

GAS UND WASSER AKTUELL

Vortrag 11:

Kostenreduktion beim Heizelementstumpfschweißen von Rohrleitungen aus Polyethylen

Dipl.-Ing. Holger Hesse, egeplast Werner Strumann GmbH & Co. KG

1 Einleitung

Mit Beginn der industriellen Herstellung von Niederdruckpolyethylenen (PE-hart) 1953 ist der Werkstoff ständig weiterentwickelt und verbessert worden. An der Beschreibung der Eigenschaften des vergleichsweise jungen Werkstoffes, im Vergleich zu den metallischen Werkstoffen, wird weiterhin geforscht und gearbeitet. Die Langzeitfestigkeiten von Polyethylen sind sehr genau in Zeitstanddiagrammen beschrieben.¹²

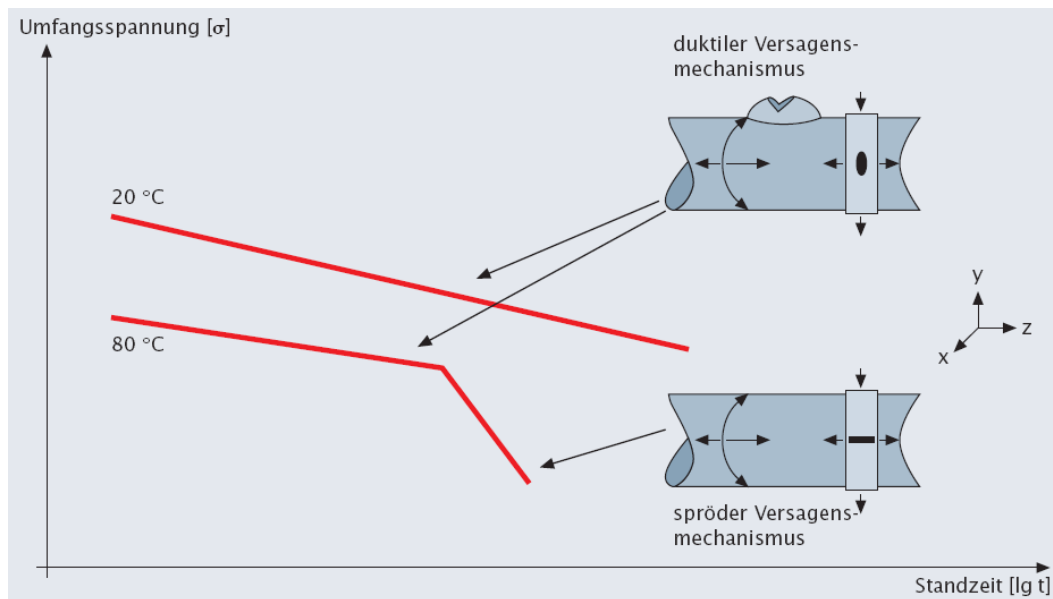


Bild1: Zeitstandverhalten bei mehrachsigem Spannungszustand,
Quelle: Basell technisches Handbuch – Werkstoffe für die Rohrextrusion

Werkstofftechnisch werden drei Versagensmechanismen bei Polyethylenrohren unterschieden:

- duktiles Versagen – ausgelöst durch Überschreiten der Streckgrenze (Bild 1)
- sprödes Versagen – ausgelöst durch Spannungsrisse aufgrund örtlicher Spannungsspitzen infolge ungeeigneter Verlegung (Bild 1)
- Wärmealterung – chemischer Prozess - Abbau der mittleren molaren Masse

Die Erhöhung der Langzeitfestigkeit ist mit der Einführung von PE 63 über PE 80 bis hin zum PE 100 erfolgreich umgesetzt worden. Mit Erscheinen der bimodalen PE-Rohstoffe ist eine Optimierung hinsichtlich Spannungsrissbeständigkeit erzielt worden. Zeitstandkurven moderner multimodale Rohstoffe weisen keinen steilen Ast, der das Werkstoffversagen in Bezug auf Spannungsriss beschreibt, auf. Diese Rohstoffe haben nachweislich eine Lebenserwartung von 100 Jahren im Betrieb, und werden nachfolgend als PE 100 RC^{plus} bezeichnet.

2 Schweißen von Rohrleitungen aus Polyethylen

Seit über 40 Jahren werden Rohrleitungen aus Polyethylen im Heizelementstumpfschweißverfahren geschweißt. Der Deutsche Verband für Schweißtechnik hat sich mit der Schweißung von Polyethylen in dem Arbeitsblatt DVS 2207-1³ auseinandergesetzt. Den Ablauf des Schweißens kann man wie folgt beschreiben:

1. Kontrolliertes Aufwärmen der Schweißstücke auf Fügetemperatur (Zeit; Temperatur)
2. Fügen der Schweißstücke unter definiertem Fügedruck (Druck)
3. Definiertes Abkühlen der Schweißstücke unter Fügedruck (Zeit)

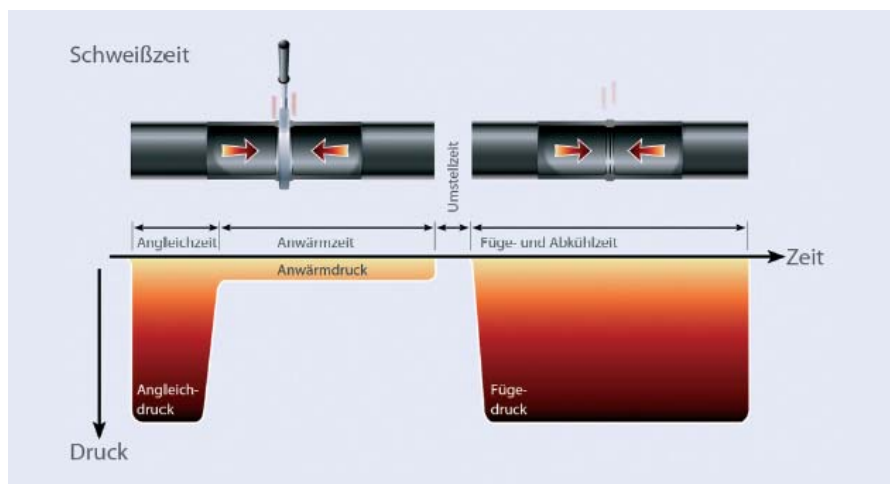


Bild 2 Zeitlicher Ablauf des Heizelementstumpfschweißens gemäß DVS 2207-1

3 Vergleich der Schweißparameter

Ziel einer jeden Schweißung ist ein Fügen der Bauteile für einen definierten Zeitraum. Der Ablauf der Schweißung ist in Europa schematisch gleich. Hinsichtlich der Parameter Zeit, Temperatur und Druck bestehen jedoch Abweichungen.

In den Regelwerken des DVGW⁴ wird eine Mindestnutzungsdauer von Rohrleitungen von mindestens 50 Jahren gefordert. Vergleicht man die Schweißparameter hinsichtlich Fügedruck und Anwärm- bzw. Abkühlzeiten innerhalb der europäischen Union wird klar, dass es verschiedene Wege gibt, zu diesem Ziel, einer gesicherten Nutzung von mindestens 50 Jahren, zu kommen.

Parametervergleich unterschiedlicher Länder am Beispiel eines Rohres mit 50 mm Wandstärke:

	Fügedruck N/mm ²	Anwärmzeit s	Abkühlzeit min
Deutschland	0,15 ± 0,01	500	60
Niederlande	0,18 ± 0,01	550 bis 650	75
Italien	0,15 ± 0,02 0,05 ± 0,01	555 bis 566	10 sec 53
Norwegen	0,15	700	36

Tabelle 1: Schweißparameter innerhalb der EU

In allen Fällen ist das Resultat der Schweißung eine längskraftschlüssige Verbindung der Rohrleitung, die in der gewünschten Zeitspanne sicher hält. Dabei ist selbstverständlich, dass auch die Belastungen, denen die Rohrleitungen auf der Baustelle ausgesetzt sind, von den Schweißverbindungen mit getragen werden, ohne dass mit Einschränkungen oder Reduzierungen der Mindestnutzungsdauer gerechnet werden muss.

4 Wirtschaftliche Betrachtung des Schweißprozesses in der Kalkulation

Bei näherer Betrachtung der Schweißparameter wird deutlich, dass die Abkühlzeit die 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 Control⁵ bereits beschrieben worden. Ansatz ist hier, dass die Abkühlzeit in Bezug zur Rekristallisationstemperatur betrachtet wird. 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.

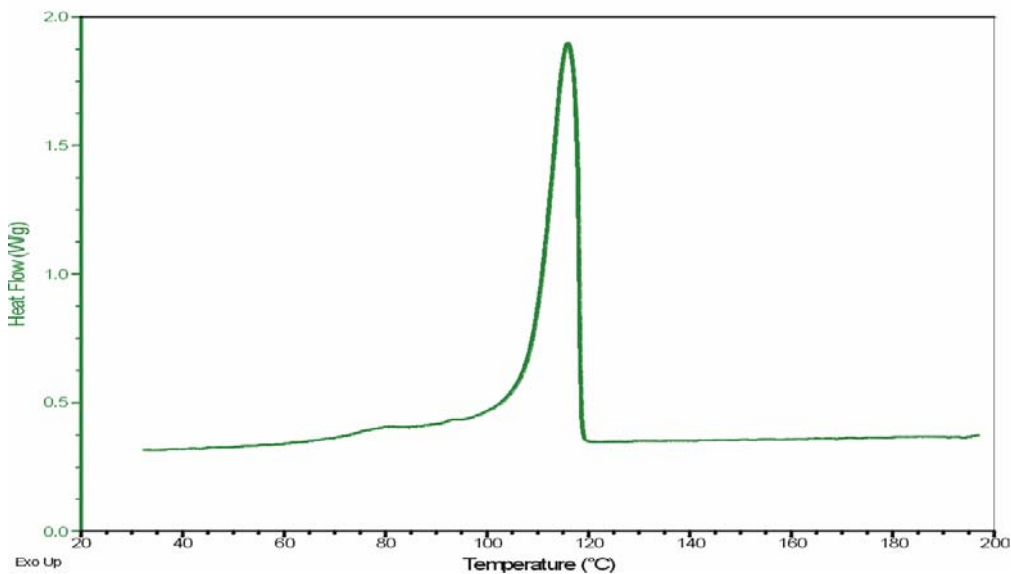


Bild 3: DSC-Kurve für ein PE 80

Man kann erkennen, dass die primäre Kristallisation bei der Unterschreitung von 120°C beginnt und bei einer Abkühlung auf unter 90°C nahezu abgeschlossen ist. Erst mit Abkühlung auf 20°C und vollständiger Kristallisation kann die Schweißverbindung ohne Einschränkungen die mechanischen Beanspruchungen aufnehmen, wie sie in den Regelwerken beschrieben werden. Bei höheren Rohrwandtemperaturen muss von einer Einschränkung der mechanischen Eigenschaften und gegebenenfalls von einer verringerten Mindestnutzungsdauer der Rohrleitung ausgegangen werden.

Mit einer Halbierung der Abkühlzeit ließe sich aber nahezu eine Halbierung der Kosten der Schweißung erzielen. Am Beispiel einer Rohrleitung OD 630 mm SDR 11 aus PE 100 wird dies deutlich:

Nennwanddicke	Anwärmzeit	Umstellzeit	Fügedruckaufbauzeit	Abkühlzeit unter Fügedruck
57,2 mm	9 Min 32 sec	22 sec	28 sec	68 Min

Tabelle 2: Schweißparameter gemäß DVS 2207-1

Der Zeitrahmen für die gesamte Schweißung beläuft sich auf, aufgerundet, 79 Minuten. Mit halber Abkühlzeit wäre der Prozess nach 45 Minuten abgeschlossen. Die Kosten für Schweißer, Helfer und Maschine lassen sich mit gesamt 3€/Min veranschlagen.

Verfahren	Gesamtzeit	Kosten
Schweißung nach DVS	68 Min	204 €
Schweißung nach DVS mit halber Abkühlzeit	45 Min	135 €

Tabelle 3: Kostenvergleich

Eine Reduktion der Herstellungskosten auf etwa 2/3 der ursprünglichen Kosten ließe sich realisieren, wenn keine Einschränkungen der Mindestnutzungsdauer durch die veränderten Schweißparameter zu erwarten wäre.

5 Belastung von Rohrleitungen aus Polyethylen auf der Baustelle

Beschrieben werden die zulässigen Belastungen für Rohrleitungen aus Polyethylen z.B. in dem DVGW Arbeitsblatt GW 321⁶ für Zug und Biegung.

Die Belastung der Rohrleitungen aus Polyethylen während des Betriebes wird durch die in den DIN und DVGW Regelwerken beschriebene Sandbettung minimiert. Eine sandbettfreie Verlegung ist, wie oben beschrieben, aufgrund der Optimierung der Rohstoffe (PE 100 RC^{plus}) möglich.

Die zusätzlich auftretenden Spannungen werden von dem Werkstoff getragen. Wird die geschweißte Rohrverbindung während der Schweißung bewegt, werden dort ebenfalls, vergleichbar der sandbettfreien Verlegung, zusätzliche Spannungen in der Schweißverbindung hervorgerufen.

Die Vermutung liegt nahe, dass nachgewiesenen spannungsrißbeständige Rohrwerkstoffe solche zusätzlichen Spannungen besser ertragen können als konventionelle PE-Rohstoffe. Eine weitere Vermutung ist, dass Rohrleitungen mit geringen Eigenspannungen diese hinzukommenden Spannungen besser kompensieren können. Durch das in der Fertigung nachträgliche Aufbringen des Schutzmantels weisen solche Rohrleitungen wesentlich geringere Eigenspannungen auf als Rohrleitungen ohne Schutzmantel. Geprüft wurden aus diesem Grund Schutzmantelrohre aus PE 80 (egeplast Kanal SL SLM[®]) und aus PE 100 RC^{plus} (egeplast SLM[®] 2.0)

Bei der Verlegung werden die Rohrleitungen nach der Verbindung im Stumpfschweißverfahren auf Zug und Biegung belastet. Die Biegebelastung tritt durch das Herausheben des Rohrstranges aus der Schweißmaschine auf, die Zugbelastung durch den Weitertransport des Stranges.

Der Fragestellung, ob Rohrleitungen aus spannungsrißbeständigem Polyethylen bei veränderten Schweißparametern und gleichzeitig auftretenden mechanischen Belastungen wie sie auf Baustellen auftreten, der Mindestnutzungsdauer entsprechend standhalten, soll hier nachgegangen werden.

6 Beschreibung des Versuchsaufbaus

Untersucht werden sollte, ob eine Halbierung der Abkühlzeit von Schweißverbindungen bei anschließender mechanischer Beanspruchung einen Einfluss auf die Langzeitfestigkeit der Schweißverbindung bei PE-Rohstoffen unterschiedlicher Güte hat, und von welcher Mindestnutzungsdauer bei einer entsprechenden Baustellenbelastung noch ausgegangen werden kann. Der Temperaturverlauf in der Fügeebene, in Rohrwandmitte, wurde aufgenommen um sicherzustellen, dass die mechanische Belastung erst nach nahezu vollständiger Kristallisation zum Tragen kommt.

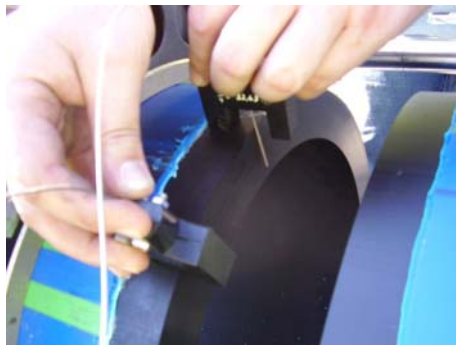


Bild 4: Positionierung der Temperaturfühler,
Quelle: Hessel Ingenieurtechnik

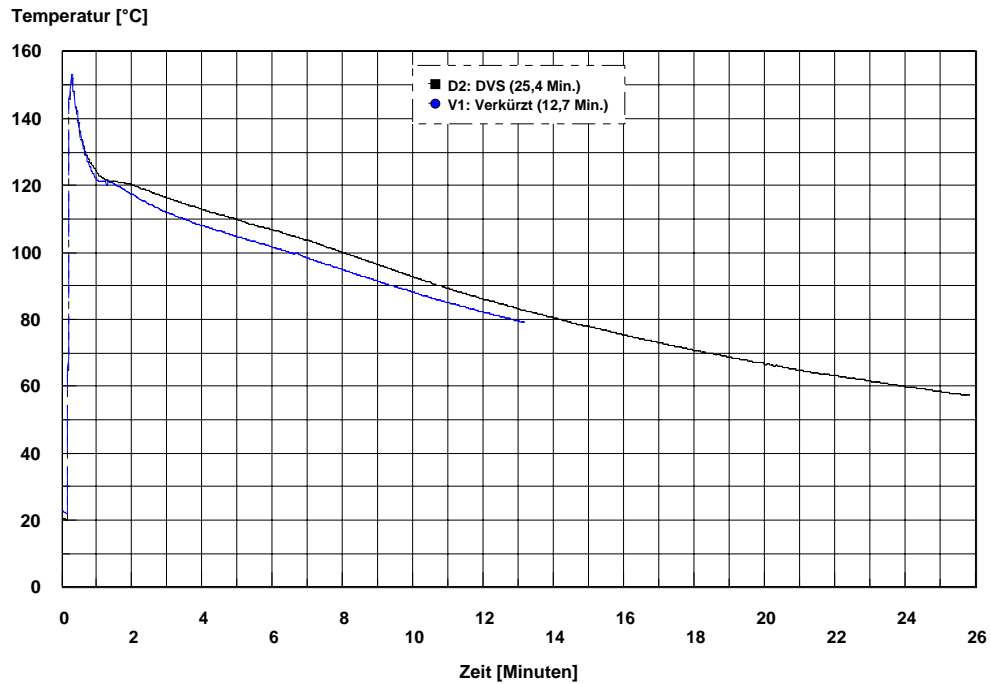


Bild 5: Temperaturverlauf in der Fügeebene beim Abkühlen
Quelle: Hessel Ingenieurtechnik

Erkennbar ist eine annähernd exponentiell verlaufende Abkühlkurve, so dass nach weniger als halber Abkühlzeit die Temperatur in der Fügeebene mit 80°C unter den ermittelten Wert, bei der die Kristallisation nahezu abgeschlossen ist, gesunken ist. Rohrleitungen gleicher Produktion wurden entsprechend den Parametern der Richtlinie DVS 2207-1 geschweißt. Die Belastung der geschweißten Kanal SL SLM[®] und SLM[®] 2.0 Rohre erfolgte durch das Eigengewicht der Rohre.



Bild 6: Mechanische Belastung der Schweißverbindung,
Quelle: Hessel Ingenieurtechnik

Dazu wurden die Rohre im Bereich der Schweißung mittels Schlupf angehoben, so dass in dem Bereich der Fugeebene das maximale Biegemoment wirkt. Für die Untersuchung wurde jeweils ein Rohrpaar nach Ablauf der vollen Abkühlzeit und ein Rohrpaar bereits nach Verstreichen der halben Abkühlzeit wie beschrieben mechanisch belastet. Um Eventualitäten auf der Baustelle abzudecken, wurden die Schweißverbindungen 30 Minuten auf Biegung beansprucht. Die erreichte Dehnung unter baustellenähnlichen Bedingungen in 12:00 Uhr Position der Rohre wurde mit maximal 1,25% erfasst.

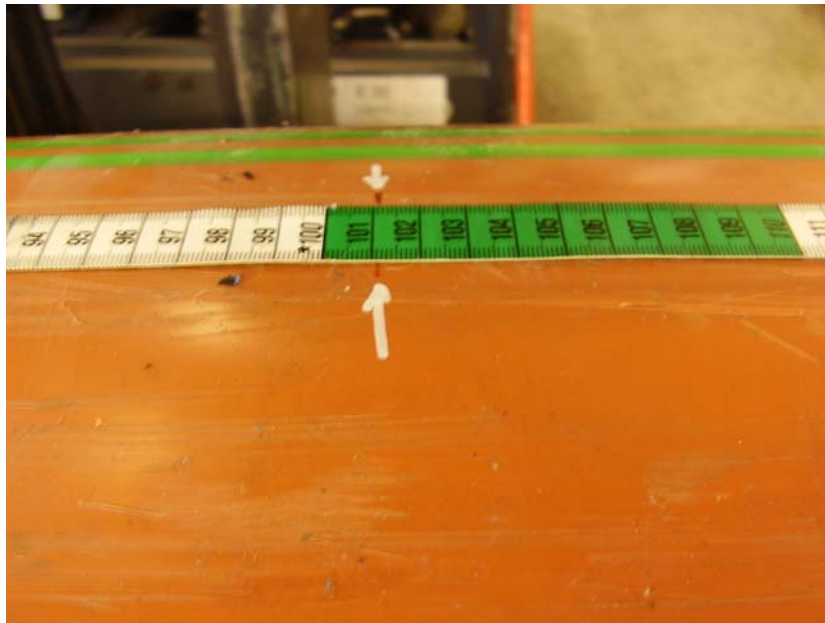


Bild 7: Dehnungsmessung an der Rohroberseite,
Quelle: Hessel Ingenieurtechnik

7 Beschreibung der Untersuchungen

Aus den Versuchsschweißungen sowie aus den Schweißungen nach DVS wurden im Scheitel- und im Sohlenbereich Streifenproben entnommen und im Zeitstand-Zugversuch nach DVS 2203-4⁷ bei 90°C und einer Spannung von 3,46 N/mm² in wässriger Netzmittellösung bei Hessel Ingenieurtechnik untersucht, um die zu erwartende Mindestnutzungsdauer zu ermitteln.

Die Untersuchung der Mindestlebensdauer der Schweißverbindung basierte auf dem Modified Arrhenius Concept⁸. Aus diesem Ansatz folgt u.a., dass die Aktivierungsenergie für das spröde Versagen unabhängig von der anliegenden Prüfspannung ist. Eine gleichzeitige Änderung der Prüfspannung und Prüftemperatur ist möglich, wenn man den Bereich des spröden Versagensmechanismus nicht verlässt. Bei freier Wahl der Ausgangsspannung und bekannter Aktivierungsenergie kann auf eine beliebige Zielspannung extrapoliert werden. So kann die Mindestnutzungsdauer von Schweißverbindungen ermittelt werden, ohne dass eine Untersuchung von ungeschweißten Bezugsproben erforderlich ist.

Eine Einflussnahme der Probenpräparation, wie bei dem gängigen Verfahren nach DVS 2203-4 der Fall, wird damit ausgeblendet.

Vergleichend untersucht wurden die mechanisch belasteten Schweißverbindungen aus PE 80 und PE 100 RC^{plus}, die nach den gültigen Parametern der DVS 2207-1 geschweißt wurden mit rohstoffgleichen Schweißverbindungen, die bereits nach halber Abkühlzeit mit identischer mechanischer Last beaufschlagt wurden, hinsichtlich ihrer Mindestnutzungsdauer bei Betriebstemperatur.

Schweißbedingungen	Abkühlzeit in min
DVS 2207-1	25,4
DVS 2207-1, halbierte Abkühlzeit	12,7

Tabelle 4: Angaben zu den Schweißparametern

Aus 12:00 Uhr und 6:00 Uhr Position wurden Prüfmuster⁹ präpariert. Die Proben wurden im Zeitstandzugversuch nach DVS 2203-4 bei 90°C und 3,46 N/mm² untersucht sowie der FNCT (Full Notch Creep Test) bei verschiedenen Temperaturen ermittelt. Der Versatz der Schweißproben wurde zusätzlich erfasst.

Nachfolgend dargestellt sind Ergebnisse für die Prüfmuster aus PE 80.

Probe	Standzeit in Stunden	Versatz außen in %	Position
D1	211,5	3,0	12:00
D8	137,7	6,4	6:00
V2	118,8	3,1	12:00
V8	126,6	4,9	6:00

Tabelle 5: Ergebnisse der Zeitstandzugversuche bei 90 °C und 3,46 N/mm² in 2 % NM 5

Probe	Standzeit in h	Prüftemperatur in °C	Prüfspannung in N/mm ²
1	48,7	90	3,46
4	135,9	80	4,0
9	1163,7	60	5,17

Tabelle 6: Standzeiten im FNCT in 2 % NM 5

Der Einfluss des Versatzes lässt sich wie folgt darstellen

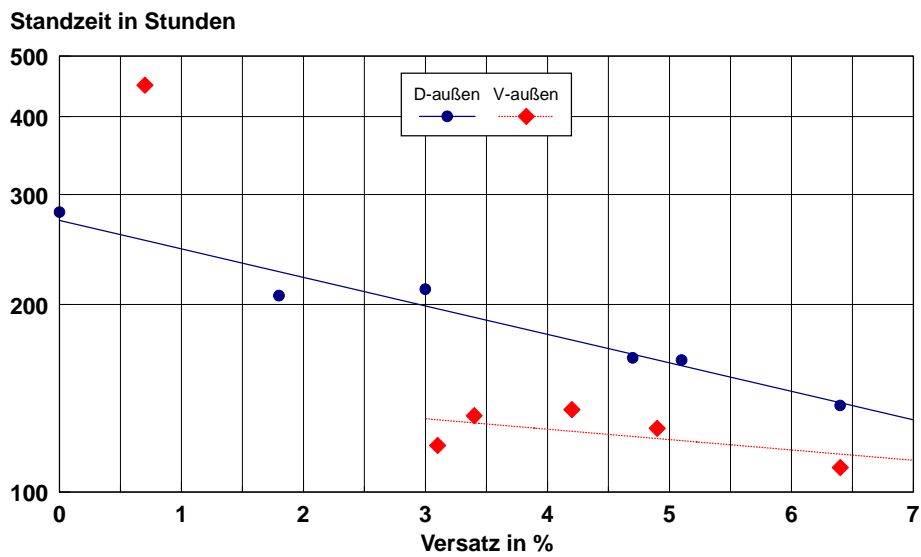


Bild 8: Einfluss des Versatzes auf die Standzeiten von Heizelementstumpf-Schweißungen, Quelle: Hessel Ingenieurtechnik

Eine lineare Abhängigkeit der Standzeit vom Versatz der Schweißverbindung nach DVS 2207-1 ist erkennbar. Aus dem flacheren Verlauf der Regressionsgeraden der Schweißverbindungen mit halber Abkühlzeit (rot) kann man vermuten, dass der Einfluss des Versatzes von anderen Mechanismen überlagert ist. Die Schweißverbindung wird während der halbstündigen Biegebelastung in 12:00 Uhr Position einer Zugspannung und in 6:00 Uhr Position einer Druckspannung ausgesetzt. Durch die anschließende Entlastung wird der gestauchte Bereich durch die dann auftretende Dehnung anscheinend höher belastet, als der Bereich der Schweißverbindung in 12:00 Uhr Position.

8 Ergebnisse

Wie zu erwarten war, hat eine vorzeitige mechanische Belastung der geschweißten Rohrverbindung einen signifikanten Einfluss auf die Mindestnutzungsdauer der Schweißverbindung.

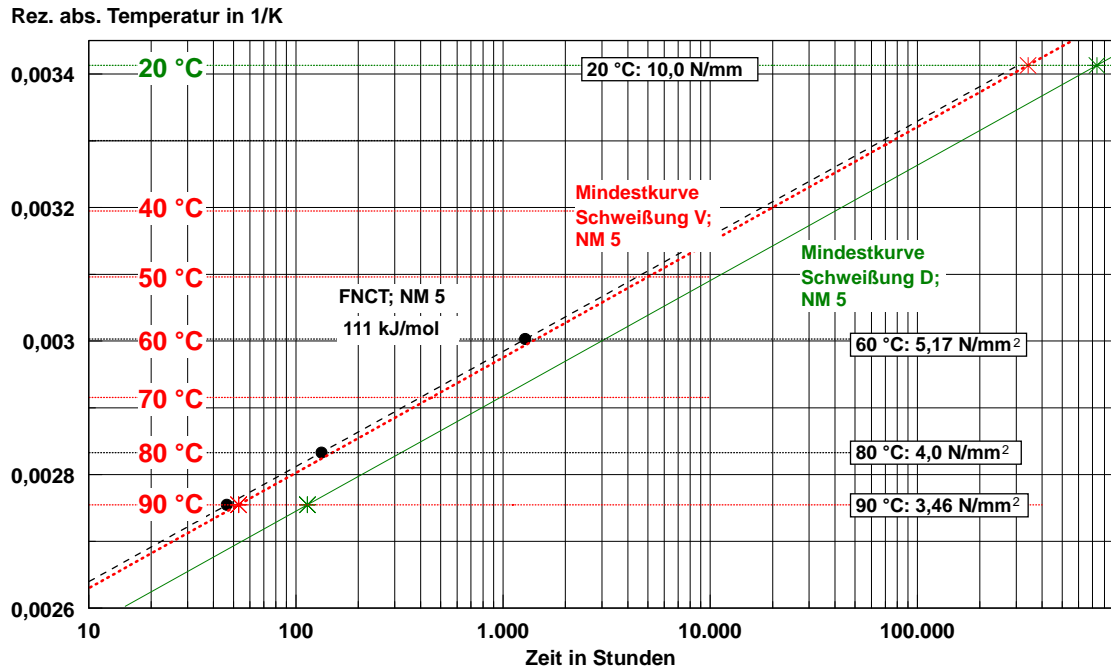


Bild 9: Arrhenius-Diagramm für die Ergebnisse der Prüfungen im FNCT und der Zeitstandzugversuche an Schweißverbindungen in 2 % NM 5, Quelle: Hessel Ingenieurtechnik

Bei der hier untersuchten Schweißverbindung einer Rohrleitung aus PE 80 ist bei vorzeitiger Belastung von einer Halbierung der Mindestnutzungsdauer auszugehen. Der Bruchverlauf der Proben zeigt, dass die Fügeebene der Schweißverbindung nicht auslösendes Moment für das Versagen war.



Bild 10: Bruchfläche der Probe V6 (Bruchausgang Nahtkante außen, Bruchverlauf außerhalb der Fügeebene), Quelle: Hessel Ingenieurtechnik

9 Zusammenfassung und Ausblick

Die Mindestnutzungsdauer von modernen Polyethylen-Rohstoffen wird im wissenschaftlichen Nachweis mit mehr als 100 Jahren angegeben. Eine Erkenntnis aus der beschriebenen Untersuchung zur Verringerung der Abkühlzeit ist, dass bei vorzeitiger Belastung der Schweißverbindung bei Polyethylenwerkstoffen die Mindestnutzungsdauer um ca. 50% reduziert wird.

Bis zur Verfassung des Skriptes befanden sich die Prüflinge des Schutzmantelrohres SLM[®] 2.0 aus PE 100 RC^{plus} noch immer in der Prüfung. Aus der Kenntnis vorhergehender Prüfungen und erreichter Prüfzeiten mit Rohrleitungen aus PE 100 RC^{plus} lässt sich jetzt schon ableiten, dass auch bei Belastung der Schweißverbindung nach halber Abkühlzeit entsprechend DVS 2207-1, die Mindestnutzungsdauer der Verbindung mit mehr als 100 Jahren angenommen 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 Kosteneinsparung ist daher möglich.

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

Literatur

- (1) DIN 8075, Rohre aus Polyethylen (PE) PE63, PE 80, PE 100, PE-HD Allgemeine Güteanforderungen, Prüfung“
- (2) basell Polyolefine GmbH, „Technisches Handbuch – Werkstoffe für die Rohrextrusion“
- (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“
- (4) DVGW Technische Regel W 400-1, „Technische Regeln Wasserverteilungsanlagen (TRWV) Teil 1: Planung“
- (5) 3R international 3-4/2003 Vulkan-Verlag GmbH Essen; Thomas Steiert und Dipl.-Ing. Bernd Schuster: „Verbinden von PE-Großrohren!“
- (6) DVGW Technische Regel GW 321, „Steuerbare horizontale Spülbohrverfahren für Gas- und Wasserrohrleitungen – Anforderungen, Gütesicherung und Prüfung“
- (7) DVS Richtlinie 2203-4, „Prüfen von Schweißverbindungen an Tafeln und Rohren aus thermoplastischen Kunststoffen – Zeitstand-Zugversuch –“
- (8) 3R international 9/2006 Vulkan-Verlag GmbH Essen; Dipl.-Ing. Ulrich Schulte, basell Polyolefine GmbH, Dr.-Ing. Joachim Hessel, „Restlebensdauer von Rohren aus Hostalen GM5010 nach einer Betriebszeit von 41 Jahren“,
- (9) Hessel Ingenieurtechnik, Dokument R07 04 1194-1