

**Auswirkungen von zweiaxialer
Umlenkung auf die Ergebnisse
des Umlenkversuchs bei externen
Spanngliedern**

T 3118

T 3118

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

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

Im Originalmanuskript enthaltene Farbvorlagen, wie z.B. Farbfotos, können nur in Grautönen wiedergegeben werden. Liegen dem Fraunhofer IRB Verlag die Originalabbildungen vor, können gegen Berechnung Farbkopien angefertigt werden. Richten Sie Ihre Anfrage bitte an die untenstehende Adresse.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2006

ISBN-10: 3-8167-7184-X

ISBN-13: 978-3-8167-7184-5

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

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.IRBbuch.de



TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN
INSTITUT FÜR BAUSTOFFE UND KONSTRUKTION
LEHRSTUHL FÜR MASSIVBAU

Auswirkungen von zweiachsender Umlenkung auf die Ergebnisse des Umlenkversuchs bei externen Spanngliedern

Konrad Zilch und Hermann Weiher

Forschungsbericht

März 2006

gefördert durch das
Deutsche Institut für Bautechnik
P 32-5-7.216-1052/03

Technische Universität München
Lehrstuhl für Massivbau
Institut für Baustoffe und Konstruktion
Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E.h. K. Zilch

Briefanschrift:
80290 München

Hausanschrift:
Gebäude N6
Theresienstraße 90
80333 München

Tel.: +49 / 89 / 289 – 23039
Fax.: +49 / 89 / 289 – 23046
E-mail: massivbau@mb.bv.tum.de

Auswirkungen von zweiachsender Umlenkung auf die Ergebnisse des Umlenkversuchs bei externen Spannmitgliedern (P 32-5-7.216-1052/03)

Zusammenfassung

Im Gegensatz zu im Betonquerschnitt von Spannbetonbrücken angeordneten Spannmitgliedern können externe Spannmitglieder aus baupraktischen und wirtschaftlichen Gründen nicht kontinuierlich über die gesamte Bauwerkslänge umgelenkt werden. Vielmehr werden die Spannmitglieder an einigen wenigen Punkten auf relativ kurzer Strecke umgelenkt, an denen das Tragwerk und das Spannmitglied sehr hohen Anforderungen ausgesetzt sind. Beim Anspannvorgang wird durch die elastische Dehnung des Spannstahls das Spannmitglied in seiner Achse über den Umlenkpunkt gezogen. Bewegen sich Stahl und Schutzhülle dabei gemeinsam über den Umlenkpunkt, so spricht man von „Äußerer Gleitung“. Findet dagegen eine Relativbewegung zwischen den Litzen und der Ummantelung statt, so wird dies als „Innere Gleitung“ bezeichnet. Mit Umlenkversuchen in Anlehnung an die Richtlinie des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) wurde innerhalb des Forschungsvorhabens der Einfluss der Parameter Richtung der Umlenkung und besonders der Gleitverhältnisse auf die Funktionsfähigkeit des Korrosionsschutzes untersucht. Die insgesamt neun Versuche wurden mit drei Bandspannmitgliedsystemen (innere und äußere Schutzhülle aus HD-PE), die sich in Litzenform und Form der Schutzhülle unterscheiden, durchgeführt. Bei allen Versuchen wurde das Spannmitglied über einen Sattel mit konstantem Umlenkradius von 4 m gezogen. Für jeden Spannmitgliedtyp wurde je ein Versuch ohne Innere Gleitung, mit Innerer Gleitung und mit zusätzlicher horizontaler Umlenkung mit dem Radius 10 m ohne Innere Gleitung bei maximalen Temperaturen zwischen 22 °C und 25 °C durchgeführt. Die Anforderungen der „Richtlinie für die Eignungsprüfung von Spannverfahren für externe Vorspannung“ des DIBt an Versuchsaufbau und Versuchsablauf bei der "Prüfung mit großer Umlenkung" wurden berücksichtigt. Wichtigstes Kriterium für die Beurteilung der Dauerhaftigkeit der Schutzhüllen ist die minimale Restwandstärke. Einige signifikante Einflüsse auf die verbleibende Wandstärke waren deutlich erkennbar. Es zeigte sich, dass die Restwandstärke von folgenden Faktoren abhängt:

- Pressung auf die Korrosionsschutzhüllen
- Oberflächenform der Litze
- Verschiebung mit Innerer Gleitung (Relativbewegung zwischen Litze und Schutzhülle)
- Standzeit unter Last

Je größer die aufgebrachte Pressung desto geringer ist die gemessene Restwanddicke der Schutzhüllen. Allerdings ist diese Beziehung nicht linear. Bei sehr hohen Pressungen fällt die Restwandstärke rapide ab. Dabei zeigten die inneren Mäntel bei Verwendung der kompaktierten Litze erwartungsgemäß deutlich größere Restwandstärken. Die größere Aufstandsfläche der abgeflachten Außendrähte führte hier zu geringeren Spitzendruckspannungen zwischen Litzen und Schutzhülle. Für den Grad bzw. die Tiefe der Eindrückung in die innere Ummantelung ist somit zusätzlich zur Pressung die Oberflächenform der Litze zu berücksichtigen. Einen Einfluss auf die Restwandstärke der inneren Ummantelung hatte auch die Innere Gleitung. Die Wanddicke der inneren Ummantelung nahm hier deutlicher ab. Durch Reibung Stahl auf PE wurde Material des weicheren PE abgetragen und durch Kurzzeiteinspannungen traten höhere Pressungen auf. Da zwischen der inneren und der äußeren Ummantelung keine Verschiebung auftrat, spielte dieser Effekt für die äußere Ummantelung nur dann eine Rolle, wenn durch

Innere Gleitung extrem dünne Restwandstärken bei der inneren Ummantelung auftraten und die Lasteinleitung in den äußeren Mantel weniger flächig erfolgte. Der Lastfall Äußere Gleitung führte weder für die innere noch für die äußere Ummantelung zu einem mit dem Gleitweg korrelierenden Wandstärkeverlust. Im Anschluss an den Verschiebung verblieb das Spannglied noch 21 Tage unter Last im Versuchsstand. In dieser Zeit wurde der viskose Anteil der plastischen Verformung gemessen, der für den inneren Mantel bis zu 40 % der Gesamtverformung ausmachen kann. Bei der äußeren Ummantelung betrug der maximale Anteil 14 %. Die Messergebnisse zeigen, dass nach 21 Tagen keine nennenswerten Verformungen mehr zu erwarten sind. Drei Versuche wurden mit zweiachsialer Umlenkung durchgeführt. Die resultierenden horizontalen Pressungen waren bei einem Umlenkradius von 10 m relativ klein. Es konnte kein Einfluss auf die äußeren Schutzhüllen festgestellt werden. Die Ergebnisse der Wanddickemessung der inneren Schutzhülle waren nur bei Verwendung der kompaktierten Litze etwas ungünstiger als beim einachsialen Versuch. Bei keinem der Versuche wurde eine Ummantelung durch die Beanspruchungen vollständig durchtrennt.

Influence of biaxial deviation on the results of deviation tests of external tendons (P 32-5-7.216-1052/03)

Abstract

Because of economical reasons and difficulties in construction on site a continuous deviation is impossible for external tendons. The tendons either can be arranged horizontally without deviation or a deviation at a very short length at concrete deviators can be realized. The latter solution not only saves some steel but also has a course that fits better to the stress distribution in the bridge. At the deviators the sheathing of the steel is stressed perpendicular to its axis. When load is applied on site the elastic strain evokes a shortening of the tendon and the tendon moves over deviation points like concrete saddles. The movement of the tendon under high pressure wears the polyethylene sheathing. This is because of the higher hardness of steel compared to the hardness of high density polyethylene (HD-PE). Because of different states of friction that are able to appear on site it is possible, that the tendon is not moving completely en bloc. The polyethylene sheathing is during the loading of the tendon blocked because of high frictional forces whereas the strands move regularly. Testing has been done with full scale deviation to investigate the influence of the pressure under the strands, shape of the strands, duration of loading and especially friction between strands and polyethylene on the wearing of the PE-sheathing at deviation points. The maximum temperature has been between 22 °C and 25 °C. Some significant influences after exhibiting the testing on the remaining thickness of inner and outer sheathing could be detected. The results of the experimental investigation confirm that the loss in thickness is dependant on the following factors:

- pressure on the sheathings
- shape of the strand (outer radius of wire)
- relative movement between strands and sheathings (friction)
- duration of holding the load

At high values of pressure the thickness drops significantly because of plastic behaviour of the polyethylene. Although the pressure under the compacted strands is higher than the pressure under regular strands the inner sheathings are less worn. The systems differ in shape of the used strands. For system C the compacted strand with a higher outer radius of the outer wires is used.

The contact area between steel and polyethylene is bigger because of the larger outer radius of the wires. A larger contact area means at an equal pressure lower maximum stresses at the contact area. Another influence on the loss in thickness is the friction as a result of the relative movement between strand and inner sheathing. The longer the way of friction the higher is the abrasion of material and, therefore, the remaining thickness of the inner sheathing decreases. This effect does not appear between the inner and outer sheathing. No relative movement between the sheathings could be detected because of the strong bonding between them. According to the test set-up 21 days of loading without any movement were planned. During this time the viscous part of the plastic vertical deformation of the complete tendon with its four bands is measured at the deviation saddle. The measurement results show that the viscous deformation is complete and no more deformation is expected after 21 days. The viscous part of the total deformation is up to 40 % for the inner and up to 14 % for the outer sheathing. The additional horizontal deviation with a radius of 10 m does not lead to thinner sheathings with the exception of the system using compacted strands. In comparison with the uniaxial test the mean remaining thickness drops more pronounced. Nevertheless, the minimum remaining thickness is still higher than when using the regular strands. The sheathings never have been worn completely.

Influence de déviation biaxiale aux résultats du test de tendon extérieure dévié (P 32-5-7.216-1052/03)

Résumé

Les tendons extérieurs, contrairement aux tendons comprises dans la coupe du béton des ponts en béton précontraint, ne peuvent pas, pour des raisons techniques et économiques, être déviées sur la totalité de la longueur de l'ouvrage. Les tendons sont plutôt déviés sur une distance relativement courte où se trouvent quelques points de déviation. La structure portante et le toron exigent beaucoup de ces points-là. Pendant la mise en tension, le tendon est tiré et il passe par le point de déviation, perpendiculairement à son axe à cause de l'extension de l'acier précontraint. On parlera de glissement externe si l'acier et sa gaine de protection évoluent ensemble à l'endroit du point de déviation. Par contre, on parlera de glissement interne s'il y a un mouvement relatif entre le câble et son enveloppe protectrice. Grâce aux essais de déviation et d'après les directives du DIBt, dans le cadre du projet de recherche, des tests ont été réalisés concernant l'influence des paramètres de direction de la déviation et particulièrement de conditions de glissement, sur la capacité anti-corrosives. Au total, neuf tests ont été faits avec trois systèmes de toron avec gaines de protection internes et externes en polyéthylène haute densité (PEHD). Ces systèmes se différencient par la forme des torons et celle de la gaine. Lors de chaque test, le tendon a été tiré par un déviateur avec un radius constant de déviation de 4 m. Pour chaque sorte de toron, trois tests ont été réalisés par une température maximale de 22° à 25° : un sans glissement interne, une autre avec et une dernier avec une déviation horizontale supplémentaire d'un radius de 10m et sans glissement interne. On a pris en compte, lors de la vérification avec la grande déviation, les exigences de la directive pour la vérification de la capacité des mises en tension de la précontrainte externe de DIBt en ce qui concerne la préparation de l'expérience et la réalisation de cette dernière. L'épaisseur minimale restante représente le critère le plus important pour le jugement de la stabilité des gaines de protection.

Quelques influences significatives sur l'épaisseur restante sont clairement reconnaissables. Il en résulte un certain rapport entre l'épaisseur restante et les facteurs suivants:

- la pression sur les gaines de protection anti-corrosives
- le type de surface des torons
- le mouvement relatif entre les torons et les gaines de protection
- la durée de la charge (21 jours)

Plus la pression exercée est grande, plus l'épaisseur restante mesurée des gaines de protection diminue: Néanmoins ce rapport n'est pas linéaire. Lors de très fortes pressions, l'épaisseur restante diminue rapidement. Pendant l'utilisation des torons compactés, les enveloppes montrent clairement des épaisseurs restantes plus grandes malgré les fortes pressions de ces mêmes torons. L'assez grande surface de contact des fils aplatis du pourtour mène ici à une tension ponctuelle plus faibles entre les torons et la gaine de protection. Concernant le degré ou bien la profondeur d'empreinte dans l'enveloppe interne, il faut ainsi prendre en compte en plus de la pression, le type de surface des torons. Le glissement intérieur a également une influence sur l'épaisseur restante de l'enveloppe interne. L'épaisseur de l'enveloppe interne diminue considérablement. A cause du frottement de l'acier contre le polyéthylène (PE), le matériau du polyéthylène souple est enlevé. Cet effet de frottement n'apparaît pas entre l'enveloppe interne et externe étant donné qu'on n'observe aucun mouvement entre elles. Le frottement ne joue un rôle pour l'enveloppe externe que si, à cause du glissement interne, il en résulte des épaisseurs restantes extrêmement fines au niveau de l'enveloppe interne et si la charge occupe moins de surface sur l'enveloppe externe. Dans le cas d'un glissement externe, on ne perd aucune épaisseur de gaine, ni pour l'enveloppe interne, ni pour l'enveloppe externe. Suite au mouvement, le tendon reste encore sous tension de façon expérimentale pendant 21 jours. Pendant cette période, la partie visqueuse des déformations plastiques est mesurée. Cette dernière peut constituer jusqu'à 40% de la déformation totale de l'enveloppe interne et 14% de l'enveloppe externe. Les résultats de la mesure montrent, qu'après 21 jours, il n'y plus de déformations considérablement à attendre. Trois tests ont été réalisés avec une déviation biaxiale. Les pressions horizontales qui en résultent sont relativement faibles pour un radius de déviation de 10m. Aucune influence sur l'enveloppe externe n'a pas pu être constaté. Les résultats de la mesure de l'épaisseur de la gaine interne sont seulement un peu plus défavorables que lors d'un test uni-axial.

Inhaltsverzeichnis

<u>INHALTSVERZEICHNIS</u>	7
<u>ABBILDUNGSVERZEICHNIS</u>	9
<u>TABELLENVERZEICHNIS</u>	11
<u>1 EINLEITUNG</u>	13
<u>2 UMLENKUNG VON EXTERNEN SPANNGLIEDERN</u>	17
2.1 EXTERNE SPANNGLIEDSYSTEME	17
2.1.1 SPANNSTAHL IM HD-PE HÜLLROHR	17
2.1.2 SPANNSTAHL IN HD-PE BÄNDERN	18
2.2 BEANSPRUCHUNGSMECHANISMEN AN UMLENKSTELLEN	19
2.2.1 UMLENKPRESSUNG	19
2.2.2 UMLENKRICHTUNG	21
2.2.3 REIBUNGSVERHÄLTNISSE	22
2.2.4 ZEITABHÄNGIGES VERHALTEN	24
2.2.5 TEMPERATUREINFLUSS	24
2.3 ZULASSUNGSANFORDERUNGEN NACH DEN AKTUELLEN RICHTLINIEN	27
2.3.1 NATIONALE RICHTLINIE DES DIBT	27
2.3.2 EUROPÄISCHE RICHTLINIE ETAG 013	27
<u>3 BANDSPANNGLIEDER</u>	29
3.1 SYSTEME	29
3.2 LITZEN	30
3.3 KORROSIONSSCHUTZ HD-PE	31
<u>4 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN</u>	35
4.1 VERSUCHSAUFBAU	35
4.1.1 ANFORDERUNGEN NACH DIBT RICHTLINIE BZW. ETAG 013	35
4.1.2 ERZEUGUNG VON INNERER GLEITUNG	37
4.1.3 HORIZONTALE UMLENKUNG	37

4.1.4	EINBAU DER SPANNGLIEDER	39
4.2	VERSUCHSABLAUF	40
4.3	MESSUNGEN	42
4.4	VERSUCHSPROGRAMM	44
5	<u>ERGEBNISSE UND AUSWERTUNG</u>	45
5.1	PROZESS 1 UND 2 – ANSPANNVORGANG UND VERSCHUB	45
5.1.1	EINAXIALE VERSUCHE OHNE INNERE GLEITUNG - A	45
5.1.2	EINAXIALE VERSUCHE MIT INNERER GLEITUNG - B	46
5.1.3	ZWEIAXIALE VERSUCHE OHNE INNERE GLEITUNG – C	48
5.1.4	GLEITBEDINGUNGEN	49
5.2	PROZESS 3 – 21TÄGIGE STANDZEIT	52
5.2.1	SPANNGLIEDKRAFT	52
5.2.2	TEMPERATUR	53
5.2.3	ZEITABHÄNGIGE VERFORMUNGEN	54
5.3	RESTWANDSTÄRKE BZW. WANDSTÄRKEVERLUST	56
5.3.1	AUSGANGSWANDSTÄRKE	56
5.3.2	UMLENKPRESSUNG	58
5.3.3	REIBUNGSVERHÄLTNISSE	61
5.3.4	UMLENKRICHTUNG	68
5.3.5	ZEITABHÄNGIGES VERHALTEN	74
5.3.6	WERTUNG	75
6	<u>ZUSAMMENFASSUNG UND FAZIT</u>	77
7	<u>LITERATUR</u>	81
	<u>ANHANG</u>	83

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Bahnstabsbrücke in Aue/Sachsen (Neubau) [Quelle: ISP Scholz, München]	13
Abbildung 1.2: Hohlkastenquerschnitt mit verbundlosen internen und externen Spanngliedern [3]	14
Abbildung 1.3: Externe Bandspannglieder im Inneren eines Hohlkastens [Quelle: VT, Salzburg]	15
Abbildung 1.4: Umlenkstelle im Inneren eines Hohlkastens [Quelle: Schäfer, Ibbenbüren]	16
Abbildung 2.1: Spanngliedquerschnitt mit kaltgezogenen Drähten an einer Umlenkstelle	17
Abbildung 2.2: Spanngliedquerschnitt mit Monolitzen an einer Umlenkstelle	17
Abbildung 2.3: Spanngliedquerschnitt mit nackten Litzen an einer Umlenkstelle	18
Abbildung 2.4: Spanngliedquerschnitt mit nackten Litzen an einer Umlenkstelle mit Abstandhalter	18
Abbildung 2.5: Querschnitt eines Spannglieds mit Monolitzen im HD-PE Band	18
Abbildung 2.6: Querschnittsteile von äußerer und innerer Ummantelung	19
Abbildung 2.7: Eindrück- und Verschleißspuren von äußeren (links) und inneren Mänteln (rechts)	19
Abbildung 2.8: Längs- und Querschnitt eines extern vorgespannten Trägers (aus [7])	20
Abbildung 2.9: Wirkungsweise der Umlenkung von Zuggliedern mit konstantem Radius	20
Abbildung 2.10: Einfluss des Radius auf die Wanddicke bei Innenmänteln (Hegger [8])	21
Abbildung 2.11: Überziehweg-Spannungs-Diagramm (Beispiel)	22
Abbildung 2.12: Burgers-Modell	24
Abbildung 2.13: Temperaturmessung an einer Hohlkastenbrücke	25
Abbildung 2.14: Verstärkung an der Stegaußenseite (Quelle: SUSPA-DSI, Langenfeld)	26
Abbildung 3.1: Querschnitte des einzelnen Spanngliedbandes mit vier Litzen und doppelter PE-Ummantelung	29
Abbildung 3.2: Querschnitte eines externen Spanngliedes mit vier übereinander gestapelten Einzelbändern	29
Abbildung 3.3: Querschnitt einer Runddrahtlitze (links) und einer kompaktierten Litze (rechts)	30
Abbildung 3.4: Schematische Darstellung eines Extruders	31
Abbildung 4.1: Schematischer Aufbau eines Umlenkversuchs gemäß ETAG 013 ([6])	35
Abbildung 4.2: Schematischer Aufbau eines zwei axialen Umlenkversuchs (Längsschnitt und Grundriss)	36
Abbildung 4.3: Umlenksattel mit vertikalen Abhebepunkten	36
Abbildung 4.4: Stahlrost zum Abstreifen des Korrosionsschutzes bei erzwungener innerer Gleitung	37
Abbildung 4.5: Schmirgelgewebe „Löwenzunge“ vor (oben, Detail) und nach einem Versuch (unten)	38
Abbildung 4.6: Zwei axiale Umlenkung – Versuchsstand aus der Vogelperspektive	38
Abbildung 4.7: Ablaufschema beim Umlenkversuch	40
Abbildung 4.8: Messstellen in Längsrichtung nach dem Versuch	43
Abbildung 4.9: Restwandstärkemessung am Querschnitt: Äußerer und ein innerer HD-PE Mantel	43
Abbildung 4.10: Bügelmessschraube	44

Abbildung 5.1: Kraft-Weg-Diagramm A VT-CMM D	45
Abbildung 5.2: Kraft-Weg-Diagramm A VBF-CMM D	46
Abbildung 5.3: Extreme Schiefstellung des Spannglieds B VT-CMM D	47
Abbildung 5.4: Kraft-Weg-Diagramm B VT-CMM D	47
Abbildung 5.5: Position Spannglied nach dem Verschiebungsvorgang B VT-CMM D	48
Abbildung 5.6: Kraft-Weg-Diagramm C VT-CMM KD	49
Abbildung 5.7: Aufgestauchtes HD-PE B VT-CMM KD	50
Abbildung 5.8: Verlauf der Spanngliedkraft während der Standzeit A VBF-CMM D	53
Abbildung 5.9: Verlauf der Spanngliedkraft während der Standzeit C VT-CMM KD	55
Abbildung 5.10: Mittelwerte der Restwandstärken der äußeren (li.) und inneren Mäntel (re.) – Versuche A	59
Abbildung 5.11: Mittelwerte der Restwandstärken der äußeren (li.) und inneren Mäntel (re.) – Versuche B	60
Abbildung 5.12: Mittelwerte der Restwandstärken der äußeren (li.) und inneren Mäntel (re.) – Versuche C	60
Abbildung 5.13: Mittelwerte der Wandstärkeverluste des äußeren Mantels P4 (bezogen auf 80 mm)	61
Abbildung 5.14: Mittelwerte der Wandstärkeverluste des inneren Mantels P4 (bezogen auf 80 mm)	62
Abbildung 5.15: Mittelwerte der Wandstärkeverluste des äußeren Mantels P4 (bezogen auf 280 mm)	63
Abbildung 5.16: Mittelwerte der Wandstärkeverluste des inneren Mantels P4 (bezogen auf 280 mm)	64
Abbildung 5.17: Mittelwerte der Wandstärkeverluste der inneren Mäntel VT-CMM D	65
Abbildung 5.18: Mittelwerte der Wandstärkeverluste der äußeren Mäntel VT-CMM D	65
Abbildung 5.19: Mittelwerte der Wandstärkeverluste der inneren Mäntel VBF-CMM D	66
Abbildung 5.20: Mittelwerte der Wandstärkeverluste der äußeren Mäntel VBF-CMM D	66
Abbildung 5.21: Mittelwerte der Wandstärkeverluste der inneren Mäntel VT-CMM KD	67
Abbildung 5.22: Mittelwerte der Wandstärkeverluste der äußeren Mäntel VT-CMM KD	67
Abbildung 5.23: Druck zwischen einzelnen Litzen bei horizontaler Umlenkung (Variante A)	68
Abbildung 5.24: Übertragung der Horizontalpressung über Verzahnung und Reibung (Variante B)	70
Abbildung 5.25: Änderung innere Seitenwandstärke – Pressung - Diagramm C VT-CMM D (R, 21 – 25)	72
Abbildung 5.26: Änderung innere Seitenwandstärke – Pressung - Diagramm C VBF-CMM D (R, 21 – 25)	72
Abbildung 5.27: Änderung innere Seitenwandstärke – Pressung - Diagramm C VT-CMM KD (R, 21 – 25)	72
Abbildung 5.28: Mittlerer zeitabhängiger Wandstärkeverlust der äußeren (li.) und inneren Mäntel (re.) – A	74
Abbildung 5.29: Mittlerer zeitabhängiger Wandstärkeverlust der äußeren (li.) und inneren Mäntel (re.) – B	75
Abbildung 5.30: Mittlerer zeitabhängiger Wandstärkeverlust der äußeren (li.) und inneren Mäntel (re.) – C	75

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Litzeneigenschaften gemäß Zulassung ([11], [12], [13])	30
Tabelle 3.2: Geprüfte Litzeneigenschaften (u.a.)	30
Tabelle 3.3: Eigenschaften der Korrosionsschutzummantelungen gemäß Zulassung ([11], [12], [13])	31
Tabelle 3.4: Eigenschaften HD-PE (u.a. [8], [14])	32
Tabelle 3.5: Durchlässigkeitswerte von HD-PE bei Beaufschlagung mit Flüssigkeiten ([15])	33
Tabelle 3.6: Durchlässigkeitswerte von HD-PE bei Beaufschlagung mit Gasen ([15])	34
Tabelle 4.1: Spanngliedkräfte während des Versuchs	41
Tabelle 4.2: Messprogramm	42
Tabelle 4.3: Versuchsprogramm	44
Tabelle 5.1: Bei den Versuchen realisierte Gleitbedingungen	49
Tabelle 5.2: Zeitlicher Verlauf der Spanngliedkraft während der Standzeit	52
Tabelle 5.3: Mittlere Spanngliedkraft bei einer Standzeit von $T = 21$ d	53
Tabelle 5.4: Temperaturbelastung während der Standzeit	54
Tabelle 5.5: Zeitlicher Verlauf der vertikalen Verformung am Gesamtspannglied während der Standzeit	54
Tabelle 5.6: Einstufung der Umlenkpressungen in Klassen	56
Tabelle 5.7: Ausgangswandstärken der äußeren Ummantelung (Mittelwerte)	57
Tabelle 5.8: Ausgangswandstärken der inneren Ummantelung (Mittelwerte)	57
Tabelle 5.9: Resultierende Pressungen bei der zwei axialen Umlenkung nach Variante B bei 70% F_{pk}	70

1 Einleitung

Spannverfahren für externe Vorspannung werden in Deutschland seit den neunziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts beim Bau von in Ortbetonbauweise erstellten vorgespannten Hohlkastenbrücken sehr häufig eingesetzt. Mit der Richtlinie für Betonbrücken mit externen Spanngliedern (ARS 28, 1998, [1]) bzw. dem späteren DIN Fachbericht 102 [2] wurde die Bauweise in Deutschland als Regelbauweise eingeführt. Dabei dürfen in den Stegen keine Spannglieder mehr angeordnet werden.

Dischinger hatte aber bereits 1934 ein Patent für ein externes Spannverfahren angemeldet und 1937 wurde schließlich die erste Spannbetonbrücke in Aue (Sachsen) mit einer maximalen Spannweite von 69 m mit diesem Verfahren fertig gestellt. Als externe Spannglieder dienen Rundstahlstäbe der Güte St 52. Aufgrund der geringen Festigkeit und des daraus resultierenden Spannungsverlusts durch Betonverkürzung aus Kriechen und Schwinden mussten die Spannglieder mehrmals nachgespannt werden. Infolge mangelhafter Bauwerkserhaltung wurde die Brücke 1996 originalgetreu ersetzt. Das äußere Erscheinungsbild entspricht dem von Dischinger geplanten Vorgängerbauwerk (siehe Abbildung 1.1).



Abbildung 1.1: Bahnhofsbrücke in Aue/Sachsen (Neubau) [Quelle: ISP Scholz, München]

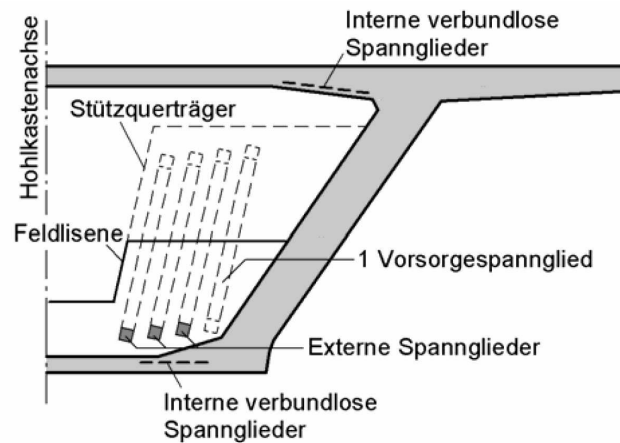


Abbildung 1.2: Hohlkastenquerschnitt mit verbundlosen internen und externen Spanngliedern [3]

Beim Neubau von Brücken wird die externe Vorspannung entweder mit einem Anteil an der gesamten Längsvorspannung von 100% (rein externe Vorspannung) oder mit einem geringeren Anteil (Mischbauweise) eingesetzt. Bei der Mischbauweise wird ein Teil der Vorspannung durch ausschließlich in der Platte geführte interne Spannglieder mit oder ohne Verbund aufgebracht (siehe Abbildung 1.2). Darüber hinaus können externe Spannglieder bei der Ertüchtigung bzw. durch Verstärken von Brückenbauwerken effizient eingesetzt werden. Abbildung 1.3 zeigt das Innere eines Hohlkastens mit externen Bandspanngliedern.

Die Verwendung externer Spannglieder hat im Vergleich zu intern angeordneten Spanngliedern folgende Vorteile:

- hohe Verarbeitungsqualität der Komponenten durch Fertigung im Werk
- Kontrollmöglichkeit der Verarbeitungsqualität
- Inspizierbarkeit der Spannglieder bei Bauwerksprüfungen
- Nachspannbarkeit (sofern die Hüllen nicht mit Zement verpresst werden)
- Austauschbarkeit
- Bemessung als Stahlbetonbauteil möglich

Aufgrund der Anordnung der externen Spannglieder außerhalb des Betonquerschnitts im Hohlkasten ergeben sich neben den gewichtigen Vorteilen auch einige Einschränkungen. Durch die Führung außerhalb des Betonquerschnitts erzielt man bei gleicher Überbauhöhe geringere statische Hebelarme als bei internen Spannverfahren.

Des Weiteren können die externen Spannglieder aus baupraktischen und wirtschaftlichen Gründen nicht kontinuierlich über die gesamte Brückenlänge umgelenkt werden. Es sind einige wenige Punkte anzuordnen (z.B. im Stützbereich), an denen die Spannglieder auf relativ kurzer Strecke umgelenkt werden. Diese so genannten Umlenkstellen stellen durch die konzentrierte Einleitung der Umlenkkraft in das Tragwerk sehr hohe Anforderungen sowohl an das Tragwerk als auch an das Spannglied.



Abbildung 1.3: Externe Bandspannglieder im Inneren eines Hohlkastens [Quelle: VT, Salzburg]

Dabei treten die kritischsten Beanspruchungen für den Korrosionsschutz des externen Spannglieds beim Anspannvorgang auf. Durch die Umlenkraft werden die Litzen auf das Polyethylen gepresst. Zusätzlich zu der vertikalen Pressung wird das Spannglied durch die elastische Dehnung des Stahls beim Spannen über die Umlenkstelle gezogen. Dieser Effekt fällt vor allem bei sehr langen Spanngliedern an den Umlenkstellen ins Gewicht, die nah am Spannanker liegen. Bei diesem Vorgang wird die Polyethylen-Schutzhülle (Korrosionsschutz aus PE) durch Reibung stark beansprucht. Aufgrund dieses Schädigungspotentials führte das Deutsche Institut für Bautechnik, Berlin, im Jahr 1999 die „Richtlinie für die Eignungsprüfung von Spannverfahren für externe Vorspannung“ ein, die die Zulassungsgrundlage in Deutschland für externe Spannglieder darstellt ([4], [5]).

Gemäß dieser nationalen Richtlinie und auch nach der europäischen Richtlinie ETAG 013 [6] ist die Funktionstüchtigkeit des Korrosionsschutzes externer Spannglieder in einem einaxialen Umlenkversuch mit einem Gesamtumlenkwinkel von mindestens 14° nachzuweisen. Bei diesem Versuch ist das Spannglied bei einer Stahlspannung von 70 % seiner Nennfestigkeit um mindestens 800 mm über den Umlenksattel zu ziehen. Der Umlenksattel ist mit einem konstanten Radius gekrümmt. Im Anschluss folgt zur Überprüfung der Funktionstüchtigkeit eine 21tägige Standzeit unter dieser Last, wodurch Langzeiteinflüsse simuliert werden sollen. Um den Nachweis der Dauerhaftigkeit zu erbringen, haben die Korrosionsschutzhüllen dabei gewisse Kriterien hinsichtlich ihrer verbleibenden Wanddicken nach dem Versuch zu erfüllen.

Bei rotationssymmetrischen externen Spanngliedern simuliert dieser Versuchsaufbau die gegebenen Verhältnisse und die mechanischen Beanspruchungen im Bauwerk für alle geometrischen Spanngliedführungen recht zutreffend. Bei den rechteckigen Bandspanngliedern können sich an den Umlenkstellen aber zwei Umlenkungen in zueinander senkrecht stehenden Richtungen ergeben – also eine zweiachsigle Umlenkung. Dabei werden die Litzen auch seitlich gegen die Schutzhüllen gepresst. Innerhalb dieses Forschungsvorhabens wird der Einfluss der Umlenkung in eine zweite Richtung auf die Funktionsfähigkeit des Korrosionsschutzes von Bandspanngliedern untersucht. Hierfür werden sowohl einaxiale als auch zweiachsigle Umlenkversuche an unterschiedlichen Spanngliedertypen durchgeführt.



Abbildung 1.4: Umlenkstelle im Inneren eines Hohlkastens [Quelle: Schäfer, Ibbenbüren]

Bei der Verwendung von Umlenkkörpern, an denen die Spannglieder über Oberflächen mit relativ geringen Reibungsbeiwerten gezogen werden, ist der Anteil an innerer Gleitung sehr gering. Allerdings ist bisher unbekannt, welchen Anteil die Beanspruchung aufgrund der Relativbewegung zwischen Litzen und Ummantelung am Gesamtverschleiß hat. Aus diesem Grund werden zusätzlich zu den Versuchen mit natürlichem Anteil an innerer Gleitung auch Umlenkversuche durchgeführt, bei denen bewusst ein hoher Anteil an innerer Gleitung erzwungen wird. Das Auftreten von Innerer Gleitung ist auch möglich, wenn die Litzen nicht zusammen sondern nacheinander angespannt werden. Die bereits angespannten Litzen pressen dabei die Schutzhüllen an den Umlenkstellen fest, so dass die verbleibenden noch anzuspinnenden Litzen diese nicht mehr mitbewegen können. Die experimentelle Untersuchung wird mit drei Spanngliedtypen der österreichischen Hersteller VBT GmbH, Thalgau (im folgenden VBT genannt) und Vorspann-Technik GmbH&Co.KG, Salzburg (im folgenden VT genannt) durchgeführt.

2 Umlenkung von externen Spanngliedern

2.1 Externe Spanngliedssysteme

Aktuell zugelassene Systeme für Vorspannung mit externen Spanngliedern sehen die Führung der einzelnen Zugglieder in einem kreisrunden Polyethylen Hüllrohr oder in einem stapelbaren Band vor.

2.1.1 Spannstahl im HD-PE Hüllrohr

Kaltgezogene Drähte:

Kaltgezogenen Einzeldrähte mit einem Durchmesser von 7 mm stellen die Zugglieder im Spanngliedssystem nach Abbildung 2.1 dar. Sie sind lose in einem HD-PE Hüllrohr angeordnet. Das Hüllrohr wird mit einer Korrosionsschutzmasse verfüllt (siehe Abbildung 2.1).

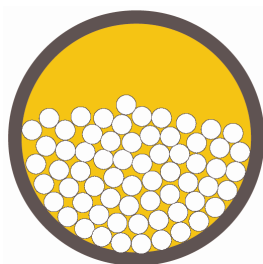


Abbildung 2.1: Spanngliedquerschnitt mit kaltgezogenen Drähten an einer Umlenkstelle

Monolitzen:

Alternativ können handelsübliche Monolitzen, die bereits durch Korrosionsschutzmasse und eigene Polyethylenummantelung gegen äußere Einwirkungen geschützt sind, in einem HD-PE Hüllrohr angeordnet werden. Ein weiteres Verfüllen des Rohrs mit Korrosionsschutzmasse erfolgt nicht (siehe Abbildung 2.2).

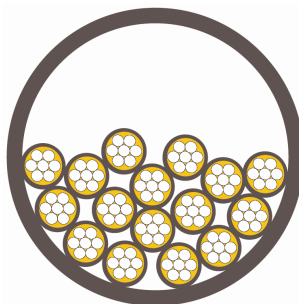


Abbildung 2.2: Spanngliedquerschnitt mit Monolitzen an einer Umlenkstelle

Nackte Litzen

Spannstahllitzen werden lose in einem HD-PE Rohr geführt. Das Rohr wird mit einer Korrosionsschutzmasse verfüllt (Abbildung 2.3). An der Umlenkstelle ist die Anordnung von Abstandhaltern möglich, so dass sich die Litzen dort gleichmäßig im Querschnitt verteilen (siehe Abbildung 2.4).

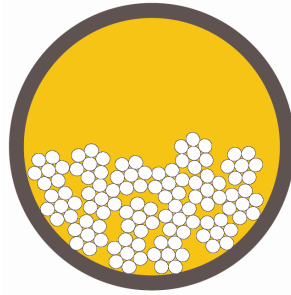


Abbildung 2.3: Spanngliedquerschnitt mit nackten Litzen an einer Umlenkstelle

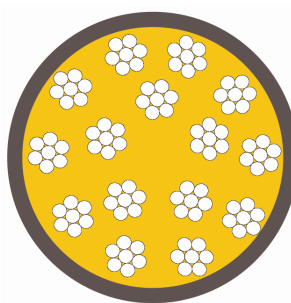


Abbildung 2.4: Spanngliedquerschnitt mit nackten Litzen an einer Umlenkstelle mit Abstandhalter

2.1.2 Spannstahl in HD-PE Bändern

Zwei Hersteller bieten externe Spannglieder in Bandform an. Bis zu vier einzeln mit Korrosionsschutzmasse und HD-PE Mantel geschützte Litzen werden durch eine äußere Ummantelung zu einem stapelbarem Band zusammengefasst (siehe Abbildung 2.5). Die Spannglieder werden vollständig im Herstellwerk gefertigt und können auf der Baustelle schnell und einfach installiert werden. Bandspannglieder sind Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit und werden in Kapitel 3 ausführlich dargestellt.

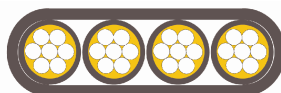


Abbildung 2.5: Querschnitt eines Spannglieds mit Monolitzen im HD-PE Band

2.2 Beanspruchungsmechanismen an Umlenkstellen

Die HD-PE Korrosionsschutzummantelungen von Spanngliedern werden an Umlenkstellen stark beansprucht. Dabei kommt es zu Verformungen des HD-PE an den Auflagestellen des Spannstahls. Abbildung 2.6 zeigt den Querschnitt von Teilen der HD-PE Ummantelungen eines Bandspannglieds nach einem Umlenkversuch (siehe hierzu auch Abbildung 2.7). Die Verringerung der Wandstärke ist auf mehrere Einflüsse zurückzuführen, die im Folgenden erläutert werden.



Abbildung 2.6: Querschnittsteile von äußerer und innerer Ummantelung

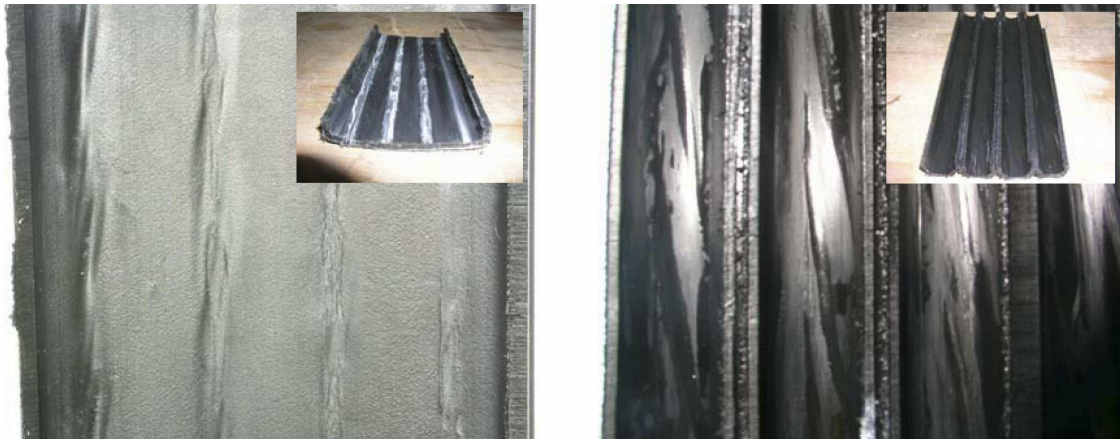


Abbildung 2.7: Eindrück- und Verschleißspuren von äußeren (links) und inneren Mänteln (rechts)

2.2.1 Umlenkpressung

Externe Spannglieder werden in der Regel zum Ziele einer Anpassung des geometrischen Spanngliedverlaufs an die statischen Gegebenheiten an einzelnen Punkten umgelenkt. Üblicherweise befinden sich diese Umlenkstellen in Querträgern im Stützbereich von Durchlaufträgersystemen im Kasten oben liegend und im Feldbereich unten liegend. Die zeichnerische Darstellung eines Einfeldträgers mit Plattenbalkenquerschnitt in Abbildung 2.8 veranschaulicht die Wirkung der Vorspannung mit einer Umlenkung in Feldmitte. Durch das Anspannen des Spannglieds wird die Umlenkraft U_p in den Querträger eingeleitet. Der Träger wölbt sich unter dieser Einwirkung (entspricht einer Einzellast).

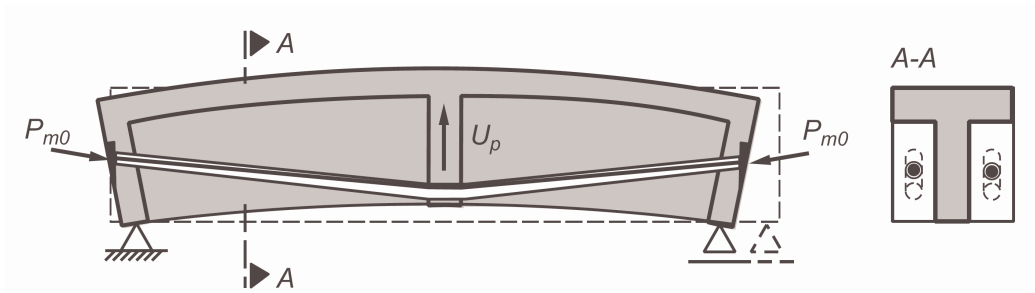


Abbildung 2.8: Längs- und Querschnitt eines extern vorgespannten Trägers (aus [7])

Die Umlenkung um einen geometrischen Punkt wäre gleichbedeutend mit einer konzentrierten Lasteinleitung der Umlenkkraft vom Spannglied in das Tragwerk. Dies stellt nicht nur sehr hohe Anforderungen an die Konstruktion des Querträgers sondern führt zu einer punktuellen Beanspruchung der Schutzhüllen des Spannglieds, die gewöhnlich aus HD-PE bestehen – einem im Vergleich zu Stahl weichen Material. Die Spannglieder werden an Umlenkestellen aus diesem Grund über eine bestimmte Länge mit einer konstanten Radius umgelenkt (siehe Abbildung 2.9). Die Einzelumlenkkraft U_p wird über die Strecke s mit einer Gleichlast von

$$u_p = \frac{U_p}{s} \quad (\text{Gleichung 2.1})$$

bzw. auf den Radius R der Umlenkung und die Vorspannkraft P bezogen von

$$u_p = \frac{P}{R} \quad (\text{Gleichung 2.2})$$

in das Tragwerk eingeleitet. Der Spannstahl drückt sich dabei mit der Pressung u_p in die am Umlenksattel direkt aufliegende Korrosionsschutzhülle ein. Bei gestapelten, gespannten Bändern werden die äußeren Bänder an die innenliegenden gedrückt. Die innen anliegende Seite der Korrosionsschutzmäntel jedes einzelnen Bandes wird mit der Umlenkkpressung

$$u_p = \frac{P_{\text{Einzelband}} \cdot n}{R} \quad (\text{Gleichung 2.3})$$

belastet, wobei n die Anzahl der außerhalb (im Falle von Abbildung 2.9 wäre „außerhalb“ gleich „oberhalb“) der betreffenden Schutzhülle liegenden Litzen ist. Beispielsweise liegen über der Unterseite des unteren Bandes in vertikaler Richtung insgesamt vier Litzen ($n = 4$).

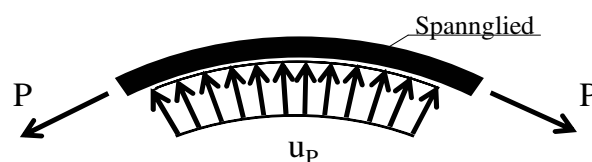


Abbildung 2.9: Wirkungsweise der Umlenkung von Zuggliedern mit konstantem Radius

Hegger et. al. untersuchten 2001 die mechanische Beanspruchung der Korrosionsschutzhüllen von externen Spanngliedern mit einer Kleinmodellversuchsanlage ([8], [10]). Hier wird die

Umlenkpressung nicht direkt über den Spannstahl sondern mit einer Lasteinleitungsplatte auf den Spannstahl und schließlich auf die HD-PE Hüllen aufgebracht. Damit ist zumindest eine erste Untersuchung einer Vielzahl von Einflussfaktoren möglich. Hegger stellt eine „leicht überproportionale Abnahme der Restwandstärke bei Verringerung des Umlenkradius“ fest. Tatsächlich verläuft die Regressionskurve annähernd linear (siehe Abbildung 2.10). Die Kurve ist durch drei Punkte (bzw. Radien) definiert, an denen die Restwandstärken streuen. Wie obige Gleichungen zeigen, verhält sich die Umlenkpressung u_p reziprok zum Umlenkradius R . Würde man also die Restwandstärken über die Umlenkpressung auftragen, so wäre die erzeugte Kurve und somit das Eindruckverhalten von Stahl in HD-PE deutlich nichtlinear. Ferner ist zu beachten, dass die Angabe der Restwandstärke in Abhängigkeit vom Radius nur genau für den verwendeten Spanngliedtyp eindeutig ist. Die Umlenkung um noch engere Radien kann sehr wohl auch hohe Restwandstärken zulassen. Bei Bandspanngliedern beispielsweise kann dies durch das Stapeln von weniger Bändern übereinander erfolgen (siehe Gleichung 2.3). Die Art der Darstellung ist deshalb etwas ungeschickt gewählt. Im vorliegenden Vorhaben wird die Restwandstärke stets auf die Umlenkpressung u_p bezogen.

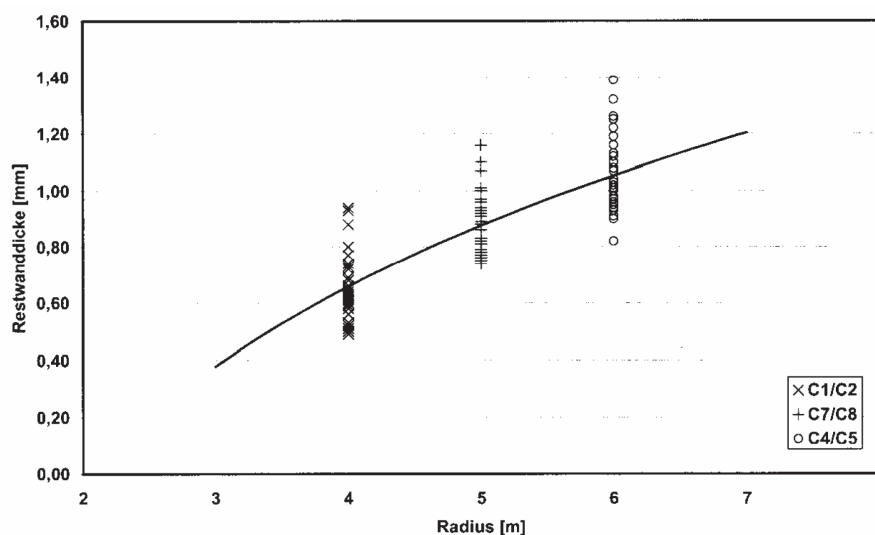


Abbildung 2.10: Einfluss des Radius auf die Wanddicke bei Innenmänteln (Hegger [8])

2.2.2 Umlenkrichtung

Bei der zweiachsialen Umlenkung werden Spannglieder zusätzlich zur vertikalen Umlenkung auch horizontal um einen bestimmten Radius umgelenkt, der im Allgemeinen deutlich größer ist. Bei rotationssymmetrischen Spanngliedern (HD-PE Hüllrohr) ergibt sich für den Gesamtumlenkradius im Raum R_{Gesamt} die Beziehung:

$$\frac{1}{R_{\text{Gesamt}}^2} = \frac{1}{R_{\text{Vertikal}}^2} + \frac{1}{R_{\text{Horizontal}}^2} \quad (\text{Gleichung 2.4})$$

bzw.:

$$R_{\text{Gesamt}} = \left(\frac{1}{R_{\text{Vertikal}}^2} + \frac{1}{R_{\text{Horizontal}}^2} \right)^{-1/2} = \sqrt{\frac{R_{\text{Vertikal}}^2 \cdot R_{\text{Horizontal}}^2}{R_{\text{Vertikal}}^2 + R_{\text{Horizontal}}^2}} \quad (\text{Gleichung 2.5})$$

ein. Die Beanspruchungen des Hüllrohrs durch die Umlenkpressung u_p entsprechen einer vertikalen Umlenkung um R_{Gesamt} . Eine gesonderte Untersuchung des Lastfalls „Zweiachsigale Umlenkung“ ist also nicht erforderlich. Voraussetzung hierfür ist allerdings, dass die Umlenkung im Raum durch die richtige Anordnung der Aussparungen in den Umlenkkörpern planmäßig erfolgt (z.B. mit einer rotationssymmetrischen „Trompete“).

Bandspannglieder können ebenfalls bei entsprechender Ausbildung der Umlenkstelle im Raum mit R_{Gesamt} umgelenkt werden. Durch die eckige Querschnittsform setzt dies einen sehr exakten Einbau des Umlenkformteils voraus. Dabei können sich die Spannglieder auf der freien Länge verdrillen. Bei den großen Abständen der Umlenkstellen zueinander bei gleichzeitig geringem Verdrehungswinkel stellt diese Verdrillung eine vernachlässigbar kleine Beanspruchung dar.

Möchte man Bandspannglieder sowohl vertikal als auch horizontal umlenken ohne dabei das Umlenkformteil geneigt in die Umlenkstelle einbauen zu müssen sondern aus Gründen eines deutlich vereinfachten Bauablaufs gerade, so liegt das Spannglied an der Umlenkstelle sowohl an seiner Unterseite als auch an einer Seite mit einer entsprechenden Umlenkpressung an.

2.2.3 Reibungsverhältnisse

Beim Anspannvorgang wird durch die elastische Dehnung des Spannstahls das Spannglied in Längsrichtung über den Umlenkpunkt gezogen. Dabei tritt der größte Überzugweg an derjenigen Umlenkstelle auf, die am weitesten vom Festanker entfernt liegt.

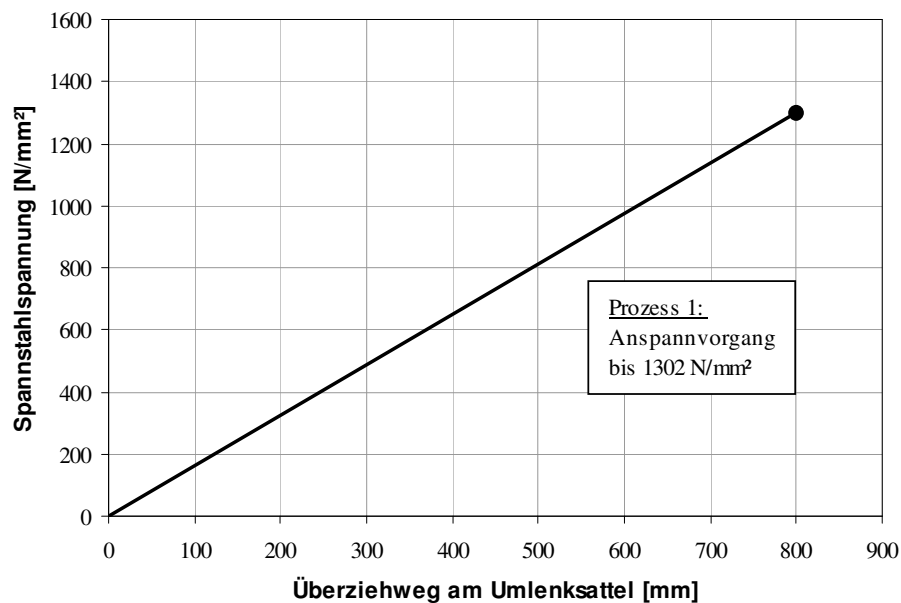


Abbildung 2.11: Überziehweg-Spannungs-Diagramm (Beispiel)

Beispiel: Beim Anspannen eines Spannglieds mit dem E-Modul 195000 N/mm^2 bis auf eine Spannstahlspannung von 70% einer Nennfestigkeit von 1860 N/mm^2 tritt an einer etwa 120 m vom Festanker entfernten Umlenkstelle ein Überziehweg von 80 cm auf.

Das Überziehweg-Spannungs-Diagramm in Abbildung 2.11 zeigt den linearen Anstieg der Spannstahlspannung im Bauwerk unter den Voraussetzungen des vorliegenden Beispiels. Die maximale Umlenkpressung bei der maximalen Stahlspannung wird also erst am Ende des Überziehwegs erreicht.

Das Überziehen von Spannlidern bei hoher Umlenkpressung erzeugt an der Umlenkstelle Reibbeanspruchungen des äußeren und teilweise auch des inneren Polyethylenmantels. Dabei kann zwischen „Äußerer-“, „Innerer-“ und „Gemischter Gleitung“ unterschieden werden.

Definition - Äußere Gleitung:

Zwischen den Spannstahlritzen und den Schutzhüllen aus Polyethylen findet bei einer Bewegung des Spannglieds an einer Umlenkstelle keinerlei Relativbewegung statt. Diese gleichförmige Bewegung des gesamten Spannglieds tritt bei ausreichend hohen Querpressungen und somit einer starken Verbundwirkung zwischen Spannstahl und Ummantelung auf. Des Weiteren wird die Äußere Gleitung bei glatten Führungsflächen (z.B. Umlenksattelformteil) mit ausreichend kleinem Reibbeiwert begünstigt.

Definition - Innere Gleitung:

Zwischen den Spannstahlritzen und dem Korrosionsschutz aus Polyethylen findet bei einer Bewegung des Spannglieds an einer Umlenkstelle eine Relativbewegung statt. Der Spannstahl „gleitet“ durch die HD-PE-Ummantelung und ist die einzige Komponente, die einer Verschiebung unterliegt.

Definition - Gemischte Gleitung:

Bei einer Bewegung des Spannglieds an einer Umlenkstelle treten sowohl Äußere Gleitung als auch Innere Gleitung auf.

Die Gleitkomponenten können als Anteil an der Gesamtbewegung der Litze über das Umlenkelement angegeben werden. Beispielsweise entspricht dem Lastfall „Innere Gleitung“ 100 % Innere Gleitung. Einer bestimmten Konstellation des Lastfalls „Gemischte Gleitung“ entspricht beispielsweise 40 % Innere Gleitung. Diese Art der Bezeichnung ist allerdings nur dann sinnvoll, wenn man sich stets auf eine gleich große Gesamtbewegung bezieht. Alternativ können die Anteile der jeweiligen Gleitkomponenten als absolute Werte angegeben werden (z.B. 320 mm Innere Gleitung und 480 mm Äußere Gleitung). Diese Angabe zeigt anschaulich auf, welche Reibungsbelastung die Korrosionsschutzhülle tatsächlich erfahren hat. Auch am Bauwerk ist eine anschaulichere Bewertung der Beanspruchung durch Innere Gleitung möglich. Ein bei zwei Umlenkstellen gemessener Anteil von 20 % Innerer Gleitung impliziert gleiche Beanspruchung. Allerdings werden die Litzen bei unterschiedlichem Abstand der Umlenkstellen zum Festanker dabei auch unterschiedlich weit über den Korrosionsschutz gezogen. Demzufolge unterliegen die Schutzhüllen hier nicht der gleichen Beanspruchung.

Hegger et al. [8] stellten bei seinen Versuchen mit der Kleinversuchsanlage u.a. fest, dass bei Innerer Gleitung die Litzen nach einer bestimmten Verschublänge durch das HD-PE „walken“. Dabei gleiten die Litzen in dem schraubenartigen HD-PE Bett bis sehr hohe Rückstellkräfte auftreten, die dieses „Zurückwalken“ erzeugen. Hegger schließt das Auftreten dieses Effekts an Bauwerken nicht aus.

2.2.4 Zeitabhängiges Verhalten

Polymere haben im Vergleich zu Metallen ein stark ausgeprägtes viskoelastisches Deformationsverhalten, was sich deutlich auf den Grad der Eindrückung der Litzen in die HD-PE Ummantelungen auswirkt. Bei lang andauernder Pressung von Stahl auf HD-PE treten zusätzlich zu den sofortigen elastischen und plastischen Verformungsanteilen auch zeitabhängige auf. Das HD-PE kriecht an Stellen hohen Drucks.

An Umlenkstellen kann dieses Verhalten mit Messung der Gesamtdicke der vier Bänder beobachtet werden. Mit zunehmender Beanspruchungszeit nimmt die Gesamtdicke ab, d.h. die Deformation nimmt zu. Die Abnahme entspricht der Summe der vertikalen Kriechverformungen. Das mechanische Verhalten kann mit dem Burgers-Modell beschrieben werden (siehe Abbildung 2.12). Dieses rheologische Modell beschreibt ein Material, dass sich bei Belastung sowohl sofort als auch zeitabhängig elastisch und plastisch verformt.

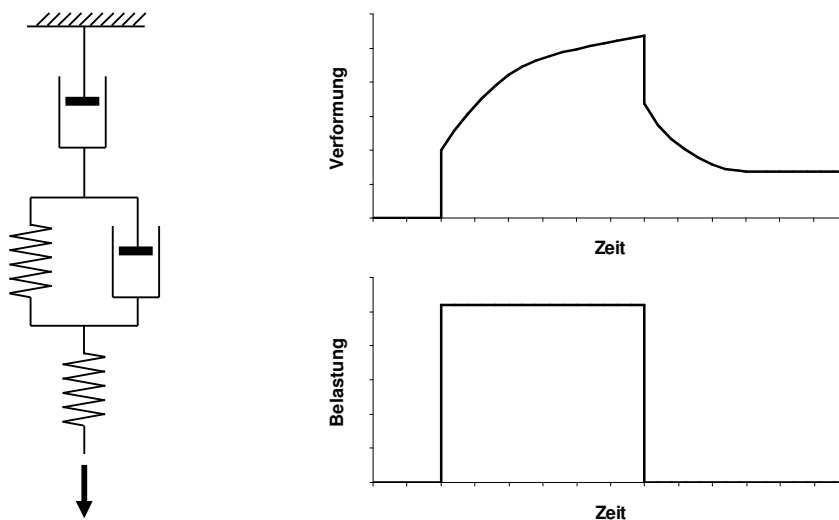


Abbildung 2.12: Burgers-Modell

2.2.5 Temperatureinfluss

Das für die Umhüllung des Spannstahls verwendete Polyethylen hoher Dichte weist ein temperaturabhängiges mechanisches Verhalten auf. Bei hohen Temperaturen wird es weicher. Auf freier Spanngliedlänge wird das HD-PE nicht mechanisch beansprucht. Deshalb ist lediglich ein genauerer Blick auf die Temperaturbelastung an den Umlenkstellen erforderlich. Bei planmäßiger Nutzung in mitteleuropäischem Klima treten in Hohlkästen von extern vorgespannten Spannbetonbrücken im Gegensatz zur Fahrbahntafel keine extrem hohen

Temperaturen auf. Die tageszeitlichen Schwankungen werden durch das Wärmespeichervermögen der Betonbauteile sowie durch keinerlei direkte Aufheizung durch Sonneneinstrahlung abgepuffert. Selbst in heißen Sommerperioden sind Temperaturen im Hohlkasten über 30 °C selten.

Beispielhaft sind für einen Sommermonat die Temperaturverläufe der Luft in einem Hohlkasten und außerhalb in Abbildung 2.13 dargestellt. Das Speichervermögen des Betonkastens puffert die tageszeitlichen Maximalwerte ab, so dass die maximale Innentemperatur in einem Hohlkasten deutlich darunter bleibt. Etwas anders verhält es sich bei der Verstärkung von Brückenüberbauten, bei denen die externen Spannglieder mitunter auch an den Stegaußenseiten angebracht werden müssen (siehe Abbildung 2.14). Je nach Exposition des Bauwerks können die Spannglieder und die Umlenkstellen zum Teil direkt durch Sonneneinstrahlung zusätzlich aufgeheizt werden. Durch die Überdeckung der Stege mit den Kragarmen werden die Teile allerdings nur bei niedrigem Sonnenstand, der mit einer geringeren Strahlungsintensität verbunden ist, angeschieden. Es sind höhere Temperaturen zu erwarten als in Hohlkästen.

Hegger et. al. haben 2004 u.a. das Verhalten des HD-PE Korrosionsschutzes von Bandspanngliedern bei unterschiedlichen Temperaturbeanspruchungen mit einer Kleinversuchsanlage untersucht [9]: Für Temperaturen zwischen -25 °C und 40 °C wurde die zusätzliche Verringerung der Wandstärken von innerer und äußerer HD-PE Ummantelung gemessen und ein linearer Zusammenhang zwischen den Größen Temperatur und Restwandstärke gefunden. Demnach nimmt bei einer Zunahme der Temperatur um 10 K die innere Wandstärke unabhängig von Belastungsdauer und Umlenkpressung um etwa 4 % bis 7 % der Ausgangswanddicke ab. Bei der äußeren Ummantelung der Bandspannglieder betrug die Abnahme zwischen 4 % und 8 %. Maßgebend ist dabei die maximal je erreichte Temperatur.

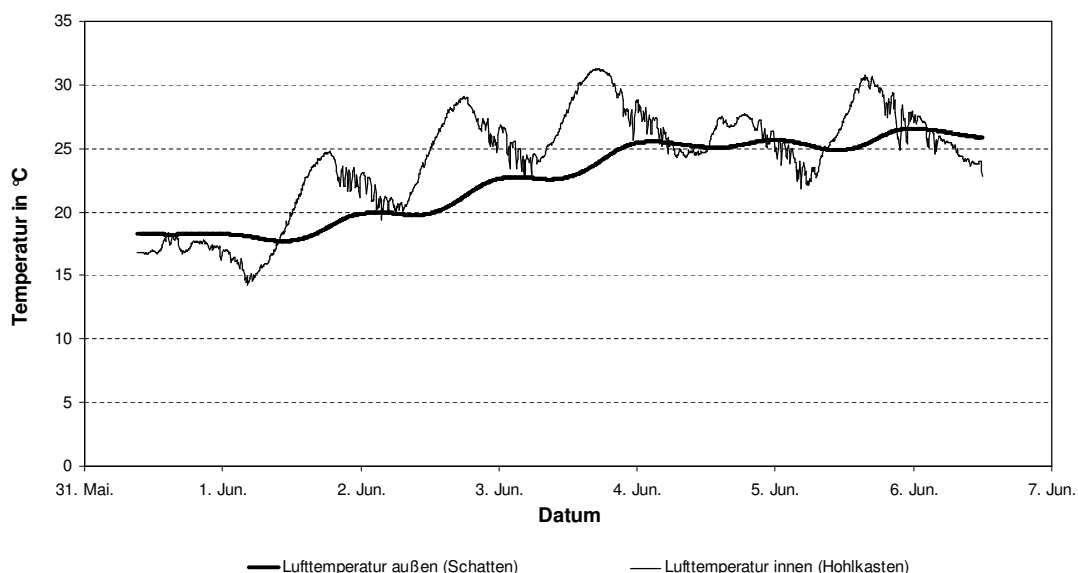


Abbildung 2.13: Temperaturmessung an einer Hohlkastenbrücke



Abbildung 2.14: Verstärkung an der Stegaußenseite [Quelle: SUSPA-DSI, Langenfeld]

2.3 Zulassungsanforderungen nach den aktuellen Richtlinien

2.3.1 Nationale Richtlinie des DIBt

Die Anforderungen für die Zulassung von Spannverfahren mit externen Spanngliedern bei der planmäßigen Umlenkung am Sattel sind national in der „Richtlinie für die Eignungsprüfung von Spannverfahren für externe Vorspannung“ des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt, 1999) [4] sowie in den zugehörigen Erläuterungen [5] angegeben. Mit deren Einhaltung beim Umlenkversuch soll sichergestellt werden, dass auch unter realen Bedingungen am Bauwerk die notwendige Restwandstärke über die Nutzungsdauer des Tragwerks vorhanden ist.

Demnach müssen Schutzhüllen, die innerhalb einer weiteren Schutzhülle vor äußeren Einwirkungen geschützt angeordnet werden (wie beispielsweise Monolitzenummantelungen), nach Durchführung entsprechender Versuche eine minimale verbleibende Wandstärke aufweisen, die sowohl größer als die halbe Ausgangswanddicke als auch größer als 1,00 mm ist.

Die Beschränkung der Dickenreduzierung auf maximal 50% der Ausgangswandstärke soll extrem abrasive und eindrückungsintensive Systeme abweisen. Die zweite Anforderung bei 1,00 mm entspricht einem absoluten Grenzwert, bei dessen Unterschreitung die Schutzwirkung der Ummantelung nicht ausnahmslos sichergestellt werden kann.

Bei Systemen, die lediglich eine Ebene von Kunststoffschutzhüllen aufweisen liegen die Anforderungen höher. Als absolute Grenze für die minimale Restwandstärke sind 2,00 mm einzuhalten. Die maximale Eindrückung ist auf 25% der Ausgangswandstärke zu begrenzen. Diese Anforderungen werden auch an die äußeren Ummantelungen bei mehrschichtigen Schutzsystemen gestellt. Davon betroffen sind also auch die äußeren Mäntel der Bandspannglieder.

2.3.2 Europäische Richtlinie ETAG 013

Die europäische Richtlinie für die Zulassung von Spannverfahren [6] sieht weniger konservative einzuhaltende Kriterien für die Restwandstärken beim Umlenkversuch vor.

Als absoluten Minimalwert gibt die ETAG 013 (Ausgabe Juni 2002) 0,80 mm vor. Ferner sind die Wanddickenreduzierungen auf maximal 50% der Ausgangswanddicke beschränkt. Es wird keine gesonderte Aussage zu mehrschichtig aufgebauten Korrosionsschutzsystemen (wie z.B. Bandspannglieder) gemacht. Für besondere Anwendungsfälle (z.B. Tieftemperaturanwendungen) definiert die Richtlinie allerdings verschärfte Anforderungen:

Bei nachspannbaren Spannsystemen haben die Schutzhüllen wie oben bereits dargestellt die Anforderungen der DIBt-Richtlinie an ihre Dicke zu erfüllen.

Nach Meinung der Verfasser besteht Klärungsbedarf, welche detaillierten Anforderungen die einzelnen Umhüllungen zum Erhalt eines Zulassungsbescheids zu erfüllen haben. Bei der Betrachtung der relevanten Passagen könnten folgende mögliche Konstellationen interpretiert werden:

- Es wird lediglich die äußere Ummantelung für die Beurteilung der Eindrücke herangezogen. Die innere Ummantelung dient bei großer Beanspruchung durch ihre plastische Verformung mit daraus folgender Füllung der Litzenwickel ausschließlich einer gleichmäßigeren Lasteinleitung an Umlenkstellen sowie der Kompensation von Verschleißerscheinungen. Dies könnte vor allem dann sinnvoll sein, wenn die Weiterleitung von Gasen und Flüssigkeiten in Längsrichtung durch das Verfüllen des Raumes zwischen den Schutzhüllen mit einer Korrosionsschutzmasse verhindert wird.
- Es wird die Summe der Wanddicken aller Ummantelungen für die Überprüfung der Kriterien verwendet.
- Jede einzelne Schutzhülle hat die o.g. Anforderungen zu erfüllen.

3 Bandspannglieder

3.1 Systeme

Untersuchungsgegenstand sind die in ihrer äußeren Form fast rechteckigen Bandspannglieder. Es werden folgende Systeme für die experimentelle Untersuchung herangezogen:

- VT-CMM D der Fa. VT
- VBF-CMM D der Fa. VBT
- VT-CMM KD der Fa. VT

Die Systeme unterscheiden sich in ihrer Litzenform und/oder in ihrem Korrosionsschutz.

Die größten zugelassenen Bandspannglieder weisen insgesamt 16 Litzen auf. Dabei werden vier Spannstahllitzen mit je sieben Drähten und ein Korrosionsschutzmittel (z.B. Fett) von der inneren Ummantelung aus High-Density-Polyethylen (HD-PE) umschlossen. Diese vier Monolitzen werden wiederum nebeneinander angeordnet von einer äußeren HD-PE Hülle umschlossen. Bei den Systemen der Fa. VT sind die inneren Ummantelungen mit HD-PE-Stegen verbunden. Das System der Fa. VBT sieht keine Verbindungen der inneren Hüllen mit PE-Stegen vor. Vier lose Monolitzen werden hier allein durch die äußere Ummantelung in ihrer Lage gehalten. In Abbildung 3.1 sind die Querschnitte eines solchen Bandes der oben genannten Systeme dargestellt. Es können gemäß den bestehenden Zulassungen ([11], [12], [13]) je Spannglied maximal vier dieser beschriebenen Bänder übereinander angeordnet werden (siehe Abbildung 3.2). Die Größe ist also auf eine Litzenanzahl von maximal 16 beschränkt.

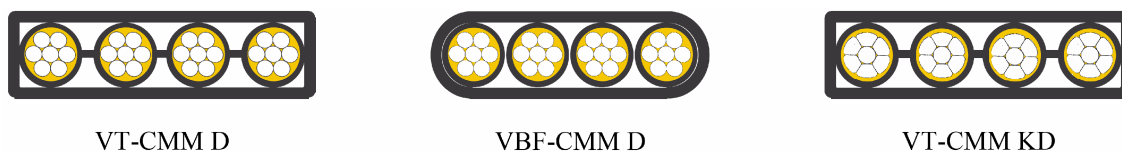


Abbildung 3.1: Querschnitte des einzelnen Spanngliedbandes mit vier Litzen und doppelter PE-Ummantelung

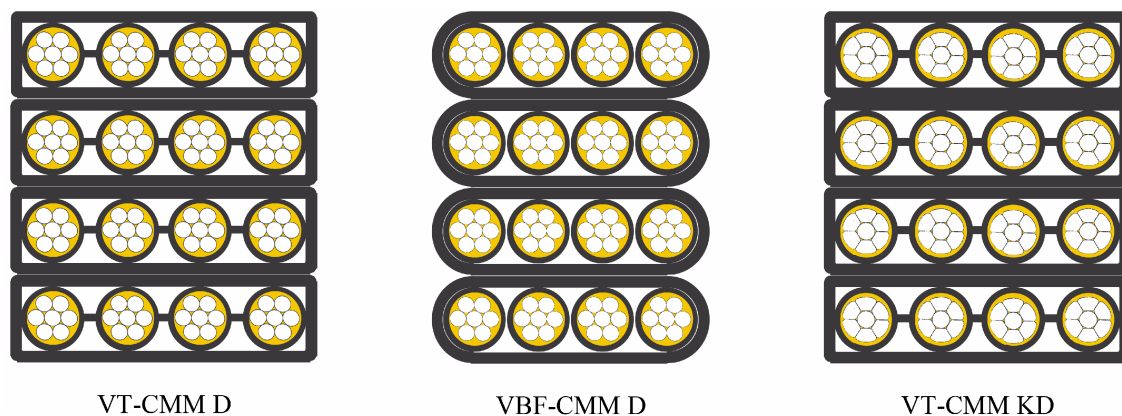


Abbildung 3.2: Querschnitte eines externen Spanngliedes mit vier übereinander gestapelten Einzelbändern

3.2 Litzen

Die experimentellen Untersuchungen werden mit zwei unterschiedlichen Litzentypen durchgeführt – die Runddrahtlitzen der Spannvorfahren VT-CMM D und VBF-CMM D und die kompaktierte Litze des Spannvorfahrens VT-CMM KD (siehe Abbildung 3.3). Die Litzen unterscheiden sich in ihrer Querschnittsgeometrie. Die Runddrahtlitze besteht aus sieben im Querschnitt kreisförmigen Drähten, wohingegen bei der kompaktierten Litze die sechs äußeren Drähte durch einen zusätzlichen Herstellvorgang an der jeweiligen Litzenaußenseite abgeflacht sind. Die kompaktierte Litze weist kleinere Zwischenräume (Zwickel) auf. Bei ähnlichem Durchmesser ist so die Anordnung einer größeren Nettoquerschnittsfläche möglich. Folglich erlaubt die Litze bei gleicher Festigkeit die Übertragung von größeren Kräften.

In Tabelle 3.1 sind Details zu den verwendeten Litzen angegeben. Die kompaktierte Litze besitzt eine um 10% höhere Querschnittsfläche als die Runddrahtlitze. Der für die experimentelle Untersuchung verwendete Spannstahl hat eine Nennfestigkeit von 1770 N/mm². Die Beanspruchungen des Korrosionsschutzsystems werden allerdings bereits für zukünftige Belastungen untersucht. Aus diesem Grund wurden die aufgebrachten Belastungen entsprechend einer zukünftigen Nennfestigkeit von 1860 N/mm² gewählt (siehe Tabelle 3.1). Vor Verwendung wurden die Eigenschaften der Spannstähle geprüft (siehe Tabelle 3.2). Die Prüfzeugnisse der verwendeten Litzen sind im Anhang A aufgeführt.



Abbildung 3.3: Querschnitt einer Runddrahtlitze (links) und einer kompaktierten Litze (rechts)

Tabelle 3.1: Litzeigenschaften gemäß Zulassung ([11], [12], [13])

System	VT-CMM D	VBF-CMM D	VT-CMM KD
Litzenform	Runddrahtlitze	Runddrahtlitze	kompakt. Litze
Anzahl der Drähte	7	7	7
Querschnittsfläche	150 mm ²	150 mm ²	165 mm ²
Aktuelle Nennfestigkeit	1 770 N/mm ²	1 770 N/mm ²	1 820 N/mm ²
Zukünftige Nennfestigkeit	1 860 N/mm ²	1 860 N/mm ²	1 860 N/mm ²

Tabelle 3.2: Geprüfte Litzeigenschaften (u.a.)

System	VT-CMM D	VBF-CMM D	VT-CMM KD
Litzenform	Runddrahtlitze	Runddrahtlitze	kompaktierte Litze
E-Modul (Mittelwert)	193 100 N/mm ²	195 000 N/mm ² *	188 800 N/mm ²

*) Angabe des Herstellers

3.3 Korrosionsschutz HD-PE

Wie oben bereits erwähnt, setzt sich der Korrosionsschutz der untersuchten externen Bandspannglieder zum einen aus einer handelsüblichen Korrosionsschutzmasse und zum anderen aus zwei Schutzhüllen aus HD-PE zusammen.

Im Folgenden wird lediglich auf die Eigenschaften des Polyethylens hoher Dichte eingegangen. Sie bestimmen mit ihren Abmessungen und ihren Materialeigenschaften wesentlich den Bauteilwiderstand und somit die Dauerhaftigkeit der Schutzhüllen gegenüber Eindrück- und Verschleißvorgängen durch die Litzen an Umlenkstellen und ungewollte Knickstellen an deren Austritt.

Die äußeren Abmessungen der einzelnen Schutzhüllen gemäß Zulassung sind in Tabelle 3.3 dargestellt. Aufgrund der fehlenden Polyethylen Stege zwischen den Monolithenmänteln ist das Band des Systems VBF-CMM D um 12 mm schmaler als die Bänder der Systeme der Fa. VT (VT-CMM D und VT-CMM KD).

Tabelle 3.3: Eigenschaften der Korrosionsschutzummantelungen gemäß Zulassung ([11], [12], [13])

System	VT-CMM D	VBF-CMM D	VT-CMM KD
Wanddicke innerer Mandel	≥ 1,5 mm	1,75 mm	≥ 1,5 mm
Wanddicke äußerer Mantel	≥ 3,0 mm	≥ 3,0 mm	≥ 3,0 mm
Abmessung Band à 4 Litzen	96x27 mm ²	84x27 mm ²	96x27 mm ²

Die Herstellung der Schutzhüllen erfolgt im Allgemeinen durch Extrusion mit Hilfe geeigneter Maschinen. Beim Extrudieren wird Kunststoff durch eine Öffnung gepresst (z.B. Hohlhorn-Rohrwerkzeug, [8]), die ihm die gewünschte Form und einen gleichmäßigen Querschnitt gibt. Abbildung 3.4 zeigt schematisch eine Extrusionsmaschine mit den wichtigsten Komponenten.

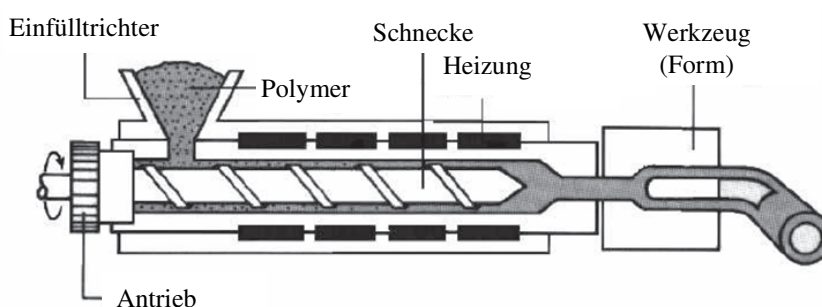


Abbildung 3.4: Schematische Darstellung eines Extruders

HD-PE ist die Kurzbezeichnung für High-Density Polyethylen, Polyethylen hoher Dichte bzw. Hartpolyethylen. Im Allgemeinen ist HD-PE ein halbkristalliner, weißlicher und halbdurchsichtiger Thermoplast. Durch die Zugabe von Kohlenstoffpartikel erhalten die Schutzhüllen ihre schwarze Farbe.

Thermoplaste sind Polymerwerkstoffe mit unvernetzten Kettenmolekülen. Wärmezufuhr erhöht die Beweglichkeit der Ketten, das Material wird weicher und somit verbessert sich auch die Verarbeitbarkeit (z.B. Extrusion) [14].

Hartpolyethylen ist ein sehr haltbares und starres Material mit hoher Beständigkeit gegenüber chemischen Substanzen. Eine hohe Schlagzähigkeit und gute Sperreigenschaften kennzeichnen zusätzlich dieses robuste Material, dass vor allem im Behälter- und Rohrleitungsbau angewendet wird.

Nachfolgend sind einige mechanische, chemische, physikalische und thermische Eigenschaften des verwendeten Materials aufgeführt:

Tabelle 3.4: Eigenschaften HD-PE (u.a. aus [8] und [14])

<i>Mechanische Eigenschaften (u.a.)</i>	<i>Wert</i>	<i>Norm</i>
E-Modul (Zugversuch, 1 mm/min)	1 000 N/mm ²	ISO 527-2
Streckspannung (50 mm/min)	22 N/mm ²	ISO 527-2
Reißfestigkeit	max. 30 N/mm ²	
Dehnung bei Streckspannung	9 %	ISO 527-2
Reißdehnung	> 600 %	ISO 527-2
Kriechmodul (23 °C, 4 N/mm ² , 500 h)	ca. 200 N/mm ²	ISO 899
Schubmodul bei 23°C	700 - 1000 N/mm ²	
Schubmodul bei 23°C	400 - 900 N/mm ²	
Querdehnungszahl (Poissonverhältnis)	0,46	
Härte Shore (A/D) oder Rockwell (R/L/M)	D60	ISO 868, ISO 2039-2
Kerbschlagzähigkeit nach Izod (23°C)	20 - 210 J/m	ISO 180/1C
Gleitkoeffizient gegen Stahl im Trockenlauf	0,2 - 0,4	
<i>Chemische Eigenschaften (u.a.)</i>	<i>Wert</i>	<i>Norm</i>
Kohlenstoffgehalt	> 2%	ASTM D 1603
<i>Physikalische Eigenschaften (u.a.)</i>	<i>Wert</i>	<i>Norm</i>
Dichte	956 kg/m ³	ISO 1183
Wasserabsorption (über 24 h)	< 0,01 %	ISO 62
Entzündbarkeit	HB	IEC 60695-11-10
<i>Thermische Eigenschaften (u.a.)</i>	<i>Wert</i>	<i>Norm</i>
Wärmeausdehnungskoeffizient	12 - 15 · 10 ⁻⁵ /K	ISO 11359
Schmelztemperatur	135 °C	ISO 11357
Glasübergangstemperatur	- 70 °C	ASTM D746
Vicat Erweichungstemperatur B (50N)	72 °C	ISO 306 VST/B/50
Wärmeformbeständigkeit B (0,45 N/mm ²)	70°C	ISO 75 HDT/B

Polyethylen hoher Dichte ist ein Material, dessen mechanische Eigenschaften temperaturabhängig sind. Die sehr hohe Erweichungstemperatur von 72 °C und die sehr niedrige Glasübergangstemperatur von -70 °C liegen allerdings deutlich außerhalb der üblichen Temperaturspanne während des gewöhnlichen Betriebs bei Brückenbauwerken.

Um die Wirksamkeit des Korrosionsschutzes dauerhaft sicherzustellen, sind gewisse Anforderungen an die zulässige Durchlässigkeit der HD-PE Ummantelungen für Flüssigkeiten und Gase zu stellen.

Diese Durchlässigkeit oder Permeation kann nach dem 1. Fick'schen Gesetz bestimmt werden (siehe Gleichung 3.1):

$$\frac{\partial m}{\partial t} = -D \cdot A \cdot \frac{\Delta p}{s} \quad (\text{Gleichung 3.1})$$

mit $\partial m/\partial t$	Durchlässigkeit bzw. Permeation
D	Diffusionskonstante
A	Oberfläche
Δp	Dampfdruckbarriere (Partialdruck)
s	Dicke der Barriere

In [15] wird u.a. eine Durchlässigkeitsuntersuchung von HD-PE mit Flüssigkeiten und Gasen durchgeführt. In Tabelle 3.5 und Tabelle 3.6 sind ausgewählte Ergebnisse dargestellt. Im Allgemeinen tritt in Spannbetonhohlkästen keine und bei außen liegenden Spanngliedern keine dauerhafte Beaufschlagung der Spannglieder durch Flüssigkeiten auf. Deren Eindringen kann also bereits durch eine geschlossene Hülle verhindert werden. Gase aus der umgebenden Luft (z.B. Kohlendioxid, Sauerstoff, Stickstoff) wirken jedoch stets ein und diffundieren durch die HD-PE Schutzhülle. Dieser Vorgang ist zum einen abhängig von der Dicke der Barriere und zum anderen von der Dauer der Einwirkung.

Die Korrosionsschutzmasse, mit der die Hüllrohre verfüllt werden, stellt eine weitere Barriere für das Eindringen der Gase dar. Um die erforderliche Barrierewirkung und damit eine Schutzwirkung des Spannstahls vor Korrosion über die geplante Lebenszeit zu erreichen, ist somit eine gewisse Mindestdicke der Schutzhülle erforderlich.

Tabelle 3.5: Durchlässigkeitswerte von HD-PE bei Beaufschlagung mit Flüssigkeiten ([15])

<i>Permeant</i>	<i>Löslichkeit</i>	<i>Diffusionsvermögen</i>	<i>Freier Vol.-Faktor</i>	<i>P.-Vol.</i>	<i>P.-Masse</i>
<i>[-]</i>	<i>m³/m³</i>	<i>m²/s</i>	<i>[-]</i>	<i>m³/m³·m²/s</i>	<i>g/(m·s)</i>
Wasser	0,0002	1·10 ⁻¹¹	-	2·10 ⁻¹⁵	2·10 ⁻⁹
Benzol	0,10	7·10 ⁻¹³	0,025	1·10 ⁻¹²	9·10 ⁻⁷
Toluol	0,11	6·10 ⁻¹³	0,025	1·10 ^{-12[^]}	1·10 ⁻⁶
Styrol	0,10	4·10 ⁻¹³	0,025	6·10 ⁻¹³	5·10 ⁻⁷
Benzin	0,09	6·10 ⁻¹³	-	5·10 ⁻¹²	4·10 ⁻⁷

*) Bedingungen bei den Versuchen: Temperatur 37°C, Druck 1 bar, Aktivität des Permeanten 1

Tabelle 3.6: Durchlässigkeitswerte von HD-PE bei Beaufschlagung mit Gasen ([15])

<i>Permeant</i>	<i>Löslichkeit</i>	<i>Diffusionsvermögen</i>	<i>Freier Vol.-Faktor</i>	<i>P.-Vol.</i>	<i>P.-Masse</i>
<i>[-]</i>	<i>m³/m³·bar</i>	<i>m²/s</i>	<i>[-]</i>	<i>m³/m³·bar·m²/s</i>	<i>g/(ms)</i>
CO ₂	0,29	1,2·10 ⁻¹¹	-	3,5·10 ⁻¹²	6,8·10 ⁻⁹
O ₂	0,046	1,7·10 ⁻¹¹	-	7,8·10 ⁻¹³	1,1·10 ⁻⁹
N ₂	0,025	9,3·10 ⁻¹²	-	2,3·10 ⁻¹³	2,8·10 ⁻¹⁰
H ₂	0,073	2,6·10 ⁻¹¹	-	1,9·10 ⁻¹²	1,7·10 ⁻¹⁰

*) Bedingungen bei den Versuchen: Temperatur 25°C, Druck 1 bar, Aktivität des Permeanten 1

4 Experimentelle Untersuchungen

4.1 Versuchsaufbau

4.1.1 Anforderungen nach DIBt Richtlinie bzw. ETAG 013

Die Anforderungen beim Umlenkversuch an den Versuchstand bei der „Prüfung mit großer Umlenkung“ in der DIBt Richtlinie [4] und bei „Large Deviation“ in der ETAG 013 Richtlinie [6] sind identisch:

Dabei ist das Spannglied mit einem konstanten Radius um mindestens $\alpha = 14^\circ$ umzulenken. Es sind die Originalkomponenten des Systems zu verwenden. Die freie Länge des Spannglieds zwischen Umlenkstelle und den Verankerungen (Widerlagern) ist mindestens mit 3,0 m anzusetzen. Abbildung 4.1 zeigt den in ETAG 013 vorgeschlagenen Versuchsaufbau.

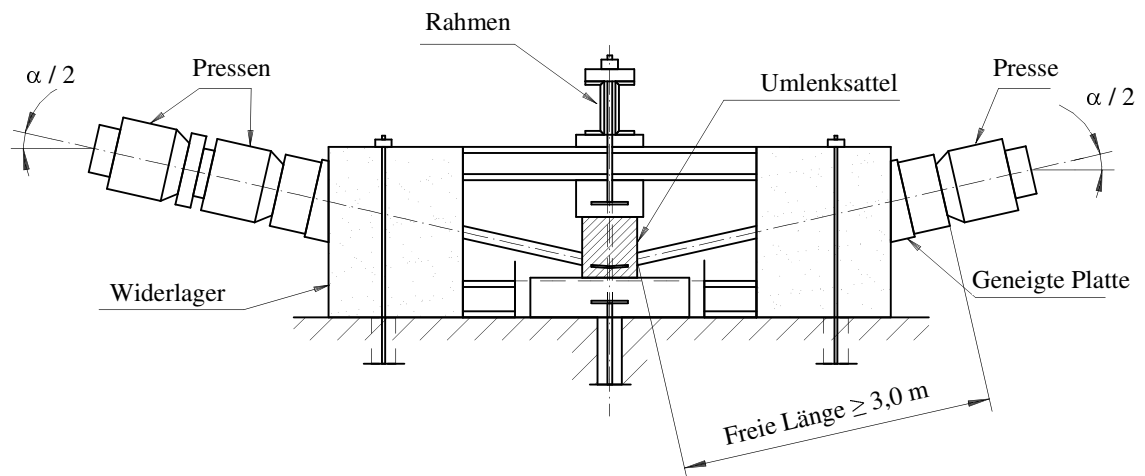


Abbildung 4.1: Schematischer Aufbau eines Umlenkversuchs gemäß ETAG 013 (gemäß [6])

Der am MPA BAU für die Durchführung der Umlenkversuche entwickelte Versuchsaufbau weicht in seinem Aufbau von den in der „Richtlinie für die Eignungsprüfung von Spannverfahren für externe Vorspannung“ [1] und in der europäischen Richtlinie ETAG 013 (Edition June 2002) [2] vorgeschlagenen Aufbauten etwas ab. Die o.g. Anforderungen an den Versuchsaufbau für die „Große Umlenkung“ werden dabei erfüllt. Zusätzlich ist die horizontale Umlenkung optional möglich.

Abbildung 4.2 zeigt schematisch den am MPA BAU der TU München errichteten Versuchsaufbau, der unter Einhaltung der o.g. Anforderungen bereits zusätzlich zur vertikalen Umlenkung mit dem Radius $R_V = 4,0 \text{ m}$ ($\alpha \geq 14^\circ$) eine horizontale Umlenkung mit $R_H = 10,0 \text{ m}$ ($\beta = 6^\circ$) zulässt.

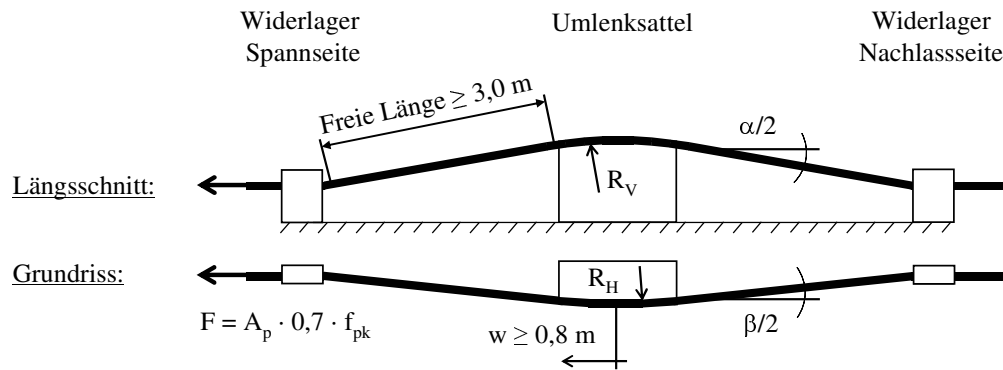


Abbildung 4.2: Schematischer Aufbau eines zweiachsialen Umlenkversuchs (Längsschnitt und Grundriss)

Für den Fall der einaxialen Umlenkung wird $R_H = \infty$ gewählt. Der Spanngliedverlauf im Grundriss ist also gerade ($\beta = 0^\circ$). Bei der Umlenkung liegen die Spannglieder zwischen den Abhebepunkten am Sattel an. Unter den gegebenen geometrischen Randbedingungen lassen sich folgende Anliegестrecken L_V und L_H , auf der die volle Umlenkpressung auf die Bänder einwirkt, als Teile eines Kreisbogens ermitteln:

- vertikale Umlenkung von $\alpha = 14^\circ$ mit $R_V = 4,0 \text{ m}$:

$$L_V = 2 \cdot R_V \cdot \pi \cdot \frac{\alpha}{360^\circ} = 0,98 \text{ m} \quad (\text{Gleichung 4.1})$$

- horizontale Umlenkung von $\beta = 6^\circ$ mit $R_H = 10,0 \text{ m}$:

$$L_H = 2 \cdot R_H \cdot \pi \cdot \frac{\beta}{360^\circ} = 1,05 \text{ m} \quad (\text{Gleichung 4.2})$$

Der Umlenksattel wurde folglich mit einer Länge von 1,20 m ausgebildet, um jenseits der Abhebepunkte etwas Puffer vorzusehen. In Abbildung 4.3 ist der Umlenksattel während eines Versuchs mit einem Bandspannglied dargestellt. Die Abhebepunkte der vertikalen Umlenkung sind darin markiert.



Abbildung 4.3: Umlenksattel mit vertikalen Abhebepunkten

4.1.2 Erzeugung von innerer Gleitung

Für die Versuche, bei denen ein hoher Anteil an innerer Gleitung an der großen Umlenkung erzwungen wird, sind Umbauten am Versuchsstand erforderlich. Unter regulären Bedingungen sind die Spannglieder bestrebt, im Ganzen über den Sattel zu gleiten (sehr kleiner Anteil an Innerer Gleitung). Es wurden zwei unterschiedliche Maßnahmen angewendet.

Bei Variante 1 wird der PE-Korrosionsschutz mit Hilfe eines am Ende des Umlenkformteils angebrachten und am Stahlbau verankerten Rostes abgestreift. Jede Litze ist dabei auf allen Seiten von diesem Rost umschlossen, so dass auch das Abstreifen der inneren PE-Ummantelung sichergestellt werden kann. Die Litzen gleiten beim Vershub somit durch die zurückgehaltenen Ummantelungen. Der verwendete Rost ist in Abbildung 4.4 dargestellt.

Variante 2 sieht entgegen der punktuellen Abstreifung mit dem Rost eine kontinuierlich über die gesamte Auflagefläche der Bänder am Sattel erzeugte Widerstandskraft vor. Durch das Einlegen eines Schmirgelgewebes aus beschichteten Glasfasern (Produktname des Herstellers: „Löwenzunge“) zwischen Spannglied und Umlenkformteil und zwischen den Bändern kann die Reibung zwischen Spannglied und Umlenksattel stark erhöht werden (siehe Abbildung 4.5). Die Litzen gleiten beim Vershub durch die zurückgehaltenen Ummantelungen.

Bei der Planung der Versuche wurde berücksichtigt, dass nach bisherigen Erfahrungen zwischen der inneren und äußeren Schutzhülle keine Relativverschiebungen auftreten.

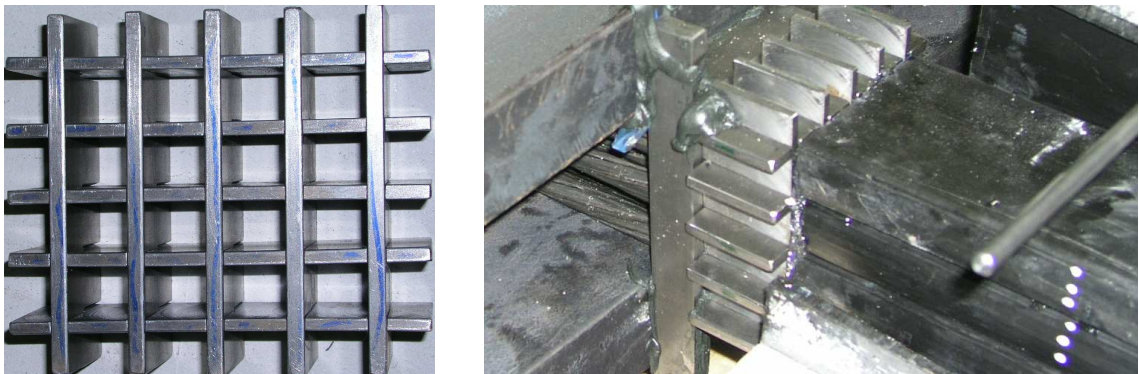


Abbildung 4.4: Stahlrost zum Abstreifen des Korrosionsschutzes bei erzwungener innerer Gleitung

4.1.3 Horizontale Umlenkung

Die horizontale Umlenkung mit einem Radius von $R_H = 10,0$ m erfordert einen Umbau des Versuchsstandes. Durch den modularen Gesamtaufbau konnte das Stahlbetonbauteil mit dem einbetonierten Umlenkformteil horizontal verschoben werden. Zur Aufnahme der zusätzlich entstehenden horizontalen Umlenkkräfte musste ein Widerlager angeordnet werden. Abbildung 4.6 zeigt den Versuchsstand am Umlenksattel von oben. Die horizontale Umlenkung mit einem Radius von 10,0 m kann durch die Krümmung des HD-PE Formteils in horizontaler Richtung realisiert werden.

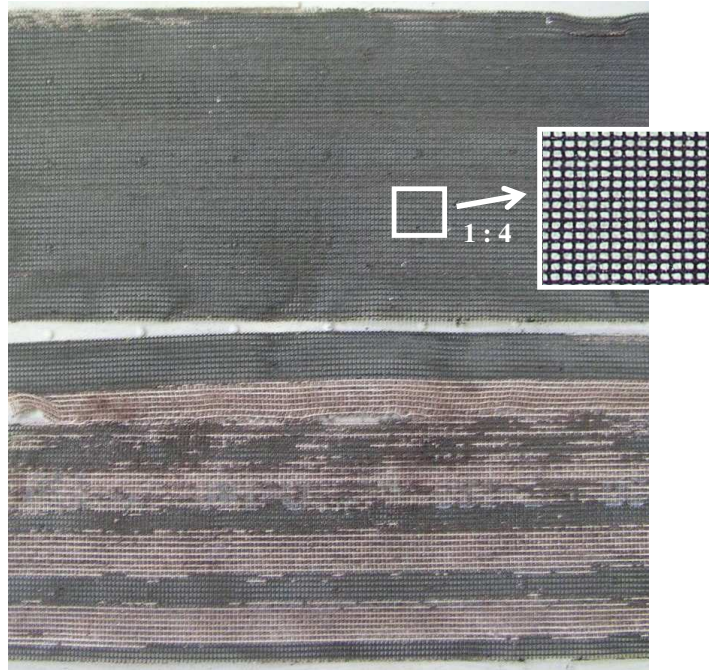


Abbildung 4.5: Schmirgelgewebe „Löwenzunge“ vor (oben, Detail) und nach einem Versuch (unten)

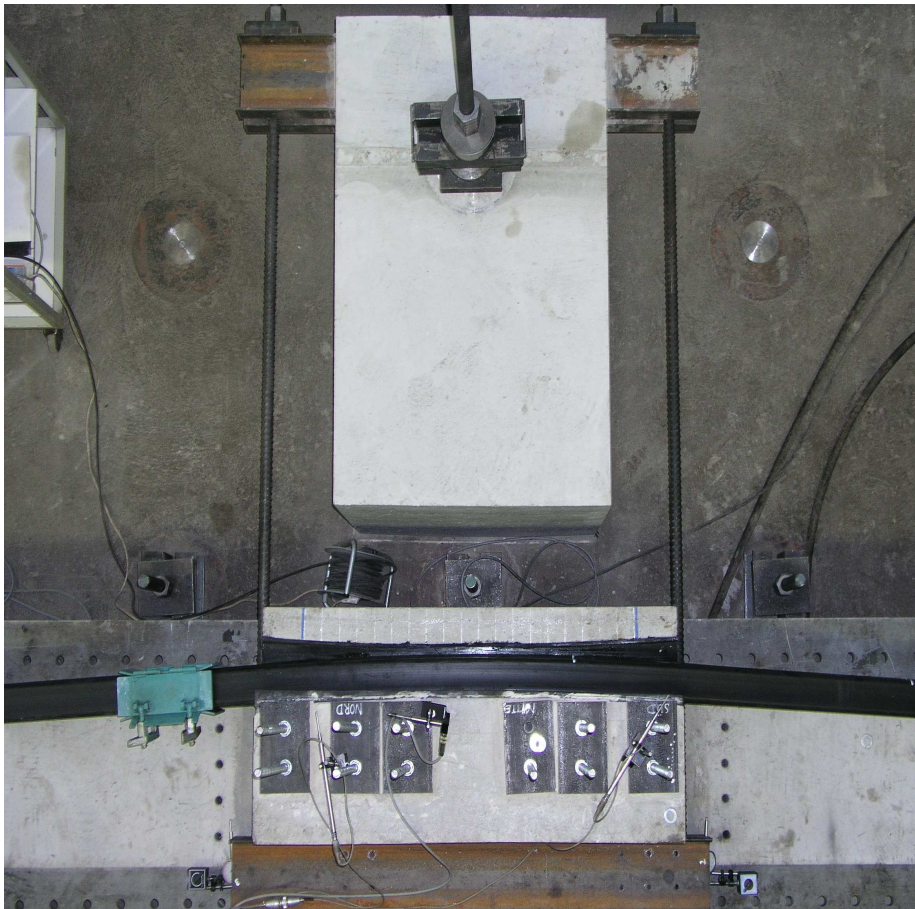


Abbildung 4.6: Zweiaxiale Umlenkung – Versuchsstand aus der Vogelperspektive

4.1.4 Einbau der Spannglieder

Die vier Spannbänder mit jeweils vier Litzen werden übereinander gestapelt in den Versuchsstand eingebaut. Die Auflageflächen an den HD-PE-Formteilen werden zuvor gereinigt und eingefettet. Bei Versuchen mit einem hohen angestrebten Anteil an Innerer Gleitung werden in alle Zwischenflächen Schmirgelgewebe eingelegt. An beiden Spanngliedenden werden von außen hydraulische Spannpressen angeordnet, die alle Litzen zusammen anspannen können. Eine Presse dient als so genannte Spannpresse, die gegenüber liegenden Pressen dienen als so genannte Nachlasspressen. Nach einem „Straffen“ der Bänder werden Markierungen und sämtliche Wegaufnehmer angebracht.

4.2 Versuchsablauf

Der Umlenkversuch ist nach der DIBt Richtlinie [4] und ETAG 013 [6] in seinem Ablauf in insgesamt drei Einzelprozesse zu unterteilen:

- Anspannvorgang bis 70% F_{pk} (Prozess 1)
- Schubvorgang unter Last (Prozess 2)
- 21 Tage Standzeit unter Last (Prozess 3)

Der Ablauf der ersten beiden Vorgänge des Versuchs ist in Abbildung 4.7 dargestellt. Noch vor dem Anspannen wird für den Fall der erzwungenen inneren Gleitung bei Variante 2 beim Einbau der Spannglieder das Schmirgelgewebe flächig zwischen Spannglied und Umlenkformteil sowie zwischen den Bändern eingelegt.

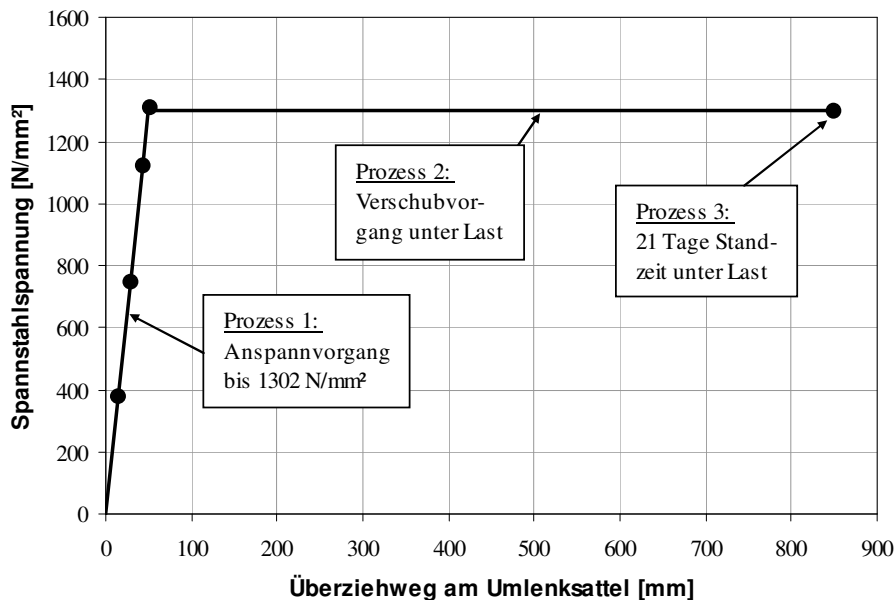


Abbildung 4.7: Ablaufschema beim Umlenkversuch

Die Vorspannkraft wird in 20 % Schritten stufenweise bis auf eine Spannstahlspannung von zunächst 60 % der Nennfestigkeit f_{pk} aufgebracht. In einer letzten Stufe wird die Spannung auf 70 % der Nennfestigkeit f_{pk} gesteigert (Ziellast). Vor dem Schub wird für den Fall der erzwungenen Inneren Gleitung nach Variante 1 der Korrosionsschutz an der Stelle, an die der Rost für den Abstreifvorgang angebracht wird, vollständig entfernt. Der Anspannvorgang und ein Teil des Spanngliederschubvorgangs werden mit angebrachtem Rost durchgeführt. Das Spannglied wird unter der Ziellast nun durch gleichzeitiges Anspannen auf einer Seite und Nachlassen auf der gegenüberliegenden Seite über den Umlenksattel gezogen. Dabei ist ein Gesamtverschubweg von mindestens 800 mm erforderlich. Bei Verwendung des Rosts wird dieser nach einem gewissen Überziehweg entfernt und der noch erforderliche Restverschubweg

mit natürlichen Gleitverhältnissen hergestellt. Diese stellen sich ohne zusätzliche Blockierungsmaßnahmen ein.

Der hier vorgestellte Versuchsablauf entspricht nicht dem Ablauf am Bauwerk. Wie in Abbildung 2.11 bereits dargestellt, erfolgt der Vers Schub nicht unter konstanter Last sondern unter linearer Zunahme der Last. Bei Erreichen der Ziellast ist auch das Überziehen des Spannglieds abgeschlossen. Würde man allerdings die realistische Situation abbilden wollen, so würde das zu im Versuch nur schwer realisierbaren Überziehwegen von bis zu mehreren Metern führen. Aus diesem Grund wird durch den Versuchsablauf nach der DIBt Richtlinie [4] und ETAG 013 [6] ein Vers Schubweg von insgesamt 800 mm allerdings stets bei Ziellast als ausreichend angesehen.

Während des Vers Schubs (Prozess 2) wird das Spannglied kontinuierlich mit einer Geschwindigkeit von etwa 1 mm/s über die Umlenkstelle gezogen. Der Vorgang wird lediglich durch Umsetzvorgänge der Spannpressen unterbrochen. Die Spannung im Spannglied sollte während des Vers Schubvorgangs (Prozess 2) und während der Standzeit (Prozess 3) zu keinem Zeitpunkt unter 67 % der Nennfestigkeit f_{pk} fallen. Die charakteristischen Spanngliedkräfte der drei Systeme sind in Tabelle 4.1 angeführt. Nach Ablauf der 21tägigen Standzeit wird das Spannglied entlastet und demontiert. Die beim Versuch herrschende Temperatur sollte während der Standzeit um maximal 5 °C von 20 °C abweichen.

Tabelle 4.1: Spanngliedkräfte während des Versuchs

<i>System</i>	<i>Kraft bei 100% f_{pk}</i>	<i>bei 70% f_{pk} in kN</i>	<i>bei 67% f_{pk} in kN</i>
VT-CMM D	$16 \cdot 150 \text{mm}^2 \cdot 1860 \text{N/mm}^2 = 4464 \text{ kN}$	$0,70 \cdot 4464 = 3125$	$0,67 \cdot 4464 = 2991$
VBF-CMM D	$16 \cdot 150 \text{mm}^2 \cdot 1860 \text{N/mm}^2 = 4464 \text{ kN}$	$0,70 \cdot 4464 = 3125$	$0,67 \cdot 4464 = 2991$
VT-CMM KD	$16 \cdot 165 \text{mm}^2 \cdot 1860 \text{N/mm}^2 = 4910 \text{ kN}$	$0,70 \cdot 4910 = 3437$	$0,67 \cdot 4910 = 3290$

4.3 Messungen

Bei den durchgeführten Versuchen wurden folgende Messungen durchgeführt:

Tabelle 4.2: Messprogramm

<i>Messgröße (Nr./Bezeichnung)</i>	<i>Messgerät</i>	<i>Messgenauigkeit</i>
11 Kraft Spannseite	Öldruck	$\pm 1 \%$
12 Kraft Nachlassseite	Kraftmessdose	$\pm 0,45 \%$
21 Litzenweg Umlenksattel	Wegaufnehmer	$\pm 0,01 \text{ mm}$
22 Weg Litze-Ummantelung	Wegaufnehmer	$\pm 0,01 \text{ mm}$
23 Einsinken Sattel-SÜD	Wegaufnehmer	$\pm 0,01 \text{ mm}$
24 Einsinken Sattel-MITTE	Wegaufnehmer	$\pm 0,01 \text{ mm}$
25 Einsinken Sattel-NORD	Wegaufnehmer	$\pm 0,01 \text{ mm}$
31 Temperatur	elektron. Thermometer	$\pm 0,01 \text{ }^\circ\text{C}$
41 Restwandstärke HD-PE	Bügelmessschraube	$\pm 0,01 \text{ mm}$

Die Hydraulikpresse an der Spannseite wurde im Anschluss an die Prozesse 1 und 2 entfernt. Die Kraftmessung an der Spannseite wurde somit während der Standzeit nicht mehr gemessen.

Mit der Messung der Kraft an beiden Widerlagern und dem dadurch ermittelbaren Verlust der Vorspannung dazwischen ist auch die Vorspannkraft genau in der Mitte, nämlich am Umlenksattel zu errechnen. Hierzu wird angenommen, dass die Verteilung der Spannkraftverluste analog dem symmetrischen Versuchsaufbau zu gleichen Teilen vor und nach dem Umlenksattel erfolgt. Die letztlich am Sattel vorhandene Spannkraft ist somit gleich dem Mittelwert der beiden Messwerte. Neben der Messung des Litzenwegs am Umlenksattel wird dort auch die relative Verschiebung der HD-PE-Ummantelung zu den Litzen aufgenommen.

Durch die Messgröße 22 (Weg Litze-Ummantelung) ist der absolute und relative Anteil an Innerer und Äußerer Gleitung zu jedem Zeitpunkt des Versuchs zu ermitteln. Des Weiteren werden an drei Stellen am Umlenksattel (je 50 mm innerhalb der beiden Abhebepunkte sowie zusätzlich mittig) die vertikalen Verformungen des Gesamtpakets der vier Spannbänder gemessen. Diese Messungen wurden nach Abschluss des Überziehvorgangs gestartet. Sie sollen die zeitabhängigen Verformungen des Gesamtpakets während der 21tägigen Standzeit erfassen. Während des gesamten Versuchs wird in kurzen Abständen die Umgebungstemperatur gemessen. Die Aufrechterhaltung von stabilen thermischen Verhältnissen über die Dauer der Versuchsreihe (10 Monate) als Grundlage der Vergleichbarkeit der Versuchsergebnisse kann durch die aufwändige bauphysikalische Konstruktionsweise der Prüfhalle sichergestellt werden.

Nach dem Ausbau der Spannglieder nach Ablauf der Standzeit wurden die Polyethylen Ummantelungen von den Spannstahllitzen gelöst. Die Restwandstärken als wichtigstes Kriterium zur Beurteilung der Beanspruchung der inneren und der äußeren Ummantelung wurden an signifikanten Stellen sowohl in Längsrichtung als auch im Spanngliedquerschnitt gemessen (siehe Abbildung 4.8). Die Messungen wurden an allen Spannbändern durchgeführt.

Am Umlenksattel wurden in Längsrichtung insgesamt bis zu neun im gleichen Abstand zueinander liegende Querschnitte bzw. Messstellen zur Messung herangezogen. Fünf Messstellen wurden direkt am Umlenksattel gewählt (Messstellen 21 bis 25). Weitere vier Messstellen wurden im angrenzenden Bereich gewählt (Messstellen 11 bis 14). Das dort sich befindliche Material wurde während des Versuchs über den Abhebepunkt am Sattel hinaus in die freie Länge bewegt – es unterlag also einer kurzzeitigen Querpressungsbeanspruchung aber nicht mehr der 21tägigen Standzeit.

Bei einem Anteil an Innerer Gleitung von 100 % wird nur der Spannstahl bewegt. Die Polyethylen-Ummantelungen verbleiben vollständig am Umlenksattel. Die Messstellen werden hier nur mehr am Sattel selbst gewählt. Der Querschnitt der Referenzmessstelle (Messstelle R) wurde an einer Stelle in der freien Länge des Spannglieds gewählt, die während des Versuchs zu keinem Zeitpunkt durch Querpressung beansprucht worden ist.

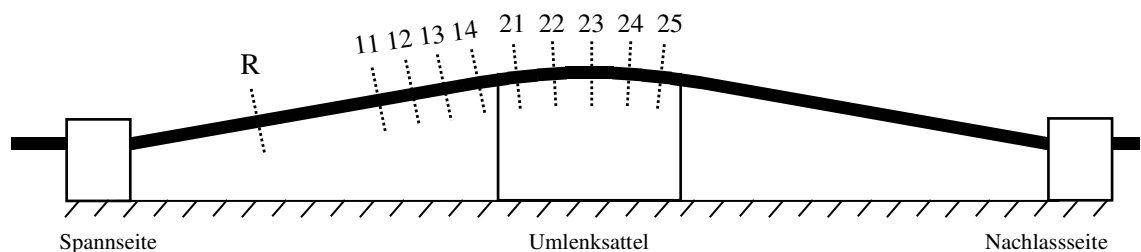


Abbildung 4.8: Messstellen in Längsrichtung nach dem Versuch

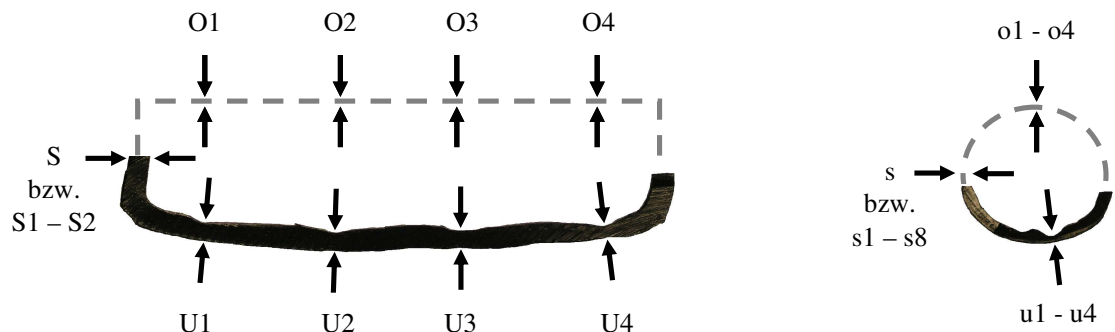


Abbildung 4.9: Restwandstärkemessung am Querschnitt: Äußerer und ein innerer HD-PE Mantel

Abbildung 4.9 illustriert die Stellen der Restwandstärkemessungen bei einem Querschnitt. Es wurden alle inneren und die äußere Schutzhülle oben und unten vermessen. Dabei wurden für die Beschreibung der Messstellen der äußeren Ummantelung Großbuchstaben, für die inneren Ummantelungen Kleinbuchstaben verwendet. Bei den einaxialen Versuchen wurde wie dargestellt die verbleibende minimale Wandstärke an einer außen liegenden Seitenfläche bei der äußeren und einer inneren Schutzhülle erfasst. Bei den zweiaxialen Versuchen erfolgte dies an allen Seitenflächen aller inneren und äußeren Mäntel. Die Nummerierung erfolgt von der nicht anliegenden Seite zur anliegenden Seite. S2 bzw. s8 sind die am Umlenkkörper anliegenden Wandseiten der äußeren bzw. inneren Ummantelung. Die Messung wurde mit einer Bügelschraube durchgeführt (Abbildung 4.10). Es wurde stets die Dicke der Hüllen senkrecht zur großen Körperquerschnittsausdehnung gemessen (siehe Abbildung 4.9)



Abbildung 4.10: Bügelmessschraube

4.4 Versuchsprogramm

Das vorliegende Forschungsvorhaben sieht für die experimentelle Untersuchung insgesamt neun Versuche mit großer Umlenkung vor. Mit jedem der drei verwendeten Bandspanngliedssysteme wurde ein einaxialer Versuch mit natürlichem Anteil an Innerer Gleitung, ein einaxialer Versuch mit erzwungenem Anteil an Innerer Gleitung sowie ein zweiaxialer Versuch mit natürlichem Anteil an Innerer Gleitung durchgeführt. Dabei wurden die Buchstaben A – C für folgende Versuchstypen vergeben:

- A Einaxialer Versuch mit natürlichen Gleitverhältnissen
- B Einaxialer Versuch mit erzwungenem Anteil an Innerer Gleitung
- C Zweiaxialer Versuch mit natürlichen Gleitverhältnissen

Die vertikale Umlenkung erfolgt mit einem Radius von 4 m. Sofern erforderlich (Versuche C) erfolgt zusätzlich die horizontale Umlenkung mit einem Radius von 10 m.

Tabelle 4.3: Versuchsprogramm

Bezeichnung	Umlenkradius in mm		Anteil Innerer Gleitung		verwendete Litze	
	vertikal	horizontal	natürlich	erzwungen	Runddraht	kompaktiert
A VT-CMM D	4000	∞	X		X	
A VBF-CMM D	4000	∞	X		X	
A VT-CMM KD	4000	∞	X			X
B VT-CMM D	4000	∞		X (L.Z.)*	X	
B VBF-CMM D	4000	∞		X (L.Z.)*	X	
B VT-CMM KD	4000	∞		X (Rost)		X
C VT-CMM D	4000	10000	X		X	
C VBF-CMM D	4000	10000	X		X	
C VT-CMM KD	4000	10000	X			X

*) Verwendung von Löwenzunge (Schmirgelgewebe)

5 Ergebnisse und Auswertung

Es werden die bei den Versuchen gewonnenen Messergebnisse hier lediglich exemplarisch zur Erläuterung der beobachteten Effekte dargestellt. Die vollständigen Messdaten und Ergebnisdarstellungen sind dem Anhang zu entnehmen.

5.1 Prozess 1 und 2 – Anspannvorgang und Vers Schub

Der Anspannvorgang erfolgte während der Versuche problemlos. Allerdings führten die äußerst komplexen Randbedingungen besonders bei der Erzeugung von hohen Anteilen an Innerer Gleitung (Versuche B) zu Problemen beim Vers Schub des Spannglieds über den Sattel (Prozess 2). Nachstehend werden die Beobachtungen beim Ablauf für die neun Versuche angeführt. Ferner werden außergewöhnliche Effekte, die möglicherweise Auswirkungen auf das Versuchsergebnis haben, beschrieben (siehe hierzu auch Anhang Kapitel 1.X.1).

5.1.1 Einaxiale Versuche ohne Innere Gleitung - A

A VT-CMM D:

Der Versuchsablauf erfolgte planmäßig ohne außergewöhnliche Vorkommnisse. Nachstehende Abbildung zeigt die Kraftmessung in Abhängigkeit vom Vers Schubweg der Litzen. Das angestrebte Ziel, beim Versuch eine zwischen 67 % und 70 % der Nennfestigkeit liegende Spannstahlspannung aufrecht zu erhalten, konnte weitgehend eingehalten werden.

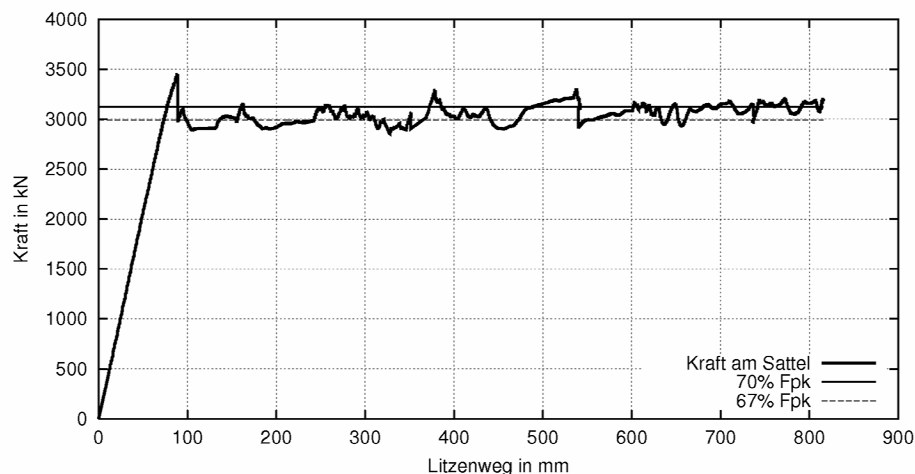


Abbildung 5.1: Kraft-Weg-Diagramm A VT-CMM D

Versuch A VBF-CMM D:

Nach einem Vers Schub von etwa 600 mm wurde das Spannglied durch Einfahren der hydraulischen Pressen auf der Nachlassseite vollständig entlastet (negative Steigung der Last-Verformungs-Kurve, Abbildung 5.2). Nach Behebung einer Störung im Versuchsaufbau konnte mit dem Versuch ohne außergewöhnliche Vorkommnisse planmäßig fortgefahren werden. Die Spannstahtspannung am Umlenksattel lag während des gesamten Vers chubs am oberen Ende des angestrebten Spannungsintervalls, zeitweise sogar darüber.

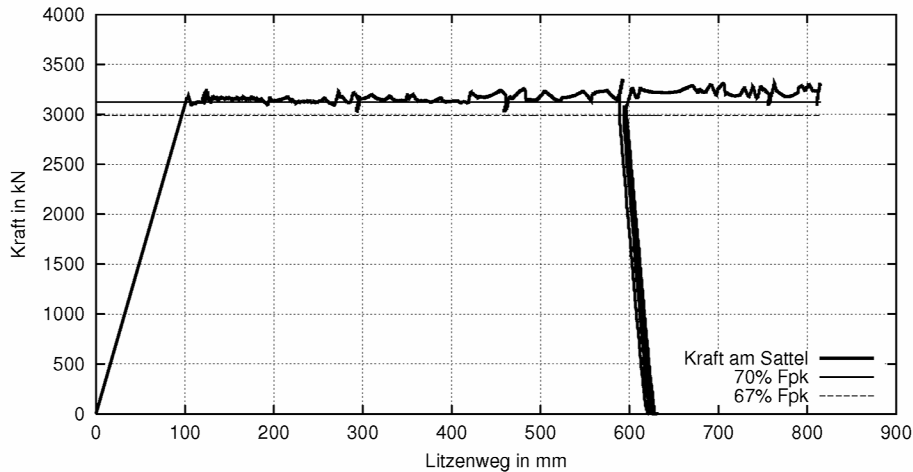


Abbildung 5.2: Kraft-Weg-Diagramm A VBF-CMM D

Versuch A VT-CMM KD:

Der Versuchsablauf erfolgte planmäßig ohne außergewöhnliche Vorkommnisse.

5.1.2 Einaxiale Versuche mit Innerer Gleitung - B

B VT-CMM D:

Während des Versuchs mit Erzeugung von Innerer Gleitung mit dem Schmirgelgewebe trat eine Schiefstellung des am Sattel seitlich nicht gehaltenen Spannglieds auf, die mit zunehmendem Vers chub gravierender wurde (siehe Abbildung 5.3). Das Spannglied wurde wie in Abbildung 5.4 dargestellt nach einem Vers chubweg von etwa 330 mm durch Einfahren der Pressen auf der Nachlassseite (negative Steigung der Last-Verformungs-Kurve) vollständig entlastet, gerade ausgerichtet und für den weiteren Vers chub mit einem Stahlprofil über die gesamte Sattellänge seitlich gehalten. Die positive Steigung der Last-Verformungs-Kurve beim Wiederbelasten zeigt, dass hierzu die hydraulische Presse auf der Spannseite ausgefahren wurde.

Die erneute horizontale gegenseitige Verschiebung der Bänder konnte nicht vollständig verhindert allerdings im Ausmaß begrenzt werden. Abbildung 5.5 zeigt die Lage des Querschnitts des Spannglieds nach Abschluss des Vers chubs.

Die Verdrehung der Litzen einzeldrähte stellt ein Gewinde dar. Bei Innerer Gleitung bewegen sich die Litzen im durch die Umlenkpressung erzeugten „negativen HD-PE Gewinde“

vergleichbar mit einer Schraube. Die Rückstellkräfte führen zunächst zu einer geringen horizontalen Verschiebung der lose übereinander gelegten Bänder.

Durch die Pressung der Litzen auf die jeweils leicht versetzten darunter liegenden Litzen wird die Ulenkkraft der oben liegenden Bänder nicht rein vertikal übertragen sondern mit einer horizontalen Kraftkomponente. Die Litzen streben bei der Umlenkung dann zu einem Abgleiten in die Zwischenräume. Eine anfänglich leichte Verschiebung kann bei fehlender seitlicher Halterung so zu einer extremen Schiefstellung wie in Abbildung 5.3 dargestellt führen.



Abbildung 5.3: Extreme Schiefstellung des Spannglieds B VT-CMM D

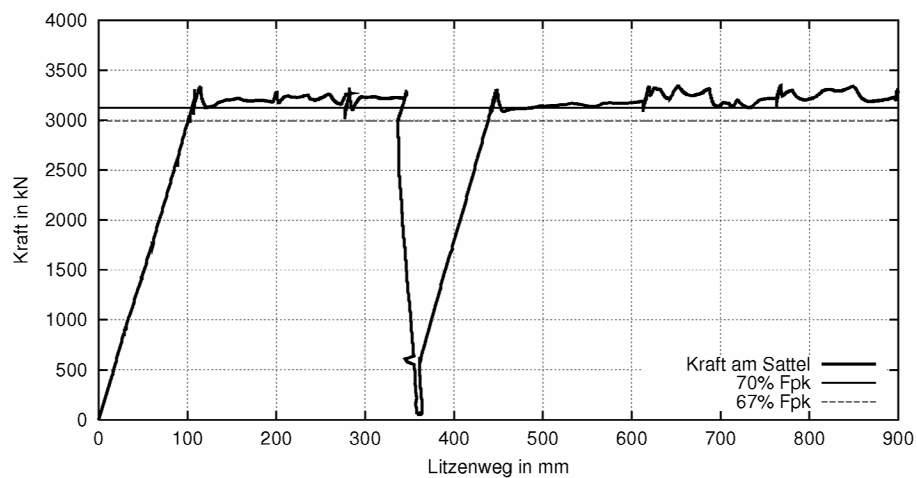


Abbildung 5.4: Kraft-Weg-Diagramm B VT-CMM D

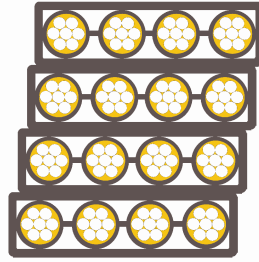


Abbildung 5.5: Position Spannglied nach dem Verschiebungsvorgang B VT-CMM D

Versuch B VBF-CMM D:

Während des Versuchs mit Innerer Gleitung konnte hier die oben genannte extreme Schiefstellung durch die Anordnung einer seitlichen Halterung der vier Bänder am Sattel verhindert werden. Eine leichte Schiefstellung wie in Abbildung 5.5 gezeigt trat auch hier auf.

Versuch B VT-CMM KD:

Während des Versuchs mit Innerer Gleitung konnte auch hier die oben genannte extreme Schiefstellung durch die Anordnung einer seitlichen Halterung der vier Bänder am Sattel verhindert werden. Eine leichte Schiefstellung wie in Abbildung 5.5 gezeigt war auch hier festzustellen.

5.1.3 Zweiaxiale Versuche ohne Innere Gleitung – C

C VT-CMM D:

Bei der zweiaxialen Umlenkung war die Stabilität in horizontaler Richtung aufgrund des Versuchsaufbaus gegeben. Das Umlenkformteil diente dabei automatisch als seitliche Halterung. Der Versuchsablauf erfolgte planmäßig ohne außergewöhnliche Vorkommnisse.

Versuch C VBF-CMM D:

Der Versuchsablauf erfolgte planmäßig ohne außergewöhnliche Vorkommnisse.

Versuch C VT-CMM KD:

Während des Anspannvorgangs und zusätzlich bei Erreichen der Ziellast wurde das Spannglied zur Behebung einer Störung im Versuchsaufbau teil- bzw. vollständig entlastet und wiederbelastet. Im Anschluss konnte der Versuch planmäßig fortgesetzt werden (siehe Abbildung 5.6).

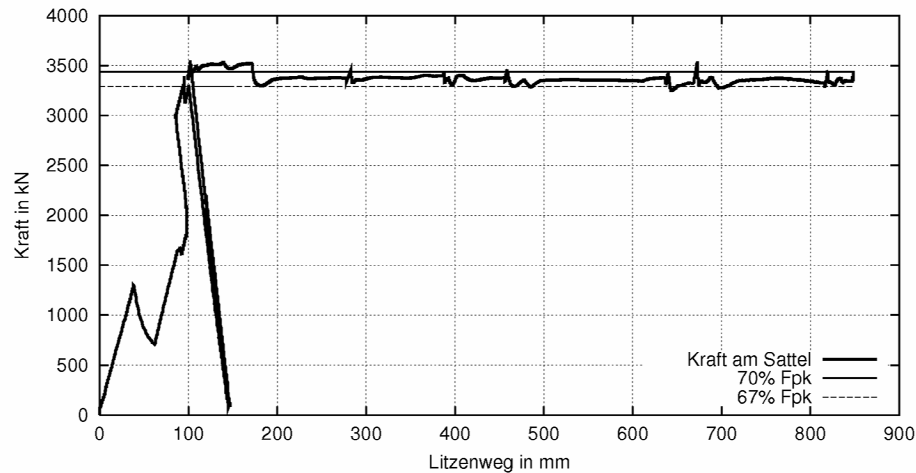


Abbildung 5.6: Kraft-Weg-Diagramm C VT-CMM KD

5.1.4 Gleitbedingungen

Die bei den durchgeführten Versuchen erzielten Gleitbedingungen sind in Tabelle 5.1 angegeben. Bei den Versuchsreihen A und C traten keine nennenswerten Behinderungen auf. Es konnten durchweg hohe Anteile an Äußerer Gleitung von mindestens 98,5 % erreicht werden. Hier wurde festgestellt, dass Innere Gleitung lediglich beim Anspannvorgang und dabei nur bis zum Erreichen von etwa 50% der Nennfestigkeit auftritt.

Durch die Umlenkpressung wird zwischen Litzen und HD-PE eine Verbundwirkung erzeugt, die für die Bewegung des Spannglieds über den Umlenksattel beim Verschieben mit vollständiger Äußerer Reibung verantwortlich ist.

Tabelle 5.1: Bei den Versuchen realisierte Gleitbedingungen

Versuch	Überziehweg der Litzen		Anteil Innere Gleitung		Anteil Äußere Gleitung	
	absolut	relativ	absolut	relativ	absolut	relativ
A VT-CMM D	818 mm	100,0 %	4 mm	0,5 %	814 mm	99,5 %
A VBF-CMM D	822 mm	100,0 %	7 mm	0,9 %	815 mm	99,1 %
A VT-CMM KD	870 mm	100,0 %	8 mm	0,9 %	862 mm	99,1 %
B VT-CMM D	880 mm	100,0 %	420 mm	47,7 %	460 mm	52,3 %
B VBF-CMM D	841 mm	100,0 %	833 mm	99,0 %	8 mm	1,0 %
B VT-CMM KD	814 mm	100,0 %	210 mm	25,8 %	604 mm	74,2 %
C VT-CMM D	872 mm	100,0 %	9 mm	1,0 %	863 mm	99,0 %
C VBF-CMM D	821 mm	100,0 %	12 mm	1,5 %	809 mm	98,5 %
C VT-CMM KD	846 mm	100,0 %	7 mm	0,8 %	839 mm	99,2 %

In Reihe B waren die erzielten Anteile an Innerer Gleitung stark unterschiedlich. Bei Versuch B VT-CMM KD (kompaktierte Litze) wurde der Abstreifrost verwendet. Dieses horizontale Einzelwiderlager führte zu starken an den Außenseiten wellenförmigen Deformationen der Ummantelungen (siehe Abbildung 5.7). Diese Deformationen waren bei der Demontage des Abstreifrosts beim oberen Band erst in einem Abstand von einigen Dezimetern abgeklungen.

Durch die von oben und unten einwirkende Umlenkpressung verhielten sich die unteren Bänder relativ formstabil. Der gestörte Bereich war kürzer.

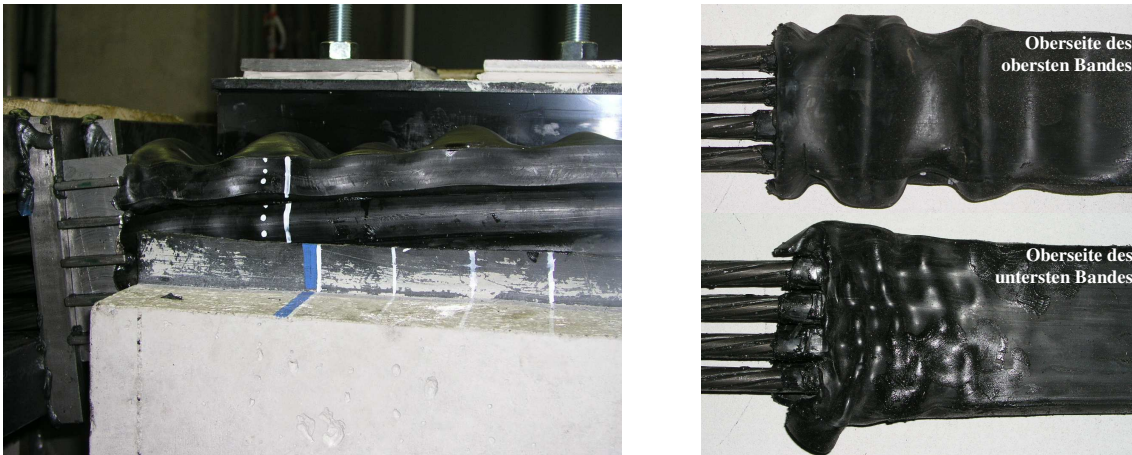


Abbildung 5.7: Aufgestauchtes HD-PE B VT-CMM KD

Dieser Bereich mit den deformierten HD-PE Ummantelungen wurde mit dem bis zum erforderlichen Gesamtlitzenweg verbleibenden Weg mit Äußerer Gleitung unter Last zur freien Länge aus dem Sattelbereich herausbewegt. Aus diesem Grund konnte lediglich ein Anteil an Innerer Gleitung im ungestörten Bereich von 210 mm bzw. 25,8 % erreicht werden.

Die Versuche B VT-CMM D und B VBF-CMM D wurden mit Verwendung des Schmirgelgewebes („Löwenzunge“) durchgeführt. Beim erstgenannten Versuch musste aus o.g. Grund während des Verschiebens einmal vollständig entlastet werden. Bei erneuter Belastung und Fortsetzung des Verschiebens konnte die volle Verbundwirkung des Gewebes nicht mehr erreicht werden. Durch das kurzzeitige Lösen des Verbunds beim Ent- und Wiederbelastungsvorgang kam es zur Zerstörung großer Teile der Gewebe. Nach dem Versuch zeigten die Gewebe starke Schädigungen.

Nach dem Wiederbelasten konnte nur mehr ein Verschieben mit sehr hohem Anteil an Äußerer Gleitung erreicht werden. Insgesamt ergaben sich für den Anteil an Innerer Gleitung bei diesem Versuch 420 mm bzw. 47,7 %. Dass die Verwendung der „Löwenzunge“ trotzdem die zweckmäßigere und deutlich einfacher handhabbarere Alternative für die Erzeugung hoher Reibung zwischen Umlenksattel und Bändern ist, zeigte der Versuch B VBF-CMM D. Hier wurde ohne Zwischenentlastung ein sehr hoher Anteil an Innerer Gleitung von 833 mm bzw. 99,0 % realisiert.

Bei den Versuchen mit Innerer Gleitung war wie oben beschrieben ein Bestreben des Spannglieds nach einer Schiefstellung festzustellen. Ferner traten bei allen drei Versuchen während des Anspann- und Verschiebevorgangs akustisch deutlich vernehmbare Geräusche auf. Dieses laute „Knallen“ entstand beim ruckartigen Lösen der Verbundwirkung zwischen Litzen und innerem HD-PE Mantel. Dabei wirkt der Umlenksattel kurzzeitig als Widerlager oder Verankerung. Wird durch das weitere Fahren der Pressen eine ausreichend hohe Zugkraft aufgebracht löst sich die Verbundeinspannung. Die Litzen gleichen damit durch eine ruckartige Bewegung im Umlenkbereich den unterschiedlichen Spannungszustand im Spannglied vor und

nach der Umlenkstelle wieder aus. Diese kurzzeitigen Einspanneffekte traten vereinzelt auf. Der Großteil der Litzenbewegung erfolgte als kontinuierliches Gleiten durch die Polyethylenhülle.

Der von Hegger [8] mit seiner Kleinversuchsanlage beobachtete Effekt des „Durchwalkens“ der Litzen bei Innerer Gleitung konnte bei keinem der drei Versuche festgestellt werden. Die Autoren führen dies auf eine ausreichend groß gewählte freie Spanngliedlänge von hier etwa 3 m zurück.

Damit treten nur sehr geringe Rückstellkräfte auf. Da die Abstände der Umlenkstellen am Bauwerk sogar noch deutlich größer sind, wird das Auftreten dieses Effekts als sehr unwahrscheinlich angesehen. Das „Walken“ durch das HD-PE ist höchstwahrscheinlich eine auf die Versuchsanlage zurückzuführende Erscheinung.

5.2 Prozess 3 – 21tägige Standzeit

Die ausführliche Darstellung der Messwerte für Prozess 3 ist im Anhang in den Kapiteln 1.X.2 aufgeführt.

5.2.1 Spanngliedkraft

Nach Durchführung des Verschiebevorgangs wurde das Spannglied an der Spannseite am Widerlager verkeilt. Aus dem Schlupf der Keile resultieren sofortige Spannkraftverluste. An der Nachlassseite wurden die Litzen nicht am Widerlager verankert. Die Verankerung erfolgte über die hydraulischen Pressen, deren Zylinder vollständig eingefahren wurden.

Bei einer Spannpresse wurde durch Abriegeln des Ölkreislaufs ein für den Spanngliedausbau erforderlicher Resthub von etwa 100 mm vorgesehen. Auf der Nachlassseite waren zwar keine Keilschlupfverluste zu erwarten, allerdings waren Wegänderungen des Zylinders der Spannpresse mit dem Resthub möglich. Zusätzlich erzeugen die zeitabhängigen Verformungen des HD-PE an den Umlenkstellen Spannkraftverluste.

Nach den Richtlinien zur Umlenkung von externen Spanngliedern ([4], [5], [6]) sollte die Spanngliedkraft während des Verschiebens und während der Standzeit (hier $T = 21$ d) so groß sein, dass die Spannsteelspannung zwischen 67 % und 70 % der Nennfestigkeit liegt. Im Falle eines zu starken Abfalls der Spannkraft hätte diese durch nachträgliches Spannen wieder erhöht werden können. Dies war allerdings bei keinem der durchgeführten Versuche erforderlich. Tabelle 5.2 zeigt die ermittelte Spanngliedkraft am Umlenksattel zu ausgewählten Zeitpunkten.

Tabelle 5.2: Zeitlicher Verlauf der Spanngliedkraft während der Standzeit

Versuch	Vergleichswert:	Spanngliedkraft nach:				
	70 % von F_{pk}	Verschiebung	1 Tag	3 Tage	10 Tage	21 Tage
A VT-CMM D	3125 kN	3164 kN	3132 kN	3121 kN	3108 kN	3102 kN
A VBF-CMM D	3125 kN	3207 kN	3161 kN	3131 kN	3099 kN	3096 kN
A VT-CMM KD	3437 kN	3440 kN	3427 kN	3419 kN	3406 kN	3400 kN
B VT-CMM D	3125 kN	3255 kN	3226 kN	3217 kN	3209 kN	3203 kN
B VBF-CMM D	3125 kN	3131 kN	3072 kN	3049 kN	3028 kN	3021 kN
B VT-CMM KD	3437 kN	3646 kN	3575 kN	3563 kN	3555 kN	3548 kN
C VT-CMM D	3125 kN	3172 kN	3129 kN	3119 kN	3112 kN	3106 kN
C VBF-CMM D	3125 kN	3234 kN	3193 kN	3178 kN	3168 kN	3162 kN
C VT-CMM KD	3437 kN	3443 kN	3400 kN	3382 kN	3360 kN	3351 kN

Die Spannkraftverluste traten zum Großteil in den ersten Tagen der Standzeit auf. Als Beispiel sei in Abbildung 5.8 exemplarisch der zeitliche Verlauf der Spannkraft beim Versuch A VBF-CMM D dargestellt.

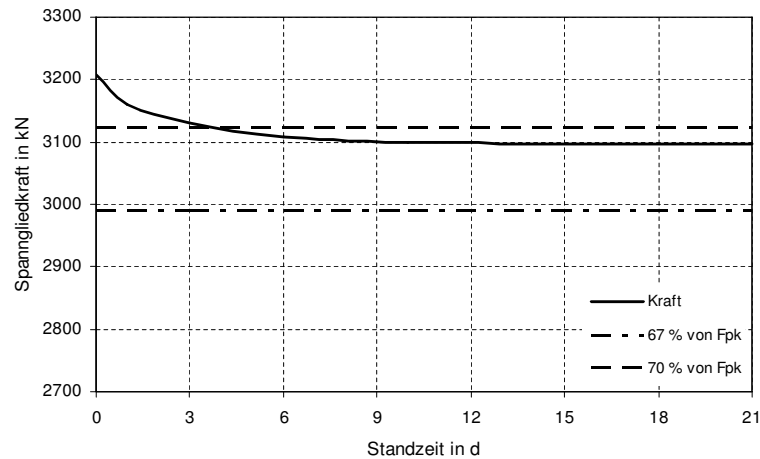


Abbildung 5.8: Verlauf der Spanngliedkraft während der Standzeit A VBF-CMM D

Für die Untersuchung des Einflusses der Umlenkpressung u_p auf den Verschleiß der HD-PE Hüllen ist ein Wert für u_p zu finden, der nach Gleichung 2.2 aus der mittleren Spanngliedkraft P_m ermittelt werden kann. P_m kann nach Gleichung 5.1 für eine Standzeit T errechnet werden.

$$P_m = \frac{1}{T} \cdot \int_{t=0}^{t=T} P(t) dt \quad (\text{Gleichung 5.1})$$

Tabelle 5.3 zeigt die für die einzelnen Versuche gemäß Gleichung 5.1 errechnete mittlere Spanngliedkraft über die Standzeit von 21 Tagen. Die mittleren Spannstahlspannungen liegen dabei zwischen 68,0 % und 72,5 % von F_{pk} .

Tabelle 5.3: Mittlere Spanngliedkraft bei einer Standzeit von $T = 21$ d

Versuch	in kN	in % von F_{pk}
A VT-CMM D	3112,1	69,7
A VBF-CMM D	3110,7	69,7
A VT-CMM KD	3409,3	69,4
B VT-CMM D	3211,7	71,9
B VBF-CMM D	3035,5	68,0
B VT-CMM KD	3558,5	72,5
C VT-CMM D	3114,2	69,8
C VBF-CMM D	3171,7	71,1
C VT-CMM KD	3366,4	68,6

5.2.2 Temperatur

Die Umgebungstemperatur soll bei Umlenkversuchen nach den Richtlinien zur Umlenkung von externen Spanngliedern ([4], [5], [6]) maximal um 5 °C von 20 °C abweichen. Diese Anforderung wurde für alle Versuche eingehalten. Die Umlenkversuche wurden in der Prüfhalle des Laboratoriums für den Konstruktiven Ingenieurbau der TU München durchgeführt. Die besondere Konstruktion des Gebäudes stellte sicher, dass keine extremen Temperaturschwankungen auftraten. Die mittlere Temperaturbeanspruchung T_m während der 21tägigen Standzeit kann analog der mittleren Spanngliedkraft P_m (siehe Kapitel 5.2.1) ermittelt

werden. Zusätzlich zu T_m sind in Tabelle 5.4 noch die Extremwerte T_{max} und T_{min} sowie der Zeitraum der Versuchsdurchführung gegeben. Die Versuche unterliegen sehr ähnlichen thermischen Beanspruchungen. Die mittlere Temperaturbeanspruchung T_m unterscheidet sich dabei höchstens um 2,7 K, der Maximalwert um höchstens 3,0 K. Diese Randbedingungen erlaubten die Durchführung der Versuche unter vergleichbaren thermischen Bedingungen.

Tabelle 5.4: Temperaturbelastung während der Standzeit

<i>Versuch</i>	T_m in °C	T_{max} in °C	T_{min} in °C	<i>Monat/Jahr</i>
A VT-CMM D	21,4	22,0	21,0	Dezember 2004
A VBF-CMM D	22,0	22,9	20,4	Mai 2005
A VT-CMM KD	21,4	22,4	20,9	Januar 2005
B VT-CMM D	22,6	23,6	21,3	April 2005
B VBF-CMM D	23,3	24,8	22,0	Juni 2005
B VT-CMM KD	20,9	21,8	20,2	Februar 2005
C VT-CMM D	20,6	22,2	18,1	Oktober 2005
C VBF-CMM D	22,3	24,6	21,6	Juli 2005
C VT-CMM KD	22,5	24,3	20,4	September/Oktober 2005

5.2.3 Zeitabhängige Verformungen

Der Verlauf der zeitabhängigen elastischen und plastischen Verformungen kann anhand der Messung der vertikalen Verformung des Gesamtspannglieds beobachtet werden. Die Messungen wurden jeweils nach Abschluss des Verschiebens gestartet und vor Entlastung nach 21 Tagen beendet. Die sofortigen Verformungen sind somit in der Messgröße nicht enthalten. Tabelle 5.5 zeigt den Anteil an der nach 21 Tagen erreichten Gesamtverformung zu ausgewählten Zeitpunkten (Mittelwert aus drei Einzelwerten). Die vertikale Einsenkung bzw. die vertikalen Verformungen des Gesamtpaketes wurde an drei Stellen am Umlenksattel (je 50 mm innerhalb der beiden Abhebepunkte sowie zusätzlich mittig) gemessen. Diese Messungen wurden erst nach Abschluss des Überziehvorgangs gestartet.

Tabelle 5.5: Zeitlicher Verlauf der vertikalen Verformung am Gesamtspannglied während der Standzeit

<i>Versuch</i>	<i>Verformungsanteil nach:</i>	<i>Verschiebung</i>	<i>1 Tag</i>	<i>3 Tage</i>	<i>10 Tage</i>	<i>21 Tage</i>
A VT-CMM D		0 %	69 %	83 %	96 %	100 %
A VBF-CMM D		0 %	74 %	88 %	98 %	100 %
A VT-CMM KD		0 %	83 %	91 %	97 %	100 %
B VT-CMM D		0 %	79 %	89 %	97 %	100 %
B VBF-CMM D		0 %	77 %	91 %	99 %	100 %
B VT-CMM KD		0 %	80 %	89 %	97 %	100 %
C VT-CMM D		0 %	72 %	88 %	97 %	100 %
C VBF-CMM D		0 %	74 %	88 %	97 %	100 %
C VT-CMM KD		0 %	77 %	91 %	98 %	100 %

Die Verformungen traten zum Großteil in den ersten Tagen der Standzeit auf. Als Beispiel sei in Abbildung 5.9 exemplarisch der zeitliche Verlauf der Spannkraft beim Versuch A VT-CMM D

dargestellt. Die Verformungskurve konvergiert auch im logarithmischen Maßstab. Es kann also von einem abklingenden Verformungsverhalten ausgegangen werden.

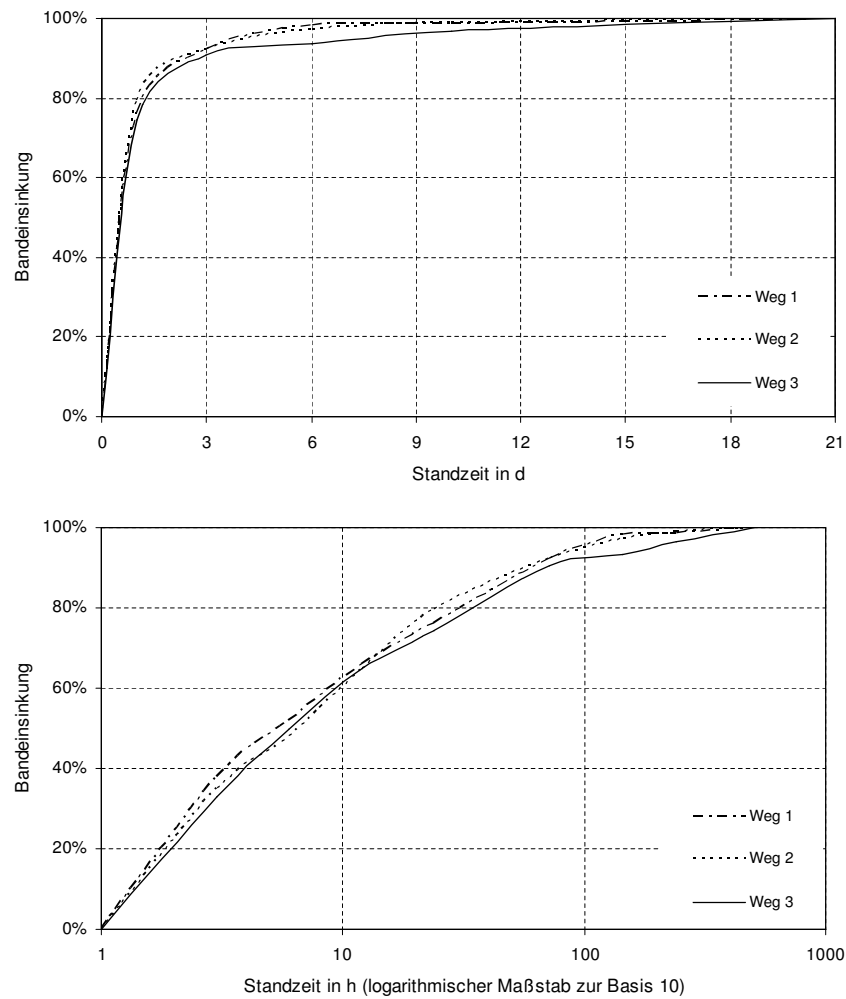


Abbildung 5.9: Verlauf der Spanngliedkraft während der Standzeit C VT-CMM KD

5.3 Restwandstärke bzw. Wandstärkeverlust

Von den Verfassern wird die Restwandstärke der HD-PE Hüllen oder der Wandstärkeverlust als maßgebende Größe bei der Beurteilung der Dauerhaftigkeit von externen Spanngliedern angesehen. Der Wandstärkeverlust ist die Differenz aus Ausgangswandstärke und Restwandstärke. Dieser kann als Maß für den Verschleiß bei bestimmten Randbedingungen angesehen werden. Die hier untersuchten Einflussparameter sind

- Umlenkpressung
- Umlenkrichtung
- Reibungsverhältnisse
- Zeitabhängiges Verhalten

Alle Messwerte der Restwandstärke sind vollständig im Anhang aufgeführt. Nachstehend werden lediglich Diagramme gezeigt, die den Mittelwert von vier Messungen innerhalb eines Bandes zeigen. Bei der Darstellung lediglich eines Einflussparameters werden mitunter mehrere Klassen eines anderen Einflussparameters zusammen dargestellt. Dies führt zu streuenden Ergebnissen. Eine eindeutige Trennung ist ohne eine Korrektur der Messwerte lediglich in Form einer Matrix (siehe Ergebnistableaus im Anhang) nicht aber bei zweidimensionalen Diagrammen möglich.

Für die auf Kapitel 5.3.2 folgenden Kapitel werden die Wirkungen der genannten Einflussparameter z.T. getrennt für unterschiedliche Klassen der Umlenkpressung untersucht. Es wird angenommen, dass dieser Einflussparameter die größte Wirkung auf den Wandstärkeverlust hat.

Es werden folgende Klassen gebildet:

Tabelle 5.6: Einstufung der Umlenkpressungen in Klassen

<i>Klasse</i>	<i>Umlenkpressung</i>	<i>Beschreibung</i>
P0	0 kN/m	Ausgangsmaterial, Oberseite des obersten Bandes (B4 ^{*)})
P1	bis 55 kN/m	Unterseite B4, Oberseite B3
P2	bis 110 kN/m	Unterseite B3, Oberseite B2
P3	bis 166 kN/m	Unterseite B2, Oberseite B1
P4	bis 223 kN/m	Unterseite B1

^{*)} B4 entspricht viertem Band von unten; B3, B2 und B1 analog.

5.3.1 Ausgangswandstärke

Tabelle 5.7 und Tabelle 5.8 zeigen die Ausgangswanddicken der inneren und äußeren Mäntel bei allen eingebauten Bändern (Mittelwert aus acht Einzelwerten – Messstellen u1 bis u4, o1 bis u4 für die inneren Mäntel und Messstellen U1 bis U4, O1 bis O4 für den äußeren Mantel).

Alle Einzelwerte sowie die Verteilungskennzahlen Standardabweichung, Minimum und Maximum sind im Anhang gegeben (Anhang Kapitel 1.X.3). Die Messstellen entsprachen somit in ihrer Lage im Querschnitt denen der Restwandstärkemessung nach Durchführung der Versuche (siehe Messstelle R, Abbildung 4.8).

Tabelle 5.7: Ausgangswandstärken der äußeren Ummantelung (Mittelwerte)

<i>Versuch</i>	<i>Sollwert (Zulassung)</i>	<i>Band 1</i>	<i>Band 2</i>	<i>Band 3</i>	<i>Band 4</i>
A VT-CMM D	≥ 3,00 mm	3,57 mm	3,11 mm	3,56 mm	3,56 mm
A VBF-CMM D	≥ 3,00 mm	2,89 mm	3,11 mm	2,96 mm	2,98 mm
A VT-CMM KD	≥ 3,00 mm	3,49 mm	3,50 mm	3,45 mm	3,59 mm
B VT-CMM D	≥ 3,00 mm	3,52 mm	3,45 mm	3,53 mm	3,51 mm
B VBF-CMM D	≥ 3,00 mm	3,04 mm	3,10 mm	2,96 mm	3,10 mm
B VT-CMM KD	≥ 3,00 mm	3,57 mm	3,61 mm	3,62 mm	3,57 mm
C VT-CMM D	≥ 3,00 mm	3,43 mm	3,38 mm	3,56 mm	3,57 mm
C VBF-CMM D	≥ 3,00 mm	2,99 mm	2,93 mm	2,92 mm	2,92 mm
C VT-CMM KD	≥ 3,00 mm	3,64 mm	3,65 mm	3,64 mm	3,69 mm

*) Band 1 entspricht dem ersten Band von unten; Band 2, Band 3 und Band 4 analog.

Auffallend deutlich von den häufigsten mittleren Werten für die Wanddicke der Außenmäntel der Bänder (ca. 3,5 mm für die VT Systeme; ca. 3,0 mm für System VBF) weichen die Ausgangswandstärken bei folgenden Bändern ab:

- A VT-CMM D - Band 2 (ca. -0,40 mm)
- C VT-CMM KD – Band 1 bis 4 (ca. +0,15 mm)

Tabelle 5.8: Ausgangswandstärken der inneren Ummantelung (Mittelwerte)

<i>Versuch</i>	<i>Sollwert (Zulassung)</i>	<i>Band 1</i>	<i>Band 2</i>	<i>Band 3</i>	<i>Band 4</i>
A VT-CMM D	≥ 1,50 mm	1,78 mm	1,33 mm	1,70 mm	1,76 mm
A VBF-CMM D	≥ 1,75 mm	1,72 mm	1,69 mm	1,75 mm	1,78 mm
A VT-CMM KD	≥ 1,50 mm	1,78 mm	1,79 mm	1,78 mm	1,81 mm
B VT-CMM D	≥ 1,50 mm	1,54 mm	1,57 mm	1,59 mm	1,53 mm
B VBF-CMM D	≥ 1,75 mm	1,71 mm	1,82 mm	1,71 mm	1,73 mm
B VT-CMM KD	≥ 1,50 mm	1,79 mm	1,77 mm	1,87 mm	1,79 mm
C VT-CMM D	≥ 1,50 mm	1,55 mm	1,45 mm	1,60 mm	1,56 mm
C VBF-CMM D	≥ 1,75 mm	1,48 mm	1,56 mm	1,48 mm	1,49 mm
C VT-CMM KD	≥ 1,50 mm	1,72 mm	1,76 mm	1,80 mm	1,70 mm

*) Band 1 entspricht dem ersten Band von unten; Band 2, Band 3 und Band 4 analog.

Bei den Innenmänteln weichen die Ausgangswandstärken bei folgenden Bändern deutlich von den am häufigsten gemessenen mittleren Werten (ca. 1,75 mm) ab:

- A VT-CMM D - Band 2 (ca. -0,40 mm)
- B VT-CMM D - Band 1 bis 4 (ca. -0,20 mm)
- C VT-CMM D - Band 1 bis 4 (ca. -0,20 mm)
- C VBF-CMM D - Band 1 bis 4 (ca. -0,25 mm)

5.3.2 Umlenkpressung

Die auf die Schutzhüllen einwirkende Umlenkpressung übt den größten Einfluss auf die Reduzierung ihrer Wanddicken aus. Um den Verschleiß bzw. den Wandstärkeverlust genau quantifizieren zu können ist es sinnvoll den gemessenen Wert der Restwandstärke an einer Stelle mit der Ausgangswandstärke an einer vergleichbaren Stelle gegenüberzustellen. Aufgrund des Herstellvorgangs (siehe Kapitel 3.3) sind vergleichbare Stellen in Längsrichtung einer Hülle aufzusuchen.

Als Referenzmesswert ist deshalb das oberste Band ungeeignet, obwohl es an seiner Oberseite während des gesamten Versuchs vollständig unbelastet ist. Am sinnvollsten ist die Wahl der Referenzmessstellen in der freien Spanngliedlänge möglichst nah am Umlenksattel. Diese Art der Ermittlung des Verschleißes bzw. Wandstärkeverlusts liegt den Diagrammen zur Darstellung der Abhängigkeit von der Umlenkpressung im Anhang zu Grunde (Anhang Kapitel 1.X.3). Nachstehende Diagramme (Abbildung 5.10 bis Abbildung 5.12) zeigen allerdings die Restwandstärke ohne Bezug auf die Referenzmessung. Diese Art der Darstellung erlaubt eine qualitativ umfassendere Beurteilung der Ergebnisse.

Bei den einaxialen Versuchen ohne Innere Gleitung (Versuche A, siehe linkes Diagramm in Abbildung 5.10) nimmt die verbleibende Wandstärke der äußeren Ummantelung, die hier mit dem Mittelwert der bis zu jeweils acht Messstellen erfasst ist, nur leicht ab. Selbst bei sehr hohen Pressungen von etwa 200 kN/m in der untersten Bandlage nimmt die mittlere Wandstärke im Vergleich zur mittleren Ausgangswandstärke um maximal etwa 0,7 mm (Abnahme um ca. 20 %) ab.

Die Abnahme der Wandstärke bei Versuch A VBF-CMM D ist trotz der geringeren Ausgangswandstärke von ca. 3,0 mm nur unwesentlich größer als bei den beiden VT Systemen. Bei der inneren Ummantelung (siehe rechtes Diagramm in Abbildung 5.10) nimmt die Wandstärke mit bis zu etwa 50 % in deutlich höherem Maße ab. Der mittlere Abfall beträgt bis zu 0,8 mm. Vor allem bei der inneren Ummantelung zeigt die in A VT-CMM KD verwendete kompaktierte Litze größere Restwandstärken und somit ein deutlich geringeres Eindrücken. Die im Vergleich zu den anderen Systemen extrem geringe mittlere Restwandstärke bei Versuch A VT-CMM D bei einer Umlenkpressung von etwa 150 kN/m (entspricht Band 2) ist auf die äußerst geringe Ausgangswandstärke von 1,33 mm zurückzuführen (vgl. Tabelle 5.8).

Bei den einaxialen Versuchen mit Innerer Gleitung nimmt die Wandstärke der äußeren Ummantelung bei hohen Umlenkpressungen zwar leicht ab (Versuche B, siehe linkes Diagramm in Abbildung 5.11), allerdings ist keine signifikante Abweichung zu den Versuchen ohne Innere Gleitung feststellbar (Versuche A). Bei Innerer Gleitung findet eine Relativbewegung zwischen innerer Ummantelung und Litze statt. Die Beanspruchung der äußeren Ummantelung entspricht also der ohne Innere Gleitung.

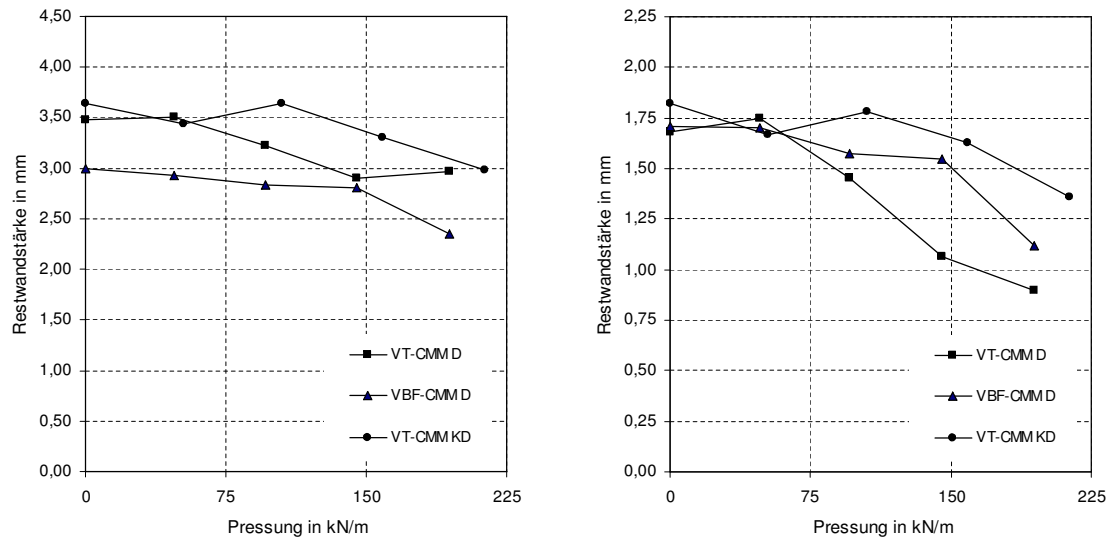


Abbildung 5.10: Mittelwerte der Restwandstärken der äußeren (li.) und inneren Mäntel (re.) – Versuche A

Bei der inneren Ummantelung hingegen ist ein höherer Verschleiß bei den Versuchen mit Runddrahtlitze zu erkennen (siehe rechtes Diagramm in Abbildung 5.11). Die beiden Spannglieder mit Runddrahtlitze weisen qualitativ ein sehr ähnliches Verhalten (Verlauf der Wandstärkenkurve) auf. Die Kurve des Systems VT-CMM D liegt dabei unter der Kurve des Systems VBF-CMM D. Aus der in diesem Versuch bei allen Bändern vorliegenden geringeren Ausgangswandstärke (siehe Tabelle 5.8) resultiert folglich die niedrigere mittlere Restwandstärke bei höheren Pressungen, die bis über 1,0 mm von der Ausgangswandstärke abweicht. Dabei wurden vor allem beim hoch beanspruchten untersten Band äußerst geringe Ausgangswandstärken deutlich unter 1,5 mm gemessen.

Das bei den Versuchen festgestellte günstigere Eindrückverhalten der kompaktierten Litze kann auch hier beobachtet werden.

Zusätzlich kann bei Versuch B VT-CMM KD (kompaktierte Litze) eine stärkere Eindrückung der Litze infolge innerer Gleitung nicht festgestellt werden. Der Anteil an Innerer Gleitung betrug hier nur 25,8 % bzw. 210 mm, wohingegen dieser Anteil bei Versuch B VT-CMM D mit 47,7 % bzw. 420 mm und bei Versuch VBF-CMM D mit 99,0 % bzw. 841 mm recht hoch war.

Die Streuung der Ergebnisse ist größer als bei den Versuchen A. Dies wird vor allem auf die bei den Versuchen B auftretende Schiefstellung zurückgeführt. Durch diese unsymmetrische und somit ungleichmäßige Belastung ist es wahrscheinlich, dass die Hüllen innerhalb eines Bandes eine unterschiedlich große Umlenkpressung erfahren.

Die gemessenen Restwandstärken bei den zwei axialen Versuchen sind in Abbildung 5.12 gegen die anliegende Umlenkpressung aufgetragen. Das Verhalten des HD-PEs der äußeren Ummantelung ist dem der Versuchsreihen A und B sehr ähnlich (siehe linkes Diagramm in Abbildung 5.12). Erst bei sehr hohen Umlenkpressungen ist ein gewisser Abfall der Wandstärke zu beobachten. Allerdings bewegt sich dieser in einem Bereich bis maximal etwa 20 % der Ausgangswandstärke.

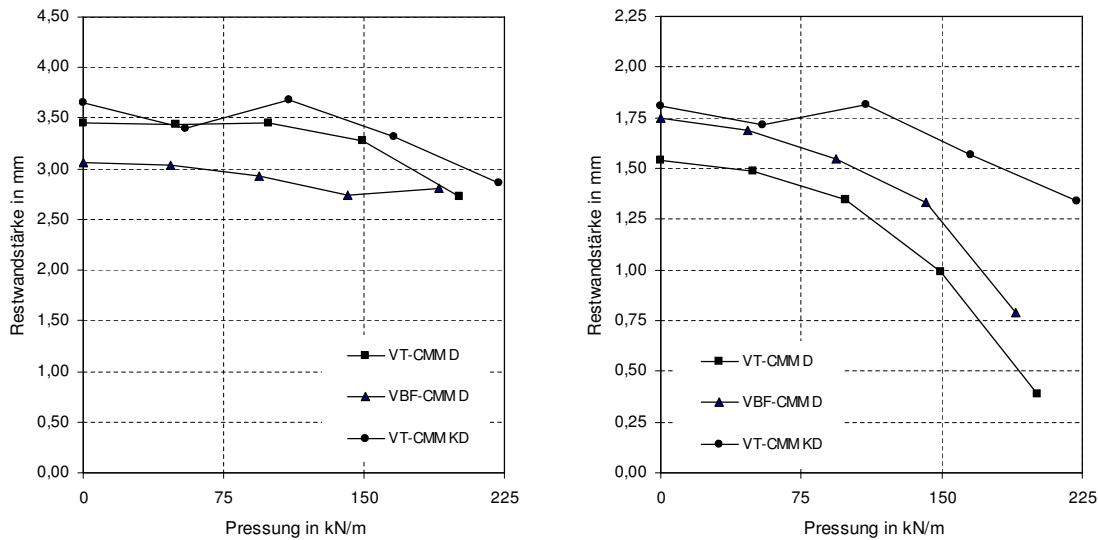


Abbildung 5.11: Mittelwerte der Restwandstärken der äußeren (li.) und inneren Mäntel (re.) – Versuche B

Die im rechten Diagramm von Abbildung 5.12 dargestellte Wanddicke der inneren Ummantelung verläuft für alle Systeme etwas ungünstiger als bei der einaxialen Umlenkung. Die beiden Versuche mit Runddrahtlitze sind hier in ihrem Ergebnis sehr ähnlich. Der Abfall beträgt maximal bis zu etwa 0,8 mm. Die Ummantelung wird bei Verwendung der kompaktierten Litze, die erneut ein deutlich weniger verschleißendes Verhalten aufweist, maximal im Mittel um 0,6 mm in ihrer Wanddicke reduziert.

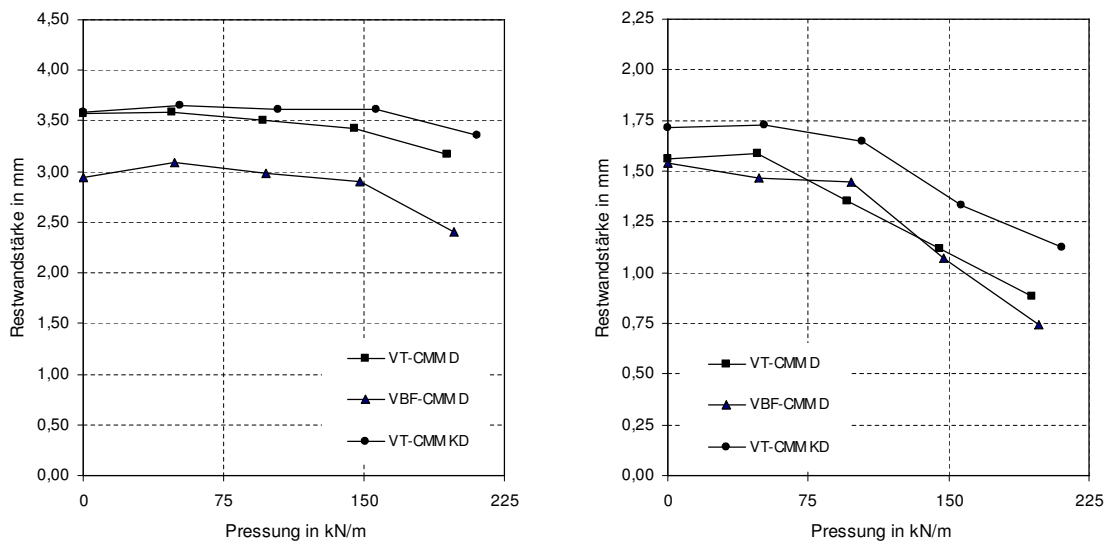


Abbildung 5.12: Mittelwerte der Restwandstärken der äußeren (li.) und inneren Mäntel (re.) – Versuche C

5.3.3 Reibungsverhältnisse

Einfluss der Äußeren Gleitung:

Um festzustellen, ob der Grad der Eindrückung der Litzen in das HD-PE abhängig vom Umfang des Spanngliedverschubs mit Äußerer Gleitung ist, werden die Versuche herangezogen, die fast vollständig mit Äußerer Gleitung durchgeführt wurden. Bei den Versuchen mit Innerer Gleitung sind beide Gleitkomponenten vertreten (mit Ausnahme von Versuch B VBF-CMM D; hier wurden annähernd 100 % Innere Gleitung erreicht). Um die beiden Einflüsse von einander unterscheiden zu können, werden diese Versuche (B) zunächst nicht herangezogen. Abbildung 5.13 zeigt den mittleren Wandstärkeverlust des äußeren Mantels an der Unterseite des untersten Bandes (Mittelwert aus U1 bis U4, siehe Abbildung 4.9).

Dieses Band liegt direkt auf dem Umlenkformteil auf und ist am höchsten beansprucht. Es entspricht der Beanspruchungsklasse P4. Die Ergebnisse der Restwandstärkemessung an dieser Stelle werden dargestellt, da Äußere Gleitung lediglich dort Reibvorgänge hervorruft. Zwischen den Bändern bzw. zwischen Litzen und HD-PE Ummantelungen treten keine Relativverschiebungen auf, die gleichbedeutend mit Reibbeanspruchungen sind. Als Referenzwert wird die gemessene Restwandstärke an der Messstelle 25 am Ende des Umlenksattels (Längsrichtung, siehe Abbildung 4.8) angenommen.

Dort ertrug das HD-PE lediglich einen Äußeren Gleitweg von etwa 80 mm. Der aufgezeichnete Wandstärkeverlust zeigt keine ausgeprägte Korrelation mit dem Umfang an Äußerer Gleitung. Lässt man die Ergebnisse des Versuchs A VT-CMM D außen vor, so ist nach einem teilweise deutlichen Abfall der Wandstärke zwischen 80 mm und 280 mm an äußerem Gleitweg ein abklingendes Verformungsverhalten erkennbar.

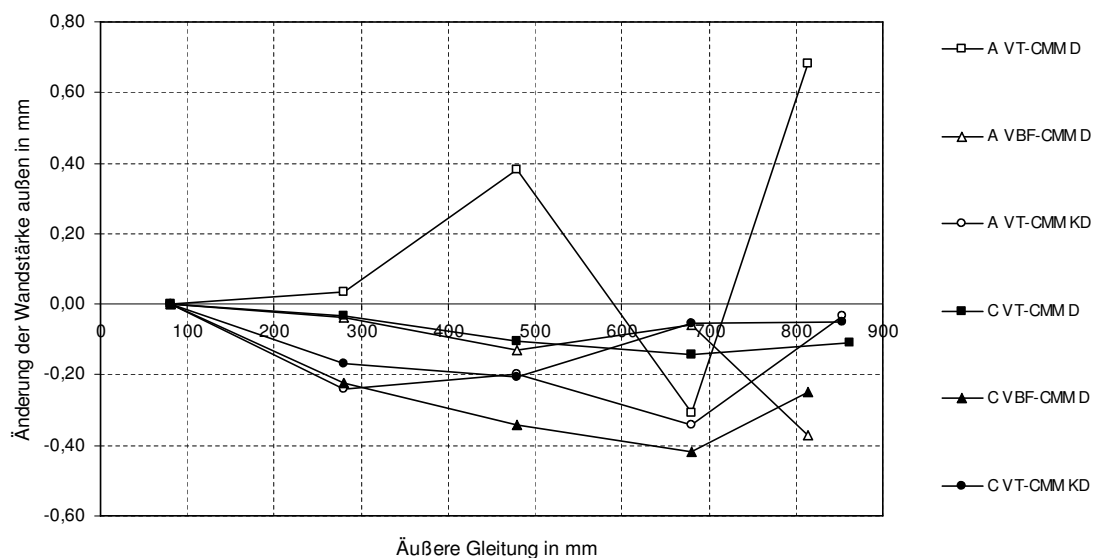


Abbildung 5.13: Mittelwerte der Wandstärkeverluste des äußeren Mantels P4 (bezogen auf 80 mm)

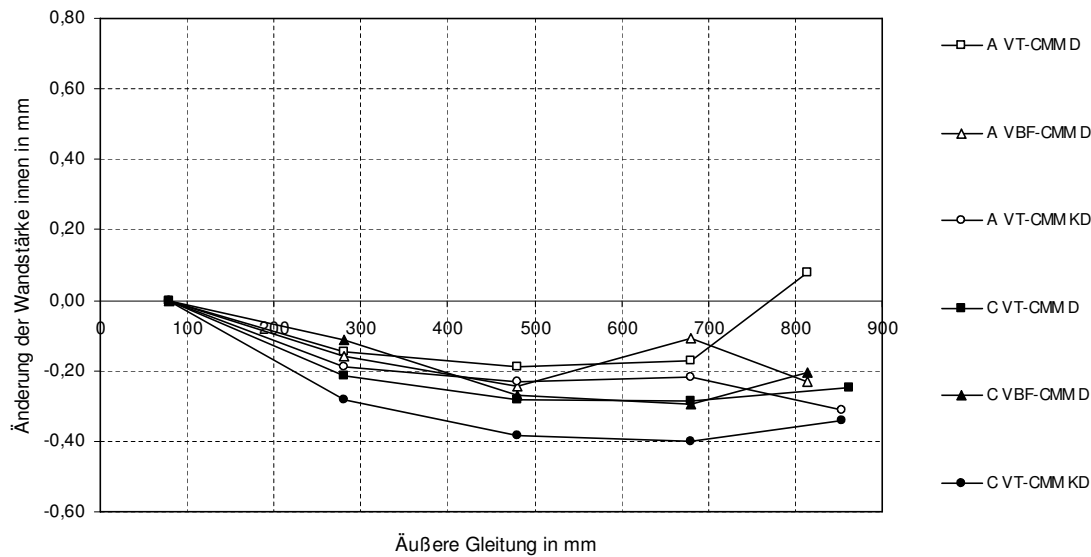


Abbildung 5.14: Mittelwerte der Wandstärkeverluste des inneren Mantels P4 (bezogen auf 80 mm)

Abbildung 5.14 zeigt den auf die Referenzstelle 25 bezogenen mittleren Wandstärkeverlust der inneren Ummantelungen. Diese Ummantelung unterliegt zwar keiner Reibbeanspruchung, allerdings können Effekte bei der äußeren Ummantelung durch die Korrelation zwischen den beiden Ummantelungen u.U. erklärt werden. So ist beispielsweise sogar noch deutlicher ein Abfall der Wandstärke zwischen Messstelle 25 und Messstelle 24 erkennbar. Dadurch, dass die innere Ummantelung aller Bänder eine ähnliche Charakteristik aufweist, liegt die Vermutung nahe, dass nicht die Beanspruchung durch äußere Gleitung diese Tendenzen hervorruft sondern unterschiedliche Umlenkpressungen. Für Messstelle 25 ist eine Überprüfung der Pressungsverhältnisse aus diesem Grund erforderlich.

Elastische und Plastische Verformungen der HD-PE Ummantelungen rufen am Gesamtspannglied eine Verkleinerung der gesamten vertikalen Spanngliedabmessung hervor. Über die nach der Standzeit gemessenen Restwandstärken der Bänder kann die plastische Verformung ermittelt werden. Der Unterschied zur ursprünglichen Abmessung im unbelasteten Zustand beträgt bis zu 8 mm. Elastische Verformungen, das Zusammendrücken von Hohlräumen und vor allem das versetzte Aufeinanderliegen der Litzen kann in ungünstigen Fällen bis zu einer gesamten vertikalen Verformung von bis zu etwa 20 mm führen.

An den Verankerungen (Widerlager) tritt dieser Effekt ebenfalls auf, so dass sich dadurch die Neigung des Spanngliedes verringert. Hierzu sei nochmals angemerkt, dass die Neigung des Spanngliedes keinerlei Einfluss auf die Umlenkpressung hat sondern nur die Länge der Spanngliedaufstandslänge am Umlenksattel bzw. den Abstand der Abhebepunkte zueinander bestimmt. Eine geringere Neigung führt zu einem geringeren Abstand der Abhebepunkte zueinander. Geht man von einer anfänglichen Neigung von $7,5^\circ$ aus, so ergibt sich für diesen Abstand d eine (Bogen-)länge von

$$d = \frac{2 \cdot 7,5^\circ}{360^\circ} \cdot 2 \cdot r \cdot \pi = 1,05 \text{ m} \quad (\text{Gleichung 5.2})$$

Bei einer freien Spanngliedlänge zwischen Widerlager und Umlenksattel von 3 m besteht zwischen Umlenksattel und Widerlager eine Höhendifferenz von 395 mm. Bei einem Zusammendrücken des Bandes um geschätzte $2 \cdot 20$ mm folgt mit der jetzigen Höhendifferenz von 355 mm ein Neigungswinkel von $6,7^\circ$ und analog Gleichung 5.2 ein Abstand d von nur noch 0,94 m. Das bedeutet, dass während des Versuchs durch die Verformungen des Spannglieds die Abhebepunkte zum Scheitel des Umlenksattels nach Innen wandern. Dieser Effekt ist umso ausgeprägter je weiter außen von der Umlenkstelle das betrachtete Band liegt. An den theoretischen Abhebepunkten und in den benachbarten Bereichen des Umlenksattels liegt dann eine etwas geringere Umlenkpressung an. Es ist somit unter Berücksichtigung etwaiger elastischer Verformungen des gesamten Versuchsstandes unter den gegebenen enorm hohen Belastungen durchaus denkbar, dass an der Messstelle 25, die im Abstand von 80 mm vom theoretischen Abhebepunkt liegt, noch nicht die volle Umlenkpressung anliegt.

Die Umlenkpressung hat wie in Kapitel 5.3.2 dargestellt den entscheidenden Einfluss auf die Restwandstärke. Im Bereich von Umlenkpressungen der Klasse P4 kann eine um 10% verminderte Pressung ohne weiteres im Mittel einen um bis zu 0,2 mm geringeren Wandstärkeverlust zur Folge haben.

Abbildung 5.15 für den äußeren Mantel und Abbildung 5.16 für die inneren Hüllen zeigen nun die gemittelten Wandstärkeverluste in Abhängigkeit vom äußeren Gleitweg für die Unterseite von Band 1 (Klasse P4) mit Messstelle 24 als Referenzpunkt. Alle Einzelwerte sind im Anhang tabellarisch und in Diagrammen für die Versuche dargestellt (Anhang Kapitel 1.X.3). Die Messstelle 24 ist der nächste erfasste Punkt am Umlenksattel – dort wird das Polyethylen hoher Dichte trotz möglicher Verformungen der Komponenten mit voller Umlenkpressung beansprucht. Besonders bei der relevanten äußeren Ummantelung ist kein signifikanter vom äußeren Gleitweg abhängiger Wandstärkeabfall erkennbar.

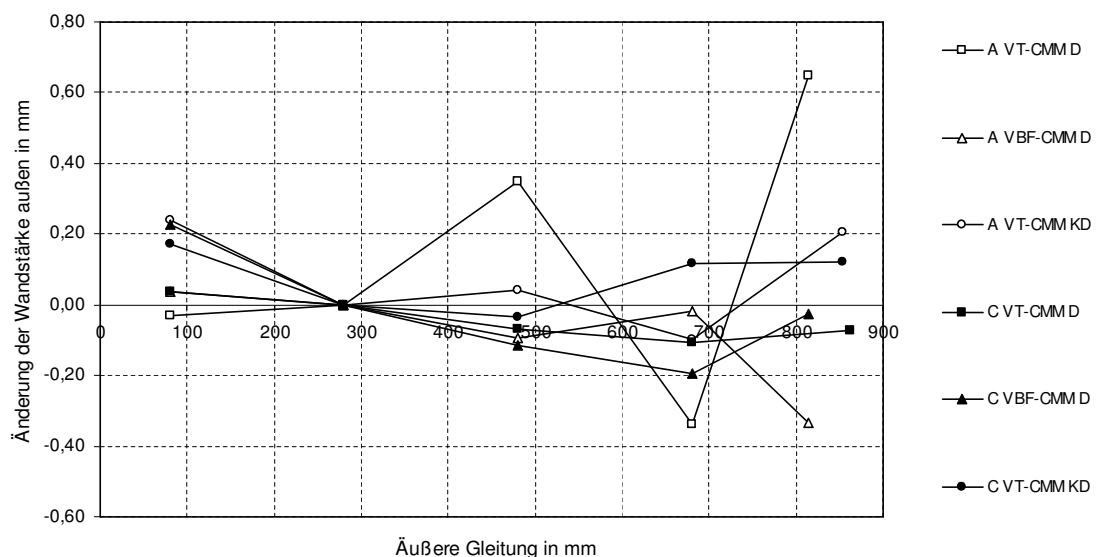


Abbildung 5.15: Mittelwerte der Wandstärkeverluste des äußeren Mantels P4 (bezogen auf 280 mm)

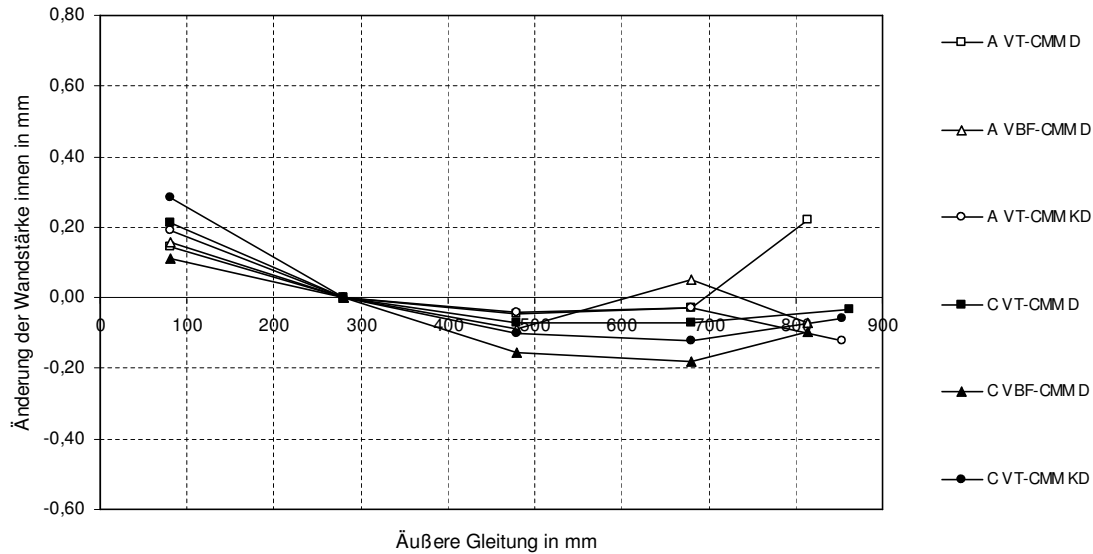


Abbildung 5.16: Mittelwerte der Wandstärkeverluste des inneren Mantels P4 (bezogen auf 280 mm)

Einfluss der Inneren Gleitung:

Wird das Spannglied beim Umlenkversuch mit Innerer Gleitung verschoben, so bewegen sich lediglich die Spannstahlitzen über den Sattel. Die Polyethylenummantelungen verbleiben in ihrer ursprünglichen Position. An allen Stellen am Umlenksattel tritt folglich eine gleich große Relativbewegung zwischen Litzen und innerer HD-PE Ummantelung auf.

Es ist für die Darstellung der Ergebnisse daher nicht zweckmäßig, den Wandstärkeverlust über den Inneren Gleitweg aufzutragen. Hier wird der Darstellung des Wandstärkeverlusts in Abhängigkeit von der Umlenkpressung der Vorzug gegeben. Um die Ergebnisse einordnen zu können, werden zusätzlich die Mittelwerte der Änderung der Wandstärke der Versuche ohne Innere Gleitung (Versuche A und C) dargestellt (siehe Abbildung 5.17 bis Abbildung 5.22).

Die Relativbewegung zwischen Spannstahl und Innenmantel führt durch die Reibung zu einem Abrieb von Kunststoffpartikeln. Die äußere Ummantelung ist von dieser Beanspruchung zunächst nicht direkt betroffen. Wird der Innere Mantel durch Umlenkpressung und Abrieb allerdings sehr dünn und somit die Lastverteilung unter den Einzeldrähten weniger gleichmäßig, so wird die äußere Ummantelung auch beeinträchtigt. Aus diesem Grund sind die Diagramme für die äußere Ummantelung ebenfalls dargestellt.

Bei Spanngliedtyp VT CMM D wurde im Versuch B ein Anteil an innerer Gleitung von 420 mm bzw. 47,7 % erreicht. Der mittlere Wandstärkeverlust liegt wie in Abbildung 5.17 erkennbar stets betragsmäßig über den Verlusten bei Versuch A und Versuch C. Der mittlere Unterschied beträgt dabei etwa 0,2 bis 0,3 mm. Ein Einfluss auf die äußere Ummantelung ist lediglich im Bereich sehr hoher Pressungen feststellbar (Abbildung 5.18). Die Restwandstärken fallen dort sehr stark ab.

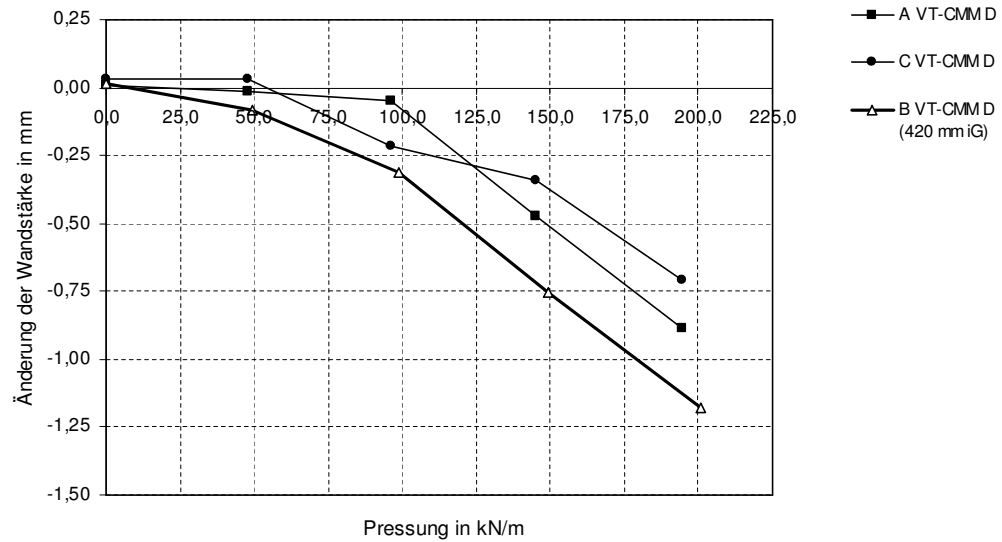


Abbildung 5.17: Mittelwerte der Wandstärkeverluste der inneren Mäntel VT-CMM D

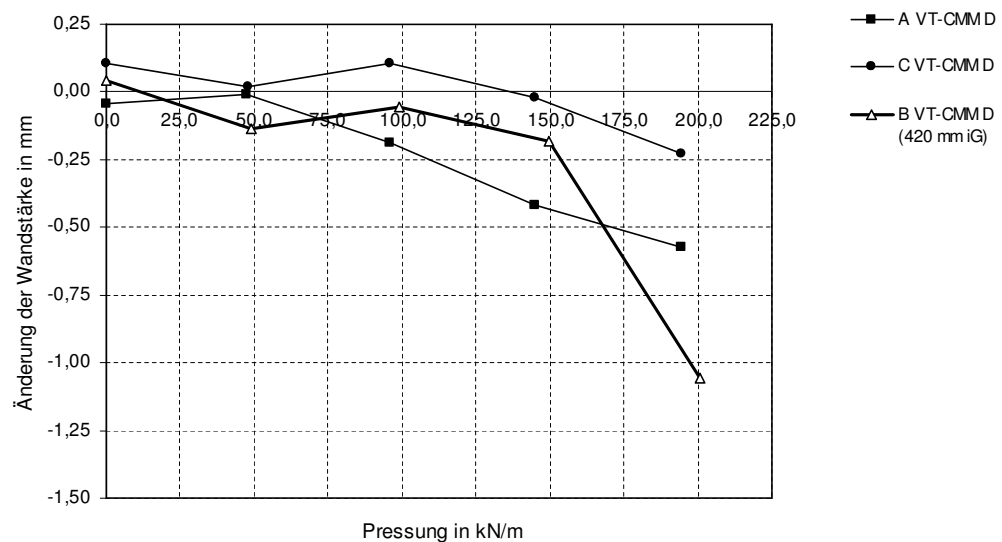


Abbildung 5.18: Mittelwerte der Wandstärkeverluste der äußeren Mäntel VT-CMM D

Die Wandstärkeabfälle bei den Versuchen des Spanngliedtyps VBF-CMM D sind in Abbildung 5.19 für die innere und Abbildung 5.20 für die äußere Ummantelung durch die Mittelwerte gegeben. Auch hier führt die Beanspruchung durch Innere Gleitung (833 mm bzw. 99,0 %) zu kleineren Restwandstärken bei der inneren Ummantelung. Sie liegen bei hohen Umlenkpressungen ähnlich wie bei System VT-CMM D etwa 0,2 bis 0,3 mm unter den Werten von Versuch A und Versuch C. Es ist kein Einfluss auf die äußere Ummantelung erkennbar.

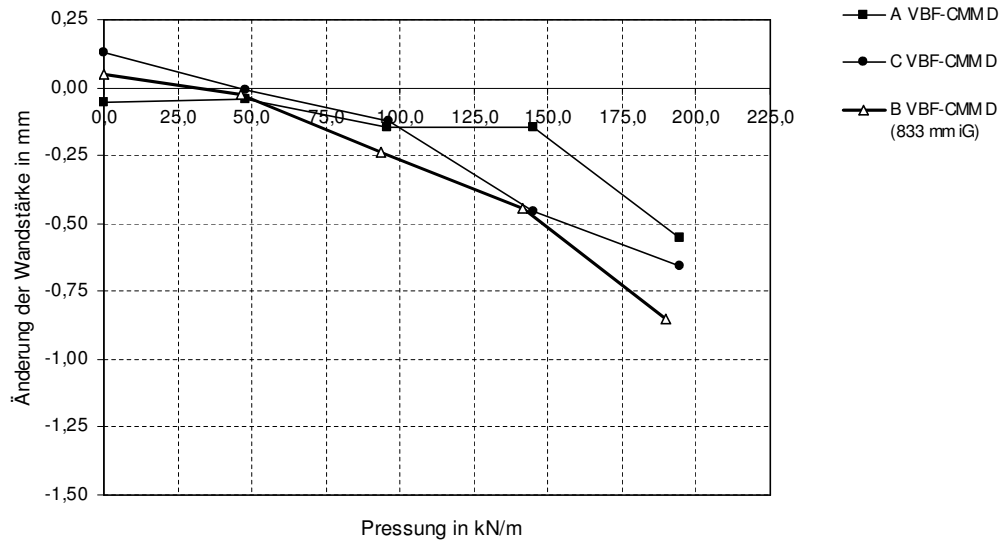


Abbildung 5.19: Mittelwerte der Wandstärkeverluste der inneren Mäntel VBF-CMM D

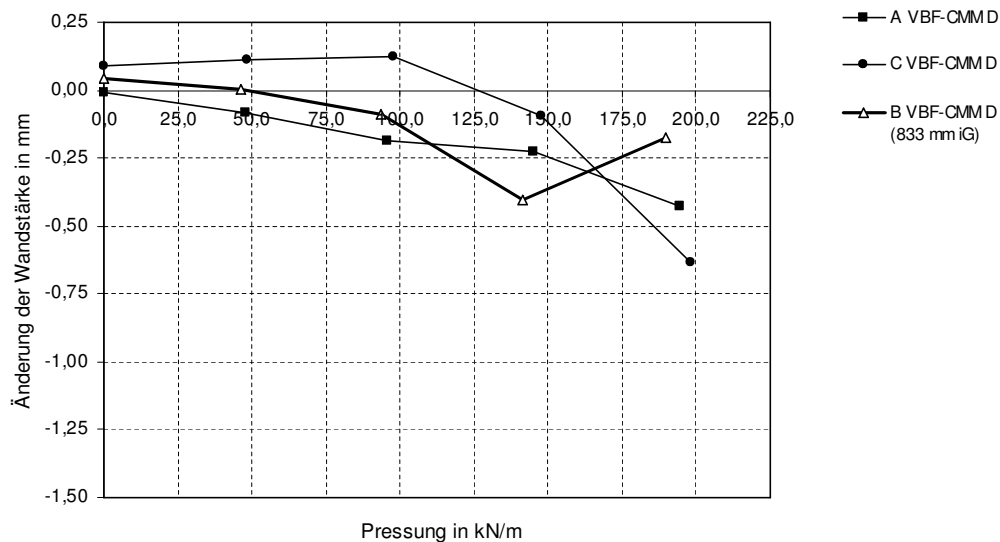


Abbildung 5.20: Mittelwerte der Wandstärkeverluste der äußeren Mäntel VBF-CMM D

Das Spanngliedsystem VT-CMM KD unterscheidet sich von VT-CMM D in der Form und der Querschnittsfläche der verwendeten Spannstahllitzen. Die höheren Umlenkpressungen werden dabei aber gleichmäßiger von den Drähten auf die Polyethylenummantelung übertragen. Es treten keine so extremen Spannungsspitzen unter den Einzeldrähten auf, so dass die Eindrückungen deutlich geringer sind als bei der Verwendung von Runddrahtlitzen. Die Wandstärkeverluste sind wie in Abbildung 5.21 dargestellt infolge Innerer Gleitung bei der inneren Ummantelung im Mittel etwa 0,1 bis 0,2 mm größer als diejenigen beim einaxialen Versuch ohne Innere Gleitung. Die Kurve für den äußeren Mantel fällt bei hohen Pressungen stärker ab (siehe Abbildung 5.22).

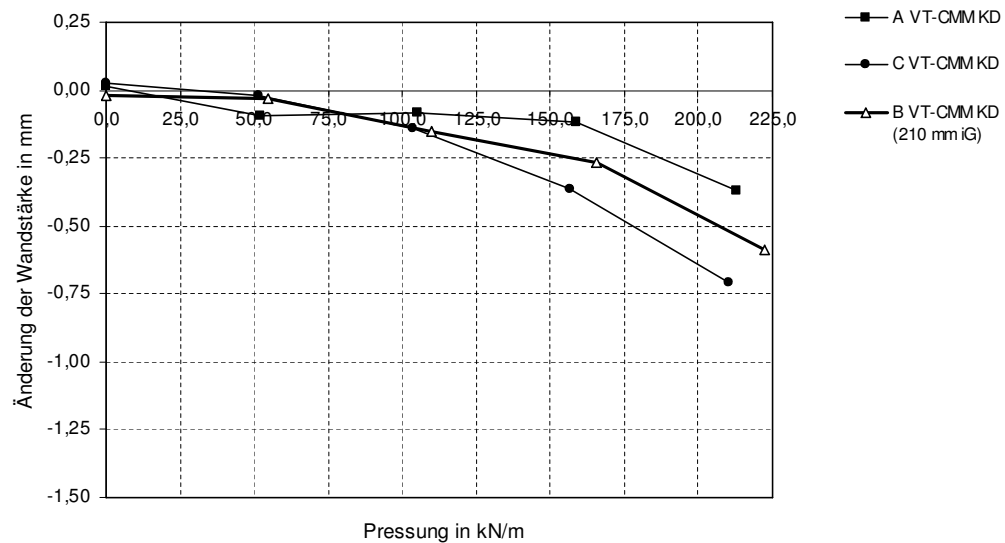


Abbildung 5.21: Mittelwerte der Wandstärkeverluste der inneren Mäntel VT-CMM KD

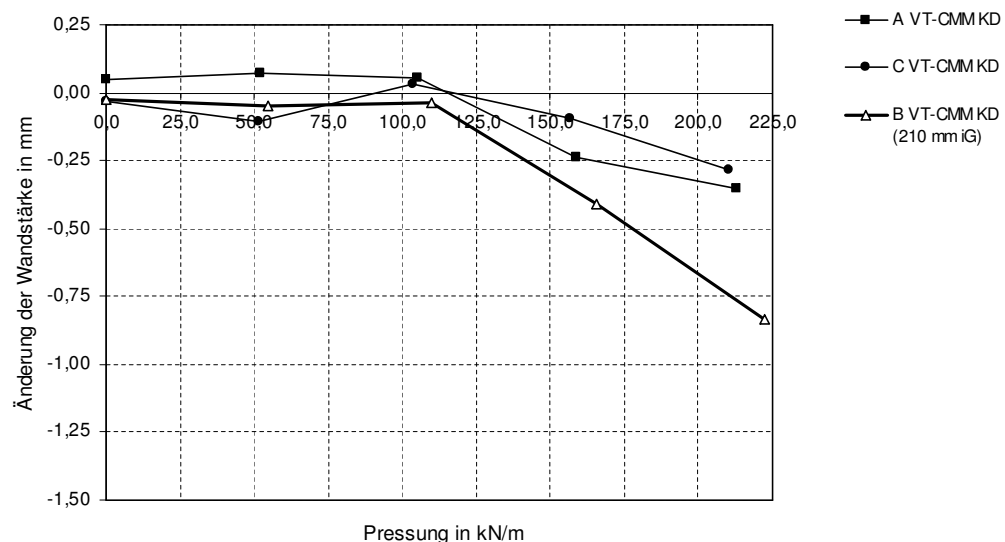


Abbildung 5.22: Mittelwerte der Wandstärkeverluste der äußeren Mäntel VT-CMM KD

5.3.4 Umlenkrichtung

Um den Einfluss der zweiaxialen Umlenkung auf die Ergebnisse der Restwandstärkemessung zu untersuchen, werden zum einen die Seitenwanddicken verglichen. Ferner werden aber auch die verbleibenden Wanddicken an Ober- und Unterseite der Ummantelungen betrachtet. Dabei sind zwei Varianten zur Übertragung der Horizontalpressung in den Umlenksattel denkbar, die die Schutzhüllen unterschiedlich beanspruchen:

Variante A: Horizontale Kraftübertragung durch Kontakt:

Die Art der Kraftübertragung nach Variante A ist allerdings nicht für alle Konstellationen der zweiaxialen Umlenkung möglich. Die Abtragung der horizontalen Pressung setzt eine ausreichend hohe vertikale Pressung voraus. Andernfalls würden die inneren Mäntel zur innen liegenden Seitenwand der äußeren Ummantelung durchrutschen und die Pressung würde direkt durch Druckkontakt von Litze zu Litze und schließlich in den Umlenksattel eingeleitet werden (Variante A).

Der Extremfall wäre die einaxiale Umlenkung um die Seitenfläche des Spannglieds. Die Bänder liegen hier nicht mehr übereinander sondern stehen nebeneinander. Die Ummantelungen werden hier also nicht mit einer dem resultierenden Radius entsprechenden Pressung beansprucht sondern jeweils nur mit den Einzelradien.

Im vorliegenden Forschungsvorhaben wurde die Umlenkung um einen Radius von 10 m gewählt, der im Vergleich zum vertikalen Umlenkradius von 4 m relativ groß gewählt wurde. Daraus ergibt sich eine horizontale Umlenkpressung $u_{P, \text{horizontal}}$ je Band von

$$u_{P, \text{horizontal}} = \frac{R_{\text{vertikal}}}{R_{\text{horizontal}}} \cdot u_{P, \text{vertikal}} = 0,4 \cdot u_{P, \text{vertikal}} \quad (\text{Gleichung 5.3})$$

Damit befinden sich die Umlenkpressungen in diesem Fall in einem Bereich, in dem keine sehr großen Verformungen und Eindrückungen zu erwarten sind. Etwas kritischer sind die HD-PE Seitenwände zwischen den einzelnen Litzen zu begutachten (siehe Abbildung 5.23). Hier liegen zwischen den Stahlflächen beim System VBF-CMM D lediglich zwei innere Ummantelungen. Die Bettung erfolgt nicht so nachgiebig wie an der Außenseite oder wie bei der vertikalen Umlenkung, wo stets die dicke äußere Ummantelung noch zusätzlich zwischen den Litzen liegt.

Jedoch wird die ungünstigste Zwischenschicht maximal mit einer Umlenkpressung von $u_{P, \text{horizontal}} = 0,3 \cdot u_{P, \text{vertikal}}$ beansprucht, da lediglich die Umlenkkraft von drei außen liegenden Litzen hier einwirkt. Beim System der Fa. VT ist zu untersuchen, wie sich die inneren Mäntel unter dieser Beanspruchung an den Seitenflächen verhalten, da diese durch HD-PE Stege verbunden sind.

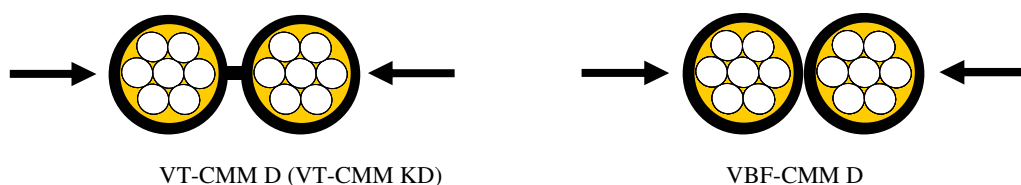


Abbildung 5.23: Druck zwischen einzelnen Litzen bei horizontaler Umlenkung (Variante A)

Variante B: Horizontale Kraftübertragung durch Reibung und Verzahnung:

Für diesen Fall, in dem die horizontalen Umlenkkräfte durch Reibung und Verzahnung (Querkraft) über die äußeren PE-Mäntel in das Umlenkformteil eingetragen werden, ergäbe sich eine geneigte Kraftresultierende, die auf die Mäntel einwirkt.

Bei dieser Lasteinleitungsvariante drücken sich die Litzen durch die vertikale Umlenkpressung in die innere Ummantelung ein. Besonders die zunächst extrem hohen Spitzendruckspannungen unter den aufstehenden Außendrähten der Runddrahtlitze führen dazu, dass selbst bei etwas kleineren Pressungen sich die Litzen mit dem Innenmantel verzahnen. Die Übertragung der Horizontalkräfte erfolgt zunächst durch diese Verzahnung in den inneren Mantel und dann über Verzahnung und Reibung in die äußere Ummantelung. Dieser Kräfteverlauf ist in Abbildung 5.24 dargestellt. Von der äußeren Ummantelung werden die horizontalen Kräfte schließlich in den Umlenksattel eingeleitet. Die vertikalen Kräfte werden über Druckkontakt direkt in den Umlenksattel eingeleitet und sind hier nicht dargestellt.

Um den Einfluss der zusätzlichen horizontalen Umlenkung auf den Verschleiß der Unter- und Oberseiten der Schutzhüllen quantifizieren zu können, ist ein Vergleich der Restwandstärken bzw. der Wandstärkenänderung erforderlich, der die Lage der Litzen im Spannglied berücksichtigt. Unter der Annahme, dass die horizontale Pressung vollständig über Verzahnung und Reibung abgetragen werden ergeben sich resultierende Kräfte, die in Tabelle 5.9 aufgeführt sind. Die nach Gleichung 5.3 berechneten resultierenden Pressungen u_{ges} entsprechen den nach Gleichung 5.4 ermittelten resultierenden Umlenkradien $R_{\text{ges,Einzellitze}}$, mit der eine Einzellitze, die mit der Kraft $P_{\text{Einzellitze}}$ gespannt wird, zu deren Erzeugung umgelenkt werden müsste:

$$u_{\text{ges}} = \frac{P_{\text{Einzellitze}}}{R_{\text{ges,Einzellitze}}} \quad (\text{Gleichung 5.4})$$

$$R_{\text{ges,Einzellitze}} = \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{n}{R_{\text{vertikal}}}\right)^2 + \left(\frac{1}{m \cdot R_{\text{horizontal}}}\right)^2}} \quad (\text{Gleichung 5.5})$$

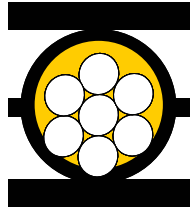
mit n Anzahl der außerhalb der betreffenden Schutzhülle liegenden Litzen
 m Anzahl der Schutzhüllenseiten, über die die Horizontalpressung abgeleitet wird

Die Werte gelten für die verwendete Runddrahtlitze bei einer Spannstahlspannung von 70% der Nennfestigkeit. Für die kompaktierte Litze (gleiche Nennfestigkeit, 10% größere Querschnittsfläche) sind die Pressungen pauschal um 10% zu erhöhen. Der Winkel der Resultierenden zur Vertikalen ist jeweils gleich groß. Bei der rechnerischen Ermittlung von $R_{\text{ges,Einzellitze}}$ wird berücksichtigt, dass die Litzen der unteren drei Bänder die horizontale Umlenkpressung über Verzahnung und Reibung sowohl an die unten als auch oben anliegenden Schutzhüllen übertragen. Lediglich beim obersten Band (bzw. außen liegend) wird die horizontale Pressung nur über die untere Schutzhüllenlage übertragen.

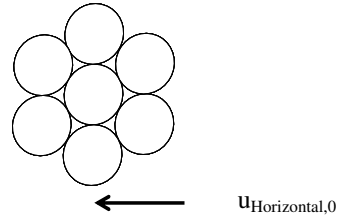
Da sich bei dieser Variante der Übertragung der horizontalen Pressung diese nicht wie bei der vertikalen Umlenkung aufsummieren und hier ein großer Umlenkradius gewählt wurde, treten nur sehr geringe horizontale Pressungen auf. An der am höchsten beanspruchten Stelle an der Unterseite des untersten Bandes beträgt die Erhöhung der Pressung lediglich 0,12 %.

Demzufolge sind sofern die horizontale Belastung entsprechend dieser Variante erfolgt keine signifikant höheren Wandstärkeverluste zu erwarten.

Runddrahtlitze mit
verformten Schutzhüllen
(oberstes Band):



Übertragung der horizontalen Pressung
von der Litze zur Unterseite der
Schutzhüllen (Oberseite analog):



Runddrahtlitze mit
verformten Schutzhüllen
(Band 1 bis 3):

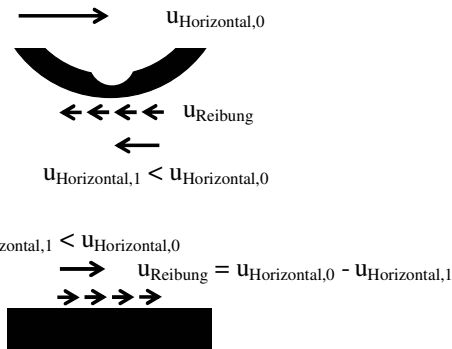
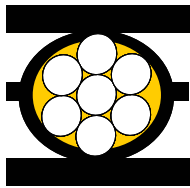


Abbildung 5.24: Übertragung der Horizontalpressung über Verzahnung und Reibung (Variante B)

Tabelle 5.9: Resultierende Pressungen bei der zweiaxialen Umlenkung nach Variante B bei 70% F_{pk}

Klasse	Umlenkpressung*		$R_{ges, Einzellitze}$	u_{ges} (res. Pressung)	Winkel
	Vertikal	Horizontal			
P1-oben	48,8 kN/m	19,5 kN/m	3714 mm	52,6 kN/m	21,8°
P1-unten	48,8 kN/m	9,8 kN/m	3922 mm	49,8 kN/m	11,3°
P2	97,7 kN/m	9,8 kN/m	1990 mm	98,1 kN/m	5,7°
P3	146,5 kN/m	9,8 kN/m	1330 mm	146,8 kN/m	3,8°
P4	195,3 kN/m	9,8 kN/m	999 mm	195,5 kN/m	2,9°

*) es sind die Pressungen bei Verwendung der Runddrahtlitze angeführt

Ergebnisse Seitenwandstärkenmessung:

Nachstehend sind die Änderungen der Restwandstärke der Seitenflächen der inneren Ummantelung abhängig von der horizontalen Umlenkpressung für die drei zwei axialen Versuche dargestellt (siehe Abbildung 5.25 bis Abbildung 5.27). Diagramme mit den gemessenen Restwandstärken werden im Anhang angeführt. Bei der rechnerischen Ermittlung der anliegenden Umlenkpressung wird hier davon ausgegangen, dass alle Horizontalkräfte entsprechend Variante A über die Seitenwände der Schutzhüllen abgetragen werden und nicht über die Äußere Ummantelung. Vorneweg muss gesagt werden, dass die Ausgangswandstärke der Seiten beim Korrosionsschutzsystem der Fa. VT vermutlich herstellungsbedingt stark schwankt.

Es treten bei allen vier Bändern an einer bestimmten inneren Litzenummantelung stets Ausgangswandstärken an der Seite im Bereich von 0,9 mm bis 1,0 mm auf. Diese systematische Abweichung ist höchstwahrscheinlich Folge eines ungenau justierten Extrudierwerkzeugs. Die inneren PE Ummantelungen der VT Systeme werden in einem Herstellschritt durch die Stege zusammenhängend erzeugt. Dies ist auch der Grund, warum diese Abweichungen stets an der gleichen Stelle auftreten. Für die Wertung der Ergebnisse der Restwandstärkemessung ist es daher auch hier sinnvoll, nicht die Restwandstärke sondern deren Änderung im Vergleich zum Referenzmesswert als Maß für den Verschleiß darzustellen.

Bei Betrachtung der grafischen Darstellung der Messergebnisse (Abbildung 5.25 bis Abbildung 5.27) ist deutlich ersichtlich, dass für den hier vorliegenden Fall der zwei axialen Umlenkung keine Korrelation zwischen der theoretisch anliegenden horizontalen Umlenkpressung und dem Wandstärkeverlust besteht. Abweichungen vom jeweiligen Referenzwert sind ausschließlich auf Streuungen aus dem Herstellprozess und der Messgenauigkeit zurückzuführen. Dabei unterscheiden sich die beiden unterschiedlichen Korrosionsschutzsysteme nicht.

Die maximale Belastung ist bei weitem nicht so hoch wie die der vertikalen Umlenkung. Es sind aus diesem Grund weniger große Eindrückungen zu erwarten gewesen. Allerdings macht die Untersuchung der Wandstärken an Unter- und Oberseite der inneren Hüllen deutlich, dass zumindest bei Verwendung der Runddrahtlitze für die höher beanspruchten Bereiche ab einer Umlenkpressung von etwa 50 kN/m ein Abfall der Kurve hätte erfolgen müssen.

Bei Verwendung der kompaktierten Litze zeigen die Ergebnisse der vertikalen Umlenkung, dass mit einem signifikanten Abfall der Wandstärke der Innenmäntel ab einer Umlenkpressung von etwa 100 kN/m zu rechnen ist. Beim vorliegenden Forschungsvorhaben sind die horizontalen Umlenkpressungen auf maximal etwa 85 kN/m beschränkt, so dass diese noch nicht zu ernsthaften Eindrückungen führen können.

Die Ergebnisse der Seitenwandstärkemessung der Systeme mit Runddrahtlitzen deuten jedoch darauf hin, dass die horizontale Umlenkpressung vollständig oder zumindest zu großen Teilen nicht über die Seitenflächen in den eingespannten Umlenksattel eingeleitet wird. Es ist also zu untersuchen, inwieweit die Pressungen aus der horizontalen Umlenkung mit einem Radius von 10 m die Schutzhüllen an deren Unter- und Oberseite zusätzlich beanspruchen.

Die Änderung der Restwandstärke der Seiten der äußeren Mäntel wird nur im Anhang grafisch dargestellt. Bei allen drei zwei axialen Versuchen tritt keine bleibende Eindrückung infolge plastischer Verformungen des HD-PE auf.

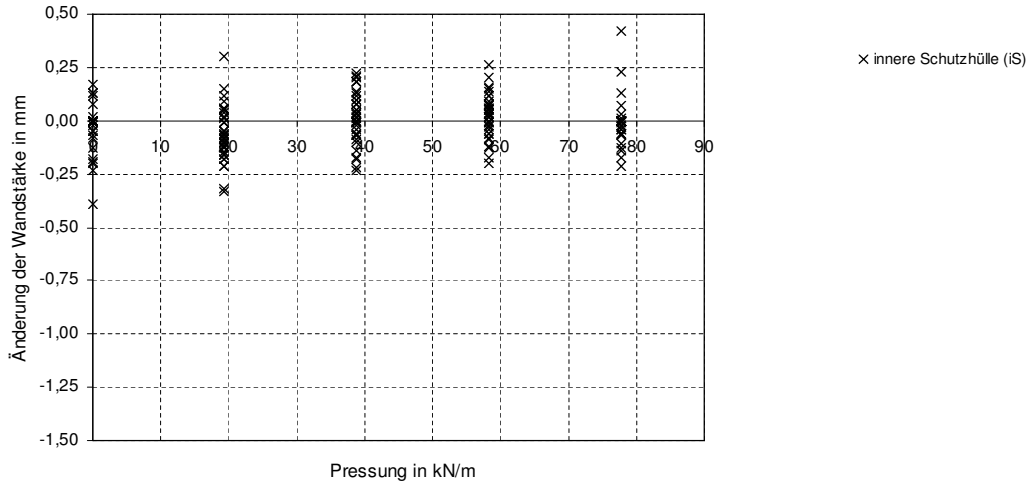


Abbildung 5.25: Änderung innere Seitenwandstärke – Pressung - Diagramm C VT-CMM D (R, 21 – 25)

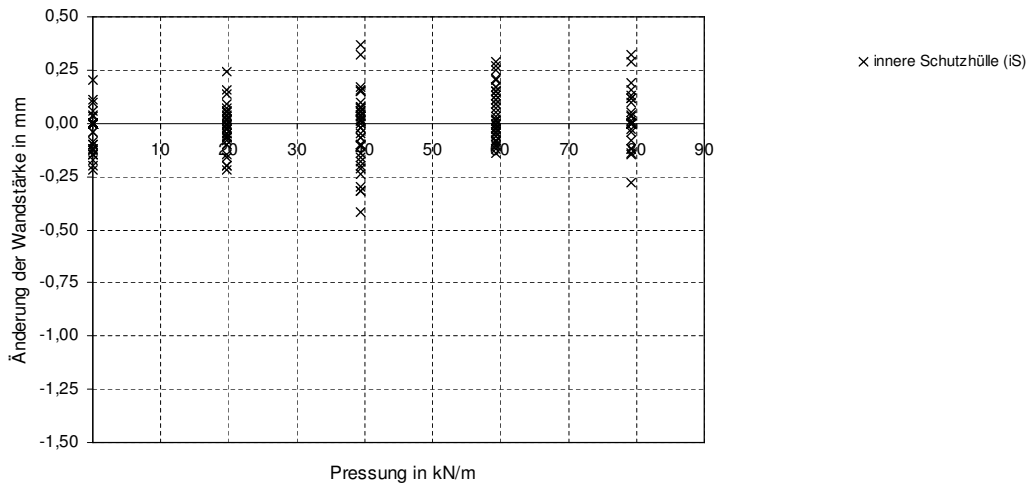


Abbildung 5.26: Änderung innere Seitenwandstärke – Pressung - Diagramm C VBF-CMM D (R, 21 – 25)

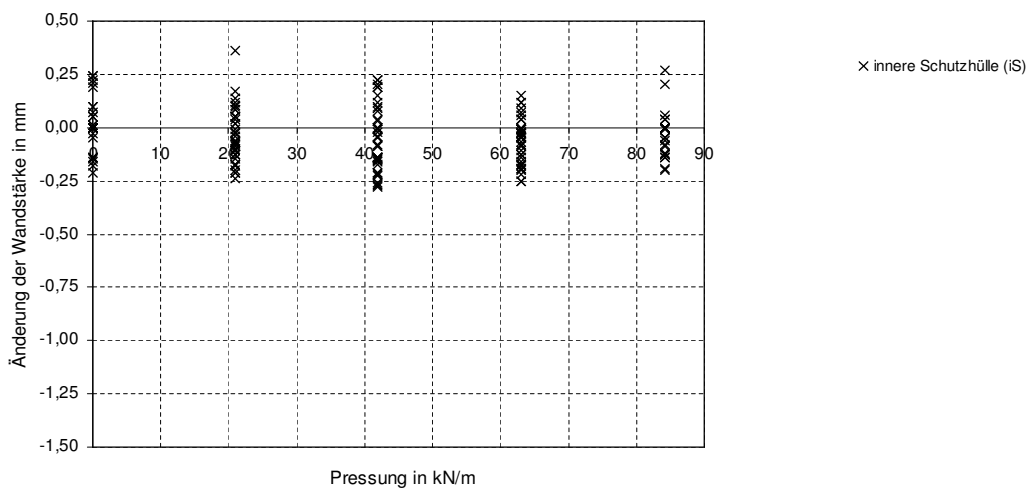


Abbildung 5.27: Änderung innere Seitenwandstärke – Pressung - Diagramm C VT-CMM KD (R, 21 – 25)

Ergebnisse Wandstärkemessung Ober/Unterseite:

Die gemittelten Wandstärkeverluste der Ummantelungen für die zwei axialen Versuche (Versuche C) sind bereits in Abbildung 5.17 bis Abbildung 5.22 dargestellt. Die äußeren Mäntel weisen demnach kein unterschiedliches Eindrückungsbild auf. Für die inneren Mäntel kann bei den höchsten Pressungen erwartungsgemäß bei den Systemen VT CMM D und VBF-CMM D kein ungewöhnlich hoher Unterschied zu den einaxialen Versuchen mit vergleichbaren Gleitbedingungen (Versuche A) festgestellt werden. Die nach dem Versuch gemessenen Restwandstärken bei System VT-CMM D liegen bei hohen Pressungen sogar etwas höher. Diese Unterschiede sind auf Streuungen in Herstellung und Messung zurückzuführen.

Auffällig ist allerdings der im Vergleich zum einaxialen Versuch deutlichere Abfall der inneren Wandstärke bei Verwendung der kompaktierten Litze bei System VT-CMM KD (etwa 0,3 bis 0,4 mm bei hohen Pressungen). Dabei wird ein mittlerer Wandstärkeverlust erreicht, der im Bereich der Runddrahtlitze liegt. Die Streubreite der Ergebnisse sowie die maximale Abweichung vom Mittelwert sind allerdings geringer, so dass die hier gemessene minimale Restwandstärke noch deutlich über den Minimalwerten bei Verwendung der Runddrahtlitze liegt.

5.3.5 Zeitabhängiges Verhalten

Aufgrund des verwendeten Versuchsablaufs liegen Messergebnisse für die Restwandstärke von äußerer und innerer Ummantelung für eine kurzzeitige Beanspruchung (Dauer von Prozess 1 und Prozess 2) und für eine Langzeitbeanspruchung (21tägige Standzeit, Prozess 3) vor. Durch den Verschiebung des Spannglieds werden Teile des zunächst am Umlenksattel sich befindlichen HD-PE während Prozess 2 aus dem Sattelbereich hinaus in die freie Länge geschoben. Dort ist das HD-PE wieder unbelastet. Dieses kurzzeitig belastete HD-PE ist allerdings nur „Abfallprodukt“ des Versuchs und somit für die Auswertung heranzuziehen sofern die Bewegung mit nennenswerten Anteilen an Äußerer Gleitung erfolgt. Bei Versuch B VBF-CMM D wurde ein sehr hoher Anteil an Innerer Gleitung erreicht. Die Polyethylenummantelungen wurden nur um eine sehr kurze Strecke in die freie Länge bewegt, die allerdings keine Auswertung erlaubt.

In Abbildung 5.28 bis Abbildung 5.30 ist für vergleichbar belastete HD-PE Mäntel jeweils anteilig zur Ausgangswandstärke die Differenz der Wandstärken zwischen kurzer und langer Beanspruchungsdauer dargestellt. Die Werte für diesen Anteil ω werden wie folgt ermittelt:

$$\omega = \frac{t(T = 21d; u_p > 0) - t(T \rightarrow 0; u_p > 0)}{t(T = 0; u_p = 0)} \quad (\text{Gleichung 5.6})$$

mit:

- t Wanddicke der HD-PE Ummantelung
- T Beanspruchungsdauer
- u_p Umlenkpressung

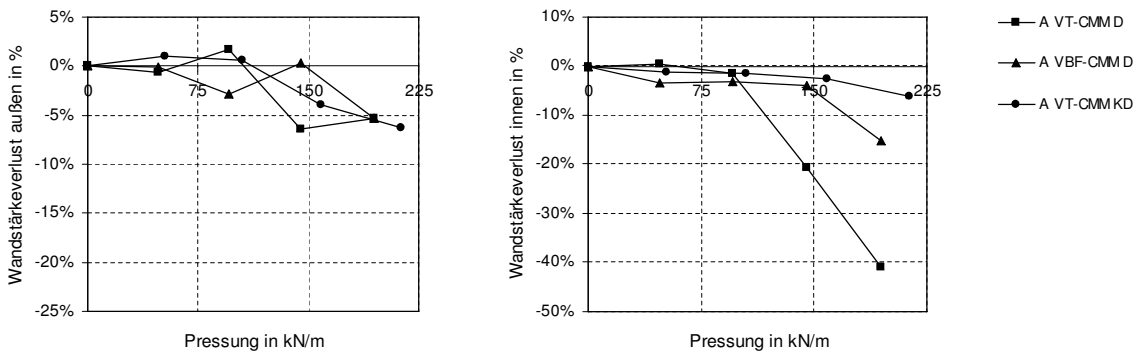
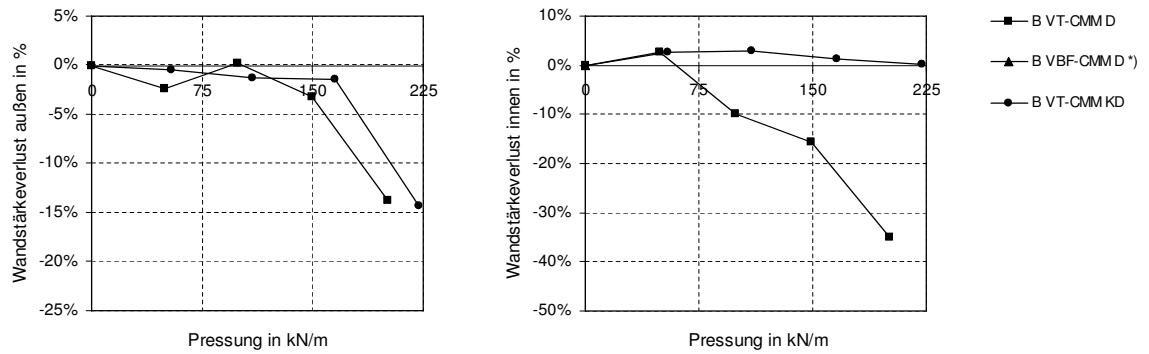


Abbildung 5.28: Mittlerer zeitabhängiger Wandstärkeverlust der äußeren (li.) und inneren Mäntel (re.) – A



*) Dieser Versuch wurde fast vollständig mit Innerer Gleitung durchgeführt. Es liegt kein nur kurzzeitig belastetes HD-PE vor.

Abbildung 5.29: Mittlerer zeitabhängiger Wandstärkeverlust der äußeren (li.) und inneren Mäntel (re.) – B

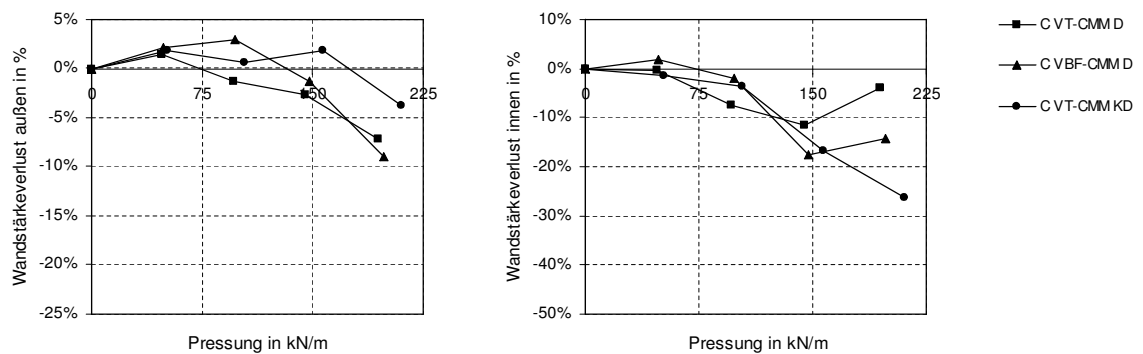


Abbildung 5.30: Mittlerer zeitabhängiger Wandstärkeverlust der äußeren (li.) und inneren Mäntel (re.) – C

5.3.6 Wertung

Alle durchgeführten Versuche wiesen trotz der extremen Beanspruchungen keinerlei Stellen in der HD-PE Ummantelung auf, an denen die Ummantelung vollständig zerstört und somit durchlässig gewesen ist. Der Korrosionsschutz war also stets gegeben. Alle verwendeten Systeme wurden innerhalb dieses Vorhabens mit einem engeren Radius umgelenkt als in der Zulassung angegeben. Zusätzlich kamen noch die Beanspruchung aus Innerer Gleitung und Horizontaler Umlenkung hinzu.

Die Ergebnisse zeigen, dass die innere Ummantelung der am höchsten beanspruchte Teil des mehrschichtigen Korrosionsschutzsystems ist. Die plastische Verformbarkeit des Polyethylens hoher Dichte führte vor allem bei der inneren Ummantelung zu einem Verfüllen der Zwickel zwischen Drähten der Litze und somit zu einem Abbau der Spitzendruckspannungen.

Die kompaktierte Litze ist durch den Herstellungsprozess so geformt, dass geringere Spitzendruckspannungen unter den einzelnen Drähten auftreten. In allen Versuchsserien sind die Ergebnisse der Restwandstärkemessung deutlich günstiger. Die Litze erlaubt eine relativ gleichmäßig verteilte Lasteinleitung in den inneren PE-Mantel mit geringen Spannungen ohne dass ein so umfangreiches Plastifizieren und Umlagern des Polyethylens wie bei der Runddrahtlitze erforderlich wäre. Die Betrachtung der Mantelstücke zeigt, dass bei hohen

Belastungen auch hier die kleinen Zwickel ausgefüllt werden. Allerdings „sinkt“ die Litze dabei weniger tief in die HD-PE Bettung ein.

Erwähnenswert ist ferner, dass der Vershub der Spannglieder mit äußerer Gleitung keine nennenswerte Auswirkung auf die Restwandstärke hat.

Die Umlenkung um eine zweite Achse führt mit den verwendeten Systemen ebenfalls zu keiner signifikanten Abweichung von den einaxialen Versuchen. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die horizontalen Anteile der Umlenkpressung nicht aufsummiert über direkten Kontakt zum Umlenksattel eingeleitet werden sondern über Reibung und Verzahnung in die äußeren Mäntel.

Auffällig ist lediglich, dass der mittlere Wandstärkeabfall der inneren Mäntel bei der zweiaxialen Umlenkung des Spannglieds mit kompaktierten Litzen (Versuch C VT-CMM KD) ähnlich groß ist wie bei Verwendung der Runddrahtlitze. Allerdings ist die Streuung wesentlich geringer, so dass bei diesem Versuch trotzdem eine deutlich höhere minimale Restwandstärke gemessen werden konnte.

6 Zusammenfassung und Fazit

Im Gegensatz zu im Betonquerschnitt von Spannbetonbrücken angeordneten Spanngliedern können externe Spannglieder aus baupraktischen und wirtschaftlichen Gründen nicht kontinuierlich über die gesamte Bauwerkslänge umgelenkt werden. Vielmehr werden die Spannglieder an einigen wenigen Punkten auf relativ kurzer Strecke umgelenkt, an denen das Tragwerk und das Spannglied sehr hohe Anforderungen ausgesetzt sind. Beim Anspannvorgang wird durch die elastische Dehnung des Spannstahls das Spannglied in seiner Achse über den Umlenkpunkt gezogen. Bewegen sich Stahl und Schutzhülle dabei gemeinsam über den Umlenkpunkt, so spricht man von „Äußerer Gleitung“. Findet dagegen eine Relativbewegung zwischen den Litzen und der Ummantelung statt, so wird dies als „Innere Gleitung“ bezeichnet. Mit Umlenkversuchen in Anlehnung an die Richtlinie des DIBt wurde innerhalb des Forschungsvorhabens der Einfluss der Parameter Richtung der Umlenkung und besonders der Gleitverhältnisse auf die Funktionsfähigkeit des Korrosionsschutzes untersucht.

Die insgesamt neun Versuche wurden mit drei Bandspanngliedssystemen (innere und äußere Schutzhülle aus HD-PE), die sich in Litzenform und Form der Schutzhülle unterscheiden, durchgeführt. Bei allen Versuchen wurde das Spannglied über einen Sattel mit konstantem Umlenkradius von 4 m gezogen. Für jeden Spanngliedtyp wurde je ein Versuch ohne Innere Gleitung, mit Innerer Gleitung und mit zusätzlicher horizontaler Umlenkung mit dem Radius 10 m ohne Innere Gleitung bei maximalen Temperaturen zwischen 22 °C und 25 °C durchgeführt. Die Anforderungen der „Richtlinie für die Eignungsprüfung von Spannverfahren für externe Vorspannung“ des DIBt an Versuchsaufbau und Versuchsablauf bei der "Prüfung mit großer Umlenkung“ wurden berücksichtigt. Wichtigstes Kriterium für die Beurteilung der Dauerhaftigkeit der Schutzhüllen ist die minimale Restwandstärke. Einige signifikante Einflüsse auf die verbleibende Wandstärke waren deutlich erkennbar. Es zeigte sich, dass die Restwandstärke von folgenden Faktoren abhängt:

- Pressung auf die Korrosionsschutzhüllen
- Oberflächenform der Litze
- Vers Schub mit Innerer Gleitung (Relativbewegung zwischen Litze und Schutzhülle)
- Standzeit unter Last

Je größer die aufgebrauchte Pressung ist, desto geringer wird die gemessene Restwanddicke der Schutzhüllen. Allerdings ist diese Beziehung nicht linear. Bei sehr hohen Pressungen fällt die Restwandstärke rapide ab. Trotz der höheren Litzenpressungen zeigten die inneren Mäntel bei Verwendung der kompaktierten Litze deutlich größere Restwandstärken. Die größere Aufstandsfläche der abgeflachten Außendrähte führte hier zu geringeren Spitzendruckspannungen zwischen Litzen und Schutzhülle.

Für den Grad bzw. die Tiefe der Eindrückung in die innere Ummantelung ist somit zusätzlich zur Pressung die Oberflächenform der Litze maßgebend. Einen Einfluss auf die Restwandstärke der inneren Ummantelung hatte auch der Überzug mit Innerer Gleitung. Die Wanddicke der inneren Ummantelung nahm hier deutlicher ab. Durch Reibung Stahl auf PE wurde Material des weicheren PE abgetragen und durch Kurzzeiteinspannungen traten höhere Pressungen auf. Da zwischen der inneren und der äußeren Ummantelung keine Verschiebung auftrat, spielte dieser Effekt für die äußere Ummantelung nur dann eine Rolle, wenn durch Innere Gleitung extrem

dünne Restwandstärken bei der inneren Ummantelung auftraten und die Lasteinleitung in den äußeren Mantel weniger flächig erfolgte. Ein „Zurückwalken“ der sich verdrehenden Litzen - wie in Versuchen mit einer Kleinmodellversuchsanlage von Hegger et al. [8] beobachtet - konnte bei den Versuchen mit Innerer Gleitung nicht festgestellt werden.

Bei dem Lastfall Äußere Gleitung konnte keine signifikante Änderung der Wandstärke abhängig vom Überziehweg festgestellt werden. Im Anschluss an den Verschiebung verblieb das Spannglied noch 21 Tage unter Last im Versuchsstand. In dieser Zeit wurde der viskose Anteil der plastischen Verformung gemessen, der für den inneren Mantel bis zu 40 % der Gesamtverformung ausmachen kann. Bei der äußeren Ummantelung betrug der maximale Anteil 14 %. Die Messergebnisse zeigen, dass nach 21 Tagen keine nennenswerten Verformungen mehr zu erwarten sind. Drei Versuche wurden mit zweiaxialer Umlenkung durchgeführt. Die resultierenden horizontalen Pressungen waren bei einem Umlenkradius von 10 m relativ klein. Es konnte kein Einfluss auf die äußeren Schutzhüllen festgestellt werden. Die Ergebnisse der Wanddickemessung der inneren Schutzhülle waren nur bei Verwendung der kompaktierten Litze etwas ungünstiger als beim einaxialen Versuch.

Bei keinem der Versuche wurde eine Ummantelung durch die Beanspruchungen vollständig durchtrennt. Alle durchgeführten Versuche wiesen trotz der extremen Beanspruchungen keinerlei Stellen in der HD-PE Ummantelung auf, an denen die Ummantelung durchlässig gewesen wäre. Der Korrosionsschutz war also stets gegeben. Alle verwendeten Systeme wurden innerhalb dieses Vorhabens mit einem engeren Radius umgelenkt als in der Zulassung angegeben. Zusätzlich kamen noch die Beanspruchung aus Innerer Gleitung und Horizontaler Umlenkung hinzu. Die Ergebnisse der Untersuchung, die über den Beanspruchungen am Bauwerk lag, zeigen das „gutmütige“ Verhalten der HD-PE Schutzhüllen. Durch das Plastifizieren und Ausfüllen der Litzenwickel werden Spannungsspitzen abgebaut.

Besonders günstig wirkt sich die weiche Bettung der inneren Ummantelung auf der äußeren Ummantelung aus, die zu einem gleichmäßigen Lasteintrag der Umlenkpressung in den Sattel führt. Würde die innere Ummantelung über ein hartes Material wie etwa Stahl gezogen werden, so wäre ein „Durchschneiden“ der Ummantelung denkbar. Für die Praxis ist unter diesem Gesichtspunkt an Umlenkstellen die Verwendung von HD-PE Umlenkformteilen (weiches Material) gegenüber Stahlformteilen oder der nackten Betonoberfläche (hartes Material) vorzuziehen.

In Anbetracht der hier vorgestellten Ergebnisse ist der Versaufbau und -ablauf von Zulassungsversuchen kritisch zu überprüfen. Beispielsweise könnte von einem Verschiebung mit sich frei einstellenden Gleitverhältnissen abgesehen werden, wohingegen die Erzeugung eines höheren Anteils an Innere Gleitung Bestandteil werden sollte. Da das Eindrückverhalten maßgeblich von der maximalen auftretenden Temperatur abhängig ist, schlagen die Verfasser vor, dass während der Standzeit das gesamte Spannglied einmal auf einen Wert erwärmt wird, der eine ausreichende Sicherheit gegenüber den klimatischen Bedingungen am Umlenksattel gewährleistet. Dabei kann durchaus auch die Hydratationswärmeentwicklung von mit Einpressmörtel verfüllten HD-PE Rohren in Betracht gezogen werden. An außen liegende Spannglieder sollten dabei höhere Anforderungen gestellt werden.

Die spezielle Untersuchung von Bandspanngliedern mit deren vielschichtigem Aufbau erlaubte die Erfassung von zahlreichen Messdaten. Diese umfangreiche Datenbasis, die u.U. durch weitere Ergebnisse von früheren Versuchen erweitert werden kann, ermöglicht sogar eine

statistische Auswertung, mit deren Hilfe man eine erste Näherungsformel für das Eindruckverhalten generieren könnte. Das Ergebnis einer solchen Auswertung würde die quantitative Beurteilung von Ergebnissen von Zulassungsversuchen deutlich erleichtern und Aussagen zu Belastungssituationen erlauben, die jenseits derjenigen liegen, die den Versuchen zu Grunde lagen.

Ein weiterer noch ungeklärter Aspekt ist die Beurteilung der Güte des Korrosionsschutzes. Welche Schutzwirkung hat eine HD-PE Schicht je cm Dicke? Ab welchen verbleibenden Dicken ist der Spannstahl für die geplante Lebensdauer vor Korrosion geschützt? Welche Anforderungen werden an alternative Materialien gestellt? Für diese Fragen sollte nach Meinung der Verfasser eine Lösung gefunden werden, die u.a. auf technischen und physikalischen Betrachtungen zu Diffusion, Korrosion, Längsverteilung von Stoffen im Spannglied und äußeren Einflüssen (z.B. UV-Einwirkung, Alterung) basiert. Für die momentan gültigen Grenzwerte liegen keine Erfahrungen vor, ob deren Einhaltung die sichere Abweisung von Einwirkungen dauerhaft gewährleisten kann.

7 Literatur

- [1] Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen: Richtlinie für Betonbrücken mit externen Spanngliedern. Ausgabe 1998, Allgemeines Rundschreiben Straßenbau (ARS) Nr. 28/1998, Verkehrsblatt-Verlag, Dortmund
- [2] DIN Fachbericht 102: Betonbrücken. Beuth-Verlag, Berlin, 2001
- [3] Maurer, R.; Zilch, K., Bäätjer, G. und Weiher, H.: Sicherheit von Spannbetonbrücken. Forschungsbericht, Hrsg.: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Bonn, 2006
- [4] Richtlinie für die Eignungsprüfung von Spannverfahren für externe Vorspannung. Mitteilungen des Deutschen Instituts für Bautechnik 30 (1999), Nr. 5, Berlin, 1999
- [5] Hartz, U.: Erläuterungen zur „Richtlinie für die Eignungsprüfung von Spannverfahren für externe Vorspannung“. Mitteilungen des Deutschen Instituts für Bautechnik 30 (1999), Nr. 5, Berlin, 1999
- [6] ETAG 013, Edition June 2002, Guideline for European Technical Approval of Post-Tensioning Kits for Prestressing of Structures. EOTA, Brussels, 2002
- [7] Zilch, K. und Zehetmaier, G.: Vorlesungen Massivbau – Bemessung im konstruktiven Betonbau nach DIN 1045-1 und DIN EN 1992-1-1. Berlin – Heidelberg – New York: Springer, 2005
- [8] Hegger, J.; Cordes, H. und Neuser, U.: Dauerhaftigkeit von Polyethylen-Schutzhüllen externer Spannglieder an Umlenkstellen. Forschungsbericht 70/2001 Institut für Massivbau,, 2001
- [9] Hegger, J.; Peters, S. und Schmitz, M.: Dauerhaftigkeit von Polyethylen-Schutzhüllen externer Spannglieder an Umlenkstellen bei wechselnden Beanspruchungszuständen. Forschungsbericht 88/2004 Institut für Massivbau, RWTH Aachen, 2004
- [10] Hegger, J.; Cordes, H. und Neuser, U.: Zur Beanspruchung externer Spannglieder an Umlenkstellen – Versuche und Empfehlungen. Beton- und Stahlbetonbau 100 (2005), Heft 11, Ernst&Sohn, Berlin, 2005
- [11] Litzenspannverfahren VT-CMM D für externe Vorspannung. Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung, Zulassungsnummer: Z-13.1-78, Berlin, 1996
- [12] Litzenspannverfahren VT-CMM KD für externe Vorspannung nach DIN 1045-1:2001-07 und DIN Fachbericht 102:2003. Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung, Zulassungsnummer: Z-13.3-110, Berlin, 2004
- [13] Litzenspannglieder VBF-CMM D für externe Vorspannung. Broschüre der Fa. VBF Ratingen GmbH auf Grundlage der Zulassung: Z-13.3-90

[14] Uetz, H. und Wiedemeyer, J.: Tribologie der Polymere, Grundlagen und Anwendungen in der Technik: Reibung, Verschleiß, Schmierung. Carl Hanser Verlag, München Wien, 1984

[15] www.diffusion-polymers.com