Ermüdungssicherheit von vollverschlossenen Seilen mit Korrosionsschäden

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 146

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

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen.** Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines
B - Brücken- und Ingenieurbau
F - Fahrzeugtechnik
M - Mensch und Sicherheit
S - Straßenbau
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Ed. Schünemann KG, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Berichte der **Bundesanstalt für Straßenwesen** (BASt) stehen zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BASt-Archiv ELBA zur Verfügung.
http://bast.opus.hbz-nrw.de

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt FE 15.0444/2007/HRB
Beurteilung der Ermüdungssicherheit von vollverschlossenen Seilen mit Korrosionsschäden

Fachbetreuung
Heinz Friedrich

Referat
Stahlbau, Korrosionsschutz, Brückenausstattung

Herausgeber
Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0

Redaktion
Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag
Fachverlag NW in der
Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9293
ISBN 978-3-95606-453-1

Bergisch Gladbach, Januar 2020

Kurzfassung – Abstract

Ermüdungssicherheit von vollverschlossenen Seilen mit Korrosionsschäden

Im Rahmen von durchgeführten Bauwerksprüfungen an Brücken mit vollverschlossenen Seilen wurden auch an diesen Bauteilen Schäden identifiziert. Bei diesen Schäden handelt es sich im wesentlichem um Korrosionsschäden und ganz vereinzelt aber auch um Drahtbrüche. Teilweise werden diese Schäden erst dann sichtbar, wenn der Korrosionsschutz entfernt oder aber bei Kabeln, wenn die einzelnen Seile gespreizt werden. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wird die Bewertung solcher Schäden hinsichtlich der Ermüdungssicherheit und Restlebensdauer durchgeführt.

Im Anschluss an eine Erläuterung der Bauweise der vollverschlossenen Seile werden aktuelle Schäden dieser Seilart bei Schrägseilbrücken und Hängebrücken vorgestellt.

Es wurden insgesamt fünf Bauteilversuche mit vollverschlossenen Seilen durchgeführt, wobei die Probestücke aus den ausgebauten Seilen der Rheinbrücke Flehe entnommen wurden. Die Rheinbrücke Flehe wurde 1979 unter Verkehr genommen, Korrosionsschäden und hier insbesondere Drahtbrüche führten 2006 dazu, dass Seile ausgetauscht werden mussten. Die Versuche wurden an 5m-Seilabschnitten durchgeführt, die hierfür mit neu vergossenen Seilköpfen an den Enden versehen wurden. Diese Bauteilversuche bestehen aus zwei Komponenten, d. h. es wurde zunächst ein Ermüdungsversuch zur Prüfung der Betriebsfestigkeit durchgeführt. Anschließend wurde die verbleibende Bruchlast in einem Zerreißversuch ermittelt. Die sehr unterschiedlichen Versuchsergebnisse werden dargestellt und bewertet.

Weitergehende Untersuchungen zum Korrosionsverhalten von verzinkten Seilen, chemischer Zusammensetzung und Alterungsverhalten einzelner Drähte werden durchgeführt.

Zusätzlich wurden Seilabschnitte lagenweise entfernt und der Zustand der inneren Drahtlagen untersucht.

Eine Bewertung der Korrosionsschäden zur möglichen Verringerung der Restlebensdauer wird vorgenommen.

Es werden Vorschläge für die Bewertung von festgestellten Schäden für SIB-BW (Straßeninformationsbank Bauwerke) gegeben.

Die Hintergründe der deutschen Festlegung einer Kerbfalleinstufung für vollverschlossenen Spiralseile werden in einem Anhang erläutert. Hiernach liegt die Kerbfalleinstufung 112 auf der sicheren Seite.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Korrosionsschäden durch die Querschnittsminderung zu einer Erhöhung der Beanspruchung im Restquerschnitt führen, jedoch nicht zwangsläufig Drahtbrüche verursachen. Dies konnte sowohl in den Versuchen als auch bei der Auswertung der gefundenen Schäden an den Bauwerken bestätigt werden. In Anbetracht der bisher durchgeführten Bemessung und den tatsächlich auftretenden Ermüdungsbeanspruchungen eines einzelnen Seiles kann, selbst bei erheblichen Korrosionsschäden, von einer schadenstoleranten Konstruktion ausgegangen werden.

Fatigue resistance of full locked ropes with corrosion defects

During the execution of bridge inspections of bridges with full locked ropes also damages of the ropes are observed. These damages are mainly caused by corrosion, but also fractures of wires will be found. Sometimes the bridge inspector can only see the damages by removal of the corrosion protection. If several ropes are combined to a cable heavy corrosion damages can only be found if the single rope will be take out of the close arrangement. In this research project the fatigue safety and the remaining life time will be evaluated.

At first the construction of full locked ropes will be explained and current damages of ropes used by cable stayed bridges and suspension bridges will be presented.

Five full scale tests are carried out. The test specimens are from a rhinebridge near Düsseldorf. These rhinebridge was built 1979 and 2006 it was necessary to replace some of the ropes because a lot of fractures in the first layer of the wires was occurred. The test would be carried out at 5 m test specimens with new sockets.

The whole test consists of two parts, the first part was a fatigue test over 2 mio. Cycles, the second part was a fracture test.

The results of the five test specimens were very different. The differences will be presented and evaluated.

Additional test to the corrosion behaviour of galvanized wires, chemical composition and aging effect of the wires were carried out.

By some cables all layer were removed and a inspection of the inner layers was carried out.

The evaluation of the possible reducing effect to the remaining life time will be given.

A proposal for the rating of such damages for the bridge inspector will be described.

In the german specification for full locked ropes the fatigue is 112 N/mm². The background of the determination of these fatigue class will be explained. The fatigue class 112 N/mm² is a conservative classification.

It can be summarized that the corrosion of a cable reduces the cross section and the transferable force. The corrosion and the according notches will not lead automatically to the fracture of the wires. This fact was observed in the tests and on site by the bridges.

In view of the design of cables with a high safety factor and the real fatigue strength caused by traffic it can be determined that the cables have a good behaviour for the load capacity.

Summary

Fatigue resistance of full locked ropes with corrosion defects

1 Introduction

The evaluation of fatigue damages of full locked ropes is based on the structural safety, traffic safety and durability, therefore is no difference to other components.

The evaluation of the structural safety considers the effective cross section with the reduction of the corroded areas and fractures of wires.

The traffic safety is influenced by the inattention of the users for traffic situation f. e. caused by fractures and hanging wires

The durability is mainly influenced by the corrosion protection and the temporal stability of the coating. An increase of the durability will also increase the life time of the ropes.

The fatigue life will be reduced by the number of vehicles, the weight of the trucks and the existing fatigue resistance of the ropes and the single wires. The fatigue safety will be established by these factors.

The corrosion damages are influences by the environmental conditions in the area of the bridge, the origin state of the ropes and the wiree, the corrosion protection and the design of the other structural components.

So far the evaluation of corrosion damages and the effects on the fatigue safety will be done by arithmetical work and some experimental tests without any fundamental basis. In the frame of this research project test with corrodes ropes will be done. The aim of the test is the description of the effect of corrosion in due of corrosion and the possible increase of the fatigue classification. Also the influence of the context of fractures of wires and corrosion will be in focus of the tests. The test will be carried out as similar to test for news ropes and the german specification (TL/TP VVS). The test results showed differences in the results.

2 Method

In a first step all information of damages of full locked ropes are collected and evaluated.

Five full scale tests are carried out. The test specimens are from a rhinebridge near Düsseldorf. These rhinebridge was built 1979 and 2006 it was necessary to replace some of the ropes because a lot of fractures in the first layer of the wires was occurred. The test would be carried out at 5 m test specimens with new sockets.

The sections of the ropes are visual inspected in due of mechanical damages (fractures and notches) and the installation of the new sockets. The fatigue tests are carried out similar to the test of new ropes.

Additional examination would be carried out:

- Salt spray tests on ropes with a length of 200 mm and single wires for the realization of corroded notches. The test procedure is comparable to a test procedure in the automotive sector.
- Chemical Analysis of wires for the determination of the single elements and detection of irregularities.
- Bending test on single wires for the ductility after more than 20 years in use.
- Metallographic examinations and raster electron microscope views of wires with fractures for the determination of the initial effect of the fracture.
- Opening of the single layers of the ropes and visual inspection of the actual state of the inner wires.
- Ultrasonic tests for the amount of fractures in the socket.
- Additional examination by the procedure for the installation of the sockets.
- Summary of all background documents which are available for the determination of the actual fatigue classification of full locked ropes.
- Comparison to the test results with the test results in 1979 during the erection of the bridge for the new ropes.
- Collection and evaluation of actual corrosion damages of ropes.

3 Component tests

Five tests were carried out. The test specimens are from removed ropes of cable stayed bridge Flehe near Düsseldorf. The diameter of the full locked ropes is 111 mm. The Bridge ‚Flehe' was constructed and built 1979. The ropes had to be removed in 2006 because of a lot of fractures in the outside layer of the ropes.

The whole test procedure consisted of two parts:

- The first part was a fatigue test with 2. mio. cycles and with as stress at the upper level of σ_o = 0,42 $f_{u,K}$ and the magnitude was $\Delta\sigma$ = 150 N/mm².
- The second part was a fracture test to determine the breaking load.

The test specimens had a length of 5 m and had new sockets and their ends. For the filler of the socket either a metallic variant (ZAMAK) would be used or a plastic filler was used. The material of the filler was in accordance with the specific rules of the eurocode.

Table 1 compares the new test results with the former test results from of 1979.

4 Conclusion

The following conclusions can be drawn from the test results:

1. It is no strict influence between the corrosion of wires and fractures in the corroded area. Practical experiences and observes damages with corrosion in deeper layers of the wires show that also under the influence of traffic no fracture in the wires will be happened. In general the fractures will be caused by other mechanical damages or chemical circumstances. The notches caused by corrosion are smooth and are not comparable to sharp notches.

2. The new sockets in combination of the old ropes caused difficulties. During some tests al lot of fractures occurred inside the sockets. The fractures were independently of the kind of filler. Fractures inside the sockets are unusual to the experience of the former test 1979 and for many test carried for other full locked ropes. In general the fractures occurred in the free length of the test specimen. The fracture resulted approximately 50-80 mm after the introduction of the rope inside the socket, exactly at the

Number of the test Kind of the filler	Real ultimate force in the test [kN]	Comparison to the theoratical ultimate force of 13390 [kN]	Number of fractures	Remarks
1. test 1979	12680	0,95	not known	
2. test 1979	12750	0,95	not known	
1. test (ZAMAK)	8334	0,62	60	2 fractures in the middle of the test specimen, 58 fractures in the inside area of a socket, the fatigue test has to be stopped by. 1,5 Mio cycles.
2. test (plastic)	12943	0,97	1	1 fracture in the corroded area by 1,25 Mio cycles, the test results are comparable to the test results from 1979.
3. test (plastic)	12683	0,95	7	At all 7 fractures of wires, 1 fracture in a strong corroded area, 2 fractures in a area with light corrosion, 4 fractures outside of the corrodes area and outside of the sokets, the ultimate force was comparable to the former tests in 1979.
4. test (ZAMAK)	9068	0,68		In addition 52 fractures of wires, 4 fractures in the free length of the rope, but outside of the corroded area, the other fractures were inside of the two sockets.
5. test (plastic)	10488	0,78	18	The rope hat got man-made notches with a depth of 0,5, 1 and 1,5 mm an in groups of 1, 2, 3 and 4 side by side. 2 fractures were in the free length of the rope, 1 fracture nearby a natural corroded area, all other 15 fractures inside of the sockets, no fracture was in ther area of the man-made notches.

Tab. 1: Comparison of the test results

beginning point of the transmission of the rope force from the rope to the socket.

The experiences of all other test for new full locked ropes showed at this point occasional fractures but not so many occured in the test with the old ropes.

During the test for the determination of the ultimate force in general the rope fails in the middle of the length.

It can be assumed that the operating time of the ropes influences the test results. After 20 years life time the ropes were in a curved stabilized location, in the test the load introduction happen in a horizontal direction. Also the new sockets with the load introduction disturb this stabilized situation.

3. The opening of all layers shows the good behaviour of full locked ropes. The inner layers were in a very good situation. No damages (corrosion and fractures) would be detected. The design of the full locked ropes with z-shaped wires prevents the progression of damages to the next layer. The next layer will be attacked if the other layer outside will completely corroded.

4. The test specimens with the different filler (metallic or plastic) showed in different results. Therefore a good basis for the calculation of a fatigue classification for corroded ropes is still missing. The tests verified that the fatigue classification of 112 N/mm² is an assumption with additional safety reserves. All five tests showed only some fractures in the corroded area; therefore in the moment it is no need for new test to determine a new fatigue classification of corroded ropes. In view of corrosion damages the fatigue safety will not be reduced.

5. Examples for the evaluation of damages for the bridge inspectors will be presented. After discussion the evaluation will be included in SIB-BW (Straßeninformationsbank Bauwerke – german specification for the bridge inspection).

The original research project with the aim to present a numerical fatigue classification could not be reached. The reason was not sufficient test results can be presented. Under consideration of the real cross section the fatigue classification of 112 N/mm² can also be used for corroded ropes. In deed the higher stresses in the existing cross section will reduce the remaining life time, but it is no additional effect of fractures and other damages.

As a practical solution the following procedure will be proposed:

- In a first step the damages will be visual inspected and classified. The first evaluation has to be done for the structural and traffic safety and for the durability.

- The damages shall be cleaned, f. e. with a bristle blaster and painted to reduce a further corrosion. For the painting a ductile type can be used, because probably fractures will not be happened. If the remaining life time of the bridge is limited for other reasons it can also a brittle painting can be used. In this case for the bridge inspector it is easier to recognize damages under the painting and cracks in the painting happens earlier.

- In case of damages the interval between the normal bridge inspections (every 6 years) can be reduced and also completed with additional inspections of selected points one or several times between the main inspection. Depending on the inspection results it can be decided to increase or decrease the time between the inspections. In case of serious damages a decision between the replacement of a rope or other measure for reducing the stresses in the rope hat to be taken.

In Erinnerung

an

Herrn Univ. Prof. em. Dr.-Ing. Dr. h.c. Gerhard Sedlacek

(*17.11.1939, †01.02.2012)

Wie viele andere Projekte wurde auch dieses Forschungsvorhaben von Herrn Prof. Sedlacek mit dem Ziel initiiert, auf eine offene Frage im Bauwesen und insbesondere im Stahlbau eine Antwort zu finden.

Bis zu seinem Tod war er bei diesem Projekt analysierend und beratend dabei.

Seine Vorgehensweise war dabei prägend; von einer grundlegenden umfassenden Ausarbeitung der Situation ausgehend weitere Schritte zu planen und auszuarbeiten, ist ein zunächst einfacher Ansatz. Die Kunst besteht darin, dies immer wieder neu durchzuführen, grundlegend, sich keiner Bequemlichkeit hinzugeben und die erforderlichen Arbeiten und Anstrengungen mit Elan und Leidenschaft zu erledigen.

In einer Zeit, bei denen auch bei den Brücken außergewöhnliche Situationen entstanden sind, war die Erinnerung und das konsequente Umsetzen dieser Vorgehensweise immer ein hilfreicher und sehr guter Weg zur Lösung der anstehenden Probleme.

Die Verfasser waren bestrebt, diesen Forschungsbericht im Sinne von Herrn Prof. Sedlacek herzustellen, an der einen oder anderen Stelle fehlen jedoch unbestritten das Hintergrundwissen und die Fähigkeiten von ihm.

Im Laufe eines Lebens erkennt man den prägenden Einfluss von Personen, die man kennenlernen durfte. Mit seinen Idealen und Werten bleibt Herr Prof. Sedlacek stets Vorbild und Teil unseres Lebens.

Wir verneigen uns vor einem großen Lehrer und gedenken seiner mit Hochachtung!

Aachen, den 17.November 2017

Michael Paschen

Inhalt

Erinnerung an Gerhard Sedlacek 8

1 Einleitung 11
1.1 Veranlassung 11
1.2 Ziel 11
1.3 Vorgehensweise 12

2 Vollverschlossene Seile 13
2.1 Allgemeines 13
2.2 Beanspruchung und Bemessung 15
2.3 Drähte 16
2.4 Seile 16
2.5 Korrosionsschutz 17
2.6 Verankerung 17
2.7 Prüfung 20
2.8 Instandsetzungsmaßnahmen 20
2.9 Normen und Regelwerke 20

3 Schäden an ausgesuchten seilverspannten Brücken 20
3.1 Rheinbrücke Duisburg Neuenkamp 20
3.2 Rheinbrücke Flehe 26
3.3 Rheinbrücke Emmerich 32
3.4 Weitere Korrosionsschäden an Brücken mit VVS 37

4 Bauteilversuche 40
4.1 Vorbemerkungen 40
4.2 Ausbau der Seilabschnitte 40
4.3 Herstellung der Probekörper 42
4.4 Grundlagen zum Ermüdungsversuch und Bruchlastversuch 44
4.5 Erster Bauteilversuch 46
4.6 Zweiter Bauteilversuch 51
4.7 Dritter Bauteilversuch 54
4.8 Vierter Bauteilversuch 56
4.9 Fünfter Bauteilversuch 59
4.10 Zusammenfassung 64

5 Untersuchungen zur Korrosion 67
5.1 Allgemeines 67
5.2 Korrosionsversuche am kompletten Seil 68
5.3 Korrosionsversuche an Einzeldrähten 70

6 Weitere Untersuchungen 71
6.1 Allgemeines 71
6.2 Chemische Analyse der Seilwerkstoffe 72
6.3 Öffnung von Seilabschnitten 73
6.4 Untersuchungen des Seilkopfes vom ersten Bauteilversuch 74
6.5 Verformungsverhalten der alten Drähte 75
6.6 Betrachtungen zum Seilverguss 75
6.7 Untersuchung zu früher durchgeführten Bauteilversuchen an ausgebauten Seilen 76
6.8 Bauteilversuche vor dem Bau der Rheinbrücke Düsseldorf-Flehe 76

7 Bewertung der Ermüdungssicherheit von korrodierten Seilen 77
7.1 Allgemeines 77
7.2 Bemessung der Seile 78
7.3 Bewertung der derzeitigen Tragfähigkeiten 79
7.4 Bewertung der Dauerhaftigkeit 80
7.5 Rechnerische Bewertung der Ermüdungssicherheit 82
7.6 Untersuchungen hinsichtlich Korrosionsschäden für Sondertransporte 84
7.7 Tatsächliche Beanspruchungen 85

8 Beurteilung von Schäden 90
8.1 Allgemeines 90
8.2 Prüfung vor Ort. 90
8.3 Bewertung einzelner Schäden 93
8.4 Sofortmaßnahmen bei Schäden. 95

9 Schlussfolgerungen. 96

Literatur. 97

Bilder 101

Tabellen 106

Anhang

Die Anhänge A-E sind im elektronischen BASt-Archiv ELBA unter http://bast.opus.hbz-nrw.de abrufbar.

1 Einleitung

1.1 Veranlassung

Bei den Eurocodes regelt die EN 1993-1-11 ‚Bemessung und Konstruktion von Tragwerken mit Zuggliedern aus Stahl' [1] auch die Bemessung von vollverschlossenen Seilen im Brückenbau.

Die Regelungen verfolgen dabei die folgenden Schutzziele:

- ausreichende Sicherheit der Brücke in Grenzzuständen der Tragfähigkeit,
- ausreichende Nutzungssicherheit in ständigen Bemessungssituationen,
- ausreichende Dauerhaftigkeit und geringer Unterhaltungsaufwand.

Hierdurch werden robuste und nachhaltige Brückenbauwerke angestrebt. Für die Nachhaltigkeit von Brücken sind besonders die Dauerhaftigkeit und der dafür notwendige Unterhaltungsaufwand von besonderer Bedeutung. Bei seilverspannten Brücken bestimmen die Seile als Hauptbauteile wesentlich die Nachhaltigkeit, hierbei steht die Dauerhaftigkeit der Seile im besonderen Fokus.

Die Dauerhaftigkeit von vollverschlossenen Seilen kann durch:

- Korrosionsschäden,
- Ermüdungsschäden, die durch Korrosionsschäden beschleunigt würden,
- Drahtbrüche oder sonstige mechanische Verletzungen

begrenzt werden. Alle genannten Schäden schränken je nach Ausmaß auch die lokale, aber auch die globale Tragfähigkeit ein. Der durch Korrosionsschäden oder Ermüdungsschäden entstehende Tragfähigkeitsverlust ist eine Funktion der Zeit.

Die regelmäßig durchgeführten Brückenprüfungen sollen ermöglichen rechtzeitig zu erkennen, ob Korrosionsschäden oder Ermüdungsschäden aufgetreten sind, um Instandsetzungen oder einen Seilaustausch so rechtzeitig bewerkstelligen zu können, dass die Tragfähigkeit nicht unter eine untere Toleranzgrenze fällt.

Solche Brückenprüfungen sind nur effektiv, wenn die angewendeten Prüfmittel ein so frühes Erkennen harmloser Anfangsschäden ermöglichen, dass genügend Zeit für die Entscheidung, Planung und Durchführung von Instandsetzungsmaßnahmen bleibt. In diesem Fall spricht man von schadenstoleranter Konstruktion.

Schadenstoleranz ist dadurch erreicht, dass:

- ein mit dem eingesetzten Prüfmittel erkennbarer Schaden ggf. übersehen werden kann, ohne dass gravierende Folgen entstehen,
- die dann durch den Schaden beschleunigte Ermüdung mit Korrosion einen sicheren weiteren Betrieb über ein mehrfaches der Prüfintervalle ermöglicht, ohne dass die untere Toleranzgrenze der Tragfähigkeit erreicht wird,
- dieses Mehrfache der Prüfintervalle das sichere Erkennen des Schadens bei einem der nächsten Prüfungen und genügend Zeit für Entscheidung, Planung und Durchführung der Instandsetzungsmaßnahmen einschließt.

Das richtige Bewerten von geschädigten Seilen auf Grundlage von bestehenden und neuen Erfahrungen stellt die Veranlassung für dieses Forschungsvorhaben dar.

1.2 Ziel

Das Ziel einer nachhaltigen Brückenlösung ist eine Reduzierung des Unterhaltungsaufwandes für Seile dadurch, dass

- mit einfachen, kostengünstigen Prüfverfahren zuverlässig geprüft werden kann,
- solche Seilprodukte und Korrosionsschutzmaßnahmen eingesetzt werden, bei denen zwischen erkennbaren Schäden und Erreichen der unteren Toleranzgrenze für die Tragfähigkeit eine ausreichend große Betriebszeit ohne Verkehrseinschränkungen liegt.

Zum Erreichen dieser Zielsetzung soll das Forschungsvorhaben „Beurteilung der Ermüdungssicherheit von vollverschlossenen Seilen mit Korrosionsschäden" einen Beitrag liefern. Anhand von Untersuchungen an ausgebauten Seilen der Rheinbrücke Flehe und der Auswertung aktueller Schadensbilder von vollverschlossenen Seilen anderer Brücken sollen neue Erkenntnisse für die Beurteilung und Einstufung von Korrosionsschäden bei Seilen gewonnen werden.

Weiterhin ist das Ziel des Forschungsvorhabens die Erarbeitung von Empfehlungen zur Bewertung von Schäden hinsichtlich der Tragsicherheit, Verkehrssicherheit und Dauerhaftigkeit für die Bauwerksprüfung.

1.3 Vorgehensweise

Zunächst sind alle verfügbaren Informationen hinsichtlich von Schäden an vollverschlossenen Seile bei Brücken zu sammeln und auszuwerten.

Weiterhin sollen Erfahrungen mit der Prüfung früher ausgebauter Seile, z. B. von der Rheinbrücke Rees genutzt werden, um das vorgesehene Prüfprogramm anzupassen. Das damalige Prüfprogramm zeigte, dass Seile mit etwa 13 Jahren Betriebszeit, aber ohne nennenswerten Korrosionsangriff keinen erheblichen Abfall der Resttragfähigkeit hatten.

Das anschließend durchgeführte Prüfprogramm sieht weitere Ermüdungsversuche vor, allerdings werden die Versuche an vorgeschädigten Seilen durchgeführt. Die Vorschädigung kann dabei durch

- eine natürliche Korrosion erfolgt sein, oder aber durch
- eine künstliche Korrosion erzeugt werden.

Die künstliche Korrosion hat dabei auch zum Ziel, eine Abhängigkeit der Ermüdungsfestigkeit von der jeweiligen Narbentiefe zu ermitteln. Für die Versuche werden 5-m-Seilprüfstücke benutzt, die aus ausgesuchten Abschnitten der ausgebauten Seile der Rheinbrücke Flehe hergestellt werden. Die Korrosionsbeanspruchung wird auf diese Seilabschnitte künstlich erzeugt, die durch geeignete Verfahren (ohne Beschädigung der Außendrähte) von Beschichtungen (Farbanstriche und Überzug) befreit wurden.

Die Rauheiten werden dabei wie folgt definiert:

- Rauheit 1: Narbentiefe 0,5 mm,
- Rauheit 2: Narbentiefe 1,0 mm.

Die Seilprüfungen der vorgeschädigten Seile werden nach TL bzw. TL/TPVVS Seile durchgeführt, d. h. zunächst Durchführung eines Ermüdungsversuches und anschließend Feststellung der Restbruchkraft.

Mit den Ergebnissen dieses Prüfprogramms soll folgendes erreicht werden:

- es kann das Verhalten von neuen Seilen mit dem Verhalten vorgeschädigter Seile direkt verglichen werden in Hinblick auf:
  - Häufigkeit der Drahtbrüche und damit der Ermüdungsfestigkeit,
  - Abhängigkeit von Drahtbruchanzahl und Restbruchfestigkeit.
- Es sollen vom Korrosionszustand (Rauheit 1 oder Rauheit 2) abhängige Abminderungen der Ermüdungsfestigkeit und Tragfähigkeit angegeben werden,
- es wird die Sicherheit zu einem extremen, in der Praxis nicht zu erwartenden Grenzzustand angebbar, der sich nach dem Bruch aller Außendrähte ergeben würde.

Die beschriebenen Untersuchungen werden durch folgende Stellen durchgeführt:

- Ingenieurbüro Prof. Sedlacek und Partner, Aachen,
- Institut für Eisenhüttenkunde (IEHK) der RWTH Aachen, Aachen,
- DMT, Bochum,
- BRIDON, Gelsenkirchen.

Das Ingenieurbüro PSP, Aachen definiert das Programm, koordiniert die Aktivitäten und führt zusammen mit DMT die Versuchsauswertung und die Literaturauswertung durch, bewertet die Ergebnisse hinsichtlich der Dauerhaftigkeit und Tragfähigkeit von Seilen und schreibt die Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisses.

Das Institut für Eisenhüttenkunde der RWTH Aachen führt ergänzende Untersuchungen zur Korrosion an Seilen durch. Die ergänzenden Untersuchungen sind z. B.:

- Vorversuche an Seilabschnitten (Länge ca. 1 m), es werden in der dort vorhandenen Salzsprühanlage die Einwirkungszeiten ermittelt, in der die definierten Rauheiten 1 und 2 erreicht werden,
- Kleinteilversuche an ausgebauten Drähten (Analysen, Gefüge, Oberflächen, Festigkeiten),
- Durchführung, Betreuung und Auswertung der Korrosionsversuche,

- Begutachtung der Drahtbrüche nach den Versuchen zur Resttragfähigkeit der vorgeschädigten Teilprüfkörper.

Die DMT in Bochum ist mit folgenden Aufgaben tätig:

- Einbringung der Erfahrungen aus der Mitwirkung bei den bisherigen Seilprüfungen der Seile an der Rheinbrücke Flehe,
- Einbringen von Prüfergebnissen aus Seilprüfungen nach TL Seile für Seilneulieferungen von Brücken,
- Vorbereitung für die Durchführung der Seilprüfungen nach TL Seile für die ausgebauten Seile der Rheinbrücke Flehe (Seilkraftmessungen vor Ausbau, Kartierung der Schäden, Sicherung durch Umbändelung, Zerschneiden in ca. 8 m Abschnitte, Anbringen der Endverankerungen und Durchführung der Versuche,
- Durchführung der Seilprüfungen mit den vorgeschädigten Seilprüfkörpern.

Die Fa. BRIDON in Gelsenkirchen übernimmt die Vorbereitung der Bauteilproben, wie z. B. die Einlagerung, das Ablängen, das Anbringen der Seilköpfe etc.

Insbesondere die Straßenbauverwaltung in NRW ‚Strassen.NRW' ist daran interessiert, eine Aussage zur Sicherheit und Lebensdauer von eingebauten Seilen, die ggf. Korrosion aufweisen, zu erhalten. Da quantitative Aussagen dazu nicht ohne weiteres möglich sind, wurde nach geeigneten Möglichkeiten gesucht, Dauerhaftigkeits- und Tragfähigkeitsversuche an vorgeschädigten Seilen mit korrodierten Oberflächen durchzuführen, mit denen die Grundlagen für die gewünschten Sicherheits- und Lebensdauernachweise geschaffen werden sollen. Dazu boten die für den Ausbau vorgesehenen vorgeschädigten Seile der Rheinbrücke Flehe an.

Das vorliegende Forschungsprogramm zielt darauf ab, die Gelegenheit dieses Ausbaus zu nutzen, um neben den ohnehin geplanten Untersuchungen zu Korrosionsschäden im Seilinneren und zur Überprüfung der Genauigkeit der Befunde der magnetischen Seilprüfung mit den ausgebauten Seilen die erforderlichen Untersuchungen auch zu quantitativen Aussagen zur Sicherheit und Lebensdauer durchzuführen.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden für alle seilverspannten Brücken genutzt.

2 Vollverschlossene Seile

2.1 Allgemeines

Vollverschlossene Seile [2,3] werden bei Schrägseilbrücken, Hängebrücken, unterspannten Balkenbrücken und als Hängerseile bei Bogenbrücken eingesetzt. Bild 2.1 zeigt die Rheinbrücke Leverkusen, hier werden jeweils immer 19 einzelne vollverschlossene Seile zu einem Kabel zusammengefasst. Auf dem Bild sind die Kabel zu erkennen.

Die Anordnung von Seilen zu einem Kabel findet man insbesondere bei früher gebauten Schrägseilbrücken.

Bild 2.2 und Bild 2.3 zeigen Details der Rheinbrücke Bonn Nord, hier werden die Seile fächerförmig einzeln geführt und somit auch einzeln im Pylon und im Brückenhohlkasten verankert.

In Bild 2.3 sind die unten angebrachten Seildämpfer zu erkennen, die zur Vermeidung von Seilschwingungen nachträglich angebracht wurden.

Bild 2.4 zeigt die Rheinbrücke Rodenkirchen, hier sind 61 Einzelseile zu einem Tragkabel zusammen-

Bild 2.1: Rheinbrücke Leverkusen

Bild 2.2: Rheinbrücke Bonn Nord – Seilverankerung am Pylon

Bild 2.3: Rheinbrücke Bonn Nord – unterer Seilbereich oberhalb des Brückendecks

Bild 2.4: Rheinbrücke Rodenkirchen mit Blick auf das Tragkabel und die Hängerseile

gefasst, über das Tragkabel werden die Hängerseile, an denen die Fahrbahn hängen, geführt. Jedes Hängerseil ist mit seinen beiden Enden im Brückendeck verankert. Alle Seile sind vollverschlossene Seile.

Inzwischen werden Seile mit einem Durchmesser von bis zu 158 mm eingesetzt, so erfolgt bei der Schrägseilbrücke Hochstraße Bremen. Dieser Durchmesser wurde erforderlich, da es sich hier um eine Schrägseilbrücke mit einer Verbundplatte handelt, bei der das Eigengewicht im Vergleich zu einer reinen Stahlbrücke mit orthotroper Fahrbahnplatte deutlich höher ist. Die in dem Zeitraum von 1960 bis 1980 gebauten Schrägseilbrücken sind durchweg als reine Stahlbrücken gebaut worden. Weitere detaillierte Informationen zu seilverspannten Brücken werden in [4] und [8] gegeben.

Tabelle 1.1 gibt eine Übersicht über einige Brücken, die mit vollverschlossenen Seilen gebaut wurden, inzwischen werden auch Seilbrücken mit Litzenbündelseilen gebaut.

Lfd. Nr.	Bauweise – Name/Ort	Im Zuge Straße/Ort	Baujahr	Gesamtlänge (Stahl Überbau in m)	Überquert	Baulastträger Bund = B Land = L Gemeinde = G
	Hängebrücken					
1.	Mettlach	B 51	1952	125	Saar	B
2.	Köln-Rodenkirchen[1)]	BAB A 4	1954/1992	567	Rhein	B
3.	Kleve-Emmerich	B 220	1965	803	Rhein	B
4.	Wehlen	K 73	1949	206	Mosel	L
5.	Langenargen	Stadt	1898	72	Argen	G
6.	Köln-Mühlheim	Stadt	1951	485	Rhein	G
7.	Luitpoldbrücke Passau	Stadt (B 12)	1949	126	Donau	G
	Schrägseilbrücken					
8.	Büchenauer Brücke Bruchsal	B 35	1955	85	Bahn	B
9.	Norderelbbrücke Hamburg (K 6)	BAB A 1	1963	411	Elbe	B
10.	Leverkusen	BAB A 1	1965	493	Rhein	B
11.	Maxau	BAB A 652	1966	292	Rhein	B

[1)] Die Rheinbrücke Köln Rodenkirchen wurde 1992 verbreitert

Tab. 1.1: Brücken mit vollverschlossenen Seilen, Zusammenstellung basiert auf [4]

Lfd. Nr.	Bauweise – Name/Ort	Im Zuge Straße/Ort	Baujahr	Gesamtlänge (Stahl Überbau in m)	Überquert	Baulastträger Bund = B Land = L Gemeinde = G
	Schrägseilbrücken (Fortsetzung)					
12.	Rees-Kalkar	B 67	1967	463	Rhein	B
13.	Bonn-Nord	BAB A 565	1967	520	Rhein	B
14.	Duisburg-Neunkamp	BAB A 2	1970	777	Rhein	B
15.	Speyer-Nord	BAB A 61	1974	469	Rhein	B
16.	Deggenau	BAB A 3	1975	435	Donau	B
17.	Neuwied-Weißenthurm	B 256	1978	486	Rhein	B
18.	Düsseldorf-Flehe	BAB A 46	1979	607	Rhein	B
19.	Emscherschnellweg	BAB A 42	1990	1030	Rhein	B
20.	Köhlbrand-Hamburg	Stadt	1974	520	Hafen	L
21.	Th.-Heuss-Brücke Düsseldorf	Stadt (B 7)	1957	476	Rhein	G
22.	Severinsbrücke Köln	Stadt	1959	533	Rhein	G
23.	Jülicher Straße Düsseldorf	Stadt	1963	162	Bahn	G
24.	Stahlhochstraße Ludwigshafen	Stadt	1968	280	Bahn	G
25.	Rheinkniebrücke Düsseldorf	Stadt	1969	744	Rhein	G
26.	Franklinbrücke Düsseldorf	Stadt	1974	209	Bahn	G
27.	Neckarbrücke Mannheim	Stadt	1975	253	Neckar	G
28.	Oberkassel Düsseldorf	Stadt	1976	591	Rhein	G
29.	Heinrich-Erhard-Brücke D'dorf	Stadt	1980	177	Bahn	G
30.	Flughafenbrücke	BAB 44	2002	288	Rhein	B
31.	Berliner Brücke (Halle)	Stadt	2005	171	Bahn	G
32.	Elbebrücke Niederwartha	Stadt	2008	192	Elbe	G
33.	Bremen Neustadt	BAB 281	2008	311	Stadtstraßen	B
34.	Werrebrücke Bad Oeynhausen	BAB 30	2012	153	Werre	B
	Zügelgurtbrücken					
35.	Friedich-Ebert-Brücke Duisburg-Homberg	Stadt (B 60)	1954	542	Rhein	G
	Sonderbauweisen					
36.	Fehmarnsund-Brücke	B 207/DB	1963	248	Fehmarnsund	B/DB
37.	Neckartalbrücke Weitingen	BAB A 81	1978	900	Neckartal	B
38.	Talbrücke Obere Argen	BABA A 96	1990	730	Argen Tal	B

Tab. 1.1: Fortsetzung

2.2 Beanspruchung und Bemessung

Bei den Brückenbauwerken werden die Seile statisch durch das Brückeneigewicht und die ständigen Ausbaulasten beansprucht. Zusätzlich werden sie aber auch dynamisch beansprucht. Die dynamischen Wechselbeanspruchungen entstehen durch veränderliche Verkehrsbelastungen und durch Schwingungen, wie z. B. wirbelerregte Querschwingungen, Regen-Wind-induzierte Schwingungen oder aber Galloping.

Bei der Bemessung der Seile nach DIN 18809 ‚Stählerne Straßen- und Wegbrücken' [5] wurden in

der Vergangenheit folgende Sicherheiten berücksichtigt:

- v = 2,2 Lastfall H,
- v = 2,0 Lastfall HZ.

Der Lastfall H berücksichtigt das Eigengewicht und die Verkehrslasten, der Lastfall HZ zusätzlich noch alle weiteren Beanspruchungen.

Bei einigen Brücken wurde durch die Straßenbauverwaltung eine erhöhte Sicherheit von v = 3,0 gefordert. Dies berücksichtigt konstruktive Besonderheiten, wie z. B. einen engen Umlenkungsradius um das Tragkabel bei einer Hängebrücke oder aber den Umstand, dass bei einem Tragkabel einer Hängebrücke oder einer Schrägseilbrücke mit der Anordnung der einzelnen Seile zu einem Kabel ein Austausch der Seile nicht möglich ist. Insofern wurden die Seile mit einer erhöhten Sicherheit gegenüber den sonstigen Stahlbauteilen bemessen. Berücksichtigt man außerdem, dass in der Regel die wirkliche Bruchkraft der vollverschlossenen Seilen weniger als 8 % unter der rechnerischen Bruchkraft liegt, diese Abminderung ist der sog. Verseilverlust, so ist allein durch die Bemessung eine erhebliche Redundanz gegenüber einer möglichen Schädigung vorhanden.

Bei den Brücken neueren Datums ist in jedem Fall auch der Seilaustausch einzelner Seile vorgesehen.

2.3 Drähte

Bei den Drähten handelt es um unlegierten Kohlenstoffstahl mit einem Kohlenstoffgehalt von 0,7 % bis 0,8 %, in der Vergangenheit entsprechend der DIN 17140. Die Nennfestigkeit der Drähte betrug dabei in der Regel 1.570 N/mm².

Das Vormaterial der Drähte wird in Salzsäure gebeizt und dann über Kaltziehprozesse stufenweise auf den Enddurchmesser gezogen, siehe hierzu auch [6]. Bei diesem Vorgang wird die Zugfestigkeit durch die Kaltverformung erreicht.

Bei den Profildrähten wird der wärmebehandelte, gebeizte Walzdraht vorgezogen und anschließend in mehreren Arbeitsgängen auf die endgültige Form gezogen. Die normativen Vorgaben waren 1988 in der DIN 2078 ‚Stahldraht für Drahtseile' und DIN 779 ‚Formstahldrähte für vollverschlossene Spiralseile – Maße und Technische Lieferbedingungen' festgelegt. Für die Fertigung der Seile gibt es spezielle Verseilmaschinen.

2.4 Seile

Die einzelnen Drähte werden im Werk über eine Verseilmaschine zu einem Seil, siehe Bild 2.5.

Bild 2.6 zeigt den Seilquerschnitt eines Seiles der Rheinbrücke Flehe mit einem Durchmesser von 111 mm, hier wurden sowohl Rund- als auch Z-Drähte verwendet. Insgesamt besteht dieses Seil aus einem Runddraht in der Mitte, dann vier Lagen Runddrähte und abschließend sechs Lagen Z-Drähte. Die einzelnen Lagen werden jeweils gegeneinander um den Querschnitt angeordnet (Gegenverseilung, siehe Bild 2.7).

Weitere Verseilarten werden in [11] beschrieben.

Bild 2.5: Herstellung eines Seiles mit Durchmessser von 167 mm [11]

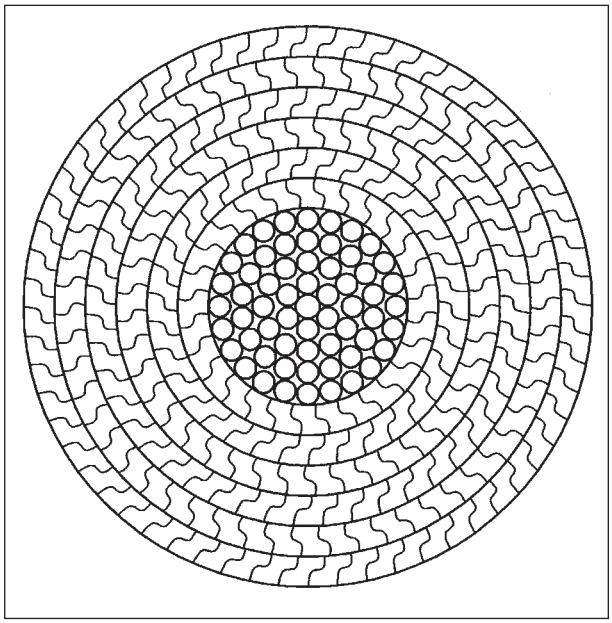


Bild 2.6: Seildurmesser von 111 mm der Rheinbrücke Flehe

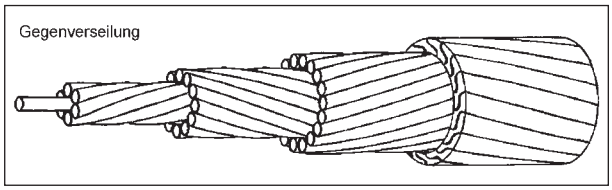


Bild 2.7: Gegenverseilung eines vollverschlossenen Seiles [11]

2.5 Korrosionsschutz

Die vollverschlossenen Seile werden durch folgende Maßnahmen geschützt:

- Beschichtungssysteme der Außenflächen,
- Feuerverzinkung der einzelnen Drähte (Temperatur 460 °C),
- Verwendung eines Seilverfüllmittels für die Zwischenräume.

Die Vorgaben hierfür sind in den ZTV-ING Teil 4-5 Korrosionsschutz von Seilen und Kabeln [7] enthalten.

Inzwischen werden bei Seilen auch zweilagige Umwicklungen eingesetzt, die mittels Seilbefahrgeräten angebracht werden.

In der Regel besteht das heutige Beschichtungssystem zum äußeren Korrosionsschutz der Seile aus einer Grundbeschichtung auf Epoxidharzbasis mit Eisenglimmer, sowie zwei Zwischen- und der Deckbeschichtung auf Polyurethanbasis. Die hier angegeben Beschichtungsarten beziehen sich dabei auf die jetzigen Neulieferungen und die in der Vergangenheit seit ca. 1983 eingebauten Seile.

Bei den vor 1983 betrachteten Brücken und deren Seilen sind Abweichungen beim Korrosionsschutz festzustellen. Bis ca. 1965 wurden die Seile aus blanken unverzinkten Drähten gefertigt, anschließend wurden verzinkte Drähte verwendet.

Nach [4] wurden zunächst elektrolytisch verzinkte Drähte mit Auflagen von bis zu 500 g/m² entsprechend ca. 70 µm Zinkauflage im Seilgefüge nur in der äußeren Lage als verstärkte Korrosionsschutzmaßnahme verwendet. Als Beispiel in [4] werden die Rheinbrücke Maxau (1966), die Rheinbrücke Bonn-Nord (1967), die Rheinbrücke Rees (1967) und die Stahlhochstraße Ludwigshafen (1968) genannt.

Anschließend wurde auf feuerverzinkte Drähte umgestellt, zunächst nur in der äußeren Lage, dann in den beiden äußeren Lagen, inzwischen in allen Lagen. Die Zinkauflage besteht aus ca. 300 g/m², dies entspricht einer Schichtdicke von ca. 40 µm. Höhere Zinkauflagen konnten wegen der dann nicht mehr gegebenen Formtreue der Profildrähte und der abnehmenden Haftzugfestigkeit der Zinkauflage nicht realisiert werden.

Bei den Seilen, die in den letzten Jahren bei Brücken eingebaut wurden, sind für die beiden äußeren Lagen mit Z-Drähten anstelle der Feuerverzinkung eine Zink-Aluminium-Legierung verwendet worden (Markenname: Galfan Verzinkung, dies ist aber nicht mit einer galvanischen Verzinkung gleich zu setzen, die für Brückenseile verboten ist) [8].

Als Seilverfüllmittel wurde früher Lein-Öl-Blei-Menninge verwendet. Wegen der giftigen Bleimenninge ist dies heute nicht mehr zulässig, sodass jetzt Zinkstaubfarbe verwendet wird. Hierbei werden die beiden äußeren Lagen ausgespart um das sogenannte ‚Bluten' der Seile zu vermeiden, das wiederum die Haftung der Beschichtung vermindert.

2.6 Verankerung

Die Verankerung der Seile im Brückendeck ist bei den im Zeitraum von 1960 bis 1980 gebauten Brücken sehr unterschiedlich ausgebildet worden. Bild 2.8 und Bild 2.9 zeigen die Seilkammer der Rheinbrücke Leverkusen, bei der die Seile und deren Seilköpfe über Traversen verankert werden, wobei die Traversen an den zwei mittleren Hauptträgerstegen anschließen.

Diese Ausführung einer Seilkammer stellt ein sehr massives Bauteil dar, das in der Werkstatt zu einer fertigen Montageeinheit hergestellt wurde. Das rote Bauteil in Bild 2.8 zeigt die Halterung der Seile nach dem Eintritt durch das Brückendeck. Hierdurch werden die Schwingungen und die Seilverdrehungen an einer Stelle aufgenommen, die damit geometrisch deutlich entfernt von der Stelle liegt, an dem das Seil in dem Seilkopf verankert wird und damit die Seilkraft in die eigentliche Brückenkonstruktion abgeleitet wird.

Bild 2.8: Seile vor den Traversen

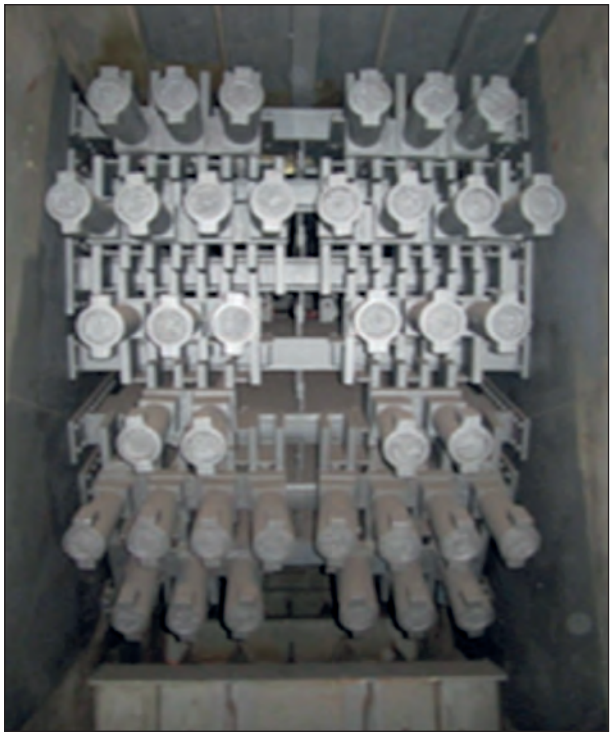


Bild 2.9: Verankerung hinter den Traversen

Aus dieser Anordnung ist auch der Nachteil eines Kabels, d. h. das Zusammenlegen einiger Seile zu einem Strang, zu erkennen. Die konzentrierte Kabelkraft bzw. die einzelnen Seilkräfte müssen in einem lokal begrenzten Bereich verankert werden.

Die Bilder 2.10 und 2.11 stellen die Seileinleitung der Rheinbrücke Neuenkamp dar, hier sind die Seile ebenfalls als Kabel angeordnet worden.

In den Bildern 2.10 und 2.11 wird die eine Hälfte der Seile mit ihrer Verankerung sichtbar, die andere Hälfte ist auf der anderen Seite des mittleren Hauptträgerstegs symmetrisch angeordnet.

Bild 2.10: Vorderseite der Verankerung

Bild 2.11: Rückseite der Verankerung

Die Verankerung der Seile in die Brückenkonstruktion erfolgt über ein Seilquerschott, den mittleren Hauptträgersteg und eine kurzen Längsscheibe. Im Bild 2.10 ist ebenfalls wieder die Umlenkkonstruktion und Festhaltung der Seile zu erkennen, die die Winkeländerung zwischen freier Seillänge und der Verankerung aufnimmt.

Die Konstruktion ist somit deutlich besser zugänglich als die Seilkammer der Rheinbrücke Leverkusen.

Bei der Rheinbrücke Bonn Nord sind die Seile fächerförmig angeordnet, somit erfolgt die Seilverankerung jeweils der einzelnen Seile in die Brückenkonstruktion, siehe hierzu Bild 2.12.

Unabhängig davon, ob die Seile als gebündeltes Kabel oder einzeln verankert werden, besteht die eigentliche Verankerung zumeist aus einem konischen Gussbauteil (nach [3] aus dem höherfesten Gussstahl GS-26 CrMo 4 oder inzwischen mit noch mehr Festigkeit aus einem GS-14 Ni Cr Mo 10 6), in dem das Seil und die einzelnen Drähte fächerförmig mittels einer Vergussmasse verankert werden. Auf die Arten des Vergusses und die Vorgehensweise wird später nochmals detailliert eingegangen.

Bild 2.13 stellt schematisch die Konstruktion und der Verankerung eines Seiles in einer Brücke dar.

Bild 2.14 zeigt das Prinzip der Kraftübertragung in dem eigentlichen Seilkopf dar, die Zeichnung wurde in Anlehnung an die Ausführungen in [9] erstellt. Im Wesentlichen erfolgt die Kraftübertragung in dem ersten Bereich des Vergusskegels, da sich im hinteren Bereich Ablösungen ergeben und durch die statische und dynamische Seilkraft sich der Vergusskegel in den Vergusskörper hineinzieht und sich auch entsprechende Setzungen ergeben.

Bild 2.12: Verankerung der Einzelseile bei der Rheinbrücke Bonn Nord

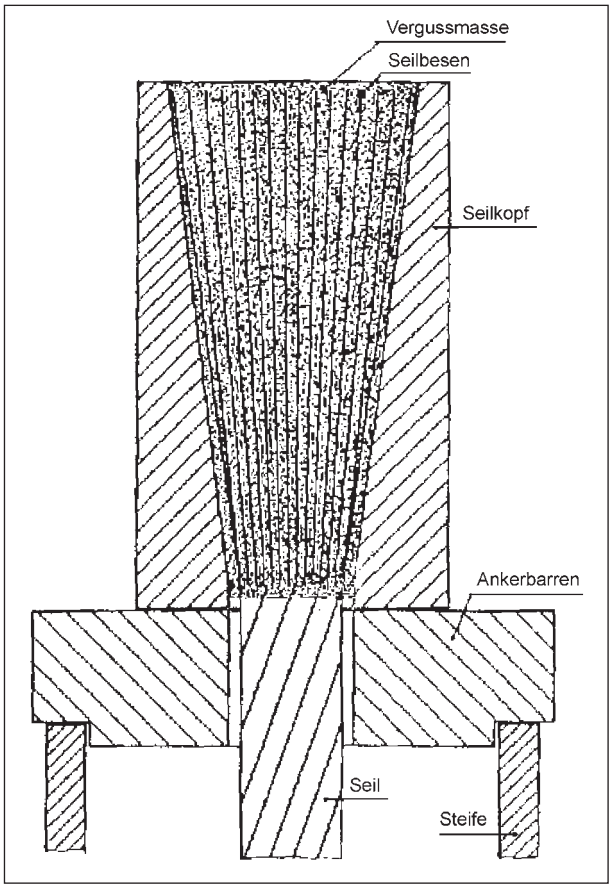


Bild 2.13: Prinzip der Lagerung eines Seilkopfes in einer Brücke [6]

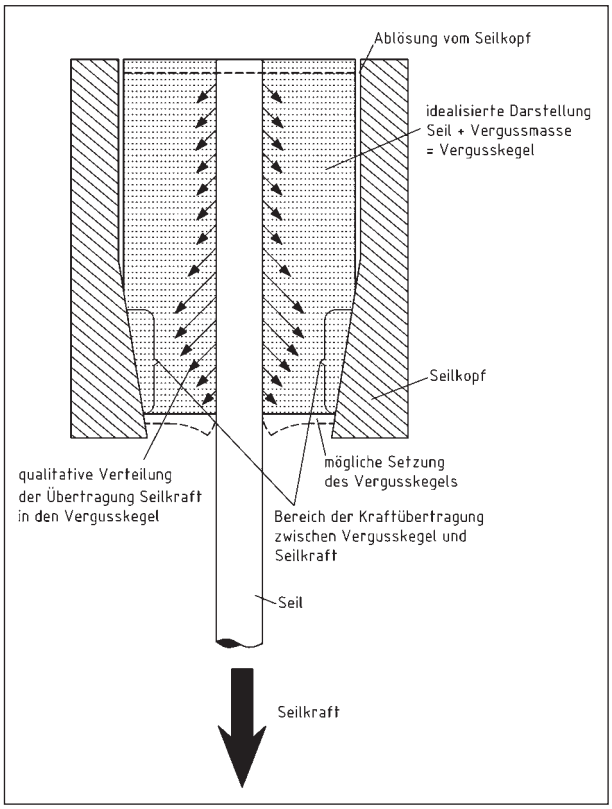


Bild 2.14: Kraftübertragung im Seilkopf (Zeichnung nach [10])

Zur Berechnung solcher Konstruktionen wird ebenfalls auf [10] verwiesen.

2.7 Prüfung

Wie auch alle anderen Brückenbauteile unterliegen die Seile ebenfalls der regelmäßigen Bauwerksprüfung nach DIN 1076. Bei den alle sechs Jahre stattfindenden Hauptprüfungen werden die Seile inzwischen unter Einsatz eines Hubsteigers oder besonderer Befahrkörbe abgefahren und visuell auf erkennbare Beschädigungen geprüft. Zu dem Einsatz von magnetinduktiven Prüfungen wird auf [2, 3] verwiesen.

2.8 Instandsetzungsmaßnahmen

Im Wesentlichen handelt es sich bei den Instandsetzungen bei vollverschlossenen Seilen um Maßnahmen, die den Korrosionsschutz entweder wieder herstellen oder verbessern.

Dies kann z. B. auch eine Seilspreizung sein, d. h. das Auseinanderlegen von Kabeln, am Beispiel der Rheinbrücke Duisburg Neuenkamp wird dies im Detail vorgestellt, siehe Kapitel 3.1.

Bei massiven Schädigungen kann es erforderlich werden, dass ein gesamtes Seil ausgetauscht werden muss. Bei Hängebrücken ist dies bei den Hängern relativ einfach möglich und sowohl bei der Rheinbrücke Rodenkirchen durchgängig und bei der Rheinbrücke Emmerich an einem Hängerseil bereits durchgeführt worden. Inzwischen wird grundsätzlich die Möglichkeit eines Seilaustausches bei dem Entwurf von neuen Brücken vorgesehen. Bei einigen älteren Brücken, bei denen die Seile über den Pylonkopf geführt werden, ist ein Austausch nicht machbar. Für einen Seilaustausch steht das Beispiel der Rheinbrücke Flehe, dies wird im Weiteren ebenfalls noch behandelt, siehe Kapitel 3.2.

Der Korrosionsschutz erreicht in der Regel bei Brücken eine Lebensdauer von ca. 30 Jahren, sodass bei den Schrägseilbrücken, die in der Zeit von 1960 bis 1980 gebaut wurden entweder bereits eine Erneuerung durchgeführt wurde oder aber ansteht, Beispiel sind hier die Rheinbrücke Neuenkamp, Rheinbrücke Bonn Nord oder aber auch die Severinsbrücke der Stadt Köln. Die Schwierigkeit bei den Baumaßnahmen besteht hier zumeist in den dafür erforderlichen großen Gerüsten, ggf. mit Verbindungsstellen und/oder Abstützungen auf den Seilen. Bei den Gerüsten und Befahranlagen, die sich direkt auf den Seilen abstützen, sind besondere Schutzmaßnahmen an den Auflagerungspunkten erforderlich, da es sonst zu Kerben und Drahtbrüchen kommen kann.

Weiterhin problematisch ist die Zustandserfassung der inneren Seile bei der festen Anordnung einiger Seile zu einem Kabel.

2.9 Normen und Regelwerke

Für die vollverschlossenen Seile liegt inzwischen folgendes Regelwerk vor:

- Eurocode 3, Teil 1-11, Bemessung und Konstruktion von Tragwerken mit Zuggliedern aus Stahl,
- Nationaler Anhang zu EN 1993, Teil 1-11,
- ZTV-ING Teil 4-4, Brückenseile,
- ZTV-ING Teil 4-5, Korrosionsschutz von Brückenseile,
- TL Kor VVS,
- TP Kor VVS,
- TL/TP-VVS Technische Lieferbedingungen und Technische Prüfvorschriften für vollverschlossene Seile.

Weitere Teile der Vorschriften werden zukünftig in die ZTV-ING überführt. Die ZTV-ING wird durch die BASt gepflegt und ist auf deren Internetseite einsehbar.

3 Schäden an ausgesuchten seilverspannten Brücken

3.1 Rheinbrücke Duisburg Neuenkamp

Die Schrägseilbrücke Duisburg Neuenkamp überquert im Zuge der A 40 von Moers nach Duisburg den Rhein. Die Gesamtlänge der Rheinbrücke beträgt 777,40 m, die Mittelöffnung hat eine Weite von 350 m, siehe Bild 3.1.

Der Stahlquerschnitt des Versteifungsträgers ist ein zweizelliger Hohlkasten mit orthotroper Fahrbahnplatte in der Ausführung mit Sektkelchprofilen, sie-

he Bild 3.2. Im Bodenblechbereich wurden aber bereits Trapezhohlsteifen eingesetzt.

Die Rheinbrücke Duisburg Neuenkamp ist eine der ersten vollständig geschweißten Brücken, d. h. auch die Montagestöße auf der Baustelle wurden geschweißt. Es wurden vollverschlossen Seile mit den Durchmessern von 83, 81, 67 und 57 mm verbaut, die Bilder 3.3 und 3.4 zeigen den Lagenaufbau von dem 57 und 83 mm dicken Seil.

Die Bezeichnung der Kabel und Durchmesser der einzelnen Seile geht aus Bild 3.5 hervor.

Die Seilenden sind im Versteifungsträger verankert und werden im Pylon über Sättel durchgeführt, d. h. ein Seilwechsel ist hier nicht möglich. Die Verankerungen der Seile im Versteifungsträger sind in Bild 2.10 und Bild 2.11 dargestellt.

Die Seile wurden mit einer Sicherheit von v = 2,5 bemessen.

Bild 3.1: Rheinbrücke Duisburg Neuenkamp

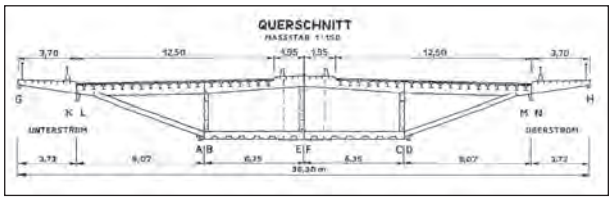


Bild 3.2: Querschnitt

Entsprechend den Bestandsunterlagen war der folgende Korrosionsschutz vorgesehen:

- die Einzeldrähte erhalten bei der Verseilung jeder einzelnen Drahtlage einen Grundanstrich aus Bleimennige entsprechend der TL der DB,

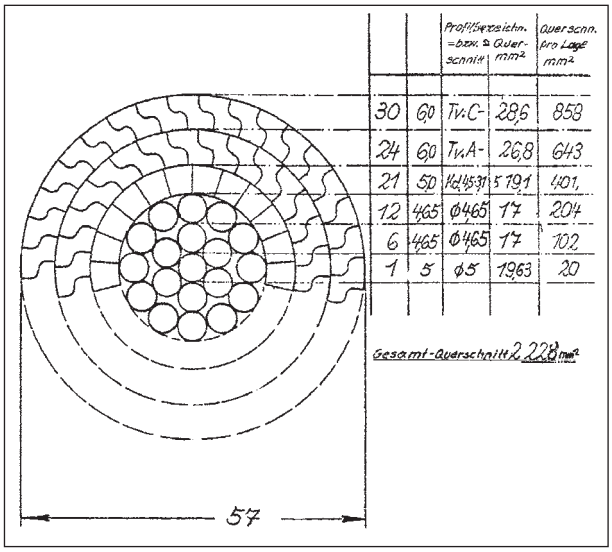


Bild 3.3: Seildurchmesser 57 mm

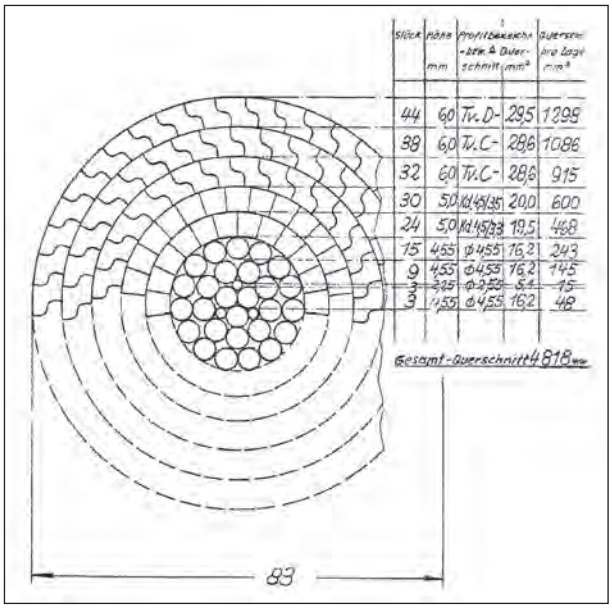


Bild 3.4: Seildurchmesser 83 mm

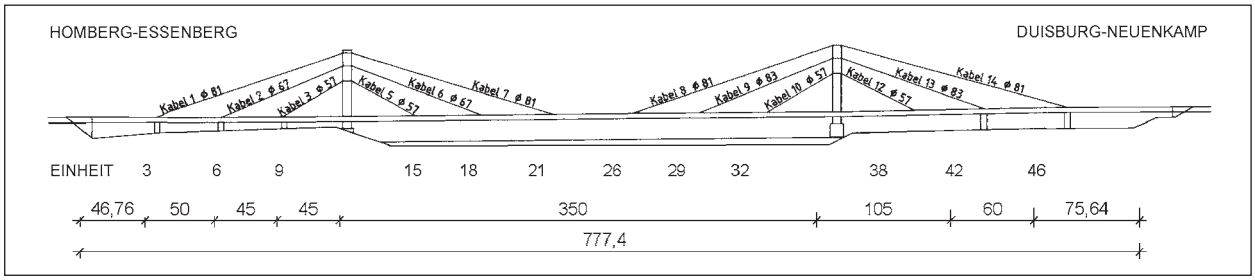


Bild 3.5: Verteilung der Seildurchmesser

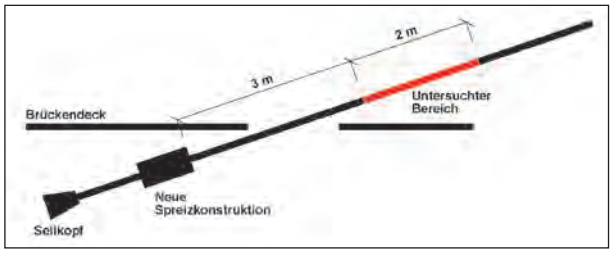


Bild 3.6: Schadensbereich und Untersuchungsbereich

- die äußere Drahtlage sollte eine Feuerverzinkung erhalten.

Es ist davon auszugehen, dass diese Anforderungen ausgeführt wurden.

1971 wurden an dem oberen Kabel der rechtsrheinischen Seilöffnung (Kabel 14) vertikale Schwingungsbewegungen beobachtet /U6/.

In den Bestandsunterlagen wurde vermerkt, dass sich bei diesen Schwingungen die Dichtschellen an den unteren Kabelhauben auf und ab bewegten. 1975 wurden an den jeweils oberen Kabeln Nr. 1, 7, 8 und 14 jeweils 3 Kabelverbindungsstäbe angebracht. Zusätzliche wurde die untere Kabelhaube bei dem Kabel 14 entfernt und der dortige Korrosionsschutzanstrich erneuert. Inwieweit neben den Korrosionsschutzschäden, verursacht durch das Anschlagen durch die Schwingungen, weitere Schäden, z. B. Drahtbrüche aufgetreten sind, ist aus den Unterlagen nicht zu ersehen.

Bei den 2003/2004 durchgeführten Bauwerksprüfungen wurden Wasseransammlungen in den unteren Bereichen der Seile oberhalb des Deckblechs festgestellt, siehe Bild 3.6.

Strassen.NRW entschloss sich zu einer dauerhaften Spreizung der Kabel und beauftragte ein Gutachten zur Untersuchung der Resttragfähigkeit und Dauerhaftigkeitsanalyse der korrodierten Seile in diesem Bereich.

2005 wurde mit den Arbeiten zu einer dauerhaften Seilspreizung begonnen. Hierbei wurden zunächst in den unteren Seilverankerungspunkten mittels Hilfskonstruktionen die Seile auseinandergezogen. Die Bilder 3.7 bis 3.11 zeigen einige Details der Spreizung und des Endzustandes.

Bei diesen Arbeiten wurde in den Seilbereichen unmittelbar oberhalb des Fahrbahndeckblechs in Höhe der Kabelhauben erhebliche Rostbildung an den jeweils unteren Seilen der Kabelstränge festgestellt.

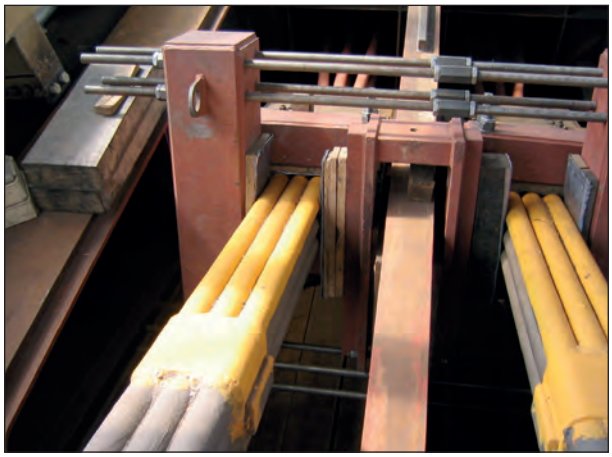


Bild 3.7: Montagehilfskonstruktion vor dem Spreizen

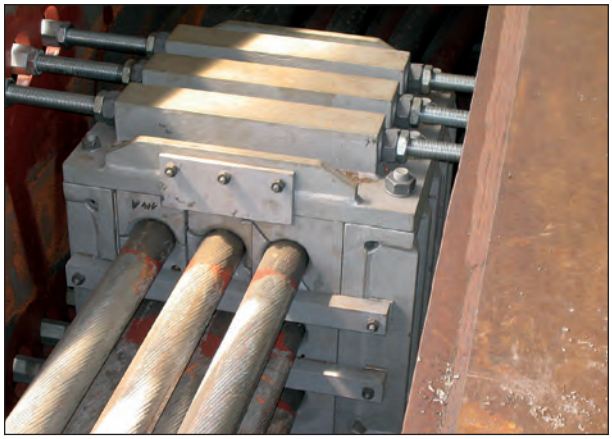


Bild 3.8: Neue Halterung der gespreizten Seile

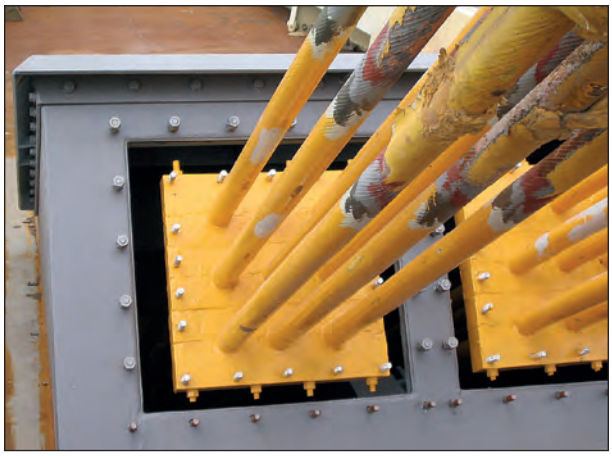


Bild 3.9: Neue Kabelhaube

Bild 3.12 zeigt beispielhaft einen gespreizten und korrodierten Bereich nach dem Auseinanderziehen und vor dem Strahlen.

Es wurden ganz erheblich lose Korrosionsprodukte gefunden, die für eine deutliche Querschnittsschwächung der betroffenen Seile sprechen, siehe Bild 3.13.

Bild 3.10: Gespreizte Kabel im unteren Bereich

Bild 3.11: Gesamtansicht

Bild 3.12: Zustand der Seile nach dem Spreizen

Bild 3.14 zeigt den gestrahlten Bereich. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Querschnittschwächung insbesondere in der Drahtmitte stattgefunden hat und zu den Drahträndern abgenommen hat, siehe Bild 3.15.

Beim Freistrahlen wurden nur ganz vereinzelte Drahtbrüche, wie in Bild 3.16 erkennbar, festgestellt.

Bild 3.13: Starke Korrosion mit Blattrost

Bild 3.14: Zustand nach dem Strahlen

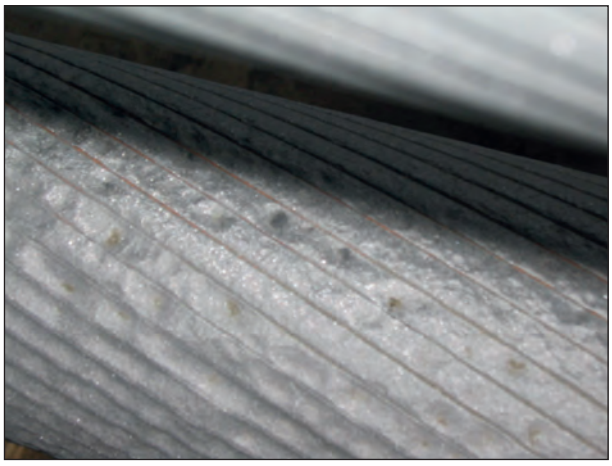


Bild 3.15: Detailaufnahme

Bei der Spreizung wurde weiterhin festgestellt, dass nicht alle Seile geleichermaßen betroffen waren und bei den angegriffenen Seilen die Abrostungen nicht über dem gesamten Querschnitt gingen, siehe Bild 3.17.

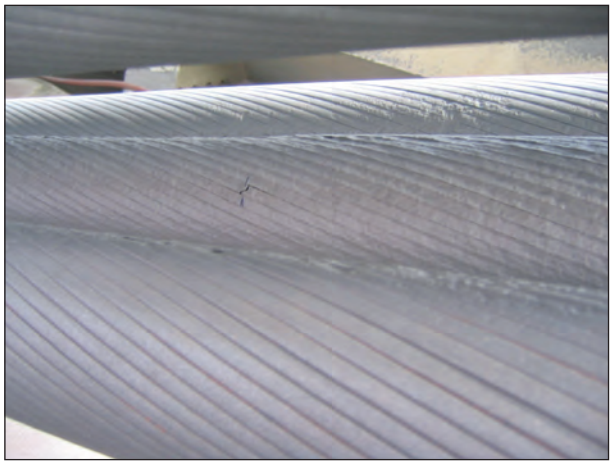


Bild 3.16: Drahtbruch im freigestrahlten Bereich

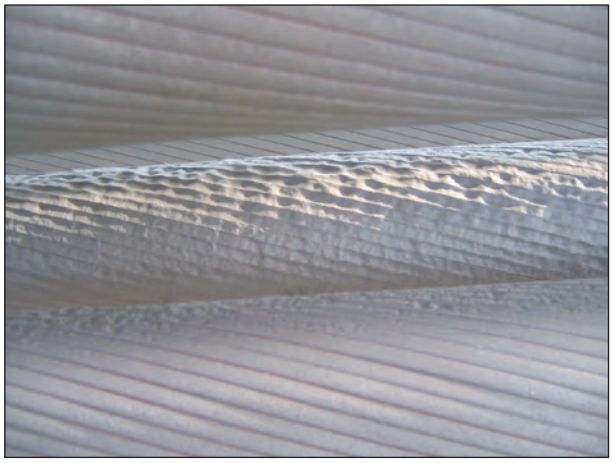


Bild 3.17: Verteilte korrodierte Bereiche bezogen auf den Seilquerschnitt

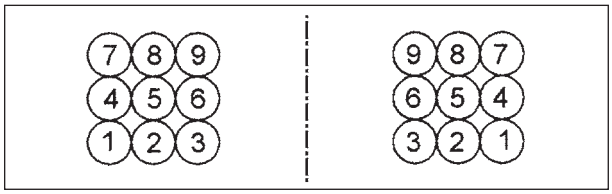


Bild 3.18: Anordnung der Seile vor dem Spreizen

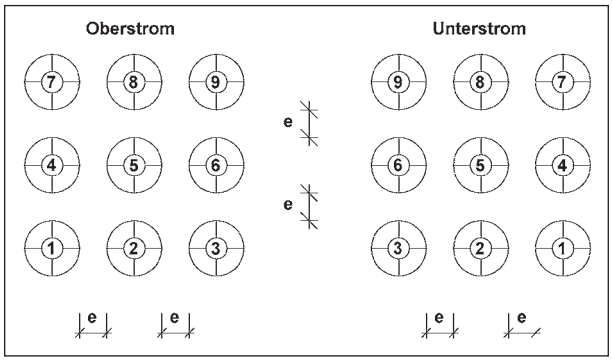


Bild 3.19: Anordnung der Seile nach dem Spreizen

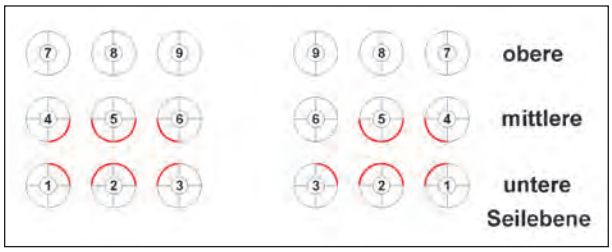


Bild 3.20: Bereiche mit starker Korrosion

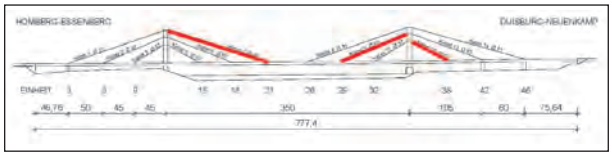


Bild 3.21: Betroffene Seile mit Korrosion

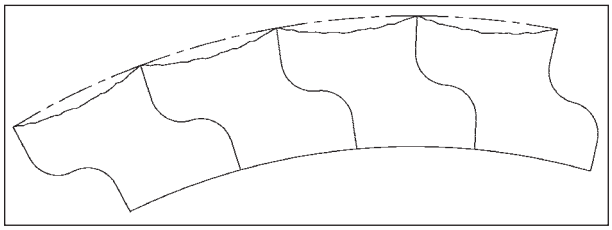


Bild 3.22: Typische Erscheinung der Muldenkorrosion an Z-Drähten

Nennenswerte Korrosion wurde bauweisenbedingt an den inneren Berührungsflächen der Seile festgestellt und zwar in den unteren Bereichen. Bild 3.18 zeigt die enganliegende Konfiguration der Seile vor dem Spreizen mit den jeweiligen Berührungsflächen, Bild 3.19 zeigt die auseinandergezogene neue Lage.

Im Bild 3.20 ist dargestellt, wo die stark korrodierten Bereiche waren, dies waren die gemeinsamen Berührungsflächen der unteren und der mittleren Lage.

Grundsätzlich waren auch nicht alle Kabel betroffen, sondern die Kabel Nr. 7, 9 und 12, siehe Bild 3.21.

Die z. T. starke Korrosion führt zu flächigem Materialabtrag mit muldenförmiger und z. T. narbenartiger Oberfläche mit einem Materialabtrag bis zu 2 mm im Bereich lokaler Narben. Bild 3.15 zeigt dies vor Ort und Bild 3.22 zeigt skizzenhaft die Form der Materialabtragung, die Ränder von den einzelnen Drähten waren deutlich geringer geschädigt.

Der mittlere Materialabtrag wurde bei den am stärksten korrodierten Seilen anhand von stichprobenartigen Messungen mit 1 – 1,5 mm über maximal den halben Umfang eines Einzelseiles abge-

schätzt. Eine genaue Ermittlung der verbliebenden Restfläche war aufgrund der gegebenen örtlichen Verhältnisse nicht möglich.

Visuell konnte keine lokale Vergrößerung der Seildurchmesser infolge inneren Treibrostes festgestellt werden.

Für die weitere Beurteilung wurde davon ausgegangen, dass nur die äußere Drahtlage durch Korrosion geschädigt wurde. Dafür spricht die muldenartige Form des Korrosionsabtrags, die auf einen intakten Korrosionsschutz an den Kontaktflächen der Drähte der äußeren Drahtlage schließen lässt.

Die der Witterung ausgesetzten von außen sichtbaren Seilflächen des Seilbündels wiesen nahezu keine Korrosionsschäden auf.

Es wurden folgende Drahtbrüche festgestellt:

- Kabel Nr. 7
  - Seil Nr. 1 Oberstrom, 2 Brüche,
  - Seil Nr. 2 Oberstrom, 3 Brüche.
- Kabel Nr. 12
  - Seil Nr. 8 Oberstrom, 1 Bruch.
- Kabel Nr. 9
  - keine Brüche.

Die Lage der Drahtbrüche korrespondierte nicht mit Stellen größerer abtragender Korrosion oder starker Narbenbildung

Die gebrochenen Drähte lagen alle im Verbund, d. h. die Spalte zwischen den Drahtenden sind klein, da die Drähte in kurzer Entfernung von der Bruchstelle durch Reibung die Kraft wieder aufnehmen. Heraustretende Drähte wurden nicht beobachtet.

Beim Abstrahlen der Seile in den oberen Bereichen wurden weitere Drahtbrüche durch den Landesbetrieb festgestellt, die jedoch ebenfalls nicht im korrodierten Bereich lagen und teilweise mit verschiedenen Materialien ausgefüllt waren.

Die Häufung der Drahtbrüche beim Kabel 7 kann in Zusammenhang mit den 1971 festgestellten Schwingungen gesehen werden. Kabel 14 und Kabel 7 sind hinsichtlich ihrer Eigenfrequenz (bei Eigengewicht f [HZ] = 0,74 bzw. 0,63) und ihrer Ausrichtung vergleichbar, sodass auch Kabel 7 neben dem beobachteten Kabel 14 geschwungen haben

Bild 3.23: Seilkopplungen zur Reduzierung der freien Länge

muss. Durch solche Schwingungen mit gleichzeitigem Anschlagen der Seile an die Kabelhauben können solche Drahtbrüche hervorgerufen worden sein.

Nach der Spreizung der Seile wurde festgestellt, dass die auseinandergezogenen Seile in den einzelnen längeren Seilabschnitte anfingen, bei Regen-Wind zu schwingen.

Zur Behebung des Phänomens wurden zusätzliche Seilkopplungen, siehe Bild 3.23, eingebaut.

Bei den durchgeführten Untersuchungen wurden zunächst die Korrosionsprodukte analysiert. Bei allen untersuchten Korrosionsprodukten wurden Chloride und auch Sulfate festgestellt. Chloride und Sulfate wirken sich beschleunigend auf den Korrosionsvorgang aus. Bei den Korrosionsprodukten aus den Kabeln 7 und 12 waren die Chlorid- und Sulfatanteile höher als bei der Probe aus Kabel 9.

Die Kabel 7 und 12 besitzen die gleiche Ausrichtung hinsichtlich der Windanströmrichtung. Es besteht die Vermutung, dass korrosive Feuchtigkeit durch die Anströmung dieser Seile von unten in die Seilzwischenräume hineingebracht wurde und sich in den unteren Bereichen angesammelt hat.

Durch die Kabelverbindungsstäbe wurden die Seile an diesen Stellen so zusammengehalten, dass diese Wasseransammlungen nicht abfließen konnten.

Weiterhin wurden Tragfähigkeitsuntersuchungen durchgeführt, Auf der sicheren Seite liegend wurde für die Seile der Kabel Nr. 7 und 12 eine rechnerische Abrostung von 1,0 mm über den gesamten Umfang angesetzt. Für das Kabel Nr. 9 erübrigten sich rechnerische Nachweise, da für dieses Kabel Seile mit deutlich größerem Querschnitt als statisch erforderlich gewählt wurden und die Spannungen

unter Volllast deutlich geringer sind als in den übrigen Seilen. Für die Seile (d = 81 mm) von Kabel Nr. 7 ergibt sich bei einer rechnerischen Abrostung von 1,0 mm über den gesamten Umfang eine Reduktion der Querschnittfläche von 5,6 %. Für die Seile (d = 57 mm) von Kabel Nr. 12 ergibt sich bei einer rechnerischen Abrostung von 1,0 mm über den gesamten Umfang eine Reduktion der Querschnittsfläche von 7,9 %. Für die festgestellten Drahtbrüche wurden ebenfalls Querschnittsreduktionen ermittelt. Für die Beurteilung der Resttragsicherheit werden die auf der Grundlage der Mindestbruchkraft ermittelte zulässige Spannung von 630 N/mm² nach DIN 18800 als maßgebende Spannung angesetzt. Die wirklichen Bruchlasten liefern etwa 5-10 % größere zulässige Spannungen. Da nach den vorliegenden Unterlagen, abweichend von den Forderungen der DIN 18809, die Bruchkräfte ohne vorhergehende Dauerschwingungsversuche ermittelt wurden, wurden die höheren zulässigen Spannungen rechnerisch aber nicht angesetzt.

Für die betrachteten Seile ergeben sich somit folgende Beanspruchungen:

- Seil (d = 57 mm/Kabel Nr. 12):
  - σ_{max} = 646 N/mm^2 = 1,03 • σ_{zul}.
- Seil (d = 81 mm/Kabel Nr. 7):
  - σ_{max} = 648 N/mm^2 = 1,03 • σ_{zul}.

Bei den getroffenen Annahmen für die Abrostung über den gesamten Seilumfang von 1,0 mm ergaben sich bei den untersuchten Seilen bei Ansatz der Restquerschnitte keine Sicherheitsdefizite für die Tragfähigkeit des maßgebenden Einzelseiles. Die geringfügigen Überschreitungen der zulässigen Spannungen wurden durch den Bauherrn akzeptiert.

Zudem ist für die Standsicherheit des Bauwerkes die Tragfähigkeit des Kabels, bestehend aus 2 x 9 Seilen, von Bedeutung. Die Querschnittsschwächung des Kabels bzw. des Seilbündels (bestehend aus 9 Seilen) ist jedoch erheblich kleiner als die Querschnittsschwächung des maßgebenden Einzelseiles. Somit sind weitere Tragreserven vorhanden.

Die Dauerhaftigkeitsuntersuchungen konnten aufgrund der fehlenden Kennwerte von Kerbfällen für korrodierte Seile nicht durchgeführt werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass es folgende Ursachen für die Korrosion an den Seilen gab:

- konstruktive Anordnung der Seile als kompaktes, von oben und seitlich durch Kitt verschlossenes Bündel,
- untere Öffnungen zwischen den Seilen, sodass für die Kabel keine geschlossene Hülle entstand,
- Kabelverbindungsstellen, die sehr wahrscheinlich Wasseransammlungen zur Folge hatten,
- Umwelteinflüsse, Feuchtigkeit mit hohem Gehalt an Cloriden und Sulfaten.

Die Drahtbrüche zeigten keinen Zusammenhang mit der festgestellten Korrosion und wurden möglicherweise durch frühere Seilschwingungen verursacht.

Strassen.NRW entschied sich zu folgenden Instandsetzungsmaßnahmen:

1. Dauerhafte Spreizung der Seile zur Verbesserung der Belüftung und Prüf- und Wartungsmöglichkeiten,
2. Erneuerung der Seilbeschichtung nach Strahlen der Oberflächen.

Die Seilmittelpunkte wurden um 160 mm auseinandergezogen, somit ergibt sich je nach Durchmesser der Abstand e (siehe Bild 3.19) mit:

- für d_{min} = 57 mm; e = 160 - 57 = 103 mm,
- für d_{max} = 83 mm; e = 160 - 83 = 77 mm.

Ein größerer Abstand der Seile, der ggf. auch eine Kamerabefahrung der Einzelseile ermöglicht hätte, war konstruktiv nicht umsetzbar.

Die ungeklärte Frage nach der Restlebensdauer der Einzelseile gab den Auslöser für das hier beschriebene Forschungsvorhaben.

3.2 Rheinbrücke Flehe

Die Rheinbrücke Flehe (siehe Bild 3.24) überführt die A 46 über den Rhein und verbindet die Städte Neuss und Düsseldorf miteinander.

Die Brücke wurde 1979 dem Verkehr übergeben. Sie ist als eine einhüftige Mittelträger-Schrägseilbrücke gebaut worden. Der am linken Rheinufer stehende Stahlbetonpylon ist ca. 146,5 m hoch. Die Gesamtlänge der Rheinbrücke beträgt 552,25 m, die Hauptöffnung über dem Rhein beträgt 368 m, siehe Bild 3.25).

Bild 3.24: Rheinbrücke Flehe

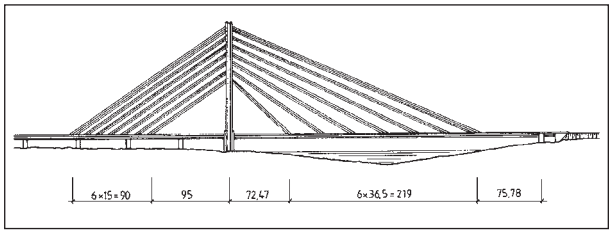


Bild 3.25: Längsschnitt der Brücke

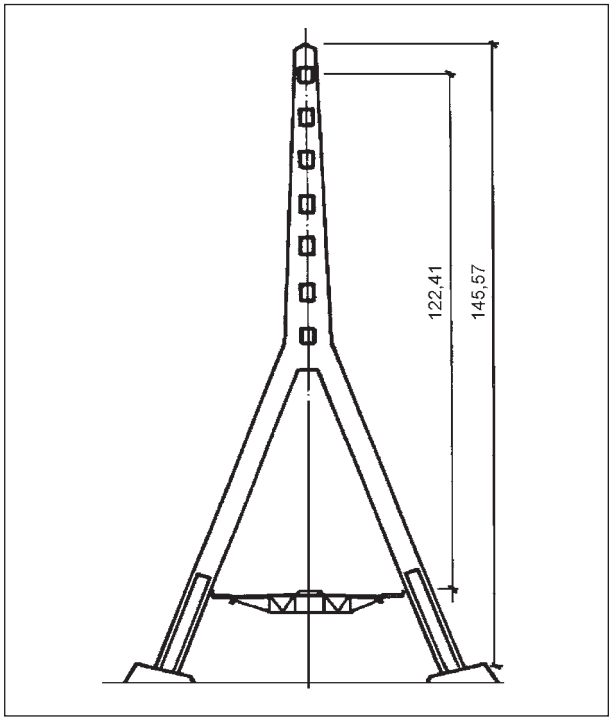


Bild 3.26: Pylonquerschnitt der Brücke

Bild 3.26 zeigt den Querschnitt der Brücke mit dem Pylon und den Seileinläufen. Der Versteifungsträger besteht aus einem dreizelligen Stahlhohlkasten mit einer orthotropen Fahrbahnplatte. Die Ausbildung der Fahrbahnpatte entspricht dabei der heutigen Bauweise.

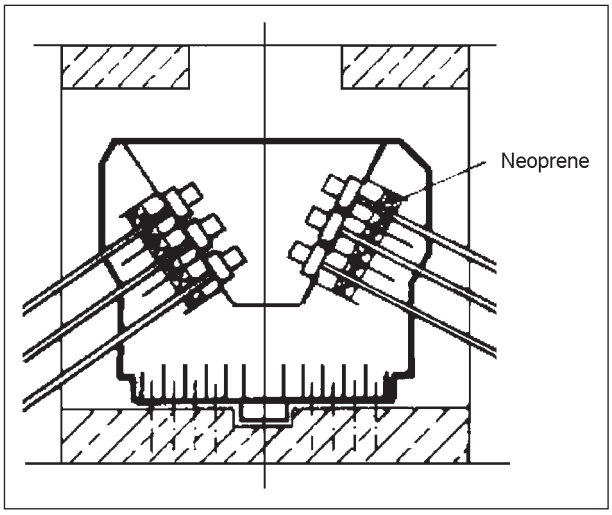


Bild 3.27: Verankerung im Pylonkopf

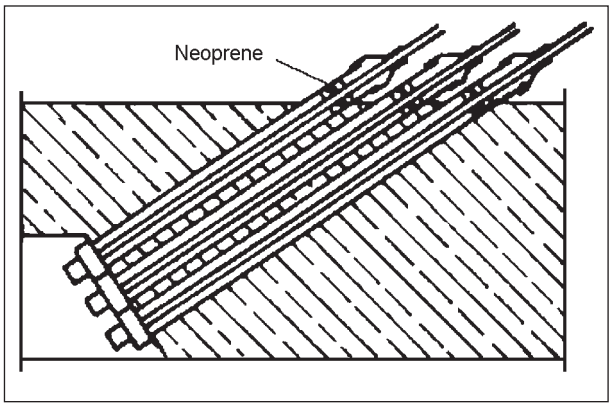


Bild 3.28: Verankerung in der Vorlandbrücke

Die Seile sind im Pylon und im Versteifungsträger oder aber im Widerlager verankert, somit ist hier ein Seilaustausch möglich, Bild 3.27 zeigt die Verankerung der Seile im Pylonkopf.

In den unteren Bereichen gibt es zum einen die Verankerung im Bereich der Vorlandbrücke, die eine Stahlbetonbrücke ist, siehe Bild 3.28.

Im Bereich der Stromöffnung erfolgt die Verankerung zum anderen in der Stahlbrücke, siehe die schematische Darstellung in Bild 3.29.

Bild 3.30 gibt die Seilbezeichnungen und die Seildurchmesser an. Die Spiralseile sind in 7 Gruppen angeordnet und haben Durchmesser von 93, 97, 101, 105 und 111 mm.

Die Seile wurden von zwei verschiedenen Herstellern geliefert, die Seile mit den Durchmessern von 111 und 101 mm lieferte Trefil-Arbed (Arbed Felten+ Guilleaume, Köln), alle übrigen Seile lieferte Thyssen Draht (Hamm).

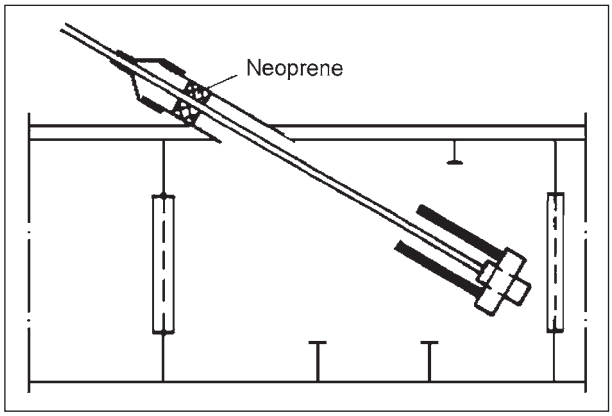


Bild 3.29: Verankerung in der Strombrücke

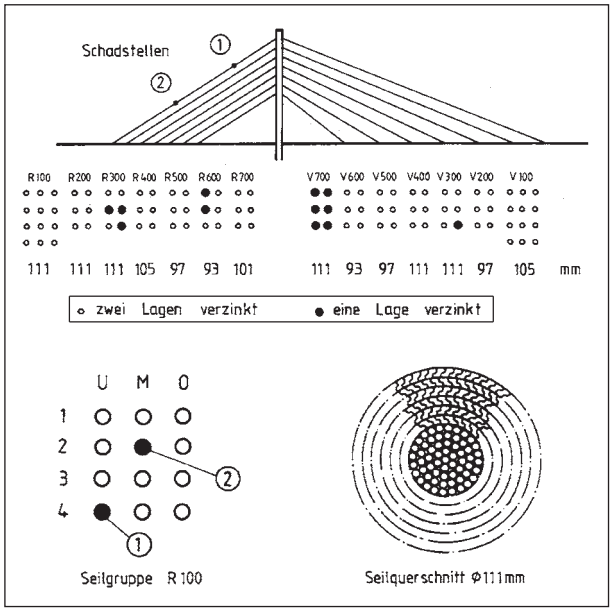


Bild 3.30: Übersicht über Seile der Rheinbrücke Flehe mit Angabe der schadhaften Seile (Bildquelle: Gutachten Boué)

Bei der Rheinbrücke Flehe wurde nicht die sonst übliche Beschichtung mit Bleimennige aufgebracht, sondern ein neu entwickeltes Beschichtungssystem mit Polyurethan.

Eine weitere Besonderheit ist die Tatsache, dass es Seile mit einer feuerverzinkten Formdrahtlage gibt und Seile, die zwei Lagen feuerverzinkte Formdrähte aufweisen.

Die Drähte wurden beim Verseilen durch Bleimennige auf Leinölbasis gezogen.

Die Schädigung einiger Seile begann bereits bei der Montage der Brücke, sie wird im folgendem kurz zusammengefasst.

Bereits bei der Erstbeschichtung der verzinkten Seile sind Probleme mit der Haftung der Beschichtungen aufgetreten. Inwieweit die neue Beschichtungsart und das verwendete Seilverfüllmittel auf Bleimennige-Basis zu Unverträglichkeiten geführt haben, konnte nicht abschließend geklärt werden. Es gibt aber Hinweise in den Bauakten hierzu, die in [12] aufgeführt werden, so z. B. der nachfolgende Absatz aus der Bauakte:

„Es ist daher von Bedeutung, die Zinkoberfläche gründlich zu reinigen. Geringe Mennigereste in den Nuten zwischen den äußeren Einzeldrähten beeinträchtigen die Qualität des Korrosionsschutzes nicht."

Weitere Hinweise bezogen sich auf die schwere Verarbeitbarkeit der Beschichtungsstoffe.

Während der Montage wird in dem Bautagebuch auch von festgestellten sechs Drahtbrüchen berichtet, die vor dem Beschichten abgeklebt und die Fugen mit ZnCr-Spachtel ausgefüllt wurden.

1986 wurden bei einer Seilprüfung Schäden in der Beschichtung festgestellt, die 1987 behoben wurden. Bei dem Entfernen der Beschichtung sollten scharfe Spachtel und Schleifpapier benutzt werden, bei Rostflächen sollten rotierende Drahtbürsten eingesetzt werden, jedoch keine Topfbürsten. Die Verzinkung durfte nicht beschädigt werden. Bei der Instandsetzung wurde festgestellt (nachfolgende Angaben wurden [12] entnommen), dass 6 Seile von R 100 Drahtbrüche innnerhalb von 3 m insgesamt 20 Drahtbrüche aufwiesen. Von unten bis auf 70 m befinden sich davon 10 Drahtbrüche in der äußeren Lage und verteilen sich auf zwei Drähte (1 x 8, 1 x 2). Ein Drahtbruch war verkittet. Das typische Drahtbruchbild hat eine Lücke von rd. 5 mm und die Zinkschicht ist intakt. Visuell werden auf der Strecke Beschichtungsabhebungen mit schwachem Rostangriff an den Drähten festgestellt. Im Allgemeinen wurde eine leichte Welligkeit und Ungleichförmigkeit der Beschichtung festgestellt, sowie abblätternde Deckbeschichtung; hier vor allem auf den Fahrseilen 1o und 1u, an denen Gerüste gehangen haben. Die darunterliegende Verzinkung wies keine Schäden auf.

1990 wurde bei der Bauwerksprüfung festgestellt, dass die Beschichtung sehr ungleich über den Umfang war und Fehlstellen aufwies. Wo keine Beschichtung mehr vorhanden war, entstand Weiß- und Flächenrost, teilweise auch Spaltkorrosion. Bei Unterrostungen hatte sich Lochfraß gebildet. In der Nähe der Stoßdämpfer wurden mechanische Verletzungen entdeckt. Die Anzahl der festgestellten

Drahtbrüche nahm im Laufe der Zeit immer mehr zu, siehe Bild 3.31 und Bild 3.32.

Insgesamt wird der Zustand aller Seile durch die DMT-Seilprüfstelle Bochum 1990 in ihrem Gutachten (DMT-Gutachtens Nr. 9272/23.10.1990) wie folgt beschrieben:

„Über weite Seilstrecken ist die Korrosionsschutzbeschichtung noch wirksam. An einigen Stellen wurden Ausbesserungen vorgefunden. Die Beschichtung war weitgehend allseitig geschlossen und haftete überwiegend gut an den Seilen. Hierbei besaß das Beschichtungssystem eine noch ausreichende Elastizität. In solchen Bereichen wurden keine Korrosion des Zinküberzuges oder gar der Drähte selbst gefunden.

Allerdings waren die Korrosionsschutzbeschichtungen bei allen Seilen sehr ungleichförmig um den Seilumfang oder auch lückenhaft aufgetragen; Tropfnasen, Farbverdickungen und Hartfarbeinschlüsse sind an fast allen Seilen in unterschiedlicher Stärke und Ausprägung gefunden worden ... .“

Seil Nr.	1984 1)	1986 2)	1990 3)	1996 4)
R100 1 o	39, 47, 51, 53, 55, 61, 66, 76 112, 160, 162, 164, 176, 178, 204 [15]	119, 132 [17]	146, 150, 177 [20]	[20]
1 u	109, 151*, 159 [3]	79, 133 [5]	151 „kein Drahtbruch“ [4]	[4]
2 o	106, 138, 204, 211 [4]	[4]	K = 182 – 185 [4]	150, 202 K = 184 – 187 [6]
2 m	13, 197, 212, K = 185 – 187 [3]	[3]	45, 155, 157, 195 K = 183 – 185 [7]	196, K = 185 – 187 [8]
3 m	15, 29, 41, 43, 47, 51, 53, 54, 55, 69, 70, 94, 111, 114, 120, 128, 149, 160, 174, 181 [20]	5 [21]	56 [22]	30 [23]
4 o	96 [1]	[1]	[1]	[1]
Gesamtzahl der Drahtbrüche	46	51	58	62

Die Ziffern bezeichnen die am jeweiligen Seil gemessene Entfernung von der unteren Gummimanschette (Seilabdichtung).
Unterstreichung = Drahtbruch in Decklage, visuell identifiziert.
K = starke Korrosion
[n] = Anzahl der Drahtbrüche
* = innen ?

Bild 3.31: Übersicht über Drahtbrüche in der Seilgruppe R 100 [12]

R300	Ø 111 mm	1u, 2o, 3o je 1 Drahtbruch	= 3 Drahtbrüche
R700	Ø 101 mm	1o, 2o, 3o, 3u je 1 Drahtbruch	= 4 Drahtbrüche
V100	Ø 105 mm	1o = 3,2 m = 17, 3u = 2,4 m = 1	= 23 Drahtbrüche
V200	Ø 97 mm	1o = 2	= 2 Drahtbrüche
		zusammen	= 32 Drahtbrüche

Bild 3.32: Übersicht über Drahtbrüche in den anderen Seilgruppe [12]

„Abschnittweise wurden Anzeichen für erhebliche Abweichungen von den Behandlungsvorschriften für das Auftragen von Korrosions-Schutz-Beschichtungen gefunden. In Bereichen mit Beschädigungen, Unwirksamwerden oder unsachgemäßem Auftragen des Korrosionsschutzes wurden Korrosionsstellen in unterschiedlicher Ausbildung gefunden:

- Verbrauch der Verzinkung,
- flächenhafte Korrosion im Bereich mechanischer Beschädigungen,
- Spaltkorrosion,
- Unterrostungen mit Lochfraßbildung ... .“

„Während die Seile der Gruppen R 700 und V 700 eine als gut zu bezeichnende Korrosionsschutzbeschichtung aufwiesen, die lediglich in geringem Maße eine Verkreidung der Deckbeschichtung zeigte, ist die Qualität der Beschichtung fast aller übrigen Seile so, daß von gut bis schlecht an einem Seil alle Abstufungen vorgefunden werden.

In fast allen Seilen wurden Unregelmäßigkeiten und Auffälligkeiten in unterschiedlicher Ausprägung an dem Korrosionsschutzsystem gefunden ... .“

Die Bilder 3.33 bis 3.42 zeigen exemplarisch einige der Schäden an den Seilen. Die Untersuchungen wurden von einem entsprechend großen Steiger aus gemacht.

Bild 3.33: Steiger an der Brücke im Einsatz (Bild: Boué Ingenieure)

Bild 3.34: Typischer Schaden

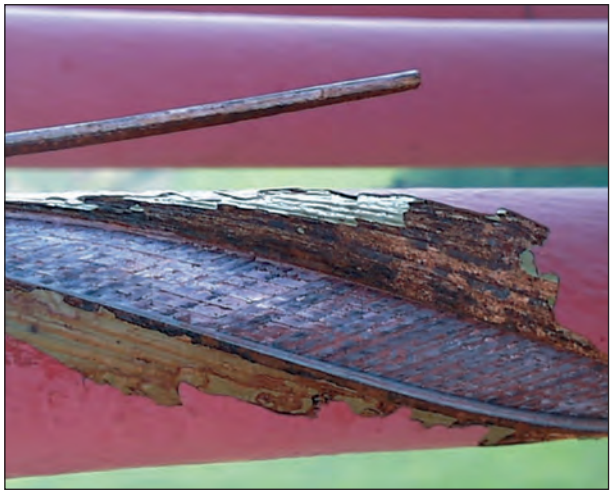


Bild 3.35: Drahtbrüche und Korrosionserscheinungen

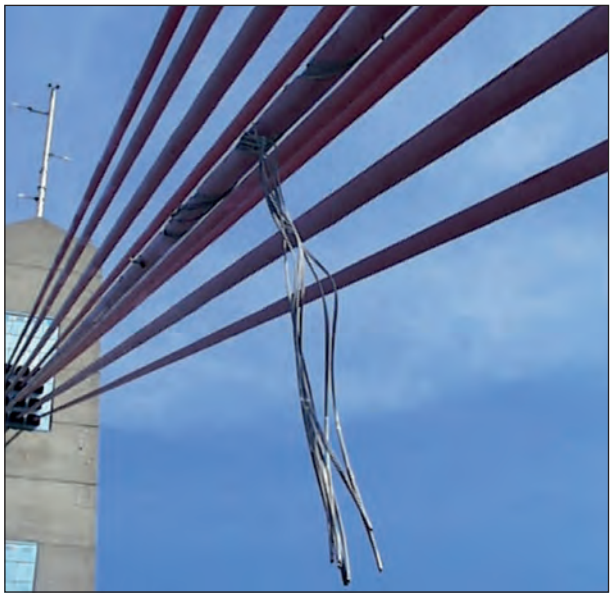


Bild 3.36: Seil nach Spleißen einzelner Drähte

Bild 3.37: Drähte aus dem Verbund gelöst

Bild 3.38: Verbund über 5 Schläge gelöst

Bild 3.39: Schadensstelle mit Abhebungen und Unterrostungen

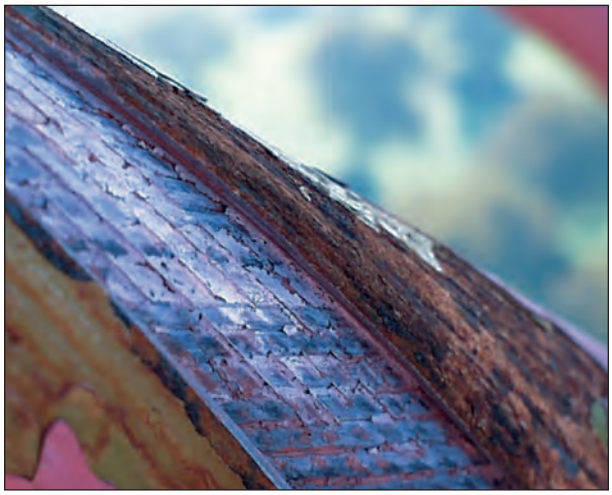


Bild 3.40: Detailbild zum Schaden

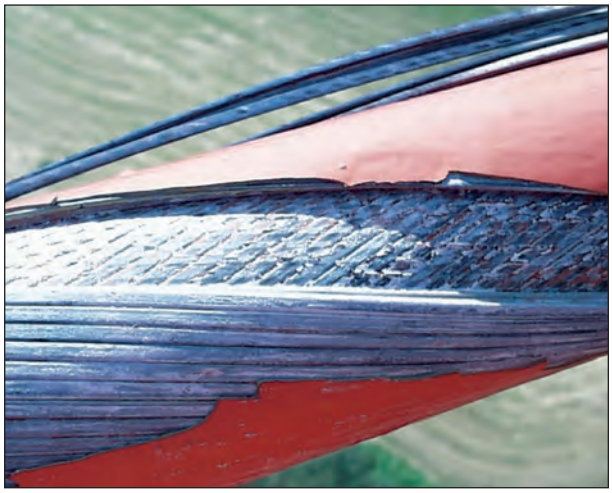


Bild 3.41: Schadenstelle mit Abschälungen, Weißrost, Rost und Reibspuren

Bild 3.42: Schadstelle mit stark korrodierten Drähten

Folgende Schlussfolgerungen konnten aus den Schäden gezogen werden:

1. Bereits bei der Erstbeschichtung der verzinkten Seile sind Probleme mit der Haftung der Beschichtungen aufgetreten.
2. Die Beschichtung wurde z. T. mechanisch (!) entfernt und eine Neubeschichtung durchgeführt, die später stellenweise ausgebessert wurde.
3. Offensichtlich hat sich auch diese Beschichtung von dem Seil in Form einer zusammenhängenden Hülle gelöst, sodass sich zwischen Hülle und Seil ein eigenes korrosives Klima bilden könnte. Voraussetzung hierfür ist, dass die Hülle Verletzungen aufweist, sodass Feuchtigkeit eintreten kann. Die Hülle war aber in weiten Teilen so intakt, dass es nicht zu einem Abtrocknen kommen konnte.
4. In diesem Klima ist der restliche Zinküberzug durch Korrosion abgetragen worden, und die Korrosion erfasste die Außendrähte (Z-Drähte) am gesamten Umfang.
5. Es kam zu Drahtbrüchen, nicht nur vereinzelt, sondern auch in Form von 2, 3 oder mehr Drahtbrüchen nebeneinander, die zu einem Spleißen der Drahtenden aus der verschlossenen Außenlage und dem Herabhängen von Drahtlocken vom Seil geführt haben.
6. Aufgrund von Mikrountersuchungen wurden die Drahtbrüche mit wasserstoffinduzierter Spannungsrisskorrosion in Zusammenhang gebracht.
7. Die der Witterung ausgesetzten verzinkten Drähte unter den gespleißten Außendrähten zeigen keine Korrosionserscheinungen.
8. Längs der geschädigten Seile sind auch Drahtbrüche bekannt, die nicht zum Spleißen geführt haben.
9. Praktisch alle Drahtbrüche finden in den Außenlagen statt.
10. Es wird berichtet, dass an Stellen mit mehreren nebeneinanderliegenden Drahtbrüchen Kerben an den Außendrahtoberflächen vorliegen sollen. Diese Kerben werden auf die mechanische Entfernung der ursprünglichen Beschichtung durch unsachgemäßes Beschleifen mit zurückgeführt.

Durch die massive Schädigung der Seile war es erforderlich, diese auszutauschen, Details zu dieser Baumaßnahme sind in [13] und [3] beschrieben.

3.3 Rheinbrücke Emmerich

Die Rheinbrücke Emmerich überführt die Bundesstraße 220 von Kleve nach Emmerich über den Rhein. Die Brücke wurde von Mai 1962 bis September 1965 gebaut.

Sie wurde als echte Hängebrücke und reine Stahlkonstruktion gebaut und hat mit 500 m die längste Spannweite in Deutschland. Die Gesamtlänge der Brücke einschließlich der Vorlandbrücken beträgt 1.227,75 m.

Die Rheinbrücke hat eine Breite zwischen den Schrammborden von 14,92 m und überführt pro Richtungsfahrbahn einen Fahrstreifen mit Seitenstreifen. Außerhalb der Hänger- und Tragseilebene sind die außenliegenden Geh- und Radwege angeordnet.

Die Fahrbahntafel besteht aus einer orthotropen Fahrbahnplatte mit Sektkelchprofilen und mit einem Querträgerabstand von 2,53 m. In der Mittelöffnung ist unterhalb der Brücke ein Windverband angeordnet.

Die Bilder 3.43 bis 3.45 zeigen eine Ansicht, Draufsicht und Querschnitte der Brücke.

Das Haupttragsystem besteht aus einem Versteifungsträger, der als ein Fachwerkträger ausgebildet wurde, den 76,7 m hohen Pylonen (siehe Bild 3.46), die in Querrichtung durch einen Querriegel verbunden sind und dem Tragkabel.

An dem Tragkabel sind in einem Abstand von ca. 15,15 m Hängerseile angebracht, die ebenfalls aus vollverschlossenen Seilen mit einem Durchmesser von 37 bzw. 42 mm bestehen. Diese Hän-

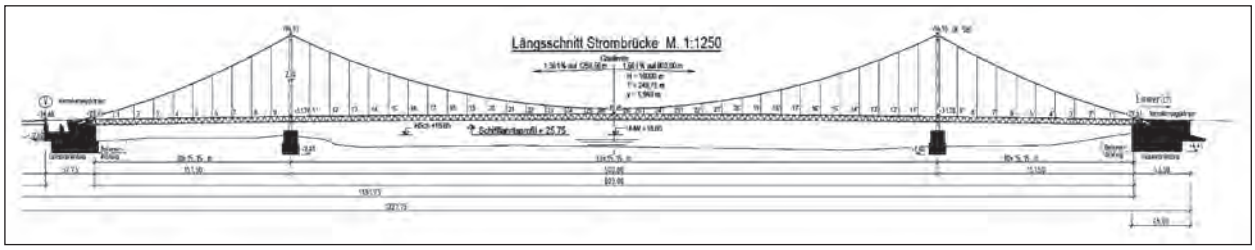


Bild 3.43: Ansicht der Rheinbrücke Emmerich (ohne Vorlandbrücken)

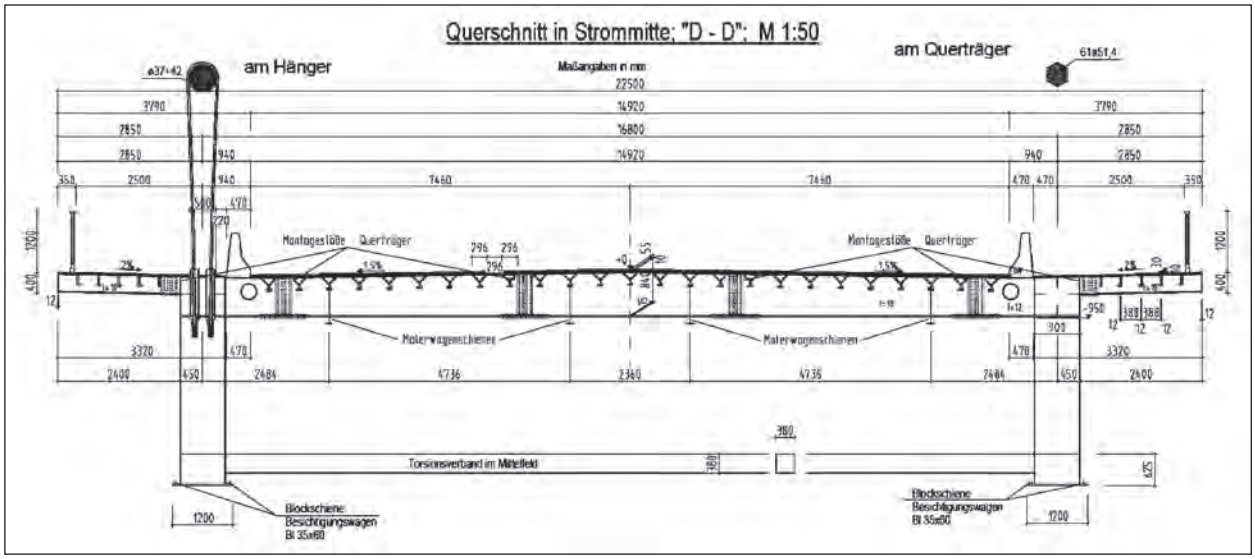


Bild 3.44: Querschnitt der Rheinbrücke Emmerich

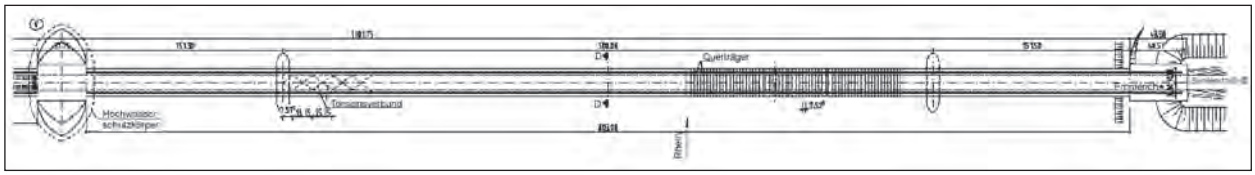


Bild 3.45: Draufsicht der Rheinbrücke Emmerich

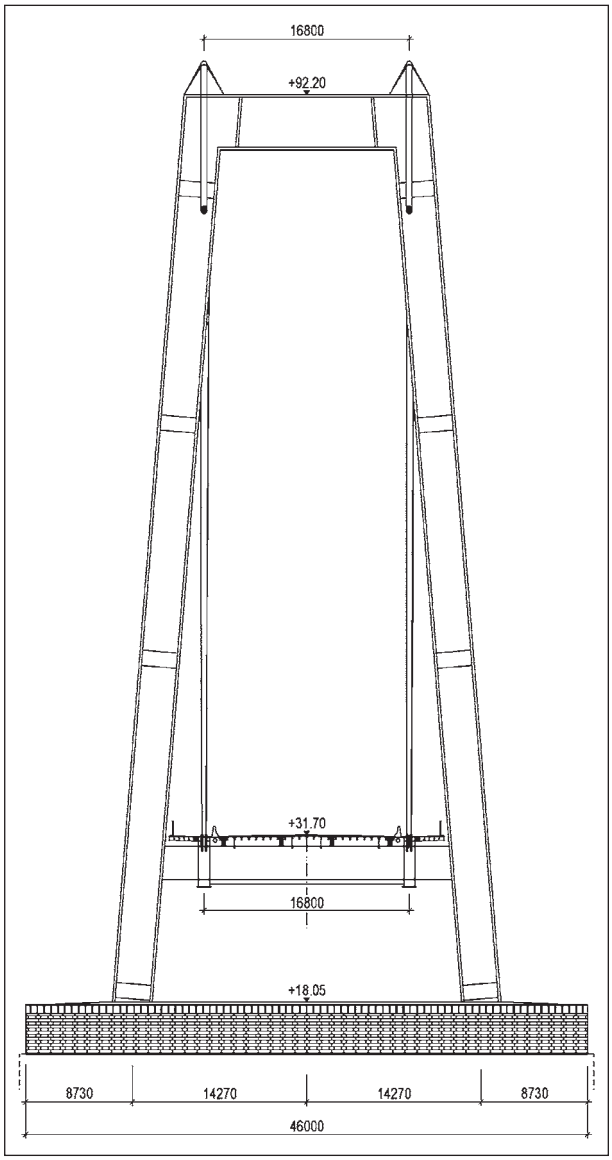


Bild 3.46: Querschnitt im Pylonbereich

Bild 3.47: Ansicht der Hängerseile in Brückenmitte

gerseile werden über das Tragkabel umgelenkt und im Brückendeck verankert, siehe Bild 3.47.

Jeder Hänger besteht somit aus zwei umgelenkten Seilen. Die Bilder 3.48 und 3.49 zeigen die obere Umlenkstelle, die um das Tragkabel geführt wird.

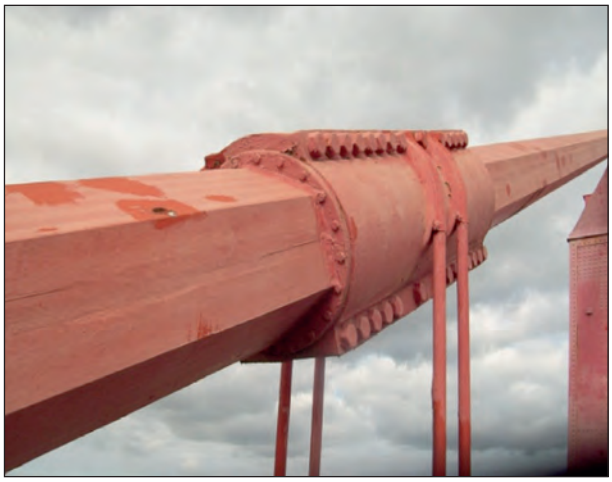


Bild 3.48: Umlenkung der Hängerseile um das Tragkabel

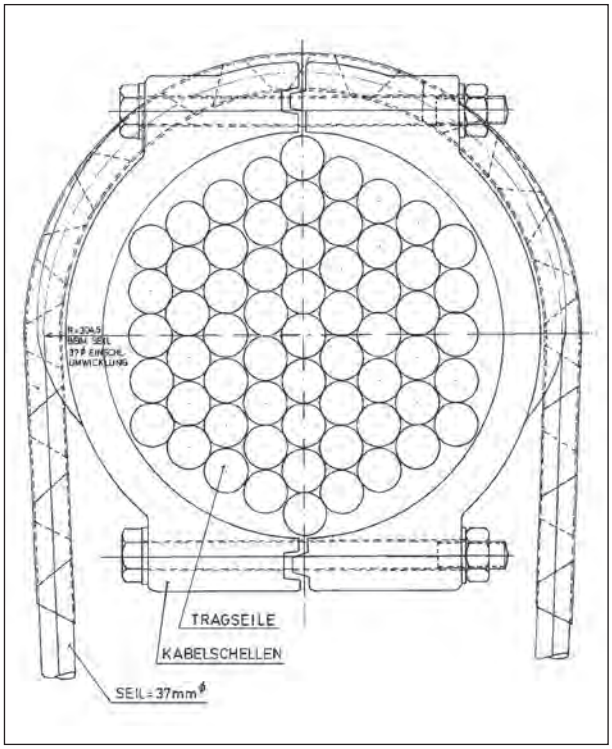


Bild 3.49: Querschnitt durch das Tragkabel mit der oberen Umlenkung

Die Bilder 3.50 und 3.51 zeigen die untere Verankerung, die durch das Brückendeck hindurchgeführt wird.

Das Tragkabel besteht aus 61 vollverschlossenen Seilen, die kreisförmig zu dem Hauptkabel angeordnet sind. Der Durchmesser der Einzelseile beträgt 51,4 mm.

Entgegen der heutigen Vorgehensweise bei der Herstellung von vollverschlossenen Seilen sind alle Seile und die Einzeldrähte der Rheinbrücke Emmerich unverzinkt.

Bild 3.50: Verankerung der Hängerseile unterhalb des Brückendecks

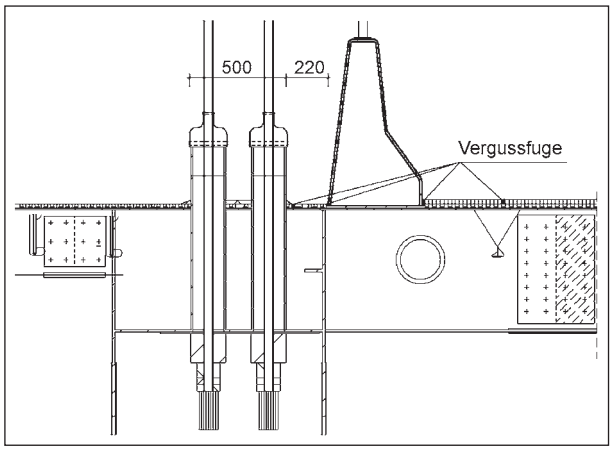


Bild 3.51: Querschnittsskizze zur Verankerung der Hängerseile im Brückendeck

Die Seile sowohl für die Hänger als auch für das Tragkabel wurden mit zwei Grund- und zwei Deckbeschichtungen auf Phtalatharzgrundage versehen. Die Grundbeschichtungen auf Phtalatharzgrundlage enthalten Bleimennige, die Deckbeschichtungen Eisenglimmer.

Die gesamte Schichtdicke des Korrosionsschutzes beträgt 160 µm. Ausnahme bildet hier ein inzwischen ausgetauschtes Hängerseil (Nr. 4).

Die ersten Schadensfälle wurden bereits 1975 bei einer Bauwerksprüfung entdeckt und waren z. T. konstruktiv bedingt sowie durch eine unsachgemäße Behandlung verursacht.

Der beschriebene Schadensfall hinsichtlich der Korrosionsschäden an den Hängerseilen betrifft den Durchdringungspunkt der Hänger durch das Brückendeck, siehe Bild 3.52. Zum Schutz der Seilverankerungskonstruktionen in diesem Bereich gegen eindringendes Oberflächenwasser waren Abdeckhauben mit Gummidichtung eingebaut worden.

Bild 3.52: Ausbildung der ursprünglichen Abdeckhauben

Bild 3.53: Korrosionsschäden im Bereich der Abdeckhauben (ausgebaute Hängerseile)

Bild 3.54: Detailaufnahme eines Korrosionsschadens

Im Laufe der Zeit erwiesen sich die Abdeckungen als unzureichend, sodass Wasser und Schmutz eindringen konnte, was zu einer entsprechenden Korrosion in diesen Bereichen führte.

Neben einer erheblichen Narben- und Flächenkorrosion unterhalb der Abdeckhauben wurde auch Korrosion oberhalb der Abdeckhauben im frei bewitterten Bereich entdeckt, siehe Bild 3.53 und Bild 3.54.

Die bisherige Haubenkonstruktion wurde durch eine geänderte Konstruktion mit Gummihauben, welche die Hänger einzeln abdichten, ersetzt, siehe Bild 3.55.

Bild 3.55: Geänderte, heutige Abdichtung der Hängerdurchführung

Seile

4 ○○ 3

2 ○○ 1

Kleve <--- > Emmerich

Harfe 1

Vorlandbereich Emmerich - Unterstrom

Schaden Nr.	Hänger Nr.	Seil Nr.	Deckbeschichtung abgeplatzt	Beschichtung abgeplatzt UG rost	1. Drahtlage Blattrost	2. Drahtlage Blattrost	1. Drahtlage Blattrost 2. Drahtlage angerostet	beschädigte Fläche cm²	Höhe	Bild Nr.	Bild Nr.	Bemerkungen
1	1	2		x				40	7	830	831	
2	1	Schelle	x	TW				>100	7	832	833	
3	2	1		x				40	11	834	835	
4	2	Schelle	x					>100	11	836	837	
5	3	4		x				40	5	838	839	
6	3	2		x				8	4	842	843	
7	3	4			x			50	2	840	841	
8	3	2			x			50	5	844	845	
9	3	Schelle		x				>100	16	846	847	
10	4	2		x				50	5	848	849	
11	4	4		x				20	13	850	852	
12	4	4		x				40	20	853	854	
13	5	1		x				60	5	855	856	
14	5	4		x				50	18,5	857	858	
15	5	4		x				50	16,5	859	860	

Bild 3.56: Schadensdokumentation Strassen.NRW

Die bei der Bauwerksprüfung im Herbst 2012 festgestellten Schäden /U15/ wurden, in Tabellen bezogen, auf die einzelnen Harfen festgehalten, siehe Bild 3.56.

Die Schäden wurden in verschiedene Schadensstufen entsprechend des Schädigungsgrades eingestuft. Die Kategorien sind im Einzelnen:

- Kategorie 1:
  Deckbeschichtung abgeplatzt,
- Kategorie 2:
  Beschichtung abgeplatzt, Untergrund Rost,
- Kategorie 3:
  1. Drahtlage Blattrost,
- Kategorie 4:
  1. Drahtlage Blattrost, 2. Drahtlage angerostet,
- Kategorie 5:
  1. Drahtlage nicht mehr vorhanden,
  2. Drahtlage Blattrost.

Die Bilder 3.57 bis 3.62 zeigen exemplarisch die einzelnen Schadensstufen.

Es bleibt aber hier festzuhalten, dass selbst an den Seilen, wo die äußere Drahtlage durchaus auf einen Bereich von 1/3 bis 1/2 des Umfanges weggerostet ist, die Drähte bisher noch im Verbund geblieben sind. Drahtbrüche in dem korrodierten Bereich wurden nicht gefunden.

Bild 3.57: Beispiel für 1. Schadenkategorie: Deckbeschichtung abgeplatzt

Eine Bewertung solcher Schäden für die Bauzustandserfassung nach RI-EBW-Prüf und SIB BW wird in dem Kapitel 8 gegeben.

Es wurden auch 10 Seilhauben geöffnet, siehe Bild 3.63.

Aufgrund der beengten Platzverhältnisse waren weitergehende Untersuchungen hier nicht möglich. Bei einer geöffneten Stelle wurde versucht, mit einem Endoskop in die unteren Bereiche unterhalb des Deckblechs zu gelangen, dies ist aber wegen des geringen Freiraums zwischen der Seilhülse und dem Hängerseil nicht möglich gewesen.

Folgende Feststellungen konnten getroffen werden:

- die Seile weisen in diesen Bereichen keine Beschädigungen oder Korrosionsstellen auf,

Bild 3.58: Beispiel für 1. Schadenkategorie: Deckbeschichtung abgeplatzt – hier: Konzentration von Schadstellen

Bild 3.59: Beispiel für 2. Schadenkategorie: Beschichtung abgeplatzt, Untergrund Rost

- die eingesehenen Bereiche waren staubtrocken, es waren keine Schlieren oder sonstige Anzeichen von vielleicht mal vorhandener Feuchtigkeit erkennbar, somit dichten die Hauben diese Bereiche wasserdicht ab.

Weitere Seilschäden an dieser Brücke betrafen das Tragkabel. Das Tragkabel ist mit einer Kunststoffummantelung versehen. Im Tiefpunkt des Tragkabels ist diese Ummantelung nicht vorhanden, hier kommt es verstärkt zu Feuchtigkeitsaustritten, siehe Bild 3.64.

Bild 3.60: Beispiel für 3. Schadenkategorie: 1. Drahtlage Blattrost

Bild 3.61: Beispiel für 4. Schadenkategorie: 1. Drahtlage Blattrost, 2. Drahtlage angerostet

Bild 3.62: Beispiel für 5. Schadenkategorie: 2. Drahtlage Blattrost, 2. Drahtlage angerostet

Bild 3.63: Blick in den Seilbereich unterhalb der Haubenabdichtung

Bild 3.64: Feuchtigkeitsaustritt aus dem ummantelten Tragkabel an dem Tiefpunkt, hier ist keine Ummantelung

Vor der Durchführung der Instandsetzung wurde 2015 noch eine Öffnung des Tragkabels durchgeführt, hierbei sind keine besonderen Schäden im Inneren des Kabels gefunden worden.

Die rechnerischen Untersuchungen haben ergeben, dass die Hängerseile für den regulären Verkehr nach DIN 1072 Brückenklasse 60 noch ausreichend tragsicher sind. Die Querschnittsverluste infolge der Korrosion hat die ursprüngliche Sicherheit von $\nu > 3{,}00$ z. B. bei dem am stärksten geschädigten Seil auf die rechnerische Sicherheit von $\nu = 1{,}38$ reduziert. Ansonsten liegen bei den anderen geschädigten Seilen die rechnerischen Sicherheiten noch über $\nu = 2{,}00$.

Bei mehr als 70 % aller Hängerseile ist die Dauerhaftigkeit nicht mehr gegeben. Die punktuell vorhandenen Roststellen sind weitgehend ungeschützt, somit können sich die Querschnittsverluste infolge der Abrostungen weiter entwickeln. Inzwischen wurden die Roststellen der Kategorie 4 und 5 gesäubert und mit einer temporären Beschichtung versehen.

Rechnerisch konnte abgeschätzt werden, dass für den jetzigen Zustand noch ausreichende Ermüdungssicherheiten bei den geschädigten Seilen vorliegen. Hierbei kann das Auftreten von Drahtbrüchen jedoch nicht ganz ausgeschlossen werden, da die vorhandenen Kerben infolge Korrosion solche Brüche auch bei einem niedrigen Spannungszustand auslösen können.

Bei dieser Brücke ist in naher Zukunft eine Grundinstandsetzung geplant, hierbei werden die unverzinkten gegen verzinkte Hängerseile ausgetauscht.

Ohne einen Austausch wäre mittelfristig mit einer Schadenszunahme zu rechnen, es werden sich auch Drähte aus dem Verbund lösen, die Tragfähigkeit würde dann weiter reduziert werden.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die oben beschriebenen Schadensfälle hinsichtlich der Korrosion zeigen, dass die ursprünglich gewählte Beschichtung bei der Stahlkonstruktion und bei den Seilen für die Seile nicht dauerhaft ausgebildet war. Die in der Regel durch eine ordnungsgemäße Beschichtung angestrebte Lebensdauer eines Korrosionsschutzes von mindestens 30 Jahren wurde nicht erreicht.

3.4 Weitere Korrosionsschäden an Brücken mit VVS

Entsprechend vergleichbare Seilschäden sind auch von der Köhlbrandbrücke bekannt.

Eine detaillierte Beschreibung der Umstände, die zu einem Komplettaustausch aller Seile bei der Köhlbrandbrücke geführt haben, wird in [90] gegeben.

Bei den ursprünglich eingebauten Seile der Köhlbrandbrücke (Durchmesser zwischen 54 und 104 mm) wurden die inneren Hohlräume mit Leinölbleimenninge (Stoffnummer 5634.35 der TL 918300) verfüllt und die Seile selber mit einem temporären äußeren Korrosionsschutz (Stoffnummer 4634.75, Schichtdicke 20 µm) versehen. Auf eine Verzinkung der Drähte hatte man aufgrund von Drahtbrüchen bei einer anderen Schrägseilbrücke,

die dort auf die angewandte galvanische Verzinkung zurückgeführt wurden, verzichtet.

Der Korrosionsschutz bestand aus einer 1. und 2. Grundbeschichtung mit Leinölbleimenninge und einem 1 und 2. Deckanstrich mit Eisenglimmerfarbe auf Leinölbasis. Die Schichtdicken betrugen jeweils 50 µm.

Als Schadensursache war zunächst die dünne temporäre Beschichtung zu sehen, die für die recht lange Lagerungszeit vor dem Einbau auf der Brücke und Montagezeit nicht ausreichend war. Darüber hinaus kam es nach dem Einbau zum Anschlagen der Seile an Konstruktionsbauteile, hierdurch entstanden Drahtbrüche, die z. T. bis in die 4. Drahtlage hineingingen (bei einem Seil wurden in der äußersten Drahtlage 10 Drahtbrüche, in der 2. 7, in der 3. 4 und in der 4. Lage noch ein Drahtbruch festgestellt).

Durch die zunächst gewählte konstruktive Gegebenheit an den Verankerungsstellen konnte auch Wasser eindringen, das anschließend aber nicht ablaufen konnte, sodass eine dauerhafte Nässe entstand.

Die endgültig aufgebrachte Beschichtung wurde schichtweise und abschnittsweise in einem Zeitfenster von 2 bis 200 Tagen nach der Montage der Seile aufgebracht, sodass die Zwischenhaftung nicht kraftschlüssig gegeben war. Weiterhin wurden auch winderregte Schwingungen festgestellt. Weitere Untersuchungen zeigten, dass durchaus auch in den Drahtlagen zwei und drei unter der äußeren Drahtlage Korrosionsprodukte (wenn auch nur sehr leicht) vorhanden waren.

Eine wesentliche Erkenntnis war, dass auch dichte und unverletzte Z-Drahtlagen unter bestimmten Bedingungen (Schwingungen und nicht ausreichender Korrosionsschutz) das Eindringen der Feuchtigkeit und damit Korrosion zulassen.

Interessant war auch die Erkenntnis, dass infolge des Einfüllens des ca. 450 °C heißen Vergussmaterials in den Seilkopf das Verseilmittel innerhalb der Seile verbrannt war.

Infolge der unsachgemäßen Nachbehandlung bei der Beseitigung des Gußbartes wurden darüber hinaus Meißelkerben gefunden.

Im Bereich des Seilkopfes geht das elastische Drahtbündel in eine vollständige Einspannung in dem Seilkopf über, wodurch eine zusätzliche Zwangsbeanspruchung entsteht. Bei vier der fünf ausgebauten Seile wurden hier Drahtbrüche gefunden, die als Folge von Schwingungsrisskorrosion eingestuft wurden.

Bei dem geführten Dauerfestigkeitsnachweis für die neuen Seile (Nennfestigkeit 1.600 N/mm²) wurden 60 % der rechnerischen Verkehrslast der DIN 1072 als Betriebslast angesetzt und eine maximale Schwingbreite von 150 N/mm² zugelassen.

Im Gegensatz zur Erstausführung wurden geschmiedete Seilköpfe aus A St52-3 in einer neuen verstärkten Form gewählt. Durch eine geeignete konstruktive Form wurde das Bilden von Wassersäcken vermieden. Die Drähte wurden feuerverzinkt, mindestens mit 280 g/m². Zunächst wurde eine Teilverzinkung der beiden äußeren Drahtlagen durchgeführt, anschließend, nach Bewertung dreier Schwingversuche an vollverzinkten Seilen, wurden nur noch vollverzinkte Seile verwendet.

Ein weiteres Beispiel ist die Autobahnbrücke über die Norderelbe. In [24] wird über die Seilverspannung und die durchgeführten Dauerfestigkeitsversuche berichtet. HARRE berichtet in [28] über die Erkenntnisse aus der Prüfung baupraktisch vorbelasteter vollverschlossener Brückenseile der Autobahnbrücke über die Norderelbe. Hierbei wiesen die ausgebauten Seile keine starke, sondern nur eine leichte Korrosion auf. Die 1962 gebaute Brücke wurde 1985 einer Grundinstandsetzung und auch einer Umplanung unterzogen, sodass der Seilaustausch notwendig wurde. Die Gelegenheit wurde genutzt um Ermüdungsversuche an Seilen, die 25 Jahre in Betrieb waren, durchzuführen.

Die bei den Ermüdungsversuchen eingesetzten Seilabschnitte wiesen somit keine auffälligen Korrosionsschäden auf (leichte Korrosion).

Insgesamt wurden drei Versuche durchgeführt:

- Versuch 1

  Ein Einstufen-Ermüdungsversuch unter gleichzeitiger Einwirkung von Querpressung. Der Versuch entsprach den bei der Seilfertigung durchgeführten Versuchen.

- Versuch 2

  Ein Einstufen-Ermüdungsversuch ohne Einwirkung einer Querpressung. Der Seilabschnitt wurde aus einem Endbereich mit Originalkopf verwendet.

- Versuch 3

  Ein Einstufen-Ermüdungsversuch mit einem Originalkabelsattel und zwei gegenüberliegenden umgelenkten Seilabschnitten.

Der Versuch Nr. 1 wurde mit 2,0 * 10^6 Lastwechsel zwar zu Ende gefahren, es traten aber insgesamt 116 Drahtbrüche auf, neun lagen in dem oberen Seilkopf und 100 Drahtbrüche in dem unteren Seilkopf. Alle Brüche veteilten sich auf die vier äußeren Lagen. Sieben Drahtbrüche lagen in Seilmitte. Die Drahtbrüche in den Seilköpfen lagen im Mittel 34 mm innerhalb der Seilvergüsse. Das Vergussmittel im Ursprungszustand war eine Feinzink-, bzw. Blei-Antimon-Zinn-Legierung, die wesentlich weicher ist, als das heute verwendete Zamak 610. Die Drahtbrüche in den Seilköpfen wurden mit dem Einfluss des metallischen Vergusses hinsichtlich der Reibkorrosion, die von der Querpressung und den Relativverschiebungen zwischen Seildraht und Vergusskörper abhängt. Interessant war bei diesem Versuch, dass im Bereich der Querpressung in Seilmitte fünf Drahtbrüche gefunden wurden, bei den ursprünglichen Versuchen waren hier 16 und sechs festgestellt worden, sodass der Schluss gezogen werden darf, dass die Lastwechsel beim Einbau hier keine negativen Einfluss gezeigt haben. Die weiteren zwei Drahtbrüche in der freien Seillänge zeigen ebenfalls keinen signifikanten Unterschied hinsichtlich der Ermüdungsfestigkeit von neuen Seilen und Seilen nach 25 Jahren Betriebsdauer.

Der zweite Versuch endete ebenfalls nach 2,0 * 10^6 Lastwechseln und 90 Drahtbrüchen, d. h. 51 % des Seilquerschnittes waren gebrochen. 79 Drahtbrüche verteilten sich auf die vier äußeren Lagen in dem neu vergossenen Seilkopf (Verwendung von Zamak 610). Die übrigen 11 Drahtbrüche lagen in der freien Länge (in den äußeren fünf Lagen), es wurden keine Drahtbrüche in dem Originalseilkopf festgestellt. Die hohe Anzahl der Drahtbrüche wurde ebenfalls wieder mit Reibkorrosion erklärt.

Der dritte Versuch stellt eine Sonderuntersuchung mit gleichzeitig zwei Probekörpern dar, insgesamt wurden bei dem einen Seil 328 Drahtbrüche festgestellt, die sich über alle Lagen sogar bis zum Kerndraht verteilten. 22 Drahtbrüche waren im linken Seilkopf, 88 in der freien linken Länge, 65 Drahtbrüche im Umlenksattel, 153 in der rechten freien Seillänge und null Drahtbrüche in dem rechten Seilkopf. Das zweite Seil hatte einen Drahtbruch. Dieser Unterschied wird mit der versuchstechnisch bedingten unterschiedlichen Beanspruchung erklärt.

Insgesamt wurden bei allen Versuchen die Bruchflächen als neue Drahtbrüche bestimmt. Die bei den Ermüdungsversuchen aufgetretenen Drahtbrüche waren in keinem Fall durch korrosionsbedingte Narben oder Abtragungen ausgelöst worden.

Die Dauerschwingfestigkeit der 25 Jahre alten Seile in der freien Länge entsprach den damals neu gelieferten Seilen. Die neu vergossenen Seilköpfe bestimmten in dem Versuch 1 und 2 mit 99 % und 88 % der Drahtbrüche das Versuchsgeschehen.

In [28] wird Folgendes festgehalten: „Dieses Ergebnis unterstreicht zusammen mit der Tatsache, daß in dem einzigen belassenen Originlseilkopf – der über 25 Jahre im Bauwerk war – überhaupt keine Brüche auftraten, die Problematik neu angegossener Seilköpfe an baupraktisch vorbelasteten Seilen“.

In einer weiteren Veröffentlichung berichtet HARRE über die Erkenntnisse aus der Prüfung baupraktisch vorbelasteter vollverschlossener Brückenseile der Fehmarnsundbrücke [31].

Bei dieser Brücke hatte man ganz erhebliche Korrosionsschäden an einigen der 80 Hängerseile festgestellt. Der Korrosionsschutz hatte sich hierbei z. T. flächig abgelöst, der Rost konnte in die Spalte der einzelnen Drähte eindringen. Somit war ein Ausbau erforderlich geworden, an zwei Seilproben wurden dann Ermüdungsversuche durchgeführt, wobei die Seile bereits einen 10 % Querschnittsverlust infolge Korrosion aufwiesen.

Für beide Brücken, Norderelbebrücke und Fehmarnsundbrücke, werden in [16] folgende Erkenntnisse gezogen:

’a) Die untersuchten Brückenseile wiesen nach über 25-jährigem Einsatz im Bauwerk sowohl im gut erhaltenen Zustand (Norderelbebrücke) wie auch im erheblich korrosionsgeschädigten Zustand (Fehmarnsundbrücke) in der freien Länge eine Ermüdungs-Resttragfähigkeit auf, die über 2 * 10^6 Schwingspiele liegt. Die Seile haben sich damit als immer noch ausreichend ermüdungsfest erwiesen ... .‘

’b) ... Neben der rein mechanischen Beanspruchungskomponente der Materialermüdung hat die mechanisch-chemische Beanspruchungskomponente der Reibkorrosion einen entscheidenden Einfluss auf das Ermüdungsverhalten der Seilkonstruktionen ... .‘

Zu der Rheinbrücke Rees findet man in der Literatur weitere Hinweise auf Schäden an vollverschlossenen Brückenseilen, so z. B. in der vom Bundesministerium für Verkehr zeitweise herausgegebenen Schadenssammlung: Schäden an Brücken und anderen Ingenieurbauwerken, BMV [14, 16].

Hier wird über die Rheinbrücke Rees berichtet, bei der Drahtbrüche an galvanisch verzinkten Drähten festgestellt wurden und die Seile Korrosion aufwiesen. Inwieweit die Drahtbrüche im Bereich der Korrosion lagen, konnte den Veröffentlichungen nicht entnommen werden.

Die Seile waren so geschädigt, dass sie ausgetauscht wurden, an den ausgebauten Seilen wurden Ermüdungs- und Bruchversuche durchgeführt.

Die statischen Zerreißversuche (ohne Zugschwellversuch) lieferten bei fünf Probeversuchen fast die volle rechnerische Bruchkraft. Drei Seilproben, die zunächst einem Ermüdungsversuche unterzogen wurden lieferten anschließend im Zerreißversuch 89 %, 84 % und 96 % der rechnerischen Bruchkraft.

4 Bauteilversuche

4.1 Vorbemerkungen

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden die ausgebauten Seile von der Instandsetzungsmaßnahme bei der Rheinbrücke Flehe genutzt [13] als Ausgangsmaterial für die Probestücke verwendet.

Die Versuche erfolgten dabei in Anlehnung an die TL Seile Abschnitt 9 Technischer Anhang mit dem Stand von November 1994 [29], s. a. Anhang. Hiernach ist für die Versuchslänge des Prüfstücks eine Mindestlänge von 5 m vorzusehen.

4.2 Ausbau der Seilabschnitte

Bei der Rheinbrücke Düsseldorf-Flehe wurden an der Seilgruppe R 100 Probestücke für die Seilversuche (Bauteilversuche) entnommen. Bild 4.1 zeigt die Lage der ausgetauschten Seile. Bei der Seilgruppe R 100 wurde der folgende zeitliche Ablauf zum Austausch der einzelnen Seile durchgeführt:

1. Seil 2m,
2. Seil 2o,
3. Seil 2u,
4. Seil 3m,
5. Seil 1o,
6. Seil 4o und
7. Seil 4u.

Aufgrund von bereits damals durchgeführten Arbeiten an der Rheinbrücke Flehe wurde die Probenent-

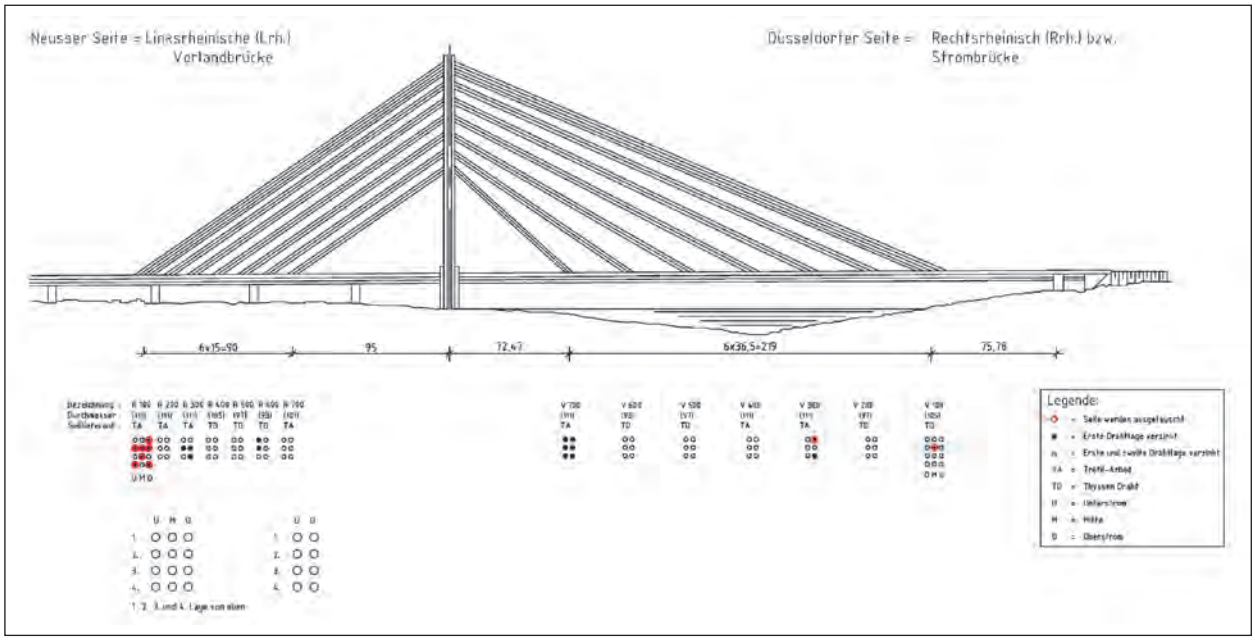


Bild 4.1: Übersicht zum Austausch vorgesehene Seile

nahme an den Seilen 3m, 1o, 4o oder 4u durchgeführt.

Für die Probenentnahme waren folgende Randbedingungen festgelegt worden:

- Länge der Probestücke ca. 7.5 bis 8 m (hierdurch sollte sichergestellt werden, dass die erforderliche Prüflänge von 5 m der Probekörper eingehalten wird,
- die Seile sollten möglichst keine oder nur wenig starke Korrosion aufweisen, da durch eine künstliche Korrosion eine definierte Narbentiefe hergestellt werden sollte,
- möglichst einen Originalseilkopf ausbauen, der zur Herstellung der Probekörper verwendet werden kann, wobei hier nicht ein bereits vergossenes Endstück als Probekörper verwendet werden konnte.

Die Entnahmebereiche zu den Seilen 2u, 3m, 1o, 4o und 4u sind in dem Bild 4.2 angegeben, sie wurden auf Grundlage des DMT-Inspektionsberichts Nr. 069/2003/01 ermittelt.

Die genaue Lage der einzelnen Proben wurde vor Ort durch PSP/DMT angegeben. Die Sicherung und Entnahme erfolgte durch die Fa. BRIDON.

Es wurden Kleinteilproben (zur Feststellung von Werkstoffkenngrößen und Vorversuche zur Festlegung der Rauhigkeiten) aus den ausgebauten Seilabschnitten der Seile 2m oder 2o entnommen

Durch DMT wurden folgende Seilbereiche auf der Baustelle eingemessen und bezeichnet:

- Seil 3m

  Probe 1: 7 bis 15 m,

  Probe 2: 30 bis 38 m,

  Probe 3: 80 bis 88 m.

- Seil 1o

  Probe 4: 7 bis 15 m,

  Probe 5: 80 bis 88 m.

- Seil 4o

  Probe 6: 6 bis 14 m,

  Probe 7: 61 bis 69 m.

- Seil 4u

  Probe 8: 6 bis 14 m,

  Probe 9: 34 bis 42 m,

  Probe 10: 71 bis 79 m.

Bild 4.3 zeigt die ausgebauten Seilabschnitte, die zur Herstellung der Probekörper zur Verfügung standen. Abschnittsweise waren an den Seilen Abbänselungen angebracht worden, dies sollte sicherstellen, dass während des Transportes keine Schädigung der Seile entstehen konnte.

Bild 4.4 zeigt die schadhafte Beschichtung, die sich leicht von den Seilen ablöst.

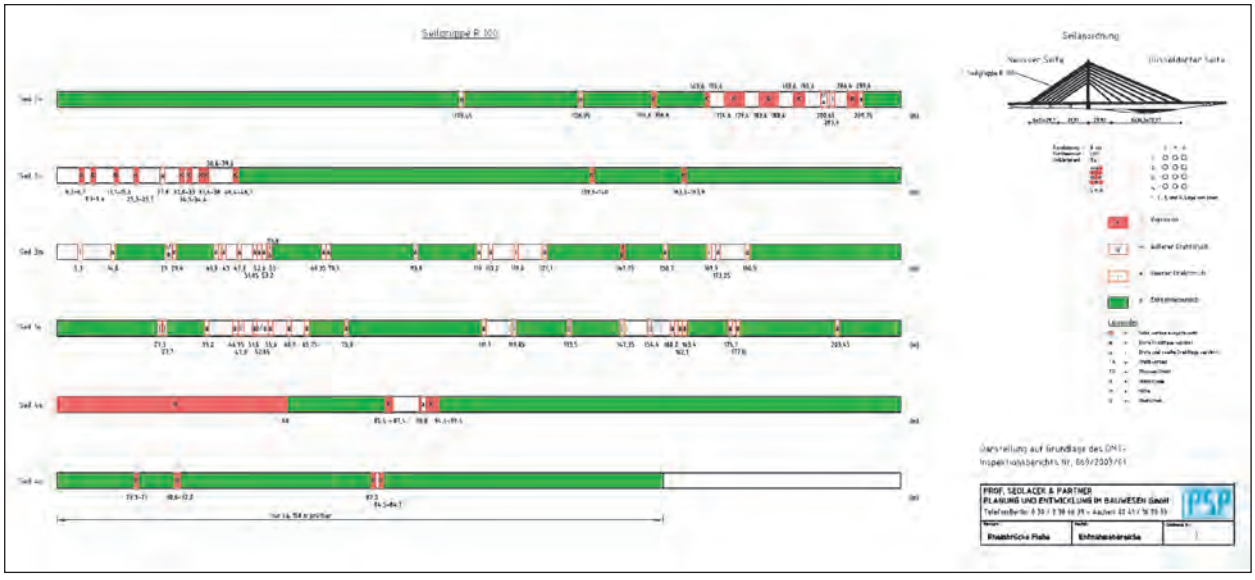


Bild 4.2: Übersicht der möglichen Entnahmebereiche

Bild 4.3: Ausgebaute Seilabschnitte (Übersicht)

Bild 4.4: Detailaufnahme

4.3 Herstellung der Probekörper

Entsprechend der TL Seile (Ausgabe 11.94) wurde die Versuchslänge des Seilstückes mit mindestens 5 m ausgeführt.

Für die Endverankerungen von vollverschlossenen Seilen nach DIN 18 800 (und EN 1993-11) sind Verankerung mit Verguss nach DIN EN 13411-4 zugelassen.

Bei den Verankerungen mit Verguss wird zwischen einem metallischen Verguss (z. B. mit ZAMAK) oder einem Kunststoffverguss unterschieden.

In der Regel wird ein metallischer Verguss gewählt, hierbei handelt es sich um eine Zink-Aluminium-Magnesium-Kupfer-Legierung (ZAMAK Verguss). In [62] wird hierzu ausgeführt, dass es sich um eine Feinzinklegierung GB-Zn Al6 Cu 1 (Z610) nach der damaligen DIN 1743 handelt. Die Zugfestigkeit beträgt 220 bis 260 N/mm² und die Brinell-Härte 80 bis 90.

Bei dem Anbringen der Seilköpfe wurde folgendermaßen vorgegangen:

1. Die Seilabschnitte wurden so gesichert, dass der Verbund der Drähte untereinander erhalten bleibt, und anschließend wurden sie auf Länge geschnitten.

2. Die Drähte an dem Seilende werden fächerförmig auseinander gebogen und zu einem Besen geformt. Hierbei werden ggf. die einzelnen Drähte mit einem aufgesetzten Rohr durch Kaltverformung in die gewünschte Lage gebracht. Die Zwischenräume, die mit dem Seilverfüllmittel wegen Korrosionsschutz ausgefüllt sind, werden mit einem Dampfreiniger mit Wasser gesäubert. Diese Vorgaben waren früher in der DIN 3092 enthalten.

3. Der aufgebogene Drahtbesen wird in den Seilkopf eingezogen und mit besonderen Klemmen zentriert. Für den anschließenden Verguss müssen Seilkopf und Seil so ausgerichtet werden, dass die Achsen eine gemeinsame Lotrechte bilden, ansonsten wird eine Winkelabweichung eingeprägt, dies führt dann anschließend zu ungleichmäßigen Beanspruchungen bei der Kraftübertragung zwischen den einzelnen Seilen und dem Seilkopf. Die Probekörper für die Versuche werden zumeist an einem Stück ausgerichtet.

4. Der ZAMAK-Verguss wird mit einer Temperatur von 450 °C in den Seilkopf gegossen und kühlt dann ab. Die Temperatur muss dabei mit einer Toleranz von +10 °C eingehalten werden. Damit der Vergusskegel in dem Seilkopf komplett ausgefüllt wird und ein vorzeitiges Erstarren vermieden wird, ist der Seilkopf als gesamtes Bauteil auf ca. 325 °C vorzuwärmen

Die Bilder 4.5 bis 4.10 zeigen die grundsätzliche Vorgehensweise beim Anbringen eines Seilkopfes oder einer Gabelverankerung. Die einzelnen Schritte sind hierbei:

- Sicherung des Verbundes, die Klemmkonstruktion und Öffnen des Drahtbesens, siehe Bild 4.5

- Herstellung des Besens durch Auseinanderbiegen der Drähte, z. T. mit einem aufgesetzten Rohr, siehe Bild 4.6,

- Reinigung der Besenzwischenräume mit Wasser, siehe Bild 4.7,
- Vorwärmen der Seilköpfe im ausgerichteten Zustand, siehe Bild 4.8,
- Einfüllen des Vergussmaterials in den Seilkopf, siehe Bild 4.9,
- Überprüfung des Vergusszustandes, siehe Bild 4.10.

Bild 4.5: Öffnen des Drahtbesens

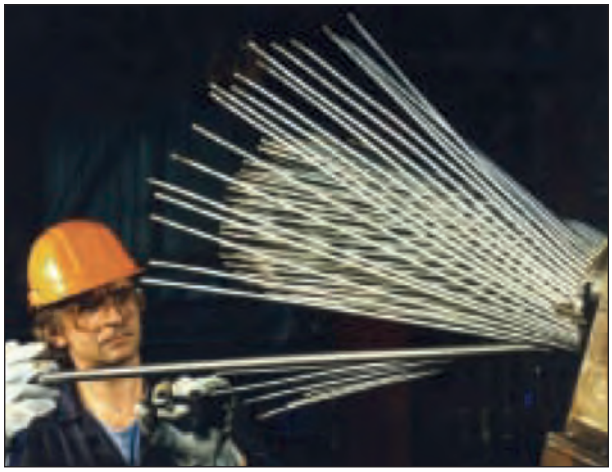


Bild 4.6: Aufbiegen einiger Drähte mit einem Rohr

Bild 4.7: Säubern des Drahtbesens

Die Vergusskegel/Seilköpfe (s. a. [6, 9]) sind hinsichtlich ihrer Abmessungen in der damaligen DIN 3092 festgelegt. Die Übertragung der Mindest-

Bild 4.8: Vorwärmen der Seilköpfe im bereits ausgerichteten Zustand

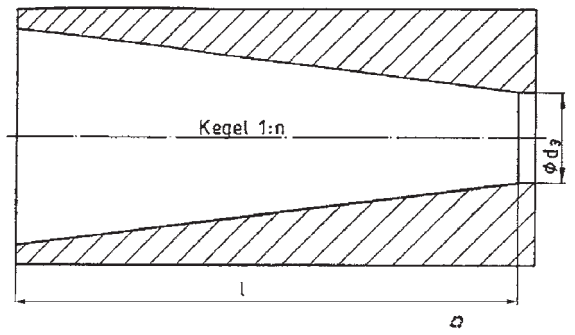
Bild 4.9: Einfüllen des Vergussmaterials im ausgerichteten Zustand

Bild 4.10: Überprüfung des Seilvergusses

bruchkraft des Seiles muss sichergestellt sein, in der Regel sind die Seilköpfe 5 mal Seildurchmesser lang. Bild 4.11 zeigt den Schnitt durch einen Seilkopf und die normativen Festlegungen und die weitere Entwicklung. Die Seilköpfe sind zumeist aus Stahlguss oder aus Schmiedestahl hergestellt mit einer Zugfestigkeit von mindestens 500 N/mm^2.

Bei den hier durchgeführten Bauteilversuchen wurde an einem Seilende ein Originalseilkopf verwendet, der aber ebenfalls neu aufgesetzt und vergossen wurde.

In [6] wird berichtet, dass die Vergrößerung der Vergusskegel um 20 % im Vergleich zu früheren Längen eine deutliche Verbesserung bei den Dauerschwingversuchen ergeben hat. Hiernach bewirkt der gegenüber der DIN 3092 weitaus größere Kegeldurchmesser in Verbindung mit der kürzeren Eingusslänge eine Verminderung der Relativbewegung zwischen den Seildrähten und dem Vergusswerkstoff, dies hat dann eine bessere Dauerfestigkeit zur Folge.



Norm / Maß	DIN 1079 (1970)	DIN 3092 (1979)	Stand der Forschung (1983)*
d_3 =	d_1 + 4 mm	1,2 · d_1 + 3 mm	1,5...1,8 · d_1
n =	6 bis 8	6 bis 11	~10
l ≧	4,5 · d_1	5 · d_1 bzw 50 · d_D ≧ l ≧ 7 · d_1 (d_D = größter Drahtdurchmesser)	~3 · d_1
d_1	Seilendurchmesser		

* Für Feinzinklegierung Z610 DIN1743

Bild 4.11: Vergusskegelabmessungen [6]

4.4 Grundlagen zum Ermüdungsversuch und Bruchlastversuch

Bei fast allen vollverschlossenen Seilen, die in Deutschland eingebaut wurden, sind vorab Eignungsversuche durchgeführt worden. Eine Übersicht zu solchen Versuchen bei einzelnen Brücken gibt Tabelle 4.1.

Die Randbedingungen des Standardversuches zum Betriebsfestigkeitsnachweis für vollverschlossene Brückenseile entsprechend der TL Seile waren Grundlage für die Bauteilversuche. Der Versuch wird als Zugschwellversuch durchgeführt.

Für die Versuchsdurchführung gelten die folgenden Randbedingungen:

- die obere Grenzspannung beträgt σ_o = zul σ_H = 0,42 $f_{U,K}$,
- bei σ_o = 0,42 $f_{U,K}$ beträgt die Schwingweite $\Delta\sigma$ = 150 N/mm^2, unabhängig von der charakteristischen Festigkeit $f_{U,K}$,
- die Kraft wird in Längsachse in den Versuchskörper eingebracht,
- die Grenzlastspielzahl N beträgt 2 x 10^6,
- die Frequenz soll zwischen 1,5 und 3,8 Hz liegen,
- 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 cal $Z_{B,K}$ liegt.

Die ausgebauten Seile hatten alle einen Nenndurchmesser von 111 mm (siehe Bild 4.12), mit den folgenden Kenngrößen:

- der Aufbau des vollverschlossenen Spiralseils besteht aus:
  - 1 Runddraht: mit Ø 4,80 mm,
  - 60 Runddrähte mit Ø 4,25 mm,
  - 6 Lagen Z-Profildrähte, 6,00 mm hoch.

Lfd. Nr.	Bauwerk	Seil-Ø mm	σ_o N/mm^2	σ_u N/mm^2	$\Delta\sigma$ N/mm^2	Nenn-festigkeit N/mm^2	Rest-bruchkraft %	Bemerkungen
1.	Brücke Rodenkirchen	54	565	419	146	1.470	92	Sattelversuch mit Längs-zug
2.	Brücke Rodenkirchen	65	549	373	177	1.470	77	Sattelversuch mit Längs-zug
3.	Kniebrücke Düsseldorf	72	540	432	108	1.470	92	Sattelversuch mit Querhub 1° und 1,75° Knick
4.	Brücke Homberg	73	530	334	196	1.470	99	
5.	Brücke Emmerich	42	491	343	147	1.570	100	
6.	Brücke Emmerich	42	334	226	108	1.570	100	
7.	Severinsbrücke Köln	78	445	288	157	1.470	72	
8.	Severinsbrücke Köln	73	445	292	153	1.470	76	
9.	Norderelbbrücke	72	502	353	149	1.420	78	
10.	Norderelbbrücke	72	502	353	149	1.420	80	
11.	Norderelbbrücke	72	502	353	149	1.420	97	
12.	Nordbrücke Düsseldorf	73	440	227	215	1.420	78	
13.	Nordbrücke Düsseldorf	69	528	336	192	1.420	–[1)]	
14.	Fehmarn-Sund-Brücke	104	212	13	204	1.470	83	
15.	Donaubrücke Jugoslawien	50	357	190	167	1.470	85	
16.	Donaubrücke Jugoslawien	81	336	159	178	1.470	87	
17.	Olympia-Dach	81	529	392	196	1.570	89	
18.	Brücke Oberkassel	92	378	241	136	1.470	99	
19.	Brücke Speyer	105	618	471	147	1.470	96	
20.	Brücke Speyer	105	618	471	147	1.470	81	
21.	Brücke Speyer	115	618	471	147	1.470	83	
22.	Brücke Speyer	115	618	471	147	1.470	48	Probe krumm
23.	Brücke Neuwied	118	618	471	147	1.470	87	
24.	Brücke Neuwied	118	618	471	147	1.470	96	
25.	Brücke Neuwied	118	618	471	147	1.470	98	
26.	Brücke Weitingen	110	579	489	90	1.570	101	Sattelversuch mit Quer-hub; Auslenkwinkel
27.	Brücke Weitingen	110	579	489	90	1.570	101	= 0,16°
28.	Brücke Weitingen	105	659	512	147	1.570	74,6	Bändsel im Kopf
29.	Brücke Weitingen	120	659	512	147	1.570	94,9	
30.	Brücke Weitingen	105	659	512	147	1.570	88	
31.	Brücke Flehe	111	487	404	82	1.570	85,9	Sattelversuch mit Quer-hub; Auslenkwinkel
32.	Brücke Flehe	111	487	404	82	1.570	78	1° – 1,7°
							66,6	0,5° stat., 0,5° dyn.
33.	Sonderversuche vollverzinkt	104	618	471	147	1.470	97,7	
34.	Sonderversuche vollverzinkt	104	618	471	147	1.470	91,8	
35.	Sonderversuche vollverzinkt	104	618	471	147	1.470	83,2	

[1)] nicht ermittelt

Tab. 4.1: Dauerschwingversuche mit vollverschlossenen Seilen [6]

Lfd. Nr.	Bauwerk	Seil-Ø mm	σ_o N/mm^2	σ_u N/mm^2	$\Delta\sigma$ N/mm^2	Nenn-festigkeit N/mm^2	Rest-bruchkraft %	Bemerkungen
36.	Köhlbrandbrücke vollverzinkt	118	659	512	147	1.570	98	6 Drahtbrüche
37.	Köhlbrandbrücke vollverzinkt	118	659	512	147	1.570	99	keine Drahtbrüche
38.	Maracaibo vollverzinkt	78	652	507	145	1.570	97,2	keine Dauerbrüche
39.	Maracaibo vollverzinkt	78	652	507	145	1.570	94,2	3 Brüche bei ca. 1,4 x 10^6 LW
40.	Willemsburg vollverzinkt	94	659	514	145	1.570	98,8	keine Dauerbrüche

Tab. 4.1: Fortsetzung

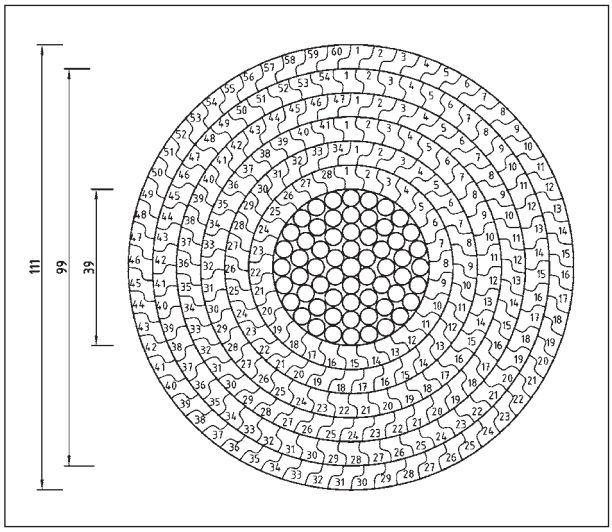


Bild 4.12: Lagen und Drahtaufbau eines 111 mm Seiles

- die metallische Querschnittfläche beträgt 8.420 mm^2,
- die Nennfestigkeit aller Drähte beträgt 1.570 N/mm^2,
- die rechnerische Bruchkraft ergibt sich somit mit 13.214 MN.

Somit ergibt sich obere Grenzspannung mit:

σ_o = 0,42 * 1.570 = 659,4 N/mm^2.

4.5 Erster Bauteilversuch

Im Zuge der Vorbereitung wurde entschieden, als Ausgangsreferenz einen Seilabschnitt mit einer natürlichen Korrosion zu testen.

Aus den zur Verfügung stehenden Seilabschnitten wurde ein Probekörper ausgesucht, der in der Mitte einen typischen Korrosionsschaden aufwies.

Bild 4.13: 1. Bauteilprobe im Versandzustand

Die Abrostungen waren deutlich geringer als 1 mm, punktuell wurden Narbentiefen von maximal 0,5 mm gemessen.

Bild 4.13 stellt den für den Transport konfektionierten Prüfkörper bei der Anlieferung in der Seilprüfstelle der DMT in Bochum dar. Die Bilder 4.14 und 4.15 zeigen die beiden angebrachten Seilköpfe.

Zunächst wurde die Probe in die dynamische Prüfeinrichtung bei der DMT in Bochum eingebaut, siehe Bild 4.16. In der Mitte des Seiles ist die korrodierte Stelle zu erkennen.

Bild 4.17 zeigt den dynamischen Seilkopf, bei dem die Beanspruchung eingeleitet wird. Bild 4.18 zeigt den verankerten Seilkopf, bei dem die entsprechenden Reaktionskräfte aufgenommen werden.

Nach ca. 400.000 Lastwechseln traten zwei nebeneinanderliegende Drahtbrüche im korrodierten Bereich auf, siehe die Bilder 4.19 und 4.20.

Aufgrund der beiden Drahtbrüche und dem Verlust der Vorspannung in den beiden Drähten ergab sich ein Versatz, siehe Bild 4.21.

Bild 4.14: 1. Seilkopf der ersten Bauteilprobe

Bild 4.15: 2. Seilkopf der ersten Bauteilprobe

Bild 4.16: Eingebaute Probe in der dynamischen Prüfeinrichtung

Bild 4.17: Die Verankerung bei der Krafteinleitung

Bild 4.18: Die Festhaltung

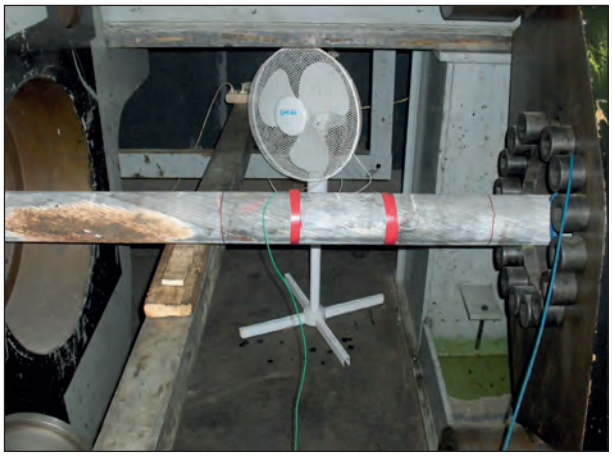


Bild 4.19: Beide Drahtbrüche

Der Versuch wurde bis fast 1.6 Mio. Lastwechsel durchgeführt, musste aber vor Erreichen der 2 Mio. Lastwechsel (Zielvorgabe entsprechend TL Seile) abgebrochen werden.

Grund für den Abbruch waren zahlreich auftretende Drahtbrüche, sodass sich die äußere Drahtlage komplett aus dem Verbund löste. Ein Weiterführen des Versuches hätte zu einem vollständigen Versa-

Bild 4.20: Nahaufnahme der beiden Drahtbrüche

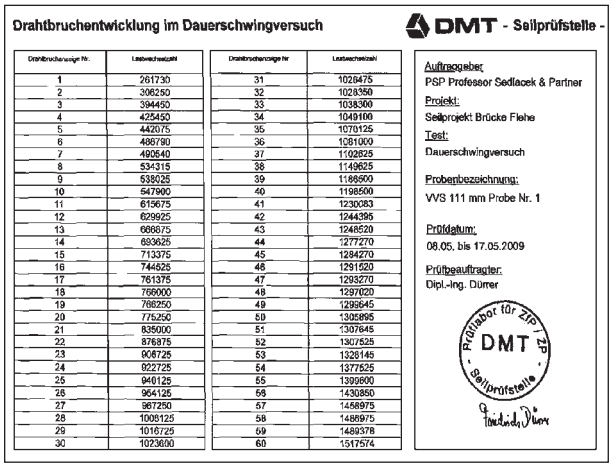


Bild 4.22: Auflistung der festgestellten Drahtbrüche

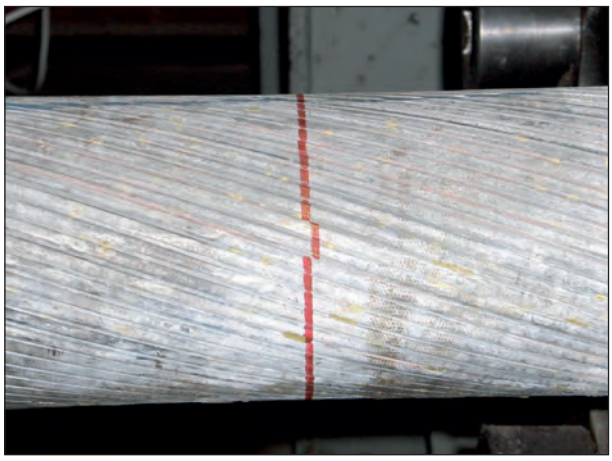


Bild 4.21: Versatz in der äußeren Drahtlage infolge der beiden Drahtbrüche

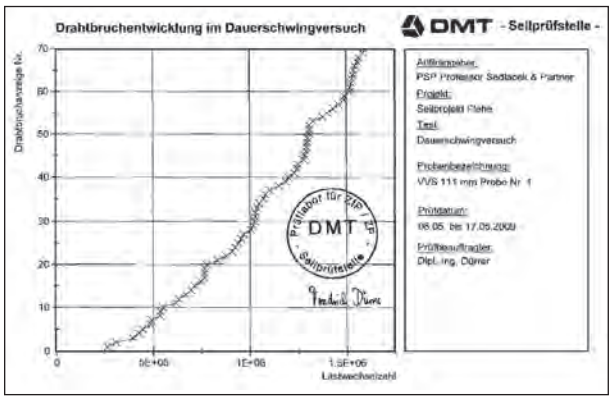


Bild 4.23: Entwicklung der Drahtbrüche mit zugehörigen Lastwechseln

gen geführt und war aus sicherheitstechnischen Gründen nicht zu verantworten.

Bild 4.22 zeigt tabellarisch die Entwicklung der Drahtbrüche in Zusammenhang mit den gefahrenen Lastwechseln, Bild 4.23 zeigt die grafische Darstellung. Hier ist zu erkennen, dass die Drahtbruchentwicklung grundsätzlich sehr stetig voran geschritten ist, teilweise mit einigen sehr kurzzeitigen massiven Drahtbruchfolgen.

Die Bilder 4.24 bis 4.28 zeigen die ausgebaute Probe nach dem dynamischen Versuch.

Wie auf den Bildern zu erkennen, hat sich die gesamte äußere Drahtlage aus dem Verbund gelöst. Die festgestellte Zahl der Drahtbrüche stimmt exakt mit der Anzahl der Drähte in der äußeren Lage überein. Im korrodierten Bereich wurden vier Drahtbrüche festgestellt, alle anderen lagen im Bereich des dynamischen Seilkopfes.

Bild 4.24: Ausgebaute Probe

Die Bilder 4.26 und 4.28 zeigen Detailaufnahmen des Seilkopfes, über den die Lasteinleitung der Prüfkraft erfolgte.

Die Untersuchung dieses Seilkopfes ergab folgende Feststellungen:

Bild 4.25: Linker Seilkopf (Festpunkt)

Bild 4.28: Dynamischer Seilkopf

Bild 4.26: Dynamischer Seilkopf

Bild 4.29: Ende der Seilverankerung

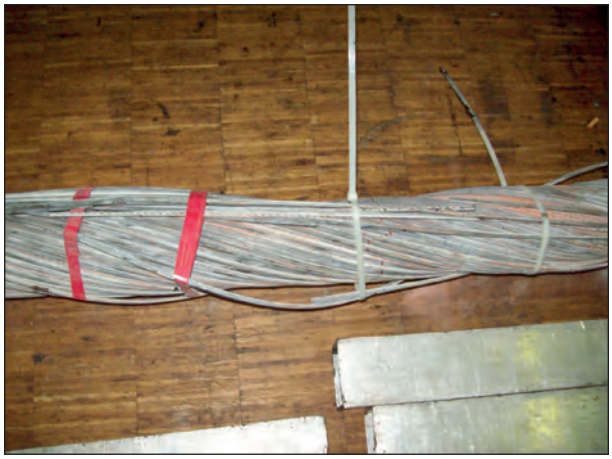


Bild 4.27: Freie Seillänge

- die Drahtbrüche lagen fast ausschließlich im Inneren des Seilkopfes,
- die Bruchstellen lagen ca. 50 bis 80 mm von der Außenkante des Seilkopfes entfernt,
- der Seilkopf an sich wies keine Beschädigungen auf,
- das Ende des Seilkopfes (siehe Bild 4.29) wies keine Setzungen oder sonstige Auffälligkeiten auf.

Im Anschluss an den dynamischen Versuch wurde die Probe zur Ermittlung der Restbruchkraft in die statische Prüfmaschine eingebaut, siehe Bild 4.30.

Die äußere Drahtlage wurde hierbei durch Kabelbinder soweit in der Lage gesichert.

Bild 4.31 zeigt die Probe nach Ermittlung der Restbruchkraft. Aufgrund der Vorschädigung war der Verbund der äußeren Drahtlagen jetzt komplett zerstört.

Bild 4.32 zeigt das Last-Verformungs-Diagramm mit der ermittelten Bruchkraft von 8.334 kN. Der Kurvenverlauf zeigt einige Unstetigkeiten, die nicht dem typischen Verlauf einer solchen Kurve entsprechen. Die Rückgänge bei der Zugkraft sind durch

Bild 4.30: Versuchseinrichtung zur Ermittlung der Restbruchkraft

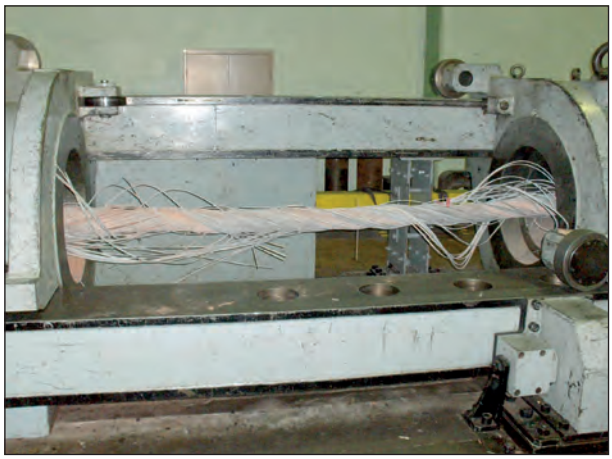


Bild 4.31: Probe nach Versuchsende

das Versagen von vorgeschädigten Drähten zu erklären, anschließend erfolgt eine Kraftumlagerung, und eine weitere Kraftaufnahme kann stattfinden.

Weiterhin muss angemerkt werden, dass durch die zahlreichen Drahtbrüche von Anfang an die Abstützung im Seilkopf nicht mehr symmetrisch war und ein typischer Kurvenverlauf auch nicht mehr zu erwarten war.

Die Bewertung der Bruchkraft erfolgt unter zwei Voraussetzungen:

a) das volle Seil mit Ø 111 mm,

b) das reduzierte Seil mit Ø 97 mm, dies berücksichtigt, dass die äußere Drahtlage nicht mehr kraftschlüssig vorhanden war.

In Tabelle 4.2 sind die rechnerischen und die wirklichen Bruchkräfte und das resultierende Verhältnis gegenübergestellt.

Unter der Annahme eines Seils Ø 111 mm liegt die wirkliche Bruchkraft um mehr als 25 % unter der

Ø [mm]	Rechnerische Bruchkraft [kN]	Bruchkraft der 1. Probe [kN]	Verhältnis
111	13.390	8.334	0,62
97	10.230	8.334	0,81

Tab. 4.2: Vergleich der tatsächlichen Bruchlast der 1. Probe hinsichtlich des Querschnittes

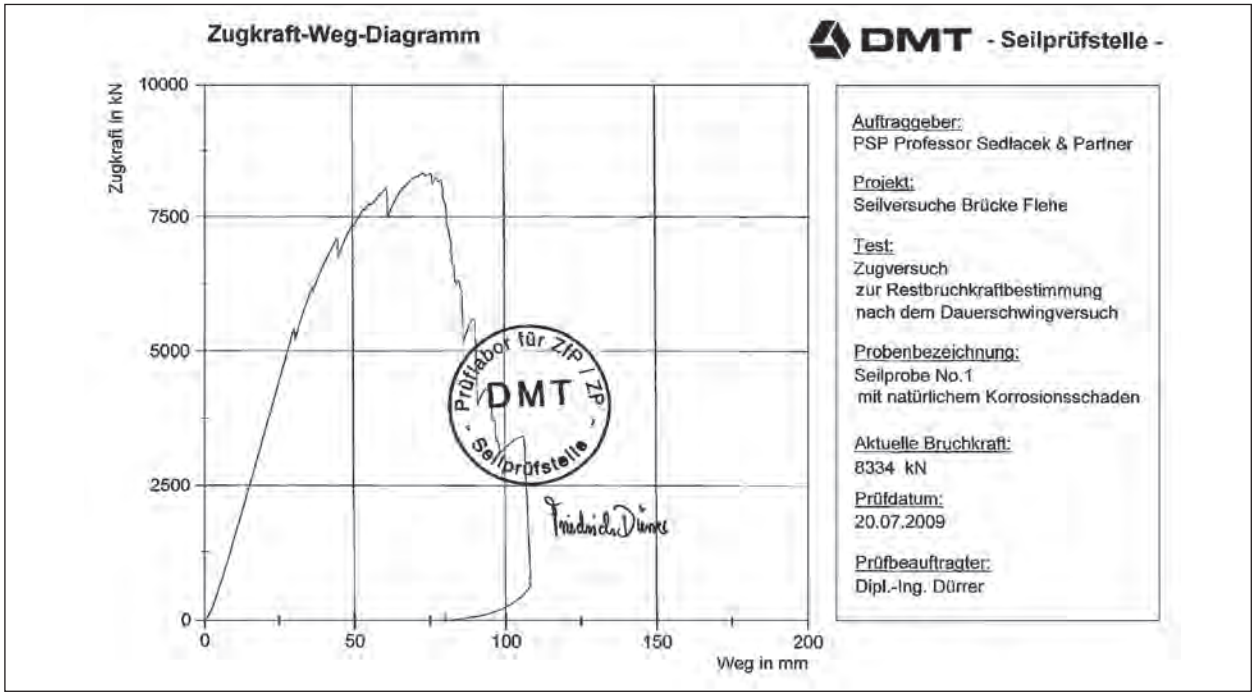


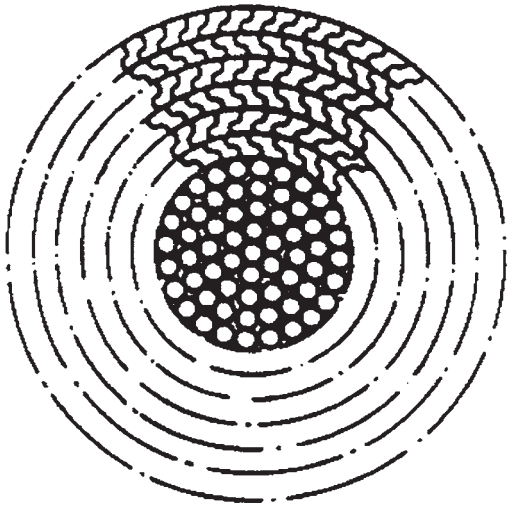
Bild 4.32: Last-Verformungskurve zum Zugversuch der 1. Bauteilprobe

rechnerischen Bruchkraft, bei der Annahme eines Seils Ø 97 mm wird die 25%-Grenze der TL Seile für Neulieferungen eingehalten.

Bei der Bemessung der Seile wurde in der Vergangenheit zumeist eine Sicherheit von 2,5 auf die rechnerische Bruchkraft eingehalten. In Bild 4.33 werden für die beiden Seildurchmesser die Sicherheiten mit der jetzt ermittelten tatsächlichen Bruchkraft bezogen auf die Bemessungslast angegeben.

Die Sicherheiten zu der Bemessungslast liegen je nach Ansatz bei 1,5 oder bei 2,0. Somit liegen selbst beim völligen Ausfall der äußeren Drahtlage noch ausreichende Sicherheiten für die Tragfähigkeit der Seile vor.

Tabelle 4.3 vergleicht die Bruchlasten mit den Versuchen von 1979.



Ø 111 mm Bruchlast: 13.390 kN
Bemessungslast: γ = 2,5 5.356 kN
→ 8.334/5.356 = 1,5

Ø 97 mm Bruchlast: 10.230 kN
Bemessungslast: γ = 2,5 4.092 kN
→ 8.334/4.092 = 2,0

Bild 4.33: Vergleich der Bauteilsicherheiten

Seil Ø 111 mm	Tatsächliche Bruchkraft [kN]	Rechnerische Bruchkraft [kN]	Verhältnis
1. Versuch 1979	12.680	13.390	0,95
2. Versuch 1979	12.750	13.390	0,95
1. Versuch (ZAMAK)	8.334	13.390	0,62

Tab. 4.3: Vergleich der Bruchlasten

4.6 Zweiter Bauteilversuch

Beim zweiten Bauteilversuch wurde an dem Probekörper eine Veränderung hinsichtlich der Vergussart vorgenommen. Die Änderung der Vergussart lag darin begründet, dass die massive Schädigung bei dem ersten Ermüdungsversuch auf den heißen, metallischen Verguss zurückgeführt wurde, die eine Art Vorschädigung für die Drähte herbeiführte.

Somit wurde bei diesem Versuch ein Kunstharz verwendet. Der Kunstharzverguss wurde entsprechend DIN EN 13411-4 durchgeführt, als Material kam Wirelock zum Einsatz.

Der Dauerschwingversuch und Bruchversuch wurde wiederum in Anlehnung an die TL/TPVVS-Seile durchgeführt.

Das Seil wies ebenfalls etwa in der Mitte eine Stelle mit natürlicher Korrosion auf. Die korrodierte Stelle war im Vergleich zum ersten Probekörper geringer, die festgestellten Abrostungstiefen betrugen weniger als 0,5 mm, sie lagen bei ca. 0,2 – 0,3 mm. Eine weitergehende künstliche Korrosion wurde nicht aufgebracht. Bild 4.34 zeigt die eingebaute Probe in dem Dauerschwingversuchsstand.

Der Versuch wurde bis zum Erreichen der 2,0 Millionen Lastwechsel planmäßig durchgefahren. Es wurde während der Versuchsdurchführung ein

Bild 4.34: Zweite Bauteilprobe im Versuchsstand

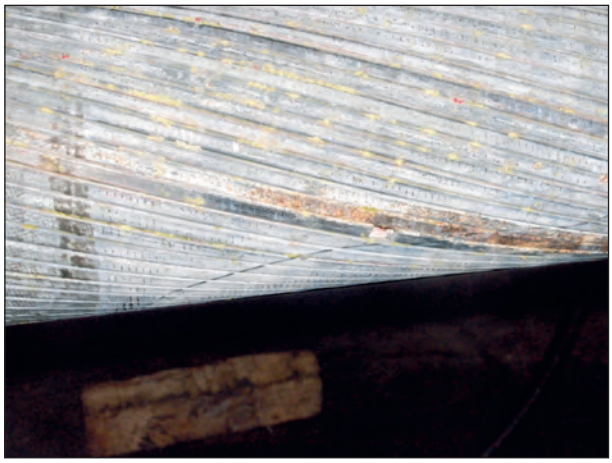


Bild 4.35: Drahtbruch im korrodierten Bereich

Drahtbruch im korrodierten Bereich festgestellt, siehe Bild 4.35.

Der Drahtbruch trat bei 1,25 Millionen Lastwechsel auf, siehe Bild 4.36.

Im Anschluss an dem Dauerschwingversuch wurde die Probe in die Prüfmaschine für den Zerreißversuch eingebaut, siehe Bild 4.37.

Der anschließend gefahrene Bruchversuch ergab eine Bruchkraft von 12.943 kN, Bild 4.38 zeigt die Last-Verformungskurve des Versuchs.

Der Versuch zeigt ein absolut zufriedenstellendes Verhalten mit einem relativ langen horizontalen

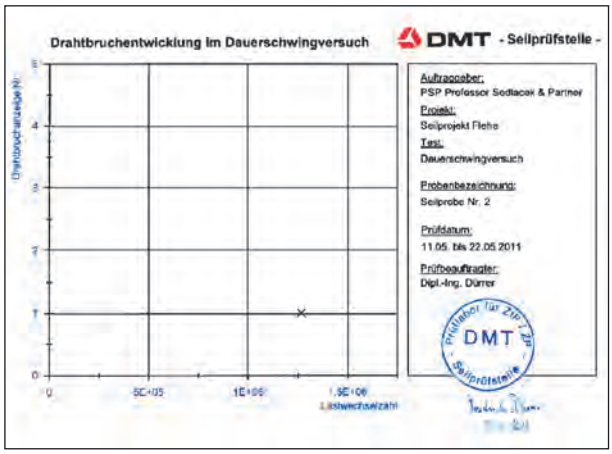


Bild 4.36: Drahtbruchaufzeichnung Bauteilprobe Nr. 2

Bild 4.37: Eingebaute Probe – Bruchversuch

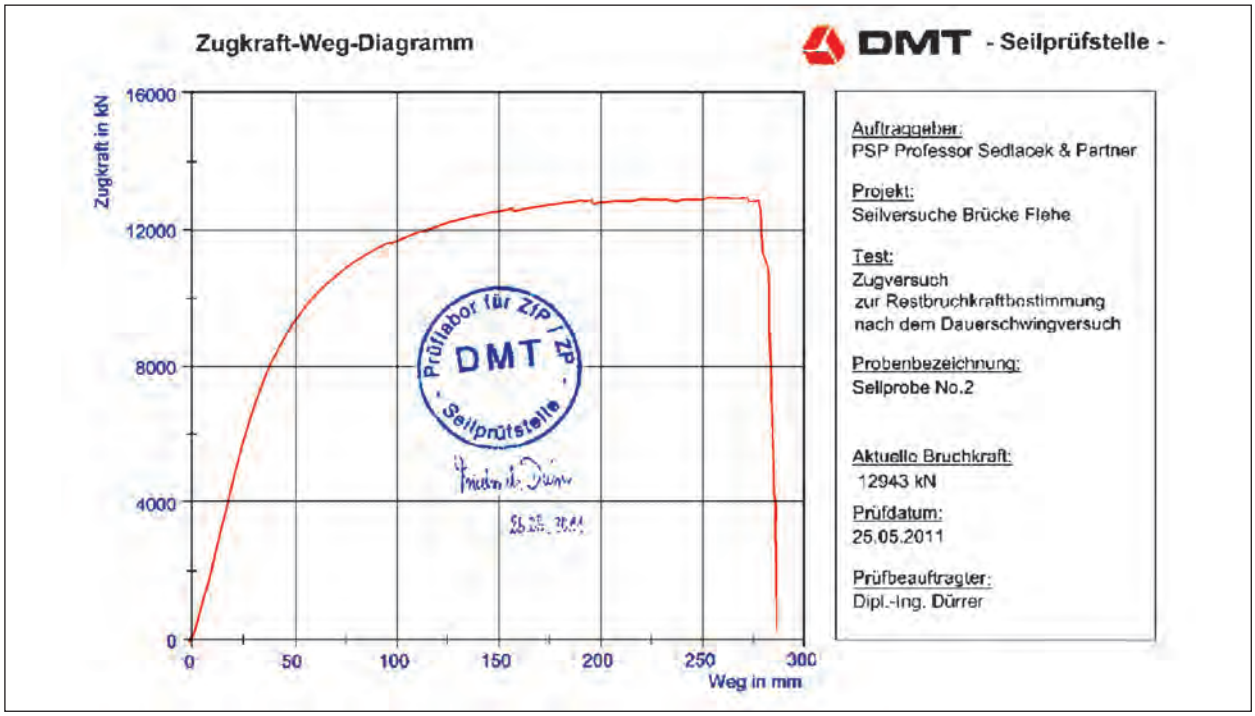


Bild 4.38: Last-Verformungskurve des 2. Bruchlastversuchs

Dehnungsplateau vor dem eigentlichen Bruch. Der Kurvenverlauf entspricht dem Idealverlauf eines solchen Bruchversuches. Im Vergleich zum ersten Versuch stören hier auch keine Vorschädigungen (Drahtbrüche in der äußeren Lage) aus dem Ermüdungsversuch, die zu asymmetrischen Krafteinleitungen oder Setzungen führen würden. Generell scheint die Ermüdungsschädigung der Drähte gering gewesen zu sein, da während des Versuches nur ein vereinzelter Drahtbruch aufgetreten ist.

Nach Aussage der DMT tritt bei neuen Seilen und direktem Bruchversuch durchaus früher Drahtbrüche auf und es kann zu Unstetigkeiten beim Zugeversuch kommen. Nach einem Ermüdungsversuch stellt sich ein sog. Trainingseffekt bei den Drähten ein, d. h. die einzelnen Drähte haben sich in ihrer Lage stabilisiert und die gesamte Krafteinleitung erfolgt stetig vom Seilkopf in das Seil. In dem vorliegenden Fall besteht die Zeitspanne für diesen Trainingseffekt aus der Zeit des Einbaues in der Brücke und dem anschließenden Ermüdungsversuch.

Die Bilder 4.39 bis 4.41 zeigen die Bauteilprobe nach dem Versuch.

Folgende Feststellungen können zu dem Versuch festgehalten werden:

- der Bruch ist in der freien Länge entstanden,
- die Bruchflächen sind z. T. mit Einschnürungen versehen, z. T. sind sie auch als Gewaltbruch entstanden.

Insbesondere dieser Versuch zeigt, dass Drahtbrüche im wesentlichem von mechanischen Spitzenbeanspruchungen ausgehen und weniger von ‚geschmeidigen' Vertiefungen.

Je nach Korrosionsart, hier auch die Muldenkorrosion, so wie sie bei den meisten Schäden beobachtet wurden, sind hinsichtlich der Ermüdungsbeanspruchung also unkritischer als scharfe geometrische Kerben zu sehen.

In Tabelle 4.4 sind die rechnerische Bruchkraft, die jetzt tatsächliche und die in der Vergangenheit erreichte Bruchkraft gegenüber gestellt.

Die Bruchkraft von 1979 wurde somit sogar leicht überschritten. Ein Vergleich mit Art und Lage des Bruchs zeigt auch eine Übereinstimmung, bei allen drei Versuchen war der Bruch in der freien Länge.

Als Fazit für diesen Versuch kann festgehalten werden, dass die Bauteilprobe das Anforderungsprofil für eine Neulieferung erfüllt hat.

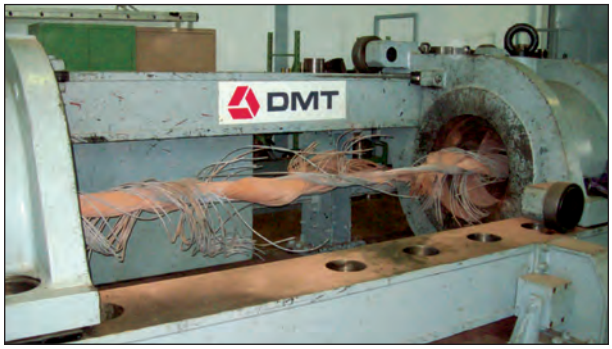


Bild 4.39: Bauteilprobe nach dem Zerreißversuchs

Bild 4.41: Bruchflächen der einzelnen Drähte

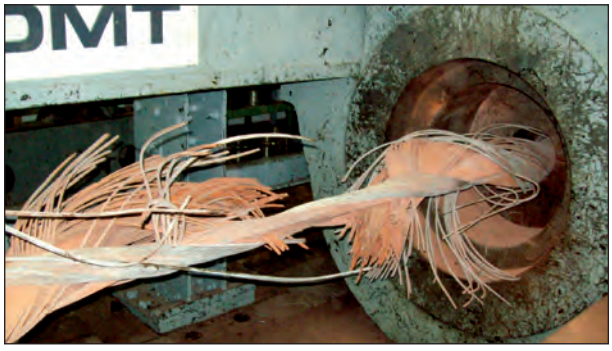


Bild 4.40: Detailansicht der Bauteilprobe nach dem Bruchversuch

Seil Ø 111 mm	Tatsächliche Bruchkraft [kN]	Rechnerische Bruchkraft [kN]	Verhältnis
1. Versuch 1979	12.680	13.390	0,95
2. Versuch 1979	12.750	13.390	0,95
1. Versuch (ZAMAK)	8.334	13.390	0,62
2. Versuch (Kunststoff)	12.943	13.390	0,97

Tab. 4.4: Vergleich der Bruchlasten

Es kann festgestellt werden, dass die korrodierten Stellen nur bedingt Ausgangspunkte von Drahtbrüchen darstellen.

4.7 Dritter Bauteilversuch

Bei dem dritten Bauteilversuch wurde beschlossen, ebenfalls mit einem Kunststoffverguss zu arbeiten und eine Probe mit natürlicher Korrosion zu nehmen.

Dies sollte zum einen den Verdacht hinsichtlich des negativen Einflusses eines metallischen Vergusses auf abgelegte Seile bestätigen, und zum anderen sollte das gute Ermüdungsverhalten der ausgebauten Seile bestätigt werden.

Hierzu wurde ein entsprechender Probekörper ausgesucht, Bild 4.42 zeigt die eingebaute Probe mit dem natürlich korrodierten Bereich. Hier war ebenfalls eine Narbentiefe von 0,2 – 0,3 mm festzustellen.

Bild 4.42: Probe dritter Bauteilversuch mit natürlicher Korrosion

Bild 4.43: Seilkopf dritter Bauteilversuch mit Kunststoffverguss

Bild 4.43 und Bild 4.44 zeigt die Seilköpfe mit Kunststoffverguss. Die beiden unterschiedlichen Farbgebungen entstehen durch das Abstreuen des rechten Seilkopfes nach dem Verguss.

Der Ermüdungsversuch konnte bis zum Erreichen der 2,0 Mio. Lastwechsel ohne Zwischenfälle durchgefahren werden. Die Bilder 4.45 und 4.46 zeigen grafisch und tabellarisch die festgestellten sieben

Bild 4.44: Seilkopf dritter Bauteilversuch mit Kunststoffverguss

Bild 4.45: Drahtbruchentwicklung bei dem dritten Bauteilversuch

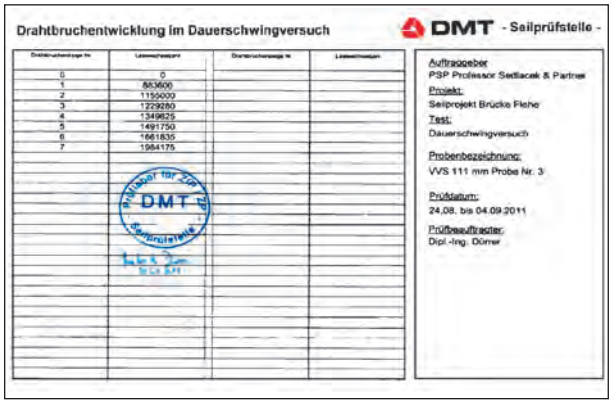


Bild 4.46: Drahtbruchentwicklung abhängig von den Lastwechselzahlen beim dritten Bauteilversuch

Drahtbrüche, die sich über die gesamte Versuchsdauer erstrecken.

Die Bilder 4.47 bis 4.50 stellen die sichtbaren Drahtbrüche dar. Sie waren teilweise in dem korrodierten Bereich, es gab aber auch Brüche in Bereichen wo keine Korrosion sichtbar war. Weitere traten in Bereichen auf, die Oberflächenbeschädigungen aufwiesen.

Bild 4.47: Erster Drahtbruch im Bereich mit ausgeprägter Korrosion

Bild 4.48: Drahtbruch außerhalb der Korrosionsstelle

Bild 4.49: Zwei Drahtbrüche im leicht korrodierten Bereich

Der anschließend gefahrene Bruchlastversuch zeigt wiederum ein sehr gutes Ergebnis, die tatsächlich ermittelte Bruchlast entsprach 95 % der rechnerisch ermittelten Bruchlast, siehe Tabelle 4.5 und Bild 4.51.

Die einzelnen Unstetigkeiten in dem ansonsten typischen Kurvenverlauf sind mit vorzeitigen Drahtbrüchen oder kleineren Setzungen im Seilkopf zu erklären.

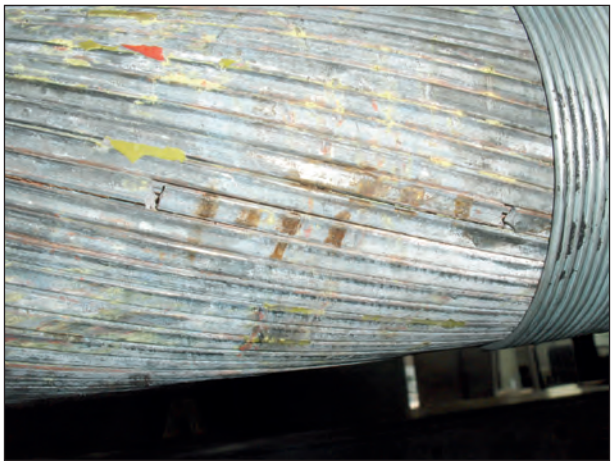


Bild 4.50: Zwei Drahtbrüche außerhalb der korrodierten Bereiche, kleine korrodierte Bereiche und Oberflächenunregelmäßigkeiten sichtbar

Seil Ø 111 mm	**Tatsächliche Bruchkraft [kN]**	**Rechnerische Bruchkraft [kN]**	**Verhältnis**
1. Versuch 1979	12.680	13.390	0,95
2. Versuch 1979	12.750	13.390	0,95
1. Versuch (ZAMAK)	8.334	13.390	0,62
2. Versuch (Kunststoff)	12.943	13.390	0,97
3. Versuch (Kunststoff)	12.683	13.390	0,95

Tab. 4.5: Vergleich der Bruchlasten

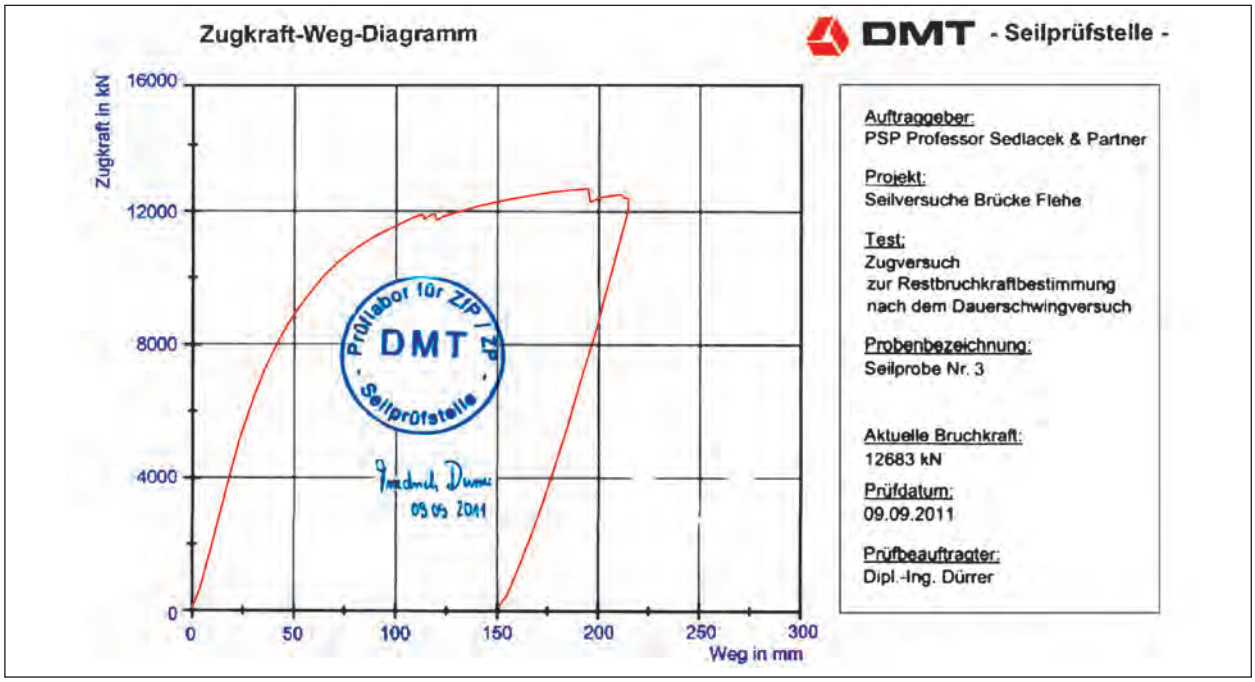


Bild 4.51: Bruchlastdiagramm vom dritten Bauteilversuch

4.8 Vierter Bauteilversuch

Nach den durchaus guten Versuchsergebnissen mit dem Kunststoffverguss wurde entschieden, den vierten Versuch erneut mit einem ZAMAK-Verguss durchzuführen. Hierbei wurde unterstellt, dass weniger der heiße Verguss ursächlich für das schlechte Abschneiden im ersten Bauteilversuch war, sondern ggf. die generelle Vorgehensweise beim Reinigen und Aufbiegen der Seilbesen eine Vorschädigung der Drähte verursacht hat, die dann im Ermüdungsversuch zu den zahlreichen Drahtbrüchen führten. Besondere Sorgfalt wurde daher auf die Herstellung des Probekörpers und das Aufbiegen der Drähte gelegt.

Die sonstigen Randbedingungen entsprachen dabei dem zweiten und dem dritten Versuch, d. h. es wurde ein Abschnitt mit Korrosion ausgesucht.

Hierbei handelte es sich um einen Bereich mit leichter Korrosion, die vereinzelten Narbentiefen betrugen 0,2 mm. Bild 4.52 zeigt die eingebaute Probe in der Versuchseinrichtung. Der braun verfärbte Bereich ist die korrodierte Stelle (siehe Bild 4.53).

Im Ermüdungsversuch nahm dieser Versuch einen vergleichbaren Verlauf wie beim ersten Bauteilversuch. Es traten insgesamt 52 Drahtbrüche auf, die sich aber diesmal auf beide Seilköpfe verteilten. Einige Drahtbrüche lagen auch in der freien Seillänge. Die Bilder 4.54 bis 4.58 zeigen einige aussagekräftige Details.

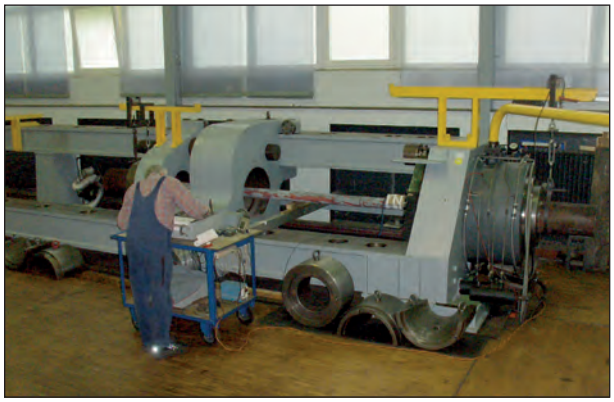


Bild 4.52: Eingebaute vierte Bauteilprobe

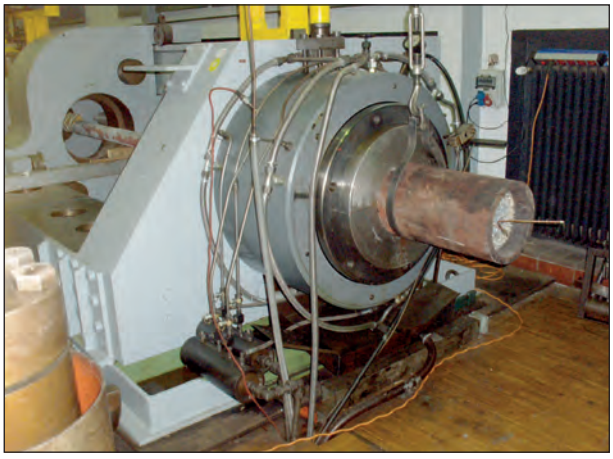


Bild 4.53: Eingebaute vierte Bauteilprobe

Bild 4.54: Erster Drahtbruch mit geringer Verschiebung, genaue Lage nicht ermittelbar

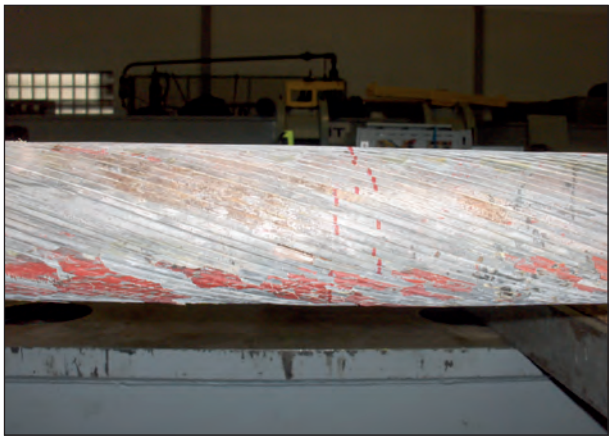


Bild 4.57: Drahtbrüche benachbarter Drähte erkennbar

Bild 4.55: Zwei weitere Drahtbrüche, genaue Lage unbekannt

Bild 4.58: Abbändelung zur Sicherung des Verbundes erforderlich

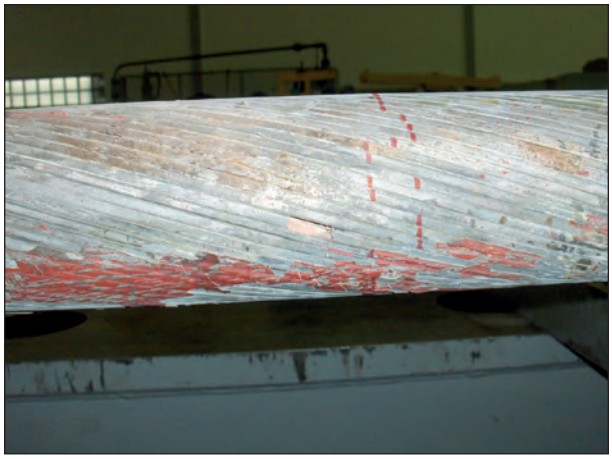


Bild 4.56: Drahtbruch außerhalb des korrodierten Bereiches mit großem Versatz

Bild 4.59: Drahtbrüche in der Nähe des Seilkopfes

Zunächst traten drei Drahtbrüche auf, die nur aufgrund der Verschiebung der Markierung erkennbar waren, die genaue Lage, sehr wahrscheinlich im Inneren des Seilkopfes, war visuell nicht sichtbar. Anschließend traten weiter Drahtbüche auf, die dann dazu führten, dass der Verbund mit einer Abbändelung gesichert werden musste.

In Bild 4.59 ist zu erkennen, dass sich das Seil im Seilkopf gesetzt hat. Diese Setzung ist aber im erlaubten Bereich. In der Regel werden 8 % vom Seildurchmesser als zulässig angesehen, andere Vor-

Bild 4.60: Drahtbruchentwicklung bei dem 4. Versuch

Bild 4.61: Drahtbruchentwicklung abhängig von den Lastwechselzahlen

schriften wie z. B. die norwegische Vorschrift, beschränken dies strenger (auf 4 mm unabhängig vom Durchmesser).

Mit dem Anbringen von weiteren Abbändelungen konnte der Ermüdungsversuch bis zum Erreichen der 2,0 Mio. Lastwechsel durchgefahren werden. Die Drahtbruchentwicklung ist grafisch und tabellarisch in den Bildern 4.60 und 4.61 dargestellt. Über die Gesamtzeit des Versuches war eine stetige Drahtbruchentwicklung feststellbar. Hinsichtlich der Lage einzelner Drahtbrüche wurde eine weitergehende Ultraschalluntersuchung durchgeführt, die in Kapitel 4.5.6 dargestellt ist.

Das Bruchlastdiagramm (siehe Bild 4.62) zeigt einen unstetigen Verlauf, es ist zu vermuten, dass sich weitere Setzungen und zusätzliche Drahtbrüche ergeben haben, die zunächst zu einem Verlust der bereits aufgenommenen Zugkraft geführt haben. Es kommt auch zu Veränderungen bei der Schlaglänge in dem Bereich der Drahtbrüche, das Gesamtsystem hat sich dann wieder stabilisiert und konnte die ursprüngliche Zugkraft wieder aufnehmen, bevor ein Gesamtversagen eingetreten ist (siehe Bild 4.63). Im Gegensatz zu dem zweiten und dritten Versuch hat der Probekörper relativ schnell versagt, es fand auch keine Ankündigung statt. Die Vorschädigung und die dadurch auftretenden Asymmetrien haben ein Dehnungsplateau nicht ermöglicht.

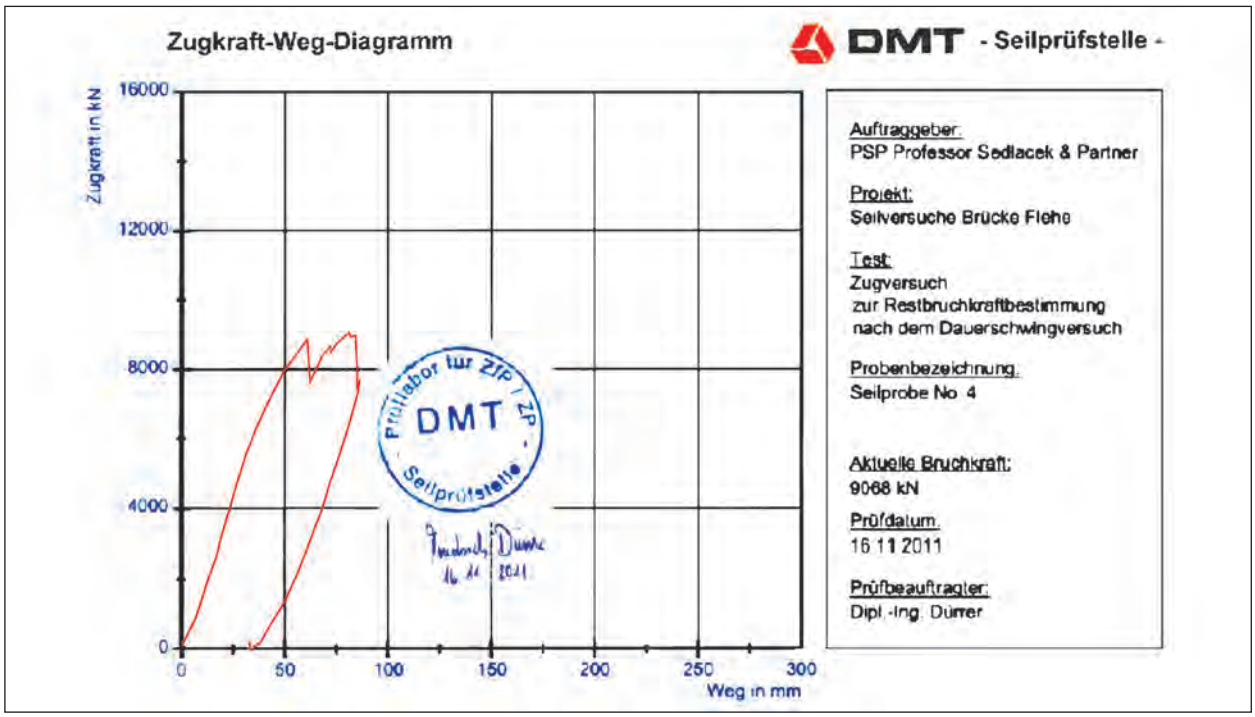


Bild 4.62: Bruchlastdiagramm 4. Versuch

Bild 4.63: 4. Bauteilprobe nach dem Bruchlastversuch

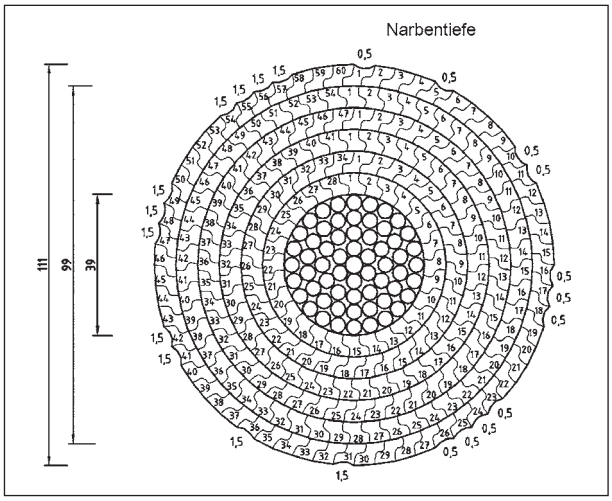


Bild 4.64: Vorgabe der Narbentiefe für den fünften Bauteilversuch

Seil Ø 111 mm	Tatsächliche Bruchkraft [kN]	Rechnerische Bruchkraft [kN]	Verhältnis
1. Versuch 1979	12.680	13.390	0,95
2. Versuch 1979	12.750	13.390	0,95
1. Versuch (ZAMAK)	8.334	13.390	0,62
2. Versuch (Kunststoff)	12.943	13.390	0,97
3. Versuch (Kunststoff)	12.683	13.390	0,95
4. Versuch (ZAMAK)	9.068	13.390	0,68

Tab. 4.6: Vergleich der Bruchlasten

Bild 4.65: Eingebrachte künstliche Narbentiefe

Die aufnehmbare Bruchlast entsprach etwa 68 % der rechnerischen Bruchlast und liegt somit in der Größenordnung des ersten Versuches, siehe Tabelle 4.6.

4.9 Fünfter Bauteilversuch

Um in einem abschließenden Versuch die Abhängigkeit der Narbentiefe auf mögliche Drahtbrüche zu untersuchen, wurde ein Seilabschnitt mit künstlich eingebrachten Narben versehen.

Hierbei handelte es sich um Narbentiefen von 0,5 und 1,5 mm, die vereinzelt, zwei nebeneinander, drei nebeneinander und vier nebeneinander angebracht wurden. In Bild 4.64 sind die Vorgaben zu diesem Versuch dargestellt. Die einzelnen Narbenpackte wurden ringförmig angebracht, jedoch immer mit einem genügenden Abstand untereinander in Form von unbeschädigten Drähten, sodass eine gegenseitige Beeinflussung weitgehend ausgeschlossen werden konnte.

Bild 4.65 zeigt die Ausführung der künstlichen Narben, zum einen die beiden vereinzelten 0,5 mm tiefen Narben und die vier nebeneinanderliegenden 1,5 mm tiefen Narben.

Hinsichtlich des Vergussmaterials wurde aufgrund der guten Erfahrungen entschieden, diesen Versuch wiederum mit einem Kunststoffverguss durchzuführen. Hierdurch sollten die ggf. störenden Drahtbrüche in den Seilköpfen direkt vermieden werden.

Der Ermüdungsversuch konnte bis zum Erreichen der 2,0 Mio. Lastwechsel durchgefahren werden, allerdings ergaben sich 18 Drahtbrüche, wobei nur wenige in dem zugänglichen und sichtbaren Bereich waren. In den künstlich angebrachten Narben wurden keine Drahtbrüche festgestellt, siehe Bild 4.65.

Zwei Drahtbrüche (siehe Bild 4.66 und Bild 4.67) lagen in der freien Länge ausserhalb des Bereiches mit den künstlichen Narben. Der eine Drahtbruch lag am Rand einer Stelle mit leichtem Rostansatz, hier hatten sich aber noch keine Mulden oder sonstigen Vertiefungen gebildet und der Drahtbruch lag auch nicht im Zentrum der korrodierten Stelle.

Die Bilder 4.68 bis 4.71 zeigen die Bereiche mit den künstlichen Narben, hier ergaben sich keine Veränderungen, wie z. B. direkte Drahtbrüche und Versätze, die auf benachbarte Drahtbrüche schließen würden.

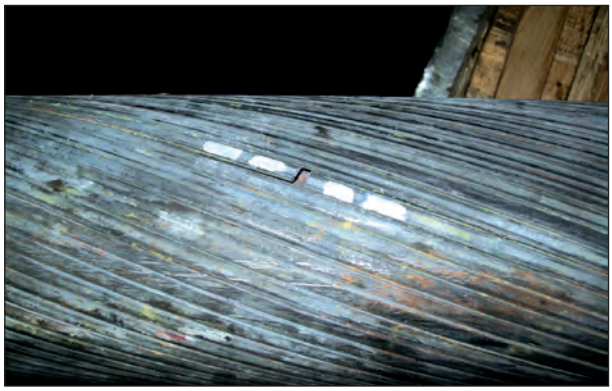


Bild 4.66: Drahtbruch in der freien Länge

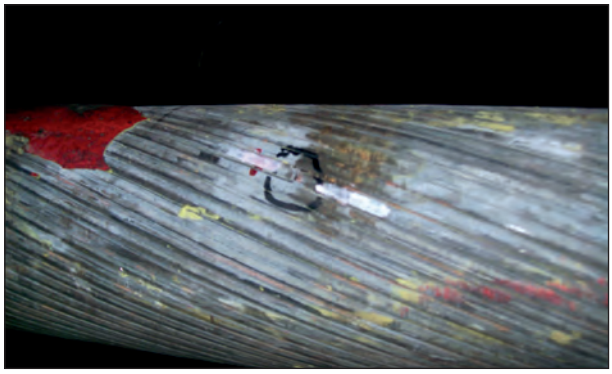


Bild 4.67: Drahtbruch in der freien Länge im Bereich einer korrodierten Stelle

Bild 4.68: Bereich mit künstlichen Narben (Stelle mit 1,5 mm und 4er Gruppe mit 0,5 mm Tiefe)

Somit war im Ansatz das passiert, was auch bei dem ersten und vierten Versuch stattgefunden hatte, es lagen zahlreiche Drahtbrüche im Bereich der Krafteinleitung.

Es deutet sich somit an, dass nicht der Warmverguss bei Verwendung von ZAMAK ausschließlich ursächlich ist für die Drahtbrüche in den Seilköpfen, sondern hier eine mechanische Beanspruchung ggf. eine Reibkorrosion die Drahtbrüche verursacht hat.

Bild 4.69: Bereich mit künstlichen Narben (1er Gruppe mit 1,5 mm Tiefe)

Bild 4.70: Bereich mit künstlichen Narben (3er Gruppe mit 0,5 mm Tiefe)

Bild 4.71: Bereich mit künstlichen Narben (4er Gruppe mit 1,5 mm Tiefe)

Die Bilder 4.72 und 4.73 zeigen grafisch und tabellarisch die Entwicklung der Drahtbrüche. Auffällig ist hierbei, dass die Drahtbruchentwicklung erst nach ca. 1,0 Mio. Lastwechsel losgeht, dann allerdings durchaus mehrere Drahtbrüche direkt hintereinander erfolgen. Die Drahtbrüche Nr. 4, 5, 6 und 7 liegen nur 750 (von 4 nach 5), 875 (von 5 nach 6) und 1.250 (von 6 nach 7) Lastwechsel auseinander.

Die Probe wurde anschließend in die Prüfmaschine für den Bruchlastversuch eingebaut, siehe Bild 4.74.

Bild 4.75 zeigt den Bereich mit der Vorschädigung und den roten Markierungen, die ohne Versatz sind und damit beweisen, dass hier im Ermüdungsversuch keine visuell sichtbare Schädigung entstanden ist.

Der Bruchversuch wurde begonnen, musste aber unterbrochen werden, da sich ein großer Abfall bei der aufgenommen Kraft zeigte. Der Versuchskörper wurde daraufhin visuell kontrolliert.

Bild 4.72: Drahtbruchentwicklung beim 5. Versuch abhängig von den Lastwechselzahlen

0	0
1	1067500
2	1216575
3	1300500
4	1376125
5	1376875
6	1377750
7	1379000
8	1512250
9	1527750
10	1609100
11	1609800
12	1641600
13	1697225
14	1777625
15	1785000
16	1815750
17	1924975
18	1969930

Bild 4.73: Drahtbruchentwicklung 5. Versuch abhängig von den Lastwechselzahlen

Es zeigte sich zunächst ein Drahtbruch in dem Bereich mit den künstlich eingebrachten Narben, siehe Bild 4.76.

Weiterhin hat sich der gebrochene Draht aus dem Verbund gelöst, siehe die Bilder 4.77 und 4.78.

Der Versuch wurde anschließend weitergefahren und bis zum endgültigen Versagen durchgeführt.

Bild 4.74: Eingebaute Probe für den Bruchlastversuch

Bild 4.75: Eingebaute Probe mit Blick auf die Vorschädigung

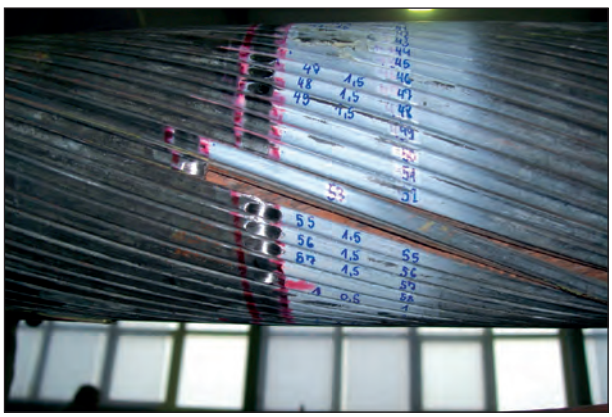


Bild 4.76: Drahtbruch im Bereich einer 1,5 mm tiefen Narbe

Bild 4.77: Drahtbruchstelle aus dem Ermüdungsversuch

Bild 4.78: Seil nach dem Bruchlastversuch

Bild 4.79 zeigt die Last-Verformungskurve, die zunächst einen einigermaßen typischen Anstieg zeigt, dann einen Abfall mit einem erneuten Anstieg. Dies liegt darin begründet, dass der Versuch angehalten wurde und der Versuchskörper visuell auf Besonderheiten kontrolliert wurde. Auffälligkeiten wurden hierbei aber nicht festgestellt, sodass anschließend der Versuch weiter geführt wurde. Die höchste Bruchlast von 10.488 kN wird allerdings nicht mehr erreicht, das Seil versagt komplett unterhalb von 10.000 kN. Somit war eine Schädigung in den Seilköpfen vorhanden, da die Drahtbrüche und Unregelmäßigkeiten auf der freien Länge relativ gering waren.

Nach dem Versuch wurde die Probe ausgebaut und visuell begutachtet. Auffallend war dabei die relativ große Setzung an einem Seilkopf, die in Bild 4.80 zu erkennen ist, diese liegt über der eigentlich zu erwartenden Größe von maximal 8 – 9 mm.

Die Setzung im Seilkopf erklärt auch den Abfall in der Last-Verformungskurve.

Der Probekörper zeigt also nicht das typische Versagen mit einer gehäuften Anzahl von Drahtbrüchen in Probenmitte sondern versagt durch übergroße Setzungen im Bereich des Seilkopfes.

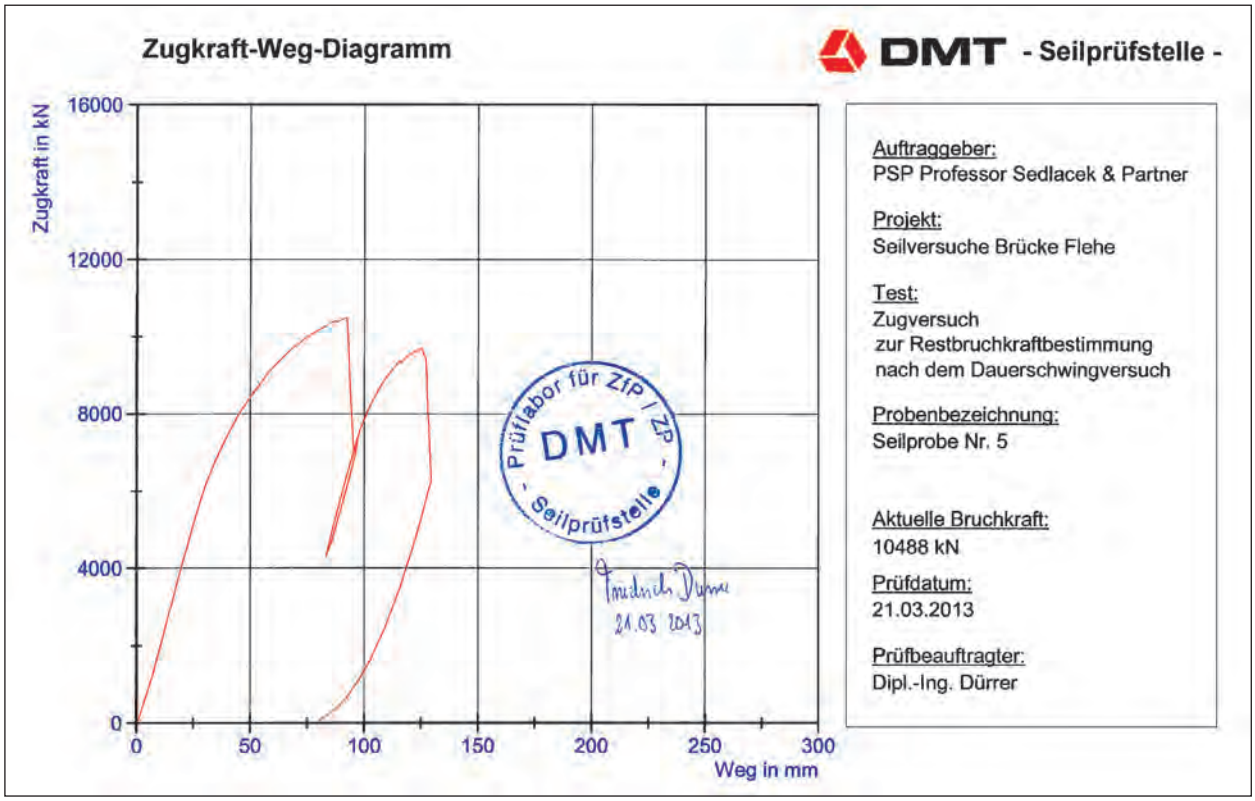


Bild 4.79: Bruchlastdiagramm 5. Versuch

Im Nachgang wurde an diesem Seil die äußere Drahtlage entfernt (siehe Bild 4.83) und mittels einer Ultraschalluntersuchung geprüft. Das Ziel war, verdeckte Drahtbrüche in den unteren Lagen im Seilkopf zu detektieren, es ergaben sich aber keine Anzeichen und Hinweise.

Tabelle 4.7 stellt die Bruchlasten aller durchgeführten Versuche zusammen. Beim 5. Versuch ergibt sich eine geringere Bruchlast als bei den Versuchen von 1979 und dem 2. und 3. Versuch des Forschungsvorhabens.

Insbesondere dieser Versuch zeigt, dass Drahtbrüche im Wesentlichen von mechanischen Spitzenbeanspruchungen und/oder Kerben ausgehen und weniger von geschmeidigen Vertiefungen.

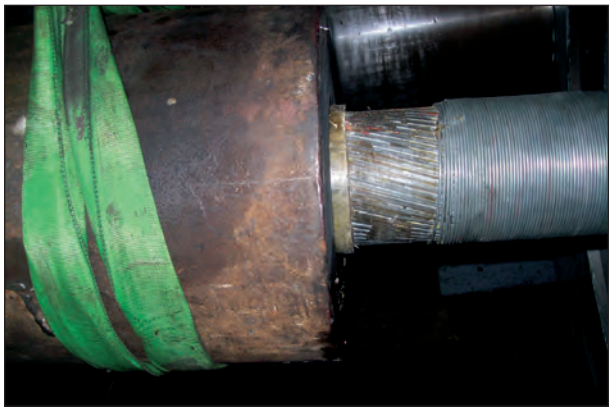


Bild 4.80: Setzung im Seilkopf

Bild 4.82: Drahtverbund nach dem Bruchlastversuch

Bild 4.81: Ausgebaute Probe des 5. Bauteilversuchs

Bild 4.83: Ultraschalluntersuchung am ausgebauten Versuchskörper

Seil Ø 111 mm	Tatsächliche Bruchkraft [kN]	Rechnerische Bruchkraft [kN]	Verhältnis
1. Versuch 1979	12.680	13.390	0,95
2. Versuch 1979	12.750	13.390	0,95
1. Versuch (ZAMAK)	8.334	13.390	0,62
2. Versuch (Kunststoff)	12.943	13.390	0,97
3. Versuch (Kunststoff)	12.683	13.390	0,95
4. Versuch (ZAMAK)	9.068	13.390	0,68
5. Versuch (Kunststoff)	10.488	13.390	0,78

Tab. 4.7: Vergleich der Bruchlasten

Bezogen auf die zumeist auftretende muldenförmige Korrosion bedeutet dies, dass die Gefahr von Drahtbrüchen hier geringer einzustufen ist.

4.10 Zusammenfassung

Es wurden insgesamt 5 Bauteilproben untersucht, hierbei wurden zweimal ein Metallverguss (ZAMAK) und dreimal ein Kunststoffverguss (WIRELOCK) gewählt. Nachfolgend und im Anhang A1 werden Details der durchgeführten Versuche mit den Ergebnissen dargestellt:

- Versuch 1
  - ZAMAK-Verguss,
  - Ermüdungsversuch abgebrochen,
  - Zahlreiche Drahtbrüche in einem Seilkopf,
  - geringe Bruchlast erreicht.
- Versuch 2
  - WIRELOCK-Verguss,
  - Ermüdungsversuch erfolgreich,
  - ein Drahtbruch im korrodierten Bereich,
  - sehr hohe Bruchlast erreicht.
- Versuch 3
  - WIRELOCK-Verguss,
  - Ermüdungsversuch erfolgreich,
  - sieben Drahtbrüche in der freien Längen, an Stellen mit und ohne Korrosion ,
  - sehr hohe Bruchlast erreicht.
- Versuch 4
  - ZAMAK-Verguss,
  - Ermüdungsversuch erfolgreich,
  - zahlreiche Drahtbrüche in beiden Seilköpfen,
  - geringe Bruchlast erreicht.
- Versuch 5
  - WIRELOCK-Verguss,
  - Ermüdungsversuch erfolgreich,
  - viele Drahtbrüche in einem Seilkopf, vereinzelt in der freien Länge,
  - niedrige Bruchlast erreicht.

Zur Bewertung der Versuchsergebnisse sind folgende Sachverhalte zu berücksichtigen:

- Die Seile wurden ursprünglich entsprechend dem damaligen Stand der Technik gefertigt, geprüft und eingebaut.
- Die damaligen Versuche, die im wesentlichem schon den Anforderungen der TL Seile entsprachen, zeigten keine Auffälligkeiten.
- Die Seile waren von 1979 bis 2006 in der Brücke eingebaut, die Verkehrsbeanspruchung entsprach der einer Autobahnbrücke, allerdings war der Schwerverkehrsanteil geringer als bei den beiden hochbelasteten Rheinbrücken Leverkusen und Duisburg-Neuenkamp.
- Die Entnahmebereiche wurden so ausgewählt, dass Seilabschnitte entnommen wurden, die zwar Korrosionsstellen hatten, jedoch keine offensichtlichen mechanischen Beschädigungen oder Drahtbrüche.
- Die Probenentnahme erfolgte in allen Bereichen des Seiles, d. h. die Seile hatten durchaus entsprechend dem eingestellten Seildurchhang über ca. 25 Jahre eine Vorkrümmung erfahren und sind in diesem Zustand durch die auftretenden Verkehrsbeanspruchung eingeschwungen worden und haben eine stabile Ausgangslage gefunden.
- Durch die Ausbesserung des Korrosionsschutzes, haben die Seile in Teilbereichen mechanische Verletzungen erfahren, es sind durchaus Anfangskerben und ggf. Mikroanrisse erzeugt worden.

Die oben genannten Umstände beschreiben den allgemeinen Ausgangszustand der Bauteilprobe-

Nr. der Versuche Angabe der Vergussart Zeit der Durchführung	Bruchlast im Versuch [kN]	Verhältnis zur rechnerischen Bruchkraft von 13.390 [kN]	Anzahl der Drahtbrüche nach dem Ermüdungsversuch	Bemerkungen
1. Versuch 1979	12.680	0,95	Nicht bekannt	
2. Versuch 1979	12.750	0,95	Nicht bekannt	
1. Versuch (ZAMAK Metallverguss) Ermüdungsversuch 08.05.2009 bis 17.05.2009 Bruchversuch 20.05.2009	8.334	0,62	60	2 Drahtbrüche lagen im korrodierten Seilabschnitt in Probenmitte, 58 Drahtbrüche im Bereich eines Seilkopfes, der Ermüdungsversuch musste bei 1,5 Mio. Lastwechsel abgebrochen werden.
2. Versuch (WIRELOCK Kunststoffverguss) Ermüdungsversuch 11.05.2011 bis 22.05.2011 Bruchversuch 25.05.2011	12.943	0,97	1	1 Drahtbruch im korrodierten Bereich bei 1,25 Mio. Lastwechsel Versuchsergebniss entsprach den Versuchen von 1979.
3. Versuch (WIRELOCK Kunststoffverguss) Ermüdungsversuch 24.08.2011 bis 04.09.2011 Bruchversuch 09.09.2011	12.683	0,95	7	Insgesamt 7 Drahtbrüche 1 Drahtbruch im stark korrodierten Bereich, zwei Drahtbrücke im leicht korrodierten Bereich, 4 Drahtbrüche außerhalb in der freien Länge, ermittelte Bruchlast entsprach den Versuchen von 1979.
4. Versuch (ZAMAK) Ermüdungsversuch 26.10.2011 bis 06.11.2011 Bruchversuch 15.11.2011	9.068	0,68		Insgesamt 52 Drahtbrüche, davon 4 Drahtbrüche auf der freien Länge, jedoch außerhalb des korrodierten Bereiches, die anderen Drahtbrüche verteilten sich auf beide Seilköpfe.
5. Versuch (Kunststoffverguss) Ermüdungsversuch 07.03.2013 bis 18.03.2013 Bruchversuch 21.03.2013	10.488	0,78	18	Bei diesem Versuch wurden künstliche Narben mit einer Tiefe von 0,5 und 1,5 mm eingebracht 2 Drahtbrüche lagen in der freien Länge, ein Drahtbruch im der Nähe einen natürlich korrodierten Stelle, alle 15 anderen Drahtbrüche lagen im Bereich der Seilköpfe, kein Drahtbruch lag bei den künstlichen Narben.

Tab. 4.8: Vergleich der Versuchsergebnisse

körper, inwieweit diese jetzt mehr oder weniger stark bei dem einzelnen Probekörper ausgeprägt war, konnte nicht festgestellt werden.

Der erste Versuch mit Metallverguss zeigte ein eindeutiges Versagen in dem neu angegossenen Seilkopf, hier ist davon auszugehen, dass unplanmäßig große Kerbbeanspruchungen in dem Krafteinleitungsbereich entstanden sind, die dazu führten, dass die gesamte äußere Drahtlage relativ schnell gebrochen war. Hier kann z. B.

- die bauseitige Vorkrümmung,
- ein unsachgemäßes Einbauen des Seiles im Seilkopf,
- Fehler beim Seilverguss,
- Vorschädigungen beim Aufbiegen der einzelnen Drähte,
- thermische Beanspruchung beim Warmverguss,
- visuell nicht sichtbare Vorschädigung aus den vergangenen Jahren,

allein oder in Kombination die Ursache gewesen sein.

Insgesamt kann man hier aber von einem untypischen Versuchsverlauf sprechen, die vereinzelten Drahtbrüche in dem korrodierten Bereich lassen aber bereits hier erkennen, das von Korrosionsnarben keine übergroße Gefährdung hinsichtlich der Drahtbrüche ausgeht.

Um einen Einfluss auf das Versuchsergebnis durch den Warmverguss auszuschließen, wurde der zweite Versuch mit einem Kunststoffverguss durchgeführt. Der Versuch endet mit einem recht typischen Versuchsverlauf und sehr gutem Versuchsergebnis.

Der Bruchversuch zeigte ein normales Versagen in der freien Seillänge. Der Drahtbruch in einem korrodierten Bereich bei 1,25 Mio. Lastwechsel deutet einen Einfluss von Korrosion auf mögliche Drahtbrüche an, wobei der Drahtbruch an einem benachbarten Draht mit wenig Korrosion aufgetreten ist, hier können ggf. Umlagerungen von einem zum anderen Draht den Ausschlag für den Drahtbruch gegeben haben. Dieser Versuch kann als Beleg für das insgesamt gute Resttragverhalten der Seile auch nach über 25 Jahren Betriebsdauer gesehen werden.

Der dritte Versuch wurde wiederum mit einem Kunststoffverguss ausgeführt und zeigte hinsichtlich des Gesamtergebnisses das selbe Verhalten wie der zweite Versuch. Die sieben Drahtbrüche in der freien Länge verteilten sich sowohl auf korrodierte und nicht korrodierte Stellen, sodass man wiederum festhalten kann, dass die Korrosion nicht grundsätzlich Drahtbrüche provoziert, sondern hier auch andere Faktoren den Ausschlag für einen Drahtbruch geben.

Beim vierten Versuch wurde ein Metallverguss gewählt mit folgenden Überlegungen und Vorkehrungen:

- sehr sorgfältiges Vorgehen beim Aufbiegen der Drähte und Anbringen der Seilköpfe,
- der Versuch sollte auch überprüfen, inwieweit der Warmverguss oder Kaltverguss ausschlaggebend für das anschließende Versagen ist. Die Auswertungen anderer Bauteilversuche für Neulieferungen hatten keinen wesentlichen Unterschied bei der Vergussart gezeigt,
- Klärung der Fragestellung ob das Versagen des ersten Versuches einen Einzelfall darstellt.

Im Gegensatz zum ersten Versuch konnte der Ermüdungsversuch durchlaufen, es ergaben sich aber wiederum gehäuft Drahtbrüche in den Seilköpfen. Hierbei verteilten sich die Drahtbrüche auf beide Seilköpfe und betrafen jeweils die äußere Lage. Aufgrund der Vorschädigungen war die erreichte Bruchlast ebenfalls geringer als in den Ursprungsversuchen und in dem 2. und 3. Bauteilversuch. Die Setzungen in einem Seilkopf waren zwar deutlich, aber in dem zulässigen Bereich. Die Drahtbrüche in der freien Länge lagen alle außerhalb des korrodierten Bereiches, insofern hatte die Korrosion auf die Drahtbrüche und das anschließende Versagen keinen wesentlichen Einfluss. Dieser Versuch ist ein Hinweis, dass das Ergebnis des 1. Bauteilversuches kein singuläres Ereignis darstellt.

Der fünfte Bauteilversuch wurde mit künstlichen Narben mit einer Tiefe von 0,5 und 1,5 mm durchgeführt. Die Narben wurden in 1er, 2er, 3er und 4er Gruppen über den Seilumfanng verteilt angeordnet. Im Ermüdungsversuch ergaben sich keine Drahtbrüche im Bereich der Narben. Die festgestellten 18 Drahtbrüche verteilten sich in der freien Seillänge und vereinzelt visuell nicht sichtbar in den Seilköpfen. Der Bruchlastversuch musste unterbrochen werden, im Nachgang stellte sich heraus, dass übergroße Setzungen in einem Seilkopf das Bauteilversagen bestimmt hat. Aus diesem Versuch lässt sich folgendes ableiten:

- Das Bauteilversagen wird nicht durch den Warm- oder Kaltverguss bestimmt,
- die Drahtbrüche liegen nicht zwangsläufig im korrodierten Bereich,
- das Bauteilversagen wird durch Unstetigkeiten in der Kraftübertragung zwischen Seil und Seilkopf maßgeblich bestimmt. Diese Unstetigkeiten können übergroße Setzungen im Seilkopf und/ oder Anhäufungen von Drahtbrüchen im Inneren des Seilkopfes sein,
- geschmeidige Narben haben keinen wesentlichen Einfluss auf die Entwicklung von Drahtbrüchen.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass die 25 Jahre Betriebsdauer die Seile nicht grundlegend so geschädigt haben, dass Einbußen bei der Tragfähigkeit und Ermüdungssicherheit grundsätzlich unterstellt werden muss. Die schlechten Versuchsergebnisse sind durch Veränderungen in der Lastabtragung und sonstigen Maßnahmen begründet. Insofern gilt auch für die Seile das grundlegende Prinzip, nicht ohne wirkliche Erfordernis in ein bestehendes und fehlerfreies Lastabtrageverhalten einzugreifen. Jeder zusätzlich Einbau oder Veränderung kann auch zu ungewollten Kraftumlagerungen führen, die ggf. massive Schäden hervorrufen.

Insofern sind z. B. bei den anstehenden Korrosionsschutzmaßnahmen bei anderen Brücken, die lokale Lateinleitung von Gerüsten und Befahranlagen besonders kritisch zu hinterfragen. Hier ist durch eine entsprechend konstruktive Ausbildung eine Vorschädigung der einzelnen Drähte zu vermeiden.

Zusammenfassend über alle Versuche können folgende Feststellungen getroffen werde:

- Verguss

  Bestand zunächst der Verdacht, dass ein Warmverguss eine zusätzliche Schädigung der Drähte verursacht hat, wurde dies bei dem 5. Versuch widerlegt. Auch bei dem hier durchgeführten Kaltverguss sind zahlreiche Drahtbrüche in dem Seilkopf aufgetreten.

- Drahtbrüche

  Es scheint so, dass die mechanische Beanspruchung in den Seilköpfen einen ganz erheblichen Einfluss auf die Entstehung von Drahtbrüchen hat. Teilweise sind die Drahtbrüche nach dem Erreichen der Hälfte der 2,0 Mio. Lastwechsel eingetreten, sodass als Schadensursache eine Reibkorrosion durchaus in Frage kommt.

- Bruchlasten

  Der nach den Drahtbrüchen verbleibende Restquerschnitt bestimmt die im Versuch erreichbare Bruchlast. Bei den Versuchen 1, 4 und 5 sind dadurch die geringen Bruchlasten zu erklären. Zeigen die Versuch 2 und 3 einen typischen Verlauf, so sind die Last Verformungskurven der anderen drei Versuche durch Besonderheiten gekennzeichnet. Diese können z. B. auch durch Setzungen im Seilkopf verursacht werden.

- Korrosion

  Es wurden Drahtbrüche in den korrodierten Bereichen in der freien Länge festgestellt. Die korrodierten Stellen führten aber in den Versuchen nicht zwangsläufig zu Drahtbrüchen. Die Narbentiefe konnte hier nicht als Parameter für den Zeitpunkt der Entstehung ermittelt werden. Das Einbringen von künstlichen Narben hatte keinen Einfluss auf die Entstehung von Drahtbrüchen, selbst tiefe und nebeneinander liegende Narben führten nicht zu Drahtbrüchen. Insofern ist das Vorhandensein von Korrosion als Schaden der Drähte anzusehen, der eine Ausbesserung oder Erneuerung des Korrosionsschutzes erfordert. Weitergehende Maßnahmen sind aber nicht zwangläufig damit verbunden.

5 Untersuchungen zur Korrosion

5.1 Allgemeines

In der Regel werden Seile als vorgespannte Zugelemente eingesetzt. Unter Vernachlässigung des Biegeanteils herrscht über den gesamten Querschnitt die gleiche Spannungsausnutzung. Bei den Seilen bieten die vollverschlossenen Seile aufgrund ihres Konstruktionsprinzips den Vorteil, dass sie infolge der Zugbeanspruchung und der Verzahnung in einer geschlossenen Form bleiben. Der Zutritt von Wasser und Luft an die inneren Drahtlagen wird dadurch in der Regel verhindert.

Generell wird in diesem Forschungsvorhaben die Korrosion auf der freien Länge betrachtet, also in einem über den Seilquerschnitt gesehen gleichbleibend hohen Spannungsausnutzung.

Im Bereich von Verankerungen, Umlenkungen oder sonstigen Lasteinleitungspunkten wird der in Längsrichtung eindimensionale Spannungszustand gestört, und es werden insbesondere in den Randbereichen des Seilquerschnitts nochmals höhere Spannungen auftreten. In der Regel können hier aber auch besondere Konstruktionsdetails eine Korrosion verhindern.

In der Fachliteratur (z. B. [81]) werden verschiedene Korrosionsarten unterschieden, z. B.:

- abtragende Korrosion,
- Spannungsrisskorrosion,
- Reibkorrosion,
- Schwingungrisskorrosion.

Die abtragende Korrosion tritt am häufigsten bei ungeschützten oder mit defektem Korrosionsschutz versehenen Seilen mit unverzinkten Drähten auf, siehe z. B. die Schäden an den Rheinbrücken Emmerich und Duisburg-Neuenkamp in Kapitel 3. Nach [81] überwiegt bei einer freien Angriffsfläche die muldenartige oder gleichmäßige Abtragung, in Spalten eher die lochfraßartige Ausbildung. Schwefeldioxid in der Umgebungsluft wirkt eher muldenartig, wobei Cloride eher Lochfraß bewirken. Durch diese Korrosion wird der statisch wirksame Querschnitt reduziert. Inwieweit diese Schädigung bei dynamisch beanspruchten Seilen die Herabsetzung der Ermüdungssicherheit bewirkt, ist die hier vorliegende Fragestellung.

Die Spannungsrisskorrosion ist dadurch gekennzeichnet, dass bei einem Korrosionsangriff Wasserstoff frei wird. Falls dieser Wasserstoff in den Stahl eindringt und dabei nicht sofort wieder durch Sauerstoff in eine Oxidation überführt wird, versprödet der Stahl an dieser Stelle lokal. Bei einer dynamischen Belastung können dann Drahtbrüche entstehen. Gefährdet hierbei sind insbesondere die inneren Lagen von Seilen, da hier ggf. Feuchtigkeit eindringen kann aber die Sauerstoffzufuhr abgeschirmt wird. Es ist zu vermuten, dass bei den vollverschlossenen Seilen die Wahrscheinlichkeit von Spannungsrisskorrosion geringer ist als bei den anderen Seilarten.

Desweiteren gibt es die Form der Reibkorrosion. Hierunter ist die ständige Relativerschiebung der Drähte untereinander und der gleichzeitige Zutritt von einem korrosionsfördernden Medium zu verstehen. Das Eindringen von Luft mit einem Feuchtigkeitsgehalt reicht neben der Bewegung aus, um diese Korrosionsart zu beginnen und fortzusetzen.

Eine weitere Korrosionsart ist die Schwingungsrisskorrosion, die sich aus einer Kombination von dynamischen Belastungen und einer Korrosion ergibt. Die Korrosion wird durch Umwelteinflüsse wie Industrieabgase und Cloridbeaufschlagung verursacht. Ungeeignete Konstruktionsdetails beschleunigen diese Art der Korrosion.

In [81] wird folgende Unterscheidung hinsichtlich der Reibkorrosion und der Schwingungsrißkorrosion gegeben, die in der Praxis nur schwer zu unterscheiden sind, im Labor hingegen eindeutig: Bei der Reibkorrosion stellt man Gefügezerrüttungen und Anrisse durch die Kristallite fest und die Anrisse verlaufen schräg zur Kraftrichtung, bei Schwingungsrißkorrosion erfolgen die Anrisse senkrecht zur Kraftrichtung und zeigen Anzeichen von Korrosion.

Inzwischen hat sich als sehr wirksamer Korrosionsschutz das Verzinken der Einzeldrähte herausgestellt. In die Hohlräume zwischen den Drähten werden Schmiermittel, wie z. B. Öle, Fette sowie Bleimenninge auf Leinölbasis als sog. Seilverfüllmittel gefüllt, die aber auf die verzinkten Drähte und den Zink abgestimmt werden müssen.

In [81] wird besonders auf die Verankerung der Drähte bzw. des Seiles in dem Seilkopf hingewiesen, siehe auch Bild 2.14. Durch die Abkantungen im Inneren des Seilkopfes kommt es zu einem Eindrücken des harten Seilkopfes in die weicheren Drähte, somit werden hier die Randspannungen bezogen auf die freie Seillänge deutlich erhöht. Statisch gesehen kommt es in dem Seilkopf zu einer durchaus gleichmäßigen Seilkrafteinleitung über die Seilkopflänge in die einzelnen Drähte. Kommt neben der rein statischen Beanspruchung noch eine dynamische Komponente hinzu entweder durch veränderliche Lasten oder aber durch Seilkraftauslenkungen, erhält man zwischen dem Seilkopf und den Drähten eine Relativverschiebung am Keilanfang. Hierdurch kann sich ein Bereich entwickeln, in dem Reibkorrosion entsteht, diese kann dann anschließend zu Drahtbrüchen in den Randbereichen führen.

Diese Überlegungen führen zu einer Umkonstruktion der Seilköpfe, die darauf abzielt, dass die Seilkrafteinleitung möglichst schnell in den Querschnitt eingeleitet wird und die Seilkraft im Ausgangsbreich möglichst schon gleichmäßig im Querschnitt vorhanden ist. Die geometrische Beanspruchungsspitze und die Krafteinleitungsspitze sind möglich weit auseinanderzulegen.

5.2 Korrosionsversuche am kompletten Seil

Durch das Institut für Eisenhüttenkunde (IEHK) wurden an aufbereiteten Seilabschnitten Vorversuche zur Ermittlung der Versuchsparameter zur Aufbringung der Korrosionsschädigung durchgeführt. Grundlage für diese Vorversuche gab der im Automobilbau angewendete Salzsprühtest.

Bild 5.1 zeigt einen vorbereiteten Seilabschnitt und Bild 5.2 zeigt die zugehörige Seilsprüheinrichtung.

Bild 5.3 zeigt den Probekörper nach einem durchgeführten Zyklus.

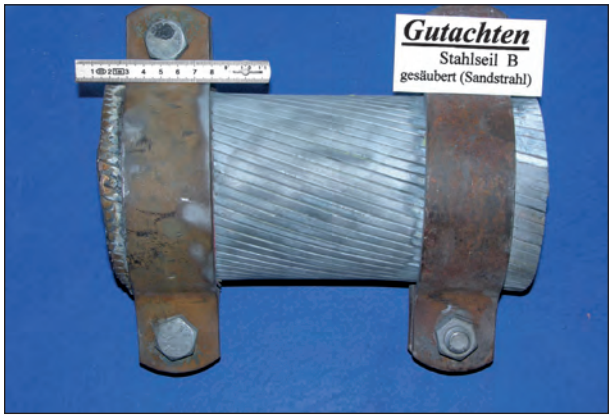


Bild 5.1: Vorbereitete Probe

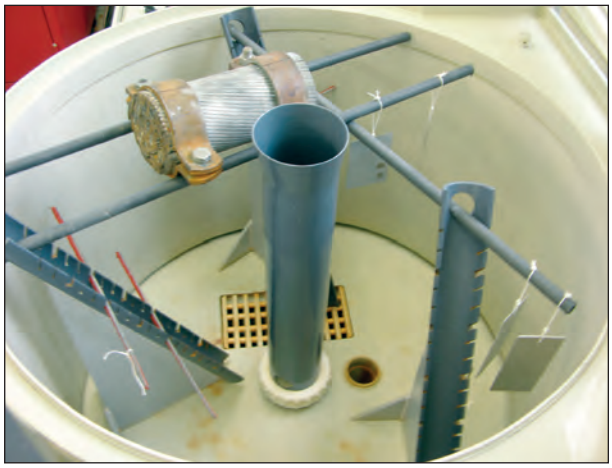


Bild 5.2: Salzsprüheinrichtung

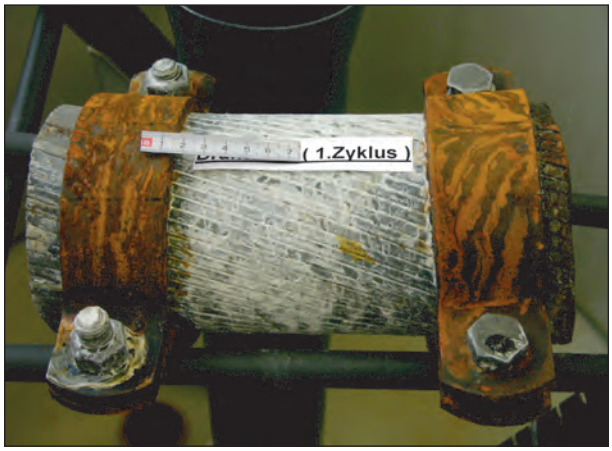


Bild 5.3: Probe nach dem 1. Zyklus

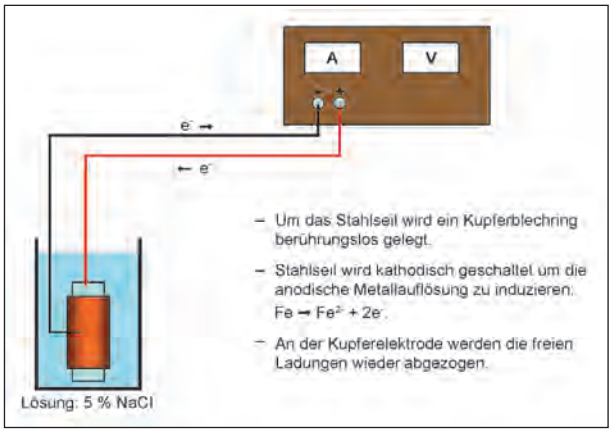


Bild 5.4: Veränderter Versuchsaufbau

Bild 5.5: Eingebauter Seilabschnitt

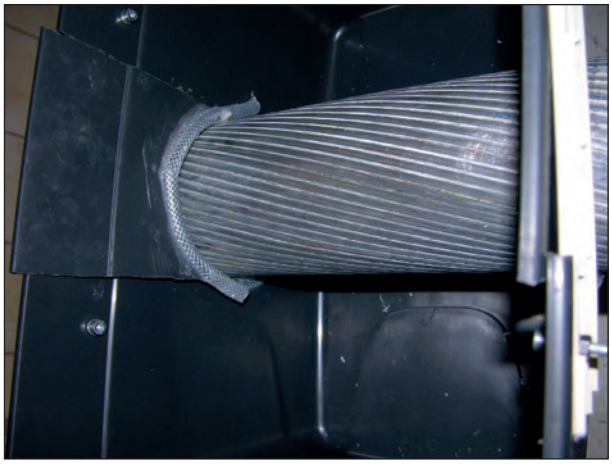


Bild 5.6: Blick in die Wanne

Bei den durchgeführten Vorversuchen zeigte sich, dass eine gewünschte Abrostung von 1 mm, wenn überhaupt, nur über einen extrem langen Zeitraum durch den Salzsprühtest erreicht werden kann.

Durch weitergehende Überlegungen wurde ein komplett anderer Versuchsaufbau durch das IEHK entwickelt.

Bild 5.4 zeigt eine Skizze von dem geänderten Versuchsaufbau. Der Versuchsaufbau orientiert sich an Verfahren einer anodischen Metallauflösung.

In weiteren Versuchen wurde dieser Versuchsaufbau weiterentwickelt, sodass an dem gesamten Seilaufbau Korrosion erzeugt werden kann, Die Bilder 5.5 und 5.6 zeigen den Wannenbehälter, in dem der Seilabschnitt eingebaut wird.

Aufgrund der durchgeführten Versuche ließen sich zeitliche Hochrechnungen durchführen, die den Zeitraum angeben, in dem eine definierte Korrosionstiefe erreicht werden kann.

Bild 5.7 stellt diese Hochrechnungen dar, somit würde eine Abrostung von 1 mm bezogen auf den Gesamtquerschnitt des Seiles eine Versuchsdauer von 76 h bedeuten.

Bild 5.8 zeigt den Seilabschnitt mit den Korrosionsstellen.

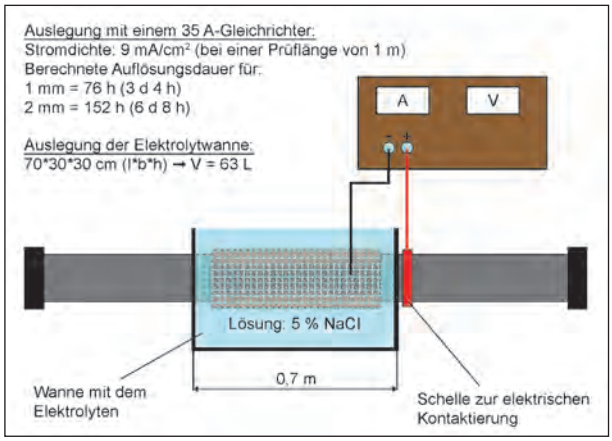


Bild 5.7: Ermittlung der Versuchsdauern bei 1 oder 2 mm Abrostungsrate

Bild 5.8: Korrodierter Seilabschnitt

Bild 5.9 und Bild 5.10 stellen den Versuchsaufbau für einen größeren Seilabschnitt dar, so wie er z. B. bei den geplanten Bauteilversuchen zum Einsatz kommen kann.

Somit können folgende Schlussfolgerungen aus den Vorversuchen gezogen werden:

- Durch die Anwendung des definierten Salzsprühtests ließ sich die gewünschte Schädigung der Seile nicht herstellen,

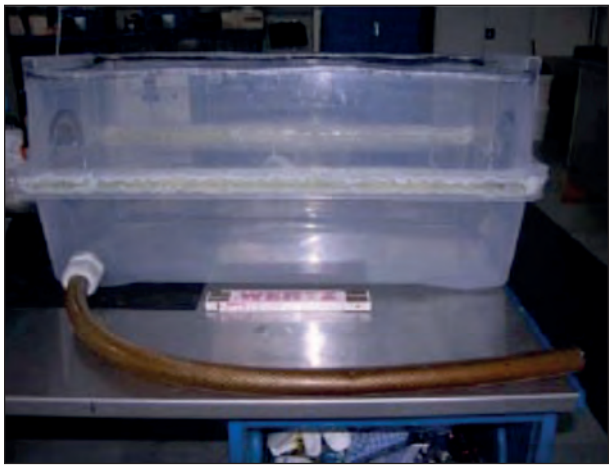


Bild 5.9: Versuchsaufbau für größere Seilabschnitte

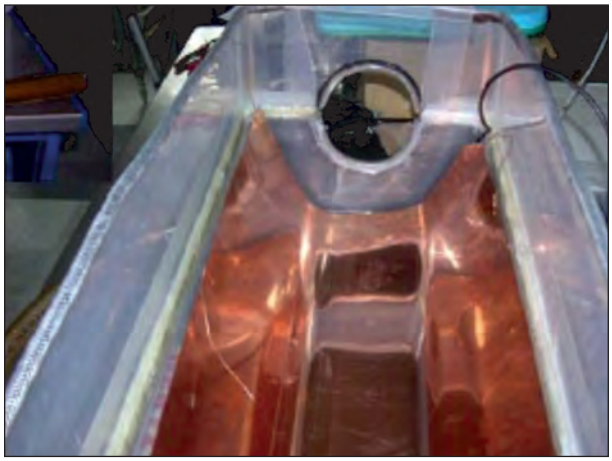


Bild 5.10: Blick in die Versuchswanne

- der geänderte Versuchsaufbau ermöglicht eine zügige Abrostung des Seilquerschnitts,
- die Korrosion ist über die gesamte Fläche, die sich im Korrosionsmedium befindet, gleichmäßig verteilt,
- mit dem Versuchsaufbau ist es aber weiterhin schwierig, die, z. B. bei der Rheinbrücke Duisburg-Neuenkamp gefundene Muldenkorrosion, exakt nachzubilden.

5.3 Korrosionsversuche an Einzeldrähten

In Ergänzung zu den durchgeführten Versuchen an dem kompletten Seilaufbau wurden Untersuchungen an den Einzeldrähten durchgeführt.

Die Vorgehensweise ist mit dem unter Kapitel 5.1 beschriebenen Verfahren identisch, siehe die Bilder 5.11 und 5.12.

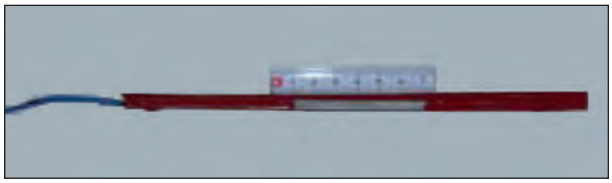


Bild 5.11: Einzelner Draht als Probekörper

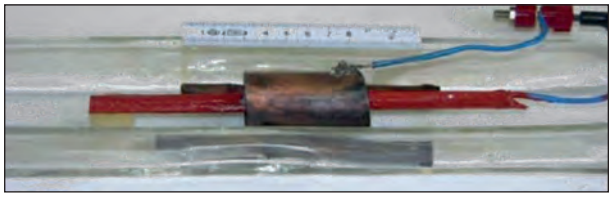


Bild 5.12: Versuchsanordnung mit einem Einzeldraht

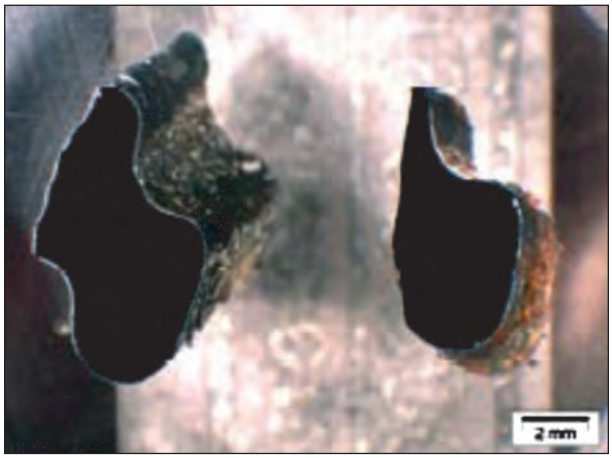


Bild 5.13: Schliffe durch den Einzeldraht

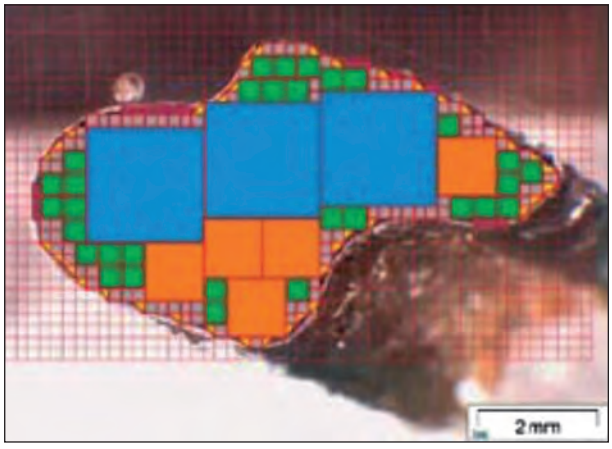


Bild 5.14: Durchgeführte Querschnittermittlung bei einem Einzeldraht

In Bild 5.13 sind Schliffe durch den Ausgangsdraht und den korrodierten Draht dargestellt, sodass die stattgefundene Abrostung deutlich wird.

Bild 5.14 stellt die Querschnittsermittlung der einzelnen Drahtquerschnitte dar.

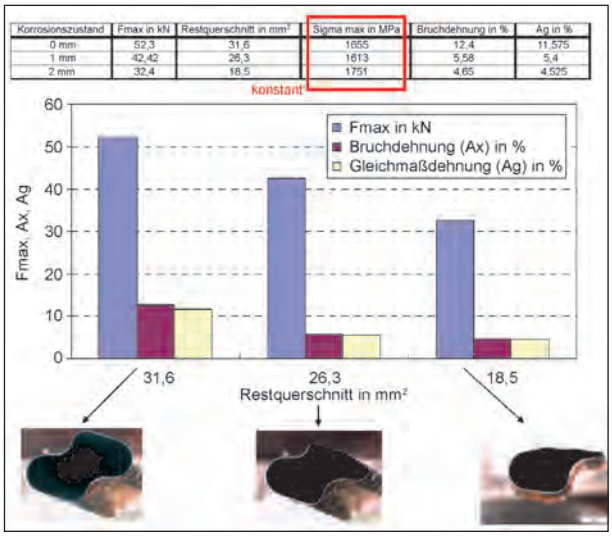


Bild 5.15: Versuchsergebnisse an Einzeldrähten

An den Einzeldrähten wurden Zugversuche durchgeführt, und zwar an einem Draht mit Ausgangsquerschnitt 1 mm Abrostung und 2 mm Abrostung. Bild 5.15 stellt die ermittelten Versuchsergebnisse dar.

Die Versuchsergebnisse belegen, dass die ermittelte maximale Bruchkraft sich proportional zu dem verbleibenden Querschnitt verhält. Auch bei den ermittelten Kennwerten der Bruchdehnung und der Gleichmaßdehnung konnten keine besonderen Auffälligkeiten ermittelt werden.

6 Weitere Untersuchungen

6.1 Allgemeines

In Ergänzung zu den durchgeführten Bauteilversuchen und aufgrund der festgestellten Versuchsergebnisse wurden weitere Untersuchungen durchgeführt, so z. B.:

- chemische Analyse des verwendeten Seilwerkstoffes,
- Untersuchung des Seilkopfes,
- Untersuchung der gebrochenen Drähte und der Bruchflächen,
- Untersuchung der Bauteilversuche zur damaligen Neulieferung der Seile,
- Untersuchung von bisher durchgeführten Bauteilversuchen,

- Untersuchung zum Aufbiegeverhalten der vorliegenden Drähte,
- Untersuchung zum Seilverguss.

Eine weitere Untersuchung wurde parallel zu diesem Forschungsvorhaben, direkt im Auftrag von Strassen.NRW durchgeführt. Hierbei handelt es sich um das Öffnen und Entfernen von äußeren Drahtlagen an ausgebauten Seilabschnitten der Rheinbrücke Flehe zur Überprüfung des inneren Zustandes. In den nachfolgenden Abschnitten wird über diese Untersuchungen berichtet.

6.2 Chemische Analyse der Seilwerkstoffe

Entsprechend den Bestandsunterlagen wurden bei dem Bau der Fleher Brücke die Seile von zwei Herstellern geliefert.

Bei den zuerst ausgetauschten Seilen handelte es sich um Seile, die die Fa. Trefill Arbed geliefert hat. Bei den für die Seilversuche aufbereiteten Probekörpern handelt es sich um Seile der Fa. Thyssen.

Eine Zuordnung der vor Ort festgestellten Schäden zu einem Seilhersteller konnte nicht erkannt werden, Seile beider Seilhersteller waren gleichermaßen betroffen. Trotzdem sollte verfolgt werden inwieweit die chemische Zusammensetzung oder die verwendeten Legierungselemente einen möglichen Einfluss auf das Korrosionsverhalten hatten.

Somit standen Materialproben für chemische Analysen von beiden Seillieferanten zur Verfügung, an denen jeweils die Einzelbestandteile ermittelt wurden.

Die Bilder 6.1 und 6.2 zeigen Schliffe von den beiden Proben.

Das Bild 6.3 stellt die wesentlichen Bestandteile der chemischen Analyse der beiden Proben dar.

Der Kohlenstoffgehalt bei der Probe Trefill Arbed ist höher als bei der Probe Thyssen, bei den anderen Bestandteilen ist der Unterschied nicht so gravierend.

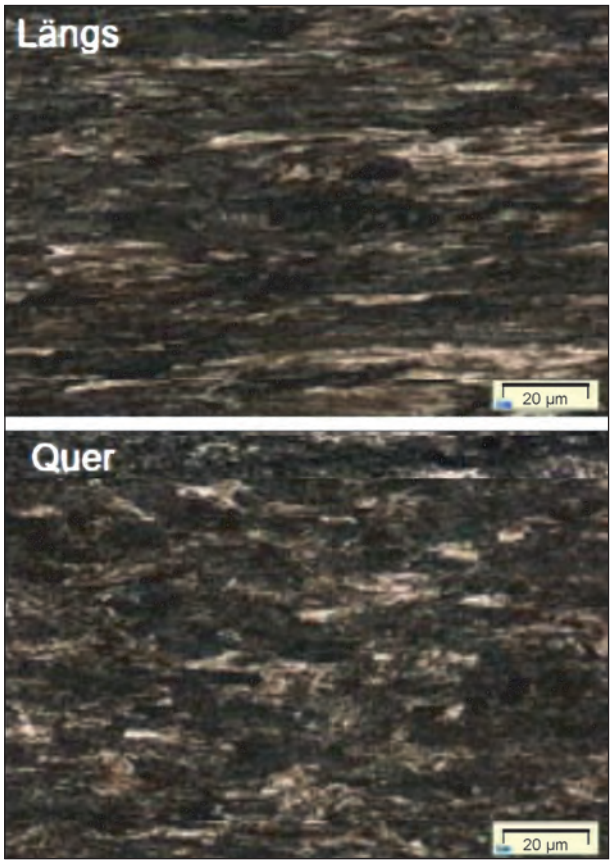


Bild 6.1: Schliffbilder von der Probe Thyssen

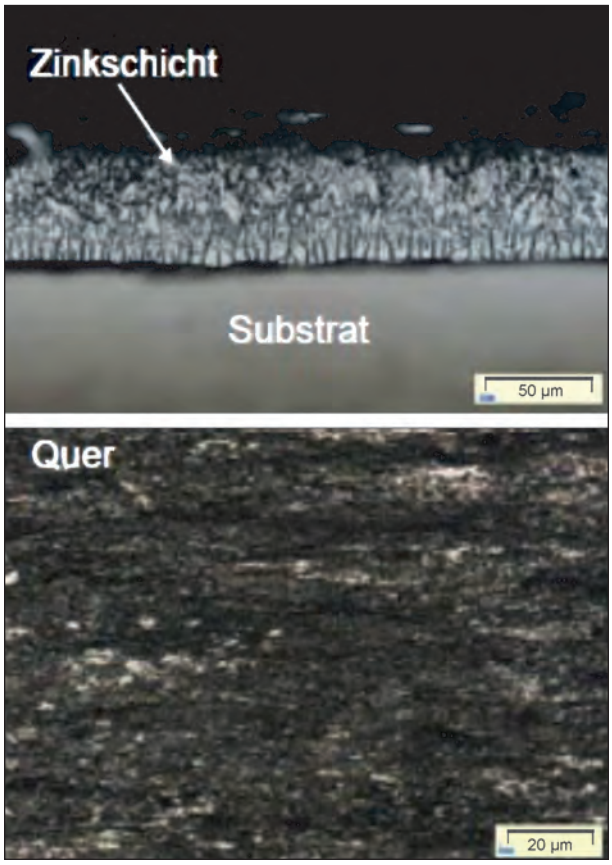


Bild 6.2: Schliffbilder von der Probe Trefill Arbed

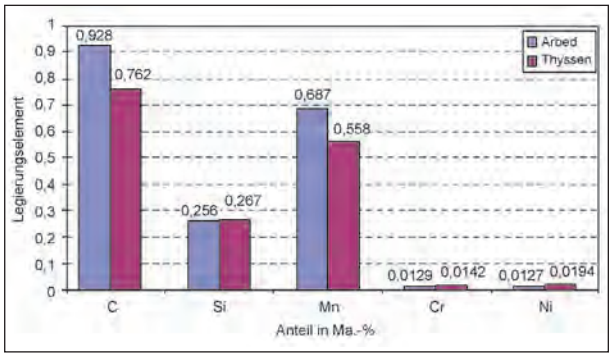


Bild 6.3: Ergebnisse der chemischen Analyse

6.3 Öffnung von Seilabschnitten

Im Zuge der Baumaßnahme wurden neben den Probekörpern für die Seilversuche des betrachteten Forschungsprojektes auch Proben bereitgestellt, an denen die Beschaffenheit der inneren Drahtlagen untersucht werden soll.

Die Untersuchung wurde im Auftrag des Landesbetriebs Straßenbau NRW Niederlassung Krefeld bei der DMT in Bochum durchgeführt.

Das Ergebnis ist in dem Bericht Nr. 043/2008/01 der DMT [7] vom 24.04.2008 festgehalten. Bild 6.4 zeigt ein Probestück vor der Öffnung mit großflächiger Korrosion.

Die Bilder 6.5 bis 6.8 zeigen das geöffnete Seil.

Insgesamt wurden 5 Proben untersucht.

Entsprechend dem Bericht der DMT [7] können die Ergebnisse wie folgt zusammengefasst werden:

- bei der Begutachtung der fünf Proben von der Außenseite zeigten sich Unterschiede hinsichtlich der Verzinkung und auch der Korrosion,
- Verzinkung der Außenseite war teilweise bis mäßig angegriffen,
- es gab Bereiche mit leichter und mäßiger Korrosion, eine Probe mit starker Korrosion,
- die Begutachtung den inneren Lagen ergaben keine gravierenden Unterschiede.
- ausreichend Seilverfüllmittel vorhanden, augenscheinlich relativ trocken, jedoch wurde beim Entfernen noch eine genügende Schmierwirkung festgestellt,
- bei den inneren Lagen wurden leichte Druckstellen festgestellt, aber keine nennenswerte Befunde wie Verschleiß oder Korrosion.

Bild 6.4: Probestück

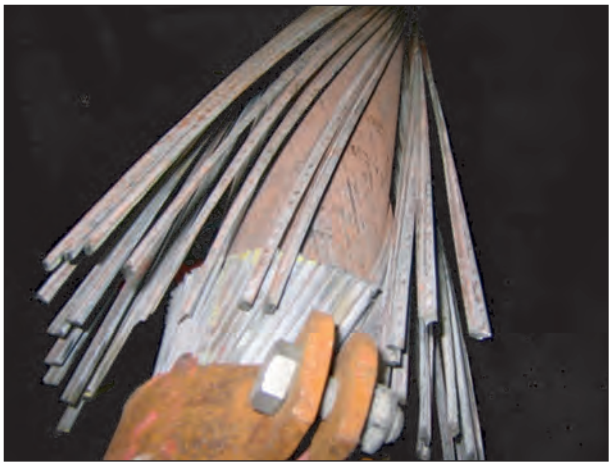


Bild 6.5: Geöffnetes Seil – 1. Drahtlage entfernt

Bild 6.6: Geöffnetes Seil – 2. Drahtlage entfernt

Korrosion wurde also nur auf der äußeren Lage der Seile festgestellt, im Inneren war die Beschaffenheit der Einzeldrähte und des Verbundes einwandfrei.

Bild 6.7: Geöffnetes Seil – 2. Drahtlage entfernt

Bild 6.8: Ausgelöstes Seilende aus dem ‚dynamischen' Seilkopf

6.4 Untersuchungen des Seilkopfes vom ersten Bauteilversuch

Die Bilder 6.9 und 6.10 zeigen den Seilkopf nach dem Abbrennen des Restquerschnitts.

Folgende Feststellungen lassen sich ziehen:

- der Bruch ist treppenförmig, d. h. in den einzelnen Lagen sind die Bruchflächen in Seillängsrichtung versetzt angeordnet,
- es treten Gewaltbrüche und duktile Brüche mit Einschnürung über den Seilquerschnitt verteilt auf,
- die Brüche treten paketweise auf, d. h. es gibt immer nebeneinanderliegende Brüche, wobei die Pakete entweder aus Gewaltbrüchen oder aus duktilen Brüchen bestehen.

An den Bruchflächen wurden weitergehende Untersuchungen durchgeführt, siehe hierzu die Bilder 6.11 und 6.12.

Bild 6.9: Blick auf die Seilbruchfläche

Bild 6.10: Metallografische Untersuchungen an einzelnen Bruchflächen

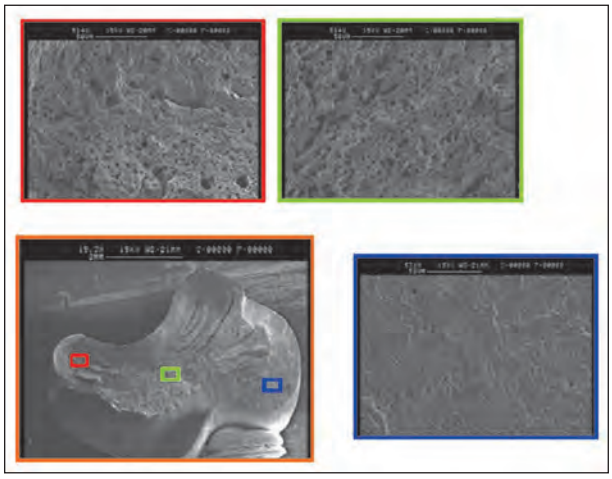


Bild 6.11: Metallografische Untersuchung einer Bruchfläche mit Einschnürung

Die metallografischen Untersuchungen zeigten sowohl bei den Brüchen mit Einschnürungen als auch bei den Brüchen ohne Einschnürungen keine Auffälligkeiten.

Zum Ausschluss einer flüssigmetallinduzierten Spannungsrisskorrosion (LME) wurden weitere

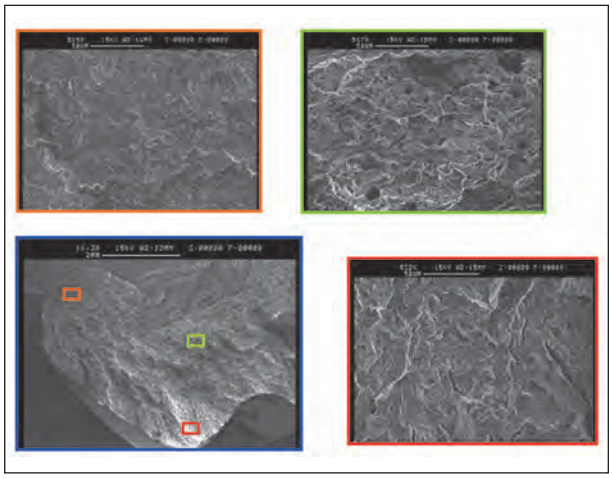


Bild 6.12: Metallografische Untersuchung einer Bruchfläche ohne Einschnürung

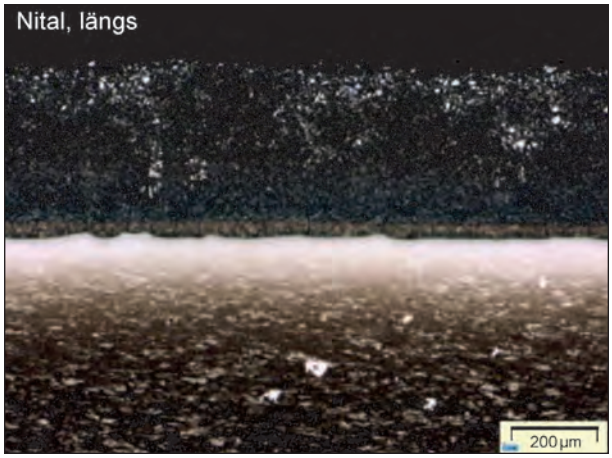


Bild 6.13: Längsschliff

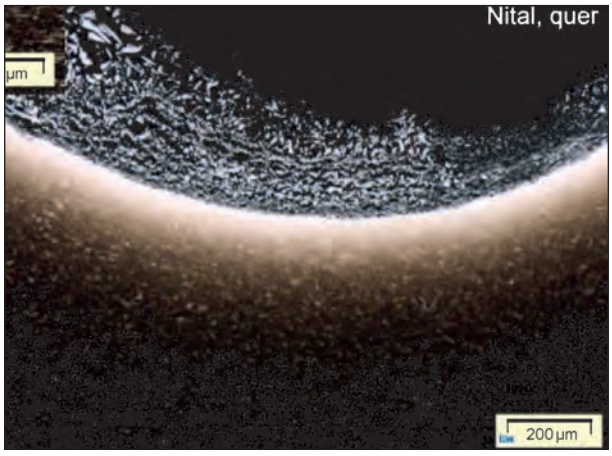


Bild 6.14: Querschliff

Schliffbilder mit Anätzungen durchgeführt, siehe Bild 6.13 und Bild 6.14.

Aufgrund der Schliffbilder kann eine flüssigmetall-induzierte Spannungsrisskorrosion ausgeschlossen werden.

Weiterhin wurden an 5 Drähten, die mit dem Seilverfüllmittel vollständig umgeben waren Zugprüfungen durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen keine Abweichungen zu den normalen Drähten.

Abschließend kann festgehalten werden, dass die durchgeführten Werkstoffuntersuchungen keine Anhaltspunkte für eine mögliche Versagensursache geliefert haben.

6.5 Verformungsverhalten der alten Drähte

Zur Überprüfung des Alterungsverhaltens einzelner Drähte wurden an Einzeldrähten von ausgebauten Seilen der Rheinbrücke Flehe Hin- und Herbiegeversuche durchgeführt.

Insgesamt wurden an 9 Drähten (Z-Profildrähte) solche Versuche durchgeführt, die Drähte lieferten folgende Ergebnisse:

- 3 Z-Profildrähte der Decklage: 10, 4 und 5,
- 3 Z-Profildrähte der ersten Drahtlage: 10,11 und 6,
- 3 Z-Profildrähte der vierten Drahtlage: 25,18 und 25.

Gemäß den damaligen Anforderungen wurden für

- verzinkte Drähte 4 Biegezahlen und für
- blanke Drähte 7 Biegezahlen

ohne Bruch gefordert.

Die Drähte haben somit die Spezifikation für die damalige Lieferung erfüllt und zeigen somit kein Anzeichen für eine Alterung oder sprödes Materialverhalten.

6.6 Betrachtungen zum Seilverguss

Die Herstellung der Seilköpfe erfolgte durch die Fa. Bridon in Gelsenkirchen.

Die Vorgehensweise entsprach hierbei dem Vorgehen, das auch üblich für den Seilverguss bei neuen Drähten ist, dies ist im Kapitel 4.3 dargestellt.

Bei dem ersten Seilverguss ist aber im Nachhinein nicht auszuschließen, dass beim Säubern die Drähte ggf. zu weit aufgebogen wurden und somit eine Vorschädigung in den äußeren Drahtlagen eingeprägt wurde.

6.7 Untersuchung zu früher durchgeführten Bauteilversuchen an ausgebauten Seilen

Eine im Vorfeld durchgeführte Literaturrecherche hatte ergeben, dass es an verschiedenen Brücken erhebliche Schäden an Seilen gegeben hat, somit Seile ausgetauscht werden mussten. An einigen dieser ausgebauten Seile wurden dann auch Bauteilversuche durchgeführt.

Die damals durchgeführten Versuche hatten aber jeweils eine andere Fragestellung und lieferten daher keine Ermüdungsfestigkeiten.

Aufgrund der erzielten Versuchsergebnisse wurden aber die Veröffentlichungen und die Versuchsberichte nochmal durchgesehen, inwieweit Anhaltspunkte für ein Bauteilversagen in dem Seilkopf vorliegen.

Teilweise wird auf außergewöhnliche Versagensformen hingewiesen, die aber im Zusammenhang mit Transportschäden stehen, d. h. die Seile hatten außergewöhnliche Vorschädigungen.

Auffälligkeiten im Seilkopf gab es bei Bauteilversuchen an den ausgebauten Seilen der Seile der Fehmarnsundbrücke. Beim zweiten Ermüdungsversuch wurde folgendes zu den Drahtbrüchen ausgeführt (Zitat aus [23]):

„Zur Lage der Drahtbrüche fällt folgendes auf:

Im Vergusskonus des neu vergossenen, im Versuch unten befindlichen Seilkopfes war ein Viertel aller Brüche (genau 48) konzentriert, und zwar 10 bis 90 mm vom Eintritt der Drähte in den Vergusskonus entfernt.“

Ein ähnliches Verhalten wurde auch bei einem statischen Bruchversuch beobachtet.

Ähnliche Beobachtungen und Ausführungen sind auch bei den durchgeführten Versuchen an den ausgebauten Seilen der Autobahnbrücke über die Norderelbe zu entnehmen.

Bei beiden Brücken wurden in den Versuchsreihen festgestellt, dass insbesondere in den neu vergossenen Seilköpfen extrem häufige Drahtbrüche auftraten. Zitat aus [13] „Vielmehr bestimmten die neu angegossenen Seilköpfe mit 99 % bzw. 88 % der Drahtbrüche das Versuchsgeschehen“.

Als Verursacher der hohen Anzahl der Drahtbrüche wurde die Reibkorrosion insbesondere im Metallverguss der Seilköpfe ausgemacht.

Hierbei muss allerdings auch festgehalten werden, dass bei der Fehmarnsundbrücke ein Vergießen von z. T. korrodierten und daher mit hoher Rauheit behafteter Drähte stattgefunden hat. Bei der Norderelbebrücke war dies allerdings nicht der Fall, hier traten auch verstärkt Drahtbrüche im neuen Seilkopf auf.

Dass die Originalköpfe trotz z. T. erheblicher Lebensdauer in den Versuchen deutlich weniger Drahtbrüche aufwiesen, wird auf das feinere Vergussmittel (Verwendung von Blei-Antimon-Zinn-Legierung) zurückgeführt.

Die neuen Seilköpfe wurden mit dem heute üblichen Vergussmaterial ZAMAK 610 vergossen.

Als Schlussfolgerung aus den obigen Ausführungen sind somit weitergehende Untersuchungen und Überlegungen hinsichtlich des zu verwendenden Vergussmaterials erforderlich.

6.8 Bauteilversuche vor dem Bau der Rheinbrücke Düsseldorf-Flehe

Vergleichbar dem heutigen Vorgehen wurden im Vorfeld des Baus der Brücke auch Eignungsversuche an den Seillieferungen durchgeführt.

Durch Strassen.NRW und ergänzend durch DMT-Bochum als Nachfolger der Seilprüfstelle Bochum wurden die entsprechenden Berichte zur Verfügung gestellt.

In der beigefügten Anlage wird eine Zusammenfassung der Ergebnisse gegeben.

Folgende Anmerkungen müssen hierzu gegeben werden:

- die entsprechenden Vorschriften, wie z. B. die TL Seile lagen noch nicht vor,
- bei der Festlegung der Versuche wurden teilweise Versuchsanordnungen neu entwickelt, sodass zunächst zu hohe Beanspruchungen, wie z. B. hohe Auslenkwinkel und Umlenkwinkel eingebaut wurden, die zu einem vorzeitigen Versagen der Seile geführt haben.

7 Bewertung der Ermüdungssicherheit von korrodierten Seilen

7.1 Allgemeines

Inwieweit bei korrodierten Seilen eine Abminderung der Tragfähigkeiten entsteht und wie diese zu bewerten sind, wird in den nachfolgenden Ausführungen betrachtet. Eine Abminderung der Tragsicherheit von Seilen durch Korrosion mindert ebenfalls die Dauerhaftigkeit und ggf. auch die Ermüdungssicherheit.

Entsprechend den bereits in Kapitel 3 (siehe Bilder 3.57 bis 3.62) dargestellten Kategorien:

Kategorie 1: Deckbeschichtung abgeplatzt,

Kategorie 2: Beschichtung abgeplatzt, Untergrund Rost,

Kategorie 3: 1. Drahtlage Blattrost,

Kategorie 4: 1. Drahtlage Blattrost,
2. Drahtlage angerostet,

Kategorie 5: 2. Drahtlage Blattrost,

sind unterschiedliche Bewertungen durchzuführen.

Ab der Kategorie 3 ist eine rechnerische Tragfähigkeitsuntersuchung oder mindestens eine Abschätzung erforderlich.

Ab der Kategorie 4 und 5 ist diese zwingend vorzunehmen.

Die Bilder 7.1 bis 7.3 zeigen solche massiven Schäden, die in dem vorliegenden Fall lokal begrenzt auftraten.

Bild 7.1: Beispielschaden für Kategorie 5

Bei Drahtbrüchen ist eine solche Bewertung sicherlich von der Anzahl der Drahtbrüche in einem Querschnitt abhängig. Hieraus ergibt sich dann der reduzierte Querschnitt mit zugehöriger Tragfähigkeit. Bild 7.4 zeigt zwei Drahtbrüche bei einem Kategorie 3-Schaden. Hierdurch ist dann

Bild 7.2: Beispielschaden für Kategorie 4

Bild 7.3: Beispielschaden für Kategorie 5

Bild 7.4: Beispielschaden für Kategorie 3 mit Drahtbrüchen

auch die darunterliegende Lage ungeschützt, im Laufe der Zeit entstehen dann Kategorie-4- oder 5-Schäden.

7.2 Bemessung der Seile

Bei der Berechnung der Seilsysteme der hier betrachteten Brücken wurde zumeist die Brückenlasten für Brückenklasse 60 nach DIN 1072 angesetzt, d. h. die entsprechenden Flächenlasten (5 kN/m² im Hauptfahrstreifen oder 3 kN/m² in den übrigen Bereichen) und ein Schwerlastwagen mit 60 t.

Um die Begegnung zweier schwerer Fahrzeuge zu berücksichtigen, wurde bei einigen Brücken ggf. für das Haupttragsystem einschließlich Seilsystem und deren Bauteile ein SLW 100 angesetzt.

Die im nachfolgenden betrachteten korrodierten Seile sind Hängerseile, die entweder einen Seildurchmesser von 37 mm oder 42 mm haben, siehe die Bilder 7.5 und 7.6.

Die Bemessung der Seile wurde zur damaligen Zeit in der DIN 1073 Stählerne Straßenbrücken festgelegt. Sie wurden einmal für alle Hauptlasten (Lastfall H, Eigengewicht und Verkehr) und für den Lastfall Haupt- und Zusatzlasten (Lastfall HZ, alle Einwirkungen) geführt.

Folgende Spannungen mussten demnach eingehalten werden:

$$zul\sigma_H = \frac{0,447}{1,08} \cdot \beta_N = 0,42 \cdot \beta_N$$

$$zul\sigma_{HZ} = \frac{0,502}{1,08} \cdot \beta_N = 0,46 \cdot \beta_N$$

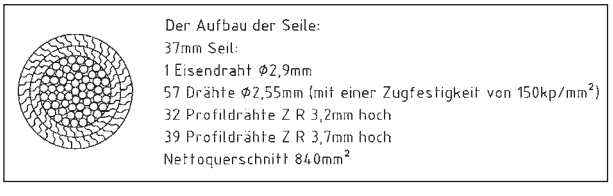


Bild 7.5: Seilaufbau Durchmesser Ø 37 mm

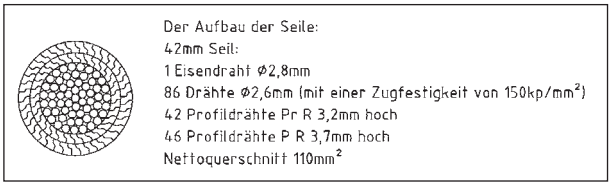


Bild 7.6: Seilaufbau Durchmesser Ø 42 mm

Die Sicherheiten wurden wie folgt angegeben:

a) gegen die effektive Bruchkraft:

$$\nu_{B,H} \approx 2,2,$$

$$\nu_{B,HZ} \approx 2,0.$$

b) gegen die Streckgrenze (0,2-Dehngrenze):

$$\nu_{S,H} \approx 2,2,$$

$$\nu_{S,HZ} \approx 2,0.$$

Die zulässigen Spannungen berücksichtigen, dass die effektiven Bruchlasten 5 bis 8 % kleiner als die rechnerischen Bruchlasten sind.

Weiterhin war der Nachweis zu führen, dass bei einem Ausfall oder Austausch eines Hängerseils die Sicherheit gegenüber der wirklichen Bruchlast noch $\nu_{H,Z}$ = 1,6 beträgt.

Teilweise wurde für die Bemessung der Tragkabel oder Seile ein höherer Sicherheitsbeiwert ν = 3,0 angesetzt. Somit wurden die Seile mit einer gegenüber der damaligen Zeit erhöhten Sicherheit bemessen. Dies ist ggf. dem Umstand geschuldet, dass die Seile des Tragkabels nicht ausgetauscht werden können und ein einheitlicher Sicherheitsbeiwert für alle Seile gewählt wurde.

Die Materialfestigkeit der Hängerseile wird mit St 150 ($\beta_N = 150\ kN/m^2$) angegeben.

Die zulässige Spannung bei der Berechnung ergibt sich mit einem angesetzten Sicherheitsfaktor von ν = 3,0 zu:

$$\sigma_{zul} = \frac{150\,KN/cm^2}{3} = 50\,KN/cm^2$$

Wegen der starken Krümmung im Bereich der Umlenkung über das Tragkabel durch die Kabelschelle wird dieser Wert für die Hängerseile um weitere 10 % abgemindert:

$$\sigma_{zul} = 0,9 * 50\,KN/cm^2 = 45\,KN/cm^2$$

Die 10%-Abminderung wird mit einem Hinweis auf Versuche begründet, die gezeigt haben, dass die Reduktion unter der statischen Last 5 % beträgt, weitere 5 % bezogen sich auf die Berücksichtigung bei der Verminderung der Dauerfestigkeit.

Die zulässige rechnerische Kraft für die vier Hänger beträgt somit:

Ø 37 *mm*:
$Z \leq 4 * 8{,}35 * 4{,}5$ t = 150,3 t = 1.503 *KN*,

Ø 42 *mm*:
$Z \leq 4 * 11{,}05 *$ g4,5 t = 198,9 t = 1.989 *KN*.

7.3 Bewertung der derzeitigen Tragfähigkeiten

Zur Beurteilung der derzeitigen Tragfähigkeit werden die festgestellten Korrosionsschäden hinsichtlich der erfolgten Querschnittsschwächung aufgemessen und bewertet.

Anhand der ermittelten Restquerschnitte erfolgt dann eine Ermittlung der verbleibenden Sicherheiten.

Bild 7.7 zeigt die rechnerisch angenommenen Querschnittsverluste.

Die betrachteten Annahmen sind hierbei:

Fall A) maximal 1/3 Umfang der ersten Lage weggerostet,

Fall B) maximal 3/4 Umfang der ersten Lage weggerostet und bereits in der 2. Lage starker Blattrost.

Der Ansatz für die rechnerischen Querschnittsverlustes geht davon aus, dass, falls bei einer Lage Blattrost festgestellt wurde, diese Lage rechnerisch nicht mehr mitträgt. Dies stellt eine Abschätzung auf der sicheren Seite dar und ist bei der Bewertung der Sicherheiten mit zu berücksichtigen.

In Absprache mit dem Bauherrn können dann die tolerierbaren Sicherheiten festgelegt werden, wobei dann durchaus auf die damals normativ festgelegten Sicherheiten von $v_{S,H} \approx 2{,}2$ (Lastfall H) oder $v_{S,HZ} \approx 2{,}0$ (Lastfall HZ) zurückgegriffen werden kann.

Falls solche Sicherheiten noch weiter reduziert werden, muss zur Beibehaltung eines ausreichenden Sicherheitsniveaus das Intervall der Bauwerksprüfungen an den lokalen Stellen verkürzt werden.

Bei einem Beispiel entsprechend Bild 7.8 ergibt sich hier eine reduzierte rechnerische Sicherheit von $v \approx 1{,}38$, die damit deutlich unter der ursprünglichen Sicherheit von $v \approx 3{,}0$ liegt.

Dieser Schaden gehört zur Schadenskategorie 4, d. h. die äußere Lage ist weggerostet und die zweite Lage weist Blattrost auf, ist aber noch nicht über die gesamte Dicke weggerostet.

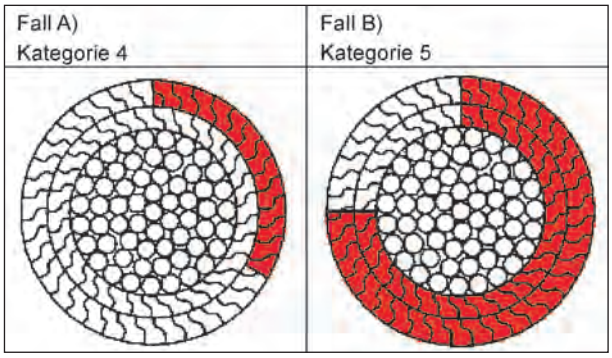


Bild 7.7: Rechnerischer Ansatz für Querschnittsverluste

Bild 7.8: Rechnerisch ermittelte Sicherheit von 1,38

Die Nachmessung vor Ort an vergleichbaren verschiedenen anderen Schadenstellen hat ergeben, dass in der Regel bei Blattrost maximal die halbe Lagendicke weggerostet ist, sodass rechnerisch eine Sicherheit von $v \approx 1{,}96$ vorhanden sein wird, siehe Tabelle 7.1.

In dem vorliegenden Fall bestehen bei den Hängerseilen, bis auf eine Ausnahme, hinsichtlich der Tragfähigkeit derzeit noch keine Bedenken. Es ist allerdings davon auszugehen, dass ohne umgehende Maßnahmen die Korrosion weiter voran schreitet und die Tragsicherheiten in der Zukunft dann weiter reduziert werden.

A	Tiefe Fehler	Länge Fehler	ΔA	A_{eff}	N (rechn.)	Spannung	tats. Spannung	Sicherheiten
[cm^2]	[cm]	[cm]	[cm^2]	[cm^2]	[kN]	[kN/cm^2]	[kN/cm^2]	V
8,350	0,45	8,720	3,924	4,426	339,50	40,66	76,71	1,96

Tab. 7.1: Rechnerisch ermittelte Sicherheit (Durchmesser Ø 37 mm)

7.4 Bewertung der Dauerhaftigkeit

Zur Betrachtung und Bewertung der Dauerhaftigkeit werden die Schadenskategorien einzeln betrachtet, siehe Bild 7.9 bis Bild 7.13.

Für die Schadenskategorie 1 (Bild 7.9) werden folgende Bewertungen und Einstufungen gegeben.

- Bewertung

  Der Korrosionsschutz der Drähte ist nicht mehr gegeben, in der Regel gibt es auch leichte Ansätze von Flugrost.

  Da die Drähte in diesem Fall nicht verzinkt sind, stellt die Beschichtung ausschließlich den Korrosionsschutz der Drähte dar.

  Die Dauerhaftigkeit dieser Seile ist nicht mehr gegeben.

- Instandsetzung

  Diese Schadensstellen können grundsätzlich durch Strahlen und Aufbringen einer neuen Beschichtung instand gesetzt werden.

- Wirtschaftlichkeit

  Unter der Voraussetzung, dass an den betroffenen Seilen ausschließlich Schäden dieser Kategorie vorhanden sind, ist die beschriebene Instandsetzung bezogen auf ein einzelnes Seil wirtschaftlicher.

  Zur endgültigen Bewertung der Wirtschaftlichkeit muss der Gesamtzustand aller Seile und die gewählte Instandsetzungsmaßnahme betrachtet werden.

Für die Schadenskategorie 2 (Bild 7.10) werden folgende Bewertungen und Einstufungen gegeben.

- Bewertung

  Der Korrosionsschutz der Drähte ist nicht mehr gegeben, die festgestellte Korrosion führte bereits zur Querschnittsschwächung.

  Da die Drähte nicht verzinkt waren, besteht kein weiterer Schutz.

Bild 7.9: Beispiel für Schadenskategorie 1

Bild 7.10: Beispiel für Schadenskategorie 2

  Die Dauerhaftigkeit dieser Seile ist nicht mehr gegeben.

- Instandsetzung

  Diese Schadensstellen können durch Strahlen und Aufbringen einer neuen Beschichtung vor einer weiteren Querschnittsschwächung geschützt werden.

  Die bereits vorhandene Querschnittsschwächung kann nicht behoben werden.

- Wirtschaftlichkeit

  Siehe Schadenskategorie 1.

Für die Schadenskategorie 3 (Bild 7.11) werden folgende Bewertungen und Einstufungen gegeben.

- Bewertung

  Der Korrosionsschutz der Drähte ist nicht mehr gegeben, der vorhandene Blattrost stellt eine deutliche Querschnittsschwächung in der äußeren Lage dar.

  Da die Drähte nicht verzinkt waren, besteht kein weiterer Schutz.

  Die Dauerhaftigkeit dieser Seile ist nicht mehr gegeben.

- Instandsetzung

  Diese Schadensstellen können durch Strahlen und Aufbringen einer neuen Beschichtung vor einer weiteren Querschnittsschwächung geschützt werden.

  Die bereits vorhandene Querschnittsschwächung kann nicht behoben werden.

- Wirtschaftlichkeit

  Siehe Schadenskategorie 1.

Bild 7.11: Beispiel für Schadenskategorie 3

Für die Schadenskategorie 4 (Bild 7.12) werden folgende Bewertungen und Einstufungen gegeben.

- Bewertung

  Der Korrosionsschutz der Drähte ist nicht mehr gegeben, die festgestellte Korrosion führte bereits zu einer großen Querschnittsschwächung (1. Lage weggerostet und 2. Lage angerostet).

  Die Dauerhaftigkeit dieser Seile ist nicht mehr gegeben.

- Instandsetzung

  Diese Schadensstellen können durch Strahlen und Aufbringen einer neuen Beschichtung vor einer weiteren Querschnittsschwächung geschützt werden.

  Die bereits vorhandene Querschnittsschwächung kann nicht behoben werden.

- Wirtschaftlichkeit

  Siehe Schadenskategorie 1.

Bild 7.12: Beispiel für Schadenskategorie 4

Für die Schadenskategorie 5 (Bild 7.13) werden folgende Bewertungen und Einstufungen gegeben.

Bild 7.13: Beispiel für Schadenskategorie 5

- Bewertung

  Der Korrosionsschutz der Drähte ist nicht mehr gegeben, der vorhandene Blattrost in der 2. Lage stellt eine deutliche Querschnittsschwächung dar.

Die Dauerhaftigkeit dieser Seile ist nicht mehr gegeben.

- Instandsetzung

  Diese Schadensstellen können durch Strahlen und Aufbringen einer neuen Beschichtung vor einer weiteren Querschnittsschwächung geschützt werden.

  Die bereits vorhandene Querschnittsschwächung kann nicht behoben werden.

- Wirtschaftlichkeit

  Siehe Schadenskategorie 1.

Eine mögliche Instandsetzung (Erneuerung des Korrosionsschutzes) verhindert eine weitere Querschnittsschwächung, jedoch gibt es kein Verfahren oder Möglichkeit, die vorhandenen Schwächungen zu beheben.

7.5 Rechnerische Bewertung der Ermüdungssicherheit

Bei dem Bau der Brücke wurden für den Seildurchmesser 42 mm auch entsprechende Bauteilversuche durchgeführt, siehe Tabelle 4.1, welche Dauerschwingversuche mit vollverschlossenen Seilen [6] zeigt.

Die Dauerschwingversuche wurden ohne Drahtbrüche beendet, und der anschließende Zerreißversuch mit der Bestimmung der Restbruchkraft hat zu 100 % die rechnerische Sollbruchkraft ergeben.

Die Versuche wurden in Anlehnung an die TL Seile gemacht, somit kann annähernd davon ausgegangen werden, dass die Seile hinsichtlich der Ermüdungssicherheit dem heutigen Standard entsprechen.

Bei den durchgeführten Bauwerksprüfungen wurden nur an einer korrodierten Stelle Drahtbrüche festgestellt, siehe Bild 7.14.

Zur Abschätzung der Ermüdungssicherheit der korrodierten Seile wird eine Gegenüberstellung des vorhandenen Kerbfalls mit den jetzt auftretenden Ermüdungsbeanspruchungen durchgeführt.

Es erfolgt die Gegenüberstellung in Anlehnung an die deutschen Vorschriften.

Nach [16] wird für vollverschlossene Seile nachgewiesen, dass mindestens der Kerbfall

Bild 7.14: Korrodierte Stelle mit Drahtbruch

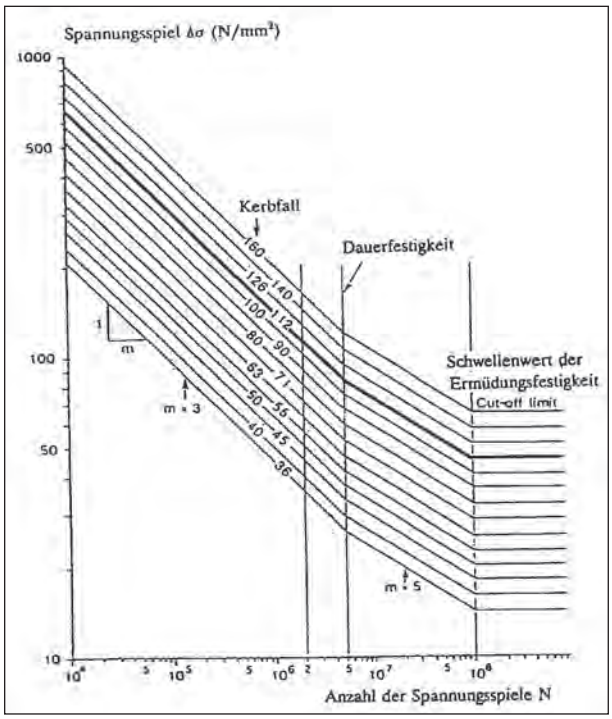


Bild 7.15: Wöhlerkurve für vollverschlossene Seile

$\Delta\sigma_c$ = 112 N/mm^2

auf der sicheren Seite liegend angesetzt werden kann. Es wird aber auch darauf hingewiesen, dass dies auf der sicheren Seite liegt, und in den europäischen Normen werden auch höhere Kerbfälle angesetzt.

Entsprechend dem Bericht wird für den Kerbfall somit die abgeknickte Wöhlerkurve angesetzt, siehe Bild 7.15.

Die Dauerfestigkeit ergibt sich mit $\Delta\sigma_D$ = 0,737 * 112 = 82,5 N/mm^2, siehe Bild 7.16.

Falls die Beanspruchungen unterhalb der Dauerfestigkeitsgrenze bleiben, sind Drahtbrüche in der

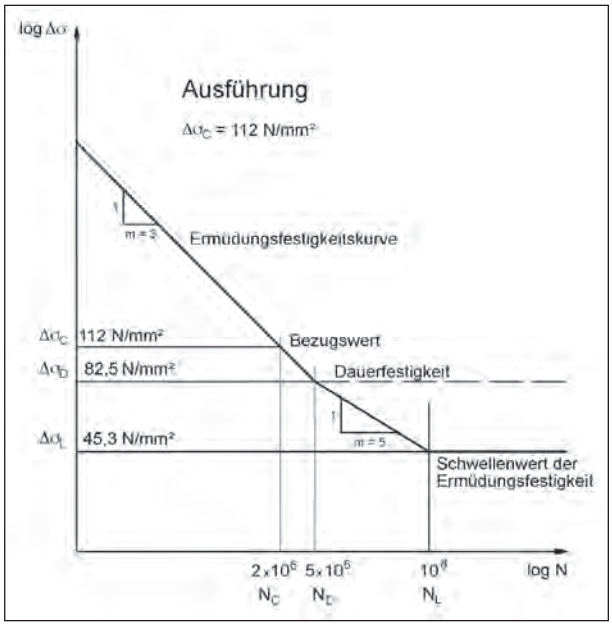


Bild 7.16: Dauerfestigkeitsgrenze für vollverschlossene Seile

Regel nicht zu erwarten (unbegrenzte Lebensdauer).

Die tatsächlich auftretenden Ermüdungsbeanspruchungen sind bei einer Hängebrücke für die einzelnen Hängerseile äußerst schwer zu ermitteln. Die Ermüdungslastmodelle aus den Eurocodes lassen sich nur bedingt anwenden, z. T. fehlen die entsprechenden Beiwerte (λ-Faktoren). Daher werden für die nachfolgende Ermüdungsbetrachtungen die 0,25-fachen, die 0,5-fachen und die 1,0-fachen Hängerkräfte der Verkehrsbeanspruchung nach DIN 1072 als Fallbetrachtungen angesetzt.

Die ermüdungswirksamen Spannungen und die daraus resultierenden Sicherheiten werden an den reduzierten Querschnitten ermittelt.

Die Berechnungen zeigen, dass die Ermüdungsbeanspruchung auch bei den geschädigten Seilen deutlich unter der Dauerfestigkeitsgrenze liegt.

Auch bei dem am stärksten geschädigten Seil (siehe Bild 7.19) beträgt die Sicherheit bei voller Verkehrslast ν = 2,02.

Somit sind Drahtbrüche aufgrund der Ermüdungsspannungen nicht zu erwarten. Die realistischen Ermüdungsbeanspruchungen durch die Überfahrt regulärer Lkw wird zwischen der 0,25- und 0,5-fachen Verkehrslast nach DIN 1072 liegen.

Dies erklärt, warum derzeit die Anzahl der Drahtbrüche (1 entdeckte Stelle mit Drahtbrüchen infolge der Korrosion) sehr gering ist.

Harfe	Hänger	Seil	Durchmesser [cm]	A [cm²]	Tiefe Fehler [cm]	Länge Fehler [cm]	ΔA [cm²]	A_{ges} [cm²]	N (rechn.) [kN]	Spannung [kN/cm²]	tats. Spannung [kN/cm²]	Sicherheiten ν
5	2	2	3,7	8,350	0,3	5,810	1,743	6,607	5,25	0,39	0,49	16,77
5	3	2	3,7	8,350	0,3	7,740	2,322	6,028	3,36	0,40	0,56	14,79
5	4	1	3,7	8,350	0,3	5,810	1,743	6,607	3,49	0,42	0,53	15,60
5	8	2	3,7	8,350	0,3	5,810	1,743	6,607	4,21	0,50	0,64	12,94
5	8	2	3,7	8,350	0,3	5,810	1,743	6,607	4,21	0,50	0,64	12,94
5	8	2	3,7	8,350	0,3	5,810	1,743	6,607	4,21	0,50	0,64	12,94
5	8	2	3,7	8,350	0,3	7,740	2,322	6,028	4,21	0,50	0,70	11,81
5	8	1	3,7	8,350	0,3	5,810	1,743	6,607	4,21	0,50	0,64	12,94
5	9	3	4,2	11,050	0,5	8,780	2,637	8,413	4,69	0,41	0,53	15,49
5	9	4	4,2	11,050	0,3	6,600	1,980	9,070	4,49	0,41	0,50	16,65
5	9	1	4,2	11,050	0,3	6,600	1,980	9,070	4,46	0,41	0,50	16,65
6	22	4	4,2	11,050	0,3	6,600	1,980	9,070	3,74	0,34	0,41	20,02
6	22	1	4,2	11,050	0,3	6,600	1,980	9,070	3,74	0,34	0,41	20,02
6	21	3	4,2	11,050	0,3	6,600	1,980	9,070	3,74	0,34	0,41	20,02
6	20	1	4,2	11,050	0,3	6,600	1,980	9,070	3,74	0,34	0,41	19,99
6	20	2	4,2	11,050	0,8	14,390	3,317	9,733	3,74	0,34	0,38	21,45
6	19	3	4,2	11,050	0,3	14,390	3,317	9,733	3,74	0,34	0,38	21,45
6	19	2	4,2	11,050	0,3	6,600	1,980	9,070	3,74	0,34	0,41	19,95
6	19	3	4,2	11,050	0,3	14,390	3,317	9,733	3,74	0,34	0,38	21,45
7	17	1	4,2	11,050	0,3	14,390	3,317	9,733	3,75	0,34	0,39	21,41
7	17	1	4,2	11,050	0,3	6,600	1,980	9,070	3,75	0,34	0,41	19,95
7	21	4	4,2	11,050	0,3	6,600	1,980	9,070	3,74	0,34	0,41	20,02
7	21	4	4,2	11,050	0,4	8,600	2,449	8,431	3,74	0,34	0,44	18,56
7	22	4	4,2	11,050	0,3	6,600	1,980	9,070	3,74	0,34	0,41	20,02
7	23	2	3,7	8,350	0,4	5,810	2,424	6,026	3,74	0,45	0,62	13,30
8	3	2	3,7	8,350	0,3	3,870	1,161	7,189	3,56	0,40	0,47	17,64
8	2	4	3,7	8,350	0,6	8,720	5,232	3,118	3,39	0,38	1,00	8,07
8	1	4	3,7	8,350	0,4	5,810	2,324	6,026	3,24	0,38	0,52	15,81

Bild 7.17: Sicherheit ν zur Dauerfestigkeit bei 0,25-facher Verkehrslast

Harfe	Hänger	Seil	Durchmesser [cm]	A [cm²]	Tiefe Fehler [cm]	Länge Fehler [cm]	ΔA [cm²]	A_{ges} [cm²]	N (rechn.) [kN]	Spannung [kN/cm²]	tats. Spannung [kN/cm²]	Sicherheiten ν
5	2	2	3,7	8,350	0,3	5,810	1,743	6,607	6,30	0,78	0,98	8,39
5	3	2	3,7	8,350	0,3	7,740	2,322	6,028	6,73	0,81	1,12	7,39
5	4	1	3,7	8,350	0,3	5,810	1,743	6,607	6,98	0,84	1,06	7,80
5	8	2	3,7	8,350	0,3	5,810	1,743	6,607	8,43	1,01	1,28	6,47
5	8	2	3,7	8,350	0,3	5,810	1,743	6,607	8,43	1,01	1,28	6,47
5	8	2	3,7	8,350	0,3	5,810	1,743	6,607	8,43	1,01	1,28	6,47
5	8	2	3,7	8,350	0,3	5,810	1,743	6,607	8,43	1,01	1,28	6,47
5	8	2	3,7	8,350	0,7	7,740	2,322	6,028	8,43	1,01	1,40	5,90
5	8	1	3,7	8,350	0,3	5,810	1,743	6,607	8,43	1,01	1,28	6,47
5	9	3	4,2	11,050	0,5	8,790	2,637	8,413	8,99	0,81	1,07	7,72
5	9	4	4,2	11,050	0,3	6,600	1,980	9,070	8,99	0,81	0,99	8,38
5	9	1	4,2	11,050	0,3	6,600	1,980	9,070	8,99	0,81	0,99	8,38
6	22	4	4,2	11,050	0,3	6,600	1,980	9,070	7,48	0,68	0,82	10,01
6	22	1	4,2	11,050	0,3	6,600	1,980	9,070	7,48	0,68	0,82	10,01
6	21	3	4,2	11,050	0,3	6,600	1,980	9,070	7,48	0,68	0,82	10,01
6	20	1	4,2	11,050	0,3	6,600	1,980	9,070	7,49	0,68	0,83	9,99
6	20	2	4,2	11,050	0,8	14,390	3,317	9,733	7,49	0,68	0,77	10,73
6	19	3	4,2	11,050	0,3	14,390	3,317	9,733	7,49	0,68	0,77	10,72
6	19	2	4,2	11,050	0,3	6,600	1,980	9,070	7,49	0,68	0,83	9,99
6	19	3	4,2	11,050	0,3	14,390	3,317	9,733	7,49	0,68	0,77	10,72
7	17	1	4,2	11,050	0,3	14,390	3,317	9,733	7,50	0,68	0,77	10,71
7	17	1	4,2	11,050	0,3	6,600	1,980	9,070	7,50	0,68	0,83	9,98
7	21	4	4,2	11,050	0,3	6,600	1,980	9,070	7,48	0,68	0,82	10,01
7	21	4	4,2	11,050	0,4	8,600	2,449	8,601	7,48	0,68	0,87	9,28
7	22	4	4,2	11,050	0,3	6,600	1,980	9,070	7,48	0,68	0,82	10,01
7	23	2	3,7	8,350	0,4	5,810	2,324	6,026	7,48	0,90	1,24	6,65
8	3	2	3,7	8,350	0,3	3,870	1,161	7,189	6,73	0,81	0,94	8,82
8	2	4	3,7	8,350	0,6	8,720	5,232	3,118	6,34	0,76	2,03	4,04
8	1	4	3,7	8,350	0,4	5,810	2,324	6,026	6,29	0,75	1,04	7,91

Bild 7.18: Sicherheit ν zur Dauerfestigkeit bei 0,5-facher Verkehrslast

Harfe	Hänger	Seil	Durchmesser [cm]	A [cm²]	Tiefe Fehler [cm]	Länge Fehler [cm]	ΔA [cm²]	A_{ges} [cm²]	N (rechn.) [kN]	Spannung [kN/cm²]	tats. Spannung [kN/cm²]	Sicherheiten ν
5	2	2	3,7	8,350	0,3	5,810	1,743	6,607	13,00	1,56	1,97	4,19
5	3	2	3,7	8,350	0,3	7,740	2,322	6,028	13,45	1,61	2,23	3,70
5	4	1	3,7	8,350	0,3	5,810	1,743	6,607	13,98	1,67	2,12	3,90
5	8	2	3,7	8,350	0,3	5,810	1,743	6,607	16,85	2,02	2,55	3,23
5	8	2	3,7	8,350	0,3	5,810	1,743	6,607	16,85	2,02	2,55	3,23
5	8	2	3,7	8,350	0,3	5,810	1,743	6,607	16,85	2,02	2,55	3,23
5	8	2	3,7	8,350	0,3	5,810	1,743	6,607	16,85	2,02	2,55	3,23
5	8	2	3,7	8,350	0,7	7,740	2,322	6,028	16,85	2,02	2,80	2,95
5	8	1	3,7	8,350	0,3	5,810	1,743	6,607	16,85	2,02	2,55	3,23
5	9	3	4,2	11,050	0,5	8,790	2,637	8,413	17,98	1,63	2,14	3,86
5	9	4	4,2	11,050	0,3	6,600	1,980	9,070	17,98	1,63	1,98	4,19
5	9	1	4,2	11,050	0,3	6,600	1,980	9,070	17,98	1,63	1,98	4,19
6	22	4	4,2	11,050	0,3	6,600	1,980	9,070	14,95	1,35	1,65	5,01
6	22	1	4,2	11,050	0,3	6,600	1,980	9,070	14,95	1,35	1,65	5,01
6	21	3	4,2	11,050	0,3	6,600	1,980	9,070	14,95	1,35	1,65	5,01
6	20	1	4,2	11,050	0,3	6,600	1,980	9,070	14,98	1,36	1,65	5,00
6	20	2	4,2	11,050	0,3	14,390	3,317	9,733	14,98	1,36	1,54	5,36
6	19	3	4,2	11,050	0,3	14,390	3,317	9,733	14,98	1,36	1,54	5,36
6	19	2	4,2	11,050	0,3	6,600	1,980	9,070	14,98	1,36	1,65	5,00
6	19	3	4,2	11,050	0,3	14,390	3,317	9,733	14,98	1,36	1,54	5,36
7	17	1	4,2	11,050	0,3	14,390	3,317	9,733	15,00	1,36	1,54	5,35
7	17	1	4,2	11,050	0,3	6,600	1,980	9,070	15,00	1,36	1,65	4,99
7	21	4	4,2	11,050	0,3	6,600	1,980	9,070	14,95	1,35	1,65	5,01
7	21	4	4,2	11,050	0,4	8,600	2,449	8,601	14,95	1,35	1,78	4,64
7	22	4	4,2	11,050	0,3	6,600	1,980	9,070	14,95	1,35	1,65	5,01
7	23	2	3,7	8,350	0,4	5,810	2,324	6,026	14,95	1,79	2,48	3,33
8	3	2	3,7	8,350	0,3	3,870	1,161	7,189	13,45	1,61	1,87	4,41
8	2	4	3,7	8,350	0,6	8,720	5,232	3,118	12,75	1,53	4,05	2,02
8	1	4	3,7	8,350	0,4	5,810	2,324	6,026	12,58	1,51	2,09	3,95

Bild 7.19: Sicherheit ν zur Dauerfestigkeit bei 1,0-facher Verkehrslast

Allerdings berücksichtigt diese Berechnung nicht die Kerbwirkung von scharfkantigen Verletzungen, es wurde eine Spannungsberechnung ohne Berücksichtigung von hot spots durchgeführt. Die Berechnung beruht auf dem Nennspannungskonzept. Die durchgeführten Bauteilversuche sichern hierbei diese Annahme ab, da sie gezeigt haben, dass nicht zwangsläufig aus den Korrosionsnarben Drahtbrüche entstehen.

7.6 Untersuchungen hinsichtlich Korrosionsschäden für Sondertransporte

Die festgestellten Querschnittsminderungen an den Hängerseilen bedingen ebenfalls eine Überprüfung hinsichtlich der verbleibenden Sicherheiten bei den Überfahrten von Sondertransporten, d. h. Fahrzeuge, die z. B. über 200 t Gesamtgewicht haben.

Es wird das am stärksten betroffenen Seil betrachtet.

Die Tiefe des Schadens beträgt 6 mm. Es handelt sich um ein Seil mit einem Durchmesser von 37 mm, die Schädigung umfasst dabei ¾ vom Umfang, siehe Tabelle 7.1. In dem betrachteten Hängerseilquerschnitt ist dies die einzige Schädigung.

Die rechnerische Bewertung solcher Schäden erfolgt in Analogie von zwei hintereinander geschalteten Federn, siehe Bild 7.20. Dies bedeutet, dass die geschädigte Stelle die Tragfähigkeit des gesamten Hängers mit seinen vier Einzelseilen vorgibt.

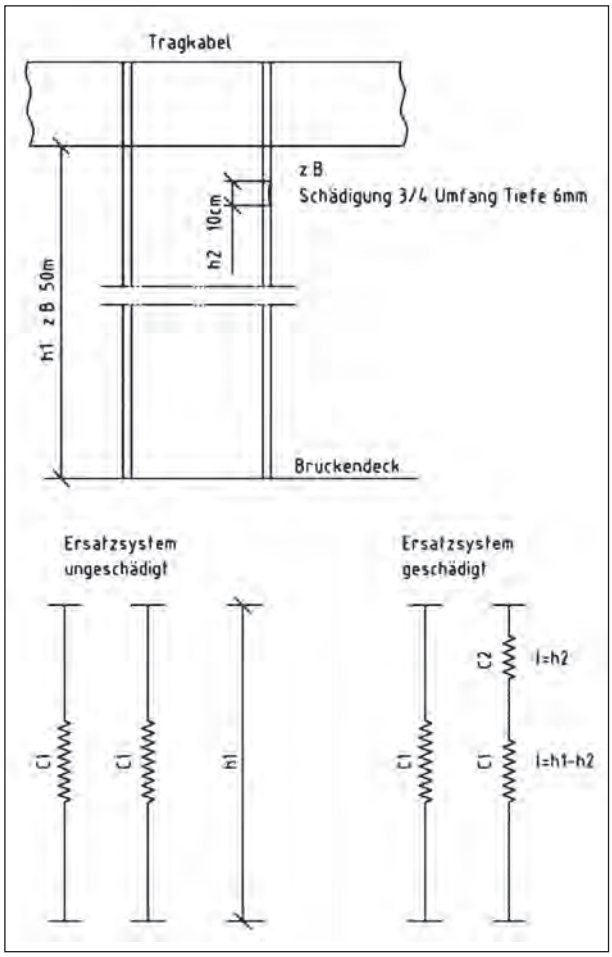


Bild 7.20: Federersatzsystem für das geschädigte Seil

Federkraft F:

$$F = c\Delta L$$

$$c = \frac{EA}{L_0}$$

In Parallelschaltung:

$$c = \sum_{i=1}^{N} c_i = c_1 + c_2 + \cdots + c_N$$

In Reihenschaltung:

$$\frac{1}{c} = \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{c_i} = \frac{1}{c_1} + \frac{1}{c_2} + \cdots + \frac{1}{c_N}$$

Bild 7.21: Berechnung als Federersatzsystem

Federkraft:

$$c = \frac{15.000\ \frac{kN}{cm^2} * 6{,}028\ cm^2}{9868\ cm} = 9{,}16\ \frac{kN}{cm}$$

In Reihenschaltung:

$$\frac{1}{c} = \sum_{i=1}^{N} \frac{1}{c_i} = \frac{1}{9{,}16} + \frac{1}{9042{,}0} = 0{,}10925\ \frac{cm}{kN}$$

$$c = 9{,}151\ \frac{cm}{kN}$$

Steifigkeiten annähernd gleich

Bild 7.22: Federsteifigkeiten für das geschädigte Seil

Der wirksame Restquerschnitt ergibt sich somit mit:

Umfang

$$U = 2 * \pi * r = 2 * \pi * \frac{37}{2} = 116{,}3mm,$$

Geschädigter Umfang

$$L = 116{,}3 * \frac{3}{4} = 87{,}2mm,$$

Fehlfläche

$$A_{fehl} = 87{,}2 * 6 = 523{,}2mm^2,$$

Gesamte Querschnittsfläche

$A_{ges} = \pi * r^2 = \pi * (37/2)^2 = 1075{,}2mm^2$ und

Anteil der verbleibenden Fläche

$$\frac{A_{ges} - A_{fehl}}{A_{ges}} = \frac{1075,2 - 523,2}{1075,2} = 0,51.$$

Der wirksame Seilquerschnitt ohne Abrostungen wird mit 835 mm² angegeben.

Somit ergibt sich folgender Restquerschnitt:

$$A_{wirk} = 0,51 * 835 = 428,7 cm^2$$

Je nach Fahrzeugaufbau der Schwertransporte sind in der Regel mit Achsen von 11,5 t alle 1,40 m bzw. 1,50 m zu rechnen.

Bei einem Hängerabstand von 15,15 m liegen im Einzugsbereich eines Hängers somit 11 Achsen, siehe Bild 7.23.

Hinsichtlich der Beanspruchung durch den Schwerlasttransport wird in der Regel von einer mittigen Überfahrt ausgegangen, d. h. von den 11 Achsen im Einflussbereichs eines Hängers verteilen sich die Lasten zu beiden Brückenseiten gleichmäßig, die Verkehrslast beträgt somit:

$$P_{SLW} = 11 * 11,5 * 0,5 = 63,25t.$$

Die auftretende Hängerkraft (Ständige und Verkehrslasten) beträgt in diesem Fall:

$$P_{ges} = 63,25t + 80,8 + 3,0 = 147,05t$$

Die zulässige Hängerkraft (bei Beibehaltung der Sicherheit von v = 3,00) wird von dem Restquerschnitt des einen geschädigten Seils bestimmt:

$$Z_{zul} = 4 * 4,287 * 4,5 \approx 77,2t$$

$$77,2t = 147,05t.$$

Somit wäre eine Überfahrt unter Beibehaltung der Sicherheit von v = 3,00 nicht möglich.

Bei Ansatz einer zulässigen Spannung von 15 * 0,9 = 13,5 t/cm² (die Reduktion wegen der Umlenkung der Seile würde beibehalten) würde sich folgende Hängerkraft ergeben:

$$Z = 4 * 4,287 * 13,5 = 231,5t$$

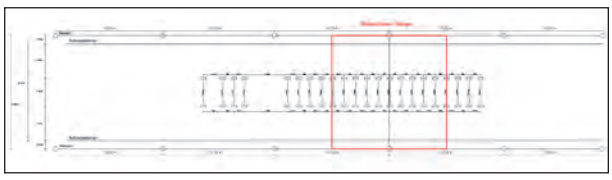


Bild 7.23: Brücke mit mittiger Alleinfahrt eines Schwertransportfahrzeuges

Dies entspricht einer Sicherheit von

$$v = \frac{231,5}{147,05} = 1,574.$$

Die Berechnung berücksichtigt zunächst nicht die die vorhandene Längsverteilung der Verkehrslast in dem System Versteifungsträger/Tragkabel/Hängerseile.

Die Längsverteilung führt zu einer rechnerischen Abminderung der Verkehrslast um mindestens 20 %, sodass sich die folgende Verkehrsbelastung ergibt:

$$P_{SLW} = 11 * 11,5 * 0,5 * 0,8 = 50,6t$$

und hierdurch eine Gesamtbeanspruchung von

$$P_{ges} = 50,6t + 80,8 + 3,0 = 134,4t.$$

Somit ergibt sich eine Sicherheit, die mindestens bei

$$v = \frac{231,5}{134,4} = 1,72$$

liegt.

Die Überfahrt eines Schwerlasttransportes kann unter Berücksichtigung des derzeitigen Zustands der Hänger nur mit reduzierten Sicherheiten erfolgen.

Inwieweit diese reduzierte Sicherheit akzeptiert wird, liegt dann im Verantwortungsbereich der Straßenbauverwaltung.

7.7 Tatsächliche Beanspruchungen

Bei der Rheinbrücke Leverkusen (siehe Bild 7.24) werden die Kabel in den Seilkammern in einzelne Seile auseinandergezogen und hier in Gruppen von 3 bis 4 Seilen verankert.

Bild 7.24: Kabelanordnung bei der Rheinbrücke Leverkusen

Die Seile verankern sich über Traversen in die beiden mittleren Haupttägern. In Bild 7.25 sieht man die Vorderseite mit dem Seileintritt und Durchführung der Seile zwischen den Traversen. Bild 7.26 zeigt die Rückseite mit der markierten Traverse, in dem u. a. ein 400 mm langer Riss zwischen dem Traversenblech und dem Verbindungsblech zum Haupttäger gefunden wurde.

Bild 7.25: Seile werden zwischen Traversen hindurch geführt

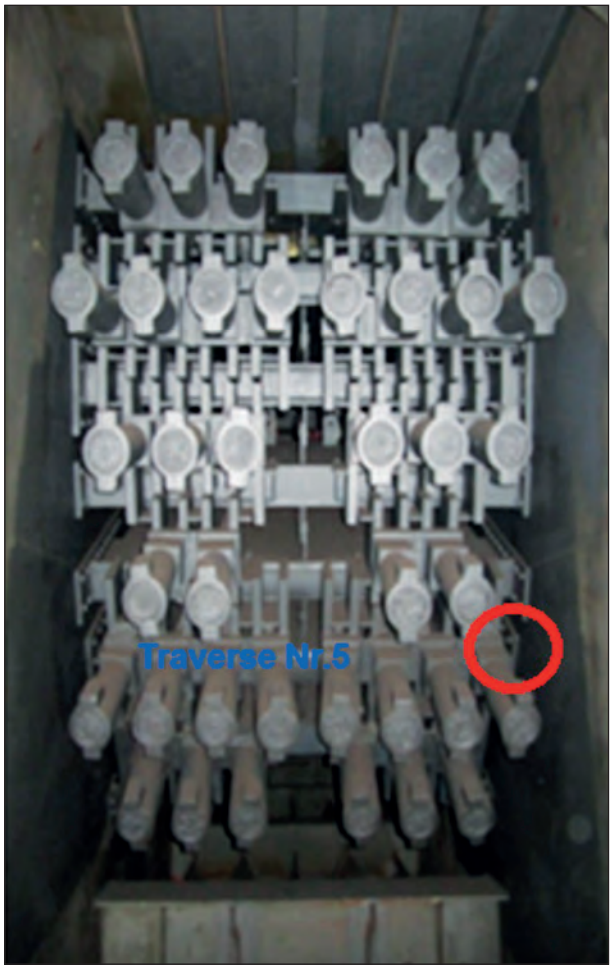


Bild 7.26: Rückwärtige Verankerung der Seilköpfe

Bild 7.27 zeigt das Stahlbaudetail und Bild 7.28 zeigt den Riss. Bei der Instandsetzung wurde festgestellt, dass sich der Riss bis 11 mm tief in das 18 mm dicke Blech hineinzog. Die Instandsetzung dieses Risses wurde im Sommer 2016 bei einer kompletten Vollsperrung der Brücke für den Straßenverkehr durchgeführt.

Für die Beurteilung des Risswachstums und die Beurteilung der Resttragfähigkeit der Traverse mit dem Riss war neben den durchgeführten statischen Berechnungen auch die tatsächliche Beanspruchung aus dem Straßenverkehr von besonderem Interesse. An den Seilen hängt das Gewicht der Brücke, sie erhalten aber auch die auftretenden Verkehrslasten über den Versteifungsträger.

An fünf Querschnitten der Brücke ist ein Monitoringssystem installiert worden um die allgemeine und lokale Beanspruchung in den einzelnen Stahlbauteilen zu messen, siehe Bild 7.29.

Bild 7.27: Traversenblech mit Riss

Bild 7.28: Detailbild mit Riss

Bild 7.30 zeigt die DMS-Anordung im Querschnitt der Brücke.

Nach dem Auffinden von Rissen im Bereich der Seilverankerungen wurden auch die Seilkammern der Achse 10 und 50 (hier wurde der 400mm-Riss gefunden) mit weiteren DMS-Messstellen bestückt, siehe Bild 7.31.

Das gesamte Monitoringssytem wurde mit Referenzfahrzeugen und genauen statischen Messungen auf definierten Positionen (siehe Bild 7.32) und Überfahrten mit verschiedenen Geschwindigkeien (siehe Bild 7.33) kalibriert.

Als Referenzfahrzeug wurde insbesondere ein 36t-Autokran eingesetzt, da dieser mit seinen beiden hinteren Achsen (2 x 12 t = 24 t) in etwa den häufigsten Lkw-Typ (Sattelzugmaschine mit 3-achsigem Auflieger mit Achslasten von 3 x 8 t = 24 t) wiedergibt, siehe Bild 7.34.

Bild 7.35 zeigt eine Beispielmessung mit dem Referenzfahrzeug.

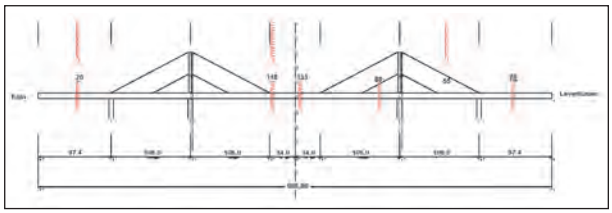


Bild 7.29: Anordnung von Überwachungsquerschnitten

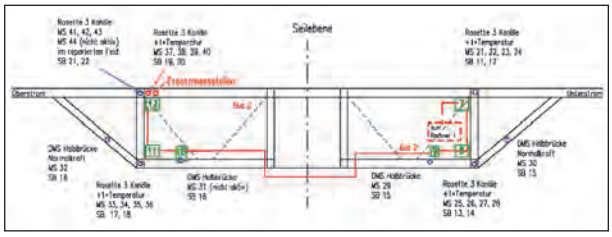


Bild 7.30: Querschnitt mit Angabe der DMS-Messstellen

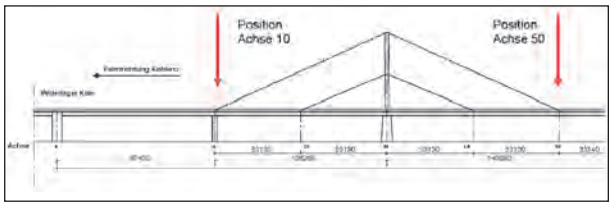


Bild 7.31: Überwachte Seilverankerungsbereiche

Bild 7.32: Genaue Positionierung eines Referenzfahrzeuges für eine statische Messung

Bild 7.33: Referenzfahrzeug für dynamische Messung

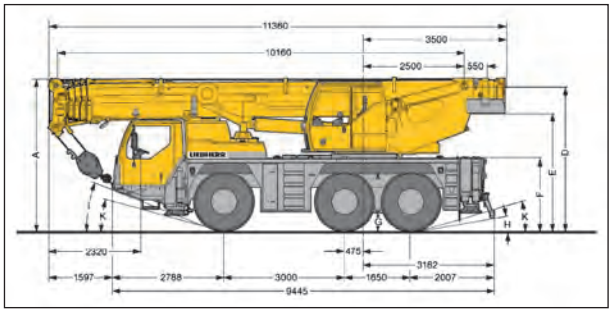


Bild 7.34: 38t-Autokran als Referenzfahrzeug

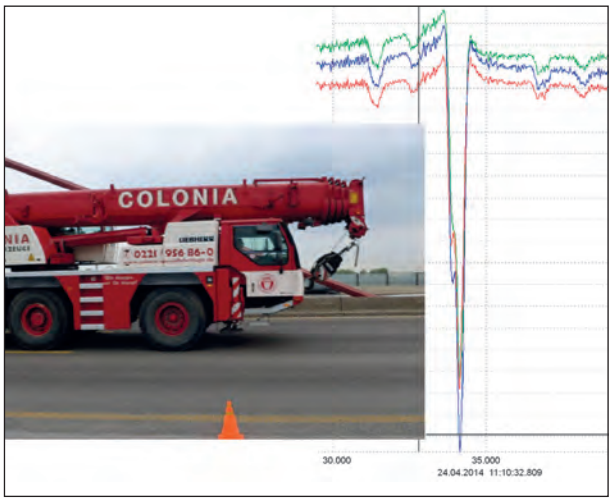


Bild 7.35: Beispielhafte Messung

Bild 7.36 zeigt die aufgezeichneten Messergebnisse, die man dann den jeweiligen Fahrzeugtypen zuordnen kann. Mit der vorhandenen Kalibration kann das tatsächliche Fahrzeuggewicht abgeschätzt werden.

Bild 7.37 zeigt die Position der DMS-Messstreifen in der Seilkammer Achse 50.

Die Bilder 7.38 und 7.39 zeigen die geklebten DMS an den Traversenblechen.

Bild 7.40 zeigt einen aufgezeichneten Messschrieb, der über 84 sec geht; es sind deutlich die Überfahrten einzelner schwerer Fahrzeuge zu erkennen.

Bild 7.41 zeigt einen Messschrieb der vom 24. Mai bis ca. 20. Juni 2016 geht. Hier wird deutlich, dass es auch einen erheblichen Einfluss aus der Temperatur und insbesondere dem Unterschied zwischen der Tages- und der Nachttemperatur gibt. Hierdurch werden ebenfalls Wechselbeanspruchungen in dem Bereich der Seilverankerungen erzeugt.

Bild 7.42 zeigt den herausgezogenen Bereich vom 6.07.2016 bis zum 08.06.2016. Es wird deutlich, dass sich die Wechselbeanspruchungen aus Temperatur und aus den Überfahrten von einzelnen Fahrzeugen überlagern.

Die festgestellten Beanspruchungen aus Temperatur liegen dabei höher als die festgestellten Benspruchungen aus dem normalen Straßenverkehr. Über den Tagesvergangsverlauf überlagert sind die einzelnen Fahrzeugüberfahrten zu erkennen.

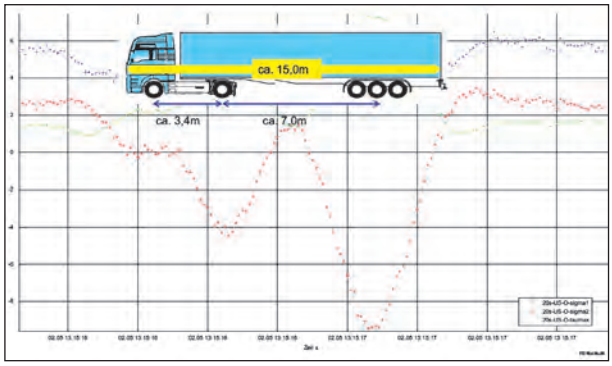


Bild 7.36: Auswertung einer Messung mit Zuordnung eines Fahrzeuges

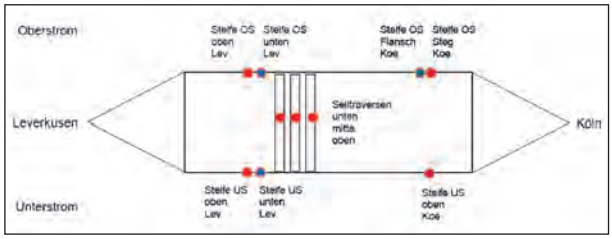


Bild 7.37: Anordnung der DMS im Grundriss der Seilkammer Ache 50

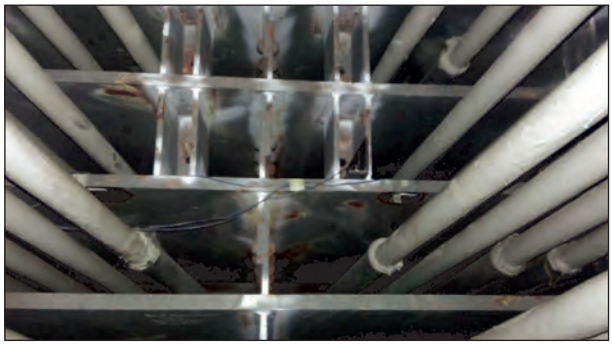


Bild 7.38: Anordnung der DMS im Bereich der Seileinleitung

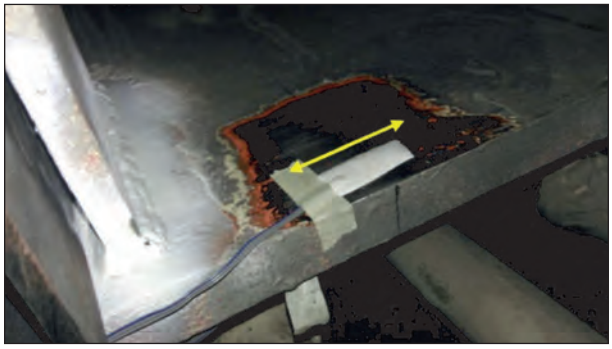


Bild 7.39: Anordnung der DMS an einem Traversenblech

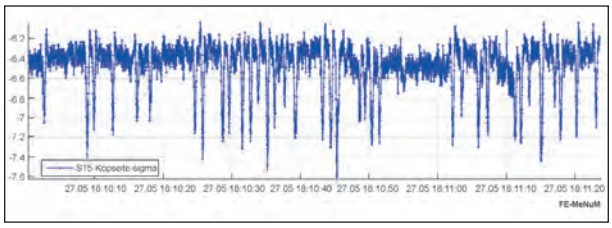


Bild 7.40: 84 sec Messschrieb mit Fahrzeugüberfahrten

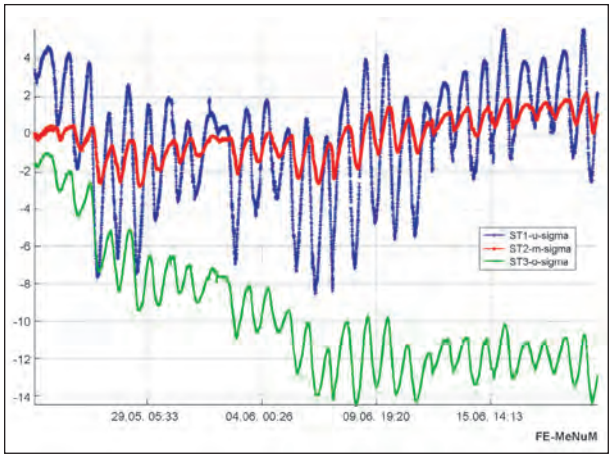


Bild 7.41: Messschrieb vom 29.05.2016 bis 15.06.2016

Bild 7.43 zeigt den Einfluss von besonders schweren Fahrzeugen, die im Bereich der Seiltraversen ungefähr das vierfache der Beanspruchungen auslösen, die der normale Straßenverkehr auslöst.

Im Bild 7.44 sind die Spannungsverläufe in der unteren, der mittleren und der oberen Traverse dargestellt.

Die Überfahrt von schweren Fahrzeugen ist insbesondere bei der unteren Traverse deutlich zu erkennen, bei der mittleren und bei der oberen Traverse ist dies nicht so ausgepägt zu erkennen.

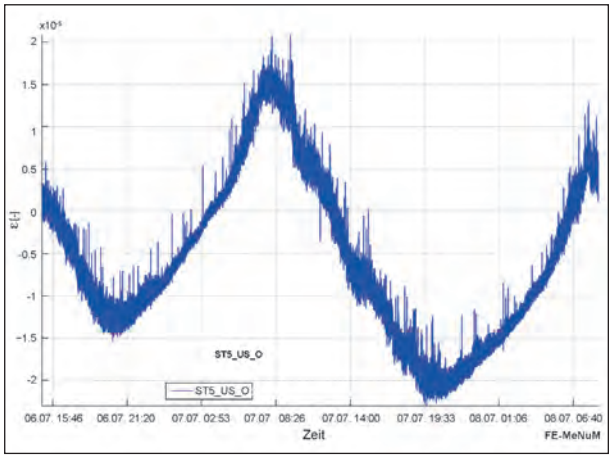


Bild 7.42: Messschrieb über ca. 3 Tage

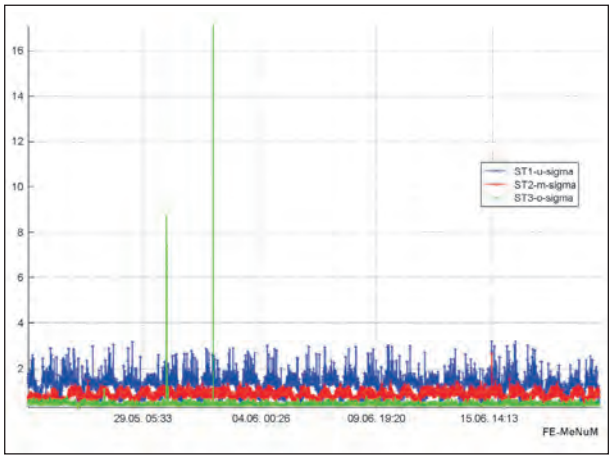


Bild 7.43: Aufgezeichnete Sonderereignisse

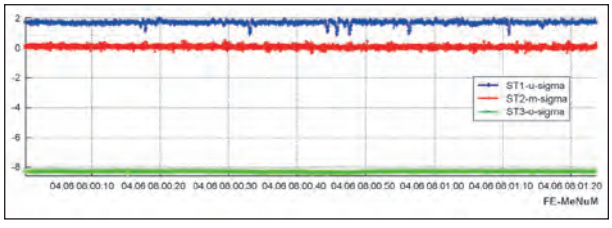


Bild 7.44: Messschrieb für drei übereinanderliegende Traversen

Dies lässt darauf schließen, dass die einzelnen Seile und deren Gruppen sich an der Lastabtragung unterschiedlich beteiligen. Dies ist mit Sicherheit den konstruktiven Gegebenheiten und der doch nicht gleichmäßigen Vorspannung der einzelnen Seile untereinnader geschuldet.

Bild 7.45 zeigt die Beanspruchungen der Traverse bei der Seilachse 50 über einen Zeitraum von ca. 17 min, die gemessene maximale Spannungsschwingbreite im vorderen Bereich der Traverse betragen hier 2,1 N/mm². Hierzu muss festgehalten werden, dass zu dieser Zeit nur noch verbotenerweise Lkw über die Brücke fuhren (die Sperranlage war zu diesem Zeitpunkt noch nicht installiert).

Bild 7.46 zeigt die Überfahrt des 36t-Autokrans, der eine Beanspruchung in der Traverse von 3 N/mm² erzeugt.

Hieraus lässt sich Folgendes folgern:

- die Einzelüberfahrten von Lkw sind an den Traversen messbar, allerdings in sehr geringer Größenordnung,

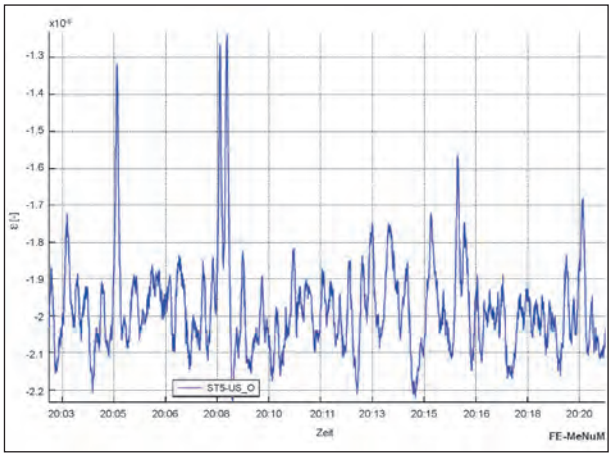


Bild 7.45: 20 sec Messschrieb

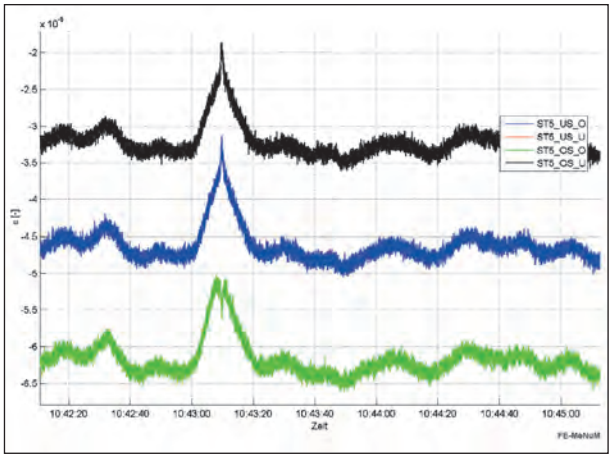


Bild 7.46: Überfahrt des 36t-Autokrans

- berücksichtigt man, dass die Traversen jeweils 3 oder 4 Einzelseile verankern, ist die Ermüdungsbeanspruchung, die das einzelne Seil bekommt, extrem gering,
- somit sind Schäden aus diesen Wechselbeanspruchungen nicht zu erwarten, was durch die Beobachtungen und Ergebnisse aus den Bauwerksprüfungen bestätigt wird.

8 Beurteilung von Schäden

8.1 Allgemeines

In diesem Kapitel werden einige Schäden dargestellt und Vorschläge zur Bewertung bei der Bauwerksprüfung gemacht. Eine detaillierte Darstellung ist im beigefügten Anhang E enthalten.

Die derzeitige Programmversion von SIB-BW enthält derzeit noch keine expliziten Schadensbeispiele für Schäden an vollverschlossenen Seilen, insofern können die nachfolgenden Ausführungen als ein möglicher Diskussionsbeitrag zur erforderlichen Erweiterung angesehen werden.

Die Bewertung solcher Schäden und die hier gemachten Vorschläge orientieren sich an der bekannten Schadensbewertung von 0 bis 4 und auf die Bereiche Standsicherheit (S), Verkehrssicherheit (V) und Dauerhaftigkeit (D).

Grundsätzlich sind bei der Bauwerksprüfung die festgestellten Schäden folgendermaßen zu unterscheiden/Hamme/:

- Korrosionsschäden,
- Drahtbrüche,
- Verformungen,
- unplanmäßige Schwingungen,
- sonstige Schäden.

8.2 Prüfung vor Ort

Die zunächst visuelle Prüfung umfasst dabei die freie Seillänge genauso wie Auskreuzungen, Verbindungsschellen, Dämpfer, Verankerungen, Kabelschellen, Dichtungen vor Seilköpfen etc.

Inzwischen erfolgt die visuelle Bauwerksprüfung bei einer Hauptprüfung mit der Anforderung einer handnahen Prüfung durch entsprechenden Hubsteiger, siehe Bild 8.1. Das früher eingesetzte Seilbesichtigungsgerät des Bundes steht aus technischen Gründen nicht mehr zur Verfügung.

Bei dem Einsatz eines großen Hubsteigers sind die dabei entstehenden Pratzendrücke bei der Lasteinleitung in die Stahlfahrbahn zu berücksichtigen, siehe Bild 8.2. Weiterhin verursachen solche Prüfungen meist weitgehenden Verkehrsleitmaßnahmen und finden daher zumeist nachts oder an Wochenenden statt.

Bild 8.1: Einsatz eines Hubsteigers

Bild 8.2: Berücksichtigung der Pratzendrücke

Desweiteren können zerstörungsfreie Prüfungen erfolgen, wie z. B. visuelle und magnetinduktive Prüfungen (siehe Bild 8.3 und Bild 8.4) oder Eigenfrequenzmessungen.

Die Prüfung von Einzelseilen ist dabei einfacher als die Prüfung von Kabeln, hier können zumeist nur die äußeren Seilflächen durchstrahlungsmäßig geprüft werden.

Das Innere der Kabel ist hier nicht einsehbar, es sei denn man führt eine Seilspreizung durch, die entweder dauerhaft, wie bei der Rheinbrücke Neuenkamp, durchgeführt wird oder aber temporär, wie bei der Rheinbrücke Emmerich.

Hier wurde 2014 zum ersten Mal in Deutschland ein Tragkabel einer Hängebrücke gespreizt, sodass man auch einige Bereiche der inneren Lagen visuell prüfen konnte.

Bei vergleichbaren anderen Brücken in Europa, Asien und Amerika wurden Spreizungen von Tragkabel bei Hängebrücken durchgeführt, siehe z. B. Bild 8.5, welches Tragkabel der Fort Road Bridge in Schottland zeigt. Bei diesen Brücken bestehen die Tragkabel aber zumeist aus parallel geführten Drähten. Die Öffnung des Tragkabels wurde nach ca. 50 Jahren Betriebszeit vorgenommen.

Bei der Spreizung wurden auch Drahtbrüche im Inneren festgestellt, ob diese durch die Spreizung initiiert wurden oder aber bereits vorher vorhandene waren, konnte nicht geklärt werden.

Die Spreizung bei der Rheinbrücke Emmerich wurde durchgeführt, da in den tieferen Bereichen das Tragkabel bewusst nicht ummantelt wurde und hier Feuchtigkeit permanent austritt. Das Wasser sammelt sich in den oberen Bereichen, läuft in der Ummantelung herunter und tritt unten aus, siehe die Bilder 8.6 und 8.7.

Der Bereich wurde eingehaust, siehe Bild 8.8. Damit dieser Bereich auch gespreizt werden konnte, wurde vorher ein Hänger ausgebaut.

Dies war beim Entwurf und Berechnung der Brücke damals berücksichtigt worden.

Bild 8.3: Magnetinduktives Seilprüfgerät (Bild: www.alpintechnik.de)

Bild 8.4: Zerstörungsfreie Seilprüfung bestehend aus Selbstfahrer, magnetinduktivem Seilprüfgerät und visuellem Seilprüfgerät (Bild: Fa. Rotec, Stuttgart)

Bild 8.5: Tragkabel der Fort Road Bridge

Bild 8.6: Mittlerer Bereich des Tragkabels ohne Ummantelung

In den Randbereichen wurde ebenfalls die Ummantelung entfernt, sodass ein Spreizen der Seile hier nicht behindert wird, siehe Bild 8.9.

Mittels spezieller Klemmkonstruktionen und Spanngurte wurden dann die Seile einzeln nach außen gezogen, siehe Bild 8.10.

Bild 8.11 zeigt die auseinandergezogenen Seile.

Bild 8.7: Austritt von Feuchtigkeit

Bild 8.8: Einhausung des mittleren Bereiches des Tragkabels

Bild 8.9: Teilweise wurde die Ummantelung entfernt

Teilweise konnten im unteren Bereich komplette Ebenen freigelegt werden, siehe Bild 8.12.

Das Ergebnis war, dass trotz des jahrelangen Austretens von Feuchtigkeit die Seile nicht angegriffen waren und der innere Korrosionsschutz in einem sehr guten Zustand war. Die Bereiche wurden gereinigt und neu gegen Feuchtigkeit geschützt.

Nach Aussage von Bauwerksprüfern von Straßen. NRW ist es durchaus möglich, bei einigen Schräg-

Bild 8.10: Spezielle Klemmkonstruktion zum Auseinanderziehen der einzelnen Seile

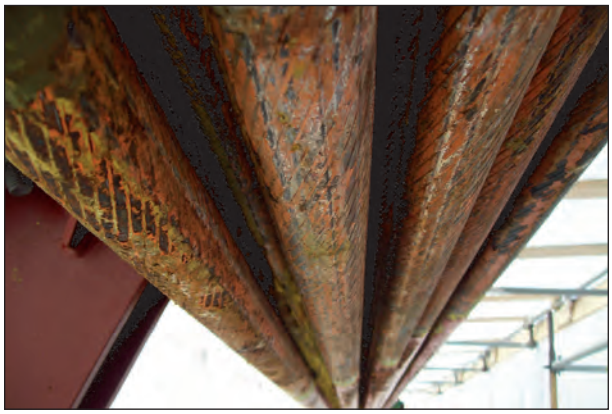


Bild 8.11: Auseinandergezogene Seile

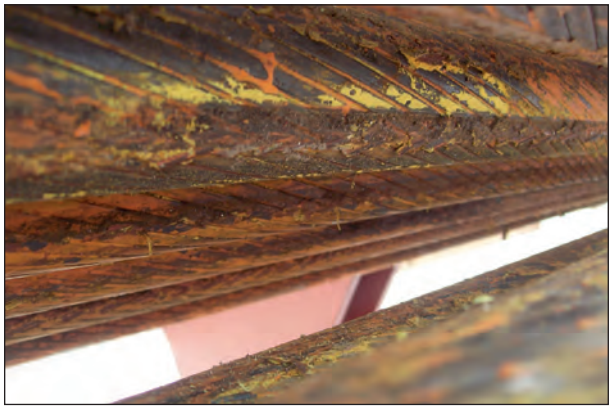


Bild 8.12: Freigelegte Seilebene

seilbrücken die äußeren Seile mit Holzkeilen soweit auseinander zu treiben, dass visuell oder endoskopisch kleinere Innenbereiche eingesehen werden können. Die Gefahr einer Beschädigung von Drähten ist hierbei aber immer gegeben, insofern wird dieses Vorgehen nur bei besonderen Verdachtsfällen angewendet.

Zur Spreizung bei der Rheinbrücke Neuenkamp bleibt festzuhalten, dass die Seile nicht so weit auseinandergezogen werden konnten, dass anschließend eine magnetinduktive Prüfung der einzelnen Seile möglich war.

8.3 Bewertung einzelner Schäden

Bei der Bewertung von Drahtbrüchen sind folgende Aspekte zu bewerten und bestimmen somit die Benotung:

- Anzahl der Drahtbrüche an einer Stelle

  Hierbei ist zu prüfen ob die Drähte noch im Verbund sind oder die Gefahr besteht, dass sie sich lösen und herabhängen.

- Anzahl und Verteilung der Drahtbrüche über die gesamte Länge eines Seils,

- Entstehungsgeschichte (zeitliche Entwicklung der Schäden).

- Innere/äußere Drahtbrüche

  Die Detektion von inneren Drahtbrüchen ist nur über gesonderte Durchstrahlungsprüfungen oder magnetinduktive Prüfung feststellbar und hierbei stark abhängig von den Seilanordnungen.

Bild 8.13 zeigt ein Seil mit drei Drahtbrüchen an einer Stelle.

Der Bewertungsvorschlag würde hier S = 2, V = 1 und D = 3 lauten.

Die Bewertung der Standsicherheit könnte wie folgt begründet werden:

Die Bewertung S = 1 beinhaltet einen einzelnen Drahtbruch, wobei der Draht an sich aber noch im Verbund bleibt. Die Bewertung S = 2 könnten bei 2 bis 3 Drahtbrüchen nebeneinander liegen, bei Drahtbrüchen, die im Umfang der Seile ein Drittel ausmachen, könnte S = 3 gegeben werden, darüber hinaus ist S = 4 zu geben.

In die Bewertung mit einfließen sollte durchaus die Tatsache, inwieweit die Drähte im Verbund bleiben oder aus dem Verbund gelöst sind und herabhängen, siehe Bild 8.14.

Die Bewertung könnte hier S = 3, V = 3 und D = 3 sein. Die Verkehrssicherheit ist hier indirekt beeinflusst dadurch, dass die stark herabhängenden Drähte die Verkehrsteilnehmer in ihrer Aufmerksamkeit beeinträchtigen und damit zu Unfällen führen können.

Unstrittig ist bei solchen Schäden, dass hier eine umgehende Baumaßnahme erfolgen muss, d. h. das Abbändeln des Seiles muss erfolgen um eine weitere Schadenserweiterung zu verhindern.

Weiterhin ist im Anschluss an solche Schäden auch eine OSA (Objektbezogene Schadensanalayse) durchzuführen.

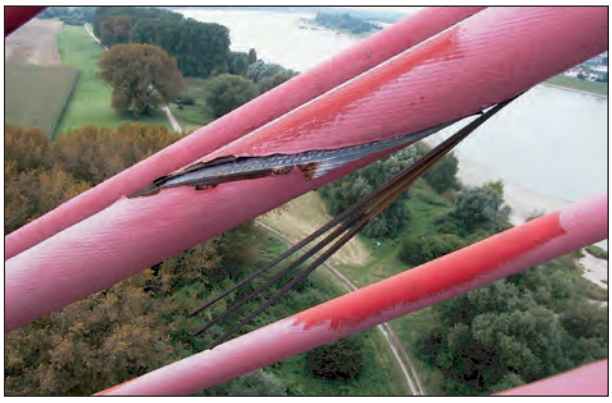


Bild 8.13: Drei Drahtbrüche mit Verlust des Verbundes

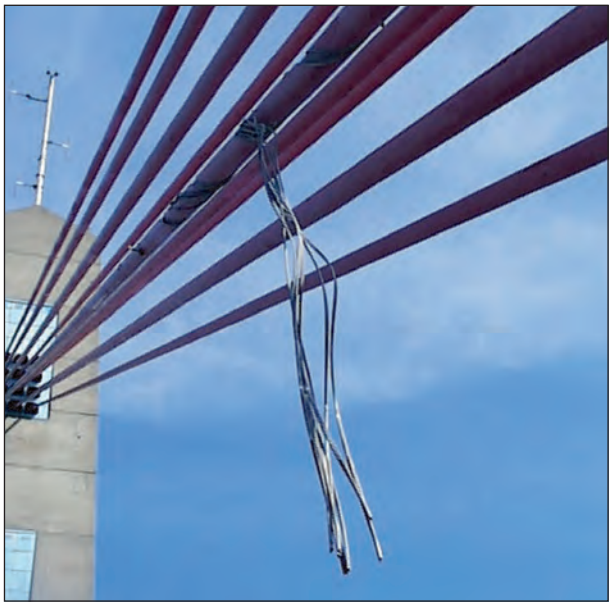


Bild 8.14: Drei Drahtbrüche mit Verlust des Verbundes

Im Vergleich dazu zeigt das Bild 8.15 einen Tragfähigkeitsschaden.

Der Bewertungsvorschlag würde mit S = 3 bis 4, V = 0 und D = 4 erfolgen. Auch in diesem Fall sind eine umgehende Baumaßnahme und eine anschließende OSA zu empfehlen.

Bild 8.16 zeigt ein freigelegtes Seil mit starker Korrosion und damit mit einem Querschnittsverlust. Es sind aber keine Drahtbrüche vorhanden.

Der Vorschlag für die Bewertung würde hier S = 1 bis 2, V = 0 und D = 2 lauten. Da für den Bauwerksprüfer der Grad der Schädigung und dessen Einfluss auf die Reduzierung der Tragfähigkeit des Seiles nicht bekannt ist, wird hier ebenfalls eine OSA zur Ermittlung der Ursachen, der Resttragfähigkeit und Ausarbeitung von Empfehlungen hinsichtlich der Vermeidung einer Schadenserweiterung erforderlich.

Die Bilder 8.17 und 8.18 zeigen Beschichtungsschäden.

Der Bewertungsvorschlag lautet S = 0, V = 0 und D = 1. Falls hier nicht direkt die Ursache der Beschädigung feststeht und damit auch die Instandsetzung klar ist, muss hier auch eine OSA durchgeführt werden.

Bild 8.19 zeigt einen punktuellen Schaden in der Beschichtung, der mit S = 0, V = 0 und D = 1 zu bewerten wäre.

Bild 8.15: Mehrere Drahtbrüche mit bestehendem Verbund

Bild 8.16: Starke Korrosion mit Blattrostbildung

Bild 8.17: Beschichtungsschaden mit regelmäßigen Muster

Bild 8.18: Detailbild

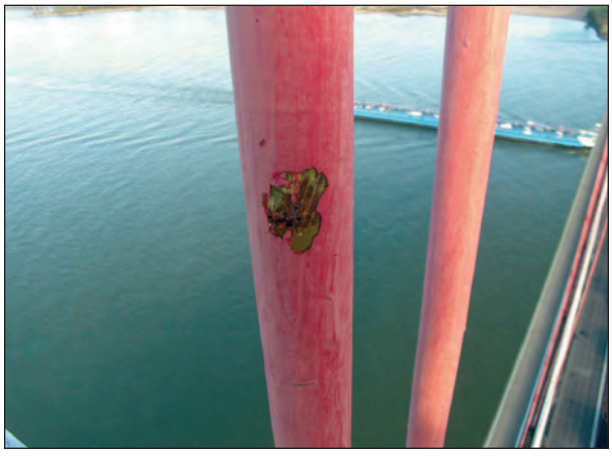


Bild 8.19: Korrosionsschutzschaden

Abhängig von dem Gesamtschadensausmaß und der Häufigkeit des Schadens ergibt sich dann die erforderliche Instandsetzungsmaßnahme. Tritt dieser Schaden gehäuft am Bauwerk auf, sind sicherlich die Eignung der Beschichtungsstoffe und die Untergrundvorbereitung zu hinterfragen, dies wäre dann ebenfalls wieder im Rahmen einer OSA zu erbringen.

8.4 Sofortmaßnahmen bei Schäden

Bei besonders starken Korrosionsschäden besteht die Gefahr, dass durch eine weitere Abrostung und/oder das Eindringen von Wasser in die Zwischenräume der Drahtverbund aufgesprengt wird. Dies sollte in jedem Fall vermieden werden.

In Absprache mit der Straßenbaubehörde wurden folgende Maßnahmen getroffen.

- Die Korrosionsstellen wurden gesäubert, in dem vorliegenden Fall wurde dies mit einem sog. Bristle Blaster durchgeführt.
- Anschließend wurde ein temporärer Korrosionsschutz aufgebracht.

Die einzelnen Zustände sind in den Bildern 8.20 bis 8.22 dargestellt.

Bild 8.20: Beispielschaden vor dem Entfernen des Blattrostes

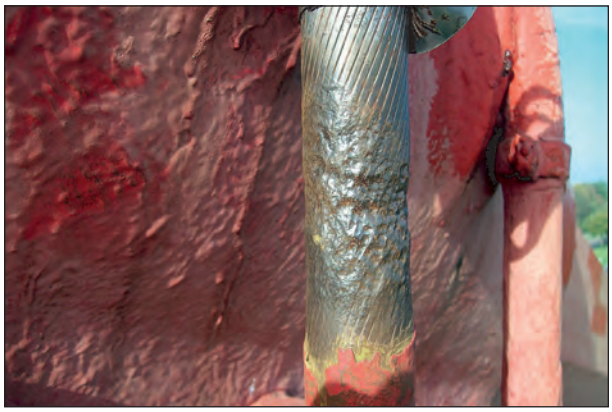


Bild 8.21: Seil nach dem Entfernen von Rost mithilfe eines Bristle Blaster

Bild 8.22: Seil nach dem Entfernen von Rost mithilfe eines Bristle Blaster

9 Schlussfolgerungen

Der erste Versuch musste frühzeitig abgebrochen werden, da die gesamte äußere Drahtlage gebrochen war und der Ermüdungsversuch nicht weiter ordnungsgemäß gefahren werden konnte.

Der anschließende Zerreißversuch an dem Restquerschnitt lieferte aber immer noch eine ausreichend große Bruchkraft, sodass beim Einsatz in der Brücke auch bei völligem Ausfall der äußeren Drahtlage kein Sicherheitsdefizit entstanden wäre.

Der zweite Versuch lieferte ein hervorragendes Ergebnis und entsprach somit einem ungeschädigten neuen Seil. Im Ermüdungsversuch zeigte sich, dass natürlich korrodierte Stellen den Ansatzpunkt für mögliche Drahtbrüche liefern können. Ein nachfolgendes Versagen von benachbarten Drähten blieb in diesem Ermüdungsversuch aber aus, ein Reißverschlusseffekt konnte nicht beobachtet werden.

Der dritte Versuch wurde ebenfalls mit einem Kunststoffverguss durchgeführt und zeigte ebenfalls ein sehr gutes Ergebnis im Ermüdungsversuch, aber auch im Bruchversuch.

Der vierte Versuch wurde mit einem metallischen Verguss durchgeführt, konnte zwar im Ermüdungsversuch bis zum Ende gefahren werden, zeigte aber ebenfalls viele Drahtbrüche im Seilkopf.

Dieses Verhalten wurde dann auch im fünften Versuch, der mit einem Kunststoffverguss durchgeführt wurde, beobachtet.

Die Drahtbrüche im Seilkopf lagen durchweg in dem Bereich des Knicks im Vergusskegel.

Dies lässt ggf. folgende Schlüsse zu:

- insbesondere ausgebaute Seile mit einer gewissen Nutzungsdauer sind empfindlich hinsichtlich eine besonderen Kerbspannung,
- der Reinigung, dem Anbringen der Seilköpfe und dem vollständigen Verguss muss besondere Aufmerksamkeit gewidmet werden,
- durch die verschiedenen Vergussarten ist erkennbar, dass nicht zwingend der metallische Verguss mit seiner erforderlichen Temperatur diese Drahtbrüche provoziert hat.

Das Auftreten solch massiver Drahtbruchanordnungen im Bereich der Seilköpfe an sich, aber auch das von einzelnen wenigen in diesem Bereich ist in der Praxis bisher noch nicht beobachtet worden. Dies liegt im wesentlichen daran, dass die konstruktiven Gegebenheiten hier anders sind, d. h. der Verankerungsbereich bei den Brücken wird so ausgebildet, dass:

- ein Anschlagen der Einzelseile untereinander und mit der Haltekonstruktion nicht auftreten kann, ggf. werden hier auch zusätzliche Dämpfer angebracht, die die Seilschwingungen von der Verankerungsstelle fernhalten,
- die Verankerung wird zumeist in dem Hohlkasteninneren angebracht und nicht im Durchdringungspunkt der Seile durch das Deckblech der Brücken, somit erfolgt eine Trennung der Beanspruchungen und ein zusätzliches Abschirmen der Seilköpfe vor dem Zutritt von Feuchtigkeit und damit Vermeidung von Korrosion an den Seilköpfen.

Ein weiterer Aspekt, der sich im nachhinein als bestimmend für die Versuche ergeben könnte, ist der Einbauort der ausgewählten Seilproben in dem Seil. Je nach Lage über die Länge erfährt das Seil einen anderen Seildurchhang mit entsprechender Krümmung und wird im anschließend Ermüdungsversuch zentrisch gezogen, auch hierdurch entstehen unsymmetrische Beanspruchungen in dem Seilkrafteinleitungsbereich des Seilkopfes.

Die hier durchgeführten Versuche, die in der Literatur belegten Versuche und die Auswertung von Korrosionsschäden an vollverschlossenen Seilen zeigen keinen Abfall der Ermüdungsfestigkeit infolge der Korrosionsnarben.

Im Gegensatz zu Stahlbauteilen, bei dem die Kerbwirkung in einen Anriss übergeht und anschließend der Ermüdungsrissfortschritt immer weiter den tragfähigen Querschnitt reduziert, zeigten die Versuche, dass selbst bei einem frühzeitigen Drahtbruch kein Reißverschlussefekt zu einem Gesamtversagen führt. Ein einzelner Drahtbruch, selbst in einem frühen Stadium, ist somit nicht als unabdingbarer Schädigungsverlauf bis zum Gesamtversagen anzusehen.

In [16] wird als Grenzkriterium 25 % Drahtbrüche angegeben, hierbei ist der Seilverbund nachhaltig gestört und ein Restversagen des gesamten Seiles wird wahrscheinlicher. Der Ermüdungsbruch eines vollverschlossenen Seiles kann somit als ein Bruch mit hoher Duktilität bzw. mit Vorankündigung eingestuft werden.

Literatur

[1] DIN EN 1993-1-11:2010-12: Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten – Teil 1-11: Bemessung und Konstruktion von Tragwerken mit Zuggliedern aus Stahl. Deutsche Fassung EN 1993-1-11:2006 + AC:2009, Beuth-Verlag

[2] FRIEDRICH, H.; HAMME, M.; HEMMERT-HALSWICK, A.; SAUL, R.: Brückenseile. Stahlbaukalender 2012, S. 633-666

[3] HAMME, M.: Neue Entwicklung bei den Brückenseilen. Beitrag zum BASt-Seminar ‚Neue Entwicklungen im Stahlbrückenbau', Bundesanstalt für Straßenwesen, 22.10.2008

[4] SCZYSLO, S.: Brückenseile aus der Sicht der Straßenbauverwaltung. Bauingenieur 67 (1992), S. 347-358

[5] DIN 18809:1987-09: Stählerne Straßen- und Wegbrücken; Bemessung, Konstruktion, Herstellung. Norm ist inzwischen zurückgezogen

[6] WESTERHOFF, D.: Vollverschlossene Spiralseile für Brücken. Sonderdruck aus Thyssen Technische Berichte, Heft 2/88, 16 Seiten

[7] Richtlinien für den Korrosionsschutz von Seilen und Kabeln im Brückenbau, Ausgabe 1983, (RKS-Seile) jetzt ZTV-ING Teil 4-4 Seile und Kabel, ZTV-ING Teil 4-5 Korrosionsschutz von Seilen und Kabeln und TL/TP-KOR-Seile und Kabel, BASt

[8] FRIEDRICH, H.; STAECK, M.: Mit Galfan verzinkte Brückenseile, Untersuchung der Haftfestigkeit von Grundbeschichtungen. Schlussbericht; Bundesanstalt für Straßenwesen, September 2004, 60 Seiten

[9] WESTERHOFF, D.: Seil-Endverbindungen bei Brücken und Masten; Sonderdruck aus der Fachzeitschrift DRAHT 35 (1984) 10, 4 Seiten

[10] AREND, M.: Hochfeste Zugglieder und ihre Verankerung. Beitrag zum DAfStb-Forschungskolloquium der Universität Stuttgart, November 1994

[11] Thyssen Draht AG: Offene Spiralseile vollverschlossene Spiralseile. Ausgabe 1992, Verfasser: Obering, Dipl.-Ing. Dieter WESTERHOFF

[12] Gutachtliche Stellungnahme zu den offenen Drahtbrüchen in der Seilgruppe R100. Boué Ingenieure, Darmstadt 15.02.2003, Gutachten im Auftrag von Strassen.NRW, ANL Krefeld

[13] GURTMANN, St.; HAMME, M.; MARZAHN, G.; SIEBERT, S.: Seilaustausch unter Verkehr an der Rheinbrücke Flehe. Stahlbau 79 (2010), Heft 9, 2010

[14] Schäden an Brücken und anderen Ingenieurbauwerken. Dokumentation 1982, S. 210-221, Bundesministerium für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Verkehrblatt Verlag, 1982

[15] Erhaltungsarbeiten an Brücken und anderen Ingenieurbauwerken von Straßen-Dokumentation 1990. Seite 332-339, Bundesministerium für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Verkehrsblatt Verlag, 1990

[16] Schäden an Brücken und anderen Ingenieurbauwerken, Dokumentation 1994, S. 255-273, Bundesministerium für Verkehr, Abteilung Straßenbau, Verkehrsblatt Verlag, 1994

[17] 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. Abschlußbericht zum DFG-Forschungsvorhaben Se 351/10-2, RWTH Aachen, Juni 1995, 51 Seiten

[18] Bericht Nr. 043/2008/01 über die visuelle Prüfung von 5 abgelegten VVS-Seilenden, Bericht der DMT vom 24.04.2008, Bochum

[19] Prüfungsbericht zum Forschungsauftrag an einem ausgebauten Seil der Fehmarnsundbrücke. F.A. 15.103 R 80 H, 15.07.1980

[20] BOUÉ, P.: Erfahrungen und Versuchsergebnisse zur bleibenden Spreizung an der Donaubrücke Deggenau. Stahlbau 69 (2000), Heft 11, S. 909-916

[21] REHM, G.; NÜRNBERGER, U.:
Korrosionsprobleme bei Seilen. S. 191-199; Buch RWTH 1762,3b

[22] GABRIEL, K.:
On the Fatigue Strength of Wires in Spiral Ropes. Reprinted from March 1985, Vol. 107, Journal of Energy Resources Technology, S. 107-112

[23] GABRIEL, K.:
Fatigue Resistance of Locked Coil Ropes, Stuttgart, 15 pages

[24] HAVEMANN, K.:
Die Seilverspannung der Autobahnbrücke über die Norderelbe – Bericht über Versuche zur Dauerfestigkeit der Drahtseile. Der Stahlbau (31), Heft 8, 1962

[25] IABSE Workshop El Paular: Length Effect on Fatigue of Wires and Strands Bericht IABSE, AIPC, IVBH, Madrid 1992, Seite 51-72

[26] IABSE Workshop El Paular: Length Effect on Fatigue of Wires and Strands Bericht IABSE, AIPC, IVBH, Madrid 1992, pp. 233-249

[27] FUCHS, D.; HÖHLE, H. W.:
Untersuchung an 50 Jahre alten ausgebauten Seilen von Tragkabeln einer Hängebrücke. Stahlbau 65 (1996) Heft 4, S.148-155

[28] HARRE, W.:
Erkenntnisse aus der Prüfung baupraktisch vorbelasteter vollverschlossener Brückenseile der Autobahnbrücke über die Norderelbe, Bauingenieur 67 (1992), S. 91-99

[29] TL Seile, Abschnitt 9 – Technischer Anhang: ‚Standardversuch zum Betriebsfestigkeitsnachweis für vollverschlossene Brückenseile‘, Anlage 9, Verkehrsblatt-Dokument Nr. B. 5229, Version 11/1994

[30] NÜRNBERGER, U.; WIUME, D.; BEUL, W.:
Korrosionsverhalten von Litzen aus hochfesten austenitischen Stahldrähten. Bauingenieur 65 (1990), S. 171 ff.

[31] HARRE, W.:
Erkenntnisse aus der Prüfung baupraktisch vorbelasteter vollverschlossener Brückenseile (Teil 1: Fehmarnsundbrücke). Bauingenieur 66 (1991)

[32] DONANDT, H.:
Zur Dauerfestigkeit von Seildraht und Drahtseil. Sonderabdrucke vom Verlag Stahleisen 21. Jahrgang, Heft 9-10 Sept./Okt. 1950, S. 283-291

[33] RIECKE, E.:
Untersuchungen über den Einfluß des Zinks auf das Korrosionsverhalten von Spannstählen. Verlag Chemie, 1979, S. 619-631

[34] WOODTLI-FOLPRECHT, J.; FICHTER, R.:
Fraktographie von Brüchen an Seildrähten aus Stahl, DRA HT-Fachzeitschrift 1975/5, S. 211, 212 und 214

[35] NÜRNBERGER, U.: Schwingungsrisskorrosionsverhalten von Litzen aus hochfesten austenitischen Stahldrähten.
S. 207-220

[36] REHM, G.; FREY, R.; NÜRNBERGER, U.:
Untersuchung zum Spannungsrißkorrosionsverhalten von Seildrähten, Seite 5. 6-1 bis 5. 6-4 s. S. 5. 6-1 bis 5. 6-4

[37] Eurocode – DIN EN 1993-1-11

[38] Gutachten Duisburg Neuenkamp

[39] RAUPP, D.; KLOPFER A.:
Stehende Seile unter ermüdender Zugbeanspruchung. Stahlbau 75 (2006). Heft 1, S. 40-44

[40] o. Namen: Rheinbrücke am Tropf, Stickstoffinfusionen verringern Korrosionsgefahr

[41] Westfälische Berggewerkschaftskasse, Seilprüfstelle, Institut für Fördertechnik und Werkstoffkunde: Gutachten über den Zustand von ausgesuchten Stellen des Kabelbündels an Kabelschellen, den zugehörigen Hängerseilen sowie zwei Kabelsattellagern der Rheinbrücke Köln-Rodenkirchen für das Rheinische Autobahnamt Köln. 12.02.1987; 49 Seiten

[42] Westfälische Berggewerkschaftskasse, WBK-Seilprüfstelle, Institut für Fördertechnik und Werkstoffkunde; Gutachterliche Stellungnahme zur Bewertung des vorhandenen Seiltragwerkes der Rheinbrücke Köln-Rodenkirchen BW-Nr. 5007.829. 15.05.1989, 18 Seiten

[43] HÖHLE, H.-W.; BECKER, K.; FUCHS, D.; NÖLLER, H.:
Seile unter Zugbelastung; Materialprüfung 35 (1993) 3, Carl Hanser Verlag, München 1993, S. 59-62

[44] DIN EN 10264-1, DIN Deutscher Institut für Normung e. V., 2002-06, 6 Seiten

[45] DIN EN 10264-2, DIN Deutscher Institut für Normung e. V., 2002-06, 5 Seiten

[46] DIN EN 10264-3, DIN Deutscher Institut für Normung e. V., 2003-02, 18 Seiten

[47] DIN EN 10264-4, DIN Deutscher Institut für Normung e. V., 2002-11, 9 Seiten

[48] HUNDT, J.:
Einsatz des Endoskops zum Nachweis von Korrosionsschäden an Spannstählen und deren Verankerung. S. 15-22

[49] KRAUSE, H.; MATHIAS, M.:
Röntgenographische Eigenspannungsuntersuchungen an Seildrähten. DRAHT 35 (1984) 6, S. 331-335

[50] RAOOF, M.; HOBBS, R. E.:
Analysis of Multilayered Structural; (erfasst 51.36.5). pp. 1166-1181

[51] BAHKE:
Universität Karlsruhe: 150 Jahre Drahtseilforschung, Teil 1. Draht 35 (1984) 10, S. 498-502

[52] BAHKE
Universität Karlsruhe:
150 Jahre Drahtseilforschung, Teil 2. Draht 35 (1984) 12, S. 616-619

[53] HAMSCH, D.; MÜLLER, B.:
Litzenspannverfahren im Brückenbau. Die Straße, 29. Jahrgang (1989) 2, S. 56-58

[54] HAID, K.-D.:
Zur Bestimmung der Kräfte in Litzendrähten. Draht 33 (1982) 6, S. 398-401

[55] STAUSKE, D.:
Drahtseile für Seilbauwerke. Stahlbau 69 (2000) Heft 8, 7 Seiten

[56] Bundesministerium für Verkehr, Abteilung Straßenbau; TL Seile, Technische Lieferbedingungen für vollverschlossene Brückenseile. Fassung vom November 1994; Verkehrsblatt-Dokument-Nr. B 5229

[57] Recommendations from Thyssen Draht: Determining the Rope Diameter for static and dynamic Rope Loading

[58] Deutsche Normen: Stählerne Straßenbrücken. Berechnungsgrundlagen, Erläuterungen, DIN 1073 Beiblatt; Beuth-Vertrieb; April 1969

[59] DIN 18800 Teil 1, Seite 9-11

[60] SAUL, R.:
Hochfeste Zugglieder mit Beispielen aus der Praxis. Seminar „Stahlbau DIN 18800“
19. März 1999, 20 Seiten

[61] SAUL, R.; SVENSSON, H. S.:
On the Corrosion Protection of Stay Cables. Sonderdruck Stahlbau Heft 6/1990, pp. 165-176

[62] SAUL, R.; SVENSSON, H.:
Übersetzung des Beitrags “On the Corrosion Protection of Stay Cables”; Stahlbau Heft 6/1990, S. 165-176

[63] LEONHARDT, ANDRÄ & Partner:
Survey of Stay Cable Technology. September 1989

[64] SCHLAICH, J.:
On the Detailing of Cable-Stayed Bridges. Elsevier Science Publishers B.V. 1991

[65] GABRIEL, K.; HELMES, F.:
The Mechanics of Socketing: The Zinc Alloy Cast Cone as a Special Compound Structure; Proceedings of the First (1991). International Offshore and Polar Engineering Conference

[66] LEONHARDT, ANDRÄ & Partner:
Auszug aus ‚Structural Dynamics’ – Cable Vibrations; 8 Seiten

[67] Teilauszug aus TL Seile, Anhang 9; Verkehrsblatt-Dokument Nr. B 5229 – Vers. 11/94, 1 Seite

[68] AREND, M.:
Hochfeste Zugglieder und ihre Verankerung; DafStb-Forschungskolloquium, Univ. Stuttgart, Nov. 1994, 15 Seiten

[69] SAUL, R.; SVENSSON, H.:
Zur Behandlung des Lastfalls „ständige Last” beim Tragsicherheitsnachweis von Schrägkabelbrücken. Bauingenieur 58 (1983), S. 329-335

[70] KOVÁCS, I.:
Zur Frage der Seilschwingungen und der Seildämpfung; Sonderdruck. Die Bautechnik, Heft 10/82, S. 1-10

[71] WESTERHOFF, D.:
Offene Spiralseile Vollverschlossene Spiralseile. Thyssen Draht AG, Ausgabe 1992, S. 1-97

[72] KÜHLHORN, A.; SCHOOP, H.:
A nonlinear theory for sandwich shells including wrinkling. Received 19. Febr. 1992

[73] KUTTERER, M.; STAROSSEK, U.:
Dynamic Cable Stiffness and Dynamic Interaction between Cable and Beam; Proceedings of the Second (1992). International Offshore and Polar Engineering Conference 14.-19. June 1992

[74] STAROSSEK, U.:
Ein Beitrag zum Brückenflattern: Nachweis am ebenen Ersatzsystem zum Einfluß des Profils. Bauingenieur 68 (1993), S. 95-98

[75] STAROSSEK, U.:
Flatternachweis von Brücken mittels Finiter Balkenelemente. Stahlbau 61 (1992) H. 7, S. 203-208

[76] STAROSSEK, U.:
Dynamic Stiffness Matrix of Sagging Cable. Journal of Engineering Mechanics, Vol. 117 No. 12, Dec. 1991, pp. 2815-2829

[77] ALTMANN, H.:
Untersuchungen an Klemmen für verschlossene Spiralseile. Berichtsreihe Seilkonstruktionen, Werner Verlag 1973, SFB 64 Mitteilungen 5/1972

[78] SVENSSON, H. S.:
The Development of Composite Cable-Stayed Bridges. Nordic Steel Construction Conference 1995, 19.-21. June 1995

[79] Dywidag-Systems International:
Dywidag-Litzenspannverfahren – Technische Daten – Zulassungsbescheid, Stand Juli 1998

[80] PAXKOWSKI, S.:
Statik der Seilkonstruktionen – Theorie und Zahlenbeispiele. Springer Verlag 1990, 112 Seiten

[81] MAYR, G.; GABRIEL, K.:
Weitgespannte Flächentragwerke; Sonderforschungsbereich 64; SFB 64, Mitteilung 7/1973

[82] SCHUMANN, R.:
Anwendung werkstoffmechanischer Zusammenhänge auf Vergussverankerungen von Seilen. Sonderdruck aus der Fachzeitschrift DRAHT 35 (1984) 12, 4 Seiten

[83] SEDLACEK, G.; HORTMANNS, M.; EISEL, H.; KRAUS, O.; KAMMEL, Chr.:
Überprüfung des dynamischen Verhaltens und der Windlasten der Friedrich-Ebert-Brücke in Bonn. Bericht W 721/1098, 29. Dez. 1998, 47 Seiten

[84] CHAIRMAN: SCHLAICH, J.:
Working Group Nr. 6 „Tension Structures". Report on the meetings held in Stuttgart, March 1981 and May 1983

[85] LEONHARDT, ANDRÄ & Partner:
Cable-Stayed Bridges. Firmenveröffentlichung, Stuttgart Büro LAP 1995

[86] GABRIEL, K.:
Konstruktion und Bemessung. Stehende Drahtseile, expert-Verlag, 1990

[87] GABRIEL, K.:
Der „Biegewiderstand" der Seile – Kurze Technische Bericht. S. 507-509

[88] GROPPER, H.; GABRIEL, K.:
Zur Verankerung von Faserbündeln und Stahldrahtseilen in Stahlhülsen mit Kunstharzverguss. Bauingenieur 62 (1987), S. 293-304

[89] BOUÉ, P.; HÖFT, H.-D.:
Austausch der Tragseile der Köhlbrandbrücke in Hamburg. Bauingenieur 65 (1990), S. 59-71

[90] RHEM, G.; NÜRNBERGER, U.:
Korrosionsprobleme bei Seilen. S. 191-193

[91] IABSE Workshop El Paular: Length Effect on Fatigue of Wires and Strands Bericht IABSE, AIPC, IVBH, Madrid 1992, pp. 51-72

Bilder

Bild 2.1: Rheinbrücke Leverkusen

Bild 2.2: Rheinbrücke Bonn Nord Seilverankerung am Pylon

Bild 2.3: Rheinbrücke Bonn Nord unterer Seilbereich oberhalb des Brückendecks

Bild 2.4: Rheinbrücke Rodenkirchen mit Blick auf das Tragkabel und die Hängerseile

Bild 2.5: Herstellung eines Seiles mit Durchmesser von 167 mm [11]

Bild 2.6: Seildurmesser von 111 mm der Rheinbrücke Flehe

Bild 2.7: Gegenverseilung eines vollverschlossenen Seiles [11]

Bild 2.8: Seile vor den Traversen

Bild 2.9: Verankerung hinter den Traversen

Bild 2.10: Vorderseite der Verankerung

Bild 2.11: Rückseite der Verankerung

Bild 2.12: Verankerung der Einzelseile bei der Rheinbrücke Bonn Nord

Bild 2.13: Prinzip der Lagerung eines Seilkopfes in einer Brücke [6]

Bild 2.14: Kraftübertragung im Seilkopf (Zeichnung nach [10])

Bild 3.1: Rheinbrücke Duisburg Neuenkamp

Bild 3.2: Querschnitt

Bild 3.3: Seildurchmesser 57 mm

Bild 3.4: Seildurchmesser 83 mm

Bild 3.5: Verteilung der Seildurchmesser

Bild 3.6: Schadensbereich und Untersuchungsbereich

Bild 3.7: Montagehilfskonstruktion vor dem Spreizen

Bild 3.8: Neue Halterung der gespreizten Seile

Bild 3.9: Neue Kabelhaube

Bild 3.10: Gespreizte Kabel im unteren Bereich

Bild 3.11: Gesamtansicht

Bild 3.12: Zustand der Seile nach dem Spreizen

Bild 3.13: Starke Korrosion mit Blattrost

Bild 3.14: Zustand nach dem Strahlen

Bild 3.15: Detailaufnahme

Bild 3.16: Drahtbruch im freigestrahlten Bereich

Bild 3.17: Verteilte korrodierte Bereiche bezogen auf den Seilquerschnitt

Bild 3.18: Anordnung der Seile vor dem Spreizen

Bild 3.19: Anordnung der Seile nach dem Spreizen

Bild 3.20: Bereiche mit starker Korrosion

Bild 3.21: Betroffene Seile mit Korrosion

Bild 3.22: Typische Erscheinung der Muldenkorrosion an Z-Drähten

Bild 3.23: Seilkopplungen zur Reduzierung der freien Länge

Bild 3.24: Rheinbrücke Flehe

Bild 3.25: Längsschnitt der Brücke

Bild 3.26: Pylonquerschnitt der Brücke

Bild 3.27: Verankerung im Pylonkopf

Bild 3.28; Verankerung in der Vorlandbrücke

Bild 3.29: Verankerung in der Strombrücke

Bild 3.30: Übersicht über Seile der Rheinbrücke Flehe mit Angabe der schadhaften Seile (Bildquelle: Gutachten Boué)

Bild 3.31: Übersicht über Drahtbrüche in der Seilgruppe R100 [12]

Bild 3.32: Übersicht über Drahtbrüche in den anderen Seilgruppe [12]

Bild 3.33: Steiger an der Brücke im Einsatz (Bild: Boué Ingenieure)

Bild 3.34: Typischer Schaden

Bild 3.35: Drahtbrüche und Korrosionserscheinungen

Bild 3.36: Seil nach Spleißen einzelner Drähte

Bild 3.37: Drähte aus dem Verbund gelöst

Bild 3.38: Verbund über 5 Schläge gelöst

Bild 3.39: Schadensstelle mit Abhebungen und Unterrostungen

Bild 3.40: Detailbild zum Schaden

Bild 3.41: Schadenstelle mit Abschälungen, Weißrost, Rost und Reibspuren

Bild 3.42: Schadstelle mit stark korrodierten Drähten

Bild 3.43: Ansicht der Rheinbrücke Emmerich (ohne Vorlandbrücken)

Bild 3.44: Querschnitt der Rheinbrücke Emmerich

Bild 3.45: Draufsicht der Rheinbrücke Emmerich

Bild 3.46: Querschnitt im Pylonbereich

Bild 3.47: Ansicht der Hängerseile in Brückenmitte

Bild 3.48: Umlenkung der Hängerseile um das Tragkabel

Bild 3.49: Querschnitt durch das Tragkabel mit der oberen Umlenkung

Bild 3.50: Verankerung der Hängerseile unterhalb des Brückendecks

Bild 3.51: Querschnittsskizze zur Verankerung der Hängerseile im Brückendeck

Bild 3.52: Ausbildung der ursprünglichen Abdeckhauben

Bild 3.53: Korrosionsschäden im Bereich der Abdeckhauben (Bild zeigt ausgebaute Hängerseile)

Bild 3.54: Detailaufnahme eines Korrosionsschadens

Bild 3.55: Geänderte, heutige Abdichtung der Hängerdurchführung

Bild 3.56: Schadensdokumentation Strassen.NRW

Bild 3.57: Beispiel für 1. Schadenkategorie: Deckbeschichtung abgeplatzt

Bild 3.58: Beispiel für 1. Schadenkategorie: Deckbeschichtung abgeplatzt – hier: Konzentration von Schadstellen

Bild 3.59: Beispiel für 2. Schadenkategorie: Beschichtung abgeplatzt, Untergrund Rost

Bild 3.60: Beispiel für 3. Schadenkategorie: 1. Drahtlage Blattrost

Bild 3.61: Beispiel für 4. Schadenkategorie: 1. Drahtlage Blattrost, 2. Drahtlage angerostet

Bild 3.62: Beispiel für 5. Schadenkategorie: 2. Drahtlage Blattrost, 2. Drahtlage angerostet

Bild 3.63: Blick in den Seilbereich unterhalb der Haubenabdichtung

Bild 3.64: Feuchtigkeitsautritt aus dem ummantelten Tragkabel an dem Tiefpunkt, hier ist keine Ummantelung

Bild 4.1: Übersicht zum Austausch vorgesehene Seile

Bild 4.2: Übersicht der möglichen Entnahmebereiche

Bild 4.3: Ausgebaute Seilabschnitte (Übersicht)

Bild 4.4: Detailaufnahme

Bild 4.5: Öffnen des Drahtbesens

Bild 4.6: Aufbiegen einiger Drähte mit einem Rohr

Bild 4.7: Säubern des Drahtbesens

Bild 4.8: Vorwärmen der Seilköpfe im bereits ausgerichteten Zustand

Bild 4.9: Einfüllen des Vergussmaterials im ausgerichteten Zustand

Bild 4.10: Überprüfung des Seilvergusses

Bild 4.11: Vergusskegelabmessungen [6]

Bild 4.12: Lagen und Drahtaufbau eines 111 mm Seiles

Bild 4.13: 1. Bauteilprobe im Versandzustand

Bild 4.14: 1. Seilkopf der ersten Bauteilprobe

Bild 4.15: 2. Seilkopf der ersten Bauteilprobe

Bild 4.16: Eingebaute Probe in der dynamischen Prüfeinrichtung

Bild 4.17: Die Verankerung bei der Krafteinleitung

Bild 4.18: Die Festhaltung

Bild 4.19: Beide Drahtbrüche

Bild 4.20: Nahaufnahme der beiden Drahtbrüche

Bild 4.21: Versatz in der äußeren Drahtlage infolge der beiden Drahtbrüche

Bild 4.22: Auflistung der festgestellten Drahtbrüche

Bild 4.23: Entwicklung der Drahtbrüche mit zugehörigen Lastwechseln

Bild 4.24: Ausgebaute Probe

Bild 4.25: Linker Seilkopf (Festpunkt)

Bild 4.26: Dynamischer Seilkopf

Bild 4.27: Freie Seillänge

Bild 4.28: Dynamischer Seilkopf

Bild 4.29: Ende der Seilverankerung

Bild 4.30: Versuchseinrichtung zur Ermittlung der Restbruchkraft

Bild 4.31: Probe nach Versuchsende

Bild 4.32: Last-Verformungskurve zum Zugversuch der 1. Bauteilprobe

Bild 4.33: Vergleich der Bauteilsicherheiten

Bild 4.34: Zweite Bauteilprobe im Versuchsstand

Bild 4.35: Drahtbruch im korrodierten Bereich

Bild 4.36: Drahtbruchaufzeichnung Bauteilprobe Nr. 2

Bild 4.37: Eingebaute Probe – Bruchversuch

Bild 4.38: Last-Verformungskurve des 2. Bruchlastversuchs

Bild 4.39: Bauteilprobe nach dem Zerreißversuchs

Bild 4.40: Detailansicht der Bauteilprobe nach dem Bruchversuch

Bild 4.41: Bruchflächen der einzelnen Drähte

Bild 4.42: Probe dritter Bauteilversuch mit natürlicher Korrosion

Bild 4.43: Seilkopf dritter Bauteilversuch mit Kunststoffverguss

Bild 4.44: Seilkopf dritter Bauteilversuch mit Kunststoffverguss

Bild 4.45: Drahtbruchentwicklung bei dem dritten Bauteilversuch

Bild 4.46: Drahtbruchentwicklung abhängig von den Lastwechselzahlen beim dritten Bauteilversuch

Bild 4.47: Erster Drahtbruch im Bereich mit ausgeprägter Korrosion

Bild 4.48: Drahtbruch außerhalb der Korrosionsstelle

Bild 4.49: Zwei Drahtbrüche im leicht korrodierten Bereich

Bild 4.50: Zwei Drahtbrüche außerhalb der korrodierten Bereiche, kleine korrodierte Bereiche und Oberflächenunregelmäßigkeiten sichtbar

Bild 4.51: Bruchlastdiagramm vom dritten Bauteilversuch

Bild 4.52: Eingebaute vierte Bauteilprobe

Bild 4.53: Eingebaute vierte Bauteilprobe

Bild 4.54: Erster Drahtbruch mit geringer Verschiebung, genaue Lage nicht ermittelbar

Bild 4.55: Zwei weitere Drahtbrüche, genaue Lage unbekannt

Bild 4.56: Drahtbruch außerhalb des korrodierten Bereiches mit großem Versatz

Bild 4.57: Drahtbrüche benachbarter Drähte erkennbar

Bild 4.58: Abbändelung zur Sicherung des Verbundes erforderlich

Bild 4.59: Drahtbrüche in der Nähe des Seilkopfes

Bild 4.60: Drahtbruchentwicklung bei dem 4. Versuch

Bild 4.61: Drahtbruchentwicklung abhängig von den Lastwechselzahlen

Bild 4.62: Bruchlastdiagramm 4. Versuch

Bild 4.63: 4. Bauteilprobe nach dem Bruchlastversuch

Bild 4.64: Vorgabe der Narbentiefe für den fünften Bauteilversuch

Bild 4.65: Eingebrachte künstliche Narbentiefe

Bild 4.66: Drahtbruch in der freien Länge

Bild 4.67: Drahtbruch in der freien Länge im Bereich einer korrodierten Stelle

Bild 4.68: Bereich mit künstlichen Narben (Stelle mit 1,5 mm und 4er Gruppe mit 0,5 mm Tiefe)

Bild 4.69: Bereich mit künstlichen Narben (1er Gruppe mit 1,5 mm Tiefe)

Bild 4.70: Bereich mit künstlichen Narben (3er Gruppe mit 0,5 mm Tiefe)

Bild 4.71: Bereich mit künstlichen Narben (4er Gruppe mit 1,5 mm Tiefe)

Bild 4.72: Drahtbruchentwicklung beim 5. Versuch abhängig von den Lastwechselzahlen

Bild 4.73: Drahtbruchentwicklung 5. Versuch abhängig von den Lastwechselzahlen

Bild 4.74: Eingebaute Probe für den Bruchlastversuch

Bild 4.75: Eingebaute Probe mit Blick auf die Vorschädigung

Bild 4.76: Drahtbruch im Bereich einer 1,5 mm tiefen Narbe

Bild 4.77: Drahtbruchstelle aus dem Ermüdungsversuch

Bild 4.78 Seil nach dem Bruchlastversuch

Bild 4.79: Bruchlastdiagramm 5. Versuch

Bild 4.80: Setzung im Seilkopf

Bild 4.81: Ausgebaute Probe des 5. Bauteilversuchs

Bild 4.82: Drahtverbund nach dem Bruchlastversuch

Bild 4.83: Ultraschalluntersuchung am ausgebauten Versuchskörper

Bild 5.1: Vorbereitete Probe

Bild 5.2: Salzsprüheinrichtung

Bild 5.3: Probe nach dem 1. Zyklus

Bild 5.4: Veränderter Versuchsaufbau

Bild 5.5: Eingebauter Seilabschnitt

Bild 5.6: Blick in die Wanne

Bild 5.7: Ermittlung der Versuchsdauern bei 1 oder 2 mm Abrostungsrate

Bild 5.8: Korrodierter Seilabschnitt

Bild 5.9: Versuchsaufbau für größere Seilabschnitte

Bild 5.10: Blick in die Versuchswanne

Bild 5.11: Einzelner Draht als Probekörper

Bild 5.12: Versuchsanordnung mit einem Einzeldraht

Bild 5.13: Schliffe durch den Einzeldraht

Bild 5.14: Durchgeführte Querschnittermittlung bei einem Einzeldraht

Bild 5.15: Versuchsergebnisse an Einzeldrähten

Bild 6.1: Schliffbilder von der Probe Thyssen

Bild 6.2: Schliffbilder von der Probe Trefill Arbed

Bild 6.3: Ergebnisse der chemischen Analyse

Bild 6.4: Probestück

Bild 6.5: Geöffnetes Seil – 1. Drahtlage entfernt

Bild 6.6: Geöffnetes Seil – 2. Drahtlage entfernt

Bild 6.7: Geöffnetes Seil – 2. Drahtlage entfernt

Bild 6.8: Ausgelöstes Seilende aus dem dynamischen Seilkopf

Bild 6.9: Blick auf die Seilbruchfläche

Bild 6.10: Metallografische Untersuchungen an einzelnen Bruchflächen

Bild 6.11: Metallografische Untersuchung einer Bruchfläche mit Einschnürung

Bild 6.12: Metallografische Untersuchung einer Bruchfläche ohne Einschnürung

Bild 6.13: Längsschliff

Bild 6.14: Querschliff

Bild 7.1: Beispielschaden für Kategorie 5

Bild 7.2: Beispielschaden für Kategorie 4

Bild 7.3: Beispielschaden für Kategorie 5

Bild 7.4: Beispielschaden für Kategorie 3 mit Drahtbrüchen

Bild 7.5: Seilaufbau Durchmesser Ø 37 mm

Bild 7.6 Seilaufbau Durchmesser Ø 42 mm

Bild 7.7: Rechnerischer Ansatz für Querschnittsverluste

Bild 7.8: Rechnerisch ermittelte Sicherheit von 1,38

Bild 7.9: Beispiel für Schadenskategorie 1

Bild 7.10: Beispiel für Schadenskategorie 2

Bild 7.11: Beispiel für Schadenskategorie 3

Bild 7.12: Beispiel für Schadenskategorie 4

Bild 7.13: Beispiel für Schadenskategorie 5

Bild 7.14: Korrodierte Stelle mit Drahtbruch

Bild 7.15: Wöhlerkurve für vollverschlossene Seile

Bild 7.16: Dauerfestigkeitsgrenze für vollverschlossene Seile

Bild 7.17: Sicherheit ν zur Dauerfestigkeit bei 0,25-facher Verkehrslast

Bild 7.18: Sicherheit ν zur Dauerfestigkeit bei 0,5-facher Verkehrslast

Bild 7.19: Sicherheit ν zur Dauerfestigkeit bei 1,0-facher Verkehrslast

Bild 7.20: Federersatzsystem für das geschädigte Seil

Bild 7.21: Berechnung als Federersatzsystem

Bild 7.22: Federsteifigkeiten für das geschädigte Seil

Bild 7.23: Brücke mit mittiger Alleinfahrt eines Schwertransportfahrzeuges

Bild 7.24: Kabelanordnung bei der Rheinbrücke Leverkusen

Bild 7.25: Seile werden zwischen Traversen hindurch geführt

Bild 7.26: Rückwärtige Verankerung der Seilköpfe

Bild 7.27: Traversenblech mit Riss

Bild 7.28: Detailbild mit Riss

Bild 7.29: Anordnung von Überwachungsquerschnitten

Bild 7.30: Querschnitt mit Angabe der DMS-Messstellen

Bild 7.31: Überwachte Seilverankerungsbereiche

Bild 7.32: Genaue Positionierung eines Referenzfahrzeuges für eine statische Messung

Bild 7.33: Referenzfahrzeug für dynamische Messung

Bild 7.34: 38t-Autokran als Referenzfahrzeug

Bild 7.35: Beispielhafte Messung

Bild 7.36: Auswertung einer Messung mit Zuordnung eines Fahrzeuges

Bild 7.37: Anordnung der DMS im Grundriss der Seilkammer Ache 50

Bild 7.38: Anordnung der DMS im Bereich der Seileinleitung

Bild 7.39: Anordnung der DMS an einem Traversenblech

Bild 7.40: 84 sec Messschrieb mit Fahrzeugüberfahrten

Bild 7.41: Messschrieb vom 29.05.2016 bis 15.06.2016

Bild 7.42: Messschrieb über ca. 3 Tagen

Bild 7.43: Aufgezeichnete Sonderereignisse

Bild 7.44: Messschrieb für drei übereinanderliegende Traversen

Bild 7.45: 20 sec Messschrieb

Bild 7.46: Überfahrt des 36t-Autokrans

Bild 8.1: Einsatz eines Hubsteigers

Bild 8.2: Berücksichtigung der Pratzendrücke

Bild 8.3: Magnetinduktives Seilprüfgerät (Bild: www.alpintechnik.de)

Bild 8.4: Zerstörungsfreie Seilprüfung bestehend aus Selbstfahrer, magnetinduktivem Seilprüfgerät und visuellem Seilprüfgerät (Bild: Fa. Rotec, Stuttgart)

Bild 8.5: Tragkabel der Fort Road Bridge

Bild 8.6: Mittlerer Bereich des Tragkabels ohne Ummantelung

Bild 8.7: Austritt von Feuchtigkeit

Bild 8.8: Einhausung des mittleren Bereiches des Tragkabels

Bild 8.9: Teilweise wurde die Ummantelung entfernt

Bild 8.10: Spezielle Klemmkonstruktion zum Auseinanderziehen der einzelnen Seile

Bild 8.11: Auseinandergezogene Seile

Bild 8.12: Freigelegte Seilebene

Bild 8.13: Drei Drahtbrüche mit Verlust des Verbundes

Bild 8.14: Mehrere Drahtbrüche mit herabhängenden Drähten

Bild 8.15: Mehrere Drahtbrüche mit bestehendem Verbund

Bild 8.16: Starke Korrosion mit Blattrostbildung

Bild 8.17: Beschichtungsschaden mit regelmäßigen Muster

Bild 8.18: Detailbild

Bild 8.19: Korrosionsschutzschaden

Bild 8.20: Beispielschaden vor dem Entfernen des Blattrostes

Bild 8.21: Seil nach dem Entfernen von Rost mithilfe eines Bristle Blaster

Bild 8.22: Seil nach dem Entfernen von Rost mithilfe eines Bristle Blaster

Tabellen

Tab. 1.1: Brücken mit vollverschlossenen Seilen, Zusammenstellung basiert auf [4]

Tab. 4.1: Dauerschwingversuche mit vollverschlossenen Seilen [6]

Tab. 4.2: Vergleich der tatsächlichen Bruchlast der 1. Probe hinsichtlich des Querschnittes

Tab. 4.3: Vergleich der Bruchlasten

Tab. 4.4: Vergleich der Bruchlasten

Tab. 4.5: Vergleich der Bruchlasten

Tab. 4.6: Vergleich der Bruchlasten

Tab. 4.7: Vergleich der Bruchlasten

Tab. 4.8: Vergleich der Versuchsergebnisse

Tab. 7.1: Rechnerisch ermittelte Sicherheit (Durchmesser Ø 37 mm)

Schriftenreihe
Berichte der Bundesanstalt
für Straßenwesen
Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

2015

B 112: **Nachhaltigkeitsberechnung von feuerverzinkten Stahlbrücken**
Kuhlmann, Maier, Ummenhofer, Zinke,
Fischer, Schneider € 14,00

B 113: **Versagen eines Einzelelementes bei Stützkonstruktionen aus Gabionen**
Placzek, Pohl
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter http://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 114: **Auswirkungen von Lang-Lkw auf die sicherheitstechnische Ausstattung und den Brandschutz von Straßentunneln**
Mayer, Brennberger, Großmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter http://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 115: **Auswirkungen von Lang-Lkw auf die sicherheitstechnische Ausstattung und den Brandschutz von Straßentunneln**
Mayer, Brennberger, Großmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter http://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 116: **Überwachungskonzepte im Rahmen der tragfähigkeitsrelevanten Verstärkung von Brückenbauwerken aus Beton**
Schnellenbach-Held, Peeters, Brylka, Fickler, Schmidt
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter http://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 117: **Intelligente Bauwerke – Prototyp zur Ermittlung der Schadens- und Zustandsentwicklung für Elemente des Brückenmodells**
Thöns, Borrmann, Straub, Schneider, Fischer, Bügler
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter http://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 118: **Überwachungskonzepte für Bestandsbauwerke aus Beton als Kompensationsmaßnahme zur Sicherstellung von Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit**
Siegert, Holst, Empelmann, Budelmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter http://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 119: **Untersuchungen zum Brandüberschlag in Straßentunneln**
Schmidt, Simon, Guder, Juknat,
Hegemann, Dehn € 16,00

B 120: **Untersuchungen zur Querkrafttragfähigkeit an einem vorgespannten Zweifeldträger**
Maurer, Gleich, Heeke, Zilch, Dunkelberg
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter http://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 121: **Zerstörungsfreie Detailuntersuchungen von vorgespannten Brückenplatten unter Verkehr bei der objektbezogenen Schadensanalyse**
Diersch, Taffe, Wöstmann, Kurz, Moryson
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter http://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 122: **Gussasphalt mit integrierten Rohrregistern zur Temperierung von Brücken**
Eilers, Friedrich, Quaas, Rogalski, Staeck
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter http://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

2016

B 123: **Nachrechnung bestehender Stahl- und Verbundbrücken – Restnutzung**
Geißler, Krohn € 15,50

B 124: **Nachrechnung von Betonbrücken – Systematische Datenauswertung nachgerechneter Bauwerke**
Fischer, Lechner, Wild, Müller, Kessner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter http://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 125: **Entwicklung einheitlicher Bewertungskriterien für Infrastrukturbauwerke im Hinblick auf Nachhaltigkeit**
Mielecke, Kistner, Graubner, Knauf, Fischer, Schmidt-Thrö
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter http://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 126: **Konzeptionelle Ansätze zur Nachhaltigkeitsbewertung im Lebenszyklus von Elementen der Straßeninfrastruktur**
Mielecke, Graubner, Roth
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter http://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 127: **Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-2-Schäden**
Kuhlmann, Hubmann € 21,50

B 128: **Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-3-Schäden**
Ungermann, Brune, Giese € 21,00

B 129: **Weiterentwicklung von Verfahren zur Bewertung der Nachhaltigkeit von Verkehrsinfrastrukturen**
Schmellekamp
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter http://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 130: **Intelligente Straßenverkehrsinfrastruktur durch 3D-Modelle und RFID-Tags**
Tulke, Schäfer, Brakowski, Braun
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter http://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 132: **Pre-Check der Nachhaltigkeitsbewertung für Brückenbauwerke**
Graubner, Ramge, Hess, Ditter, Lohmeier
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter http://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 133: **Anforderungen an Baustoffe, Bauwerke und Realisierungsprozesse der Straßeninfrastrukturen im Hinblick auf Nachhaltigkeit**
Mielecke, Graubner, Ramge, Hess, Pola, Caspari
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter http://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 134: **Nachhaltigkeitsbewertung für Erhaltungs- und Ertüchtigungskonzepte von Straßenbrücken**
Gehrlein, Lingemann, Jungwirth
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter http://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

2017

B 135: **Wirksamkeit automatischer Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln**
Kohl, Kammerer, Leucker, Leismann, Mühlberger, Gast
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter http://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 136: **HANV als Verstärkung von Stahlbrücken mit Kategorie-1-Schäden**
Stranghöner, Lorenz, Raake, Straube †, Knauff
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter http://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 137: **Verstärkung von Stahlbrücken mit hochfestem Beton**
Mansperger, Lehmann, Hofmann, Krüger, Lehmann € 14,50

B 138: **Rückhaltesysteme auf Brücken – Einwirkungen aus Fahrzeuganprall und Einsatz von Schutzeinrichtungen auf Bauwerken**
Mayer
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter http://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 139: **Unterstützung der Bauwerksprüfung durch innovative digitale Bildauswertung – Pilotstudie**
Sperber, Gößmann, Reget, Müller, Nolden,
Köhler, Kremkau € 16,50

B 140: **Untersuchungen zum Beulnachweis nach DIN EN 1993-1-5**
U. Kuhlmann, Chr. Schmidt-Rasche, J. Frickel, V. Pourostad
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter http://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 141: **Entwurf von hydrogeothermischen Anlagen an deutschen Straßentunneln**
Moormann, Buhmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter http://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

B 142: **Einsatz von offenporigen Belägen in Einhausungs- und Tunnelbauwerken**
Baltzer, Riepe, Zimmermann, Meyer, Brungsberg, Mayer,
Brennberger, Jung, Oeser, Meyer, Koch, Wienecke
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter http://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

2018

B 143: **Analyse des menschlichen Verhaltens bei Aktivierung von stationären Brandbekämpfungsanlagen in Straßentunneln**
Mühlberger, Gast, Plab, Probst € 15,50

B 144: **Nachrechnung von Stahl- und Verbundbrücken – Systematische Datenauswertung nachgerechneter Bauwerke**
Neumann, Brauer € 16,50

B 145: **8. BASt-Tunnelsymposium vom 6. Juni 2018 in der Bundesanstalt für Straßenwesen Bergisch Gladbach – Tagungsband**
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter http://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

2019

B 147: **Vorbereitung von Großversuchen an Stützkonstruktionen aus Gabionen**
Blosfeld, Schreck, Decker, Wawrzyniak
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter http://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

2020

B 146: **Beurteilung der Ermüdungssicherheit von vollverschlossenen Seilen mit Korrosionsschäden**
Paschen, Dürrer, Gronau, Rentmeister
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter http://bast.opus.hbz-nrw.de/ heruntergeladen werden.

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel.+(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-63

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.

Anhang A 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 A

bast

Beurteilung der Ermüdungssicherheit von vollverschlossenen Spiralseilen mit Korrosionsschäden

FE 15.0444/2007/HRB

Anhang A
Dokumentation zu den durchgeführten Versuchen

Auftraggeber: Bundesanstalt für Straßenwesen

Verfasser: M. Paschen, Ing.-Büro PSP

Durchführung:

PROF. SEDLACEK & PARTNER
PLANUNG UND ENTWICKLUNG IM BAUWESEN GmbH

PSP

BRIDON
International GmbH

IEH RWTH RHEINISCH-WESTFÄLISCHE TECHNISCHE HOCHSCHULE AACHEN

DMT

Stand: 23. November 2017

Anhang A: Dokumentation zu den durchgeführten Versuchen

Inhaltsverzeichnis

A1. Zusammenstellung aller Versuche 1
A2. Erster Bauteilversuch 2
A3. Zweiter Bauteilversuch 3
A4. Dritter Bauteilversuch 6
A6. Fünfter Bauteilversuch 12

A1. Zusammenstellung aller Versuche

Nr. der Versuche Angabe der Vergussart Zeit der Durchführung	Bruchlast im Versuch [kN]	Verhältnis zur rechnerischen Bruchkraft von 13390 [kN]	Anzahl der Drahtbrüche	Bemerkungen
1. Versuch 1979	12680	0,95	Nicht bekannt	
2. Versuch 1979	12750	0,95	Nicht bekannt	
1. Versuch (ZAMAK Metallverguss) Ermüdungsversuch 08.05.2009 bis 17.05.2009 Bruchversuch 20.05.2009	8334	0,62	60	2 Drahtbrüche lagen im korrodierten Seilabschnitt in Probenmitte, 58 Drahtbrüche im Bereich eines Seilkopfes, der Ermüdungsversuch musste bei 1,5 Mio Lastwechsel abgebrochen werden
2. Versuch (WIRELOCK Kunststoffverguss) Ermüdungsversuch 11.05.2011 bis 22.05.2011 Bruchversuch 25.05.2011	12943	0,97	1	1 Drahtbruch im korrodierten Bereich bei 1,25 Mio. Lastwechsel Versuchsergebniss entsprach den Versuchen von 1979
3. Versuch (WIRELOCK Kunststoffverguss) Ermüdungsversuch 24.08.2011 bis 04.09.2011 Bruchversuch 09.09.2011	12683	0,95	7	Insgesamt 7 Drahtbrüche 1 Drahtbruch im stark korrodierten Bereich, zwei Drahtbrücke im leicht korrodierten Bereich, 4 Drahtbrüche außerhalb in der freien Länge, ermittelte Bruchlast entsprach den Versuchen von 1979
4. Versuch (ZAMAK) Ermüdungsversuch 26.10.2011 bis 06.11.2011 Bruchversuch 15.11.2011	9068	0,68		Insgesamt 52 Drahtbrüche, davon 4 Drahtbrüche auf der freien Länge, jedoch außerhalb des korrodierten Bereiches, die anderen Drahtbrüche verteilten sich auf beide Seilköpfe.
5. Versuch (Kunststoffverguss) Ermüdungsversuch 07.03.2013 bis 18.03.2013 Bruchversuch 21.03.2013	10488	0,78	18	Bei diesem Versuch wurden künstliche Narben mit einer Tiefe von 0,5 und 1,5 mm eingebracht,2 Drahtbrüche lagen in der freien Länge, ein Drahtbruch im der Nähe einen natürlich korrodierten Stelle, alle 15 anderen Drahtbrüche lagen im Bereich der Seilköpfe, kein Drahtbruch lag bei den künstlichen Narben.

A2. Erster Bauteilversuch

Probe mit ZAMAK Verguss

Dauerschwingversuch abgebrochen

Nach 1,5 Mio. Lastwechsel 4 Drahtbrüche im korrodierten Bereich, jedoch Insgesamt ca. 60 Drahtbrüche, die gesamte äußere Z-Drahtlage, Drahtbrüche im Inneren des ‚dynamischen' Seilkopfes

Versuchsergebnis wird auf den durchgeführten Seilverguss zurückgeführt

Drahtbruchentwicklung im Dauerschwingversuch

DMT - Seilprüfstelle -

Drahtbruchanzeige Nr	Lastwechselzahl	Drahtbruchanzeige Nr	Lastwechselzahl
1	261730	31	1026475
2	306250	32	1028350
3	394450	33	1038300
4	425450	34	1049100
5	442075	35	1070125
6	486790	36	1081000
7	490540	37	1102625
8	534315	38	1149625
9	538025	39	1186500
10	547900	40	1198500
11	615675	41	1230083
12	629925	42	1244395
13	666875	43	1248520
14	693625	44	1277270
15	713375	45	1284270
16	744525	46	1291520
17	761375	47	1293270
18	766000	48	1297020
19	766250	49	1299645
20	775250	50	1305895
21	835000	51	1307645
22	876875	52	1307525
23	906725	53	1328145
24	922725	54	1377525
25	940125	55	1399600
26	954125	56	1430850
27	967250	57	1458975
28	1006125	58	1486975
29	1016725	59	1489378
30	1023600	60	1517574

Auftraggeber
PSP Professor Sedlacek & Partner
Projekt:
Seilprojekt Brücke Flehe
Test:
Dauerschwingversuch
Probenbezeichnung:
VVS 111 mm Probe Nr. 1
Prüfdatum:
08.05. bis 17.05.2009
Prüfbeauftragter:
Dipl.-Ing. Dürrer

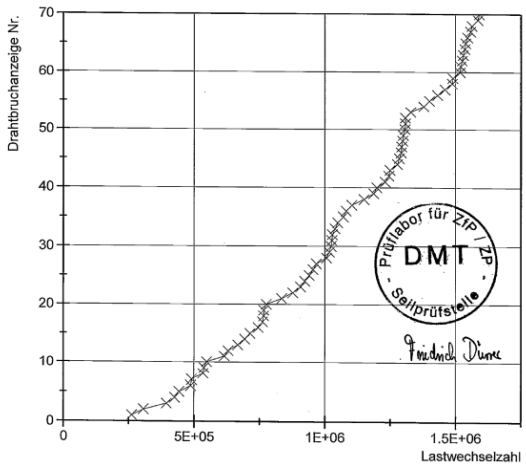
Prüflabor für ZfP / ZP - DMT - Seilprüfstelle

Friedrich Dürrer

DMT

Drahtbruchentwicklung im Dauerschwingversuch

DMT - Seilprüfstelle -

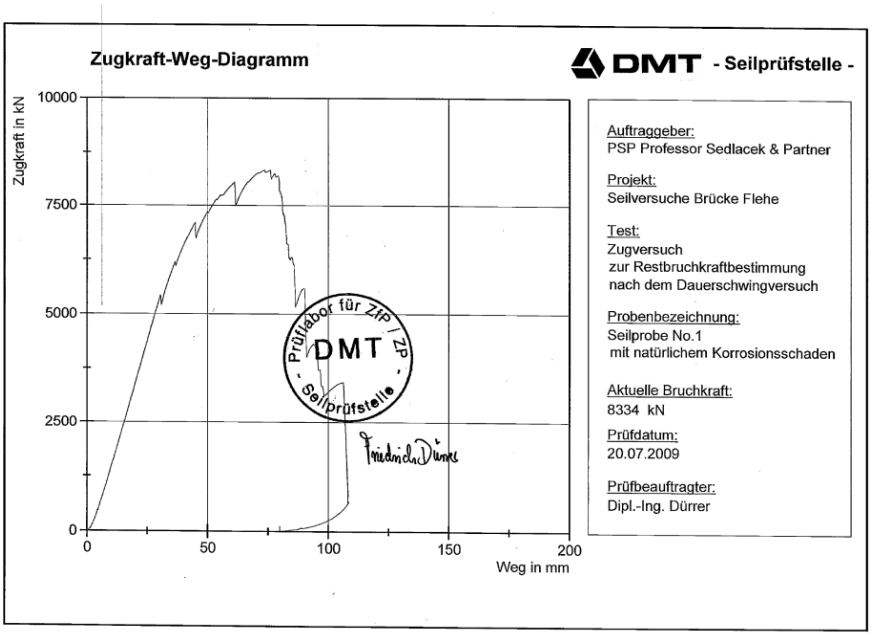


Auftraggeber:
PSP Professor Sedlacek & Partner
Projekt:
Seilprojekt Flehe
Test:
Dauerschwingversuch
Probenbezeichnung:
VVS 111 mm Probe Nr. 1
Prüfdatum:
08.05. bis 17.05.2009
Prüfbeauftragter:
Dipl.-Ing. Dürrer

Prüflabor für ZfP / ZP - DMT - Seilprüfstelle

Friedrich Dürrer

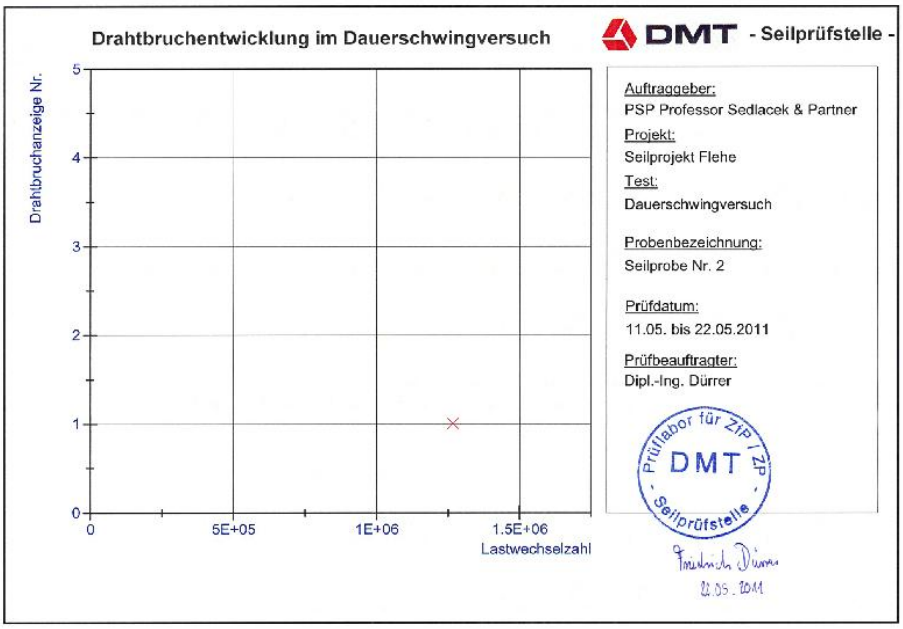
DMT

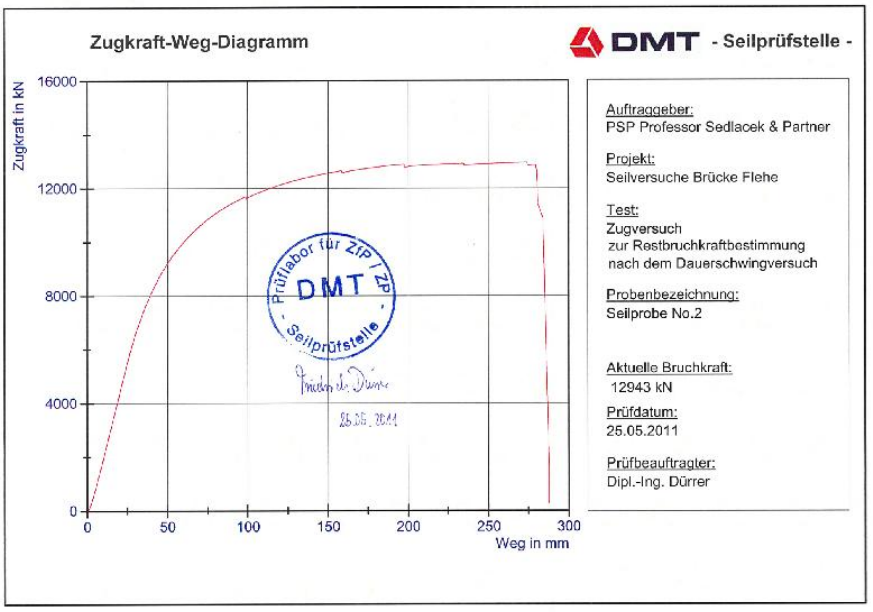


Durchmesser	Rechnerische Bruchkraft [kN]	Tatsächliche Bruchkraft [kN]	Verhältnis
Ø 111 mm	13390	8334	0,62
Ø 97 mm	10230	8334	0,81
Ansatz eines 97 mm Seiles wegen Verlust der gesamten äußeren Drahtlage			

A3. Zweiter Bauteilversuch

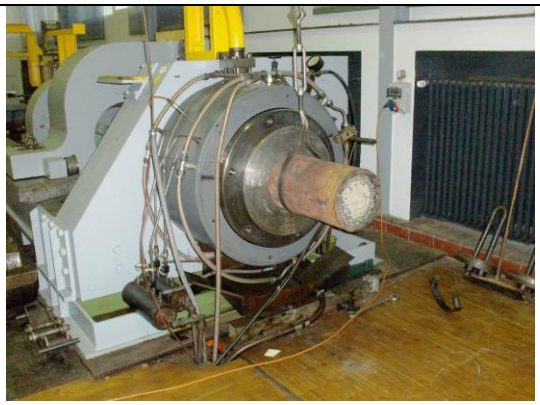
Probe mit Kunststoffverguss
Dauerschwingversuch erfolgreich beendet
Nach 2,0 Mio. Lastwechseln 1 Drahtbruch im korrodierten Bereich

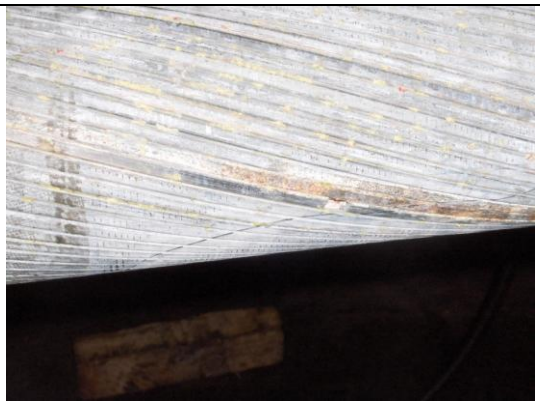




Vergleich der Bruchlasten

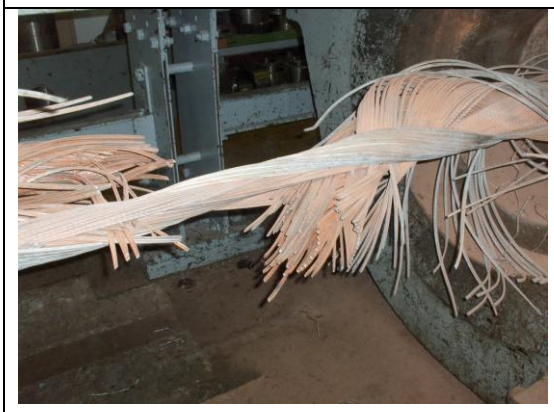
Durchmesser Ø 111 mm	Tatsächliche Bruchkraft [kN]	Rechnerische Bruchkraft [kN]	Verhältnis
1. Versuch 1979	12680	13390	0,95
2. Versuch 1979	12750	13390	0,95
2. Probe	12943	13390	0,97

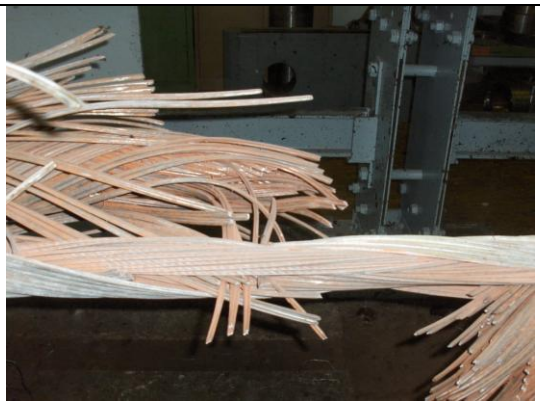




DMT

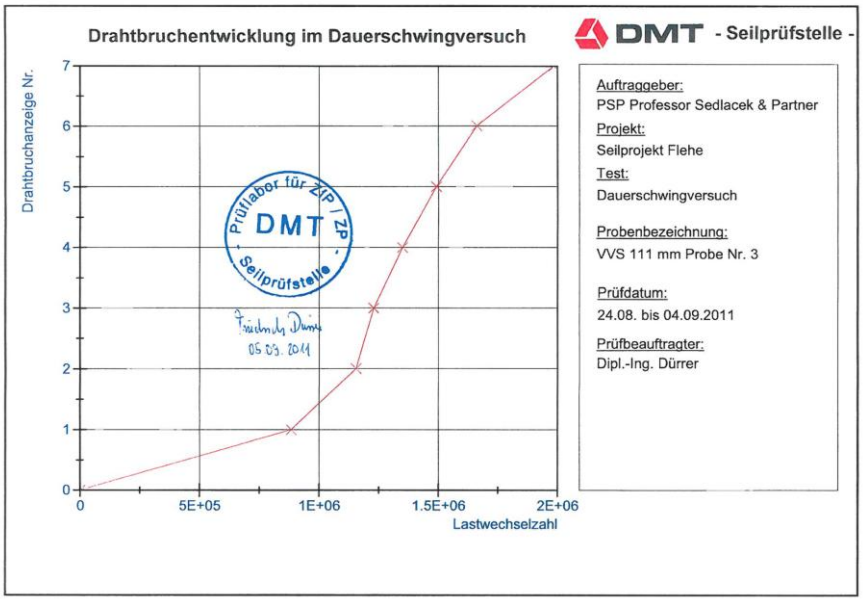
DMT

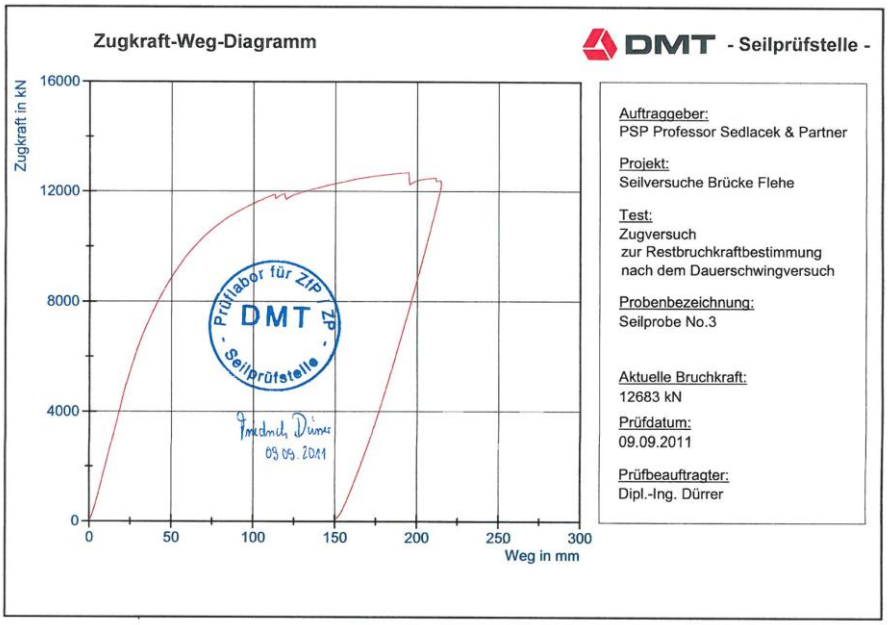




A4. Dritter Bauteilversuch

Probe mit Kunststoffverguss
Dauerschwingversuch erfolgreich beendet
Nach 2,0 Mio. Lastwechseln 7 Drahtbrüche





Vergleich der Bruchlasten

Durchmesser Ø 111 mm	Tatsächliche Bruchkraft [kN]	Rechnerische Bruchkraft [kN]	Verhältnis
1. Versuch 1979	12680	13390	0,95
2. Versuch 1979	12750	13390	0,95
2. Probe	12943	13390	0,97
3. Probe	12683	13390	0,95

A5. Vierter Bauteilversuch

Probe mit ZAMAK Verguss
Dauerschwingversuch konnte beendet
Nach 2,0 Mio. 52 Drahtbrüche

Drahtbruchentwicklung im Dauerschwingversuch — DMT - Seilprüfstelle -

Drahtbruchanzeige Nr	Lastwechselzahl	Drahtbruchanzeige Nr	Lastwechselzahl
0	0	30	1349625
1	225500	31	1388375
2	269125	32	1421750
3	294375	33	1438915
4	305750	34	1464040
5	346190	35	1551125
6	405190	36	1599720
7	430190	37	1631050
8	477690	38	1643675
9	514600	39	1676425
10	544625	40	1703300
11	571443	41	1723300
12	640193	42	1749175
13	691375	43	1767875
14	735750	44	1794500
15	770500	45	1821250
16	828375	46	1836750
17	851775	47	1853125
18	978395	48	1900625
19	994175	49	1959375
20	1004145	50	1968625
21	1035520	51	1987500
22	1056875	52	1998125
23	1071790		
24	1131000		
25	1158500		
26	1206010		
27	1247345		
28	1299250		
29	1318020		

Auftraggeber
PSP Professor Sedlacek & Partner
Projekt:
Seilprojekt Brücke Flehe
Test:
Dauerschwingversuch

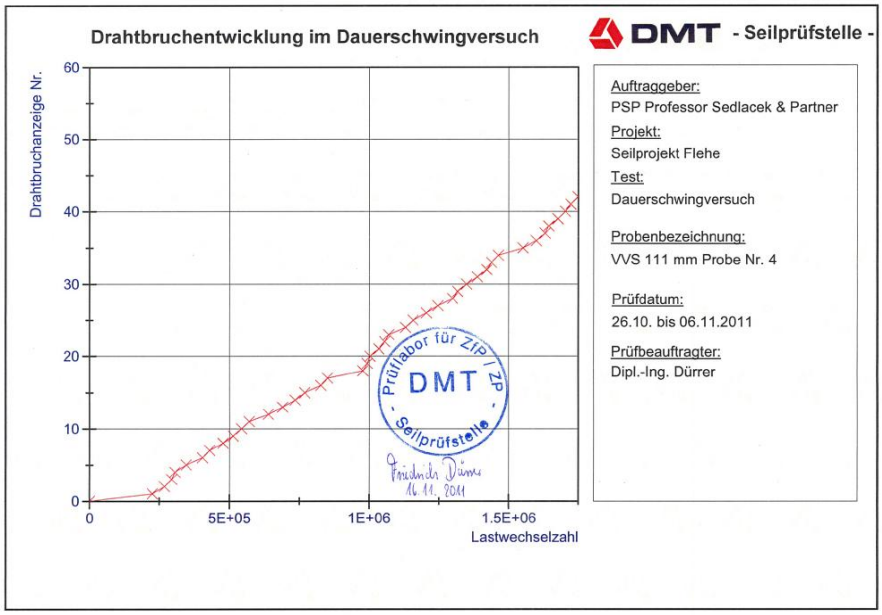
Probenbezeichnung:
VVS 111 mm Probe Nr. 4

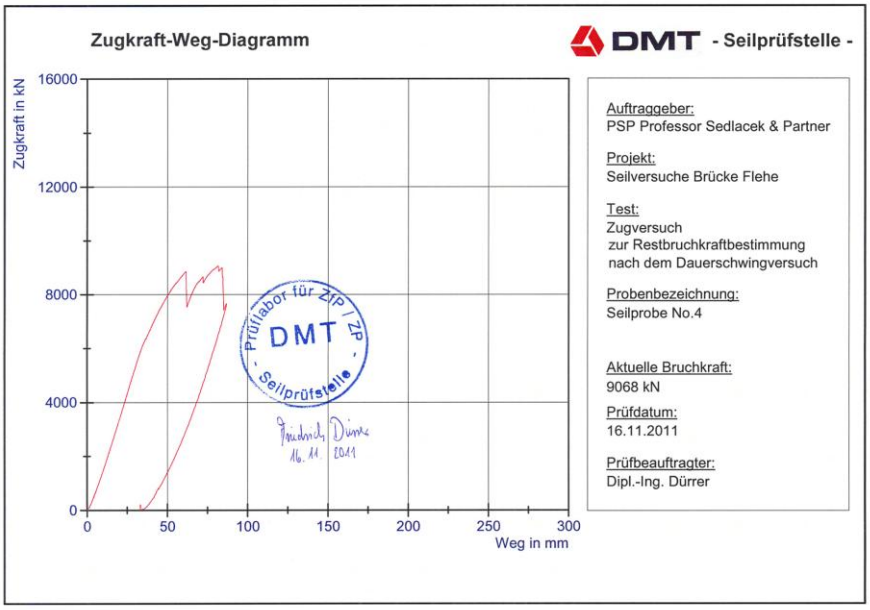
Prüfdatum:
26.10. bis 06.11.2011

Prüfbeauftragter:
Dipl.-Ing. Dürrer

Prüflabor für ZP / ZP DMT - Seilprüfstelle -

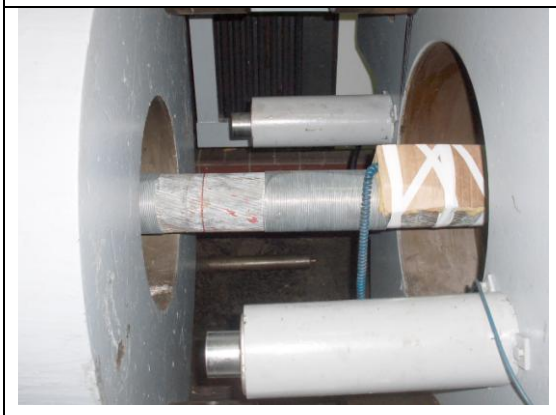
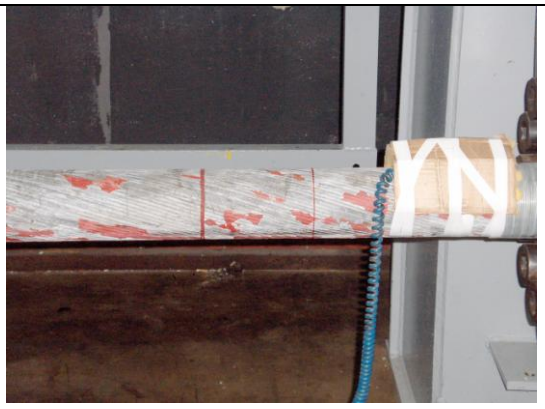
Friedrich Dürrer
16.11.2011

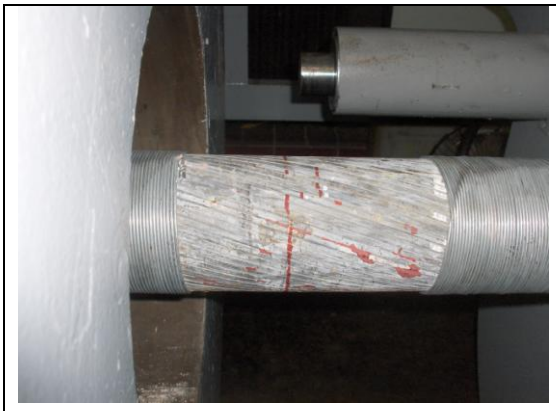


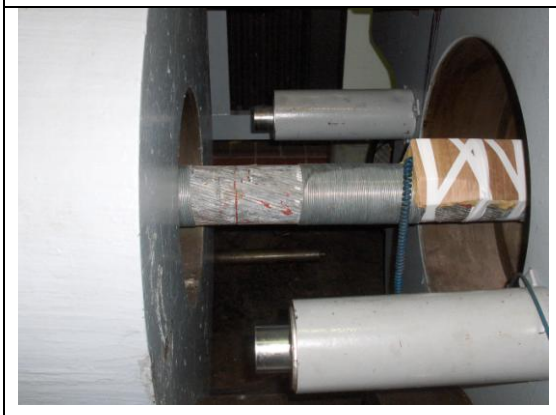


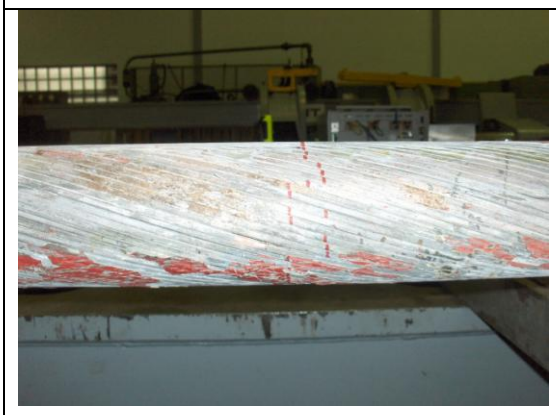
Vergleich der Bruchlasten

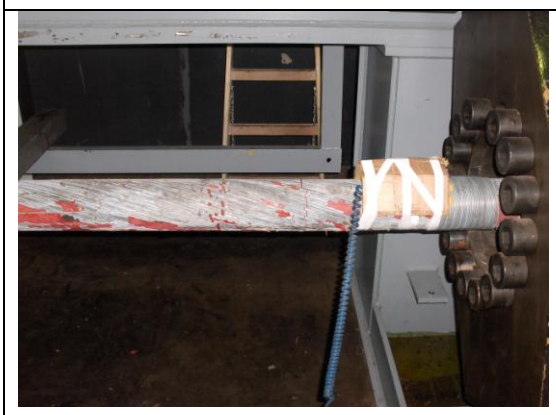
Durchmesser Ø 111 mm	Tatsächliche Bruchkraft [kN]	Rechnerische Bruchkraft [kN]	Verhältnis
1. Versuch 1979	12680	13390	0,95
2. Versuch 1979	12750	13390	0,95
1. Probe	8334	13390	0,62
2. Probe	12943	13390	0,97
3. Probe	12683	13390	0,95
4. Probe	9068	13390	0,68









A6. Fünfter Bauteilversuch

Probe mit Kunststoff Verguss
Dauerschwingversuch konnte beendet
Nach 2,0 Mio. x Drahtbrüche

Drahtbruchentwicklung im Dauerschwingversuch

DMT - Seilprüfstelle -

Drahtbruchanzeige Nr	Lastwechselzahl
0	0
1	1067500
2	1216575
3	1330500
4	1376125
5	1376875
6	1377750
7	1379000
8	1512250
9	1527750
10	1609100
11	1609600
12	1641600
13	1697225
14	1777625
15	1785000
16	1815750
17	1924975
18	1969930

Drahtbruchanzeige Nr	Lastwechselzahl

Auftraggeber
PSP Professor Sedlacek & Partner
Projekt:
Seilprojekt Brücke Flehe
Test:
Dauerschwingversuch

Probenbezeichnung:
VVS 111 mm Probe Nr. 5

Prüfdatum:
07.03. bis 18.03.2013

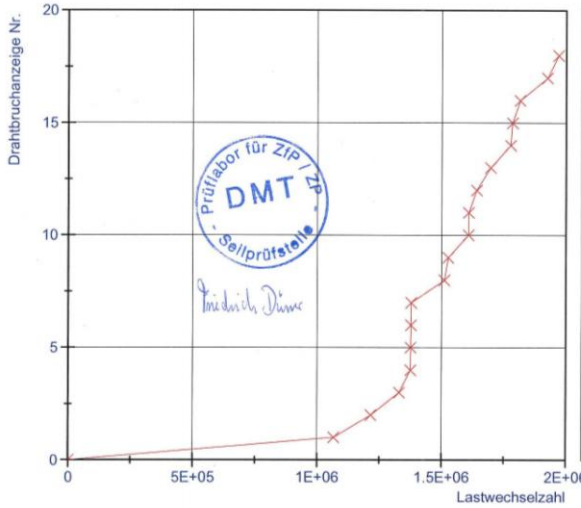
Prüfbeauftragter:
Dipl.-Ing. Dürrer

Prüflabor für ZiP / ZP DMT Seilprüfstelle

Friedrich Dürrer

Drahtbruchentwicklung im Dauerschwingversuch

DMT - Seilprüfstelle -



Auftraggeber:
PSP Professor Sedlacek & Partner
Projekt:
Seilprojekt Flehe
Test:
Dauerschwingversuch

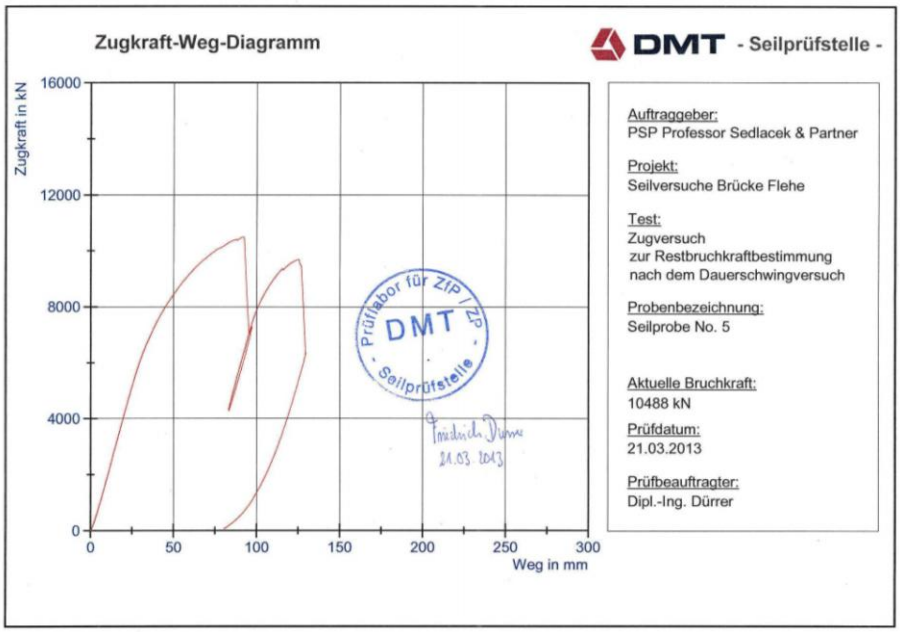
Probenbezeichnung:
VVS 111 mm Probe Nr. 5

Prüfdatum:
07.03. bis 18.03.2013

Prüfbeauftragter:
Dipl.-Ing. Dürrer

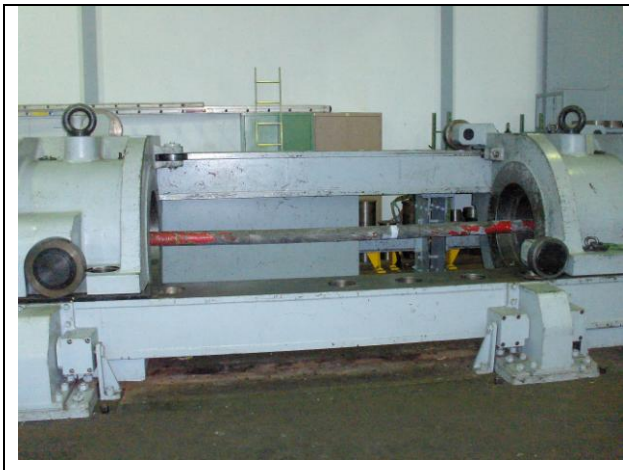
Prüflabor für ZiP / ZP DMT Seilprüfstelle

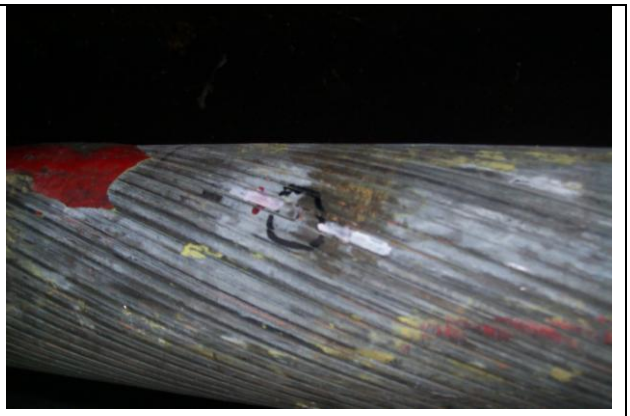
Friedrich Dürrer

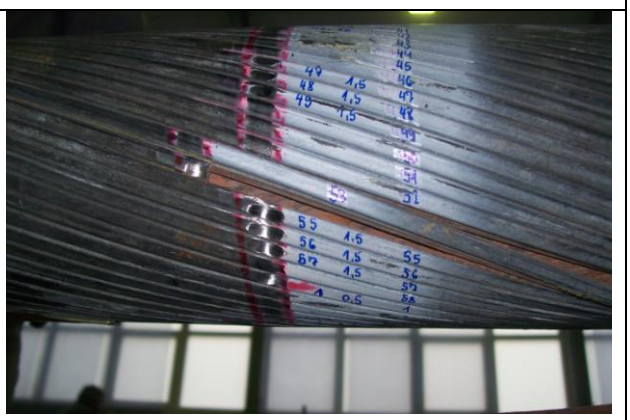


Vergleich der Bruchlasten

Durchmesser Ø 111 mm	Tatsächliche Bruchkraft [kN]	Rechnerische Bruchkraft [kN]	Verhältnis
1. Versuch 1979	12680	13390	0,95
2. Versuch 1979	12750	13390	0,95
1. Probe	8334	13390	0,62
2. Probe	12943	13390	0,97
3. Probe	12683	13390	0,95
4. Probe	9068	13390	0,68
5. Probe	10488	13390	0,78







Anhang B 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 B

bast

Beurteilung der Ermüdungssicherheit von vollverschlossenen Spiralseilen mit Korrosionsschäden

FE 15.0444/2007/HRB

Anhang B

Bericht der DMT über die visuelle Prüfung von abgelegten VVS-Seilenden

Auftraggeber: Bundesanstalt für Straßenwesen

Verfasser: Olivier Gronau, DMT

Durchführung:

PROF. SEDLACEK & PARTNER
PLANUNG UND ENTWICKLUNG IM BAUWESEN GmbH

PSP

BRIDON
International GmbH

IEH RWTH RHEINISCH-WESTFÄLISCHE TECHNISCHE HOCHSCHULE AACHEN

DMT

Stand

10. September 2015

DMT GmbH & Co. KG · Dinnendahlstraße 9 · 44809 Bochum

Name Olivier Gronau
Telefon +49 234 3696-502
Telefax +49 234 3696-500
Unser Zeichen PL-Gr, Kj
E-Mail Olivier.Gronau@dmt.de
Seite 1/28
Datum 24.04.2008

DMT GmbH & Co. KG

DMT-Prüflaboratorium für
Zerstörungsfreie und Zerstörende
Prüfung -Seilprüfstelle-

Dinnendahlstraße 9
44809 Bochum
Deutschland

dmt@dmt.de
www.dmt.de

Bericht Nr. 043/2008/01

über die visuelle Prüfung von 5 abgelegten VVS-Seilenden

Auftraggeber: Landesbetrieb Straßenbau NRW
Niederlassung Krefeld
Hansastraße 2
D-47799 Krefeld

Prüfbeauftragte: Dipl. Ing. Olivier Gronau

Dieser Bericht umfasst 28 Seiten und darf ohne schriftliche Genehmigung des DMT-Prüflaboratoriums für Zerstörungsfreie und Zerstörende Prüfung -Seilprüfstelle- nur vollständig, nicht auszugsweise, weiterverbreitet werden.

Nach DIN EN ISO/IEC 17025:2005 durch die
DAP Deutsches Akkreditierungssystem Prüfwesen GmbH
akkreditiertes Prüflaboratorium

Die Akkreditierung gilt für die in der Urkunde
aufgeführten Prüfverfahren

Deutscher Akkreditierungs Rat

DIN EN ISO 9001 zertifiziert

1 Allgemeine Angaben

1.1 Auftraggeber / Vorgang

Landesbetrieb Straßenbau NRW
Niederlassung Krefeld
Hansastraße 2
D-47799 Krefeld

Bestellung mit Ingenieurvertrag vom 12. Juli 2006, Vertrags-Nr. UA III 021/06
Aktenzeichen: 4700/30000.080/3.40.12.01 - Flehe

Bezug: Angebot Nr. SF-A2006-0065 der DMT vom 06.06.2006

1.2 Auftragsumfang

Visuelle Prüfung an 5 vorgelegten VVS-Seilenden, die aus den abgelegten Seilen der Rheinbrücke Düsseldorf-Flehe im Zuge der A 46 stammen. Dazu sind die einzelnen Drahtlagen der Seilenden nacheinander zu entnehmen und der innere Befund zu dokumentieren.

Die Ergebnisse werden in einem Prüfbericht nach DIN EN ISO 17025 zusammengestellt.

1.3 Prüfpersonal

Dipl.-Ing. Gronau (visuelle Seilprüfung)

Die Seilproben wurden durch die DMT-Mitarbeiter Klein, Lubos und Wiczorek in der Werkstatt der DMT-Seilprüfstelle, Bochum, geöffnet.

1.4 Frühere Inspektions- bzw. Prüfberichte über die Brückenseile durch DMT sind wie folgt datiert

1984 Gutachten vom 06.12.1985 der WBK-Seilprüfstelle
1986 Gutachten vom 02.10.1986 der WBK-Seilprüfstelle
1990 Gutachten Nr. 9157 vom 31.10.1990 des DMT-IFT

1996 Prüfbericht Nr. 2235 vom 29.11.1996 des DMT-IFT

2003 Inspektionsbericht Nr. 069/2003/01 vom 08.09.2003 der DMT

2004 Prüfbericht Nr. 098/2004/01 vom 01.10.2004

2 Angaben zum Vorgang

2.1 Allgemeine Angaben

Die Rheinbrücke Düsseldorf-Flehe wird von insgesamt 96 vollverschlossenen Seilen getragen. Die Anordnung der Seile im Bauwerk geht aus Tabelle 1, Seite 4, hervor.

Die Seilgruppen werden mit R -Rückhalteseile- (Vorlandseite) bzw. V -Vorbauseile- (Rheinseite) jeweils von außen zum Pylon hin zählend mit V 100 bis V 700 bzw. R 100 bis R700 bezeichnet. Innerhalb der einzelnen Seilgruppen werden die Seile zum Pylon hin mit 1 bis 3, bzw. 4 gezählt und entsprechend ihrer Anordnung in Bezug auf die Fließrichtung des Rheins mit u = unterstrom, o = oberstromseitig bzw. in den R/V 100-Gruppen auch mit m = Mitte benannt.

Die Seile wurden von Trefil Arbed (TA), Köln, und Thyssen Draht AG (TD), Gelsenkirchen, geliefert. Die Zuordnung der Seile zu den Herstellerwerken geht aus Tabelle 1, Seite 4, sowie aus Bild 1, Seite 5, hervor.

2.2 Angaben zur Probennahme

Aufgrund von Schäden an den Seilen wurden umfangreiche Sanierungsmaßnahmen vorgenommen, zu denen auch ein Austausch von Seilen gehörte. Von diesen abgelegten Seilen sollten 5 Seilenden von ca. 1 m Länge, mit stirnseitig verschweißten Drähten zur weiteren Untersuchung der DMT-Seilprüfstelle zur Verfügung gestellt werden. Entsprechend der Vorgabe durch den Auftraggeber sollten die Schadstellen im Drahtbruchbereich der Seile R100-4u und R100-2m entnommen werden, sowie 3 weitere Seilproben mit starkem Rost auf den Außendrähten sowie mit starken Angriff der Verzinkung.

Tabelle 1: Anordnung, technische Daten und Umfang vergangener Prüfungen durch DMT

Bezeichnung der Seilgruppen	R100	R200	R300	R400	R500	R600	R700	V700	V600	V500	V400	V300	V200	V100
Anzahl der Seile	12	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	6	12
Hersteller	TA	TA	TA	TD	TD	TD	TA	TA	TD	TD	TA	TA	TD	TD
Seil-Ø	111	111	111	105	97	93	101	111	93	97	111	111	97	105
Seilanordnung Nr. u m o	1234 OOOO OOOO OOOO	123 OOO OOO	123 OOO OOO	123 OOO OOO	123 OOO OOO	123 OOO OOO	123 OOO OOO	321 OOO OOO	321 OOO OOO	321 OOO OOO	321 OOO OOO	321 OOO OOO	321 OOO OOO	4321 OOOO OOOO OOOO
1984 alle Seile geprüft (hier Befund an Seilen)	**O**OOO O**OO**O **OO**O	OOO OOO	**O**OO OO**O**	OOO OOO	OOO OOO	OOO OOO	OO**O** OO**O**	OOO OOO	OOO OOO	OOO OOO	OOO[1] OO**O**	OOO OO**O**	OOO OOO	OOOO OO**O**O OOO**O**[2]
1986 reparierte Seile	O OO OO O													
1986 geprüfte Seile	O OOO O											O		O O O
1990 alle Seile geprüft (hier Befund an Seilen)	**O**OOO O**OO**O **OO**O	OOO OOO	**O**OO OO**O**	OOO OOO	OOO OOO	OOO OOO	OO**O** OO**O**	OOO OOO	OOO OOO	OOO OOO	OOO OOO	OOO OO**O**	OOO OOO	OOOO OO**O**O OOO**O**
1996 geprüfte Seile	**O**O O**OO** **OO O**	O O	**O**O **OO**	O O	O O	O O	OO**O** O**O**	O O	O O	O O	O O	O O	O **O**	**O** O **O** **O**O O **O**
2003 alle Seile geprüft (hier Befund an Seilen)	**OO**OO O**OO**O **OOO**O	OOO OOO	**O**OO O**OO**	OOO **O**OO	OOO OOO	OOO OOO	**O**OO **OO**O	**OO**O O**O**O	**O**OO OOO	OOO O**OO**	OOO OOO	OO**O** OO**O**	OOO OO**O**	**OO**OO O**OO** O**OO**O
2004 Nach-prüfung + LMA-Messung								O[3]	O	O				OOO OO

[1] einige kleine spitze Ausschläge, oft auf allen 4 Spulen bei allen Seilen dieser Gruppe
[2] Vielzahl von sehr spitzen Ausschlägen, oft in allen 4 Spulen bei allen Seilen dieser Gruppe
[3] mit Messung des metallischen Seilquerschnittsverlustes

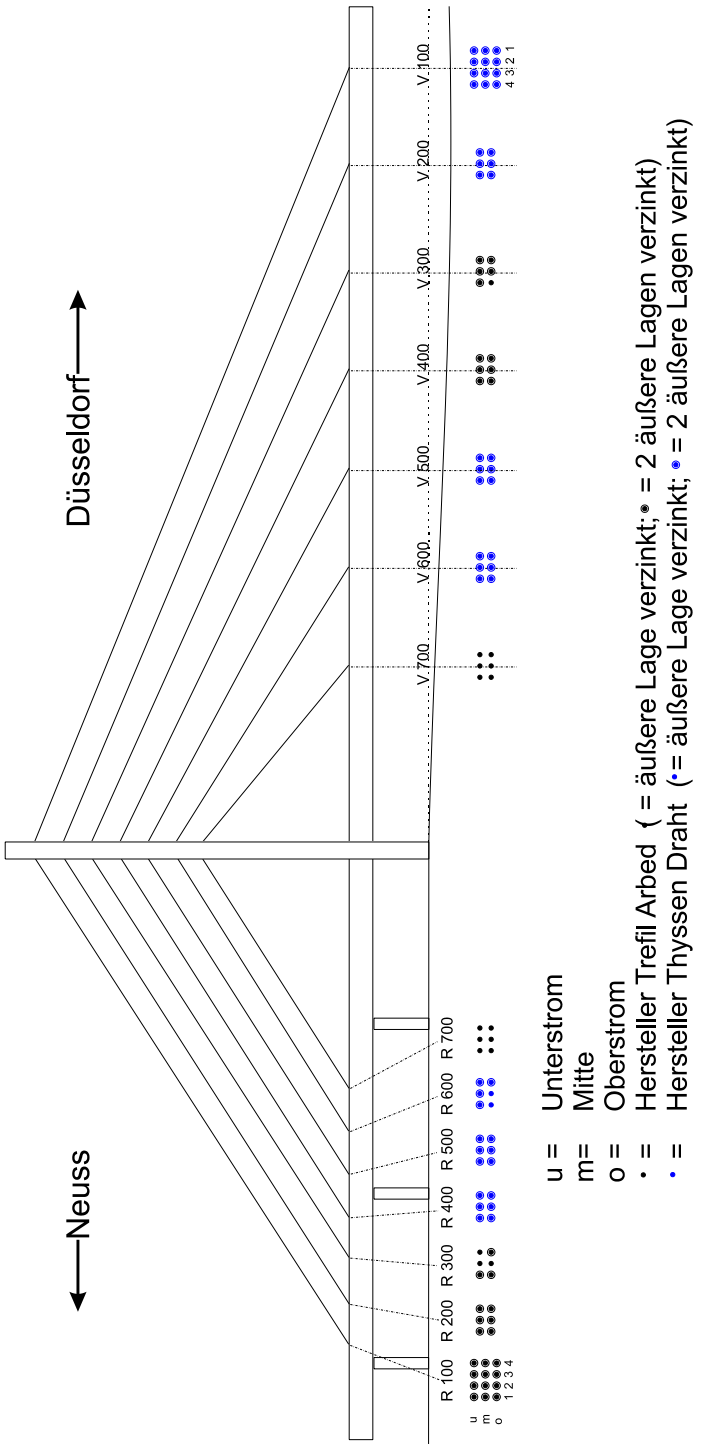


Bild 1 Skizzenhafte Darstellung der Brückenseile sowie Angaben zum Hersteller und Seilausführung

Im Vorfeld wurde zwischen dem unterzeichnenden Prüfbeauftragten und dem Projektleiter der die Sanierungsmaßnahmen ausführenden Firma Dr. Roxlau, abgesprochen, daß die Seilprobenentnahme bei einer vor Ort-Begehung gemeinsam vorgenommen werden sollte. Hierzu fand jedoch keine weitere Terminierung statt. Die Seilproben wurden daher auch nicht direkt zur DMT-Seilprüfstelle versand, sondern zum Seilhersteller für die neuen Seile (hier BRIDON International GmbH, Werk Gelsenkirchen).

Die Seilproben wurden dann im November 2007 zur Seilprüfstelle geliefert. Insgesamt wurden 7 Seilproben mit Längen zwischen ca. 3 m und ca. 10m (siehe Bild 2, Seite 11) geliefert. Diese Seilproben hatten weder Bezeichnungen noch andersartige Markierungen. Die Schadstellen der Seile R100-4u (im Weiteren als Probe 1 bezeichnet) und R100-2m (im Weiteren als Probe 2 bezeichnet) konnten Aufgrund der fehlenden Drähte identifiziert werden.

Beim Öffnen der Probe 2 am 17.12.2007 wurde mit dem Auftraggeber abgestimmt, welche Seilabschnitte für die weiteren Untersuchungen aus den angelieferten Proben entnommen werden sollten. Diese Probenpräparation wurde durch den für die Sanierungsmaßnahmen zuständigen Projektleiter beauftragt und am 19.03.2008 für die Seilproben 1, 3, 4 und 5 vorgenommen.

2.3 Angaben zu den Seilen

Nach Angabe des Lieferanten handelt es sich bei den Proben ausschließlich um Seilstücke der R100-Gruppe. Diese Seile wurden von Trefil Arbed, Werk Köln, gefertigt und haben einen Nenndurchmesser von 111 mm. Aus den Unterlagen zu den Seilen, die bereits bei den o. g. Vorgängerprüfungen zur Verfügung gestellt wurden, geht hervor, daß die beiden äußeren Z-Profillagen verzinkt sind.

Die Probenbezeichnungen für die weiteren Untersuchungen wurden wie folgt gewählt:

- Seilprobe 1: Seilprobe aus R100-4u im Bereich der 6 Drahtbrüche (siehe Bild 3, Seite 11)
- Seilprobe 2: Seilprobe aus R100-2m im Bereich der 3 Drahtbrüche (siehe Bild 9, Seite 14)
- Seilprobe 3: keine Zuordnung möglich (siehe Bild 12, Seite 16)

- Seilprobe 4: keine Zuordnung möglich (siehe Bild 14, Seite 17)
- Seilprobe 5: keine Zuordnung möglich (siehe Bild 17, Seite 18)

2.3.1 Seilaufbau

Der Seilaufbau, d. h. Anzahl der Drahtlagen, Anzahl der Drähte je Lage sowie Drahtform und Schlagrichtung sind beim Öffnen der Seile wie folgt entnommen worden:

Drahtlage	Anzahl der Drähte	Drahtform	Schlagrichtung der Drahtlage	Schlaglänge [mm]
Kerndraht	1	rund	-	-
1. Drahtlage	6	rund	links	110
2. Drahtlage	12	rund	rechts	220
3. Drahtlage	18	rund	links	295
4. Drahtlage	24	rund	rechts	370
5. Drahtlage	26	Z-Profil	links	425
6. Drahtlage	34	Z-Profil	rechts	550
7. Drahtlage	41	Z-Profil	links	735
8. Drahtlage	47	Z-Profil	rechts	810
9. Drahtlage	54	Z-Profil	links	1030
10. Drahtlage (Außenlage)	57	Z-Profil	rechts	1140

3 Befunde der Prüfungen

Der innere Befund der untersuchten Seilproben unterscheidet sich nicht voneinander, weshalb im weiteren Verlauf nur bei zur Dokumentation erstellten Bildern eine Zuordnung zu den einzelnen Proben gemacht wird.

Der äußere Zustand der Seilproben unterscheidet sich hinsichtlich des Korrosionsangriffes bzw. des Angriffes auf die Verzinkung. Bei den gelieferten

Seilproben konnte keine genügende Haftung des Originalanstriches beobachtet werden. Hierfür wurden bereits mehrere Untersuchungsberichte erstellt.

3.1 Äußerer Befund

Wie aus Bild 3 und Bild 4 hervorgeht, ist die Verzinkung der Drähte von Seilprobe 1 teilweise bis mäßig angegriffen. Stellenweise wurde auch geringe Korrosion an den Einzeldrähten vorgefunden. Ein Draht mit mäßigem Angriff auf die Verzinkung ist in Bild 5, Seite 12, dargestellt. Der Angriff der Verzinkung beschränkt sich auf die Außenfläche. Punktuell wurden am Rand der Außenfläche auch Bereiche vorgefunden, auf denen die Verzinkung nicht mehr vorhanden war (siehe Bild 6, Seite 13). Ein weiterer Draht mit geringer Oberflächenkorrosion ist in Bild 7, Seite 13, dargestellt. Auch hier ist die Verzinkung stellenweise am Rand sowie auch an der Außenfläche verbraucht (siehe Bild 8, Seite 14).

Seilprobe 2 zeigte über weite Bereiche einen schwachen Angriff auf die Verzinkung. Neben einer starken Korrosion an den Bruchstellen wurde ein weiterer Bereich mit mäßiger Korrosion an einigen Außendrähten vorgefunden (siehe Bild 11, Seite 15).

Seilprobe 3 (Bild 12, Seite 16) zeigte über weite Bereiche auf den Außenflächen der Außendrahtlage einen mäßigen Angriff auf die Verzinkung. Innerhalb dieser Bereiche wurde punktuell bereits auch selektive Korrosion des Drahtwerkstoffes vorgefunden (siehe Bild 13, Seite 16).

Seilprobe 4 (Bild 14, Seite 17) zeigte über weite Bereiche eine starke Korrosion der Außendrähte. Die Einzeldrahtaufnahmen in Bild 15 und Bild 16 , ab Seite 17, zeigen, daß die Korrosion bereits den Rand der Außenflächen erreicht hat. Im Randbereich ist die Verzinkung ebenfalls verbraucht. Ab dem Stegbereich konnte keine Schädigung bzw. ein Angriff auf die Verzinkung vorgefunden werden. Teilweise war im Stegbereich festhaftender Primer beim Reinigen der Drähte festgestellt worden.

Seilprobe 5 (Bild 17, Seite 18) zeigte über große Bereiche geringe bis mäßige Korrosion an den Außendrähten sowie vereinzelt einen geringen Angriff auf die Verzinkung.

3.2 Innerer Befund

Wie schon einleitend angeführt unterscheidet sich der innere Befund der 5 Seilproben nicht voneinander. Nach dem Öffnen der einzelnen Lagen wurde augenscheinlich trockenes Seilverfüllmittel in ausreichendem Maße vorgefunden. Beim Entfernen des Verfüllmittels konnte jedoch festgestellt werden, daß dieses noch eine genügende Schmierwirkung aufwies.

In Bild 18 bis Bild 22, ab Seite 19, ist die 9. Drahtlage nach dem Entfernen der Außendrahtlage dargestellt. Da die Z-Profildrähte dieser Drahtlage ebenfalls verzinkt waren, wurden auf den Auflageflächen die Abdrücke beider Nachbarlagen vorgefunden. Durch leichtes mechanisches Reinigen mit einer Drahtbürste ließen sich diese schwachen Abdrücke entfernen. Bild 22 zeigt eine Unregelmäßigkeit in der Verzinkung, wie sie auch an anderen Stellen vorgefunden wurden.

Die Befunde der Drahtlagen 1 bis 8 sind in Bild 23 bis Bild 36, ab Seite 21, für die 5 Seilproben exemplarisch dargestellt. Eine Aufnahme des Kerndrahtes ist in Bild 37, Seite 28, dargestellt. Während bei den Z-Profildrähten der 5. bis 8. Drahtlage keine Druckstellen beobachtet wurden, sind in den Runddrähten der 1. bis 4. Lage sehr schwache Druckstellen an den Kreuzungspunkten der Drähte zwischen den Lagen zu erkennen. Auf den Oberflächen der Kerndrähte wurden ebenfalls sehr schwache linienförmige Druckstellen, die von den Runddrähten der 1. Drahtlage hervorgerufen wurden, beobachtet. Weitere nennenswerte Befunde wie Verschleiß oder Korrosion wurden nicht festgestellt.

4 Zusammenfassung

Die Untersuchungen zeigen, daß ausschließlich die Drähte der Außenlage durch Korrosion geschädigt sind, sofern der Seilverband geschlossen ist. Die Korrosion ist dabei nur auf der Außenfläche der Z-Profildrähte vorgefunden worden sowie an beiden Rändern dieser Fläche. Ab dem Steg der äußeren Z-Profildrähte konnte weder Korrosion noch ein Angriff auf die Verzinkung vorgefunden werden.

Im Seilinneren wurden weder Korrosion noch nennenswerter Verschleiß beobachtet. Das vorgefundene Seilverfüllmittel war in ausreichendem Maße vorhanden und zeigte sich noch schmierfähig.

Prüfbeauftragte:

(Dipl.-Ing. Gronau)

Bild 2 **Seilproben im Anlieferungszustand**

Bild 3 **Seilprobe 1 vor dem Öffnen**

Bild 4 **Seilprobe 1: schwache bis geringe Korrosion an einigen Außendrähten sowie mäßiger Angriff auf die Verzinkung**

Bild 5 **Einzeldraht aus Seilprobe 1 mit mäßigem Angriff auf die Verzinkung**

Bild 6 **gereinigter Drahtabschnitt im Vergleich zu Bild 5; Verzinkung teilweise am Rand verbraucht**

Bild 7 **geringe Korrosion auf einem Außendraht von Seilprobe 1**

Bild 8 **gereinigter Drahtabschnitt aus Bild 7; teilweise ist die Verzinkung an der Oberfläche bzw. am Rand verbraucht**

Bild 9 **Seilprobe 2 vor dem Öffnen**

Bild 10 **3 Drahtbrüche im Seil R100-2m (Seilprobe 2)**

Bild 11 **mäßige Korrosion von Außendrähten an Seilprobe 2**

Bild 12 **Seilprobe 3 vor dem Öffnen**

Bild 13 **selektive (punktuell) Korrosion des Drahtwerkstoffes der Außenlage (Seilprobe 3)**

Bild 14 **Seilprobe 4 vor dem Öffnen**

Bild 15 **starke Korrosion auf der Drahtaußenfläche sowie am Rand (Seilprobe 4)**

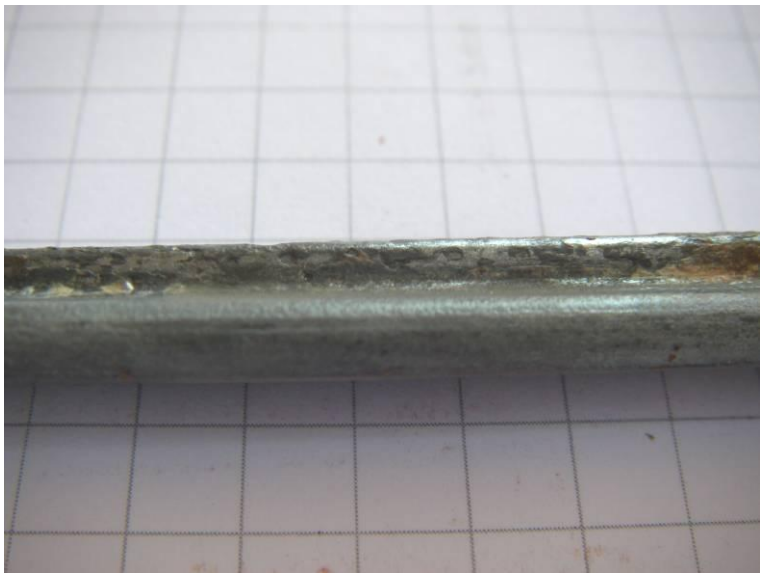


Bild 16 **gereinigter Drahtabschnitt aus Bild 15; Verzinkung ist teilweise bis über den Rand der Außenfläche verbraucht**

Bild 17 **Seilprobe 5 vor dem Öffnen**

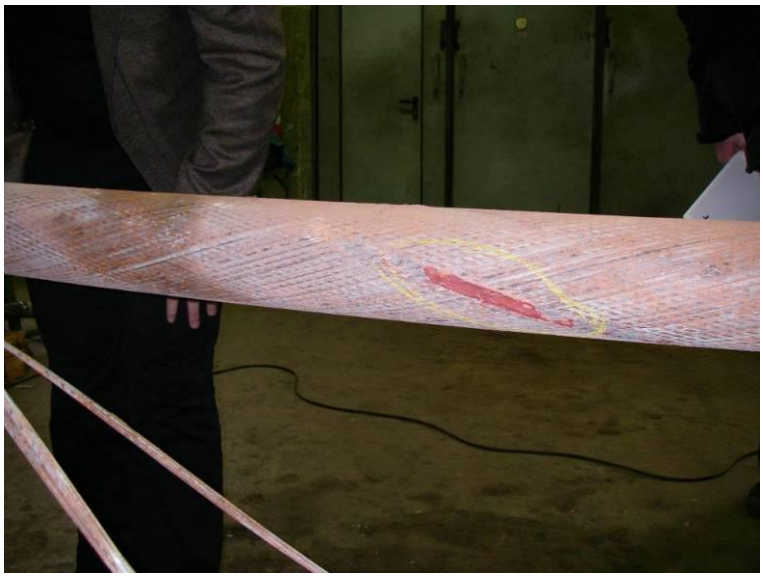


Bild 18 **Blick auf die 9. Drahtlage von Seilprobe 2 mit dunkler Stelle am linken Bildrand**

Bild 19 **Blick auf 9. Drahtlage von Seilprobe 1**

Bild 20 **Z-Profildraht der 9. Drahtlage mit sehr schwachen Druckstellen in der Verzinkung**

Bild 21 **9. Drahtlage von Seilprobe 2 teilweise mit Drahtbürste gereinigt**

Bild 22 **9. Drahtlage von Seilprobe 2 mit Unregelmäßigkeit in der Verzinkung**

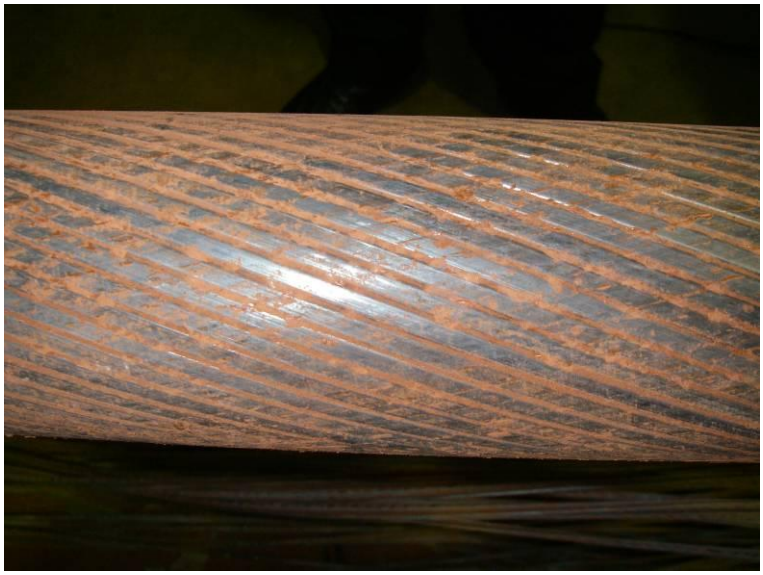


Bild 23 **8. Drahtlage von Seilprobe 2**

Bild 24 **7. Drahtlage von Seilprobe 1**

Bild 25 **7. Drahtlage von Seilprobe 3**

Bild 26 **7. Drahtlage von Seilprobe 3 mit Drahtbürste gereinigt**

Bild 27 **6. Drahtlage von Seilprobe 1**

Bild 28 **5. Drahtlage von Seilprobe 4**

Bild 29 **4. Drahtlage von Seilprobe 5**

Bild 30 **Seilabschnitt aus Bild 29 mit Drahtbürste gereinigt**

Bild 31 **3. Drahtlage von Seilprobe 2**

Bild 32 **Seilabschnitt aus Bild 31 mit Drahtbürste gereinigt**

Bild 33 **2. Drahtlage von Seilprobe 2**

Bild 34 **Einzeldraht aus 2. Drahtlage von Seilprobe 5**

Bild 35 **1. Drahtlage von Seilprobe 2**

Bild 36 **Seilabschnitt aus Bild 35 mit Drahtbürste gereinigt**

Bild 37 **Kerndraht**

Anhang C 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 C

bast

Beurteilung der Ermüdungssicherheit von vollverschlossenen Spiralseilen mit Korrosionsschäden

FE 15.0444/2007/HRB

Anhang C

Ultraschallprüfung Dokumentation Seilkopf

Auftraggeber: Bundesanstalt für Straßenwesen

Verfasser: DMT

Durchführung:

PROF. SEDLACEK & PARTNER
PLANUNG UND ENTWICKLUNG IM BAUWESEN GmbH

BRIDON International GmbH

IEH RWTH RHEINISCH-WESTFÄLISCHE TECHNISCHE HOCHSCHULE AACHEN

DMT

24. November 2017

Tabelle 1 **UT – Befunde, Probe Flehe, äußere Drahtlage**

Fest- und Loslager bezeichnen die Köpfe im eingebauten Zustand während des Dauerschwingversuches

Außenlage	Festlager Orientierung →		Loslager Orientierung ←	
Draht Nr.	dB	mm	dB	mm
1	73	63		
2	79	96	71	53
3	69	63	66	40
4			66	34
5			79	61
6			74	37
7				
8	71	72	74	40
9				
10	76	79	74	74
11			70	51
12			70	33
13			70	33
14	70	72		
15				
16				
17				
18			77	77
19				
20				
21				
22				
23				
24				
25				
26				
27				
28	"offen"	~ 50 mm vor		
29	"offen"	~ 50 mm vor		
30			76	58
31			72	63

Außenlage Draht Nr.	Festlager Orientierung → dB	 mm	Loslager Orientierung ← dB	 mm
32				
33				
34				
35				
36				
37				
38	81	72		
39	77	67		
40	73	46		
41				
42	73	50		
43	73	45		
44	73	39		
45	73	81		
46	81	89		
47				
48				
49	68	40		
50	75	46		
51	71	44	76	84
52	70	40		
53	67	36	80	83
54	67	48	82	132
55	67	50		
56	72	34		
57	72	47		
58	78	70	78	78
Summe N	**26**		**17**	
Anteil [%]	**44,8**		**29,3**	

Bild 1 Seilkopf Festlager, äußere Drahtlage, Draht 1 (0 – Punkt) bis Draht 10

0 – Punkt:	Zenit im eingebauten Zustand während des Dauerschwingversuches	
Orientierung:	rechtsläufig	
Weiß:	Markierung doppelt	Draht Nr. 1
	Markierung einfach	Draht Nr. 10, 20 usw.
Gelb:	Drähte mit UT - Befund	

Bild 2 Seilkopf Festlager, äußere Drahtlage, Draht 10 bis Draht 20

Bild 3 Seilkopf Festlager, äußere Drahtlage, Draht 20 bis Draht 30

Bild 4 Seilkopf Festlager, äußere Drahtlage, Draht 30 bis Draht 40

Bild 5 Seilkopf Festlager, äußere Drahtlage, Draht 40 bis Draht 50

Bild 6 Seilkopf Festlager, äußere Drahtlage, Draht 50 bis Draht 58
Markierung Punkt Draht Nr. 58

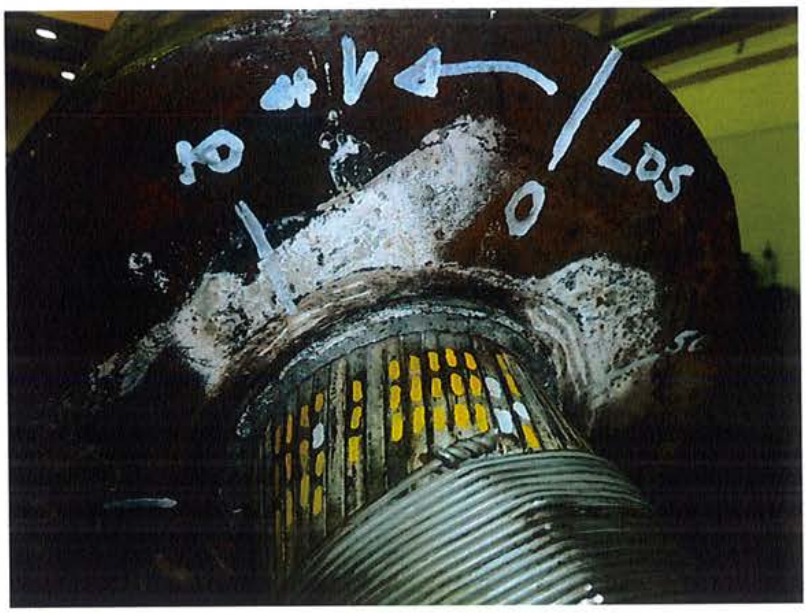


Bild 7 Seilkopf Loslager, äußere Drahtlage, Draht 1 (0 – Punkt) bis Draht 10

0 – Punkt:	Zenit im eingebauten Zustand während des Dauerschwingversuches	
Orientierung:	linksläufig	
Weiß:	Markierung doppelt	Draht Nr. 1
	Markierung einfach	Draht Nr. 10, 20 usw.
	Markierung Punkt	Draht Nr. 58
Gelb:	Drähte mit UT - Befund	

Bild 8 Seilkopf Loslager, äußere Drahtlage, Draht 10 bis Draht 20

Bild 9 Seilkopf Loslager, äußere Drahtlage, Draht 20 bis Draht 30

Bild 10 Seilkopf Loslager, äußere Drahtlage, Draht 30 bis Draht 40

Bild 11 Seilkopf Loslager, äußere Drahtlage, Draht 40 bis Draht 50

Bild 12 Seilkopf Loslager, äußere Drahtlage, Draht 50 bis Draht 58

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

IEH RWTH Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

DMT

Stand: 19. Juli 2017

Anhang D:Kerbfalleinstufung von vollverschlossenen Spiralseilen

Inhaltsverzeichnis

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

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/mm²
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 19931-11

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.

II-A.9.2 Veränderliche axiale Belastung

(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 — Kategorie 112

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 σ_0 = zul σ_H = 0.42 $f_{U,K}$
   - Bei σ_0=0.42 $f_{u,K}$ beträgt die Schwingbreite $\Delta\sigma$= 150 N/mm^2, unabhängig von der „charakteristischen“ Festigkeit $f_{u,K}$
   - Die Kraft wird in Längsachse in den Versuchskörper eingebracht
   - Die Grenzspielzahl beträgt 2 x 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_{Seil} + 3 mm
     - Vergussmaterial: Zamak 610 DIN 1783
     - Verankerungslänge: min. 4 d_{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 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. Drahtriss“, 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. Drahtrisses für vollverschlossene Seile sehr konservativ, weil in diesem Fall durch den 1. Drahtriss 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.

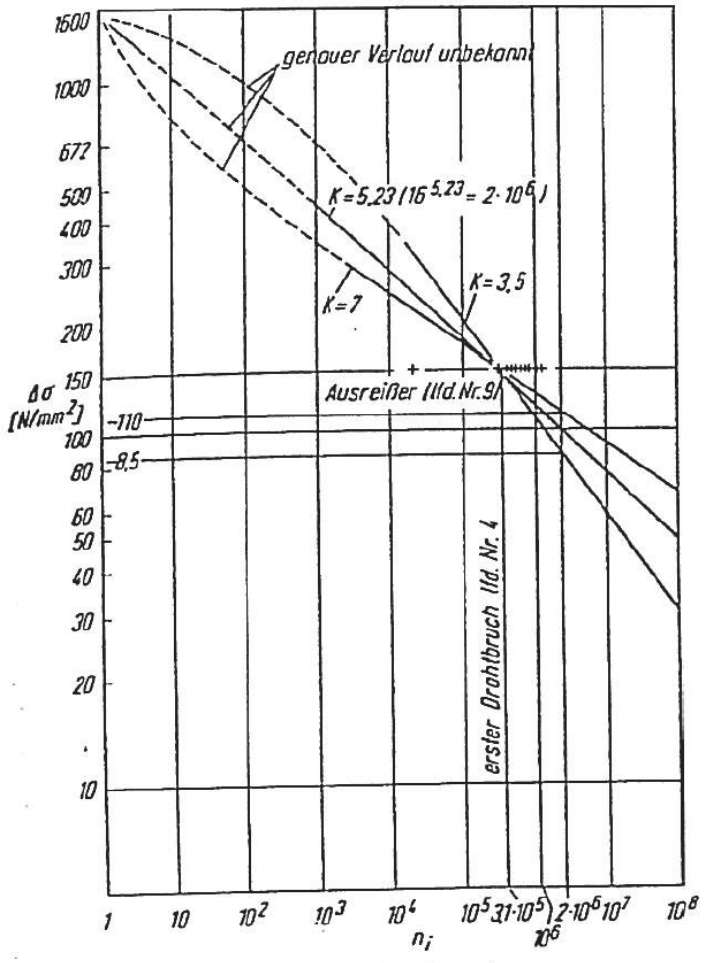


Bild D.3: Wöhlerlinie für den 1. Drahtriss, aus /2/

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 ΔR_0 = 147 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 ΔR_0 = 147 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 ΔR_0 = 147 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 ΔR_0 = 150 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 ΔR_0 = 70 N/mm^2 mit ca. 1.300.000 Zyklen auf Normalkraft belastet. Ungefähr bei jedem 10. Zyklus wurde eine Querschwingung mit einem dynamischen Knickwinkel α_d = 1% zusätzlich aufgebracht. Oberhalb von 1.300.000 Zyklen wur-

de ΔR_0 auf 110 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 ΔR_0 = 100 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 Weitlingen /9/ (mit NW1, NW2 und NW3 bezeichnet) wurden jeweils bei konstanter Amplitude ΔR_0 = 147 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 ΔR_0 = 150 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	Nenndurchmesser d [mm]	Nennquerschnitt A_m [mm^2]	Nennfestigkeit R_0[N/mm^2]	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)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 ΔR_0 [n/mm^2]	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.

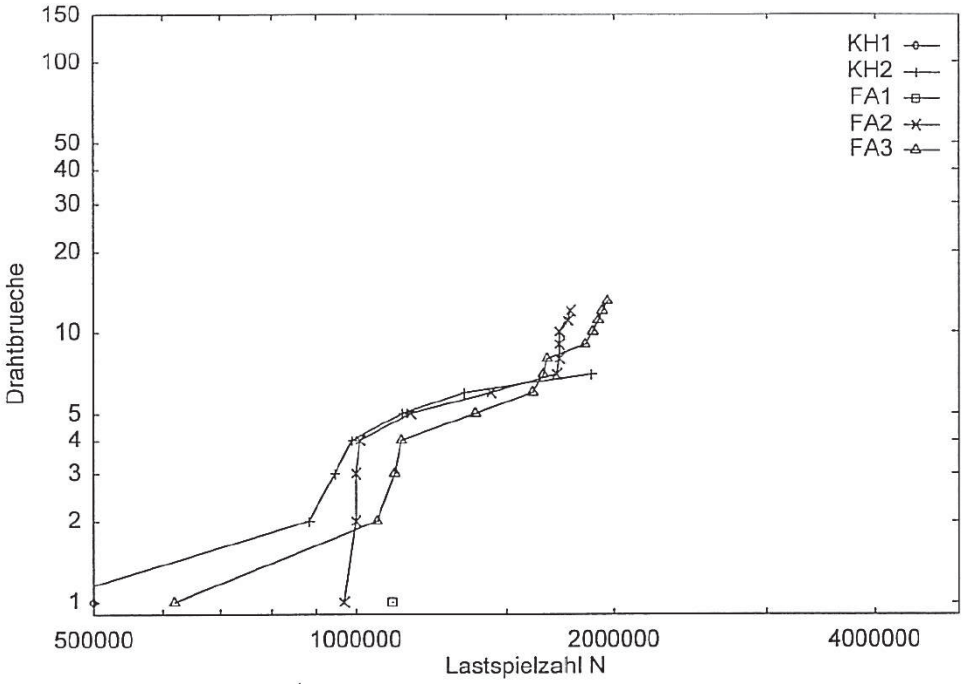


Bild D.4: Drahtbrüche in KH und FA Seilen

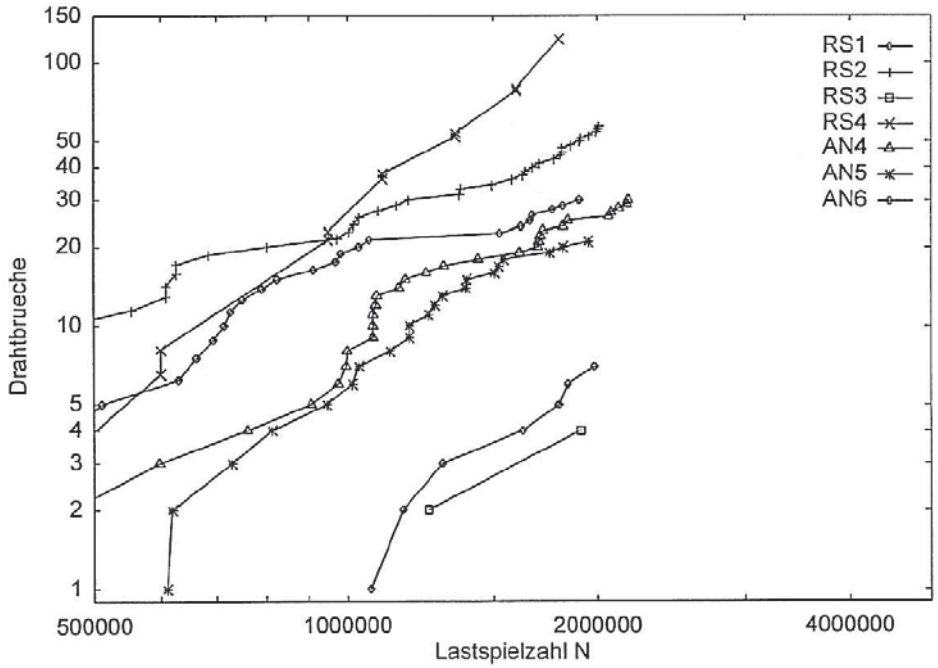


Bild D.5: Drahtbrüche in RS und AN Seilen

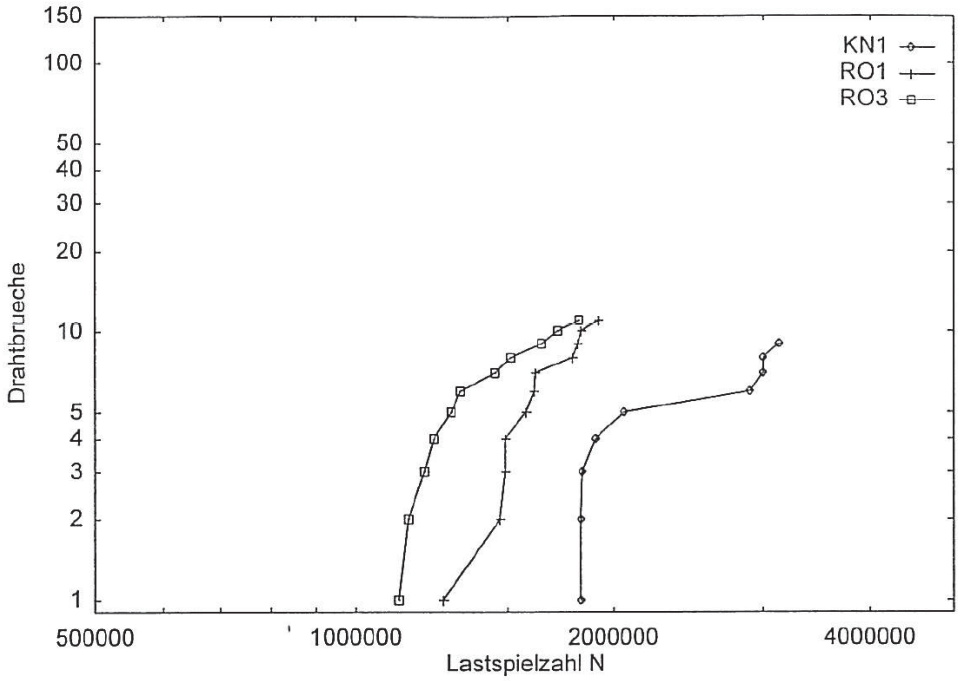


Bild D.6: Drahtbrüche in KN und RO Seilen

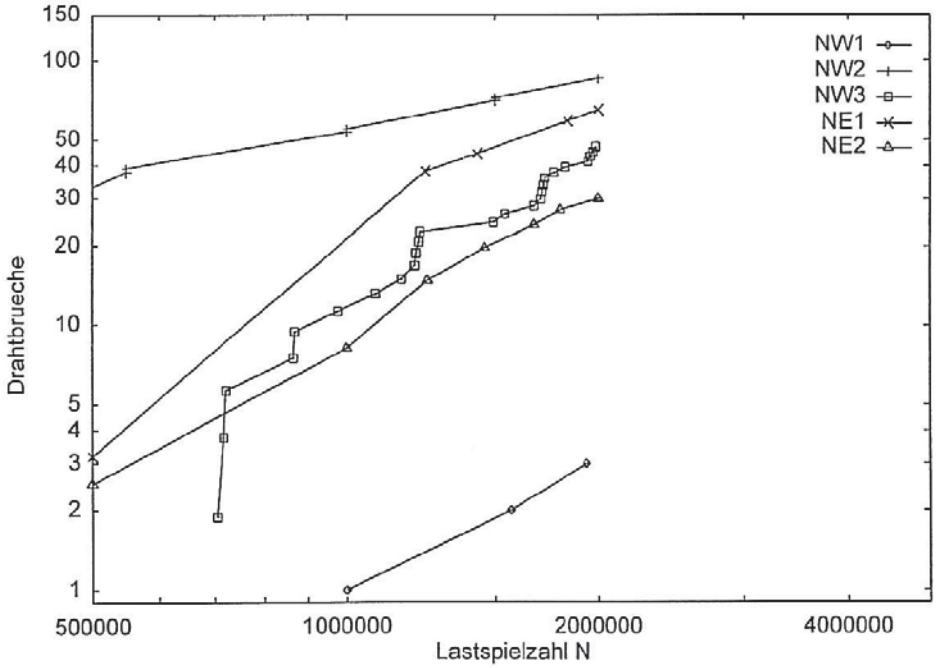


Bild D.7: Drahtbrüche in NW und NE Seilen

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 Zyklenanzahl N abzuschätzen. Es wurde die Annahme getroffen, dass die Festigkeitsabminderung ΔF, 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.

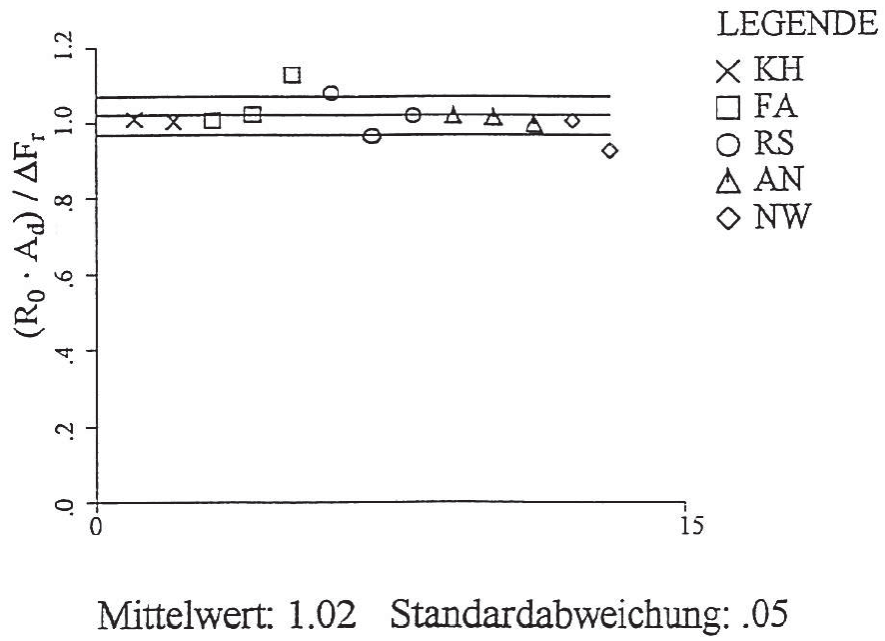


Bild D.8: Festigkeit der gebrochenen Drähte bezogen auf Festigkeitsverlust der untersuchten Seile in Abhängigkeit von der Zyklenzahl N anzugeben.

(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.

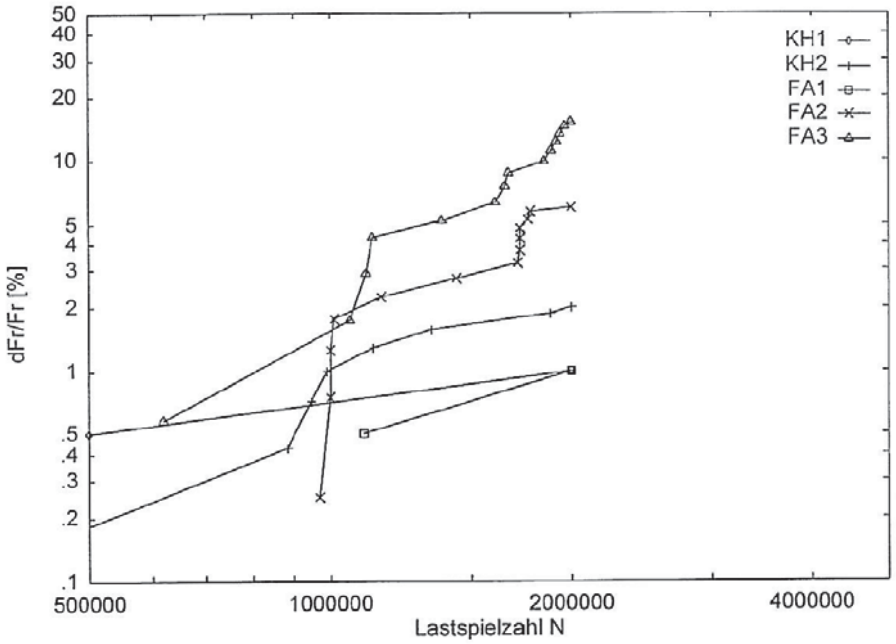


Bild D.9: Festigkeitsverlust für KH und FA Seile

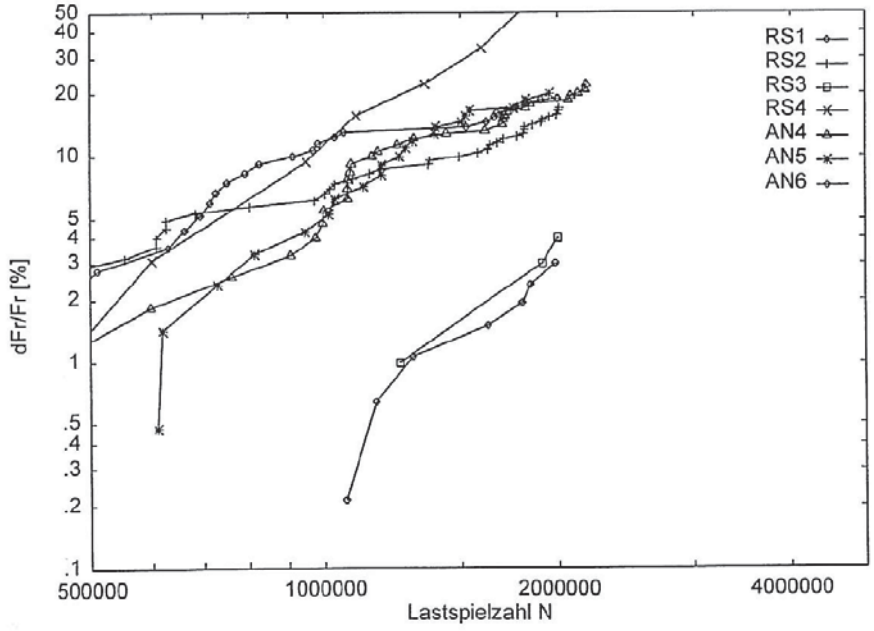


Bild D.10: Festigkeitsverlust für RS und AN Seile

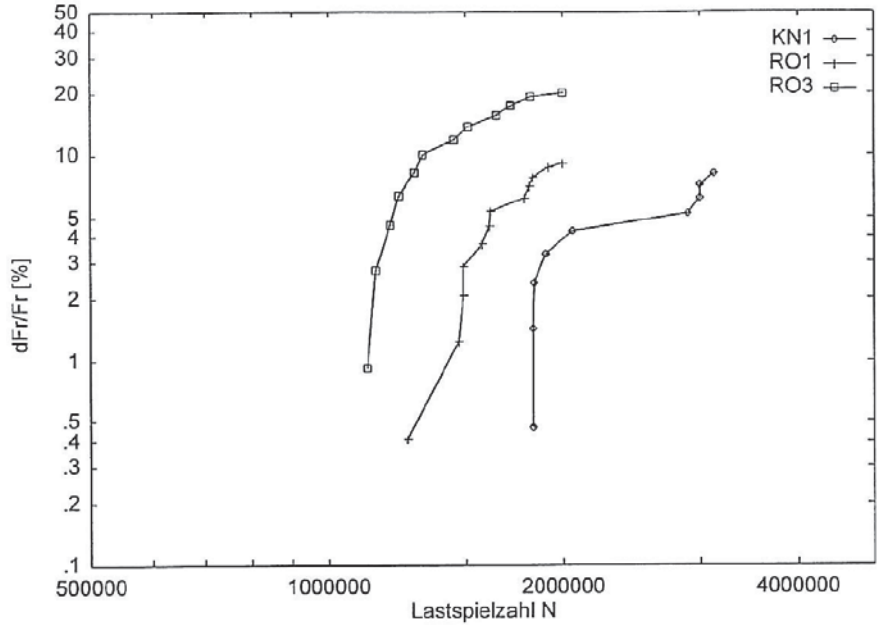


Bild D.11: Festigkeitsverlust für KN und RO Seile

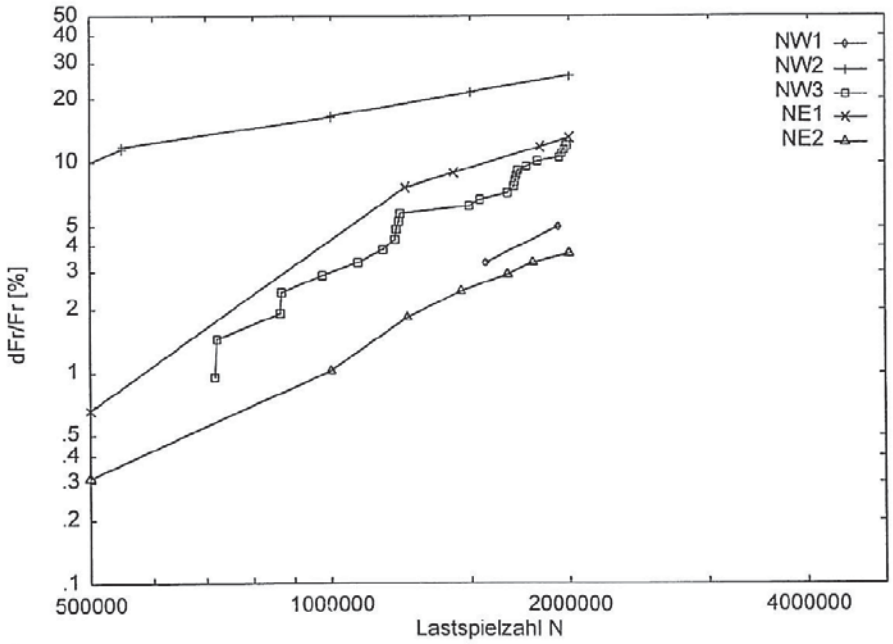


Bild D.12: Festigkeitsverlust für NW und NE Seile

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 Stützwerten 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.

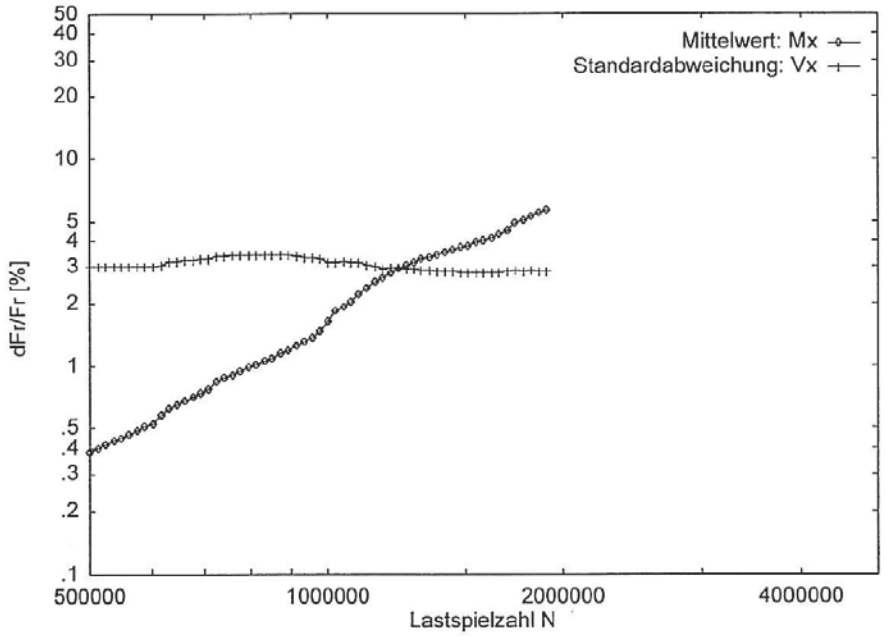


Bild D.13: Mittelwert und Standardabweichung der relativen Festigkeitsabminderung über N

(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

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

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

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

(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 $)F_b/F_r$ über der Zyklenzahl N aufgetragen. Außerdem sind die aus diesen Kurven ermittelten Regressionsgeraden in diesem Diagramm dargestellt.

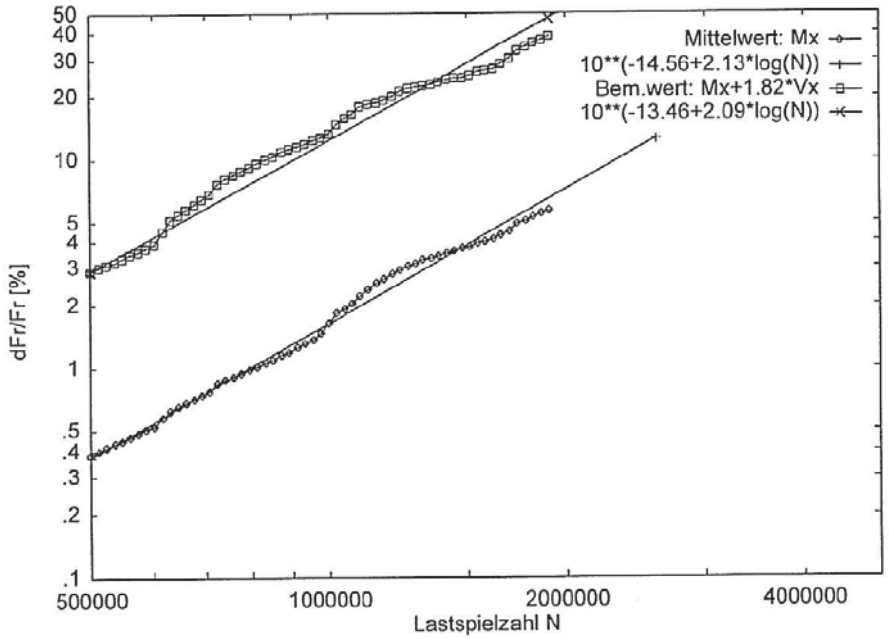


Bild D.14: Statische Auswertung für den Festigkeitsverlust

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

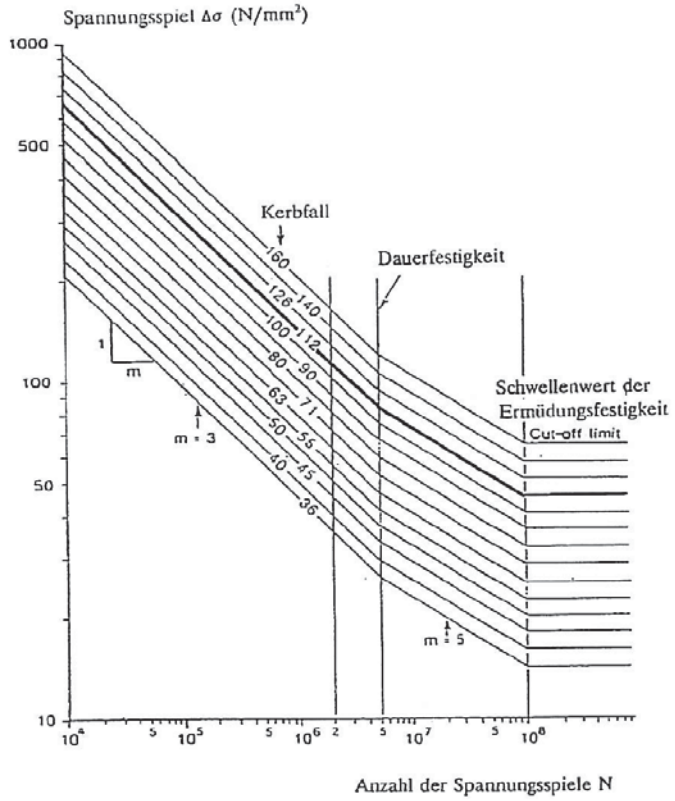


Bild D.15: Ermüdungsfestigkeitskurven für Längsspannungsspiele nach EC3

Die hier ausgewerteten Versuche wurden alle mit einer Spannungsdifferenz von ca. 150N/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≤ 5 · 10^6 gelten für die Wöhlerlinien nach Eurocode:

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

mit

N_K: Bezugskennzahl $= 2 \cdot 10^6$

σ_K: Bezugsspannung entspr. Kerbkl. Eurocode

$1/m$: Steigung der Wöhlerlinien $= 1/3$

Mit σ_K = 150 N/mm^2 ergibt sich somit folgende Beziehung für N:

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

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 Φ_K:

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

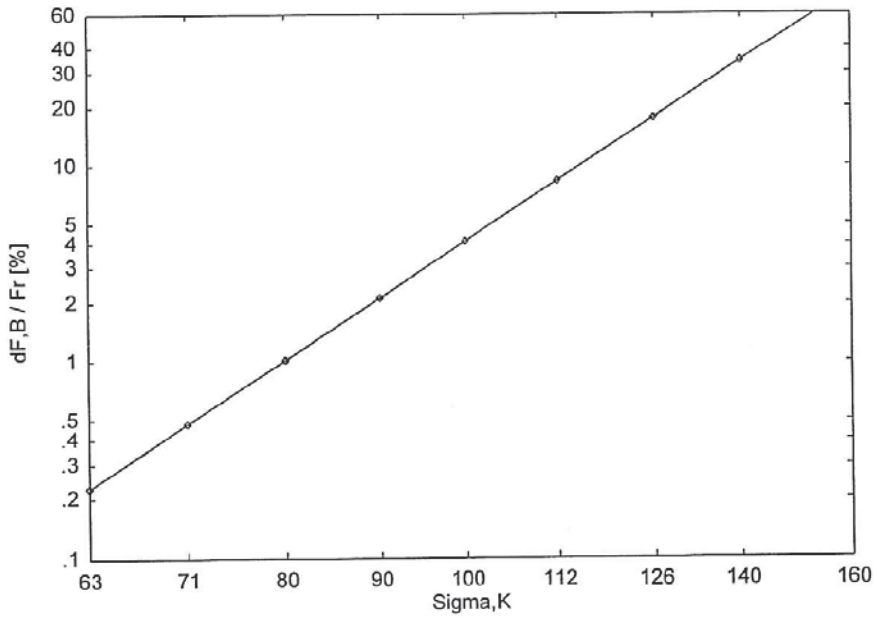


Bild D.16: Beziehung zwischen dem Bemessungswert der relativen Festigkeitsverlustes und der Kerbspannung σK

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 Φ_K = 112 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, Dauerschwingungsversuche 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 Committe for Standardization, Ref. No. ENV 1993-1: 1992 D

/14/ „Eurocode 1, Part 1, Basis of Design, Background Documentation“, European Committe for Standardization, Ref. No. ENV 1991-1: 1994

/15/ M. Martin / H. Stromberg / J. Tins: „Verhalten vollverschlossener Spiralseile bei Zugschwellbeamspruchung“, 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

Anhang E 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 E

bast

Beurteilung der Ermüdungssicherheit von vollverschlossenen Spiralseilen mit Korrosionsschäden

FE 15.0444/2007/HRB

Anhang E

Vorschlag zur Bewertung von Seilschäden in SIBBW

Auftraggeber: Bundesanstalt für Straßenwesen

Verfasser: Michael Paschen, PSP

Durchführung:

PROF. SEDLACEK & PARTNER
PLANUNG UND ENTWICKLUNG IM BAUWESEN GmbH

BRIDON International GmbH

IEH RWTH RHEINISCH-WESTFÄLISCHE TECHNISCHE HOCHSCHULE AACHEN

DMT

24. November 2017

Beurteilung der Ermüdungssicherheit von vollverschlossenen Spiralseilen mit Korrosionsschäden

FE 15.0444/2007/HRB

Die nachfolgende Übersicht stellt verschiedene Schäden an Brückenseile vor und gibt einen Vorschlag zur Bewertung dieser Schäden nach RI-EBW-Prüf, bzw. Einarbeitung in SIBBW.

Eine endgültige Bewertung wird durch die Mitglieder der AG Brückenseile der Bundesanstalt für Strassenwesen erfolgen.

Verwendete Legende:

RF Rheinbrücke Flehe

RND Rheinbrücke Duisburg Neuenkamp

RL Rheinbrücke Leverkusen

RE Rheinbrücke Emmerich

Offene Punkte:

Erfordernis einer OSA, bei Brückenseilen generell immer oder nur bei Drahtbrüchen

Wie verknüpft man die jeweiligen Schäden mit Maßnahmen und wie sehen diese Maßnahmen im Detail aus.

Schadensbild/Schadensbeschreibung	Bewertung Standsicherheit	Verkehrssicherheit	Dauerhaftigkeit	Bemerkungen
RF-1 Drahtbrüche, Drähte sind aus dem Verbund und hängen runter	**1-4** Die Höhe der Note Standsícherheit sollte mit der Schadensausbreitung gekoppelt werden. Ein Drahtbruch Note 1, 2-3 Drahtbrüche Note 2 Bis 1/3 Umfang Note 3, darüber Note 4	**1** Die Verkehrssicherheit ist dann mit gefährdet, wenn die Drähte herunterhängen und zur Ablenkung der Verkehrsteilnehmer führen.	**3**	**OSA erforderlich** Umgehende Sicherungsmaßnahme der Seile erforderlich, abbänseln
RF-2 Drahtbrüche, Drähte sind korrodiert	**2**	**0**	**3**	**OSA erforderlich**

Schadensbild/Schadensbeschreibung	Bewertung Standsicherheit	Verkehrssicherheit	Dauerhaftigkeit	Bemerkungen
RF-3 Drahtbrüche, Drähte sind aus dem Verbund und hängen runter	**3**	**3**	**3**	**OSA erforderlich** Umgehende Sicherungsmaßnahme der Seile erforderlich, abbänseln
RF-4 Drahtbrüche, Drähte sind aus dem Verbund und hängen runter	**3**	**3**	**3**	**OSA erforderlich** Umgehende Maßnahme erforderlich

Schadensbild/Schadensbeschreibung	Bewertung Standsicherheit	Verkehrssicherheit	Dauerhaftigkeit	Bemerkungen
RDN-1 Keine Drahtbrüche, Oberfläche korrodiert, kein übermäßiger Querschnittsverlust erkennbar	**0-1**	**0**	**2**	OSA oder Baumaßnahme?
RDN-2 Keine Drahtbrüche, Oberfläche korrodiert, Mulden erkennbar, somit Querschnittsverlust	**1-2**	**0**	**2**	OSA oder Baumaßnahme?

Schadensbild/Schadensbeschreibung	Bewertung Standsicherheit	Verkehrssicherheit	Dauerhaftigkeit	Bemerkungen
RL-1 Schäden in der Beschichtung	**0**	**0**	**1**	Welche weitere Maßnahme wird verknüpft?
RL-2 Schäden in der Beschichtung	**0**	**0**	**1**	Welche weitere Maßnahme wird verknüpft?

Schadensbild/Schadensbeschreibung	Bewertung Standsicherheit	Verkehrssicherheit	Dauerhaftigkeit	Bemerkungen
RL-3 Schäden in der Beschichtung	**0**	**0**	**1-2**	Weitere Maßnahmen erforderlich OSA? oder direkt kurzfristige Baumaßnahme Anders als ein vergleichbarer Beschichtungsschaden z.B. an einem Haupt- oder Querträger sind die Seile besondere Bauteile.
RE-1 Deckbeschichtung nicht vorhanden	**0**	**0**	**1**	Baumaßnahme von Schadenshäufigkeit abhängig. Wie oft kommt der Schaden vor?

Schadensbild/Schadensbeschreibung	Bewertung Standsicherheit	Verkehrssicherheit	Dauerhaftigkeit	Bemerkungen
RE-2 Beschichtung weg, Rost an der 1.Lage	**1**	**0**	**2**	**OSA erforderlich**
RE-3 Beschichtung nicht mehr vorhanden, oberste Seillage zeigt Korrosion ,mit Ansatz Blattrost	**2**	**0**	**3** Note 3 wegen Blattrost.	**OSA erforderlich**

Schadensbild/Schadensbeschreibung	Bewertung Standsicherheit	Verkehrssicherheit	Dauerhaftigkeit	Bemerkungen
RE-4 1. Drahtlage weggerostet, 2. Drahtlage angerostet	**3**	**0**	**3**	**OSA erforderlich**
Re-5 1. Drahtlage weg, 2. Drahtlage Blattrost	**3-4**	**0**	**4**	**OSA erforderlich** Umgehende Sicherungsmaßnahme der Seile erforderlich, abbänseln