

Lehrstuhl für Massivbau  
Institut für Baustoffe und Konstruktion  
Technische Universität München

# Verhalten von PE-HD Schutzhüllen bei der Umlenkung von verbundlosen Spanngliedern

Hermann Josef Weiher

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der  
Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Mensinger  
Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil., Dr.-Ing. E.h. Konrad Zilch  
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Reinhard Maurer  
Universität Dortmund

Die Dissertation wurde am 05.02.2007 bei der Technischen Universität München eingereicht  
und durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen am 31.10.2007  
angenommen.

Kontakt (Hochschule):

Lehrstuhl für Massivbau  
Institut für Baustoffe und Konstruktion  
Technische Universität München  
Theresienstraße 90, Gebäude N6  
80333 München

Tel.: +49 (0) 89 289230-39

Fax: +49 (0) 89 289230-46

Kontakt (privat):

Hermann Weiher

E-Mail: [weiherh@gmx.de](mailto:weiherh@gmx.de)

# **Verhalten von PE-HD Schutzhüllen bei der Umlenkung von verbundlosen Spanngliedern**

## **Kurzfassung**

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Verhalten von Korrosionsschutzhüllen (Polyethylen, PE-HD) hoch beanspruchter, verbundloser Spanngliedersysteme. Solche Systeme werden derzeit vor allem im Brücken-, Hoch- und Behälterbau eingesetzt. Insbesondere an Umlenkstellen kann die Druckbelastung durch den Spannstahl (z.B. Litze) und die während des Anspannens des Stahls auftretende Reibung zu Eindrückungen in den Kunststoff und damit zu einer Reduzierung der Schutzwirkung der Kunststoffhüllen führen. Neben der Erarbeitung von Grundlagen (z.B. Ermittlung des Stapelfaktors bei Spanngliedern mit Hüllrohr), werden die Ergebnisse experimenteller und theoretischer Untersuchungen zum Verschleißverhalten an Spanngliedern vorgestellt. Zur Beurteilung des Verschleißverhaltens und zur Dimensionierung von Bauteilabmessungen werden Vorhersagemodelle und praxistaugliche Bemessungsverfahren entwickelt. Somit kann die Arbeit als Grundlage für fundierte Beurteilungen der Dauerhaftigkeit und Effizienz von bestehenden Spanngliedersystemen und von Neuentwicklungen dienen.

## **Wear of polyethylene ducts when deviating bondless steel tendons**

### **Abstract**

This thesis deals with the behaviour of corrosion protection ducts (polyethylene, PE-HD) of unbonded post-tensioning kits. These products are mainly used in bridge, building and tank construction. The protection effect of the ducts can be reduced at deviated tendons by imprints of the steel on the soft plastic and by friction that occurs when stressing the steel. Basic tasks, e.g. calculation of the cable factor of tendons using PE pipes, are presented but also the results of extensive experimental and theoretical investigations of different steel tendons for unbonded stressing. Both a regression model and a design model have been proposed for band tendons to estimate the mean of the depth of imprints into the PE-ducts for assessing their wear and for designing the dimensions that are necessary to maintain their protection effect. For tendons using pipes a first principle of mechanics has been proposed to estimate the imprints into the pipe. The content of the thesis will contribute to a qualified assessment of the durability and efficiency of existing post-tensioning systems and to their development.

## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter und Akademischer Rat am Lehrstuhl für Massivbau der Technischen Universität München. Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil., Dr.-Ing. E.h. Konrad Zilch, Ordinarius für Massivbau an der Technischen Universität München, gilt mein besonderer Dank für sein permanentes Vertrauen in meine tägliche Arbeit, die gewährte akademische Freiheit und seine inhaltlichen Anregungen zur Dissertation. Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Reinhard Maurer von der Universität Dortmund, Lehrstuhl für Betonbau, gebührt mein Dank für die Auseinandersetzung mit der Dissertation und die bereitwillige Übernahme des Koreferates. Dem Prüfungsvorsitzenden, Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Mensinger, Ordinarius für Metallbau an der Technischen Universität München, möchte ich ebenfalls danken.

Grundlage der Forschungsarbeit waren experimentelle Untersuchungen im Auftrag des Deutschen Instituts für Bautechnik in Zusammenarbeit mit den Firmen Vorspann-Technik und VBTsystems sowie Versuche für die Firmen BBV Vorspanntechnik und SUSPA-DSI. Mein Dank gilt allen Beteiligten für die Zusammenarbeit, denn diese Versuche ermöglichten erst die Erarbeitung der praxisrelevanten Inhalte. Zudem möchte ich Frau Dr. Barbara Pfeiffer (Univ. Erlangen-Nürnberg) und Herrn Dr. Eckard Specht (Univ. Magdeburg) meinen Dank für ihre Sehhilfe im Dickicht der numerischen Welten aussprechen.

Danken möchte ich meinen Kollegen am Lehrstuhl für Massivbau und Materialprüfungsamt für das Bauwesen für die stets professionelle, zielorientierte aber auch freundschaftliche Zusammenarbeit. Meinen Kollegen Kurt Borchert, Christian Gläser und meinem Bruder Bernd Weiher danke ich besonders für ihre konstruktiven Anmerkungen bei der intensiven Durchsicht des Manuskripts. Ich danke meiner Familie für ihre stete Förderung und Unterstützung. In besonderer Weise möchte ich mich bei meiner Freundin Mirjam bedanken, die mich mit Liebe, Geduld und Rat während der ganzen Zeit begleitet hat.

Ich widme die Arbeit dem Gedenken an meinen Opa Michael Schimmer, der seine Faszination für das Bauwesen an mich weitergegeben hat.

Erlangen, im November 2007

Hermann Josef Weiher

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Martin Mensinger  
Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil., Dr.-Ing. E.h. Konrad Zilch  
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Reinhard Maurer, Universität Dortmund

Die Dissertation wurde am 05.02.2007 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen am 31.10.2007 angenommen.

# Inhalt

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>UMLENKUNG VON SPANGLIEDERN .....</b>	<b>5</b>
<b>3</b>	<b>SPANGLIEDER FÜR VERBUNDLOSE VORSPANNUNG .....</b>	<b>6</b>
<b>3.1</b>	<b>Polyethylen hoher Dichte: PE-HD .....</b>	<b>6</b>
3.1.1	Eigenschaften .....	6
3.1.2	Barrierewirkung von PE-HD .....	8
3.1.3	Herstellung und Herstellgenauigkeit von PE-HD .....	10
<b>3.2</b>	<b>Spannstahl .....</b>	<b>10</b>
<b>3.3</b>	<b>Extern geführte Spannglieder .....</b>	<b>11</b>
<b>3.4</b>	<b>Intern geführte Spannglieder .....</b>	<b>12</b>
<b>4</b>	<b>BEANSPRUCHUNG DER SCHUTZHÜLLEN .....</b>	<b>14</b>
<b>4.1</b>	<b>Umlenkbelastung .....</b>	<b>15</b>
4.1.1	Ermittlung der gesamten Umlenkbelastung eines Spannglieds .....	15
4.1.2	Stapelfaktor .....	19
4.1.3	Optimierungsproblem „Kreise im Kreis“ .....	22
4.1.4	Modifizierter Pulsating Disk Shaking (M-PDS) Algorithmus .....	26
4.1.5	Maximaler Stapelfaktor nach hydrostatischer Analogie .....	29
4.1.6	Vereinfachtes Verfahren zur Ermittlung des maximalen Stapelfaktors .....	31
4.1.7	Vergleich der verschiedenen Verfahren zur Ermittlung des Stapelfaktors bei Spanngliedern mit Hüllrohr .....	32
4.1.8	Exkurs: Innerer Stapelfaktor .....	33
4.1.9	Sonderfall: Intern geführte Monolitzen .....	34
<b>4.2</b>	<b>Querschnittsform des verwendeten Spannstahls .....</b>	<b>35</b>
<b>4.3</b>	<b>Reibungsverhältnisse .....</b>	<b>41</b>
4.3.1	Anspannvorgang .....	41
4.3.2	Arten der Spanngliedbewegung .....	42
4.3.3	Auftretensformen von Innerer Gleitung .....	43
4.3.4	Innere Gleitung bei spannankernaher Umlenkung .....	43
<b>4.4</b>	<b>Beanspruchungsdauer .....</b>	<b>44</b>
<b>4.5</b>	<b>Temperatur .....</b>	<b>46</b>
<b>4.6</b>	<b>Zweiachiale Umlenkung .....</b>	<b>47</b>

<b>5</b>	<b>EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN .....</b>	<b>49</b>
<b>5.1</b>	<b>Umlenkversuch nach ETAG 013 bzw. DIBt-Richtlinie .....</b>	<b>49</b>
<b>5.2</b>	<b>Eigene Versuche, TU München.....</b>	<b>51</b>
5.2.1	Versuchsaufbau, -ablauf und -programm .....	51
5.2.2	Ergebnisse der Eindröckmessungen .....	53
<b>5.3</b>	<b>Kleinmodellversuche, RWTH Aachen.....</b>	<b>56</b>
<b>5.4</b>	<b>Umlenkversuche, Service d'Etudes des Structures (SES) .....</b>	<b>59</b>
<b>5.5</b>	<b>Ausbau eines externen Spannglieds, ETH Zörich.....</b>	<b>62</b>
<b>6</b>	<b>MODELLE FÖR DAS EINDRÖCKVERHALTEN VON SPANNSTAHL IN PE-HD.....</b>	<b>64</b>
<b>6.1</b>	<b>Regressionsmodell fÖr Bandspannglieder .....</b>	<b>64</b>
6.1.1	Datenbasis .....	64
6.1.2	Moderatorenanalyse mit Multipler Linearer Regression.....	65
6.1.3	Modellgleichungen fÖr Restwandstärke .....	68
6.1.4	GÖte des Modells.....	70
<b>6.2</b>	<b>Mechanisches Modell fÖr einlagige, dicke PE-HD SchutzhÖllen .....</b>	<b>73</b>
6.2.1	Kugeldruckhärte .....	73
6.2.2	Formulierung des mechanischen Modells .....	75
<b>7</b>	<b>BEMESSUNG VON PE-HD SCHUTZHÖLLEN.....</b>	<b>80</b>
<b>7.1</b>	<b>FIP Recommendations .....</b>	<b>80</b>
<b>7.2</b>	<b>Bemessungsvorschlag fÖr Spannglieder mit HÖllrohr nach EC 2 T.1-5 bzw. ENV 1992-1-5 (Dezember 1994) .....</b>	<b>80</b>
<b>7.3</b>	<b>Bemessungskonzept nach ETAG 013 (2002).....</b>	<b>82</b>
<b>7.4</b>	<b>Eigener Bemessungsvorschlag fÖr Bandspannglieder .....</b>	<b>83</b>
7.4.1	Allgemeine Formulierung .....	84
7.4.2	Bestimmung der Sicherheitsbeiwerte .....	85
7.4.3	Innere Gleitung.....	86
7.4.4	Bemessungsdiagramme .....	89
<b>7.5</b>	<b>Eigener Bemessungsvorschlag fÖr einlagige SchutzhÖllen .....</b>	<b>94</b>
7.5.1	Anpassungsfaktor bzgl. Versuch.....	94
7.5.2	Anpassungsfaktor bzgl. Umlenkbelastung .....	95
7.5.3	Anpassungsfaktor bzgl. Wanddicke .....	95
7.5.4	Fallstudie .....	96

<b>8</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK .....</b>	<b>98</b>
<b>9</b>	<b>LITERATUR.....</b>	<b>104</b>
<b>10</b>	<b>ANHANG.....</b>	<b>109</b>
<b>10.1</b>	<b>Umlenkstellen .....</b>	<b>109</b>
<b>10.2</b>	<b>Optimale Packungsdichte .....</b>	<b>110</b>
<b>10.3</b>	<b>Stapelfaktoren nach exaktem Verfahren .....</b>	<b>111</b>
<b>10.4</b>	<b>Stapelfaktoren – Vergleich der Berechnungsverfahren.....</b>	<b>115</b>
<b>10.5</b>	<b>Eindrückungen – Eigene Versuche, TU München .....</b>	<b>119</b>
10.5.1	Bandspannglieder mit Runddrahtlitze .....	119
10.5.2	Bandspannglieder mit Kompaktlitze .....	121
<b>10.6</b>	<b>Eindrückungen – Kleinmodellversuche, RWTH Aachen.....</b>	<b>123</b>
10.6.1	Bandspannglieder mit Runddrahtlitze .....	123
10.6.2	Bandspannglieder mit Kompaktlitze .....	124
<b>10.7</b>	<b>Sonstige Versuche (Zulassungsversuche).....</b>	<b>125</b>
<b>10.8</b>	<b>Eindrückungen – Sonstige Versuche .....</b>	<b>130</b>
10.8.1	Bandspannglieder mit Runddrahtlitze .....	130
10.8.2	Bandspannglieder mit Kompaktlitze .....	131
10.8.3	Spannglieder mit Drähten im PE-HD Hüllrohr .....	131
10.8.4	Spannglieder mit Runddrahtlitzen im PE-HD Hüllrohr .....	132
10.8.5	Spannglieder mit Monolitzen im PE-HD Hüllrohr .....	133
10.8.6	Monolitzen (intern).....	133
<b>10.9</b>	<b>Bemessungsdiagramme für Schutzhüllen von Bandspanngliedern bei konstanten Anforderungen.....</b>	<b>133</b>

# Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Mechanische Eigenschaften PE-HD (Hegger et al., 2002, Uetz und Wiedemeyer, 1984) .	8
Tabelle 3.2: Chemische und physikalische Eigenschaften PE-HD (Hegger et al., 2002, Uetz et al., 1984).....	8
Tabelle 3.3: Thermische Eigenschaften PE-HD (Hegger et al., 2002, Uetz et al., 1984).....	8
Tabelle 3.4: Durchlässigkeitswerte von PE-HD bei Beaufschlagung mit Flüssigkeiten (aus www.diffusion-polymers.com).....	9
Tabelle 3.5: Durchlässigkeitswerte von PE-HD bei Beaufschlagung mit Gasen (aus www.diffusion-polymers.com).....	9
Tabelle 4.1: Maximaler Stapelfaktor $k_{\max}$ , mittlerer Stapelfaktor $k_{\text{mittel}}$ und innerer Stapelfaktor $k_{\max,\text{innen}}$ sowie Klemmbeiwert $\kappa$ und tatsächlicher Füllgrad $\Sigma A_f / A_R$ nach dem Optimierungsansatz ( $N \in [13; 14]$ ).....	25
Tabelle 5.1: Versuchsprogramm „Eigene Versuche“.....	52
Tabelle 7.1: Mindestradien für Krümmungen in der Verankerungszone von Spanngliedern, Tabelle 3.105 aus EC 2 T.1-5 (1994).....	81
Tabelle 7.2: Mindestradien für Krümmungen in der Umlenkzone von Spanngliedern, Tabelle 3.106 aus EC 2 T.1-5 (1994).....	81
Tabelle 7.3: Minimal zulässige Wanddicke nach Umlenkversuch gemäß ETAG 013 (2002).....	83
Tabelle 7.4: Sicherheitsbeiwerte des eigenen Bemessungsvorschlags.....	86
Tabelle 8.1: Konstruktionsmatrix: Umlenkung verbundloser Spannglieder.....	102
Tabelle 10.1: Maximal anzuordnende Anzahl gleich großer Kreise im Kreis nach Specht (2006)....	110
Tabelle 10.2: Maximaler Stapelfaktor $n_{\max}$ , mittlerer Stapelfaktor $n_{\text{mittel}}$ und innerer Stapelfaktor $n_{\max,\text{innen}}$ sowie Klemmbeiwert $\kappa$ und tatsächlicher Füllgrad $\Sigma A_f / A_R$ nach exaktem Verfahren ( $N \in [1; 10]$ ).....	111
Tabelle 10.3: Maximaler Stapelfaktor $n_{\max}$ , mittlerer Stapelfaktor $n_{\text{mittel}}$ und innerer Stapelfaktor $n_{\max,\text{innen}}$ sowie Klemmbeiwert $\kappa$ und tatsächlicher Füllgrad $\Sigma A_f / A_R$ nach exaktem Verfahren ( $N \in [11; 21]$ ).....	112
Tabelle 10.4: Maximaler Stapelfaktor $n_{\max}$ , mittlerer Stapelfaktor $n_{\text{mittel}}$ und innerer Stapelfaktor $n_{\max,\text{innen}}$ sowie Klemmbeiwert $\kappa$ und tatsächlicher Füllgrad $\Sigma A_f / A_R$ nach exaktem Verfahren ( $N \in [22; 75]$ ).....	113
Tabelle 10.5: Maximaler Stapelfaktor $n_{\max}$ , mittlerer Stapelfaktor $n_{\text{mittel}}$ und innerer Stapelfaktor $n_{\max,\text{innen}}$ sowie Klemmbeiwert $\kappa$ und tatsächlicher Füllgrad $\Sigma A_f / A_R$ nach exaktem Verfahren ( $N \in [90; 150]$ ).....	114



# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Verbundloses Vorspannen eines Betonkörpers (Maurer, Zilch, Bätjer & Weiher, 2006).....	2
Abbildung 1.2: Gekrümmter Verlauf eines intern geführten Spannglieds im Betonbauteil (Maurer et al., 2006).....	2
Abbildung 1.3: Spannbetonbauwerke.....	3
Abbildung 2.1: Statische Wirkung von kontinuierlicher (Fall a) und annähernd punktueller (Fall b) Umlenkung von Spanngliedern (Zilch, Diederichs und Katzenbach, 2001).....	5
Abbildung 2.2: Längs- und Querschnitt eines extern vorgespannten Trägers mit Einzelumlenkkraft $U_p$ (Zilch und Zehetmaier, 2005).....	5
Abbildung 3.1: Schematische Darstellung eines Extruders.....	10
Abbildung 3.2: Derzeit für verbundlose Vorspannung verwendete Querschnittsformen von Spannstahl mit Angabe möglicher (Umkreis-) Durchmesser $\emptyset$ .....	11
Abbildung 3.3: Bandspannglieder für externe Vorspannung - Querschnitte.....	12
Abbildung 3.4: Spannglieder für externe Vorspannung mit Spannstahl im Hüllrohr – Querschnitte an Umlenkstellen im Stützbereich.....	12
Abbildung 3.5: Monolitze.....	13
Abbildung 3.6: Anordnung von Monolitzen zu intern geführten Spanngliedern.....	13
Abbildung 4.1: Querschnittsteile von äußerer (links) und innerer Ummantelung (rechts) nach Belastung (Umlenkung) eines Bandspannglieds.....	14
Abbildung 4.2: Eindrück- und Verschleißspuren von äußeren (links) und inneren Mänteln (rechts) eines Bandspannglieds (Methner, 2005).....	14
Abbildung 4.3: Querschnittsteil eines PE-HD Hüllrohrs nach Belastung (Umlenkung).....	14
Abbildung 4.4: Wirkungsweise der Umlenkung von Zuggliedern mit konstantem Radius.....	15
Abbildung 4.5: Optimale Packungsdichte nach Specht (2006) und Näherung nach Gleichung 4.5, Ausschnitt für $N_{max} \in [2; 100]$ .....	18
Abbildung 4.6: Füllwinkel $\varphi_0$ und Füllhöhe $h_0$ nach hydrostatischer Analogiebetrachtung.....	18
Abbildung 4.7: Füllgrad $\eta_{hyd}$ und Klemmbeiwert $\kappa$ nach hydrostatischer Analogiebetrachtung.....	19
Abbildung 4.8: Grafische Ermittlung der Stapelfaktoren für ein Spannglied aus 60 Drähten mit Hüllrohr (Örtle, 1988).....	21
Abbildung 4.9: Berechnung der Stapelfaktoren für ein Spannglied aus 19 „Kreisen“ mit Hüllrohr mit Hilfe eines Fachwerkmodells.....	22
Abbildung 4.10: Optimierung „Kreise im Kreis“ – Startkonfiguration (links) und optimierte Konfiguration (rechts) für $N = 16$ kleine Kreise (Radius $r = 0,175$ ) im Hüllkreis (Radius $R_d = 1$ ).....	24
Abbildung 4.11: Stapelfaktoren und Lasten für insgesamt 150 Kreise im Hüllkreis mit einem Verhältnis der Radien $r/R_d = 0,07$ .....	26
Abbildung 4.12: Beispiele für dichte Anordnungen kleiner Kreise im Hüllquadrat (links) und im Hüllkreis (rechts) mit dem Pulsating Disk Shaking (PDS) Algorithmus (Specht, 2006).....	27
Abbildung 4.13: Hydrostatische Druckverteilung (links), Maximaler Druck unter mittig liegendem Spannstahlelement (rechts).....	29
Abbildung 4.14: Maximale Stapelfaktoren aus Exakter Berechnung, Vereinfachtem Verfahren, Hydrostatischer Analogie sowie nach Rostásy/Holzenkämpfer und Zwicky/Örtle ( $r/R_d = 0,16$ und $r/R_d = 0,10$ ).....	33

Abbildung 4.15: Intern verbundlose (einbetonierte) Monolitzen ohne (links) und mit Abstandhalter (rechts; Eisler, 2006).....	35
Abbildung 4.16: Druckspannungsverteilung zwischen Stahl und PE-HD für Runddraht- und Kompaktlitze bei Belastungsbeginn $T \rightarrow 0$ und nach Dauerbelastung $T \rightarrow \infty$ (Methner 2005, Weiher und Zilch 2006) .....	36
Abbildung 4.17: Beispiele für das idealisierte „Einsinken“ von verschiedenen Spannstahlquerschnitten in ein weiches Medium.....	36
Abbildung 4.18: Relative Aufstandsweite abhängig von der relativen Einsinktiefe von Kreisquerschnitt (z.B. Draht oder angenähert Kompaktlitze), Runddrahtlitze auf zwei Außendrähten stehend, sowie Runddrahtlitze auf einem Außendraht stehend (von links nach rechts) .....	37
Abbildung 4.19: Idealisierter Querschnitt; relative Aufstandsweite von der Runddrahtlitze unter Berücksichtigung der Längssteifigkeit; Kombination der Extremsituationen (von links).....	38
Abbildung 4.20: Schematische 3-D Ansichten einer Runddrahtlitze (oben) und eines Drahtes (unten) mit Aufstands- bzw. Schnittebene je für eine Einsinktiefe von $r/10$ .....	40
Abbildung 4.21: Relative Aufstandsweite abhängig von der relativen Einsinktiefe der Runddrahtlitze bei Berücksichtigung stetiger Längsverdrillung; Näherungslösung (links) und Zwischenkonstellationen für Diskretisierung (rechts) .....	41
Abbildung 4.22: Überziehweg-Spannungs-Diagramm (Beispiel) .....	41
Abbildung 4.23: Eindrückungen im PE-HD bei Äußerer Gleitung (links), Verschleißerscheinung im PE-HD bei Innerer Gleitung mit Translation (rechts).....	44
Abbildung 4.24: Verschleißerscheinung im PE-HD bei Innerer Gleitung mit Verdrehen („Schraube“) .....	44
Abbildung 4.25: Rheologisches Modell von PE: Burgers-Modell (Zilch und Weiher, 2006).....	45
Abbildung 4.26: Bei Kriechversuchen an der TH Karlsruhe ermittelte sofortige und zeitabhängige Verformung (Stauchung) von PE-HD Monolitzenhüllen bei drei verschiedenen Umlenkbelastungen und zwei verschiedenen Temperaturen (Puttendörfer, 2006) .....	46
Abbildung 4.27: Exemplarische Temperaturmessung an einer Hohlkastenbrücke .....	47
Abbildung 5.1: Schematischer Aufbau eines Umlenkversuchs gemäß ETAG 013 (Ed. 06/2002).....	50
Abbildung 5.2: Ablaufschema beim Umlenkversuch.....	50
Abbildung 5.3: Schematischer Aufbau eines zweiaxialen Umlenkversuchs (Längsschnitt und Grundriss).....	52
Abbildung 5.4: Umlenkversuch: Umlenksattel mit Spannglied beim einaxialen und zweiaxialen Versuch (von links) .....	53
Abbildung 5.5: Übertragung der Horizontalbelastung über Verzahnung und Reibung von der Litze in den äußeren Mantel .....	54
Abbildung 5.6: Eindrückung in Innen- (oben), Außenmantel (mittig) und Gesamt (unten) – Einzelwerte, Mittelwerte und 5%-Quantil - G1 linke Spalte (640 Messstellen), G4 rechte Spalte (160 Messstellen).....	55
Abbildung 5.7: Eindrückung in Innen- (oben), Außenmantel (mittig) und Gesamt (unten) – Einzelwerte RWTH-1 (620 Messstellen, links), RWTH-2 (130 Messstellen, rechts) und 5%-Quantil G1 bzw. G2.....	57
Abbildung 5.8: Schematische Darstellung der Kleinmodellversuchsanlage der RWTH Aachen (aus Neuser, 2003) .....	58
Abbildung 5.9: Eindrückungen in PE-HD Hüllrohr am Umlenksattel und auf freier Länge (SES) (Fouré und Hoang, 1993).....	61

Abbildung 5.10: Messstellen Wanddicken im Querschnitt (links) und in Längsrichtung (rechts), (Vogel und Kott, 2001).....	63
Abbildung 6.1: Messstellen in Längsrichtung (Zilch und Weiher, 2006).....	65
Abbildung 6.2: Messstellen in Querrichtung (Zilch und Weiher, 2006) .....	65
Abbildung 6.3: Transformation Belastungsdauer: Relative Kriechverformung $\beta(T)$ und Verformungszunahme $\beta'(T)$ .....	68
Abbildung 6.4: Vergleich statistische Analyse – Mittlere Eindrückung, Versuche G1 (links) und G5 (rechts).....	71
Abbildung 6.5: Vergleich statistische Analyse – Messung Restwandstärke innere und äußere Ummantelung von Bandspanngliedern.....	72
Abbildung 6.6: Vergleich statistische Analyse – Messung Restwandstärke gesamte Ummantelung von Bandspanngliedern .....	72
Abbildung 6.7: Kugeldruckhärte: Versuchsaufbau und Messergebnisse an PE-HD Proben (von links, Neuser 2003) .....	74
Abbildung 6.8: Einleitung der Umlenkbelastung $p$ von Spannstahlelement in PE-HD Lage, angenommene Druckspannungsverteilungen bei zweiachsiger Druckbeanspruchung.....	74
Abbildung 6.9: Einfluss der Spannstahlform auf die konstante Druckspannung $\sigma_{c0}$ in Abhängigkeit von der Dicke der PE-HD Lage (links), Vergleich Modell-Messung für Eindrückungen bei Drahtspanngliedern (rechts).....	76
Abbildung 6.10: Basismodell: Eindrückungen in PE-Rohr bei Variation der Umlenkradien und des Spannstahls für eine Beispielkonfiguration (u.a. $P = 3 \text{ MN}$ ; $\varnothing_{\text{Hüllrohr, außen}} = 100 \text{ mm}$ ; Wanddicke 5 mm) .....	77
Abbildung 6.11: Rechnerische Eindrückungen von Spannstahldrähten $d_p = 7 \text{ mm}$ in PE-HD Lagen der Dicke $d_0 = [5 \text{ mm}; 8 \text{ mm}]$ abhängig von der anliegenden Umlenkbelastung (Gleichung 6.11) .....	78
Abbildung 6.12: Rechnerische Eindrückungen von Kompaktlitzen $d_p = 15,2 \text{ mm}$ in PE-HD Lagen der Dicke $d_0 = [5 \text{ mm}; 8 \text{ mm}]$ abhängig von der anliegenden Umlenkbelastung (Gleichung 6.11) .....	78
Abbildung 6.13: Rechnerische Eindrückungen von Runddrahtlitzen $d_p = 15,7 \text{ mm}$ in PE-HD Lagen der Dicke $d_0 = [5 \text{ mm}; 8 \text{ mm}]$ abhängig von der anliegenden Umlenkbelastung (Gleichung 6.11) .....	79
Abbildung 7.1: Grafische Darstellung der minimal zulässigen Wanddicke von PE-HD Schutzhüllen verschiedener Spanngliedertypen nach einem Umlenkversuch gemäß ETAG 013 (2002) .....	83
Abbildung 7.2: Linearer Ansatz für zusätzliche umlenkbelastungsabhängige Eindrückung in den Innenmantel durch Innere Gleitung – Beispiele mit $l_{IG} = k \cdot 400 \text{ mm}$ ( $k = 1, 2, 3$ ) .....	88
Abbildung 7.3: Verschleißarbeit in Abhängigkeit vom Überziehweg bei Innerer Gleitung – Vergleich Umlenkversuch und Bauwerk.....	88
Abbildung 7.4: Bemessungsdiagramm für PE-Schutzhüllen von Bandspanngliedern mit Runddrahtlitzen für Anforderungen nach ETAG 013.....	91
Abbildung 7.5: Bemessungsdiagramm für PE-Schutzhüllen von Bandspanngliedern mit Kompaktlitzen für Anforderungen nach ETAG 013.....	92
Abbildung 7.6: Beispielanwendung eines Bemessungsdiagramms für PE-Schutzhüllen von Bandspanngliedern .....	93
Abbildung 10.1: Varianten zur Durchführung von Spanngliedern an Umlenkstellen .....	109
Abbildung 10.2: Maximale Stapelfaktoren aus Exakter Berechnung, Vereinfachtem Verfahren, Hydrostatischer Analogie sowie nach Rostásy/Holzenkämpfer und Zwicky/Örtle ( $r/R_d \in [0,06; 0,09]$ ) .....	115

Abbildung 10.3: Maximale Stapelfaktoren aus Exakter Berechnung, Vereinfachtem Verfahren, Hydrostatischer Analogie sowie nach Rostàsý/Holzenkämpfer und Zwicky/Örtle ( $r/R_d \in [0,10; 0,14]$ ) .....	116
Abbildung 10.4: Maximale Stapelfaktoren aus Exakter Berechnung, Vereinfachtem Verfahren, Hydrostatischer Analogie sowie nach Rostàsý/Holzenkämpfer und Zwicky/Örtle ( $r/R_d \in [0,16; 0,22]$ ) .....	117
Abbildung 10.5: Maximale Stapelfaktoren aus Exakter Berechnung, Vereinfachtem Verfahren, Hydrostatischer Analogie sowie nach Rostàsý/Holzenkämpfer und Zwicky/Örtle ( $r/R_d \in [0,25; 0,40]$ ) .....	118
Abbildung 10.6: Eindrückung in Innen- (oben), Außenmantel (mittig) und Gesamt (unten) – Einzelwerte, Mittelwerte, 5%-Quantil G1 (640 Messstellen, links) und G2 (96 Messstellen, rechts) sowie 5%-Quantil G1 .....	119
Abbildung 10.7: Eindrückung in Innen- (oben), Außenmantel (mittig) und Gesamt (unten) – Einzelwerte, Mittelwerte, 5%-Quantil G3 (160 Messstellen, links) und 5%-Quantil G1 .....	120
Abbildung 10.8: Eindrückung in Innen- (oben), Außenmantel (mittig) und Gesamt (unten) – Einzelwerte, Mittelwerte, 5%-Quantil G4 (links) und G5 (rechts) (jeweils 160 Messstellen) sowie 5%-Quantil G1 .....	121
Abbildung 10.9: Eindrückung in Innen- (oben), Außenmantel (mittig) und Gesamt (unten) – Einzelwerte, Mittelwerte, 5%-Quantil G6 (160 Messstellen, links) und 5%-Quantil G1 .....	122
Abbildung 10.10: Eindrückung in Innen- (oben), Außenmantel (mittig) und Gesamt (unten) – Einzelwerte RWTH-1 (620 Messstellen, links), RWTH-2 (130 Messstellen, rechts) und 5%-Quantil G1 bzw. G2.....	123
Abbildung 10.11: Eindrückung in Innen- (oben), Außenmantel (mittig) und Gesamt (unten) – Einzelwerte RWTH-3 (100 Messstellen, links), RWTH-4 (20 Messstellen, rechts) und 5%-Quantil G1 bzw. G2.....	124
Abbildung 10.12: Eindrückung in Innen- (oben), Außenmantel (mittig) und Gesamt (unten) – Einzelwerte SV-01 bis SV-04 (580 Messstellen, links), SV-05 (110, rechts) und 5%-Quantil G1 bzw. G2.....	130
Abbildung 10.13: Eindrückung in Innen- (links oben), Außenmantel (links unten) und Gesamt (rechts oben) – Einzelwerte SV-11 (280 Messstellen, links) und 5%-Quantil G1 bzw. G6.....	131
Abbildung 10.14: Eindrückung in Hüllrohr – Einzelwerte ETHZ, SV-21, SV-22 (50 Messstellen)..	131
Abbildung 10.15: Eindrückung in Hüllrohr – Einzelwerte SES und SV-32 (Äußere Gleitung) und 5%-Quantil sowie Mittelwert G1 .....	132
Abbildung 10.16: Eindrückung in Hüllrohr – Einzelwerte SV-31 und SV-32 (Innere Gleitung) und 5%-Quantil sowie Mittelwert G1.....	132
Abbildung 10.17: Eindrückung in Monolitzenmantel – Einzelwerte SV-41 bis SV-44 (Kurzzeitbelastung, 4 Messstellen), SV-45 bis SV-46 (24 Messstellen) und 5%-Quantil G1 .....	133
Abbildung 10.18: Eindrückung in Monolitzenmantel (Zwickel mit Mörtel verfüllt) in Abhängigkeit von der Druckbelastung – Einzelwerte sowie Verlauf 5%-Quantilwerte G1 (Versuch SV-51 bei 40°C, 12 Messstellen), abgeminderte Druckbelastungen .....	133
Abbildung 10.19: Bemessungsdiagramm für PE-Schutzhüllen von Bandspanngliedern mit Runddrahtlitzen für konstante Anforderungen .....	134
Abbildung 10.20: Bemessungsdiagramm für PE-Schutzhüllen von Bandspanngliedern mit Kompaktlitzen für konstante Anforderungen .....	135

# Verwendete Zeichen und Einheiten

Im Folgenden werden die wichtigsten in dieser Arbeit verwendeten Zeichen und Einheiten aufgeführt.

## Abkürzungen und Sonderzeichen

CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid	O <sub>2</sub>	Sauerstoff
H <sub>2</sub>	Wasserstoff	OV	Verfahren: Exakte Ermittlung
HD	High Density (dt.: Hohe Dichte)	PE	Polyethylen
HV	Verfahren: Hydrostatische Analogie	SV	Sonstige Versuche
MRS	Minimum Required Strength (dt.: erforderliche Mindestfestigkeit)	UV	Ultraviolettstrahlung
N <sub>2</sub>	Stickstoff	VV	Verfahren: Vereinfachte Ermittlung
!	Fakultät	∅	Durchmesser
		∞	unendlich

## Große lateinische Buchstaben

A	(Ober-), (Querschnitts-)fläche	R	Radius
D	Diffusionskonstante	T	Zeit oder Temperatur
E	E-Modul	U	Umlenkraft
N	Anzahl an Kreisen	W	(Verschleiß-)arbeit
OVL	Überlappung	X	Unabhängige Variable
P	Vorspannkraft	Y	Abhängige Variable
Q	Anteil von Vollbelastung	Z	Anzahl an Operationen

## Kleine lateinische Buchstaben

a	Hohlraumgehalt oder Einzelfläche	p	(Umlenk-)pressung
b	Breite	r	Radius oder Korrelation
d	(Euklidischer) Abstand oder (Wand-)dicke oder Durchmesser	s	Strecke oder Dicke einer Barriere oder Standardfehler des Schätzers
f	Festigkeit	t	(Einsink-)tiefe
h	(Füll-)höhe	u	Umlenk-(gleich-)last
k	Stapelfaktor (bzw. Kabelfaktor)	w	(Überzieh-)weg
l	Länge	z	Vertikale Koordinate

## Griechische Buchstaben

$\alpha$	Winkel oder Beiwert für Litztenform	$\Delta p$	Partialdruck
$\beta$	Winkel oder relative Kriechverformung oder Konstante	$\varepsilon$	Störgröße
$\gamma$	Sicherheitsbeiwert oder Konstante oder Korrekturwert	$\eta$	Füllgrad oder Anpassungsfaktor
$\delta$	Abstandsfaktor	$\varphi$	(Füll-)winkel
$\partial m / \partial t$	Permeation bzw. Durchlässigkeit	$\kappa$	Klemmbeiwert
$\Delta d$	Eindrückung	$\lambda$	Anteil
		$\pi$	Kreiszahl Pi
		$\sigma$	Spannung

## Indizes

0	Null, Startwert, Ausgang	iG	Innere Gleitung (auch IG)
a	außen	k	charakteristischer Wert
c	Druck (engl.: compression)	$\kappa$	Klemmwirkung
c0	konstanter Druck	l	links
co	Druck oben	max	Maximum
cu	Druck unten	min	Minimum
cal	Berechnung (engl.: calculation)	mittel	Mittelwert
d	Hüllrohr (engl.: duct)	M	Mitte(-lpunkt) oder Anzahl
d-c	Scheibe-Hülle (engl.: disk-container)	N	Kreise
d-d	Scheibe-Scheibe (engl.: disk-disk)	P	Vorspannung
FA	Festanker	r	kleine Kreise oder rechts
ges	Gesamt	R	Hüllkreis
grenz	Kriterium	t	Zeitpunkt
H	horizontal	V	vertikal
hyd	Analogie zur Hydraulik	zul	zulässiger Wert
i	innen		

## Einheiten

Dichte	$g/cm^3, kg/dm^3, t/m^3$
Druck	bar bzw. Einheiten für Spannung
Fläche	$mm^2, cm^2, m^2$
Kraft	N, kN, MN
(Umlenk-)pressung	N/mm, kN/m
Spannung	$N/mm^2, MN/m^2, MPa$
Strecke	mm, m
Temperatur	$^{\circ}C$
Temperaturunterschied	K

# 1 Einleitung

Zug- und biegebeanspruchte Bauteile aus Beton müssen wegen der geringen Zugfestigkeit des Werkstoffs verstärkt werden, wofür sich Stahl gut eignet (u.a. hohe Zugfestigkeit, Verfügbarkeit des Werkstoffs, isotrope mechanische Eigenschaften). Bei einer Überschreitung der Betonzugfestigkeit reißt das Stahlbetonbauteil auf, und die Zugkräfte werden auf die Stahlzulagen übertragen. Möchte man zum Schutz des Stahls vor Korrosion und zur Beschränkung der Bauteildurchbiegung das Aufreißen des Bauteils verhindern, so kann es mit Zuggliedern vorgespannt werden. Abbildung 1.1 zeigt ein Spannbetonbauteil vor und nach dem Vorspannen. Der gespannte Spannstahl ist an den Enden des Betonkörpers verankert und überträgt dort die Vorspannkraft. Damit wird das Betonbauteil permanent „gedrückt“ und kann so Zugspannungen aus Eigengewicht, äußeren Einwirkungen oder Zwang ohne Aufreißen des Betons kompensieren. Vorgespannte Betonbauteile nutzen die positiven Eigenschaften von Stahl und Beton gut aus und sind daher steifer und rissunempfindlicher als vergleichbare Stahlbetonbauteile. Sie können folglich schlanker dimensioniert werden. Erst dadurch war es in der Vergangenheit möglich, sehr große Spannweiten mit Betonbauwerken zu überbrücken (vgl. Abbildung 1.3a).

Bei der sog. „verbundlosen“ Vorspannung überträgt der Spannstahl die Zugkraft an den Verankerungen auf den Beton. Alternativ ist auch eine Vorspannung „mit Verbund“ möglich, wobei der Spannstahl auf voller Länge kraftschlüssig mit dem umgebenden Beton „verbunden“ ist. Verbundlose Spannglieder sind mit einer Schutzhülle (z.B. aus Kunststoff) ummantelt, die mit einer Schutzmasse gefüllt ist. Sie können sogar außerhalb des Betonkörpers angeordnet werden, wodurch Verstärkungsmaßnahmen, Bauwerksprüfung oder der Austausch von Spanngliedern vereinfacht werden. Die Vorspannkraft wird auch in diesem Fall an den Enden des Betonkörpers auf diesen übertragen.

Die Werkstoffeigenschaften von Stahl und Beton können noch besser ausgenutzt werden, wenn die Spannglieder nicht zentrisch gerade sondern exzentrisch oder mit gekrümmtem Verlauf geführt werden. Denn zusätzlich zu Drucknormalkräften können so Biegemomente erzeugt werden, die den Biegebeanspruchungen entgegengerichtet sind bzw. diese kompensieren. Bei einem gekrümmten Verlauf werden die Spannglieder umgelenkt (Abbildung 1.2).

Dabei entstehen durch die Vorspannung auch Umlenkquerkräfte, die vom Spannstahl auf das Betonbauteil übertragen werden. Diese führen zu einer Quetschung der Schutzhülle durch den Spannstahl. Bei einer im Vergleich zu Stahl weichen Hülle kann dies zu tiefen Eindrückungen des Spannstahls in die Hülle führen und die Wirkung der Schutzhülle als Bestandteil des Korrosionsschutzes für den Spannstahl herabsetzen. Je enger der Radius der Umlenkung, desto größer ist der Druck des Stahls auf seine Hülle.

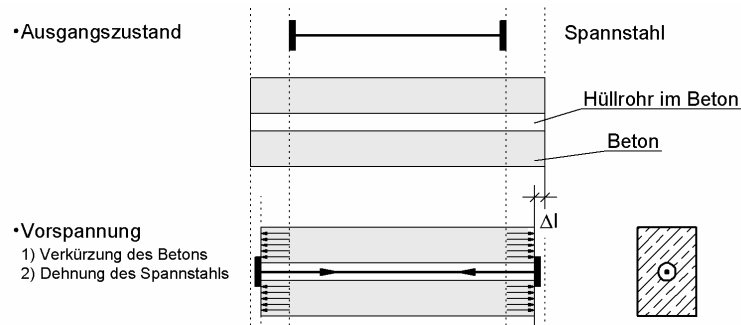


Abbildung 1.1: Verbundloses Vorspannen eines Betonkörpers (Maurer, Zilch, Bätjtjer & Weiher, 2006)

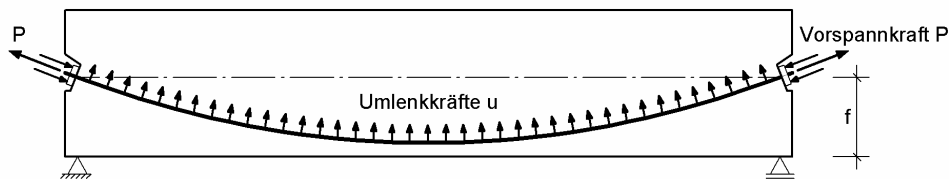


Abbildung 1.2: Gekrümmter Verlauf eines intern geführten Spannglieds im Betonbauteil (Maurer et al., 2006)

Bei extern geführten Spanngliedern kann die Umlenkung mit Einzelumlenkstellen realisiert werden, dazwischen verlaufen die Spannglieder gerade (Abbildung 1.3c). An Umlenkstellen muss der gewünschte Knickwinkel des Spannglieds mit einem engen Umlenkradius erreicht werden um die Abmessungen der Umlenkstellen klein zu halten. Entsprechend groß ist dort die Belastung des Spannstahls auf seine Hülle. Im Gegensatz zu intern geführten Spanngliedern fehlt der zusätzliche Schutz des Stahls vor korrosionsfördernden Medien durch den umgebenden Beton.

Wird das Spannglied bei seiner Installation gespannt, so treten durch die Verkürzung des Betons und die Verlängerung des Stahls gegenläufige Bewegungen auf, die im Falle eines umgelenkten Spannglieds zu Reibung mit Abrasions- und Umformvorgängen zwischen Hüllrohr und anliegendem Stahl führen. Sowohl im Beton als auch außerhalb des Betons liegende verbundlose Spannglieder werden derzeit v.a. mit Hüllen aus hochdichtem Polyethylen (kurz: PE-HD) geschützt, einem thermoplastischen Kunststoff. Dieser Werkstoff wird bei umgelenkten Spanngliedern durch die beschriebenen Beanspruchungen lokal stark belastet. Die durch die Umlenkbelastung des Stahls bewirkten Eindrückungen nehmen bei zunehmender Beanspruchungsdauer und zunehmender Temperatur zu. Sehr große Eindrückungen reduzieren die Sperrwirkung der Korrosionsschutzhülle und gefährden dadurch die Dauerhaftigkeit des Spannstahls und des vorgespannten Bauwerks.

Derzeit zugelassene verbundlose und umlenkbare Spannglieder unterscheiden sich in Form und Größe der verwendeten Spannstahlelemente (Litze, Draht, Kompaktlitze), in der Anordnung dieser zueinander, und im Korrosionsschutz (Dicke des PE-HD, Anzahl der Schutzlagen). Für stapelbare Spanngliedbänder (Litze, Kompaktlitze) kann aufgrund der geometrisch vorbestimmten Anordnung des Spannstahls die Beanspruchung der Hülle exakt bestimmt werden. Das Eindrückverhalten bei Bändern wurde in der Vergangenheit bisher nur mit Kleinmodellversuchen an der RWTH Aachen untersucht. In der vorliegenden Arbeit



sollen anhand eigener Großversuche einerseits die dort gewonnenen Ergebnisse überprüft werden und andererseits der Einfluss von weiteren Faktoren erforscht werden. Basierend darauf soll die Eindrückung des Spannstahls in PE-HD theoretisch in Abhängigkeit der Parameter Umlenkbelastung, Litzenform, -größe, Reibung und Umlenkrichtung grundlegend untersucht und quantifiziert werden. Für die Verwendung der Ergebnisse in der Praxis sollen für Band- und Bündelspannglieder erstmals Bemessungsmodelle vorgeschlagen werden.

Bei loser Anordnung des Spannstahls in einem Rohr kann die Beanspruchung der Schutzhüllen durch die Umlenkbelastung bisher nicht zufriedenstellend bestimmt werden. Ohne die Kenntnis der Belastung der PE-HD Hülle durch den Spannstahl, ist die Vorhersage der zu erwartenden Eindrückungen und somit eine Beurteilung der Dauerhaftigkeit eines Spannglieds kaum möglich. Diese Wissenslücke stellt ein Sicherheitsrisiko dar. Die maximale Umlenklast unter einem am Rohr anliegenden Spannstahlelement hängt von der geometrischen Anordnung dieser zueinander ab. Für nur wenige Konfigurationen (Anzahl an Spannstahlelementen, Größenverhältnis zu Hüllrohr) wurde diese Fragestellung in der Vergangenheit mit Hilfe aufwändig angefertigter, maßstäblicher Modelle gelöst. Ein Ziel der vorliegenden Arbeit ist deshalb die Erarbeitung von theoretischen Lösungen, mit denen, mit vertretbarem Aufwand, für verschiedenste Konfigurationen zunächst die geometrische Anordnung der Spannstahlelemente im Rohr und folglich die maximale Umlenkbelastung bestimmt werden können.



a) Rheinbrücke Worms, Baujahr 1953 (Quelle: Keuser)



b) Sulzebachtalbrücke im Bauzustand, Baujahr 2007



c) Umlenkstelle im Hohlkasten einer Spannbetonbrücke (Quelle: Schäfer)



d) Faulbehälter Gut Großlappen im Bauzustand, Baujahr 2007 (Quelle: [www.arge-ggl.de](http://www.arge-ggl.de))

**Abbildung 1.3: Spannbetonbauwerke**

Auf Basis der durchgeführten Untersuchungen sollen abschließend Konstruktionsempfehlungen für den Aufbau dauerhafter, verbundloser Spanngliedssysteme hinsichtlich ihrer besonderen Beanspruchung an Umlenkstellen vorgeschlagen werden. Mit diesen Empfehlungen soll es auch möglich sein, bestehende Spanngliedssysteme in Bezug auf ihre Dauerhaftigkeit zu beurteilen.

## 2 Umlenkung von Spanngliedern

Bei vorgespannten Betonbauwerken wird zur Reduzierung der Rissbildung im Beton und der Bauwerksdurchbiegung mit angespannten Zugliedern ein Betonbauteil überdrückt. Diese Zugglieder bzw. Spannglieder bestehen oft aus höherfestem Spannstahl. Zur besseren Nutzung der Vorspannwirkung können Spannglieder bei ihrer Anordnung im Bauwerk an den Verlauf der Schnittgrößen in einem Bauwerk angepasst werden. Bei einer Verlegung im Inneren des Betonquerschnitts können sie kontinuierlich umgelenkt werden (Abbildung 2.1). Um den Zustand der Spannglieder während der Nutzungszeit beobachten zu können und im Zweifel einen Austausch vornehmen zu können, werden Spannglieder auch außerhalb des Betonquerschnitts angeordnet. Sie sind dann jedoch an einzelnen Stellen (z.B. Querträger, Widerlager) zu verankern und/oder umzulenken (Abbildung 2.1, Abbildung 2.2). Zwischen diesen Stellen verlaufen Sie gerade. Neben der zentrischen Überdrückung des Querschnitts wirken die Schnittgrößen aus den Umlenkkräften bzw. -lasten den Schnittgrößen aus äußeren Einwirkungen (z.B. Eigengewicht) und innerem Zwang entgegen. Neben der planmäßigen Umlenkung kann es an Einzelumlenkstellen auch zu einer ungewollten Umlenkung (Abknicken) kommen, bei der das Spannglied an einer Kante anliegt.

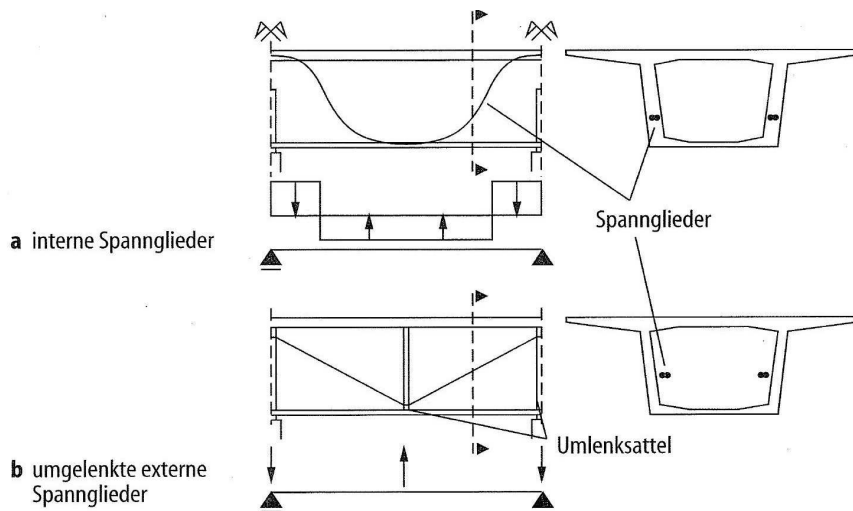


Abbildung 2.1: Statische Wirkung von kontinuierlicher (Fall a) und annähernd punktueller (Fall b) Umlenkung von Spanngliedern (Zilch, Diederichs und Katzenbach, 2001)

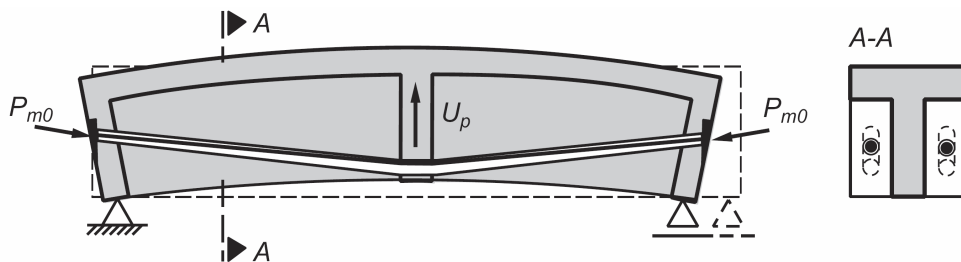


Abbildung 2.2: Längs- und Querschnitt eines extern vorgespannten Trägers mit Einzelumlenkkraft  $U_p$  (Zilch und Zehetmaier, 2005)

# 3 Spannglieder für verbundlose Vorspannung

Verbundlose Spannglieder können je nach ihrer Lage außerhalb bzw. innerhalb des Betonquerschnitts in „extern“ bzw. „intern“ geführte Spannglieder unterteilt werden. Per Definition ist der Spannstahl dabei nicht mit dem umgebenden Beton kraftschlüssig verbunden im Gegensatz zur Vorspannung mit Verbund. Die Einleitung der Vorspannnormalkraft erfolgt bei der verbundlosen Vorspannung ausschließlich an den Verankerungen. Umlenkkräfte können im Falle der internen Anordnung kontinuierlich oder bei externer Anordnung an einzelnen Stellen (z.B. Querträger) in das Tragwerk eingeleitet werden. Für die Umlenkung sind nur Spannglieder mit Spannstahlelemente von geringer Steifigkeit geeignet (z.B. Litze, Einzeldrähte). Stabspannglieder sind sehr steif und können deshalb nur gerade geführt werden. Sie sind daher nicht Gegenstand der Untersuchung. Derzeitige Spanngliedersysteme für verbundlose Vorspannung sind zusammengesetzt aus Spannstahl, Schutzhülle(n) aus dem Kunststoff Polyethylen hoher Dichte (PE-HD) sowie Korrosionsschutzmasse (z.B. Mörtel, Wachs). Für die Untersuchung des Verschleißverhaltens der Kunststoffhülle sind deren Materialeigenschaften sowie Form und Größe der Spannstahlelemente von besonderem Interesse, weshalb darauf vorab eingegangen werden soll.

## 3.1 Polyethylen hoher Dichte: PE-HD

Die Kunststoffhülle von Spanngliedern muss bestimmte Eigenschaften aufweisen um die an sie gestellten Anforderungen an Korrosionsschutz und Dauerhaftigkeit erfüllen zu können. Polyethylen hoher Dichte ist hierfür geeignet. Als Teil des Korrosionsschutzsystems des Stahls ist besonders die Barriere-/Sperrwirkung der PE-HD Hülle hervorzuheben, die abhängig von der Dicke der Schutzhülle ist. Deshalb wird zur Abschätzung von Dickenschwankungen auch der Herstellungsprozess von Schutzhüllen für das linienförmige Produkt „Spannglied“ beschrieben.

### 3.1.1 Eigenschaften

PE-HD steht kurz für High-Density Polyethylene, Polyethylen hoher Dichte bzw. Hartpolyethylen. PE-HD ist in seiner Grundzusammensetzung ein halbkristalliner, weißlicher und halbdurchsichtiger Thermoplast. Durch die Zugabe von Kohlenstoffpartikel erhalten die Hüllen ihre schwarze Farbe. Damit kann eine UV-Stabilisierung bzw. UV-Beständigkeit des Materials erreicht werden. Thermoplaste sind Polymerwerkstoffe mit unvernetzten Kettenmolekülen. Bei Wärmezufuhr erhöht sich die Beweglichkeit der Molekülketten und das Material wird weicher. Nach Uetz und Wiedemeyer (1984) verbessert sich bei höherer Fließfähigkeit auch die Verarbeitbarkeit (z.B. Formgebung beim

Herstellungsvorgang). Diese temperaturabhängige Eigenschaft ist auch bei mechanischer Beanspruchung von Interesse.

Tabelle 3.1 bis Tabelle 3.3 führen einige mechanische, chemische, physikalische und thermische Eigenschaften des verwendeten Materials auf. Hartpolyethylen ist ein sehr haltbares und starres Material mit hoher Beständigkeit gegenüber chemischen Substanzen. Eine hohe Schlagzähigkeit und gute Sperreigenschaften bei gleichzeitig hoher Flexibilität kennzeichnen zusätzlich dieses robuste Material, weshalb es vor allem im Behälter- und Rohrleitungsbau Verwendung findet. Charakteristische Größen bei temperaturabhängigen Werkstoffen sind Erweichungs- und Glasübergangspunkt. Diese liegen mit 72 °C und -70 °C außerhalb der üblichen Temperaturspanne bei einem planmäßigen Betrieb von vorgespannten Bauwerken. Damit kann einerseits von einer Formbeständigkeit der Schutzhüllen ausgegangen werden und andererseits ein zu sprödes Werkstoffverhalten ausgeschlossen werden. Die Schmelztemperatur beträgt 135 °C.

PE-HD bietet sich des Weiteren aufgrund folgender Eigenschaften als Schutzmaterial von Spannstahl an:

- sehr hohe Duktilität,
- sehr gute chemische Beständigkeit,
- Witterungs- und Strahlenbeständigkeit,
- hoher Abrasionswiderstand,
- gute Fügbarkeit durch Schweißen,
- hoher Widerstand gegen Beschädigungen durch Nagetiere,
- Beständigkeit gegen mikrobiellen Materialabbau,
- geringe Dichte von ca. 0,95 g/cm<sup>3</sup>,
- einfacher Transport und Handhabung durch geringes Gewicht und gute Verformbarkeit (Aufrollen).

Bei Rohren wird Polyethylen seit kurzem nicht mehr nach der Dichte sondern nach der Festigkeit unterschieden. PE kann nach EN ISO 12162 (1995) entsprechend der erforderlichen Mindestfestigkeit MRS (engl.: Minimum Required Strength) klassifiziert werden.

- PE 63:            MRS ≥ 6,3 MPa ;
- PE 80:            MRS ≥ 8,0 MPa ;
- PE 100:           MRS ≥ 10,0 MPa ;

Man versteht unter einem PE 63 ein Polyethylen hoher Dichte, dessen Festigkeit bei 50 Jahre andauernder Druckbelastung mit 20°C temperiertem Wasser mindestens 6,3 MPa beträgt. Diese Mindestfestigkeit (MRS) beträgt bei den Rohrwerkstoffen PE 80 und PE 100 entsprechend bei 8,0 MPa bzw. 10,0 MPa (vgl. EN ISO 12162, 1995).

**Tabelle 3.1: Mechanische Eigenschaften PE-HD (Hegger et al., 2002, Uetz und Wiedemeyer, 1984)**

<i>Eigenschaft</i>	<i>Wert</i>	<i>Norm</i>
E-Modul (Zugversuch, 1 mm/min)	1 000 N/mm <sup>2</sup>	ISO 527-2
Streckspannung bei 23 °C (50 mm/min)	22 N/mm <sup>2</sup>	ISO 527-2
Zug-(Reiß-) Festigkeit	max. 30 N/mm <sup>2</sup>	
Dehnung bei Streckspannung	9 %	ISO 527-2
Reißdehnung	> 600 %	ISO 527-2
Kriechmodul (23 °C, 4 N/mm <sup>2</sup> , 500 h)	ca. 200 N/mm <sup>2</sup>	ISO 899
Schubmodul bei 23°C	700 - >1000 N/mm <sup>2</sup>	
Schubmodul bei 50°C	400 - 900 N/mm <sup>2</sup>	
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	

**Tabelle 3.2: Chemische und physikalische Eigenschaften PE-HD (Hegger et al., 2002, Uetz et al., 1984)**

<i>Eigenschaft</i>	<i>Wert</i>	<i>Norm</i>
Kohlenstoffgehalt	> 2%	ASTM D 1603
Dichte	0,956 g/cm <sup>3</sup>	ISO 1183
Wasserabsorption (über 24 h)	< 0,01 %	ISO 62
Entzündbarkeit	HB	IEC 60695-11-10

**Tabelle 3.3: Thermische Eigenschaften PE-HD (Hegger et al., 2002, Uetz et al., 1984)**

<i>Eigenschaft</i>	<i>Wert</i>	<i>Norm</i>
Wärmeausdehnungskoeffizient	12 - 15 · 10 <sup>-5</sup> /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 <sup>2</sup> )	70°C	ISO 75 HDT/B

### 3.1.2 Barrierewirkung von PE-HD

Da die PE-HD Ummantelungen die Spannglieder dauerhaft vor Umwelteinflüssen und daraus folgender Spannstahlkorrosion schützen sollen, sind gewisse Anforderungen an die zulässige Durchlässigkeit der PE-HD Ummantelungen für Flüssigkeiten und Gase zu stellen. Diese Durchlässigkeit oder Permeation kann nach dem 1. Fick'schen Gesetz bestimmt werden (Gleichung 3.1):

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

mit

$\partial m/\partial t$  Durchlässigkeit bzw. Permeation

D Diffusionskonstante

A	Oberfläche
$\Delta p$	Dampfdruckbarriere (Partialdruck)
s	Dicke der Barriere

In Tabelle 3.4 und Tabelle 3.5 sind ausgewählte Ergebnisse einer Durchlässigkeitsuntersuchung von PE-HD mit Flüssigkeiten und Gasen dargestellt (aus [www.diffusion-polymers.com](http://www.diffusion-polymers.com)). Damit kann die durch eine Schutzhülle diffundierende Menge an korrosionsfördernden Stoffen über die Nutzungszeit von Spanngliedern sowie der durch chemische Reaktion damit maximal mögliche Abbau von Stahl quantifiziert werden. Im Allgemeinen tritt bei extern geführten Spanngliedern keine dauerhafte Beaufschlagung der Spannglieder durch Flüssigkeiten auf, da das Eindringen dieser Medien bereits durch eine geschlossene Hülle verhindert werden kann. Gase aus der umgebenden Luft (z.B. Kohlendioxid, Sauerstoff, Stickstoff) wirken jedoch stets ein und diffundieren durch die 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 mit Spannstaahl bestückten Hüllrohre aufgefüllt werden, stellt eine weitere Barriere für das Eindringen der Gase dar, deren Vordringen sowohl in Quer- als auch in Längsrichtung verhindert wird. Um die erforderliche Barrierewirkung und damit eine Schutzwirkung des Spannstaahls vor Korrosion über die geplante Lebenszeit zu erreichen, ist somit eine gewisse Mindestdicke der Schutzhülle erforderlich.

**Tabelle 3.4: Durchlässigkeitswerte von PE-HD bei Beaufschlagung mit Flüssigkeiten (aus [www.diffusion-polymers.com](http://www.diffusion-polymers.com))**

<i>Permeant</i>	<i>Löslichkeit</i>	<i>Diffusionsvermögen</i>	<i>Freier Vol.-Faktor</i>	<i>P.-Vol.</i>	<i>P.-Masse</i>
	$m^3/m^3$	$m^2/s$	$[-]$	$m^3/m^3 \cdot m^2/s$	$g/(ms)$
Wasser	0,0002	$1 \cdot 10^{-11}$	-	$2 \cdot 10^{-15}$	$2 \cdot 10^{-9}$
Benzol	0,10	$7 \cdot 10^{-13}$	0,025	$1 \cdot 10^{-12}$	$9 \cdot 10^{-7}$
Toluol	0,11	$6 \cdot 10^{-13}$	0,025	$1 \cdot 10^{-12}$	$1 \cdot 10^{-6}$
Styrol	0,10	$4 \cdot 10^{-13}$	0,025	$6 \cdot 10^{-13}$	$5 \cdot 10^{-7}$
Benzin	0,09	$6 \cdot 10^{-13}$	-	$5 \cdot 10^{-12}$	$4 \cdot 10^{-7}$

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

**Tabelle 3.5: Durchlässigkeitswerte von PE-HD bei Beaufschlagung mit Gasen (aus [www.diffusion-polymers.com](http://www.diffusion-polymers.com))**

<i>Permeant</i>	<i>Löslichkeit</i>	<i>Diffusionsvermögen</i>	<i>Freier Vol.-Faktor</i>	<i>P.-Vol.</i>	<i>P.-Masse</i>
	$m^3/m^3 \cdot bar$	$m^2/s$	$[-]$	$m^3/m^3 \cdot bar \cdot m^2/s$	$g/(ms)$
CO <sub>2</sub>	0,29	$1,2 \cdot 10^{-11}$	-	$3,5 \cdot 10^{-12}$	$6,8 \cdot 10^{-9}$
O <sub>2</sub>	0,046	$1,7 \cdot 10^{-11}$	-	$7,8 \cdot 10^{-13}$	$1,1 \cdot 10^{-9}$
N <sub>2</sub>	0,025	$9,3 \cdot 10^{-12}$	-	$2,3 \cdot 10^{-13}$	$2,8 \cdot 10^{-10}$
H <sub>2</sub>	0,073	$2,6 \cdot 10^{-11}$	-	$1,9 \cdot 10^{-12}$	$1,7 \cdot 10^{-10}$

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

### 3.1.3 Herstellung und Herstellgenauigkeit von PE-HD

Die Herstellung der Schutzhüllen erfolgt im Allgemeinen durch so genannte Extrusion. Bei der Extrusion wird erhitzter Kunststoff durch eine Öffnung gepresst welche ihm die gewünschte Form und einen gleichmäßigen Querschnitt gibt. Abbildung 3.1 zeigt schematisch eine Extrusionsmaschine mit den wichtigsten Maschinenkomponenten. Beim Extrusionsverfahren wird die Dicke des Extrusionsprodukts (z.B. Monolitzenmantel, PE-Rohr, PE-Band) maßgeblich durch die Menge an Ausgangsmaterial, die je Längeneinheit des Produkts zugeführt wird, bestimmt. Bei einer Maschine, bei der durch genaues Abstimmen von Heizung und Schneckenförderung ein gleichmäßiger Fluss des Polyethylens ohne Verklumpung angestrebt wird, kann ein Produkt (z.B. Monolitzenmantel) hergestellt werden, dessen Dicke mit bestimmten Schwankungen eingestellt werden kann.

Beispielsweise ist zur Erzeugung eines Monolitzenmantels mit der Kennzeichnung „Mindestdicke 1,50 mm“ eine Maschinenkonfiguration erforderlich, unter der eine mittlere Wanddicke von mehr als 1,50 mm erreicht wird. Kann der Mindestwert der Ausgangsdicke nicht zuverlässig erreicht werden, so sind die Zufuhrmenge an PE-Ausgangsmaterial bei der Produktion und damit der sich einstellende Mittelwert der Wanddicke zu erhöhen. Eine Erhöhung des angestrebten Mittelwerts ist allerdings nur dann hinsichtlich einer gleichzeitig angestrebten Erhöhung des Minimalwerts zielführend, wenn die Streuung der Dicke nicht auch größer wird.

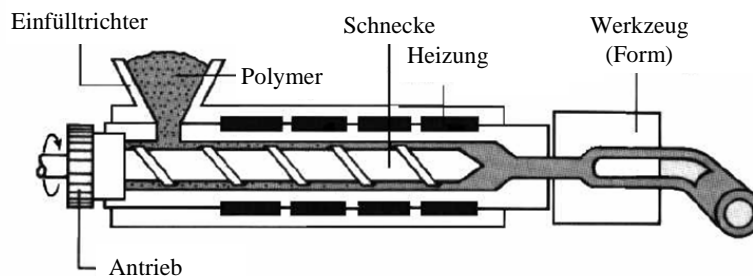


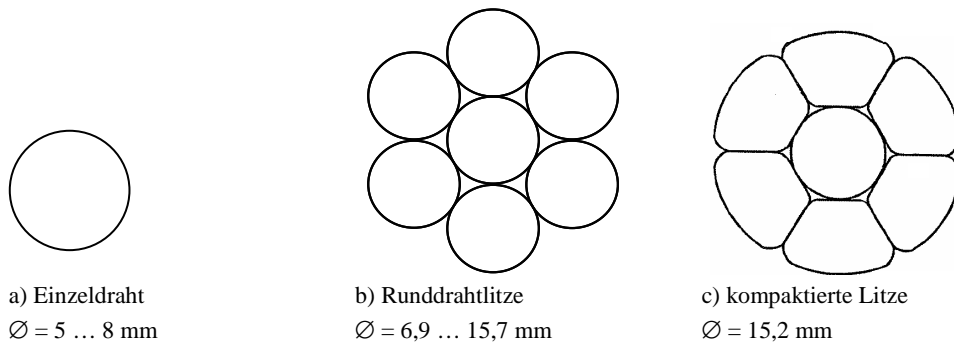
Abbildung 3.1: Schematische Darstellung eines Extruders

## 3.2 Spannstahl

Für die Belastungsintensität der PE-Schutzhüllen spielt der Spannstahl bzw. dessen Querschnittsform und -größe eine wesentliche Rolle. Spannstahl wird mit verschiedenen, für die Umlenkung geeigneten, Querschnittsformen bei der verbundlosen Vorspannung eingesetzt, nämlich Einzeldrähte, (Runddraht-) Litzen und kompaktierte Litzen (Abbildung 3.2). Letztere unterscheiden sich in ihrer Querschnittsgeometrie. Die Runddrahtlitze besteht aus sieben kreisförmigen Drähten, wohingegen bei der kompaktierten Litze die sechs äußeren Drähte durch einen zusätzlichen Bearbeitungsvorgang bei der Herstellung an ihren Seiten abgeflacht werden. Die kompaktierte Litze weist kleinere Zwischenräume („Zwickel“) als die Runddrahtlitze auf. Bei ähnlichem Außendurchmesser kann so eine



größere Nettoquerschnittsfläche erreicht werden. Folglich erlaubt die kompaktierte Litze bei gleicher Festigkeit dabei die Übertragung von größeren Kräften.



**Abbildung 3.2: Derzeit für verbundlose Vorspannung verwendete Querschnittsformen von Spannstahl mit Angabe möglicher (Umkreis-) Durchmesser  $\varnothing$**

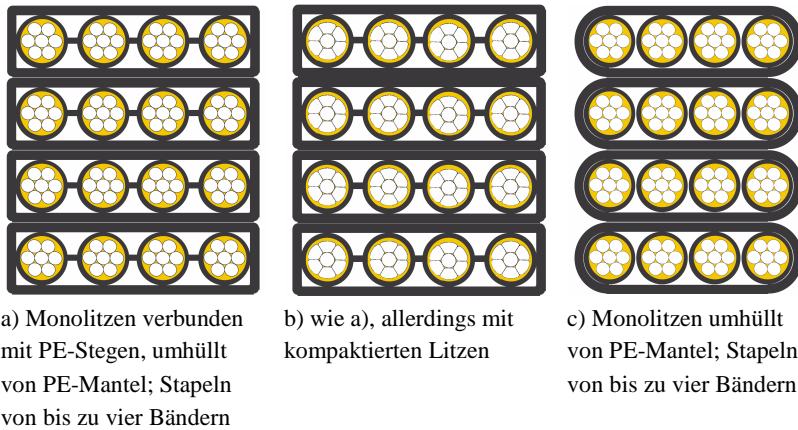
### 3.3 Extern geführte Spannglieder

Extern geführte Spannglieder werden außerhalb des Betonquerschnitts angeordnet (ausgenommen Umlenk- und Verankerungsstellen). Sie kommen fast ausschließlich im Brückenbau sowie vereinzelt im Behälterbau und Turmbau zum Einsatz. Extern geführte Spannglieder werden anhand ihrer Querschnittsform unterschieden: derzeit angewendete Systeme besitzen entweder Rechteck- (bzw. Band-) oder Kreisform.

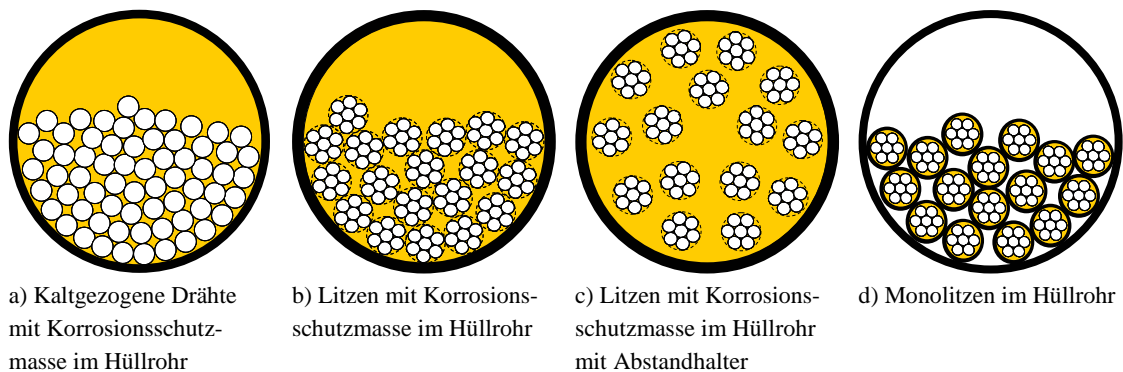
Bei Bandspanngliedern werden bis zu vier Litzen, welche einzeln mit Korrosionsschutzmasse und PE-HD Mantel geschützt sind, durch eine äußere Kunststoffummantelung zu einem stapelbaren Band zusammengefasst (Abbildung 3.3). Die einzelnen Bänder werden vollständig im Herstellwerk gefertigt und können aufgrund ihrer relativ geringen Größe auf der Baustelle schnell und einfach installiert werden. Bei Bandspanngliedersystemen werden derzeit zwei verschiedene Spannstahllitzenformen verwendet: dies sind die Runddrahtlitze und die Kompaktlitze. Leichte Unterschiede bestehen auch in der geometrischen Form der Kunststoffhülle. Die größten in Deutschland bauaufsichtlich zugelassenen Bandspannglieder weisen aktuell insgesamt 16 Litzen auf. Dabei werden vier Spannstahllitzen (Runddrahtlitzen oder kompaktierte Litzen) aus je sieben Drähten umgeben mit Korrosionsschutzmittel (z.B. Wachs) von einer inneren Ummantelung aus PE-HD umschlossen (vgl. Abbildung 3.3). Diese vier Monolitzen werden wiederum nebeneinander angeordnet von einer äußeren PE-HD Hülle umschlossen. Dabei können die inneren Ummantelungen mit PE-HD-Stegen verbunden werden (Abbildung 3.3 a und b) oder nicht (Abbildung 3.3 c). Ohne die Verbindung der Monolitzenhüllen werden die einzelnen Litzen nur durch den äußeren Mantel in ihrer Lage gehalten.

Bei Spanngliedern mit Kreisquerschnitt wird der Spannstahl in einem Hüllrohr geführt, wobei unterschiedliche Verfahren existieren. Zum einen können kaltgezogene Einzeldrähte die Zugglieder darstellen (Abbildung 3.4 a). Diese sind lose in einem PE-HD Hüllrohr angeordnet, welches mit Korrosionsschutzmasse verfüllt wird. Eine weitere Variante sieht lose in einem PE-HD Rohr geführte Spannstahllitzen vor (Abbildung 3.4 b), wobei auch hier

das Hüllrohr mit Korrosionsschutzmasse verfüllt wird. An Umlenkstellen können auch Abstandhalter vorgesehen werden, so dass sich mit deren Hilfe die Litzen dort gleichmäßig im gesamten Rohrquerschnitt verteilen (Abbildung 3.4 c). So soll sichergestellt werden, dass die Korrosionsschutzmasse die Spannstahlitzen vollständig umschließt. Als vierte Variante können handelsübliche Monolitzen, die bereits durch Korrosionsschutzmasse und eigene Polyethylenummantelung gegen äußere Einwirkungen geschützt sind, in einem PE-HD Hüllrohr angeordnet werden. Ein weiteres Verfüllen des Rohrs mit Korrosionsschutzmasse erfolgt in diesem Fall nicht mehr (Abbildung 3.4 d).



**Abbildung 3.3: Bandspannglieder für externe Vorspannung - Querschnitte**

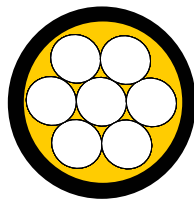


**Abbildung 3.4: Spannglieder für externe Vorspannung mit Spannstahl im Hüllrohr – Querschnitte an Umlenkstellen im Stützbereich**

### 3.4 Intern geführte Spannglieder

Intern geführte verbundlose Spannglieder werden im Betonquerschnitt angeordnet. Sie können dadurch ebenso wie Spannglieder mit nachträglichem Verbund kontinuierlich umgelenkt werden. Im Gegensatz zu letzteren können die verbundlosen Spannglieder zu einem späteren Zeitpunkt nachgespannt oder ausgetauscht werden. Die Anwendungsmöglichkeiten dieser Spannglieder sind vielfältig: sie kommen häufig im Hochbau, Brückenbau oder Behälterbau zum Einsatz. Die verbundlosen Spannglieder werden oftmals vollständig im Werk gefertigt, wobei auf ein Verpressen des Hüllrohrs und auf die Vorhaltung der hierfür erforderlichen Baustelleneinrichtung verzichtet werden kann.

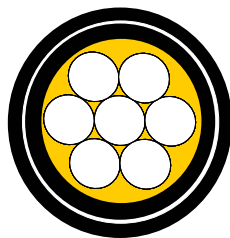
Die kleinste Spanngliedeinheit ist die Monolitze (Abbildung 3.5). Umhüllt man die Monolitze mit einem zweiten PE-HD Mantel, so kann die Monolitze zu einem späteren Zeitpunkt vollständig ausgetauscht werden. Monolitzen können in verschiedener Art und Weise zu größeren Spanngliedern kombiniert werden. Abbildung 3.6 zeigt drei mögliche Varianten. So können vier in einer Reihe liegende Monolitzen lose angeordnet oder durch Stege verbunden werden. Bei der dritten Variante werden mehrere Lagen von Monolitzenreihen versetzt gestapelt. Bei allen Varianten ist die Lage im Bauwerk vor dem Betonieren zu fixieren. Eigentlich für die externe Anordnung konzipierte Spanngliedersysteme können ebenfalls innerhalb des Betonquerschnitts (intern) geführt werden (Kapitel 3.3).



a) Querschnitt einer Monolitze mit einfach extrudiertem PE-Mantel



b) Isometrie einer Monolitze (Quelle: www.dwk-koeln.de)

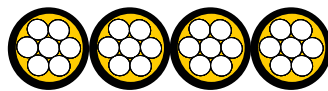


c) Querschnitt einer Monolitze mit doppelt extrudiertem PE-Mantel

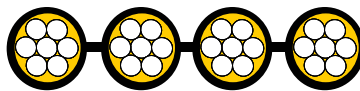


d) Isometrie einer Monolitze mit zwei PE-Mänteln (Quelle: www.dwk-koeln.de)

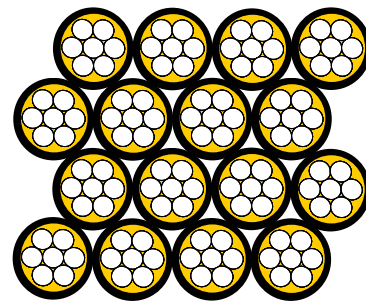
**Abbildung 3.5: Monolitze**



a) Vier lose Monolitzen in Reihe



b) Vier durch Stege verbundene Monolitzen in Reihe



c) Vier versetzte Lagen von Monolitzenreihen, Kompaktlage

**Abbildung 3.6: Anordnung von Monolitzen zu intern geführten Spanngliedern**

## 4 Beanspruchung der Schutzhüllen

Die Schutzhüllen von Spanngliedern werden an Umlenkstellen stark beansprucht. Zusätzlich zur Umlenkdruckbelastung können noch Reibung, Alterung (zeitabhängige Veränderung der Werkstoffeigenschaften) oder Ermüdung beitragen. Diese Beanspruchungen führen dazu, dass sich das PE-HD an den Auflagestellen des Spannstahls verformen kann. Abbildung 4.1 zeigt Teile des Querschnitts der Schutzhüllen eines Bandspannglieds nach einem Umlenkversuch (siehe hierzu auch Abbildung 4.2). Abbildung 4.3 stellt den Querschnitt eines PE-HD Hüllrohrs (Außendurchmesser 110 mm) im Ganzen und als Ausschnitt dar. Auch hier wurde die Kunststoffhülle durch die hohe Umlenkbelastung von eindrückenden Spannstahlritzen deformiert. Die maßgebenden Einflüsse, die zu einer Verringerung der Wandstärke und damit zu einer Reduzierung der Barrierewirkung führen können, werden im Folgenden erläutert. Auf Sondereffekte, die nicht durch die Umlenkung bedingt sind, wird nicht eingegangen (z.B. UV-Versprödung, Alterung, Längsrisswachstum, vgl. Hsuan, 2006).



Abbildung 4.1: Querschnittsteile von äußerer (links) und innerer Ummantelung (rechts) nach Belastung (Umlenkung) eines Bandspannglieds

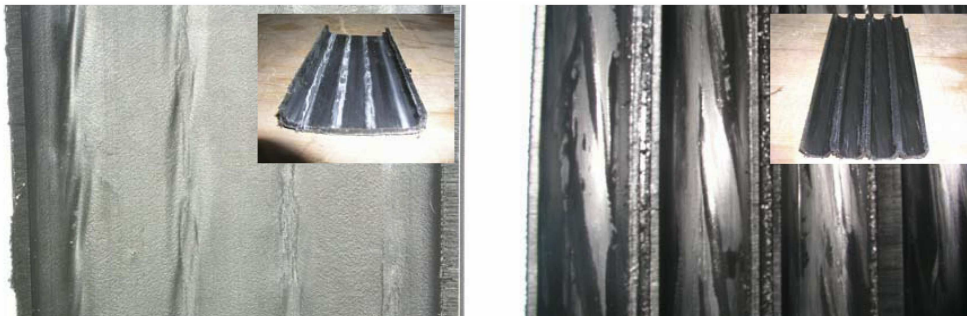


Abbildung 4.2: Eindrück- und Verschleißspuren von äußeren (links) und inneren Mänteln (rechts) eines Bandspannglieds (Methner, 2005)



Abbildung 4.3: Querschnittsteil eines PE-HD Hüllrohrs nach Belastung (Umlenkung)

## 4.1 Umlenkbelastung

Spannglieder werden zum Ziele einer Anpassung des geometrischen Spanngliedverlaufs an die statischen Gegebenheiten umgelenkt, so dass sie im Stützbereich im oberen Querschnittsteil und im Feldbereich im unteren Querschnittsteil liegen. Im Spannbetonbrückenbau mit externen Spanngliedern kann die Umlenkung nur an Einzelstellen realisiert werden. Zur Einleitung der Einzelumlenkkräfte ist die Ausbildung von teils massiven Querträgern mit Aussparungen für die Spannglieder erforderlich. Durch das Anspannen des Spannglieds wird die Umlenkraft in das Tragwerk eingeleitet.

Die Umlenkung um einen geometrischen Punkt wäre gleichbedeutend mit einer konzentrierten Lasteinleitung der Umlenkraft 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 Druckspannungen des Stahls auf den Kunststoff wären bei der theoretischen Umlenkung um einen Punkt so groß, dass der Stahl die Schutzhülle durchtrennen würde. Zudem würde auch der Spannstahl selbst so hoch beansprucht, dass er an der Knickstelle plastifiziert. Daher werden in der Praxis die Spannglieder an Umlenkstellen über eine gewisse Länge kontinuierlich umgelenkt (siehe Abbildung 4.4). Zweckmäßig ist dabei die Wahl eines konstanten Radius.

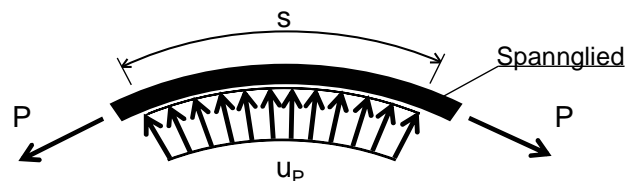


Abbildung 4.4: Wirkungsweise der Umlenkung von Zuggliedern mit konstantem Radius

Derzeitige Lösungen für die Gestaltung von Umlenkstellen sind schematisch in Abbildung 10.1 dargestellt (vgl. Anhang, Seite 109). Um die mechanische Beanspruchung der Korrosionsschutzhüllen durch den Spannstahl an diesen Umlenkstellen quantifizieren zu können, wird zunächst die gesamte Umlenkbelastung eines Spannglieds untersucht.

### 4.1.1 Ermittlung der gesamten Umlenkbelastung eines Spannglieds

Die Einzelumlenkraft eines ganzen Spannglieds wird über die Strecke mit einer Umlenkgleichlast  $u_p$  von

$$u_p = \frac{U_p}{s}; \quad (4.1)$$

mit

$u_p$  Umlenkgleichlast [kN/m]

$U_p$  Einzelumlenkraft [kN]

$s$  Bogenlänge eines mit konstantem Krümmungsradius umgelenkten Spannglieds [m]

bzw., auf den Radius der Umlenkung und die Vorspannkraft eines Spannglieds bezogen (Kesselformel), von

$$u_P = \frac{P}{R}; \quad (4.2)$$

mit

$u_P$	Umlenkgleichlast [kN/m]
$P$	Vorspannkraft eines Spannglieds [kN]
$R$	Krümmungsradius [m]

in das Tragwerk eingeleitet. In Abhängigkeit vom Aufbau, drückt das Spannglied dabei aber nicht zwingend auch mit der Gleichlast  $u_P$  in die Korrosionsschutzhülle. Für im Querschnitt kreisförmige Auflagerungen, wie sie bei Spanngliedern mit Hüllrohren auftreten, ist ein Erhöhungsfaktor (Klemmbeiwert  $\kappa$ ) für die zusätzlichen, senkrecht zur Umlenkbelastung wirkenden Auflagerspannungen zu berücksichtigen.  $u_P$  entspricht den vertikalen Anteilen der gesamten Umlenklast. Die vertikale Umlenkbelastung des ganzen Spannglieds  $u_P$  muss durch Multiplikation mit dem Klemmbeiwert  $\kappa$  korrigiert bzw. erhöht werden (Gleichung 4.3). In der Praxis ist dieser erhöhte Wert für die Abschätzung der Reibung an Umlenkstellen und für die Quantifizierung der Spaltkräfte unter einem Spanngliedstrang von Interesse.

$$u_{P,\kappa} = u_P \cdot \kappa = \frac{P}{R} \cdot \kappa; \quad (4.3)$$

mit

$u_{P,\kappa}$	Gesamte am Hüllrohr übertragene Umlenkbelastung [kN/m]
$u_P$	Umlenkgleichlast nach Gleichung 4.2 [kN/m]
$\kappa$	Klemmbeiwert [-]

Der Klemmbeiwert kann Werte zwischen eins und zwei annehmen. Die aus der Klemmwirkung resultierenden zusätzlichen Spannungen heben sich zwar in Summe wieder auf; allerdings wirkt auf die Schutzhülle lokal eine größere Belastung ein. Bei der Dimensionierung von Umlenkbauteilen sollte diese Wirkung (z.B. Spaltzugkräfte bei Stahlbetonumlensätteln) auch berücksichtigt werden. Diese Thematik kann verglichen werden mit einem Flüssigkeitsbehälter: Zusätzlich zur Abtragung der vertikalen Lasten über die Bodenplatte müssen auch die auf die Behälterwände einwirkenden horizontalen Lasten vom Bauwerk aufgenommen werden können.

Befindet sich nur ein einziger Kreis in einem Hüllrohr, dessen Abmessungen deutlich größer als die des Litzenumkreises ist, bzw. liegt eine Monolitze auf einer Umlenkfläche auf, die quer zur Spannrichtung nicht gekrümmt ist, so ist der Klemmwert  $\kappa$  gleich 1,0. Aus diesem Grund beträgt bei Bandspanngliedern der Erhöhungsfaktor ebenfalls  $\kappa = 1,0$ . Ist die Monolitze dagegen von Beton umschlossen (z.B. bei intern verbundloser Vorspannung), so kann die Umlenkgleichlast über eine gekrümmte Fläche („Betonwanne“) in das Tragwerk eingeleitet werden. Es tritt auch hier eine Klemmwirkung auf.

Walter, Utescher und Schreck (1977) schlagen ein vereinfachtes Verfahren zur Abschätzung des Klemmbeiwerts  $\kappa$  vor. Bei Spanngliedern mit Hüllrohr ist die Anzahl der Spannstahlelemente  $N$ , der Radius der gleich großen Spannstahlelemente  $r$  sowie der Innenradius des Hüllrohrs  $R_d$  gegeben. Zunächst bestimmen Walter et al. anhand der Anzahl  $N$  an gleichgroßen Kreisen (Litzen oder Drähte), die tatsächlich in einem Hüllrohr angeordnet sind, sowie anhand der Anzahl an Kreisen  $N_{max}$ , die maximal in diesem Rohr angeordnet werden können, einen Füllgrad  $\eta_N$  als Quotient der beiden Größen.

$$\eta_N = \frac{N}{N_{max}}; \quad (4.4)$$

mit

$\eta_N$	Füllgrad des Hüllrohrs [-]
$N$	Anzahl der Spannstahlelemente [-]
$N_{max}$	Anzahl der Spannstahlelemente, die maximal im Hüllrohr angeordnet werden können [-]

Das Verhältnis der Radien der Kreise zum Hüllkreis  $r/R_d$  legt fest, welche, zunächst unbekannte, maximale Anzahl an kleinen Kreisen  $N_{max}$  bei möglichst hoher (optimaler) Packungsdichte innerhalb des Hüllkreises angeordnet werden kann. Specht (2006) fasst die bisher gefundenen bestmöglichen Packungen von gleichgroßen Kreisen in einem Hüllkreis zusammen. Für bis zu 250 gleichgroße Kreise sind die maximalen Verhältniszahlen  $r/R_d$  in Tabelle 10.1 (Anhang) gegeben.  $N_{max}$  kann auch mit einer, hier durch Regressionsrechnung ermittelten, Näherungsformel nach Gleichung 4.5 in Abhängigkeit vom Größenverhältnis der Kreise und des Hüllkreises errechnet werden.

$$N_{max} = \frac{2}{3} \cdot \left( \frac{R_d}{r} \right)^{2,08}; \quad (4.5)$$

mit

$N_{max}$	Anzahl der Spannstahlelemente bzw. Kreise, die maximal im Hüllrohr angeordnet werden können [-]
$R_d$	Innenradius des Hüllrohrs bzw. -kreis [mm]
$r$	Radius (des Umkreises) der Spannstahlelemente bzw. Kreise [mm]

Das Bestimmtheitsmaß und folglich die Güte der Näherungslösung beträgt sehr hohe 99 %. Im Gegensatz zur Lösung mit Hilfe von Tabelle 10.1 beschreibt Gleichung 4.5 einen, für numerische Berechnungen geeigneten, stetigen Funktionsverlauf. Sowohl die diskreten Werte nach Specht (2006) als auch die Näherungslösung nach Gleichung 4.5 sind exemplarisch für zwei bis 100 Kreise grafisch in Abbildung 4.5 dargestellt. In Analogie zur hydrostatischen Druckverteilung auf das Hüllrohr bei einer Füllung mit einem homogenen Medium (z.B. Wasser) kann dem Füllgrad  $\eta_{hyd}$  sowohl eine Füllhöhe  $h_0$  als auch ein Füllwinkel  $\varphi_0$  zugeordnet werden (vgl. Abbildung 4.6).

Diese Größen stehen geometrisch wie folgt im Zusammenhang:

$$\eta_{hyd} = \frac{\varphi_0 - \sin \varphi_0 \cdot \cos \varphi_0}{\pi}; \quad (4.6)$$

mit

$\eta_{hyd}$  Füllgrad nach hydrostatischer Analogie [-]

$\varphi_0$  Füllwinkel, vgl. Abbildung 4.6 [rad]

$$h_0 = R_d \cdot (1 - \cos \varphi_0); \quad (4.7)$$

mit

$h_0$  Füllhöhe, vgl. Abbildung 4.6 [mm]

$R_d$  Innenradius des Hüllrohrs bzw. -kreis [mm]

$\varphi_0$  Füllwinkel, vgl. Abbildung 4.6 [rad]

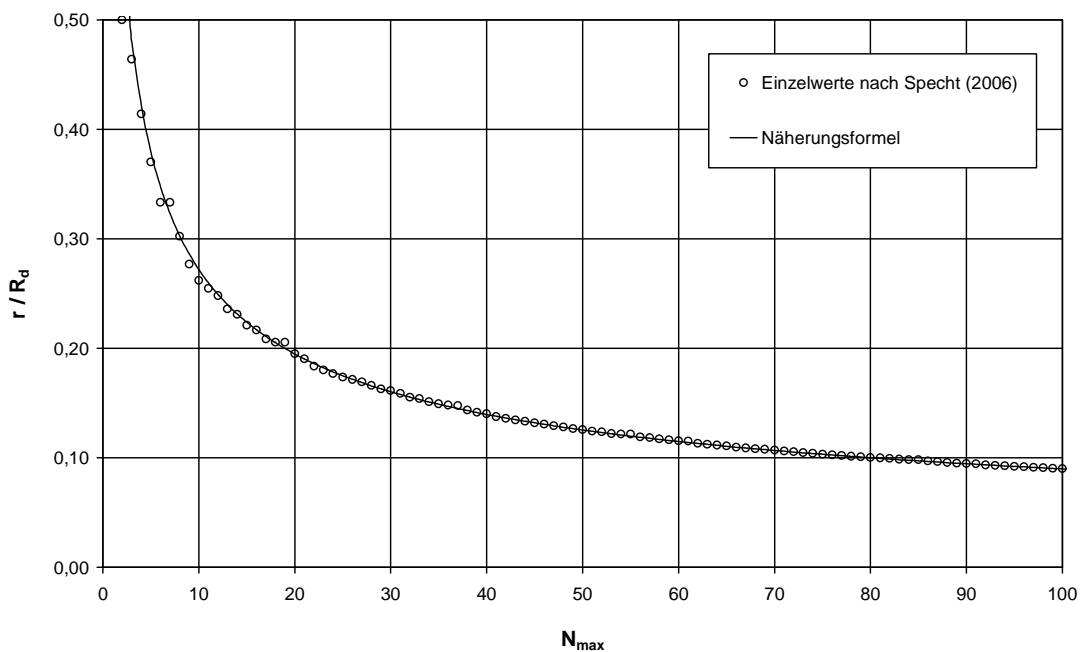


Abbildung 4.5: Optimale Packungsdichte nach Specht (2006) und Näherung nach Gleichung 4.5, Ausschnitt für  $N_{max} \in [2; 100]$

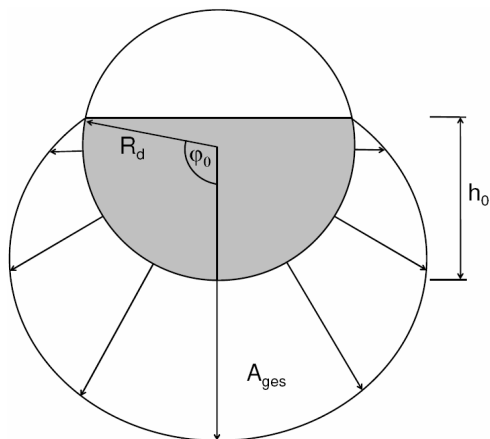


Abbildung 4.6: Füllwinkel  $\varphi_0$  und Füllhöhe  $h_0$  nach hydrostatischer Analogiebetrachtung



Durch Gleichsetzen der Gleichungen 4.4 und 4.6 kann eine Lösung für den Füllwinkel  $\varphi_0$  gefunden werden. Eine geschlossene Formulierung wäre aufgrund der trigonometrischen Terme jedoch nur mit einer Reihenbildung möglich. Die Ermittlung des Klemmbeiwerts  $\kappa$  nach Walter et al. (1977) erfolgt gemäß Gleichung 4.8 in Abhängigkeit von  $\varphi_0$ .

$$\kappa = \frac{0,5 \cdot \sin^2 \varphi_0 + \cos^2 \varphi_0 - \cos \varphi_0}{\varphi_0 - \sin \varphi_0 \cdot \cos \varphi_0}; \quad (4.8)$$

Grafisch sind die Abhängigkeiten des Füllgrads  $\eta$  und des Klemmbeiwerts  $\kappa$  vom Füllwinkel  $\varphi_0$  in Abbildung 4.7 illustriert. Damit ist bei Annahme eines Parameters die Ermittlung der weiteren darin dargestellten Parameter möglich (vgl. Walter et al., 1977).

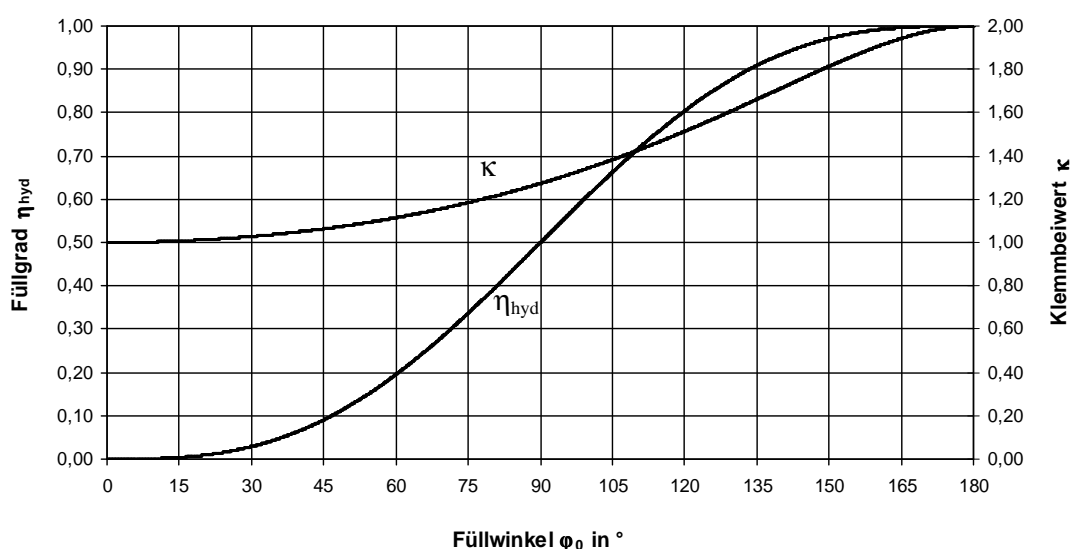


Abbildung 4.7: Füllgrad  $\eta_{\text{hyd}}$  und Klemmbeiwert  $\kappa$  nach hydrostatischer Analogiebetrachtung

## 4.1.2 Stapelfaktor

Für die genaue Beurteilung der zu erwartenden maximalen Beanspruchung der Polyethylenschutzhülle durch die Umlenkbelastung ist die globale Betrachtung des gesamten Spannglieds nicht ausreichend, da zwischen dem Spannstahl und den Schutzhüllen keine konstanten Druckspannungen auftreten. Entscheidend für den maßgebenden Verschleiß der Hüllen ist die maximale Belastung unter einem der an der Hülle anliegenden Spannstahlelemente (z.B. Draht, Litze). Zur Ermittlung dieses Wertes ist es zweckmäßig, den Stapelfaktor  $k$  einzuführen, der hier wie folgt definiert wird:

### Definition – Stapelfaktor $k$ :

Faktor, um welchen die Umlenkbelastung zwischen Schutzhülle und einem daran anliegenden Spannstahlelement (Litze oder Draht) eines Spannglieds größer ist, als diejenige Belastung, die

sich einstellt, wenn nur ein einziges Spannstahlelement ceteris paribus umgelenkt wird.

Die maximale Umlenkbelastung  $p_{\max}$  unter einem an der Schutzhülle anliegenden Einzelspannstahlelement eines Spannglieds mit insgesamt  $N$  Spannstahlelementen ergibt sich folglich in Abhängigkeit vom maximalen Stapelfaktor  $k_{\max}$  zu:

$$p_{\max} = \frac{P}{N \cdot R} \cdot k_{\max}; \quad (4.9)$$

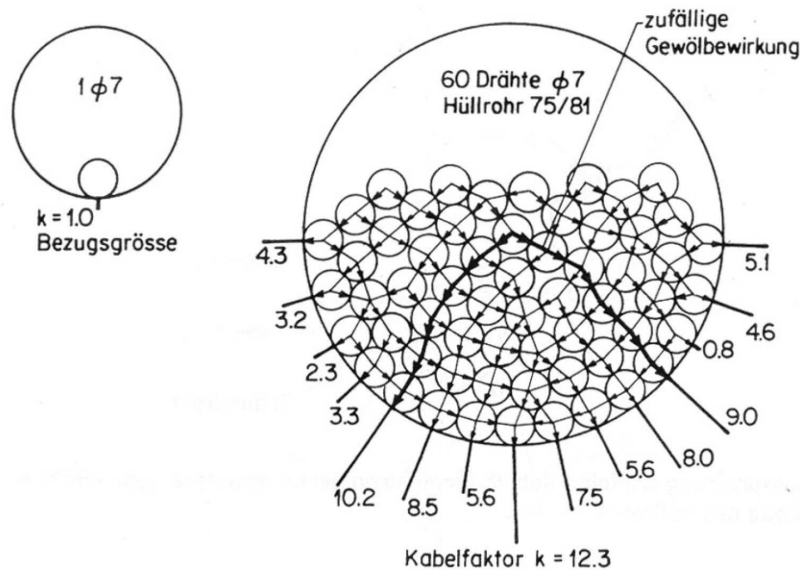
mit

$p_{\max}$	Maximale Umlenkbelastung [kN/m]
$P$	Vorspannkraft des gesamten Spannglieds [kN]
$N$	Anzahl der Spannstahlelemente des Spannglieds [-]
$R$	Umlenkradius des Spannglieds [m]
$k_{\max}$	maximaler Stapelfaktor [-]

Bei gestapelten Bandspanngliedern werden an Umlenkstellen die äußeren Bänder an die inneren Bänder gedrückt. Die Ermittlung des Stapelfaktors ist hier sehr einfach. Für Bandspannglieder entspricht der Stapelfaktor stets der Anzahl an Spannstahllagen, die außerhalb der untersuchten Schutzhülle liegen. Bei einem Spannglied mit vier gestapelten Bändern hat der Stapelfaktor an der Innenseite des ganz innen am Umlenkelement anliegenden Bandes beispielsweise den Wert  $k_{\max} = 4$ .

Bei Spanngliedern mit Hüllrohr ist die Ermittlung des maximalen Stapelfaktors und somit der maximalen Belastung unter einem Einzelspannstahlelement vor allem aufgrund der nicht eindeutig bestimmbar Anordnung der Elemente im Hüllrohr deutlich anspruchsvoller. Örtle (1988) ermittelte für ein Spannglied mit 60 Drähten die geometrische Anordnung der Kreise und die Stapelfaktoren grafisch (Abbildung 4.8). Örtle bezeichnete den Stapelfaktor als „Kabelfaktor“, da er seine Untersuchungen an Bündelspanngliedern/Spannkabel durchgeführt hat. Im Folgenden wird stets der Begriff des Stapelfaktors verwendet.

Für die gegebene Konstellation der Drähte erhielt er Stapelfaktoren zwischen  $k_{\min} = 0,8$  und  $k_{\max} = 12,3$ . Auffällig hierbei ist, dass der Wert der Stapelfaktoren mit zunehmendem vertikalen Abstand vom Hüllrohrtiefpunkt nicht zwingend abnehmen muss, wie das bei hydrostatischem Druck der Fall ist. Im vorliegenden Beispiel stellt sich eine „zufällige Gewölbewirkung“ ein, die dazu führt, dass einige der zwischen den „Kämpfern“ am Hüllrohr anliegenden Drähte etwas entlastet werden (Abbildung 4.8). Die grafische Lösung ist vor allem für Spannglieder mit vielen Spannstahlelementen sehr aufwändig. Bei der Wahl der geometrischen Abmessungen der Elemente ist darauf zu achten, dass bei höheren Umlenkbelastungen das Hüllrohr von den innen liegenden jeweils vertikal belasteten Spannstahlelementen sowohl nach unten als auch infolge der Klemmwirkung nach außen gedrückt wird.

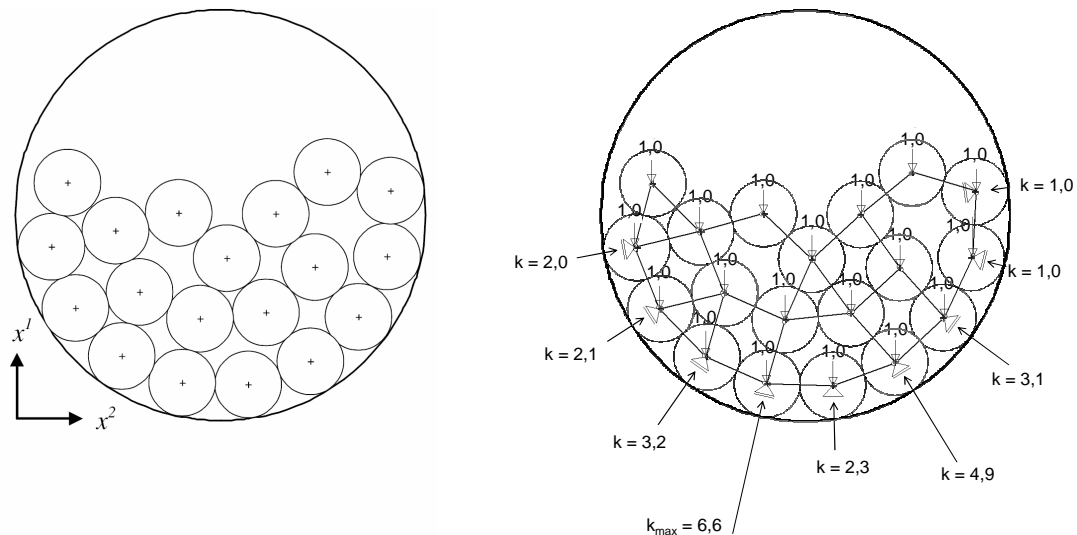


**Abbildung 4.8: Grafische Ermittlung der Stapelfaktoren für ein Spannglied aus 60 Drähten mit Hüllrohr (Örtle, 1988)**

Ist die Aussparung für das Hüllrohr im Betonquerschnitt deutlich größer als das Hüllrohr, so tritt ein Ovalisieren des Rohrs auf. Dieser Effekt konnte nach Hegger et al. (2002) bei Versuchen an der RWTH Aachen beobachtet werden, als ein Hüllrohr mit einem Außendurchmesser von 90 mm in einer Aussparung mit Innendurchmesser 140 mm geführt wurde. Die Anpassung der Hüllrohrform sollte bei der geometrischen Anordnung der Spannstahlelemente darin berücksichtigt werden.

Liegt eine stabile Anordnung der Kreise im Hüllkreis vor, so kann mithilfe eines zweidimensionalen Fachwerks eine für diese Konstellation eindeutige Lösung für die Stapelfaktoren gefunden werden. Jedes Spannstahlelement wird durch einen Knoten mit den Koordinaten des Kreismittelpunkts dargestellt. Entspricht der Abstand zweier Knoten genau dem Kreisdurchmesser bzw. berühren sich zwei Kreise, so wird zwischen den beiden Knoten ein Fachwerkstab angeordnet. Diese Fachwerkstäbe werden so definiert, dass lediglich Drucknormalkräfte übertragen werden können. Für am Hüllrohr anliegende Kreise werden an den Knoten verschiebliche gelenkige Auflager angeordnet, so dass nur radiale (Druck-) Kräfte aufgenommen werden können (bezogen auf das Hüllrohr). Am tiefsten Knoten wird ein festes gelenkiges Auflager angeordnet um die Verschieblichkeit des Systems zu verhindern (Pol im Hüllrohrmittelpunkt). An jedem Knoten wird die vertikale Einzelumlenkkraft 1,0 aufgebracht.

Abbildung 4.9 zeigt Ausgangssituation und Lösung eines Beispiels für die Ermittlung der Stapelfaktoren mit einem zweidimensionalen Fachwerk mit 19 Knoten (Kreisen). Mit handelsüblicher Software ist die Lösung dieser Fragestellung selbst bei einer großen Anzahl an Spannstahlelementen mit vertretbarem Aufwand möglich. Bei wenigen Kreisen ist u.U. durch Handrechnung noch eine Lösung zu finden. Voraussetzung ist allerdings eine stabile Anordnung der Kreise im Hüllrohr.



**Abbildung 4.9:** Berechnung der Stapelfaktoren für ein Spannglied aus 19 „Kreisen“ mit Hüllrohr mit Hilfe eines Fachwerkmodells

Walter et al. (1977) führten zu diesem Zweck Versuche mit maßstäblichen Modellen von Spanngliedern durch. Dabei erzeugten sie mittels Schütteln der Modelle eine möglichst tief liegende und somit „energetisch günstige Anordnung“ herbei, die hier wie folgt definiert wird:

**Definition – energetisch günstige Anordnung:**

Als energetisch günstiger wird eine Konstellation bezeichnet, wenn die Summe der vertikalen Koordinaten der Kreismittelpunkte bei sonst gleich bleibenden Randbedingungen kleiner als deren Summe bei einer anderen Konstellation ist.

Die Vorgehensweise nach Walter et al. (1977) ist sehr aufwändig, da für die Modelle zahlreiche Einzelteile zu erstellen sind. Sie ist damit einerseits für eine Verbreitung der Methode in der Fachwelt ungeeignet und andererseits nicht für beliebig unterschiedliche Konfigurationen anzuwenden.

Weiber et al. (2007) zeigen zwei Alternativen für die, zur Ermittlung der Stapelfaktoren erforderliche, Bestimmung energetisch günstiger Anordnungen von gleichen Kreisen in einem Hüllkreis auf. Zunächst wird die Problemstellung als ein Optimierungsproblem formuliert. Die zweite Variante bedient sich eines Algorithmus, der die Kreise zunächst zufällig anordnet, „schüttelt“ und über eine hohe Anzahl an Berechnungsschritten schließlich energetisch günstige Konstellationen findet.

**4.1.3 Optimierungsproblem „Kreise im Kreis“**

Das Optimierungsproblem zur stabilen Anordnung von kleinen Kreisen in einem Hüllkreis kann formal wie folgt beschrieben werden:

### Optimierungsproblem „Kreise im Kreis“:

Bestimmung der optimalen Anordnung von  $N$  kleinen Kreisen mit Radius  $r$  in einem Hüllkreis mit Radius  $R_d = 1$  um den Mittelpunkt  $m_M = (1; 1)$ , so dass die kleinen Kreise möglichst tief im Hüllkreis liegen:

$$\text{Minimiere } \sum_{i=1}^N z^i; \quad (\text{Zielfunktion})$$

$$d(m^i, m^j) \geq 2 \cdot r; \quad i = 1, \dots, N; \quad j = i + 1, \dots, N; \quad (\text{NB 1})$$

$$d(m^i, m^M) \leq 1 - r; \quad i = 1, \dots, N; \quad (\text{NB 2})$$

$$m^i \in R^2; \quad i = 1, \dots, N; \quad (\text{NB 3})$$

$$m^i \geq 0; \quad i = 1, \dots, N; \quad (\text{NB 4})$$

mit:

$N$  Anzahl der kleinen Kreise

$m^i = (x^i, z^i); \quad i = 1, \dots, N;$  Mittelpunkte der kleinen Kreise

$r$  Radius der kleinen Kreise

$d(A; B)$  Euklidischer Abstand der Punkte A und B

Hierbei wird in der Zielfunktion der Abstand der Kreismittelpunkte zur horizontalen x-Achse minimiert. Dadurch wird modelliert, dass die Kreise möglichst tief unten im Hüllkreis liegen. In der ersten Nebenbedingung (NB 1) wird gefordert, dass sich zwei kleine Kreise nicht schneiden dürfen. Die Abstandsfunktion  $d$  steht für deren Euklidischen Abstand. Die zweite Nebenbedingung (NB 2) garantiert, dass die kleinen Kreise innerhalb des Hüllkreises liegen.

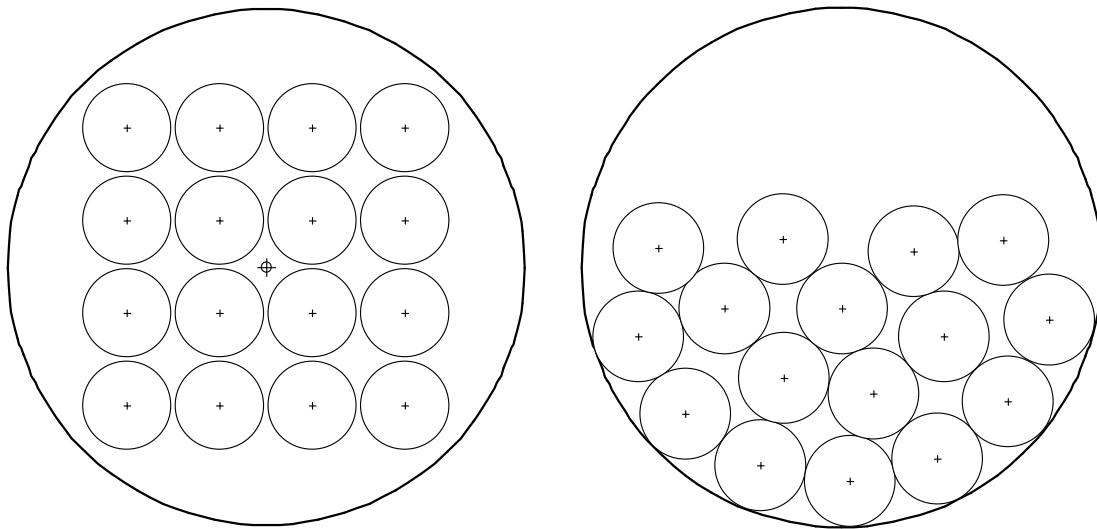
Die weiteren Nebenbedingungen (NB 3 und NB 4) besagen lediglich, dass man im zweidimensionalen reellen Rechenraum ist bzw. dass das Problem im positiven Quadranten betrachtet wird. Für die letzte Bedingung ist es erforderlich, dass auch der Hüllkreis vollständig im positiven Quadranten liegt, weshalb hier die Koordinaten des Mittelpunkts zu  $(R_d; R_d)$  bzw.  $(1; 1)$  gewählt wurden.

Zur Lösung des nichtlinearen Optimierungsproblems ist die Angabe einer (beliebigen) Startkonfiguration erforderlich. Bei der gewählten Vorgehensweise wird eine bestimmte Anzahl an Kreisen vorgegeben, deren Wurzel eine ganze Zahl ist (z.B.  $N = 16 = 4^2$ ). Diese Kreise werden in einem Quadrat, dessen Schwerpunkt dem Hüllrohrmittelpunkt entspricht, so angeordnet, dass sie sich nicht berühren (Abstandsfaktor  $\delta > 1$ ). Die Koordinaten der Startmittelpunkte berechnen sich zu:

$$x_0^{i,j} = R_d + \delta \cdot r \cdot (2 \cdot i - \sqrt{N} - 1); \quad i = 1, \dots, \sqrt{N}; \quad j = 1, \dots, \sqrt{N}; \quad (4.10)$$

$$z_0^{i,j} = R_d + \delta \cdot r \cdot (2 \cdot j - \sqrt{N} - 1); \quad i = 1, \dots, \sqrt{N}; \quad j = 1, \dots, \sqrt{N}; \quad (4.11)$$

Für Konfigurationen mit einer Anzahl an kleinen Kreisen, deren Wurzel nicht ganzzahlig ist, wählt man die nächste, kleinere Zahl, für die diese Bedingung erfüllt ist. Die zu N noch fehlenden Kreise werden dann zunächst oberhalb und bei Bedarf noch rechts von der quadratischen Ausgangslösung angeordnet. Dabei spielt es keine Rolle, ob für die Startkonfiguration bereits alle Nebenbedingungen des Optimierungsproblems erfüllt sind. Ein Beispiel für eine Startkonfiguration mit zugehöriger Lösung der Anordnung der kleinen Kreise kann Abbildung 4.10 entnommen werden (linkes Teilbild).



**Abbildung 4.10: Optimierung „Kreise im Kreis“ – Startkonfiguration (links) und optimierte Konfiguration (rechts) für N = 16 kleine Kreise (Radius r = 0,175) im Hüllkreis (Radius R<sub>d</sub> = 1)**

Das nichtlineare Optimierungsproblem kann schließlich mit handelsüblicher Lösungssoftware gelöst werden. Im vorliegenden Fall wurde das Programm *SNOPT* gewählt (Nutzung z.B. online über [neos.mcs.anl.gov](http://neos.mcs.anl.gov)). *SNOPT* bedient sich der so genannten SQP-Verfahren (Sequentielle Quadratische Programmierung), die sich bei der Lösung von beschränkten nichtlinearen Optimierungsproblemen durch eine iterative Vorgehensweise als sehr leistungsfähig erwiesen haben. Hierzu sei auf die Arbeiten von Gill, Murray und Saunders (1997) sowie Nocedal und Wright (1999) verwiesen. Bei den nach dieser Methode erhaltenen Lösungen handelt es sich um lokal optimale Ergebnisse. Für unterschiedliche Startkonfigurationen erhält man i.d.R. etwas unterschiedliche Werte für die Zielfunktion.

Für Spannstahlelemente von 1 bis 150 wurde für praxisrelevante tatsächliche Spanngliedfüllgrade  $\Sigma A_f / A_R$  bzw. Radienverhältnisse  $r/R_d$  exakte Anordnungen mit dem Verfahren ermittelt. Mithilfe der im vorausgehenden Kapitel erläuterten Nachlaufrechnung wurden die Stapelfaktoren aller anliegenden Spannstahlelemente berechnet. Als Beispiel sei das Ergebnis der Berechnung der Stapelfaktoren für die Konfiguration „N = 150 bei  $r/R_d = 0,07$ “ in Abbildung 4.11 grafisch dargestellt. Die Ergebnisse aller Konfigurationen sind in Tabelle 10.2 bis Tabelle 10.4 (Anhang) zusammengefasst. Tabelle 4.1 zeigt den Ausschnitt für 13 und 14 Spannstahlelemente.

**Tabelle 4.1: Maximaler Stapelfaktor  $k_{max}$ , mittlerer Stapelfaktor  $k_{mittel}$  und innerer Stapelfaktor  $k_{max,innen}$  sowie Klemmbeiwert  $\kappa$  und tatsächlicher Füllgrad  $\Sigma A_r / A_R$  nach dem Optimierungsansatz ( $N \in \{13; 14\}$ )**

N [-]		r / R <sub>d</sub> [-]									
		0,35	0,30	0,25	0,22	0,20	0,18	0,16	0,14	0,12	0,11
13	$k_{max}$	-	-	-	6,36	4,87	3,83	-	-	-	-
	$k_{mittel}$	-	-	-	2,83	2,82	2,36	-	-	-	-
	$k_{max,innen}$	-	-	-	4,49	3,02	2,64	-	-	-	-
	$\kappa$	-	-	-	1,52	1,30	1,27	-	-	-	-
	$\Sigma A_r / A_R$	-	-	-	63%	52%	42%	-	-	-	-
14	$k_{max}$	-	-	-	5,92	4,96	4,77	4,48	-	-	-
	$k_{mittel}$	-	-	-	3,26	2,67	2,65	2,54	-	-	-
	$k_{max,innen}$	-	-	-	3,67	3,33	2,41	3,19	-	-	-
	$\kappa$	-	-	-	1,63	1,33	1,33	1,27	-	-	-
	$\Sigma A_r / A_R$	-	-	-	68%	56%	45%	36%	-	-	-

Der maximale Stapelfaktor  $k_{max}$  entspricht der maximalen Auflagerkraft eines am Hüllrohr anliegenden Spannstahlelements. Als  $k_{mittel}$  wird der Mittelwert der Stapelfaktoren aller anliegenden Spannstahlelemente bezeichnet. Der Klemmbeiwert  $\kappa$  errechnet sich schließlich als Quotient aus der Summe aller  $i$  Stapelfaktoren  $\Sigma k_i$  und der Anzahl der Spannstahlelemente  $N$ . Mit dem Quotienten  $\Sigma A_r / A_R$  (Spannstahlgehalt) kann, wie erwähnt, der tatsächliche Füllgrad ermittelt werden – für Spannstahlelemente mit Vollkreisquerschnitt. Bei der Abschätzung des gesamten Hohlraums im Hüllrohr ist bei zusammengesetzten Querschnitten dieser Wert noch abzumindern. Bei einer Runddrahtlitze mit einer Querschnittsfläche von 150 mm<sup>2</sup> und Umkreisdurchmesser von 15,7 mm errechnet sich dieser Abminderungswert zu  $150 : (15,7^2 \cdot \pi / 4) = 77,5\%$ . Für eine Beispielkonfiguration mit 13 Spannstahlelementen und einem Radienverhältnis von  $r/R_d = 0,22$  erhält man einen Hohlraumgehalt  $a$  von

$$a = 1 - \left( \frac{\Sigma A_r}{A_R} \cdot 77,5\% \right) = 1 - (63\% \cdot 77,5\%) = 1 - 49\% = 51\% ; \quad (4.12)$$

mit

- a           Hohlraumgehalt [-]
- $A_r$         Querschnittsfläche des Umlkreises eines einzelnen Spannstahlelements [mm<sup>2</sup>]
- $A_R$         Querschnittsfläche des Hüllrohrs innen [mm<sup>2</sup>]

In der Regel nehmen bei gleichem Radienverhältnis alle in den Tabellen gegebenen Größen bei einer zunehmenden Anzahl an Spannstahlelementen zu. Wird diese Anzahl vorgegeben, erzielen zunehmende Radienverhältnisse dieselbe Wirkung. Abweichungen davon hängen von der Unstetigkeit des Verfahrens ab. Bei manchen Anordnungen der Kreise kann sich durch eine entsprechende Ausbildung des Fachwerks ein besonders kleiner oder großer maximaler Stapelfaktor ergeben. Für die gewählten Radienverhältnisse  $r/R_d$  gibt es sowohl eine Obergrenze als auch eine Untergrenze. Als Obergrenze wird das Verhältnis gewählt, bei dem die Kreise gerade noch in den Hüllkreis passen. Für die gewählten Beispiele passen bei  $r/R_d = 0,25$  weder 13 noch 14 Kreise in den Hüllkreis, weshalb als Obergrenze das nächst kleinere gewählte Verhältnis  $r/R_d = 0,22$  gilt. Das Grenzverhältnis, bei der die Spannstahlelemente gerade noch in das Hüllrohr passen, beträgt nach Tabelle 10.1  $r/R_d =$

0,2361 für  $N = 13$  und  $r/R_d = 0,2310$  für  $N = 14$ . Obwohl für alle Radienverhältnisse zwischen 0 und dem Grenzverhältnis Lösungen existieren, wird hier eine Untergrenze gewählt. Zu geringe Füllgrade führen u.a. zu einem größeren Platzbedarf eines Spannglieds oder zu höheren Aufwendungen für die Korrosionsschutzmaterialien und sind somit unwirtschaftlich. Zum anderen entstehen in Betonbauwerken unnötig große Querschnittsschwächungen wodurch die Querkrafttragfähigkeit von Bauteilen beeinträchtigt werden kann. Die Untergrenze wurde für bis zu 10 Spannstahlelemente zu  $\Sigma A_r / A_R = 30 \%$ , für eine größere Anzahl zu  $\Sigma A_r / A_R = 35 \%$  gewählt.

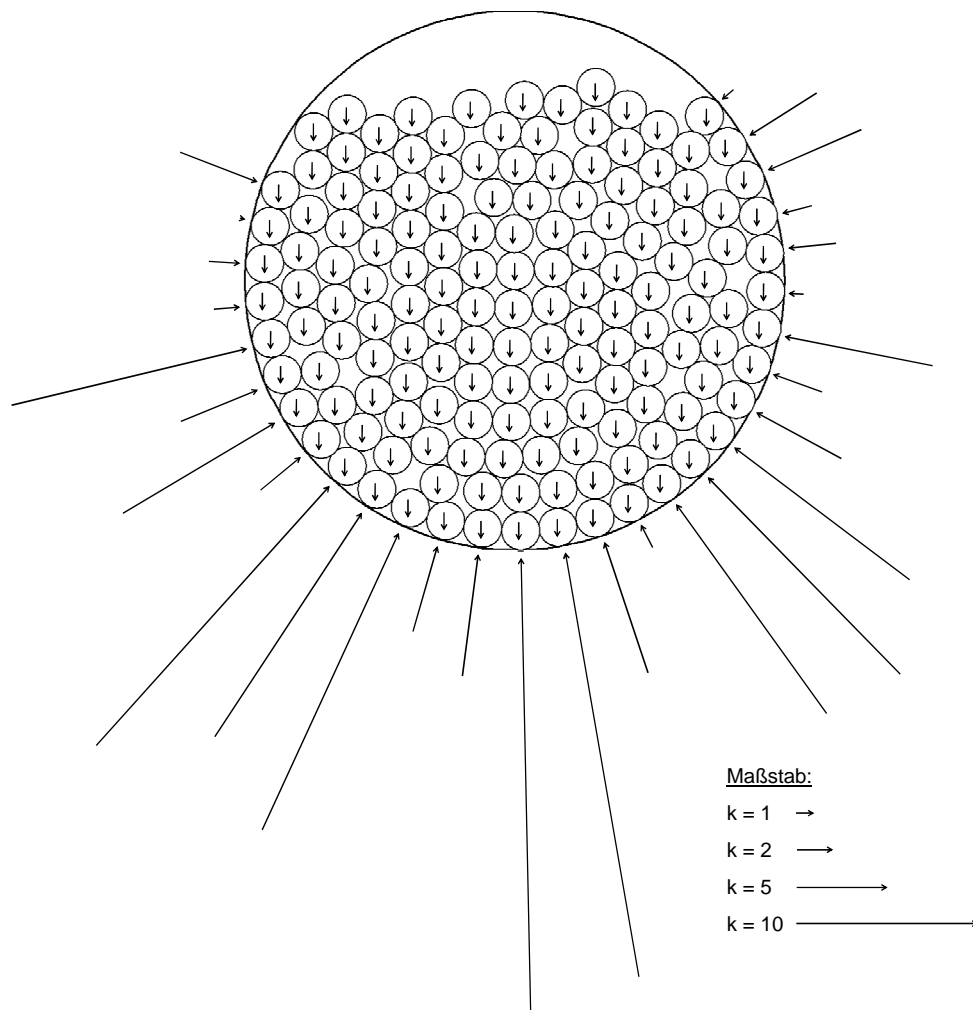


Abbildung 4.11: Stapelfaktoren und Lasten für insgesamt 150 Kreise im Hüllkreis mit einem Verhältnis der Radien  $r/R_d = 0,07$

#### 4.1.4 Modifizierter Pulsating Disk Shaking (M-PDS) Algorithmus

Eine zweite Variante zur Ermittlung von stabilen Anordnungen von kleinen, gleich großen Kreisen im Hüllkreis basiert ursprünglich auf einem Schüttelalgorithmus zur Erzielung einer möglichst großen Packungsdichte von Kreisen im Hüllkreis nach Specht (2006). Dieser so genannte Pulsating Disk Shaking (PDS) Algorithmus kann, wie in Weiher et al. (2007) dargestellt, für die benötigte Fragestellung modifiziert werden. Möglichst dichte

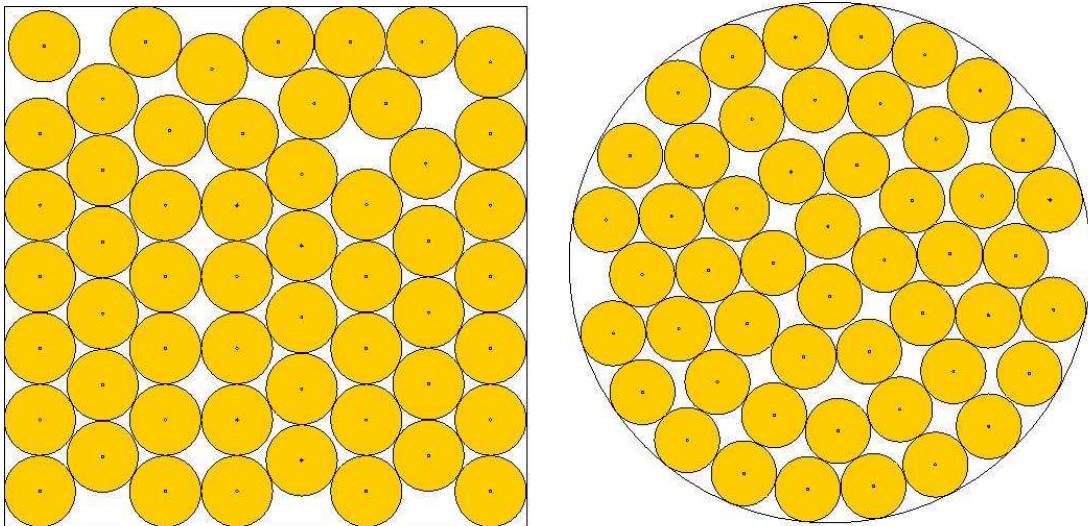


Kugelpackungen in dreidimensionalen Hüllkörpern können nach Donev et al. (2004) mit sehr guten Ergebnissen durch „physikalisches“ Schütteln der Kugeln erreicht werden. Dies war auch die Vorgehensweise von Walter et al. (1977), die mit Modellen für eine begrenzte Anzahl an Konfigurationen die Anordnung der Spannstahelemente im Hüllrohr ermittelten. Szabó et al. (2007) simulierten schließlich rechnergestützt diesen statischen, rein geometrischen Prozess zunächst für zweidimensionale Fragestellungen.

Der PDS-Algorithmus kann wie folgt beschrieben werden: Insgesamt  $N$  gleich große, kleine Kreise bzw. Scheiben („disks“) werden zunächst ohne gegenseitige Überlappung innerhalb einer beliebigen Hüllform (z.B. Rechteck oder Hüllkreis, „container“) angeordnet. In jeder der folgenden Phasen können die kleinen Kreise entweder voneinander getrennt sein, sich berühren oder sich sogar überlappen. Nun werden die gleich großen, kleinen Kreise solange vergrößert bis sie sich oder die Hüllform berühren bzw. überlappen. Es wird für jedes Scheibenpaar die Verschiebung ermittelt, die erforderlich ist, dass sich die Scheiben untereinander sowie die Scheiben und Hüllform nicht mehr überlappen sondern nur berühren. Innerhalb eines Berechnungsschritts werden so insgesamt

$$Z_{d-d} = \binom{N}{2} = \frac{N!}{2 \cdot (N-2)!}; \quad (4.13)$$

paarweise Vergleiche zwischen zwei Scheiben und  $Z_{d-c} = N$  Vergleiche zwischen Scheiben und Hüllform durchgeführt.



**Abbildung 4.12: Beispiele für dichte Anordnungen kleiner Kreise im Hüllquadrat (links) und im Hüllkreis (rechts) mit dem Pulsating Disk Shaking (PDS) Algorithmus (Specht, 2006)**

Dabei werden alle Verschiebungen aufsummiert. Nach jedem abgeschlossenen Berechnungsschritt werden die Verschiebungen auf die Kreise aufgebracht, was im Allgemeinen noch nicht zu einer überlappungsfreien Lösung führt. Deshalb wird die Packung permanent „geschüttelt“. Als Maßzahl für die Güte der Lösung wird die gesamte Überlappung  $OVL_t$  nach jedem abgeschlossenen Berechnungsschritt ermittelt:

$$OVL_t = \sum_{OVL \leq 0} OVL ; \quad (4.14)$$

mit

$$OVL = \begin{cases} d - 2 \cdot r ; & \text{für Kreiskontakte untereinander} \\ d - 1 \cdot r ; & \text{für Kontakt Kreis - Hülle} \end{cases}$$

- d        (Euklidischer) Abstand zwischen Kreismittelpunkten bzw. zwischen  
           Kreismittelpunkt und Hüllformrand  
 r        Radius der kleinen gleich großen Kreise

Wird nach einigen Berechnungsschritten keine überlappungsfreie Lösung gefunden, so wird der gemeinsame Kreisradius durch Multiplikation mit einem konstanten Faktor verringert (Faktor < 1). Bei Vorliegen einer überlappungsfreien Lösung wird der Radius dagegen entsprechend erhöht (Faktor > 1). Dieser Ablauf, mit vielen einzelnen Berechnungsschritten, führt zu einem so genannten „Pulsieren“ des Werts für den gemeinsamen Kreisradius (Pulsating Disk Shaking algorithm). Der Prozess wird entweder abgebrochen, wenn die Amplitude der Pulsation einen festzusetzenden sehr kleinen Grenzwert unterschreitet, oder, wenn die Anzahl der Berechnungsschritte einen maximal zulässigen Wert überschreitet. Bis zu diesem Abbruch konvergiert die Lösung automatisch zu einer stabilen Anordnung möglichst vieler kleiner Kreise.

Modifizierter PDS-Algorithmus:

Für die Anwendung bei der Umlenkung von Spanngliedern mit kreisförmigen Spannstahelementen im Hüllrohr muss der PDS-Algorithmus modifiziert werden, da zum einen die Zahl der Kreise nun vorgegeben wird und zum anderen den Kreisen jeweils eine gleichgerichtete gleichgroße Kraft zugeordnet wird (analog zum Eigengewicht). Um dies umzusetzen, wird im Modifizierten Pulsating Disk Shaking (M-PDS) Algorithmus den einzelnen Kreisen nach jedem Berechnungsschritt eine bestimmte vertikale Verformung aufgezwungen, so dass sich das Kreispaket gemeinsam um diesen Betrag vertikal bewegt. Nun folgt der nächste Berechnungsschritt mit gleichem Ablauf. Mit zunehmender Anzahl an Berechnungsschritten nimmt auch der Betrag der vertikalen Verschiebung bis zum Erreichen der Endkonfiguration ab.

Die Simulation kann deutlich beschleunigt werden, wenn bei jedem Berechnungsschritt nicht für alle Kontaktpaare (Kreis und Kreis bzw. Kreis und Hüllform) die genannten Operationen durchgeführt werden müssen. Dies kann mit einer Klassifizierung der Kontaktpaare abhängig vom Abstand zueinander erreicht werden. Sehr weit entfernt voneinander liegende Kontaktpaare werden markiert und in den folgenden Berechnungsschritten nicht mehr herangezogen. Je länger das Programm läuft, desto weniger Operationen werden je Berechnungsschritt durchgeführt. Mit dem M-PDS Algorithmus können bei entsprechend zahlreichen Berechnungsschritten oftmals Kreisanordnungen erzielt werden, die insgesamt dichter und somit tiefer im Hüllkreis liegen als die Kreisanordnungen bzw. Lösungen des zuvor beschriebenen Optimierungsproblems (lokales Optimum). Dass diese Unterschiede jedoch nicht gravierend sind, zeigt sich daran, dass sich die Ergebnisse der

Stapelfaktorberechnung zwischen den Verfahren nicht unterscheiden. Beide Verfahren sind somit gleichwertig und können wahlweise bei der exakten Berechnung der Stapelfaktoren als Methode zur Bestimmung einer stabilen Kreisanordnung herangezogen werden.

#### 4.1.5 Maximaler Stapelfaktor nach hydrostatischer Analogie

Im Folgenden wird nun zur Vereinfachung ein analytisches Verfahren zur Bestimmung des maximalen Stapelfaktors auf Basis der hydrostatischen Druckverteilung auf gekrümmte Flächen vorgestellt (Abbildung 4.13, linkes Teilbild).

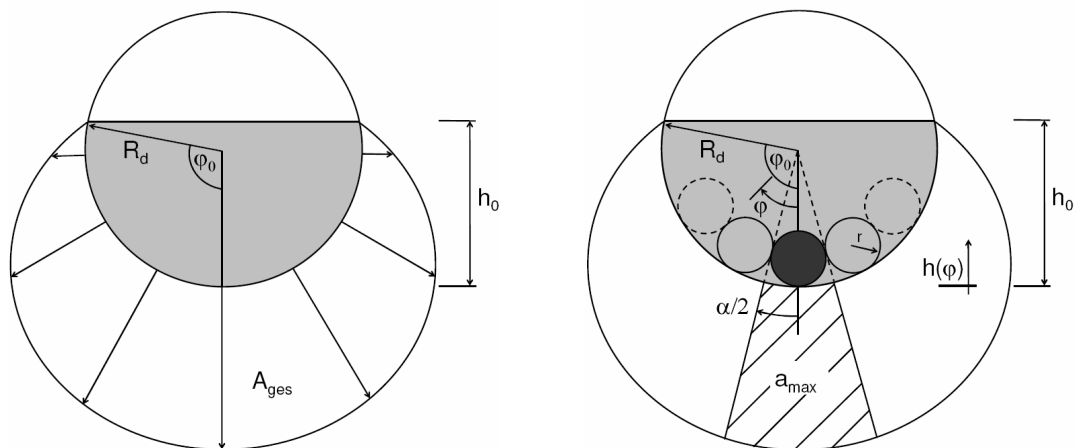


Abbildung 4.13: Hydrostatische Druckverteilung (links), Maximaler Druck unter mittig liegendem Spannstahlelement (rechts)

Dabei soll untersucht werden, inwieweit auf die sehr aufwändige exakte Ermittlung energetisch günstiger Anordnungen von Spannstahlelementen im Hüllrohr sowie auf die Nachlaufrechnung mit Hilfe eines Fachwerks verzichtet werden kann. Nach Ermittlung des Klemmbeiwerts wird der Anteil der Umlenkraft an der Gesamtumlenkkraft, der von dem am tiefsten liegenden Spannstahlelement übertragen wird, berechnet. Daraus kann schließlich entsprechend der hydrostatischen Druckverteilung der maximale Stapelfaktor berechnet werden. Je höher der Füllgrad bei sonst gleichen Bedingungen, desto größer wird der Klemmbeiwert und desto größer wird die Anzahl der am Hüllrohr anliegenden Spannstahlelemente. Diese beiden Effekte sind in ihrer Wirkung auf die Höhe des Stapelfaktors gegenläufig.

Formal kann dieser Ansatz mit Hilfe einer näherungsweisen Ermittlung der maximal im Hüllkreis anzuordnenden Anzahl an Spannstahlelementen in Abhängigkeit vom Verhältnis der Radien  $r/R_d$  wie folgt notiert werden (vgl. auch Gleichungen 4.4 und 4.5):

$$\eta_{hyd} = \eta_N = \frac{N}{N_{max}} = N \cdot \frac{3}{2} \cdot \left( \frac{r}{R_d} \right)^{2,08} ; \quad (4.15)$$

mit

$\eta_{hyd}$  Füllgrad des Hüllrohrs nach hydrostatischer Analogie [-]

$\eta_N$	Füllgrad des Hüllrohrs [-]
$N$	Anzahl der Spannstahlelemente [-]
$N_{\max}$	Anzahl der Spannstahlelemente, die maximal im Hüllrohr angeordnet werden können nach Gleichung 4.5 [-]

Mit Hilfe der geometrischen Beziehungen aus Kapitel 4.1.1 kann zunächst über den Füllwinkel  $\varphi_0$  (Gleichsetzen der Formeln für den Füllgrad  $\eta_{\text{hyd}}$ ) der Klemmbeiwert  $\kappa$  ermittelt werden (Gleichung 4.8). Die Summe der Stapelfaktoren aller  $i$  anliegenden Spannstahlelemente ergibt sich zu:

$$\sum_i k_i = N \cdot \kappa ; \quad (4.16)$$

mit

$k$	Stapelfaktor [-]
$N$	Anzahl der Spannstahlelemente [-]
$\kappa$	Klemmbeiwert [-]

Die für die Ermittlung des hydrostatischen Drucks benötigte Höhe der anliegenden „Wassersäule“  $H(\varphi)$  kann in Abhängigkeit vom Füllwinkel  $\varphi_0$ , Winkel  $\varphi$  und Hüllrohrinnenradius  $R_d$  dargestellt werden.

$$H(\varphi) = h_0 - h(\varphi) = R_d \cdot (1 - \cos \varphi_0) - R_d \cdot (1 - \cos \varphi) = R_d \cdot (\cos \varphi - \cos \varphi_0) ; \quad (4.17)$$

Der maximale hydrostatische Druck liegt am Hüllrohrtiefpunkt an. Es wird somit auf der sicheren Seite liegend davon ausgegangen, dass sich genau dort ein Spannstahlelement befindet (Abbildung 4.13, rechtes Teilbild). Der Winkel  $\alpha$ , den die durch den Hüllrohrmittelpunkt verlaufenden Tangenten an das mittlere Spannstahlelement umschließen, errechnet sich zu:

$$\alpha = 2 \cdot \arcsin \left( \frac{r}{R_d - r} \right) ; \quad (4.18)$$

Der maximale hydrostatische Stapelfaktor  $k_{\text{hyd}}$  entspricht schließlich dem Anteil des mittigen Spannstahlelements an der Summe der Stapelfaktoren aller anliegenden Spannstahlelemente und kann demnach wie folgt ermittelt werden:

$$k_{\text{hyd}} = \frac{a_{\max}}{A_{\text{ges}}} \cdot \sum_i k_i = \frac{\int_{\varphi_0}^{\alpha/2} H(\varphi) \cdot R_d \cdot d\varphi}{\int_{-\varphi_0}^{\alpha/2} H(\varphi) \cdot R_d \cdot d\varphi} \cdot \kappa \cdot N ; \quad (4.19)$$

mit

$k_{\text{hyd}}$	Maximaler Stapelfaktor nach hydrostatischer Analogie [-]
------------------	--

$a_{\max}$	Fläche unter mittigem Spannstahlelement, vgl. Abbildung 4.13 (rechts)
$A_{\text{ges}}$	Gesamtfläche unter allen am Hüllrohr anliegenden Spannstahlelementen, vgl. Abbildung 4.13 (links)
$k_i$	Stapelfaktoren [-]

Die exakte Ermittlung der Stapelfaktoren, deren Ergebnis beispielhaft für eine Konfiguration grafisch in Abbildung 4.11 und für zahlreiche Konfigurationen in Tabelle 10.2 bis Tabelle 10.4 dargestellt ist, liefert entgegen der Annahme einer stetigen Druckzunahme aus der hydrostatischen Analogiebetrachtung stark schwankende Werte für die Stapelfaktoren benachbarter anliegender Spannstahlelemente.

Zur Ermittlung des maximalen Stapelfaktors  $k_{\max}$  wird diese Streuung mit dem Erhöhungsfaktor  $\gamma_{\text{hyd}} = 1,5$  erfasst. Die Güte des Ansatzes wird in Kapitel 4.1.7 überprüft.

$$k_{\max} = \gamma_{\text{hyd}} \cdot k_{\text{hyd}} = 1,5 \cdot k_{\text{hyd}} ; \quad (4.20)$$

mit

$k_{\max}$	Maximaler Stapelfaktor [-]
$\gamma_{\text{hyd}}$	Erhöhungsfaktor zur Berücksichtigung von Schwankungen [-]
$k_{\text{hyd}}$	Maximaler Stapelfaktor nach hydrostatischer Analogie [-]

#### 4.1.6 Vereinfachtes Verfahren zur Ermittlung des maximalen Stapelfaktors

Im Gegensatz zu den beiden zuvor erläuterten Verfahren zur exakten Ermittlung von Anordnungen kleiner Kreise (Spannstahlelemente) im Hüllkreis mit anschließender Ermittlung der maximalen Stapelfaktoren bzw. im Gegensatz zur hydrostatischen Analogiebetrachtung wird nun ein stark vereinfachtes Verfahren für den praktischen Gebrauch vorgeschlagen. Dabei wird zunächst der mittlere Stapelfaktor  $k_{\text{mittel,cal}}$  in Abhängigkeit von der Anzahl der Spannstahlelemente  $N$  sowie vom Verhältnis der Radien der kleinen Kreise und des Hüllkreises  $r/R_d$  ermittelt.

$$k_{\text{mittel,cal}} = \frac{r}{R_d} \cdot N ; \quad (4.21)$$

mit

$k_{\text{mittel,cal}}$	Mittlerer Stapelfaktor nach vereinfachtem Verfahren [-]
$r/R_d$	Radialverhältnis von Umkreis eines Spannstahlelements und Hüllrohr (innen) [-]
$N$	Anzahl der Spannstahlelemente [-]

Den maximalen Stapelfaktor  $n_{\max,cal}$  erhält man durch Multiplikation des mittleren Wertes  $n_{\text{mittel,cal}}$  mit dem Erhöhungsfaktor  $\gamma_{\text{cal}} = 2$ . Hierbei wird die vereinfachte Annahme eines von der Hüllrohrseite zum Tiefpunkt zunehmenden linearen Belastungsverlaufs zugrunde gelegt. Die Güte des Ansatzes wird in Kapitel 4.1.7 überprüft.

$$k_{max,cal} = \gamma_{cal} \cdot k_{mittel,cal} = 2 \cdot \frac{r}{R_d} \cdot N ; \quad (4.22)$$

mit

$k_{max,cal}$	Maximaler Stapelfaktor nach vereinfachtem Verfahren [-]
$\gamma_{cal}$	Erhöhungsfaktor zur Berücksichtigung von Schwankungen [-]
$k_{mittel,cal}$	Mittlerer Stapelfaktor nach vereinfachtem Verfahren nach Gleichung 4.21 [-]
$r/R_d$	Radienverhältnis von Umkreis eines Spannstahlelements und Hüllrohr (innen) [-]
$N$	Anzahl der Spannstahlelemente [-]

#### 4.1.7 Vergleich der verschiedenen Verfahren zur Ermittlung des Stapelfaktors bei Spanngliedern mit Hüllrohr

In den vorangegangenen Kapiteln wurden verschiedene Verfahren zur Ermittlung des Stapelfaktors vorgestellt, die jeweils mit recht unterschiedlichem Aufwand verbunden sind:

- Exakte Fachwerkberechnung auf Basis der Anordnung von Kreisen im Kreis (Optimierungsproblem bzw. M-PDS Algorithmus, kurz: „Weiher-exakt“)
- Hydrostatische Analogiebetrachtung (kurz: „Weiher-hydrostatisch“)
- Vereinfachtes Verfahren (kurz: „Weiher-einfach“)

Zudem wurden in der Vergangenheit bereits zwei vereinfachte Verfahren zur Ermittlung des maximalen Stapelfaktors  $k_{max}$  in Bündelspanngliedern alleine in Abhängigkeit von der Anzahl der Spannstahlelemente  $N$  vorgeschlagen.

- Rostàsy und Holzenkämpfer (1994):  $k_{max} = 1 + 2 \cdot \sqrt{N - 1}$ ;
- Zwicky (2002) basierend auf Örtle (1988):  $k_{max} = 2,1 + 0,17 \cdot N$ ; ( $N \geq 15$ ).

Bei der weiteren Verwendung dieser Formeln werden diese kurz nur mit dem Namen der Autoren angegeben, z.B. Rostàsy/Holzenkämpfer. In Tabelle 10.2 bis Tabelle 10.5 (siehe Anhang) sind für etliche Konfigurationen von Spanngliedern die Ergebnisse der exakten Berechnung mit Hilfe des Optimierungsansatzes gegeben. In Abbildung 10.2 bis Abbildung 10.5 (Anhang) sind diese Ergebnisse zusammen mit den Ergebnissen der genannten anderen Verfahren grafisch dargestellt.

Das Verfahren nach Rostàsy/Holzenkämpfer überschätzt den maximalen Stapelfaktor bei allen Konstellationen. Bei kleinen Füllgraden kann der Wert bis zu 100% vom exakten Wert abweichen. Für größere Füllgrade ist die Abweichung kleiner. Wendet man das Verfahren nach Zwicky/Örtle an, so unterschätzt man bei Spanngliedern mit vielen Spannstahlelementen vor allem bei großen Füllgraden die exakte Lösung. Dagegen erhält man mit dem Verfahren für mittelgroße Spannglieder recht passable Ergebnisse. Bei kleinen Spanngliedern überschätzt man den maximalen Stapelfaktor.

Hydrostatisches und vereinfachtes Verfahren eignen sich ab etwa fünf Spannstahlelementen hervorragend zur Vorhersage des maximalen Stapelfaktors, wobei vor allem das Vereinfachte Verfahren rasch mit wenigen Eingangsparametern zu einer Lösung führt (Gleichung 4.22). Für weniger als fünf Spannstahlelemente sollte auf die Methode der hydrostatischen Analogiebetrachtung zurückgegriffen werden. Sie liefert in diesem Bereich stark schwankender Resultate höhere und folglich konservativere Werte. Nachfolgend seien exemplarisch zwei Diagramme abgebildet, mit denen die Abhängigkeit des Stapelfaktors von der Anzahl der Spannstahlelemente und vom Größenverhältnis von Spannstahlelementen und Hüllrohr verdeutlicht wird. Dargestellt werden die Resultate für die Verhältnisse der Radien der kleinen Kreise und des Hüllkreises von  $r/R_d = 0,16$  und von  $r/R_d = 0,10$  (Abbildung 4.14).

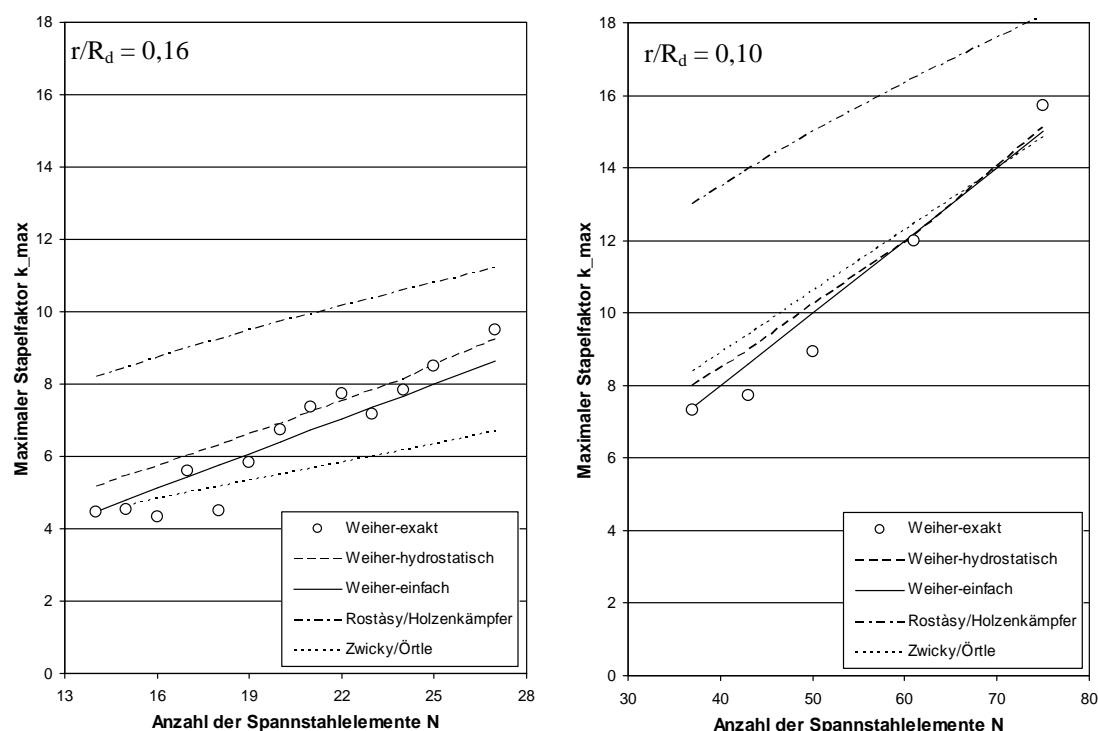


Abbildung 4.14: Maximale Stapelfaktoren aus Exakter Berechnung, Vereinfachtem Verfahren, Hydrostatischer Analogie sowie nach Rostásy/Holzenkämpfer und Zwicky/Örtle ( $r/R_d = 0,16$  und  $r/R_d = 0,10$ )

#### 4.1.8 Exkurs: Innerer Stapelfaktor

Als Innerer Stapelfaktor wird der Stapelfaktor zwischen zwei Spannstahlelementen bezeichnet. Er ist bedeutend für die Beurteilung der maßgebenden Umlenkbelastung bei mit PE-HD Hüllrohren ausgestatteten Verbundspanngliedern bei teilweise vorgespannten Bauteilen, die der Reibermüdung unterliegen. Reibermüdung tritt zwischen metallischen Reibpartnern auf. Während die maximale Umlenkbelastung bei der Verwendung von Metallhüllrohren zwischen dem dort anliegenden Spannstahl und dem Metallrohr auftritt, so geschieht dies bei Kunststoffrohren nur zwischen den einzelnen Spannstahlelementen. Der Innere Stapelfaktor kann analog dem Vorgehen für die exakte Ermittlung der Stapelfaktoren ermittelt werden. In diesem Fall entsprechen jedoch nicht die Auflagerreaktionen des Fachwerkmodells den Stapelfaktoren, sondern die Normalkräfte der Stäbe, die zwischen

benachbarten, sich berührenden Spannstahlelementen angeordnet werden (vgl. Abbildung 4.9). Acosta-Jaramillo (2007) hat, basierend auf den hier erarbeiteten Ergebnissen für die Stapelfaktorberechnung, die maximalen Inneren Stapelfaktoren für alle in Tabelle 10.2 bis Tabelle 10.5 dargestellten Konfigurationen (Spanngliedgrößen, Füllgrade) mithilfe der Fachwerkberechnung ermittelt und tabellarisch dargestellt. Die Darstellung der Ergebnisse beschränkt sich hier auf die Angabe einer, von Acosta-Jaramillo (2007) vorgeschlagenen, vereinfachten, gut geeigneten Berechnungsformel für den maximalen inneren Stapelfaktor:

$$k_{max,innen} = k_{max,cal} - \sqrt[4]{\frac{R_d}{r}} = 2 \cdot \frac{r}{R_d} \cdot N - \sqrt[4]{\frac{R_d}{r}} ; \quad (4.23)$$

mit

$k_{max,innen}$	Maximaler innerer Stapelfaktor zwischen einzelnen Spannstahlelementen [-]
$k_{max,cal}$	Maximaler Stapelfaktor zwischen Spannstahl und Hüllrohr nach Gleichung 4.22 [-]
$R_d$	Innenradius des Hüllrohrs bzw. -kreis [mm]
$r$	Radius (des Umkreises) der Spannstahlelemente bzw. Kreise [mm]
$N$	Anzahl der Spannstahlelemente [-]

#### 4.1.9 Sonderfall: Intern geführte Monolitzen

Einer besonderen Betrachtung bedarf es bei intern geführten Einzellitzen mit eigenem Korrosionsschutz, da für sie ein günstigeres Aufstandsverhalten gilt. Die Umlenkkraft wird bei einbetonierten, verbundlosen Monolitzen nicht vom im Querschnitt kreisförmigen Spannglied über einen „Punkt“ auf eine Ebene übertragen, sondern über mehrere Punkte, da die Zwickel zwischen den Monolitzen mit druckstabilem Beton oder Mörtel (Abbildung 4.15) gefüllt sind und so auch seitlich als Auflagerfläche für die Litze dienen. Idealisiert man die Litze zu einem Kreisquerschnitt, so erhält man für den Klemmbeiwert  $\kappa$  theoretisch den Maximalwert 2,0. Die Umlenkbelastung wird bei Litzen mit insgesamt sechs Außendrähten stets über drei Außendrähte in das Bauwerk eingetragen. Somit ergibt sich unter der Annahme, dass die drei Außendrähte jeweils gleiche Lastanteile übertragen, ein maximaler Stapelfaktor  $n_{max}$  mit dem Wert 2/3.

Werden druckstabile Abstandhalter zwischen mehreren Monolitzenlagen angeordnet, so ist darauf zu achten, dass die Abstandhalter in Richtung der Spanngliedachse ausreichend kurz sind, so dass die Zwickel zwischen den Monolitzen und den Abstandhaltern mit Beton zuverlässig verfüllt werden (Abbildung 4.15, rechts). Andernfalls liegt die günstige Wirkung der „Zwickelstützung“ nicht mehr vor. Es finden sich derzeit noch keine Forschungsergebnisse, die diese Wirkung quantifizieren. Bei der Anordnung dieser Abstandhalter ist zudem deren Einfluss auf die Quertragfähigkeit von Bauteilen zu beachten.



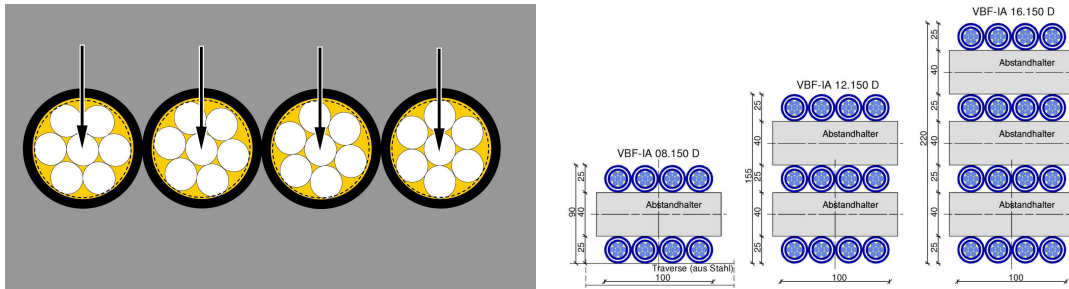


Abbildung 4.15: Intern verbundlose (einbetonierte) Monolitzen ohne (links) und mit Abstandhalter (rechts; Eisler, 2006)

## 4.2 Querschnittsform des verwendeten Spannstahls

Die geometrische Form des Querschnitts des verwendeten Spannstahls spielt, neben der Umlenkbelastung, eine wichtige Rolle bei der Betrachtung der Druckspannungen, die zwischen Spannstahl und PE auftreten. Je größer die Aufstandsfläche eines Spannstahlelements ist, desto größer ist die Umlenkbelastung bei konstanter Druckspannung, die an dieser Kontaktfläche vom Stahl auf das Polyethylen und schließlich ins Bauwerk eingeleitet werden kann. Die Größe der Aufstandsfläche hängt direkt mit der Tiefe der Eindrückung eines Spannstahlelements zusammen. Im folgenden Kapitel soll v.a. der Einfluss der Form der Spannstahlelemente auf das Einsinkverhalten (Zusammenhang zwischen Aufstandsweite und Einsinktiefe) erarbeitet werden. Aus der maximalen Umlenkbelastung  $p_{\max}$  und Aufstandsweite  $b$  des Spannstahlelements lässt sich mit Gleichung 4.24 die maximale Umlenkdruckspannung  $\sigma_{c0}$  errechnen (vgl. Kapitel 4.1).

$$\sigma_{c0} = \frac{p_{\max}}{b}; \quad (4.24)$$

mit

- $\sigma_{c0}$  Maximale Umlenkdruckspannung unter einem Spannstahlelement [N/mm<sup>2</sup>]
- $p_{\max}$  Maximaler Umlenkbelastung, z.B. nach Gleichung 4.9 [N/mm]
- $b$  Horizontale Aufstandsweite eines Spannstahlelements [mm]

Vereinfacht wird hier davon ausgegangen, dass die Verteilung der vertikalen Druckspannungen über die Breite konstant ist. Diese Annahme ist für die spätere Entwicklung eines theoretischen Modells von Bedeutung. Mit einer FEM Untersuchung des zeitabhängigen Eindrückverhaltens von Runddrahtlitze und Kompaktlitze hat Methner (2005) gezeigt, dass aufgrund umfangreicher Plastifizierung und Kriechumlagerungen im PE bei Langzeitbeanspruchung  $T \rightarrow \infty$  die Druckspannungsverteilung zwischen Spannstahl und anliegendem PE, mit Ausnahme kurzer Randbereiche, etwa konstant ist (Abbildung 4.16). Abbildung 4.17 zeigt für verschieden Litzenquerschnittsformen Beispiele, wie die Größen Aufstandsweite  $b$  und die Einsinktiefe  $t$  des Spannstahlquerschnitts definiert sind. Die Aufstandsweite  $b$  kann bei punktsymmetrischen Spannstahlquerschnitten maximal den Wert des Umkreisdurchmessers erreichen.

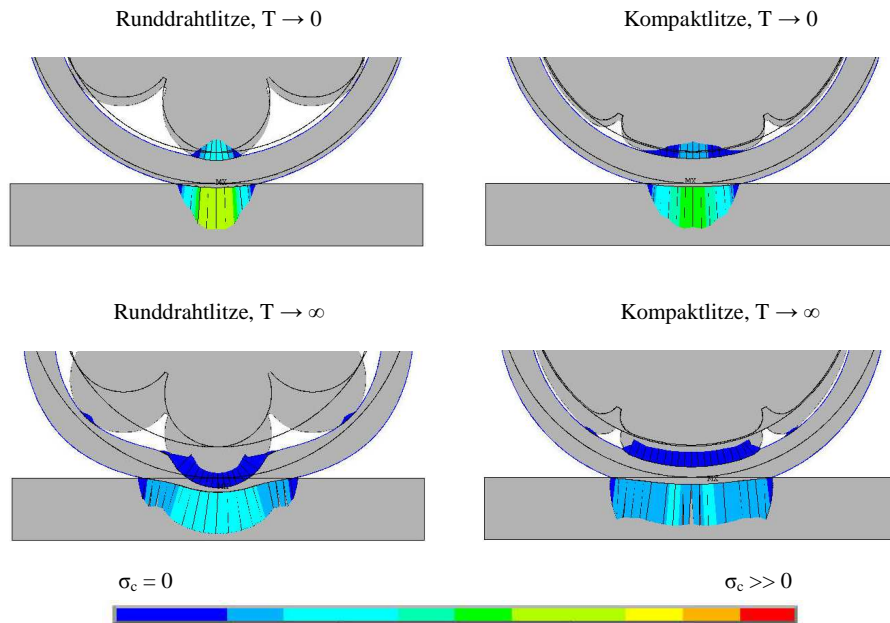


Abbildung 4.16: Druckspannungsverteilung zwischen Stahl und PE-HD für Runddraht- und Kompaktlitze bei Belastungsbeginn  $T \rightarrow 0$  und nach Dauerbelastung  $T \rightarrow \infty$  (Methner 2005, Weiher und Zilch 2006)

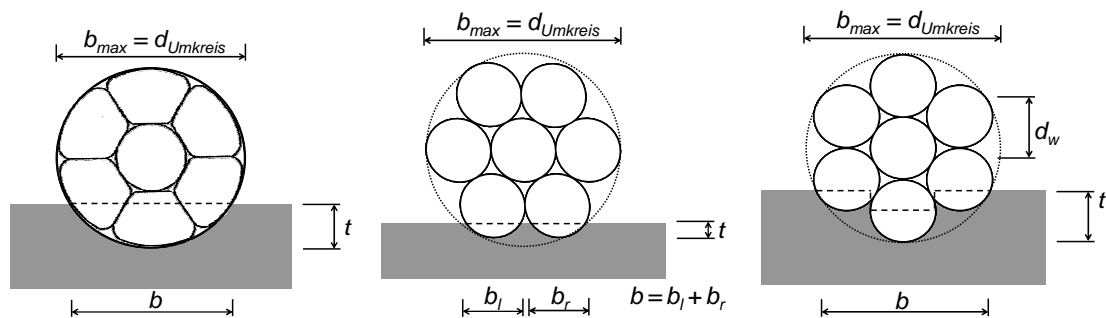


Abbildung 4.17: Beispiele für das idealisierte „Einsinken“ von verschiedenen Spannstahlquerschnitten in ein weiches Medium

Unter Berücksichtigung dieser Beziehungen kann Gleichung 4.24 allgemein auch wie folgt formuliert werden:

$$\sigma_{c0} = \frac{p_{max}}{b'(t') \cdot d_{Umkreis}}; \quad (4.25)$$

mit

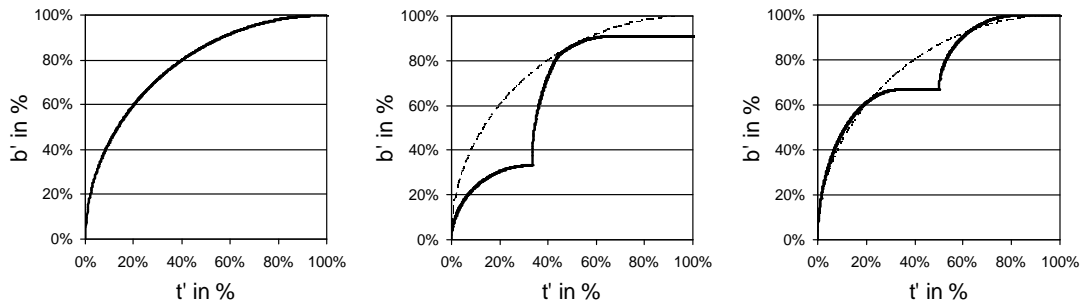
$\sigma_{c0}$  Maximale Umlenkdruckspannung unter einem Spannstahlelement [N/mm<sup>2</sup>]

$p_{max}$  Maximaler Umlenkbelastung, z.B. nach Gleichung 4.9 [N/mm]

$b'(t')$  Relative Aufstandsweite des Spannstahls abhängig von der relativen Einsinktiefe  $t'$  in ein vollplastisches Medium;  $b'(t') \in [0; 1]$  und  $t' \in [0; 1]$

$$\text{mit } t' = \frac{t}{d_{Umkreis}/2}; \text{ bzw. } b'(t') = \frac{b(t)}{b_{max}} = \frac{b(t)}{d_{Umkreis}};$$

$d_{Umkreis}$  Durchmesser des Umkreises des Spannstahlquerschnitts [mm]



**Abbildung 4.18: Relative Aufstandsweite abhängig von der relativen Einsinktiefe von Kreisquerschnitt (z.B. Draht oder angenähert Kompaktlitze), Runddrahtlitze auf zwei Außendrähten stehend, sowie Runddrahtlitze auf einem Außendraht stehend (von links nach rechts)**

Für die in Kapitel 3.2 vorgestellten zur Spanngliedumlenkung geeigneten Spannstahlformen wird die relative Aufstandsweite jeweils, sowohl als geometrische Funktion (Gleichungen 4.26 bis 4.28) als auch grafisch, angegeben (Abbildung 4.18). Dabei wird die Kompaktlitze näherungsweise als Kreisquerschnitt angesehen.

Kreisquerschnitt (z.B. Drähte, Kompaktlitze):

$$b'(t') = \begin{cases} 0 & \text{für } t' < 0 \\ \sqrt{t'(2-t')} & \text{für } 0 \leq t' < 1 \\ 1 & \text{für } t' \geq 1 \end{cases} \quad (4.26)$$

Runddrahtlitze auf zwei Außendrähten:

$$b'(t') = \begin{cases} 0 & \text{für } t' < 0 \\ 2 \cdot \frac{\sqrt{t'(2-3t')}}{\sqrt{3}} & \text{für } t' < \frac{1}{3} \\ \frac{2}{3} & \text{für } t' < \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{2 + \sqrt{-9t'^2 + 6(1 + \sqrt{3})t' - (2\sqrt{3} + 3)}}{3} & \text{für } t' < \frac{1 + \sqrt{3}}{3} \\ 1 & \text{für } t' \geq \frac{1 + \sqrt{3}}{3} \end{cases} \quad (4.27)$$

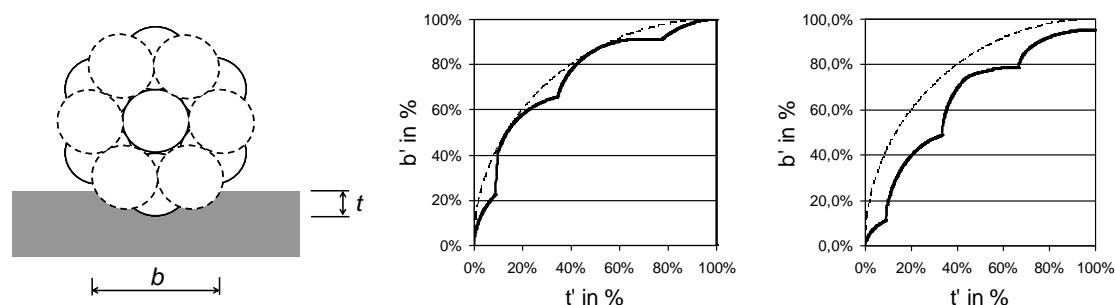
Runddrahtlitze auf einem Außendraht:

$$b'(t') = \begin{cases} 0 & \text{für } t' < 0 \\ \frac{\sqrt{t'(2-3t')}}{\sqrt{3}} & \text{für } t' < \frac{1}{3} \\ \frac{1 + 2\sqrt{3}\sqrt{-3t'^2 + 4t' - 1}}{3} & \text{für } t' < \frac{1}{3}(2 - \sqrt{2\sqrt{3} - 3}) \\ \frac{1 + \sqrt{-3t'^2 + 4t' - 1}}{\sqrt{3}} & \text{für } t' < \frac{2}{3} \\ \frac{1 + \sqrt{3}}{3} & \text{für } t' \geq \frac{2}{3} \end{cases} \quad (4.28)$$

Für die Runddrahtlitze werden zwei Aufstandskonstellationen betrachtet (Litze auf zwei Außendrähten bzw. Litze auf einem Außendraht). Es wird vereinfachend angenommen, dass alle sieben Drähte, auch der etwas größere Kerndraht, die gleichen Abmessungen haben. Die grafische Darstellung in Abbildung 4.18 zeigt deutlich, dass die Konstellation „Runddrahtlitze auf einem Außendraht“ zunächst sehr ungünstig ist. Erst wenn die Einsinktiefe so groß ist, dass die beiden angrenzenden Außendrähte durch ihren Kontakt auch Teile der Umlenkbelastung in das PE einleiten können, nimmt die Aufstandsweite und somit die auf das Polyethylen übertragbare Umlenkbelastung bei zunehmender Einsinktiefe sprunghaft zu. Für alle Querschnittsformen gilt zudem: für Spannstahlelemente mit kleineren Abmessungen (also kleinerem Umkreisdurchmesser  $d_{\text{Umkreis}}$ ) stellt sich bei konstantem  $b'$  und  $t'$  eine geringere Einsinktiefe ein.

Abbildung 4.19 (linkes Teilbild) zeigt einen idealisierten Querschnitt einer Runddrahtlitze bei Annahme einer Längssteifigkeit. Durch die Verdrillung der Außendrähte liegen die beiden Aufstandskonstellationen „Runddrahtlitze auf einem Außendraht“ und „Runddrahtlitze auf zwei Außendrähten“ bei handelsüblichen Litzen nur etwa 18 mm auseinander. Es ist somit davon auszugehen, dass die Einsinkungen bei beiden Konstellationen nicht unabhängig voneinander stattfinden. Die eigentlich größere Eindrückung beim Aufstand auf nur einem Draht wird abgemindert durch eine Rückhaltekraft der benachbarten günstigeren Konstellation beim Aufstand auf zwei Außendrähten. Gleichung 4.29 und Abbildung 4.19 (mittleres Teilbild) geben für diesen Fall die relative Aufstandsweite analytisch und grafisch wieder. Die letztgenannte Variante erfasst zwar die Mitwirkung günstig gelagerter Bereiche (Aufstand auf zwei Außendrähten), allerdings fällt in Abbildung 4.19 (mittleres Teilbild) beim Vergleich von Kreisform (gestrichelte Linie) und Litzenform (durchgehende Linie) auf, dass die Aufstandsfläche der Litze zu groß angenähert wird. Sie unterscheidet sich nur geringfügig vom Kreisquerschnitt, was im Kontrast zur Realität steht (Abbildung 4.20).

Als weiterer Ansatz für eine vereinfachte Darstellung der Aufstandsbreitenentwicklung in Abhängigkeit von der Einsinktiefe wird nun auf eine Kombination der beiden ursprünglichen Varianten für den Aufstand der Litze auf einem Außendraht sowie für den Aufstand der Litze auf zwei Außendrähten zurückgegriffen. Beide „Extremsituationen“ werden bei der Ermittlung der relativen Aufstandsweite in Abhängigkeit von der Einsinktiefe zu je 50 % gewichtet.



**Abbildung 4.19: Idealisierter Querschnitt; relative Aufstandsweite von der Runddrahtlitze unter Berücksichtigung der Längssteifigkeit; Kombination der Extremsituationen (von links)**

Dabei ist zu beachten, dass für die Konstellation mit zwei aufstehenden Außendrähten aufgrund der dreidimensionalen geometrischen Form die  $t'$ - $b'$ -Kurve in Richtung von  $t'$  verschoben werden muss. Die Zwillingsaußendrähte wirken erst dann mit, wenn die Litze schon etwas eingesunken ist. Gleichung 4.30 und Abbildung 4.19 (rechtes Teilbild) geben für diesen Fall die relative Aufstandsbreite analytisch und grafisch wieder.

Runddrahtlitze – Berücksichtigung der Verdrillung (Längssteifigkeit):

$$b'(t') = \begin{cases} 0 & \text{für } t' < 0 \\ \frac{\sqrt{3t'(2-3t')}}{3} & \text{für } t' < \frac{2-\sqrt{3}}{3} \\ \frac{\sqrt{2+4\sqrt{-9t'^2+(18+6\sqrt{3})t'-(11-6\sqrt{3})}}}{6} & \text{für } t' < \frac{2-\sqrt{2}}{6} \\ \frac{1+\sqrt{-9t'^2+(18+6\sqrt{3})t'-(11-6\sqrt{3})}}{3} & \text{für } t' < \frac{2-\cos(\pi/12)}{3} \\ \frac{1+\sqrt{-3t'^2+4t'-1}}{\sqrt{3}} & \text{für } t' < \frac{2}{3} \\ \frac{1+\sqrt{3}}{3} & \text{für } t' < 1 - \frac{\sqrt{2\sqrt{3}-3}}{3} \\ \frac{2+\sqrt{-9t'^2+18t'-8}}{3} & \text{für } t' < 1 \\ 1 & \text{für } t' \geq 1 \end{cases} \quad (4.29)$$

Runddrahtlitze – Kombination der Extremkonstellationen zu je 50 %:

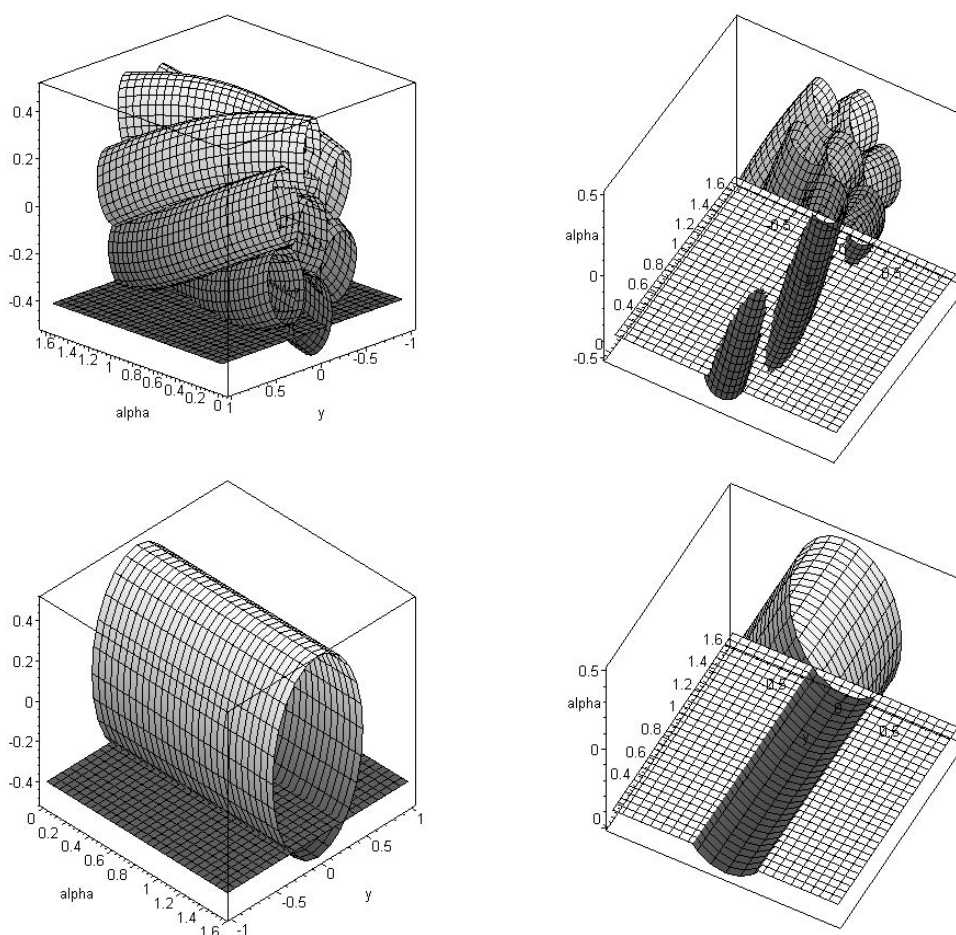
$$b'(t') = \begin{cases} 0 & \text{für } t' < 0 \\ \frac{\sqrt{3t'(2-3t')}}{6} & \text{für } t' < \frac{2-\sqrt{3}}{3} \\ \frac{\sqrt{3t'(2-3t')} + 2h}{6} & \text{für } t' < \frac{1}{3} \\ \frac{1}{6} + \frac{\sqrt{-9t'^2+12t'-3} + h}{3} & \text{für } t' < 1 - \frac{1}{\sqrt{3}} \\ \frac{1}{2} + \frac{\sqrt{-9t'^2+12t'-3}}{3} & \text{für } t' < \frac{2}{3} - \frac{\sqrt{2\sqrt{3}-3}}{3} \\ \frac{1}{3} + \frac{\sqrt{3}}{6} + \frac{\sqrt{-9t'^2+12t'-3}}{6} & \text{für } t' < \frac{2}{3} \\ \frac{1}{2} + \frac{\sqrt{3}}{6} + \frac{\sqrt{-9t'^2+18t'-8}}{6} & \text{für } t' < 1 \\ \frac{4+\sqrt{3}}{6} & \text{für } t' \geq 1 \end{cases} \quad (4.30)$$

mit

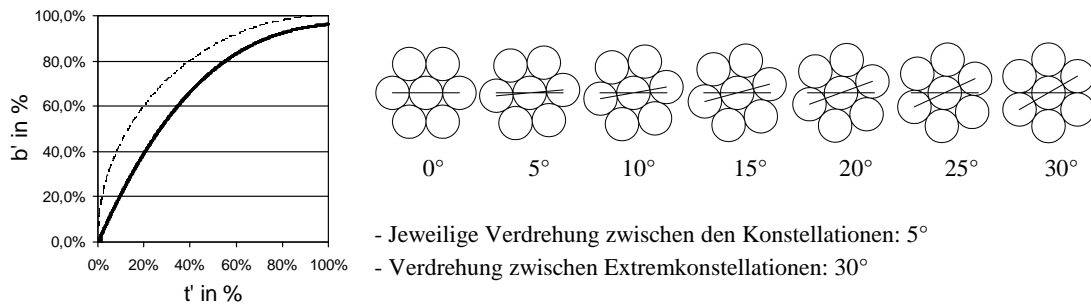
$$\text{Hilfsvariable } h = \sqrt{-9t'^2+(18+6\sqrt{3})t'-11+6\sqrt{3}}.$$

Aus der letzten Konstellation, der Kombination der Extremsituationen zu je 50 %, ist bereits erkennbar, dass die Aufstandsbreite-Einsinktiefe-Kurve etwas stetiger ausgeprägt ist als bei den Extremkonstellationen. Verglichen mit dem Verlauf bei im Querschnitt kreisförmigen Eindringkörpern liegt sie zudem permanent darunter und erreicht nicht die maximale Aufstandsbreite von 100%. Die Außendrähte der Runddrahtlitze drehen sich kontinuierlich um den Kerndraht. Die Kombination der Extremkonstellationen zu jeweils 50 % stellt somit eine diskrete Lösung dar – wenn auch nur mit einer sehr groben Unterteilung. Verfeinert man die Diskretisierung und wählt zwischen den beiden Extremkonstellationen in gleichen Abständen fünf weitere Konstellationen so ist entsprechend der kontinuierlichen Verdrillung der Litze im Gegensatz zu den bisher gefundenen stückweisen Lösungen ein stetiger Verlauf der Aufstandsbreite-Einsinktiefe-Funktion erkennbar, der mit einem Polynom dritter Ordnung sehr genau erfasst werden kann (vgl. Gleichung 4.31, Abbildung 4.21).

$$b'(t') = \begin{cases} 0 & \text{für } t' < 0 \\ t'(0,5 \cdot t'^2 - 1,85 \cdot t' + 2,3) & \text{für } 0 \leq t' < 1 \\ 0,95 & \text{für } t' \geq 1 \end{cases} \quad (4.31)$$



**Abbildung 4.20: Schematische 3-D Ansichten einer Runddrahtlitze (oben) und eines Drahtes (unten) mit Aufstands- bzw. Schnittebene je für eine Einsinktiefe von  $r/10$**



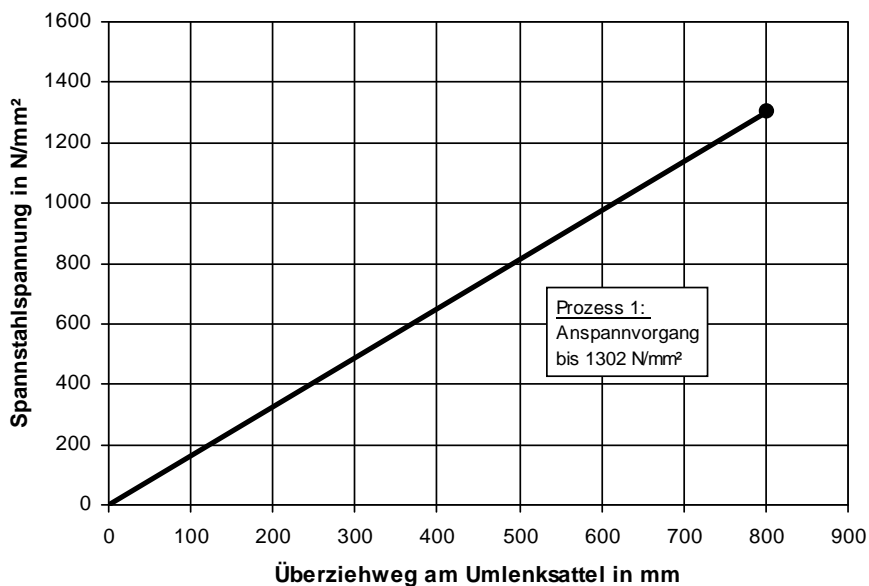
**Abbildung 4.21: Relative Aufstandsweite abhängig von der relativen Einsinktiefe der Runddrahtlitze bei Berücksichtigung stetiger Längsverdrillung; Näherungslösung (links) und Zwischenkonstellationen für Diskretisierung (rechts)**

## 4.3 Reibungsverhältnisse

Für den Verschleiß von Polyethylen-Schutzhüllen können die Reibungsverhältnisse an Umlenkstellen eine wichtige Rolle spielen. Beim Anspannvorgang wird das Spannglied durch die elastische Dehnung des Spannstahls in Längsrichtung über die Umlenkstelle gezogen. Diese Bewegung führt zu Reibung, durch welche die Schutzhüllen eines Spannglieds beansprucht werden können.

### 4.3.1 Anspannvorgang

Der größte Überzugweg tritt an derjenigen Umlenkstelle auf, die am weitesten vom Festanker entfernt liegt. Beim Anspannen eines Spannglieds mit dem E-Modul  $195.000 \text{ N/mm}^2$  bis auf eine Spannstahlspannung von 70 % einer Nennfestigkeit von  $1860 \text{ N/mm}^2$  an einer etwa  $120 \text{ m}$  vom Festanker entfernten Umlenkstelle tritt beispielsweise ein Überziehweg von  $80 \text{ cm}$  auf.



**Abbildung 4.22: Überziehweg-Spannungs-Diagramm (Beispiel)**

Das Überziehweg-Spannungs-Diagramm in Abbildung 4.22 zeigt, aufgrund der direkten Proportionalität von Spannstahldehnung zu -spannung im elastischen Bereich, den linearen Anstieg der Spannstahlspannung im Bauwerk unter den Voraussetzungen des oben genannten Beispiels. Die maximale Umlenkbelastung bei der maximalen Stahlspannung wird erst am Ende des Anspannvorgangs erreicht. Das Überziehen von Spanngliedern bei hoher Umlenkbelastung kann an der Umlenkstelle zu Reibbeanspruchungen am äußeren und/oder inneren Polyethylenmantel führen.

### 4.3.2 Arten der Spanngliedbewegung

Bei der durch den Anspannvorgang erzwungenen Spanngliedbewegung kann zwischen „Äußerer-“, „Innerer-“ und „Gemischter Gleitung“ unterschieden werden.

#### **Definition - Äußere Gleitung:**

Zwischen Spannstahlitzen und Schutzhülle findet bei einer Bewegung des Spannglieds an einer Umlenkstelle keine Relativbewegung statt. Eine gleichförmige Bewegung des gesamten Spannglieds tritt bei ausreichend hohen Kontaktpressungen und somit einer starken Verbundwirkung zwischen Spannstahl und Ummantelung auf. *Äußere Gleitung* wird durch glatte Führungsflächen (z.B. Umlenksattelformteil) mit kleinem Reibbeiwert und hohen Umlenkpressungen begünstigt.

#### **Definition - Innere Gleitung:**

Zwischen Spannstahlitzen und Schutzhülle findet bei einer Bewegung des Spannglieds an einer Umlenkstelle eine Relativbewegung statt. Der Spannstahl „gleitet“ durch die 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. 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.

Puttendörfer (2006) definiert ferner für Spannglieder mit zweifacher PE-HD Ummantelung den Begriff „Mittlere Gleitung“. Diese entspricht theoretisch einer Relativbewegung zwischen den PE-HD Lagen. Bei reiner Mittlerer Gleitung bewegt sich die äußere Hülle nicht und verbleibt am Umlenksattel. Die innere Hülle wird zusammen mit dem Spannstahl über den Sattel gezogen. Bisher konnte diese Gleitungsvariante bei Bandspanngliedern nicht beobachtet werden. Die Haftkräfte zwischen den PE-HD Hüllen sind unter Umlenkbelastung so groß, dass diese Relativverschiebung wohl verhindert wird. Mittlere Gleitung wird daher innerhalb dieser Arbeit nicht weiter betrachtet. Die innere und die äußere Schutzhülle bilden also eine gemeinsame Schicht, die den oben definierten Gleitungszuständen Äußere-, Innere- und Gemischte Gleitung unterliegen kann.

Äußere Gleitung entspricht quasi einer statischen Eindrückbelastung. Abbildung 4.23 (linkes Teilbild) zeigt deformiertes Polyethylen nach einer solchen Belastung durch umgelenkte Spannstahllitzen.

### **4.3.3 Auftretensformen von Innerer Gleitung**

Die Relativbewegung der Litze zum PE-HD Mantel kann als Translation oder durch Verdrehen auftreten.

Spannstahl kann sich bei Innerer Gleitung mittels „Translation“ relativ zum Polyethylenmantel verschieben. Bei der Translation bilden sich bei Litzen große Kanäle mit dem Radius des Litzenumkreises aus. Dies ist dann möglich, wenn bei relativ geringem Einsinken der Litzen in das Polyethylen diese bei der Relativverschiebung über den Kunststoff „walzen“ ohne sich zu verdrehen (Abbildung 4.23, rechtes Teilbild).

Durch die Verdrillung der Drähte von Spannstahllitzen können sich diese bei hoher Umlenkbelastung auch, vergleichbar mit einer Schraube in einem Dübel, in den Polyethylenmantel eindrehen („Verdrehen“). Beim Verdrehen bilden sich im Gegensatz zur Translation zahlreiche kleine Kanäle mit deutlich kleinerem Radius – dem der einzelnen Außendrähte einer Litze (Abbildung 4.24). Diese Arten von Innerer Gleitung sind auch ausführlich in Zilch und Weiher (2006), Hegger et al. (2002) und Neuser (2003) beschrieben.

### **4.3.4 Innere Gleitung bei spannkernnaher Umlenkung**

Liegt die Umlenkstelle sehr nahe am Spannanker, so führt Innere Gleitung mit Verdrehen der Litze bei großen Ziehwegen zu einer sehr hohen Torsionsbelastung der Litze. Sie ist am Spannanker während des Anspannvorgangs in der hydraulischen Presse eingespannt. Diese Belastung ist umso höher, je kürzer der Abstand der Umlenkstelle zur Verankerung ist und je länger der Überziehweg ist.



Litze



Litze

**Abbildung 4.23: Eindrückungen im PE-HD bei Äußerer Gleitung (links), Verschleißerscheinung im PE-HD bei Innerer Gleitung mit Translation (rechts)**



Lineal

Litze

**Abbildung 4.24: Verschleißerscheinung im PE-HD bei Innerer Gleitung mit Verdrehen („Schaube“)**

## 4.4 Beanspruchungsdauer

Polymere haben im Vergleich zu Metallen ein stark ausgeprägtes visko-elastisches Deformationsverhalten, was sich deutlich auf den Grad der Eindrückung der Litzen in die PE Ummantelungen auswirkt. Bei lang andauernder Pressung von Stahl auf Polyethylen treten zusätzlich zu den sofortigen elastischen und plastischen Verformungsanteilen auch zeitabhängige Verformungsanteile auf. Das PE kriecht an Stellen hohen Drucks. An Umlenkstellen kann dieses Verhalten mit einer Messung der zeitabhängigen Vertikalverformung des gesamten Spannglieds beobachtet werden. Mit zunehmender Beanspruchungszeit wird die Schutzhülle dünner, d.h. die Deformation des PE nimmt zu. Das mechanische Verhalten kann mit dem rheologischen Modell nach Burgers beschrieben werden (Reiner, 1972 bzw. Betten, 1993). Dieses rheologische Modell, das in einer

einfachen Grundversion in Abbildung 4.25 dargestellt ist, beschreibt ein Material, dass sich bei Belastung sowohl sofort als auch zeitabhängig elastisch und plastisch verformt.

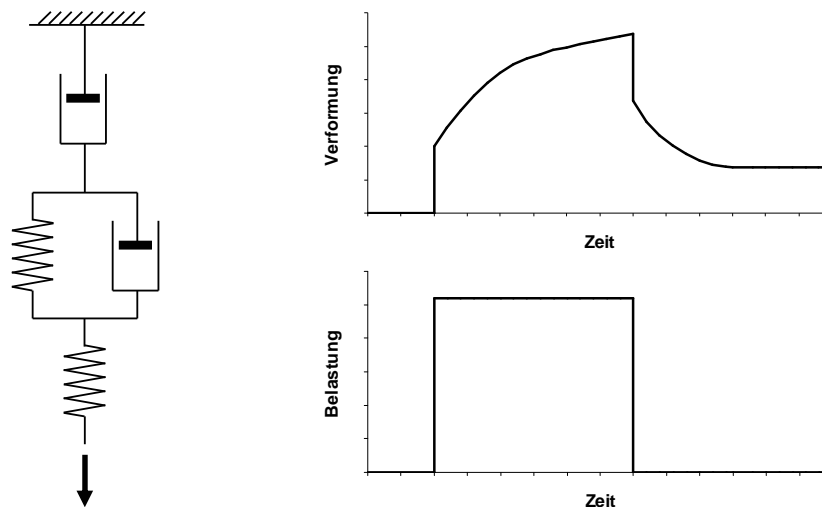


Abbildung 4.25: Rheologisches Modell von PE: Burgers-Modell (Zilch und Weiher, 2006)

Puttendörfer (2006) hat für zwei Temperaturen und drei Umlenkbelastungen Druckbelastungsversuche mit Litzen auf PE-HD Lagen durchgeführt und dabei über einen Zeitraum von 16 Stunden die Stauchung erfasst. Abbildung 4.26 zeigt die zugehörigen Stauchungsverläufe, aufgetragen über die Zeitachse. Als eine wesentliche Erkenntnis kann festgehalten werden, soweit die Genauigkeit der grafischen Darstellung dies zulässt, dass der zeitabhängige Stauchungsanteil bei beiden Temperaturen für alle drei Umlenkbelastungen jeweils etwa gleich groß ist. Das Größenverhältnis der Umlenkbelastungen betrug dabei: 1 : 2 : 4 bzw. 25 % : 50 % : 100 %. Dabei scheint der zeitabhängige Stauchungsanteil bei höherer Temperatur sogar etwas geringer zu sein (Abbildung 4.26). Die Untersuchungen Puttendörfers zum Kriechverhalten sind zur quantitativen Erfassung sehr wichtig. Es wurde ein kurzer Zeitraum von 16 Stunden für die Aufzeichnung der Belastungen mit einer linearen Skalierung gewählt. Trotz der anscheinend sehr schnell abklingenden zeitabhängigen Verformung ist gerade bei Kunststoffen mit weiteren nennenswerten zeitabhängigen Verformungsanteilen bei Belastungsdauern, die denen im Bauwerk entsprechen, zu rechnen (Abbildung 4.26). Dies geht u.a. aus Ehrenstein (1999), Ehrenstein, Riedel und Trawiel (2004), Borchert (2007) oder Letsch (1983) hervor, die intensiv das zeit- und temperaturabhängige Verhalten von Kunststoffen im Bauwesen untersuchten.

Eine exakte Quantifizierung der zeitabhängigen Verformungen bei der Druckbelastung von unterschiedlich großen und unterschiedlich geformten Spannstählen auf Polyethylen ist mithilfe des derzeitigen Wissensstands in der Fachwelt nicht möglich. Diese Wissenslücke könnte mit einer Versuchsreihe behoben werden, bei der Stahl in Polyethylen gedrückt wird. Innerhalb einer Parameterstudie sollten die Belastungshöhe, die Dicke der Polyethylenschicht, die Spannstahlform und besonders die Belastungsdauer variiert werden.

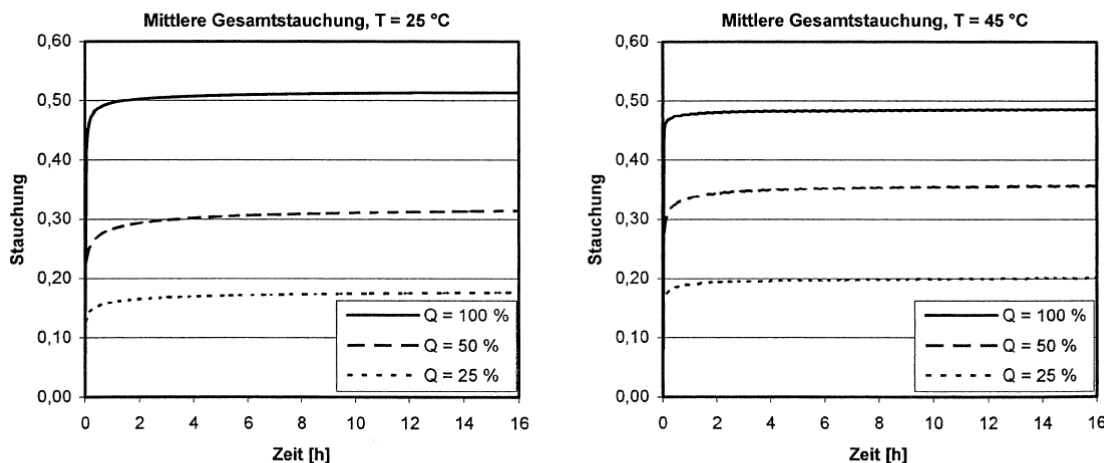


Abbildung 4.26: Bei Kriechversuchen an der TH Karlsruhe ermittelte sofortige und zeitabhängige Verformung (Stauchung) von PE-HD Monolitzenhüllen bei drei verschiedenen Umlenkbelastungen und zwei verschiedenen Temperaturen (Puttendörfer, 2006)

## 4.5 Temperatur

Das für die Umhüllung des Spannstahls verwendete Polyethylen hoher Dichte weist ein mechanisches Verhalten auf, das in Abhängigkeit von der Temperatur verschieden ist. Bei zunehmenden Temperaturen wird es weicher. Diese Tatsache gilt es vor allem an Umlenkstellen zu beachten. Im Gegensatz zur freien Spannliedlänge wird das PE-HD hier planmäßig mechanisch hoch beansprucht.

In Hohlkästen von extern vorgespannten Spannbetonbrücken treten in Mitteleuropa im Gegensatz zur Fahrbahntafel geringere Temperaturen auf, da die tageszeitlichen Temperaturschwankungen durch das Wärmespeichervermögen der Betonbauteile gedämpft werden und keine direkte Sonneneinstrahlung stattfindet. Selbst in heißen Sommerperioden sind Temperaturen über 30 °C in Hohlkästen selten. Beispielhaft sind für neun Tage im Sommermonat Juni die Verläufe der Lufttemperatur im Innern eines Hohlkastens und außerhalb in Abbildung 4.27 dargestellt. Zusätzlich ist der Temperaturverlauf in einem exponierten Bauteil, der Fahrbahnplatte, dargestellt. Der Effekt der Pufferwirkung des Betons ist deutlich erkennbar: die maximale Innentemperatur in einem Hohlkasten bleibt im Bereich zunehmender Temperaturen stets unter den Werten der Außentemperatur.

Etwas anders verhält es sich bei der Verstärkung von Brückenüberbauten, bei denen externe Spannlieder auch an den Stegaußenseiten angebracht werden. Je nach Exposition des Bauwerks können die Spannlieder und die Umlenkstellen durch direkte Sonneneinstrahlung aufgeheizt werden. Dabei zeigt Abbildung 4.27 wie sich die Sonneneinstrahlung auf die Temperatur in Betonbauteilen, in diesem Fall eine Fahrbahnplatte, auswirkt. Durch die schwarze Färbung der Spannliedhüllen können sich diese bei direkter Sonneneinstrahlung durch Absorption zusätzlich erwärmen. Demnach sind in dieser Situation höhere Temperaturen zu erwarten als in Hohlkästen, wodurch das Polyethylen weicher wird und einen geringen Widerstand der Eindrucksbelastung durch den Spannstahl entgegengesetzt. Durch die Überdeckung der Stege mit den Kragarmen werden die Stegflächen allerdings nur

bei niedrigem Sonnenstand und damit mit einer geringeren Strahlungsintensität angeschieden. Verbundlose Spannglieder können mit einer ölasierten Korrosionsschutzmasse (Wachs, Vaseline) verfüllt werden. Diese wird vor dem Verfüllen erhitzt, wodurch sie, die für diesen Vorgang erforderliche, flüssige Konsistenz erreicht. Dabei wird die Masse auf etwa 100 °C erhitzt. Wird das Verfüllen der Spannglieder mit heißer Korrosionsschutzmasse auf der Baustelle am bereits eingebauten, vorgespannten Spannglied durchgeführt, so könnten hohe Temperaturen auch an den Umlenkstellen auftreten. Durch Zufuhr von Wärme wird das Polyethylen weicher, wodurch sich der Spannstaht tiefer in das Hüllrohr eindrücken kann. An den Umlenkstellen liegen bei gespannten Spanngliedern die Spannstahtelemente direkt am Polyethylen an. Beim Verfüllen der heißen Masse kühlt diese durch Abgabe von Wärme an die kalten Spannstahtelemente ab, bevor sie die Schutzhülle erreicht. Auf welche Temperatur sich das Polyethylen tatsächlich erhitzt und ob sich die mechanischen Eigenschaften des Kunststoffes wesentlich verändern kann schwer vorhergesagt werden. Ohne genaue Kenntnis der thermischen Bedingungen beim Verfüllvorgang ist es daher positiv zu bewerten, wenn zunächst nur bis zu einer geringen Spannung vorgespannt wird (z.B. 10 % der Nennfestigkeit des Spannstahts) und nach Abkühlen der Korrosionsschutzmasse, bei temperaturbedingt steiferem Polyethylen, die restliche Vorspannkraft aufgebracht wird.

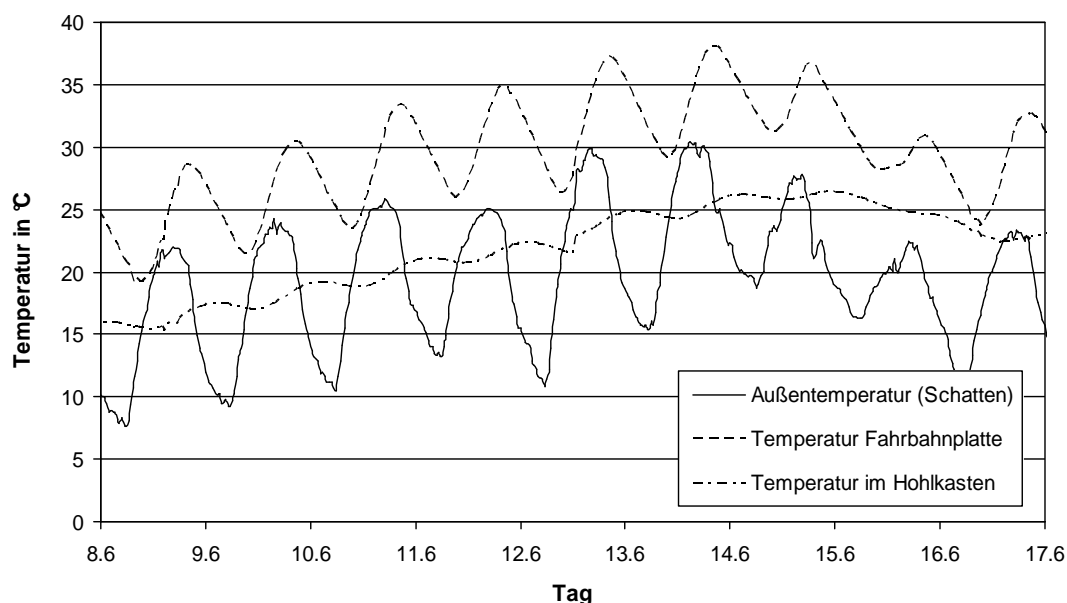


Abbildung 4.27: Exemplarische Temperaturmessung an einer Hohlkastenbrücke

## 4.6 Zweiaxiale Umlenkung

Bei der Umlenkung von extern geführten Spanngliedern im Raum ist ein sehr genauer Einbau der Umlenkformteile erforderlich, damit es zu keinen Verklemmungen oder Knickbeanspruchungen des Spannglieds kommt. Diese können zu zusätzlichen unplanmäßigen Quetschungen und Beschädigungen der Kunststoffhülle führen.

Bei rotationssymmetrischen Spanngliedern mit Hüllrohr ergibt sich für den Gesamtumlenkradius im Raum  $R_{\text{Gesamt}}$  die Beziehung:

$$\frac{l}{R_{\text{Gesamt}}^2} = \frac{l}{R_{\text{Vertikal}}^2} + \frac{l}{R_{\text{Horizontal}}^2}; \quad (4.32)$$

bzw.:

$$R_{\text{Gesamt}} = \left( \frac{l}{R_{\text{Vertikal}}^2} + \frac{l}{R_{\text{Horizontal}}^2} \right)^{-1/2} = \sqrt{\frac{R_{\text{Vertikal}}^2 \cdot R_{\text{Horizontal}}^2}{R_{\text{Vertikal}}^2 + R_{\text{Horizontal}}^2}}; \quad (4.33)$$

mit

$R_{\text{Gesamt}}$  Gesamt- bzw. Resultierender Umlenkradius [m]

$R_{\text{Vertikal}}$  Umlenkradius der Krümmung in vertikaler Ebene [m]

$R_{\text{Horizontal}}$  Umlenkradius der Krümmung in horizontaler Ebene [m]

Die Beanspruchungen des Hüllrohrs durch die Umlenkbelastung entsprechen einer vertikalen Umlenkung um  $R_{\text{Gesamt}}$ . Eine gesonderte Untersuchung des Lastfalls „Zweiachiale 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  $R_{\text{Gesamt}}$  umgelenkt werden. Durch die eckige Querschnittsform setzt dies einen sehr exakten Einbau des Umlenkformteils voraus. Zwischen Umlenkstellen 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.

Bei Bandspanngliedern kann, zur Vereinfachung ihres Einbaus und damit des Bauablaufs, die einaxiale Umlenkung im Raum auch als zweiachiale Umlenkung realisiert werden. Bisher liegen jedoch keine Erfahrungen zum Verschleißverhalten von Bandspanngliedern unter dieser Beanspruchungssituation vor. Bei der zweiachsialen Umlenkung werden Spannglieder zusätzlich zur vertikalen Umlenkung auch horizontal um einen bestimmten Radius umgelenkt, der im Allgemeinen größer ist. Das Spannglied liegt nun an zwei Kanten an. Problematisch könnte diese zusätzliche Umlenkung für Spannglieder sein, deren Aufbau im Querschnitt quasi anisotrop ist. Bei Bandspanngliedern sind in Querrichtung die einzelnen Litzen nur durch die Monolitzenschutzhüllen und je nach Spanngliedtyp auch den Stegen dazwischen voneinander getrennt. Diese Kunststoffzwischenlage ist, noch bevor sich der Stahl eindrückt und seinen Korrosionsschutz mindert, bereits wesentlich dünner als die Polyethylenschichten bei planmäßiger vertikaler Querschnittsbelastung.

## 5 Experimentelle Untersuchungen

Das Verhalten von Korrosionsschutzhüllen umgelenkter Spannglieder kann mit Versuchen untersucht werden. Mit ihrer Hilfe kann für die vielen unterschiedlichen Systeme deren Bauteilwiderstand gut quantifiziert werden. Für die Zulassung von Spanngliedern sind so genannte Umlenkversuche mit Spanngliedern erforderlich. Mit ihnen kann die Beanspruchung der umgelenkten Spannglieder am Bauwerk nachvollzogen werden. Zilch und Weiher (2006) führten eine systematische, experimentelle Untersuchung von Einflussparametern auf die Eindrückungen des Spannstahls in dessen Schutzhülle mit neun Umlenkversuchen an Bandspanngliedern durch. Zwei weitere umfangreiche experimentelle Forschungsvorhaben wurden von Hegger et al. (2002, 2005) an der RWTH Aachen durchgeführt. Mit einer Kleinmodellversuchsanlage wurden Einzelteile verschiedener Spanngliedertypen, v.a. von Bandspanngliedern, geprüft. Für Spannglieder im Hüllrohr beschränkt sich der Wissensstand auf Einzeluntersuchungen von Service d'Etudes des Structures (Frankreich) und der ETH Zürich (Schweiz).

Zahlreiche Versuche an verschiedenen Spanngliedersystemen wurden innerhalb von Zulassungsverfahren durchgeführt, wobei deren Ergebnisse nicht frei zugänglich sind:

- Bandspannglieder mit Runddrahtlitzen
- Bandspannglieder mit Kompaktlitzen
- Spannglieder mit Drähten im PE-HD Hüllrohr
- Spannglieder mit Runddrahtlitzen im PE-HD Hüllrohr
- Spannglieder mit Monolitzen im PE-HD Hüllrohr
- Monolitzen (intern)

Etliche europäische Hersteller verbundloser Spannglieder haben der Veröffentlichung von Teilergebnissen in dieser Arbeit zugestimmt. Die Randbedingungen und wesentliche Ergebnisse dieser Versuche sind in Kapitel 10.7 und 10.8 zusammengestellt.

### 5.1 Umlenkversuch nach ETAG 013 bzw. DIBt-Richtlinie

Mit Umlenkversuchen soll das Verhalten des PE-HD Korrosionsschutzes von extern geführten verbundlosen Spanngliedern an Umlenkstellen während des Anspannvorgangs und der Standzeit experimentell überprüft werden. Die aus solchen Versuchen gewonnenen Ergebnisse werden vor der Erteilung von Zulassungen für die untersuchten Produkte zur Beurteilung von Dauerhaftigkeit und Funktionstauglichkeit herangezogen.

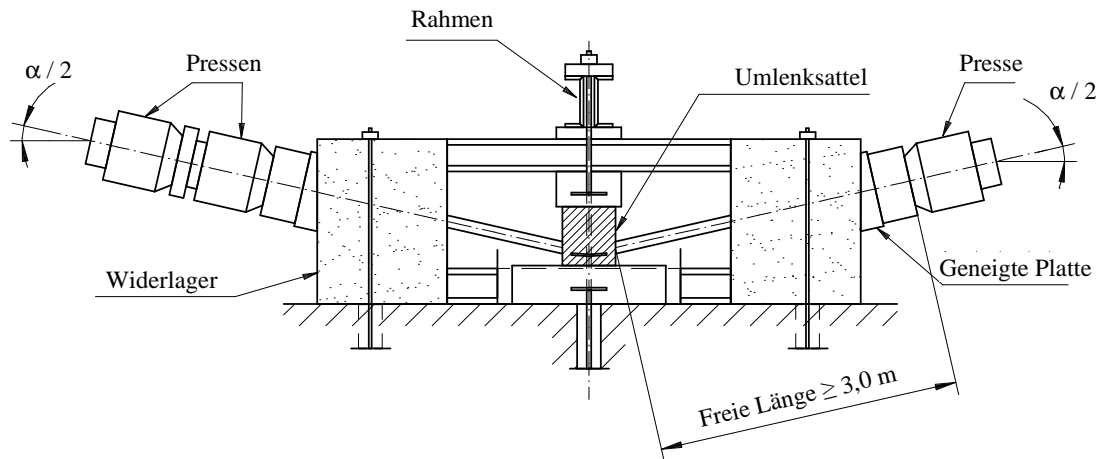


Abbildung 5.1: Schematischer Aufbau eines Umlenkversuchs gemäß ETAG 013 (Ed. 06/2002)

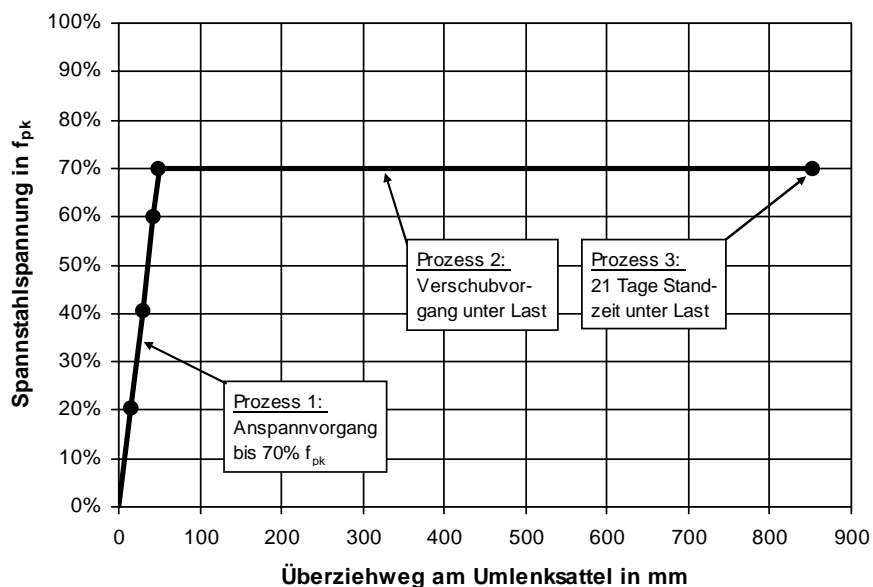


Abbildung 5.2: Ablaufschema beim Umlenkversuch

Die nationale DIBt-Richtlinie (1999) sieht bei der „Prüfung mit großer Umlenkung“ dabei identische Anforderungen an den Versuchsaufbau und -ablauf vor wie die europäische Richtlinie ETAG 013, Edition June 2002, bei der Prüfung mit „Large Deviation“: Das Spannglied soll mit einem konstanten Radius um mindestens  $\alpha = 14^\circ$  umgelenkt werden. Es sind die Originalkomponenten des untersuchten Spanngliedsystems zu verwenden. Die freie Länge des Spannglieds zwischen Umlenkstelle und den Verankerungen (Widerlagern) soll mindestens 3,0 m betragen. Abbildung 5.1 zeigt den in ETAG 013 (2002) vorgeschlagenen Versuchsaufbau. Der Umlenkversuch ist in seinem Ablauf in insgesamt drei Einzelprozesse (für nachspannbare Spannglieder u.U. sogar in vier Einzelprozesse) zu unterteilen:

- Prozess 1: Anspannvorgang bis 70 % ·  $F_{pk}$  (Ziellast)
- Prozess 2: Schubvorgang um 800 mm unter Ziellast
- Prozess 3: 21 Tage Standzeit unter Ziellast
- (Prozess 4: Schubvorgang 2 unter Ziellast)



Während des Anspannvorgangs wird die Vorspannkraft des Spannglieds in 20 % Schritten stufenweise bis auf eine Spannstahlspannung von zunächst 60 % der Nennfestigkeit des verwendeten Stahls  $f_{pk}$  aufgebracht (Abbildung 5.2). In einer letzten Stufe wird die Spannung auf 70 % der Nennfestigkeit  $f_{pk}$  gesteigert (Ziellast). Das Spannglied wird unter der Ziellast nun mit einem Gesamtverschubweg von mindestens 800 mm über den Umlenksattel gezogen. Die Spannung im Spannglied sollte während des Verschubvorgangs (Prozess 2) und während der Standzeit (Prozess 3) zu keinem Zeitpunkt unter 67 % der Nennfestigkeit des Spannstahls  $f_{pk}$  fallen. Nach Ablauf der 21-tägigen Standzeit wird das Spannglied entweder sofort entlastet und demontiert oder Prozess 4 für nachspannbare Spannglieder zwischengeschaltet. Dabei wird das Spannglied entsprechend Prozess 2 um eine bestimmte Länge nochmals über den Umlenksattel gezogen. Die beim Versuch herrschende Temperatur sollte während der Standzeit um maximal 5 K von 20 °C abweichen.

## 5.2 Eigene Versuche, TU München

Zilch und Weiher (2006) führten an der TU München in einem Forschungsvorhaben zwischen 2004 und 2006 insgesamt neun Umlenkversuche durch, wobei, die in Abbildung 3.3 dargestellten, drei Bandspanngliedsysteme mit je 16 Litzen zum Einsatz kamen. Die Dicke der zwei PE-Schutzhüllen der Spannglieder betrug vor Versuchsdurchführung für die Innenmäntel 1,5 bis 2,0 mm und für die Außenmäntel 3,0 bis 3,5 mm. Mit den Versuchen sollte im Besonderen erforscht werden, wie sich das Eindrückungsverhalten von Stahl in die PE-HD Schutzhüllen verändert, in Abhängigkeit von folgenden Parametern:

- Verwendung von unterschiedlichen Spannstahllitzenformen (Runddrahtlitze mit  $A_p = 150 \text{ mm}^2$  und kompaktierte Litze mit  $A_p = 165 \text{ mm}^2$ );
- Hohe Anteile an Innerer Gleitung (mit Gitterrost und rauem Gewebe bewusst erzwungen);
- Zusätzliche Umlenkung der Bandspannglieder in eine senkrecht zur ersten liegenden Richtung (zweiachiale Umlenkung).

In dieser Arbeit wird nur kurz auf die wesentlichsten Ergebnisse des Vorhabens eingegangen. Für weitergehende Details (z.B. Messstellen, Einzelwerte) sei auf den veröffentlichten Forschungsbericht verwiesen (Zilch und Weiher, 2006).

### 5.2.1 Versuchsaufbau, -ablauf und -programm

Abbildung 5.3 zeigt schematisch den Aufbau des verwendeten Versuchsstands im Längsschnitt und im Grundriss. Die Umlenkstelle mit definierten Radien in vertikaler und horizontaler Richtung liegt am Umlenksattel. Eine zusätzliche Umlenkung an den Widerlagern ist mit dem gegebenen Aufbau zwar möglich, wurde hier allerdings nicht weiter betrachtet. Die Anforderungen an Versuchsaufbau und -ablauf nach ETAG 013 (2002) bzw. DIBt-Richtlinie (1999) wurden eingehalten (siehe Kapitel 5.1).

Das Forschungsvorhaben umfasste neun Versuche mit großer Umlenkung. Mit jedem der drei Bandspanngliedssysteme wurde ein einaxialer Versuch mit natürlichem Anteil an Innerer Gleitung durchgeführt, ein einaxialer Versuch mit hohem Anteil an Innerer Gleitung und ein zweiaxialer Versuch mit natürlichem Anteil an Innerer Gleitung (Abbildung 3.3, Abbildung 5.3 und Tabelle 5.1). Die verschiedenen Versuchstypen werden wie folgt gekennzeichnet:

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

Die verwendeten Bandspanngliedssysteme werden wie folgt symbolisiert:

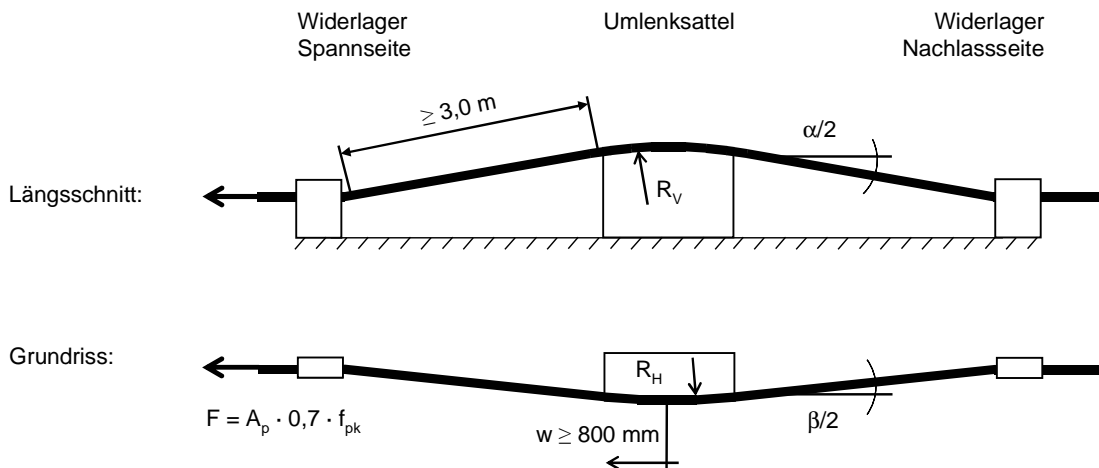
- SR: Innere PE-HD Hüllen mit Stegen verbunden / Runddrahtlitze
- LR: Innere PE-HD Hüllen Lose / Runddrahtlitze
- SK: Innere PE-HD Hüllen mit Stegen verbunden / Kompaktlitze

**Tabelle 5.1: Versuchsprogramm „Eigene Versuche“**

Bezeichnung	Umlenkradius in mm		Anteil Innerer Gleitung		verwendete Litze	
	vertikal	horizontal	natürlich	erzwungen	Runddraht	kompaktiert
A SR	4000	$\infty$	X		X	
A LR	4000	$\infty$	X		X	
A SK	4000	$\infty$	X			X
B SR	4000	$\infty$	X *		X	
B LR	4000	$\infty$	X *		X	
B SK	4000	$\infty$	X **			X
C SR	4000	10000	X		X	
C LR	4000	10000	X		X	
C SK	4000	10000	X			X

\*) Verwendung von Schmirgelgewebe für die Erzeugung hoher Anteile an Innerer Gleitung

\*\*\*) Verwendung eines Rosts zum Abstreifen der Mäntel



**Abbildung 5.3: Schematischer Aufbau eines zweiaxialen Umlenkversuchs (Längsschnitt und Grundriss)**

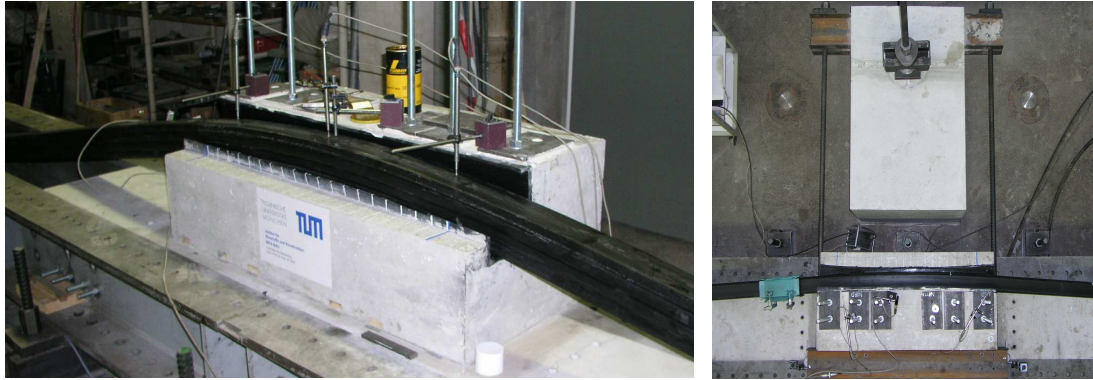


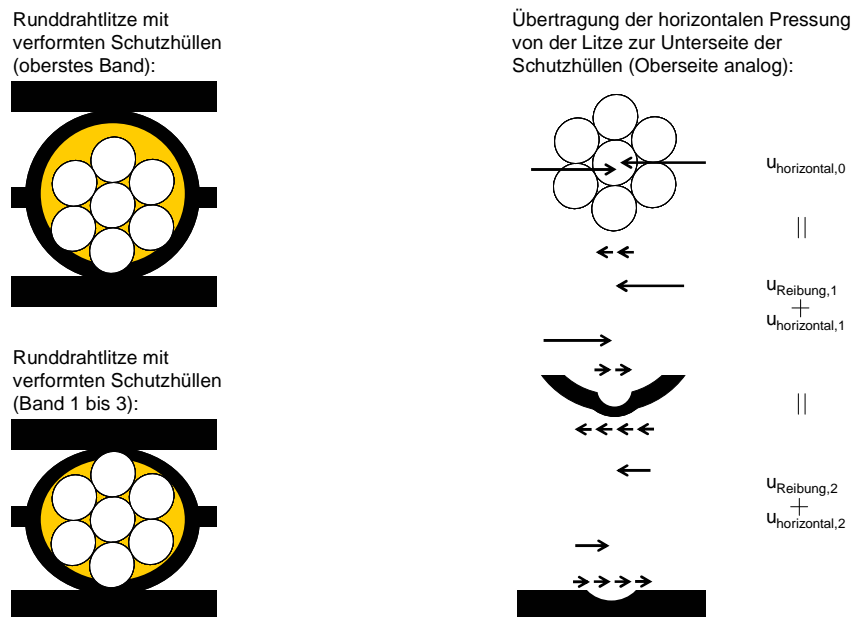
Abbildung 5.4: Umlenkversuch: Umlenksattel mit Spannglied beim einaxialen und zwei axialen Versuch (von links)

## 5.2.2 Ergebnisse der Eindrückmessungen

Maßgeblich für die Größe der bleibenden Eindrückungen des Spannstahls in die PE-HD Schutzhüllen ist die Umlenkbelastung zwischen Spannstahlelement und Kunststoff.

Während eines Umlenkversuchs werden die inneren Ummantelungen aufgrund des direkten Kontakts zum Stahl deutlich stärker beansprucht als die äußeren Ummantelungen. Bei den für die Spanngliedproben gewählten Abmessungen der Hüllen der Bandspannglieder sind sie der kritische Punkt. Im Gegensatz zu bisher durchgeführten Versuchen wurden in diesem Forschungsprojekt zahlreiche Querschnitte der Spannglieder in gleichen Abständen zueinander hinsichtlich maximaler Eindrückungen untersucht. Trotz streuender Messergebnisse ist eine klare Abhängigkeit der Eindrückungen von der Umlenklast erkennbar. Dabei ist das Verhalten der Kompaktlitze, aufgrund der abgeflachten Außendrähte, die schon bei einer geringen Eindrückung für eine relativ große Aufstandsfläche und somit für geringe Spitzendruckspannungen sorgen, günstiger als das der Runddrahtlitze. Mit zunehmender Umlenklast nimmt im Bereich  $p \in [0; 225 \text{ N/mm}]$  die maximale Eindrückung für beide Litzenarten überproportional zu.

Zilch und Weiher (2006) zeigten anhand von Eindrückungsmessungen an den Seitenflächen und den Kontaktflächen der PE-Hüllen bei vertikaler Umlenkung auch, dass für ein gegebenes Verhältnis von 2,5 zwischen horizontaler Umlenkung und vertikaler Umlenkung sich die zusätzliche horizontale Umlenkung bei Verwendung der Runddrahtlitze nicht auf die maximal zu erwartenden Eindrückungen auswirkt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der horizontale Umlenkkraftanteil jedes einzelnen Bandes über Verzahnung und Reibung in Querrichtung zunächst in die Schutzhüllen und schließlich in das Bauwerk eingeleitet wird (Abbildung 5.5). Diese Theorie wird dadurch bestätigt, dass die Verbindungsstege der Monolithenhüllen bei den Systemen SR und SK kaum deformiert waren.



**Abbildung 5.5: Übertragung der Horizontalbelastung über Verzahnung und Reibung von der Litze in den äußeren Mantel**

Die Ergebnisse der Eindrückungsmessungen sollen im Folgenden für bestimmte Gruppen getrennt betrachtet werden. Es werden dabei Versuche mit gleichen Charakteristiken zu Gruppen zusammengefasst, wodurch die Aussagekraft erhöht wird:

- G1: Versuche A SR, A LR, C SR und C LR (ein- und zweiachiale Versuche ohne Innere Gleitung mit Runddrahtlitze)
- G2: Versuch B SR
- G3: Versuch B LR
- G4: Versuch A SK
- G5: Versuch B SK
- G6: Versuch C SK

Die Messdaten der mit Runddrahtlitzen durchgeführten zweiachialen Versuche können mit den Daten der einachialen Versuche ohne Innere Gleitung zusammengelegt werden (Gruppe G1). Zilch und Weiher (2006) zeigten, dass sich die tatsächlich auftretenden Belastungen nur unwesentlich unterscheiden. Die Versuchsgruppe G1 repräsentiert den „Standardfall“ der Anwendung. Die Messergebnisse bzw. daraus resultierende Sekundärgrößen werden deshalb bei allen Beanspruchungsvariationen zum Vergleich mit angegeben. G2 und G3 beinhalten Versuche mit Innerer Gleitung mit Runddrahtlitze. Innere Gleitung erfolgte bei allen Versuchen durch Verdrehung der Litzen. Die drei Versuche mit Kompaktlitze werden separat behandelt (SK – A, B, C in G4 bis G6).

Die in der Praxis besonders interessante Größe ist die maximal auftretende Eindrückung bzw. die minimale, verbleibende Wanddicke nach dem Versuch. Aus diesem Grund wird im Folgenden zusätzlich zur Darstellung der Messwerte der 5 % - Quantilwert angegeben. Somit werden Diagramme, denen eine unterschiedliche Anzahl an Messwerten zu Grunde

liegt, besser vergleichbar. Eine Überprüfung der Datenbasis ergab eine annähernd normale Verteilung ausreichender Güte. Abbildung 5.6 bzw. Abbildung 10.6 bis Abbildung 10.9 (Anhang) zeigen in Diagrammen die Eindrückungen in den inneren Mantel, in den äußeren Mantel sowie die Gesamteindrückung der untersuchten Bandspannglieder in Abhängigkeit von der anliegenden Umlenklast für die Gruppen G1 bis G6. Die Eindrückungen werden entsprechend einem „Verlust“ an Dicke mit negativem Vorzeichen versehen.

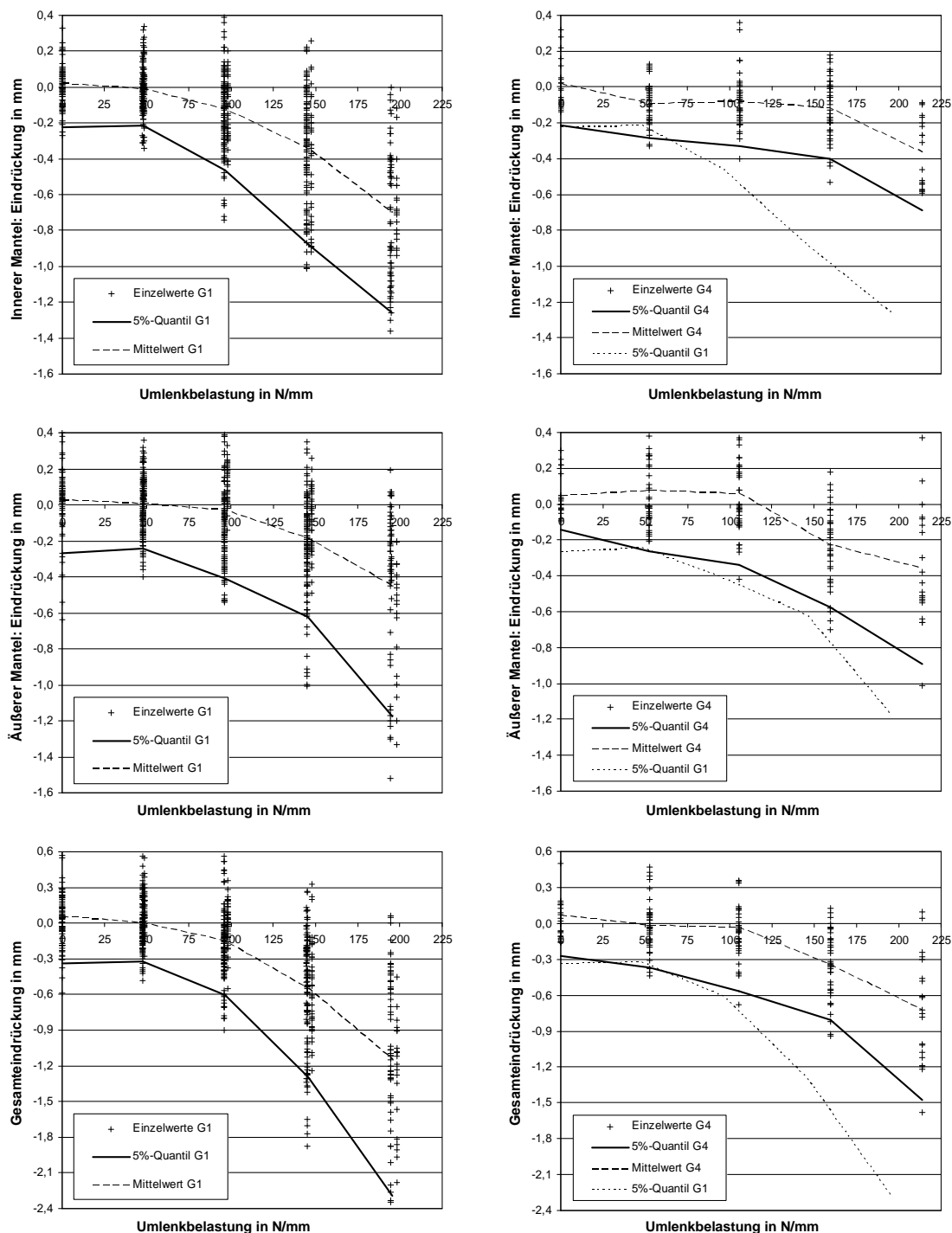


Abbildung 5.6: Eindrückung in Innen- (oben), Außenmantel (mittig) und Gesamt (unten) – Einzelwerte, Mittelwerte und 5%-Quantil - G1 linke Spalte (640 Messstellen), G4 rechte Spalte (160 Messstellen)

Die wesentlichsten Beobachtungen waren:

- Die Eindrückungen nehmen bei der Umlenkung von Bandspanngliedern mit Runddrahtlitze mit zunehmender Umlenklast zu (G1, Abbildung 5.6, linke Spalte bzw. Abbildung 10.6). Die Eindrückungskurven der jeweiligen Mittelwerte und der 5 % - Quantilwerte verlaufen rechtsgekrümmt bzw. konkav (Zeichen der Überproportionalität).
- Innere Gleitung führt zu einer zusätzlichen Reduzierung der Wanddicke durch Materialabrieb und -umlagerung (Abbildung 10.6, Abbildung 10.7). Dabei unterscheidet sich das System mit lose im Band eingelegten Monolitzen (G2, Abbildung 10.6) von dem System mit PE-HD Stegen zwischen den Monolitzenmänteln (G3, Abbildung 10.7). Trotz geringerer Innerer Gleitung (420 mm) tritt bei letztgenanntem System ein stärkerer Verschleiß auf.
- Bei einaxialer Umlenkung der kompaktierten Litze treten deutlich geringere Eindrückungen auf als bei Verwendung der Runddrahtlitze (G4, Abbildung 5.6, rechte Spalte bzw. Abbildung 10.8). Dies ist auf die günstigere Form der Litze zurückzuführen (siehe hierzu Kapitel 4.2). Innere Gleitung (im Versuch wurden insgesamt 210 mm erreicht) führt auch bei der Kompaktlitze zu höherem Verschleiß (G5, Abbildung 10.8).
- Die Umlenkung der Spannglieder mit Kompaktlitze in eine zweite Richtung führt bei hohen Umlenklasten zu höherem Verschleiß (G6, siehe Abbildung 10.9). Dies steht im Gegensatz zu den Versuchsergebnissen bei Verwendung der Runddrahtlitze, wobei das Eindrückverhalten immer noch deutlich günstiger als das der Runddrahtlitze ist.

### 5.3 Kleinmodellversuche, RWTH Aachen

An der RWTH Aachen wurden in den letzten Jahren zwei umfangreiche Versuchsprogramme zur Dauerhaftigkeit von PE-HD Schutzhüllen an Umlenkstellen mit einer Kleinmodellversuchsanlage durchgeführt (vgl. Abbildung 5.8). Es wurde experimentell der Einfluss der Umlenkbelastung, der Dicke der PE-HD Hülle, der Gleitverhältnisse, der Spannstahlform, der Beanspruchungsdauer sowie der Umgebungstemperatur auf das Eindrückungsverhalten untersucht. Dabei wurde die Umlenkbelastung mit einer Druckprüfmaschine auf einer Länge von 0,2 m auf die Versuchskörper bzw. Spanngliederteile aufgebracht (Hegger et al., 2002, 2005/1, 2005/2, 2006 und Neuser, 2003).

Für die vorliegende Arbeit werden ausgewählte Versuche von Hegger et al. an Bandspanngliedelementen unter gewöhnlichen Lasten herangezogen (Hegger et al., 2002 - im Folgenden als RWTH-VB-1 bezeichnet, und Hegger et al., 2005/2 - im Folgenden als RWTH-VB-2 bezeichnet). Sonderbeanspruchungen wie dynamische Belastungen, Temperaturen außerhalb des Intervalls  $20^{\circ}\text{C} \pm 5 \text{ K}$  oder sehr kurze Beanspruchungsdauer sowie Sondereinbauten (z.B. Zwickelverfüllung bei Bandspanngliedern, Randstützung)

wurden zwar in den Untersuchungen betrachtet. Sie werden in dieser Arbeit jedoch nicht berücksichtigt.

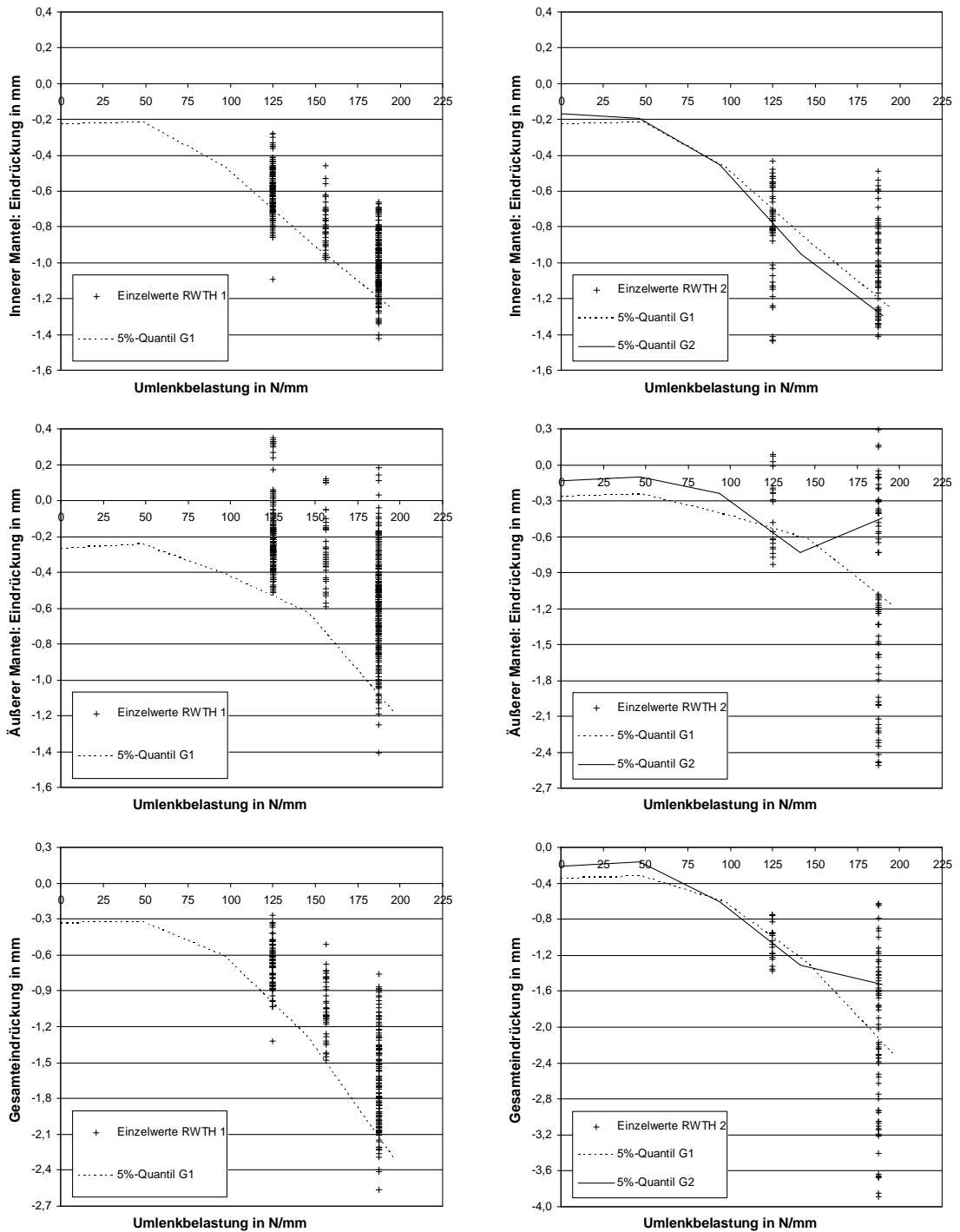
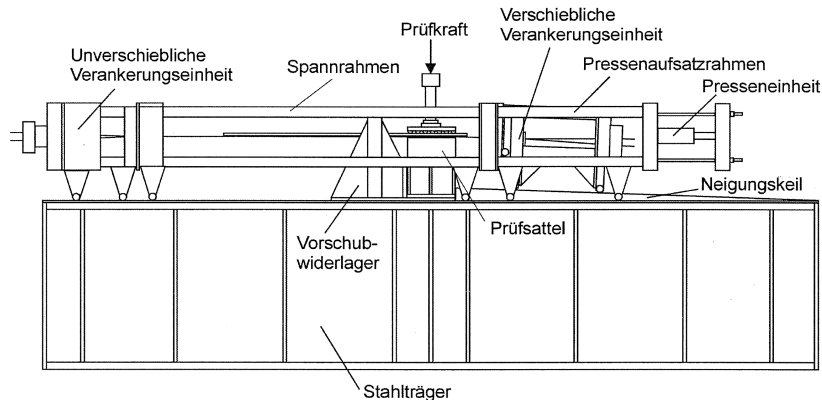


Abbildung 5.7: Eindrückung in Innen- (oben), Außenmantel (mittig) und Gesamt (unten) – Einzelwerte RWTH-1 (620 Messstellen, links), RWTH-2 (130 Messstellen, rechts) und 5%-Quantil G1 bzw. G2



**Abbildung 5.8: Schematische Darstellung der Kleinmodellversuchsanlage der RWTH Aachen (aus Neuser, 2003)**

Außer Bandspanngliedelementen wurden auch Monolitzen und ein Spannglied mit Hüllrohr von Hegger untersucht. Auch deren Ergebnisse werden hier nicht aufgezeigt, da folgende Probleme bei ihrer Prüfung vorlagen:

- Monolitzen (mit einfachem Mantel oder doppelt extrudierter Umhüllung) wurden nicht einbetoniert geprüft. Damit entspricht die Belastung nicht der Realität, in der der „Wanneneffekt“ zu geringeren Eindrückungen führt (siehe Kapitel 4.1.8).
- Die Untersuchung an einem Spannglied mit Einzeldrähten im Hüllrohr wird ebenfalls als nicht wirklichkeitsnah angesehen, da die Umlenkraft nicht an jedem Spannstahelement einzeln, sondern konzentriert mit einem Stempel auf die oberste Drahtlage, aufgebracht wurde. Zudem lag das Hüllrohr in einer deutlich größeren Halbschale. Durch die Druckbelastung der Drähte wurde das Hüllrohr so verformt, dass es sich an die Form der Halbschale anpasste.

Im Folgenden werden die für die Arbeit relevanten Randbedingungen, Beobachtungen und Ergebnisse aus beiden Vorhaben zusammengefasst. Es werden nur die Untersuchungsergebnisse für Bandspannglieder verwendet, da hier eine sehr wirklichkeitsnahe Beanspruchung aufgebracht wurde. Wie auch Zilch und Weiher (2006) stellten Hegger et al. einen signifikanten Zusammenhang zwischen Umlenklast und Eindrückung fest. Des Weiteren messen sie für die Spannglieder mit Kompaktlitze bei vergleichbaren Beanspruchungen ebenfalls größere Restwanddicken als bei Verwendung der Runddrahtlitze. In RWTH-VB-1 wurde festgestellt, dass bei Innerer Gleitung die Litzen nach einer bestimmten Verschlusslänge durch das PE-HD „walken“. D.h. die Litzen gleiten in dem schraubenartigen PE-HD Bett bis sehr hohe Rückstellkräfte auftreten, die dieses „Zurückwalken“ erzeugen.

Hegger et al. schließen das Auftreten dieses Effekts an Bauwerken nicht aus. Ein solches Verhalten konnte jedoch in den realitätsnäheren Großmodellversuchen an der TU München von Zilch und Weiher (2006) nicht beobachtet werden. Das „Zurückwalken“ stellt eine hohe, auf die Versuchsanordnung mit sehr kurzen Spanngliedlängen zurückzuführende, Belastung dar, deren Auftreten am Bauwerk nicht erwartet werden kann. Die detaillierten Ergebnisse



der Eindrückungsmessungen abhängig von der anliegenden Drucklast können dem Anhang entnommen werden (Kapitel 10.6).

Bandspannglieder mit Runddrahtlitzen:

- RWTH-1: Die in dieser Serie zusammengefassten Versuche entstammen den Testreihen „A“ und „C“ aus RWTH-VB-1 sowie den Testreihen „B“ und Testreihe „D“ aus RWTH-VB-2. Die Bänder wurden mit Drucklasten zwischen 125 und 188 N/mm ohne Gleitvorgänge belastet. Die Belastungszeit lag zwischen 0,3 und 2,7 Tagen, zumeist ca. einen Tag. Die Umgebungstemperatur wird mit 20°C angegeben.
- RWTH-2: Diese Serie umfasst diejenigen Versuche, in denen Reibvorgänge (Innere Gleitung von jeweils 800 mm) in die Belastung aufgenommen wurden. Die Bänder wurden mit Druckbelastungen zwischen 125 und 188 N/mm zwischen 0,7 und 0,8 Tagen belastet, die Umgebungstemperatur betrug 20°C. Die Versuchsergebnisse sind RWTH-VB-1 entnommen und entstammen der Testreihe „A“ und „C“.

Bandspannglieder mit Kompaktlitzen:

- RWTH-3: Die in dieser Serie zusammengefassten Versuche entstammen der Testreihe „Cl“ aus RWTH-VB-1. Die Bänder mit Kompaktlitzen wurden mit Umlenkbelastungen zwischen 188 und 206 N/mm ohne Gleitvorgänge belastet. Die Belastungszeit lag bei etwa 0,8 Tagen. Die Umgebungstemperatur betrug 20°C.
- RWTH-4: Diese Serie umfasst nur einen Versuch, in dem Reibvorgänge (Innere Gleitung von 800 mm) in die Belastung aufgenommen wurde. Das Spannglied wurde mit einer Umlenkbelastung von 206 N/mm etwa 0,8 Tage belastet; die Umgebungstemperatur betrug 20°C. Die Versuchsergebnisse sind ebenfalls RWTH-VB-1 entnommen und entstammen der Testreihe „Cl“.

Die bei den zuvor genannten Versuchen gemessenen Eindrückungen sind im Anhang (Abbildung 10.10 und Abbildung 10.11) zusammen mit den 5 % - Quantilwertkurven der eigenen Versuche dargestellt. Vor allem für Versuche mit Runddrahtlitzen ohne Innere Gleitung sind die Ergebnisse der Kleinmodellversuche sehr gut mit den Ergebnissen der Großversuche vergleichbar (vgl. Abbildung 5.7, linke Spalte bzw. Abbildung 10.10). Die durch den Versuchsabau bedingte nicht repräsentative Belastung bei Innerer Gleitung („Zurückwalken“) macht sich insofern bei den Ergebnissen bemerkbar, als dass unverhältnismäßig hohe Eindrückungen auftreten, die nicht mit den Ergebnissen der Großversuche vergleichbar sind (vgl. Abbildung 5.7, rechte Spalte bzw. Abbildung 10.10).

## **5.4 Umlenkversuche, Service d'Etudes des Structures (SES)**

Fouré und Hoang (1993) führten vier Umlenkversuche mit einem Spannglied durch, dessen Spannstaht (insgesamt 19 Litzen à 140 mm<sup>2</sup>) durch ein Hüllrohr geschützt war. Der Außendurchmesser des HD-PE Hüllrohrs betrug 110 mm. Der Nennwert der

Ausgangswanddicke betrug 6,3 mm. Die Konfiguration der Versuche entsprach weitestgehend der in ETAG 013 (2002) empfohlenen (siehe Kapitel 5.1). Abweichend von den Vorgaben der Richtlinie wurden die Versuche hier nach Standzeiten von einer, zwei, vier und acht Wochen beendet, um schließlich die Restwanddickemessungen durchzuführen. Zudem wurden die Spannglieder nicht über einen Sattel gezogen, so dass keine Reibungseffekte infolge Innerer Gleitung bei den vier Versuchen auftraten.

Für die Beurteilung der Eindrückungsmessungen ist die Kenntnis der Beanspruchung erforderlich. Nach dem Vereinfachten Verfahren (vgl. Kapitel 4.1, Gleichung 4.22) wird für das vorliegende Spannglied der maximale Stapelfaktor zu  $k_{max} = 5,9$  ermittelt. Somit ergibt sich nach Gleichung 4.9 eine maximale Umlenkbelastung unter der am höchsten beanspruchten Litze von:

$$p_{max} = \frac{P}{N \cdot R} \cdot k_{max} = \frac{P}{19 \cdot 3000mm} \cdot 5,9; \quad (5.1)$$

Der Wert des Stapelfaktors liegt deutlich über dem damals von Fouré und Hoang (1993) abgeschätzten maximalen Stapelfaktor von  $k_{max} = 4$ . Durch einfaches Abzählen der vertikal höchstens übereinander liegenden Litzen wurde dieser Wert ermittelt. Sie definierten den maximalen Stapelfaktor „ $n_M$ “ wie folgt (Fouré und Hoang, 1993, S. 102f):

„  $n_M$ : maximum number of strands pushing on the same strand in contact with the sheath“

Fouré und Hoang (1993) geben keinen Wert für die Spannstahlspannung während der Standzeit an. Somit kann die Zugkraft P des gesamten Spannglieds nicht ermittelt werden. Schätzt man einen Wert von  $P = 19 \cdot 140 \text{ mm}^2 \cdot 0,7 \cdot 1670 \text{ N/mm}^2 = 3110 \cdot 10^3 \text{ N}$  ab, so ergibt sich ein hoher Wert für die Umlenkbelastung nach Gleichung 4.9 von

$$p_{max} = \frac{P}{N \cdot R} \cdot k_{max} = \frac{3110 \cdot 10^3 \text{ N}}{19 \cdot 3000mm} \cdot 5,9 = 319 \text{ N/mm}; \quad (5.2)$$

Der maximale Messwert der Eindrückung in das PE-HD Hüllrohr, die als Differenz von Referenzwert der Ausgangswanddicke und Restwanddicke errechnet wird, betrug laut Fouré und Hoang (1993) nach acht Wochen 0,92 mm. Als Referenzwerte wurden die Wanddicken der Hüllrohre an der den Litzen abgewandten Seite gewählt. Wie Fouré und Hoang (1993) auch anmerkten, ist die Wahl dieser Referenzwerte problematisch. Für ein PE-Rohr dieser Abmessungen kann die Wanddicke über den Querschnitt bis zu 0,3 mm zwischen Minimalwert und Maximalwert schwanken. Aufgrund des Herstellvorgangs (Extrusion eines linienförmigen Produkts) ist die Wahl von Referenzmessstellen am gleichen Querschnittsort exakter, jedoch in Längsrichtung bis zum unbelasteten Bereich verschoben. Die einzelnen Messwerte dieser Untersuchung können der grafischen Dokumentation in Abbildung 5.9 entnommen werden. In den Randbereichen des Umlenksattels nehmen die Eindrückungen fast linear bis zum Erreichen eines „Plateaus“ mit annähernd konstanten Eindrückungen zu.

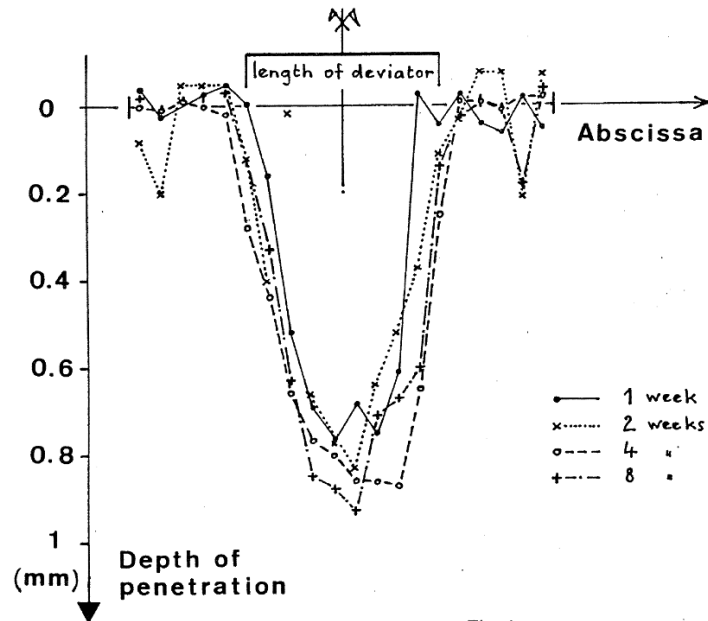


Fig. 4

Abbildung 5.9: Eindrückungen in PE-HD Hüllrohr am Umlenksattel und auf freier Länge (SES) (Fouré und Hoang, 1993)

Dieser Randbereich stellt die Übergangszone vom vollständig unbelasteten Spanngliedhüllrohr auf freier Länge zum Umlenkbereich, in dem die volle Umlenkbelastung anliegt. Durch die Eindrückung des Spannstahls am Umlenkelement verschieben sich die Abhebepunkte in Richtung Sattelscheitel. Zilch und Weiher (2006) stellten bei ihren Versuchen den gleichen Effekt fest. Auffällig an den Ergebnissen der Eindrückungsmessung ist, dass bei allen vier Versuchen annähernd gleich große Eindrückungen gemessen wurden. Dies überrascht deshalb, weil normalerweise nicht von identischen Anordnungen der Litzen im Hüllrohr und folglich nicht von gleichgroßen, maximalen Umlenkbelastungen auf die Polyethylenschutzhülle ausgegangen werden kann. Aus der Literaturquelle geht nicht hervor, ob die Litzen vor jedem Versuch bewusst in eine vorbestimmte Anordnung gebracht wurden, was den Sachverhalt klären würde.

Zur Beurteilung des Einflusses der Belastungszeit werden in der vorliegenden Arbeit lediglich die Messpunkte im Scheitelbereich herangezogen (jeweils drei Messquerschnitte zu beiden Seiten des Umlenksattelscheitels). Die Mittelwerte der, aus Abbildung 5.9 ermittelten, Einzelwerte betragen für die vier Versuche 0,66 mm, 0,67 mm, 0,79 mm und 0,77 mm für die Belastungsdauern eine, zwei, vier und acht Wochen. Obwohl die Mittelwerte für die letzten zwei Versuche etwas höher sind, geht der Autor nicht davon aus, dass diese Zunahme eine zeitabhängige Verformungszunahme entsprechender Größe ist.

Nach den Untersuchungen von Puttendörfer (2006) sowie Zilch und Weiher (2006) klingt das Eindrückverhalten bei konstanter Temperatur bereits nach sehr kurzer Belastungszeit soweit ab, dass die Verformungszunahmen, insbesondere in den betrachteten Zeiträumen der Versuche von Fouré und Hoang (1993) nur noch sehr klein sein können. Neuser (2003) hat diese Verformungszunahme mit eigenen Kleinversuchen quantifiziert. Nach einer Woche betragen die Verformungen bereits etwa 98 % der Verformung nach vier Wochen, nach zwei

Wochen sind dies ca. 99 %. Die Unterschiede der Eindrückungsmessungen können somit kaum durch die zeitabhängige Zunahme der Verformung ausreichend erklärt werden. Die deutlich größeren Eindrückungen der letzten beiden Versuchszeitpunkte können andere Ursachen haben, wie etwa:

- Schwankungen der Wanddicke des Hüllrohrs;
- Messungenauigkeit;
- unterschiedlich große Maximalbelastung aufgrund etwas differierender geometrischer Spannstananordnung im Hüllrohr;
- Kurzzeitiges Auftreten von höheren Temperaturen während der langen Standzeit.

Die Messergebnisse sind ebenfalls in Abbildung 10.15 (Anhang) dargestellt. Darin wird nicht zwischen den unterschiedlichen Belastungsdauern unterschieden.

## 5.5 Ausbau eines externen Spannglieds, ETH Zürich

Vogel und Kott (2001) führten am Institut für Baustatik und Konstruktion der ETH Zürich eine Untersuchung der externen Spannglieder des Viadotto Preonzo-Claro durch. Dieses Bauwerk wurde laut Vogel und Heer (1989) als Pilotprojekt für die Anwendung von externer Vorspannung in den Jahren 1987 bis 1989 errichtet. Die untersuchten Spannglieder waren somit etwa 12 Jahre im Einsatz. Die Spannglieder wurden am Bauwerk mit einem Radius von 5 m umgelenkt. Innerhalb der Untersuchung wurden Spannglieder ausgewechselt und an den Umlenkstellen auf Eindrückungen hin überprüft. Die Spannglieder bestanden aus 78 Drähten mit einem Durchmesser von je 7 mm, die in einem Hüllrohr mit einem Außendurchmesser von 90 mm und einer Nennwanddicke von 5,4 mm angeordnet waren.

Vogel und Kott (2001) weisen, basierend auf Ergebnissen aus Vorversuchen an der TH Karlsruhe und der Dissertation von Örtle (1988), darauf hin, dass die Einleitung der Umlenkkräfte der sich gegenseitig abstützenden Spannstahtdrähte durch die Ausbildung eines Gewölbes nicht gleichmäßig (gleich großer Stapelfaktor aller anliegenden Drähte) oder von außen nach innen zunehmend (zunehmender Stapelfaktor analog zur hydrostatischen Druckverteilung) erfolgen muss. Hohe Werte für die anliegende Umlenkbelastung können auch an den Flanken des Spannglieds auftreten. Örtle (1988) hatte für ein Spannglied mit 60 Drähten und einem PE-HD Hüllrohr mit einem Außendurchmesser von 81 mm bei einer Rohrwanddicke von 3 mm grafisch einen maximalen Stapelfaktor von 12,3 ermittelt. Wohl darauf zurückgreifend, gaben Vogel und Kott (2001) trotz unterschiedlicher Ausgangskonfiguration für die beim Viadotto Preonzo-Claro eingesetzten Spannglieder als Stapelfaktor den Wert 12 an. Die maximale Umlenkbelastung  $p_{\max}$  bei einer Spannkraft von 3180 kN ermittelten sie schließlich gemäß Gleichung 4.9 zu:

$$p_{\max} = \frac{P}{N \cdot R} \cdot k_{\max} = \frac{3180 \cdot 10^3 \text{ N}}{78 \cdot 5000 \text{ mm}} \cdot 12 = 98 \text{ N / mm ;} \quad (5.3)$$

Dabei gingen sie vereinfachend davon aus, dass die Umlenkbelastung am anliegenden Einzeldraht über eine dem Drahtdurchmesser entsprechende Aufstandsweite in das Hüllrohr eingetragen wird. Die Überprüfung des maximalen Stapelfaktors  $k_{max}$  mittels des Vereinfachten Verfahrens nach Gleichung 4.22 führt für das vorliegende Spannglied zu einem Wert von  $k_{max} = 13,8$ . Somit ergibt sich mit Gleichung 4.9 eine korrigierte, größere maximale Umlenkbelastung  $p_{max}$  von

$$p_{max} = \frac{P}{N \cdot R} \cdot k_{max} = \frac{3180 \cdot 10^3 \text{ N}}{78 \cdot 5000 \text{ mm}} \cdot 13,8 = 112 \text{ N/mm}; \quad (5.4)$$

Die verbleibende Wanddicke des Hüllrohrs wurde für vier der Umlenkstellen und für eine Stelle in freier Länge jeweils fünf Mal im Querschnitt und fünfzehn Mal in Längsrichtung ermittelt (Abbildung 5.10). Die Messstellen in Querrichtung S1 bis S4 wurden stets in einem Winkelabstand von  $90^\circ$  umlaufend angeordnet; Messstelle V5 wurde variabel gewählt als die Stelle mit der maximalen Eindrückung. Die minimale gemessene Restwanddicke betrug 4,72 mm. Als Referenzwert für die Ausgangswanddicke geben Vogel und Kott (2001) den Mittelwert der Ausgangswanddicke, gemessen beim Einbau, an - er betrug 5,50 mm. Die maximale Eindrückung ergibt sich somit zu  $5,50 \text{ mm} - 4,72 \text{ mm} = 0,78 \text{ mm}$ . Abbildung 10.14 zeigt u.a. die aus der Differenz zwischen Referenzwert und gemessener Wanddicke ermittelten maximalen Eindrückungen an den vier Umlenkstellen („Versuche ETHZ“). Die beim Anspannvorgang herrschenden Gleitverhältnisse sind unbekannt.

Über die in Kapitel 4.2 zur Spannstahlquerschnittsform „Kreis“ angeführten mathematischen Beziehungen lässt sich die zugehörige Aufstandsweite  $b$  und hiermit schließlich die dort permanent anliegende, konstante Druckspannung  $\sigma_{c0}$  ermitteln.

$$t' = \frac{t}{d_{Umkreis}/2} = \frac{0,78 \text{ mm}}{7 \text{ mm}/2} = 0,223 = 22,3 \%; \quad (5.5)$$

$$b'(t') = \sqrt{t' \cdot (2 - t')} = \sqrt{0,223 \cdot (2 - 0,223)} = 0,63 = 63 \%; \quad (5.6)$$

$$b = b' \cdot d_{Umkreis} = 0,63 \cdot 7 \text{ mm} = 4,4 \text{ mm}; \quad (5.7)$$

$$\sigma_{c0} = \frac{p_{max}}{b} = \frac{112 \text{ N/mm}}{4,4 \text{ mm}} = 25,5 \text{ N/mm}^2; \quad (5.8)$$

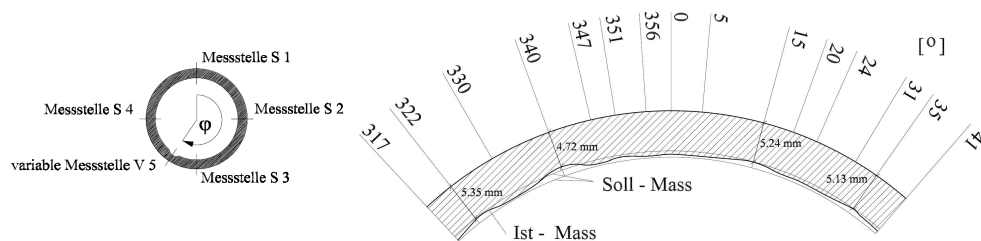


Abbildung 5.10: Messstellen Wanddicken im Querschnitt (links) und in Längsrichtung (rechts), (Vogel und Kott, 2001)

# 6 Modelle für das Eindrückverhalten von Spannstahl in PE-HD

Für Bandspannglieder liegen aus den eigenen Versuchen umfangreiche Ergebnisse mit genauer Kenntnis der Randbedingungen vor. Hieraus wird ein statistisches Modell erarbeitet, mit dessen Hilfe die zu erwartenden Eindrückungen bei bekannter Belastung vorhergesagt werden können. Für die Durchführung der statistischen Analyse wird auf das SPSS Programmpaket zurückgegriffen. Grundlagen zur Regressionsrechnung und zur Anwendung von SPSS können Backhaus, Erichson und Plinke (2003), Draper und Smith (1998), Janssen und Laatz (2005) sowie Levesque (2005) entnommen werden. Für andere Spanngliedtypen (z.B. Spannstahl im Hüllrohr) liegen vergleichbare Versuchsergebnisse weder im Umfang noch in der Qualität vor. Es soll hierfür ein mechanisches Modell entwickelt werden, mit dem das Eindrückverhalten bei Systemen mit einlagiger PE-HD Schutzhülle mit einem ersten Ansatz modelliert werden.

## 6.1 Regressionsmodell für Bandspannglieder

Mit Hilfe des Verfahrens der Multiplen Linearen Regressionsanalyse wird im Folgenden ein Ansatz zur Vorhersage der zu erwartenden Eindrückung von Litzen in die PE-HD Ummantelungen von Bandspanngliedern bei  $20\text{ °C} \pm 5\text{ K}$  ermittelt. Mit diesem Verfahren ist es möglich die jeweilige Wirkung und Ausprägung von Einflussfaktoren auf die abhängige Variable „Eindrückung“ zu isolieren. Dabei wird der Einfluss von folgenden Parametern (Merkmale  $X_i$ ,  $i = 1 \dots 4$ ) auf die abhängige Variable (Merkmal  $Y$ ) quantifiziert:

- Ausgangswanddicke (Merkmal  $X_1$ )
- Umlenkbelastung (Merkmal  $X_2$ )
- Gleitweg mit Innerer Gleitung (Merkmal  $X_3$ )
- Litzenform (Runddrahtlitze und Kompaktlitze) (Merkmal  $X_4$ )

Die Gültigkeit des Modells kann sich nur auf den von den Versuchen abgedeckten Bereich der aufgetragenen Belastungen und der verwendeten Probekörper erstrecken. Der Parameter Belastungsdauer ist nicht variabel. Die Versuchsdaten wurden nach einer Belastungsdauer von drei Wochen gewonnen.

### 6.1.1 Datenbasis

Als Datenbasis dienen die bei den eigenen Versuchen (Zilch und Weiher, 2006 bzw. Kapitel 5.2) ermittelten Messwerte für die Eindrückungen in die innere und äußere Ummantelung der Spannglieder. Erstmals wurden dabei die Eindrückungen an regelmäßig angeordneten

Messquerschnitten ermittelt. Bisher war es üblich, sich auf das Finden des einzelnen Extremwerts zu beschränken. Darüber hinaus wurden hier auch Spanngliedstücke vermessen, die während der Versuche beim Anspannen und Verschieben nur kurzzeitig einer Umlenkbelastung unterlagen. Bei äußerer Gleitung werden die PE-HD Mäntel mit dem Spannstaht über die Umlenkelemente bewegt, so dass manche Bereiche nach Abschluss des Überziehvorgangs während der Standzeit nicht mehr einer Umlenkbelastung ausgesetzt sind. Bei vollständiger Innerer Gleitung gibt es diese nur kurzzeitig belasteten Stellen nicht. Abbildung 6.1 und Abbildung 6.2 zeigen die gewählten Messstellen sowohl in Längsrichtung als auch in Querrichtung. Die Eindrückungsmessungen wurden mittig am Ort des Aufliegens eines Außendrahtes der Litzen mit einer Bügelmessschraube durchgeführt.

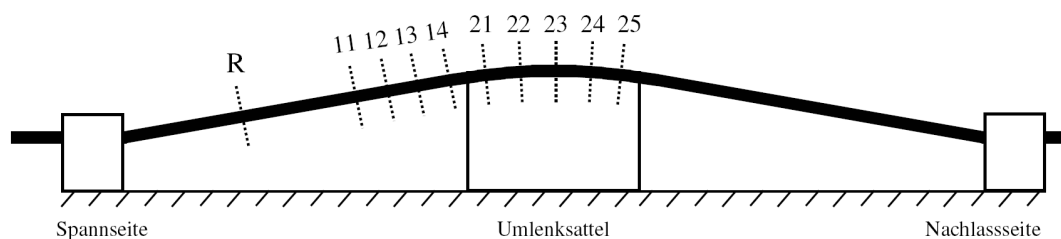


Abbildung 6.1: Messstellen in Längsrichtung (Zilch und Weiher, 2006)

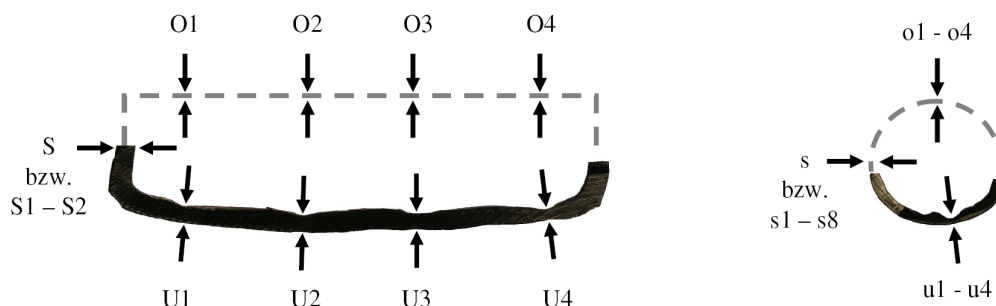


Abbildung 6.2: Messstellen in Querrichtung (Zilch und Weiher, 2006)

## 6.1.2 Moderatorenanalyse mit Multipler Linearer Regression

Der Multiplen Linearen Regression bzw. Mehrfachregression bedient man sich um ein Merkmal  $Y$  aus korrelierten Merkmalen  $X_i$  vorherzusagen. Mit diesem statistischen Auswertungsverfahren wird die Bedeutung der einzelnen unabhängigen Variablen  $X_i$  auf die Ausprägung der abhängigen Variable  $Y$  (hier Restwandstärke) bestimmt und eine lineare Gleichung für  $Y$  gefunden. Die Versuchsergebnisse der eigenen Versuche zeigen deutlich, dass zwischen den unabhängigen Variablen und der abhängigen Variable nicht immer lineare Zusammenhänge bestehen, was aber für eine Regressionsanalyse erforderlich ist. Durch eine Transformation der unabhängigen Variablen (z.B. Umlenkbelastung) können nichtlineare Effekte linearisiert werden. Diese Transformation führt dazu, dass die Zusammenhänge nun zwischen den transformierten unabhängigen Variablen und der abhängigen Variable im Wesen weiterhin linear bleiben (engl.: „Intrinsically Linear Model“). Ferner treten Interaktionseffekte zwischen den Prädiktoren auf. Die Effekte von Gleitweg mit Innerer

Gleitung (Merkmal  $X_3$ ) und Litzenform (Merkmal  $X_4$ ) auf die Restwanddicke (Merkmal  $Y$ ) werden jeweils von der anliegenden Umlenkbelastung (Merkmal  $X_2$ ) moderiert. Dabei handelt es sich im ersten Fall um eine bilineare Interaktion von zwei metrischen Prädiktoren. Im zweiten Fall liegt mit der Litzenform ein diskreter (bzw. kategorialer) Faktor vor.

#### **Ausgangswanddicke $X_1$ :**

Die Ausgangswanddicke ist zu berücksichtigen, da sie vor allem für die Querdruckbehinderung verantwortlich ist. Bei sehr dünnen Ausgangswanddicken kann sich folglich ein geringerer absoluter Wandstärkeverlust bei sonst gleich bleibenden Bedingungen einstellen.  $X_1$  ist intervallskaliert.

$$\hat{Y}_1 = \gamma_{1,0} + \gamma_{1,1} \cdot X_1; \quad (6.1)$$

#### **Umlenkbelastung $X_2$ :**

Es wird für Runddrahtlitze und Kompaktlitze vereinfacht ein Kreisquerschnitt angenommen. Geht man des Weiteren von einem vollplastischen Medium mit konstanter Spannung über die horizontale Aufstandsweite aus, so verhält sich die Eindrückung quadratisch zur Umlenkbelastung. In die statistische Analyse geht die transformierte Größe  $X_2^T = X_2^2$  als unabhängiges Merkmal als auch  $X_2$  ein.  $X_2$  und folglich auch  $X_2^T$  sind intervallskaliert.

$$\hat{Y}_2 = \gamma_{2,0} + \gamma_{2,1} \cdot X_2 + \gamma_{2,2} \cdot X_2^2; \quad (6.2)$$

#### **Gleitweg mit Innerer Gleitung $X_3$ :**

Die Messergebnisse von Zilch und Weiher (2006) weisen darauf hin, dass die zusätzlichen Eindrückungen durch Abriebvorgänge bei Innerer Gleitung nicht nur abhängig von der Länge der Reibungsvorgänge, sondern auch abhängig von der Höhe der Umlenkbelastung sind,  $X_3$  also von  $X_2$  abhängt (korreliert ist). Es wird ein linearer Zusammenhang angenommen. Die transformierte Größe  $X_3^T = X_3 \cdot X_2$  geht als Merkmal in die Regressionsanalyse ein.  $X_3$  und  $X_2$  sind jeweils intervallskaliert und somit auch  $X_3^T$ .

$$\hat{Y}_3 = \gamma_{3,0} + \gamma_{3,1} \cdot X_3 + \gamma_{3,2} \cdot X_2 + \gamma_{3,3} \cdot X_3 \cdot X_2; \quad (6.3)$$

Hierbei handelt es sich um ein so genanntes bilineares Modell, da die Koeffizienten der bedingten linearen Regression wiederum vom Moderator linear abhängen.

#### **Litzenform $X_4$ :**

Bei der vorliegenden Untersuchung werden zwei Litzenformen getestet. Zweckmäßigerweise wählt man für die Runddrahtlitze die



Ausprägung 0 und für die Kompaktlitze die Ausprägung 1, um den Unterschied zwischen den beiden Querschnittsformen quantifizieren zu können („Dummy-Codierung“). Diese Vorgehensweise führt zu einer nominal skalierten Größe (z.B. auch Postleitzahlen, Geschlecht). Als intervallskalierte Größe könnte man alternativ ein Maß für die Unregelmäßigkeit der Litzenoberfläche wählen: z.B. der Außendrahtradius. Bei der Kompaktlitze wäre dieser aufgrund der Vergleichbarkeit mit einem Vollkreis gleich dem Umkreisradius der Litze. Die Wirkung von  $X_4$  auf die Restwanddicke ist druckbelastungsabhängig (vergleiche Messergebnisse). Diese offensichtliche Interaktion kann durch Transformation von  $X_4$  durch die Multiplikation mit  $X_2$  erfasst werden. Die transformierte Größe  $X_4^T = X_4 \cdot X_2$  geht als Merkmal in die Regressionsanalyse ein.  $X_4$  und  $X_2$  sind jeweils intervallskaliert und somit auch  $X_4^T$ .

$$\hat{Y}_4 = \gamma_{4,0} + \gamma_{4,1} \cdot X_4 + \gamma_{4,2} \cdot X_2 + \gamma_{4,3} \cdot X_4 \cdot X_2; \quad (6.4)$$

Auch hier liegt ein bilineares Modell vor.

Weiber (2005) zeigte anhand der Messergebnisse der ersten fünf durchgeführten Versuche, dass der Gleitweg mit Äußerer Gleitung nicht mit der Eindrückung bzw. Restwanddicke korreliert ist. Dies bedeutet, dass Äußere Gleitung keinen Einfluss auf die Eindrückungen von Spannstahlilitzen in PE-HD Ummantelungen hat. Mit zunehmender Belastungsdauer vergrößert sich aufgrund von Kriechvorgängen die Eindrückung. Allerdings ist diese zeitabhängige Verformungszunahme, wie Hegger et al. (2005/1) und Zilch und Weiber (2006) feststellten, bei gleich bleibenden Temperaturen bereits nach wenigen Tagen der Belastung nur noch sehr klein. Puttendörfer (2006) zeigte mit seinen Kriechversuchen, dass die zeitabhängigen Verformungen weniger druckbelastungsabhängig als vielmehr spannungsabhängig sind (Abbildung 4.26). Aus diesem Grund sind die zeitabhängigen Verformungen trotz unterschiedlicher Druckbelastung etwa vergleichbar. Für das statistische Modell werden die Messdaten von langfristig belasteten Bereichen berücksichtigt. Somit liegen nur Messdaten der Belastungsdauer von 21 Tagen zugrunde.

Man könnte die Belastungsdauer in die Analyse integrieren, sofern die Datenbasis Messdaten mit verschiedenen Belastungsdauern aufweisen würde, wie etwa die Umlenkversuche des Service d'Etudes des Structures (Kapitel 5.4). Eine normierte, relative Kriechverformung  $\beta(T \rightarrow \infty) = 1$  könnte gemäß Gleichung 6.5 formuliert werden. Die relative Kriechverformung  $\beta(T)$  und die Verformungszunahme  $\beta'(T)$  sind in Abbildung 6.3 dargestellt. Selbst bei dem gewählten logarithmischen Maßstab für die Zeitachse fällt die Kurve der Verformungszunahme bei zunehmender Belastungsdauer rasch ab.

$$\beta(T) = \sqrt{\frac{T}{1+T}}; \quad (6.5)$$

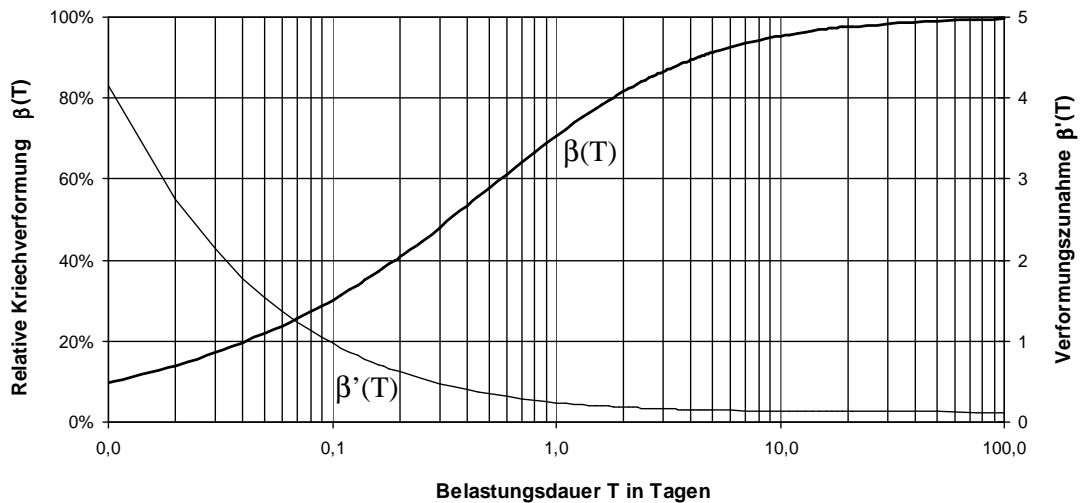


Abbildung 6.3: Transformation Belastungsdauer: Relative Kriechverformung  $\beta(T)$  und Verformungszunahme  $\beta'(T)$

### 6.1.3 Modellgleichungen für Restwandstärke

Im Folgenden werden jeweils Modellgleichungen für die innere und äußere Ummantelung von Bandspanngliedern ermittelt. Die Restdicke der beiden PE-Lagen kann als Summe der beiden Einzelrestwanddicken berechnet werden. Für Merkmal Y (z.B. Dicke der inneren PE-HD Ummantelung) ergibt sich unter Berücksichtigung der oben aufgeführten Annahmen folgende Modellgleichung in allgemeiner Notation:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_{2,1} X_2 + \beta_{2,2} X_2^2 + \beta_{3,1} X_3 + \beta_{3,2} X_3 X_2 + \beta_{4,1} X_4 + \beta_{4,2} X_4 X_2 + \varepsilon; \quad (6.6)$$

mit

- Y Ausprägung des abhängigen Merkmals
- $X_i^{(T)}$  (Transformierte) unabhängige Merkmale ( $i = 0, 1, 2, 3, 4$ )
- $\varepsilon$  Störgröße
- $\beta_{i(j)}$  Unbekannte Parameter:

$$\beta_0 = \sum_{i=1}^4 \gamma_{i,0};$$

$$\beta_1 = \gamma_{1,1};$$

$$\beta_{2,1} = \gamma_{1,1}; \quad \beta_{2,1} = \gamma_{2,1} + \gamma_{3,2} + \gamma_{4,2}; \quad \beta_{2,2} = \gamma_{2,2};$$

$$\beta_{3,1} = \gamma_{3,1}; \quad \beta_{3,2} = \gamma_{3,3};$$

$$\beta_{4,1} = \gamma_{4,1}; \quad \beta_{4,2} = \gamma_{4,3};$$

Stellt sich heraus, dass bestimmte Merkmale keine Vorhersagekraft auf die abhängige Größe haben, so wird in einer zweiten Analyse auf diese Merkmale verzichtet. Nachstehende Ergebnisse sind dieser zweiten „bereinigten“ Analyse entnommen.

Innere Ummantelung:

Für die Restdicke der inneren PE-HD Ummantelung  $d_i$  [mm] kann Gleichung 6.6 schließlich nach Ermittlung der unbekannt Parameter  $\beta_{i(j)}$  mit Hilfe der statistischen Regressionsanalyse wie folgt formuliert werden:

$$d_i = 0,53 + 0,69 \cdot d_{0,i} - \frac{2,03 \cdot p^2}{10^5} - \frac{1,10 \cdot l_{iG} \cdot p}{10^6} - \frac{\alpha_{Litze}}{10^3} \cdot (64 - 2,37 \cdot p) + \varepsilon_i; \quad (6.7)$$

mit

$d_{0,i}$	Ausgangswandstärke (Referenzwert) innerer Mantel [mm] (Merkmal $X_1$ )
$p$	Umlenkbelastung [N/mm] (Merkmal $X_2$ )
$l_{iG}$	Länge der Inneren Gleitung [mm] (Merkmal $X_3$ )
$\alpha_{Litze}$	Beiwert für Litzenform [-] (Merkmal $X_4$ ): Runddrahtlitze: $\alpha_{Litze} = 0$ ; Kompaktlitze: $\alpha_{Litze} = 1$ ;
$\varepsilon_i$	Störgröße [mm]

Äußere Ummantelung:

Für die Dicke der äußeren PE-HD Ummantelung  $d_a$  [mm] ergibt sich folgende Modellgleichung (Innere Gleitung bzw. Merkmal  $X_3$  hat keinen Einfluss auf die Eindrückung bzw. Merkmal  $Y$ ; somit hier  $\gamma_2 = 0$ ):

$$d_a = 0,57 + 0,83 \cdot d_{0,a} + \frac{p}{10^5} \cdot (98 - 1,78 \cdot p) + \frac{1,04 \cdot \alpha_{Litze} \cdot p}{10^3} + \varepsilon_a; \quad (6.8)$$

mit

$d_{0,a}$	Ausgangswandstärke (Referenzwert) äußerer Mantel [mm] (Merkmal $X_1$ )
$p$	Umlenkbelastung [N/mm] (Merkmal $X_2$ )
$\alpha_{Litze}$	Beiwert für Litzenform [-] (Merkmal $X_4$ ): Runddrahtlitze: $\alpha_{Litze} = 0$ ; Kompaktlitze: $\alpha_{Litze} = 1$ ;
$\varepsilon_a$	Störgröße [mm]

Gesamteindrückung PE-HD Mäntel:

Die gesamte verbleibende Dicke  $d_{gesamt}$  des zweilagigen PE-HD-Aufbaus kann durch einfache Superposition der Messwerte von innerer und äußerer Ummantelung einer Stelle gemessen werden. Auch für diese Datenbasis kann eine Regressionsanalyse durchgeführt werden. Diese Auswertung ist nur möglich, da jedem Messwert für die Dicke der inneren Ummantelung genau ein Messwert für die Dicke der äußeren Ummantelung zugeordnet werden kann.

$$d_{gesamt} = 1,52 + 0,66(d_{0,i} + d_{0,a}) + \frac{p(375 - 4,63 \cdot p)}{10^5} - \frac{2 \cdot l_{iG} \cdot p}{10^6} + \frac{3,56 \cdot \alpha_{Litze} \cdot p}{10^3} + \varepsilon; \quad (6.9)$$

mit

$d_{0,i}$  Ausgangswandstärke (Referenzwert) innerer Mantel [mm]

$d_{0,a}$  Ausgangswandstärke (Referenzwert) äußerer Mantel [mm]

$p$  Umlenkbelastung [N/mm] (Merkmal  $X_2$ )

$l_{iG}$  Länge der Inneren Gleitung [mm] (Merkmal  $X_3$ )

$\alpha_{Litze}$  Beiwert für Litzenform [-] (Merkmal  $X_4$ ):

Runddrahtlitze:  $\alpha_{Litze} = 0$ ;

Kompaktlitze:  $\alpha_{Litze} = 1$ ;

$\varepsilon$  Störgröße [mm]

### 6.1.4 Güte des Modells

Das Diagramm in Abbildung 6.5 vergleicht die gemessenen mit den berechneten Restwandstärken für innere und äußere Ummantelung. Die Güte der Regressionsmodelle kann mit Hilfe von statistischen Kenngrößen beurteilt werden, dessen mathematische Formulierung in gängiger Statistikkliteratur zu finden ist - z.B. Cohen und Cohen (1983).

- Die (Produkt-Moment-)Korrelation  $r$  ist ein Korrelationsmaß, dessen Ausprägung nur von der Stärke des linearen Zusammenhangs abhängt, im Gegensatz zur Kovarianz.  $r$  beträgt maximal den Wert 1 (perfekte positive Linearität) und minimal den Wert -1 (perfekte negative Linearität). Ist  $r = 0$ , so besteht kein linearer Zusammenhang, wobei allein hierdurch nicht auf die Unabhängigkeit der betrachteten Größen geschlossen werden kann.
- Das Bestimmtheitsmaß oder Determinationskoeffizient  $r^2$  ist ein Maß, das die Güte der Schätzung bzw. die Schätzgenauigkeit der Regression repräsentiert. Je weiter  $r^2 \in [0; 1]$  von 0 abweicht, desto höher ist die Schätzgenauigkeit. Die Varianz in der abhängigen Größe kann zu einem Anteil von  $r^2$  durch die gewählten Prädiktoren erklärt werden.
- Der Standardschätzfehler  $s_{Fehler}$  ist ein Maß dafür, wie stark die geschätzten Werte von den tatsächlichen für die abhängige Größe  $Y$  im Durchschnitt abweichen.

Güte des Modells zur Schätzung der Restwandstärke des Innenmantels:

- Korrelation  $r = 0,78$
- Determinationskoeffizient  $r^2 = 0,61$
- Standardfehler des Schätzers  $s_{Fehler} = 0,24 \text{ mm}$

Güte des Modells zur Schätzung der Restwandstärke des Außenmantels:

- Korrelation  $r = 0,83$
- Determinationskoeffizient  $r^2 = 0,68$

- Standardfehler des Schätzers  $s_{\text{Fehler}} = 0,25 \text{ mm}$

Güte des Modells zur Schätzung der gesamten Restwandstärke beider PE-Lagen (vgl. Abbildung 6.6):

- Korrelation  $r = 0,77$
- Determinationskoeffizient  $r^2 = 0,59$
- Standardfehler des Schätzers  $s_{\text{Fehler}} = 0,44 \text{ mm}$

Trotz der vereinfachten Annahmen bei der Transformation der unabhängigen Merkmale ist eine relativ gute Übereinstimmung von Modell und Realität für die verbleibende Wandstärke der inneren, der äußeren und der gesamten Ummantlung gegeben. Allerdings ist eine gewisse Diskrepanz im Bereich sehr kleiner Wandstärken erkennbar. Exemplarisch soll für die innere Ummantlung eines Bandspannglieds mit Runddrahtlitze ( $\alpha_{\text{Litze}} = 0$ ) die zu erwartende Eindrückung bei einem einaxialen Umlenkversuch ohne Innere Gleitung ( $l_{\text{IG}} = 0$ ) abhängig von der Umlenkbelastung rechnerisch bestimmt werden und den Versuchsergebnissen der Versuche G1 grafisch gegenübergestellt werden. Als Ausgangswanddicke wird die mittlere Ausgangswanddicke aus den eigenen Versuchen herangezogen:  $d_{0,i} = 1,65 \text{ mm}$ . Gleichung 6.7 kann nun vereinfacht werden und wird als Funktion der Eindrückung in Abhängigkeit nur eines Parameters, der Umlenkbelastung, formal und grafisch angegeben (Gleichung 6.10, Abbildung 6.4, links). Abbildung 6.4 zeigt im rechten Teilbild den Vergleich Modell vs. Versuch für Versuch G5 (Kompaktlitze  $\alpha_{\text{Litze}} = 0$ , Innere Gleitung  $l_{\text{IG}} = 210 \text{ mm}$ , Ausgangswanddicke  $d_{0,i} = 1,67 \text{ mm}$ ).

$$d_i(p) = 0,02 - \frac{2,03 \cdot p^2}{10^5}; \quad (6.10)$$

mit

$d_i(p)$  Wanddicke des Innenmantels [mm]

$p$  Umlenkbelastung [N/mm]

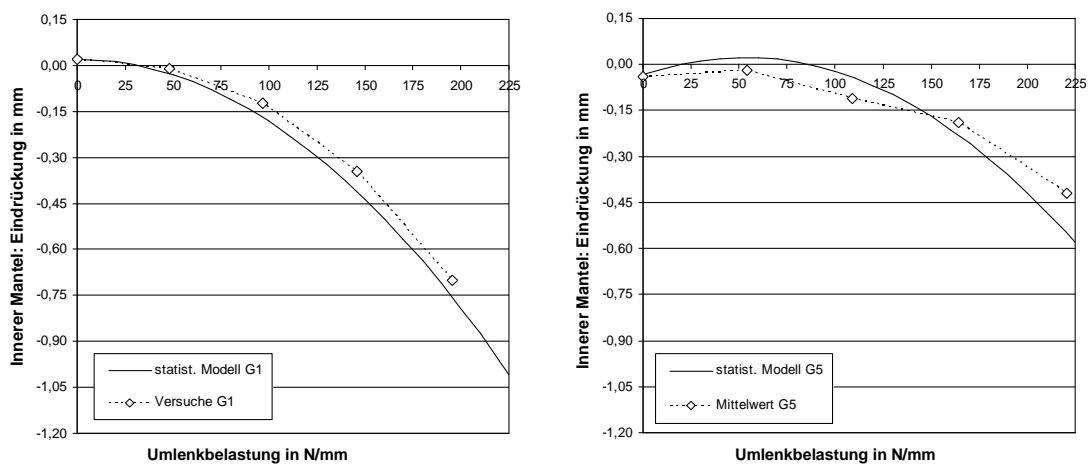


Abbildung 6.4: Vergleich statistische Analyse – Mittlere Eindrückung, Versuche G1 (links) und G5 (rechts)

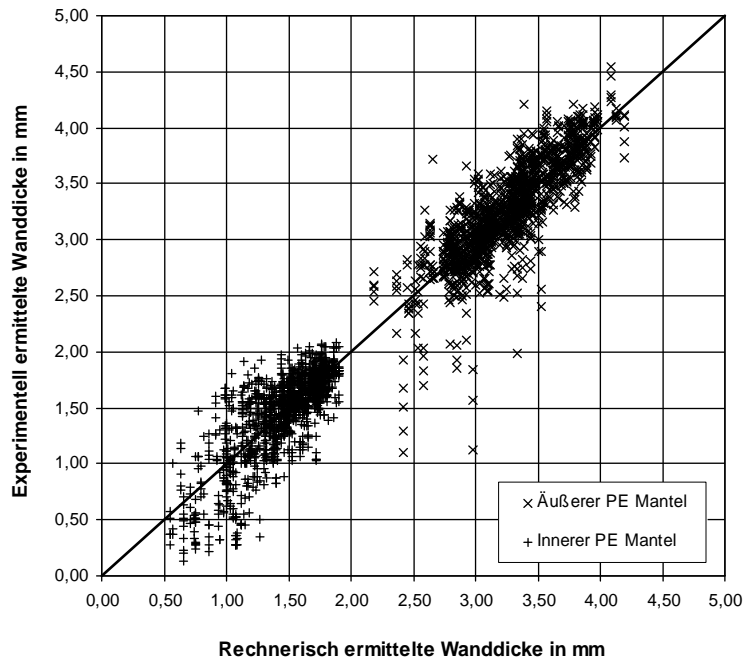


Abbildung 6.5: Vergleich statistische Analyse – Messung Restwandstärke innere und äußere Ummantelung von Bandspanngliedern

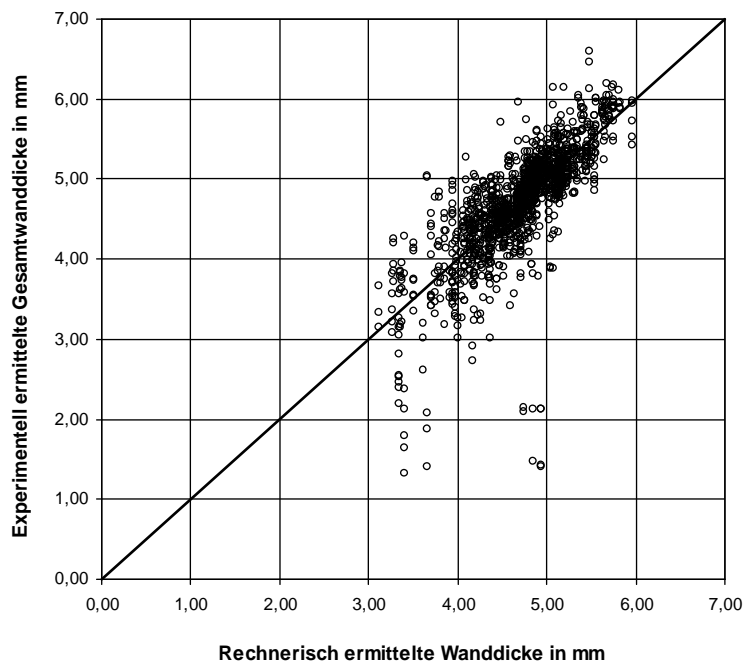


Abbildung 6.6: Vergleich statistische Analyse – Messung Restwandstärke gesamte Ummantelung von Bandspanngliedern

## 6.2 Mechanisches Modell für einlagige, dicke PE-HD Schutzhüllen

Mit einem allgemeinen Modell soll erstmals das sofortige und zeitabhängige Eindrücken von Spannstahlelementen in eine einlagige, querdehnungsbehinderte PE-HD Hülle mit einer Ausgangsdicke über 5 mm bei Temperaturen von etwa  $20\text{ °C} \pm 5\text{ K}$  abgeschätzt werden. Ziel ist die Formulierung eines Basismodells, das mit Hilfe zukünftiger Versuche kalibriert und verifiziert werden kann. Dies ist bisher nicht möglich, da die bei Umlenkversuchen tatsächlich anliegende Umlenkbelastung unter Spannstahlelementen im Hüllrohr nicht genau bestimmt werden kann. Für eine exakte Beziehung zwischen bleibender Eindrückungsverformung und Umlenkbelastung bedarf es einer Versuchsserie mit genau definierter Belastung.

Mit dem Modell wird nur der Einfluss der Umlenkbelastung als bedeutendsten Faktor auf das Maß der Eindrückung eines Spannstahlelements berücksichtigt. Für die Quantifizierung zusätzlicher Faktoren wie Verschleiß bzw. Abrieb durch Reibvorgänge bei Innerer Gleitung liegen weder im Umfang noch in der Güte ausreichende experimentelle Daten vor. Im Gegensatz zu den Bandspanngliedern wurde das Verhalten von Spanngliedern mit Hüllrohr an Umlenkstellen noch nicht systematisch erforscht. Bei der Modellbildung wird angenommen, dass das Spannstahlelement bei Druckbelastung durch sofortige idealplastische Verformungen an der Kontaktfläche soweit in das PE-HD eindringt, bis sich ein Gleichgewicht mit konstanter Druckspannungsverteilung einstellt. Als Analogie hierzu kann das Eintauchen eines Schiffsrumpfs in Wasser herangezogen werden. Der Eintauchvorgang ist abgeschlossen, wenn sich ein Gleichgewicht zwischen Last und Auftriebskraft bzw. anliegender Druckspannung eingestellt hat.

### 6.2.1 Kugeldruckhärte

Die Größe der Druckspannung, bei der keine weiteren Einsinkverformungen mehr zu erwarten sind, ist abhängig von den mechanischen Materialeigenschaften des PE-HD. Bei dem nach EN ISO 2039-1 (2003) genormten Kugeleindruckversuch wird die so genannte „Kugeldruckhärte“ ermittelt.

Hierzu wird eine Kugel mit einer festgelegten Kraft in einen Probekörper gedrückt. Der Quotient aus Kraft und Aufstandsfläche der Kugel ergibt die Kugeldruckhärte (in  $\text{N}/\text{mm}^2$ ). Für den standardisierten Versuch wird eine Stahlkugel mit dem Durchmesser 5,0 mm verwendet. Litzendrähte (z.B. 5,0 mm bzw. 5,2 mm) und Einzeldrähte (z.B. 7,0 mm) haben vergleichbare Abmessungen. Sinkt eine Litze jedoch soweit in das PE-HD ein, dass mehrere Außendrähte die Umlenkbelastung übertragen, so ist eine Vergleichbarkeit nicht mehr gegeben. Mit dem Kugeleindruckversuch ist es möglich, den von der Dicke der PE-HD Lage abhängigen Einfluss der Querdehnungsbehinderung quantitativ zu erfassen. Neuser (2003) hat mit Material, das er aus den Schutzhüllen von Bandspanngliedern gewonnen hat, Kugeleindruckversuche mit verschiedenen dicken Lagen durchgeführt.

Die Kugeldruckhärte nimmt mit zunehmender Bauteildicke ab (siehe Abbildung 6.7, rechtes Teilbild). Aufgrund der unterschiedlichen Größe der Spannstahlelemente kann die Kugeldruckhärte nicht direkt aus dem Diagramm genommen werden, es muss ein Maßstabeffekt berücksichtigt werden.

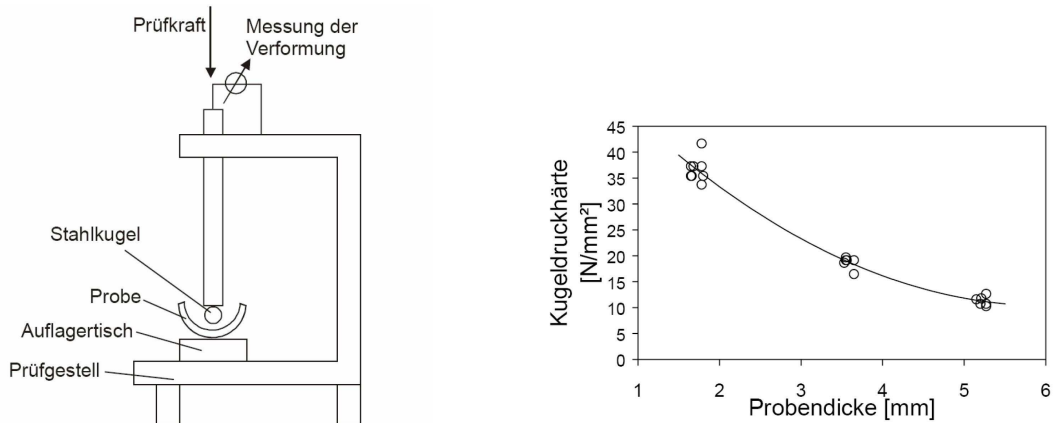


Abbildung 6.7: Kugeldruckhärte: Versuchsaufbau und Messergebnisse an PE-HD Proben (von links, Neuser 2003)

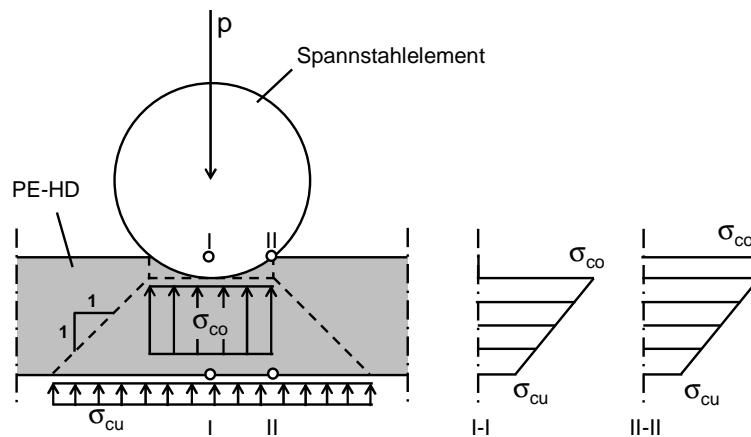


Abbildung 6.8: Einleitung der Umlenkbelastung  $p$  von Spannstahlelement in PE-HD Lage, angenommene Druckspannungsverteilungen bei zweiachsiger Druckbeanspruchung

Spannstahlelemente übertragen die Umlenkbelastung linienförmig. Zudem liegen sie oftmals direkt nebeneinander (z.B. lose Litzen im Hüllrohr), weshalb eine Erhöhung der Druckfestigkeit infolge zwei- oder dreiaxialer Spannungszustände zu erwarten ist. Abbildung 6.8 berücksichtigt bei der Spannungsermittlung an der Unterseite des PE-HD bereits den zweiachsigen Druckspannungszustand. Die Druckspannung wird von der Kontaktfläche zunächst in das PE-HD und schließlich in das Bauwerk abgeleitet. Es wird eine Lastausbreitung im PE-HD mit einem Winkel von  $45^\circ$  angenommen. Vereinfacht angenommen erfolgt die Lastausbreitung über die gesamte Aufstandsweite ab der tiefsten Stelle des eingesunkenen Spannstahlelements (Abbildung 6.8).



## 6.2.2 Formulierung des mechanischen Modells

Für die Ermittlung der sich einstellenden konstanten Druckspannung  $\sigma_{c0}$  ist die Kenntnis der Restwanddicke erforderlich. Aus diesem Grund kann das Modell nur rekursiv formuliert werden, d.h. für eine gegebene Eindrückung wird die hierfür zugehörige Umlenkbelastung mit Gleichung 6.11 ermittelt. In dieses Basismodell gehen folgende Parameter ein:

- Spannstahlform und -abmessungen: Zur Bestimmung der Aufstandsweite des Spannstahls  $b(t)$  sind Querschnittsform und Einsinktiefe  $t$  entscheidend. Für die Runddrahtlitze kann  $b(t)$  nach Gleichung 6.12, für kreisförmige Querschnitte (Kompaktlitze, Draht) nach Gleichung 6.13 bestimmt werden. Die Vergleichbarkeit mit Ergebnissen des Kugeleindruckversuchs ist möglich durch die Eliminierung des Maßstabeffekts. Insofern geht der Durchmesser des Spannstahls in die Bestimmung der Kontaktdruckspannung  $\sigma_{c0}$  nach Gleichung 6.14 ein (vgl. Abbildung 6.9, links).
- Eindrückung: Die Eindrückung bzw. Einsinktiefe  $t$  geht als Parameter in die Berechnung der Aufstandsweite  $b(t)$  ein. Sie muss zudem für die Ermittlung der sich einstellenden Kontaktdruckspannung  $\sigma_{c0}$  (Gleichung 6.14) berücksichtigt werden.
- Ausgangswanddicke: Für die Bestimmung von  $\sigma_{c0}$  ist die theoretische Dicke des PE-HD festzulegen. Sie ist die Differenz aus Ausgangswanddicke  $d_0$  und Einsinktiefe  $t$ .

Basismodell:

$$p = b(t) \cdot \sigma_{c0}; \quad (6.11)$$

mit

$p$  Umlenkbelastung, z.B. nach Gleichung 4.9 [N/mm]

$b(t)$  Aufstandsweite in Abhängigkeit von der Einsinktiefe  $t$ :

$$\text{- Runddrahtlitze: } b(t) = \min \left\{ \begin{array}{l} t \cdot \left( 4 \cdot \left( \frac{t}{d_P} \right)^2 - 5,4 \cdot \frac{t}{d_P} + 4,6 \right); \\ \frac{1}{2} \cdot d_P; \end{array} \right. \quad (6.12)$$

$$\text{- Draht bzw. Kompaktlitze (Kreisform): } b(t) = \min \left\{ \begin{array}{l} 2 \cdot \sqrt{t \cdot (d_P - t)}; \\ \frac{1}{2} \cdot d_P; \end{array} \right. \quad (6.13)$$

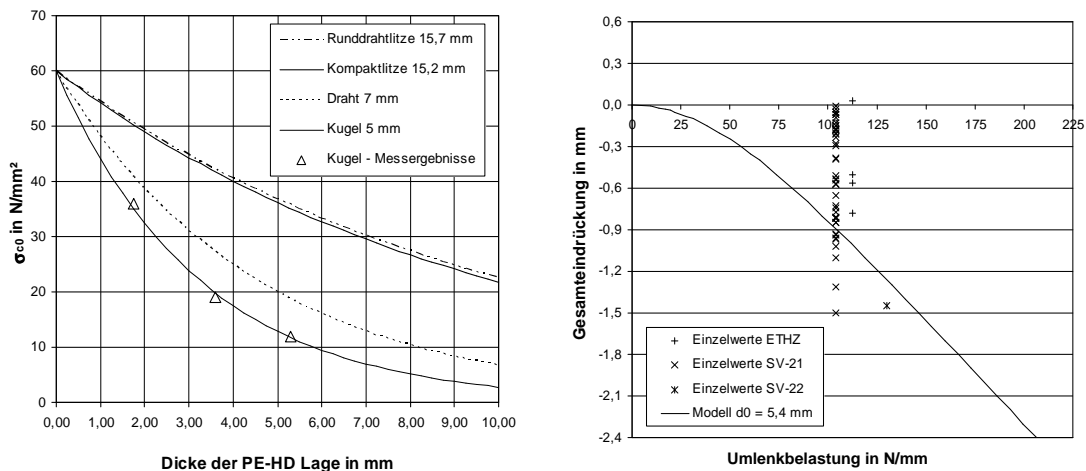
$t$  Einsinktiefe in mm

$d_P$  Durchmesser des Spannstahlumkreises in mm

$\sigma_{c0}$  Kontaktdruckspannung in N/mm<sup>2</sup> (vgl. Abbildung 6.9)

$$\sigma_{c0} = 60 \cdot e^{-0,3075 \cdot (d_0 - t) \cdot \frac{5 \text{ mm}}{d_P}}; \quad (6.14)$$

$d_0$  Ausgangswanddicke der PE-HD Lage



**Abbildung 6.9: Einfluss der Spannstahlform auf die konstante Druckspannung  $\sigma_{c0}$  in Abhängigkeit von der Dicke der PE-HD Lage (links), Vergleich Modell-Messung für Eindrückungen bei Drahtspanngliedern (rechts)**

Grafisch ist das Basismodell nach Gleichung 6.11 für verschiedene Ausgangswanddicken in Abbildung 6.11 für kreisrunde Einzeldrähte mit Durchmesser 7,0 mm, in Abbildung 6.12 für Kompaktlitzen mit Umkreisdurchmesser 15,2 mm sowie in Abbildung 6.13 für Runddrahtlitzen mit Umkreisdurchmesser von 15,7 mm dargestellt. Offensichtlich treten bei vergleichbaren Umlenkbelastungen bei der Verwendung kleiner Einzeldrähte die größten Eindrückungen auf. Dabei muss allerdings beachtet werden, dass für vergleichbare Spanngliedergrößen, trotz der größeren Anzahl an Spannstahlelementen, deutlich geringere Druckbelastungen auftreten - diese sind direkt proportional zu  $N \cdot r^3$  (vgl. Gleichung 4.9 und Gleichung 4.22).

Für eine Hüllrohrdicke von 5,4 mm und für Spannglieder mit Drähten mit einem Durchmesser von 7,0 mm im Hüllrohr sind in Abbildung 6.9, rechtes Teilbild, die aus dem Basismodell berechneten Eindrückungen den Messergebnissen aus Umlenkversuchen gegenübergestellt. Wie eingangs erwähnt, ist eine Kalibrierung bzw. Verifizierung des Modells nicht möglich, da zum einen nur für einen Druckbelastungsbereich Messergebnisse vorliegen und zum anderen die tatsächlich bei den Versuchen anliegende Umlenkbelastung nicht exakt bestimmt werden kann.

Zur Veranschaulichung des Einflusses der unterschiedlichen Form der Spannstahlelemente auf deren Eindrückung in ein PE-HD-Hüllrohr wird eine Beispielrechnung durchgeführt. Die, nach dem Basismodell zu erwartenden, mittleren Eindrückungen von Spannstahl in das PE-Rohr sind für bestimmte Spannglieder in Abhängigkeit vom gewählten Spannstahl und vom Umlenkradius in Abbildung 6.10 grafisch dargestellt. Die für die Beispielrechnung erforderlichen Randbedingungen werden wie folgt gewählt:

- 3 MN Zugkraft des Spannglieds bei 70 % einer Nennfestigkeit von 1860 N/mm<sup>2</sup>;
- Verwendete Spannstahldurchmesser: Draht 7 mm, Runddrahtlitze 15,7 mm, Kompaktlitze 15,2 mm;
- Hüllrohrabmessungen: Außendurchmesser 100 mm, Wanddicke 5 mm.

Aus den ersten beiden Bedingungen ergibt sich die jeweils erforderliche Anzahl an Spannstahlelementen (für das vorliegende Beispiel:  $N_{\text{Draht}} \approx 60$ ,  $N_{\text{RDL}} \approx 15$  und  $N_{\text{KL}} \approx 14$ ). Mit dem Vereinfachten Verfahren nach Gleichung 4.22 wird schließlich zusammen mit der dritten Bedingung der maximale Stapelfaktor errechnet ( $k_{\text{max,Draht}} \approx 9,3$ ,  $k_{\text{max,RDL}} \approx 5,4$  und  $k_{\text{max,KL}} \approx 4,7$ ). Das Spannglied mit Runddrahtlitzen weist, weitgehend unabhängig vom Umlenkradius, aufgrund der ungünstigen Querschnittsform deutlich tiefere Eindrückungen in das PE-HD Rohr auf als die Spannglieder mit Kompaktlitzen und Drähten. Spannglieder mit Kompaktlitze zeigen theoretisch das günstigste Eindrückungsverhalten. Der Unterschied zu Spanngliedern mit Drähten ist auf zwei Faktoren zurückzuführen. Einerseits weisen Kompaktlitzen Zwickel auf. Sie haben einen größeren Durchmesser als es die Nettostahlquerschnittsfläche erfordern würde. Damit steht für eine vergleichbare Umlenkbelastung eine größere Aufstandsfläche zur Verfügung. Ein zweiter Faktor ist die Größe im Verhältnis zur Dicke der PE-Hülle. In diesem Beispiel wurde für Kompaktlitze und Draht eine Rohrwanddicke von 5 mm gewählt. Durch den Maßstabseffekt stellt sich eine größere Kontaktdruckspannung ein (siehe Abbildung 6.9, linkes Teilbild). Je weiter sich die Spannstahlelemente in die Polyethylenhülle eindrücken, desto stärker nimmt dieser Effekt ab. Bei einer Dicke von 4,00 mm beträgt die Differenz zwischen den anliegenden Kontaktdruckspannungen der beiden Spannstahlformen ungefähr 15 N/mm<sup>2</sup>. Kompaktlitzen werden hier mit einem Kreisquerschnitt idealisiert. Tatsächlich weicht ihr Querschnitt durch leichte Randprofilierung davon ab, weshalb bei Versuchen etwas größere Eindrückungen zu erwarten sein dürften als theoretisch ermittelt. Die Profilierung ist jedoch bei weitem weniger ausgeprägt als bei der Runddrahtlitze.

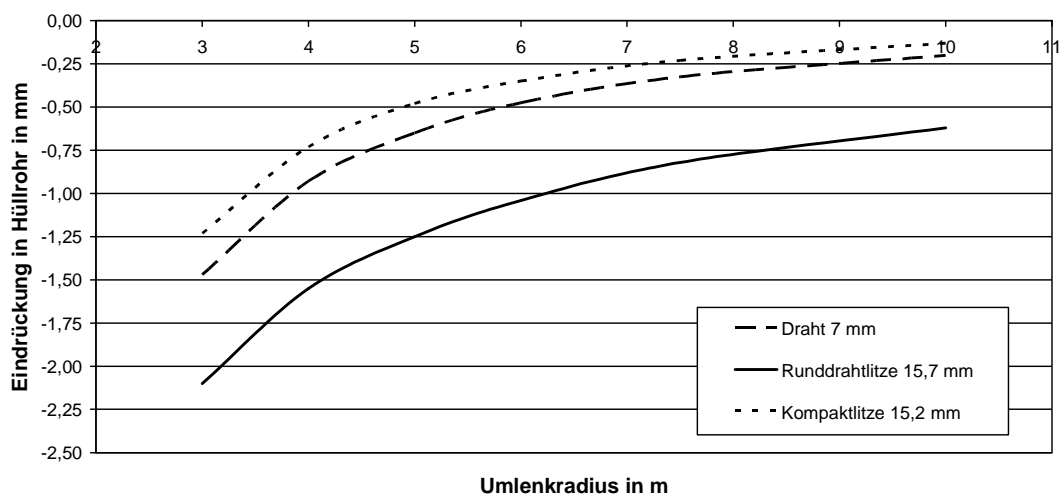


Abbildung 6.10: Basismodell: Eindrückungen in PE-Rohr bei Variation der Umlenkradien und des Spannstahls für eine Beispielkonfiguration (u.a.  $P = 3 \text{ MN}$ ;  $\varnothing_{\text{Hüllrohr,außen}} = 100 \text{ mm}$ ; Wanddicke 5 mm)

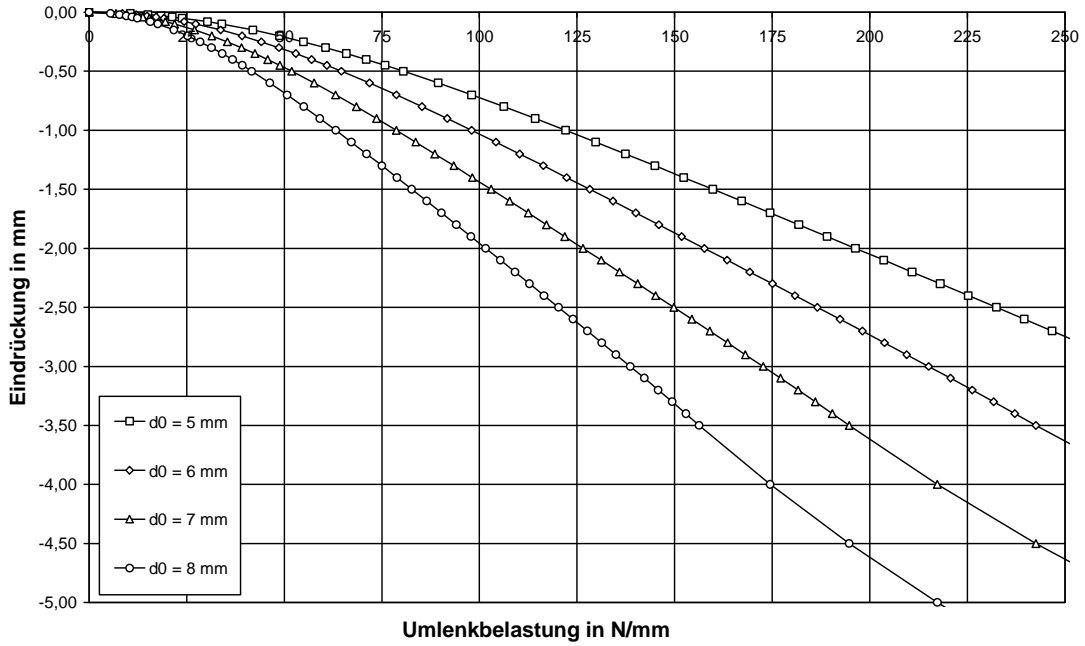


Abbildung 6.11: Rechnerische Eindrückungen von Spannstahldrähten  $d_p = 7 \text{ mm}$  in PE-HD Lagen der Dicke  $d_0 = [5 \text{ mm}; 8 \text{ mm}]$  abhängig von der anliegenden Umlenkbelastung (Gleichung 6.11)

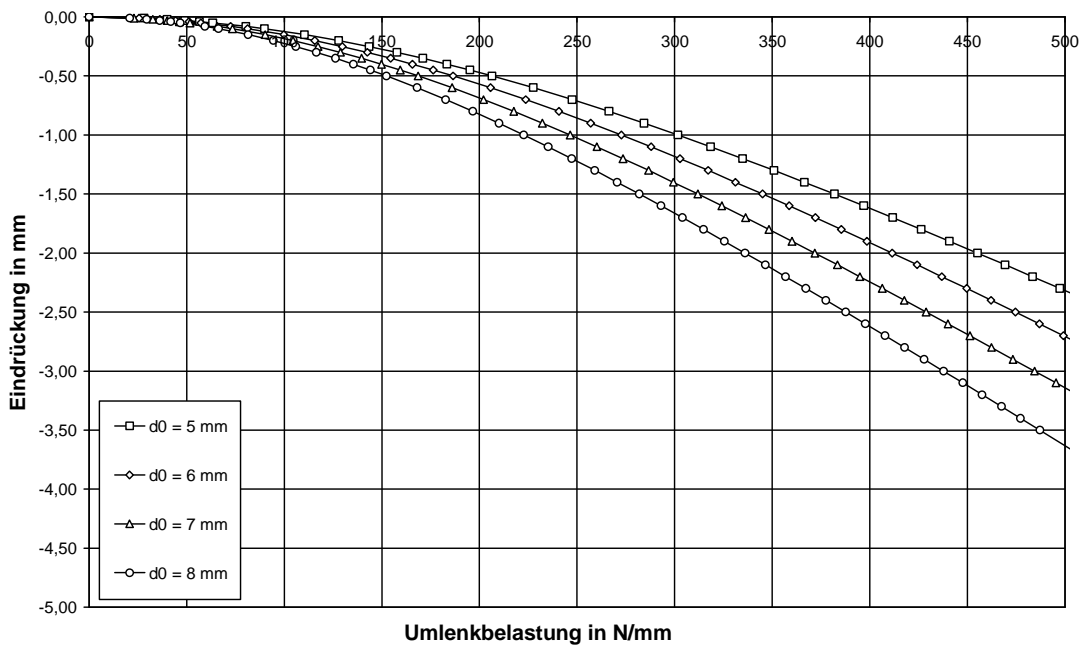


Abbildung 6.12: Rechnerische Eindrückungen von Kompaktlitzen  $d_p = 15,2 \text{ mm}$  in PE-HD Lagen der Dicke  $d_0 = [5 \text{ mm}; 8 \text{ mm}]$  abhängig von der anliegenden Umlenkbelastung (Gleichung 6.11)

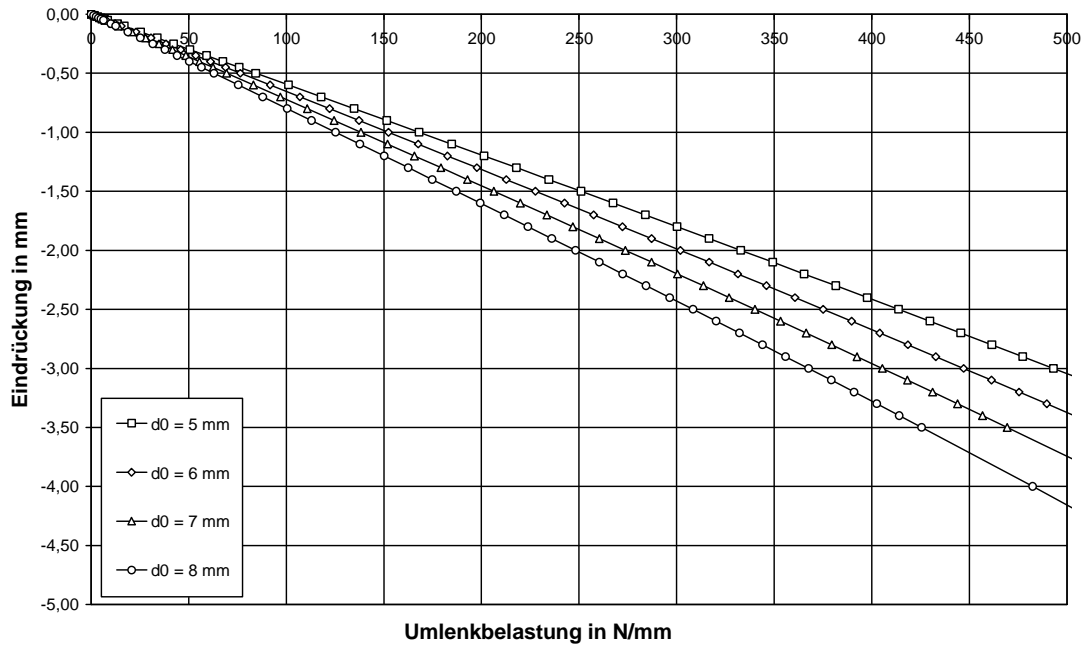


Abbildung 6.13: Rechnerische Eindrückungen von Runddrahtlitzen  $d_p = 15,7$  mm in PE-HD Lagen der Dicke  $d_0 = [5$  mm;  $8$  mm] abhängig von der anliegenden Umlenkbelastung (Gleichung 6.11)

# 7 Bemessung von PE-HD Schutzhüllen

Verbundlose Spannglieder mit PE-HD Schutzhüllen sind erst seit den 1980er Jahren als Schutzhüllen von Spanngliedern und Schrägseilen verbreitet im Einsatz. Lange Zeit lagen weder Bemessungskonzepte noch Prüfrichtlinien zur Untersuchung der Eignung dieser Schutzhüllen zur Verwendung bei umgelenkten Spanngliedern vor.

## 7.1 FIP Recommendations

Die „Recommendations for the acceptance of post-tensioning systems“ (1993) der *fédération internationale de la précontrainte (FIP)* gibt für die Umlenkung von externen verbundlosen Spanngliedern nur eine sehr vage Empfehlung mit folgendem Wortlaut:

### „5.4.5 Deviation test for unbonded external tendons

For post-tensioning with external unbonded tendons, devices such as saddles for the deviation of the tendon may be used. Supplementary tests may be necessary to prove the proper function of the tendon (prestressing steel and corrosion protection) at such a device. Dynamic load tests with the deviated tendon are suitable. Internationally agreed test procedures are not presently available.“

Darin sind weder Angaben zum Versuchsaufbau und zur Versuchsdurchführung noch zu den Anforderungen, die der Spann Stahl und die Korrosionsschutzelemente nach Durchführung von experimentellen Untersuchungen einzuhalten haben, um den Nachweis eines dauerhaften Systems zu erbringen, enthalten. Es wird ohne weitere Details zu nennen auf einen möglichen dynamischen Versuch hingewiesen.

## 7.2 Bemessungsvorschlag für Spannglieder mit Hüllrohr nach EC 2 T.1-5 bzw. ENV 1992-1-5 (Dezember 1994)

In EC 2 T.1-5 (1994) bzw. ENV 1992-1-5 mit Stand Dezember 1994 ist ein grobes Bemessungsverfahren für Spannglieder mit Stahl- oder PE-HD Hüllrohren aufgeführt. In der aktuellen Fassung des EC 2 ist dieses Verfahren nicht mehr enthalten. Für PE-HD Hüllrohre wird als Mindestausgangswanddicke, sofern in den jeweiligen Zulassungen der Spannverfahren nicht anders gegeben, folgender Wert empfohlen:

$$d_{min,1992-1-5} = \max \left\{ \begin{array}{l} \varnothing_{Hüllrohr} / 16 ; \\ 5 \text{ mm} ; \end{array} \right. \quad (7.1)$$

**Tabelle 7.1: Mindestradien für Krümmungen in der Verankerungszone von Spanngliedern, Tabelle 3.105 aus EC 2 T.1-5 (1994)**

<i>Spannglied</i>		
<i>Litzen</i>	<i>Drähte</i>	<i>minimaler Radius</i>
19 Ø 13 mm oder 12 Ø 15 mm	54 Ø 7 mm	3,5 m
31 Ø 13 mm oder 19 Ø 15 mm	91 Ø 7 mm	4,0 m
55 Ø 13 mm oder 37 Ø 15 mm	140 Ø 7 mm	5,0 m

Eine lineare Interpolation zwischen den Werten der Tabelle 3.105 ist zulässig

**Tabelle 7.2: Mindestradien für Krümmungen in der Umlenkzone von Spanngliedern, Tabelle 3.106 aus EC 2 T.1-5 (1994)**

<i>Spannglied</i>		
<i>Litzen</i>	<i>Drähte</i>	<i>minimaler Radius</i>
19 Ø 13 mm oder 12 Ø 15 mm	54 Ø 7 mm	2,5 m
31 Ø 13 mm oder 19 Ø 15 mm	91 Ø 7 mm	3,0 m
55 Ø 13 mm oder 37 Ø 15 mm	140 Ø 7 mm	5,0 m

Eine lineare Interpolation zwischen den Werten der Tabelle 3.106 ist zulässig

Die Wanddicke wird unabhängig von der Belastung (Umlenkbelastung, Gleitbedingungen) bestimmt - linear abhängig vom Rohrdurchmesser mit der unteren Schranke von 5 mm. EC 2 T.1-5 (1994) gibt zulässige minimale Umlenkradien für verschiedene Spanngliedgrößen an und unterscheidet dabei zwischen Krümmungen in den Verankerungszonen und den Umlenkzonen (siehe Tabelle 7.1 und Tabelle 7.2). Hierbei werden in Abhängigkeit von der Anzahl und der Größe der Spannstahelemente minimal zulässige Umlenkradien angegeben. Aussagen zu besonderen Querschnittsformen oder zur Spannstahlfestigkeit werden nicht gemacht. In Eibl (1993), einer Vorversion von EC 2 T.1-5 (1994), findet sich Tabelle 7.1 wieder, jedoch werden im Gegensatz zu EC 2 T.1-5 (1994) für die Umlenkzonen im Vergleich zu den Verankerungszonen keine unterschiedlichen Werte angegeben. Diese Annahme Eibls ist sinnvoll, da die Belastungen an diesen Stellen nicht verschieden sind.

Die Hüllrohrabmessungen gehen insofern in den Bemessungsvorschlag ein, als dass eine obere Grenze für den Füllgrad bei einer Verfüllung mit Mörtel, nicht jedoch mit Wachs, angegeben wird. Für die Mörtellösung gilt demnach folgende Ungleichung:

$$\varnothing_{\text{Hüllrohr,innen}} \geq 1,6 \cdot \sqrt{A_P} ; \quad (7.2)$$

mit

$\varnothing_{\text{Hüllrohr,innen}}$  Innendurchmesser des Hüllrohrs [mm]

$A_P$  Spannstahlquerschnittsfläche [mm<sup>2</sup>]

Die auf die PE-Hüllen wirkenden Beanspruchungen werden nur sehr grob über die Anzahl der Spannstahelemente und der Zuweisung mit Mindestradien erfasst. Eine Aussage zu den Reibungsverhältnissen wird nicht gemacht. Paradox ist die Tatsache, dass bei der Wahl eines etwas größeren Hüllrohrs für ein bestimmtes Spannglied die Beanspruchungen sinken

(geringerer maximaler Stapelfaktor), gleichzeitig aber aufgrund der in Gleichung 7.1 dargestellten linearen Beziehung zwischen Wanddicke und Durchmesser von Hüllrohren die Ausgangswanddicke laut EC 2 T.1-5 (1994) jedoch größer gewählt werden muss. Aus dem Modell wird nicht ersichtlich, welche Restwanddicken als zulässig eingestuft werden bzw. bei welchen Restwanddicken ein dauerhafter Korrosionsschutz gegeben ist.

### **7.3 Bemessungskonzept nach ETAG 013 (2002)**

Mit der ETAG 013 (2002) wurde eine europäische Richtlinie erarbeitet, in der Anforderungen an Spannverfahren gegeben werden, die diese zum Ziele der Beantragung einer europäischen Zulassungen zu erfüllen haben. Die Überprüfung der Eignung von Spannverfahren erfolgt durch standardisierte Prüfungen. ETAG 013 (2002) stellt für die Schutzhüllen von umgelenkten Spangliedern ein Bemessungskonzept basierend auf einer experimentellen Untersuchung mit einem Umlenkversuch vor. Mit nur einer Spangliedgröße eines Spannverfahrens werden bei Umlenkung um einen vom Hersteller gewählten Umlenkradius Ergebnisse erzielt, die für eine erfolgreiche Zulassung des Produkts in der Richtlinie festgelegte Kriterien einzuhalten haben.

In ETAG 013 (2002) sind minimale Wanddicken gegeben, die die Schutzhüllen von umgelenkten verbundlosen Spangliedern nach Durchführung eines Umlenkversuchs aufzuweisen haben (vgl. Kapitel 5.1). Diese Kriterien unterscheiden sich zwischen einlagigen und zweilagigen Schutzhüllen (z.B. Bandspannglieder). Bei einlagigen Spangliedern wird unterschieden, ob die Möglichkeit eines späteren „Nachspannens“ gegeben ist oder nicht. Tabelle 7.3 und Abbildung 7.1 geben die Grenzwerte für die minimal zulässige Wanddicke nach einem Umlenkversuch abhängig von den genannten Spangliedcharakteristika an. Bei allen Varianten ist die minimal einzuhaltende Wanddicke linear abhängig von der Ausgangswanddicke. Zudem ist für sie ein konstanter Mindestwert gegeben. Soll ein Spanglied zu einem späteren Zeitpunkt nachgespannt werden können, so ist dies nicht nur durch einen höheren Bauteilwiderstand zu berücksichtigen, sondern noch durch eine höhere Belastung bei der Versuchsdurchführung. Nach der dreiwöchigen Standzeit wird das Spanglied nochmals über die Umlenkstelle gezogen um das Nachspannen am Bauwerk zu simulieren. Es werden jedoch keine Angaben zur Länge der zusätzlichen Verzugsstrecke gemacht.

Mit der Vorgabe eines einheitlichen, praxisnahen Prüfverfahrens für die Umlenkung von Spangliedern leistet die Richtlinie ETAG 013 (2002) in Europa einen sehr wichtigen Beitrag zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit und Eignung von Spannverfahren. Schwer nachvollziehbar ist jedoch, warum für die verschiedenen Spangliedtypen, trotz Berücksichtigung unterschiedlicher Beanspruchungssituationen („Nachspannbarkeit“) in der Prüfung, keine einheitlichen Anforderungen an die Wanddicke gestellt werden. In ETAG 013 (2002) ist zudem nicht geregelt, wie die experimentellen Erfahrungen mit der Prüfung einer Spangliedgröße auf andere Spangliedgrößen eines Spannverfahrens übertragen werden können, um einen gleichen Sicherheitsstandard sicherzustellen.

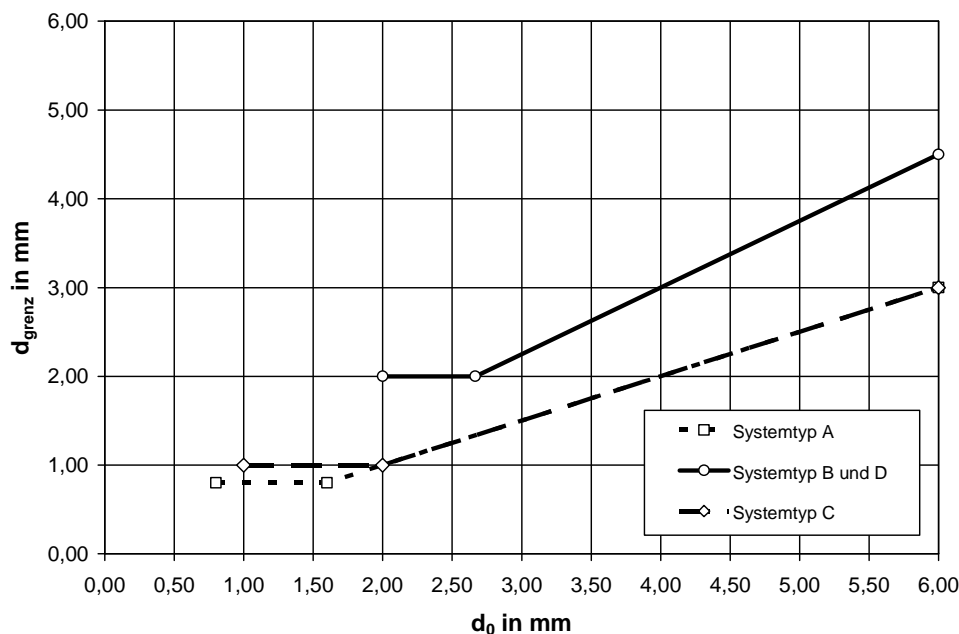


**Tabelle 7.3: Minimal zulässige Wanddicke nach Umlenkversuch gemäß ETAG 013 (2002)**

Bezeichnung	Anzahl Lagen PE	Lage*	Nachspannbarkeit	Grenzwert $d_{grenz}$
	[-]	[-]		mm
A	1	1	nein	max (0,80 mm; 50 % · $d_{0,1}$ )
B	1	1	ja	max (2,00 mm; 75 % · $d_{0,1}$ )
C	2	1	ja	max (1,00 mm; 50 % · $d_{0,1}$ )
D	2	2	ja	max (2,00 mm; 75 % · $d_{0,2}$ )

\*) die Lagen werden von innen nach außen aufsteigend nummeriert („1“ entspricht der innersten Lage)

’) mit  $d_{0,i}$  wird die Ausgangswanddicke der Lage i bezeichnet (in mm)



**Abbildung 7.1: Grafische Darstellung der minimal zulässigen Wanddicke von PE-HD Schutzhüllen verschiedener Spannliedssystemtypen nach einem Umlenkversuch gemäß ETAG 013 (2002)**

## 7.4 Eigener Bemessungsvorschlag für Bandspannglieder

Im Folgenden wird ein eigener Bemessungsvorschlag für die PE-HD Schutzhüllen von Bandspanngliedern vorgestellt auf Basis der Kriterien von ETAG 013 (2002). Diesem Ansatz liegen die Messergebnisse der neun eigenen Umlenkversuche zugrunde. Er ist so konzipiert, dass nicht nur die Streuung der Messergebnisse eines Versuchs, sondern auch die Streuung zwischen den Versuchen und die Herstellgenauigkeit mittels konservativer Annahmen berücksichtigt werden. Damit liegt dem Modell ein deutlich höheres Sicherheitsniveau zu Grunde als bei der Zulassung von Spannverfahren nach ETAG 013 (2002) bei Verwendung identischer Kriterien. Gemäß ETAG 013 (2002) ist die Durchführung von nur einem einzigen Umlenkversuch ausreichend, sofern die Anforderungen an die Restwanddicke bei bestimmter Belastung erfüllt werden. Die resultierende Unsicherheit über die Streuung der Ergebnisse wird durch relativ hohe Anforderungen der europäischen Richtlinie an die Ergebnisse kompensiert. Der eigene

Bemessungsvorschlag wird trotz des unterschiedlichen Sicherheitskonzepts zunächst für die Kriterien nach ETAG 013 ausgelegt, er könnte jedoch mit geringem, zusätzlichem Aufwand an neu definierte Anforderungen angepasst werden. Mindestrestwanddicken könnten zum Beispiel für geschützte Bauteile wie der inneren Ummantelung von Bandspanngliedern aus einer dickenabhängigen Durchlässigkeitsbetrachtung von Gasen und Flüssigkeiten abgeleitet werden (z.B.  $d_{i,grenz} \geq 0,50$  mm) und für exponierte Schutzhüllen aus Robustheitsbetrachtungen (z.B.  $d_{a,grenz} \geq 2,00$  mm).

#### 7.4.1 Allgemeine Formulierung

In Kapitel 6.1 wurde ein statistisches Modell zur Vorhersage der zu erwartenden maximalen Eindrückung von Spannstahl in die PE-HD Schutzhüllen von Bandspanngliedern vorgestellt. Für die Bemessung ist allerdings zu berücksichtigen, dass auch Eindrückungen, die größer als der statistische Erwartungswert sind, mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit auftreten können. Die Messergebnisse aus den eigenen Versuchen lassen darauf schließen, dass diese Streuung bei hohen Lasten größer wird. Das statistische Modell soll daher mit einem belastungsabhängigen Sicherheitsbeiwert und einem konstanten Sicherheitswert zu einem Bemessungsmodell erweitert werden, mit dessen Hilfe man die Schutzhüllen für vorgegebene Beanspruchungen dimensionieren kann bzw. für vorgegebene Abmessungen der Schutzhüllen die zulässigen Beanspruchungen festlegen kann. Dabei ist es für die Praxis sinnvoll, Mindestwerte der Abmessungen der Schutzhüllen anzugeben.

Gleichung 7.3 formuliert das Bemessungsmodell formal für die innere Schutzhülle von Bandspanngliedern. Das Modell kann für die äußere Hülle analog formuliert werden (Gleichung 7.4). Sowohl für die Ermittlung der zu erwartenden Eindrückung als auch für die Festlegung der minimalen Restwanddicke nach dem Versuch benötigt man die Ausgangswanddicke. Aus diesem Grund sind die Gleichungen 7.3 und 7.4 iterativ zu lösen. Für die Bemessung werden die Ergebnisse aller drei untersuchten Bandspanngliedersysteme gemeinsam betrachtet. Der herstellerunabhängige Bemessungsvorschlag wird aufgrund der daraus resultierenden kleinen Schwankungen konservativ angesetzt. Bei Betrachtung nur einzelner Systeme wäre eine weniger konservative Bemessung unter Einhaltung eines vergleichbar hohen Sicherheitsniveaus möglich, da dann genauer auf systemspezifische Eigenschaften wie beispielsweise unterschiedliches Verschleißverhalten bei Innerer Gleitung eingegangen werden könnte.

$$d_{i,min} \geq d_{i,grenz} + \gamma_{i,1} \cdot (|\Delta d_i| + \gamma_{i,2}) - \gamma_{i,3} ; \quad (7.3)$$

mit

- $d_{i,min}$  Minimale Ausgangswanddicke [mm]
- $d_{i,grenz}$  Erforderliche Restwanddicke der inneren Ummantelung eines Bandspannglieds nach Durchführung eines Umlenkversuchs (ETAG 013) [mm]

$$d_{i,grenz} = \max \left\{ \begin{array}{l} 1,00 \text{ mm} ; \\ \frac{1}{2} \cdot \max \left\{ \begin{array}{l} 1,50 \text{ mm} ; \\ d_{i,min} ; \end{array} \right. \end{array} \right.$$

- $\gamma_{i,1}$  Belastungsabhängiger Sicherheitsbeiwert [-]  
 $\Delta d_i$  Erwartungswert der Eindrückung (u.a. abhängig von  $d_{i,min}$ ) [mm]  
 $\gamma_{i,2}$  Konstanter Sicherheitsbeiwert (Herstellungsgenauigkeit) [-]  
 $\gamma_{i,3}$  Korrekturwert für Unterschied Mittelwert – Minimalwert [-]

$$d_{a,min} \geq d_{a,grenz} + \gamma_{a,1} \cdot (|\Delta d_a| + \gamma_{a,2}) - \gamma_{a,3} ; \quad (7.4)$$

mit

- $d_{a,min}$  Minimale Ausgangswanddicke des Außenmantels [mm]  
 $d_{a,grenz}$  Erforderliche Restwanddicke des Außenmantels eines Bandspannglieds nach Durchführung eines Umlenkversuchs (ETAG 013) [mm]

$$d_{a,grenz} = \max \left\{ \begin{array}{l} 2,00 \text{ mm} ; \\ \frac{3}{4} \cdot d_{a,min} ; \end{array} \right.$$

- $\gamma_{a,1}$  Belastungsabhängiger Sicherheitsbeiwert [-]  
 $\Delta d_a$  Erwartungswert der Eindrückung (u.a. abhängig von  $d_{a,min}$ ) [mm]  
 $\gamma_{a,2}$  Konstanter Sicherheitsbeiwert (Herstellungsgenauigkeit) [-]  
 $\gamma_{a,3}$  Korrekturwert für Unterschied Mittelwert – Minimalwert [-]

## 7.4.2 Bestimmung der Sicherheitsbeiwerte

Bildet man, sowohl für die Belastung durch Umlenkbelastung als auch für die Messwerte der Eindrückung in die PE-Hüllen, Klassen geeigneter Intervallgröße (z.B. Messwerte zwischen -0,05 und -0,15 werden in die Klasse -0,10 eingeordnet usw.), so kann man deren statistische Verteilung abhängig von der Belastung (-sklasse) untersuchen. Für die gemessenen Eindrückungen der eigenen Versuche kann auch für hohe Druckbelastungen annähernd eine Normalverteilung angenommen werden. Dies ist auf die systematische Wahl der Messstellen in Längs- und Querrichtung und die bei Bandspanngliedern mit Gewissheit zu bestimmende Umlenkbelastung zurückzuführen.

Die Bestimmung der Sicherheitsbeiwerte wird im Folgenden für die innere Ummantelung durchgeführt. Für die gewählte Vorgehensweise ist besonders die Abweichung des 5%-Quantilwerts abzüglich des konstanten Sicherheitsbeiwerts vom Erwartungswert der Eindrückung von Interesse. Als konstanter Sicherheitsbeiwert wird sowohl für die Runddrahtlitze als auch für die Kompaktlitze 0,25 mm gewählt (Tabelle 7.4). Dieser Wert liegt über den Abweichungen 0,11 mm und 0,24 mm, die bei den Versuchen vorlagen (im Mittel 0,17 mm bei insgesamt neun Versuchen). Unabhängig von Belastung oder Litzenform

soll dieser Wert Ungenauigkeiten aus dem Herstellprozess erfassen. Das statistische Modell ermittelt die zu erwartenden Eindrückungen auf Basis der mittleren Ausgangswanddicke. Diese liegt jedoch per se stets über den Mindestausgangswanddicken, für die das Bemessungsmodell gültig sein soll. Als kleinster Abstand zwischen Mindestwert und Mittelwert, der mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit (> 95 %) gegeben ist, wird der Wert 0,10 mm angesetzt (Tabelle 7.4). Dieser Wert entspricht folglich dem „Korrekturwert“ für den Unterschied Minimalwert vs. Mittelwert der Ausgangswanddicke der inneren PE-Umhüllung. Für die Ermittlung des belastungsabhängigen Sicherheitsbeiwerts ist nach verwendeter Litzenform zu unterscheiden. Die Streuung der Messergebnisse ist bei der kompaktierten Litze deutlich geringer, was im Bemessungsmodell wiedergegeben werden soll. Der belastungsabhängige Sicherheitsbeiwert wird auf Basis der statistischen Kennwerte für die Runddrahtlitze („RDL“) zu 1,50 und für die Kompaktlitze („KL“) zu 1,25 gewählt (Tabelle 7.4). Analog werden die Sicherheitsbeiwerte für die äußere Ummantelung ermittelt. Im Gegensatz zur inneren Ummantelung werden für beide Litzenformen gleich große Beiwerte gewählt. Das PE-HD der inneren Ummantelung füllt bei hoher Belastung durch Plastifizieren die Zwickel der Runddrahtlitze. Für die äußere Ummantelung spielt es somit keine Rolle, welche Litzenform der Spannstahl hat.

Tabelle 7.4 fasst alle Sicherheitsbeiwerte zusammen.

**Tabelle 7.4: Sicherheitsbeiwerte des eigenen Bemessungsvorschlags**

<i>Bezeichnung</i>	<i>Wert</i>	<i>Ummantelung</i>		<i>Spannstahlform</i>	
		<i>Innen</i>	<i>Außen</i>	<i>Runddrahtlitze</i>	<i>Kompaktlitze</i>
$\gamma_{i,1-RDL}$	1,50	X		X	
$\gamma_{i,1-KL}$	1,25	X			X
$\gamma_{i,2}$	0,25 mm	X		X	X
$\gamma_{i,3}$	0,10 mm	X		X	X
$\gamma_{a,1}$	1,20		X	X	X
$\gamma_{a,2}$	0,50 mm		X	X	X
$\gamma_{a,3}$	0,15 mm		X	X	X

### 7.4.3 Innere Gleitung

Die Belastungen, denen ein Spannglied bei einem Umlenkversuch ausgesetzt ist, unterscheiden sich von den Belastungen beim Anspannvorgang des Zugglieds im Bauwerk. Die Stahllitzen werden bei letzterem mit einer Last, die linear bis zur Ziellast ansteigt, „durch“ die Monolitzenmäntel gezogen. Beim Versuch hingegen hat man aufgrund der kurzen Spanngliedlänge nach kurzem Spannweg bereits die Ziellast erreicht und zieht das Spannglied den Großteil des Überziehwegs unter Ziellast über die Umlenkstelle. Die Belastungen im Bauwerk sind daher günstiger. Das der Bemessung zu Grunde liegende Modell berücksichtigt jedoch die Beanspruchung während eines Umlenkversuchs. Eine Vergleichsbetrachtung Bauwerk - Versuch ist erforderlich.

Innere Gleitung führt bei sonst gleichen Randbedingungen durch Abrieb zu größeren Eindrückungen in die innere Ummantelung von Bandspanngliedern. Im statistischen Modell wird dieser Effekt mit einem Term (Gleichung 7.5) beschrieben, dessen Verlauf in Abbildung 7.2 für drei unterschiedlich große Überziehwegen mit Innerer Gleitung grafisch dargestellt ist.

$$\Delta d_{i,iG} = \frac{1,10 \cdot l_{iG} \cdot p}{10^6}; \quad (7.5)$$

mit

- $\Delta d_{i,iG}$     Zusätzliche Eindrückung in den Innenmantel eines Bandspannglieds aus Innerer Gleitung [mm]  
 $l_{iG}$         Länge der Inneren Gleitung [mm]  
 $p$             Umlenkbelastung, z.B. nach Gleichung 4.9 [N/mm]

Mit einer Analogie zu einer Arbeitsbetrachtung lassen sich die Versuchsergebnisse mit der Situation am Bauwerk vergleichen. Die bei einem Umlenkversuch nach ETAG 013 (2002) verrichtete Verschleißarbeit  $W_{\text{Versuch}}$  ermittelt sich unter Vernachlässigung des Anspannvorgangs zu (Analogie zur Volumenberechnung eines Quaders):

$$W_{\text{Versuch}} = \Delta d_{i,iG} \cdot p = \frac{1,10 \cdot l_{iG} \cdot p^2}{10^6}; \quad (7.6)$$

mit

- $W_{\text{Versuch}}$     Verschleißarbeit beim Umlenkversuch [N]  
 $l_{iG}$         Länge der Inneren Gleitung [mm]  
 $p$             Umlenkbelastung, z.B. nach Gleichung 4.9 [N/mm]

Bei der Berechnung der Verschleißarbeit beim Anspannvorgang am Bauwerk ist zusätzlich zum linearen Spannstahlspannungsverlauf der lineare lastabhängige Verlauf des infolge Innerer Gleitung auftretenden zusätzlichen Verschleißes zu berücksichtigen. In Analogie zur Volumenberechnung eines allgemeinen Kegels ermittelt sich die verrichtete Verschleißarbeit hier zu:

$$W_{\text{Bauwerk}} = \frac{1}{3} \cdot \frac{1,10}{10^6} \cdot l_{iG} \cdot p^2; \quad (7.7)$$

mit

- $W_{\text{Bauwerk}}$     Bemessungswert der Verschleißarbeit am Bauwerk [N]  
 $l_{iG}$         Länge der Inneren Gleitung [mm]  
 $p$             Umlenkbelastung, z.B. nach Gleichung 4.9 [N/mm]

Abbildung 7.3 zeigt beide Verschleißarbeitsfunktionen in Abhängigkeit von Überziehweg  $l_{iG}$  und Umlenkbelastung  $p$ . Es ist klar erkennbar, dass eine gleich große Verschleißarbeit am Bauwerk bei gleicher Ziellast (Umlenkbelastung) nach einem größeren Überziehweg mit vollständiger Innerer Gleitung als im Versuch erreicht wird. Der Wert der Verschleißarbeit

beim Umlenkversuch beträgt nach Gleichung 7.7 stets das Dreifache des Wertes der Verschleißarbeit am Bauwerk, sofern Umlenkbelastung und Überziehweg am Bauwerk und beim Versuch gleich groß sind. Für das Bemessungsmodell können einer gegebenen Beanspruchung am Bauwerk nun exakte Ergebnisse aus dem Versuch zugeordnet werden.

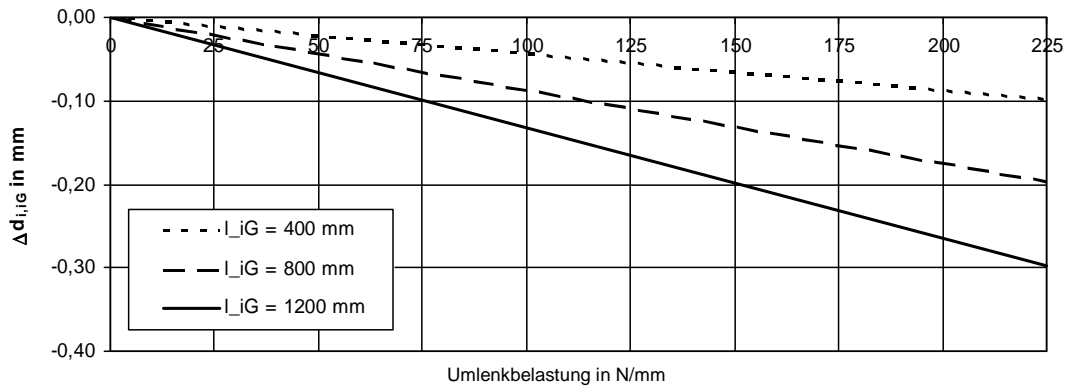


Abbildung 7.2: Linearer Ansatz für zusätzliche umlenkbelastungsabhängige Eindrückung in den Innenmantel durch Innere Gleitung – Beispiele mit  $l_{iG} = k \cdot 400$  mm ( $k = 1, 2, 3$ )

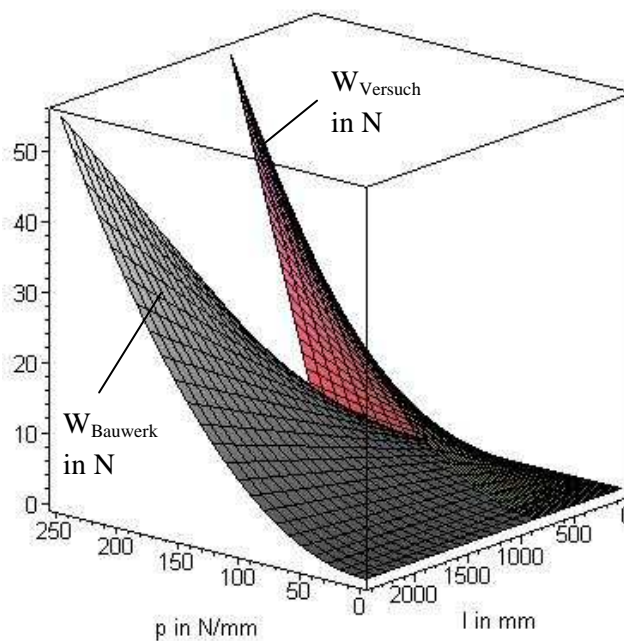


Abbildung 7.3: Verschleißarbeit in Abhängigkeit vom Überziehweg bei Innerer Gleitung – Vergleich Umlenkversuch und Bauwerk

## 7.4.4 Bemessungsdiagramme

Da die Parameter des Bemessungsmodells iterativ ermittelt werden müssen, wird es zum Ziele der vereinfachten Handhabung grafisch in Form einer Bemessungskurve dargestellt. Dabei kann die Bemessung getrennt nach Litzenform durchgeführt werden (Runddrahtlitze: Bemessungsdiagramm aus Abbildung 7.4; Kompaktlitze: Bemessungsdiagramm aus Abbildung 7.5). Mit Hilfe dieser Diagramme ist es möglich sowohl ausgehend von einer gegebenen Mindestwanddicke für eine Ummantelung auf die maximal zulässige Umlenkbelastung zu schließen als auch umgekehrt. Den Diagrammen werden die Anforderungen der ETAG 013 (2002) für Bandspanngliedschutzhüllen an die Mindestrestwanddicken nach Durchführung eines Umlenkversuchs zugrunde gelegt.

Die Eingangsparameter Umlenkbelastung  $p_{max}$  und Überziehweg mit Innerer Gleitung am Bauwerk  $l_{IG,Bauwerk}$  können gemäß Gleichung 7.8 bzw. Gleichung 7.9 bestimmt werden.

$$p_{max} = \frac{a_p \cdot \sigma_p}{R} \cdot k_{max} ; \quad (7.8)$$

mit

$p_{max}$	Maximale Umlenkbelastung [N/mm]
$a_p$	Querschnittsfläche eines einzelnen Spannstahelements [mm <sup>2</sup> ] (z.B. Litze, Draht)
$\sigma_p$	Maximale Spannstahtspannung [N/mm <sup>2</sup> ] (z.B. 70 % der Nennfestigkeit)
$R$	(Resultierender) Umlenkradius [mm]
$k_{max}$	Maximaler Stapelfaktor [-]

$$l_{IG,Bauwerk} = \lambda_{IG,zul} \cdot \frac{f_{pk}}{E_p} \cdot l_{FA} ; \quad (7.9)$$

mit

$l_{IG,Bauwerk}$	Überziehweg mit Innerer Gleitung am Bauwerk [m]
$\lambda_{IG,zul}$	Zulässiger Anteil an Innerer Gleitung, $\lambda_{IG,zul} \in [0; 1]$
$f_{pk}$	Nennfestigkeit des Spannstahts [N/mm <sup>2</sup> ]
$E_p$	E-Modul des Spannstahts [N/mm <sup>2</sup> ]
$l_{FA}$	maximaler Abstand einer Umlenkstelle vom Festanker [m]

Eindrückungen in den Innenmantel von Bandspanngliedern sind abhängig von Innerer Gleitung und Umlenkbelastung. Im Bemessungsdiagramm ist die Mindestausgangswanddicke der PE-Hülle in Abhängigkeit von der Belastung durch eine Kurve mit kontinuierlichem Verlauf dargestellt. Für die Berücksichtigung der Inneren Gleitung wurden insgesamt fünf dieser Kurven bei konstanten Werten (Vielfache von 1200 mm) gegeben. Zwischenwerte können interpoliert werden. Der Kurvenverlauf folgt zunächst einem konstanten Wert, der bei der Runddrahtlitze in Folge eines etwas höheren Sicherheitsbeiwerts  $\gamma_{i,1}$  über dem Wert der Kompaktlitze liegt. Bei der iterativen Ermittlung

der Eindrückung wird als Mindestwert für die Ausgangswanddicke stets ein Wert von 1,50 mm angesetzt. Dieser ergibt sich aus den Versuchsdaten, die dem Bemessungsmodell zu Grunde liegen. Es wurden stets PE-Hüllen mit Ausgangswanddicken über 1,50 mm geprüft.

Nach einem konstanten Verlauf steigt die Bemessungskurve bei höheren Umlenkbelastungen an. Bei einer Mindestausgangswanddicke von 1,50 mm knickt der Verlauf der Kurve ab und verläuft bei zunehmenden Umlenkbelastungen steiler. Ab diesem Knick ist die Eingangsgröße für die Ausgangswanddicke gleich dem Ergebnis für die Ausgangswanddicke. Für das gewählte Intervall der Ausgangswanddicke des Innenmantels ist nach ETAG 013 (2002) stets der konstante Wert 1,00 mm das einzuhaltende Kriterium für die Restwanddicke.

Für den äußeren Mantel von Bandspanngliedern ist die Bemessungskurve nur von der Umlenkbelastung abhängig, da Innere Gleitung hier nicht von Bedeutung ist. Nach einem konstanten Verlauf geht die Bemessungskurve auch hier in eine flach ansteigende Kurve über. Diese knickt auch ab zu einer sehr steil ansteigenden Kurve. Der Steigungssprung hat jedoch eine andere Ursache als der Steigungssprung in der Bemessungskurve für den Innenmantel. Vor dem Knick beträgt die Mindestrestwanddicke den konstanten Wert 2,00 mm. Nach dem Knick sind 75 % der Ausgangswanddicke als Mindestrestwanddicke einzuhalten. Dies ist eine extreme Verschärfung der Anforderung, die ab einer Mindestausgangswanddicke von  $2,00 \text{ mm} / 75 \% = 2,67 \text{ mm}$  wirksam wird (siehe auch Abbildung 7.1). Dabei ist es fraglich, ob diese Anforderung aufrechterhalten werden soll. Schließlich ist bei der äußeren Ummantelung, wie u.a. die experimentellen Untersuchungen zeigten, nicht mit einer Zunahme der Eindrückung durch Innere Gleitung oder Nachspannen zu rechnen. Reduziert man das ETAG 013 Kriterium für die Restwanddicke des Außenmantels auf die Einhaltung allein des konstanten Werts 2,00 mm, so entfällt der Knick in der Kurve. Für beide Litzenformen ist die modifizierte Kurve in den Bemessungsdiagrammen in Abbildung 10.19 und Abbildung 10.20 dargestellt (Anhang).

Mit dem Bemessungsdiagramm für Runddrahtlitzen wird die Vorgehensweise bei der Anwendung der Diagramme in Abbildung 7.6 für zwei Beispiele, A und B, illustriert. Für Bemessungsvariante A wird zunächst die minimale Ausgangswanddicke der inneren Ummantelung aus Herstellungsgründen zu 1,85 mm gewählt. Der Hersteller stellt zudem sicher, dass am Bauwerk keine Innere Gleitung auftritt, d.h.  $l_{IG, \text{Bauwerk}} = 0$ . Am Schnittpunkt der Horizontalen A1 mit der Bemessungskurve für den Innenmantel „0 mm Innere Gleitung“ folgt man im Diagramm der Strecke A2 vertikal nach unten bis zum Schnittpunkt mit der Bemessungskurve für den Außenmantel. Dieser Schnittpunkt dient als Verzweigungspunkt. Einerseits kann über eine horizontale Strecke A3 I die Mindestausgangswanddicke des äußeren Mantels zu 2,50 mm bestimmt werden. Andererseits kann über A3 II, die Verlängerung der Strecke A2, die zu den Ausgangswanddicken zugehörige maximal zulässige Umlenkbelastung von 129 N/mm und, nach Umrechnung gemäß Gleichung 7.8, schließlich der minimale Umlenkradius ermittelt werden.



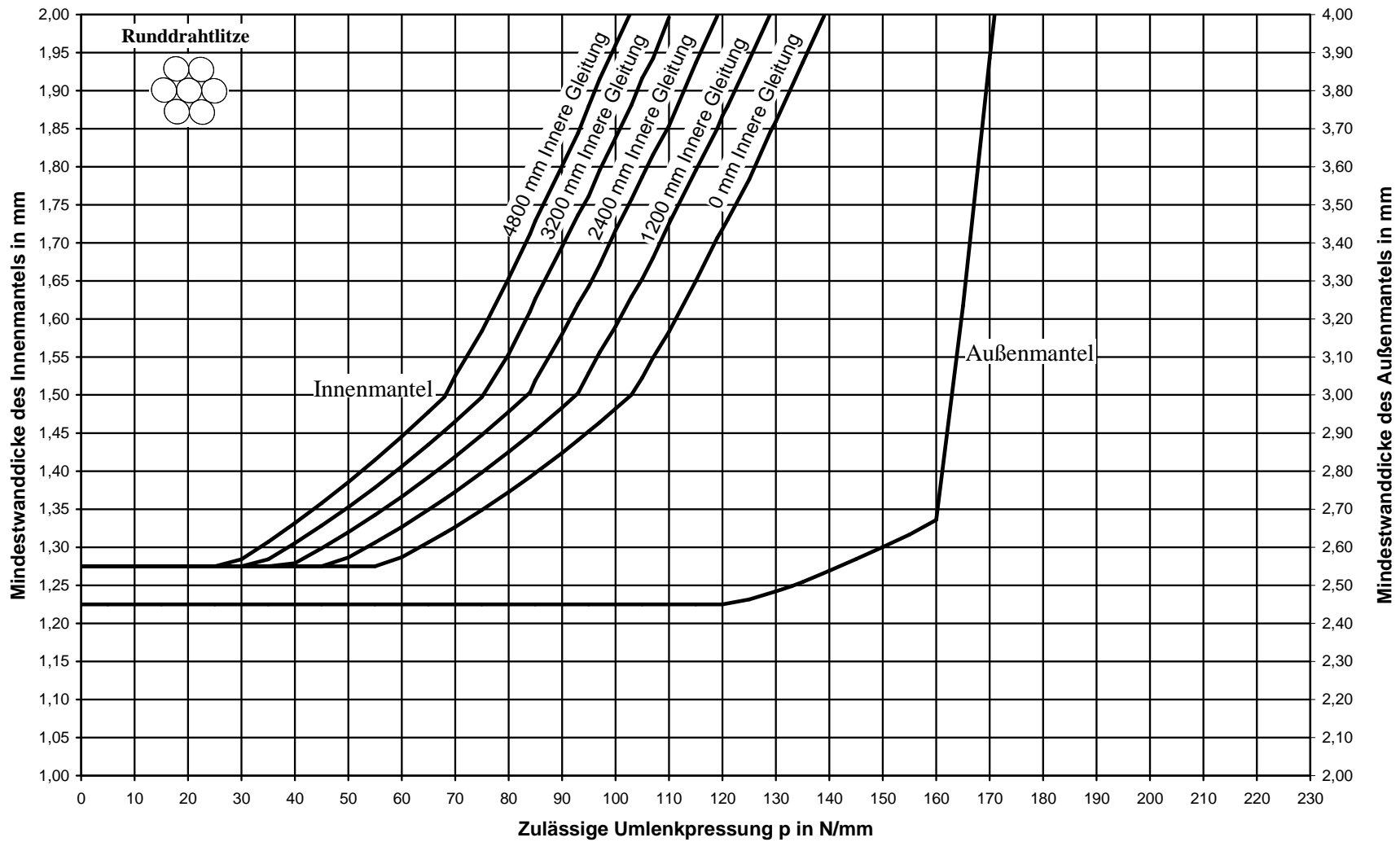


Abbildung 7.4: Bemessungsdiagramm für PE-Schutzhüllen von Bandspanngliedern mit Runddrahtlitzen für Anforderungen nach ETAG 013

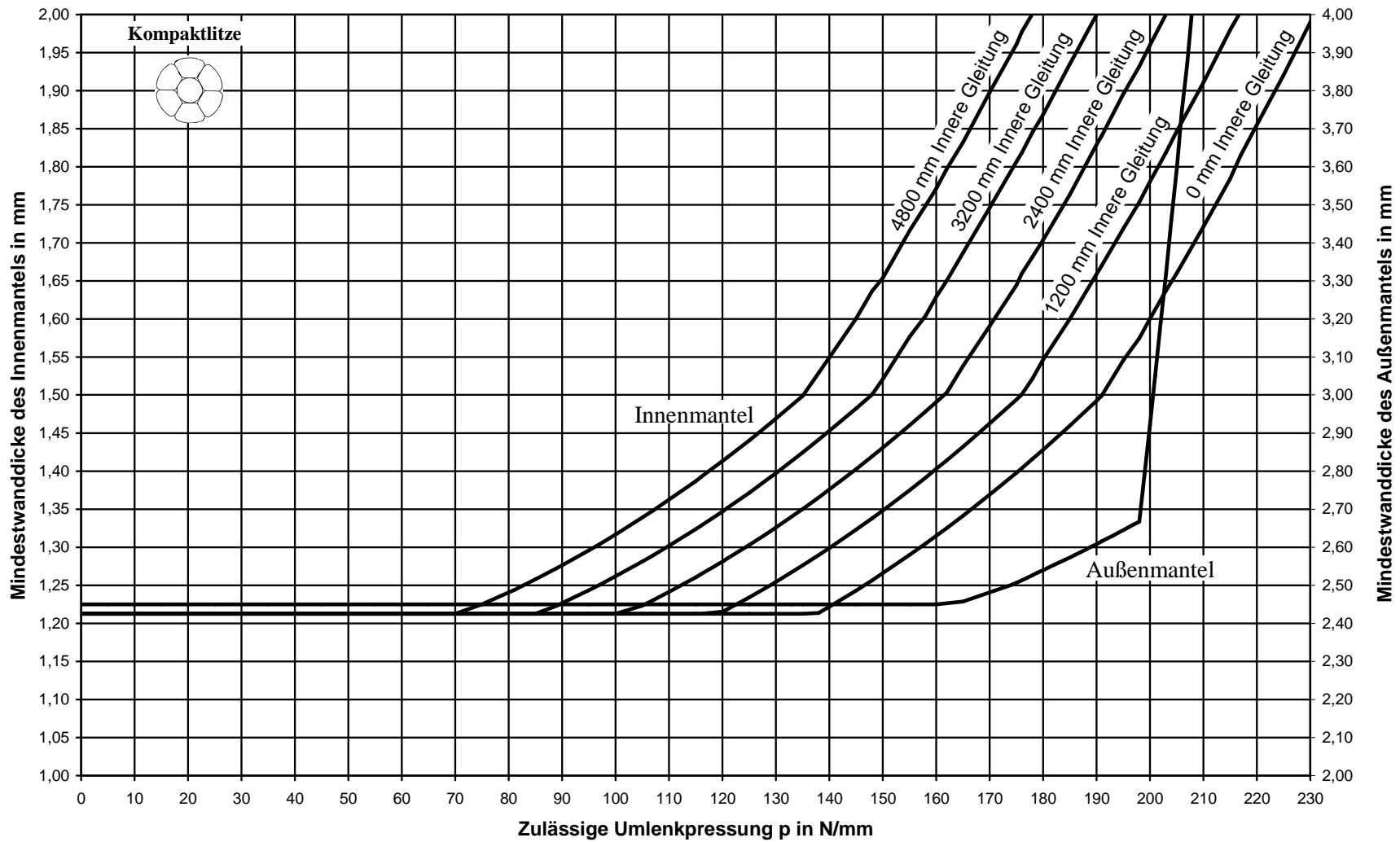


Abbildung 7.5: Bemessungsdiagramm für PE-Schutzhüllen von Bandspanngliedern mit Kompaktlitzen für Anforderungen nach ETAG 013

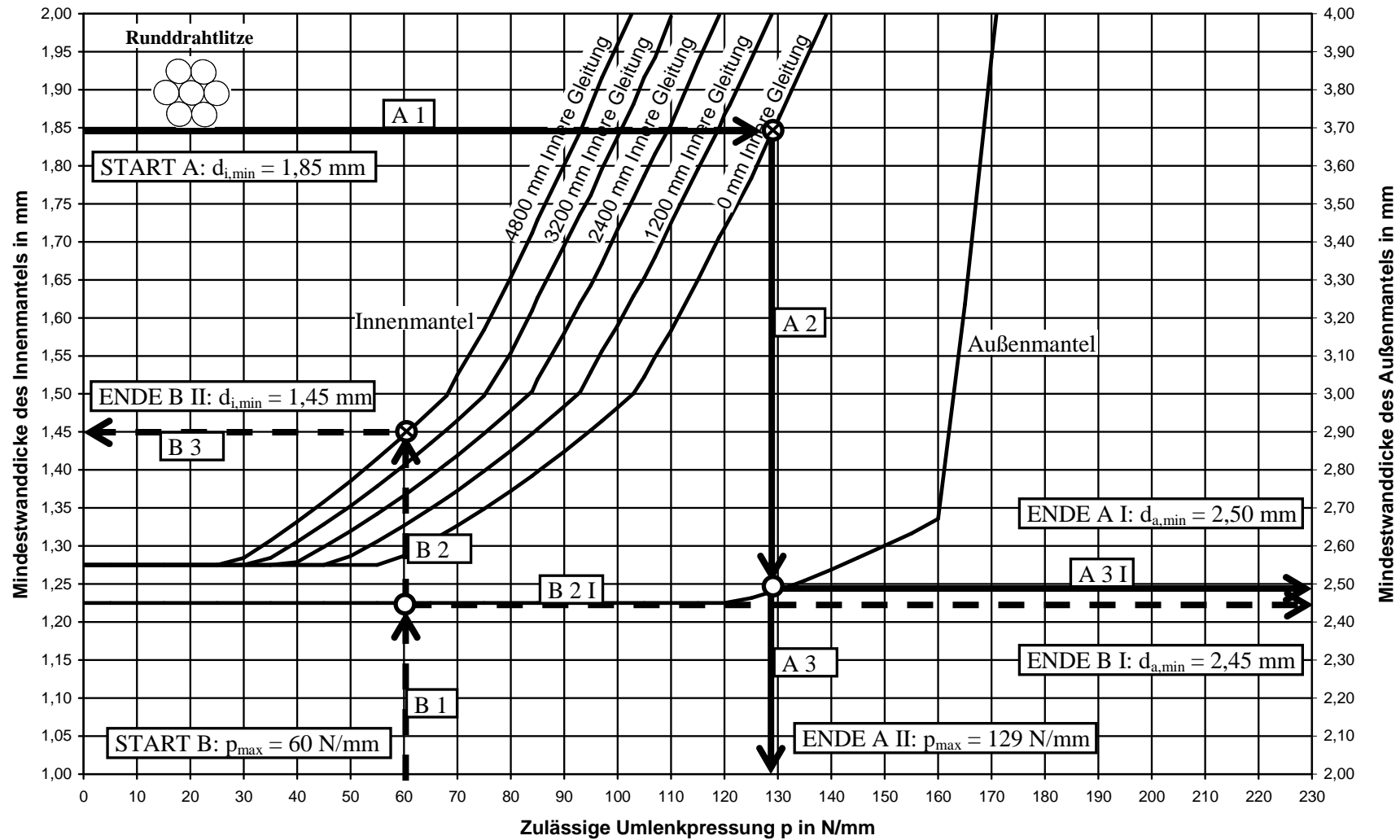


Abbildung 7.6: Beispielanwendung eines Bemessungsdiagramms für PE-Schutzhüllen von Bandspanngliedern

## 7.5 Eigener Bemessungsvorschlag für einlagige Schutzhüllen

Für einlagige Schutzhüllen liegen zwar einige Versuchsergebnisse zum Eindrückverhalten von Spannstahl vor, allerdings ist eine exakte Quantifizierung der dabei vorhandenen Randbedingungen (z.B. Höhe der Umlenkbelastung) nicht möglich. Diese können lediglich abgeschätzt werden. Die Ableitung eines Bemessungsmodells aus diesen Versuchsergebnissen ist daher nicht möglich. Hierzu wären Kleinversuche hilfreich, in denen einzelne Spannstahlelemente mit definierter Umlenkbelastung in verschiedenen dicke PE-HD Lagen eingedrückt werden.

Im Folgenden wird dargestellt, wie man auf Basis der Ergebnisse eines Umlenkversuchs Aussagen über das Eindrückverhalten am untersuchten Spannglied sowie für andere Spanngliedgrößen mit unterschiedlichen Wanddicken treffen kann bzw. zulässige Umlenkradien zur Einhaltung der Mindestwanddicken gemäß ETAG 013 festlegt. Dabei wird gleiches Ausgangsmaterial verwendet (z.B. PE-HD, Spannstahlform, Umlenkformteile etc.). Alle Spanngliedkonfigurationen werden mit Hilfe des in Kapitel 6.2 vorgestellten mechanischen Modells auf das im Versuch untersuchte System zurückgeführt. Das Bemessungsmodell ist allgemein formuliert, so dass auch von ETAG 013 verschiedene Kriterien verwendet werden können.

Der minimal zulässige Umlenkradius einer Spanngliedgröße ergibt sich durch Multiplikation des im Umlenkversuch gegebenen Radius mit drei dimensionslosen Anpassungsfaktoren, die den Einfluss der Variation von Versuchskonfiguration, Umlenkbelastung (z.B. unterschiedliche Spanngliedgröße) sowie PE-HD Wanddicke quantifizieren.

$$R_{min} = R_{Versuch} \cdot \eta_{Versuch} \cdot \eta_{Umlenkbelastung} \cdot \eta_{Wanddicke} \quad (7.11)$$

mit

$R_{min}$	Minimal zulässiger Umlenkradius [m]
$R_{Versuch}$	Im Umlenkversuch verwendeter Umlenkradius [m]
$\eta$	Anpassungsfaktoren [-]

### 7.5.1 Anpassungsfaktor bzgl. Versuch

Durch Multiplikation des bei einem Umlenkversuch verwendeten Umlenkradius mit dem Anpassungsfaktor bzgl. Versuch  $\eta_{Versuch}$  wird derjenige Umlenkradius ermittelt, bei dem sich für die Versuchsspanngliedgröße genau die nach ETAG 013 zulässige Eindrückung ergibt. Der Anpassungsfaktor bzgl. Versuch entspricht dem Verhältnis der den tatsächlichen und zulässigen Eindrückungen gemäß dem Basismodell zugeordneten, theoretischen Umlenkbelastungen (vgl. Gleichung 6.11 bzw. Abbildung 7.7).

$$\eta_{Versuch} = \frac{p(t_{Versuch})}{p(t_{zul,Versuch})}; \quad (7.12)$$

mit

$\eta_{\text{Versuch}}$	Anpassungsfaktor zur Berücksichtigung der Abweichung der im Versuch gemessenen von der zulässigen Eindrückung, z.B. aus ETAG 013 [-]
$p$	Rechnerische Umlenkbelastung nach Gleichung 6.11 [N/mm]
$t_{\text{Versuch}}$	Maximale Eindrückung des Spannstahls in das Hüllrohr beim Versuch [mm]
$t_{\text{zul,Versuch}}$	Maximal zulässige Eindrückung des Spannstahls in das Hüllrohr der Versuchsspanngliedgröße, z.B. aus ETAG 013 [mm]

### 7.5.2 Anpassungsfaktor bzgl. Umlenkbelastung

Durch Multiplikation des bei einem Umlenkversuchs verwendeten Umlenkradius mit dem Anpassungsfaktor bzgl. Umlenkbelastung  $\eta_{\text{Umlenkbelastung}}$  wird derjenige Umlenkradius rechnerisch ermittelt, bei dem sich für eine neue, verschiedene Spanngliedgröße genau die für die Versuchsspanngliedgröße gemessene Eindrückung ergibt. Der Anpassungsfaktor bzgl. Umlenkbelastung entspricht dem Verhältnis der maximalen Umlenkbelastungen von neuer- und Versuchsspanngliedgröße. Die maximalen Umlenkbelastungen können nach Gleichung 4.9 ermittelt werden.

$$\eta_{\text{Umlenkbelastung}} = \frac{P_{\text{max,neu}}}{P_{\text{max,Versuch}}}; \quad (7.13)$$

mit

$\eta_{\text{Umlenkbel.}}$	Anpassungsfaktor zur Berücksichtigung unterschiedlicher Spanngliedgrößen [-]
$p_{\text{max,neu}}$	Maximale Umlenkbelastung für neue Spanngliedgröße [-]
$p_{\text{max,Versuch}}$	Maximale Umlenkbelastung für Versuchsspanngliedgröße [-]

### 7.5.3 Anpassungsfaktor bzgl. Wanddicke

Der Anpassungsfaktor bzgl. Wanddicke  $\eta_{\text{Wanddicke}}$  quantifiziert den Einfluss der Wanddicke auf das Eindrückverhalten von Spannstahl. Eine unterschiedliche Wanddicke führt einerseits zu einem unterschiedlichen Einsinkungsverhalten (Querdehnungsbehinderung). Andererseits verschiebt sich auch die maximal zulässige Eindrückung (z.B. 25 % von  $d_0$  bei Nachspannbarkeit des Systems).

$$\eta_{\text{Wanddicke}} = \frac{p(t_{\text{zul,Versuch}}; d_{0,\text{Versuch}})}{p(t_{\text{zul,neu}}; d_{0,\text{neu}})}; \quad (7.14)$$

mit

$\eta_{\text{Wanddicke}}$	Anpassungsfaktor zur Berücksichtigung verschiedener PE-HD Wanddicken [-]
$p$	Rechnerische Umlenkbelastung nach Gleichung 6.11 [N/mm]
$t_{\text{zul,Versuch}}$	Maximal zulässige Eindrückung des Spannstahls in das Hüllrohr der Versuchsspanngliedgröße, z.B. aus ETAG 013 [mm]

$t_{zul,neu}$	Maximal zulässige Eindrückung des Spannstahls in das Hüllrohr mit neuer Wanddicke, z.B. aus ETAG 013 [mm]
$d_{0,neu}$	PE-HD Wanddicke der neuen Spanngliedgröße [mm]
$d_{0,Versuch}$	PE-HD Wanddicke der Versuchsspanngliedgröße [-]

#### 7.5.4 Fallstudie

Es wird ein Umlenkversuch nach ETAG 013 mit einem nachspannbaren Bündelspannglied mit 25 Litzen à 150 mm<sup>2</sup> bei einer Spannung von 70% · 1770 N/mm<sup>2</sup> bei einem Umlenkradius von 3,5 m durchgeführt (vgl. Kapitel 5.1). Das PE-HD Hüllrohr hat eine Ausgangswanddicke von  $d_{0,Versuch} = 6,0$  mm und einen Außendurchmesser von 120 mm. Die minimale Restwanddicke nach Durchführung des Umlenkversuchs beträgt 4,0 mm,  $t_{Versuch}$  demnach 2,0 mm. Der maximale Stapelfaktor für dieses Bündelspannglied mit 25 Litzen beträgt gemäß Gleichung 4.22 (Vereinfachtes Verfahren)  $k_{max,Versuch} = 7,3$ .

Es soll nun sowohl für die Versuchsspanngliedgröße als auch für eine neue Spanngliedgröße der minimal zulässige Umlenkradius ermittelt werden, so dass die Kriterien der ETAG 013 an die einlagige PE-HD Schutzhüllen von nachspannbaren Spanngliedern eingehalten sind.

Die neue Spanngliedgröße hat neben der Nachspannbarkeit folgende Spezifikationen:

- Spannstahl: 40 Litzen à 150 mm<sup>2</sup> bei einer Spannung von 70% · 1860 N/mm<sup>2</sup>,
- Hüllrohr: Ausgangswanddicke  $d_{0,neu} = 7,0$  mm und Außendurchmesser 150 mm,
- Stapelfaktor:  $k_{max,neu} = 9,2$  (nach Gleichung 4.22).

Versuchsspanngliedgröße:

$$R_{min} = R_{Versuch} \cdot \eta_{Versuch} \cdot \eta_{Umlenkbelastung} \cdot \eta_{Wanddicke} = 3,5m \cdot 1,33 \cdot 1,00 \cdot 1,00 = 4,6m; \quad (7.11-a)$$

mit

$$\eta_{Versuch} = \frac{p(t_{Versuch})}{p(t_{zul,Versuch})} = \frac{p(-2,0)}{p(-1,5)} = \frac{302N/mm}{228N/mm} = 1,33; \quad (7.12-a)$$

$$\eta_{Umlenkbelastung} = \frac{P_{max,neu}}{P_{max,Versuch}} = \frac{P_{max,Versuch}}{P_{max,Versuch}} = 1,00; \quad (7.13-a)$$

$$\eta_{Wanddicke} = \frac{p(t_{zul,Versuch}; d_{0,Versuch})}{p(t_{zul,neu}; d_{0,neu})} = \frac{p(t_{zul,Versuch}; d_{0,Versuch})}{p(t_{zul,Versuch}; d_{0,Versuch})} = 1,00; \quad (7.14-a)$$

Der minimal zulässige Radius zur Einhaltung des Restwanddickekriteriums für nachspannbare Spannglieder aus ETAG 013 errechnet sich gemäß Gleichung 7.11-a zu 4,6 m. Die Anpassungsfaktoren bzgl. Umlenkbelastung und Wanddicke ergeben sich beide zu 1,00, da die zugehörigen Parameter im Vergleich zum Versuch nicht verändert wurden.

Neue Spanngliedgröße:

$$R_{min} = R_{Versuch} \cdot \eta_{Versuch} \cdot \eta_{Umlenkbelastung} \cdot \eta_{Wanddicke} = 3,5m \cdot 1,33 \cdot 1,34 \cdot 0,95 = 5,9m; \quad (7.11-b)$$

mit

$$\eta_{Versuch} = \frac{p(t_{Versuch})}{p(t_{zul,Versuch})} = \frac{p(-2,0)}{p(-1,5)} = \frac{302N/mm}{228N/mm} = 1,33; \quad (7.12-b)$$

$$\eta_{Umlenkbelastung} = \frac{P_{max,neu}}{P_{max,Versuch}} = \frac{1860N/mm^2 \cdot 9,2}{1770N/mm^2 \cdot 7,3} = 1,34; \quad (7.13-b)$$

$$\eta_{Wanddicke} = \frac{p(t_{zul,Versuch}; d_{0,Versuch})}{p(t_{zul,neu}; d_{0,neu})} = \frac{p(-1,5; 6,0)}{p(-1,75; 7,0)} = \frac{228N/mm}{240N/mm} = 0,95; \quad (7.14-b)$$

Der minimal zulässige Radius zur Einhaltung des Restwanddickekriteriums für nachspannbare Spannglieder aus ETAG 013 errechnet sich für die neue Spanngliedgröße gemäß Gleichung 7.11-b zu 5,9 m. Für den Anpassungsfaktor bzgl. Umlenkbelastung ist hier einerseits zu berücksichtigen, dass nun eine größere Spannstahtspannung aufgebracht wird. Andererseits liegt für die neue Spanngliedgröße ein anderer Stapelfaktor vor. Die größere Wanddicke des Hüllrohrs der neuen Spanngliedgröße führt zu einer größeren, zulässigen Eindrückung von 1,75 mm. Damit ist die Aufnahme einer größeren Umlenkbelastung zulässig. Die insgesamt etwas dickere PE-Schutzhülle führt dagegen zu einer weicheren Bettung und folglich zu einer geringeren, zulässigen Umlenkbelastung. Der letzte Effekt ist jedoch geringer ausgeprägt, so dass der Anpassungsfaktor bzgl. Wanddicke schließlich kleiner als 1 ist.

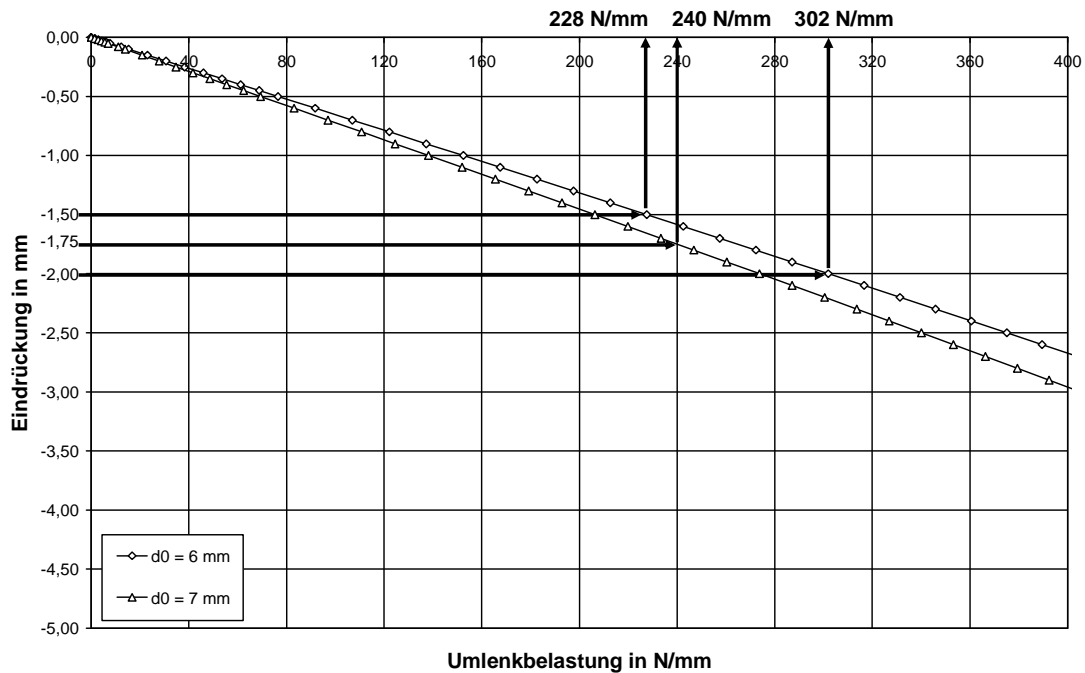


Abbildung 7.7: Rechnerische Eindrückungen von Runddrahtlitzen nach Gleichung 6.11, Rechnerische Umlenkbelastungen bei Eindrückungen in PE-HD Lage mit  $d_0 = 6$  mm von 1,5 mm und 2,0 mm und mit  $d_0 = 7$  mm von 1,75 mm

## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Verhalten von Stahlumhüllungen aus Polyethylen hoher Dichte (PE-HD). Sie werden bei verbundlosen Spanngliedern als Korrosionsschutz eingesetzt und unterliegen an Umlenkstellen einer hohen Beanspruchung. Ziel der Arbeit war die Erarbeitung des quantitativen Einflusses verschiedener Beanspruchungsparameter (z.B. Umlenkbelastung, Reibung, Querschnittsform des Stahls) auf die Eindrückungen von Spannstahl in die Schutzhülle. Durch die Eindrückungen wird die Dicke der PE-HD Hüllen und somit der Widerstand gegen eindringende, korrosionsfördernde Stoffe reduziert, wodurch die Dauerhaftigkeit des Spannglieds und des Bauteils, in dem es angeordnet ist, herabgesetzt wird. Diese Fragestellung ist vor allem für verbundlose Spannglieder relevant. Sie werden im Brücken-, Hoch- und Ingenieurbau eingesetzt. Bei Brückenbauwerken können sie sowohl außerhalb als auch innerhalb des Betonquerschnitts angeordnet werden. Bei Hoch- und Ingenieurbauwerken werden sie fast nur intern geführt.

Die Höhe der Umlenkbelastung, die durch die Umlenkung eines Spannglieds zwischen Spannstahl und Kunststoff anliegt, bestimmt maßgeblich den Verschleiß der Kunststoffhüllen. Der Verschleiß entspricht der Reduzierung der Schutzhüllendicke durch die Eindrückung des härteren Stahls. Die Höhe der Umlenkbelastung kann bei Bandspanngliedern aufgrund der vorbestimmten geometrischen Anordnung des Spannstahls genau ermittelt werden. Bei Spanngliedern mit loser Anordnung des Stahls in einem Hüllrohr ist die Umlenkbelastung unter den einzelnen am Rohr anliegenden Spannstahlelementen nicht direkt vorherzusagen. Es wird daher der „Stapelfaktor“ eingeführt. Er gibt an, um wie viel größer die Umlenkbelastung unter einem anliegenden Spannstahlelement im Vergleich zu derjenigen Belastung ist, die sich bei der Umlenkung genau eines Spannstahlelements ergibt. Bei stapelbaren Bandspanngliedern entspricht der Stapelfaktor der Anzahl der übereinander gestapelten Bänder. Bei Spanngliedern mit lose im Hüllrohr verlegten Spannstahlelementen hängt die Bestimmung des Stapelfaktors sehr stark von der Anordnung der Elemente im Hüllrohr ab und kann demzufolge stark schwanken. Ist die Lage der Spannstahlelemente im Rohr bekannt, so können die Stapelfaktoren mit einem Fachwerkmodell rechnerisch ermittelt werden. Es sind dies die radial gerichteten Auflagerkräfte bei einer Belastung aller Spannstahlelemente des Zugglieds mit der vertikalen (Umlenk-) Kraft  $F$ . Ein allgemeiner Lösungsansatz für die Anordnung des Stahls im Hüllrohr liegt bisher in der Fachwelt nicht vor, weshalb im Zuge der Untersuchungen zwei Algorithmen entwickelt wurden, mit deren Hilfe man möglichst tief liegende Anordnungen für gleich große Kreise in einem Hüllkreis findet. Der erste Algorithmus löst die Fragestellung als nichtlineares Optimierungsproblem. Der zweite Algorithmus, der Modifizierte Pulsating Disk Shaking (M-PDS) Algorithmus, simuliert zur Lösung einerseits das physikalische Schütteln eines Behälters und andererseits die Wirkung der Umlenkkraft. Beide Methoden führen zu gleichwertigen Ergebnissen. Bisher wurde versucht, diese Fragestellung mit aufwändig hergestellten maßstäblichen Modellen zu lösen. Der große Vorteil der Algorithmen liegt zum einen in ihrer beliebigen Wiederholbarkeit, zum anderen



in der Möglichkeit mit vertretbarem Aufwand für unterschiedliche Konfigurationen realistische Anordnungen für den Spannstahl und folglich Aussagen über die Belastungen der PE-Hüllen zu finden. Für die Abschätzung der maximalen Druckbeanspruchung der Schutzhüllen ist die Kenntnis des Maximalwerts der Stapelfaktoren entscheidend. Für die Anwendung und Verbreitung in der Praxis ist die Nutzung der Algorithmen aufgrund des sehr hohen Aufwands nicht zweckmäßig. Es werden deshalb einerseits die exakten Werte für den maximalen Stapelfaktor für die gängigsten Spanngliedgrößen tabellarisch zusammengefasst. Andererseits werden zwei Verfahren zur Abschätzung des maximalen Stapelfaktors vorgeschlagen. Er kann mit Rechnerunterstützung aus einer Analogiebetrachtung zum hydrostatischen Druck auf gekrümmte Flächen generiert werden. Mit dem „Vereinfachten Verfahren“ ist per Handrechnung sehr schnell ein gutes Ergebnis zu erzielen. Es ist damit für die praktische Anwendung von besonderem Interesse.

Bei hohen Druckbelastungen kann Reibung aufgrund einer Relativbewegung zwischen Spannstahl und PE-HD zu zusätzlichem Verschleiß führen. Diese Relativbewegung bezeichnet man als Innere Gleitung. Sie kann am Bauwerk während des Anspannvorgangs durch die elastische Verformung des Stahls auftreten. Sofern Spannstahlritzen verwendet werden, so können sich diese u.U. entsprechend ihres Gewindes verdrehen. Liegt die Umlenkstelle dabei sehr nahe am Spannanker, so können sehr hohe Torsionsspannungen in der Litze auftreten. Innere Gleitung nimmt mit zunehmender Umlenkdruckbelastung durch die Verbundwirkung zwischen dem u.U. tief eingedrückten Spannstahl und dem Kunststoff ab. Die Verbundkräfte führen dazu, dass die Korrosionsschutzhülle beim Anspannen des Spannglieds mitgezogen wird. Bei vollständigem Mitziehen liegt Äußere Gleitung vor.

Die Querschnittsform der verwendeten Spannstahlelemente ist für die Eindrückung von Spannstahl in PE-HD mitentscheidend. Im Querschnitt (annähernd) kreisförmige Spannstahlelemente (z.B. Draht, Kompaktlitze) können diese Umlenkbelastung mit vergleichsweise geringen Eindrückungen in den Kunststoff übertragen. Der profilierte Querschnitt einer gewöhnlichen Runddrahtlitze, die auch noch verdreht ist, führt dazu, dass eine ausreichend große Aufstandsfläche des Spannstahls erst bei einer größeren Einsinktiefen zur Verfügung steht. Prinzipiell gilt: je mehr Aufstandsfläche bei gegebener Einsinktiefen zur Verfügung steht, desto günstiger ist das Eindrückverhalten.

Mit einem umfangreichen experimentellen Forschungsprogramm wurde bei Bandspanngliedern der Einfluss von Umlenkbelastung, Litzenform, Gleitverhältnisse und zusätzlicher Umlenkung senkrecht zur Hauptumlenkrichtung untersucht. Bandspannglieder eignen sich hierfür besonders gut, da durch die festgelegte Querschnittsgeometrie die Druckbelastung exakt bestimmt werden kann. Durch die Stapelung in sich abgeschlossener Bänder konnten zudem insgesamt vier unterschiedliche Druckbelastungsklassen erfasst werden. Auf die Schutzhüllen von weiter außen anliegenden Bändern wirken geringere Kräfte. Die Versuche entsprachen im Aufbau und im Ablauf den Vorschlägen der europäischen Richtlinie ETAG 013 (2002): Nach dem Anspannen des Spannglieds wird dieses unter Last über einen Umlenksattel mit konstantem Radius gezogen. Im Anschluss verbleibt das Spannglied zur Erfassung der zeitabhängigen Kunststoffverformungen über einen Zeitraum von drei Wochen im angespannten Zustand bevor es schließlich entlastet und

demontiert wird. Der maßgebliche Einfluss der Umlenkbelastung auf die Restwanddicke der Schutzhüllen kann mit den Versuchen bei Runddrahtlitzen und Kompaktlitzen aufgezeigt werden. Bei letzteren wurden jedoch aufgrund der abgeflachten Querschnittsform geringere Eindrückungen gemessen. Innere Gleitung führte nur in Kombination mit hohen Druckbelastungen und nur bei der inneren Ummantelung zu etwas größeren Eindrückungen. Die zusätzliche horizontale Umlenkung führte dagegen nicht zu einem Mehrverschleiß. Bei den hier vorliegenden Verhältnissen der Radien wird der horizontale Anteil der Umlenkkraft jeder einzelnen Litze durch die vertikale Eindrückung über Verzahnung und Reibung direkt in die als Stege wirkenden, steifen PE-HD Außenhüllen eingetragen. Es trat somit keine nennenswerte Erhöhung der Druckbelastung und folglich der Eindrückungen auf.

Mit Unterstützung der Spannverfahrensanbieter, die in der Vergangenheit bereits Umlenkversuche für die Zulassung ihrer Produkte durchführten, sowie durch die Zusammenfassung bisher durchgeführter Forschungsvorhaben (Kleinmodellversuche an der RWTH Aachen, Ausbau eines Spannglieds durch die ETH Zürich/Schweiz, Umlenkversuche am SES Saint-Rémy-lès-Chevreuse/Frankreich) werden in dieser Arbeit erstmals die europäischen, experimentellen Erfahrungen mit der Umlenkung von Stahlspanngliedern mit PE-HD Hüllen gebündelt. Diese Untersuchungen wurden jedoch oftmals nicht unter vergleichbaren Randbedingungen durchgeführt, so dass eine direkte Vergleichbarkeit selten möglich ist. Nur das umfangreiche Versuchsprogramm zur Untersuchung der Bandspannglieder machte eine Isolierung der verschiedenen einwirkenden Parameter möglich.













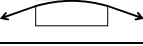
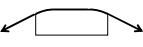


Aufbauend auf den Ergebnissen der eigenen Versuche wird mit Hilfe einer Moderatorenanalyse per Multipler Linearer Regression ein statistisches Modell zur Vorhersage der zu erwartenden Restwanddicke der inneren und äußeren Ummantelung des Spannstahls entwickelt. Dabei werden die einzelnen Parameter vor der Analyse transformiert, damit nichtlineare Zusammenhänge entsprechend erfasst werden können (Linearisierung). Basierend auf dem statistischen Modell wird ein Bemessungsmodell entwickelt, das zum einen die durch den Herstellprozess bedingten Unsicherheiten bzw. Streuungen der Ausgangswanddicke und zum anderen die Schwankungen der gemessenen Eindrückungen berücksichtigt. Für die Einhaltung der in ETAG 013 (2002) gegebenen Anforderungen an die Restwanddicke wird für die Runddrahtlitze und für die Kompaktlitze jeweils ein Bemessungsdiagramm entwickelt. Damit kann abhängig vom Reibweg mit Innerer Gleitung und von der Ausgangswanddicke die maximal zulässige Umlenkbelastung für beide Ummantelungen bestimmt werden. Dabei verfolgt das vorgeschlagene Bemessungskonzept bei der Einschätzung der maximal zu erwartenden Eindrückung eine deutlich konservativere Vorgehensweise als ETAG 013 (2002), wonach nur ein einziger Umlenkversuch erfolgreich durchgeführt werden muss. In der Richtlinie wird dieser Mangel an Information durch hohe Anforderungen an die Dicke der Schutzhüllen beim Umlenkversuch ausgeglichen. Die geforderten Abmessungen gehen über die für Barrierewirkung und Robustheit tatsächlich notwendige Dicke hinaus. Das vorgeschlagene Bemessungskonzept für Bandspannglieder kann problemlos durch die Wahl etwas geringerer Grenzwerte an das Sicherheitsniveau der ETAG 013 (2002) angepasst werden.

Im Gegensatz zu Bandspanngliedern sind Spannglieder im Hüllrohr bzgl. des Sicherheitsniveaus differenzierter zu betrachten. Ein Sicherheitsrisiko tritt ein, wenn beim Umlenkversuch eine besonders günstige Konfiguration der Drähte oder Litzen mit kleinen Eindrückungen auftritt, auf deren Basis schließlich alle Spanngliedgrößen dimensioniert werden, z.B. mit Hilfe des hier erarbeiteten Bemessungsvorschlags mit Anpassungsfaktoren. Mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit treten am Bauwerk jedoch ungünstigere Stahlanordnungen im Hüllkreis auf. Diese sind ursächlich für deutlich größere Eindrückungen oder gar die Durchtrennung der Schutzhülle. Im umgekehrten Fall, einer besonders ungünstigen Anordnung im Versuch, werden die gemessenen Eindrückungen am Bauwerk selbst kaum erreicht, das Hüllrohr ist überdimensioniert. Nach Meinung des Autors sollte daher das Sicherheitskonzept der ETAG 013 (2002) für Spannglieder mit PE-HD Schutzhüllen grundlegend überarbeitet werden, um in Europa und Deutschland einheitliche, nachvollziehbare und ausreichend hohe Sicherheitsstandards für diese innovativen Produkte für verbundlose Vorspannung zu erreichen. Für Spannglieder mit Hüllrohr sind deshalb in Zukunft zahlreiche experimentelle und theoretische Untersuchungen erforderlich. Vor allem aufgrund der nicht vorhersehbaren Umlenkbelastung ist die Durchführung von Kleinversuchen zum Eindrückverhalten von Spannstaht bei klar definierten Lasten sehr zu empfehlen. Entsprechend dem vorgeschlagenen Sicherheitskonzept für die Bandspannglieder könnte zukünftig eine deutlich verbesserte Kenntnis des Verhaltens der Spannglieder mit Hüllrohr zu einem einheitlichen Bemessungskonzept bei u.U. geringeren zulässigen Restwanddicken führen.

Die Erkenntnisse aus dem Vorhaben wurden auf Basis von Versuchen gewonnen, die bei Raumtemperatur durchgeführt wurden. PE-HD ist ein temperaturabhängiges Material das bei stark abweichenden Temperaturen u.U. ein unterschiedliches Verhalten zeigt. Somit sind die vorliegenden Modelle für die Anwendung bei im Hohlkasten verlaufenden, extern geführten Spanngliedern oder bei im Betonquerschnitt liegenden Zuggliedern geeignet. Für die Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Spanngliedern, die einer zusätzlichen Wärmeeinwirkung unterliegen (z.B. direkte Sonneneinstrahlung) oder besonderen dynamischen Belastungen ausgesetzt sind, dienen die vorgestellten grundlegenden Erkenntnisse als gute Ausgangsbasis für weiterführende Untersuchungen.

Grundsätzlich sind der Konzeption und der Optimierung von verbundlosen Spanngliedersystemen keine engen Grenzen gesetzt. Aus Sicht der Verschleißbeanspruchung an Umlenkstellen können die Systeme einerseits durch eine Erhöhung des Bauteilwiderstands als auch durch eine Reduzierung der Beanspruchungen verbessert werden. Aus Sicht des Bauherrn und des Nutzers eines Bauwerks spielt die Möglichkeit einer zuverlässigen, genauen Vorhersage der zu erwartenden Beanspruchungen und damit der Bauwerkssicherheit eine gewichtige Rolle. Die qualitative Beurteilung von einigen Konstruktionsprinzipien hinsichtlich der beiden letztgenannten Aspekte ist in einer Konstruktionsmatrix in Tabelle 8.1 angegeben.

**Tabelle 8.1: Konstruktionsmatrix: Umlenkung verbundloser Spannglieder**

		Reduzierung der Belastungshöhe	Vorhersagegenauigkeit der Belastungshöhe
<b>Spannstahlform</b>			
	Kreis (z.B. Draht)	o	k.A.
	Litze	-	k.A.
	Kompaktlitze	o	k.A.
	Quadratdraht	±	k.A.
<b>Hüllrohre – Form und Anordnung</b>			
	Kreisrohr	-	-
	Ovalrohr	o	o
	Band, Flachrohr	+	+
	Stapelung	-	±
	Reihung	+	±
<b>Füllgrad</b>			
	Hoher Füllgrad	-	k.A.
	Niedriger Füllgrad	+	k.A.
<b>Umlenkstelle</b>			
	Knick	-	-
	Konstanter Radius	+	+
	Ausrundung der Ecken	o	+
<b>Anordnung der Spannstahlelemente</b>			
	Zufällig, nicht vorhersehbar	±	-
	Geometrisch vorbestimmt	±	+

Legende:

+ gut o befriedigend - schlecht ± gut oder schlecht (je nach Anwendung) k.A. keine Aussage

Der Bauteilwiderstand der Schutzhüllen kann u.a. erhöht werden durch:

- Vergrößerung der Bauteilabmessungen (Wanddicke);
- Anordnung zusätzlicher, verstärkender oder alternativer Bauteile an Umlenkstellen;
- Verbesserung der Materialeigenschaften bzw. Wahl alternativer Materialien;
- Verwendung von hybriden Schutzhüllen (Kombination unterschiedlicher Werkstoffe).

Eine Reduzierung der Beanspruchung (Umlenkbelastung) kann u.a. erreicht werden durch:

- Erhöhung des Umlenkradius;
- Verbesserung der Spannstahlauf Lagerung (z.B. „Wannenwirkung“ bei einbetonierten Monolitzen)
- geschickte Anordnung der Spannstahlelemente und Wahl der Hüllform;
- geschickte Anordnung (Stapelung) von Einzelspanngliedern zueinander („nebeneinander statt übereinander“);
- Wahl günstiger Querschnittsformen für den Spannstahl (z.B. Einzeldrähte, Kompaktlitze, Quadratdraht u.a.).

Die Wahrscheinlichkeit einer zuverlässigen, genauen Bestimmung der Beanspruchung der Schutzhüllen kann u.a. erhöht werden durch:

- einen geometrisch vorbestimmten Aufbau eines Spannglieds im Querschnitt;
- Reduzierung der Druckbelastungserhöhung (hervorgerufen durch zufällige Anordnungen von Spannstahlelementen) durch Verwendung kleiner Spanngliedgrößen bzw. Einsatz von Zusatzbauteilen wie Abstandhalter.

Die vorliegende Arbeit fasst erstmals die bisherigen Erfahrungen zur Umlenkung von verbundlosen Spanngliedern zusammen und leistet mit Hilfe der erarbeiteten Werkzeuge einen gewichtigen Beitrag zur beanspruchungskonformen Dimensionierung von Spanngliedhüllen. Sie kann als Basis für fundierte Beurteilungen der Dauerhaftigkeit und Wirtschaftlichkeit von verschiedensten Spanngliedformen unter dem Gesichtspunkt der Umlenkung dienen.

## 9 Literatur

- Acosta-Jaramillo, A. (2007).** *Einfluss der Umlenkbelastung auf die Reibermüdung bei Bündelspanngliedern.* Diplomarbeit, Lehrstuhl für Massivbau der TU München.
- Backhaus, K., Erichson, B. & Plinke, W. (2003).** *Multivariate Analysemethoden - Eine anwendungsorientierte Einführung, 10. Auflage.* Berlin: Springer Verlag.
- Betten, J. (1993).** *Kontinuumsmechanik - Elasto-, Plasto- und Kriechmechanik.* Berlin: Springer Verlag.
- Borchert, K. (2007).** *Verbundverhalten von Klebebewehrung unter Betriebsbedingungen.* Dissertation, Lehrstuhl für Massivbau der TU München.
- Czichos, H. & Habig, K.-H. (2003).** *Tribologie-Handbuch - Reibung und Verschleiß. 2. Auflage.* Wiesbaden: Vieweg & Sohn Verlag.
- Cohen, J. & Cohen, P. (1983).** *Applied multiple regression/correlation analyses for the behavioral sciences (2nd Edition).* New York: Lawrence Erlbaum.
- Draper, N. R. & Smith, H. (1998):** *Applied Regression Analysis.* New York: Wiley Verlag.
- Deutsches Institut für Bautechnik (1999).** Richtlinie für die Eignungsüberprüfung von Spannverfahren für externe Vorspannung. *DIBt Mitteilungen* 30 (1999), Nr. 5, 168-171.
- Donev, A., Cisse, I., Sachs, D., Variano, E. A., Stillinger, F. H., Connelly, R., Torquato, S. & Chaikin, P. M. (2004).** Improving the Density of Jammed Disordered Packings Using Ellipsoids. *Science* 303, 5660, 990-993.
- Ehrenstein, G. W. (1999).** *Polymer-Werkstoffe: Struktur - Eigenschaften – Anwendung. 2. Auflage.* München: Carl Hanser Verlag.
- Ehrenstein, G. W., Riedel, G. & Trawiel, P. (2004).** *Thermal Analysis of Plastics.* Cincinnati: Hanser Gardener Publications.
- Eibl, J., Iványi, G., Buschmeyer, W. & Kobler, G. (1995).** Vorspannung ohne Verbund, Technik und Anwendung. *Betonkalender 1995, Teil 2*, 739-803.
- Eibl, J. & Voß, W. (1989).** Zwei Autobahnbrücken mit externer Vorspannung. *Beton- und Stahlbetonbau* 84. 11, 291-296.
- Eibl, J. (1993).** *Vorentwurf zu ENV 1992-1-5, Eurocode 2: Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken Teil 1-5: Tragwerke mit Spanngliedern ohne Verbund und/oder extern angeordneten Spanngliedern.* Stuttgart: IRB Verlag.
- EC 2, Teil 1-5 (1994).** Planung von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken. Teil 1-5: Tragwerke mit Spanngliedern ohne Verbund. Deutsche Fassung ENV 1992-1-5: 1994. Dezember 1994. *Betonkalender 1998, Teil 2*, 296-302.
- Eisler, R. (2006).** Neue Mischbauweise mit interner Vorspannung ohne Verbund – Pilotprojekt Mühlenbergbrücke. In: *Tagungsband 10. Münchner Massivbau Seminar.* München: Eigenverlag.

- EN ISO 527-2 (1996).** Kunststoffe, Bestimmung der Zugeigenschaften, Teil 2: Prüfbedingungen für Form- und Extrusionsmassen (ISO 527-2:1993, einschließlich Corr 1: 1994).
- EN ISO 1133 (2005).** Kunststoffe, Bestimmung der Schmelze-Massefließrate (MFR) und der Schmelze-Volumenfließrate (MVR) von Thermoplasten (ISO 1133: 2005).
- EN ISO 1872-1 (1999).** Kunststoffe, Polyethylen (PE)-Formmassen, Teil 1: Bezeichnungssystem und Basis für Spezifikationen (ISO 1872-1:1993).
- EN ISO 2039-1 (2003).** Kunststoffe, Bestimmung der Härte, Teil 1: Kugeleindruckversuch (ISO 2039-1:2001).
- EN ISO 12162 (1995).** Thermoplastische Werkstoffe für Rohre und Formstücke bei Anwendungen unter Druck, Klassifizierung und Werkstoffkennzeichnung, Gesamtbetriebs-(berechnungs-)koeffizient (ISO 12162: 1995).
- fib Bulletin 33 (2006).** *Durability of post-tensioning tendons. Recommendation prepared by Jean-Philippe Fuzier, Hans-Rudolf Ganz, Peter Matt in fib Working Party 5.4.2 "Durability specifics for prestressed concrete structures".* Stuttgart: Sprint-Digital-Druck.
- FIP Recommendation (1993).** Recommendations for the acceptance of post-tensioning systems. London: Seto Verlag.
- Fouré, B. & Hoang, L. H. (1993).** Experimental study of the local behaviour of cables and sheath inside the deviators. In E. Conti and B. Fouré (Eds.): *External Prestressing in Structures*. Saint-Rémy-lès-Chevreuse: Eigenverlag.
- Fouré, B. (1993).** *Les essais du CEBTP à Saint-Rémy-Lès-Chevreuse (sur financement SETRA, FNB et FNTP).* *Béton* 285, 19-25.
- Gill, P. E., Murray, W. & Saunders, M. A. (1997).** *SNOPT: An SQP algorithm for large-scale constrained optimization.* Bericht der UC San Diego.
- Hartung, J., Elpelt, B. & Klösener, K.-H. (2002).** *Statistik: Lehr- und Handbuch der angewandten Statistik.* München: Oldenbourg Verlag.
- Hartz, U. (1999).** Erläuterungen zur „Richtlinie für die Eignungsüberprüfung von Spannverfahren für externe Vorspannung“ und Anforderungen an externe Spannglieder. *DIBt Mitteilungen* 30 (1999), Nr. 5, 165-168.
- Hegger, J., Cordes, H. & Neuser, J. U. (2002).** *Dauerhaftigkeit von Polyethylen-Schutzhüllen externer Spannglieder an Umlenkstellen.* Schlussbericht. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.
- Hegger, J., Cordes, H. & Neuser, J. U. (2005/1).** Zur Beanspruchung externer Spannglieder an Umlenkstellen. *Beton- und Stahlbetonbau* 100, 11, 939-944.
- Hegger, J., Neuser, J. U., Peters, S. & Schmitz, M. (2006).** Zur Dauerhaftigkeit externer Spannglieder bei wechselnden Beanspruchungen. *Beton- und Stahlbetonbau* 101, 2, 81-86.
- Hegger, J., Peters, S. & Schmitz, M. (2005/2).** *Dauerhaftigkeit von Polyethylen-Schutzhüllen externer Spannglieder an Umlenkstellen bei wechselnden Beanspruchungszuständen.* Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.

- Hsuan, G. (2004).** *Evaluation of High Density Polyethylene Ducts of the Sunshine Skyway Bridge – Research Report No. FL/DOT/SMO/04-476.* Florida State Department of Transportation. Gainesville and Philadelphia.
- Hunkeler, F., Matt, P., von Matt, U. & Werner, R. (2005).** *Spannglieder, Schrägseile und Anker - Beschreibung der Systeme und Erkenntnisse aus Korrosionsschäden. (Câbles de précontrainte, haubans et tirants d'ancrage - Description des systèmes et leçons tirées des dégâts dus à la corrosion. Prestressing tendons, stay cables and ground anchors - Description of the systems and lessons learnt from corrosion damages).* Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Bundesamt für Straßen, Bericht 588.
- Hunkeler, F., Ungricht, H. & Matt, P. (1998).** *Korrosionsschäden an Spannstählen, in Spanngliedern und vorgespannten Boden- und Felsankern; FA 86/95 ASTRA. VSS-Bericht Nr. 534.*
- Janssen, J. & Laatz, W. (2005).** *Statistische Datenanalyse mit SPSS für Windows. 5. Auflage.* Berlin: Springer-Verlag.
- Letsch, R. (1983).** *Über das Verformungsverhalten von Epoxidharzen und Epoxidmörteln bei stationären und instationären Temperaturen.* Dissertation TU München.
- Levesque, R. (2005).** *SPSS Programming and Data Management, 2nd Edition.* SPSS, Inc. 2005. [http://www.spss.com/spss/data\\_management\\_book.htm](http://www.spss.com/spss/data_management_book.htm).
- Maurer, R., Zilch, K., Bäätjer, G. & Weiher, H. (2006).** *Sicherheit von Spannbetonbrücken.* Erscheint demnächst in der Schriftenreihe „Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik“ herausgegeben vom Bundesminister für Verkehr.
- Methner, R. (2005).** *Experimentelle Untersuchung des Einflusses der Gleitverhältnisse auf den Verschleiß von Polyethylenschutzhüllen bei der einaxialen Umlenkung von externen Bandspanngliedern.* Unveröffentlichte Diplomarbeit, Lehrstuhl für Massivbau der TU München.
- Neuser, J. U. (2003).** *Zur Krafteinleitung bei externer Vorspannung.* Dissertation RWTH Aachen.
- Nocedal, J. & Wright, S. J. (1999).** *Numerical Optimization.* New York: Springer Verlag.
- Örtle, J. (1988).** *Reibermüdung einbetonierter Spannkabel.* Dissertation ETH Zürich. Basel: Birkhäuser Verlag.
- Puttendörfer, N. (2006).** Gleitungsverhalten externer Spannglieder. In: *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Beiträge zum 47. Forschungskolloquium am 09. und 10. November an der Universität Karlsruhe (TH).*
- Reiner, M. (1972).** *Rheologie in elementarer Darstellung.* Leipzig: Fachbuchverlag.
- Specht, E. (2006).** The best known packings of equal circles in the unit circle (up to  $N = 500$ ). [www.packomania.de](http://www.packomania.de).
- Stempniewski, L. & Puttendörfer, N. (2005).** Fehlertolerante Sattelausbildung für externe Spannglieder. In: *Tagungsband 15. Dresdner Brückenbausymposium.*



- Suarez, J., Zhang, J., Hsuan, G. & Hartt, W. (2006).** Polyethylene Duct Cracking on Post-tensioning Tendons in Florida Segmented Bridges. *Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE)*. July/August 2006, 581-587.
- Szabó, P. G., Markót, M. C., Csendes, T., Specht, E., Casado, L. G. & García, I. (2007).** *New Approaches to Circle Packing in a Square: With Program Codes (Springer Optimization and its Application, Volume 6)*. Berlin: Springer Verlag.
- Uetz, H. & Wiedemeyer, J. (1984).** *Tribologie der Polymere, Grundlagen und Anwendungen in der Technik: Reibung, Verschleiß, Schmierung*. München und Wien: Carl Hanser Verlag.
- Vogel, T. (2006).** Zustandsbeurteilung von Brücken bei deren Abbruch (ZEBRA). In: *Tagungsband 10. Münchner Massivbau Seminar*.
- Vogel, T. & Heer, K. (1989).** Externe Vorspannung ohne Verbund – Der Viadotto Preonzo-Claro. *Schweizer Ingenieur und Architekt*. 48, 1312-1317.
- Vogel, T. & Kott, A. (2001).** *Viadotto Preonzo-Claro. Auswechslung und Überprüfung des Spanngliedes 34N*. Technischer Bericht der ETH Zürich.
- Walter, R., Utescher, U. & Schreck, D. (1977).** *Vorausbestimmung der Spannkraftverluste infolge Dehnungsbehinderung, DAfStb Heft 282*. Berlin: Beuth Verlag.
- Walz, A. (2002).** *Maple 7: Rechnen und Programmieren, 2. Auflage*. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag.
- Weiher, H. (2005).** Reibung und Verschleiß von Polyethylen bei externen Bandspanngliedern an Umlenkstellen. In K. Bergmeister (Ed.): *Beton- und Stahlbetonbau - 45. Forschungskolloquium des DAfStb*. Berlin: Ernst & Sohn Verlag.
- Weiher, H. (2006).** Zweiachiale Umlenkung von externen Bandspanngliedern. In: *Tagungsband 10. Münchner Massivbau Seminar*.
- Weiher, H., Specht, E., Pfeiffer, B., Klamroth, K. & Zilch, K. (2007).** New approaches for the determination of the cable factor in post-tensioning tendons. *Proceedings of IABSE Symposium 2007*, Weimar.
- Weiher, H., Specht, E., Pfeiffer, B., Klamroth, K. & Zilch, K. (2008).** Determination of the Cable Factor for Deviated Tendon Bundles. *Structural Engineering International, IABSE, Vol. 18 (1)*. In Druck.
- Weiher, H. & Zilch, K. (2005).** An experimental investigation of friction and wear of polyethylene sheathings of external tendons at deviation points. In G. Albrecht, I. Mangerig, G. Siebert and K. Zilch (Eds.): *Proceedings of 6th Japanese German Bridge Symposium*.
- Weiher, H. & Zilch, K. (2006/1).** Wear of polyethylene sheathings of external tendons at deviation points in post tensioned box girder concrete bridges. In: *Proceedings of 7th International Conference on Short and Medium Span bridges*, Montréal.
- Weiher, H. & Zilch, K. (2006/2).** Usage of PE-HD in bridge construction - a corrosion protection system for steel tendons under extreme loading. In: *Proceedings of Plastics Pipes XIII*, Washington, DC.

**Zilch, K., Diederichs, C. J. & Katzenbach, R. (2001).** *Handbuch für Bauingenieure: Technik, Organisation und Wirtschaftlichkeit – Fachwissen in einer Hand.* Berlin, Heidelberg: Springer Verlag.

**Zilch, K., Hennecke, M. & Gläser, C. (2004).** Stand der Entwicklung interner verbundloser Vorspannung – System und Anwendungen. In F. Dehn, K. Holschemacher und N. V. Tue (Eds.): *Neue Entwicklungen im Brückenbau – Innovationen im Bauwesen – Beiträge aus Praxis und Wissenschaft*, Berlin: Bauwerk Verlag.

**Zilch, K. & Weiher, H. (2006).** *Auswirkungen von zweiachialer Umlenkung auf die Ergebnisse des Umlenkversuchs bei externen Spanngliedern.* Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag.

**Zilch, K. & Zehetmaier, G. (2005).** *Bemessung im konstruktiven Betonbau, Nach DIN 1045-1 und DIN EN-1992-1-1.* Berlin: Springer Verlag.

<http://www.arge-ggl.de>. Gesehen 02. Januar 2007

<http://neos.mcs.anl.gov>. Gesehen 15. Juli 2006

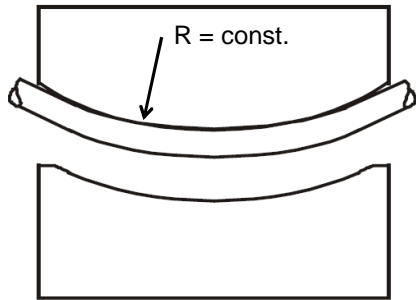
<http://www.diffusion-polymers.com>. Gesehen 21. März 2006

<http://www.dwk-koeln.de>. Gesehen 03. November 2006

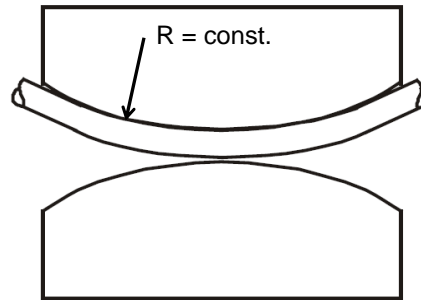
<http://www.packomania.de>. Gesehen 10. August 2006

# 10 Anhang

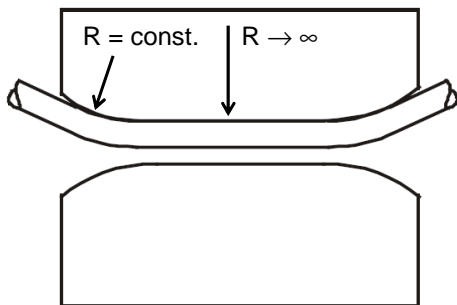
## 10.1 Umlenkstellen



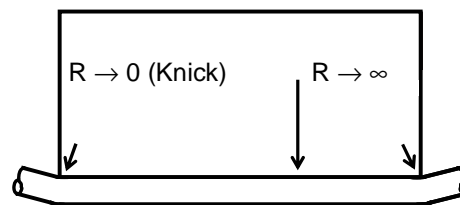
a) Durchführung des Spannglieds mit konstantem Radius durch gebogenes Rohr



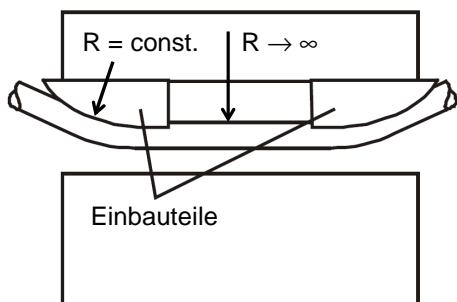
b) Durchführung des Spannglieds mit konstantem Radius durch rotationssymmetrische Aussparung



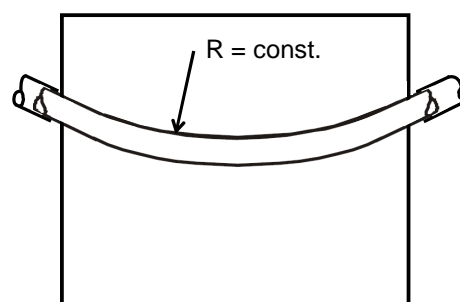
c) Durchführung des Spannglieds mit konstantem Radius und gerader Teilführung durch rotationssymmetrische Aussparung



d) Umlenkung durch Knicke



e) Durchführung des Spannglieds durch gerades Rohr mit gekrümmten Umlenkeinbauteilen



f) Anschluss des Hüllrohrstrangs an ein gebogenes Stahlrohr außerhalb des Umlenkbereichs

Abbildung 10.1: Varianten zur Durchführung von Spanngliedern an Umlenkstellen

## 10.2 Optimale Packungsdichte

Tabelle 10.1: Maximal anzuordnende Anzahl gleich großer Kreise im Kreis nach Specht (2006)

$r/R_d$ [-]	N [-]	$r/R_d$ [-]	N [-]	$r/R_d$ [-]	N [-]	$r/R_d$ [-]	N [-]	$r/R_d$ [-]	N [-]
1,0000	1	0,1246	51	0,0897	101	0,0742	151	0,0644	201
0,5000	2	0,1237	52	0,0893	102	0,0739	152	0,0642	202
0,4641	3	0,1223	53	0,0888	103	0,0736	153	0,0640	203
0,4142	4	0,1219	54	0,0884	104	0,0733	154	0,0639	204
0,3702	5	0,1218	55	0,0880	105	0,0731	155	0,0636	205
0,3333	6	0,1193	56	0,0875	106	0,0729	156	0,0635	206
0,3333	7	0,1184	57	0,0871	107	0,0726	157	0,0634	207
0,3026	8	0,1173	58	0,0867	108	0,0723	158	0,0632	208
0,2768	9	0,1164	59	0,0865	109	0,0721	159	0,0631	209
0,2623	10	0,1157	60	0,0861	110	0,0718	160	0,0629	210
0,2549	11	0,1155	61	0,0857	111	0,0716	161	0,0628	211
0,2482	12	0,1133	62	0,0854	112	0,0713	162	0,0627	212
0,2361	13	0,1125	63	0,0851	113	0,0711	163	0,0626	213
0,2310	14	0,1116	64	0,0848	114	0,0709	164	0,0624	214
0,2212	15	0,1109	65	0,0845	115	0,0707	165	0,0623	215
0,2167	16	0,1099	66	0,0841	116	0,0705	166	0,0621	216
0,2087	17	0,1091	67	0,0837	117	0,0703	167	0,0620	217
0,2056	18	0,1083	68	0,0834	118	0,0701	168	0,0619	218
0,2056	19	0,1079	69	0,0830	119	0,0699	169	0,0618	219
0,1952	20	0,1070	70	0,0827	120	0,0698	170	0,0616	220
0,1904	21	0,1062	71	0,0825	121	0,0696	171	0,0615	221
0,1838	22	0,1056	72	0,0819	122	0,0694	172	0,0613	222
0,1803	23	0,1048	73	0,0815	123	0,0692	173	0,0612	223
0,1769	24	0,1043	74	0,0811	124	0,0690	174	0,0610	224
0,1738	25	0,1033	75	0,0808	125	0,0688	175	0,0609	225
0,1716	26	0,1028	76	0,0805	126	0,0686	176	0,0608	226
0,1693	27	0,1021	77	0,0802	127	0,0684	177	0,0606	227
0,1663	28	0,1014	78	0,0799	128	0,0682	178	0,0605	228
0,1629	29	0,1010	79	0,0796	129	0,0680	179	0,0603	229
0,1613	30	0,1003	80	0,0793	130	0,0678	180	0,0602	230
0,1589	31	0,0999	81	0,0790	131	0,0677	181	0,0601	231
0,1555	32	0,0995	82	0,0788	132	0,0674	182	0,0600	232
0,1542	33	0,0988	83	0,0785	133	0,0672	183	0,0599	233
0,1513	34	0,0985	84	0,0783	134	0,0671	184	0,0599	234
0,1493	35	0,0984	85	0,0780	135	0,0669	185	0,0598	235
0,1482	36	0,0971	86	0,0777	136	0,0668	186	0,0596	236
0,1480	37	0,0965	87	0,0774	137	0,0667	187	0,0595	237
0,1436	38	0,0959	88	0,0771	138	0,0665	188	0,0594	238
0,1417	39	0,0952	89	0,0769	139	0,0664	189	0,0593	239
0,1404	40	0,0948	90	0,0766	140	0,0662	190	0,0592	240
0,1377	41	0,0946	91	0,0763	141	0,0660	191	0,0591	241
0,1361	42	0,0936	92	0,0761	142	0,0659	192	0,0590	242
0,1348	43	0,0931	93	0,0757	143	0,0658	193	0,0588	243
0,1334	44	0,0928	94	0,0754	144	0,0656	194	0,0587	244
0,1320	45	0,0922	95	0,0753	145	0,0654	195	0,0585	245
0,1307	46	0,0919	96	0,0750	146	0,0653	196	0,0584	246
0,1295	47	0,0914	97	0,0748	147	0,0651	197	0,0583	247
0,1283	48	0,0911	98	0,0747	148	0,0650	198	0,0582	248
0,1268	49	0,0906	99	0,0744	149	0,0649	199	0,0581	249
0,1258	50	0,0902	100	0,0743	150	0,0647	200	0,0579	250

### 10.3 Stapelfaktoren nach exaktem Verfahren

Tabelle 10.2: Maximaler Stapelfaktor  $n_{max}$ , mittlerer Stapelfaktor  $n_{mittel}$  und innerer Stapelfaktor  $n_{max,innen}$  sowie Klemmbeiwert  $\kappa$  und tatsächlicher Füllgrad  $\Sigma A_r / A_R$  nach exaktem Verfahren ( $N \in [1; 10]$ )

N [-]		r / R <sub>d</sub> [-]									
		1,00	0,45	0,40	0,35	0,30	0,25	0,22	0,20	0,18	0,16
1	$k_{max}$	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$k_{mittel}$	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$k_{max,innen}$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$\kappa$	1,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	$\Sigma A_r / A_R$	100%	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	$k_{max}$	-	1,74	1,34	-	-	-	-	-	-	-
	$k_{mittel}$	-	1,74	1,34	-	-	-	-	-	-	-
	$k_{max,innen}$	-	1,42	0,89	-	-	-	-	-	-	-
	$\kappa$	-	1,74	1,34	-	-	-	-	-	-	-
	$\Sigma A_r / A_R$	-	41%	32%	-	-	-	-	-	-	-
3	$k_{max}$	-	3,68	2,78	2,16	-	-	-	-	-	-
	$k_{mittel}$	-	1,88	1,96	1,39	-	-	-	-	-	-
	$k_{max,innen}$	-	1,64	1,33	1,08	-	-	-	-	-	-
	$\kappa$	-	1,88	1,96	1,39	-	-	-	-	-	-
	$\Sigma A_r / A_R$	-	61%	48%	37%	-	-	-	-	-	-
4	$k_{max}$	-	-	3,55	2,32	2,68	-	-	-	-	-
	$k_{mittel}$	-	-	2,52	2,12	1,59	-	-	-	-	-
	$k_{max,innen}$	-	-	1,92	1,82	0,95	-	-	-	-	-
	$\kappa$	-	-	1,89	1,59	1,19	-	-	-	-	-
	$\Sigma A_r / A_R$	-	-	0,64	0,49	0,36	-	-	-	-	-
5	$k_{max}$	-	-	-	3,28	2,58	2,19	-	-	-	-
	$k_{mittel}$	-	-	-	2,62	1,64	1,51	-	-	-	-
	$k_{max,innen}$	-	-	-	2,59	1,50	1,15	-	-	-	-
	$\kappa$	-	-	-	2,10	1,31	1,21	-	-	-	-
	$\Sigma A_r / A_R$	-	-	-	0,61	0,45	0,31	-	-	-	-
6	$k_{max}$	-	-	-	-	3,52	2,82	-	-	-	-
	$k_{mittel}$	-	-	-	-	2,12	2,01	-	-	-	-
	$k_{max,innen}$	-	-	-	-	1,94	1,70	-	-	-	-
	$\kappa$	-	-	-	-	1,41	1,34	-	-	-	-
	$\Sigma A_r / A_R$	-	-	-	-	0,54	0,38	-	-	-	-
7	$k_{max}$	-	-	-	-	4,11	3,16	2,82	-	-	-
	$k_{mittel}$	-	-	-	-	1,85	1,89	1,84	-	-	-
	$k_{max,innen}$	-	-	-	-	2,23	1,81	1,79	-	-	-
	$\kappa$	-	-	-	-	1,32	1,35	1,31	-	-	-
	$\Sigma A_r / A_R$	-	-	-	-	0,63	0,44	0,34	-	-	-
8	$k_{max}$	-	-	-	-	4,46	3,68	2,82	3,05	-	-
	$k_{mittel}$	-	-	-	-	2,70	1,84	1,83	1,92	-	-
	$k_{max,innen}$	-	-	-	-	3,69	2,55	2,25	1,65	-	-
	$\kappa$	-	-	-	-	2,03	1,38	1,37	1,20	-	-
	$\Sigma A_r / A_R$	-	-	-	-	0,72	0,50	0,39	0,32	-	-
9	$k_{max}$	-	-	-	-	-	4,74	3,49	3,56	-	-
	$k_{mittel}$	-	-	-	-	-	2,04	2,03	2,13	-	-
	$k_{max,innen}$	-	-	-	-	-	2,55	2,19	1,88	-	-
	$\kappa$	-	-	-	-	-	1,36	1,35	1,18	-	-
	$\Sigma A_r / A_R$	-	-	-	-	-	56%	44%	36%	-	-
10	$k_{max}$	-	-	-	-	-	4,61	4,11	4,16	3,89	-
	$k_{mittel}$	-	-	-	-	-	2,53	2,04	2,04	2,01	-
	$k_{max,innen}$	-	-	-	-	-	2,27	2,50	2,25	2,17	-
	$\kappa$	-	-	-	-	-	1,52	1,43	1,22	1,20	-
	$\Sigma A_r / A_R$	-	-	-	-	-	63%	48%	40%	32%	-

Tabelle 10.3: Maximaler Stapelfaktor  $n_{max}$ , mittlerer Stapelfaktor  $n_{mittel}$  und innerer Stapelfaktor  $n_{max,innen}$  sowie Klemmbeiwert  $\kappa$  und tatsächlicher Füllgrad  $\Sigma A_T / A_R$  nach exaktem Verfahren ( $N \in [11; 21]$ )

N [-]		r / R <sub>d</sub> [-]									
		0,35	0,30	0,25	0,22	0,20	0,18	0,16	0,14	0,12	0,11
11	$k_{max}$	-	-	6,14	4,74	4,24	3,90	-	-	-	-
	$k_{mittel}$	-	-	3,31	2,80	2,28	2,23	-	-	-	-
	$k_{max,innen}$	-	-	3,90	3,75	2,62	2,15	-	-	-	-
	$\kappa$	-	-	1,81	1,55	1,24	1,22	-	-	-	-
	$\Sigma A_T / A_R$	-	-	69%	53%	44%	36%	-	-	-	-
12	$k_{max}$	-	-	-	5,94	4,14	3,84	-	-	-	-
	$k_{mittel}$	-	-	-	3,08	2,19	2,15	-	-	-	-
	$k_{max,innen}$	-	-	-	4,31	2,92	2,46	-	-	-	-
	$\kappa$	-	-	-	1,54	1,28	1,25	-	-	-	-
	$\Sigma A_T / A_R$	-	-	-	58%	48%	39%	-	-	-	-
13	$k_{max}$	-	-	-	6,36	4,87	3,83	-	-	-	-
	$k_{mittel}$	-	-	-	2,83	2,82	2,36	-	-	-	-
	$k_{max,innen}$	-	-	-	4,49	3,02	2,64	-	-	-	-
	$\kappa$	-	-	-	1,52	1,30	1,27	-	-	-	-
	$\Sigma A_T / A_R$	-	-	-	63%	52%	42%	-	-	-	-
14	$k_{max}$	-	-	-	5,92	4,96	4,77	4,48	-	-	-
	$k_{mittel}$	-	-	-	3,26	2,67	2,65	2,54	-	-	-
	$k_{max,innen}$	-	-	-	3,67	3,33	2,41	3,19	-	-	-
	$\kappa$	-	-	-	1,63	1,33	1,33	1,27	-	-	-
	$\Sigma A_T / A_R$	-	-	-	68%	56%	45%	36%	-	-	-
15	$k_{max}$	-	-	-	7,66	5,63	4,96	4,55	-	-	-
	$k_{mittel}$	-	-	-	3,42	2,90	2,90	2,53	-	-	-
	$k_{max,innen}$	-	-	-	6,95	3,38	3,08	2,96	-	-	-
	$\kappa$	-	-	-	1,92	1,35	1,35	1,35	-	-	-
	$\Sigma A_T / A_R$	-	-	-	73%	60%	49%	38%	-	-	-
16	$k_{max}$	-	-	-	-	6,19	4,50	4,35	-	-	-
	$k_{mittel}$	-	-	-	-	3,08	2,87	2,63	-	-	-
	$k_{max,innen}$	-	-	-	-	4,04	2,97	3,04	-	-	-
	$\kappa$	-	-	-	-	1,35	1,44	1,31	-	-	-
	$\Sigma A_T / A_R$	-	-	-	-	64%	52%	41%	-	-	-
17	$k_{max}$	-	-	-	-	6,46	6,02	5,59	-	-	-
	$k_{mittel}$	-	-	-	-	3,29	3,54	3,32	-	-	-
	$k_{max,innen}$	-	-	-	-	4,09	4,18	4,24	-	-	-
	$\kappa$	-	-	-	-	1,36	1,46	1,37	-	-	-
	$\Sigma A_T / A_R$	-	-	-	-	68%	55%	44%	-	-	-
18	$k_{max}$	-	-	-	-	6,30	5,65	4,49	4,39	-	-
	$k_{mittel}$	-	-	-	-	3,29	3,55	2,77	2,74	-	-
	$k_{max,innen}$	-	-	-	-	4,03	4,24	3,82	3,49	-	-
	$\kappa$	-	-	-	-	1,46	1,38	1,23	1,22	-	-
	$\Sigma A_T / A_R$	-	-	-	-	72%	58%	46%	35%	-	-
19	$k_{max}$	-	-	-	-	7,52	6,38	5,83	4,90	-	-
	$k_{mittel}$	-	-	-	-	3,02	3,43	3,16	2,99	-	-
	$k_{max,innen}$	-	-	-	-	4,93	4,26	3,82	3,49	-	-
	$\kappa$	-	-	-	-	1,43	1,44	1,33	1,26	-	-
	$\Sigma A_T / A_R$	-	-	-	-	76%	62%	49%	37%	-	-
20	$k_{max}$	-	-	-	-	-	5,91	6,73	4,57	-	-
	$k_{mittel}$	-	-	-	-	-	3,50	3,09	2,73	-	-
	$k_{max,innen}$	-	-	-	-	-	4,43	4,90	3,35	-	-
	$\kappa$	-	-	-	-	-	1,57	1,39	1,23	-	-
	$\Sigma A_T / A_R$	-	-	-	-	-	65%	51%	39%	-	-
21	$k_{max}$	-	-	-	-	-	7,65	7,36	5,18	-	-
	$k_{mittel}$	-	-	-	-	-	3,36	3,33	2,88	-	-
	$k_{max,innen}$	-	-	-	-	-	4,76	5,59	3,49	-	-
	$\kappa$	-	-	-	-	-	1,44	1,43	1,24	-	-
	$\Sigma A_T / A_R$	-	-	-	-	-	68%	54%	41%	-	-

Tabelle 10.4: Maximaler Stapelfaktor  $n_{max}$ , mittlerer Stapelfaktor  $n_{mittel}$  und innerer Stapelfaktor  $n_{max,innen}$  sowie Klemmbeiwert  $\kappa$  und tatsächlicher Füllgrad  $\Sigma A_T / A_R$  nach exaktem Verfahren ( $N \in [22; 75]$ )

N [-]		r / R <sub>d</sub> [-]									
		0,20	0,18	0,16	0,14	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08	0,07
22	$k_{max}$	-	7,91	7,73	5,28	-	-	-	-	-	-
	$k_{mittel}$	-	3,49	3,55	3,23	-	-	-	-	-	-
	$k_{max,innen}$	-	5,17	5,85	3,47	-	-	-	-	-	-
	$\kappa$	-	1,59	1,45	1,17	-	-	-	-	-	-
	$\Sigma A_T / A_R$	-	71%	56%	43%	-	-	-	-	-	-
23	$k_{max}$	-	8,38	7,18	5,21	-	-	-	-	-	-
	$k_{mittel}$	-	3,11	3,59	3,29	-	-	-	-	-	-
	$k_{max,innen}$	-	6,17	5,02	3,52	-	-	-	-	-	-
	$\kappa$	-	1,49	1,40	1,29	-	-	-	-	-	-
	$\Sigma A_T / A_R$	-	-	59%	45%	-	-	-	-	-	-
24	$k_{max}$	-	-	7,82	5,21	-	-	-	-	-	-
	$k_{mittel}$	-	-	3,74	3,40	-	-	-	-	-	-
	$k_{max,innen}$	-	-	5,57	4,04	-	-	-	-	-	-
	$\kappa$	-	-	1,40	1,28	-	-	-	-	-	-
	$\Sigma A_T / A_R$	-	-	61%	47%	-	-	-	-	-	-
25	$k_{max}$	-	-	8,50	6,84	5,67	-	-	-	-	-
	$k_{mittel}$	-	-	3,78	3,23	3,14	-	-	-	-	-
	$k_{max,innen}$	-	-	6,64	5,07	3,85	-	-	-	-	-
	$\kappa$	-	-	1,51	1,29	1,26	-	-	-	-	-
	$\Sigma A_T / A_R$	-	-	64%	49%	36%	-	-	-	-	-
27	$k_{max}$	-	-	9,51	8,03	6,51	-	-	-	-	-
	$k_{mittel}$	-	-	4,86	4,17	3,80	-	-	-	-	-
	$k_{max,innen}$	-	-	8,16	5,98	5,28	-	-	-	-	-
	$\kappa$	-	-	1,80	1,39	1,27	-	-	-	-	-
	$\Sigma A_T / A_R$	-	-	69%	53%	39%	-	-	-	-	-
31	$k_{max}$	-	-	-	8,34	7,69	6,77	-	-	-	-
	$k_{mittel}$	-	-	-	4,30	3,86	3,51	-	-	-	-
	$k_{max,innen}$	-	-	-	6,45	7,74	4,13	-	-	-	-
	$\kappa$	-	-	-	1,39	1,37	1,26	-	-	-	-
	$\Sigma A_T / A_R$	-	-	-	61%	45%	38%	-	-	-	-
37	$k_{max}$	-	-	-	11,90	8,93	7,75	7,32	-	-	-
	$k_{mittel}$	-	-	-	5,15	4,61	4,21	4,02	-	-	-
	$k_{max,innen}$	-	-	-	9,02	7,07	4,71	6,73	-	-	-
	$\kappa$	-	-	-	1,74	1,38	1,37	1,25	-	-	-
	$\Sigma A_T / A_R$	-	-	-	73%	53%	45%	37%	-	-	-
43	$k_{max}$	-	-	-	-	11,09	8,27	7,73	-	-	-
	$k_{mittel}$	-	-	-	-	4,82	4,51	3,94	-	-	-
	$k_{max,innen}$	-	-	-	-	9,92	6,88	6,53	-	-	-
	$\kappa$	-	-	-	-	1,57	1,36	1,28	-	-	-
	$\Sigma A_T / A_R$	-	-	-	-	62%	52%	43%	-	-	-
50	$k_{max}$	-	-	-	-	12,21	10,39	8,93	7,86	-	-
	$k_{mittel}$	-	-	-	-	6,05	4,80	4,89	4,51	-	-
	$k_{max,innen}$	-	-	-	-	10,07	9,12	8,26	6,08	-	-
	$\kappa$	-	-	-	-	1,82	1,44	1,37	1,26	-	-
	$\Sigma A_T / A_R$	-	-	-	-	72%	61%	50%	41%	-	-
61	$k_{max}$	-	-	-	-	-	14,31	11,98	9,95	8,73	-
	$k_{mittel}$	-	-	-	-	-	6,05	5,93	5,41	4,99	-
	$k_{max,innen}$	-	-	-	-	-	11,84	9,30	9,69	8,31	-
	$\kappa$	-	-	-	-	-	1,69	1,46	1,33	1,23	-
	$\Sigma A_T / A_R$	-	-	-	-	-	74%	61%	49%	39%	-
75	$k_{max}$	-	-	-	-	-	-	15,72	12,45	9,03	10,96
	$k_{mittel}$	-	-	-	-	-	-	6,92	6,05	5,47	5,10
	$k_{max,innen}$	-	-	-	-	-	-	14,73	11,45	8,11	9,26
	$\kappa$	-	-	-	-	-	-	1,75	1,45	1,31	1,22
	$\Sigma A_T / A_R$	-	-	-	-	-	-	75%	61%	48%	37%

Tabelle 10.5: Maximaler Stapelfaktor  $n_{max}$ , mittlerer Stapelfaktor  $n_{mittel}$  und innerer Stapelfaktor  $n_{max,innen}$  sowie Klemmbeiwert  $\kappa$  und tatsächlicher Füllgrad  $\Sigma A_r / A_R$  nach exaktem Verfahren ( $N \in [90; 150]$ )

N [-]		r / R <sub>d</sub> [-]									
		0,11	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,05	-	-	-
90	$k_{max}$	-	-	16,72	14,16	12,61	-	-	-	-	-
	$k_{mittel}$	-	-	6,89	6,13	5,85	-	-	-	-	-
	$k_{max,innen}$	-	-	15,77	12,88	10,91	-	-	-	-	-
	$\kappa$	-	-	1,66	1,43	1,30	-	-	-	-	-
	$\Sigma A_r / A_R$	-	-	73%	58%	44%	-	-	-	-	-
100	$k_{max}$	-	-	18,69	15,69	11,82	11,17	-	-	-	-
	$k_{mittel}$	-	-	8,08	6,94	6,45	6,24	-	-	-	-
	$k_{max,innen}$	-	-	15,57	13,84	12,92	7,64	-	-	-	-
	$\kappa$	-	-	1,86	1,39	1,35	1,25	-	-	-	-
	$\Sigma A_r / A_R$	-	-	81%	64%	49%	36%	-	-	-	-
125	$k_{max}$	-	-	-	17,42	18,83	13,92	-	-	-	-
	$k_{mittel}$	-	-	-	9,05	7,86	7,00	-	-	-	-
	$k_{max,innen}$	-	-	-	16,59	18,29	12,89	-	-	-	-
	$\kappa$	-	-	-	1,59	1,47	1,29	-	-	-	-
	$\Sigma A_r / A_R$	-	-	-	80%	61%	45%	-	-	-	-
150	$k_{max}$	-	-	-	-	23,15	17,79	14,13	-	-	-
	$k_{mittel}$	-	-	-	-	8,56	7,64	7,10	-	-	-
	$k_{max,innen}$	-	-	-	-	22,60	16,41	15,77	-	-	-
	$\kappa$	-	-	-	-	1,56	1,37	1,23	-	-	-
	$\Sigma A_r / A_R$	-	-	-	-	74%	54%	38%	-	-	-



## 10.4 Stapelfaktoren – Vergleich der Berechnungsverfahren

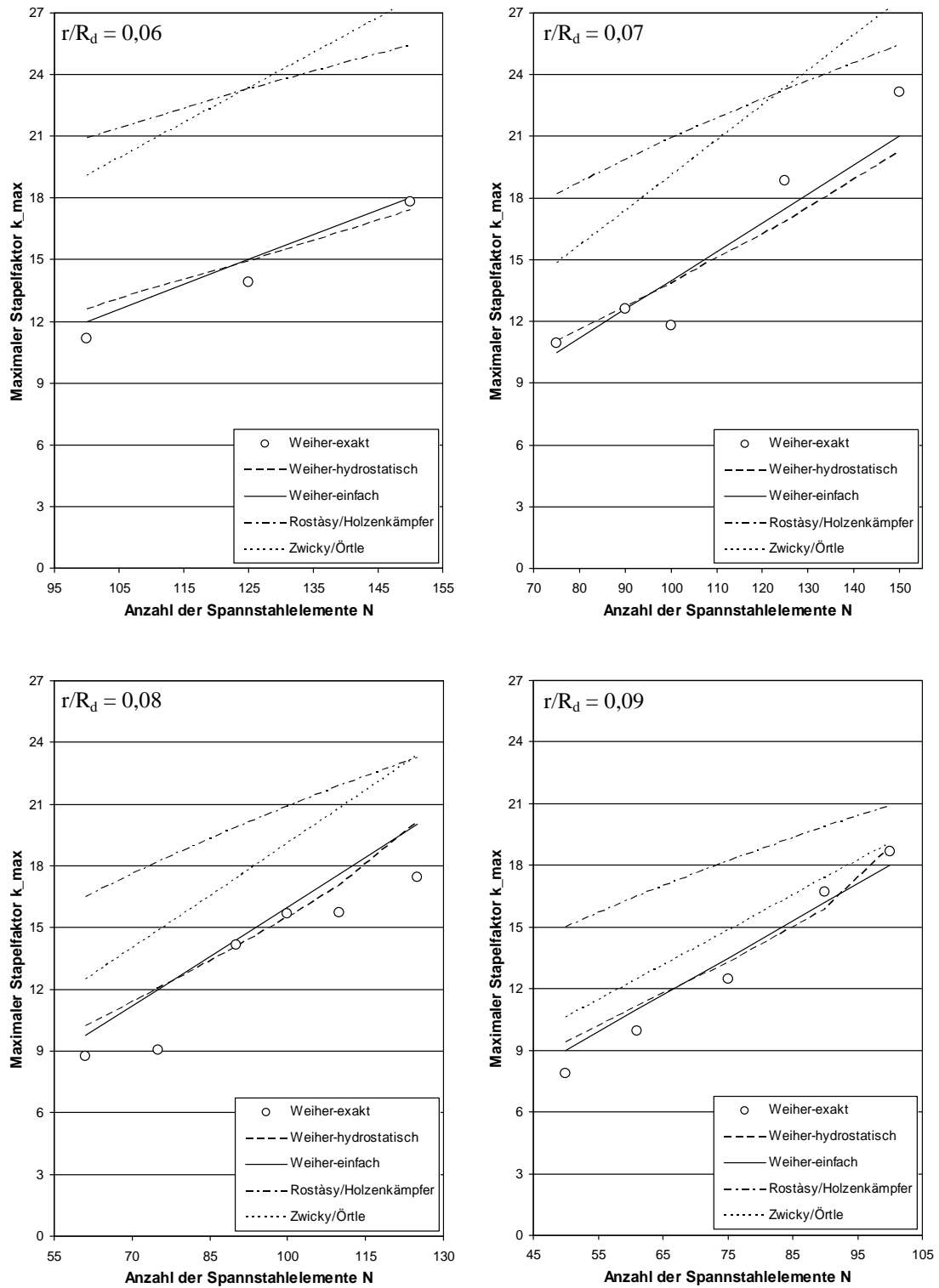


Abbildung 10.2: Maximale Stapelfaktoren aus Exakter Berechnung, Vereinfachtem Verfahren, Hydrostatischer Analogie sowie nach Rostásy/Holzenkämpfer und Zwicky/Örtle ( $r/R_d \in [0,06; 0,09]$ )

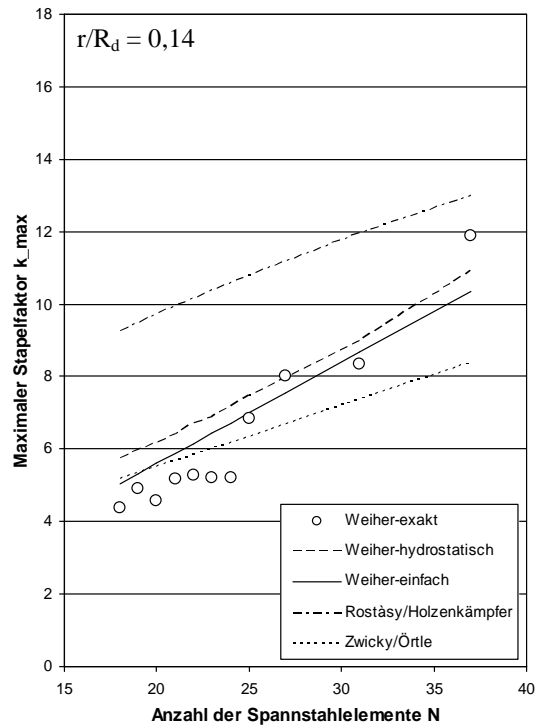
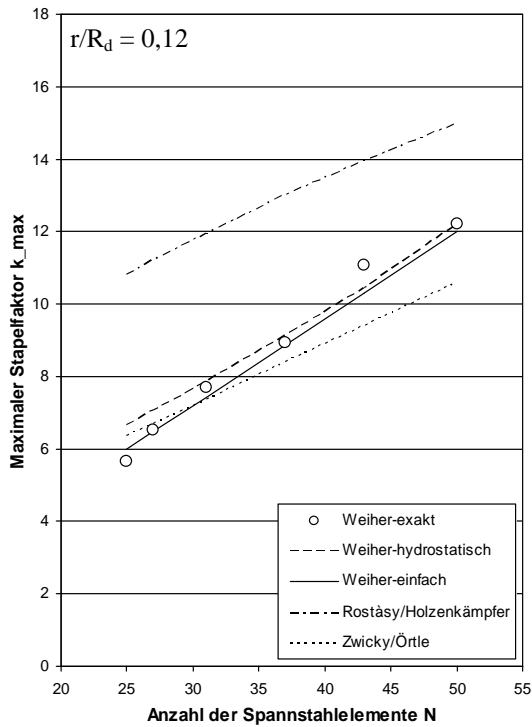
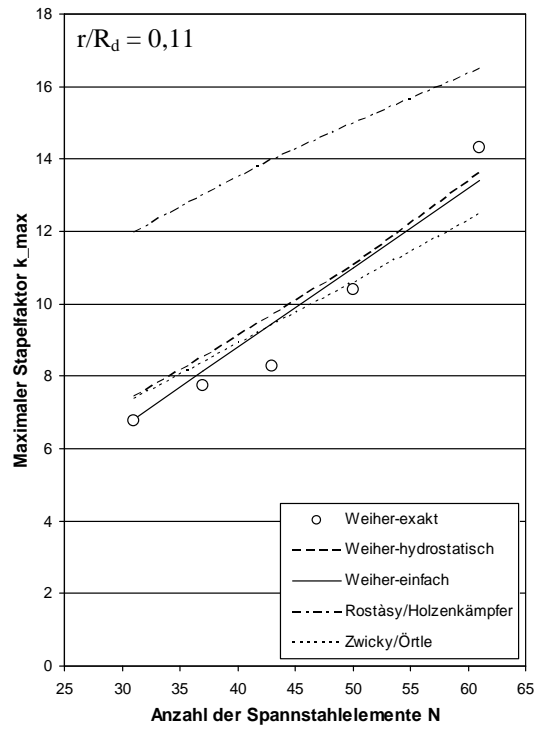
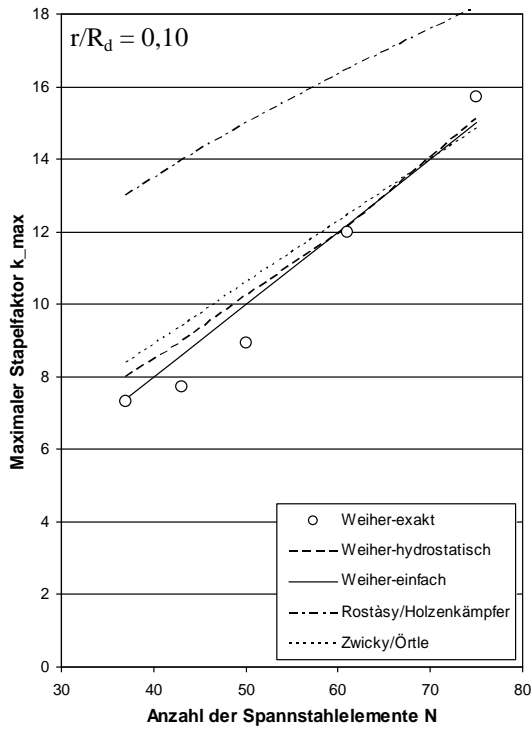


Abbildung 10.3: Maximale Stapelfaktoren aus Exakter Berechnung, Vereinfachtem Verfahren, Hydrostatischer Analogie sowie nach Rostásy/Holzenkämpfer und Zwicky/Örtle ( $r/R_d \in [0,10; 0,14]$ )

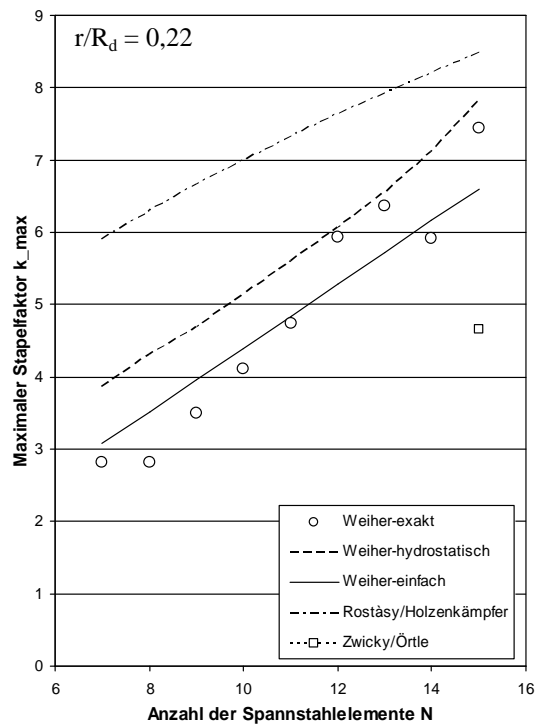
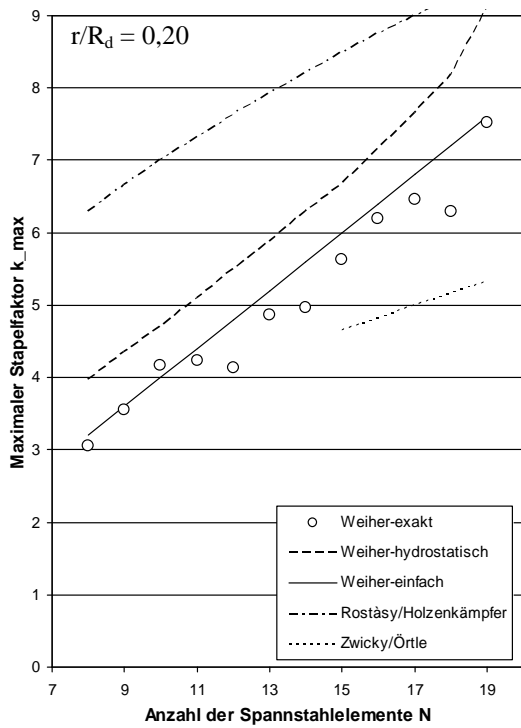
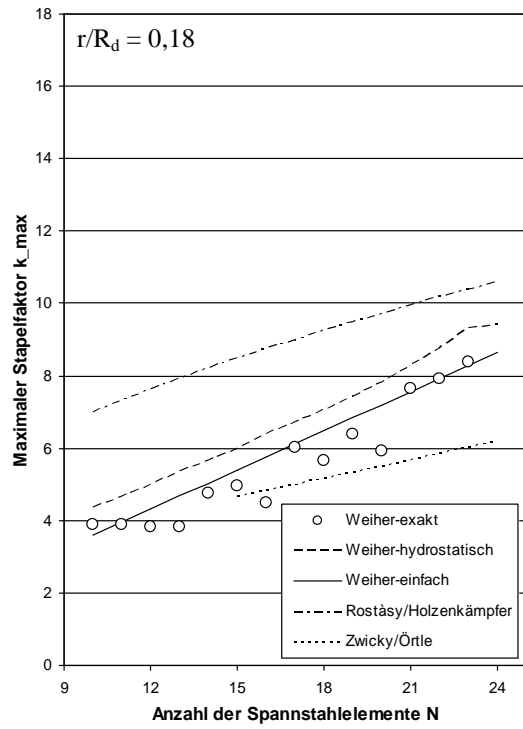
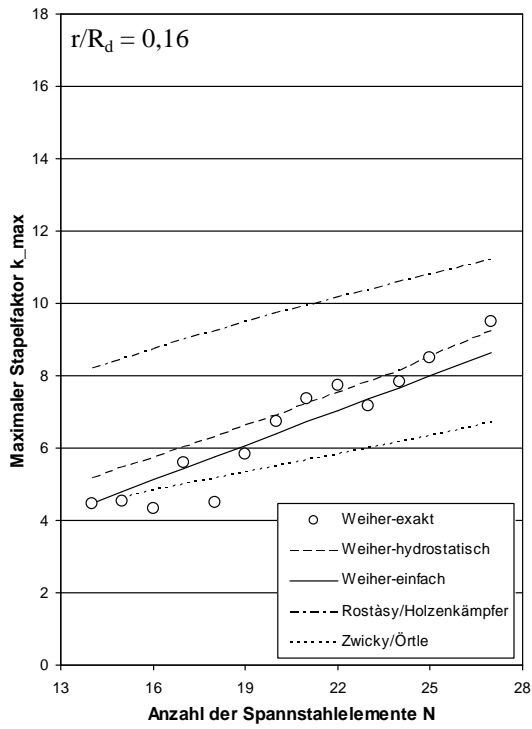


Abbildung 10.4: Maximale Stapelfaktoren aus Exakter Berechnung, Vereinfachtem Verfahren, Hydrostatischer Analogie sowie nach Rostásy/Holzenkämpfer und Zwicky/Örtle ( $r/R_d \in [0,16; 0,22]$ )

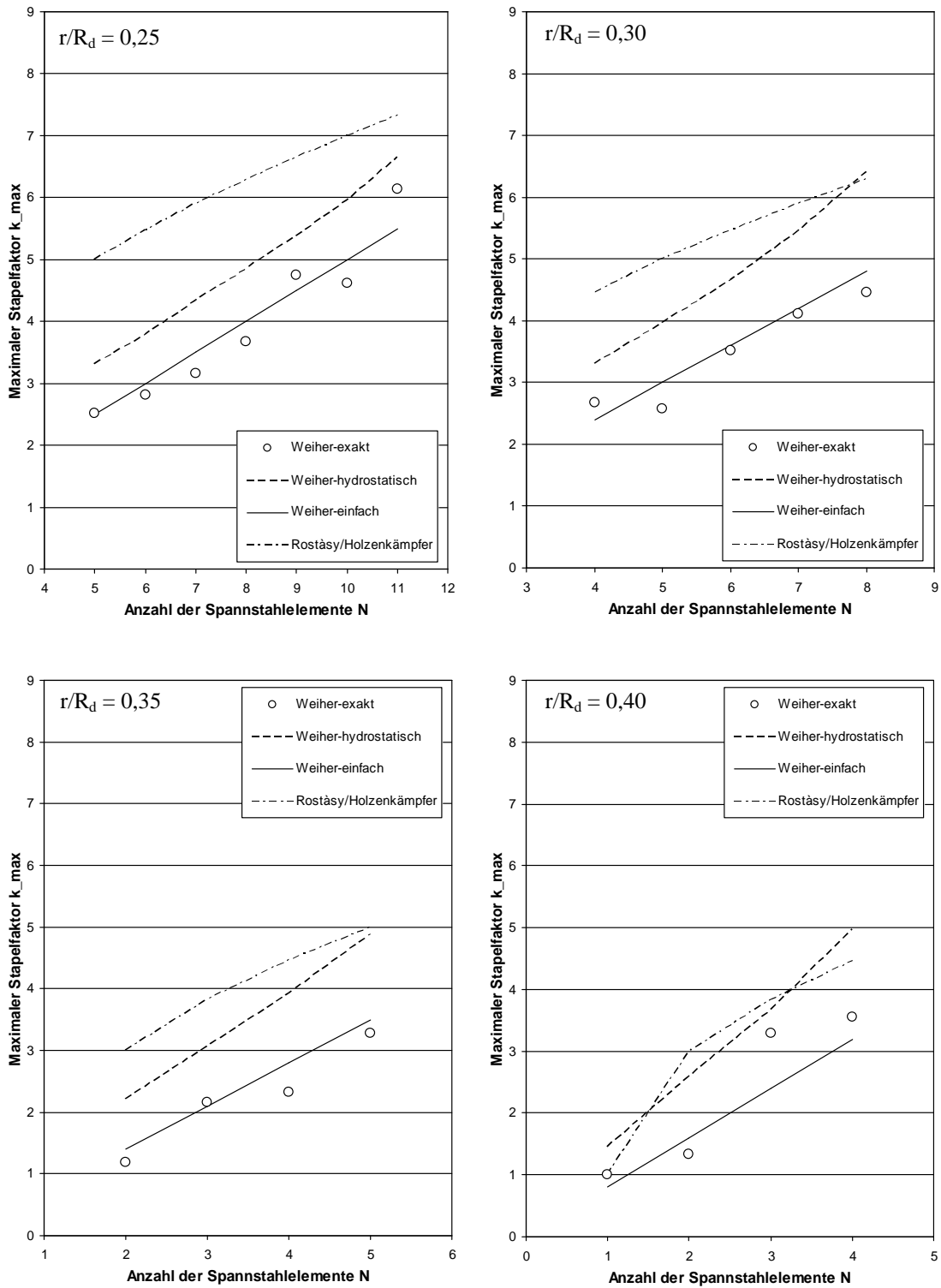


Abbildung 10.5: Maximale Stapelfaktoren aus Exakter Berechnung, Vereinfachtem Verfahren, Hydrostatischer Analogie sowie nach Rostásy/Holzenkämpfer und Zwicky/Örtle ( $r/R_d \in [0,25; 0,40]$ )

## 10.5 Eindrückungen – Eigene Versuche, TU München

### 10.5.1 Bandspannglieder mit Runddrahtlitze

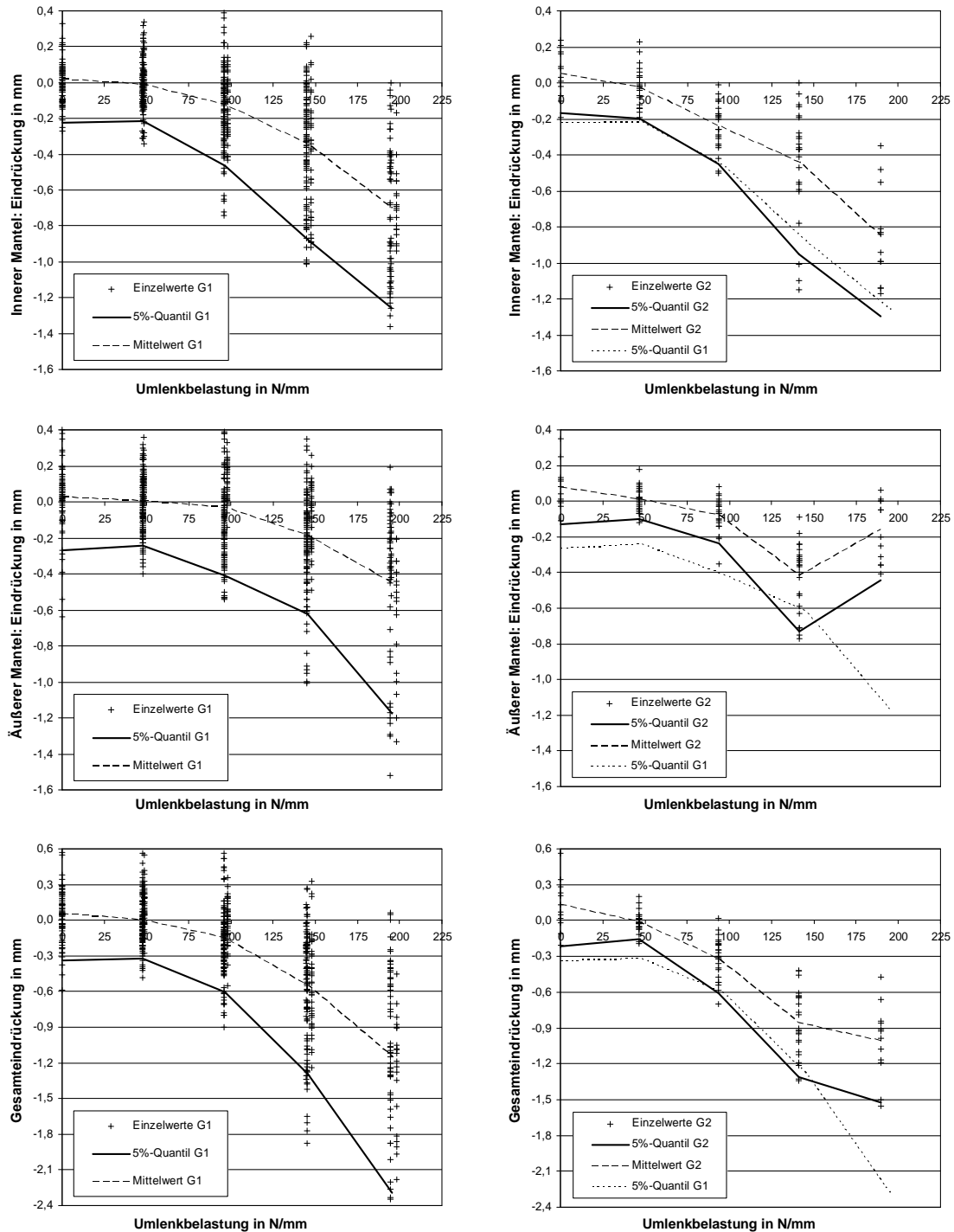


Abbildung 10.6: Eindrückung in Innen- (oben), Außenmantel (mittig) und Gesamt (unten) – Einzelwerte, Mittelwerte, 5%-Quantil G1 (640 Messstellen, links) und G2 (96 Messstellen, rechts) sowie 5%-Quantil G1

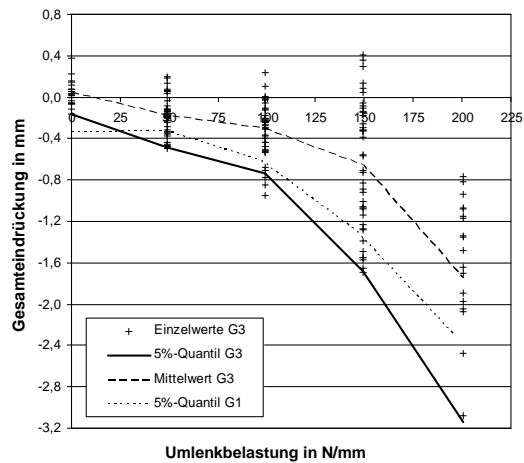
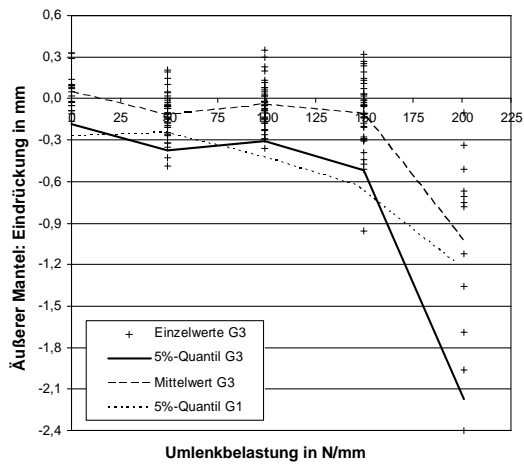
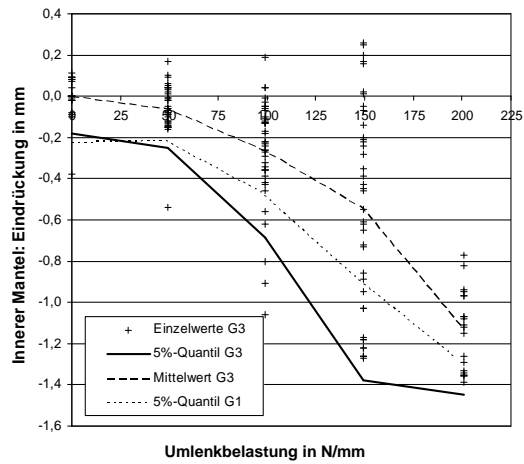


Abbildung 10.7: Eindrückung in Innen- (oben), Außenmantel (mittig) und Gesamt (unten) – Einzelwerte, Mittelwerte, 5%-Quantil G3 (160 Messstellen, links) und 5%-Quantil G1

## 10.5.2 Bandspannglieder mit Kompaktlitze

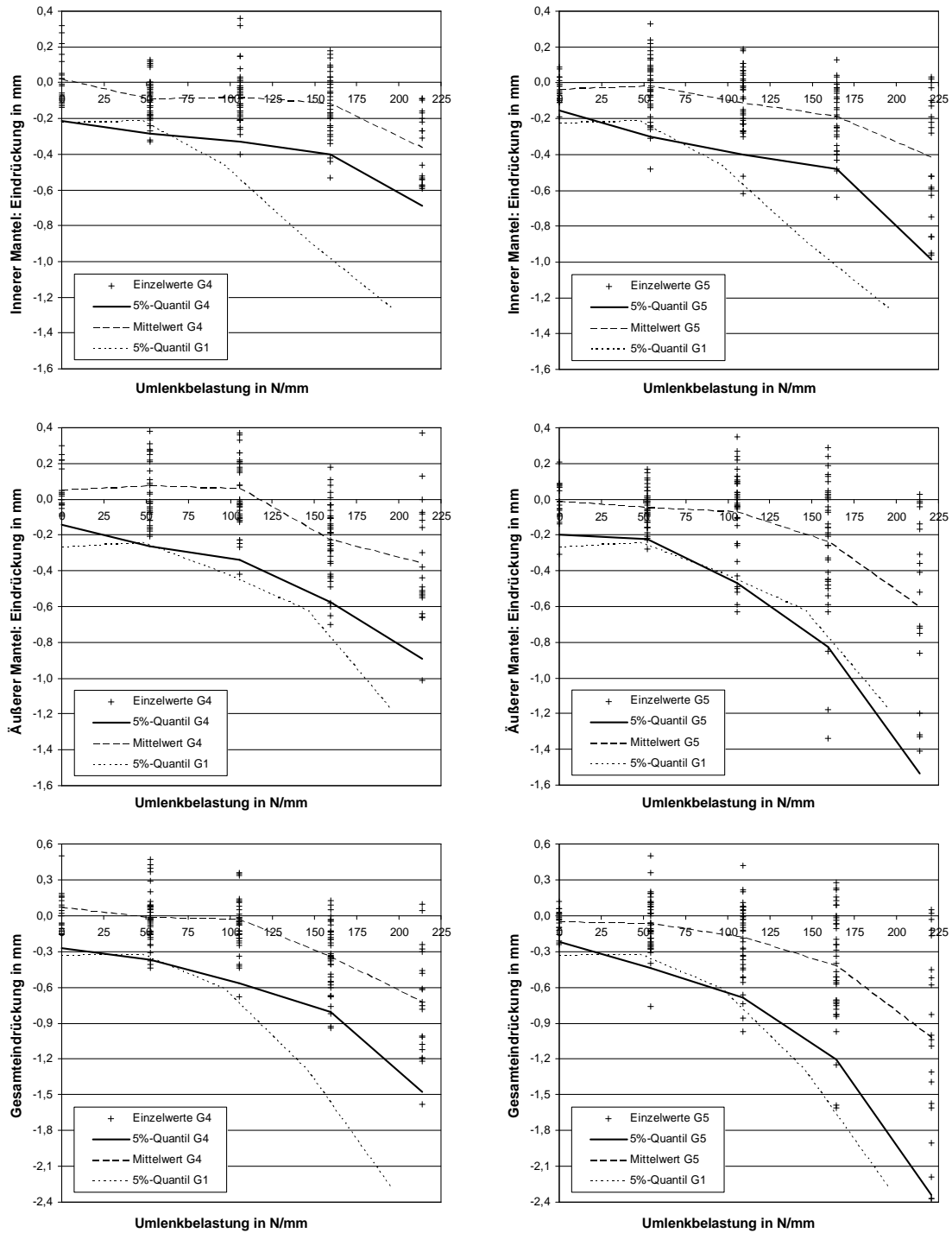


Abbildung 10.8: Eindrückung in Innen- (oben), Außenmantel (mittig) und Gesamt (unten) – Einzelwerte, Mittelwerte, 5%-Quantil G4 (links) und G5 (rechts) (jeweils 160 Messstellen) sowie 5%-Quantil G1

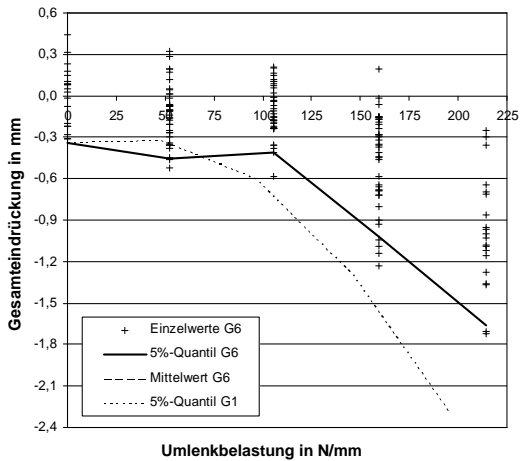
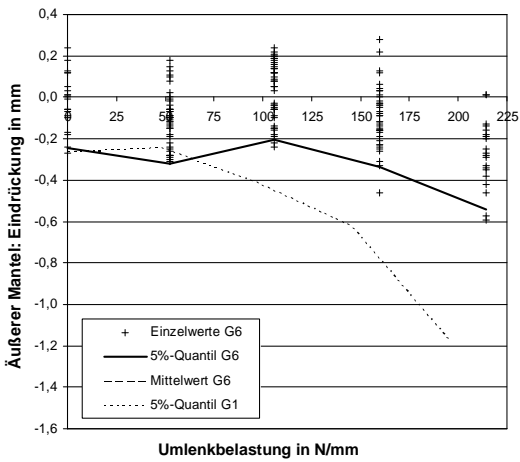
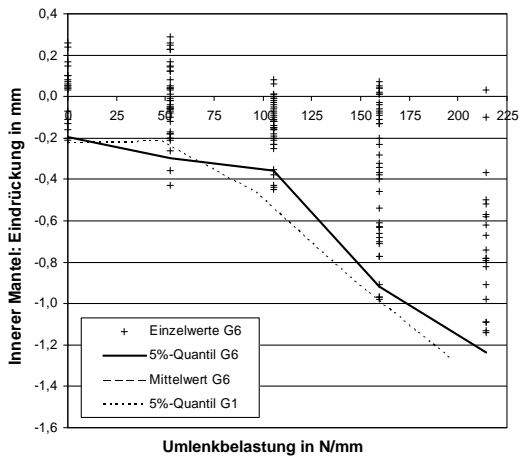


Abbildung 10.9: Eindrückung in Innen- (oben), Außenmantel (mittig) und Gesamt (unten) – Einzelwerte, Mittelwerte, 5%-Quantil G6 (160 Messstellen, links) und 5%-Quantil G1



## 10.6 Eindrückungen – Kleinmodellversuche, RWTH Aachen

### 10.6.1 Bandspannglieder mit Runddrahtlitze

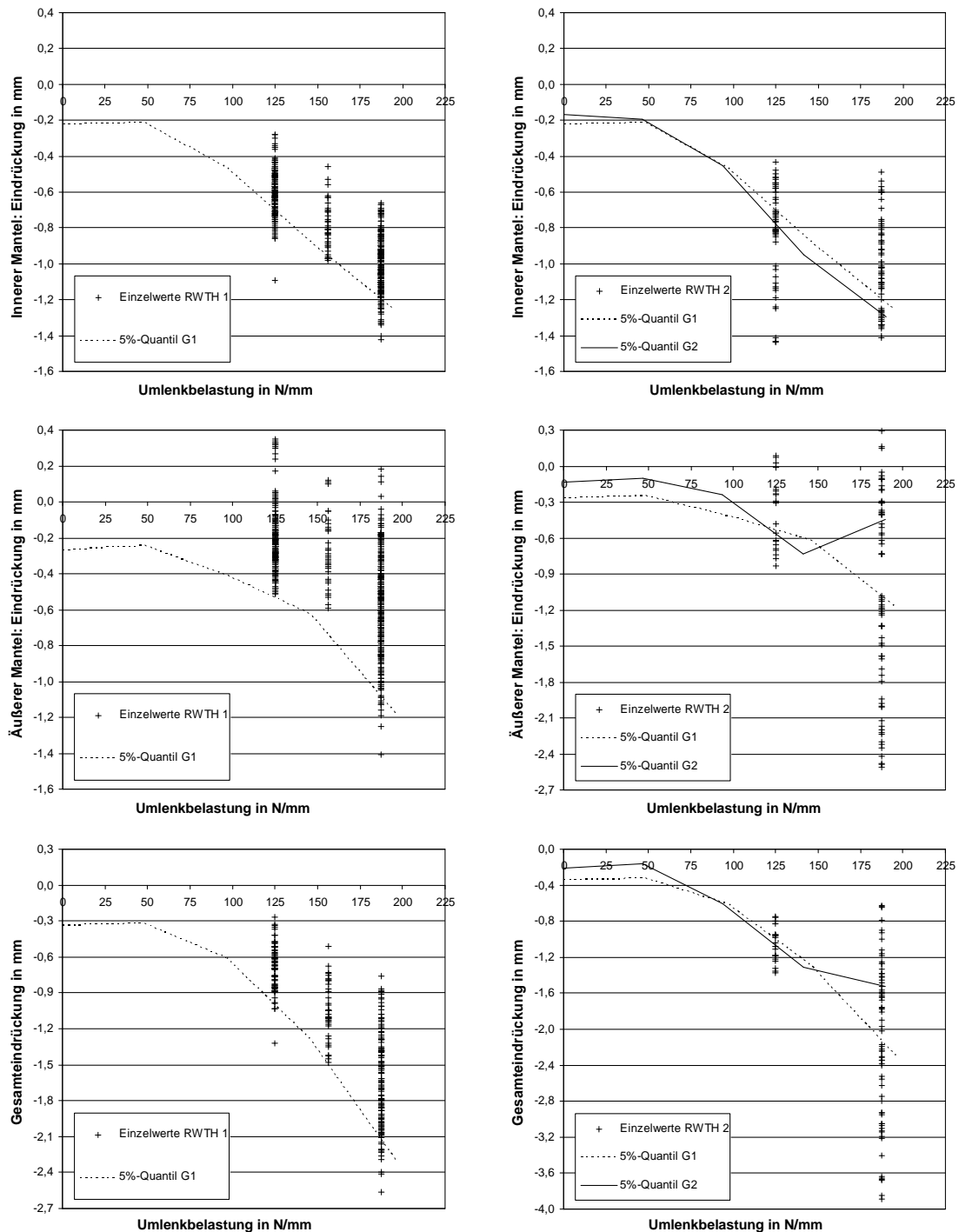


Abbildung 10.10: Eindrückung in Innen- (oben), Außenmantel (mittig) und Gesamt (unten) – Einzelwerte RWTH-1 (620 Messstellen, links), RWTH-2 (130 Messstellen, rechts) und 5%-Quantil G1 bzw. G2

## 10.6.2 Bandspannglieder mit Kompaktlitze

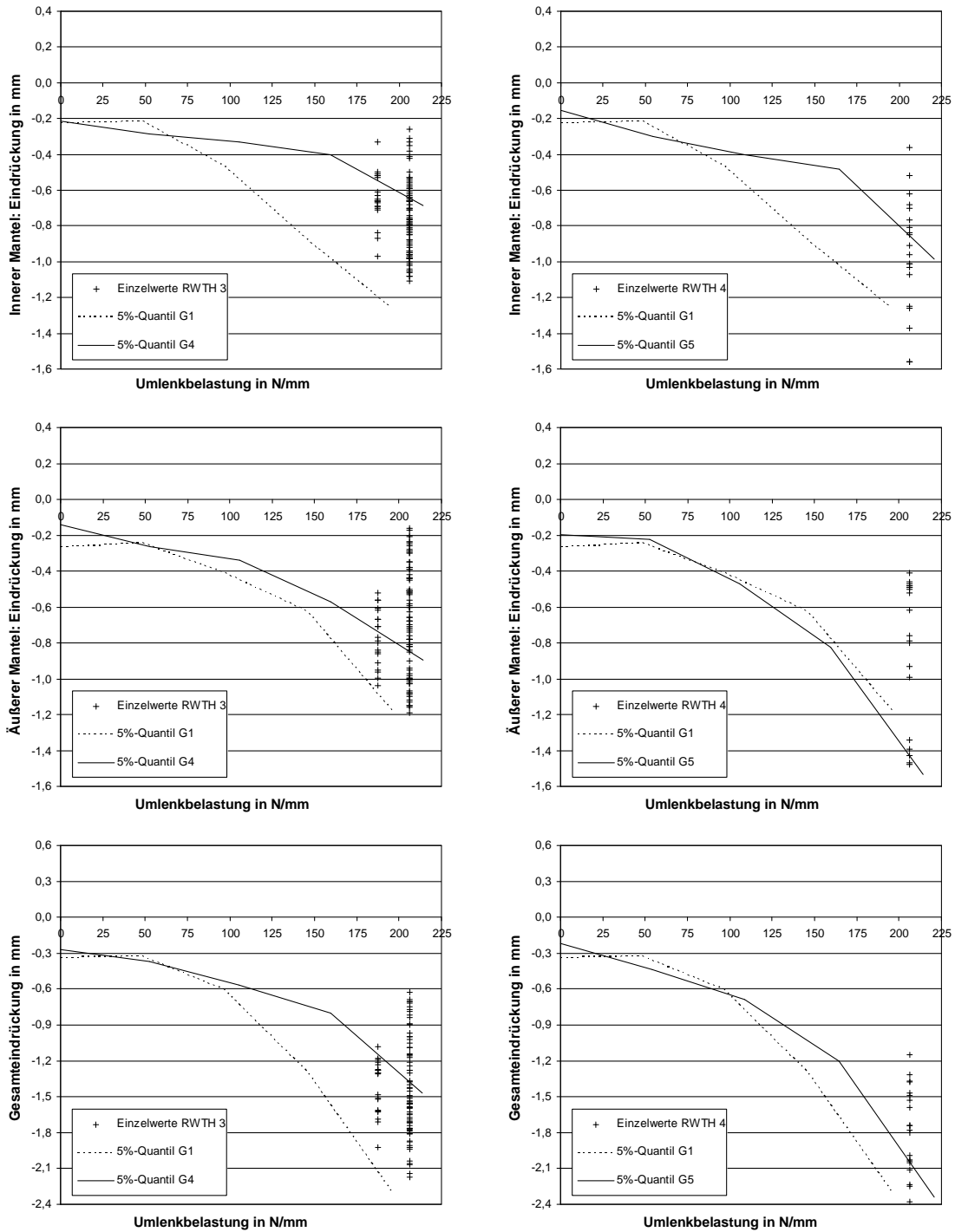


Abbildung 10.11: Eindrückung in Innen- (oben), Außenmantel (mittig) und Gesamt (unten) – Einzelwerte RWTH-3 (100 Messstellen, links), RWTH-4 (20 Messstellen, rechts) und 5%-Quantil G1 bzw. G2

## 10.7 Sonstige Versuche (Zulassungsversuche)

Die folgenden Ergebnisse von Umlenkversuchen wurden im Rahmen von Zulassungsverfahren gewonnen. Aus Rücksicht auf die Hersteller, die bereitwillig die Versuchsergebnisse zur Verfügung stellten, werden an dieser Stelle nur die für diese Untersuchung erforderlichen Randbedingungen präsentiert. Die relevanten Eindrücke abhängig von der anliegenden Druckbelastung können Kapitel 10.710.8 entnommen werden.

Bandspannglieder mit Runddrahtlitzen:

- SV-01 (Abbildung 10.12): Drei gestapelte Bänder à vier Litzen wurden mit einem vertikalen Radius von 2,60 m bei einer maximalen Druckbelastung von 237 N/mm umgelenkt. Das Spannglied wurde mit Äußerer Gleitung 1,20 m über einen Sattel gezogen und im Anschluss sofort wieder entlastet. Die Belastungszeit betrug nur 0,1 Tage, die Umgebungstemperatur etwa 20°C.
- SV-02 (Abbildung 10.12): Vier gestapelte Bänder à vier Litzen wurden mit einem vertikalen Radius von 5,00 m sowie mit einem horizontalen Radius von 10,00 m bei einer maximalen Druckbelastung von 150 N/mm umgelenkt, jedoch nicht über einen Sattel gezogen. Die Belastungszeit betrug 0,1 Tage, die Umgebungstemperatur 22°C.
- SV-03 (Abbildung 10.12): Vier gestapelte Bänder à vier Litzen wurden mit einem vertikalen Radius von 5,00 m sowie mit einem horizontalen Radius von 10,00 m bei einer maximalen Druckbelastung von 152 N/mm umgelenkt und ca. 800 mm mit Äußerer Gleitung über einen Sattel gezogen. Die Belastungszeit betrug 21 Tage, die maximale Umgebungstemperatur 22°C.
- SV-04 (Abbildung 10.12): Vier gestapelte Bänder à vier Litzen wurden mit einem vertikalen Radius von 5,00 m bei einer maximalen Druckbelastung von 156 N/mm umgelenkt und ca. 800 mm mit Äußerer Gleitung über einen Sattel gezogen. Die Belastungszeit betrug 21 Tage, die maximale Umgebungstemperatur 25°C.
- SV-05 (Abbildung 10.12): Vier gestapelte Bänder à vier Litzen wurden mit einem vertikalen Radius von 4,00 m bei einer maximalen Druckbelastung von 180 N/mm umgelenkt und ca. 800 mm mit Innerer Gleitung über einen Sattel gezogen. Die Belastungszeit betrug 21 Tage, die maximale Umgebungstemperatur 23°C.

Die Eindrücke der Runddrahtlitzen in die Polyethylen-Hüllen der untersuchten Bandspannglieder nehmen vergleichbar mit den Eindrücken bei den eigenen Versuchen mit zunehmender Umlenkbelastung zu. Lediglich bei den Versuchen SV-01 und SV-02 erreichen die Eindrücke in ihrer Tiefe nicht die Größenordnung der eigenen Ergebnisse (Abbildung 10.12). Dies liegt daran, dass die beiden Versuche sofort nach dem Schubvorgang beendet wurden, das Spannglied also entlastet wurde.

Bandspannglieder mit Kompaktlitzen:

- SV-11 (Abbildung 10.13): Vier gestapelte Bänder à vier Kompaktlitzen wurden mit einem vertikalen Radius von 5,00 m sowie mit einem horizontalen Radius von 10,00 m bei einer maximalen Druckbelastung von 164 N/mm umgelenkt und ca. 800 mm mit Äußerer Gleitung über einen Sattel gezogen. Die Belastungszeit betrug 21 Tage, die maximale Umgebungstemperatur 22°C.

Der Versuchsaufbau dieses Versuchs entsprach mit Ausnahme des Umlenkradius dem des Versuchs G6. Für Druckbelastungen bis ca. 125 N/mm<sup>2</sup> stimmen die Eindrückungsergebnisse des inneren Mantels sehr gut mit den Ergebnissen des eigenen Versuchs überein. Bei hoher Druckbelastung waren die Eindrückungen weniger tief, jedoch etwas größer als bei dem vergleichbaren einaxialen Versuch G1.

Spannglieder mit Drähten im PE-HD Hüllrohr:

- SV-21 (Abbildung 10.14): Ein Spannglied mit insgesamt 66 Drähten mit einem Durchmesser von 7 mm wurde mit einem Radius von 4,00 m umgelenkt und ca. 800 mm mit Äußerer Gleitung über einen Sattel gezogen. Die Belastungszeit betrug 21 Tage, die maximale Umgebungstemperatur 25°C. Die maximale Druckbelastung kann mit Hilfe des maximalen Stapelfaktors für die gewählten Hüllrohrabmessungen (Vereinfachtes Verfahren:  $n_{\max} = 11,6$ ) zu 104 N/mm bestimmt werden.
- SV-22 (Abbildung 10.14): Ein Spannglied mit insgesamt 66 Drähten mit einem Durchmesser von 7 mm wurde mit einem Radius von 4,00 m umgelenkt und ca. 650 mm mit Äußerer Gleitung über einen Sattel gezogen. Die Belastungszeit betrug 22 Tage, die maximale Umgebungstemperatur 25°C. Die maximale Druckbelastung kann mit Hilfe des maximalen Stapelfaktors für die gewählten Hüllrohrabmessungen (Vereinfachtes Verfahren:  $n_{\max} = 11,6$ ) zu 130 N/mm bestimmt werden. Der im Vergleich zu Versuch SV-21 höhere Wert für die Umlenkdruckbelastung ist auf eine höhere Spannstahlspannung bei Ziellast zurückzuführen.

Die Umlenkbelastungen sind bei Drahtspanngliedern bei vergleichbaren Spanngliedgrößen trotz höherer Stapelfaktoren deutlich geringer als bei Litzenspanngliedern. Allerdings müssen diese auch mittels kleinerer Spannstahlelemente in die Schutzhüllen eingetragen werden. Vorteilhaft ist jedoch, dass eine relativ große Aufstandsweite bei geringer Einsinktiefen zur Verfügung steht. Die Eindrückungsergebnisse der beiden Versuche sind in etwa vergleichbar. Die Eindrückungen der ausgebauten Spanngliedhüllen der vergleichbaren Spannglieder des Viadotto Preonzo-Claro sind allerdings trotz der sehr langen Beanspruchungsdauer von über 10 Jahren deutlich kleiner. Die Ursache dieser Abweichung wird auch hier in der nicht exakt zu bestimmenden Umlenkbelastung der Drähte angesehen.

Spannglieder mit Runddrahtlitzen im PE-HD Hüllrohr:

Es wurden zwei im Aufbau identische Versuche durchgeführt. Dabei wurde jeweils ein Spannglied mit insgesamt 19 Litzen mit einer Querschnittsfläche von je 150 mm<sup>2</sup> an insgesamt drei Umlenkstellen umgelenkt. Mit den Umlenkformteilen wurden Radien von ein Mal 4,0 m und zwei Mal 6,0 m realisiert. Die maximalen Druckbelastungen können mit Hilfe des maximalen Stapelfaktors für die gewählten Hüllrohrabmessungen (Vereinfachtes

Verfahren:  $n_{\max} = 6,1$ ) zu 298 N/mm bei einem Radius von 4,00 m und zu 199 N/mm bei einem Radius von 6,00 m geschätzt werden.

- SV-31 (Abbildung 10.16): Das Spannglied wurde im ersten Versuch etwa 750 mm mit Äußerer Gleitung und davon bis zu 700 mm mit Innerer Gleitung über die drei Sättel gezogen. Die Belastungszeit betrug 21 Tage, die maximale Umgebungstemperatur 23°C.
- SV-32 (Abbildung 10.15, Abbildung 10.16): Im zweiten Versuch wurde für die Umlenkung mit Radius 4,0 m annähernd 100 % Äußere Gleitung, für die Umlenkung mit 6,0 m annähernd 100 % Innere Gleitung erreicht. Die Belastungszeit betrug 21 Tage, die maximale Umgebungstemperatur 22°C. Nach Ablauf der Standzeit wurde das Spannglied zusätzlich 210 mm unter Ziellast über die Umlenkelemente gezogen.

Die Umlenkung mit Äußerer Gleitung um den engen Radius von 4,00 m (Versuch SV-32) zeigte erstaunlicherweise die geringsten Eindrückungen. Die Betrachtung der aufgeschnittenen Schutzhüllen zeigt, dass im Tiefpunkt zwei Einzellitzen so nebeneinander lagen, dass die vertikale Mittelachse des Rohrs genau zwischen diesen verlief. Liegt eine solche Konstellation der Litzen vor, so ergeben sich häufig auch rechnerisch kleinere maximale Stapelfaktoren als wenn nur eine Litze genau im Hüllrohrtiefpunkt liegt.

Die Eindrückungen bei Vershub mit Innerer Gleitung waren selbst bei einem Radius von 6,00 m viel größer. Im Gegensatz zu den Ergebnissen mit Äußerer Gleitung zeigte das Eindrückbild der Hüllrohre stets einen genau mittig am Tiefpunkt des Rohrs liegenden sehr tiefen Litzenkanal. Alle benachbarten Eindrückungen wiesen deutlich geringere Eindrückungen auf. Hier lag zudem der Fall der spannkernnahen Umlenkung vor, deren Effekt in Kapitel 4.3.4 erläutert wird.

Inwiefern Innere Gleitung diese extremen Eindrückungen mit verursacht ist mit den Versuchsdaten nicht eindeutig zu klären. Es kann jedoch aufgrund der eigenen Versuche ausgeschlossen werden, dass dieser „Eindrückungssprung“ durch Reibungverschleiß erfolgte. In diesem Fall hätte eine beträchtliche Menge an abgespannten PE-Partikeln erzeugt werden müssen. Denkbar ist, dass die hohen Torsionsmomente in den Litzen ein gleichmäßiges Verdrehen der Litzen verhindern. Die Rückstellkräfte führen so zu Walkprozessen mit starken plastischen Verformungen des Kunststoffes.

Bei der Umlenkung mit dem Radius 4,00 m trat die Relativverschiebung zwischen Stahl und PE-HD als „Verdrehung“ auf, bei der Umlenkung mit 6,00 m teilweise als Verdrehung und teilweise als „Translation“ (vgl. Kapitel 4.3). Unklar ist zudem, welche Auswirkung die Verdrillung der Litzen hat. Bei der „Verdrehung“ drehen sich die anliegenden Litzen um die eigene Achse, die verbleibenden Litzen jedoch nicht.

Für die endgültige Klärung der Fragestellung wäre eine experimentelle Untersuchung mit Isolierung der einzelnen Einflüsse Umlenkbelastung und Innere Gleitung erforderlich.

#### Spannglieder mit Monolitzen im PE-HD Hüllrohr:

- SV-41 (Abbildung 10.17): Ein Spannglied mit insgesamt 19 Monolitzen wurde mit einem Radius von 4,00 m umgelenkt und 240 mm mit Äußerer Gleitung über einen Umlenksattel gezogen. Die Belastungszeit betrug 0,1 Tage, die maximale Umgebungstemperatur betrug 25°C. Die maximale Druckbelastung kann mit Hilfe des maximalen Stapelfaktors für die gewählten Hüllrohrabmessungen und 19 Spannstahlelemente (Vereinfachtes Verfahren:  $n_{\max} = 4,5$ ) zu 206 N/mm bestimmt werden.
- SV-42 (Abbildung 10.17): Als Variante zu SV-41 wurde dieser Versuch mit ca. 200 mm Äußerer Gleitung durchgeführt.
- SV-43 (Abbildung 10.17): Als Variante zu SV-41 wurde dieser Versuch mit ca. 210 mm Innerer Gleitung durchgeführt. Aufgrund des größeren Radius von 6,00 m betrug die anliegende Umlenkbelastung nur 138 N/mm.
- SV-44 (Abbildung 10.17): Als Variante zu SV-41 wurde dieser Versuch mit ca. 100 mm Innerer Gleitung durchgeführt.
- SV-45 (Abbildung 10.17): Als Variante zu SV-43 wurde dieser Versuch mit einer Standzeit von 20 Tagen durchgeführt.
- SV-46 (Abbildung 10.17): Ein Spannglied mit 19 Monolitzen wurde mit einem Radius von 6,00 m umgelenkt und 260 mm mit Innerer Gleitung sowie 540 mm mit Äußerer Gleitung über einen Sattel gezogen. Die Belastungszeit betrug 21 Tage, die maximale Umgebungstemperatur 25°C. Die maximale Druckbelastung betrug 131 N/mm.

Die Versuche unterscheiden sich im Wesentlichen durch die Beanspruchungszeit. Bei den Versuchen SV-41 bis SV-44 wurde das Spannglied nach dem Verschub sofort entlastet. Bei SV-45 und SV-46 wurde die dreiwöchige Standzeit eingehalten. Trotzdem liegen hier kleinere Eindrückungen in den Monolitzenmantel vor. Auch hier liegt die Problematik vor, dass die tatsächlich anliegende Umlenkbelastung nicht bestimmt werden kann.

#### Monolitzen (intern):

- SV-51 (Abbildung 10.18): Vier Monolitzen wurden mit einem Radius von 0,6 m bei einer maximalen Druckbelastung von 375 N/mm umgelenkt, jedoch nicht über einen Sattel gezogen. Die Belastungszeit betrug 21 Tage, die maximale Umgebungstemperatur 40°C. Die Zwickel zwischen den Monolitzenhüllen waren mit Mörtel verfüllt. Dadurch wird die Umlenkbelastung bei idealisierter Betrachtung nicht mehr linienförmig („Kreis auf Ebene“) sondern flächig („Kreis auf Bogen“) in das Bauwerk eingetragen. Somit treten geringere Druckspannungen und folglich geringere Eindrückungen bei gleicher Umlenkbelastung auf.

Die Eindrückungen sind trotz der enorm hohen Druckbelastungen klein (vgl. Abbildung 10.18). Selbst nach Berücksichtigung der Zwickelstützung mit einer Abminderung der Druckbelastung durch Multiplikation mit dem Faktor  $2/3$  zu 250 N/mm<sup>2</sup>, wie in Kapitel 4.1.8 theoretisch abgeschätzt, erscheint die gemessene Eindrückungstiefe noch gering. Die Wirkung der Zwickelstützung scheint demnach deutlich ausgeprägter zu sein. Dabei lag mit

40 °C zudem eine höhere Versuchstemperatur vor als bei den eigenen Versuchen. Mindert man die anliegende Druckbelastung durch Multiplikation mit dem frei gewählten Faktor 1/3 ab, so stimmen die Eindrückungsergebnisse gut mit den Ergebnissen der eigenen Versuche G1 überein (vgl. Abbildung 10.18). Für eine zuverlässige Quantifizierung der Wirkung der Zwickelstützung ist dieser Versuch alleine nicht ausreichend. Aufgrund der vielfältigen Einsatzmöglichkeiten und der weiten Verbreitung intern geführter, verbundloser Spannglieder würde eine experimentelle Untersuchung des Eindrückverhaltens zu wirtschaftlicheren und dauerhafteren Systemen durch die genaue Kenntnis des Bauteilverhaltens der Polyethylenrohre führen. Bei der Untersuchung von Monolitzen ist wie bei den Bandspanngliedern der Vorteil der genauen Kenntnis der Beanspruchung gegeben.

## 10.8 Eindrückungen – Sonstige Versuche

### 10.8.1 Bandspannglieder mit Runddrahtlitze

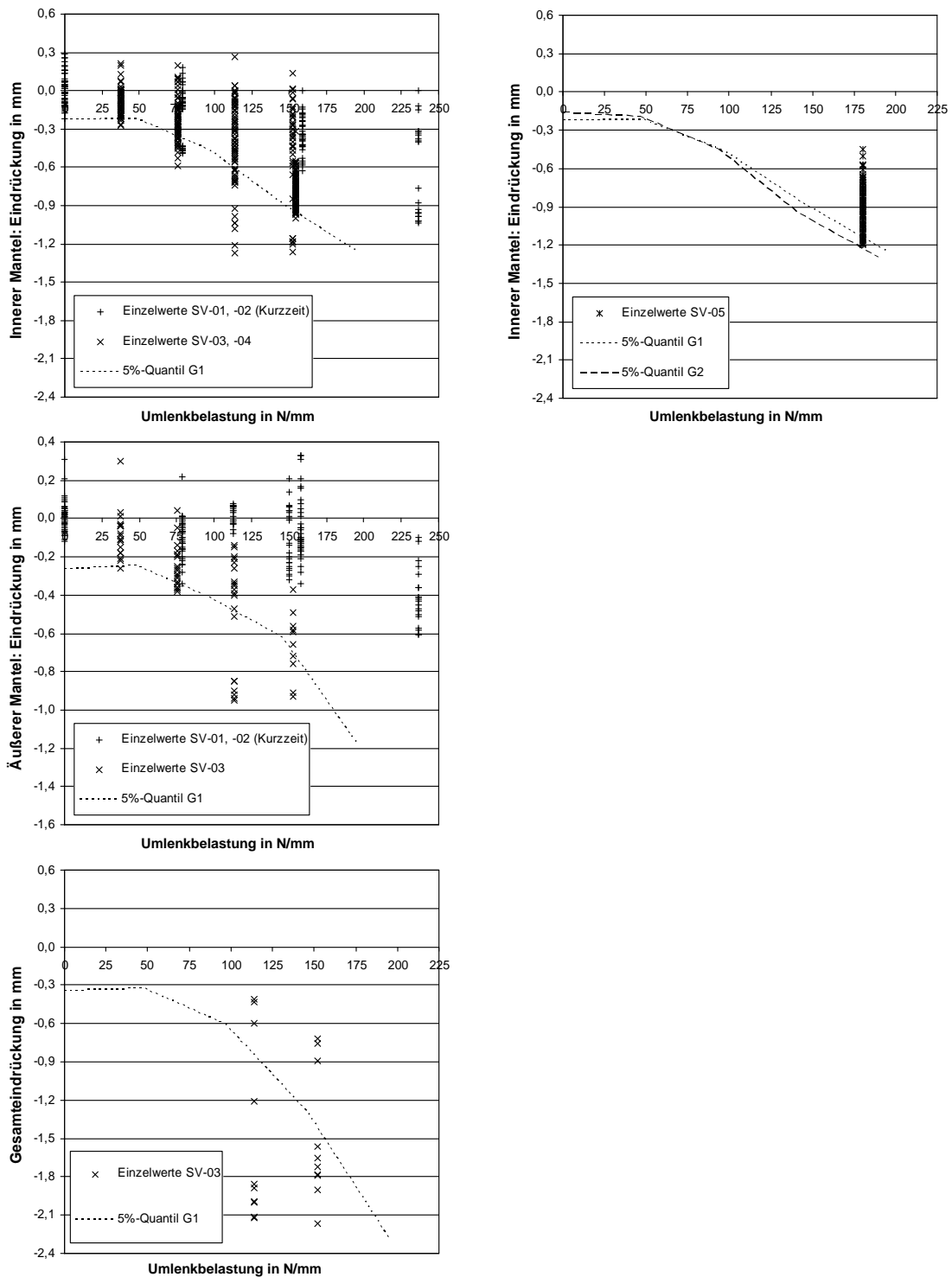


Abbildung 10.12: Eindrückung in Innen- (oben), Außenmantel (mittig) und Gesamt (unten) – Einzelwerte SV-01 bis SV-04 (580 Messstellen, links), SV-05 (110, rechts) und 5%-Quantil G1 bzw. G2



## 10.8.2 Bandspannglieder mit Kompaktlitze

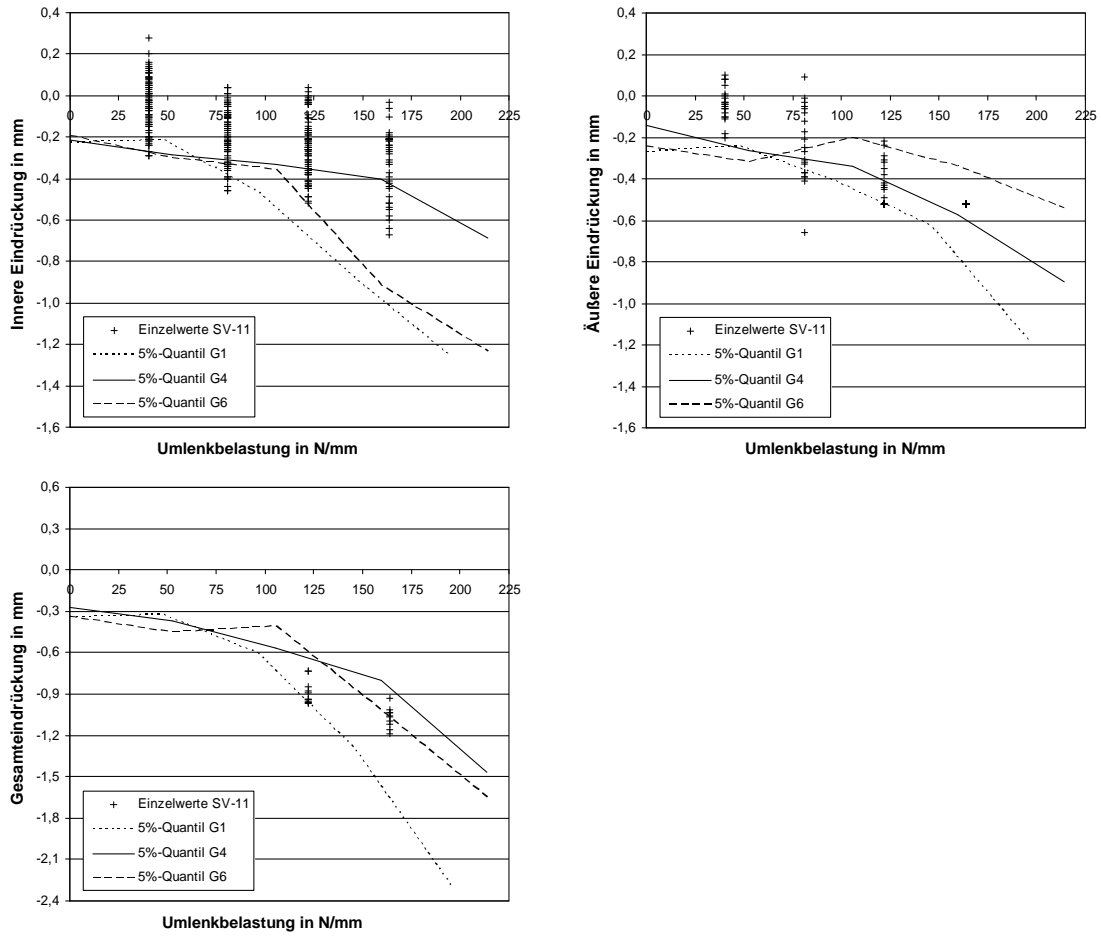


Abbildung 10.13: Eindrückung in Innen- (links oben), Außenmantel (links unten) und Gesamt (rechts oben) – Einzelwerte SV-11 (280 Messstellen, links) und 5%-Quantil G1 bzw. G6

## 10.8.3 Spannglieder mit Drähten im PE-HD Hüllrohr

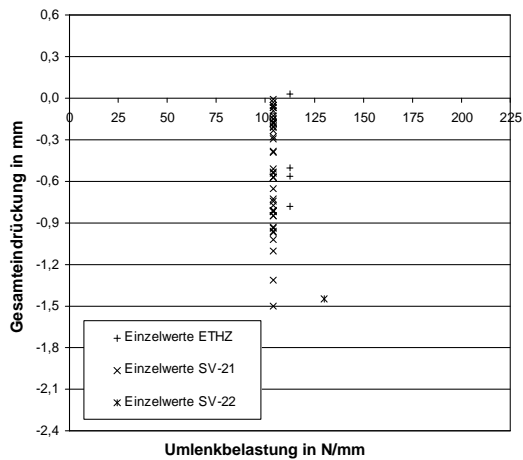


Abbildung 10.14: Eindrückung in Hüllrohr – Einzelwerte ETHZ, SV-21, SV-22 (50 Messstellen)

### 10.8.4 Spannglieder mit Runddrahtlitzen im PE-HD Hüllrohr

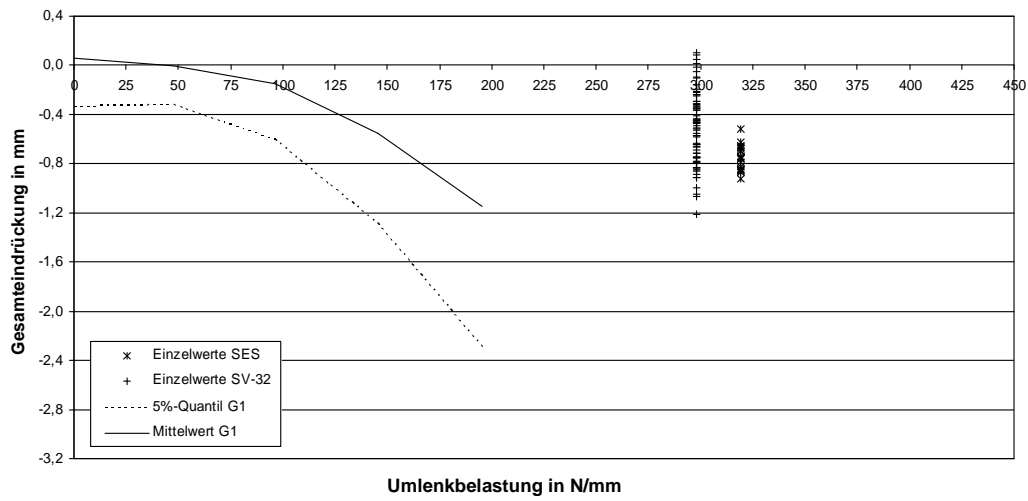


Abbildung 10.15: Eindrückung in Hüllrohr – Einzelwerte SES und SV-32 (Äußere Gleitung) und 5%-Quantil sowie Mittelwert G1

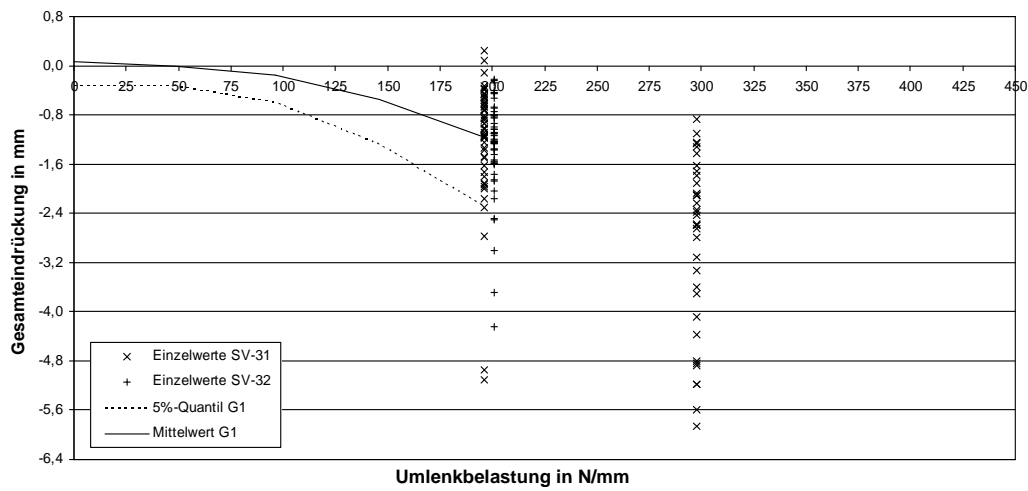


Abbildung 10.16: Eindrückung in Hüllrohr – Einzelwerte SV-31 und SV-32 (Innere Gleitung) und 5%-Quantil sowie Mittelwert G1

### 10.8.5 Spannglieder mit Monolitzen im PE-HD Hüllrohr

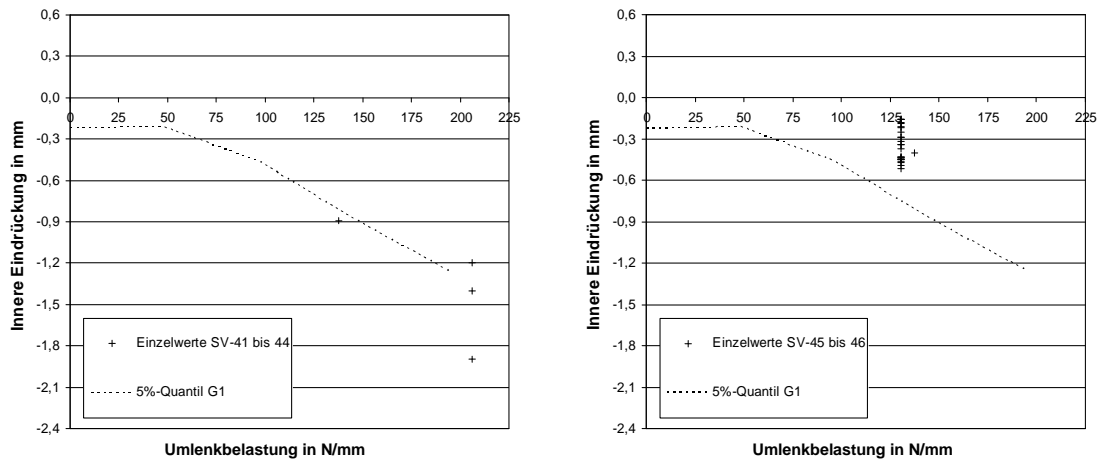


Abbildung 10.17: Eindrückung in Monolitzenmantel – Einzelwerte SV-41 bis SV-44 (Kurzzeitbelastung, 4 Messstellen), SV-45 bis SV-46 (24 Messstellen) und 5%-Quantil G1

### 10.8.6 Monolitzen (intern)

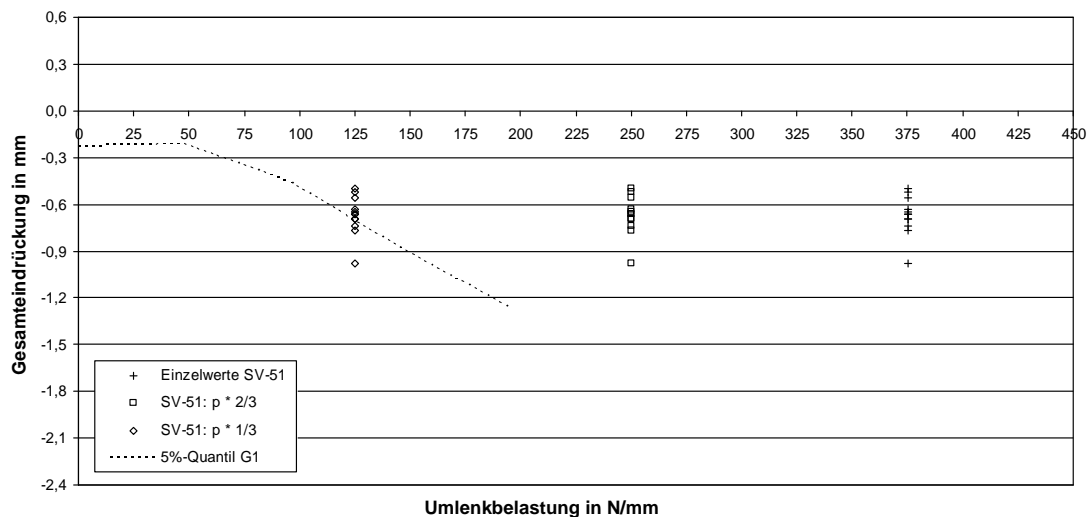


Abbildung 10.18: Eindrückung in Monolitzenmantel (Zwickel mit Mörtel verfüllt) in Abhängigkeit von der Druckbelastung – Einzelwerte sowie Verlauf 5%-Quantilwerte G1 (Versuch SV-51 bei 40°C, 12 Messstellen), abgeminderte Druckbelastungen

## 10.9 Bemessungsdiagramme für Schutzhüllen von Bandspanngliedern bei konstanten Anforderungen

Siehe Abbildung 10.19, Seite 134 (Runddrahtlitze)

Siehe Abbildung 10.20, Seite 135 (Kompaktlitze)

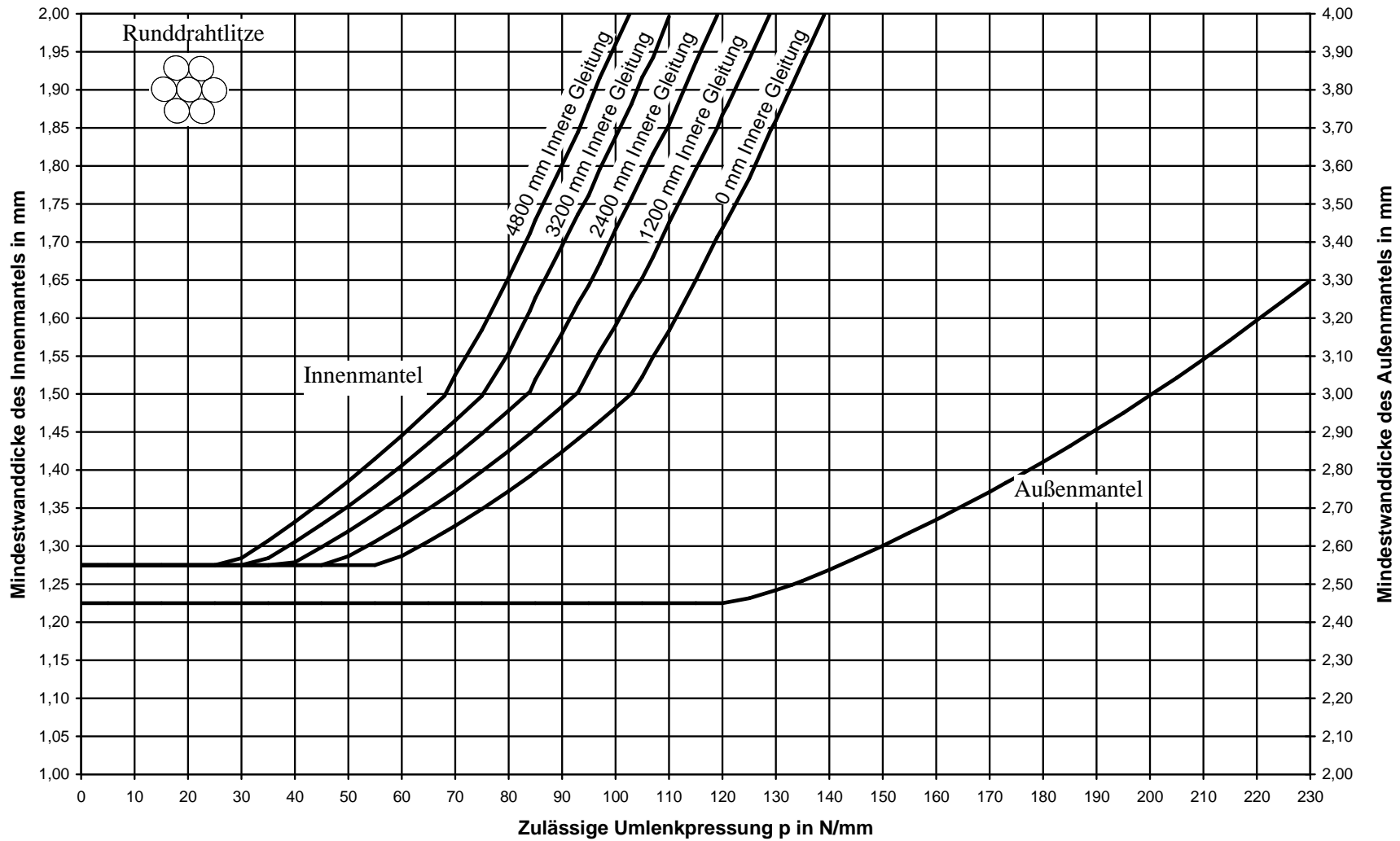


Abbildung 10.19: Bemessungsdiagramm für PE-Schutzhüllen von Bandspanngliedern mit Runddrahtlitzen für konstante Anforderungen

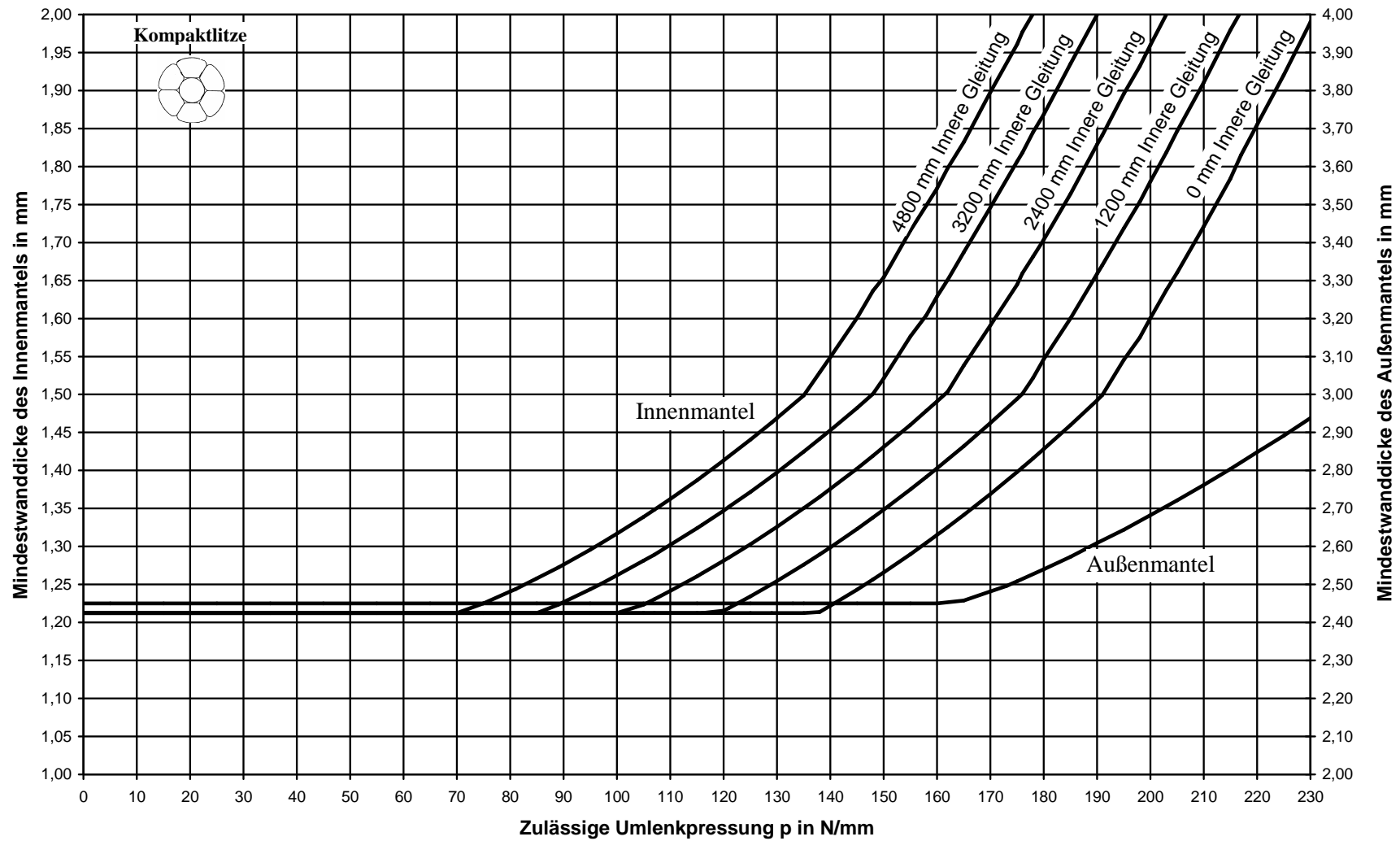


Abbildung 10.20: Bemessungsdiagramm für PE-Schutzhüllen von Bandspanngliedern mit Kompaktlitzen für konstante Anforderungen