

Praktische Vorgehensweise beim Standsicherheitsnachweis für Linersysteme in Abwasserkanälen

Prof. Dr.-Ing. Bernhard Falter, Münster

Die statische Berechnung von Linersystemen zur Sanierung schadhafter Abwasserkanäle erfordert neue Ansätze und Lösungen, die sich z. T. erheblich von eingeführten Vorschriften zur Dimensionierung neuerlegter Leitungen unterscheiden. Im Vorfeld muß die Bauzustandserfassung der Kanäle u. a. auch solche Informationen zur Verfügung stellen, die eine Eingruppierung der Schadensfälle in statisch relevante Fälle und Detailausagen zur Bettung des Liners im Altrohr (Vorverformungen/ Spaltbildung/Rißverlauf) und erforderlichenfalls zum Rohr-Bodensystem (tragfähig/nicht tragfähig) ermöglichen.

Damit wird die Grundlage für eine zuverlässige Dimensionierung des Sanierungssystems unter Berücksichtigung der maßgebenden Einwirkungen (z. B. Grundwasserdruck, Eigenlasten, Wärmeeinwirkungen) gelegt. Die Nachweise sind – wie vom ATV-Arbeitsblatt A 127 gewohnt – als Spannungs-, Verformungs- und Stabilitätsnachweise zu führen. Hierfür werden die erforderlichen Gleichungen und beispielhaft einige Tafeln für Schnittgrößen- und Verformungsbeiwerte mitgeteilt. Die Vorgehensweise bei den Nachweisen wird anhand eines Anwendungsbeispiels aus der Praxis (Schlauchliner) demonstriert.

1 Einleitung

Die Sanierung schadhafter Abwasserleitungen durch Einbau eines neuen Rohres (Liners) ist an verschiedenen

Stellen ausführlich beschrieben worden [1], so daß die wesentlichen Merkmale und Varianten als bekannt vorausgesetzt werden können.

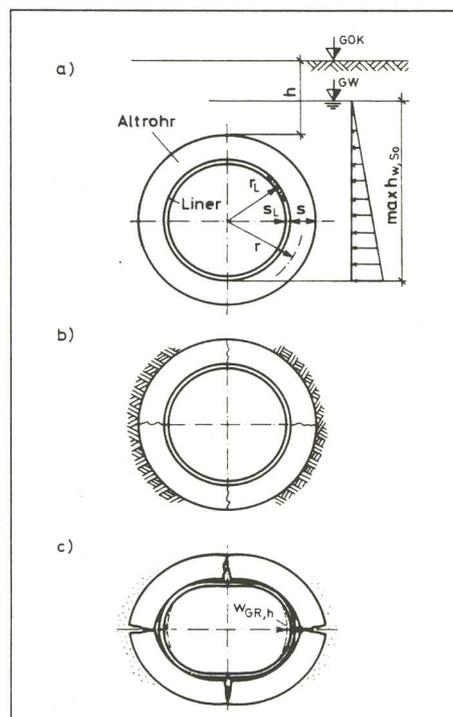
Es ist jedoch unabdingbar, daß auch die mit den Sanierungssystemen verbundenen Standsicherheitsfragen diskutiert werden. So fordert z. B. das ATV-Merkblatt M 143 Teil 3 (4.93) im Abschnitt 6.2:

„Für alle maßgebenden Bau- und Betriebszustände sind mindestens folgende Nachweise zu führen: bei biegesteifen Rohren: Spannungsnachweis
bei biegeweichen Rohren: Verformungs-, Stabilitäts- und ggf. Spannungsnachweis.“

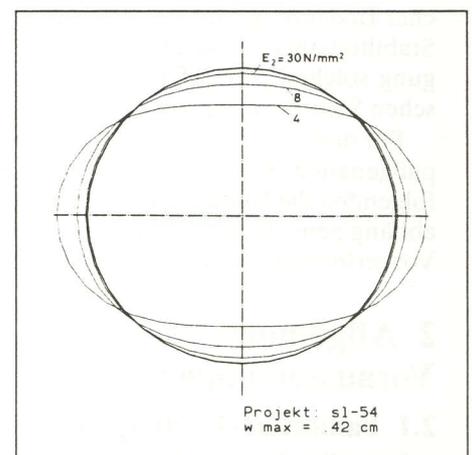
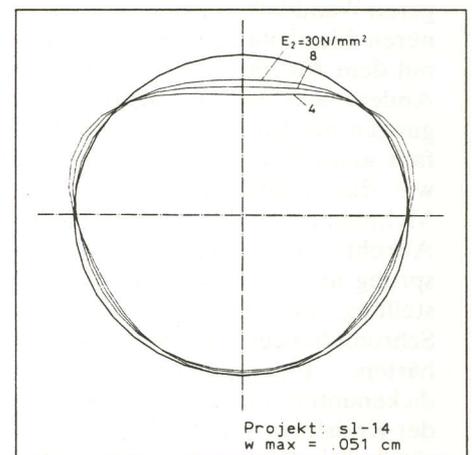
Dies gilt sowohl für den bereits in [2] untersuchten Fall eines lediglich z. B. in

den Muffen undichten Rohres (Bild 1a) als auch für Schadensfälle wie größere Versätze in den Rohrverbindungen und Längsrisse (Bild 1b, c).

Eine Umfrage zur Praxis der Standsicherheitsnachweise [3] hat ergeben, daß die von Auftraggebern verlangten Nachweise oft in Anlehnung an das ATV-Arbeitsblatt A 127 geführt werden, obwohl diese Richtlinie ausschließlich für Neuerlegungen entwickelt wurde. Eines der größten Pro-



1 Altrohr mit Liner a) lediglich undichtes Altrohr (Zustand I) b) Rohr-Bodensystem tragfähig (Zustand II) c) Rohr-Bodensystem nicht tragfähig (Zustand III)



2 Biegelinien des Liners nach Abschnitt 3.5 infolge a) Wasseraußendruck $h_w = 5$ m (Altrohr: Zustand I und II) b) Erdlasten $h = 5$ m (Altrohr: Zustand III) gemäß ATV-Arbeitsblatt A 127 bei Variation von E_2

bleme bei der Anwendung des A 127 ist die Festlegung eines sogenannten „fiktiven Verformungsmoduls E_2 in der Leitungszone“, der die Bettung des Liners im Altrohr beschreiben soll.

Bild 2 a zeigt die Biegelinien eines Schlauchliners unter Wasseraußen- druck und Bild 2 b unter Erd- und Ver- kehrslasten, wenn E_2 variiert wird (4, 8 und 30 N/mm²). Es ist zu erkennen, daß keiner der Ansätze für E_2 auch nur annähernd richtige Biegelinien liefert, die mit dem Altrohr (dicke Kreislinie) kompatibel sind. Auch eine willkürliche Erhöhung des Wertes E_2 führt immer zu Verformungen, die innerhalb und außerhalb des Altrohrs liegen. Wenn aber die Biegelinie eines statischen Systems nicht stimmt, so sind auch die Schnittgrößenfunktionen und -ordinaten zu verwerfen!

Auch der Hinweis auf Berech- nungsannahmen „auf der sicheren Sei- te“ hilft nicht weiter. Schon der weni- ger kritische Fall des lediglich undich- ten Altrohres muß hinsichtlich seines Tragverhaltens sorgfältig untersucht werden. Das liegt zum einen daran, daß als Liner meist Kunststoffe mit gerin- geren Wanddicken und wesentlich klei- neren Elastizitätsmoduln – verglichen mit dem Altrohr – verwendet werden. Andererseits sind die Lagerungsbedin- gungen des Liners im Altrohr keines- falls so ideal (Close-fit und kreisrund), wie dies häufig angenommen wird. Vielmehr treten durch den Zustand des Altrohrs (Sohlablagerungen, Sohl- sprung usw.) als auch durch die Her- stellung des Liners (Gewebe naht, Schrumpfen des Harzanteils beim Aus- härten, Eigenspannungen, Wand- dickenunterschiede usw.) Störungen der Kreisform auf, die für die Standsi- cherheitsberechnungen von erheblicher Bedeutung sind. In der modernen Stabilitätstheorie ist die Berücksichti- gung solcher „Imperfektionen“ inzwi- schen Stand der Technik.

Für diese Störungen der idealen und paßgenauen Kreisgeometrie wird im folgenden die Einführung von zwei un- abhängigen Größen vorgeschlagen: Vorverformungen und Spaltbildung.

2 Allgemeine Voraussetzungen

2.1 Fallunterscheidungen

Natürlich hat der Schädigungsgrad des Altrohres einen erheblichen Ein-

fluß auf das Nachweisverfahren für Li- nersysteme. Hierbei sollen drei statisch relevante Zustandsklassen unterschieden werden, vgl. Bild 1a–c:

Zustand I:

Der Kanal ist mit Ausnahme von Haar- rissen < 0,1 mm (Stahlbeton ≤ 0,3 mm) rissfrei und voll tragfähig. Eine Sanie- rung ist z. B. zur Herstellung der Was- serdichtheit erforderlich (in [2] Zu- stand Ia).

Zustand II:

Der Kanal hat einen oder mehrere durchgehende Längsrisse und ist nicht mehr allein tragfähig. Er ist jedoch auf- grund einer ausreichenden Bettungs- wirkung des Bodens in der Leitungszo- ne weiterhin als „Rohr-Bodensystem“ standsicher (in [2] Zustand Ib).

Zustand III:

Das „Rohr-Bodensystem“ ist nicht mehr tragfähig, eine Sanierung ist zur Wiederherstellung der Trag- und Dichtfunktion erforderlich (in [2] Zu- stand II).

Die z. B. im ATV-Merkblatt M 143 Teil 1 (12.89) klassifizierten Schadens- formen sollten für Standsicherheits- nachweise einem der drei Zustände zu- geordnet werden, wobei zur besseren Anpassung an die Situation im Kanal noch die weiter unten beschriebenen Größen Vorverformungen und Spalt- bildung hinzukommen.

Ein während der Inspektion festge- stellter Zustand I muß u. U. bei Fort- schreiten der Korrosion zur Sicherheit auch als Zustand II (oder sogar Zu- stand III) nachgewiesen werden. Die Differenzierung der Fälle II und III ist geboten, um unwirtschaftliche Sanie- rungslösungen zu vermeiden, wo ein in- taktetes Rohr-Bodensystem vorhanden ist und dieses durch statische Verfahren nachgewiesen werden kann (siehe Ab- schnitt 4).

2.2 Annahmen

Es gelten die u. a. in der Rohrlei- tungsstatik üblichen Annahmen:

a) die Geometrie und Belastung längs der x-Achse des Rohres sei kon- stant. Dies ist gerade bei nur örtlich auftretenden Störungen (z. B. Sohl- sprung, seitlicher Abzweig, Schachtan- schluß) unzureichend, doch liegt das auf diese Weise vereinfachte zwei- dimensionale Rechenmodell (Kreisring) auf der sicheren Seite (vgl. Beultheorie der „langen Schale“ und Beulversuche in [5] und [6], die übereinstimmend

eine in Längsrichtung konstante Beul- form ergeben). In einzelnen Fällen können auch dreidimensionale Be- rechnungsmodelle verwendet werden, diese müssen jedoch auch die übrigen Besonderheiten des hier beschriebenen Kreisringmodells enthalten

b) es werden keine Haftzugspan- nungen und keine tangentialen Kräfte zwischen Altrohr und Liner angenom- men, d. h. der Liner verschiebt sich rei- bungsfrei im Altrohr

c) nur bei kleinen Druckkräften (Kri- terium in Anlehnung an DIN 18 800 Teil 2 (11.90), Stahlbauten – Stabilitäts- fälle: $N \leq 0,1 \cdot \text{krit } N = 10\%$ der Durch- schlaglast) wird nach Theorie I. Ord- nung gerechnet. Ansonsten ist das Gleichgewicht am verformten System, d. h. nach Theorie II. Ordnung, zu er- mitteln. Daraus folgt, daß die Bez. hungen zwischen den äußeren Lasten und den Zustandsgrößen des Systems (Biegelinie, Q- und M-Linie) nicht- linear sind – eine Verdoppelung der Last bewirkt i. d. Regel mehr als zwei- fache Ordinaten für w, Q und M! Nur bei dieser Vorgehensweise ist garan- tiert, daß die anzusetzenden Lasten die Durchschlaglast des Liners nicht über- schreiten – in einem solchen Fall wür- den alle Zustandsgrößen gegen Un- endlich streben. Die Berechnung wird mit γ -fachen Lasten durchgeführt – anschließend werden die Ergebnisse wieder durch γ geteilt, um eine dem ATV-Arbeitsblatt A 127 entsprechen- de Nachweisführung zu ermöglichen.

d) es werden „kleine Verschiebun- gen“ vorausgesetzt. Die Zulässigkeit dieser Annahme kann anhand ei- ner geometrisch nichtlinearen Theorie [7] überprüft werden. Berechnungen, in denen größere Verschiebungen und Rotationen erzielt werden, sind kri- tisch zu bewerten

e) die Lasten werden richtungstreu angenommen, d. h., sie behalten bei Sy- stemverdrehungen ihre Richtung bei. Das ist für Erd- und Verkehrslasten zu- treffend, bei Wasserdruck sind die Lö- sungen nur näherungsweise richtig. Bei gebetteten Systemen mit kleinen Ver- formungen ist die Differenz i. Allg. klein, beim freien Kreisring beträgt sie allerdings 33 %

f) für die Momenten-Krümmungs- beziehungen sollen die in der linearen Elastizitätstheorie üblichen Regeln gelten: Ebenbleiben der Querschnitte, die senkrecht zur Schwerachse des Kreisringes stehen, sowie das Hooke-

sche Gesetz. Die bei Kunststoffen von der Spannung, der Temperatur, der Zeit und dem Medium abhängigen Werkstoffkennwerte werden durch Abminderungsfaktoren erfaßt, die zum Teil in einschlägigen Normen geregelt sind (DVS-Richtlinie 2205 Teil 1, DIN 4266 Teil 1). Dies gilt insbesondere für die folgenden Größen:

- E_L = Elastizitätsmodul
- σ_{BZ} = Biegezugfestigkeit
- σ_D = Druckfestigkeit

In den Abschnitten 3 bis 5 kommen noch spezielle Annahmen hinzu.

2.3 Vorverformungen und Spaltbildung

Vorverformungen nach Bild 3 werden durch die Gleichung

$$w_v(\varphi) = w_v(\varphi_v) \cdot \cos^2(\pi\varphi/2\varphi_1) \text{ mit } -\varphi_1 \leq \varphi \leq +\varphi_1$$

und φ_v = Lage der Verformung (0° = Scheitel, 180° = Sohle)

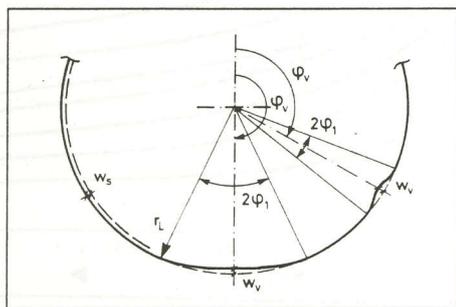
$2\varphi_1$ = Öffnungswinkel (Inspektionsergebnis)

w_v = Tiefe der Verformung (Inspektionsergebnis)

Der oft gewählte Ansatz einer ovalen Vorverformung [4] liefert i. d. Regel nicht die kleinste Durchschlaglast. Vielmehr müssen z. B. in Anlehnung an DIN 18 800 Teil 2, Element (202) „Imperfektionen (d. h. Vorverformungen, der Verf.) so angesetzt werden, daß sie sich der zum niedrigsten Knickeigenwert gehörenden Verformungsfigur möglichst gut anpassen“.

Bei Spannungsnachweisen sollten dagegen die gemessenen Vorverformungen einschließlich der Größe $2\varphi_1$ nach Gl. (1) angesetzt werden (siehe Abschnitt 3.3 und 3.4).

Die Spaltbildung zwischen Liner und Altrrohr wird durch die Größe w_s (bzw. $w_s/r_L \cdot 100\%$) als umlaufender Spalt (Bild 3, links) oder bei Auftrieb durch eingedrungenes Grundwasser als Spalt der Größe $2w_s$ in der Sohle beschrieben.



3 Vorverformungen mit verschiedenen Öffnungswinkeln $2\varphi_1$ und Spaltbildung

3 Nachweise für den Liner bei undichtigem Altrrohr (Zustand I)

3.1 Einwirkungen und Kombinationen, Sicherheitskonzept

Bei der Sanierung eines undichten, jedoch statisch intakten Altrrohres durch einen Liner sind die folgenden Einwirkungen denkbar:

- Wasseraußendruck p_a (Bild 1)
- Eigenlasten g
- Wasserfüllung p_w
- Wärmeeinwirkungen ϑ mit Unterscheidung in
 - $\vartheta < 0$: Spaltvergrößerung
 - $\vartheta > 0$: Erhöhung der Druckkraft in der Linerwandung
- innerer Unterdruck $p_i < 0$

Eigenlasten der Linerwandung sind erst bei größeren Nennweiten von Bedeutung. Der Lastfall p_i ist i. Allg. nur bei Druckleitungen interessant. Er wirkt ähnlich wie der Lastfall p_a , ist jedoch über den Linerumfang konstant.

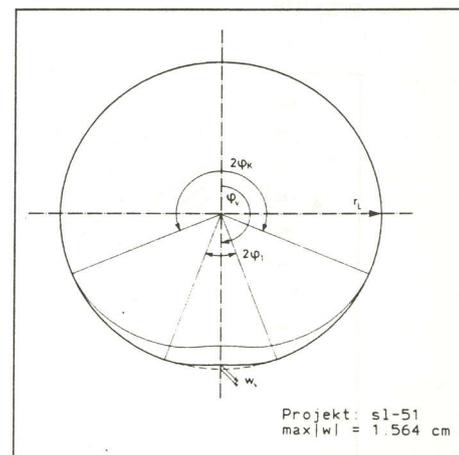
Die Einwirkungen können auch in verschiedenen Kombinationen auftreten – hierfür sind dann jeweils gesonderte Nachweise zu führen, falls nicht eine von vornherein plausible „ungünstige“ Kombination zu erkennen ist. Wenig wahrscheinliche oder selten auftretende Kombinationen sollten in Anlehnung an Eurocode 1 durch Kombinationsbeiwerte $\psi < 1$ oder durch Verringerung des globalen Sicherheitsfaktors γ berücksichtigt.

Die in den Beispielen verwendeten Sicherheitsbeiwerte orientieren sich am ATV-Arbeitsblatt A 127. Bei Berücksichtigung von Vorverformungen könnte jedoch der Sicherheitsbeiwert auf z. B. $\gamma = 2,0$ abgemindert werden, da der höhere Beiwert nach A 127 solche nicht berücksichtigten Einflüsse abdecken muß. Von erheblichem Vorteil ist die Einführung des Konzepts der Teilsicherheitsbeiwerte für Einwirkungen und Widerstände entsprechend Eurocode 1, da die bei Sanierungen auftretenden Größen sehr unterschiedlich statistisch verteilt sind. Zudem kommen sowohl kraft- als auch verformungsschlüssige Einwirkungen vor, die das Beulverhalten maßgeblich beeinflussen – hierfür sind ebenfalls verschiedene Teilsicherheitsbeiwerte einzuführen.

3.2 Berechnungsverfahren für Liner unter Wasseraußendruck p_a

Das EDV-gestützte Verfahren für Liner unter den oben genannten Einwirkungen beruht auf der iterativen Berechnung des starr gebetteten Kreisringes mit einem speziell erweiterten Stabwerkprogramm [8]. Die Iteration ist sowohl für die Ermittlung des Kontaktbereichs $2\varphi_K$ und der Kontaktkräfte als auch für die Längskraftumlagerungen (N) und damit die Zusatzmomente nach Theorie II. Ordnung erforderlich. Das Abbruchkriterium für die Iteration ist erfüllt, wenn sich die maximalen Verschiebungen der beiden letzten Schritte um weniger als 0,5% voneinander unterscheiden. Durch die simultane Iteration der Größen $2\varphi_K$ und N ist eine größere Zahl von Berechnungsschritten (10 und mehr) erforderlich, bis eine Konvergenz erzielt wird. Bei Berechnungen in der Nähe der Durchschlaglast ($N > 0,5 \cdot \text{krit } N$) ist ein weiterer Anstieg der Iterationszahl zu beobachten, bis bei vorsichtiger Laststeigerung ein alternierendes oder divergentes Verhalten der Lösungen auftritt.

Eine anschauliche und zuverlässige Kontrolle für das Iterationsergebnis ist die Biegelinie (Bild 4). Für den Lastfall Wasseraußendruck muß die Vorverformungsfunktion $w_v(\varphi)$ in der Sohle angesetzt werden, die sich einstellende Biegelinie $w(\varphi)$ hat dann einen ähnlichen Verlauf und erfüllt damit die im Abschnitt 1 genannten Bedingungen des „Rohr-im-Rohr“-Problems. Bei Störungen der Iteration und insbesondere bei Überschreitung der Durch-



4 Biegelinie des „Rohr-im-Rohr-Problems“ bei Wasseraußendruck für Zustand I, überhöhte Darstellung ($2\varphi_K$ = Kontaktbereich)

schlaglast resultieren Biegelinien, die z. B. mehrwellig sind und/oder die Kreiskontur schneiden.

3.3 Durchschlaglasten, Theorie und Versuche

Für den ideal runden und spaltfreien Liner wird die Durchschlaglast von mehreren Autoren (z. B. [9]) wie folgt hergeleitet:

$$\text{krit } p_a = \alpha_D \cdot S_L \quad (2)$$

mit $\alpha_D = 2,62 \cdot (r_L/s_L)^{0,8}$ = Durchschlagbeiwert
 und $S_L = (EI)_L/r_L^3$ = Rohrsteifigkeit des Liners

Diese Gleichung läßt sich mit dem hier vorgestellten Verfahren bestätigen. Darüber hinaus ist krit p_a der Grenzwert für die in [7] mitgeteilten und im ATV-Arbeitsblatt A 127, Diagramm D 10 eingetragenen Durchschlagbeiwerte α_D , wenn das Steifigkeitsverhältnis $V_{RB} = S_R/S_{Bh}$ gegen Null strebt, also im Fall starrer Bettung. Kommen Vorverformungen nach Gl. (1) hinzu, so ist krit p_a nach Gl. (2) durch einen Abminderungsfaktor κ_v zu reduzieren. Für Vorverformungen mit den beiden Parametern $w_v/r_L \cdot 100\%$ und $2\phi_1$ sind – zunächst unabhängig von der Situation im Kanal – zwei Regeln zu beachten:

1) beim Stabilitätsproblem muß der Bereichswinkel $2\phi_1$ der Vorbeule so gewählt werden, daß sich minimale Durchschlaglasten ergeben – es handelt sich also um eine Optimierungsaufgabe. Die so ermittelten Werte für κ_v liegen stets auf der sicheren Seite.

2) beim Spannungsproblem bewirkt eine Verkleinerung der Vorbeulbreite $2\phi_1$ bei gleichbleibender Vorbeultiefe w_v progressiv zunehmende Biegespannungen – es ist also ein Gebot der Wirtschaftlichkeit, die Vorverformungen

des Kanals und die des Sanierungsverfahrens zu messen oder abzuschätzen und diese in die Schnittgrößenermittlung einzubringen.

Eine Spaltbildung zwischen Altrrohr und Liner ist besonders kritisch zu bewerten, wie bereits entsprechende Untersuchungen von Link [10] im Schachtbau gezeigt haben. Besonders bei den dort zur Sanierung verwendeten dünnwandigen Linern aus hochfestem Stahl setzen bereits sehr kleine Spalte von weniger als 1‰ des Schachtdurchmessers die Traglasten um ca. 40 % herab! Es handelt sich dabei nicht um den durch Wasserdruck verursachten elastischen Spalt, der bereits in Gl. (2) enthalten ist, sondern um den sogenannten spannungsfreien „Initialspalt“.

Parameterstudien für Abmessungen von Linern, die in Abwasserkanälen eingesetzt werden, haben in [2] zu einem Diagramm für Abminderungsfaktoren κ_v in Abhängigkeit von r_L/s_L und $w_s/r_L \cdot 100\%$ geführt. Ferner sind gleichzeitig Vorverformungen und Spalte angesetzt worden, um auch deren Interaktion zu überprüfen. Zusammenfassend wird die folgende Gleichung vorgeschlagen:

$$\text{krit } p_a = \kappa_{v,s} \cdot \alpha_D \cdot S_L \quad (2)$$

mit $\kappa_{v,s} \approx \kappa_v \cdot \kappa_s$

und κ_v = Abminderungsfaktor für Vorverformungen, Bild 5a

κ_s = Abminderungsfaktor für Spaltbildung, Bild 5b

$\alpha_D = 2,62 \cdot (r_L/s_L)^{0,8}$ und

$S_L = (EI)_L/r_L^3$

Kontrollrechnungen haben gezeigt, daß die Berücksichtigung beider Größen w_v und w_s durch das Produkt der zugehörigen Abminderungsfaktoren κ_v und κ_s konservative Werte für krit p_a liefert. Es können aber auch je-

weils einzelne Berechnungen für die gemessene Vorverformung und die erwartete Spaltbreite durchgeführt werden.

In [5] sind zahlreiche Versuche mit Schlauchlinern bei systematischer Variation der Größen r_L , s_L und w_s mit vorheriger Ermittlung der Werkstoffkennwerte E , σ_{BZ} und σ_D durchgeführt worden. Gezielte Nachrechnungen von neun typischen Versuchen haben ergeben, daß das vorgestellte Nachweisverfahren im Mittel etwa 65% der in den Versuchen ermittelten Durchschlaglasten ergibt [2]. Daß die Versuchswerte nicht ganz erreicht werden, ist u. a. mit der Vernachlässigung der Reibungskräfte zwischen Liner und Altrrohr zu begründen – es zeigt sich also, daß das hier verwendete Rechenmodell konservativ und damit für die Aufgabenstellung brauchbar ist.

Über weitere Versuche, ihre Auswertung sowie Hinweise zur Durchführung von Durchschlagtests wird in [2] berichtet.

Für weitere Einwirkungen gelten die kritischen Lasten:

Eigenlasten

$$\text{krit } g = \text{mit } \kappa_v \cdot 2,03 \cdot (r_L/s_L)^{0,8} \cdot S_L \quad (4)$$

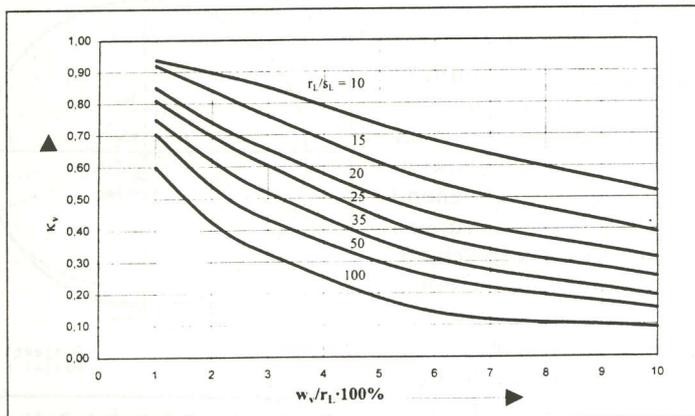
Wärmeeinwirkungen

$$\text{krit } p_\theta = 6,72 \cdot (r_L/s_L)^{0,8} \cdot S_L \quad (5)$$

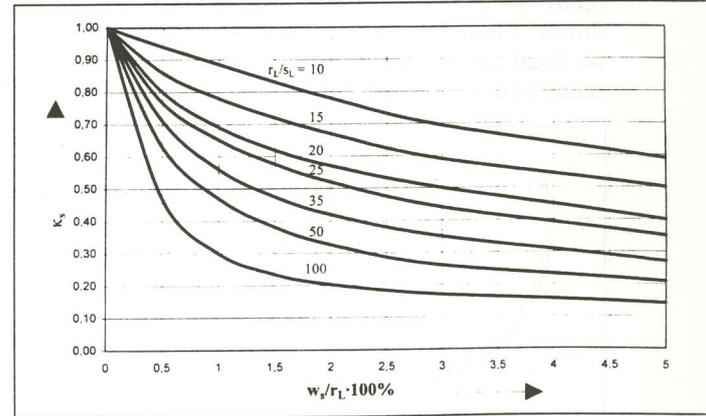
mit p_θ = Kontaktspannungen aus Erwärmung des Liners. (Näheres s. [2])

3.4 Schnittgrößen und Verformungen

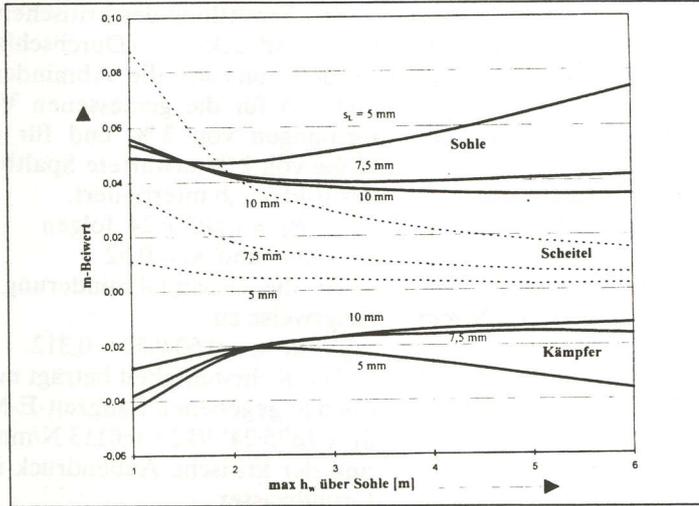
Aufgrund der Besonderheiten des Linersystems und von Versuchsauswertungen ist festzustellen, daß schon bei alleinigem Wasseraußendruck und Zustand I der Stabilitätsnachweis mit krit p_a für eine sichere Bemessung nicht ausreicht. Selbst im Fall des ideal kreisrunden und spaltfreien Systems ergibt



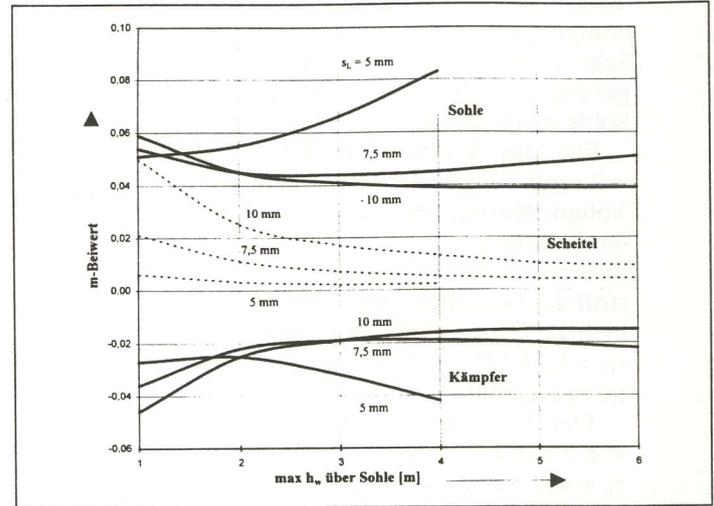
5a Abminderungsfaktor κ_v für Vorverformungen



5b Abminderungsfaktor κ_s für Spaltbildung



6a m-Beiwerte für Zustand I, $r_L = 125 \text{ mm}$ ($E_L = 2000 \text{ N/mm}^2$, $w_v = 3 \%$ von r_L , $w_s = 2 \%$ von r_L)



6b m-Beiwerte für Zustand I, $r_L = 150 \text{ mm}$ ($E_L = 2000 \text{ N/mm}^2$, $w_v = 3 \%$ von r_L , $w_s = 2 \%$ von r_L)

sich bei Laststeigerung ein überproportional anwachsender Biegemomentenanteil, der zum Druckversagen der maßgebenden Randfaser (z. B. in der Sohle) führt. Bei $w_v > 0$ und/oder $w_s > 0$ wird das Biegemoment gegenüber der Längskraft weiter vergrößert und es wird die – i. d. Regel kleinere – Biegezugfestigkeit überschritten (etwa in der Sohle innen).

Es sind also ähnlich dem ATV-Arbeitsblatt A 127 Spannungsnachweise zu führen, hier allerdings unter Verwendung des Langzeit-E-Moduls! Mit den hierfür erforderlichen Schnittgrößen

$$M_{pa} = m_{pa} \cdot p_a \cdot r_L^2 \quad (M > 0 \text{ bei } \sigma_i > 0) \quad (6a)$$

$$N_{pa} = n_{pa} \cdot p_a \cdot r_L \quad (N > 0 \text{ bei Zug}) \quad (6b)$$

gilt dann wieder

$$\sigma_i = N/A + \alpha_{ki} \cdot M/W,$$

$$\alpha_{ki} = 1 + s_L / (3r_L) \quad (7a)$$

$$\sigma_a = N/A - \alpha_{ka} \cdot M/W,$$

$$\alpha_{ka} = 1 - s_L / (3r_L) \quad (7b)$$

Durch die Korrekturfaktoren $\alpha_{ki,a}$ wird der bei gekrümmten Stäben nicht-lineare Verlauf der Spannungen erfaßt.

Abweichend vom ATV-Arbeitsblatt A 127 sind die Schnittgrößenbeiwerte m_{pa} und n_{pa} bei Laststeigerung nicht konstant. Wegen der Nichtlinearität des Kontaktdruckproblems ist auch keine Ähnlichkeit der Beiwerte für gleiche Radius-/Wanddickenverhältnisse festzustellen. Es verbleiben also nur zwei Wege zur Ermittlung der Schnittgrößen:

a) Aufstellung von m-/n-Diagrammen für spezielle Linergruppen, getrennt für die Größen E_L , r_L , s_L und p_a (bzw. $\max h_{w,So}$), vgl. Bild 6 a, b

b) jeweils neue elektronische Berechnung für den vorliegenden Einzel-

fall einer Sanierungsmaßnahme

Die genauere EDV-gestützte Berechnung ist i. d. Regel vorzuziehen. Dennoch ist zur Abschätzung von Wanddicken, für Trenduntersuchungen und zur Überprüfung von elektronischen Ergebnissen eine tabellarische Berechnungsmöglichkeit ähnlich dem Anhang 1/T3 des A 127 von Vorteil.

Die Bilder 6 a, b zeigen m-Beiwerte in Abhängigkeit vom Grundwasserstand über der Linersohle für Schlauchliner mittlerer Durchmesser von 250 und 300 mm, für Wanddicken von 5, 7,5 und 10 mm, für den Langzeit-Elastizitätsmodul 2000 N/mm^2 , für 3% Vorverformungen mit 40° Ausbreitung und 2% Spaltweite.

Die Normalkraftbeiwerte in Gl. (6b) sind nahezu konstant und nehmen für die hier wiedergegebenen Fälle Werte zwischen $-0,8$ und $-1,1$ an. Da der Spannungsanteil aus N gering ist, ist die folgende Näherung völlig ausreichend:

$$n_{pa} = -0,80 \text{ beim Nachweis der Zugspannungen} \quad (8a)$$

$$n_{pa} = -1,10 \text{ beim Nachweis der Druckspannungen} \quad (8b)$$

Der Verlauf der Biegemomentenbeiwerte über $\max h_w$ ist wie folgt zu erklären: Bei geringerem Wasserdruck verhält sich der Liner eher biegesteif. Er legt sich infolge Auftrieb in der Scheitellinie am Altrohr an, was zu relativ hohen Biegemomenten an den drei Nachweisstellen Scheitel, Kämpfer und Sohle führt. Bei zunehmendem Grundwasserdruck vergrößert sich der Kontaktwinkel $2\varphi_K$ im Scheitelbereich und die m-Werte nehmen dort rasch ab. In der Sohle, wo die Vorverformungen angesetzt sind und der Gesamtpalt zu-

nimmt, wachsen sie dagegen überproportional an, vgl. insbesondere die Kurven für 5 mm Wanddicke. Bei DN 300 wird für $s_L = 5 \text{ mm}$ und $\max h_w > 4 \text{ m}$ die Durchschlaglast erreicht, was durch einen steilen Anstieg der Kurve des m-Beiwertes sichtbar wird, vgl. Bild 6b. Die Beiwerte für den Kämpfer verhalten sich ähnlich, haben jedoch negative Vorzeichen und kleinere Werte, verglichen mit der Sohle – sie sind also i. d. Regel nicht maßgebend.

Die auf $2r_L$ bezogenen elastischen Verformungen sind aus Bild 7 zu entnehmen. Hinzu kommt noch die Vorverformung, die jedoch mit dem halben Wert angesetzt werden kann, wenn sie ähnlich dem Arbeitsblatt A 127 auf den Durchmesser $2r_L$ bezogen wird. Da der Spalt w_s kreisförmig angenommen wird, ist er im Verformungsnachweis nicht zu berücksichtigen. w_s ist jedoch ggf. bei der hydraulischen Bemessung des sanierten Rohres von Bedeutung.

3.5 Beispiel: Schlauchliner, Zustand I des Altrohrs

Es soll ein mit dem Schlauchverfahren hergestellter Liner für 5 m Wasseraußendruck über Rohrscheitel statisch nachgewiesen werden (vgl. auch [2]). Das Altrohr (Betonkanal DN 250) ist intakt und lediglich in den Muffen undicht. Eine sorgfältige Inspektion hat ergeben, daß der Ansatz einer Vorverformung von 3% des Radius (= 3,8 mm) mit einer Ausbreitung von $2\varphi_1 = 40^\circ$ ausreichend ist, um Muffenversätze, nicht lösbare Sohlablagerungen und kleinere Störungen durch einragende Seitenanschlüsse zu erfassen. Für die Gewebenacht wird ein größenord-

nungsmäßig ähnlicher Vorverformungsansatz gewählt. Sie wird im Scheitel angeordnet, um eine Überlagerung mit der Vorverformung der Sohle zu vermeiden.

Für das Schrumpfen des Harzes während des Aushärtens wurden 8% Volumenverminderung gemessen, d. h., das lineare Schrumpfmaß wird auf der sicheren Seite für den Verbundwerkstoff des Gewebeslauchs mit 2% angesetzt. Damit wird ein Ringspalt von $w_s = 0,02 \cdot 125 = 2,5$ mm in die Berechnung eingeführt.

Der Radius des Liners folgt bei Wahl von 5 mm Mindestwanddicke zu $r_L = d_i/2 - s_L/2 - w_s = 125 - 5/2 - 2,5 = 120$ mm

Verfahrensprüfungen und Laboruntersuchungen einer unabhängigen Prüfstelle haben einen Kurzzeit-E-Modul von 3000 N/mm² und die Bruchfestigkeiten $\sigma_{BZ} = 50$ N/mm² und $\sigma_D = 80$ N/mm² ergeben. Langzeiteinflüsse werden durch den Abminderungsfaktor $A_E = 1,6$ für E_L und $A_\sigma = 2,0$ für σ erfasst, so daß die folgenden Kennwerte resultieren:

$E_L = 1875$ N/mm²
 $\sigma_{BZ,L} = 25$ N/mm² und
 $\sigma_{DL} = 40$ N/mm² (Index L für Liner)

a) Spannungsnachweis

Der Wasserdruck über Linersohle beträgt $p_a = \gamma_w \cdot \max h_w = 10 \cdot (5 + 0,25) = 52,5$ kN/m².

In den m-/n-Beiwerten sind die Eigenlasten des Liners auf der sicheren Seite vernachlässigt. Aus Bild 6a ergeben sich für den Lastfall pa die Beiwerte

$m_{Sch} < 0,01$
 $m_K \approx -0,032$
 $m_{So} \approx 0,068 \rightarrow$ maßgebend

Die Größen r_L und E_L der Tabelle unterscheiden sich nur wenig von dem hier behandelten Beispiel. Im folgenden werden die mit einem Stabwerkprogramm exakt ermittelten Ergebnisse in geschweiften Klammern angefügt.

$M_{So} \approx 0,068 \cdot 52,5 \cdot 0,12^2 = +0,0514$ kNm/m = +51,4 Nmm/mm {49,9}
 $\max N_{So} \approx -0,8 \cdot 52,5 \cdot 0,12 = -5,04$ kN/m = -5,04 N/mm
 $\min N_{So} \approx -1,1 \cdot 52,5 \cdot 0,12 = -6,93$ kN/m = -6,93 N/mm {-6,50}

Mit $A_L = s_L/1$ mm = 5 mm²/mm
 $W_L = 1/6 \cdot s_L^2/1$ mm = 5²/6 = 4,17 mm³/mm
 und $\alpha_{ki} = 1 + 5/(3 \cdot 120) = 1,014$
 $\alpha_{ka} = 1 - 5/(3 \cdot 120) = 0,986$
 folgen die Spannungen der inneren und der äußeren Randfaser der Sohle $\sigma_i \approx -5,04/5 + 1,014 \cdot 51,4/4,17 \approx -1,01 + 12,50 = +11,49$ N/mm² {10,83}
 $\sigma_a \approx -6,93/5 - 0,986 \cdot 51,4/4,17 \approx -1,39 - 12,15 = -13,54$ N/mm² {-13,10}

und damit die Nachweise $\gamma_{BZ} \approx 25/11,49 = 2,18 > 2,0 = \text{erf } \gamma_{BZ}$ {2,31}
 $\gamma_D \approx 40/13,54 = 2,95 > 1,5 = \text{erf } \gamma_D$ {3,05}

b) Verformungsnachweis

Die auf $2r_L$ bezogenen elastischen Verformungen betragen nach Bild 7 für den vorliegenden Lastfall 2,2%. Hinzu kommen noch 50% der angesetzten Vorverformungen, d. h., es gilt $\delta_v = 2,2\% + 0,5 \cdot 3\% = 3,7\% < 6\%$ = zul δ_v (vgl. A 127) {3,72}

c) Stabilitätsnachweis

Zur Ermittlung des kritischen Wasseraußendrucks (Durchschlaglast) werden zunächst die Abminderungsfaktoren für die gemessenen Vorverformungen von 3% und für die in Höhe von 2% erwartete Spaltbildung aus Bild 5 a, b interpoliert.

Mit $r_L/s_L = 120/5 = 24$ folgen $\kappa_v = 0,60$ und $\kappa_s = 0,52$ sowie die Gesamtabminderung näherungsweise zu $\kappa_{v,s} \approx \kappa_v \cdot \kappa_s = 0,60 \cdot 0,52 = 0,312$.

Die Rohrsteifigkeit beträgt mit dem oben angegebenen Langzeit-E-Modul $S_L = 1875 \cdot 24^{-3}/12 = 0,0113$ N/mm² und der kritische Außendruck infolge Grundwasser $\text{krit } p_a = 0,312 \cdot 2,62 \cdot 24^{0,8} \cdot 0,0113 = 0,117$ N/mm²

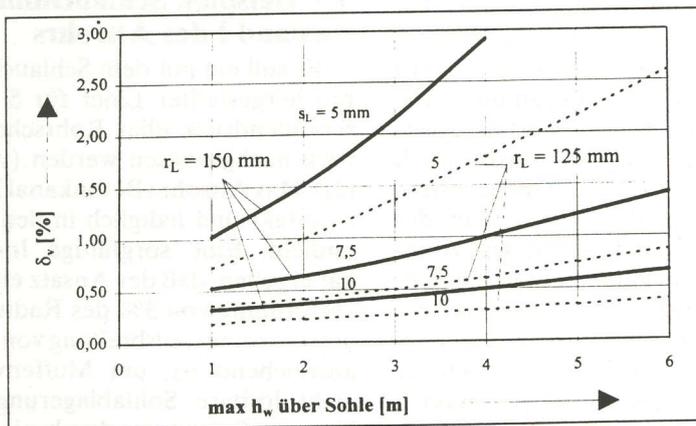
Bei einem vorhandenen Außendruck von $p_a = 0,0525$ N/mm² folgt der Stabilitätsnachweis mit $\gamma = \text{krit } p_a/p_a = 0,117/0,0525 = 2,23 > 2,0 = \text{erf } \gamma$

Damit sind die Standsicherheitsnachweise für die Sanierungsmaßnahme erfolgreich geführt.

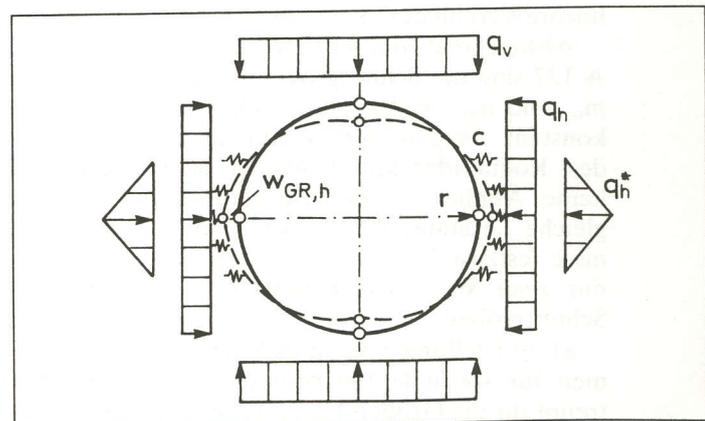
4 Nachweise für den Liner bei längsgerissenem Altrohr und tragfähigem Rohr-Bodensystem (Zustand II)

4.1 Abgrenzung vom Zustand III eines labilen Rohr-Bodensystems

In biegesteifen Rohren entsorgen durch Überschreiten der Biegezugfestigkeit σ_{BZ} des Rohrwerkstoffs Risse. Dieser Werkstoffkennwert wird i. d.



7 Verformungen (δ_v für Zustand I, $r_L = 125$ und 150 mm ($E_L = 2000$ N/mm², $w_s = 2\%$ von r_L , $w_s = 2\%$ von r_L)



8 System und Belastung des Viergelenkrings (Altrohr-Bodensystem)

Regel durch den Scheiteldruckversuch, der die Bruchkraft F_N in kN/m liefert, indirekt ermittelt. Hieraus kann durch bekannte Methoden der Kreisringstatik σ_{BZ} berechnet und für den Spannungsnachweis

$$\gamma = \sigma_{BZ} / \sigma \geq \text{erf } \gamma \text{ verwendet werden.}$$

Bei $\gamma < 1$ kommt es – zumindest rechnerisch – an der betrachteten Stelle zu einem Längsriß (z. B. im Scheitel) und anschließend aufgrund der Berbeanspruchung der übrigen Nachweistellen (Kämpfer und Sohle) häufig zu weiteren drei Rissen – es entsteht ein verschieblicher „Viergelenkring“ (Bild 8).

Eine Überschreitung der Biegezugfestigkeit kann verschiedene Gründe haben, einige typische Ursachen seien kurz aufgezählt (vgl. auch ATV-Merkblatt M 143 Teil 1):

- Unterschätzung des Konzentrationsfaktors λ_R
- Ausführung einer Dammschüttung anstelle der in der statischen Berechnung zugrunde gelegten Grabenbedingung
- Verringerung der Wanddicke durch Korrosion oder Abrieb
- Verminderung oder Entfall des entlastenden Seitendrucks durch Ausspülung oder unzureichende Verdichtung der Leitungszone
- nicht vorgesehene Auflasterhöhlungen während des Bau- oder Betriebszustandes
- unzureichende Rohrqualität
- Die Kenntnis des Grundes oder der Gründe ist für die Auswahl und die Dimensionierung des Sanierungssystems von erheblicher Bedeutung.

Der Viergelenkring ist nicht notwendigerweise labil. Vielmehr wird sich nach der Ribbildung und der Vertikalverformung nach innen die Scheitelbelastung verringern, und gleichzeitig werden durch die Horizontalverformung nach außen Bettungskräfte in der Leitungszone geweckt, die den Viergelenkring stützen. Das neu entstandene System verhält sich also unter gewissen Bedingungen wie ein biegeweiches Rohr.

Die Überprüfung der Standsicherheit des Viergelenkringes erfolgt durch Gleichgewichtsbetrachtungen, wobei die folgenden Voraussetzungen gelten:

- ideale, reibungsfreie und zentrische Momentengelenke in Scheitel, Kämpfer und Sohle
- Konzentrationsfaktor $\lambda_R = 1,0$ (es sind auch andere Werte denkbar)

□ Formulierung des Gleichgewichts am verformten System (Theorie II. Ordnung)

□ Winklersche Bettung bei Verformungen nach außen, d. h. $q_h^* = c \cdot w = S_{Bh} \cdot w/r$ mit dreieckförmiger Verteilung nach Bild 8

□ Begrenzung der Horizontalspannungen durch den passiven Erddruck, d. h. $\sum q_h \leq K_{pgh} \cdot q_v$

□ Vernachlässigung einer möglichen Druckdifferenz zwischen Außen- und Innenoberfläche des Altrohrs infolge Grundwasser

Die Ergebnisse der Berechnungen werden wie in [11] als Last-Verschiebungskurven ausgewertet und dargestellt (Bild 9). Es ist deutlich zu erkennen, daß die Lösungen nach Theorie I.

über eventuell vorhandene Hohlräume von großer Bedeutung, deren Aufspürung schwierig ist. Es ist aber damit zu rechnen, daß hierfür verbesserte Ortungsverfahren entwickelt werden.

Bei tiefliegenden Rohren (d. h. bei Vernachlässigung der Verkehrslasten) und $p_a = 0$ gilt unter Beachtung der Werte für K_2 , φ' und $\delta_{GR,v} = w_{GR,v}/r_m \cdot 100\%$ (Index GR – Gelenkring) für den kritischen Scheiteldruck

$$q_{v,krit} = (q_v/S_{Bh})_{max} \cdot S_{Bh} \quad (9a)$$

mit $(q_v/S_{Bh})_{max}$ nach Bild 9 oder getrennter Berechnung

$$\gamma = \text{krit } q_v/q_v \geq 2 \quad (9b)$$

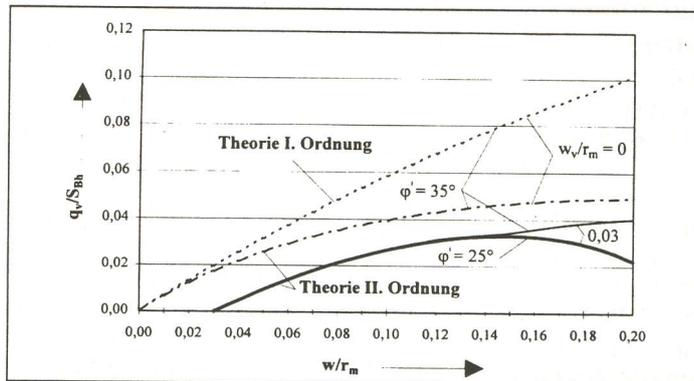
Zur Sicherung der Integrität des Altrohrs sind außerdem die Druckspannungen im Kämpfergelenk nachzuweisen.

Wird ungünstig ein dreieckförmiger Spannungsverlauf über einen Teil der Wanddicke s_D angenommen, so gilt

$$\sigma_D = 2N_K/s_D \text{ mit } N_K = \text{Druckkraft im Kämpfer} \approx -q_v \cdot \lambda_R (1 + \delta_{GR,h}) \cdot d_a/2 \quad (10)$$

und $\delta_{GR,h} = \delta_{GR,v}$ (vgl. Bild 9)

Bei Annahme einer Druckspannungszone von 20 % der Wanddicke und $\lambda_R \approx 1,0$ folgt $\sigma_D = 10N_K/s$. Gegebenenfalls sind Versuche zur Abschätzung des Einflusses von Querspannungen infolge von Teilflächenbelastungen angezeigt.



9 Last-Verschiebungskurven des Altrohr-Bodensystems (Zustand II oder III) für $S_{Bh} = c \cdot r = 5 \text{ N/mm}^2$

Ordnung das vorliegende Durchschlagproblem nicht zutreffend beschreiben. Die Kurven, die nach Theorie II. Ordnung ermittelt werden, haben ein Lastmaximum bei einer bestimmten zugehörigen Scheitelabsenkung. Eine weitere Laststeigerung ist nicht mehr möglich – der Gelenkring stürzt ein. Kommen noch Vorverformungen hinzu, so sind die Durchschlaglasten weiter abzumindern (Bild 9, ausgezogene Kurve). Bei Beschränkung der seitlichen Bodenspannungen durch den passiven Erddruck findet das Absinken der Last-Verschiebungskurve noch früher und ausgeprägter statt.

Die Herleitung der Bild 9 zugrunde liegenden Gleichungen erfordert die Kenntnis des Bettungsmoduls c bzw. des Verformungsmoduls E_2 in der Leitungszone und des Winkels φ' der inneren Reibung bzw. der Bodengruppe (G1 bis G4 gemäß A 127). Diese Werte können z. B. durch Rammsondierungen und Probennahme beschafft werden. Es ist aber auch die Kenntnis

4.2 Berechnungsverfahren für Wasseraußendruck p_a und Setzungen w_z

Nachdem die Standsicherheit des Rohr-Bodensystems unter Verwendung konservativer Annahmen überprüft ist, können die Spannungen und Verformungen des Liners für das Altrohr im Zustand II wie folgt nachgewiesen werden:

1. Die zum Zeitpunkt der Sanierung vorhandenen Verformungen des Viergelenkringes werden dem starr gebetteten Kreisring als zusätzliche spannungslose Vorverformungsfigur $w_{GR}(\varphi)$ eingepreßt.

2. Eventuelle weitere Setzungen des sanierten Altrohrs oder weitere Ver-

formungen bei veränderten Auflasten führen zu Zwangsverformungen w_z des Liners. Voraussetzung ist allerdings, daß auch für diese vergrößerten Verformungen und/oder Belastungen der Viergelenkring nach Abschnitt 4.1 standsicher ist.

Mit diesen Erweiterungen wird eine iterative Berechnung nach Theorie II. Ordnung für Wasseraußendruck analog Abschnitt 3.2 durchgeführt. Mit den Ergebnissen wird der Spannungs- und Verformungsnachweis geführt.

Für den Stabilitätsnachweis gilt näherungsweise Gl. (3), wenn zuvor die Gesamtvorverformung $w_v + w_{GR,v}$ ermittelt und hiermit κ_v berechnet wird. Zu κ_s gilt das im Abschnitt 3.3 Gesagte.

4.3 Beispiel: Schlauchliner, Zustand II des Altrohrs

Der Betonkanal DN 250 nach Abschnitt 3.5 soll für den Zustand II (tragfähiges Viergelenkrohr-Bodensystem) mit einem Schlauchliner saniert werden.

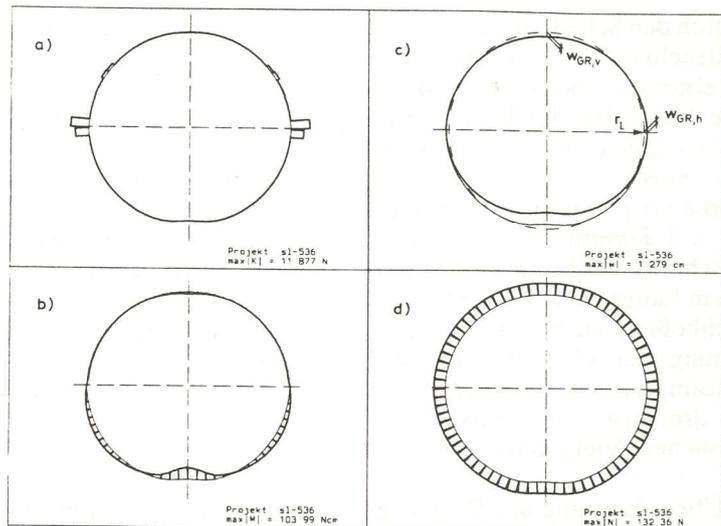
Für das Altrrohr gilt:
 Wanddicke $s = 30$ mm (es wurde kein Korrosionsabtrag festgestellt)
 Betongüte entsprechend B 25, unbewehrt
 Überdeckung $h = 4$ m
 Die Vertikalverformung des Viergelenkkringes beträgt $\delta_{GR,v} = 3\%$ von r_m
 Durch Rammsondierungen und weitere Erkundungen der Leitungszone wird ein Boden der Gruppe G2 bis G3 und eine Mindest-Proctordichte von 97 % festgestellt.

a) Nachweis des Rohr-Bodensystems

Mit dem ATV-Arbeitsblatt A 127 folgen die Bodenkennwerte $E_2 = 8$ N/mm², $\phi' = 25$ und $K_2 = 0,2$ (Viergelenkring = biegeweiches Rohr!)
 Mit $S_{Bh} = 0,6 \cdot \zeta \cdot E_2 = 0,6 \cdot 8 = 4,8$ N/mm² folgt nach Bild 9: $(q_v/S_{Bh})_{max} \approx 0,0331$ und mit Gl. (9 a, b) krit $q_v = 0,0331 \cdot 4,8 = 0,159$ N/mm² = 159 kN/m² gilt
 $\gamma = \text{krit } q_v/q_v = 159/(20 \cdot 4) = 1,99 \approx 2,0 = \text{erf } \gamma$

b) Nachweis der Druckspannungen in der Wand des Altrohrs

Druckkraft im Kämpfer nach Gl. (10):
 $N_K \approx -80 \cdot 1,0 \cdot (1 + 0,03) \cdot 0,31/2 = 12,8$ kN/m = 12,8 N/mm
 $\sigma_D \approx 10 \cdot 12,8/30 = 4,27$ N/mm²
 Mit $\beta_R = 17,5$ N/mm² bei B 25 und erf $\gamma = 2,1$ nach DIN 1045 folgt:
 $\gamma_D = 17,5/4,27 = 4,1 > 2,1 = \text{erf } \gamma$ (bei



10 Ergebnisplot für das Beispiel eines Schlauchliners DN 250 (Zustand II), a) Kontaktkräfte zwischen Liner und Altrrohr, b) Biegemomente, c) Biegelinie, überhöht dargestellt (----= ideale Kreiskontur), d) Längskräfte

Versagen des Querschnitts ohne Vorankündigung)

c) Nachweise für den Schlauchliner

Aus in größeren Zeitabständen durchgeführten Inspektionen wird geschlossen, daß die Verformungen mit $\delta_{GR,v} = 3\%$ ihren Endwert erreicht haben. Die Beanspruchung des Rohres in der Scheitelebene bleibt auch nach der Sanierung während der Restnutzungszeit näherungsweise konstant. Der maximale Grundwasserstand beträgt 5 m über dem Linerscheitel. Der Vorverformungsansatz, die Spaltweite zwischen Liner und Altrrohr und die Werkstoffkennwerte des Liners stimmen mit Abschnitt 3.5 überein.

Da für den vorliegenden Fall noch keine m-/n-Beiwerttafeln vorliegen, ist eine eigene elektronische Berechnung des Linersystems erforderlich (Bild 10). Diese ergibt für eine Linerwanddicke von 5 mm um 38% vergrößerte Biegemomente, verglichen mit dem rissefreien Zustand nach Abschnitt 3.5. Da die erforderliche Sicherheit mit $\gamma = 1,63 < 2,0$ nicht erreicht wird, muß die Wanddicke auf 6 mm erhöht werden.

c₁) Spannungsnachweis

Schnittgrößen an der maßgebenden Stelle (Sohle) nach Bild 10:

$$M_{So} = +51,7 \text{ Nmm/mm}$$

$$N_{So} = -6,37 \text{ N/mm}$$

$$\text{Mit } A_L = s_L/1 \text{ mm} = 6 \text{ mm}^2/\text{mm}$$

$$W_L = 1/6 \cdot s_L^2/1 \text{ mm} = 6^2/6 = 6 \text{ mm}^3/\text{mm}$$

$$\text{und } \alpha_{ki} = 1 + 6/(3 \cdot 120) = 1,017$$

$$\alpha_{ka} = 1 - 6/(3 \cdot 120) = 0,983$$

folgen die Spannungen der inneren und der äußeren Randfaser der Sohle

$$\sigma_i = -6,37/6 + 1,017 \cdot 51,7/6$$

$$= -1,06 + 8,76$$

$$= +7,70 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_a = -6,37/6 - 0,983 \cdot 51,7/6$$

$$= -1,06 - 8,47$$

$$= -9,53 \text{ N/mm}^2$$

und damit die Nachweise

$$\gamma_{BZ} = 25/7,70 =$$

$$3,25 > 2,0 = \text{erf } \gamma_{BZ}$$

$$\gamma_D = 40/9,35 =$$

$$4,20 > 1,5 = \text{erf } \gamma_D$$

c₂) Verformungsnachweis

Die Gesamtverformungen betragen nach Bild 10 c) 1,279 cm. Nach Abzug des Spaltes in der Sohle und Division durch die Sicherheit folgt $w_v = (12,79 - 5)/2,0 = 3,90$ mm, vgl. Abschnitt 2.2c.

Die auf $2r_L$ bezogene Gesamtverformung ergibt sich mit den Vorverformungen δ_v und $\delta_{GR,v}$ zu
 $\Sigma \delta_v = 3,90/119,5 \cdot 100\% + 1,5\% + 3\% = 7,75\%$

Dies ist zwar größer als zul $\delta_v = 6\%$ nach ATV-Arbeitsblatt A 127, jedoch sollten bei einer Beurteilung das Sanierungsziel und die im Altrrohr bereits vorhandenen Vorverformungen berücksichtigt werden!

c₃) Stabilitätsnachweis

Näherungsweise werden die Vorverformungen des nicht gerissenen Altrrohres von 3 % in der Sohle und die Verformungen des Gelenkkringes $\delta_{GR,v} = 3\%$ addiert. Zusammen mit 2 % Spaltbildung ergeben sich die Abminderungsfaktoren für die Durchschlaglast bei

$$r_L/s_L = 119,5/6 = 19,9 \text{ zu } \kappa_v \approx 0,45, \kappa_s \approx 0,57 \text{ und } \kappa_v \cdot \kappa_s \approx 0,45 \cdot 0,57 = 0,256$$

Mit $S_L = 1875 \cdot 19,9^{-3} / 12 = 0,0198 \text{ N/mm}^2$ folgt der kritische Außendruck
 krit $p_a \approx 0,256 \cdot 2,62 \cdot 19,9^{0,8} \cdot 0,0198 = 0,145 \text{ N/mm}^2$
 und der Stabilitätsnachweis
 $\gamma \approx \text{krit } p_a / p_a = 0,145 / 0,0525 = 2,77 > 2,0 = \text{erf } \gamma$

5 Nachweise für den Liner bei längsgerissenem Altrohr und nicht tragfähigem Rohr-Bodensystem (Zustand III)

Erbringen die im Abschnitt 4.1 beschriebenen Nachweise (9) und (10) keine ausreichende Sicherheit, fehlen wesentliche Parameter zur Abschätzung der Durchschlaglast des Viergelenkringes oder soll aus anderen Gründen der Zustand III zugrunde gelegt werden, so ist der Liner zusätzlich für Erd- und Verkehrslasten standsicher auszulegen.

Da jedoch i. d. Regel nicht mit einem völligen Zerfall des gerissenen Altrohrs zu rechnen ist, ist dieses in zweifacher Hinsicht für den Liner weiterhin von Bedeutung: Es überträgt die Erd- und Verkehrslasten kraftschlüssig auf den Liner und bildet gleichzeitig seine Lagerung. In Bild 1c wird unterstellt, daß wieder ein idealer Viergelenkring nach Abschnitt 4.1 vorliegt. Wird das Altrohr nicht mehr durch seitliche Federn gestützt, so verursachen die Scheitel- (und Sohl-)verformungen nach innen die Linienlast

$$Q_v = q_v \cdot d_a (1 + w_{GR,h} / r_m)$$

Bei Vernachlässigung der Wanddicke s und der Verformung $w_{GR,h}$ ergeben sich mit [12] die Biegemomente im Scheitel und in der Sohle zu

$$M \approx \frac{1}{\pi} \cdot Q_v \cdot r_m \approx \frac{2}{\pi} \cdot q_v \cdot r_m = 0,637 \cdot q_v \cdot r_m^2 \quad (11)$$

Nach A 127 ergibt selbst der ungünstigste Lagerungsfall I/60° das maximale Biegemoment

$$M = (0,377 \cdot q_v - 0,250 \cdot q_h - 0,181 \cdot q_h^*) \cdot r_m^2 \quad (12)$$

und damit weniger als 50 % des Wertes nach Gl. (11). Andererseits zeigt Bild 1c deutlich, daß bei der im Zustand III anzunehmenden speziellen Lagerung des Liners durch den Viergelenkring im Kämpfer keine seitlichen Lasten q_h und q_h^* auftreten können und damit die m -Beiwerte der ATV-Arbeitsblätter A 127 und A 161 nicht anwendbar sind.

Eine Nachweisführung mit den Biegemomenten nach Gl. (11) läge zwar auf der sicheren Seite, da die unter $\varphi = \pm 45^\circ$ und $\pm 135^\circ$ auftretenden Kontaktspannungen vernachlässigt werden, die daraus resultierenden Wanddicken wären jedoch im Sinne einer wirtschaftlichen Sanierungslösung nicht zu vertreten.

Es ist also eine möglichst exakte Nachbildung des nichtlinearen Kontakt-druckproblems durch geeignete Modelle erforderlich, die aus den in den Abschnitten 3.2 und 4.2 vorgestellten Lösungen weiterentwickelt werden. Diagramme und Rechenbeispiele hierzu sind in einer späteren Veröffentlichung vorgesehen.

6 Weitere Aufgabenstellungen und Ausblick

Im folgenden werden einige Aufgabenstellungen und Probleme genannt, die mit den vorgestellten Verfahren behandelt werden können.

a) Bei Eiprofilen ist das Durchschlagen eines Liners unter Wasseraußendruck bei den Zuständen I und II im unteren Kämpferbereich, wo der Linerradius das Dreifache des Scheitelradius beträgt, zu erwarten. Auf der sicheren Seite (aber etwas unwirtschaftlich) kann der Stabilitätsnachweis mit Gl. (3) geführt werden, wenn für r_L der Radius des Kämpfers r_{LK} eingesetzt wird. Die Spannungen und Verformungen sind durch Einzelnachweise zu überprüfen, vgl. [2]. Da beim Schlauchverfahren in der Sohle und im Scheitel größere Spalte auftreten können, sind diese in die Ansätze einzubauen.

b) Beim Verdämmen ist u. U. damit zu rechnen, daß ein Teil des Rohrumfanges nicht verfüllt wird. Dieser Fall läßt sich durch Abwandlung des statischen Modells nachbilden, wobei die Größe des dämmerfreien Bereichs bekannt sein muß.

c) Profilierte Rohre werden nicht nur bei Neuverlegungen, sondern auch bei Sanierungen angetroffen. Aufgrund der Auflösung und Optimierung des Querschnitts wird dieser i. d. Regel höher beansprucht. Gegebenenfalls sind zusätzlich zu den oben beschriebenen Nachweisen Schubspannungen, mehrachsiale Beanspruchungen und örtliches Beulen zu überprüfen.

d) Verankerte Liner werden in [2] näher behandelt.

Aufgrund der raschen Entwicklung bei den Reliningverfahren kann diese Liste nur einen kleinen Ausschnitt der möglichen Sonderfälle beinhalten, an deren Lösung auch in Zukunft noch intensiv zu arbeiten ist.

Bei allen vorgestellten Verfahren wird die Aufteilung der Nachweise in einen Spannungs-, Verformungs- und Stabilitätsnachweis ähnlich dem ATV-Arbeitsblatt A 127 beibehalten. Die Herleitung der Schnittgrößen- und Verformungsbeiwerte und die Durchschlaglasten unterscheiden sich jedoch erheblich von diesem Regelwerk. Auch bei noch tragfähigem Rohr-Bodensystem und bei anstehendem Grundwasserdruck müssen die genannten drei Nachweise unter Berücksichtigung von Vorverformungen und Spaltbildung geführt werden, und zwar auf der Grundlage der Langzeit-Werkstoffkennwerte des Liners. Bei nicht tragfähigem Rohr-Bodensystem ist der Liner zusätzlich mit Erd- und Verkehrslasten zu beaufschlagen, wobei aus wirtschaftlichen Gründen eine genaue Berechnung des Kontaktdruckproblems angezeigt ist.

Die vorliegende Arbeit wurde durch Mittel des Ministeriums für Wissenschaft und Forschung NRW im Rahmen des an der FH Münster eingerichteten Forschungsschwerpunktes „Umweltschutztechnologien in der Wasser- und Abfallwirtschaft“ unterstützt. Der Verfasser dankt Herrn Dipl.-Ing. Jürgen Liebendahl für die Durchführung der umfangreichen Berechnungen.

Literatur:

[1] Stein, D.: Niederehe, W.: Instandhaltung von Kanalisationen. 2. Aufl. 1992. Ernst & Sohn, Berlin
 [2] Falter, B.: Standsicherheit von Linern. In: Sanierung von Abwasserkanälen durch Relining (Hrsg. Lenz, J.). Vulkan-Verlag Essen, 1994
 [3] Standsicherheitsnachweise für biegeeweiche Liner. Tischvorlage zur Sitzung der ATV-Arbeitsgruppe 1.2.3 „Rohrstatik“, UA 2 „Sanierung“ am 5.11.1993 in Frankfurt
 [4] McAlpine, G.: Ovality Limitations in Pipe Rehabilitation Design. Design Theory Workshop NASTT „NO-DIG 94“ am 10. bis 13.4.1994 in Dallas, Texas
 [5] Wagner, V.: Beulnachweis bei der Sanierung von nichtbegehbaren, undichten Abwasserkanälen mit dem Schlauchverfahren. Diss. TU Berlin 1992
 [6] Glanert, R.: Sanierung von Rohrleitungen mit Close-fit-Relining unter besonderer Berücksichtigung des U-Liner-Verfahrens. Diplomarbeit FH Oldenburg 1992
 [7] Falter, B.: Grenzlasten von einseitig elastisch gebetteten kreiszylindrischen Konstruktionen. Bauing. 55 (1980), S. 381
 [8] Falter, B.: Statische Berechnung von erdverlegten Rohrleitungen und von Sanierungssystemen mittels EDV. In: Schriftenreihe aus dem Institut für Rohrleitungsbau an der FH Oldenburg (Hrsg. Prof. Lenz). Vulkan-Verlag Essen 1991
 [9] Glock, D.: Überkritisches Verhalten eines starr ummantelten Kreisrohres bei Wasserdruck von außen und Temperaturdehnung. Stahlbau 46 (1977), S. 212
 [10] Link, H.: Der kritische Außenwasserdruck des starr gebetteten Kreisrohres bei einer Klaffung zwischen Rohr und Bettung. Kali und Steinsalz (1987), S. 345
 [11] Hain, H.; Falter, B.: Stabilität von biegesteifen oder durch Momentengelenke geschwächten und auf der Außenseite elastisch gebetteten Kreisringen unter konstantem Außendruck. Straße Brücke Tunnel (1975), S. 98
 [12] Hornung, K.; Kittel, D.: Statik erdüberdeckter Rohre. Bauverlag Wiesbaden und Berlin 1989