

Rohre aus Polyethylen – Stand und Perspektiven

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

Einleitung

Die ersten Rohre aus Niederdruckpolyethylen bzw. Polyethylen hoher Dichte wurden 1954 in industriellem Maßstab hergestellt [1]. Im Vorfeld waren bereits grundlegende Erkenntnisse zum Zeitstandverhalten von Rohren und Stäben aus Polyethylen gewonnen worden [2]. Es zeigte sich dabei, dass für die ingenieurtechnische Auslegung von mehrachsigt beanspruchten Bauteilen aus Polyethylen die an Rohren gemessenen Zeitstandkurven maßgebend sind.

Für die langzeitige Anwendung des korrosionsbeständigen Polyethylens im industriellen Bereich (z. B. für 10 Jahre) oder bei der kommunalen Wasserversorgung (z. B. für 50 Jahre) ergab sich die Notwendigkeit einer zuverlässigen Vorhersage der Eigenschaften bei einer vorliegenden Versuchszeit von nur 3 Jahren [3]. Die anfangs graphische Extrapolation war ausreichend genau, weil genügend Messwerte zur Verfügung standen [4] und führte zu demselben Ergebnis wie die auf dem Arrhenius-Gesetz basierende mathematisch-analytische Extrapolation [5].

Die heute angewandten Extrapolationsmethoden (z. B. nach ISO 9080) liefern Mindestfestigkeiten für 50 Jahre bei 20 °C auf der Basis einer Prüfzeit von 10000 Stunden (ca. 1,1 Jahre).

Zeitstandfestigkeit - Dimensionierungsgrundlage bei Stahl und Polyethylen

Das Phänomen der Zeitstandfestigkeit ist aus der Zeitstandprüfung von Hochtemperaturstählen bekannt. Die dabei gesammelten Erfahrungen übertrug K. Richard¹ auf die Prüfung von Polyethylen (Bild 1).

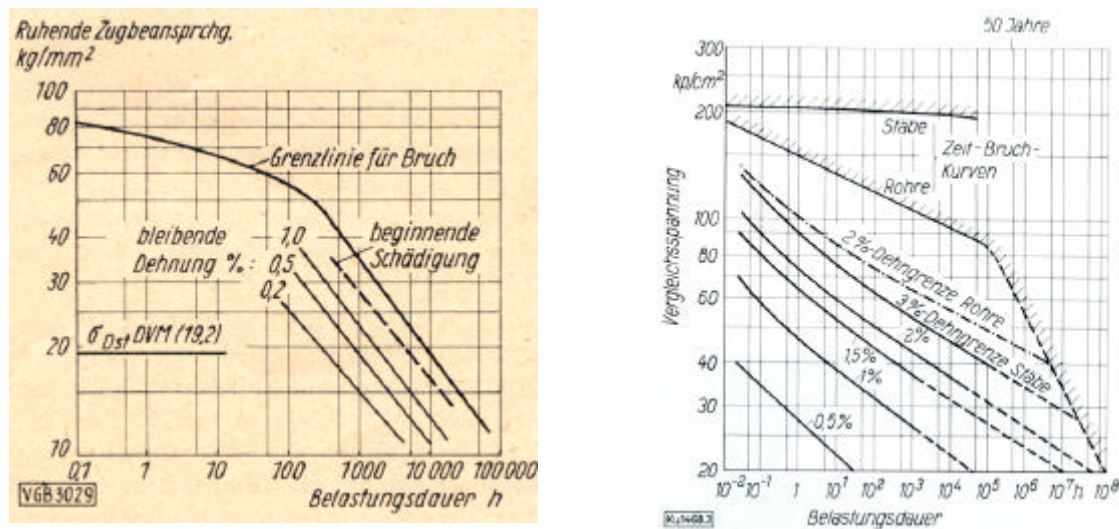


Bild 1: Zeitstandfestigkeit von Stahl bei 500 ° (links) bzw. Polyethylen bei 20 °C (rechts)

Die im Bild 1 gezeigten Zeitstandkurven für Stahl bei 500 °C bzw. für Polyethylen bei 20 °C weisen qualitativ denselben Verlauf auf. Die doppelt logarithmische Darstellungsform wurde für die Norm-Zeitstandkurven der Rohre aus Polyethylen nach DIN 8075 übernommen.

¹ Dr.-Ing. Kurt Richard, Leiter der Werkstoffstelle von 1950 bis 1972, Farbwerke Hoechst, vormals Meister Lucius und Brüning, Frankfurt-Höchst

Normung – Mindestqualität als Berechnungsgrundlage

Die stetige Verbesserung der Rohstoffe für Rohre aus Polyethylen in den letzten 50 Jahren kann z. B. an der zeitlichen Entwicklung der Mindestanforderungen nach DIN 8075 [6] nachvollzogen werden (Tabelle1).

Erscheinungsjahr DIN 8075	Bezeichnung	Prüfanforderung* in Stunden	E-Modul in N/mm ²	Anmerkung
1960	PE hart	54	1200	Lineare Polymerkette
1987	HDPE; PE-HD	170	800 -1000	Verzweigungen (Copolymer)
1999	PE 80	1000	650 - 900	Mono – und bimodaler Herstellungsprozess
1999	PE 100	3000	1200	Bi – bzw. multimodaler Herstellungsprozess

Tabelle 1: Entwicklung der Mindestanforderungen nach DIN 8075

Die Zeitstanddiagramme nach DIN 8075 können für Rohre aus Polyethylen zur Förderung von Wasser bzw. Gas (oder bei Medien, die auf Polyethylen wie Wasser wirken) ohne weitere Einschränkungen verwendet werden.

Für Medien, die gegenüber Wasser zeitstandverkürzend wirken, werden bei der Dimensionierung Abminderungsfaktoren verwendet, die für eine Vielzahl von Substanzen zur Verfügung stehen [7].

Das Normungsgeschehen hat in der Vergangenheit gezeigt, dass ca. 10 Jahre zwischen der Markteinführung einer neuen „Generation“ eines Polyethylen-Werkstoffs und der Fertigstellung der zugehörigen Norm vergehen. Es ist deshalb verständlich, dass die heute am Markt befindlichen Rohre gegenüber den gültigen Normanforderungen nochmals höhere Standzeiten bei der Prüfung nach DIN 8075 aufweisen.

Erfahrungsgemäß werden an PE 80- bzw. PE 100-Werkstoffen, die eine bauaufsichtliche Zulassung durch das Deutsche Institut für Bautechnik besitzen², bei 80 °C und den in DIN 8075 vorgegebenen Prüfspannungen in der Regel Standzeiten von einem Jahr ohne Bruch erreicht.

Hierdurch wird einerseits der definitionsgemäße Charakter der Mindestkurve dokumentiert, andererseits ein erheblicher Abstand zwischen den Mindestanforderungen nach DIN 8075 und realer Zeitstandfestigkeit belegt.

Die bereits von Gaube 1959 beschriebenen flachen „Äste“ für den Verformungsbruch und die steileren „Äste“ für den Sprödbruch der Zeitstandkurven für Polyethylen im doppelt logarithmischen Maßstab wurden ergänzt durch den in [11] beschriebenen „Ast“ der Wärmealterung.

² http://zulassungen.dibt.de/deutsch/data/zulassungen/3f/nat_aktplan.htm

Das Zeitstandverhalten von Rohren aus Polyethylen ist qualitativ im Bild 2 dargestellt.

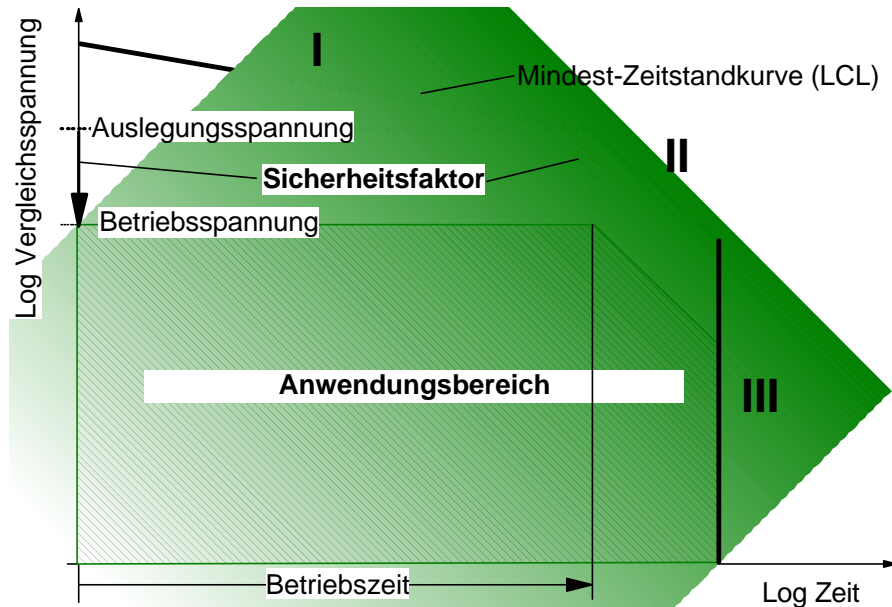


Bild 2: Schematische Darstellung des Zeitstandverhaltens von Rohren aus Polyethylen
I: Verformungsbrüche; II: Spannungsrisse; III: Wärmealterung

Bei der ingenieurmäßigen Auslegung ist generell ein Sicherheitsfaktor einzubeziehen. Der Sicherheitsfaktor wird abhängig vom Gefährdungspotential im Versagensfall [12] und der Werkstoffcharakteristik unterschiedlich hoch gewählt. Ein vergleichsweise niedriger Sicherheitsfaktor kann bei duktilen, verformungsfähigen Werkstoffen gewählt werden, weil inhärente, nicht quantifizierbare Auslastungsreserven vorhanden sind. Bei sprödem Werkstoffverhalten muss ein höherer Sicherheitsfaktor gewählt werden, da hier ein Versagen durch Sprödbruch zu unterstellen ist [13].

Bei den für Rohre aus Polyethylen verwendeten Sicherheitsfaktoren liegen die Betriebsspannungen bei bestimmungsgemäßer Belastung immer im Spannungsrissbereich (Bereich II im Bild 2).

Die Anwendung höherer Innendrucke bei Rohren aus Polyethylen wurde 1987 durch das erste am Markt befindliche PE 100 der Firma Solvay möglich [8]. Nachdem man bei der Normung von PE 100 gleichzeitig den Sicherheitsfaktor (für das Medium Wasser) mit 1,25 festgesetzt hatte, konnten gegenüber den bisherigen Mindestkurven unter Beibehaltung der Rohrabmessungen um 60 % höhere Innendrucke realisiert werden.

Prüfung – Verbesserte Rohstoffqualitäten erfordern neue Prüfmethode

Die Prüfung der realen Zeitstandfestigkeit unter Verwendung der Prüfbedingungen nach DIN 8075 ist bei den vorgenannten Werkstoffen in vertretbaren Zeiten nicht mehr möglich. Deshalb wurden Prüfmethode entwickelt, die sich durch eine weitere Zeitraffung auszeichnen [9, 10].

Zur anwendungsbezogenen Beurteilung von Polyethylen-Werkstoffen sind Prüfverfahren geeignet, die in vertretbaren Prüfzeiten eine zuverlässige Aussage über das Spannungsrissverhalten erlauben. Dabei müssen sich die bei erhöhter Temperatur gewonnenen Ergebnisse auf Basis einer allgemein akzeptierten physikalischen Gesetzmäßigkeit auf die Betriebsbedingungen sicher extrapolieren lassen.

Diese Bedingungen erfüllt der FNCT als heute schnellste Zeitstandprüfung von Polyethylen.

Den Zusammenhang von Prüfungen im FNCT und Zeitstandinnendruckversuchen an Rohren hat Fleißner 1987 publiziert [14]. Die im Bild 3 gezeigten Prüfergebnisse in wässrigen Netzmittellösungen bestätigen die gute Korrelation zwischen FNCT und Prüfung von Rohren [15].

Standzeit Rohr mit Punktlast + Innenkerbe in Stunden

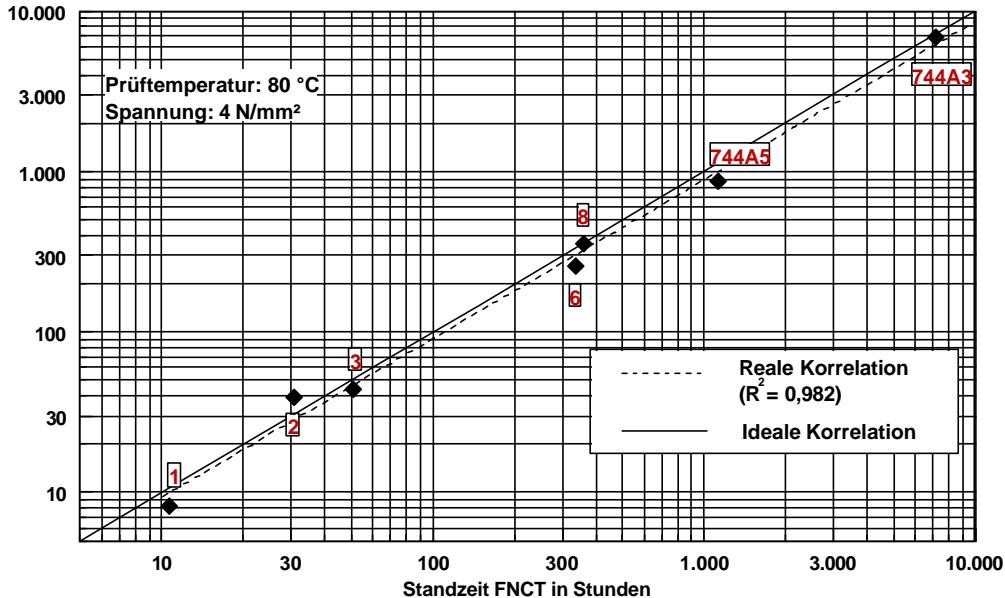


Bild 3: Korrelation zwischen FNCT und Zeitstandinnendruckversuchen an Rohren in wässrigen Netzmittellösungen [26]

Die Prüfzeit im FNCT liegt bei optimierten Prüfbedingungen zwischen 0,3 und 5 %³ gegenüber der Prüfzeit von Rohren unter Innendruck nach DIN 8075. Mit dem FNCT sind nunmehr auch moderne Rohrwerkstoffe hinsichtlich ihres Spannungsrisssverhaltens in vertretbaren Prüfzeiten zu beschreiben.

Im **Bild 4** sind Prüfergebnisse im FNCT für Proben von Rohren aus Polyethylen verschiedener „Generationen“ dargestellt. Die Zahlen über den Balken entsprechen den Standzeiten in Stunden.

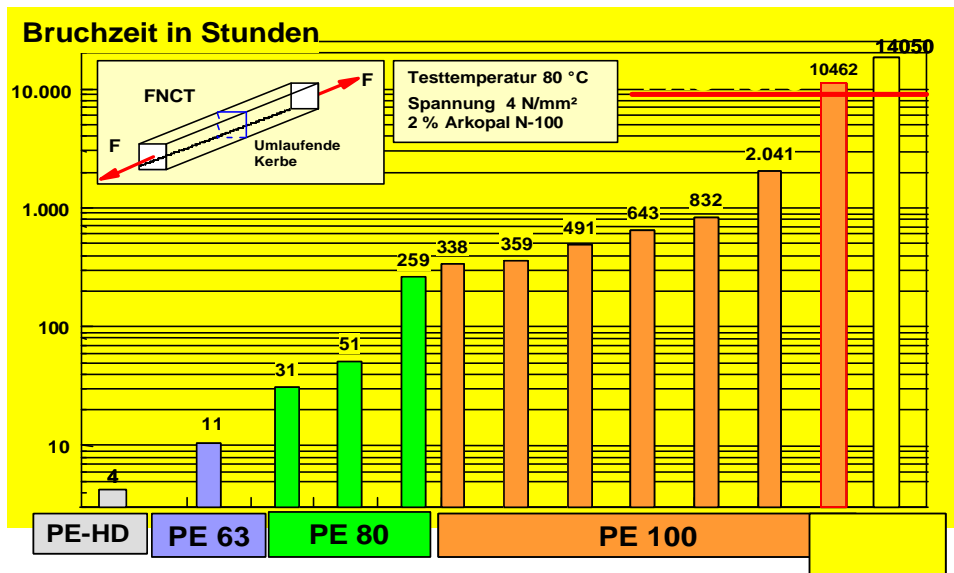


Bild 4: Reale Entwicklung des Widerstandes gegenüber Spannungsrisssbildung (Herstellung: PEHD ab 1960; PE 80 ab 1977; PE 100 ab 1987; PE 100-RC ab 2003)
PAS 1075: Rohre aus Polyethylen für alternative Verlegetechniken; Abmessungen, Technische Anforderungen und Prüfung

³ PA ACT 2.1-9, 2005-09, Accelerated Creep Test (ACT) – Beschleunigtes Prüfverfahren mit Validierungsnachweis zur Bestimmung der Zeitstandfestigkeit von Polyolefinen.
Akkreditiertes Prüfverfahren der HESSEL Ingenieurtechnik GmbH, DAP-PL-37600.00

Die Aktivierungsenergie – Brücke zwischen Prüf- und Betriebsbedingungen

In der Kunststoffprüfung wird das Arrhenius-Gesetz [16] herangezogen, um von kurzen Standzeiten bei hohen Prüftemperaturen auf entsprechend längere Betriebszeiten bei niedrigeren Temperaturen zu extrapolieren. Besteht im Arrhenius-Diagramm zwischen der reziproken absoluten Temperatur und dem Logarithmus der Standzeit ein linearer Zusammenhang, ist die Aktivierungsenergie E_A über den betrachteten Temperaturbereich konstant. Die Berechnung der Aktivierungsenergie kann in Anlehnung an Westphal [17] gemäß nachfolgender Gleichung erfolgen.

$E_A = 1,9152 \cdot 10^{-2} \frac{\log t_{B1} - \log t_{B2}}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} \frac{\text{kJ}}{\text{mol}}$	E_A Aktivierungsenergie [kJ/mol] t_{B1} Standzeit bei der Temperatur T_1 t_{B2} Standzeit bei der Temperatur T_2 T_1, T_2 absolute Temperatur [K]
---	--

Bei der Berechnung der Aktivierungsenergie ist es von ausschlaggebender Bedeutung, dass die ausgewerteten Proben ein und denselben Bruchmechanismus aufweisen (z. B. verformungsarme Zeitstandbrüche).

Unter der Annahme, dass z. B. die Prüfung bei 80 °C stattfindet und auf das Verhalten bei 20 °C extrapoliert werden soll, kann aus o. g. Gleichung für verschiedene Aktivierungsenergien der entsprechende Zeitfaktor berechnet werden. Es ergibt sich z. B. ein Zeitfaktor von 100 bei einer Aktivierungsenergie von 66,1 kJ/mol. Diese Aktivierungsenergie von 66,1 kJ/mol ist mindestens notwendig, um z. B. bei einer Prüfzeit von einem Jahr bei 80 °C auf eine Betriebszeit von 100 Jahren bei 20 °C zu extrapolieren.

Wärmealterung – Das „Ende der Fahnenstange“

Bereits früh wurde erkannt, dass sich der Wärmealterungsprozess bei Polyethylen durch die Arrhenius-Gleichung sehr gut beschreiben lässt [18]. Dies gilt sowohl für die mechanischen Kenngrößen (z. B. Reißdehnung oder Bereich III in Bild 1) als auch für Ergebnisse aus polymerphysikalischen Untersuchungen [19].

Die maximale Einsatzdauer von Polyethylen wird durch die Wärmealterung (Bereich III im Bild 2) begrenzt.

Mit Beginn der Wärmealterung versprödet das Polyethylen und kann keine Zugbelastungen mehr ertragen. Die Zeit bis zur beginnenden Wärmealterung hängt bei vorgegebener Stabilisierung des Polyethylenrohres von der Temperatur, dem Sauerstoffangebot und der Strömungsgeschwindigkeit des flüssigen Mediums ab.

Im Beiblatt 19 zur Richtlinie DVS 2205 sind die für Polyethylen allgemein akzeptierten Zeiten für den Beginn der Wärmealterung im Temperaturbereich von 80 °C bis 20 °C angegeben (Bild 5).

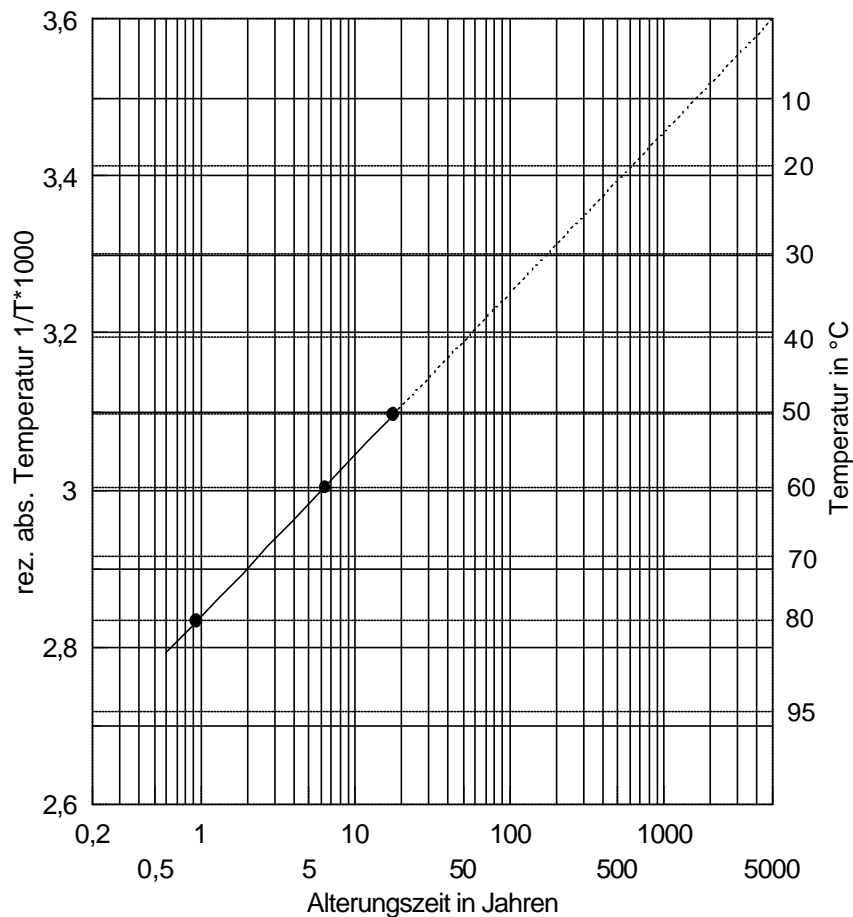


Bild 5: Zeiten bis zur beginnenden Wärmealterung von Polyethylen nach DVS 2205-1, Beiblatt 19

Die aus der Steigung der „Arrhenius-Geraden“ in Bild 5 berechenbare Aktivierungsenergie für die Wärmealterung beträgt 93 kJ/mol.

Bei der Anwendung von Rohren aus Polyethylen im industriellen Bereich ist zudem der frühere Beginn der Wärmealterung bei quellend wirkenden Medien zu beachten.

Neueste Erkenntnisse im Zusammenhang mit Polyethylen-Rohren, die lokal über die Streckdehnung beansprucht worden sind, zeigen ebenfalls lokal eine vorzeitige Wärmealterung. Zur Klärung dieses Phänomens werden derzeit im Rahmen eines Gemeinschaftsprogramms unter Beteiligung von Rohstoffherstellern und Rohrerstellern Untersuchungen durchgeführt.

Die Nachmessung der polymerphysikalischen Eigenschaften sowie der Restlebensdauer an Rohren aus Hostalen GM5010, die seit 41 Jahren unter ständigem Druck des Wassernetzes im heutigen Industriepark Höchst standen, ergab einen noch ausreichenden Widerstand gegenüber Wärmealterung sowie eine Mindest-Restlebensdauer bei Betriebsbedingungen mehr als 17 Jahren⁴ [20].

Schweißen – Druckrohr und Schweißverbindung mit der gleichen Langzeitfestigkeit

Bei Rohren unter Innendruck beträgt die Umfangsspannung das 2fache der in Längsrichtung des Rohres wirkenden Spannung. Bei stumpf geschweißten Rohren wird die Schweißverbindung demnach mit einer Zugspannung belastet, die 50 % der Umfangsspannung in der Rohrwand beträgt. Nach Richtlinie DVS 2205-1 [21] wird ein Mindest-Zeitstandzugschweißfaktor von 0,8 gefordert, um

⁴Bestimmung durch direkte Extrapolation von Prüf- zu Betriebsbedingungen mit dem MAC-Konzept (Modified Arrhenius Concept) unter der (konservativen) Voraussetzung, dass die Aktivierungsenergie zu niedrigeren Spannungen nicht kleiner wird.

die Spannungsüberhöhung an den Wulstkerben und eventuelle Zusatz-Längsspannungen aus Biegung und/ oder behinderter Wärmedehnung der Rohre abzusichern.

Das Langzeitverhalten von Schweißverbindungen wird im Zeitstandzugversuch nach Richtlinie DVS 2203-4 geprüft [22]. Die Langzeitversuche werden zur Zeitraffung bei erhöhter Temperatur und in wässriger Netzmittellösung durchgeführt.

Bei allen Zeitstandprüfungen an Schweißverbindungen, die nach Richtlinie DVS 2207-1 [23] hergestellt worden waren, verläuft der Bruch nicht durch die Fügeebene, sondern von der Wulstkerbe ausgehend durch das Grundmaterial (Bild 6). Hierdurch wird deutlich, dass das Zeitstandverhalten dieser Schweißverbindungen von der Kerbe zwischen Schweißwulst und Grundmaterial beeinflusst wird.

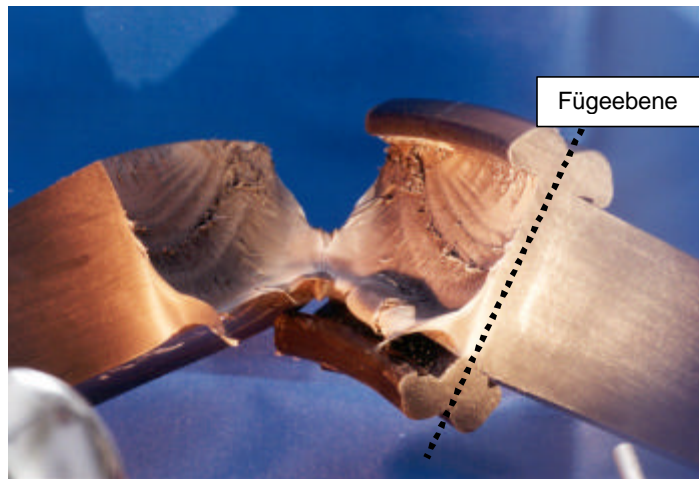


Bild 6: Bruchverlauf nach dem Zeitstandzugversuch an der Schweißung eines Rohres aus PE 100 500 mm x 48 mm

Da in der Praxis ein ideales Abarbeiten der Schweißwülste nicht möglich ist, wird die Standzeit einer Stumpf-Schweißverbindung maßgeblich durch die Kerbempfindlichkeit (Spannungsrissempfindlichkeit) der Rohrwerkstoffe bestimmt. Der Zusammenhang zwischen der Spannungsrissempfindlichkeit des Werkstoffs und dem Zeitstandverhalten von Stumpfschweißverbindungen wird durch die Prüfung der Spannungsrissempfindlichkeit im FNCT und der Schweißverbindungen aus PE 80, PE 100 und PE 100-RC deutlich (Bild 7).

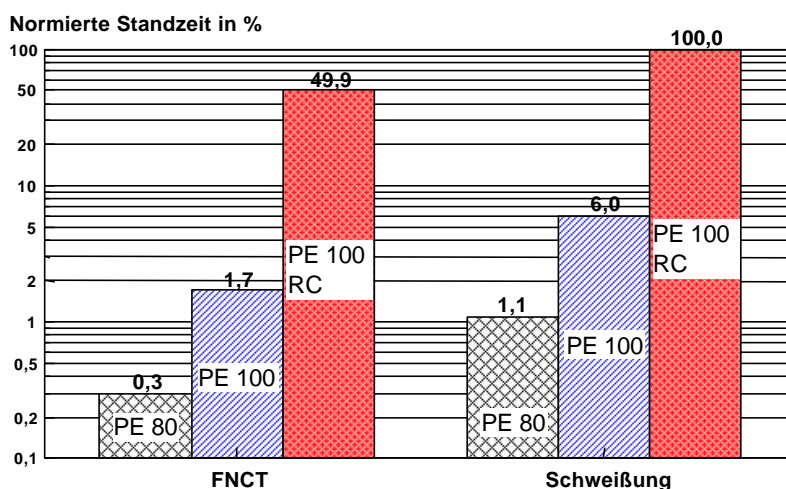


Bild 7: Langzeitverhalten von Rohren im FNCT und deren Stumpfschweißverbindungen

Mit zunehmenden Standzeiten im FNCT erhöhen sich die Standzeiten der Schweißverbindungen und damit deren Lebensdauer.

Zum Verbinden von Rohren aus Polyethylen hat sich neben dem Heizelementstumpfschweißen das Heizwendelschweißen bewährt. Bei fachgerechter Ausführung beider Schweißverfahren nach Richtlinie DVS 2207-1 kann von gleich guter Qualität ausgegangen werden. Heizwendelschweißmuffen werden heute für PE-Rohre bis zu einem Außendurchmesser von 800 mm angeboten.

Die langzeitige Haltbarkeit der Heizwendel-Schweißverbindungen kann nach DVS 2207-1 im Zeitstandinnendruckversuch oder im Zeitstandzugversuch geprüft werden. Allerdings ist beim Zeitstandinnendruckversuch die (Schub-)Belastung der Heizwendel-Schweißverbindung vergleichsweise gering, so dass eine Aussage über die langzeitige Bindefestigkeit der Fügeebene nicht möglich ist. Der Zeitstandzugversuch mit Belastung senkrecht zur Fügeebene nach DVS 2203-4 Beiblatt 1 an Proben aus der Heizwendelschweißverbindung differenziert hingegen gut die Zeitstandfestigkeit der Verbindung.

Voraussetzung für eine einwandfreie Schweißverbindung ist u. a. die spannende Abarbeitung der Rohroberfläche. Bei Rohren aus PE 100 wird die Verwendung von Rotationsschälgeräten empfohlen. Die Spandicke sollte ca. 0,2 mm betragen.

Bei fachgerecht ausgeführten Heizwendelmuffen-Schweißverbindungen von Rohren aus Polyethylen findet der Bruch erfahrungsgemäß nicht in der Fügeebene sondern in der Heizwendelebene statt [24].

Moderne Rohrwerkstoffe - Höherer Nutzen für den Endanwender

Die stetige Verbesserung der Polyethylen-Rohstoffe hinsichtlich des Widerstandes gegenüber Spannungsrissen führte in den letzten 50 Jahren zu einer Verlängerung der Standzeiten um den Faktor 200 bis 1000 (Bild 4).

Ein direkt nutzbarer Vorteil für den Anwender besteht bei hochspannungsriss“beständigen“ Polyethylen-Rohrwerkstoffen durch die in der Wanddickenberechnung heranzuziehenden A_{2B} -Faktoren. Die A_{2B} -Faktoren können bei spannungsrissfördernden Chemikalien reduziert werden, so dass sich geringere Wanddicken (z. B. im Behälterbau) ergeben.

Dünnere Querschnitte lassen sich mit geringerem Zeitaufwand herzustellen und führen zu geringeren Schweißnahtenspannungen und damit zu ökonomischen und qualitativen Vorteilen.

Eine weitere Möglichkeit zur wirtschaftlichen Nutzung hochspannungsriss“beständiger“ Polyethylen-Rohrwerkstoffe besteht in der Anwendung kostensparender Verlegeverfahren [25].

So sind sichere sandbettfreie Verlegungen von Druckrohren aus Polyethylen (Bild 8) ab einem Mindestwiderstand des Rohrwerkstoffs gegenüber Spannungsrissbildung für eine Betriebszeit von z. B. 50 Jahren möglich.

Als Nachweisverfahren haben sich der FNCT⁵ einerseits für die Rohstoffkontrolle und der Punktlastversuch⁶ als Bauteilprüfung bewährt.

⁵ PA FNCT 2.-3;2004-05:Full Notch Creep Test (FNCT) in Anlehnung an DIN EN 12814-3 (2005-10), Anhang A.1

⁶ PA PLP 2.2-2;2004-05:Innendruckversuche an Rohren aus thermoplastischen Kunststoffen mit zusätzlicher äußerer konzentrierter Last (Punktlast, Linienlast)

Akkreditierte Prüfverfahren der HESSEL Ingenieurtechnik GmbH, DAP-PL-37600.00



Bild 8: Versuchsstrecke (Länge 300 m) mit sandbettloser Verlegung von Rohren aus Polyethylen in steinigem Boden (Kalksteinfelsen) unter Wiederverwendung des Aushubs

In Punktlastversuchen an Rohren aus Polyethylen bei 80 °C, 60 °C, 40 °C und 20 °C wurde der Nachweis erbracht, dass die Aktivierungsenergie zwischen 80 °C und 20 °C konstant ist, da sich das Zeitstandverhalten mit ausreichender Genauigkeit durch eine Gerade im Arrhenius-Diagramm darstellen lässt (**Bild 9**).

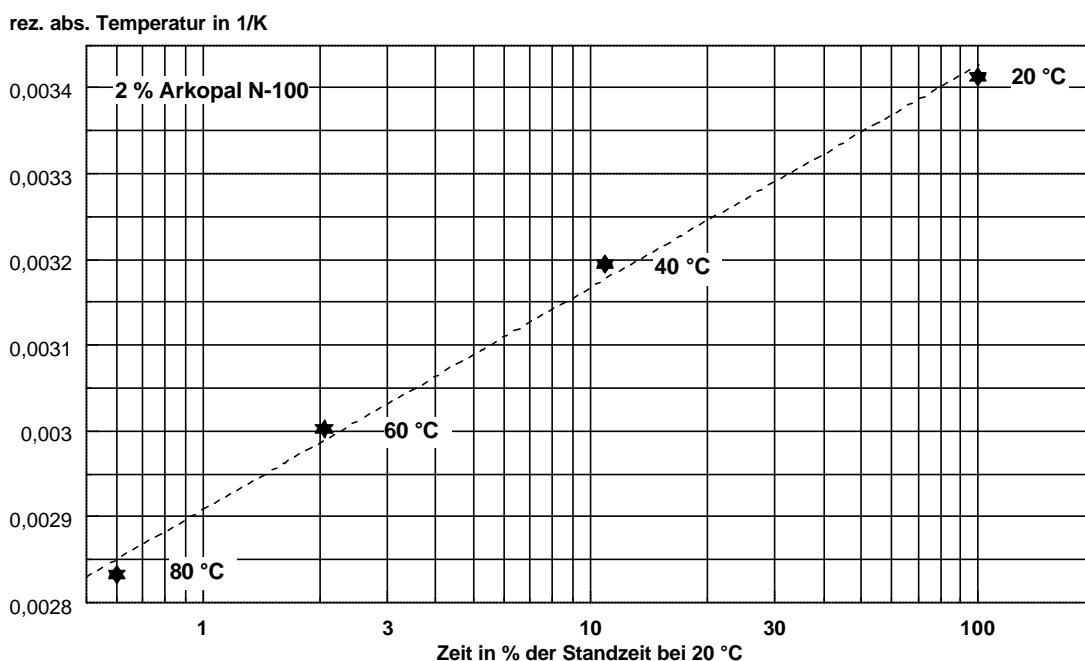


Bild 9: Zeitstandinnendruckversuche von PE-Rohren unter Innendruck (Umfangsspannung 4 N/mm²) mit zusätzlicher äußerer Punktlast

Damit ist eine sichere Extrapolation von Prüfungen bei 80 °C auf das Verhalten bei 20 °C möglich.

Die statistische Auswertung der in [27] publizierten Ergebnisse an Rohren aus Polyethylen unter Innendruck mit zusätzlicher äußerer Punktlast ergibt eine Mindestkurve (statistisch liegen 97,5 % der Messwerte oberhalb dieser Linie) für die Anforderungen im FNCT (**Bild 10**). Der Schnittpunkt dieser Mindestkurve mit der Wärmealterungszeit bei 80 °C (Anforderung an das punktbelastete Rohr), liegt bei 3300 Stunden.

Hieraus kann der Schluss abgeleitet werden, dass aus allen Polyethylen-Rohstoffen, die 3300 Stunden im FNCT erreichen (80 °C, 4 N/mm², 2 % Arkopal N-100), bei fachgerechter Verarbeitung sandbettlos verlegbare Rohre hergestellt werden können.

Standzeit Rohr mit Punktlast (h)

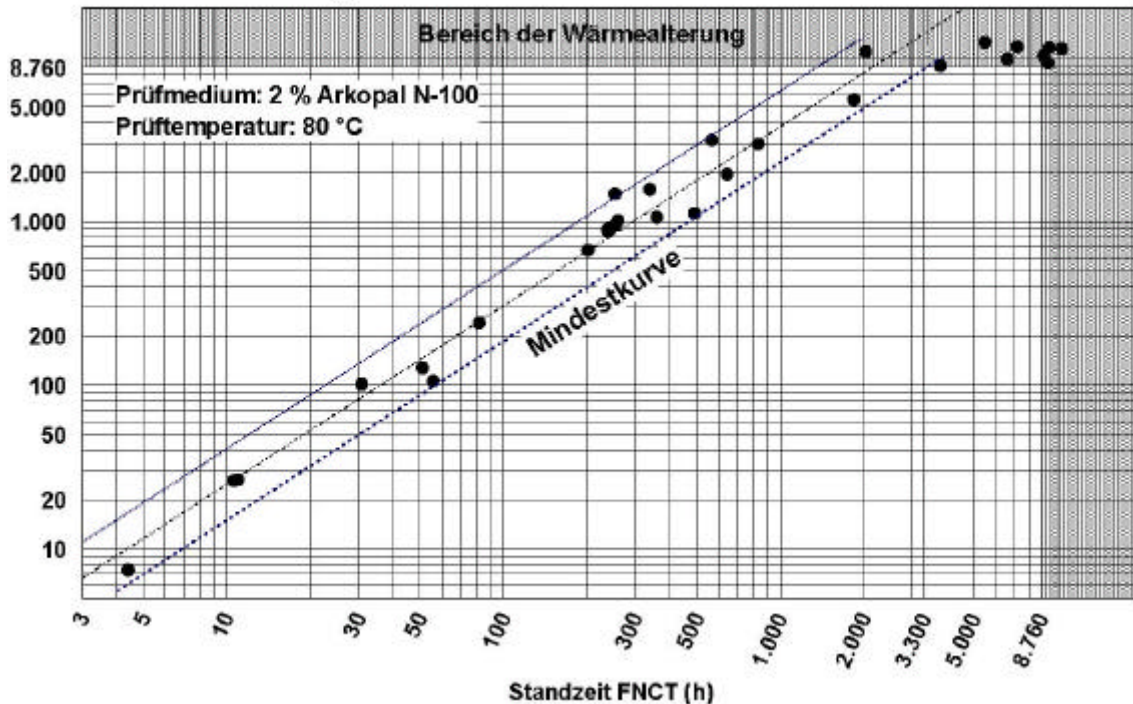


Bild 10: Korrelation zwischen den Ergebnissen von Punktlastversuchen an PE-Rohren und im FNCT an Proben aus diesen Rohren nach PAS 1075

Die Prüfung mit 2 % Arkopal N-100 über mindestens 1 Jahr im Punktlastversuch ohne Bruch ergibt einen Sicherheitsfaktor von 2,1. Stärker spannungsrisssfördernde Netzmittel führen bei einer Standzeit von einem Jahr zu einen höheren Sicherheitsfaktor [15].⁷

Auf der Grundlage der bisher fünfjährigen Prüfpraxis zum Zeitstandverhalten von Polyethylen-Druckrohren, mit zusätzlichen äußeren Punkt- oder Linienlasten [26], sind Mindestanforderungen an Rohstoffe und Rohre im Rahmen eines umfassenden Qualitätssicherungskonzepts festgelegt worden [28].

Qualitätssicherung – Nachhaltige Absicherung der Produkteigenschaften

Die kontinuierliche Absicherung der entscheidenden Produkteigenschaften für sandbettlos verlegbare Rohre aus Polyethylen basiert auf der wiederkehrenden Prüfung der maßgebenden Einflüsse. Als wichtigste Prüfungen in diesem Zusammenhang werden angesehen:

- Ermittlung der Übertragungsfunktion auf Betriebstemperatur („Arrhenius“)
- Kontrolle der eingesetzten Rohstoffchargen (Spannungsrisssverhalten)
- Kontrolle der Werkstoffeigenschaften nach der Verarbeitung (Spannungsrisssverhalten; Isotropie über Rohrwandquerschnitt)
- Nachweis der Mindestlebensdauer in Punktlastversuchen (Spannungsrisssverhalten; Wärmealterung)
- Statistische Absicherung der Ergebnisse (Mindestgröße der Grundgesamtheit)

Die regelmäßige Qualitätssicherung durch o. g. Prüfungen stellt die Voraussetzung für einen sicheren Betrieb von sandbettlos verlegten Rohren aus Polyethylen dar.

Rohre nach PAS 1075 [29] geben dem Endanwender die Sicherheit einer mindestens 100 jährigen Betriebsdauer (z. B. Gas- oder Wasser bei maximal 20 °C) bei gleichzeitiger sandbettloser Verlegung.

⁷ Die Prüfung in Wasser ergäbe einen „Sicherheitsfaktor“ von 1,0, der für die Dimensionierung unzureichend ist.

Literatur:

- [1] Gaube, E., Diedrich, G. u. Müller, W.: Rohre aus thermoplastischen Kunststoffen - Erfahrungen aus 20 Jahren Zeitstandprüfung - Kunststoffe, 66. Jahrgang (1976) Heft 1, S. 2 - 8
- [2] Gaube, E.: Zeitstandfestigkeit und Spannungsrissbildung bei Niederdruckpolyäthylen Dissertation D 17, TH Darmstadt, 1959
- [3] Richard, K. u. Diedrich, G.: Standfestigkeit von einigen Hochpolymeren Kunststoffe, Bd. 45 (1955) S. 429 - 433
- [4] Richard, K., Diedrich, G. u. Gaube, E.: Das Problem der Zeitstandfestigkeit und Spannungsrissbildung bei Kunststoffrohrleitungen Dechema-Monographie Bd. 36 (1958) S. 193 - 201
- [5] Gaube, E.: Anwendung der Larsen-Miller-Korrelation auf Belastungskennwerte von Niederdruckpolyäthylen Kunststoffe, Bd. 49(1959) Heft 3
- [6] DIN 8075: Rohre aus Polyethylen hoher Dichte, Anforderungen und Prüfung
- [7] DIBt- Medienlisten 40 (Januar 2004)
- [8] Solvay: Firmenschrift Eltex TUB 121 (1994)
- [9] DIN EN ISO 13479: Rohre aus Polyolefinen für den Transport von Fluiden; Bestimmung des Widerstandes gegenüber Rissfortpflanzung; Prüfverfahren für langsames Risswachstum an gekerbten Rohren (Kerbprüfung)
- [10] ISO 16770: Ausgabe: 2004-02: Kunststoffe - Bestimmung der Spannungsrissbeständigkeit von Polyethylen unter Medieneinfluss (ESC) - Kriechversuch an Probekörpern mit umlaufender Kerbe (FNCT)
- [11] Gaube, E., Gebler, H., Müller, W. und Gondro C.: Zeitstandfestigkeit und Alterung von Rohren aus Polyethylen. - Erfahrungen aus 30 Jahren Rohrprüfung - Kunststoffe 7/85
- [12] Berechnung von Behältern und Apparaten aus Thermoplasten Richtlinie DVS 2205-1 (04/2002), DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf
- [13] Roos, E.: Integritätsanalyse von Druckrohrleitungen in Pumpspeicherwerken mit bruchmechanischen Methoden, Materialprüfungsanstalt MPA Stuttgart 9. Werkstofftagung (TU Graz); 11/2004
- [14] Fleißner, M.: Langsames Rißwachstum und Zeitstandfestigkeit von Rohren aus Polyethylen, Kunststoffe 77 (1987) 1, S. 45/50
- [15] Hessel, J. und Grieser, J.: Verfahren zum Nachweis des Sicherheitsfaktors für Rohre aus Polyethylen unter komplexer Beanspruchung 3R international (44) Heft 5/ 2005, Seite 277 – 283
- [16] Svante Arrhenius: Über die Reaktionsgeschwindigkeit bei der Inversion von Rohrzucker durch Säuren Zeitschrift für physikalische Chemie, 1889, Seite 226/ 248
- [17] Westphal, W. H.: Physikalisches Wörterbuch Springer-Verlag, Berlin/ Göttingen/ Heidelberg 1952
- [18] Richard, K., Gaube E. u. Diedrich, G.: Die Alterungsbeständigkeit von Zieglerpolyäthylen-Rohren, Materialprüfung 5 (1963) Nr. 6, S. 213 - 217
- [19] Gebler, H.: Langzeitverhalten und Alterung von PE-HD-Rohren, Kunststoffe 9 (1989), S. 823/ 826
- [20] Bericht der Hessel Ingenieurtechnik R05 04 1071-1; Auftraggeber Basell
- [21] Richtlinie DVS 2205-1: Berechnen von Apparaten und Behältern aus Thermoplasten - Kennwerte -⁸
- [22] Richtlinie DVS 2203-4: Prüfen von Schweißverbindungen an Tafeln und Rohren aus thermoplastischen Kunststoffen: Zeitstand-Zugversuch⁸
- [23] Schweißen von thermoplastischen Kunststoffen: Heizelementschweißen von Rohren, Rohrleitungsteilen und Tafeln aus Polyethylen⁸
- [24] Hessel, J.: Langzeituntersuchungen an geschweißten Rohren aus PE 100 - Heizelementstumpf- und Heizwendelschweißen - Wiesbadener Kunststoffrohrtage 2003
- [25] Rameil, M et al : Rohre aus Polyethylen für grabenlose Verlegetechniken 3R international (43) Heft 4-5/2004, Seite 226 – 231
- [26] Hessel, J.: Aktueller Stand der Erkenntnisse bei sandbettlos verlegbaren PE-Rohren Wiesbadener Kunststoff Rohrtage 2004
- [27] Hessel, J.: Mindestlebensdauer von erdverlegten Rohren aus Polyethylen ohne Sandeinbettung; Teil 2 3R international Heft 6, 2001, S. 360 - 366
- [28] Firmenschrift der Firma Egeplast Werner Strumann GmbH & Co. KG
- [29] Rohre aus Polyethylen für alternative Verlegetechniken: Abmessungen, Technische Anforderungen und Prüfung Beuth Verlag, Berlin

⁸ DVS-Verlag GmbH, Postfach 10 19 65, D-40010 Düsseldorf