

# Einfluss der Werkstoffqualität auf das Langzeitverhalten von Schweißverbindungen

## Influence of the material quality on the long-term behaviour of welded joints

Markus Haager, Thomas Frank, Albert Lueghamer

### Kurzfassung

Von mehreren Forschungsarbeiten ist grundsätzlich bekannt, dass ein hoher Widerstand des Werkstoffes gegenüber dem langsamen Risswachstum entscheidend ist, für das Langzeitverhalten von Heizelementstumpfschweißungen aus Polyethylen (PE). Weit aus weniger Informationen gibt es allerdings darüber inwieweit diese Erkenntnisse auf andere Schweißmethoden oder auf andere Werkstoffe übertragbar sind. In der vorgestellten Forschungsarbeit wurden daher Elektroschweißmuffen und Anbohrschellen aus PE sowie Heizelementstumpfschweißungen aus Polypropylen (PP) und Polyvinylidenfluorid (PVDF) untersucht. Alle Ergebnisse zeigten, dass der Risswachstumswiderstand der eingesetzten Werkstoffe maßgeblich das Langzeitverhalten der Schweißverbindungen beeinflusst.

### Abstract

In principle, it is known from various research work that a high resistance of the material to slow crack growth is decisive for the long-term behaviour of heated tool butt welds made of polyethylene (PE). However, far less information is available about the extent to which this knowledge is transferable to other welding methods or to other materials. Therefore, electrofusion sockets and tapping saddles made of PE as well as heated tool butt welds made of polypropylene (PP) and polyvinylidene fluoride (PVDF) were investigated in the presented research work. All the results showed that the crack growth resistance of the utilised materials exerted a crucial influence on the long-term behaviour of the welded joints.

### 1. Einleitung

Die Bedeutung von Rohrsystemen aus Polyethylen (PE), Polypropylen (PP) und Polyvinylidenfluorid (PVDF) hat in den letzten Jahrzehnten weltweit kontinuierlich zugenommen. Während PE hauptsächlich für Gas- und Wasserleitungen im Infrastrukturbereich (Gas- und Wasserversorgung, Abwasserentsorgung, Kraftwerksbau, Bewässerungsanlagen, usw.) eingesetzt wird, kommen Rohrleitungen aus PP und PVDF wegen ihrer guten Chemikalien- und Temperaturbeständigkeit überwiegend bei industriellen Prozessleitungen zum Einsatz. Wesentlich zur positiven Entwicklung beigetragen hat neben den hervorragenden Eigenschaften dieser Kunststoffe, die zuverlässige und einfache Verbindungstechnik.

Rohre und Formteile aus PE, PP und PVDF werden hauptsächlich durch Schweißen miteinander verbunden. Gängige Verfahren sind das Heizelementstumpfschweißen [4, 15] und das Heizwendelschweißen [16]. Das Heizelementstumpfschweißen wird bevorzugt bei industriellen Anwendungen bei allen drei Polymeren angewandt. Teilweise kommt es bei PP und PVDF auch in einer weiterentwickelten Form als Infrarotschweißen zum Einsatz [10]. Im Gegensatz dazu wird das Heizwendelschweißen häufig im erdverlegten Rohrleitungsbau für Gas-, Wasser- und

	Markus Haager <b>Autorenprofil:</b> <a href="http://www.fuegen-von-kunststoffen.de/?id=201656">www.fuegen-von-kunststoffen.de/?id=201656</a> <a href="http://www.joining-plastics.info?id=201656">www.joining-plastics.info?id=201656</a>
	Thomas Frank <b>Autorenprofil:</b> <a href="http://www.fuegen-von-kunststoffen.de/?id=201438">www.fuegen-von-kunststoffen.de/?id=201438</a> <a href="http://www.joining-plastics.info?id=201438">www.joining-plastics.info?id=201438</a>
	Albert Lueghamer <b>Autorenprofil:</b> <a href="http://www.fuegen-von-kunststoffen.de/?id=201655">www.fuegen-von-kunststoffen.de/?id=201655</a> <a href="http://www.joining-plastics.info?id=201655">www.joining-plastics.info?id=201655</a>

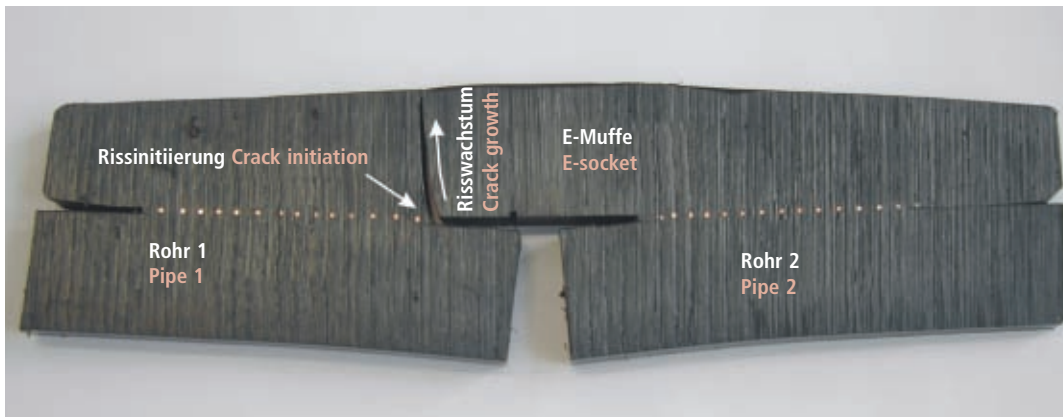
Abwasserleitungen aus PE angewandt. Die Wirtschaftlichkeit dieses Schweißverfahrens ist hauptsächlich bei Dimensionen kleiner als 250 mm gegeben, hängt jedoch von den Randbedingungen (Rohrdurchmesser, Anzahl der Schweißungen, verfügbarer Raum, Verlegeverfahren, usw.) ab. Beispielsweise kann bei hohem Platzangebot und einer sehr großen Anzahl von Fugstellen das Heizelementstumpfschweißen bei der Dimension 160 mm wirtschaftlicher sein. Sind allerdings nur wenige Nähte auf engem Raum zu schweißen, so ist auch bei wesentlich größeren Dimensionen (z. B.: 400 mm) die Heizwendelschweißung die kostengünstigere Methode.

### 1. Introduction

In recent decades, piping systems made of polyethylene (PE), polypropylene (PP) and polyvinylidene fluoride (PVDF) have become ever more important all over the world. While PE is mainly used for gas and water pipes in the infrastructure field (gas and water supply, waste water disposal, power station engineering, irrigation installations etc.), pipelines made of PP and PVDF are predominantly utilised for industrial process pipes because of their good chemical and temperature resistance. Not only the outstanding properties of these plastics but also the reliable and simple joining technology have made an essential contribution to the positive development.

Welding is mainly used in order to join pipes and fittings made of PE, PP and PVDF with each other. Popular processes are heated tool butt welding [4, 15] and heated coil welding [16]. Heated tool butt welding is preferably utilised for industrial applications with all three polymers. In part, it is also used in a refined form as infrared welding in the case of PP and PVDF [10]. In contrast with this, heated coil welding is frequently applied in underground pipeline construction for gas, water and waste water pipes made of PE. This welding process is mainly economically viable in the case of dimensions smaller than 250 mm but depends on the outline conditions (pipe diameter, number of welds, available space, laying process etc.). For example, heated tool butt welding may be more economically viable with the 160 mm dimension in the case of a large available space and a very large number of joints. However, if only a few seams are to be welded in a confined space, heated coil welding is the more cost-favourable method with considerably larger dimensions too (e.g.: 400 mm).

Not only heated tool butt welding but also heated coil welding are basically characterised by a very high strength. This may be attributed to the formation of common superstructures of the macromolecules of both the compo-



**Bild 1:** Versagen einer E-Muffe durch Rissinitiation und langsames Risswachstum nach sehr langen Standzeiten im Innendruckversuch bei 80°C.

**Fig. 1:** Failure of an Esocket caused by crack initiation and slow crack growth after very long creep rupture times in the internal pressure test at 80°C.

nents to be welded together (cocrySTALLISATION) beyond the joining plane [10, 13].

Comprehensive experience is already available with regard to the service capability and failure behaviour of polymer pipe systems. Three different cases are usually assumed for the failure when subjected to internal pressure [1, 14]: Ductile failure occurs with high loads; a reduction in the load leads to quasi-brittle failure due to slow crack growth; after very long times, even lower loads result in the global chemical ageing of the material. On the basis of observations in internal pressure creep rupture tests and of failure cases in practice, it has been known for quite some time that slow crack growth is the critical failure case when pipes are subjected to long-term loads [1, 14]. In various investigations, it was possible to show that the crack initiation and the subsequent crack growth are of decisive significance for welded joints as well. Diedrich and Gaube [4] have already established that, in the case of optimally executed butt welds, the crack initiates in the notch between the welding flash and the pipe surface. The crack then grows in the circumferential direction through the pipe wall until the failure occurs. This characteristic failure mechanism can be observed on modern PE pipe materials too after correspondingly long creep rupture times [9, 15]. In the case of Esocket welds too, it is also known that the critical mechanism is mostly the failure caused by slow crack growth. The cracks initiate in the region of the greatest stress concentration, i.e. usu-

ally in the wire turns (acting as notches) located closest to the pipe ends (Fig. 1) [3, 19, 25].

Corresponding to the described failure mechanisms, it is thus obvious that the long-term behaviour of welded joints is decisively dependent on the notch sensitivity of the materials used. For example, it was shown by Bowman that the service life of Esockets made of PE is extremely dependent on the material used but, to a lesser extent, on their geometry [3]. Furthermore, Hessel proved, by means of correlations with the full notch creep test for PE, that the long-term behaviour of Esocket welds and of butt welds improves with a rising resistance to slow crack growth [9, 11]. However, not only the material but also the geometry of the notch and the residual stresses that build up during the welding influence the service life of welded joints [2, 24].

In order to obtain more detailed information about the influence of the crack growth behaviour on the service life of welded joints, a large number of investigations were conducted in the present work. The influence of the crack growth resistance of PE pipe materials on the service life of heated coil welded joints was investigated first of all. For this purpose, tensile creep rupture tests as well as cyclic tests were performed of heated coil mouldings and the results were compared with those from cyclic tests on CRB specimens. In addition to the investigations on PE, heated tool butt welds on PP and PVDF were investigated too in order to check whether the relationships

Sowohl das Heizelementstumpfschweißen als auch die Heizwendelschweißung zeichnet sich grundsätzlich durch eine sehr hohe Festigkeit aus. Dies ist auf die Bildung von gemeinsamen Überstrukturen der Makromoleküle beider zu verschweißenden Komponenten (Co-Kristallisation) über die Fügeebene hinweg zurückzuführen [10, 13].

Über die Gebrauchstauglichkeit sowie das Versagensverhalten von polymeren Rohrsystemen liegen bereits umfangreiche Erfahrungen vor. Beim Versagen unter Innendruck geht man üblicherweise von drei verschiedenen Fällen aus [1, 14]: Bei hohen Belastungen tritt duktiler Versagen auf; wird die Belastung verringert, erfolgt quasi-sprödes Versagen durch langsames Risswachstum; bei noch kleineren Lasten kommt es nach sehr langen Zeiten zur globalen chemischen Alterung des Werkstoffes. Durch Beobachtungen von Zeitstandinnendruckversuchen sowie von Versagensfällen in der Praxis ist seit längerem bekannt, dass langsames Risswachstum der kritische Versagensfall von Rohren bei Langzeitbelastungen ist [1, 14].

In diversen Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass Rissinitiation und nachfolgendes Risswachstum auch für Schweißverbindungen von entscheidender Bedeutung ist. Bereits Diedrich und Gaube [4] haben festgestellt, dass es bei optimal ausgeführten Stumpfschweißungen zur Rissinitiation in der Kerbe zwischen Schweißwulst und der Rohroberfläche kommt. Anschließend wächst der Riss in Umfangsrichtung durch die Rohr-

wand bis Versagen auftritt. Dieser charakteristische Versagensmechanismus kann nach entsprechend langen Standzeiten auch an modernen PE-Rohrwerkstoffen beobachtet werden [9, 15]. Darüber hinaus ist auch bei E-Muffenschweißungen bekannt, dass meist Versagen durch langsames Risswachstum der kritische Mechanismus ist. Die Risse initiieren im Bereich der größten Spannungskonzentration, also üblicherweise bei den Drahtwindungen (wirken als Kerben) die den Rohrenden am nächsten liegen (Bild 1) [3, 19, 25].

Entsprechend den beschriebenen Versagensmechanismen ist es somit nahe liegend, dass das Langzeitverhalten von Schweißverbindungen maßgeblich von der Kerbempfindlichkeit der verwendeten Werkstoffe abhängt. Beispielsweise wurde von Bowman gezeigt, dass die Lebensdauer von E-Muffen aus PE, stark vom verwendeten Material abhängt, weniger jedoch von deren Geometrie [3]. Darüber hinaus wies Hessel durch Korrelationen mit dem Full Notch Creep Test für PE nach, dass sich mit steigendem Widerstand gegen langsames Risswachstum das Langzeitverhalten von E-Muffen- sowie von Stumpfschweißungen verbessert [9, 11]. Aber nicht nur der Werkstoff, sondern auch die Geometrie der Kerbe und die beim Schweißen eingebrachten Eigenspannungen beeinflussen die Lebensdauer von Schweißverbindungen [2, 24].

Um nähere Informationen über den Einfluss des Risswachstumsverhaltens auf die Lebensdauer von Schweißverbindungen zu erlangen wurden in der vorliegenden Arbeit zahlreiche Untersuchungen durchgeführt. Zunächst wurde der Einfluss des Risswachstumswiderstandes von PE-Rohrwerkstoffen auf die Lebensdauer von Heizwendelschweißverbindungen untersucht. Dazu wurden Zeitstandzugversuche sowie zyklische Versuche an Heizwendelformteilen durchgeführt und die Ergebnisse denen von zyklischen Versuchen an CRB-Proben gegenübergestellt. Zusätzlich zu den Untersuchungen an PE wurden auch Heizelementstumpfschweißungen an PP und PVDF untersucht, um zu überprüfen ob die für PE gefundenen Zusammenhänge auch für diese Polymere gültig sind.

2. Grundlagen

2.1 Prüfmethode für Heizelementstumpfschweißungen

Bei stumpfgeschweißten Rohren werden zur Ermittlung der Schweißparameter und zur Kontrolle der Qualifikation des Schweißpersonals häufig Kurzzeitprüfungen angewandt. Für die Auslegung von geschweißten Konstruktionen ist allerdings das Langzeitverhalten entscheidend, das durch das Kriechverhalten und im Besonderen durch den Widerstand gegen langsames Risswachstum bestimmt wird. Neben der absoluten Standzeit von Schweißverbindungen ist der Zeitstandzug-Schweißfaktor  $f_s$  (oder Langzeitschweißfaktor) eine wichtige Kenngröße. Der Langzeitschweißfaktor wird ermittelt aus dem Verhältnis der Bruchspannung der geschweißten Probe zur Bruchspannung der ungeschweißten Probe (Bezugsspannung) bei gleicher Standzeit.

Die bevorzugte Testmethode um die Langzeiteigenschaften von Stumpfschweißungen zu ermitteln sowie um den Langzeitschweißfaktor zu bestimmen ist die Zeitstandzugprüfung gemäß DVS (Bild 2) [5]. Um die Standzeiten bei der Prüfung zu reduzieren werden die Tests bei erhöhter Temperatur (z. B.: 80°C und 95°C) in einem oberflächenaktiven Medium (z. B.: Arkopal N100) durchgeführt.

2.2 Prüfung von Heizwendelschweißungen

Eine wichtige Methode um die Qualität von Heizwendelformteilen zu überprüfen sind Zeitstandinnendruckversuche.

Allerdings sind diese aufwendig und teuer und weisen zudem eine hohe Streuung der Messwerte auf. Grundvoraussetzung für ein gutes Verhalten unter Innendruckbelastung ist auf jeden Fall eine ausreichende Festigkeit zwischen E-Muffe (bzw. Schweißsattel) und Rohr. Hierzu gibt es unterschiedliche Prüfmethode bei denen das Rohr von der Muffe abgeschält oder abgesichert wird. Diese haben allerdings überwiegend qualitativen Charakter und geben keinen Aufschluss über das Langzeitverhalten. Eine Möglichkeit um quantitativ die Langzeitfestigkeit der Schweißverbindung zu überprüfen ist die in DVS 2203-4 Beiblatt 1 angegebene Methode [5, 25]. Dabei werden senkrecht zur Schweißebene Proben entnommen (Bild 3a und 3b), verlängert und ein Zeitstandzugversuch durchgeführt. Gemäß DVS-Richtlinie sind aber auf Grund dieses Versuches keine Aussagen über die Langzeiteigenschaften von Heizwendelschweißungen möglich [5]. Sondern es werden Vergleichswerte ermittelt die zur Optimierung von Schweißparametern bzw. zur Optimierung der Konstruktion von Heizwendelformteilen genutzt werden können.

Obwohl es unerlässlich ist die Festigkeit der Schweißverbindung zwischen Heizwendelformteil und Rohr zu überprüfen wird dabei nicht auf das typische Versagensverhalten von E-Muffen, welches durch Rissinitiation und langsames Risswachstum erfolgt, eingegangen [19]. Vielmehr ist die Belastung in Längsrichtung

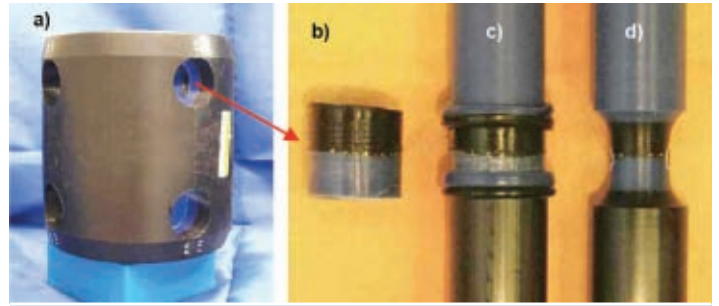


Bild 3: Herstellung von Proben für Zeitstandzugversuche an Heizwendelschweißung senkrecht zur Schweißebene: a) Probenentnahme und b-c) Probenvorbereitung [25].

Fig. 3: Manufacture of specimens for tensile creep rupture tests of heated coil welds vertical to the welding plane: a) sampling and b-c) specimen preparation [25].

found for PE are valid for these polymers as well.

carried out at an elevated temperature (e.g.: 80°C and 95°C) in a surface-active medium (e.g.: Arkopal N100).

2. Fundamentals

2.1 Test methods for heated tool butt welds

In the case of butt-welded pipes, short-term tests are frequently applied in order to establish the welding parameters and to check the qualification of the welding personnel. However, the long-term behaviour which is defined by the creep behaviour and, in particular, by the resistance to slow crack growth is decisive for the design of welded structures. Not only the absolute creep rupture time of welded joints but also the tensile creep rupture welding factor  $f_s$  (or the long-term welding factor) are important characteristic parameters. The long-term welding factor is established from the ratio of the rupture stress of the welded specimen to the rupture stress of the unwelded specimen (reference stress) with the same creep rupture time.

The tensile creep rupture test according to DVS is the preferred test method for establishing the long-term properties of butt welds and for determining the long-term welding factor (see Fig. 2) [5]. In order to reduce the creep rupture times during the tests, they were

2.2 Testing of heated coil welds

Internal pressure creep rupture tests constitute one important method of checking the quality of electro fusion fittings. However, these are time-consuming and expensive and also exhibit an extreme scatter of the measured values. The basic prerequisite for good behaviour when subjected to internal pressure loads is definitely a sufficient strength between the Esocket (or the welding saddle) and the pipe. For this purpose, there are different test methods in which the pipe is peeled or sheared off the socket. However, these have a predominantly qualitative character and provide no information about the long-term behaviour. One possibility for the quantitative checking of the long-term strength of the welded joint is the method specified in DVS 2203-4, Annex 1 [5, 25]. In this case, specimens are taken vertical to the welding plane (see Figs. 3a and 3b) – are extended and a tensile creep rupture test is performed. However, according to the DVS technical code, no statements about the long-term behaviour of heated coil welds are possible on the basis of this test [5].

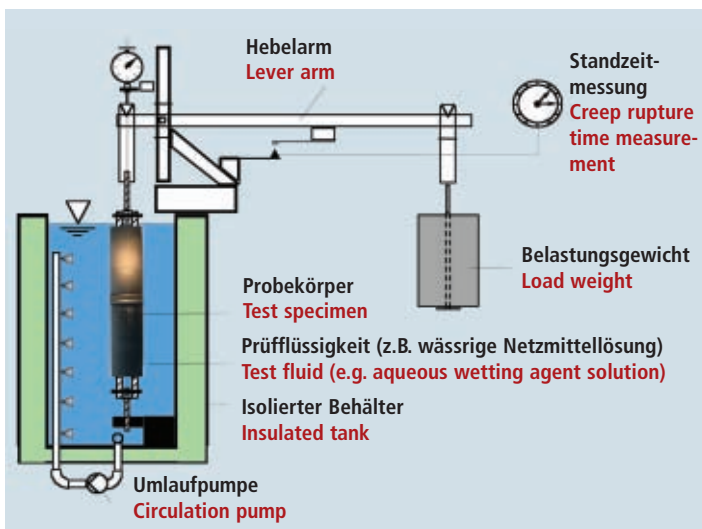


Bild 2: Schematische Darstellung von Langzeitzugversuchen an Heizelementstumpfschweißungen.

Fig. 2: Schematic representation of long-term tensile tests of heated tool butt welds.

Sonotroden vom Spezialisten  
Horns/Sonotrodes from experts

Entwicklung • Optimierung • Bau  
Design • Optimisation • Building

FEINTECHNIK  
RITTMAYER

www.sonotrodenbau.de



tung (hervorgerufen durch den Innendruck) für die Lebensdauer von E-Muffen entscheidend. Folglich scheint es sinnvoll Zugversuche in Längsrichtung durchzuführen, wobei entweder die ganze Muffe mit den eingeschweißten Rohren geprüft werden kann [25] oder aus der hergestellten Schweißverbindung Proben in Längsrichtung herausgeschnitten werden (Bild 4) [9, 18]. Ähnliche Versuche wurden vorgeschlagen [19], wobei die Proben aus den E-Muffen allerdings zyklisch belastet wurden, um die Versuchsdauer zu reduzieren.

### 2.3 Untersuchung des Risswachstumsverhaltens

Vor allem in Mitteleuropa ist der Full Notch Creep Test (FNCT) weit verbreitet, um das langsame Risswachstumsverhalten von PE zu charakterisieren. Beim FNCT werden Zeitstandzugversuche bei erhöhter Temperatur (meist 80 °C) an quadratischen Probekörpern (10 x 10 x 100 mm) mit einer umlaufenden Kerbe durchgeführt. Üblicherweise wird die Kerbe mit 1,6 mm Tiefe durch Einpressen einer Rasierklinge in alle 4 Seiten der Proben hergestellt. Zur Förderung des Risswachstums bzw. zur Reduktion der Versuchsdauer wird der FNCT-Versuch in Netzmittellösungen durchgeführt. Üblicherweise werden dazu Nonylphenol-Polyglykol-Ether (z. B.: Arkopal) in einer Konzentration von 2 Gew.-% in entionisiertem Wasser eingesetzt [6, 12, 23].

Gemessen wird beim FNCT die Versagenszeit bei definierten Anfangsspannungen (bezogen auf den Restquerschnitt). Als Vergleichswert wird meist die Standzeit bei 80 °C und 4 MPa herangezogen. Grundsätzlich wird davon ausgegangen, dass FNCT-Ergebnisse mit den Versagenszeiten von spröde versagten, innendruckbelasteten Rohren korrelieren [6]. Dies ist nahe liegend da in beiden Fällen ähnliche Versagensmechanismen vorliegen (Rissinitiierung und nachfolgendes Risswachstum).

Eine weitere Möglichkeit um das Risswachstumsverhalten von PE-Rohrwerkstoffen zu charakterisieren stellen zyklische Versuche dar. Durch die zyklische Belastung wird sprödes Risswachstum gefördert und selbst bei 23 °C können bei modernen PE-Werkstoffen innerhalb von 1-2 Tagen langsam wachsende Risse initiiert werden, ohne Netzmittel einzusetzen. Trotz der unterschiedlichen

Belastungsbedingungen im Vergleich zu statischen Versuchen konnte in zahlreichen Untersuchungen gezeigt werden, dass bei PE in beiden Belastungsfällen sehr ähnliche Risswachstumsmechanismen vorliegen. Weiter korrelieren Materialrankings basierend auf zyklischen Versuchen sehr gut mit solchen die unter statischer Belastung ermittelt wurden [1, 20].

Besonders bewährt haben sich bei den zyklischen Versuchen Cracked Round Bar (CRB) Proben (Bild 5) bei denen die Versagenszeit bei verschiedenen Anfangsbelastungen ermittelt wird [17, 22]. Die Auswertung erfolgt üblicherweise mittels linear elastischer Bruchmechanik (LEBM). Dabei handelt es sich um ein Konzept zur Beschreibung des Risswachstumsverhaltens bei dem davon ausgegangen wird, dass der so genannte Spannungsintensitätsfaktor  $K_I$  die Spannungsverteilung rund um die Risspitze beschreibt und das Risswachstum kontrolliert. Im Allgemeinen kann  $K_I$  mit folgendem Zusammenhang beschrieben werden:

$$K_I = \sigma \cdot \sqrt{a} \cdot Y \left( \frac{a}{W} \right) \quad (1)$$

wobei  $\sigma$  für die globale Spannung,  $a$  für die Risslänge,  $W$  für die Probenweite und  $Y(a/W)$  für eine von der Bauteil- bzw. Prüfkörpergeometrie abhängige Korrekturfunktion steht. Die Darstellung der Ergebnisse erfolgt durch Auftragen von  $K_I$  über der Versagenszeit  $t_f$  in einem doppel-logarithmischen Diagramm [22].

Instead, comparative values are established and can be used in order to optimise welding parameters or to optimise the structure of heated coil mouldings. Although it is indispensable to check the strength of the welded joint between the heated coil moulding and the pipe, the typical failure behaviour of Esockets which results from crack initiation and slow crack growth is not dealt with here [19]. On the contrary, the loads in the longitudinal direction (caused by the internal pressure) are decisive for the service life of Esockets. Consequently, it seems to be sensible to carry out tensile tests in the longitudinal direction. In this case, either the whole Esocket with the welded-in pipes can be tested [25] or specimens can be cut out of the welded joint in the longitudinal direction (see Fig. 4) [9, 18]. Similar tests were also proposed [19]. However, the specimens from the Esockets were subjected to cyclic loads in this case in order to reduce the test duration.

### 2.3 Investigation of the crack growth behaviour

Above all in Central Europe, the full notch creep test (FNCT) is widespread in order to characterise the slow crack growth behaviour of PE. In the case of the FNCT, tensile creep rupture tests are carried out at an elevated temperature (mostly 80 °C) on square test specimens (10 x 10 x 100 mm) with a circumferential notch. The notch with

a depth of 1.6 mm is usually manufactured by pressing a razor blade into all four sides of the specimens. In order to promote the crack growth and to reduce the test duration, the FNCT is performed in wetting agent solutions. Nonylphenol polyglycol ether (e.g.: Arkopal) in a concentration of 2 % by weight is normally used in deionised water [6, 12, 23].

The failure time at defined initial stresses is measured in the FNCT (in relation to the residual cross-section). The comparative value referred to in most cases is the creep rupture time at 80 °C and 4 MPa. In principle, it is assumed that FNCT results correlate with the failure times of pipes which were subjected to internal pressure loads and exhibited brittle failure [6]. This is the obvious since similar failure mechanisms exist in both cases (crack initiation and subsequent crack growth). Cyclic tests represent another possibility of characterising the crack growth behaviour of PE pipe materials. As a result of the cyclic loads, brittle crack growth is promoted and, even at 23 °C, slowly growing cracks can be initiated in modern PE materials within one or two days without using wetting agents. In spite of the different loading conditions compared to static test, numerous investigations showed that very similar crack growth mechanisms exist with both load types in case of PE. Furthermore, material rankings based on cyclic tests correlate very well with those

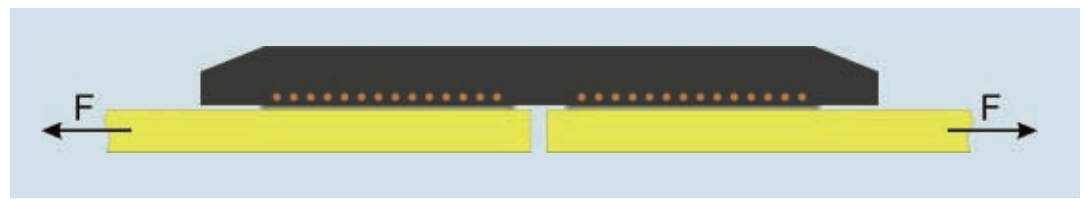


Bild 4: Schematische Darstellung von Längsproben für Zugversuche an E-Muffen.

Fig. 4: Schematic representation of longitudinal specimens for tensile tests on Esockets.

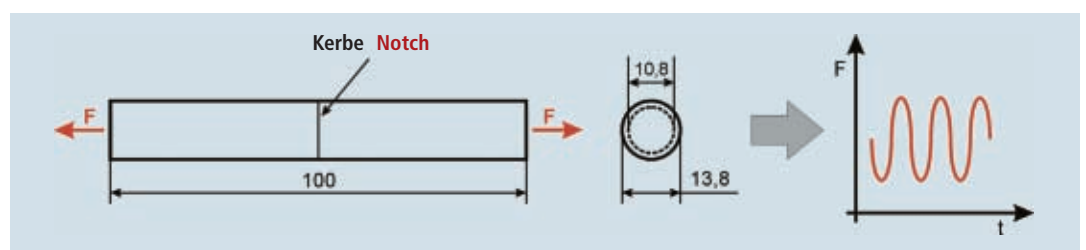


Bild 5: Abmessungen der in dieser Arbeit verwendeten CRB-Proben.

Fig. 5: Dimensions of the CRB specimens used in this work.

### 3. Ergebnisse

#### 3.1 Heizwendelschweißverbindungen aus Polyethylen

Im ersten Teil dieser Untersuchungen wurde der Einfluss des Risswachstums-widerstandes von zwei verschiedenen PE 100 Werkstoffen (PE-I und PE-II) auf das Langzeitverhalten von Heizwendelformteilen untersucht. Zunächst wurden zyklische Versuche an CRB-Proben bei 23°C, 5 Hz und einem Verhältnis der minimalen zur maximalen Last von 0,1 ( $R = 0,1$ ) durchgeführt. In weiterer Folge wurden aus beiden Werkstoffen E-Muffen (Durchmesser: 355 mm) und Anbohrschellen (Dimension: 160/32 mm) hergestellt und jeweils mit PE 100 Rohren (SDR 11) verschweißt. Anschließend wurden aus den E-Muffen Proben in Längsrichtung entnommen und bei 23°C, 5 Hz und  $R = 0,1$  zyklisch belastet (Bild 6) und die Versagenszeit ermittelt. Aus den Anbohrschellen wurden von der HESSEL Ingenieurtechnik GmbH wie in DVS 2203-4 Beiblatt 1 beschrieben jeweils 4 Stopfen entnommen (Bild 3) und quer zur Schweißebene bei 80°C und 3 MPa in einer wässrigen 2 % Arkopal N100 Lösung einem Langzeit-zugversuch unterzogen.

In Bild 7 sind die Ergebnisse der zyklischen Versuche an den beiden Werkstoffen (unverschweißt) PE-I und PE-II dargestellt. Neben der Spannungsintensitätsfaktordifferenz zu Versuchsbeginn  $\Delta K_{I,0}$  ist auch die Spannung zu Versuchsbeginn im Restquerschnitt  $\sigma_0$  angegeben. Die Ergebnisse zeigten, dass im doppelt-logarithmischen Diagramm die spröde versagten Proben von beiden Materialien jeweils auf einer Geraden liegen die parallel zueinander sind. PE-

II zeigte unabhängig von der Belastung ca. 2,5 mal längere Versagenszeiten als PE-I und wies somit einen deutlich höheren Widerstand gegenüber dem langsamen Risswachstum auf. Bei den durchgeführten Untersuchungen an den Proben aus den E-Muffenverbindungen sowie an den Proben die aus den aufgeschweißten Anbohrschellen herausgearbeitet wurden, konnte festgestellt werden, dass langsames Risswachstum zum Versagen führte. Insbesondere bei den zyklischen Versuchen an den E-Muffen konnte der Versagensmechanismus gut beobachtet werden. Im Mittelteil der E-Muffen initiierten Risse im Bereich der Drahtwindungen und wuchsen langsam durch die Wand der Muffe. Somit lag ein ähnlicher Versagensmechanismus wie bei Zeitstandin-  
 druckversuchen vor und der Versuch scheint geeignet das Langzeitverhalten von E-Muffen abzuschätzen.

Die Versagenszeiten der zyklischen Versuche an den Proben aus den E-Muffen

which were established by subjecting the materials to static loads [1, 20].

Cracked round bar (CRB) specimens (see Fig. 5) with which the failure time is established at various initial loads have proven to be particularly suitable for the cyclic tests [17, 22]. The evaluation is usually made by means of linear elastic fracture mechanics (LEFM). In this concept for the description of the crack growth behaviour, it is assumed that the so-called stress intensity factor  $K_I$  describes the stress distribution around the crack tip and controls the crack growth. In general,  $K_I$  can be described with the following relationship:

$$K_I = \sigma \cdot \sqrt{a} \cdot Y \left( \frac{a}{W} \right) \quad (1)$$

where  $\sigma$  stands for the global stress,  $a$  for the crack length,  $W$  for the specimen width and  $Y(a/W)$  for a correction function dependent on the geometry of the component or test specimen. The results are represented by plotting  $K_I$

over the failure time  $t_f$  in a log-log diagram [22].

### 3. Results

#### 3.1 Heated coil welded joints made of polyethylene

The first part of these investigations related to the influence of the crack growth resistance of two different PE 100 materials (PE-I and PE-II) on the long-term behaviour of heated coil fittings. First of all, cyclic tests were carried out on CRB specimens at 23°C, 5 Hz and a ratio of 0.1 ( $R = 0.1$ ) of the minimum load to the maximum load. Thereafter, Esockets (diameter: 355 mm) and tapping saddles (dimensions: 160/32 mm) were manufactured from both materials and were welded together with PE 100 pipes (SDR 11) in each case. Specimens were then taken from the Esockets in the longitudinal direction and were subjected to cyclic loads at 23°C, 5 Hz and  $R = 0.1$  (see Fig. 6) and the failure time was established.

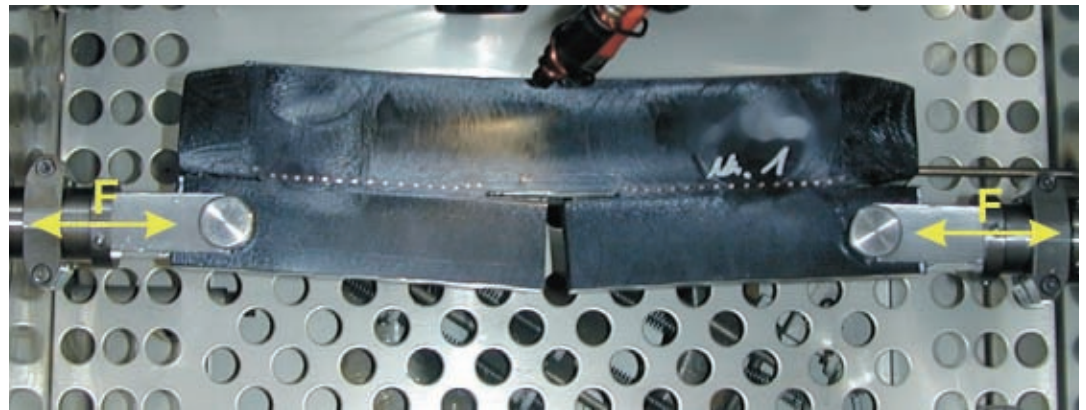


Bild 6: Zyklische Versuche an Proben die in Längsrichtung aus E-Muffen herausgearbeitet wurden.

Fig. 6: Cyclic tests on specimens which were machined out of Esockets in the longitudinal direction.

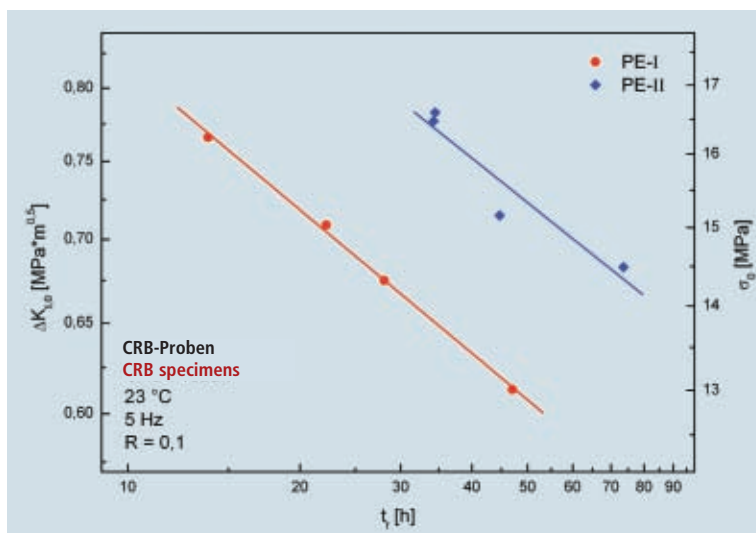


Bild 7: Vergleich des Risswachstumsverhaltens der beiden untersuchten PE 100 Typen.

Fig. 7: Comparison of the crack growth behaviour of the two PE 100 types under investigation.

HESSEL Ingenieurtechnik GmbH removed four plugs from each of the tapping saddles using the method described in DVS 2203-4, Annex 1 (see Fig. 3) and subjected these to a long-term test transverse to the welding plane at 80°C and 3 MPa in an aqueous 2 % Arkopal N100 solution. Fig. 7 indicates the results of the cyclic tests on the two materials (unwelded) PEI and PEII. Not only the stress intensity factor difference at the beginning of the test  $\Delta K_{I,0}$  but also the stress in the remaining cross-section at the beginning of the test  $\sigma_0$  are specified. The results showed that, on the log-log diagram, specimens of both materials with brittle

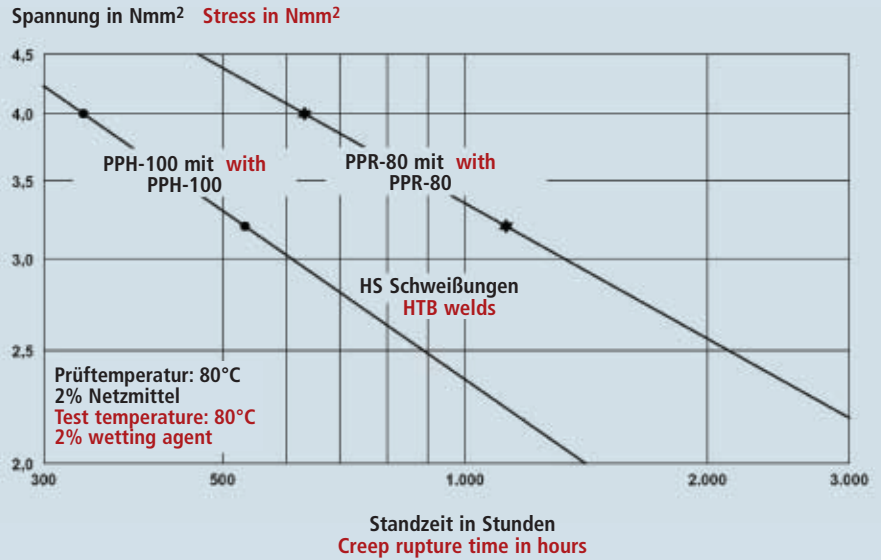
sind in Tabelle 1 gemeinsam mit den Versuchen an den Anbohrschellen dargestellt. In beiden Fällen zeigten die Schweißverbindungen mit den E-Formteilen aus PE-II wesentlich längere Versagenszeiten als die aus PE-I. Auffallend ist, dass die E-Muffen aus PE-II ca. 1,6 mal so lange Standzeiten aufwiesen während die Schweißung der Anbohrschelle mehr als 5 mal so lange Standzeiten zeigten. Erklärt werden kann diese Tatsache mit der unterschiedlichen Prüftemperatur bei diesen beiden Untersuchungen (Prüfung der E-Muffen bei 23°C während Anbohrschellen bei 80°C geprüft wurden), da der Einfluss der Temperatur auf das Risswachstumsverhalten je nach Material unterschiedlich ist [22]. Trotz der großen Standardabweichung (große Streuung) der Ergebnisse konnte somit gezeigt werden, dass sich der Risswiderstand des PE-Werkstoffes nachhaltig auf die Leistungsfähigkeit von Heizwendelformteilen bzw. Heizwendelschweißverbindungen auswirkt.

**3.2 Hezelementstumpfschweißung von Polypropylen-Rohren**

Bereits vor längerer Zeit wurden von den Autoren, gemeinsam mit der Hessel Ingenieurtechnik GmbH, Untersuchungen an Hezelementstumpfschweißungen an Rohren (Dimension 110 x 10,0 mm) aus einem PP-Randomcopolymer (PP-R) sowie einem PP-Homopolymer (PP-H), unter Berücksichtigung des Risswachstumsverhaltens, durchgeführt [8]. Dazu wurden einerseits Zeitstandzugversuche gemäß [5] bei 80°C in einer 2 % wässrigen Netzmittellösung (NM 5.2) durchgeführt. Andererseits wurde

**Bild 8: Ergebnisse der Untersuchungen an den hezelementstumpfgeschweißten PP-Rohren (80 °C, 3 MPa, 2 % NM 5.2) [8].**

**Fig. 8: Results of the investigations on the PP pipes after the heated tool butt welding (80°C, 3 MPa, 2 % NM 5.2) [8].**



für beide Werkstoffe mittels FNCT (80°C, 4 MPa, 2 % NM 5.2) der Widerstand gegenüber dem langsamen Risswachstum charakterisiert.

Bei den Ergebnissen aus den FNCT-Versuchen ist zunächst aufgefallen, dass PP-R mit 352 h eine mehr als doppelt so lange Versagenszeit aufwies als PP-H (146 h). Somit hatte die untersuchte PP-R Formmasse wie erwartet [7] einen höheren Widerstand gegenüber dem langsamen Risswachstum. Die Ergebnisse der Zeitstandzugversuche an Proben aus den stumpfgeschweißten Rohren sind in Bild 8 dargestellt. Auch hier ist deutlich zu erkennen, dass PP-R rund doppelt so lange Standzeiten aufwies [8].

Bei allen Proben aus den Schweißverbindungen der PP-Rohre erfolgte Versagen durch langsames Risswachstum ausgehend von den Kerben beim Schweißwulst (Bild 9). Unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus den FNCT-

failure are each located on straight lines which are parallel to each other. Irrespective of the loads, PE-II exhibited approx. 2.5 times longer failure times than PE-I and thus a substantially higher resistance to slow crack growth.

During the investigations conducted on the specimens from the Esocket joints and on the specimens which were machined out of the welded-on tapping saddles, it was possible to establish that slow crack growth led to the failure. Particularly during the cyclic tests on the Esockets, the failure mechanism could be observed readily. In the central part of the Esockets, cracks initiated in the region of the wire turns and slowly grew through the wall of the socket. Thus, there was a similar failure mechanism to that during internal pressure creep rupture tests and the test seems suitable for estimating the long-term behaviour of Esockets.

The failure times in the cyclic tests on the specimens from the Esockets are indicated in Table 1 together with the tests on the tapping saddles. In both cases, the welded joints with the Emouldings made of PE-II exhibited considerably longer failure times than those made of PE-I. It is conspicuous that the creep rupture times of the Esockets made of PE-II were approx. 1.6 times as long while the creep rupture times of the welding from the tapping saddle were more than five times as long. This fact may be explained by the different test temperature in these two investigations (testing of the Esockets at 23°C while the tapping saddles

were tested at 80°C) since the temperature exerts a different influence on the crack growth behaviour depending on the material [22]. In spite of the great standard deviation (great scatter) of the results, it was thus possible to show that the crack resistance of the PE material has an enduring effect on the efficiency of heated coil mouldings and heated coil welded joints.

**3.2 Heated tool butt welding of polypropylene pipes**

Quite a long time ago, the authors, together with Hessel Ingenieurtechnik GmbH, already conducted investigations of heated tool butt welds of pipes (dimensions: 110 x 10.0 mm) made of a PP random copolymer (PP-R) and a PP homopolymer (PP-H), taking account of the crack growth behaviour [8]. On the one hand, tensile creep rupture tests according to [5] were performed at 80°C in a 2 % aqueous wetting agent solution (NM 5.2) for this purpose. On the other hand, the resistance to slow crack growth was characterised for both materials by means of FNCT (80°C, 4 MPa, 2 % NM 5.2).

With regard to the results from the FNCT, it is firstly conspicuous that, with 352 h, PP-R exhibited more than double the failure time of PP-H (146 h). As expected [7], the investigated PP-R material thus had a higher resistance to slow crack growth. The results of the tensile creep rupture tests on specimens from the butt-welded pipes are indicated in Fig. 8. Here as well, it can be recognised clearly that the creep rupture

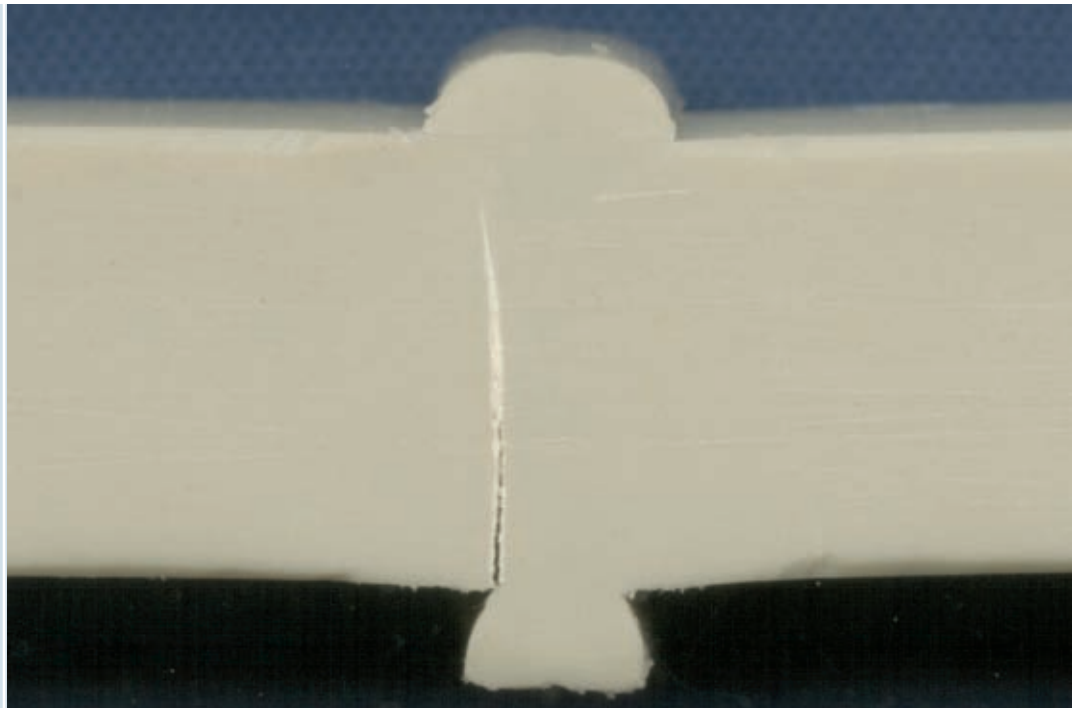
**Tabelle 1: Ergebnisse der zyklischen Versuche an Längsproben aus E-Muffen (23°C) sowie Zeitstandzugversuchen gemäß DVS 2203-4 (Beiblatt 1) quer zur Schweißverbindung von Anbohrschellen (80°C).**

**Table 1: Results of the cyclic tests on longitudinal specimens from Esockets (23°C) as well as of the tensile creep rupture tests according to DVS 2203-4 (Annex 1) transverse to the welded joint on tapping saddles (80°C).**

	E-Muffe längs E-socket, longitudinal		Anbohrschelle Tapping saddle	
	t <sub>f</sub> [h]	Standardabweichung Standard deviation	t <sub>f</sub> [h]	Standardabweichung Standard deviation
PE-I	19	6	126	70
PE-II	32	10	686	270

**Bild 9: Rissinitiation ausgehend von der Wulstkerbe und langsames Risswachstum einer Schweißnaht aus der untersuchten PP-H Formmasse.**

**Fig. 9: Crack initiation originating from the flash notch and slow crack growth in a weld made of the investigated PP-H moulding compound.**



times of the PP-R are around twice as long [8].

With all the specimens from the welded joints on the PP pipes, the failure was caused by slow crack growth originating from the notches at the welding bead (Fig. 9). Taking into account the results from the FNCT investigations, it was possible to conclude that the crack growth resistance of PP has a decisive influence on the service life of heated tool butt welds.

### 3.3 Heated tool butt welds of polyvinylidene fluoride pipes

In this part of the work, investigations were conducted of heated tool butt welds on pipes (dimensions: 63 x 3.0 mm) made of two different PVDF types. Tensile creep rupture tests in compliance with [5] were carried out at 80°C and 12.5 MPa in a 2 % aqueous wetting agent solution (Arkopal N100) at Hessel Ingenieurtechnik GmbH; not only on the base material but also on the welded joints [10]. In these conditions, crack initiation could be established in all the specimens. In this respect, the cracks in the welded specimens initiated in the region of the notch between the pipe and the welding bead.

The mean creep rupture times in the tensile tests are compared in Table 2. The first conspicuous aspect relates to the great standard deviations which are typical of such tests. It was possi-

ble to deduce from the investigations on the base material that, on the basis of the longer creep rupture times, the PVDF suspension type exhibited a higher resistance to slow crack growth than the PVDF emulsion type. As expected, the different crack growth behaviour then exerted an effect on the failure times of the manufactured welded joints too. Also during the investigations on the welded specimens, the creep rupture times of the suspension type were many times longer than those of the emulsion type.

Thus, these results also showed that there is a clear relationship between the notch sensitivity of the PVDF material used and the service life of heated tool butt welds. Thus a targeted material selection is important in order

Untersuchungen konnte geschlussfolgert werden, dass der Risswachstums-widerstand von PP einen entscheidenden Einfluss auf die Lebensdauer von Heizelementstumpfschweißungen hat.

### 3.3 Heizelementstumpfschweißungen von Polyvinylidenfluorid-Rohren

In diesem Teil der Arbeit wurden Heizelementstumpfschweißungen von Rohren (Dimension 63 x 3,0 mm) aus zwei verschiedenen PVDF-Typen untersucht. Es wurden Zeitstandzugversuche entsprechend [5] bei 80°C, 12,5 MPa in einer 2 % wässrigen Netzmittellösung (Arkopal N100) bei der Hessel Ingenieurtechnik GmbH durchgeführt; sowohl am Grundmaterial als auch an den Schweißverbindungen [10]. Bei diesen Bedingungen konnte bei allen Proben Rissinitiation

festgestellt werden, wobei die Risse bei den geschweißten Proben im Bereich der Wulstkerbe initiierten.

Die Mittelwerte der Standzeiten der Zugversuche sind in Tabelle 2 gegenübergestellt. Auffallend sind zunächst die großen Standardabweichungen die typisch für derartige Versuche sind. An den Untersuchungen des Grundmaterials konnte abgeleitet werden, dass der PVDF-Suspensionstyp aufgrund der längeren Standzeiten einen höheren Widerstand gegenüber dem langsamen Risswachstum als der PVDF-Emulsionstyp aufwies. Wie erwartet wirkte sich das unterschiedliche Risswachstumsverhalten dann auch auf die Versagenszeiten der hergestellten Schweißverbindungen aus. Der Suspensionstyp zeigte auch bei den Untersuchungen der geschweißten Proben um ein vielfaches höhere Standzeiten als der Emulsionstyp.

Somit zeigten auch diese Ergebnisse einen klaren Zusammenhang zwischen der Kerbempfindlichkeit des verwendeten PVDF-Werkstoffes und der Lebensdauer von Heizelementstumpfschweißungen. Also ist eine gezielte Werkstoffauswahl wichtig um die Leistungsfähigkeit von PVDF-Rohrleitungen sicherzustellen.

### 4. Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Im ersten Teil der hier zusammengefassten Forschungsarbeiten wurden E-Muffen und Anbohrschellen aus zwei verschiedenen PE 100 Typen

**Tabelle 2: Standzeiten der Zugversuche an geschweißten PVDF-Rohren (80°C, 12,5 MPa, 2 % Arkopal N100).**

**Table 2: Creep rupture times in the tensile tests on welded PVDF pipes (80°C, 12.5 MPa, 2 % Arkopal N100).**

	Grundmaterial Base material		Schweißungen Weld	
	t <sub>f</sub> [h]	Standard-abweichung Standard deviation	t <sub>f</sub> [h]	Standard-abweichung Standard deviation
PVDF Emulsionstyp emulsion type	217	92	58	21
PVDF Suspensionstyp suspension type	1.536	475	408	303

untersucht. Mit Hilfe der gleichzeitig durchgeführten Risswachstumsversuche konnte gezeigt werden, dass sich ein hoher Widerstand gegenüber dem langsamen Risswachstum positiv auf die Lebensdauer der Heizwendelformteile bzw. die Heizwendelschweißungen auswirkte. Weiterhin wurde anhand der vorgestellten Versuche an Heizelementstumpfschweißungen von PP- und PVDF-Rohren gezeigt, dass mit steigendem Risswachstumswiderstand des verwendeten Rohrwerkstoffes längere Standzeiten der Schweißverbindungen einhergehen. Folglich ist die Werkstoffauswahl für die Lebensdauer von Schweißverbindungen aus PE, PP und PVDF entscheidend, da bei höherem Widerstand gegenüber dem langsamen Risswachstum auch mit einer längeren Lebensdauer der Schweißverbindungen

- und damit verbunden mit einer höheren Lebensdauer von installierten Rohrsystemen, gerechnet werden kann. Dies konnte mit allen durchgeführten Langzeitprüfungen übereinstimmend nachgewiesen werden. Nach den bisher vorliegenden Erkenntnissen ist dieser Zusammenhang unabhängig vom Polymer sowie unabhängig von der Schweißmethode gültig, so lange der dominierende Versagensmechanismus von Schweißverbindungen langsames Risswachstum ist. Der Einsatz von hochwertigen Werkstoffen mit hohem Widerstand gegenüber dem langsamen Risswachstum ist daher in Zukunft generell für Rohrleitungssysteme aus Thermoplasten zu empfehlen.

to ensure the efficiency of PVDF pipelines.

#### 4. Summary and conclusions

In the first part of the research work summarised here, investigations were conducted on Esockets and tapping saddles made of two different PE 100 types. With the aid of the performed crack growth tests, it was possible to show that a high resistance to slow crack growth had a positive effect on the service life of the heated coil mouldings and of the heated coil welds. On the basis of the presented tests of heated tool butt welds on PP and PVDF pipes, it was also shown that longer creep rupture times of the welded joints are associated with a slow crack growth resistance of the pipe material used. Consequently, the material selection

is decisive for the service life of welded joints made of PE, PP and PVDF since a longer service life of the welded joints and, connected with this, a longer service life of installed pipe systems may also be expected with a higher resistance to slow crack growth. This could be proven congruently with all the performed long-term tests. According to the knowledge available until now, this relationship is valid irrespective of the polymer and irrespective of the welding method provided that slow crack growth is the predominant failure mechanism of the welded joints. Therefore, the utilisation of high-quality materials with a high resistance to slow crack growth must be generally recommended for piping systems made of thermoplastics in future.

#### Literatur **References**

- [1] Barker, Bowman, Bevis, The Performance and Cause of Failure of Polyethylene Pipes Subjected to Constant and Fluctuating Internal Pressure Loadings, *Journal of Materials Science*, 18 (1983) 1095-1118
- [2] Bergström, Nilsson, Lindqvist, The Influence from Pipe Surface, Weld Beads and Protective Skins on Long Term Failure Times for PE Butt Fusion Joints, in *Proc. Plastics Pipes XII*, Baveno, Italy, 2004
- [3] Bowman, The fatigue performance of polyethylene pipe joints made with electrofusion fittings, *Plastics and Rubber Processing and Applications*, 9 (1988) 147-153
- [4] Diedrich, Gaube, Schweißverfahren für Rohre und Platten aus Hart-Polyäthylen - Zeitstandfestigkeit und Langzeitschweißfaktoren, *Kunststoffe*, 60 (1970) 74-80
- [5] DVS 2203-4 (1997) Prüfen von Schweißverbindungen an Tafeln und Rohren aus thermoplastischen Kunststoffen - Teil 4: Zeitstandzugversuch
- [6] Fleissner, Experience with a Full Notch Creep Test in Determining the Stress Crack Performance of Polyethylene, *Polymer Engineering and Science*, 38 (1998) 330-340
- [7] Frank, Unterscheidungskriterien bei Industrierohren aus PP-Homopolymer und PP-Copolymer, *3R international*, 39 (2000) 252-258
- [8] Hessel, Frank, Lueghamer, Langzeitverhalten infrarotgeschweißter Rohrleitungssysteme aus PVDF und PP - Teil 2, *3R international*, 42 (2003) 282-287
- [9] Hessel, Larsen, Neue Erkenntnisse zum Langzeitverhalten von Schweißverbindungen an Kunststoffmantelrohren, *3R international*, 36 (1997) 283-287
- [10] Hessel, Lueghamer, Hackl, Langzeitverhalten infrarotgeschweißter Rohrleitungssysteme aus PVDF und PP - Teil 1, *3R international*, 41 (2002) 645-651
- [11] Hessel, Lueghamer, Tsunaga, Welding of Large Diameter Heavy Wall Polyolefine Pipes and Long Term Performance, in *Proc. Plastics Pipes XII*, Baveno, Italien, 2004
- [12] ISO 16770 (2004) Plastics - Determination of Environmental Stress Cracking (ESC) on Polyethylene (PE) - Full Notch Creep Test (FNCT)
- [13] Kausch, Grellmann, Bierögel, Mechanical Strength of Interfaces in Thermoplastic Polymers, in *Proc. 10. Problemseminar: Deformation und Bruchverhalten von Kunststoffen*, Merseburg, Deutschland, 2005
- [14] Lang, Stern, Doerner, Applicability and Limitations of Current Lifetime Prediction Models for Thermoplastics Pipes under Internal Pressure, *Die angewandte makromolekulare Chemie*, 247 (1997) 131-137
- [15] Lueghamer, Verbindungstechnik bei Kunststoff-Großrohren, in *Proc. 18. Leobener Kunststoff-Kolloquium - Kunststoffrohre 2004*, Leoben, Österreich, 2004
- [16] Narbeshuber, Seidelt, Moderne Heizwendelformteile - Teil 1, *3R international*, 41 (2002) 527-531
- [17] Nishimura, Narisawa, Fatigue Behavior of Medium-Density Polyethylene Pipes, *Polymer Engineering and Science*, 31 (1991) 399-403
- [18] No, Benatar, Development of Flaw Criteria for Short-Term Performance of Electro-Fusion Pipe Welds, in *Proc. ANTEC 2005*, Boston, Massachusetts, USA, 2005
- [19] Olick, Moet, Grigory, Kanninen, Fatigue-Accelerated Slow Crack Growth in Electrofusion Joints of MDPE Fuel Gas Pipes, in *Proc. 13th Plastic Fuel Gas Pipe Symposium*, San Antonio, Texas, USA, 1991
- [20] Parsons, Stepanov, Hiltner, Baer, Correlation of Fatigue and Creep Slow Crack Growth in a Medium Density Polyethylene Pipe Material, *Journal of Materials Science*, 35 (2000) 2659-2674
- [21] Pinter, Haager, Balika, Lang, Fatigue Crack Growth in PE-HD Pipe Materials, *Plastics Rubber and Composites*, 34 (2005) 25-33
- [22] Pinter, Haager, Balika, Lang, Cyclic Crack Growth Tests with CRB Specimens for the Evaluation of the Long Term Performance of PE Pipe Grades, *Polymer Testing*, 26 (2007a) 180-188
- [23] Pinter, Haager, Lang, Influence of Nonylphenol-Polyglycol-Ether Environments on the Results of the Full Notch Creep Test, *Polymer Testing*, in Press (2007b)
- [24] Potente, Schnieders, Stress Cracking Caused by Hot Plate Welding - Theoretical Analysis, in *Proc. ANTEC 2005*, Boston, Massachusetts, USA, 2005
- [25] Troughton, Brown, Hessel, Comparison of Long-term and Short-term Tests for Electrofusion Joints in PE Pipes, in *Proc. Plastics Pipes XIII*, Washington DC, USA, 2006