

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/272686759>

Umlenkung von Spanngliedern

Conference Paper · January 2009

CITATIONS

0

READS

162

2 authors:



Hermann Weiher

matrics engineering GmbH

61 PUBLICATIONS 90 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Konrad Zilch

Technische Universität München

190 PUBLICATIONS 605 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Hybridanker [View project](#)



Strength Monitoring Using Thermal Imaging [View project](#)

Umlenkung von Spanngliedern

Hermann Weiher¹⁾

¹⁾ Lehrstuhl für Massivbau, Technische Universität München

Zusammenfassung

Bei der Umlenkung von gespannten Zuggliedern treten quer zur Spannrichtung Pressungen zwischen Zugglied und Bauteil auf. Diese Querpressungen können je nach Größe ursächlich für Beeinträchtigungen der Dauerhaftigkeit und der statischen und dynamischen Tragfähigkeit der Zugglieder sein. Bei Verwendung weicher Hüllrohre aus Polyethylen oder Polypropylen können diese durch die Querbeanspruchung durch den Spannstahl deformiert werden. Der Spannstahl selbst darf nur einer bestimmten Krümmung unterliegen, da sonst die kombinierte Spannung aus Längskraft und Biegung sehr groß wird. An Kontaktstellen Stahl auf Stahl (Spannstahl auf Blechhüllrohr, Spannstahl auf Spannstahl) kann bei nicht ruhender Belastung Reibermüdung mit Spannstahlbruch auftreten.

Am Lehrstuhl für Massivbau wurde in den vergangenen Jahren in diesem Themenbereich intensiv geforscht. Hierzu wurden angestoßen von einem Forschungsauftrag des Deutschen Instituts für Bautechnik eine Dissertation, vier Diplom- bzw. Masterarbeiten sowie eine Bachelorarbeit angefertigt ([1] bis [7]). Der Schwerpunkt lag dabei vor allem auf der experimentellen Untersuchung und theoretischen Quantifizierung der Dauerhaftigkeit von Polyethylenschutzhüllen umgelenkter Spannglieder. Diese Problematik ist für verbundlose Spannglieder besonders relevant und wird den Kern dieses Artikels bilden (u.a. mechanisches Modell für das Eindringen von Spannstahl in Polyethylen und Bemessung der Hüllrohre). In einem Exkurs werden die Ergebnisse einer experimentellen Untersuchung der Eignung von alternativen Hüllrohrmaterialien gezeigt. Neben der Widerstandsseite wird besonders die Einwirkungsseite mit neuen Ansätzen beleuchtet. Die genaue Kenntnis der Umlenkbelastung von Spanngliedern und Hüllrohren ist von essentieller Bedeutung für die Dauerhaftigkeitsbetrachtung weicher Hüllrohre und für die Reibermüdung.

Die Ergebnisse des Forschungsbereichs finden v.a. Verwendung bei der Extrapolation von Versuchsergebnissen auf andere Spanngliedgrößen (Zulassungen) und bei der Beurteilung der Dauerhaftigkeit und Effizienz von bestehenden Spanngliedsystemen und Neuentwicklungen. Internationale Richtlinien und Berichte zum Stand der Technik greifen auf Teile der Ergebnisse zu (EOTA, fib).

1 Problemstellung

Verbundlose Vorspannung wird national seit ca. 20 Jahren vermehrt eingesetzt (Bild 1). Gründe hierfür sind neben Dauerhaftigkeitsproblem von Spanngliedern mit nachträglichem Verbund u.a. die erwartete bessere Dauerhaftigkeit und die Kontrollierbarkeit der Spannglieder. Bei vorgespannten Betonbrücken mit Kastenquerschnitt ist in Deutschland seit 1999 die Verwendung extern geführter Spannglieder obligatorisch. Weltweit erlangte sie mit extern geführten Spanngliedern große Bedeutung bei der Vorspannung von Segmentbrücken. Der Spannstahl verbundloser Vorspannsysteme wird durch Schutzhüllen und eingebrachte Füllstoffe wie Einpressmörtel oder Wachs vor dem Angriff korrosionsfördernder Stoffe geschützt. Die Mehrzahl dieser Systeme verwendet dabei Schutzhüllen aus Polyethylen hoher Dichte (PE-HD). Die Wirkung der Schutzhüllen und damit die Dauerhaftigkeit der Spann-

glieder kann besonders an Umlenkstellen durch die dort auftretenden Beanspruchungen reduziert werden (Bild 2). Durch die auftretende Umlenkpressung und eine beim Anspannvorgang mögliche Verschiebung wird die Schutzhülle mechanisch beansprucht und der Spannstahl drückt sich in diese ein (Bild 2). Die verbleibende Wanddicke (Restwanddicke) ist ein Maß für die Dauerhaftigkeit und Güte des Korrosionsschutzes. Alle in Deutschland verwendeten Spannglieder müssen über eine Zulassung entweder national nach den Regeln des Deutschen Instituts für Bautechnik oder europäisch nach der Richtlinie ETAG 013 der EOTA (European Organisation for Technical Approvals) verfügen. Bei der Zulassung von verbundlosen Spanngliedern wird dabei die Durchführung eines Umlenkversuchs gefordert, dessen Ergebnisse zum Nachweis der Dauerhaftigkeit der Schutzhüllen gewisse Kriterien (z. B. eine Restwanddicke) zu erfüllen haben. Aufgrund des hohen Aufwandes dieses Umlenkversuches werden üblicherweise nur ganz wenige Konstellationen (z. B. ein Umlenkradius, eine Spanngliedgröße) untersucht. Eine detaillierte Erfassung aller möglichen Bemessungssituationen ist dabei nicht möglich; durch in der Praxis erforderlich werdende Abschätzungen kann dabei entweder die Wirtschaftlichkeit oder die Sicherheit eingeschränkt sein. Es werden erstmals theoretische Verfahren zur Vorhersage der zu erwartenden Eindrückungen für unterschiedliche Einwirkungen und für die am Markt befindlichen Spannsysteme entwickelt (Bild 3).

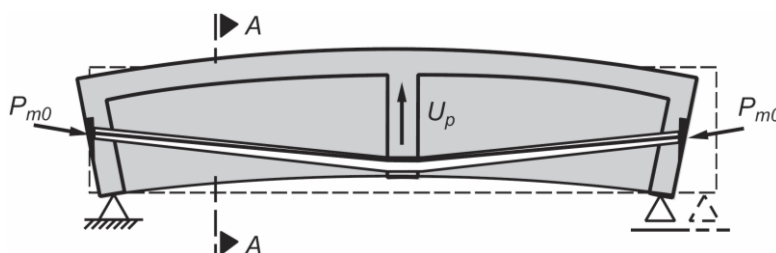


Umlenkung von externen, verbundlosen Spanngliedern im Hohlkasten (Bildnachweis: Schäfer, Ibbenbüren)

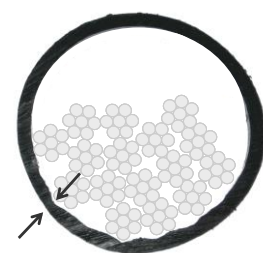


Faulbehälter mit internen, verbundlosen Spanngliedern (Bildnachweis: Arge Gut Großlappen, München)

Bild 1: Umlenkung von verbundlosen Spanngliedern



Plattenbalken mit umgelenkten externen Spanngliedern (aus)



PE-Hüllrohr nach Belastung

Bild 2: Eindrückungen von Spannstahliliten in das PE Hüllrohr an Umlenkstellen

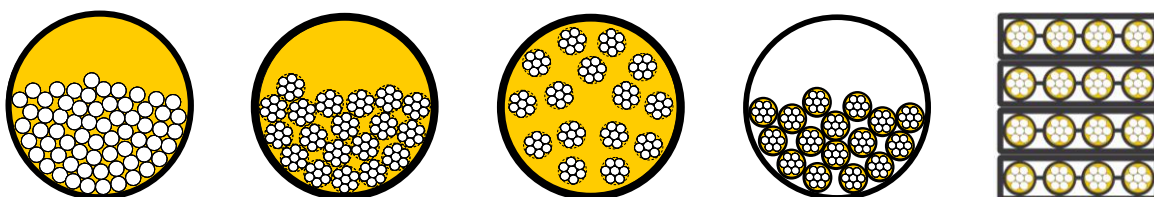


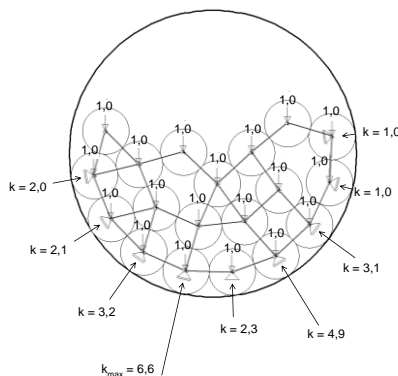
Bild 3: Ausgewählte Querschnitte von Spannverfahren für verbundlose Vorspannung

2 Umlenkbelastung

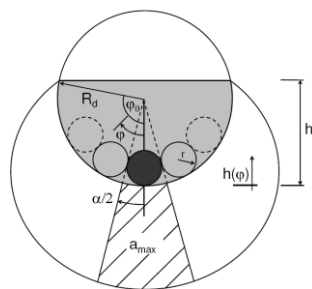
Die wesentliche Beanspruchung des PE-Rohres ergibt sich aus der Umlenklast zwischen Spannstahl und Hüllrohr, mit der der harte Stahl in den weichen Kunststoff eingedrückt wird. Als Maß für die geometrische Anordnung der Spannstahlelemente zueinander wird der „Stapelfaktor“ eingeführt, der das Verhältnis der Kontaktbelastung aus der Wirkung des gesamten Spanngliedes zur Kontaktbelastung eines einzelnen Spannstahlelementes darstellt. Bei stapelbaren Bandspanngliedern entspricht der Stapelfaktor einfach der Anzahl der übereinander gestapelten Bänder. Bei Bündelspanngliedern können bei einer bekannten Anordnung der Spannstahlelemente im Hüllrohr die Stapelfaktoren mit einem 2D-Fachwerkmodell rechnerisch bestimmt werden, Bild 4. Die Anordnung der Spannstahlelemente im Hüllrohr beeinflusst die Stapelfaktoren wesentlich. Daher wurden mathematische Algorithmen entwickelt, mit deren Hilfe die exakte geometrische Lage der Spannstahlelemente im Hüllrohr für verschiedene Randbedingungen bestimmbar ist (M-PDS Algorithmus, Optimierungsmodell mit SNOPT). Für eine praxistaugliche Verwendung sind Vereinfachungen erforderlich. Neben einer hydrostatischen Analogiebetrachtung wurde ein vereinfachtes Verfahren mit sehr guter Übereinstimmung mit den exakten Verfahren entwickelt (Bild 4): Gleichung 1 zeigt die damit durchgeführte Ermittlung des maximalen Stapelfaktors anhand weniger Parameter.

$$k_{max,cal} = 2 \cdot \frac{r}{R_d} \cdot N \quad (1)$$

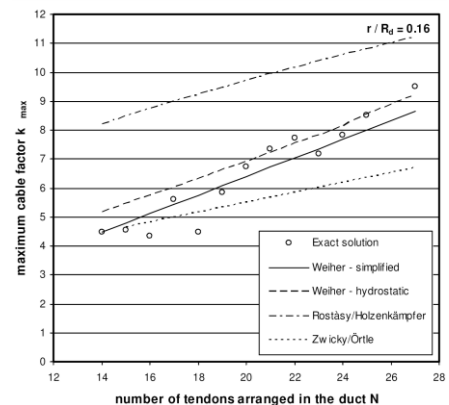
$k_{max, cal}$	maximaler Stapelfaktor [-]
r	Radius eines einzelnen Spannstahlelements (Litze, Draht) [mm]
R_d	Hüllrohrradius, innen [mm]
N	Anzahl an Spannstahlelementen [-]



Exakte Bestimmung des Stapelfaktors k mithilfe eines Fachwerkmodells



Grundlagen des hydrostatischen Modells



Vergleich verschiedener Ansätze zur Bestimmung des max. Stapelfaktors für $r/R_d = 0,16$

Bild 4: Theoretische Bestimmung des maximalen Stapelfaktors – Verfahren und Vergleich

Die Umlenkbelastung kann man nun mithilfe der Kesselformel wie folgt berechnen:

$$p_{max} = \frac{F_P \cdot k_{max,cal}}{N \cdot R} = \frac{2 \cdot F_P \cdot r}{R \cdot R_d} \quad (2)$$

p_{max}	maximale Umlenkbelastung zwischen Spannstahl und Hüllrohr [kN/m]
F_P	Längskraft im Spannglied [kN]
R	Umlenkradius des Spannglieds [m]

Als weitere ggf. zu beachtende Beanspruchungselemente der Hüllrohre sind die Reibung beim Spannvorgang (Innere und Äußere Gleitung), die Beanspruchungsdauer, die Temperatur und ggf. zweiaxiale Umlenkungen (nur bei Bandspanngliedern) zu nennen.

3 Experimentelle Untersuchungen

In [2] sind alle bis dato in Europa gesammelten experimentellen Erfahrungen bezüglich der Belastungen von PE-Korrosionsschutzhüllen verbundloser Spannglieder zusammengefasst. Mit eigenen Versuchen mit Band- und Bündelspanngliedern wurden Einflüsse von Umlenklast, Litzenform, Gleitverhältnisse, sowie verschiedene Stapelungen auf den Polyethylenverschleiß erfasst. Diese Versuche entsprechen im Aufbau und Ablauf den Vorschlägen der europäischen Richtlinie ETAG 013 (2002), Bild 5. Dabei wird nicht nur die statische Umlenkbelastung aufgebracht. Zusätzlich wird der Spannvorgang verschärft derart simuliert als dass bei Erreichen der Ziellast das Spannglied über den Umlenksattel gezogen wird. Ergänzt werden diese eigenen Versuche durch die von Spannverfahrensanbietern zur Verfügung gestellten Umlenkversuche anderer Versuchsanstalten sowie durch die Ergebnisse von an der RWTH Aachen durchgeführten Kleinmodellversuchen. Für Bündelspannglieder gibt es deutlich weniger Untersuchungen. Hier sind nur die Messungen beim Ausbau eines Spannglieds durch die ETH Zürich/Schweiz, Umlenkversuche am SES Saint-Rémy-lès-Chevreuse/Frankreich sowie zwei eigene Versuche verfügbar.

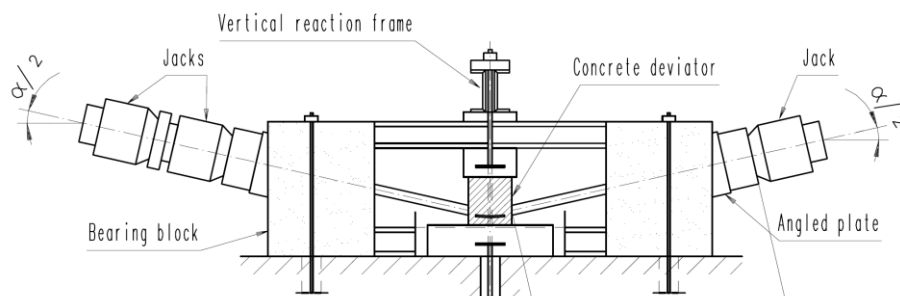


Bild 5: Versuchsaufbau für Umlenkversuch nach ETAG 013 (Ed. 2002)

4 Modelle zur Vorhersage des Eindrückverhaltens in PE-Hüllrohre

Für Bandspannglieder lag eine umfangreiche Datenmenge an Versuchsergebnissen vor. Damit konnte mithilfe einer Moderatorenanalyse (multiple lineare Regression mit transformierten unabhängigen Variablen) ein Regressionsmodell für die Vorhersage der zu erwartenden Restwanddicke der inneren und äußeren Ummantelung des Spannstahls bei Bandspanngliedern entwickelt werden. Mit diesem Modell, welches einen sehr hohen Bestimmtheitsgrad zeigt, ist es für Bandspannglieder möglich, die einzelnen untersuchten Parameter in ihrer Auswirkung auf die Restwanddicke zu beurteilen.

Für einlagige Schutzhüllen (Bündelspannglieder) wurde ein mechanisches Modell entwickelt. Aus den Erfahrungen mit den Bandspanngliedern wird nun angenommen, dass die Umlenkbelastung der einzig wesentliche Faktor für das Maß der Eindrückung der Spannstahlelemente ist. Andere Faktoren, wie z. B. Verschleiß bzw. Abrieb bei Innerer Gleitung, werden vernachlässigt, da dafür auch weder im Umfang noch in der Güte ausreichende experimentelle Daten vorliegen. Zur Beschreibung des Bauteilwiderstands wird im Kugeleindruckversuch die Kugeldruckhärte ermittelt. Sie ist neben dem eigentlichen Werkstoff auch abhängig von der Wanddicke der Probe, dem Belastungsniveau und natürlich dem Kugeldurchmesser. In

Analogie hierzu wird nun ein mechanisches Basismodell entwickelt. Ausgehend von einer als konstant über die Projektionsfläche angenommenen „Kontakthärte“ wird ein Gleichgewicht zwischen Umlenkbelastung und Kontaktkraft als Produkt aus Kontakthärte und Aufstandsfläche formuliert. Die Tiefe des Eindringens eines Körpers hängt von der zugehörigen Aufstandsfläche ab. Einsinkungsgleichungen können für verschiedene Spannstahlformen (Litze, Draht, Kompaktlitze) aus der Querschnittsgeometrie hergeleitet werden (Bild 6).

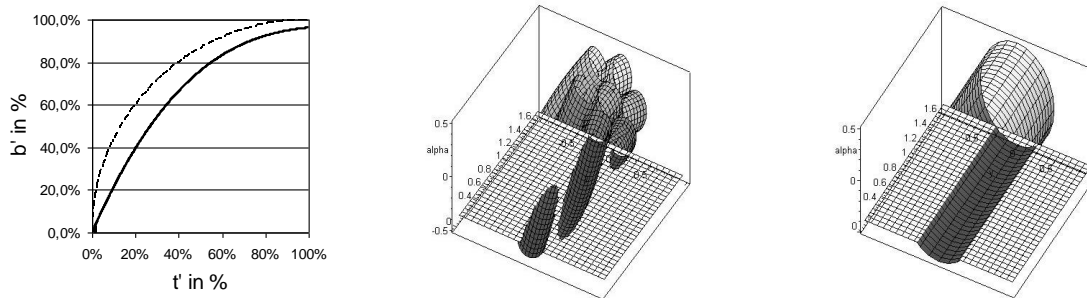


Bild 6: Kontaktbreite (b') abhängig von der Eindrückungstiefe (t') für Litzen (durchgezogene Linie) und Drähte bzw. Kompaktlitzen (gestrichelte Linie)

Die entstehenden nichtlinearen Gleichungen können rekursiv gelöst werden. So bestimmt man für die verschiedenen Spanngliedssysteme ausgehend von einer Ausgangswanddicke und einer erforderlichen Mindestrestwanddicke, die mögliche Umlenkbelastung, d.h. den möglichen Mindestumlenkradius. Die „Kontakthärte“ muss jeweils speziell unter Berücksichtigung der vorliegenden Geometrien ermittelt oder näherungsweise durch Größen-, Geometrie- und Belastungsfaktoren aus der Kugeleindruckhärte bestimmt werden. Es kann gezeigt werden, dass die vorliegenden wenigen Messungen der Restwanddicke bei Bündelspanngliedern (nur Umlenkradius) sich gut mit diesem Modell beschreiben lassen. Bild 7 zeigt grafisch das mechanische Modell für ein Beispiel ($F_P = 3 \text{ MN}$; imaginäres Hüllrohr PE 100/5,0) mit Variation der Spannstahlquerschnitte. Es sind die Eindrückungskurven für Einzeldrähte (7 mm, 38,5 mm², St1770), Litzen (15,7 mm, 150 mm², St1860) und Kompaktlitzen (15,2 mm, 165 mm², St1820) dargestellt.

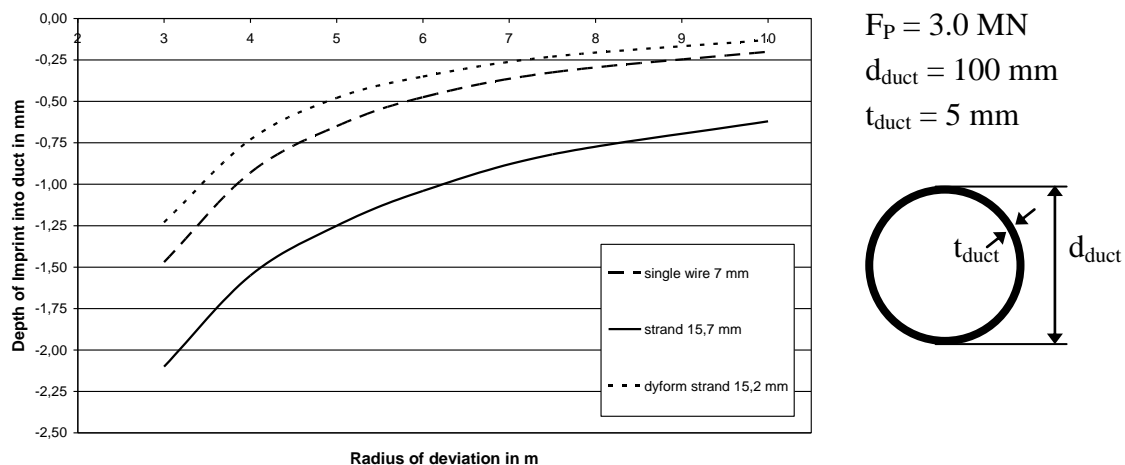


Bild 7: Mechanisches Grundmodell zur Vorhersage der Hüllrohreindrückungen für eine Spanngliedgröße mit unterschiedlichem Spannstahl (Draht, Litze, Kompaktlitze)

5 Bemessung PE-Hüllrohre

Für die Bemessungsansätze werden die Kriterien der europäischen Richtlinie ETAG 013 übernommen. Der Bemessungsansatz für Bandspannglieder baut auf dem Regressionsmodell auf und berücksichtigt Streuungen aus Versuchsanzahl, Herstellung und verschiedener Belastungsmodi. Praxistauglich kann das Modell in Bemessungsdiagrammen dargestellt werden (z.B. Bild 8), in denen die Geometrie des Spannstahls und die Gleitungsverhältnisse als Scharparameter verwendet werden und die Mindestrestwanddicke der Schutzhülle über der zulässigen Umlenklast dargestellt wird. Die Bemessungsdiagramme eignen sich zur direkten Aufnahme in Zulassungen.

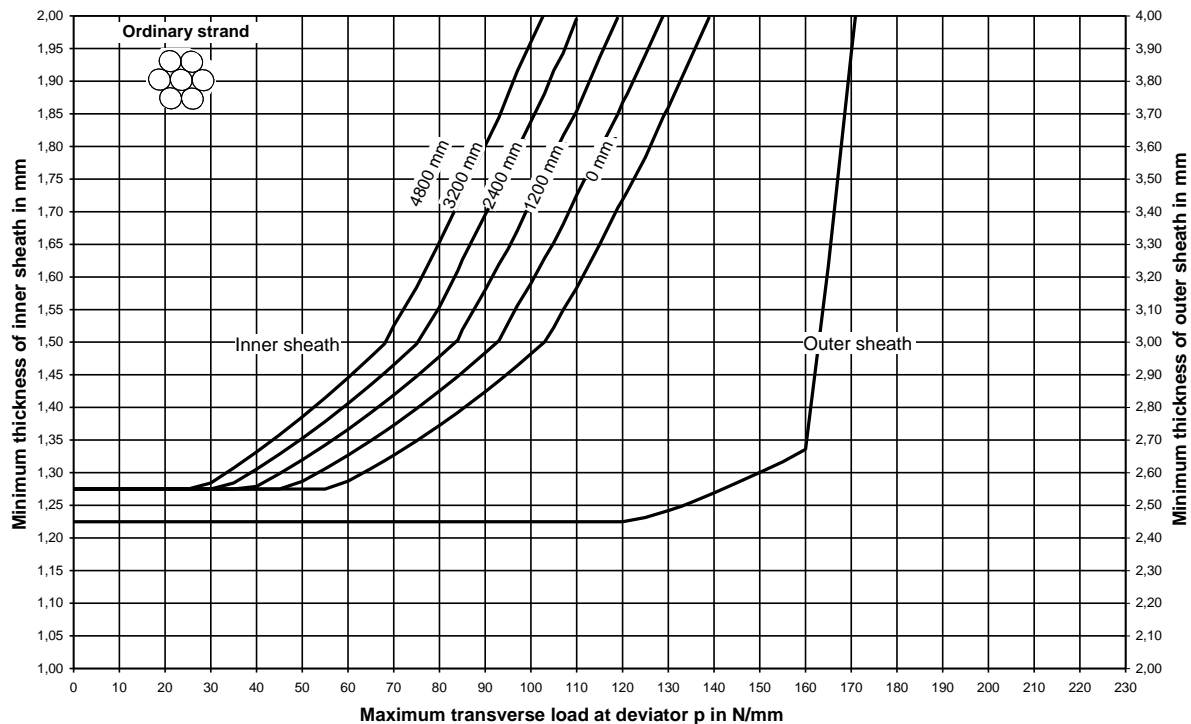


Bild 8: Bemessungsdiagramm auf Basis der Kriterien von ETAG013 für nachspannbare Bandspannglieder mit Litzen und zwei PE-Hüllen

Für die Bemessung der PE-Hüllrohre für Bündelspannglieder ist ein Umlenkversuch nach ETAG013 erforderlich. Liegt bei der Anwendung nur äußere Gleitung vor, so ist auch ein Kleinversuch möglich. Mithilfe von drei Anpassungsfaktoren wird für alle Spanngliedergrößen derjenige Umlenkradius bestimmt, bei dem exakt die maximal zulässige Eindrückung erreicht wird (Gleichung 3). Dabei werden die Versuchsergebnisse mithilfe des mechanischen Modells auf andere Randbedingungen übertragen bzw. extrapoliert (Reihenbildung, [2]).

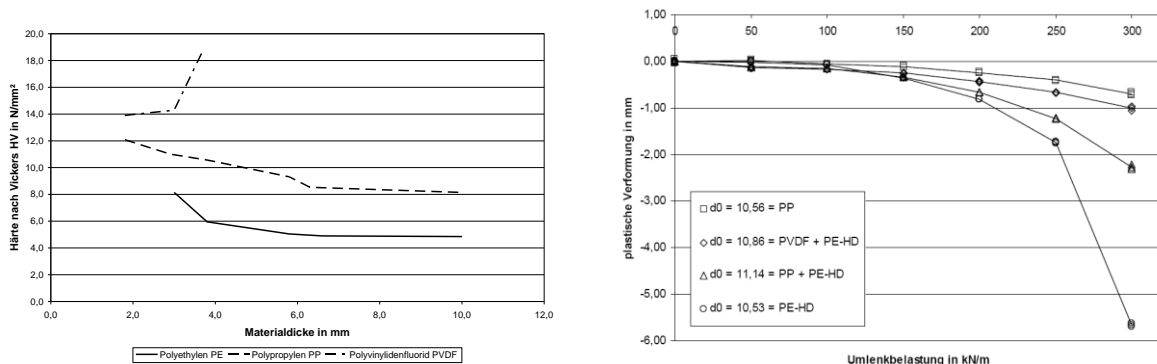
$$R_{min} = R_{Versuch} \cdot \eta_{Versuch} \cdot \eta_{Umlenkung} \cdot \eta_{PE-Wanddicke} \quad (3)$$

6 Exkurs: Hüllrohrwerkstoffe und -abmessungen

In [7] wurde die Eignung verschiedener Werkstoffe für die Verwendung als Hüllrohrmaterial bei verbundlosen Spanngliedern untersucht. Dabei wurde auch mit Kleinversuchen das Eindruckverhalten von Spannstahl in den jeweiligen Werkstoff experimentell geprüft. Aufgrund Ihrer Eigenschaften eignen sich besonders Polyethylen PE und Polypropylen PP für den Einsatz. Für beide nimmt die Härte mit zunehmender Dicke ab (Querdehnungsbehinderung), wobei PP grundsätzlich härter als PE ist (Bild 9). Die auf den ersten Blick naheliegende Wahl

dickerer Hüllrohre bei übermäßiger Eindrückung des Spannstahls (z.B. zu enger Umlenkradius) kann sich als nicht adäquates Konstruktionsmittel herausstellen. Die zusätzliche Dicke wird durch die dickenbedingt tiefere Eindrückung bei gleicher Belastung wieder kompensiert.

Es wurden in [7] auch Werkstoffkombinationen untersucht mit PE als Außenschicht und den härteren Materialien PP und Polyvinylidenfluorid PVDF (extrem hart, spröde, teuer). Die Gesamtdicke wurde stets gleich groß gewählt. Die Dicke des PE betrug bei den Kombinationen ca. 2/3 der Gesamtdicke. Es konnte gezeigt werden, dass durch Einlage härterer Materialien das Eindrückverhalten in PE Hüllrohre verbessert werden kann (Bild 9). Diese Eigenschaft macht die Verwendung von Kombinationen in sehr hoch belasteten Bereichen (Umlenkstellen, Ankerbereiche) denkbar.



Härtemessung nach Vickers für verschiedene Werkstoffe und Dicken (Messdaten aus [7])

Plastische Eindrückungen eines Stahlzylinders (Durchmesser 6 mm) in Werkstoffe bzw. Kombinationen daraus (aus [7])

Bild 9: Einfluss von Dicke und Werkstoffwahl auf die Härte von Werkstoffen

7 Exkurs: Reibermüdung

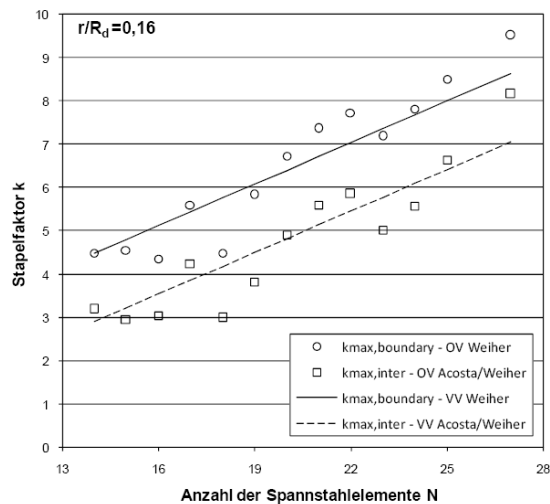
Die genaue Kenntnis der maximalen Umlenkbelastung zwischen Spannstahl und Hüllrohr ist für die Reibermüdung von großer Bedeutung. Mit dem theoretischen Verfahren ist es nun auch möglich die minimal zulässigen Umlenkradien von Spanngliedern mit nachträglichem Verbund für die verschiedenen Größen festzulegen basierend auf vergleichbarer Belastung. Reibermüdung tritt bei Verwendung von Kunststoffhüllrohren für Verbundvorspannung nun nicht mehr am Hüllrohr sondern zwischen Spannstahlelementen auf (Reibpartner Stahl-Stahl). In [5] wurde eine Erweiterung der Gleichung 1 derart bestimmt, dass nun die maximale Umlenkbelastung zwischen Spannstahlelementen rechnerisch ermittelt werden kann:

$$k_{max,cal,i} = k_{max,cal} - \sqrt[4]{\frac{R_d}{r}} = 2 \cdot \frac{r}{R_d} \cdot N - \sqrt[4]{\frac{R_d}{r}} \quad (3)$$

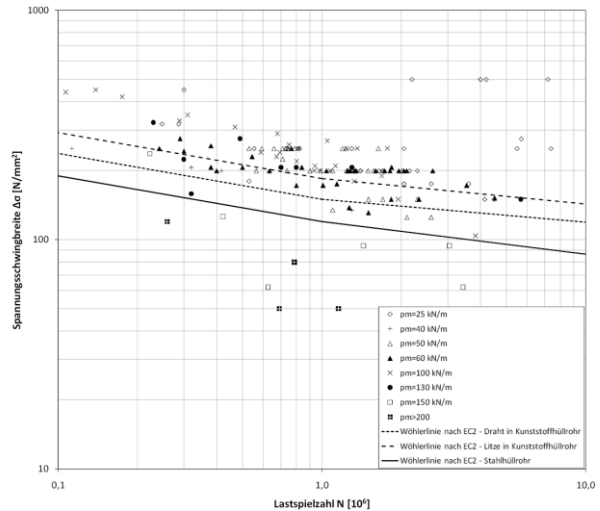
$k_{max,cal,i}$ maximaler innerer Stapelfaktor (zwischen zwei Spannstahlelementen)

Die maximale innere Umlenkbelastung ist kleiner als diejenige am Hüllrohr. Die Differenz hängt lediglich von der Größe der Spannstahlelemente verglichen zur Hüllrohrgröße ab. Für Bündelspannglieder mit zunehmenden Einzelementen wird die Differenz relativ kleiner. Bild 10 zeigt exemplarisch für ein Verhältnis $r/R_d = 0,16$ die verschiedenen Stapelfaktoren.

Durch die Entwicklung eines sehr einfachen und genauen Verfahrens zur Ermittlung des maximalen Stapelfaktors bei Bündelspanngliedern (Gleichung 1 und 3) konnten in [5] zahlreiche international durchgeführte Versuche zur Reibermüdung von Spannstahl in Blechhüllrohren neu bewertet werden (Bild 10).



Maximale Stapelfaktoren am Hüllrohr und zwischen Spannstahlelementen für $r/R_d = 0,16$ (aus 8)



Neubewertung von Versuchen zur Reibermüdung bei Verwendung von Kunststoff- und Stahlhüllrohren (aus 8)

Bild 10: Einfluss von Dicke und Werkstoffwahl auf die Härte von Werkstoffen

8 Fazit

Die Umlenkung von Spanngliedern ist an vielen Stellen der limitierende Faktor für die Spanngliedführung. Die in den letzten Jahren hierzu durchgeführte Forschung trägt wesentlich zur besseren mechanischen Beurteilung der Beanspruchung der Spannglieder bei ([1] bis [7]). Für verbundlose Spannglieder besteht v.a. Forschungsbedarf für den Einsatz bei höheren Temperaturen (z.B. aus Hydratationswärmeentwicklung im Beton, Sonneneinstrahlung, Verfüllen heißer Korrosionsschutzmassen nach dem Spannen).

9 Literatur

- [1] Zilch, K.; Weiher, H.: Auswirkungen von zweiachsender Umlenkung auf die Ergebnisse des Umlenkversuchs bei externen Spanngliedern. Auftraggeber: Deutsches Institut für Bautechnik, München, 2006
- [2] Weiher, H.: Verhalten von PE-HD Schutzhüllen bei der Umlenkung von verbundlosen Spanngliedern. Dissertation, 2007
- [3] Dier, F.: Verschleiß der PE-HD Hüllen bei der Umlenkung von Monolitzen, Master Thesis, 2008
- [4] Manne, R.: Cable factor for rectangular ducts, Master Thesis IIT Roorkee/India, 2008
- [5] Acosta-Jaramillo, A.: Einfluss der Umlenkbelastung auf die Reibermüdung bei Bündelspanngliedern, Diplomarbeit, 2007
- [6] Methner, R.: Experimentelle Untersuchung des Einflusses der Gleitverhältnisse auf den Verschleiß von Polyethylenschutzhüllen bei der einaxialen Umlenkung von externen Bandspanngliedern, 2005
- [7] Hock, S. R.: Einsatz verschiedener Werkstoffe als Korrosionsschutzhülle von verbundlosen Spanngliedern, Bachelor Thesis, 2008