

Wirtschaftliches Optimierungspotential beim Heizelementstumpfschweißen von Schutzmantelrohren aus spannungsrisssbeständigem Polyethylen

Economic Optimisation Potential of Pipes with a Crack Resistant Polyethylene and Protective Outer Layer during Heated Element Butt Welding

Holger Hesse, egeplast, Werner Strumann GmbH & Co.KG, Greven; Johannes Grieser, Hessel Ingenieurtechnik GmbH, Roetgen; Dr. Uwe Egen, RothenbergerWerkzeuge Produktions GmbH, Kelkheim

Zusammenfassung

Die Langzeitfestigkeit von Rohren aus Polyethylen konnte im Zuge der Entwicklung vom PE 63 über PE 80 bis zum PE 100 ständig verbessert werden. Mit Erscheinen der bimodalen PE-Rohstoffe ist eine weitere Optimierung hinsichtlich der Spannungsrisssbeständigkeit erzielt worden. Eine weitere Verbesserung ergibt sich bei Rohren aus spannungsrisssbeständigem Material, die zusätzlich durch einen Schutzmantel vor äußerer Beschädigung geschützt sind. Die durch diese verbesserten Eigenschaften erzeugte Zeitstandreserve kann genutzt werden, um den Heizelementstumpf-Schweißprozess zu beschleunigen. Der Beitrag zeigt unter welchen Bedingungen das Optimierungspotential ausgeschöpft werden kann, ohne die erwartete Mindestlebensdauer von 100 Jahren zu gefährden.

Summary

It has been possible to consistently improve the long-term durability of polyethylene pipes over the course of development from PE 63 and PE 80 through to PE 100. A further optimisation has been achieved with respect to stress crack resistance due to the emergence of bimodal PE materials. Another improvement results from pipes made of stress crack resistant material which also have additional protection from external damage through a mineral-reinforced polypropylene protective outer layer. The creep behaviour reserve created by these improved properties can be utilised to accelerate the heating element butt welding process. This report demonstrates the conditions under which the optimisation potential can be exploited without constituting a risk to the expected 100 year minimum service life.

1. Einleitung

Seit Beginn der industriellen Herstellung von Niederdruckpolyethylen (PE-hard, PE-HD) 1953 wurde dieser Werkstoff ständig verbessert. Trotz des bereits hohen Entwicklungsstandes werden die Eigenschaften des, im Vergleich zu den Metallen, jungen Werkstoffes weiterhin optimiert. PE-HD eignet sich aufgrund seiner Verarbeitungs- und Anwendungseigenschaften und wegen seiner Wirtschaftlichkeit hervorragend zur Herstellung von Rohren für die verschiedensten Anwendungen. Für den Einsatz als Druckrohrleitung für Gas und Wasser ist insbesondere das Langzeitverhalten von besonderem Interesse. Die temperatur- und spannungsabhängige Langzeitfestigkeit von Polyethylen ist in Zeitstanddiagrammen beschrieben [1].

Werkstofftechnisch werden drei Versagensmechanismen bei Rohren aus Polyethylen unterschieden (Bild 1):

- duktiles Versagen – ausgelöst durch Überschreiten der Streckgrenze erfolgt

	Dipl.-Ing. (FH) Holger Hesse Autorenprofil: Author profile: www.fuegen-von-kunststoffen.de/?id=201920 www.joining-plastics.info/?id=201920 Holger.Hesse@egeplast.de
	Dipl.-Ing. (FH) Johannes Grieser Autorenprofil: Author profile: www.fuegen-von-kunststoffen.de/?id=201621 www.joining-plastics.info/?id=201621 johannes.grieser@hessel-ingtech.de
	Dr. Uwe Egen Autorenprofil: Author profile: www.fuegen-von-kunststoffen.de/?id=201921 www.joining-plastics.info/?id=201921 Uwe.Egen@rothenberger.com

im sogenannten flach verlaufenden Ast der Zeitstandkurve (I)

- sprödes Versagen bei tiefer Temperatur oder bei langzeitiger Belastung – ausgelöst durch Spannungsrisse – erfolgt im sogenannten steilen Ast der Zeitstandkurve (II)
- sprödes Versagen durch Wärmealterung – chemischer Prozess – Abbau der mittleren molaren Masse (III)

1. Introduction

Since industrial manufacturing of low pressure polyethylene (PE-hard, PE-HD) began in 1953 this material has been continuously improved. In spite of the already high level of development the properties of this material, which is young compared to metals, continue to be optimised. PE-HD is excellently suited to the manufacture of pipes for the

most diverse applications owing to its processing and application properties and because of its cost effectiveness. The long-term behaviour of polyethylene is of particular interest with respect to application as a pressure pipeline for gas and water. The temperature and stress-dependent long-term durability of polyethylene is described in creep behaviour diagrams [1].

In terms of materials three failure mechanisms in polyethylene pipes are distinguished (Fig. 1):

- Ductile failure – triggered by exceeding the yield stress; takes place in the so-called flat running branch of the creep behaviour curve (I).
- Brittle failure at low temperature or in the event of long-term stress – triggered by stress cracks; takes place in the so-called steep branch of the creep behaviour curve (II).
- Brittle failure through thermal ageing – chemical process; degradation of the mean molar mass (III).

Die Langzeitfestigkeit von Rohren aus Polyethylen konnte im Zuge der Entwicklung vom PE 63 über PE 80 bis zum PE 100 ständig verbessert werden. Mit Erscheinen der bimodalen PE-Rohstoffe ist eine weitere Optimierung hinsichtlich der Spannungsrisssbeständigkeit erzielt worden. Zeitstandkurven moderner bimodaler Rohstoffe weisen unter Einwirkung von Wasser oder Gas keinen steilen Ast im Verlauf ihrer Zeitstandkurven auf, der das Werkstoffversagen in Bezug auf das Spannungsrisssverhalten beschreibt. Diese PE Werkstoffe haben nachweislich eine Lebenserwartung von mehr als 100 Jahren im Betrieb und werden nachfolgend als PE 100 RC^{plus} bezeichnet.

2. Schweißen von Rohrleitungen aus Polyethylen

Rohrleitungen aus Polyethylen werden seit über 50 Jahren im Heizelementstumpfschweißverfahren geschweißt. Der Deutsche Verband für Schweißtechnik hat im Rahmen seiner Richtlinienarbeit im Arbeitsblatt DVS 2207-1 [3] für das Heizelementstumpfschweißen von Polyethylen praxisrelevante Verfahrensparameter festgelegt. Der Ablauf des Heizelementstumpfschweißens wird darin wie folgt beschrieben:

1. Angleichen der Verbindungsflächen unter Fügedruck am Heizelement
2. Anwärmen der Schweißstücke auf Fügetemperatur bei geringem Druck
3. Lösen und Entnehmen des Heizelementes
4. Fügen der Schweißstücke mittels linear ansteigendem Fügedruck
5. Abkühlen der Schweißstücke unter Fügedruck

3. Vergleich der Schweißparameter

Ziel einer jeden Schweißung ist eine feste Verbindung der Bauteile über einen definierten Zeitraum. Während sich die europäischen Fachkreise über den schematischen Ablauf einer Heizelementstumpfschweißung einig sind, gibt es hinsichtlich der Parameter Zeit, Temperatur und Druck beim Stumpfschweißen jedoch abweichende Auffassungen. In den Regelwerken des DVGW [4] wird eine Mindestnutzungsdauer der Rohrleitungen von 50 Jahren gefordert. Der

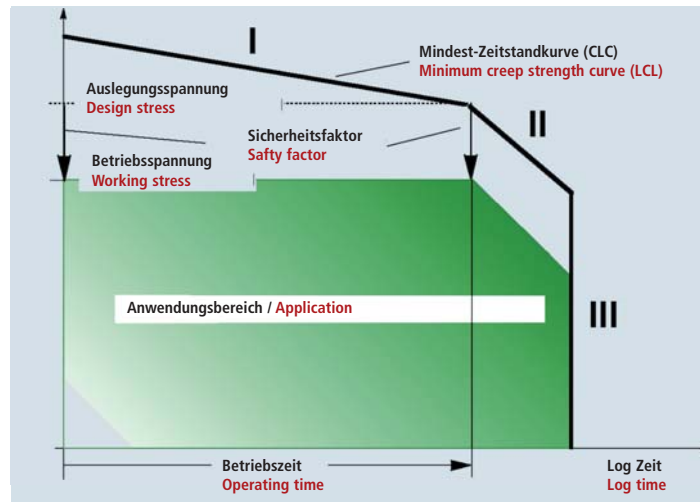


Bild 1: Schematische Darstellung des Zeitstandverhaltens von Rohren aus Polyethylen (I: Verformungsbrüche; II: Spannungsrisse; III: Wärmealterung) [2]

Fig. 1: Schematic representation of creep behaviour of polyethylene pipes (I: ductile fractures; II: stress cracks; III: thermal ageing) [2]

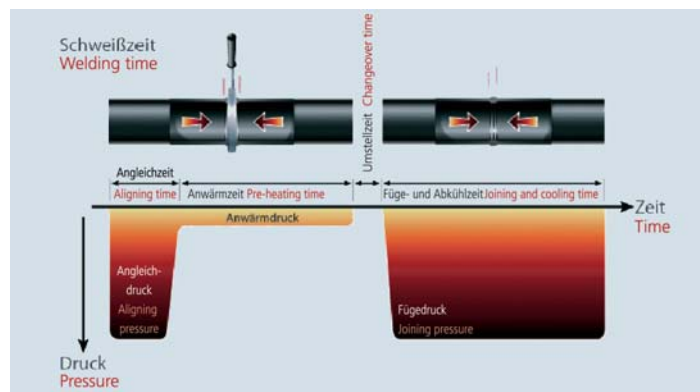


Bild 2: Zeitlicher Ablauf des Heizelementstumpfschweißens gemäß Richtlinie DVS 2207-1

Fig. 2: Temporal sequence of heating element butt welding in accordance with Directive DVS 2207-1

Vergleich der Schweißparameter (Fügedruck, Anwärm- und Abkühlzeiten) innerhalb der europäischen Union zeigt, dass verschiedene Wege existieren, um das Ziel einer gesicherten Nutzungsdauer von mindestens 50 Jahren zu erreichen.

Tabelle 1 gibt am Beispiel eines Rohres mit 50 mm Wanddicke eine Übersicht über die in europäischen Ländern angewendeten Schweißparameter beim Heizelementstumpfschweißen.

In allen Fällen ist das Resultat der Schweißung eine längskraftschlüssige und druckdichte Verbindung der Rohrleitung, die eine Mindestnutzungsdauer von 50 Jahren sicher erreicht. Dabei wird vorausge-

It has been possible to consistently improve the long-term durability of polyethylene pipes over the course of development from PE 63 and PE 80 through to PE 100. A further optimisation has been achieved with respect

to stress crack resistance due to the emergence of bimodal PE materials. Creep behaviour curves of modern bimodal materials exhibit no steep branch in the progression of their creep behaviour curves from the effects of water or gas which describes material failure with respect to stress crack resistance. These PE materials have been proven to have an operational service life expectancy of over 100 years and will be referred to below as PE 100 RC^{plus}.

2. Welding of Polyethylene Pipelines

Pipelines made of polyethylene have been welded in a heating element butt welding procedure for over 50 years. The German Association for Welding Technology (DVS) has defined process parameters relevant to the practice of heating element butt welding within the framework of its work on directives in Work Sheet DVS 2207-1 [3]. The heating element butt welding operation is described in this as follows:

1. Alignment of jointing surfaces under jointing pressure on the heating element
2. Pre-heating of pieces to be welded to jointing temperature at low pressure
3. Release and removal of the heating element
4. Joining the pieces to be welded with linear increase in the jointing pressure
5. Cooling of the pieces to be welded at jointing pressure

3. Comparison of Welding Parameters

The objective of any such weld is a strong bonding of components for a def-

Tabelle 1: Schweißparameter beim Heizelementstumpfschweißen innerhalb der EU
Table 1: welding parameters for heating element butt welding within the EU

	Fügedruck N/mm ² Jointing pressure N/mm ²	Anwärmzeit s Pre-heating time s	Abkühlzeit min Min. cooling time
Deutschland Germany	0,15 ± 0,01	500	60
Niederlande Netherlands	0,18 ± 0,01	550 bis 650	75
Italien Italy	0,15 ± 0,02 0,05 ± 0,01	555 bis 566	10 sec 53
Norwegen Norway	0,15	700	36

setzt, dass sowohl die Belastungen, denen die Rohre bei der Herstellung und beim Transport ausgesetzt sind als auch die Beanspruchungen auf der Baustelle, die durch das Schweißen und Verlegen entstehen, von den Schweißverbindungen ausgehalten werden, ohne dass mit Einschränkungen oder Reduzierungen der geforderten Mindestnutzungsdauer gerechnet werden muss.

4. Wirtschaftliche Betrachtung des Schweißprozesses

Bei näherer Betrachtung der Schweißparameter wird deutlich, dass die Abkühlzeit die wirtschaftlich bestimmende Größe in dem Prozess ist. Optimierungen hinsichtlich der Kosten können nur hier sinnvoll angreifen. Über den Einfluss der Außentemperatur auf die Abkühlzeit soll hier nicht vertiefend eingegangen werden. Dieser Einfluss ist mit dem Verfahren der Cooling Time Control [5] bereits beschrieben worden. Gegenstand der im vorliegenden Beitrag beschriebenen Untersuchungen ist es, die Abkühlzeit in Bezug zur Rekristallisationstemperatur zu betrachten. Hierzu wird zunächst das Abkühl- und Erstarrungsverhalten von PE, einem teilkristallinen thermoplastischen Polymerwerkstoff erläutert. Bild 3 zeigt den Wärmefluss bei der Abkühlung einer PE 80-Schmelze. Der Peak, beginnend bei 120°C, stellt die einsetzende Kristallisation aus der PE-Schmelze dar.

Es ist zu erkennen, dass die primäre Kristallisation bei der Unterschreitung von 120°C beginnt und bei einer Abkühlung auf unter 90°C nahezu abgeschlossen ist. Die in Regelwerken oder von Herstellern angegebenen mechanischen Eigenschaften von PE gelten i. d. R. für Werkstoff- und Umgebungstemperaturen von 20°C. Folglich verfügt eine Schweißverbindung erst mit Abkühlung auf 20°C über die zugesicherten Eigenschaften und kann ohne Einschränkungen die zulässige mechanische Belastung aufnehmen. Bei höheren Temperaturen ist eine niedrigere Festigkeit des PE anzusetzen. Wird eine abkühlende Schweißverbindung durch vorzeitige Beanspruchung belastet, kann es zu Vorschädigungen des Werkstoffes kommen, woraufhin von einer Mindestnutzungsdauer der Rohrleitung ausgegangen werden muss.

Am Beispiel einer Rohrleitung OD 630 mm SDR 11 aus PE 100 sollen die zeitlichen und monetären Verhältnisse dar-

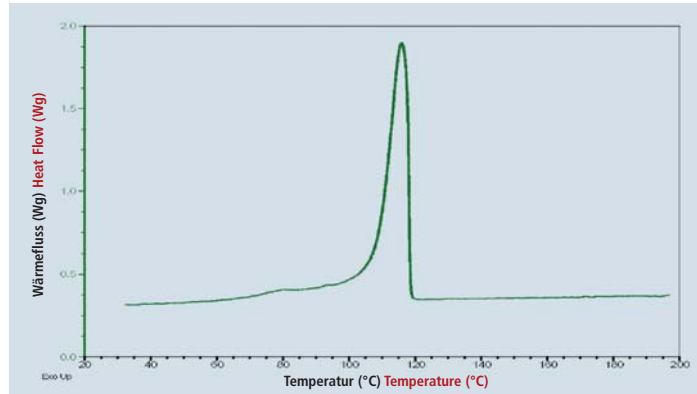


Bild 3: DSC-Kurve eines PE 80

Fig. 3: DSC curve of a PE 80

gestellt werden, die sich durch eine Verkürzung der Abkühlzeit auf die Hälfte der in der Richtlinie DVS 2207-1 empfohlenen Zeit ergeben.

Der zeitliche Aufwand für des Fügen, beginnend mit dem Anwärmen, beläuft sich auf etwa 79 Minuten. Auf die Abkühlzeit entfallen mit 68 Minuten ca. 85% der Gesamtschweißzeit. Durch eine Halbierung der Abkühlzeit wäre der Schweißprozess bereits nach 45 Minuten abgeschlossen.

Die Kosten für Schweißer, Helfer und Maschine lassen sich mit 3 €/ Min veranschlagen. Durch eine Verkürzung der Abkühlzeit auf die Hälfte ließe sich eine Reduktion der Herstellungskosten um 34% realisieren.

Ziel dieser Untersuchungen ist es die zu erwartenden Einschränkungen der Mindestnutzungsdauer infolge der verkürzten Abkühlzeit zu bestimmen.

5. Belastung von Rohren aus Polyethylen bei der Herstellung, der Verlegung und im Betrieb

Rohre aus Polyethylen werden in einem kontinuierlichen Extrusionsprozess hergestellt. Prozessbedingt verbleiben in der Rohrwand je nach Wanddicke und Abkühlbedingungen mehr oder weniger hohe Eigenspannungen. Schutzmantelrohre haben ein niedrigeres Eigenspannungsniveau als Rohre ohne Mantel, da durch die nachträgliche Aufbringung des Mantels und der damit ein-

inite period of time. While European groups of experts are agreed on the schematic sequence of heating element butt welding there are, however, deviations in opinion with respect to the time, temperature and pressure parameters of butt welding.

The regulations of DVGW [4] require a minimum service life for pipelines of 50 years. Comparison of welding parameters (jointing pressure, pre-heating and cooling times) within the European Union shows that there are various ways of achieving the objective of a guaranteed service life of at least 50 years.

Table 1 uses the example of a pipe with 50 mm wall thickness to provide an overview of welding parameters for heating element butt welding used in European countries.

The result of welding in all cases is longitudinally force-locked and pressure sealed connection of the pipeline which reliably achieves a minimum service life of 50 years. The prerequisite here is that welded joints are able to withstand both loads which the pipes are exposed to during manufacture and transport as well as the demands of the construction site resulting from welding and laying without

this leading to expected restrictions to or reductions in the required minimum service life.

4. Cost Effectiveness Aspect of the Welding Process

Closer examination of the welding parameters makes it apparent that the cooling time is the decisive cost efficiency factor in the process. Cost optimisation can only sensibly be tackled here. There will be no detailed discussion here of the influence of outside temperature on the cooling time. This influence has already been described under the Cooling Time Control procedure [5].

The subject matter of the tests described in this report is to consider the cooling time with reference to the recrystallisation temperature. To this end there will first be an explanation of the cooling and hardening behaviour of PE, a part crystalline thermoplastic polymer material. Fig. 3 shows the flow of heat during the cooling of a PE 80 melt. The peak which starts at 120°C represents the incipient crystallisation from the PE melt.

It can be seen that primary crystallisation starts when the temperature drops below 120°C and is almost complete at a cooling temperature of below 90°C. The mechanical properties of PE given in regulations or provided by manufacturers generally apply to material and ambient temperatures of 20°C. Consequently a welded joint only has the warranted properties when cooled to 20°C and can only then support the

Tabelle 3: Kostenvergleich
Table 3: Cost comparison

Verfahren Process	Gesamtzeit Total time	Kosten Cost
Schweißung nach DVS Welding to DVS	68 Min	204 €
Schweißung nach DVS mit halber Abkühlzeit Welding to DVS halving the cooling time	45 Min	135 €

Tabelle 2: Stumpfschweißparameter für PE-Rohr OD 630 mm SDR 11 gemäß DVS 2207-1

Table 2: Butt welding parameters for PE pipe with OD 630 mm SDR 11 in accordance with DVS 2207-1

Nennwanddicke Nominal wall thickness	Anwärmzeit Pre-heating time	Umstellzeit Adjusting time	Fügedruckaufbauzeit Jointing pressure build-up time	Abkühlzeit unter Fügedruck Cooling time with jointing pressure
57.2 mm	9 Min 32 sec	22 sec	28 sec	68 Min



Bild 4: Mechanische Belastung der Schweißverbindung

Fig. 4: Mechanical load on the welded joint

hergehenden Erwärmung, die im Grundrohr vorhandenen Eigenspannungen abgebaut werden. Röhre mit niedrigerem Eigenspannungsniveau weisen größere Reserven hinsichtlich zusätzlichen Beanspruchungen, die z. B. aus Vorschädigung resultieren, auf.

Beim Transport und beim Handling von Röhren auf der Baustelle ist eine Beschädigung der Oberfläche zu vermeiden. Schutzmantelrohre bieten hier einen weiteren Vorteil.

Nach der Verbindung im Stumpfschweißverfahren werden Rohrleitungen durch die Verlegung auf Zug und Biegung belastet. Die Biegebelastung tritt durch das Herausheben des Rohrstranges aus der Schweißmaschine auf. Die Zugbelastung entsteht durch den Weitertransport des Stranges. Eine Optimierung des Schweißprozesses durch Verkürzung der Abkühlzeit kann nur dann ernsthaft in Erwägung gezogen werden, wenn Langzeituntersuchungen an geschweißten Röhren eine sichere Aussage über die Mindestnutzungsdauer ergeben.

Im Betrieb sind Druckrohrleitungen bestimmungsgemäß einem Innendruck ausgesetzt. Äußere Belastungen durch Zug oder Biegung und Punktbelastun-

permissible mechanical load without restriction. Lower stability of the PE is to be estimated at higher temperatures. If premature load is exerted on a cooling welded joint then material damage may occur; it must then be assumed that this will result in a diminished minimum service life of the pipeline.

The temporal and monetary relationships that result from a curtailment of cooling time to half that recommended in the DVS 2207-1 Directive will be shown using the example of a pipeline with OD 630 mm SDR 11 made of PE 100.

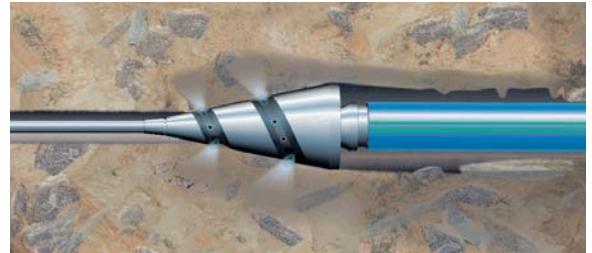
The temporal outlay for jointing, starting with pre-heating, is around 79 minutes. Approx. 85% of the total welding time is taken up with the cooling time of 68 minutes. By halving the cooling time the welding process would be completed in just 45 minutes. Costs for welders, helpers and machines can be calculated at € 3 / min. A 34% reduction in manufacturing costs could be realised by curtailing the cooling time by half.

The objective of these tests is to determine the anticipated restrictions in minimum service life as a result of shortening the cooling time.

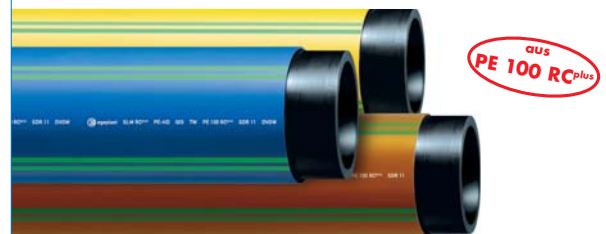


egeplast

Schutzmantelrohre von egeplast



egeplast SLM[®] RC^{plus}



Grabenlose Verlegetechniken stellen höhere Anforderungen an das Rohrmaterial: Die drucktragende Rohrwand des egeplast SLM[®] RC^{plus} besteht aus modernen PE 100 RC^{plus}-Werkstoffen (Resistance to Crack), zusätzlich wird das Rohr durch eine extrem „harte Schale“ gegen Kratzer und Riefen geschützt. Unerlässlich für Black-Box-Verlegungen und daher vom DVGW in den Regelwerken GW 321 und GW 323 empfohlen!

Dimension: OD 25 mm - OD 1200 mm
Materialprüfung: HESSEL Ingenieurtechnik



Kontinuierliche Qualitätsüberwachung

Die besondere Qualität von Werkstoffen und Röhren für die sandbettfreie und grabenlose Verlegung wird zusätzlich zu nationalen Zertifizierungen (DVGW) im Rahmen des „Full Quality Testing Cycle“ durch HESSEL Ingenieurtechnik kontinuierlich überwacht.

egeplast

Werner Strumann
GmbH & Co. KG

Tel.: +49.2575.9710-0
Fax: +49.2575.9710-110

Robert-Bosch-Straße 7
48268 Greven, Germany

info@egeplast.de
www.egeplast.de

Tabelle 4: Maximale Dehnungen nach Belastung über 30 Minuten von geschweißten Rohren mit unterschiedlichen Abkühlzeiten

Table 4: Maximum distension after load for 30 minutes to welded pipes with differing cooling times

Werkstoff Material	PE 80 PE 80		PE 100 PE 100 RC ^{plus}	
	Rohrdimension Pipe dimension	AD 355 x 20,2 OD 355 x 20.2		OD 450 x 40,9 OD 450 x 40.9
Abkühlzeit in Minuten Cooling time in minutes	25,4 (DVS) 25,4 (DVS)	12,7 (verkürzt) 12,7 (shortened)	49,4 (DVS) 49,4 (DVS)	24,7 (verkürzt) 24,7 (shortened)
Max. Dehnung (12:00 h Pos.) Max. distension (12 o'clock pos.)	0,95 %	1,25 %	1,65 %	2,35 %

gungen bzw. Überlasten entstehende Spannungsspitzen zu ertragen. Unter Zugrundelegung der eingangs beschriebenen Versagensmechanismen ist davon auszugehen, dass die verbesserte Spannungsrissbeständigkeit der neuen Rohrwerkstoffe auch unter Zusatzlasten zu langen Nutzungsdauern führt.

gen sind zu vermeiden. Im DVGW Arbeitsblatt GW 321 [6] für Zug und Biegung werden die zulässigen Belastungen für Rohrleitungen aus Polyethylen beschrieben. Durch die in den DIN und DVGW Regelwerken beschriebene Sandbettung wird eine zusätzliche Belastung der Rohrleitungen während des Betriebes minimiert. Die normgerechte Sandbettung verhindert, dass während des Verlegens in der Bauphase und während des Betriebes Beschädigungen der äußeren Rohroberfläche durch z. B. scharfkantiges Gestein und lokale Überlastungen durch geologisch bedingte Übergänge zwischen hart und weich auftreten. Eine sandbettfreie Verlegung wurde erst durch die Optimierung der Rohstoffe (PE 100 RC^{plus}) möglich. Diese neuen spannungsrissbeständigen Rohrwerkstoffe sind in der Lage durch lokale Beschädi-

6. Versuchsbeschreibung

Das Ziel der Prüfungen ist es, den Einfluss einer Halbierung der Abkühlzeit von Stumpfschweißverbindungen bei anschließender mechanischer Beanspruchung auf die Mindestnutzungsdauer zu untersuchen. Hierzu wurden SLM[®] 2.0-Rohre der Dimension AD 450 x 40,9 aus PE-RC^{plus} und Kanal SL SLM[®] Rohre der Dimension AD 355 x 20,2 aus PE 80 der Firma egeplast, Greven mit den Parametern der Richtlinie DVS 2207-1 im Heizelementstumpf-Schweißverfahren gefügt. Um einen reproduzierbaren Schweißprozess für alle Verbindungen im Test sicherzustellen, wurde eine ROWELD[®] P500B CNC der Firma ROTHENBERGER, Kelkheim, eingesetzt. Die Belastung der geschweißten Rohre erfolgte nach dem Ausspannen aus der

5. Load Placed on Polyethylene Pipes during Manufacture, Laying and Operation

Polyethylene pipes are manufactured in a continuous extrusion process. For process-related reasons higher or lower levels of residual stress depending on wall thickness and cooling conditions remain in the pipe wall. Pipes with a protective outer layer have a lower level of residual stress than pipes without outer layer because the residual stress present in the run pipe relaxes due to the subsequent attachment of the outer layer and associated warming. Pipes with lower residual stress exhibit greater reserves with respect to additional stresses, such as those resulting from material damage. Damage to the surface during the transportation and pipe handling on the construction site should be avoided. Pipes with protective outer layer offer a further advantage here. After connection using a butt welding process pipelines are subjected to tensile and bending load when laid. Bending load occurs when the pipeline section is lifted out of the welding machine. The tensile load is generated by the further transportation of the section. An optimisation of the welding process by curtailing the cooling time can only be seriously considered if long-term tests on welded pipes produce reliable information on the minimum service life. It is normal for pressure pipelines to be exposed to internal pressure during operation. External tensile, bending

and point loads should be avoided. The admissible tensile and bending loads for polyethylene pipelines are described in the DVGW GW 321 [6] worksheet. The sand bedding described in the DIN and DVGW regulations minimises additional strain on the pipelines during operation. Sand bedding in compliance with standards prevents damage occurring to the external pipe surface from sharp edged stones and localised excess load from, for example, geologically-related hard/soft transitions when the pipeline is laid during the construction phase and during operation. Trenchless laying has only become possible through optimisation of the raw materials (PE 100 RC^{plus}). These new stress crack resistant materials are able to cope with stress peaks created by localised damage or excess loads. Based on the abovementioned failure mechanisms it can be assumed that the improved stress crack resistance of the new materials will lead to long service life also when subjected to additional load.

6. Test Description

The aim of tests is to examine the effect on the minimum service life of halving the cooling time of butt welded joints with subsequent mechanical load. For this purpose SLM[®] RC^{plus} pipes in the dimension OD 450 x 40.9 made of PE RC^{plus} and Canal SL SLM[®] pipe in the dimension OD 355 x 20.2 made of PE 80 from the company egeplast, Greven with the parameters of Directive DVS

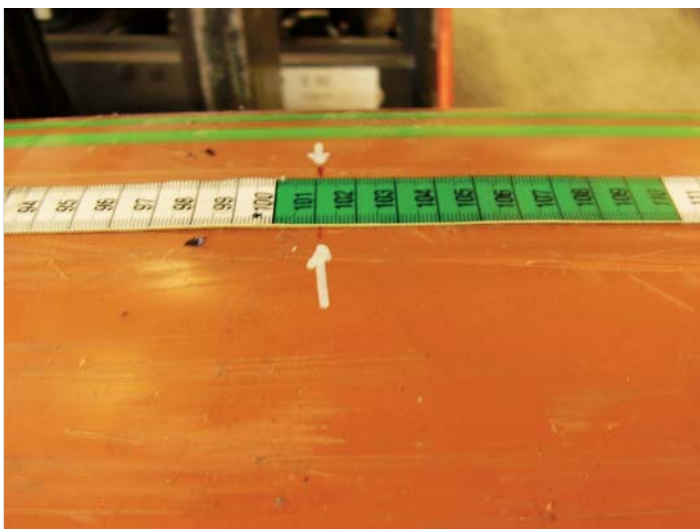


Bild 5: Dehnungsmessung an der Rohroberseite
Fig. 5: Measurement of distension on the top of the pipe

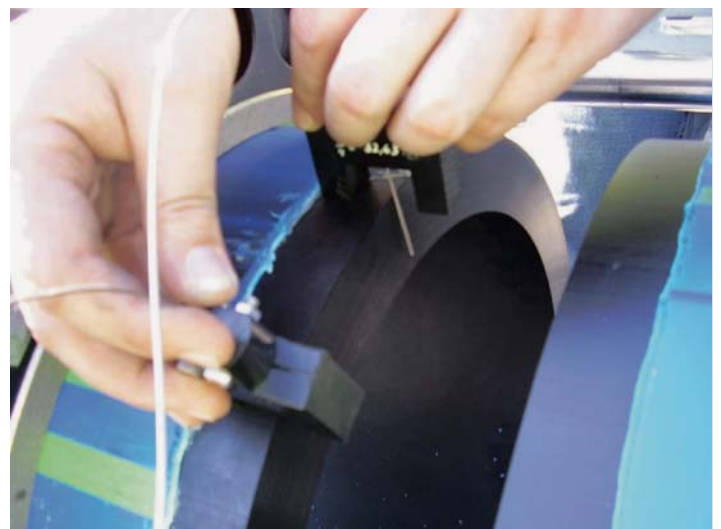


Bild 6: Positionierung der Temperaturfühler
Fig. 6: Positioning of the temperature sensor

Schweißmaschine praxisgerecht durch das Eigengewicht der jeweils 12 m langen Rohre.

Zur Realisierung einer praxisnahen mechanischen Belastung wurden die Rohre im Bereich der Schweißung mittels Schlupf angehoben, so dass in der Fügeebene der maximale Biegemoment wirkt. Am Beispiel der Rohre mit einem Außendurchmesser von 450 mm wurden 2 je 12 m lange Rohrstücke zu einem 24 m langen Rohr zusammengesweißt. Für die Untersuchung wurde jeweils ein solches Rohrpaar nach Ablauf der vollen Abkühlzeit und ein weiteres Rohrpaar bereits nach Verstreichen der halben Abkühlzeit, wie beschrieben, mechanisch belastet. Um den auf der Baustelle auftretenden Belastungsfall zu simulieren, wurden die Schweißverbindungen 30 Minuten im Schlupf hängend durch Biegung (Bild 4) beansprucht. Die maximalen Dehnungen unter baustellenähnlichen Bedingungen in 12:00 Uhr Position am Ende der Belastungszeit von 30 Minuten sind in Tabelle 4 angegeben.

Nach der Beanspruchung durch die Eigenlast wurden die Rohre abgelegt und seitlich gestützt, um eine Rückverformung der gestreckten und gestauchten Bereiche zuzulassen.

Während des Schweißprozesses wurde die Temperatur in der Fügeebene, in Rohrwandmitte aufgezeichnet und dokumentiert.

Den Abkühlkurven der PE 80 Rohre in Bild 7 ist zu entnehmen, dass die Temperatur in der Fügeebene (Rohrwandmitte) im Falle der Schweißung mit halber Abkühlzeit auf ca. 80 °C abgesunken war. Bei der DVS-Schweißung betrug die Temperatur in der Mitte der Fügeebene am Ende der Abkühlzeit ca. 58 °C. Bei beiden Schweißprozeduren ist davon auszugehen, dass die Kristallisation des Polyethylens vor Aufbringung der Last abgeschlossen war.

7. Durchgeführte Prüfungen

7.1 Messung der Eigenspannungen

Zur Quantifizierung der Eigenspannungen von SLM-Rohren im Verhältnis zu Rohren ohne Schutzmantel wurde die Verformung an geschlitzten Rohringen betrachtet. Dazu wurden SLM 2.0 Rohre aus PE 100 der Dimension OD 225 SDR 11 und SLM Rohre aus PE 80 der Dimension OD 280 SDR 17,6 untersucht

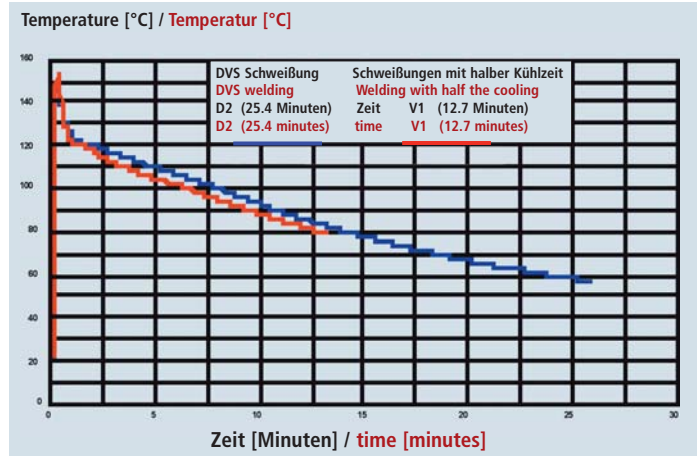


Bild 7: Temperaturverlauf in der Fügeebene beim Abkühlen der PE 80 Rohre [7]

Fig. 7: Temperature characteristics in the joint level during cooling of the PE 80 pipes [7]

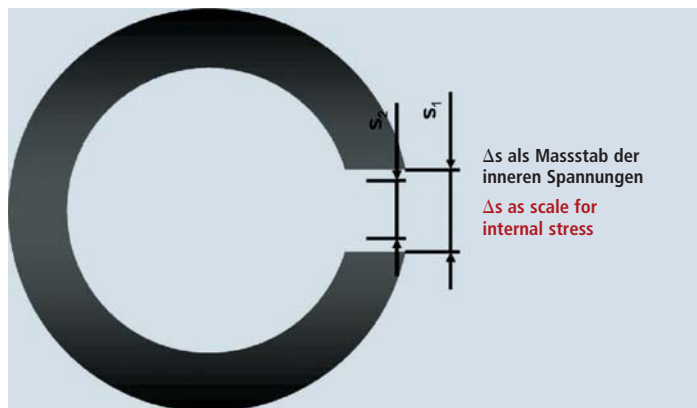


Bild 8: Messung der Spaltbreite zur Quantifizierung der Eigenspannungen

Fig. 8: Measurement of gap width to quantify residual stress

und das ermittelte Eigenspannungsniveau den jeweiligen Kernrohren, die ohne PP Schutzmantel hergestellt wurden, gegenübergestellt.

7.2 Zeitstandzugversuche

Aus den beschriebenen Stumpfschweißverbindungen mit Abkühlzeiten nach DVS und halbierten Abkühlzeiten wurden je 3 Probekörper im Scheitel- und im Sohlenbereich der Rohre entnommen. Die geschweißten Probekörper sind in Anlehnung an DVS 2203-4 [8] bei 90°C mit einer Spannung von 3,46 N/mm² in wässriger Netzmittellösung in der Zeitstand-Zugprüfung eingesetzt worden. Diese Untersuchungen wurden von Hessel Ingenieurtechnik, Roetgen, durchgeführt und ausgewertet.

Zur Bestimmung der Aktivierungsenergie des PE 80 wurden FNCT-Proben aus den SLM[®]-Rohren mit den in Tabelle 5 angegebenen Parametern in wässri-

2207-1 were joined by heating element butt welding.

A ROWELD[®] P500B CNC made by the company ROTHENBERGER, Kelkheim was used in order to guarantee a reproducible welding process for all welded joints in the test.

After unclamping from the welding machine the welded pipes were stressed according to normal practice using the dead weight of each of the 12 m long pipes.

Tabelle 5: Prüfparameter für den FNCT
Table 5: Test parameters for the FNCT

Prüftemperatur in °C Test temperature in °C	Prüfspannung in N/mm ² Test tension in N/mm ²
90	3.46
80	4.0
60	5.17

In order to achieve a mechanical load similar to that witnessed in practice, the pipes were raised in the area of the weld using a belt so that the maximum bending moment was at the joint level. Using pipes with an outer diameter of 450 mm by way of example 2 lengths of pipe each 12 m long were welded together to make a 24 m pipe. For the test pairs of pipes like this were each subjected to mechanical load as described, one pair after the full cooling time and a further pair after half the cooling time had elapsed. In order to simulate the load case occurring on the construction site the welded joints were subjected to being hung in a bent position in the belt for 30 minutes (Fig. 4). The maximum distension under conditions similar to the construction site in the 12 o'clock position at the end of the load time of 30 minutes can be seen in Table 4.

After the strain caused by dead load the pipes were laid aside and given lateral support in order to permit recovery of shape of the distended and compressed areas.

During the welding process the temperature at the joint level in the middle of the pipe wall was recorded and documented.

The cooling curves of the PE 80 pipes in Fig. 7 indicate that the temperature at joint level (middle of the pipe wall) in the case of welding with half the cooling time had sunk to around 80 C. With DVS welding the temperature at the middle of the joint level at the end of the cooling time was around 58 C. It may be assumed in the case of both welding procedures that crystallisation of the polyethylene was complete before application of the load.

7. Tests Performed

7.1 Residual Stress Measurement

In order to quantify the residual stress of SLM pipes in relationship to pipes without protective outer layer the deformation in slit pipe rings was examined. For this purpose SLM RC^{plus} pipes made of PE 100 RC^{plus} with dimension OD 225 SDR 11 and SLM pipes made of PE 80 with dimension OD 280 SDR 17.6 were examined and the identified residual stress level contrasted with the respective core pipes

ger Netzmittellösung im Zeitstand-Zugversuch nach DVS 2203-4 Beiblatt 2 [9] geprüft.

Die Prüfbedingungen wurden nach dem Modified Arrhenius Concept (MAC) [2] gewählt, das die Beschreibung des temperaturabhängigen Zeitstandverhaltens bei variabler Spannung und die Vorhersage der Mindestnutzungsdauer von Schweißverbindungen bei den Auslegungs- oder Betriebsbedingungen erlaubt.

8. Ergebnisse aus den Prüfungen

8.1 Eigenspannungen

Die Verformungsmessungen an geschlitzten Rohrringen weisen für die Schutzmantelrohre ein niedrigeres Eigenspannungsniveau im Vergleich zu ihren Kernrohren auf. Bild 9 zeigt die Eigenspannungen der Schutzmantelrohre in Relation zu den mit 100 % gesetzten Eigenspannungen der Kernrohre ohne Mantel. Der Tempereffekt des nachträglich aufextrudierten Schutzmantels reduziert die Eigenspannungen des Kernrohres bei den untersuchten Rohren um mehr als die Hälfte. Die höhere Reduzierung der Eigenspannung beim PE 80 Mantelrohr kann durch die Rohrgeometrie und die Extrusionsparameter erklärt werden.

8.2 Zeitstandzugversuche

Die Zeitstand-Zugprüfung der Schweißverbindungen aus den Kanal SL SLM[®] Rohren aus PE 80 ist vollständig abgeschlossen. Bild 10 zeigt ein typisches Bruchbild der geschweißten Probekörper nach der Zeitstandprüfung mit dem Bruchverlauf außerhalb der Fügeebene. Das beschriebene Bruchversagen wurde bei allen 6 Probekörpern beobachtet, die nach Ablauf der im DVS-Regel-

werk angegebenen Abkühlzeit durch ihr Eigengewicht belastet wurden. Das gleiche Bruchbild ergab sich bei 5 von 6 Probekörpern, die bereits nach der Hälfte der Abkühlzeit belastet wurden. Der 6. Probekörper aus dem Sohlenbereich der Schweißung mit verkürzter Abkühlzeit wies einen Anriss in der Fügeebene auf. Eine weitere Reduzierung der Abkühlzeit über das beschriebene Maß hinaus, ließe folglich ein frühzeitiges Versagen der Schweißverbindung in der Fügeebene erwarten.

In Tabelle 6 sind die Ergebnisse der geschweißten Probekörpern mit der Abkühlzeit exakt nach DVS und der auf die Hälfte verkürzten Abkühlzeit angegeben.

Die Schweißung nach DVS führt im Vergleich zur Schweißung mit verkürzter Abkühlzeit im Mittel zu höheren Standzeiten. Aus der größeren Streuung der Einzelwerte folgt für die Schweißung mit halber Abkühlzeit ein um den Faktor 2,1 geringerer Mindestwert, der für die Extrapolation auf Betriebsbedingungen angesetzt werden kann. Folglich werden sich beide Schweißverbindungen der Kanal SL SLM[®] Rohre aus PE 80 um den Faktor 2,1 in der Angabe der Mindestnutzungsdauer voneinander unterscheiden.

Wie zu erwarten, hat eine vorzeitige mechanische Belastung der geschweißten Rohrverbindung einen signifikanten Einfluss auf die Mindestnutzungsdauer der Schweißverbindung. Bei den hier untersuchten Schweißverbindungen von Kanal SL SLM[®] Rohren aus PE 80 ist bei Belastung nach der Hälfte der Abkühlzeit von einer Halbierung der Mindestnutzungsdauer auszugehen. Probekörper der SLM[®] 2.0 Rohre aus PE RC^{plus} befinden sich seit über 2000

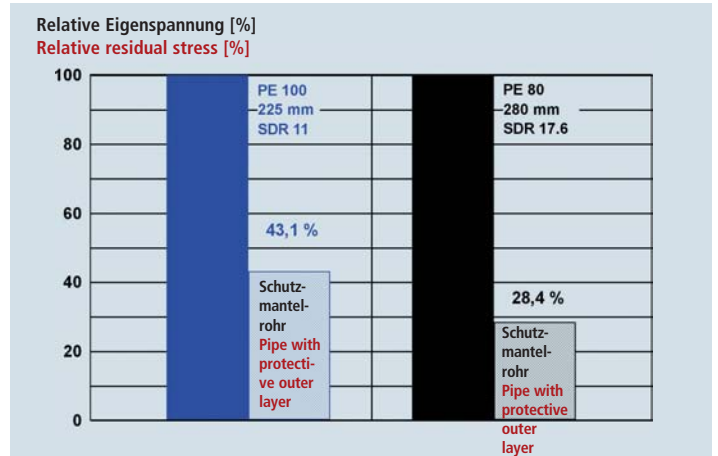


Bild 9: Eigenspannungsniveau von Schutzmantelrohren im Verhältnis zu Rohren ohne Schutzmantel [10]

Fig. 9: Residual stress level of pipes with protective outer layer in relation to pipes without protective outer layer [10]

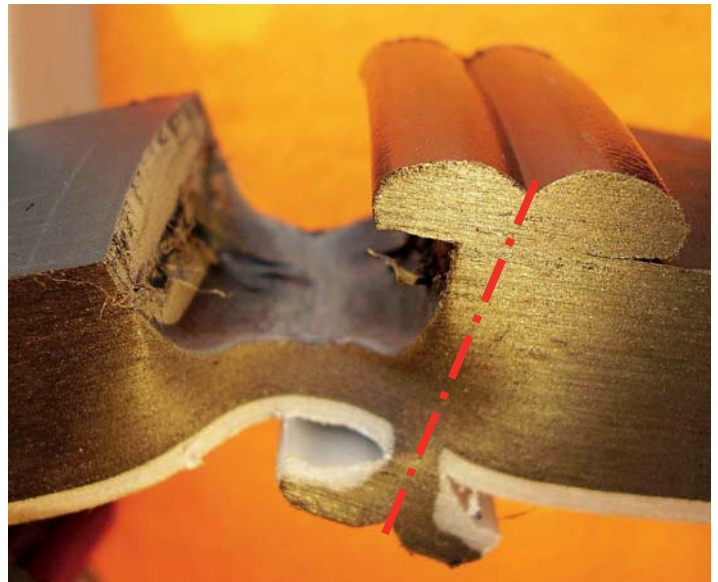


Bild 10: Bruchbild eines geschweißten Probekörpers, Bruchverlauf außerhalb der Fügeebene (rote Linie)

Fig. 10: Image of fracture in a welded specimen, crack propagation outside the fusion plane (red line)

manufactured without PP protective outer layer.

7.2 Tensile Creep Rupture Tests

3 specimens each were removed from the peak and bottom pipe sections of the butt welded joints described with cooling times in accordance with DVS and halved cooling times. According to DVS 2203-4 [8] the welded specimens were inserted into the tensile creep rupture testing equipment at 90°C with a stress of 3.46 N/mm² in an aqueous wetting agent solution. These tests were conducted and evaluated by Hessel Ingenieurtechnik, Roetgen.

FNCT samples from SL SLM[®] pipes with the parameters specified in Table 5 were tested in an aqueous wetting agent solution in a tensile creep rupture test in accordance with DVS 2203-4 Supplementary Sheet 2 [9] to determine the activation energy of the PE 80. The test conditions were selected according to the Modified Arrhenius Concept (MAC) [2], which allows description of the temperature-dependent creep behaviour with variable tension and the forecasting of the minimum service life of welded joints under laying or operating conditions.

Tabelle 6: Ergebnisse der Zeitstandzugversuche an Heizelementstumpf-Schweißungen aus PE 80

Table 6: Results of tensile creep rupture tests to heating element butt welds made of PE 80

Schweißung Weld	Geom. Mittelwert der Standzeiten in Stunden Geom. mean stress rupture lives in hours	Standardabweichung der Logarithmen Standard deviation of logarithms	Mindestwerte ($X_{\text{quer}} - 2s$) Minimum values ($X_{\text{quer}} - 2s$)
nach DVS To DVS	188,7	0,1099	113,7
mit halber Abkühlzeit With halved cooling time	153,9	0,2311	52,9

Stunden ohne Bruch der Schweißverbindung in der Zeitstand-Zugprüfung. Sie haben mehr als das 10-fache der Standzeiten der PE 80 Schweißverbindungen aus den Kanal SL SLM® Rohren erreicht. Es kann also jetzt schon festgestellt werden, dass der zu erwartende Mindestwert der Schweißverbindungen aus PE RC^{plus} um ein Vielfaches höher liegen wird, als die Mindestwerte, die für die PE 80 Schweißverbindungen ermittelt wurden.

Die Aktivierungsenergie bei veränderlicher Spannung aus den geometrischen Mittelwerten der Standzeiten im FNCT beträgt für das untersuchte PE 80 Material 111 kJ/mol. Unter der Annahme einer zum PE 80 vergleichbaren Aktivierungsenergie erhöht sich die Mindestnutzungsdauer der SLM® 2.0 Rohre aus PE RC^{plus} um den Faktor, der aus den Mindestwerten der Prüfzeiten für PE RC^{plus} und den Standzeiten des PE 80 berechnet werden kann. Daraus lässt sich selbst für die Schweißverbindung mit verkürzter Abkühlzeit eine Mindestnutzungsdauer bei Betriebsbedingungen von mehr als 100 Jahren ableiten.

9. Fazit

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchung zeigen, dass für Rohre mit entsprechenden Eigenschaften (Eigenspannungsniveau, Spannungsrisssbeständigkeit) auch bei Halbierung der Abkühlzeit beim Heizelementstumpfschweißen Standzeiten von über 100 Jahren nachgewiesen werden können.

10. Zusammenfassung und Ausblick

Die Mindestnutzungsdauer von spannungsrisssbeständigen Polyethylen-Rohstoffen wird im wissenschaftlichen Nachweis mit mehr als 100 Jahren angegeben. Eine Erkenntnis aus den beschriebenen Untersuchungen zur Verringerung der Abkühlzeit ist, dass bei vorzeitiger Belastung der Schweißverbindung die Mindestnutzungsdauer um ca. 50% reduziert wird. Aus der Kenntnis vorhergehender Prüfungen und den erreichten Prüfzeiten von Schweißverbindungen aus PE 100 RC^{plus} kann abgeleitet werden, dass im Falle einer Belastung nach der Hälfte, der in der Richtlinie DVS 2207-1 empfohlenen Abkühlzeit, von einer Mindestnutzungsdauer von mehr als 100

8. Results of Tests

8.1 Residual Stress

The deformation measurements on slit pipe rings indicate a lower level of residual stress for the pipes with protective outer layer compared to their core pipes. Fig. 9 shows the residual stress of pipes with protective outer layer in relation to the residual stress of core pipes without outer layer set at 100%. The temper effect of the protective outer layer subsequently extruded onto the pipe reduces the residual stress of the core pipe by over half in the pipes tested. The greater reduction in residual stress with PE 80 pipe with outer layer can be explained by the pipe geometry and the extrusion parameters.

8.2 Tensile Creep Rupture Tests

The tensile creep rupture test of welded joints from the Canal SL SLM® pipes made of PE 80 has been completely concluded. Fig. 10 shows a typical image of a fracture in the welded specimen after creep test with the fracture progression outside the joint level. The fracture failure described was observed

in all 6 specimens subjected to residual stress once the cooling time specified in the DVS rules had elapsed. The same fracture image resulted in 5 out of the 6 specimens which were subjected to load after just half the cooling time. The 6th specimen from the bottom area of the weld with curtailed cooling time exhibited a tear at joint level. Consequently it may be expected that a further reduction in the cooling time beyond the level described would produce premature failure of the welded joint at the joint level.

Table 6 indicates the results of welded specimens with cooling time exactly in accordance with DVS and with halved cooling time.

Welding in accordance with DVS compared to welding with curtailed cooling time on average produces higher stress rupture lives. From the wide range of individual values for the weld with halved cooling time a minimum value which is lower by a factor of 2.1 may be extrapolated and applied to operating conditions. Consequently when specifying minimum service life both welded joints of the Canal SL



Schweißtechnische
Lehr- und Versuchsanstalt
Mannheim GmbH



Unser neuer Service für Sie: Ausbildung und Prüfung von Kunststoffschweißern

Das  Kunststoffzentrum der



Prüfung von Kunststoffschweißern
nach: DVS-2212-1
DVS 2212-3
DIN EN 13067
Druckgeräterichtlinie

Vorankündigung:
Fachmann für Kunststoffschweißen-Wochenendlehrgang:
18.01. bis 16.02.2008 Prüfung 23.03.2007



E-Mail: lammel@slv-mannheim.de

Käthe-Kollwitz-Straße 19
68169 Mannheim
Telefax (0621) 3004-292
Telefon (0621) 3004-139



Literatur References

- [1] DIN 8075, Rohre aus Polyethylen (PE) PE63, PE 80, PE 100, PE-HD - Allgemeine Güteanforderungen, Prüfung, Ausgabe 1999 08, Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [2] Schulte, Ulrich; Hessel, Joachim: „Restlebensdauer von Rohren aus Hostalen GM5010 nach einer Betriebszeit von 41 Jahren“, 3R international 9/2006, Vulkan-Verlag GmbH Essen.
- [3] Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V., Richtlinie DVS 2207-1: „Schweißen von thermoplastischen Kunststoffen Heizelementschweißen von Rohren und Tafeln aus PE-HD“, Ausgabe 09-2005, DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf.
- [4] DVGW Technische Regel W 400-1: „Technische Regeln - Wasser-
- verteilungsanlagen (TRWW) – Teil 1: Planung“, Ausgabe 2004 10, Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [5] Steiert, Thomas; Schuster, Bernd: „Verbinden von PE-Großrohren“, 3R international, 3-4/2003m, Vulkan-Verlag GmbH, Essen.
- [6] DVGW Technische Regel GW 321: „Steuerelemente horizontale Spülbohrverfahren für Gas- und Wasserrohrleitungen – Anforderungen, Gütesicherung und Prüfung“, Ausgabe 2003 10, Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [7] HESSEL Ingenieurtechnik GmbH, Bericht Nr. R07 04 1194 1: „Zeitstand-Untersuchungen an Heizelementstumpf-Schweißverbindungen mit verkürzter Abkühlzeit“, Auftraggeber: egeplast, Werner Strumann GmbH & Co.KG, März 2007.
- [8] Deutscher Verband für Schwei-
- Ben und verwandte Verfahren e.V., Richtlinie 2203-4: „Prüfen von Schweißverbindungen an Tafeln und Rohren aus thermoplastischen Kunststoffen – Zeitstand-Zugversuch“, Ausgabe 07/1997, DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf.
- [9] Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V., Richtlinie 2203-4, Beiblatt 2: „Prüfen des Widerstandes gegen langsames Risswachstum im Full Notch Creep-Test (FNCT)“, Ausgabe 07/1997, DVS-Verlag GmbH, Düsseldorf.
- [10] HESSEL Ingenieurtechnik GmbH, Bericht Nr. R07 02 1271: „Untersuchungen zu Eigenspannungen von egeplast SLM-Rohren“, Auftraggeber: egeplast, Werner Strumann GmbH & Co.KG, Januar 2007.

Jahren für die Schweißverbindung ausgegangen werden kann. Eine Reduzierung der Abkühlzeit bei Schutzmantelrohren aus einem PE 100 RC^{plus} auf die Hälfte der in der DVS 2207-1 empfohlenen Abkühlzeit mit einhergehender Kos-

teneinsparung ist daher möglich. In die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung für die Erstellung von Versorgungsleitungen einbezogen, eröffnen sich neue Einsatzgebiete für Schutzmantelrohre aus PE 100 RC^{plus}.



Sie wollen Kunststoffschweißer, Kunststoffkleber oder Kunststofflaminiierer ausbilden und nach DVS-Richtlinien prüfen lassen?

Interesse? Wir bieten Ihnen eine kostenlose Einzelberatung!

Unser Tipp:
Bitte nehmen Sie die Bildungsberatung aus förderrechtlichen Gründen vor der Lehrgangsbuchung wahr und nutzen Sie die Fördermöglichkeiten durch den

BILDUNGSSCHÜCK

Kursstätte für
Kunststofftechnik

Info: 0241/ 96 74-194 | www.hwk-aachen.de

Mit finanzieller Unterstützung der Europäischen Union
und des Landes Nordrhein-Westfalen

Handwerkskammer Aachen



amounts to 111 kJ/Mol for the tested PE 80 material. Assuming an activation energy comparable with that of a PE 80, the minimum service life of the SLM[®] RC^{plus} pipes made of PE RC^{plus} increase by the factor that can be calculated from the minimum values of test times for PE RC^{plus} and the stress rupture lives of the PE 80. From this a minimum service life under operating conditions of over 100 years can be derived even for welded joints with curtailed cooling times.

9. Conclusion

The results of this study show that stress rupture lives of over 100 years can be demonstrated for pipes with corresponding properties (residual stress level, stress crack resistance) with heating element butt welding even when the cooling time is halved.

10. Summary and Outlook

The minimum service life of stress crack resistant polyethylene materials is scientifically verified at over 100 years. A conclusion taken from the described tests on reducing the cooling time is that the minimum service life is diminished by approx. 50% when there is premature load to the welded joint. It is possible to derive from the findings of preceding tests and the test times achieved by welded joints made of PE 100 RC^{plus} that, in the case of load after half the cooling time recommended in Directive DVS 2207-1, a minimum service life of over 100 years for the welded joint may be assumed. A reduction in the cooling time in the case of pipes with protective outer layers made of PE 100 RC^{plus} to half the cooling time recommended in DVS 2207-1 with corresponding cost savings is therefore feasible.

When incorporated into the feasibility study for the creation of supply lines, new areas of application are opened up for pipes with protective outer layer made of PE 100 RC^{plus}.

SLM[®] pipes made of PE 80 will differ by a factor of 2.1.

A premature load on the welded pipe connection has a significant influence on the minimum service life of the welded joint as expected. It may be assumed that welded joints of the Canal SL SLM[®] pipes made of PE 80 tested here and subjected to load after half the cooling time will have half the minimum service life.

Specimens of SLM[®] RC^{plus} pipes made of PE RC^{plus} have been tested for tensile creep rupture for over 2000 hours without a fracture of the welded joint. They achieved stress rupture lives over 10 times greater than those of the PE 80 welded joints from the Canal SL SLM[®] pipes. It can therefore already be established that the anticipated minimum value of welded joints from PE RC^{plus} will be several times greater than the minimum values determined for the PE 80 welded joints.

The activation energy for changeable tension from the geometric mean values of stress rupture lives in FNCT