend von der Höhe des Pylons ab. Je steiler die Seile geneigt sind, um so direkter wird die Vertikal-komponente der Last ins Seil übertragen.

Das Bild 3 zeigt, daß die Rückverankerungsseile nicht zu flach verlaufen sollen. Das bedeutet aber, daß der Pylon eine gewisse Höhe haben muß, dadurch werden die Seile besser ausgenutzt, aber länger. Das Gesamtoptimum für die Konstruktion folgt aus Seilkosten und Pylonkosten.

|            | Neigung der Seile    |                           |                               |
|------------|----------------------|---------------------------|-------------------------------|
| Systeme    |                      |                           |                               |
| Kraftecke  |                      |                           |                               |
| Kräfte     | $S_1 = G$<br>$H = 0$ | $S_2 = 1,42 G$<br>$H = G$ | $S_3 = 2,2 G$<br>$H = 1,96 G$ |
| Ausnutzung | $\eta = 1$           | $\eta = 0,72$             | $\eta = 0,45$                 |

Bild 3. Ausnutzungsgrad der Seile in Abhängigkeit von ihrer Neigung

atisch unbestimmten Rechnung können die Seilkräfte der Rückhaltekel für beide Lastkonfigurationen und das Unter-Oberspannungsverhältnis (Tabelle 1) bestimmt werden.

In Bild 2 ist das Verhältnis Seiten- zu Mittelfeldspannweite in Abhängigkeit vom Verhältnis der Verkehrs- zur Eigengewichtsbelastung und dem Parameter  $\alpha$ , das Unter-Oberspannungsverhältnis aufgetragen. Man stellt fest, daß die Seitenöffnung immer kleiner als die Hälfte der Hauptöffnung ( $\beta = l_1/l \leq 0,5$ ) sein muß. Die Seitenöffnung  $l_1$  wird bei konstantem  $\alpha$  kleiner, je größer das Verhältnis  $(p + g)/g$  wird.

Bei Straßenbrücken aus Verbund- bzw. Stahlbetonkonstruktion liegt die Größenordnung der dauerfestigkeitsrelevanten Verkehrslast bei  $p = 0,2 g - 0,25 g$ . Soll das Unter-Oberspannungsverhältnis  $\alpha \approx 0,4$  für die Rückhalteseile nicht unterschritten werden, so wird die Seitenfeldlänge  $l_1 \approx 0,4 \cdot l$ . Bei Eisenbahnschrägseilbrücken kann  $p \approx g$  werden. Soll  $\alpha \approx 0,4$  eingehalten werden, so wird die Seitenöffnung etwa  $l_1 \approx 0,2 \cdot l - 0,3 \cdot l$ . Diese Rückhaltekel können von mehreren Seilen gebildet werden.

Die Harfe hat keine Rückhaltekel. Daher treten bei einem solchen System sehr große Verformungen auf. Aus dem Vergleich der Verformungen von Fächer- und Harfensystem [2] erkennt man, daß die Verformungen der Harfe ein Vielfaches des Fächers betragen. Nur die Anordnung von Rückhängepfeilern verringert die Verformung auf die Größenordnung des Fächers. Eine weitere Möglichkeit, eine größere Systemsteifigkeit bei der Harfe zu erhalten, besteht darin, den Pylon sehr biegesteif zu machen.

Bei dem Harfensystem werden alle Seile so schlecht ausgenutzt wie das flachste, längste Seil, da alle Seile parallel verlaufen. Das Harfensystem ist nicht so wirtschaftlich wie das Fächersystem, weil zusätzliche Rückhängepfeiler im Seitenfeld oder sehr steife Pylone erforderlich werden und der Ausnutzungsgrad der Seile ( $S = n \times G$ ,  $n \gg 1,0$ ) sehr schlecht ist, da alle Seile relativ flach verlaufen.

Um die Seilmassen zu optimieren, hat man ähnliche vereinfachte Überlegungen wie bei den Seitenfeldproportionen angestellt [5]. Beim modifizierten Fächersystem ist  $h$  der Abstand des Schwerpunktes der Verankerung der Kabel, das ist ungefähr die Mitte des Verankerungsbereiches im Pylonkopf, von der Systemlinie des Hauptträgers. Zur Ermittlung der optimalen Pylonhöhe im Entwurfsstadium wurden die Pylon- und Seilmassen [3] nach Gewicht ermittelt. Zur Ermittlung des Kostenoptimums wurden dann Stahlseil- und Pylonbetonpreisverhältnisse in einer Variationsbreite gebildet, wie sie bei inländischen aber auch internationalen Wettbewerben für deutsche Firmen relevant sind. Die Tonnenpreise enthalten alle anteiligen Schlüsselkosten. Das Kostenoptimum wird für das Fächer- und das Harfensystem ermittelt. Dabei werden vereinfachte Formeln für das Kosten- bzw. das Massenoptimum angegeben. Die Auswertung erfolgt jedoch für das relative Kostenoptimum, damit die Auswertung flexibel bleibt für absolute Preisveränderungen.

In den folgenden Formeln bedeuten:

- $\gamma_B$  = Raumbgewicht des Betons
- $\gamma_s$  = Raumbgewicht der Stahlseile
- $\sigma_N$  = zulässige Normalspannung im Beton nach Abzug der Biegespannung im Pylon
- $\sigma_s$  = zulässige Spannung der Stahlseile
- $k_s$  = Stahlseilkosten pro Tonne einschließlich aller Nebenkosten
- $k_B$  = Betonkosten pro Tonne einschließlich aller Nebenkosten
- $k$  = Kostenverhältnis  $k_B/k_s$
- $K$  = Gesamtkosten (Pylone + Seile)
- $C_{Pyl}$  = dimensionsloses Kostenverhältnis Pylone
- $C_{Seil}$  = dimensionsloses Kostenverhältnis Seile
- $G_p$  = Pylongewicht
- $G_s$  = Seilgewicht
- $(g + p)$  = Eigengewichts- und Verkehrslast des Versteifungsträgers pro m Brückenlänge
- $V$  = Resultierende aller vertikalen Seilkräfte im Pylonkopf
- $F$  = Resultierende Pylonkraft
- $l_1$  = Seitenfeldöffnung
- $l$  = Hauptöffnung
- $l_m$  = halbe Hauptfeldöffnung
- $h$  = Pylonhöhe über dem Versteifungsträger
- $A$  = Pylonquerschnittsfläche
- $H$  = Gesamtpylonhöhe über OK-Fundament

### 3.1 Pylonhöhe beim Fächersystem

Annahmen:

1. System symmetrisch,
2. Biegesteifigkeit des Versteifungsträgers vernachlässigt (Gelenke an den Seilknotenpunkten),
3. Seiten-Hauptfeldverhältnis  $\beta \approx 0,4$ ,
4. Rückhalteseilmassen global berücksichtigt durch Seilfächerspannweite der Länge  $2 \cdot l$  statt  $1,8 \cdot l$ ,
5. Seilgewicht wird beim Eigengewicht des Versteifungsträgers berücksichtigt,
6. Pylon vertikal und von gleicher Festigkeit,
7. Seilkräfte werden an der Pylonspitze konzentriert eingeleitet,
8. Pylonhöhe reicht von OK-Versteifungsträger bis zum Schwerpunkt der Verankerung im Pylonkopf,
9. Pylonbeanspruchung nur durch Normalkräfte, die Biegebeanspruchung wird durch Reduktion der zulässigen Betonspannung berücksichtigt.

Das *Fächerpylonegewicht* erhält man unter der Annahme gleicher Beanspruchung des Querschnitts [4] durch Lösung der Gleichgewichts-Differentialgleichung (Bild 4). Die Höhe des Pylons unterhalb des Versteifungsträgers bleibt unberücksichtigt, da sie durch das Lichtraumprofil für jedes System vorgegeben ist. Beim modifizierten Fächer muß man die Gesamthöhe des Pylons um den halben Verankerungsbereich ergänzen. Für eine Optimierung des Höhen-Mittelöffnungsverhältnisses ist dies jedoch ohne Bedeutung, da es sich um eine konstante Ordinatenverschiebung handelt ohne Einfluß auf das Kurvenminimum. Die Belastungslänge eines Pylons wird mit  $1,8 \cdot l_m = (0,4 + 0,5) l$  angenommen.

Das *Fächerseilgewicht* ermittelt man an einem fiktiven, kontinuierlichen Seilschleier (Bild 5). Für den Seilschleier nimmt man

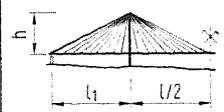
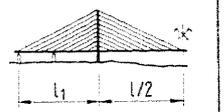
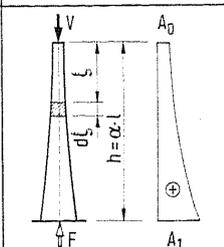
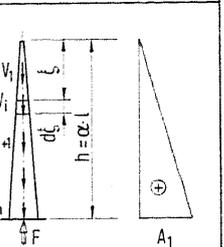
|               | Fächersystem   | Harfensystem  |
|---------------|--|---|
| Systeme       |  |  |
| Lasten        | $V = (g + p) (l_1 + l/2)$ (1a)   | $V = \sum V_i = (g + p) (l_1 + l/2)$ (1b)   |
| Pylone        |  |  |
| Gleichgewicht | $F(\xi) + dF(\xi) = F(\xi) + A(\xi) \gamma_B d\xi$ (2)                             |   |
| Kraft         | $F(h) = V \cdot \exp[\gamma_B / \sigma_B \cdot h]$ (3a)                            | $F(h) = V + 1/2 A_1 h \gamma_B$ (3b)  |
| Gewicht       | $G_{Pyl} = V \cdot (\exp[\gamma_B / \sigma_B \cdot h] - 1)$ (4a)                   | $G_{Pyl} = \frac{V h \gamma_B}{\sigma_B (1 - 1/2 (\gamma_B / \sigma_B) h)}$ (4b)    |

Bild 4. Ermittlung des Pylongewichts

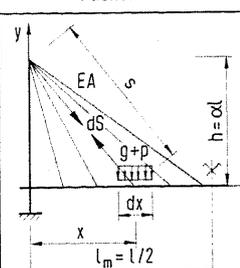
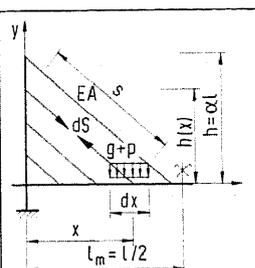
|             | Fächer   | Harfe   |
|-------------|--|---|
| Systeme     |                          |    |
| Last        | $dV = (g + p) dx$ (5)  |   |
| Seilskraft  | $\frac{dS}{dV} = \frac{\sqrt{x^2 + h^2}}{h}$ (6a)  | $\frac{dS}{dV} = \frac{\sqrt{x^2 + h^2(x)}}{h(x)}$ (6b)   |
|             |  | $\frac{x}{l/2} = \frac{\sqrt{x^2 + h^2(x)}}{\sqrt{(l/2)^2 + h^2}}$ (6c)   |
| Seilgewicht | $dA = dS / \sigma_s$ (7a)  | $dG = dA \cdot s \cdot \gamma_s$ (7b)   |
|             | $G_{Seil} = \frac{\gamma_s}{\sigma_s} \frac{g+p}{h} \int_0^{l_m} (x^2 + h^2) dx$                             | $G_{Seil} = \frac{\gamma_s}{\sigma_s} (g+p) \frac{l_m}{h} \int_0^l \left(1 + \left(\frac{h}{l_m}\right)^2\right) x dx$                    |
|             | $G_{Seil} = \frac{\gamma_s}{\sigma_s} \frac{g+p}{h} \cdot \left[ \frac{x^3}{3} + h^2 x \right]_0^{l_m}$ (8a) | $G_{Seil} = \frac{\gamma_s}{\sigma_s} (g+p) \frac{l_m}{h} \left(1 + \left(\frac{h}{l_m}\right)^2\right) \frac{x^2}{2} \Big _0^{l_m}$ (8b) |

Bild 5. Ermittlung des Seilgewichts

eine Seitenfeldlänge von  $l_1 \approx 0,5 \cdot l$  an. Dies ist plausibel, da das Hauptfeld kräftemäßig auch bei kürzerem Seitenfeld zurückgehängt werden muß.

Die Gewichte für eine Fächerbrückenhälfte lauten:

$$\text{Pylon: } G_{Pyl}^F = 1,8 l_m (g + p) \left[ \exp\left(\frac{\gamma_B}{\sigma_B} h\right) - 1 \right] \quad (9)$$

$$\text{Seile: } G_{Seil}^F = 2 \frac{\gamma_s}{\sigma_s} (g + p) \left( \frac{1}{3} \frac{l_m^3}{h} + h l_m \right) \quad (10)$$

Mit

$$l_m = l/2 \quad \text{und} \quad \alpha = h/l \quad (11)$$

erhalten wir die Gesamtkosten der Brücke zu:

$$K_F = 2 (G_{Pyl} k_B + G_{Seil} k_s) \quad (12)$$

$$K_F = \frac{(g+p) l^2}{\sigma_s} \gamma_s k_s \left[ \left( \frac{1}{6\alpha} + 2\alpha \right) + 1,8 \frac{\sigma_s \cdot k_B}{\gamma_s \cdot k_s} \frac{1}{l} \left[ \exp \left( \frac{\gamma_B}{\sigma_B} h \right) - 1 \right] \right] \quad (13)$$

Die dimensionslosen Kostenfunktionen lauten:

$$C_{Seil}^F = \left( \frac{1}{6\alpha} + 2\alpha \right) \quad \text{siehe auch [3]} \quad (14)$$

$$C_{Pyl}^F = 1,8 \frac{\sigma_s \cdot k_B}{\gamma_s \cdot k_s} \frac{1}{l} \left[ \exp \left( \frac{\gamma_B}{\sigma_B} h \right) - 1 \right] \quad (15)$$

$$C_F = C_{Seil}^F + C_{Pyl}^F \quad (16)$$

**Pylonhöhe beim Harfensystem**

annahmen:

1. System symmetrisch,
2. Biegesteifigkeit des Versteifungsträgers vernachlässigt,
3. Seiten-Hauptfeldverhältnis  $\beta \cong 0,5$ ,
4. Rückhängepfeiler im Seitenfeld zur Aussteifung [2],
5. Rückhängeseile nicht gesondert berücksichtigt, sind durch das Verhältnis  $\beta$  geschätzt,
6. Seilgewicht beim Eigengewicht des Versteifungsträgers berücksichtigt,
7. Pylon vertikal und lineare Querschnittszunahme,
8. Seilkräfte werden konstant über die gesamte Pylonhöhe eingeleitet,
9. Pylonhöhe von OK-Versteifungsträger bis zur Pylonspitze,
10. Pylonbeanspruchung nur durch Normalkräfte, die Biegebeanspruchung wird durch Reduktion der zulässigen Betonspannungen berücksichtigt.

Das *Harfenspylengewicht* erhält man unter der Annahme, daß die Seile ihre Kräfte als konstante Liniennormalkraft über die Pylonhöhe abgeben. Dadurch kommt man zu der linearen Zunahme des Pylonquerschnitts (Bild 4). Die Höhe des Pylons unterhalb des Versteifungsträgers bleibt ohne Relevanz für das Optimum. Auch hier wird das *Harfenseilgewicht* an einem fiktiven, kontinuierlichen Seilschleier ermittelt (Bild 5).

Die Gewichte für eine Harfenbrückenhälfte lauten:

$$\text{Pylon: } G_{Pyl}^H = \frac{1}{2} \frac{\gamma_B}{\sigma_B} \frac{(g+p) 2 l_m h}{1 - \frac{1}{2} \frac{\gamma_B}{\sigma_B} h} \quad (17)$$

$$\text{Seile: } G_{Seil}^H = \frac{\gamma_s}{\sigma_s} (g+p) \frac{l_m}{h} \left( 1 + \left( \frac{h}{l_m} \right)^2 \right) \frac{l_m^2}{2} \quad (18)$$

Mit den Beziehungen (11) und (12) erhält man die Gesamtkostenfunktion der Brücke zu:

$$K_H = \frac{(g+p) l^2}{\sigma_s} \gamma_s k_s \left[ \left( \frac{1}{4\alpha} + \alpha \right) + \frac{k_B \cdot \gamma_B \cdot \sigma_s}{k_s \cdot \sigma_B \cdot \gamma_s} \frac{\alpha}{\left( 1 - \frac{1}{2} \frac{\gamma_B}{\sigma_B} \alpha l \right)} \right] \quad (19)$$

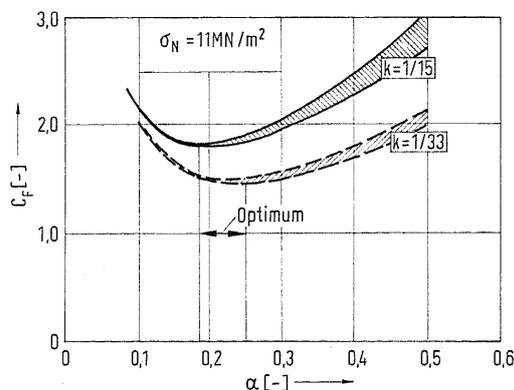
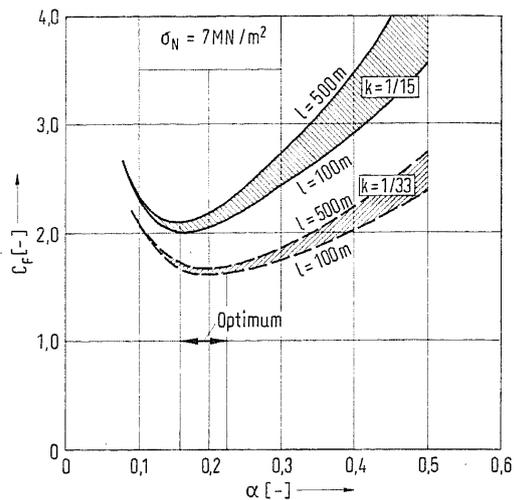


Bild 6. Kostenoptimum eines Fächersystems

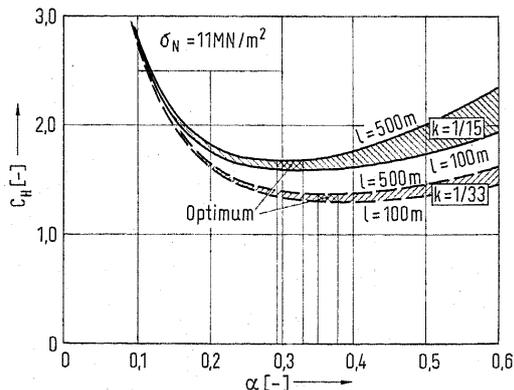
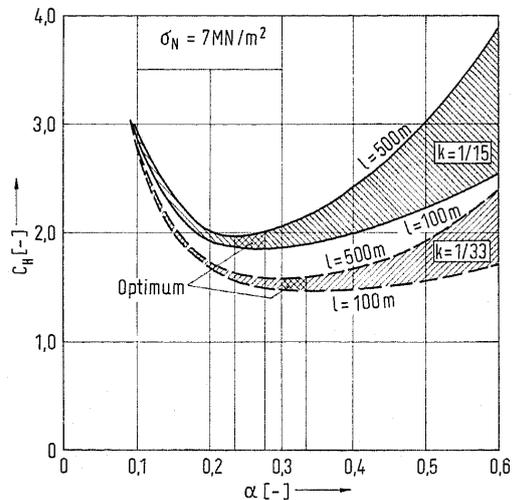


Bild 7. Kostenoptimum eines Harfensystems

Die dimensionslosen Kostenfunktionen lauten:

$$\text{Seile: } C_{\text{Seil}}^H = \left( \frac{1}{4\alpha} + \alpha \right) \quad \text{siehe auch [3]} \quad (20)$$

$$\text{Pylone: } C_{\text{Pyl}}^H = \frac{k_B \cdot \gamma_B \cdot \sigma_s}{k_s \cdot \sigma_B \cdot \gamma_s} \cdot \frac{\alpha}{\left( 1 - \frac{1}{2} \frac{\gamma_B}{\sigma_B} \alpha l \right)} \quad (21)$$

$$C_H = C_{\text{Seil}}^H + C_{\text{Pyl}}^H$$

### 3.3 Die Pylon-Seil-Kostenfunktionen einer Fächer- und Harfenschrägseilbrücke

Die dimensionslosen Kostenfunktionen für Fächer und Harfe werden für folgende Werkstoffgüten ausgewertet:

Betonpylon: B35 – B45

Seile : S 1450/1600

Die Normalkraft-Betonspannung wird auf 60 – 85 % der zulässigen begrenzt, um die nicht berücksichtigten Biegespannungen aufzunehmen.

Zulässige Betonspannung:  $7 \text{ MN/m}^2 \lesssim \sigma_B \lesssim 11 \text{ MN/m}^2$

Zulässige Seilspannung:  $\sigma_s = 720 \text{ MN/m}^2$

Das Kostenverhältnis von Betonpylon- und Stahlseileinheits-tonnagekosten wird in großer Bandbreite untersucht, um für unterschiedliche Preisrelationen die Tendenz zu signalisieren. Kostenverhältnis:  $1/33 \leq k_B/k_s \leq 1/15$ .

Für den Fächer wurden die Kostenfunktionen in Bild 6 ausgewertet. Das Kostenoptimum schwankt in der Bandbreite von  $0,19 \leq \alpha \leq 0,25$ .

Für die Harfe wurden die Kostenfunktionen in Bild 7 ausgewertet.

#### Literatur:

- [1] *Kreher, K.*: Kriterien und Methoden zur Beurteilung von Ingenieurbauwerken, dargestellt am Beispiel einer Schrägseilbrücke. Dissertation, TH Darmstadt (D 17), 1974.
- [2] *Pauser, A.*: Vergleichende Untersuchungen an Schrägseilbrücken, 1. und 2. Teil. Österreichischer Stahlbautag 1981.
- [3] *Leonhardt, F., und Zellner, W.*: Vergleiche zwischen Hängebrücken und Schrägkabelbrücken für Spannweiten über 600 m. IVBH, Bd. 20. Zürich 1972.
- [4] *Marquerre, K.*: Technische Mechanik. Teil 2: Elastomechanik. Berlin: Springer Verlag 1967.
- [5] *Gimsing, N. J.*: Cable supported Bridges. New York: Wiley 1983.
- [6] *Girmscheid, G.*: Entwicklungstendenzen und Konstruktionselemente von Schrägseilbrücken aus Stahlbeton und Verbundkonstruktion. Bautechnik 64 (1987), H. 8, S. 256–267.