

Key words:
Telekommunikationskabel, Sanierung von Abwasserkanälen, Standsicherheit, Beulen, Spannungen, Verformungen

BERNHARD FALTER *
ANDRZEJ KOLONKO **

SANIERUNG VON KANÄLEN MIT IM SCHEITEL BEFESTIGTEN TELEKOMMUNIKATIONSKABELN

Statische Berechnungen von Linern zur Sanierung von Abwasserkanälen und -leitungen werden in Deutschland nach dem Merkblatt ATV-M 127-2 durchgeführt. Hierfür ist der Zustand der Altleitung durch die Altrohrzustände I, II und III zu beschreiben, die für die anzusetzenden Belastungen und Imperfektionen maßgebend sind. Für den in der Praxis bedeutsamen Fall einer Störung der Kreisgeometrie (oder der Geometrie des Eiquerschnitts) durch eingebaute Telekommunikationskabel existiert noch keine gesonderte Berechnungsvorschrift. Im folgenden werden hierfür auf der Grundlage der Vorgehensweise in ATV-M 127-2 und unter Berücksichtigung von Verfahrensprüfungen Nachweismöglichkeiten fortentwickelt und Vergleichsrechnungen diskutiert. Die Untersuchungen beschränken sich auf den Altrohrzustand I (keine Längsrisse), da dieser Fall für den Einbau von Kabeln eher geeignet ist.

1. EINLEITUNG

Bei der Sanierung von Kanälen, in deren Scheitel ein Telekommunikationskabel oder ein Kabelbündel nach Bild 1 eingebaut wird, sind gesonderte Untersuchungen zur Belastung des Liners und des Kabels erforderlich.

Erste Vergleichsrechnungen und Versuche hierzu sind in [2] und [3] wiedergegeben. Ziel ist eine Erweiterung der im Merkblatt ATV-M 127-2 [1] vorgegebenen Vorgehensweise auf das Problem des durch Wasseraußen- druck belasteten Liners mit im Scheitel konzentrierten Geometriestörungen.

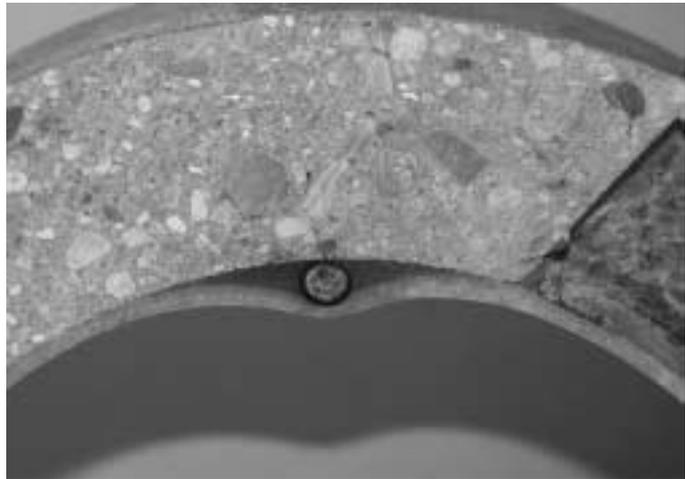


Bild 1 Betonrohr DN 300 mit Kabel, durch Liner saniert
(aus [2])

* Fachbereich Bauingenieurwesen, University of Applied Sciences Münster, PF 3020, 48016 Münster, Germany
** Instytut inżynierii ładowej, Politechniki Wrocławskiej, Wybrzeże Wyspińskiego 27, 50-370 Wrocław, Poland

2. SYSTEM

2.1. GEOMETRIE

2.1.1. LINER MIT KABEL

Die örtliche Störung der kreisrunden Linergeometrie im Altrohrscheitel kann durch die folgende Gleichung beschrieben werden:

$$w_v(\varphi) = h_K \cdot \cos^2\left(\frac{\varphi \cdot \pi}{\varphi_K}\right) \quad (1)$$

gültig für $-\varphi_K / 2 \leq \varphi \leq +\varphi_K / 2$

mit h_K = Höhe der Störung (= Durchmesser des Kabels)

φ_K = Öffnungswinkel des Kabelbereichs

In [3] wird der gestörte Bereich durch die Breite b_K beschrieben. Der Winkel φ_K in Gl. (1) ergibt sich hieraus wie folgt:

$$\varphi_K = \frac{360}{\pi} \cdot \frac{b_K}{d_{a,L}} \quad (2)$$

mit $d_{a,L}$ = Außendurchmesser des Liners (in der Regel Nennweite des Altrohres)

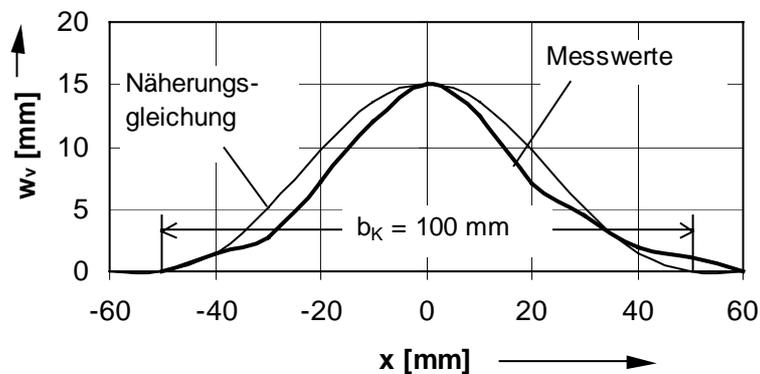


Bild 2 Vorverformung des Liners (Messungen an DN 250 in [3]), Näherung durch Gleichung (1)

2.1.2. WANDDICKEN

Die Wanddicken sind im Bereich der Vorverformung durch das Kabel nicht konstant, vgl. z. B. Bild 1. Messungen in [3] an einem Liner aus Synthesfaserlaminat der Nennweite DN 250 haben eine Wanddickenverteilung nach Bild 3 ergeben.

Es kann sinnvoll sein, das verwendete Berechnungsmodell um den Einfluss einer *veränderlichen* Wanddicke zu erweitern, statt die kleinste Wanddicke nachzuweisen, vgl. [3].

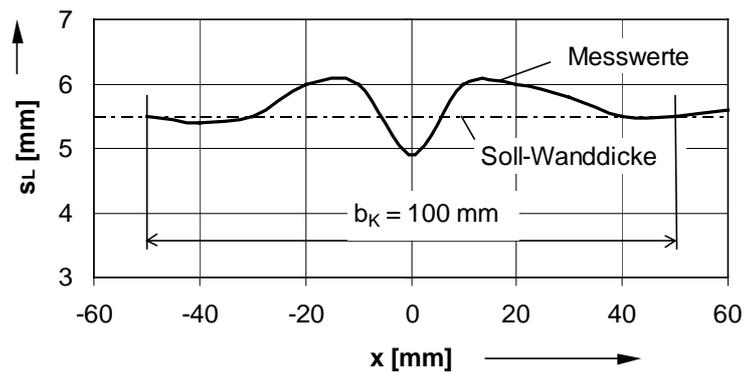


Bild 3 Verteilung der Linerwanddicke im Bereich der Störung durch das Kabel [3]

2.2. BELASTUNG

2.2.1. LINER

Die Belastung des Liners ist von dem in [1] definierten Altrohrzustand abhängig, vgl. Tabelle 1.

Tab. 1 Belastungen des Liners, erforderliche Sicherheitsfaktoren nach [1]

Altrohrzustand	Wasserdruck p_a		Erddruck- und Verkehrslasten	Sicherheitsfaktor erf γ
	Grundwasser über Linersohle	alternativ: Ersatzlast		
I	h_w	1,5 m oder DN + 0,1 m	-	2,0
II				
III				
örtliche Schäden				
			$p_E = 0,75 \cdot \gamma_b \cdot h,$ p_V	2,0 für p_a 1,5 für p_E, p_V

Die Ersatzlast soll eine ausreichende Mindeststeifigkeit des Liners gewährleisten. In den weiteren Untersuchungen erfolgt eine Beschränkung auf den Altrohrzustand I, also auf rissefreie Altrohre.

2.2.2. KABEL

Die Belastbarkeit von Glasfaserkabeln in Querrichtung ist auf 200 N/cm beschränkt, vgl. Tabelle 1 in [3]. Dort durchgeführte Überschlagsrechnungen und Versuche haben gezeigt, dass auch bei Inversionsdrücken von 0,6 bis 0,8 bar eine Überbeanspruchung des Kabels beim Einziehen und Aushärten des Liners ausgeschlossen ist.

Die thermische Belastung der Kabel ist bei einer Wasserhärtung (max. ca. 70°C) deutlich geringer als bei einer Aushärtung mit UV-Lichtquellen (max. ca. 120°C), vgl. [3] – es wird daher von Verfahren mit hoher Temperaturentwicklung abgeraten.

3. BERECHNUNGEN FÜR LINER MIT KABEL

3.1. DISKRETISIERUNG IM KABELBEREICH

Für die Berechnung von Linern sind die folgenden Berechnungsmodelle üblich:

1. *Lösung des nichtlinearen Differentialgleichungssystems* der sechs statischen Größen N , V , M , w (Radialverschiebung), v (Tangentialverschiebung) und ψ (Verdrehung)
2. *Stabwerkmodell* und Berechnung nach Theorie II. Ordnung
3. *Finite Element Modell* (Standardprogramme wie COSMOS/M, ANSYS und ABAQUS)

In allen Modellen ist die Lagerung des Liners im Altrohr durch geeignete reibungsfreie Kontaktelemente zu beschreiben. In [5] werden umfangreiche Vergleichsberechnungen für die drei Modelle vorgestellt. Danach ergibt das Modell 2 um 10 bis 20 % geringere Spannungen, was in den hier vorgestellten Berechnungen an Altrohren mit Kabel durch Vernachlässigung der Querkontraktion des Linerwerkstoffs zum Teil kompensiert wird.

Für das Modell 2 haben sich für Berechnungen ohne Kabel Elementzahlen im Scheitelbereich von $n_{\text{Sch}} = 36$ (also Elementlängen von $r_L \cdot 5^\circ$) als ausreichend genau erwiesen. Variationen von n_{Sch} für Liner mit Kabel haben ergeben, dass Elementzahlen ≥ 50 im Scheitelbereich erforderlich sind, vgl. Bild 4a,b.

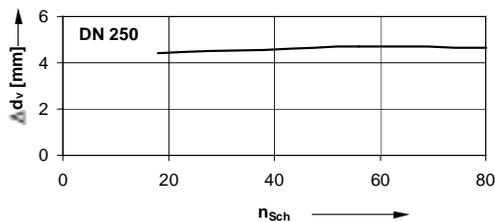


Bild 4a Linerverformungen bei Variation von n_{Sch}

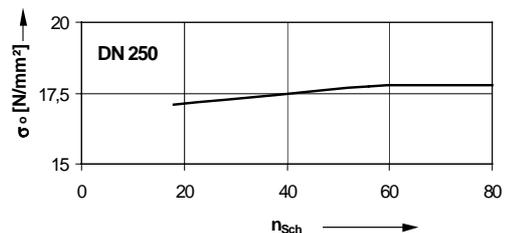


Bild 4b Linerspannungen bei Variation von n_{Sch}

3.2. MASSGEBENDE VORVERFORMUNG

Das Merkblatt ATV-M 127-2 [1] schreibt für Kreisquerschnitte den Ansatz einer örtlichen Vorverformung w_v von 2% des Linerradius mit einer Ausdehnung von 40° vor, die *in der Sohle* zu positionieren ist, vgl. Bild 5.

Bei einer Störung der Kreisgeometrie durch ein *Kabel im Scheitel* stellt sich die Frage, ob in diesem Fall nicht auf die Vorverformung in der Sohle verzichtet werden kann.

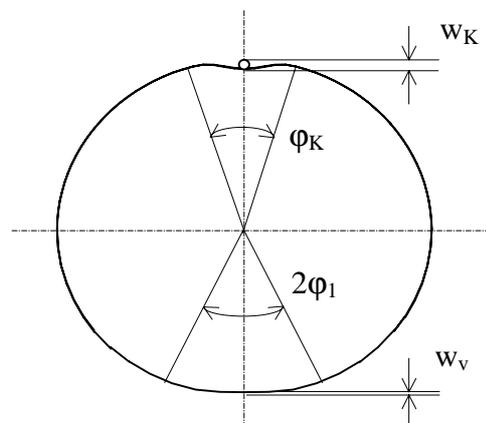


Bild 5 Vorverformungen in Sohle und Scheitel

Für die in der vorliegenden Arbeit an Nennweiten DN 250 und DN 600 sowie dem Kabeldurchmesser $h_k = 15$ mm durchgeführten Vergleichsrechnungen werden *beide* Vorverformungstypen angesetzt. Diese Annahme liegt einerseits auf der sicheren Seite und ist andererseits aus stabilitätstheoretischer Sicht erforderlich, s. Abschnitt 4.1. Damit ergeben sich die Vorverformungen nach Tabelle 2.

Tab. 2 Vorverformungsansatz bei Linern mit Kabel

		DN 250	DN 600
Scheitel			
Vorverformungstiefe	$h_k = w_k$	15 mm = 12%	15 mm = 5 %
Vorverformungsbreite	b_k	100 mm	100 mm
Öffnungswinkel	φ_k	45,8° ($\approx 45^\circ$)	19,1° ($\approx 20^\circ$)
Sohle			
Vorverformungstiefe	w_v	2,5 mm = 2%	6,0 mm = 2%
Öffnungswinkel	$2\varphi_1$	40°	40°

3.3. WEITERE BERECHNUNGSARAMETER

Für die Vergleichsberechnungen gelten zusätzlich zu den Werten in Tabelle 2 die folgenden Parameter:

Wanddicke DN 250: $s_L = 5,5$ mm, DN 600: $s_L = 13,2$ mm

(Damit resultiert das konstante Radius-Wanddickenverhältnis $r_L/s_L = 22,2$.)

Langzeit-Elastizitätsmodul des Liners $E_L = 1500$ N/mm²

Langzeit-Biegezugfestigkeit $\sigma_{bz} = 20$ N/mm²

Langzeit-Druckfestigkeit $\sigma_D = 50$ N/mm²

(Damit wird stets der Nachweis der Biegezugspannungen maßgebend.)

Spaltbildung $w_s = 0,5$ % von r_L (vgl. ATV-M 127-2)

Gelenkringvorverformung $w_{GR,v} = 0$ (also Altrohrzustand I)

4. NACHWEISE

4.1. STABILITÄT

4.1.1. LAST-VERSCHIEBUNGSKURVEN

Bei Altrohrzustand I kommt als Belastung nur der äußere Wasserdruck in Betracht. Die Ermittlung der kritischen Belastung erfolgt durch schrittweise Vergrößerung der Wasserdruckhöhe h_w und Aufzeichnung der Ergebnisse als Last-Verschiebungskurven.

Bild 6a für DN 250 zeigt für alle Öffnungswinkel φ_k der Kabelvorverformung eine überproportionale Zunahme der Scheitelverformungen, während die Verformungen der Sohle gegen Null streben. Dies deutet auf ein Durchschlagen des Scheitels hin.

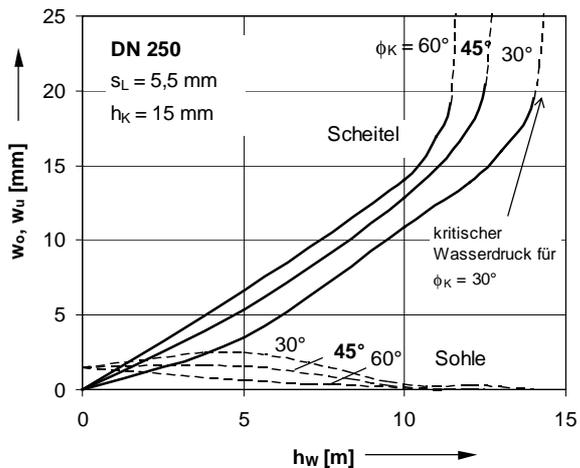


Bild 6a Last-Verschiebungskurven DN 250, Variation φ_K

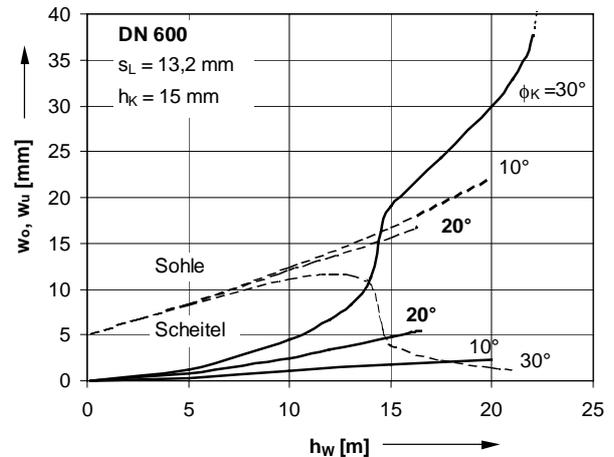


Bild 6b Last-Verschiebungskurven DN 600, Variation φ_K

Dagegen zeigt Bild 6b für DN 600 bei $\varphi_K = 10^\circ$ und 20° eine kontinuierliche Zunahme der Sohlverformungen, die Verformungen des Scheitels zeigen eine ähnliche Tendenz, sind jedoch kleiner. Es ist also ein Durchschlagen der Sohle zu erwarten. Für $\varphi_K = 30^\circ$ ist jedoch eine Änderung des Verlaufs bei Laststeigerung zu erkennen: Bei etwa 13 bis 14 m Wassersäule gehen die Sohlverformungen zurück und die Scheitelverformungen werden dominant.

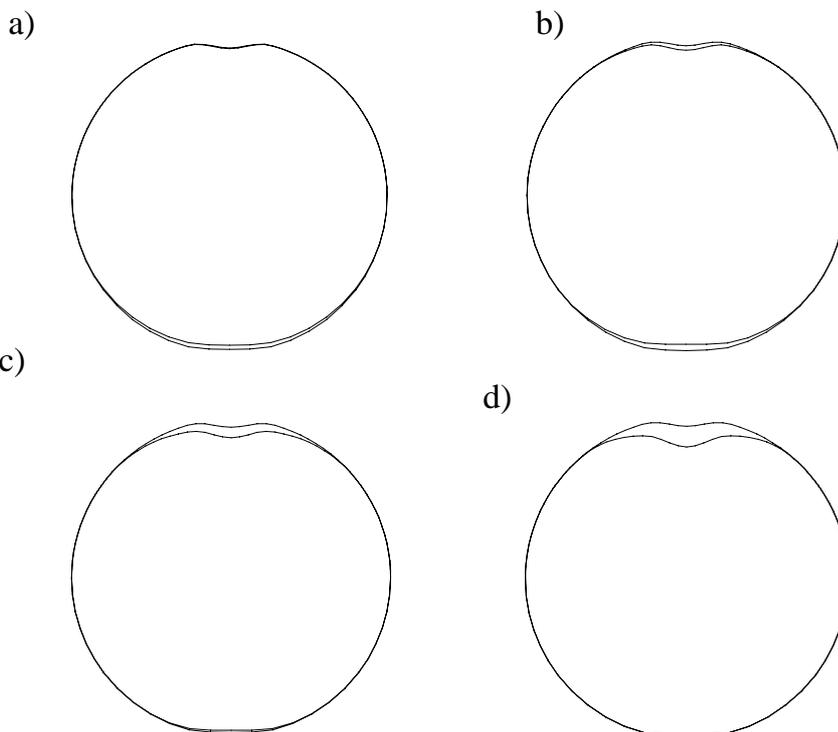


Bild 7 Liner DN 600, $s_L = 13,2$ mm, Kabel: $h_K = 15$ mm, $\varphi_K = 30^\circ$
 a) $h_W = 5$ m: Aufschwimmen des Liners, alleinige Sohlverformung
 b) $h_W = 13$ m: beginnende Verformung im Scheitel
 c) $h_W = 15$ m: Zunahme der Scheitelverformung, Zurückgehen der Sohlverformung
 d) $h_W = 22$ m: Beginn des Durchschlagens des Scheitels

Dieses Verhaltens ist wie folgt zu erklären: Die relativ schmalen Kabelvorverformungen bei DN 600 bewirken, dass die Vorverformung der Linersohle ein Durchschlagen auslöst. Diese ist zwar kleiner als die Scheitelvorverformung ($w_v = 2\% < 5\% = w_k$), sie hat jedoch eine zur Beulfigur ähnlichere Form. Erst bei der breiteren Kabelvorverformung $\phi_k = 30^\circ$ wird die Scheitelvorverformung maßgebend, dies allerdings erst für höhere Belastungen, bei denen ein plötzlicher Wechsel der Biegelinien erfolgt.

Eine anschauliche Erklärung liefern die Bilder 7a-d, in denen die Biegelinien für den interessanten Fall $\phi_k = 30^\circ$ bei Laststeigerung wiedergegeben sind. Zunächst erfolgt eine Vergrößerung der Sohlverformung, nach Überschreitung der Lastgrenze von 13 bis 14 m entwickelt sich jedoch die Scheitelbeule. Bei etwa 22 m Wassersäule erfolgt schließlich dort auch das Durchschlagen des Liners.

Ähnliche Phänomene wurden bereits bei Eiprofilen festgestellt, wenn für die Kämpfervorverformung ein zu geringer Wert gewählt wird [6]. In diesem Fall wird zunächst eine zweiwellige symmetrische Verformung beobachtet, die dann bei höheren Lasten schlagartig in die maßgebende einwellige Beulform übergeht.

4.1.2. KRITISCHER WASSERDRUCK

Der kritische Wasserdruck p_a des Liners wird als vertikale Asymptote aus den Last-Verschiebungskurven nach Bild 6a,b entnommen – dort streben die Verschiebungen gegen Unendlich. Wie Bild 8 zeigt, ist der Wert für p_a bzw. h_w vom Kabelwinkel ϕ_k abhängig.

p_a wird in [1] mit Hilfe von Abminderungsfaktoren κ für Imperfektionen ermittelt. Als zu berücksichtigende Imperfektion gilt die örtliche Vorverformung w_v , die für kreisförmige Liner ohne Kabel 2% des Radius beträgt. Wird die Störung durch ein Kabel als örtliche Vorverformung aufgefasst, so sind diese Werte größer als 2% (Tab. 2) und es folgen erhebliche Abminderungen der kritischen Lasten:

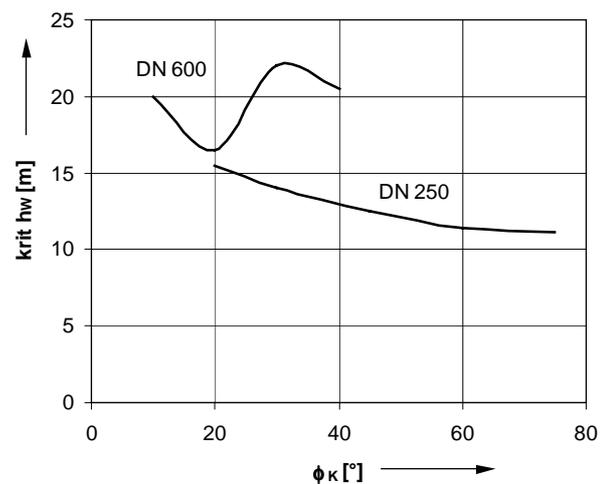


Bild 8 Kritische Linerbelastung, abhängig von ϕ_k

Tab. 3 Abminderungsfaktoren für örtliche Vorverformungen (Parameter $r_L/s_L = 22,2$)

Vorverformung	κ für DN 250	κ für DN 600
$w_v = 2\%$	0,72	
$w_k = 12\%$ (DN 250) bzw. 5% (DN 600)	0,25 ^{*)}	0,46

^{*)} aus Diagramm D1 in [1] extrapoliert

Es wird empfohlen, den Stabilitätsnachweis nicht mit der Gleichung (6.23) in [1] sondern als nichtlinearen Spannungsnachweis zu führen, vgl. [1], Abschnitt 6.5.3.1, Hinweis für „vom Kreisquerschnitt abweichende Profile“.

4.2. SPANNUNGEN

Wie bereits die Verformungen, so lassen sich auch die Spannungen in Abhängigkeit von der Lasthöhe auftragen. Es werden nur die Biegezugspannungen im Scheitel (Kabel) und der Sohle (Stelle des maximalen Wasserdrucks) ausgewertet. Die Druckspannungen liegen stets deutlich unter dem mit dem Quotienten der Bruchspannungen bei Druck und Biegezug ($\sigma_D/\sigma_{bz} = 50/20 = 2,5$) multiplizierten Wert der Biegezugspannungen und sind daher im vorliegenden Fall ohne Bedeutung.

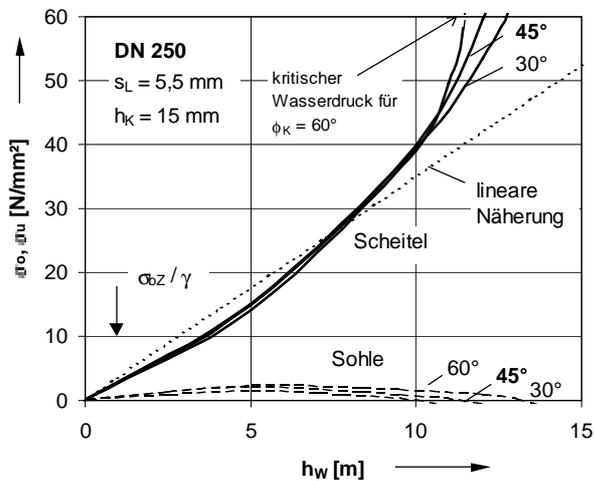


Bild 9a Spannungen des Liners DN 250, Variation φ_K

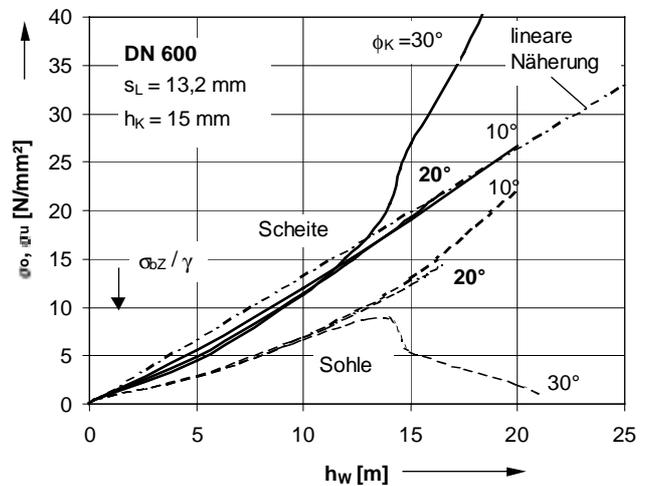


Bild 9b Spannungen des Liners DN 600, Variation φ_K

Die Kurven in den Bildern 9a,b sind vergleichbar mit den Lastverschiebungskurven der Bilder 6a,b: Für DN 250 folgen monotone Anstiege der Scheitelspannungen (maßgebende Stelle) und vernachlässigbar kleine Spannungen in der Sohle.

Dagegen haben die Scheitel- und Sohlspannungen bei DN 600 eine vergleichbare Größenordnung. Bei $\varphi_K = 30^\circ$ und $h_w \approx 13$ m wachsen die Scheitelspannungen überproportional an - wiederum ein Zeichen für den Wechsel vom Sohl- zum Scheiteldurchschlagen.

Der Spannungsnachweis erfolgt durch Vergleich der Spannungen mit der zulässigen Spannung zu $\sigma_{bz} = \sigma_{bz} / \gamma$. Für die gewählten Berechnungsparameter DN 250 ist diese Grenze bei etwa 3,5 m Wassersäule erreicht (Bild 9a), für DN 600 dagegen bei etwa 8,5 m.

Der Liner ist im Bereich des Kabels stark gekrümmt. Dieser Einfluss auf die Spannungsverteilung über die Wanddicke kann rechnerisch mit der Gleichung

$$\alpha_{ki} = 1 + \frac{s_L}{3 \cdot r_K} \quad \text{mit} \quad r_K = h_K + s_L/2 \quad (3)$$

ermittelt werden. Für das gewählte Beispiel folgt bei DN 250 $\alpha_{ki} = 1,18$ und bei DN 600 $\alpha_{ki} = 1,31$. Da auch die Werkstoffeigenschaften durch die Krümmung beeinflusst werden

können, ist eine gezielte Werkstoffprüfung an gekrümmten Scheitelproben z. B. als Vierpunkt-Biegeversuch erforderlich.

Bei einer nichtlinearen Ermittlung der Spannung σ_d (Index d: „Bemessungsspannung“) mit γ -fachen Belastungen und bei Ansatz ausreichender Vorverformungen kann auch der Stabilitätsnachweis mit Hilfe der Gleichung

$$\frac{\sigma_d}{\sigma_{bZ}} \leq 1 \quad (4)$$

geführt werden.

Eine einfache Überprüfung der Schnittgrößen und der Spannungen für Vordimensionierungen ist mit der folgenden Gleichung möglich:

$$\begin{aligned} N_{Sch} &= -p_a \cdot r_L \\ M_{Sch} &= -N_{Sch} \cdot h_K \end{aligned} \quad (5a,b)$$

Die resultierenden Spannungen sind in den Bildern 9a,b gestrichelt eingetragen. Abweichend von den im Abschnitt 3.1 genannten Berechnungsmodellen sind die Gleichungen (5a,b) jedoch linear und enthalten damit keine Möglichkeit eines Stabilitätsnachweises.

4.3. VERFORMUNGEN

Vor einer Sanierung und dem Anbringen von Kabeln ist vom Planer zu prüfen, ob die Schäden im Kanal und die Kabelgeometrie die Nutzung und Reinigung des Kanals beeinträchtigen. Daher hat der Nachweis der Verformungen – abweichend von der Dimensionierung neu verlegter biegeweicher Rohre – eine nur untergeordnete Bedeutung. In ATV-M 127-2 wird infolgedessen ein Anhaltswert von 10% Durchmesseränderung empfohlen, von dem in begründeten Einzelfällen auch abgewichen werden kann.

5. WEITERE ANWEDUNGSFÄLLE

5.1. KABELBÜNDEL

Bei dem Einbau von Kabelbündeln wird die Vorverformung durch den Gesamtwinkel φ_K und den Winkel des „flachen“ Bereichs α_K beschrieben.

Die Auswirkungen können mit den Erkenntnissen der Abschnitte 4.1 und 4.2 wie folgt prognostiziert werden:

1. Die Vorverformung nach Bild 10 wird der maßgebenden Vorverformung ähnlicher, die Beulgefahr wird vergrößert.
2. Die Spannungen werden wie bereits durch

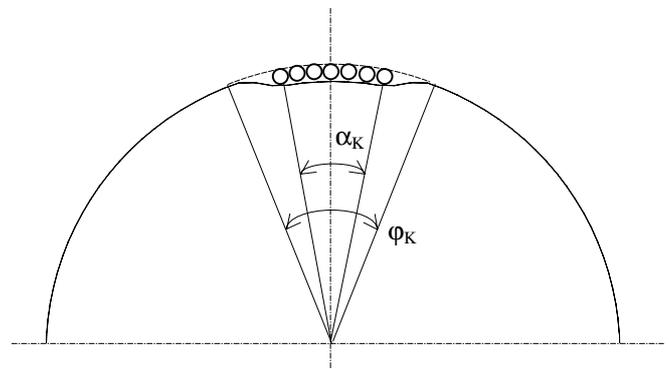


Bild 10 Kreisquerschnitt mit Kabelbündel im Scheitel

die Näherungsgleichungen (5a,b) beschrieben nur wenig von der Verbreiterung der Vorverformung beeinflusst.

Unabhängig hiervon ist in jedem Anwendungsfall eine gesonderte Berechnung z. B. mit dem Modell 2 nach Abschnitt 3.1 erforderlich.

5.2. EIQUERSCHNITTE

Telekommunikationskabel werden nicht nur in kreisförmigen Profilen sondern auch in eiförmigen Querschnitten verlegt. Hierbei kommen normale Eiquerschnitte mit drei Radien ($B/H = 1/1,5$) vor, aber auch abweichende Querschnitte, die durch einen Korbbogen mit vier Radien beschrieben werden können.

Bild 11 zeigt ein Hamburger Profil der Klasse V (Altona) mit einem Kabelbündel im Sammlerscheitel. Die Geometrie wird durch den Gesamtwinkel $\varphi_k = 40^\circ$ und den Winkel des flachen Bereichs $\alpha_k = 20^\circ$ beschrieben.

Die für einen Wasserdruck aus $h_w = 3,92$ m (= 3 m über Sammlerscheitel) resultierende Biegemomentenlinie ergibt – wie beim Querschnitt ohne Kabelbündel – maximale Biegemomente der Größe +497 Ncm/cm im flachen Kämpferbereich, s. Bild 11. Zum Vergleich: Beim Sammler ohne Kabelbündel beträgt max $M +486$ Nmm/mm, d. h., die Anordnung eines Kabelbündels mit 20 mm Höhe hat abweichend vom Kreisquerschnitt im vorliegenden Fall nahezu keine Auswirkungen auf die maßgebende Beanspruchung des Liners im Kämpferbereich.

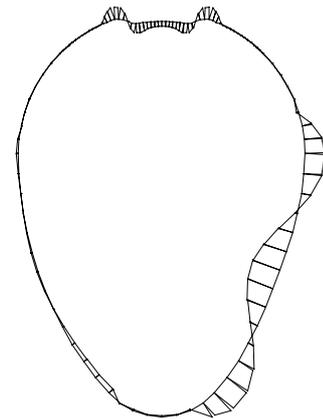


Bild 11 Eiprofil $B/H = 580/820$ mm mit Kabelbündel $h_k = 20$ mm im Scheitel, Biegemomentenlinie

6. ZUSAMMENFASSUNG

Wird ein Abwasserkanal mit einem im Scheitel fixierten Kabel durch einen Liner saniert, so stellt das Kabel bzw. das Leerrohrbündel eine Geometriestörung dar, die bei der Dimensionierung des Liners nach bestehenden Vorschriften (in Deutschland: Merkblatt ATV-M 127-2) berücksichtigt werden muss.

Für die vorliegenden Untersuchungen wird der im ATV-M 127-2 eingeführte Altrrohrzustand I zugrunde gelegt. Der in der Regel maßgebende Lastfall ist Grundwasser auf der Außenseite des Liners. Wie bei sanierten Kanälen ohne Kabel sind die folgenden Nachweise für Langzeitbedingungen zu führen:

- Spannungsnachweis
- Verformungsnachweis
- Stabilitätsnachweis

Umfangreiche Vergleichsberechnungen für Liner ohne Verbund mit dem Altrohr unter Wasseraußendruck zeigen, dass

- die Spannungen im kreisförmigen Liner - bedingt durch die Vorverformung im Scheitelpunkt (also im Bereich der Störung durch das Kabel) - deutlich zunehmen,
- die Sicherheit gegen Stabilitätsversagen dagegen weniger beeinträchtigt wird – hiervon ausgenommen sind jedoch Fälle mit großräumiger Störung, die der Eigenform des zugehörigen Stabilitätsproblems ähnlich sind und
- der Verformungsnachweis eine untergeordnete Rolle spielt.

Eignungsversuche mit verschiedenen Linersystemen nach dem Einbau von Kabeln haben ergeben, dass die Wanddicken im Scheitelpunkt des Kabels reduziert werden ([2], [3]). Schließlich ist auch der Krümmungseinfluss in die Langzeitbemessung einzubeziehen.

Aufgrund des komplexen Beulverhaltens von Linern mit einem Kabel oder Kabelbündel im Scheitel wird empfohlen, die Vorverformungstypen $w_k (= h_k)$ im Scheitel und w_v in der Sohle grundsätzlich gemeinsam anzusetzen.

Eiförmige Querschnitte werden in den flachen Bereichen (Kämpfern) am meisten beansprucht. Im Unterschied zu Kreisquerschnitten hat daher der Einbau eines Kabels oder eines Kabelbündels im Scheitel in der Regel keine höheren Wanddicken zur Folge.

REFERENCES

- [1] Merkblatt ATV-M 127-2, *Statische Berechnung zur Sanierung von Abwasserkanälen und -leitungen mit Lining- und Montageverfahren*, Ergänzung zum Arbeitsblatt ATV-A 127, Hennef (01.2000)
- [2] Univ. of Appl. Sc. Münster, Fachbereich Bauingenieurwesen, *Standicherheit von durch Lining über ein im Scheitel befestigtes Kabel sanierten Kanalrohren*, Gutachten für Starline Rohrservice GmbH, 05.03.1999 (unveröffentlicht).
- [3] SEDEHIZADE F., RÖLING M., *Sanierung von Abwasserkanälen nach Einbau von Telekommunikationskabeln*, KA – Wasserwirtschaft, Abwasser, Abfall 2001 (48) Nr. 11, 1565–1572.
- [4] FALTER B., *Statecznosc linerow w rehabilitacji technicznej przewodow kanalizacyjnych*. Gaz, Woda i technika sanitarna (2001) 273-282
- [5] FALTER B., *Structural Design of Linings*. Underground Infrastructure Research: Municipal, Industrial and Environmental Applications. Knight & Thomson (eds), pp. 49-58 © 2001, Swets & Zeitlinger, Lisse
- [6] FALTER B., *Structural Analysis of Linings for Sewer Renovation*. Proceedings for the 5th International Conference on Pipeline Construction. Oct. 19.-23. 1997 in Hamburg, 471-502