

8-9/2011

ISSN 2191-9798
K 1252 E

Vulkan-Verlag,
Essen



ER

Fachzeitschrift für sichere und
effiziente Rohrleitungssysteme

Schwerpunkt:
**Grabenloser
Rohrleitungsbau**

Die bruchmechanischen Eigenschaften der Polyolefine - Sind die in den Normen vorgesehenen Anwendungsbereiche realistisch?

Von H.-J. Kocks, C. Bosch, M. Betz

Die bruchmechanischen Eigenschaften der Polyolefine - Sind die in den Normen vorgesehenen Anwendungsbereiche realistisch?

Von H.-J. Kocks, C. Bosch, M. Betz

ZUSAMMENFASSUNG: Mit dem Erscheinen der ISO 21809-1 in 2012 werden die Anforderungen an dreischichtigen extrudierten Ausführungen der Polyethylen- und Polypropylenumhüllung international für Öl- und Gastransportleitungen festgeschrieben. Die nicht erfassten Anwendungsbereiche, wie z. B. der Bereich der Gas- und Wasserverteilung, werden national mit der Überarbeitung der DIN 30670 für die PE-Umhüllungen und der DIN 30678 für PP-Umhüllungen als Restnormen abgedeckt. Die ISO 21809-1 wurde als Normentwurf bereits 2010 veröffentlicht. In dieser Norm sind zukünftig Einsatzgrenzen festgelegt, die als Grundlage für vertragliche Vereinbarungen nicht unkommentiert akzeptiert werden sollten. Die Hintergründe dazu sind auf die Materialeigenschaften von Polyethylen bzw. Polypropylen zurückzuführen.

EINLEITUNG

Polyethylen- und Polypropylenumhüllungen sind seit Jahrzehnten für Stahlrohre im Einsatz. National sind diese Korrosionsschutzsysteme in DIN 30670 und DIN 30678 beschrieben [1, 2]. Die ersten Normentwürfe zur DIN 30670 wurden bereits in den 70er Jahren des vergangenen Jahrhunderts erarbeitet. Demgegenüber entstand die DIN 30678 für die Polypropylenumhüllungen erst 1992 zu einer Zeit, als be-

reits erste Schritte für die internationale Festlegung der Anforderungen für Polyethylen- und Polypropylenumhüllungen unternommen wurden. Erst mit der ISO 21809-1 fanden jedoch die internationalen Bemühungen für die Harmonisierung dieser Lieferbedingungen ihren Abschluss [3].

In DIN 30670 und DIN 30678 sind nicht nur die Anforderungen und Prüfungen festgelegt, sondern auch Hinweise für die Anwendung und Einsatzgrenzen dieser Umhüllungen zu finden. Der Anwendungsbereich dieser Normen ist auf erd- und wassererlegte Leitungen eingeschränkt. In DIN 30670 sind für die Polyethylenumhüllungen zwei Ausführungen beschrieben. Die Einsatztemperatur für die Ausführung N ist auf 50 °C, die der Ausführung S auf 70 °C begrenzt. Die DIN 30678 sieht für die Polypropylenumhüllung eine maximale Betriebstemperatur von 90 °C vor. Im Falle der Polypropylenumhüllung wird darüber hinaus auf die eingeschränkte Nutzungsdauer bei höheren Einsatztemperaturen hingewiesen. Die Empfindlichkeit des Materials bei tiefen Temperaturen erfordert eine Prüfung der Schlagbeständigkeit bei 0 °C.

Weitergehende Anforderungen an das Bettungsmaterial für polyethylen- oder polypropylenumhüllte Rohre finden sich darüber hinaus beispielsweise in den Richtlinien und Regelwerken rund um Planung und Bau von Rohrleitungen in der Gas- und Wasserversorgung. Hier wird generell der Einsatz von steinfreiem Material zur Bettung solcher Leitungen gefordert.

Die ISO 21809-1 weitet diese Anwendungsbereiche auf. So werden im Falle größerer Schichtdicken auch steinige Böden zur Bettung zugelassen, da offensichtlich aufgrund der Forderung einer entsprechenden Spannungsrissbeständigkeit im sogenannten Belltest nach ASTM D 1693 [4] eine Eignung des Materials gegenüber Punktlasten und Punktlagerungen

TABELLE 1: Anwendungsbereiche der Umhüllungsarten nach ISO 21809-1 in Abhängigkeit von der Umhüllungschichtdicke und des Rohrgewichtes [3]

| Schichtdickenklasse | 1 | 2 | 3 |
|--|-------------------------|----------------------------|------------------------------|
| Bodenbeschaffenheit | Onshore: sandiger Boden | Tonböden ohne Füllmaterial | Steinige Böden oder Offshore |
| LDPE-Decklage, Gesamtschichtdicke | 1,8–3,2 mm | 2,1–3,8 mm | 2,6–4,7 mm |
| MDPE/HDPE-Decklage, Gesamtschichtdicke | 1,3–2,5 mm | 1,8–3,3 mm | 2,3–4,2 mm |
| PP-Decklage, Gesamtschichtdicke | 1,3–2,5 mm | 1,7–3,0 mm | 2,1–3,8 mm |

TABELLE 2: Anwendungstemperaturen der Umhüllungsarten nach ISO 21809-1 [3]

| Decklage | LDPE | MDPE/HDPE | PP |
|------------------------|----------------|----------------|-----------------|
| Anwendungstemperaturen | –20 bis +60 °C | –40 bis +80 °C | –20 bis +110 °C |



BILD 1: Schaden an einer PP-Umhüllung nach einem Rohreinzug



BILD 2: Schaden an einer PP-Umhüllung auf dem Rohrlager

angenommen wird (**Tabelle 1**). Bei dem sogenannten Belltest handelt es sich um eine Prüfung der Rissbeständigkeit unter Netzmitteleinsatz und ist eine mit dem inzwischen besser bekannten FNCT (Full-Notch-Creep-Test) vergleichbare Materialprüfung. Die Ergebnisse des FNCT dienen wie beispielsweise im Falle der PAS 1075 auch als Nachweis der Eignung von Kunststoffmaterialien für kritische Einbaubedingungen alternativer Verlegetechniken [5].

Auch im Falle der Anwendungen bei niedrigen Temperaturen wurden Einsatzgrenzen in der ISO 21809-1 aufgenommen. Im Falle von Polyethylen ist die mit dem Typ N nach DIN 30670 vergleichbare Umhüllungsart für den Temperaturbereich von -20 bis $+60$ °C, die mit der Ausführung S vergleichbare Umhüllungsart für den Temperaturbereich von -40 bis $+80$ °C vorgesehen. Die Polypropylenumhüllung kann lt. Norm in einem Bereich von -20 bis 110 °C eingesetzt werden (**Tabelle 2**). Hinweise auf eine eingeschränkte Nutzungsdauer bei höheren Betriebstemperaturen, wie diese in der DIN 30678 zu finden sind, fehlen.

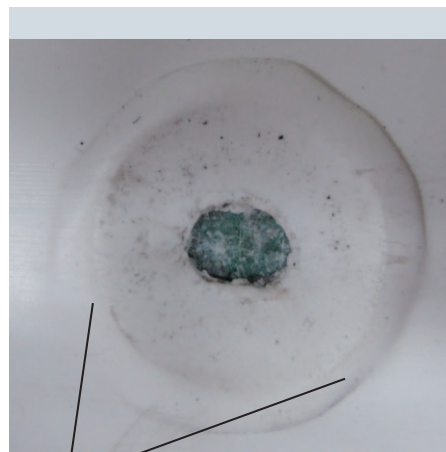
Die Erfahrungen der Praxis zeigen, dass diese Einsatzgrenzen mit Blick auf die Materialeigenschaften und insbesondere in Bezug auf die bruchmechanischen Zusammenhänge von Temperatur und Alterung einer genaueren Betrachtung bedürfen.

DAS TIEFTEMPERATURVERHALTEN VON POLYPROPYLEN UND POLYETHYLEN

Von Polypropylenumhüllungen sind Schäden bei tiefen Umgebungstemperaturen bekannt. Bild 1 und Bild 2 zeigen Beispiele solcher Schadensformen. In **Bild 1** handelt es sich um einen im Spülbohrverfahren eingezogenen Rohrstrang. Das Rohrende in Zugrichtung ragt aus der Bohrung und zeigt nach einer Kälteperiode mit -10 bis -15 °C deutliche Abplatzungen. Auch im Falle der noch unbeanspruchten Rohre auf dem Rohrlager fanden sich erste Risse (**Bild 2**). Bei einem Schlag mit dem Hammer konnte bei -4 °C an Lagerrohren diese Rissbildung ebenfalls beobachtet werden. Untersuchungen der abgeplatzten Decklage zeigten, dass die Polypropylenbeschichtung sämtliche Qualitätsanforderungen erfüllt. In

den Datenblättern war für den hier verwendeten Polypropylen-typ eine Glasübergangstemperatur von -40 °C angegeben. Mit den üblichen Schlagprüfungen nach DIN 30678 konnten auch bei -20 °C keine Hinweise auf das mögliche Versagen der Umhüllung gefunden werden. Angesichts der in ISO 21809-1 vorgesehenen Einsatztemperatur von -20 bis $+110$ °C musste daher eine Prüfung der Umhüllungen gefunden werden, die eine realistische Aussage über den Anwendungsbereich der Umhüllungen ermöglicht.

Im Fall der oben erwähnten Schlagprüfung nach DIN 30678 wäre an einem kälteversprödeten Material ein grobes Abplatzen bzw. die Bildung von Rissen erwartet worden, wie es z. B. bei -4 °C an den Lagerrohren der Fall war. Der Prüfaufbau für die Schlagprüfung nach DIN 30670 bzw. DIN 30678 ist dafür bei genauerer Betrachtung prinzipiell wenig geeignet. Die bei der Prüfung verwendete Aufschlagsfläche ist halbkugelförmig. Der Durchmesser dieser Halbkugel beträgt normgemäß 25 mm. Durch die halbkugelförmige Aufschlagsfläche wird das Beschichtungsmaterial beim Auftreffen des Gewichtes zu den Rändern der Prüffläche hin verdrängt. Mit der Wulstbildung entstehen Druckspannungen in einem Bereich, wo die Rissbildung ausgelöst werden sollte (**Bild 3**).



Wulst mit Druckspannungen

BILD 3: Bild des Prüfbereiches einer Umhüllung nach dem klassischen Schlagversuch



BILD 4: Fallgewicht für den modifizierte Schlagversuch

Unter Verwendung einer flachen Aufschlagsfläche wird dieser Effekt vermieden (**Bild 4**). Der gewählte Durchmesser für den Prüfstempel dieser modifizierten Schlagprüfung beträgt 21 mm. Es wurde ein Gewicht von 10 kg gewählt, das aus einer Höhe von 1,0 m auf die Oberfläche fällt. Die Schlagenergie beträgt somit 98,1 J. Die Prüfung wird bei unterschiedlichen Temperaturen durchgeführt, so dass eine minimale Temperatur ermittelt werden kann, bei welcher keine Rissbildung zu beobachten ist.

Zur Überprüfung der Aussagekraft des Prüfverfahrens wurden in einem ersten Schritt Rohrsegmente der Dimension (DN 200) mit einem dreischichtigen Aufbau der Umhüllung bestehend aus Epoxidharzprimer, Kleber und Polyolefindeckschicht (Polyethylen, PE bzw. Polypropylen, PP) untersucht. Die Schichtdicke der hier geprüften Polyolefinumhüllungen lag in einem Bereich von 2,4 und 3,0 mm. Für die vergleichende Untersuchung an einer 2-lagigen Pulverepoxidharzbeschichtung (dual layer FBE) wurde bei unveränderter Fallhöhe das Gewicht auf 5 kg reduziert, da die Dicke der Epoxidharzschicht nur 770 µm betrug.

Die verschiedenen Polyolefine liefern in dieser Prüfung Ergebnisse, die mit den Beobachtungen in der Praxis gut korrelieren (**Tabelle 3**). Für LDPE liegt die Versprödungstemperatur unterhalb -27 °C und für HDPE unterhalb -40 °C. Hier sind in der ISO 21809-1 als untere Einsatzgrenzen für LDPE -20 °C und für HDPE -40 °C angegeben. Beim PP werden im Falle des dreischichtigen Umhüllungssystems Versprödungstemperaturen im Bereich von 0 °C bis +6 °C gefunden. Auch diese Ergebnisse entsprechen den Beobachtungen in der Praxis. Eine Anwendungstemperatur lt. ISO 21809-1

TABELLE 3: Ermittelte minimale Temperaturen ohne Rissbildung bzw. Abplatzen

| | LDPE | HDPE | PP1 | PP2 | PP3 | Zweischicht FBE |
|-------------|--------|----------|--------|--------|-------|-----------------|
| Dreischicht | -27 °C | -40 °C | +6 °C | +4 °C | 0 °C | |
| Zweischicht | | | | | | +15 °C |
| Einschicht | | | -12 °C | -20 °C | 0 °C | |
| Platten | -33 °C | < -50 °C | -10 °C | -15 °C | -5 °C | |

von -20 °C kann nicht realisiert werden. Die vergleichend durchgeführte Prüfung am Epoxidharzsystem zeigt die wesentlich größere Empfindlichkeit gegenüber mechanischen Beanspruchungen, die insbesondere beim Handling derart beschichteter Rohre auch bekannt ist. Die mit dieser Prüfung ermittelte Temperatur ist somit als die niedrigste empfohlene Einsatztemperatur des Beschichtungsmaterials anzusehen. Unterhalb dieser Temperatur sind je nach Lastfall Rissbildungen durch Kälteversprödung bzw. ein Abplatzen der Beschichtung nicht auszuschließen.

Neben den dreischichtigen Systemen wurden auch einschichtig auf Stahlrohre extrudierte Umhüllungsmaterialien untersucht. Diese Beschichtungen wurden ausschließlich für den Vergleich mit den dreischichtigen Umhüllungen hergestellt und besitzen keine Anwendung im Feld. In jedem Fall sind hier für die 1-Lagen Beschichtungen niedrigere Versprödungstemperaturen zu beobachten, so dass nicht auszuschließen ist, dass der dreischichtige Aufbau einen wesentlichen Beitrag zu diesem Bruchverhalten liefert. Die Ergebnisse an den einschichtig extrudierten Rohrproben und die ebenfalls durchgeführten Untersuchungen an Platten zeigen dabei eine weitgehende Übereinstimmung.

Da die technischen Produktdatenblätter lediglich bedingt Informationen über die bruchmechanischen Eigenschaften liefern, wurde in einem zweiten Schritt versucht, die Unterschiede bei den verschiedenen Polypropylentypen mit Hilfe des FNCT (Prüfung mit umlaufender Kerbe) bzw. 2NCT (Prüfung zweiseitig gekerbter Proben) zumindest qualitativ zu bewerten. Angaben über Ergebnisse von FNCT oder Belltest sind üblicherweise Bestandteil der technischen Datenblätter und könnten so als Auswahlkriterium für Einsatzmaterialien genutzt werden.

Es konnte keine Korrelation zwischen den gefundenen Versprödungstemperaturen und den Ergebnissen des hier angewendeten 2NCT nachgewiesen werden. Für den Vergleich wurden die Standzeiten im 2NCT-Test und die mit der modifizierten Schlagprüfung ermittelte minimale Einsatztemperatur herangezogen. Das Material PP2 mit den schlechtesten Ergebnissen im 2NCT zeigte bei den modifizierten Schlagversuchen erst unterhalb von -15 °C eine Tendenz zur Rissbildung. Bei den anderen Materialien mit den deutlich besseren Ergebnissen im 2NCT liegen die Versprödungstemperaturen unterhalb -5 °C bzw. -10 °C und damit auf deutlich höherem Niveau (**Bild 5** und **Bild 6**). Angesichts der Tatsache, dass die Prüfung im FNCT bzw. 2NCT bei hohen Temperaturen durchgeführt wird, kann somit weder der Wechsel dieser bruchmechanischer Eigenschaften erfasst und noch eine qualitative Bewertung der Materialien vorgenommen werden.

MECHANISTISCHE BETRACHTUNG DER RISSBILDUNG

Im Zuge der Untersuchung der Kälteversprödung des Polypropylens wurden auch mechanische Prüfungen zum Verständnis der Ursachen durchgeführt. Die bei unterschiedlichen Temperaturen vorgenommenen Zugversuche bestätig-

ten die bereits früher an gealterten und damit versprödeten Polyethylenumhüllungen festgestellten Zusammenhänge [6]. **Bild 7** und **Bild 8** zeigen einerseits den Vergleich von Zugversuchen an einer durch Alterung versprödeten Polyethylenumhüllung gegenüber einem nicht gealterten Material, andererseits die Zugversuche an Polypropylen bei Raumtemperatur und im Bereich der beobachteten Versprödungstemperatur. Bei beiden Proben ist der Einbruch in der Reißdehnung offensichtlich, der letztlich auf ein ungünstiges Verhältnis von Streckspannung und Reißfestigkeit zurückzuführen ist. Dieses ungünstige Verhältnis von Streckspannung und Reißdehnung ist in den Grafiken durch die gestrichelten Linien angedeutet.

Der einzige Unterschied liegt in der Tatsache, dass im Falle der Kälteversprödung die Streckspannung gegenüber der Reißfestigkeit ansteigt, während im Falle der Alterung die Reißfestigkeit gegenüber der Streckspannung abgebaut wird. Die Streckspannung bleibt im Falle der Alterung beim versprödeten Material unbeeinflusst.

Wesentliche Voraussetzung für die Rissbildung ist die Überschreitung von Streckspannung bzw. Streckdehnung. Die Überschreitung dieser kritischen Werte kann das gesamte Bauteil betreffen, wenn bspw. aufgrund unterschiedlicher Wärmeausdehnungskoeffizienten mit fallenden Temperaturen „Kältespannungen“ aufgebaut werden. Eine solche Überschreitung kann aber auch sehr lokal bei Punktlasten, Punktlagerungen, Quetschungen usw. auftreten [7].

Im Falle der Rissbildung aufgrund einer UV-Schädigung der Polyethylenumhüllung konnte dieser Zusammenhang in der Praxis sehr gut dokumentiert werden. **Bild 9** zeigt die durchgeführten mechanischen Untersuchungen an einem über den Umfang abgelösten Abschnitt des geschädigten Rohres. Der geschädigte Bereich beschränkt sich zwangsläufig auf die der Sonne zugewandten Seite und ist in Bild 9 an einer Farbänderung von gelb nach farblos erkennbar. Die Unterseite ist unbeschädigt und daher noch gelb gefärbt. Im beschädigten Bereich erstreckte sich die Verfärbung bis zu mindestens 1/3 der Dicke der PE-Decklage. Anzumerken ist hier dass die beobachtete Verfärbung auf einer Zersetzung des dem PE beigemischten gelben Farbstoffes beruht.

Die Streckspannung liegt sowohl im geschädigten als auch im nicht geschädigten Bereich je nach Schichtdicke bei Werten um 155 bis 160 N (Bild 9). Im geschädigten Bereich weisen die Reißdehnung und die Reißfestigkeit viel kleinere Werte auf, als im ungeschädigten Bereich.

Hier zeigt sich, dass mit zunehmender UV-Schädigung die Reißfestigkeit abnimmt. Mit Abnahme der Reißfestigkeit wird ein ungünstiges Verhältnis zur Streckspannung erreicht und die Reißdehnung bricht grenzwertig zusammen. Auch diese Ergebnisse aus der Praxis bestätigen das Zusammenspiel von Streckspannung und Reißfestigkeit und deren Einfluss auf die Dehnbarkeit und damit die Flexibilität des Materials. Der Versuch mit Blick auf die Kälteversprödung allein auf Basis der Daten einer Zugprüfung die möglichen Anforderungen an das Einsatzmaterial festzulegen scheidert, da die Prüfung durch eine Erwärmung des Materials im Bereich der sich bildenden Einschnürungen beeinflusst wird.

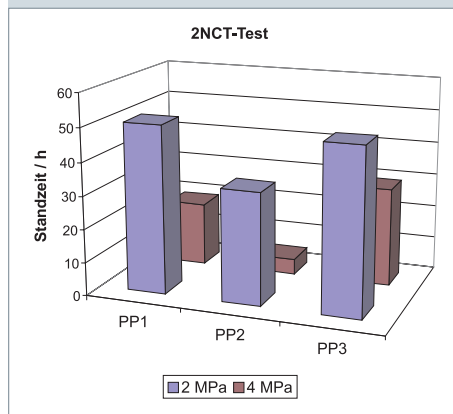


BILD 5 UND BILD 6: Vergleich der Ergebnisse von 2 NCT-Test und Schlagprüfungen (Platten)

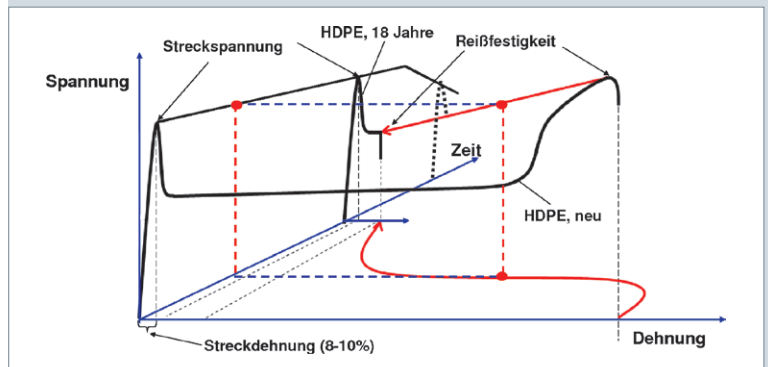
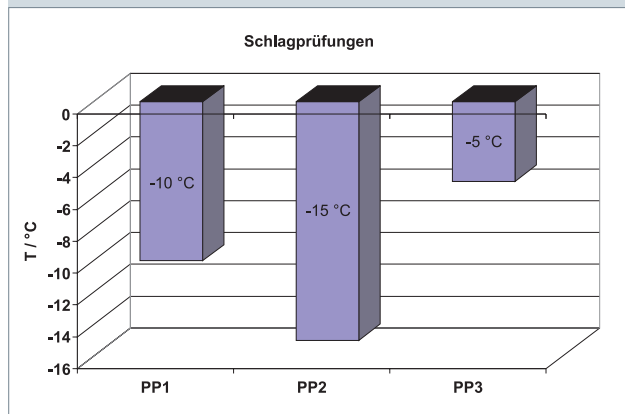


BILD 7: Vergleich der Zugversuche: Alterung von HDPE

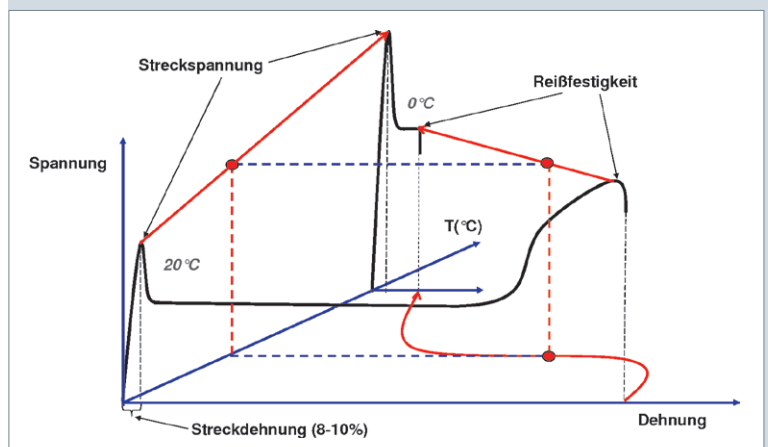
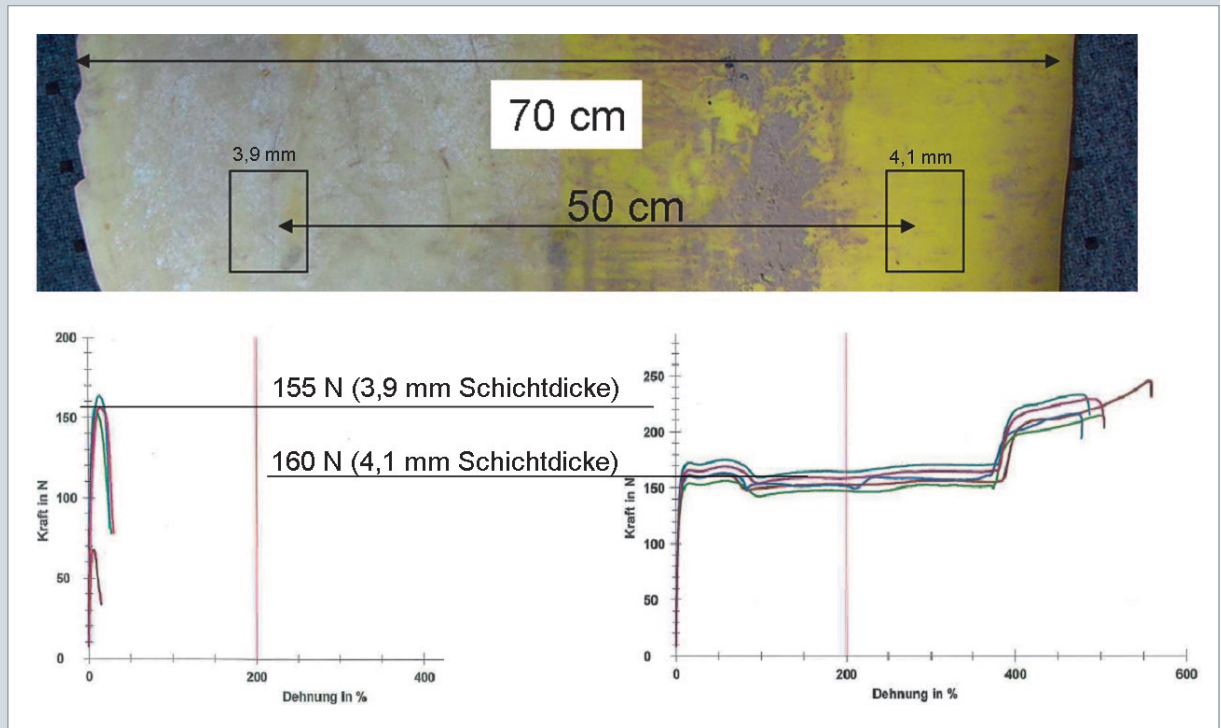


BILD 8: Vergleich der Zugversuche: Kälteversprödung von PP

BILD 9: Untersuchung einer durch UV-geschädigten Umhüllung des Stahlrohres – Zugversuche



Ein Vergleich der Bruchbilder dieser Schadensformen bestätigt den ursächlichen Zusammenhang dieser Schadensformen (**Bild 10** und **Bild 11**). In beiden Fällen ergibt sich eine identische Form der Rissbildung am Rohr.

In der Praxis müssen Alterung und Kälteversprödung zwangsläufig auch in der Kombination betrachtet werden. Wenn sich aufgrund der Alterung die Reißfestigkeit der Streckspannung annähert, wird bei fallender Temperatur durch den Anstieg der Streckspannung auch früher der Ver-

sprödungspunkt erreicht. Ein gealtertes Material wird daher mit fallender Temperatur bruchanfälliger als das neuwertige Material sein. Da an Umhüllungen üblicherweise keine Zeitstandsuntersuchungen durchgeführt werden, bietet sich in Bezug auf die Werkstoffalterung ein Blick auf die Erfahrungen und damit den Erkenntnissen an Bauteilen aus dem Vollmaterial geradezu an (**Bild 12**).

Aus Zeitstandsinnendruckversuchen an PE-Rohren ist bekannt, dass sich der 2. Ast mit einem spröden Bruchverhal-



BILD 10 UND BILD 11: Vergleich des Rissbildes einer Kälteversprödung (links) und Werkstoffalterung (rechts)

ten zu einem Zeitpunkt andeuten sollte, wenn sich durch die Extrapolation auf 20 °C eine theoretische Betriebsfähigkeit von mind. 50 Jahren ergibt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass im Falle einer solchen Prüfung z. B. bei +80 °C die Versprödungstemperatur zu diesem Zeitpunkt selbst unter der weitgehend gleichförmigen Innendruckbeanspruchung ein Niveau von +80 °C erreicht ist.

Der Ausgangspunkt der Versprödungstemperatur für das neuwertige Material liegt jedoch weit unterhalb von 0 °C. Wird für die überwiegend ruhende Beanspruchung eines Innendruckversuches als Ausgangspunkt die Glasübergangstemperatur angenommen, so ist bei den heute eingesetzten HDPE-Typen eine Temperatur von etwa -120 °C anzusetzen. Während sich in Bezug auf die Materialfestigkeit (Streckspannung) somit kaum Änderungen ergeben, ist unter Berücksichtigung von Ausgangs- und Endpunkt die Verlagerung der Versprödungstemperatur erheblich. Der tatsächliche Verlauf der Versprödungstemperatur entlang der logarithmischen Zeitachse ist derzeit nicht bekannt. Aus diesem Grunde ist der Verlauf in Bild 12 gestrichelt dargestellt. Entscheidend für das spröde Bruchverhalten in der Praxis ist der Schnittpunkt mit der jeweils niedrigsten Betriebstemperatur. Dieser Schnittpunkt hat jedoch nichts mit der im Zeitstandsinnendruckversuch ermittelten theoretischen Betriebsfähigkeit unter Festigkeitsaspekten zu tun. Die zu berücksichtigende minimale Betriebstemperatur ist abhängig von den klimatischen Gegebenheiten und der jeweiligen Verlegetiefe der Gewerke. Für Wasserrohre beispielsweise, die in der Regel frostfrei verlegt werden, wurde hier in der Betrachtung eine minimale Betriebstemperatur von 0 °C angenommen. Trotz unveränderter Festigkeitswerte reagiert das Material am Schnittpunkt mit 0 °C unter äußeren Einwirkungen spröde.

Ein Hinweis für die Richtigkeit dieser Zusammenhänge ergibt sich möglicherweise auch durch einen Vergleich von Klimadaten und Schadensraten. Stahlrohrumhüllungen sind dazu wenig geeignet, da der Schadensfall an einer PE-Umhüllung entweder im Rahmen von Messungen des kathodischen Korrosionsschutzes oder eher zufällig bei späteren Aufgrabungen entdeckt wird. Eine zeitliche Zuordnung der Schadensinitiiierung und damit die Zuordnung der zu diesem Zeitpunkt vorherrschenden klimatischen Verhältnisse sind hier nur schwer darstellbar. Einfacher ist diese Zuordnung an Bauteilen aus dem Vollmaterial, die im Zuge einer Versprödung und der damit verbundenen größeren Anfälligkeit gegenüber mechanischen Einwirkungen wie Punktlasten, Punktlagerungen, Verformungen usw. unmittelbar auftretende Undichtigkeiten zur Folge haben.

Für einen solchen Vergleich wurde die vom DVGW veröffentlichte Schadenstatistik [8] und die Klimadaten vom Deutschen Wetterdienst übernommen (Bild 13). Als Maß für die Härte des Winters bietet sich die Zahl der registrierten Eistage an. Eistage sind Tage, an denen die Temperatur von 0 °C nicht überschritten wurde. Eine hohe Zahl an Eistagen ergibt sich in der Regel, wenn eine stabile Hochdruckwetterlage im Winter vorherrscht. Im Zuge solcher Wetterlagen wird auch der Frost in tiefere Bodenschichten vordringen. Die Abbildung zeigt die Lage der ausgewählten Wetterstationen. Es

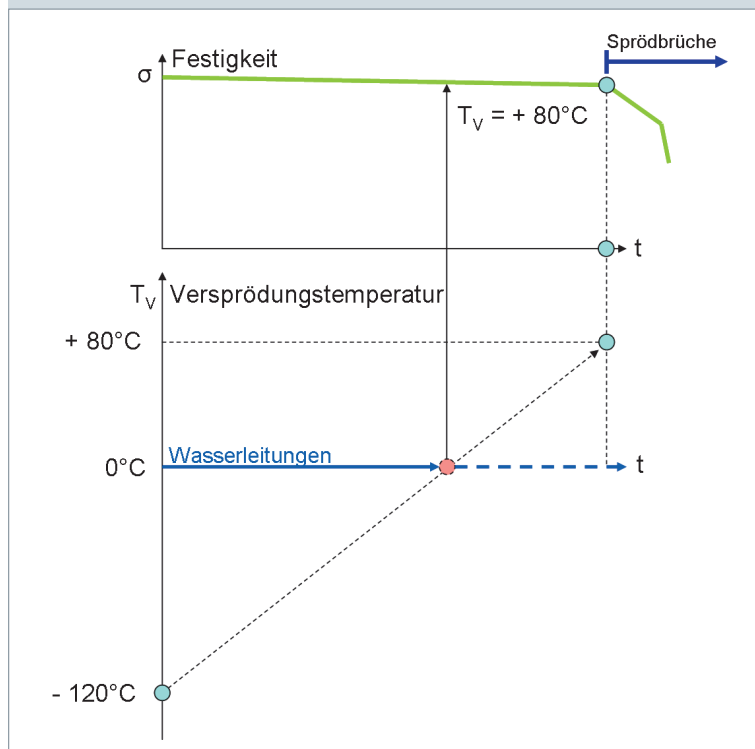


BILD 12: Erläuterung des Versprödungsverhaltens am Beispiel des Zeitstandsinnendruckversuches

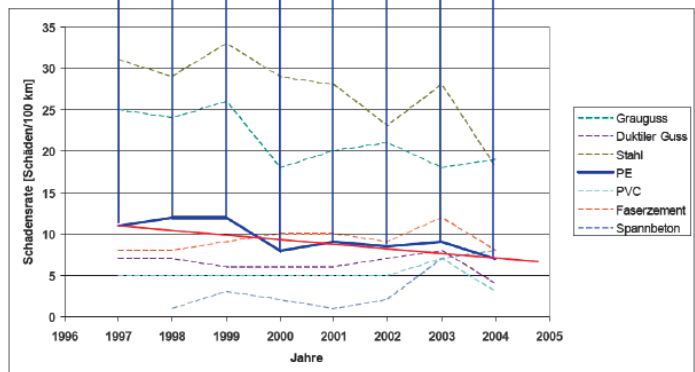
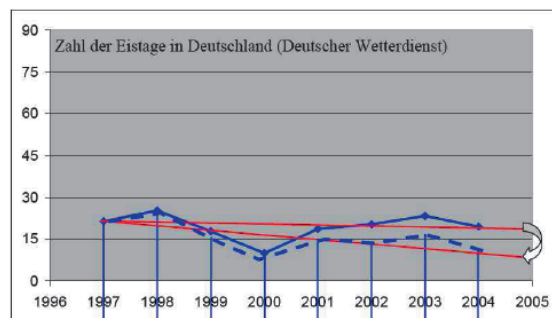
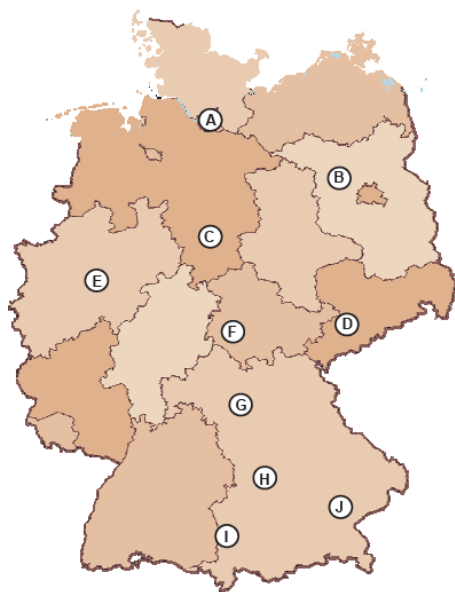
wurde dabei bewusst auf Extremlagen wie beispielsweise der Brocken im Harz, die Zugspitze oder Kap Arkona verzichtet. Aus den registrierten Eistagen der Jahre 1997 bis 2004 ergibt sich eine Mittelwertkurve, die mit den vom DVGW veröffentlichten Schadensraten für den gleichen Zeitraum gegenübergestellt wurden.

Die Korrelation der Klimadaten mit der DVGW-Schadenstatistik spricht beim Polyethylen eindeutig für den kausalen Zusammenhang von Alterung und Kälteversprödung, auch wenn die Kurve dazu leicht geneigt und die Schadensrate für das Jahr 1999 eine geringfügige Abweichung zeigt. Aber auch unabhängig von diesem Vergleich der Klimadaten mit den Schadensraten ist offensichtlich, dass sich die alterungsbedingte Versprödung durch eine zunehmende Anfälligkeit der Polyolefine bei niedrigen Temperaturen äußert und damit im Falle äußerer Einwirkungen durch Punktlagerungen, Punktlasten, Verformungen, usw. schadensursächlich ist.

Von entscheidender Bedeutung ist dabei die schon für die Kälteversprödung festgestellte Tatsache, dass eine Bewertung der Materialien durch Netzmitteluntersuchungen wie FNCT, Belltest o.ä. weder quantitativ noch qualitativ Hinweise für die Bruchbeständigkeit unter Punktlasten, Punktlagerungen, Verformungen usw. liefert. Die Versuche werden bei hohen Temperaturen durchgeführt. Der Wechsel der bruchmechanischen Eigenschaften bei niedrigeren Temperaturen kann weder bei neuwertigen, geschweige denn bei gealterten Materialien erfasst werden. Über diese Problematik wurde schon in früheren Beiträgen berichtet [6] [9] [10]. Darüber hinaus ist im Vorwort zur aktuell überarbeiteten Fassung der DIN 30670 ein entsprechender Hinweis zu finden [11].

BILD 13: Vergleich der Klimadaten mit der DVGW-Schadenstatistik von PE-Rohren [8]

| Messstationen in Deutschland | | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 |
|------------------------------|------------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| A | Hamburg | 16 | 11 | 4 | 6 | 16 | 16 | 14 | 8 |
| B | Neuruppin | 21 | 21 | 17 | 10 | 14 | 22 | 19 | 19 |
| C | Seesen | 24 | 36 | 22 | 10 | 24 | 25 | 26 | 25 |
| D | Chemnitz | 14 | 7 | 5 | 1 | 6 | 5 | 13 | 5 |
| E | Essen | 14 | 20 | 14 | 7 | 16 | 17 | 20 | 10 |
| F | Meiningen | 30 | 38 | 32 | 19 | 25 | 27 | 31 | 36 |
| G | Ebrach | 22 | 32 | 23 | | 26 | 22 | 35 | 33 |
| H | Donauwörth | 28 | 40 | 26 | 15 | 25 | 29 | 31 | 26 |
| I | Memmingen | 27 | 30 | 26 | 12 | 17 | 18 | 25 | 20 |
| J | Straubing | 17 | 18 | 8 | 9 | 17 | 23 | 18 | 12 |
| | | 213 | 253 | 177 | 89 | 186 | 204 | 232 | 194 |
| | | 1997 | 1998 | 1999 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 |
| | | 21 | 25 | 18 | 10 | 19 | 20 | 23 | 19 |



SCHLUSSFOLGERUNGEN

Nach derzeitigem Kenntnisstand und unter Berücksichtigung der veröffentlichten Daten können mit Blick auf die anfangs gestellte Frage die in technischen Lieferbedingungen wie der ISO 21809-1 zugesagten Anwendungsbereiche nicht vollständig abgedeckt werden. Sowohl die Tieftemperatureigenschaften im Falle der Polypropylenumhüllung, als auch die dort für Polyethylen und Polypropylen genannten Freiräume im Falle der Bettungsbedingungen würden in der Praxis zwangsläufig zu Problemen führen. Umhüllte Stahlrohre werden über den kathodischen Korrosionsschutz permanent überwacht und Umhüllungsfehlstellen zwangsläufig zeitnah festgestellt. Die sich dann ergebenden Diskussionen über versteckte Mängel können durch die entsprechende Kommentierung und Erläuterung der tatsächlichen Einsatzgrenzen im Vorfeld vermieden werden.

Die Untersuchungen zeigen, dass die derzeit üblicherweise eingesetzten Polypropylentypen als dreischichtiges Umhüllungssystem einen Anwendungsbereich bis -20 °C , wie er in der ISO 21809-1 beschrieben ist, nicht zulassen. Die Ergebnisse legen eine vorläufige Beschränkung für die Handhabung und Verlegung auf Temperaturen oberhalb 0 °C nahe. Prinzipiell wird dies auch über die in DIN 30678 bei 0 °C geforderte Schlagbeständigkeitsprüfung abgedeckt. In der endgültigen Normenfassung der ISO 21809-1 wird dieser Aspekt zwar noch nicht berücksichtigt sein. Es konnte jedoch erreicht werden, dass auf die Kälteempfindlichkeit zumindest in einer Fußnote für das Handling und die Verlegung hingewiesen wird.

Im Zusammenhang mit der weiterführenden Untersuchung der Schadensmechanismen konnte gezeigt werden, dass die Rissbildung durch Alterung und Kälteversprödung letztlich auf

gleiche Ursachen zurückzuführen sind. Dafür sprechen die gleichen mechanischen Zusammenhänge, das gleiche Schadensbild und der Vergleich von Klimadaten mit den DVGW-Schadenstatistiken.

Aufgrund der sich ändernden Bruchmechanismen lassen die Daten aus Netzmitteluntersuchungen keinen Rückschluss auf die Empfindlichkeit gegen Kälteversprödung zu. Gleiches gilt zwangsläufig für die alterungsbedingte Versprödung, die letztlich im Sinne einer Kälteversprödung zu behandeln ist. Derzeit existieren keinerlei Erfahrungen, wie sich die Versprödungstemperatur im Laufe der Betriebsjahre verändert. Der Versuch, diesen Verlauf bspw. über die Bestimmung der Glasübergangstemperatur an unterschiedlich in der Wärme gealterten Proben zu ermitteln, scheitert, da

sich der Übergang von duktilem zu spröden Bruchverhalten aus der Wärme oder aus der Kälte kommend jeweils anders darstellt. Frühere Untersuchungen haben gezeigt, dass unter Praxisbedingung gealterte und versprödete Proben durch die Wärmebehandlung wieder ein duktiler Bruchverhalten annehmen können [10], [13]. Dies ist einerseits nur möglich, solange diese Versprödung zu einem Zeitpunkt der Wärmebehandlung unterzogen wird, zu dem die Betriebsfähigkeit im Sinne einer Zeitstandsinnendruckprüfung noch nicht aufgezehrt ist und die Temperatur für den Übergang von duktilem zu spröden Verhalten aus der Wärme kommend zu tieferen Werten hin verlagert ist. Gerade das Beispiel der Kälteversprödung beim Polypropylen zeigt, wie wichtig eine Eignungsprüfung für Anwendungsbereiche ist, die im Rahmen einer technischen Lieferbedingung zugesagt werden. Da für eine sandbettfreie Verlegung die einzige diesbezügliche Anforderung der ISO 21809-1 in einem Nachweis der Rissbeständigkeit des Vormaterials unter Netzmitteleinfluss (Bell-Test) besteht, ist dieser Anwendungsbereich mangels aussagefähiger Eignungsprüfung nicht abgedeckt. Im Falle einer steinfreien Bettung, wie sie bisher durchgängig gefordert war, wird selbst eine völlig versprödete PE-Umhüllung in Kombination mit einem Stahlrohr die als Korrosionsschutz erforderliche Barrierewirkung erfüllen, solange nicht beispielsweise durch Kälteeinwirkung die Streckspannung überschritten wird. Entsprechende Erfahrungen dazu sind dokumentiert [12].

LITERATUR

- [1] DIN 30670 „Umhüllung von Stahlrohren und -formstücken mit Polyethylen“ (1991-04)
- [2] DIN 30678 „Umhüllung von Stahlrohren mit Polypropylen“ (1992-10)
- [3] ISO 21809-1 „Erdöl- und Erdgasindustrie - Umhüllungen für erd- und wasserverlegte Rohrleitungen in Transportsystemen - Teil 1: Polyolefinumhüllungen (3-Lagen-PE und 3-Lagen-PP)“ (ISO/DIS 21809-1:2010); Englische Fassung prEN ISO 21809-1, (2010-05)
- [4] ASTM D1693 „Standard Test Method for Environmental Stress-Cracking of Ethylene Plastics“ (2008)
- [5] PAS 1075 „Rohre aus Polyethylen für alternative Verlegungstechniken - Abmessungen, technische Anforderungen und Prüfung“ (2009-04)
- [6] Kocks, H.-J.: Die Korrosion von Polyethylen – Optimierungspotential der Polyethylenumhüllung von Stahlrohren, 3R international 47 (2008) Nr. 1/2, S. 79–85
- [7] Adams, A.; Adams, M.; Blümich, B.; Kocks, H.-J.; Hilgert, O.; Zimmermann, S.: Optimierung der Umhüllung von Stahlrohren - Zerstörungsfreies Untersuchungsverfahren zur Bewertung bruchmechanisch relevanter Veränderungen in teilkristallinen Polymeren, 3R international 49 (2010) Nr. 4, S. 216–225
- [8] Niehues, B.: DVGW-Schadenstatistik Wasser: Ergebnisse aus den Jahren 1997 bis 2004, ewp (2006) Nr. 10, S. 18–22
- [9] Kocks, H.-J.: Prüfgrundlagen und Stand der Normen für Stahlleitungs- und Kunststoffrohre - Regelwerke mit zweierlei Maß, 2004 – Rohrleitungen im Jahr der Technik; Vulkan Verlag Essen, 2004, Schriftenreihe aus dem Institut für Rohrleitungsbau an der Fachhochschule Oldenburg; Bd. 28, S. 385–398 (ISBN 3-8027-5391-7)
- [10] Kocks, H.-J.: Die Spannungsrissbildung von Polyethylen, 3R international 45 (2006) Nr. 3/4, S. 135–142
- [11] Norm-Entwurf DIN 30670 „Polyethylen-Umhüllungen von Rohren und Formstücken aus Stahl“, Februar 2011
- [12] Gaugler, H.; Kocks, H.-J.: Sinn und Unsinn von Nutzungsdauerstatistiken – Zustandsorientierte Instandhaltung kathodisch geschützter Rohrleitungen, 3R international 46 (2007) Nr. 6, S. 385–391
- [13] Celina, M.; Gillen, K.T.; Wise, J.; Clough, R.L.: Anomalous aging phenomena in a crosslinked polyolefin cable insulation, Radiat. Phys. Chem. 48 (1996) H. 5, S. 613 – 626

AUTOREN



DR. HANS-JÜRGEN KOCKS
Salzgitter Mannesmann Line Pipe GmbH,
Siegen, Germany
Tel. +49 271 691 170
E-Mail: hans-juergen.kocks@smpl.eu



DR.-ING. CHRISTOPH BOSCH
Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH,
Duisburg, Germany
Tel. +49 203 999-3183
E-Mail: c.bosch@du.szmf.de



DR. RER. NAT. MARKUS BETZ
Salzgitter Mannesmann Forschung GmbH,
Duisburg, Germany
Tel. +49 203 999-3113
E-Mail: m.betz@du.szmf.de