

# Die Spannungsrisssbildung von Polyethylen

An Praxisbeispielen von Stahlrohrumhüllungen

## Stress cracking in polyethylene

using the practical example of sheathing systems for steel pipes

Von H.-J. Kocks

*Der vorliegende Beitrag behandelt verschiedene Formen der Spannungsrisssbildung von Polyethylen, die anhand von Praxisbeispielen der Stahlrohrumhüllungen vorgestellt und diskutiert werden. Dass die hier aufgeführten Praxisbeispiele überhaupt beschrieben werden können, ist maßgeblich auf die verschiedenen Untersuchungsmethoden des kathodischen Korrosionsschutzes (KKS) zur Fehlstellenortung zurückzuführen. Die bei solchen KKS-bedingten Leitungskontrollen vorgefundenen Spannungsrisssphänomene des Polyethylens waren Anlass, sich mit dieser speziellen Schadensform intensiver zu befassen. Die Ursachen der Risssbildung sind vielfältiger Natur. Es finden sich Risse aufgrund mechanischer Einwirkungen, Risse aufgrund von Netzmittelwirkung, aber auch aufgrund von alterungsbedingter Versprödung des Polyethylens. Bei der Untersuchung dieser Schadensfälle zeigt sich, dass mit den bisher üblichen Prüfungen Langzeitaussagen für den Einsatz von Bauteilen aus Polyethylen kaum möglich sind.*

*Bei der Bewertung solcher Schäden ist zu berücksichtigen, dass die hier behandelte Werkstoffkombination aus Polyethylen und Stahl im Anwendungsbereich der Gas- und Wasserverteilung nur geringen Dehnungsbeanspruchungen ausgesetzt ist. Spannungen und die daraus resultierenden Spannungsrisse sind auch im Falle einer alterungsbedingten Versprödung des Polyethylens primär auf unerlaubt auftretende lokale Beanspruchungen wie Punktlasten oder Punktlagerungen sowie fremd beeinflussten Vorschädigungen zurückzuführen. Deshalb wäre es wünschenswert, wenn die Langzeitbeständigkeit des Polyethylens mit Blick auf den alterungsbedingten Materialabbau im Erdreich nicht nur prüftechnisch erfasst, sondern für den späteren Betrieb der Leitungen weiter optimiert werden kann.*

*The present paper deals with various forms of stress corrosion cracking in polyethylene and discusses them on the basis of practical examples of polyethylene steel pipe coatings. These practical examples presented here could be discussed because of the possibility of targeted defect localization by means of cathodic corrosion protection (CCP). The stress cracking phenomena detected during CCP caused pipeline inspections caused us to look more closely into this specific form of polyethylene damage. There are different reasons leading to crack growth in polyethylene. Reasons are mechanical damages, wetting agents but also ageing processes which leads to embrittlement of the material. Investigations of the damage events revealed that conventional creep tests cannot provide a valid prognosis of the long-time service behaviour of polyethylene components. For the evaluation of such damages it has to be considered that the material combination of polyethylene and steel is only slightly exposed to strain in practical use for gas- and water distributions. So Stress and the cracks are primarily attributable to impermissible local point loads or outside interference. Even so, the possibility not only to determine the creep resistance of polyethylene by tests but also to improve it with a view to the intended service conditions would certainly be welcomed.*

## Einleitung

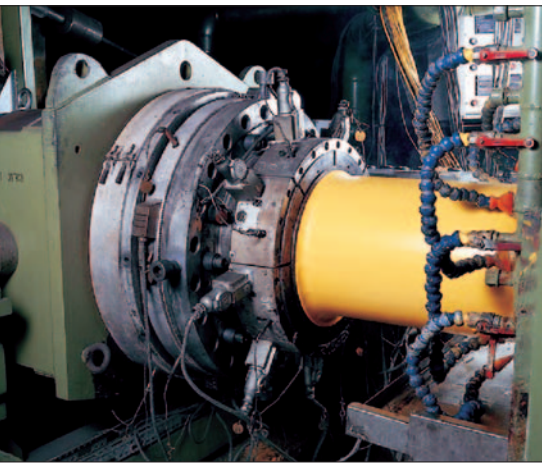
Der Einsatz von Kunststoffen in der Produktion von Rohren zum Transport von Trink- und Abwasser bzw. für Rohre zum Transport wassergefährdender Medien und Gase ist bekannt. Polyethylen wird sowohl als Rohrwerkstoff, als auch für die Umhüllung von Stahl- und Gussrohren eingesetzt. Der wesentliche

Vorteil dieses Werkstoffes liegt in der chemischen Beständigkeit des Materials, die den Einsatz in allen Bodenaggressivitätsstufen zulässt. Die Chemikalienbeständigkeit ist jedoch nicht zu verwechseln mit dem Begriff der Korrosionsbeständigkeit. Nach DIN EN ISO 8044 ist Korrosion die Wechselwirkung eines Werkstoffes mit seiner Umgebung, die zu einer Veränderung der mechanischen Ei-

genschaften und damit zu einem Versagen des Bauteils führen kann. Diese Wechselwirkungen können chemischer, physikalischer oder elektrochemischer Natur sein. Diese Definition gilt nicht nur für metallische Werkstoffe, sondern auch für nichtmetallische Werkstoffe, wie beispielsweise Kunststoffe oder zementgebundene Materialien. Der Begriff der Korrosion wird fälschlicherweise meist im spezielleren Sinne allein auf die elektrochemische Korrosion metallischer Werkstoffe bezogen [1].

Dem entsprechend führt beispielsweise die Stichwortpaarung von Kunststoff und Korrosion bei Datenbankrecherchen nur selten zum Erfolg. Erst die Kombination des Begriffs Kunststoff mit möglichen Korrosionserscheinungsformen wie Lichtalterung, Wärmealterung, Permeations- bzw. Migrationsercheinungen (z. B. in Gegenwart von Kohlenwasserstoffen) oder auch die Spannungsrisssbildung liefert eine Vielzahl von Publikationen über entsprechende Schäden und Schadensmechanismen, aber auch über notwendige Maßnahmen zur Vermeidung solcher Schäden. Jede Stabilisierung des Kunststoffes zum Schutz gegen Wärme- und/oder Lichtalterung, jede Werkstoffmodifikation zur Verbesserung der Spannungsrisssbeständigkeit sind letztlich Korrosionsschutzmaßnahmen.

Spannungsrisse werden im Falle einer Werkstoffversprödung unter zusätzlichen äußeren Lasten wie Punktlasten oder Punktlagerungen im Falle der Rohre oder Umhüllungen aus Polyethylen initiiert [2, 3]. Eine weitere Form der Spannungsrisse ist auf den Einfluss von rissfördernden Medien, wie beispielsweise den Netzmitteln, zurückzuführen. Der wesentliche Unterschied dieser beiden Mechanismen liegt in der Tatsache, dass die Risssbildung unter Netzmiteleinfluss bereits bei Spannungen einsetzt, die weit unterhalb der zulässigen Werkstoffspannung liegen. Die Risssbildung im Falle der alterungsbedingten Versprödung des Materials ohne Netzmiteleinwirkung bedarf hingegen unter Berücksichtigung aller im Bauteil wirkenden Spannungsanteile einer Überschreitung dieser zulässigen Werkstoffspannung. Im Falle der Alterung sind die sich im Laufe der Zeit verändernden bruchmechanischen Eigenschaften des Materials, beispielsweise charakterisiert durch die Bruchdehnung, zu berücksichtigen. Schäden unter Netzmiteleinfluss treten auch an nicht gealtertem Material auf und werden maßgeblich vom molekularen Gefüge des Polymeren bestimmt. Auch hier sind in der Vergangenheit entsprechende Schäden an den Polyethylenumhüllungen von Stahlrohren aufgetreten. In der Literatur sind die Hintergründe dieser Form der Werkstoffschädigung bisher nur unzureichend beschrieben, ein Mangel, der im Gespräch mit den betroffenen Versorgern immer wieder zu Irritationen führt.



**Bild 1:** Das Schlauchextrusionsverfahren zur Herstellung der Polyethylenumhüllung

**Fig. 1:** Polyethylene coating production using the blown film extrusion process

Mit diesem Beitrag sollen deshalb die grundlegenden Mechanismen der Spannungsrissbildung von Polyethylen anhand von Praxisbeispielen der Stahlrohrumhüllung vorgestellt und diskutiert werden.

### Polyethylenumhüllung von Stahlrohren – ein historischer Rückblick

Der Einsatz von Polyethylen zur Umhüllung von Stahlrohren ist heute anerkannter Stand der Technik. Ein wesentlicher Vorteil dieses Materials liegt in der chemischen Beständigkeit, die den Einsatz dieser Rohrumhüllungen in allen Bodenaggressivitätsstufen ermöglicht. Polyethylen als Umhüllungsmaterial hat das früher standardmäßig eingesetzte Bitumen vollständig verdrängt. Ende der 50'er Jahre wurde die Polyethylenumhüllung als Korrosionsschutz erdverlegter Stahlrohre eingeführt. Im Vergleich zum Bitumen zeichnet sich das Polyethylen vor allem durch den deutlich größeren elektrischen Umhüllungswiderstand aus. So können beispielsweise

heute problemlos über 100 km Pipeline mit einer Anlage für den kathodischen Schutz überwacht und geschützt werden.

Die ersten Polyethylenumhüllungen wurden im Sinterverfahren hergestellt. Die Rohre wurden zunächst mit Stahlkorn metallisch blank gestrahlt. Bei einer Oberflächentemperatur von etwa 300 °C rieselte Polyethylenpulver auf das sich drehende Rohr und verschmolz bei Kontakt mit der Rohroberfläche zu einer homogenen Schicht. Diese Pulverbeschichtungen hatten im Vergleich zu den, später im Schlauchextrusionsverfahren hergestellten Umhüllungen den Nachteil der geringeren Haftung und Reißdehnung. Das gesinterte Polyethylen verhält sich im Vergleich zu den heute üblicherweise extrudierten Materialien relativ spröde.

Die heute gebräuchlichen Schlauch- und Wickelextrusionsverfahren werden seit Mitte der 60'er Jahre eingesetzt. So wurde anfänglich eine Zweischichtumhüllung bestehend aus Kleber und Polyethylen hergestellt. Ab Mitte der 80'er Jahre kamen Dreischichtsysteme zum Einsatz. Diese Dreischichtumhüllungen verfügen über einen zusätzlichen Primer auf Epoxidharzbasis. Diese, auf die Praxis ausgerichteten Systeme erzielen bei Raumtemperatur hohe Haftfestigkeiten und erlauben bei der Herstellung von Schnittrohren den problemlosen Rückschnitt des Polyethylens durch das Erwärmen der Rohrenden. Als Materialien sind sowohl Polyethylentypen niedriger Dichte (LDPE) als auch Polyethylentypen mittlerer und hoher Dichte (MDPE und HDPE), insbesondere für erhöhte Betriebstemperaturen im Einsatz. Umhüllungen aus Polypropylen haben im Vergleich zum Polyethylen bisher nur geringe Bedeutung und werden überwiegend in Sonderfällen, wie beispielsweise der grabenlosen Rohrverlegung, eingesetzt.

Die Anwendungsbereiche von Schlauch- und Wickelextrusionsverfahren sind in der Regel auf unterschiedliche Dimensionsbereiche der Stahlrohre beschränkt. Das Wickelextrusionsverfahren kommt vor allem bei Groß-

rohren zum Einsatz. Nach dem Stahlstrahlen auf einen Reinheitsgrad von SA 2 1/2 und Vorwärmen der Rohre auf etwa 200 °C erfolgt die Epoxidharzprimerbeschichtung als Pulverapplikation, während die Kleber- und Polyethylenschicht über Seitenextruder aufgebracht und unter dem Druck einer Rolle fest miteinander verbunden werden. Bei der Schlauchextrusion werden Primer und Kleber in der Regel als Pulverbeschichtung appliziert. Im letzten Arbeitsgang erfolgt hier die Extrusion von Polyethylen als nahtloser Schlauch (**Bild 1**). Die Schlauchextrusion wird im Nennweitenbereich der Rohre bis max. DN 600 eingesetzt.

### Normung der Polyethylenumhüllung für Stahlrohre

Nach derzeitigem Stand der Technik erfolgt die Umhüllung der Stahlrohre auf Basis der DIN 30670, deren aktuelle Fassung aus dem Jahr 1991 stammt. Die Umhüllungen werden je nach Dimension standardmäßig mit einer Schichtdicke im Bereich von 1,8 bis 3,0 mm gefertigt, eine um 0,7 mm dickere Ausführung ist für Sonderanwendungen vorgesehen (**Tabelle 1**).

Die Anforderungen der verschiedenen Ausgaben dieser Norm für die Polyethylenumhüllung von Stahlrohren sind eng verknüpft mit dem technischen Fortschritt der Vormaterialqualität und der Herstellungsverfahren. Die DIN 30670 wurde 1974 für Polyethylenumhüllungen erdverlegter Stahlrohre erstmals als Vornorm publiziert. Die erste überarbeitete Fassung brachte 1980 beispielsweise die Anhebung der Mindestschälwiderstände für die Polyethylenumhüllung von ehemals 15 auf 35 N/cm Streifenbreite. Diese Mindestanforderungen wurden 1991 durch eine Prüfung bei höherer Temperatur ergänzt, wobei zwischen der Normalausführung (N) für Betriebstemperaturen bis 50 °C und der Sonderausführung (S) für Betriebstemperaturen bis 70 °C unterschieden wird. Während für die Normalausführung bei 50 °C ein Schälwiderstand von mindestens 15 N je cm Streifenbreite gefordert ist, liegt der Mindestschälwiderstand der Sonderausführung bei 50 °C bei mind. 25 N/cm Streifenbreite.

Neben den Anforderungen an die fertigungsbedingten Produkteigenschaften wurden auch materialseitig die Anforderungen an die Korrosionsbeständigkeit des Polyethylens ständig erhöht. In der Fassung von 1974 wurde eine kombinierte Prüfung der Wärme- und Lichtalterung gefordert. Die mit einem Schwarztafel-Thermometer gemessene Temperatur lag bei 60 °C. Die Auslagerungsdauer unter Bestrahlung mit einer Xenonbogenlampe betrug 800 Stunden. Als Maß für die Alterung wurde der Schmelzindex gewählt. Dieser durfte um maximal 25 % vom Ausgangswert abweichen.

**Tab. 1:** Schichtdicken der Polyethylenumhüllungen nach DIN 30670

**Table 1:** Layer thicknesses in polyethylene coatings according to DIN 30670

Rohrdurchmesser	Polyethylenumhüllungen nach DIN 30670	
	N	v
bis DN 100	1,8 mm	2,5 mm
über DN 100 bis DN 250	2,0 mm	2,7 mm
über DN 250 bis unter DN 500	2,2 mm	2,9 mm
ab DN 500 bis unter DN 800	2,5 mm	3,2 mm
ab DN 800	3,0 mm	3,7 mm

In der DIN 30670 aus dem Jahr 1980 wurde diese kombinierte Prüfung getrennt. Die Prüfung der Wärmealterung erfolgte in einem Zeitraum von nunmehr 2400 Stunden bei 100 °C. Die Prüfung der Lichtalterung des Polyethylens erfolgte bei gleicher Auslagerungsdauer und einer Schwarztafeltemperatur von 45 °C. In beiden Fällen durfte sich nach der Auslagerung der Schmelzindex um maximal 35 % vom Ausgangswert unterscheiden. Seit 1991 wird in der DIN 30670 für die Lichtalterung ein definierter Energieeintrag von 7 GJ mit zusätzlicher Bewitterung bei einer Schwarztafeltemperatur von 65 °C gefordert. Die Anforderungen an die thermische Beständigkeit des Polyethylens blieben seit 1980 unverändert, wobei die Auslagerungsdauer für die neu eingeführte Sonderausführung auf 4800 Stunden festgelegt wurde.

Auf europäischer Ebene sind die Normungsaktivitäten für die PE-Umhüllung für die gesinterte und extrudierte Dreischicht-PE-Umhüllung eingestellt worden. Lediglich die in Deutschland seit etwa 20 Jahren nicht mehr produzierte Zweischicht-PE-Umhüllung ist europäisch genormt. Speziell die in den Normen festgelegten Alterungsprüfungen der Langzeiteigenschaften des Polyethylens sind aufgrund der in diesem Beitrag vorgestellten Erkenntnisse zukünftig kritischer zu bewerten.

## Spannungsrisssbildung an Polyethylenumhüllungen von Stahlrohren

Die heute bekannten Formen der Spannungsrisssbildung an Polyethylenumhüllungen von Stahlrohren für Standardanwendungen in der Wasser- und Gasverteilung beschränken sich auf Ausführungen, die noch den geringen Schälwiderstand der ersten Normengenerationen der DIN 30670 aufweisen und betreffen die gesinterten und Zweilag-PE-Umhüllungen, die speziell bis 1985 gefertigt wurden. In Bezug auf die Spannungsrisssbildung der Polyethylenumhüllungen von Stahlrohren sind drei Schadenstypen zu unterscheiden:

1. Rissbildung aufgrund mechanischer Einwirkungen
2. Rissbildung durch Werkstoffversprödung
3. Rissbildung als Sekundärschädigung ausgehend von Fehlstellen kathodisch geschützter Rohrleitungen

### Rissbildung aufgrund mechanischer Einwirkungen

Diese, in der Praxis eher unbedeutende Form der Rissbildung kann im Falle äußerer mechanischer Einwirkungen auch unabhängig von der Alterung des Werkstoffes herbeigeführt werden. Diese Form der Schädigung wird maßgeblich durch die noch vorhandene Haftung der Polyethylenumhüllung zum Stahlrohr beeinflusst.



**Bild 2:** Rissbildung aufgrund mechanischer Einwirkungen  
**Fig. 2:** Cracking due to mechanical stresses



**Bild 3:** Durch Versprödung geschädigte Polyethylenumhüllung  
**Fig. 3:** Polyethylene coating damaged by embrittlement

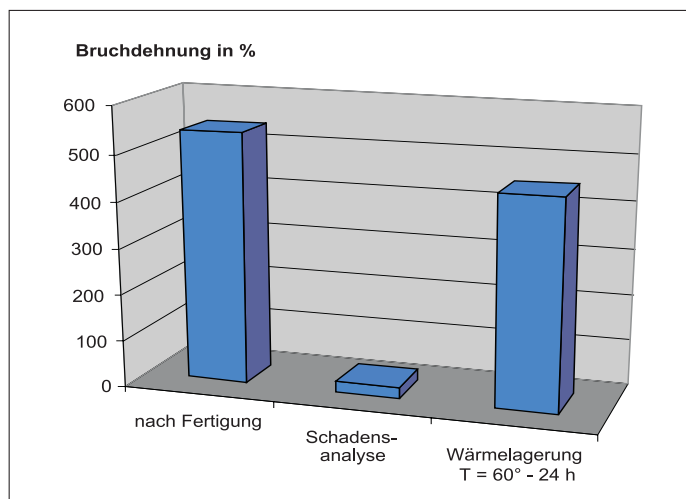
**Bild 2** zeigt den typischen Schaden einer Polyethylenumhüllung, der durch einen Baggerzahn verursacht wurde. Der Baggerzahn verletzte nicht nur punktuell die Polyethylen-schicht, sondern übte gleichzeitig einen entsprechenden Druck auf die Umhüllung aus. Die dabei auftretende Spannung löste sich in zwei etwa 1 m lange Risse, die zu beiden Seiten aus der Fehlstelle herauslaufen. Das Stahlrohr war aufgrund seiner hohen mechanischen Festigkeit unversehrt. Bei der Polyethylenumhüllung handelt es sich um ein Zweischichtsystem mit einem Bitumenkleber, der in den 70'er Jahren standardmäßig verwendet wurde. Der Schälwiderstand und damit die Haftung des Klebers waren im Vergleich zu den später eingesetzten Systemen deutlich geringer.

### Rissbildung durch Werkstoffversprödung

Eine weitere Form der Spannungsrisssbildung ist auf eine einsetzende Alterung der Polyethylenumhüllung zurückzuführen. Hier sind mögliche Schadensmechanismen des Polyethylens, wie Licht- oder Wärmealterung, Sauerstoffversprödung und Stabilisatorabbau zu berücksichtigen.

**Bild 3** zeigt die, für solche Schäden typische verzweigte Erscheinungsform der Rissbildung. Die Untersuchung ergab, dass die Bruchdehnung dieser 1978 gefertigten Polyethylenumhüllung deutlich abgenommen hat. Die Bruchdehnung erreichte im Mittel gerade noch etwa 25 % (**Bild 4**).

Für diese Form der Rissbildung ist die lokale Überschreitung der zulässigen Werkstoffspannung erforderlich. Die Abnahme der Bruchdehnung ist ein deutlicher Hinweis für die Alterung und damit die Korrosion des Polyethylens. Die hier noch vorhandene Bruchdehnung liegt jedoch noch immer weit oberhalb der Dehnungen, denen eine Werkstoffkombination aus PE und Stahl bei regelgerechter Verlegung ausgesetzt ist. Daher sind solche Risse üblicherweise auf Fremdeinwirkungen oder mangelnde Sorgfalt bei der Verlegung zurückzuführen. Hier führen unzulässige Punktlagerungen oder Punktlasten zu Beanspruchungen, die eine lokale Konzentration von Spannungen und damit die Rissbildung begünstigen. Auch wenn derartige Schäden meist auf die Nichtbeachtung der Regelwerke zurückzuführen sind, wäre es wünschenswert das Alterungsverhalten des Polyethylens in aussagefähigen Prüfungen zu erfassen und damit die Umhüllungen weiter zu optimieren.



**Bild 4:** Bruchdehnung der versprödeten Polyethylenumhüllung

**Fig. 4:** Elongation of a brittle polyethylene coating at fracture





**Bild 5:** Erscheinungsbild der Spannungsrisse als Sekundärschädigung einer mangelhaft ausgeführten Nachumhüllung von Anschlüssen für den kathodischen Korrosionsschutz

**Fig. 5:** Stress cracks as a secondary damage in inadequately field coated connections for cathodic corrosion protection

Die Fragestellung der Alterung von Polyethylen und insbesondere die Problematik eines Nachweises der damit verbundenen Gebrauchstauglichkeit, sind auch im Zusammenhang mit anderen Produkten aus Polyethylen in der Diskussion. So wurde beispielsweise bereits 2004 bei den Wiesbadener Kunststoffrohrtagen über vergleichbare Ergebnisse sowohl von Rohren auf LDPE, als auch HDPE-Basis berichtet. Trotz der nachgewiesenen Abnahme der Bruchdehnung hatte ein Teil dieser 20 bis 30 Jahre alten Rohre die erneut durchgeführte Zeitstandsinnendruckprüfung bestanden [4]. Es gibt somit auch keinen Anlass zu glauben, dass diese Rohre zum Zeitpunkt ihrer Herstellung diese Zeitstandsinnendruckprüfung nicht bestanden hätten. Umso mehr verwundert die hier nachgewiesene Versprödung des Materials.

Der entscheidende Widerspruch besteht jedoch in der erkennbaren, die bruchmechanischen Eigenschaften beeinträchtigenden Korrosionsproblematik einerseits und der, auf die bestandene Zeitstandsinnendruckprüfung basierenden, angenommenen Ge-

brauchstauglichkeit andererseits. Durch eine simple Wärmelagerung in der Praxis gealterter Polyethylenproben kann dieser Widerspruch aufgeklärt werden. Bereits eine 24stündige Auslagerung bei 60 °C reicht aus, um die Bruchdehnung eines in der Praxis gealterten Materials von bescheidenen 25 % auf über 400 % zu erhöhen (Bild 4). Die unter den praxisrelevanten Temperaturen des Erdreichs auftretenden alterungsbedingten Versprödungen des Polyethylens werden bei den Temperaturen einer Zeitstandsinnendruckprüfung, einer Wärmelagerung oder aber selbst im Falle einer kombinierten Licht- und Wärmealterungsprüfung von Bauteilen im Labor oder unter der Sonne Floridas kaschiert. Aus diesem Grunde ist eine direkte Übertragung solcher Prüfergebnisse auf die tatsächliche Nutzungsdauer von Polyethylenbauteilen bei den niedrigeren Temperaturen und z. T. unbekanntem Medieneinflüssen im Erdreich gar nicht zulässig.

Grundsätzlich stellt sich die Frage, wie aus heutiger Sicht eine sinnvolle, für die Praxis relevante Prüfung der Alterungsbeständigkeit durchzuführen ist. Da sich offensichtlich bei den höheren Temperaturen nicht nur das Polymergefüge, sondern zwangsläufig damit auch das Alterungsverhalten des Polyethylens ändert, sind solche Prüfungen selbst unter qualitativen Aspekten zu hinterfragen. Diese Fragestellung wird derzeit näher untersucht und bedarf unter Umständen auch den Einsatz neuerer analytischer Verfahren, die es zum Zeitpunkt der Entwicklung heute üblicher Auslagerungsprüfungen noch nicht gab [5].

**Rissbildung als Sekundärschädigung ausgehend von Fehlstellen kathodisch geschützter Rohrleitungen**

Abweichend von den oben beschriebenen und in ihren Ursachen prinzipiell bekannten Formen der Spannungsrisbildung, wurden in der Vergangenheit auch an Polyethylenumhüllungen Risse festgestellt, deren Herkunft nicht auf eine Kombination von mechanischer Beanspruchung und Materialversprödung zurückgeführt werden kann. Es

handelt sich dabei phänomenologisch um lang gestreckte einzelne Risse in der Umhüllung, deren Bruchdehnung immer noch dem werksfrischen Zustand entspricht (**Bild 5** und **6**).

Bei dieser Form der Spannungsrisbildung wurden folgende, immer in Kombination vorliegende Randbedingungen festgestellt:

- Die Rohre sind mit einer Zweischichtumhüllung versehen
- Es liegt eine, bis zur Stahloberfläche reichende Beschädigungen vor
- Die Fehlstelle weist 'Kerbspitzen' z. B. Messerschnitte auf
- Die Rohrleitung ist kathodisch geschützt.

Die komplexen mechanistischen Zusammenhänge dieser Form der Spannungsrisbildung wurden in vielen Versuchsreihen nachgewiesen. Über die wesentlichen Untersuchungsverfahren und Ergebnisse berichten die folgenden Abschnitte.

**Untersuchungsergebnisse und Diskussion**

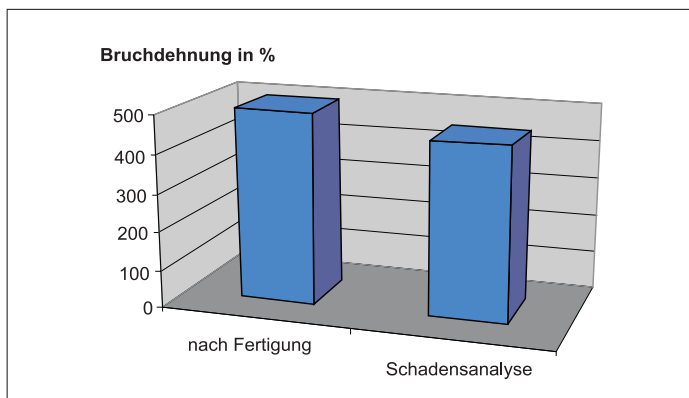
**Der Versuchsaufbau**

Bei den hier untersuchten polyethylenumhüllten Rohrabschnitten handelt es sich um Proben, die unter den Standardproduktionsbedingungen hergestellt wurden. Zur Untersuchung der Spannungsrisbildung wurde die Polyethylenumhüllung mit einem scharfen Teppichmesser auf einer Länge von 40 mm bis zum Stahlgrundmaterial eingeschnitten, wobei nach jedem Schnitt ein Wechsel der Messerklinge erfolgte. Auf dem polyethylenumhüllten Stahlrohrsegment wurde jeweils um die Schnittverletzung herum ein PVC Rohrstück aufgesetzt, das zur Aufnahme der jeweils eingesetzten Versuchslösung diente (**Bild 7**). Die Auslagerung der Proben erfolgte bei Raumtemperatur. Die Proben wurden täglich kontrolliert und der Zeitpunkt der Rissinitiation dokumentiert.

Als Versuchslösungen wurden neben der 5%igen Netzmittellösung (Igepal, siehe Belltest, ASTM 1693) eine 3%ige NaCl-Lösung und alternativ die synthetische Bodenlösung nach Baeckmann [6] unter den Bedingungen des kathodischen Korrosionsschutzes eingesetzt. Diese synthetische Bodenlösung enthielt die folgenden Bestandteile:

- 17 mg/l Magnesiumsulfat ( $MgSO_4 \cdot 7 H_2O$ )
- 733 mg/l Calciumchlorid ( $CaCl_2 \cdot 2 H_2O$ )
- 430 mg/l Calciumsulfat ( $CaSO_4 \cdot 2 H_2O$ )
- 210 mg/l Natriumhydrogencarbonat  $Na_2HCO_3$ .

Zur Simulation der Betriebsbedingungen kathodisch geschützter Leitungen wurde die Stahloberfläche mit Hilfe einer Kalomelektrode als Referenz auf -1,5 Volt polarisiert.



**Bild 6:** Bruchdehnung der gerissenen Polyethylenumhüllung

**Fig. 6:** Elongation of fractured polyethylene coating

### Der Einfluss von Schmelzindex und Beschichtungsaufbau

Ein wesentlicher Schwerpunkt dieser Untersuchung galt vor allem der Klärung von Einflüssen wie dem Beschichtungsaufbau und den in der Vergangenheit jeweils eingesetzten Polyethylentypen. **Bild 8** zeigt die wesentlichen Erkenntnisse dieser Laboruntersuchungen.

Es wurden zwei unterschiedliche Beschichtungssysteme untersucht. Es handelte sich dabei um das Zweischicht-System bestehend aus einem Kleber auf Polyacrylharzbasis und der Polyethylendeckschicht sowie dem heute noch üblichen Dreischicht-System bestehend aus Epoxidharzprimer, einem acrylsäure-/acrylatmodifizierten PE-Copolymer als Kleber und der abschließenden Polyethylendeckschicht. Des Weiteren wurden drei LDPE-Typen mit unterschiedlichem Schmelzindex eingesetzt. Der abnehmende Schmelzindex beruht hier maßgeblich auf die zunehmende Kettenlänge der eingesetzten Polyethylentypen. Der Zeitpunkt der Rissinitiierung in Gegenwart von Netzmitteln und unter Einsatz der Salzlösung in Kombination mit dem kathodischen Korrosionsschutz korreliert nur im Falle der Zwei-Schicht-PE-Umhüllungen. Am Beispiel der 2-Schichtumhüllungen zeigte sich, dass mit zunehmender Kettenlänge die Resistenz gegenüber Spannungsrissbildung zunimmt (**Bild 8**). Im Falle der Dreischichtsysteme wurde unabhängig vom eingesetzten Polyethylentyp auch nach 700 Tagen noch keine Spannungsrissbildung festgestellt. Bei der Bewertung der Untersuchungsergebnisse ist zu berücksichtigen, dass weder das Zweischichtsystem mit dem Polyethylentyp im Schmelzindexbereich von 0,3 bis 0,4 noch das Dreischichtsystem mit dem Polyethylentyp im Schmelzindexbereich zwischen 0,6 bis 1,0 jemals zum Einsatz kamen.

Der Blick auf die Praxis bestätigt die im Labor gefundenen Ergebnisse. Im Laufe der Jahre wurde jeder gemeldete Schadensfall sorgfältig in Bezug auf Produktionszeitraum Risslänge und Bruchdehnung der Polyethylenumhüllung dokumentiert.

**Bild 9** zeigt die Zahl der im Verlaufe der letzten 20 Jahre gemeldeten Schadensfälle in Abhängigkeit vom Fertigungszeitraum und der jeweils eingesetzten Ausführung der Polyethylenumhüllung. Es fällt auf, dass bis zum Jahr 1977 kaum derartige Spannungsrisschäden bekannt waren. Bis etwa 1980 wurden die, in Bezug auf eine Spannungsrissbildung sensibelsten PE-Typen eingesetzt. Wesentlich entscheidender ist jedoch, dass ab 1977 der Klebertyp wechselte, da höhere Anforderungen an den Schälwiderstand mit Erscheinen der überarbeiteten DIN 30670 realisiert werden mussten. Bis 1977 wurde ein Kleber auf Bitumenbasis eingesetzt. Ab 1977 folgte ein Kleber auf Polyac-



**Bild 7:** Versuchsstand zur Untersuchung der Rissbildung von Polyethylenumhüllungen  
**Fig. 7:** Test stand for examining cracks in polyethylene coatings

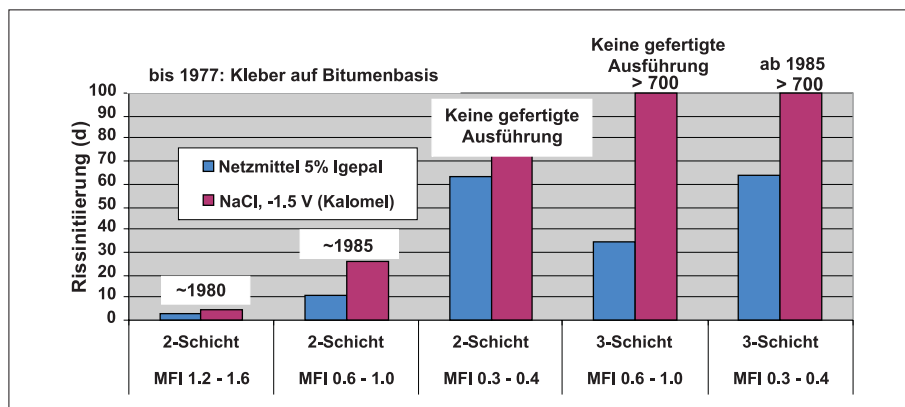
rylat-Kunstharzbasis. In dieser Zeit stieg die Zahl der Schadensfälle drastisch an. Ab 1981 wurde der spannungsrisstbeständigere PE-Typ im Schmelzindexbereich von 0,6 bis 1,0 bei gleichem Klebertyp und Beschichtungsaufbau eingesetzt. Die Zahl der gemeldeten Schadensfälle, die diesen Produktionszeitraum betreffen, ging deutlich zurück.

Mitte der 80er Jahre wurde in Deutschland die heute noch gefertigte Dreischicht-PE-Umhüllung mit zusätzlichem Epoxidharzprimer eingeführt. Mit dieser Umstellung auf das

Dreischichtsystem in Verbindung mit den Polyethylentypen im Schmelzindexbereich von 0,3 bis 0,4 sind keine derartigen Schäden mehr aufgetreten.

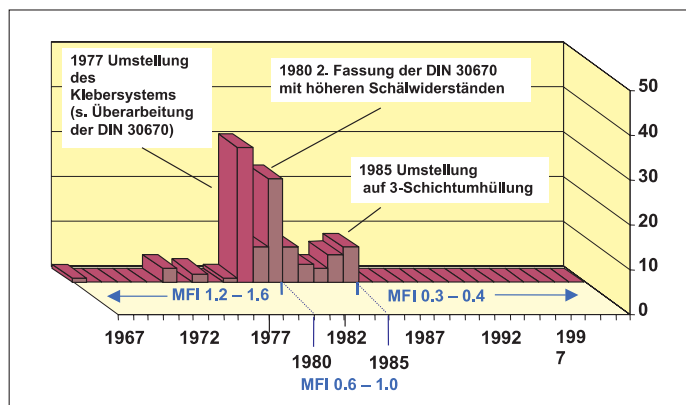
### Der Einfluss der Medienzusammensetzung

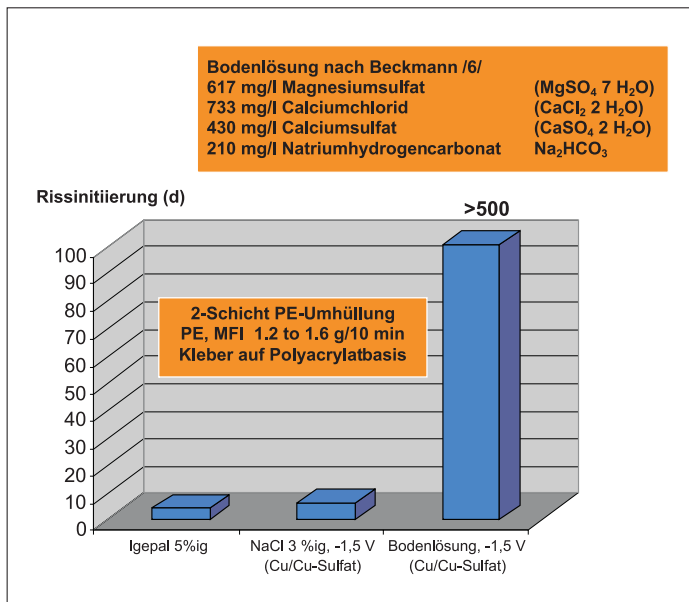
In der Vergangenheit wurde natürlich versucht, mit Hilfe der Intensivmesstechnik gezielt derartige Schäden in der Polyethylenumhüllung nachzuweisen. Diese Suche gestaltete sich jedoch als äußerst schwierig.



**Bild 8:** Untersuchung zum Einfluss von Schmelzindex und Beschichtungsaufbau auf den Zeitpunkt der Rissinitiierung  
**Fig. 8:** Investigations into the effect of the melting index and coating structure on the time of crack initiation

**Bild 9:** Zahl der gemeldeten Schadensfälle in Abhängigkeit vom Fertigungszeitraum und den jeweils eingesetzten Umhüllungssystemen  
**Fig. 9:** Number of reported damage events per year and coating system





**Bild 10:** Spannungsrissinitiation in Abhängigkeit der Versuchsmedien

**Fig. 10:** Stress crack initiation in various test media

Die Spannungsrisschäden waren deutlich seltener als erwartet. Hintergrund ist die Tatsache, dass nur eine Kombination verschiedener Randbedingungen zu derartigen Spannungsrissen führt.

**Bild 10** zeigt dazu exemplarisch den Einfluss des Bodenmediums auf das Spannungsrissverhalten. Bei der eingesetzten Polyethylenumhüllung handelt es sich um das sensibelste Zweischichtsystem mit einem Schmelzindex im Bereich von 1,2 bis 1,6. Während die Probe in der Netzmittellösung ohne kathodischer Polarisation bereits nach drei Tagen Rissbildung zeigt, versagt die Probe unter kathodischer Polarisation in der Salzlösung nach fünf Tagen. In der synthetischen Bodenlösung nach Baeckmann wurde auch nach 1,5 Jahren noch keine Rissbildung festgestellt.

Damit konnte nachgewiesen werden, dass die Alkalität im Fehlstellenbereich bei kathodischer Polarisation und die Bodeneigenschaften im Fehlstellenbereich eine wesentliche Rolle für die hier untersuchte Form der

Spannungsrissbildung spielt. In der Salzlösung wird primär Natriumhydroxid im Fehlstellenbereich gebildet, während im Falle der synthetischen Bodenlösung die Pufferwirkung des Hydrogencarbonats hohe pH-Werte und damit eine Spannungsrissbildung verhindert.

### Mechanistische Betrachtungen

#### Die Spannungsrissbildung unter Netzmittelwirkung

Auf der Basis der vorliegenden Untersuchungsergebnisse lassen sich einige grundsätzliche mechanistische Aussagen über diese spezielle Form der Spannungsrissbildung des Polyethylens ableiten. Dazu sind die vorhandenen Kenntnisse aus dem Bereich der Kunststoffkorrosion mit den Gegebenheiten des kathodischen Korrosionsschutzes zu kombinieren.

Das Phänomen der Spannungsrissbildung ist keine auf die PE-Umhüllung von Stahlrohren begrenzte Schadensform. Solche Schä-

den sind prinzipiell von allen, durch Wärme geformten Kunststoffprodukte bekannt. Die wesentliche Voraussetzung für Spannungsrisse ist, wie der Name schon sagt, die Gegenwart von Spannungen, die bei der Herstellung in der Wärme aufgrund großer Wärmedehnung und schlechter Wärmeleitfähigkeit oder aber während des Betriebes bzw. während des Einsatz eines Bauteils erzeugt werden und auch im Bauteil zumindest in Anteilen verbleiben. Über die Besonderheiten von Bauteilspannungen speziell beim Polyethylen wurde bereits früher berichtet [7]. Der Mechanismus der Spannungsrissbildung wird heute im Allgemeinen durch die so genannte Partikeltheorie beschrieben (**Bild 11**).

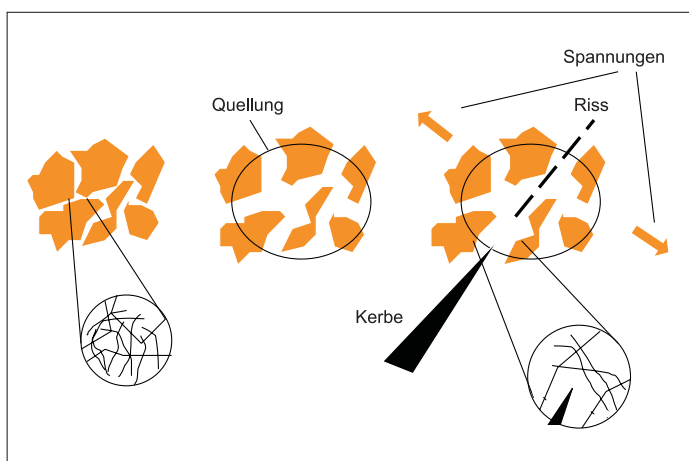
Ausgehend von der Vorstellung, dass die kristallinen Bereiche (Partikel, Kristallite) in erster Linie durch miteinander in einem Grenzbereich verschlungener Molekülketten (Kristallbrücken) zusammengehalten werden, kommt es in Gegenwart von Netzmitteln und vorhandenen Spannungen zu einer Aufweitung bzw. Quellung dieser Struktur. Die Aufweitung ist in diesem Stadium noch reversibel. Erst im Falle einer Kerbe können sich durch ein "Endschlaufen" der Molekülketten Risse bilden. Die Rissinitiation bzw. die Rissfortpflanzungsgeschwindigkeit ist dabei unter anderem auch abhängig von den vorliegenden Kettenlängen, den lokalen Spannungen in der Kerbspitze sowie vom verwendeten Netzmitteltyp. Diese Form der Spannungsrissbildung wird nicht durch eine chemische Reaktion ausgelöst. Es handelt sich hierbei um einen diffusionskontrollierten Vorgang und basiert auf rein physikalische Gesetzmäßigkeiten. Diese Form der Spannungsrissbildung ist allgemein unter dem Begriff des so genannten „Environmental Stress Cracking (ESCR)“ einzuordnen und erfordert folgende Randbedingungen:

1. Es müssen spannungsrissempfindliche Materialien vorliegen
2. Es muss eine Fehlstellengeometrie vorliegen, die eine Kerbwirkung ermöglicht
3. Es ist die Gegenwart von Netzmitteln erforderlich
4. Es müssen Spannungen vorliegen.

Die Frage der Spannungsrissempfindlichkeit der hier eingesetzten Materialien wurde sowohl im Labor, als auch in der Praxis geklärt. Die Fragen der Fehlstellengeometrien, die Gegenwart von Netzmitteln und die Herkunft der Spannungen im Falle der Polyethylenumhüllung verdient eine gesonderte Betrachtung.

#### Die Fehlstellengeometrien mit Kerbwirkung

Abgesehen von den massiven Einflüssen im Falle des Baggerzahnangriffs oder dem ungewollten „Hieb“ mit der Spitzhacke, ergaben sich in der Vergangenheit bei alltäglichen



**Bild 11:** Partikeltheorie  
**Fig. 11:** Particle theory



chen Arbeiten, wie der Erstellung von Hausanschlüssen Möglichkeiten Fehlstellen mit Kerbwirkung zu erzeugen. Während das Regelwerk ausdrücklich das runde Ausschneiden der Polyethylenumhüllung bei der Erstellung von Hausanschlüssen fordert, wurde in der Vergangenheit häufig die Umhüllung mit vier Einzelschnitten entfernt (Bild 12). Die Endpunkte dieser Schnitte boten insbesondere bei einer weiteren thermischen Schädigung durch den, zum Lösen der Deckschicht üblicherweise eingesetzten Brenner in Kombination mit einer mangelhaften Ausführung der Nachumhüllung Ausgangspunkte für die hier vorgestellte Form der Spannungsrisbildung.

### Die Entstehung des Netzmittels

Um die Entstehung der zur Spannungsrisbildung erforderlichen Netzmittel zu erklären, ist die Wirkung des kathodischen Korrosionsschutzes im Falle einer bis zur Stahloberfläche reichenden Beschädigung näher zu betrachten. Bild 13 zeigt die hier wesentlichen elektrochemischen Reaktionen, die im Fehlstellenbereich einer kathodisch geschützten Stahlleitung zu berücksichtigen sind.

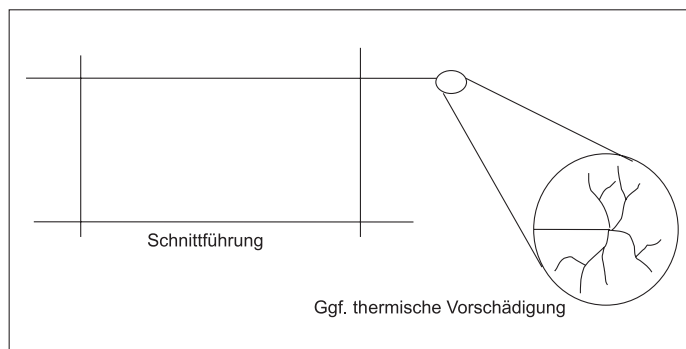
Durch die „Opferanode“, die beim kathodischen Korrosionsschutz als unedler Partner elektrisch leitend mit dem Stahlrohr verbunden ist, wird im Stahl ein „Elektronenüberschuss“ erzeugt, der verhindert, dass Eisen in Kontakt mit dem Bodenmedium unter Elektronenabgabe in Lösung gehen kann. Dieser Elektronenüberschuss erlaubt im Fehlstellenbereich als kathodische Teilreaktion die Umsetzung von Sauerstoff zum Hydroxid. Dabei wird die anodische Teilreaktion räumlich auf die entfernt installierte Opferanode verlagert. Im Falle einer Fehlstelle wird sich ein funktionierender kathodischer Korrosionsschutz durch die intensive Bildung von Alkalihydroxiden und damit durch einen pH-Anstieg des Bodenmediums bemerkbar machen. Der hohe pH-Wert führte beim Zwei-Schicht-System zu einer lokalen Verseifung des damals eingesetzten Klebmaterials und zur Bildung von Netzmitteln (Seifen) im Bereich der Stahloberfläche. Diese mechanistische Betrachtungsweise wird durch die Korrelation der Laborergebnisse bei der Zwei-Schicht-Umhüllung unter kathodischer Polarisation in Salzlösung und unter Einsatz des Netzmittels bestätigt.

Die Trennung von Stahloberfläche und Kleber durch den Einsatz des Epoxidharzprimers verhindert effektiv die Bildung des Netzmittels. Aus diesem Grunde sind derartige Formen der Spannungsrisbildung von dreischichtigen Umhüllungssystemen nicht bekannt.

Die hier beschriebene Wirkung des kathodischen Korrosionsschutzes darf nicht darüber hinwegtäuschen, dass die eigentliche Ur-

**Bild 12:** Das fehlerhafte Einschneiden der Polyethylenumhüllung zur Herstellung von Hausanschlüssen als Ursache für die Kerbwirkung

**Fig. 12:** Notch effect caused by an inappropriate cut into the coating incision when making a service connection



che für das Schadensbild in den Umhüllungsschäden zu sehen ist. Korrosionen waren in Einzelfällen bei unzulässiger Fremdstrombeeinflussung zu beobachten. Eine Vergrößerung der Fehlstellenoberfläche durch die Rissbildung ist je nach Fehlstellengröße eher positiv zu bewerten. Der Metallabtrag im Fehlstellenbereich ist direkt proportional zum austretenden Fremdstrom. Je kleiner eine Fehlstelle unter Fremdstrombeeinflussung wird, umso konzentrierter ist zwangsläufig der Metallabtrag. Sind die in den Regelwerken festgelegten Schutzkriterien des kathodischen Korrosionsschutzes erfüllt, wird die Korrosion des Grundmaterials sowohl im Fehlstellen- als auch im Rissbereich unterbunden. Darüber hinaus sind über den kathodischen Korrosionsschutz Fehlstellen in der Polyethylenumhüllung von der Erdoberfläche aus problemlos zu lokalisieren. Dieser Möglichkeit der Zustandserfassung erdverlegter Stahlrohrleitungen sind letztlich die hier vorgestellten Erkenntnisse zu verdanken.

### Die Ursache von Spannungen

Bei der Bewertung von Spannungen in der Polyethylenumhüllung ist ein weiterer Blick in die bereits angesprochene Schadensstatistik hilfreich. Bild 14 zeigt die Auswertung

der Schäden mit Blick auf die vorgefundenen Risslängen in der PE-Umhüllung. Die überwiegende Zahl der Risse beschränkt sich auf einen Längenbereich von bis zu 2 m. Bei der genaueren Bewertung der Schäden in Abhängigkeit von den Rohrdimensionen zeigt sich, dass im Falle der Dimensionen oberhalb von DN 200 die Zahl der großen Risslängen deutlich zunimmt (Bild 14). Hier liegen offensichtlich höhere Spannungen in der Umhüllung vor, als im Falle der kleineren Rohrdimensionen.

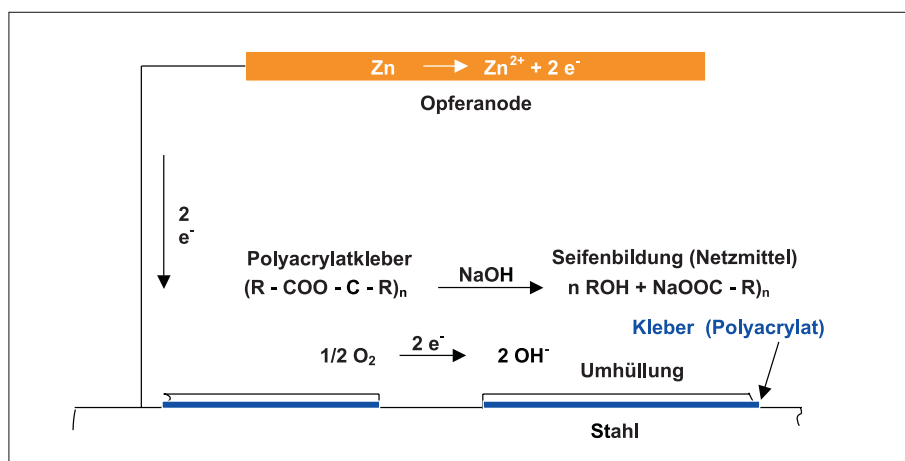
Die Frage der in den Polyethylenumhüllungen eingelagerten Spannungen ist mit Blick auf die Produktionsbedingungen offensichtlich. Die Abkühlgeschwindigkeit der Rohre hängt maßgeblich von den Stahlwanddicken, der Dimension und der Umhüllungsgeschwindigkeit ab. Eine besondere Rolle spielen auch die unterschiedlichen Wärmeausdehnungskoeffizienten von Polyethylen und Stahl. Die eingelagerten Spannungen sind offensichtlich bei den größeren Rohrdimensionen am stärksten ausgeprägt.

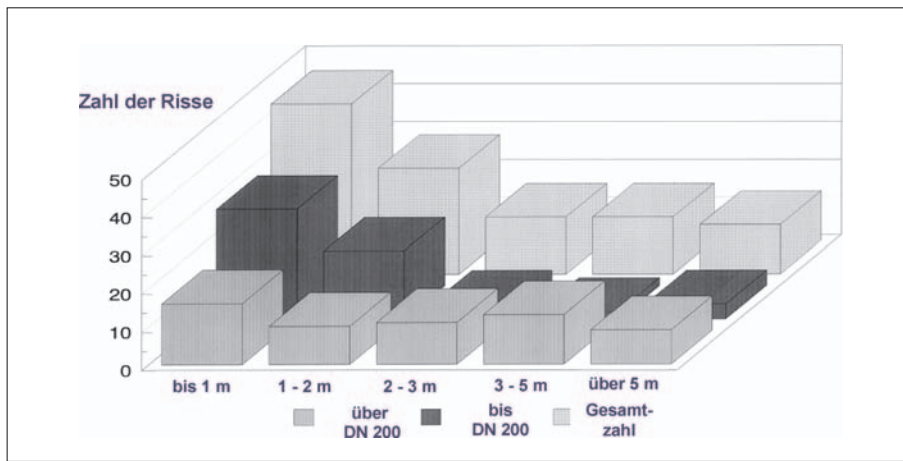
### Schlussfolgerungen

In diesem Beitrag wurde die Spannungsris-korrosion des Polyethylens am Beispiel der Umhüllung von Stahlrohren behandelt. Von

**Bild 13:** Die Wirkung des kathodischen Korrosionsschutzes

**Fig. 13:** The effect of cathodic corrosion protection





**Bild 14:** Vergleich der Risslängen in Abhängigkeit von der Rohrdimension

**Fig. 14:** Comparison of crack lengths as a function of pipe size

den bereits bekannten Formen einer Rissbildung aufgrund der Versprödung z. B. durch Licht- oder Wärmealterung sowie im Falle einer mechanischen Beschädigung der Umhüllung wurde hier eine dritte Form der Spannungsrisssschäden vorgestellt, die letztlich als Sekundärschädigung ausgehend von einer bereits vorliegenden Fehlstelle unter ganz bestimmten und nur in Kombination wirksamen Randbedingungen in der Polyethylenumhüllung einer Stahlleitung auftreten kann und mechanistisch gesehen der Spannungsrissbildung in Gegenwart von Netzmitteln entspricht. Aufgrund des kathodischen Korrosionsschutzes besteht für solche Leitungen keine Gefahr, wenn die Schutzkriterien erfüllt sind [8]. In Deutschland wurden in den letzten 20 Jahren nur noch Umhüllungssysteme hergestellt, die diese Spannungsrissbildung nicht mehr zulassen.

Spannungsrisse, die an versprödeten Polyethylenumhüllungen beobachtet wurden, resultieren aus lokalen, die zulässigen Festigkeiten und die Bruchdehnung überschreitenden Beanspruchungen. Ohne unzulässige lokale Beanspruchungen besteht keine Gefahr, da die Werkstoffkombination von Polyethylen und Stahl während des Betriebes auch keiner derartigen Dehnungsbeanspruchung unterliegt. Unter funktionalen Aspekten ist im Falle der Stahlrohrumhüllung die Barrierewirkung gegenüber korrosiven Bestandteilen des Erdreiches gefordert. Die Umhüllung hat keinerlei Bedeutung für die Statik dieser Werkstoffkombination. Die vorliegenden Ergebnisse zeigen, dass die Langzeitaussagen von Prüfungen speziell in der Frage der Materialalterung, aufgrund der üblicherweise angewendeten höheren Temperaturen selbst unter qualitativen Gesichtspunkten zweifelhaft sind. Das Zeitstandsverhalten des Polyethylens wird nicht allein durch die Zeitstandsfestigkeit, sondern durch die Gesamtheit der mechanischen Eigenschaften be-

stimmt. Der alterungsbedingte Abbau der Bruchdehnung unter den Praxisbedingungen einer erdverlegten Rohrleitung wird in Kurzzeituntersuchungen bei erhöhter Temperatur nicht erfasst. Höhere Prüftemperaturen führen zu einer Veränderung des Polymergefüges und damit auch zu einer Änderung des Alterungsverhaltens.

Ein besonderes Problem stellt die Prüfung einer Umhüllung in Bezug auf die Spannungsrissbeständigkeit dar. Es existiert keine Prüfung, die umfänglich in der Lage ist, die in der Praxis relevanten Aspekte zu erfassen. Bezogen auf die Polyethylenumhüllung von Stahlrohrleitungen heißt es dazu in den Erläuterungen der zurzeit gültigen Fassung der DIN 30670:

„Im Arbeitsausschuss bestand Einvernehmen, dass eine Prüfung der Rissbeständigkeit der PE-Umhüllung in die Norm aufgenommen werden sollte. Zu diesem Themenkreis wurde bereits eine Anzahl von Untersuchungen unter verschiedenen Prüfbedingungen durchgeführt. Bisher konnten noch keine reproduzierbaren, aussagekräftigen Messergebnisse erhalten werden.“

Mit Blick auf die heutige Situation hat sich an dieser Aussage nichts geändert. Die hier vorgestellte Untersuchung schnittverletzter Proben unter kathodischer Polarisation in einer Salzlösung könnte die Basis einer praxisgerechten Prüfung der Polyethylenumhüllung darstellen. Dabei muss jedoch berücksichtigt werden, dass eine Bewertung der Ergebnisse, wie auch im Falle des Netzmittleinsatzes, nur für Polyethylenbauteile möglich ist, deren Gefüge, bzw. deren bruchmechanische Eigenschaften noch keiner Veränderung aufgrund von Alterungsvorgängen unterliegen. Die Rissbildung unter Netzmittleinfluss ist unabhängig von der Alterung des Werkstoffes und kann nur auf das Eigenschaftsprofil des Polymergefüges bezogen sein, das zum Zeitpunkt der Auslagerung

vorliegt. Die besonderen Aspekte einer Änderung des Polymergefüges mit steigender Temperatur und die damit verbundene Änderung des Alterungsverhaltens sind letztlich bei der Bewertung solcher Ergebnisse zu berücksichtigen. Die zur Rissbildung erforderliche Spannung unter Netzmittleinfluss liegt weit unterhalb der sonst zulässigen Werkstoffspannung. Die Kinetik wird hier maßgeblich von Diffusionsprozessen bestimmt und erfasst keinesfalls die Alterung und die damit verbundene Versprödung des Werkstoffes.

Die hier vorgestellten Beispiele für die Spannungsrissbildung und deren Ursachen zeigen, dass aus heutiger Sicht dringender Forschungsbedarf besteht. Es fehlen vor allem Prüfungen, die Aussagen über die Gebrauchstauglichkeit von Polyethylenbauteilen insbesondere mit Blick auf ihr Langzeitverhalten unter den Praxisbedingungen erdverlegter Rohrleitungen ermöglichen.

**Literatur**

- [1] Schmitt, G.: Der Korrosionsbegriff bei nichtmetallischen Werkstoffen; *Materials and Corrosion* 55 (2004) 367–372
- [2] Kiesselbach, G.: Sicherheit und Nutzungsdauer erdverlegter PE-Druckrohrleitungen. Teil 1: Rohrversagen bei Punktlagerungen? *gwf Wasser/Abwasser* (2004) Nr 1
- [3] Kiesselbach, G.: Sicherheit und Nutzungsdauer erdverlegter PE-Druckrohrleitungen. Teil 2: Rohrversagen durch Fremdeinwirkungen? *gwf Wasser/Abwasser* (2004) Nr. 2
- [4] Krietenbrink H.; Kloth, R.: 100 Jahre Nutzungsdauer von PE- Rohrsystemen in der Wasserversorgung; *3R international* 43 (2004) Nr. 10, S. 576f
- [5] Blümich, B.; Casanova, F.; Buda, A.; Kremer, K.; Wegener, T.: Anwendungen der mobilen NMR zur Zustandsbewertung von Bauteilen aus Polyethylen; *3R International* 44 (2005) S. 349-354
- [6] von Baeckmann, W.G.: Kathodische Korrosion von Blei im Erdboden; *Werkstoffe und Korrosion* 20 (1969) S. 578–583
- [7] Kocks, H.-J.: Prüfgrundlagen und Stand der Normen für Stahlleitungs- und Kunststoffrohre – Regelwerke mit zweierlei Maß?; *Rohrleitungen eine unendliche Geschichte?*, Vulkan Verlag Essen, 2004 (Schriftenreihe aus dem Institut für Rohrleitungsbau an der Fachhochschule Oldenburg; Bd. 28)
- [8] Schwenk, W.: Bemerkungen zur Abschätzung von Umhüllungsschäden erdverlegter Stahlrohre aus Potentialgradienten-Messungen; *3R international* 33 (1994) S. 328–337

**Autor:**

**Dr. rer. nat. Hans-Jürgen Kocks**  
Röhrenwerk Gebr. Fuchs GmbH,  
Siegen

Tel. +49(0)271/691-170  
E-Mail: Hans-Juergen.Kocks@mannesmann-fuchs.com

