

Statische Berechnung

Bauvorhaben: TM 4-2019

Auftraggeber: IngSoft GmbH (intern)

Bearbeiter: IngSoft GmbH
Irrerstraße 17
90403 Nürnberg
www.ingsoft.de
Bearbeiter: Dipl.-Ing. (FH) Frederik Müller M.Eng.
frederik.mueller@ingsoft.de
+49 (911) 430879-27

Statik-Nr.: WID18580/19161

Datum: 11.02.2020

Beschreibung: Ermüdungsnachweis bei Stahlrohren - Nachweisformate im Vergleich
Unterschiede in der Eingabe siehe Register 'Metall'

Inhaltsangabe

1 Vortriebsrohr nach DWA-A 161, 2. Auflage: hü = 2 m Regelwerk	5
1.1 Eingaben	5
1.1.1 Vortriebsverfahren	5
1.1.2 Trasse und Vortriebskraft	5
1.1.3 Druckübertragungsring (DÜR)	5
1.1.4 Bodenkennwerte	5
1.1.5 Bodenverhalten	5
1.1.6 Lasten	6
1.1.7 Berechnungsoptionen	6
1.1.8 Vollwand/Profil-Rohr	6
1.1.8.1 Metall	6
1.1.8.2 Systemskizze	7
1.2 Ergebnisse	8
1.2.1 Teilsicherheitsbeiwerte (Einwirkungen)	8
1.2.2 Zwischenergebnisse Rohr	8
1.2.2.1 Materialeigenschaften	8
1.2.2.2 Sicherheiten	8
1.2.2.3 Überprüfung der Mindestwanddicke	8
1.2.3 Zwischenergebnisse Boden	9
1.2.4 Betriebszustand	9
1.2.4.1 Belastungen Betriebszustand	9
1.2.4.2 Schnittkräfte Betriebszustand	10
1.2.4.3 Verformungsnachweis Betriebszustand	10
1.2.4.4 Beulnachweis Betriebszustand	10
1.2.4.5 Spannungsnachweis Betriebszustand	11
1.2.4.6 Nachweis gegen Ermüden unter nicht vorwiegend ruhender Belastung	11
2 Vortriebsrohr nach DWA-A 161, 2. Auflage: hü = 2 m DWA Tab. 22	13
2.1 Eingaben	13
2.1.1 Vortriebsverfahren	13
2.1.2 Trasse und Vortriebskraft	13
2.1.3 Druckübertragungsring (DÜR)	13
2.1.4 Bodenkennwerte	13
2.1.5 Bodenverhalten	13
2.1.6 Lasten	14
2.1.7 Berechnungsoptionen	14
2.1.8 Vollwand/Profil-Rohr	14
2.1.8.1 Metall	14
2.1.8.2 Systemskizze	15
2.2 Ergebnisse	16

2.2.1 Teilsicherheitsbeiwerte (Einwirkungen)	16
2.2.2 Zwischenergebnisse Rohr	16
2.2.2.1 Materialeigenschaften	16
2.2.2.2 Sicherheiten	16
2.2.2.3 Überprüfung der Mindestwanddicke	16
2.2.3 Zwischenergebnisse Boden	17
2.2.4 Betriebszustand	17
2.2.4.1 Belastungen Betriebszustand	17
2.2.4.2 Schnittkräfte Betriebszustand	18
2.2.4.3 Verformungsnachweis Betriebszustand	18
2.2.4.4 Beulnachweis Betriebszustand	18
2.2.4.5 Spannungsnachweis Betriebszustand	19
2.2.4.6 Nachweis gegen Ermüden unter nicht vorwiegend ruhender Belastung	19
3 Vortriebsrohr nach DWA-A 161, 2. Auflage: hü = 2 m Bahn TM	21
3.1 Eingaben	21
3.1.1 Vortriebsverfahren	21
3.1.2 Trasse und Vortriebskraft	21
3.1.3 Druckübertragungsring (DÜR)	21
3.1.4 Bodenkennwerte	21
3.1.5 Bodenverhalten	21
3.1.6 Lasten	22
3.1.7 Berechnungsoptionen	22
3.1.8 Vollwand/Profil-Rohr	22
3.1.8.1 Metall	22
3.1.8.2 Systemskizze	23
3.2 Ergebnisse	24
3.2.1 Teilsicherheitsbeiwerte (Einwirkungen)	24
3.2.2 Zwischenergebnisse Rohr	24
3.2.2.1 Materialeigenschaften	24
3.2.2.2 Sicherheiten	24
3.2.2.3 Überprüfung der Mindestwanddicke	24
3.2.3 Zwischenergebnisse Boden	25
3.2.4 Betriebszustand	25
3.2.4.1 Belastungen Betriebszustand	25
3.2.4.2 Schnittkräfte Betriebszustand	26
3.2.4.3 Verformungsnachweis Betriebszustand	26
3.2.4.4 Beulnachweis Betriebszustand	26
3.2.4.5 Spannungsnachweis Betriebszustand	27
3.2.4.6 Nachweis gegen Ermüden unter nicht vorwiegend ruhender Belastung	27
4 Vortriebsrohr nach DWA-A 161, 2. Auflage: hü = 1,2 m	29
4.1 Eingaben	29
4.1.1 Vortriebsverfahren	29
4.1.2 Trasse und Vortriebskraft	29
4.1.3 Druckübertragungsring (DÜR)	29
4.1.4 Bodenkennwerte	29
4.1.5 Bodenverhalten	29



4.1.6 Lasten	30
4.1.7 Berechnungsoptionen	30
4.1.8 Vollwand/Profil-Rohr	30
4.1.8.1 Metall	30
4.1.8.2 Systemskizze	31
4.2 Ergebnisse	32
4.2.1 Teilsicherheitsbeiwerte (Einwirkungen)	32
4.2.2 Zwischenergebnisse Rohr	32
4.2.2.1 Materialeigenschaften	32
4.2.2.2 Sicherheiten	32
4.2.2.3 Überprüfung der Mindestwanddicke	32
4.2.3 Zwischenergebnisse Boden	33
4.2.4 Betriebszustand	33
4.2.4.1 Belastungen Betriebszustand	33
4.2.4.2 Schnittkräfte Betriebszustand	34
4.2.4.3 Verformungsnachweis Betriebszustand	34
4.2.4.4 Beulnachweis Betriebszustand	34
4.2.4.5 Spannungsnachweis Betriebszustand	35
4.2.4.6 Nachweis gegen Ermüden unter nicht vorwiegend ruhender Belastung	35
5 Statik nach ATV-DVWK-A 127, 3.Auflage: Grabenverlegung Stahlrohr OHNE TM	37
5.1 Eingaben	37
5.1.1 Sicherheiten	37
5.1.2 Boden	37
5.1.3 Belastung	37
5.1.4 Einbau	37
5.1.5 Vollwand/Profil-Rohr	38
5.1.5.1 Metall	38
5.2 Ergebnisse	39
5.2.1 Zwischenergebnisse Rohr	39
5.2.1.1 Materialeigenschaften	39
5.2.1.2 Sicherheiten	39
5.2.1.3 Mindestgrabenbreite nach DIN EN 1610:2015-12	39
5.2.2 Zwischenergebnisse	39
5.2.2.1 Silotheorie	39
5.2.2.2 Belastung	39
5.2.2.3 Boden-Verformungsmoduln EB	39
5.2.2.4 Bodensteifigkeiten	40
5.2.2.5 Auflagerwinkel, wirksame Ausladung und Reibungswinkel	40
5.2.2.6 Rohrwerkstoffkennwerte und Ringsteifigkeit	40
5.2.2.7 Steifigkeitsverhältnisse	40
5.2.2.8 Beiwerte	40
5.2.2.9 Konzentrationsfaktoren λ_R und λ_B	40
5.2.2.10 Druckverteilung am Rohrumfang	40
5.2.3 Schnittkräfte , Langzeit	41
5.2.4 Nachweise Langzeit	41
5.2.4.1 Spannungsnachweis	41
5.2.4.2 Verformungsnachweis	42
5.2.4.3 Stabilitätsnachweis, linear:	42
5.2.4.4 Nachweis Stabilität radial, linear	42
5.2.4.5 Stabilitätsnachweis, nichtlinear	43
5.2.4.6 Nachweis der Sicherheit gegen Versagen bei nicht vorwiegend ruhender	43

1 Vortriebsrohr nach DWA-A 161, 2. Auflage: hü = 2 m Regelwerk

Die Korrekturen vom Mai und Oktober 2017 sind berücksichtigt. TM 4-2019 (Ermüden bei Vortriebsrohren aus Stahl unter Bahnlasten) ist umgesetzt.

Titel der Berechnung: hü = 2 m Regelwerk

Annahmen: Überdeckungshöhe > 1,5 m
5x10⁶ anwendbar
"Regelwerk" entspricht dem aktuellen Stand der Technik, so wie ihn IngSoft derzeit interpretiert - und der sich in der Zukunft ändern kann

Berechnungsart: Vollwand-/Profilrohr
Nachzuweisende Zustände: Nur Betriebszustand
Einbauskizze in Ausdruck: Ja
Mindestschnittgrößen im Betriebszustand drucken: Ja

1.1 Eingaben

1.1.1 Vortriebsverfahren

Dynamischer Vortrieb: Nein
Verfahren: Manuelle Eingabe
Typ der Bodenverschiebung: Keine
Vollständige dauerhafte Ringraumverpressung: Nein
Einsatz von Stütz- oder Gleitmittel: Nein
Ringspalt: Andere Vortriebsverfahren, kontinuierliche Ringspaltstützung mit Dokumentation

1.1.2 Trasse und Vortriebskraft

Verlauf der Vortriebsstrecke: Gerade
Berechnung der unplanmäßigen Abweichungen von der Sollachse (gerader Vortrieb): Ohne Pilotvortrieb
Kombinationsbeiwert für Rohrabwinklungen: ψ 0,80 [-]
Vorgabe der Vortriebskraft: Nein
Freie Eingabe der Sicherheit für Längsrichtung: Nein
Kontrollierter Einbau: Nein

1.1.3 Druckübertragungsring (DÜR)

Art der Druckübertragung: Ohne Druckübertragungsring

1.1.4 Bodenkennwerte

Bodenbeschaffenheit: Lockergestein
Bodengruppe am Rohr: G1
Andere Bodengruppe oberhalb Rohrscheitel: Nein
Auflagerwinkel (Lockergestein): $2\alpha = 180^\circ$ (Regelfall)
Manuelle Angabe des inneren Reibungswinkel des Bodens: Nein
Manuelle Angabe der Wichte des Bodens: Nein

1.1.5 Bodenverhalten

Manuelle Angabe des Verformungsmoduls des Bodens: Nein
Anwendung von Silotheorie: Automatisch

Manuelle Angabe von f_1 , K_1 , δ und c :
 Lagerungsdichte am Rohr:
 Berücksichtigung des Konzentrationsfaktors λ :

Nein
 Mitteldicht bis dicht
 Nein

1.1.6 Lasten

Überdeckungshöhe:
 Zusätzliche Flächenlast:
 Teilsicherheitsbeiwert Wasseraußendruck:
 Grundwasserstand über Sohle:
 Innendruck (Betriebszustand):
 Rohr ist im Betrieb mit Flüssigkeit gefüllt:
 Freie Eingabe Sicherheitsbeiwert für Verkehrslasten:
 Verkehrslast:
 Anpassungsfaktor α_{Qi} LM71 (DIN EN 1991-2):
 Abminderungsfaktor dynamische Last manuell eingeben:

h	2,0	m
P_0	0,00	kN/m ²
$\gamma_{F,W}$	1,35	[-]
h_{GW}	0,0	m
$P_{I,0}$	0,0	bar
		Nein
		Nein
	Schiene LM71, eingleisig	
$\alpha_{Qi,LM71}$	1,00	[-]
		Nein

1.1.7 Berechnungsoptionen

Beulnachweis:
 Verformungsnachweis:
 Zulässige Verformung nach A161:
 Ermüdungsnachweis:
 Mindestschnittgrößen nach Norm:
 Vergleichsspannung Mindestschnittgrößen:

Nach A 127
 Nach A 161
 Ja
 Nach Regelwerk
 Ja
 Mit Bemessungswerten

1.1.8 Vollwand/Profil-Rohr

Rohrauswahl:

Vollwand

Material-Klasse:
 Vorverformung Typ A:
 Lokale Vorverformung:
 Auswahl der Eingaben:
 Außendurchmesser:
 Wandstärke:

Metall		
$\delta_{v,TypA}$	1,0	%
$\delta_{v,lokal}$	0,0	%
D_a und s		
d_a	404,0	mm
s	10,0	mm

Perforation:

Ohne Perforation

Äußerer Rücksprung:
 Innerer Rücksprung:
 Rohrlänge:
 Manuelle Vorgabe Δa_{cal} :
 Rohrende ist vorgespannt:
 Exzentrizitäten beim Rohranschluss:

$\Delta d_{a,min}$	0,0	mm
$\Delta d_{i,max}$	0,0	mm
L_R	3,00	m
		Nein
		Nein
$vorh\ e$	0,0	mm

1.1.8.1 Metall

Teilsicherheiten nach Norm:

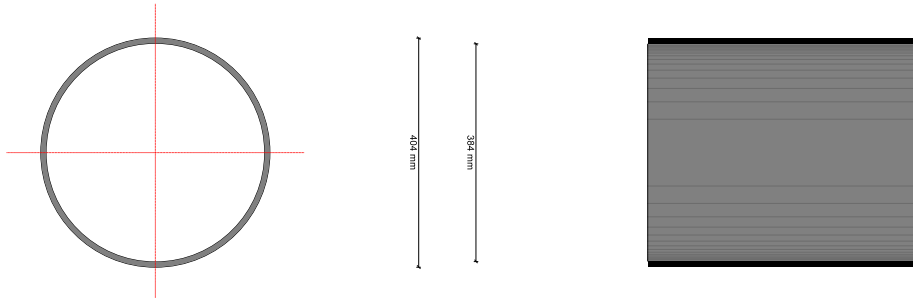
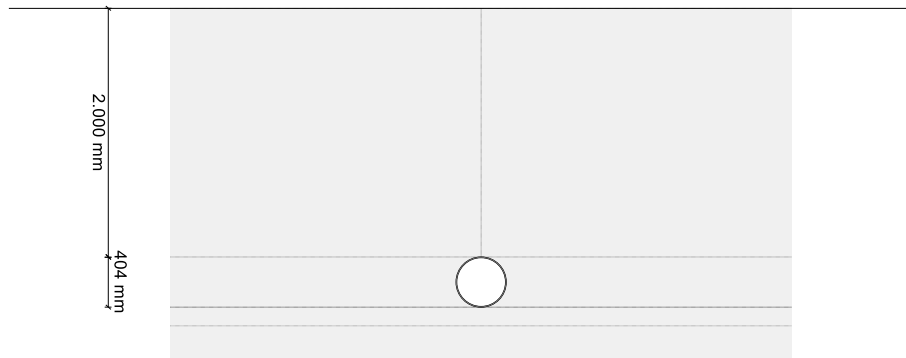
Ja

Auswahl Material:
 Dyn. Nachweis führen nach:
 Kerbfall nach EC 3-1-9, Bild 7.1:
 Stahlgüte DIN:
 Plastische Reserven nutzen:
 Angabe Grenzspannungen:
 Art des Metalls:

Nach Norm (DIN)
 Regelwerk
 71
 Baustahl S235 (EN 10025-2)
 Nein
 Ja
 Stahl-(ZM), geschweißte Rohre

1.1.8.2 Systemskizze

Schiene LM71, eingleisig



1.2 Ergebnisse

1.2.1 Teilsicherheitsbeiwerte (Einwirkungen)

Teilsicherheitsbeiwert für Verkehrslasten (quer zur Rohrachse):	YQ	1,35	[-]
Teilsicherheitsbeiwert für Innendruck (Druckrohre > 0,5 bar):	YF,Pi	1,50	[-]
Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkungen quer zur Rohrachse:	YF	1,35	[-]
Teilsicherheitsbeiwert Einwirkung längs der Rohrachse:	YF,ax	1,30	[-]

1.2.2 Zwischenergebnisse Rohr

Innendurchmesser:	d _i	384,0	mm
Außendurchmesser:	d _a	404,0	mm
Mittlerer Radius:	r _m	197,00	mm
Wanddicke:	s	10,00	mm
Verhältnis Radius zu Wanddicke:	r _m /s	19,700	[-]
Korrekturfaktor Krümmung innen:	α _{ki}	1,000	[-]
Korrekturfaktor Krümmung außen:	α _{ka}	1,000	[-]
Örtliche Vorverformung:	δ _{vl}	0,00	%
Vorverformung (Ovalisierung vor Last):	δ _{vg}	1,00	%
Axial wirksame Profilfläche:	A _{ax}	10,00	mm ² /mm
Radiale Profilfläche:	A _{rad}	10,00	mm ² /mm
Trägheitsabstand:	e	5,00	mm
Trägheitsmoment:	I	83,33	mm ⁴ /mm
Äußeres Widerstandsmoment:	W _a	16,67	mm ³ /mm
Inneres Widerstandsmoment:	W _i	16,67	mm ³ /mm
Flächenverhältnis:	KQ	1,2	[-]
Kleinster Außendurchmesser:	d _{a,min}	404	mm
Größter Innendurchmesser:	d _{i,max}	384	mm
Max. Abweichung Stirnflächen von Rechtwinkligkeit:	Δ _{a,cal}	3,2	mm
Länge des einzelnen Vortriebrohres:	LR	3,00	m

1.2.2.1 Materialeigenschaften

Wichte des Rohrwerkstoffs:	YR	78,5	kN/m ³
Querkontraktionszahl:	v	0,30	[-]
Elastizitätsmodul in Umfangsrichtung:	E _R	210.000,0	N/mm ²
Elastizitätsmodul in axialer Richtung:	E _{R,ax}	210.000,0	N/mm ²
Radiale Biegezugfestigkeit:	σ _{RBZ}	235,0	N/mm ²
Radiale Biegedruckfestigkeit:	σ _{RBD}	235,0	N/mm ²
Ringzugfestigkeit:	σ _{RZ}	235,0	N/mm ²
Schwingbreite bei 2·10 ⁶ Lastspielen:	2σ _{a,2E6}	71,0	N/mm ²
Schwingbreite bei 5·10 ⁶ Lastspielen:	2σ _{a,5E6}	52,3	N/mm ²
Schwingbreite bei 1·10 ⁸ Lastspielen:	2σ _{a,1E8}	28,8	N/mm ²
Grenzwert der Längsdruckfestigkeit:	σ _{LD}	235,0	N/mm ²

1.2.2.2 Sicherheiten

Teilsicherheitsbeiwert für Bauteilwiderstand längs der Rohrachse:	Y _{M,ax}	1,35	[-]
Teilsicherheitsbeiwert für Bauteilwiderstand quer zur Rohrachse:	Y _{M,rad}	1,10	[-]
Teilsicherheitsbeiwert für Bauteilwiderstand auf Stabilität:	Y _{M,stab}	1,85	[-]
Teilsicherheitsbeiwert für Bauteilwiderstand auf Stabilität bei Berücksichtigung der Rohrverformungen:	Y _{M,stab,red}	1,45	[-]

1.2.2.3 Überprüfung der Mindestwanddicke

Außendurchmesser:	d _a	404,0	mm
Mittlerer Radius:	r _m	197,00	mm
Wanddicke:	s	10,00	mm

Berechnete Mindestwanddicke bei vorgegebenen Radius r_m : min. t 6,30 mm

Die Mindestwanddicke nach 9.3.1 Tabelle 19 / 20 wird eingehalten bzw. übertroffen.

1.2.3 Zwischenergebnisse Boden

Wichte des Bodens:	γ_B	20,0	kN/m ³
Wichte des Bodens unter Auftrieb:	γ'_B	11,0	kN/m ³
Bodengruppe am Rohr:	G1		
Innerer Reibungswinkel am Rohr:	φ'_2	32,5	°
Grundwert des Verformungsmodul Boden:	E_0	50,00	N/mm ²
Faktor für die Lagerungsdichte/Konsistenz nach A161, Tabelle 3/4:	f_1	0,60	[-]
Auflockerungsfaktor nach A161, Tabelle 5:	f_2	0,80	[-]
Innerer Reibungswinkel über Rohrscheitel:	φ'_1	32,5	°
Spannungsexponent:	z	0,4	[-]
Hinweis zur Silotheorie:	$\kappa = 1$, da keine Bodenverschiebungen stattfinden.		
Berücksichtigung des Konzentrationsfaktors λF notwendig:	Ja		
Konzentrationsfaktor:	λ	1,000	[-]
Basis-Erddruckverhältnis unter Rohrscheitel:	$K_{2,0}$	0,46	[-]
Erddruckverhältnis unter Rohrscheitel, Bauzustand:	$K_{2,Bau}$	0,37	[-]
Erddruckverhältnis unter Rohrscheitel, Endzustand:	$K_{2,End}$	0,46	[-]

1.2.4 Betriebszustand

1.2.4.1 Belastungen Betriebszustand

Stoßbeiwert:	Φ_2	1,67	[-]
Stoßbeiwert:	red Φ_2	1,57	[-]
Anpassungsfaktor α_{Qi} LM71 (DIN EN 1991-2):	$\alpha_{Qi,LM71}$	1,00	[-]
Einfache Bodenspannung aus Verkehr:	p	43,50	kN/m ²
Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Scheitelhöhe:	p_T	68,30	kN/m ²
Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Kämpferhöhe (ohne φ):	p_K	41,68	kN/m ²
Erddruckverhältnis unter Rohrscheitel:	K_2	0,46	[-]
Horizontale Bodenspannung aus Verkehr:	$p_{T,h}$	24,78	kN/m ²
Vertikale Bodenspannung in Rohrscheitelebene:	p_{Ev}	40,000	kN/m ²
Wirksame vertikale Bodenspannung in Rohrscheitelebene:	q_{Ev}	40,000	kN/m ²
Vertikale Gesamt-Bodenspannung in Rohrscheitelebene:	$q_{Ges,v}$	108,295	kN/m ²
Die Erddruckverteilung am Rohr wird \cos^2 - bzw. \sin^2 -förmig angenommen.:	Nein		
Horizontale Bodenspannung am Rohr:	q_{Eh}	20,38	kN/m ²
Horizontale Gesamt-Bodenspannung am Rohr:	$q_{Ges,h}$	45,160	kN/m ²
Innerer Überdruck:	p_i	0,000	bar
Äußerer Überdruck über Rohrscheitel:	$p_{a,Sc}$	0,000	bar
Rohrsteifigkeit:	S_R	2.289	kN/m ²
Rohrsteifigkeit:	\bar{S}_R	2.289	kN/m ²
Normierender Bezugswert:	$\sigma_{B,0}$	100,0	kN/m ²
Spannungsabhängiger Erhöhungsfaktor:	f_3	1,00	[-]
Verformungsmodul Boden:	E_B	24,00	N/mm ²
Erddruckverhältnis unter Rohrscheitel:	K_2	0,46	[-]
Bettungssteifigkeit:	S_{Bh}	14,40	N/mm ²
Systemsteifigkeit:	V_{RB}	0,1590	[-]
Das Rohr-Bodensystem verhält sich biegeweich:	Ja		

Der seitliche Bettungsreaktionsdruck darf nach DWA-A 161, Kapitel 6.2.2 nur angesetzt werden, wenn das Rohr nach Abschluss des Vortriebes dauerhaft und vollständig verpresst wird.

1.2.4.2 Schnittkräfte Betriebszustand

Momente:		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Vertikale Belastung aus Erdüberdeckung	$M_{pEv,d}$	0,524	-0,524	0,524	kNm/m
Vertikale Belastung aus Verkehr	$M_{pTv,d}$	0,895	-0,895	0,895	kNm/m
Horizontale Belastung aus Verkehr	$M_{pTh,d}$	-0,325	0,325	-0,325	kNm/m
Horizontale Belastung aus Erdüberdeckung	$M_{pEh,d}$	-0,267	0,267	-0,267	kNm/m
Eigengewicht	$M_{g,d}$	0,016	-0,018	0,029	kNm/m
Wasserfüllung bis Rohrscheitel	$M_{w,d}$	0,000	0,000	0,000	kNm/m
Auftrieb (äußerer Wasserstand bis Scheitel)	$M_{a,d}$	0,000	0,000	0,000	kNm/m
Wasserdruck	$M_{pw,d}$	0,000	0,000	0,000	kNm/m
Bettungsreaktionsdruck Erdlast	$M_{qEh^*,d}$	0,000	0,000	0,000	kNm/m
Bettungsreaktionsdruck	$M_{qh^*,d}$	0,000	0,000	0,000	kNm/m
Summe der Momente	ΣM_d	0,843	-0,845	0,856	kNm/m

Normalkräfte:		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Vertikale Belastung aus Erdüberdeckung	$N_{pEv,d}$	0,000	-10,638	0,000	kN/m
Vertikale Belastung aus Verkehr	$N_{pTv,d}$	0,000	-18,163	0,000	kN/m
Horizontale Belastung aus Verkehr	$N_{pTh,d}$	-6,591	0,000	-6,591	kN/m
Horizontale Belastung aus Erdüberdeckung	$N_{pEh,d}$	-5,419	0,000	-5,419	kN/m
Eigengewicht	$N_{g,d}$	0,052	-0,328	-0,298	kN/m
Wasserfüllung bis Rohrscheitel	$N_{w,d}$	0,000	0,000	0,000	kN/m
Auftrieb (äußerer Wasserstand bis Scheitel)	$N_{a,d}$	0,000	0,000	0,000	kN/m
Wasserdruck	$N_{pw,d}$	0,000	0,000	0,000	kN/m
Bettungsreaktionsdruck Erdlast	$N_{qEh^*,d}$	0,000	0,000	0,000	kN/m
Bettungsreaktionsdruck Verkehr	$N_{qTh^*,d}$	0,000	0,000	0,000	kN/m
Bettungsreaktionsdruck	$N_{qh^*,d}$	0,000	0,000	0,000	kN/m
Summe der Normalkräfte	ΣN_d	-11,958	-29,129	-12,308	kN/m

1.2.4.3 Verformungsnachweis Betriebszustand

Verformungsbeiwert:	C_{v,qh^*}	0,0640	[-]
Verformungsbeiwert:	$C_{v,qv}$	-0,0833	[-]
Beiwert des Bettungsreaktionsdruckes:	K^*	0,371	[-]
Verformungsbeiwert:	c^*_v	-0,060	[-]
Vertikale Bodenspannung in Rohrscheitelebene:	p_{Ev}	40,000	kN/m ²
Vertikale Bodenspannung infolge Verkehrslast:	p_T	68,30	kN/m ²
Vertikale Gesamt-Bodenspannung in Rohrscheitelebene:	$q_{Ges,v}$	108,295	kN/m ²
Horizontale Bodenspannung am Rohr:	q_{Eh}	20,38	kN/m ²
Horizontale Bodenspannung infolge Verkehrslast:	p_{Th}	24,78	kN/m ²
Horizontale Gesamt-Bodenspannung am Rohr:	$q_{Ges,h}$	45,160	kN/m ²
Relative vertikale Durchmesseränderung:	δ_v	0,16	%
Zulässige vertikale Durchmesseränderung:	zul δ_v	2,00	%
Ausnutzungsgrad Verformung:	U_{δ_v}	8,2	%

Die errechnete Verformung ist kleiner als die zulässige Verformung.

1.2.4.4 Beulnachweis Betriebszustand

Teilsicherheitsbeiwert für Bauteilwiderstand auf Stabilität bei Berücksichtigung der Rohrverformungen:	$\gamma_{M,stab,red}$	1,45	[-]
Vertikale Gesamtbelastung, Designwert:	$q_{v,d}$	146,20	kN/m ²
Abminderungsfaktor für krit q_v (nach A127):	K_{v2}	0,85	[-]
Kritische Erdlast:	krit $q_{v,d}$	6,871	N/mm ²
$\text{krit } q_{v,d} = K_{v2} \cdot \left\{ 3 + \frac{1}{3 V_{RB}} \right\} \cdot S_R \cdot \frac{1}{\gamma_{M,stab,red}} \quad (72b)$			
Ausnutzungsgrad Stabilität (vertikale Gesamtlast):	U_{qv}	2,1	%
Äußerer Überdruck über Rohrsohle:	$p_{a,So}$	0,000	bar
Maximaler äußerer Druck aus Wasser, Stütz- oder Gleitmittel, Pressdruck:	$p_{a,max}$	0,000	bar

Äußerer Flüssigkeitsdruck, Designwert: $p_{a,d}$ 0,00 bar

Der Beulnachweis für Wasserdruck entfällt, da weder Grundwasser ansteht noch Unterdruck vorliegt.
Ausnutzungsgrad Stabilität: $U_{Stab,rad}$ 2,1 %

Der Nachweis der Stabilität ist erbracht.

1.2.4.5 Spannungsnachweis Betriebszustand

Innen:		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
	$\sigma_{ST,d} = \frac{\sum N_{qv,qh,qh^*,d}}{A_{rad}} + \alpha_{ki} \cdot \frac{\sum M_{qv,qh,qh^*,d}}{W_a}$				(54)
Spannung aufgrund Erd- u. Verkehrslasten	$\sigma_{ST,d}$	48,415	-52,497	48,415	N/mm ²
	$\sigma_{re,d} = \frac{\sum N_{sonst,d}}{A_{rad}} + \alpha_{ki} \cdot \frac{\sum M_{sonst,d}}{W_a}$				(54)
Spannung aufgrund anderer Lasten	$\sigma_{re,d}$	0,953	-1,111	1,712	N/mm ²
Spannung gesamt	σ	49,368	-53,608	50,128	N/mm ²
Anzusetzende Biegezugfestigkeit	$\sigma_{RBZ,res,d}$	213,64	213,64	213,64	N/mm ²
Anzusetzende Biegedruckfestigkeit	$\sigma_{RBD,res,d}$	213,64	213,64	213,64	N/mm ²
Ausnutzungsgrad Biegezug:	U_{BZ}	23,1	---	23,5	%
Ausnutzungsgrad Biegedruck:	U_{BD}	---	25,1	---	%

Außen:		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
	$\sigma_{ST,d} = \frac{\sum N_{qv,qh,qh^*,d}}{A_{rad}} - \alpha_{ka} \cdot \frac{\sum M_{qv,qh,qh^*,d}}{W_a}$				(55)
Spannung aufgrund Erd- u. Verkehrslasten	$\sigma_{ST,d}$	-50,818	46,736	-50,818	N/mm ²
	$\sigma_{re,d} = \frac{\sum N_{sonst,d}}{A_{rad}} - \alpha_{ka} \cdot \frac{\sum M_{sonst,d}}{W_a}$				(55)
Spannung aufgrund anderer Lasten	$\sigma_{re,d}$	-0,942	1,046	-1,772	N/mm ²
Spannung gesamt	σ	-51,760	47,782	-52,590	N/mm ²
Anzusetzende Biegezugfestigkeit	$\sigma_{RBZ,res,d}$	213,64	213,64	213,64	N/mm ²
Anzusetzende Biegedruckfestigkeit	$\sigma_{RBD,res,d}$	213,64	213,64	213,64	N/mm ²
Ausnutzungsgrad Biegezug:	U_{BZ}	---	22,4	---	%
Ausnutzungsgrad Biegedruck:	U_{BD}	24,2	---	24,6	%

Alle errechneten Spannungen sind kleiner als die zulässigen Werte.

1.2.4.6 Nachweis gegen Ermüden unter nicht vorwiegend ruhender Belastung

Vertikale dynamisch relevante Bodenspannung in Scheitelhöhe: $\text{dyn } p_T$ 68,30 kN/m²
 Horizontale Bodenspannung infolge Verkehrslast für Ermüdungsnachweis: $p_{Th,E}$ 24,78 kN/m²
 Anzusetzender seitlicher Erddruck aufgrund Verkehrslast: $\text{dyn } p_{Th}$ 24,8 kN/m²
 Die stützende Wirkung des Bettungsreaktionsdruckes $\text{dyn } p_{Vh}^*$ wird nicht angesetzt, da sich das Rohr-Boden-System biegesteif verhält.

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Normalkraft aus vertikaler Verkehrslast	$\text{dyn } N_{pTv}$	0,000	-13,454	0,000	kN/m
Normalkraft aus seitlicher Verkehrslast	$\text{dyn } N_{pTh}$	-4,882	0,000	-4,882	kN/m
Summe der Normalkräfte aus Verkehr	$\text{dyn } \Sigma N$	-4,882	-13,454	-4,882	kN/m
Moment aus vertikaler Verkehrslast	$\text{dyn } M_{pTv}$	0,663	-0,663	0,663	kNm/m
Moment aus seitlicher Verkehrslast	$\text{dyn } M_{pTh}$	-0,240	0,240	-0,240	kNm/m
Summe der Momente aus Verkehr	$\text{dyn } \Sigma M$	0,422	-0,422	0,422	kNm/m
Summe der Momente aus ständigen Lasten	ΣM_g	0,202	-0,204	0,212	kNm/m



Summe der Normalkräfte aus ständigen Lasten	ΣN_g	-3,976	-8,123	-4,235	kN/m
Schwingbreite bei $5 \cdot 10^6$ Lastspielen:			$2\sigma_{a,5E6}$	52,327	N/mm ²
innen					
Korrekturfaktor Krümmung innen:			α_{ki}	1,000	[-]
Dynamischer Spannungsanteil	dyn σ_{pT}	24,842	-26,675	24,842	N/mm ²
Ausnutzungsgrad dynamischer Spannungsanteil	dyn U	52,2	---	52,2	%
außen					
Korrekturfaktor Krümmung außen:			α_{ka}	1,000	[-]
Dynamischer Spannungsanteil	dyn σ_{pT}	-25,818	23,985	-25,818	N/mm ²
Ausnutzungsgrad dynamischer Spannungsanteil	dyn U	---	50,4	---	%

Der Nachweis gegen Ermüden unter nicht vorwiegend ruhender Belastung ist erbracht.

Alle notwendigen Nachweise sind erbracht.

2 Vortriebsrohr nach DWA-A 161, 2. Auflage: hü = 2 m DWA Tab. 22

Die Korrekturen vom Mai und Oktober 2017 sind berücksichtigt. TM 4-2019 (Ermüden bei Vortriebsrohren aus Stahl unter Bahnlasten) ist umgesetzt.

Titel der Berechnung: hü = 2 m DWA Tab. 22

Annahmen: Überdeckungshöhe > 1,5 m
5x10⁶ anwendbar, jedoch Ansatz nach Tabelle 22 des DWA-A 161 gewählt (VERALTET!)

Berechnungsart: Vollwand-/Profilrohr
Nachzuweisende Zustände: Nur Betriebszustand
Einbauskizze in Ausdruck: Ja
Mindestschnittgrößen im Betriebszustand drucken: Ja

2.1 Eingaben

2.1.1 Vortriebsverfahren

Dynamischer Vortrieb: Nein
Verfahren: Manuelle Eingabe
Typ der Bodenverschiebung: Keine
Vollständige dauerhafte Ringraumverpressung: Nein
Einsatz von Stütz- oder Gleitmittel: Nein
Ringspalt: Andere Vortriebsverfahren, kontinuierliche Ringspaltstützung mit Dokumentation

2.1.2 Trasse und Vortriebskraft

Verlauf der Vortriebsstrecke: Gerade
Berechnung der unplanmäßigen Abweichungen von der Sollachse (gerader Vortrieb): Ohne Pilotvortrieb
Kombinationsbeiwert für Rohrabwinklungen: ψ 0,80 [-]
Vorgabe der Vortriebskraft: Nein
Freie Eingabe der Sicherheit für Längsrichtung: Nein
Kontrollierter Einbau: Nein

2.1.3 Druckübertragungsring (DÜR)

Art der Druckübertragung: Ohne Druckübertragungsring

2.1.4 Bodenkennwerte

Bodenbeschaffenheit: Lockergestein
Bodengruppe am Rohr: G1
Andere Bodengruppe oberhalb Rohrscheitel: Nein
Auflagerwinkel (Lockergestein): $2\alpha = 180^\circ$ (Regelfall)
Manuelle Angabe des inneren Reibungswinkel des Bodens: Nein
Manuelle Angabe der Wichte des Bodens: Nein

2.1.5 Bodenverhalten

Manuelle Angabe des Verformungsmoduls des Bodens: Nein
Anwendung von Silotheorie: Automatisch
Manuelle Angabe von f_1 , K_1 , δ und c : Nein
Lagerungsdichte am Rohr: Mitteldicht bis dicht

Berücksichtigung des Konzentrationsfaktors λ :

Nein

2.1.6 Lasten

Überdeckungshöhe:
 Zusätzliche Flächenlast:
 Teilsicherheitsbeiwert Wasseraußendruck:
 Grundwasserstand über Sohle:
 Innendruck (Betriebszustand):
 Rohr ist im Betrieb mit Flüssigkeit gefüllt:
 Freie Eingabe Sicherheitsbeiwert für Verkehrslasten:
 Verkehrslast:
 Anpassungsfaktor α_{Qi} LM71 (DIN EN 1991-2):
 Abminderungsfaktor dynamische Last manuell eingeben:

h	2,0	m
P_0	0,00	kN/m ²
$\gamma_{F,W}$	1,35	[-]
h_{GW}	0,0	m
$P_{i,O}$	0,0	bar
Nein		
Nein		
Schiene LM71, eingleisig		
$\alpha_{Qi,LM71}$	1,00	[-]
Nein		

2.1.7 Berechnungsoptionen

Beulnachweis:
 Verformungsnachweis:
 Zulässige Verformung nach A161:
 Ermüdungsnachweis:
 Mindestschnittgrößen nach Norm:
 Vergleichsspannung Mindestschnittgrößen:

Nach A 127
 Nach A 161
 Ja
 Nach Regelwerk
 Ja
 Mit Bemessungswerten

2.1.8 Vollwand/Profil-Rohr

Rohrauswahl:

Vollwand

Material-Klasse:
 Vorverformung Typ A:
 Lokale Vorverformung:
 Auswahl der Eingaben:
 Außendurchmesser:
 Wandstärke:

Metall		
$\delta_{v,TypA}$	1,0	%
$\delta_{v,lokal}$	0,0	%
Da und s		
d_a	404,0	mm
s	10,0	mm

Perforation:

Ohne Perforation

Äußerer Rücksprung:
 Innerer Rücksprung:
 Rohrlänge:
 Manuelle Vorgabe Δa_{cal} :
 Rohrende ist vorgespannt:
 Exzentrizitäten beim Rohranschluss:

$\Delta d_{a,min}$	0,0	mm
$\Delta d_{i,max}$	0,0	mm
L_R	3,00	m
Nein		
Nein		
vorh e	0,0	mm

2.1.8.1 Metall

Teilsicherheiten nach Norm:

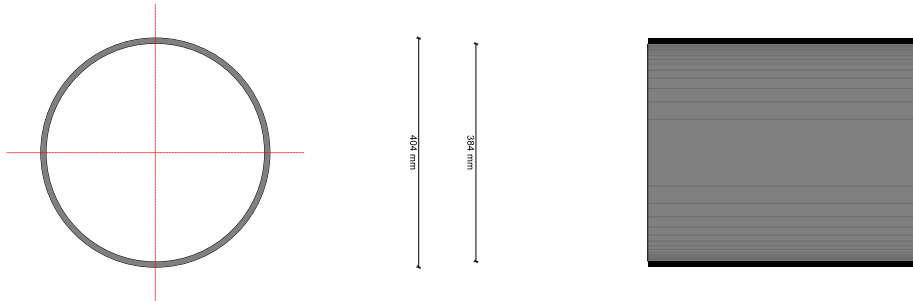
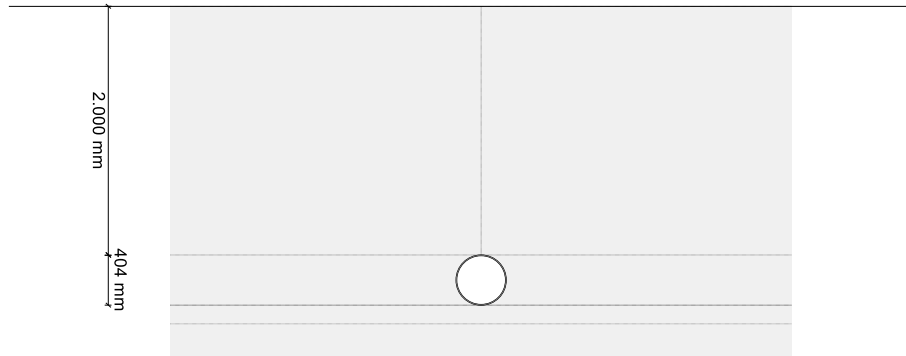
Ja

Auswahl Material:
 Dyn. Nachweis führen nach:
 Stahlgüte DIN:
 Plastische Reserven nutzen:
 Angabe Grenzspannungen:
 Art des Metalls:

Nach Norm (DIN)
 DWA-A 161 Tab. 22
 Baustahl S235 (EN 10025-2)
 Nein
 Ja
 Stahl-(ZM), geschweißte Rohre

2.1.8.2 Systemskizze

Schiene LM71, eingleisig





2.2 Ergebnisse

2.2.1 Teilsicherheitsbeiwerte (Einwirkungen)

Teilsicherheitsbeiwert für Verkehrslasten (quer zur Rohrachse):	Y _Q	1,35	[-]
Teilsicherheitsbeiwert für Innendruck (Druckrohre > 0,5 bar):	Y _{F,Pi}	1,50	[-]
Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkungen quer zur Rohrachse:	Y _F	1,35	[-]
Teilsicherheitsbeiwert Einwirkung längs der Rohrachse:	Y _{F,ax}	1,30	[-]

2.2.2 Zwischenergebnisse Rohr

Innendurchmesser:	d _i	384,0	mm
Außendurchmesser:	d _a	404,0	mm
Mittlerer Radius:	r _m	197,00	mm
Wanddicke:	s	10,00	mm
Verhältnis Radius zu Wanddicke:	r _m /s	19,700	[-]
Korrekturfaktor Krümmung innen:	α _{ki}	1,000	[-]
Korrekturfaktor Krümmung außen:	α _{ka}	1,000	[-]
Örtliche Vorverformung:	δ _{vl}	0,00	%
Vorverformung (Ovalisierung vor Last):	δ _{vg}	1,00	%
Axial wirksame Profilfläche:	A _{ax}	10,00	mm ² /mm
Radiale Profilfläche:	A _{rad}	10,00	mm ² /mm
Trägheitsabstand:	e	5,00	mm
Trägheitsmoment:	I	83,33	mm ⁴ /mm
Äußeres Widerstandsmoment:	W _a	16,67	mm ³ /mm
Inneres Widerstandsmoment:	W _i	16,67	mm ³ /mm
Flächenverhältnis:	K _Q	1,2	[-]
Kleinster Außendurchmesser:	d _{a,min}	404	mm
Größter Innendurchmesser:	d _{i,max}	384	mm
Max. Abweichung Stirnflächen von Rechtwinkligkeit:	Δ _{a,cal}	3,2	mm
Länge des einzelnen Vortriebrohres:	L _R	3,00	m

2.2.2.1 Materialeigenschaften

Wichte des Rohrwerkstoffs:	Y _R	78,5	kN/m ³
Querkontraktionszahl:	v	0,30	[-]
Elastizitätsmodul in Umfangsrichtung:	E _R	210.000,0	N/mm ²
Elastizitätsmodul in axialer Richtung:	E _{R,ax}	210.000,0	N/mm ²
Radiale Biegezugfestigkeit:	σ _{RBZ}	235,0	N/mm ²
Radiale Biegedruckfestigkeit:	σ _{RBD}	235,0	N/mm ²
Ringzugfestigkeit:	σ _{RZ}	235,0	N/mm ²
Schwingbreite bei 2·10 ⁶ Lastspielen:	2σ _{a,2E6}	71,0	N/mm ²
Schwingbreite bei 5·10 ⁶ Lastspielen:	2σ _{a,5E6}	52,3	N/mm ²
Schwingbreite bei 1·10 ⁸ Lastspielen:	2σ _{a,1E8}	28,8	N/mm ²
Grenzwert der Längsdruckfestigkeit:	σ _{LD}	235,0	N/mm ²

2.2.2.2 Sicherheiten

Teilsicherheitsbeiwert für Bauteilwiderstand längs der Rohrachse:	Y _{M,ax}	1,35	[-]
Teilsicherheitsbeiwert für Bauteilwiderstand quer zur Rohrachse:	Y _{M,rad}	1,10	[-]
Teilsicherheitsbeiwert für Bauteilwiderstand auf Stabilität:	Y _{M,stab}	1,85	[-]
Teilsicherheitsbeiwert für Bauteilwiderstand auf Stabilität bei Berücksichtigung der Rohrverformungen:	Y _{M,stab,red}	1,45	[-]

2.2.2.3 Überprüfung der Mindestwanddicke

Außendurchmesser:	d _a	404,0	mm
Mittlerer Radius:	r _m	197,00	mm
Wanddicke:	s	10,00	mm

Berechnete Mindestwanddicke bei vorgegebenen Radius rm: min. t 6,30 mm

Die Mindestwanddicke nach 9.3.1 Tabelle 19 / 20 wird eingehalten bzw. übertroffen.

2.2.3 Zwischenergebnisse Boden

Wichte des Bodens:	γ_B	20,0	kN/m ³
Wichte des Bodens unter Auftrieb:	γ'_B	11,0	kN/m ³
Bodengruppe am Rohr:	G1		
Innerer Reibungswinkel am Rohr:	φ'_2	32,5	°
Grundwert des Verformungsmodul Boden:	E_0	50,00	N/mm ²
Faktor für die Lagerungsdichte/Konsistenz nach A161, Tabelle 3/4:	f_1	0,60	[-]
Auflockerungsfaktor nach A161, Tabelle 5:	f_2	0,80	[-]
Innerer Reibungswinkel über Rohrscheitel:	φ'_1	32,5	°
Spannungsexponent:	z	0,4	[-]
Hinweis zur Silotheorie:	$\kappa = 1$, da keine Bodenverschiebungen stattfinden.		
Berücksichtigung des Konzentrationsfaktors λF notwendig:	Ja		
Konzentrationsfaktor:	λ	1,000	[-]
Basis-Erddruckverhältnis unter Rohrscheitel:	$K_{2,0}$	0,46	[-]
Erddruckverhältnis unter Rohrscheitel, Bauzustand:	$K_{2,Bau}$	0,37	[-]
Erddruckverhältnis unter Rohrscheitel, Endzustand:	$K_{2,End}$	0,46	[-]

2.2.4 Betriebszustand

2.2.4.1 Belastungen Betriebszustand

Stoßbeiwert:	Φ_2	1,67	[-]
Stoßbeiwert:	red Φ_2	1,57	[-]
Anpassungsfaktor α_{Qi} LM71 (DIN EN 1991-2):	$\alpha_{Qi,LM71}$	1,00	[-]
Einfache Bodenspannung aus Verkehr:	p	43,50	kN/m ²
Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Scheitelhöhe:	p_T	68,30	kN/m ²
Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Kämpferhöhe (ohne φ):	p_K	41,68	kN/m ²
Erddruckverhältnis unter Rohrscheitel:	K_2	0,46	[-]
Horizontale Bodenspannung aus Verkehr:	$p_{T,h}$	24,78	kN/m ²
Vertikale Bodenspannung in Rohrscheitelebene:	p_{Ev}	40,000	kN/m ²
Wirksame vertikale Bodenspannung in Rohrscheitelebene:	q_{Ev}	40,000	kN/m ²
Vertikale Gesamt-Bodenspannung in Rohrscheitelebene:	$q_{Ges,v}$	108,295	kN/m ²
Die Erddruckverteilung am Rohr wird \cos^2 - bzw. \sin^2 -förmig angenommen.:	Nein		
Horizontale Bodenspannung am Rohr:	q_{Eh}	20,38	kN/m ²
Horizontale Gesamt-Bodenspannung am Rohr:	$q_{Ges,h}$	45,160	kN/m ²
Innerer Überdruck:	p_i	0,000	bar
Äußerer Überdruck über Rohrscheitel:	$p_{a,Sc}$	0,000	bar
Rohrsteifigkeit:	S_R	2.289	kN/m ²
Rohrsteifigkeit:	\bar{S}_R	2.289	kN/m ²
Normierender Bezugswert:	$\sigma_{B,0}$	100,0	kN/m ²
Spannungsabhängiger Erhöhungsfaktor:	f_3	1,00	[-]
Verformungsmodul Boden:	E_B	24,00	N/mm ²
Erddruckverhältnis unter Rohrscheitel:	K_2	0,46	[-]
Bettungssteifigkeit:	S_{Bh}	14,40	N/mm ²
Systemsteifigkeit:	V_{RB}	0,1590	[-]
Das Rohr-Bodensystem verhält sich biegeweich:	Ja		

Der seitliche Bettungsreaktionsdruck darf nach DWA-A 161, Kapitel 6.2.2 nur angesetzt werden, wenn das Rohr nach Abschluss des Vortriebes dauerhaft und vollständig verpresst wird.

2.2.4.2 Schnittkräfte Betriebszustand

Momente:		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Vertikale Belastung aus Erdüberdeckung	$M_{pEv,d}$	0,524	-0,524	0,524	kNm/m
Vertikale Belastung aus Verkehr	$M_{pTv,d}$	0,895	-0,895	0,895	kNm/m
Horizontale Belastung aus Verkehr	$M_{pTh,d}$	-0,325	0,325	-0,325	kNm/m
Horizontale Belastung aus Erdüberdeckung	$M_{pEh,d}$	-0,267	0,267	-0,267	kNm/m
Eigengewicht	$M_{g,d}$	0,016	-0,018	0,029	kNm/m
Wasserfüllung bis Rohrscheitel	$M_{w,d}$	0,000	0,000	0,000	kNm/m
Auftrieb (äußerer Wasserstand bis Scheitel)	$M_{a,d}$	0,000	0,000	0,000	kNm/m
Wasserdruck	$M_{pw,d}$	0,000	0,000	0,000	kNm/m
Bettungsreaktionsdruck Erdlast	$M_{qEh^*,d}$	0,000	0,000	0,000	kNm/m
Bettungsreaktionsdruck	$M_{qh^*,d}$	0,000	0,000	0,000	kNm/m
Summe der Momente	ΣM_d	0,843	-0,845	0,856	kNm/m

Normalkräfte:		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Vertikale Belastung aus Erdüberdeckung	$N_{pEv,d}$	0,000	-10,638	0,000	kN/m
Vertikale Belastung aus Verkehr	$N_{pTv,d}$	0,000	-18,163	0,000	kN/m
Horizontale Belastung aus Verkehr	$N_{pTh,d}$	-6,591	0,000	-6,591	kN/m
Horizontale Belastung aus Erdüberdeckung	$N_{pEh,d}$	-5,419	0,000	-5,419	kN/m
Eigengewicht	$N_{g,d}$	0,052	-0,328	-0,298	kN/m
Wasserfüllung bis Rohrscheitel	$N_{w,d}$	0,000	0,000	0,000	kN/m
Auftrieb (äußerer Wasserstand bis Scheitel)	$N_{a,d}$	0,000	0,000	0,000	kN/m
Wasserdruck	$N_{pw,d}$	0,000	0,000	0,000	kN/m
Bettungsreaktionsdruck Erdlast	$N_{qEh^*,d}$	0,000	0,000	0,000	kN/m
Bettungsreaktionsdruck Verkehr	$N_{qTh^*,d}$	0,000	0,000	0,000	kN/m
Bettungsreaktionsdruck	$N_{qh^*,d}$	0,000	0,000	0,000	kN/m
Summe der Normalkräfte	ΣN_d	-11,958	-29,129	-12,308	kN/m

2.2.4.3 Verformungsnachweis Betriebszustand

Verformungsbeiwert:	C_{v,qh^*}	0,0640	[-]
Verformungsbeiwert:	$C_{v,qv}$	-0,0833	[-]
Beiwert des Bettungsreaktionsdruckes:	K^*	0,371	[-]
Verformungsbeiwert:	c^*_v	-0,060	[-]
Vertikale Bodenspannung in Rohrscheitelebene:	p_{Ev}	40,000	kN/m ²
Vertikale Bodenspannung infolge Verkehrslast:	p_T	68,30	kN/m ²
Vertikale Gesamt-Bodenspannung in Rohrscheitelebene:	$q_{Ges,v}$	108,295	kN/m ²
Horizontale Bodenspannung am Rohr:	q_{Eh}	20,38	kN/m ²
Horizontale Bodenspannung infolge Verkehrslast:	p_{Th}	24,78	kN/m ²
Horizontale Gesamt-Bodenspannung am Rohr:	$q_{Ges,h}$	45,160	kN/m ²
Relative vertikale Durchmesseränderung:	δ_v	0,16	%
Zulässige vertikale Durchmesseränderung:	zul δ_v	2,00	%
Ausnutzungsgrad Verformung:	U_{δ_v}	8,2	%

Die errechnete Verformung ist kleiner als die zulässige Verformung.

2.2.4.4 Beulnachweis Betriebszustand

Teilsicherheitsbeiwert für Bauteilwiderstand auf Stabilität bei Berücksichtigung der Rohrverformungen:	$\gamma_{M,stab,red}$	1,45	[-]
Vertikale Gesamtbelastung, Designwert:	$q_{v,d}$	146,20	kN/m ²
Abminderungsfaktor für krit q_v (nach A127):	K_{v2}	0,85	[-]
Kritische Erdlast:	krit $q_{v,d}$	6,871	N/mm ²

$$\text{krit } q_{v,d} = K_{v2} \cdot \left\{ 3 + \frac{1}{3 V_{RB}} \right\} \cdot S_R \cdot \frac{1}{\gamma_{M,stab,red}} \quad (72b)$$

Ausnutzungsgrad Stabilität (vertikale Gesamtlast):	U_{qv}	2,1	%
Äußerer Überdruck über Rohrsohle:	$p_{a,So}$	0,000	bar
Maximaler äußerer Druck aus Wasser, Stütz- oder Gleitmittel, Pressdruck:	$p_{a,max}$	0,000	bar

Äußerer Flüssigkeitsdruck, Designwert:	Pa,d	0,00	bar
Der Beulnachweis für Wasserdruck entfällt, da weder Grundwasser ansteht noch Unterdruck vorliegt.			
Ausnutzungsgrad Stabilität:	U _{Stab,rad}	2,1	%

Der Nachweis der Stabilität ist erbracht.

2.2.4.5 Spannungsnachweis Betriebszustand

Innen:		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
	$\sigma_{ST,d} = \frac{\sum N_{qv,qh,qh^*,d}}{A_{rad}} + \alpha_{ki} \cdot \frac{\sum M_{qv,qh,qh^*,d}}{W_a}$				(54)
Spannung aufgrund Erd- u. Verkehrslasten	$\sigma_{ST,d}$	48,415	-52,497	48,415	N/mm ²
	$\sigma_{re,d} = \frac{\sum N_{sonst,d}}{A_{rad}} + \alpha_{ki} \cdot \frac{\sum M_{sonst,d}}{W_a}$				(54)
Spannung aufgrund anderer Lasten	$\sigma_{re,d}$	0,953	-1,111	1,712	N/mm ²
Spannung gesamt	σ	49,368	-53,608	50,128	N/mm ²
Anzusetzende Biegezugfestigkeit	$\sigma_{RBZ,res,d}$	213,64	213,64	213,64	N/mm ²
Anzusetzende Biegedruckfestigkeit	$\sigma_{RBD,res,d}$	213,64	213,64	213,64	N/mm ²
Ausnutzungsgrad Biegezug:	U _{BZ}	23,1	---	23,5	%
Ausnutzungsgrad Biegedruck:	U _{BD}	---	25,1	---	%

Außen:		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
	$\sigma_{ST,d} = \frac{\sum N_{qv,qh,qh^*,d}}{A_{rad}} - \alpha_{ka} \cdot \frac{\sum M_{qv,qh,qh^*,d}}{W_a}$				(55)
Spannung aufgrund Erd- u. Verkehrslasten	$\sigma_{ST,d}$	-50,818	46,736	-50,818	N/mm ²
	$\sigma_{re,d} = \frac{\sum N_{sonst,d}}{A_{rad}} - \alpha_{ka} \cdot \frac{\sum M_{sonst,d}}{W_a}$				(55)
Spannung aufgrund anderer Lasten	$\sigma_{re,d}$	-0,942	1,046	-1,772	N/mm ²
Spannung gesamt	σ	-51,760	47,782	-52,590	N/mm ²
Anzusetzende Biegezugfestigkeit	$\sigma_{RBZ,res,d}$	213,64	213,64	213,64	N/mm ²
Anzusetzende Biegedruckfestigkeit	$\sigma_{RBD,res,d}$	213,64	213,64	213,64	N/mm ²
Ausnutzungsgrad Biegezug:	U _{BZ}	---	22,4	---	%
Ausnutzungsgrad Biegedruck:	U _{BD}	24,2	---	24,6	%

Alle errechneten Spannungen sind kleiner als die zulässigen Werte.

2.2.4.6 Nachweis gegen Ermüden unter nicht vorwiegend ruhender Belastung

Vertikale dynamisch relevante Bodenspannung in Scheitelhöhe:	dyn p _T	68,30	kN/m ²
Horizontale Bodenspannung infolge Verkehrslast für Ermüdungsnachweis:	p _{Th,E}	24,78	kN/m ²
Anzusetzender seitlicher Erddruck aufgrund Verkehrslast:	dyn p _{Th}	24,8	kN/m ²
Die stützende Wirkung des Bettungsreaktionsdruckes dyn p _{Vh} * wird nicht angesetzt, da sich das Rohr-Boden-System biegesteif verhält.			

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Normalkraft aus vertikaler Verkehrslast	dyn N _{pTv}	0,000	-13,454	0,000	kN/m
Normalkraft aus seitlicher Verkehrslast	dyn N _{pTh}	-4,882	0,000	-4,882	kN/m
Summe der Normalkräfte aus Verkehr	dyn ΣN	-4,882	-13,454	-4,882	kN/m
Moment aus vertikaler Verkehrslast	dyn M _{pTv}	0,663	-0,663	0,663	kNm/m
Moment aus seitlicher Verkehrslast	dyn M _{pTh}	-0,240	0,240	-0,240	kNm/m
Summe der Momente aus Verkehr	dyn ΣM	0,422	-0,422	0,422	kNm/m
Summe der Momente aus ständigen Lasten	ΣM_g	0,202	-0,204	0,212	kNm/m



Summe der Normalkräfte aus ständigen Lasten	ΣN_g	-3,976	-8,123	-4,235	kN/m
---	--------------	--------	--------	--------	------

innen

Korrekturfaktor Krümmung innen:			α_{ki}	1,000	[-]
Im dynamischen Nachweis sind nur Zugspannungen zu berücksichtigen, Druckspannungen werden nicht untersucht.					
Dynamischer Spannungsanteil	dyn σ_{pT}	24,842	-26,675	24,842	N/mm ²
Summe der Momente aus ständigen Lasten	ΣM_g	0,202	-0,204	0,212	kNm/m
Summe der Normalkräfte aus ständigen Lasten	ΣN_g	-3,976	-8,123	-4,235	kN/m
Spannungsdoppelamplitude	$\Delta\sigma_{Be}$	24,842	---	24,842	N/mm ²
Spannung aus ständigen Lasten	σ_g	11,727	---	12,290	N/mm ²
$\max \sigma_{0,Be} = \max(\sigma_g ; \sigma_g + \Delta\sigma_{Be})$					
Oberspannung	$\max \sigma_{0,Be}$	36,569	---	37,132	N/mm ²
$\min \sigma_{0,Be} = \min(\sigma_g ; \sigma_g + \Delta\sigma_{Be})$					
Unterspannung	$\min \sigma_{0,Be}$	11,727	---	12,290	N/mm ²
Kerbgruppe	X_{Be}	0,321	---	0,331	[-]
Zul. Spannungsdoppelamplitude, Tab. 22	zul $\Delta\sigma_{Be,T22}$	85,965	0,000	85,451	N/mm ²

Der Wert für die zulässige Spannungsdoppelamplitude in Tabelle 22 wird für 1×10^8 Lastwechsel mit dem Faktor 0,405 multipliziert, da die Tabellenwerte für 2×10^6 gelten.

Zul. Spannungsdoppelamplitude	zul $\Delta\sigma_{Be}$	34,816	---	34,608	N/mm ²
Ausnutzungsgrad Spannungsdoppelamplitude	dyn U	71,4	---	71,8	%

außen

Korrekturfaktor Krümmung außen:			α_{ka}	1,000	[-]
Im dynamischen Nachweis sind nur Zugspannungen zu berücksichtigen, Druckspannungen werden nicht untersucht.					
Dynamischer Spannungsanteil	dyn σ_{pT}	-25,818	23,985	-25,818	N/mm ²
Summe der Momente aus ständigen Lasten	ΣM_g	0,202	-0,204	0,212	kNm/m
Summe der Normalkräfte aus ständigen Lasten	ΣN_g	-3,976	-8,123	-4,235	kN/m
Spannungsdoppelamplitude	$\Delta\sigma_{Be}$	---	23,985	---	N/mm ²
Spannung aus ständigen Lasten	σ_g	---	11,410	---	N/mm ²
$\max \sigma_{0,Be} = \max(\sigma_g ; \sigma_g + \Delta\sigma_{Be})$					
Oberspannung	$\max \sigma_{0,Be}$	---	35,394	---	N/mm ²
$\min \sigma_{0,Be} = \min(\sigma_g ; \sigma_g + \Delta\sigma_{Be})$					
Unterspannung	$\min \sigma_{0,Be}$	---	11,410	---	N/mm ²
Kerbgruppe	X_{Be}	---	0,322	---	[-]
Zul. Spannungsdoppelamplitude, Tab. 22	zul $\Delta\sigma_{Be,T22}$	0,000	85,882	0,000	N/mm ²

Der Wert für die zulässige Spannungsdoppelamplitude in Tabelle 22 wird für 1×10^8 Lastwechsel mit dem Faktor 0,405 multipliziert, da die Tabellenwerte für 2×10^6 gelten.

Zul. Spannungsdoppelamplitude	zul $\Delta\sigma_{Be}$	---	34,782	---	N/mm ²
Ausnutzungsgrad Spannungsdoppelamplitude	dyn U	---	69,0	---	%

Der Nachweis gegen Ermüden unter nicht vorwiegend ruhender Belastung ist erbracht.

Alle notwendigen Nachweise sind erbracht.

3 Vortriebsrohr nach DWA-A 161, 2. Auflage: hü = 2 m Bahn TM

Die Korrekturen vom Mai und Oktober 2017 sind berücksichtigt. TM 4-2019 (Ermüden bei Vortriebsrohren aus Stahl unter Bahnlasten) ist umgesetzt.

Titel der Berechnung: hü = 2 m Bahn TM

Annahmen: Überdeckungshöhe > 1,5 m
5x10⁶ anwendbar
Identisch mit der ersten Variante

Berechnungsart:	Vollwand-/Profilrohr
Nachzuweisende Zustände:	Nur Betriebszustand
Einbauskizze in Ausdruck:	Ja
Mindestschnittgrößen im Betriebszustand drucken:	Ja

3.1 Eingaben

3.1.1 Vortriebsverfahren

Dynamischer Vortrieb:	Nein
Verfahren:	Manuelle Eingabe
Typ der Bodenverschiebung:	Keine
Vollständige dauerhafte Ringraumverpressung:	Nein
Einsatz von Stütz- oder Gleitmittel:	Nein
Ringspalt:	Andere Vortriebsverfahren, kontinuierliche Ringspaltstützung mit Dokumentation

3.1.2 Trasse und Vortriebskraft

Verlauf der Vortriebsstrecke:	Gerade
Berechnung der unplanmäßigen Abweichungen von der Sollachse (gerader Vortrieb):	Ohne Pilotvortrieb
Kombinationsbeiwert für Rohrabwinklungen:	ψ 0,80 [-]
Vorgabe der Vortriebskraft:	Nein
Freie Eingabe der Sicherheit für Längsrichtung:	Nein
Kontrollierter Einbau:	Nein

3.1.3 Druckübertragungsring (DÜR)

Art der Druckübertragung: Ohne Druckübertragungsring

3.1.4 Bodenkennwerte

Bodenbeschaffenheit:	Lockergestein
Bodengruppe am Rohr:	G1
Andere Bodengruppe oberhalb Rohrscheitel:	Nein
Auflagerwinkel (Lockergestein):	2 α = 180° (Regelfall)
Manuelle Angabe des inneren Reibungswinkel des Bodens:	Nein
Manuelle Angabe der Wichte des Bodens:	Nein

3.1.5 Bodenverhalten

Manuelle Angabe des Verformungsmoduls des Bodens:	Nein
Anwendung von Silotheorie:	Automatisch
Manuelle Angabe von f ₁ , K ₁ , δ und c:	Nein

Lagerungsdichte am Rohr:
Berücksichtigung des Konzentrationsfaktors λ :

Mitteldicht bis dicht
Nein

3.1.6 Lasten

Überdeckungshöhe:
Zusätzliche Flächenlast:
Teilsicherheitsbeiwert Wasseraußendruck:
Grundwasserstand über Sohle:
Innendruck (Betriebszustand):
Rohr ist im Betrieb mit Flüssigkeit gefüllt:
Freie Eingabe Sicherheitsbeiwert für Verkehrslasten:
Verkehrslast:
Anpassungsfaktor α_{Qi} LM71 (DIN EN 1991-2):
Abminderungsfaktor dynamische Last manuell eingeben:

h 2,0 m
P₀ 0,00 kN/m²
Y_{F,W} 1,35 [-]
h_{GW} 0,0 m
P_{i,O} 0,0 bar
Nein
Nein
Schiene LM71, eingleisig
 $\alpha_{Qi,LM71}$ 1,00 [-]
Nein

3.1.7 Berechnungsoptionen

Beulnachweis:
Verformungsnachweis:
Zulässige Verformung nach A161:
Ermüdungsnachweis:
Mindestschnittgrößen nach Norm:
Vergleichsspannung Mindestschnittgrößen:

Nach A 127
Nach A 161
Ja
Nach Regelwerk
Ja
Mit Bemessungswerten

3.1.8 Vollwand/Profil-Rohr

Rohrauswahl:

Vollwand

Material-Klasse:
Vorverformung Typ A:
Lokale Vorverformung:
Auswahl der Eingaben:
Außendurchmesser:
Wandstärke:

Metall
 $\delta_{v,TypA}$ 1,0 %
 $\delta_{v,lokal}$ 0,0 %
Da und s
d_a 404,0 mm
s 10,0 mm

Perforation:

Ohne Perforation

Äußerer Rücksprung:
Innerer Rücksprung:
Rohrlänge:
Manuelle Vorgabe Δa_{cal} :
Rohrende ist vorgespannt:
Exzentrizitäten beim Rohranschluss:

$\Delta d_{a,min}$ 0,0 mm
 $\Delta d_{i,max}$ 0,0 mm
L_R 3,00 m
Nein
Nein
vorh e 0,0 mm

3.1.8.1 Metall

Teilsicherheiten nach Norm:

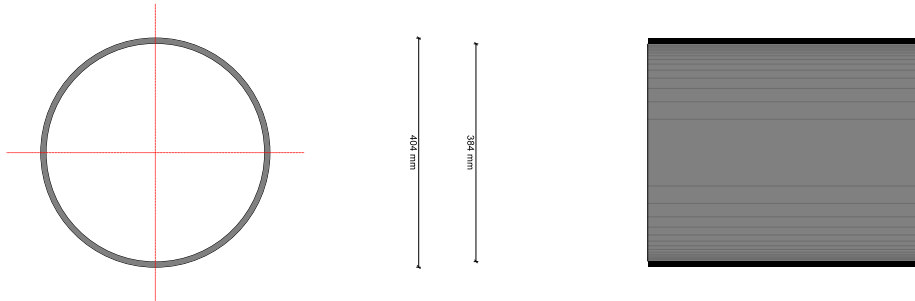
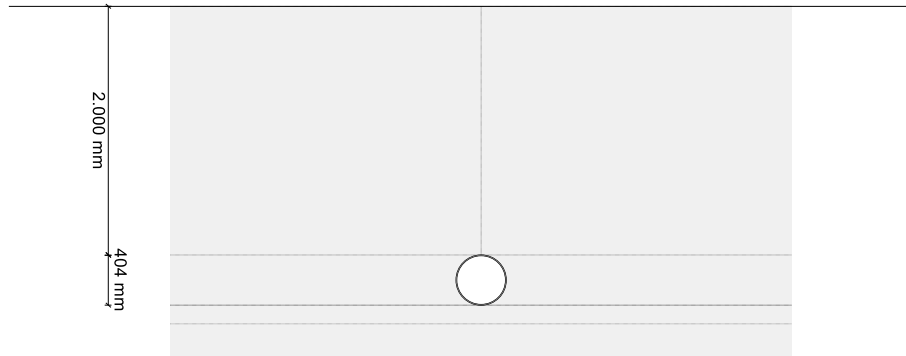
Ja

Auswahl Material:
Dyn. Nachweis führen nach:
Kerbfall nach EC 3-1-9, Bild 7.1:
Stahlgüte DIN:
Plastische Reserven nutzen:
Angabe Grenzspannungen:
Art des Metalls:

Nach Norm (DIN)
Bahn: TM 4-2019
71
Baustahl S235 (EN 10025-2)
Nein
Ja
Stahl-(ZM), geschweißte Rohre

3.1.8.2 Systemskizze

Schiene LM71, eingleisig



3.2 Ergebnisse

3.2.1 Teilsicherheitsbeiwerte (Einwirkungen)

Teilsicherheitsbeiwert für Verkehrslasten (quer zur Rohrachse):	YQ	1,35	[-]
Teilsicherheitsbeiwert für Innendruck (Druckrohre > 0,5 bar):	YF,Pi	1,50	[-]
Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkungen quer zur Rohrachse:	YF	1,35	[-]
Teilsicherheitsbeiwert Einwirkung längs der Rohrachse:	YF,ax	1,30	[-]

3.2.2 Zwischenergebnisse Rohr

Innendurchmesser:	d _i	384,0	mm
Außendurchmesser:	d _a	404,0	mm
Mittlerer Radius:	r _m	197,00	mm
Wanddicke:	s	10,00	mm
Verhältnis Radius zu Wanddicke:	r _m /s	19,700	[-]
Korrekturfaktor Krümmung innen:	α _{ki}	1,000	[-]
Korrekturfaktor Krümmung außen:	α _{ka}	1,000	[-]
Örtliche Vorverformung:	δ _{vl}	0,00	%
Vorverformung (Ovalisierung vor Last):	δ _{vg}	1,00	%
Axial wirksame Profilfläche:	A _{ax}	10,00	mm ² /mm
Radiale Profilfläche:	A _{rad}	10,00	mm ² /mm
Trägheitsabstand:	e	5,00	mm
Trägheitsmoment:	I	83,33	mm ⁴ /mm
Äußeres Widerstandsmoment:	W _a	16,67	mm ³ /mm
Inneres Widerstandsmoment:	W _i	16,67	mm ³ /mm
Flächenverhältnis:	KQ	1,2	[-]
Kleinster Außendurchmesser:	d _{a,min}	404	mm
Größter Innendurchmesser:	d _{i,max}	384	mm
Max. Abweichung Stirnflächen von Rechtwinkligkeit:	Δ _{a,cal}	3,2	mm
Länge des einzelnen Vortriebrohres:	LR	3,00	m

3.2.2.1 Materialeigenschaften

Wichte des Rohrwerkstoffs:	YR	78,5	kN/m ³
Querkontraktionszahl:	v	0,30	[-]
Elastizitätsmodul in Umfangsrichtung:	E _R	210.000,0	N/mm ²
Elastizitätsmodul in axialer Richtung:	E _{R,ax}	210.000,0	N/mm ²
Radiale Biegezugfestigkeit:	σ _{RBZ}	235,0	N/mm ²
Radiale Biegedruckfestigkeit:	σ _{RBD}	235,0	N/mm ²
Ringzugfestigkeit:	σ _{RZ}	235,0	N/mm ²
Schwingbreite bei 2·10 ⁶ Lastspielen:	2σ _{a,2E6}	71,0	N/mm ²
Schwingbreite bei 5·10 ⁶ Lastspielen:	2σ _{a,5E6}	52,3	N/mm ²
Schwingbreite bei 1·10 ⁸ Lastspielen:	2σ _{a,1E8}	28,8	N/mm ²
Grenzwert der Längsdruckfestigkeit:	σ _{LD}	235,0	N/mm ²

3.2.2.2 Sicherheiten

Teilsicherheitsbeiwert für Bauteilwiderstand längs der Rohrachse:	Y _{M,ax}	1,35	[-]
Teilsicherheitsbeiwert für Bauteilwiderstand quer zur Rohrachse:	Y _{M,rad}	1,10	[-]
Teilsicherheitsbeiwert für Bauteilwiderstand auf Stabilität:	Y _{M,stab}	1,85	[-]
Teilsicherheitsbeiwert für Bauteilwiderstand auf Stabilität bei Berücksichtigung der Rohrverformungen:	Y _{M,stab,red}	1,45	[-]

3.2.2.3 Überprüfung der Mindestwanddicke

Außendurchmesser:	d _a	404,0	mm
Mittlerer Radius:	r _m	197,00	mm
Wanddicke:	s	10,00	mm

Berechnete Mindestwanddicke bei vorgegebenen Radius r_m : min. t 6,30 mm

Die Mindestwanddicke nach 9.3.1 Tabelle 19 / 20 wird eingehalten bzw. übertroffen.

3.2.3 Zwischenergebnisse Boden

Wichte des Bodens:	γ_B	20,0	kN/m ³
Wichte des Bodens unter Auftrieb:	γ'_B	11,0	kN/m ³
Bodengruppe am Rohr:	G1		
Innerer Reibungswinkel am Rohr:	φ'_2	32,5	°
Grundwert des Verformungsmodul Boden:	E_0	50,00	N/mm ²
Faktor für die Lagerungsdichte/Konsistenz nach A161, Tabelle 3/4:	f_1	0,60	[-]
Auflockerungsfaktor nach A161, Tabelle 5:	f_2	0,80	[-]
Innerer Reibungswinkel über Rohrscheitel:	φ'_1	32,5	°
Spannungsexponent:	z	0,4	[-]
Hinweis zur Silotheorie:	$\kappa = 1$, da keine Bodenverschiebungen stattfinden.		
Berücksichtigung des Konzentrationsfaktors λF notwendig:	Ja		
Konzentrationsfaktor:	λ	1,000	[-]
Basis-Erddruckverhältnis unter Rohrscheitel:	$K_{2,0}$	0,46	[-]
Erddruckverhältnis unter Rohrscheitel, Bauzustand:	$K_{2,Bau}$	0,37	[-]
Erddruckverhältnis unter Rohrscheitel, Endzustand:	$K_{2,End}$	0,46	[-]

3.2.4 Betriebszustand

3.2.4.1 Belastungen Betriebszustand

Stoßbeiwert:	Φ_2	1,67	[-]
Stoßbeiwert:	red Φ_2	1,57	[-]
Anpassungsfaktor α_{Qi} LM71 (DIN EN 1991-2):	$\alpha_{Qi,LM71}$	1,00	[-]
Einfache Bodenspannung aus Verkehr:	p	43,50	kN/m ²
Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Scheitelhöhe:	p_T	68,30	kN/m ²
Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Kämpferhöhe (ohne φ):	p_K	41,68	kN/m ²
Erddruckverhältnis unter Rohrscheitel:	K_2	0,46	[-]
Horizontale Bodenspannung aus Verkehr:	$p_{T,h}$	24,78	kN/m ²
Vertikale Bodenspannung in Rohrscheitelebene:	p_{Ev}	40,000	kN/m ²
Wirksame vertikale Bodenspannung in Rohrscheitelebene:	q_{Ev}	40,000	kN/m ²
Vertikale Gesamt-Bodenspannung in Rohrscheitelebene:	$q_{Ges,v}$	108,295	kN/m ²
Die Erddruckverteilung am Rohr wird \cos^2 - bzw. \sin^2 -förmig angenommen.:	Nein		
Horizontale Bodenspannung am Rohr:	q_{Eh}	20,38	kN/m ²
Horizontale Gesamt-Bodenspannung am Rohr:	$q_{Ges,h}$	45,160	kN/m ²
Innerer Überdruck:	p_i	0,000	bar
Äußerer Überdruck über Rohrscheitel:	$p_{a,Sc}$	0,000	bar
Rohrsteifigkeit:	S_R	2.289	kN/m ²
Rohrsteifigkeit:	\bar{S}_R	2.289	kN/m ²
Normierender Bezugswert:	$\sigma_{B,0}$	100,0	kN/m ²
Spannungsabhängiger Erhöhungsfaktor:	f_3	1,00	[-]
Verformungsmodul Boden:	E_B	24,00	N/mm ²
Erddruckverhältnis unter Rohrscheitel:	K_2	0,46	[-]
Bettungssteifigkeit:	S_{Bh}	14,40	N/mm ²
Systemsteifigkeit:	V_{RB}	0,1590	[-]
Das Rohr-Bodensystem verhält sich biegeweich:	Ja		

Der seitliche Bettungsreaktionsdruck darf nach DWA-A 161, Kapitel 6.2.2 nur angesetzt werden, wenn das Rohr nach Abschluss des Vortriebes dauerhaft und vollständig verpresst wird.

3.2.4.2 Schnittkräfte Betriebszustand

Momente:		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Vertikale Belastung aus Erdüberdeckung	$M_{pEv,d}$	0,524	-0,524	0,524	kNm/m
Vertikale Belastung aus Verkehr	$M_{pTv,d}$	0,895	-0,895	0,895	kNm/m
Horizontale Belastung aus Verkehr	$M_{pTh,d}$	-0,325	0,325	-0,325	kNm/m
Horizontale Belastung aus Erdüberdeckung	$M_{pEh,d}$	-0,267	0,267	-0,267	kNm/m
Eigengewicht	$M_{g,d}$	0,016	-0,018	0,029	kNm/m
Wasserfüllung bis Rohrscheitel	$M_{w,d}$	0,000	0,000	0,000	kNm/m
Auftrieb (äußerer Wasserstand bis Scheitel)	$M_{a,d}$	0,000	0,000	0,000	kNm/m
Wasserdruck	$M_{pw,d}$	0,000	0,000	0,000	kNm/m
Bettungsreaktionsdruck Erdlast	$M_{qEh^*,d}$	0,000	0,000	0,000	kNm/m
Bettungsreaktionsdruck	$M_{qH^*,d}$	0,000	0,000	0,000	kNm/m
Summe der Momente	ΣM_d	0,843	-0,845	0,856	kNm/m

Normalkräfte:		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Vertikale Belastung aus Erdüberdeckung	$N_{pEv,d}$	0,000	-10,638	0,000	kN/m
Vertikale Belastung aus Verkehr	$N_{pTv,d}$	0,000	-18,163	0,000	kN/m
Horizontale Belastung aus Verkehr	$N_{pTh,d}$	-6,591	0,000	-6,591	kN/m
Horizontale Belastung aus Erdüberdeckung	$N_{pEh,d}$	-5,419	0,000	-5,419	kN/m
Eigengewicht	$N_{g,d}$	0,052	-0,328	-0,298	kN/m
Wasserfüllung bis Rohrscheitel	$N_{w,d}$	0,000	0,000	0,000	kN/m
Auftrieb (äußerer Wasserstand bis Scheitel)	$N_{a,d}$	0,000	0,000	0,000	kN/m
Wasserdruck	$N_{pw,d}$	0,000	0,000	0,000	kN/m
Bettungsreaktionsdruck Erdlast	$N_{qEh^*,d}$	0,000	0,000	0,000	kN/m
Bettungsreaktionsdruck Verkehr	$N_{qTh^*,d}$	0,000	0,000	0,000	kN/m
Bettungsreaktionsdruck	$N_{qH^*,d}$	0,000	0,000	0,000	kN/m
Summe der Normalkräfte	ΣN_d	-11,958	-29,129	-12,308	kN/m

3.2.4.3 Verformungsnachweis Betriebszustand

Verformungsbeiwert:	C_{v,qh^*}	0,0640	[-]
Verformungsbeiwert:	$C_{v,qv}$	-0,0833	[-]
Beiwert des Bettungsreaktionsdruckes:	K^*	0,371	[-]
Verformungsbeiwert:	c^*_v	-0,060	[-]
Vertikale Bodenspannung in Rohrscheitelebene:	p_{Ev}	40,000	kN/m ²
Vertikale Bodenspannung infolge Verkehrslast:	p_T	68,30	kN/m ²
Vertikale Gesamt-Bodenspannung in Rohrscheitelebene:	$q_{Ges,v}$	108,295	kN/m ²
Horizontale Bodenspannung am Rohr:	q_{Eh}	20,38	kN/m ²
Horizontale Bodenspannung infolge Verkehrslast:	p_{Th}	24,78	kN/m ²
Horizontale Gesamt-Bodenspannung am Rohr:	$q_{Ges,h}$	45,160	kN/m ²
Relative vertikale Durchmesseränderung:	δ_v	0,16	%
Zulässige vertikale Durchmesseränderung:	zul δ_v	2,00	%
Ausnutzungsgrad Verformung:	$U_{\delta v}$	8,2	%

Die errechnete Verformung ist kleiner als die zulässige Verformung.

3.2.4.4 Beulnachweis Betriebszustand

Teilsicherheitsbeiwert für Bauteilwiderstand auf Stabilität bei Berücksichtigung der Rohrverformungen:	$\gamma_{M,stab,red}$	1,45	[-]
Vertikale Gesamtbelastung, Designwert:	$q_{v,d}$	146,20	kN/m ²
Abminderungsfaktor für krit q_v (nach A127):	K_{v2}	0,85	[-]
Kritische Erdlast:	krit $q_{v,d}$	6,871	N/mm ²

$$\text{krit } q_{v,d} = K_{v2} \cdot \left\{ 3 + \frac{1}{3 V_{RB}} \right\} \cdot S_R \cdot \frac{1}{\gamma_{M,stab,red}} \quad (72b)$$

Ausnutzungsgrad Stabilität (vertikale Gesamtlast):	U_{qv}	2,1	%
Äußerer Überdruck über Rohrsohle:	$p_{a,So}$	0,000	bar
Maximaler äußerer Druck aus Wasser, Stütz- oder Gleitmittel, Pressdruck:	$p_{a,max}$	0,000	bar

Äußerer Flüssigkeitsdruck, Designwert: $p_{a,d}$ 0,00 bar

Der Beulnachweis für Wasserdruck entfällt, da weder Grundwasser ansteht noch Unterdruck vorliegt.
Ausnutzungsgrad Stabilität: $U_{Stab,rad}$ 2,1 %

Der Nachweis der Stabilität ist erbracht.

3.2.4.5 Spannungsnachweis Betriebszustand

Innen:		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
	$\sigma_{ST,d} = \frac{\sum N_{qv,qh,qh^*,d}}{A_{rad}} + \alpha_{ki} \cdot \frac{\sum M_{qv,qh,qh^*,d}}{W_a}$				(54)
Spannung aufgrund Erd- u. Verkehrslasten	$\sigma_{ST,d}$	48,415	-52,497	48,415	N/mm ²
	$\sigma_{re,d} = \frac{\sum N_{sonst,d}}{A_{rad}} + \alpha_{ki} \cdot \frac{\sum M_{sonst,d}}{W_a}$				(54)
Spannung aufgrund anderer Lasten	$\sigma_{re,d}$	0,953	-1,111	1,712	N/mm ²
Spannung gesamt	σ	49,368	-53,608	50,128	N/mm ²
Anzusetzende Biegezugfestigkeit	$\sigma_{RBZ,res,d}$	213,64	213,64	213,64	N/mm ²
Anzusetzende Biegedruckfestigkeit	$\sigma_{RBD,res,d}$	213,64	213,64	213,64	N/mm ²
Ausnutzungsgrad Biegezug:	U_{BZ}	23,1	---	23,5	%
Ausnutzungsgrad Biegedruck:	U_{BD}	---	25,1	---	%

Außen:		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
	$\sigma_{ST,d} = \frac{\sum N_{qv,qh,qh^*,d}}{A_{rad}} - \alpha_{ka} \cdot \frac{\sum M_{qv,qh,qh^*,d}}{W_a}$				(55)
Spannung aufgrund Erd- u. Verkehrslasten	$\sigma_{ST,d}$	-50,818	46,736	-50,818	N/mm ²
	$\sigma_{re,d} = \frac{\sum N_{sonst,d}}{A_{rad}} - \alpha_{ka} \cdot \frac{\sum M_{sonst,d}}{W_a}$				(55)
Spannung aufgrund anderer Lasten	$\sigma_{re,d}$	-0,942	1,046	-1,772	N/mm ²
Spannung gesamt	σ	-51,760	47,782	-52,590	N/mm ²
Anzusetzende Biegezugfestigkeit	$\sigma_{RBZ,res,d}$	213,64	213,64	213,64	N/mm ²
Anzusetzende Biegedruckfestigkeit	$\sigma_{RBD,res,d}$	213,64	213,64	213,64	N/mm ²
Ausnutzungsgrad Biegezug:	U_{BZ}	---	22,4	---	%
Ausnutzungsgrad Biegedruck:	U_{BD}	24,2	---	24,6	%

Alle errechneten Spannungen sind kleiner als die zulässigen Werte.

3.2.4.6 Nachweis gegen Ermüden unter nicht vorwiegend ruhender Belastung

Vertikale dynamisch relevante Bodenspannung in Scheitelhöhe: $\text{dyn } p_T$ 68,30 kN/m²
 Horizontale Bodenspannung infolge Verkehrslast für Ermüdungsnachweis: $p_{Th,E}$ 24,78 kN/m²
 Anzusetzender seitlicher Erddruck aufgrund Verkehrslast: $\text{dyn } p_{Th}$ 24,8 kN/m²
 Die stützende Wirkung des Bettungsreaktionsdruckes $\text{dyn } p_{Vh}^*$ wird nicht angesetzt, da sich das Rohr-Boden-System biegesteif verhält.

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Normalkraft aus vertikaler Verkehrslast	$\text{dyn } N_{pTv}$	0,000	-13,454	0,000	kN/m
Normalkraft aus seitlicher Verkehrslast	$\text{dyn } N_{pTh}$	-4,882	0,000	-4,882	kN/m
Summe der Normalkräfte aus Verkehr	$\text{dyn } \Sigma N$	-4,882	-13,454	-4,882	kN/m
Moment aus vertikaler Verkehrslast	$\text{dyn } M_{pTv}$	0,663	-0,663	0,663	kNm/m
Moment aus seitlicher Verkehrslast	$\text{dyn } M_{pTh}$	-0,240	0,240	-0,240	kNm/m
Summe der Momente aus Verkehr	$\text{dyn } \Sigma M$	0,422	-0,422	0,422	kNm/m
Summe der Momente aus ständigen Lasten	ΣM_g	0,202	-0,204	0,212	kNm/m



Summe der Normalkräfte aus ständigen Lasten	ΣN_g	-3,976	-8,123	-4,235	kN/m
Schwingbreite bei $5 \cdot 10^6$ Lastspielen:			$2\sigma_{a,5E6}$	52,327	N/mm ²
innen					
Korrekturfaktor Krümmung innen:			α_{ki}	1,000	[-]
Dynamischer Spannungsanteil	dyn σ_{pT}	24,842	-26,675	24,842	N/mm ²
Ausnutzungsgrad dynamischer Spannungsanteil	dyn U	52,2	---	52,2	%
außen					
Korrekturfaktor Krümmung außen:			α_{ka}	1,000	[-]
Dynamischer Spannungsanteil	dyn σ_{pT}	-25,818	23,985	-25,818	N/mm ²
Ausnutzungsgrad dynamischer Spannungsanteil	dyn U	---	50,4	---	%

Der Nachweis gegen Ermüden unter nicht vorwiegend ruhender Belastung ist erbracht.

Alle notwendigen Nachweise sind erbracht.

4 Vortriebsrohr nach DWA-A 161, 2. Auflage: hü = 1,2 m

Die Korrekturen vom Mai und Oktober 2017 sind berücksichtigt. TM 4-2019 (Ermüden bei Vortriebsrohren aus Stahl unter Bahnlasten) ist umgesetzt.

Titel der Berechnung: hü = 1,2 m

Annahmen: Überdeckungshöhe < 1,5 m
5x10⁶ NICHT anwendbar --> Hinweis auf der Oberfläche

Berechnungsart: Vollwand-/Profilrohr
Nachzuweisende Zustände: Nur Betriebszustand
Einbauskizze in Ausdruck: Ja
Mindestschnittgrößen im Betriebszustand drucken: Ja

4.1 Eingaben

4.1.1 Vortriebsverfahren

Dynamischer Vortrieb: Nein
Verfahren: Manuelle Eingabe
Typ der Bodenverschiebung: Keine
Vollständige dauerhafte Ringraumverpressung: Nein
Einsatz von Stütz- oder Gleitmittel: Nein
Ringspalt: Andere Vortriebsverfahren, kontinuierliche Ringspaltstützung mit Dokumentation

4.1.2 Trasse und Vortriebskraft

Verlauf der Vortriebsstrecke: Gerade
Berechnung der unplanmäßigen Abweichungen von der Sollachse (gerader Vortrieb): Ohne Pilotvortrieb
Kombinationsbeiwert für Rohrabwinklungen: ψ 0,80 [-]
Vorgabe der Vortriebskraft: Nein
Freie Eingabe der Sicherheit für Längsrichtung: Nein
Kontrollierter Einbau: Nein

4.1.3 Druckübertragungsring (DÜR)

Art der Druckübertragung: Ohne Druckübertragungsring

4.1.4 Bodenkennwerte

Bodenbeschaffenheit: Lockergestein
Bodengruppe am Rohr: G1
Andere Bodengruppe oberhalb Rohrscheitel: Nein
Auflagerwinkel (Lockergestein): $2\alpha = 180^\circ$ (Regelfall)
Manuelle Angabe des inneren Reibungswinkel des Bodens: Nein
Manuelle Angabe der Wichte des Bodens: Nein

4.1.5 Bodenverhalten

Manuelle Angabe des Verformungsmoduls des Bodens: Nein
Anwendung von Silotheorie: Automatisch
Manuelle Angabe von f_1 , K_1 , δ und c : Nein
Lagerungsdichte am Rohr: Mitteldicht bis dicht



Berücksichtigung des Konzentrationsfaktors λ :

Nein

4.1.6 Lasten

Überdeckungshöhe:
 Zusätzliche Flächenlast:
 Teilsicherheitsbeiwert Wasseraußendruck:
 Grundwasserstand über Sohle:
 Innendruck (Betriebszustand):
 Rohr ist im Betrieb mit Flüssigkeit gefüllt:
 Freie Eingabe Sicherheitsbeiwert für Verkehrslasten:
 Verkehrslast:
 Anpassungsfaktor α_{Qi} LM71 (DIN EN 1991-2):
 Abminderungsfaktor dynamische Last manuell eingeben:

h	1,5	m
P_0	0,00	kN/m ²
$\gamma_{F,W}$	1,35	[-]
h_{GW}	0,0	m
$P_{i,0}$	0,0	bar
Nein		
Nein		
Schiene LM71, eingleisig		
$\alpha_{Qi,LM71}$	1,00	[-]
Nein		

4.1.7 Berechnungsoptionen

Beulnachweis:
 Verformungsnachweis:
 Zulässige Verformung nach A161:
 Ermüdungsnachweis:
 Mindestschnittgrößen nach Norm:
 Vergleichsspannung Mindestschnittgrößen:

Nach A 127
 Nach A 161
 Ja
 Nach Regelwerk
 Ja
 Mit Bemessungswerten

4.1.8 Vollwand/Profil-Rohr

Rohrauswahl:

Vollwand

Material-Klasse:
 Vorverformung Typ A:
 Lokale Vorverformung:
 Auswahl der Eingaben:
 Außendurchmesser:
 Wandstärke:

Metall		
$\delta_{v,TypA}$	1,0	%
$\delta_{v,lokal}$	0,0	%
Da und s		
d_a	404,0	mm
s	10,0	mm

Perforation:

Ohne Perforation

Äußerer Rücksprung:
 Innerer Rücksprung:
 Rohrlänge:
 Manuelle Vorgabe Δa_{cal} :
 Rohrende ist vorgespannt:
 Exzentrizitäten beim Rohranschluss:

$\Delta d_{a,min}$	0,0	mm
$\Delta d_{i,max}$	0,0	mm
L_R	3,00	m
Nein		
Nein		
vorh e	0,0	mm

4.1.8.1 Metall

Teilsicherheiten nach Norm:

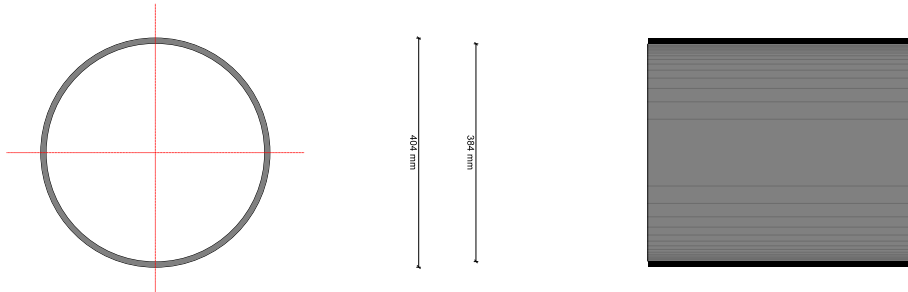
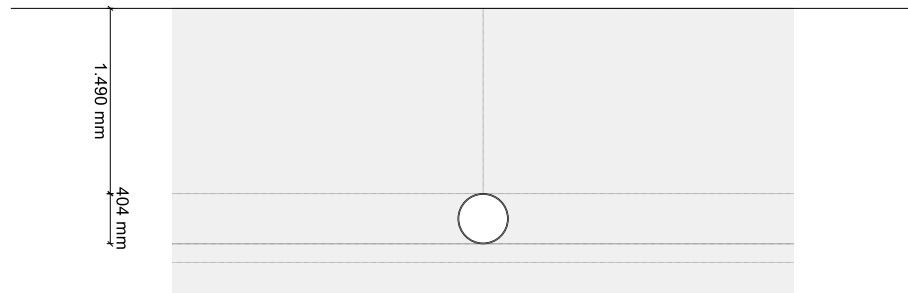
Ja

Auswahl Material:
 Dyn. Nachweis führen nach:
 Kerbfall nach EC 3-1-9, Bild 7.1:
 Stahlgüte DIN:
 Plastische Reserven nutzen:
 Angabe Grenzspannungen:
 Art des Metalls:

Nach Norm (DIN)
 Regelwerk
 71
 Baustahl S235 (EN 10025-2)
 Nein
 Ja
 Stahl-(ZM), geschweißte Rohre

4.1.8.2 Systemskizze

Schiene LM71, eingleisig



4.2 Ergebnisse

4.2.1 Teilsicherheitsbeiwerte (Einwirkungen)

Teilsicherheitsbeiwert für Verkehrslasten (quer zur Rohrachse):	YQ	1,35	[-]
Teilsicherheitsbeiwert für Innendruck (Druckrohre > 0,5 bar):	YF,Pi	1,50	[-]
Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkungen quer zur Rohrachse:	YF	1,35	[-]
Teilsicherheitsbeiwert Einwirkung längs der Rohrachse:	YF,ax	1,30	[-]

4.2.2 Zwischenergebnisse Rohr

Innendurchmesser:	d _i	384,0	mm
Außendurchmesser:	d _a	404,0	mm
Mittlerer Radius:	r _m	197,00	mm
Wanddicke:	s	10,00	mm
Verhältnis Radius zu Wanddicke:	r _m /s	19,700	[-]
Korrekturfaktor Krümmung innen:	α _{ki}	1,000	[-]
Korrekturfaktor Krümmung außen:	α _{ka}	1,000	[-]
Örtliche Vorverformung:	δ _{vl}	0,00	%
Vorverformung (Ovalisierung vor Last):	δ _{vg}	1,00	%
Axial wirksame Profilfläche:	A _{ax}	10,00	mm ² /mm
Radiale Profilfläche:	A _{rad}	10,00	mm ² /mm
Trägheitsabstand:	e	5,00	mm
Trägheitsmoment:	I	83,33	mm ⁴ /mm
Äußeres Widerstandsmoment:	W _a	16,67	mm ³ /mm
Inneres Widerstandsmoment:	W _i	16,67	mm ³ /mm
Flächenverhältnis:	KQ	1,2	[-]
Kleinster Außendurchmesser:	d _{a,min}	404	mm
Größter Innendurchmesser:	d _{i,max}	384	mm
Max. Abweichung Stirnflächen von Rechtwinkligkeit:	Δ _{a,cal}	3,2	mm
Länge des einzelnen Vortriebrohres:	LR	3,00	m

4.2.2.1 Materialeigenschaften

Wichte des Rohrwerkstoffs:	YR	78,5	kN/m ³
Querkontraktionszahl:	v	0,30	[-]
Elastizitätsmodul in Umfangsrichtung:	E _R	210.000,0	N/mm ²
Elastizitätsmodul in axialer Richtung:	E _{R,ax}	210.000,0	N/mm ²
Radiale Biegezugfestigkeit:	σ _{RBZ}	235,0	N/mm ²
Radiale Biegedruckfestigkeit:	σ _{RBD}	235,0	N/mm ²
Ringzugfestigkeit:	σ _{RZ}	235,0	N/mm ²
Schwingbreite bei 2·10 ⁶ Lastspielen:	2σ _{a,2E6}	71,0	N/mm ²
Schwingbreite bei 5·10 ⁶ Lastspielen:	2σ _{a,5E6}	52,3	N/mm ²
Schwingbreite bei 1·10 ⁸ Lastspielen:	2σ _{a,1E8}	28,8	N/mm ²
Grenzwert der Längsdruckfestigkeit:	σ _{LD}	235,0	N/mm ²

4.2.2.2 Sicherheiten

Teilsicherheitsbeiwert für Bauteilwiderstand längs der Rohrachse:	Y _{M,ax}	1,35	[-]
Teilsicherheitsbeiwert für Bauteilwiderstand quer zur Rohrachse:	Y _{M,rad}	1,10	[-]
Teilsicherheitsbeiwert für Bauteilwiderstand auf Stabilität:	Y _{M,stab}	1,85	[-]
Teilsicherheitsbeiwert für Bauteilwiderstand auf Stabilität bei Berücksichtigung der Rohrverformungen:	Y _{M,stab,red}	1,45	[-]

4.2.2.3 Überprüfung der Mindestwanddicke

Außendurchmesser:	d _a	404,0	mm
Mittlerer Radius:	r _m	197,00	mm
Wanddicke:	s	10,00	mm

Berechnete Mindestwanddicke bei vorgegebenen Radius r_m : min. t 6,30 mm

Die Mindestwanddicke nach 9.3.1 Tabelle 19 / 20 wird eingehalten bzw. übertroffen.

4.2.3 Zwischenergebnisse Boden

Wichte des Bodens:	γ_B	20,0	kN/m ³
Wichte des Bodens unter Auftrieb:	γ'_B	11,0	kN/m ³
Bodengruppe am Rohr:	G1		
Innerer Reibungswinkel am Rohr:	φ'_2	32,5	°
Grundwert des Verformungsmodul Boden:	E_0	50,00	N/mm ²
Faktor für die Lagerungsdichte/Konsistenz nach A161, Tabelle 3/4:	f_1	0,60	[-]
Auflockerungsfaktor nach A161, Tabelle 5:	f_2	0,80	[-]
Innerer Reibungswinkel über Rohrscheitel:	φ'_1	32,5	°
Spannungsexponent:	z	0,4	[-]
Hinweis zur Silotheorie:	$\kappa = 1$, da keine Bodenverschiebungen stattfinden.		
Berücksichtigung des Konzentrationsfaktors λF notwendig:	Ja		
Konzentrationsfaktor:	λ	1,000	[-]
Basis-Erddruckverhältnis unter Rohrscheitel:	$K_{2,0}$	0,46	[-]
Erddruckverhältnis unter Rohrscheitel, Bauzustand:	$K_{2,Bau}$	0,37	[-]
Erddruckverhältnis unter Rohrscheitel, Endzustand:	$K_{2,End}$	0,46	[-]

4.2.4 Betriebszustand

4.2.4.1 Belastungen Betriebszustand

Stoßbeiwert: Φ_2 1,67 [-]

Für Rohre, die mit Vortriebsverfahren eingebracht werden, gilt der größere der beiden Werte a) Überdeckungshöhe (gemessen von OK Schwelle bis OK Rohr) $h_{\bar{u}} \geq 1,50$ m oder b) Bodenüberdeckung (gemessen von UK Schotter bis OK Rohr) $h_B \geq 2 \cdot d_a$, vgl. DWA-A 161 Abschnitt 6.2.3.3 bzw. Ril 836.4505 (8).

Für die Ausführung von Querungen unter Gleisanlagen mit kleineren Überdeckungen - und grundsätzlich bei $h_{\bar{u}} < 1,1$ m - ist eine unternehmensinterne Genehmigung (UiG) der DB AG und ggf. eine Zustimmung im Einzelfall (ZiE) des Eisenbahn-Bundesamtes (EBA) erforderlich.

Festlegung Eisenbahnbundesamt: Der Schwingbeiwert ist für alle Bereiche $h_{\bar{u}} < 1,50$ m mit 1,67 anzusetzen.

Stoßbeiwert:	red Φ_2	1,67	[-]
Anpassungsfaktor α_{Qi} LM71 (DIN EN 1991-2):	$\alpha_{Qi,LM71}$	1,00	[-]
Einfache Bodenspannung aus Verkehr:	p	55,65	kN/m ²
Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Scheitelhöhe:	p_T	92,94	kN/m ²
Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Kämpferhöhe (ohne φ):	p_K	46,27	kN/m ²
Erddruckverhältnis unter Rohrscheitel:	K_2	0,46	[-]
Horizontale Bodenspannung aus Verkehr:	$p_{T,h}$	28,58	kN/m ²
Vertikale Bodenspannung in Rohrscheitelebene:	p_{Ev}	29,800	kN/m ²
Wirksame vertikale Bodenspannung in Rohrscheitelebene:	q_{Ev}	29,800	kN/m ²
Vertikale Gesamt-Bodenspannung in Rohrscheitelebene:	$q_{Ges,v}$	122,740	kN/m ²
Die Erddruckverteilung am Rohr wird \cos^2 - bzw. \sin^2 -förmig angenommen.:	Nein		
Horizontale Bodenspannung am Rohr:	q_{Eh}	15,66	kN/m ²
Horizontale Gesamt-Bodenspannung am Rohr:	$q_{Ges,h}$	44,240	kN/m ²
Innerer Überdruck:	p_i	0,000	bar
Äußerer Überdruck über Rohrscheitel:	$p_{a,Sc}$	0,000	bar
Rohrsteifigkeit:	S_R	2.289	kN/m ²
Rohrsteifigkeit:	\bar{S}_R	2.289	kN/m ²
Normierender Bezugswert:	$\sigma_{B,0}$	100,0	kN/m ²



Spannungsabhängiger Erhöhungsfaktor:	f_3	1,00	[-]
Verformungsmodul Boden:	E_B	24,00	N/mm ²
Erddruckverhältnis unter Rohrscheitel:	K_2	0,46	[-]
Bettungssteifigkeit:	S_{Bh}	14,40	N/mm ²
Systemsteifigkeit:	V_{RB}	0,1590	[-]
Das Rohr-Bodensystem verhält sich biegeweich:	Ja		

Der seitliche Bettungsreaktionsdruck darf nach DWA-A 161, Kapitel 6.2.2 nur angesetzt werden, wenn das Rohr nach Abschluss des Vortriebes dauerhaft und vollständig verpresst wird.

4.2.4.2 Schnittkräfte Betriebszustand

Momente:		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Vertikale Belastung aus Erdüberdeckung	$M_{pEv,d}$	0,390	-0,390	0,390	kNm/m
Vertikale Belastung aus Verkehr	$M_{pTv,d}$	1,217	-1,217	1,217	kNm/m
Horizontale Belastung aus Verkehr	$M_{pTh,d}$	-0,374	0,374	-0,374	kNm/m
Horizontale Belastung aus Erdüberdeckung	$M_{pEh,d}$	-0,205	0,205	-0,205	kNm/m
Eigengewicht	$M_{g,d}$	0,016	-0,018	0,029	kNm/m
Wasserfüllung bis Rohrscheitel	$M_{w,d}$	0,000	0,000	0,000	kNm/m
Auftrieb (äußerer Wasserstand bis Scheitel)	$M_{a,d}$	0,000	0,000	0,000	kNm/m
Wasserdruck	$M_{pw,d}$	0,000	0,000	0,000	kNm/m
Bettungsreaktionsdruck Erdlast	$M_{qEh^*,d}$	0,000	0,000	0,000	kNm/m
Bettungsreaktionsdruck	$M_{qTh^*,d}$	0,000	0,000	0,000	kNm/m
Summe der Momente	ΣM_d	1,044	-1,046	1,057	kNm/m

Normalkräfte:		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Vertikale Belastung aus Erdüberdeckung	$N_{pEv,d}$	0,000	-7,925	0,000	kN/m
Vertikale Belastung aus Verkehr	$N_{pTv,d}$	0,000	-24,717	0,000	kN/m
Horizontale Belastung aus Verkehr	$N_{pTh,d}$	-7,602	0,000	-7,602	kN/m
Horizontale Belastung aus Erdüberdeckung	$N_{pEh,d}$	-4,164	0,000	-4,164	kN/m
Eigengewicht	$N_{g,d}$	0,052	-0,328	-0,298	kN/m
Wasserfüllung bis Rohrscheitel	$N_{w,d}$	0,000	0,000	0,000	kN/m
Auftrieb (äußerer Wasserstand bis Scheitel)	$N_{a,d}$	0,000	0,000	0,000	kN/m
Wasserdruck	$N_{pw,d}$	0,000	0,000	0,000	kN/m
Bettungsreaktionsdruck Erdlast	$N_{qEh^*,d}$	0,000	0,000	0,000	kN/m
Bettungsreaktionsdruck Verkehr	$N_{qTh^*,d}$	0,000	0,000	0,000	kN/m
Bettungsreaktionsdruck	$N_{qh^*,d}$	0,000	0,000	0,000	kN/m
Summe der Normalkräfte	ΣN_d	-11,713	-32,971	-12,064	kN/m

4.2.4.3 Verformungsnachweis Betriebszustand

Verformungsbeiwert:	C_{v,qh^*}	0,0640	[-]
Verformungsbeiwert:	$C_{v,qv}$	-0,0833	[-]
Beiwert des Bettungsreaktionsdruckes:	K^*	0,371	[-]
Verformungsbeiwert:	c^*_v	-0,060	[-]
Vertikale Bodenspannung in Rohrscheitelebene:	p_{Ev}	29,800	kN/m ²
Vertikale Bodenspannung infolge Verkehrslast:	p_T	92,94	kN/m ²
Vertikale Gesamt-Bodenspannung in Rohrscheitelebene:	$q_{Ges,v}$	122,740	kN/m ²
Horizontale Bodenspannung am Rohr:	q_{Eh}	15,66	kN/m ²
Horizontale Bodenspannung infolge Verkehrslast:	p_{Th}	28,58	kN/m ²
Horizontale Gesamt-Bodenspannung am Rohr:	$q_{Ges,h}$	44,240	kN/m ²
Relative vertikale Durchmesseränderung:	δ_v	0,20	%
Zulässige vertikale Durchmesseränderung:	zul δ_v	2,00	%
Ausnutzungsgrad Verformung:	U_{δ_v}	10,2	%

Die errechnete Verformung ist kleiner als die zulässige Verformung.

4.2.4.4 Beulnachweis Betriebszustand

Teilsicherheitsbeiwert für Bauteilwiderstand auf Stabilität bei Berücksichtigung der Rohrverformungen:	$\gamma_{M,stab,red}$	1,45	[-]
Vertikale Gesamtbelastung, Designwert:	$q_{v,d}$	165,70	kN/m ²
Abminderungsfaktor für krit q_v (nach A127):	K_{v2}	0,85	[-]

Kritische Erdlast:	krit $q_{v,d}$	6,871	N/mm ²
$\text{krit } q_{v,d} = K_{v2} \cdot \left\{ 3 + \frac{1}{3 V_{RB}} \right\} \cdot S_R \cdot \frac{1}{Y_{M,stab,red}} \quad (72b)$			

Ausnutzungsgrad Stabilität (vertikale Gesamtlast):	U_{qv}	2,4	%
Äußerer Überdruck über Rohrsohle:	$p_{a,So}$	0,000	bar
Maximaler äußerer Druck aus Wasser, Stütz- oder Gleitmittel, Pressdruck:	$p_{a,max}$	0,000	bar
Äußerer Flüssigkeitsdruck, Designwert:	$p_{a,d}$	0,00	bar

Der Beulnachweis für Wasserdruck entfällt, da weder Grundwasser ansteht noch Unterdruck vorliegt.
 Ausnutzungsgrad Stabilität: $U_{Stab,rad}$ 2,4 %

Der Nachweis der Stabilität ist erbracht.

4.2.4.5 Spannungsnachweis Betriebszustand

Innen:		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
$\sigma_{ST,d} = \frac{\sum N_{qv,qh,qh^*,d}}{A_{rad}} + \alpha_{ki} \cdot \frac{\sum M_{qv,qh,qh^*,d}}{W_a} \quad (54)$					
Spannung aufgrund Erd- u. Verkehrslasten	$\sigma_{ST,d}$	60,515	-64,956	60,515	N/mm ²
$\sigma_{re,d} = \frac{\sum N_{sonst,d}}{A_{rad}} + \alpha_{ki} \cdot \frac{\sum M_{sonst,d}}{W_a} \quad (54)$					
Spannung aufgrund anderer Lasten	$\sigma_{re,d}$	0,953	-1,111	1,712	N/mm ²
Spannung gesamt	σ	61,468	-66,067	62,227	N/mm ²
Anzusetzende Biegezugfestigkeit	$\sigma_{RBZ,res,d}$	213,64	213,64	213,64	N/mm ²
Anzusetzende Biegedruckfestigkeit	$\sigma_{RBD,res,d}$	213,64	213,64	213,64	N/mm ²
Ausnutzungsgrad Biegezug:	U_{BZ}	28,8	---	29,1	%
Ausnutzungsgrad Biegedruck:	U_{BD}	---	30,9	---	%

Außen:		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
$\sigma_{ST,d} = \frac{\sum N_{qv,qh,qh^*,d}}{A_{rad}} - \alpha_{ka} \cdot \frac{\sum M_{qv,qh,qh^*,d}}{W_a} \quad (55)$					
Spannung aufgrund Erd- u. Verkehrslasten	$\sigma_{ST,d}$	-62,868	58,427	-62,868	N/mm ²
$\sigma_{re,d} = \frac{\sum N_{sonst,d}}{A_{rad}} - \alpha_{ka} \cdot \frac{\sum M_{sonst,d}}{W_a} \quad (55)$					
Spannung aufgrund anderer Lasten	$\sigma_{re,d}$	-0,942	1,046	-1,772	N/mm ²
Spannung gesamt	σ	-63,810	59,473	-64,640	N/mm ²
Anzusetzende Biegezugfestigkeit	$\sigma_{RBZ,res,d}$	213,64	213,64	213,64	N/mm ²
Anzusetzende Biegedruckfestigkeit	$\sigma_{RBD,res,d}$	213,64	213,64	213,64	N/mm ²
Ausnutzungsgrad Biegezug:	U_{BZ}	---	27,8	---	%
Ausnutzungsgrad Biegedruck:	U_{BD}	29,9	---	30,3	%

Alle errechneten Spannungen sind kleiner als die zulässigen Werte.

4.2.4.6 Nachweis gegen Ermüden unter nicht vorwiegend ruhender Belastung

Gemäß TM 4-2019 der DB Netz AG darf die Schwingbreite für Stahlrohre bei $5 \cdot 10^6$ Lastwechseln nur angesetzt werden, wenn die Überdeckung $\geq 1,5$ m ist. Anderenfalls ist der Ermüdungsnachweis für $1 \cdot 10^8$ Zyklen zu führen.

Vertikale dynamisch relevante Bodenspannung in Scheitelhöhe:	dyn p_T	92,94	kN/m ²
Horizontale Bodenspannung infolge Verkehrslast für Ermüdungsnachweis:	$p_{Th,E}$	28,58	kN/m ²
Anzusetzender seitlicher Erddruck aufgrund Verkehrslast:	dyn p_{Th}	28,6	kN/m ²

Die stützende Wirkung des Bettungsreaktionsdruckes $\text{dyn } p_{Vh}^*$ wird nicht angesetzt, da sich das Rohr-Boden-System biegesteif verhält.

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Normalkraft aus vertikaler Verkehrslast	$\text{dyn } N_{pTv}$	0,000	-18,309	0,000	kN/m
Normalkraft aus seitlicher Verkehrslast	$\text{dyn } N_{pTh}$	-5,631	0,000	-5,631	kN/m
Summe der Normalkräfte aus Verkehr	$\text{dyn } \Sigma N$	-5,631	-18,309	-5,631	kN/m
Moment aus vertikaler Verkehrslast	$\text{dyn } M_{pTv}$	0,902	-0,902	0,902	kNm/m
Moment aus seitlicher Verkehrslast	$\text{dyn } M_{pTh}$	-0,277	0,277	-0,277	kNm/m
Summe der Momente aus Verkehr	$\text{dyn } \Sigma M$	0,624	-0,624	0,624	kNm/m
Summe der Momente aus ständigen Lasten	ΣM_g	0,149	-0,151	0,159	kNm/m
Summe der Normalkräfte aus ständigen Lasten	ΣN_g	-3,046	-6,114	-3,305	kN/m
Schwingbreite bei $1 \cdot 10^8$ Lastspielen:			$2\sigma_{a,1E8}$	28,755	N/mm ²
innen					
Korrekturfaktor Krümmung innen:					
Dynamischer Spannungsanteil	$\text{dyn } \sigma_{pT}$	36,902	α_{ki} -39,296	1,000	[-]
Ausnutzungsgrad dynamischer Spannungsanteil	$\text{dyn } U$	141,2	---	141,2	%
außen					
Korrekturfaktor Krümmung außen:					
Dynamischer Spannungsanteil	$\text{dyn } \sigma_{pT}$	-38,028	α_{ka} 35,634	1,000	[-]
Ausnutzungsgrad dynamischer Spannungsanteil	$\text{dyn } U$	---	136,3	---	%

Der Nachweis gegen Ermüden unter nicht vorwiegend ruhender Belastung konnte nicht erbracht werden!

Es konnten nicht alle geforderten statischen Nachweise erbracht werden!

5 Statik nach ATV-DVWK-A 127, 3.Auflage: Grabenverlegung Stahlrohr OHNE TM

Titel der Teilstatik: Grabenverlegung Stahlrohr OHNE TM

Berechnungsart: Vollwand-/Profilrohr
 Skizzen (Einbau/Rohr) in Ausdruck: Ja

5.1 Eingaben

5.1.1 Sicherheiten

Sicherheitsklasse: A (Regelfall)
 Sicherheit Stabilität nach Tabelle 13: Ohne Vorverformungen (2,5 / 2,0)
 Zulässige Verformung: 6% (Regelfall)
 Behandlung von Innendruck: Gemäß Fußnote des ATV-DVWK-A 127
 Kleinere Biegedruck-Sicherheiten: Nein (ATV-DVWK-A 127)
 Nachweis bei nicht vorwiegend ruhender Belastung: Nach Regelwerk
 Berücksichtigung von dyn pvh*: Nach Norm
 Berücksichtigung der Vorverformungen Typ A in Verformungsnachweis: Ja

5.1.2 Boden

Bodengruppe Verfüllung: G1
 Berechnung E1: Tabelle 8 (A127)
 Bodengruppe Einbettung: G1
 Berechnung E20: Tabelle 8 (A127)
 Bodengruppe anstehender Boden: G1
 Berechnung E3: Verdichtungsgrad
 Verdichtungsgrad E3: D_{Pr,E3} 99,0 %
 E4 = 10 · E1: Ja
 Anwendung von Silotheorie: Automatisch

5.1.3 Belastung

Überdeckungshöhe: h 3,50 m
 Minimaler Grundwasserstand über Sohle: h_{W,min} 0,00 m
 Maximaler Grundwasserstand über Sohle: h_{W,max} 0,00 m
 Wichte des Bodens: γ 20,0 kN/m³
 Zusätzliche Flächenlast: p₀ 0,0 kN/m²
 Innendruck, langfristig: P_{I,L} 0,00 bar
 Wasserfüllung (z.B. Staukanal): Ja
 Wichte Füllmedium: γ_F 10,0 kN/m³
 Eingabe Spezialfahrzeug: Nein
 Verkehrslast: Eisenbahn, eingleisig, LM 71
 Ansatz horizontaler Belastungen aus Verkehr im Ermüdungsnachweis: α_{qhT,dyn} 0,00 %

5.1.4 Einbau

Einbauweise: Graben
 Grabenbreite in Scheitelhöhe: b 1,80 m
 Mindestgrabenbreite prüfen: Nein
 Stärke der Bettungsschicht automatisch ermitteln: Ja
 Böschungswinkel: β 90 °
 Überschüttungsbedingung: A1
 Einbettungsbedingung: B1
 Auflagerart: Lose

Auflagerwinkel:	120°		
Relative Ausladung automatisch ermitteln:	Ja		
Untere Sockelhöhe vorgeben:	Nein		
Gesamt-Sockelhöhe:	h_s	0,00	m

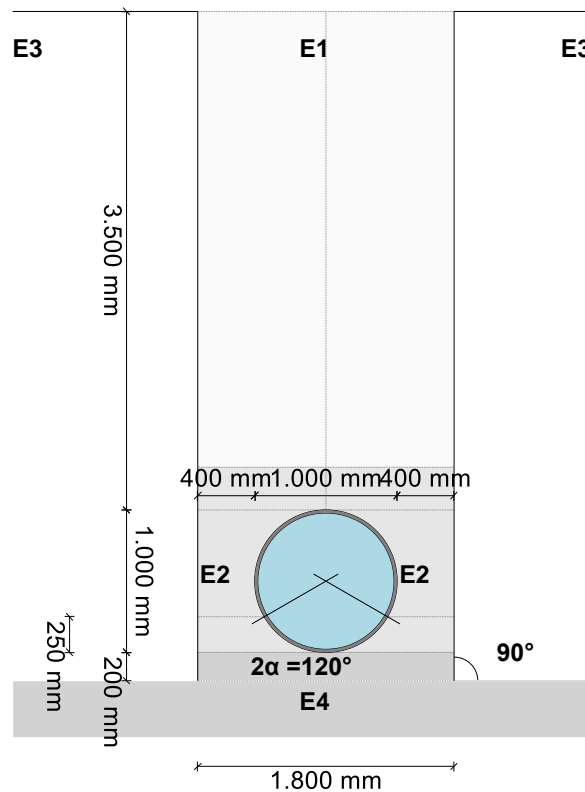
5.1.5 Vollwand/Profil-Rohr

Rohrauswahl:	Vollwand		
Material-Klasse:	Metall		
Vorverformung Typ A:	$\delta_{v,TypA}$	1,0	%
Lokale Vorverformung:	$\delta_{v,lokal}$	0,0	%
Auswahl der Eingaben:	Da und s		
Außendurchmesser:	d_a	1.000,0	mm
Wandstärke:	s	25,0	mm
Perforation:	Ohne Perforation		

5.1.5.1 Metall

Auswahl Material:	Nach Norm (DIN)
Stahlgüte DIN:	Baustahl S235 (EN 10025-2)
Plastische Reserven nutzen:	Nein
Angabe Grenzspannungen:	Ja

Verkehrslast: Eisenbahn, eingleisig, LM 71



5.2 Ergebnisse

5.2.1 Zwischenergebnisse Rohr

Innendurchmesser:	d_i	950,0	mm
Außendurchmesser:	d_a	1.000,0	mm
Mittlerer Radius:	r_m	487,50	mm
Wanddicke:	s	25,00	mm
Verhältnis Radius zu Wanddicke:	r_m/s	19,500	[-]
Korrekturfaktor Krümmung innen:	α_{ki}	1,017	[-]
Korrekturfaktor Krümmung außen:	α_{ka}	0,983	[-]
Örtliche Vorverformung:	δ_{vl}	0,00	%
Vorverformung (Ovalisierung vor Last):	δ_{vg}	1,00	%
Radiale Profilfläche:	A_{rad}	25,00	mm ² /mm
Trägheitsabstand:	e	12,50	mm
Trägheitsmoment:	I	1.302,08	mm ⁴ /mm
Äußeres Widerstandsmoment:	W_a	104,17	mm ³ /mm
Inneres Widerstandsmoment:	W_i	104,17	mm ³ /mm
Flächenverhältnis:	k_Q	1,2	[-]

5.2.1.1 Materialeigenschaften

Wichte des Rohrwerkstoffs:	γ_R	78,5	kN/m ³
Querkontraktionszahl:	ν	0,30	[-]
Elastizitätsmodul in Umfangsrichtung:	E_R	210.000,0	N/mm ²
Radiale Biegezugfestigkeit:	σ_{RBZ}	225,0	N/mm ²
Radiale Biegedruckfestigkeit:	σ_{RBD}	225,0	N/mm ²
Ringzugfestigkeit:	σ_{RZ}	225,0	N/mm ²
Schwingbreite bei $2 \cdot 10^6$ Lastspielen:	$2\sigma_{a,2E6}$	140,0	N/mm ²
Schwingbreite bei $5 \cdot 10^6$ Lastspielen:	$2\sigma_{a,5E6}$	103,2	N/mm ²
Schwingbreite bei $1 \cdot 10^8$ Lastspielen:	$2\sigma_{a,1E8}$	56,7	N/mm ²

5.2.1.2 Sicherheiten

Erforderlicher Sicherheitsbeiwert, Biegezugspannungen:	$\text{erf } \gamma_{RBZ}$	1,50	[-]
Erforderlicher Sicherheitsbeiwert, Biegedruckspannungen:	$\text{erf } \gamma_{RBD}$	1,50	[-]
Erforderlicher Sicherheitsbeiwert, Instabilität:	$\text{erf } \gamma_{stab}$	2,50	[-]

5.2.1.3 Mindestgrabenbreite nach DIN EN 1610:2015-12

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

5.2.2 Zwischenergebnisse

5.2.2.1 Silotheorie

Erdlastbeiwert κ für Grabenlast (Silotheorie):	κ	0,677	[-]
Erdlastbeiwert κ_0 für Flächenlast (Silotheorie):	κ_0	0,432	[-]

5.2.2.2 Belastung

Grundwasserstand über Scheitel:	$h_{W,Scheitel}$	0,00	m
Vertikale Bodenspannung aufgrund Erdlast:	P_{Erd}	47,38	kN/m ²
Vertikale Bodenspannung aufgrund Erd- und Flächenlast:	P_E	47,38	kN/m ²
Spannung aufgrund Verkehrslast:	P_V	43,07	kN/m ²
Enthaltener Stoßfaktor:	ϕ	1,42	[-]
Spannung für Ermüden inkl. Stoßbeiwert:	p_T	43,07	kN/m ²

5.2.2.3 Boden-Verformungsmoduln EB

E-Modul Verfüllung unter Last:	$E_{1,\sigma}$	16,00	N/mm ²
--------------------------------	----------------	-------	-------------------

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

3.01

E-Modul anstehender Boden:	$E_{3,\sigma}$	33,14	N/mm ²
E-Modul Einbettung unter Last:	$E_{20,\sigma}$	16,00	N/mm ²
Reduktionsfaktor für das Kriechen:	f_1	1,000	[-]
Abminderungsfaktor E20 (Grundwasser):	f_2	1,000	[-]
Abminderungsfaktor E20 (Diagramm 5):	α_{B0}	0,667	[-]
Abminderungsfaktor E20 (enger Graben):	α_B	0,756	[-]
E-Modul Einbettung (abgemindert):	$E_{2,\sigma}$	12,09	N/mm ²
E-Modul Boden unter dem Rohr:	$E_{4,\sigma}$	160,00	N/mm ²

5.2.2.4 Bodensteifigkeiten

Hilfswert für horizontale Bettungssteifigkeit:	Δf	0,662	[-]
Korrekturfaktor für die horizontale Bettungssteifigkeit:	ζ	1,621	[-]
Horizontale Bettungssteifigkeit:	S_{Bh}	11,755	N/mm ²
Vertikale Bettungssteifigkeit:	S_{Bv}	12,089	N/mm ²

5.2.2.5 Auflagerwinkel, wirksame Ausladung und Reibungswinkel

Auflagerwinkel:	2α	120	°
Höhe Auflager von Auflagerwinkel bis UK Rohr:	t_r	0,250	m
Berechnete Ausladung:	a	1,00	[-]
Wirksame Ausladung:	a'	1,324	[-]
Innerer Reibungswinkel:	φ'	35,000	°
Wandreibungswinkel:	δ	23,333	°

5.2.2.6 Rohrwerkstoffkennwerte und Ringsteifigkeit

Elastizitätsmodul in Umfangsrichtung:	E_R	210.000,0	N/mm ²
Radiale Biegezugfestigkeit:	σ_{RBZ}	225,0	N/mm ²
Radiale Biegedruckfestigkeit:	σ_{RBD}	225,0	N/mm ²
Rohrsteifigkeit:	S_R	2.360	kN/m ²

5.2.2.7 Steifigkeitsverhältnisse

Systemsteifigkeit, gewichtet:	$V_{RB,w}$	0,2008	[-]
Steifigkeitsverhältnis:	V_S	2,8749	[-]
Beiwert für den Bettungsreaktionsdruck:	c_v^*	-0,068	[-]

5.2.2.8 Beiwerte

Erddruckbeiwert (Einbettung):	K_2	0,400	[-]
Beiwert für den Bettungsreaktionsdruck:	K^*	0,334	[-]
Resultierender Verformungsbeiwert:	$c'_{h,qv}$	0,0891	[-]
Resultierender Verformungsbeiwert:	c'_{h,qh^*}	-0,0658	[-]
Beiwert für den Bettungsreaktionsdruck:	c_v^*	-0,068	[-]

5.2.2.9 Konzentrationsfaktoren λ_R und λ_B

Maximaler Konzentrationsfaktor:	$\max \lambda$	1,699	[-]
Beiwert für maximalen Konzentrationsfaktor:	K'	0,932	[-]
Konzentrationsfaktor über Rohr, Startwert:	λ_R	1,382	[-]
Konzentrationsfaktor über Rohr, unter Grabeneinfluss:	λ_{RG}	1,102	[-]
Konzentrationsfaktor über Rohr, oberer Grenzwert:	λ_{fo}	3,475	[-]
Konzentrationsfaktor über Rohr, unterer Grenzwert:	λ_{fu}	0,373	[-]
Konzentrationsfaktor über Rohr, endgültiger Wert:	λ_{RG}	1,102	[-]
Konzentrationsfaktor Boden:	λ_B	0,873	[-]

5.2.2.10 Druckverteilung am Rohrumfang

Vertikale Gesamtlast:	q_v	95,28	kN/m ²
Seitendruck:	q_h	20,54	kN/m ²
Bettungsreaktionsdruck (Erdlasten):	q^*_h	25,43	kN/m ²



Bettungsreaktionsdruck (Wasserfüllung): q^*_{hw} 1,30 kN/m²

5.2.3 Schnittkräfte , Langzeit

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Moment aufgrund vertikaler Gesamtbelastung	M_{qv}	5,910	-6,001	6,227	kNm/m
Moment aufgrund Seitendruck	M_{qh}	-1,220	1,220	-1,220	kNm/m
Moment aufgrund horiz. Bettungsreaktionsdruck	M^*_{qh}	-1,094	1,257	-1,094	kNm/m
Moment aufgrund horiz. Bettungsreakt. (Wasserfüllung)	M^*_{qw}	-0,056	0,064	-0,056	kNm/m
Moment aufgrund Eigengewicht	M_g	0,178	-0,205	0,243	kNm/m
Moment aufgrund Wasserfüllung	M_w	0,220	-0,255	0,301	kNm/m
Moment aufgrund Wasserdruck/Innendruck	M_{pw}	0,000	0,000	0,000	kNm/m
Summe der Momente	ΣM	3,938	-3,919	4,401	kNm/m

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Normalkraft aufgrund vertikaler Gesamtbelastung	N_{qv}	1,254	-46,451	-1,254	kN/m
Normalkraft aufgrund Seitendruck	N_{qh}	-10,013	0,000	-10,013	kN/m
Normalkraft aufgrund horiz. Bettungsreaktionsdruck	N^*_{qh}	-7,153	0,000	-7,153	kN/m
Normalkraft aufgrund horiz. Bettungsreakt. (Wasserfüllung)	N^*_{qw}	-0,365	0,000	-0,365	kN/m
Normalkraft aufgrund Eigengewicht	N_g	0,239	-1,503	-0,239	kN/m
Normalkraft aufgrund Wasserfüllung	N_w	1,485	0,511	3,268	kN/m
Normalkraft aufgrund Wasserdruck/Innendruck	N_{pw}	0,000	0,000	0,000	kN/m
Summe der Normalkräfte	ΣN	-14,553	-47,443	-15,757	kN/m

Enthaltener Stoßfaktor: ϕ 1,42 [-]
 Spannung für Ermüden inkl. Stoßbeiwert: p_T 43,07 kN/m²
 Abminderungsfaktor α_V nach Tabelle 14 für Verkehrslasten: α_V 1,00 [-]
 Abgeminderte vertikale Bodenspannung für Ermüdung: $\text{dyn } p_v$ 43,073 kN/m²

Die stützende Wirkung des Bettungsreaktionsdruckes $\text{dyn } p_{vh}^*$ wird nicht angesetzt, da der Verdichtungsgrad < 97% ist (manuell gewählt oder nach ATV-DVWK-A 127 Tabelle 8; hier nur für B4 \geq 97%).

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Moment aufgrund vertikaler Bodenspannung	m_{qv}	0,261	-0,265	0,275	[-]
aufgrund dynamischer Last	$\text{dyn } M_{qv}$	2,672	-2,713	2,815	kNm/m
Summe der Momente aufgrund Verkehrslast	$M_{QK,dyn}$	2,672	-2,713	2,815	kNm/m

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Normalkraft aufgrund vertikaler Bodenspannung	n_{pv}	0,027	-1,000	-0,027	[-]
aufgrund dynamischer Last	$\text{dyn } N_{qv}$	0,567	-20,998	-0,567	kN/m
Summe der Normalkräfte aufgrund Verkehrslast	$N_{QK,dyn}$	0,567	-20,998	-0,567	kN/m

5.2.4 Nachweise Langzeit

5.2.4.1 Spannungsnachweis

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

Erforderlicher Sicherheitsbeiwert, Biegezugspannungen: erf γ_{RBZ} 1,50 [-]
 Erforderlicher Sicherheitsbeiwert, Biegedruckspannungen: erf γ_{RBD} 1,50 [-]



Anzusetzende Biegezugfestigkeit	$\sigma_{RBZ, res}$	225,00	225,00	225,00	N/mm ²
Anzusetzende Biegedruckfestigkeit	$\sigma_{RBD, res}$	225,00	225,00	225,00	N/mm ²

innen

Korrekturfaktor Krümmung innen:			α_{ki}	1,017	[-]
		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Spannung aufgrund Erd- u. Verkehrslasten	σ_{qv, qh, qh^*}	34,475	-36,261	37,471	N/mm ²
Spannung aufgrund anderer Lasten	σ_{sonst}	3,394	-3,906	4,871	N/mm ²
Spannung gesamt	σ	37,869	-40,167	42,341	N/mm ²
Sicherheitsbeiwert Biegezug:	YBZ	5,942	---	5,314	[-]
Sicherheitsbeiwert Biegedruck:	YBD	---	5,602	---	[-]

außen

Korrekturfaktor Krümmung außen:			α_{ka}	0,983	[-]
		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Spannung aufgrund Erd- u. Verkehrslasten	σ_{qv, qh, qh^*}	-34,568	31,389	-37,660	N/mm ²
Spannung aufgrund anderer Lasten	σ_{sonst}	-3,173	3,696	-4,497	N/mm ²
Spannung gesamt	σ	-37,741	35,085	-42,157	N/mm ²
Sicherheitsbeiwert Biegezug:	YBZ	---	6,413	---	[-]
Sicherheitsbeiwert Biegedruck:	YBD	5,962	---	5,337	[-]

Alle errechneten Sicherheitsbeiwerte des Spannungsnachweises sind ausreichend.

5.2.4.2 Verformungsnachweis

Rechenmodus:		linear		
Verhältnis:		$I/(A \cdot r_m^2)$	0,00022	[-]
Verhältnis ' $I/(A \cdot r_m^2) \cdot \kappa \sim Q'$ ':		$I/(A \cdot r_m^2) \cdot \kappa_Q$	0,00026	[-]

Verformungsbeiwert für Biegemomente	c_v	q_v	-0,0893	q_h	0,0833	q_h^*	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	$c'_{h, qv}$	0,0891	-0,0833	-0,0658	[-]

Vertikale Durchmesseränderung:	Δd_v	2,14	mm
Horizontale Durchmesseränderung:	Δd_h	2,11	mm

Relative vertikale Verformung (aus Belastung, elastisch, Typ B):	$\delta_{v, B}$	0,22	%
Lokale Vorverformung (z. B. aus Fertigung, plastisch, Typ A):	$\delta_{v, A}$	1,00	%
Vertikale Gesamtverformung (Typ A + Typ B):	$\delta_{v, Ges}$	1,22	%
Zulässige Verformung:	zul δ_v	6,00	%

Die errechnete Verformung ist kleiner als die zulässige Verformung.

5.2.4.3 Stabilitätsnachweis, linear:

Vertikale Gesamtlast:	q_v	95,28	kN/m ²
Abminderungsfaktor Beullast bei Erd-/Verkehrslasten:	κ_{v2}	0,85	[-]
Kritische vertikale Gesamtlast:	krit q_v	9.349,0	kN/m ²

Der Beulnachweis für Wasserdruck entfällt, da weder Grundwasser ansteht noch Unterdruck vorliegt.

Sicherheitsbeiwert Stabilität:	γ	98,12	[-]
Erforderlicher Sicherheitsbeiwert, Instabilität:	erf γ_{stab}	2,50	[-]

Der Stabilitätsnachweis ist erbracht.

5.2.4.4 Nachweis Stabilität radial, linear

Erd- und Verkehrslasten			
Rohrsteifigkeit:	\bar{S}_R	2.360	kN/m ²

Horizontale Bettungssteifigkeit:	S_{Bh}	11,755	N/mm ²
Systemsteifigkeit, gewichtet:	$V_{RB,w}$	0,2008	[-]
Abminderungsfaktor Beullast bei Erd-/Verkehrslasten:	κ_{v2}	0,85	[-]
Innerer Reibungswinkel:	φ'	35,000	°
Kritische vertikale Gesamtlast:	krit q_v	9.349,0	kN/m ²
Vertikale Gesamtlast:	q_v	95,28	kN/m ²
Sicherheit Stabilität, radial:	$\gamma_{Stab,rad}$	98,12	[-]
Erforderlicher Sicherheitsbeiwert, Instabilität:	erf γ_{stab}	2,50	[-]

Der Stabilitätsnachweis ist erbracht.

5.2.4.5 Stabilitätsnachweis, nichtlinear

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

5.2.4.6 Nachweis der Sicherheit gegen Versagen bei nicht vorwiegend ruhender Belastung

Schwingbreite bei $1 \cdot 10^8$ Lastspielen:	$2\sigma_{a,1E8}$	56,700	N/mm ²
Enthaltener Stoßfaktor:	ϕ	1,42	[-]
Spannung für Ermüden inkl. Stoßbeiwert:	ρ_T	43,07	kN/m ²
Abminderungsfaktor α_V nach Tabelle 14 für Verkehrslasten:	α_V	1,00	[-]
Abgeminderte vertikale Bodenspannung für Ermüdung:	dyn p_v	43,073	kN/m ²

Die stützende Wirkung des Bettungsreaktionsdruckes $\text{dyn } p_{Vh}^*$ wird nicht angesetzt, da der Verdichtungsgrad $< 97\%$ ist (manuell gewählt oder nach ATV-DVWK-A 127 Tabelle 8; hier nur für $B4 \geq 97\%$).

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Moment aufgrund vertikaler Bodenspannung	m_{qv}	0,261	-0,265	0,275	[-]
aufgrund dynamischer Last	dyn M_{qv}	2,672	-2,713	2,815	kNm/m
Summe der Momente aufgrund Verkehrslast	$M_{QK,dyn}$	2,672	-2,713	2,815	kNm/m
Normalkraft aufgrund vertikaler Bodenspannung	n_{pv}	0,027	-1,000	-0,027	[-]
aufgrund dynamischer Last	dyn N_{qv}	0,567	-20,998	-0,567	kN/m
Summe der Normalkräfte aufgrund Verkehrslast	$N_{QK,dyn}$	0,567	-20,998	-0,567	kN/m
innen					
Dynamischer Spannungsanteil	dyn σ_{pV}	26,110	-27,327	27,464	N/mm ²
Sicherheitsbeiwert:	dyn γ	2,172	---	2,065	[-]
Erforderlicher Sicherheitsbeiwert:			erf γ	2,000	[-]
außen					
Dynamischer Spannungsanteil	dyn σ_{pV}	-25,188	24,757	-26,585	N/mm ²
Sicherheitsbeiwert:	dyn γ	---	2,290	---	[-]
Erforderlicher Sicherheitsbeiwert:			erf γ	2,000	[-]

Die errechneten Sicherheitsbeiwerte sind ausreichend.

Alle notwendigen Nachweise sind erbracht.