

„PE 100-RC“ – Ein PE 100 mit erweitertem Anwendungspotenzial

Dr.-Ing. Joachim Hessel, Roetgen

„PE 100-RC“ – Ein PE 100 mit erweitertem Anwendungspotenzial

“PE 100-RC” – A PE 100 with extended application potential

Von Dr. Joachim Hessel

Die Entwicklung von Polyethylen-Werkstoffen und deren Anwendung als Rohre für den Gas- bzw. Wassertransport hat mit einer Auslegungsspannung von 10 N/mm² (20 °C, 50 Jahre) für PE 100-Werkstoffe im Hinblick auf die Druckbelastbarkeit der PE 100-Rohre ihren vorläufigen Abschluss gefunden.

Die Weiterentwicklung der PE 100-Werkstoffe mit dem Ziel, neue Anwendungsgebiete zu erschließen, hat sich in den vergangenen sieben Jahren auf eine Eigenschaft konzentriert, die man allgemein als „Widerstand gegenüber langsamem Rissfortschritt“ oder „Spannungsrisssbeständigkeit“ bezeichnet.

Durch verfahrenstechnische Optimierung bei der Herstellung multimodaler Polyethylen-Werkstoffe bzw. durch Copolymerisation mit geeigneten α -Olefinen haben einige Rohstoffhersteller PE-100-Rohstoffe mit herausragender Spannungsrisssbeständigkeit entwickelt. Diese PE 100-Rohstoffe werden mit „PE 100-RC“ bezeichnet und sind in der PAS 1075 im Zusammenhang mit alternativen Verlegeverfahren beschrieben.

The development of polyethylene resins and their application in the field of gas and water supply has reached a plateau for the present in the pressure resistance of PE 100 pipes (10 N/mm²; 20 °C; 50 years).

In the last 7 years additional material development has been focused on a property which is commonly known as “resistance to slow crack growth” or “stress crack resistance” with the objective of entering new applications.

Some raw material producers have developed resins with extraordinary stress crack resistance by optimizing the process technology or by using appropriate α -olefines as a copolymer. These PE 100 resins are designated as “PE 100-RC” and are connected with PAS 1075 describing alternative pipe installation methods.

Definition von PE 100-RC

Im Sinne einer anwenderfreundlichen Vereinheitlichung der verschiedensten Bezeichnungen für hochspannungsrisssbeständige Rohstoffe (z. B. RCplus; SUPERSTRESS; CR RESIST; FRANK 100 plus) bzw. den daraus hergestellten Rohren (z. B. 9010; SLM 2.0; SafeTech RCn; TS-DOQ; Sureline II; RAU-PROTECT; Rcprotect) hat man in industrieller Gemeinschaftsarbeit an einer PAS (Public Available Specification; Öffentlich verfügbare Spezifikation) mit der Nummer 1075 diese hochspannungsrisssbeständigen Rohstoffe mit „PE 100-RC“ bezeichnet.

Die PAS 1075 dient als Ergänzung zu bestehendem Normen- und Richtlinienwerk und gilt speziell für Rohre aus Polyethylen für alternative Verlegetechniken. Dabei werden weitergehende Anforderungen definiert, die über die Mindestanforderungen der einschlägigen Nor-

men für Rohre aus PE 100 und die PAS 1031 hinausgehen. Insbesondere gilt dies für die Rohstoffwahl. Die Veröffentlichung der PAS wird von der Stabsabteilung Technik im DIN Deutsches Institut für Normung e.V. betreut.

Die Verfasser der PAS 1075 sind:

- AGRU-FRANK GmbH
- Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt)
- egeplast Werner Strumann GmbH & Co. KG
- Frank & Krahe Wickelrohr GmbH
- HESSEL Ingenieurtechnik GmbH
- INEOS Polyolefins
- TOTAL Petrochemicals Research Feluy
- Wavin GmbH

Als Mitgestalter werden genannt:

- Fachhochschule Aachen
- NRM Netzdienste Rhein-Main GmbH
- STRABAG AG
- Tracto-Technik GmbH

In dem Schlusssentwurf der PAS 1075 (April 2008) findet sich für PE 100-RC-Werkstoffe folgende Definition:

„Das Mindest-Niveau der Spannungsrisssbeständigkeit ist mit einer Standzeit im FNCT (80 °C, 4 N/mm², 2 % Arkopal N-100) von 8760 Stunden festgelegt“

Zum Vergleich sind in **Tabelle 1** die derzeit beim Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt), Berlin für die Zulassung von Formmassen und Halbzeugen aus Polyethylen festgelegten Mindeststandzeiten im FNCT (80 °C; 4 N/mm²; 2 % Arkopal N-100) genannt.

In dem Entwurf des Beiblattes 6 zur Richtlinie DVS 2205-1 „Berechnung von Behältern und Apparaten aus Thermoplasten – Kennwerte der Werkstoffgruppe Polyethylen“ ist darüber hinaus eine Mindestanforderung im FNCT für PE 100-RC von 8760 Stunden (80 °C; 4 N/mm²; 2 % Arkopal N-100) aufgeführt.

Prüfungen (Zulassung, Qualitätssicherung) im Rahmen der PAS 1075

In der PAS 1075 wird zwischen Zulassungsprüfungen und produktionsüberwachenden Prüfungen unterschieden. Des Weiteren sind Werkstoffprüfungen und Rohrprüfungen vorgesehen.

Tab. 1: Mindeststandzeiten im FNCT im Rahmen der bauaufsichtlichen Zulassung durch das DIBt

Table 1: Minimum creep rupture times in the FNCT in the DIBt approval procedure

Werkstoff	Mindeststandzeit in Stunden
PE 63	≥ 30
PE 80	≥ 100
PE 100	≥ 300

Bei den Zulassungsprüfungen werden z. T. höhere Anforderungen bei der Rohstoffprüfung gestellt, um Einflüsse aus z. B. Verarbeitung, konstruktiver Gestaltung abzusichern.

Die durchzuführenden Prüfungen zum Nachweis der Spannungsrissbeständigkeit für die Erstzulassung eines PE 100-RC-Werkstoffs sind in **Tabelle 2** aufgeführt.

Die durchzuführenden Prüfungen für die Qualitätssicherung der Werkstoffe sind in **Tabelle 3** genannt.

Die durchzuführenden Prüfungen für die Erstzulassung der Rohre sind in **Tabelle 4** aufgeführt.

Die Prüfungen im Rahmen der Qualitätssicherung der Rohre werden in **Tabelle 5** dargestellt.

Moderne PE-Rohstoffe erfordern neue Prüfmethode

Da die herausragende Spannungsrissbeständigkeit von PE 100-RC-Werkstoffen nicht mehr mit dem seit mehr als 50 Jahren üblichen Zeitstandinnendruckversuch an Rohren mit Wasserfüllung geprüft werden kann¹⁾, mussten neue beschleunigende Prüfmethode entwickelt werden.

Ein geeignetes Prüfverfahren für diese Werkstoffeigenschaft stellt der Full Notch Creep Test (FNCT) dar. Der FNCT ist mittlerweile in nationalen und internationalen Regelwerken verankert. Neben seinem Ursprung in der japanischen Norm JIS K 6774 ist der FNCT in Richtlinie DVS 2203-4 Beiblatt 2, CEN 12814-3 Annex A und in ISO/DIS 16770 „Plastics – Determination of environmental stress cracking (ESC) of polyethylene (PE) – Full-notch creep test (FNCT)“ beschrieben.

Den ersten Nachweis der Korrelation zwischen Innendruckversuchen an Rohren und dem FNCT hat M. Fleißner 1987 veröffentlicht [1]. Die hier verwendeten Prüfflüssigkeiten (Wasser und Glykol) führten bei den damals untersuchten Materialien noch zu praktikablen Prüfzeiten.

Mit der Rohstoffentwicklung hin zu verbessertem Zeitstandverhalten wurden zur Verkürzung der Prüfzeiten die aus den Anfängen der Spannungsrissprüfung bekannten wässrigen Netzmittellösungen eingesetzt. Die FNCT-Probe ist schematisch in **Bild 1** gezeigt.

Prüfzeiten von einem Jahr (8760 Stunden) im FNCT sind zwar für die Zulassungsprüfung von PE 100-RC-Werkstoffen unumgänglich, jedoch ist eine derart lange Prüfzeit für die laufende Prüfung der Rohstoffchargen ungeeignet.

¹⁾ Bei der Prüftemperatur 80 °C werden für Rohre aus PE 100-RC Prüfzeiten von mehreren Jahren erreicht. In Abhängigkeit der Wärmestabilisierung treten dann Brüche durch Wärmealterung ein. Der Nachweis der Spannungsrissbeständigkeit ist somit nicht möglich.

Tab. 2: Spezielle additive Zulassungsprüfungen für den Werkstoff PE-100-RC zum Nachweis der Spannungsrissbeständigkeit

Table 2: Special add-on approval tests for PE 100-RC materials to demonstrate the resistance against stress cracking

Lfd. Nr.	Prüfung	Anforderung	Bemerkung
1	Spannungsrissprüfung des Rohstoffs	> 8760 h bei 80 °C, 4 N/mm ² , 2 % Arkopal N-100	FNCT an 6 Einzelproben (Orientierungsfreies Verarbeitungsverfahren)
2	Punktlastversuch am Vollwandrohr	8760 h bei 80 °C, 4 N/mm ² , 2 % Arkopal N-100	3 Einzelproben z. B. bei 80 °C bzw. Einzelproben verteilt gemäß mathematischem Modell (z. B. Arrhenius)
3	Wärmealterungsversuch	> 100 Jahre bei 20 °C	Prüfung bei erhöhter Temperatur und Nachweis einer Mindestaktivierungsenergie
4	Notch Test am Vollwandrohr	> 8760 Stunden	Wahlweise auch an definierter Rohrkonstruktion möglich

Tab. 3: Spezielle additive Prüfungen zur Qualitätssicherung für den Werkstoff PE-100-RC zum Nachweis der Spannungsrissbeständigkeit

Table 3: Special add-on quality control tests for PE 100-RC materials to demonstrate the resistance against stress cracking

Lfd. Nr.	Prüfung	Anforderung	Häufigkeit	Bemerkung
1	Spannungsrissprüfung des Rohstoffs	> 8760 h bei 80 °C, 4 N/mm ² , 2 % Arkopal N-100 (Rohstoff); oder in einem korrelierendem Prüfverfahren ¹ , z. B. 320 h im ACT-Verfahren (Rohstoff)	Jede Charge	FNCT an 3 Einzelproben gemäß Anhang A1 zur PAS 1075

¹⁾ Absicherung über mindestens 30 Prüfserien in 3 Dekaden, wobei die Zielgröße (z. B. 8760 Stunden) eingeschlossen sein muss. Der Korrelationskoeffizient muss > 0,9 sein. Die Mindestanforderung ist mit einem „lower confidence limit“ von 2,5 % nachzuweisen. Die Korrelation muss nach EN ISO/IEC 17025 akkreditiert sein

Tab. 4: Prüfungen der Rohre für die Erstzulassung

Table 4: Pipe testing for initial approval

Lfd. Nr.	Prüfung	Anforderung	Bemerkung
1	Prüfung des Spannungsrissverhaltens	> 3300 h bei 80 °C, 4 N/mm ² , 2 % Arkopal N-100 (Proben aus Rohr)	2NCT je 3 Einzelproben an kleinster und größer Wanddicke + Da 110, SDR 11 über Rohrwandquerschnitt
2	Punktlastversuch	8760 h bei 80 °C, 4 N/mm ² , 2 % Arkopal N-100	3 Einzelproben z. B. bei 80 °C bzw. Einzelproben (Da 110, SDR 11) verteilt über Temperatur gemäß mathematischem Modell (B. Arrhenius)
3	Penetrationsversuch (Simulation einer Graugusscherbe durch „GG2“)	Restwanddicke nach 9000 h > 50 % der Ursprungswanddicke	Prüfbedingungen nach MAC-Konzept unter Berücksichtigung von Spannungsrissbeständigkeit und Wärmealterung

Tab. 5: Prüfungen zur Qualitätssicherung der Rohre

Table 5: Pipe testing for quality control

Lfd. Nr.	Prüfung	Anforderung	Häufigkeit	Bemerkung
1	Spannungsrissprüfung des Rohres	> 3300 h bei 80 °C, 4 N/mm ² , 2 % Arkopal N-100 oder in einem korrelierendem Prüfverfahren ¹ , z. B. 160 h im ACT-Verfahren (Proben aus Rohr)	1 x pro Halbjahr, jedoch mindestens pro Fertigungsgruppe 1 x pro Jahr	2NCT bzw. FNCT an 3 Einzelproben (Rohrinnenseite Bestandteil der Proben!)
2	Punktlastversuch	8760 h bei 80 °C, 4 N/mm ² , 2 % Arkopal N-100	Fertigungsgruppe 1 u. 2 jährlich, Fertigungsgruppe 3 in 3 Jahren einmal	80 °C Einzelprobe

¹⁾ Absicherung über mindestens 30 Prüfserien in 3 Dekaden, wobei die Zielgröße (z. B. 8760 Stunden) eingeschlossen sein muss. Der Korrelationskoeffizient muss > 0,9 sein. Die Mindestanforderung ist mit einem „lower confidence limit“ von 2,5 % nachzuweisen. Die Korrelation muss nach EN ISO/IEC 17025 akkreditiert sein.

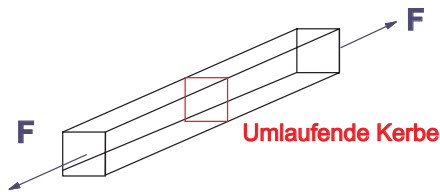


Bild 1: FNCT-Probe
Fig. 1: FNCT specimen

Deshalb wurde ein nochmals schnelleres Prüfverfahren zur Charakterisierung des Spannungsrisssverhaltens entwickelt und nach Prüfung durch Gutachter des DAP, Deutsches Akkreditierungssystem Prüfwesen GmbH, unter der Bezeichnung: „PA ACT 2.1-9 (2005-09): Accelerated Creep Test (ACT) – Beschleunigtes Prüfverfahren mit Validierungsnachweis zur Bestimmung der Zeitstandfestigkeit von Polyolefinen“ unter der DAR Registriernummer: DAP-PL-3760.00 akkreditiert.

Die dem ACT-Verfahren zugrunde liegende Korrelation ist in **Bild 2** dargestellt. Die statistische Auswertung der Prüfpunkte und Berechnung der Mindestkurve (Versagenswahrscheinlichkeit 2,5 %) ergibt eine Mindestanforderung im ACT von 160 Stunden zur Absicherung der DVGW-Anforderung von 3300 Stunden [2] bzw. 320 Stunden im ACT zur Absicherung von 8760 Stunden.

Damit ist in vertretbaren Prüfzeiten (ca. eine Woche bzw. zwei Wochen) die sichere Bewertung der Spannungsrisssbeständigkeit auch von hochspannungsrisssbeständigen PE-Werkstoffen möglich.

Eine notwendige, jedoch nicht hinreichende Voraussetzung ist die Akkreditierung des Prüflabors gemäß DIN EN ISO/IEC 17025 für den FNCT.

Ein wesentlicher Bestandteil der Validierung von Langzeitprüfverfahren ist die Prüfung von Referenzproben.

Ein Beispiel für die gleich bleibende Wirksamkeit von Netzmittellösungen über einen Zeitraum von einem Jahr, die für den FNCT bzw. ACT eingesetzt werden, zeigt **Bild 3**.

Vergleich von PE 100 mit PE 100-RC

Nach Aussagen der Verarbeiter von Rohr- bzw. Tafelmaterialien aus PE 100 (konventionell) bzw. PE 100-RC sind im Hinblick auf die Verarbeitungseigenschaften keine Unterschiede zu erkennen. Die Schmelzflussraten (MFR) für PE 100-RC liegen zwischen ca. 0,2 bis 0,4 g/10 min bei 190 °C/5 kg, also im gewohnten Bereich von PE 100-Werkstoffen.

Das Schweißen (z. B. Heizelementschweißen) ist unter Beachtung der Richtlinie DVS 2207-1 für PE 100-RC geregelt und ohne Einschränkungen möglich.

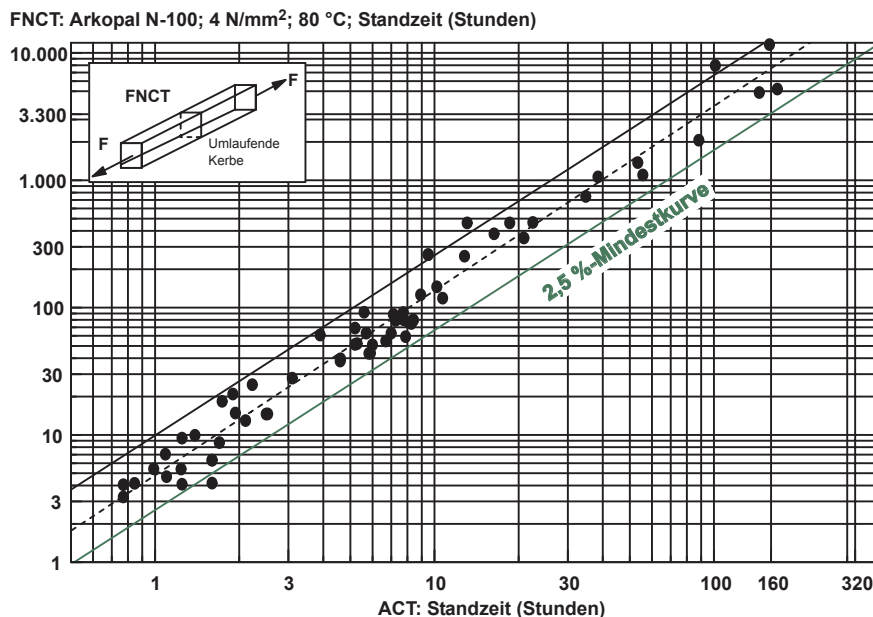


Bild 2: Korrelation zwischen dem FNCT und dem ACT-Verfahren
Fig. 2: Correlation between FNCT and the ACT procedure

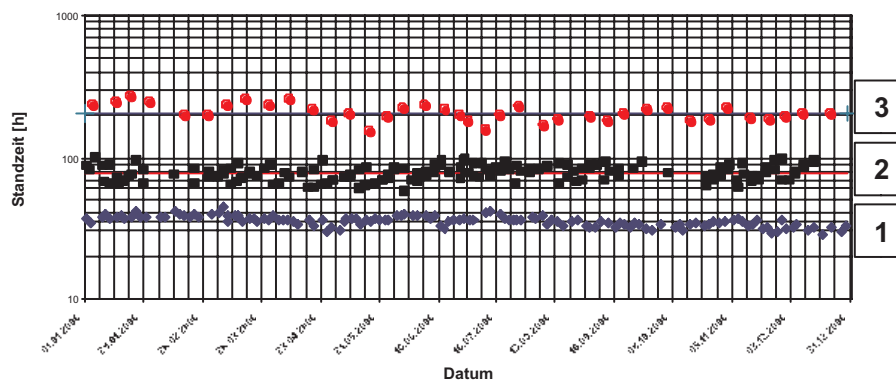


Bild 3: Ergebnisse von Prüfungen an Referenzproben über ein Jahr [3]: (1) PE 100, ACT-Verfahren; (2) PE 80; FNCT bei 80 °C, 4 N/mm², 2 %, Arkopal N-100; (3) PE 80; FNCT bei 60 °C, 4 N/mm²; 2 % Netzmittel
Fig. 3: One year testing of reference specimens [3]: (1) PE 100, ACT-Verfahren; (2) PE 80; FNCT at 80 °C, 4 N/mm², 2 % Arkopal N-100; (3) PE 80; FNCT at 60 °C, 4 N/mm²; 2 % Netzmittel

- PE100 std: Standard PE 100;
- PE 100+: PE 100 gemäß Anforderungen der PE 100+-Association;
- PE 100-RC:
- RCP: Rapid Crack Propagation/ Schneller Rissfortschritt
- ESCR: Spannungsrisssbeständigkeit
- Stiffness: Steifigkeit bzw. E-Modul
- MRS: (Druck-)Festigkeit von Rohren
- Yield strength: Streckspannung

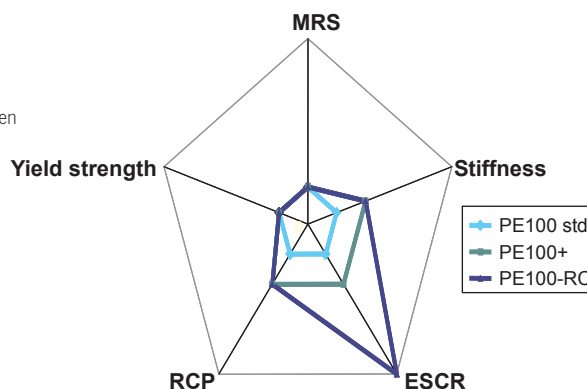


Bild 4: Vergleich maßgebender Eigenschaften von PE 100-Werkstoffqualitäten (Quelle: INEOS Polyolefins, TOTAL Petrochemicals)
Fig. 4: Comparison of relevant properties of PE 100-material qualities (Source: INEOS Polyolefins, TOTAL Petrochemicals)

kungen gegeben. Bei der Bewertung der Mindestlebensdauer von Heizelementstumpf-Schweißverbindungen mit Rohren aus PE 100-RC ergeben sich darüber hinaus Kostenvorteile [4] aus der möglichen Verkürzung der Abkühlzeiten.

Der einzige, jedoch maßgebende Unterschied ist in der herausragenden Spannungsrissbeständigkeit von PE 100-RC-Werkstoffen zu sehen.

In **Bild 4** sind einige wesentliche Eigenschaften gegenübergestellt.

Vorteile von PE 100-RC

Neue Anwendungsgebiete – Alternative Verlegeverfahren

Ein wesentlicher Vorteil von Rohren aus PE 100-RC ist die alternative (z. B. sandbettlose) Verlegung dieser Rohre (**Bild 5**).

Alternativen zur offenen Bauweise werden deshalb gewählt, da diese grabenlosen Verfahren Zeit und Geld sparen. In den letzten Jahren haben sich verschiedenste Verlegetechniken aufgrund ihrer wirtschaftlichen Vorteile zum akzeptierten Stand der Technik entwickelt.

Grabenlose Verlegeverfahren stellen gegenüber der Verlegung im schützenden Sandbett höhere Anforderungen an die zu verwendenden Rohrsysteme.

Als alternative Verlegemethoden werden solche bezeichnet, bei denen von den für PE-Rohre vorgeschriebenen Bettungsbedingungen in Sand in der offenen Bauweise (z. B. nach DVGW W400-2) abgewichen wird. Diese Verfahren werden von folgenden Organisationen näher beschrieben:

Die GSTT (German Society for Trenchless Technology) beschreibt in der GSTT-Information Nr. 20 „Sanierung von Druckrohrleitungen“ verschiedene grabenlose Verlegetechniken wie das Relining-Verfahren, Berstlining, Press-Zieh-Verfahren usw. Das ATV-DVWK-Regelwerk beschreibt in der M 160 das Fräs- und Pflugverfahren. Und der DVGW hat in der GW 32x-Reihe Verfahrensbeschreibungen und Anweisungen als Arbeits- bzw. Merkblätter herausgebracht.

Anforderungen an alternativ neu verlegte Rohre sind in den Regeln der Technik bislang unzureichend beschrieben. Das DVGW-Regelwerk fordert lediglich, dass die Rohrleitungen den Anforderungen der Verlegung genügen müssen. Die maßgebenden Anforderungen an Werkstoffe und Rohre werden dagegen in der PAS 1075 für eine Mindestnutzungsdauer von 100 Jahren erstmalig beschrieben.

Die Basis für die Festlegungen in der PAS1075 stellen die grundlegenden Untersuchungen zur Punktlast“beständigkeit“ dar [5] ergänzt um weitere an Rohren aus PE 100-RC im Industrieauftrag durchgeführten Punktlastversuche.

Bild 5: Alternative (sandbettlose) Verlegung eines Rohres

Fig. 5: Alternative (sandless) installation of a pipe



Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse sind in **Bild 6** zusammengefasst.

Sicheres Abquetschen

Das Abquetschen von Rohrleitungen aus Polyethylen ist zwar im DVGW-Merkblatt GW 332 verfahrenstechnisch beschrieben, jedoch ist mit dem Abquetschen eine Vorschädigung des Rohrwandquerschnittes verbunden.

Da die zeitstandverkürzende Wirkung der Belastung beim Abquetschen geringer ist als beim Punktlastversuch, bieten Rohre aus PE 100-RC hier ausreichende Festigkeitsreserven, so dass mit einer gesicherten Lebensdauer von 100 Jahren gerechnet werden kann.

Ein PE 100-Rohr in einer Abquetschvorrichtung ist in **Bild 7** gezeigt.

Kostenvorteile durch Schweißzeitverkürzung

Ebenso wie bei Heizelementstumpf-Schweißverbindungen von PE 80 und PE 100 treten

beim Zeitstandzugversuch an Heizelementstumpf-Schweißungen mit PE 100-RC-Rohren die Brüche NICHT in der Fügeebene sondern ausgehend von der Wulstkerbe im Grundmaterial auf (**Bild 8**).

Diese Beobachtung lässt den Schluss zu, dass die Standzeiten der Schweißverbindungen von der Kerbempfindlichkeit (Widerstand gegenüber langsamem Rissfortschritt) der Grundmaterialien abhängt.

Aufgrund des außergewöhnlich hohen Widerstandes von PE 100-RC-Materialien gegenüber langsamem Rissfortschritt können diese Reserven zur Einsparung von Kosten (Verkürzung der Abkühlzeit) beim Heizelementstumpf-Schweißen von Rohren aus PE 100-RC genutzt werden [4].

Kostenvorteile bei spannungsrissfördernden Medien

In der Medienliste 40-1.1 und 40-B1.1 des Deutschen Instituts für Bautechnik werden Abminderungsfaktoren (A2B) für eine Vielzahl

Standzeit Rohr mit Punktlast (h)

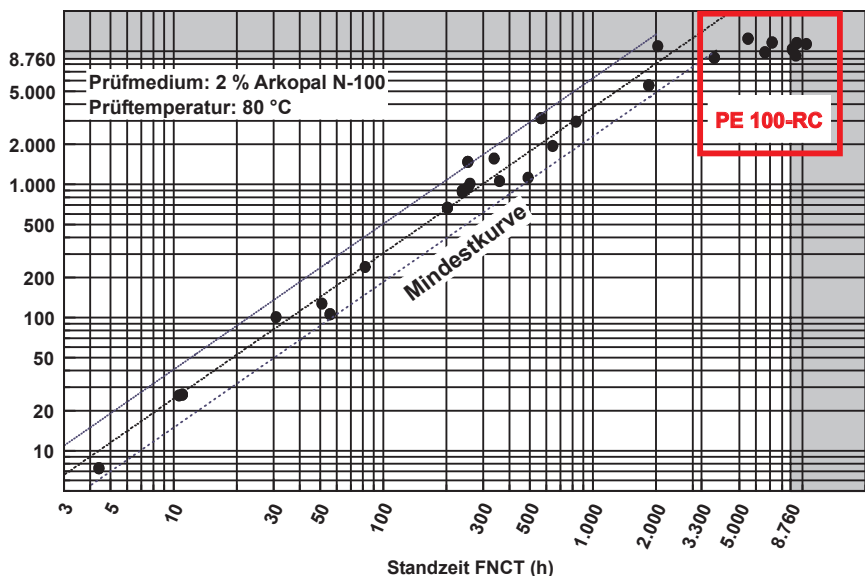


Bild 6: Korrelation zwischen Punktlastversuch und FNCT

Fig. 6: Correlation between Point loading test and FNCT

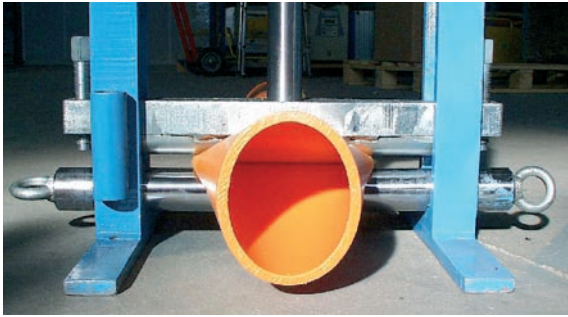


Bild 7: Rohr aus Polyethylen in der Abquetschvorrichtung (Quelle: Frank GmbH)

Fig. 7: PE-pipe in a squeeze-off equipment (Source: Frank GmbH)

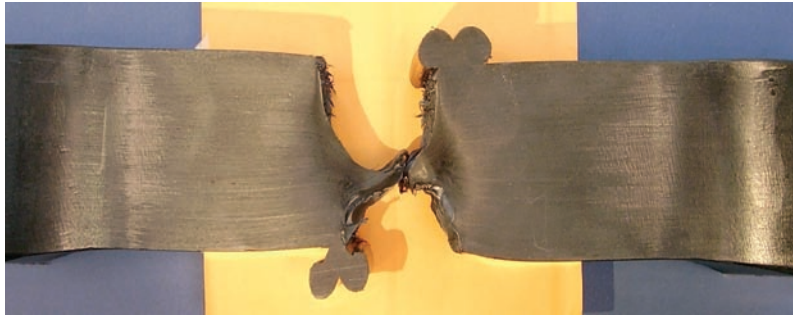


Bild 8: Heizelementstumpf-Schweißung aus PE 100-RC-Rohr (Wanddicke 58 mm) nach dem Zeitstandzugversuch mit Bruchverlauf außerhalb der Fügeebene

Fig. 8: Heated tool butt welded from a PE 100-RC pipe (wall thickness 58 mm) after the tensile creep rupture test with crack path outside the fusion plane

von Substanzen angegeben. Diese Abminderungsfaktoren werden bei der statischen Berechnung von lasttragenden Bauteilen (Behälter, Rohre) berücksichtigt und Erhöhen die Wanddicke bei A2B-Werten > 1.

Da die statische Berechnung von den Zeitstandkurven nach DIN 8075 ausgeht und die PE 100-RC-Materialien diese Zeitstandkurven im berechnungsrelevanten Bereich („2. Ast“) erheblich übertreffen, kann bei spannungsrisssfördernden Medien mit einer Wanddickenreduzierung gerechnet werden.

Werden z. B. Mindeststandzeiten von 7000 Stunden im Notch-Pipe-Test nach DIN EN ISO 13479 erreicht, können alle Abminderungsfaktoren bis 1,4 auf 1,0 herabgesetzt werden. Damit wäre eine Wanddickeneinsparung von 40 % verbunden.

Schlussfolgerungen

Mit „PE 100-RC“ werden PE 100-Werkstoffe bezeichnet, die den heute für unernetzte

Polyethylene bekannten höchsten Widerstand gegenüber langsamem Rissfortschritt aufweisen. Diese Eigenschaft erlaubt z. B. die sichere Anwendung von alternativen Verlegetechniken erdverlegter Rohre.

Darüber hinaus ermöglichen Bauteile aus PE 100-RC Kostenvorteile beim Schweißen und beim Einfluss zeitstandverkürzender Medien.

Literatur:

- [1] Fleißner, M.: Langsames Rißwachstum und Zeitstandfestigkeit von Rohren aus Polyethylen. (Slow crack growth and creep rupture strength of polyethylene pipe). Kunststoffe 77 (1987) Nr. 1, p. 45/50
- [2] DVGW-Merkblatt GW 323 „Grabenlose Erneuerung von Gas- und Wasserversorgungsleitungen durch Berstlining; Anforderungen, Gütesicherung und Prüfung“ (2004-07)
- [3] Hessel, J.: Qualitätssicherung für grabenlos verlegbare Rohre aus Polyethylen, Zweites Deutsches Symposium für die grabenlose Leitungs-

erneuerung, Universität Siegen, September 2007

- [4] Egen, U., Hesse, H. und Grieser J.: Wirtschaftliches Optimierungspotential beim Heizelementstumpfschweißen von Schutzmantelrohren aus spannungsrisssbeständigem Polyethylen, JOINING PLASTICS - Fügen von Kunststoffen (2007) Nr. 2, S. 134-142
- [5] Hessel, J.: Minimum service-life of buried polyethylene pipes without sand-embedding. 3R internat. 40 (2001) Special Plastic Pipes, p. 4-12

Autor:

Dr.-Ing. Joachim Hessel
Hessel Ingenieurtechnik GmbH

Tel. +49(0)2471/92022-0
E-Mail: joachim.hessel@hessel-ingtech.de

