

Zustandsbestimmung von externen Spanngliedern und Schrägseilen mit Frequenzanalysen

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

DOKTOR-INGENIEURS

der Fakultät für
Bauingenieur-, Geo- und Umweltwissenschaften
des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Vorname Name
aus Karlsruhe (Baden)

Tag der mündlichen Prüfung: XX. Monat 20XX

Referent: Prof. Dr.-Ing. Lothar Stempniewski

Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Thomas Ummenhofer

Karlsruhe 2018

Kurzfassung

Vorgespannte Bauwerke erfordern die Integrität der Spannstähle zur Sicherstellung der Standsicherheit und Gebrauchstauglichkeit während der gesamten Nutzungsdauer. Korrosion an den Spanngliedern bzw. Seilen der Bauwerke führt meist zu unkalkulierbaren Risiken bis hin zum Bauteil- bzw. Bauwerkversagen.

Bei den Bauwerksprüfungen nach DIN 1076 besteht ein verstärkter Bedarf nach aussagefähigen Prüfverfahren für die eingesetzten externen Spannglieder und Schrägseile. Um den aktuellen Zustand der externen Spannglieder und Schrägseile beurteilen zu können, stehen verschiedene zerstörungsfreie bzw. zerstörungsarme Prüfverfahren zur Verfügung. Diese Verfahren wurden im Rahmen dieser Arbeit hinsichtlich Aussagefähigkeit, Aufwand und Kosten untersucht. Die Verfahren sind jedoch so zeitaufwändig bzw. nicht aussagekräftig genug, dass eine routinemäßige Anwendung nicht wirtschaftlich durchführbar ist. Eine regelmäßige Messung kann nicht in erster Linie das Ziel haben, die absolute Änderung der Spannkraft bezogen auf den ursprünglichen Zustand zu bestimmen. Vielmehr sollte die Messung klare Indikatoren liefern, dass sich der Zustand des externen Spanngliedes / Schrägseils innerhalb oder außerhalb eines Toleranzbereiches befindet. Daher wurde ein Schnelltest entwickelt, bei dem lediglich die vorhandene Eigenfrequenz des jeweiligen Messabschnittes ermittelt und auf die Erstmessung des Abschnittes normiert wird. Dies ermöglicht, dass alle Spannglieder / Seile eines Bauwerks miteinander verglichen werden können.

Der Einfluss von Drahtbrüchen auf das Spannglied bzw. Seil selbst sowie die restlichen Spannglieder / Seile im Bauwerk wurden mittels Finite-Elemente-Berechnungen für eine extern vorgespannte Brücke, eine Seilbrücke sowie einem Stadionsdach durchgeführt. Darüber hinaus wurde mittels Finite-Elemente-Berechnungen das Verhalten von Litzen bei Drahtbrüchen an Umlenkstellen untersucht.

Abstract

Prestressed constructions require integrity of prestressed steels to ensure stability and usability over the complete service life. Corrosion of tendons or cables of constructions mostly leads to incalculable risks or even component or construction failure.

There is an increasing need for methods to test external tendons and stay cables according to DIN 1076 Tab. 2.1. To assess the status of external tendons and stay cables, various non-destructive or low-destructive test methods can be applied. These methods have been analysed with respect to the quality of information they yield and the expenditure and costs with which they are associated. It was found that the methods are very time-consuming and do not provide sufficient information for their routine application to be economically efficient. Regular measurement should not focus on determining absolute change of prestressing force compared to the original state, but should rather supply indicators for the external tendon or stay cable being within or without a certain range of tolerance. For this purpose, a rapid test was developed to determine the eigenfrequency of the measurement section and normalize it to the first measurement of this section. In this way, all tendons / cables of the construction can be compared with each other.

Together with this rapid test method, the ResoCable® measurement system was developed. It consists of hardware and software for the rapid execution and evaluation of frequency measurements with minimum error. Apart from tests of strands and full locked cables, numerous measurements of tendons of external prestressed bridges, cable-stayed bridges and of a stadium roof were carried out.

The influence of wire damage on the tendon or cable proper and on the remaining tendons / cables of the construction was determined with the help of finite-element calculations for an external prestressed bridge, a cable-stayed bridge, and a stadium roof. In addition, finite-element calculations were made to study the behavior of strands in case of wire damage at deflection points.

Vorwort

Damit Ihr Dokument ein professionelles Aussehen erhält, stellt Word einander ergänzende Designs für Kopfzeile, Fußzeile, Deckblatt und Textfelder zur Verfügung. Beispielsweise können Sie ein passendes Deckblatt mit Kopfzeile und Randleiste hinzufügen. Klicken Sie auf "Einfügen", und wählen Sie dann die gewünschten Elemente aus den verschiedenen Katalogen aus.

Designs und Formatvorlagen helfen auch dabei, die Elemente Ihres Dokuments aufeinander abzustimmen. Wenn Sie auf "Design" klicken und ein neues Design auswählen, ändern sich die Grafiken, Diagramme und SmartArt-Grafiken so, dass sie dem neuen Design entsprechen. Wenn Sie Formatvorlagen anwenden, ändern sich die Überschriften passend zum neuen Design.

Sparen Sie Zeit in Word dank neuer Schaltflächen, die angezeigt werden, wo Sie sie benötigen. Zum Ändern der Weise, in der sich ein Bild in Ihr Dokument einfügt, klicken Sie auf das Bild. Dann wird eine Schaltfläche für Layoutoptionen neben dem Bild angezeigt. Beim Arbeiten an einer Tabelle klicken Sie an die Position, an der Sie eine Zeile oder Spalte hinzufügen möchten, und klicken Sie dann auf das Pluszeichen.

Auch das Lesen ist bequemer in der neuen Leseansicht. Sie können Teile des Dokuments reduzieren und sich auf den gewünschten Text konzentrieren. Wenn Sie vor dem Ende zu lesen aufhören müssen, merkt sich Word die Stelle, bis zu der Sie gelangt sind – sogar auf einem anderen Gerät.

Damit Ihr Dokument ein professionelles Aussehen erhält, stellt Word einander ergänzende Designs für Kopfzeile, Fußzeile, Deckblatt und Textfelder zur Verfügung. Beispielsweise können Sie ein passendes Deckblatt mit Kopfzeile und Randleiste hinzufügen. Klicken Sie auf "Einfügen", und wählen Sie dann die gewünschten Elemente aus den verschiedenen Katalogen aus.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	i
Abstract.....	iii
Vorwort.....	v
Kapitel 1: Einleitung.....	1
Kapitel 2: Externe Spannglieder, Seile und ihre Eigenschaften	3
2.1 Externe Vorspannung.....	3
2.1.1 Externe Spannglieder im Brückenbau	4
2.1.2 Externe Spannglieder in Windenergieanlagen	6
2.2 Seile im Brückenbau	8
2.2.1 Schäden an Seilen	9
2.2.2 Spannstahl.....	10
2.2.3 High Density Polyethylene (HDPE).....	12
2.2.4 Korrosionsschutz	13
Kapitel 3: Einfluss von Drahtbrüchen auf die Eigenfrequenz	15
3.1 Versuche mit Litzen	16
3.1.1 Aufbau der Versuche	16
Kapitel 4: Zusammenfassung und Ausblick	17
Abbildungsverzeichnis.....	19
Tabellenverzeichnis.....	21
Literatur.....	23
Autoren	23
Zulassungen	24
Anhang.....	25

Kapitel 1

Einleitung

Spannbeton ist, gemessen an der langen Geschichte des Betons, eine vergleichsweise junge Bauweise. Im Jahr 1875 wurde die erste Eisenbetonbrücke bei Chazelet (Frankreich) errichtet Abb. 1.1. In den Jahren 1935 bis 1937 wurde die Bahnhofsbrücke in Aue, Sachsen, als erste Spannbetonbrücke mit externen Spanngliedern in Deutschland nach einem Entwurf Dischingers errichtet Abb. 1.2.

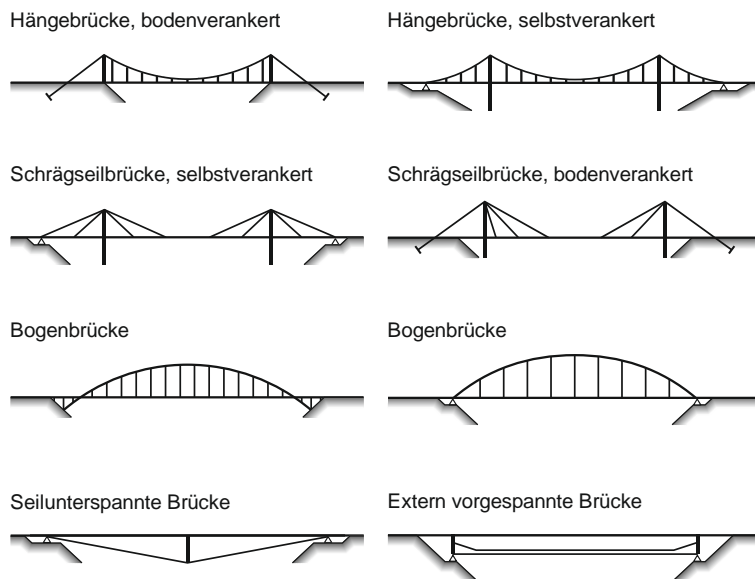


Abb. 1.1: Seilverspannte Brücken, in Anlehnung an Abb. 2.2

Drei der insgesamt 10 Felder der Brücke wurden gemäß dem Patent Dischingers extern vorgespannt. Nach dem zweiten Weltkrieg wurden Spannbetonbrücken nahezu ausschließlich mit internen Spanngliedern hergestellt, bevor Mitte der 1980er Jahre – aufgrund sicherheitsrelevanter Probleme bei internen Spanngliedern – die externen Spannglieder wieder entdeckt wurden. Zwei der ersten erstellten Brücken mit externer Vorspannung sind

die Talbrücke Berbke und die Talbrücke Wintrop im Zuge der A 46. Die Verwendung von externen Spanngliedern ist seit Einführung der „Richtlinie für Betonbrücken mit externen Spanngliedern“ im Jahre 1998 für vorgespannte Betonbrücken mit Hohlkasten-querschnitt im Zuständigkeitsbereich des Bundes als Standardbauweise vorgeschrieben Abb. 1.2.



Abb. 1.2: Video bietet eine leistungsstarke Möglichkeit zur Unterstützung Ihres Standpunkts. Wenn Sie auf "Onlinevideo" klicken, können Sie den Einbettungscode für das Video einfügen, das hinzugefügt werden soll. Sie können auch ein Stichwort eingeben, um online nach dem Videoclip zu suchen, der optimal zu Ihrem Dokument passt.

Der erfolgreiche Einsatz zerstörungsfreier Prüfverfahren (ZfP) hängt wesentlich mit der Auswahl des geeigneten Verfahrens zusammen. Monitoringsysteme können helfen, den Zustand der Bauwerke zu erhalten Abb. 1.1.

In den letzten Jahren wurden in den zahlreichen Verfahren und der Gerätetechnik große Fortschritte gemacht. Neben dem DBV-Merkblatt „Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren im Bauwesen“ Abb. 1.2, in dem für unterschiedliche Bereiche der Bauwerke die jeweils möglichen Prüfverfahren beschrieben werden, wurden im Rahmen dieser Arbeit explizit verfügbare Verfahren zur Prüfung des Zustands von externen Spanngliedern und Schrägseilen hinsichtlich der Eignung und der Kosten untersucht. Anhand der Ergebnisse wurde ein Verfahren entwickelt, mit dem in-situ der Zustand externer Spannglieder und Seile mittels Frequenzanalyse bewertet werden kann. Hierbei steht nicht im Vordergrund, den genauen Ort einer Schädigung zu ermitteln, sondern um festzustellen, ob es an einem externen Spannglied bzw. Seil zu einer Schädigung gekommen ist.

Kapitel 2

Externe Spannglieder, Seile und ihre Eigenschaften

2.1 Externe Vorspannung

Die externe Vorspannung wurde erstmals im Jahr 1936 nach einem Entwurf Dischingers in Deutschland eingesetzt, jedoch wurde in den darauf folgenden 50 Jahren die interne, im Verbund liegende Vorspannung vorgezogen [7]. In den 1980er Jahren wurde die externe Vorspannung nach dem vermehrten Auffinden von teilweise nicht verpressten internen Spanngliedern wieder aufgegriffen und weiter entwickelt. In Abb. 2.2 wurde Anfang der 1990er der technische Fortschritt der externen Spannglieder dargestellt und diskutiert.

Die Verwendung von externen Spanngliedern ist seit Einführung der „Richtlinie für Betonbrücken mit externen Spanngliedern“ im Jahre 1998 für vorgespannte Betonbrücken mit Hohlkastenquerschnitt im Zuständigkeitsbereich des Bundes als Standardbauweise vorgeschrieben Abb. 2.3. Die Richtlinie begrenzt die zulässige Spannkraft je Spannglied auf ca. 3 MN und die Spanngliedlänge auf ca. 200 m. Diese Richtwerte wurden u.a. hinsichtlich der Handhabbarkeit und späteren Erhaltungsarbeiten festgelegt. Generell sind externe Spannglieder so anzuordnen, dass die Nachspannbarkeit und auch Auswechselbarkeit der Spannglieder sichergestellt ist. Unter halber Verkehrslast muss ein beliebiges Spannglied pro Steg ausgetauscht werden können. Dies gilt auch für die Mischbauweise. Der Höchstabstand der Spanngliedstützungen (Umlenkstellen, Ankerstellen) wurde auf 35 m festgelegt.



Abb. 2.1: Externe Spannglieder in der Pfinztalbrücke Nöttingen

2.1.1 Externe Spannglieder im Brückenbau

Externe Spannglieder sind im Brückenbau außerhalb des Betonquerschnittes und – in der Regel – innerhalb der Betonumhüllenden angeordnet. Hierbei wird zwischen 3 unterschiedlichen Spanngliederführungen unterschieden: geradliniger Verlauf, dreiecksförmiger Verlauf und trapezförmiger Verlauf, wobei meist nur nachträglich angeordnete Spannglieder einen geradlinigen Verlauf ausweisen (Abb. 2.4).

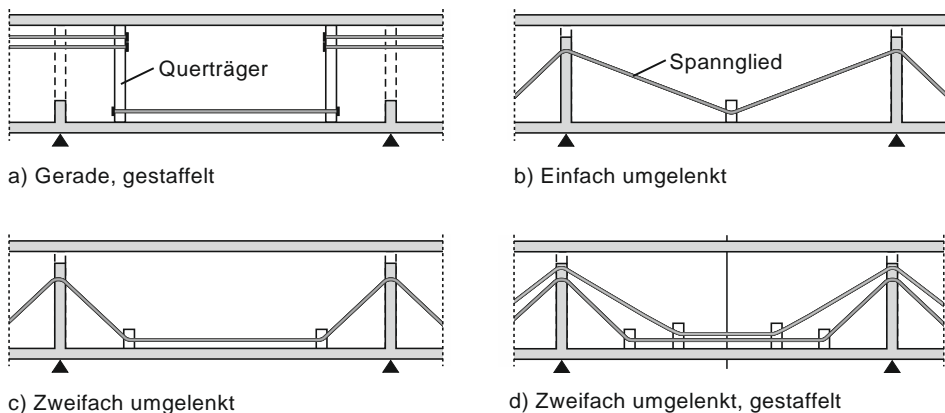
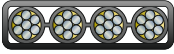

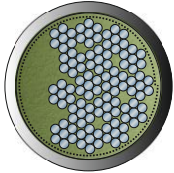

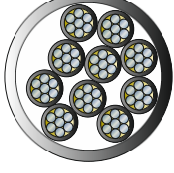
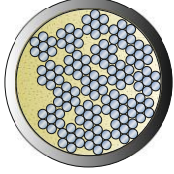
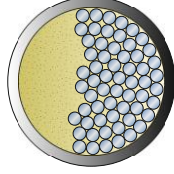


Abb. 2.2: Spanngliedverläufe bei extern vorgespannten Brücken

Tab. 2.1: Externe Spannglieder in Deutschland [11] bis Tab. 2.3

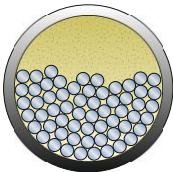


BBR VT CMM D / CMM KD	Litzen		PE-Hüllrohr, Monolitze	$P_{m0} = 372 - 3.366 \text{ kN}$
VBT BE	Litzen		PE-Hüllrohr, Monolitze	$P_{m0} = 186 - 3.264 \text{ kN}$
Dywidag Typ MC	Litzen		PE-Hüllrohr, Mörtel	$P_{m0} = 1.115 - 4.089 \text{ kN}$
Dywidag Typ W	Litzen		PE-Hüllrohr, Monolitze, Mörtel	$P_{m0} = 1.041 - 3.296 \text{ kN}$
BBV Typ EMR	Litzen		PE-Hüllrohr, Monolitze	$P_{m0} = 1.561 - 3.264 \text{ kN}$
BBV Typ E	Litzen		PE-Hüllrohr, Fett	$P_{m0} = 536 - 6324 \text{ kN}$
DSI SUSPA-Draht EX	Drähte		PE-Hüllrohr, Fett / (Mörtel)	$P_{m0} = 1.350 - 4.528 \text{ kN}$

In Deutschland sind bzw. waren bis zu 7 unterschiedliche Spanngliedtypen mit einer maximal zulässigen Vorspannkraft in Höhe von etwa 6,3 MN zugelassen (Tab. 2.2). Während früher als Füllmaterial der Hüllrohre teilweise noch Zement verwendet wurde, kommt heute ausschließlich Korrosionsschutzfett zum Einsatz, das aufgrund seiner Eigenschaften einen besseren Korrosionsschutz ermöglicht.

2.1.2 Externe Spannglieder in Windenergieanlagen

Bei Windenergieanlagen sind Stahlbetontürme etwa fünf bis sechs Mal schwerer als gleich hohe Stahltürme und weisen deshalb günstigere Schwingungseigenschaften und geringere Schallemissionen auf. Bei Türmen über 100 m Höhe werden inzwischen vermehrt Hybridtürme eingesetzt. Hierbei wird der untere Teil des Turms (ca. 60-70% der Turmhöhe) aus Spannbeton und der obere aus Stahl gefertigt. Verbunden werden beide Teile durch einen Adapter aus Stahl, was eine vom Stahlteil unabhängige Herstellung des Spannbetonschafts erlaubt. Der Spannbetonteil wird entweder in Ortbetonbauweise mit Kletter- oder Gleitschalung oder in Fertigteilbauweise hergestellt. Hybridtürme haben Fußdurchmesser bis 12 m und Wanddicken des Spannbetonteils von 30 bis 55 cm.

Tab. 2.2: Zulassungen externer Spannglieder für den Einsatz in Windenergieanlagen Tab. 2.4

SUSPA-Draht EX	BBV / ENERCON Typ EW	BBR-VT CMM D / KD
Drähte	Litzen	Litzen
		
$P_{m0} = 1.350 - 4.528 \text{ kN}$	$P_{m0} = 1.428 - 3.060 \text{ kN}$	$P_{m0} = 372 - 3.501 \text{ kN}$

Für Windenergieanlagen verwendete externe Spannglieder bestehen aktuell entweder aus einzelnen Monolitzen (BBV Systems GmbH – Externes Litzenspannverfahren Typ EW für Türme von Windenergieanlagen, Zulassungsnummer Z-13.3-133 Abb. 2.1 sowie ENERCON GmbH – Externes Litzenspannverfahren TYP EW für Türme von Windenergieanlagen, Zulassungsnummer Z-13.3-140 Abb. 2.3) oder aus mehreren zusammengefassten

Monolitzen, wie beim Spanngliedtyp VT-CMM D bzw. VT-CMM KD (Z-13.3-143 Abb. 2.1) der BBR VT International Ltd. Die Monolitzen sind hierbei durch Stege miteinander verbunden. Eine weitere Möglichkeit sind Drahtspannglieder des Typs SUSPA-Draht EX (Z-13.3-141 Abb. 2.3) der Firma DYWIDAG-Systems International GmbH (Tab. 2.2).

Im Gegensatz zum Brückenbau werden externe Spannglieder in Windenergieanlagen nahezu vertikal entlang der Turmwand geführt. In der Richtlinie für Windenergieanlagen Tab. 3.1 wird gefordert, dass „Spannverfahren, die zum Vorspannen von Windenergieanlagen verwendet werden, [...] für die Vorspannung von Türmen [...] zugelassen sein“ müssen. Am 19.12.2013 wurde vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) unter der Nummer Z-13.3-133 Tab. 2.1 das Spannverfahren der Firma BBV Systems GmbH als erstes Spannverfahren für Türme von Windenergieanlagen zugelassen. Alle vor diesem Zeitpunkt eingesetzten externen Spannglieder in Hybridtürmen wurden ohne bauaufsichtliche Zulassung eingebaut. Die Verwendung von externen Spanngliedern ohne Zulassung für Windenergieanlagen war nur bis Ende 2014 zulässig, unter Beachtung einzelner Auflagen. So dürfen externe Spannglieder z.B. für eine Temperatur bis maximal 37°C eingesetzt werden.

Tab. 2.3: Temperaturabhängiger Kurzzeit-E-Modul von HDPE in N/mm²

≤ 10°C	20°C	30°C	40°C	50°C	60°C
1100	800	550	390	270	190

Diese Temperatur wird jedoch – ohne Einsatz von Gegenmaßnahmen – bei Windenergieanlagen schnell überschritten. Erhöhte Temperaturen führen dazu, dass bei umgelenkten bzw. anliegenden externen Spanngliedern die Hüllrohrdicke an den Anlegepunkten weit aus stärker abnimmt. Das liegt an den Materialeigenschaften des HDPE, welche sich mit steigender Temperatur ändern. Der Kurzzeit-Elastizitätsmodul beträgt bei 20°C 800 N/mm² und bei 50°C nur noch 270 N/mm² (Tab. 2.3).

Da Spannglieder in Windenergieanlagen ohne zweite Schutzhülle eingebaut werden, wird der Monolitzenmantel dicker ausgeführt. Bei dem Spannglied Typ EW der Firmen BBV bzw. ENERCON ist das Hüllrohr mit 2,4 mm etwas dicker als die Mindestwanddicke bei Zulassungen für den Einsatz von Monolitzen im Brückenbau.

Schäden an externen Spanngliedern

Die Verwendung von externen Spanngliedern im Brückenbau ist eine vergleichsweise junge Bauweise, die vor allem in Deutschland erst in den 90er Jahren des letzten Jahrhunderts stetig zunahm. Es gibt auch ältere Brücken mit externen Spanngliedern, vor allem im Ausland. Bei diesen sind die meisten Schäden bekannt. In vielen Fällen sind nur einzelne Drähte bzw. Litzen eines Spanngliedes betroffen, teilweise gibt es auch komplett gerissene Spannglieder (Abb. 2.2).

In der von 1973 bis 1976 erbauten Überführung in Guildford (südwestlich von London) wurden 1994 zwei wegen Korrosion gerissene externe Spannglieder festgestellt. Die Kontrolle der anderen Spannglieder zeigte, dass mehrere Spannglieder Korrosionsschäden aufwiesen (Abbildung 2.3). Die Spannglieder waren während der Bauphase nicht ausreichend gegen Korrosion geschützt und auch das verwendete Fett bot in den Endbereichen keinen ausreichenden Schutz gegen eindringendes Wasser. 1996 wurden im Rahmen der Instandsetzung alle Spannglieder ersetzt. [2].



Abb. 2.3: Zustand eines Spannglieds im Bereich des Endquerträgers (links), gerissenes Spannglied der Überführung in Guildford (rechts)

2.2 Seile im Brückenbau

Die Zugglieder von Seilbrücken bestehen meist aus kaltgezogenen Stahldrähten. Die Technik des Kaltziehens von Metaldrähten ist bereits seit dem 14. Jahrhundert bekannt. Der Draht wird hierbei durch mehrere Ziehösen gezogen, die immer kleinere Durchmesser aufweisen. Durch die Kaltverformung erhält man eine Erhöhung der Zugfestigkeit der Stahldrähte. [2]

Tab. 2.4: Seildefinitionen Abb. 1.2

Litze	Ein Seilelement, üblicherweise bestehend aus einer Anordnung von Drähten mit geeignetem Querschnitt und Abmessungen, die spiralförmig um ein Zentralstück gelegt sind.
Rundlitzenseil	Eine Anordnung von mehreren Litzen, die spiralförmig einlagig oder lagenweise um einen Kern (Seil mit einer Lage) oder ein Zentralstück (drillfreies oder parallel geschlossenes Seil) gelegt sind.
Spiralseil	Eine Anordnung von mindestens zwei Drahtlagen, die spiralförmig um ein Zentralstück (üblicherweise einen Draht) gelegt sind.
Offenes Spiralseil	Spiralseil nur aus Runddrähten
Vollverschlossenes Spiralseil	Spiralseil mit einer äußeren Lage von vollverschlossenen (Z-) Drähten

Ähnlich wie externe Spannglieder sind auch Schrägseile frei zugänglich, wobei Schrägseile darüber hinaus durchgehend der Witterung und anderen Umwelteinflüssen ausgesetzt sind.

Vollverschlossene Seile (VVS) bestehen aus Runddrähten und mindestens zwei Lagen Z-Profildrähten. Sie werden einschließlich Verankerung vollständig im Werk hergestellt und einbaufertig zur Baustelle transportiert. Die Verseilung erfolgt vollkommen maschinell. Die einzelnen Drahtlagen werden hierbei jeweils in unterschiedliche Richtungen verdreht. Vollverschlossene Seile waren früher auch als patentverschlossene Seile bekannt. Abb. 2.1

2.2.1 Schäden an Seilen

Im Gegensatz zu externen Spanngliedern kommen Seile, insbesondere Schrägseile im Brückenbau, weit verbreiteter zum Einsatz. In der Literatur gibt es nicht viele Informationen über Korrosionsschäden an Seilen bei Hänge- und Schrägseilbrücken, allerdings sind teils erhebliche Korrosionsschäden an Seilen vorhanden (Abb. 2.2)

Im Jahr 1988 wurde in der Zeitschrift Civil Engineering Abb. 1.2 der Artikel "Cables in trouble" veröffentlicht. Die Autoren kommen nach Begutachtung von mehr als der Hälfte der etwa 200 vorhandenen bedeutenden Schrägseilbrücken zu der Schlussfolgerung:

"Having inspected more than half of the world's cable stayed bridges, the authors say many are in danger of sudden collapse unless corrosion problems can be stopped." [15]

Die Autoren verweisen auf eine ganze Reihe von Schrägseilbrücken mit Korrosionsproblemen beim Spannstahl, u.a.:

- St. Nazaire-Brücke in der Nähe von Le Havre (Frankreich):
Es sind deutliche Anzeichen vorhanden, dass Spanndrähte rosten.
- Severin-Brücke in Köln: Korrosion im Bereich der Verankerung.
- Kurt Schumacher-Brücke (Nord-Brücke) in Mannheim: Die faserverstärkten Schutzrohre für die Schrägseile weisen viele Risse auf und es zeigen sich Rostspuren.

Schwachstellen bei vollverschlossenen Seilen (VVS) sind neben mangelhafter Beschichtungen auch Probleme mit der Abdichtung, unverfüllte Hohlräume, Wasserstoffversprödung der Spannstähle durch das galvanische Verzinken sowie Temperatureinwirkungen auf das plastische Füllgut beim Vergießen des Seilkopfes. Bei Litzenbündelseilen bzw. Paralleldrahtbündeln sind die Schwachstellen meist Hohlräume in den Hüllrohren, aber auch Materialeigenschaften der Hüllrohre sowie Probleme mit der Abdichtung, Risse im zementösen Füllgut und fehlende Langzeitbeständigkeit von verwendeten Klebebändern zur Abdichtung. Tab. 2.3 Materialien und ihre Eigenschaften

Im Gegensatz zu vollverschlossenen Seilen (VVS) bestehen Litzenbündelseile sowie Paralleldrahtbündel und externe Spannglieder neben dem Spannstahl in Form von Drähten bzw. Litzen zusätzlich aus einem Hüllrohr sowie dessen Verfüllung mit Korrosionsschutzfett bzw. -wachs. Die Hüllrohre werden in der Regel aus HDPE (High Density Poly-Ethylene) hergestellt. Ein Aspekt dieser Arbeit ist die Untersuchung von externen Spanngliedern im Bereich von Umlenkstellen (Abb. 2.1), weshalb hier zusätzlich auf Reibung und Verschleißmechanismen eingegangen wird.

2.2.2 Spannstahl

Das Spannungsdehnungsverhalten von Drahtseilen ist nichtlinear, wobei die Nichtlinearität bei Litzenseilen stärker ausgeprägt ist als bei Spiralseilen. In Abbildung 2.4 (links) ist das Verhalten eines hochfesten Drahts und eines Litzenseils dargestellt. Die Kurven resultieren aus dem unterschiedlichen Querschnittsaufbau der Seile. Bereits bei Erstbelastung stellt sich beim Litzenseil eine größere Dehnung als bei einem einzelnen Draht ein. Hierbei werden zunächst vorhandene Freiräume im Seil geschlossen. Dadurch kommt es zu einer Verfestigung des Seils und der Verformungsmodul nimmt zu. Des Weiteren resultiert eine bleibende Verformung (Verlängerung) des Seils, hervorgerufen durch Querpressungen der

Einzeldrähte und Querdehnungen, der sogenannte Seilreck. Ein stabiles Verhalten stellt sich erst nach mehreren Belastungszyklen ein. Die Anzahl hierfür benötigter Zyklen ist dabei abhängig vom Seilaufbau, der Herstellungsqualität und dem Anlieferungszustand Abb. 2.3 Nur für vorgereckte Seile kann die voraussichtliche Dehnung unter gegebener Last zuverlässig vorausgesagt werden Tab. 3.1. Aus diesem Grund werden – insbesondere im Brückenbau – die Seile vor der Montage vorgereckt. Dies erfolgt in der Regel mit einer über mehrere Stunden aufgetragenen Kraft, die gleich oder größer als die Gebrauchslast des Seils ist.

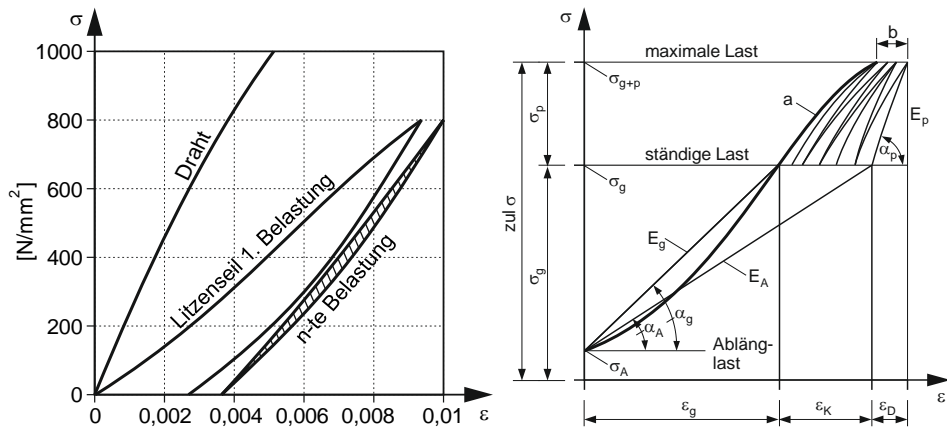


Abb. 2.4: Spannungs-Dehnungs-Verhalten – Draht und Litzenseil (links) vollverschlossenes Seil (rechts)

In Abbildung 2.4 (rechts) ist das Spannungs-Dehnungsverhalten für ein vollverschlossenes Seil bei erstmaliger Belastung (a) und bei wiederholter Be- und teilweiser Entlastung (b) dargestellt.

Der elastische Anteil der Seildehnung setzt sich aus der elastischen Dehnung der Drähte und der elastischen Querfederung der Drahtlagen zusammen. Die Nichtlinearität wird zusätzlich durch die sukzessive Aktivierung der Einzeldrähte bzw. Drahtlagen verstärkt, welche wiederum vom Verseilungsgrad abhängt.

Bei Seilen unter Dauerlast kommt es neben den elastischen und bleibenden Dehnungen zu Kriechverformungen. Kriechdehnungen führen zu einem ungewollten größeren Seildurchhang bzw. zu geringeren Seilspannungen. Die Dehnungen infolge Kriechen sind relativ gering, werden jedoch beim Ablängen der Seile des Seils berücksichtigt Tab. 2.2.

Nicht belastete Drahtseile weisen – wie bereits erläutert – ein nichtlineares Spannungsdehnungsverhalten auf. Auch Seile gleicher Herstellung und gleicher Größe können erst nach einer definierten Lastaufbringung miteinander verglichen werden Tab. 2.4. Deshalb ist der

Begriff Elastizitätsmodul, der eine Werkstoff- und keine Bauteilkonstante beschreibt, im Zusammenhang mit dem Dehnungsverhalten von Seilen nicht zutreffend, man spricht daher bei Seilen vom Verformungsmodul. Dieser wird in der Regel aus Versuchen ermittelt und ist u.a. abhängig vom Beanspruchungsniveau. Der Verformungsmodul wird nach einer ausreichenden Anzahl von Lastwechseln bestimmt. Falls keine Prüfergebnisse vorliegen, darf der Elastizitätsmodul nach DIN EN 1993-1-11 z.B. für Litzen mit $E_p = 195.000 \text{ N/mm}^2$ und für Stäbe und Drähte mit $E_p = 205.000 \text{ N/mm}^2$ als Schätzwert angesetzt werden. Bei der Bemessung ist der Temperaturendeckungskoeffizient $\alpha_T = 12 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ für Stahldrähte und für nichtrostende Stahldrähte $\alpha_T = 16 \cdot 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ anzusetzen.

2.2.3 High Density Polyethylene (HDPE)

Die bei externen Spanngliedern und seit einigen Jahren auch bei Schrägseilen eingesetzten Hüllrohre werden meist aus High Density Poly-Ethylene (HDPE) – im Deutschen als PE-HD (Polyethylen hoher Dichte) bezeichnet – hergestellt. Hierbei handelt es sich um einen teilkristallinen Thermoplast. Bei Thermoplasten sind die Kettenmoleküle unvernetzt, es bestehen also keine Hauptvalenzbindungen zwischen den Molekülen. Durch Wärmezufuhr wird die Beweglichkeit der Ketten gesteigert. In der Regel sind Thermoplaste löslich und schmelzbar und dadurch auch schweißbar. Im Gegensatz zu metallischen Werkstoffen haben Polymere ein stark ausgeprägtes viskoelastisches Deformationsverhalten. Dies wirkt sich auf das tribologische Verhalten von Polymer/Gegenstoff-Systemen aus. Bei einer Relativbewegung werden adhäsiv an den betreffenden Partner gebundene bzw. mechanisch verhakete Polymersegmente ausgelenkt. Zur Beschreibung des mechanischen Deformationsverhaltens der viskoelastischen Stoffe haben sich die rheologischen Modelle als geeignet erwiesen, da sie – bei geeigneter Einstellung der Federkonstante s (Hooke'sches Modell) und der Dämpferkonstante d (Newton'sches Modell) und Kombination der Parameter – die Realität sehr gut wiedergeben. Die rheologischen Modelle werden mit den Grundelementen Feder (elastisches Verhalten) und Dämpfer (viskoses Verhalten) beschrieben.

Aus den Versuchen wurden Stauchungsraten ermittelt, welche sich aus dem Verhältnis der Stauchungsdifferenz und dem Zeitschritt bilden lassen (2.1):

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\Delta\varepsilon}{\Delta t} \quad (2.1)$$

Für die ermittelten Stauchungsraten wird zur Glättung der Kurven folgender Ansatz verwendet (2.2):

$$\dot{\epsilon} = A \cdot t^{-n} \quad (2.2)$$

2.2.4 Korrosionsschutz

2.2.4.1 Externe Spannglieder

Der Korrosionsschutz besteht heutzutage bei externen Spanngliedern aus einem Korrosionsschutzsystem mit ein bzw. zwei Hüllrohren, welche mit Korrosionsschutzfett verfüllt sind. Im Laufe der Zeit wurden verschiedene Korrosionsschutzfette für den Einsatz bei externen Spanngliedern zugelassen. Beim Spannverfahren SUSPA-Draht EX zum Beispiel wurde 1998 bei der ersten Zulassung Tab. 2.4 lediglich Denso-Jet als Korrosionsschutzfett aufgeführt. Im Jahr 2003 wurde dies dann um Petro-Plast Abb. 2.1 und 2013 um Vaseline FC 284 Abb. 2.2 ergänzt. In einigen Zulassungen ist das Korrosionsschutzfett nicht genauer angegeben. Generell wird in den Zulassungen darauf verwiesen, dass die Korrosionsschutzmassen den beim DIBt hinterlegten Rezepturen entsprechen müssen.

Das Korrosionsschutzfett wird bei nahezu allen mit Fett verfüllten externen Spanngliedern sowie bei Litzenbündelseilen und Paralleldrahtbündeln bereits im Werk aufgebracht. Lediglich beim externen Spannverfahren BBV Typ E wird das HDPE-Rohr erst in der Brücke mit heißem Korrosionsschutzfett (Vaseline FC 284) verfüllt Tab. 3.1. Hierfür werden entlang des Hüllrohres – wie bei internen, im Verbund liegenden Spanngliedern – Entlüftungsöffnungen angebracht, damit die Luft entweichen kann und um sicherzustellen, dass das Hüllrohr über die gesamte Länge mit Fett verfüllt ist.

Als Material für die Hüllrohre wird heutzutage meist HDPE verwendet. Dies ist jedoch nicht unbedingt erforderlich, da sich die Angaben in den Zulassungen hierzu im Lauf der Zeit auch etwas geändert haben, wie z.B. beim Bandspannglied VT-CMMD (Zulassung Z-13.3-78). 2008 waren laut Zulassung noch zwei aufextrudierte HDPE-Hüllrohre erforderlich sechs Jahre später waren es nur noch PE-Hüllrohre und seit 2015 heißt es nur noch „im Werk aufgebrachtes Korrosionsschutzsystem mit Hüllrohren“.

Kapitel 3

Einfluss von Drahtbrüchen auf die Eigenfrequenz

In diesem Kapitel wird anhand von Versuchen geklärt, ob sich Drahtbrüche bei (Mono-)Litzen und vollverschlossenen Seilen rein visuell erkennen lassen und wie sie sich auf die Eigenfrequenzen auswirken. Bei einem bestehenden Bauwerk ist eine wiederkehrende Überprüfung des Zustandes und der Erhalt eines sicheren und zuverlässigen Betriebs Aufgabe der regelmäßigen Wartung und Instandhaltung (Tab. 3.1). Während bei Brücken die DIN 1076 die Abstände und Umfänge der einzelnen Prüfungen regelt, ist bei einer Windenergieanlage im Wartungshandbuch detailliert festgelegt.

Tab. 3.1: Beispiel möglicher Frequenzauflösungen [Hz] in Abhängigkeit der Blocklänge und der Abtastrate

Frequenzbereich (Hz)	Abtastrate (1/s)	Blocklänge					
		128	512	2048	8192	32768	131072
125	320	2,5	0,625	0,15625	0,03906	0,00977	0,00244
250	640	5,0	1,25	0,3125	0,07813	0,01953	0,00488
500	1280	10,0	2,5	0,625	0,15625	0,03906	0,00977
1000	2560	20,0	5,0	1,25	0,31250	0,07813	0,01953
2000	5120	40,0	10,0	2,5	0,6250	0,15625	0,03906
5000	12800	100,0	25,0	6,25	1,5625	0,39063	0,09766
10000	25600	200,0	50,0	12,5	3,125	0,78125	0,19531
20000	51200	400,0	100,0	25,0	6,25	1,56250	0,39063

3.1 Versuche mit Litzen

Bei Spannverfahren für externe Spannglieder sind neben Monolitzen auch nackte im Hüllrohr liegende Litzen zugelassen (Tab. 2.3). Aus diesem Grund wurden beide Typen untersucht.

3.1.1 Aufbau der Versuche

Die drei nackten Litzen bzw. drei Monolitzen gemäß Zulassung Z.3-113 mit einer Stahlgüte St1660/1860 haben eine Stahlquerschnittsfläche von 150 mm² und wurden im Versuchsaufbau eingebaut, vorgespannt und anschließend ein bzw. zwei Drahtbrüche pro Litze mittels Trennschleifer realisiert. Die freie Schwinglänge der Litzen zwischen den beiden Ankern betrug etwa 22,90 m. Das Aufbringen der Vorspannkraft erfolgte mittels Monolitzenpresse und die Verankerung wurde gemäß Zulassung mit dreiteiligen Keilen realisiert, welche sich in der Lochscheibe verankerten. Mittels Kraftmessdose wurde die Spannkraft in der jeweiligen Litze über den gesamten Versuch gemessen.

$$\varepsilon = \frac{P}{E \cdot A} \approx \frac{172}{195 \cdot 150} = 5880 \mu\text{m/m} \quad (3.1)$$

$$\Delta L = \frac{P}{E \cdot A} \cdot L \approx \frac{172}{195 \cdot 150} \cdot 22,9 = 0,135 \text{ m} \quad (3.2)$$

und bei den Versuchen 5 und 6:

$$\varepsilon = \frac{P}{E \cdot A} \approx \frac{45}{195 \cdot 150} = 1538 \mu\text{m/m} \quad (3.3)$$

$$\Delta L = \frac{P}{E \cdot A} \cdot L \approx \frac{45}{195 \cdot 150} \cdot 22,9 = 0,035 \text{ m} \quad (3.4)$$

Kapitel 4

Zusammenfassung und Ausblick

Neben Schrägseilen kommen im Brückenbau immer häufiger externe Spannglieder zum Einsatz, sowohl bei Neubauten als auch zur Verstärkung bestehender Brücken. Auch diese Bauteile müssen im Rahmen der Bauwerksprüfungen hinsichtlich Beschädigungen untersucht werden. Aufgetretene Schäden reichen von Querschnittsminderungen einzelner Drähte bis hin zum Komplettausfall einzelner Spannglieder sowie Seile.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden mehrere verfügbare Verfahren untersucht, mit denen Schäden an den externen Spanngliedern und Seilen detektiert werden können. Neben Verfahren zur Ermittlung der vorhandenen Spannkraft kamen auch Messgeräte zum Einsatz, mit denen die Größe sowie der Ort einzelner Schäden festgestellt werden können. Die unterschiedlichen Verfahren wurden an einem Testspannglied in der Versuchshalle sowie an zwei externen Spanngliedern zweier Brücken im Sauerland hinsichtlich Anwendbarkeit, Aussagefähigkeit und Zeitaufwand untersucht. Letzteres hat einen großen Einfluss auf die Kosten, welche bei einigen Verfahren in bzw. zum Teil weit über einem grenzwertigen Bereich liegen, da auch im Brückenbau, und hier insbesondere bei der Wartung und Unterhaltung, keine ausreichenden Mittel zur Verfügung stehen. Hinzu kommt, dass viele Verfahren nur einen Teilbereich eines Spannglieds / Seils überprüfen können, sodass mehrere Verfahren eingesetzt werden müssten, um alle Spannglieder / Seile über die gesamte Länge zu untersuchen. Auch ergibt sich durch das Öffnen von Ankerhaube oder Hüllrohr die Frage, wie der Korrosionsschutz wieder fachgerecht hergestellt werden kann.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1:	Seilverspannte Brücken, in Anlehnung an [128]	1
Abb. 1.5:	Video bietet eine leistungsstarke Möglichkeit zur Unterstützung Ihres Standpunkts. Wenn Sie auf "Onlinevideo" klicken, können Sie den Einbettungscode für das Video einfügen, das hinzugefügt werden soll. Sie können auch ein Stichwort eingeben, um online nach dem Videoclip zu suchen, der optimal zu Ihrem Dokument passt.	2
Abb. 2.5:	Externe Spannglieder in der Pfintalbrücke Nöttingen	4
Abb. 2.6:	Spanngliedverläufe bei extern vorgespannten Brücken	4
Abb. 2.8:	Zustand eines Spannglieds im Bereich des Endquerträgers, gerissenes Spannglied der Überführung in Guildford	8
Abb. 2.21:	Spannungs-Dehnungs-Verhalten – Draht und Litzenseil, vollver- schlossenes Seil	11
Abb. A-1:	Brücke Denkendorf, TBW 1	30
Abb. A-2:	Brücke Denkendorf, TBW 2	31

Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1: Externe Spannglieder in Deutschland [11] bis Tab. 2.3.....	5
Tab. 2.2: Zulassungen externer Spannglieder für den Einsatz in Wind- energieanlagen Tab. 2.4	6
Tab. 2.3: Temperaturabhängiger Kurzzeit-E-Modul von HDPE in N/mm ²	7
Tab. 2.4: Seildefinitionen Abb. 1.2	9
Tab. 3.1: Beispiel möglicher Frequenzauflösungen [Hz] in Abhängigkeit der Blocklänge und der Abtastrate	15

Literatur

Autoren

- [1] Ahlvers, U.: Nachrichtentechnik. HAW Hamburg, 2005.
- [2] Alvarez, M., Matt, P., Meyer, L., Vollmer, U.: Schrägseile und externe Spannglieder für den Brückenbau. Herausgeber: Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK), Bundesamt für Strassen, ASTRA 82015, 2011.
- [3] Andrä, W., Zellner, W.: Zugglieder aus Paralleldrahtbündeln und ihre Verankerung bei hoher Dauerschwellbelastung. In: Die Bautechnik, 08/1969.
- [4] Andrä, W., Zellner, W.: Zugglieder aus Paralleldrahtbündeln und ihre Verankerung bei hoher Dauerschwellbelastung. In: Die Bautechnik, 09/1969.
- [5] Avak, R., Glaser, R.: Spannbetonbau – Theorie, Praxis, Berechnungsbeispiele. 2. aktualisierte und erweiterte Auflage, Bauwerk Verlag, Berlin, 2007.
- [6] Bargel, H.-J., Schulze, G.: Werkstoffkunde. Springer Verlag, Berlin, 2008.
- [7] Baumann, T.: Vorspannung von Brücken – Anwendung interner und externer Spannglieder. Beton- und Stahlbetonbau, Heft 11, Ernst & Sohn Berlin, 2000.
- [8] Baur, E., Brinkmann, S., Osswald, T. A., Rudolph, N., Schmachtenberg, E.: Saechtling Kunststoff Taschenbuch. 31. Auflage, Carl Hanser Verlag, München, 2013.
- [9] BBV Vorspanntechnik GmbH: Bauwerksuntersuchung, Bauwerksinstandsetzung. Informationsmaterial, 2006.
- [10] Bestle, D.: Technische Mechanik III: Schwingungen und Hydromechanik. Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Lehrstuhl: Technische Mechanik und Fahrzeugtechnik, Senftenberg, Arbeitsunterlagen zur Vorlesung 2011.

Zulassungen

- [11] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Zulassung ETA-07/0168 (2007-12-20 bis 2012-12-19): Litzenspannverfahren, extern, für das Vorspannen von Tragwerken. BBR VT International Ltd, 2007.
- [12] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Zulassung ETA-07/0168 (2012-12-20 bis 2017-12-19): Litzenspannverfahren, extern, für das Vorspannen von Tragwerken. BBR VT International Ltd, 2012.
- [13] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Zulassung ETA-10/0006 (2010-03-25 bis 2015-03-25): Externes verbundloses Litzenspannverfahren VBT BE 1 bis 16. Vorspann- Brückentechnologie GmbH, 2010.
- [14] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Zulassung ETA-10/0006 (2013-06-24 bis 2015-03-25): Externes verbundloses Litzenspannverfahren VBT BE 1 bis 16. Vorspann- Brückentechnologie GmbH, 2013.
- [15] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Zulassung ETA-10/0006 (ab 2015-09-01): Externes verbundloses Litzenspannverfahren VBT BE 1 bis 16. Gleitbau Ges.m.b.H. VBT-Systems, 2015.

Anhang

Tab. A-1: Hersteller externer Spannglieder inkl. jeweiliger Zulassungsnummer, Teil I [11]

Nr.	Ausgabe- datum	Geltungs- dauer	Antragsteller / Ort	Bezeichnung Spannverfahren	Spannstahl
Z-13.1-66	24.05.1994	31.05.1999	Dyckerhoff & Widmann AG 81902 München	Litzenspannver- fahren DYWIDAG für externe Vorspannung	
Z-13.3-66	28.02.2003	31.07.2006	DYWIDAG-Systems International GmbH 85609 Aschheim	Litzenspannverfahren DYWIDAG Typ W für externe Vorspannung	
Z-13.1-78	05.07.1996	31.07.2001	Vorspann-Technik GmbH 40878 Ratingen	Litzenspannver- fahren VT-CMM D für externe Vorspannung	St 1570/1770
			Vorspann-Technik Ges.m.b.H. A-5028 Salzburg		
	13.08.2002	31.08.2007	Vorspann-Technik GmbH & Co. KG A-5110 Oberndorf		
Z-13.3-78	05.12.2003	31.08.2007	BBR VT International Ltd CH-8603 Schwerzenbach		
	20.03.2008	31.08.2010			
	16.08.2010	31.08.2011			
	01.09.2011	31.08.2012			
	01.09.2012	01.09.2017			
	14.07.2014	01.09.2017			
Z-13.1-85	29.01.1998	31.01.2003	SUSPA Spannbeton GmbH 40764 Langenfeld	Spannverfahren SUSPA-Draht EX für externe Vorspannung	St 1470/1670
	25.06.1998	31.01.2003			
	21.01.1999	31.01.2003			
Z-13.3-85	25.04.2003	31.10.2003	SUSPA-DSI GmbH 40764 Langenfeld		
	23.07.2003	31.01.2008			
	01.02.2008	31.01.2010			

Fortsetzung Tabelle A-1:

	01.02.2010	31.01.2013	Dywidag Systems International GmbH 85609 Aschheim		
	01.02.2013	31.01.2016	Dywidag Systems International GmbH 85716 Unterschleißheim		
	01.02.2016	01.02.2018	Dywidag Systems International GmbH 85716 Unterschleißheim		
Z-13.3-90	17.12.1998	31.07.2001	VT Vorspann-Technik GmbH 40878 Ratingen	Litzenspannverfahren VT-CMMD	
	16.08.1999	31.07.2001	VBF Ratingen GmbH 40878 Ratingen	Litzenspannverfahren VBF-CMMD	
	20.08.2001	31.01.2002			
	01.03.2002	31.07.2002			
	13.09.2002	31.07.2007	VBF GmbH 49494 Mettingen		
Z-13.3-97	09.12.1999	31.12.2004	Dyckerhoff & Widmann AG 81902 München	Litzenspannverfahren DYWIDAG Typ MC für externe Vorspan- nung	
	18.07.2001	31.12.2004			
Z-13.3-99	04.05.2000	04.05.2005	Bilfinger + Berger Vorspanntechnik GmbH 67240 Bobenheim- Roxheim	Externe Spannglieder B+B - Typ EMR	St 1570/1770
	26.06.2001	04.05.2005			
	28.02.2005	31.12.2009	BBV Vorspanntechnik GmbH 67240 Bobenheim- Roxheim		
	04.01.2010	31.12.2014	BBV-System GmbH 67240 Bobenheim- Roxheim	BBV Externes Spann- verfahren Typ EMR	
	01.01.2015	01.01.2020			

Tab. A-2: The Cable Table – Hersteller verschiedener Seiltypen

	BBR VT International	Bridon International	Dywidag-Systems International	Freyssinet International	Liuzhou OVM Machinery Group	Mekano 4	Pfeifer Seil- und Hebeteknik	Redaelli Tecna	Shanghai Pujiang Cable	Tensacciai	VSL International	Wireco World Group
AREA OF ACTIVITY												
North America	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
South America	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Europe	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Middle East	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Africa	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Asia	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Australasia	x	x	x	x			x	x	x	x	x	x
SUSPENSION BRIDGE CABLES												
galvanised wire for aerial spinning		x						x	x			x
galvanised factory fabricated parallel wire bundles	x			x	x				x		x	
galvanised locked coil cable assemblies	x	x		x	x		x	x	x			x
galvanised spiral strand cable assemblies		x	x	x	x		x	x	x		x	x
other suspension bridge main cables				2		3				5		6
SUSPENSION BRIDGE HANGERS												
plastic coated parallel wire strand	x		x		x				x		x	
prestressed galvanised locked coil cable assemblies		x		x	x		x	x	x			x
prestressed plastic coated locked coil cable assemblies		x			x		x	x	x			x
prestressed galvanised spiral strand cable assemblies	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	x
prestressed plastic coated spiral strand cable assemblies		x	x	x	x		x	x	x	x	x	x
prestressed galvanised structural 6-strand rope cable assemblies		x			x				x			x

Fortsetzung Tabelle A-2:

SITE FABRICATED STAY CABLES													
plastic coated parallel laid strand cables	x		x		x					x			
galvanised waxed and coated 15mm PC strand	x	x	x	x						x	x	x	
galvanised grased and coated 15mm PC strand	x	x	x							x	x	x	
ungalvanised 15mm PC strand	x	x	x	x	x					x	x	x	
epoxy coated strand	x		x							x			x
other site fabricated stay cables			1	2		3							
OTHER PRODUCTS AND SERVICES													
cable design service	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
cable installation service	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
hanger replacement service	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
cable damping systems	x		x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x

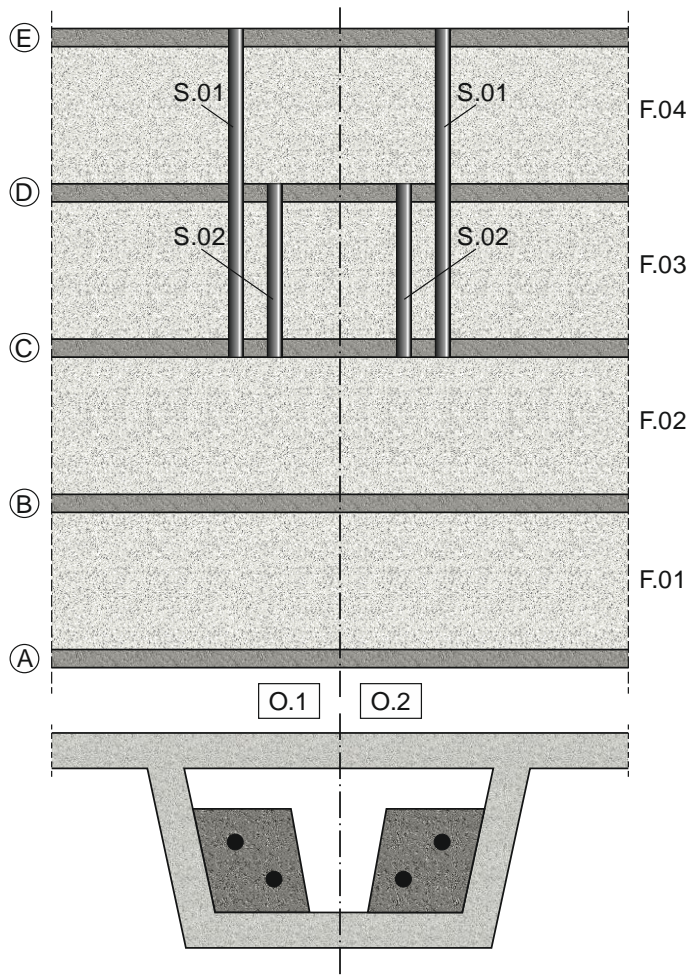


Abb. A-1: Brücke Denkendorf, TBW 1

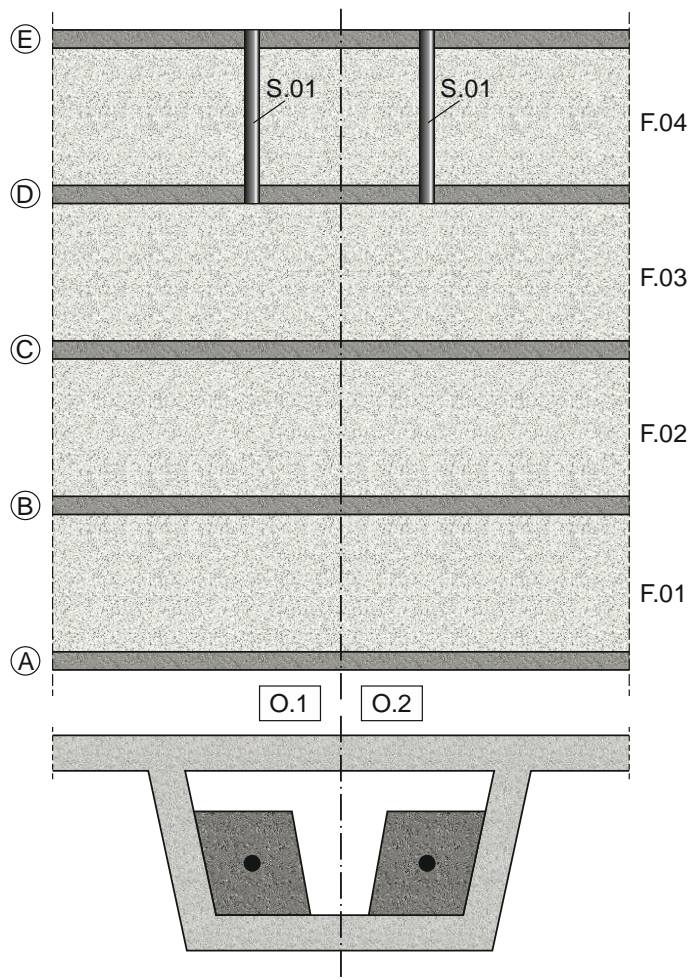


Abb. A-2: Brücke Denkendorf, TBW 2