

Kosteneinsparung

Sandbettlose Verlegung von PE-Rohren

– Eine Frage der Rohrqualität –

Die Zeitstandfestigkeit der PE-Rohstoffe hat sich in den letzten 30 Jahren wesentlich verbessert. Es war deshalb wünschenswert zu untersuchen, 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 lässt.

Schäden an erdverlegten Leitungen aus Polyethylen (PE) 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 [1].

1. Praxiserfahrungen

Typische Schäden an Druckwasserrohrleitungen aus PE durch örtlich konzentrierte punktförmige Zusatzlasten zeigen die **Bilder 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 Zeitandriss

maßgebend. Die Bruchfläche dieses Risses ist in **Bild 3** zu sehen.

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

2. Breite Palette von Rohrqualitäten

Für die Untersuchungen wurden Rohre 110×10 mm (SDR 11) aus Polyethylen der Festigkeitsklassen PE 63, PE 80, PE 100 nach DIN 8075 sowie PE-Xa (peroxidisch vernetztes Polyethylen) und PE-Xb (silanvernetztes Polyethylen) 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, dem heute bekannten „schnellsten“ Zeitstandtest, untersucht.

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

3. Prüfbedingungen „auf der sicheren Seite“

Im Hinblick auf die Erfassung der in der Praxis zu erwartenden maximalen Spannungskonzentration durch äußere Punktlast auf einem Rohr wird die Dehnung bei Streckspannung an der 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.

Die Randfaserdehnung an der inneren Rohrwand über die Streckspannung hinaus wurde durch radiales Eindringen

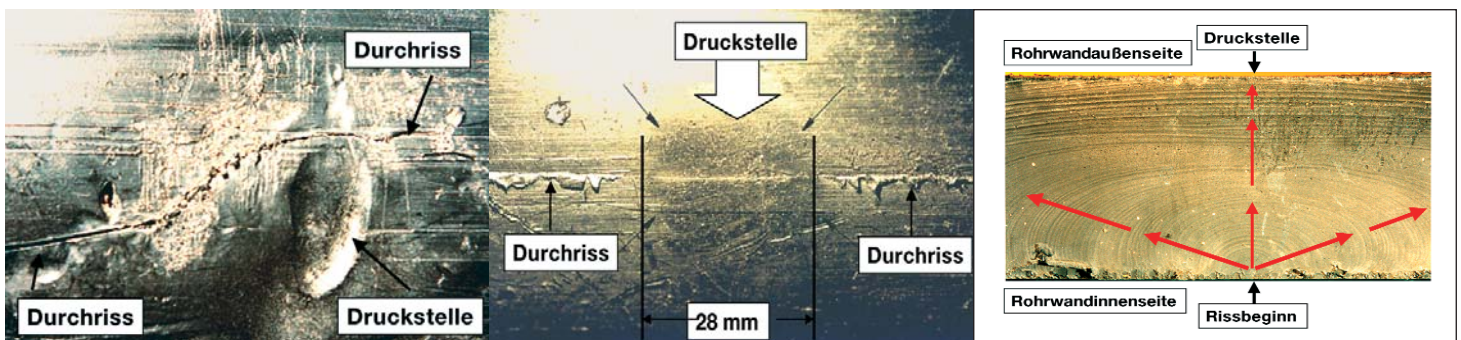


Bild 1: Punktförmige Druckstelle und Rissverlauf auf der Außenwand eines Rohres aus Polyethylen.

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

Bild 3: Bruchfläche an einem Rohr aus Polyethylen nach Belastung durch eine lokale Druckstelle.

Tabelle 1: Untersuchte Rohrmuster.

| Prüfserie ¹⁾ | Werkstoffklasse ²⁾ | E-Modul (N/mm ²) | Farbe |
|-------------------------|-------------------------------|------------------------------|------------|
| 1 | PE 63 | 950 ³⁾ | schwarz |
| 2 | PE 80 | 800 ³⁾ | schwarz |
| 3 | PE 80 | 1050 ³⁾ | schwarz |
| 4 | PE 80 | 700 ³⁾ | gelb |
| 5 | PE 80 | 950 ³⁾ | schwarz |
| 6 | PE 100 | 1300 ⁴⁾ | blau |
| 7 | PE 100 | 1400 ⁴⁾ | orange |
| 8 | PE 100 | 1400 ⁴⁾ | schwarz |
| 9 | PE 100 | 900 ³⁾ | schwarz |
| 10 | PE 100 | 1100 ³⁾ | schwarz |
| 11 | PE 100 | 1130 ³⁾ | schwarz |
| 12 | PE 100 | 1130 ³⁾ | schwarz |
| 13 | PE 100 | 1100 ³⁾ | orange |
| 14 | PE 100 | 1100 ³⁾ | orange |
| 15 | PE 100 | 1100 ³⁾ | blau |
| 16 | PE 100 | 1100 ³⁾ | blau |
| 17 | PE 100 | 1100 ³⁾ | blau |
| 18 | PE-Xa | 650 ³⁾ | schwarz |
| 19 | PE-Xb | 1200 ²⁾ | rot-orange |

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

eines Stempels mit verschiedenen Kopfradien auf die äußere Rohrwand erzeugt.

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

4. Gleicher Schädigungsmechanismus in Versuch und Praxis

Ausgehend von der Vorstellung, dass der Vorgang des langsamen Rissfortschritts der maßgebende Schädigungsmechanis-

mus bei langzeitiger Beanspruchung von Rohren aus PE unter zusätzlicher äußerer Punktlast ist, wird der Widerstand gegenüber Rissbildung durch Prüfung im FNCT herangezogen.

Sowohl im FNCT (**Bild 5**) als auch bei Rohren unter zusätzlicher äußerer Punktlast (**Bild 6**) zeigt sich der langsame Rissfortschritt als verformungsarme Bruchfläche ohne makroskopisch sichtbare duktile Anteile.

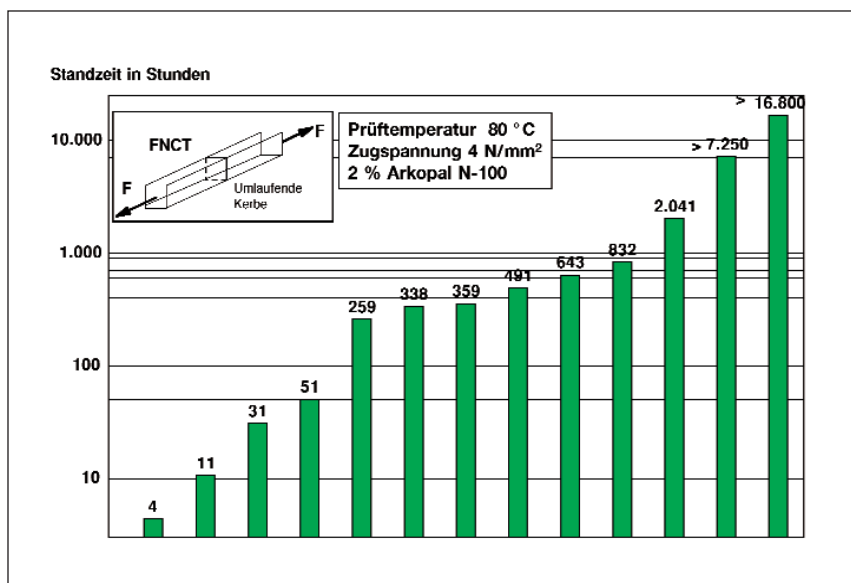


Bild 4: Bruchzeiten von Proben aus Rohren mit verschiedenem Widerstand gegenüber langsamem Rissfortschritt im FNCT.

Bei Rohren unter zusätzlicher äußerer Punktlast geht der Bruch **immer** von der **Innenseite** der Rohrwand aus. Die Anrisse auf der Rohrwandinnenseite eines PE-100-Rohres nach äußerer Punktbelastung zeigt **Bild 7**.

5. Rohrqualität entscheidend

Die Ergebnisse der derzeit abgeschlossenen Versuchsreihen an Rohren mit zusätzlicher äußerer Punktlast und die entsprechenden Proben im FNCT sind in **Bild 8** zusammengefasst. Die an den Messpunkten angegebenen Zahlen korrespondieren mit der Nummerierung der Prüfserien von **Tabelle 1**.

Die Muster aus PE 63 zeigen erwartungsgemäß die kürzesten Zeiten, sowohl im FNCT als auch an den Rohren unter zusätzlicher äußerer Punktlast. Die Standzeiten in beiden Versuchsarten steigen in der Folge PE 63 – PE 80 – PE 100 – PE-X.

Ohne Berücksichtigung der nachfolgend beschriebenen Einflussparameter (z. B. Medium, Messwertstreuung, Aktivierungsenergie) könnte bereits jetzt der Schluss gezogen werden, dass alle Rohrqualitäten mit Standzeiten im FNCT über 2000 Stunden (80 °C, 2 % Arkopal N-100, 4 N/mm²) ohne Sandeinbettung verlegt werden können, da die Rohre mit Punktlast die Alterungsgrenze bei 80 °C erreichen und damit eine Haltbarkeit von mindestens 50 Jahren bei 20 °C belegt ist [2].

Die Ergebnisse der Prüfserien Nr. 12 (Rohr unter Punktlast) und Nr. 15 (FNCT und Rohr unter Punktlast) liegen im Bereich der Wärmealterung.

Die bisher nicht vollständig abgeschlossenen Prüfserien sind in **Tabelle 3** zusammengefasst. Die hier zu erwartenden Ergebnisse werden prognostiziert.

6. Einfluss des Rohrinendrucks

Alle punktbelasteten Rohre wurden mit einem Innendruck von etwa 8 bar in Anlehnung an die maßgebenden Prüfnormen für Rohre aus PE (Vergleichsspannung von 4 N/mm²; SDR 11) geprüft.

7. Einfluss der Temperatur

Die Versuchstemperatur betrug in der Regel 80 °C. Zusätzliche Untersuchungen wurden bei 95 °C, 60 °C, 40 °C und 20 °C durchgeführt.

Tabelle 2: Übersicht des Versuchsprogramms.

| Prüfserie | Rohstoffklasse | Temperatur (°C) | Medium | Spannung (N/mm ²) | Eindrücktiefe (mm) | Kopfradius (Stempel) | Ziel |
|-----------|----------------|----------------------|-----------------------|-------------------------------|--------------------|----------------------|---|
| 1 | PE 63 | 80 60 40 20 | Netzmittel, Wasser | 4 2 | 9 | 5 | Temperaturabhängigkeit (Arrhenius); Einfluss Rohrrinnendruck; 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 Rohrrinnendruck; 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 | | | | | | |

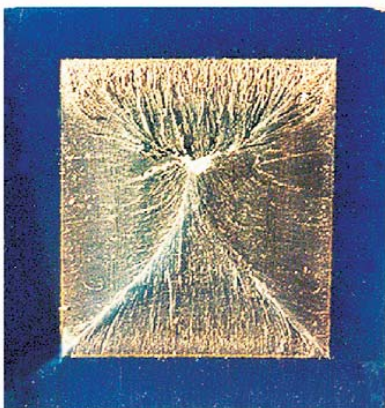


Bild 5: Bruchfläche einer FNCT-Probe aus einem PE-100-Rohr.

In **Tabelle 4** sind die Versuchsergebnisse der Prüfserien 1 und 3 und die daraus berechneten Aktivierungsenergien [3] im Vergleich zu den Werten der Aktivierungsenergie für die „Spröbruchäste“ von PE 63, PE 80 und PE 100 nach DIN 8075 genannt.

Die in **Tabelle 2** genannten Werte der Aktivierungsenergien für punktblastete Rohre sind wesentlich niedriger als die aus den Zeitstandkurven nach DIN 8075 berechneten Daten. Hieraus ergibt sich zwangsläufig, dass die Zeit-Temperatur-Gesetzmäßigkeit nach DIN 8075 nicht für

punktblastete Rohre anwendbar ist, da ansonsten zu optimistische Ergebnisse bei 20 °C extrapoliert würden.

8. Einfluss des Mediums

Um bei allen untersuchten Rohrqualitäten in praktikablen Zeiten Ergebnisse zu erhalten, wurden die Untersuchungen in der Regel unter dem Einfluss einer 2%igen wässrigen Lösung mit Arkopal N-100 durchgeführt. Dabei wurde sowohl bei den Versuchen im FNCT als auch bei punktblasteten Rohren sichergestellt, dass das Medium immer homogen ge-

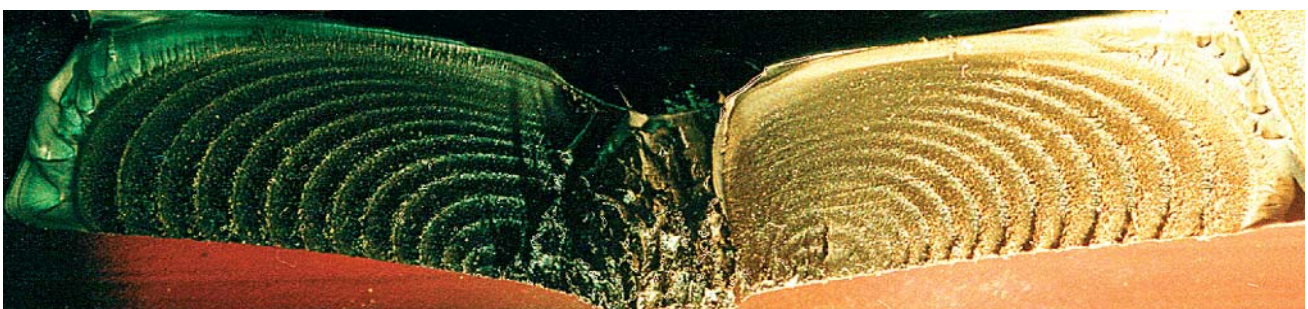


Bild 6: Bruchfläche in einem PE-Rohr nach äußerer Punktbelastung.

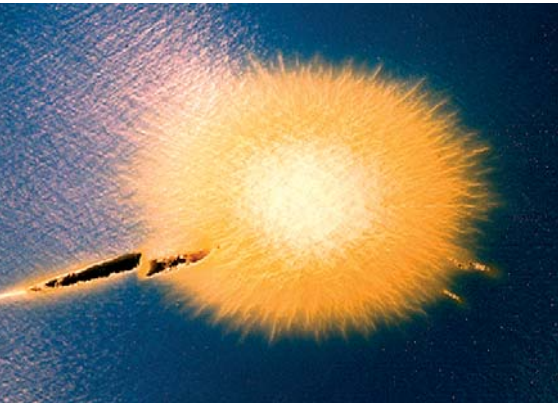


Bild 7: Bruchfläche in einem PE-100-Rohr nach äußerer Punktbelastung (Prüfserie 6).

mischt vorlag. Eine mangelhafte Durchmischung führt zu undefinierten Konzentrationsverhältnissen und damit zu in der Regel längeren, nicht vergleichbaren Standzeiten.

Da in der Praxis (z.B. bei Wasser- oder Gasrohren) das Zeitstandverhalten der Rohre unter dem Einfluss von Wasser herangezogen wird (Zeitstandkurven nach DIN 8075), muss im Hinblick auf die Berechnung der Mindestlebensdauer der Unterschied zwischen dem Einfluss von Wasser und Netzmittel quantifiziert werden.

Die derzeit verfügbaren Daten sind in **Tabelle 5** zusammengestellt. Sie stimmen gut mit den in einem Ringversuch zum FNCT erhaltenen Ergebnissen überein [4].

9. Einfluss von Kerben auf der Rohrwandinnenseite

Zur Untersuchung von Kerben mit geringer Tiefe wurden an den Prüfserien 1, 2, 3, 6 und 8 Versuche mit Rohren unter Innendruck mit Kerben auf der Innenseite der Rohrwand gegenüber der Punktlast durchgeführt. In **Bild 9** sind die Standzeiten der o.g. Prüfserien mit und ohne Innenkerben gegenübergestellt. Die Innenkerben verkürzen die Standzeiten bei einer Rohrqualität, die zur Wärmealterung bei Wassereinwirkung führt, um den Faktor 4,1.

An der Prüfserie 3 wurde die Kerbtiefe zwischen 0,25 und 0,85 mm variiert. Dabei wurde kein signifikanter Unterschied der Standzeiten in Abhängigkeit von der Kerbtiefe gemessen.

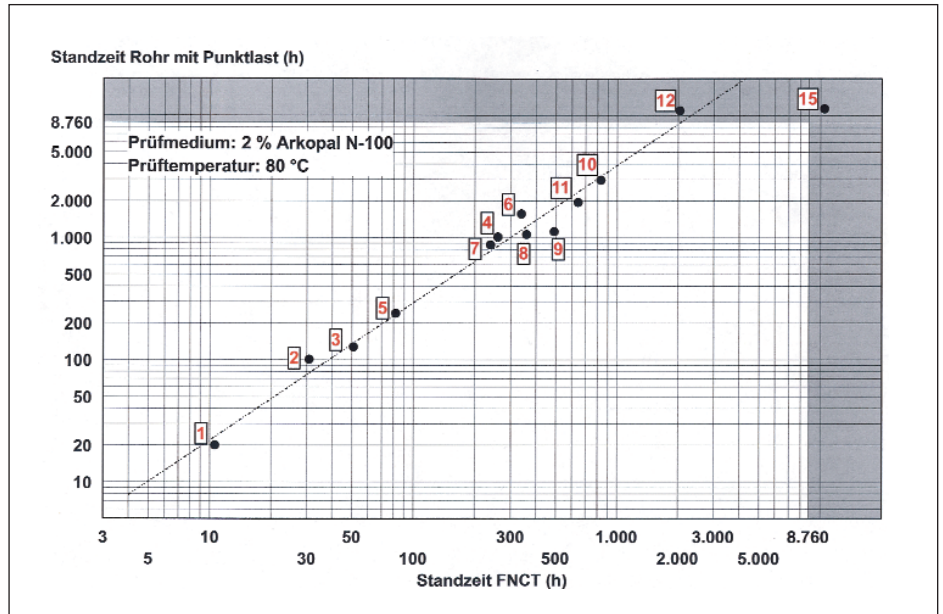


Bild 8: Korrelation zwischen Ergebnissen aus Punktlastversuchen und im FNCT an Proben von Rohren aus Polyethylen (Zahlen an Messpunkten: Nr. der Prüfserie in Tabelle 1).

Tabelle 3: Derzeit noch in Prüfung befindliche Rohrmuster.

| Prüfserie | Werkstoffklasse ²⁾ | Prüfzeit im FNCT (h) ¹⁾ | Prüfzeit mit Punktlast (h) ²⁾ | Bewertung gemäß Tabelle 7 (S = 2) |
|-----------|-------------------------------|------------------------------------|--|--|
| 13 | PE 100 | 9 309,3 | 9 262,5 | Sandbettlose Verlegung bis 8 bar Rohrrinnendruck abgesichert |
| 14 | PE 100 | 9 009,4 | 10 125,3 | |
| 16 | PE 100 | 9 208,0 | 9 906,5 | |
| 17 | PE 100 | 9 180,1 | 9 420,5 | |
| 18 | PE-Xa | > 20 000 | > 30 000 | |
| 19 | PE-Xb | > 11 000 ³⁾ | > 20 400 | |

1) 80 °C, Zugspannung 4 N/mm², 2% Arkopal N-100 2) 80 °C, Vergleichsspannung 4 N/mm², 2% Arkopal N-100
 3) Versuch abgebrochen

Tabelle 4: Aktivierungsenergien für den Zeitstandbruch von Rohren unter Innendruck mit und ohne zusätzlicher Punktlast (Sprödbereich).

| Prüfserie | Werkstoffklasse | Aktivierungsenergie (kJ/mol) | Bemerkung |
|-----------|-----------------|------------------------------|---------------------------|
| 1 | PE 63 | 66,8 | mit Punktlast |
| 3 | PE 80 | 81,63 | |
| | PE 63 | 165,1 | ohne Punktlast (DIN 8075) |
| | PE 80 | 168,6 | |
| | PE 100 | 178,9 | |

Tabelle 5: Einwirkung von Wasser bzw. Netzmittel auf Polyethylen bei Zeitstandversuchen.

| Prüfserie (Probenart) | Werkstoffklasse | Prüfzeit in Arkopal N-100 (h) ¹⁾ | Prüfzeit in Wasser (h) ¹⁾ | Zeitfaktor t _{Wasser} /t _{Netzmittel} |
|----------------------------|-----------------|---|--------------------------------------|---|
| 1 (FNCT) | PE 63 | 10,6 | 44,3 | 4,2 |
| 2 (FNCT) | PE 80 | 30,8 | 171,9 | 5,6 |
| 3 (FNCT) | PE 80 | 51,0 | 289,0 | 5,7 |
| 7 (FNCT) | PE 100 | 238,8 | 2320,1 | 9,7 |
| Lit. [5] (glatter Zugstab) | PE 80 | – | – | 25 – 30 |

1) 80 °C, Zugspannung 4 N/mm², Geometrischer Mittelwert aus je 3 Einzelproben

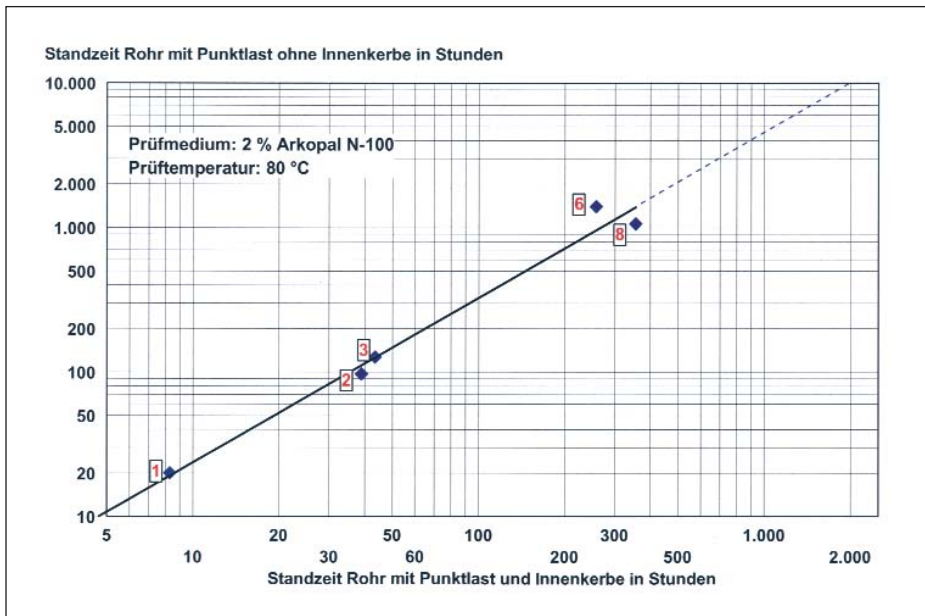


Bild 9: Einfluss von Innenkerben auf das Zeitstandverhalten von punktbelasteten Rohren (Prüfserien 1, 2, 3, 6 und 8).

10. Fazit: Sandlose Verlegung möglich

Unter Berücksichtigung der genannten Einflussgrößen wurden die in **Tabelle 6** und **Tabelle 7** angegebenen Mindestwerte für die Standzeiten im FNCT bei 80 °C, 4 N/mm² in 2 % Arkopal N-100 berechnet [5].

Für die sandlose Verlegung von PE-Rohren SDR 11 mit einem Innendruck von 4 bar ist demnach zum Beispiel eine Mindestzeit im FNCT von ca. 2000 Stunden

erforderlich (Sicherheitsfaktor 2). Diese Mindestqualität wird von 8 der 19 untersuchten Rohrqualitäten erreicht.

11. Zusammenfassung

Die Rohstoffentwicklung von Polyethylen in den letzten 20 Jahren führte zur Verbesserung des Zeitstandfestigkeitsverhaltens. Es stellte sich somit die Frage, ob für erdverlegte Rohre aus Polyethylen die Sandeinbettung weiterhin notwendig ist. Die Untersuchungen werden mit dem Ziel durchgeführt, das Niveau der Mindest-

qualität von erdverlegten Rohren aus Polyethylen zu beschreiben, oberhalb derer auf eine Sandeinbettung verzichtet werden kann. Diese Mindestqualität wird von einigen der auf dem Markt befindlichen Rohrqualitäten erreicht. ■

Literaturhinweise

- [1] HESSEL, J. (1995): Zeitstandverhalten von Polyethylen unter dem Einfluss lokal konzentrierter Spannungen. – 3R international 34, 10/11, S. 573/579, Vulkan-Verlag, Essen
- [2] GAUBE, E. et al. (1985): Zeitstandfestigkeit und Alterung von Rohren aus HDPE; Erfahrungen aus 30 Jahren Rohrprüfung. – Kunststoffe 7, S. 412/415
- [3] WESTPHAL, W. H. (1952): Physikalisches Wörterbuch. – Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/ Heidelberg
- [4] Ringversuch zum FNCT 1998: Teilnehmer: BASF, DSM, FINA, HESSEL, MAINOVA, REINERT-RITZ, SIMONA, SOLVAY, TARCO, TGM, TWI, TÜV Süddeutschland Symposium am 03.12.1998, Hauptgeschäftsstelle des Deutschen Verbandes für Schweißen und verwandte Verfahren (DVS), Düsseldorf
- [5] HESSEL, J. (2001): Mindestlebensdauer von erdverlegten Rohren aus Polyethylen ohne Sandeinbettung. – Teil 1: 3R international Heft 4, S. 178–184; Teil 2: 3R international Heft 6, S. 360–366, Vulkan-Verlag Essen

Autor

Dr.-Ing. Joachim Hessel
 HESSEL Ingenieurtechnik GmbH
 Am Vennstein 1a
 52159 Roetgen
 Tel.: 0 24 71/9 20 22-0
 Fax: 0 24 71/9 20 22-19
 E-Mail: joachim.hessel@hessel-ingtech.de
 Internet: www.hessel-ingtech.de

Tabelle 6: Mindeststandzeiten im FNCT für punktbelastete Rohre ohne Innenkerbe.

| FNCT _{min} (h) | Vergleichs- spannung aus Rohrinnendruck (N/mm ²) | Sicherheits- faktor |
|----------------------------|---|------------------------|
| 575 | 4,0 | 1,0 |
| 676 | | 1,25 |
| 948 | | 2,0 |
| 483 | 3,0 | 1,0 |
| 567 | | 1,25 |
| 770 | | 2,0 |
| 360 | 2,0 | 1,0 |
| 423 | | 1,25 |
| 575 | | 2,0 |
| 219 | 1,0 | 1,0 |
| 257 | | 1,25 |
| 360 | | 2,0 |
| 133 | 0,5 | 1,0 |
| 156 | | 1,25 |
| 219 | | 2,0 |

Tabelle 7: Mindeststandzeiten im FNCT für punktbelastete Rohre mit Innenkerbe.

| FNCT _{min} (h) | Vergleichs- spannung aus Rohrinnendruck (N/mm ²) | Sicherheits- faktor |
|----------------------------|---|------------------------|
| 1976 | 4,0 | 1,0 |
| 2645 | | 1,25 |
| 3254 | | 2,0 |
| 1606 | 3,0 | 1,0 |
| 1886 | | 1,25 |
| 2645 | | 2,0 |
| 1199 | 2,0 | 1,0 |
| 1408 | | 1,25 |
| 1976 | | 2,0 |
| 728 | 1,0 | 1,0 |
| 855 | | 1,25 |
| 1199 | | 2,0 |
| 442 | 0,5 | 1,0 |
| 519 | | 1,25 |
| 728 | | 2,0 |

Alle Abbildungen: Hessel Ingenieurtechnik GmbH