

# Anhang D zu:

## **Ermüdungssicherheit von vollverschlossenen Seilen mit Korrosionsschäden**

von

Michael Paschen

PSP – Prof. Sedlacek & Partner Planung  
und Entwicklung im Bauwesen GmbH  
Aachen

Friedhelm Dürrer  
Olivier Gronau

DMT GmbH & Co. KG  
Essen

Friedhelm Eric Rentmeister

BRIDON International GmbH  
Gelsenkirchen

**Berichte der  
Bundesanstalt für Straßenwesen**

**Brücken- und Ingenieurbau Heft B 146 – Anhang D**

**bast**

# Beurteilung der Ermüdungssicherheit von vollverschlossenen Spiralseilen mit Korrosionsschäden

FE 15.0444/2007/HRB

## Anhang D Kerbfalleinstufung von vollverschlossenen Spiralseilen

Auftraggeber: Bundesanstalt für Straßenwesen  
Verfasser: G. Sedlacek, M. Paschen, Ing.-Büro PSP  
Durchführung:

PROF. SEDLACEK & PARTNER  
PLANUNG UND ENTWICKLUNG IM BAUWESEN GmbH



**BRIDON**  
International GmbH

**IEHK** RWTH RHEINISCH-  
WESTFÄLISCHE  
TECHNISCHE  
HOCHSCHULE  
AACHEN

 **DMT**

Stand: 19. Juli 2017

## Anhang D: Kerbfalleinstufung von vollverschlossenen Spiralseilen

### Inhaltsverzeichnis

<b>D1. Allgemeines.....</b>	<b>1</b>
<b>D.2 Ermüdungsfestigkeit von vollverschlossenen Seilen.....</b>	<b>2</b>
D.2.1 Vorbemerkungen.....	2
<b>D.3 Ermüdungswiderstand nach DIN-Fachbericht 103.....</b>	<b>2</b>
D.3.1 Allgemeines.....	2
<b>D.4 Ableitung einer Wöhlerlinie für vollverschlossene Brückenseile.....</b>	<b>4</b>
D.4.1 Versuchsbeschreibung.....	4
<b>D.5 Interpretation der Versuchsergebnisse.....</b>	<b>9</b>
<b>D.6 Kerbklaseinstufung.....</b>	<b>11</b>
<b>D.7 Literatur.....</b>	<b>15</b>

### D1. Allgemeines

1. Europäisch wird die Ermüdungssicherheit von Seilen mit Angabe der Ermüdungsfestigkeit von Seilen in der EN 1993-1-11 geregelt.
2. Bild D.1 gibt einen Überblick über die Angaben zum Ermüdungswiderstand. Die Angaben umfassen dabei die vollverschlossenen Spiralseile und die Paralleldrahtseile.

Gruppe	Zugglied		Kerbfalleinstufung $\Delta\sigma_c$ in N/mm <sup>2</sup>
A	1	Vorspannstäbe	105
B	2	Vollverschlossene Seile mit metall- oder harzvergossenem Seilkopf	150
	3	Spiralseil mit metall- oder harzvergossenem Seilkopf	150
C	4	Paralleldrahtlitzen mit Epoxid-vergossenem Seilkopf	160
	5	Parallellitzenbündel	160
	6	Paralleldrahtbündel	160

**Bild D.1:** Angaben in EN 1993-1-11

3. National gelten der DIN-Fachbericht 103 in Verbindung mit der ZTV-Ing und den Technischen Lieferbedingungen für Seile (TL Seile), die sich in ihren Angaben bisher weitgehend auf die vollverschlossenen Spiralseilen beschränken.
4. Bild D.2 gibt den Kerbfall für vollverschlossene Spiralseile nach DIN-Fachbericht 103 an.

<b>II-A.9.2 Veränderliche axiale Belastung</b>	
(1)	Falls keine Versuche nach II-A.9.1 (2) vorliegen, sind die folgenden Ermüdungskategorien unter Beachtung der Anforderungen in (2), anzusetzen.
-	Vollverschlossene Seile mit Verguss aus Weichmetall <span style="float: right;">Kategorie 112</span>

**Bild D.2:** Angaben aus DIN-Fachbericht 103

5. Im nachfolgenden wird dargestellt, wie die Ermüdungswiderstände ermittelt wurden.

## D.2 Ermüdungsfestigkeit von vollverschlossenen Seilen

### D.2.1 Vorbemerkungen

1. Bei den vollverschlossenen Spiralseilen bestehen zwischen den nationalen und europäischen Normenangaben für die anzusetzende Kerbklasse große Differenzen.
2. Zunächst werden daher die Hintergründe zur Ermittlung der jeweiligen Ermüdungswiderstände dargestellt und anschließend versucht die unterschiedlichen Angaben abzuklären.
3. Unter Abschnitt 2.2 werden zunächst die Hintergründe zur Ermittlung des Ermüdungswiderstandes von vollverschlossenen Seilen entsprechend DIN-Fachbericht 103 dargestellt.

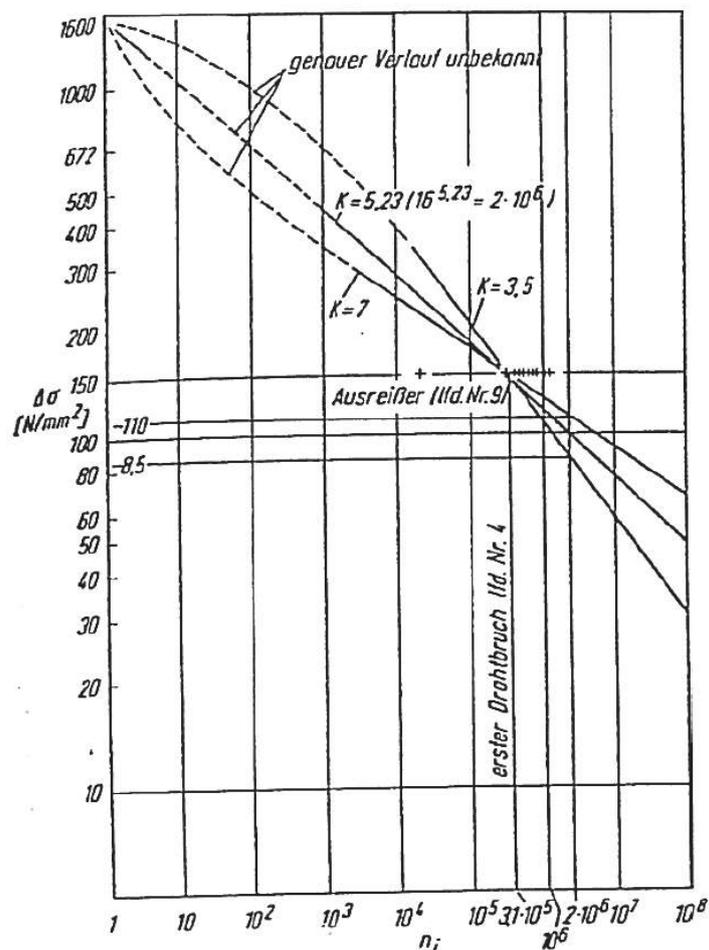
## D.3 Ermüdungswiderstand nach DIN-Fachbericht 103

### D.3.1 Allgemeines

1. Nach dem heutigen Stand der Technik wird der Betriebsfestigkeitsnachweis für vollverschlossene Brückenseile auf der Basis von Zugschwellenversuchen durchgeführt (z. B. DIN 18006). Im technischen Anhang der TL Seile wird die Durchführung eines solchen Versuches generell geregelt. Die Randbedingungen dieses Standardversuches werden im Folgenden aufgeführt.
  - Der Nachweis ist für den Lastfall H zu führen
  - Die obere Grenzspannung beträgt  $\sigma_0 = \text{zul } \sigma_H = 0.42 f_{u,K}$
  - Bei  $\sigma_0 = 0.42 f_{u,K}$  beträgt die Schwingbreite  $\Delta\sigma = 150 \text{ N/mm}^2$ , unabhängig von der „charakteristischen“ Festigkeit  $f_{u,K}$
  - Die Kraft wird in Längsachse in den Versuchskörper eingebracht
  - Die Grenzspielzahl beträgt  $2 \times 10^6$
  - Die Frequenz soll zwischen 1.5 und 3.8 Hz liegen
  - Die Versuchslänge des Seilstücks soll 5m nicht unterschreiten
  - Die Verankerungsbedingungen entsprechend DIN 3092 Teil 1 sind:
    - Konusneigung: 1:10
    - Seil-Eintrittsbohrung min.  $1.2 d_{\text{Seil}} + 3 \text{ mm}$
    - Vergussmaterial: Zamak 610 DIN 1783
    - Verankerungslänge: min.  $4 d_{\text{Seil}}$
  - Die Probe muss derjenigen Lieferung entnommen werden, die für das Bauwerk bestimmt ist, für das der Nachweis erbracht wird.
  - Der Versuch ist auch nach Drahtbrüchen mit der Ursprungskraft weiterzuführen
  - Der Versuch ist unter Aufsicht einer anerkannten Prüfstelle durchzuführen
  - Der Versuch ist bestanden, wenn die wirkliche Bruchkraft  $Z_{B,K}$  nicht mehr als 25% unter der rechnerischen Bruchkraft  $\text{cal } Z_{B,K}$  liegt.
2. In der Vergangenheit sind in Deutschland eine Vielzahl von Versuchen entsprechend dem oben beschriebenen Standardversuch durchgeführt worden.
3. Diese Versuche bildete die Grundlage für die Ermittlung der Ermüdungsfestigkeit von vollverschlossenen Seilen die im Rahmen eines DFG Projektes ausgewertet wurden /1/.
4. Die meisten der ausgewerteten Versuche gehen von idealen Verhältnissen aus, die im baupraktischen Einsatz der Brückenseile nicht unbedingt gegeben sind. Folgende Einflussgrößen auf die Betriebsfestigkeit werden unter anderem nicht erfasst:
  1. Belastungskollektive aus Verkehrs- und Windbelastung. Der Ermüdungsnachweis wird über die Differenz aus maximaler und minimaler Seilnormkraft geführt.

2. Der Einfluss der Querschwingungen auf die Betriebsfestigkeit wird in den meisten Versuchen nicht erfasst. Aus den wenigen Versuchen mit Berücksichtigung der Querschwingungen lassen sich keine allgemein gültigen Schlüsse ziehen.
  3. Die aus versuchstechnischen Gründen begrenzte Probenlänge führt u. U. zu einer ungenauen Abschätzung der Betriebsfestigkeit /15/.
  4. Die Korrosion wird nicht berücksichtigt.
- zu 1. Die Beurteilung der Betriebsfestigkeit in Abhängigkeit zu realitätsnahen Belastungskollektiven erfolgt über Standardbauteile in der Regel über ein lineares Schädigungsmodell (Miner-Regel). Eine analoge Betrachtung für Seile ist auf der Basis des Standardversuchers ohne weiteres nicht möglich. Ein Ansatz hierzu ist in /2/ beschrieben. Hierbei wird die Wöhlerlinie durch die Einhängewerte „1. Drahtstriss“, zugehörige Lastwechselzahl und nominelle Bruchspannung bei  $n=1$  definiert. Ein Beispiel für diese Auswertung ist in Bild D.3 dargestellt.

Prinzipiell erscheint diese Vorgehensweise sinnvoll, allerdings ist das am Litzenseil abgeleitete Versagenskriterium des 1. Drahtstrisses für vollverschlossene Seile sehr konservativ, weil in diesem Fall durch den 1. Drahtstriss die Gesamtfestigkeit nur sehr gering beeinflusst wird. Im folgenden Kapitel wird eine modifizierte Vorgehensweise zur Bestimmung einer geeigneten Wöhlerlinie anhand von Versuchsergebnissen abgeleitet. Insgesamt erscheint die Betrachtung des Ermüdungsverhaltens in Form eines linearen Schädigungsmodells, wie es auch im Eurocode 3, Teil 2 vorgeschlagen ist, als sinnvoll.



**Bild D.3:**

Wöhlerlinie für den 1. Drahtstriss, aus /2/

zu 2. Der Einfluss der Querbiegung auf die Betriebsfestigkeit von Brückenseilen ist hinsichtlich zweier Gesichtspunkte von großen Interesse:

- Durch die Querbiegung verschieben sich die einzelnen Drähte in Abhängigkeit vom Krümmungsradius mehr oder weniger stark gegeneinander. Die hierbei auftretende Reibung führt u.U. zu verfrühtem Bruch der betroffenen Einzeldrähte.
- Durch die Biegung erhöhen sich die Spannungen in den Randdrähten, was ebenfalls zu verfrühtem Bruch führen kann.

In der Praxis werden zu große Querschnittsamplituden durch geeignete Dämpfer begrenzt.

Versuche zum Ermüdungsverhalten von Seilen unter Querschwingung wurden aus verschiedenen Gründen selten durchgeführt worden. Ein Beispiel für Versuche unter Berücksichtigung von Querbelastung sind die Untersuchungen für die Rheinbrücke Düsseldorf Flehe /3/, die im Auftrag der „Thyssen Draht“ durch die „EMPA“ in Dübendorf durchgeführt wurden.

zu 3. Bei kurzen Probenlängen wirken sich Ungenauigkeiten bei der Seilkopfbefestigung oder Ungenauigkeiten beim Einspannen in die Maschine stärker aus. So ist mit größeren Streuungen der Ergebnisse und mit einer erhöhten Anzahl von Rissen pro Meter zu rechnen.

zu 4. In heutiger Zeit werden bei Brückenbauten vollverschlossene Seile aus verzinkten Drähten eingesetzt. Durch die bei vollverschlossenen Seilen typischen dichte Packung der äußeren Lagen und die Verzinkung der Einzeldrähte ist der Einfluss der Korrosion auf die Ermüdung nur von untergeordneter Bedeutung.

## D.4 Ableitung einer Wöhlerlinie für vollverschlossene Brückenseile

### D.4.1 Versuchsbeschreibung

1. Zur Beurteilung der Widerstandsseite von vollverschlossenen Brückenseilen wurden in /1/ eine Reihe von Versuchen herangezogen, die damals zum großen Teil von der THYSSEN DRAHT AG zur Verfügung gestellt wurde. Eine kurze Beschreibung der Versuche und die in diesem Text verwendeten Bezeichnungen für die Versuchsseile werden im Folgenden gegeben:

- Seile für die Köhlbrand-Hochbrücke /4/ (nachfolgend mit KH1 und KH2 bezeichnet) wurden jeweils bei konstanter Amplitude  $\Delta R_0 = 147 \text{ N/mm}^2$  mit insgesamt ca. 2.000.000 Zyklen auf Normalkraft belastet.
- Die in /5/ getesteten Seile (mit FA1, FA2 und FA3 bezeichnet) wurden jeweils bei konstanter Amplitude  $\Delta R_0 = 147 \text{ N/mm}^2$  mit insgesamt ca. 2.000.000 Zyklen auf Normalkraft belastet.
- Seile der Rheinbrücke Speyer /6/ und /7/ (mit RS1, RS2, RS3 und RS4 bezeichnet) wurden jeweils bei konstanter Amplitude  $\Delta R_0 = 147 \text{ N/mm}^2$  mit insgesamt ca. 2.000.000 Zyklen auf Normalkraft belastet.
- Seile für die Autobahnbrücke Nordelbe /8/ (mit AN4, AN5 und AN6 bezeichnet) wurden jeweils bei konstanter Amplitude  $\Delta R_0 = 150 \text{ N/mm}^2$  mit insgesamt ca. 2.000.000 Zyklen auf Normalkraft belastet. Die Seile AN5 und AN6 wurden auf einer Länge von 40 cm mit einer Querpressung von 18.6 kN/cm behaftet.
- Das betrachtete Seile der Kniebrücke Düsseldorf /9/ (mit KN1 bezeichnet) wurde zunächst mit einer Amplitude  $\Delta R_0 = 70 \text{ N/mm}^2$  mit ca. 1.300.000 Zyklen auf Normalkraft belastet. Ungefähr bei jedem 10. Zyklus wurde eine Querschwingung mit einem dynamischen Knickwinkel  $\alpha_d = 1\%$  zusätzlich aufgebracht. Oberhalb von 1.300.000 Zyklen wur-

de  $\Delta R_0$  auf  $110 \text{ N/mm}^2$  und der dynamischen Knickwinkel auf 1.75% erhöht. Die zusätzliche Schwingungsanzahl betrug ca. 1.550.000.

- Seile der Rheinbrücke Rodenkirchen /10/ (mit RO1 und RO3 bezeichnet) wurden bei einer konstanter Amplitude  $\Delta R_0 = 100 \text{ N/mm}^2$  mit insgesamt ca. 2.000.000 Zyklen durch eine Querkraft belastet. Einem statischen Knickwinkel von 3.5% wurde ein dynamischer Knickwinkel von 0.5% überlagert.
- Seile der Neckartalbrücke Weitingen /9/ (mit NW1, NW2 und NW3 bezeichnet) wurden jeweils bei konstanter Amplitude  $\Delta R_0 = 147 \text{ N/mm}^2$  mit insgesamt ca. 2.000.000 Zyklen auf Normalkraft belastet.
- Seile der Brücke Neuwied /2/ (mit NE1 und NE2 bezeichnet) wurden jeweils bei konstanter Amplitude  $\Delta R_0 = 150 \text{ N/mm}^2$  mit insgesamt ca. 2.000.000 Zyklen auf Normalkraft belastet.

2. Die Kenngrößen der einzelnen Seile sind in Tabelle D.1 dargestellt:

**Tabelle D.1:** Seilkenngrößen

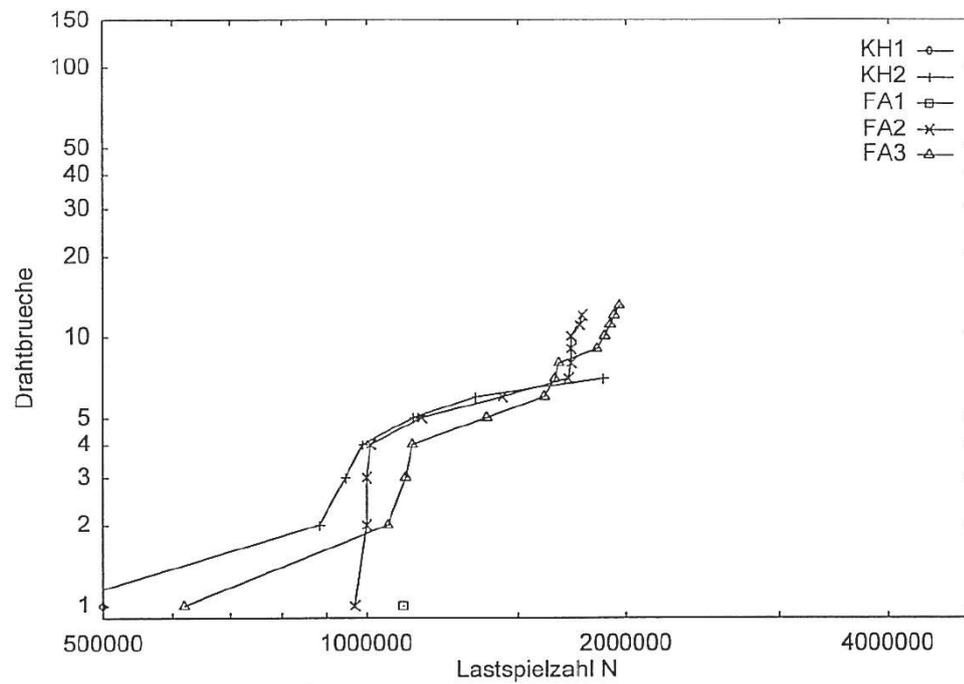
Seil	Nenn Durchmesser d [mm]	Nennquerschnitt $A_m$ [mm <sup>2</sup> ]	Nennfestigkeit $R_0$ [N/mm <sup>2</sup> ]	rechn. Bruchkraft $F_r$ [kN]
KH1	118	9520	1570	14900
KH2	118	9520	1570	14900
FA1	104	7350	1570	10800
FA2	104	7350	1570	10800
FA3	104	7350	1570	10800
RS1	105	7489	1470	11010
RS2	115	9040	1470	13300
RS3	105	7489	1470	11010
RS4	115	9040	1470	13300
AN4	72	3610	1470	5310
AN5	72	3610	1470	5310
AN6	72	3610	1470	5310
KN1	72	3640	1470	5350
RO1	54	1870	1370	2562
RO3	54	1870	1370	2562
NW1	120	9840	1570	15449
NW2	105	7489	1570	11758
NW3	105	7489	1570	11758
NE1	118	9520	1500	14280
NE2	118	9520	1500	14280

3. Während der Ermüdungsversuche wurden die Drahtbrüche gemessen. Diese Messung erfolgte je nach Möglichkeit direkt oder indirekt. Bei der indirekten Messung wurden Erschütterungen infolge möglicher Drahtrisse festgestellt. Die Anzahl der Drahtrisse pro Erschütterung ist nicht direkt zu bestimmen. Um die vorgegebene mittlere Spannung  $\sigma_{R_0}$  einzuhalten, wurde nach jedem Drahtriß bzw. jeder Erschütterung der Versuch unterbrochen und die Belastung angepasst. Nach Abschluss der Ermüdungsversuche wurden die Restbruchkräfte  $F_a$  der Seile gemessen und die tatsächliche Anzahl der Ermüdungsbrüche  $n_a$  bestimmt. In Tabelle D.2 sind die Spannungsamplitude in Normalkraftrichtung, die freie Probelänge, die auf die Nennbruchkraft der Seile bezogene Restbruchkraft und die Anzahl der Drahtbrüche nach Abschluss der Ermüdungsversuche angegeben.

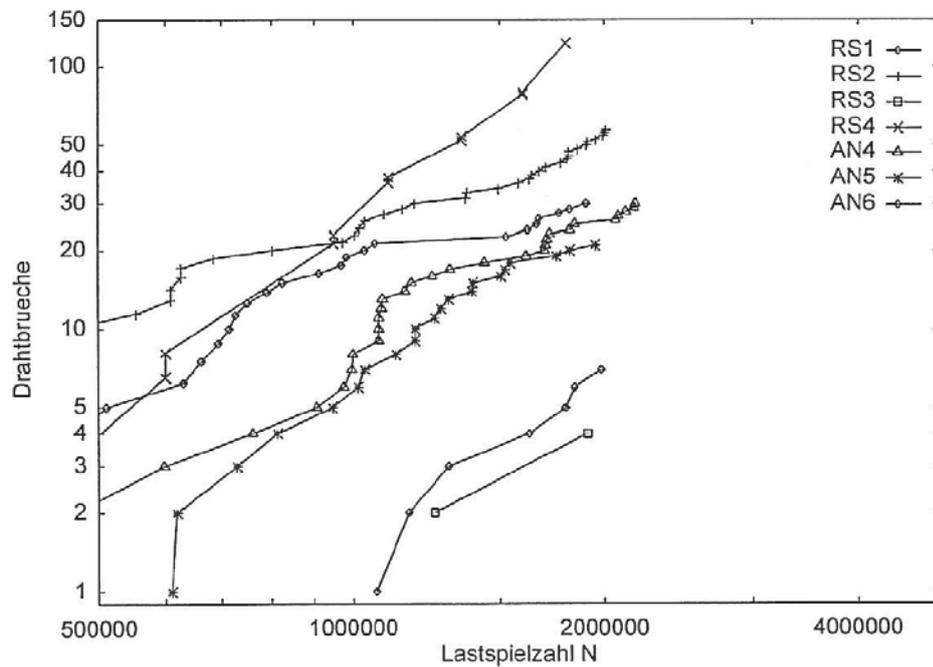
**Tabelle D.2:** Versuchsgrößen und Ergebnisse

Seil	Spannungsamplitude $\Delta R_0$ [N/mm <sup>2</sup> ]	frei Probelänge [cm]	bez. Restbruchkraft $F_a/F_r$ [%]	Anz. Drahtbrüche $n_a$ [-]	Kommentar
KH1	147	500	95	7	
KH2	147	500	98	0	
FA1	147	500	99	1	
FA2	147	500	94	12	
FA3	147	500	85	13	
RS1	147	560	81	30	
RS2	147	560	83	57	
RS3	147	560	96	4	
RS4	147	560	48	122	Probe krumm
AN4	150	180	78	30	
AN5	150	180	80	21	Querpressung
AN6	150	550	97	7	Querpressung
KN1	70/110	390	82	13	Querbiegung
RO1	100	460	91	11	Querbiegung
RO3	100	460	80	11	Querbiegung
NW1	147	490	95	16	
NW2	147	490	74	86	Bändsel am Kopf
NW3	147	490	88	47	
NE1	150		87	65	
NE2	150		96	30	

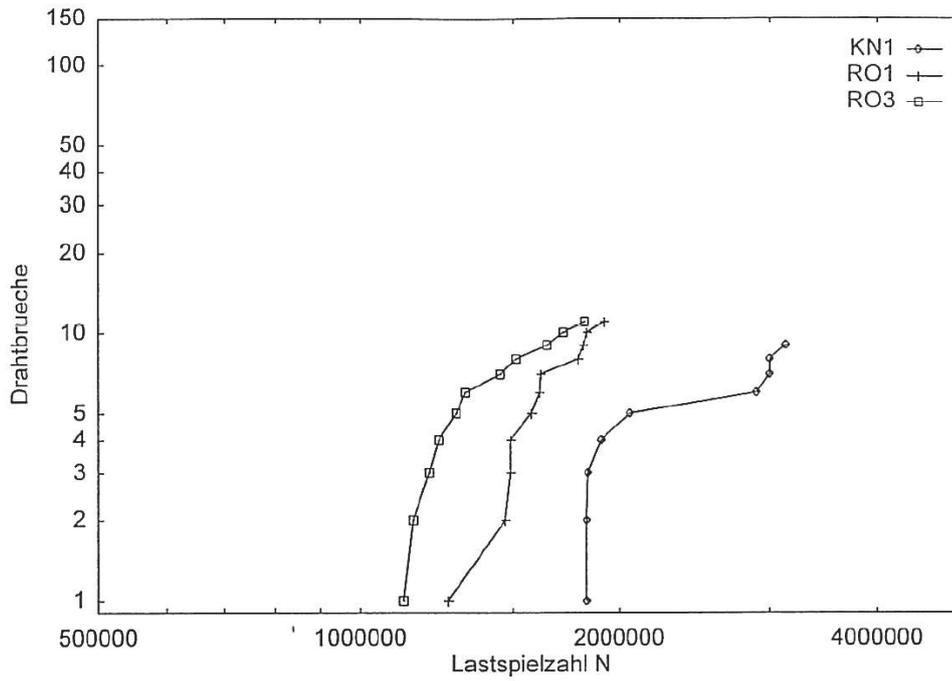
- (3) Die Drahtbrüche der einzelnen Seile aufgetragen über der Zyklenzahl ist in den Bildern D.4 bis D.7 wiedergegeben. Bei den indirekt gemessenen Drahtbrüchen wurden die Unterbrechungen mit dem Verhältnis aus Gesamtzahl Unterbrechungen zu Gesamtzahl Drahtbrüche erweitert.



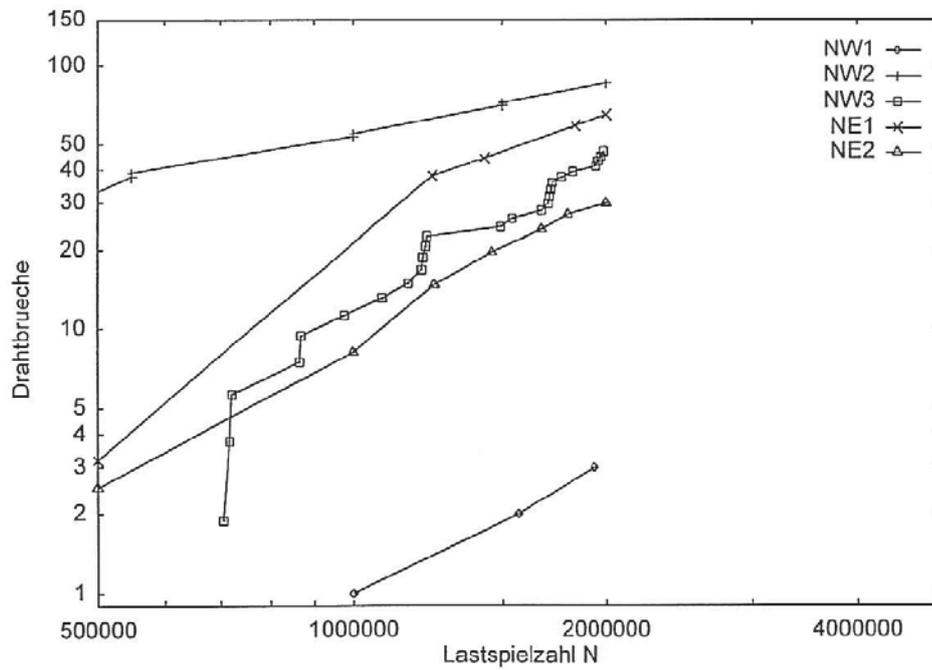
**Bild D.4:** Drahtbrüche in KH und FA Seilen



**Bild D.5:** Drahtbrüche in RS und AN Seilen



**Bild D.6:** Drahtbrüche in KN und RO Seilen

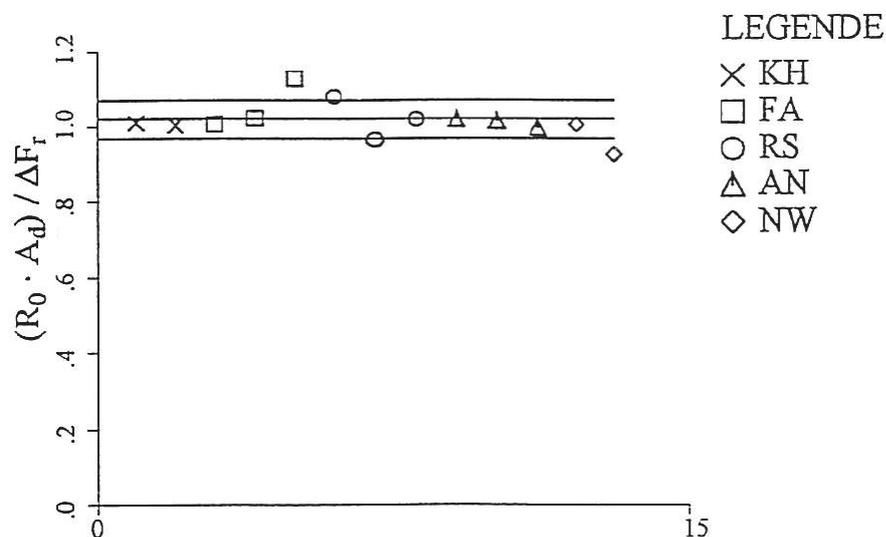


**Bild D.7:** Drahtbrüche in NW und NE Seilen

## D.5 Interpretation der Versuchsergebnisse

1. Das Ziel der Untersuchung in /1/ lag darin eine geeignete Wöhlerlinie für vollverschlossene Brückenseile zu finden. Hierbei wurden die oben beschriebenen Versuchsergebnisse verwendet. Da keiner dieser Versuche bis zum Bruch geführt wurde, war es notwendig, die Festigkeit der Seile in Abhängigkeit zur Zyklenzahl  $N$  abzuschätzen. Es wurde die Annahme getroffen, dass die Festigkeitsabminderung  $\Delta F$ , der Seile direkt proportional zur Festigkeit der gebrochenen Drähte  $\Delta F_d = R_0 \cdot A_d$  ist. Hierbei bezeichnet  $R_0$  die Nennfestigkeit und  $A_d$  die Summe der Einzelflächen der gebrochenen Seile.

Unter Verwendung der Restfestigkeit nach Beendigung der Ermüdungsversuche und der zugehörigen Drahtbrüche wurden die Versuche entsprechend ausgewertet. Die Ergebnisse dieser Auswertung sind in Bild D.8 dargestellt und zeigen die Rechtfertigung obiger Annahme.



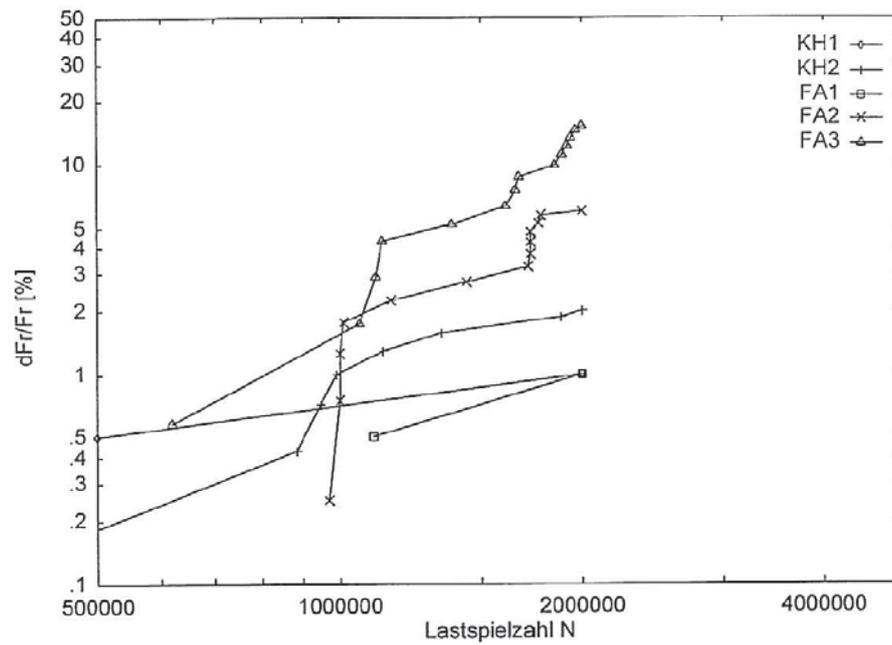
Mittelwert: 1.02 Standardabweichung: .05

**Bild D.8:** Festigkeit der gebrochenen Drähte bezogen auf Festigkeitsverlust der untersuchten Seile in Abhängigkeit von der Zyklenzahl  $N$  anzugeben.

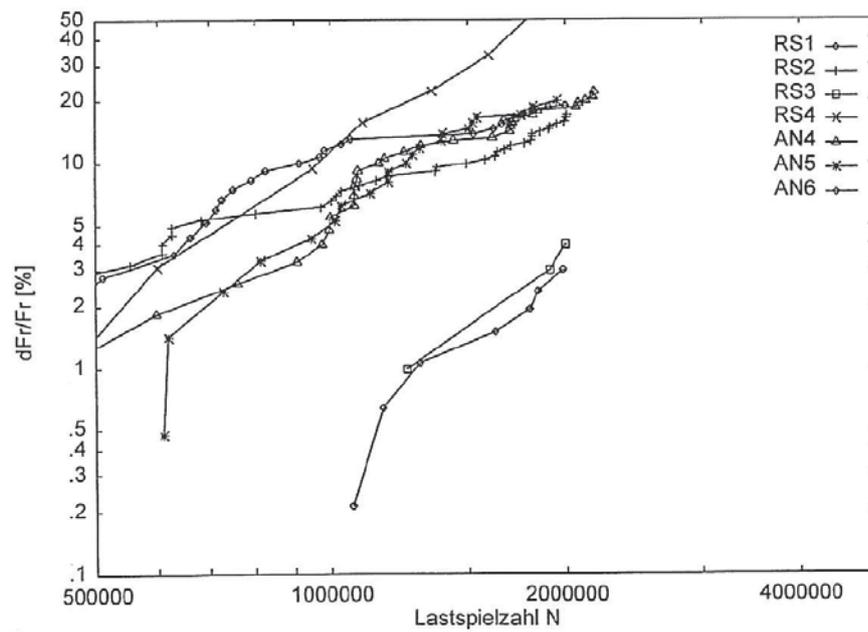
- (1) Unter Berücksichtigung der bekannten Drahtbrüche  $n_d$  ist es nun möglich den Festigkeitsverlust der untersuchten Seile in Abhängigkeit von der Zyklenzahl  $N$  anzugeben.

$$\Delta F_r(N) = \frac{F_r - F_a}{n_a} \cdot n_d(N)$$

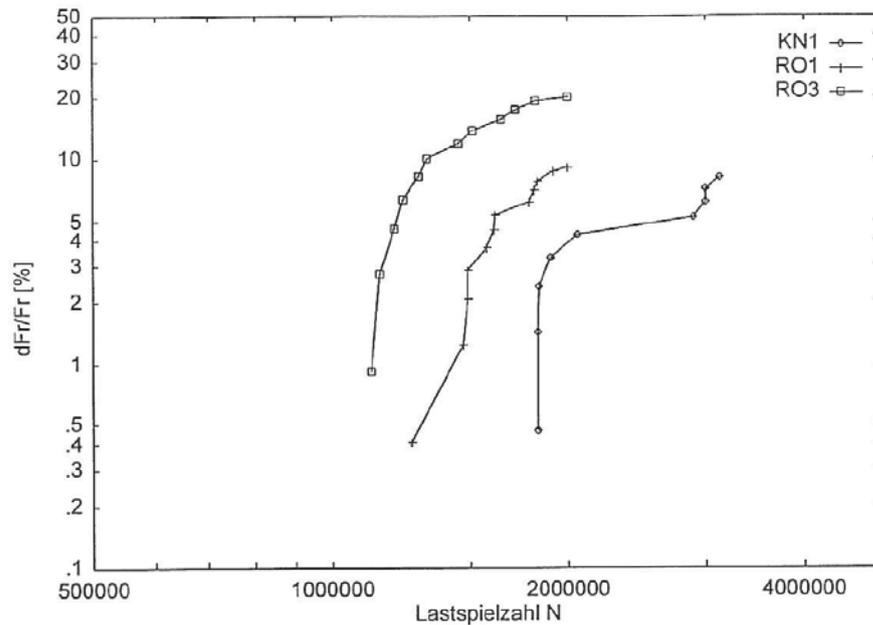
- (2) Eine entsprechende Auswertung der Versuche zeigen die Bilder D.9 bis D.12.



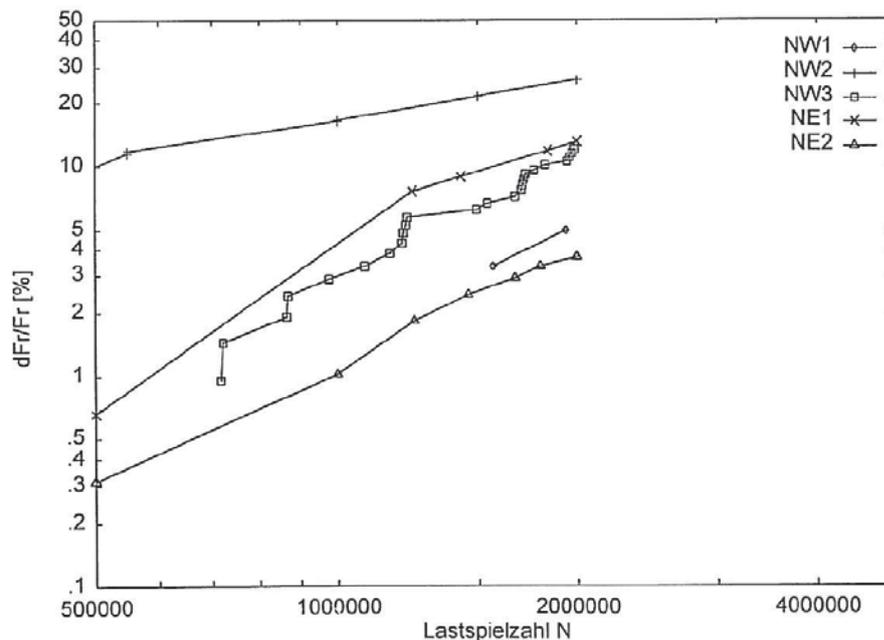
**Bild D.9:** Festigkeitsverlust für KH und FA Seile



**Bild D.10:** Festigkeitsverlust für RS und AN Seile



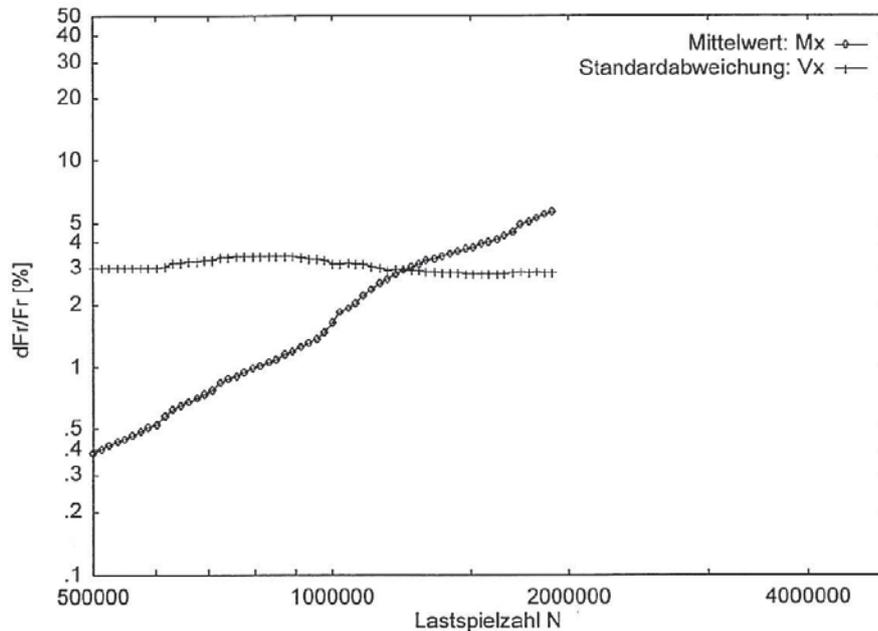
**Bild D.11:** Festigkeitsverlust für KN und RO Seile



**Bild D.12:** Festigkeitsverlust für NW und NE Seile

## D.6 Kerbklasseneinstufung

1. In der durchgeführten statischen Auswertung wurden nur die Versuche mit vergleichbaren Randbedingungen verwendet. Die Versuche mit Querbiegung wurden ausgesondert. Die Versuche RS4 und NW2 wurden als Ausreißer ebenfalls nicht mit berücksichtigt. Hierbei wurden zu bestimmten Stützpunkten der Zyklenzahl N jeweils der zugehörige Wert der relativen Festigkeitsabminderung jedes einzelnen Versuches durch Interpolation bestimmt. Die Ergebnisse wurden statistisch ausgewertet, wobei für jeden Wert n unter Annahme einer logarithmischen Verteilung Mittelwert und Standardabweichung ermittelt wurden. Die Ergebnisse dieser Auswertung sind in Bild D.13 dargestellt.



**Bild D.13:** Mittelwert und Standardabweichung der relativen Festigkeitsabminderung über N

- (2) Die weitere Auswertung erfolgt entsprechend /14/. Hierbei wurde der bemessungsrelevante Wert der relativen Festigkeitsabminderung für die 95%-Fraktile ermittelt. Da die Standardabweichung nicht aus vorherigen Versuchen bekannt war, wurde die T-Verteilung von „Student“ zur Bestimmung des Bemessungswertes der Festigkeitsabminderung gewählt. Die Bestimmungsgleichung lautet:

$$B = \frac{\Delta F_B}{F_r} = M_x + t_v \cdot V_x \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n}}$$

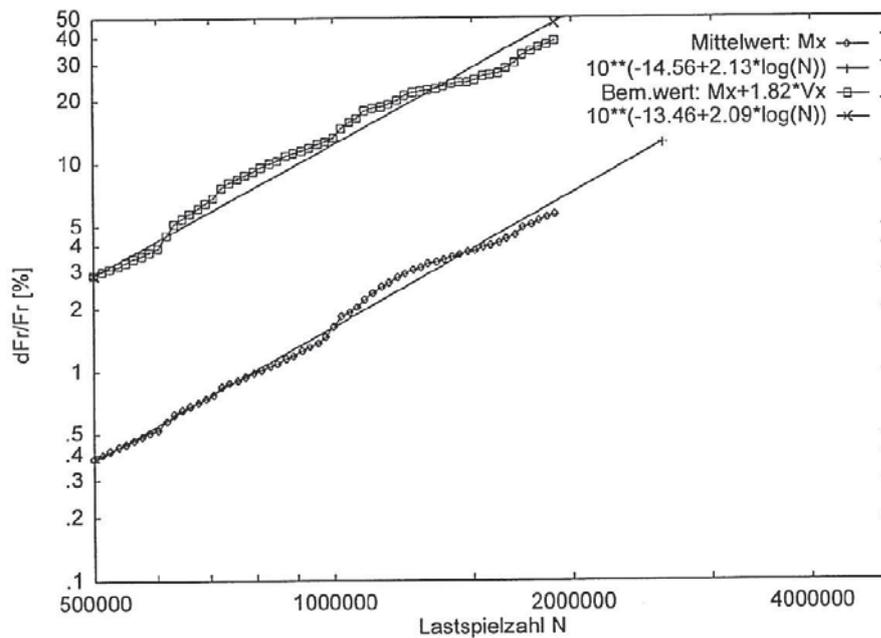
mit

$$n = \text{Anzahl der Versuche} = 15$$

$$v = n - 1 = 14 \Rightarrow t_{14}^{95\%} = 1,761$$

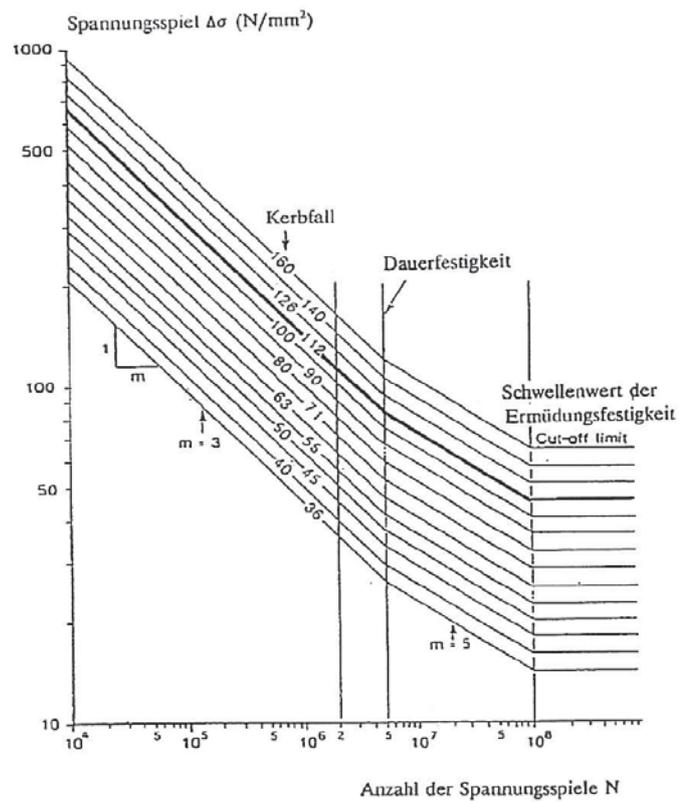
$$B = \frac{\Delta F_B}{F_r} = M_x + 1,82 \cdot V_x$$

- (3) Das Ergebnis dieser Auswertung ist in Bild D.14 dargestellt. Hier sind die Kurven für den Mittelwert  $M_x$  und die Kurve für den Bemessungswert des relativen Festigkeitsverlusts  $\Delta F_B/F_r$  über der Zyklenzahl N aufgetragen. Außerdem sind die aus diesen Kurven ermittelten Regressionsgeraden in diesem Diagramm dargestellt.



**Bild D.14:** Statische Auswertung für den Festigkeitsverlust

Im Folgenden wird gezeigt, wie mit Hilfe dieser Auswertung die Einstufung der Brückenseile in die Kerbfallklassen des EC3 (s. Bild D.15) erfolgen kann.



**Bild D.15:** Ermüdungsfestigkeitskurven für Längsspannungspegel nach EC3

Die hier ausgewerteten Versuche wurden alle mit einer Spannungsdifferenz von ca.  $150\text{N/mm}^2$  ausgeführt. Legt man den Kehrwert der Steigung der Wöhlerlinie entsprechend EC3 zu  $m = 3$  fest, dann lassen sich Schnittpunkte der Wöhlerlinie mit der oben gezeigten Bemessungskurve finden. Für den Bereich  $N \leq 5 \cdot 10^6$  gelten für die Wöhlerlinien nach Eurocode:

$$\log(N) = \log(N_K) + [\log(\sigma_K) - \log(\sigma)] \cdot m$$

mit

$$N_K: \text{Bezugskennzahl} = 2 \cdot 10^6$$

$$\sigma_K: \text{Bezugsspannung entspr. Kerbkl. Eurocode}$$

$$1/m: \text{Steigung der Wöhlerlinien} = 1/3$$

Mit  $\sigma_K = 150\text{N/mm}^2$  ergibt sich somit folgende Beziehung für N:

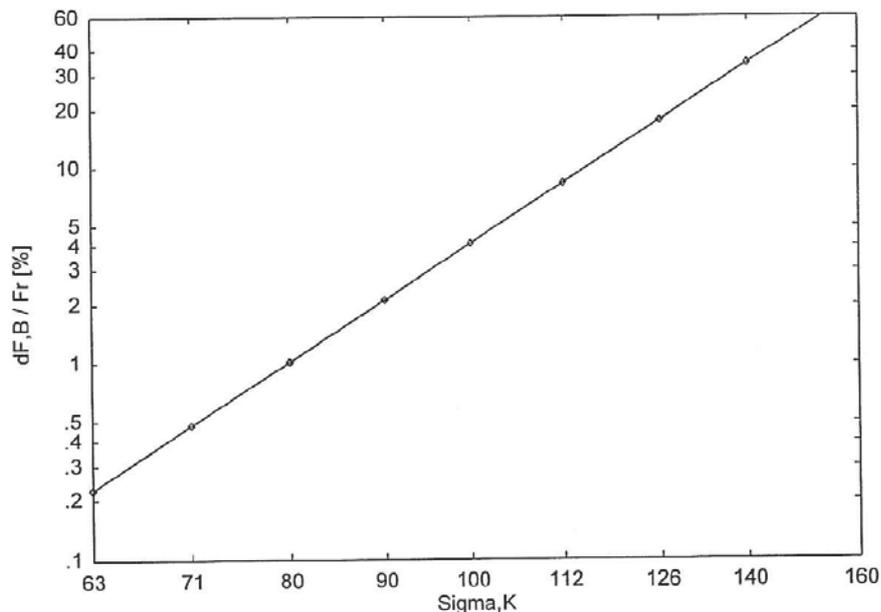
$$\begin{aligned} \log(N) &= \log(2 \cdot 10^6) + [\log(\sigma_K) - \log(150)] \cdot 3 \\ &= 6,301 + 3 \cdot \log(\sigma_K) - 6,528 \\ &= -0,227 + 3 \cdot \log(\sigma_K) \end{aligned}$$

Aus der statischen Auswertung ergibt sich folgende Regressionsgerade für den Bemessungswert (s.a. Bild D.12):

$$\log\left(\frac{\Delta F_B}{F_r}\right) = -13,463 + 2,092 \cdot \log(N)$$

Gleichung (3.4) in Gleichung (3.5) eingesetzt ergibt eine Beziehung zwischen dem Bemessungswert der relativen Festigkeitsverlustes und der Kerbspannung  $\Phi_K$ :

$$\begin{aligned} \log\left(\frac{\Delta F_B}{F_r}\right) &= -13,463 + 2,092 \cdot [-0,227 + 3 \cdot \log(\sigma_K)] \\ &= -13,463 + 6,276 \cdot \log(\sigma_K) \end{aligned}$$



**Bild D.16:** Beziehung zwischen dem Bemessungswert der relativen Festigkeitsverlustes und der Kerbspannung  $\sigma_K$

Mit Hilfe der in Bild D.16 dargestellten Kurve lässt sich eine Einstufung der Wöhlerlinie in das Schema des Eurocodes 3 vornehmen. Man erkennt, dass der im EC3, Teil 2 vorgegebene Wert für dem Kerbfall  $\Phi_K = 112\text{ kN/cm}^2$  zu einem relativen Festigkeitsverlust von 8,5% führt. Da die im Brückenbau eingesetzten Seile maximal mit 42% der rechnerischen Bruchlast ausgenutzt sind, also eine Festigkeitsreserve von

58% ausweisen, erscheint diese Einstufung als relativ konservativ. Ein Anheben der Wöhlerlinie auf einen höheren Kerbfall als 112 erscheint somit für auf Normalkraft belastete vollverschlossene Brückenseile als gerechtfertigt und möglich.

## D.7 Literatur

- /1/ Sedlacek, G.; Lopetegui, J.; Neuenhaus, D.; Merzenich, G.; Heinemeyer, C.; Kuck, J.: Untersuchungen zum Schwingungs- und Ermüdungsverhalten der Seile und Kabel abgespannter Brücken mit Fußpunkterregung, Lehrstuhl für Stahlbau der RWTH Aachen, Abschlußbericht zum DFG-Forschungsvorhaben SE 351/10-2, Aachen Juni 1995
- /2/ Saul, R.; Andrä, W.: „Zur Berücksichtigung dynamischer Beanspruchungen bei der Bemessung von vollverschlossenen Seilen stählerner Straßenbrücken“, Die Bautechnik 4/1981, S. 116 - 124
- /3/ „Rheinbrücke Düsseldorf-Flehe, Dauerschwingversuche mit Querauslenkung an zwei Brückenseilen, EMPA Dübendorf, EMPA Nr. 40896, 1979
- /4/ „Köhlerbrand-Hochbrücke“, Westfälische Bergwerkskasse, Institut für Fördertechnik und Werkstoffkunde, 1979
- /5/ „Forschungsbericht F.A. 15.068 R 78 C“, Westfälische Berggewerkschaftskasse, Seilprüfstelle Institut für Fördertechnik und Werkstoffkunde, 1979
- /6/ „Rheinbrücke Speyer, Verformungsmessungen und Dauerschwingversuche an zwei Brückeseilen No. 2301 und 1301“, Eidgenössische Materialprüfungs- und Versuchsanstalt für Industrie, Bauwesen und Gewerbe, EMPA No. 30298/1, 1973
- /7/ „Rheinbrücke Speyer, Verformungsmessungen und Dauerschwingversuche an zwei Brückeseilen No. 2303 und 1303“, Eidgenössische Materialprüfungs- und Versuchsanstalt für Industrie, Bauwesen und Gewerbe, EMPA No. 30298/2
- /8/ H, K. Havemann: „Die Seilverspannung der Autobahnbrücke über die Norderelbe - Bericht über Versuche zur Dauerfestigkeit der Drahtseile“, Der Stahlbau 31. Jahrgang; Heft 8; August 1962, Seiten 225-232
- /9/ „Seilversuche für die Kniebrücke Düsseldorf“, Amtliche Forschungs- und Materialprüfanstalt für das Bauwesen, Otto-Graf-Institut an der Technischen Hochschule Stuttgart, 1967
- /10/ „Prüfungen an vollverschlossenen Stahldrahtseilen zur Brückenverbreiterung der Rheinbrücke Köln-Rodenkirchen“, DMT-Gesellschaft für Forschung und Prüfung mbH, Bericht Nr. 4236, 1992
- /11/ „-Neckartalbrücke Weitingen- Dauerschwingversuch an zwei Brückenseilen“, EMPA Dübendorf, Eidgenössische Materialprüfungs- und Versuchsanstalt für Industrie, Bauwesen und Gewerbe, EMPA No. 37810, 1977
- /12/ „-Neckartalbrücke Weitingen- Dauerschwingversuch an einem Brückenseil“, EMPA Dübendorf, Eidgenössische Materialprüfungs- und Versuchsanstalt für Industrie, Bauwesen und Gewerbe, EMPA No. 38572, 1978
- /13/ „Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten“, European Committee for Standardization, Ref. No. ENV 1993-1: 1992 D
- /14/ „Eurocode 1, Part 1, Basis of Design, Background Documentation“, European Committee for Standardization, Ref. No. ENV 1991-1: 1994
- /15/ M. Martin / H. Stromberg / J. Tins: „Verhalten vollverschlossener Spiralseile bei Zugschwellbeanspruchung“, Die Bautechnik, 60. Jahrgang, Heft 11, S. 369-372, 1983
- /18/ TL Seile. „Technische Lieferbedingungen für vollverschlossene Brückenseile“, Bundesministerium für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Ausgabe 1994