

Auswirkungen hoher Steifigkeitskennwerte auf das Bruchverhalten von Schlauchlinern

Stellungnahme

Autor: Dr. Heinz Doll

Co-Autoren: Dr. Susanne Leddig-Bahls, Wolfgang Buchner, Delia Ewert, Andreas Haacker

(Unterarbeitsgruppe des RSV Arbeitskreises 1.1)

Hamburg, im Februar 2021

Inhaltsverzeichnis

Vorwort.....	2
Zwangsbeanspruchung am Beispiel des 3-Punkt-Biegeversuches	3
Entwicklung der Linersteifigkeit und -festigkeit gemäß DWA-M 144-3	5
Zwangsbeanspruchung im AZ II bei Kreisquerschnitten.....	8
Zwangsbeanspruchung im AZ II bei Regeleiquerschnitten	13
Zusammenfassung	16
Bewertung der Ergebnisse.....	17
Literaturverzeichnis	17

Vorwort

Die vor Ort härtenden Schlauchliningverfahren werden seit 50 Jahren erfolgreich zur grabenlosen Ertüchtigung schadhafter Abwasserkanäle genutzt. Neben den zunächst entwickelten Synthefaserlinern (SF-Liner) kommen seit ca. 20 Jahren verstärkt GfK-Liner (GF-Liner) zum Einsatz. Während sich SF-Liner durch ein weitestgehend homogenes, isotropes Werkstoffverhalten auszeichnen, erlaubt der Werkstoff GfK abhängig von der zu erwartenden Lasteinwirkung die gezielte Anordnung der als Bewehrung dienenden Glasfasern. Als Folge hieraus ergibt sich insbesondere abhängig von Glasgehalt, Fasertyp und Faserrichtung eine große Spanne von Steifigkeits- (E-Modul) und Festigkeitskennwerten (Biegefestigkeit) der Produkte. Diese Entwicklung äußert sich u. a. in den gem. DWA-M 144-3 [1] definierten Materialkenngruppen der Tabelle 2. Die – basierend auf neueren Produktentwicklungen seit 2015 – ergänzend zu [1] definierten Materialkenngruppen 22 bis 25 weisen eine erhebliche Zunahme der E-Modul- und Festigkeitskennwerte auf.

Im Zuge dieser Entwicklung wurde von Anwender- und Planungsseite die Vermutung geäußert, dass bedingt durch sehr hohe Linersteifigkeiten ggf. infolge unplanmäßiger Zwangseinwirkungen [2] Schädigungen des Liners eintreten können. Im Rahmen der aktuellen Überarbeitung des RSV Merkblattes 1.1 "Renovierung von Entwässerungskanälen und -leitungen mit vor Ort härtendem Schlauchlining" wurden die Auswirkungen von Zwangsbeanspruchungen im Detail betrachtet. Die vorliegende Veröffentlichung stellt die theoretischen Betrachtungen und Parameteruntersuchungen im Detail dar.

Zwangsbeanspruchung am Beispiel des 3-Punkt-Biegeversuches

Es ist zu prüfen, ob Zwangsbeanspruchungen durch unplanmäßige Deformation des Altrohr-Boden-Systems zu Überbeanspruchungen des Schlauchliners und somit zu Schäden führen können. Derartige Zwangsverformungen werden z.B. durch

- Verkehrslasten bei geringer Überdeckung,
- veränderliche Erdaufasten bedingt durch Grundwasserschwankungen, Auflockerungen der Leitungszone (z.B. seitliche Baumaßnahmen),
- Erschütterungen in der Rohrleitungsumgebung (z.B. Rammarbeiten) und damit einhergehende Bodenumlagerungen,
- Setzungen im Bereich von Bergbau- und Bergsenkungsgebieten

verursacht. Die statischen Verhältnisse bei zwangsweise aufgebrachtten Deformationen sollen hier zunächst an dem Beispiel des 3-Punkt-Biegeversuches veranschaulicht werden (s. Abbildung 1). Es erfolgt die vergleichende Betrachtung von zwei Materialproben (z.B. GfK-Platten) der Länge L , die an ihren Enden vertikal gelagert sind und mittig durch eine Last F belastet werden. Zunächst wird vorausgesetzt, dass beide Prüfkörper die gleichen Materialkennwerte (E-Modul und Biegefestigkeit) aufweisen, sich jedoch in der Wanddicke ($t_{L,1}$ und $t_{L,2}$) unterscheiden. Insbesondere um das Verformungsverhalten anschaulich darzustellen, sind beide Proben in Abbildung 1. in einem statischen System (graphisch überlagert; Probe 1 schwarz, Probe 2 grün) dargestellt.

Erfolgt die Lasterhöhung bis zu einem für beide Probekörper gleichen Verformungswert (Durchbiegung f in Feldmitte, s. Abbildung 1, Bereich b)) so liegt eine Zwangsproblematik vor. Unter der Voraussetzung, dass die Querschnitte während der Verformung eben bleiben (Bernoulli-Hypothese) ergibt sich eine lineare Dehnungsverteilung ε über die Querschnittshöhe (s. Abbildung 1, Bereich b)), wobei die maximalen Randfaserdehnungen ε_R in Probenmitte (im Bereich der Kräfteinleitung F) auftreten. In der Mittelfläche der Proben

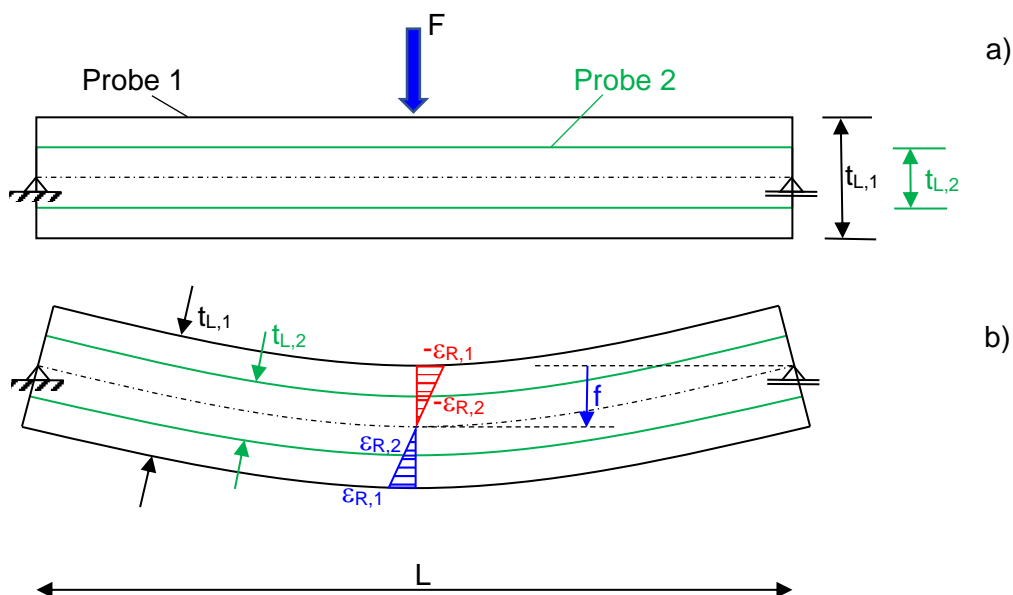
resultiert die Dehnung $\varepsilon = 0$, während der obere Probenrand gestaucht (negatives Vorzeichen) und der untere Probenrand gestreckt wird.

Aus den geometrischen Verhältnissen der in Abbildung 1, Bereich b) dargestellten Dehnungsverteilung ergibt sich durch Anwendung des Strahlensatzes für die Randfaserdehnungen $\varepsilon_{R,1}$ und $\varepsilon_{R,2}$ der beiden Proben der Zusammenhang

$$\frac{\varepsilon_{R,1}}{\varepsilon_{R,2}} = \frac{t_{L,1}}{t_{L,2}} \Leftrightarrow \varepsilon_{R,2} = \varepsilon_{R,1} \cdot \frac{t_{L,2}}{t_{L,1}} \quad (\text{Gleichung 1})$$

Bei gleicher Zwangsverformung ist die Randfaserdehnung somit proportional zur Wanddicke. Sofern die Randfaserdehnung $\varepsilon_{R,1}$ der ersten Probe als Referenzwert gewählt wird, so kann die Randfaserdehnung $\varepsilon_{R,2}$ der zweiten Probe unmittelbar aus der Probengeometrie (Wanddickenverhältnis, s. Gleichung 1) berechnet werden. Zur Veranschaulichung: Die Verdopplung der Wanddicke bewirkt eine Verdopplung der Randfaserdehnung (Gleichung 1 und Dehnungsverteilung in Abbildung 1, Bereich b)). Die Erhöhung der Steifigkeit, hier durch die Wanddickenerhöhung simuliert, bewirkt also bei gleicher Zwangsverformung f eine höhere Materialbeanspruchung und somit eine geringere Sicherheit gegen Spannungsversagen.

Abbildung 1: Zwangsdeformation im 3-Punkt-Biegeversuch, a) Statisches System, b) Verformtes System mit Darstellung der Dehnungsverteilung



Der Tragfähigkeitsnachweis von Schlauchlinern erfolgt in der Regel in Form eines Spannungsnachweises wobei linear-elastisches Materialverhalten, also die Gültigkeit des Hookeschen Gesetzes (Gleichung 2.1 bzw. für den hier betrachteten Sonderfall der Zwangsverformung Gleichung 2.2) vorausgesetzt wird.

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (\text{Gleichung 2.1})$$

$$\sigma_{Zwang} = E \cdot \varepsilon_{Zwang} \quad (\text{Gleichung 2.2})$$

mit E: E-Modul des Liners

Für die Zwangsbeanspruchung (Biegespannung) ergibt sich somit, hier auch unter Berücksichtigung einer variablen Verformung f , eine Proportionalität zu Linerwanddicke, E-Modul und aufgezwingener Deformation (Gleichung 3.1 bis 3.3).

$$\sigma_{Zwang} \sim t_L \quad (\text{Gleichung 3.1})$$

$$\sigma_{Zwang} \sim E \quad (\text{Gleichung 3.2})$$

$$\sigma_{Zwang} \sim f \quad (\text{Gleichung 3.3})$$

Der Spannungsnachweis wird gem. DWA-A 143-2 [3] unter Berücksichtigung des Teilsicherheitskonzeptes geführt, indem eine Auslastung U_σ unter γ_F -facher Einwirkung ermittelt wird.

$$U_\sigma = \frac{\sigma_{Zwang,d}}{\sigma_{BR,d}} \quad (\text{Gleichung 4.1})$$

mit $\sigma_{Zwang,d}$: Spannung infolge γ_F -facher Einwirkung (Designwert)

$\sigma_{BR,d}$: Biegefestigkeit, Designwert

σ_{BR} : Biegefestigkeit, charakteristischer Wert

$$\sigma_{BR,d} = \frac{\sigma_{BR}}{\gamma_M}$$

$\gamma_F = 1,1$ (betr. Verformung, gem. [3], Tabelle 18, da Zwang)

$\gamma_{M,1} = 1,0$ (betr. E-Modul gem. [3] da bei Zwang günstig)

$\gamma_{M,2} = 1,35$ (betr. Biegefestigkeit gem. [3], da bei Zwang ungünstig)

Für die Auslastung U_σ ergibt sich somit

$$U_\sigma \sim \frac{t_L \cdot E \cdot f \cdot 1,1}{\sigma_{BR} / 1,35} \quad (\text{Gleichung 4.2})$$

Entwicklung der Linersteifigkeit und -festigkeit gemäß DWA-M 144-3

In Tabelle 1 (SF-Liner) und Tabelle 2 (GF-Liner) sind die den im DWA-M 144-3 [1] definierten Materialkenngruppen zugeordneten charakteristischen Materialkennwerte (E-Modul E , Biegefestigkeit σ_{Br}) zusammengefasst. Während sich die Kennwerte der SF-Liner (Tabelle 1) abgesehen von MKG 2 (σ_{Br}) und MKG 21 (E) in einem relativ engen Wertebereich bewegen, ist bei den GF-Linern eine kontinuierliche Steigerung des E-Moduls und mit dem E-Modul der Biegefestigkeit zu erkennen.

Die Tabellen beinhalten ferner den in Gl. 4.2 aufgeführten Faktor $E/\sigma_{Br} = \kappa_1$, der maßgeblich (proportional) in die Ermittlung der statischen Auslastung U_σ infolge Zwangsbeanspruchung eingeht. Analog zur Vorgehensweise gemäß Beckmann, 2018 [2] und Doll, 2001 [4] erfolgt die Auswahl von Referenzkennwerten des Materials, hier MKG 7 für SF-Liner und MKG 20 für GF-Liner (s. auch [2]). Mit $\kappa_2 = \kappa_1 / \kappa_{1, MKG7}$ (Tabelle 1) bzw. $\kappa_2 = \kappa_1 / \kappa_{1, MKG20}$ (Tabelle 2) wird der Bezug der einzelnen κ_1 -Werte auf den κ_1 -Wert der Referenzkenngruppe gebildet. Dieser Bezugswert bietet die Möglichkeit, die Auswirkungen von der Referenzkenngruppe abweichenden Materialkennwerten auf die Zwangsbeanspruchung zu bewerten.

So ist bei gleicher Linergeometrie und gleicher Zwangsverformung bei einem Liner der MKG 21 die 1,533-fache Auslastung, bei einem Liner der MKG 1 die 0,522-fache Auslastung im Vergleich zum Liner der MKG 7 zu erwarten (s. κ_2 in Tabelle 1). Während für SF-Liner kein systematischer Zusammenhang zwischen κ_2 und dem E-Modul erkennbar ist, ergibt sich für GF-Liner gemäß Tabelle 2 offenbar eine derartige Abhängigkeit.

Tabelle 1: SF-Liner, Einteilung in Materialkenngruppen gem. DWA-M 144-3

Materialkenn-gruppe [-]	E-Modul E [N/mm ²]	Biegefestigkeit σ_{Br} [N/mm ²]	$\kappa_1 = E/\sigma_{Br}$ [-]	$\kappa_2 = \kappa_1 / \kappa_{1, MKG7}$
1	1000	23	43,48	0,522
2	1500	31	48,39	0,581
3	1400	14	100,00	1,200
4	1400	16	87,50	1,050
5	1400	18	77,77	0,933
6	1500	17	88,24	1,059
7	1500	18	83,33	1,000
21	2300	18	127,78	1,533

Tabelle 2: GF-Liner, Einteilung in Materialkenngruppen gem. DWA-M 144-3

Materialkenn- gruppe [-]	E-Modul E [N/mm ²]	Biegefestigkeit σ_{Br} [N/mm ²]	$\kappa_1 = E/\sigma_{Br}$ [-]	$\kappa_2 = \kappa_1 / \kappa_1, MKG20$
8	3500	75	46,66	0,663
9	4000	80	50,00	0,710
10	4500	85	52,94	0,752
11	5000	90	55,56	0,789
12	5500	95	57,89	0,822
13	6000	100	60,00	0,852
14	6500	105	61,90	0,879
15	7000	110	63,64	0,904
16	7500	115	65,22	0,926
17	8000	120	66,67	0,947
18	8500	125	68,00	0,966
19	9000	130	69,23	0,983
20	9500	135	70,40	1,000
22	11000	150	73,33	1,042
24*	12000	160	75,00	1,065
23*	14500	185	78,38	1,113
25	16000	200	80,00	1,136

*Sortierung gemäß aufsteigender Kennwerte

Abbildung 2: Zusammenhang zwischen κ_2 und Liner-E-Modul; GF-Liner gem. Tabelle 2

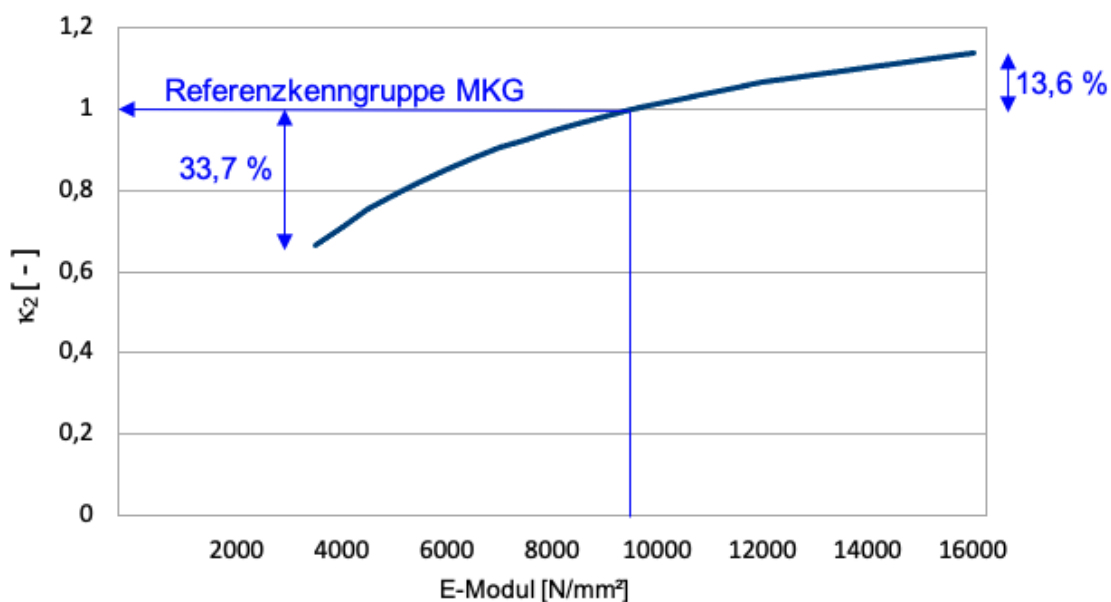


Abbildung 2 zeigt für GF-Liner gemäß Tabelle 2 diesen Zusammenhang zwischen κ_2 und Liner-E-Modul. Der κ_2 -Wert steigt mit zunehmendem E-Modul unterlinear an. Bei gleicher Linergeometrie und gleicher Zwangsverformung ist bei einem Liner der MKG 25 die 1,136-fache Auslastung, bei einem Liner der MKG 8 die 0,663-fache Auslastung im Vergleich zum Liner der MKG 20 zu erwarten (s. κ_2 in Tabelle 1). Es ergibt sich eine deutlich geringere Schwankungsbreite als bei SF-Linern (Tabelle 1). Der unterlineare Zuwachs stellt ein grundsätzlich gutmütiges Verhalten dar. Die Zunahme der Auslastung zwischen MKG 20 und MKG 25 beträgt 13,6 %. Es sei angemerkt, dass diese Auslastungserhöhung ggf. durch eine geringere statisch erforderliche Wanddicke des Liners der MKG 25 und die damit verbundene Auslastungsreduktion ausgeglichen (s. Gleichung 4.2) wird.

Zwangsbeanspruchung im AZ II bei Kreisquerschnitten

Aus Gleichung 4.2 ist ersichtlich, dass mit hohen Zwangsbeanspruchungen bei großen Linersteifigkeiten zu rechnen ist. Mit Bezug auf die Bemessungstabellen des DWA-M 144-3 [1] ergeben sich diese insbesondere bei kleinen Nennweiten, bei denen die Mindestwanddicke von 3 mm nicht aus statischen, sondern aus konstruktiven Gründen resultiert und ggf. bei Linern, die für hohe Grundwasserstände, mit der Folge relativ großer Wanddicken, auszulegen sind.

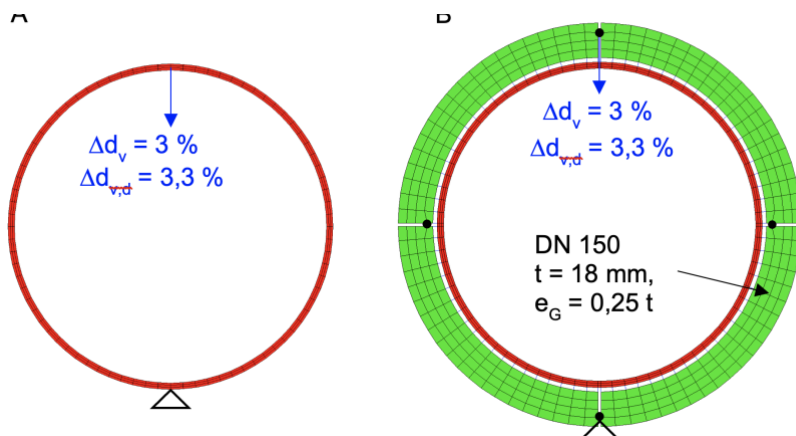
Im Rahmen der durchgeführten statischen Berechnungen wird daher zunächst exemplarisch ein Schlauchliner DN 150 der Materiakennggruppe 8 mit der Mindestwanddicke von 3,0 mm betrachtet. Abbildung 3 zeigt die beiden alternativ untersuchten statischen Modellbildungen. Modellbildung A betrachtet den Schlauchliner analog zum Vorschlag gemäß Beckmann, 2018 [2] im Sohlpunkt aufgelagert, während der Scheitelpunkt zwangsweise nach unten verschoben wird (entspricht Scheiteldruckversuch).

Im Gegensatz hierzu berücksichtigt die Modellbildung B analog zu Doll 2001 [4] die Verhältnisse wie sie im DWA-A 143-2 [3] für Altrohrzustand II und III beschrieben sind. Das Altrohr (Wanddicke $t = 18$ mm) wird hierbei gemäß DWA-A 143-2 [3] als Viergelenkring in der Modellbildung berücksichtigt. Der Liner wird als druckstarr im Altrohr gebettet simuliert, das heißt in der Kontaktfläche zwischen Liner und Altrohr können allein Druck-, keine Zug- und Schubkräfte übertragen werden.

Es wird zunächst von einer Gelenkringexzentrizität von $e_G = 0,25 \cdot t$ ausgegangen. Die Altrohrsohle wird vertikal festgehalten und der Altrohrscheitel nach unten verschoben. In allen hier betrachteten Fällen wird von einer maximalen, unplanmäßigen Zwangsdeformation von

$\Delta d_v = 3,0 \%$ des Linderdurchmessers (Designwert $\Delta d_{v,d} = \Delta d_v \cdot \gamma_F = 3,0 \cdot 1,1 = 3,3 \%$)
ausgegangen.

Abbildung 3: Statische Modellbildungen zum Nachweis der Zwangsdeformation, Kreisprofil



Für beide Modellbildungen wird die Lindersteifigkeit variiert, wie in Tabelle 3 ersichtlich ist: Ausgehend von dem Linder der Materialkenngruppe 8 mit einer Wanddicke von 3,0 mm (Variante a) erfolgt eine Verdopplung des E-Moduls (Variante b), eine Verdopplung der Wanddicke (Variante c) und eine Verdopplung von Wanddicke und E-Modul (Variante d). Die Varianten b) und c) beinhaltenen somit gegenüber a) eine Verdopplung, Variante d) eine Vervielfachung des Produktes $E \cdot t_L$. Die Biegefestigkeit bleibt bei der Betrachtung unverändert. In Tabelle 3 sind als wesentliche Berechnungsergebnisse die maximalen infolge $\Delta d_{v,d}$ im Linder resultierenden Zug- ($\max.\sigma_{Z,d}$) und Druckspannungen ($\max.\sigma_{D,d}$) zusammengefasst.

Tabelle 3: Beispiel DN 150, MKG 8, Ermittlung der Zwangsbeanspruchungen für Modellbildung A und B

		Modell A	Modell B	
Wanddicke [mm]	E-Modul E_d [N/mm ²]	$\max.\sigma_{Z,d} / \max.\sigma_{D,d}$ [N/mm ²]	$\max.\sigma_{Z,d} / \max.\sigma_{D,d}$ [N/mm ²]	Variante
$t_{L,1} = 3,0$	$E_{1,d} = 3500^{1)}$	11,10 / -10,86	12,83 / -12,56	a)
	$E_{2,d} = 7000$	22,20 / -21,73	25,66 / -25,11	b)
$t_{L,2} = 6,0$	$E_{1,d} = 3500^{1)}$	22,88 / -22,14	25,08 / -24,54	c)
	$E_{2,d} = 7000$	45,76 / -44,28	50,01 / -48,90	d)

¹⁾ Materialkenngruppe 8: $E = 3500 \text{ N/mm}^2$, $\sigma_{Br} = 75 \text{ N/mm}^2$; bei Zwang: $E_d = E / \gamma_M = 3500/1,0 = 3500 \text{ N/mm}^2$; $\sigma_{Br,d} = \sigma_{Br} / \gamma_M = 75/1,35 = 55,55 \text{ N/mm}^2$

Die Ergebnisse (Tabelle 3) zeigen, dass die Linerspannungen in keinem Fall die Materialfestigkeit (Designwert $\sigma_{Br,d} = \sigma_{Br} / \gamma_M = 75/1,35 = 55,55 \text{ N/mm}^2$) erreichen. Die ausreichende Standsicherheit der Linder unter Zwang ist somit nachgewiesen. Ferner zeigt der

Vergleich der beiden hier betrachteten Modellbildungen A und B, dass in allen Fällen Modell B maßgebend wird. Bedingt durch die höhere Steifigkeit des im Viergelenkring teilgebetteten Liners (B) erfährt dieser bei gleicher Zwangsdeformation $\Delta d_{v,d}$ höhere Beanspruchungen gegenüber einer Vernachlässigung dieser Teilbettung (B). In den weiteren Betrachtungen erfolgt daher allein der Ansatz der auf dem DWA-A 143-2 [3] beruhenden Modellbildung B.

Der Vergleich der betrachteten Varianten a) bis d) zeigt für beide Modellbildungen den vermuteten proportionalen Zusammenhang zwischen E-Modul (E) wie auch Linerwanddicke (t_L) und der Linerbeanspruchung ($\max.\sigma_{z,d}$, $\max.\sigma_{D,d}$). Die Verdopplung des Produktes E $\cdot t_L$ bewirkt die doppelten Spannungen, die Vervielfachung des Produktes E $\cdot t_L$ die vierfachen Spannungen. Dabei ist es nahezu unerheblich, ob die Steifigkeitserhöhung durch die Erhöhung der Wanddicke oder des E-Moduls simuliert wird. Die am Beispiel des 3-Punkt-Biegeversuches hergeleiteten Gleichungen 3.1 und 3.2 werden somit für beide Modellbildungen (A und B) bestätigt.

Im Rahmen weiterer Modifikationen der Modellbildung B, erfolgte eine Erhöhung der Altrohrwalldicke t sowie der Gelenkexzentrizität e_G . Da in beiden Fällen eine Abminderung der Linerspannungen gegenüber den Ergebnissen aus Tabelle 1 und Tabelle 2 resultiert, wird nachfolgend konservativ der Ansatz von $e_G = 0,25 t$ und des Werkstoffes Steinzeug (geringe Altrohrwalldicke) beibehalten. Auf die Dokumentation der Ergebnisse wird hier verzichtet.

Aus den Berechnungsergebnissen und den dargelegten Schlussfolgerungen ergibt sich durch die Definition von Umrechnungsfaktoren unter Verwendung der Gleichungen 5.1 bis 6.2 eine einfache Möglichkeit, die Beanspruchungen (Spannungen) von kreisförmigen Linern für variierende Linerwanddicken, Nennweiten und E-Module zu berechnen. Die in Abbildung 3 dargestellte Modellbildung B wird als Bezugsmodell definiert. Für zu betrachtende Linervarianten ergeben sich die nachfolgenden Umrechnungsfaktoren:

$$\eta_1 = E_{MKG,x,d} / E_{ref,d} \quad (\text{Gleichung 5.1})$$

$$\eta_2 = t_{L,x} / t_{L,ref} \quad (\text{Gleichung 5.2})$$

$$\eta_3 = r_{L,DN,ref} / r_{L,DN,x} \quad (\text{Gleichung 5.3})$$

Die Wahl der Bezugsgrößen ist grundsätzlich beliebig, hier erfolgt die Wahl der bereits betrachteten Parameterkombination

$$E_{ref,d} = 3500 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{MKG 8})$$

$$\sigma_{Br,ref,d} = 55,55 \text{ N/mm}^2 \text{ (MKG 8)}$$

$$t_{L,ref} = 3,0 \text{ mm}$$

$$DN_{ref} = 150 \text{ mm}$$

$$r_{L,DN,ref} = (150 - 3)/2 = 73,5 \text{ mm}$$

$$\max.\sigma_{Z,d,ref} = 12,83 \text{ N/mm}^2 \text{ (aus Tabelle 3)}$$

$$\max.\sigma_{D,d,ref} = -12,56 \text{ N/mm}^2 \text{ (aus Tabelle 3)}$$

Für eine abweichende Parameterkombination können die Linerspannungen (Zug Z/Druck D) mit den Gleichungen 6.1 und 6.2 ermittelt werden:

$$\max.\sigma_{Z,d} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \max.\sigma_{Z,d,ref} \quad \text{(Gleichung 6.1)}$$

$$\max.\sigma_{D,d} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot \eta_3 \cdot \max.\sigma_{D,d,ref} \quad \text{(Gleichung 6.2)}$$

Tabelle 4 zeigt die Berechnungsergebnisse unterschiedlicher Fallbeispiele ausgehend von vier ausgewählten Materialkenngruppen.

Für die Nennweite DN 1200 erfolgte eine Erhöhung der Altrohrwanddicke proportional zur Nennweite. Zulässige Spannungen (kleiner $\sigma_{BR,d}$) sind blau, unzulässige Spannungen rot hervorgehoben. Betrachtet werden allein die maßgebenden Zugspannungen, die Ermittlung der Druckspannungen kann jedoch in analoger Weise durchgeführt werden. Die Spannungen wurden einerseits unter Verwendung der Referenzwerte mit Hilfe der Gleichung 6.1, andererseits durch eine statische Berechnung (Modellbildung B) ermittelt. Neben den Linerspannungen wurden in Tabelle 4 die Auslastungen U_σ , berechnet gem. Gleichung 4.1, aufgeführt.

Der Vergleich der Ergebnisse zeigt nur relativ geringe Abweichungen, wobei die Berechnung mit Gleichung 6.1 auf der sicheren Seite liegt. Die je Materialkenngruppe aufgeführte erste Zeile ergibt sich aus den Parameterkombinationen (E , $\sigma_{BR,d}$, t_L), die den Bemessungstabellen aus [1] zu entnehmen sind. Für diese Regelfälle ergibt sich die Einhaltung des Tragfähigkeitskriterium (Spannungsnachweis), wobei noch ein deutlicher Sicherheitsabstand vorhanden ist. Die maximale Auslastung ($\max.\sigma_{Z,d,1}/\sigma_{BR,d}$) beträgt bei den GF-Linern ca. 40 % (MKG 25), bei dem SF-Liner ca. 50 % (zulässige Auslastung: 100 %). Es ist somit für die im DWA-M 144-3 [1] aufgeführten Standardfälle (betr. hier zunächst Kreisprofile) davon auszugehen, dass infolge einer alleinigen Zwangsdeformation von $\Delta_{v,d} = 3,3 \%$ keine Schäden zu erwarten sind.

Tabelle 4: Ergebnisse (Linerspannungen) für Beispielberechnungen, Linner mit Kreisquerschnitt, Vergleich des Nachweises mit Gl. 6.1 sowie der Modellbildung B, Voraussetzung: Zwangsverformung um $\Delta d_{v,d} = 3,3\%$ (**s.** Abbildung 3), Voraussetzung: Zwangsverformung um $\Delta d_{v,d} = 3,3\%$ (**s.** Abbildung 3)

MKG	DN [mm]	t _L [mm]	E _d [N/mm ²]	σ _{BR,d} [N/mm ²]	η ₁ [-]	η ₂ [-]	η ₃ [-]	max. σ _{Z,d,1} [N/mm ²]]³)	U _σ [%]³)	max. σ _{Z,d,2} [N/mm ²]]⁴)	U _σ [%]⁴)
8 ¹⁾	150 ¹⁾	3,0 ¹⁾	3500 ¹⁾	55,55 ¹⁾	1,0	1,0	1,0	12,83 ¹⁾	23,1 ¹⁾	12,83 ¹⁾	23,1 ¹⁾
	150	6,0	3500	55,55	1,0	2,0	1,02	26,17	47,1	25,08	45,1
	150	6,0	5250 ²⁾	55,55	1,5	2,0	1,02	39,26	70,7	37,53	67,6
20	1200	10,5	9500	100,0	2,71	3,5	0,124	15,09	15,1	15,18	15,2
	1200	21,0	9500	100,0	2,71	7,0	0,125	30,42	30,4	29,81	29,8
	1200	21,0	14250 ²⁾	100,0	4,07	7,0	0,125	45,71	45,7	44,70	44,7
25	150	3,0	16000	148,0	4,57	1,0	1,0	58,63	39,6	58,58	39,6
	150	6,0	16000	148,0	4,57	2,0	1,02	119,61	80,8	114,0	77,0
	150	6,0	24000 ²⁾	148,0	6,86	2,0	1,02	179,55	121,3	170,5	115,2
3	150	3,0	1400	10,37	0,4	1,0	1,0	5,13	49,5	5,13	49,5
	150	6,0	1400	10,37	0,4	2,0	1,02	10,46	100,9	10,04	96,8
	150	6,0	2100 ²⁾	10,37	0,6	2,0	1,02	15,70	151,4	15,05	145,1

¹⁾ Referenzbeispiel mit Ergebnissen für Modellbildung B

²⁾ Erhöhung des der Materialkenngruppe zugeordneten E-Moduls um den Faktor 1,5

³⁾ Berechnung der Biegezugspannung mit Gleichung 6.1

⁴⁾ Berechnung der Biegezugspannung mit FEM, Modellbildung B

Ergänzend zu den vorgenannten Standardfällen erfolgt die Betrachtung bei doppelter Linnerwanddicke (2. Zeile je MKG) und zusätzlich 1,5-fachem E-Modul (3. Zeile je MKG). Deutliche Wanddickenerhöhungen können planmäßig gewählt sein. E-Modulerhöhungen treten hingegen bei SF-Linern kaum auf, da die Festigkeit allein aus dem Harzsystem und nicht aus der Synthesefaser kommt. Bei GF-Linern sind E-Modulerhöhungen aufgrund der Glasfaserverstärkung eher möglich aber E-Modulüberschreitungen über das 1,5-fache des Sollwertes hinaus treten in der Praxis i.A. nicht auf.

In Abhängigkeit von den genannten Steifigkeitserhöhungen ergeben sich proportionale Spannungserhöhungen (s. Tabelle 4). Für die GF-Liner (MKG 8, 20, 25) ergibt sich bei einer maximalen Auslastung von ca. 80 % auch bei Wanddickenverdopplung noch eine ausreichende Sicherheit im Spannungsnachweis, während der SF-Liner (MKG 3) mit einer maximalen Auslastung von 100,9 % die zulässige Auslastung (100 %) gerade leicht übersteigt. Die zusätzliche Erhöhung des E-Moduls führt schließlich bei dem GF-Liner der MKG 25 (Auslastung ca. 120 %) sowie bei dem SF-Liner der MKG 3 (Auslastung ca. 150 %) zu deutlichen Überschreitungen der zulässigen Auslastung. Hierzu ist jedoch anzumerken, dass die gleichzeitige Berücksichtigung beider Effekte (Wanddickenverdopplung und E-Modul-Erhöpfung) Verhältnisse darstellen, die in der Praxis nicht zu erwarten sind. Dies betrifft insbesondere die offensichtlich ungünstigste, da kleinste Nennweite DN 150.

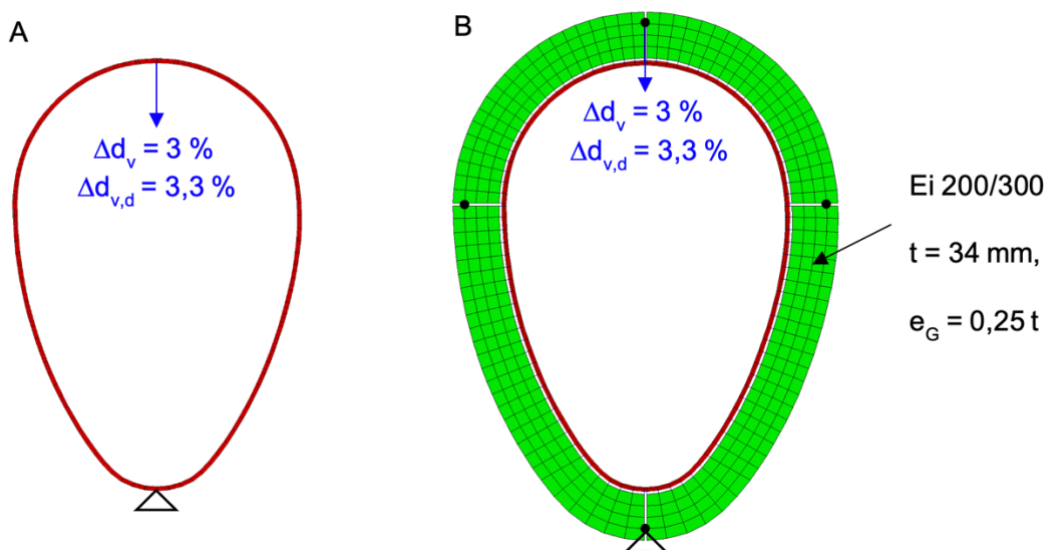
Bezüglich der simulierten E-Modul-Erhöpfung ist anzumerken, dass die Materialfestigkeit der entsprechenden MKG für den Spannungsnachweis beibehalten wurde. Da sich jedoch ein erhöhter E-Modul in der Regel auch in erhöhten Festigkeitskennwerten äußert, wird hierdurch die ungünstige Auswirkung der Steifigkeitserhöhung zumindest teilweise eliminiert (s. auch Gleichung 4.2 und Abbildung 2. Sofern E-Modul und Biegefestigkeit gleichermaßen zu- oder abnehmen, was in der Praxis häufig der Fall ist, ändert sich die Auslastung U_{σ} nicht (s. Gleichung 4.2).

Zwangsbeanspruchung im AZ II bei Regeleiquerschnitten

Da im DWA-M 144-3 [1] neben den Kreisprofilen auch die Ergebnisse von Regelstatiken zu Regeleiprofilen (200/300 bis 700/1050) enthalten sind, werden nachfolgend die Auswirkungen von Zwangsdeformationen auf eiförmige Linerquerschnitte betrachtet. Die relative Verformung von $\Delta d_v = 3 \%$ bzw. $\Delta d_{v,d} = 3,3 \%$ ist hier gem. Kap. 7.6.3 des DWA-A 143-2 [3] auf den Mittelwert von Vertikal- und Horizontaldurchmesser des Liners bezogen.

Analog zu den Kreisprofilen (s. o.) erfolgte zunächst der Vergleich zwischen einem ungebetteten Liner (Modellbildung A) und einem im Altrrohr (Viergelenkring) teilgebetteten Liner (Modellbildung B) unter Einwirkung der Scheitelpunktverschiebung. Wie bei kreisförmigen Linern ergeben sich auch hier für Modellbildung B die höheren Linerbeanspruchungen. Auf die Darstellung der Berechnungsergebnisse zu Modellbildung A wird hier verzichtet. In der Folge wird allein das in Abbildung 4 dargestellte statische Modell B des im Viergelenkring (Altrrohr) teilgebetteten Liners betrachtet.

Abbildung 4: Statische Modellbildungen zum Nachweis der Zwangsdeformation, Eiprofil. A: Scheitelpunktverformung des ungebetteten Liners; B: Zwangsverformung des im Altrrohr gebetteten Liners



Es ist davon auszugehen, dass die Berechnung der Zwangsbeanspruchungen für beliebige Konstellationen (Variation von Querschnitt, Wanddicke, E-Modul) auch hier mit Hilfe der Gleichungen 5.1 bis 6.2 erfolgen kann. Zur Verifikation dieser Annahme wurden wiederum Beispielberechnungen durchgeführt und die Ergebnisse den Resultaten, die mit Modellbildung B ermittelt wurden, in Tabelle 5 gegenübergestellt.

Es erfolgte die Wahl nachfolgender Bezugsgrößen:

$$E_{\text{ref,d}} = 3500 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{MKG 8})$$

$$\sigma_{\text{Br,ref,d}} = 55,55 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{MKG 8})$$

$$t_{\text{L,ref}} = 3,0 \text{ mm}$$

$$\text{DN}_{\text{ref}} = 200 \text{ mm}/300 \text{ mm}$$

$$r_{\text{L,DN,ref}} = (200 - 3)/2 = 98,5 \text{ mm}$$

$$\text{max.} \sigma_{\text{Z,d,ref}} = 14,73 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{aus Berechnung Modell B})$$

$$\text{max.} \sigma_{\text{D,d,ref}} = -14,27 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{aus Berechnung Modell B})$$

Für das Eiprofil 700/1050 erfolgte eine Erhöhung der Altrrohrwanddicke proportional zur Nennweite.

Tabelle 5: Ergebnisse (Linerspannungen) für Beispielberechnungen, Liner mit Regeleiquerschnitt. Vergleich des Nachweises mit Gleichung. 6.1 sowie der Modellbildung B; Voraussetzung: Zwangsverformung um $\Delta d_{v,d} = 3,3\%$ (s. Abbildung 4)

MKG	DN [mm]	t_L [mm]	E_d [N/mm ²]	$\sigma_{BR,d}$ [N/mm ²]	η_1 [-]	η_2 [-]	η_3 [-]	$\max.\sigma_{z,d,1}$ [N/mm ²] ³⁾	U_σ [%] ³⁾	$\max.\sigma_{z,d,2}$ [N/mm ²] ⁴⁾	U_σ [%] ⁴⁾
8 ¹⁾	200/300 ¹⁾	3,0 ¹⁾	3500 ¹⁾	55,55 ¹⁾	1,0	1,0	1,0	14,73 ¹⁾	26,5 ¹⁾	14,73 ¹⁾	26,5 ¹⁾
	200/300	6,0	3500	55,55	1,0	2,0	1,015	29,90	53,8	29,39	52,9
	200/300	6,0	5250 ²⁾	55,55	1,5	2,0	1,015	44,85	80,7	44,07	79,3
20	700/1050	12,0	9500	100,0	2,71	4,0	0,286	45,67	45,7	46,10	46,1
	700/1050	24,0	9500	100,0	2,71	8,0	0,291	92,93	92,9	91,97	92,0
	700/1050	24,0	14250 ²⁾	100,0	4,07	8,0	0,291	139,39	139,4	137,7	137,7
25	200/300	3,0	16000	148,0	4,57	1,0	1,0	67,32	45,5	67,31	45,5
	200/300	6,0	16000	148,0	4,57	2,0	1,015	136,65	92,3	133,9	90,5
	200/300	6,0	24000 ²⁾	148,0	6,86	2,0	1,015	204,98	138,5	200,5	135,5
3	200/300	3,0	1400	10,37	0,4	1,0	1,0	5,89	56,8	5,89	56,8
	200/300	6,0	1400	10,37	0,4	2,0	1,015	11,96	115,3	11,76	113,4
	200/300	6,0	2100 ²⁾	10,37	0,6	2,0	1,015	17,94	173,0	17,64	170,1

¹⁾ Referenzbeispiel mit Ergebnissen für Modellbildung B

²⁾ Erhöhung des der Materialkenngruppe zugeordneten E-Moduls um den Faktor 1,5

³⁾ Berechnung der Biegezugspannung mit Gl. 6.1

⁴⁾ Berechnung der Biegezugspannung mit FEM, Modellbildung B

Betrachtet werden wiederum allein die maßgebenden Zugspannungen. Sie wurden einerseits unter Verwendung der Referenzwerte mit Hilfe der Gleichung 6.1, andererseits durch eine statische Berechnung (Modellbildung B) ermittelt. Neben den Linerspannungen wurden in Tabelle 5 die Auslastungen U_σ , berechnet gem. Gleichung 4.1, aufgeführt. Der Vergleich der Zwangsbeanspruchungen zeigt relativ geringe Abweichungen wobei die Berechnung mit Gleichung 6.1 auf der sicheren Seite liegt.

Für die Regelfälle gem. DWA-M 144-3 [1] (in Tabelle 4 erste Zeile je MKG) ergibt sich die Einhaltung des Tragfähigkeitskriterium (Spannungsnachweis). Die maximale Auslastung ($\max.\sigma_{z,d,1}/\sigma_{BR,d}$) beträgt bei den GF-Schlauchlinern ca. 45 % (MKG 20, 25), bei dem SF-Liner ca. 57 % (zulässige Auslastung: 100 %). Es ist somit für die im DWA-M 144-3 [1] aufgeführten

Standardfälle (betr. hier Regeleipprofile) davon auszugehen, dass infolge einer alleinigen Zwangsdeformation von $\Delta d_{v,d} = 3,3 \%$ keine Schäden zu erwarten sind.

In Abhängigkeit von Steifigkeitserhöhungen, die analog zur Betrachtung der Kreisprofile simuliert wurden, ergeben sich proportionale Spannungserhöhungen (s. Tabelle 5). Für die GF-Liner (MKG 8, 20, 25) resultiert auch bei Wanddickenverdopplung noch eine ausreichende Sicherheit im Spannungsnachweis (maximale Auslastung von ca. 93 %), während der SF-Liner (MKG 3) mit einer maximalen Auslastung von 115,3 % die zulässige Auslastung (100 %) übersteigt.

Die zusätzliche Erhöhung des E-Moduls führt schließlich bei den GF-Linern der MKG 20 und 25 sowie bei dem SF-Liner der MKG 3 zu deutlichen Überschreitungen der zulässigen Auslastung. Hierzu sei wiederum auf die günstige Wirkung einer in der Regel mit dem E-Modul auch zunehmenden Materialfestigkeit verwiesen (s. Kreisprofile), die die ungünstige Auswirkung der Steifigkeitserhöhung zumindest teilweise eliminiert (s. auch Gleichung 4.2 und **Error! Reference source not found.**).

Zusammenfassung

Ausgehend von der Fragestellung, ob bei Linern mit hohen E-Modul-Kennwerten infolge unplanmäßiger Zwangsdeformationen statische Überbeanspruchungen des Materials zu erwarten sind, wurden die theoretischen Zusammenhänge am Beispiel des Biegebalkens dargestellt und auf die konkret vorliegende Problemstellung des im Altrohr gebetteten Liners übertragen. Es zeigt sich eine Proportionalität der zu erwartenden Linerspannung zu Liner-E-Modul, Linerwanddicke und einwirkender Zwangsverformung (Gleichung 3.1 bis 3.3). Betrachtet man den Spannungsnachweis also die Ermittlung der statischen Auslastung (Gleichung 4.2), so liegt hier eine zusätzliche Proportionalität zum Kehrwert der Linerfestigkeit vor. Es wurde aufgezeigt, in welcher Weise Variationen der Linersteifigkeit (E-Modul, Wanddicke) die zu erwartenden Linerbeanspruchungen beeinflussen.

Schließlich erfolgten unter Berücksichtigung einer Zwangsdeformation von 3,0 % statische Berechnungen zu maßgeblichen Parameterkombinationen, die sich aus den Regelstatiktabellen des DWA-M 144-3 [1] ergeben. Es zeigt sich für die dort aufgeführten Standardfälle ein ausreichender Sicherheitsabstand zur zulässigen Auslastung (Einhaltung des Spannungsnachweises). Die getroffene Annahme (3 % Zwangsverformung) stellt einen konservativen Ansatz dar. Dieser tritt in der Praxis im Regelfall nicht auf. Zur Orientierung: bei geringen Überdeckungshöhen in einer Größenordnung von 1,0 m und demzufolge hohem

Verkehrslastanteil der Gesamtauflast sind erfahrungsgemäß infolge der Verkehrslast Rechenwerte der relativen Durchmesseränderung in einem Bereich von 1,0 % bis 2,0 % (abhängig von Einbettungsverhältnissen) realistisch. Hier wurde auf der sicheren Seite liegend eine größere Verformung von 3,0 % gewählt.

Bezüglich der Auswirkungen von Zwangsbeanspruchung sind deutliche plan- oder unplanmäßige Steifigkeitserhöhungen (E-Modul, Wanddicke) sowie Festigkeitsabminderungen im Vergleich zu den Tabellenwerten des DWA-M 144-3 [1] von Bedeutung. Deren Einfluss auf den Spannungsnachweis kann mit Hilfe des Faktors (E-Modul · Wanddicke / Festigkeit, s. Gl. 4.2) bewertet werden. Es wird darauf hingewiesen, dass in der vorliegenden vergleichenden Betrachtung die Zwangsdeformation als alleinige Einwirkung (z.B. im Sinne einer Ersatzlast) berücksichtigt wurde. Im konkreten Fall ist ggf. (abhängig von der Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Zwang) eine Überlagerung mit weiteren Einwirkungen durchzuführen. Dies geschieht bei Altrohrzustand III automatisch im Rahmen der statischen Berechnung.

Bewertung der Ergebnisse

Unter den oben genannten Annahmen ergeben sich bei Einhaltung der Kennwerte der Materialkenngruppen [1] keine unzulässigen Zwangsbeanspruchungen in der Linerwandung. Steifigkeitserhöhungen z. B. durch Erhöhung des E-Moduls und/oder der Wanddicke können zu negativen Auswirkungen führen. In der Praxis geht jedoch eine Erhöhung des E-Moduls mit einer Erhöhung der Biegefestigkeit einher, so dass diese Auswirkung kompensiert wird.

Die Betrachtung des Zwangsverformungsfalles ist bei Altrohrzustand I und II in der Regel nicht erforderlich und nur dann zu empfehlen, wenn besondere Lastbedingungen auftreten, die eine ausgeprägte Linerverformung verursachen können.

Literaturverzeichnis

- [1] „DWA-M 143-3: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen (ZTV) für die Sanierung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden,“ in *Teil 3: Renovierung mit Schlauchliningverfahren (vor Ort härtendes Schlauchlining) für Abwasserkanäle sowie Ergänzungsblätter E1 bis E5*, November 2012.

- [2] D. Beckmann, *Auswirkung extremer E-Module auf die Anwendungsbedingungen im Altbestand*, Vortrag auf dem 19. VSB Beratertag, Hannover 07.06.2018.
- [3] DWA-A 143-2: Sanierung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden; Teil 2: Statische Berechnung zur Sanierung von Abwasserleitungen und -kanälen mit Lining- und Montageverfahren; Juli 2015.
- [4] H. Doll, Dimensionierung von Kunststofflinern Close-Fit-Verfahren, Mitteilungen des IGBE der Universität Hannover, Heft 59 2001.