

# Beitrag zum Warmgas-Extrusionsschweißen von Dichtungsbahnen aus flexiblen Polyolefinen (FPO/TPO) im Tunnelbau

## Contribution to the hot gas extrusion welding of sealing sheets made of flexible polyolefins (FPO/TPO) in tunnel construction

Dipl.-Ing. Leopold Glück, Sachverständigenbüro LEGL, Martinsheim; Dipl.-Ing. Udo Dengel, Süddeutsches Kunststoff-Zentrum (SKZ), Würzburg; Dipl.-Ing. (FH) Bruno von Wyl, Leister Process Technologies, Kägiswil, Schweiz

### Zusammenfassung

Bisher wurden Tunnelbahnen aus flexiblen Polyolefinen (FPO/TPO) im Tunnelbau ausschließlich mithilfe von Warmgas-Schweißmaschinen und -Geräten miteinander verbunden. Im Rahmen der Erarbeitung der DVS-Richtlinie 2225-5 wurde unter anderem in einem Workshop unter Mitwirkung von Geräteherstellern, Dichtungsbahnenherstellern, Prüfinstituten, Sachverständigen und ausführenden Fachbetrieben die Anwendbarkeit des Extrusionsschweißens überprüft.

Die umfangreichen Schweißversuche haben gezeigt, dass das Warmgas-Extrusionsschweißen zum Verbinden von Dichtungsbahnen aus flexiblen Polyolefinen prinzipiell geeignet ist. Obwohl den Schweißversuchen keine umfassenden Optimierungen vorausgingen, wurden nahezu ausnahmslos anwendungs- und anforderungsgerechte Nahtqualitäten erzielt.

Das Warmgas-Extrusionsschweißen ist somit unter Werkstattbedingungen, aber auch unter Baustellenbedingungen im Tunnel anwendbar.

### Summary

Until now, tunnel sheets made of flexible polyolefins (FPO/TPO) in tunnel construction have been joined with each other exclusively with the aid of hot gas welding machines and devices. Within the framework of the elaboration of the DVS 2225-5 technical code, the applicability of extrusion welding was checked, amongst other ways, in a workshop with the collaboration of device manufacturers, sealing sheet manufacturers, test institutes, experts and executing specialist businesses.

The extensive welding tests have shown that, in principle, hot gas extrusion welding is suitable for the joining of sealing sheets made of flexible polyolefins. Although the welding tests were not preceded by any comprehensive optimisation measures, weld qualities appropriate for the applications and the requirements were obtained nearly without exception.

Hot gas extrusion welding can thus be applied not only in workshop conditions but also in building site conditions in the tunnel.

### 1. Einleitung

Das Fügen von Dichtungsbahnen aus polymeren Werkstoffen im Erd- und Wasserbau und bei sonstigen Grundwasserschutzmaßnahmen wird in den Richtlinien DVS 2225-1 bis -3 [1, 2, 3] und das Schweißen von Dichtungsbahnen aus Polyethylen (PE) für die Abdichtung von Deponien und Altlasten in der Richtlinie DVS 2225-4 [4] geregelt.

Die Richtlinie DVS 2225-5 [5], die in Bearbeitung ist, gilt für das Schweißen von flexiblen, polymeren Dichtungsbahnen zur Herstellung von Abdichtungssystemen in Tunneln, Schachtbauwerken, Kavernen und sonstigen umschlossenen Bauwerken in loser Verlegung.

Mit dieser Richtlinie soll den zuständigen Behörden, den Bauherren, den Planern, den Ausführenden und den Verantwortlichen im Bereich der Qualitätssicherung eine Anleitung für die Durchführung der Schweißarbeiten und der Schweißnahtprüfungen auf der Baustelle gegeben werden. Sie ergänzt diesbe-

	<p>Dipl.-Ing. Leopold Glück Profil: <a href="http://www.fuegen-von-kunststoffen.de/?id=202839">www.fuegen-von-kunststoffen.de/?id=202839</a> profile: <a href="http://www.joining-plastics.info/?id=202839">www.joining-plastics.info/?id=202839</a> Leopold.Glueck@svglueck.de</p>
	<p>Dipl.-Ing. Udo Dengel Profil: <a href="http://www.fuegen-von-kunststoffen.de/?id=202843">www.fuegen-von-kunststoffen.de/?id=202843</a> profile: <a href="http://www.joining-plastics.info/?id=202843">www.joining-plastics.info/?id=202843</a> u.dengel@skz.de</p>
	<p>Dipl.-Ing. (FH) Bruno von Wyl Profil: <a href="http://www.fuegen-von-kunststoffen.de/?id=202844">www.fuegen-von-kunststoffen.de/?id=202844</a> profile: <a href="http://www.joining-plastics.info/?id=202844">www.joining-plastics.info/?id=202844</a></p>

züglich die Richtlinien des BMVBW (ZTV-ING, [6]) und der Deutschen Bahn AG (Richtlinie 853, [7]) sowie die Empfehlungen der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e. V. (EAG-EDT, [8]) für die Abdichtung von Tunnelbauwerken. Dichtungsbahnen für die Abdichtung von Tunneln werden üblicherweise aus

made of polyethylene (PE) for the sealing of dumps and contaminated sites by the DVS 2225-4 technical code [4].

The DVS 2225-5 technical code [5] which is being processed at the moment applies to the welding of flexible, polymeric sealing sheets in order to manufacture sealing systems in tunnels, shaft structures, caverns and miscellaneous enclosed structures in loose laying.

This technical code is intended to give the responsible authorities, the building owners, the planners, the people performing the work and the people responsible in the field of quality assurance instructions for carrying out the welding work and the weld tests on the building site. In this regard, it supplements the guidelines of the German Federal Ministry of Transport, Construction and Urban Development (BMVBW) (Additional technical contractual terms and guidelines for civil engineering structures - ZTV-ING, [6]) and Deutsche Bahn AG (Guideline 853, [7]) as well as

### 1. Introduction

The joining of sealing sheets made of polymeric materials in earthwork and hydraulic engineering and in the case of miscellaneous ground water protection measures is governed by the DVS 2225-1 to DVS 2225-3 technical codes [1, 2, 3] and the welding of sealing sheets

**Tabelle 1: Übersicht über die Dichtungsbahnen und Schweißzusätze**  
**Table 1: Overview of the sealing sheets and the welding filler materials**

ID-Nr. ID no.	Werkstoffbasis laut Hersteller Material basis according to the manufacturer	Neendicke [mm] Nominal thickness [mm]	Istdicke [mm] Actual thickness [mm]	Steifigkeit E <sub>1,2</sub> -Modul [N/mm <sup>2</sup> ] Stiffness/modulus of elasticity <sub>1,2</sub> [N/mm <sup>2</sup> ]	Schweißzusatz Welding filler material
A1	PE-VLD	2,0	2,22	95,3	A - Rund 4 -
A1	PE-VLD	2,0	2,22	95,3	A - Round 4 -
A2	PE-LLD	3,0	3,10	184,5	PE-VLD
A2	PE-LLD	3,0	3,10	184,5	PE-VLD
B	PE-VLD	2,0	1,98	85,4	B - Rund 4 - PE-VLD
B	PE-VLD	2,0	1,98	85,4	B - Round 4 - PE-VLD
C	PE-LD	2,0	2,17	83,9	C - Rund 4 - PE-HD
C	PE-LD	2,0	2,17	83,9	C - Round 4 - PE-HD
D	FPO	2,0	1,94	50,5	D - Rund 3 - FPO
D	FPO	2,0	1,94	50,5	D - Round 3 - FPO
E	TPO auf PP-Basis	2,0	1,81	51,9	E - Rund 4 - TPO auf PP-Basis
E	TPO on a PP basis	2,0	1,81	51,9	E - Round 4 - TPO on a PP basis

weichmacherhaltigem Polyvinylchlorid (PVC-P) oder aus thermoplastischen Polyolefinen (TPO/FPO) in Nenndicken von 2,0 mm oder 3,0 mm (für druckwasserhaltende Abdichtungen) hergestellt. Gegenüber den in der Deponietechnik gebräuchlichen Dichtungsbahnen aus Polyethylen mit mittlerer Dichte (etwa zwischen 0,932 bis 0,942 g/cm<sup>3</sup>), für die sich gleichwohl die Bezeichnung „PE-HD-Dichtungsbahnen“ fest eingebürgert hat, weisen die im Tunnel zur Verwendung kommenden Dichtungsbahnen aus Polyethylen eine deutlich verminderte Steifigkeit beziehungsweise deutlich erhöhte Flexibilität auf. Dies wird durch den Verschnitt unterschiedlicher Polyethylentypen mit niedriger Dichte (PE-LD), sehr niedriger Dichte (PE-VLD) oder auch linearem Polyethylen niedriger Dichte (PE-LLD) erreicht. Zur weiteren Flexibilisierung werden dann noch Modifikatoren wie Ethylen-Vinyl-Acetat (EVA) oder Metallocen-Polyethylen (mPE) zugegeben. Derartige Dichtungsbahnen werden dann als TPO (Thermoplastische Polyolefine, überwiegend im angelsächsischen Raum) oder auch als FPO (flexible Polyolefine, überwiegend im europäischen Raum) bezeichnet. Bisher wurden Tunnelbahnen aus flexiblen Polyolefinen im Tunnelbau ausschließlich mithilfe von Warmgas-Schweißmaschinen und -geräten miteinander verbunden. Im Rahmen der Erarbeitung der DVS-Richtlinie 2225-5 wurde deshalb von der DVS-Arbeitsgruppe W 4.7 ein Workshop unter Mitwirkung von Geräteherstellern, Dichtungsbahnenherstellern, Prüfinstituten, Sachverständigen und ausführenden Fachfirmen veranstaltet, um die Anwendbarkeit des Warmgas-Extrusionsschweißens (WE) zu verifizieren.

**2. Workshop Extrusionsschweißen**

Ziel des Workshops war es, die Eignung des Extrusionsschweißens von Dichtungsbahnen aus flexiblen Polyolefinen im Tunnelbau unter Labor- und Praxisbedingungen zu überprüfen. Insbesondere galt es, die auf Grundlage der DVS 2225-2 bis dato festgelegten Kriterien für die Dimensionierung der Nähte und die Kriterien für die Beurteilung der Nahtqualität zu überprüfen und gegebenenfalls anzupassen. Die Resultate sollten in die DVS 2225-5 einfließen.

**2.1 Untersuchte Dichtungsbahnen**

In der Tabelle 1 sind die untersuchten Dichtungsbahnen zusammengestellt. Es kamen ausschließlich handelsübliche Dichtungsbahnen, die zum Zeitpunkt des Workshops auch in Tunnelbaumaßnahmen verwendet wurden, zum Einsatz. Mit Ausnahme der transluzenten Dichtungsbahn E weisen alle anderen Dichtungsbahnen eine hell eingefärbte Signalschicht auf. Die Dichtungsbahnen unterscheiden sich unter anderem deutlich in ihrer Steifigkeit. Um bereits im Vorfeld möglichst hochwertige Schweißverbindungen sicherzustellen, ist die Verwendung eines zum Werkstoff der Dichtungsbahn typengleichen Schweißzusatzes Voraussetzung. Dies war bei allen Kombinationen Dichtungsbahn/Schweißzusatz mit Ausnahme der ID-Nr. C der Fall, wo als Schweißzusatz ein PE-HD verwendet wurde. Allerdings lagen die beiden gemessenen Schmelzmassefließraten MFR 190/2,16 dicht beieinander: Die Schmelzmassefließrate der Dichtungsbahn lag bei 0,84 g/(10 min) und die des Schweißzusatzes bei 1,1 g/(10 min).

the recommendations of the German Society for Geotechnics (Recommendations for sealing systems in tunnel construction - EAG-EDT, [8]) for the sealing of tunnel structures.

Sealing sheets for the sealing of tunnels are usually made of plasticised polyvinyl chloride (PVC P) or thermoplastic polyolefins (TPO/FPO) in nominal thicknesses of 2.0 mm or 3.0 mm (for seals holding confined ground water). Compared with the medium-density polyethylene (approx. 0.932 - 0.942 g/cm<sup>3</sup>) sealing sheets customary in dump technology for which the designation “PE HD sealing sheets” has nevertheless become firmly established, the polyethylene sealing sheets used in the tunnel exhibit a substantially reduced stiffness or a substantially increased flexibility. This is achieved by blending different polyethylene types with a low density (PE-LD) or a very low density (PE-VLD) or also linear polyethylene with a low density (PE-LLD). Modifiers such as ethylene vinyl acetate (EVA) or metallocene polyethylenes (mPE) are then added for further flexibilisation. Such sealing sheets are then designated as TPO (thermoplastic polyolefins, predominantly in the Anglo-Saxon area) or also as FPO (flexible polyolefins, predominantly in the European area).

Until now, tunnel sheets made of flexible polyolefins in tunnel construction have been joined with each other exclusively with the aid of hot gas welding machines and devices. Within the framework of the elaboration of the DVS 2225-5 technical code, a workshop was therefore organised by the DVS working group W 4.7 with the collaboration of device manufacturers, sealing sheet manufacturers, test institutes, experts

and executing specialist companies in order to verify the applicability of hot gas extrusion welding (WE).

**2. Workshop on extrusion welding**

The objective of the workshop was to check the suitability of the extrusion welding of sealing sheets made of flexible polyolefins in tunnel construction in laboratory and practical conditions. In particular, the aim was to check and, if necessary, adjust those criteria for dimensioning the welds which have been stipulated until now on the basis of DVS 2225-2 and the criteria for assessing the weld quality. The results should be incorporated into DVS 2225-5.

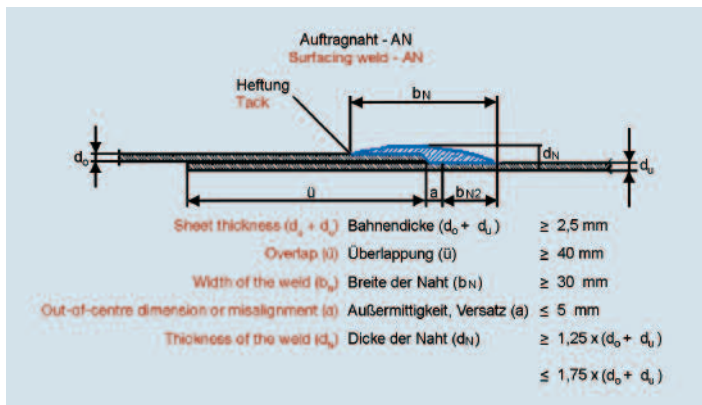
**2.1 Investigated sealing sheets**

The investigated sealing sheets are listed in Table 1. The utilised sealing sheets were exclusively commercially available sealing sheets which were also used in tunnel construction measures at the point in time of the workshop. With the exception of the translucent Sealing Sheet E, all the other sealing sheets exhibit a light-coloured signal coat. Amongst other characteristics, the sealing sheets have substantially different stiffnesses.

One prerequisite for ensuring the highest possible quality of the welded joints already in advance is to use a welding filler material of the same type as the material of the sealing sheet. This was applied to all the sealing sheet/welding filler material combinations with the exception of ID No. C, the case where a PE-HD was used as the welding filler material. However, both the measured melt flow rates MFR 190/2.16 were located close together: The melt flow

## 2.2 Schweißgeräte

Als Schweißgeräte wurden digital geregelte Hand-Extruder vom Typ „Leister Weldplast S2“ eingesetzt. Das sind leistungsstarke, ergonomisch geformte Hand-Extruder mit beidseitigem drallfreien Schweißdrahteinzug, 360° drehbarem Schweißschuh und stufenlos verstellbarem Handgriff. Außerdem verfügt der kompakt gebaute „Weldplast S2“ über einen Kaltstartschutz und ein multifunktionales Display zur Anzeige und Kontrolle aller Schweißparameter. Der Ausstoß liegt bei TPO/FPO-Werkstoffen und Verwendung eines Runddrahtes mit 4 mm Durchmesser in einem Bereich von 1,0 kg bis 2,3 kg. Die Geometrie der Plastifizierungszone in der Schnecke zusammen mit der menügesteuerten digitalen Regelung ermöglichen das zielgenaue Anfahren und Konstanthalten der werkstoffbezogenen Aufschmelztemperaturen von TPO/FPO.



**Bild 1:** Nahtgeometrie einer Auftragnaht nach DVS 2225-1 [1] bzw -4 [4]

**Fig. 1:** Weld geometry of a surfacing weld according to DVS 2225-1 [1] and DVS 2225-4 [4]



**Bild 2:** Vorbereitung der Schweißarbeiten, Heften der beiden zu schweißenden Bahnenabschnitte mit einem Wärmegasschweißgerät

**Fig. 2:** Preparation for the welding, using a hot gas welding device in order to tack both the sheet sections to be welded

**Tabelle 2: Variation der Schweißschuhe**  
**Table 2: Variation of the welding shoes**

Schweißnahtbreite Weld width $b_N$ [mm]	Nahtdickenfaktor $f_{NA}$ Weld thickness factor $f_{NA}$	
	1,25	1,5
20	–	
25		
30		

## 2.3 Schweißschuhe

Mit dem Wärmegasschweißen (WE) werden Auftragnahte hergestellt. Über einen entsprechend der gewünschten Nahtgeometrie geformten Schweiß-

rate of the sealing sheet was 0.84 g/ (10 min) and that of the welding filler material 1.1 g/(10 min).

## 2.2 Welding devices

Digitally regulated hand-held extruders of the “Leister Weldplast S2” type were utilised as the welding devices. These constitute efficient, ergonomically shaped hand-held extruders with twist-free welding wire intake on both sides, a 360° rotatable welding shoe and an infinitely adjustable handle. Moreover, the compactly built “Weldplast S2” is equipped with cold start protection and a multifunctional display in order to indicate and check all the welding parameters. In the case of TPO/FPO materials and the use of a round wire with a diameter of 4 mm, the output is in a range from 1.0 kg to 2.3 kg. Due to the geometry of the plastification zone and the menu-controlled digital regulation, the material-related melting temperatures of TPO/FPO can be accurately approached and kept constant.

## 2.3 Welding shoes

Surfacing welds are manufactured with hot gas extrusion welding (WE). A welding shoe shaped according to the desired weld geometry is used in order to press the plastified welding filler material into the welding groove of the base material. The welding groove is preheated using a hot gas blower attached to the welding head. The requirements on the weld geometry of surfacing welds on sealing sheets made of PE-HD are stipulated in DVS 2225-1 and DVS 2225-4 (Fig. 1).

The so-called weld thickness factor  $f_{NA}$  is determined as the essential assessment criterion for the weld thickness:

$$f_{NA} = d_N / (d_o + d_u) \quad (1)$$

In order to check the influence of the material input on the weld quality, not only the width but also the weld reinforcement (weld thickness factor) of the welding shoes were varied according to Table 2.

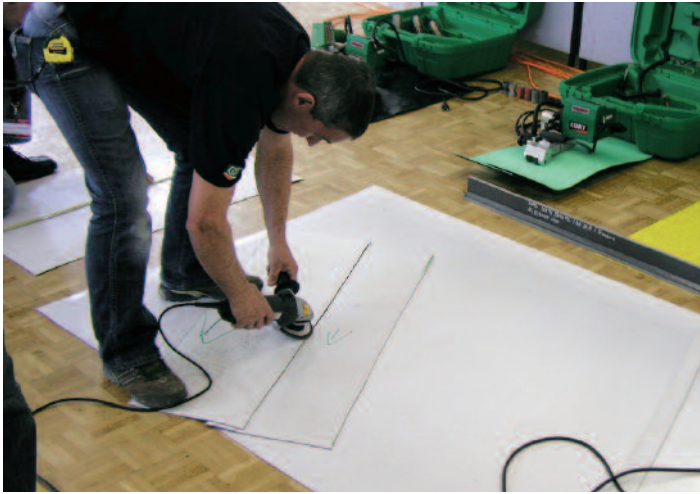
All welding shoe edges which come into contact with the sealing sheet were rounded.

## 2.4 Welding conditions

The welding conditions and parameters were documented on welding record sheets and are summarised in Table 3. Before the beginning of the welding operation, both sheet sections were tacked (Fig. 2) in order to exclude any positional changes during the welding and the joining faces were ground (with the exception of Variant 15b) in order to remove the oxide coat on the surface (Fig. 3). In the case of manual welding, the welding speed is determined by the material output of the extruder and the size of the weld cross-section ( $f_{NA}$ ). It was predominantly in a range from 50 cm/min to 70 cm/min. In order to simulate the substrate conditions in the tunnel, two layers of a geotextile with a weight per unit area of 500 g/m<sup>2</sup> were placed underneath during the welding (Fig. 4).

## 2.5 Testing and assessment of the welded joints

The laboratory tests were performed in the Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ), an accredited test institute. The following test procedures were applied:



**Bild 3:** Vorbereitung der Schweißung, Anschleifen der Fügeflächen mit einem Winkelschleifer mit Schleifpapier (Körnung 120)

**Fig. 3:** Preparation for the welding, using a right-angle grinder with emery paper (grain size: 120) in order to grind the joining faces



**Bild 4:** Warmgas-Extrusions-schweißen mit dem Hand-Extruder vom Typ „Leister Weldplast S2“

**Fig. 4:** Hot gas extrusion welding with the hand-held extruder of the "Leister Weldplast S2" type

schuh wird der plastifizierte Schweißzusatz in die Schweißfuge des Grundwerkstoffs gedrückt. Die Vorwärmung der Schweißfuge erfolgt über ein am Schweißkopf angebrachtes Warmgasgebläse. Die Anforderungen an die Nahtgeometrie von Auftragnähten von Dichtungsbahnen aus PE-HD sind in DVS 2225-1 und -4 festgelegt (Bild 1). Als wesentliches Beurteilungskriterium für die Nahtdicke wird der sogenannte Nahtdickenfaktor  $f_{NA}$  ermittelt:

$$f_{NA} = d_N / (d_o + d_u) \quad (1)$$

Um den Einfluss des Masseintrags auf die Schweißnahtqualität zu überprüfen,

wurden sowohl die Breite als auch die Nahtüberhöhung (Nahtdickenfaktor) der Schweißschuhe gemäß Tabelle 2 variiert.

Es wurden sämtliche Kanten der Schweißschuhe, die mit der Dichtungsbahn in Berührung kommen, gerundet.

**2.4 Schweißbedingungen**

Die Schweißbedingungen und -parameter wurden in Schweißprotokollen dokumentiert und sind in der Tabelle 3 zusammengefasst.

Vor Beginn des Schweißvorgangs wurden die beiden Bahnenabschnitte

**2.5.1 Visual inspection of the undestroyed weld**

In detail, the visual inspection relates to the features:

- shape and uniformity of the weld path,
- notches and lines in the weld area,
- central position and uniform edge areas without any bead if at all possible as well as
- smooth and smear-free surface.

**2.5.2 Checking of the dimensions**

The characteristic dimensions were determined on strip-shaped test specimens from the weld (Fig. 5):

It is thus possible to calculate the weld misalignment (out-of-centre dimension:  $a = b_N/2 - b_{N2}$ ) as well as the weld thickness factor of the surfacing welds  $f_{NA}$  according to Equation (1).

**2.5.3 Testing of the mechanical strength in the peeling test according to DVS 2226-3 [9]**

The peeling resistance was determined from the force/displacement diagrams as a quotient of the maximum force and the test specimen width and was specified in N/mm. When the weld was cut open, the mean peeling force was

**Tabelle 3: Schweißbedingungen und -parameter**  
**Table 3: Welding conditions and parameters**

Nr. No.	KDB PSS	Schweißzusatz Welding filler material	Schweißschuh Welding shoe		Temperatur [°C] Temperature [°C]		Bahndicke Sheet thickness [mm]	Geschwindigkeit Speed [cm/min]	Anschleifen Grinding
			Breite [mm] Width [mm]	$f_{NA}$ $f_{NA}$	Masse Material	Warmgas Hot gas			
1	A1	A	30	1,5	190	260	2,24	40	Ja Yes
2	B	B	25	1,25	190	260	2,07	70	Ja Yes
3	C	C	30	1,25	215	200	2,18		Ja Yes
4	C	C	25	1,25	210	200	2,17	65	Ja Yes
6	C	C	30	1,5	210	200	2,18	75	Ja Yes
7	C	C	25	1,5	210	190	2,22	25	Ja Yes
8	B	B	30	1,5	190	260	2,13	35	Ja Yes
9	B	B	30	1,25	190	260	2,12	60	Ja Yes
10	A1	B	30	1,25	190	260	2,29	45	Ja Yes
11	A1	B	25	1,25	190	260	2,26	65	Ja Yes
12	A1	B	25	1,5	190	246	2,27	60	Ja Yes
13	C	C	20	1,5	215	190	2,24	66	Ja Yes
15a	C	B	25	1,25	190	230	2,18	65	Ja Yes
15b	C	B	25	1,25	190	230	2,19	65	Nein No
16	D	D	25	1,25	179	190	1,96	25	Ja Yes
17	E	E	25	1,25	190	230	1,84	50	Ja Yes
19	B	B	25	1,5	190	246	2,12	60	Ja Yes
20	A1	A	25	1,25	191	230	2,23	60	Ja Yes
21	A2	A	25	1,25	191	230	3,06	60	Ja Yes
25	D	B	25	1,25	200	230	1,97	70	Ja Yes
26	D	B	30	1,5	180	200	1,97	65	Ja Yes
29	E	E	25	1,25	200	250	1,85	50	Ja Yes
30	E	B	25	1,25	180	200	1,83	55	Ja Yes

geheftet (Bild 2), um eine Lageänderung während des Schweißens auszuschließen und die Fügeflächen angeschliffen (mit Ausnahme der Variante 15b), um die Oxidschicht auf der Oberfläche zu entfernen (Bild 3). Die Schweißgeschwindigkeit wird beim manuellen Schweißen durch den Masseausstoß des Extruders und die Größe des Nahtquerschnitts ( $f_{NA}$ ) bestimmt. Sie lag überwiegend in einem Bereich von 50 cm/min bis 70 cm/min. Um die Untergrundverhältnisse im Tunnel zu simulieren, wurde beim Schweißen ein Geotextil mit einem Flächengewicht von 500 g/m<sup>2</sup> zweilagig untergelegt (Bild 4).

## 2.5 Prüfung und Beurteilung der Schweißverbindungen

Die Laborprüfungen wurden im Süddeutschen Kunststoff-Zentrum (SKZ), einem akkreditierten Prüfinstitut, durchgeführt. Folgende Prüfverfahren wurden angewendet:

### 2.5.1 Visuelle Prüfung der unzerstörten Naht

Die visuelle Prüfung bezieht sich im Einzelnen auf die Merkmale:

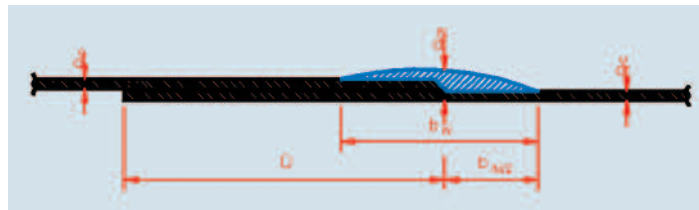
- Form und Gleichmäßigkeit des Nahtverlaufs,
- Kerben und Riefen im Nahtbereich,
- mittige Lage und gleichmäßige, möglichst wulstfreie Randbereiche,
- glatte und schlierenfreie Oberfläche.

### 2.5.2 Prüfung der Abmessungen

Die kennzeichnenden Abmessungen wurden an streifenförmigen Probekörpern aus der Naht (Bild 5) ermittelt: Damit lässt sich der Nahtversatz (Außermittigkeit  $a = b_N/2 - b_{N2}$ ) sowie der Nahtdickenfaktor der Auftragnähte  $f_{NA}$  nach Gleichung (1) berechnen.

### 2.5.3 Prüfung der mechanischen Festigkeit im Schälversuch nach DVS 2226-3 [9]

Aus den Kraft-Weg-Diagrammen wurde der Schälwiderstand als Quotient der Höchstkraft und der Probekörperbreite ermittelt und in N/mm angegeben. Im Falle eines Auftrennens der Naht, wurde nach DIN 53539 (DIN ISO 6133) die mittlere Schälkraft ermittelt und der mittlere (Trenn-)Schälwiderstand „Rs“ als Quotient aus der mittleren Schälkraft und der Probekörperbreite berechnet.



**Bild 5:**  
 $b_N$  = gesamte Breite der Naht  
 $b_{N2}$  = Breite der vorderen Teilnaht  
 $d_o$  = Dicke der oberen Bahn  
 $d_u$  = Dicke der unteren Bahn  
 $d_N$  = Dicke der Naht

### 2.5.4 Zeitstand-Zugversuch nach DVS 2226-4 [10]

Zur Beurteilung der Schweißverbindungen unter langzeitiger Zugbeanspruchung wurden orientierende Prüfungen an schulterförmigen Probekörpern mit mittiger Auftragnäht (Bild 6) bei 80°C in einer 2%igen wässrigen Netzmittellösung (Netzmittel: Arkopal N 100) durchgeführt.

Zur Reduzierung des Prüfaufwandes wurde die vereinfachte Methode zum Nachweis des Langzeit-Fügefaktors ( $f_L$ ) von 0,4 (Anforderungswert nach DVS 2226-1 [11]) angewendet. Die Prüfspannung für das Grundmaterial C wurde so lange variiert, bis keine spontane Verformung mehr auftrat, sondern ausschließlich sprödes Versagen. Die Prüfspannung lag dabei bei 1,75 N/mm<sup>2</sup>, die mittlere Standzeit des Grundmaterials betrug 2020 Stunden.

### 2.6 Ergebnis der Schweißnahtprüfungen

Die Ergebnisse sind in der Tabelle 4 zusammengefasst.

Prinzipiell ließen sich bei allen Varianten Auftragnähte mit gleichförmigen und gleichmäßigen Nahtverläufen sowie mit glatten und nahezu schlierenfreien Oberflächen erzielen. Die mittige Lage, die bei reduzierter Nahtbreite eine wichtige Rolle spielt, und die möglichst wulstfreie Ausbildung der Randbereiche (Seitenaustrieb) erfordert vom Schweißer ein hohes Maß an handwerklicher Fertigkeit und Geschicklichkeit.

Übergänge, wie in Bild 7 dargestellt, mit einer ausgeprägten Kerbe und starkem Wulstaustrieb müssen unbedingt vermieden werden, da die abrupte Querschnittsänderung bei Zugbeanspruchung senkrecht zur Schweißnaht eine erhöhte Kerbwirkung und somit ein frühzeitigeres Versagen bewirkt. Die gewünschte Querschnittsgeometrie der Auftragnäht (die Nahtbreite und die

**Fig. 5:**  
 $b_N$  = total width of the weld  
 $b_{N2}$  = width of the front part of the weld  
 $d_o$  = thickness of the upper sheet  
 $d_u$  = thickness of the lower sheet  
 $d_N$  = thickness of the weld

determined according to DIN 53539 (DIN ISO 6133) and the mean (separating) peeling resistance "Rs" was calculated as a quotient from the mean peeling force and the test specimen width.

### 2.5.4 Tensile creep test according to DVS 2226-4 [10]

In order to assess the welded joints when they were subjected to long-time tensile stresses, orientational tests were performed on shoulder-shaped test specimens with a central surfacing weld (Fig. 6) at 80°C in a 2% aqueous wetting agent

solution (wetting agent: Arkopal N 100). The simplified method of proving the long-time joining factor ( $f_L$ ) of 0.4 (value required according to DVS 2226-1 [11]) was applied in order to reduce the scope of testing. The testing stress for base material C was varied until no more spontaneous deformation occurred but instead exclusively brittle failure. In this respect, the testing stress was 1.75 N/mm<sup>2</sup> and the mean service life of the base material 2,020 hours.

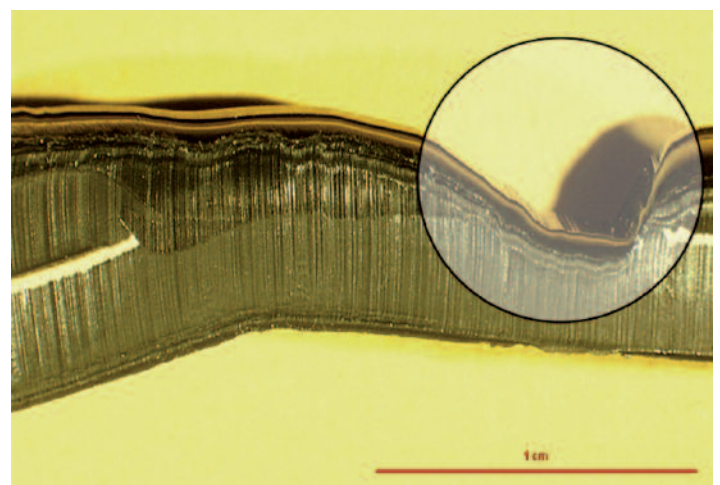
### 2.6 Results of the weld tests

The results are summarised in Table 4. With all the variants, it was possible, in principle, to obtain surfacing welds with uniform and consistent weld paths as well as with smooth and nearly smear-free surfaces. The central position which plays an important role in the case of a reduced weld width and the formation of the edge areas without any bead if at all possible (lateral flow) necessitate a high degree of handcraft skill and dexterity from the welder. It is imperative to avoid any interfaces such as the one portrayed on Fig. 7 with



**Bild 6:** Schulterförmiger Probekörper mit mittiger Auftragnäht für Zeitstand-Zugversuche

**Fig. 6:** Shoulder-shaped test specimen with a central surfacing weld for tensile creep tests



**Bild 7:** Nahtübergang mit ausgeprägter Materialeinkerbung und starkem Wulstaustrieb (Vergrößerung 6-fach)

**Fig. 7:** Weld interface with distinct material notching and an extreme bead flash (magnifying power: 6 times)

Tabelle 4: Ergebnis der Schweißnahtprüfungen  
Table 4: Results of the weld tests

Nr. No.	KDB PSS	Schweißzusatz Welding filler material	Schweißschuh Welding shoe		Abmessungen Dimensions			Schälwiderstand <sup>1)</sup> Peeling resistance <sup>1)</sup>	Versagensart <sup>2)</sup> Failure type <sup>2)</sup>
			Breite [mm] Width [mm]	f <sub>NA</sub> f <sub>NA</sub>	b <sub>N</sub> [mm] b <sub>N</sub> [mm]	Versatz [mm] Misalignment [mm]	f <sub>NA</sub> f <sub>NA</sub>		
1	A1	A	30	1,5	31,1	0,2	1,52	15,9 ± 0,1	1
2	B	B	25	1,25	26,4	0	1,34	14,5 ± 0,1	1
3	C	C	30	1,25	31,6	1,8	1,37	16,0 ± 0,1	1
4	C	C	25	1,25	27,4	2,7	1,35	16,0 ± 0,1	1
6	C	C	30	1,5	29,2	1,7	1,47	15,9 ± 0,2	1
7	C	C	25	1,5	25,1	3,4	1,49	16,2 ± 0,2	2
8	B	B	30	1,5	31,9	2,0	1,63	14,8 ± 0,3	1
9	B	B	30	1,25	32,3	1,6	1,37	14,9 ± 0,1	1
10	A1	B	30	1,25	31,4	1,8	1,37	16,3 ± 0,1	1
11	A1	B	25	1,25	26,2	0,8	1,35	16,3 ± 0,1	1
12	A1	B	25	1,5	26,0	1,3	1,43	16,3 ± 0,1	1
13	C	C	20	1,5	21,2	5,1	1,54	16,3 ± 0,1	2
15a	C	B	25	1,25	26,1	1,3	1,32	16,3 ± 0,5	1
15b	C	B	25	1,25	26,1	1,1	1,31	16,0 ± 0,1	1
16	D	D	25	1,25	26,2	1,4	1,73	9,7 ± 0,3	2
17	E	E	25	1,25	26,6	1,5	1,56	9,6 ± 0,5	3
19	B	B	25	1,5	26,0	0,5	1,38	14,8 ± 0,1	1
20	A1	A	25	1,25	25,9	0,2	1,39	16,1 ± 0,1	1
21	A2	A	25	1,25	26,3	3,0	1,25	26,5 ± 1,0	1
25	D	B	25	1,25	25,9	2,6	1,44	10,4 ± 0,3	2
26	D	B	30	1,5	25,7	2,3	1,45	10,3 ± 0,2	2
29	E	E	25	1,25	26,3	0,1	1,58	9,7 ± 0,1	2x1, 3x2
30	E	B	25	1,25	26,3	0,1	1,49	0,7 ± 0,3	2

1) Ergebnisangabe: arithmetischer Mittelwert ± Standardabweichung  
2) Legende für die Versagensart:  
1 = Verstreckung/Bruch im Grundmaterial außerhalb des Nahtbereichs  
2 = Aufschälen der Naht  
3 = Verstreckung/Bruch im Extrudat

1) Indicated results: arithmetic mean ± standard deviation  
2) Key for the failure type:  
1 = stretching/fracture in the base material outside the weld area  
2 = peeling-open of the weld  
3 = stretching/fracture in the extrudate

Nahtüberhöhung) lässt sich durch eine entsprechende Ausbildung des Schweißschuhs erreichen, insofern hätten insbesondere die verwendeten Schweißschuhe mit dem f<sub>NA</sub>-Faktor 1,25 leicht nachgearbeitet werden müssen, da die gemessenen f<sub>NA</sub>-Werte etwas höher lagen.  
Im Bild 8 ist das Verformungsverhalten im Zugversuch der Dichtungsbahn A1 (PE-VLD) dem Verformungsverhalten im Schälversuch gegenübergestellt. Im Zugversuch ist nach dem Erreichen eines konstanten Spannungsniveaus ein stationäres plastisches Fließen mit einem

daran anschließenden Verfestigen (Spannungsanstieg) und ein ultimatives Versagen (Bruch) zu beobachten. Im Schälversuch ist das Verhalten bis zum Ende des plastischen Fließprozesses identisch, allerdings tritt der Verfestigungsbereich, verbunden mit dem Spannungsanstieg, nicht auf, was auf die Kerbwirkung und Spannungskonzentration im Nahtübergang zurückzuführen sein dürfte. Die Schweißnaht Nr. 1 (Bild 8, rechtes Diagramm) versagte im Grundmaterial im Nahtübergang. Die flexiblere Dichtungsbahn D (FPO) verhält sich bei Zugbeanspruchung ana-

a distinct notch and an extreme bead flash since the abrupt change in the cross-section gives rise to an increased notch effect and thus to more premature failure when subjected to tensile stresses vertical to the weld.  
The desired cross-sectional geometry of the surfacing weld (weld width and weld reinforcement) can be achieved by forming the welding shoe in a corresponding way. To this extent, particularly the welding shoes used with the f<sub>NA</sub> factor of 1.25 would have to be remachined somewhat since the measured f<sub>NA</sub> values were somewhat higher.

On Fig. 8, the deformation behaviour in the tensile test on Sealing Sheet A1 (PE-VLD) is compared with the deformation behaviour in the peeling test. In the tensile test, steady plastic flow with subsequent work hardening (stress rise) and ultimate failure (fracture) can be observed when a constant stress level has been reached. In the peeling test, the behaviour is identical until the end of the plastic flow process. However, the work hardening range, connected with the stress rise, does not occur. This should be attributed to the notch effect and stress concentration at the weld

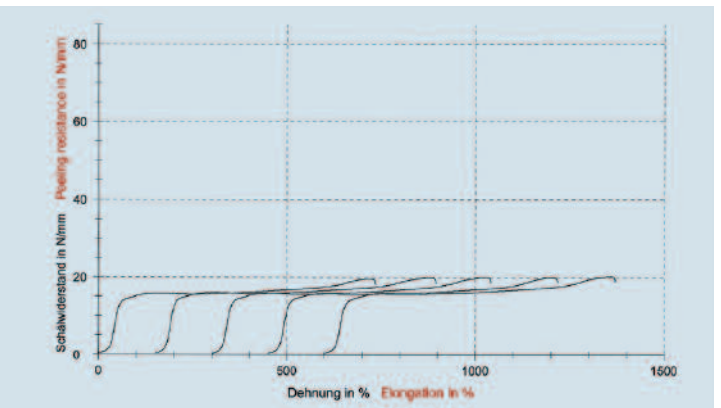
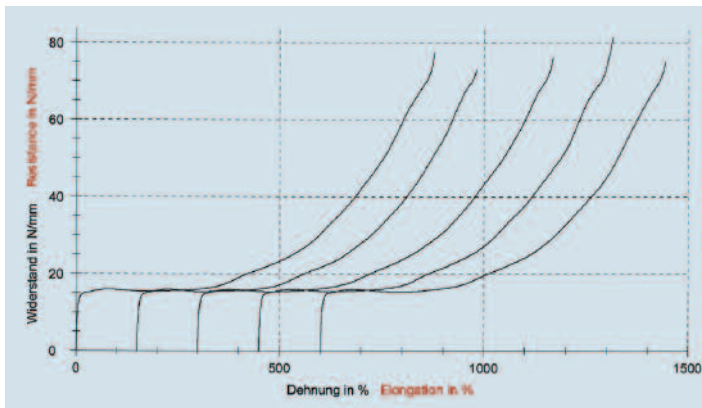
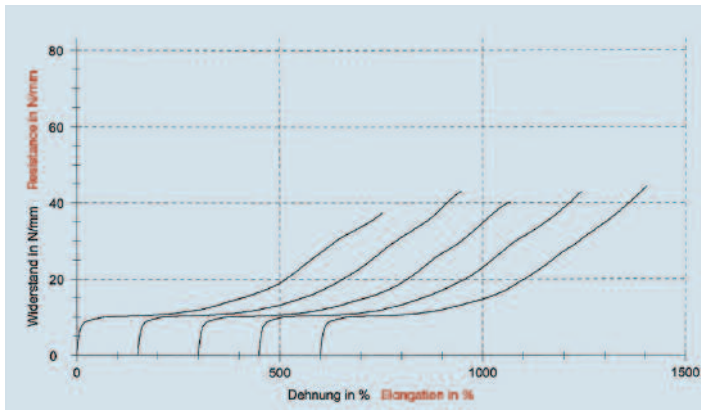
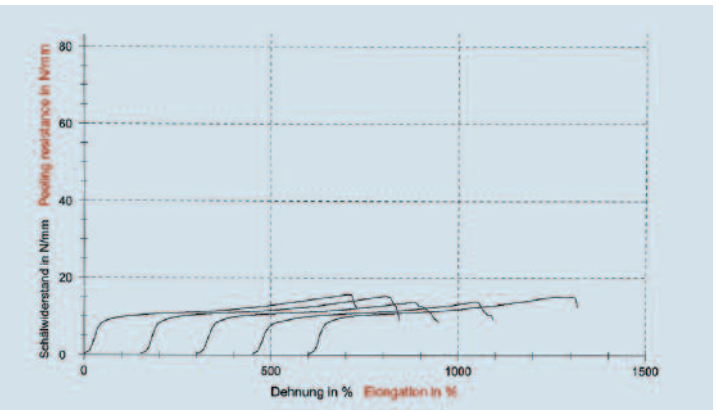


Bild 8: Verformungsverhalten im Zugversuch (linkes Diagramm) und im Schälversuch (Dichtungsbahn A1 –PE-VLD, Schweißnaht Nr. 1)

Fig. 8: Deformation behaviour in the tensile test (diagram on the left) and in the peeling test (Sealing Sheet A1 - PE VLD, Weld No. 1)



**Bild 9:** Verformungsverhalten im Zugversuch (linkes Diagramm) und im Schälversuch (Dichtungsbahn D - FPO, Schweißnaht Nr. 16)



**Fig. 9:** Deformation behaviour in the tensile test (diagram on the left) and in the peeling test (Sealing Sheet D - FPO, Weld No. 16)

log zur steiferen Variante A1, lediglich auf einem niedrigeren Spannungsniveau (Bild 9). Die Schweißnaht schälte sich jedoch nach ausgeprägter Verformung vollständig auf.

Die Abhängigkeit des Schälwiderstandes und des gemessenen  $f_{NA}$ -Faktors von der Geometrie des Schweißschuhs beispielhaft am Material C, zeigt Bild 10. Im Breitenbereich von 20 mm bis 30 mm und mit  $f_{NA}$ -Faktoren von 1,25 bis 1,5 liegen die Schälwiderstände bei ca. 16 N/mm.

Im Zeitstand-Zugversuch wurden exemplarisch die Schweißnahtvarianten 2 (Dichtungsbahn B, Schweißzusatz B, Schweißschuh 25 x 1,25) und 12 (Dichtungsbahn A1, Schweißzusatz B, Schweißschuh 25 x 1,5) mit dem jeweiligen Grundmaterial geprüft.

In beiden Fällen wurde der Langzeit-Fügefaktor ( $f_s$ ) von  $>0,4$  nachgewiesen.

### 3. Baustellenerprobung

Auf einer Tunnelbaustelle wurde die praktische Anwendung des Extrusions-schweißens unter anderem mit dem

Hand-Extruder vom Typ „Leister Weldplast S2“ überprüft. Insbesondere das Überkopf-Schweißen stellt höchste Anforderungen an den Schweißer und an das Equipment (Bild 11).

Die aufgeschweißte Dichtscheibe (Flicken) wurde vollständig ausgeschnitten und im Labor überprüft. Folgende Ergebnisse wurden erzielt:

- Nahtbreite: 25,0 mm
- $f_{NA}$ : 1,17 (Schweißschuhgeometrie 25 x 1,25)
- Schälwiderstand: 12,2 N/mm
- Versagensart: Bruch im Grundmaterial im Nahtübergang

### 4. Zusammenfassung

Die umfangreichen Schweißversuche haben gezeigt, dass das Warmgas-Extrusionsschweißen zum Verbinden von Dichtungsbahnen aus flexiblen Polyolefinen prinzipiell geeignet ist. Obwohl den Schweißversuchen keine umfassenden Optimierungen vorausgingen, wurden nahezu ausnahmslos anwendungs- und anforderungsgerechte Nahtqualitäten erzielt.

interface. Weld No. 1 (Fig. 8, diagram on the right) failed in the base material at the weld interface.

When subjected to tensile stresses, the more flexible Sealing Sheet D (FPO) exhibits behaviour analogous to the stiffer Variant A1, merely at a lower stress level (Fig. 9). However, the weld was peeled open completely after distinct deformation.

Using Material C as an example, Fig. 10 shows how the peeling resistance and the measured  $f_{NA}$  factor depend on the geometry of the welding shoe. In the width range from 20 mm to 30 mm and with  $f_{NA}$  factors from 1.25 to 1.5, the peeling resistances are approx. 16 N/mm. In the tensile creep test, Weld Variant 2 (Sealing Sheet B, welding filler Material B, welding shoe: 25 x 1.25) and Weld Variant 12 (Sealing Sheet A1, Welding Filler Material B, welding shoe: 25 x 1.5) with the respective base materials were tested as examples.

The long-time joining factor ( $f_s$ ) of  $> 0.4$  was proven in both cases.

### 3. Trials on the building site

On a tunnel building site, the practical application of extrusion welding was checked, amongst other ways, with the hand-held extruder of the “Leister Weldplast S2” type. In particular, overhead welding sets the most stringent requirements on the welder and on the equipment (Fig. 11).

The welded-on sealing disc (patch) was cut out completely and checked in the laboratory. The following results were obtained:

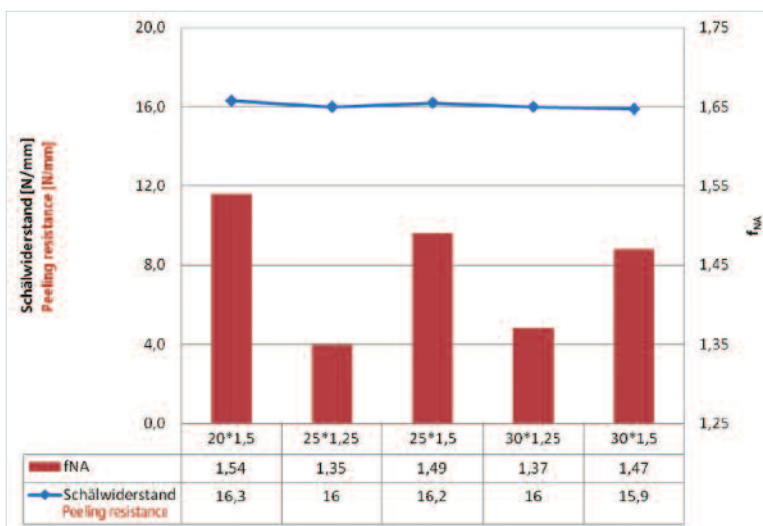
- weld width: 25.0 mm
- $f_{NA}$ : 1.17 (welding shoe geometry: 25 x 1.25)
- peeling resistance: 12.2 N/mm
- failure type: fracture in the base material at the weld interface

### 4. Summary

The extensive welding tests have shown that, in principle, hot gas extrusion welding is suitable for the joining of sealing sheets made of flexible polyolefins. Although the welding tests were not preceded by any comprehensive optimisation measures, weld qualities appropriate for the applications and the requirements were obtained nearly without exception. Hot gas extrusion welding can thus be applied not only in workshop conditions but also in building site conditions in the tunnel.

### 5. Conclusion and outlook

Because of the positive results obtained during the workshop and on the building site, hot gas extrusion welding will be included in the DVS 2225-5 technical code [5] as an alternative process to the customary hot gas or heated wedge welding for the welding of flexible sealing sheets on a polyolefin basis.



**Bild 10:** Abhängigkeit des Schälwiderstandes und des gemessenen  $f_{NA}$ -Faktors von der Geometrie des Schweißschuhs (Dichtungsbahn C – PE-LD, Schweißzusatz C – PE-HD)

**Fig. 10:** How the peeling resistance and the measured  $f_{NA}$  factor depend on the geometry of the welding shoe (Sealing Sheet C - PE-LD, Welding Filler Material C - PE-HD)

Das Warmgas-Extrusionsschweißen ist somit unter Werkstattbedingungen, aber auch unter Baustellenbedingungen im Tunnel anwendbar.

**5. Fazit und Ausblick**

Aufgrund der positiven Ergebnisse, die während des Workshops und auf der Baustelle erzielt wurden, wird das Warmgas-Extrusionsschweißen als alternatives Verfahren zum gebräuchlichen Warmgas- oder Heizkeilschweißen zum Schweißen von flexiblen Dichtungsbahnen auf Polyolefinbasis in die Richtlinie 2225-5 [5] aufgenommen werden.

Gegenüber den Festlegungen für Dichtungsbahnen aus PE-HD [4] wird die Schweißnahtgeometrie dahingehend modifiziert, dass der  $f_{NA}$ -Faktor im Mittel zwischen 1,25 und 1,50 liegen soll, wobei einzelne Werte außerhalb dieses Bereiches liegen dürfen. Hintergrund dieser Einengung ist es, den Masseeintrag in die Schweißnaht zu minimieren, um somit die beim Erkalten der Nähte auftretenden Schrumpfspannungen und die Gefahr des Durchzeichnens und Durchschmelzens der unteren Dichtungsbahn zu minimieren. Darüber hinaus wird die Nahtbreite auf mindestens 25 mm (gegenüber 30 mm in [4]) und die maximale Abweichung der Nahtmitte, bezogen auf die Kante der oberen Dichtungsbahn, auf 5 mm begrenzt.

Da die exakte Zusammensetzung der Dichtungsbahnen dem Schweißer nicht bekannt ist und auch aus den Herstellerbezeichnungen nicht abgeleitet werden kann, ist als Schweißzusatz generell die gleiche Formmasse wie beim Bahnenmaterial zu verwenden.

Die qualitative Beurteilung des Verformungs- und Versagensverhaltens der Schweißnähte ist durch Schälversuche nachzuweisen. Im Schälversuch ist Aufschälen zulässig, falls ein Schälwiderstand von mindestens 6 N/mm erreicht wird. Abschließend ist nochmals zu betonen, dass das Warmgasextrusionsschweißen ein Schweißverfahren ist, das umfangreiche Kenntnisse bezüglich der zu schweißenden Werkstoffe und der Handhabung der Maschinen und Geräte sowie hohe Fertigkeiten in der Ausführung voraussetzt. Es ist deshalb dringend geboten, die Richtlinie 2212-3 [12] um die Belange und Bedürfnisse des Tunnelbaus zu ergänzen und eine eigene Prüfgruppe für das Schweißen von flexiblen Dichtungsbahnen auf Polyolefinbasis einzurichten, damit die Schweißer eine Prüfung ablegen und eine gültige Prüfbescheinigung erwerben können.

**6. Danksagung**

Die Autoren danken den Mitgliedern und Gästen der DVS-Arbeitsgruppe AG W 4.7 „Folien und Bahnen“ für ihre aktive Unterstützung und Gestaltung des Workshops. Den Herstellern AGRU Kunststofftechnik GmbH, Flag S.p.A., GSE Lining Technology GmbH, Naue GmbH & Co. KG und Sika Technology AG sei für das Zurverfügungstellen der Dichtungsbahnen und der Schweißzusätze ebenfalls gedankt. Weiterer Dank geht an die Firma LEISTER Process Technologies für die Bereitstellung der Infrastruktur, der Schweißgeräte und der Prüfvorrichtungen für den Workshop sowie an das Süddeutsche Kunststoff-Zentrum (SKZ) für die sorgfältige Durchführung der Laborprüfungen.



**Bild 11: Überkopf-Extrusionsschweißen im Tunnel (Dichtungsbahn B – PE-LLD, Schweißzusatz B – PE-LLD) mit dem Handextruder vom Typ „Leister Weldplast S2“**

**Fig. 11: Overhead extrusion welding in the tunnel (Sealing Sheet B - PE-LLD, Welding Filler Material B - PE-LLD) with the hand-held extruder of the "Leister Weldplast S2" type**

Compared with the stipulations for sealing sheets made of PE-HD [4], the weld geometry is modified to the effect that the  $f_{NA}$  factor should be between 1.25 and 1.50 on average. In this respect, individual values may be outside this range. The background to this constriction relates to minimising not only the material input into the weld in order to thus minimise the shrinkage stresses occurring during the cooling of the welds but also the danger of the lower sealing sheet being drawn through and melted through. Furthermore, the weld width is limited to min. 25 mm (compared with 30 mm in [4]) and the maximum deviation of the centre of the weld in relation to the edge of the upper sealing sheet to 5 mm. Since the exact composition of the sealing sheets is not known to the welder and cannot be derived from the manu-

facturer designations either, the same moulding material as that of the sheet material must generally be used as the welding filler material.

The qualitative assessment of the deformation and failure behaviour of the welds must be proven by peeling tests. In the peeling test, peeling-open is permissible if a peeling resistance of min. 6 N/mm is reached.

Finally, it must be emphasised once again that hot gas extrusion welding is a welding process for which not only extensive knowledge with regard to the materials to be welded and to the handling of the machines and devices but also great skills in the execution are prerequisites. It is therefore imperative to supplement the DVS 2212-3 technical code [12] with the concerns and needs of tunnel construction and to set up an independent testing group for the welding of flexible sealing sheets on a polyolefin basis so that the welders can take a qualification test and acquire a valid qualification test certificate.

**6. Expression of thanks**

The authors thank not only the members and guests of the DVS working group AG W 4.7, "Films and Sheets", for their active support and organisation of the workshop but also the manufacturers AGRU Kunststofftechnik GmbH, Flag S.p.A., GSE Lining Technology GmbH, Naue GmbH & Co. KG and Sika Technology AG for making the sealing sheets and the welding filler materials available. Further gratitude goes to LEISTER Process Technologies for providing the infrastructure, the welding devices and the testing jigs for the workshop as well as to the Süddeutsches Kunststoffzentrum (SKZ) for carefully performing the laboratory tests.

**Literatur References**

[1] N.N.: Fügen von Dichtungsbahnen aus polymeren Werkstoffen im Erd- und Wasserbau – Schweißen, Kleben, Vulkanisieren, Richtlinie DVS 2225-1, Düsseldorf, DVS-Verlag Februar 1991.  
 [2] N.N.: Fügen von Dichtungsbahnen aus polymeren Werkstoffen im Erd- und Wasserbau – Baustellenprüfungen, Richtlinie DVS 2225-2, Düsseldorf, DVS-Verlag August 1992.  
 [3] N.N.: Fügen von Dichtungsbahnen aus polymeren Werkstoffen im Erd- und Wasserbau – Anforderungen an Schweißmaschinen und Schweißgeräte, Richtlinie DVS 2225-3, Düsseldorf, DVS-Verlag Juli 1997.  
 [4] N.N.: Schweißen von Dichtungsbahnen aus Polyethylen (PE) für die Abdichtung von Deponien und Altlasten, Richtlinie DVS 2225-4, Düsseldorf, DVS-Verlag Dezember 2006.  
 [5] N.N.: Schweißen von Dichtungsbahnen aus thermoplastischen Kunststoffen im Tunnelbau, Richtlinie DVS 2225-5, zurzeit in Erarbeitung.  
 [6] N.N.: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten, ZTV-ING, Teil 5 Tunnelbau, Abschnitt 5 Abdichtung, Bundesanstalt für Straßenwesen, Stand 12/07.  
 [7] N.N.: Richtlinie 853 - Eisenbahntunnel planen, bauen und instandhalten, DB Netz AG, Stand 01.01.2007.  
 [8] N.N.: Empfehlungen zu Dichtungssystemen im Tunnelbau (EAG-EDT), herausgegeben von der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT), Verlag Glückauf GmbH, 2005.  
 [9] N.N.: Prüfen von Fügeverbindungen an Dichtungsbahnen aus polymeren Werkstoffen - Schälversuch -, Richtlinie DVS 2226-3, Düsseldorf, DVS-Verlag Juli 1997.  
 [10] N.N.: Prüfen von Fügeverbindungen an Dichtungsbahnen aus polymeren Werkstoffen - Zeitstand-Zugversuch an Polyethylen, Richtlinie DVS 2226-4, Düsseldorf, DVS-Verlag, Juli 2000.  
 [11] N.N.: Prüfen von Fügeverbindungen an Dichtungsbahnen aus polymeren Werkstoffen - Prüfverfahren, Anforderungen -, Richtlinie DVS 2226-1, Düsseldorf, DVS-Verlag, September 2000.  
 [12] N.N.: Prüfen von Kunststoffschweißern; Prüfgruppe III; Bahnen im Erd- und Wasserbau, Richtlinie DVS 2212-3, Düsseldorf, DVS-Verlag, Oktober 1994.