

Zeitabhängiges Beulverhalten von U-Linern aus PE-HD

Time-dependent bulging behaviour in HDPE U-liners

Im Rahmen eines USA-Praxissemesters der erstgenannten Autorin an der Tulane University in New Orleans wurden im Jahr 1995 in Zusammenarbeit mit Pipe Liners, Inc. Außendruckversuche an PE-HD-Linern durchgeführt [1]. Bei diesen Versuchen sollte der maximale Beuldruck unter Variation von Randbedingungen des Liners im Altrohr (hier: Längsversatz und Ovalisierung) ermittelt werden. Außerdem war die Ermittlung des Zeitstandverhaltens der mit konstantem Außendruck beaufschlagten Versuchskörper ein wichtiges Versuchsziel. Die experimentellen Ergebnisse werden unter Verwendung der vom Zweitverfasser entwickelten nichtlinearen Theorie ausgewertet.

In the context of a practical semester spent in the USA by the first of the above-mentioned authors at Tulane University, New Orleans, La., external pressure tests were performed on HDPE liners in cooperation with Pipe Liners, Inc., during 1995 [1]. The objective of these tests was determination of maximum bulging pressure at various liner background conditions in the original pipe (in this case: longitudinal misalignment and ovalization). In addition, the determination of the creep resistance behaviour of the test objects when exposed to a constant external pressure was another important test target. The experimental results are evaluated using the non-linear theory developed by the second author.

Einleitung

Bei der Sanierung von Ver- und Entsorgungsleitungen findet im In- und Ausland das U-Linerverfahren häufige Verwendung. Der Name beruht auf der Fertigung eines PE-HD-Rohres mit einem U-förmigen Querschnitt, das einen Einbau in den Altkanal über den Schacht ohne Startbaugrube ermöglicht. Durch Beaufschlagen mit Heißdampf und Druck wird der U-Liner gegen das Altrohr gedrückt und in die Kreisform gebracht.

Für die Dimensionierung der Wanddicke von Sanierungssystemen für Leitungen der Ver- und Entsorgung wird im Allgemeinen der Lastfall Wasseraußendruck als maßgebend angenommen. Hierfür wurden in den vergangenen Jahren von verschiedenen Autoren Beulformeln entwickelt, die die Situation von Linern im Altkanal realistisch beschreiben sollen. In der englischsprachigen Literatur wird meist der Beuldruck des ungebetteten Liners durch Stützfaktoren vergrößert, die anhand von Versuchen geeicht werden, vgl. [2] bis [4]. In [5] und [6] wird ein Nachweisverfahren vorgestellt, das die Durchschlaglast des starr gebetteten ex-

akten Kreisringes zugrundelegt. Die unvermeidlichen Geometriestörungen im Altrohr (Vorverformungen und Spaltbildungen) werden durch Abminderungsfaktoren der Durchschlaglast berücksichtigt. Auf diese Weise wurden bereits zahlreiche Beulversuche an Schlauchlinern ausgewertet [7] – im vorliegenden Fall wird eine noch ausgeprägtere Abhängigkeit des Beulvorganges vom Langzeitverhalten des Werkstoffs PE-HD erwartet.

Versuche

Versuchskörper

Die U-Liner wurden in Stahlmantelrohren installiert, die die folgenden planmäßigen Geometriestörungen aufwiesen:

- Versuche 1 bis 5: Stahlmantelrohr mit Längsversatz (Kurzzeitversuche)
- Versuche 6 bis 10: Stahlmantelrohr mit ovalem Mittelteil (Kurzzeitversuche)
- Versuche 11 und 12: Stahlmantelrohr mit ovalem Mittelteil (Zeitstandversuche)

In den Versuchen 1 bis 5 mit längsversetzten Mantelrohren können unterschiedliche Setzungen an Muffenverbindungen nachgebildet werden. Hierfür wurde ein Stahlmantelrohr mit einer Gesamtlänge von 2,438 m und einem Innen-

Dipl.-Ing. Mechthild Alberding



Hamburger Stadtentwässerung;
Tel. (040) 3498-5318.

Prof. Dr.-Ing. Bernhard Falter



Fachhochschule Münster, Fachbereich Bauingenieurwesen, Lehrgebiet Baustatik und Stahlbau; Tel. (0251) 8365218. – Mitglied in VDI, DVS und ATV; Mitglied der ATV-Arbeitsgruppe Rohrstatik.

durchmesser von 202,7 mm in der Mitte getrennt, um etwa 25 mm versetzt und wieder verschweißt. Die durch den Versatz entstandenen sichelförmigen Öffnungen wurden mit Stahlplatten verschlossen. Somit entstand ein dichtes Rohr mit Versatz im Sohl- und Scheitelbereich (Bild 1).

Eine Ovalisierung ist ein bei Altleitungen häufig anzutreffender Schadensfall. Bricht das Altrohr z. B. infolge von Überbeanspruchung im Bereich der Viertelpunkte, so wird es in der Regel von der seitlichen Bettung im Boden weiterhin gestützt, so daß sich eine näherungsweise ovale Querschnittsform ausbildet (vgl. „Altrohrzustand II“ nach [6]).

Für die Versuche 6 bis 12 wurde das Stahlmantelrohr an den äußeren 1/4-Punkten geteilt. Das mittlere 1,219 m lange Rohrstück wurde oval verformt und mit den beiden kreisrunden Endstücken verschweißt (Bild 2). Die Innendurchmesser des ovalen Mittelstücks wurden näherungsweise über die Außendurchmesser durch Abzug der Wanddicke von 8,2 mm ermittelt. Der Querschnitt läßt sich damit durch eine Ellipse mit $2b = 201,6 - 2 \cdot 8,2 = 185,2$ mm und $2a = 233,7 - 2 \cdot 8,2 = 217,3$ mm beschreiben. Die vertikale

Die Autoren danken für die großzügigen Forschungsmöglichkeiten, die an der Tulane University in New Orleans und bei der Firma Pipe Liners, Inc. gewährt wurden.

Durchmesseränderung beträgt $d_{\text{Kreis}} - 2b = 201,25 - 185,2 = 16,05$ mm, auf den mittleren Radius des Liners bezogen:

$$w_{\text{GR,v}} = 16,05 / (201,25 - 8) \cdot 100 \% = 8,3 \% \approx 8 \%$$

(Index GR,v – Gelenkringvorverformung).

Im Scheitel des ovalen Rohrstücks konnte noch eine weitere Vorverformung beobachtet werden, eine kleine Delle von etwa 2,5 mm Tiefe, die sich über eine Länge von rund 150 mm erstreckte.

An die Mantelrohrenenden wurden Flansche angeschweißt (Bild 3). Zur Vorbereitung der Versuche wurde der U-Liner in das Stahlmantelrohr eingezogen und mit Hilfe von Druck und Temperatur verfahrensspezifisch zurückverformt. Nach dem Abkühlen wurden beide Linerenden mit rund 10 cm Überstand abgeschnitten, die Überstände thermomechanisch aufgeweitet und zwischen Doppelflanschen verschraubt. Dadurch entstand zwischen Liner und Stahlmantelrohr ein abgeschlossener Raum, in dem der Prüfdruck aufgebaut wurde. Das geschah bei allen Versuchen durch Beaufschlagung mit Druckluft über einen Lufteinlaßstutzen im Scheitel des Mantelrohres.

Versuchsdurchführung

Mit den beiden Versuchskörpern wurden jeweils fünf Kurzzeitversuche durchgeführt (vgl. ähnliche Versuche ohne Vorverformungen aus dem Jahr 1992 [8]), am Mantelrohr mit ovalem Mittelteil zusätzlich zwei Zeitstandversuche.

Die Kurzzeitversuche fanden an den beiden Versuchskörpern zeitgleich statt. Zunächst wurde ein Anfangsdruck von 0,7 bar aufgebracht, der nach jeweils 10 min in 0,41-bar-Schritten bis zum Versagen des U-Liners gesteigert wurde.

Die Zeitstandversuche 11 und 12 wurden auf unterschiedliche Weise durchgeführt: Beim Versuch 11 wurde während der Versuchsdauer auch die Volumenänderung des Innenraums gemessen. Hierfür wurden an den Stirnseiten der Mantelrohre zwischen zwei Dichtringen Plexiglasscheiben mit Wassereinlaß- und Auslaßöffnung eingespannt (siehe Bild 3). Vor Versuchsbeginn wurde das Rohr mit Wasser gefüllt, wobei die im Rohr befindliche Luft durch die Auslaßöffnung entweichen konnte. Nach dem Austreten von Wasser wurde die Zufuhr beendet, und die beiden Öffnungen wurden verschlossen.

Sobald das Rohr in einem klimatisierten Raum mit der Auslaßöffnung im Scheitelbereich positioniert war, wurde ein Bogenstück an der Auslaßöffnung befestigt. Das war erforderlich, damit die zu überwindende Austrittshöhe mit der Wasserspiegelhöhe im Rohr identisch ist; anderenfalls würde bei größerer Austrittshöhe ein Überdruck, bei geringerer Höhe ein Unterdruck im Rohr aufgebaut. An den Bogenstücken wurde ein Schlauch befestigt, der das bis zum Versagen des Liners austretende Wasser in einen Meßzylinder leitete.

Der Versuch 12 wurde als „trockener Versuch“ durchgeführt, der Innenraum also nicht mit Wasser gefüllt. Somit unterschied sich der Aufbau nicht von den Kurzzeitversuchen 6 bis 10.

Bild 1:
Versuche 1 bis 5, Stahlmantelrohr mit Längsversatz $v = 25$ mm
a) Ansicht, b) Skizze (Maße in mm)

Fig. 1:
Tests 1 to 5:
steel-sheathing tube with longitudinal misalignment $v = 25$ mm
a) view, b) diagram (dimensions in mm)

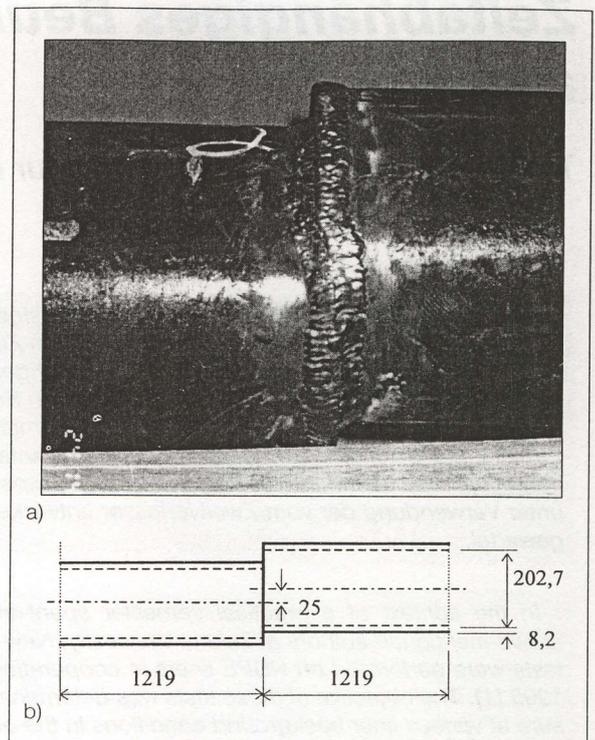


Bild 2:
Versuche 6 bis 10, Stahlmantelrohr mit ovalem Mittelteil (Maße in mm)

Fig. 2:
Tests 6 to 10:
steel-sheathing tube with oval mid-section (dimensions in mm)

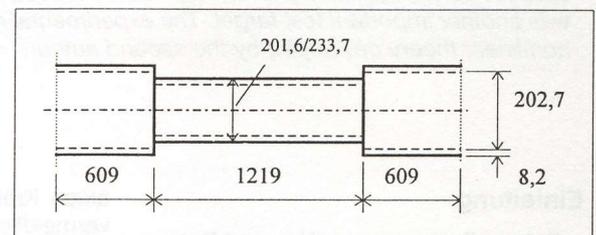
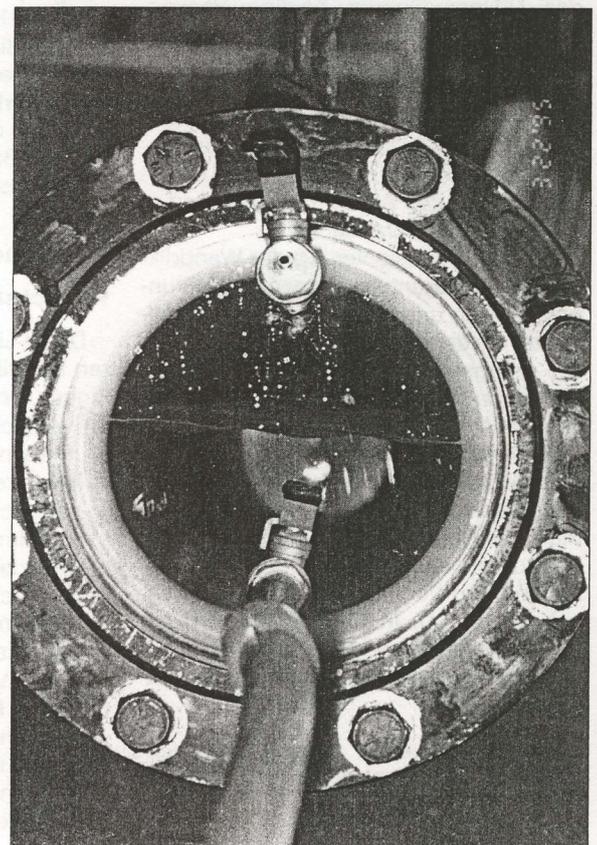


Bild 3:
Einfüllen des Wassers

Fig. 3:
Filling with water



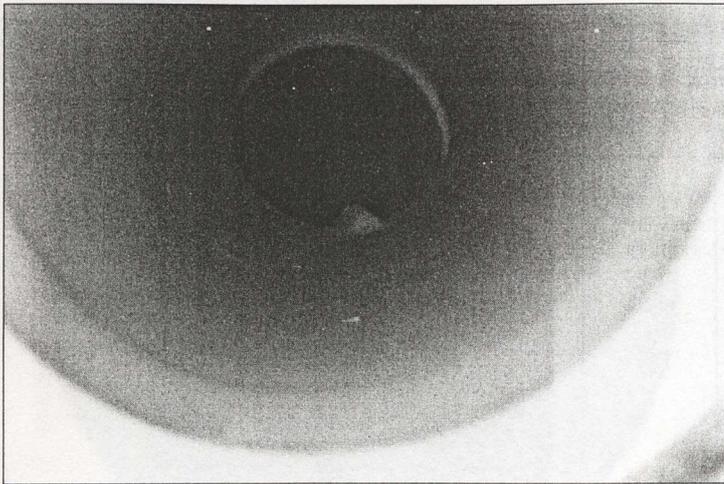


Bild 4:
Beulbeginn am
Versatz

Fig. 4:
Incipient bulging
at the cross-joint

In vier von fünf Versuchen bildete sich im Bereich der größten Rückverformung des Liners („U-Punkt“) beim Stoß der Mantelrohre eine Längsfalte aus. In einem Fall lag die Falte in einer 11 Uhr-Position zwischen Kämpfer und Scheitel. Die Falte war maximal 20 mm hoch und ragte etwa 160 mm in den höher und etwa 40 mm in den tiefer gelegenen Rohrbereich hinein.

Als Versagen wurde ein Durchschlagen bzw. Kollabieren des Liners beobachtet. Der mittlere Versagensdruck betrug 3,74 bar, die mittlere Versuchsdauer 2,9 h (Tabelle 1). Bis etwa 3 bar war keine Reaktion des Liners auf den Druckanstieg zu erkennen, es war weder eine Beule sichtbar noch vergrößerte sich die Faltenbreite oder -länge. Erst nach Überschreiten von 3 bar vergrößerte sich die vorhandene Falte (Bild 5). Bei den Versuchen 1 bis 3 schlug die Falte schließlich in den Innenraum durch.

Bei den Versuchen 4 und 5 vergrößerte sich die Falte zunächst ebenfalls im Versatz. Bei weiterer Laststeigerung entstand jedoch eine weitere Beule im tiefer gelegenen Rohrbereich, die dann durchschlug (Bild 6). Da diese Stelle mit dem „U-Punkt“ in der Sohle übereinstimmte, kann die Versagensstelle auch mit einer örtlichen Schwächung erklärt werden, zum Beispiel mit einer geringeren Wanddicke oder einem Spalt zwischen Liner und Mantelrohr.

Kurzzeitversuche 6 bis 10 (Stahlmantelrohr mit ovalem Mittelteil)

Nach der Rückverformung lag der Liner durchweg eng am Mantelrohr an (Bild 7). Im ovalen Rohrbereich kam es allerdings zur Ausbildung von kleineren, über den Umfang verteilten Beulen mit einer Höhe von maximal 3 mm und 40 bis 100 mm Länge, die durch die Abweichung von der Kreisform und hierdurch bedingte Stauungen erklärt werden können. Die örtliche Vorverformung im Scheitel des Stahlmantels („Delle“, vgl. Abschnitt „Versuchskörper“) zeichnete sich auch am Liner ab.

Der Versagensdruck betrug im Mittel 2,08 bar, Einzelergebnisse sind in Tabelle 2 wiedergegeben. In den Versuchen 6 bis 8 sowie 10 versagte der Liner an der Stelle der größten Vorverformung, also im Scheitelpunkt. Nur im Versuch 9 beulte der Liner im Sohlbereich, wo bei allen Versuchen der „U-Punkt“ lag.

Zeitstandversuche 11 und 12 (Stahlmantelrohr mit ovalem Mittelteil)

Ähnlich dem Zeitstandinnendruckversuch für Druckleitungen aus kriechfähigen Werkstoffen müssen auch Außendruckversuche an Linern mit konstantem Druck und damit konstanter Spannung in

Versuch	Versagensdruck	Versuchsdauer	Temperatur
	psi / bar		
		h	F / °C
1	54 / 3,80	3,01	66 / 19
2	54 / 3,80	2,83	75 / 24
3	54 / 3,80	3,00	70 / 21
4	48 / 3,37	2,50	78 / 26
5	56 / 3,94	3,16	74 / 23
Mittelwert	53,2 / 3,74	2,90	
Standardabweichung	2,71 / 0,19	0,23	

Tabelle 1: Ergebnisse der Kurzzeitversuche 1 bis 5 (Versatz)

Table 1: Results of short-time tests 1 to 5 (cross-joint)

Versuchsergebnisse

Kurzzeitversuche 1 bis 5 (Stahlmantelrohr mit Versatz)

Im Bereich des um 25 mm versetzten Rohrstoßes wird der vertikale Durchmesser um ebenfalls 25 mm verringert, wo-

durch bei der Rückverformung des Liners ein Materialüberschuß entsteht. Der Liner wurde während der Installation durch den Rückverformungsdruck an die Rohrwand gepreßt und lag deshalb nahezu am gesamten Umfang des Versatzes eng an.

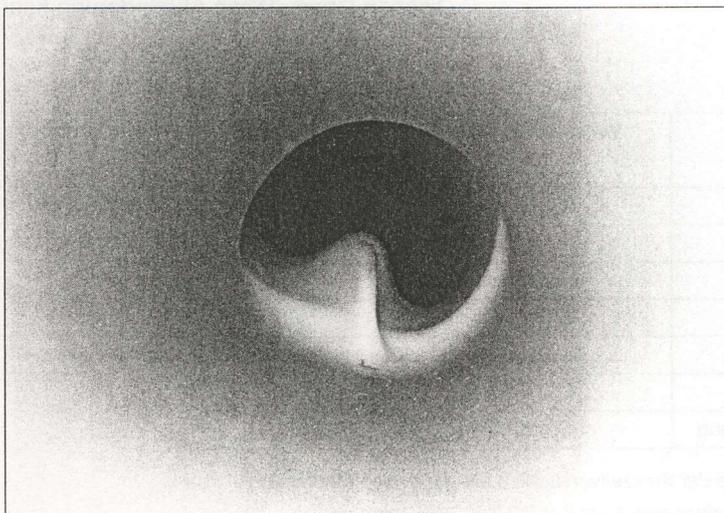


Bild 5:
Durchschlagen
des Liners im
Bereich der Falte
(Versuche 1 bis 3)

Fig. 5:
Failure of the liner
at the fold (tests 1
to 3)

der Wand durchgeführt werden. Nur anhand von Versuchen über längere Zeiträume ist eine sichere Beurteilung des Durchschlagverhaltens bei Wasseraußendruck möglich. Beim Versuch 11 (erster Zeitstandversuch) wurde der Druck von zunächst 1,34 bar, nach einem Druckabfall 1,26 bar, über rund 120 h gehalten, bis der U-Liner kollabierte. Die dabei gemessenen Volumenänderungen sind aus Tabelle 3 zu entnehmen.

Im Versuch 12 mit ungefähr gleichem Prüfdruck versagte der Liner schon nach rund 68 h (Tabelle 4). Eine mögliche Ursache für das frühere Versagen könnte die fehlende Wasserfüllung sein, obgleich sie keinen nennenswerten rechnerischen Gegendruck bewirkt.

Durchschlagen von Linern unter Außendruck

Durchschlaglast des ideal kreisrunden Liners ohne Spalt

Für die Versuchsauswertung wird der im Altrohr ideal gebettete Liner zugrunde gelegt, Altrohr und Liner sind also exakt kreisrund und ohne Ringspalt. Die kritische Last für diesen Fall ist nach [5]:

$$\text{krit } p_a = \alpha_D \cdot S_L \tag{1a}$$

mit dem Durchschlagbeiwert

$$\alpha_D = 2,62 \cdot \left(\frac{r_L}{s_L}\right)^{0,8} \text{ und} \tag{1b}$$

der Rohrsteifigkeit des Liners mit beliebigem

$$\text{Wandquerschnitt } S_L = \frac{(E/L)_L}{r_L^3} \tag{1c}$$

bzw. des glattwandigen Liners

$$S_L = \frac{E_L}{12 \cdot (1 - \mu^2)} \cdot \left(\frac{s_L}{r_L}\right)^3 \tag{1d}$$

Der Index L wird zur Kennzeichnung von Größen des Liners verwendet. Der Faktor $1/(1 - \mu^2)$ in Gleichung (1d) berücksichtigt die Behinderung der Querkontraktion, die bei Standsicherheitsnachweisen auf der sicheren Seite vernachlässigt (vgl. ATV-Arbeitsblatt A 127), bei Nachrechnungen von Beulversuchen jedoch angesetzt wird.

Die Beulfigur ist einwellig, das heißt, nach Überschreiten von $\text{krit } p_a$ springt eine Einzelbeule in das Rohrinne und schlägt bei unvermindertem Prüfdruck bis zur gegenüberliegenden Rohrwand durch (siehe Bilder 4 bis 6).

Liner mit ovalem Mantelrohr

Berücksichtigung der Ovalisierung durch Radiusvergrößerung

Zu Vergleichen mit der Literatur wird der ovale Querschnitt des U-Liners bei den Versuchen 6 bis 12 zunächst als Ersatzkreis mit dem maximalen Krümmungsradius $\text{max } r$ betrachtet (Bild 8).

Bild 6: Durchschlagen des Liners hinter dem Versatz (Versuche 4 und 5)

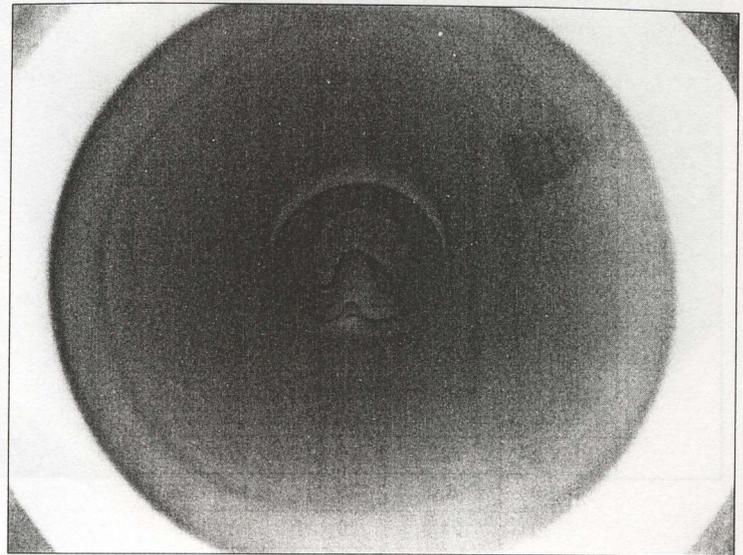


Fig. 6: Failure of the liner behind the cross-joint (tests 4 and 5)

Bild 7: U-Liner im ovalen Stahlmantelrohr

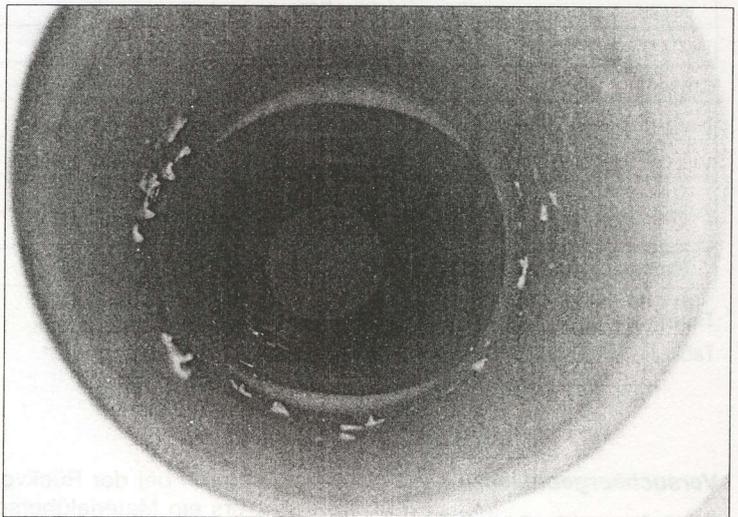


Fig. 7: U-liner in an oval steel-sheathing pipe

Der maximale Krümmungsradius einer Ellipse mit den Halbachsen $a = r_L \cdot (1 + \delta_v)$ und $b = r_L \cdot (1 - \delta_v)$ beträgt

$$\text{max } r = \frac{a^2}{b} = r_L \cdot \frac{(1 + \delta_v)^2}{1 - \delta_v} \tag{2}$$

mit δ_v = relative vertikale Durchmesseränderung, Bezeichnung nach ATV-A 127

Wird $\text{max } r$ anstelle von r_L in Gleichung (1a, b und d) eingesetzt, so ergibt sich die abgeminderte Durchschlaglast des elliptischen Liners. Diese Abminderung kann

Versuch	Versagensdruck psi / bar	Versuchsdauer h	Temperatur F / °C
6	30 / 2,11	1,01	66 / 19
7	32 / 2,25	1,00	75 / 24
8	30 / 2,11	1,00	70 / 21
9	28 / 1,97	0,83	78 / 26
10	28 / 1,97	0,83	74 / 23
Mittelwert	29,6 / 2,08	0,93	
Standardabweichung	1,50 / 0,10	0,08	

Tabelle 2: Ergebnisse der Kurzzeitversuche 6 bis 10 (ovales Mantelrohr)

Table 2: Results of short-time tests 6 to 10 (oval sheathing pipe)

Datum	Uhrzeit	Dauer t h	Temperatur F / °C	Prüfdruck psi / bar	Auslaufvolumen ml	Σ Auslaufvolumen ml	Volumenänderung %
29.6.95	10:27	-	71 / 22	10 / 0,70	231	231	0,36
	10:37	0,2	71 / 22	16 / 1,12	218	449	0,69
	10:57	0,5	70 / 21	19 / 1,34	230	679	1,04
	11:17	0,8	70 / 21	19 / 1,34	72	751	1,15
	11:47	1,3	70 / 21	19 / 1,34	77	828	1,27
	12:15	1,8	70 / 21	19 / 1,34	55	883	1,35
	12:45	2,3	70 / 21	19 / 1,34	37	920	1,41
	13:50	3,4	70 / 21	19 / 1,34	60	980	1,50
	14:50	4,4	70 / 21	19 / 1,34	46	1026	1,57
	15:50	5,5	70 / 21	19 / 1,34	31	1057	1,62
	16:30	6,0	70 / 21	19 / 1,34	16	1073	1,65
30.06.95	10:30	24,0	70 / 21	18 / 1,26	185	1258	1,93
01.07.95	15:45	53,2	69 / 20,5	18 / 1,26	163	1421	2,18
02.07.95	15:00	76,5	68 / 20	18 / 1,26	101	1522	2,34
03.07.95	9:30	95,0	68 / 20	18 / 1,26	186	1708	2,62
04.07.95	10:00	119,5	69 / 20,5	18 / 1,26	Versagen		

Anmerkung: Die Stützstellen für die Auswertungen in Tabelle 6 sind fett gedruckt.

Tabelle 3: Protokoll des Versuchs 11 (Zeitstandversuch am Liner mit ovalem Mantelrohr)

Table 3: Record of test 11 (creep resistance test on a liner with an oval sheathing pipe)

auch mit Hilfe des Faktors κ_{ev} ausgedrückt werden:

$$\kappa_{ev} = \frac{\text{krit } p_a(\max r)}{\text{krit } p_a(r_L)} = \left(\frac{r_L}{\max r}\right)^{2,2} = \left(\frac{1 - \delta_v}{(1 + \delta_v)^2}\right)^{2,2} \quad (3)$$

Für die in den Versuchen 6 bis 12 verwendeten Mantelrohre mit $\delta_v = 8\%$ Ovalisierung beträgt der nach Gleichung (3) ermittelte Abminderungsfaktor $\kappa_{ev} = 0,59^{1)}$.

Die Abminderung der Durchschlaglast mit κ_{ev} nach Gleichung (3) ist jedoch unbefriedigend, da

1. die Ellipse gegenüber dem Ersatzkreis einen kleineren Umfang und damit eine geringere Dehnfähigkeit hat (was jedoch in Gleichung (3) unberücksichtigt bleibt) und
2. die in [6] festgestellte Abhängigkeit der Abminderungsfaktoren κ vom Radius-Wanddicken-Verhältnis durch Gleichung (3) nicht wiedergegeben wird.

¹⁾ In der Literatur sind für κ_{ev} abweichende Gleichungen angegeben. Zum Beispiel wird in [9] für Gleichung (3) der Exponent 3 statt 2,2 gesetzt, woraus $\kappa_{ev} = 0,49$ folgt.

Datum	Uhrzeit	Dauer t h	Temperatur F / °C	Prüfdruck psi / bar	Beobachtung
24.07.95	13:48	-	74 / 23	0	-
	13:50	0,03	74 / 23	10 / 0,70	leichtes Knacken
	14:00	0,2	74 / 23	16 / 1,12	Knacken
	14:10	0,4	74 / 23	19 / 1,34	Knacken
25.07.95	09:00	19,2	70 / 21	18 / 1,26	auffällige Beule im ovalen Bereich
26.07.95	07:20	41,5	71 / 22	17 / 1,20	ausgeprägte Verformungen im Scheitel und in der Sohle
27.07.95	10:00	68,2	71 / 22	17 / 1,20	Versagen im Scheitel

Tabelle 4: Protokoll des Versuchs 12 (Zeitstandversuch am Liner mit ovalem Mantelrohr)

Table 4: Record of test 12 (creep resistance test on a liner with an oval sheathing pipe)

Abminderung der Durchschlaglast für Liner bei ovalem Mantelrohr

Zur genaueren Berücksichtigung der ovalen Vorverformung wurden daher mit dem Programm LINERB [12] systematische Berechnungen für vierfach längs gerissene Althrore („Althrohzustand II“) durchgeführt und die Ergebnisse in Abminderungsfaktoren $\kappa_{GR,v}$ umgerechnet. Diese Faktoren sind erwartungsgemäß vom Radius-Wanddicken-Verhältnis r_L/s_L abhängig. Aus Bild 9 folgt anschaulich, daß die Durchschlaglasten dünnwandiger ovaler Liner stärker abgemindert werden als die dickwandiger ovaler Liner.

Bei der Versuchsauswertung spielen weitere weniger gut erfaßbare Parameter eine Rolle, nämlich Wanddickenstreuungen über den Umfang und gegebenenfalls örtliche Vorverformungen. Vereinfachend wird im folgenden die mittlere Wanddicke verwendet. Da die örtliche Vorverformung („Delle“, siehe oben) in der Rohrlängsrichtung begrenzt ist, kann sie wegen der günstigen räumlichen Lastabtragung näherungsweise vernachlässigt werden.

Abminderung der Durchschlaglast bei Spaltbildung zwischen Mantel und Liner

Zusätzlich zu Vorverformungen haben Spaltbildungen zwischen Liner und Mantelrohr eine abmindernde Wirkung auf die Durchschlaglast. Mit der wellenförmigen Rückverformung des Liners zum Beispiel im ovalen Rohrbereich entstehen Hohlräume, die zu einem resultierenden Ringspalt von näherungsweise $w_s = 2$ mm zusammengefaßt werden. Für $r_L/s_L = 12$ beträgt nach [6] der zugehörige Abminderungsfaktor $\kappa_s = 0,75$ (angenommen für alle Versuche).

Durchschlaglast für imperfekte Liner (ovales Mantelrohr und Spaltbildung)

Mit den im vorhergehenden vorgestellten Abminderungen für ovale Mantelroh-

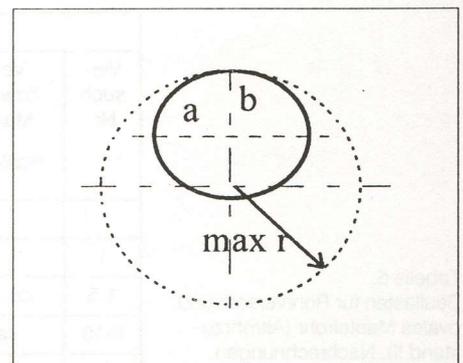


Bild 8: Oval verformter Liner, Ersatzkreis mit max r

Fig. 8: Oval-deformed liner, equivalent circle with max r

re und Spaltbildung folgt die Durchschlaglast imperfekter Liner zu

$$p_{a,krit} \approx \kappa_{GR,v} \cdot \kappa_s \cdot \alpha_D \cdot S_L(t) \quad (4)$$

Gleichung (4) liegt wegen der multiplikativen Verknüpfung der beiden Abminderungsfaktoren auf der sicheren Seite, wie gesonderte Berechnungen gezeigt haben.

Werkstoffkennwerte

Für die Auswertung der Versuchsergebnisse ist die möglichst genaue Kenntnis des Biegekrechmoduls $E(t)$ von großer Bedeutung.

Der Kurzzeit-Elastizitätsmodul wurde an Proben des für die Versuche in den USA verwendeten PE-HD-Werkstoffs mit 3-Punkt-Biegeversuchen ermittelt [10]; er betrug mit rund 460 N/mm² nur etwa 60 % des Wertes für PE-HD-Werkstoffe nach DIN 8074/8075. Das für die Beulversuche in den USA verwendete Material hatte nach Angaben der Herstellerfirma Quail eine Dichte von 0,947 g/cm³. Überprüfungen an einer Probe ergaben mit 0,96 g/cm³ einen für den Werkstoff Hostalen GM 5010 T2 typischen Wert [10].

Für die Ermittlung des maßgebenden Biegekrechmoduls wird wie folgt vorgegangen: Aus der Versuchsbelastung $p_a = \text{const}$ ergibt sich mit der Kesselformel zunächst die Umfangsspannung in der Linerwand zu

$$\sigma = \frac{p_a \cdot r_L}{s_L} \quad (5)$$

Wird aus dem Zeit-Dehnungs-Diagramm für Hostalen GM 5010 T2 [11] die zeit- und spannungsabhängige Dehnung $\epsilon(t)$ abgelesen, so folgt der Biegekrechmodul des genormten Werkstoffs

$$E(t) = \frac{\sigma}{\epsilon(t)} \quad (6)$$

Der Biegekrechmodul des Versuchswerkstoffs wird näherungsweise durch proportionale Abminderung mit dem Quotienten aus den Kurzzeit-E-Moduln zu

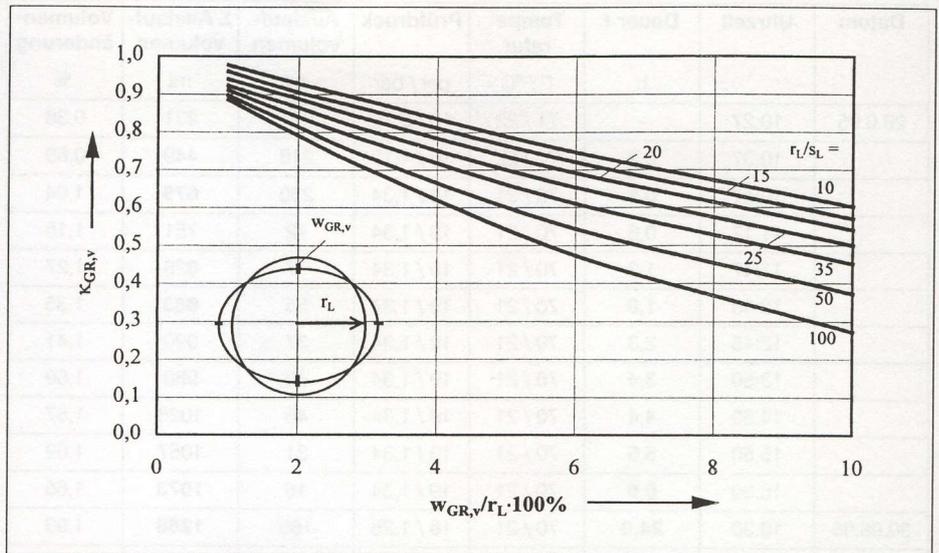


Bild 9: Abminderungsfaktor $\kappa_{GR,v}$ für Gelenkringvorverformungen (ovale Vorverformung)
Fig. 9: Reduction factor $\kappa_{GR,v}$ for floating ring deformations (oval pre-deformation)

$$E_{U-Liner}(t) \approx E(t) \cdot \frac{460}{800} \quad (7)$$

berechnet, wobei der Kurzzeit-E-Modul des U-Liners 460 N/mm² und der des genormten Werkstoffs 800 N/mm² beträgt. Die Rohrsteifigkeit des Liners $S_L(t)$ kann nun mit Gleichung (7) und dem Biegekrechmodul aus Gleichung (1d) berechnet werden, wobei $\mu \approx 0,4$ einzusetzen ist.

Auswertung der Versuche

Berechnungsergebnisse für die Versuche 1 bis 12 und Vergleiche

Für Tragsicherheitsnachweise sind die Mindest- oder Fraktilwerte zum Beispiel aus Verfahrensprüfungen und die Nennfestigkeiten maßgebend.

Bei Versuchsauswertungen müssen dagegen die tatsächlich vorhandenen

Größen verwendet werden. Bei den Wanddicken ist dies der Mittelwert der Meßgrößen, die in [1], Anhang C, an 13 Stellen des Linerumfangs angegeben sind (Tabelle 5, Spalte 5). Der Linerradius wird einheitlich mit $r_L = (d_i - s_L)/2 = (202,7 - 8)/2 \approx 97$ mm angesetzt.

Zur Ablesung der Abminderungsfaktoren für ovale Vorverformungen und für Spaltbildung ist ein einheitliches Radius-Wanddickenverhältnis $r_L/s_L = 97/8,1 \approx 12$ genügend genau. Zur Auswertung der Versuche 1 bis 5 sowie 6 bis 10 dienen die Mittelwerte der jeweils fünf Einzelwerte, da die Parameter und Durchschlaglasten nur wenig streuen [1]. Alle Versuche werden mit den Kriechmoduln des Linerwerkstoffs, die zur Standzeit des Versuchs bis zum Versagen gehören, ausgewertet (Tabelle 5, Spalte 6).



Tabelle 5: Beullasten für Rohrversatz und ovales Mantelrohr (Altrhrzustand II), Nachrechnungen

Table 5: Bulging loads for pipe cross-joint and oval sheathing pipe (old pipe state II), re-calculations

Versuche [1]				Berechnungen [12]					
Versuch Nr.	Versatz v bzw. ovales Mantelrohr $w_{GR,v}/r_L \cdot 100$	Standzeit t	Durchschlaglast p_{Test}	Wanddicke s_L	Kriechmodul $E(t)$	Abminderungsfaktoren		theoret. Durchschlaglast krit $p_{a,v,s}$	Vergleich $\frac{p_{Test}}{\text{krit } p_{a,v,s}}$
						κ_s	$\kappa_{GR,v}$		
	–	h	kN/m ²	mm	N/mm ²	–	–	kN/m ²	–
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10 = 4/9
1-5	ca. 25 mm	2,9	374 ¹⁾	8,18	272	0,75	1	230	1,63
6-10	ca. 8 %	0,93	208	8,14	369	0,75	0,66	204	1,02
11	ca. 8 %	119,5	126	8,1 ²⁾	228	0,75	0,66	121	1,04
12	ca. 8 %	68,2	120	8,1 ²⁾	267	0,75	0,66	142	0,85

¹⁾ Ein weiterer Versuch mit dem verminderten Prüfdruck 246 kN/m² ergab mehr als 500 h Standzeit.
²⁾ Schätzwerte in Anlehnung an die Versuche 1 bis 10

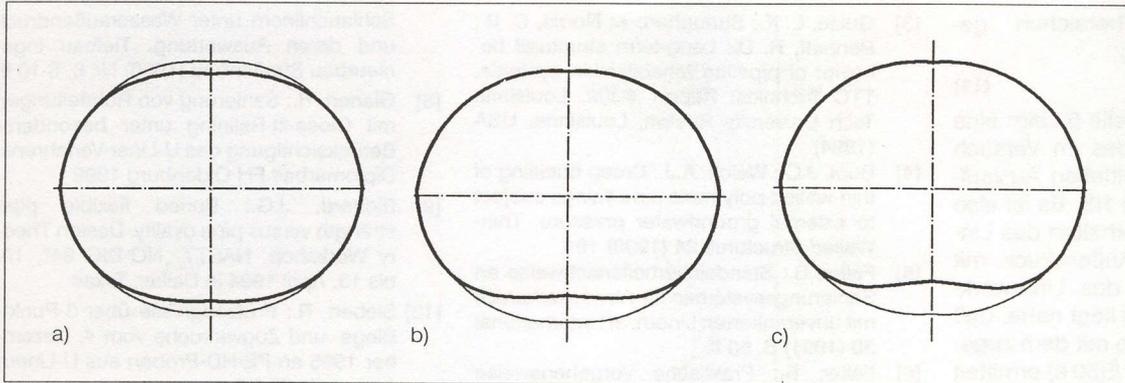


Bild 10:
Biegelinie des Liners für
a) $t = 0,5 \text{ h}$, b) $t = 6 \text{ h}$, c)
 $t = 53,2 \text{ h}$

Fig. 10:
Bending curve of the liner
for a) $t = 0.5 \text{ h}$, b) $t = 6 \text{ h}$
and c) $t = 53.2 \text{ h}$

Versuch (Tab. 3)			Berechnungen [12]							
Prüfzeit t h	Prüfdruck p_0 kN/m ²	Auslaufvolumen ΣV ml	$E(t)$ N/mm ²	Verformung w_0 mm	Winkel φ_0 °	Verformung w_u mm	Winkel φ_u °	Gesamtfläche ΣA mm ²	Auslaufvolumen ΣV ml	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
0,5	134	679	394	8,75	70	4,56	60	282	550	
1,8	134	883	347	9,56	70	5,28	60	452	882	
6	134	1073	300	19,35	50	3,13	25	552	1080	
24	126	1258	263	21,44	50	3,48	20	717	1398	
53,2	126	1421	248	0,27	25	23,45	50	781	1523	
76,5	126	1522	235	Versagen laut Berechnung						
95	126	1708	228							
119,5	126	Versagen	223							

Tabelle 6: Berechnung des während des Versuchs 11 verdrängten Wasservolumens

Table 6: Calculation of the volume of water displaced during test 11

Der Rohrversatz vergrößert die Durchschlaglasten sogar, die quer zur Rohrachse verlaufende Falte stellt also eine Versteifung der Linerwand dar (Tabelle 5). Dagegen führt ein ovales Altrrohr (etwa Zustand II) zu einer deutlichen Verminderung der Durchschlaglasten. Die für die Versuche 6 bis 12 mit $w_{GR,V} = 8 \%$ und $w_s = 2 \%$ ermittelten kritischen Lasten stimmen gut mit den Durchschlaglasten der Versuche überein (Tabelle 5, Spalten 4, 9 und 10).

Nachrechnung des im Versuch 11 verdrängten Wasservolumens

Bei Verwendung der zeitabhängigen Elastizitätsmoduln ist eine Nachrechnung der Versuche mit einem nichtlinearen Verfahren [12] und damit die Ermittlung des verdrängten Wasservolumens $\Sigma V(t)$ möglich. Hierzu wird die jeweilige Biegelinie des Liners durch einfache Funktionen $w(\varphi)$ angenähert und deren Flächeninhalt ermittelt. Die Scheitelbiegelinie wird entsprechend [6] wie folgt beschrieben:

$$w_0(\varphi) = \max w_0 \cdot \left[\cos\left(\frac{\pi \cdot \varphi}{2\varphi_0}\right) \right]^2 \quad (8)$$

mit $\max w_0$ und φ_0 aus Bild 10.

Die Integration der Scheitelverformungen ergibt

$$A_0 = \int_{-\varphi_0}^{\varphi_0} w_0(\varphi) \cdot r_L \cdot d\varphi = \max w_0 \cdot r_L \cdot \varphi_0 \quad (9)$$

Die Gesamtfläche ΣA ist gleich der Summe der Flächen der Scheitel- und Sohlverformungen, von denen die Fläche des Ringspaltes w_s abzuziehen ist, da dieser keine Wasserverdrängung verursacht:

$$\Sigma A = A_0 + A_u - A_s = r_L \cdot (\max w_0 \cdot \varphi_0 + \max w_u \cdot \varphi_u) - w_s \cdot 2r_L \cdot \pi \quad (10)$$

Das verdrängte Wasservolumen ergibt sich durch Multiplikation von ΣA mit der Rohrlänge $l_R = 2,438 \text{ m}$, wobei ein Korrekturfaktor 0,8 zur Berücksichtigung der Einspannung an den Enden und der etwas geringeren Verformungen in den

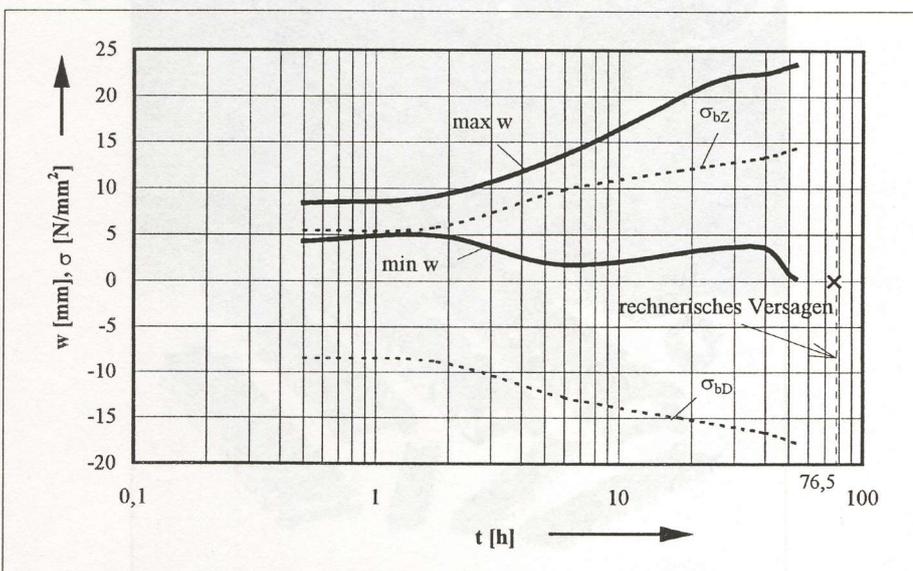


Bild 11: Zeitabhängige Verformungen und Spannungen (Nachrechnungen für Versuch 11)

Fig. 11: Time-dependent deformations and stresses (re-calculations for Test 11)

kreisrunden Mantelrohrbereichen geschätzt wird (siehe Bild 2):

$$\Sigma V = \Sigma A \cdot l_R \cdot 0,8. \quad (11)$$

Die Auswertung in Tabelle 6 zeigt eine gute Übereinstimmung des im Versuch und des theoretisch ermittelten Auslaufvolumens (Spalten 3 und 10). Es ist also möglich, das Zeitstandverhalten des Liners unter konstantem Außendruck mit den Kriechmoduln $E(t)$ des Linerwerkstoffs nachzurechnen. Es liegt nahe, daß das Versagen für 50 Jahre mit dem zugehörigen Langzeitmodul $E(50 \text{ a})$ ermittelt werden muß.

Zeitabhängige Verschiebungen und Spannungen im Versuch 11

Durch Messen des verdrängten Wasservolumens kann nicht direkt auf die zeitabhängigen Scheitel- und Sohlverformungen w_o und w_u geschlossen werden. Diese Größen werden deshalb für konstanten Außendruck $p_0 = 126 \text{ kN/m}^2$ mit Hilfe des Kriechmoduls $E(t)$ rechnerisch ermittelt und über t aufgetragen (Bild 11). Zusätzlich werden die maximalen Biegezug- und Druckspannungen des Liners angegeben.

Bild 11 zeigt die auch in [4] beobachtete Tendenz, daß die Scheitel- und Sohlverformungen zunächst relativ ähnlich sind und gemeinsam anwachsen. Mit zunehmender Dauer verkleinert sich dann allerdings eine der beiden Beulen, während die gegenüberliegende Beule weiter anwächst und schließlich durchschlägt, vgl. auch die Biegelinien in Bild 10.

Schlußbemerkung

Die vorgestellten Beulversuche an Linern aus einem Werkstoff mit hoher Kriechneigung haben das in Deutschland übliche Vorgehen bestätigt, Stabilitätsnachweise mit dem Langzeit-E-Modul zu führen. Bei Versätzen der Altleitung zeigt sich ein relativ „gutmütiges“ Beulverhalten. Dagegen müssen Vorverformungen, die sich über eine größere Rohrlänge erstrecken (Ovalisierungen) sowie Spaltbildungen zwischen Liner und Mantelrohr mit deutlichen Abminderungen der Durchschlaglast berücksichtigt werden. Die theoretisch ermittelten Abminderungsfaktoren konnten durch die Versuche bestätigt werden.

Literatur

- [1] Alberding, M.: Beuluntersuchungen an vorverformten Linern aus PE-HD für Abwasserkanäle. Diplomarbeit FH Oldenburg 1996
- [2] McAlpine, G.: Ovality limitations in pipe rehabilitation design. Design Theory Workshop NASTT „NO-DIG 94“ 10. bis 13. April 1994 in Dallas, Texas

- [3] Guice, L. K.; Straughan, T.; Norris, C. R.; Bennett, R. D.: Long-term structural behavior of pipeline rehabilitation systems. TTC Technical Report #302, Louisiana Tech University Ruston, Louisiana, USA (1994)
- [4] Boot, J.C.; Welch, A.J.: Creep buckling of thin-walled polymeric pipe linings subject to external groundwater pressure. Thin-Walled Structures 24 (1996) 191
- [5] Falter, B.: Standsicherheitsnachweise an Sanierungssystemen für Abwasserkanäle mit unverankerten Linern. 3R international 30 (1991) S. 50 ff.
- [6] Falter, B.: Praktische Vorgehensweise beim Standsicherheitsnachweis für Linersysteme in Abwasserkanälen. Tiefbau Ingenieurbau Straßenbau (1994) Nr. 9, S. 13 ff.
- [7] Falter, B.; Lanvers, D.; Liebendahl, J.: Bericht über deutsche und amerikanische Kurz- und Langzeitbeulversuche an Schlauchlinern unter Wasseraußendruck und deren Auswertung. Tiefbau Ingenieurbau Straßenbau (1996) Nr. 6, S 10 ff.
- [8] Glanert, R.: Sanierung von Rohrleitungen mit Close-fit-Relining unter besonderer Berücksichtigung des U-Liner-Verfahrens. Diplomarbeit FH Oldenburg 1992
- [9] Richard, J.G.: Buried flexible pipe strength versus pipe ovality. Design Theory Workshop. NASTT „NO-DIG 94“, 10. bis 13. April 1994 in Dallas, Texas
- [10] Siebert, R.: Prüfzeugnisse über 3-Punkt-Biege- und Zugversuche vom 4. Dezember 1995 an PE-HD-Proben aus U-Linern (unveröffentlicht)
- [11] Hoechst AG: Berechnung von Kunststoffrohren aus Hostalen für die Sanierung von Rohrleitungen durch Relining. Firmenschrift Oktober 1982
- [12] Falter, B.: Programm LINERB 4.8, Programmbeschreibung. FH Münster 1997



PLITEC

**PLITEC LINK-SEAL
RINGRAUMDICHTUNGEN**

- DRUCKDICHTE ABDICHTUNG
- EINFACHE MONTAGE
- NACHTRÄGLICHER EINBAU

PLITEC GMBH · GLÜCK-AUF-WEG 9 · D-57482 WENDEN
TELEFON 0 27 62/93 00-0 · TELEFAX 0 27 62/93 00-90