

Statische Berechnung

RVT 02 - Rohrvortrieb Gleisparallel

Auftrags-Nr.: MA-250346

Bauvorhaben: Hauptsammler Ost, HBF Wiesbaden

Bauherr: ELW - Entsorgungsbetriebe Wiesbaden
vertreten durch Herrn Schöneich
Unterer Zwerchweg 120
6525 Wiesbaden

Tragwerksplanung: Verheyen - Ingenieure GmbH & Co. KG
Bad Kreuznach | Mainz | Bonn - Siegburg | Gießen
NL Mainz
Lise-Meitner-Straße 11, 55129 Mainz
Dipl.-Ing. Martin Hofmann
Beratender Ingenieur / Geschäftsführer
Anzahl Seiten: 131

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel

Seite:

1

Kapitel / Vorgang:
TB Titelblatt

Archiv-Nr.

Inhaltsverzeichnis

Position	Beschreibung	Seite
TB	Titelblatt	1
	Inhalt	2
V01 - Vorbemerkungen		V-1
V01	Vorbemerkung zur Gesamtmaßnahme	V-2
V02	Übersicht Bauteile	V-3
V03	Vorbemerkung zum Bauteil RVT-01	V-4
V04	Unterlagen	V-5
V05	Vorschriften	V-7
V06	Einfluss von Eisenbahnverkehrslasten	V-10
V07	Mindestüberdeckung unter Gleisen	V-13
A - Lastannahmen		A-1
A01	Lastannahmen	A-2
	Vorbemerkung	A-2
	System	A-2
A02	Belastung aus Winkelstützwand	A-3
B - Materialien		B-1
B01	Vortriebsrohr - Zusammenstellung	B-2
C - Hinweise zur Berechnung		C-1
C01	Hinweise	C-2
D - Berechnung		D-1
D01	Vortriebsrohr - Berechnung	D-2

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: 2

Kapitel / Vorgang: Inhaltsverzeichnis

Archiv-Nr.

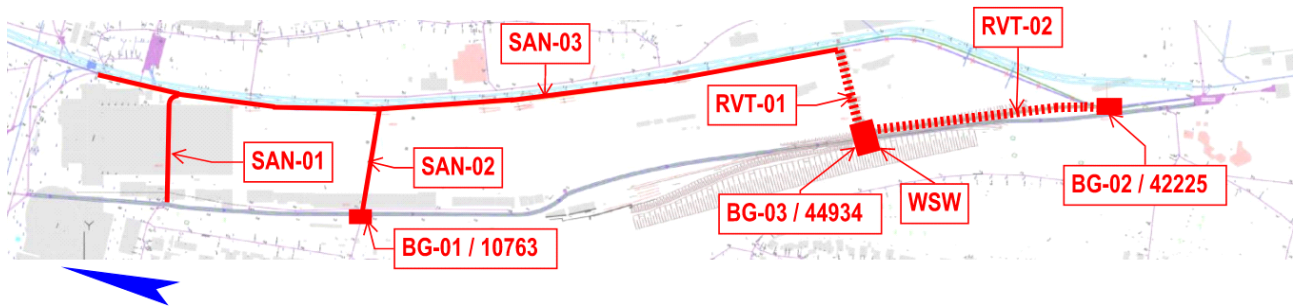
V01 - Vorbemerkungen

Pos. V01**Vorbemerkung zur Gesamtmaßnahme****Bauteil:** RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
 MA-250346**Seite:**
V-2**Kapitel / Vorgang:** V01 - Vorbemerkungen
 V01 Vorbemerkung zur Gesamtmaßnahme**Archiv-Nr.**

Pos. V02

Übersicht Bauteile

Übersicht über die von Verheyen - Ingenieure bearbeiteten Bauteile:



LV-Pos.	Bauteil	Bezeichnung	Positionsplan
09	SAN-01	GFK Sanierung Querverbindung Nord Ei 600/1100	P101
10	SAN-02	GFK-Sanierung Querverbindung Süd Ei 700/1250	P201
11	SAN-03	GFK Sanierung Hauptsammler Ei 1000/1750	P301
07	RVT-01	Rohrvortrieb Gleisquerung	P401
08	RVT-02	Rohrvortrieb Gleisparallele Strecke	P501
05.01	BG-01	Baugrube für Schacht 10763 (an Rollkontor)	P601
14.03	BG-02	Baugrube für Schacht 42225 (Zielgrube)	P701
14.04	BG-03	Baugrube für Schacht 44934 (Startgrube)	P801
17	WSW	Betriebs- und Wendepplatz West (Winkelstützwand an Wendepplatz für Saugfahrzeug)	P901
-	HSW	Nachweis besteh. Hauptsammler West im Bauzustand (Auftrieb) im Schacht 44934	- / -

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: V-3

Kapitel / Vorgang: V01 - Vorbemerkungen
V02 Übersicht Bauteile

Archiv-Nr.

Pos. V04

Unterlagen

Planungsgrundlagen

Die statische Bearbeitung erfolgte auf Grundlage folgender Dokumente:

Entwurfsunterlagen

- [101] 1.1 "Bestand", Dr. Pecher GmbH, 24.11.2025
- [102] 1.2 "Übersichtsplan Baulogistik", Dr. Pecher GmbH, 24.11.2025
- [103] 1.2.1 "Lageplan 1 Baulogistik", Dr. Pecher GmbH, 17.10.2025
- [104] 1.2.2 "Lageplan 2 Baulogistik", Dr. Pecher GmbH, 17.10.2025
- [105] 1.2.3 "Lageplan 3 Baulogistik", Dr. Pecher GmbH, 17.10.2025
- [106] 1.3 "Übersichtslageplan Baugruben", Dr. Pecher GmbH, 24.11.2025
- [107] 1.3.1 "Lageplan 1 Baugruben", Dr. Pecher GmbH, 17.10.2025
- [108] 1.3.2 "Lageplan 2 Baugruben", Dr. Pecher GmbH, 17.10.2025
- [109] 1.3.3 "Lageplan 3 Baugruben", Dr. Pecher GmbH, 17.10.2025
- [110] 1.4 "Endzustand", Dr. Pecher GmbH, 24.11.2025
- [111] 2.1 "Längsschnitt Gleisquerung", Dr. Pecher GmbH, 23.01.2025
- [112] 2.2 "Längsschnitt gleisparallele Strecke", Dr. Pecher GmbH, 23.01.2025
- [113] 4.9 "Bauwerksplan Schachtbauwerk 44934", Dr. Pecher GmbH, 23.01.2026
- [114] Längsschnitt Startgrube 44934, Dr. Pecher GmbH, 10.12.2025
- [115] 4.10 "Bauwerksplan Schachtbauwerk 42225", Dr. Pecher GmbH, 23.01.2026
- [116] 4.11 "Bauwerksplan Schachtbauwerk 10763", Dr. Pecher GmbH, 07.01.2026
- [117] "Stützwand", Dr. Pecher GmbH, 10.09.2025

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite:
V-5

Kapitel / Vorgang: V01 - Vorbemerkungen
V04 Unterlagen

Archiv-Nr.

Vermesser

[V101] Bestandsplan Hauptsammler Ost 351-23 UTM, 12.12.2025

Baugrundgutachten

[G101] Geotechnischer Bericht Teil 1, ICP Ingenieure GmbH, 31.08.2025

[G102] Mitteilung Kennwerte, ICP Ingenieure GmbH, 31.07.2025

[G103] Geotechnischer Bericht Teil 2, ICP Ingenieure GmbH, 12.11.2025

Dokumentation Hauptsammler West

[G102] LOS II - Stollenvortrieb des Hauptsammler West 11.01.2000
 Projektgemeinschaft Hauptsammler West
 Dr. Friedrich W. Hug Geoconsult GmbH /
 Prof. Dr. Ing. Menzenbach + Partners Consulting Engineers GmbH
 Niederhöchstädter Str. 71, 61476 Kronberg

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
 MA-250346

Seite: V-6

Kapitel / Vorgang: V01 - Vorbemerkungen
 V04 Unterlagen

Archiv-Nr.

Pos. V05

Vorschriften

Allgemeine Vorschriften

[R101_xxx] **Eisenbahnspezifische Technische Baubestimmungen (EiTB)**
Ausgabe 2025/1

Herausgeber Eisenbahn-Bundesamt

[R102] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für
Ingenieurbauten - ZTV-ING, August 2025,

Bundesministerium für Verkehr

Erd- und Grundbau

[R103] Empfehlungen des Arbeitskreises "Baugruben" (EAB), 5. Aufl.

[R104] Empfehlungen des Arbeitskreises "Pfähle" (EA Pfähle), 2. Aufl.

in [R101_xxx]

A 1.2.2 Bauliche Anlagen im Erd- und Grundbau
A 1.2.2.1 Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik
Allgemeine Regeln DIN EN 1997-1:2009-09
DIN EN 1997-1/NA:2010-12 Anlage A 1.2.2/1

Anlage Ei A 1.2.2/1 Baugrund - Sicherheitsnachweise im Erdbau- und Grundbau
DIN 1054:2021-04 Anlage A 1.2.2/1

Anlage Ei A 1.2.2/2

A 1.2.2.2 Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Bohrpfähle
DIN EN 1536:2010-12
DIN SPEC 18140:2012-02 Anlage Ei A 1.2.2/3

A 1.2.2.3 Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Verdrängungspfähle
DIN EN 12699:2001-05
DIN EN 12699 Ber. 1:2010-11
DIN SPEC 18538:2012-02 Anlage A 1.2.2/2

A 1.2.2.4 Ausschachtungen, Gründungen und Unterfangungen im Bereich bestehender
Gebäude
DIN 4123:2013-04

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite:
V-7

Kapitel / Vorgang: V01 - Vorbemerkungen
V05 Vorschriften

Archiv-Nr.

- A 1.2.2.5 Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Verpressanker
DIN EN 1537:2014-07
DIN /TS18537:2021-05 Anlage A 1.2.2/3
- A 1.2.2.6 Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Mikropfähle
Ergänzende Festlegungen zu DIN EN 14199:2012-01, Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) - Pfähle mit kleinen Durchmessern (Mikropfähle)
DIN EN 14199:2012-01
DIN SPEC 18539:2012-02
- A 1.2.2.7 Ausführung von besonderen Arbeiten (Spezialtiefbau) - Injektionen, Düsenstrahlverfahren
Bemessung von verfestigten Bodenkörpern - hergestellt mit Düsenstrahl-, Deep-Mixing- oder Injektions-Verfahren
DIN EN 12715:2000-10
DIN SPEC 18187:2015-08
DIN EN 12716:2019-03
DIN 4093:2015-11 Anlage A 1.2.2/4

zusätzlich:

- [R301] Handbuch
83601 | Erdbauwerke und sonstige geotechnische Bauwerke planen, bauen und instand halten

RIL 836 - Version 2.0 Gültig ab 01.05.2025

Herausgeber DB InfraGO AG

darin speziell:

Vortriebsrohre und Inliner

- [R302] Richtlinie 836.4501 "Querungen - Grundsätze"

Die DB InfraGO AG hat die Richtlinie 836.4501 „Querungen; Grundsätze“ in einer geänderten Fassung zum 02.01.2025 in Kraft gesetzt.
- [R303] Richtlinie 836.4502 "Querungen - Durchlässe und Rohrleitungen"
- Ei A 1.2.10.3.5 Statische Berechnung von Vortriebsrohren
Arbeitsblatt DWA-A 161 aus 2014/03, korrigierte Fassung 2021-03
- [R401] **Arbeitsblatt DWA-A 161 03/2021**
DWA-A 161 - Statische Berechnung von Vortriebsrohren - März 2014;

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: V-8

Kapitel / Vorgang: V01 - Vorbemerkungen
V05 Vorschriften

Archiv-Nr.

Stand: korrigierte Fassung März 2021

DIN EN 12889 Grabenlose Verlegung und Prüfung von Abwasserleitungen und -kanälen, März 2000

[R402] **DWA-A 125** Rohrvortrieb und verwandte Verfahren, korrigierte Fassung September 2020

{R40}3] **DWA-A 127-1** Statische Berechnung von Entwässerungsanlagen – Teil 1: Grundlagen, korrigierte Fassung Dezember 2024

[R404] **DWA-A 127-10** Statische Berechnung von Entwässerungsanlagen – Teil 10: Werkstoffkennwerte, September 2020

[R405] **DWA-A 143-2** Sanierung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden - Teil 2: Statische Berechnung zur Sanierung von Abwasserleitungen und -kanälen mit Lining- und Montageverfahren, Juli 2015

[R406] **DWA-M 143-12** Sanierung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden – Teil 12: Renovierung von Abwasserleitungen und -kanälen mit vorgefertigten Profilen – Einzelrohr-Lining, März 2025

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: V-9

Kapitel / Vorgang: V01 - Vorbemerkungen
V05 Vorschriften

Archiv-Nr.

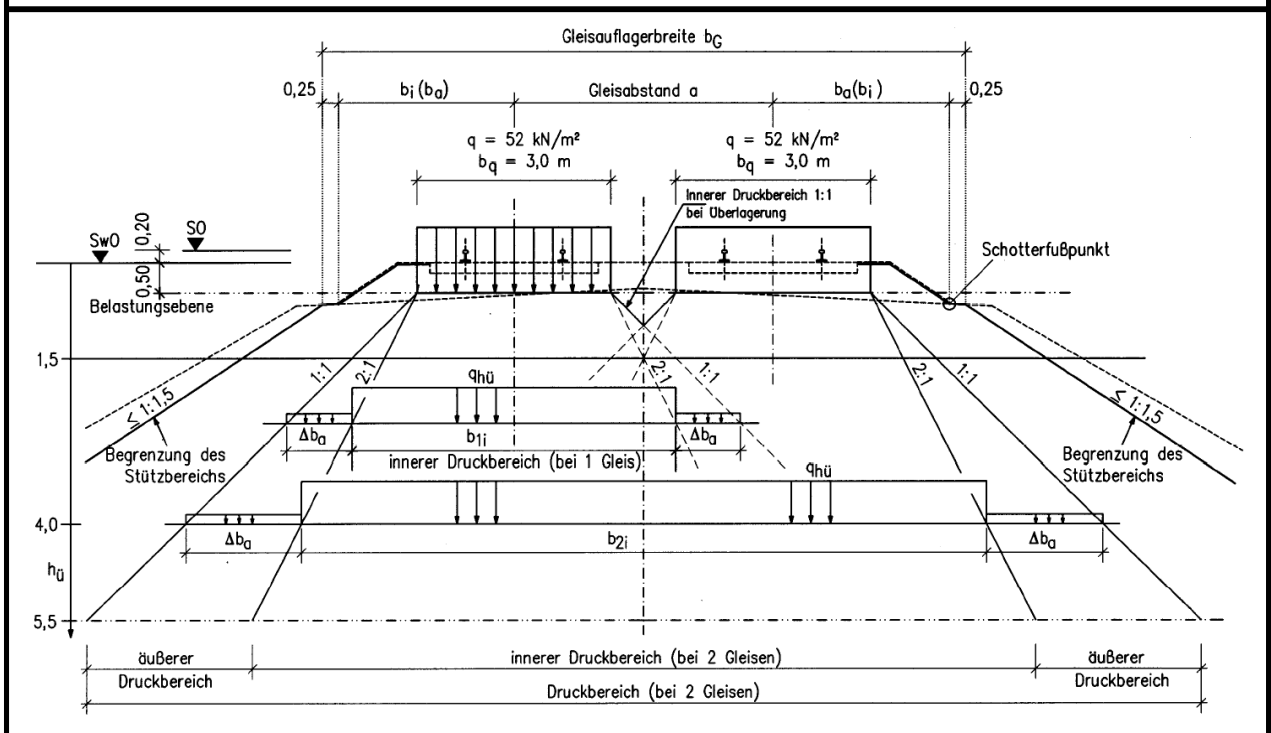
Pos. V06

Einfluss von Eisenbahnverkehrslasten

Einflussbereich von Eisenbahnverkehrslasten

- [R01] RIL 836 - / 836.2001
- Der Stützbereich ist im Gegensatz zum Druckbereich nach unten nicht begrenzt.
- Soweit nicht anderweitig ausdrücklich anders definiert, ist der Einflussbereich von Eisenbahnverkehrslasten mit dem Stützbereich gleichzusetzen.

Bild 1 Ausbreitung der vertikalen Lasten (charakteristische Werte)
Definitionen Druckbereich und Stützbereich



- Der Stützbereich ist durch eine Linie unter 1: 1 ausgehend von der Belastungsfläche begrenzt.
- Der Einflussbereich entspricht dem Stützbereich, er ist durch eine Linie unter 1:1,5 ausgehend von der Belastungsfläche begrenzt.

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: V-10

Kapitel / Vorgang: V01 - Vorbemerkungen
V06 Einfluss von Eisenbahnverkehrslasten

Archiv-Nr.

Belastung auf den Rohrscheitel

- (6) Rohre für Unterquerungen von Gleisen sind innerhalb des gesamten Druckbereiches mit den für den inneren Druckbereich geltenden Werten als Belastung in Höhe des Rohrscheitels zu bemessen.

Für Rohre, die parallel zum Gleis verlaufen und im äußeren Druckbereich liegen, darf die Belastung auf den Rohrscheitel nach Tabelle 3 bestimmt werden.

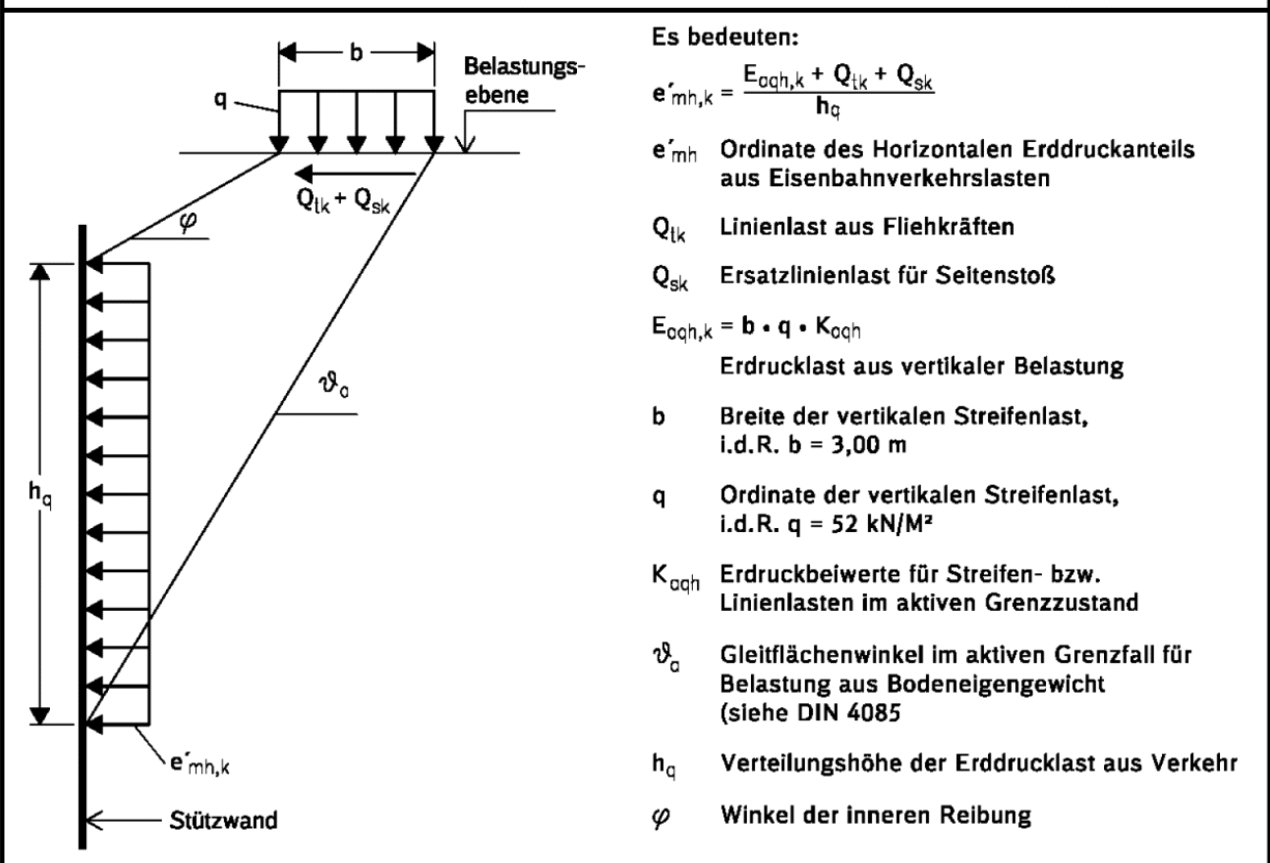
Überschüttungshöhe (Tiefe unter SO) [m]	Zusatzbreite $\square b_a$ [m]	Vertikalspannungen [kN/m ²]
<i>Spalte 1</i>	<i>Spalte 2</i>	<i>Spalte 3</i>
1,5 (1,7)	0,5	7,5
2,5 (2,7)	1,0	6
4,0 (4,2)	1,75	5
5,5 (5,7)	2,5	4

Tabelle 3: Charakteristische Werte der maximalen Spannungen im äußeren Druckbereich infolge Belastung nach LM 71

Erddrücke aus Eisenbahnverkehrslasten

Bei Stützbauwerken, deren Wandruckseiten außerhalb des planmäßigen Schotterfußes von Schottergleisen nach Bild 3 bzw. nicht näher als 2,5 m zur nächstgelegenen Gleisachse entfernt liegen, dürfen die Erddrucklasten aus vertikalen und horizontalen Anteilen von Eisenbahnverkehrslasten gemeinsam für jeweils ein Gleis vereinfacht rechteckförmig verteilt über eine vereinfacht ermittelte Verteilungshöhe bestimmt werden (siehe Bild 2).

Bild 2: Erddruck aus Eisenbahnverkehrslasten auf streckenparallel verlaufende Stützwände (Prinzipdarstellung, charakteristische Werte)



Pos. V07

Mindestüberdeckung unter Gleisen

Mindest-Überdeckung im Einflussbereich von Eisenbahnverkehrslasten

- [R01] 836.4502 (3)

Die Mindestüberdeckungshöhe von Rohren unter Gleisanlagen ist in Ril 836 geregelt. Danach gilt für Rohre, die mit Vortriebsverfahren eingebracht werden, der größere der beiden Werte:

$$h_{\bar{u}} = 1,50 \text{ m (gemessen von OK Schwelle bis OK Rohr)}$$

oder

$$h_B = 2 \cdot d_a \text{ (gemessen von UK Schotter bis OK Rohr)}$$

- Folgende Mindestüberdeckungen sind einzuhalten:

Bodenüberdeckung h_b bis UK Schotterbett: $h_b = 2 \cdot 2,04 = 4,08 \text{ m}$

Höhe Schotterbett $= 0,50 \text{ m}$

Somit: Überdeckung bis OK Schwelle (SWO) $h_{\bar{u}} = 4,08 + 0,50 = 4,58 \text{ m}$

Bild 2

Bezeichnungen zur Überdeckung

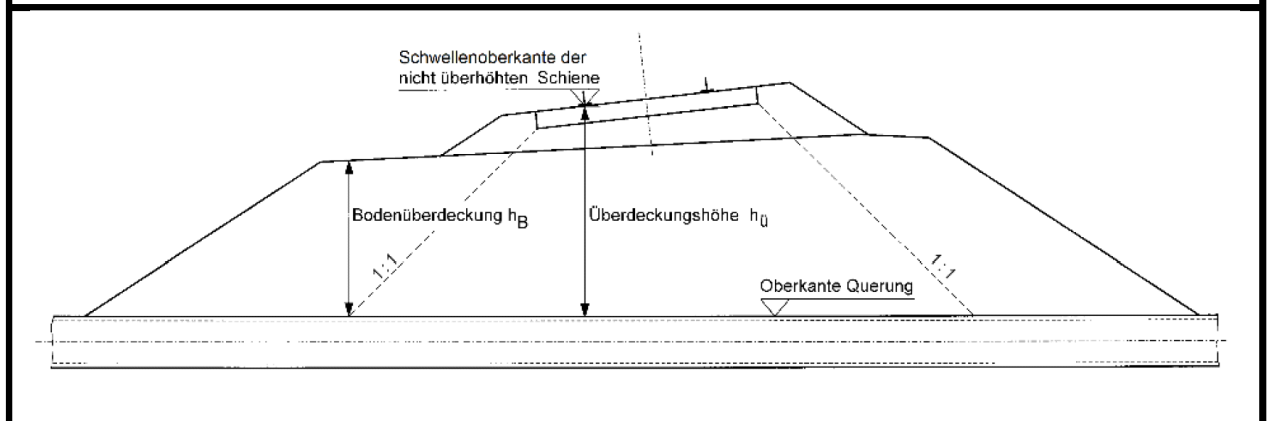


Bild 2 aus RIL. 834.4501

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite:
V-13

Kapitel / Vorgang: V01 - Vorbemerkungen
V07 Mindestüberdeckung unter Gleisen

Archiv-Nr.

Pos. A01 Lastannahmen

Belastung aus Erdauflast

Überdeckung

- max. Überdeckung $h_{\bar{u}} = 13,25 \text{ m}$
aus Winkelstützwand (s. hinten)
max. Überdeckung $h_{\bar{u}} = 7,24 + 7,65 = 14,89 \text{ m} \Rightarrow \text{Pos. 01}$
- max. Überdeckung $h_{\bar{u}} = 7,24 \text{ m} \Rightarrow \text{Pos. 02}$
Bahngelände
- min Überdeckung $h_{\bar{u}} = 4,66 \text{ m} > 4,58 \text{ m} \Rightarrow \text{Pos. 02}$

Grundwasser

Die Auftriebssicherheit der Rohre ist nachzuweisen für einen Grundwasserstand bei

HGW = +99,00 m NHN

Belastung aus Eisenbahnbetrieb

- gem. Pos. V05 bzw. programmintern (Doppelgleis)

Belastung aus LKW-Verkehr (Wendeplatz)

- gem. EAB für LKW-Verkehr mit Straßenzulassung
 $q = 10,0 \text{ kN/m}^2$

Vortriebskraft

- gem. Vorgabe PECHER ist mit einer Vortriebskraft von 5.000 kN zu rechnen.

Hinweis:

Im Bereich der Kurve ($R = 440 \text{ m}$) muss die Vortriebskraft reduziert werden auf

QP = 4820 kN

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite:
A-2

Kapitel / Vorgang: A - Lastannahmen
A01 Lastannahmen

Archiv-Nr.

Pos. A02

Belastung aus Winkelstützwand

Belastung aus Stützwand am Wendeplatz für Saugfahrzeug

Die Stützwand wird unter Bauteil WSW berechnet.

- Die Stützwand wird nach dem Rohrvortrieb errichtet.

Durch die Stützwand erhöht sich die Auflast auf das Vortriebsrohr.
Unter der Stützwand ergibt sich eine Bodenpressung von

$$q_d \leq 200 \text{ kN/m}^2$$

$$q_k \sim 200 / 1,4 = 142,86 < 145 \text{ kN/m}^2$$

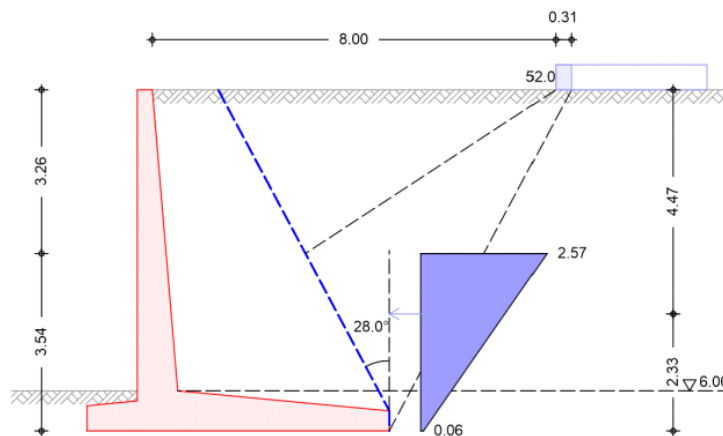
- Die Belastung hinter der Stützwand beträgt näherungsweise

$$g = 6,00 \cdot 21,0 = 126,00 \text{ kN/m}$$

- Die Eisenbahnlasten haben nur einen geringen Einfluss auf die Stützwand, sie können für die Belastung des Vortriebsrohrs vernachlässigt werden.

aktiver Erddruck aus Blocklast (Nr. 2)
Lastordinate

$$v_e = 52,00 \text{ kN/m}^2$$



- Für die Berechnung wird die Belastung aus Stützwand in eine Überschüttung umgerechnet:

$$H = 145,0 / 19,0 = 7,63 \text{ m} < 7,65 \text{ m}$$

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: A-3

Kapitel / Vorgang: A - Lastannahmen
A02 Belastung aus Winkelstützwand

Archiv-Nr.

B - Materialien

Pos. B01

Vortriebsrohr - Zusammenstellung

Material

Beton C50/60

Expositionsklassen Beton : XC4, XM2, XD2, XA 3, WA

Der verwertete Zement muss einen hohen Sulfatwiderstand aufweisen (HS Zement nach DIN 1164 - 10).

Betondeckung innen cv = 45 mm

Betondeckung außen cv = 55 mm

Längsbewehrung innen Ø 10 / 25 (26 St.)

Längsbewehrung außen Ø 10 / 25 (33 St.)

Ringbewehrung innen Ø 14 / 12,5

Ringbewehrung außen Ø 12 / 12,5

zus. Steckbügel vor Kopf Ø 8 / 10

Druckübertragungsringe OSB 4, 22 + 18 = 40 mm, Breite 140 mm

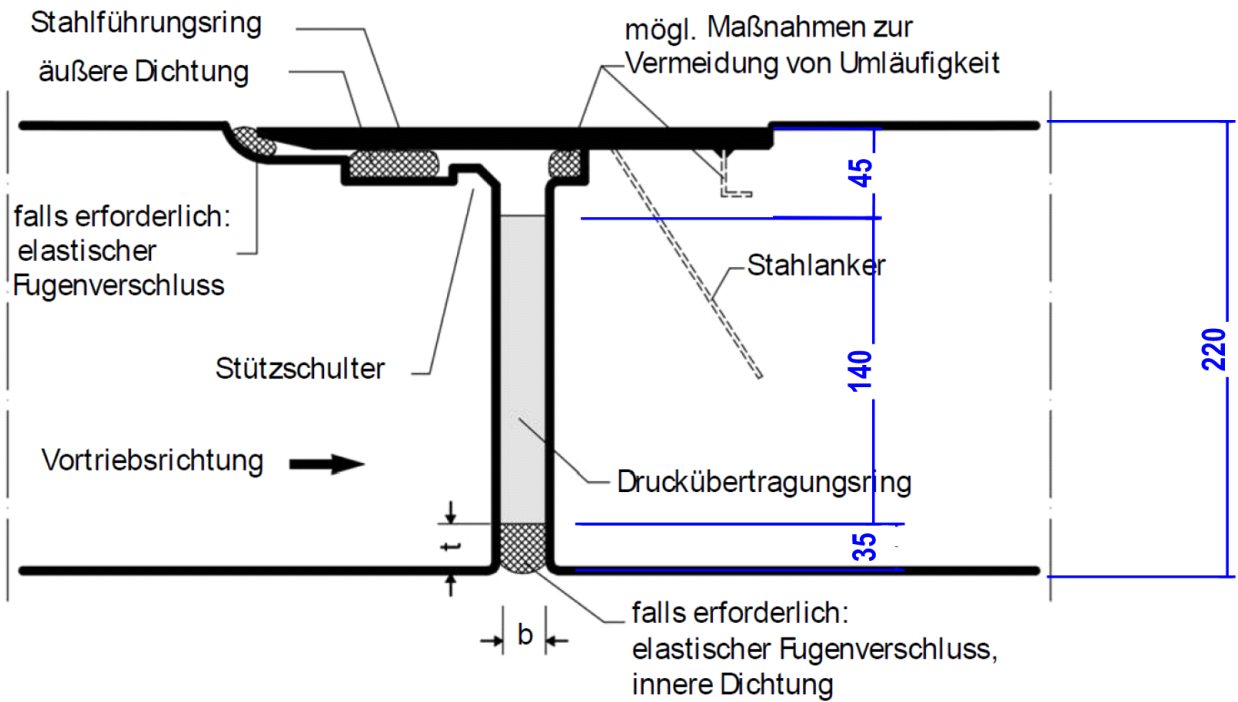
Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite:
B-2

Kapitel / Vorgang: B - Materialien
B01 Vortriebsrohr - Zusammenstellung

Archiv-Nr.

Rohrverbindung



Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: B-3

Kapitel / Vorgang: B - Materialien
B01 Vortriebsrohr - Zusammenstellung

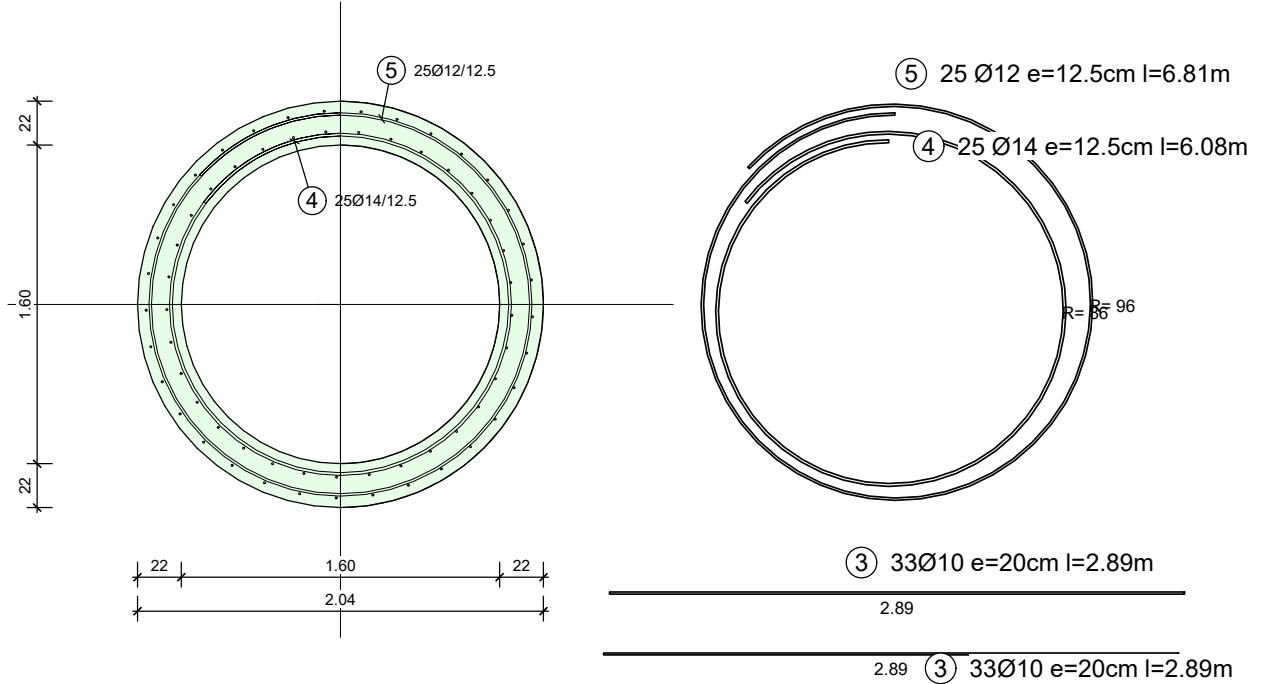
Archiv-Nr.

Querschnitt

DN 1600

Wanddicke 220 mm

DA = 2240 mm



Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: B-4

Kapitel / Vorgang: B - Materialien
B01 Vortriebsrohr - Zusammenstellung

Archiv-Nr.

C - Hinweise zur Berechnung

Pos. C01

Hinweise

Berechnung

- Die Berechnung erfolgt für die drei maßgeblichen Überschüttungshöhen.
Dabei werden folgende Parameter bestimmt bzw. kontrolliert
 - gewählte Wanddicke
 - die erforderliche Bewehrung
 - die Druckübertragungsringe
- Weitere Elemente wie insbes. die Ausführung der konstruktiven Gestaltung der Rohrverbindung, Stahlführungsringe und Dichtungen nach Planung des AN.

Eingangswerte

- Wasserdruck über Rohrsohle (Unterkante) - maßg. QP 4

HGW = 99,00 m NHN
 UK Rohr = 96,59 m NHN
 $h_w = 99,00 - 96,59 = 2,41 \text{ m}$
 Wasserdruck $p_w = 2,41 \cdot 10,0 = 24,10 \text{ kN} = 0,24 \text{ bar}$
- Druckluft

Druck $p \leq 0,3 \text{ bar} > \text{Wasserdruck} = 0,24 \text{ bar}$

D - Berechnung

Inhaltsangabe

1 Vortriebsrohr nach DWA-A 161, 2. Auflage: QP 1 - Bauzustand	6
1.1 Eingaben	6
1.1.1 Vortriebsverfahren	6
1.1.2 Trasse und Vortriebskraft	6
1.1.3 Druckübertragungsring (DÜR)	6
1.1.4 Bodenkennwerte	7
1.1.5 Bodenverhalten	7
1.1.6 Lasten	7
1.1.7 Berechnungsoptionen	7
1.1.8 Stahlbeton-Rohr	7
1.1.8.1 Systemskizze	8
1.1.8.2 Stirnseite mit DÜR	9
1.2 Ergebnisse	10
1.2.1 Teilsicherheitsbeiwerte (Einwirkungen)	10
1.2.2 Zwischenergebnisse Rohr	10
1.2.2.1 Materialeigenschaften	10
1.2.2.2 Sicherheiten	10
1.2.2.3 Stahlbetonrohr	11
1.2.3 Nicht lastabhängige Nachweise, Stahlbeton	12
1.2.3.1 Mindestbetongüte infolge der gewählten Expositionsklasse	12
1.2.3.2 Überprüfung der Mindestwanddicke (DIN V 1201:2004-08 5.3.5.2)	12
1.2.3.3 Überprüfung der Mindestbewehrung (DIN V 1201:2004-08 5.3.7)	13
1.2.3.4 Überprüfung der äußeren Bewehrung (DIN V 1201:2004-08 5.2.6)	13
1.2.3.5 Abstand und Anzahl der Längsstäbe (DIN V 1201:2004-08 5.2.1)	13
1.2.3.6 Betondeckung (DIN V 1201:2004-08 5.2.2)	14
1.2.3.7 Bemessung mit Mindestschnittgröße	14
1.2.4 Zwischenergebnisse Boden	16
1.2.5 Bauzustand	17
1.2.5.1 Belastungen Bauzustand	17
1.2.5.2 Schnittkräfte Bauzustand	18
1.2.5.3 Verformungsnachweis Bauzustand	20
1.2.5.4 Beulnachweis Bauzustand	21
1.2.5.5 Bemessung Ringbewehrung	21
1.2.5.6 Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (DIN V 1201:2004-08 4.3.5)	22
1.2.5.7 Ermittlung der Lastklasse (DIN V 1201:2004-08 4.3.5)	22
1.2.6 Nachweis der Zulässigkeit der Vortriebskraft	23
1.2.6.1 Rohr	23
1.2.6.2 Rohrabwinklung	23
1.2.6.3 Verformung des Druckübertragungsringes	24
1.2.6.4 Verformung des Druckübertragungsringes	25
1.2.6.5 Verformung des Rohres	26
1.2.6.6 Interaktion - Vergleichsspannungsnachweis Schaft	27

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite:
D-3

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

2.1 Eingaben	28
2.1.1 Vortriebsverfahren	28
2.1.2 Trasse und Vortriebskraft	28
2.1.3 Druckübertragungsring (DÜR)	28
2.1.4 Bodenkennwerte	29
2.1.5 Bodenverhalten	29
2.1.6 Lasten	29
2.1.7 Berechnungsoptionen	29
2.1.8 Stahlbeton-Rohr	29
2.1.8.1 Systemskizze	30
2.1.8.2 Stirnseite mit DÜR	31
2.2 Ergebnisse	32
2.2.1 Teilsicherheitsbeiwerte (Einwirkungen)	32
2.2.2 Zwischenergebnisse Rohr	32
2.2.2.1 Materialeigenschaften	32
2.2.2.2 Sicherheiten	32
2.2.2.3 Stahlbetonrohr	33
2.2.3 Nicht lastabhängige Nachweise, Stahlbeton	34
2.2.3.1 Mindestbetongüte infolge der gewählten Expositionsklasse	34
2.2.3.2 Überprüfung der Mindestwanddicke (DIN V 1201:2004-08 5.3.5.2)	34
2.2.3.3 Überprüfung der Mindestbewehrung (DIN V 1201:2004-08 5.3.7)	35
2.2.3.4 Überprüfung der äußeren Bewehrung (DIN V 1201:2004-08 5.2.6)	35
2.2.3.5 Abstand und Anzahl der Längsstäbe (DIN V 1201:2004-08 5.2.1)	35
2.2.3.6 Betondeckung (DIN V 1201:2004-08 5.2.2)	36
2.2.3.7 Bemessung mit Mindestschnittgröße	36
2.2.4 Zwischenergebnisse Boden	38
2.2.5 Betriebszustand	38
2.2.5.1 Belastungen Betriebszustand	38
2.2.5.2 Schnittkräfte Betriebszustand	39
2.2.5.3 Verformungsnachweis Betriebszustand	41
2.2.5.4 Beulnachweis Betriebszustand	42
2.2.5.5 Bemessung Ringbewehrung	42
2.2.5.6 Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (DIN V 1201:2004-08 4.3.5)	43
2.2.5.7 Ermittlung der Lastklasse (DIN V 1201:2004-08 4.3.5)	44
2.2.6 Nachweis gegen Ermüden unter nicht vorwiegend ruhender Belastung	44

3 Vortriebsrohr nach DWA-A 161, 2. Auflage: QP 3 45

3.1 Eingaben	45
3.1.1 Vortriebsverfahren	45
3.1.2 Trasse und Vortriebskraft	45
3.1.3 Druckübertragungsring (DÜR)	45
3.1.4 Bodenkennwerte	45
3.1.5 Bodenverhalten	46
3.1.6 Lasten	46
3.1.7 Berechnungsoptionen	46
3.1.8 Stahlbeton-Rohr	46

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-4

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

3.2 Ergebnisse	49
3.2.1 Teilsicherheitsbeiwerte (Einwirkungen)	49
3.2.2 Zwischenergebnisse Rohr	49
3.2.2.1 Materialeigenschaften	49
3.2.2.2 Sicherheiten	49
3.2.2.3 Stahlbetonrohr	50
3.2.3 Nicht lastabhängige Nachweise, Stahlbeton	51
3.2.3.1 Mindestbetongüte infolge der gewählten Expositionsklasse	51
3.2.3.2 Überprüfung der Mindestwanddicke (DIN V 1201:2004-08 5.3.5.2)	51
3.2.3.3 Überprüfung der Mindestbewehrung (DIN V 1201:2004-08 5.3.7)	52
3.2.3.4 Überprüfung der äußeren Bewehrung (DIN V 1201:2004-08 5.2.6)	52
3.2.3.5 Abstand und Anzahl der Längsstäbe (DIN V 1201:2004-08 5.2.1)	52
3.2.3.6 Betondeckung (DIN V 1201:2004-08 5.2.2)	53
3.2.3.7 Bemessung mit Mindestschnittgröße	53
3.2.4 Zwischenergebnisse Boden	55
3.2.5 Bauzustand	56
3.2.5.1 Belastungen Bauzustand	56
3.2.5.2 Schnittkräfte Bauzustand	57
3.2.5.3 Verformungsnachweis Bauzustand	59
3.2.5.4 Beulnachweis Bauzustand	60
3.2.5.5 Bemessung Ringbewehrung	60
3.2.5.6 Bemessung Längsbewehrung (Bahn)	60
3.2.5.7 Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (DIN V 1201:2004-08)	61
3.2.5.8 Ermittlung der Lastklasse (DIN V 1201:2004-08 4.3.5)	61
3.2.6 Nachweis der Zulässigkeit der Vortriebskraft	62
3.2.6.1 Rohr	62
3.2.6.2 Rohrabwinklung	62
3.2.6.3 Verformung des Druckübertragungsringes	63
3.2.6.4 Verformung des Druckübertragungsringes	64
3.2.6.5 Verformung des Rohres	65
3.2.6.6 Interaktion - Vergleichsspannungsnachweis Schaft	66
3.2.7 Betriebszustand	67
3.2.7.1 Belastungen Betriebszustand	67
3.2.7.2 Schnittkräfte Betriebszustand	68
3.2.7.3 Verformungsnachweis Betriebszustand	70
3.2.7.4 Beulnachweis Betriebszustand	70
3.2.7.5 Bemessung Ringbewehrung	70
3.2.7.6 Bemessung Längsbewehrung (Bahn)	71
3.2.7.7 Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (DIN V 1201:2004-08)	72
3.2.7.8 Ermittlung der Lastklasse (DIN V 1201:2004-08 4.3.5)	72
3.2.8 Nachweis gegen Ermüden unter nicht vorwiegend ruhender Belastung	73
3.2.9 Vereinfachter Nachweis gegen Ermüden nach DIN EN 1992-1-1, 6.8.7	73
3.2.9.1 Nachweis der geschweißten Bewehrungskörbe	74
3.2.9.2 Nachweis Beton in der Druckzone	74

4 Vortriebsrohr nach DWA-A 161, 2. Auflage: QP 4 76

4.1 Eingaben	76
4.1.1 Vortriebsverfahren	76
4.1.2 Trasse und Vortriebskraft	76
4.1.3 Druckübertragungsring (DÜR)	76
4.1.4 Bodenkennwerte	77
4.1.5 Bodenverhältnisse	77

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-5

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

4.1.7 Berechnungsoptionen	77
4.1.8 Stahlbeton-Rohr	77
4.1.8.1 Systemskizze	78
4.1.8.2 Stirnseite mit DÜR	79
4.2 Ergebnisse	80
4.2.1 Teilsicherheitsbeiwerte (Einwirkungen)	80
4.2.2 Zwischenergebnisse Rohr	80
4.2.2.1 Materialeigenschaften	80
4.2.2.2 Sicherheiten	80
4.2.2.3 Stahlbetonrohr	81
4.2.3 Nicht lastabhängige Nachweise, Stahlbeton	82
4.2.3.1 Mindestbetongüte infolge der gewählten Expositionsklasse	82
4.2.3.2 Überprüfung der Mindestwanddicke (DIN V 1201:2004-08 5.3.5.2)	82
4.2.3.3 Überprüfung der Mindestbewehrung (DIN V 1201:2004-08 5.3.7)	83
4.2.3.4 Überprüfung der äußeren Bewehrung (DIN V 1201:2004-08 5.2.6)	83
4.2.3.5 Abstand und Anzahl der Längsstäbe (DIN V 1201:2004-08 5.2.1)	83
4.2.3.6 Betondeckung (DIN V 1201:2004-08 5.2.2)	84
4.2.3.7 Bemessung mit Mindestschnittgröße	84
4.2.4 Zwischenergebnisse Boden	86
4.2.5 Bauzustand	87
4.2.5.1 Belastungen Bauzustand	87
4.2.5.2 Schnittkräfte Bauzustand	88
4.2.5.3 Verformungsnachweis Bauzustand	90
4.2.5.4 Beulnachweis Bauzustand	91
4.2.5.5 Bemessung Ringbewehrung	91
4.2.5.6 Bemessung Längsbewehrung (Bahn)	91
4.2.5.7 Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (DIN V 1201:2004-08)	92
4.2.5.8 Ermittlung der Lastklasse (DIN V 1201:2004-08 4.3.5)	92
4.2.6 Nachweis der Zulässigkeit der Vortriebskraft	93
4.2.6.1 Rohr	93
4.2.6.2 Rohrabwinklung	93
4.2.6.3 Verformung des Druckübertragungsringes	94
4.2.6.4 Verformung des Druckübertragungsringes	95
4.2.6.5 Verformung des Rohres	96
4.2.6.6 Interaktion - Vergleichsspannungsnachweis Schaft	97
4.2.7 Betriebszustand	98
4.2.7.1 Belastungen Betriebszustand	98
4.2.7.2 Schnittkräfte Betriebszustand	99
4.2.7.3 Verformungsnachweis Betriebszustand	101
4.2.7.4 Beulnachweis Betriebszustand	101
4.2.7.5 Bemessung Ringbewehrung	101
4.2.7.6 Bemessung Längsbewehrung (Bahn)	102
4.2.7.7 Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (DIN V 1201:2004-08)	103
4.2.7.8 Ermittlung der Lastklasse (DIN V 1201:2004-08 4.3.5)	103
4.2.8 Nachweis gegen Ermüden unter nicht vorwiegend ruhender Belastung	104
4.2.9 Vereinfachter Nachweis gegen Ermüden nach DIN EN 1992-1-1, 6.8.7	104
4.2.9.1 Nachweis der geschweißten Bewehrungskörbe	105
4.2.9.2 Nachweis Beton in der Druckzone	105

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-6

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

1 Vortriebsrohr nach DWA-A 161, 2. Auflage: QP 1 - Bauzustand

Folgende Korrekturen des Arbeitsblatts DWA-A 161 berücksichtigt das Rechenmodul: DWA-A 161 04/2017, DWA-A 161 10/2017, TM 4-2019 der DB Netz AG, DWA-A 161 10/2020, DWA-A 127-10:2020-10, DWA-A 161 03/2021

Zulässige Vorpressekraft: F_j 6.454 kN

Titel der Berechnung: QP 1 - Bauzustand

Annahmen: Überdeckung 7,00 m
Last aus Kettenkran

nicht relevant für Endzustand

Berechnungsart: Stahlbeton
Nachzuweisende Zustände: Nur Bauzustand
Einbauskizze in Ausdruck: Ja

1.1 Eingaben

1.1.1 Vortriebsverfahren

Verfahren: Mikrotunnel und bemannte Verfahren
Vollständige dauerhafte Ringraumverpressung: Ja
Druck beim Verpressen des Überschnitts: p_D 1,5 bar
Einsatz von Stütz- oder Gleitmittel: Ja
Stütz- oder Gleitmitteldruck: p_{Stm} 1,0 bar
Ringspalt: Ringspalt $\leq 1,0$ cm bezogen auf den Radius, nicht systematisch gestützt

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: Ja
Vorgegebene Vortriebskraft: $F_{j,m}$ 5.000,0 kN
Freie Eingabe der Sicherheit für Längsrichtung: Nein
Kontrollierter Einbau: Nein

1.1.3 Druckübertragungsring (DÜR)

Art der Druckübertragung: Mit Druckübertragungsring
Art der Bemessung: Vorbemessung
Anzahl der Schichten im DÜR: Zwei Schichten
Angabe der Durchmesser des DÜR: Angabe der Randabstände
Äußerer Randabstand bezogen auf tRohr: $a_{a,DÜR}$ 45 mm
Innerer Randabstand bezogen auf tRohr: $a_{i,DÜR}$ 35 mm
Schichtdicke: s_{D1} 22,00 mm
Ermittlung Ecal der Schicht: Ermittlung über Material aus Norm
Material: OSB-Platte (OSB/3. OSB/4)

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-7

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

Manuelle Angabe der Steifigkeit:

Nein

1.1.4 Bodenkennwerte

Bodenbeschaffenheit:

Teils Fels, teils Lockergestein

Bodengruppe am Rohr:

G4

Andere Bodengruppe oberhalb Rohrscheitel:

Nein

Eingabe des Seitendruckwertes über:

Reibungswinkel Lockerboden (ϕ')

Verformungsmodul des Felses:

 E_F 50,0 N/mm²

Auflagerwinkel (Festgestein, Bauzustand):

90°

Manuelle Angabe des inneren Reibungswinkel des Bodens:

Nein

Manuelle Angabe der Wichte des Bodens:

Nein

1.1.5 Bodenverhalten

Anwendung von Silotheorie:

Automatisch

Manuelle Angabe κ und κ_0 :

Nein

Manuelle Angabe von f_1 , K_1 , δ und c :

Nein

Konsistenz am Rohr:

Halbfest

Berücksichtigung des Konzentrationsfaktors λ :

Nein

1.1.6 Lasten

Überdeckungshöhe:

 h 7,0 m

Zusätzliche Flächenlast:

 P_0 0,00 kN/m²

Teilsicherheitsbeiwert Wasseraußendruck:

 $\gamma_{F,W}$ 1,35 [-]

Grundwasserstand über Sohle:

 h_{GW} 2,0 m

Auftriebsnachweis führen:

Nein

Innendruck (Bauzustand):

 $P_{I,C}$ 0,3 bar

Teilsicherheitsbeiwert Innendruck manuell setzen:

Nein

Rohr ist während des Vortriebs mit Flüssigkeit gefüllt:

Nein

Freie Eingabe Sicherheitsbeiwert für Verkehrslasten:

Nein

Verkehrslast:

Straße LM 1 - Fahrstreifenbreite: 2,7 m

Dicke des Fahrbahnbelags:

 h_F 0,00 m

Anpassungsfaktor $\alpha_{Qi,LM1}$ (DIN EN 1991-2):

 $\alpha_{Qi,LM1}$ 1,50 [-]

Abminderungsfaktor dynamische Last manuell eingeben:

Ja

Abminderungsfaktor dynamische Last:

 α_T 1,00 [-]

1.1.7 Berechnungsoptionen

Beulnachweis:

Nicht führen

Verformungsnachweis:

Führen

Zulässige Verformung nach A161:

Ja

Ermüdungsnachweis:

Nach Regelwerk

Behandlung Mindestschnittgrößen:

Nach Norm

Vergleichsspannung Mindestschnittgrößen:

Mit Bemessungswerten

1.1.8 Stahlbeton-Rohr

Auswahl der Eingaben:

 D_i und s

Innendurchmesser:

 d_i 1.600 mm

Wandstärke:

 s 220 mm

Betongüte:

C50/60

Längsdruckfestigkeit nach:

DWA-A 161:2014, korrigierte Fassung vom September 2020

Betonstahl nach Norm:

Ja

Nachweis der Rissbreite:

Nein

Manuelle Vorgabe $\max f_R$:

Nein

Lastklasse ermitteln:

Ja

Lastwechsel-Zahl manuell:

Nein

Verhältnis E-Moduli manuell:

Nein

Rohrlänge:

 L_R 3,00 m

Minimaler Außendurchmesser:

 $d_{a,min}$ 2.040 mm

Maximaler Innendurchmesser:

 $d_{i,max}$ 1.600 mm

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite:
D-8

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

Bewehrungsführung:
 Expositionsklasse außen:
 Expositionsklasse innen:
 Besondere Maßnahmen:
 Abstand Längsbewehrung nach Norm:

Zweilagig
 XA1: Chemisch schwach angreifend
 XA1: Chemisch schwach angreifend
 Nein
 Ja

Reihenfolge innere Bewehrung:
 Reihenfolge äußere Bewehrung:

Längsstäbe innerhalb Ringbewehrung
 Längsstäbe außerhalb Ringbewehrung

Durchmesser Ringbewehrung innen:
 Abstand Ringbewehrung innen:
 Durchmesser Ringbewehrung außen:
 Abstand Ringbewehrung außen:

$\varnothing_{\text{rad,i}}$	12	mm
e_i	150	mm
$\varnothing_{\text{rad,e}}$	12	mm
e_e	150	mm

Durchmesser Längsbewehrung innen:
 Anzahl der Längsstäbe innen:
 Durchmesser Längsbewehrung außen:
 Anzahl der Längsstäbe außen:

$\varnothing_{\text{ax,i}}$	10	mm
$n_{\text{ax,i}}$	26	[-]
$\varnothing_{\text{ax,e}}$	10	mm
$n_{\text{ax,e}}$	30	[-]

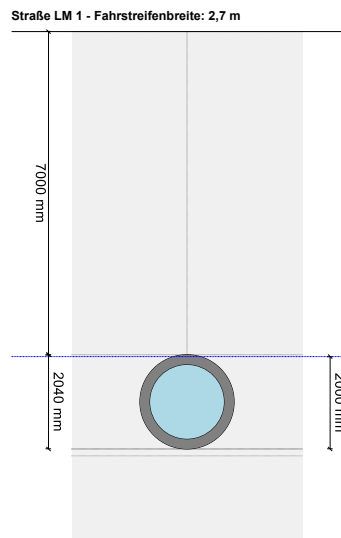
Nennmaß der Betondeckung innen:
 Nennmaß der Betondeckung außen:
 Teilsicherheiten manuell definieren:

$c_{\text{nom,i}}$	45,0	mm
$c_{\text{nom,e}}$	55,0	mm
Nein		

Bewehrungsmenge ermitteln:
 Stahlpreis:
 Betonpreis:

Ermitteln		
P_{St}	15	€/kg
P_{B}	750	€/m³

1.1.8.1 Systemskizze



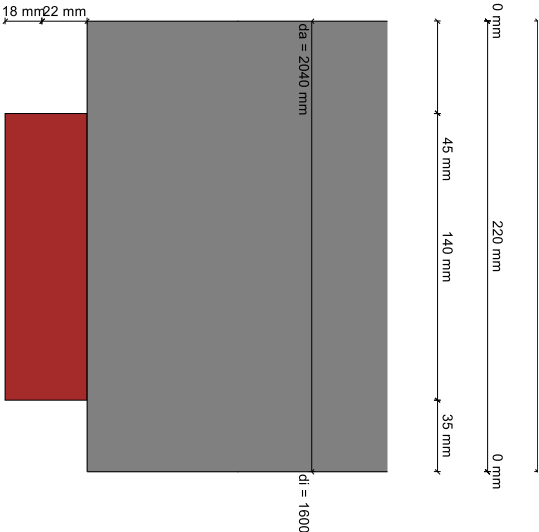
Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
 MA-250346

Seite:
 D-9

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
 D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

1.1.8.2 Stirnseite mit DÜR



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	1.600,0	mm
Außendurchmesser:	d _a	2.040,0	mm
Mittlerer Radius:	r _m	910,00	mm
Wanddicke:	s	220,00	mm
Verhältnis Radius zu Wanddicke:	r _m /s	4,136	[-]

$$\alpha_{ki} = 1 + \frac{s}{3 \cdot r_m} \quad A 127 (8.14a)$$

Korrekturfaktor Krümmung innen:	α_{ki}	1,081	[-]
---------------------------------	---------------	-------	-----

$$\alpha_{ka} = 1 - \frac{s}{3 \cdot r_m} \quad A 127 (8.14b)$$

Korrekturfaktor Krümmung außen:	α_{ka}	0,919	[-]
---------------------------------	---------------	-------	-----

Lokale Vorverformung:	$\delta_{v,l}$	0,00	%
Vorverformung (Ovalisierung vor Last):	$\delta_{v,A}$	0,00	%

Axial wirksame Profilfläche:	A _{ax}	220,00	mm ² /mm
Radiale Profilfläche:	A _{rad}	220,00	mm ² /mm
Trägheitsabstand:	e	110,00	mm
Trägheitsmoment:	I	887.333,33	mm ⁴ /mm
Äußeres Widerstandsmoment:	W _a	8.066,67	mm ³ /mm
Inneres Widerstandsmoment:	W _i	8.066,67	mm ³ /mm
Flächenverhältnis:	K _Q	1,2	[-]

Kleinsten Außendurchmesser:	d _{a,min}	2.040	mm
Größter Innendurchmesser:	d _{i,max}	1.600	mm
Max. Abweichung Stirnflächen von Rechtwinkligkeit:	$\Delta_{a,cal}$	8,0	mm
Länge des einzelnen Vortriebsrohres:	L _R	3,00	m

1.2.2.1 Materialeigenschaften

Wichte des Rohrwerkstoffs:	Y _R	25,0	kN/m ³
Querkontraktionszahl:	v	0,15	[-]
Charakteristische Zylinderdruckfestigkeit:	f _{ck,cyl}	50,0	N/mm ²
Charakteristische Würfeldruckfestigkeit:	f _{ck,cube}	60,0	N/mm ²

$$f_{cm} = f_{ck,cyl} + 8$$

Druckfestigkeit:	f _{cm}	58,0	N/mm ²
Mittlere Zugfestigkeit:	f _{ctm}	4,1	N/mm ²

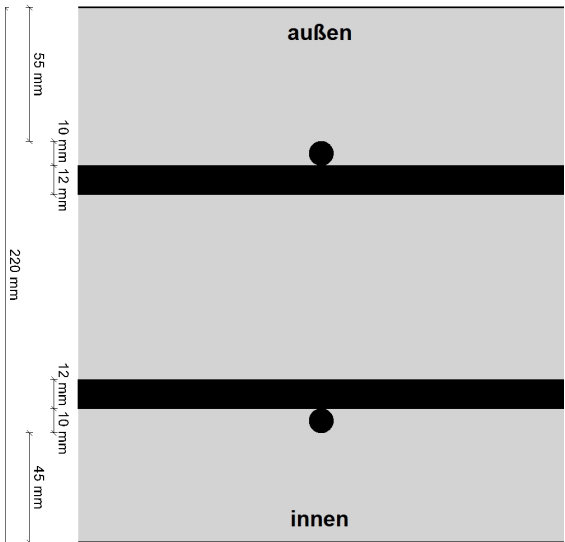
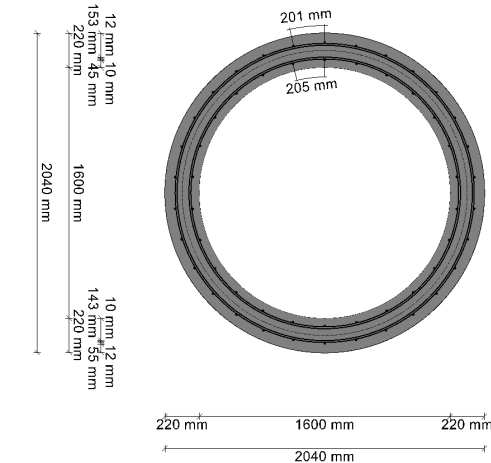
$$E_{cm} = 22 \cdot \frac{f_{cm}^{0,30}}{10} \cdot 100 \cdot 100 \cdot 100 \cdot 1.000$$

Mittlerer E-Modul (Sekantenmodul):	E _{cm}	37.278	N/mm ²
Längsdruckfestigkeit:	f _{c,ax}	50,0	N/mm ²

nach DWA-A 161 Tabelle 6) angesetzt.

Teilsicherheitsbeiwert für Bauteilwiderstand längs der Rohrachse:	Y _{M,ax}	1,35	[-]
Teilsicherheitsbeiwert für Bauteilwiderstand quer zur Rohrachse:	Y _{M,rad}	1,50	[-]
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	[-]
Teilsicherheitsbeiwert Tragwiderstand Beton:	Y _{RC}	1,50	[-]
Teilsicherheitsbeiwert Tragwiderstand Stahl:	Y _{RS}	1,15	[-]

1.2.2.3 Stahlbetonrohr



Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-12

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

$$z_i = \frac{h}{2} - c_{\text{nom},i} - \varnothing_{\text{ax},i} - \frac{\varnothing_{\text{rad},i}}{2}$$

Hebelarm innere Ringbewehrung z_i 49,0 49,0 49,0 mm

$$z_e = \frac{h}{2} - c_{\text{nom},e} - \varnothing_{\text{ax},e} - \frac{\varnothing_{\text{rad},e}}{2}$$

Hebelarm äußere Ringbewehrung z_e 39,0 39,0 39,0 mm

$$d_{\text{ik}} = \frac{h}{2} + z_i$$

Statische Höhe innerer Bewehrungskorb d_{ik} 159,0 159,0 159,0 mm

$$d_{\text{ek}} = \frac{h}{2} + z_e$$

Statische Höhe äußerer Bewehrungskorb d_{ek} 149,0 149,0 149,0 mm

Verhältnis E-Modul Stahl zu E-Modul Beton nach DIN V 1201:2004-08: n 15,0 [-]

$$z_{\text{id}} = \frac{z_i \cdot n \cdot \text{vorh } a_{\text{S},i} - z_e \cdot n \cdot \text{vorh } a_{\text{S},e}}{A_{\text{id}}}$$

z_{id} 0,5 0,5 0,5 mm

$$A_{\text{id}} = h + 15 \cdot \text{vorh } a_{\text{S},i} + n \cdot \text{vorh } a_{\text{S},e}$$

Ideelle Querschnittsfläche A_{id} 2.426,19 2.426,19 2.426,19 cm²/m

$$I_{\text{id}} = \frac{h^3}{12} + h \cdot z_{\text{id}}^2 + n \cdot \text{vorh } a_{\text{S},i} \cdot z_i - z_{\text{id}}^2 + n \cdot \text{vorh } a_{\text{S},e} \cdot z_e + z_{\text{id}}^2$$

Ideeles Trägheitsmoment I_{id} 931.637,4 931.637,4 931.637,4 mm⁴/mm

$$W_{\text{id},a} = \frac{I_{\text{id}}}{\frac{h}{2} + z_{\text{id}}}$$

Ideeles Widerstandsmoment, außen $W_{\text{id},a}$ 8.433,69 8.433,69 8.433,69 mm³/mm

$$W_{\text{id},i} = \frac{I_{\text{id}}}{\frac{h}{2} - z_{\text{id}}}$$

Ideeles Widerstandsmoment, innen $W_{\text{id},i}$ 8.505,47 8.505,47 8.505,47 mm³/mm

Nennmaß der Betondeckung innen $c_{\text{nom},i}$ 45,0 45,0 45,0 mm

Nennmaß der Betondeckung außen $c_{\text{nom},e}$ 55,0 55,0 55,0 mm

1.2.3 Nicht lastabhängige Nachweise, Stahlbeton

1.2.3.1 Mindestbetongüte infolge der gewählten Expositionsklasse

Mindestbetongüte, Außen:

C25/30

Mindestbetongüte, Innen:

C25/30

Betonqualität:

C50/60

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-13

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

1.2.3.2 Überprüfung der Mindestwanddicke (DIN V 1201:2004-08 5.3.5.2)

Betongüte: C50/60
 Mindestwert für Wandicken/Radius-Verhältnis: min. t/r_m 0,16 [-]
 Innendurchmesser: d_i 1.600,0 mm

$$\min. t = \frac{\min. t/r_m}{2 - \min. t/r_m} \cdot d_i$$

Berechnete Mindestwanddicke: min. t 139,1 mm

Die Mindestwanddicke nach DIN V 1201:2004-08, 5.3.5.2 wird eingehalten bzw. übertroffen.

1.2.3.3 Überprüfung der Mindestbewehrung (DIN V 1201:2004-08 5.3.7)

Vorhandene Ringbewehrung innen: vorh. $a_{sring,i}$ 7,54 cm²/m
 min. $a_{s,i} = 0,004 \cdot \min. t$ DIN V 1201 5.3.7

Mindest-Ringbewehrung innen DIN V 1201, 5.3.7: min. $a_{s,i}$ 5,57 cm²/m

Vorhandene Ringbewehrung außen: vorh. $a_{sring,e}$ 7,54 cm²/m

min. $a_{s,e} = 0,003 \cdot \min. t$ DIN V 1201 5.3.7

Mindest-Ringbewehrung außen DIN V 1201, 5.3.7: min. $a_{s,e}$ 4,17 cm²/m

Vorhandene Bewehrung	vorh. a_s	Scheitel 7,54	Kämpfer 7,54	Sohle 7,54	cm ² /m
Mindestbewehrung	min. a_s	5,57	4,17	5,57	cm ² /m

$$U \min. a_s = \frac{\min. a_s}{\text{vorh. } a_s}$$

Ausnutzung Bewehrung (Mindestbewehrung DIN) U min. a_s 73,8 55,4 73,8 %

Die Mindestbewehrung nach DIN V 1201:2004-08, 5.3.7 wird eingehalten bzw. übertroffen.

1.2.3.4 Überprüfung der äußeren Bewehrung (DIN V 1201:2004-08 5.2.6)

$$\text{vorh. } a_{sring,i} = \frac{\varnothing_{rad,i}^2}{2} \cdot \pi \cdot \frac{1}{e_i}$$

Vorhandene Ringbewehrung innen: vorh. $a_{sring,i}$ 7,54 cm²/m

$$a_{s,e,60\%i} = 0,60 \cdot \text{vorh. } a_{sring,i}$$

Erforderliche Ringbewehrung außen (DIN V 1201 5.2.6): $a_{s,e,60\%i}$ 4,52 cm²/m

Vorhandene Ringbewehrung außen: vorh. $a_{sring,e}$ 7,54 cm²/m

Vorhandene Ringbewehrung außen, Anteil (DIN V 1201 5.2.6): $a_{s,e/i\%}$ 100,00 %

1.2.3.5 Abstand und Anzahl der Längsstäbe (DIN V 1201:2004-08 5.2.1)

Maximaler Soll-Abstand Längsbewehrung: $e_{L,max}$ 333 mm

Anzahl der Längsstäbe innen: $n_{ax,i}$ 26 [-]

$$r_i = \frac{d_i}{2} + c_{nom,i} + \frac{\varnothing_{ax,i}}{2}$$

Angesetzter Radius innen: r_i 850 mm

$$U_{Li,vor} = 2 \cdot r_i \cdot \pi$$

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-14

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

Vorhandener Abstand Längsbewehrung:	$e_{L,vor,i}$	205	mm
$vorh\ a_{S,L,i} = \frac{\varnothing_{ax,i}^2}{2} \cdot \pi \cdot \frac{1}{e_{L,vor,i}}$			
Vorhandene Längsbewehrung innerer Korb:	$vorh\ a_{S,L,i}$	3,82	cm ² /m
Anzahl der Längsstäbe außen:	$n_{ax,e}$	30	[-]
$r_e = \frac{d_a}{2} - 0,055 - \frac{\varnothing_{ax,e}}{2}$			
Angesetzter Radius außen, bezogen auf Kämpfer:	r_e	960	mm
$U_{Le,vor} = 2 \cdot r_e \cdot \pi$			
Vorhandener Umfang Längsbewehrung außen:	$U_{Le,vor}$	6.032	mm
Vorhandener Abstand Längsbewehrung:	$e_{L,vor,e}$	201	mm
$vorh\ a_{S,L,e} = \frac{\varnothing_{ax,e}^2}{2} \cdot \pi \cdot \frac{1}{e_{L,vor,e}}$			
Vorhandene Längsbewehrung äußerer Korb:	$vorh\ a_{S,L,e}$	3,91	cm ² /m

Der Abstand der Längsstäbe ist ausreichend klein.

1.2.3.6 Betondeckung (DIN V 1201:2004-08 5.2.2)

Es wird ein Vorhaltemaß von 10 mm angesetzt (Rohr nach DIN V 1201).

Die erforderliche Betonüberdeckung wurde um 5 mm reduziert gemäß Arbeitsblatt 6 des ISB: Gewählte Festigkeitsklasse ist min. zwei Klassen größer als die Mindestbetonfestigkeitsklasse.

Die erforderliche Betonüberdeckung außen wurde um 5 mm erhöht (Vortriebsrohr).

	erf. $c_{nom,e}$	Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Erf. Betondeckung außen	35,0	35,0	35,0	35,0	mm
Nennmaß der Betondeckung außen	$c_{nom,e}$	55,0	55,0	55,0	mm

Die Betondeckung (außen) ist ausreichend.

Die erforderliche Betonüberdeckung wurde um 5 mm reduziert gemäß Arbeitsblatt 6 des ISB: Gewählte Festigkeitsklasse ist min. zwei Klassen größer als die Mindestbetonfestigkeitsklasse.

	erf. $c_{nom,i}$	30,0	30,0	30,0	mm
Erf. Betondeckung innen	$c_{nom,i}$	45,0	45,0	45,0	mm

Die Betondeckung (innen) ist ausreichend.

1.2.3.7 Bemessung mit Mindestschnittgröße

$$f_{t,fl,d} = \frac{f_{t,fl}}{Y_{M,rad}}$$

Maximal zulässige Ringbiegezugspannung:	$f_{t,fl,d}$	4,0	N/mm ²
---	--------------	-----	-------------------

$$f_{c,rad,d} = \frac{f_{c,rad}}{Y_{M,rad}}$$

Maximal zulässige Ringbiegedruckspannung:	$f_{c,rad,d}$	33,3	N/mm ²
---	---------------	------	-------------------

$$\kappa_{min} = 1 + (0,5 - z_k/d_{a,min}) \geq 1 \quad (49)$$

		Scheitel 45·m ² ·kmin (47a) 37,265	Kämpfer -45·m ² ·kmin (47b) -37,265	Sohle 45·m ² ·kmin (47c) 37,265	kNm/m
Bemessungsmoment für Mindestbemessung	M _{d,min}				
		-135·m·kmin (48a) -122,850	-270·m·kmin (48b) -245,700	-135·m·kmin (48c) -122,850	kN/m
Bemessungsnormalkraft für Mindestbemessung	N _{d,min}				
<i>Ringbewehrung</i>					
Hebelarm innere Ringbewehrung	z _i	49,0	39,0	49,0	mm
$M_{Ed,s,min} = M_{d,min} - z_i \cdot N_{d,min}$					
Auslegungsmoment	M _{Ed,s,min}	43,284	46,847	43,284	kNm/m
$\mu_{Ed,s} = M_{Ed,s,min} / (d^2 \cdot f_{cd})$					
Normiertes Auslegungsmoment	μ _{Ed,s}	0,0604	0,0745	0,0604	[-]
Erforderlicher mechanischer Bewehrungsgrad	ω _{min}	0,0626	0,0776	0,0626	[-]
Statische Höhe	d	0,159	0,149	0,159	m
$\sigma_{s,d,min} = f_{yd}$					
Rechenwert der Stahlgrenzspannung	σ _{s,d,min}	434,78	434,78	434,78	N/mm ²
$a_{s,calc,min} = \frac{\omega_{min} \cdot 1 \cdot d \cdot f_{cd} + N_{d,min}}{\sigma_{s,d,min}}$					
Rechnerisch erforderliche Bewehrung	a _{s,calc,min}	3,66	1,89	3,66	cm ² /m
Vorhandene Bewehrung	vorh. a _s	7,54	7,54	7,54	cm ² /m
Ausnutzung Bewehrung	U a _{s,calc,min}	48,5	25,0	48,5	%

Die gewählte Bewehrung ist ausreichend.

Vergleichsspannung

		Scheitel 37,265	Kämpfer -37,265	Sohle 37,265	kNm/m
Anzunehmendes Moment	M _{d,min}				
Ideelles Widerstandsmoment, Zugseite	W _{id}	8.505,47	8.433,69	8.505,47	mm ³ /mm
$\sigma_{M,E,min} = \frac{ M_{d,min} }{W_{id}}$					
Biegespannungsanteil aus Biegemomenten	σ _{M,E,min}	4,3812	4,4185	4,3812	N/mm ²
Anzunehmende Normalkraft	N _{d,min}	-122,850	-245,700	-122,850	kN/m
Ideelle Querschnittsfläche	A _{id}	2.426,19	2.426,19	2.426,19	cm ² /m
$\sigma_{N,E,min} = \frac{N_{d,min}}{A_{id}}$					
Spannungsanteil aus Normalkräften	σ _{N,E,min}	-0,5063	-1,0127	-0,5063	N/mm ²
$f_{t,fl,min} = \sigma_{M,E,min} + \sigma_{N,E,min}$					
Maßgebliche Biegezugspannung	f _{t,fl,min}	3,8749	3,4058	3,8749	N/mm ²
Spannungsverhältnis	σ _{N,E,min} /σ _{M,E,min}	-0,1156	-0,2292	-0,1156	[-]
Profilhöhe	h	220,00	220,00	220,00	mm
Beiwert nach DIN V 1201, Bild 9	f _{R,min}	1,03	0,93	1,03	[-]
$\sigma_{VR,min} = f_{R,min} \cdot f_{t,fl,min}$					

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-16

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

$$\max \sigma_{VR} = \text{MIN: } 6 \text{ N/mm}^2 ; \frac{f_{ctm}}{3,50} \cdot 6$$

Maximale Rohrvergleichsspannung nach DIN V 1201:					
Ausnutzung Rohrvergleichsspannung (Mindestbemessung)	U $\sigma_{VR,min}$	66,6	max σ_{VR}	6,0	N/mm ²
			53,0	66,6	%

Der Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ist erbracht.

1.2.4 Zwischenergebnisse Boden

Wichte des Bodens:	γ_B	20,0	kN/m ³
Wichte des Bodens unter Auftrieb:	γ'_B	10,0	kN/m ³
Rechenwert des Verformungsmodul EF:	E_F	50,00	N/mm ²
Auflockerungsfaktor nach A161, Tabelle 15:	$f_{2,F,Bau}$	0,10	[-]
Auflockerungsfaktor nach A161, Tabelle 15:	$f_{2,F,Betrieb}$	0,20	[-]
Innerer Reibungswinkel über Rohrscheitel:	φ'_1	15,0	°
Spannungsexponent:	z	0,7	[-]

$$\delta/\varphi'_1 = \frac{\delta}{\varphi'_1}$$

Verhältnis Reibungswinkel Scherfuge / Innerer Reibungswinkel:	δ/φ'_1	1,00	[-]
Reibungswinkel in der Scherfuge:	δ	15,00	°
Erddruckverhältnis über Rohrscheitel:	K_1	0,80	[-]

$$b = d_a \cdot \sqrt{3} \quad (7)$$

Einflußbreite des Bodens über dem Rohr:	b	3,53	m
---	-----	------	---

$$\kappa = \frac{1 - e^{\left(-2 \cdot \frac{h}{b} \cdot K_1 \cdot \tan \delta\right)}}{2 \cdot \frac{h}{b} \cdot K_1 \cdot \tan \delta} \quad (8)$$

Abminderungsfaktor Erdlast:	κ	0,674	[-]
-----------------------------	----------	-------	-----

$$\kappa_0 = e^{\left(-2 \cdot \frac{h}{b} \cdot K_1 \cdot \tan \delta\right)} \quad (9)$$

Abminderungsfaktor Flächenlast:	κ_0	0,428	[-]
Hinweis zur Silotheorie:	Die Silotheorie kann angewendet werden.		
Berücksichtigung des Konzentrationsfaktors λF notwendig:	Ja		
Konzentrationsfaktor:	λ	1,000	[-]
Basis-Erddruckverhältnis unter Rohrscheitel:	$K_{2,0}$	0,74	[-]

$$K_{2,Bau} = K_{2,0} \cdot f_{2,F,Bau} \leq K_{2,0} \leq 0,4 \quad (4)$$

Erddruckverhältnis unter Rohrscheitel, Bauzustand:	$K_{2,Bau}$	0,07	[-]
--	-------------	------	-----

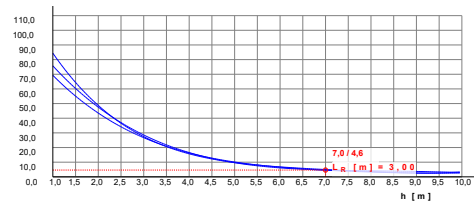
$$K_{2,End} = K_{2,0} \cdot f_{2,F,Betrieb} + 0,2 \leq K_{2,0} \leq 0,5 \quad (4)$$

Erddruckverhältnis unter Rohrscheitel, Endzustand:	$K_{2,End}$	0,35	[-]
--	-------------	------	-----

1.2.5 Bauzustand

1.2.5.1 Belastungen Bauzustand

Straße LM 1 - Fahrstreifenbreite: 2,7 m - $\alpha_{Qi} = 0,8$
 $p_T' \text{ [kN/m}^2\text{]}$



Anpassungsfaktor α_{Qi} LM1 (DIN EN 1991-2):

$$f_{\alpha, Qi} = \frac{\alpha_{Qi, LM1}}{0,80}$$

Faktor für Abweichung von Diagrammen/Formeln:

$$p_T = p_T' \cdot f_{\alpha, Qi}$$

Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Scheitelhöhe:
Stoßbeiwert:

$$p = \frac{p_T}{\varphi}$$

Einfache Bodenspannung aus Verkehr:

$$F_1 = 120 \text{ kN/m}^2 \cdot f_{\alpha, Qi}$$

Radlast:

$$p_{TK} = \frac{F_1}{(h + 0,4 + d_a/2)^2}$$

Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Kämpferhöhe (mit φ):

Erddruckverhältnis unter Rohrscheitel:

Beiwert f für die Berechnung des seitlichen Erddrucks aus Verkehrslasten:

$$p_{T,h} = \frac{p_{TK} \cdot f \cdot K_2}{\varphi}$$

Horizontale Bodenspannung aus Verkehr:

$$p_{Ev} = \kappa \cdot \gamma_B \cdot (h - h_{GW} + d_a) + \kappa \cdot \gamma'_B \cdot (h_{GW} - d_a) + \kappa_0 \cdot P_0$$

Vertikale Bodenspannung in Rohrscheitelebene:

Wirksame vertikale Bodenspannung in Rohrscheitelebene:

$$q_{Ges,v} = q_0 + p_T$$

Vertikale Gesamt-Bodenspannung in Rohrscheitelebene:

Die Erddruckverteilung am Rohr wird $\cos^2$ - bzw. $\sin^2$ -förmig angenommen.:

Grundwasserstand im Bereich der oberen Rohrhälfte:

$\alpha_{Qi, LM1}$	1,50	[-]
$f_{\alpha, Qi}$	1,88	[-]
p_T	8,68	kN/m ²
φ	1,20	[-]
p	7,23	kN/m ²
F_1	225,00	kN
p_{TK}	3,81	kN/m ²
K_2	0,07	[-]
f	1,00	[-]
$p_{T,h}$	0,24	kN/m ²
p_{Ev}	94,335	kN/m ²
q_{Ev}	94,335	kN/m ²
$q_{Ges,v}$	145,122	kN/m ²
$h_{GW, oRh}$	2,000	m

3

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-18

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

Radiale Erdlast auf das Rohr während des Vortriebs:

q_0	136,446	kN/m ²
-------	---------	-------------------

$$q_{0,h} = \left(q_0 + \frac{\gamma_B \cdot d_a}{2} \right) \cdot K_2 \quad (34a)$$

Horizontale Bodenspannung während des Vortriebs:

$q_{0,h}$	10,869	kN/m ²
-----------	--------	-------------------

$$q_{Ges,h} = q_{0,h} + p_{Th} \quad (53)$$

Horizontale Gesamt-Bodenspannung am Rohr:

$q_{Ges,h}$	11,104	kN/m ²
-------------	--------	-------------------

Innerer Überdruck:

p_i	0,300	bar
-------	-------	-----

Äußerer Überdruck über Rohrscheitel:

$p_{a,Sc}$	0,000	bar
------------	-------	-----

Rohrsteifigkeit:

S_R	43,895	kN/m ²
-------	--------	-------------------

Rohrsteifigkeit:

$\bar{S}_R$	43,895	kN/m ²
-------------	--------	-------------------

Rechenwert des Verformungsmodul EF:

E_F	50,00	N/mm ²
-------	-------	-------------------

Auflockerungsfaktor nach A161, Tabelle 15:

$f_{2,F,Bau}$	0,10	[-]
---------------	------	-----

$$E_B = E_F \cdot f_{2,F,Bau} \quad (50)$$

Verformungsmodul Boden:

E_B	5,00	N/mm ²
-------	------	-------------------

Erddruckverhältnis unter Rohrscheitel:

K_2	0,07	[-]
-------	------	-----

$$S_{Bh} = 0,60 \cdot E_B \quad (18)$$

Bettungssteifigkeit:

S_{Bh}	3,00	N/mm ²
----------	------	-------------------

$$V_{RB} = \frac{\bar{S}_R}{S_{Bh}} \quad (14)$$

Systemsteifigkeit:

V_{RB}	14,6316	[-]
----------	---------	-----

Das Rohr-Bodensystem verhält sich biegeweich:

Nein		
------	--	--

1.2.5.2 Schnittkräfte Bauzustand

Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkungen quer zur Rohrachse:

γ_F	1,35	[-]
------------	------	-----

Teilsicherheitsbeiwert Wasseraußendruck:

$\gamma_{F,W}$	1,35	[-]
----------------	------	-----

Mittlerer Radius:

r_m	910,00	mm
-------	--------	----

Innerer Überdruck:

p_i	0,300	bar
-------	-------	-----

Äußerer Überdruck über Rohrscheitel:

$p_{a,Sc}$	0,000	bar
------------	-------	-----

Radiale Erdlast auf das Rohr während des Vortriebs:

q_0	136,446	kN/m ²
-------	---------	-------------------

Horizontale Bodenspannung während des Vortriebs:

$q_{0,h}$	10,869	kN/m ²
-----------	--------	-------------------

Vertikale Bodenspannung infolge Verkehrslast:

p_T	8,68	kN/m ²
-------	------	-------------------

Horizontale Bodenspannung infolge Verkehrslast:

p_{Th}	0,24	kN/m ²
----------	------	-------------------

Vertikale Gesamt-Bodenspannung in Rohrscheitelebe:

$q_{Ges,v}$	145,122	kN/m ²
-------------	---------	-------------------

Horizontale Gesamt-Bodenspannung am Rohr:

$q_{Ges,h}$	11,104	kN/m ²
-------------	--------	-------------------

Momente:

m_{q_0}	Scheitel 0,269	Kämpfer -0,275	Sohle 0,292	[-]
-----------	-------------------	-------------------	----------------	-----

$$M_{q0v,d} = \gamma_F \cdot m_{q_0} \cdot q_0 \cdot r_m^2 \quad (24)$$

Vertikale Belastung aus Erdüberdeckung

$M_{q0v,d}$	41,033	-41,948	44,541	kNm/m
m_{p_T}	0,269	-0,275	0,292	[-]

$$M_{pTv,d} = \gamma_Q \cdot m_{p_T} \cdot p_T \cdot r_m^2 \quad (29)$$

Vertikale Belastung aus Verkehr

$M_{pTv,d}$	2,609	-2,667	2,832	kNm/m
$m_{p_{Th}}$	-0,245	0,244	-0,224	[-]

$$M_{pTh,d} = \gamma_Q \cdot m_{p_{Th}} \cdot p_{Th} \cdot r_m^2 \quad (31)$$

$$M_{qh,d} = \gamma_F \cdot m_{qh} \cdot q_{0,h} \cdot r_m^2 \quad (33)$$

Horizontale Belastung aus Erdüberdeckung	$M_{qh,d}$ m_g	-2,977 0,406	2,965 -0,471	-2,722 0,573	kNm/m [-]
--	---------------------	-----------------	-----------------	-----------------	--------------

$$M_{g,d} = \gamma_F \cdot m_g \cdot \gamma_R \cdot s \cdot r_m^2 \quad (37)$$

Eigengewicht	$M_{g,d}$ m_w	2,496 0,203	-2,896 -0,235	3,523 0,286	kNm/m [-]
--------------	--------------------	----------------	------------------	----------------	--------------

$$M_{w,d} = \gamma_F \cdot m_w \cdot \gamma_W \cdot r_m^3 \quad (39)$$

Wasserfüllung bis Rohrscheitel	$M_{w,d}$ m_a	0,000 -0,203	0,000 0,235	0,000 -0,286	kNm/m [-]
--------------------------------	--------------------	-----------------	----------------	-----------------	--------------

$$M_{a,d} = \gamma_{F,W} \cdot m_a \cdot \gamma_W \cdot r_m^3 \quad (41)$$

Auftrieb (äußerer Wasserstand bis Scheitel)	$M_{a,d}$	0,000	0,000	0,000	kNm/m
---	-----------	-------	-------	-------	-------

$$M_{pw,d} = ((\gamma_F \cdot p_i) - (\gamma_{F,W} \cdot p_a)) \cdot r_i \cdot r_a \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{r_i \cdot r_a}{r_a^2 - r_i^2} \cdot \ln \cdot \frac{r_a}{r_i} \right) \quad (43)$$

Wasserdruck	$M_{pw,d}$ m_{qh^*}	0,161 -0,181	0,161 0,208	0,161 -0,181	kNm/m [-]
-------------	--------------------------	-----------------	----------------	-----------------	--------------

$$M_{qEh^*,d} = \gamma_F \cdot m_{qh^*} \cdot q_{Eh^*} \cdot r_m^2 \quad (45a)$$

Bettungsreaktionsdruck Erdlast	$M_{qEh^*,d}$	0,000	0,000	0,000	kNm/m
--------------------------------	---------------	-------	-------	-------	-------

$$M_{qTh^*,d} = \gamma_Q \cdot m_{qh^*} \cdot q_{Th^*} \cdot r_m^2 \quad (45b)$$

Bettungsreaktionsdruck Verkehr	$M_{qTh^*,d}$	0,000	0,000	0,000	kNm/m
--------------------------------	---------------	-------	-------	-------	-------

$$M_{qh^*,d} = M_{qTh^*,d} + M_{qEh^*,d}$$

Bettungsreaktionsdruck	$M_{qh^*,d}$	0,000	0,000	0,000	kNm/m
------------------------	--------------	-------	-------	-------	-------

Summe der Momente	ΣM_d	43,258	-44,321	48,277	kNm/m
Summe Erd- und Verkehrslasten	$\Sigma M_{qv,qh,qh^*,d}$	40,600	-41,586	44,592	kNm/m
Summe andere Lasten	$\Sigma M_{sonst,d}$	2,658	-2,735	3,685	kNm/m

Normalkräfte:	n_{qo}	Scheitel 0,044	Kämpfer -1,000	Sohle -0,433	[-]
---------------	----------	-------------------	-------------------	-----------------	-----

$$N_{q0v,d} = \gamma_F \cdot n_{qo} \cdot q_0 \cdot r_m \quad (25)$$

Vertikale Belastung aus Erdüberdeckung	$N_{q0v,d}$ n_{pT}	7,375 0,044	-167,624 -1,000	-72,581 -0,433	kN/m [-]
--	-------------------------	----------------	--------------------	-------------------	-------------

$$N_{pTv,d} = \gamma_Q \cdot n_{pT} \cdot p_T \cdot r_m \quad (30)$$

Vertikale Belastung aus Verkehr	$N_{pTv,d}$ n_{pTh}	0,469 -0,989	-10,658 0,000	-4,615 -0,718	kN/m [-]
---------------------------------	--------------------------	-----------------	------------------	------------------	-------------

$$N_{pTh,d} = \gamma_Q \cdot n_{pTh} \cdot p_{Th} \cdot r_m \quad (32)$$

Horizontale Belastung aus Verkehr	$N_{pTh,d}$ n_{qh}	-0,286 -0,989	0,000 0,000	-0,207 -0,718	kN/m [-]
-----------------------------------	-------------------------	------------------	----------------	------------------	-------------

$$N_{qh,d} = \gamma_F \cdot n_{qh} \cdot q_{0,h} \cdot r_m \quad (34)$$

Horizontale Belastung aus Erdüberdeckung	$N_{qh,d}$ n_g	-13,206 0,306	0,000 -1,571	-9,587 -1,528	kN/m [-]
--	---------------------	------------------	-----------------	------------------	-------------

$$N_{a,d} = \gamma_F \cdot n_a \cdot \gamma_R \cdot s \cdot r_m \quad (38)$$

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite:
D-20

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

	n_w	0,653	0,215	0,736	[-]
$N_{w,d} = \gamma_F \cdot n_w \cdot \gamma_W \cdot r_m^2$					(40)
Wasserfüllung bis Rohrscheitel	$N_{w,d}$ m_a	0,000 -0,653	0,000 -0,215	0,000 -0,736	kN/m [-]
$N_{a,d} = \gamma_{F,W} \cdot m_a \cdot \gamma_W \cdot r_m^2$					(42)
Auftrieb (äußerer Wasserstand bis Scheitel)	$N_{a,d}$	0,000	0,000	0,000	kN/m
$N_{pw,d} = (\gamma_F \cdot p_i \cdot r_i) - (\gamma_{F,W} \cdot P_a \cdot r_a)$					(44)
Wasserdruck	$N_{pw,d}$	32,400	32,400	32,400	kN/m
Summe der Normalkräfte	ΣN_d	28,820	-156,497	-64,915	kN/m
$\Sigma N_{qv,qh,qh^*,d} = N_{q0v,d} + N_{pTv,d} + N_{qh,d} + N_{pTh,d} + N_{qh^*,d}$					
Summe Erd- und Verkehrslasten	$\Sigma N_{qv,qh,qh^*,d}$	-5,647	-178,282	-86,991	kN/m
$\Sigma N_{sonst,d} = N_{g,d} + N_{w,d} + N_{a,d} + N_{pw,d}$					
Summe andere Lasten	$\Sigma N_{sonst,d}$	34,468	21,785	22,076	kN/m
<u>1.2.5.3 Verformungsnachweis Bauzustand</u>					
Verformungsbeiwert:			c_{v,qh^*}	0,0640	[-]
Verformungsbeiwert:			$c_{v,qv}$	-0,0966	[-]
$K^* = \frac{c_{h,qv}}{V_{RB} - c_{h,qh^*}}$					
Beiwert des Bettungsreaktionsdruckes:			K^*	0,007	[-]
$c_v^* = c_{v,qv} + c_{v,qh^*} \cdot K^*$					A 127 (6.13); A 161 (52a-d)
Verformungsbeiwert:			c_v^*	-0,096	[-]
$q_0 = \frac{3}{2 + K_2} \cdot q_{Ev}$					(26)
Radiale Erdlast auf das Rohr während des Vortriebs:			q_0	136,446	kN/m ²
Vertikale Bodenspannung infolge Verkehrslast:			p_T	8,68	kN/m ²
$q_{Ges,v} = q_0 + p_T$					(53)
Vertikale Gesamt-Bodenspannung in Rohrscheitelebene:			$q_{Ges,v}$	145,122	kN/m ²
$q_{0,h} = \left(q_0 + \frac{\gamma'_B \cdot d_a}{2} \right) \cdot K_2$					(34a)
Horizontale Bodenspannung während des Vortriebs:			$q_{0,h}$	10,869	kN/m ²
Horizontale Bodenspannung infolge Verkehrslast:			p_{Th}	0,24	kN/m ²
$q_{Ges,h} = q_{0,h} + p_{Th}$					(53)
Horizontale Gesamt-Bodenspannung am Rohr:			$q_{Ges,h}$	11,104	kN/m ²
$\delta_v = c_v^* \cdot \frac{q_{Ges,v} - q_{Ges,h}}{\bar{S}_R} \cdot 100 $					(51)
Relative vertikale Durchmesseränderung:			δ_v	0,02	%
Zulässige vertikale Durchmesseränderung:			zul δ_v	3,00	%

$$U_{\delta V} = \frac{\delta_V}{\text{zul } \delta_V}$$

Ausnutzungsgrad Verformung:

 $U_{\delta V}$ 0,7 %

Die errechnete Verformung ist kleiner als die zulässige Verformung.

1.2.5.4 Beulnachweis Bauzustand

Der Beulnachweis wurde vom Nutzer deaktiviert.

1.2.5.5 Bemessung Ringbewehrung

Teilsicherheitsbeiwert Tragwiderstand Beton:

 γ_{RC} 1,50 [-]

Teilsicherheitsbeiwert Tragwiderstand Stahl:

 γ_{RS} 1,15 [-]

Charakteristische Zylinderdruckfestigkeit:

 $f_{ck,cyl}$ 50,0 N/mm²

$$f_{cd} = \frac{0,85 \cdot f_{ck,cyl}}{\gamma_{RC}}$$

Bemessungswert Beton:

 f_{cd} 28,33 N/mm²

Nennstreckgrenze:

 f_{yk} 500 N/mm²

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_{RS}}$$

Bemessungswert Betonstahl:

 f_{yd} 434,78 N/mm²

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Summe der Momente	M_E	32,043	-32,830	35,761	kNm/m
Summe der Momente inkl. Teilssicherheitsbeiwert	M_{Ed}	43,258	-44,321	48,277	kNm/m
Summe Normalkraft	N_E	21,348	-115,923	-48,085	kN/m
Summe der Normalkräfte inkl. Teilssicherheitsbeiwert	N_{Ed}	28,820	-156,497	-64,915	kN/m

Bemessung:

Hebelarm innere Ringbewehrung

	Scheitel	Kämpfer	Sohle	
z_i	49,0	39,0	49,0	mm

$$M_{Eds} = |M_{Ed}| - N_{Ed} \cdot z_i$$

Auslegungsmoment Plattenbemessung

M_{Eds}	41,846	50,424	51,458	kNm/m
-----------	--------	--------	--------	-------

$$\sigma_{s,d} = f_{yd}$$

Rechenwert der Stahlgrenzspannung

	$\sigma_{s,d}$	434,78	434,78	434,78	N/mm ²
Statische Höhe	d	0,159	0,149	0,159	m

$$\mu_{Eds} = \frac{M_{Eds}}{d^2 \cdot f_{cd}}$$

Normiertes Auslegungsmoment

μ_{Eds}	0,0584	0,0802	0,0718	[-]
-------------	--------	--------	--------	-----

Erforderlicher mechanischer Bewehrungsgrad

ω	0,0604	0,0838	0,0748	[-]
----------	--------	--------	--------	-----

$$a_{s,calc} = \frac{\omega \cdot d \cdot f_{cd} + N_{Ed}}{\sigma_{s,d}}$$

Erforderliche Bewehrung (Bemessung)

$a_{s,calc}$	6,92	4,54	6,26	cm ² /m
--------------	------	------	------	--------------------

Vorhandene Bewehrung

vorh. a_s	7,54	7,54	7,54	cm ² /m
-------------	------	------	------	--------------------

Ausnutzung Bewehrung (Bemessung)

$U_{a_s,calc}$	91,8	60,2	83,0	%
----------------	------	------	------	---

Die gewählte Bewehrung ist ausreichend.

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-22

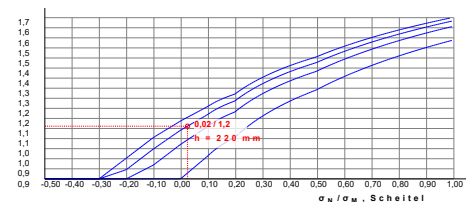
Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

1.2.5.6 Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (DIN V 1201:2004-08 5.2.5)

Ideeles Widerstandsmoment, Zugseite	W_{id}	Scheitel 8.505,47	Kämpfer 8.433,69	Sohle 8.505,47	mm³/mm
$ \sigma_{M,E} = \frac{M_E}{W_{id}}$					
Biegespannungsanteil aus Biegemomenten	$\sigma_{M,E}$	3,7673	3,8927	4,2044	N/mm²
Spannungsanteil aus Normalkräften	$\sigma_{N,E}$	0,0880	-0,4778	-0,1982	N/mm²
$f_{t,fl} = \sigma_{M,E} + \sigma_{N,E}$					
Maßgebliche Biegezugspannung	$f_{t,fl}$	3,8553	3,4149	4,0062	N/mm²
Spannungsverhältnis	σ_N / σ_M	0,0234	-0,1227	-0,0471	[-]
Profilhöhe	h	220,00	220,00	220,00	mm

Beiwert nach DIN V 1201, Bild 9
 f_R , Scheitel



Beiwert nach DIN V 1201, Bild 9	f_R	1,15	1,02	1,09	[-]
$\sigma_{VR} = f_R \cdot f_{t,fl}$					
Rohrvergleichsspannung unter Risskraft im Zustand I	σ_{VR}	4,45	3,50	4,39	N/mm²
Mittlere Zugfestigkeit:			f_{ctm}	4,1	N/mm²
$\max \sigma_{VR} = \min: 6 \text{ N/mm}^2; \frac{f_{ctm}}{3,50} \cdot 6$					
Maximale Rohrvergleichsspannung nach DIN V 1201:			$\max \sigma_{VR}$	6,0	N/mm²
$U \sigma_{VR} = \frac{\sigma_{VR}}{\max \sigma_{VR}}$					

Ausnutzung Rohrvergleichsspannung	$U \sigma_{VR}$	74,2	58,3	73,1	%
-----------------------------------	-----------------	------	------	------	---

Der Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ist erbracht.

1.2.5.7 Ermittlung der Lastklasse (DIN V 1201:2004-08 4.3.5)

Maximale Rohrvergleichsspannung nach DIN V 1201:	max σ _{VR}	6,0	N/mm ²
Inneres Widerstandsmoment:	W _i	8.066,67	mm ³ /mm
Abminderungsbeiwert für Langzeitwirkung:	α _{c,F}	0,90	[-]
Beiwert nach DIN V 1201, Bild 9:	f _R	1,15	[-]
Mittlerer Radius:	r _m	910,00	mm
Gewichtskraft des Rohrs:	G _p	31,45	kN/m
$F_c = 1/0,3 \cdot \left\{ \frac{\max \sigma_{VR} \cdot W_i}{\alpha_{c,F} \cdot f_R \cdot r_m} - 0,07 G_p \right\}$			
Risskraft (Ergänzung Mindestscheiteldruckkraft):	F _c	163,23	kN/m
Ermittelte Lastspannung nach DIN V 1201 Tabelle 8/9:			

bedeutet, dass Rohre dieser Nennweiten und Lastklassen im Regelfall nicht hergestellt werden. Zum Einsatz kommen Rohre mit höherer Tragfähigkeit (Lastklasse).

1.2.6 Nachweis der Zulässigkeit der Vortriebskraft

1.2.6.1 Rohr

Minimale Wanddicke des Rohres:	$t_{R,min}$	220,0	mm
Maßgebende Druckübertragungsfläche:	A_R	12.578,937	cm ²
Längsdruckfestigkeit:	$f_{c,ax}$	50,0	N/mm ²
Teilsicherheitsbeiwert für Bauteilwiderstand längs der Rohrachse:	$\gamma_{M,ax}$	1,35	[-]
Charakteristische Festigkeit des Rohrwerkstoffs:	f_k	50,00	N/mm ²
Mittlere Zugfestigkeit des Rohrwerkstoffs in Ringrichtung:	f_{tm}	4,07	N/mm ²
Elastizitätsmodul in axialer Richtung:	$E_{R,ax}$	37.277,9	N/mm ²
Teilsicherheitsbeiwert für Bauteilwiderstand längs der Rohrachse:	$\gamma_{M,ax}$	1,35	[-]

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_{M,ax}} \quad (100)$$

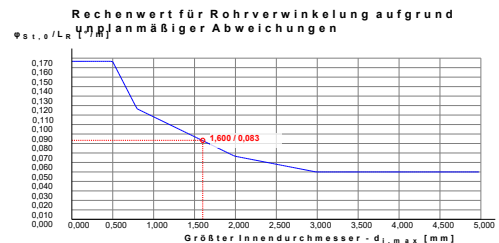
Bemessungswert der Rohrfestigkeit: f_d 37,04 N/mm²

1.2.6.2 Rohrabwinklung

Minimaler planmäßiger Kurvenradius der Vortriebsstrecke:	R_{Plan}	+∞	m
Länge des einzelnen Vortriebsrohres:	L_R	3,00	m

$$\varphi_R = \arctan\left(\frac{L_R}{R_{Plan}}\right) \quad (93)$$

Berechnete Rohrverwinklung aus planmäßiger Krümmung: φ_R 0,000 °
 φ_R wurde zu 0° gesetzt, da für $\varphi_R < 0,05^\circ$ die Trasse als planmäßig gerade gilt.
 Angesetzte Rohrverwinklung aus planmäßiger Krümmung: φ_R 0,000 °
 Größter Innendurchmesser: $d_{i,max}$ 1.600 mm



Rechenwert für Rohrverwinklung aufgrund unplanmäßiger Abweichungen: $\varphi_{St,0}/L_R$ 0,083 °/m
 $\varphi_{St} = \varphi_{St,0}/L_R \cdot L_R + 0,0625^\circ \geq 0 \quad (94)$

Rohrverwinklung aufgrund unplanmäßiger Abweichungen: φ_{St} 0,313 °
 Nennweite: DN 1.600 mm
 Max. Abweichung Stirnflächen von Rechtwinkligkeit: $\Delta_{a,cal}$ 8,0 mm
 Kleinster Außendurchmesser: $d_{a,min}$ 2.040 mm

$$\varphi_{\Delta a,cal} = \arctan\left(\frac{\Delta_{a,cal}}{d_{a,min}}\right) \quad (96)$$

Rohrverwinklung aufgrund Abweichungen der Rohrspiegel von der Rechtwinkligkeit: $\varphi_{\Delta a,cal}$ 0,225 °

Kombinationsbeiwert für Rohrabwinklungen: ψ 0,80 [-]

$$\varphi_{ges} = \varphi_R + \text{MAX}[\varphi_{St}, (\varphi_{St} + \varphi_{\Delta a,cal}) \cdot \psi, \varphi_{\Delta a,cal}] \quad (97)$$

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-24

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

1.2.6.3 Verformung des Druckübertragungsringes

Druckübertragungsring (DÜR)

OSB-Platte (OSB/3, OSB/4) - OSB-Platte (OSB/3, OSB/4)

Außendurchmesser des DÜR:

$d_{a,DÜR}$ 1.950,0 mm

Innendurchmesser des DÜR:

$d_{i,DÜR}$ 1.670,0 mm

Äußerer Randabstand des DÜR:

$a_{a,DÜR}$ 45,0 mm

Innerer Randabstand des DÜR:

$a_{i,DÜR}$ 35,0 mm

Breite des DÜR:

$t_{DÜR}$ 140,0 mm

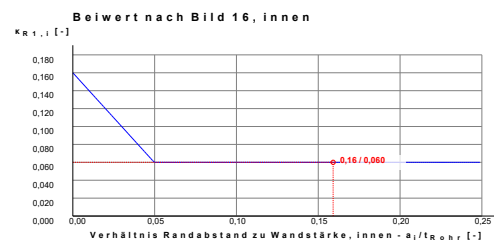
Minimale Wanddicke des Rohres:

$t_{R,min}$ 220,0 mm

$$K_t = \frac{t_{R,min}}{t_{DÜR}} \quad (99)$$

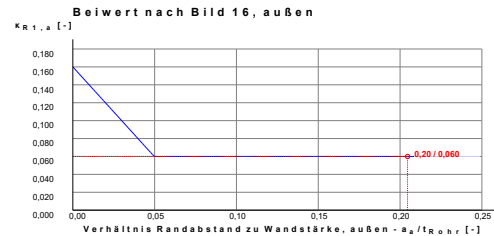
Verhältnis $t_{DÜR}$ zu t_{Rohr} :

K_t 1,571 [-]



Verhältnis Randabstand zu Wandstärke, innen:

Beiwert nach Bild 16, innen:



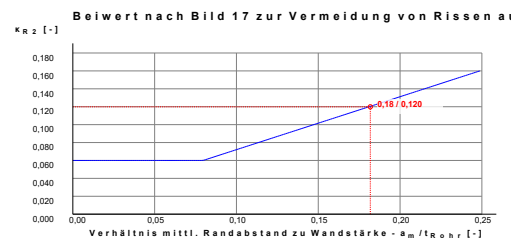
Verhältnis Randabstand zu Wandstärke, außen:

Beiwert nach Bild 16, außen:

$$K_{R1} = \max(K_{R1,i}, K_{R1,a})$$

Beiwert nach Bild 16 zur Vermeidung von Randabplatzungen:

K_{R1} 0,060 [-]



Verhältnis mittl. Randabstand zu Wandstärke:

Beiwert nach Bild 17 zur Vermeidung von Rissen aus Spaltzug:

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite:
D-25

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

$$K_R = \max(K_{R1}, K_{R2})$$

Beiwert nach Bild 16/17, angesetzter Wert:

Mittlere Zugfestigkeit des Rohrwerkstoffs in Ringrichtung:

K_R	0,120	[-]
f_{tm}	4,07	N/mm ²

$$\alpha_{D,T} = \frac{f_{tm}}{f_k} \cdot \frac{1}{K_R} \quad (98)$$

Beiwert für zulässige Druckspannung:

$\alpha_{D,T}$	0,679	[-]
----------------	-------	-----

$$\sigma_{cal} = \alpha_{D,T} \cdot K_t \cdot f_d \quad (97)$$

Höchste in der Rohrfuge wirkende, zulässige Druckspannung:

σ_{cal}	39,53	N/mm ²
----------------	-------	-------------------

Angesetzte Vorpresskraft, Laufvariable:

F_j	5.000	kN
-------	-------	----

$$\sigma_{0DÜR} = \frac{F_j}{A_{DÜR}}$$

Gleichmäßig verteilte Spannung im DÜR:

$\sigma_{0DÜR}$	8,11	N/mm ²
-----------------	------	-------------------

$$\sigma_I = 2 \cdot \sigma_{0DÜR} \quad (107)$$

Maßgebende Spannung der Vorbelastung:

σ_I	16,21	N/mm ²
------------	-------	-------------------

$$\sigma_I / \sigma_{cal} = \frac{\sigma_I}{\sigma_{cal}}$$

Prozentsatz der Vorbelastung:

σ_I / σ_{cal}	41,0	%
---------------------------	------	---

1.2.6.4 Verformung des Druckübertragungsringes

Schicht 1

OSB-Platte (OSB/3, OSB/4)

Schichtdicke:

s_d	22,00	mm
-------	-------	----

$$E_{cal} = \left(\sigma_{cal} \cdot 61,113 (\sigma_I / \sigma_{cal})^{1,33} - 983,8 \cdot (\sigma_I / \sigma_{cal}) + 3249 \cdot (\sigma_I / \sigma_{cal})^2 - 5866 \cdot (\sigma_I / \sigma_{cal})^3 + 0,23236 + 4140 \cdot (\sigma_I / \sigma_{cal})^4 \right) \cdot (-0,0009 \cdot s_d^3 + 0,0608 \cdot s_d^2 + 1,2216 \cdot s_d + 8,6507) \quad (110)$$

Steifigkeit der DUER-Schicht:

E_{cal}	962,09	N/mm ²
-----------	--------	-------------------

$$\Delta s_{DÜR,S,1} = s_{d,1} \cdot \left(\frac{\sigma_{cal}}{E_{cal}} \right)^{0,5} \cdot \frac{d_{a,min}}{d_{a,DÜR}} \quad (102 / 111)$$

Verformungsanteil der Schicht:

$\Delta s_{DÜR,S}$	4,7	mm
--------------------	-----	----

Schicht 2

OSB-Platte (OSB/3, OSB/4)

Schichtdicke:

s_d	18,00	mm
-------	-------	----

$$E_{cal} = \left(\sigma_{cal} \cdot 61,113 (\sigma_I / \sigma_{cal})^{1,33} - 983,8 \cdot (\sigma_I / \sigma_{cal}) + 3249 \cdot (\sigma_I / \sigma_{cal})^2 - 5866 \cdot (\sigma_I / \sigma_{cal})^3 + 0,23236 + 4140 \cdot (\sigma_I / \sigma_{cal})^4 \right) \cdot (-0,0009 \cdot s_d^3 + 0,0608 \cdot s_d^2 + 1,2216 \cdot s_d + 8,6507) \quad (110)$$

Steifigkeit der DUER-Schicht:

E_{cal}	660,78	N/mm ²
-----------	--------	-------------------

$$\Delta s_{DÜR,S,2} = s_{d,2} \cdot \left(\frac{\sigma_{cal}}{E_{cal}} \right)^{0,5} \cdot \frac{d_{a,min}}{d_{a,DÜR}} \quad (102 / 111)$$

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-26

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

Verformungsanteil der Schicht:

 $\Delta s_{DÜR,S}$ 4,6 mm

$$\Delta s_{DÜR} = \Delta s_{DÜR,S,1} + \Delta s_{DÜR,S,2} \quad (112)$$

Verformungsanteil Gesamt:

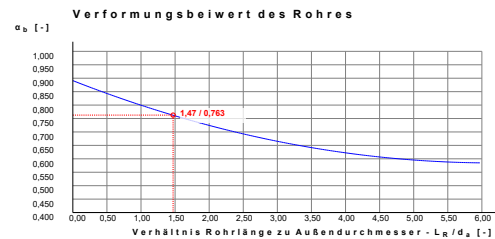
 $\Delta s_{DÜR}$ 9,3 mm

1.2.6.5 Verformung des Rohres

$$\sigma_{\max} = \sigma_{\text{cal}} \cdot \frac{t_{DÜR}}{t_{R,\min}} \quad (103b)$$

$$\sigma_{\max} = \frac{\sigma_{\text{cal}} \cdot t_{DÜR}}{t_{R,\min}}$$

Rechnerische Druckspannung im Rohrwerkstoff:

 $\sigma_{\max}$ 25,16 N/mm²


$$L_R/d_a = \frac{L_R}{d_a}$$

Verhältnis Rohrlänge zu Außendurchmesser:

 L_R/d_a 1,47 [-]

$$\alpha_b = 0,008 \cdot \frac{L_R^2}{d_a} - 0,099 \cdot \frac{L_R}{d_a} + 0,891 \quad (105)$$

Verformungsbeiwert des Rohres:

 α_b 0,763 [-]

$$\alpha_\varphi = \varphi_R - 0,05 \leq 1 \ \& \geq 0$$

Beiwert:

 α_φ 0,000 [-]

$$\kappa_{ab} = \alpha_b - (\alpha_b - 0,5) \cdot (1 - \alpha_\varphi) \quad (104)$$

Verformungsfaktor des Rohres:

 κ_{ab} 0,500 [-]

$$\Delta s_R = \frac{\sigma_{\max} \cdot \kappa_{ab} \cdot L_R}{E_{R,ax}} \quad (103a)$$

Verformungsanteil des Vortriebsrohres:

 Δs_R 1,0 mm

Ergebnis

$$z_k/d_{a,\min} = \frac{\Delta s_{DÜR} + \Delta s_R}{\tan(\varphi_{\text{ges}}) \cdot d_{a,DÜR}} \leq 1 \quad (101)$$

Maß der Fugenklaffung:

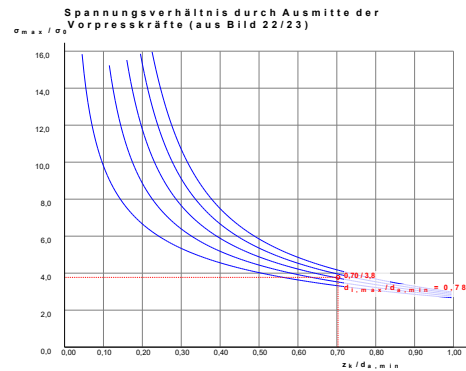
 $z_k/d_{a,\min}$ 0,70 [-]

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-27

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.



Spannungsverhältnis durch Ausmitte der Vorpresskräfte (aus Bild 22/23): $\sigma_{\max} / \sigma_0$ 3,77 [-]

$$A_R = \frac{(d_{a,\min}^2 - d_{i,\max}^2) \cdot \pi}{4}$$

Maßgebende Druckübertragungsfläche:
Teilsicherheitsbeiwert Einwirkung längs der Rohrachse:

A_R 12.578,937 cm²
 $\gamma_{F,ax}$ 1,30 [-]

$$F_j = \frac{A_R \cdot \sigma_{\max}}{\sigma_{\max} / \sigma_0 \cdot \gamma_{F,ax}} \quad (113)$$

Zulässige Vorpresskraft:

F_j 6.454 kN

Vorgegebene Vortriebskraft:

$F_{j,m}$ 5.000,0 kN

$$U_{Fj} = \frac{F_{j,m}}{F_j}$$

Ausnutzung zulässige Vortriebskraft:

U_{Fj} 77,5 %

Die angesetzte Vortriebskraft ist zulässig.

$$A_{R,0} = \frac{(d_i + 2 \cdot A_{ax}^2 - d_i^2) \cdot \pi}{4}$$

Rohrfläche für Axialdruck außerhalb Kupplungsbereich:

$A_{R,0}$ 12.578,94 cm²

$$\sigma_{x,d,0} = -1 \cdot \gamma_{F,ax} \cdot \frac{F_{j,m}}{A_{R,0}} \cdot \sigma_{\max} / \sigma_0 \quad (113)$$

Im Rohr wirkende axiale Spannung, Bemessungswert:

$\sigma_{x,d,0}$ -19,49 N/mm²

1.2.6.6 Interaktion - Vergleichsspannungsnachweis Schaft

Der Nachweis der Vergleichsspannung ist bei biegesteifen Rohren nicht erforderlich.

Alle notwendigen Nachweise sind erbracht.

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-28

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

2 Vortriebsrohr nach DWA-A 161, 2. Auflage: QP 1 - Endzustand

Folgende Korrekturen des Arbeitsblatts DWA-A 161 berücksichtigt das Rechenmodul: DWA-A 161 04/2017, DWA-A 161 10/2017, TM 4-2019 der DB Netz AG, DWA-A 161 10/2020, DWA-A 127-10:2020-10, DWA-A 161 03/2021

Titel der Berechnung: QP 1 - Endzustand

Annahmen: Überdeckung 13,25m
Belastung aus LKW-Wendeplatz
Belastung aus Stützwand

Berechnungsart: Stahlbeton
Nachzuweisende Zustände: Nur Betriebszustand
Einbauskizze in Ausdruck: Ja
Mindestschnittgrößen im Betriebszustand drucken: Ja

2.1 Eingaben

2.1.1 Vortriebsverfahren

Verfahren: Mikrotunnel und bemannte Verfahren
Vollständige dauerhafte Ringraumverpressung: Ja
Druck beim Verpressen des Überschchnitts: p_D 1,5 bar
Einsatz von Stütz- oder Gleitmittel: Ja
Stütz- oder Gleitmitteldruck: p_{Stm} 1,0 bar
Ringspalt: Ringspalt $\leq 1,0$ cm bezogen auf den Radius, nicht systematisch gestützt

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: Ja
Vorgegebene Vortriebskraft: $F_{j,m}$ 5.000,0 kN
Freie Eingabe der Sicherheit für Längsrichtung: Nein
Kontrollierter Einbau: Nein

2.1.3 Druckübertragungsring (DÜR)

Art der Druckübertragung: Mit Druckübertragungsring
Art der Bemessung: Vorbemessung
Anzahl der Schichten im DÜR: Zwei Schichten
Angabe der Durchmesser des DÜR: Angabe der Randabstände
Äußerer Randabstand bezogen auf t_{Rohr} : $a_{a,DÜR}$ 45 mm
Innerer Randabstand bezogen auf t_{Rohr} : $a_{i,DÜR}$ 35 mm
Schichtdicke: s_{D1} 22,00 mm
Ermittlung Ecal der Schicht: Ermittlung über Material aus Norm
Material: OSB-Platte (OSB/3, OSB/4)
Schichtdicke: s_{D2} 18,00 mm
Material: OSB-Platte (OSB/3, OSB/4)
Manuelle Angabe der Steifigkeit: Nein

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-29

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

2.1.4 Bodenkennwerte

Bodenbeschaffenheit: Teils Fels, teils Lockergestein
 Bodengruppe am Rohr: G4
 Andere Bodengruppe oberhalb Rohrscheitel: Nein
 Eingabe des Seitendruckwertes über: Reibungswinkel Lockerboden (φ')
 Verformungsmodul des Felses: E_F 50,0 N/mm²
 Auflagerwinkel (Festgestein, Betriebszustand): 60°
 Manuelle Angabe des inneren Reibungswinkel des Bodens: Nein
 Manuelle Angabe der Wichte des Bodens: Nein

2.1.5 Bodenverhalten

Anwendung von Silotheorie: Automatisch
 Manuelle Angabe κ und κ_0 : Nein
 Manuelle Angabe von f_1 , K_1 , δ und c : Nein
 Konsistenz am Rohr: Halbfest
 Berücksichtigung des Konzentrationsfaktors λ : Nein

2.1.6 Lasten

Überdeckungshöhe: h 13,3 m
 Zusätzliche Flächenlast: P_0 0,00 kN/m²
 Teilsicherheitsbeiwert Wasseraußendruck: $\gamma_{F,w}$ 1,35 [-]
 Grundwasserstand über Sohle: h_{GW} 2,0 m
 Auftriebsnachweis führen: Nein
 Innendruck (Betriebszustand): $P_{i,0}$ 0,3 bar
 Teilsicherheitsbeiwert Innendruck manuell setzen: Nein
 Rohr ist im Betrieb mit Flüssigkeit gefüllt: Ja
 Wichte des Füllmediums: γ_{WF} 10,0 kN/m³
 Freie Eingabe Sicherheitsbeiwert für Verkehrslasten: Nein
 Verkehrslast: Freie Eingabe
 Bezeichnung: LKW - gem. EAB
 Bodenspannung in Scheitelhöhe, ohne Stoßbeiwert: p 10,00 kN/m²
 Bodenspannung in Kämpferhöhe, ohne Stoßbeiwert: p_K 10,00 kN/m²
 Stoßbeiwert: φ 1,00 [-]
 Abminderungsfaktor dynamische Last: α_T 1,00 [-]

2.1.7 Berechnungsoptionen

Beulnachweis: Nicht führen
 Verformungsnachweis: Führen
 Zulässige Verformung nach A161: Ja
 Ermüdungsnachweis: Nach Regelwerk
 Behandlung Mindestschnittgrößen: Nach Norm
 Vergleichsspannung Mindestschnittgrößen: Mit Bemessungswerten

2.1.8 Stahlbeton-Rohr

Auswahl der Eingaben: D_i und s
 Innendurchmesser: d_i 1.600 mm
 Wandstärke: s 220 mm
 Betongüte: C50/60
 Längsdruckfestigkeit nach: DWA-A 161:2014, korrigierte Fassung vom September 2020
 Betonstahl nach Norm: Ja
 Nachweis der Rissbreite: Nein
 Manuelle Vorgabe $\max f_R$: Nein
 Lastklasse ermitteln: Ja
 Lastwechsel-Zahl manuell: Nein
 Verhältnis E-Moduli manuell: Nein
 Rohrlänge: L_R 3,00 m
 Minimaler Außendurchmesser: $d_{a,min}$ 2.040 mm

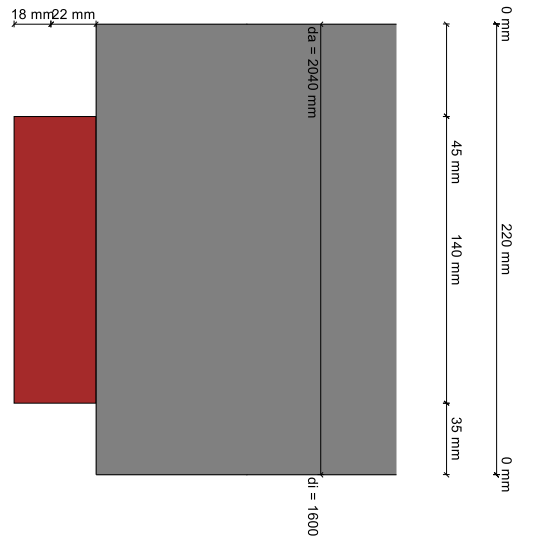
Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
 MA-250346

Seite:
 D-30

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
 D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

2.1.8.2 Stirnseite mit DÜR



Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-32

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

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	1.600,0	mm
Außendurchmesser:	d _a	2.040,0	mm
Mittlerer Radius:	r _m	910,00	mm
Wanddicke:	s	220,00	mm
Verhältnis Radius zu Wanddicke:	r _m /s	4,136	[-]

$$\alpha_{ki} = 1 + \frac{s}{3 \cdot r_m} \quad A 127 (8.14a)$$

Korrekturfaktor Krümmung innen:	α_{ki}	1,081	[-]
---------------------------------	---------------	-------	-----

$$\alpha_{ka} = 1 - \frac{s}{3 \cdot r_m} \quad A 127 (8.14b)$$

Korrekturfaktor Krümmung außen:	α_{ka}	0,919	[-]
---------------------------------	---------------	-------	-----

Lokale Vorverformung:	$\delta_{v, l}$	0,00	%
Vorverformung (Ovalisierung vor Last):	$\delta_{v, A}$	0,00	%

Axial wirksame Profilfläche:	A _{ax}	220,00	mm ² /mm
Radiale Profilfläche:	A _{rad}	220,00	mm ² /mm
Trägheitsabstand:	e	110,00	mm
Trägheitsmoment:	I	887.333,33	mm ⁴ /mm
Äußeres Widerstandsmoment:	W _a	8.066,67	mm ³ /mm
Inneres Widerstandsmoment:	W _i	8.066,67	mm ³ /mm
Flächenverhältnis:	K _Q	1,2	[-]

Kleinsten Außendurchmesser:	d _{a, min}	2.040	mm
Größter Innendurchmesser:	d _{i, max}	1.600	mm
Max. Abweichung Stirnflächen von Rechtwinkligkeit:	$\Delta_{a, cal}$	8,0	mm
Länge des einzelnen Vortriebsrohres:	L _R	3,00	m

2.2.2.1 Materialeigenschaften

Wichte des Rohrwerkstoffs:	Y _R	25,0	kN/m ³
Querkontraktionszahl:	v	0,15	[-]
Charakteristische Zylinderdruckfestigkeit:	f _{ck, cyl}	50,0	N/mm ²
Charakteristische Würfeldruckfestigkeit:	f _{ck, cube}	60,0	N/mm ²

$$f_{cm} = f_{ck, cyl} + 8$$

Druckfestigkeit:	f _{cm}	58,0	N/mm ²
Mittlere Zugfestigkeit:	f _{ctm}	4,1	N/mm ²

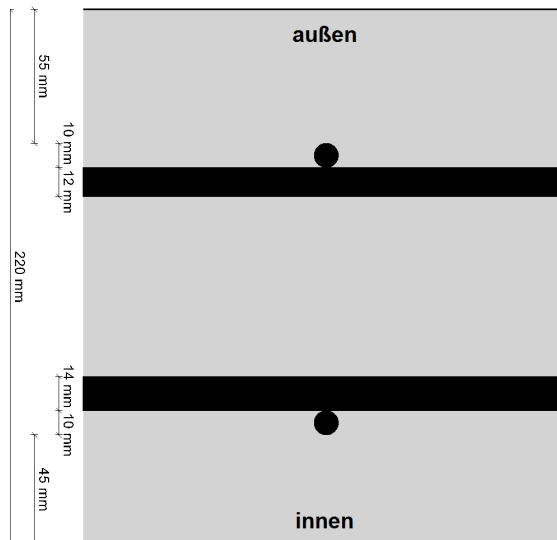
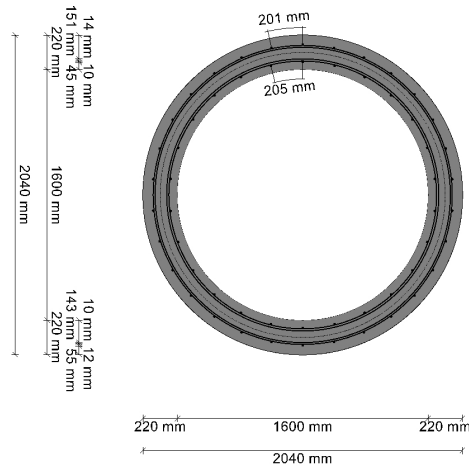
$$E_{cm} = 22 \cdot \frac{f_{cm}^{0,30}}{10} \cdot 100 \cdot 100 \cdot 100 \cdot 1.000$$

Mittlerer E-Modul (Sekantenmodul):	E _{cm}	37.278	N/mm ²
Längsdruckfestigkeit:	f _{c, ax}	50,0	N/mm ²

nach DWA-A 161 Tabelle 6) angesetzt.

Teilsicherheitsbeiwert für Bauteilwiderstand längs der Rohrachse:	YM,ax	1,35	[-]
Teilsicherheitsbeiwert für Bauteilwiderstand quer zur Rohrachse:	YM,rad	1,50	[-]
Teilsicherheitsbeiwert für Bauteilwiderstand auf Stabilität:	YM,stab	1,85	[-]
Teilsicherheitsbeiwert für Bauteilwiderstand auf Stabilität bei Berücksichtigung der Rohrverformungen:	YM,stab,red	1,45	[-]
Teilsicherheitsbeiwert Tragwiderstand Beton:	YRC	1,50	[-]
Teilsicherheitsbeiwert Tragwiderstand Stahl:	YRS	1,15	[-]

2.2.2.3 Stahlbetonrohr



Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-34

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

$$z_i = \frac{h}{2} - c_{\text{nom},i} - \varnothing_{\text{ax},i} - \frac{\varnothing_{\text{rad},i}}{2}$$

Hebelarm innere Ringbewehrung z_i 48,0 48,0 48,0 mm

$$z_e = \frac{h}{2} - c_{\text{nom},e} - \varnothing_{\text{ax},e} - \frac{\varnothing_{\text{rad},e}}{2}$$

Hebelarm äußere Ringbewehrung z_e 39,0 39,0 39,0 mm

$$d_{\text{ik}} = \frac{h}{2} + z_i$$

Statische Höhe innerer Bewehrungskorb d_{ik} 158,0 158,0 158,0 mm

$$d_{\text{ek}} = \frac{h}{2} + z_e$$

Statische Höhe äußerer Bewehrungskorb d_{ek} 149,0 149,0 149,0 mm

Verhältnis E-Modul Stahl zu E-Modul Beton nach DIN V 1201:2004-08: n 15,0 [-]

$$z_{\text{id}} = \frac{z_i \cdot n \cdot \text{vorh } a_{\text{S},i} - z_e \cdot n \cdot \text{vorh } a_{\text{S},e}}{A_{\text{id}}}$$

z_{id} 1,4 1,4 1,4 mm

$$A_{\text{id}} = h + 15 \cdot \text{vorh } a_{\text{S},i} + n \cdot \text{vorh } a_{\text{S},e}$$

Ideelle Querschnittsfläche A_{id} 2.520,44 2.520,44 2.520,44 cm²/m

$$I_{\text{id}} = \frac{h^3}{12} + h \cdot z_{\text{id}}^2 + n \cdot \text{vorh } a_{\text{S},i} \cdot z_i - z_{\text{id}}^2 + n \cdot \text{vorh } a_{\text{S},e} \cdot z_e + z_{\text{id}}^2$$

Ideeles Trägheitsmoment I_{id} 950.029,9 950.029,9 950.029,9 mm⁴/mm

$$W_{\text{id},a} = \frac{I_{\text{id}}}{\frac{h}{2} + z_{\text{id}}}$$

Ideeles Widerstandsmoment, außen $W_{\text{id},a}$ 8.526,72 8.526,72 8.526,72 mm³/mm

$$W_{\text{id},i} = \frac{I_{\text{id}}}{\frac{h}{2} - z_{\text{id}}}$$

Ideeles Widerstandsmoment, innen $W_{\text{id},i}$ 8.749,42 8.749,42 8.749,42 mm³/mm

Nennmaß der Betondeckung innen $c_{\text{nom},i}$ 45,0 45,0 45,0 mm

Nennmaß der Betondeckung außen $c_{\text{nom},e}$ 55,0 55,0 55,0 mm

2.2.3 Nicht lastabhängige Nachweise, Stahlbeton

2.2.3.1 Mindestbetongüte infolge der gewählten Expositionsklasse

Mindestbetongüte, Außen: C25/30

Mindestbetongüte, Innen: C25/30

Betonqualität: C50/60

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-35

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

2.2.3.2 Überprüfung der Mindestwanddicke (DIN V 1201:2004-08 5.3.5.2)

Betongüte: C50/60
 Mindestwert für Wandicken/Radius-Verhältnis: min. t/r_m 0,16 [-]
 Innendurchmesser: d_i 1.600,0 mm

$$\min. t = \frac{\min. t/r_m}{2 - \min. t/r_m} \cdot d_i$$

Berechnete Mindestwanddicke: min. t 139,1 mm

Die Mindestwanddicke nach DIN V 1201:2004-08, 5.3.5.2 wird eingehalten bzw. übertroffen.

2.2.3.3 Überprüfung der Mindestbewehrung (DIN V 1201:2004-08 5.3.7)

Vorhandene Ringbewehrung innen: vorh. $a_{sring,i}$ 12,32 cm²/m
 min. $a_{s,i} = 0,004 \cdot \min. t$ DIN V 1201 5.3.7

Mindest-Ringbewehrung innen DIN V 1201, 5.3.7: min. $a_{s,i}$ 5,57 cm²/m

Vorhandene Ringbewehrung außen: vorh. $a_{sring,e}$ 9,05 cm²/m

min. $a_{s,e} = 0,003 \cdot \min. t$ DIN V 1201 5.3.7

Mindest-Ringbewehrung außen DIN V 1201, 5.3.7: min. $a_{s,e}$ 4,17 cm²/m

Vorhandene Bewehrung	vorh. a_s	Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Mindestbewehrung	min. a_s	12,32	9,05	12,32	cm ² /m
		5,57	4,17	5,57	cm ² /m

$$U \min. a_s = \frac{\min. a_s}{\text{vorh. } a_s}$$

Ausnutzung Bewehrung (Mindestbewehrung DIN) U min. a_s 45,2 46,1 45,2 %

Die Mindestbewehrung nach DIN V 1201:2004-08, 5.3.7 wird eingehalten bzw. übertroffen.

2.2.3.4 Überprüfung der äußeren Bewehrung (DIN V 1201:2004-08 5.2.6)

$$\text{vorh. } a_{sring,i} = \frac{\varnothing_{rad,i}^2}{2} \cdot \pi \cdot \frac{1}{e_i}$$

Vorhandene Ringbewehrung innen: vorh. $a_{sring,i}$ 12,32 cm²/m

$$a_{s,e,60\%i} = 0,60 \cdot \text{vorh. } a_{sring,i}$$

Erforderliche Ringbewehrung außen (DIN V 1201 5.2.6): $a_{s,e,60\%i}$ 7,39 cm²/m

Vorhandene Ringbewehrung außen: vorh. $a_{sring,e}$ 9,05 cm²/m

Vorhandene Ringbewehrung außen, Anteil (DIN V 1201 5.2.6): $a_{s,e/i\%}$ 73,47 %

2.2.3.5 Abstand und Anzahl der Längsstäbe (DIN V 1201:2004-08 5.2.1)

Maximaler Soll-Abstand Längsbewehrung: $e_{L,max}$ 333 mm

Anzahl der Längsstäbe innen: $n_{ax,i}$ 26 [-]

$$r_i = \frac{d_i}{2} + c_{nom,i} + \frac{\varnothing_{ax,i}}{2}$$

Angesetzter Radius innen: r_i 850 mm

$$U_{Li,vor} = 2 \cdot r_i \cdot \pi$$

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-36

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

Vorhandener Abstand Längsbewehrung:	$e_{L,vor,i}$	205	mm
$vorh\ a_{S,L,i} = \frac{\varnothing_{ax,i}^2}{2} \cdot \pi \cdot \frac{1}{e_{L,vor,i}}$			
Vorhandene Längsbewehrung innerer Korb:	$vorh\ a_{S,L,i}$	3,82	cm ² /m
Anzahl der Längsstäbe außen:	$n_{ax,e}$	30	[-]
$r_e = \frac{d_a}{2} - 0,055 - \frac{\varnothing_{ax,e}}{2}$			
Angesetzter Radius außen, bezogen auf Kämpfer:	r_e	960	mm
$U_{Le,vor} = 2 \cdot r_e \cdot \pi$			
Vorhandener Umfang Längsbewehrung außen:	$U_{Le,vor}$	6.032	mm
Vorhandener Abstand Längsbewehrung:	$e_{L,vor,e}$	201	mm
$vorh\ a_{S,L,e} = \frac{\varnothing_{ax,e}^2}{2} \cdot \pi \cdot \frac{1}{e_{L,vor,e}}$			
Vorhandene Längsbewehrung äußerer Korb:	$vorh\ a_{S,L,e}$	3,91	cm ² /m

Der Abstand der Längsstäbe ist ausreichend klein.

2.2.3.6 Betondeckung (DIN V 1201:2004-08 5.2.2)

Es wird ein Vorhaltemaß von 10 mm angesetzt (Rohr nach DIN V 1201).

Die erforderliche Betonüberdeckung wurde um 5 mm reduziert gemäß Arbeitsblatt 6 des ISB: Gewählte Festigkeitsklasse ist min. zwei Klassen größer als die Mindestbetonfestigkeitsklasse.

Die erforderliche Betonüberdeckung außen wurde um 5 mm erhöht (Vortriebsrohr).

	erf. $c_{nom,e}$	Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Erf. Betondeckung außen	35,0	35,0	35,0	35,0	mm
Nennmaß der Betondeckung außen	$c_{nom,e}$	55,0	55,0	55,0	mm

Die Betondeckung (außen) ist ausreichend.

Die erforderliche Betonüberdeckung wurde um 5 mm reduziert gemäß Arbeitsblatt 6 des ISB: Gewählte Festigkeitsklasse ist min. zwei Klassen größer als die Mindestbetonfestigkeitsklasse.

	erf. $c_{nom,i}$	30,0	30,0	30,0	mm
Erf. Betondeckung innen	$c_{nom,i}$	45,0	45,0	45,0	mm

Die Betondeckung (innen) ist ausreichend.

2.2.3.7 Bemessung mit Mindestschnittgröße

$$f_{t,fl,d} = \frac{f_{t,fl}}{Y_{M,rad}}$$

Maximal zulässige Ringbiegezugspannung:	$f_{t,fl,d}$	4,0	N/mm ²
---	--------------	-----	-------------------

$$f_{c,rad,d} = \frac{f_{c,rad}}{Y_{M,rad}}$$

Maximal zulässige Ringbiegedruckspannung:	$f_{c,rad,d}$	33,3	N/mm ²
---	---------------	------	-------------------

$$\kappa_{min} = 1 + (0,5 - z_k/d_{a,min}) \geq 1 \quad (49)$$

		Scheitel 45·m ² ·kmin (47a) 37,265	Kämpfer -45·m ² ·kmin (47b) -37,265	Sohle 45·m ² ·kmin (47c) 37,265	kNm/m
Bemessungsmoment für Mindestbemessung	M _{d,min}				
		-135·m·kmin (48a) -122,850	-270·m·kmin (48b) -245,700	-135·m·kmin (48c) -122,850	kN/m
Bemessungsnormalkraft für Mindestbemessung	N _{d,min}				
<i>Ringbewehrung</i>					
Hebelarm innere Ringbewehrung	z _i	48,0	39,0	48,0	mm
$M_{Ed,s,min} = M_{d,min} - z_i \cdot N_{d,min}$					
Auslegungsmoment	M _{Ed,s,min}	43,161	46,847	43,161	kNm/m
$\mu_{Ed,s} = M_{Ed,s,min} / (d^2 \cdot f_{cd})$					
Normiertes Auslegungsmoment	μ _{Ed,s}	0,0610	0,0745	0,0610	[-]
Erforderlicher mechanischer Bewehrungsgrad	ω _{min}	0,0632	0,0776	0,0632	[-]
Statische Höhe	d	0,158	0,149	0,158	m
$\sigma_{s,d,min} = f_{yd}$					
Rechenwert der Stahlgrenzspannung	σ _{s,d,min}	434,78	434,78	434,78	N/mm ²
$a_{s,calc,min} = \frac{\omega_{min} \cdot 1 \cdot d \cdot f_{cd} + N_{d,min}}{\sigma_{s,d,min}}$					
Rechnerisch erforderliche Bewehrung	a _{s,calc,min}	3,68	1,89	3,68	cm ² /m
Vorhandene Bewehrung	vorh. a _s	12,32	9,05	12,32	cm ² /m
Ausnutzung Bewehrung	U a _{s,calc,min}	29,9	20,9	29,9	%

Die gewählte Bewehrung ist ausreichend.

Vergleichsspannung

		Scheitel 37,265	Kämpfer -37,265	Sohle 37,265	kNm/m
Anzunehmendes Moment	M _{d,min}				
Ideelles Widerstandsmoment, Zugseite	W _{id}	8.749,42	8.526,72	8.749,42	mm ³ /mm
$\sigma_{M,E,min} = \frac{ M_{d,min} }{W_{id}}$					
Biegespannungsanteil aus Biegemomenten	σ _{M,E,min}	4,2591	4,3703	4,2591	N/mm ²
Anzunehmende Normalkraft	N _{d,min}	-122,850	-245,700	-122,850	kN/m
Ideelle Querschnittsfläche	A _{id}	2.520,44	2.520,44	2.520,44	cm ² /m
$\sigma_{N,E,min} = \frac{N_{d,min}}{A_{id}}$					
Spannungsanteil aus Normalkräften	σ _{N,E,min}	-0,4874	-0,9748	-0,4874	N/mm ²
$f_{t,fl,min} = \sigma_{M,E,min} + \sigma_{N,E,min}$					
Maßgebliche Biegezugspannung	f _{t,fl,min}	3,7717	3,3955	3,7717	N/mm ²
Spannungsverhältnis	σ _{N,E,min} /σ _{M,E,min}	-0,1144	-0,2231	-0,1144	[-]
Profilhöhe	h	220,00	220,00	220,00	mm
Beiwert nach DIN V 1201, Bild 9	f _{R,min}	1,03	0,94	1,03	[-]
$\sigma_{VR,min} = f_{R,min} \cdot f_{t,fl,min}$					

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-38

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

$$\max \sigma_{VR} = \min: 6 \text{ N/mm}^2; \frac{f_{ctm}}{3,50} \cdot 6$$

Maximale Rohrvergleichsspannung nach DIN V 1201:					
Ausnutzung Rohrvergleichsspannung (Mindestbemessung)	U $\sigma_{VR,min}$	64,9	max σ_{VR}	6,0	N/mm ²
			53,0	64,9	%

Der Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ist erbracht.

2.2.4 Zwischenergebnisse Boden

Wichte des Bodens:	γ_B	20,0	kN/m ³
Wichte des Bodens unter Auftrieb:	γ'_B	10,0	kN/m ³
Rechenwert des Verformungsmodul EF:	E_F	50,00	N/mm ²
Auflockerungsfaktor nach A161, Tabelle 15:	$f_{2,F,Bau}$	0,10	[-]
Auflockerungsfaktor nach A161, Tabelle 15:	$f_{2,F,Betrieb}$	0,20	[-]
Innerer Reibungswinkel über Rohrscheitel:	φ'_1	15,0	°
Spannungsexponent:	z	0,7	[-]

$$\delta/\varphi'_1 = \frac{\delta}{\varphi'_1}$$

Verhältnis Reibungswinkel Scherfuge / Innerer Reibungswinkel:	δ/φ'_1	1,00	[-]
Reibungswinkel in der Scherfuge:	δ	15,00	°
Erddruckverhältnis über Rohrscheitel:	K_1	0,80	[-]

$$b = d_a \cdot \sqrt{3} \quad (7)$$

Einflußbreite des Bodens über dem Rohr:	b	3,53	m
---	-----	------	---

$$\kappa = \frac{1 - e^{\left(-2 \cdot \frac{h}{b} \cdot K_1 \cdot \tan \delta\right)}}{2 \cdot \frac{h}{b} \cdot K_1 \cdot \tan \delta} \quad (8)$$

Abminderungsfaktor Erdlast:	κ	0,497	[-]
-----------------------------	----------	-------	-----

$$\kappa_0 = e^{\left(-2 \cdot \frac{h}{b} \cdot K_1 \cdot \tan \delta\right)} \quad (9)$$

Abminderungsfaktor Flächenlast:	κ_0	0,200	[-]
Hinweis zur Silotheorie:	Die Silotheorie kann angewendet werden.		
Berücksichtigung des Konzentrationsfaktors λF notwendig:	Ja		
Konzentrationsfaktor:	λ	1,000	[-]
Basis-Erddruckverhältnis unter Rohrscheitel:	$K_{2,0}$	0,74	[-]

$$K_{2,Bau} = K_{2,0} \cdot f_{2,F,Bau} \leq K_{2,0} \leq 0,4 \quad (4)$$

Erddruckverhältnis unter Rohrscheitel, Bauzustand:	$K_{2,Bau}$	0,07	[-]
--	-------------	------	-----

$$K_{2,End} = K_{2,0} \cdot f_{2,F,Betrieb} + 0,2 \leq K_{2,0} \leq 0,5 \quad (4)$$

Erddruckverhältnis unter Rohrscheitel, Endzustand:	$K_{2,End}$	0,35	[-]
--	-------------	------	-----

2.2.5 Betriebszustand

2.2.5.1 Belastungen Betriebszustand

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite:
D-39

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

$$p_T = p \cdot \varphi$$

Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Scheitelhöhe:

$$p_T \quad 10,00 \quad \text{kN/m}^2$$

 Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Kämpferhöhe (ohne φ):

$$p_K \quad 10,00 \quad \text{kN/m}^2$$

Erddruckverhältnis unter Rohrscheitel:

$$K_2 \quad 0,35 \quad [-]$$

$$p_{T,h} = p_K \cdot K_2$$

Horizontale Bodenspannung aus Verkehr:

$$p_{T,h} \quad 3,48 \quad \text{kN/m}^2$$

$$p_{Ev} = \kappa \cdot \gamma_B \cdot (h - h_{GW} + d_a) + \kappa \cdot \gamma'_B \cdot (h_{GW} - d_a) + \kappa_0 \cdot P_0$$

(5b)

Vertikale Bodenspannung in Rohrscheitelebene:

$$p_{Ev} \quad 131,809 \quad \text{kN/m}^2$$

Wirksame vertikale Bodenspannung in Rohrscheitelebene:

$$q_{Ev} \quad 131,809 \quad \text{kN/m}^2$$

$$q_{Ges,v} = p_{Ev} + p_T$$

(53)

Vertikale Gesamt-Bodenspannung in Rohrscheitelebene:

$$q_{Ges,v} \quad 141,809 \quad \text{kN/m}^2$$

 Die Erddruckverteilung am Rohr wird $\cos^2$ - bzw. $\sin^2$ -förmig angenommen.:

Nein

Grundwasserstand im Bereich der oberen Rohrhälfte:

$$h_{GW,oRh} \quad 2,000 \quad \text{m}$$

$$q_{Eh} = \left(p_{Ev} + \gamma_B \cdot \left(d_a - h_{GW,oRh} \right) + \gamma'_B \cdot \left(h_{GW,oRh} - \frac{d_a}{2} \right) \right) \cdot K_2$$

Horizontale Bodenspannung am Rohr:

$$q_{Eh} \quad 49,59 \quad \text{kN/m}^2$$

$$q_{Ges,h} = q_{Eh} + p_{Th}$$

(53)

Horizontale Gesamt-Bodenspannung am Rohr:

$$q_{Ges,h} \quad 53,074 \quad \text{kN/m}^2$$

Innerer Überdruck:

$$p_i \quad 0,300 \quad \text{bar}$$

Äußerer Überdruck über Rohrscheitel:

$$p_{a,Sc} \quad 0,000 \quad \text{bar}$$

Rohrsteifigkeit:

$$S_R \quad 43,895 \quad \text{kN/m}^2$$

Rohrsteifigkeit:

$$\bar{S}_R \quad 43,895 \quad \text{kN/m}^2$$

 Rechenwert des Verformungsmodul E_F :

$$E_F \quad 50,00 \quad \text{N/mm}^2$$

Auflockerungsfaktor nach A161, Tabelle 15:

$$f_{2,F,Betrieb} \quad 0,20 \quad [-]$$

$$E_B = E_F \cdot f_{2,F,Betrieb}$$

(50)

Verformungsmodul Boden:

$$E_B \quad 10,00 \quad \text{N/mm}^2$$

Erddruckverhältnis unter Rohrscheitel:

$$K_2 \quad 0,35 \quad [-]$$

$$S_{Bh} = 0,60 \cdot E_B$$

(18)

Bettungssteifigkeit:

$$S_{Bh} \quad 6,00 \quad \text{N/mm}^2$$

$$V_{RB,LK} = \frac{\bar{S}_R}{S_{Bh}}$$

(14)

Systemsteifigkeit:

$$V_{RB} \quad 7,3158 \quad [-]$$

Das Rohr-Bodensystem verhält sich biegeweich:

Nein

2.2.5.2 Schnittkräfte Betriebszustand

Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkungen quer zur Rohrachse:

$$\gamma_F \quad 1,35 \quad [-]$$

Teilsicherheitsbeiwert Wasseraußendruck:

$$\gamma_{F,W} \quad 1,35 \quad [-]$$

Mittlerer Radius:

$$r_m \quad 910,00 \quad \text{mm}$$

Innerer Überdruck:

$$p_i \quad 0,300 \quad \text{bar}$$

Äußerer Überdruck über Rohrscheitel:

$$p_{a,Sc} \quad 0,000 \quad \text{bar}$$

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite:
D-40

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

$$N_{pEv,d} = \gamma_F \cdot n_{pEv} \cdot q_{Ev} \cdot r_m \quad (28)$$

Vertikale Belastung aus Erdüberdeckung	$N_{pEv,d}$	12,630	-161,928	-54,894	kN/m
	n_{pT}	0,078	-1,000	-0,339	[-]

$$N_{pTv,d} = \gamma_Q \cdot n_{pT} \cdot p_T \cdot r_m \quad (30)$$

Vertikale Belastung aus Verkehr	$N_{pTv,d}$	0,958	-12,285	-4,165	kN/m
	n_{pTh}	-0,998	0,000	-0,868	[-]

$$N_{pTh,d} = \gamma_Q \cdot n_{pTh} \cdot p_{Th} \cdot r_m \quad (32)$$

Horizontale Belastung aus Verkehr	$N_{pTh,d}$	-4,270	0,000	-3,713	kN/m
	n_{pEh}	-0,998	0,000	-0,868	[-]

$$N_{pEh,d} = \gamma_F \cdot n_{pEh} \cdot q_{Eh} \cdot r_m \quad (36)$$

Horizontale Belastung aus Erdüberdeckung	$N_{pEh,d}$	-60,802	0,000	-52,882	kN/m
	n_g	0,411	-1,571	-1,232	[-]

$$N_{g,d} = \gamma_F \cdot n_g \cdot \gamma_R \cdot s \cdot r_m \quad (38)$$

Eigengewicht	$N_{g,d}$	2,777	-10,615	-8,324	kN/m
	n_w	0,705	0,215	0,884	[-]

$$N_{w,d} = \gamma_F \cdot n_w \cdot \gamma_W \cdot r_m^2 \quad (40)$$

Wasserfüllung bis Rohrscheitel	$N_{w,d}$	7,881	2,404	9,883	kN/m
	m_a	-0,705	-0,215	-0,884	[-]

$$N_{a,d} = \gamma_F \cdot m_a \cdot \gamma_W \cdot r_m^2 \quad (42)$$

Auftrieb (äußerer Wasserstand bis Scheitel)	$N_{a,d}$	0,000	0,000	0,000	kN/m
---	-----------	-------	-------	-------	------

$$N_{pw,d} = (\gamma_F \cdot p_i \cdot r_i) - (\gamma_F \cdot W \cdot P_a \cdot r_a) \quad (44)$$

Wasserdruck	$N_{pw,d}$	32,400	32,400	32,400	kN/m
-------------	------------	--------	--------	--------	------

Summe der Normalkräfte	ΣN_d	-8,425	-150,024	-81,695	kN/m
------------------------	--------------	--------	----------	---------	------

$$\Sigma N_{qv,qh,qh^*,d} = N_{pEv,d} + N_{pTv,d} + N_{pEh,d} + N_{pTh,d} + N_{qh^*,d}$$

Summe Erd- und Verkehrslasten	$\Sigma N_{qv,qh,qh^*,d}$	-51,483	-174,213	-115,653	kN/m
-------------------------------	---------------------------	---------	----------	----------	------

$$\Sigma N_{sonst,d} = N_{g,d} + N_{w,d} + N_{a,d} + N_{pw,d}$$

Summe andere Lasten	$\Sigma N_{sonst,d}$	43,058	24,189	33,958	kN/m
---------------------	----------------------	--------	--------	--------	------

2.2.5.3 Verformungsnachweis Betriebszustand

Verformungsbeiwert:	c_{v,qh^*}	0,0640	[-]
Verformungsbeiwert:	$c_{v,qv}$	-0,1053	[-]

$$K^* = \frac{c_{h,qv}}{V_{RB} - c_{h,qh^*}}$$

Beiwert des Bettungsreaktionsdruckes:	K^*	0,014	[-]
---------------------------------------	-------	-------	-----

$$c_v^* = c_{v,qv} + c_{v,qh^*} \cdot K^* \quad A 127 (6.13); A 161 (52a-d)$$

Verformungsbeiwert:	c_v^*	-0,104	[-]
Vertikale Bodenspannung in Rohrscheitelebene:	p_{Ev}	131,809	kN/m ²
Vertikale Bodenspannung infolge Verkehrslast:	p_T	10,00	kN/m ²

$$\sigma_v = p_{Ev} + p_T \quad (53)$$

$$q_{Eh} = \left(p_{Ev} + \gamma_B \cdot \left(d_a - h_{GW,oRh} \right) + \gamma'_B \cdot \left(h_{GW,oRh} - \frac{d_a}{2} \right) \right) \cdot K_2$$

Horizontale Bodenspannung am Rohr:

 q_{Eh} 49,59 kN/m²

Horizontale Bodenspannung infolge Verkehrslast:

 p_{Th} 3,48 kN/m²

$$q_{Ges,h} = q_{Eh} + p_{Th}$$

(53)

Horizontale Gesamt-Bodenspannung am Rohr:

 $q_{Ges,h}$ 53,074 kN/m²

$$\delta_v = \left| c_v^* \cdot \frac{q_{Ges,v} - q_{Ges,h}}{S_R} \cdot 100 \right|$$

(51)

Relative vertikale Durchmesseränderung:

 δ_v 0,02 %

Zulässige vertikale Durchmesseränderung:

 zul δ_v 3,00 %

$$U_{\delta v} = \frac{\delta_v}{\text{zul } \delta_v}$$

Ausnutzungsgrad Verformung:

 $U_{\delta v}$ 0,7 %

Die errechnete Verformung ist kleiner als die zulässige Verformung.

2.2.5.4 Beulnachweis Betriebszustand

Der Beulnachweis wurde vom Nutzer deaktiviert.

2.2.5.5 Bemessung Ringbewehrung

Teilsicherheitsbeiwert Tragwiderstand Beton:

 γ_{RC} 1,50 [-]

Teilsicherheitsbeiwert Tragwiderstand Stahl:

 γ_{RS} 1,15 [-]

Charakteristische Zylinderdruckfestigkeit:

 $f_{ck,cyl}$ 50,0 N/mm²

$$f_{cd} = \frac{0,85 \cdot f_{ck,cyl}}{\gamma_{RC}}$$

Bemessungswert Beton:

 f_{cd} 28,33 N/mm²

Nennstreckgrenze:

 f_{yk} 500 N/mm²

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_{RS}}$$

Bemessungswert Betonstahl:

 f_{yd} 434,78 N/mm²

Summe der Momente

 M_E

Scheitel

26,439

Kämpfer

-27,600

39,546 kNm/m

Summe der Momente inkl.

 M_{Ed}

35,693

-37,260

53,388 kNm/m

Teilssicherheitsbeiwert

Summe Normalkraft

 N_E

-6,240

-111,129

-60,515 kN/m

Summe der Normalkräfte inkl.

 N_{Ed}

-8,425

-150,024

-81,695 kN/m

Teilssicherheitsbeiwert

Bemessung:

Hebelarm innere Ringbewehrung

 z_i

Scheitel

48,0

Kämpfer

39,0

Sohle

48,0 mm

$$M_{Eds} = |M_{Ed}| - N_{Ed} \cdot z_i$$

Auslegungsmoment Plattenbemessung

 M_{Eds}

36,097

43,111

57,309 kNm/m

$$\sigma_{s,d} = f_{yd}$$

Rechenwert der Stahlgrenzspannung

 $\sigma_{s,d}$

434,78

434,78

 434,78 N/mm²

Statische Höhe

 d

0,158

0,149

0,158 m

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite:
D-43

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

$$\mu_{Eds} = \frac{M_{Eds}}{d^2 \cdot f_{cd}}$$

Normiertes Auslegungsmoment	μ_{Eds}	0,0510	0,0685	0,0810	[-]
Erforderlicher mechanischer Bewehrungsgrad	ω	0,0526	0,0712	0,0847	[-]

$$a_{s,calc} = \frac{\omega \cdot d \cdot f_{cd} + N_{Ed}}{\sigma_{s,d}}$$

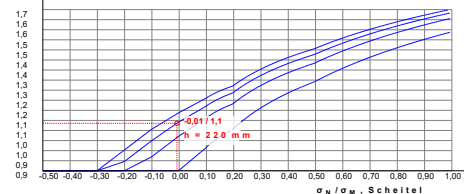
Erforderliche Bewehrung (Bemessung)	$a_{s,calc}$	5,22	3,47	6,84	cm ² /m
Vorhandene Bewehrung	vorh. a_s	12,32	9,05	12,32	cm ² /m
Ausnutzung Bewehrung (Bemessung)	$U a_{s,calc}$	42,4	38,3	55,6	%

Die gewählte Bewehrung ist ausreichend.

2.2.5.6 Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (DIN V 1201:2004-08 5.2.5)

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Ideeles Widerstandsmoment, Zugseite	W_{id}	8.749,42	8.526,72	8.749,42	mm ³ /mm
	$ \sigma_{M,E} = \frac{M_E}{W_{id}}$				
Biegespannungsanteil aus Biegemomenten	$\sigma_{M,E}$	3,0218	3,2369	4,5199	N/mm ²
Spannungsanteil aus Normalkräften	$\sigma_{N,E}$	-0,0248	-0,4409	-0,2401	N/mm ²
	$f_{t,fl} = \sigma_{M,E} + \sigma_{N,E}$				
Maßgebliche Biegezugspannung	$f_{t,fl}$	2,9970	2,7960	4,2798	N/mm ²
Spannungsverhältnis	σ_N/σ_M	-0,0082	-0,1362	-0,0531	[-]
Profilhöhe	h	220,00	220,00	220,00	mm

Beiwert nach DIN V 1201, Bild 9
f_R, Scheitel



Beiwert nach DIN V 1201, Bild 9	f_R	1,13	1,01	1,09	[-]
	$\sigma_{VR} = f_R \cdot f_{t,fl}$				
Rohrvergleichsspannung unter Risskraft im Zustand I	σ_{VR}	3,39	2,83	4,66	N/mm ²
Mittlere Zugfestigkeit:			f_{ctm}	4,1	N/mm ²
	$\max \sigma_{VR} = \min: 6 \text{ N/mm}^2; \frac{f_{ctm}}{3,50}$				
Maximale Rohrvergleichsspannung nach DIN V 1201:			$\max \sigma_{VR}$	6,0	N/mm ²
	$U \sigma_{VR} = \frac{\sigma_{VR}}{\max \sigma_{VR}}$				
Ausnutzung Rohrvergleichsspannung	$U \sigma_{VR}$	50,4	47,4	77,7	%

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-44

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

2.2.5.7 Ermittlung der Lastklasse (DIN V 1201:2004-08 4.3.5)

Maximale Rohrvergleichsspannung nach DIN V 1201:

Inneres Widerstandsmoment:

Abminderungsbeiwert für Langzeitwirkung:

Beiwert nach DIN V 1201, Bild 9:

Mittlerer Radius:

Gewichtskraft des Rohrs:

$\max \sigma_{VR}$	6,0	N/mm ²
W_i	8.066,67	mm ³ /mm
$\alpha_{c,F}$	0,90	[-]
f_R	1,13	[-]
r_m	910,00	mm
G_p	31,45	kN/m

$$F_c = 1/0,3 \cdot \left\{ \frac{\max \sigma_{VR} \cdot W_i}{\alpha_{c,F} \cdot f_R \cdot r_m} - 0,07 G_p \right\}$$

Risskraft (Ergänzung Mindestscheiteldruckkraft):

Ermittelte Lastklasse nach DIN V 1201 Tabelle 8/9:

F_c	167,00	kN/m
	90	

Werte mit einem (+) bedeuten, dass in Sonderfällen auch Rohre mit diesen Lastklassen (Festigkeitsklassen) hergestellt werden können. Der Strich - bedeutet, dass Rohre dieser Nennweiten und Lastklassen im Regelfall nicht hergestellt werden. Zum Einsatz kommen Rohre mit höherer Tragfähigkeit (Lastklasse).

2.2.6 Nachweis gegen Ermüden unter nicht vorwiegend ruhender Belastung

Der Nachweis gegen Ermüden unter nicht vorwiegend ruhender Belastung soll in diesem Fall nicht geführt werden.

Alle notwendigen Nachweise sind erbracht.

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-45

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

3 Vortriebsrohr nach DWA-A 161, 2. Auflage: QP 3

Folgende Korrekturen des Arbeitsblatts DWA-A 161 berücksichtigt das Rechenmodul: DWA-A 161 04/2017, DWA-A 161 10/2017, TM 4-2019 der DB Netz AG, DWA-A 161 10/2020, DWA-A 127-10:2020-10, DWA-A 161 03/2021

Zulässige Vorpresskraft: F_j 6.454 kN

Titel der Berechnung: QP 3

Annahmen: Überdeckung 15,00 m
Bahn - äußerer Druckbereich

Berechnungsart: Stahlbeton
Nachzuweisende Zustände: Bau- und Betriebszustand
Einbauskizze in Ausdruck: Ja
Mindestschnittgrößen im Betriebszustand drucken: Ja

3.1 Eingaben

3.1.1 Vortriebsverfahren

Verfahren: Mikrotunnel und bemannte Verfahren
Vollständige dauerhafte Ringraumverpressung: Ja
Druck beim Verpressen des Überschchnitts: p_D 1,5 bar
Einsatz von Stütz- oder Gleitmittel: Ja
Stütz- oder Gleitmitteldruck: p_{Stm} 1,0 bar
Ringspalt: Ringspalt $\leq 1,0$ cm bezogen auf den Radius, nicht systematisch gestützt

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: Ja
Vorgegebene Vortriebskraft: $F_{j,m}$ 5.000,0 kN
Freie Eingabe der Sicherheit für Längsrichtung: Nein
Kontrollierter Einbau: Nein

3.1.3 Druckübertragungsring (DÜR)

Art der Druckübertragung: Mit Druckübertragungsring
Art der Bemessung: Vorbemessung
Anzahl der Schichten im DÜR: Zwei Schichten
Angabe der Durchmesser des DÜR: Angabe der Randabstände
Äußerer Randabstand bezogen auf t_{Rohr} : $a_{a,DÜR}$ 45 mm
Innerer Randabstand bezogen auf t_{Rohr} : $a_{i,DÜR}$ 35 mm
Schichtdicke: s_{D1} 22,00 mm
Ermittlung Ecal der Schicht: Ermittlung über Material aus Norm
Material: OSB-Platte (OSB/3, OSB/4)
Schichtdicke: s_{n2} 18.00 mm

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-46

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

3.1.4 Bodenkennwerte

Bodenbeschaffenheit:	Teils Fels, teils Lockergestein
Bodengruppe am Rohr:	G4
Andere Bodengruppe oberhalb Rohrscheitel:	Nein
Eingabe des Seitendruckwertes über:	Reibungswinkel Lockerboden (φ')
Verformungsmodul des Felses:	E_F 50,0 N/mm ²
Auflagerwinkel (Festgestein, Bauzustand):	90°
Auflagerwinkel (Festgestein, Betriebszustand):	60°
Manuelle Angabe des inneren Reibungswinkel des Bodens:	Nein
Manuelle Angabe der Wichte des Bodens:	Nein

3.1.5 Bodenverhalten

Anwendung von Silotheorie:	Automatisch
Manuelle Angabe k und k_0 :	Nein
Manuelle Angabe von f_1 , K_1 , δ und c :	Nein
Konsistenz am Rohr:	Halbfest
Berücksichtigung des Konzentrationsfaktors λ :	Nein

3.1.6 Lasten

Überdeckungshöhe:	h	15,0	m
Zusätzliche Flächenlast:	P_0	0,00	kN/m ²
Teilsicherheitsbeiwert Wasseraußendruck:	$\gamma_{F,W}$	1,35	[-]
Grundwasserstand über Sohle:	h_{GW}	2,0	m
Auftriebsnachweis führen:	Nein		
Innendruck (Bauzustand):	$P_{I,C}$	0,3	bar
Innendruck (Betriebszustand):	$P_{I,O}$	0,3	bar
Teilsicherheitsbeiwert Innendruck manuell setzen:	Nein		
Rohr ist während des Vortriebs mit Flüssigkeit gefüllt:	Nein		
Rohr ist im Betrieb mit Flüssigkeit gefüllt:	Ja		
Wichte des Füllmediums:	γ_{WF}	10,0	kN/m ³
Freie Eingabe Sicherheitsbeiwert für Verkehrslasten:	Nein		
Verkehrslast:	Bahn LM 71 - Äußerer Druckbereich		
Abminderungsfaktor dynamische Last manuell eingeben:	Ja		
Abminderungsfaktor dynamische Last:	α_T	1,00	[-]

3.1.7 Berechnungsoptionen

Beulnachweis:	Nicht führen
Verformungsnachweis:	Führen
Zulässige Verformung nach A161:	Ja
Ermüdungsnachweis:	Nach Regelwerk
Behandlung Mindestschnittgrößen:	Nach Norm
Vergleichsspannung Mindestschnittgrößen:	Mit Bemessungswerten

3.1.8 Stahlbeton-Rohr

Auswahl der Eingaben:	D_i und s		
Innendurchmesser:	d_i	1.600	mm
Wandstärke:	s	220	mm
Betongüte:	C50/60		
Längsdruckfestigkeit nach:	DWA-A 161:2014, korrigierte Fassung vom September 2020		
Betonstahl nach Norm:	Ja		
Nachweis der Rissbreite:	Nein		
Manuelle Vorgabe $\max f_R$:	Nein		
Lastklasse ermitteln:	Ja		
Lastwechsel-Zahl manuell:	Nein		
Verhältnis E-Moduli manuell:	Nein		
Rohrlänge:	L_R	3,00	m
Minimaler Außendurchmesser:	$d_{a,min}$	2.040	mm
Maximaler Innendurchmesser:	$d_{i,max}$	1.600	mm

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-47

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

Bewehrungsführung:
Expositionsklasse außen:
Expositionsklasse innen:
Besondere Maßnahmen:
Abstand Längsbewehrung nach Norm:

Zweilagig
XA1: Chemisch schwach angreifend
XA1: Chemisch schwach angreifend
Nein
Ja

Reihenfolge innere Bewehrung:
Reihenfolge äußere Bewehrung:

Längsstäbe innerhalb Ringbewehrung
Längsstäbe außerhalb Ringbewehrung

Durchmesser Ringbewehrung innen:
Abstand Ringbewehrung innen:
Durchmesser Ringbewehrung außen:
Abstand Ringbewehrung außen:

$\varnothing_{\text{rad,i}}$	14	mm
e_i	125	mm
$\varnothing_{\text{rad,e}}$	12	mm
e_e	125	mm

Durchmesser Längsbewehrung innen:
Anzahl der Längsstäbe innen:
Durchmesser Längsbewehrung außen:
Anzahl der Längsstäbe außen:

$\varnothing_{\text{ax,i}}$	10	mm
$n_{\text{ax,i}}$	26	[-]
$\varnothing_{\text{ax,e}}$	10	mm
$n_{\text{ax,e}}$	30	[-]

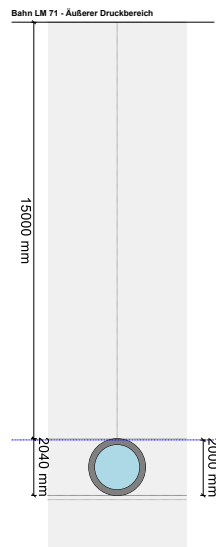
Nennmaß der Betondeckung innen:
Nennmaß der Betondeckung außen:
Teilsicherheiten manuell definieren:

$c_{\text{nom,i}}$	45,0	mm
$c_{\text{nom,e}}$	55,0	mm
	Nein	

Bewehrungsmenge ermitteln:
Stahlpreis:
Betonpreis:

Ermitteln		
P_{St}	15	€/kg
P_{B}	750	€/m³

3.1.8.1 Systemskizze

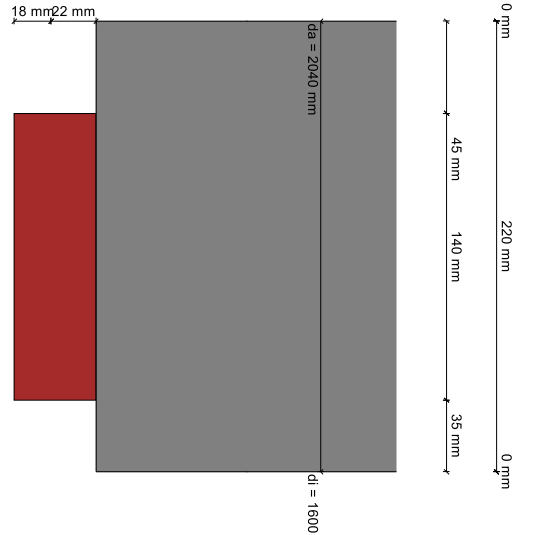


Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-48

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.



3.2 Ergebnisse

3.2.1 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	[-]

3.2.2 Zwischenergebnisse Rohr

Innendurchmesser:	d _i	1.600,0	mm
Außendurchmesser:	d _a	2.040,0	mm
Mittlerer Radius:	r _m	910,00	mm
Wanddicke:	s	220,00	mm
Verhältnis Radius zu Wanddicke:	r _m /s	4,136	[-]

$$\alpha_{ki} = 1 + \frac{s}{3 \cdot r_m} \quad A 127 (8.14a)$$

Korrekturfaktor Krümmung innen:	α_{ki}	1,081	[-]
---------------------------------	---------------	-------	-----

$$\alpha_{ka} = 1 - \frac{s}{3 \cdot r_m} \quad A 127 (8.14b)$$

Korrekturfaktor Krümmung außen:	α_{ka}	0,919	[-]
---------------------------------	---------------	-------	-----

Lokale Vorverformung:	$\delta_{v, l}$	0,00	%
Vorverformung (Ovalisierung vor Last):	$\delta_{v, A}$	0,00	%

Axial wirksame Profilfläche:	A _{ax}	220,00	mm ² /mm
Radiale Profilfläche:	A _{rad}	220,00	mm ² /mm
Trägheitsabstand:	e	110,00	mm
Trägheitsmoment:	I	887.333,33	mm ⁴ /mm
Äußeres Widerstandsmoment:	W _a	8.066,67	mm ³ /mm
Inneres Widerstandsmoment:	W _i	8.066,67	mm ³ /mm
Flächenverhältnis:	K _Q	1,2	[-]

Kleinsten Außendurchmesser:	d _{a, min}	2.040	mm
Größter Innendurchmesser:	d _{i, max}	1.600	mm
Max. Abweichung Stirnflächen von Rechtwinkligkeit:	$\Delta_{a, cal}$	8,0	mm
Länge des einzelnen Vortriebsrohres:	L _R	3,00	m

3.2.2.1 Materialeigenschaften

Wichte des Rohrwerkstoffs:	Y _R	25,0	kN/m ³
Querkontraktionszahl:	v	0,15	[-]
Charakteristische Zylinderdruckfestigkeit:	f _{ck, cyl}	50,0	N/mm ²
Charakteristische Würfeldruckfestigkeit:	f _{ck, cube}	60,0	N/mm ²

$$f_{cm} = f_{ck, cyl} + 8$$

Druckfestigkeit:	f _{cm}	58,0	N/mm ²
Mittlere Zugfestigkeit:	f _{ctm}	4,1	N/mm ²

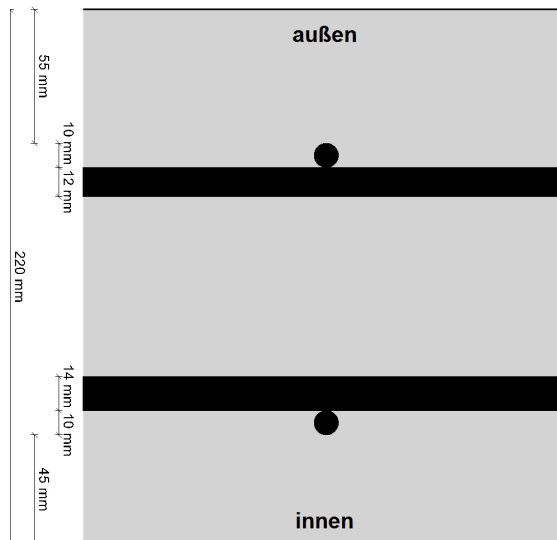
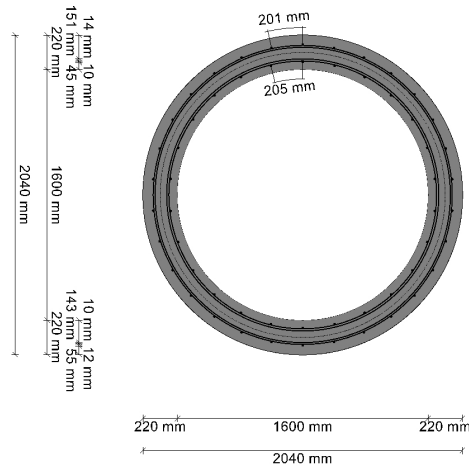
$$E_{cm} = 22 \cdot \frac{f_{cm}^{0,30}}{10} \cdot 100 \cdot 100 \cdot 100 \cdot 1.000$$

Mittlerer E-Modul (Sekantenmodul):	E _{cm}	37.278	N/mm ²
Längsdruckfestigkeit:	f _{c, ax}	50,0	N/mm ²

nach DWA-A 161 Tabelle 6) angesetzt.

Teilsicherheitsbeiwert für Bauteilwiderstand längs der Rohrachse:	YM,ax	1,35	[-]
Teilsicherheitsbeiwert für Bauteilwiderstand quer zur Rohrachse:	YM,rad	1,50	[-]
Teilsicherheitsbeiwert für Bauteilwiderstand auf Stabilität:	YM,stab	1,85	[-]
Teilsicherheitsbeiwert für Bauteilwiderstand auf Stabilität bei Berücksichtigung der Rohrverformungen:	YM,stab,red	1,45	[-]
Teilsicherheitsbeiwert Tragwiderstand Beton:	YRC	1,50	[-]
Teilsicherheitsbeiwert Tragwiderstand Stahl:	YRS	1,15	[-]

3.2.2.3 Stahlbetonrohr



Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-51

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

$$z_i = \frac{h}{2} - c_{\text{nom},i} - \varnothing_{\text{ax},i} - \frac{\varnothing_{\text{rad},i}}{2}$$

Hebelarm innere Ringbewehrung z_i 48,0 48,0 48,0 mm

$$z_e = \frac{h}{2} - c_{\text{nom},e} - \varnothing_{\text{ax},e} - \frac{\varnothing_{\text{rad},e}}{2}$$

Hebelarm äußere Ringbewehrung z_e 39,0 39,0 39,0 mm

$$d_{\text{IK}} = \frac{h}{2} + z_i$$

Statische Höhe innerer Bewehrungskorb d_{IK} 158,0 158,0 158,0 mm

$$d_{\text{eK}} = \frac{h}{2} + z_e$$

Statische Höhe äußerer Bewehrungskorb d_{eK} 149,0 149,0 149,0 mm

Verhältnis E-Modul Stahl zu E-Modul Beton nach DIN V 1201:2004-08: n 15,0 [-]

$$z_{\text{id}} = \frac{z_i \cdot n \cdot \text{vorh } a_{\text{S},i} - z_e \cdot n \cdot \text{vorh } a_{\text{S},e}}{A_{\text{id}}}$$

z_{id} 1,4 1,4 1,4 mm

$$A_{\text{id}} = h + 15 \cdot \text{vorh } a_{\text{S},i} + n \cdot \text{vorh } a_{\text{S},e}$$

Ideelle Querschnittsfläche A_{id} 2.520,44 2.520,44 2.520,44 cm²/m

$$I_{\text{id}} = \frac{h^3}{12} + h \cdot z_{\text{id}}^2 + n \cdot \text{vorh } a_{\text{S},i} \cdot z_i - z_{\text{id}}^2 + n \cdot \text{vorh } a_{\text{S},e} \cdot z_e + z_{\text{id}}^2$$

Ideeles Trägheitsmoment I_{id} 950.029,9 950.029,9 950.029,9 mm⁴/mm

$$W_{\text{id},a} = \frac{I_{\text{id}}}{\frac{h}{2} + z_{\text{id}}}$$

Ideeles Widerstandsmoment, außen $W_{\text{id},a}$ 8.526,72 8.526,72 8.526,72 mm³/mm

$$W_{\text{id},i} = \frac{I_{\text{id}}}{\frac{h}{2} - z_{\text{id}}}$$

Ideeles Widerstandsmoment, innen $W_{\text{id},i}$ 8.749,42 8.749,42 8.749,42 mm³/mm

Nennmaß der Betondeckung innen $c_{\text{nom},i}$ 45,0 45,0 45,0 mm

Nennmaß der Betondeckung außen $c_{\text{nom},e}$ 55,0 55,0 55,0 mm

3.2.3 Nicht lastabhängige Nachweise, Stahlbeton

3.2.3.1 Mindestbetongüte infolge der gewählten Expositionsklasse

Mindestbetongüte, Außen: C25/30

Mindestbetongüte, Innen: C25/30

Betonklasse: C50/60

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-52

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

3.2.3.2 Überprüfung der Mindestwanddicke (DIN V 1201:2004-08 5.3.5.2)

Betongüte: C50/60
 Mindestwert für Wandicken/Radius-Verhältnis: min. t/r_m 0,16 [-]
 Innendurchmesser: d_i 1.600,0 mm

$$\min. t = \frac{\min. t/r_m}{2 - \min. t/r_m} \cdot d_i$$

Berechnete Mindestwanddicke: min. t 139,1 mm

Die Mindestwanddicke nach DIN V 1201:2004-08, 5.3.5.2 wird eingehalten bzw. übertroffen.

3.2.3.3 Überprüfung der Mindestbewehrung (DIN V 1201:2004-08 5.3.7)

Vorhandene Ringbewehrung innen: vorh. $a_{sring,i}$ 12,32 cm²/m
 min. $a_{s,i} = 0,004 \cdot \min. t$ DIN V 1201 5.3.7

Mindest-Ringbewehrung innen DIN V 1201, 5.3.7: min. $a_{s,i}$ 5,57 cm²/m

Vorhandene Ringbewehrung außen: vorh. $a_{sring,e}$ 9,05 cm²/m

min. $a_{s,e} = 0,003 \cdot \min. t$ DIN V 1201 5.3.7

Mindest-Ringbewehrung außen DIN V 1201, 5.3.7: min. $a_{s,e}$ 4,17 cm²/m

Vorhandene Bewehrung	vorh. a_s	Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Mindestbewehrung	min. a_s	12,32	9,05	12,32	cm ² /m
		5,57	4,17	5,57	cm ² /m

$$U \min. a_s = \frac{\min. a_s}{\text{vorh. } a_s}$$

Ausnutzung Bewehrung (Mindestbewehrung DIN) U min. a_s 45,2 46,1 45,2 %

Die Mindestbewehrung nach DIN V 1201:2004-08, 5.3.7 wird eingehalten bzw. übertroffen.

3.2.3.4 Überprüfung der äußeren Bewehrung (DIN V 1201:2004-08 5.2.6)

$$\text{vorh. } a_{sring,i} = \frac{\varnothing_{rad,i}^2}{2} \cdot \pi \cdot \frac{1}{e_i}$$

Vorhandene Ringbewehrung innen: vorh. $a_{sring,i}$ 12,32 cm²/m

$$a_{s,e,60\%i} = 0,60 \cdot \text{vorh. } a_{sring,i}$$

Erforderliche Ringbewehrung außen (DIN V 1201 5.2.6): $a_{s,e,60\%i}$ 7,39 cm²/m

Vorhandene Ringbewehrung außen: vorh. $a_{sring,e}$ 9,05 cm²/m

Vorhandene Ringbewehrung außen, Anteil (DIN V 1201 5.2.6): $a_{s,e/i\%}$ 73,47 %

3.2.3.5 Abstand und Anzahl der Längsstäbe (DIN V 1201:2004-08 5.2.1)

Maximaler Soll-Abstand Längsbewehrung: $e_{L,max}$ 333 mm

Anzahl der Längsstäbe innen: $n_{ax,i}$ 26 [-]

$$r_i = \frac{d_i}{2} + c_{nom,i} + \frac{\varnothing_{ax,i}}{2}$$

Angesetzter Radius innen: r_i 850 mm

$$U_{Li,vor} = 2 \cdot r_i \cdot \pi$$

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-53

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

Vorhandener Abstand Längsbewehrung:	$e_{L,vor,i}$	205	mm
$vorh\ a_{S,L,i} = \frac{\varnothing_{ax,i}^2}{2} \cdot \pi \cdot \frac{1}{e_{L,vor,i}}$			
Vorhandene Längsbewehrung innerer Korb:	$vorh\ a_{S,L,i}$	3,82	cm ² /m
Anzahl der Längsstäbe außen:	$n_{ax,e}$	30	[-]
$r_e = \frac{d_a}{2} - 0,055 - \frac{\varnothing_{ax,e}}{2}$			
Angesetzter Radius außen, bezogen auf Kämpfer:	r_e	960	mm
$U_{Le,vor} = 2 \cdot r_e \cdot \pi$			
Vorhandener Umfang Längsbewehrung außen:	$U_{Le,vor}$	6.032	mm
Vorhandener Abstand Längsbewehrung:	$e_{L,vor,e}$	201	mm
$vorh\ a_{S,L,e} = \frac{\varnothing_{ax,e}^2}{2} \cdot \pi \cdot \frac{1}{e_{L,vor,e}}$			
Vorhandene Längsbewehrung äußerer Korb:	$vorh\ a_{S,L,e}$	3,91	cm ² /m

Bahnlast: Der Nachweis bzgl. 1/5 der Querbewehrung wird bei der Bemessung der Ringbewehrung geführt.

Der Abstand der Längsstäbe ist ausreichend klein.

3.2.3.6 Betondeckung (DIN V 1201:2004-08 5.2.2)

Es wird ein Vorhaltemaß von 10 mm angesetzt (Rohr nach DIN V 1201).

Die erforderliche Betonüberdeckung wurde um 5 mm reduziert gemäß Arbeitsblatt 6 des ISB: Gewählte Festigkeitsklasse ist min. zwei Klassen größer als die Mindestbetonfestigkeitsklasse.

Die erforderliche Betonüberdeckung außen wurde um 5 mm erhöht (Vortriebsrohr).

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Erf. Betondeckung außen	erf. $c_{nom,e}$	35,0	35,0	35,0	mm
Nennmaß der Betondeckung außen	$c_{nom,e}$	55,0	55,0	55,0	mm

Die Betondeckung (außen) ist ausreichend.

Die erforderliche Betonüberdeckung wurde um 5 mm reduziert gemäß Arbeitsblatt 6 des ISB: Gewählte Festigkeitsklasse ist min. zwei Klassen größer als die Mindestbetonfestigkeitsklasse.

Erf. Betondeckung innen	erf. $c_{nom,i}$	30,0	30,0	30,0	mm
Nennmaß der Betondeckung innen	$c_{nom,i}$	45,0	45,0	45,0	mm

Die Betondeckung (innen) ist ausreichend.

3.2.3.7 Bemessung mit Mindestschnittgröße

$$f_{t,fl,d} = \frac{f_{t,fl}}{Y_{M,rad}}$$

Maximal zulässige Ringbiegezugspannung:	$f_{t,fl,d}$	4,0	N/mm ²
---	--------------	-----	-------------------

$$f_{c,rad,d} = \frac{f_{c,rad}}{Y_{M,rad}}$$

Maximal zulässige Ringbiegedruckspannung:	$f_{c,rad,d}$	33,3	N/mm ²
---	---------------	------	-------------------

		Scheitel 45·m ² ·kmin (47a) 37,265	Kämpfer -45·m ² ·kmin (47b) -37,265	Sohle 45·m ² ·kmin (47c) 37,265	kNm/m
Bemessungsmoment für Mindestbemessung	M _{d,min}				
		-135·m·kmin (48a) -122,850	-270·m·kmin (48b) -245,700	-135·m·kmin (48c) -122,850	kN/m
Bemessungsnormalkraft für Mindestbemessung	N _{d,min}				
<i>Ringbewehrung</i>					
Hebelarm innere Ringbewehrung	z _i	48,0	39,0	48,0	mm
$M_{Ed,s,min} = M_{d,min} - z_i \cdot N_{d,min}$					
Auslegungsmoment	M _{Ed,s,min}	43,161	46,847	43,161	kNm/m
$\mu_{Ed,s} = M_{Ed,s,min} / (d^2 \cdot f_{cd})$					
Normiertes Auslegungsmoment	μ _{Ed,s}	0,0610	0,0745	0,0610	[-]
Erforderlicher mechanischer Bewehrungsgrad	ω _{min}	0,0632	0,0776	0,0632	[-]
Statische Höhe	d	0,158	0,149	0,158	m
$\sigma_{s,d,min} = f_{yd}$					
Rechenwert der Stahlgrenzspannung	σ _{s,d,min}	434,78	434,78	434,78	N/mm ²
$a_{s,calc,min} = \frac{\omega_{min} \cdot 1 \cdot d \cdot f_{cd} + N_{d,min}}{\sigma_{s,d,min}}$					
Rechnerisch erforderliche Bewehrung	a _{s,calc,min}	3,68	1,89	3,68	cm ² /m
Vorhandene Bewehrung	vorh. a _s	12,32	9,05	12,32	cm ² /m
Ausnutzung Bewehrung	U a _{s,calc,min}	29,9	20,9	29,9	%

Die gewählte Bewehrung ist ausreichend.

Vergleichsspannung

		Scheitel 37,265	Kämpfer -37,265	Sohle 37,265	kNm/m
Anzunehmendes Moment	M _{d,min}				
Ideelles Widerstandsmoment, Zugseite	W _{id}	8.749,42	8.526,72	8.749,42	mm ³ /mm
$\sigma_{M,E,min} = \frac{ M_{d,min} }{W_{id}}$					
Biegespannungsanteil aus Biegemomenten	σ _{M,E,min}	4,2591	4,3703	4,2591	N/mm ²
Anzunehmende Normalkraft	N _{d,min}	-122,850	-245,700	-122,850	kN/m
Ideelle Querschnittsfläche	A _{id}	2.520,44	2.520,44	2.520,44	cm ² /m
$\sigma_{N,E,min} = \frac{N_{d,min}}{A_{id}}$					
Spannungsanteil aus Normalkräften	σ _{N,E,min}	-0,4874	-0,9748	-0,4874	N/mm ²
$f_{t,fl,min} = \sigma_{M,E,min} + \sigma_{N,E,min}$					
Maßgebliche Biegezugspannung	f _{t,fl,min}	3,7717	3,3955	3,7717	N/mm ²
Spannungsverhältnis	σ _{N,E,min} /σ _{M,E,min}	-0,1144	-0,2231	-0,1144	[-]
Profilhöhe	h	220,00	220,00	220,00	mm
Beiwert nach DIN V 1201, Bild 9	f _{R,min}	1,03	0,94	1,03	[-]
$\sigma_{VR,min} = f_{R,min} \cdot f_{t,fl,min}$					

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-55

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

$$\max \sigma_{VR} = \min: 6 \text{ N/mm}^2; \frac{f_{ctm}}{3,50} \cdot 6$$

Maximale Rohrvergleichsspannung nach DIN V 1201:					
Ausnutzung Rohrvergleichsspannung (Mindestbemessung)	U $\sigma_{VR,min}$	64,9	max σ_{VR}	6,0	N/mm ²
			53,0	64,9	%

Der Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ist erbracht.

3.2.4 Zwischenergebnisse Boden

Wichte des Bodens:	γ_B	20,0	kN/m ³
Wichte des Bodens unter Auftrieb:	γ'_B	10,0	kN/m ³
Rechenwert des Verformungsmodul EF:	E_F	50,00	N/mm ²
Auflockerungsfaktor nach A161, Tabelle 15:	$f_{2,F,Bau}$	0,10	[-]
Auflockerungsfaktor nach A161, Tabelle 15:	$f_{2,F,Betrieb}$	0,20	[-]
Innerer Reibungswinkel über Rohrscheitel:	φ'_1	15,0	°
Spannungsexponent:	z	0,7	[-]

$$\delta/\varphi'_1 = \frac{\delta}{\varphi'_1}$$

Verhältnis Reibungswinkel Scherfuge / Innerer Reibungswinkel:	δ/φ'_1	1,00	[-]
Reibungswinkel in der Scherfuge:	δ	15,00	°
Erddruckverhältnis über Rohrscheitel:	K_1	0,80	[-]

$$b = d_a \cdot \sqrt{3} \quad (7)$$

Einflußbreite des Bodens über dem Rohr:	b	3,53	m
---	-----	------	---

$$\kappa = \frac{1 - e^{\left(-2 \cdot \frac{h}{b} \cdot K_1 \cdot \tan \delta\right)}}{2 \cdot \frac{h}{b} \cdot K_1 \cdot \tan \delta} \quad (8)$$

Abminderungsfaktor Erdlast:	κ	0,460	[-]
-----------------------------	----------	-------	-----

$$\kappa_0 = e^{\left(-2 \cdot \frac{h}{b} \cdot K_1 \cdot \tan \delta\right)} \quad (9)$$

Abminderungsfaktor Flächenlast:	κ_0	0,162	[-]
Hinweis zur Silotheorie:	Die Silotheorie kann angewendet werden.		
Berücksichtigung des Konzentrationsfaktors λF notwendig:	Ja		
Konzentrationsfaktor:	λ	1,000	[-]
Basis-Erddruckverhältnis unter Rohrscheitel:	$K_{2,0}$	0,74	[-]

$$K_{2,Bau} = K_{2,0} \cdot f_{2,F,Bau} \leq K_{2,0} \leq 0,4 \quad (4)$$

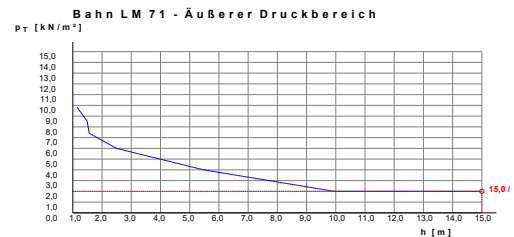
Erddruckverhältnis unter Rohrscheitel, Bauzustand:	$K_{2,Bau}$	0,07	[-]
--	-------------	------	-----

$$K_{2,End} = K_{2,0} \cdot f_{2,F,Betrieb} + 0,2 \leq K_{2,0} \leq 0,5 \quad (4)$$

Erddruckverhältnis unter Rohrscheitel, Endzustand:	$K_{2,End}$	0,35	[-]
--	-------------	------	-----

3.2.5 Bauzustand

3.2.5.1 Belastungen Bauzustand



$$\Phi_2 = \frac{1,44}{\sqrt{LF - 0,2}} + 0,82 \quad (21)$$

$$1,0 \leq \Phi_2 \leq 1,67 \quad (21)$$

Stoßbeiwert: Φ_2 1,67 [-] (22)

$$\text{red } \Phi_2 = \Phi_2 - 0,1 \cdot (h_{\text{ü}} - 1,0) \geq 1$$

Stoßbeiwert reduziert: red Φ_2 1,00 [-]
 Anpassungsfaktor $\alpha_{Qi, LM71}$ (DIN EN 1991-2): $\alpha_{Qi, LM71}$ 1,20 [-]
 Einfache Bodenspannung aus Verkehr: p 2,00 kN/m²

$$p_T = \text{red } \Phi_2 \cdot p \cdot \alpha_{Qi, LM71} \quad \text{A 161 (23a)}$$

Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Scheitelhöhe: p_T 2,40 kN/m²

Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Kämpferhöhe (ohne ϕ): p_K 2,00 kN/m²
 Erddruckverhältnis unter Rohrscheitel: K_2 0,07 [-] A 161 (23b)

$$p_{T,h} = (0,50 \cdot (\text{red } \Phi_2 - 1) + 1) \cdot p_K \cdot K_2 \cdot \alpha_{Qi, LM71}$$

Horizontale Bodenspannung aus Verkehr: $p_{T,h}$ 0,18 kN/m²

$$p_{Ev} = \kappa \cdot \gamma_B \cdot (h - h_{GW} + d_a) + \kappa \cdot \gamma'_B \cdot (h_{GW} - d_a) + \kappa_0 \cdot p_0 \quad (5b)$$

Vertikale Bodenspannung in Rohrscheitelebene: p_{Ev} 138,127 kN/m²

Wirksame vertikale Bodenspannung in Rohrscheitelebene: q_{Ev} 138,127 kN/m²

$$q_{\text{Ges},v} = q_0 + p_T \quad (53)$$

Vertikale Gesamt-Bodenspannung in Rohrscheitelebene: $q_{\text{Ges},v}$ 202,187 kN/m²

Die Erddruckverteilung am Rohr wird $\cos^2$ - bzw. $\sin^2$ -förmig angenommen.: Ja

Grundwasserstand im Bereich der oberen Rohrhälfte: $h_{GW, oRh}$ 2,000 m

$$q_0 = \frac{3}{2 + K_2} \cdot q_{Ev} \quad (26)$$

Radiale Erdlast auf das Rohr während des Vortriebs: q_0 199,787 kN/m²

$$q_{0,h} = \left(q_0 + \frac{\gamma'_B \cdot d_a}{2} \right) \cdot K_2 \quad (34a)$$

Horizontale Bodenspannung während des Vortriebs: $q_{0,h}$ 15 564 kN/m²

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-57

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

$$q_{\text{Ges,h}} = q_{0,h} + p_{\text{Th}} \quad (53)$$

Horizontale Gesamt-Bodenspannung am Rohr: $q_{\text{Ges,h}}$ 15,742 kN/m²

Innerer Überdruck: p_i 0,300 bar

Äußerer Überdruck über Rohrscheitel: $p_{a,Sc}$ 0,000 bar

Rohrsteifigkeit: S_R 43.895 kN/m²

Rohrsteifigkeit: $\bar{S}_R$ 43.895 kN/m²

Rechenwert des Verformungsmodul EF: E_F 50,00 N/mm²

Auflockerungsfaktor nach A161, Tabelle 15: $f_{2,F,Bau}$ 0,10 [-]

$$E_B = E_F \cdot f_{2,F,Bau} \quad (50)$$

Verformungsmodul Boden: E_B 5,00 N/mm²

Erddruckverhältnis unter Rohrscheitel: K_2 0,07 [-]

$$S_{Bh} = 0,60 \cdot E_B \quad (18)$$

Bettungssteifigkeit: S_{Bh} 3,00 N/mm²

$$V_{RB} = \frac{\bar{S}_R}{S_{Bh}} \quad (14)$$

Systemsteifigkeit: V_{RB} 14,6316 [-]

Das Rohr-Bodensystem verhält sich biegeweich: **Nein**

3.2.5.2 Schnittkräfte Bauzustand

Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkungen quer zur Rohrachse: γ_F 1,35 [-]

Teilsicherheitsbeiwert Wasseraußendruck: $\gamma_{F,W}$ 1,35 [-]

Mittlerer Radius: r_m 910,00 mm

Innerer Überdruck: p_i 0,300 bar

Äußerer Überdruck über Rohrscheitel: $p_{a,Sc}$ 0,000 bar

Radiale Erdlast auf das Rohr während des Vortriebs: q_0 199,787 kN/m²

Horizontale Bodenspannung während des Vortriebs: $q_{0,h}$ 15,564 kN/m²

Vertikale Bodenspannung infolge Verkehrslast: p_T 2,40 kN/m²

Horizontale Bodenspannung infolge Verkehrslast: p_{Th} 0,18 kN/m²

Vertikale Gesamt-Bodenspannung in Rohrscheitelebene: $q_{\text{Ges,v}}$ 202,187 kN/m²

Horizontale Gesamt-Bodenspannung am Rohr: $q_{\text{Ges,h}}$ 15,742 kN/m²

Momente: m_{q_0} Scheitel 0,269 Kämpfer -0,275 Sohle 0,292 [-]

$$M_{q_{0v,d}} = \gamma_F \cdot m_{q_0} \cdot q_0 \cdot r_m^2 \quad (24)$$

Vertikale Belastung aus Erdüberdeckung $M_{q_{0v,d}}$ 60,081 -61,421 65,218 kNm/m
 m_{pT} 0,269 -0,275 0,292 [-]

$$M_{pTv,d} = \gamma_Q \cdot m_{pT} \cdot p_T \cdot r_m^2 \quad (29)$$

Vertikale Belastung aus Verkehr $M_{pTv,d}$ 0,722 -0,738 0,783 kNm/m
 m_{pTh} -0,245 0,244 -0,224 [-]

$$M_{pTh,d} = \gamma_Q \cdot m_{pTh} \cdot p_{Th} \cdot r_m^2 \quad (31)$$

Horizontale Belastung aus Verkehr $M_{pTh,d}$ -0,049 0,049 -0,045 kNm/m
 m_{qh} -0,245 0,244 -0,224 [-]

$$M_{qh,d} = \gamma_F \cdot m_{qh} \cdot q_{0,h} \cdot r_m^2 \quad (33)$$

Horizontale Belastung aus Erdüberdeckung $M_{qh,d}$ -4,263 4,245 -3,897 kNm/m
 m_n 0,406 -0,471 0,573 [-]

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-58

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

$$M_{g,d} = \gamma_F \cdot m_g \cdot \gamma_R \cdot s \cdot r_m^2 \quad (37)$$

Eigengewicht	$M_{g,d}$	2,496	-2,896	3,523	kNm/m
	m_w	0,203	-0,235	0,286	[-]

$$M_{w,d} = \gamma_F \cdot m_w \cdot \gamma_W \cdot r_m^3 \quad (39)$$

Wasserfüllung bis Rohrscheitel	$M_{w,d}$	0,000	0,000	0,000	kNm/m
	m_a	-0,203	0,235	-0,286	[-]

$$M_{a,d} = \gamma_{F,W} \cdot m_a \cdot \gamma_W \cdot r_m^3 \quad (41)$$

Auftrieb (äußerer Wasserstand bis Scheitel)	$M_{a,d}$	0,000	0,000	0,000	kNm/m
---	-----------	-------	-------	-------	-------

$$M_{pw,d} = ((\gamma_F \cdot p_i) - (\gamma_{F,W} \cdot P_a)) \cdot r_i \cdot r_a \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{r_i \cdot r_a}{r_a^2 - r_i^2} \cdot \ln \cdot \frac{r_a}{r_i} \right) \quad (43)$$

Wasserdruck	$M_{pw,d}$	0,161	0,161	0,161	kNm/m
	m_{qh}^*	-0,181	0,208	-0,181	[-]

$$M_{qEh^*,d} = \gamma_F \cdot m_{qh}^* \cdot q_{Eh}^* \cdot r_m^2 \quad (45a)$$

Bettungsreaktionsdruck Erdlast	$M_{qEh^*,d}$	0,000	0,000	0,000	kNm/m
--------------------------------	---------------	-------	-------	-------	-------

$$M_{qTh^*,d} = \gamma_Q \cdot m_{qh}^* \cdot q_{Th}^* \cdot r_m^2 \quad (45b)$$

Bettungsreaktionsdruck Verkehr	$M_{qTh^*,d}$	0,000	0,000	0,000	kNm/m
--------------------------------	---------------	-------	-------	-------	-------

$$M_{qh^*,d} = M_{qTh^*,d} + M_{qEh^*,d}$$

Bettungsreaktionsdruck	$M_{qh^*,d}$	0,000	0,000	0,000	kNm/m
------------------------	--------------	-------	-------	-------	-------

Summe der Momente	ΣM_d	59,149	-60,599	65,744	kNm/m
-------------------	--------------	--------	---------	--------	-------

Summe Erd- und Verkehrslasten	$\Sigma M_{qv,qh,qh^*,d}$	56,491	-57,865	62,059	kNm/m
-------------------------------	---------------------------	--------	---------	--------	-------

Summe andere Lasten	$\Sigma M_{sonst,d}$	2,658	-2,735	3,685	kNm/m
---------------------	----------------------	-------	--------	-------	-------

Normalkräfte:	n_{qo}	Scheitel 0,044	Kämpfer -1,000	Sohle -0,433	[-]
---------------	----------	-------------------	-------------------	-----------------	-----

$$N_{q0v,d} = \gamma_F \cdot n_{qo} \cdot q_0 \cdot r_m \quad (25)$$

Vertikale Belastung aus Erdüberdeckung	$N_{q0v,d}$	10,799	-245,438	-106,275	kN/m
	n_{pT}	0,044	-1,000	-0,433	[-]

$$N_{pTv,d} = \gamma_Q \cdot n_{pT} \cdot p_T \cdot r_m \quad (30)$$

Vertikale Belastung aus Verkehr	$N_{pTv,d}$	0,130	-2,948	-1,277	kN/m
	n_{pTh}	-0,989	0,000	-0,718	[-]

$$N_{pTh,d} = \gamma_Q \cdot n_{pTh} \cdot p_{Th} \cdot r_m \quad (32)$$

Horizontale Belastung aus Verkehr	$N_{pTh,d}$	-0,216	0,000	-0,157	kN/m
	n_{qh}	-0,989	0,000	-0,718	[-]

$$N_{qh,d} = \gamma_F \cdot n_{qh} \cdot q_{0,h} \cdot r_m \quad (34)$$

Horizontale Belastung aus Erdüberdeckung	$N_{qh,d}$	-18,910	0,000	-13,728	kN/m
	n_g	0,306	-1,571	-1,528	[-]

$$N_{g,d} = \gamma_F \cdot n_g \cdot \gamma_R \cdot s \cdot r_m \quad (38)$$

Eigengewicht	$N_{g,d}$	2,068	-10,615	-10,324	kN/m
	n_w	0,653	0,215	0,736	[-]

$$N_{w,d} = \gamma_F \cdot n_w \cdot \gamma_W \cdot r_m^2 \quad (40)$$

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-59

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

	m_a	-0,653	-0,215	-0,736	[-]
$N_{a,d} = \gamma_F \cdot W \cdot m_a \cdot \gamma_W \cdot r_m^2$					(42)
Auftrieb (äußerer Wasserstand bis Scheitel)	$N_{a,d}$	0,000	0,000	0,000	kN/m
$N_{pw,d} = (\gamma_F \cdot p_i \cdot r_i) - (\gamma_F \cdot W \cdot P_a \cdot r_a)$					(44)
Wasserdruck	$N_{pw,d}$	32,400	32,400	32,400	kN/m
Summe der Normalkräfte	ΣN_d	26,271	-226,602	-99,361	kN/m
$\Sigma N_{qv,qh,qh^*,d} = N_{q0v,d} + N_{pTv,d} + N_{qh,d} + N_{pTh,d} + N_{qh^*,d}$					
Summe Erd- und Verkehrslasten	$\Sigma N_{qv,qh,qh^*,d}$	-8,197	-248,387	-121,437	kN/m
$\Sigma N_{sonst,d} = N_{g,d} + N_{w,d} + N_{a,d} + N_{pw,d}$					
Summe andere Lasten	$\Sigma N_{sonst,d}$	34,468	21,785	22,076	kN/m
3.2.5.3 Verformungsnachweis Bauzustand					
Verformungsbeiwert:			c_{v,qh^*}	0,0640	[-]
Verformungsbeiwert:			$c_{v,qv}$	-0,0966	[-]
$K^* = \frac{c_{h,qv}}{V_{RB} - c_{h,qh^*}}$					
Beiwert des Bettungsreaktionsdruckes:			K^*	0,007	[-]
$c_v^* = c_{v,qv} + c_{v,qh^*} \cdot K^*$				A 127 (6.13); A 161 (52a-d)	
Verformungsbeiwert:			c_v^*	-0,096	[-]
$q_0 = \frac{3}{2 + K_2} \cdot q_{Ev}$					(26)
Radiale Erdlast auf das Rohr während des Vortriebs:			q_0	199,787	kN/m ²
Vertikale Bodenspannung infolge Verkehrslast:			p_T	2,40	kN/m ²
$q_{Ges,v} = q_0 + p_T$					(53)
Vertikale Gesamt-Bodenspannung in Rohrscheitelebene:			$q_{Ges,v}$	202,187	kN/m ²
$q_{0,h} = \left(q_0 + \frac{\gamma'_B \cdot d_a}{2} \right) \cdot K_2$					(34a)
Horizontale Bodenspannung während des Vortriebs:			$q_{0,h}$	15,564	kN/m ²
Horizontale Bodenspannung infolge Verkehrslast:			p_{Th}	0,18	kN/m ²
$q_{Ges,h} = q_{0,h} + p_{Th}$					(53)
Horizontale Gesamt-Bodenspannung am Rohr:			$q_{Ges,h}$	15,742	kN/m ²
$\delta_v = c_v^* \cdot \frac{q_{Ges,v} - q_{Ges,h}}{\bar{S}_R} \cdot 100 $					(51)
Relative vertikale Durchmesseränderung:			δ_v	0,03	%
Zulässige vertikale Durchmesseränderung:			zul δ_v	0,55	%
$U_{\delta v} = \frac{\delta_v}{zul \delta_v}$					

3.2.5.4 Beulnachweis Bauzustand

Der Beulnachweis wurde vom Nutzer deaktiviert.

3.2.5.5 Bemessung Ringbewehrung

Teilsicherheitsbeiwert Tragwiderstand Beton:

YRC 1,50 [-]

Teilsicherheitsbeiwert Tragwiderstand Stahl:

YRS 1,15 [-]

Charakteristische Zylinderdruckfestigkeit:

$f_{ck,cyl}$ 50,0 N/mm²

$$f_{cd} = \frac{0,85 \cdot f_{ck,cyl}}{YRC}$$

Bemessungswert Beton:

f_{cd} 28,33 N/mm²

Nennstreckgrenze:

f_{yk} 500 N/mm²

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{YRS}$$

Bemessungswert Betonstahl:

f_{yd} 434,78 N/mm²

Summe der Momente

M_E

Scheitel 43,814

Kämpfer -44,888

Sohle 48,699

kNm/m

Summe der Momente inkl.

M_{Ed}

59,149

-60,599

65,744

kNm/m

Teilsicherheitsbeiwert

Summe Normalkraft

N_E

19,460

-167,853

-73,601

kN/m

Summe der Normalkräfte inkl.

N_{Ed}

26,271

-226,602

-99,361

kN/m

Teilsicherheitsbeiwert

Bemessung:

Hebelarm innere Ringbewehrung

Z_i

Scheitel 48,0

Kämpfer 39,0

Sohle 48,0

mm

$$M_{Eds} = |M_{Ed}| - N_{Ed} \cdot Z_i$$

Auslegungsmoment Plattenbemessung

M_{Eds}

57,888

69,437

70,513

kNm/m

$$\sigma_{s,d} = f_{yd}$$

Rechenwert der Stahlgrenzspannung

$\sigma_{s,d}$

434,78

434,78

434,78

N/mm²

Statische Höhe

d

0,158

0,149

0,158

m

$$\mu_{Eds} = \frac{M_{Eds}}{d^2 \cdot f_{cd}}$$

Normiertes Auslegungsmoment

μ_{Eds}

0,0818

0,1104

0,0997

[-]

Erforderlicher mechanischer Bewehrungsgrad

ω

0,0856

0,1174

0,1054

[-]

$$a_{s,calc} = \frac{\omega \cdot d \cdot f_{cd} + N_{Ed}}{\sigma_{s,d}}$$

Erforderliche Bewehrung (Bemessung)

$a_{s,calc}$

9,42

6,19

8,56

cm²/m

Vorhandene Bewehrung

vorh. a_s

12,32

9,05

12,32

cm²/m

Ausnutzung Bewehrung (Bemessung)

$U a_{s,calc}$

76,5

68,4

69,5

%

Die gewählte Bewehrung ist ausreichend.

3.2.5.6 Bemessung Längsbewehrung (Bahn)

Nach RIL 836.4501 Abschnitt 1 (4) [Korrektur TM vom 4.7.2014] muss die Längsbewehrung mindestens 1/5 (20%) der erforderlichen Ringbewehrung für vorwiegend ruhende Belastung betragen.

Vorhandene Längsbewehrung

vorh. $a_{s,L}$

3,82

3,91

3,82

cm²/m

$$a_{s,calc,L} = 0,20 \cdot a_{s,calc}$$

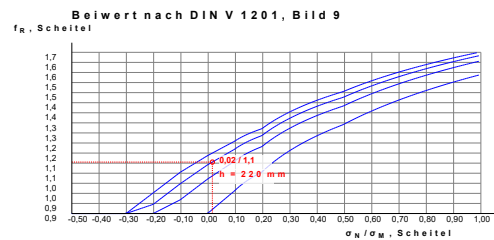
$$U_{a_{s,calc,L}} = \frac{a_{s,calc,L}}{\text{vorh. } a_{s,L}}$$

Ausnutzung Längsbewehrung (Bemessung) $U_{a_{s,calc,L}}$ 49,3 31,7 44,8 %

Die gewählte Längsbewehrung ist ausreichend.

3.2.5.7 Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (DIN V 1201:2004-08 5.2.5)

Ideeles Widerstandsmoment, Zugseite	W_{id}	Scheitel 8.749,42	Kämpfer 8.526,72	Sohle 8.749,42	mm³/mm
$ \sigma_{M,E} = \frac{M_E}{W_{id}}$					
Biegespannungsanteil aus Biegemomenten	$\sigma_{M,E}$	5,0076	5,2644	5,5660	N/mm²
Spannungsanteil aus Normalkräften	$\sigma_{N,E}$	0,0772	-0,6660	-0,2920	N/mm²
$f_{t,fl} = \sigma_{M,E} + \sigma_{N,E}$					
Maßgebliche Biegezugspannung	$f_{t,fl}$	5,0848	4,5985	5,2740	N/mm²
Spannungsverhältnis	σ_N / σ_M	0,0154	-0,1265	-0,0525	[-]
Profilhöhe	h	220,00	220,00	220,00	mm



Beiwert nach DIN V 1201, Bild 9 f_R 1,15 1,02 1,09 [-]

$$\sigma_{VR} = f_R \cdot f_{t,fl}$$

Rohrvergleichsspannung unter Risskraft im Zustand I σ_{VR} 5,84 4,69 5,75 N/mm²

Mittlere Zugfestigkeit: f_{ctm} 4,1 N/mm²

$$\max \sigma_{VR} = \text{MIN: } 6 \text{ N/mm}^2 ; \frac{f_{ctm}}{3,50} \cdot 6$$

Maximale Rohrvergleichsspannung nach DIN V 1201: $\max \sigma_{VR}$ 6,0 N/mm²

$$U_{\sigma_{VR}} = \frac{\sigma_{VR}}{\max \sigma_{VR}}$$

Ausnutzung Rohrvergleichsspannung $U_{\sigma_{VR}}$ 97,4 78,2 95,8 %

Der Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ist erbracht.

3.2.5.8 Ermittlung der Lastklasse (DIN V 1201:2004-08 4.3.5)

Maximale Rohrvergleichsspannung nach DIN V 1201:	$\max \sigma_{VR}$	6,0	N/mm²
Inneres Widerstandsmoment:	W_i	8.066,67	mm³/mm
Abminderungsbeiwert für Langzeitwirkung:	$\alpha_{c,F}$	0,90	[-]
Beiwert nach DIN V 1201, Bild 9:	f_R	1,15	[-]

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite:
D-62

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

$$F_c = 1/0,3 \cdot \left\{ \frac{\max \sigma_{VR} \cdot W_i}{\alpha_{c,F} \cdot f_R \cdot r_m} - 0,07 G_p \right\}$$

Risskraft (Ergänzung Mindestscheiteldruckkraft):
Ermittelte Lastklasse nach DIN V 1201 Tabelle 8/9:

F_c 164,11 kN/m
90

Werte mit einem (+) bedeuten, dass in Sonderfällen auch Rohre mit diesen Lastklassen (Festigkeitsklassen) hergestellt werden können. Der Strich - bedeutet, dass Rohre dieser Nennweiten und Lastklassen im Regelfall nicht hergestellt werden. Zum Einsatz kommen Rohre mit höherer Tragfähigkeit (Lastklasse).

3.2.6 Nachweis der Zulässigkeit der Vortriebskraft

3.2.6.1 Rohr

Minimale Wanddicke des Rohres:
Maßgebende Druckübertragungsfläche:
Längsdruckfestigkeit:
Teilsicherheitsbeiwert für Bauteilwiderstand längs der Rohrachse:
Charakteristische Festigkeit des Rohrwerkstoffs:
Mittlere Zugfestigkeit des Rohrwerkstoffs in Ringrichtung:
Elastizitätsmodul in axialer Richtung:
Teilsicherheitsbeiwert für Bauteilwiderstand längs der Rohrachse:

$t_{R,min}$ 220,0 mm
 A_R 12.578,937 cm²
 $f_{c,ax}$ 50,0 N/mm²
 $\gamma_{M,ax}$ 1,35 [-]
 f_k 50,00 N/mm²
 f_{tm} 4,07 N/mm²
 $E_{R,ax}$ 37.277,9 N/mm²
 $\gamma_{M,ax}$ 1,35 [-]

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_{M,ax}} \quad (100)$$

Bemessungswert der Rohrfestigkeit:

f_d 37,04 N/mm²

3.2.6.2 Rohrabwinklung

Minimaler planmäßiger Kurvenradius der Vortriebsstrecke:
Länge des einzelnen Vortriebsrohres:

R_{Plan} +∞ m
 L_R 3,00 m

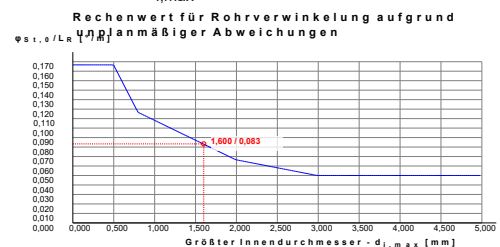
$$\varphi_R = \arctan \left(\frac{L_R}{R_{Plan}} \right) \quad (93)$$

Berechnete Rohrverwinklung aus planmäßiger Krümmung:
 φ_R wurde zu 0° gesetzt, da für $\varphi_R < 0,05^\circ$ die Trasse als planmäßig gerade gilt.
Angesetzte Rohrverwinklung aus planmäßiger Krümmung:

φ_R 0,000 °
 φ_R 0,000 °

Größter Innendurchmesser:

$d_{i,max}$ 1.600 mm



Rechenwert für Rohrverwinklung aufgrund unplanmäßiger Abweichungen:

$\varphi_{St,0}/L_R$ 0,083 °/m

$$\varphi_{St} = \varphi_{St,0}/L_R \cdot L_R + 0,0625^\circ \geq 0 \quad (94)$$

Rohrverwinklung aufgrund unplanmäßiger Abweichungen:

φ_{St} 0,313 °

Nennweite:

DN 1.600 mm

Max. Abweichung Stirnflächen von Rechtwinkligkeit:

$\Delta_{a,cal}$ 8,0 mm

Kleinster Außendurchmesser:

$d_{a,min}$ 2.040 mm

$$(\Delta_{a,cal})$$

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-63

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

Rohrverwinkelung aufgrund Abweichungen der Rohrspiegel von der Rechtwinkligkeit:

$\varphi_{\Delta a, cal}$ 0,225 °

Kombinationsbeiwert für Rohrabwinkelungen:

ψ 0,80 [-]

$$\varphi_{ges} = \varphi_R + \text{MAX}[\psi \cdot (\varphi_{St} + \varphi_{\Delta a, cal}) ; \varphi_{St} \cdot \varphi_{\Delta a, cal}]$$

(92)

Rohrverwinkelung im Bereich einer Rohrfuge (gesamt):

φ_{ges} 0,430 °

3.2.6.3 Verformung des Druckübertragungsringes

Druckübertragungsring (DÜR)

OSB-Platte (OSB/3, OSB/4) - OSB-Platte (OSB/3, OSB/4)

Außendurchmesser des DÜR:

$d_{a, DÜR}$ 1.950,0 mm

Innendurchmesser des DÜR:

$d_{i, DÜR}$ 1.670,0 mm

Äußerer Randabstand des DÜR:

$a_{a, DÜR}$ 45,0 mm

Innerer Randabstand des DÜR:

$a_{i, DÜR}$ 35,0 mm

Breite des DÜR:

$t_{DÜR}$ 140,0 mm

Minimale Wanddicke des Rohres:

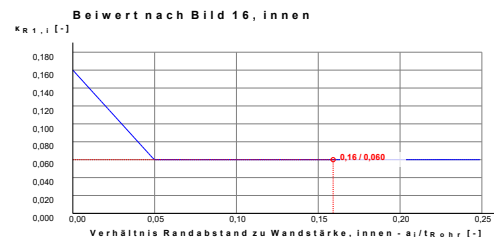
$t_{R, min}$ 220,0 mm

$$K_t = \frac{t_{R, min}}{t_{DÜR}}$$

(99)

Verhältnis $t_{DÜR}$ zu t_{Rohr} :

K_t 1,571 [-]

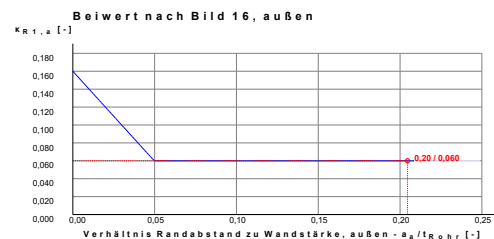


Verhältnis Randabstand zu Wandstärke, innen:

a_i/t_{Rohr} 0,159 [-]

Beiwert nach Bild 16, innen:

$K_{R1, i}$ 0,060 [-]



Verhältnis Randabstand zu Wandstärke, außen:

a_a/t_{Rohr} 0,205 [-]

Beiwert nach Bild 16, außen:

$K_{R1, a}$ 0,060 [-]

$$K_{R1} = \text{max}(K_{R1, i}, K_{R1, a})$$

Beiwert nach Bild 16 zur Vermeidung von Randabplatzungen:

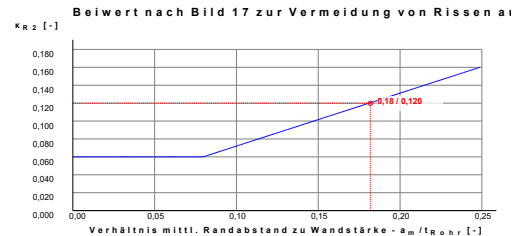
K_{R1} 0,060 [-]

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-64

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.



Verhältnis mittl. Randabstand zu Wandstärke:

Beiwert nach Bild 17 zur Vermeidung von Rissen aus Spaltzug:

$$K_R = \max(K_{R1}, K_{R2})$$

Beiwert nach Bild 16/17, angesetzter Wert:

Mittlere Zugfestigkeit des Rohrwerkstoffs in Ringrichtung:

$$\alpha_{D,T} = \frac{f_{tm}}{f_k} \cdot \frac{1}{K_R} \quad (98)$$

Beiwert für zulässige Druckspannung:

$$\sigma_{cal} = \alpha_{D,T} \cdot K_t \cdot f_d \quad (97)$$

Höchste in der Rohrfuge wirkende, zulässige Druckspannung:

Angesetzte Vorpresskraft, Laufvariable:

$$\sigma_{0DÜR} = \frac{F_j}{A_{DÜR}}$$

Gleichmäßig verteilte Spannung im DÜR:

$$\sigma_I = 2 \cdot \sigma_{0DÜR} \quad (107)$$

Maßgebende Spannung der Vorbelastung:

$$\sigma_I / \sigma_{cal} = \frac{\sigma_I}{\sigma_{cal}}$$

Prozentsatz der Vorbelastung:

$$\sigma_I / \sigma_{cal} \quad 41,0 \quad \%$$

3.2.6.4 Verformung des Druckübertragungsringes

Schicht 1

OSB-Platte (OSB/3, OSB/4)

Schichtdicke:

$$E_{cal} = \left(\sigma_{cal} \cdot 61,113 (\sigma_I / \sigma_{cal})^{1,33} - 983,8 \cdot (\sigma_I / \sigma_{cal}) + 3249 \cdot (\sigma_I / \sigma_{cal})^2 - 5866 \cdot (\sigma_I / \sigma_{cal})^3 + 0,23236 + 4140 \cdot (\sigma_I / \sigma_{cal})^4 \right) \cdot (-0,0009 \cdot s_d^3 + 0,0608 \cdot s_d^2 + 1,2216 \cdot s_d + 8,6507) \quad (110)$$

Steifigkeit der DUER-Schicht:

$$\Delta s_{DÜR,S,1} = s_{d,1} \cdot \left(\frac{\sigma_{cal}}{E_{cal}} \right)^{0,5} \cdot \frac{d_{a,min}}{d_{a,DÜR}} \quad (102 / 111)$$

Verformungsanteil der Schicht:

$$\Delta s_{DÜR,S,1} \quad 1,7 \quad mm$$

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-65

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

Schicht 2

OSB-Platte (OSB/3, OSB/4)

Schichtdicke:

s_d 18,00 mm

$$E_{cal} = \left(\sigma_{cal} \cdot 61,113(\sigma_I/\sigma_{cal})^{1,33} - 983,8 \cdot (\sigma_I/\sigma_{cal}) + 3249 \cdot (\sigma_I/\sigma_{cal})^2 - 5866 \cdot (\sigma_I/\sigma_{cal})^3 + 0,23236 + 4140 \cdot (\sigma_I/\sigma_{cal})^4 \right) \cdot (-0,0009 \cdot s_d^3 + 0,0608 \cdot s_d^2 + 1,2216 \cdot s_d + 8,6507) \quad (110)$$

Steifigkeit der DUER-Schicht:

E_{cal} 660,78 N/mm²

$$\Delta s_{DÜR,S,2} = s_{d,2} \cdot \left(\frac{\sigma_{cal}}{E_{cal}} \right)^{0,5} \cdot \frac{d_{a,min}}{d_{a,DÜR}} \quad (102 / 111)$$

Verformungsanteil der Schicht:

$\Delta s_{DÜR,S}$ 4,6 mm

$$\Delta s_{DÜR} = \Delta s_{DÜR,S,1} + \Delta s_{DÜR,S,2} \quad (112)$$

Verformungsanteil Gesamt:

$\Delta s_{DÜR}$ 9,3 mm

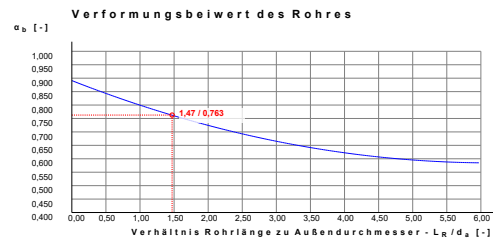
3.2.6.5 Verformung des Rohres

$$\sigma_{max} = \sigma_{cal} \cdot \frac{t_{DÜR}}{t_{R,min}} \quad (103b)$$

$$\sigma_{max} = \frac{\sigma_{cal} \cdot t_{DÜR}}{t_{R,min}}$$

Rechnerische Druckspannung im Rohrwerkstoff:

σ_{max} 25,16 N/mm²



$$L_R/d_a = \frac{L_R}{d_a}$$

Verhältnis Rohrlänge zu Außendurchmesser:

L_R/d_a 1,47 [-]

$$\alpha_b = 0,008 \cdot \frac{L_R^2}{d_a} - 0,099 \cdot \frac{L_R}{d_a} + 0,891 \quad (105)$$

Verformungsbeiwert des Rohres:

α_b 0,763 [-]

$$\alpha_\varphi = \varphi_R - 0,05 \leq 1 \quad \& \quad \geq 0$$

Beiwert:

α_φ 0,000 [-]

$$\kappa_{ab} = \alpha_b - (\alpha_b - 0,5) \cdot (1 - \alpha_\varphi) \quad (104)$$

Verformungsfaktor des Rohres:

κ_{ab} 0,500 [-]

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-66

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

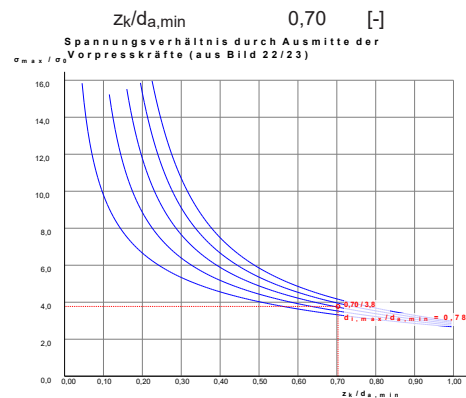
$$\Delta s_R = \frac{\sigma_{\max} \cdot K_{ab} \cdot L_R}{E_{R,ax}} \quad (103a)$$

Verformungsanteil des Vortriebsrohres: Δs_R 1,0 mm

Ergebnis

$$z_k/d_{a,min} = \frac{\Delta s_{DÜR} + \Delta s_R}{\tan(\varphi_{ges}) \cdot d_{a,DÜR}} \leq 1 \quad (101)$$

Maß der Fugenklaffung:



Spannungsverhältnis durch Ausmitte der Vorpressekräfte (aus Bild 22/23):

$$A_R = \frac{(d_{a,min}^2 - d_{i,max}^2) \cdot \pi}{4}$$

Maßgebende Druckübertragungsfläche:

A_R 12.578,937 cm²

Teilsicherheitsbeiwert Einwirkung längs der Rohrachse:

$\gamma_{F,ax}$ 1,30 [-]

$$F_j = \frac{A_R \cdot \sigma_{\max}}{\sigma_{\max} / \sigma_0 \cdot \gamma_{F,ax}} \quad (113)$$

Zulässige Vorpressekraft:

F_j 6.454 kN

Vorgegebene Vortriebskraft:

$F_{j,m}$ 5.000,0 kN

$$U_{Fj} = \frac{F_{j,m}}{F_j}$$

Ausnutzung zulässige Vortriebskraft:

U_{Fj} 77,5 %

Die angesetzte Vortriebskraft ist zulässig.

$$A_{R,0} = \frac{(d_i^2 + 2 \cdot A_{ax}^2 - d_i^2) \cdot \pi}{4}$$

Rohrfläche für Axialdruck außerhalb Kupplungsbereich:

$A_{R,0}$ 12.578,94 cm²

$$\sigma_{x,d,0} = -1 \cdot \gamma_{F,ax} \cdot \frac{F_{j,m}}{A_{R,0}} \cdot \sigma_{\max} / \sigma_0 \quad (113)$$

Im Rohr wirkende axiale Spannung, Bemessungswert:

$\sigma_{x,d,0}$ -19,49 N/mm²

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-67

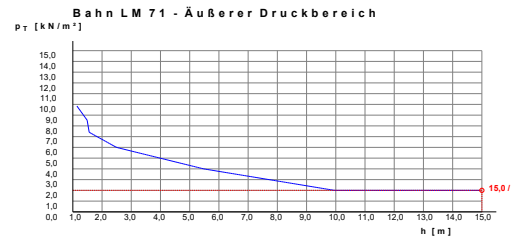
Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

Der Nachweis der Vergleichsspannung ist bei biegesteifen Rohren nicht erforderlich.

3.2.7 Betriebszustand

3.2.7.1 Belastungen Betriebszustand



$$\Phi_2 = \frac{1,44}{\sqrt{LF} - 0,2} + 0,82 \quad (21)$$

$$1,0 \leq \Phi_2 \leq 1,67 \quad (21)$$

Stoßbeiwert:	Φ_2	1,67	[-]
red $\Phi_2 = \Phi_2 - 0,1 \cdot (h_{\text{ü}} - 1,0) \geq 1$ (22)			

Stoßbeiwert reduziert:	red Φ_2	1,00	[-]
Anpassungsfaktor $\alpha_{Qi, LM71}$ (DIN EN 1991-2):	$\alpha_{Qi, LM71}$	1,20	[-]
Einfache Bodenspannung aus Verkehr:	p	2,00	kN/m²
$p_T = \text{red } \Phi_2 \cdot p \cdot \alpha_{Qi, LM71}$ A 161 (23a)			

Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Scheitelhöhe:	p_T	2,40	kN/m²
---	-------	------	-------

Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Kämpferhöhe (ohne ϕ):	p_K	2,00	kN/m²
Erddruckverhältnis unter Rohrscheitel:	K_2	0,35	[-]
$p_{T,h} = (0,50 \cdot (\text{red } \Phi_2 - 1) + 1) \cdot p_K \cdot K_2 \cdot \alpha_{Qi, LM71}$ A 161 (23b)			

Horizontale Bodenspannung aus Verkehr:	$p_{T,h}$	0,84	kN/m²
$p_{Ev} = \kappa \cdot \gamma_B \cdot (h - h_{GW} + d_a) + \kappa \cdot \gamma'_B \cdot (h_{GW} - d_a) + \kappa_0 \cdot p_0$ (5b)			

Vertikale Bodenspannung in Rohrscheitelebene:	p_{Ev}	138,127	kN/m²
Wirksame vertikale Bodenspannung in Rohrscheitelebene:	q_{Ev}	138,127	kN/m²
$q_{Ges,v} = p_{Ev} + p_T$ (53)			

Vertikale Gesamt-Bodenspannung in Rohrscheitelebene:	$q_{Ges,v}$	140,527	kN/m²
--	-------------	---------	-------

Die Erddruckverteilung am Rohr wird $\cos^2$ - bzw. $\sin^2$ -förmig angenommen.: **Nein**

Grundwasserstand im Bereich der oberen Rohrhälfte:	$h_{GW, oRh}$	2,000	m
$q_{Eh} = \left(p_{Ev} + \gamma_B \cdot (d_a - h_{GW, oRh}) + \gamma'_B \cdot \left(h_{GW, oRh} - \frac{d_a}{2} \right) \right) \cdot K_2$			

Horizontale Bodenspannung am Rohr:	q_{Eh}	51,79	kN/m²
$q_{Ges,h} = q_{Eh} + p_{Th}$ (53)			

Horizontale Gesamt-Bodenspannung am Rohr:	$q_{Ges,h}$	52 628	kN/m²
---	-------------	--------	-------

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-68

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

Äußerer Überdruck über Rohrscheitel: $p_{a,Sc}$ 0,000 bar

Rohrsteifigkeit: S_R 43.895 kN/m²

Rohrsteifigkeit: $\bar{S}_R$ 43.895 kN/m²

Rechenwert des Verformungsmodul EF: E_F 50,00 N/mm²

Auflockerungsfaktor nach A161, Tabelle 15: $f_{2,F,Betrieb}$ 0,20 [-]

$E_B = E_F \cdot f_{2,F,Betrieb}$ (50)

Verformungsmodul Boden: E_B 10,00 N/mm²

Erddruckverhältnis unter Rohrscheitel: K_2 0,35 [-]

$S_{Bh} = 0,60 \cdot E_B$ (18)

Bettungssteifigkeit: S_{Bh} 6,00 N/mm²

$V_{RB,LK} = \frac{\bar{S}_R}{S_{Bh}}$ (14)

Systemsteifigkeit: V_{RB} 7,3158 [-]

Das Rohr-Bodensystem verhält sich biegeweich: Nein

3.2.7.2 Schnittkräfte Betriebszustand

Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkungen quer zur Rohrachse: γ_F 1,35 [-]

Teilsicherheitsbeiwert Wasseraußendruck: $\gamma_{F,W}$ 1,35 [-]

Mittlerer Radius: r_m 910,00 mm

Innerer Überdruck: p_i 0,300 bar

Äußerer Überdruck über Rohrscheitel: $p_{a,Sc}$ 0,000 bar

Wirksame vertikale Bodenspannung in Rohrscheitelebene: q_{Ev} 138,127 kN/m²

Horizontale Bodenspannung am Rohr: q_{Eh} 51,79 kN/m²

Vertikale Bodenspannung infolge Verkehrslast: p_T 2,40 kN/m²

Horizontale Bodenspannung infolge Verkehrslast: p_{Th} 0,84 kN/m²

Vertikale Gesamt-Bodenspannung in Rohrscheitelebene: $q_{Ges,v}$ 140,527 kN/m²

Horizontale Gesamt-Bodenspannung am Rohr: $q_{Ges,h}$ 52,628 kN/m²

Momente: m_{pEv} Scheitel 0,285 Kämpfer -0,292 Sohle 0,369 [-]

$M_{pEvd} = \gamma_F \cdot m_{pEv} \cdot q_{Ev} \cdot r_m^2$ (27)

Vertikale Belastung aus Erdüberdeckung $M_{pEv,d}$ 44,009 -45,090 56,980 kNm/m

m_{pT} 0,285 -0,292 0,369 [-]

$M_{pTv,d} = \gamma_Q \cdot m_{pT} \cdot p_T \cdot r_m^2$ (29)

Vertikale Belastung aus Verkehr $M_{pTv,d}$ 0,765 -0,783 0,990 kNm/m

m_{pTh} -0,249 0,249 -0,243 [-]

$M_{pTh,d} = \gamma_Q \cdot m_{pTh} \cdot p_{Th} \cdot r_m^2$ (31)

Horizontale Belastung aus Verkehr $M_{pTh,d}$ -0,233 0,233 -0,227 kNm/m

m_{pEh} -0,249 0,249 -0,243 [-]

$M_{pEh,d} = \gamma_F \cdot m_{pEh} \cdot q_{Eh} \cdot r_m^2$ (35)

Horizontale Belastung aus Erdüberdeckung $M_{pEh,d}$ -14,417 14,417 -14,070 kNm/m

m_g 0,456 -0,525 0,814 [-]

$M_{g,d} = \gamma_F \cdot m_g \cdot \gamma_R \cdot s \cdot r_m^2$ (37)

Eigengewicht $M_{g,d}$ 2,804 -3,228 5,005 kNm/m

m_w 0,228 -0,263 0,407 [-]

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-69

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

Wasserfüllung bis Rohrscheitel	$M_{w,d}$ m_a	2,319 -0,228	-2,676 0,263	4,140 -0,407	kNm/m [-]
$M_{a,d} = \gamma_{F,W} \cdot m_a \cdot \gamma_W \cdot r_m^3$ (41)					
Auftrieb (äußerer Wasserstand bis Scheitel)	$M_{a,d}$	0,000	0,000	0,000	kNm/m
$M_{pw,d} = ((\gamma_F \cdot p_i) - (\gamma_{F,W} \cdot P_a)) \cdot r_i \cdot r_a \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{r_i \cdot r_a}{r_a^2 - r_i^2} \cdot \ln \cdot \frac{r_a}{r_i} \right)$ (43)					
Wasserdruck	$M_{pw,d}$ m_{qh}^*	0,161 -0,181	0,161 0,208	0,161 -0,181	kNm/m [-]
$M_{qEh^*,d} = \gamma_F \cdot m_{qh}^* \cdot q_{Eh}^* \cdot r_m^2$ (45a)					
Bettungsreaktionsdruck Erdlast	$M_{qEh^*,d}$	0,000	0,000	0,000	kNm/m
$M_{qTh^*,d} = \gamma_Q \cdot m_{qh}^* \cdot q_{Th}^* \cdot r_m^2$ (45b)					
Bettungsreaktionsdruck Verkehr	$M_{qTh^*,d}$	0,000	0,000	0,000	kNm/m
$M_{qh^*,d} = M_{qTh^*,d} + M_{qEh^*,d}$					
Bettungsreaktionsdruck	$M_{qh^*,d}$	0,000	0,000	0,000	kNm/m
Summe der Momente	ΣM_d	35,408	-36,966	52,980	kNm/m
Summe Erd- und Verkehrslasten	$\Sigma M_{qv,qh,qh^*,d}$	30,124	-31,223	43,673	kNm/m
Summe andere Lasten	$\Sigma M_{sonst,d}$	5,285	-5,742	9,307	kNm/m
Normalkräfte:					
	n_{pEv}	Scheitel 0,078	Kämpfer -1,000	Sohle -0,339	[-]
$N_{pEv,d} = \gamma_F \cdot n_{pEv} \cdot q_{Ev} \cdot r_m$ (28)					
Vertikale Belastung aus Erdüberdeckung	$N_{pEv,d}$ n_{pT}	13,236 0,078	-169,689 -1,000	-57,525 -0,339	kN/m [-]
$N_{pTv,d} = \gamma_Q \cdot n_{pT} \cdot p_T \cdot r_m$ (30)					
Vertikale Belastung aus Verkehr	$N_{pTv,d}$ n_{pTh}	0,230 -0,998	-2,948 0,000	-1,000 -0,868	kN/m [-]
$N_{pTh,d} = \gamma_Q \cdot n_{pTh} \cdot p_{Th} \cdot r_m$ (32)					
Horizontale Belastung aus Verkehr	$N_{pTh,d}$ n_{pEh}	-1,025 -0,998	0,000 0,000	-0,891 -0,868	kN/m [-]
$N_{pEh,d} = \gamma_F \cdot n_{pEh} \cdot q_{Eh} \cdot r_m$ (36)					
Horizontale Belastung aus Erdüberdeckung	$N_{pEh,d}$ n_g	-63,500 0,411	0,000 -1,571	-55,228 -1,232	kN/m [-]
$N_{g,d} = \gamma_F \cdot n_g \cdot \gamma_R \cdot s \cdot r_m$ (38)					
Eigengewicht	$N_{g,d}$ n_w	2,777 0,705	-10,615 0,215	-8,324 0,884	kN/m [-]
$N_{w,d} = \gamma_F \cdot n_w \cdot \gamma_W \cdot r_m^2$ (40)					
Wasserfüllung bis Rohrscheitel	$N_{w,d}$ m_a	7,881 -0,705	2,404 -0,215	9,883 -0,884	kN/m [-]
$N_{a,d} = \gamma_{F,W} \cdot m_a \cdot \gamma_W \cdot r_m^2$ (42)					
Auftrieb (äußerer Wasserstand bis Scheitel)	$N_{a,d}$	0,000	0,000	0,000	kN/m

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-70

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

Wasserdruck	$N_{pw,d}$	32,400	32,400	32,400	kN/m
Summe der Normalkräfte	ΣN_d	-8,000	-148,449	-80,685	kN/m

$\Sigma N_{qv,qh,qh^*,d} = N_{pEv,d} + N_{pTv,d} + N_{pEh,d} + N_{pTh,d} + N_{qh^*,d}$					
Summe Erd- und Verkehrslasten	$\Sigma N_{qv,qh,qh^*,d}$	-51,058	-172,638	-114,643	kN/m

$\Sigma N_{sonst,d} = N_{g,d} + N_{w,d} + N_{a,d} + N_{pw,d}$					
Summe andere Lasten	$\Sigma N_{sonst,d}$	43,058	24,189	33,958	kN/m

3.2.7.3 Verformungsnachweis Betriebszustand

Verformungsbeiwert:	c_{v,qh^*}	0,0640	[-]
Verformungsbeiwert:	$c_{v,qv}$	-0,1053	[-]

$$K^* = \frac{c_{h,qv}}{V_{RB} - c_{h,qh^*}}$$

Beiwert des Bettungsreaktionsdruckes:	K^*	0,014	[-]
---------------------------------------	-------	-------	-----

$$c_v^* = c_{v,qv} + c_{v,qh^*} \cdot K^* \quad A 127 (6.13); A 161 (52a-d)$$

Verformungsbeiwert:	c_v^*	-0,104	[-]
Vertikale Bodenspannung in Rohrscheitelebene:	p_{Ev}	138,127	kN/m ²
Vertikale Bodenspannung infolge Verkehrslast:	p_T	2,40	kN/m ²

$$q_{Ges,v} = p_{Ev} + p_T \quad (53)$$

Vertikale Gesamt-Bodenspannung in Rohrscheitelebene:	$q_{Ges,v}$	140,527	kN/m ²
--	-------------	---------	-------------------

$$q_{Eh} = \left(p_{Ev} + \gamma_B \cdot (d_a - h_{GW,oRh}) + \gamma'_B \cdot \left(h_{GW,oRh} - \frac{d_a}{2} \right) \right) \cdot K_2$$

Horizontale Bodenspannung am Rohr:	q_{Eh}	51,79	kN/m ²
Horizontale Bodenspannung infolge Verkehrslast:	p_{Th}	0,84	kN/m ²

$$q_{Ges,h} = q_{Eh} + p_{Th} \quad (53)$$

Horizontale Gesamt-Bodenspannung am Rohr:	$q_{Ges,h}$	52,628	kN/m ²
---	-------------	--------	-------------------

$$\delta_v = \left| c_v^* \cdot \frac{q_{Ges,v} - q_{Ges,h}}{S_R} \cdot 100 \right| \quad (51)$$

Relative vertikale Durchmesseränderung:	δ_v	0,02	%
Zulässige vertikale Durchmesseränderung:	zul δ_v	0,55	%

$$U_{\delta v} = \frac{\delta_v}{\text{zul } \delta_v}$$

Ausnutzungsgrad Verformung:	$U_{\delta v}$	3,8	%
-----------------------------	----------------	-----	---

Die errechnete Verformung ist kleiner als die zulässige Verformung.

3.2.7.4 Beulnachweis Betriebszustand

Der Beulnachweis wurde vom Nutzer deaktiviert.

3.2.7.5 Bemessung Ringbewehrung

Teilsicherheitsbeiwert Tragwiderstand Beton:	γ_{RC}	1,50	[-]
Teilsicherheitsbeiwert Tragwiderstand Stahl:	γ_{RS}	1,15	[-]
Charakteristische Zylinderdruckfestigkeit:	$f_{ck,cyl}$	50 N	N/mm ²

$$f_{cd} = \frac{0,85 \cdot f_{ck,cyl}}{\gamma_{RC}}$$

Bemessungswert Beton:
Nennstreckgrenze:

f_{cd} 28,33 N/mm²
 f_{yk} 500 N/mm²

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_{RS}}$$

Bemessungswert Betonstahl:

f_{yd} 434,78 N/mm²

Summe der Momente	M_E	Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Summe der Momente inkl. Teilssicherheitsbeiwert	M_{Ed}	26,229	-27,382	39,245	kNm/m
Summe Normalkraft	N_E	35,408	-36,966	52,980	kNm/m
Summe der Normalkräfte inkl. Teilssicherheitsbeiwert	N_{Ed}	-5,926	-109,962	-59,767	kN/m
Bemessung:		-8,000	-148,449	-80,685	kN/m

Hebelarm innere Ringbewehrung	z_i	Scheitel	Kämpfer	Sohle	
		48,0	39,0	48,0	mm

$$M_{Eds} = |M_{Ed}| - N_{Ed} \cdot z_i$$

Auslegungsmoment Plattenbemessung	M_{Eds}	35,792	42,755	56,853	kNm/m
-----------------------------------	-----------	--------	--------	--------	-------

$$\sigma_{s,d} = f_{yd}$$

Rechenwert der Stahlgrenzspannung	$\sigma_{s,d}$	434,78	434,78	434,78	N/mm ²
Statische Höhe	d	0,158	0,149	0,158	m

$$\mu_{Eds} = \frac{M_{Eds}}{d^2 \cdot f_{cd}}$$

Normiertes Auslegungsmoment	μ_{Eds}	0,0506	0,0680	0,0804	[-]
Erforderlicher mechanischer Bewehrungsgrad	ω	0,0521	0,0706	0,0840	[-]

$$a_{s,calc} = \frac{\omega \cdot d \cdot f_{cd} + N_{Ed}}{\sigma_{s,d}}$$

Erforderliche Bewehrung (Bemessung)	$a_{s,calc}$	5,18	3,44	6,79	cm ² /m
Vorhandene Bewehrung	vorh. a_s	12,32	9,05	12,32	cm ² /m
Ausnutzung Bewehrung (Bemessung)	$U a_{s,calc}$	42,1	38,1	55,2	%

Die gewählte Bewehrung ist ausreichend.

3.2.7.6 Bemessung Längsbewehrung (Bahn)

Nach RIL 836.4501 Abschnitt 1 (4) [Korrektur TM vom 4.7.2014] muss die Längsbewehrung mindestens 1/5 (20%) der erforderlichen Ringbewehrung für vorwiegend ruhende Belastung betragen.

Vorhandene Längsbewehrung	vorh. $a_{s,L}$	3,82	3,91	3,82	cm ² /m
---------------------------	-----------------	------	------	------	--------------------

$$a_{s,calc,L} = 0,20 \cdot a_{s,calc}$$

Erforderliche Längsbewehrung (Bemessung)	$a_{s,calc,L}$	1,04	0,69	1,36	cm ² /m
--	----------------	------	------	------	--------------------

$$U a_{s,calc,L} = \frac{a_{s,calc,L}}{\text{vorh. } a_{s,L}}$$

Ausnutzung Längsbewehrung (Bemessung)	$U a_{s,calc,L}$	27,1	17,6	35,5	%
---------------------------------------	------------------	------	------	------	---

Die gewählte Längsbewehrung ist ausreichend.

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-72

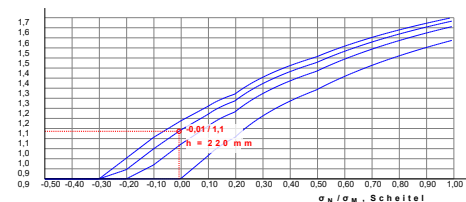
Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

3.2.7.7 Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (DIN V 1201:2004-08 5.2.5)

Ideeles Widerstandsmoment, Zugseite	W_{id}	Scheitel 8.749,42	Kämpfer 8.526,72	Sohle 8.749,42	mm ³ /mm
$ \sigma_{M,E} = \frac{M_E}{W_{id}}$					
Biegespannungsanteil aus Biegemomenten	$\sigma_{M,E}$	2,9977	3,2113	4,4854	N/mm ²
Spannungsanteil aus Normalkräften	$\sigma_{N,E}$	-0,0235	-0,4363	-0,2371	N/mm ²
$f_{t,fl} = \sigma_{M,E} + \sigma_{N,E}$					
Maßgebliche Biegezugspannung	$f_{t,fl}$	2,9742	2,7750	4,2483	N/mm ²
Spannungsverhältnis	σ_N / σ_M	-0,0078	-0,1359	-0,0529	[-]
Profilhöhe	h	220,00	220,00	220,00	mm

Beiwert nach DIN V 1201, Bild 9
 f_R , Scheitel



Beiwert nach DIN V 1201, Bild 9	f_R	1,13	1,01	1,09	[-]
$\sigma_{VR} = f_R \cdot f_{t,fl}$					
Rohrvergleichsspannung unter Risskraft im Zustand I	σ_{VR}	3,36	2,81	4,63	N/mm ²
Mittlere Zugfestigkeit:			f_{ctm}	4,1	N/mm ²
$\max \sigma_{VR} = \min: 6 \text{ N/mm}^2; \frac{f_{ctm}}{3,50} \cdot 6$					
Maximale Rohrvergleichsspannung nach DIN V 1201:			$\max \sigma_{VR}$	6,0	N/mm ²
$U \sigma_{VR} = \frac{\sigma_{VR}}{\max \sigma_{VR}}$					

Ausnutzung Rohrvergleichsspannung	$U \sigma_{VR}$	56,0	46,8	77,1	%
-----------------------------------	-----------------	------	------	------	---

Der Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ist erbracht.

3.2.7.8 Ermittlung der Lastklasse (DIN V 1201:2004-08 4.3.5)

Maximale Rohrvergleichsspannung nach DIN V 1201:	$\max \sigma_{VR}$	6,0	N/mm ²
Inneres Widerstandsmoment:	W_i	8.066,67	mm ³ /mm
Abminderungsbeiwert für Langzeitwirkung:	$\alpha_{c,F}$	0,90	[-]
Beiwert nach DIN V 1201, Bild 9:	f_R	1,13	[-]
Mittlerer Radius:	r_m	910,00	mm
Gewichtskraft des Rohrs:	G_p	31,45	kN/m
$F_c = 1/0,3 \cdot \left\{ \frac{\max \sigma_{VR} \cdot W_i}{\alpha_{c,F} \cdot f_R \cdot r_m} - 0,07 G_p \right\}$			
Risskraft (Ergänzung Mindestdruckkraft):	F_c	166,95	kN/m

bedeutet, dass Rohre dieser Nennweiten und Lastklassen im Regelfall nicht hergestellt werden. Zum Einsatz kommen Rohre mit höherer Tragfähigkeit (Lastklasse).

3.2.8 Nachweis gegen Ermüden unter nicht vorwiegend ruhender Belastung

$$\text{dyn } p_T = p_T \cdot \alpha_T$$

Vertikale dynamisch relevante Bodenspannung in Scheitelhöhe: $\text{dyn } p_T$ 2,40 kN/m²
 Horizontale Bodenspannung infolge Verkehrslast für Ermüdungsnachweis: $p_{Th,E}$ 0,84 kN/m²

$$\text{dyn } p_{Th} = p_{Th,E} \cdot \alpha_T \quad (80b)$$

Anzusetzender seitlicher Erddruck aufgrund Verkehrslast: $\text{dyn } p_{Th}$ 0,8 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	
$\text{dyn } N_{pTv} = n_{pT} \cdot \text{dyn } p_T \cdot r_m$					(81)

Normalkraft aus vertikaler Verkehrslast $\text{dyn } N_{pTv}$ 0,170 -2,184 -0,740 kN/m

$$\text{dyn } N_{pTh} = n_{pTh} \cdot \text{dyn } p_{Th} \cdot r_m \quad (81)$$

Normalkraft aus seitlicher Verkehrslast $\text{dyn } N_{pTh}$ -0,759 0,000 -0,660 kN/m
 Summe der Normalkräfte aus Verkehr $\text{dyn } \Sigma N$ -0,589 -2,184 -1,401 kN/m

$$\text{dyn } M_{pTv} = m_{pT} \cdot \text{dyn } p_T \cdot r_m^2 \quad (82)$$

Moment aus vertikaler Verkehrslast $\text{dyn } M_{pTv}$ 0,566 -0,580 0,733 kNm/m

$$\text{dyn } M_{pTh} = m_{pTh} \cdot \text{dyn } p_{Th} \cdot r_m^2 \quad (82)$$

Moment aus seitlicher Verkehrslast $\text{dyn } M_{pTh}$ -0,172 0,172 -0,168 kNm/m
 Summe der Momente aus Verkehr $\text{dyn } \Sigma M$ 0,394 -0,408 0,565 kNm/m

Teilsicherheitsbeiwert für Bauteilwiderstand quer zur Rohrachse: $\gamma_{M,rad}$ 1,50 [-]

3.2.9 Vereinfachter Nachweis gegen Ermüden nach DIN EN 1992-1-1, 6.8.7

Teilsicherheitsbeiwert dynamische Einwirkung: $\gamma_{Ed,fat}$ 1,00 [-]

Teilsicherheitsbeiwert Tragwiderstand Stahl: $\gamma_{s,fat}$ 1,15 [-]

Beiwert nach DIN 1055-100, Tabelle A.2: ψ_1 1,00 [-]

Elastizitätsmodul Betonstahl: E_s 200.000 N/mm²

Mittlerer E-Modul (Sekantenmodul): E_{cm} 37.278 N/mm²

$$n = \frac{E_s}{E_{cm}}$$

Verhältnis E-Modul Stahl zu E-Modul Beton: n 5,37 [-]

Querschnittsbreite: b 1,00 m

Schwingbreite für 2·10⁶ Zyklen: $\Delta\sigma_{Rsk}(N^*)$ 74,00 N/mm²

Modifizierte Betondruckfestigkeit: $f_{cd,fat}$ 22,67 N/mm²

$$f_{cd,fat} = \beta_{cc}(t_0) \cdot f_{cd} \cdot (1 - f_{ck}/250); \beta_{cc}(t=28\text{Tage}) = 1,0$$

Moment aufgrund ständiger Lasten M_G Scheitel 25,834 Kämpfer -26,974 Sohle 38,679 kNm/m

Normalkraft aufgrund ständiger Lasten N_G -5,337 -107,778 -58,366 kN/m

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-74

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

Auf die Zugbewehrung bezogenes Moment M_{Gs} 26,091 31,177 41,481 kNm/m
aufgrund ständiger Lasten

$$M'_{Gs,min} = M_{Gs} \cdot \gamma_{Ed,fat}$$

Bemessungsmoment, ständig $M'_{Gs,min}$ 26,091 31,177 41,481 kNm/m

Hebelarm innere Ringbewehrung z_i 48,0 39,0 48,0 mm

Moment für Ermüdungsnachweis $M_{Q,dyn}$ 0,394 -0,408 0,565 kNm/m

Normalkraft für Ermüdungsnachweis $N_{Q,dyn}$ -0,589 -2,184 -1,401 kN/m

Auf die Zugbewehrung bezogenes Moment $M_{Qs,dyn}$ 0,422 0,493 0,632 kNm/m
aufgrund dynamischer Lasten

$$M'_{Qs,dyn} = M_{Qs,dyn} \cdot \psi_1 \cdot \gamma_{Ed,fat}$$

Bemessungsmoment, dynamisch $M'_{Qs,dyn}$ 0,422 0,493 0,632 kNm/m

3.2.9.1 Nachweis der geschweißten Bewehrungskörbe

Statische Höhe d 0,158 0,149 0,158 m

$$x = \left(\frac{n \cdot a_s}{b} \right) \cdot \left[-1 + \left(1 + \frac{2 \cdot b \cdot d}{n \cdot a_s} \right)^{0,5} \right]$$

Höhe der Betondruckzone x 0,040 0,033 0,040 m

Höhe der Zugzone $d-x$ 0,118 0,116 0,118 m

$$z = d - \frac{x}{3}$$

Innerer Hebelarm z 0,145 0,138 0,145 m

$$\sigma_{c,dyn} = \frac{2 \cdot M'_{Qs,dyn}}{x \cdot z \cdot b}$$

Betonspannung $\sigma_{c,dyn}$ 0,147 0,214 0,221 N/mm²

$$\sigma_{s,dyn} = \left(\frac{1}{\text{vorh. } a_s} \right) \cdot \left(\frac{M'_{Qs,dyn}}{z} + N_{Q,dyn} \right)$$

Spannung in der Zugbewehrung $\sigma_{s,dyn}$ 1,890 1,541 2,409 N/mm²

$$\sigma_{s,dyn,kon} = n \cdot \sigma_{c,dyn} \cdot \frac{d-x}{x} + \frac{N_{Q,dyn}}{\text{vorh } a_{s,i}}$$

Kontrolle $\sigma_{s,dyn,kon}$ 1,890 1,541 2,409 N/mm²

$$\Delta \sigma_{s,eq} = \sigma_{s,dyn} \cdot \gamma_{Ed,fat}$$

Ermittelter Wert $\Delta \sigma_{s,eq}$ 1,890 1,541 2,409 N/mm²

Maximalwert (abgeminderte Schwingbreite) $\Delta \sigma_{Rsk}/\gamma_{s,fat}$ 64,348 64,348 64,348 N/mm²

Vorhandene Bewehrung $\text{vorh. } a_s$ 12,32 9,05 12,32 cm²/m

Erforderliche Bewehrung aus Ermüden $\text{erf. } a_s$ 0,36 0,22 0,46 cm²/m

Ausnutzung Ermüden Stahl $U \sigma_{s,dyn}$ 2,9 2,4 3,7 %

Der Nachweis gegen Ermüden der Bewehrung ist erbracht.

3.2.9.2 Nachweis Beton in der Druckzone

$$M'_{Ed,dyn} = M'_{Qs,dyn} + M'_{Gs,min}$$

Bemessungsmoment, ständig+dynamisch $M'_{Ed,dyn}$ 26,513 31,670 42,113 kNm/m

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite:
D-75

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

$\sigma'_{c,max} = \sigma_{c,dyn} \cdot \frac{M'_{Ed,dyn}}{M'_{Qs,dyn}}$					
Maximale Betondruckspannung	$\sigma'_{c,max}$	9,256	13,722	14,702	N/mm ²
$\sigma'_{c,min} = \sigma_{c,dyn} \cdot \frac{M'_{Gs,min}}{M'_{Qs,dyn}}$					
Minimale Betondruckspannung	$\sigma'_{c,min}$	9,108	13,509	14,481	N/mm ²
$U_{\sigma'_{c,max,eff}} = \frac{\sigma'_{c,max}}{f_{cd,fat}}$					DIN EN 1992-1-1 Gl. (6.77)
Ausnutzung bei maximaler Betondruckspannung	$U_{\sigma'_{c,max,eff}}$	0,408	0,605	0,649	[-]
$U_{\sigma_{s,max,dyn}} = \frac{U_{\sigma'_{c,max,eff}}}{U_{\sigma'_{c,min,eff}}}$					
Ausnutzung Ermüden maximale Spannung	$U_{\sigma_{s,max,dyn}}$	60,0	78,8	82,4	%
$U_{\sigma'_{c,min,eff}} = 0,50 + 0,45 \cdot \frac{\sigma'_{c,min}}{f_{cd,fat}}$					DIN EN 1992-1-1 Gl. (6.77)
Ausnutzung bei minimaler Betondruckspannung	$U_{\sigma'_{c,min,eff}}$	0,681	0,768	0,787	[-]
$U_{\sigma_{s,min,dyn}} = \frac{U_{\sigma'_{c,min,eff}}}{0,90}$					
Ausnutzung Ermüden minimale Spannung	$U_{\sigma_{s,min,dyn}}$	75,6	85,4	87,5	%
$U_{\sigma'_{c,max,eff}} \leq U_{\sigma'_{c,min,eff}} \leq 0,9$					DIN EN 1992-1-1 Gl. (6.77)
Ausnutzung Ermüden Beton	$U_{\sigma_{c,dyn}}$	75,6	85,4	87,5	%

Der Nachweis gegen Ermüden des Betons ist erbracht.

Alle notwendigen Nachweise sind erbracht.

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite:
D-76

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

4 Vortriebsrohr nach DWA-A 161, 2. Auflage: QP 4

Folgende Korrekturen des Arbeitsblatts DWA-A 161 berücksichtigt das Rechenmodul: DWA-A 161 04/2017, DWA-A 161 10/2017, TM 4-2019 der DB Netz AG, DWA-A 161 10/2020, DWA-A 127-10:2020-10, DWA-A 161 03/2021

Zulässige Vorpresskraft: F_j 4.824 kN

Titel der Berechnung: QP 4

Annahmen: Überdeckung 9 m
Bahn - äußerer Druckbereich
Kurve R = 400 m

Berechnungsart: Stahlbeton
Nachzuweisende Zustände: Bau- und Betriebszustand
Einbauskizze in Ausdruck: Ja
Mindestschnittgrößen im Betriebszustand drucken: Ja

4.1 Eingaben

4.1.1 Vortriebsverfahren

Verfahren: Mikrotunnel und bemannte Verfahren
Vollständige dauerhafte Ringraumverpressung: Ja
Druck beim Verpressen des Überschnitts: p_D 1,5 bar
Einsatz von Stütz- oder Gleitmittel: Ja
Stütz- oder Gleitmitteldruck: p_{Stm} 1,0 bar
Ringspalt: Ringspalt $\leq 1,0$ cm bezogen auf den Radius, nicht systematisch gestützt

4.1.2 Trasse und Vortriebskraft

Verlauf der Vortriebsstrecke: Eine Kurve
Planmäßiger Krümmungsradius: R_{plan} 440,00 m
Berechnung der unplanmäßigen Abweichungen von der Sollachse: Trassierung mit Übergangsbögen
Kombinationsbeiwert für Rohrabwinklungen: ψ 0,80 [-]
Vorgabe der Vortriebskraft: Ja
Vorgegebene Vortriebskraft: $F_{j,m}$ 4.820,0 kN
Freie Eingabe der Sicherheit für Längsrichtung: Nein
Kontrollierter Einbau: Nein

4.1.3 Druckübertragungsring (DÜR)

Art der Druckübertragung: Mit Druckübertragungsring
Art der Bemessung: Vorbemessung
Anzahl der Schichten im DÜR: Zwei Schichten
Angabe der Durchmesser des DÜR: Angabe der Randabstände
Äußerer Randabstand bezogen auf tRohr: $a_{a,DÜR}$ 45 mm
Innerer Randabstand bezogen auf tRohr: $a_{i,DÜR}$ 35 mm
Schichtdicke: s_{D1} 22,00 mm
Ermittlung Ecal der Schicht: Ermittlung über Material aus Norm
Material: OSB-Platte (OSB/3. OSB/4)

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-77

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

Manuelle Angabe der Steifigkeit:

Nein

4.1.4 Bodenkennwerte

Bodenbeschaffenheit:

Teils Fels, teils Lockergestein

Bodengruppe am Rohr:

G4

Andere Bodengruppe oberhalb Rohrscheitel:

Nein

Eingabe des Seitendruckwertes über:

Reibungswinkel Lockerboden (ϕ')

Verformungsmodul des Felses:

 E_F 50,0 N/mm²

Auflagerwinkel (Festgestein, Bauzustand):

90°

Auflagerwinkel (Festgestein, Betriebszustand):

60°

Manuelle Angabe des inneren Reibungswinkel des Bodens:

Nein

Manuelle Angabe der Wichte des Bodens:

Nein

4.1.5 Bodenverhalten

Anwendung von Silotheorie:

Automatisch

Manuelle Angabe k und k_0 :

Nein

Manuelle Angabe von f_1 , K_1 , δ und c :

Nein

Konsistenz am Rohr:

Halbfest

Berücksichtigung des Konzentrationsfaktors λ :

Nein

4.1.6 Lasten

Überdeckungshöhe:

 h 9,0 m

Zusätzliche Flächenlast:

 P_0 0,00 kN/m²

Teilsicherheitsbeiwert Wasseraußendruck:

 $\gamma_{F,W}$ 1,35 [-]

Grundwasserstand über Sohle:

 h_{GW} 2,0 m

Auftriebsnachweis führen:

Nein

Innendruck (Bauzustand):

 $P_{I,C}$ 0,3 bar

Innendruck (Betriebszustand):

 $P_{I,O}$ 0,3 bar

Teilsicherheitsbeiwert Innendruck manuell setzen:

Nein

Rohr ist während des Vortriebs mit Flüssigkeit gefüllt:

Nein

Rohr ist im Betrieb mit Flüssigkeit gefüllt:

Ja

Wichte des Füllmediums:

 γ_{WF} 10,0 kN/m³

Freie Eingabe Sicherheitsbeiwert für Verkehrslasten:

Nein

Verkehrslast:

Bahn LM 71 - Äußerer Druckbereich

Abminderungsfaktor dynamische Last manuell eingeben:

Ja

Abminderungsfaktor dynamische Last:

 α_T 1,00 [-]

4.1.7 Berechnungsoptionen

Beulnachweis:

Nicht führen

Verformungsnachweis:

Führen

Zulässige Verformung nach A161:

Ja

Ermüdungsnachweis:

Nach Regelwerk

Behandlung Mindestschnittgrößen:

Nach Norm

Vergleichsspannung Mindestschnittgrößen:

Mit Bemessungswerten

4.1.8 Stahlbeton-Rohr

Auswahl der Eingaben:

 D_i und s

Innendurchmesser:

 d_i 1.600 mm

Wandstärke:

 s 220 mm

Betongüte:

C50/60

Längsdruckfestigkeit nach:

DWA-A 161:2014, korrigierte Fassung vom September 2020

Betonstahl nach Norm:

Ja

Nachweis der Rissbreite:

Nein

Manuelle Vorgabe max f_R :

Nein

Lastklasse ermitteln:

Ja

Lastwechsel-Zahl manuell:

Nein

Verhältnis E-Moduli manuell:

Nein

Rohrlänge:

 L_R 3,00 m

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite:
D-78

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

4.2 Ergebnisse

4.2.1 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	[-]

4.2.2 Zwischenergebnisse Rohr

Innendurchmesser:	d _i	1.600,0	mm
Außendurchmesser:	d _a	2.040,0	mm
Mittlerer Radius:	r _m	910,00	mm
Wanddicke:	s	220,00	mm
Verhältnis Radius zu Wanddicke:	r _m /s	4,136	[-]

$$\alpha_{ki} = 1 + \frac{s}{3 \cdot r_m} \quad A 127 (8.14a)$$

Korrekturfaktor Krümmung innen:	α_{ki}	1,081	[-]
---------------------------------	---------------	-------	-----

$$\alpha_{ka} = 1 - \frac{s}{3 \cdot r_m} \quad A 127 (8.14b)$$

Korrekturfaktor Krümmung außen:	α_{ka}	0,919	[-]
---------------------------------	---------------	-------	-----

Lokale Vorverformung:	$\delta_{v, l}$	0,00	%
Vorverformung (Ovalisierung vor Last):	$\delta_{v, A}$	0,00	%

Axial wirksame Profilfläche:	A _{ax}	220,00	mm ² /mm
Radiale Profilfläche:	A _{rad}	220,00	mm ² /mm
Trägheitsabstand:	e	110,00	mm
Trägheitsmoment:	I	887.333,33	mm ⁴ /mm
Äußeres Widerstandsmoment:	W _a	8.066,67	mm ³ /mm
Inneres Widerstandsmoment:	W _i	8.066,67	mm ³ /mm
Flächenverhältnis:	K _Q	1,2	[-]

Kleinsten Außendurchmesser:	d _{a, min}	2.040	mm
Größter Innendurchmesser:	d _{i, max}	1.600	mm
Max. Abweichung Stirnflächen von Rechtwinkligkeit:	$\Delta_{a, cal}$	8,0	mm
Länge des einzelnen Vortriebsrohres:	L _R	3,00	m

4.2.2.1 Materialeigenschaften

Wichte des Rohrwerkstoffs:	Y _R	25,0	kN/m ³
Querkontraktionszahl:	v	0,15	[-]
Charakteristische Zylinderdruckfestigkeit:	f _{ck, cyl}	50,0	N/mm ²
Charakteristische Würfeldruckfestigkeit:	f _{ck, cube}	60,0	N/mm ²

$$f_{cm} = f_{ck, cyl} + 8$$

Druckfestigkeit:	f _{cm}	58,0	N/mm ²
Mittlere Zugfestigkeit:	f _{ctm}	4,1	N/mm ²

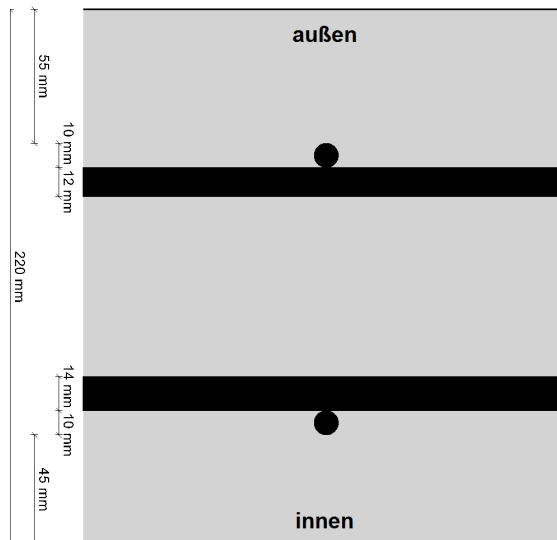
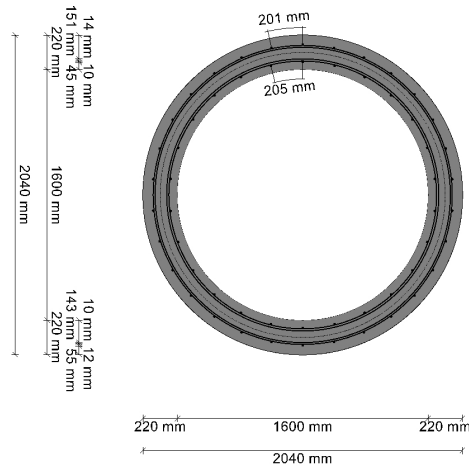
$$E_{cm} = 22 \cdot \frac{f_{cm}^{0,30}}{10} \cdot 100 \cdot 100 \cdot 100 \cdot 1.000$$

Mittlerer E-Modul (Sekantenmodul):	E _{cm}	37.278	N/mm ²
Längsdruckfestigkeit:	f _{c, ax}	50,0	N/mm ²

nach DWA-A 161 Tabelle 6) angesetzt.

Teilsicherheitsbeiwert für Bauteilwiderstand längs der Rohrachse:	YM,ax	1,35	[-]
Teilsicherheitsbeiwert für Bauteilwiderstand quer zur Rohrachse:	YM,rad	1,50	[-]
Teilsicherheitsbeiwert für Bauteilwiderstand auf Stabilität:	YM,stab	1,85	[-]
Teilsicherheitsbeiwert für Bauteilwiderstand auf Stabilität bei Berücksichtigung der Rohrverformungen:	YM,stab,red	1,45	[-]
Teilsicherheitsbeiwert Tragwiderstand Beton:	YRC	1,50	[-]
Teilsicherheitsbeiwert Tragwiderstand Stahl:	YRS	1,15	[-]

4.2.2.3 Stahlbetonrohr



Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-82

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

$$z_i = \frac{h}{2} - c_{nom,i} - \varnothing_{ax,i} - \frac{\varnothing_{rad,i}}{2}$$

Hebelarm innere Ringbewehrung z_i 48,0 48,0 48,0 mm

$$z_e = \frac{h}{2} - c_{nom,e} - \varnothing_{ax,e} - \frac{\varnothing_{rad,e}}{2}$$

Hebelarm äußere Ringbewehrung z_e 39,0 39,0 39,0 mm

$$d_{iK} = \frac{h}{2} + z_i$$

Statische Höhe innerer Bewehrungskorb d_{iK} 158,0 158,0 158,0 mm

$$d_{eK} = \frac{h}{2} + z_e$$

Statische Höhe äußerer Bewehrungskorb d_{eK} 149,0 149,0 149,0 mm

Verhältnis E-Modul Stahl zu E-Modul Beton nach DIN V 1201:2004-08: n 15,0 [-]

$$z_{id} = \frac{z_i \cdot n \cdot \text{vorh } a_{S,i} - z_e \cdot n \cdot \text{vorh } a_{S,e}}{A_{id}}$$

z_{id} 1,4 1,4 1,4 mm

$$A_{id} = h + 15 \cdot \text{vorh } a_{S,i} + n \cdot \text{vorh } a_{S,e}$$

Ideelle Querschnittsfläche A_{id} 2.520,44 2.520,44 2.520,44 cm²/m

$$I_{id} = \frac{h^3}{12} + h \cdot z_{id}^2 + n \cdot \text{vorh } a_{S,i} \cdot z_i - z_{id}^2 + n \cdot \text{vorh } a_{S,e} \cdot z_e + z_{id}^2$$

Ideeles Trägheitsmoment I_{id} 950.029,9 950.029,9 950.029,9 mm⁴/mm

$$W_{id,a} = \frac{I_{id}}{\frac{h}{2} + z_{id}}$$

Ideeles Widerstandsmoment, außen $W_{id,a}$ 8.526,72 8.526,72 8.526,72 mm³/mm

$$W_{id,i} = \frac{I_{id}}{\frac{h}{2} - z_{id}}$$

Ideeles Widerstandsmoment, innen $W_{id,i}$ 8.749,42 8.749,42 8.749,42 mm³/mm

Nennmaß der Betondeckung innen $c_{nom,i}$ 45,0 45,0 45,0 mm

Nennmaß der Betondeckung außen $c_{nom,e}$ 55,0 55,0 55,0 mm

4.2.3 Nicht lastabhängige Nachweise, Stahlbeton

4.2.3.1 Mindestbetongüte infolge der gewählten Expositionsklasse

Mindestbetongüte, Außen: C25/30

Mindestbetongüte, Innen: C25/30

Betonqualität: C50/60

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-83

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

4.2.3.2 Überprüfung der Mindestwanddicke (DIN V 1201:2004-08 5.3.5.2)

Betongüte: C50/60
 Mindestwert für Wandicken/Radius-Verhältnis: min. t/r_m 0,16 [-]
 Innendurchmesser: d_i 1.600,0 mm

$$\min. t = \frac{\min. t/r_m}{2 - \min. t/r_m} \cdot d_i$$

Berechnete Mindestwanddicke: min. t 139,1 mm

Die Mindestwanddicke nach DIN V 1201:2004-08, 5.3.5.2 wird eingehalten bzw. übertroffen.

4.2.3.3 Überprüfung der Mindestbewehrung (DIN V 1201:2004-08 5.3.7)

Vorhandene Ringbewehrung innen: vorh. $a_{sring,i}$ 12,32 cm²/m
 min. $a_{s,i} = 0,004 \cdot \min. t$ DIN V 1201 5.3.7

Mindest-Ringbewehrung innen DIN V 1201, 5.3.7: min. $a_{s,i}$ 5,57 cm²/m

Vorhandene Ringbewehrung außen: vorh. $a_{sring,e}$ 9,05 cm²/m

min. $a_{s,e} = 0,003 \cdot \min. t$ DIN V 1201 5.3.7

Mindest-Ringbewehrung außen DIN V 1201, 5.3.7: min. $a_{s,e}$ 4,17 cm²/m

Vorhandene Bewehrung	vorh. a_s	Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Mindestbewehrung	min. a_s	12,32	9,05	12,32	cm ² /m
		5,57	4,17	5,57	cm ² /m

$$U \min. a_s = \frac{\min. a_s}{\text{vorh. } a_s}$$

Ausnutzung Bewehrung (Mindestbewehrung DIN) U min. a_s 45,2 46,1 45,2 %

Die Mindestbewehrung nach DIN V 1201:2004-08, 5.3.7 wird eingehalten bzw. übertroffen.

4.2.3.4 Überprüfung der äußeren Bewehrung (DIN V 1201:2004-08 5.2.6)

$$\text{vorh. } a_{sring,i} = \frac{\varnothing_{rad,i}^2}{2} \cdot \pi \cdot \frac{1}{e_i}$$

Vorhandene Ringbewehrung innen: vorh. $a_{sring,i}$ 12,32 cm²/m

$$a_{s,e,60\%i} = 0,60 \cdot \text{vorh. } a_{sring,i}$$

Erforderliche Ringbewehrung außen (DIN V 1201 5.2.6): $a_{s,e,60\%i}$ 7,39 cm²/m

Vorhandene Ringbewehrung außen: vorh. $a_{sring,e}$ 9,05 cm²/m

Vorhandene Ringbewehrung außen, Anteil (DIN V 1201 5.2.6): $a_{s,e/i\%}$ 73,47 %

4.2.3.5 Abstand und Anzahl der Längsstäbe (DIN V 1201:2004-08 5.2.1)

Maximaler Soll-Abstand Längsbewehrung: $e_{L,max}$ 250 mm

Anzahl der Längsstäbe innen: $n_{ax,i}$ 26 [-]

$$r_i = \frac{d_i}{2} + c_{nom,i} + \frac{\varnothing_{ax,i}}{2}$$

Angesetzter Radius innen: r_i 850 mm

$$U_{Li,vor} = 2 \cdot r_i \cdot \pi$$

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-84

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

Vorhandener Abstand Längsbewehrung: $e_{L,vor,i}$ 205 mm

$$vorh\ a_{S,L,i} = \frac{\varnothing_{ax,i}^2}{2} \cdot \pi \cdot \frac{1}{e_{L,vor,i}}$$

Vorhandene Längsbewehrung innerer Korb: $vorh\ a_{S,L,i}$ 3,82 cm²/m

Anzahl der Längsstäbe außen: $n_{ax,e}$ 30 [-]

$$r_e = \frac{d_a}{2} - 0,055 - \frac{\varnothing_{ax,e}}{2}$$

Angesetzter Radius außen, bezogen auf Kämpfer: r_e 960 mm

$$U_{Le,vor} = 2 \cdot r_e \cdot \pi$$

Vorhandener Umfang Längsbewehrung außen: $U_{Le,vor}$ 6.032 mm
Vorhandener Abstand Längsbewehrung: $e_{L,vor,e}$ 201 mm

$$vorh\ a_{S,L,e} = \frac{\varnothing_{ax,e}^2}{2} \cdot \pi \cdot \frac{1}{e_{L,vor,e}}$$

Vorhandene Längsbewehrung äußerer Korb: $vorh\ a_{S,L,e}$ 3,91 cm²/m

Bahnlast: Der Nachweis bzgl. 1/5 der Querbewehrung wird bei der Bemessung der Ringbewehrung geführt.

Der Abstand der Längsstäbe ist ausreichend klein.

4.2.3.6 Betondeckung (DIN V 1201:2004-08 5.2.2)

Es wird ein Vorhaltemaß von 10 mm angesetzt (Rohr nach DIN V 1201).

Die erforderliche Betonüberdeckung wurde um 5 mm reduziert gemäß Arbeitsblatt 6 des ISB: Gewählte Festigkeitsklasse ist min. zwei Klassen größer als die Mindestbetonfestigkeitsklasse.

Die erforderliche Betonüberdeckung außen wurde um 5 mm erhöht (Vortriebsrohr).

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Erf. Betondeckung außen	erf. $c_{nom,e}$	35,0	35,0	35,0	mm
Nennmaß der Betondeckung außen	$c_{nom,e}$	55,0	55,0	55,0	mm

Die Betondeckung (außen) ist ausreichend.

Die erforderliche Betonüberdeckung wurde um 5 mm reduziert gemäß Arbeitsblatt 6 des ISB: Gewählte Festigkeitsklasse ist min. zwei Klassen größer als die Mindestbetonfestigkeitsklasse.

Erf. Betondeckung innen	erf. $c_{nom,i}$	30,0	30,0	30,0	mm
Nennmaß der Betondeckung innen	$c_{nom,i}$	45,0	45,0	45,0	mm

Die Betondeckung (innen) ist ausreichend.

4.2.3.7 Bemessung mit Mindestschnittgröße

$$f_{t,fl,d} = \frac{f_{t,fl}}{Y_{M,rad}}$$

Maximal zulässige Ringbiegezugspannung: $f_{t,fl,d}$ 4,0 N/mm²

$$f_{c,rad,d} = \frac{f_{c,rad}}{Y_{M,rad}}$$

Maximal zulässige Ringbiegedruckspannung: $f_{c,rad,d}$ 33,3 N/mm²

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-85

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

		Scheitel 45·m ² ·kmin (47a) 37,678	Kämpfer -45·m ² ·kmin (47b) -37,678	Sohle 45·m ² ·kmin (47c) 37,678	kNm/m
Bemessungsmoment für Mindestbemessung	M _{d,min}				
		-135·m·kmin (48a) -124,213	-270·m·kmin (48b) -248,426	-135·m·kmin (48c) -124,213	kN/m
Bemessungsnormalkraft für Mindestbemessung	N _{d,min}				
<i>Ringbewehrung</i>					
Hebelarm innere Ringbewehrung	z _i	48,0	39,0	48,0	mm
$M_{Ed,s,min} = M_{d,min} - z_i \cdot N_{d,min}$					
Auslegungsmoment	M _{Ed,s,min}	43,640	47,366	43,640	kNm/m
$\mu_{Ed,s} = M_{Ed,s,min} / (d^2 \cdot f_{cd})$					
Normiertes Auslegungsmoment	μ _{Ed,s}	0,0617	0,0753	0,0617	[-]
Erforderlicher mechanischer Bewehrungsgrad	ω _{min}	0,0639	0,0785	0,0639	[-]
Statische Höhe	d	0,158	0,149	0,158	m
$\sigma_{s,d,min} = f_{yd}$					
Rechenwert der Stahlgrenzspannung	σ _{s,d,min}	434,78	434,78	434,78	N/mm ²
$a_{s,calc,min} = \frac{\omega_{min} \cdot 1 \cdot d \cdot f_{cd} + N_{d,min}}{\sigma_{s,d,min}}$					
Rechnerisch erforderliche Bewehrung	a _{s,calc,min}	3,72	1,91	3,72	cm ² /m
Vorhandene Bewehrung	vorh. a _s	12,32	9,05	12,32	cm ² /m
Ausnutzung Bewehrung	U a _{s,calc,min}	30,2	21,1	30,2	%

Die gewählte Bewehrung ist ausreichend.

Vergleichsspannung

		Scheitel 37,678	Kämpfer -37,678	Sohle 37,678	kNm/m
Anzunehmendes Moment	M _{d,min}				
Ideelles Widerstandsmoment, Zugseite	W _{id}	8.749,42	8.526,72	8.749,42	mm ³ /mm
$\sigma_{M,E,min} = \frac{ M_{d,min} }{W_{id}}$					
Biegespannungsanteil aus Biegemomenten	σ _{M,E,min}	4,3063	4,4188	4,3063	N/mm ²
Anzunehmende Normalkraft	N _{d,min}	-124,213	-248,426	-124,213	kN/m
Ideelle Querschnittsfläche	A _{id}	2.520,44	2.520,44	2.520,44	cm ² /m
$\sigma_{N,E,min} = \frac{N_{d,min}}{A_{id}}$					
Spannungsanteil aus Normalkräften	σ _{N,E,min}	-0,4928	-0,9856	-0,4928	N/mm ²
$f_{t,fl,min} = \sigma_{M,E,min} + \sigma_{N,E,min}$					
Maßgebliche Biegezugspannung	f _{t,fl,min}	3,8135	3,4332	3,8135	N/mm ²
Spannungsverhältnis	σ _{N,E,min} /σ _{M,E,min}	-0,1144	-0,2231	-0,1144	[-]
Profilhöhe	h	220,00	220,00	220,00	mm
Beiwert nach DIN V 1201, Bild 9	f _{R,min}	1,03	0,94	1,03	[-]
$\sigma_{VR,min} = f_{R,min} \cdot f_{t,fl,min}$					

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-86

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

$$\max \sigma_{VR} = \min: 6 \text{ N/mm}^2; \frac{f_{ctm}}{3,50} \cdot 6$$

Maximale Rohrvergleichsspannung nach DIN V 1201:					
Ausnutzung Rohrvergleichsspannung (Mindestbemessung)	U $\sigma_{VR,min}$	65,6	max σ_{VR}	6,0	N/mm ²
			53,6	65,6	%

Der Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ist erbracht.

4.2.4 Zwischenergebnisse Boden

Wichte des Bodens:	γ_B	20,0	kN/m ³
Wichte des Bodens unter Auftrieb:	γ'_B	10,0	kN/m ³
Rechenwert des Verformungsmodul EF:	E_F	50,00	N/mm ²
Auflockerungsfaktor nach A161, Tabelle 15:	$f_{2,F,Bau}$	0,10	[-]
Auflockerungsfaktor nach A161, Tabelle 15:	$f_{2,F,Betrieb}$	0,20	[-]
Innerer Reibungswinkel über Rohrscheitel:	φ'_1	15,0	°
Spannungsexponent:	z	0,7	[-]

$$\delta/\varphi'_1 = \frac{\delta}{\varphi'_1}$$

Verhältnis Reibungswinkel Scherfuge / Innerer Reibungswinkel:	δ/φ'_1	1,00	[-]
Reibungswinkel in der Scherfuge:	δ	15,00	°
Erddruckverhältnis über Rohrscheitel:	K_1	0,80	[-]

$$b = d_a \cdot \sqrt{3} \quad (7)$$

Einflußbreite des Bodens über dem Rohr:	b	3,53	m
---	-----	------	---

$$\kappa = \frac{1 - e^{\left(-2 \cdot \frac{h}{b} \cdot K_1 \cdot \tan \delta\right)}}{2 \cdot \frac{h}{b} \cdot K_1 \cdot \tan \delta} \quad (8)$$

Abminderungsfaktor Erdlast:	κ	0,608	[-]
-----------------------------	----------	-------	-----

$$\kappa_0 = e^{\left(-2 \cdot \frac{h}{b} \cdot K_1 \cdot \tan \delta\right)} \quad (9)$$

Abminderungsfaktor Flächenlast:	κ_0	0,336	[-]
Hinweis zur Silotheorie:	Die Silotheorie kann angewendet werden.		
Berücksichtigung des Konzentrationsfaktors λF notwendig:	Ja		
Konzentrationsfaktor:	λ	1,000	[-]
Basis-Erddruckverhältnis unter Rohrscheitel:	$K_{2,0}$	0,74	[-]

$$K_{2,Bau} = K_{2,0} \cdot f_{2,F,Bau} \leq K_{2,0} \leq 0,4 \quad (4)$$

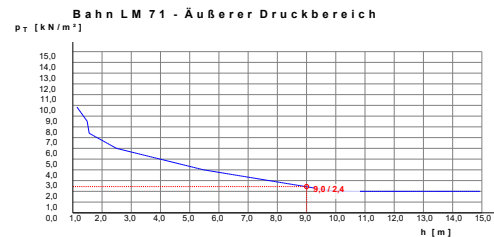
Erddruckverhältnis unter Rohrscheitel, Bauzustand:	$K_{2,Bau}$	0,07	[-]
--	-------------	------	-----

$$K_{2,End} = K_{2,0} \cdot f_{2,F,Betrieb} + 0,2 \leq K_{2,0} \leq 0,5 \quad (4)$$

Erddruckverhältnis unter Rohrscheitel, Endzustand:	$K_{2,End}$	0,35	[-]
--	-------------	------	-----

4.2.5 Bauzustand

4.2.5.1 Belastungen Bauzustand



$$\Phi_2 = \frac{1,44}{\sqrt{LF - 0,2}} + 0,82 \quad (21)$$

$$1,0 \leq \Phi_2 \leq 1,67 \quad (21)$$

Stoßbeiwert:

$$\Phi_2 \quad 1,67 \quad [-]$$

$$\text{red } \Phi_2 = \Phi_2 - 0,1 \cdot (h_{\text{ü}} - 1,0) \geq 1 \quad (22)$$

Stoßbeiwert reduziert:

$$\text{red } \Phi_2 \quad 1,00 \quad [-]$$

Anpassungsfaktor α_{Qi} LM71 (DIN EN 1991-2):

$$\alpha_{Qi, LM71} \quad 1,20 \quad [-]$$

Einfache Bodenspannung aus Verkehr:

$$p \quad 2,44 \quad \text{kN/m}^2$$

$$p_T = \text{red } \Phi_2 \cdot p \cdot \alpha_{Qi, LM71} \quad A \ 161 \ (23a)$$

Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Scheitelhöhe:

$$p_T \quad 2,93 \quad \text{kN/m}^2$$

Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Kämpferhöhe (ohne ϕ):
Erddruckverhältnis unter Rohrscheitel:

$$p_K \quad 2,00 \quad \text{kN/m}^2$$

$$K_2 \quad 0,07 \quad [-]$$

$$p_{T,h} = (0,50 \cdot (\text{red } \Phi_2 - 1) + 1) \cdot p_K \cdot K_2 \cdot \alpha_{Qi, LM71} \quad A \ 161 \ (23b)$$

Horizontale Bodenspannung aus Verkehr:

$$p_{T,h} \quad 0,18 \quad \text{kN/m}^2$$

$$p_{Ev} = \kappa \cdot \gamma_B \cdot (h - h_{GW} + d_a) + \kappa \cdot \gamma'_B \cdot (h_{GW} - d_a) + \kappa_0 \cdot p_0 \quad (5b)$$

Vertikale Bodenspannung in Rohrscheitelebene:

$$p_{Ev} \quad 109,525 \quad \text{kN/m}^2$$

Wirksame vertikale Bodenspannung in Rohrscheitelebene:

$$q_{Ev} \quad 109,525 \quad \text{kN/m}^2$$

$$q_{\text{Ges},v} = q_0 + p_T \quad (53)$$

Vertikale Gesamt-Bodenspannung in Rohrscheitelebene:

$$q_{\text{Ges},v} \quad 161,351 \quad \text{kN/m}^2$$

Die Erddruckverteilung am Rohr wird $\cos^2$ - bzw. $\sin^2$ -förmig angenommen.:

$$\text{Ja}$$

Grundwasserstand im Bereich der oberen Rohrhälfte:

$$h_{GW, oRh} \quad 2,000 \quad \text{m}$$

$$q_0 = \frac{3}{2 + K_2} \cdot q_{Ev} \quad (26)$$

Radiale Erdlast auf das Rohr während des Vortriebs:

$$q_0 \quad 158,417 \quad \text{kN/m}^2$$

$$q_{0,h} = \left(q_0 + \frac{\gamma'_B \cdot d_a}{2} \right) \cdot K_2 \quad (34a)$$

Horizontale Bodenspannung während des Vortriebs:

$$q_{0,h} \quad 12 \ 498 \quad \text{kN/m}^2$$

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-88

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

$$q_{\text{Ges,h}} = q_{0,h} + p_{\text{Th}} \quad (53)$$

Horizontale Gesamt-Bodenspannung am Rohr: $q_{\text{Ges,h}}$ 12,675 kN/m²

Innerer Überdruck: p_i 0,300 bar

Äußerer Überdruck über Rohrscheitel: $p_{a,Sc}$ 0,000 bar

Rohrsteifigkeit: S_R 43.895 kN/m²

Rohrsteifigkeit: $\bar{S}_R$ 43.895 kN/m²

Rechenwert des Verformungsmodul EF: E_F 50,00 N/mm²

Auflockerungsfaktor nach A161, Tabelle 15: $f_{2,F,Bau}$ 0,10 [-]

$$E_B = E_F \cdot f_{2,F,Bau} \quad (50)$$

Verformungsmodul Boden: E_B 5,00 N/mm²

Erddruckverhältnis unter Rohrscheitel: K_2 0,07 [-]

$$S_{Bh} = 0,60 \cdot E_B \quad (18)$$

Bettungssteifigkeit: S_{Bh} 3,00 N/mm²

$$V_{RB} = \frac{\bar{S}_R}{S_{Bh}} \quad (14)$$

Systemsteifigkeit: V_{RB} 14,6316 [-]

Das Rohr-Bodensystem verhält sich biegeweich: **Nein**

4.2.5.2 Schnittkräfte Bauzustand

Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkungen quer zur Rohrachse: γ_F 1,35 [-]

Teilsicherheitsbeiwert Wasseraußendruck: $\gamma_{F,W}$ 1,35 [-]

Mittlerer Radius: r_m 910,00 mm

Innerer Überdruck: p_i 0,300 bar

Äußerer Überdruck über Rohrscheitel: $p_{a,Sc}$ 0,000 bar

Radiale Erdlast auf das Rohr während des Vortriebs: q_0 158,417 kN/m²

Horizontale Bodenspannung während des Vortriebs: $q_{0,h}$ 12,498 kN/m²

Vertikale Bodenspannung infolge Verkehrslast: p_T 2,93 kN/m²

Horizontale Bodenspannung infolge Verkehrslast: p_{Th} 0,18 kN/m²

Vertikale Gesamt-Bodenspannung in Rohrscheitelebene: $q_{\text{Ges,v}}$ 161,351 kN/m²

Horizontale Gesamt-Bodenspannung am Rohr: $q_{\text{Ges,h}}$ 12,675 kN/m²

Momente: m_{q_0} Scheitel 0,269 Kämpfer -0,275 Sohle 0,292 [-]

$$M_{q_{0v,d}} = \gamma_F \cdot m_{q_0} \cdot q_0 \cdot r_m^2 \quad (24)$$

Vertikale Belastung aus Erdüberdeckung $M_{q_{0v,d}}$ 47,640 -48,703 51,713 kNm/m

m_{pT} 0,269 -0,275 0,292 [-]

$$M_{pTv,d} = \gamma_Q \cdot m_{pT} \cdot p_T \cdot r_m^2 \quad (29)$$

Vertikale Belastung aus Verkehr $M_{pTv,d}$ 0,882 -0,902 0,958 kNm/m

m_{pTh} -0,245 0,244 -0,224 [-]

$$M_{pTh,d} = \gamma_Q \cdot m_{pTh} \cdot p_{Th} \cdot r_m^2 \quad (31)$$

Horizontale Belastung aus Verkehr $M_{pTh,d}$ -0,049 0,049 -0,045 kNm/m

m_{qh} -0,245 0,244 -0,224 [-]

$$M_{qh,d} = \gamma_F \cdot m_{qh} \cdot q_{0,h} \cdot r_m^2 \quad (33)$$

Horizontale Belastung aus Erdüberdeckung $M_{qh,d}$ -3,423 3,409 -3,130 kNm/m

m_n 0,406 -0,471 0,573 [-]

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-89

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

$$M_{g,d} = \gamma_F \cdot m_g \cdot \gamma_R \cdot s \cdot r_m^2 \quad (37)$$

Eigengewicht	$M_{g,d}$	2,496	-2,896	3,523	kNm/m
	m_w	0,203	-0,235	0,286	[-]

$$M_{w,d} = \gamma_F \cdot m_w \cdot \gamma_W \cdot r_m^3 \quad (39)$$

Wasserfüllung bis Rohrscheitel	$M_{w,d}$	0,000	0,000	0,000	kNm/m
	m_a	-0,203	0,235	-0,286	[-]

$$M_{a,d} = \gamma_{F,W} \cdot m_a \cdot \gamma_W \cdot r_m^3 \quad (41)$$

Auftrieb (äußerer Wasserstand bis Scheitel)	$M_{a,d}$	0,000	0,000	0,000	kNm/m
---	-----------	-------	-------	-------	-------

$$M_{pw,d} = ((\gamma_F \cdot p_i) - (\gamma_{F,W} \cdot P_a)) \cdot r_i \cdot r_a \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{r_i \cdot r_a}{r_a^2 - r_i^2} \cdot \ln \cdot \frac{r_a}{r_i} \right) \quad (43)$$

Wasserdruck	$M_{pw,d}$	0,161	0,161	0,161	kNm/m
	m_{qh}^*	-0,181	0,208	-0,181	[-]

$$M_{qEh^*,d} = \gamma_F \cdot m_{qh}^* \cdot q_{Eh}^* \cdot r_m^2 \quad (45a)$$

Bettungsreaktionsdruck Erdlast	$M_{qEh^*,d}$	0,000	0,000	0,000	kNm/m
--------------------------------	---------------	-------	-------	-------	-------

$$M_{qTh^*,d} = \gamma_Q \cdot m_{qh}^* \cdot q_{Th}^* \cdot r_m^2 \quad (45b)$$

Bettungsreaktionsdruck Verkehr	$M_{qTh^*,d}$	0,000	0,000	0,000	kNm/m
--------------------------------	---------------	-------	-------	-------	-------

$$M_{qh^*,d} = M_{qTh^*,d} + M_{qEh^*,d}$$

Bettungsreaktionsdruck	$M_{qh^*,d}$	0,000	0,000	0,000	kNm/m
------------------------	--------------	-------	-------	-------	-------

Summe der Momente	ΣM_d	47,708	-48,881	53,181	kNm/m
-------------------	--------------	--------	---------	--------	-------

Summe Erd- und Verkehrslasten	$\Sigma M_{qv,qh,qh^*,d}$	45,050	-46,147	49,497	kNm/m
-------------------------------	---------------------------	--------	---------	--------	-------

Summe andere Lasten	$\Sigma M_{sonst,d}$	2,658	-2,735	3,685	kNm/m
---------------------	----------------------	-------	--------	-------	-------

Normalkräfte:	n_{qo}	Scheitel 0,044	Kämpfer -1,000	Sohle -0,433	[-]
---------------	----------	-------------------	-------------------	-----------------	-----

$$N_{q0v,d} = \gamma_F \cdot n_{qo} \cdot q_0 \cdot r_m \quad (25)$$

Vertikale Belastung aus Erdüberdeckung	$N_{q0v,d}$	8,563	-194,616	-84,269	kN/m
	n_{pT}	0,044	-1,000	-0,433	[-]

$$N_{pTv,d} = \gamma_Q \cdot n_{pT} \cdot p_T \cdot r_m \quad (30)$$

Vertikale Belastung aus Verkehr	$N_{pTv,d}$	0,159	-3,604	-1,560	kN/m
	n_{pTh}	-0,989	0,000	-0,718	[-]

$$N_{pTh,d} = \gamma_Q \cdot n_{pTh} \cdot p_{Th} \cdot r_m \quad (32)$$

Horizontale Belastung aus Verkehr	$N_{pTh,d}$	-0,216	0,000	-0,157	kN/m
	n_{qh}	-0,989	0,000	-0,718	[-]

$$N_{qh,d} = \gamma_F \cdot n_{qh} \cdot q_{0,h} \cdot r_m \quad (34)$$

Horizontale Belastung aus Erdüberdeckung	$N_{qh,d}$	-15,184	0,000	-11,024	kN/m
	n_g	0,306	-1,571	-1,528	[-]

$$N_{g,d} = \gamma_F \cdot n_g \cdot \gamma_R \cdot s \cdot r_m \quad (38)$$

Eigengewicht	$N_{g,d}$	2,068	-10,615	-10,324	kN/m
	n_w	0,653	0,215	0,736	[-]

$$N_{w,d} = \gamma_F \cdot n_w \cdot \gamma_W \cdot r_m^2 \quad (40)$$

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-90

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

$$N_{a,d} = \gamma_{F,W} \cdot m_a \cdot \gamma_W \cdot r_m^2 \quad (42)$$

Auftrieb (äußerer Wasserstand bis Scheitel) $N_{a,d}$ 0,000 0,000 0,000 kN/m

$$N_{pw,d} = (\gamma_F \cdot p_i \cdot r_i) - (\gamma_{F,W} \cdot P_a \cdot r_a) \quad (44)$$

Wasserdruck $N_{pw,d}$ 32,400 32,400 32,400 kN/m

Summe der Normalkräfte ΣN_d 27,789 -176,434 -74,934 kN/m

$$\Sigma N_{qv,qh,qh^*,d} = N_{q0v,d} + N_{pTv,d} + N_{qh,d} + N_{pTh,d} + N_{qh^*,d}$$

Summe Erd- und Verkehrslasten $\Sigma N_{qv,qh,qh^*,d}$ -6,679 -198,219 -97,010 kN/m

$$\Sigma N_{sonst,d} = N_{g,d} + N_{w,d} + N_{a,d} + N_{pw,d}$$

Summe andere Lasten $\Sigma N_{sonst,d}$ 34,468 21,785 22,076 kN/m

4.2.5.3 Verformungsnachweis Bauzustand

Verformungsbeiwert: c_{v,qh^*} 0,0640 [-]

Verformungsbeiwert: $c_{v,qv}$ -0,0966 [-]

$$K^* = \frac{c_{h,qv}}{V_{RB} - c_{h,qh^*}}$$

Beiwert des Bettungsreaktionsdruckes: K^* 0,007 [-]

$$c_v^* = c_{v,qv} + c_{v,qh^*} \cdot K^* \quad A 127 (6.13); A 161 (52a-d)$$

Verformungsbeiwert: c_v^* -0,096 [-]

$$q_0 = \frac{3}{2 + K_2} \cdot q_{Ev} \quad (26)$$

Radiale Erdlast auf das Rohr während des Vortriebs: q_0 158,417 kN/m²
Vertikale Bodenspannung infolge Verkehrslast: p_T 2,93 kN/m²

$$q_{Ges,v} = q_0 + p_T \quad (53)$$

Vertikale Gesamt-Bodenspannung in Rohrscheitelebene: $q_{Ges,v}$ 161,351 kN/m²

$$q_{0,h} = \left(q_0 + \frac{\gamma'_B \cdot d_a}{2} \right) \cdot K_2 \quad (34a)$$

Horizontale Bodenspannung während des Vortriebs: $q_{0,h}$ 12,498 kN/m²
Horizontale Bodenspannung infolge Verkehrslast: p_{Th} 0,18 kN/m²

$$q_{Ges,h} = q_{0,h} + p_{Th} \quad (53)$$

Horizontale Gesamt-Bodenspannung am Rohr: $q_{Ges,h}$ 12,675 kN/m²

$$\delta_v = |c_v^* \cdot \frac{q_{Ges,v} - q_{Ges,h}}{\bar{s}_R} \cdot 100| \quad (51)$$

Relative vertikale Durchmesseränderung: δ_v 0,02 %
Zulässige vertikale Durchmesseränderung: zul δ_v 0,55 %

$$U_{\delta v} = \frac{\delta_v}{\text{zul } \delta_v}$$

4.2.5.4 Beulnachweis Bauzustand

Der Beulnachweis wurde vom Nutzer deaktiviert.

4.2.5.5 Bemessung Ringbewehrung

Teilsicherheitsbeiwert Tragwiderstand Beton:

YRC 1,50 [-]

Teilsicherheitsbeiwert Tragwiderstand Stahl:

YRS 1,15 [-]

Charakteristische Zylinderdruckfestigkeit:

$f_{ck,cyl}$ 50,0 N/mm²

$$f_{cd} = \frac{0,85 \cdot f_{ck,cyl}}{YRC}$$

Bemessungswert Beton:

f_{cd} 28,33 N/mm²

Nennstreckgrenze:

f_{yk} 500 N/mm²

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{YRS}$$

Bemessungswert Betonstahl:

f_{yd} 434,78 N/mm²

Summe der Momente

M_E

Scheitel 35,339

Kämpfer -36,208

Sohle 39,394

kNm/m

Summe der Momente inkl.

M_{Ed}

47,708

-48,881

53,181

kNm/m

Teilsicherheitsbeiwert

Summe Normalkraft

N_E

20,584

-130,692

-55,507

kN/m

Summe der Normalkräfte inkl.

N_{Ed}

27,789

-176,434

-74,934

kN/m

Teilsicherheitsbeiwert

Bemessung:

Hebelarm innere Ringbewehrung

Z_i

Scheitel 48,0

Kämpfer 39,0

Sohle 48,0

mm

$$M_{Eds} = |M_{Ed}| - N_{Ed} \cdot Z_i$$

Auslegungsmoment Plattenbemessung

M_{Eds}

46,374

55,762

56,778

kNm/m

$$\sigma_{s,d} = f_{yd}$$

Rechenwert der Stahlgrenzspannung

$\sigma_{s,d}$

434,78

434,78

434,78

N/mm²

Statische Höhe

d

0,158

0,149

0,158

m

$$\mu_{Eds} = \frac{M_{Eds}}{d^2 \cdot f_{cd}}$$

Normiertes Auslegungsmoment

μ_{Eds}

0,0656

0,0886

0,0803

[-]

Erforderlicher mechanischer Bewehrungsgrad

ω

0,0681

0,0931

0,0839

[-]

$$a_{s,calc} = \frac{\omega \cdot d \cdot f_{cd} + N_{Ed}}{\sigma_{s,d}}$$

Erforderliche Bewehrung (Bemessung)

$a_{s,calc}$

7,65

4,98

6,92

cm²/m

Vorhandene Bewehrung

vorh. a_s

12,32

9,05

12,32

cm²/m

Ausnutzung Bewehrung (Bemessung)

$U a_{s,calc}$

62,1

55,1

56,2

%

Die gewählte Bewehrung ist ausreichend.

4.2.5.6 Bemessung Längsbewehrung (Bahn)

Nach RIL 836.4501 Abschnitt 1 (4) [Korrektur TM vom 4.7.2014] muss die Längsbewehrung mindestens 1/5 (20%) der erforderlichen Ringbewehrung für vorwiegend ruhende Belastung betragen.

Vorhandene Längsbewehrung

vorh. $a_{s,L}$

3,82

3,91

3,82

cm²/m

$$a_{s,calc,L} = 0,20 \cdot a_{s,calc}$$

$$U_{a_{s,calc,L}} = \frac{a_{s,calc,L}}{\text{vorh. } a_{s,L}}$$

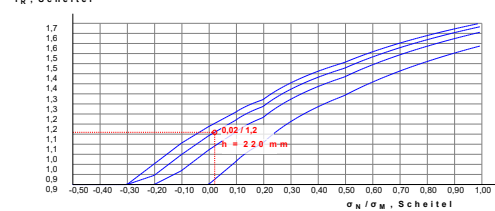
Ausnutzung Längsbewehrung (Bemessung) $U_{a_{s,calc,L}}$ 40,0 25,5 36,2 %

Die gewählte Längsbewehrung ist ausreichend.

4.2.5.7 Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (DIN V 1201:2004-08 5.2.5)

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Ideeles Widerstandsmoment, Zugseite	W_{id}	8.749,42	8.526,72	8.749,42	mm³/mm
$ \sigma_{M,E} = \frac{M_E}{W_{id}}$					
Biegespannungsanteil aus Biegemomenten	$\sigma_{M,E}$	4,0391	4,2465	4,5024	N/mm²
Spannungsanteil aus Normalkräften	$\sigma_{N,E}$	0,0817	-0,5185	-0,2202	N/mm²
$f_{t,fl} = \sigma_{M,E} + \sigma_{N,E}$					
Maßgebliche Biegezugspannung	$f_{t,fl}$	4,1207	3,7279	4,2822	N/mm²
Spannungsverhältnis	σ_N / σ_M	0,0202	-0,1221	-0,0489	[-]
Profilhöhe	h	220,00	220,00	220,00	mm

Beiwert nach DIN V 1201, Bild 9



Beiwert nach DIN V 1201, Bild 9 f_R 1,15 1,02 1,09 [-]

$$\sigma_{VR} = f_R \cdot f_{t,fl}$$

Rohrvergleichsspannung unter Risskraft im Zustand I σ_{VR} 4,75 3,82 4,68 N/mm²

Mittlere Zugfestigkeit: f_{ctm} 4,1 N/mm²

$$\max \sigma_{VR} = \text{MIN: } 6 \text{ N/mm}^2 ; \frac{f_{ctm}}{3,50} \cdot 6$$

Maximale Rohrvergleichsspannung nach DIN V 1201: $\max \sigma_{VR}$ 6,0 N/mm²

$$U_{\sigma_{VR}} = \frac{\sigma_{VR}}{\max \sigma_{VR}}$$

Ausnutzung Rohrvergleichsspannung $U_{\sigma_{VR}}$ 79,2 63,7 78,0 %

Der Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ist erbracht.

4.2.5.8 Ermittlung der Lastklasse (DIN V 1201:2004-08 4.3.5)

Maximale Rohrvergleichsspannung nach DIN V 1201:	$\max \sigma_{VR}$	6,0	N/mm²
Inneres Widerstandsmoment:	W_i	8.066,67	mm³/mm
Abminderungsbeiwert für Langzeitwirkung:	$\alpha_{c,F}$	0,90	[-]
Beiwert nach DIN V 1201, Bild 9:	f_R	1,15	[-]

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-93

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

$$F_c = 1/0,3 \cdot \left\{ \frac{\max \sigma_{VR} \cdot W_i}{\alpha_{c,F} \cdot f_R \cdot r_m} - 0,07 G_p \right\}$$

Risskraft (Ergänzung Mindestscheiteldruckkraft):
Ermittelte Lastklasse nach DIN V 1201 Tabelle 8/9:

F_c 163,58 kN/m
90

Werte mit einem (+) bedeuten, dass in Sonderfällen auch Rohre mit diesen Lastklassen (Festigkeitsklassen) hergestellt werden können. Der Strich - bedeutet, dass Rohre dieser Nennweiten und Lastklassen im Regelfall nicht hergestellt werden. Zum Einsatz kommen Rohre mit höherer Tragfähigkeit (Lastklasse).

4.2.6 Nachweis der Zulässigkeit der Vortriebskraft

4.2.6.1 Rohr

Minimale Wanddicke des Rohres:
Maßgebende Druckübertragungsfläche:
Längsdruckfestigkeit:
Teilsicherheitsbeiwert für Bauteilwiderstand längs der Rohrachse:
Charakteristische Festigkeit des Rohrwerkstoffs:
Mittlere Zugfestigkeit des Rohrwerkstoffs in Ringrichtung:
Elastizitätsmodul in axialer Richtung:
Teilsicherheitsbeiwert für Bauteilwiderstand längs der Rohrachse:

$t_{R,min}$ 220,0 mm
 A_R 12.578,937 cm²
 $f_{c,ax}$ 50,0 N/mm²
 $\gamma_{M,ax}$ 1,35 [-]
 f_k 50,00 N/mm²
 f_{tm} 4,07 N/mm²
 $E_{R,ax}$ 37.277,9 N/mm²
 $\gamma_{M,ax}$ 1,35 [-]

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_{M,ax}} \quad (100)$$

Bemessungswert der Rohrfestigkeit:

f_d 37,04 N/mm²

4.2.6.2 Rohrabwinklung

Minimaler planmäßiger Kurvenradius der Vortriebsstrecke:
Länge des einzelnen Vortriebsrohres:

R_{Plan} 440,00 m
 L_R 3,00 m

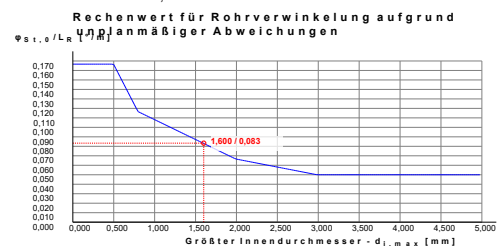
$$\varphi_R = \arctan \left(\frac{L_R}{R_{Plan}} \right) \quad (93)$$

Angesetzte Rohrverwinklung aus planmäßiger Krümmung:

φ_R 0,391 °

Größter Innendurchmesser:

$d_{i,max}$ 1.600 mm



Rechenwert für Rohrverwinklung aufgrund unplanmäßiger Abweichungen:

$\varphi_{St,0}/L_R$ 0,083 °/m

$$\varphi_{St} = \left(1 - \frac{100}{R_{Plan}} \right) \cdot \varphi_{St,0}/L_R \cdot L_R + 0,0625^\circ \geq 0 \quad (95)$$

Rohrverwinklung aufgrund unplanmäßiger Abweichungen:

φ_{St} 0,256 °

Nennweite:

DN 1.600 mm

Max. Abweichung Stirnflächen von Rechtwinkligkeit:

$\Delta_{a,cal}$ 8,0 mm

Kleinster Außendurchmesser:

$d_{a,min}$ 2.040 mm

$$\varphi_{a,min} = \arctan \left(\Delta_{a,cal} \right) \quad (96)$$

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-94

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

Rohrverwinkelung aufgrund Abweichungen der Rohrspiegel von der Rechtwinkligkeit:

$\varphi_{\Delta a, cal}$ 0,225 °

Kombinationsbeiwert für Rohrabwinkelungen:

ψ 0,80 [-]

$$\varphi_{ges} = \varphi_R + \text{MAX}[\psi \cdot (\varphi_{St} + \varphi_{\Delta a, cal}) ; \varphi_{St} \cdot \varphi_{\Delta a, cal}]$$

(92)

Rohrverwinkelung im Bereich einer Rohrfuge (gesamt):

φ_{ges} 0,775 °

4.2.6.3 Verformung des Druckübertragungsringes

Druckübertragungsring (DÜR)

OSB-Platte (OSB/3, OSB/4) - OSB-Platte (OSB/3, OSB/4)

Außendurchmesser des DÜR:

$d_{a, DÜR}$ 1.950,0 mm

Innendurchmesser des DÜR:

$d_{i, DÜR}$ 1.670,0 mm

Äußerer Randabstand des DÜR:

$a_{a, DÜR}$ 45,0 mm

Innerer Randabstand des DÜR:

$a_{i, DÜR}$ 35,0 mm

Breite des DÜR:

$t_{DÜR}$ 140,0 mm

Minimale Wanddicke des Rohres:

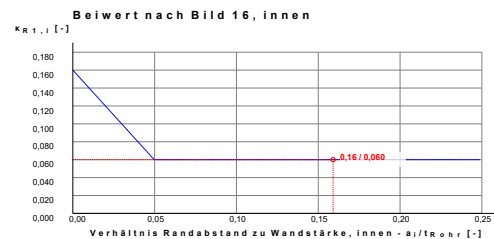
$t_{R, min}$ 220,0 mm

$$K_t = \frac{t_{R, min}}{t_{DÜR}}$$

(99)

Verhältnis $t_{DÜR}$ zu t_{Rohr} :

K_t 1,571 [-]

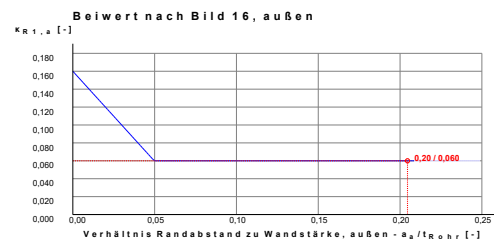


Verhältnis Randabstand zu Wandstärke, innen:

a_i/t_{Rohr} 0,159 [-]

Beiwert nach Bild 16, innen:

$K_{R1, i}$ 0,060 [-]



Verhältnis Randabstand zu Wandstärke, außen:

a_a/t_{Rohr} 0,205 [-]

Beiwert nach Bild 16, außen:

$K_{R1, a}$ 0,060 [-]

$$K_{R1} = \max(K_{R1, i}, K_{R1, a})$$

Beiwert nach Bild 16 zur Vermeidung von Randabplatzungen:

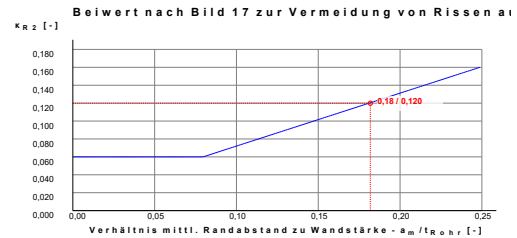
K_{R1} 0,060 [-]

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-95

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.



Verhältnis mittl. Randabstand zu Wandstärke:

Beiwert nach Bild 17 zur Vermeidung von Rissen aus Spaltzug:

$$K_R = \max(K_{R1}, K_{R2})$$

Beiwert nach Bild 16/17, angesetzter Wert:

Mittlere Zugfestigkeit des Rohrwerkstoffs in Ringrichtung:

$$\alpha_{D,T} = \frac{f_{tm}}{f_k} \cdot \frac{1}{K_R} \quad (98)$$

Beiwert für zulässige Druckspannung:

$$\sigma_{cal} = \alpha_{D,T} \cdot K_t \cdot f_d \quad (97)$$

Höchste in der Rohrfuge wirkende, zulässige Druckspannung:

Angesetzte Vorpresskraft, Laufvariable:

$$\sigma_{0DÜR} = \frac{F_j}{A_{DÜR}}$$

Gleichmäßig verteilte Spannung im DÜR:

$$\sigma_I = 2 \cdot \sigma_{0DÜR} \quad (107)$$

Maßgebende Spannung der Vorbelastung:

$$\sigma_I / \sigma_{cal} = \frac{\sigma_I}{\sigma_{cal}}$$

Prozentsatz der Vorbelastung:

4.2.6.4 Verformung des Druckübertragungsringes

Schicht 1

OSB-Platte (OSB/3, OSB/4)

Schichtdicke:

$$E_{cal} = \left(\sigma_{cal} \cdot 61,113 (\sigma_I / \sigma_{cal})^{1,33} - 983,8 \cdot (\sigma_I / \sigma_{cal}) + 3249 \cdot (\sigma_I / \sigma_{cal})^2 - 5866 \cdot (\sigma_I / \sigma_{cal})^3 + 0,23236 + 4140 \cdot (\sigma_I / \sigma_{cal})^4 \right) \cdot (-0,0009 \cdot s_d^3 + 0,0608 \cdot s_d^2 + 1,2216 \cdot s_d + 8,6507) \quad (110)$$

Steifigkeit der DUER-Schicht:

$$\Delta s_{DÜR,S,1} = s_{d,1} \cdot \left(\frac{\sigma_{cal}}{E_{cal}} \right)^{0,5} \cdot \frac{d_{a,min}}{d_{a,DÜR}} \quad (102 / 111)$$

Verformungsanteil der Schicht:

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-96

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

Schicht 2

OSB-Platte (OSB/3, OSB/4)

Schichtdicke:

s_d 18,00 mm

$$E_{cal} = \left(\sigma_{cal} \cdot 61,113(\sigma_I/\sigma_{cal})^{1,33} - 983,8(\sigma_I/\sigma_{cal}) + 3249(\sigma_I/\sigma_{cal})^2 - 5866(\sigma_I/\sigma_{cal})^3 + 0,23236 + 4140(\sigma_I/\sigma_{cal})^4 \right) \cdot (-0,0009 \cdot s_d^3 + 0,0608 \cdot s_d^2 + 1,2216 \cdot s_d + 8,6507) \quad (110)$$

Steifigkeit der DUER-Schicht:

E_{cal} 414,76 N/mm²

$$\Delta s_{DÜR,S,2} = s_{d,2} \cdot \left(\frac{\sigma_{cal}}{E_{cal}} \right)^{0,5} \cdot \frac{d_{a,min}}{d_{a,DÜR}} \quad (102 / 111)$$

Verformungsanteil der Schicht:

$\Delta s_{DÜR,S}$ 5,8 mm

$$\Delta s_{DÜR} = \Delta s_{DÜR,S,1} + \Delta s_{DÜR,S,2} \quad (112)$$

Verformungsanteil Gesamt:

$\Delta s_{DÜR}$ 11,7 mm

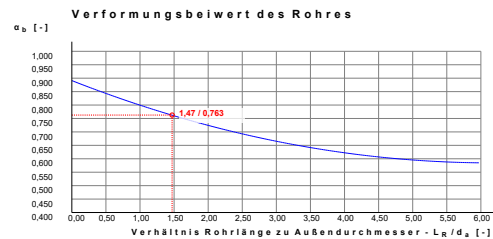
4.2.6.5 Verformung des Rohres

$$\sigma_{max} = \sigma_{cal} \cdot \frac{t_{DÜR}}{t_{R,min}} \quad (103b)$$

$$\sigma_{max} = \frac{\sigma_{cal} \cdot t_{DÜR}}{t_{R,min}}$$

Rechnerische Druckspannung im Rohrwerkstoff:

σ_{max} 25,16 N/mm²



$$L_R/d_a = \frac{L_R}{d_a}$$

Verhältnis Rohrlänge zu Außendurchmesser:

L_R/d_a 1,47 [-]

$$\alpha_b = 0,008 \cdot \frac{L_R^2}{d_a} - 0,099 \cdot \frac{L_R}{d_a} + 0,891 \quad (105)$$

Verformungsbeiwert des Rohres:

α_b 0,763 [-]

$$\alpha_\varphi = \varphi_R - 0,05 \leq 1 \quad \& \quad \geq 0$$

Beiwert:

α_φ 0,341 [-]

$$\kappa_{ab} = \alpha_b - (\alpha_b - 0,5) \cdot (1 - \alpha_\varphi) \quad (104)$$

Verformungsfaktor des Rohres:

κ_{ab} 0,589 [-]

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite:
D-97

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

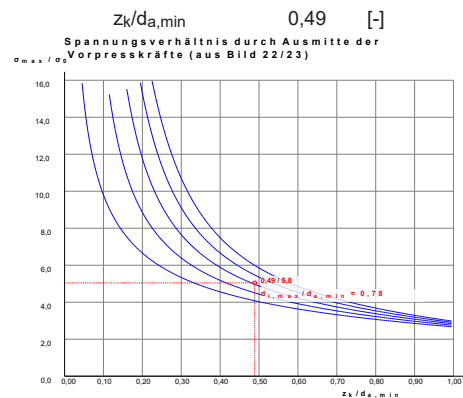
$$\Delta s_R = \frac{\sigma_{\max} \cdot K_{ab} \cdot L_R}{E_{R,ax}} \quad (103a)$$

Verformungsanteil des Vortriebsrohres: Δs_R 1,2 mm

Ergebnis

$$z_k/d_{a,min} = \frac{\Delta s_{DÜR} + \Delta s_R}{\tan(\varphi_{ges}) \cdot d_{a,DÜR}} \leq 1 \quad (101)$$

Maß der Fugenklaffung:



Spannungsverhältnis durch Ausmitte der Vorpressekräfte (aus Bild 22/23):

$$A_R = \frac{(d_{a,min}^2 - d_{i,max}^2) \cdot \pi}{4}$$

Maßgebende Druckübertragungsfläche:

A_R 12.578,937 cm²

Teilsicherheitsbeiwert Einwirkung längs der Rohrachse:

$\gamma_{F,ax}$ 1,30 [-]

$$F_j = \frac{A_R \cdot \sigma_{\max}}{\sigma_{\max} / \sigma_0 \cdot \gamma_{F,ax}} \quad (113)$$

Zulässige Vorpressekraft:

F_j 4.824 kN

Vorgegebene Vortriebskraft:

$F_{j,m}$ 4.820,0 kN

$$U_{Fj} = \frac{F_{j,m}}{F_j}$$

Ausnutzung zulässige Vortriebskraft:

U_{Fj} 99,9 %

Die angesetzte Vortriebskraft ist zulässig.

$$A_{R,0} = \frac{(d_i + 2 \cdot A_{ax}^2 - d_i^2) \cdot \pi}{4}$$

Rohrfläche für Axialdruck außerhalb Kupplungsbereich:

$A_{R,0}$ 12.578,94 cm²

$$\sigma_{x,d,0} = -1 \cdot \gamma_{F,ax} \cdot \frac{F_{j,m}}{A_{R,0}} \cdot \sigma_{\max} / \sigma_0 \quad (113)$$

Im Rohr wirkende axiale Spannung, Bemessungswert:

$\sigma_{x,d,0}$ -25,14 N/mm²

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-98

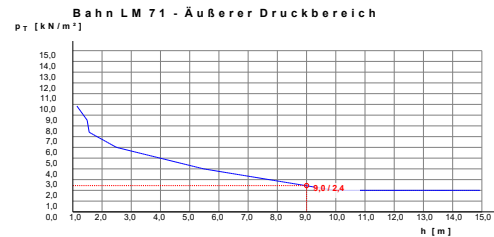
Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

Der Nachweis der Vergleichsspannung ist bei biegesteifen Rohren nicht erforderlich.

4.2.7 Betriebszustand

4.2.7.1 Belastungen Betriebszustand



$$\Phi_2 = \frac{1,44}{\sqrt{LF - 0,2}} + 0,82 \quad (21)$$

$$1,0 \leq \Phi_2 \leq 1,67 \quad (21)$$

Stoßbeiwert:	Φ_2	1,67	[-]	
$\text{red } \Phi_2 = \Phi_2 - 0,1 \cdot (h_{\text{ü}} - 1,0) \geq 1$				(22)

Stoßbeiwert reduziert:	red Φ_2	1,00	[-]	
Anpassungsfaktor $\alpha_{Qi, LM71}$ (DIN EN 1991-2):	$\alpha_{Qi, LM71}$	1,20	[-]	
Einfache Bodenspannung aus Verkehr:	p	2,44	kN/m²	
$p_T = \text{red } \Phi_2 \cdot p \cdot \alpha_{Qi, LM71}$				A 161 (23a)

Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Scheitelhöhe:	p _T	2,93	kN/m²	
Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Kämpferhöhe (ohne ϕ):	p _K	2,00	kN/m²	
Erddruckverhältnis unter Rohrscheitel:	K ₂	0,35	[-]	
$p_{T,h} = (0,50 \cdot (\text{red } \Phi_2 - 1) + 1) \cdot p_K \cdot K_2 \cdot \alpha_{Qi, LM71}$				A 161 (23b)

Horizontale Bodenspannung aus Verkehr:	p _{T,h}	0,84	kN/m²	
$p_{Ev} = \kappa \cdot \gamma_B \cdot (h - h_{GW} + d_a) + \kappa \cdot \gamma'_B \cdot (h_{GW} - d_a) + \kappa_0 \cdot P_0$				(5b)

Vertikale Bodenspannung in Rohrscheitelebene:	p _{Ev}	109,525	kN/m²	
Wirksame vertikale Bodenspannung in Rohrscheitelebene:	q _{Ev}	109,525	kN/m²	
$q_{Ges,v} = p_{Ev} + p_T$				(53)

Vertikale Gesamt-Bodenspannung in Rohrscheitelebene:	q _{Ges,v}	112,459	kN/m²	
Die Erddruckverteilung am Rohr wird cos²- bzw. sin²-förmig angenommen.:	Nein			
Grundwasserstand im Bereich der oberen Rohrhälfte:	h _{GW,oRh}	2,000	m	

$q_{Eh} = \left(p_{Ev} + \gamma_B \cdot \left(d_a - h_{GW,oRh} \right) + \gamma'_B \cdot \left(h_{GW,oRh} - \frac{d_a}{2} \right) \right) \cdot K_2$				
Horizontale Bodenspannung am Rohr:	q _{Eh}	41,83	kN/m²	
$q_{Ges,h} = q_{Eh} + p_{Th}$				(53)

Horizontale Gesamt-Bodenspannung am Rohr:	q _{Ges,h}	42 668	kN/m²	
---	--------------------	--------	-------	--

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-99

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

Äußerer Überdruck über Rohrscheitel: $p_{a,Sc}$ 0,000 bar

Rohrsteifigkeit: S_R 43.895 kN/m²

Rohrsteifigkeit: $\bar{S}_R$ 43.895 kN/m²

Rechenwert des Verformungsmodul EF: E_F 50,00 N/mm²

Auflockerungsfaktor nach A161, Tabelle 15: $f_{2,F,Betrieb}$ 0,20 [-]

$E_B = E_F \cdot f_{2,F,Betrieb}$ (50)

Verformungsmodul Boden: E_B 10,00 N/mm²

Erddruckverhältnis unter Rohrscheitel: K_2 0,35 [-]

$S_{Bh} = 0,60 \cdot E_B$ (18)

Bettungssteifigkeit: S_{Bh} 6,00 N/mm²

$V_{RB,LK} = \frac{\bar{S}_R}{S_{Bh}}$ (14)

Systemsteifigkeit: V_{RB} 7,3158 [-]

Das Rohr-Bodensystem verhält sich biegeweich: Nein

4.2.7.2 Schnittkräfte Betriebszustand

Teilsicherheitsbeiwert für ständige Einwirkungen quer zur Rohrachse: γ_F 1,35 [-]

Teilsicherheitsbeiwert Wasseraußendruck: $\gamma_{F,W}$ 1,35 [-]

Mittlerer Radius: r_m 910,00 mm

Innerer Überdruck: p_i 0,300 bar

Äußerer Überdruck über Rohrscheitel: $p_{a,Sc}$ 0,000 bar

Wirksame vertikale Bodenspannung in Rohrscheitelebene: q_{Ev} 109,525 kN/m²

Horizontale Bodenspannung am Rohr: q_{Eh} 41,83 kN/m²

Vertikale Bodenspannung infolge Verkehrslast: p_T 2,93 kN/m²

Horizontale Bodenspannung infolge Verkehrslast: p_{Th} 0,84 kN/m²

Vertikale Gesamt-Bodenspannung in Rohrscheitelebene: $q_{Ges,v}$ 112,459 kN/m²

Horizontale Gesamt-Bodenspannung am Rohr: $q_{Ges,h}$ 42,668 kN/m²

Momente: m_{pEv} Scheitel 0,285 Kämpfer -0,292 Sohle 0,369 [-]

$M_{pEvd} = \gamma_F \cdot m_{pEv} \cdot q_{Ev} \cdot r_m^2$ (27)

Vertikale Belastung aus Erdüberdeckung $M_{pEv,d}$ 34,896 -35,753 45,181 kNm/m

m_{pT} 0,285 -0,292 0,369 [-]

$M_{pTv,d} = \gamma_Q \cdot m_{pT} \cdot p_T \cdot r_m^2$ (29)

Vertikale Belastung aus Verkehr $M_{pTv,d}$ 0,935 -0,958 1,210 kNm/m

m_{pTh} -0,249 0,249 -0,243 [-]

$M_{pTh,d} = \gamma_Q \cdot m_{pTh} \cdot p_{Th} \cdot r_m^2$ (31)

Horizontale Belastung aus Verkehr $M_{pTh,d}$ -0,233 0,233 -0,227 kNm/m

m_{pEh} -0,249 0,249 -0,243 [-]

$M_{pEh,d} = \gamma_F \cdot m_{pEh} \cdot q_{Eh} \cdot r_m^2$ (35)

Horizontale Belastung aus Erdüberdeckung $M_{pEh,d}$ -11,645 11,645 -11,364 kNm/m

m_g 0,456 -0,525 0,814 [-]

$M_{g,d} = \gamma_F \cdot m_g \cdot \gamma_R \cdot s \cdot r_m^2$ (37)

Eigengewicht $M_{g,d}$ 2,804 -3,228 5,005 kNm/m

m_w 0,228 -0,263 0,407 [-]

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-100

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

Wasserfüllung bis Rohrscheitel	$M_{w,d}$ m_a	2,319 -0,228	-2,676 0,263	4,140 -0,407	kNm/m [-]
$M_{a,d} = \gamma_{F,W} \cdot m_a \cdot \gamma_W \cdot r_m^3$ (41)					
Auftrieb (äußerer Wasserstand bis Scheitel)	$M_{a,d}$	0,000	0,000	0,000	kNm/m
$M_{pw,d} = ((\gamma_F \cdot p_i) - (\gamma_{F,W} \cdot P_a)) \cdot r_i \cdot r_a \cdot \left(\frac{1}{2} - \frac{r_i \cdot r_a}{r_a^2 - r_i^2} \cdot \ln \cdot \frac{r_a}{r_i} \right)$ (43)					
Wasserdruck	$M_{pw,d}$ m_{qh}^*	0,161 -0,181	0,161 0,208	0,161 -0,181	kNm/m [-]
$M_{qEh^*,d} = \gamma_F \cdot m_{qh}^* \cdot q_{Eh}^* \cdot r_m^2$ (45a)					
Bettungsreaktionsdruck Erdlast	$M_{qEh^*,d}$	0,000	0,000	0,000	kNm/m
$M_{qTh^*,d} = \gamma_Q \cdot m_{qh}^* \cdot q_{Th}^* \cdot r_m^2$ (45b)					
Bettungsreaktionsdruck Verkehr	$M_{qTh^*,d}$	0,000	0,000	0,000	kNm/m
$M_{qh^*,d} = M_{qTh^*,d} + M_{qEh^*,d}$					
Bettungsreaktionsdruck	$M_{qh^*,d}$	0,000	0,000	0,000	kNm/m
Summe der Momente	ΣM_d	29,238	-30,576	44,107	kNm/m
Summe Erd- und Verkehrslasten	$\Sigma M_{qv,qh,qh^*,d}$	23,953	-24,833	34,800	kNm/m
Summe andere Lasten	$\Sigma M_{sonst,d}$	5,285	-5,742	9,307	kNm/m
Normalkräfte:	n_{pEv}	Scheitel 0,078	Kämpfer -1,000	Sohle -0,339	[-]
$N_{pEv,d} = \gamma_F \cdot n_{pEv} \cdot q_{Ev} \cdot r_m$ (28)					
Vertikale Belastung aus Erdüberdeckung	$N_{pEv,d}$ n_{pT}	10,495 0,078	-134,552 -1,000	-45,613 -0,339	kN/m [-]
$N_{pTv,d} = \gamma_Q \cdot n_{pT} \cdot p_T \cdot r_m$ (30)					
Vertikale Belastung aus Verkehr	$N_{pTv,d}$ n_{pTh}	0,281 -0,998	-3,604 0,000	-1,222 -0,868	kN/m [-]
$N_{pTh,d} = \gamma_Q \cdot n_{pTh} \cdot p_{Th} \cdot r_m$ (32)					
Horizontale Belastung aus Verkehr	$N_{pTh,d}$ n_{pEh}	-1,025 -0,998	0,000 0,000	-0,891 -0,868	kN/m [-]
$N_{pEh,d} = \gamma_F \cdot n_{pEh} \cdot q_{Eh} \cdot r_m$ (36)					
Horizontale Belastung aus Erdüberdeckung	$N_{pEh,d}$ n_g	-51,288 0,411	0,000 -1,571	-44,607 -1,232	kN/m [-]
$N_{g,d} = \gamma_F \cdot n_g \cdot \gamma_R \cdot s \cdot r_m$ (38)					
Eigengewicht	$N_{g,d}$ n_w	2,777 0,705	-10,615 0,215	-8,324 0,884	kN/m [-]
$N_{w,d} = \gamma_F \cdot n_w \cdot \gamma_W \cdot r_m^2$ (40)					
Wasserfüllung bis Rohrscheitel	$N_{w,d}$ m_a	7,881 -0,705	2,404 -0,215	9,883 -0,884	kN/m [-]
$N_{a,d} = \gamma_{F,W} \cdot m_a \cdot \gamma_W \cdot r_m^2$ (42)					
Auftrieb (äußerer Wasserstand bis Scheitel)	$N_{a,d}$	0,000	0,000	0,000	kN/m

Wasserdruck	$N_{pw,d}$	32,400	32,400	32,400	kN/m
Summe der Normalkräfte	ΣN_d	1,522	-113,967	-58,375	kN/m

$\Sigma N_{qv,qh,qh^*,d} = N_{pEv,d} + N_{pTv,d} + N_{pEh,d} + N_{pTh,d} + N_{qh^*,d}$					
Summe Erd- und Verkehrslasten	$\Sigma N_{qv,qh,qh^*,d}$	-41,536	-138,156	-92,333	kN/m

$\Sigma N_{sonst,d} = N_{g,d} + N_{w,d} + N_{a,d} + N_{pw,d}$					
Summe andere Lasten	$\Sigma N_{sonst,d}$	43,058	24,189	33,958	kN/m

4.2.7.3 Verformungsnachweis Betriebszustand

Verformungsbeiwert:	c_{v,qh^*}	0,0640	[-]
Verformungsbeiwert:	$c_{v,qv}$	-0,1053	[-]

$$K^* = \frac{c_{h,qv}}{V_{RB} - c_{h,qh^*}}$$

Beiwert des Bettungsreaktionsdruckes:	K^*	0,014	[-]
---------------------------------------	-------	-------	-----

$$c_v^* = c_{v,qv} + c_{v,qh^*} \cdot K^* \quad A 127 (6.13); A 161 (52a-d)$$

Verformungsbeiwert:	c_v^*	-0,104	[-]
Vertikale Bodenspannung in Rohrscheitelebene:	p_{Ev}	109,525	kN/m ²
Vertikale Bodenspannung infolge Verkehrslast:	p_T	2,93	kN/m ²

$$q_{Ges,v} = p_{Ev} + p_T \quad (53)$$

Vertikale Gesamt-Bodenspannung in Rohrscheitelebene:	$q_{Ges,v}$	112,459	kN/m ²
--	-------------	---------	-------------------

$$q_{Eh} = \left(p_{Ev} + \gamma_B \cdot (d_a - h_{GW,oRh}) + \gamma'_B \cdot \left(h_{GW,oRh} - \frac{d_a}{2} \right) \right) \cdot K_2$$

Horizontale Bodenspannung am Rohr:	q_{Eh}	41,83	kN/m ²
Horizontale Bodenspannung infolge Verkehrslast:	p_{Th}	0,84	kN/m ²

$$q_{Ges,h} = q_{Eh} + p_{Th} \quad (53)$$

Horizontale Gesamt-Bodenspannung am Rohr:	$q_{Ges,h}$	42,668	kN/m ²
---	-------------	--------	-------------------

$$\delta_v = \left| c_v^* \cdot \frac{q_{Ges,v} - q_{Ges,h}}{\bar{S}_R} \cdot 100 \right| \quad (51)$$

Relative vertikale Durchmesseränderung:	δ_v	0,02	%
Zulässige vertikale Durchmesseränderung:	zul δ_v	0,55	%

$$U_{\delta v} = \frac{\delta_v}{\text{zul } \delta_v}$$

Ausnutzungsgrad Verformung:	$U_{\delta v}$	3,0	%
-----------------------------	----------------	-----	---

Die errechnete Verformung ist kleiner als die zulässige Verformung.

4.2.7.4 Beulnachweis Betriebszustand

Der Beulnachweis wurde vom Nutzer deaktiviert.

4.2.7.5 Bemessung Ringbewehrung

Teilsicherheitsbeiwert Tragwiderstand Beton:	γ_{RC}	1,50	[-]
Teilsicherheitsbeiwert Tragwiderstand Stahl:	γ_{RS}	1,15	[-]
Charakteristische Zylinderdruckfestigkeit:	$f_{ck,cyl}$	50 N	N/mm ²

$$f_{cd} = \frac{0,85 \cdot f_{ck,cyl}}{\gamma_{RC}}$$

Bemessungswert Beton:
Nennstreckgrenze:

f_{cd} 28,33 N/mm²
 f_{yk} 500 N/mm²

$$f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_{RS}}$$

Bemessungswert Betonstahl:

f_{yd} 434,78 N/mm²

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Summe der Momente	M_E	21,658	-22,649	32,672	kNm/m
Summe der Momente inkl. Teilssicherheitsbeiwert	M_{Ed}	29,238	-30,576	44,107	kNm/m
Summe Normalkraft	N_E	1,127	-84,420	-43,241	kN/m
Summe der Normalkräfte inkl. Teilssicherheitsbeiwert	N_{Ed}	1,522	-113,967	-58,375	kN/m

Bemessung:
Hebelarm innere Ringbewehrung

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
z_i		48,0	39,0	48,0	mm

$$M_{Eds} = |M_{Ed}| - N_{Ed} \cdot z_i$$

Auslegungsmoment Plattenbemessung

M_{Eds}		29,165	35,020	46,909	kNm/m

$$\sigma_{s,d} = f_{yd}$$

Rechenwert der Stahlgrenzspannung
Statische Höhe

$\sigma_{s,d}$		434,78	434,78	434,78	N/mm ²
d		0,158	0,149	0,158	m

$$\mu_{Eds} = \frac{M_{Eds}}{d^2 \cdot f_{cd}}$$

Normiertes Auslegungsmoment
Erforderlicher mechanischer Bewehrungsgrad

μ_{Eds}		0,0412	0,0557	0,0663	[-]
ω		0,0423	0,0575	0,0689	[-]

$$a_{s,calc} = \frac{\omega \cdot d \cdot f_{cd} + N_{Ed}}{\sigma_{s,d}}$$

Erforderliche Bewehrung (Bemessung)	$a_{s,calc}$	4,39	2,96	5,75	cm ² /m
Vorhandene Bewehrung	vorh. a_s	12,32	9,05	12,32	cm ² /m
Ausnutzung Bewehrung (Bemessung)	$U a_{s,calc}$	35,6	32,8	46,7	%

Die gewählte Bewehrung ist ausreichend.

4.2.7.6 Bemessung Längsbewehrung (Bahn)

Nach RIL 836.4501 Abschnitt 1 (4) [Korrektur TM vom 4.7.2014] muss die Längsbewehrung mindestens 1/5 (20%) der erforderlichen Ringbewehrung für vorwiegend ruhende Belastung betragen.

Vorhandene Längsbewehrung

vorh. $a_{s,L}$		3,82	3,91	3,82	cm ² /m

$$a_{s,calc,L} = 0,20 \cdot a_{s,calc}$$

Erforderliche Längsbewehrung (Bemessung)

$a_{s,calc,L}$		0,88	0,59	1,15	cm ² /m

$$U a_{s,calc,L} = \frac{a_{s,calc,L}}{\text{vorh. } a_{s,L}}$$

Ausnutzung Längsbewehrung (Bemessung)

$U a_{s,calc,L}$		23,0	15,2	30,1	%

Die gewählte Längsbewehrung ist ausreichend.

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-103

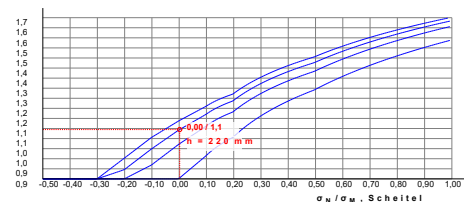
Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

4.2.7.7 Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (DIN V 1201:2004-08 5.2.5)

Ideeles Widerstandsmoment, Zugseite	W_{id}	Scheitel 8.749,42	Kämpfer 8.526,72	Sohle 8.749,42	mm ³ /mm
$ \sigma_{M,E} = \frac{M_E}{W_{id}}$					
Biegespannungsanteil aus Biegemomenten	$\sigma_{M,E}$	2,4753	2,6562	3,7342	N/mm ²
Spannungsanteil aus Normalkräften	$\sigma_{N,E}$	0,0045	-0,3349	-0,1716	N/mm ²
$f_{t,fl} = \sigma_{M,E} + \sigma_{N,E}$					
Maßgebliche Biegezugspannung	$f_{t,fl}$	2,4798	2,3212	3,5626	N/mm ²
Spannungsverhältnis	σ_N / σ_M	0,0018	-0,1261	-0,0459	[-]
Profilhöhe	h	220,00	220,00	220,00	mm

Beiwert nach DIN V 1201, Bild 9
 f_R , Scheitel



Beiwert nach DIN V 1201, Bild 9	f_R	1,14	1,02	1,10	[-]
$\sigma_{VR} = f_R \cdot f_{t,fl}$					
Rohrvergleichsspannung unter Risskraft im Zustand I	σ_{VR}	2,82	2,37	3,90	N/mm ²
Mittlere Zugfestigkeit:			f_{ctm}	4,1	N/mm ²
$\max \sigma_{VR} = \min: 6 \text{ N/mm}^2; \frac{f_{ctm}}{3,50}$					
Maximale Rohrvergleichsspannung nach DIN V 1201:			$\max \sigma_{VR}$	6,0	N/mm ²
$U \sigma_{VR} = \frac{\sigma_{VR}}{\max \sigma_{VR}}$					
Ausnutzung Rohrvergleichsspannung	$U \sigma_{VR}$	47,1	39,5	65,1	%

Der Nachweis im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit ist erbracht.

4.2.7.8 Ermittlung der Lastklasse (DIN V 1201:2004-08 4.3.5)

Maximale Rohrvergleichsspannung nach DIN V 1201:	$\max \sigma_{VR}$	6,0	N/mm ²
Inneres Widerstandsmoment:	W_i	8.066,67	mm ³ /mm
Abminderungsbeiwert für Langzeitwirkung:	$\alpha_{c,F}$	0,90	[-]
Beiwert nach DIN V 1201, Bild 9:	f_R	1,14	[-]
Mittlerer Radius:	r_m	910,00	mm
Gewichtskraft des Rohrs:	G_p	31,45	kN/m
$F_c = 1/0,3 \cdot \left\{ \frac{\max \sigma_{VR} \cdot W_i}{\alpha_{c,F} \cdot f_R \cdot r_m} - 0,07 G_p \right\}$			
Risskraft (Ergänzung Mindestdruckkraft):	F_c	165,66	kN/m

bedeutet, dass Rohre dieser Nennweiten und Lastklassen im Regelfall nicht hergestellt werden. Zum Einsatz kommen Rohre mit höherer Tragfähigkeit (Lastklasse).

4.2.8 Nachweis gegen Ermüden unter nicht vorwiegend ruhender Belastung

$$\text{dyn } p_T = p_T \cdot \alpha_T$$

Vertikale dynamisch relevante Bodenspannung in Scheitelhöhe: $\text{dyn } p_T$ 2,93 kN/m²
 Horizontale Bodenspannung infolge Verkehrslast für Ermüdungsnachweis: $p_{Th,E}$ 0,84 kN/m²

$$\text{dyn } p_{Th} = p_{Th,E} \cdot \alpha_T \quad (80b)$$

Anzusetzender seitlicher Erddruck aufgrund Verkehrslast: $\text{dyn } p_{Th}$ 0,8 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	
$\text{dyn } N_{pTv} = n_{pT} \cdot \text{dyn } p_T \cdot r_m$					(81)
Normalkraft aus vertikaler Verkehrslast	$\text{dyn } N_{pTv}$	0,208	-2,669	-0,905	kN/m
$\text{dyn } N_{pTh} = n_{pTh} \cdot \text{dyn } p_{Th} \cdot r_m$					(81)
Normalkraft aus seitlicher Verkehrslast	$\text{dyn } N_{pTh}$	-0,759	0,000	-0,660	kN/m
Summe der Normalkräfte aus Verkehr	$\text{dyn } \Sigma N$	-0,551	-2,669	-1,565	kN/m
$\text{dyn } M_{pTv} = m_{pT} \cdot \text{dyn } p_T \cdot r_m^2$					(82)
Moment aus vertikaler Verkehrslast	$\text{dyn } M_{pTv}$	0,692	-0,709	0,896	kNm/m
$\text{dyn } M_{pTh} = m_{pTh} \cdot \text{dyn } p_{Th} \cdot r_m^2$					(82)
Moment aus seitlicher Verkehrslast	$\text{dyn } M_{pTh}$	-0,172	0,172	-0,168	kNm/m
Summe der Momente aus Verkehr	$\text{dyn } \Sigma M$	0,520	-0,537	0,728	kNm/m

Teilsicherheitsbeiwert für Bauteilwiderstand quer zur Rohrachse: $\gamma_{M,rad}$ 1,50 [-]

4.2.9 Vereinfachter Nachweis gegen Ermüden nach DIN EN 1992-1-1, 6.8.7

Teilsicherheitsbeiwert dynamische Einwirkung: $\gamma_{Ed,fat}$ 1,00 [-]
 Teilsicherheitsbeiwert Tragwiderstand Stahl: $\gamma_{s,fat}$ 1,15 [-]
 Beiwert nach DIN 1055-100, Tabelle A.2: ψ_1 1,00 [-]

Elastizitätsmodul Betonstahl: E_s 200.000 N/mm²
 Mittlerer E-Modul (Sekantenmodul): E_{cm} 37.278 N/mm²

$$n = \frac{E_s}{E_{cm}}$$

Verhältnis E-Modul Stahl zu E-Modul Beton: n 5,37 [-]
 Querschnittsbreite: b 1,00 m
 Schwingbreite für $2 \cdot 10^6$ Zyklen: $\Delta \sigma_{Rsk}(N^*)$ 74,00 N/mm²
 Modifizierte Betondruckfestigkeit: $f_{cd,fat}$ 22,67 N/mm²

$$f_{cd,fat} = \beta_{cc}(t_0) \cdot f_{cd} \cdot (1 - f_{ck}/250); \beta_{cc}(t=28\text{Tage}) = 1,0$$

		Scheitel	Kämpfer	Sohle	
Moment aufgrund ständiger Lasten	M_G	21,138	-22,112	31,944	kNm/m
Normalkraft aufgrund ständiger Lasten	N_G	1,678	-81,751	-41,676	kN/m

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite: D-105

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

Auf die Zugbewehrung bezogenes Moment M_{Gs} 21,057 25,300 33,944 kNm/m
aufgrund ständiger Lasten

$$M'_{Gs,min} = M_{Gs} \cdot Y_{Ed,fat}$$

Bemessungsmoment, ständig $M'_{Gs,min}$ 21,057 25,300 33,944 kNm/m

Hebelarm innere Ringbewehrung z_i 48,0 39,0 48,0 mm

Moment für Ermüdungsnachweis $M_{Q,dyn}$ 0,520 -0,537 0,728 kNm/m

Normalkraft für Ermüdungsnachweis $N_{Q,dyn}$ -0,551 -2,669 -1,565 kN/m

Auf die Zugbewehrung bezogenes Moment $M_{Qs,dyn}$ 0,546 0,641 0,803 kNm/m
aufgrund dynamischer Lasten

$$M'_{Qs,dyn} = M_{Qs,dyn} \cdot \psi_1 \cdot Y_{Ed,fat}$$

Bemessungsmoment, dynamisch $M'_{Qs,dyn}$ 0,546 0,641 0,803 kNm/m

4.2.9.1 Nachweis der geschweißten Bewehrungskörbe

Statische Höhe d 0,158 0,149 0,158 m

$$x = \left(\frac{n \cdot a_s}{b} \right) \cdot \left[-1 + \left(1 + \frac{2 \cdot b \cdot d}{n \cdot a_s} \right)^{0,5} \right]$$

Höhe der Betondruckzone x 0,040 0,033 0,040 m

Höhe der Zugzone $d-x$ 0,118 0,116 0,118 m

$$z = d - \frac{x}{3}$$

Innerer Hebelarm z 0,145 0,138 0,145 m

$$\sigma_{c,dyn} = \frac{2 \cdot M'_{Qs,dyn}}{x \cdot z \cdot b}$$

Betonspannung $\sigma_{c,dyn}$ 0,191 0,278 0,280 N/mm²

$$\sigma_{s,dyn} = \left(\frac{1}{\text{vorh. } a_s} \right) \cdot \left(\frac{M'_{Qs,dyn}}{z} + N_{Q,dyn} \right)$$

Spannung in der Zugbewehrung $\sigma_{s,dyn}$ 2,617 2,190 3,233 N/mm²

$$\sigma_{s,dyn,kon} = n \cdot \sigma_{c,dyn} \cdot \frac{d-x}{x} + \frac{N_{Q,dyn}}{\text{vorh } a_{s,i}}$$

Kontrolle $\sigma_{s,dyn,kon}$ 2,617 2,190 3,233 N/mm²

$$\Delta \sigma_{s,eq} = \sigma_{s,dyn} \cdot Y_{Ed,fat}$$

Ermittelter Wert $\Delta \sigma_{s,eq}$ 2,617 2,190 3,233 N/mm²

Maximalwert (abgeminderte Schwingbreite) $\Delta \sigma_{Rsk}/Y_{s,fat}$ 64,348 64,348 64,348 N/mm²

Vorhandene Bewehrung $\text{vorh. } a_s$ 12,32 9,05 12,32 cm²/m

Erforderliche Bewehrung aus Ermüden $\text{erf. } a_s$ 0,50 0,31 0,62 cm²/m

Ausnutzung Ermüden Stahl $U \sigma_{s,dyn}$ 4,1 3,4 5,0 %

Der Nachweis gegen Ermüden der Bewehrung ist erbracht.

4.2.9.2 Nachweis Beton in der Druckzone

$$M'_{Ed,dyn} = M'_{Qs,dyn} + M'_{Gs,min}$$

Bemessungsmoment, ständig+dynamisch $M'_{Ed,dyn}$ 21,604 25,941 34,748 kNm/m

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite:
D-106

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.

$$\sigma'_{c,max} = \sigma_{c,dyn} \cdot \frac{M'_{Ed,dyn}}{M'_{Qs,dyn}}$$

Maximale Betondruckspannung $\sigma'_{c,max}$ 7,542 11,240 12,130 N/mm²

$$\sigma'_{c,min} = \sigma_{c,dyn} \cdot \frac{M'_{Gs,min}}{M'_{Qs,dyn}}$$

Minimale Betondruckspannung $\sigma'_{c,min}$ 7,351 10,962 11,850 N/mm²

$$U_{\sigma'_{c,max,eff}} = \frac{\sigma'_{c,max}}{f_{cd,fat}}$$

DIN EN 1992-1-1 Gl. (6.77)

Ausnutzung bei maximaler Betondruckspannung

$U_{\sigma'_{c,max,eff}}$ 0,333 0,496 0,535 [-]

$$U_{\sigma_{s,max,dyn}} = \frac{U_{\sigma'_{c,max,eff}}}{U_{\sigma'_{c,min,eff}}}$$

Ausnutzung Ermüden maximale Spannung $U_{\sigma_{s,max,dyn}}$ 51,5 69,1 72,8 %

$$U_{\sigma'_{c,min,eff}} = 0,50 + 0,45 \cdot \frac{\sigma'_{c,min}}{f_{cd,fat}}$$

DIN EN 1992-1-1 Gl. (6.77)

Ausnutzung bei minimaler Betondruckspannung

$U_{\sigma'_{c,min,eff}}$ 0,646 0,718 0,735 [-]

$$U_{\sigma_{s,min,dyn}} = \frac{U_{\sigma'_{c,min,eff}}}{0,90}$$

Ausnutzung Ermüden minimale Spannung $U_{\sigma_{s,min,dyn}}$ 71,8 79,7 81,7 %

$$U_{\sigma'_{c,max,eff}} \leq U_{\sigma'_{c,min,eff}} \leq 0,9$$

DIN EN 1992-1-1 Gl. (6.77)

Ausnutzung Ermüden Beton

$U_{\sigma_{c,dyn}}$ 71,8 79,7 81,7 %

Der Nachweis gegen Ermüden des Betons ist erbracht.

Alle notwendigen Nachweise sind erbracht.

MA-250346_HSO-RVT02.1_20260417_113058.pdf

Bauteil: RVT02 - Rohrvortrieb Gleisparallel
MA-250346

Seite:
D-107

Kapitel / Vorgang: D - Berechnung
D01 Vortriebsrohr - Berechnung

Archiv-Nr.