

## Die Korrosion von Polyethylen

# Optimierungspotenzial der Polyethylenumhüllung von Stahlrohren

### Corrosion of polyethylene

## Potential for optimization of polyethylene coatings for steel pipes

Von Dr. Hans-Jürgen Kocks

*Polyethylen als wirksamer Korrosionsschutz von Stahlleitungen ist heute „Stand der Technik“. Mit Blick auf eine Vielzahl von Werkstoffmodifikationen stellt sich jedoch die Frage, welches Optimierungspotenzial sich in der Wahl des richtigen Polyethylentyps für die Umhüllung von Stahlrohren verbirgt. Polyethylen wird im erdverlegten Rohrleitungsbau seit nunmehr fast 50 Jahren eingesetzt. Es ist an der Zeit den Werkstoff in Bezug auf das Alterungsverhalten etwas genauer zu studieren.*

*Polyethylene is nowadays "state-of-the-art" in effective anti-corrosion protection of steel pipelines. In view of a large range of material modifications, however, the question arises of the optimization potential available in the selection of the correct polyethylene type for coating of these pipes. Polyethylene has now been in use in the field of buried pipeline engineering for almost fifty years. Now is an appropriate time to examine this material for its aging behaviour in greater detail.*

### Einleitung

Der Einsatz von Polyethylen zur Umhüllung von Stahlrohren für den Transport von Trink- und Abwasser bzw. Rohren zum Transport wassergefährdender Medien und Gase ist anerkannter Stand der Technik. Polyethylen als Umhüllungsmaterial hat das früher standardmäßig eingesetzte Bitumen inzwischen vollständig verdrängt. Ende der 1950er 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 zustandsorientiert überwacht und geschützt werden.

Die ersten Polyethylenumhüllungen wurden im so genannten 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.

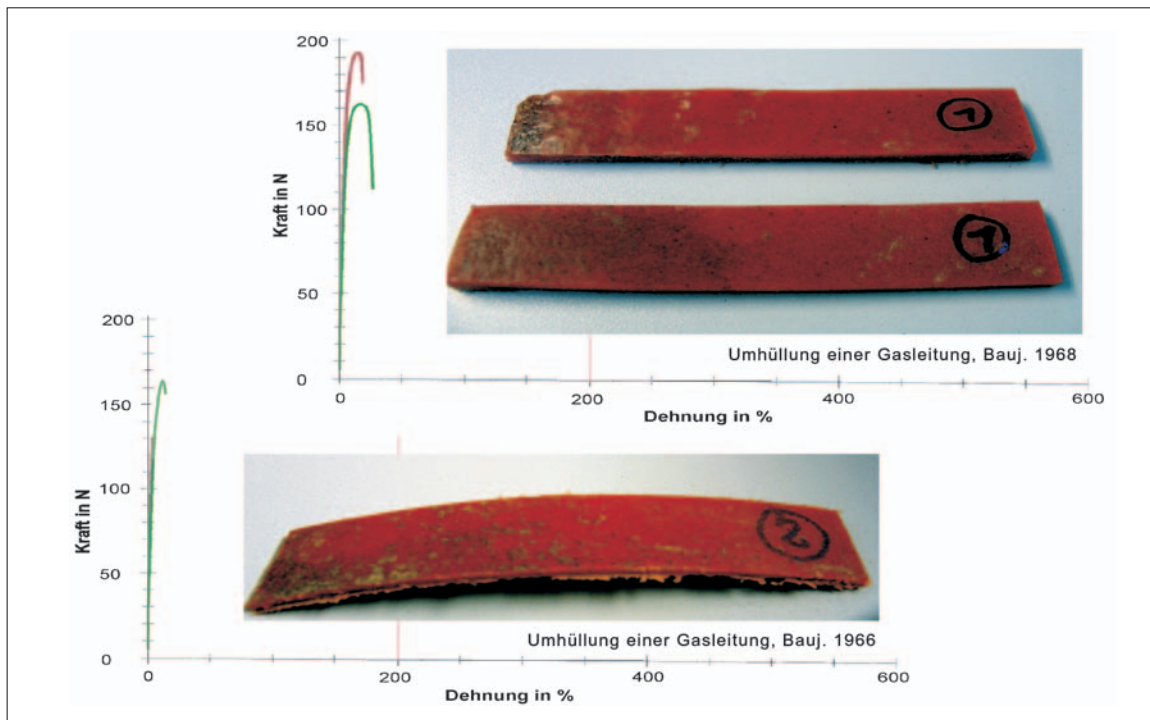
Die heute gebräuchlichen Schlauch- und Wickelextrusionsverfahren werden seit Mitte der 1960er Jahre eingesetzt und haben das Sinterverfahren im Bereich der Rohrumhüllungen inzwischen vollständig verdrängt. So wurde anfänglich eine Zweischichtumhüllung bestehend aus Kleber und Polyethylen hergestellt. Ab Mitte der 1980er Jahre kamen Dreischichtsysteme zum Einsatz. Die Dreischichtumhüllung verfügt 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 oder mit Blick auf die höheren Festigkeiten speziell für Rohre zum Bau von Transportleitungen im Einsatz.

Ein wesentlicher Vorteil des Polyethylens liegt in der chemischen Beständigkeit, die den Einsatz dieser Rohrumhüllungen in allen

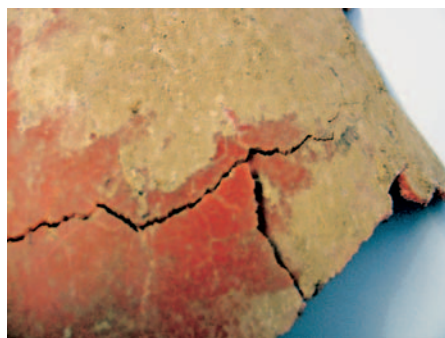
Bodenaggressivitätsstufen ermöglicht. Wesentliche Funktion der Polyethylenschicht ist die Barrierewirkung für den Grundwerkstoff Stahl gegenüber allen korrosionsrelevanten Bestandteilen des Bodens. Die chemische Beständigkeit des Materials verhindert den Abbau der Barrierschichten, darf jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, dass Polyethylen wie fast jedes Material einer eigenen Form der Korrosion unterliegt.

Die Prüfung der Korrosionsbeständigkeit bzw. die Alterungsbeständigkeit des Polyethylens ist Gegenstand der Lieferbedingungen für Polyethylenumhüllungen. Bereits 1974 wurde beispielsweise 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.

In 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 bei 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 DIN 30670 für die Lichtalterung ein definierter Energieeintrag von 7 GJ mit zusätzlicher Bewitterung, d. h. mit zusätzlichem Befeuchten der Proben während der Auslagerung, 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. Die hier genannten Prüfungen erheben dabei nicht den Anspruch einer Bewertungsmöglichkeit in Be-



**Bild 1:** Reißdehnung von gesinterten Polyethylenumhüllungen  
**Fig. 1:** Ultimate elongation of sintered polyethylene coatings



**Bild 2:** Gesinterte Umhüllung unter Einfluss äußerer Beanspruchungen  
**Fig. 2:** Sintered coating under the influence of external loadings



**Bild 3:** Sprödbrech an einer extrudierten Polyethylenumhüllung  
**Fig. 3:** Brittle fracture in an extruded polyethylene coating

zug auf das Langzeitverhalten des Polymeren, sondern dienen als Mindestanforderung einer Stabilisierung des Einsatzmaterials.

Im aktuell diskutierten Normentwurf der ISO 21809-1 wird neben der Prüfung von Licht- und Wärmealterung auch die Ermittlung der OIT (Oxidation Induction Time) gefordert. Dabei wird die Polyethylenprobe einer Sauerstoffatmosphäre bei einer Temperatur von 210 °C ausgesetzt und der Zeitpunkt der Materialzerstörung ermittelt. Die Prüfung der OIT erlaubt jedoch nur eine Beurteilung der Produktionsstabilisatoren. In Bezug auf das Alterungsverhalten unter Betriebsbedingungen hat diese Prüfung keine Aussagekraft. Dies bestätigen u. a. hervorragende OIT-Werte von unter Betriebsbedingungen gealterten Polyethylenproben mit deutlich reduzierter Reißdehnung [1]. Während zur Prüfung der Wirksamkeit einer Produktionsstabilisierung die Erfassung der Reißdehnung nach der Ex-

trusion auch schon in den verschiedenen Versionen der DIN 30670 gefordert wurde, ist im aktuellen Entwurf der ISO 21809-1 darüber hinaus der Vergleich von Reißdehnung und Schmelzindex des Vormaterials mit den entsprechenden Werten der Umhüllung nach der Extrusion vorgesehen.

Hintergrund der hier diskutierten Alterungs- bzw. Korrosionseigenschaften des Polyethylens sind Schadensfälle von Umhüllungen, die nachweislich auf den Abbau der Reißdehnung und damit einer Versprödung des Materials zurückzuführen sind. Solange die umhüllten Rohrleitungen vorschriftsmäßig in steinfreies Material gebettet und keine zusätzliche Lasten wie Punktlasten oder Punktlagerungen auf die Rohrumhüllung einwirken, wird die Barrierewirkung dieses Materials trotz deutlich reduzierter Reißdehnung nicht beeinträchtigt (**Bild 1**).

Dieser Befund hat Gültigkeit solange keine unzulässigen Beanspruchungen lokale Spannungsspitzen verursachen. Dabei entstehen in der Folge netzartige Risse in der Umhüllung (**Bild 2**).

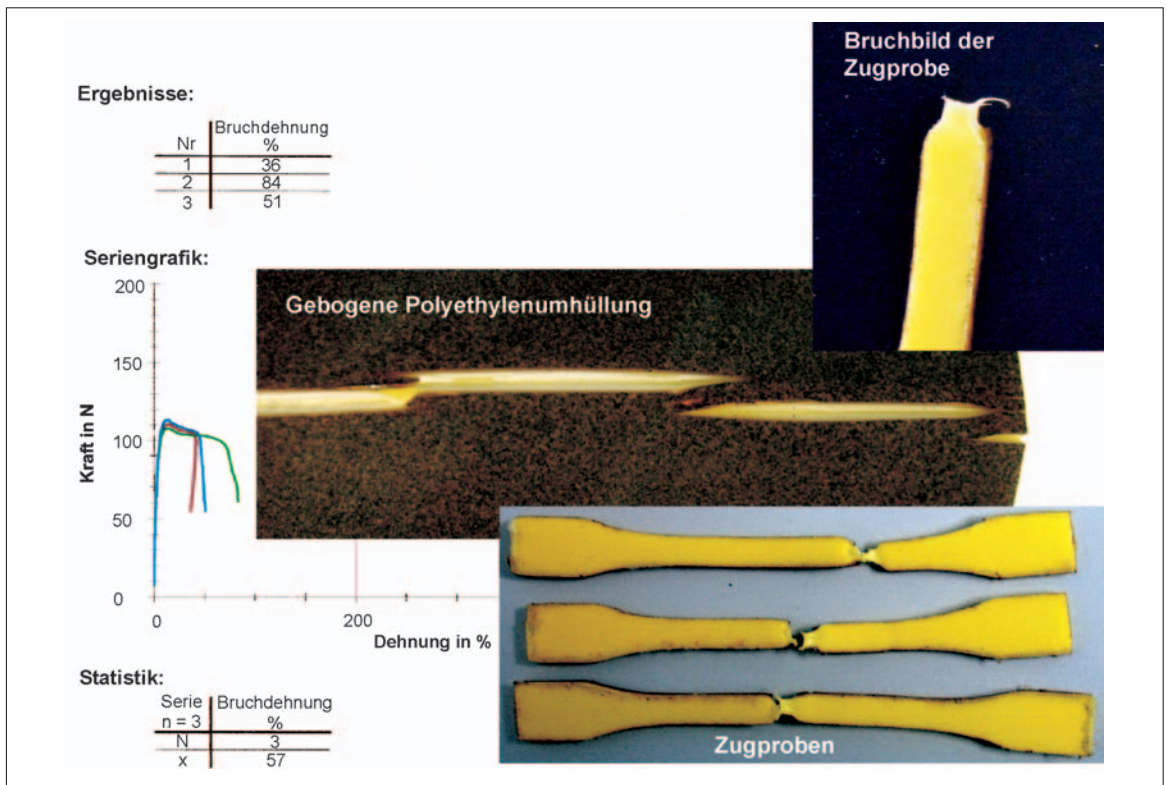
Auch bei den extrudierten Umhüllungen sind solche Schäden unter Punktlasten und Punktlagerung bekannt. **Bild 3** zeigt die für solche Schäden typische „fischgrätenartige“ Rissbildung der Polyethylenumhüllung. In diesem Fall handelt es sich um eine Umhüllung von Rohren, die 1979 verlegt wurden. Bei der Bewertung der Reißdehnung von derart gealtertem Material fällt auf, dass in den Zugproben ein eher zäher Bruch mit einer Reißdehnung zwischen 50 und 100 % beobachtet wird, während beim Biegen der Proben das Material spröde bricht. Beim Zugversuch schnürt sich das Material ein und reißt erst nach einer gewissen Dehnung (**Bild 4**). Das zähe Bruchverhalten beim Zugversuch steht im Widerspruch zum spröden Bruchverhalten beim Biegen des Materials. Dieser auffallende Widerspruch bedarf einer genaueren Betrachtung der Randfaserdehnung beim Biegevorgang.

### Randfaserdehnung

Bei der Bewertung von Lastfällen der Praxis sind beim Polyethylen zwei Lastbereiche zu unterscheiden. **Bild 5** zeigt das typische Ergebnis eines Zugversuches an einem HDPE-Typ. Der Lastfall im Bereich unterhalb der Streckspannung bis zu einer Dehnung von 8 bis 10 % (grün) wird beispielsweise für die Innendruckauslegung von Kunststoffrohren genutzt und im Rahmen von Zeitstandindendruckprüfungen auch langfristig bewertet.

**Bild 4:** Untersuchung der Reißdehnung einer versprödeten Polyethylenumhüllung

**Fig. 4:** Investigation of the ultimate elongation of an embrittled polyethylene coating

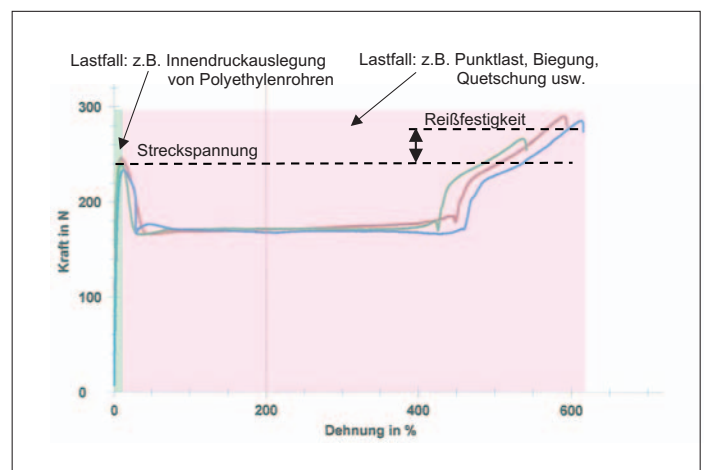


Entscheidend für das Werkstoffverhalten ist dabei die Frage mit welcher Geschwindigkeit ein Lastaufbau erfolgt. Mit abnehmender Betriebstemperatur nimmt auch die Geschwindigkeit ab, mit der ein Spannungsausgleich beim Polyethylen aufgrund der viskoelastischen Eigenschaften realisiert werden kann. Bei hohen Temperaturen wird dieser Spannungsabbau stark begünstigt. Hier kann der Werkstoff beispielsweise im Fall einer Biegung lokal auftretende Spannungsspitzen glätten. Über dieses Werkstoffverhalten wurde am Beispiel der im Werkstoff vorhandenen Eigenspannungen bereits ausführlich berichtet [2].

Ist die Geschwindigkeit des Lastaufbaus zu groß, werden zwangsläufig das Spannungsmaximum und damit die zulässige Dehnung von 8 bis 10 % (bei Raumtemperatur) lokal überschritten. Solche Verhältnisse sind bei erdverlegten Rohrleitungen z. B. im Fall einer Kombination von Punktlasten oder Punktlagerungen mit Bodensetzungen zu berücksichtigen, wie sie sich durch den Wechsel von Nass-trocken Phasen oder bei Frost-Tau-Wechsel ergeben können. Dieser Bereich oberhalb der Werkstoffdehnung von etwa 10 % bis zur Reißfestigkeit (rot) berührt Lastfälle wie das Quetschen oder das im folgenden Modellfall betrachtete Biegen, Lastfälle, die in ihrer Bewertung einer genaueren Betrachtung der Randfaserdehnung bedürfen. Bereits mit einer einmaligen Überschreitung der Dehngrenze von 8 bis 10 % wird der auf niedrigem Spannungsniveau erfolgende Streckvorgang initiiert. Der Werkstoff verlässt unter Normalbedingungen irreparabel den mit Blick auf das Langzeitver-

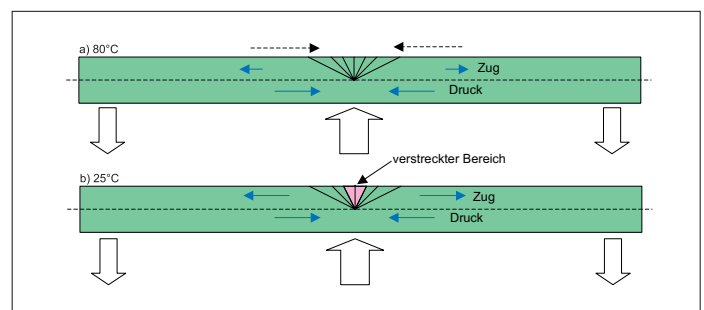
**Bild 5:** Zugversuche an Proben aus HDPE (DIN 30670)

**Fig. 5:** Tensile tests performed on HDPE specimens (DIN 30670)



**Bild 6:** Biegung von Polyethylen bei unterschiedlichen Temperaturen

**Fig. 6:** Flexure of polyethylene at various temperatures



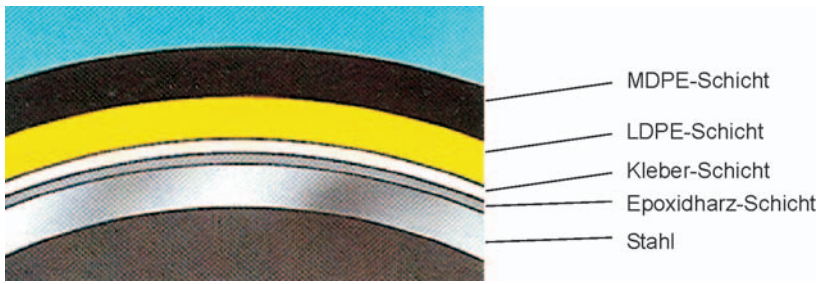
halten kalkulierbaren Bereich seiner mechanischen Eigenschaften (**Bild 6**).

Für ein Werkstoffverhalten, das mit steigender Dehnung auch eine zunehmende Werkstoffspannung erkennen lässt, ist die Betrachtung der Randfaserdehnung eher un-

praktisch (grün). Solch ein Werkstoffverhalten zeigt Polyethylen vor allem bei hohen Temperaturen (**Bild 6a**).

Dieses Verhalten ändert sich bei Raumtemperatur deutlich (**Bild 6b**). Im Bereich der Streckspannung bei einer Dehnung im Bereich von 8





**Bild 7:** Stahlrohrumhüllung aus LDPE mit zusätzlicher Schicht aus MDPE als Schutzschicht (Produktinformation Röhrenwerk Gebr. Fuchs GmbH 1988)

**Fig. 7:** LDPE coating for a steel pipe, with additional protective layer consisting of MDPE (product information from Röhrenwerk Gebr. Fuchs GmbH 1988)

bis 10 % ergibt sich ein Spannungsmaximum (vergl. Bild 5). Wird beim Biegen diese Dehngrenze lokal überschritten, opfert sich das Material zugunsten der Anteile, die noch unterhalb dieser Dehngrenze verblieben sind und wird aufgrund der dazu erforderlichen niedrigeren Spannung vollständig verstreckt (rot). Im verstreckten Zustand steigt dann die Spannung wieder an (vergl. Bild 5). Erreicht die Spannung die Streckspannung kann weiteres noch ungerecktes Material über die Dehngrenze von 10 % hinaus in diesen Prozess einbezogen werden und der Streckvorgang beginnt von neuem. Beim Biegen stellt sich somit die spätere Dehnung in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit des Lastaufbaus nicht „fließend“ sondern „schubweise“ ein. Dieses Werkstoffverhalten ist insofern kritisch, da ein Bauteil makroskopisch betrachtet, bei unkritischer Randfaserdehnung lokal bereits vollständig verstreckte Bereiche aufweist (roter Bereich).

Polyethylen kann bei Raumtemperatur und vor allem bei den Temperaturen im Erdreich nur dann in dieser Weise reagieren, solange, vereinfacht dargestellt, die Reißfestigkeit unter Berücksichtigung der wirksamen Geometrien oberhalb der Streckspannung liegt (vergl. Bild. 5). Wird die Reißfestigkeit aufgrund

von Alterungsvorgängen abgebaut, ist der Werkstoff nicht mehr in der Lage weiteres Material über die Streckspannung hinaus in den Dehnprozess zu integrieren und damit einer einwirkenden Kraft durch Dehnung auszuweichen. Das Material reißt. Der Abbau der Reißdehnung ist mit Blick auf die Werkstoffalterung somit kein kontinuierlicher Prozess, sondern für einen gegebenen Lastfall grenzwertig. Es ändern sich die bruchmechanischen Eigenschaften und die Gefahr der Rissbildung nimmt zu.

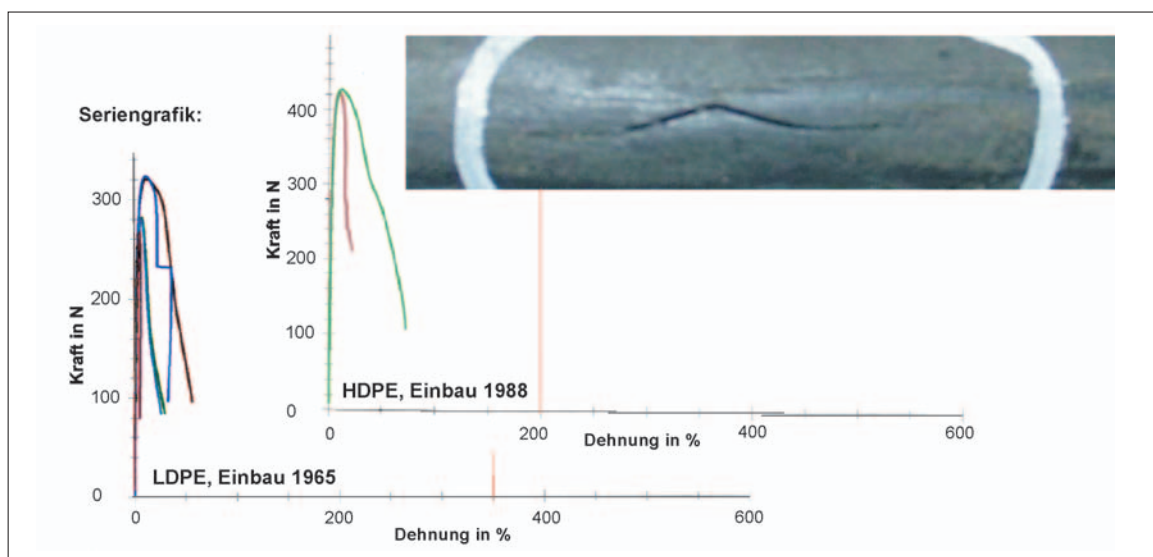
Im betrachteten Modellfall wird darüber hinaus deutlich, dass die Rissinitiierung auf der dem Druckpunkt abgewandten Seite erfolgt (Abb. 6b) [3, 4]. In der Vergangenheit wurde häufig als mechanische Schutzmaßnahme auf die Umhüllung aus LDPE eine zweite härteste Schicht aus MDPE extrudiert (**Bild 7**). Diese zweite Schicht hat zwar in Bezug auf die Tiefe der Riefen, beispielsweise beim Rohreinzug eine gewisse Schutzfunktion, verhindert jedoch keinesfalls die Rissinitiierung im Falle einer Punktlast oder Punktlagerung, wenn die Reißfestigkeit des darunter liegenden LDPE's alterungsbedingt reduziert ist. Aus diesem Grunde wird heute ge-

nerell eine zusätzliche Zementmörtelummantelung für derartige Lastfälle empfohlen.

Im Zugversuch bei Raumtemperatur ist der Wandel bruchmechanischer Eigenschaften nachweisbar. Dabei ist zu berücksichtigen, dass die im Zugversuch (hier nach DIN 30670) ermittelte Dehnung des Materials primär von der Probengeometrie abhängt. Solange gegenüber der Streckspannung eine ausreichende Reißdehnung vorliegt, wird sich ein Probestab speziell im Falle der hier betrachteten extrudierten Polyethylentypen für den erdverlegten Rohrleitungsbau vollständig verstrecken. Fällt die Reißfestigkeit unter den für diesen Lastfall erforderlichen Grenzwert ab, ist die erreichte Dehnung primär davon abhängig, welcher Abschnitt der symmetrisch geformten Zugprobe etwa zeitgleich die Dehngrenze von 8 bis 10 % überschreitet. Lediglich dieser Bereich wird im Zugversuch verstreckt und zeigt die typische Einschnürung im Prüfbereich. Eine Dehnung mit Werten oberhalb der für die Streckspannung relevanten 8 bis 10 % bedeutet daher nicht zwangsläufig, dass keine Gefahr für eine alterungsbedingte Rissbildung besteht. Ein „versprödetes“ Material kann im Zugversuch immer noch ein scheinbar zähes Bruchverhalten zeigen und erst nach einer gewissen Dehnung versagen. Dass sich unter diesen Umständen bei den Messungen deutliche Schwankungen in der ermittelten Dehnung ergeben können, ist zu erwarten. In jedem Fall lässt sich bei Materialien, die im Neuzustand beim Zugversuch vollständig verstreckt werden, über die unvollständige Verstreckung des Prüfbereiches der alterungsbedingte Abbau der Reißfestigkeit nachweisen auch wenn die Ausgangswerte für die Reißfestigkeiten nicht bekannt sind.

### Alterungsverhalten des Polyethylens

Die Wahl des Einsatzmaterials für die Polyethylenumhüllung orientiert sich schon seit



**Bild 8:** Zugversuche nach DIN 30670 an Rohrproben aus LDPE und HDPE  
**Fig. 8:** Tensile tests in accordance with DIN 30670 on LDPE and HDPE pipe specimens

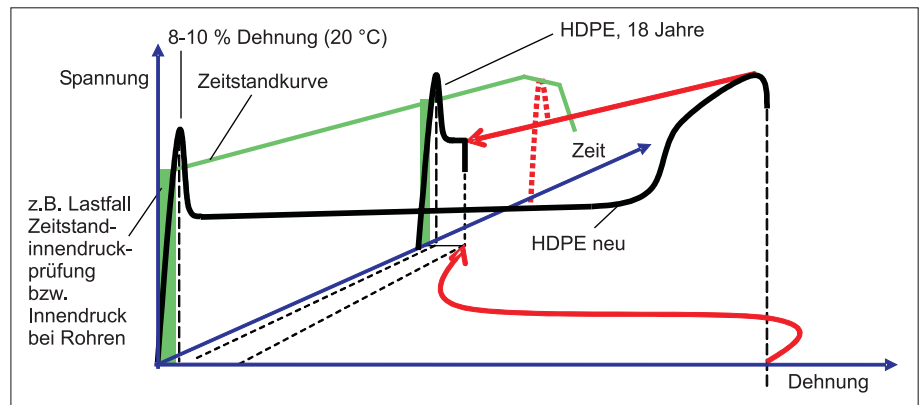
Jahren maßgeblich an den Materialentwicklungen bei Kunststoffrohren. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass zeitweise identische Materialien für Rohre und Umhüllungen eingesetzt wurden.

**Bild 8** zeigt Beispiele von Zugversuchen an unter den Bedingungen erdverlegter Bauteile ausgelagerter Rohrproben auf LDPE- und HDPE-Basis – Werkstoffe, wie sie für den Rohrleitungsbau üblich sind. Auffallend ist die Tatsache, dass der Effekt einer abnehmenden Reißfestigkeit und Reißdehnung beim jüngeren Werkstoff HDPE im Vergleich zum LDPE deutlich früher zu beobachten ist. Während beim LDPE der Abbau der Reißdehnung nach etwa 30 bis 35 Jahren feststellbar wird, ist dieser beim HDPE bereits nach weniger als 20 Jahren Auslagerungsdauer erkennbar. Dieser Effekt wurde nicht nur in eigenen Messungen nachgewiesen, sondern ist auch in der Literatur beschrieben [1]. Es wird über die unvollständige Verstreckung des Prüfbereiches und damit über die Abnahme der Reißdehnung von gealterten Rohrproben berichtet. Auch hier wurde die Abnahme der Reißdehnung bei den untersuchten Rohren aus PE 80 (HDPE) im Vergleich zu den Rohren aus PE 63 (LDPE) deutlich früher beobachtet.

**Bild 9** zeigt die im Zugversuch nachgewiesenen alterungsbedingten Materialveränderungen bzw. die Korrosion des Polyethylens an einer neuwertigen und 18 Jahre alten Probe aus HDPE. Während der Bereich bis zur Dehngrenze von max. 10 % im hier betrachteten Segment der Nutzungsdauer vom Alterungsprozess unberührt bleibt, bauen sich die Reißfestigkeit und als Sekundäreffekt, die Reißdehnung ab. Dabei ist berücksichtigt, dass entsprechend der bereits beschriebenen Effekte der Abbau der Reißdehnung keinen kontinuierlichen Verlauf nimmt, sondern bei Unterschreitung eines vom jeweiligen Lastfall abhängenden Grenzwertes für die Reißfestigkeit sprunghaft abnimmt.

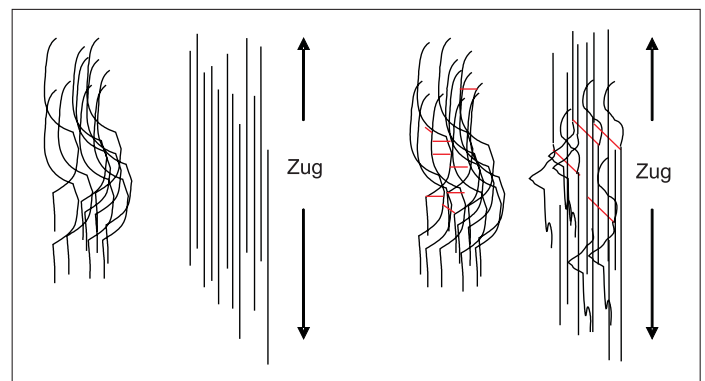
Beim oxidativen Abbau des Polyethylens spielt der Kettenabbau im Gegensatz beispielsweise zum Polypropylen anfänglich nur eine untergeordnete Rolle. Der oxidative Abbau führt primär zu Kettenverlängerungen und Kettenverzweigungen [5]. Die Verknüpfungen zwischen den Molekülketten verhindern im Fall einer Zugbeanspruchung die Einbindung aller Ketten in den Dehnungsprozess. Die Reißfestigkeit nimmt mit zunehmender Zahl an Verknüpfungen entsprechend ab (**Bild 10**).

Mit dem alterungsbedingten Abbau der Reißfestigkeit ist der einleitend beschriebene Wechsel der bruchmechanischen Eigenschaften bei Raumtemperatur verbunden. Üblicherweise werden Alterungsvorgänge bei Rohren aus Polyethylen für den Bereich unterhalb der Dehngrenze von 8 bis 10 % durch Zeitstandinnendruckversuche untersucht.



**Bild 9:** Korrosionsverhalten von HDPE  
**Fig. 9:** The corrosion performance of HDPE

**Bild 10:** Zugkraftverteilung an neuwertigem und einem gealterten Polyethylen  
**Fig. 10:** Tensile-force distribution in a new and an aged polyethylene



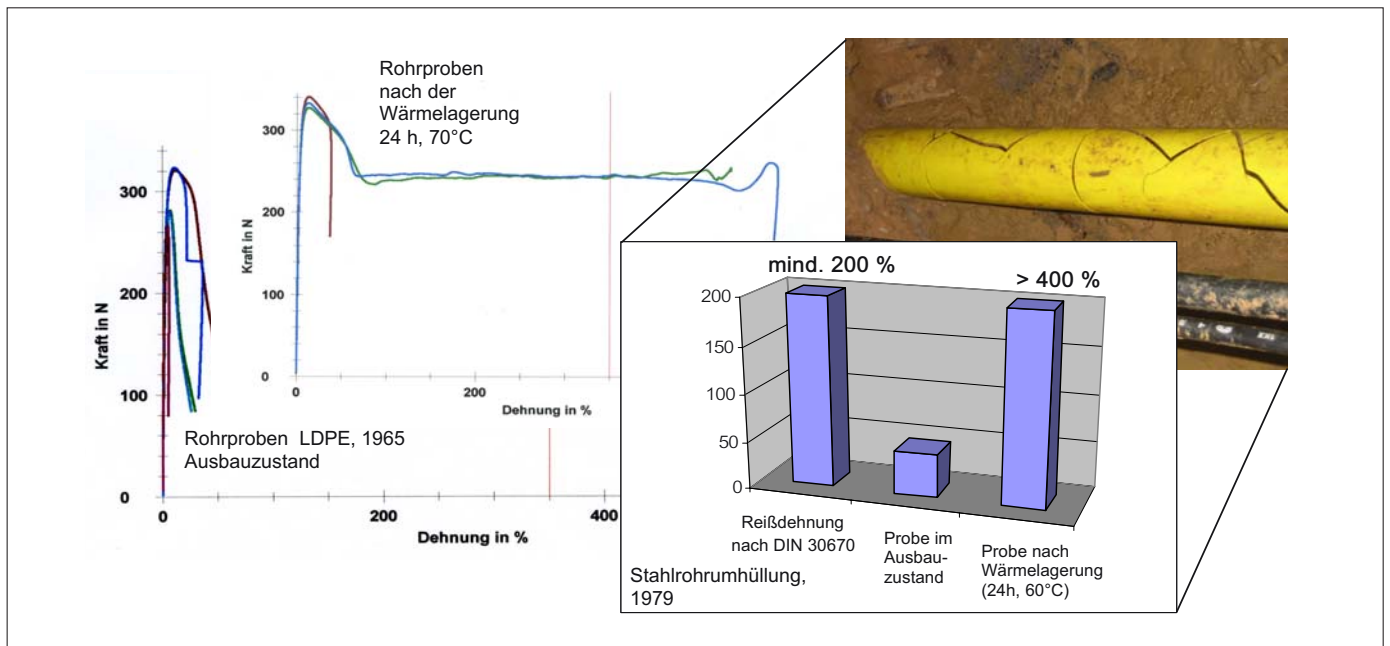
Die theoretisch denkbare Lösung einer Bewertung von Vormaterialien für die Polyethylenumhüllung als extrudierte Hohlkörper im Zeitstandinnendruckversuch ist nicht zielführend, da unter diesen Prüfbedingungen Korrosionsvorgänge des Polyethylens zwangsläufig erst sichtbar werden, wenn der Werkstoff mit Blick auf Lastfälle wie Punktlasten, Punktlagerungen, Quetschungen, Biegungen usw. seine Gebrauchstauglichkeit bereits vollständig eingebüßt hat. Über die Zeitstandinnendruckprüfung werden Veränderungen bis zur Streckspannung erfasst. Es fehlt jegliche Information über die zeitliche Änderung der Reißfestigkeit und Reißdehnung und damit das Zeitstandsverhalten jenseits der Grenze eines über die Werkstoffdehnung von 8 bis 10 % hinaus beanspruchten Materials.

Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass sich speziell im Fall gealterter Materialien auch schon nach kurzer Wärmelagerung die mechanischen Eigenschaften drastisch verändern [6]. So kann beispielsweise durch Wärmelagerung die Reißfestigkeit eines gealterten LDPE's von Werten unter 100 % Dehnung auf über 400 % angehoben werden (**Bild 11**).

Dieses Werkstoffverhalten wurde sowohl für gealterte Proben der Rohrumhüllung, als auch für Rohrproben aus LDPE nachgewie-

sen. Es ist nicht auszuschließen, dass im hier betrachteten Stadium der Alterungsvorgänge die Versprödung primär in den amorphen Bereichen des teilkristallinen Polyethylengefüges erfolgt. Durch die Wärmebehandlung können sich die immobilisierten amorphen Bereiche durch Umlagerung zu den kristallinen Bereichen und ehemals kristalline Bereiche zu neuen amorphen Bereichen ausbilden, die das ursprüngliche Materialverhalten wieder ermöglichen.

In der Literatur wurde über den Effekt berichtet, dass gealterte Rohrproben trotz Abnahme der Reißdehnung erneut die Zeitstandinnendruckprüfung bestehen [1]. In Unkenntnis des Betriebes und ohne Berücksichtigung des Abbaus von Reißfestigkeit und Reißdehnung wären solche Rohre erneut für eine Nutzungsdauer von 50 Jahren freigegeben worden. Auch dieser scheinbare Widerspruch ließe sich durch Materialveränderungen unter Wärmeeinwirkung erklären. Dabei ist jedoch auch zu berücksichtigen, dass der Zeitstandinnendruckversuch darüber hinaus keine Rückschlüsse über die Geschehnisse jenseits der Dehnung von 8–10 % zulässt. Eine Rehabilitation des Werkstoffes ist durch die Wärmebehandlung möglich. Aus diesem Grunde können Prüfungen unter Wärmeeinwirkung keine für die Praxis verwertbaren Informationen über gealtertes Material liefern. Prinzipi-



**Bild 11:** Zugversuche nach DIN 30670 an unter den Bedingungen erdverlegter Bauteile gealterten Rohrproben und Umhüllungen aus LDPE vor und nach der Wärmelagerung  
**Fig. 11:** Tensile tests in accordance with DIN 30670 on pipe specimens and LDPE coatings aged under buried-component conditions before and after hot aging

ell sind unter diesem Blickwinkel auch die Prüfungen an neuen Materialien in Bezug auf ihre Langzeitaussagekraft für die Praxis kritisch zu hinterfragen.

Auch Netzmitteluntersuchungen können weder quantitativ noch qualitativ zur Klärung dieser Fragestellung beitragen. Die Prüfungen an neuwertigen Materialien sind nicht auf ein gealtertes Material übertragbar, dessen Bruchverhalten bzw. dessen bruchmechanische Eigenschaften sich wie im vorliegenden Fall bereits im Laufe von 20 Jahren grundlegend ändern. Auch darauf wird in der Literatur eindringlich hingewiesen [7, 8, 9]. Darüber hinaus wird im Fall der Prüfung unter Netzmitteleinfluss ein rein physikalischer Effekt, nämlich die Diffusion eines netzmittelbehafteten Mediums in das Polymergefüge, betrachtet, während die eigentlich zu bewertende Alterung des Materials ein chemischer Prozess ist [5, 10]. Die oftmals angesprochenen Korrelationen zwischen

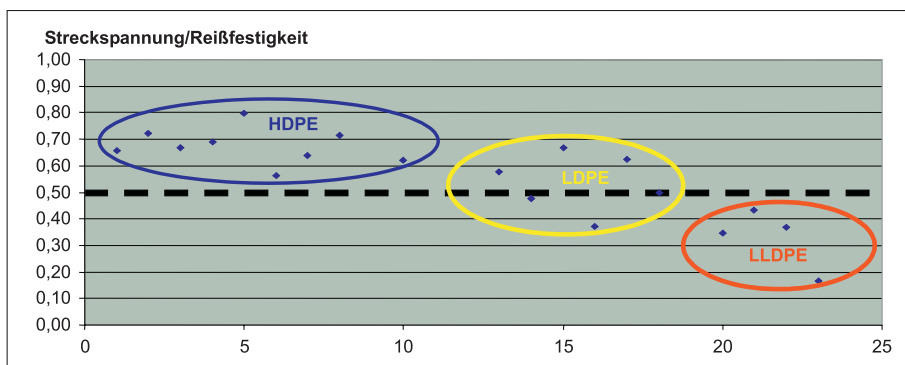
den Prüfungen der Zeitstandfestigkeit und den Untersuchungen unter Netzmitteleinfluss beruhen auf eine gleiche lineare zeitliche Abhängigkeit der beiden unterschiedlichen Versagensmechanismen. Die zu bewertende Änderung der Randbedingungen für einen der Prozesse ist mit dem Anderen zwangsläufig nicht zu erfassen. Dies zeigt auch die Tatsache, dass speziell im Rahmen zu bewertender Materialeigenschaften jenseits der Randfaserdehnung von 8 bis 10 % beispielsweise unter Punktlast, die publizierten Ergebnisse von Prüfungen in Gegenwart von Netzmitteln in Bezug auf die Langzeitbeständigkeit das offensichtlich günstigere Verhalten der früher verwendeten LDPE-Typen gegenüber den jüngeren HDPE-Typen erst gar nicht widerspiegeln.

Unter Berücksichtigung der mechanischen Kennwerte der Polyethylentypen wird das tendenziell schlechtere Alterungsverhalten des HDPE's mit Blick auf die hier beschrie-

benen Effekte möglicherweise nachvollziehbar. Unter Berücksichtigung der Tatsache, dass mit zunehmender Festigkeit, d. h. mit zunehmender Streckspannung, sich die Reißfestigkeit keinesfalls in gleichem Maße erhöht, ergibt bei der Betrachtung der Relation von Reißfestigkeit und Streckspannung ausgehend vom LLDPE über das LDPE zum HDPE eine Annäherung dieser beiden Größen (Bild 12).

**Bild 12** zeigt anhand von Werksangaben die Relation von Streckspannung und Reißfestigkeit verschiedener, für Bauteile im Erdboden verwendeter PE-Typen. Unter der Voraussetzung, dass sich der Abbau einer gegebenen Reißfestigkeit bei einem verreckten Material und ähnlicher Stabilisierung unabhängig vom PE-Typ auf jeweils etwa den gleichen Zeitraum bezieht, führt diese relative Betrachtung zwangsläufig mit zunehmendem Abstand zwischen Streckspannung und Reißfestigkeit zu einem günstigeren Alterungsverhalten. Während ein HDPE bei dieser Betrachtungsweise bereits vollständig versprödet sein kann, werden Bauteile aus LLDPE immer noch in der Lage sein, den einwirkenden Kräften durch ihre Dehnbarkeit zu begegnen. LDPE nimmt hier eine Mittelstellung ein, die diesem Material mit Blick auf die Beobachtungen in der Praxis bereits deutliche Vorteile verschafft.

Da entsprechend den Entwicklungen bei Polyethylenrohren heute fast kein Projekt im Pipelinebau ohne HDPE-Umhüllung ausgeführt wird, ist diese Materialwahl aufgrund der hier angesprochenen Erkenntnisse kritisch zu hinterfragen.



**Bild 12:** Relation von Streckspannung und Reißfestigkeit verschiedener PE-Typen (Werksangaben)  
**Fig. 12:** Correlation between yield stress and ultimate tensile strength of various PE types (manufacturer's data)



Möglicherweise sind Materialien wie die LLDPE-Typen mit vergleichsweise günstigem Verhältnis von Streckspannung und Reißfestigkeit im Falle mechanischer Einwirkungen die deutlich bessere Lösung. Die zur Zeit oft diskutierten Prüfungen erlauben jedoch weder quantitativ noch qualitativ ein Bewertung des Langzeitverhaltens dieser Materialien. Bei der Prüfung neuwertiger Materialien werden die alterungsbedingten Veränderungen der Einsatzmaterialien speziell in Bezug auf den hier betrachteten Lastfall jenseits der Dehngrenze von 8 bis 10 % nicht erfasst. Prüfungen in der Wärme verändern darüber hinaus das Materialgefüge und kaskadieren alterungsbedingte Materialveränderungen.

Es besteht aber nicht nur in Bezug auf die Prüfverfahren, sondern auch in Bezug auf Werkstofffragen, wie beispielsweise die Gegenwart des tertiären Kohlenstoffanteils beim LLDPE, Klärungsbedarf. Derzeit fehlen noch jegliche Erkenntnisse, welchen Einfluss beispielsweise gelöste Metallionen im Erdboden auf das Korrosionsverhalten von Polyethylen haben. So wie Kupferionen beispielsweise die Spannungsrisssbildung unter Netzmitteleinfluss katalysieren, sind auch in Bezug auf die hier zu bewertende Werkstoffalterung katalytische Effekte aufgrund der im Erdboden gegenwärtigen Metallionen nicht auszuschließen.

## Ausblick

Im Rahmen verschiedener Forschungsaktivitäten werden diese Fragestellungen derzeit in Zusammenarbeit von Stahlrohrhersteller, Hochschulen und Instituten näher untersucht. Versorgungsunternehmen stellen darüber hinaus gealtertes Probenmaterial für die Untersuchungen zur Verfügung. Die laufenden Forschungsaktivitäten dienen der Optimierung mechanischer Eigenschaften von Polyethylenummüllungen in Bezug auf unzulässige lokale Einwirkungen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass bei Einhaltung der in den Regelwerken geforderten Sorgfalt bei Verlegung und Betrieb, die Polyethylenschicht maximal der Dehnung des Stahlgrundmaterials folgen muss, die selbst bei Ausnutzung einer zulässigen Innendruckbeanspruchung noch deutlich unter 0,5 % liegt. Die Polyethylenummüllung wird unter diesen Bedingungen selbst im vollständig versprödeten Zustand noch keine Einbußen der Korrosionsschutzigenschaften für den Grundwerkstoff Stahl erkennen lassen [10].

## Literatur

- [1] Krietenbrink, H.; Kloth, R.: 100 Jahre Nutzungsdauer von PE-Rohrsystemen in der Wasserversorgung; 3R internat. 43 (2004) S. 576-582
- [2] Kocks, H.-J.: Prüfgrundlagen und Stand der Normen für Stahlleitungs- und Kunststoffrohre - Regelwerke mit zweierlei Maß?, Rohrleitungen im

Jahr der Technik, Essen: Vulkan-Verlag, 2004, S. 385-398 (Schriftenreihe aus dem Institut für Rohrleitungsbau an der Fachhochschule Oldenburg, Bd. 28)

- [3] Hessel, J.: Sandbettlose Verlegung von PE-Rohren; bbr 54 (2003) Nr 9, S. 61-65
- [4] Uhl, I.; Haizmann, F.: Punktbelastungen an Kunststoffrohren; gwf 141 (2000) Nr. 3, S. 142-144
- [5] Gächter, R.; Müller, H.: Taschenbuch der Kunststoffadditive; Carl Hanser Verlag, 3. Ausgabe, 1990, S. 9f
- [6] Kocks, H.-J.: Die Spannungsrisssbildung von Polyethylen; 3R internat. 45 (2006) S. 135-142
- [7] Hessel, J.: 50 Jahre Rohre aus Polyethylen; 3R internat. 45 (2006) S. 128 - 132
- [8] Hessel, J.; Schulte, U.: Restlebensdauer von Kunststoffrohren nach einer Betriebszeit von 41 Jahren; 3R internat. 45 (2006) S. 482-485
- [9] Hessel, J.; Grieser, J.: Verfahren zum Nachweis des Sicherheitsfaktors für Rohre aus Polyethylen unter komplexer Beanspruchung; 3R internat. 44 (2005) S. 277-283
- [10] Gaugler, H.; Kocks, H.-J.: Zustandsorientierte Instandhaltung kathodisch geschützter Stahlleitungen; 3R internat. 46 (2007) S. 385 - 391

## Autor:

**Dr. rer. nat.**

**Hans-Jürgen Kocks**

MANNESMANN FUCHS ROHR,  
Röhrenwerk Gebr. Fuchs, Siegen

Tel. +49(0)271-691170

E-Mail: Hans-Juergen.Kocks@mannesmann-fuchs.com



**21-23 APRIL 2008**

**3<sup>rd</sup> INTERNATIONAL PIPELINE  
TECHNOLOGY CONFERENCE**

Featuring the 2<sup>nd</sup> "Asia/Africa - Europe Pipeline Forum"  
[www.eitep.com/ptc2008](http://www.eitep.com/ptc2008)

**Pipeline Technology**

Leading Trade Fair for Pipeline Technologies and Systems  
[www.hannovermesse.de/pipeline\\_technology\\_e](http://www.hannovermesse.de/pipeline_technology_e)

