

Statische Berechnung

Bauvorhaben: Hannover - Kanalsanierung Burgweg - 3621031295

Beschreibung: Hobas GFK Rohre
OD1720 PN1 SN10.000

- Relining im vorh. Betonkanal
- Altrohrzustand IIIa
- Berechnungsgrundlage ATV-A127

Statik-Nr.: 335-25-07-24

Datum: 22.08.2025

Inhaltsangabe

1 Bemerkungen	5
2 Unterlagen/Literatur	7
3 Statik nach ATV-DVWK-A 127, 3.Auflage: LF1: min. Überdeckung 4,4m; Betriebszustand	8
3.1 Eingaben	8
3.1.1 Sicherheiten	8
3.1.2 Boden	8
3.1.3 Belastung	9
3.1.4 Einbau	9
3.1.5 Rohr mit definierter Nennsteifigkeit	9
3.1.6 Werte aus der Datenbank	9
3.2 Ergebnisse	11
3.2.1 Zwischenergebnisse Rohr	11
3.2.1.1 Materialeigenschaften	11
3.2.1.2 Sicherheiten	11
3.2.2 Mindestgrabenbreite nach DIN EN 1610:2015-12	11
3.2.3 Zwischenergebnisse bei minimalem Grundwasser	12
3.2.3.1 Silotheorie	12
3.2.3.2 Belastung	12
3.2.3.3 Boden-Verformungsmoduln EB	12
3.2.3.4 Bodensteifigkeiten	12
3.2.3.5 Auflagerwinkel, wirksame Ausladung und Reibungswinkel	12
3.2.3.6 Rohrwerkstoffkennwerte und Ringsteifigkeit	12
3.2.3.7 Steifigkeitsverhältnisse	12
3.2.3.8 Beiwerte	13
3.2.3.9 Konzentrationsfaktoren λ_R und λ_B	13
3.2.3.10 Druckverteilung am Rohrumfang	13
3.2.4 Zwischenergebnisse bei maximalem Grundwasser	13
3.2.4.1 Silotheorie	13
3.2.4.2 Belastung	13
3.2.4.3 Boden-Verformungsmoduln EB	13
3.2.4.4 Bodensteifigkeiten	14
3.2.4.5 Auflagerwinkel, wirksame Ausladung und Reibungswinkel	14
3.2.4.6 Rohrwerkstoffkennwerte und Ringsteifigkeit	14
3.2.4.7 Steifigkeitsverhältnisse	14
3.2.4.8 Beiwerte	14
3.2.4.9 Konzentrationsfaktoren λ_R und λ_B	14
3.2.4.10 Druckverteilung am Rohrumfang	14
3.2.5 Schnittkräfte	15
3.2.5.1 Schnittkräfte bei minimalem Grundwasser, Kurzzeit	15
3.2.5.2 Schnittkräfte bei minimalem Grundwasser, Langzeit	15
3.2.5.3 Schnittkräfte bei maximalem Grundwasser, Kurzzeit	16
3.2.5.4 Schnittkräfte bei maximalem Grundwasser, Langzeit	16
3.2.6 Nachweise Kurzzeit	17
3.2.6.1 Dehnungsnachweis (bei minimalem Grundwasser)	17

3.2.6.2 Dehnungsnachweis (bei maximalem Grundwasser)	17
3.2.6.3 Verformungsnachweis (bei minimalem Grundwasser)	18
3.2.6.4 Verformungsnachweis (bei maximalem Grundwasser)	18
3.2.7 Nachweise Langzeit	19
3.2.7.1 Dehnungsnachweis (bei minimalem Grundwasser)	19
3.2.7.2 Dehnungsnachweis (bei maximalem Grundwasser)	19
3.2.7.3 Verformungsnachweis (bei minimalem Grundwasser)	20
3.2.7.4 Verformungsnachweis (bei maximalem Grundwasser)	20
3.2.7.5 Nachweis Stabilität radial, linear (bei maximalem Grundwasser)	21
3.2.7.6 Stabilitätsnachweis, nichtlinear (bei minimalem Grundwasser)	21
3.2.7.7 Stabilitätsnachweis, nichtlinear (bei maximalem Grundwasser)	21
3.2.7.8 Nachweis der Sicherheit gegen Versagen bei nicht vorwiegend ruhender	21
4 Statik nach ATV-DVWK-A 127, 3.Auflage: LF2: max. Überdeckung 6m; Betriebszustand	22
4.1 Eingaben	22
4.1.1 Sicherheiten	22
4.1.2 Boden	22
4.1.3 Belastung	23
4.1.4 Einbau	23
4.1.5 Rohr mit definierter Nennsteifigkeit	23
4.1.6 Werte aus der Datenbank	23
4.2 Ergebnisse	25
4.2.1 Zwischenergebnisse Rohr	25
4.2.1.1 Materialeigenschaften	25
4.2.1.2 Sicherheiten	25
4.2.2 Mindestgrabenbreite nach DIN EN 1610:2015-12	25
4.2.3 Zwischenergebnisse bei minimalem Grundwasser	26
4.2.3.1 Silotheorie	26
4.2.3.2 Belastung	26
4.2.3.3 Boden-Verformungsmoduln EB	26
4.2.3.4 Bodensteifigkeiten	26
4.2.3.5 Auflagerwinkel, wirksame Ausladung und Reibungswinkel	26
4.2.3.6 Rohrwerkstoffkennwerte und Ringsteifigkeit	26
4.2.3.7 Steifigkeitsverhältnisse	26
4.2.3.8 Beiwerte	27
4.2.3.9 Konzentrationsfaktoren λ_R und λ_B	27
4.2.3.10 Druckverteilung am Rohrumfang	27
4.2.4 Zwischenergebnisse bei maximalem Grundwasser	27
4.2.4.1 Silotheorie	27
4.2.4.2 Belastung	27
4.2.4.3 Boden-Verformungsmoduln EB	27
4.2.4.4 Bodensteifigkeiten	28
4.2.4.5 Auflagerwinkel, wirksame Ausladung und Reibungswinkel	28
4.2.4.6 Rohrwerkstoffkennwerte und Ringsteifigkeit	28
4.2.4.7 Steifigkeitsverhältnisse	28
4.2.4.8 Beiwerte	28
4.2.4.9 Konzentrationsfaktoren λ_R und λ_B	28
4.2.4.10 Druckverteilung am Rohrumfang	28
4.2.5 Schnittkräfte	29
4.2.5.1 Schnittkräfte bei minimalem Grundwasser, Kurzzeit	29
4.2.5.2 Schnittkräfte bei minimalem Grundwasser, Langzeit	29
4.2.5.3 Schnittkräfte bei maximalem Grundwasser, Kurzzeit	30
4.2.5.4 Schnittkräfte bei maximalem Grundwasser, Langzeit	30
4.2.6 Nachweise Kurzzeit	31
4.2.6.1 Dehnungsnachweis (bei minimalem Grundwasser)	31

4.2.6.2 Dehnungsnachweis (bei maximalem Grundwasser)	31
4.2.6.3 Verformungsnachweis (bei minimalem Grundwasser)	32
4.2.6.4 Verformungsnachweis (bei maximalem Grundwasser)	32
4.2.7 Nachweise Langzeit	33
4.2.7.1 Dehnungsnachweis (bei minimalem Grundwasser)	33
4.2.7.2 Dehnungsnachweis (bei maximalem Grundwasser)	33
4.2.7.3 Verformungsnachweis (bei minimalem Grundwasser)	34
4.2.7.4 Verformungsnachweis (bei maximalem Grundwasser)	34
4.2.7.5 Nachweis Stabilität radial, linear (bei maximalem Grundwasser)	35
4.2.7.6 Stabilitätsnachweis, nichtlinear (bei minimalem Grundwasser)	35
4.2.7.7 Stabilitätsnachweis, nichtlinear (bei maximalem Grundwasser)	35
4.2.7.8 Nachweis der Sicherheit gegen Versagen bei nicht vorwiegend ruhender	35

1 Bemerkungen

HAFTUNGSAUSSCHLUSS

Als Teil des technischen Service zur Fachplanung von Projekten der Amiblu Gruppe (im Weiteren „Amiblu“) werden regelmäßig statische Berechnungen zur Entscheidungsfindung für Amiblu/Flowtite/Hobas GFK Rohrsysteme und Produkte erstellt.

Mit der Nutzung dieser kostenlosen Serviceleistung zur Erstellung von technischen Nachweisen von Amiblu erkennen Sie die folgenden Bedingungen an:

1. Keine vertragliche Beziehung:

Mit der Verwendung der oben genannten Amiblu-Berechnungen kommt kein Vertragsverhältnis, insbesondere kein Beratungs- oder Informationsvertrag zwischen Ihnen und Amiblu zustande. Insoweit bestehen keine vertraglichen oder quasivertraglichen Ansprüche gegen Amiblu.

2. Anforderungen:

Sie erkennen an, dass die angegebenen Berechnungen nur für Amiblu/Flowtite/Hobas Produkte gelten.

3. Basis der statischen Berechnung:

Amiblu stützt sich bei der Berechnung auf Ihre angegebenen Projekt- und Einbaubedingungen und ergänzt die erforderlichen fehlenden Daten nach bestem Wissen und Gewissen auf Basis des aktuellen Wissensstandes und der Anforderungen der gültigen Normen- und Regelwerke.

Die Berechnung wird nach Vorgabe DBS 918 064 nach ATV-DVWK-A A127 geführt (keine statische Tragwirkung des Bestandsbauwerks vorhanden).

Die Grabenbreite wird mit den Innenabmessungen des Bestandskanals angesetzt. Die Wandstärke des Bestandskanals wird als anstehender Boden definiert und somit nicht als zusätzlich tragfähig angenommen. Der Ringraum zwischen Bestand und Linerrohr ist mit Dämmern hohlraum- und schwindfrei zu verfüllen. Zur Verdämmung ist ein Produkt mit Mindestdruckfestigkeiten von 1,2 N/mm² einzusetzen. Nach Erfahrungswerten des Statikerstellers erreichen handelsübliche Dämmern diese Mindestwerte.

4. Vorgaben zum Einbau:

In allen Fällen müssen die folgenden Einbaubedingungen für die Verlegung von Amiblu-Produkten eingehalten werden. Beim Einbau der Reliningrohre im Altrohr empfehlen wir einen umlaufend gleichförmigen Ringraum, um ein ungehindertes Fliesen des Dämmers sicher zu stellen. Die Linerrohre sind zur Lagefixierung flächig zu verkeilen; hierbei ist auf die Vermeidung von Punkt- oder Linienlasten am gesamten Rohrumfang zu achten. Jede einzelne Lastabtragsfläche am Rohr sollte mind. 100x100mm betragen und gleichmäßig über dem Rohrscheitel bis zur Kämpferlinie angeordnet werden.

Bei der Verdämmung des Ringraumes empfehlen wir, diese in mehreren Lagen auszuführen. Die Verdämmung des Ringraumes sollte auftriebsneutral erfolgen. Der Einbau der nachfolgenden Lagen darf erst nach dem Aushärten der vorherigen Verfüllagen erfolgen. Die Restverfüllung des Bestandsprofils über dem Scheitel des Linerrohres hat keinen Einfluß mehr auf das GfK-Reliningrohr.

Die Rohrzone muss aus nicht- oder schwachbindigem Material mit der Qualität und dem Verdichtungsgrad gemäß dieser Berechnung ausgeführt werden. Die maximale Korngröße gem. Verlegeanleitung Amiblu/Flowtite/Hobas für erdverlegte Rohre und Schächte ist einzuhalten.

Zur Klassifizierung des Bettungsmaterials muss das gesamte Material der Rohrleitungszone ein Sieb mit einer Maschenweite gemäß der Spezifikation in der Verlegeanleitung durchlaufen.

Die Einhaltung der geltenden internationalen Normen und der Verlegeanleitung für Amiblu/Flowtite/Hobas Produkte werden für diese statische Berechnung als gegeben vorausgesetzt. Die Verlegeanleitungen für Amiblu/Flowtite/Hobas können auf unseren Homepages heruntergeladen werden:

<http://www.flowtite.com> oder <http://www.hobas.com> oder <http://www.amiblu.com>.

Die zur statischen Berechnung angesetzten Einbaubedingungen sollten durch Sie bzw. den Prüfenieur oder den Projektplaner mit den tatsächlichen Bedingungen vor Ort verglichen werden. Eventuelle Abweichungen können einen Einfluss auf die Rohrinstitution haben.

5. Haftungsausschluss:

Für die erbrachten Leistungen gelten, soweit anwendbar, die allgemeinen Verkaufsbedingungen von Amiblu. Die Ergebnisse der Berechnung können in der Praxis nur erzielt werden, wenn die Annahmen den realen Baustellenbedingungen Vor-Ort entsprechen.

Die statischen Berechnungen wurden gemäß der fachkundigen Meinung von Amiblu zuverlässig und sorgfältig durchgeführt. Amiblu übernimmt Gewähr für die durchgeführte statische Berechnung auf Basis kundenseitiger Vorgaben wie z.B. Inhalte aus Statik-Formblättern, Vorgaben zur Planung und Ausführung, Angaben zum Baugrund sowie dem Einbau oder/und Betrieb. Für die Richtigkeit und Vollständigkeit der konkreten kundenseitigen Vorgaben übernimmt Amiblu keine Gewähr.

Die von Amiblu erstellten statischen Berechnungen sind eine Serviceleistung in der Projektierungs- oder Ausführungsphase und werden üblicherweise Bestandteil der Projektdokumentation. Amiblu übernimmt keine Haftung für die Anwendbarkeit der Berechnungsergebnisse im Fall von Abweichungen von den zugrunde liegenden Annahmen.

Rev03 11/04/2023

2 Unterlagen/Literatur

DIN 16868 - Rohre aus glasfaserverstärktem Polyesterharz (UP-GF) – Gewickelt, gefüllt

DIN EN 1610 - Verlegung und Prüfung von Abwasserleitungen und -kanälen: Dezember 2015

DIN EN 1992-2 - Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 2: Betonbrücken - Bemessungs- und Konstruktionsregeln: Dez. 2010

DIN EN ISO 23856 - Kunststoff-Rohrleitungssysteme für Wasserversorgung, Entwässerungssysteme und Abwasserleitungen mit und ohne Druck - Glasfaserverstärkte duroplastische Kunststoffe (GFK) auf der Basis von ungesättigtem Polyesterharz: August 2023

DIN 4124 - Böschungen, Verbau, Arbeitsraumbreiten: Januar 2012

Arbeitsblatt DWA-A127-1 - Statische Berechnung von Entwässerungsanlagen - Teil1: Grundlagen: Dezember 2022

Arbeitsblatt DWA-A139 - Einbau und Prüfung von Abwasserleitungen und -kanälen: März 2019

Herstellerbezogene Produktqualifikation der DB AG zur Fertigung von Produkten für Eisenbahntiefbaumaterial: April 2022

3 Statik nach ATV-DVWK-A 127, 3.Auflage: LF1: min. Überdeckung 4,4m; Betriebszustand

Titel der Teilstatik: LF1: min. Überdeckung 4,4m; Betriebszustand

Annahmen: Verlegung nach Flowtite Verlegeanleitung für erdverlegte Rohrleitungen bzw. DIN EN 1610/DWA-A 139;

- Verkehrsst: SLW60
- Grundwasser: max. 7,97m über Sohle
- Grabenbreite entspricht kleinstem ID Bestandskanal = 1,8m
- senkrechter Rohrgraben 90° (Ersatzansatz)
- E3-anstehender Boden: G1 mit 100% Proctordichte
- E2-Leitungszone: Ansatz G1 mit 97% nach Tab. 8 (A127)
- E1-Verfüllzone: Ansatz G1 mit 97% nach Tab 8 (A127)
- Auflagerwinkel 120°
- A4/B4

Schlussfolgerungen: Wir empfehlen, die Verdämmung des Ringraumes zwischen Bestandsrohr und Linerrohr nicht in einem Zug auszuführen. Um die Lagesicherheit und Beulbeanspruchung des Linerrohres gewährleisten zu können, ist eine mehrlagige Verdämmung des Ringraumes erforderlich. Die nachfolgenden Verdämmungen dürfen dabei erst nach dem Erstarren der vorherigen Lagen eingebracht werden.

Berechnungsart:
Skizzen (Einbau/Rohr) in Ausdruck:

Nennsteifigkeit
Ja

3.1 Eingaben

3.1.1 Sicherheiten

Sicherheitsklasse:
Sicherheit Stabilität nach Tabelle 13:
Zulässige Verformung:
Behandlung von Innendruck:

A (Regelfall)
Inklusive Vorverformungen (2,0 / 1,6)
6% (Regelfall)
Volle Überlagerung mit Außenbelastung
(ATV-DVWK-A 127)
Nein (ATV-DVWK-A 127)
Nach Regelwerk
Nach Norm
Nein
DWA-A 161:2014 (nach Materialart)
Ja

Kleinere Biegedruck-Sicherheiten:
Nachweis bei nicht vorwiegend ruhender Belastung:
Berücksichtigung von dyn pvh*:
Berücksichtigung der Vorverformungen Typ A in Verformungsnachweis:
Behandlung Systemsteifigkeit VRB nach:
Rohrsteifigkeit nach Regelwerk:

3.1.2 Boden

Bodengruppe Verfüllung:
Berechnung E1:
Bodengruppe Einbettung:
Berechnung E20:
Bodengruppe anstehender Boden:
Berechnung E3:
Verdichtungsgrad E3:
E4 = 10 · E1:
Anwendung von Silotheorie:

G1
Tabelle 8 (A127)
G1
Tabelle 8 (A127)
G1
Verdichtungsgrad
D_{Pr,E3} 100,0 %
Ja
Automatisch

K2 nach Norm:

Ja

3.1.3 Belastung

Überdeckungshöhe:	h	4,40	m
Minimaler Grundwasserstand über Sohle:	h _{W,min}	0,00	m
Maximaler Grundwasserstand über Sohle:	h _{W,max}	7,97	m
Auftriebsnachweis führen:	Nein		
Wichte des Bodens:	γ _B	20,0	kN/m ³
Manuelle Angabe der Wichte des Bodens unter Auftrieb:	Nein		
Zusätzliche Flächenlast:	p ₀	0,0	kN/m ²
Innendruck, kurzzeitig wirkend:	P _{I,K}	0,00	bar
Innendruck, langfristig:	P _{I,L}	0,00	bar
Wasserfüllung (z.B. Staukanal):	Nein		
Eingabe Spezialfahrzeug:	Nein		
Verkehrslast:	Straße SLW 60 (mit Straßenaufbau)		
Ansatz horizontaler Belastungen aus Verkehr im Ermüdungsnachweis:	α _{qhT,dyn}	0,00	%

3.1.4 Einbau

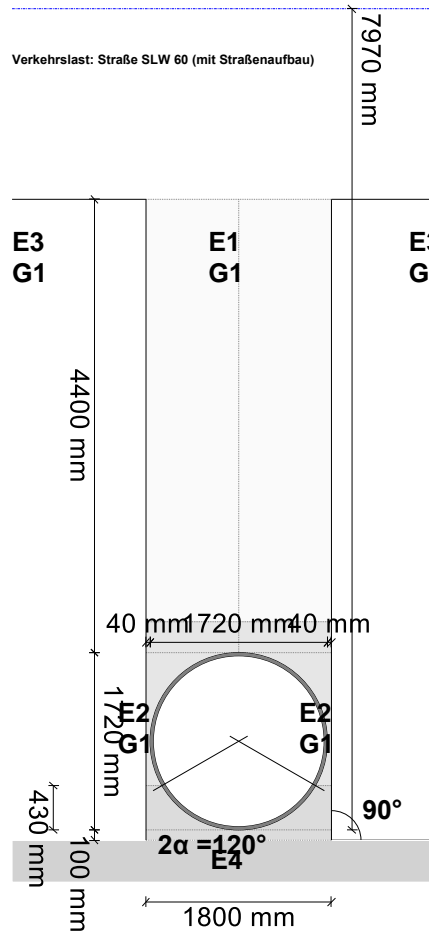
Einbauweise:	Graben		
Grabenbreite in Scheitelhöhe:	b	1,80	m
Mindestgrabenbreite prüfen:	Nein		
Stärke der Bettungsschicht automatisch ermitteln:	Nein		
Lagenstärke der Bettungsschicht:	h _{BS}	0,10	m
Böschungswinkel:	β	90	°
Überschüttungsbedingung:	A4		
Einbettungsbedingung:	B4		
Auflagerart:	Lose		
Auflagerwinkel:	120°		
Relative Ausladung automatisch ermitteln:	Ja		
Untere Sockelhöhe vorgeben:	Nein		
Gesamt-Sockelhöhe:	h _s	0,00	m

3.1.5 Rohr mit definierter Nennsteifigkeit

Rohrauswahl aus Datenbank:	Ja
Rohrauswahl:	PN1 SN10000 DN1720
Rohr-Serie:	Hobas PN1 (VO)
Rohr ist Druckrohr:	Nein
Nennndruck:	PN 1 [bar]
Nennsteifigkeit:	SN 10000 [N/m ²]
Nennndurchmesser:	DN 1720 [mm]

3.1.6 Werte aus der Datenbank

Außendurchmesser:	d _a	1.720,0	mm
Gesamt-Wanddicke:	s	35,6	mm
Wichte des Rohrwerkstoffs:	γ _R	21,79	kN/m ³
Querkontraktionszahl:	v	0,30	[-]
Schwingbreite des Rohres:	Δσ _{rsk}	0,00	N/mm ²
Lokale Vorverformung:	δ _{v,l}	1,0	%
Grenzdehnung Biegezug nach Norm:	Ja		
Längsdruckfestigkeit, Kurzzeit:	f _{c,ax,K}	90,0	N/mm ²
Grenzdehnung für Längsdruck, Kurzzeit:	ε _{AxK}	0,7	%



3.2 Ergebnisse

3.2.1 Zwischenergebnisse Rohr

Innendurchmesser:	d_i	1.648,9	mm
Außendurchmesser:	d_a	1.720,0	mm
Mittlerer Radius:	r_m	842,23	mm
Wanddicke:	s	35,55	mm
Verhältnis Radius zu Wanddicke:	r_m/s	23,691	[-]
Korrekturfaktor Krümmung innen:	α_{ki}	1,014	[-]
Korrekturfaktor Krümmung außen:	α_{ka}	0,986	[-]
Lokale Vorverformung:	$\delta_{v,l}$	1,00	%
Vorverformung (Ovalisierung vor Last):	$\delta_{v,A}$	1,00	%
Radiale Profilfläche:	A_{rad}	35,55	mm ² /mm
Trägheitsabstand:	e	17,78	mm
Trägheitsmoment:	I	3.744,01	mm ⁴ /mm
Äußeres Widerstandsmoment:	W_a	210,63	mm ³ /mm
Inneres Widerstandsmoment:	W_i	210,63	mm ³ /mm
Flächenverhältnis:	K_Q	1,2	[-]

3.2.1.1 Materialeigenschaften

		Kurzzeit	Langzeit	
Wichte des Rohrwerkstoffs	γ_R	21,8	21,8	kN/m ³
Querkontraktionszahl	ν	0,30	0,30	[-]
Elastizitätsmodul in Ringrichtung	$E_{R,rad}$	12.765,5	6.900,3	N/mm ²
Kriechverhältnis:	f_{creep}		1,85	[-]

Tabelle 3 Fußnote 13: Höhere Rechenwerte können zur Berechnung herangezogen werden, wenn diese für den eingesetzten Werkstoff nachgewiesen sind.

Tabelle 3 Fußnote 34: Ermittelt aus dem Kurzzeitwert und dem Kriechverhältnis (2,0) mit Kennwerten für 2 Jahre zur Beschreibung des Langzeitverhaltens. Zulässig auch für den Langzeitnachweis für 50 Jahre. Die Prüfung erfolgt nach DIN EN 1228 (Kurzzeit) bzw. DIN EN 1225 (Langzeit).

Rechenwert der relativen Bruchverformung	$\Delta d_{Bruch}/d_m$	15,0	9,0	%
--	------------------------	------	-----	---

$$\epsilon_R = 4,28 \cdot s/d_m \cdot \Delta d_{Bruch}/d_m$$

Rechenwert der Randfasergrenzdehnung Biegezug	ϵ_R	1,355	0,813	%
---	--------------	-------	-------	---

$$f_t = \frac{0,50 \cdot PN \cdot 4 \cdot 2 \cdot r_m}{h}$$

Ringzugfestigkeit	f_t	9,5	4,7	N/mm ²
Schwingbreite bei 2·10 ⁶ Lastspielen:	$\Delta\sigma_{rsk,2E6}$	n. def.		N/mm ²
Schwingbreite bei 5·10 ⁶ Lastspielen:	$\Delta\sigma_{rsk,5E6}$	n. def.		N/mm ²
Schwingbreite bei 1·10 ⁸ Lastspielen:	$\Delta\sigma_{rsk,1E8}$	n. def.		N/mm ²

3.2.1.2 Sicherheiten

Erforderlicher Sicherheitsbeiwert, Biegezugspannungen	erf γ_{RBZ}	2,00	2,00	[-]
Erforderlicher Sicherheitsbeiwert, Biegedruckspannungen	erf γ_{RBD}	2,00	2,00	[-]
Erforderlicher Sicherheitsbeiwert, Instabilität	erf γ_{stab}	2,00	2,00	[-]

3.2.2 Mindestgrabenbreite nach DIN EN 1610:2015-12

Die Mindestgrabenbreite nach DIN EN 1610 / DWA-A 139 wird nicht überprüft.

3.2.3 Zwischenergebnisse bei minimalem Grundwasser

3.2.3.1 Silotheorie

Erdlastbeiwert κ für Grabenlast (Silotheorie):	κ	0,479	[-]
Erdlastbeiwert κ_0 für Flächenlast (Silotheorie):	κ_0	0,181	[-]

3.2.3.2 Belastung

Grundwasserstand über Scheitel:	$h_{W,Scheitel}$	0,00	m
Vertikale Bodenspannung aufgrund Erdlast:	P_{Erd}	42,13	kN/m ²
Vertikale Bodenspannung aufgrund Erd- und Flächenlast:	P_E	42,13	kN/m ²
Spannung aufgrund Verkehrslast:	P_V	12,92	kN/m ²
Enthaltener Stoßfaktor:	ϕ	1,20	[-]

3.2.3.3 Boden-Verformungsmoduln EB

E-Modul Verfüllung unter Last:	$E_{1,\sigma}$	23,00	N/mm ²
--------------------------------	----------------	-------	-------------------

$$E_{3,\sigma} = \frac{40}{1} \cdot e^{-0,188(100 - D_{Pr})} \quad 3.01$$

E-Modul anstehender Boden:	$E_{3,\sigma}$	40,00	N/mm ²
E-Modul Einbettung (abgemindert):	$E_{2,\sigma}$	23,00	N/mm ²
E-Modul Einbettung unter Last:	$E_{20,\sigma}$	23,00	N/mm ²
Reduktionsfaktor für das Kriechen:	f_1	1,000	[-]
Verdichtungsgrad aus Tabelle 8:	$D_{pr,E20}$	0,97	[-]
Abminderungsfaktor E20 (Grundwasser):	f_2	1,000	[-]
Abminderungsfaktor E20 (Diagramm 5):	α_{B0}	1,000	[-]
Abminderungsfaktor E20 (enger Graben):	α_B	1,000	[-]
E-Modul Einbettung (abgemindert):	$E_{2,\sigma}$	23,00	N/mm ²
E-Modul Boden unter dem Rohr:	$E_{4,\sigma}$	230,00	N/mm ²

3.2.3.4 Bodensteifigkeiten

Hilfswert für horizontale Bettungssteifigkeit:	Δ_f	0,047	[-]
Korrekturfaktor für die horizontale Bettungssteifigkeit:	ζ	1,704	[-]
Horizontale Bettungssteifigkeit:	S_{Bh}	23,513	N/mm ²
Vertikale Bettungssteifigkeit:	S_{Bv}	23,000	N/mm ²

3.2.3.5 Auflagerwinkel, wirksame Ausladung und Reibungswinkel

Auflagerwinkel:	2α	120	°
Höhe Auflager von Auflagerwinkel bis UK Rohr:	t_r	0,430	m
Berechnete Ausladung:	a	1,00	[-]
Wirksame Ausladung:	a'	1,000	[-]
Innerer Reibungswinkel:	φ'	35,000	°
Wandreibungswinkel:	δ	35,000	°

Kurzzeit alle Lasten	Langzeit Erdlasten	Langzeit sonstige Lasten
	Verkehrslast	

3.2.3.6 Rohrwerkstoffkennwerte und Ringsteifigkeit

Rohrsteifigkeit	S_R	80.000	51.868	43.243	N/m ²
Rechenwert der Randfasergrenzdehnung	ϵ_R	1,355	0,940	0,813	%
Biegezug					
Elastizitätsmodul in Ringrichtung	$E_{R,rad}$	12.765,5	8.276,4	6.900,3	N/mm ²

3.2.3.7 Steifigkeitsverhältnisse

Systemsteifigkeit, gewichtet	$V_{RB,w}$	0,0034	0,0022	0,0018	[-]
Steifigkeitsverhältnis	V_S	0,5042	0,4139	---	[-]
Beiwert für die vertikale Verformung	c_v^*	-0,007	-0,005	---	[-]

3.2.3.8 Beiwerte

Erddruckbeiwert (Einbettung)	K_2	0,400	0,400	---	[-]
Beiwert für den Bettungsreaktionsdruck	K^*	1,288	1,310	---	[-]
Resultierender Verformungsbeiwert	c_h	0,0891	0,0891	---	[-]
Resultierender Verformungsbeiwert	$c_{h,qh}^*$	-0,0658	-0,0658	---	[-]
Beiwert für die vertikale Verformung	c_v^*	-0,007	-0,005	---	[-]

3.2.3.9 Konzentrationsfaktoren λ_R und λ_B

Maximaler Konzentrationsfaktor	$\max \lambda$	1,432	1,432	---	[-]
Beiwert für maximalen Konzentrationsfaktor	K'	0,908	0,901	---	[-]
Konzentrationsfaktor über Rohr, Startwert	λ_R	0,870	0,821	---	[-]
Konzentrationsfaktor über Rohr, unter Grabeneinfluss	λ_{RG}	0,998	0,997	---	[-]
Konzentrationsfaktor über Rohr, oberer Grenzwert	λ_{fo}	3,340	3,340	---	[-]
Konzentrationsfaktor über Rohr, unterer Grenzwert	λ_{fu}	0,465	0,465	---	[-]
Konzentrationsfaktor über Rohr, endgültiger Wert	λ_{RG}	0,998	0,997	---	[-]
Konzentrationsfaktor Boden	λ_B	1,043	1,060	---	[-]

3.2.3.10 Druckverteilung am Rohrumfang

		Kurzzeit alle Lasten	Langzeit Erdlasten Verkehrslast	Langzeit sonstige Lasten	
Vertikale Gesamtlast	q_v	54,96	54,93	---	kN/m ²
Seitendruck	q_h	24,46	24,74	---	kN/m ²
Bettungsreaktionsdruck (Erdlasten)	q_h^*	41,32	41,66	---	kN/m ²
Bettungsreaktionsdruck (Wasserfüllung)	q_{hw}^*	0,00	0,00	---	kN/m ²

3.2.4 Zwischenergebnisse bei maximalem Grundwasser

3.2.4.1 Silotheorie

Erddruckbeiwert κ für Grabenlast (Silotheorie):	κ	0,479	[-]
Erddruckbeiwert κ_0 für Flächenlast (Silotheorie):	κ_0	0,181	[-]

3.2.4.2 Belastung

Grundwasserstand über Scheitel:	$h_{W,Scheitel}$	4,40	m
Wichte Verfüllung unter Wasser:	γ'	11,00	kN/m ³
Vertikale Bodenspannung aufgrund Erdlast:	P_{Erd}	23,17	kN/m ²
Vertikale Bodenspannung aufgrund Erd- und Flächenlast:	P_E	23,17	kN/m ²
Spannung aufgrund Verkehrslast:	P_V	12,92	kN/m ²
Enthaltener Stoßfaktor:	ϕ	1,20	[-]

3.2.4.3 Boden-Verformungsmoduln EB

E-Modul Verfüllung unter Last:	$E_{1,\sigma}$	23,00	N/mm ²
--------------------------------	----------------	-------	-------------------

$$E_{3,\sigma} = \frac{40}{1} \cdot e^{-0,188(100 - D_{Pr})} \quad 3.01$$

E-Modul anstehender Boden:	$E_{3,\sigma}$	40,00	N/mm ²
E-Modul Einbettung (abgemindert):	$E_{2,\sigma}$	23,00	N/mm ²
E-Modul Einbettung unter Last:	$E_{20,\sigma}$	23,00	N/mm ²
Reduktionsfaktor für das Kriechen:	f_1	1,000	[-]
Verdichtungsgrad aus Tabelle 8:	$D_{pr,E20}$	0,97	[-]
Abminderungsfaktor E20 (Grundwasser):	f_2	1,000	[-]
Abminderungsfaktor E20 (Diagramm 5):	α_{B0}	1,000	[-]
Abminderungsfaktor E20 (enger Graben):	α_B	1,000	[-]

E-Modul Einbettung (abgemindert):	$E_{2,\sigma}$	23,00	N/mm ²
E-Modul Boden unter dem Rohr:	$E_{4,\sigma}$	230,00	N/mm ²

3.2.4.4 Bodensteifigkeiten

Hilfswert für horizontale Bettungssteifigkeit:	Δ_f	0,047	[-]
Korrekturfaktor für die horizontale Bettungssteifigkeit:	ζ	1,704	[-]
Horizontale Bettungssteifigkeit:	S_{Bh}	23,513	N/mm ²
Vertikale Bettungssteifigkeit:	S_{Bv}	23,000	N/mm ²

3.2.4.5 Auflagerwinkel, wirksame Ausladung und Reibungswinkel

Auflagerwinkel:	2α	120	°
Höhe Auflager von Auflagerwinkel bis UK Rohr:	t_r	0,430	m
Berechnete Ausladung:	a	1,00	[-]
Wirksame Ausladung:	a'	1,000	[-]
Innerer Reibungswinkel:	φ'	35,000	°
Wandreibungswinkel:	δ	35,000	°

Kurzzeit alle Lasten	Langzeit Erdlasten Verkehrslast	Langzeit sonstige Lasten
-------------------------	---------------------------------------	--------------------------------

3.2.4.6 Rohrwerkstoffkennwerte und Ringsteifigkeit

Rohrsteifigkeit	S_R	80.000	56.398	43.243	N/m ²
Rechenwert der Randfasergrenzdehnung	ε_R	1,355	1,007	0,813	%
Biegezug					
Elastizitätsmodul in Ringrichtung	$E_{R,rad}$	12.765,5	8.999,4	6.900,3	N/mm ²

3.2.4.7 Steifigkeitsverhältnisse

Systemsteifigkeit, gewichtet	$V_{RB,w}$	0,0034	0,0024	0,0018	[-]
Steifigkeitsverhältnis	V_S	0,5042	0,4313	---	[-]
Beiwert für die vertikale Verformung	c_v^*	-0,007	-0,006	---	[-]

3.2.4.8 Beiwerte

Erddruckbeiwert (Einbettung)	K_2	0,400	0,400	---	[-]
Beiwert für den Bettungsreaktionsdruck	K^*	1,288	1,306	---	[-]
Resultierender Verformungsbeiwert	$c'h$	0,0891	0,0891	---	[-]
Resultierender Verformungsbeiwert	$c'h_{qh^*}$	-0,0658	-0,0658	---	[-]
Beiwert für die vertikale Verformung	c_v^*	-0,007	-0,006	---	[-]

3.2.4.9 Konzentrationsfaktoren λ_R und λ_B

Maximaler Konzentrationsfaktor	$\max \lambda$	1,432	1,432	---	[-]
Beiwert für maximalen Konzentrationsfaktor	K'	0,908	0,902	---	[-]
Konzentrationsfaktor über Rohr, Startwert	λ_R	0,870	0,831	---	[-]
Konzentrationsfaktor über Rohr, unter Grabeneinfluss	λ_{RG}	0,998	0,997	---	[-]
Konzentrationsfaktor über Rohr, oberer Grenzwert	λ_{fo}	3,340	3,340	---	[-]
Konzentrationsfaktor über Rohr, unterer Grenzwert	λ_{fu}	0,465	0,465	---	[-]
Konzentrationsfaktor über Rohr, endgültiger Wert	λ_{RG}	0,998	0,997	---	[-]
Konzentrationsfaktor Boden	λ_B	1,043	1,056	---	[-]

3.2.4.10 Druckverteilung am Rohrumfang

		Kurzzeit alle Lasten	Langzeit Erdlasten Verkehrslast	Langzeit sonstige Lasten	
Vertikale Gesamtlast	q_v	36,04	36,03	---	kN/m ²
Seitendruck	q_h	13,45	13,57	---	kN/m ²

Bettungsreaktionsdruck (Erdlasten)	q^*_h	30,21	30,49	---	kN/m ²
Bettungsreaktionsdruck (Wasserfüllung)	q^*_{hw}	0,00	0,00	---	kN/m ²

3.2.5 Schnittkräfte

3.2.5.1 Schnittkräfte bei minimalem Grundwasser, Kurzzeit

Rerounding-Faktor (Abminderung Momente):		r			1,000 [-]
		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Mittlerer Radius	r_m	842,23	842,23	842,23	mm
Moment aufgrund vertikaler Gesamtbelastung	M_{qv}	10,175	-10,331	10,721	kNm/m
Moment aufgrund Seitendruck	M_{qh}	-4,338	4,338	-4,338	kNm/m
Moment aufgrund horiz. Bettungsreaktionsdruck	M^*_{qh}	-5,305	6,097	-5,305	kNm/m
Moment aufgrund Eigengewicht	M_g	0,209	-0,242	0,286	kNm/m
Moment aufgrund Wasserfüllung	M_w	0,000	0,000	0,000	kNm/m
Moment aufgrund Wasserdruck/Innendruck	M_{pw}	0,000	0,000	0,000	kNm/m
Summe der Momente	ΣM	0,742	-0,139	1,364	kNm/m

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Mittlerer Radius	r_m	842,23	842,23	842,23	mm
Normalkraft aufgrund vertikaler Gesamtbelastung	N_{qv}	1,250	-46,289	-1,250	kN/m
Normalkraft aufgrund Seitendruck	N_{qh}	-20,600	0,000	-20,600	kN/m
Normalkraft aufgrund horiz. Bettungsreaktionsdruck	N^*_{qh}	-20,080	0,000	-20,080	kN/m
Normalkraft aufgrund Eigengewicht	N_g	0,163	-1,025	-0,163	kN/m
Normalkraft aufgrund Wasserfüllung	N_w	0,000	0,000	0,000	kN/m
Normalkraft aufgrund Wasserdruck/Innendruck	N_{pw}	0,000	0,000	0,000	kN/m
Summe der Normalkräfte	ΣN	-39,268	-47,314	-42,094	kN/m

3.2.5.2 Schnittkräfte bei minimalem Grundwasser, Langzeit

Rerounding-Faktor (Abminderung Momente):		r			1,000 [-]
		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Mittlerer Radius	r_m	842,23	842,23	842,23	mm
Moment aufgrund vertikaler Gesamtbelastung	M_{qv}	10,169	-10,325	10,715	kNm/m
Moment aufgrund Seitendruck	M_{qh}	-4,387	4,387	-4,387	kNm/m
Moment aufgrund horiz. Bettungsreaktionsdruck	M^*_{qh}	-5,349	6,147	-5,349	kNm/m
Moment aufgrund Eigengewicht	M_g	0,209	-0,242	0,286	kNm/m
Moment aufgrund Wasserfüllung	M_w	0,000	0,000	0,000	kNm/m
Moment aufgrund Wasserdruck/Innendruck	M_{pw}	0,000	0,000	0,000	kNm/m
Summe der Momente	ΣM	0,642	-0,033	1,264	kNm/m

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Mittlerer Radius	r_m	842,23	842,23	842,23	mm
Normalkraft aufgrund vertikaler Gesamtbelastung	N_{qv}	1,249	-46,262	-1,249	kN/m
Normalkraft aufgrund Seitendruck	N_{qh}	-20,835	0,000	-20,835	kN/m
Normalkraft aufgrund horiz. Bettungsreaktionsdruck	N^*_{qh}	-20,247	0,000	-20,247	kN/m
Normalkraft aufgrund Eigengewicht	N_g	0,163	-1,025	-0,163	kN/m
Normalkraft aufgrund Wasserfüllung	N_w	0,000	0,000	0,000	kN/m
Normalkraft aufgrund Wasserdruck/Innendruck	N_{pw}	0,000	0,000	0,000	kN/m
Summe der Normalkräfte	ΣN	-39,670	-47,286	-42,494	kN/m

3.2.5.3 Schnittkräfte bei maximalem Grundwasser, Kurzzeit

Rerounding-Faktor (Abminderung Momente):		r		1,000	[-]
		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Mittlerer Radius	r_m	842,23	842,23	842,23	mm
Moment aufgrund vertikaler Gesamtbelastung	M_{qv}	6,672	-6,775	7,030	kNm/m
Moment aufgrund Seitendruck	M_{qh}	-2,386	2,386	-2,386	kNm/m
Moment aufgrund horiz. Bettungsreaktionsdruck	M^*_{qh}	-3,879	4,457	-3,879	kNm/m
Moment aufgrund Eigengewicht	M_g	0,209	-0,242	0,286	kNm/m
Moment aufgrund Wasserfüllung	M_w	0,000	0,000	0,000	kNm/m
Moment aufgrund Wasserdruck/Innendruck	M_{pw}	-0,008	-0,008	-0,008	kNm/m
Summe der Momente	ΣM	0,609	-0,182	1,043	kNm/m

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Mittlerer Radius	r_m	842,23	842,23	842,23	mm
Normalkraft aufgrund vertikaler Gesamtbelastung	N_{qv}	0,820	-30,354	-0,820	kN/m
Normalkraft aufgrund Seitendruck	N_{qh}	-11,330	0,000	-11,330	kN/m
Normalkraft aufgrund horiz. Bettungsreaktionsdruck	N^*_{qh}	-14,681	0,000	-14,681	kN/m
Normalkraft aufgrund Eigengewicht	N_g	0,163	-1,025	-0,163	kN/m
Normalkraft aufgrund Wasserfüllung	N_w	0,000	0,000	0,000	kN/m
Normalkraft aufgrund Wasserdruck/Innendruck	N_{pw}	-68,542	-68,542	-68,542	kN/m
Summe der Normalkräfte	ΣN	-93,570	-99,921	-95,535	kN/m

3.2.5.4 Schnittkräfte bei maximalem Grundwasser, Langzeit

Rerounding-Faktor (Abminderung Momente):		r		1,000	[-]
		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Mittlerer Radius	r_m	842,23	842,23	842,23	mm
Moment aufgrund vertikaler Gesamtbelastung	M_{qv}	6,670	-6,772	7,028	kNm/m
Moment aufgrund Seitendruck	M_{qh}	-2,407	2,407	-2,407	kNm/m
Moment aufgrund horiz. Bettungsreaktionsdruck	M^*_{qh}	-3,914	4,498	-3,914	kNm/m
Moment aufgrund Eigengewicht	M_g	0,209	-0,242	0,286	kNm/m
Moment aufgrund Wasserfüllung	M_w	0,000	0,000	0,000	kNm/m
Moment aufgrund Wasserdruck/Innendruck	M_{pw}	-0,008	-0,008	-0,008	kNm/m
Summe der Momente	ΣM	0,549	-0,117	0,983	kNm/m

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Mittlerer Radius	r_m	842,23	842,23	842,23	mm
Normalkraft aufgrund vertikaler Gesamtbelastung	N_{qv}	0,819	-30,342	-0,819	kN/m
Normalkraft aufgrund Seitendruck	N_{qh}	-11,433	0,000	-11,433	kN/m
Normalkraft aufgrund horiz. Bettungsreaktionsdruck	N^*_{qh}	-14,816	0,000	-14,816	kN/m
Normalkraft aufgrund Eigengewicht	N_g	0,163	-1,025	-0,163	kN/m
Normalkraft aufgrund Wasserfüllung	N_w	0,000	0,000	0,000	kN/m
Normalkraft aufgrund Wasserdruck/Innendruck	N_{pw}	-68,542	-68,542	-68,542	kN/m
Summe der Normalkräfte	ΣN	-93,808	-99,909	-95,772	kN/m

3.2.6 Nachweise Kurzzeit

3.2.6.1 Dehnungsnachweis (bei minimalem Grundwasser)

$$\epsilon_{R,res} = \frac{|\epsilon_{qv,qh,qh*}| \cdot \bar{\epsilon}_R + |\epsilon_{sonst}| \cdot \epsilon_{R,L}}{|\epsilon_{qv,qh,qh*}| + |\epsilon_{sonst}|} \quad (9.01d)$$

Erforderlicher Sicherheitsbeiwert, Biegezugspannungen:	erf γ_{RBZ}	2,00	[-]
Erforderlicher Sicherheitsbeiwert, Biegedruckspannungen:	erf γ_{RBD}	2,00	[-]

Anzusetzende Biegezugfestigkeit	$f_{t,fl,res}$	---	---	---	N/mm ²
Anzusetzende Biegedruckfestigkeit	$f_{c,rad,res}$	---	---	---	N/mm ²

innen

Korrekturfaktor Krümmung innen:	α_{ki}	1,014	[-]
---------------------------------	---------------	-------	-----

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Dehnung aufgrund Erd- u. Verkehrslasten	$\epsilon_{qv,qh,qh*}$	0,011	-0,006	0,031	%
Dehnung aufgrund anderer Lasten	ϵ_{sonst}	0,008	-0,009	0,011	%
Dehnung gesamt	ϵ	0,019	-0,016	0,042	%
Anzusetzende Randfasergrenzdehnung	$\epsilon_{R,res}$	1,35	1,35	1,35	%
Sicherheitsbeiwert Biegezug:	γ_{BZ}	70,112	---	32,132	[-]
Sicherheitsbeiwert Biegedruck:	γ_{BD}	---	86,513	---	[-]

außen

Korrekturfaktor Krümmung außen:	α_{ka}	0,986	[-]
---------------------------------	---------------	-------	-----

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Dehnung aufgrund Erd- u. Verkehrslasten	$\epsilon_{qv,qh,qh*}$	-0,028	-0,014	-0,049	%
Dehnung aufgrund anderer Lasten	ϵ_{sonst}	-0,008	0,009	-0,011	%
Dehnung gesamt	ϵ	-0,036	-0,005	-0,059	%
Anzusetzende Randfasergrenzdehnung	$\epsilon_{R,res}$	1,35	1,35	1,35	%
Sicherheitsbeiwert Biegezug:	γ_{BZ}	---	---	---	[-]
Sicherheitsbeiwert Biegedruck:	γ_{BD}	37,790	253,950	22,852	[-]

Alle errechneten Sicherheitsbeiwerte des Dehnungsnachweises sind ausreichend.

3.2.6.2 Dehnungsnachweis (bei maximalem Grundwasser)

$$\epsilon_{R,res} = \frac{|\epsilon_{qv,qh,qh*}| \cdot \bar{\epsilon}_R + |\epsilon_{sonst}| \cdot \epsilon_{R,L}}{|\epsilon_{qv,qh,qh*}| + |\epsilon_{sonst}|} \quad (9.01d)$$

Erforderlicher Sicherheitsbeiwert, Biegezugspannungen:	erf γ_{RBZ}	2,00	[-]
Erforderlicher Sicherheitsbeiwert, Biegedruckspannungen:	erf γ_{RBD}	2,00	[-]

Anzusetzende Biegezugfestigkeit	$f_{t,fl,res}$	---	---	---	N/mm ²
Anzusetzende Biegedruckfestigkeit	$f_{c,rad,res}$	---	---	---	N/mm ²

innen

Korrekturfaktor Krümmung innen:	α_{ki}	1,014	[-]
---------------------------------	---------------	-------	-----

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Dehnung aufgrund Erd- u. Verkehrslasten	$\epsilon_{qv,qh,qh*}$	0,010	-0,004	0,023	%
Dehnung aufgrund anderer Lasten	ϵ_{sonst}	-0,007	-0,025	-0,005	%

Dehnung gesamt	ε	0,002	-0,029	0,018	%
Anzusetzende Randfasergrenzdehnung	$\varepsilon_{R,res}$	1,35	1,35	1,35	%
Sicherheitsbeiwert Biegezug:	γ_{BZ}	576,018	---	74,050	[-]
Sicherheitsbeiwert Biegedruck:	γ_{BD}	---	46,915	---	[-]

außen

Korrekturfaktor Krümmung außen:			α_{ka}	0,986	[-]
		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Dehnung aufgrund Erd- u. Verkehrslasten	ε_{qv,qh,qh^*}	-0,021	-0,009	-0,034	%
Dehnung aufgrund anderer Lasten	ε_{sonst}	-0,022	-0,006	-0,025	%
Dehnung gesamt	ε	-0,043	-0,015	-0,059	%
Anzusetzende Randfasergrenzdehnung	$\varepsilon_{R,res}$	1,35	1,35	1,35	%
Sicherheitsbeiwert Biegezug:	γ_{BZ}	---	---	---	[-]
Sicherheitsbeiwert Biegedruck:	γ_{BD}	31,545	88,292	22,845	[-]

Alle errechneten Sicherheitsbeiwerte des Dehnungsnachweises sind ausreichend.

3.2.6.3 Verformungsnachweis (bei minimalem Grundwasser)

Rechenmodus:	linear	
Verhältnis:	$I/(A \cdot rm^2)$	0,00015 [-]
Verhältnis ' $I/(A \cdot rm^2) \cdot \kappa \sim Q$ ':	$I/(A \cdot rm^2) \cdot \kappa_Q$	0,00018 [-]

	q_v	q_h	q_{h^*}	
Verformungsbeiwert für Biegemomente	c_v	-0,0893	0,0833	0,0640 [-]

Eine Anpassung der Verformungsbeiwerte für Biegemomente nach ATV-DVWK-A 127 Tabelle 10a unterbleibt, da Gl. (6.19a) und Gl. (6.19b) $< 0,001$

Resultierender Verformungsbeiwert	c'_v	-0,0893	0,0833	0,0640 [-]
Resultierender Verformungsbeiwert	c'_h	0,0891	-0,0833	-0,0658 [-]

Vertikale Durchmesseränderung:	Δd_v	4,76	mm
Horizontale Durchmesseränderung:	Δd_h	2,96	mm

Relative vertikale Verformung (aus Belastung, elastisch, Typ B):	$\delta_{v,B}$	0,28	%
--	----------------	------	---

Zulässige Verformung:	zul δ_v	6,00	%
-----------------------	----------------	------	---

Die errechnete Verformung ist kleiner als die zulässige Verformung.

3.2.6.4 Verformungsnachweis (bei maximalem Grundwasser)

Rechenmodus:	linear	
Verhältnis:	$I/(A \cdot rm^2)$	0,00015 [-]
Verhältnis ' $I/(A \cdot rm^2) \cdot \kappa \sim Q$ ':	$I/(A \cdot rm^2) \cdot \kappa_Q$	0,00018 [-]

	q_v	q_h	q_{h^*}	
Verformungsbeiwert für Biegemomente	c_v	-0,0893	0,0833	0,0640 [-]

Eine Anpassung der Verformungsbeiwerte für Biegemomente nach ATV-DVWK-A 127 Tabelle 10a unterbleibt, da Gl. (6.19a) und Gl. (6.19b) $< 0,001$

Resultierender Verformungsbeiwert	c'_v	-0,0893	0,0833	0,0640 [-]
Resultierender Verformungsbeiwert	c'_h	0,0891	-0,0833	-0,0658 [-]

Vertikale Durchmesseränderung:	Δd_v	3,46	mm
Horizontale Durchmesseränderung:	Δd_h	2,16	mm

Relative vertikale Verformung (aus Belastung, elastisch, Typ B):	$\delta_{v,B}$	0,21	%
--	----------------	------	---

Zulässige Verformung:	zul δ_v	6,00	%
-----------------------	----------------	------	---

Die errechnete Verformung ist kleiner als die zulässige Verformung.

3.2.7 Nachweise Langzeit

3.2.7.1 Dehnungsnachweis (bei minimalem Grundwasser)

$$\epsilon_{R,res} = \frac{|\epsilon_{qv,qh,qh*}| \cdot \bar{\epsilon}_R + |\epsilon_{sonst}| \cdot \epsilon_{R,L}}{|\epsilon_{qv,qh,qh*}| + |\epsilon_{sonst}|} \quad (9.01d)$$

Erforderlicher Sicherheitsbeiwert, Biegezugspannungen:	erf γ_{RBZ}	2,00	[-]
Erforderlicher Sicherheitsbeiwert, Biegedruckspannungen:	erf γ_{RBD}	2,00	[-]

Anzusetzende Biegezugfestigkeit	$f_{t,fl,res}$	---	---	---	N/mm ²
Anzusetzende Biegedruckfestigkeit	$f_{c,rad,res}$	---	---	---	N/mm ²

innen

Korrekturfaktor Krümmung innen:	α_{ki}	1,014	[-]
---------------------------------	---------------	-------	-----

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Dehnung aufgrund Erd- u. Verkehrslasten	$\epsilon_{qv,qh,qh*}$	0,012	-0,004	0,043	%
Dehnung aufgrund anderer Lasten	ϵ_{sonst}	0,015	-0,017	0,020	%
Dehnung gesamt	ϵ	0,026	-0,021	0,062	%
Anzusetzende Randfasergrenzdehnung	$\epsilon_{R,res}$	0,87	0,84	0,90	%
Sicherheitsbeiwert Biegezug:	γ_{BZ}	33,240	---	14,495	[-]
Sicherheitsbeiwert Biegedruck:	γ_{BD}	---	40,207	---	[-]

außen

Korrekturfaktor Krümmung außen:	α_{ka}	0,986	[-]
---------------------------------	---------------	-------	-----

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Dehnung aufgrund Erd- u. Verkehrslasten	$\epsilon_{qv,qh,qh*}$	-0,038	-0,028	-0,070	%
Dehnung aufgrund anderer Lasten	ϵ_{sonst}	-0,014	0,016	-0,019	%
Dehnung gesamt	ϵ	-0,052	-0,012	-0,089	%
Anzusetzende Randfasergrenzdehnung	$\epsilon_{R,res}$	0,91	0,90	0,92	%
Sicherheitsbeiwert Biegezug:	γ_{BZ}	---	---	---	[-]
Sicherheitsbeiwert Biegedruck:	γ_{BD}	17,446	77,699	10,273	[-]

Alle errechneten Sicherheitsbeiwerte des Dehnungsnachweises sind ausreichend.

3.2.7.2 Dehnungsnachweis (bei maximalem Grundwasser)

$$\epsilon_{R,res} = \frac{|\epsilon_{qv,qh,qh*}| \cdot \bar{\epsilon}_R + |\epsilon_{sonst}| \cdot \epsilon_{R,L}}{|\epsilon_{qv,qh,qh*}| + |\epsilon_{sonst}|} \quad (9.01d)$$

Erforderlicher Sicherheitsbeiwert, Biegezugspannungen:	erf γ_{RBZ}	2,00	[-]
Erforderlicher Sicherheitsbeiwert, Biegedruckspannungen:	erf γ_{RBD}	2,00	[-]

Anzusetzende Biegezugfestigkeit	$f_{t,fl,res}$	---	---	---	N/mm ²
Anzusetzende Biegedruckfestigkeit	$f_{c,rad,res}$	---	---	---	N/mm ²

innen

Korrekturfaktor Krümmung innen:	α_{ki}	1,014	[-]
---------------------------------	---------------	-------	-----

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Dehnung aufgrund Erd- u. Verkehrslasten	$\epsilon_{qv,qh,qh*}$	0,011	-0,002	0,029	%
Dehnung aufgrund anderer Lasten	ϵ_{sonst}	-0,014	-0,046	-0,009	%

Dehnung gesamt	ε	-0,003	-0,048	0,021	%
Anzusetzende Randfasergrenzdehnung	$\varepsilon_{R,res}$	0,91	0,83	0,97	%
Sicherheitsbeiwert Biegezug:	YBZ	---	---	47,021	[-]
Sicherheitsbeiwert Biegedruck:	YBD	287,132	17,132	---	[-]

außen

Korrekturfaktor Krümmung außen:			α_{ka}	0,986	[-]
		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Dehnung aufgrund Erd- u. Verkehrslasten	ε_{qv,qh,qh^*}	-0,026	-0,016	-0,045	%
Dehnung aufgrund anderer Lasten	ε_{sonst}	-0,042	-0,011	-0,047	%
Dehnung gesamt	ε	-0,068	-0,028	-0,092	%
Anzusetzende Randfasergrenzdehnung	$\varepsilon_{R,res}$	0,90	0,94	0,92	%
Sicherheitsbeiwert Biegezug:	YBZ	---	---	---	[-]
Sicherheitsbeiwert Biegedruck:	YBD	13,324	33,783	10,011	[-]

Alle errechneten Sicherheitsbeiwerte des Dehnungsnachweises sind ausreichend.

3.2.7.3 Verformungsnachweis (bei minimalem Grundwasser)

Rechenmodus:	linear	
Verhältnis:	$I/(A \cdot rm^2)$	0,00015 [-]
Verhältnis ' $I/(A \cdot rm^2) \cdot \kappa \sim Q'$ ':	$I/(A \cdot rm^2) \cdot \kappa_Q$	0,00018 [-]

	q_v	q_h	q_{h^*}	
Verformungsbeiwert für Biegemomente	c_v	-0,0893	0,0833	0,0640 [-]

Eine Anpassung der Verformungsbeiwerte für Biegemomente nach ATV-DVWK-A 127 Tabelle 10a unterbleibt, da Gl. (6.19a) und Gl. (6.19b) < 0,001

Resultierender Verformungsbeiwert	c'_v	-0,0893	0,0833	0,0640 [-]
Resultierender Verformungsbeiwert	c'_h	0,0891	-0,0833	-0,0658 [-]

Vertikale Durchmesseränderung:	Δd_v	5,78	mm
Horizontale Durchmesseränderung:	Δd_h	2,98	mm

Relative vertikale Verformung (aus Belastung, elastisch, Typ B):	$\delta_{v,B}$	0,34	%
--	----------------	------	---

Zulässige Verformung:	zul δ_v	6,00	%
-----------------------	----------------	------	---

Die errechnete Verformung ist kleiner als die zulässige Verformung.

3.2.7.4 Verformungsnachweis (bei maximalem Grundwasser)

Rechenmodus:	linear	
Verhältnis:	$I/(A \cdot rm^2)$	0,00015 [-]
Verhältnis ' $I/(A \cdot rm^2) \cdot \kappa \sim Q'$ ':	$I/(A \cdot rm^2) \cdot \kappa_Q$	0,00018 [-]

	q_v	q_h	q_{h^*}	
Verformungsbeiwert für Biegemomente	c_v	-0,0893	0,0833	0,0640 [-]

Eine Anpassung der Verformungsbeiwerte für Biegemomente nach ATV-DVWK-A 127 Tabelle 10a unterbleibt, da Gl. (6.19a) und Gl. (6.19b) < 0,001

Resultierender Verformungsbeiwert	c'_v	-0,0893	0,0833	0,0640 [-]
Resultierender Verformungsbeiwert	c'_h	0,0891	-0,0833	-0,0658 [-]

Vertikale Durchmesseränderung:	Δd_v	4,04	mm
Horizontale Durchmesseränderung:	Δd_h	2,18	mm

Relative vertikale Verformung (aus Belastung, elastisch, Typ B):	$\delta_{v,B}$	0,24	%
--	----------------	------	---

Zulässige Verformung:	zul δ_v	6,00	%
-----------------------	----------------	------	---

Die errechnete Verformung ist kleiner als die zulässige Verformung.

3.2.7.5 Nachweis Stabilität radial, linear (bei maximalem Grundwasser)

Erd- und Verkehrslasten

Rohrsteifigkeit:	\bar{S}_R	56.398	N/m ²
Horizontale Bettungssteifigkeit:	S_{Bh}	23,513	N/mm ²
Systemsteifigkeit, gewichtet:	$V_{RB,w}$	0,0024	[-]
Abminderungsfaktor Beullast bei Erd-/Verkehrslasten:	K_{v2}	0,88	[-]
Reibungswinkel in der Leitungszone:	$\phi'2$	35,000	°
Kritische vertikale Gesamtlast:	$krit\ q_v$	2.015,2	kN/m ²
Vertikale Gesamtlast:	q_v	36,03	kN/m ²
Beulsicherheitsbeiwert (vertikale Gesamtlast):	γ_{qv}	55,94	[-]

Wasserdruck + Unterdruck

Äußerer Wasserdruck:	p_a	79,70	kN/m ²
Unterdruck im Rohr:	p_{I-}	0,00	kN/m ²

Rohrsteifigkeit:	S_R	43.243	N/m ²
Systemsteifigkeit:	V_{RB}	0,0018	[-]
Mittlerer Radius zu Wanddicke:	r_m/s	23,69	[-]
Lokale Vorverformung:	$\delta_{v,l}$	1,0	%
Abminderungsfaktor aufgrund lokaler Vorverformung für Durchschlaglast bei äußerem Wasserdruck:	$K_{a1,pa}$	0,85	[-]
Relative vertikale Verformung (aus Belastung, elastisch, Typ B):	$\delta_{v,B}$	0,24	%
Vorverformung Typ A:	$\delta_{v,A}$	1,0	%
Vorverformung Gesamt:	δ_v	1,24	%
Abminderungsfaktor:	$K_{a2,pa}$	0,90	[-]
Abminderungsfaktor:	$K_{a,pa}$	0,77	[-]
Durchschlagsbeiwert:	$\alpha_{D,pa}$	19,456	[-]
Kritischer Druck:	$krit\ p_a$	646,148	kN/m ²
Wasserdruck + Unterdruck im Rohr:	p_{a+I-}	79,70	kN/m ²
Beulsicherheitsbeiwert Druck:	$\gamma_{Stab,pa}$	8,107	[-]

Superposition

Sicherheit Stabilität, radial:	$\gamma_{Stab,rad}$	7,08	[-]
Erforderlicher Sicherheitsbeiwert, Instabilität:	$erf\ \gamma_{stab}$	2,00	[-]

Der Stabilitätsnachweis ist erbracht.

3.2.7.6 Stabilitätsnachweis, nichtlinear (bei minimalem Grundwasser)

Der nichtlineare Stabilitätsnachweis entfällt, da $V_{RB} > 1.0$ (biegesteifes Rohr) oder relative vertikale Verformung $< 6\%$.

3.2.7.7 Stabilitätsnachweis, nichtlinear (bei maximalem Grundwasser)

Der nichtlineare Stabilitätsnachweis entfällt, da $V_{RB} > 1.0$ (biegesteifes Rohr) oder relative vertikale Verformung $< 6\%$.

3.2.7.8 Nachweis der Sicherheit gegen Versagen bei nicht vorwiegend ruhender Belastung

Nach Norm ist der dynamische Nachweis nicht notwendig (z.B. bei Straßenverkehrslasten $> 1,5\ m$).

Alle notwendigen Nachweise sind erbracht.

4 Statik nach ATV-DVWK-A 127, 3.Auflage: LF2: max. Überdeckung 6m; Betriebszustand

Titel der Teilstatik: LF2: max. Überdeckung 6m; Betriebszustand

Annahmen: Verlegung nach Flowtite Verlegeanleitung für erdverlegte Rohrleitungen bzw. DIN EN 1610/DWA-A 139;

- Verkehrsst: SLW60
- Grundwasser: max. 7,97m über Sohle
- Grabenbreite entspricht kleinstem ID Bestandskanal = 1,8m
- senkrechter Rohrgraben 90° (Ersatzansatz)
- E3-anstehender Boden: G1 mit 100% Proctordichte
- E2-Leitungszone: Ansatz G1 mit 97% nach Tab. 8 (A127)
- E1-Verfüllzone: Ansatz G1 mit 97% nach Tab 8 (A127)
- Auflagerwinkel 120°
- A4/B4

Schlussfolgerungen: Wir empfehlen, die Verdämmung des Ringraumes zwischen Bestandsrohr und Linerrohr nicht in einem Zug auszuführen. Um die Lagesicherheit und Beulbeanspruchung des Linerrohres gewährleisten zu können, ist eine mehrlagige Verdämmung des Ringraumes erforderlich. Die nachfolgenden Verdämmlagen dürfen dabei erst nach dem Erstarren der vorherigen Lagen eingebracht werden.

Berechnungsart:
Skizzen (Einbau/Rohr) in Ausdruck:

Nennsteifigkeit
Ja

4.1 Eingaben

4.1.1 Sicherheiten

Sicherheitsklasse:
Sicherheit Stabilität nach Tabelle 13:
Zulässige Verformung:
Behandlung von Innendruck:

A (Regelfall)
Inklusive Vorverformungen (2,0 / 1,6)
6% (Regelfall)
Volle Überlagerung mit Außenbelastung
(ATV-DVWK-A 127)
Nein (ATV-DVWK-A 127)
Nach Regelwerk
Nach Norm
Nein
DWA-A 161:2014 (nach Materialart)
Ja

Kleinere Biegedruck-Sicherheiten:
Nachweis bei nicht vorwiegend ruhender Belastung:
Berücksichtigung von dyn pvh*:
Berücksichtigung der Vorverformungen Typ A in Verformungsnachweis:
Behandlung Systemsteifigkeit VRB nach:
Rohrsteifigkeit nach Regelwerk:

4.1.2 Boden

Bodengruppe Verfüllung:
Berechnung E1:
Bodengruppe Einbettung:
Berechnung E20:
Bodengruppe anstehender Boden:
Berechnung E3:
Verdichtungsgrad E3:
E4 = 10 · E1:
Anwendung von Silotheorie:

G1
Tabelle 8 (A127)
G1
Tabelle 8 (A127)
G1
Verdichtungsgrad
D_{Pr,E3} 100,0 %
Ja
Automatisch

K2 nach Norm:

Ja

4.1.3 Belastung

Überdeckungshöhe:	h	6,00	m
Minimaler Grundwasserstand über Sohle:	h _{W,min}	0,00	m
Maximaler Grundwasserstand über Sohle:	h _{W,max}	7,97	m
Auftriebsnachweis führen:	Nein		
Wichte des Bodens:	γ _B	20,0	kN/m ³
Manuelle Angabe der Wichte des Bodens unter Auftrieb:	Nein		
Zusätzliche Flächenlast:	p ₀	0,0	kN/m ²
Innendruck, kurzzeitig wirkend:	P _{I,K}	0,00	bar
Innendruck, langfristig:	P _{I,L}	0,00	bar
Wasserfüllung (z.B. Staukanal):	Nein		
Eingabe Spezialfahrzeug:	Nein		
Verkehrslast:	Straße SLW 60 (mit Straßenaufbau)		
Ansatz horizontaler Belastungen aus Verkehr im Ermüdungsnachweis:	α _{qhT,dyn}	0,00	%

4.1.4 Einbau

Einbauweise:	Graben		
Grabenbreite in Scheitelhöhe:	b	1,80	m
Mindestgrabenbreite prüfen:	Nein		
Stärke der Bettungsschicht automatisch ermitteln:	Nein		
Lagenstärke der Bettungsschicht:	h _{BS}	0,10	m
Böschungswinkel:	β	90	°
Überschüttungsbedingung:	A4		
Einbettungsbedingung:	B4		
Auflagerart:	Lose		
Auflagerwinkel:	120°		
Relative Ausladung automatisch ermitteln:	Ja		
Untere Sockelhöhe vorgeben:	Nein		
Gesamt-Sockelhöhe:	h _s	0,00	m

4.1.5 Rohr mit definierter Nennsteifigkeit

Rohrauswahl aus Datenbank:	Ja
Rohrauswahl:	PN1 SN10000 DN1720
Rohr-Serie:	Hobas PN1 (VO)
Rohr ist Druckrohr:	Nein
Nennndruck:	PN 1 [bar]
Nennsteifigkeit:	SN 10000 [N/m ²]
Nennndurchmesser:	DN 1720 [mm]

4.1.6 Werte aus der Datenbank

Außendurchmesser:	d _a	1.720,0	mm
Gesamt-Wanddicke:	s	35,6	mm
Wichte des Rohrwerkstoffs:	γ _R	21,79	kN/m ³
Querkontraktionszahl:	v	0,30	[-]
Schwingbreite des Rohres:	Δσ _{rsk}	0,00	N/mm ²
Lokale Vorverformung:	δ _{v,l}	1,0	%
Grenzdehnung Biegezug nach Norm:	Ja		
Längsdruckfestigkeit, Kurzzeit:	f _{c,ax,K}	90,0	N/mm ²
Grenzdehnung für Längsdruck, Kurzzeit:	ε _{AxK}	0,7	%

Technical drawing of a vertical cylindrical component with a hemispherical base. The drawing shows a side view with dimensions and a cross-section.

Dimensions:

- Total height: 7970 mm
- Main cylindrical body height: 6000 mm
- Outer diameter: 1800 mm
- Inner diameter: 1720 mm
- Base thickness: 100 mm
- Top flange thickness: 430 mm
- Base radius: 900 mm (indicated by $2\alpha = 120^\circ$)

Labels:

- Top: E3 G1
- Middle: E1 G1
- Base: E2 G1, E4

4.2 Ergebnisse

4.2.1 Zwischenergebnisse Rohr

Innendurchmesser:	d_i	1.648,9	mm
Außendurchmesser:	d_a	1.720,0	mm
Mittlerer Radius:	r_m	842,23	mm
Wanddicke:	s	35,55	mm
Verhältnis Radius zu Wanddicke:	r_m/s	23,691	[-]
Korrekturfaktor Krümmung innen:	α_{ki}	1,014	[-]
Korrekturfaktor Krümmung außen:	α_{ka}	0,986	[-]
Lokale Vorverformung:	$\delta_{v,l}$	1,00	%
Vorverformung (Ovalisierung vor Last):	$\delta_{v,A}$	1,00	%
Radiale Profilfläche:	A_{rad}	35,55	mm ² /mm
Trägheitsabstand:	e	17,78	mm
Trägheitsmoment:	I	3.744,01	mm ⁴ /mm
Äußeres Widerstandsmoment:	W_a	210,63	mm ³ /mm
Inneres Widerstandsmoment:	W_i	210,63	mm ³ /mm
Flächenverhältnis:	κ_Q	1,2	[-]

4.2.1.1 Materialeigenschaften

		Kurzzeit	Langzeit	
Wichte des Rohrwerkstoffs	γ_R	21,8	21,8	kN/m ³
Querkontraktionszahl	ν	0,30	0,30	[-]
Elastizitätsmodul in Ringrichtung	$E_{R,rad}$	12.765,5	6.900,3	N/mm ²
Kriechverhältnis:	f_{creep}		1,85	[-]
Tabelle 3 Fußnote 13: Höhere Rechenwerte können zur Berechnung herangezogen werden, wenn diese für den eingesetzten Werkstoff nachgewiesen sind.				
Tabelle 3 Fußnote 34: Ermittelt aus dem Kurzzeitwert und dem Kriechverhältnis (2,0) mit Kennwerten für 2 Jahre zur Beschreibung des Langzeitverhaltens. Zulässig auch für den Langzeitnachweis für 50 Jahre. Die Prüfung erfolgt nach DIN EN 1228 (Kurzzeit) bzw. DIN EN 1225 (Langzeit).				

Rechenwert der relativen Bruchverformung	$\Delta d_{Bruch}/d_m$	15,0	9,0	%
--	------------------------	------	-----	---

$$\epsilon_R = 4,28 \cdot s/d_m \cdot \Delta d_{Bruch}/d_m$$

Rechenwert der Randfasergrenzdehnung Biegezug	ϵ_R	1,355	0,813	%
---	--------------	-------	-------	---

$$f_t = \frac{0,50 \cdot PN \cdot 4 \cdot 2 \cdot r_m}{h}$$

Ringzugfestigkeit	f_t	9,5	4,7	N/mm ²
Schwingbreite bei 2·10 ⁶ Lastspielen:	$\Delta\sigma_{rsk,2E6}$	n. def.		N/mm ²
Schwingbreite bei 5·10 ⁶ Lastspielen:	$\Delta\sigma_{rsk,5E6}$	n. def.		N/mm ²
Schwingbreite bei 1·10 ⁸ Lastspielen:	$\Delta\sigma_{rsk,1E8}$	n. def.		N/mm ²

4.2.1.2 Sicherheiten

Erforderlicher Sicherheitsbeiwert, Biegezugspannungen	erf γ_{RBZ}	2,00	2,00	[-]
Erforderlicher Sicherheitsbeiwert, Biegedruckspannungen	erf γ_{RBD}	2,00	2,00	[-]
Erforderlicher Sicherheitsbeiwert, Instabilität	erf γ_{stab}	2,00	2,00	[-]

4.2.2 Mindestgrabenbreite nach DIN EN 1610:2015-12

Die Mindestgrabenbreite nach DIN EN 1610 / DWA-A 139 wird nicht überprüft.

4.2.3 Zwischenergebnisse bei minimalem Grundwasser

4.2.3.1 Silotheorie

Erdlastbeiwert κ für Grabenlast (Silotheorie):	κ	0,387	[-]
Erdlastbeiwert κ_0 für Flächenlast (Silotheorie):	κ_0	0,097	[-]

4.2.3.2 Belastung

Grundwasserstand über Scheitel:	$h_{W,Scheitel}$	0,00	m
Vertikale Bodenspannung aufgrund Erdlast:	P_{Erd}	46,43	kN/m ²
Vertikale Bodenspannung aufgrund Erd- und Flächenlast:	P_E	46,43	kN/m ²
Spannung aufgrund Verkehrslast:	P_V	7,97	kN/m ²
Enthaltener Stoßfaktor:	ϕ	1,20	[-]

4.2.3.3 Boden-Verformungsmoduln EB

E-Modul Verfüllung unter Last:	$E_{1,\sigma}$	23,00	N/mm ²
--------------------------------	----------------	-------	-------------------

$$E_{3,\sigma} = \frac{40}{1} \cdot e^{-0,188(100 - D_{Pr})} \quad 3.01$$

E-Modul anstehender Boden:	$E_{3,\sigma}$	40,00	N/mm ²
E-Modul Einbettung (abgemindert):	$E_{2,\sigma}$	23,00	N/mm ²
E-Modul Einbettung unter Last:	$E_{20,\sigma}$	23,00	N/mm ²
Reduktionsfaktor für das Kriechen:	f_1	1,000	[-]
Verdichtungsgrad aus Tabelle 8:	$D_{pr,E20}$	0,97	[-]
Abminderungsfaktor E20 (Grundwasser):	f_2	1,000	[-]
Abminderungsfaktor E20 (Diagramm 5):	α_{B0}	1,000	[-]
Abminderungsfaktor E20 (enger Graben):	α_B	1,000	[-]
E-Modul Einbettung (abgemindert):	$E_{2,\sigma}$	23,00	N/mm ²
E-Modul Boden unter dem Rohr:	$E_{4,\sigma}$	230,00	N/mm ²

4.2.3.4 Bodensteifigkeiten

Hilfswert für horizontale Bettungssteifigkeit:	Δ_f	0,047	[-]
Korrekturfaktor für die horizontale Bettungssteifigkeit:	ζ	1,704	[-]
Horizontale Bettungssteifigkeit:	S_{Bh}	23,513	N/mm ²
Vertikale Bettungssteifigkeit:	S_{Bv}	23,000	N/mm ²

4.2.3.5 Auflagerwinkel, wirksame Ausladung und Reibungswinkel

Auflagerwinkel:	2α	120	°
Höhe Auflager von Auflagerwinkel bis UK Rohr:	t_r	0,430	m
Berechnete Ausladung:	a	1,00	[-]
Wirksame Ausladung:	a'	1,000	[-]
Innerer Reibungswinkel:	φ'	35,000	°
Wandreibungswinkel:	δ	35,000	°

Kurzzeit alle Lasten	Langzeit Erdlasten	Langzeit sonstige Lasten
	Verkehrslast	

4.2.3.6 Rohrwerkstoffkennwerte und Ringsteifigkeit

Rohrsteifigkeit	S_R	80.000	48.630	43.243	N/m ²
Rechenwert der Randfasergrenzdehnung	ϵ_R	1,355	0,892	0,813	%
Biegezug					
Elastizitätsmodul in Ringrichtung	$E_{R,rad}$	12.765,5	7.759,9	6.900,3	N/mm ²

4.2.3.7 Steifigkeitsverhältnisse

Systemsteifigkeit, gewichtet	$V_{RB,w}$	0,0034	0,0021	0,0018	[-]
Steifigkeitsverhältnis	V_S	0,5042	0,4006	---	[-]
Beiwert für die vertikale Verformung	c_v^*	-0,007	-0,005	---	[-]

4.2.3.8 Beiwerte

Erddruckbeiwert (Einbettung)	K_2	0,400	0,400	---	[-]
Beiwert für den Bettungsreaktionsdruck	K^*	1,288	1,313	---	[-]
Resultierender Verformungsbeiwert	c_h	0,0891	0,0891	---	[-]
Resultierender Verformungsbeiwert	$c_{h,qh}^*$	-0,0658	-0,0658	---	[-]
Beiwert für die vertikale Verformung	c_v^*	-0,007	-0,005	---	[-]

4.2.3.9 Konzentrationsfaktoren λ_R und λ_B

Maximaler Konzentrationsfaktor	$\max \lambda$	1,521	1,521	---	[-]
Beiwert für maximalen Konzentrationsfaktor	K'	0,908	0,899	---	[-]
Konzentrationsfaktor über Rohr, Startwert	λ_R	0,860	0,800	---	[-]
Konzentrationsfaktor über Rohr, unter Grabeneinfluss	λ_{RG}	0,998	0,997	---	[-]
Konzentrationsfaktor über Rohr, oberer Grenzwert	λ_{fo}	3,100	3,100	---	[-]
Konzentrationsfaktor über Rohr, unterer Grenzwert	λ_{fu}	0,374	0,374	---	[-]
Konzentrationsfaktor über Rohr, endgültiger Wert	λ_{RG}	0,998	0,997	---	[-]
Konzentrationsfaktor Boden	λ_B	1,047	1,067	---	[-]

4.2.3.10 Druckverteilung am Rohrumfang

		Kurzzeit alle Lasten	Langzeit Erdlasten Verkehrslast	Langzeit sonstige Lasten	
Vertikale Gesamtlast	q_v	54,30	54,26	---	kN/m ²
Seitendruck	q_h	26,32	26,69	---	kN/m ²
Bettungsreaktionsdruck (Erdlasten)	q_h^*	38,24	38,47	---	kN/m ²
Bettungsreaktionsdruck (Wasserfüllung)	q_{hw}^*	0,00	0,00	---	kN/m ²

4.2.4 Zwischenergebnisse bei maximalem Grundwasser

4.2.4.1 Silotheorie

Erddruckbeiwert κ für Grabenlast (Silotheorie):	κ	0,387	[-]
Erddruckbeiwert κ_0 für Flächenlast (Silotheorie):	κ_0	0,097	[-]

4.2.4.2 Belastung

Grundwasserstand über Scheitel:	$h_{W,Scheitel}$	6,00	m
Wichte Verfüllung unter Wasser:	γ'	11,00	kN/m ³
Vertikale Bodenspannung aufgrund Erdlast:	P_{Erd}	25,54	kN/m ²
Vertikale Bodenspannung aufgrund Erd- und Flächenlast:	P_E	25,54	kN/m ²
Spannung aufgrund Verkehrslast:	P_V	7,97	kN/m ²
Enthaltener Stoßfaktor:	ϕ	1,20	[-]

4.2.4.3 Boden-Verformungsmoduln EB

E-Modul Verfüllung unter Last:	$E_{1,\sigma}$	23,00	N/mm ²
--------------------------------	----------------	-------	-------------------

$$E_{3,\sigma} = \frac{40}{1} \cdot e^{-0,188(100 - D_{Pr})} \quad 3.01$$

E-Modul anstehender Boden:	$E_{3,\sigma}$	40,00	N/mm ²
E-Modul Einbettung (abgemindert):	$E_{2,\sigma}$	23,00	N/mm ²
E-Modul Einbettung unter Last:	$E_{20,\sigma}$	23,00	N/mm ²
Reduktionsfaktor für das Kriechen:	f_1	1,000	[-]
Verdichtungsgrad aus Tabelle 8:	$D_{pr,E20}$	0,97	[-]
Abminderungsfaktor E20 (Grundwasser):	f_2	1,000	[-]
Abminderungsfaktor E20 (Diagramm 5):	α_{B0}	1,000	[-]
Abminderungsfaktor E20 (enger Graben):	α_B	1,000	[-]

E-Modul Einbettung (abgemindert):	$E_{2,\sigma}$	23,00	N/mm ²
E-Modul Boden unter dem Rohr:	$E_{4,\sigma}$	230,00	N/mm ²

4.2.4.4 Bodensteifigkeiten

Hilfswert für horizontale Bettungssteifigkeit:	Δf	0,047	[-]
Korrekturfaktor für die horizontale Bettungssteifigkeit:	ζ	1,704	[-]
Horizontale Bettungssteifigkeit:	S_{Bh}	23,513	N/mm ²
Vertikale Bettungssteifigkeit:	S_{Bv}	23,000	N/mm ²

4.2.4.5 Auflagerwinkel, wirksame Ausladung und Reibungswinkel

Auflagerwinkel:	2α	120	°
Höhe Auflager von Auflagerwinkel bis UK Rohr:	t_r	0,430	m
Berechnete Ausladung:	a	1,00	[-]
Wirksame Ausladung:	a'	1,000	[-]
Innerer Reibungswinkel:	φ'	35,000	°
Wandreibungswinkel:	δ	35,000	°

Kurzzeit
alle Lasten

Langzeit
Erdlasten
Verkehrslast

Langzeit
sonstige
Lasten

4.2.4.6 Rohrwerkstoffkennwerte und Ringsteifigkeit

Rohrsteifigkeit	S_R	80.000	51.989	43.243	N/m ²
Rechenwert der Randfasergrenzdehnung	ε_R	1,355	0,942	0,813	%
Biegezug					
Elastizitätsmodul in Ringrichtung	$E_{R,rad}$	12.765,5	8.295,9	6.900,3	N/mm ²

4.2.4.7 Steifigkeitsverhältnisse

Systemsteifigkeit, gewichtet	$V_{RB,w}$	0,0034	0,0022	0,0018	[-]
Steifigkeitsverhältnis	V_S	0,5042	0,4144	---	[-]
Beiwert für die vertikale Verformung	c_v^*	-0,007	-0,005	---	[-]

4.2.4.8 Beiwerte

Erddruckbeiwert (Einbettung)	K_2	0,400	0,400	---	[-]
Beiwert für den Bettungsreaktionsdruck	K^*	1,288	1,310	---	[-]
Resultierender Verformungsbeiwert	$c'h$	0,0891	0,0891	---	[-]
Resultierender Verformungsbeiwert	$c'h_{qh^*}$	-0,0658	-0,0658	---	[-]
Beiwert für die vertikale Verformung	c_v^*	-0,007	-0,005	---	[-]

4.2.4.9 Konzentrationsfaktoren λ_R und λ_B

Maximaler Konzentrationsfaktor	$\max \lambda$	1,521	1,521	---	[-]
Beiwert für maximalen Konzentrationsfaktor	K'	0,908	0,901	---	[-]
Konzentrationsfaktor über Rohr, Startwert	λ_R	0,860	0,808	---	[-]
Konzentrationsfaktor über Rohr, unter Grabeneinfluss	λ_{RG}	0,998	0,997	---	[-]
Konzentrationsfaktor über Rohr, oberer Grenzwert	λ_{fo}	3,100	3,100	---	[-]
Konzentrationsfaktor über Rohr, unterer Grenzwert	λ_{fu}	0,374	0,374	---	[-]
Konzentrationsfaktor über Rohr, endgültiger Wert	λ_{RG}	0,998	0,997	---	[-]
Konzentrationsfaktor Boden	λ_B	1,047	1,064	---	[-]

4.2.4.10 Druckverteilung am Rohrumfang

		Kurzzeit alle Lasten	Langzeit Erdlasten Verkehrslast	Langzeit sonstige Lasten	
Vertikale Gesamtlast	q_v	33,46	33,44	---	kN/m ²
Seitendruck	q_h	14,48	14,65	---	kN/m ²

Bettungsreaktionsdruck (Erdlasten)	q^*_h	25,65	25,86	---	kN/m ²
Bettungsreaktionsdruck (Wasserfüllung)	q^*_{hw}	0,00	0,00	---	kN/m ²

4.2.5 Schnittkräfte

4.2.5.1 Schnittkräfte bei minimalem Grundwasser, Kurzzeit

Rerounding-Faktor (Abminderung Momente):		r			1,000 [-]
		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Mittlerer Radius	r_m	842,23	842,23	842,23	mm
Moment aufgrund vertikaler Gesamtbelastung	M_{qv}	10,054	-10,208	10,593	kNm/m
Moment aufgrund Seitendruck	M_{qh}	-4,667	4,667	-4,667	kNm/m
Moment aufgrund horiz. Bettungsreaktionsdruck	M^*_{qh}	-4,909	5,642	-4,909	kNm/m
Moment aufgrund Eigengewicht	M_g	0,209	-0,242	0,286	kNm/m
Moment aufgrund Wasserfüllung	M_w	0,000	0,000	0,000	kNm/m
Moment aufgrund Wasserdruck/Innendruck	M_{pw}	0,000	0,000	0,000	kNm/m
Summe der Momente	ΣM	0,686	-0,141	1,302	kNm/m

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Mittlerer Radius	r_m	842,23	842,23	842,23	mm
Normalkraft aufgrund vertikaler Gesamtbelastung	N_{qv}	1,235	-45,736	-1,235	kN/m
Normalkraft aufgrund Seitendruck	N_{qh}	-22,167	0,000	-22,167	kN/m
Normalkraft aufgrund horiz. Bettungsreaktionsdruck	N^*_{qh}	-18,582	0,000	-18,582	kN/m
Normalkraft aufgrund Eigengewicht	N_g	0,163	-1,025	-0,163	kN/m
Normalkraft aufgrund Wasserfüllung	N_w	0,000	0,000	0,000	kN/m
Normalkraft aufgrund Wasserdruck/Innendruck	N_{pw}	0,000	0,000	0,000	kN/m
Summe der Normalkräfte	ΣN	-39,351	-46,761	-42,147	kN/m

4.2.5.2 Schnittkräfte bei minimalem Grundwasser, Langzeit

Rerounding-Faktor (Abminderung Momente):		r			1,000 [-]
		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Mittlerer Radius	r_m	842,23	842,23	842,23	mm
Moment aufgrund vertikaler Gesamtbelastung	M_{qv}	10,046	-10,200	10,585	kNm/m
Moment aufgrund Seitendruck	M_{qh}	-4,733	4,733	-4,733	kNm/m
Moment aufgrund horiz. Bettungsreaktionsdruck	M^*_{qh}	-4,940	5,677	-4,940	kNm/m
Moment aufgrund Eigengewicht	M_g	0,209	-0,242	0,286	kNm/m
Moment aufgrund Wasserfüllung	M_w	0,000	0,000	0,000	kNm/m
Moment aufgrund Wasserdruck/Innendruck	M_{pw}	0,000	0,000	0,000	kNm/m
Summe der Momente	ΣM	0,582	-0,031	1,197	kNm/m

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Mittlerer Radius	r_m	842,23	842,23	842,23	mm
Normalkraft aufgrund vertikaler Gesamtbelastung	N_{qv}	1,234	-45,700	-1,234	kN/m
Normalkraft aufgrund Seitendruck	N_{qh}	-22,481	0,000	-22,481	kN/m
Normalkraft aufgrund horiz. Bettungsreaktionsdruck	N^*_{qh}	-18,697	0,000	-18,697	kN/m
Normalkraft aufgrund Eigengewicht	N_g	0,163	-1,025	-0,163	kN/m
Normalkraft aufgrund Wasserfüllung	N_w	0,000	0,000	0,000	kN/m
Normalkraft aufgrund Wasserdruck/Innendruck	N_{pw}	0,000	0,000	0,000	kN/m
Summe der Normalkräfte	ΣN	-39,781	-46,725	-42,575	kN/m

4.2.5.3 Schnittkräfte bei maximalem Grundwasser, Kurzzeit

Rerounding-Faktor (Abminderung Momente):		r			1,000 [-]
		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Mittlerer Radius	r_m	842,23	842,23	842,23	mm
Moment aufgrund vertikaler Gesamtbelastung	M_{qv}	6,194	-6,289	6,526	kNm/m
Moment aufgrund Seitendruck	M_{qh}	-2,567	2,567	-2,567	kNm/m
Moment aufgrund horiz. Bettungsreaktionsdruck	M^*_{qh}	-3,293	3,785	-3,293	kNm/m
Moment aufgrund Eigengewicht	M_g	0,209	-0,242	0,286	kNm/m
Moment aufgrund Wasserfüllung	M_w	0,000	0,000	0,000	kNm/m
Moment aufgrund Wasserdruck/Innendruck	M_{pw}	-0,008	-0,008	-0,008	kNm/m
Summe der Momente	ΣM	0,535	-0,187	0,943	kNm/m

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Mittlerer Radius	r_m	842,23	842,23	842,23	mm
Normalkraft aufgrund vertikaler Gesamtbelastung	N_{qv}	0,761	-28,177	-0,761	kN/m
Normalkraft aufgrund Seitendruck	N_{qh}	-12,192	0,000	-12,192	kN/m
Normalkraft aufgrund horiz. Bettungsreaktionsdruck	N^*_{qh}	-12,465	0,000	-12,465	kN/m
Normalkraft aufgrund Eigengewicht	N_g	0,163	-1,025	-0,163	kN/m
Normalkraft aufgrund Wasserfüllung	N_w	0,000	0,000	0,000	kN/m
Normalkraft aufgrund Wasserdruck/Innendruck	N_{pw}	-68,542	-68,542	-68,542	kN/m
Summe der Normalkräfte	ΣN	-92,275	-97,744	-94,123	kN/m

4.2.5.4 Schnittkräfte bei maximalem Grundwasser, Langzeit

Rerounding-Faktor (Abminderung Momente):		r			1,000 [-]
		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Mittlerer Radius	r_m	842,23	842,23	842,23	mm
Moment aufgrund vertikaler Gesamtbelastung	M_{qv}	6,190	-6,285	6,522	kNm/m
Moment aufgrund Seitendruck	M_{qh}	-2,598	2,598	-2,598	kNm/m
Moment aufgrund horiz. Bettungsreaktionsdruck	M^*_{qh}	-3,320	3,815	-3,320	kNm/m
Moment aufgrund Eigengewicht	M_g	0,209	-0,242	0,286	kNm/m
Moment aufgrund Wasserfüllung	M_w	0,000	0,000	0,000	kNm/m
Moment aufgrund Wasserdruck/Innendruck	M_{pw}	-0,008	-0,008	-0,008	kNm/m
Summe der Momente	ΣM	0,473	-0,122	0,881	kNm/m

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Mittlerer Radius	r_m	842,23	842,23	842,23	mm
Normalkraft aufgrund vertikaler Gesamtbelastung	N_{qv}	0,760	-28,160	-0,760	kN/m
Normalkraft aufgrund Seitendruck	N_{qh}	-12,340	0,000	-12,340	kN/m
Normalkraft aufgrund horiz. Bettungsreaktionsdruck	N^*_{qh}	-12,566	0,000	-12,566	kN/m
Normalkraft aufgrund Eigengewicht	N_g	0,163	-1,025	-0,163	kN/m
Normalkraft aufgrund Wasserfüllung	N_w	0,000	0,000	0,000	kN/m
Normalkraft aufgrund Wasserdruck/Innendruck	N_{pw}	-68,542	-68,542	-68,542	kN/m
Summe der Normalkräfte	ΣN	-92,524	-97,727	-94,371	kN/m

4.2.6 Nachweise Kurzzeit

4.2.6.1 Dehnungsnachweis (bei minimalem Grundwasser)

$$\epsilon_{R,res} = \frac{|\epsilon_{qv,qh,qh*}| \cdot \bar{\epsilon}_R + |\epsilon_{sonst}| \cdot \epsilon_{R,L}}{|\epsilon_{qv,qh,qh*}| + |\epsilon_{sonst}|} \quad (9.01d)$$

Erforderlicher Sicherheitsbeiwert, Biegezugspannungen: erf γ_{RBZ} 2,00 [-]
 Erforderlicher Sicherheitsbeiwert, Biegedruckspannungen: erf γ_{RBD} 2,00 [-]

Anzusetzende Biegezugfestigkeit $f_{t,fl,res}$ --- --- --- N/mm²
 Anzusetzende Biegedruckfestigkeit $f_{c,rad,res}$ --- --- --- N/mm²

innen

Korrekturfaktor Krümmung innen: α_{ki} 1,014 [-]

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Dehnung aufgrund Erd- u. Verkehrslasten	$\epsilon_{qv,qh,qh*}$	0,009	-0,006	0,029	%
Dehnung aufgrund anderer Lasten	ϵ_{sonst}	0,008	-0,009	0,011	%
Dehnung gesamt	ϵ	0,017	-0,016	0,040	%
Anzusetzende Randfasergrenzdehnung	$\epsilon_{R,res}$	1,35	1,35	1,35	%
Sicherheitsbeiwert Biegezug:	γ_{BZ}	78,694	---	34,026	[-]
Sicherheitsbeiwert Biegedruck:	γ_{BD}	---	86,812	---	[-]

außen

Korrekturfaktor Krümmung außen: α_{ka} 0,986 [-]

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Dehnung aufgrund Erd- u. Verkehrslasten	$\epsilon_{qv,qh,qh*}$	-0,026	-0,014	-0,047	%
Dehnung aufgrund anderer Lasten	ϵ_{sonst}	-0,008	0,009	-0,011	%
Dehnung gesamt	ϵ	-0,034	-0,005	-0,057	%
Anzusetzende Randfasergrenzdehnung	$\epsilon_{R,res}$	1,35	1,35	1,35	%
Sicherheitsbeiwert Biegezug:	γ_{BZ}	---	---	---	[-]
Sicherheitsbeiwert Biegedruck:	γ_{BD}	40,037	263,209	23,757	[-]

Alle errechneten Sicherheitsbeiwerte des Dehnungsnachweises sind ausreichend.

4.2.6.2 Dehnungsnachweis (bei maximalem Grundwasser)

$$\epsilon_{R,res} = \frac{|\epsilon_{qv,qh,qh*}| \cdot \bar{\epsilon}_R + |\epsilon_{sonst}| \cdot \epsilon_{R,L}}{|\epsilon_{qv,qh,qh*}| + |\epsilon_{sonst}|} \quad (9.01d)$$

Erforderlicher Sicherheitsbeiwert, Biegezugspannungen: erf γ_{RBZ} 2,00 [-]
 Erforderlicher Sicherheitsbeiwert, Biegedruckspannungen: erf γ_{RBD} 2,00 [-]

Anzusetzende Biegezugfestigkeit $f_{t,fl,res}$ --- --- --- N/mm²
 Anzusetzende Biegedruckfestigkeit $f_{c,rad,res}$ --- --- --- N/mm²

innen

Korrekturfaktor Krümmung innen: α_{ki} 1,014 [-]

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Dehnung aufgrund Erd- u. Verkehrslasten	$\epsilon_{qv,qh,qh*}$	0,007	-0,004	0,020	%
Dehnung aufgrund anderer Lasten	ϵ_{sonst}	-0,007	-0,025	-0,005	%

Dehnung gesamt	ε	0,000	-0,029	0,015	%
Anzusetzende Randfasergrenzdehnung	$\varepsilon_{R,res}$	1,35	1,35	1,35	%
Sicherheitsbeiwert Biegezug:	YBZ	---	---	91,374	[-]
Sicherheitsbeiwert Biegedruck:	YBD	7.757,891	47,367	---	[-]

außen

Korrekturfaktor Krümmung außen:			α_{ka}	0,986	[-]
		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Dehnung aufgrund Erd- u. Verkehrslasten	ε_{qv,qh,qh^*}	-0,017	-0,009	-0,030	%
Dehnung aufgrund anderer Lasten	ε_{sonst}	-0,022	-0,006	-0,025	%
Dehnung gesamt	ε	-0,040	-0,015	-0,055	%
Anzusetzende Randfasergrenzdehnung	$\varepsilon_{R,res}$	1,35	1,35	1,35	%
Sicherheitsbeiwert Biegezug:	YBZ	---	---	---	[-]
Sicherheitsbeiwert Biegedruck:	YBD	33,930	92,375	24,492	[-]

Alle errechneten Sicherheitsbeiwerte des Dehnungsnachweises sind ausreichend.

4.2.6.3 Verformungsnachweis (bei minimalem Grundwasser)

Rechenmodus:	linear			
Verhältnis:	$I/(A \cdot rm^2)$		0,00015	[-]
Verhältnis ' $I/(A \cdot rm^2) \cdot \kappa \sim Q$ ':	$I/(A \cdot rm^2) \cdot \kappa_Q$		0,00018	[-]

		q_v	q_h	q_{h^*}	
Verformungsbeiwert für Biegemomente	c_v	-0,0893	0,0833	0,0640	[-]

Eine Anpassung der Verformungsbeiwerte für Biegemomente nach ATV-DVWK-A 127 Tabelle 10a unterbleibt, da Gl. (6.19a) und Gl. (6.19b) < 0,001

Resultierender Verformungsbeiwert	c'_v	-0,0893	0,0833	0,0640	[-]
Resultierender Verformungsbeiwert	c'_h	0,0891	-0,0833	-0,0658	[-]

Vertikale Durchmesseränderung:	Δd_v	4,42	mm
Horizontale Durchmesseränderung:	Δd_h	2,74	mm

Relative vertikale Verformung (aus Belastung, elastisch, Typ B):	$\delta_{v,B}$	0,26	%
--	----------------	------	---

Zulässige Verformung:	zul δ_v	6,00	%
-----------------------	----------------	------	---

Die errechnete Verformung ist kleiner als die zulässige Verformung.

4.2.6.4 Verformungsnachweis (bei maximalem Grundwasser)

Rechenmodus:	linear			
Verhältnis:	$I/(A \cdot rm^2)$		0,00015	[-]
Verhältnis ' $I/(A \cdot rm^2) \cdot \kappa \sim Q$ ':	$I/(A \cdot rm^2) \cdot \kappa_Q$		0,00018	[-]

		q_v	q_h	q_{h^*}	
Verformungsbeiwert für Biegemomente	c_v	-0,0893	0,0833	0,0640	[-]

Eine Anpassung der Verformungsbeiwerte für Biegemomente nach ATV-DVWK-A 127 Tabelle 10a unterbleibt, da Gl. (6.19a) und Gl. (6.19b) < 0,001

Resultierender Verformungsbeiwert	c'_v	-0,0893	0,0833	0,0640	[-]
Resultierender Verformungsbeiwert	c'_h	0,0891	-0,0833	-0,0658	[-]

Vertikale Durchmesseränderung:	Δd_v	2,95	mm
Horizontale Durchmesseränderung:	Δd_h	1,84	mm

Relative vertikale Verformung (aus Belastung, elastisch, Typ B):	$\delta_{v,B}$	0,18	%
--	----------------	------	---

Zulässige Verformung:	zul δ_v	6,00	%
-----------------------	----------------	------	---

Die errechnete Verformung ist kleiner als die zulässige Verformung.

4.2.7 Nachweise Langzeit

4.2.7.1 Dehnungsnachweis (bei minimalem Grundwasser)

$$\varepsilon_{R,res} = \frac{|\varepsilon_{qv,qh,qh^*}| \cdot \bar{\varepsilon}_R + |\varepsilon_{sonst}| \cdot \varepsilon_{R,L}}{|\varepsilon_{qv,qh,qh^*}| + |\varepsilon_{sonst}|} \quad (9.01d)$$

Erforderlicher Sicherheitsbeiwert, Biegezugspannungen: erf γ_{RBZ} 2,00 [-]
 Erforderlicher Sicherheitsbeiwert, Biegedruckspannungen: erf γ_{RBD} 2,00 [-]

Anzusetzende Biegezugfestigkeit $f_{t,fl,res}$ --- --- --- N/mm²
 Anzusetzende Biegedruckfestigkeit $f_{c,rad,res}$ --- --- --- N/mm²

innen

Korrekturfaktor Krümmung innen: α_{ki} 1,014 [-]

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Dehnung aufgrund Erd- u. Verkehrslasten	ε_{qv,qh,qh^*}	0,009	-0,004	0,041	%
Dehnung aufgrund anderer Lasten	ε_{sonst}	0,015	-0,017	0,020	%
Dehnung gesamt	ε	0,023	-0,021	0,061	%
Anzusetzende Randfasergrenzdehnung	$\varepsilon_{R,res}$	0,84	0,83	0,87	%
Sicherheitsbeiwert Biegezug:	γ_{BZ}	36,241	---	14,230	[-]
Sicherheitsbeiwert Biegedruck:	γ_{BD}	---	39,798	---	[-]

außen

Korrekturfaktor Krümmung außen: α_{ka} 0,986 [-]

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Dehnung aufgrund Erd- u. Verkehrslasten	ε_{qv,qh,qh^*}	-0,037	-0,029	-0,070	%
Dehnung aufgrund anderer Lasten	ε_{sonst}	-0,014	0,016	-0,019	%
Dehnung gesamt	ε	-0,051	-0,013	-0,090	%
Anzusetzende Randfasergrenzdehnung	$\varepsilon_{R,res}$	0,87	0,87	0,88	%
Sicherheitsbeiwert Biegezug:	γ_{BZ}	---	---	---	[-]
Sicherheitsbeiwert Biegedruck:	γ_{BD}	17,074	65,267	9,763	[-]

Alle errechneten Sicherheitsbeiwerte des Dehnungsnachweises sind ausreichend.

4.2.7.2 Dehnungsnachweis (bei maximalem Grundwasser)

$$\varepsilon_{R,res} = \frac{|\varepsilon_{qv,qh,qh^*}| \cdot \bar{\varepsilon}_R + |\varepsilon_{sonst}| \cdot \varepsilon_{R,L}}{|\varepsilon_{qv,qh,qh^*}| + |\varepsilon_{sonst}|} \quad (9.01d)$$

Erforderlicher Sicherheitsbeiwert, Biegezugspannungen: erf γ_{RBZ} 2,00 [-]
 Erforderlicher Sicherheitsbeiwert, Biegedruckspannungen: erf γ_{RBD} 2,00 [-]

Anzusetzende Biegezugfestigkeit $f_{t,fl,res}$ --- --- --- N/mm²
 Anzusetzende Biegedruckfestigkeit $f_{c,rad,res}$ --- --- --- N/mm²

innen

Korrekturfaktor Krümmung innen: α_{ki} 1,014 [-]

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Dehnung aufgrund Erd- u. Verkehrslasten	ε_{qv,qh,qh^*}	0,008	-0,002	0,026	%
Dehnung aufgrund anderer Lasten	ε_{sonst}	-0,014	-0,046	-0,009	%

Dehnung gesamt	ε	-0,006	-0,048	0,018	%
Anzusetzende Randfasergrenzdehnung	$\varepsilon_{R,res}$	0,86	0,82	0,91	%
Sicherheitsbeiwert Biegezug:	γ_{BZ}	---	---	51,674	[-]
Sicherheitsbeiwert Biegedruck:	γ_{BD}	138,129	17,109	---	[-]

außen

Korrekturfaktor Krümmung außen:			α_{ka}	0,986	[-]
		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Dehnung aufgrund Erd- u. Verkehrslasten	ε_{qv,qh,qh^*}	-0,024	-0,017	-0,043	%
Dehnung aufgrund anderer Lasten	ε_{sonst}	-0,042	-0,011	-0,047	%
Dehnung gesamt	ε	-0,065	-0,028	-0,090	%
Anzusetzende Randfasergrenzdehnung	$\varepsilon_{R,res}$	0,87	0,90	0,88	%
Sicherheitsbeiwert Biegezug:	γ_{BZ}	---	---	---	[-]
Sicherheitsbeiwert Biegedruck:	γ_{BD}	13,303	31,772	9,826	[-]

Alle errechneten Sicherheitsbeiwerte des Dehnungsnachweises sind ausreichend.

4.2.7.3 Verformungsnachweis (bei minimalem Grundwasser)

Rechenmodus:	linear	
Verhältnis:	$I/(A \cdot \text{rm}^2)$	0,00015 [-]
Verhältnis ' $I/(A \cdot \text{rm}^2) \cdot \kappa \sim Q'$ ':	$I/(A \cdot \text{rm}^2) \cdot \kappa_Q$	0,00018 [-]

	q_v	q_h	q_{h^*}	
Verformungsbeiwert für Biegemomente	c_v	-0,0893	0,0833	0,0640 [-]

Eine Anpassung der Verformungsbeiwerte für Biegemomente nach ATV-DVWK-A 127 Tabelle 10a unterbleibt, da Gl. (6.19a) und Gl. (6.19b) < 0,001

Resultierender Verformungsbeiwert	c'_v	-0,0893	0,0833	0,0640 [-]
Resultierender Verformungsbeiwert	c'_h	0,0891	-0,0833	-0,0658 [-]

Vertikale Durchmesseränderung:	Δd_v	5,53	mm
Horizontale Durchmesseränderung:	Δd_h	2,76	mm

Relative vertikale Verformung (aus Belastung, elastisch, Typ B):	$\delta_{v,B}$	0,33	%
--	----------------	------	---

Zulässige Verformung:	zul δ_v	6,00	%
-----------------------	----------------	------	---

Die errechnete Verformung ist kleiner als die zulässige Verformung.

4.2.7.4 Verformungsnachweis (bei maximalem Grundwasser)

Rechenmodus:	linear	
Verhältnis:	$I/(A \cdot \text{rm}^2)$	0,00015 [-]
Verhältnis ' $I/(A \cdot \text{rm}^2) \cdot \kappa \sim Q'$ ':	$I/(A \cdot \text{rm}^2) \cdot \kappa_Q$	0,00018 [-]

	q_v	q_h	q_{h^*}	
Verformungsbeiwert für Biegemomente	c_v	-0,0893	0,0833	0,0640 [-]

Eine Anpassung der Verformungsbeiwerte für Biegemomente nach ATV-DVWK-A 127 Tabelle 10a unterbleibt, da Gl. (6.19a) und Gl. (6.19b) < 0,001

Resultierender Verformungsbeiwert	c'_v	-0,0893	0,0833	0,0640 [-]
Resultierender Verformungsbeiwert	c'_h	0,0891	-0,0833	-0,0658 [-]

Vertikale Durchmesseränderung:	Δd_v	3,58	mm
Horizontale Durchmesseränderung:	Δd_h	1,85	mm

Relative vertikale Verformung (aus Belastung, elastisch, Typ B):	$\delta_{v,B}$	0,21	%
--	----------------	------	---

Zulässige Verformung:	zul δ_v	6,00	%
-----------------------	----------------	------	---

Die errechnete Verformung ist kleiner als die zulässige Verformung.

4.2.7.5 Nachweis Stabilität radial, linear (bei maximalem Grundwasser)

Erd- und Verkehrslasten

Rohrsteifigkeit:	\bar{S}_R	51.989	N/m ²
Horizontale Bettungssteifigkeit:	S_{Bh}	23,513	N/mm ²
Systemsteifigkeit, gewichtet:	$V_{RB,w}$	0,0022	[-]
Abminderungsfaktor Beullast bei Erd-/Verkehrslasten:	K_{v2}	0,88	[-]
Reibungswinkel in der Leitungszone:	$\phi'2$	35,000	°
Kritische vertikale Gesamtlast:	$krit\ q_v$	1.934,8	kN/m ²
Vertikale Gesamtlast:	q_v	33,44	kN/m ²
Beulsicherheitsbeiwert (vertikale Gesamtlast):	γ_{qv}	57,87	[-]

Wasserdruck + Unterdruck

Äußerer Wasserdruck:	p_a	79,70	kN/m ²
Unterdruck im Rohr:	p_{I-}	0,00	kN/m ²

Rohrsteifigkeit:	S_R	43.243	N/m ²
Systemsteifigkeit:	V_{RB}	0,0018	[-]
Mittlerer Radius zu Wanddicke:	r_m/s	23,69	[-]
Lokale Vorverformung:	$\delta_{v,l}$	1,0	%
Abminderungsfaktor aufgrund lokaler Vorverformung für Durchschlaglast bei äußerem Wasserdruck:	$K_{a1,pa}$	0,85	[-]
Relative vertikale Verformung (aus Belastung, elastisch, Typ B):	$\delta_{v,B}$	0,21	%
Vorverformung Typ A:	$\delta_{v,A}$	1,0	%
Vorverformung Gesamt:	δ_v	1,21	%
Abminderungsfaktor:	$K_{a2,pa}$	0,90	[-]
Abminderungsfaktor:	$K_{a,pa}$	0,77	[-]
Durchschlagsbeiwert:	$\alpha_{D,pa}$	19,456	[-]
Kritischer Druck:	$krit\ p_a$	647,547	kN/m ²
Wasserdruck + Unterdruck im Rohr:	p_{a+I-}	79,70	kN/m ²
Beulsicherheitsbeiwert Druck:	$\gamma_{Stab,pa}$	8,125	[-]

Superposition

Sicherheit Stabilität, radial:	$\gamma_{Stab,rad}$	7,12	[-]
Erforderlicher Sicherheitsbeiwert, Instabilität:	$erf\ \gamma_{stab}$	2,00	[-]

Der Stabilitätsnachweis ist erbracht.

4.2.7.6 Stabilitätsnachweis, nichtlinear (bei minimalem Grundwasser)

Der nichtlineare Stabilitätsnachweis entfällt, da $V_{RB} > 1.0$ (biegesteifes Rohr) oder relative vertikale Verformung $< 6\%$.

4.2.7.7 Stabilitätsnachweis, nichtlinear (bei maximalem Grundwasser)

Der nichtlineare Stabilitätsnachweis entfällt, da $V_{RB} > 1.0$ (biegesteifes Rohr) oder relative vertikale Verformung $< 6\%$.

4.2.7.8 Nachweis der Sicherheit gegen Versagen bei nicht vorwiegend ruhender Belastung

Nach Norm ist der dynamische Nachweis nicht notwendig (z.B. bei Straßenverkehrslasten $> 1,5\ m$).

Alle notwendigen Nachweise sind erbracht.