



„LEITFADEN ZUR AUSWAHL VON ROHRWERKSTOFFEN FÜR KOMMUNALE ENTWÄSSERUNGSSYSTEME“

TEILEXPERTISE

„Statische Berechnung / Biegesteifigkeit“

Im Auftrag der Fachvereinigung Betonrohre und Stahlbetonrohre e.V. (FBS), Bonn

Bearbeitung: Prof. Dr.-Ing. D. Stein
Dr.-Ing. D. Beckmann
Dipl.-Ing. A. Brauer

(Auszugsweise) Veröffentlichung nur mit Genehmigung der Prof. Dr.-Ing. Stein & Partner GmbH, Bochum

Bochum, 29. Dezember 2004

1 Einführung in das Thema

Abwasserleitungen und –kanäle aus vorgefertigten Rohren gehören zu den Ingenieurbauwerken, für die eine statische Berechnung erforderlich ist. Die dabei anzuwendenden Berechnungsverfahren enthalten die Arbeitsblätter ATV-DVWK-A 127 [1] (für die offene Bauweise) und ATV-A 161 [2] (für die geschlossene Bauweise), die auch Bestandteil der DIN EN 1295-1 [3] sind.

Bei beiden Bauweisenvarianten wird gemäß den o.a. Arbeitsblättern für die Berechnung der Rohre im Betriebszustand die gleiche Philosophie bezüglich Lastannahmen und Bettung zu Grunde gelegt. Nachfolgend wird ausschließlich auf die Berechnung im offenen Graben verlegter Rohre eingegangen. Für den Betriebszustand in geschlossener Bauweise verlegter Rohrleitungen gelten die Ausführungen sinngemäß; für den Bauzustand sind spezielle Lastannahmen und Berechnungen erforderlich, die u.a. detailliert in [4, 5] behandelt werden.

Voraussetzung für die Gültigkeit der in den o.a. Arbeitsblättern enthaltenen Berechnungsverfahren und der rechnerischen Sicherheiten sind die Einhaltung der genormten Werkstoffeigenschaften der Rohre sowie die korrekte Bauausführung nach DIN EN 1610 [6] bzw. ATV-DVWK-A 139 [7] und DIN EN 12889 [8] bzw. ATV-A 125 [9], welche in Form von entsprechenden Eingangsgrößen in die Berechnung einfließen. Diese sollen, neben einer fachgerechten Planung, Bauausführung und Prüfung bzw. Bauüberwachung durch eine Qualitätsüberwachung, welche aus Eigen- und Fremdüberwachung besteht, sichergestellt werden.

Generell wird, in Abhängigkeit des Zusammenwirkens von Rohrsteifigkeit und Bodenverformungen, zwischen biegesteifen (starr), biegeweichen (flexiblen) sowie einer Kombination aus diesen (halbsteifen) Rohren unterschieden. Diesbezüglich legt DIN EN 476 [10] folgende Definitionen fest:

- **Biegesteifes Rohr:** „Rohr, dessen Tragfähigkeit dadurch begrenzt ist, dass es ohne merkliche Verformung seines Querschnittes bricht oder überbeansprucht wird“.
- **Halbsteifes Rohr:** „Rohr, dessen Tragfähigkeit entweder durch Verformung oder

durch Bruch oder durch Überbeanspruchung begrenzt ist“.

- **Biegeweiches Rohr:** „Rohr, dessen Tragfähigkeit dadurch begrenzt ist, dass es sich unter Belastung bis zur konstruktiv vorgesehenen Höchstlast ohne Bruch oder Überbeanspruchung verformt“.

Abweichend davon wird die Rohrsteifigkeit S_R im ATV-DVWK-A 127 [1] ausschließlich als Eigenschaft des Rohres unabhängig von den Einbaubedingungen definiert, wobei der Elastizitätsmodul des Rohrwerkstoffes sowie das Trägheitsmoment und der Durchmesser eingehen:

$$S_R = \frac{E_R \cdot I}{r_m^3}$$

mit

I Trägheitsmoment [m^4/m]

r_m mittlerer Rohrradius [m]

E_R Biege-E-Modul des Rohres in Umfangsrichtung [kN/m^2].

Bei voll- bzw. glattwandigen Rohren ergibt sich die vereinfachte Formel zu:

$$S_R = \frac{E_R}{12} \cdot \left(\frac{s}{r_m} \right)^3$$

mit

s Wanddicke [m].

Eine andere Definition bezieht sich statt auf den Radius auf den mittleren Durchmesser (d_m in [m]) des Rohres. In diesem Fall berechnet sich die Rohrsteifigkeit S_0 zu:

$$S_0 = \frac{E_R \cdot I}{d_m^3}$$

d.h. $S_R = 8 \cdot S_0$.

In Tabelle 1 sind die Rechenwerte der E-Moduln der hier behandelten Rohrwerkstoffe für Kanalisationen zusammengestellt.

Tabelle 1 Rechenwerte der E-Moduln der in diesem Beitrag behandelten Rohrwerkstoffe nach ATV-DVWK-A 127 [1] bzw. [11] (für Polymerbeton)

Rohrwerkstoff	Rechenwert des E-Moduls E_R	
	Kurzzeit $E_{R,K}$ [N/mm ²]	Langzeit $E_{R,L}$ [N/mm ²]
Beton	30.000	
Stahlbeton	30.000	
Steinzeug	50.000	
Polymerbeton	23.300	8.200
Duktiles Gusseisen mit CEM-Auskleidung	170.000	
Ungesättigtes Polyesterharz, glasfaserverstärkt (GFK bzw. UP-GF)	Rechenwerte der Ringsteifigkeiten S_0	
SN 1250	1.250	625
SN 2500	2.500	1.250
SN 5000	5.000	2.500
SN 10000	10.000	5.000
Polyvinylchlorid (PVC-U)	3.000	1.500
Polyethylen hoher Dichte (PE-HD)	800	160
Polypropylen (PP)		
PP-B / PP-H	1.250	312
PP-R	800	200

Das Zusammenwirken von Rohrverformungen, d.h. die Aktivierung des horizontalen Bettungsreaktionsdruckes q_h^* in Abhängigkeit der Bettungssteifigkeit S_{Bh} , und der Rohrsteifigkeit S_R wird mit der Systemsteifigkeit V_{RB} erfasst:

$$V_{RB} = \frac{S_R}{S_{Bh}} [-].$$

ATV-DVWK-A 127 [1] definiert Rohre mit einer Systemsteifigkeit von $V_{RB} > 1$ als **biegesteif**, da bei diesen die Verformungen unter Last keine wesentlichen Auswirkungen auf die Druckverteilung hervorrufen.

Biegeweiche Rohre weisen eine Systemsteifigkeit von $V_{RB} \leq 1$ auf, d.h. deren Verformung beeinflusst wesentlich die Belastung, Druckverteilung und Beanspruchung, da der Boden Bestandteil des Tragsystems ist.

Auf Grund der unterschiedlichen Verformungsfähigkeiten der Rohre und des umgebenden Bodens lagern sich die Bodenspannungen infolge Erdlast (p_E) um. Das Maß dieser Umlagerung wird durch die Lastkonzentrationsfaktoren λ_R für die Spannung über dem Rohr und λ_B für die Spannung im Boden neben dem Rohr angegeben. Die idealisierte Form der Umlagerung ist für $b/d_a = \infty$ im Bild 1 dargestellt.

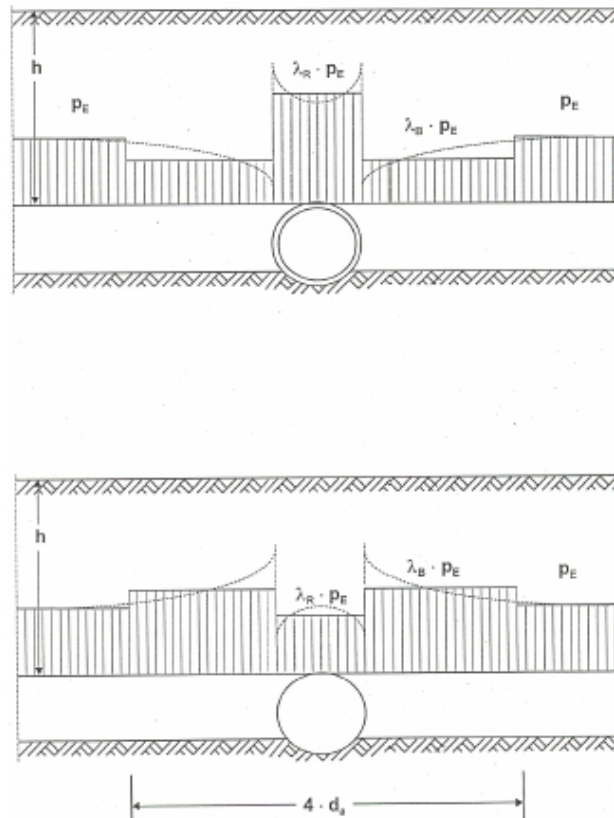


Bild 1 Umlagerung der vertikalen Bodenspannungen (oben: biegesteifes Rohr, unten: biegeweiches Rohr) nach ATV-DVWK-A 127 [1]

Auf den grundsätzlichen Ablauf der statischen Berechnung für in offener Bauweise verlegte biegesteife und biegeweiche Rohre und insbesondere den erheblichen Einfluss der Verbauart und des Ziehens des Verbaus (Verbauspur) auf die Rohrstatik wird nachfolgend nicht näher eingegangen.

2 Analyse der verschiedenen Werkstoffe bezüglich ihrer Biegesteifigkeit

Die hier betrachteten Rohrwerkstoffe werden bezüglich ihrer Biegesteifigkeit in der Regel wie folgt eingeordnet:

➤ **Biegesteife Rohre:**

- Beton/Stahlbeton
- Steinzeug
- Polymerbeton

➤ **Halbsteife Rohre:**

- Duktiler Guss (CEM) [12].

➤ **Biegeweiche Rohre:**

- GFK
- PVC-U
- PE-HD
- PP.

Zur Bemessung **biegesteifer Rohre** nach ATV-DVWK-A 127 [1] ist der Spannungs-/Dehnungsnachweis oder der vereinfachte Tragfähigkeitsnachweis, zur Bemessung **biegeweicher Rohre** der Spannungs-/Dehnungsnachweis sowie der Verformungs- und der Stabilitätsnachweis zu führen. Rohre mit nicht eindeutig biegesteifem und biegeweichem Verhalten (halbsteife Rohre, s.o.) sind als biegesteife und biegeweiche Rohre nachzuweisen [1].

Im einzelnen müssen für Abwasserkanäle aus den verschiedenen Rohrwerkstoffen die in Tabelle 2 dargestellten Nachweise gemäß ATV-DVWK-A 127 [1] geführt werden.

Tabelle 2 Erforderliche Nachweise gemäß ATV-DVWK-A 127 [1] für die Bemessung von Abwasserkanälen aus verschiedenen Rohrwerkstoffen (Quelle: Stein & Partner)

Rohrwerkstoff	Nachweis der			
	Spannung (S) / Dehnung (D)	Tragfähigkeit	Verformung	Stabilität
Beton/Stahlbeton ¹⁾	Ja (S)	Ja (vereinfacht) ²⁾	Nicht erforderlich	Nicht erforderlich
Steinzeug	Ja (S)	Ja (vereinfacht) ²⁾	Nicht erforderlich	Nicht erforderlich
Duktiler Guss(CEM)	Ja (S)	Ja (vereinfacht) ²⁾	Ja	Ja
Polymerbeton ³⁾	Ja (S) (Langzeit) ⁴⁾	Ja (Kurz- und Langzeit)	Nicht erforderlich	Nicht erforderlich
GFK	Ja (D) (Langzeit) ⁴⁾	Ja (Kurz- und Langzeit)	Ja (Kurz- und Langzeit)	Ja (Langzeit) ⁴⁾
PVC-U ⁵⁾	Ja (S) (Langzeit) ⁴⁾	Nicht möglich	Ja (Kurz- und Langzeit)	Ja (Langzeit) ⁴⁾
PE-HD ⁵⁾	Ja (S) (Langzeit) ⁴⁾	Nicht möglich	Ja (Kurz- und Langzeit)	Ja (Langzeit) ⁴⁾
PP ⁵⁾	Ja (S) (Langzeit) ⁴⁾	Nicht möglich	Ja (Kurz- und Langzeit)	Ja (Langzeit) ⁴⁾

¹⁾ Für die Bemessung von Stahlbetonrohren gilt DIN EN 1916 [13] in Verbindung mit DIN V 1201 [14]

²⁾ Möglicher Nachweis für Rohre mit definierter Scheiteldruckkraft F_N in Verbindung mit Einbau- (Bettungs-)ziffer (kann alternativ zum Spannungs-/Dehnungsnachweis geführt werden)

³⁾ Polymerbetonrohre sind im ATV-DVWK-A 127 [1] (Ausgabe 08.2000) nicht erwähnt, obwohl sie seit fast 30 Jahren in der Praxis eingesetzt werden; Angaben gemäß [15].

⁴⁾ Verkehrslasten werden mit den entsprechenden Kurzzeitwerten berücksichtigt.

⁵⁾ Ergänzende Hinweise für profilierte Rohre sind im ATV-DVWK-A 127 [1] angegeben bezüglich der Profilsteifigkeit und möglicher mehraxialer Spannungszustände. Diese sind bei den einzelnen Nachweisen zu beachten.

Die Tragfähigkeit **biegesteifer Rohre** hängt im Wesentlichen von der Scheiteldruckfestigkeit der Rohre und den Bettungsbedingungen ab. Typische Schäden biegesteifer Rohre infolge statischer Überbelastung bzw. von den statischen Annahmen abweichender Bettungsbedingungen sind Längsrisse in den Viertelpunkten mit der Folge der Minderung der Gebrauchstauglichkeit (Undichtigkeiten) oder der Tragfähigkeit (im Extremfall Einsturz) [16].

Die Tragwirkung **biegeweicher** Rohre beruht zum einen auf der Aktivierung des Bettungsreaktionsdruckes. Indem sich das biegeweiche Rohr unter der Belastung – z.B. Erd- und Wasserdruck sowie Verkehr – verformt, wird in horizontaler Richtung der passive Erddruck (Bettungsreaktionsdruck q_h^*) aktiviert. Die zweite Komponente der Tragwirkung biegeweicher Rohre besteht in einer Verringerung der vertikalen Belastung infolge der vertikalen Durchmesserreduzierung. Die Durchmesserreduzierung wird gemäß ATV-DVWK-A 127 [1] auf maximal $\delta_v = 6\%$ (Langzeitverformung) begrenzt. Für Rohre unter Gleisen der Deutschen Bahn AG beträgt zul $\delta_v = 2\%$ sowie zul $\delta_v = 10\text{ mm}$ [1]. Typische Schäden biegeweicher Rohre infolge statischer Überbelastung bzw. von den statischen Annahmen abweichender Bettungsbedingungen sind unzulässige Verformungen mit der Folge der Minderung der Gebrauchstauglichkeit (Undichtigkeiten der Rohrverbindungen, Reduzierung der hydraulischen Leistungsfähigkeit) oder der Tragfähigkeit (Beulen, Risse, im Extremfall Einsturz) [17].

3 Vergleichende Gegenüberstellung und Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Vor- und Nachteile von biegesteifen und biegeweichen Rohren bezüglich Langzeitverhalten und Verhalten bei Änderungen der äußeren Belastungen wurden und werden in der Fachwelt, insbesondere zwischen den Rohrherstellern bzw. den einzelnen Fachverbänden sowie den Kommunen und Leitungsnetzbetreibern, kontrovers diskutiert (u.a. über folgende Slogans: „*Biegeweiche Rohre weichen der Last aus, biegesteife tragen die Verantwortung!*“ oder „*Das klügere (biegeweiche) Rohr gibt nach!*“).

Bei **biegesteifen Rohren** erfolgt eine Lastkonzentration über dem Rohr („starre Körper ziehen Lasten an“). Sie besitzen ein mehr oder weniger stark ausgeprägtes sprödes Verhalten, d.h. bei Überschreitung der zulässigen Spannungen kommt es zum Bruch ohne Vorankündigung, verbunden mit Rissbildungen, oder im Extremfall zum Einsturz führen.

Biegeweiche Rohre entziehen sich den Lasten durch zunehmende Verformungen bei Belastungserhöhungen. Auch diese können zu einem Versagen ohne

Vorankündigung (Beulen), verbunden mit Rissbildungen, oder im Extremfall zum Einsturz führen.

Bei allen Rohrtypen gewährleisten eine fachgerechte Planung, Bauausführung und Prüfung maßgeblich die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit. Dabei ist insbesondere auf die korrekte Umsetzung der Annahmen und Festlegungen der Statik sowohl bei der Rohrherstellung als auch beim Einbau zu achten.

Änderungen der äußeren Einwirkungen und/oder der Bettungsbedingungen im Laufe der Nutzungsdauer sind in der statischen Berechnung zu berücksichtigen.

Fazit:

FBS-Beton- und insbesondere -Stahlbetonrohre zählen zu den biegesteifen Rohren und können mit dem gültigen Normen und Regelwerk für praktisch alle vorkommenden Belastungs- und Einbaubedingungen bemessen und hergestellt werden. Bereits mit den serienmäßig hergestellten Rohren kann der größte Teil der üblichen Belastungsbedingungen, z.B. durch Variation der Wanddicke, abgedeckt werden. Für spezielle Einsatzbereiche bieten die FBS-Rohrhersteller geeignete Lösungen an, z.B. andere Querschnittsformen, größere Wanddicken, stärkere Bewehrung (bei Stahlbetonrohren) oder optimierte Auflager- bzw. Bettungsbedingungen.

4 Literatur

- [1] Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 127: Richtlinie für die statische Berechnung von Entwässerungskanälen und –leitungen (08.2000).
- [2] Arbeitsblatt ATV-A 161: Statische Berechnung von Vortriebsrohren (01.1990).
- [3] DIN EN 1295-1: Statische Berechnung von erdverlegten Rohrleitungen unter verschiedenen Belastungsbedingungen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen (09.1997).
- [4] Stein, D.: Grabenloser Leitungsbau. Verlag Ernst & Sohn, Berlin 2003.
- [5] Stein, D., Brauer, A.: Praxisorientierter Leitfaden zur Anwendung von Verfahren des Mikrotunnelbaus zur umweltgerechten, kostenminimierten Verlegung von Abwasserleitungen und -kanälen. Unveröffentlichter Forschungsbericht im Auftrag des Ministeriums für Umwelt und Naturschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (MUNLV) des Landes NRW. Bochum, Mai 2004.
- [6] DIN EN 1610: Verlegung und Prüfung von Abwasserleitungen und –kanälen (10.1997)
DIN EN 1610 Beiblatt 1: Verlegung und Prüfung von Abwasserleitungen und -kanälen – Verzeichnis einschlägiger Normen und Richtlinien (Stand vom Februar 1997).
- [7] Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 139: Einbau und Prüfung von Abwasserleitungen und –kanälen (01.2002).
- [8] DIN EN 12889: Grabenlose Verlegung und Prüfung von Abwasserleitungen und -kanälen (03.2000).
- [9] Arbeitsblatt ATV-A 125: Rohrvortrieb (09.1996).

-
- [10] DIN EN 476: Allgemeine Anforderungen an Bauteile für Abwasserkanäle und -leitungen für Schwerkraftentwässerungssysteme (08.1997).
- [11] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung des Deutschen Institutes für Bautechnik, Berlin: Abwasserrohre aus gefülltem Reaktionsharzformstoff mit der Bezeichnung „Polycrrete PRC“ und Steckkupplungen in den Nennweiten DN 300 bis DN 1200. Zulassungsnummer Z-42.1-250. Erteilt am 13.12.2002, gültig bis 31.12.2007.
- [12] Firmeninformation Saint-Gobain Gussrohr GmbH & Co. KG, Saarbrücken.
- [13] DIN EN 1916: Rohre und Formstücke aus Beton, Stahlfaserbeton und Stahlbeton (04.2003).
DIN EN 1916 Berichtigung 1: Berichtigungen zu DIN EN 1916:2003-04 (05.2004).
- [14] DIN V 1201: Rohre und Formstücke aus Beton, Stahlfaserbeton und Stahlbeton für Abwasserleitungen und -kanäle – Typ 1 und Typ 2 – Anforderungen, Prüfung und Bewertung der Konformität (Vornorm 08.2004).
- [15] Firmeninformation Meyer Rohr + Schacht GmbH, Lüneburg.
- [16] Stein, D.: Instandhaltung von Kanalisationen, 3. Auflage. Verlag Ernst & Sohn, Berlin 1998.
- [17] Merkblatt ATV-DVWK-M 143-1: Sanierung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden – Teil 1: Grundlagen (08.2004).