

Statische Berechnung von Abwasserkanälen und -leitungen nach ATV-DVWK-A 127, 3. Auflage 08.2000

Von B. Falter¹

1. Vorbemerkungen

Das Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 127 hat sich für die statischen Nachweise erdverlegter Abwasserkanäle und -leitungen bewährt. So hat z. B. die Ermittlung der Konzentrationsfaktoren für die Belastung über dem Rohr mit dem Konzept des „schubsteifen Balkens“ von Leonhardt [1], [2] auch internationale Anerkennung und Eingang in die geplante europäische Vorschrift EN 1295 gefunden.

Bereits im Vorwort zur 2. Auflage 1988 wird darauf hingewiesen, dass die Gültigkeit auf Standardfälle beschränkt ist. Deshalb wurden inzwischen ergänzende Merkblätter für *Deponiesickerleitungen* (M 127-1, 03.1996) und für *Sanierungssysteme* (M 127-2, 01.2000) herausgegeben. Ein weiteres Merkblatt M 127-3 für *profilierte Kunststoffrohre* ist in Vorbereitung.

Aufgrund von neuen Erkenntnissen in der Rohrstatik (Versuche, Vergleiche mit der Finite Element Methode, Europäische Normung usw.) und wegen Neuentwicklungen bei den Leitungssystemen (z. B. Rohre mit profilierter Wand) ergab sich in verschiedenen Abschnitten des Arbeitsblattes Regelungsbedarf. Die neuen Erkenntnisse sind in die seit August 2000 vorliegende 3. Auflage eingearbeitet.

Wichtige Ziele bei der Erstellung der 3. Auflage waren zusammenfassend:

- 1 **Berücksichtigung von Neuentwicklungen** (etwa von profilierten Kunststoffrohren, wofür gelegentlich anstelle von Berechnungen Versuche gefordert werden),
- 2 Beibehaltung des praktikablen **Handrechenverfahrens** und Öffnungsklausel für alternative Verfahren (zwar kann heute nahezu jedes Problem der Strukturanalyse mit der Finite Element Methode berechnet werden, doch können hierbei neue Probleme und Fehlermöglichkeiten entstehen),
- 3 **Einfache und nachvollziehbare Formeln** zur Erfassung von baupraktischen Einflüssen und Berücksichtigung neuer Rohrsysteme (der Vorzug gilt geschlossenen Näherungsformeln auf der sicheren Seite)

Wegen der zeitlichen Begrenzung wird nur ein kurzer Überblick über das Arbeitsblatt A 127 gegeben und anschließend auf einige wichtige Neuerungen der 3. Auflage 08.2000 eingegangen, ausführliche Kommentare sind in [3] zu finden.

2. Grundlagen der Berechnung: Rohreinbau

Grundlage einer statischen Berechnung ist der korrekte Rohreinbau, wie er in DIN EN 1610 und ATV-DVWK-A 139 festgelegt ist. Grundsätzlich sind

- flächenförmige Belastungen (Bild 1a) auf der gesamten Rohroberfläche anzustreben, dagegen sind

¹ Prof. Dr.-Ing. Bernhard Falter, Fachhochschule Münster, Fachbereich Bauingenieurwesen

Veröffentlicht in: Schriftenreihe aus dem Inst. f. Rohrleitungsbau an der FH Oldenburg, Band 24 (Hrsg. Prof. Lenz). Vulkan Verlag, Essen (2001) 366-380

- Linienlasten durch harte Auflager (Bild 1b) oder gar
 - Punktlasten durch „Muffenreiten“ oder Steine (Bild 1c)
- durch geeignete Maßnahmen auszuschließen.

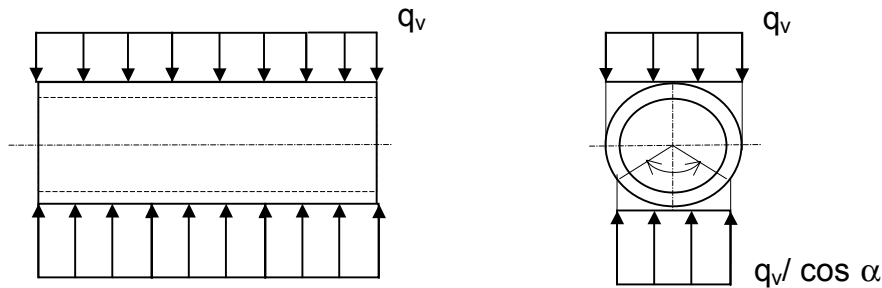


Bild 1a flächenartige Belastung z. B. durch vertikale Belastung q_v und zugehörige Auflagerspannungen

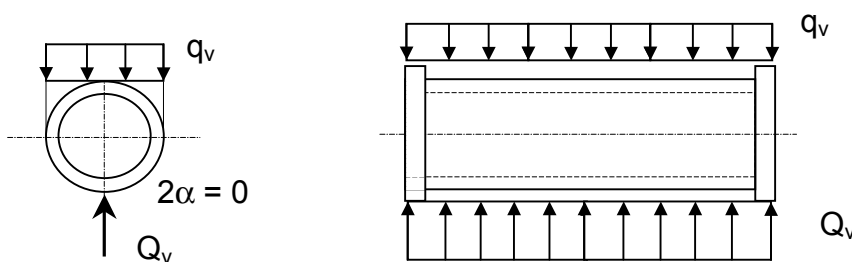


Bild 1b Linienförmige Auflagerspannungen Q_v (z. B. durch unnachgiebiges Rohraufleger, fehlende Vorbereitung der Auflagermulde)

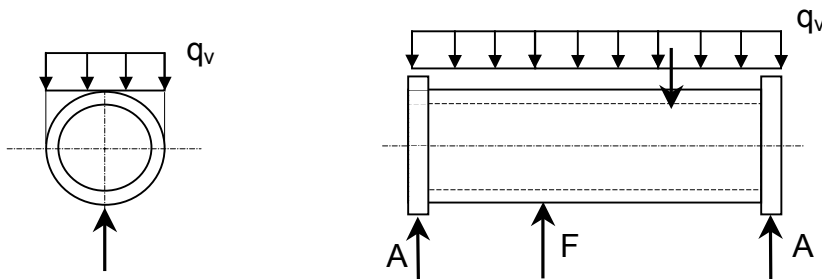


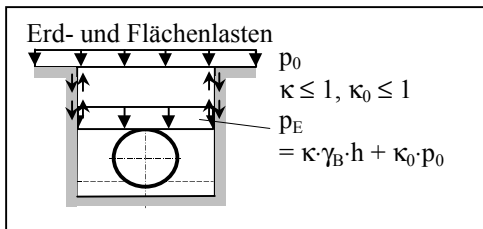
Bild 1c Punktförmige Auflagerkräfte A (z. B. durch fehlende Muffenmulden) oder Einzelkräfte F am Rohrumfang (z. B. durch Steine)

Sind Abweichungen vom vorgesehenen Rohreinbau unvermeidbar, dann sollten die Mehrbelastungen z. B. durch Wahl eines kleineren Auflagerwinkels 2α erfasst werden, die ggf. erforderlichen Schnittgrößenbeiwerte können aus [4] entnommen werden.

Biegeeweiche Rohre sind auf den seitlichen Bettungsreaktionsdruck q_h^* angewiesen, der bei der Verformung des Rohres zu einer Ellipse in den Kämpferbereichen geweckt wird. Diese Größe ist im Wesentlichen abhängig vom Verformungsmodul des Bodens in der Leitungszone E_{20} , der zur Berücksichtigung verschiedener Baustellenbedingungen (Grabenbreite, Grundwassereinfluss, plastische Böden) auf E_2 abgemindert wird.

Der Ablauf des Rechenverfahrens wird in Tabelle 1 in den erforderlichen Schritten dargestellt.

1: Belastung



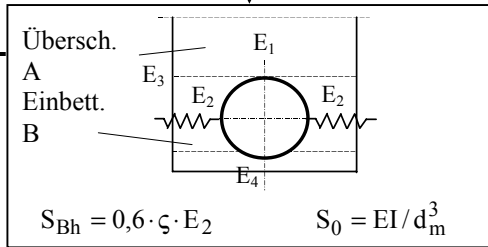
Verkehr p_V

- Straßen SLW
- Eisenbahn UIC
- Flugzeug BFZ
- ggf. konzentrierte Flächenlast p_K

sonstige Lasten

- Grundwasser
- Wasserfüllung $p_a = \gamma_w \cdot h_w$
- Eigenlasten γ_R s

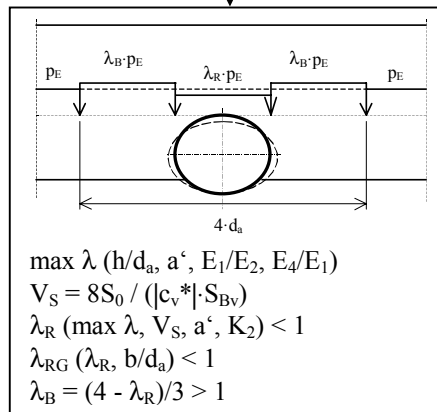
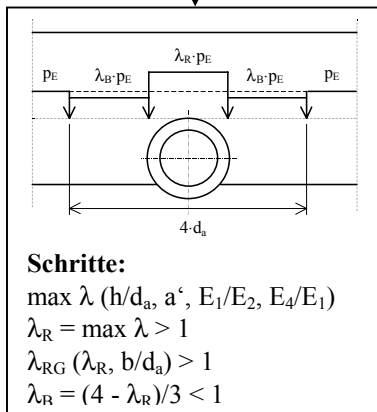
2: Rohr, Bodeneigenschaften, Einbaubedingungen



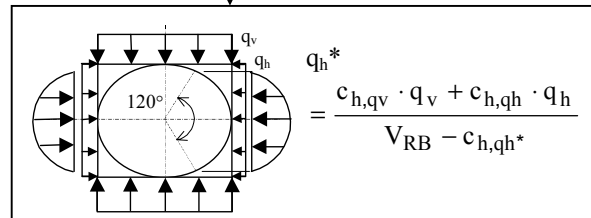
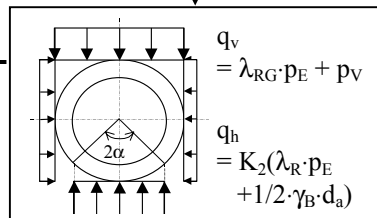
$V_{RB} = 8S_0 / S_{Bh} > 1$: **biegesteifes Rohr**

$V_{RB} \leq 1$: **biegeweiches Rohr**

3: Lastaufteilung



4: Druckverteilung am Rohrumfang



5: Schnittgrößen, Spannungen, Verformungen, Beulasten

1) $N = n \cdot q \cdot r_m$
 $M = m \cdot q \cdot r_m^2$
 $\sigma = \frac{\sum N}{A} \pm \alpha_k \cdot \frac{\sum M}{W}$
 mit $A = 1 \cdot s$, $W = 1 \cdot s^2 / 6$

1) N, M und σ s. biegesteife Rohre
 2) $\delta_v = (c_{v,qv} \cdot q_v + c_{v,qh} \cdot q_h + c_{v,qh^*} \cdot q_{h^*}) / 8S_0 \cdot 100\%$
 3) $\text{krit } q_v = 2 \cdot \kappa_{v2} \cdot \sqrt{8S_0 \cdot S_{Bh}}$ (für $V_{RB} \leq 0,1$)
 $\text{krit } p_a = \kappa_a \cdot \alpha_D \cdot 8S_0$

6: Nachweise

1) $\gamma = \sigma_R / \sigma \geq \text{erf } \gamma$ oder
 $\gamma = F_N \cdot EZ / (q_v \cdot d_a) \geq \text{erf } \gamma$
 2) ggf. Ermüdungsnachweis

1) $\gamma = \sigma_R / \sigma \geq \text{erf } \gamma$ oder
 2) $\delta_v \leq 6\% \text{ SLW } (\leq 2\% \text{ UIC})$
 3) $\gamma = 1 / (q_v / \text{krit } q_v + p_a / \text{krit } p_a) \geq \text{erf } \gamma_I$
 4) ggf. Ermüdungsnachweis

Tab. 1 Übersicht über Berechnungsverfahren für erdgebettete Abwasserkanäle nach ATV-DVWK-A 127

3. Lasten (Einwirkungen), erforderliche Nachweise

Die für erdbettete biegesteife und biegeweiche Rohre erforderlichen Standsicherheitsnachweise in Tabelle 2 zusammengestellt.

Tab. 2 Erforderliche Nachweise Abwasserkanäle und -leitungen nach ATV-A 127

| erforderliche Nachweise | biegesteife Rohre | | biegeweiche Rohre | |
|--|------------------------|--|---|-----------------|
| | z. B. Beton, Steinzeug | | Rohre ohne Kriecheigenschaften, z. B. Gusseisen | Kunststoffrohre |
| Spannungsnachweis | | | | |
| Kurzzeit | | | | |
| Langzeit | | | | |
| Verformungsnachweis | | | | |
| Kurzzeit | | | | |
| Langzeit | | | | |
| Stabilitätsnachweis | | | | |
| Kurzzeit | | | | |
| Langzeit | | | | |
| Nachweis bei nicht vorwiegend ruhender Belastung (geringe Überdeckung h) | | | | |

Bei einer Rohrdimensionierung sind die folgenden Lasten zu berücksichtigen:

- Erdlasten, Oberflächenlasten
- Verkehr
- Wasserfüllung
- Eigenlasten
- Grundwasser
- Wasserinnendruck oder innerer Unterdruck (insbesondere bei Druckleitungen²)
- Sonderlasten (z. B. Fundamentlasten in Trassennähe)

Die Erdlasten sind zunächst wie folgt zu berechnen:

$$p_E = \gamma_B \cdot h$$

Sie dürfen ggf. durch den sogenannten Siloeffekt, d. h. die Gewölbebildung im Boden infolge Setzung der Grabenverfüllung abgemindert werden. Üblicherweise wird jedoch hiervon im innerstädtischen Bereich kein Gebrauch gemacht, da eine spätere Tiefbaumaßnahme in der Rohrtrasse dieses lastmindernd angenommene Gewölbe zerstören kann.

Die Verkehrslasten für Straßenverkehr (SLW 60/30 nach DIN 1072), Eisenbahnverkehrslasten nach UIC 71 und Flugzeugverkehrslasten können auf einfache Weise aus Diagrammen abgelesen werden:

$$p_V = \varphi \cdot p \quad \text{mit } \varphi = \text{zugehöriger Stoßfaktor}$$

Der Lastfall Grundwasser

$$p_a = \gamma_W \cdot h_W \quad \text{mit } h_W = \text{auf die Rohrsohle bezogene Wassersäule}$$

erzeugt in der Rohrwandung Druckspannungen. Da diese die üblicherweise maßgebenden Biegezugspannungen reduzieren, dürfen sie beim Spannungsnachweis in der Regel

² Das Sonderthema Druckleitungen wird im Abschnitt 4.1 kurz behandelt.

nicht addiert werden, da auch der Fall eines minimalen Grundwasserstandes unter der Rohrsohle z.B. bei Grundwasserabsenkung möglich ist. Dagegen ist der Lastfall Grundwasser maßgebend, wenn ein Stabilitätsnachweis zu führen ist (s. Tab. 2, Abschnitt 4.4.1).

4. Neuerungen der 3. Auflage des A 127

4.0 Übersicht und Bewertung der Änderungen

Seit dem Erscheinen der 2. Auflage des A 127 im Jahr 1988 haben sich eine Reihe neuer Erkenntnisse, technischer Entwicklungen, neuer Werkstoffe und Trends ergeben, die nach intensiver Arbeit im Arbeitskreis ES 2.3 „Rohrstatik“ zum Weißdruck der 3. Auflage im August 2000 geführt haben. Eine Übersicht über die Änderungen und eine Abschätzung der Auswirkungen auf die Ergebnisse ist in Tabelle 3 zu finden.

Tab. 3 Änderungen der 3. Auflage 08.00 des Arbeitsblattes A 127 gegenüber der 2. Aufl.

| Nr. | Änderung | Bedeutung | | |
|-----|--|--|--------|------|
| | | gering | mittel | hoch |
| 1 | Erweiterung auf Druckleitungen | | + | |
| 2 | Erhöhung des Verformungsmoduls E_2 bei Dammbedingung und $h > 5$ m (bisher $E_2 = \text{const}$) | | + | |
| 3 | Abminderung des Verformungsmoduls E_2 entfällt | | + | |
| 4 | gleicher Auflagerwinkel $2\alpha = 120^\circ$ bzw. 180° für biege- weiche Rohre beim Spannungs- und Verformungsnachweis | | (+) | |
| 5 | Berücksichtigung der Normalkraft- und Querkraft- verformungen | (±), bei profilierten Kunststoffrohren: mittel | | |
| 6 | zul $\delta_v = 9$ % (nichtlineare Berechnung ab $\delta_v = 6$ %) | | (+) | |
| 7 | Verfahren für profilierte Rohre | | | (+) |
| 8a | Berücksichtigung von Vorverformungen beim Stabilitäts- nachweis | | (-) | |
| 8b | Grundwasser auf Rohrsohle bezogen (vorher: Kämpfer) | | (-) | |
| 8c | Reduktion von erf γ auf 2,0 (bisher 2,5) | | (+) | |
| 9 | Zusatzbelastungen infolge unter die Rohrsohle geramm- ter Spundwände (Bericht ATV AG 1.5.5 [13]) | | | -- |
| 10 | A 127, Tab. 3: Anpassung der Werkstoffkennwerte, neu: Polypropylen | | | (±) |
| 11 | Kunststoffrohre: Verkehrslasten mit Kurzzeitmodul | | | (+) |
| 12 | Langzeit-E-Modul für Kunststoffrohre für 2 Jahre (bisher 50 Jahre) | | (+) | |
| 13 | Grenzwert für biegeweiche Rohre $V_{RB} = 1$ (bisher 0,1) | | | + |
| 14 | Dauerschwingfestigkeit: q_h^* bei $S_{Bh} \geq 6$ N/mm ² | | | (±) |
| 15 | Neudefinition der Rohrsteifigkeit S_0 mit d_m (bisher r_m) | | ± | |
| 16 | Abminderung $E_{2,0}$ durch $f_1 = 0,8 / 0,5$ (nur G3 / G4) | - | | |
| 17 | Neufassung der Gleichung für ζ | + | | |
| 18 | Bettungsreaktionsdruck q_{h*W} für Wasserfüllung | | | (+) |

Anmerkungen³: + vorteilhaft, – nachteilhaft, ± vom Einzelfall abhängig bzw. kein Einfluß (...) gilt nur für Kunststoffrohre

³ Die Bewertungen in Tabelle 2 sind persönliche Auffassung des Autors und erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit.

Ab Zeile 10 der Tabelle 3 sind die Ergebnisse des umfangreichen Einspruchsverfahrens in den Jahren 1998 bis 2000 aufgeführt.

Exemplarisch werden im folgenden nur einige Punkte näher betrachtet, und zwar

- 1 die Erweiterung auf Druckleitungen (Nr. 1),
- 2 die Erhöhung der Verformungen für biegeweiche Rohre von 6 auf 9%, wenn diese nichtlinear berechnet werden (Nr. 6),
- 3 die Regelungen für profilierte Kunststoffrohre (Nr. 7),
- 4 die Einführung von Vorverformungen beim Stabilitätsnachweis (Nr. 8a-c),
- 5 die Zusatzbelastungen durch das Ziehen von unter die Rohrsohle gerammten Spundwänden (Nr. 9),
- 6 die Neuregelung des Zeiteinflusses von Verkehrslasten auf die Nachweise von Kunststoffrohren mit Hilfe eines gewichteten E-Moduls und einer gewichteten Biegezugfestigkeit (Nr. 11) und
- 7 nicht vorwiegend ruhende Belastungen – in Fällen mit $S_{Bh} \geq 6 \text{ N/mm}^2$ darf bei biegeweichen Rohren ein Bettungsreaktionsdruck q_h^* angesetzt werden (Nr. 14).

4.1 Erweiterung auf Druckleitungen

Bei erdgebetteten Druckleitungen unter Straßenverkehrslasten sind die Spannungen aus Innendruck sowie Erd- und Verkehrslasten zu überlagern, vgl. Bild 2. Inwieweit dabei ein „Rerounding“-Effekt auftritt und ausgenutzt werden kann, ist in der Literatur häufig diskutiert worden. Eine experimentelle Bestätigung des in [5] vorgeschlagenen Verfahrens für bestimmte Parameter erfolgt durch Überfahrversuche an der FH Oldenburg [6].

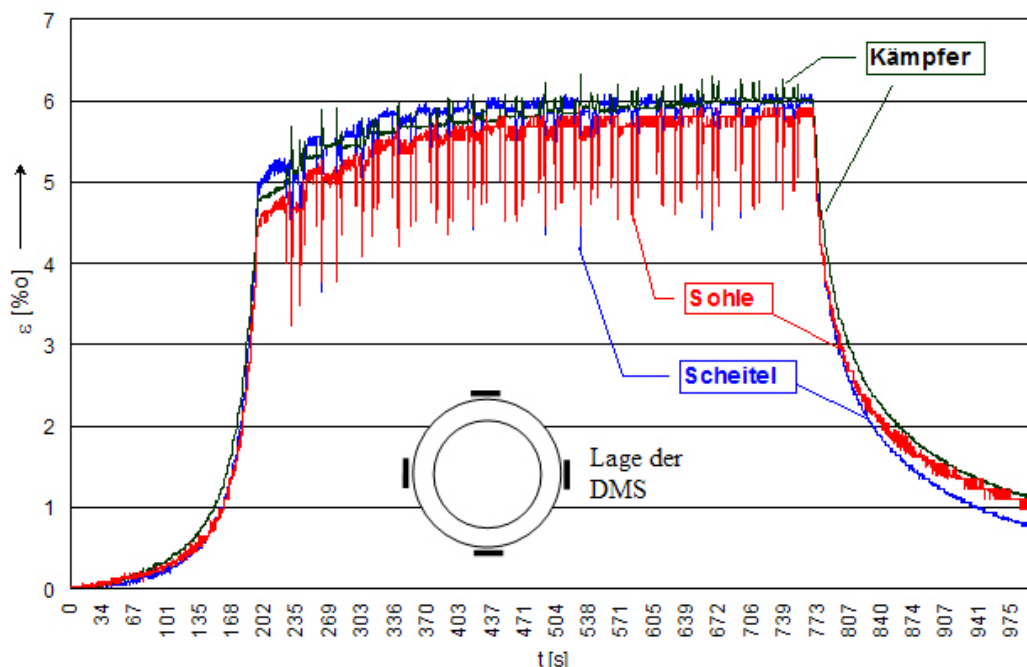


Bild 2 Überlagerung von Innendruck und Verkehrslasten bei einem Kunststoffrohr, Quelle: Überfahrversuche von Hinrichs/Schwerdt [6]

Bild 2 vermittelt möglicherweise den Eindruck, dass die Spannungsspitzen durch Verkehrslasten *reduziert* werden. Aufgrund der geringen Rohrdurchmesser konnten nur auf

der Außenseite Dehnmessstreifen appliziert werden. Auf der Innenseite etwa des Rohrscheitels sind jedoch ebenfalls entsprechende *zusätzliche* Zugspannungen zu erwarten.

Bei der praktischen Bemessung für die Interaktion von Spannungen aus dem Lastfall „Innendruck p_i inkl. Druckstoß“ und dem Lastfall „Erd- und Verkehrslasten $p_E + p_V$ “ sind außerdem die unterschiedlichen Grenzwerte für Zug (Vergleichsspannung) und Biegezug sowie die unterschiedlichen Sicherheitskonzepte zu beachten [7].

4.2 Verformungen

Die Verformungen sind auf 6 % des Rohrdurchmessers zu beschränken, unter Gleisen der DB AG sind maximal 2 % zulässig. Bei Kunststoffrohren gilt als Kurzzeitwert allgemein 4 %, um Reserven für die zeitabhängigen Kriechverformungen vorzuhalten. Langzeitversuche haben gezeigt, dass die Verformungen von Kunststoffrohren in der Regel nach ca. zwei Jahren abgeklungen sind [8].

In der 3. Auflage des Arbeitsblattes A 127 sind als Verformungsgrenze 9 % zugelassen, wobei als Begründung Langzeitmessergebnisse sowie internationale Erfahrungen und Normen angeführt werden. Für Fälle mit $\delta_v > 6 \%$ ist ein nichtlinearer Nachweis zu führen, d. h., das Gleichgewicht ist an der verformten Geometrie des Rohres zu ermitteln. Diese zunächst kompliziert erscheinende Regelung wird im A 127 durch einfache Multiplikation der Verformung δ_v mit einem Vergrößerungsfaktor α_{II} bewerkstelligt:

$$\alpha_{II} = \frac{1}{1 - \frac{1}{\gamma}} \quad \text{mit } \gamma = \frac{q_{krit}}{q_v} \quad (\text{s. a. Stabilitätsnachweis Abschnitt 4.4.2})$$

4.3 Profilierte Kunststoffrohre

Profilierte Kunststoffrohre - etwa nach DIN 19566-100 - finden im Deponiebau, bei Stauraumkanälen aber auch bei Abwasserkanälen zunehmend Verwendung. Bei der statischen Berechnung herrschte häufig Unsicherheit darüber, wie diese Rohre z. B. mit vorhandenen EDV-Programmen zu berechnen sind. Fälschlicherweise wurde die Berechnung häufig mit Hilfe der „äquivalenten Wanddicke“, also einem glattwandigen Rohr gleicher Rohrsteifigkeit durchgeführt.

Ferner wurden andere Besonderheiten der Profilierung, wie sie z. B. im Stahlleichtbau bekannt sind, nicht beachtet, so dass dringender Regelungsbedarf bestand.

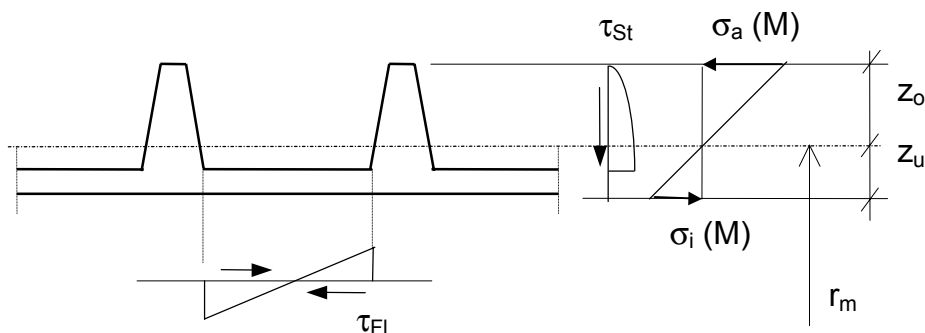


Bild 3 Innen glattwandiges und außen profiliertes Rohr, Längs- und Schubspannungen

Bild 3 zeigt ein profiliertes Rohr, dessen Wand durch Biegemomente, Normalkräfte und Querkräfte beansprucht wird. Die zugehörigen Längsspannungen und Schubspannungen sind eingetragen. Aus der nicht mittigen Lage der Schwerachse ($z_o \neq z_u$) ergibt sich auch ein unsymmetrischer Verlauf der Spannungen σ aus M über die Querschnittshöhe, die Spannungen auf der Rohraußenseite (an den Rippen) sind deutlich größer. Dieser Sachverhalt wird bei Verwendung einer „äquivalenten Wanddicke“ ignoriert!

Die korrekten Längsspannungen ergeben sich mit:

$$\sigma_a = \frac{N}{A} - \alpha_{ka} \cdot \frac{M}{W_a}$$

und
$$\sigma_i = \frac{N}{A} + \alpha_{ki} \cdot \frac{M}{W_i}$$

Die Längsspannungen aus N sind wegen der Optimierung des Querschnitts größer als bei glattwandigen Profilen.⁴

Die Schubspannungen dürfen bei profilierten Rohren nicht mehr vernachlässigt werden. Die Gleichung für die Schubspannungen lautet allgemein:

$$\tau = \frac{Q \cdot S}{I \cdot s_i}$$

- mit
- Q = 1) maximale Querkraft in der Rohrwand (ggf. zug M)
 - 2) zu max M zugehörige Querkraft (für Vergleichsspannung)
 - S = Flächenmoment 1. Grades um die Schwerachse des Querschnitts
 - I = Flächenmoment 2. Grades
 - s_i = Wanddicke an der betrachteten Stelle des Querschnitts

Für die Querkraft, die bisher nicht berechnet werden musste, ergibt sich eine weitere Besonderheit: Ihr Maximalwert liegt zwar näherungsweise bei $\varphi = 45^\circ$ und $\varphi = 135^\circ$ bis 145° , dennoch ist ein gemeinsames Auftreten der maximalen Querkraft und größerer Biegemomente möglich, so dass auch der Nachweis der Vergleichsspannungen angezeigt ist.

Beim Stabilitätsnachweis darf wegen der bei profilierten Rohre größeren Normalkraftverformungen im Diagramm D 10 nicht mehr der Parameter r_m/s verwendet werden, sondern

$$k^* = \sqrt{\frac{A}{12 \cdot I}} \cdot r_m \quad \text{vgl. [10] und [9]}$$

Ferner sind ggf. dünnwandige Teile des Querschnitts nachzuweisen:

- für Belastung auf die Rohroberfläche mit Schnittgrößen nach den Regeln der Platten- oder Schalentheorie, vgl. Bild 4 links
- Beulnachweise für lokales Beulen und Interaktion von k_q und k_p , vgl. Bild 4 rechts

Die Beulnachweise können mit den klassischen Beullasten (Beulwerte k_σ und k_τ) geführt werden, wie sie aus der Stahlbaubemessung nach DIN 1800-3 bekannt sind. Es ist allerdings darauf hinzuweisen, dass für Kunststoffe noch keine systematisch ermittelten Abminderungsfaktoren k_P existieren, mit deren Hilfe ein – wie sonst üblich – einfacher elastisch-plastischer Nachweis geführt werden könnte.

⁴ Was wiederum Konsequenzen für die Verformungen hat.

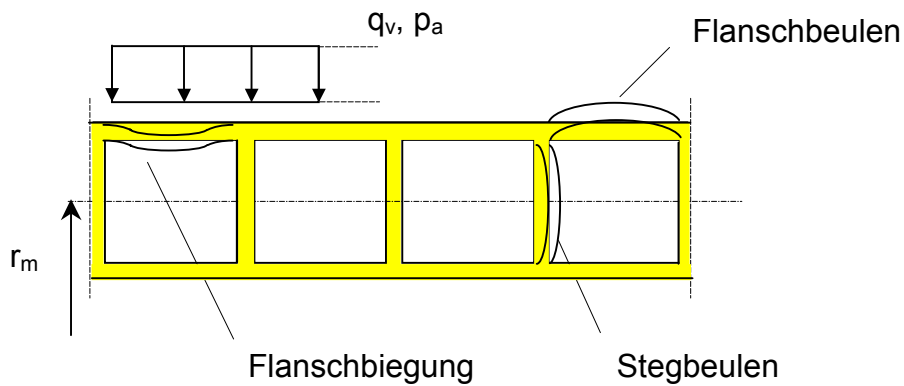


Bild 4 lokale Biegung und lokales Beulen bei profilierten Rohren

4.4 Stabilitätsnachweis, Vorverformungen

4.4.1 Wasseraußendruck p_a

In seiner Dissertation [12] hat Dürkop Großversuche an GFK-Behältern unter Wasseraußendruck bei zusätzlichem Vakuum durchgeführt. Da die Versuchskörper relativ lang waren (Bild 5), konnten die Ergebnisse auch auf biegeweiche Kunststoffrohre übertragen werden. Bild 6 zeigt eine Gegenüberstellung der Versuchsbeullasten mit den Ergebnissen nach Diagramm D 10 in ATV-A 127 unter Einbeziehung der in [12] mitgeteilten Vorverformungen – es ist eine gute Übereinstimmung zu erkennen.

Bild 5

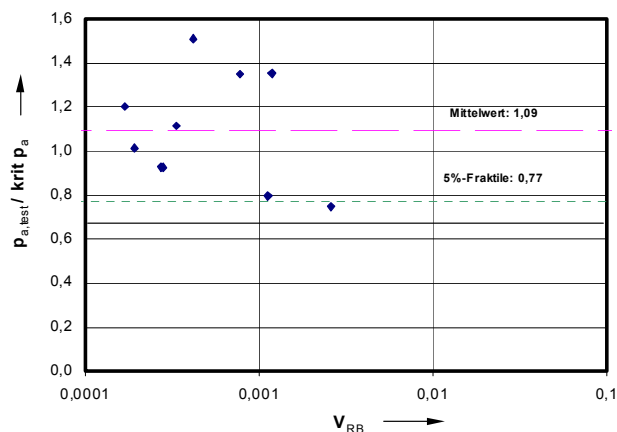
Beulversuch an GFK-Behältern DN 800 ($r/s = 80$, $l/r = 5,4$), Beulform

Foto: Diss. Dürkop [12]



Bild 6

Nachrechnung der Beulversuche von Dürkop



Die Beullasten (Durchschlaglasten) für äußeren Wasserdruck werden in der 3. Auflage des A 127 wie folgt ermittelt:

$$\text{krit } p_a = \kappa_{a1,2} \cdot \alpha_D \cdot 8S_0 \quad (2. \text{ Auflage: ohne } \kappa_a)$$

mit α_D = Durchschlagbeiwert nach Diagramm D10, abhängig von V_{RB} und r_m/s
(Herleitung s. [10])

und den Reduktionsfaktoren für Imperfektionen (in der 3. Auflage neu)

κ_{a1} für örtliche Vorverformungen nach Bild 7a (affin zur Beulfigur, vgl. auch Bild 5)
Werte aus Diagramm D13a-f oder Näherungsgleichung

κ_{a2} für zweiwellige Vorverformung nach Bild 7b (die dominante Vorverformung bei gebetteten Rohren), Werte aus Diagramm D12a-f oder Näherungsgleichung

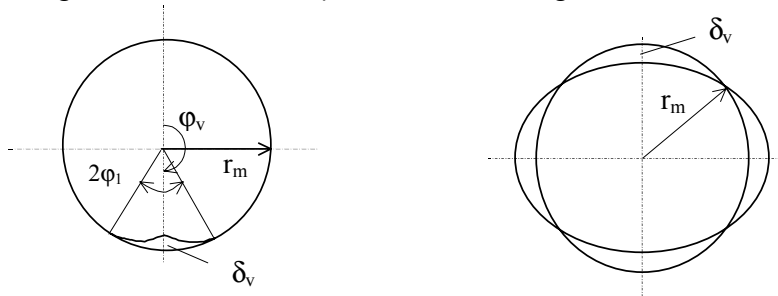


Bild 7a) einwellige Vorverformung

7b) zweiwellige Vorverformung

Der die Beullasten verringernde Einfluss von Vorverformungen liegt auf der Hand: Ein oval verformtes Rohr hat einen geringeren Beulwiderstand als ein kreisrundes Rohr. Für diesen offenkundigen Sachverhalt liegen auch experimentelle Ergebnisse vor.

4.4.2 Erd- und Verkehrslasten q_v

Für die kritische Belastung von biegeweichen Rohren unter vertikaler Belastung q_v (also Erd- und Verkehrslasten) gelten nach ATV-A 127 die Gleichungen

$$\text{krit } q_v = \kappa_{v2} \cdot 2 \cdot \sqrt{V_{RB}^{-1}} \cdot 8S_0 \quad \text{für } V_{RB} \leq 0,1 \quad (2. \text{ Auflage: ohne } \kappa_{v2})$$

$$\text{krit } q_v = \kappa_{v2} \cdot \left(3 + \frac{1}{3 \cdot V_{RB}} \right) \cdot 8S_0 \quad \text{für } V_{RB} > 0,1$$

mit S_0 = Rohrsteifigkeit (es gilt $8S_0 = S_R$)

und κ_{v2} = Reduktionsfaktor für Imperfektionen und plastisches Bodenverhalten,
Werte aus Diagramm D11 oder Näherungsgleichung.

Die Beulformel beruht auf dem allseitig nach innen und nach außen gebetteten Ring, in Bild 8 sind Versuche hierzu an dünnwandigen Ringen dargestellt, Näheres s. [10].

Bild 8

Beulmuster eines dünnwandigen Ringes unter allseitigem Druck nach [10]



Der Abminderungsfaktor κ_{v2} erfasst das plastische Bodenverhalten bei Verschiebungen der Rohrwand gegen den Boden δ^+ bzw. in das Rohrinne δ^+ nach Bild 9b.

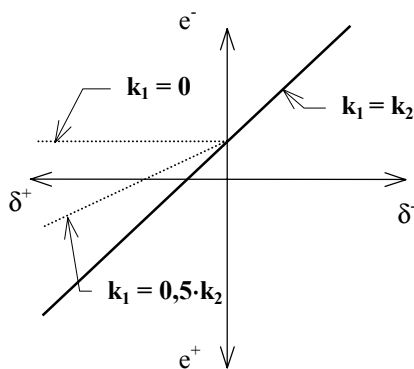


Bild 9a Bodenverhalten A 127, 2. Auflage ohne Begrenzung von q_h^*

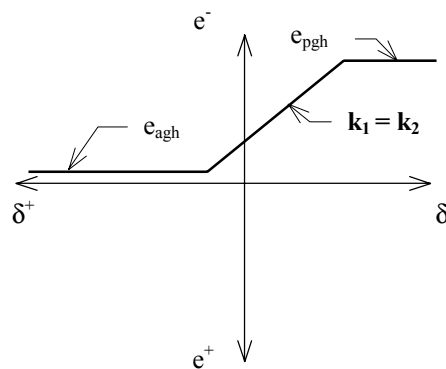


Bild 9b Bodenverhalten A 127, 3. Auflage mit Begrenzung von q_h^*

Durch das Bodengesetz nach Bild 9b und die hieraus abgeleiteten Abminderungsfaktoren κ_{v2} wird u.a. vermieden, dass die Beulbedingung im Grenzfall $V_{RB} \rightarrow 0$ (dünnwandige Rohre, steife Bettungen) krit $q_v = \infty$ liefert.

Bei Kunststoffrohren bewirkt die Relaxation zwar einen Spannungsabbau, gleichzeitig wird damit jedoch die *spannungslose* Vorverformung vergrößert.

4.4.3 Sicherheitskonzept

Da die Beullasten in der 3. Auflage mit Abminderungsfaktoren κ genauer bestimmt werden, genügt ein Sicherheitsbeiwert von 2,0 beim Stabilitätsnachweis - der bisherige Wert 2,5 musste den unbekanntem Einfluss z. B. der Vorverformungen mit abdecken.

4.5 Zusatzbelastungen aus dem Ziehen des Spundverbau

Die Mehrbelastung von Rohren durch das Ziehen des Verbau ohne wirksame Nachverdichtung betrifft biegesteife und biegeeweiche Rohre - der Bericht der ATV-AG ES 5.5 [13] schlägt erhebliche Zusatzbelastungen für beide Rohrarten vor. Versuche am IKT wurden in [14] und [15] vorveröffentlicht und in der Fachwelt diskutiert. Bis zur Veröffentlichung des Abschlussberichtes ist davon auszugehen, dass die mit dem Arbeitsbericht [13] ermittelten Zusatzbeanspruchungen deutlich auf der sicheren Seite liegen. Die aus dem Verfahren resultierenden theoretischen Spannungen konnten bisher nicht mit den DMS-Ergebnissen der Versuche [14] in Übereinstimmung gebracht werden.

Zur rechnerischen Behandlung des Problems wird eine Abschätzung der Ausladung empfohlen. Sie ist als „Höhe $a \cdot d_a$ der setzungsfähigen Bodenschicht neben (und ggf. unter) dem Rohr“ definiert und hat Einfluss auf die Konzentration der Bodenspannungen über dem Rohr. Durch das Ziehen des Verbau wird a vergrößert, vgl. Bild 10.

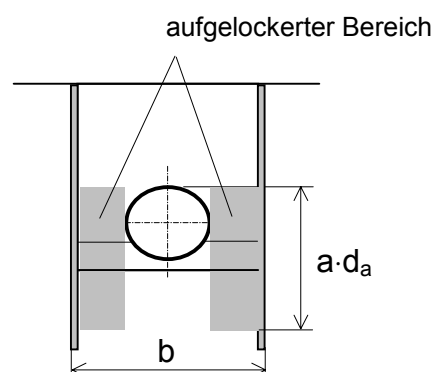


Bild 10

Vergrößerung der Ausladung durch das Ziehen des Verbau

In der Praxis wird gelegentlich durch Rammsondierungen vor *und* nach dem Ziehen des Verbaus der Einfluss dieser Maßnahme quantitativ erfasst, was bei systematischer Auswertung auch zu Verbesserungen des Berechnungsverfahrens führen dürfte.

4.6 Zeiteinfluss bei Verkehrslasten (Kunststoffrohre)

Zur Erfassung des Verkehrslasteinflusses, der nur kurzzeitig auftritt, und der übrigen langfristig wirkenden Lasten wird bei der Berechnung von Kunststoffrohren ein gewichteter Rohr-E-Modul eingeführt:

$$\bar{E}_0 = \frac{p_E \cdot E_{0L} + p_V \cdot E_{0K}}{p_E + p_V}$$

Beim Langzeitspannungsnachweis für Rohre mit Nenn-E-Modul und Nennmaßen bzw. mit Nennsteifigkeit gelten gewichtete Biegezugfestigkeiten

$$\bar{\sigma}_R = \frac{p_E \cdot \sigma_{RL} + p_V \cdot \sigma_{RK}}{p_E + p_V} \quad (\bar{\epsilon}_R \text{ entsprechend})$$

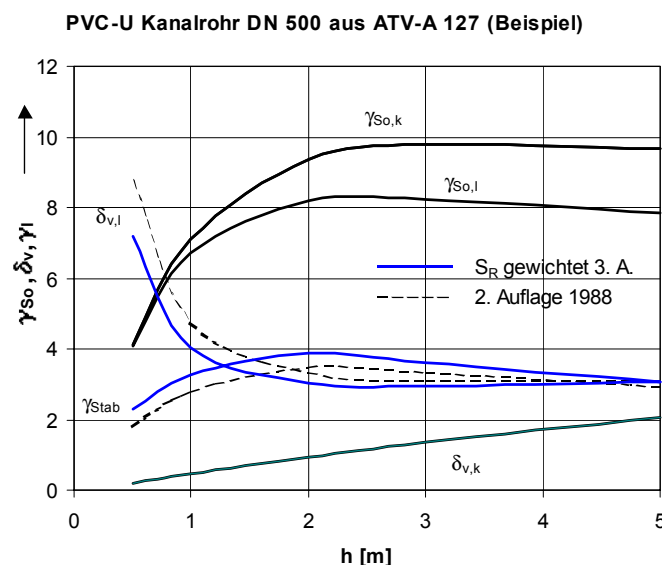
Der Spannungsnachweis lautet damit:

$$\gamma = \frac{\bar{\sigma}_R}{\sigma} = \frac{\bar{\epsilon}_R}{\epsilon}$$

Die Auswirkungen dieser Neuregelung sind aus Bild 11 zu entnehmen, bei kleinen Überdeckungen beträgt der Vorteil beim Spannungs- und Stabilitätsnachweis hier ca. 15 %.

Bild 11

Auswirkungen der Regelung für den Zeiteinfluss von Verkehrslasten bei Thermoplasten



4.7 Nicht vorwiegend ruhende Belastung (geringe Überdeckung)

Bei kleinen Überdeckungen sind im Straßenraum für alle Werkstoffe Nachweise der vorhandenen Schwingbreite zu führen und mit $2\sigma_A$ zu vergleichen. Diese Werte sind für die gängigen Rohrwerkstoffe bekannt. Für eine Reihe von Kunststoffrohren liegen Prüfzeugnisse des Süddeutschen Kunststoffzentrums als Forschungsberichte vor.

Ein Bettungsreaktionsdruck q_h^* darf jedoch im Falle nicht vorwiegend ruhender Belastung nur bei ausreichend großem Verformungsmodul bzw. genügender Verdichtung des Bo-

dens der Leitungszone in Ansatz gebracht werden. Der Mindestwert von $S_{Bh} = 6 \text{ N/mm}^2$ ist bei der Einbettungsbedingung B1 nur mit der Bodengruppe G1 und bei B4 mit den Bodengruppen G1 und G2 realisierbar.

5. Zusammenfassung

Bei der Neufassung einer Vorschrift wird häufig die Frage gestellt, welche Gesamtauswirkungen die Arbeiten für ein bestimmtes Produkt haben. Dies soll in Bild 12a-c für ein Beispiel, ein KG-Rohr DN 500 aus PVC-U, vorgestellt werden.

DN 300 glattwandig

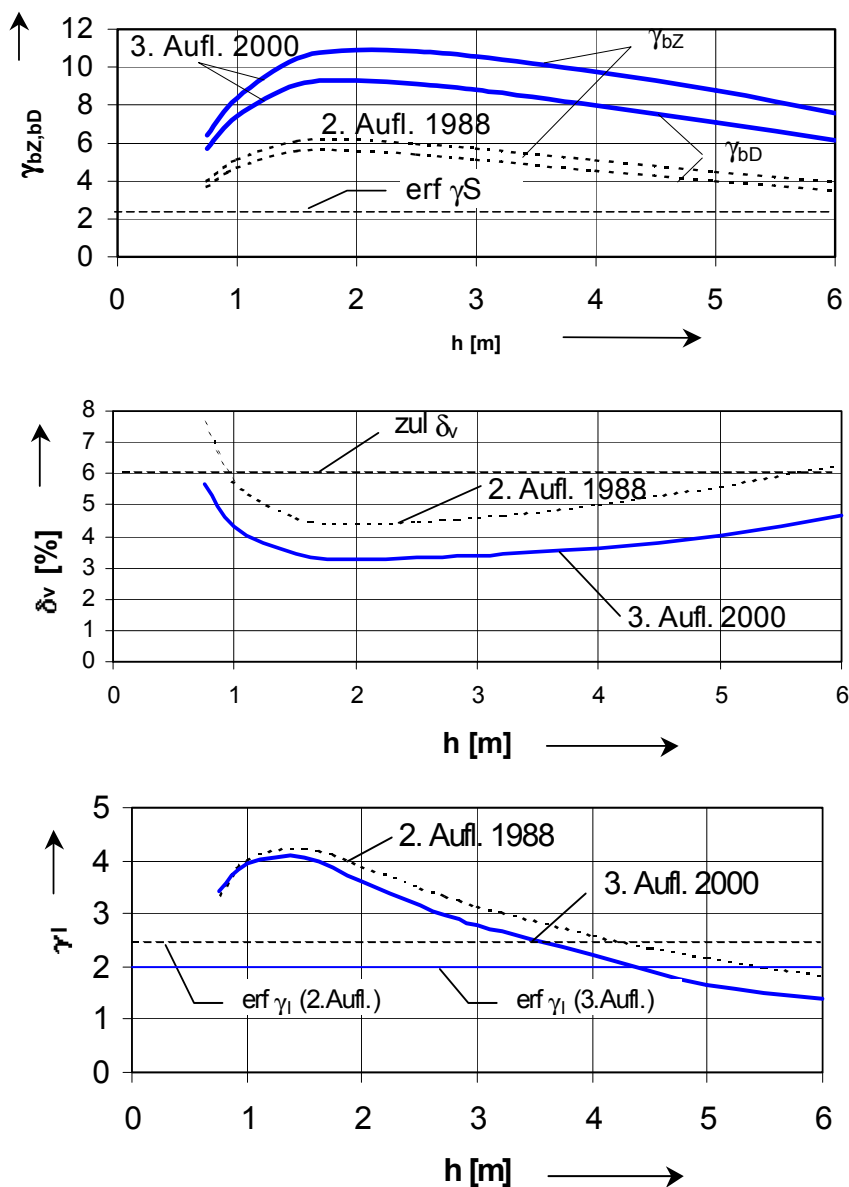


Bild 12a-c Auswirkung der Neuregelungen in ATV-A 127, 3. Auflage 08.2000 auf ein KG-Rohr DN 300, oben: Spannungsnachweis (ohne Verkehrslastneuregelung), Mitte: Verformungsnachweis, unten: Stabilitätsnachweis

Es zeigen sich Erleichterungen beim Spannungs- und Verformungsnachweis, die Situation beim Stabilitätsnachweis ist nahezu unverändert geblieben, wenn die elastischen Verformungen mit ihrem vollen Wert als Vorverformungen angesetzt werden. Eine verformungsarme Einbauart führt dagegen zu einer Reduktion der Vorverformungen und damit einer höheren Ausnutzung infolge des kleineren Sicherheitsbeiwertes. Ähnliche Vergleiche sind auch für andere Werkstoffe durchgeführt worden.

Die eingangs angegebenen Ziele konnten in der 3. Auflage des A127 zusammenfassend wie folgt verwirklicht werden:

- 1 Viele für den Rohrleitungsbau wichtige **Neuentwicklungen** wurden berücksichtigt: neue Werkstoffe, profilierte Rohre, Erweiterung auf Druckentwässerungen usw. Es liegt auf der Hand, dass damit auch der Umfang einer Vorschrift anwächst. Die Änderungen bleiben jedoch auch bei Handrechnungen überschaubar und plausibel - vgl. z. B. die Abminderungsfaktoren beim Beulnachweis oder die Vergrößerungsfaktoren beim nichtlinearen Nachweis. Bei den üblichen EDV-gestützten Berechnungen fällt der Mehraufwand ohnehin nicht ins Gewicht.
- 2 Im Gegensatz zu Verfahren aus dem europäischen Ausland wurden keine rein EDV-geführten Nachweise als Standardverfahren aufgenommen. Neben den gewohnten **Handrechenverfahren** sind mittels Öffnungsklausel allerdings auch EDV-Verfahren unter der Bedingung zulässig, dass die bodenmechanischen Gesetze beachtet werden.
- 3 Es werden **einfache und nachvollziehbare Formeln** vorgeschrieben, mit deren Hilfe Einzeleinflüsse leicht überprüft werden können (Beispiel: die Verringerung der Beullast aufgrund der Vorverformungen des Rohres). Wo nicht anders möglich, sind auch Diagramme angegeben, die die Veränderung von Auswirkungen transparent machen.

Es zeigt sich bereits jetzt, dass auch die 3. Auflage des Arbeitsblattes A 127 bei Auftraggebern, Herstellern und Planungingenieuren eine große Akzeptanz findet.

Literatur:

- [1] Leonhardt, G.: Bodenmechanische Fragen der statischen Berechnung und Einbettung erdverlegter Rohrleitungen. KA (1979) 489-493
- [2] Leonhardt, G.: Einige Bemerkungen zum statischen und bodenmechanischen Konzept des ATV-Arbeitsblattes A 127. KA (1984) 528-531
- [3] Falter, B.: Kommentar zum Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 127 (in Vorber.)
- [4] Hornung, K.; Kittel, D.: Statik erdüberdeckter Rohre. Bauverlag Wiesbaden und Berlin 1989
- [5] Netzer, W.; Pattis, O.: Überlagerung von Innen- und Außendruckbelastung erdverlegter Rohrleitungen (Rechnerische Untersuchung bei Anwendung der Theorie II. Ordnung). 3R international (1989) 96
- [6] Falter, B.; Hinrichs, H.; Lenz, J.; Schwerdt, B.: Erdüberdeckte Kunststoffrohre unter kombinierten Belastungen aus Verkehr und Innendruck, Versuche und Berechnungen. Korrespondenz Abwasser 46 (1999) 233
- [7] Falter, B.: Tischvorlage „Bemessung erdüberdeckter Druckrohre“ zur ATV-AG ES 2.3 vom 28.10.98
- [8] Nowack, R.E.: Abwasserkanäle aus Kunststoffen. Zeitstandverhalten, Meßergebnisse, Rohrstatik. awt abwassertechnik H.6 (1992)
- [9] Falter, B.: Grenzlaster von einseitig elastisch gebetteten kreiszylindrischen Konstruktionen. Bauing. 55 (1980) 381-390

- [10] Falter, B.: Zum Stabilitätsnachweis von erdverlegten Rohren gegen äußeren Wasserdruck nach ATV-Arbeitsblatt A 127. Korrespondenz Abwasser 31 (1984) 520
- [11] Falter, B.: ATV-Arbeitsblatt A 127, 3. Auflage 1997 (Entwurf) - Spannungen, Verformungen, Stabilitätsnachweis. Vortrag anlässlich des ATV-Seminars „Statische Berechnung von Abwasserkanälen“ am 02.12.1996 in Bremen
- [12] Dürkop, J.: Beitrag zur Stabilität gebetteter Zylinderschalen aus glasfaserverstärkten ungesättigten Polyesterharzen. Diss. RWTH Aachen 1974
- [13] Arbeitsbericht der ATV-Arbeitsgruppe 1.5.5: Berechnungsansätze für die Rohrbelastung im Graben mit gespundetem Verbau. Korrespondenz Abwasser 12/97
- [14] Falk, C.; Liebscher, M.; El Shahid, S.: Mehrbelastungen für Rohre durch Verbau – Rückbau. TIS H. 4 (1997) 24 und Zuschrift Falter, B. in TIS H. 7 (1997) 9
- [15] El Shahid, S.: Zur Belastung erdverlegter Rohrleitungen nach dem Ziehen von Verbauprofilen. Techn.-wiss. Ber. der Ruhr-Univ. Bochum 97/5

- [V1] Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 127 „Statische Berechnung von Abwasserkanälen und -leitungen“, 3. Aufl. 08.2000, Hennef
- [V2] Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 139 „Herstellung von Entwässerungskanälen und -leitungen“, Hennef
- [V3] DIN EN 1610, Verlegung und Prüfung von Abwasserleitungen und -kanälen, 10.97
- [V4] DIN EN 1295, Statische Berechnung von erdverlegten Rohrleitungen unter verschiedenen Belastungsbedingungen
 Teil 1: Allgemeine Anforderungen (09.97)
 Teil 2: Zusammenstellung national eingeführter Berechnungsverfahren
 Teil 3: Piping systems – Structural design of buried pipelines (Common CEN method – Option 1, Draft 10.2000)

gültige Werkstoffnormen s. [V1], Tab. 3