

**Fachhochschule**  
**Münster** University of  
Applied Sciences



**B E R I C H T**

Projekt	Außendruckprüfungen an Quick-Lock-Stahlmanschetten DN 200 bis DN 600 für Altrohrzustand II
Berichtsdatum	31.03.2008
Auftraggeber	Uhrig Kanaltechnik GmbH Am Roten Kreuz 2 78187 Geisingen
Auftragsdatum	04.10.2005
Auftragnehmer	Fachhochschule Münster Fachbereich Bauingenieurwesen Corrensstraße 25 48149 Münster
Leitung	Prof. Dr.-Ing. B. Falter
Sachbearbeitung	Dipl.-Ing. M. Wolters

## Außendruckprüfungen an Quick-Lock-Stahlmanschetten DN 200 bis DN 600 für Altrohrzustand II

### 1. Allgemeines

Es ist die Standsicherheit von Quick-Lock-Stahlmanschetten [1] in längs gerissenen Altrohren durch Außendruckprüfungen nachzuweisen und ein geeignetes Berechnungsmodell für theoretische Nachweise zu entwickeln. Die Versuche wurden im Labor für Baustoffe der FH Münster für die Nennweiten DN 200, DN 250, DN 300, DN 400 und DN 600 durchgeführt, vgl. [2].

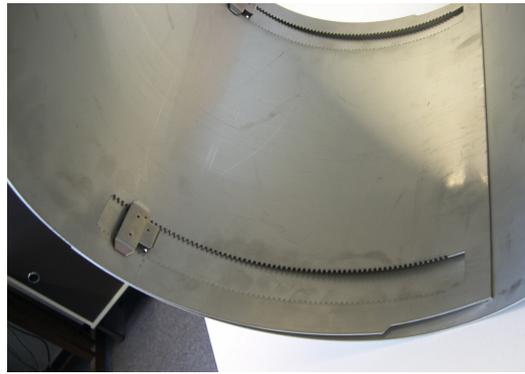


Bild 1a, b Quick-Lock-Stahlmanschette mit Zahnleistenverschluss (ohne Gummidichtung)

Die Stahlmanschetten, der Verschluss und die Dichtungen werden im eingebauten Zustand in der Regel durch Grundwasser belastet.

Manschetten zum Einsatz für Altrohrzustand I wurden in [5] nachgewiesen. In [4] wurden Grenzlaster der Zahnleistenverschlüsse (Zahnräder und -leisten) durch Zugversuche ermittelt.

Von der Uhrig Kanaltechnik GmbH wurde dem Labor für Baustoffe der Fachhochschule Münster eine zylindrische Druckkammer aus Stahl zur Verfügung gestellt, vgl. Bild 2. Die Standsicherheit der Druckkammer unter Prüfdruck wurde im Arbeitsgebiet Statik und Bauinformatik nachgewiesen, vgl. [3].



Bild 2 Druckkammer

## 2. Kennwerte der Quick-Lock-Stahlmanschetten

Die Außendruckprüfungen wurden an Manschetten mit fünf Nennweiten durchgeführt. Abhängig von der Nennweite weisen die Quick-Lock-Stahlmanschetten unterschiedliche Wanddicken und Längen auf, vgl. [1]. Die Maße der geprüften Manschetten sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 1: Abmessungen von Quick-Lock-Stahlmanschetten nach [1], Anlage 1

Versuch Nr.	Nennweite	Manschettenlänge	Manschettenwanddicke	Dicke der Gummidichtung	Höhe der Dichtnoppen
	DN	L	s	$s_G$	$h_N$
	mm	mm	mm	mm	mm
1	200	400	1,0	2	4
2	250	400	1,2	2	5
3	300	400 <td 1,2	2	7	
4	400	400	1,5	2	8
5a,b	600	500	2,0	2	9

Die Manschettenlängen und -wanddicken wurden an den von der Uhrig Kanaltechnik GmbH gelieferten Probekörpern überprüft. Es wurden keine Abweichungen gegenüber den Sollwerten in [1] festgestellt.

Für den Manschetten-Werkstoff Nr. 1.4571 (V4A) nach DIN EN 10088-1 gelten die folgenden Festigkeiten und Kennwerte, vgl. auch [7]:

$$\text{Streckgrenze } f_{y,k} = 240 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Elastizitätsmodul } E = 170.000 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Querdehnzahl } \mu = 0,30$$

Der beim *Stabilitätsnachweis* erforderliche Sicherheitsbeiwert beträgt nach ATV-M 127-2 [8], Tabelle 4 für metallische Werkstoffe  $\gamma = 2,0$ . Dies gilt bei Vorliegen der Altrohrzustände I und II.

## 3. Versuchsvorbereitung

Als Rohre 1 und 3 nach Bild 3 werden ungerissene Steinzeugmuffenrohre der Nennweiten DN 200 bis DN 400 und Stahlbetonmuffenrohre der Nennweite DN 600 ohne Gummidichtungen verwendet.

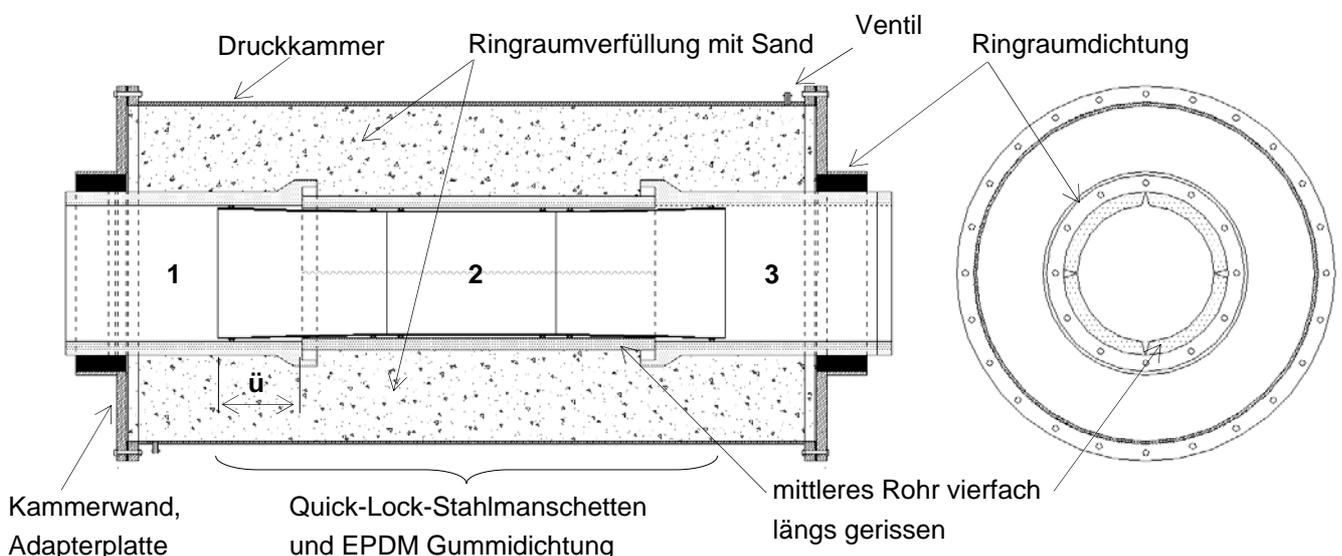


Bild 3 Versuchsaufbau mit drei Rohren und drei Manschetten, Längsschnitt, Ansicht von vorn

In die Mitte der Prüfkammer werden vierfach längs gerissene Rohrstücke (2) mit 1 m Länge eingebaut, vgl. Bild 3 und [2]. Durch die Entfernung der Dichtelemente ist eine Bewegung der Rohrscherben in den Muffen gegen die äußere Sandbettung möglich, vgl. auch die Messwerte der Spaltaufweitungen außen in Tabelle 3. Diese Bewegung wird z. B. durch den Packerdruck gegen Manschetten und Altrohr verursacht.

Das Rohr 2 wird mit einer Ovalisierung von ca. 3% eingebaut, vgl. Tabelle 2. Diese Verformung entspricht dem Mindestwert für Altrohrzustand II nach Merkblatt ATV-M 127-2 [8], vgl. Bild 4.

Die Herstellung der Rohrscherben, der Einbau der Rohre in die Druckkammer, die Verfüllung des Ringraumes mit Sand und dessen Verdichtung sind in [2] näher beschrieben.

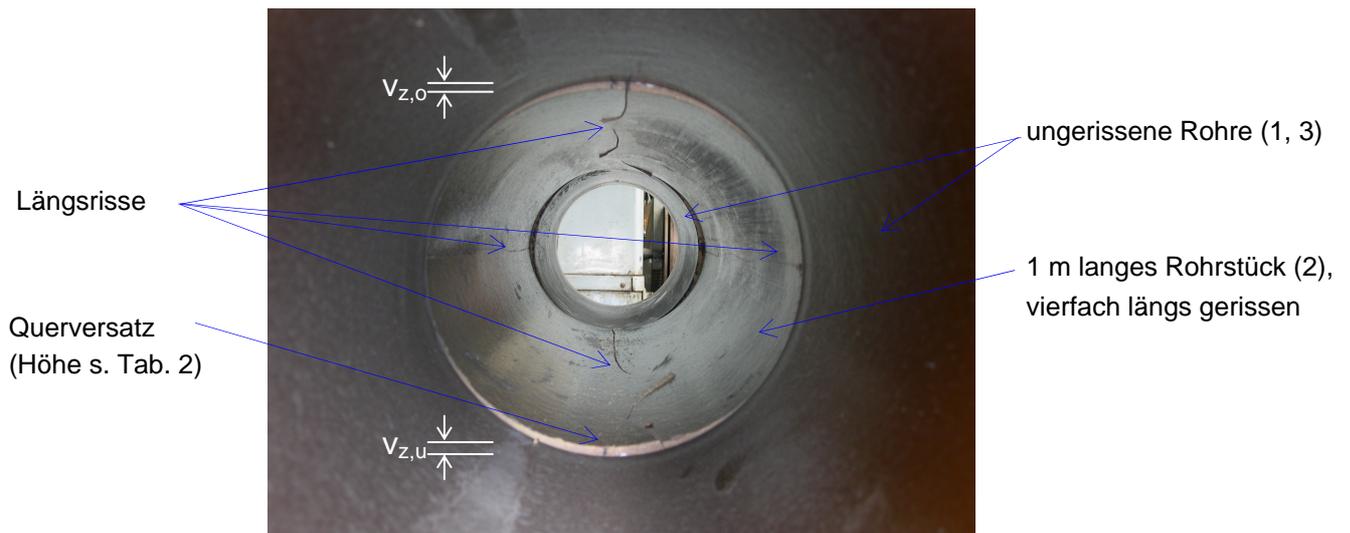


Bild 4 Vierfach längs gerissenes Steinzeugrohr DN 250 mit einer Ovalisierung von 3%

Vor dem Einbau der Manschetten wurden die Ovalisierung, die Rissbreiten im Scheitel und in der Sohle und die Längs- und Querversätze mit einer digitalen Schublehre gemessen, vgl. Tabelle 2. Die aus der Ovalisierung resultierenden Rissbreiten werden nach [9] ermittelt, vgl. Gl. (1).

$$s_P = \frac{w_{GR,v} \cdot s_R}{100} \cdot \frac{2 \cdot e_G / s_R + 1}{r_m / s_R - e_G / s_R} \quad (1)$$

mit  $s_R$  = Altrohrwanddicke  
 $r_m$  = mittlerer Radius des Altrohres  
 $e_G/s_R$  = Gelenkringexzentrizität / Altrohrwanddicke (Annahme:  $e_G/s_R = 0,5$ )

Tabelle 2: Messwerte vor Einbau der Manschetten

Nennweite	Altrohrmaterial	Wanddicke Altrohr	Ovalisierung, Messwert	Rissbreite innen, Messwert vor Einbau	Rissbreite innen, nach Gl. (1) berechnet	max. Höhe des Querversatzes	max. Längsversatz in den Muffen
DN	-	$s_R$	$w_{GR,v}$	$s_{P,ist}$	$s_{P,soll}$	$\max(v_{z,o}, v_{z,u})$	$v_x$
mm	-	mm	%	mm	mm	mm	mm
200	Steinzeug	20,9	3,0	1,0	1,3	5	4
250		26,8	3,0	1,0 – 1,6	1,6	7	10
300		29,0	2,5	1,0	1,5	6	22
400		42,9	2,7	1,4	2,3	10	5
600	Stahlbeton	77,4	2,5	2,0	3,9	<b>16</b>	6

Die Bezeichnung der Ovalisierung mit  $w_{GR,v}$  ist dem Merkblatt ATV-M 127-2 [8] entnommen.

Die Abweichungen der an den Rohren gemessenen Rissbreiten gegenüber den Rechenwerten sind in Tabelle 2 angegeben. Die größere Abweichung beim Stahlbetonrohr ist auf die Bewehrungslage und die Schlitz zurückzuführen, die vor dem Scheiteldruckversuch gefräst wurden, vgl. [2].

Um einen ausreichenden Anpressdruck der Dichtlippen an den ungerissenen Rohren zu gewährleisten, müssen größere Querversätze abgearbeitet werden. Dies war beim Stahlbetonrohr erforderlich, da dort der Querversatz den zulässigen Wert von 15 mm nach [1], Abschnitt 2.1.2 überschritt, vgl. Tabelle 2. Bei den Nennweiten DN 200 bis DN 400 konnte auf eine Bearbeitung der Übergänge verzichtet werden.

Bei den Nennweiten DN 250, DN 300 und DN 600 wurde jeweils drei Quick-Lock-Manschetten in Reihe versetzt. Bei den Nennweiten DN 200 und DN 400 wurden dagegen vier Manschetten eingebaut. Die Serienversetzung hat nach [1], Abschnitt 2.3 mit einer Überlappung von ca. 1,5 cm „Blech in Blech“ zu erfolgen, vgl. [1], Abb. 2.3.3.2 (5).

Die Überlappung zu den benachbarten ungerissenen Rohren sollte nach [1], Abschnitt 2.3.4 ca. 30 cm „in den Versatz“ betragen. Die ausgeführte Überlappungslänge beträgt im Mittel ca.

$$\ddot{u} = (n_M \cdot L - 1,0 \text{ m}) / 2,$$

also  $\ddot{u} = 100 \text{ mm}$  bei Einbau von drei und  $\ddot{u} = 300 \text{ mm}$  bei vier Manschetten ( $n_M = \text{Manschettenzahl}$ ).

Der Packerdruck („Applikationsdruck“) sollte bei Altrohren DN 250 bis DN 700 mit Längsrissen nach [1], Anlage 2 ca. 2,5 bis 3,0 bar betragen. Im Versuch 5a wurde ein höherer Packerdruck gewählt, der jedoch zu einem vorzeitigen Versagen des Zahnleistenverschlusses führte, vgl. Tabelle 4.

Maximalwerte für den Muffenspalt  $v_x$  sind in [1] nicht angegeben. Die vor dem Manschetteneinbau gemessenen Werte sind in der Tabelle 2 angegeben.

#### 4. Versuchsdurchführung



Bild 5 Druckbeaufschlagung der Quick-Lock-Manschetten im Labor für Baustoffe [2]

Nach dem Einbau der Quick-Lock-Stahlmanschetten wurde der sandgefüllte Ringraum zwischen Altrohr und Druckkammerwand langsam mit Wasser gefüllt, bis der Boden vollständig mit Wasser gesättigt war. Anschließend wurde mit dem Belastungsversuch begonnen.

Der Wasserdruck wurde mit einer Handpumpe aufgebracht, s. Bild 5. Die Messung des Wasserdrucks erfolgte mit einem Manometer, dessen Messgenauigkeit 0,02 bar betrug. Die Versuchsdurchführung wird in [2] näher beschrieben.

## 5. Versuchsergebnisse

### 5.1 Rissbreiten auf der Außenseite

Nach der Druckprüfung und dem Versagen der Manschetten wird die Adapterplatte demontiert und der Verfüllboden aus dem Ringraum lagenweise entfernt. Die Spaltweiten in den Rissen auf der Außenseite der Altrohre werden gemessen, bevor die Scherben instabil werden, vgl. Tabelle 3.

Tabelle 3: Rissbreiten außen während des Einbaus und des Ausbaus des Bettungsmaterials

Nennweite	Messung	Scheitel	Kämpfer 1	Kämpfer 2	Sohle	Bemerkung
DN	-	$s_{p,s}$	$s_{p,k1}$	$s_{p,k2}$	$s_{p,s0}$	-
mm	-	mm	mm	mm	mm	-
DN 250	Einbau	3,2 - 3,6	5,1 - 5,8	5,1 - 5,8	4,0	-
	Ausbau	9,3 - 9,6	5,8 - 6,6	8,0 - 8,7	-	
DN 300	Einbau	5,1	5,8	6,0	5,2	-
	Ausbau	5,9 - 6,5	7,2 - 7,5	9,2	-	
DN 400	Einbau	3,8 - 4,3	7,3 - 7,7	7,0 - 7,7	3,5 - 3,9	große Aufweitung durch Hohlraumbildung, vgl. Bild 6
	Ausbau	18,7 - 19,0	13,3 - 13,4	10,1 - 10,7	-	



Sandbettung

Steinzeugrohrscherben

Sandeinspülung

Manschette

Bild 6 Rissbreitenaufweitung DN 400 durch Hohlraumbildung infolge Sandeinspülung

Es kann davon ausgegangen werden, dass die gemessenen Spaltbreiten dem Gebrauchszustand der sanierten Rohre entsprechen, sofern kein größeres Sandvolumen in das Innere der Druckkammer ausgespült wurde. Dies war in den Versuchen 1, 2 und 5b der Fall.

### 5.2 Grenzlasten $\max p_{a,\text{test}}$

Die in den Versuchen erzielten Grenzlasten der Quick-Lock-Stahlmanschetten sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4: Versuchsergebnisse: Grenzlasten

Nr.	Nennweite	Wanddicke	Ovalisierung, Messwert	Grenzlast im Versuch	Bemerkungen
	DN	s	$w_{GR,v}$	$\max p_{a,\text{test}}$	-
	mm	mm	%	bar	-
1	200	1,0	3,0	1,2	Übergang Manschette 3 zu 4 wird undicht
2	250	1,2	3,0	1,5	Abbruch des Versuchs bei 1,5 bar ohne Versagen
3	300	1,2	2,5	1,3	Manschetten 2 und 3 beulen, vgl. Bild 7
4	400	1,5	2,7	1,1	Dichtung tritt aus, Manschette 3 beult, vgl. Bild 8
5a	600	2,0	2,5	0,6	Zahnleistenverschluss gebrochen, Manschette 1 wird undicht
5b				1,2	Manschette 1 wird undicht

Bei Erreichen der Grenzlast kam es bei den Nennweiten DN 300 und DN 400 neben Undichtigkeiten auch zum Beulen der Quick-Lock-Stahlmanschetten, vgl. Bilder 7 und 8.



Bild 7 Stabilitätsversagen der Manschette DN 300

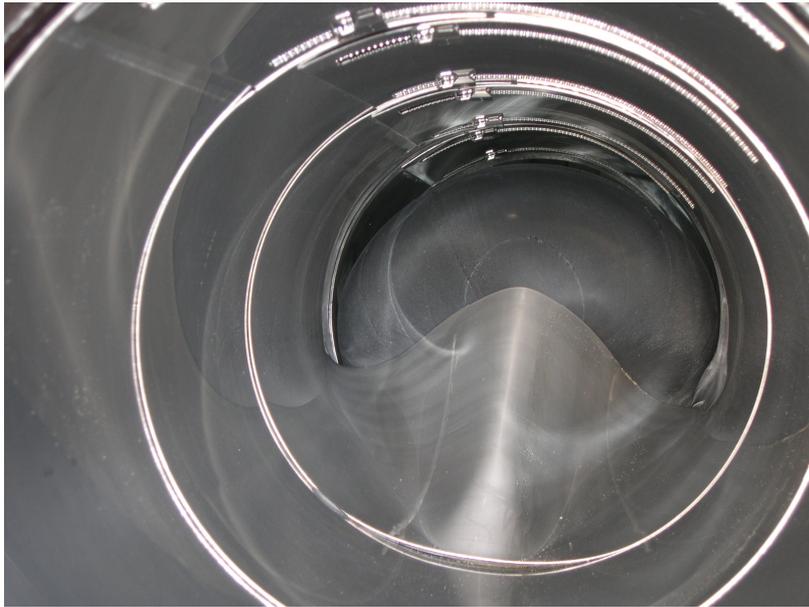


Bild 8 Stabilitätsversagen der Manschette DN 400 mit Austritt der Gummidichtung

Nach dem Rückbau der Rohre wurden die Zahnleistenverschlüsse der Versuchskörper geöffnet, die Beulerscheinungen aufwiesen. Weder an den Zahnleisten noch an den Zahnrädern waren äußere Schäden erkennbar, vgl. Bild 9.

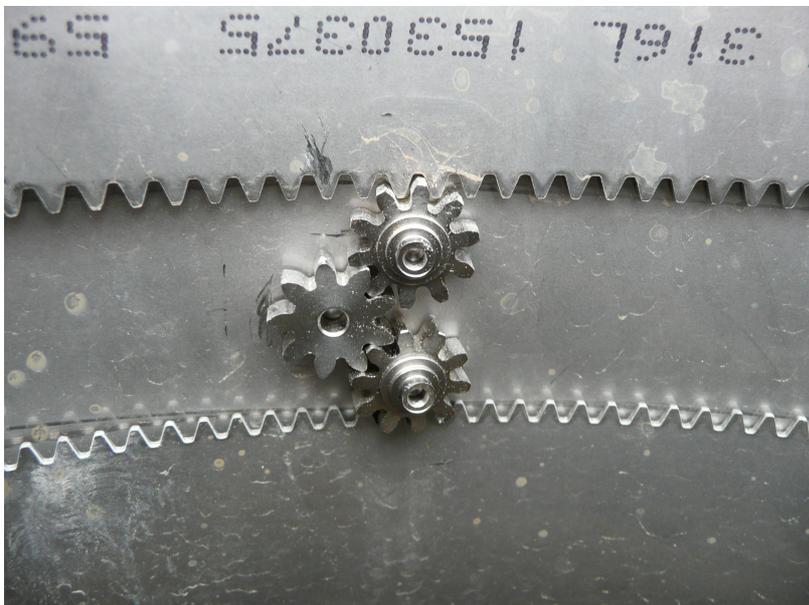


Bild 9 Versuch 3, nach dem Ausbau der Manschette: intakter Zahnleistenverschluss

Der Versuch 5a, bei dem die Manschetten mit einem erhöhten Packerdruck von 4 bar installiert wurden, zeigte dagegen plastische Verformungen der Zahnleisten und Beschädigungen an den Zahnrädern, vgl. Bild 10.

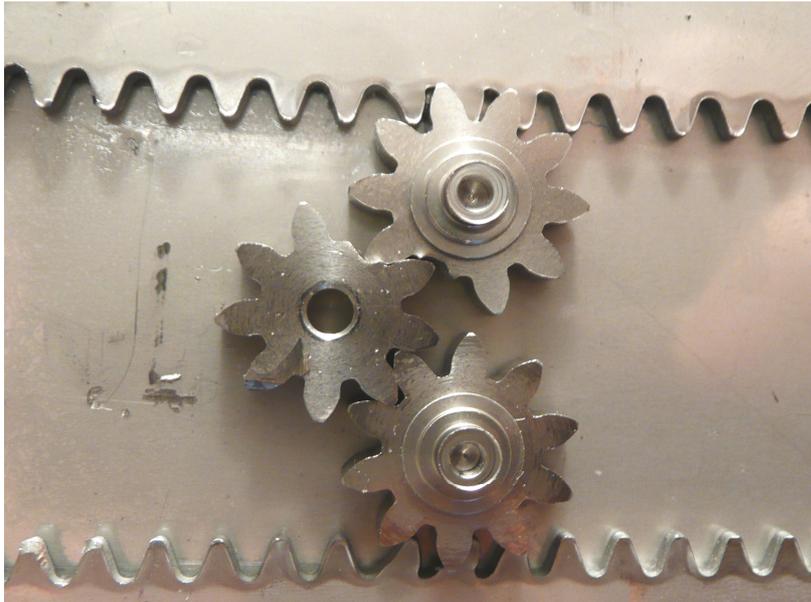


Bild 10 Versuch 5a, nach dem Ausbau der Manschette:  
plastisch verformter und gebrochener Zahnleistenverschluss

## 6. Berechnungen

### 6.1 Berechnungsmodell

Bei früheren Berechnungen [5] konnte gezeigt werden, dass Spannungsversagen der Stahlmanschetten wenig wahrscheinlich ist. Aus diesem Grund können die statischen Berechnungen auf die Beulnachweise beschränkt werden, die in Anlehnung an DIN 18800-4 (Stahlbauten, Stabilitätsfälle, Schalenbeulen) [6] geführt werden.

Die bei den Versuchen DN 300 und DN 400 aufgetretenen Beulformen sind in den Bildern 11a,b dargestellt.

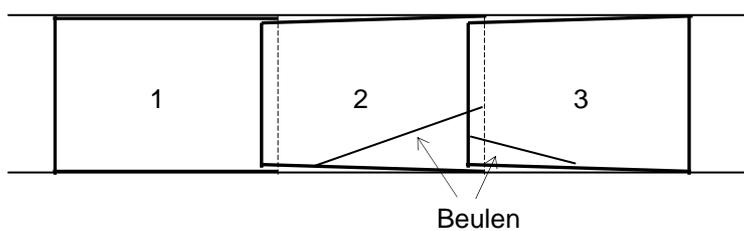


Bild 11a Beulform beim Versuch DN 300

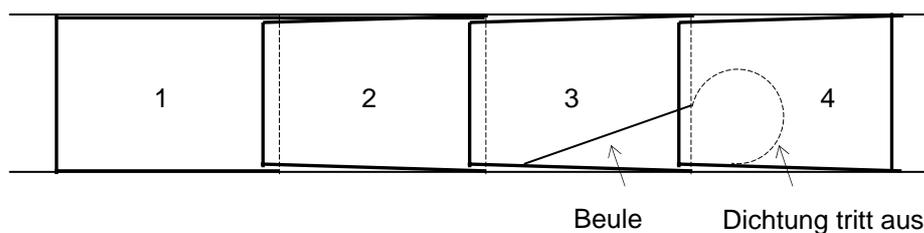


Bild 11b Beulform beim Versuch DN 400

Die Beulformen der Manschetten 2 und 3 (Bild 11a) und der Manschette 3 (Bild 11b) zeigen das folgende gleichartige Verhalten: Ein Rand der Manschetten bleibt radial unverschieblich, der gegenüberliegende Rand wird in das Rohrinne verformt.

Während die DIN 18800-4 außen und innen frei verformbare Metallschalen behandelt, ist ein Liner bzw. eine Stahlmanschette mit Gummimantel eine auf der Außenseite im Altrohr gebettete Schale. Dennoch ist die Bettung der Quick-Lock-Manschette aus den folgenden Gründen als eher gering einzustufen:

- Die Arretierung im Zahnleistenverschluss wird sich nach dem Ablassen des Packerdrucks etwas setzen.
- Die Druckbelastung von außen führt zu einer Umfangsverkürzung und damit zu einer Spaltbildung.
- Da die Manschetten nach Tabelle 5 meist Verhältnisse  $r/s > 100$  aufweisen und damit sehr schlank sind, erfolgt nach ATV-M 127-2, Diagramm D3 eine erhebliche Abminderung der Beullasten.<sup>1</sup>

Damit liegen die in Tabelle 5 und Anhang A1 bis A5 ermittelten Beullasten auf der sicheren Seite.

## 6.2 Beullasten $p_a$ für Altrohrzustand I

Die in den Versuchen beobachteten Beulformen entsprechen den Randbedingungen RB 1 und RB 3 nach DIN 18800-4, Element (403).

Nach Tabelle 2 der Norm folgt damit der Beiwert  $C_\varphi = 0,6$  für die Berechnung der idealen Beulspannung

$$\sigma_{\varphi Si} = 0,92 \cdot C_\varphi \cdot E \cdot \frac{r}{L} \cdot \left(\frac{s}{r}\right)^{1,5} \quad (2)$$

Für die Vergleichsschlankheit gilt

$$\bar{\lambda}_{S\varphi} = \sqrt{\frac{f_{y,k}}{\sigma_{\varphi Si}}} \quad (3)$$

und bei  $\bar{\lambda}_{S\varphi} > 1,2$  für den Abminderungsfaktor bei normal imperfektionsempfindlichen Schalenbeulfällen

$$\kappa_1 = 0,65 / \bar{\lambda}_{S\varphi}^2 \quad (4)$$

Bei Unrundheiten  $U > \text{zul } U$  ( $U = w_{GR,v}$  nach ATV-M 127-2) ist  $\kappa_1$  noch einmal abzumindern, s. Abschnitt 6.3.

Für die reale Beulspannung folgt:

$$\sigma_{\varphi S,R,k} = \kappa_1 \cdot f_{y,k} \quad (5)$$

Als Teilsicherheitsbeiwert für den Widerstand ist nach Element (206) bei Druckbeanspruchung in Umfangsrichtung der Wert  $\gamma_{M1} = 1,1$  anzuwenden:

$$\sigma_{\varphi S,R,d} = \sigma_{\varphi S,R,k} / \gamma_{M1} \quad (6)$$

Zum Abschluss ist der Nachweis

---

<sup>1</sup> So führt z. B. ein Spalt von 1 mm bei DN 200 mit  $w_s = 1/100 \cdot 100 \% = 1 \%$  zu einer Abminderung der Beullast auf 30 % der Beullast der spaltfrei anliegenden Schale.

$$\frac{\sigma_{\varphi,d}}{\sigma_{\varphi S,R,d}} < 1 \quad (7)$$

zu führen, wobei

$$\sigma_{\varphi,d} = p_a \cdot \gamma_F \cdot \frac{r}{s} \quad (8)$$

mit  $\gamma_F = 2,0$  = Teilsicherheitsbeiwert für die Einwirkungen, vgl. Abschnitt 2.

Der für Vergleiche mit den Versuchen benötigte kritische Wasserdruck ergibt sich wie folgt:

$$\text{krit } p_{a,k} = \sigma_{\varphi S,R,k} \cdot s / r \quad (9)$$

Die Ergebnisse der Beuluntersuchungen für Altrohrzustand I sind in der Tabelle 5 zusammengefasst, vgl. Anhang A1 bis A5.

### 6.3 Abminderung der Beullasten krit $p_a$ für Altrohrzustand II

Die für Altrohrzustand II zu betrachtende Ovalisierung („Unrundheit“) von mindestens 3% wird nach [6], Element (303) und (305) wie folgt berücksichtigt:

$$d \leq 500 \text{ mm: zul } U = 2,0 \% \quad (10a)$$

$$d = 600 \text{ mm: zul } U = 2,0 - 1,5 \cdot 100 / 750 = 1,8 \% \quad (10b)$$

(Interpolation zwischen 2 % für  $d = 500$  mm und 0,5 % für  $d = 1250$  mm)

Bei Ovalisierungen zul  $U < U \leq 2 \cdot$  zul  $U$  ist nach Element (305) ein Nachweis mit einem reduzierten Abminderungsfaktor möglich:

$$\text{red } \kappa = \kappa_1 \cdot \kappa_U \quad (11)$$

$$\text{mit } \kappa_U = 1,5 - 0,5 \cdot \frac{\text{vorh } U}{\text{zul } U}$$

gültig für  $\bar{\lambda}_S \geq 1,5$ , vgl. Anhang A1 bis A5

vorh  $U = w_{GR,v}$  nach Tabelle 5 und zul  $U$  nach Gl. (10a,b)

Tabelle 5: Rechnerische Beullasten für Stahlmanschetten, Altrohrzustand I und II

Nr.	Nennweite	Manschettenwanddicke	Verhältnis	Manschettenlänge	Beullast AZ I charakteristischer Wert Gl. (9)	Ovalisierung, Messwert	Abminderungsfaktor für AZ II Gl. (11)	Beullast AZ II charakteristischer Wert
	DN	s	r / s	L	krit $p_{a,k}$	$w_{GR,v}$	$\kappa_U$	krit $p_{a,k}$
	mm	mm	-	mm	N/mm <sup>2</sup>	%	-	N/mm <sup>2</sup>
1	200	1,0	99,2	400	0,154	3,0	0,750	0,116
2	250	1,2	78,0	400	0,174	3,0	0,750	0,130
3	300	1,2	123,7	400	0,132	2,5	0,875	0,116
4	400	1,5	133,6	400	0,154	2,7	0,825	0,127
5b	600	2,0	150,7	500	0,133	2,5	0,806	0,107

## 6.4 Vergleich der Beullasten im Versuch mit den Rechenwerten

Eine zusammenfassende Übersicht über die Grenzlaster im Versuch und die rechnerischen Beullasten ist Tabelle 6 zu entnehmen.

Tabelle 6: Vergleich der Versuchsergebnisse mit Berechnungen in Anlehnung an DIN 18800-4

Nr.	Nennweite	Altrohrmaterial	Ovalisierung, Messwert	Grenzlaster im Versuch	Beullast AZ II charakteristischer Wert	Verhältnis Versuchslast / Beullast AZ II
	DN	-	$w_{GR,v}$	$\max p_{a,test}$	$\text{krit } p_{a,k}$	$\max p_{a,test} / \text{krit } p_{a,k}$
	mm	-	%	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	-
1	200	Steinzeug	3,0	<b>0,12</b>	<b>0,116</b>	<b>1,03</b>
2	250		3,0	<b>0,15</b>	<b>0,130</b>	<b>1,15</b>
3	300		2,5	<b>0,13</b> <sup>1)</sup>	<b>0,116</b>	<b>1,12</b>
4	400		2,7	<b>0,11</b> <sup>1)</sup>	<b>0,127</b>	<b>0,87</b>
5b	600	Stahlbeton	2,5	<b>0,12</b>	<b>0,107</b>	<b>1,12</b>

<sup>1)</sup> In den Versuchen trat nur bei DN 300 und DN 400 ein Beulversagen auf, vgl. Tabelle 4.

Zwischen Versuchslasten und rechnerischen Beullasten besteht eine gute Übereinstimmung, vgl. Tabelle 6, letzte Spalte. Außerdem ist zu erkennen, dass das rechnerische Verfahren nur im Falle der Nennweite DN 400 etwas geringere Beullasten als die Beulformel ergibt.

Bei den Nennweiten DN 200, DN 250 und DN 600 wurden die Beullasten im Versuch nicht erreicht, da die Manschetten vorher undicht wurden.

Die Streuung der Werte ist relativ gering, so dass der Ansatz des geringeren Teilsicherheitsbeiwertes  $\gamma_{M1} = 1,1$  in Gl. (6) gerechtfertigt ist.

## 6.6 Zulässiger Wasserdruck

Der zulässige Wasserdruck wird nach DIN 18800-4 aus der Beullast mit den Teilsicherheitsbeiwerten  $\gamma_{M1} = 1,1$  und  $\gamma_F = 1,5$  wie folgt ermittelt:

$$\text{zul } p_a = \text{krit } p_{a,k} / \gamma_{M1} / \gamma_F \quad (12)$$

Da im Merkblatt ATV-M 127-2 bisher noch der globale Sicherheitsfaktor von  $\gamma = 2,0$  für Stabilitätsnachweise verwendet wird, wird im Folgenden mit

$$\text{zul } p_a = \text{krit } p_{a,k} / \gamma \quad (13)$$

gerechnet.

Damit liegt die Ermittlung der zulässigen Wasserdrucks gegenüber DIN 18800 wegen

$$\gamma_{M1} \cdot \gamma_F = 1,1 \cdot 1,5 = 1,65$$

auf der sicheren Seite.

Die für die untersuchten Nennweiten zugelassenen Wasserdrücke sind der Tabelle 7 zu entnehmen.

Tabelle 7: Rechnerische Beullasten für Stahlmanschetten, Altrohrzustand I ( $w_{GR,v} = 0$ )  
 und Altrohrzustand II ( $w_{GR,v} = 3\%$ )

Nr.	Nennweite	Manschettenwanddicke	Beullast AZ I charakteristischer Wert	Zulässiger Außendruck AZ I Gl. (13)	Ovalisierung, AZ II	Abminderungsfaktor für AZ II Gl. (11)	Beullast AZ II charakteristischer Wert	Zulässiger Außendruck AZ II Gl. (13)
	DN	s	krit $p_{a,k}$	<b>zul <math>p_a</math></b>	$w_{GR,v}$	$\kappa_U$	krit $p_{a,k}$	<b>zul <math>p_a</math></b>
	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	%	-	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
1	200	1,0	0,154	<b>0,077</b>	3,0	0,750	0,116	<b>0,058</b>
2	250	1,2	0,174	<b>0,084</b>	3,0	0,750	0,130	<b>0,065</b>
3	300	1,2	0,132	<b>0,062</b>	3,0	0,750	0,099	<b>0,050</b>
4	400	1,5	0,154	<b>0,077</b>	3,0	0,750	0,116	<b>0,058</b>
5b	600	2,0	0,133	<b>0,066</b>	3,0	0,667	0,089	<b>0,044</b>

## 6.6 Nicht lineares Werkstoffgesetz

DIN 18800-4 liegt das für Baustahl übliche bilineare Werkstoffgesetz mit ausgeprägter Streckgrenze zugrunde. Für nichtrostende Stähle ist das  $\sigma/\varepsilon$ -Diagramm dagegen gekrümmt, was nach der Allgemeinen Bauaufsichtlichen Zulassung Z-30.3-6 [7] z. B. durch Abminderung der Werkstoffkennwerte erfasst werden kann.

Alternativ ist eine Berechnung mit dem genauen  $\sigma/\varepsilon$ -Diagramm möglich, vgl. [7], Abschnitt 3.3.3.1 - diese Vorgehensweise wird im vorliegenden Fall für Folgeuntersuchungen empfohlen.

## 7. Zusammenfassung

Frühere Versuche und rechnerische Beulnachweise für Quick-Lock-Stahlmanschetten galten dem Altrohrzustand I. Zur Überprüfung der Standsicherheit bei längs gerissenen Altröhren (Altrohrzustand II nach der Definition in [8] mit maximal 3% Ovalisierung) werden Außendruckprüfungen an Stahlmanschetten der Nennweiten DN 200 bis DN 600 durchgeführt.

Bei Einhaltung der Anwenderempfehlungen [1] wie z. B. die Begrenzung des Packerdrucks, die erforderliche Überlappungslänge und die Abarbeitung größerer Querversätze wurden in allen Außendruckversuchen Prüflasten über 1 bar erreicht. Ein Überschreiten dieser Grenzlast führte zu Undichtigkeiten und/oder zum Beulen der Stahlmanschette. Die in den Versuchen für Altrohrzustand II bei Ovalisierungen von 2,5 % bis 3 % erreichten Grenzlasten entsprechen einem zulässigen Druck aus einer Wassersäule von 5 m mit einem Sicherheitsfaktor von mindestens 2,0.

Ferner werden statische Berechnungen nach DIN 18800-4 (Stahlbauten, Stabilitätsfälle, Schalenbeulen) [2] auf Grundlage der in Abschnitt 6 beschriebenen Beulform der Manschetten geführt. Hierbei werden gute Übereinstimmungen mit den Versuchsergebnissen erzielt, vgl. Tabelle 6.

Auf der Grundlage der Versuche können Quick-Lock-Stahlmanschetten DN 200 bis DN 400 zur Sanierung von Röhren, die dem Altrohrzustand II zuzuordnen sind, verwendet werden, wenn die Ovalisierung auf ca. 3% beschränkt ist. Bei der Nennweite DN 600 wird der Sicherheitsfaktor um ca. 10 % unterschritten, vgl. Tabelle 7.

Zur Absicherung der Ergebnisse werden ergänzende Berechnungen nach der Allgemeinen Bauaufsichtlichen Zulassung Z-30.3-6 [7] für Erzeugnisse aus nichtrostenden Stählen empfohlen, da das  $\sigma$ - $\varepsilon$ -Diagramm dieser Werkstoffe – abweichend von Baustahl – gekrümmt ist. In der Zulassung wird daher entweder eine Reduktion der Werkstoffparameter E-Modul oder Streckgrenze vorgeschrieben oder eine physikalisch nicht lineare Berechnung empfohlen. Für solche Berechnungen sollte die Finite Element Methode eingesetzt werden, was im Rahmen des hier beschriebenen Versuchsprogramms nicht vorgesehen war.

Die Berechnungs- und Versuchsergebnisse gelten nur für die in den Abschnitten 2 und 3 beschriebenen Eingabeparameter. Bei Änderung der Wanddicken ist ggf. zu prüfen, ob die Stahlmanschetten ausreichend flexibel bleiben, um Querversätze ohne Beeinträchtigung der Wasserdichtigkeit zu überbrücken.

---

(Prof. Dr.-Ing. B. Falter)

---

(Dipl.-Ing. M. Wolters)

## Unterlagen, Literatur:

- [1] Uhrig Kanaltechnik GmbH, Geisingen: Quick-Lock - Handbuch für Anwender, Stand 01.05.05.  
Quelle: [http://www.uhrig-bau.de/quick\\_lock/partnerdownload/tech\\_informationen\\_ql/quick\\_lock\\_handbuch\\_deutsch.pdf](http://www.uhrig-bau.de/quick_lock/partnerdownload/tech_informationen_ql/quick_lock_handbuch_deutsch.pdf)
- [2] Fachhochschule Münster, Labor für Baustoffe (Prof. Dr.-Ing. J. Müller-Rochholz): Prüfbericht Nr. MRF 7-07 vom 11.03.2008
- [3] Fachhochschule Münster, Arbeitsgebiet Statik und Bauinformatik: Gutachten zur Standsicherheit eines Druckzylinders aus Stahl für 1,0 bar Innendruck zur Durchführung von Versuchen an Quick-Lock-Stahlmanschetten, Statische Berechnung vom 23.07.2007
- [4] Fachhochschule Münster, Arbeitsgebiet Statik und Bauinformatik: Zugversuche am Zahnleistenverschluss zur Beurteilung der Tragfähigkeit von Quick-Lock-Stahlmanschetten, Bericht vom 08.05.2006
- [5] Fachhochschule Münster: Untersuchungen zur Standsicherheit von Quick-Lock-Kanallinern DN 250, Statische Berechnungen vom 01.12.2004
- [6] DIN 18800-4 (11.1990): Stahlbauten, Stabilitätsfälle, Schalenbeulen. Beuth-Verlag, Berlin
- [7] Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung Z-30.3-6 vom 5. Dezember 2003. Erzeugnisse, Verbindungsmittel und Bauteile aus nichtrostenden Stählen. Informationsstelle Edelstahl Rostfrei,
- [8] Merkblatt ATV-M 127-2 (01.2000): Statische Berechnung zur Sanierung von Abwasserkanälen und -leitungen mit Lining- und Montageverfahren, Ergänzung zum Arbeitsblatt ATV-A 127, Hennef
- [9] Falter, B.; Hoch, A.; Wagner, V.: Hinweise und Kommentare zur Anwendung des Merkblattes ATV-M 127-2 für die statische Berechnung von Linern. Korrespondenz Abwasser 50 (2003) 451

## Anhang A (statische Berechnungen)

## Seite

Stabilitätsnachweise für Quick-Lock-Manschetten unter Außendruck nach DIN 18800-4:

DN 200	A1
DN 250	A2
DN 300	A3
DN 400	A4
DN 600	A5



Fachhochschule Münster • Postfach 30 20 • 48016 Münster

Uhrig Kanaltechnik GmbH  
Herrn Mark Biesalski  
Am Roten Kreuz 2  
78187 Geisingen



Fachbereich 6  
Bauingenieurwesen

**Arbeitsgebiet Statik  
und Bauinformatik  
Prof. Dr.-Ing. B. Falter**

Aktenzeichen:

Fal/Wol

Auskunft erteilt:

Dipl.-Ing. M. Wolters

Corrensstraße 25

48149 Münster

Fon+49(0)2 51/83 65-218

-240

Fax+49(0)2 51/83 65-239

falter@fh-muenster.de

www.fh-muenster.de

Münster, 25. April 2008

**Außendruckprüfung an Quick-Lock-Stahlmanschetten, Altrohrzustand II**

hier: Ergänzung zu unserem Bericht vom 31.03.2008

Sehr geehrter Herr Biesalski,

wie besprochen erhalten Sie im Anhang die Beulnachweise in Anlehnung an DIN 18800-4 (Stahlbauten, Stabilitätsfälle, Schalenbeulen) für Quick-Lock Stahlmanschetten DN 150, DN 350 und DN 500 für Altrohrzustand II.

Die Berechnungen wurden mit Werkstoffkennwerten gemäß unserem Bericht zu Außen-  
druckversuchen an Quick-Lock-Stahlmanschetten vom 31.03.2008 geführt.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 7 zusammengefasst. Die Gleichungsnummern beziehen  
sich auf die Nummerierung im Bericht vom 31.03.2008.

In Tabelle 8 sind die rechnerischen Höhen der Querversätze und die im Rahmen der  
Druckversuche gemessenen Querversätze bei 3% Ovalisierung aufgeführt.

Es wird darauf hingewiesen, dass bei einer Erhöhung der Wanddicke der Manschette  
die Beullast zwar steigt, die Dichtigkeit aufgrund der geringeren Flexibilität des Mantels  
möglicherweise zurückgeht.

Für Rückfragen stehen wir Ihnen gern zur Verfügung.

Mit freundlichen Grüßen

Bernhard Falter

Anlagen

Ergänzung zum Bericht „Außendruckprüfungen an Quick-Lock-Stahlmanschetten DN 200 bis DN 600 für Altrohrzustand II“ vom 31.03.2008

Tabelle 7: Rechnerische Beullasten für Stahlmanschetten, Altrohrzustand I ( $w_{GR,v} = 0$ ) und Altrohrzustand II ( $w_{GR,v} = 3\%$ )

Nr.	Nennweite	Wanddicke	Beullast AZ I charakteristischer Wert	zulässiger Außen- druck AZ I Gl. (13)	Ovalisierung, AZ II	Abmin- derungs- faktor für AZ II Gl. (11)	Beullast AZ II charakte- ristischer Wert	zulässiger Außen- druck AZ II Gl. (13)
	DN	s	krit $p_{a,k}$	<b>zul <math>p_a</math></b>	$w_{GR,v}$	$\kappa_U$	krit $p_{a,k}$	<b>zul <math>p_a</math></b>
	mm	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	%	-	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
1*	150	1,0	0,238	<b>0,119</b>	3,0	0,75	0,178	<b>0,089</b>
1	200	1,0	0,154	<b>0,077</b>	3,0	0,75	0,116	<b>0,058</b>
2	250	1,2	0,174	<b>0,084</b>	3,0	0,75	0,130	<b>0,065</b>
3	300	1,2	0,132	<b>0,062</b>	3,0	0,75	0,099	<b>0,050</b>
4*	350	1,5	0,186	<b>0,093</b>	3,0	0,75	0,140	<b>0,070</b>
4	400	1,5	0,154	<b>0,077</b>	3,0	0,75	0,116	<b>0,058</b>
5*	500	2,0	0,176	<b>0,088</b>	3,0	0,75	0,132	<b>0,066</b>
5b	600	2,0	0,133	<b>0,066</b>	3,0	0,67	0,089	<b>0,044</b>

Tabelle 8: Rechnerische und gemessene Querversätze

Nennweite	Ovalisierung	rechnerischer Querversatz	gemessener Querversatz
DN	$w_{GR,v}$	$v_z$	$v_{z,mess}$
mm	%	mm	mm
150	3,0	4,5	-
200	3,0	6,0	5,0
250	3,0	7,5	7,0
300	2,5	7,5	6,0
	3,0	9,0	-
350	3,0	10,5	-
400	2,7	10,8	10,0
	3,0	12,0	-
500	3,0	15,0	-
600	2,5	15,0	16,0
	3,0	18,0	-

Der Versatz sollte die in der Einbauanleitung angegebenen Werte nicht überschreiten.

### Anhang A1\*: Stabilitätsnachweis (Beulen) nach DIN 18800-4 für DN 150

Kennwerte:  $l = 400 \text{ mm}$ ,  $t = 1,0 \text{ mm}$ ,  $r = 74,5 \text{ mm}$ ,  $f_{y,k} = 220 \text{ N/mm}^2$ ,  $E = 170.000 \text{ N/mm}^2$

Anzahl der Beulwellen in Umfangsrichtung:

$$n^2 = 7,52 \cdot \frac{r}{l} \cdot \sqrt{\frac{r}{t}} = 7,52 \cdot \frac{74,5}{400} \cdot \sqrt{\frac{74,5}{1,0}} = 6,5 \rightarrow n = 3$$

Element (403) Randbedingung „RB3“ (radial verschieblicher, axial verschieblicher Rand)  $\rightarrow C_\varphi = 0,6$

Bedingung für „mittellange“ und „kurze“ Kreiszyylinder Gl. (33)

$$\frac{l}{r} = \frac{400}{74,5} = 5,37 \leq 1,63 \cdot 0,6 \cdot \sqrt{\frac{74,5}{1,0}} = 8,44$$

ideale Beullast nach Gl. (34):

$$\sigma_{\varphi Si} = 0,92 \cdot C_\varphi \cdot E \cdot \frac{r}{l} \cdot \left(\frac{t}{r}\right)^{1,5} = 0,92 \cdot 0,6 \cdot 170.000 \cdot \frac{74,5}{400} \cdot \left(\frac{1,0}{74,5}\right)^{1,5} = 27,2 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Vergleichsschlankheit } \bar{\lambda}_{S\varphi} = \sqrt{\frac{f_{y,k}}{\sigma_{\varphi Si}}} = \sqrt{\frac{220}{27,2}} = 2,84$$

Abminderungsfaktor für normal imperfektionempfindliche Schalenbeulfälle

$$\kappa_1 = 0,65 / \bar{\lambda}_{S\varphi}^2 = 0,65 / 2,84^2 = 0,0806$$

Zusätzliche Abminderung für Unrundheit  $U = w_{GR,v} = 3\%$ :

$$\kappa_U = 1,5 - 0,5 \cdot \frac{\text{vorh } U}{\text{zul } U} = 1,5 - 0,5 \cdot \frac{3}{2} = 0,75$$

$$\text{red } \kappa = \kappa_1 \cdot \kappa_U = 0,0806 \cdot 0,75 = 0,0605$$

Reale Beulspannung:

$$\text{AZ I: } \sigma_{\varphi S,R,k} = \kappa_1 \cdot f_{y,k} = 0,0806 \cdot 220 = 17,7 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{AZ II: } \sigma_{\varphi S,R,k} = \text{red } \kappa \cdot f_{y,k} = 0,0605 \cdot 220 = 13,3 \text{ N/mm}^2$$

Teilsicherheitsbeiwerte für Widerstand und Einwirkungen:

- normal imperfektionempfindliche Schalenbeulfälle  $\gamma_{M1} = 1,1$  nach Element (206)
- veränderliche Einwirkung  $\gamma_F = 1,5$  nach DIN 18800-1
- Gesamtsicherheit nach DIN 18800-4:  $\gamma = \gamma_{M1} \cdot \gamma_F = 1,65$

Mit dem globalen Sicherheitsbeiwert  $\gamma = 2,0$  nach ATV-M 127-2 folgt auf der sicheren Seite:

**Altrohrzustand II, zulässiger Wasserdruck**

$$\begin{aligned} \text{zul } p_a &= \sigma_{\varphi S,R,k} \cdot (t/r) / \gamma \\ &= 13,3 \cdot 1,0 / 74,5 / 2,0 = 0,0893 \text{ N/mm}^2 = 8,9 \text{ mWS} \end{aligned}$$

### Anhang A1: Stabilitätsnachweis (Beulen) nach DIN 18800-4 für DN 200

Kennwerte:  $l = 400$  mm,  $t = 1,0$  mm,  $r = 99,5$  mm,  $f_{y,k} = 220$  N/mm<sup>2</sup>,  $E = 170.000$  N/mm<sup>2</sup>

Anzahl der Beulwellen in Umfangsrichtung:

$$n^2 = 7,52 \cdot \frac{r}{l} \cdot \sqrt{\frac{r}{t}} = 7,52 \cdot \frac{99,5}{400} \cdot \sqrt{\frac{99,5}{1,0}} = 18,6 \rightarrow n = 4$$

Element (403) Randbedingung „RB3“ (radial verschieblicher, axial verschieblicher Rand)  $\rightarrow C_\varphi = 0,6$   
Bedingung für „mittellange“ und „kurze“ Kreiszyylinder Gl. (33)

$$\frac{l}{r} = \frac{400}{99,5} = 4,02 \leq 1,63 \cdot 1,0 \cdot \sqrt{\frac{99,5}{1,0}} = 16,3$$

ideale Beullast nach Gl. (34):

$$\sigma_{\varphi Si} = 0,92 \cdot C_\varphi \cdot E \cdot \frac{r}{l} \cdot \left(\frac{t}{r}\right)^{1,5} = 0,92 \cdot 0,6 \cdot 170.000 \cdot \frac{99,5}{400} \cdot \left(\frac{1,0}{99,5}\right)^{1,5} = 23,5 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Vergleichsschlankheit } \bar{\lambda}_{S\varphi} = \sqrt{\frac{f_{y,k}}{\sigma_{\varphi Si}}} = \sqrt{\frac{220}{23,5}} = 3,06$$

Abminderungsfaktor für normal imperfektionsempfindliche Schalenbeulfälle

$$\kappa_1 = 0,65 / \bar{\lambda}_{S\varphi}^2 = 0,65 / 3,06^2 = 0,0695$$

Zusätzliche Abminderung für Unrundheit  $U = w_{GR,v} = 3\%$ :

$$\kappa_U = 1,5 - 0,5 \cdot \frac{\text{vorh } U}{\text{zul } U} = 1,5 - 0,5 \cdot \frac{3}{2} = 0,75$$

$$\text{red } \kappa = \kappa_1 \cdot \kappa_U = 0,0695 \cdot 0,75 = 0,0521$$

Reale Beulspannung:

$$\text{AZ I: } \sigma_{\varphi S,R,k} = \kappa_1 \cdot f_{y,k} = 0,0695 \cdot 220 = 15,3 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{AZ II: } \sigma_{\varphi S,R,k} = \text{red } \kappa \cdot f_{y,k} = 0,0521 \cdot 220 = 11,5 \text{ N/mm}^2$$

Teilsicherheitsbeiwerte für Widerstand und Einwirkungen:

- normal imperfektionsempfindliche Schalenbeulfälle  $\gamma_{M1} = 1,1$  nach Element (206)
- veränderliche Einwirkung  $\gamma_F = 1,5$  nach DIN 18800-1
- Gesamtsicherheit nach DIN 18800-4:  $\gamma = \gamma_{M1} \cdot \gamma_F = 1,65$

Mit dem globalen Sicherheitsbeiwert  $\gamma = 2,0$  nach ATV-M 127-2 folgt auf der sicheren Seite:

#### Altrohrzustand II, zulässiger Wasserdruck

$$\begin{aligned} \text{zul } p_a &= \sigma_{\varphi S,R,k} \cdot (t/r) / \gamma \\ &= 11,5 \cdot 1,0 / 99,5 / 2,0 = 0,058 \text{ N/mm}^2 = 5,8 \text{ mWS} \end{aligned}$$

## Anhang A2: Stabilitätsnachweis (Beulen) nach DIN 18800-4 für DN 250

Kennwerte:  $l = 400$  mm,  $t = 1,2$  mm,  $r = 124,4$  mm,  $f_{y,k} = 220$  N/mm<sup>2</sup>,  $E = 170.000$  N/mm<sup>2</sup>

Anzahl der Beulwellen in Umfangsrichtung:

$$n^2 = 7,52 \cdot \frac{r}{l} \cdot \sqrt{\frac{r}{t}} = 7,52 \cdot \frac{124,4}{400} \cdot \sqrt{\frac{124,4}{1,2}} = 23,8 \rightarrow n = 5$$

Element (403) Randbedingung „RB3“ (radial verschieblicher, axial verschieblicher Rand)  $\rightarrow C_\varphi = 0,6$

Bedingung für „mittellange“ und „kurze“ Kreiszyylinder Gl. (33)

$$\frac{l}{r} = \frac{400}{124,4} = 3,22 \leq 1,63 \cdot 1,0 \cdot \sqrt{\frac{124,4}{1,2}} = 16,6$$

ideale Beullast nach Gl. (34):

$$\sigma_{\varphi Si} = 0,92 \cdot C_\varphi \cdot E \cdot \frac{r}{l} \cdot \left(\frac{t}{r}\right)^{1,5} = 0,92 \cdot 0,6 \cdot 170.000 \cdot \frac{124,4}{400} \cdot \left(\frac{1,2}{124,4}\right)^{1,5} = 27,6 \text{ N/mm}^2$$

Vergleichsschlankheit  $\bar{\lambda}_{S\varphi} = \sqrt{\frac{f_{y,k}}{\sigma_{\varphi Si}}} = \sqrt{\frac{220}{27,6}} = 2,82$

Abminderungsfaktor für normal imperfektionempfindliche Schalenbeulfälle

$$\kappa_1 = 0,65 / \bar{\lambda}_{S\varphi}^2 = 0,65 / 2,82^2 = 0,0817$$

Zusätzliche Abminderung für Unrundheit  $U = w_{GR,v} = 3\%$ :

$$\kappa_U = 1,5 - 0,5 \cdot \frac{\text{vorh } U}{\text{zul } U} = 1,5 - 0,5 \cdot \frac{3}{2} = 0,75$$

$$\text{red } \kappa = \kappa_1 \cdot \kappa_U = 0,0817 \cdot 0,75 = 0,0613$$

Reale Beulspannung:

$$\text{AZ I: } \sigma_{\varphi S,R,k} = \kappa_1 \cdot f_{y,k} = 0,0817 \cdot 220 = 18,0 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{AZ II: } \sigma_{\varphi S,R,k} = \text{red } \kappa \cdot f_{y,k} = 0,0613 \cdot 220 = 13,5 \text{ N/mm}^2$$

Teilsicherheitsbeiwerte für Widerstand und Einwirkungen:

- normal imperfektionempfindliche Schalenbeulfälle  $\gamma_{M1} = 1,1$  nach Element (206)
- veränderliche Einwirkung  $\gamma_F = 1,5$  nach DIN 18800-1
- Gesamtsicherheit nach DIN 18800-4:  $\gamma = \gamma_{M1} \cdot \gamma_F = 1,65$

Mit dem globalen Sicherheitsbeiwert  $\gamma = 2,0$  nach ATV-M 127-2 folgt auf der sicheren Seite:

### Altrohrzustand II, zulässiger Wasserdruck

$$\begin{aligned} \text{zul } p_a &= \sigma_{\varphi S,R,k} \cdot (t/r) / \gamma \\ &= 13,5 \cdot 1,2 / 124,4 / 2,0 = 0,065 \text{ N/mm}^2 = 6,5 \text{ mWS} \end{aligned}$$

### Anhang A3: Stabilitätsnachweis (Beulen) nach DIN 18800-4 für DN 300

Kennwerte:  $l = 400$  mm,  $t = 1,2$  mm,  $r = 149,4$  mm,  $f_{y,k} = 220$  N/mm<sup>2</sup>,  $E = 170.000$  N/mm<sup>2</sup>

Anzahl der Beulwellen in Umfangsrichtung:

$$n^2 = 7,52 \cdot \frac{r}{l} \cdot \sqrt{\frac{r}{t}} = 7,52 \cdot \frac{149,4}{400} \cdot \sqrt{\frac{149,4}{1,2}} = 31,3 \rightarrow n = 6$$

Element (403) Randbedingung „RB3“ (radial verschieblicher, axial verschieblicher Rand)  $\rightarrow C_\varphi = 0,6$

Bedingung für „mittellange“ und „kurze“ Kreiszyylinder Gl. (33)

$$\frac{l}{r} = \frac{400}{149,4} = 2,68 \leq 1,63 \cdot 1,0 \cdot \sqrt{\frac{149,4}{1,2}} = 18,2$$

ideale Beullast nach Gl. (34):

$$\sigma_{\varphi Si} = 0,92 \cdot C_\varphi \cdot E \cdot \frac{r}{l} \cdot \left(\frac{t}{r}\right)^{1,5} = 0,92 \cdot 0,6 \cdot 170.000 \cdot \frac{149,4}{400} \cdot \left(\frac{1,2}{149,4}\right)^{1,5} = 25,2 \text{ N/mm}^2$$

Vergleichsschlankheit  $\bar{\lambda}_{S\varphi} = \sqrt{\frac{f_{y,k}}{\sigma_{\varphi Si}}} = \sqrt{\frac{220}{25,2}} = 2,95$

Abminderungsfaktor für normal imperfektionempfindliche Schalenbeulfälle

$$\kappa_1 = 0,65 / \bar{\lambda}_{S\varphi}^2 = 0,65 / 2,95^2 = 0,0745$$

Zusätzliche Abminderung für Unrundheit  $U = w_{GR,v} = 3\%$ :

$$\kappa_U = 1,5 - 0,5 \cdot \frac{\text{vorh } U}{\text{zul } U} = 1,5 - 0,5 \cdot \frac{3}{2} = 0,75$$

$$\text{red } \kappa = \kappa_1 \cdot \kappa_U = 0,0745 \cdot 0,75 = 0,0559$$

Reale Beulspannung:

$$\text{AZ I: } \sigma_{\varphi S,R,k} = \kappa_1 \cdot f_{y,k} = 0,0745 \cdot 220 = 16,4 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{AZ II: } \sigma_{\varphi S,R,k} = \text{red } \kappa \cdot f_{y,k} = 0,0559 \cdot 220 = 12,3 \text{ N/mm}^2$$

Teilsicherheitsbeiwerte für Widerstand und Einwirkungen:

- normal imperfektionempfindliche Schalenbeulfälle  $\gamma_{M1} = 1,1$  nach Element (206)
- veränderliche Einwirkung  $\gamma_F = 1,5$  nach DIN 18800-1
- Gesamtsicherheit nach DIN 18800-4:  $\gamma = \gamma_{M1} \cdot \gamma_F = 1,65$

Mit dem globalen Sicherheitsbeiwert  $\gamma = 2,0$  nach ATV-M 127-2 folgt auf der sicheren Seite:

**Altrohrzustand II, zulässiger Wasserdruck**

$$\begin{aligned} \text{zul } p_a &= \sigma_{\varphi S,R,k} \cdot (t/r) / \gamma \\ &= 12,3 \cdot 1,2 / 149,4 / 2,0 = 0,049 \text{ N/mm}^2 = 4,9 \text{ mWS} \end{aligned}$$

### Anhang A4\*: Stabilitätsnachweis (Beulen) nach DIN 18800-4 für DN 350

Kennwerte:  $l = 400$  mm,  $t = 1,5$  mm,  $r = 171,25$  mm,  $f_{y,k} = 220$  N/mm<sup>2</sup>,  $E = 170.000$  N/mm<sup>2</sup>

Anzahl der Beulwellen in Umfangsrichtung:

$$n^2 = 7,52 \cdot \frac{r}{l} \cdot \sqrt{\frac{r}{t}} = 7,52 \cdot \frac{171,25}{400} \cdot \sqrt{\frac{171,25}{1,5}} = 34,4 \rightarrow n = 6$$

Element (403) Randbedingung „RB3“ (radial verschieblicher, axial verschieblicher Rand)  $\rightarrow C_\varphi = 0,6$

Bedingung für „mittellange“ und „kurze“ Kreiszyylinder Gl. (33)

$$\frac{l}{r} = \frac{400}{171,25} = 2,34 \leq 1,63 \cdot 0,6 \cdot \sqrt{\frac{171,25}{1,5}} = 10,4$$

ideale Beullast nach Gl. (34):

$$\sigma_{\varphi Si} = 0,92 \cdot C_\varphi \cdot E \cdot \frac{r}{l} \cdot \left(\frac{t}{r}\right)^{1,5} = 0,92 \cdot 0,6 \cdot 170.000 \cdot \frac{171,25}{400} \cdot \left(\frac{1,5}{171,25}\right)^{1,5} = 32,9 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Vergleichsschlankheit } \bar{\lambda}_{S\varphi} = \sqrt{\frac{f_{y,k}}{\sigma_{\varphi Si}}} = \sqrt{\frac{220}{32,9}} = 2,59$$

Abminderungsfaktor für normal imperfektionsempfindliche Schalenbeulfälle

$$\kappa_1 = 0,65 / \bar{\lambda}_{S\varphi}^2 = 0,65 / 2,59^2 = 0,0969$$

Zusätzliche Abminderung für Unrundheit  $U = w_{GR,v} = 3\%$ :

$$\kappa_U = 1,5 - 0,5 \cdot \frac{\text{vorh } U}{\text{zul } U} = 1,5 - 0,5 \cdot \frac{3}{2} = 0,75$$

$$\text{red } \kappa = \kappa_1 \cdot \kappa_U = 0,0969 \cdot 0,75 = 0,0727$$

Reale Beulspannung:

$$\text{AZ I: } \sigma_{\varphi S,R,k} = \kappa_1 \cdot f_{y,k} = 0,0969 \cdot 220 = 21,3 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{AZ II: } \sigma_{\varphi S,R,k} = \text{red } \kappa \cdot f_{y,k} = 0,0727 \cdot 220 = 16,0 \text{ N/mm}^2$$

Teilsicherheitsbeiwerte für Widerstand und Einwirkungen:

- normal imperfektionsempfindliche Schalenbeulfälle  $\gamma_{M1} = 1,1$  nach Element (206)
- veränderliche Einwirkung  $\gamma_F = 1,5$  nach DIN 18800-1
- Gesamtsicherheit nach DIN 18800-4:  $\gamma = \gamma_{M1} \cdot \gamma_F = 1,65$

Mit dem globalen Sicherheitsbeiwert  $\gamma = 2,0$  nach ATV-M 127-2 folgt auf der sicheren Seite:

**Altrohrzustand II, zulässiger Wasserdruck**

$$\begin{aligned} \text{zul } p_a &= \sigma_{\varphi S,R,k} \cdot (t/r) / \gamma \\ &= 16,0 \cdot 1,5 / 171,25 / 2,0 = 0,070 \text{ N/mm}^2 = 7,0 \text{ mWS} \end{aligned}$$

#### Anhang A4: Stabilitätsnachweis (Beulen) nach DIN 18800-4 für DN 400

Kennwerte:  $l = 400$  mm,  $t = 1,5$  mm,  $r = 196,25$  mm,  $f_{y,k} = 220$  N/mm<sup>2</sup>,  $E = 170.000$  N/mm<sup>2</sup>

Anzahl der Beulwellen in Umfangsrichtung:

$$n^2 = 7,52 \cdot \frac{r}{l} \cdot \sqrt{\frac{r}{t}} = 7,52 \cdot \frac{196,25}{400} \cdot \sqrt{\frac{196,25}{1,5}} = 42,2 \rightarrow n = 6$$

Element (403) Randbedingung „RB3“ (radial verschieblicher, axial verschieblicher Rand)  $\rightarrow C_\varphi = 0,6$

Bedingung für „mittellange“ und „kurze“ Kreiszyylinder Gl. (33)

$$\frac{l}{r} = \frac{400}{196,25} = 2,04 \leq 1,63 \cdot 1,0 \cdot \sqrt{\frac{196,25}{1,5}} = 18,6$$

ideale Beullast nach Gl. (34):

$$\sigma_{\varphi Si} = 0,92 \cdot C_\varphi \cdot E \cdot \frac{r}{l} \cdot \left(\frac{t}{r}\right)^{1,5} = 0,92 \cdot 0,6 \cdot 170.000 \cdot \frac{196,25}{400} \cdot \left(\frac{1,5}{196,25}\right)^{1,5} = 30,8 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Vergleichsschlankheit } \bar{\lambda}_{S\varphi} = \sqrt{\frac{f_{y,k}}{\sigma_{\varphi Si}}} = \sqrt{\frac{220}{30,8}} = 2,67$$

Abminderungsfaktor für normal imperfektionempfindliche Schalenbeulfälle

$$\kappa_1 = 0,65 / \bar{\lambda}_{S\varphi}^2 = 0,65 / 2,67^2 = 0,0912$$

Zusätzliche Abminderung für Unrundheit  $U = w_{GR,v} = 3\%$ :

$$\kappa_U = 1,5 - 0,5 \cdot \frac{\text{vorh } U}{\text{zul } U} = 1,5 - 0,5 \cdot \frac{3}{2} = 0,75$$

$$\text{red } \kappa = \kappa_1 \cdot \kappa_U = 0,0912 \cdot 0,75 = 0,0684$$

Reale Beulspannung:

$$\text{AZ I: } \sigma_{\varphi S,R,k} = \kappa_1 \cdot f_{y,k} = 0,0912 \cdot 220 = 20,1 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{AZ II: } \sigma_{\varphi S,R,k} = \text{red } \kappa \cdot f_{y,k} = 0,0684 \cdot 220 = 15,0 \text{ N/mm}^2$$

Teilsicherheitsbeiwerte für Widerstand und Einwirkungen:

- normal imperfektionempfindliche Schalenbeulfälle  $\gamma_{M1} = 1,1$  nach Element (206)
- veränderliche Einwirkung  $\gamma_F = 1,5$  nach DIN 18800-1
- Gesamtsicherheit nach DIN 18800-4:  $\gamma = \gamma_{M1} \cdot \gamma_F = 1,65$

Mit dem globalen Sicherheitsbeiwert  $\gamma = 2,0$  nach ATV-M 127-2 folgt auf der sicheren Seite:

**Altrohrzustand II, zulässiger Wasserdruck**

$$\begin{aligned} \text{zul } p_a &= \sigma_{\varphi S,R,k} \cdot (t/r) / \gamma \\ &= 15,0 \cdot 1,5 / 196,25 / 2,0 = 0,057 \text{ N/mm}^2 = 5,7 \text{ mWS} \end{aligned}$$

### Anhang A5\*: Stabilitätsnachweis (Beulen) nach DIN 18800-4 für DN 500

Kennwerte:  $l = 500$  mm,  $t = 2,0$  mm,  $r = 249,0$  mm,  $f_{y,k} = 220$  N/mm<sup>2</sup>,  $E = 170.000$  N/mm<sup>2</sup>

Anzahl der Beulwellen in Umfangsrichtung:

$$n^2 = 7,52 \cdot \frac{r}{l} \cdot \sqrt{\frac{r}{t}} = 7,52 \cdot \frac{249}{500} \cdot \sqrt{\frac{249}{2,0}} = 41,8 \rightarrow n = 7$$

Element (403) Randbedingung „RB3“ (radial verschieblicher, axial verschieblicher Rand)  $\rightarrow C_\varphi = 0,6$

Bedingung für „mittellange“ und „kurze“ Kreiszyylinder Gl. (33)

$$\frac{l}{r} = \frac{500}{249} = 2,0 \leq 1,63 \cdot 1,0 \cdot \sqrt{\frac{249}{2,0}} = 18,2$$

ideale Beullast nach Gl. (34):

$$\sigma_{\varphi Si} = 0,92 \cdot C_\varphi \cdot E \cdot \frac{r}{l} \cdot \left(\frac{t}{r}\right)^{1,5} = 0,92 \cdot 0,6 \cdot 170.000 \cdot \frac{249}{500} \cdot \left(\frac{2,0}{249}\right)^{1,5} = 33,6 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Vergleichsschlankheit } \bar{\lambda}_{S\varphi} = \sqrt{\frac{f_{y,k}}{\sigma_{\varphi Si}}} = \sqrt{\frac{220}{33,6}} = 2,56$$

Abminderungsfaktor für normal imperfektionsempfindliche Schalenbeulfälle

$$\kappa_1 = 0,65 / \bar{\lambda}_{S\varphi}^2 = 0,65 / 2,56^2 = 0,0992$$

Zusätzliche Abminderung für Unrundheit  $U = w_{GR,v} = 3\%$ :

$$\kappa_U = 1,5 - 0,5 \cdot \frac{\text{vorh } U}{\text{zul } U} = 1,5 - 0,5 \cdot \frac{3}{2,0} = 0,75$$

$$\text{red } \kappa = \kappa_1 \cdot \kappa_U = 0,0992 \cdot 0,75 = 0,0744$$

Reale Beulspannung:

$$\text{AZ I: } \sigma_{\varphi S,R,k} = \kappa_1 \cdot f_{y,k} = 0,0992 \cdot 220 = 21,8 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{AZ II: } \sigma_{\varphi S,R,k} = \text{red } \kappa \cdot f_{y,k} = 0,0744 \cdot 220 = 16,4 \text{ N/mm}^2$$

Teilsicherheitsbeiwerte für Widerstand und Einwirkungen:

- normal imperfektionsempfindliche Schalenbeulfälle  $\gamma_{M1} = 1,1$  nach Element (206)
- veränderliche Einwirkung  $\gamma_F = 1,5$  nach DIN 18800-1
- Gesamtsicherheit nach DIN 18800-4:  $\gamma = \gamma_{M1} \cdot \gamma_F = 1,65$

Mit dem globalen Sicherheitsbeiwert  $\gamma = 2,0$  nach ATV-M 127-2 folgt auf der sicheren Seite:

**Altrohrzustand II, zulässiger Wasserdruck**

$$\begin{aligned} \text{zul } p_a &= \sigma_{\varphi S,R,k} \cdot (t/r) / \gamma \\ &= 16,4 \cdot 2,0 / 249 / 2,0 = 0,066 \text{ N/mm}^2 = 6,6 \text{ mWS} \end{aligned}$$

### Anhang A5: Stabilitätsnachweis (Beulen) nach DIN 18800-4 für DN 600

Kennwerte:  $l = 500$  mm,  $t = 2,0$  mm,  $r = 299,0$  mm,  $f_{y,k} = 220$  N/mm<sup>2</sup>,  $E = 170.000$  N/mm<sup>2</sup>

Anzahl der Beulwellen in Umfangsrichtung:

$$n^2 = 7,52 \cdot \frac{r}{l} \cdot \sqrt{\frac{r}{t}} = 7,52 \cdot \frac{299}{500} \cdot \sqrt{\frac{299}{2,0}} = 55,0 \rightarrow n = 7$$

Element (403) Randbedingung „RB3“ (radial verschieblicher, axial verschieblicher Rand)  $\rightarrow C_\varphi = 0,6$

Bedingung für „mittellange“ und „kurze“ Kreiszyylinder Gl. (33)

$$\frac{l}{r} = \frac{500}{299} = 1,67 \leq 1,63 \cdot 1,0 \cdot \sqrt{\frac{299}{2,0}} = 19,9$$

ideale Beullast nach Gl. (34):

$$\sigma_{\varphi Si} = 0,92 \cdot C_\varphi \cdot E \cdot \frac{r}{l} \cdot \left(\frac{t}{r}\right)^{1,5} = 0,92 \cdot 0,6 \cdot 170.000 \cdot \frac{299}{500} \cdot \left(\frac{2,0}{299}\right)^{1,5} = 30,7 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Vergleichsschlankheit } \bar{\lambda}_{S\varphi} = \sqrt{\frac{f_{y,k}}{\sigma_{\varphi Si}}} = \sqrt{\frac{220}{30,7}} = 2,68$$

Abminderungsfaktor für normal imperfektionsempfindliche Schalenbeulfälle

$$\kappa_1 = 0,65 / \bar{\lambda}_{S\varphi}^2 = 0,65 / 2,68^2 = 0,0907$$

Zusätzliche Abminderung für Unrundheit  $U = w_{GR,v} = 3\%$ :

$$\kappa_U = 1,5 - 0,5 \cdot \frac{\text{vorh } U}{\text{zul } U} = 1,5 - 0,5 \cdot \frac{3}{1,8} = 0,667$$

$$\text{red } \kappa = \kappa_1 \cdot \kappa_U = 0,0907 \cdot 0,667 = 0,0605$$

Reale Beulspannung:

$$\text{AZ I: } \sigma_{\varphi S,R,k} = \kappa_1 \cdot f_{y,k} = 0,0907 \cdot 220 = 20,0 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{AZ II: } \sigma_{\varphi S,R,k} = \text{red } \kappa \cdot f_{y,k} = 0,0605 \cdot 220 = 13,3 \text{ N/mm}^2$$

Teilsicherheitsbeiwerte für Widerstand und Einwirkungen:

- normal imperfektionsempfindliche Schalenbeulfälle  $\gamma_{M1} = 1,1$  nach Element (206)
- veränderliche Einwirkung  $\gamma_F = 1,5$  nach DIN 18800-1
- Gesamtsicherheit nach DIN 18800-4:  $\gamma = \gamma_{M1} \cdot \gamma_F = 1,65$

Mit dem globalen Sicherheitsbeiwert  $\gamma = 2,0$  nach ATV-M 127-2 folgt auf der sicheren Seite:

**Altrohrzustand II, zulässiger Wasserdruck**

$$\begin{aligned} \text{zul } p_a &= \sigma_{\varphi S,R,k} \cdot (t/r) / \gamma \\ &= 13,3 \cdot 2,0 / 299 / 2,0 = 0,044 \text{ N/mm}^2 = 4,4 \text{ mWS} \end{aligned}$$