

# **Mindestlebensdauer von erdverlegten Rohren aus Polyethylen ohne Sandeinbettung - Teil 1 -**

Dr.-Ing. Joachim Hessel, Hessel Ingenieurtechnik GmbH, Roetgen

# Mindestlebensdauer von erdverlegten Rohren aus Polyethylen ohne Sandeinbettung

*Teil 1: Praxiserfahrungen, Belastungskonzept und werkstofftechnische Randbedingungen*

Minimum service-life of buried polyethylene pipes without sand-embedding

*Part 1: Service experiences, concept for loading, material technology limiting conditions*

Durch die Rohstoffentwicklung von Polyethylen in den letzten 20 Jahren im Hinblick auf die Verbesserung des Zeitstandfestigkeitsverhaltens stellte sich die Frage, ob für erdverlegte Rohre aus Polyethylen die Sandeinbettung weiterhin notwendig ist. Die Untersuchungen werden mit dem Ziel durchgeführt, das Niveau der Mindestqualität von erdverlegten Rohren aus Polyethylen zu beschreiben, oberhalb derer auf eine Sandeinbettung verzichtet werden kann.

In Teil 1 der vorliegenden Arbeit werden repräsentative Schadensfälle aus der Vergangenheit, das Versuchskonzept und die werkstofftechnischen Randbedingungen beschrieben. Dabei wird ein Belastungskollektiv angewendet, das die bei sandloser Verlegung anzunehmende Belastung der Rohre sicher abdeckt. In Teil 2 werden die Versuchsergebnisse bei Variation der maßgebenden Einflussparameter mitgeteilt. Daneben wird hier eine Gleichung zur Vorausberechnung der Mindestlebensdauer von punktblasteten Rohren angegeben.

Im Rahmen dieser Untersuchungen beteiligten sich vier Rohstoffhersteller und drei Rohrhersteller.

In the past 20 years polyethylene raw materials have been developed with the aim of improving the creep rupture strength. This has raised the question whether it is possible to eliminate sand-embedding of buried pipes. Investigations were performed in order to describe the minimum quality of polyethylene pipes for this situation. The testing conditions cover the loads which are to be expected in service.

In part 1 of this report, typical failure histories, the test design and the material related conditions are described in order to generate a conservative result. The test results will be reported in part 2 considering variations in test parameters. Based on a formula presented in part 2, the minimum service life of polyethylene pipes without sand-embedding can be predicted.

Four raw material suppliers and three pipe producers were involved in these investigations.



**Dr.-Ing. Joachim Hessel**

Hessel Ingenieurtechnik GmbH, Roetgen;  
Tel. 02471/92022-0, E-Mail:  
joachim.hessel@hessel-ingtech.de

## Einleitung

Lokale Spannungskonzentration, wie sie z. B. durch äußere Punktlasten in der Rohrwand von erdverlegten Rohren hervorgerufen werden, führen allgemein zu einer Verminderung der Lebensdauer dieser Rohre.

Schäden an erdverlegten Leitungen aus Polyethylen durch punkt- oder linienförmige Lasten, die zusätzlich zu den planmäßigen Betriebslasten auftraten, sind aus der Vergangenheit bekannt.

Für die Standzeit derartig belasteter Rohre ist von ausschlaggebender Bedeutung, welchen Widerstand der Werkstoff einer Rissverlängerung bei langsamem Risswachstum entgegensetzt.

Die Polyethylen-Rohstoffe wurden im Hinblick auf die Verbesserung der Zeitstandfestigkeit ständig weiterentwickelt. Dies ist einerseits in den Normen DIN

8075 (1976 – 2000) dokumentiert, andererseits liegen definitionsgemäß die realen Zeitstandfestigkeiten mehr oder weniger oberhalb der Normanforderungen, da die „Normkurven“ Mindestanforderungen darstellen.

Es stellte sich somit die Frage, ob die Zeitstandfestigkeit aktueller Rohstoffe einen Entwicklungsstand erreicht hat, der ein Versagen innerhalb der vorgesehenen Betriebsdauer auch bei Druckrohren unter zusätzlicher äußerer Punktlast nicht erwarten lassen.

An den Untersuchungen beteiligten sich folgende Unternehmen:

- ATOFINA, Feluy [1], [2]
- BASELL, Frankfurt [3]
- BOREALIS, Site Austria [4]
- EGEPLAST, Emsdetten [5]
- SOLVAY, Brüssel [6]
- WAVIN, Twist [7]

- WIRSBO, Maintal-Bischofheim [8]
- HESSEL Ingenieurtechnik, Roetgen

## Praxiserfahrungen

Schäden an erdverlegten Leitungen aus Polyethylen können durch punkt- oder linienförmige Lasten, die zusätzlich zu den planmäßigen Betriebslasten, wie z. B. Innendruck, Erd- oder Verkehrslasten wirken, auftreten. Linienförmige Zusatzlasten treten z. B. auf, wenn bei Kanalleitungen, die während der Verlegung auf Holzbalken ruhen, diese Balken vor dem Verfüllen des Grabens nicht entfernt wurden [9].

Die Einwirkung punkt- oder linienförmiger Belastungen auf Rohre wird in den für die Erdverlegung relevanten Normen und Richtlinien als zeitstandverkürzend angesehen. Deshalb wird z. B. in DIN 4033

und DIN 19630 gefordert, die Rohre so zu verlegen, dass während des Betriebs keine Punkt- und Linienlasten auf die Rohrwand einwirken. In gleichem Sinne ist die Anforderung in DIN EN 1046 an die „Grabenaufgabe frei von Stein- und Geröllblöcken“ zu verstehen.

Typische Schäden an Druckwasserleitungen aus Polyethylen durch örtlich konzentrierte punktförmige Zusatzlasten zeigen **Bild 1** und **2**.

Die Zusatzlasten in **Bild 1** wurden hier durch einen ständig die äußere Rohrwand eindrückenden Stein verursacht. Die Eindruckstellen sind neben dem Riss auf der Rohraußenwand zu erkennen. In **Bild 2** war offenbar eine geringe flächig einwirkende lokale Last für den Zeitstandriss maßgebend. Die Bruchfläche dieses Risses ist in **Bild 3** zu sehen.

Der Bruchausgang befindet sich an der Rohrinneiseite (unten) und setzt sich bis zur Rohraußenseite (oben) fort. Die Bruchfläche weist die für einen Zeitstandbruch typische glatte Oberfläche auf. Ursächlich für den Zeitstandriss sind die zusätzlich zu den aus dem Innendruck wirkenden Zusatzspannungen an der Rohrinneiseite aufgrund der punktförmigen Last durch den auf die äußere Rohrwand drückenden Gegenstand.

Ein derartiger Schaden tritt dann nicht auf, wenn die Zeitstandfestigkeit des Rohrwerkstoffs an der Rohrwandinnenseite über der langfristig auftretenden Zusatzspannung an dieser Stelle liegt, die zum Spannungsrisss führt.

## Versuchswerkstoffe

Für die Untersuchungen wurden Rohre 110 x 10 mm (SDR 11) aus Polyethylen der Festigkeitsklassen PE 63, PE 80, PE 100 nach DIN 8075 sowie PE-Xa und PE-Xb verwendet (**Tabelle 1**).

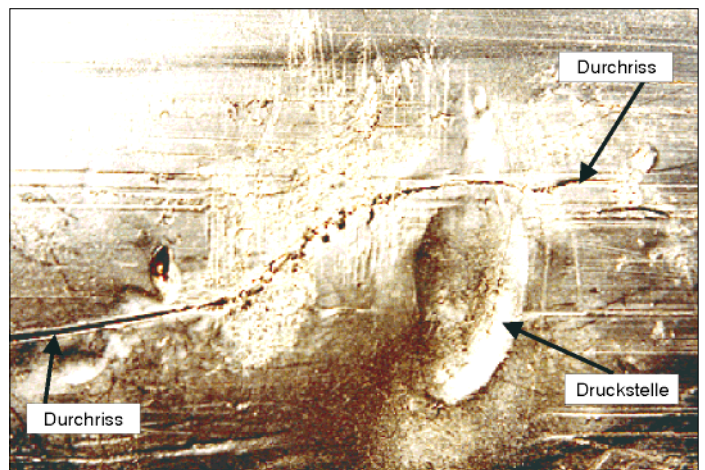
Der Widerstand gegenüber langsamem Rissfortschritt der Untersuchungsmuster wurde durch Prüfungen im Full Notch Creep Test (FNCT) nach DIN EN 12814-3 Anhang A, bzw. Beiblatt 2 zu Richtlinie DVS 2203 Teil 4 untersucht. Darüber hinaus existiert ein ISO-Entwurf „ISO/DIS16770 „Plastics – Determination of environmental stress cracking (ESC) of polyethylene (PE) – Full-notch creep test (FNCT)“.

Zur Herstellung der FNCT-Proben wurden aus den Rohren Probestäbe mit nahezu quadratischem Querschnitt in Rohrlängsrichtung herausgearbeitet und mittig gekerbt.

Die Prüfspannung von 4,0 N/mm<sup>2</sup> wurde auf den verbleibenden ungekerbten Restquerschnitt bezogen. Die maximale Abweichung von der Solltemperatur betrug ±0,2 K. Die maximale Abweichung von der Prüfkraft 0,5 %. Als Prüfmedium wurden zwei Netzmittellösungen bzw.

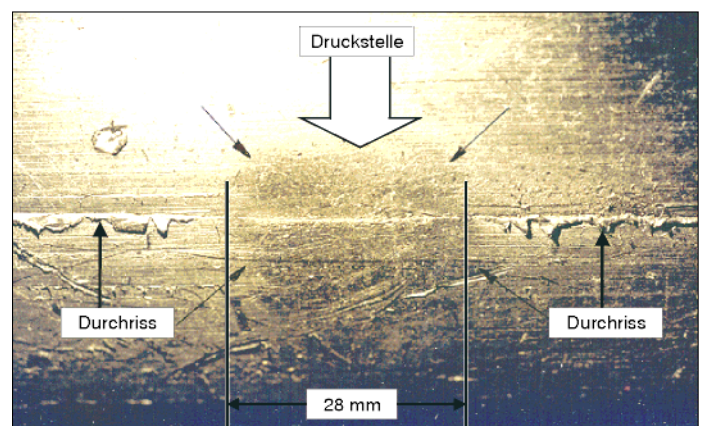
**Bild 1:** Punktförmige Druckstelle und Rissverlauf auf der Außenwand eines Rohres aus Polyethylen

**Fig. 1:** Single dent and crack path on the outside wall of a polyethylene pipe



**Bild 2:** Flächige Druckstelle und Rissverlauf auf der Außenwand eines Rohres aus Polyethylen

**Fig. 2:** External loaded area and crack path on the outside wall of a polyethylene pipe



Wasser verwendet. Die „Standard-Prüfflüssigkeit“ war eine 2%-ige wässrige Lösung aus @ARKOPAL N-100 und deionisiertem Wasser [10].

Das Qualitätsspektrum der untersuchten Rohre bei der Prüftemperatur 80 °C ist im **Bild 4** zusammengefasst.

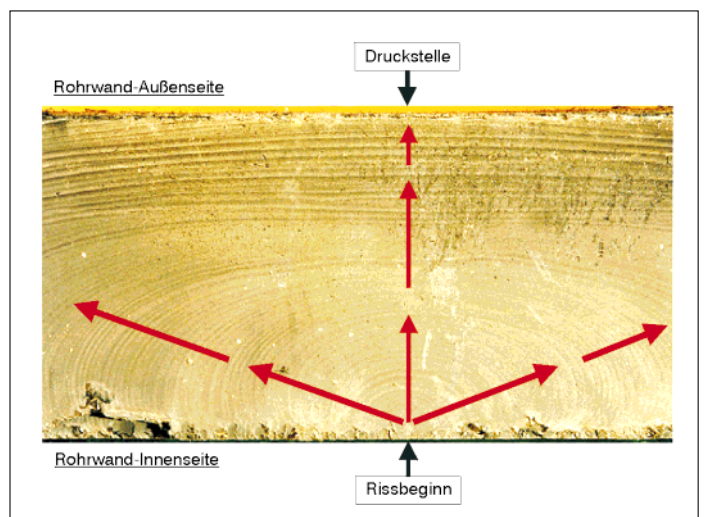
## Prinzip und Randbedingungen der Untersuchungen

### Äußere Punktlast

Im Hinblick auf die Erfassung der in der Praxis zu erwartenden maximalen Spannungskonzentration durch äußere Punkt-

**Bild 3:** Bruchfläche in der Wand eines Rohres aus Polyethylen nach Belastung durch eine lokale Druckstelle

**Fig. 3:** Fracture surface in the wall of an external loaded polyethylene pipe



**Tab.1:** Untersuchte Rohrmuster

**Tab. 1:** Pipe samples tested

Prüfserie <sup>1</sup>	Werkstoffklasse <sup>2</sup>	E-Modul (N/mm <sup>2</sup> )	Farbe
1	PE 63	950 <sup>3</sup>	schwarz
2	PE 80	800 <sup>3</sup>	schwarz
3	PE 80	1050 <sup>3</sup>	schwarz
4	PE 80	700 <sup>3</sup>	gelb
5	PE 80	950 <sup>3</sup>	schwarz
6	PE 100	1300 <sup>4</sup>	blau
7	PE 100	1400 <sup>4</sup>	schwarz
8	PE 100	1400 <sup>4</sup>	schwarz
9	PE 100	900 <sup>3</sup>	schwarz
10	PE 100	1100 <sup>3</sup>	blau
11	PE 100	1130 <sup>3</sup>	schwarz
12	PE 100	1130 <sup>3</sup>	schwarz
13	PE 100	1100 <sup>3</sup>	orange
14	PE 100	1100 <sup>3</sup>	orange
15	PE 100	1100 <sup>3</sup>	blau
16	PE 100	1100 <sup>3</sup>	blau
17	PE 100	1100 <sup>3</sup>	blau
18	PE-Xa	650 <sup>3</sup>	schwarz
19	PE-Xb	1300 <sup>3</sup>	rot-orange

<sup>1</sup> s.a. Tabelle 2  
<sup>2</sup> ISO/TR 9080  
<sup>3</sup> ISO 527 (Zugbeanspruchung)  
<sup>4</sup> ISO 178 (Biegebeanspruchung)

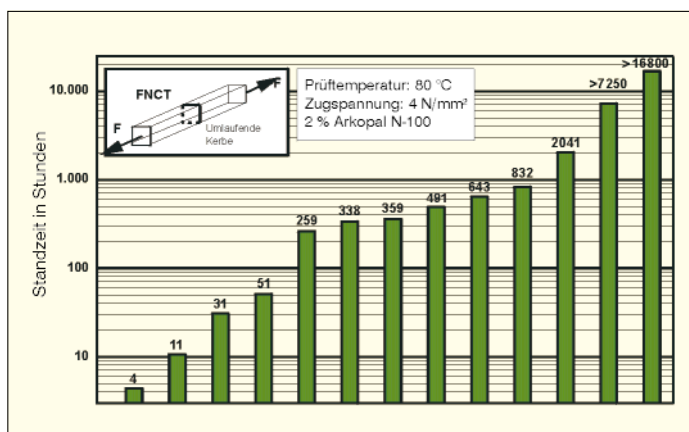
last auf einem Rohr wird die Dehnung bei Streckspannung an Randfaser der inneren Rohrwand herangezogen. Hieraus wird die Größe der äußeren Punktlast im Versuch abgeleitet.

Das Erreichen der Streckspannung stellt die maximal vom Werkstoff ertragbare Belastung dar und umfasst damit alle in der Praxis vorstellbaren kraft- bzw. weggesteuerten Punktlasten auf Rohre.

Dabei ist der Fall der Penetration – z. B. eines Nagels durch die Rohrwand – nicht

erfasst. Mit der ebenfalls vorstellbaren Belastung durch vollständiges Zusammenquetschen des Rohres – z.B. durch einen Felsbrocken – verliert zwar das Rohr seine Funktionstüchtigkeit, die Werkstoffanstrengung ist mit der Belastung im Versuch jedoch vergleichbar.

Die Randfaserdehnung an der inneren Rohrwand über die Streckspannung hinaus wurde durch radiales Eindringen eines Stempels mit Kopfradien zwischen 2,5 und 10 mm auf die äußere Rohrwand



**Bild 4:** Bruchzeiten von Proben aus Rohren mit verschiedenem Widerstand gegenüber langsamem Rissfortschritt im FNCT

**Fig. 4:** Creep rupture times of specimens from pipes of different resistances against slow crack growth in FNCT

erzeugt. Das Eindringen erfolgte bei Raumtemperatur. Die Rohre waren dabei ohne Innendruck.

Das sichere Überschreiten der Streckspannung an der Innenseite der Rohrwand wurde experimentell durch die Erzeugung einer Sehne mit einer Länge von 5 mm an der Rohrinneenseite (**Bild 5**) sichergestellt und analytisch durch folgende Beziehung verifiziert:

$$\varepsilon = [0,318 \cdot F \cdot R] / [b' \cdot s \cdot E(t)]$$

mit:

- $\varepsilon$  Dehnung an der inneren Randfaser der Rohrwand
- $F$  Radial von außen wirkende Kraft (Einzellast)
- $R$  Mittlerer Rohrradius
- $s$  Wanddicke
- $E(t)$  Zeitabhängiger E-Modul
- $b'$  Mittragende Breite

Die mittragende Breite wurde experimentell durch Messung der Stempelkraft ermittelt.

Finite Elemente Berechnungen (FEM) der Dehnungen kreisförmig um den Belastungsstempel zeigen, dass bei den gewählten Eindringtiefen des Stempels die in Tabelle 1 für die Untersuchungswerkstoffe angegebenen Dehnungen bei Streckspannung (ca. 9 %) etwa um den Faktor 2 überschritten werden [11] (**Bild 6**).

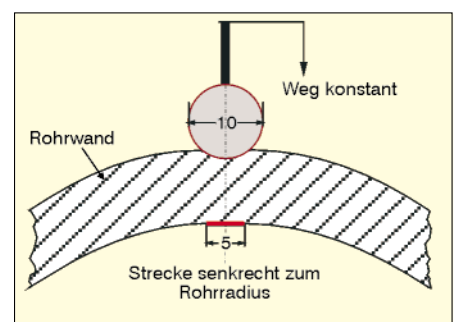
### Rohrinnendruck

Der Innendruck der Rohre während der Versuche wurde entsprechend einer Vergleichsspannung in der Rohrwand von 4 N/mm<sup>2</sup> (ISO 1167) gewählt.

Zur Untersuchung des Einflusses des Rohrinnendrucks wurden die Rohre der Prüfserien Nr. 1 und Nr. 3 bei jeweils drei Druckniveaus geprüft. Die Größe der zusätzlichen äußeren Punktlast war dabei gleich.

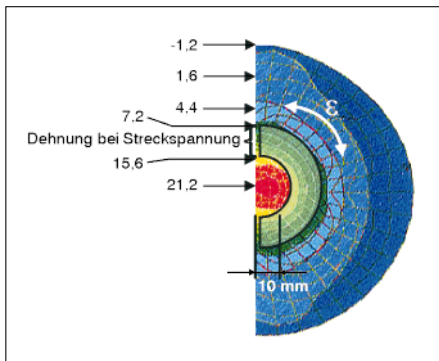
### Versuchstemperaturen

Die Versuchstemperatur betrug in der Regel 80 °C.



**Bild 5:** Belastung durch äußere Punktlast vor Beginn des Zeitstandinnendruckversuchs

**Fig. 5:** Loading by an external point load before starting the internal pressure test



**Bild 6:** Randfaserdehnung in % an der inneren Rohrwand bei Punktlast von außen und einem Innendruck von 8 bar

**Fig. 6:** Edge fiber expansion in % at the inside wall of the pipe due to an external point load and an internal pressure of 8 bar

Die Aktivierungsenergie bei punktbelasteten Rohren wurde durch weitere Untersuchungen bei 95, 80, 60, 40 und 20 °C an den Prüferien Nr. 1 und Nr. 3 verifiziert.

Zur Abkürzung der Versuchszeiten werden die Untersuchungen unter dem Ein-

fluss einer wäßrigen Netzmittellösung (2%-ige wäßrige Lösung aus ®ARKOPAL N-100 und deionisiertem Wasser) einem weiteren Netzmittel sowie in Wasser durchgeführt.

Die Netzmittellösungen wurden im Rohrinneen ständig umgewälzt.

Einen zusammenfassenden Überblick über die Versuche gibt **Tabelle 2**.

### Theoretische Grundlagen zur Lebensdauerbestimmung

Die maximale Betriebszeit von Kunststoffen ist allgemein durch die Wärmealterung (thermische Stabilität) und die damit verbundene Versprödung des Werkstoffs begrenzt.

Die maßgebenden Einflussgrößen stellen – neben der Temperatur und Zeit – das Umgebungsmedium und das Sauerstoffangebot dar. Die Kombination „sauerstoffgesättigtes Wasser“ hat sich als Kombination herausgestellt, die zu den kürzesten Zeiten bis zur beginnenden Wärmealterung führt.

Die bisherigen Untersuchungen an Polyethylen zeigen, dass in wässriger Netz-

mittellösung und Wasser die Wärmealterung etwa zu gleichen Zeiten erreicht wird. Dabei ist die Zeit bei beginnender Wärmealterung invariant gegenüber der aufgetragenen Dehnung.

Die beginnende Wärmealterung ist von Gaube et al. im Temperaturbereich von 80 bis 40 °C untersucht worden. Dabei wurde als Beurteilungskriterium das Absinken der Reißdehnung auf die Hälfte des Ausgangswertes gewählt. Spätere Untersuchungen an Rohren unter Innendruck zeigten, dass die Zeit der Wärmealterung identisch ist mit dem Beginn des Steilabfalls der Zeitstandkurven [12].

Als weitere Methode zur Beschreibung der Wärmealterung von Polyolefinen hat sich die Bestimmung der Viskositätszahl (VZ) nach ISO 1628-3 als Maß für die mittlere Molmasse bewährt [13].

Mit allen drei Untersuchungsmethoden erhält man eine Gesetzmäßigkeit, die mit der von Arrhenius aufgestellten Gleichung beschrieben werden kann. Das heißt, die bei höheren Temperaturen in relativ kurzen Zeiten stattfindende Wärmealterung stellt sich bei tieferen Temperaturen, z. B. bei 20 °C, entsprechend der Ak-

**Tab. 2:** Übersicht des Versuchsprogramms

**Tab. 2:** Test program

Prüfserie	Rohstoff-Klasse	Temperatur (°C)	Medium	Spannung (N/mm <sup>2</sup> )	Eindrücktiefe (mm)	Kopfradius (Stempel)	Ziel
1	PE 63	80; 60; 40;20	Netzmittel, Wasser	4; 2	9	5	Temperaturabhängigkeit (Arrhenius); Einfluß Rohrinneendruck Medieneinfluss; Qualität
2	PE 80	80	Netzmittel, Wasser	4	9	5	Medieneinfluss; Qualität
3	PE 80	95; 80; 60	Netzmittel, Wasser	4; 2; 0,2	9; 4,5; 0	10; 5; 2,5	Temperaturabhängigkeit (Arrhenius); Medieneinfluss; Einfluss Rohrinneendruck; Einfluss Eindrücktiefe; Einfluss Kopfradius; Qualität
4	PE 80	80	Netzmittel	4	9	5	Qualität (Widerstand gegenüber langsamem Rissfortschritt; Zeitstandfestigkeit)
5	PE 80						
6	PE 100						
7	PE 100						
8	PE 100						
9	PE 100						
10	PE 100						
11	PE 100						
12	PE 100						
13	PE 100						
14	PE 100						
15	PE 100						
16	PE 100						
17	PE 100						
18	PE-Xa						
19	PE-Xb						

tivierungsenergie, nach sehr langen Zeiten ein.

Für Polyethylen mit üblicher Wärmestabilisierung bedeutet danach eine Wärmealterungszeit bei 80 °C von einem Jahr, dass bei 20 °C die Wärmealterung nicht vor 100 Jahren beginnt [14].

Im Hinblick auf die Bewertung der Standzeiten der Rohre im Rahmen dieser Untersuchungen wird deshalb davon ausgegangen, dass diejenigen Rohre unter zusätzlicher äußerer Punktlast bei 20 °C mindestens 100 Jahre halten werden, die im Versuch bei 80 °C Standzeiten von mindestens einem Jahr aufweisen.

Unter Berücksichtigung des Auswerteverfahrens [15] sind die Aussagen als konservativ zu betrachten, das heißt, sie liegen „auf der sicheren Seite“.

## Ausblick

In Teil 2 (siehe 3R international, Ausgabe 6/2001) werden die Versuchsergebnisse bei Variation von

- Rohrqualität,

- Versuchstemperatur,
- Rohrinneindruck,
- Stempeldurchmesser,
- Stempelweg und
- Umgebungsmedium dargestellt.

Daneben wird hier der funktionelle Zusammenhang zwischen dem Widerstand der Rohrwerkstoffe gegenüber langsamem Rissfortschritt und der Mindestlebensdauer von punktbelasteten Rohren angegeben.

### Schrifttum

- [1] bis [8]: Berichte der HESSEL Ingenieurtechnik GmbH, Roetgen
- [1] Auftraggeber ATOFINA, Bericht R00 04 261-1
- [2] Auftraggeber ATOFINA, Bericht R01 04 508-1
- [3] Auftraggeber BASELL, Bericht R01 04 447
- [4] Auftraggeber BOREALIS, Bericht R01 04 500
- [5] Auftraggeber EGEPLAST, Bericht R01 04 460-1
- [6] Auftraggeber SOLVAY, Bericht R01 04 459-1

- [7] Auftraggeber WAVIN, Bericht R01 04 457-1
- [8] Auftraggeber WIRSBO, Bericht R98 04 262-1
- [9] Hessel, J.: Zeitstandverhalten von Polyethylen unter dem Einfluß lokal konzentrierter Spannungen. 3R international 34 (1995) 10/11, S. 573/579
- [10] Hessel, J.; Mauer, E.: Zeitstandzugprüfung in wäßriger Netzmittellösung. Materialprüfung 36 (1994) Nr. 6, S. 240/243
- [11] Nonhoff, G.: Persönliche Mitteilung (4/2000)
- [12] Gaube, E. et al.: Zeitstandfestigkeit und Alterung von Rohren aus HDPE; Erfahrungen aus 30 Jahren Rohrprüfung. Kunststoffe 7 (1985) S. 412/ 415
- [13] Gebler, H.: Langzeitverhalten und Alterung von PE-HD-Rohren. Kunststoffe 9 (1989) S. 823/ 826
- [14] Wernicke, K.: „100 Jahre Nutzungsdauer für Druckrohre aus PE. Wiesbadener Kunststoffrohrtage 2000
- [15] Hessel, J.; Mauer, E.; Schleyer A.; Schröder-Wrede, V.: Ein neues Konzept zur Lebensdauerabschätzung von Schweißverbindungen an Kunststoffmantelrohren aus Polyethylen. 3R international 34 (1995) 3, S. 94/101