

Statische Berechnung - SAN 03

GFK Sanierung Hauptsammler Ost

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: 283

Bauteil: SAN-03 - GFK Sanierung Hauptsammler Ost

Seite:

1

Kapitel / Vorgang:
TB Titelblatt

Archiv-Nr.

Inhaltsverzeichnis

Position	Beschreibung	Seite
TB	Titelblatt	1
	Inhalt	2
V - Vorbemerkungen		V-1
V01	Vorbemerkung zur Gesamtmaßnahme	V-2
V02	Übersicht Bauteile	V-3
V03	Vorbemerkung zum Bauteil SAN-03	V-4
V04	Unterlagen	V-5
V05	Vorschriften / Literatur	V-7
A - Lastannahmen		A-1
A01	Lasten im Bereich von Gebäuden	A-2
A02	Einfluss von Eisenbahnverkehrslasten	A-3
B - Materialien		B-1
B01	Material GFK - Inliner	B-2
C - Hinweise zur Berechnung		C-1
C01	Hinweise zu Berechnung der GFK - Inliner	C-2
C02	Querschnitt	C-6
C03	Querschnitt für die Nachweise	C-7
C04	Baugrund	C-8
QP1	Schacht 44928	C-9
QP2	Schacht 44929	C-10
QP3	Schacht 44930	C-11
QP4	Schacht 44932	C-12
QP5	Schacht 44933	C-13
QP6	Schacht 3846	C-14
QP7	Schacht 3848	C-15
QP	Zusammenstellung Querprofile	C-16
D - Nachweise		D-1
01.1	815 / 1570 t = 40 / Bereich Eisenbahnlasten	D-2
01.2	815 / 1570 t = 40 / Bereich Eisenbahnlasten	D-114
02.1	815 / 1570 t = 30 / Bereich Straßenverkehr	D-179
02.2	815 / 1570 t = 30 / Bereich Straßenverkehr	D-214

Bauteil: SAN-03 - GFK Sanierung Hauptsammler Ost
MA-250346

Seite: 2

Kapitel / Vorgang: Inhaltsverzeichnis

Archiv-Nr.

V - Vorbemerkungen

Pos. V01

Vorbemerkung zur Gesamtmaßnahme

Veranlassung

- Der Hauptsammler Ost (HS Ost) ist einer von zwei Zuleitungen zum Hauptklärwerk Wiesbaden. Er wurde im Jahr 1901 als gemauerter Kanal erstellt und leitet über eine Strecke von rd. 1.560 m das Mischwasser der Kernstadt Wiesbaden, den östlich gelegenen Direkteinzugsgebieten sowie das Regenwasser aus mehreren Überläufen und Überlaufbecken dem Hauptklärwerk zu.
- Der Hauptsammler verläuft parallel zum Salzbachkanal und zu großen Teilen unterhalb der Bahngleise bis zu einer am Ende befindlichen Regenentlastungs-anlage, die bei Regenwetter in den Salzbach entlastet.
- Der Hauptsammler Ost weist erhebliche bauliche Schäden auf, weshalb dieser inkl. der abzweigenden Rohrleitungen im Bereich des Wiesbadener Hauptbahnhofs umfassend saniert wird.
- Der Hauptsammler Ost wird vom Hauptbahnhof auf einer Strecke von 952 m, im grabenlosen Verfahren mit GFK-Rohren instandgesetzt. Die Schächte in diesem Bereich werden erneuert. Die alten Schächte für den Salzbach und den Hauptsammler werden bis auf den Einstieg zum Salzbach verdämmt. Einige Schächte werden, um Platz für die 6 neuen Schächte zu schaffen, zurückgebaut.
- Anstelle der schleifenden Gleisquerung, die am Ende der Maßnahme verdämmt wird, soll eine neue Gleisquerung rechtwinklig zu den Gleisen von ca. 127 m Länge im Vortrieb DN 1600 hergestellt werden. Von der neuen Querung am Schacht 44927 aus wird die Trasse über einen Kurvenvortrieb 352 m parallel zu den Gleisen bis zum Schacht 42225 geführt und dort an den Bestand DN 1500 angeschlossen.
- Die Baugruben für die Schächte überwiegend mit Bohrpfahlwänden errichtet.

Die Bohrpfahlwände sind aufgrund der angrenzenden Rohrleitungen in Teilbereichen ausgesetzt.

Bauteil: SAN-03 - GFK Sanierung Hauptsammler Ost
MA-250346

Seite:
V-2

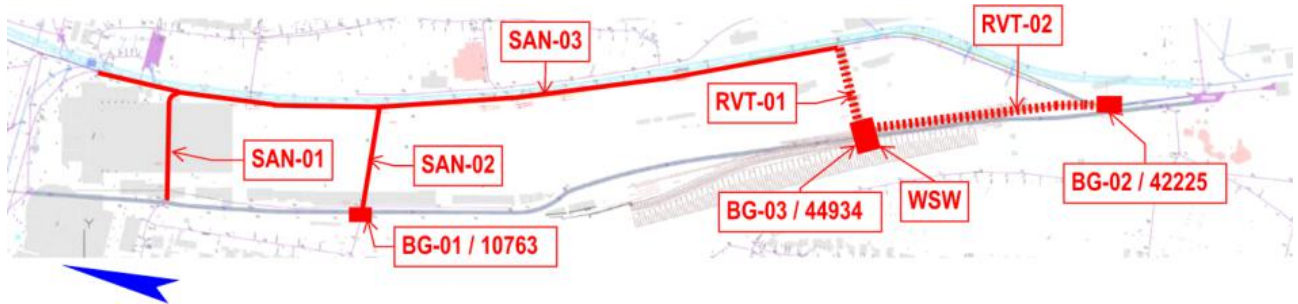
Kapitel / Vorgang: V - Vorbemerkungen
V01 Vorbemerkung zur Gesamtmaßnahme

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 Wendeplatz West (Winkelstützwand an Wendeplatz für Saugfahrzeug)	P901
-	HSW	Nachweis besteh. Hauptsammler West im Bauzustand (Auftrieb) im Schacht 44934	- / -

Bauteil: SAN-03 - GFK Sanierung Hauptsammler Ost
MA-250346

Seite: V-3

Kapitel / Vorgang: V - Vorbemerkungen
V02 Übersicht Bauteile

Archiv-Nr.

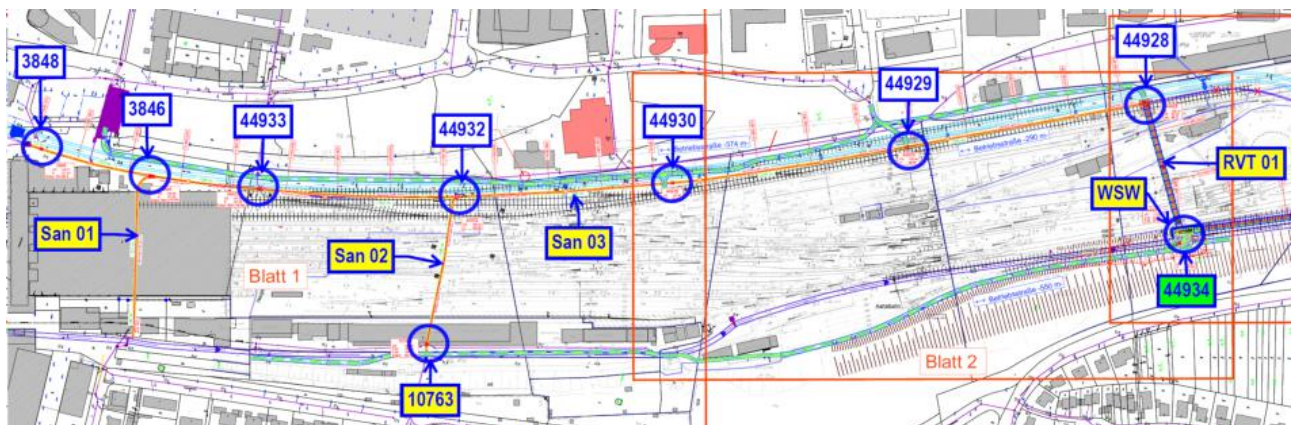
Pos. V03

Vorbemerkung zum Bauteil SAN-03

Gepl. Maßnahme SAN-03

- Bei den instand zu setzenden Kanälen handelt es sich um eiförmige gemauerte Kanäle aus der Zeit um 1905.
- Der hier behandelte Kanal beginnt an der Nordostecke des Bahnhofsgebäudes der Landeshauptstadt Wiesbaden, läuft an der Ostseite des Bahnhofs und der DB-Anlage im Bahnhofsvorfeld vorbei.
- Bez.: **GFK Sanierung Hauptsammler Ost**, besteh. Querschnitt Ei 1000/1750
Sanierung GFK mit Ei 815 / 1570 auf einer Gesamtlänge von ca. 1.070 m

Lageplan



Inhalt dieser Berechnung

Im Folgenden werden die zur Bestimmung des Querschnitts der Inliner erforderlichen statischen Nachweise geführt.

Der statische Nachweis der Lining-Rohre erfolgt nach Arbeitsblatt DWA-A 143-2 bzw. Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 127 unter Berücksichtigung der Ringraumverfüllung.

Bauteil: SAN-03 - GFK Sanierung Hauptsammler Ost
MA-250346

Seite: V-4

Kapitel / Vorgang: V - Vorbemerkungen
V03 Vorbemerkung zum Bauteil SAN-03

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: SAN-03 - GFK Sanierung Hauptsammler Ost
MA-250346

Seite: V-5

Kapitel / Vorgang: V - 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: SAN-03 - GFK Sanierung Hauptsammler Ost
 MA-250346

Seite: V-6

Kapitel / Vorgang: V - Vorbemerkungen
 V04 Unterlagen

Archiv-Nr.

Pos. V05

Vorschriften / Literatur

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: SAN-03 - GFK Sanierung Hauptsammler Ost
MA-250346

Seite: V-7

Kapitel / Vorgang: V - Vorbemerkungen
V05 Vorschriften / Literatur

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;
Stand: korrigierte Fassung März 2021

Bauteil: SAN-03 - GFK Sanierung Hauptsammler Ost
MA-250346

Seite: V-8

Kapitel / Vorgang: V - Vorbemerkungen
V05 Vorschriften / Literatur

Archiv-Nr.

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: SAN-03 - GFK Sanierung Hauptsammler Ost
MA-250346

Seite: V-9

Kapitel / Vorgang: V - Vorbemerkungen
V05 Vorschriften / Literatur

Archiv-Nr.

A - Lastannahmen

Pos. A01**Lasten im Bereich von Gebäuden**

Im Bereich dieses Sammlers sind keine Gebäudelasten vorhanden.

Bauteil: SAN-03 - GFK Sanierung Hauptsammler Ost
MA-250346**Seite:**
A-2**Kapitel / Vorgang:** A - Lastannahmen
A01 Lasten im Bereich von Gebäuden**Archiv-Nr.**

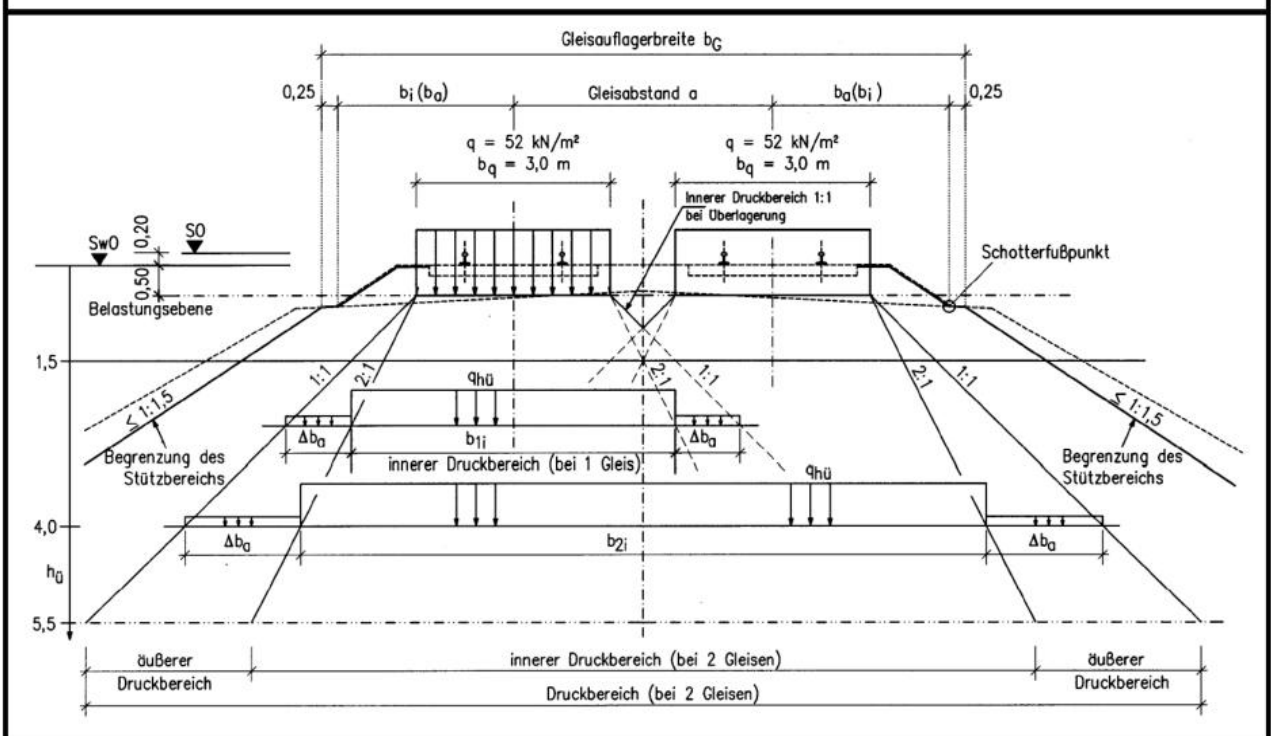
Pos. A02

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: SAN-03 - GFK Sanierung Hauptsammler Ost
MA-250346

Seite: A-3

Kapitel / Vorgang: A - Lastannahmen
A02 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.

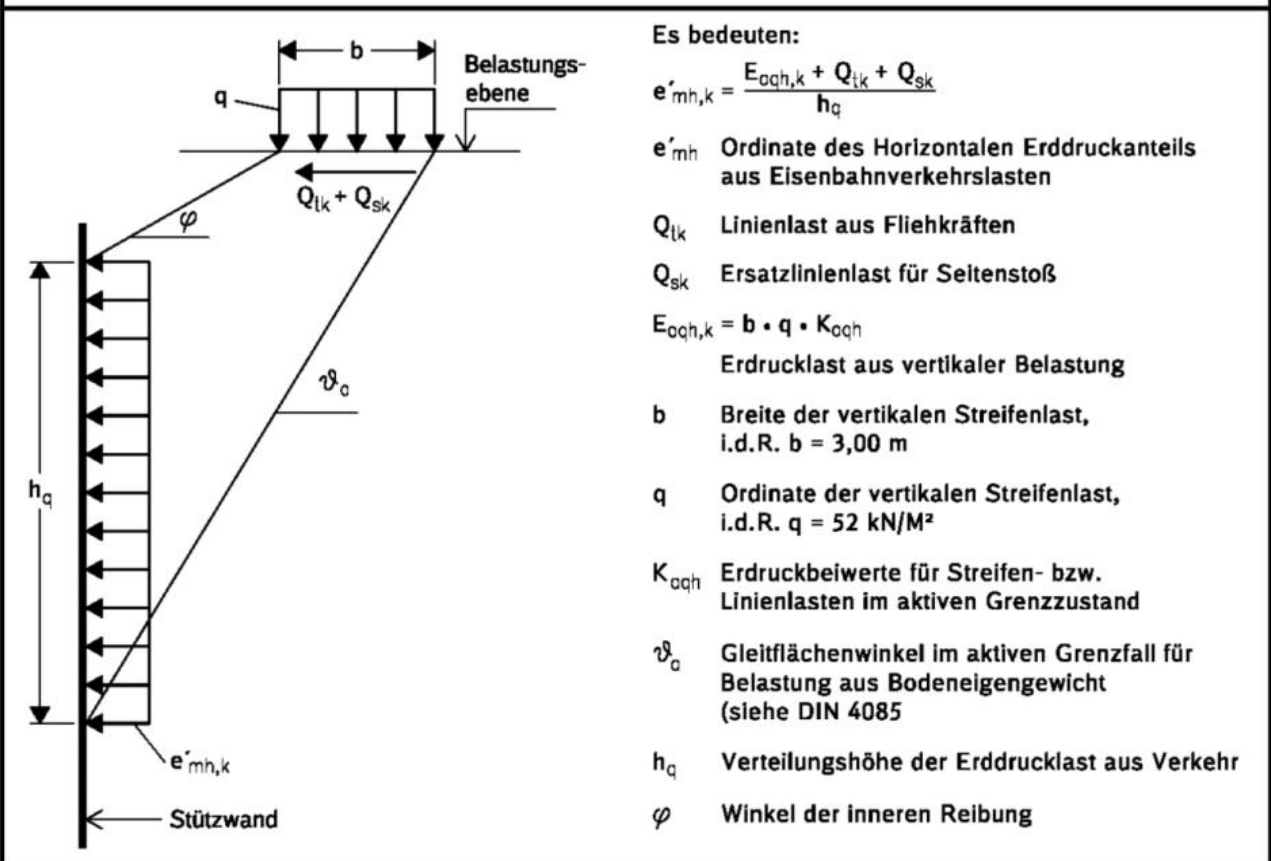
Überschüttungshöhe (Tiefe unter SO) [m]	Zusatzbreite b_a [m]	Vertikalspannungen [kN/m ²]
<i>Spalte 1</i>	<i>Spalte 2</i>	<i>Spalte 3</i>
1,5 (1,7)	0,5	7,5
2,5 (2,7)	1,0	6
4,0 (4,2)	1,75	5
5,5 (5,7)	2,5	4

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)



B - Materialien

Pos. B01

Material GFK - Inliner

Lining - Rohre

Hier sollen Lining-Rohre aus nachfolgenden Werkstoffen eingesetzt werden :

-glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK)

Hier werden Rohre mit abweichenden, projektbezogenen Abmessungen eingesetzt. Die qualitativen Anforderungen an die Rohre und die verwendeten Werkstoffe müssen der Aufstellung in Tabelle 3 entsprechen:

Tabelle 3: Materialübersicht Lining-Rohre (Auswahl)

Lining-Rohre	Verbindung	Allgemeine Produktnorm	Anwendungsnorm (Abwasser)
GFK	Steck-, Kleb- und Laminatverbindung	DIN 16868-1/-2 DIN 16869-1/-2 DIN ISO 16611	DIN EN ISO 23856 DIN ISO 16611

Verfüllung Ringraum

- Die Ringraumverfüllung dient der radialen Druckübertragung zwischen Altrohr und Lining-Rohr, da bei den Standsicherheitsnachweisen im Betriebszustand grundsätzlich vorausgesetzt wird, dass das Lining-Rohr rundum starr gebettet ist. Deshalb muss das Verfüllmaterial
- eine ausreichend hohe Bettungssteifigkeit in Abhängigkeit vom Lining-Rohr aufweisen und
- eine rundum vollständige Bettung des Lining-Rohrs gewährleisten.
- Eine hohe Druckfestigkeit des Verfüllmaterials ist nicht erforderlich. Grundsätzlich erhöht das Verfüllmaterial nicht die Tragfähigkeit des Systems, es sei denn es wird als volle Bettung angesetzt (Altrohrzustand IIIa), siehe hierzu 5.5.3. In diesem Fall sind die in der Statik zum Ansatz gebrachten Werte durch das Verfüllmaterial zu erbringen.
- Die Wichte des geplanten Dämmers soll 14 - 18 kN/m² (Normaldämmer) entsprechen.

Bauteil: SAN-03 - GFK Sanierung Hauptsammler Ost
MA-250346

Seite: B-2

Kapitel / Vorgang: B - Materialien
B01 Material GFK - Inliner

Archiv-Nr.

C - Hinweise zur Berechnung

Pos. C01

Hinweise zu Berechnung der GFK - Inliner

Nachweis

Der statische Nachweis der Lining-Rohre erfolgt nach Arbeitsblatt DWA-A 143-2 bzw. Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 127 unter Berücksichtigung der Ringraumverfüllung.

Verfüllung Ringraum

- Die Ringraumverfüllung dient der radialen Druckübertragung zwischen Altrohr und Lining-Rohr, da bei den Standsicherheitsnachweisen im Betriebszustand grundsätzlich vorausgesetzt wird, dass das Lining-Rohr rundum starr gebettet ist. Deshalb muss das Verfüllmaterial
- eine ausreichend hohe Bettungssteifigkeit in Abhängigkeit vom Lining-Rohr aufweisen und
- eine rundum vollständige Bettung des Lining-Rohrs gewährleisten.
- Eine hohe Druckfestigkeit des Verfüllmaterials ist nicht erforderlich. Grundsätzlich erhöht das Verfüllmaterial nicht die Tragfähigkeit des Systems, es sei denn es wird als volle Bettung angesetzt (Altrohrzustand IIIa), siehe hierzu 5.5.3. In diesem Fall sind die in der Statik zum Ansatz gebrachten Werte durch das Verfüllmaterial zu erbringen.
- Die Wichte des geplanten Dämmers soll 14 - 18 kN/m² (Normaldämmer) entsprechen.

Zus. Anforderungen im Bereich von Eisenbahnverkehrslasten

- 836.4502 2. (3) - Die Scheitelverformungen der Rohre sind unter Berücksichtigung des Schwelllasteinflusses nachzuweisen und dürfen höchstens 2% des Rohrdurchmessers, jedoch nicht mehr als 1,0 cm betragen.
- 836.4502 2. (9) - Durchlässe, deren Tragfähigkeit nicht mehr gewährleistet ist, können durch Einschieben eines ausreichend tragfähigen Rohres instandgesetzt werden, wenn garantiert ist, dass der reduzierte Querschnitt weiterhin eine ausreichende Durchflussmenge zulässt. Dazu ist eine Abflussmengenberechnung durchzuführen.
- Der Ringraum zwischen Rohr und bestehendem Durchlass ist kraftschlüssig und hohlraumfrei mit einer hydraulisch erhärtenden Suspension auf Zementbasis zu verpressen.

Bauteil: SAN-03 - GFK Sanierung Hauptsammler Ost
MA-250346

Seite: C-2

Kapitel / Vorgang: C - Hinweise zur Berechnung
C01 Hinweise zu Berechnung der GFK - Inliner

Archiv-Nr.

- Die Standsicherheit ist für das eingeschobene Rohr alleine, d.h. ohne Berücksichtigung einer eventuell vorhandenen Resttragwirkung des bestehenden Durchlasses nachzuweisen. Erforderlichenfalls sind zusätzliche Beanspruchungen durch lokales Versagen des bestehenden Durchlasses zu berücksichtigen.
- => Gem. Vorgaben der DB soll eine (Rest-) Tragfähigkeit des bestehenden Kanals ("Altrohr") nicht angesetzt werden.

Nachweis im Bereich von Eisenbahnverkehrslasten

Die Nachweise erfolgen daher gem. [R401] im Altrohrzustand III.

Nachweis außerhalb von Eisenbahnverkehrslasten

- Die Nachweise erfolgen daher gem. [R401] im Altrohrzustand II.

Hinweise zum Rohrquerschnitt und zu den geführten Nachweisen

Nachweis mit der verwendeten Software

- Die verwendete Software (IngSoft EasyPipe V3.1.0.0) kann nur für Kreisprofile oder für Eiprofile mit $b:h = 2:3$ eingesetzt werden.
- Das sich durch den Bestandskanal ergebende "Ei"-Profil ist wesentlich schmaler (überhöhte Eiform), so dass zusätzliche Überlegungen angestellt werden müssen.

Nachweis mit Ersatz-Kreisprofil

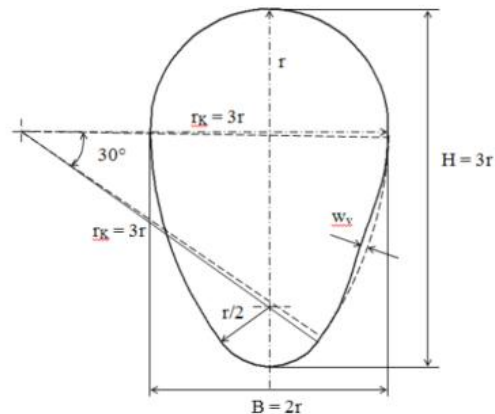
- Ein Nachweis mit einem Kreisprofil mit Radius der Firste / Scheitelbereich liefert nicht immer Ergebnisse auf der sicheren Seite und wird daher nicht geführt.
- Insbesondere wird für hier zu wählende das hohe Eiprofil das Einbeulen des seitlichen flachen Bereiches (Kämpfer) als kritisch angesehen.

Bauteil: SAN-03 - GFK Sanierung Hauptsammler Ost
MA-250346

Seite:
C-3

Kapitel / Vorgang: C - Hinweise zur Berechnung
C01 Hinweise zu Berechnung der GFK - Inliner

Archiv-Nr.



**Bild 16: Normaler Eiquerschnitt z. B. nach DIN 4263
mit Vorverformung am rechten Kämpfer
(DWA-A 134-2)**

- Ein Nachweis mit einem Kreisprofil mit dem größten Radius ist offensichtlich viel zu ungünstig und damit unwirtschaftlich und wird daher nicht geführt.

Nachweis mit Ersatz-Eiprofil

- Stattdessen erfolgt der Nachweis folgenderweise:
 - Nachweis mit einem Eiprofil mit $b:h = 2:3$ mit einem Radius r , der dem größten Radius des tatsächlich gewählten Liningprofiles entspricht.
 - Nachweis mit einem Eiprofil mit $b:h = 2:3$ mit einem Radius r , der der Gesamtlänge des schwach gekrümmten Bereiches (Ulmen / Kämpfer) des tatsächlich gewählten Liningprofiles entspricht.

Damit soll für den seitlichen Druck eine ausreichende Sicherheit (Biegung, Beulen) nachgewiesen werden.

- Bei diesem Nachweis wird das Kriterium für die Einsenkung im Scheitelbereich für den Bahnbereich von max. 2% bzw. max. 10 mm mit einem Rechenergebnis von 12,4 mm rechnerisch nicht eingehalten.

Dies kann unberücksichtigt bleiben, da die Verhältnisse bei der in diesem Nachweis verwendeten Geometrie offensichtlich - aufgrund des deutlich zu groß angesetzten Radius im Scheitelbereich - nicht die tatsächlichen Verhältnisse wiedergeben. Selbst der Nachweis A) ist für den Scheitelbereich aufgrund des zu groß angesetzten Radius immer noch ungünstig.

Die übrigen Nachweise sind auch für diese Geometrie eingehalten.

Bauteil: SAN-03 - GFK Sanierung Hauptsammler Ost
MA-250346

Seite: C-4

Kapitel / Vorgang: C - Hinweise zur Berechnung
C01 Hinweise zu Berechnung der GFK - Inliner

Archiv-Nr.

Vorverformung - gem. DWA-A 143-2

Tabelle 9: Lage und Verteilung der Imperfektionen ω_v bei sonstigen Querschnitten

Profil	Lage ω_v	Symmetrie zur vertikalen Achse	Größe ω_v (%)	Öffnungswinkel $2\varphi_1$	Bemerkungen
Nicht normales Eiprofil $B:H \neq 2:3$	Mitte des flachen Bereichs, einseitig	nein	0,5 % von H	Größe des flachen Bereichs	–

Überdeckung / Querprofile

- Ein Längsschnitt des Kanals liegt nicht vor.
- Es werden die anhand der Planung der Schächte vorhandenen Informationen genutzt.

Daher werden zunächst im Bereich der Schächte entsprechende Querprofile ausgewertet.

Bauteil: SAN-03 - GFK Sanierung Hauptsammler Ost
MA-250346

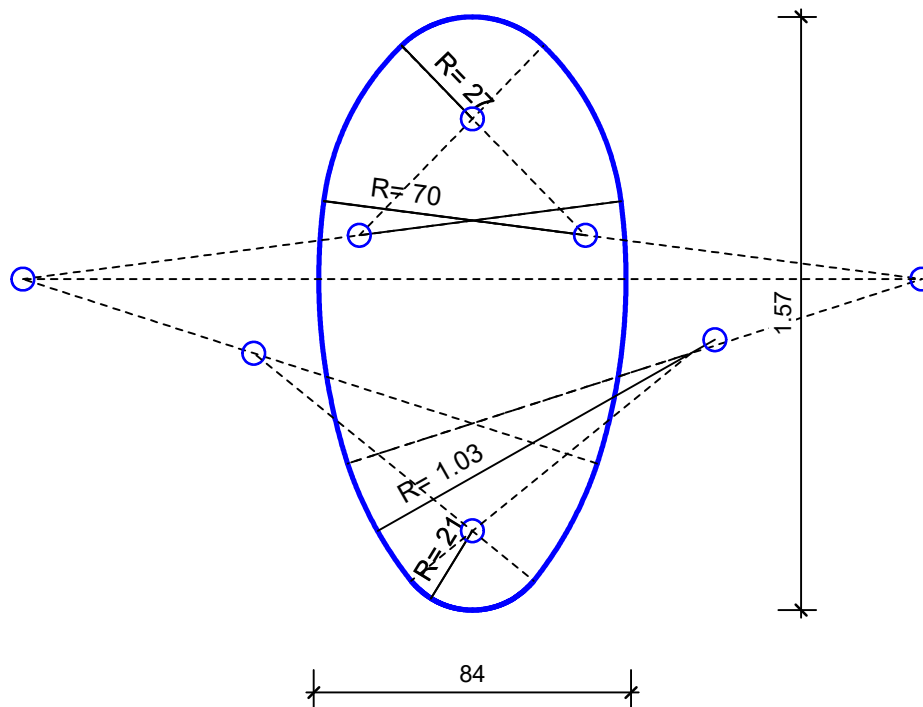
Seite: C-5

Kapitel / Vorgang: C - Hinweise zur Berechnung
C01 Hinweise zu Berechnung der GFK - Inliner

Archiv-Nr.

Pos. C02
Querschnitt

SAN-03


Bauteil: SAN-03 - GFK Sanierung Hauptsammler Ost
MA-250346

Seite: C-6

Kapitel / Vorgang: C - Hinweise zur Berechnung
C02 Querschnitt

Archiv-Nr.

Pos. C03

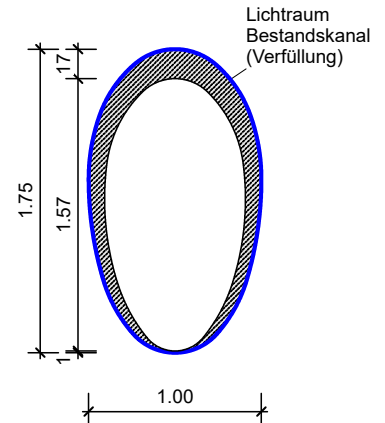
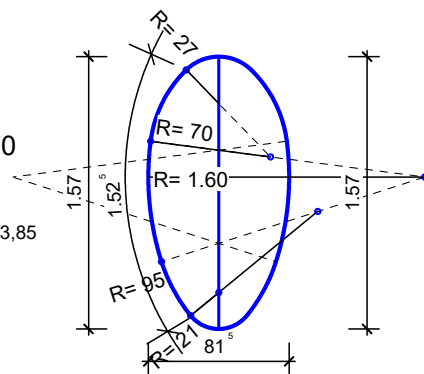
Querschnitt für die Nachweise

SAN-03

Inliner 815 / 1570

angepasst an
besteh. Kanalprofil
 $b : h = 815 / 1570 = 2 : 3,85$

$t = 40 \text{ mm}$ (Abs. 1 - 5)
 $t = 30 \text{ mm}$ (Abs. 6)

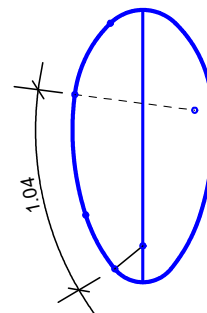
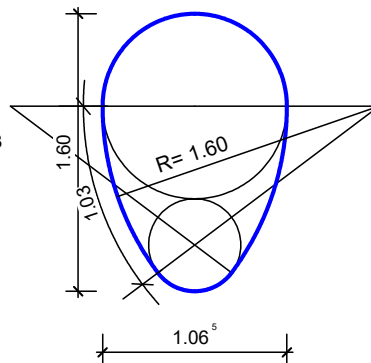


Ersatz-Ei-Profil A

mit $r = r_{\text{max}} = 1,60 \text{ m}$

Eiprofil

$b : h = 1065 / 1600 = 2 : 3$

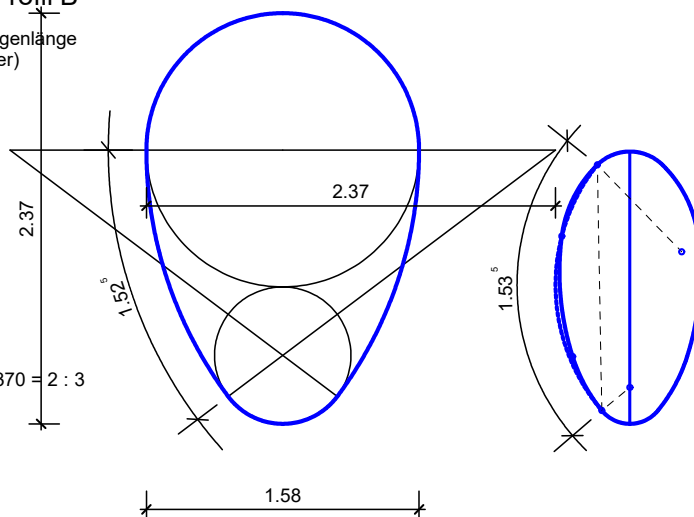


Ersatz-Ei-Profil B

mit "Ersatz"-Bogenlänge
seitlich (Kämpfer)
 $r = 1,085 \text{ m}$

Eiprofil

$b : h = 1580 / 2370 = 2 : 3$



Bauteil: SAN-03 - GFK Sanierung Hauptsammler Ost
MA-250346

Seite: C-7

Kapitel / Vorgang: C - Hinweise zur Berechnung
C03 Querschnitt für die Nachweise

Archiv-Nr.

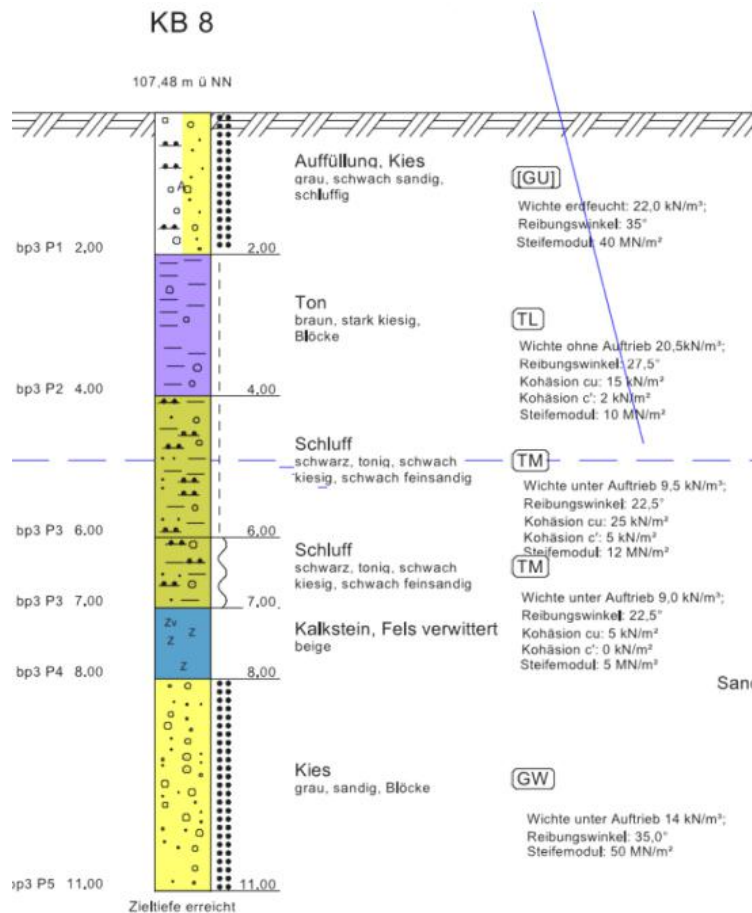
Pos. C04

Baugrund

Überwiegende Situation

- Als Baugrund steht überwiegend Ton mit $E_s = 10 \text{ MN/m}^2$ an.

Abschnitt 2 - zw. QP 2 und QP 3



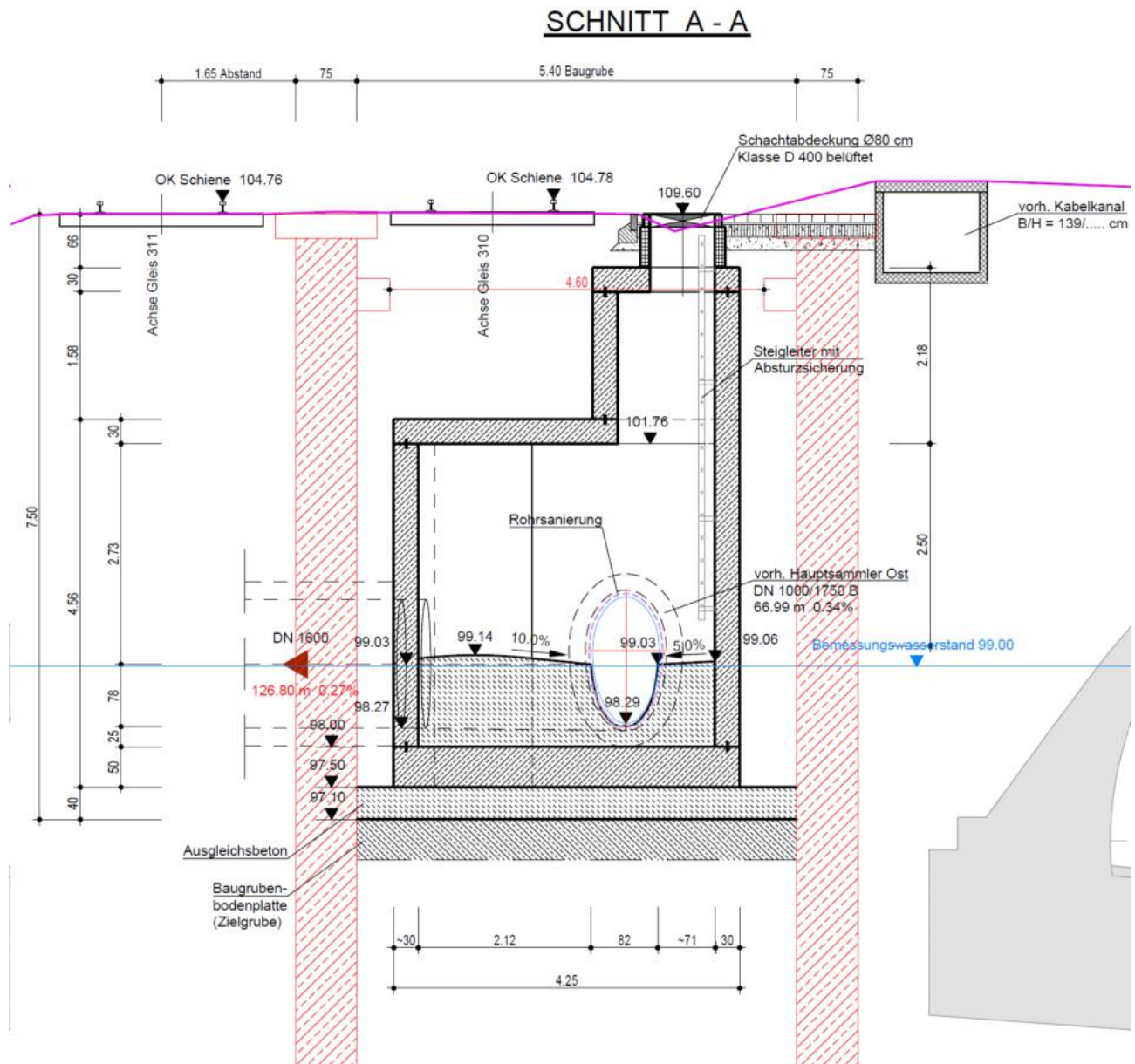
- Lediglich im Bereich der KB 8 findet sich eine Schlufflinse, deren unterer Abschnitt bei 6,00 m - 7,00 m unter GOK bei 1,00 m Mächtigkeit nur mit einem Steifemodul $E_s = 5 \text{ MN/m}^2$ ausgewiesen ist.

Vorsichtshalber wird für globale Nachweise mit $E_s = 8 \text{ MN/m}^2$ gerechnet, für den Nachweis des schwach gekrümmten Kämpfers mit $E_s = 5 \text{ MN/m}^2$

- Im Bereich neben der Bahnhofshalle wird mit $E_s = 10 \text{ MN/m}^2$ gerechnet.

Pos. QP1

Schacht 44928



Höhenlagen: OK Gelände / Schiene $H = + 104,78 \text{ m NHN}$

UK Schacht (Bestand) $H = 104,78 - 98,29 = - 6,49 \text{ m unter GOK}$

Belastung: Schienenverkehr - Kanal liegt im inneren Druckbereich

Bauteil: SAN-03 - GFK Sanierung Hauptsammler Ost
MA-250346

Seite: C-9

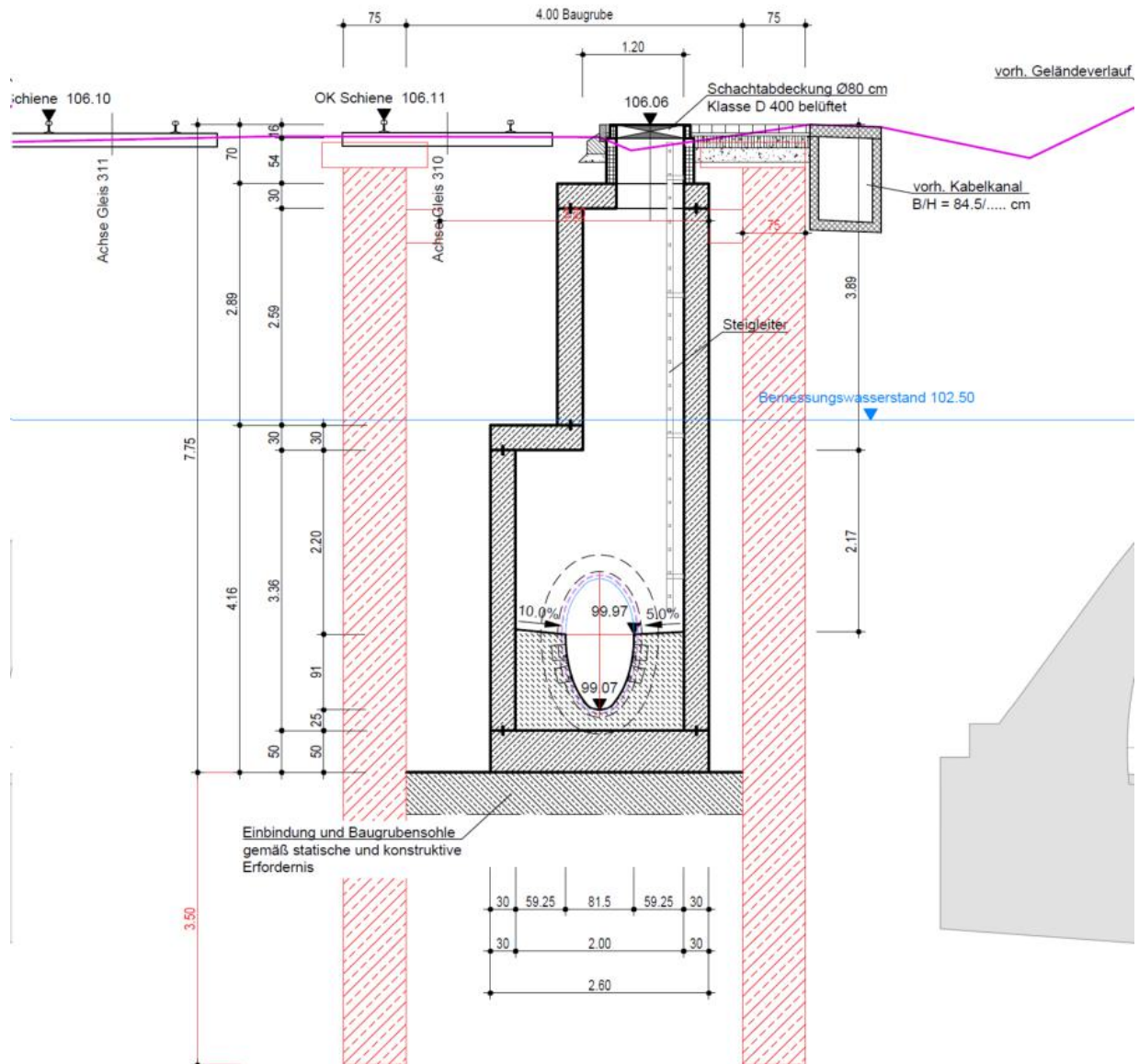
Kapitel / Vorgang: C - Hinweise zur Berechnung
QP1 Schacht 44928

Archiv-Nr.

Pos. QP2

Schacht 44929

SCHNITT A - A


Höhenlagen:

OK Gelände / Schiene

 $H = +106,11 \text{ m NHN}$

UK Schacht (Bestand)

 $H = 106,11 - 99,07 = 7,04 \text{ m unter GOK}$
Belastung:

 Schienenverkehr - Kanal liegt im inneren Druckbereich

Bauteil: SAN-03 - GFK Sanierung Hauptsammler Ost
MA-250346

Seite:

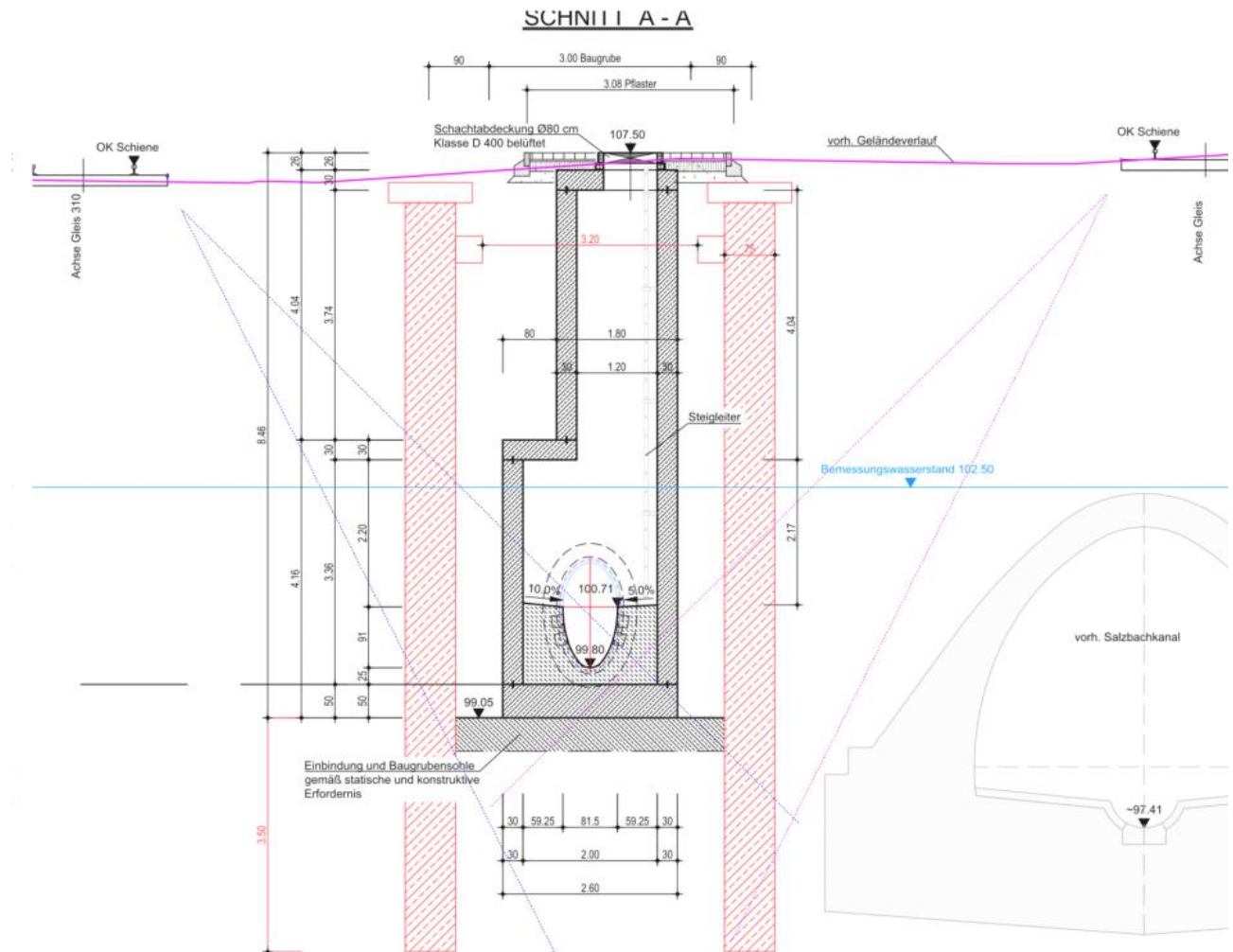
C-10

Kapitel / Vorgang: C - Hinweise zur Berechnung
QP2 Schacht 44929

Archiv-Nr.

Pos. QP3

Schacht 44930



Höhenlagen: OK Gelände / Schiene $H = +107,50 \text{ m NHN}$

UK Schacht (Bestand) $H = 107,50 - 99,80 = -7,70 \text{ m unter GOK}$

Belastung: Schienenverkehr - Kanal liegt im äußeren Druckbereich

Bauteil: SAN-03 - GFK Sanierung Hauptsammler Ost
MA-250346

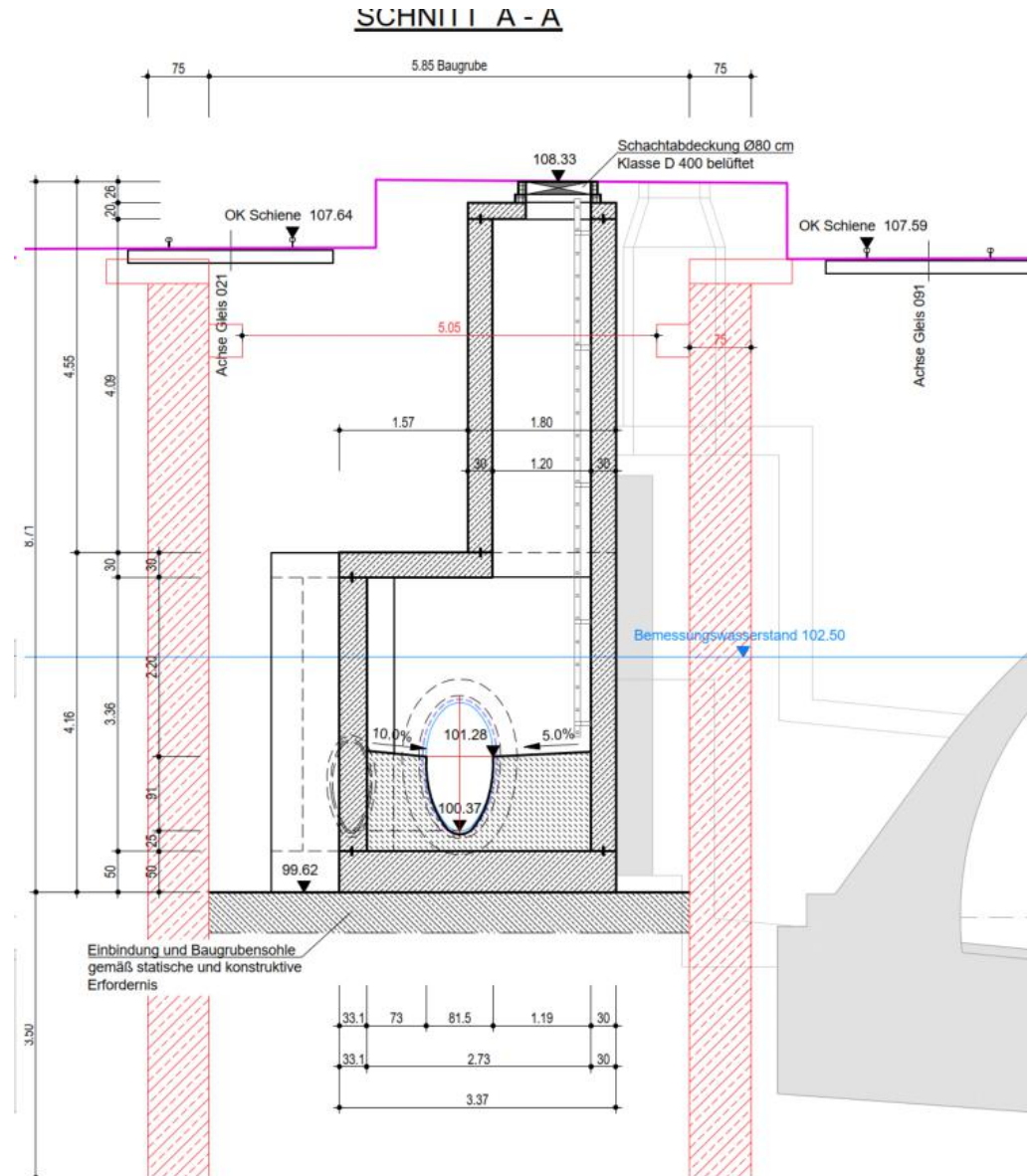
Seite:
C-11

Kapitel / Vorgang: C - Hinweise zur Berechnung
QP3 Schacht 44930

Archiv-Nr.

Pos. QP4

Schacht 44932


Höhenlagen:

OK Gelände / Schiene

 $H = +107,64 \text{ m NHN}$

UK Schacht (Bestand)

 $H = 107,64 - 100,37 = - 7,27 \text{ unter GOK}$
Belastung:

Eisenbahnlasten

innerer Druckbereich

Bauteil: SAN-03 - GFK Sanierung Hauptsammler Ost
MA-250346

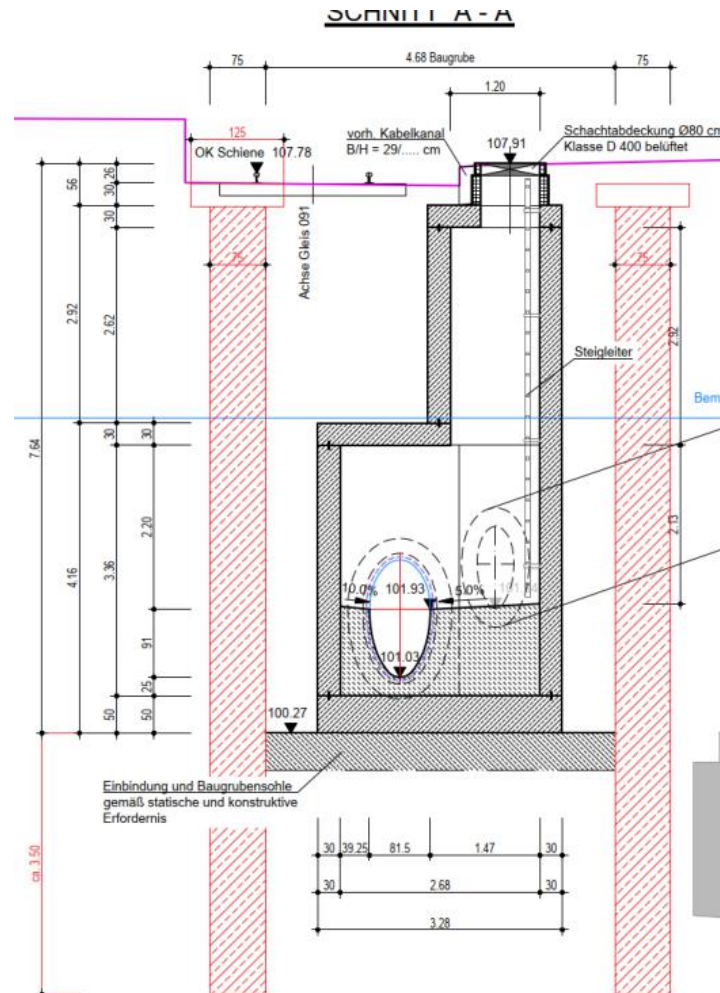
Seite:
C-12

Kapitel / Vorgang: C - Hinweise zur Berechnung
QP4 Schacht 44932

Archiv-Nr.

Pos. QP5

Schacht 44933



Höhenlagen:	OK Gelände / Schiene	H = +107,78 m NHN
	UK Schacht (Bestand)	H = 107,78 - 101,03 = -6,75 unter GOK
Belastung:	Schienenverkehr	Kanal liegt im inneren Druckbereich

Bauteil: SAN-03 - GFK Sanierung Hauptsammler Ost
MA-250346

Seite:
C-13

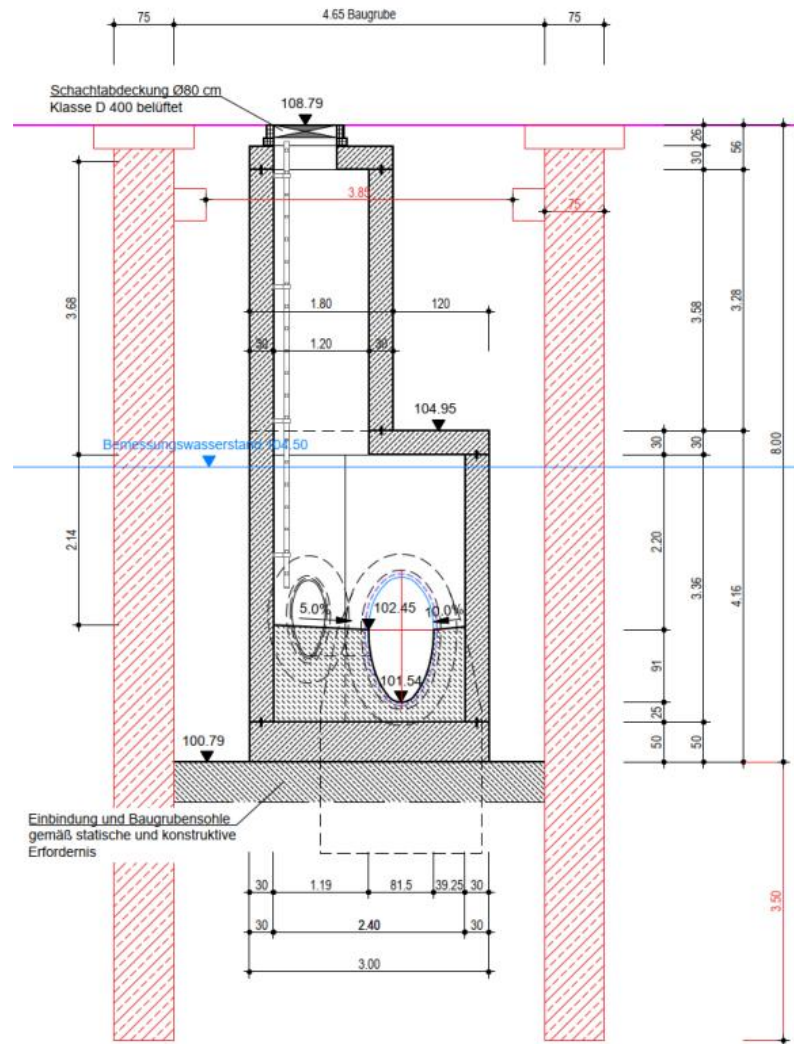
Kapitel / Vorgang: C - Hinweise zur Berechnung
QP5 Schacht 44933

Archiv-Nr.

Pos. QP6

Schacht 3846

SCHNITT A - A


Höhenlagen:

OK Gelände

 $H = +108,49 \text{ m NHN}$

UK Schacht (Bestand)

 $H = 108,79 - 101,54 = - 7,25 \text{ unter GOK}$
Belastung:

Straßenverkehr

Bauteil: SAN-03 - GFK Sanierung Hauptsammler Ost
MA-250346

Seite:
C-14

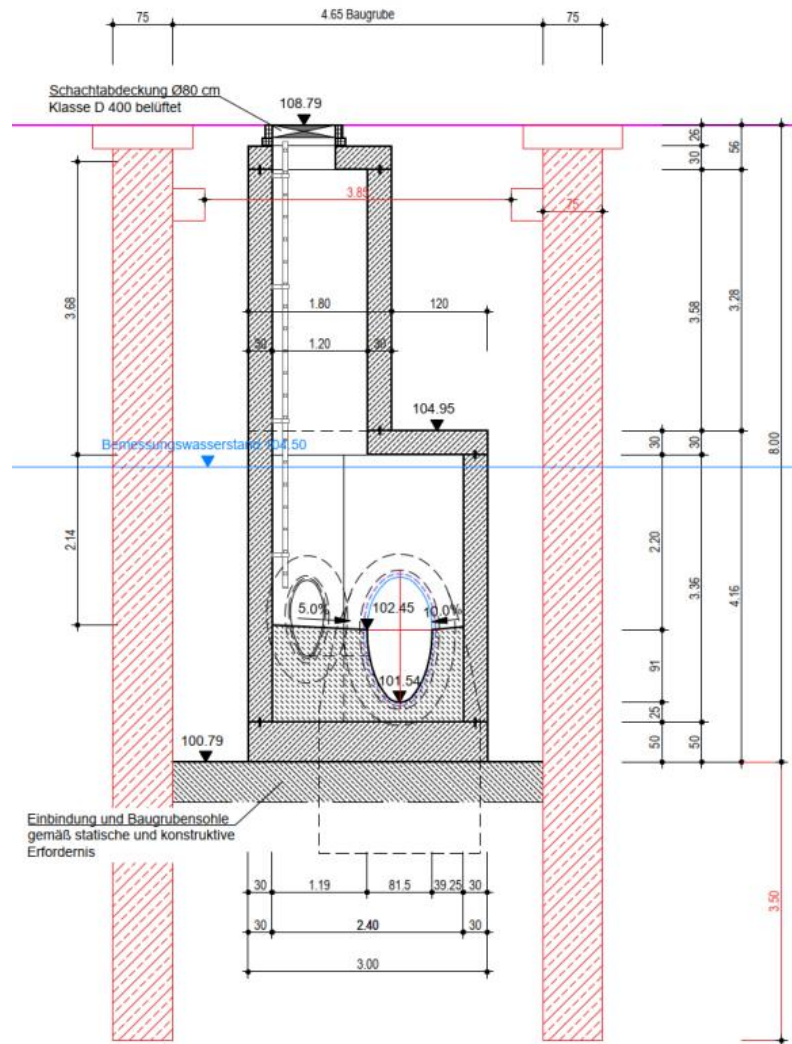
Kapitel / Vorgang: C - Hinweise zur Berechnung
QP6 Schacht 3846

Archiv-Nr.

Pos. QP7

Schacht 3848

SCHNITT A - A


Höhenlagen:

OK Gelände

 $H = +108,49 \text{ m NHN}$

UK Schacht (Bestand)

 $H = 108,79 - 101,54 = - 7,25 \text{ unter GOK}$
Belastung:

Straßenverkehr

Bauteil: SAN-03 - GFK Sanierung Hauptsammler Ost
MA-250346

Seite:
C-15

Kapitel / Vorgang: C - Hinweise zur Berechnung
QP7 Schacht 3848

Archiv-Nr.

Pos. QP

Zusammenstellung Querprofile

Auswertung

Die Zusammenstellung der Querprofile QP1 - QP 7 ergibt folgendes:

Abschnitt	Querprofil	Schacht	OK Gelände (Schiene)	Kanalsohle	HGW ü. Kanalsohle	Höhe Kanal	Dicke Altrohr	Erdauflast	Wasser- stand	Verkehrslast
1	QP1	44928	104,75	98,29	99,00	1,65	0,25	4,56	0,71	Bahn innen
2	QP2	44929	106,11	99,07	102,50	1,65	0,25	5,14	3,43	Bahn innen
3	QP3	44930	107,50	99,80	102,50	1,65	0,25	5,80	2,70	Bahn außen
4	QP4	44932	107,64	100,37	102,50	1,65	0,25	5,37	2,13	Bahn innen
5	QP5	44933	107,78	101,03	104,50	1,65	0,25	4,85	3,47	Bahn innen
6	QP6	3846	108,79	101,54	104,50	1,65	0,25	5,35	2,96	Straßenverkehr
	QP7	3848	108,79	101,54	104,50	1,65	0,25	5,35	2,96	Straßenverkehr

- Die Einwirkungen aus den Eisenbahnlasten sind aufgrund der variierenden Abständen zwischen Gleis und Kanal und variierender Höhenlage nicht exakt zuzuweisen. Insgesamt liegen bis auf einen Querschnitt (QP3) alle im inneren Druckbereich der Eisenbahnlasten.
- Der Abschnitt 6 zwischen QP 6 und QP 7 liegt im Bereich von Straßenverkehrslasten.

Untersuchte Querschnitte

- Es werden zwei Abschnitte untersucht:

A) Bereich mit Eisenbahnlasten

- Abschnitte 1 - 5 (zw. Schächten 44928 - 3846)

Erdauflast max 5,80 m

Erdauflast min 4,58 m

Wasserstand (max) 3,47 m

B) Bereich mit Straßenverkehrslasten

Bauteil: SAN-03 - GFK Sanierung Hauptsammler Ost
MA-250346

Seite: C-16

Kapitel / Vorgang: C - Hinweise zur Berechnung
QP Zusammenstellung Querprofile

Archiv-Nr.

- Abschnitt 6 (zw. Schächten 3846 / 3848)

Erdauflast max 5,35 m

Erdauflast min - / -

Wasserstand (max) 3,00 m

Bauteil: SAN-03 - GFK Sanierung Hauptsammler Ost
MA-250346

Seite: C-17

Kapitel / Vorgang: C - Hinweise zur Berechnung
QP Zusammenstellung Querprofile

Archiv-Nr.

D - Nachweise

Pos. 01.1

815 / 1570 t = 40 / Bereich Eisenbahnlasten

Inhaltsangabe

1 Bemerkungen	4
2 Statik nach DWA-A 143-2	5
2.1 Eingaben	5
2.1.1 Geometrie	5
2.1.2 Materialien	5
2.1.3 Lasten	6
2.2 Ergebnisse	6
2.2.1 Hinweis zum Einzelrohr-Lining	6
2.2.2 Materialkennwerte	6
2.2.2.1 Liner	6
2.2.2.2 Altrohr	7
2.2.3 Ringsteifigkeit nach ISO 7685	7
2.2.4 Hinweise zur Berechnung	7
2.2.5 Lastfall 01 AZ II - hW 3,47 m, Langzeit	9
2.2.5.1 Geometrie diskretisiertes System	10
2.2.5.2 Verformungsnachweis Liner, Gebrauchslast	12
2.2.6 Lastfall 02 [Ersatzkreis] AZ III - hW 0,00 m + h 6,46 m + ws 0,0 % + ww 0,0 %,	18
2.2.6.1 Geometrie diskretisiertes System	18
2.2.6.2 Erdlasten und Verkehrslasten	19
2.2.6.3 Verformungsnachweis Liner, Gebrauchslast	22
2.2.6.4 Bodeninteraktion (Gebrauchslast)	23
2.2.6.5 Stabilitätsnachweis (Designwerte)	25
2.2.6.6 Spannungsnachweis Liner, Zwang	29
2.2.6.7 Altrohrspannungen Kämpfer	33
2.2.7 Lastfall 03 [Ersatzkreis] AZ III - hW 3,47 m + h 6,46 m + ws 0,4 % + ww 0,5 %,	34
2.2.7.1 Geometrie diskretisiertes System	34
2.2.7.2 Erdlasten und Verkehrslasten	35
2.2.7.3 Verformungsnachweis Liner, Gebrauchslast	38
2.2.7.4 Bodeninteraktion (Gebrauchslast)	39
2.2.7.5 Stabilitätsnachweis (Designwerte)	41
2.2.7.6 Spannungsnachweis Liner, Zwang	45
2.2.7.7 Altrohrspannungen Kämpfer	49
2.2.8 Lastfall 04 [Ersatzkreis] AZ III - hW 3,47 m + h 6,46 m + ws 0,0 % + ww 0,0 %,	50
2.2.8.1 Geometrie diskretisiertes System	50
2.2.8.2 Erdlasten und Verkehrslasten	51
2.2.8.3 Verformungsnachweis Liner, Gebrauchslast	54
2.2.8.4 Bodeninteraktion (Gebrauchslast)	55
2.2.8.5 Stabilitätsnachweis (Designwerte)	57
2.2.8.6 Spannungsnachweis Liner, Zwang	61
2.2.8.7 Altrohrspannungen Kämpfer	65
2.2.9 Lastfall 05 [Ersatzkreis] AZ III - hW 0,00 m + h 7,70 m + ws 0,0 % + ww 0,0 %,	66
2.2.9.1 Geometrie diskretisiertes System	66
2.2.9.2 Erdlasten und Verkehrslasten	67
2.2.9.3 Verformungsnachweis Liner, Gebrauchslast	70
2.2.9.4 Bodeninteraktion (Gebrauchslast)	71

2.2.9.5 Stabilitätsnachweis (Designwerte)	73
2.2.9.6 Spannungsnachweis Liner, Zwang	77
2.2.9.7 Altrohrspannungen Kämpfer	81
2.2.10 Lastfall 06 [Ersatzkreis] AZ III - hW 3,47 m + h 7,70 m + ws 0,4 % + vv 0,5 %,	82
2.2.10.1 Geometrie diskretisiertes System	82
2.2.10.2 Erdlasten und Verkehrslasten	83
2.2.10.3 Verformungsnachweis Liner, Gebrauchslast	86
2.2.10.4 Bodeninteraktion (Gebrauchslast)	87
2.2.10.5 Stabilitätsnachweis (Designwerte)	89
2.2.10.6 Spannungsnachweis Liner, Zwang	93
2.2.10.7 Altrohrspannungen Kämpfer	97
2.2.11 Lastfall 07 [Ersatzkreis] AZ III - hW 3,47 m + h 7,70 m + ws 0,0 % + vv 0,0 %,	98
2.2.11.1 Geometrie diskretisiertes System	98
2.2.11.2 Erdlasten und Verkehrslasten	99
2.2.11.3 Verformungsnachweis Liner, Gebrauchslast	102
2.2.11.4 Bodeninteraktion (Gebrauchslast)	103
2.2.11.5 Stabilitätsnachweis (Designwerte)	105
2.2.11.6 Spannungsnachweis Liner, Zwang	109
2.2.11.7 Altrohrspannungen Kämpfer	113

1 Bemerkungen

Abschnitt 1 - 5

Mit dem folgenden Nacheis soll der Scheitel nachgewiesen werden.
Der Nachweis erfolgt daher hier für das "kleine" Elprofil.

Es wird mit dem überwiegend und auch im Bereich des Scheitels vorhandenen
Steifemodul beträgt $E_s = 10 \text{ MN/m}^2$.

Dennoch wird vorsichtig gerechnet mit:

$E_s = 8 \text{ MN/m}^2$

Die Nachweise zur Bemessung sind eingehalten.

Der Vorformungsnachweis (elastische Einsenkung im Scheitel) ist hier rechnerisch minimal
mit $10,10 \text{ mm} > 10,00 \text{ mm}$ überschritten,
Dies kann jedoch in Anbetracht des vorsichtigen Ansatzes der Bettung außer Acht gelassen
werden.

2 Statik nach DWA-A 143-2

Verfahren:
Altrohrzustand:
Ausdruck Rohrsteifigkeit:
Art der Interaktion:
Nachweis Altrohr:
Nachweis Auftrieb:
Berechnungsoptionen nach Regelwerk:

Einzelrohr-Lining
AZ III
Nach ISO 7685
Überlagerung aller Lasten am System
Nein
Nein
Ja

2.1 Eingaben

2.1.1 Geometrie

Geometrie:
Lichte Breite in Kämpferhöhe:
Lichte Höhe Scheitel-Sohle:
Profilart:
Wanddicke Liner:
Gelenkringverformung:
Relative Exzentrizität der Gelenke Altrohr:

Art des Altrohres:
Tiefe Vorverformung lange Seite:
Öffnungswinkel lokale Vorverformung Sohle:
Öffnungswinkel lokale Vorverformung lange Seite:

Regeleiwerschnitt freie Eingabe
b_k 1.065,00 mm
h_s 1.600,00 mm
Vollwand
t_L 40,00 mm
w_{GRV}/r_L 0,00 %
e_{Grel} 0,35 [-]

Normales Eiprofil mit B:H = 2:3
w_v/r_L 0,50 %
2Φ 40,00 °
2Φ 36,80 °

Art des Ringspaltes:
Ringspalt (konst. Schrumpfmaß):

Konstantes Schrumpfmaß
w_s/U 0,400 %

Vollbettungsmodell:

Ja

2.1.2 Materialien

Material Altrohr:
Wanddicke Altrohr:

Definition Material:
Langzeitige Werte verwenden:
Nachweis Schubspannung führen:

Mauerwerk
SR 250,00 mm

Norm Tabelle 2/3
Ja
Nein

Wichtung der Spannungen:
Kennwerte nach Tabelle 2/3:
Eigengewicht:
Querkontraktionszahl:
Teilsicherheitsbeiwert Material:

Nein
UP-GF (Vor Ort)
γ 17,50 kN/m³
ν 0,35 [-]
γ_M 1,35 [-]

E-Modul, Langzeit
E-Modul, Kurzzeit
Zul. Druckfestigkeit, Langzeit
Zul. Druckfestigkeit, Kurzzeit
Zul. Biegezugfestigkeit, Langzeit
Zul. Biegezugfestigkeit, Kurzzeit
Zul. Zugfestigkeit, Langzeit
Zul. Zugfestigkeit, Kurzzeit

	Charakteristisch	Design	
E _{R,rad,L}	3.500,00	2.592,59	N/mm²
E _{R,rad,K}	6.000,00	4.444,44	N/mm²
f _{c,rad,L}	75,00	55,56	N/mm²
f _{c,rad,K}	130,00	96,30	N/mm²
f _{t,fl,L}	75,00	55,56	N/mm²
f _{t,fl,K}	130,00	96,30	N/mm²
f _{t,L}	n. def.	n. def.	N/mm²
f _{t,K}	n. def.	n. def.	N/mm²

Wärmedehnzahl: α_T 0,00003 1/K

2.1.3 Lasten

Wasserspiegel über Sohle Liner:	h_w	3,47	m
Gewicht Wasser:	γ_w	10,00	kN/m ³
Temperaturänderung:	ΔT	0,00	K
Max. Überdeckung Scheitel Altrohr:	h_{max}	7,70	m
Min. Überdeckung Scheitel Altrohr:	h_{min}	6,46	m
Wichte Boden manuell eingeben:	Ja		
Anzahl Überdeckungen:	2 Überdeckungshöhen		
Wichte Boden, trocken:	γ_B	20,00	kN/m ³
Wichte Boden, unter Auftrieb:	γ_B'	10,00	kN/m ³
Horizontale Verkehrslast berücksichtigen:	Ja		
Verkehrslast:	Bahn LM 71 - mehrgleisig		
Anpassungsfaktor α_{Qi} LM71 (DIN EN 1991-2):	$\alpha_{Qi,LM71}$	1,00	[-]
Abminderungsfaktor dynamische Last manuell eingeben:	Nein		
Zusätzliche Flächenlast:	p_0	0,0	kN/m ²
Altrohr vor Sanierung gerissen:	Ja		
Bodenverhalten:	Elastisch		
Direkte Eingabe E2:	Nein		
Berechnung Bettung E20:	E-Modul		
Bodengruppe Einbettung:	G4		
E-Modul Einbettung:	$E_{20,R,rad}$	8,0	N/mm ²
Teilsicherheitsbeiwert Eigengewicht:	γ_{GE}	1,35	[-]
Teilsicherheitsbeiwert Wasserdruck:	γ_w	1,50	[-]
Teilsicherheitsbeiwert Innendruck:	γ_{pi}	1,50	[-]
Teilsicherheitsbeiwert Temperatur:	γ_T	1,10	[-]
Teilsicherheitsbeiwert Erdlast:	γ_G	1,35	[-]
Teilsicherheitsbeiwert Verkehr:	γ_Q	1,50	[-]

2.2 Ergebnisse

2.2.1 Hinweis zum Einzelrohr-Lining

Die Querdehnzahl wird in der Berechnung nicht berücksichtigt, da davon ausgegangen wird, dass die einzelnen Rohre in den Muffen keinen axialen Schub übertragen.

2.2.2 Materialkennwerte

2.2.2.1 Liner

Teilsicherheitsbeiwert Material:	γ_M	1,35	[-]
Querkontraktionszahl:	ν	0,35	[-]
E-Modul, Langzeit:	$E_{R,rad,L}$	3.500,00	N/mm ²
$E_{R,rad,L,d} = \frac{E_{R,rad,L}}{\gamma_M}$			
E-Modul, Langzeit, Design:	$E_{R,rad,L,d}$	2.592,59	N/mm ²
Verwendeter E-Modul:	$E_{R,rad}$	2.592,59	N/mm ²
Zul. Druckfestigkeit, Langzeit:	$f_{c,rad,L}$	75,00	N/mm ²
$f_{c,rad,L,d} = \frac{f_{c,rad,L}}{\gamma_M}$			
Zul. Druckfestigkeit, Langzeit, Design:	$f_{c,rad,L,d}$	-55,56	N/mm ²
Zul. Biegezugfestigkeit, Langzeit:	$f_{t,fl,L}$	75,00	N/mm ²

$$f_{t,fl,L,d} = \frac{f_{t,fl,L}}{Y_M}$$

Zul. Biegezugfestigkeit, Langzeit, Design:

 $f_{t,fl,L,d}$ 55,56 N/mm²

2.2.2.2 Altrohr

Eigengewicht:

 γ 22,00 kN/m³

Teilsicherheitsbeiwert Material:

 Y_M 2,20 [-]

E-Modul, Langzeit:

 $E_{R,rad,L}$ 8.000,00 N/mm²

E-Modul, Langzeit, Design:

 $E_{R,rad,L,d}$ 3.636,36 N/mm²

Zul. Druckfestigkeit, Langzeit:

 $f_{c,rad,L}$ 5,00 N/mm²

$$f_{c,rad,L,d} = \frac{f_{c,rad,L}}{Y_M}$$

Zul. Druckfestigkeit, Langzeit, Design:

 $f_{c,rad,L,d}$ -2,27 N/mm²

Zul. Biegezugfestigkeit, Langzeit:

 $f_{t,fl,L}$ 0,01 N/mm²

$$f_{t,fl,L,d} = \frac{f_{t,fl,L}}{Y_M}$$

Zul. Biegezugfestigkeit, Langzeit, Design:

 $f_{t,fl,L,d}$ 0,00 N/mm²

2.2.3 Ringsteifigkeit nach ISO 7685

$$I = \frac{t_L^3}{12}$$

Trägheitsmoment:

 I 5.333,33 mm⁴/mm

Außendurchmesser Liner:

 d_{aL} 1.066,67 mm

$$e = \frac{t_L}{2}$$

Trägheitsabstand:

 e 20,00 mm

$$r_{L,m} = \frac{d_{aL}}{2} - e$$

Mittlerer Radius Liner:

 $r_{L,m}$ 513,33 mm

E-Modul:

 $E_{R,rad}$

Kurzzeit 6.000,00 Langzeit 3.500,00 N/mm²

$$S_K = \frac{E_{R,rad,K} \cdot I}{r_{L,m} \cdot 2^3}$$

Ringsteifigkeit:

 S

29,57 17,25 kN/m²

2.2.4 Hinweise zur Berechnung

[Betaversion] Der Lastfall Erd- und Verkehrslasten wird nicht mit der vorgegebenen Ei-Geometrie untersucht. Es wird mit einem Ersatzkreis gerechnet, der dem Scheitelkreis entspricht. Sollte der "Regeleiquerschnitt Freie Eingabe" gewählt sein, so wird bei Abweichungen vom Verhältnis 2/3 der größte Radius der Ellipse verwendet.

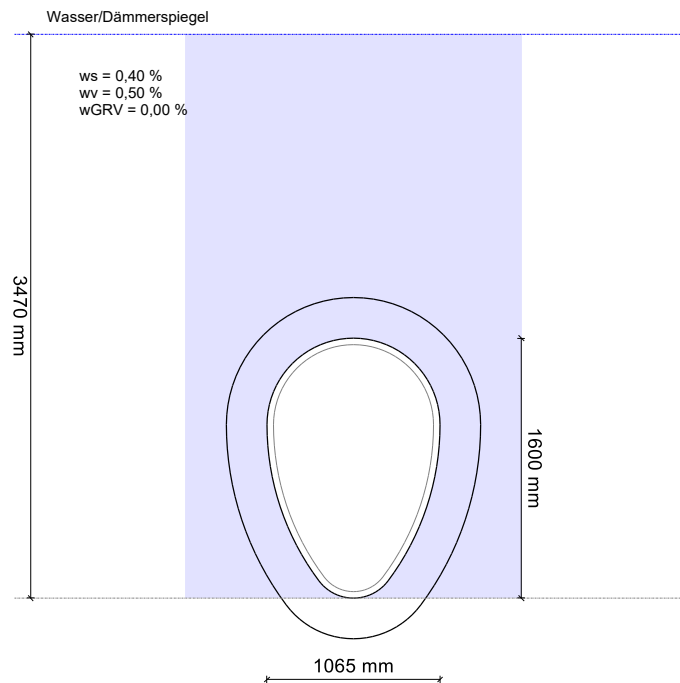
Die Berechnung des AZ III erfolgt nicht mit der tatsächlichen Querschnittsgeometrie, sondern mit dem nach DWA-A 143-2, Kap. 7.8.1 zulässigen Näherungsfahren am Ersatzkreis. ACHTUNG: Insbesondere bei Kanälen im Grundwasser liegt das Ersatzkreisverfahren nicht immer auf der sicheren Seite.

Hinweise zur Berechnungsmethode: Das statische Modell und die implementierten Berechnungsalgorithmen halten sich sehr eng an den Wortlaut des DWA-A 143-2. Dieses Regelwerk lässt aber insbesondere bei Berechnungen für den Altrohrzustand III einen breiten Interpretationsspielraum und

ausgeprägte Freiheiten bei der Modellbildung. Über 'Kann'- und 'Darf'-Bestimmungen werden vereinfachte Berechnungsmethoden erlaubt, die grundsätzlich auf der sicheren Seite liegen, aber in der Folge auch zu höheren Linerbeanspruchungen bzw. zu größeren Wanddicken führen. Hierzu gehören beispielsweise der vereinfachte Stabilitätsnachweis statt einer nichtlinearen Berechnung nach Theorie II. Ordnung oder die Reduzierung des Modells auf einen Viertelkreis, obwohl eine doppelte Symmetrie gar nicht gegeben ist. Der dabei erforderliche größere Rechenaufwand ermöglicht eine wirtschaftliche Bemessung. Ein direkter zahlenmäßiger Vergleich der Ergebnisse von EasyPipe mit den Resultaten aus vereinfachten Berechnungen ist deshalb nicht möglich.

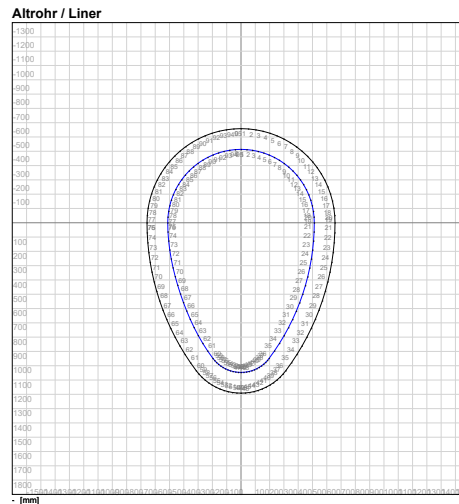
2.2.5 Lastfall 01 AZ II - hW 3,47 m, Langzeit

Grundlage für die Freie Eingabe stellt eine DIN-konforme Ei-Form dar ($H/B = 1,5$ inkl. der vorgegebenen Radien). Diese Eingabeform dient nicht zur Abbildung von z.B. überhöhten Ei-Formen. Eingeben wird dabei die Breite und Höhe des Ei-Querschnitts. Die Abweichung die sich ergibt, wenn $H < 1,5 \times B$, wird über eine Verzerrung der y-Koordinaten abgebildet.



2.2.5.1 Geometrie diskretisiertes System

Skizze



Wanddicke Liner: t_L 40,00 mm

Berechnete Punkte

Element	Altrohr X [mm]	Altrohr Y [mm]	Liner X [mm]	Liner Y [mm]	Liner r [mm]	Element	Altrohr X [mm]	Altrohr Y [mm]	Liner X [mm]	Liner Y [mm]	Liner r [mm]
0	0,0	-658,3	0,0	-513,3	511,7	48	0,0	1.191,7	0,0	1.046,7	245,8
1	51,6	-656,3	40,2	-511,8	511,7	49	-30,2	1.190,5	-19,0	1.045,9	245,8
2	102,9	-650,2	80,2	-507,0	511,7	50	-60,3	1.187,0	-37,9	1.043,7	245,9
3	153,5	-640,1	119,6	-499,2	511,8	51	-89,9	1.181,2	-56,6	1.040,1	245,9
4	203,2	-626,1	158,4	-488,2	511,9	52	-119,1	1.173,1	-74,9	1.035,0	246,0
5	251,7	-608,2	196,1	-474,3	512,0	53	-147,5	1.162,8	-92,8	1.028,5	246,0
6	298,6	-586,5	232,7	-457,4	512,2	54	-175,0	1.150,3	-110,1	1.020,6	246,1
7	343,6	-561,3	267,8	-437,7	512,4	55	-201,5	1.135,7	-126,8	1.011,5	246,2
8	386,5	-532,5	301,2	-415,3	512,5	56	-226,8	1.119,1	-142,7	1.001,0	246,3
9	427,1	-500,5	332,8	-390,4	512,7	57	-250,8	1.100,6	-157,8	989,4	246,3
10	465,0	-465,4	362,4	-363,0	512,9	58	-273,2	1.080,4	-171,9	976,6	246,4
11	500,0	-427,5	389,7	-333,4	513,1	59	-294,0	1.058,4	-185,0	962,8	246,7
12	532,0	-386,9	414,6	-301,7	513,3	60	-313,6	1.034,3	-196,9	948,2	640,4
13	560,7	-343,9	437,0	-268,2	513,5	61	-353,5	978,6	-233,6	896,4	1.292,5
14	585,9	-298,8	456,6	-233,1	513,7	62	-391,6	920,7	-267,7	843,0	1.374,9
15	607,5	-251,9	473,5	-196,5	513,8	63	-427,4	861,3	-299,4	788,1	1.468,5
16	625,3	-203,4	487,4	-158,6	513,9	64	-460,8	800,5	-328,6	731,9	1.575,8
17	639,3	-153,6	498,3	-119,8	514,0	65	-491,7	738,4	-355,5	674,5	1.700,2
18	649,4	-103,0	506,2	-80,3	514,1	66	-520,1	675,2	-380,3	616,1	1.846,4
19	655,5	-51,6	510,9	-40,3	514,2	67	-545,9	610,8	-403,1	557,0	2.021,0
20	657,5	-0,4	512,5	0,1	876,6	68	-569,1	545,4	-424,0	497,1	2.157,1
21	656,1	69,4	511,2	63,5	1.582,6	69	-589,7	479,2	-443,1	436,7	2.021,3
22	651,9	138,6	507,4	127,0	1.582,5	70	-607,6	412,2	-460,3	375,6	1.847,1
23	645,0	207,6	501,0	190,2	1.582,4	71	-622,8	344,5	-475,5	314,1	1.701,1
24	635,3	276,3	492,1	253,1	1.582,3	72	-635,3	276,3	-488,3	252,0	1.577,0
25	622,8	344,5	480,7	315,6	1.582,2	73	-645,0	207,6	-498,6	189,5	1.470,0
26	607,6	412,2	466,8	377,6	1.582,1	74	-651,9	138,6	-506,2	126,5	1.376,6
27	589,7	479,2	450,4	439,0	1.581,9	75	-656,1	69,4	-510,9	63,3	1.294,1
28	569,1	545,4	431,5	499,6	1.581,8	76	-657,5	-0,4	-512,5	0,0	803,8
29	545,9	610,8	410,3	559,5	1.581,6	77	-655,5	-51,6	-510,9	-40,3	514,2
30	520,1	675,2	386,6	618,5	1.581,4	78	-649,4	-103,0	-506,2	-80,3	514,1
31	491,7	738,4	360,6	676,4	1.581,1	79	-639,3	-153,6	-498,3	-119,8	514,0
32	460,8	800,5	332,3	733,3	1.580,9	80	-625,3	-203,4	-487,4	-158,6	513,9
33	427,4	861,3	301,7	789,0	1.580,6	81	-607,5	-251,9	-473,5	-196,5	513,8
34	391,6	920,7	269,0	843,4	1.580,4	82	-585,9	-298,8	-456,6	-233,1	513,7
35	353,5	978,6	234,0	896,4	1.580,3	83	-560,7	-343,9	-437,0	-268,2	513,5
36	313,6	1.034,3	196,9	948,1	700,4	84	-532,0	-386,9	-414,6	-301,7	513,3

37	294,0	1.058,4	185,0	962,8	246,6	85	-500,0	-427,5	-389,7	-333,4	513,1
38	273,2	1.080,4	171,9	976,6	246,4	86	-465,0	-465,4	-362,4	-363,0	512,9
39	250,8	1.100,6	157,8	989,4	246,3	87	-427,1	-500,5	-332,8	-390,4	512,7
40	226,8	1.119,1	142,7	1.001,0	246,3	88	-386,5	-532,5	-301,2	-415,3	512,5
41	201,5	1.135,7	126,8	1.011,5	246,2	89	-343,6	-561,3	-267,8	-437,7	512,4
42	175,0	1.150,3	110,1	1.020,6	246,1	90	-298,6	-586,5	-232,7	-457,4	512,2
43	147,5	1.162,8	92,8	1.028,5	246,0	91	-251,7	-608,2	-196,1	-474,3	512,0
44	119,1	1.173,1	74,9	1.035,0	246,0	92	-203,2	-626,1	-158,4	-488,2	511,9
45	89,9	1.181,2	56,6	1.040,1	245,9	93	-153,5	-640,1	-119,6	-499,2	511,8
46	60,3	1.187,0	37,9	1.043,7	245,9	94	-102,9	-650,2	-80,2	-507,0	511,7
47	30,2	1.190,5	19,0	1.045,9	245,8	95	-51,6	-656,3	-40,2	-511,8	511,7

Die Gelenkringverformung wird analog A 143-2 als eine Erhöhung (wgrv/10) der eingegebenen örtlichen Verformung angesetzt.

Vorgegebene Werte:

Lokale Vorverformung:	ω_V	0,50	%
Gelenkringverformung:	$\omega_{GR,V}$	0,00	%
$\omega_V = \omega_V + \omega_{GR,V}/10 = 0,50 \% + (0,00 \% / 10)$			
(A 143-2 Tabelle 8)			

Lokale Vorverformung:	ω_V	0,50	%
Lokale Vorverformung absolut:	W_V	7,89	mm

Eine Berücksichtigung der Gelenkringverformung in der Geometrie liegt auf der unsicheren Seite, da durch die Aufweitung im Kämpfer das Verhältnis Höhe/Breite günstiger gegen Außendruck wird. Damit würden für den Altrohrzustand II günstigere Ergebnisse berechnet werden, als im Altrohrzustand I.

Gelenkringverformung:	$\omega_{GR,V}$	0,00	%
Gelenkringverformung absolut, einseitig:	$W_{GR,V}$	0,00	mm

Der Einfluss der Gelenkringaufweitung auf den Ringspalt nach Gleichung DWA-A 143-2, Gl. 121 bleibt bei von Kreisform abweichenden Querschnitten unberücksichtigt, da in der Formel DWA-A 143-2, Gl. 121 die Kinematik des Kreises mit 4 exzentrischen Gelenken vorausgesetzt wird. Sie kann deshalb nicht für eine andere Querschnittsgeometrie mit anderer Kinematik angewendet werden. Dies gilt natürlich auch für den Ersatzkreis.

Ringspalt:	ω_S	0,40	%
Spaltweite absolut (als konst. Ringspalt):	W_S	2,59	mm
Mittlerer Radius Liner, Kämpfer:	$r_{L,m,K}$	1.577,50	mm
Mittlerer Radius Liner, Scheitel:	$r_{L,m,S}$	513,30	mm
R/t Verhältnis:	$r_{L,m}/t_{L,m}$	23,50	[-]

2.2.5.2 Verformungsnachweis Liner, Gebrauchslast

Lichte Breite in Kämpferhöhe: b_k 1.065,00 mm
 Lichte Höhe Scheitel-Sohle: h_s 1.600,00 mm

$$d_v = \frac{b_k + h_s}{2}$$

Relevanter Durchmesser für prozentuale Verformung: d_v 1.332,50 mm

Spaltweite absolut (als konst. Ringspalt): w_s 2,59 mm
 Lokale Vorverformung absolut: w_v 7,89 mm
 Gelenkringverformung absolut, einseitig: $w_{GR,v}$ 0,00 mm

Elastische Verformung absolut, horizontal: $w_{el,h,E1}$ 9,67 mm
 Elastische Verformung absolut, horizontal: $w_{el,h,E2}$ -10,10 mm

Elastische Verformung absolut, horizontal: $w_{el,h}$ 19,78 mm

$$\delta_{v,el} = \frac{w_{el,h}}{d_v}$$

Elastische Verformung relativ: $\delta_{v,el}$ 1,48 %
 Zulässige Verformung elastisch: zul $\delta_{v,el}$ 3,00 %

Die errechnete elastische Verformung ist kleiner als die zulässige Verformung.

$$w = w_{el,h} + w_v$$

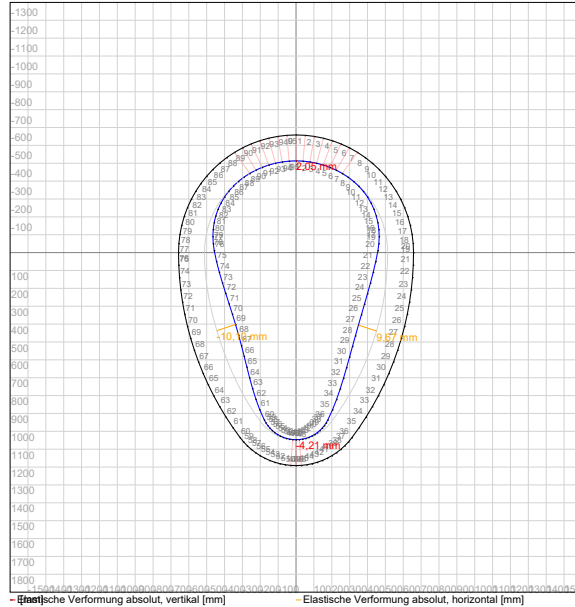
Gesamte Durchmesseränderung: w 27,66 mm

$$\delta_v = \frac{w}{d_v}$$

Relative Gesamtverformung: δ_v 2,08 %
 Anhaltswert Gesamtverformung: $\delta_{v,A}$ 10,00 %

Elastische Verformung absolut, vertikal: $w_{el,v,E1}$ 2,05 mm
 Elastische Verformung absolut, vertikal: $w_{el,v,E2}$ -4,21 mm
 Elastische Verformung absolut, vertikal: $w_{el,v}$ 6,26 mm

Gebrauchslast (x 8,8)



Spannungsnachweis Liner, Design

Fläche (Wanddicke): A 40,00 mm²/mm

Außen

$$W_e = \frac{t_L^2}{6}$$

Widerstandsmoment, außen:

		W_e	266,67	mm ³ /mm
		Druck	Zug	
Element	i	68	55	[-]
Korrekturfaktor (Verformtes System)	α_k	0,99	0,95	[-]
Normalkraft in Element	N_d	-43,18	-47,16	N/mm
Moment in Element	M_d	1.845,47	-2.045,98	Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} - \alpha_{ka} \cdot \frac{M_d}{W_e} \quad (88)$$

Spannung in Element Max σ_d -7,96 6,08 N/mm²

$$f_{c,rad,L,d} = \frac{f_{c,rad,L}}{\gamma_M}$$

Zul. Spannung, Langzeit, Design: $\sigma_{L,d}$ -55,56 55,56 N/mm²

Ausnutzung Spannungen U_σ 14,3 10,9 %

Der Spannungsnachweis Außen ist erfüllt.

Innen

$$W_i = \frac{t_L^2}{6}$$

Widerstandsmoment, innen:

		W_i	266,67	mm ³ /mm
		Druck	Zug	
Element	i	56	67	[-]
Korrekturfaktor (Verformtes System)	α_k	1,05	1,01	[-]
Normalkraft in Element	N_d	-47,17	-43,18	N/mm
Moment in Element	M_d	-2.045,98	1.845,47	Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} + \alpha_{ki} \cdot \frac{M_d}{W_i} \quad (87)$$

Spannung in Element Max σ_d -9,27 5,89 N/mm²

$$f_{c,rad,L,d} = \frac{f_{c,rad,L}}{\gamma_M}$$

Zul. Spannung, Langzeit, Design: $\sigma_{L,d}$ -55,56 55,56 N/mm²

Ausnutzung Spannungen U_σ 16,7 10,6 %

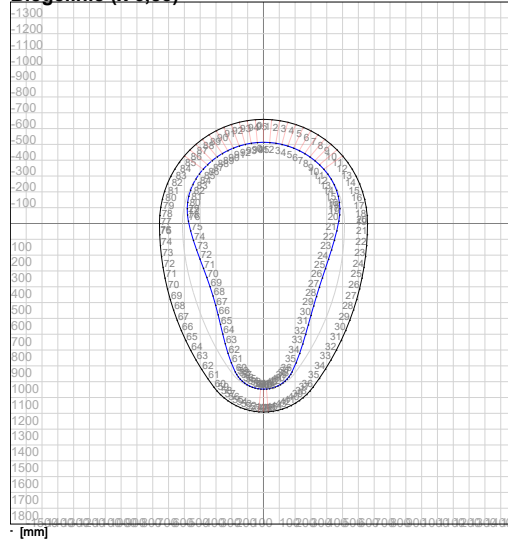
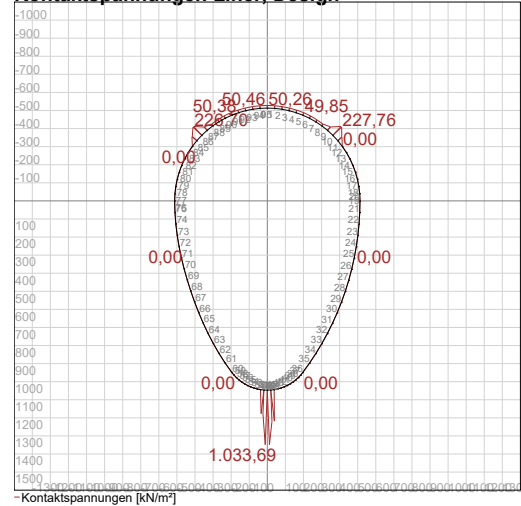
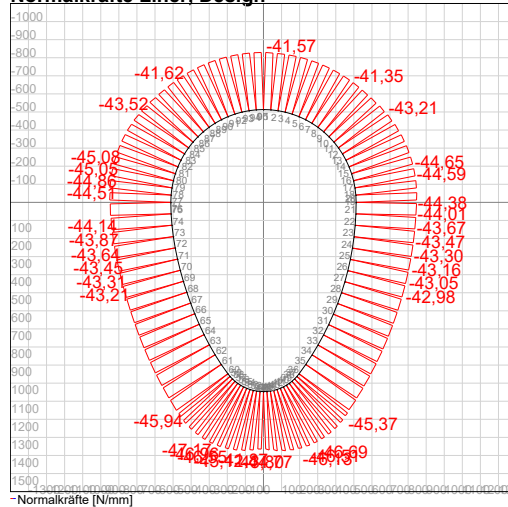
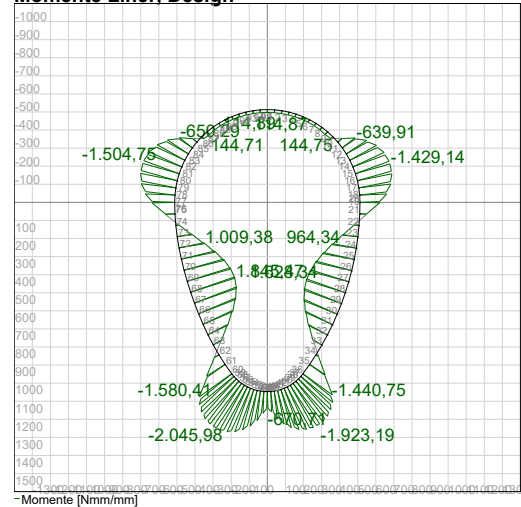
Der Spannungsnachweis Innen ist erfüllt.

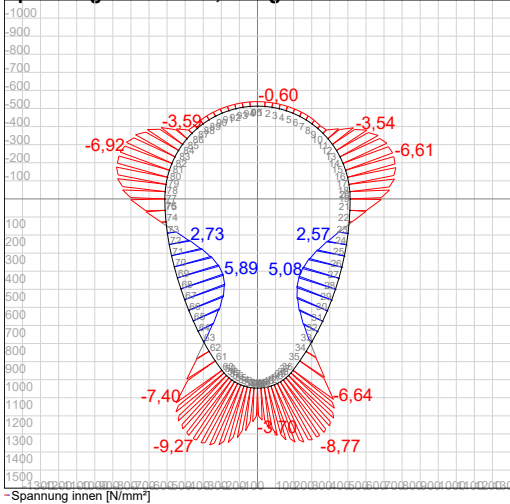
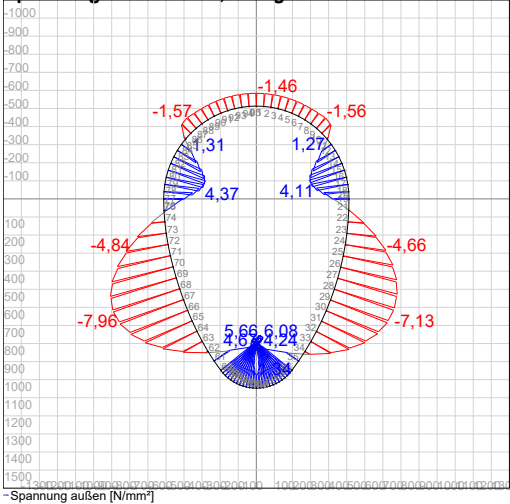
Die Spannungen liegen im zulässigen Bereich.

Tabellen

Element	α ki [-]	α ka [-]	N [N/mm] l/r	M [Nmm/m] l/r	σ i [N/mm²] l/r	σ a [N/mm²] l/r	Element	α ki [-]	α ka [-]	N [N/mm] l/r	M [Nmm/m] l/r	σ i [N/mm²] l/r	σ a [N/mm²] l/r
0	1,026	0,974	-41,30 / -41,30	114,89 / 114,89	-0,59 / -0,59	-1,45 / -1,45	48	1,054	0,946	-41,87 / -41,87	-670,71 / -867,26	-3,70 / -4,48	1,33 / 2,03
1	1,026	0,974	-41,30 / -41,30	114,89 / 114,81	-0,59 / -0,59	-1,45 / -1,45	49	1,054	0,946	-42,91 / -42,91	-867,26 / -1.183,02	-4,50 / -5,75	2,00 / 3,12
2	1,026	0,974	-41,30 / -41,31	114,81 / 114,77	-0,59 / -0,59	-1,45 / -1,45	50	1,054	0,946	-44,11 / -44,11	-1.183,02 / -1.452,43	-5,78 / -6,84	3,09 / 4,05
3	1,026	0,974	-41,31 / -41,32	114,77 / 114,71	-0,59 / -0,59	-1,45 / -1,45	51	1,054	0,946	-45,12 / -45,11	-1.452,43 / -1.673,46	-6,87 / -7,74	4,02 / 4,81
4	1,026	0,974	-41,31 / -41,32	114,71 / 114,39	-0,59 / -0,59	-1,45 / -1,45	52	1,054	0,946	-45,93 / -45,93	-1.673,46 / -1.844,47	-7,76 / -8,44	4,79 / 5,39
5	1,026	0,974	-41,32 / -41,34	114,39 / 113,38	-0,59 / -0,60	-1,45 / -1,45	53	1,054	0,946	-46,55 / -46,54	-1.844,47 / -1.964,12	-8,46 / -8,93	5,38 / 5,80
6	1,026	0,974	-41,33 / -41,35	113,38 / 113,26	-0,60 / -0,60	-1,45 / -1,45	54	1,054	0,946	-46,96 / -46,95	-1.964,12 / -2.031,47	-8,94 / -9,21	5,79 / 6,03
7	1,026	0,974	-41,33 / -41,35	113,26 / 122,30	-0,60 / -0,56	-1,45 / -1,48	55	1,054	0,946	-47,17 / -47,16	-2.031,47 / -2.045,98	-9,21 / -9,27	6,03 / 6,08
8	1,026	0,974	-41,31 / -41,34	122,30 / 144,75	-0,56 / -0,48	-1,48 / -1,56	56	1,054	0,946	-47,17 / -47,16	-2.045,98 / -2.007,46	-9,27 / -9,11	6,08 / 5,94
9	1,026	0,974	-41,34 / -41,37	144,75 / 105,69	-0,48 / -0,63	-1,56 / -1,42	57	1,054	0,946	-46,97 / -46,96	-2.007,46 / -1.916,16	-9,11 / -8,75	5,95 / 5,62
10	1,026	0,974	-41,72 / -41,75	105,69 / -224,62	-0,64 / -1,91	-1,43 / -0,22	58	1,054	0,946	-46,56 / -46,55	-1.916,16 / -1.772,71	-8,74 / -8,17	5,63 / 5,12
11	1,026	0,974	-42,46 / -42,49	-224,62 / -639,91	-1,93 / -3,52	-0,24 / 1,27	59	1,054	0,946	-45,96 / -45,94	-1.772,71 / -1.580,41	-8,16 / -7,40	5,14 / 4,46
12	1,026	0,974	-43,21 / -43,24	-639,91 / -970,70	-3,54 / -4,82	1,26 / 2,46	60	1,021	0,979	-45,30 / -45,25	-1.580,41 / -869,85	-7,18 / -4,46	4,67 / 2,06
13	1,026	0,974	-43,80 / -43,84	-970,70 / -1.213,78	-4,83 / -5,77	2,45 / 3,34	61	1,010	0,990	-44,79 / -44,74	-869,85 / -215,41	-4,42 / -1,93	2,11 / -0,32
14	1,026	0,974	-44,24 / -44,27	-1.213,78 / -1.366,98	-5,78 / -6,37	3,33 / 3,89	62	1,010	0,990	-44,36 / -44,31	-215,41 / 370,05	-1,92 / 0,29	-0,31 / -2,48
15	1,026	0,974	-44,50 / -44,54	-1.366,98 / -1.429,14	-6,37 / -6,61	3,88 / 4,11	63	1,009	0,991	-44,01 / -43,95	370,05 / 872,92	0,30 / 2,20	-2,48 / -4,34
16	1,026	0,974	-44,61 / -44,65	-1.429,14 / -1.400,21	-6,61 / -6,50	4,10 / 4,00	64	1,008	0,992	-43,72 / -43,66	872,92 / 1.281,31	2,21 / 3,75	-4,34 / -5,86
17	1,026	0,974	-44,56 / -44,59	-1.400,21 / -1.281,20	-6,50 / -6,04	4,00 / 3,57	65	1,008	0,992	-43,50 / -43,44	1.281,31 / 1.585,02	3,76 / 4,90	-5,85 / -6,98
18	1,026	0,974	-44,34 / -44,38	-1.281,20 / -1.074,20	-6,04 / -5,24	3,57 / 2,81	66	1,007	0,993	-43,34 / -43,28	1.585,02 / 1.775,43	4,90 / 5,62	-6,98 / -7,69
19	1,026	0,974	-43,97 / -44,01	-1.074,20 / -781,79	-5,23 / -4,11	2,82 / 1,76	67	1,007	0,993	-43,24 / -43,18	1.775,43 / 1.845,47	5,62 / 5,89	-7,69 / -7,95
20	1,015	0,985	-43,61 / -43,67	-781,79 / -274,32	-4,07 / -2,14	1,80 / -0,08	68	1,006	0,994	-43,18 / -43,12	1.845,47 / 1.792,36	5,88 / 5,68	-7,95 / -7,76
21	1,008	0,992	-43,41 / -43,47	-274,32 / 192,76	-2,12 / -0,36	-0,07 / -1,80	69	1,007	0,993	-43,17 / -43,11	1.792,36 / 1.625,84	5,69 / 5,06	-7,76 / -7,13
22	1,008	0,992	-43,24 / -43,30	192,76 / 608,77	-0,35 / 1,22	-1,80 / -3,35	70	1,007	0,993	-43,21 / -43,15	1.625,84 / 1.359,81	5,06 / 4,06	-7,13 / -6,14
23	1,008	0,992	-43,10 / -43,16	608,77 / 964,34	1,22 / 2,57	-3,34 / -4,66	71	1,008	0,992	-43,31 / -43,25	1.359,81 / 1.009,38	4,06 / 2,73	-6,14 / -4,84
24	1,008	0,992	-42,99 / -43,05	964,34 / 1.251,01	2,57 / 3,65	-4,66 / -5,73	72	1,008	0,992	-43,45 / -43,39	1.009,38 / 590,86	2,73 / 1,15	-4,84 / -3,28
25	1,008	0,992	-42,92 / -42,98	1.251,01 / 1.461,32	3,66 / 4,45	-5,72 / -6,51	73	1,009	0,991	-43,64 / -43,58	590,86 / 121,65	1,14 / -0,63	-3,29 / -1,54
26	1,008	0,992	-42,89 / -42,95	1.461,32 / 1.588,86	4,45 / 4,93	-6,51 / -6,98	74	1,010	0,990	-43,87 / -43,81	121,65 / -379,89	-0,64 / -2,53	-1,55 / 0,32
27	1,008	0,992	-42,90 / -42,96	1.588,86 / 1.628,34	4,94 / 5,08	-6,98 / -7,13	75	1,010	0,990	-44,14 / -44,08	-379,89 / -894,67	-2,54 / -4,49	0,31 / 2,22
28	1,008	0,992	-42,96 / -43,01	1.628,34 / 1.575,68	5,08 / 4,88	-7,13 / -6,93	76	1,017	0,983	-44,51 / -44,47	-894,67 / -1.180,54	-4,52 / -5,61	2,19 / 3,24

29	1,008	0,992	-43,06 / 1.575,68 / -43,11 1.428,05	4,88 / 4,32	-6,94 / -6,39	77	1,026	0,974	-44,86 / -1.180,54 -44,82 / -1.379,34	-5,66 / -6,43	3,19 / 3,92
30	1,008	0,992	-43,21 / 1.428,05 / -43,26 1.183,94	4,32 / 3,40	-6,39 / -5,48	78	1,026	0,974	-45,05 / -1.379,34 -45,02 / -1.488,07	-6,43 / -6,85	3,91 / 4,31
31	1,008	0,992	-43,40 / 1.183,94 / -43,46 843,16	3,39 / 2,10	-5,49 / -4,22	79	1,026	0,974	-45,08 / -1.488,07 -45,04 / -1.504,75	-6,85 / -6,92	4,31 / 4,37
32	1,008	0,992	-43,65 / 843,16 / -43,71 406,99	2,10 / 0,45	-4,23 / -2,61	80	1,026	0,974	-44,95 / -1.504,75 -44,91 / -1.428,52	-6,91 / -6,62	4,37 / 4,10
33	1,008	0,992	-43,96 / 406,99 / -44,01 -121,89	0,44 / -1,56	-2,61 / -0,65	81	1,026	0,974	-44,65 / -1.428,52 -44,61 / -1.259,63	-6,61 / -5,96	4,10 / 3,49
34	1,008	0,992	-44,31 / -121,89 / -44,36 -739,26	-1,57 / -3,90	-0,65 / 1,64	82	1,026	0,974	-44,18 / -1.259,63 -44,15 / -999,41	-5,95 / -4,95	3,50 / 2,55
35	1,008	0,992	-44,72 / -739,26 / -44,77 -1.440,75	-3,91 / -6,57	1,63 / 4,24	83	1,026	0,974	-43,55 / -999,41 / -43,52 -650,29	-4,93 / -3,59	2,56 / 1,29
36	1,019	0,981	-45,37 / -1.440,75 -45,38 / -1.636,46	-6,64 / -7,39	4,17 / 4,89	84	1,026	0,974	-42,76 / -650,29 / -42,73 -215,64	-3,57 / -1,90	1,31 / -0,28
37	1,054	0,946	-45,99 / -1.636,46 -46,01 / -1.783,42	-7,62 / -8,20	4,66 / 5,18	85	1,026	0,974	-42,00 / -215,64 / -41,98 108,91	-1,88 / -0,63	-0,26 / -1,45
38	1,054	0,946	-46,42 / -1.783,42 -46,43 / -1.879,22	-8,21 / -8,59	5,17 / 5,50	86	1,026	0,974	-41,64 / 108,91 / -41,61 144,71	-0,62 / -0,48	-1,44 / -1,57
39	1,054	0,946	-46,65 / -1.879,22 -46,66 / -1.923,19	-8,59 / -8,77	5,50 / 5,66	87	1,026	0,974	-41,61 / 144,71 / -41,58 122,03	-0,48 / -0,57	-1,57 / -1,49
40	1,054	0,946	-46,68 / -1.923,19 -46,69 / -1.915,07	-8,77 / -8,74	5,65 / 5,63	88	1,026	0,974	-41,62 / 122,03 / -41,60 113,26	-0,57 / -0,60	-1,49 / -1,45
41	1,054	0,946	-46,50 / -1.915,07 -46,51 / -1.854,97	-8,73 / -8,50	5,63 / 5,42	89	1,026	0,974	-41,62 / 113,26 / -41,60 113,47	-0,60 / -0,60	-1,45 / -1,45
42	1,054	0,946	-46,12 / -1.854,97 -46,13 / -1.743,39	-8,49 / -8,05	5,43 / 5,03	90	1,026	0,974	-41,61 / 113,47 / -41,59 114,47	-0,60 / -0,60	-1,45 / -1,46
43	1,054	0,946	-45,54 / -1.743,39 -45,54 / -1.581,20	-8,03 / -7,39	5,04 / 4,47	91	1,026	0,974	-41,60 / 114,47 / -41,58 114,79	-0,60 / -0,60	-1,46 / -1,46
44	1,054	0,946	-44,76 / -1.581,20 -44,77 / -1.369,66	-7,37 / -6,53	4,49 / 3,74	92	1,026	0,974	-41,59 / 114,79 / -41,58 114,84	-0,60 / -0,60	-1,46 / -1,46
45	1,054	0,946	-43,79 / -1.369,66 -43,80 / -1.110,35	-6,51 / -5,48	3,76 / 2,84	93	1,026	0,974	-41,58 / 114,84 / -41,57 114,87	-0,60 / -0,60	-1,46 / -1,46
46	1,054	0,946	-42,64 / -1.110,35 -42,64 / -805,19	-5,46 / -4,25	2,87 / 1,79	94	1,026	0,974	-41,57 / 114,87 / -41,57 114,86	-0,60 / -0,60	-1,46 / -1,46
47	1,054	0,946	-41,74 / -805,19 / -41,74 -670,71	-4,23 / -3,70	1,81 / 1,34	95	1,026	0,974	-41,57 / 114,86 / -41,57 114,89	-0,60 / -0,60	-1,46 / -1,46

Biegelinie (x 6,83)

Kontaktspannungen Liner, Design

Normalkräfte Liner, Design

Momente Liner, Design


Spannung innen Liner, Design

Spannung außen Liner, Design


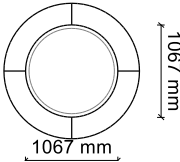
2.2.6 Lastfall 02 [Ersatzkreis] AZ III - hW 0,00 m + h 6,46 m + ws 0,0 % + wv 0,0 %, Langzeit

Bahn LM 71 - mehrgleisig

ws = 0,00 %
wv = 0,00 %
eg = 35,00 %
wGRV = 0,00 %

Min. Überdeckung Scheitel Altröh

6460 mm

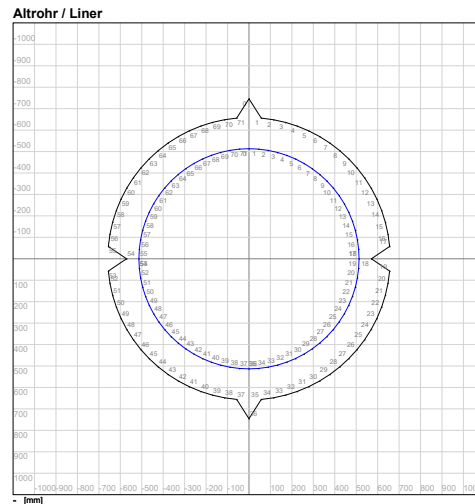


2.2.6.1 Geometrie diskretisiertes System

Bauteil:	SAN-03 - GFK Sanierung Hauptsammler Ost MA-250346
Kapitel / Vorgang:	D - Nachweise 01.1 815 / 1570 t = 40 / Bereich Eisenbahnlasten

Seite:	D-18
Archiv-Nr.	

Skizze



Wanddicke Liner: t_L 40,00 mm
Wanddicke Altrohr: t_R 250,00 mm

Berechnete Punkte

Element	Altrohr X [mm]	Altrohr Y [mm]	Liner X [mm]	Liner Y [mm]	Liner r [mm]	Element	Altrohr X [mm]	Altrohr Y [mm]	Liner X [mm]	Liner Y [mm]	Liner r [mm]
0	0,0	-745,8	0,0	-513,3	513,3	18	570,8	0,0	513,3	0,0	513,3
1	57,4	-655,8	44,7	-511,4	513,3	19	655,8	57,4	511,4	44,7	513,3
2	114,3	-648,3	89,1	-505,5	513,3	20	648,3	114,3	505,5	89,1	513,3
3	170,4	-635,9	132,9	-495,8	513,3	21	635,9	170,4	495,8	132,9	513,3
4	225,2	-618,6	175,6	-482,4	513,3	22	618,6	225,2	482,4	175,6	513,3
5	278,2	-596,7	216,9	-465,2	513,3	23	596,7	278,2	465,2	216,9	513,3
6	329,2	-570,1	256,7	-444,6	513,3	24	570,1	329,2	444,6	256,7	513,3
7	377,6	-539,3	294,4	-420,5	513,3	25	539,3	377,6	420,5	294,4	513,3
8	423,2	-504,3	330,0	-393,2	513,3	26	504,3	423,2	393,2	330,0	513,3
9	465,5	-465,5	363,0	-363,0	513,3	27	465,5	465,5	363,0	363,0	513,3
10	504,3	-423,2	393,2	-330,0	513,3	28	423,2	504,3	330,0	393,2	513,3
11	539,3	-377,6	420,5	-294,4	513,3	29	377,6	539,3	294,4	420,5	513,3
12	570,1	-329,2	444,6	-256,7	513,3	30	329,2	570,1	256,7	444,6	513,3
13	596,7	-278,2	465,2	-216,9	513,3	31	278,2	596,7	216,9	465,2	513,3
14	618,6	-225,2	482,4	-175,6	513,3	32	225,2	618,6	175,6	482,4	513,3
15	635,9	-170,4	495,8	-132,9	513,3	33	170,4	635,9	132,9	495,8	513,3
16	648,3	-114,3	505,5	-89,1	513,3	34	114,3	648,3	89,1	505,5	513,3
17	655,8	-57,4	511,4	-44,7	513,3	35	57,4	655,8	44,7	511,4	513,3
18	570,8	0,0	513,3	0,0	513,3	36	0,0	745,8	0,0	513,3	513,3

Lokale Vorverformung: ω_V 0,00 %
Lokale Vorverformung absolut: w_V 0,00 mm

Gelenkringverformung: $\omega_{GR,v}$ 0,00 %
Gelenkringverformung absolut, einseitig: $w_{GR,v}$ 0,00 mm

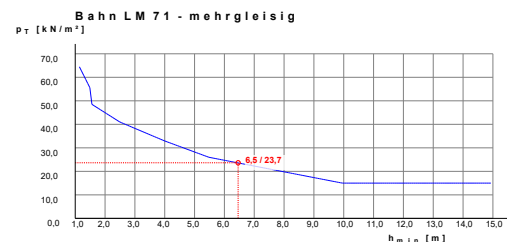
Ringspalt: ω_S 0,00 %
Spaltweite absolut (als konst. Ringspalt): w_S 0,00 mm

Mittlerer Radius Liner: $r_{L,m}$ 513,33 mm

2.2.6.2 Erdlasten und Verkehrslasten

Wichte Boden, unter Auftrieb: γ_B' 10,00 kN/m³
Wichte Boden, trocken: γ_B 20,00 kN/m³
Min. Überdeckung Scheitel Altrohr: h_{min} 6,46 m

Wasser/Dämmerspiegel:	h_w	0,00	m
Wanddicke Altrrohr:	t_R	250,00	mm
Vertikale Lichte Höhe Altrrohr:	$d_{AR,iv}$	1.066,67	mm
$h'_w = h_w - t_R - d_{AR,iv}$			
Höhe Wasserspiegel über Altrrohrscheitel:	h'_w	0,00	m
$p_E = \gamma_B \cdot (h_{min} - h'_w) + \gamma_B' \cdot h'_w$ (74)			
Vertikale Erdlast:	p_E	129,20	kN/m ²
$r_{AR,a} = t_R + \frac{d_{AR,iv}}{2}$			
Höhe Scheitel bis Kämpfer Altrrohr:	$r_{AR,a}$	783,33	mm
$h'_{wk} = h_w - d_{AR,iv} - t_R + r_{AR,a}$			
Höhe Wasserspiegel Altrrohrkämpfer bis Altrrohrscheitel:	h'_{wk}	0,00	m
$p_{E,K} = p_E + \gamma_B \cdot (r_{AR,a} - h'_{wk}) + \gamma_B' \cdot h'_{wk}$			
Vertikale Erdlast bis Kämpfer:	$p_{E,K}$	144,87	kN/m ²



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

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

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

Stoßbeiwert reduziert:	red Φ_2	1,12	[-]	A 161 (23a)
Anpassungsfaktor α_{Qi} LM71 (DIN EN 1991-2):	$\alpha_{Qi,LM71}$	1,00	[-]	
Einfache Bodenspannung aus Verkehr:	p	23,65	kN/m ²	
$p_T = red \Phi_2 \cdot p \cdot \alpha_{Qi,LM71}$				

Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Scheitelhöhe:	p_T	26,59	kN/m ²
---	-------	-------	-------------------

Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Kämpferhöhe (ohne φ):	p_K	21,74	kN/m ²	A 161 (23b)
Erdruckbeiwert (Einbettung):	K_2	0,100	[-]	
$p_{T,h} = (0,50 \cdot (red \Phi_2 - 1) + 1) \cdot p_K \cdot K_2 \cdot \alpha_{Qi,LM71}$				

Horizontale Bodenspannung aus Verkehr:	$p_{T,h}$	2,31	kN/m ²
--	-----------	------	-------------------

Vertikale Verkehrslast:	p_V	26,59	kN/m ²
-------------------------	-------	-------	-------------------

$$p_{V,d} = p_V \cdot \gamma_{T,sup}$$

Vertikale Verkehrslast, Design:	$p_{V,d}$	39,88	kN/m ²
Zusätzliche Flächenlast:	p_0	0,0	kN/m ²

Konzentrationsfaktor über Rohr:	λ_R	0,75	[-]
$q_v = \lambda_R \cdot (p_E + p_0) + p_v$			
Vertikale Gesamtlast:	q_v	123,49	kN/m ²
$q_{v,d} = \lambda_R \cdot (p_E + p_0) \cdot \gamma_{B,sup} + p_{v,d}$			
Vertikale Gesamtlast, Design: E-Modul:	$q_{v,d}$ E2	170,69 8,00	kN/m ² N/mm ²
$S_{Bh} = 0,80 \cdot E2$			(60)
Horizontale Bettungssteifigkeit: Erdruckbeiwert (Einbettung):	S_{Bh} K_2	6,400 0,100	N/mm ² [-]
$\lambda_B = \frac{4 - \lambda_R}{3}$			A 127 (6.07)
Konzentrationsfaktor Boden:	λ_B	1,083	[-]
Höhe Wasserspiegel Altrohrkämpfer bis Altrohrscheitel:	h'_{wk}	0,00	m
$r_{AR,a} = t_R + d_{AR,iv}/2$			
$r_{AR,a} = t_R + \frac{d_{AR,iv}}{2}$			
Höhe Scheitel bis Kämpfer Altrohr:	$r_{AR,a}$	783,33	mm
$q_{h,E} = K_2 \cdot \lambda_B \cdot p_{E,K}$			
Horizontale Erdlast:	$q_{h,E}$	15,69	kN/m ²
Horizontale Verkehrslast:	$q_{h,V}$	2,31	kN/m ²
$q_h = q_{h,V} + q_{h,E}$			
Horizontale Gesamtlast:	q_h	18,00	kN/m ²
$q_{h,d} = q_{h,V} \cdot 1,50 + q_{h,E} \cdot 1,35$			(75)
Designwert Horizontale Gesamtlast:	$q_{h,d}$	24,65	kN/m ²
$K_2' = \frac{q_{h,d}}{q_{v,d}}$			(77)
Rechnerischer Erdruckbeiwert:	K_2'	0,144	[-]

2.2.6.3 Verformungsnachweis Liner, Gebrauchslast

$$d_v = d_{aL}$$

Relevanter Durchmesser für prozentuale Verformung:	d_v	1.066,67	mm
Spaltweite absolut (als konst. Ringspalt):	w_s	0,00	mm
Lokale Vorverformung absolut:	w_v	0,00	mm
Gelenkringverformung absolut, einseitig:	$w_{GR,v}$	0,00	mm
Elastische Verformung absolut, vertikal:	$w_{el,v,E1}$	-9,29	mm
Elastische Verformung absolut, vertikal:	$w_{el,v}$	9,29	mm
Zulässige Verformung elastisch absolut:	zul w_{el}	10,00	mm

Die errechnete absolute elastische Verformung ist kleiner als die von der Deutschen Bahn AG festgelegten 10 mm.

$$\delta_{v,el} = \frac{w_{el,v}}{d_v}$$

Elastische Verformung relativ:	$\delta_{v,el}$	0,87	%
Zulässige Verformung elastisch:	zul $\delta_{v,el}$	2,00	%

Die errechnete elastische Verformung ist kleiner als die zulässige Verformung.

$$w = w_{el,v} + w_{GR,v} \cdot 2 + w_v$$

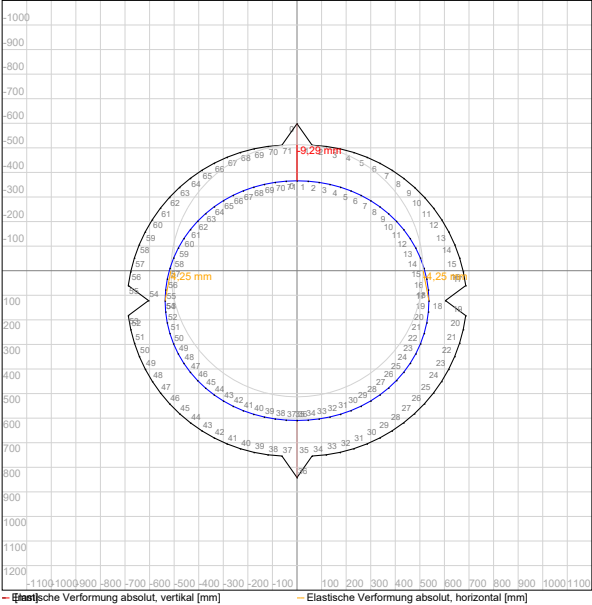
Gesamte Durchmesseränderung:	w	9,29	mm
------------------------------	-----	------	----

$$\delta_v = \frac{w}{d_v}$$

Relative Gesamtverformung:	δ_v	0,87	%
Anhaltswert Gesamtverformung:	$\delta_{v,A}$	10,00	%

Elastische Verformung absolut, horizontal:	$w_{el,h,E1}$	-4,25	mm
Elastische Verformung absolut, horizontal:	$w_{el,h,E2}$	4,25	mm
Elastische Verformung absolut, horizontal:	$w_{el,h}$	8,51	mm

Gebrauchslast (x 5,5)



2.2.6.4 Bodeninteraktion (Gebrauchslast)

$$CB = \frac{E2}{\frac{da_{AR,k}}{2}} \cdot 0,80$$

Bettungsziffer, Scheitel:

CB	8.170,21	kN/m³
----	----------	-------

$$CB = \frac{E}{r_{aR}} \cdot 0,80$$

Innerer Reibungswinkel:

φ'	20,00	°
----	-------	---

$$K_p = \tan (45^\circ + \varphi'/2)^2$$

(62)

Beiwert:

K _p	2,04	[-]
p _E	129,20	kN/m²

Vertikale Erdlast:

$$q_{h,max} = 0,75 \cdot K_p \cdot \lambda_B \cdot p_E$$

(61)

Grenzwert q_h im Scheitel (informativ):

q _{h,max}	214,11	kN/m²
--------------------	--------	-------

Vertikale Erdlast bis Kämpfer:

p _{E,K}	144,87	kN/m²
------------------	--------	-------

$$q_{h,max,K} = 0,75 \cdot K_p \cdot \lambda_B \cdot p_{E,K}$$

(61)

Grenzwert q_h im Kämpfer:

q _{h,max,K}	240,07	kN/m²
----------------------	--------	-------

Der Wert wird im Kämpfer abgelesen.

Horizontale Gesamtlast:

q _h	18,00	kN/m²
----------------	-------	-------

Seitlicher Bettungsreaktionsdruck:

q _h *	49,37	kN/m²
------------------	-------	-------

$$q_h + q_h^* = q_h^* + q_h$$

Summe horizontale Kräfte:

q _h + q _h *	67,37	kN/m²
-----------------------------------	-------	-------

$$q_{h,max,K} \geq q_h + q_h^*$$

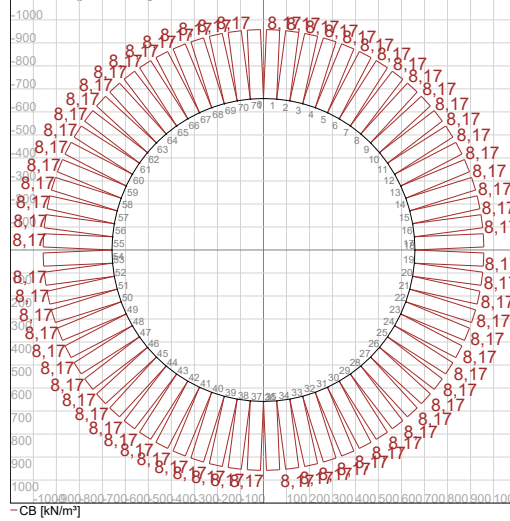
$$U_{maxqh} = \frac{q_h + q_h^*}{q_{h,max,K}}$$

Ausnutzung max qh:

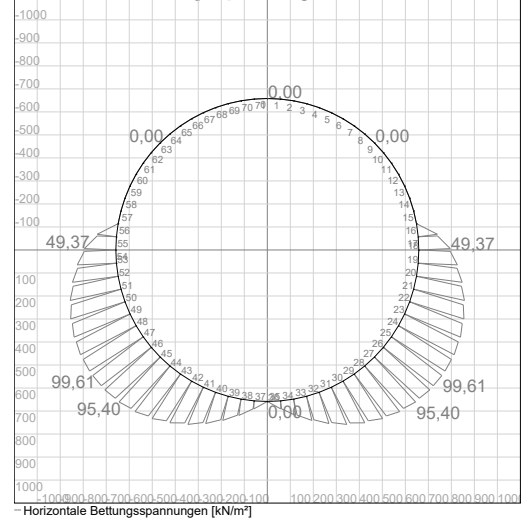
Für die Interaktion Boden-Rohrsystem wurde der elastische Ansatz verwendet. Die Bettung des Rohres wurde um den gesamten Umfang als konstant angenommen. Damit ergibt sich eine Dreiecksförmige Verteilung der Bodenspannungen, deren Maximalwert auf 75% des passiven Erddrucks begrenzt ist.

$$U_{maxqh} = 28,1 \%$$

Bettungssteifigkeit



Horizontale Bettungsspannungen



Die horizontale Kraft aus Bettungsreaktionsdruck und seitlichem Druck im Kämpfer liegt unterhalb des Grenzwertes.

2.2.6.5 Stabilitätsnachweis (Designwerte)

Der maßgebende Nachweis der Stabilität erfolgt über die im Abschnitt 7.6.4.2 (DWA-A 143-2) zugelassene (genauere) Variante einer Berechnung nach Theorie II. Ordnung unter Berücksichtigung der Vorverformungen und der Spaltbildung. Hierbei wird numerisch überprüft, ob ein elastisches Stabilitätsversagen (Beulen) unter gamma-facher Last eintritt. Darüber hinaus wird geprüft, ob die bei dieser Berechnung ermittelten Spannungen die vorgegeben maximalen Grenzspannungen für Zug und Druck mit einfacher Sicherheit nicht überschreiten.

Nachweis entfällt.

Spannungsnachweis Liner, Design

Fläche (Wanddicke): A 40,00 mm²/mm

Außen

$$W_e = \frac{t_L^2}{6}$$

Widerstandsmoment, außen: W_e 266,67 mm³/mm

$$\alpha_{ka} = 1 - \frac{t_L}{3 \cdot r_L} \quad (90)$$

Element	i	Druck	Zug	
Korrekturfaktor (Verformtes System)	α_k	35	19	[-]
Normalkraft in Element	N_d	0,97	0,97	[-]
Moment in Element	M_d	-0,48	-4,67	N/mm
		1.653,28	-884,15	Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} - \alpha_{ka} \cdot \frac{M_d}{W_e} \quad (88)$$

Spannung in Element Max σ_d -6,05 3,11 N/mm²

$$f_{c,rad,L,d} = \frac{f_{c,rad,L}}{Y_M}$$

Zul. Spannung, Langzeit, Design: $\sigma_{L,d}$ -55,56 55,56 N/mm²

Ausnutzung Spannungen U_σ 10,9 5,6 %

Der Spannungsnachweis Außen ist erfüllt.

Innen

$$W_i = \frac{t_L^2}{6}$$

Widerstandsmoment, innen: W_i 266,67 mm³/mm

$$\alpha_{ki} = 1 + \frac{t_L}{3 \cdot r_L} \quad (89)$$

Element	i	Druck	Zug	
Korrekturfaktor (Verformtes System)	α_k	18	36	[-]
Normalkraft in Element	N_d	1,03	1,03	[-]
Moment in Element	M_d	-4,69	-0,48	N/mm
		-884,15	1.653,28	Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} + \alpha_{ki} \cdot \frac{M_d}{W_i} \tag{87}$$

Spannung in Element	Max σ_d	-3,52	6,35	N/mm²
---------------------	----------------	-------	------	-------

$$f_{c,rad,L,d} = \frac{f_{c,rad,L}}{\gamma_M}$$

Zul. Spannung, Langzeit, Design:	$\sigma_{L,d}$	-55,56	55,56	N/mm²
----------------------------------	----------------	--------	-------	-------

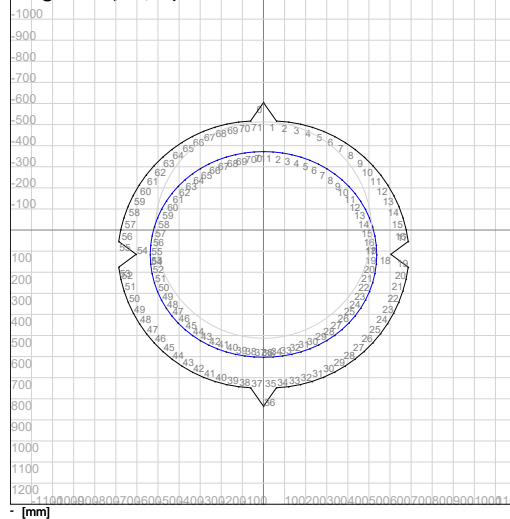
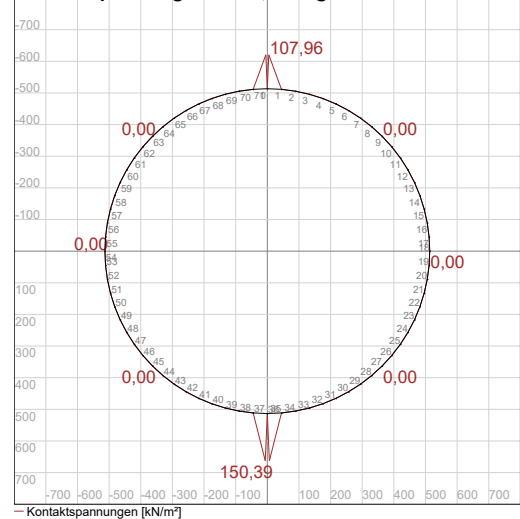
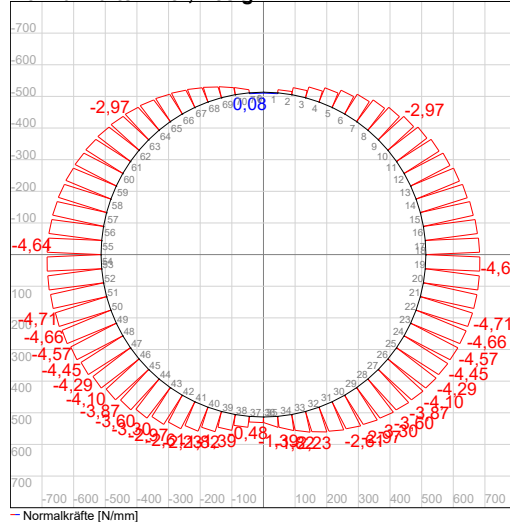
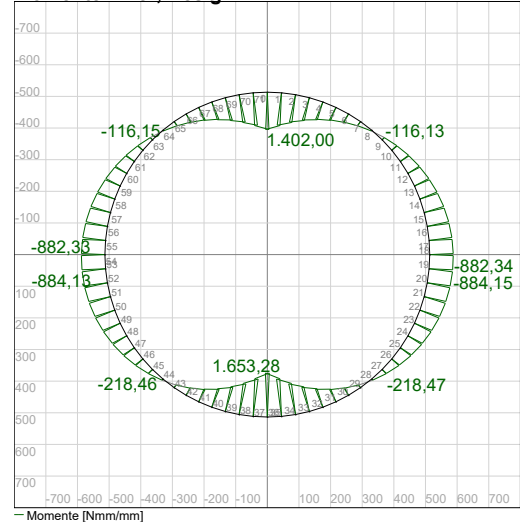
Ausnutzung Spannungen	U_σ	6,3	11,4	%
-----------------------	------------	-----	------	---

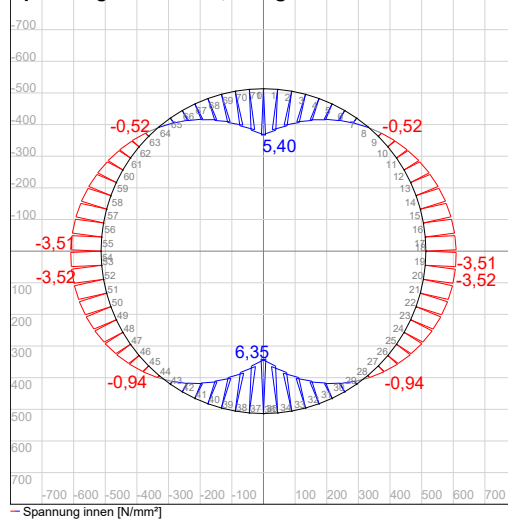
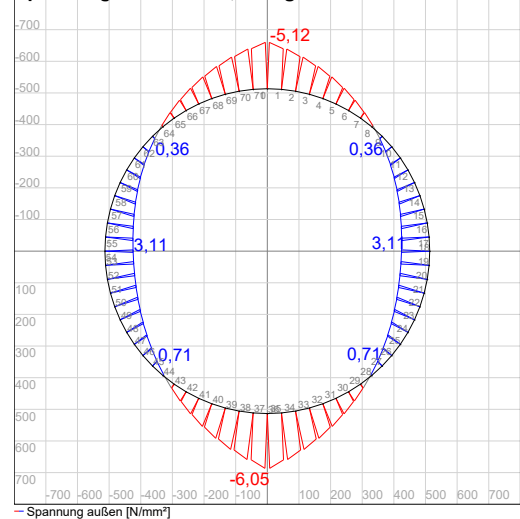
Der Spannungsnachweis Innen ist erfüllt.

Die Spannungen liegen im zulässigen Bereich.

Tabellen

Element	α ki [-]	α ka [-]	N l/r	M [Nmm/m] l/r	σ i [N/mm²] l/r	σ a [N/mm²] l/r	Element	α ki [-]	α ka [-]	N l/r	M [Nmm/m] l/r	σ i [N/mm²] l/r	σ a [N/mm²] l/r
0	1,026	0,974	0,08 / 1.402,00 /	0,08 1.227,17 /	5,40 / 4,72 /	-5,12 / -4,48	36	1,026	0,974	-0,48 / 1.653,28 /	-0,48 1.413,08 /	6,35 / 5,42 /	-6,05 / -5,17
1	1,026	0,974	-0,27 / 1.050,74 /	-0,27 1.050,74 /	4,03 / 4,04 /	-3,85 / -3,84	37	1,026	0,974	-0,94 / 1.177,31 /	-0,94 1.177,31 /	4,51 / 4,51 /	-4,32 / -4,32
2	1,026	0,974	-0,62 / 874,00 /	-0,62 874,00 /	3,35 / 3,35 /	-3,21 / -3,21	38	1,026	0,974	-1,39 / 947,58 /	-1,39 947,58 /	3,61 / 3,61 /	-3,50 / -3,50
3	1,026	0,974	-0,97 / 698,26 /	-0,97 698,26 /	2,66 / 2,66 /	-2,57 / -2,57	39	1,026	0,974	-1,82 / 725,48 /	-1,82 725,48 /	2,75 / 2,75 /	-2,70 / -2,70
4	1,026	0,974	-1,32 / 524,91 /	-1,32 524,91 /	1,99 / 1,99 /	-1,95 / -1,95	40	1,026	0,974	-2,23 / 512,58 /	-2,23 512,58 /	1,92 / 1,92 /	-1,93 / -1,93
5	1,026	0,974	-1,67 / 355,35 /	-1,67 355,35 /	1,33 / 1,33 /	-1,34 / -1,34	41	1,026	0,974	-2,61 / 310,35 /	-2,61 310,35 /	1,13 / 1,13 /	-1,20 / -1,20
6	1,026	0,974	-2,01 / 191,04 /	-2,01 191,04 /	0,68 / 0,68 /	-0,75 / -0,75	42	1,026	0,974	-2,97 / 120,23 /	-2,97 120,23 /	0,39 / 0,39 /	-0,51 / -0,51
7	1,026	0,974	-2,37 / 33,39 /	-2,37 33,39 /	0,07 / 0,07 /	-0,18 / -0,18	43	1,026	0,974	-3,30 / -56,45 /	-3,30 -56,45 /	0,38 / -0,30 /	-0,52 / 0,12
8	1,026	0,974	-2,66 / -116,13 /	-2,66 -116,13 /	0,06 / -0,51 /	-0,19 / 0,36	44	1,026	0,974	-3,60 / -218,46 /	-3,60 -218,46 /	-0,31 / -0,93 /	0,12 / 0,71
9	1,026	0,974	-2,97 / -116,13 /	-2,97 -116,13 /	0,06 / -0,51 /	-0,19 / 0,36	45	1,026	0,974	-3,87 / -218,46 /	-3,87 -218,46 /	-0,94 / -1,50 /	0,70 / 1,24
10	1,026	0,974	-3,26 / -256,12 /	-3,26 -256,12 /	-1,07 / -1,06 /	0,85 / 0,86	46	1,026	0,974	-4,10 / -364,70 /	-4,10 -364,70 /	-1,51 / -2,00 /	1,23 / 1,70
11	1,026	0,974	-3,53 / -385,19 /	-3,53 -385,19 /	-1,57 / -1,56 /	1,32 / 1,32	47	1,026	0,974	-4,29 / -494,18 /	-4,29 -494,18 /	-2,01 / -2,44 /	1,70 / 2,11
12	1,026	0,974	-3,77 / -502,02 /	-3,77 -502,02 /	-2,03 / -2,02 /	1,74 / 1,74	48	1,026	0,974	-4,45 / -606,07 /	-4,45 -606,07 /	-2,44 / -2,80 /	2,10 / 2,45
13	1,026	0,974	-3,99 / -605,35 /	-3,99 -605,35 /	-2,43 / -2,42 /	2,11 / 2,12	49	1,026	0,974	-4,57 / -699,71 /	-4,57 -699,71 /	-2,81 / -3,09 /	2,44 / 2,72
14	1,026	0,974	-4,03 / -694,00 /	-4,03 -694,00 /	-2,77 / -2,77 /	2,43 / 2,43	50	1,026	0,974	-4,66 / -774,59 /	-4,66 -774,59 /	-3,10 / -3,31 /	2,71 / 2,92
15	1,026	0,974	-4,23 / -766,91 /	-4,23 -766,91 /	-3,06 / -3,06 /	2,70 / 2,70	51	1,026	0,974	-4,71 / -830,36 /	-4,71 -830,36 /	-3,31 / -3,45 /	2,92 / 3,05
16	1,026	0,974	-4,39 / -823,12 /	-4,39 -823,12 /	-3,28 / -3,28 /	2,90 / 2,90	52	1,026	0,974	-4,71 / -866,87 /	-4,71 -866,87 /	-3,45 / -3,52 /	3,05 / 3,11
17	1,026	0,974	-4,48 / -861,83 /	-4,48 -861,83 /	-3,43 / -3,43 /	3,03 / 3,03	53	1,026	0,974	-4,69 / -884,13 /	-4,69 -884,13 /	-3,52 / -3,51 /	3,11 / 3,11
18	1,026	0,974	-4,62 / -882,34 /	-4,62 -882,34 /	-3,51 / -3,51 /	3,11 / 3,11	54	1,026	0,974	-4,62 / -882,33 /	-4,62 -882,33 /	-3,51 / -3,43 /	3,11 / 3,03
19	1,026	0,974	-4,69 / -884,15 /	-4,69 -884,15 /	-3,52 / -3,52 /	3,11 / 3,11	55	1,026	0,974	-4,58 / -861,82 /	-4,58 -861,82 /	-3,43 / -3,43 /	3,03 / 3,03
20	1,026	0,974	-4,67 / -884,15 /	-4,67 -884,15 /	-3,52 / -3,52 /	3,11 / 3,11	56	1,026	0,974	-4,52 / -861,82 /	-4,52 -861,82 /	-3,43 / -3,28 /	3,03 / 2,89
21	1,026	0,974	-4,71 / -866,89 /	-4,71 -866,89 /	-3,45 / -3,45 /	3,05 / 3,05	57	1,026	0,974	-4,48 / -823,12 /	-4,48 -823,12 /	-3,28 / -3,28 /	2,89 / 2,90
22	1,026	0,974	-4,66 / -866,89 /	-4,66 -866,89 /	-3,45 / -3,45 /	3,05 / 3,05	58	1,026	0,974	-4,39 / -823,12 /	-4,39 -823,12 /	-3,28 / -3,06 /	2,90 / 2,69
23	1,026	0,974	-4,71 / -830,38 /	-4,71 -830,38 /	-3,31 / -3,31 /	2,92 / 2,92	59	1,026	0,974	-4,35 / -766,91 /	-4,35 -766,91 /	-3,06 / -3,06 /	2,69 / 2,70
24	1,026	0,974	-4,62 / -830,38 /	-4,62 -830,38 /	-3,31 / -3,31 /	2,92 / 2,92	60	1,026	0,974	-4,23 / -766,91 /	-4,23 -766,91 /	-3,06 / -2,77 /	2,70 / 2,43
25	1,026	0,974	-4,66 / -774,60 /	-4,66 -774,60 /	-3,10 / -3,10 /	2,71 / 2,71	61	1,026	0,974	-4,19 / -694,00 /	-4,19 -694,00 /	-2,77 / -2,77 /	2,43 / 2,43
26	1,026	0,974	-4,54 / -774,60 /	-4,54 -774,60 /	-3,09 / -3,09 /	2,72 / 2,72	62	1,026	0,974	-4,03 / -694,00 /	-4,03 -694,00 /	-2,77 / -2,43 /	2,43 / 2,11
27	1,026	0,974	-4,57 / -699,72 /	-4,57 -699,72 /	-2,81 / -2,81 /	2,44 / 2,44	63	1,026	0,974	-3,99 / -605,35 /	-3,99 -605,35 /	-2,43 / -2,42 /	2,11 / 2,12
28	1,026	0,974	-4,42 / -699,72 /	-4,42 -699,72 /	-2,80 / -2,80 /	2,45 / 2,45	64	1,026	0,974	-3,81 / -605,35 /	-3,81 -605,35 /	-2,42 / -2,03 /	2,12 / 1,74
29	1,026	0,974	-4,45 / -606,08 /	-4,45 -606,08 /	-2,44 / -2,44 /	2,10 / 2,10	65	1,026	0,974	-3,77 / -502,03 /	-3,77 -502,03 /	-2,03 / -2,02 /	1,74 / 1,32
30	1,026	0,974	-4,26 / -606,08 /	-4,26 -606,08 /	-2,44 / -2,44 /	2,11 / 2,11	66	1,026	0,974	-3,56 / -502,03 /	-3,56 -502,03 /	-2,02 / -1,57 /	1,32 / 1,32
31	1,026	0,974	-4,29 / -494,18 /	-4,29 -494,18 /	-2,01 / -2,01 /	1,70 / 1,70	67	1,026	0,974	-3,53 / -385,20 /	-3,53 -385,20 /	-1,57 / -1,56 /	1,32 / 0,85
32	1,026	0,974	-4,06 / -494,18 /	-4,06 -494,18 /	-2,00 / -2,00 /	1,70 / 1,70	68	1,026	0,974	-3,29 / -385,20 /	-3,29 -385,20 /	-1,56 / -1,07 /	1,32 / 0,86
33	1,026	0,974	-4,10 / -364,70 /	-4,10 -364,70 /	-1,51 / -1,51 /	1,23 / 1,23	69	1,026	0,974	-3,26 / -256,13 /	-3,26 -256,13 /	-1,07 / -1,06 /	0,85 / 0,86
34	1,026	0,974	-3,84 / -364,70 /	-3,84 -364,70 /	-1,50 / -1,50 /	1,24 / 1,24	70	1,026	0,974	-3,00 / -256,13 /	-3,00 -256,13 /	-1,06 / -0,52 /	0,86 / 0,35
35	1,026	0,974	-3,87 / -218,47 /	-3,87 -218,47 /	-0,94 / -0,93 /	0,70 / 0,71	71	1,026	0,974	-2,97 / -116,15 /	-2,97 -116,15 /	-0,52 / -0,51 /	0,35 / 0,36
			-3,57 / -218,47 /	-3,57 -218,47 /	-0,93 / -0,93 /	0,71 / 0,71				-2,69 / -116,15 /	-2,69 -116,15 /	-0,51 / 0,06 /	0,36 / -0,19
			-3,60 / -56,45 /	-3,60 -56,45 /	-0,31 / -0,31 /	0,12 / 0,12				-2,66 / 33,38 /	-2,66 33,38 /	0,06 / 0,07 /	-0,19 / -0,18
			-3,28 / -56,45 /	-3,28 -56,45 /	-0,30 / -0,30 /	0,12 / 0,12				-2,37 / 33,38 /	-2,37 33,38 /	0,07 / 0,68 /	-0,18 / -0,76
			-3,30 / 120,23 /	-3,30 120,23 /	0,38 / 0,38 /	-0,52 / -0,52				-2,34 / 191,02 /	-2,34 191,02 /	0,68 / 0,68 /	-0,75 / -1,35
			-2,95 / 120,23 /	-2,95 120,23 /	0,39 / 0,39 /	-0,51 / -0,51				-2,03 / 191,02 /	-2,03 191,02 /	0,68 / 1,32 /	-1,35 / -1,34
			-2,97 / 310,35 /	-2,97 310,35 /	1,12 / 1,12 /	-1,21 / -1,21				-2,01 / 355,34 /	-2,01 355,34 /	1,32 / 1,98 /	-1,34 / -1,96
			-2,60 / 310,35 /	-2,60 310,35 /	1,13 / 1,13 /	-1,20 / -1,20				-1,67 / 524,89 /	-1,67 524,89 /	1,98 / 1,99 /	-1,96 / -1,95
			-2,61 / 512,58 /	-2,61 512,58 /	1,91 / 1,92 /	-1,94 / -1,93 /				-1,34 / 524,89 /	-1,34 524,89 /	2,65 / 2,65 /	-2,58 / -2,57
			-2,21 / 512,58 /	-2,21 512,58 /	1,92 / 1,92 /	-1,93 / -1,93 /				-0,98 / 698,24 /	-0,98 698,24 /	2,66 / 3,34 /	-2,57 / -3,22
			-2,23 / 725,49 /	-2,23 725,49 /	2,74 / 2,74 /	-2,71 / -2,70 /				-0,97 / 873,98 /	-0,97 873,98 /	3,35 / 3,35 /	-3,21 / -3,21
			-1,81 / 725,49 /	-1,81 725,49 /	2,75 / 2,75 /	-2,70 / -2,70 /				-0,62 / 873,98 /	-0,62 873,98 /	4,03 / 4,03 /	-3,85 / -3,84
			-1,82 / 947,58 /	-1,82 947,58 /	3,60 / 3,60 /	-3,51 / -3,50 /				-0,27 / 1.050,74 /	-0,27 1.050,74 /	4,71 / 4,71 /	-4,49 / -4,48
			-1,38 / 947,58 /	-1,38 947,58 /	3,61 / 3,61 /	-3,50 / -3,49 /				0,08 / 1.227,17 /	0,08 1.227,17 /	5,40 / 5,40 /	-5,17 / -5,12
			-1,39 / 1.177,31 /	-1,39 1.177,31 /	4,49 / 4,49 /	-4,34 / -4,32 /				0,08 1.402,00 /	0,08 1.402,00 /	5,40 / 5,40 /	-5,17 / -5,12
			-0,94 / 1.177,31 /	-0,94 1.177,31 /	4,51 / 4,51 /	-4,32 / -4,32 /							
			-0,94 / 1.413,08 /	-0,94 1.413,08 /	5,41 / 5,41 /	-5,19 / -5,17 /							
			-0,48 / 1.413,08 /	-0,48 1.413,08 /	5,42 / 5,42 /	-5,17 / -5,17 /							
			-0,48 1.653,28 /	-0,48 1.653,28 /	6,35 / 6,35 /	-6,05 / -6,05							

Biegelinie (x 3,77)

Kontaktspannungen Liner, Design

Normalkräfte Liner, Design

Momente Liner, Design


Spannung innen Liner, Design

Spannung außen Liner, Design


2.2.6.6 Spannungsnachweis Liner, Zwang

Fläche (Wanddicke):

A 40,00 mm²/mm

Außen

$$W_e = \frac{t_L^2}{6}$$

Widerstandsmoment, außen:

 W_e 266,67 mm³/mm

$$\alpha_{ka} = 1 - \frac{t_L}{3 \cdot r_L} \quad (90)$$

 Element
 Korrekturfaktor (Verformtes System)
 Normalkraft in Element
 Moment in Element

	Druck	Zug	
i	36	54	[-]
α _k	0,97	0,97	[-]
N _d	-0,54	-5,96	N/mm
M _d	2.094,11	-1.136,47	Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} - \alpha_{ka} \cdot \frac{M_d}{W_e} \quad (88)$$

Spannung in Element

 Max σ_d -7,66 4,00 N/mm²

$$f_{c,rad,L,d} = \frac{f_{c,rad,L}}{\gamma_M}$$

Zul. Spannung, Langzeit, Design:

 σ_{L,d} -55,56 55,56 N/mm²

Ausnutzung Spannungen

 U_σ 13,8 7,2 %

Der Spannungsnachweis Außen ist erfüllt.

Innen

$$W_i = \frac{t_L^2}{6}$$

Widerstandsmoment, innen:

 W_i 266,67 mm³/mm

$$\alpha_{ki} = 1 + \frac{t_L}{3 \cdot r_L}$$

(89)

Element	i	Druck	Zug	
Korrekturfaktor (Verformtes System)	α_k	53	35	[-]
Normalkraft in Element	N_d	1,03	1,03	[-]
Moment in Element	M_d	-5,98	-0,54	N/mm
		-1.136,47	2.094,11	Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} + \alpha_{ki} \cdot \frac{M_d}{W_i}$$

(87)

Spannung in Element

 $\text{Max } \sigma_d$ -4,52 8,04 N/mm²

$$f_{c,rad,L,d} = \frac{f_{c,rad,L}}{\gamma_M}$$

Zul. Spannung, Langzeit, Design:

 $\sigma_{L,d}$ -55,56 55,56 N/mm²

Ausnutzung Spannungen

 U_σ 8,1 14,5 %

Der Spannungsnachweis Innen ist erfüllt.

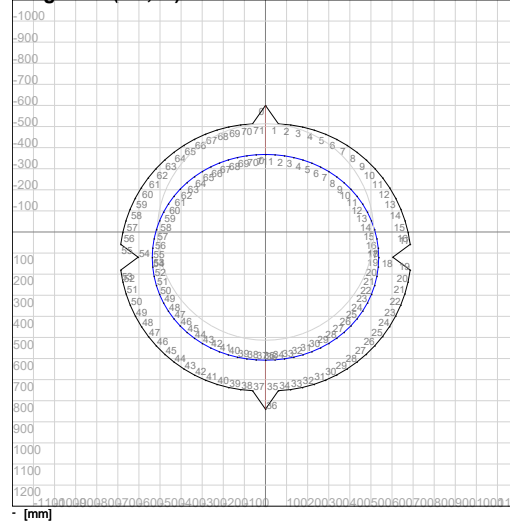
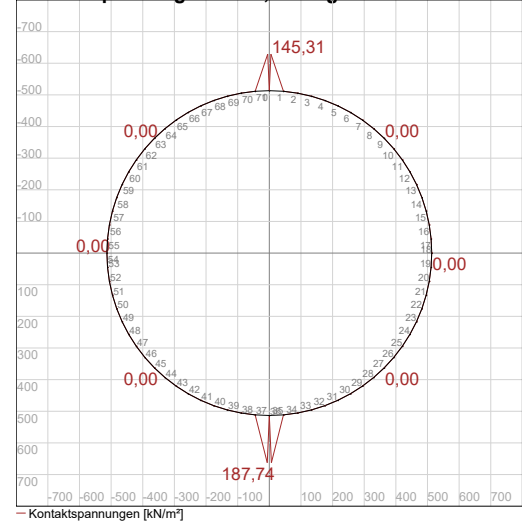
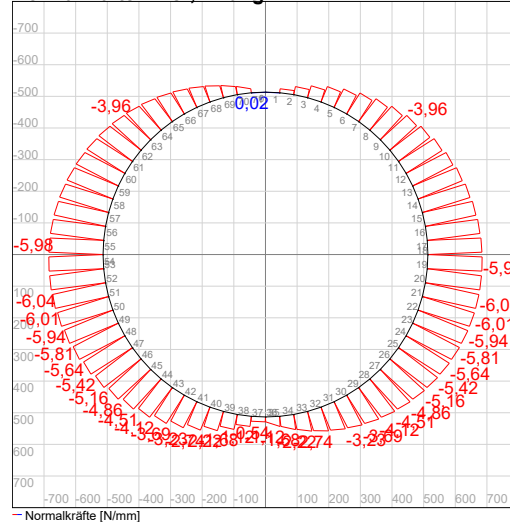
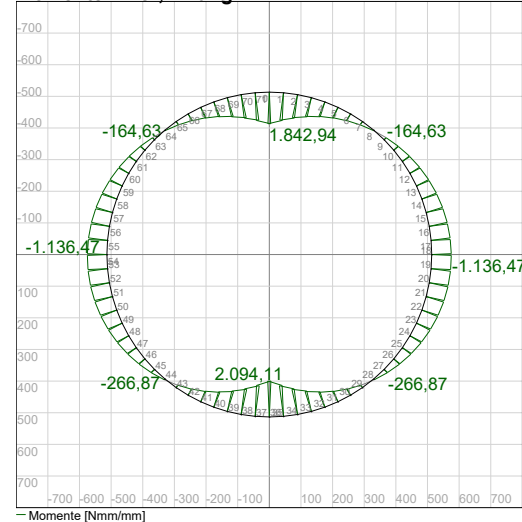
Die Spannungen liegen im zulässigen Bereich.

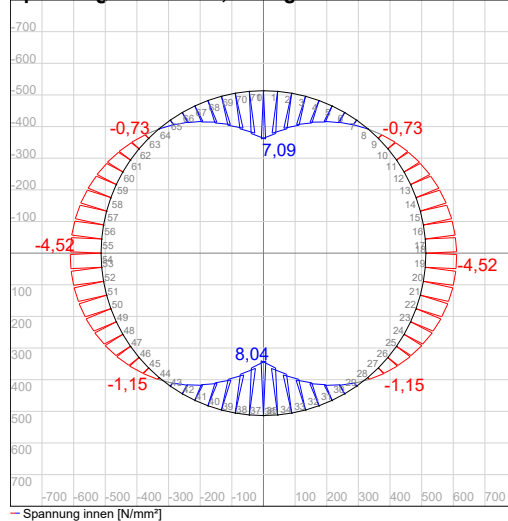
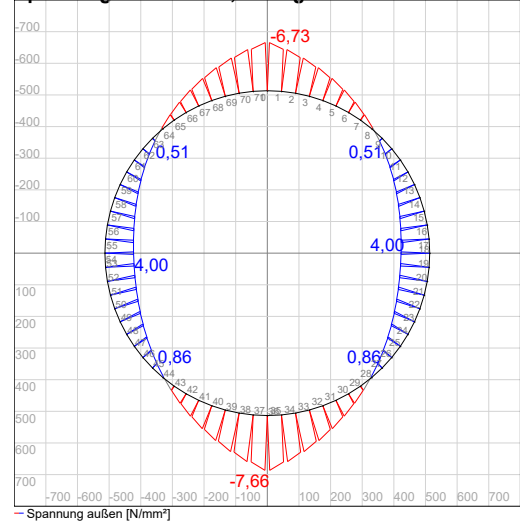
Tabellen

Element	α ki [-]	α ka [-]	N l/r	M [Nmm/m] l/r	σ i [N/mm²] l/r	σ a [N/mm²] l/r	Element	α ki [-]	α ka [-]	N l/r	M [Nmm/m] l/r	σ i [N/mm²] l/r	σ a [N/mm²] l/r
0	1,026	0,974	0,02	1.842,94 /	7,09 /	-6,73 /	36	1,026	0,974	-0,54	2.094,11 /	8,04 /	-7,66 /
				0,02 1.608,11 /	6,19 /	-5,87 /					-0,54 1.793,91 /	6,89 /	-6,57 /
1	1,026	0,974	-0,44	1.608,11 /	6,18 /	-5,88 /	37	1,026	0,974	-1,12	1.793,91 /	6,87 /	-6,58 /
			-0,45	1.372,10 /	5,27 /	-5,02 /					-1,11 1.498,57 /	5,74 /	-5,50 /
2	1,026	0,974	-0,91	1.372,10 /	5,26 /	-5,03 /	38	1,026	0,974	-1,68	1.498,57 /	5,72 /	-5,52 /
			-0,92	1.136,61 /	4,35 /	-4,17 /					-1,67 1.210,11 /	4,61 /	-4,46 /
3	1,026	0,974	-1,37	1.136,61 /	4,34 /	-4,19 /	39	1,026	0,974	-2,22	1.210,11 /	4,60 /	-4,48 /
			-1,38	903,40 /	3,44 /	-3,33 /					-2,21 930,57 /	3,53 /	-3,45 /
4	1,026	0,974	-1,83	903,40 /	3,43 /	-3,35 /	40	1,026	0,974	-2,74	930,57 /	3,51 /	-3,47 /
			-1,85	674,28 /	2,55 /	-2,51 /					-2,73 661,92 /	2,48 /	-2,49 /
5	1,026	0,974	-2,29	674,28 /	2,54 /	-2,52 /	41	1,026	0,974	-3,23	661,92 /	2,47 /	-2,50 /
			-2,31	451,07 /	1,68 /	-1,71 /					-3,21 406,07 /	1,48 /	-1,56 /
6	1,026	0,974	-2,73	451,07 /	1,67 /	-1,72 /	42	1,026	0,974	-3,69	406,07 /	1,47 /	-1,58 /
			-2,75	235,62 /	0,84 /	-0,93 /					-3,67 164,85 /	0,54 /	-0,69 /
7	1,026	0,974	-3,16	235,62 /	0,83 /	-0,94 /	43	1,026	0,974	-4,12	164,85 /	0,53 /	-0,71 /
			-3,19	29,78 /	0,03 /	-0,19 /					-4,09 -60,00 /	-0,33 /	0,12 /
8	1,026	0,974	-3,57	29,78 /	0,03 /	-0,20 /	44	1,026	0,974	-4,51	-60,00 /	-0,34 /	0,11 /
			-3,60	-164,63 /	-0,72 /	0,51 /					-4,48 -266,87 /	-1,14 /	0,86 /
9	1,026	0,974	-3,96	-164,63 /	-0,73 /	0,50 /	45	1,026	0,974	-4,86	-266,87 /	-1,15 /	0,85 /
			-3,99	-345,84 /	-1,43 /	1,16 /					-4,82 -454,30 /	-1,87 /	1,54 /
10	1,026	0,974	-4,32	-345,84 /	-1,44 /	1,16 /	46	1,026	0,974	-5,16	-454,30 /	-1,88 /	1,53 /
			-4,36	-512,12 /	-2,08 /	1,76 /					-5,13 -620,98 /	-2,52 /	2,14 /
11	1,026	0,974	-4,66	-512,12 /	-2,09 /	1,75 /	47	1,026	0,974	-5,42	-620,98 /	-2,52 /	2,13 /
			-4,70	-661,85 /	-2,66 /	2,30 /					-5,39 -765,78 /	-3,08 /	2,66 /
12	1,026	0,974	-4,96	-661,85 /	-2,67 /	2,29 /	48	1,026	0,974	-5,64	-765,78 /	-3,09 /	2,66 /
			-5,00	-793,50 /	-3,18 /	2,77 /					-5,60 -887,74 /	-3,56 /	3,10 /
13	1,026	0,974	-5,23	-793,50 /	-3,18 /	2,77 /	49	1,026	0,974	-5,81	-887,74 /	-3,56 /	3,10 /
			-5,27	-905,65 /	-3,62 /	3,18 /					-5,77 -986,13 /	-3,94 /	3,46 /
14	1,026	0,974	-5,47	-905,65 /	-3,62 /	3,17 /	50	1,026	0,974	-5,94	-986,13 /	-3,94 /	3,45 /
			-5,51	-997,04 /	-3,97 /	3,50 /					-5,90 -1.060,41 /	-4,23 /	3,73 /
15	1,026	0,974	-5,66	-997,04 /	-3,98 /	3,50 /	51	1,026	0,974	-6,01	-1.060,41 /	-4,23 /	3,72 /
			-5,70	-1.066,56 /	-4,25 /	3,75 /					-5,97 /	-4,42 /	3,91 /
16	1,026	0,974	-5,81	-1.066,56 /	-4,25 /	3,75 /	52	1,026	0,974	-6,04	-1.110,25 /	-4,42 /	3,90 /
			-5,85	/	-4,43 /	3,92 /					-6,00 /	-4,52 /	4,00 /
17	1,026	0,974	-5,92	-1.113,28 /	-4,43 /	3,92 /	53	1,026	0,974	-6,03	-1.135,57 /	-4,52 /	4,00 /
			-5,96	/	-4,52 /	4,00 /					-5,98 /	-4,52 /	4,00 /
18	1,026	0,974	-5,98	-1.136,47 /	-4,52 /	4,00 /	54	1,026	0,974	-5,96	-1.136,47 /	-4,52 /	4,00 /
			-6,03	/	-4,52 /	4,00 /					-5,92 /	-4,43 /	3,92 /
19	1,026	0,974	-6,00	-1.135,57 /	-4,52 /	4,00 /	55	1,026	0,974	-5,85	-1.113,28 /	-4,43 /	3,92 /
			-6,04	/	-4,42 /	3,90 /					-5,81 /	-4,25 /	3,75 /
20	1,026	0,974	-5,97	-1.110,25 /	-4,42 /	3,91 /	56	1,026	0,974	-5,70	-1.066,56 /	-4,25 /	3,75 /
			-6,01	/	-4,23 /	3,72 /					-5,66 /	-3,98 /	3,50 /
21	1,026	0,974	-5,90	-1.060,41 /	-4,23 /	3,73 /	57	1,026	0,974	-5,51	-997,04 /	-3,97 /	3,50 /
			-5,94	-986,13 /	-3,94 /	3,45 /					-5,47 -905,65 /	-3,62 /	3,17 /
22	1,026	0,974	-5,77	-986,13 /	-3,94 /	3,46 /	58	1,026	0,974	-5,27	-905,65 /	-3,62 /	3,18 /
			-5,81	-887,74 /	-3,56 /	3,10 /					-5,23 -793,50 /	-3,18 /	2,77 /
23	1,026	0,974	-5,60	-887,74 /	-3,56 /	3,10 /	59	1,026	0,974	-5,00	-793,50 /	-3,18 /	2,77 /
			-5,64	-765,78 /	-3,09 /	2,66 /					-4,96 -661,85 /	-2,67 /	2,29 /
24	1,026	0,974	-5,39	-765,78 /	-3,08 /	2,66 /	60	1,026	0,974	-4,70	-661,85 /	-2,66 /	2,30 /
			-5,42	-620,98 /	-2,52 /	2,13 /					-4,66 -512,12 /	-2,09 /	1,75 /
25	1,026	0,974	-5,13	-620,98 /	-2,52 /	2,14 /	61	1,026	0,974	-4,36	-512,12 /	-2,08 /	1,76 /
			-5,16	-454,30 /	-1,88 /	1,53 /					-4,32 -345,84 /	-1,44 /	1,16 /
26	1,026	0,974	-4,82	-454,30 /	-1,87 /	1,54 /	62	1,026	0,974	-3,99	-345,84 /	-1,43 /	1,16 /
			-4,86	-266,87 /	-1,15 /	0,85 /					-3,96 -164,63 /	-0,73 /	0,50 /
27	1,026	0,974	-4,48	-266,87 /	-1,14 /	0,86 /	63	1,026	0,974	-3,60	-164,63 /	-0,72 /	0,51 /
			-4,51	-60,00 /	-0,34 /	0,11 /					-3,57 29,78 /	0,03 /	-0,20 /
28	1,026	0,974	-4,09	-60,00 /	-0,33 /	0,12 /	64	1,026	0,974	-3,19	29,78 /	0,03 /	-0,19 /
			-4,12	164,85 /	0,53 /	-0,71 /					-3,16 235,62 /	0,83 /	-0,94 /
29	1,026	0,974	-3,67	164,85 /	0,54 /	-0,69 /	65	1,026	0,974	-2,75	235,62 /	0,84 /	-0,93 /
			-3,69	406,07 /	1,47 /	-1,58 /					-2,73 451,07 /	1,67 /	-1,72 /
30	1,026	0,974	-3,21	406,07 /	1,48 /	-1,56 /	66	1,026	0,974	-2,31	451,07 /	1,68 /	-1,71 /
			-3,23	661,92 /	2,47 /	-2,50 /					-2,29 674,28 /	2,54 /	-2,52 /
31	1,026	0,974	-2,73	661,92 /	2,48 /	-2,49 /	67	1,026	0,974	-1,85	674,28 /	2,55 /	-2,51 /
			-2,74	930,57 /	3,51 /	-3,47 /					-1,83 903,40 /	3,43 /	-3,35 /
32	1,026	0,974	-2,21	930,57 /	3,53 /	-3,45 /	68	1,026	0,974	-1,38	903,40 /	3,44 /	-3,33 /
			-2,22	1.210,11 /	4,60 /	-4,48 /					-1,37 1.136,61 /	4,34 /	-4,19 /
33	1,026	0,974	-1,67	1.210,11 /	4,61 /	-4,46 /	69	1,026	0,974	-0,92	1.136,61 /	4,35 /	-4,17 /
			-1,68	1.498,57 /	5,72 /	-5,52 /					-0,91 1.372,10 /	5,26 /	-5,03 /

34	1,026	0,974	-1,11 / 1.498,57 /	5,74 /	-5,50 /
35	1,026	0,974	-1,12 1.793,91	6,87	-6,58
			-0,54 / 1.793,91 /	6,89 /	-6,57 /
			-0,54 2.094,11	8,04	-7,66

70	1,026	0,974	-0,45 / 1.372,10 /	5,27 /	-5,02 /
71	1,026	0,974	-0,44 1.608,11	6,18	-5,88
			0,02 / 1.608,11 /	6,19 /	-5,87 /
			0,02 1.842,94	7,09	-6,73

Biegelinie (x 3,93)

Kontaktspannungen Liner, Zwang

Normalkräfte Liner, Zwang

Momente Liner, Zwang


Spannung innen Liner, Zwang

Spannung außen Liner, Zwang


2.2.6.7 Altrohrspannungen Kämpfer

Vertikale Gesamtlast, Design:

Wanddicke Altrohr:

Außendurchmesser Altrohr Kämpfer:

Bezogene Gelenkringexzentrizität:

$q_{v,d}$	170,69	kN/m²
t_R	250,00	mm
$d_{AR,k}$	1.566,67	mm
e_G/t	35,00	%

$$b_D = \frac{8 \cdot t_R}{3} \cdot (0,50 - e_G/t) \quad (101)$$

Druckzonenbreite:

b_D	100,00	mm
-------	--------	----

$$N_{K,d} = -q_{v,d} (1 + \omega_{GR,v}) \cdot \frac{d_{AR,k}}{2}$$

Druckkraft im Kämpfer:

$N_{K,d}$	-133,71	N/mm
-----------	---------	------

$$\sigma_d = \frac{N_{K,d}}{b_D} \cdot 1,50 \quad (100)$$

Spannung in der Druckzone:

σ_d	-2,01	N/mm²
------------	-------	-------

Zul. Druckfestigkeit, Langzeit:

$f_{c,rad,L}$	5,00	N/mm²
---------------	------	-------

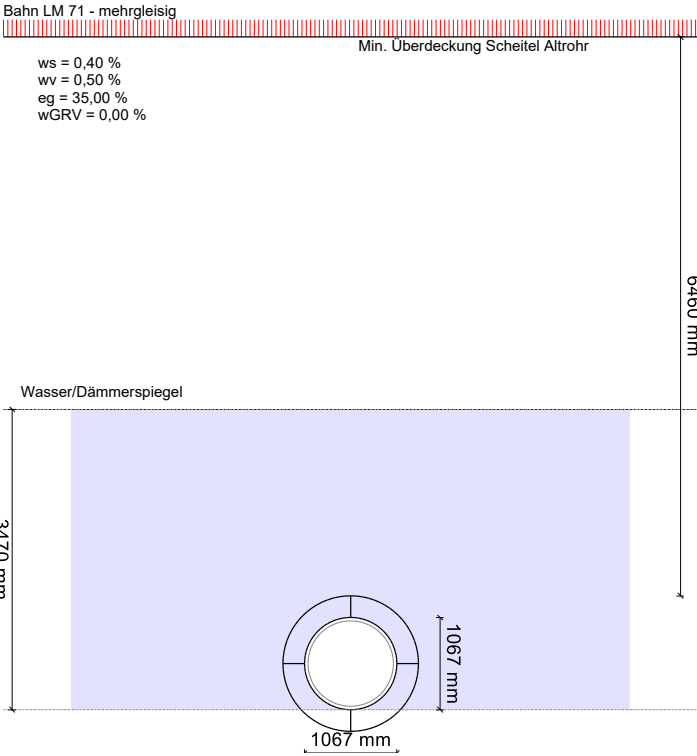
$$U_{\sigma D,AR} = \frac{-1 \cdot \sigma_d}{f_{c,rad,L}} \quad (102)$$

Ausnutzung Druckspannungen AR Kämpfer:

$U_{\sigma D,AR}$	40,1	%
-------------------	------	---

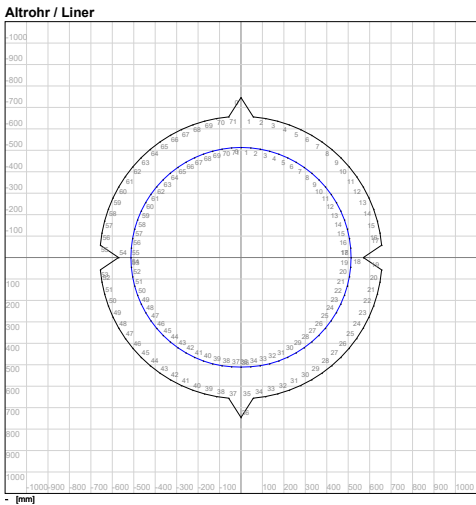
Der Spannungsnachweis für Kämpferspannungen im Altrohr ist erfüllt.

2.2.7 Lastfall 03 [Ersatzkreis] AZ III - hW 3,47 m + h 6,46 m + ws 0,4 % + ww 0,5 %, Langzeit



2.2.7.1 Geometrie diskretisiertes System

Skizze



Wanddicke Liner: t_L 40,00 mm
Wanddicke Altrrohr: t_R 250,00 mm

Berechnete Punkte

Element	Altrrohr X [mm]	Altrrohr Y [mm]	Liner X [mm]	Liner Y [mm]	Liner r [mm]	Element	Altrrohr X [mm]	Altrrohr Y [mm]	Liner X [mm]	Liner Y [mm]	Liner r [mm]
0	0,0	-745,8	0,0	-513,3	513,3	18	570,8	0,0	513,3	0,0	513,3
1	57,4	-655,8	44,7	-511,4	513,3	19	655,8	57,4	511,4	44,7	513,3
2	114,3	-648,3	89,1	-505,5	513,3	20	648,3	114,3	505,5	89,1	513,3
3	170,4	-635,9	132,9	-495,8	513,3	21	635,9	170,4	495,8	132,9	513,3
4	225,2	-618,6	175,6	-482,4	513,3	22	618,6	225,2	482,4	175,6	513,3
5	278,2	-596,7	216,9	-465,2	513,3	23	596,7	278,2	465,2	216,9	513,3
6	329,2	-570,1	256,7	-444,6	513,3	24	570,1	329,2	444,6	256,7	513,3
7	377,6	-539,3	294,4	-420,5	513,3	25	539,3	377,6	420,5	294,4	513,3
8	423,2	-504,3	330,0	-393,2	513,3	26	504,3	423,2	393,2	330,0	513,3
9	465,5	-465,5	363,0	-363,0	513,3	27	465,5	465,5	363,0	363,0	513,3
10	504,3	-423,2	393,2	-330,0	513,3	28	423,2	504,3	330,0	393,2	513,3
11	539,3	-377,6	420,5	-294,4	513,3	29	377,6	539,3	294,4	420,5	513,3
12	570,1	-329,2	444,6	-256,7	513,3	30	329,2	570,1	256,7	444,6	513,3
13	596,7	-278,2	465,2	-216,9	513,3	31	278,2	596,7	216,9	465,2	513,3
14	618,6	-225,2	482,4	-175,6	513,3	32	225,2	618,6	175,6	482,4	484,7
15	635,9	-170,4	495,8	-132,9	513,3	33	170,4	635,9	132,8	495,6	439,3
16	648,3	-114,3	505,5	-89,1	513,3	34	114,3	648,3	88,9	504,4	499,4
17	655,8	-57,4	511,4	-44,7	513,3	35	57,4	655,8	44,6	509,3	589,8
18	570,8	0,0	513,3	0,0	513,3	36	0,0	745,8	0,0	510,8	671,5

Lokale Vorverformung: ω_V 0,50 %
Lokale Vorverformung absolut: w_V 2,57 mm

Gelenkringverformung: $\omega_{GR,V}$ 0,00 %
Gelenkringverformung absolut, einseitig: $w_{GR,V}$ 0,00 mm
Ringspalt: ω_S 0,40 %
Spaltweite absolut (als konst. Ringspalt): w_S 2,05 mm

Mittlerer Radius Liner: $r_{L,m}$ 513,33 mm

2.2.7.2 Erdlasten und Verkehrslasten

Wichte Boden, unter Auftrieb: γ_B' 10,00 kN/m³
Wichte Boden, trocken: γ_B 20,00 kN/m³
Min. Überdeckung Scheitel Altrrohr: h_{min} 6,46 m
Wasser/Dämmerspiegel: h_w 3,47 m
Wanddicke Altrrohr: t_R 250,00 mm
Vertikale Lichte Höhe Altrrohr: $d_{AR,iv}$ 1.066,67 mm

$$h'_w = h_w - t_R - d_{AR,iv}$$

Höhe Wasserspiegel über Altrrohrscheitel: h'_w 2,15 m

$$p_E = \gamma_B \cdot (h_{min} - h'_w) + \gamma_B' \cdot h'_w \quad (74)$$

Vertikale Erdlast: p_E 107,67 kN/m²

$$r_{AR,a} = t_R + \frac{d_{AR,iv}}{2}$$

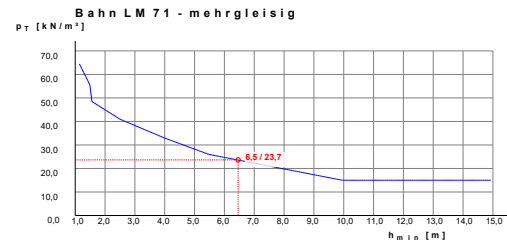
Höhe Scheitel bis Kämpfer Altrrohr: $r_{AR,a}$ 783,33 mm

$$h'_{wk} = r_{AR,a}$$

Höhe Wasserspiegel Altrrohrkämpfer bis Altrrohrscheitel: h'_{wk} 0,78 m

$$p_{E,K} = p_E + \gamma_B \cdot (r_{AR,a} - h'_{wk}) + \gamma_B' \cdot h'_{wk}$$

Vertikale Erdlast bis Kämpfer: $p_{E,K}$ 115,50 kN/m²



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

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

Stoßbeiwert: Φ_2 1,67 [-]

$$\text{red } \Phi_2 = \Phi_2 - 0,1 \cdot (h_{\ddot{u}} - 1,0) \geq 1 \quad (22)$$

Stoßbeiwert reduziert: red Φ_2 1,12 [-]
 Anpassungsfaktor α_{Qi} LM71 (DIN EN 1991-2): $\alpha_{Qi,LM71}$ 1,00 [-]
 Einfache Bodenspannung aus Verkehr: p 23,65 kN/m²

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

Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Scheitelhöhe: p_T 26,59 kN/m²

Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Kämpferhöhe (ohne φ): p_K 21,74 kN/m²
 Erdruckbeiwert (Einbettung): K_2 0,100 [-]

$$p_{T,h} = (0,50 \cdot (\text{red } \Phi_2 - 1) + 1) \cdot p_K \cdot K_2 \cdot \alpha_{Qi,LM71} \quad A 161 (23b)$$

Horizontale Bodenspannung aus Verkehr: $p_{T,h}$ 2,31 kN/m²

Vertikale Verkehrslast: p_V 26,59 kN/m²

$$p_{V,d} = p_V \cdot Y_{T,sup}$$

Vertikale Verkehrslast, Design: $p_{V,d}$ 39,88 kN/m²
 Zusätzliche Flächenlast: p_0 0,0 kN/m²

Konzentrationsfaktor über Rohr: λ_R 0,75 [-]

$$q_v = \lambda_R \cdot (p_E + p_0) + p_V$$

Vertikale Gesamtlast: q_v 107,34 kN/m²

$$q_{v,d} = \lambda_R \cdot (p_E + p_0) \cdot Y_{B,sup} + p_{V,d}$$

Vertikale Gesamtlast, Design: $q_{v,d}$ 148,89 kN/m²
 E-Modul: E_2 8,00 N/mm²

$$S_{Bh} = 0,80 \cdot E_2 \quad (60)$$

Horizontale Bettungssteifigkeit: S_{Bh} 6,400 N/mm²
 Erdruckbeiwert (Einbettung): K_2 0,100 [-]

$$\lambda_B = \frac{4 - \lambda_R}{3} \quad A 127 (6.07)$$

Konzentrationsfaktor Boden: λ_B 1,083 [-]

Höhe Wasserspiegel Altrohrkämpfer bis Altrohrscheitel: h'_{wk} 0,78 m

$$r_{AR,a} = t_R + d_{AR,iv}/2$$

$$r_{AR,a} = t_R + \frac{d_{AR,iv}}{2}$$

Höhe Scheitel bis Kämpfer Altrohr:	$r_{AR,a}$	783,33	mm
------------------------------------	------------	--------	----

$$q_{h,E} = K_2 \cdot \lambda_B \cdot p_{E,K}$$

Horizontale Erdlast:	$q_{h,E}$	12,51	kN/m²
Horizontale Verkehrslast:	$q_{h,V}$	2,31	kN/m²

$$q_h = q_{h,V} + q_{h,E}$$

Horizontale Gesamtlast:	q_h	14,82	kN/m²
-------------------------	-------	-------	-------

$$q_{h,d} = q_{h,V} \cdot 1,50 + q_{h,E} \cdot 1,35 \tag{75}$$

Designwert Horizontale Gesamtlast:	$q_{h,d}$	20,35	kN/m²
------------------------------------	-----------	-------	-------

$$K_2' = \frac{q_{h,d}}{q_{v,d}} \tag{77}$$

Rechnerischer Erddruckbeiwert:	K_2'	0,137	[-]
--------------------------------	--------	-------	-----

2.2.7.3 Verformungsnachweis Liner, Gebrauchslast

$$d_v = d_{aL}$$

Relevanter Durchmesser für prozentuale Verformung: d_v 1.066,67 mm

Spaltweite absolut (als konst. Ringspalt): w_s 2,05 mm

Lokale Vorverformung absolut: w_v 2,57 mm

Gelenkringverformung absolut, einseitig: $w_{GR,v}$ 0,00 mm

Elastische Verformung absolut, vertikal: $w_{el,v}$ 4,96 mm

Zulässige Verformung elastisch absolut: $zul\ w_{el}$ 10,00 mm

Die errechnete absolute elastische Verformung ist kleiner als die von der Deutschen Bahn AG festgelegten 10 mm.

$$\delta_{v,el} = \frac{w_{el,v}}{d_v}$$

Elastische Verformung relativ: $\delta_{v,el}$ 0,46 %

Zulässige Verformung elastisch: $zul\ \delta_{v,el}$ 2,00 %

Die errechnete elastische Verformung ist kleiner als die zulässige Verformung.

$$w = w_{el,v} + w_{GR,v} \cdot 2 + w_v$$

Gesamte Durchmesseränderung: w 7,52 mm

$$\delta_v = \frac{w}{d_v}$$

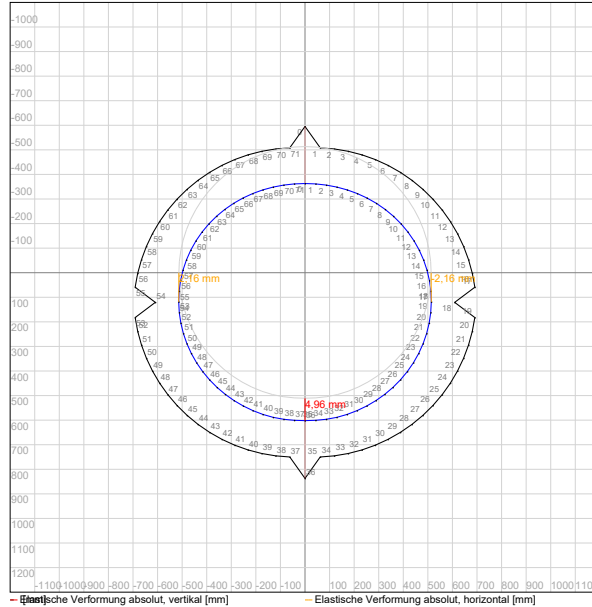
Relative Gesamtverformung: δ_v 0,71 %

Anhaltswert Gesamtverformung: $\delta_{v,A}$ 10,00 %

Elastische Verformung absolut, horizontal: $w_{el,h,E1}$ -2,16 mm

Elastische Verformung absolut, horizontal: $w_{el,h,E2}$ 2,16 mm

Elastische Verformung absolut, horizontal: $w_{el,h}$ 4,31 mm

Gebrauchslast (x 6,5)


2.2.7.4 Bodeninteraktion (Gebrauchslast)

$$CB = \frac{E_2}{\frac{da_{AR,k}}{2}} \cdot 0,80$$

Bettungsziffer, Scheitel:

CB 8.170,21 kN/m³

$$CB = \frac{E}{r_{aR}} \cdot 0,80$$

Innerer Reibungswinkel:

φ' 20,00 °

$$K_p = \tan (45^\circ + \varphi'/2)^2$$

(62)

Beiwert:

K_p 2,04 [-]
p_E 107,67 kN/m²

$$q_{h,max} = 0,75 \cdot K_p \cdot \lambda_B \cdot p_E$$

(61)

Grenzwert q_h im Scheitel (informativ):

q_{h,max} 178,42 kN/m²

Vertikale Erdlast bis Kämpfer:

p_{E,K} 115,50 kN/m²

$$q_{h,max,K} = 0,75 \cdot K_p \cdot \lambda_B \cdot p_{E,K}$$

(61)

Grenzwert q_h im Kämpfer:

q_{h,max,K} 191,40 kN/m²

Der Wert wird im Kämpfer abgelesen.

Horizontale Gesamtlast:

q_h 14,82 kN/m²
q_h* 47,88 kN/m²

Seitlicher Bettungsreaktionsdruck:

$$q_h + q_{h^*} = q_{h^*} + q_h$$

Summe horizontale Kräfte:

q_h + q_h* 62,70 kN/m²

$$q_{h,max,K} \geq q_h + q_h^*$$

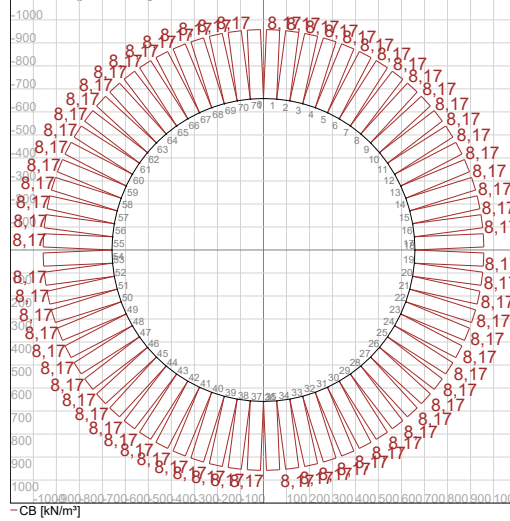
$$U_{maxqh} = \frac{q_h + q_h^*}{q_{h,max,K}}$$

Ausnutzung max qh:

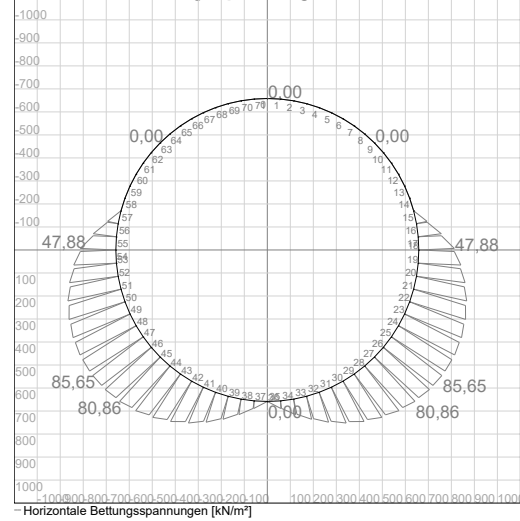
Für die Interaktion Boden-Rohrsystem wurde der elastische Ansatz verwendet. Die Bettung des Rohres wurde um den gesamten Umfang als konstant angenommen. Damit ergibt sich eine Dreiecksförmige Verteilung der Bodenspannungen, deren Maximalwert auf 75% des passiven Erddrucks begrenzt ist.

$$U_{maxqh} = 32,8 \%$$

Bettungssteifigkeit



Horizontale Bettungsspannungen



Die horizontale Kraft aus Bettungsreaktionsdruck und seitlichem Druck im Kämpfer liegt unterhalb des Grenzwertes.

2.2.7.5 Stabilitätsnachweis (Designwerte)

Der maßgebende Nachweis der Stabilität erfolgt über die im Abschnitt 7.6.4.2 (DWA-A 143-2) zugelassene (genauere) Variante einer Berechnung nach Theorie II. Ordnung unter Berücksichtigung der Vorverformungen und der Spaltbildung. Hierbei wird numerisch überprüft, ob ein elastisches Stabilitätsversagen (Beulen) unter gamma-facher Last eintritt. Darüber hinaus wird geprüft, ob die bei dieser Berechnung ermittelten Spannungen die vorgegeben maximalen Grenzspannungen für Zug und Druck mit einfacher Sicherheit nicht überschreiten.

Nachweis entfällt.

Spannungsnachweis Liner, Design

Fläche (Wanddicke): A 40,00 mm²/mm

Außen

$$W_e = \frac{t_L^2}{6}$$

Widerstandsmoment, außen: W_e 266,67 mm³/mm

$$\alpha_{ka} = 1 - \frac{t_L}{3 \cdot r_L} \quad (90)$$

Element	i	Druck	Zug	
Korrekturfaktor (Verformtes System)	α_k	71	14	[-]
Normalkraft in Element	N_d	0,97	0,97	[-]
Moment in Element	M_d	-22,43	-26,06	N/mm
		1.337,40	-620,23	Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} - \alpha_{ka} \cdot \frac{M_d}{W_e} \quad (88)$$

Spannung in Element Max σ_d -5,45 1,61 N/mm²

$$f_{c,rad,L,d} = \frac{f_{c,rad,L}}{Y_M}$$

Zul. Spannung, Langzeit, Design: $\sigma_{L,d}$ -55,56 55,56 N/mm²

Ausnutzung Spannungen U_σ 9,8 2,9 %

Der Spannungsnachweis Außen ist erfüllt.

Innen

$$W_i = \frac{t_L^2}{6}$$

Widerstandsmoment, innen: W_i 266,67 mm³/mm

$$\alpha_{ki} = 1 + \frac{t_L}{3 \cdot r_L} \quad (89)$$

Element	i	Druck	Zug	
Korrekturfaktor (Verformtes System)	α_k	56	0	[-]
Normalkraft in Element	N_d	1,03	1,03	[-]
Moment in Element	M_d	-26,06	-22,43	N/mm
		-620,23	1.337,40	Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} + \alpha_{ki} \cdot \frac{M_d}{W_i} \tag{87}$$

Spannung in Element	Max σ_d	-3,04	4,58	N/mm²
---------------------	----------------	-------	------	-------

$$f_{c,rad,L,d} = \frac{f_{c,rad,L}}{\gamma_M}$$

Zul. Spannung, Langzeit, Design:	$\sigma_{L,d}$	-55,56	55,56	N/mm²
----------------------------------	----------------	--------	-------	-------

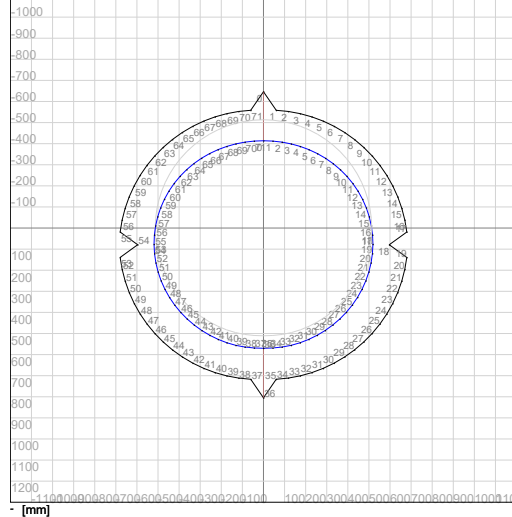
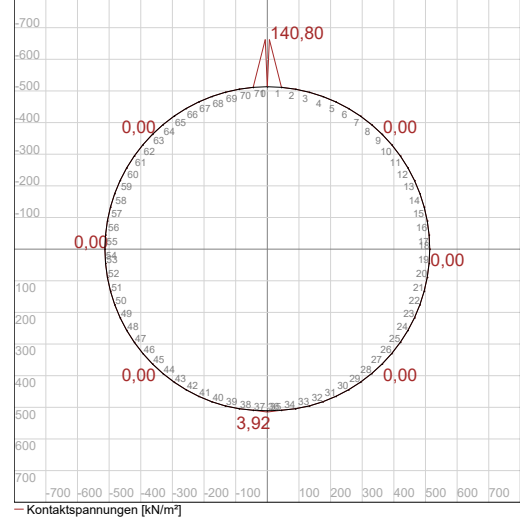
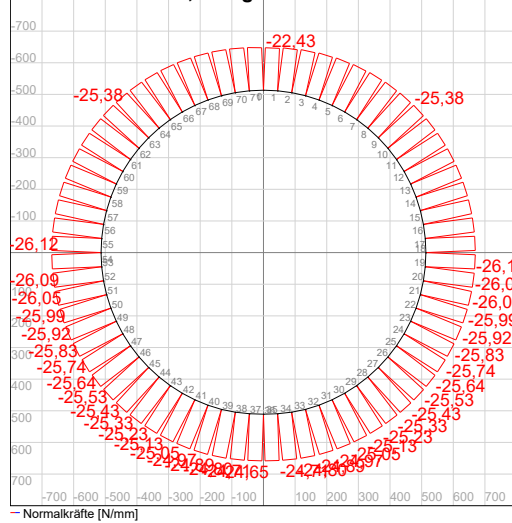
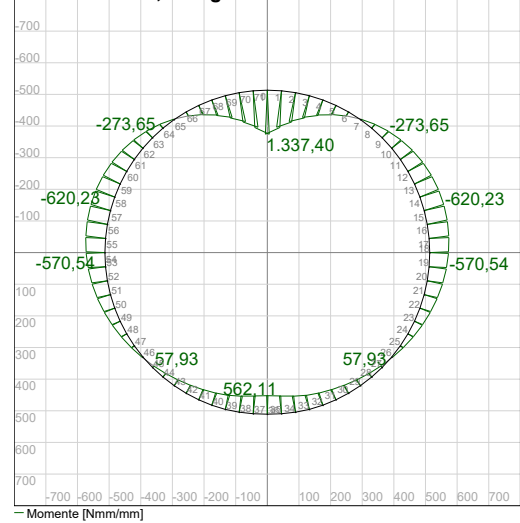
Ausnutzung Spannungen	U_σ	5,5	8,3	%
-----------------------	------------	-----	-----	---

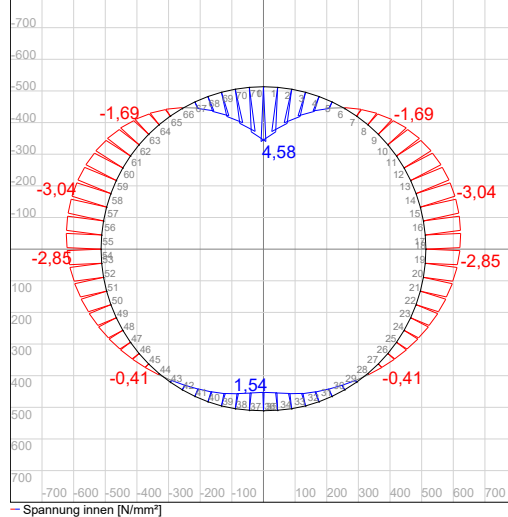
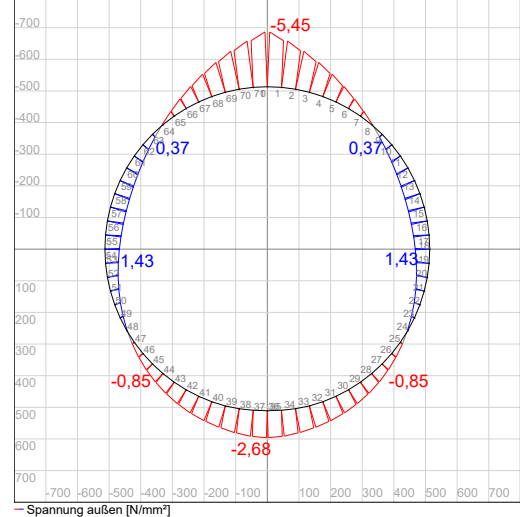
Der Spannungsnachweis Innen ist erfüllt.

Die Spannungen liegen im zulässigen Bereich.

Tabellen

Element	α ki [-]	α ka [-]	N [N/mm] l/r	M [Nmm/m] l/r	σ i [N/mm²] l/r	σ a [N/mm²] l/r	Element	α ki [-]	α ka [-]	N [N/mm] l/r	M [Nmm/m] l/r	σ i [N/mm²] l/r	σ a [N/mm²] l/r
0	1,026	0,974	-22,43 / 1.337,40 /	4,58 /	-5,45 /		36	1,020	0,980	-24,65 / 562,11 /	1,53 /	-2,68 /	
			-22,43 1.113,72 /	3,72 /	-4,63 /					-24,65 538,92 /	1,44 /	-2,60 /	
1	1,026	0,974	-22,86 897,04 /	2,88 /	-3,85 /		37	1,023	0,977	-24,71 / 538,92 /	1,45 /	-2,59 /	
			-23,26 / 897,04 /	2,87 /	-3,86 /					-24,70 492,00 /	1,27 /	-2,42 /	
2	1,026	0,974	-23,27 689,43 /	2,07 /	-3,10 /		38	1,027	0,973	-24,80 / 492,00 /	1,27 /	-2,42 /	
			-23,64 / 689,43 /	2,06 /	-3,11 /					-24,79 436,96 /	1,06 /	-2,21 /	
3	1,026	0,974	-23,65 492,79 /	1,30 /	-2,39 /		39	1,030	0,970	-24,89 / 436,96 /	1,07 /	-2,21 /	
			-24,00 / 492,79 /	1,30 /	-2,40 /					-24,88 388,27 /	0,88 /	-2,03 /	
4	1,026	0,974	-24,02 308,82 /	0,59 /	-1,73 /		40	1,028	0,972	-24,97 / 388,27 /	0,87 /	-2,04 /	
			-24,33 / 308,82 /	0,58 /	-1,74 /					-24,95 336,21 /	0,67 /	-1,85 /	
5	1,026	0,974	-24,35 139,03 /	-0,07 /	-1,12 /		41	1,026	0,974	-25,05 / 336,21 /	0,67 /	-1,85 /	
			-24,64 / 139,03 /	-0,08 /	-1,12 /					-25,03 275,99 /	0,44 /	-1,63 /	
6	1,026	0,974	-24,66 -15,30 /	-0,68 /	-0,56 /		42	1,026	0,974	-25,13 / 275,99 /	0,43 /	-1,64 /	
			-24,92 / -15,30 /	-0,68 /	-0,57 /					-25,11 208,68 /	0,18 /	-1,39 /	
7	1,026	0,974	-24,94 -153,13 /	-1,21 /	-0,06 /		43	1,026	0,974	-25,23 / 208,68 /	0,17 /	-1,39 /	
			-25,16 / -153,13 /	-1,22 /	-0,07 /					-25,20 135,54 /	-0,11 /	-1,13 /	
8	1,026	0,974	-25,19 -273,65 /	-1,68 /	0,37 /		44	1,026	0,974	-25,33 / 135,54 /	-0,11 /	-1,13 /	
			-25,38 / -273,65 /	-1,69 /	0,37 /					-25,30 57,93 /	-0,41 /	-0,84 /	
9	1,026	0,974	-25,41 -376,33 /	-2,08 /	0,74 /		45	1,026	0,974	-25,43 / 57,93 /	-0,41 /	-0,85 /	
			-25,57 / -376,33 /	-2,09 /	0,74 /					-25,40 -22,63 /	-0,72 /	-0,55 /	
10	1,026	0,974	-25,60 -460,85 /	-2,41 /	1,04 /		46	1,026	0,974	-25,53 / -22,63 /	-0,73 /	-0,56 /	
			-25,72 / -460,85 /	-2,42 /	1,04 /					-25,50 -104,54 /	-1,04 /	-0,26 /	
11	1,026	0,974	-25,76 -527,18 /	-2,67 /	1,28 /		47	1,026	0,974	-25,64 / -104,54 /	-1,04 /	-0,26 /	
			-25,85 / -527,18 /	-2,67 /	1,28 /					-25,60 -186,12 /	-1,36 /	0,04 /	
12	1,026	0,974	-25,89 -575,52 /	-2,86 /	1,45 /		48	1,026	0,974	-25,74 / -186,12 /	-1,36 /	0,04 /	
			-25,95 / -575,52 /	-2,86 /	1,45 /					-25,70 -265,64 /	-1,66 /	0,33 /	
13	1,026	0,974	-25,99 -606,31 /	-2,98 /	1,56 /		49	1,026	0,974	-25,83 / -265,64 /	-1,67 /	0,32 /	
			-26,02 / -606,31 /	-2,98 /	1,56 /					-25,79 -341,31 /	-1,96 /	0,60 /	
14	1,026	0,974	-26,06 -620,23 /	-3,04 /	1,61 /		50	1,026	0,974	-25,92 / -341,31 /	-1,96 /	0,60 /	
			-26,06 / -620,23 /	-3,04 /	1,61 /					-25,88 -411,37 /	-2,23 /	0,86 /	
15	1,026	0,974	-26,10 -618,16 /	-3,03 /	1,61 /		51	1,026	0,974	-25,99 / -411,37 /	-2,23 /	0,85 /	
			-26,08 / -618,16 /	-3,03 /	1,61 /					-25,95 -474,05 /	-2,47 /	1,08 /	
16	1,026	0,974	-26,12 -601,18 /	-2,97 /	1,54 /		52	1,026	0,974	-26,05 / -474,05 /	-2,48 /	1,08 /	
			-26,08 / -601,18 /	-2,96 /	1,54 /					-26,01 -527,66 /	-2,68 /	1,28 /	
17	1,026	0,974	-26,12 -570,54 /	-2,85 /	1,43 /		53	1,026	0,974	-26,09 / -527,66 /	-2,68 /	1,27 /	
			-26,05 / -570,54 /	-2,85 /	1,43 /					-26,05 -570,54 /	-2,85 /	1,43 /	
18	1,026	0,974	-26,09 -527,66 /	-2,68 /	1,27 /		54	1,026	0,974	-26,12 / -570,54 /	-2,85 /	1,43 /	
			-26,01 / -527,66 /	-2,68 /	1,28 /					-26,08 -601,18 /	-2,96 /	1,54 /	
19	1,026	0,974	-26,05 -474,05 /	-2,48 /	1,08 /		55	1,026	0,974	-26,12 / -601,18 /	-2,97 /	1,54 /	
			-25,95 / -474,05 /	-2,47 /	1,08 /					-26,08 -618,16 /	-3,03 /	1,61 /	
20	1,026	0,974	-25,99 -411,37 /	-2,23 /	0,85 /		56	1,026	0,974	-26,10 / -618,16 /	-3,03 /	1,61 /	
			-25,88 / -411,37 /	-2,23 /	0,86 /					-26,06 -620,23 /	-3,04 /	1,61 /	
21	1,026	0,974	-25,92 -341,31 /	-1,96 /	0,60 /		57	1,026	0,974	-26,06 / -620,23 /	-3,04 /	1,61 /	
			-25,79 / -341,31 /	-1,96 /	0,60 /					-26,02 -606,31 /	-2,98 /	1,56 /	
22	1,026	0,974	-25,83 -265,64 /	-1,67 /	0,32 /		58	1,026	0,974	-25,99 / -606,31 /	-2,98 /	1,56 /	
			-25,70 / -265,64 /	-1,66 /	0,33 /					-25,95 -575,52 /	-2,86 /	1,45 /	
23	1,026	0,974	-25,74 -186,12 /	-1,36 /	0,04 /		59	1,026	0,974	-25,89 / -575,52 /	-2,86 /	1,45 /	
			-25,60 / -186,12 /	-1,36 /	0,04 /					-25,85 -527,18 /	-2,67 /	1,28 /	
24	1,026	0,974	-25,64 -104,54 /	-1,04 /	-0,26 /		60	1,026	0,974	-25,76 / -527,18 /	-2,67 /	1,28 /	
			-25,50 / -104,54 /	-1,04 /	-0,26 /					-25,72 -460,85 /	-2,42 /	1,04 /	
25	1,026	0,974	-25,53 -22,63 /	-0,73 /	-0,56 /		61	1,026	0,974	-25,60 / -460,85 /	-2,41 /	1,04 /	
			-25,40 / -22,63 /	-0,72 /	-0,55 /					-25,57 -376,33 /	-2,09 /	0,74 /	
26	1,026	0,974	-25,43 57,93 /	-0,41 /	-0,85 /		62	1,026	0,974	-25,41 / -376,33 /	-2,08 /	0,74 /	
			-25,30 / 57,93 /	-0,41 /	-0,84 /					-25,38 -273,65 /	-1,69 /	0,37 /	
27	1,026	0,974	-25,33 135,54 /	-0,11 /	-1,13 /		63	1,026	0,974	-25,19 / -273,65 /	-1,68 /	0,37 /	
			-25,20 / 135,54 /	-0,11 /	-1,13 /					-25,16 -153,13 /	-1,22 /	-0,07 /	
28	1,026	0,974	-25,23 208,68 /	0,17 /	-1,39 /		64	1,026	0,974	-24,94 / -153,13 /	-1,21 /	-0,06 /	
			-25,11 / 208,68 /	0,18 /	-1,39 /					-24,92 -15,30 /	-0,68 /	-0,57 /	
29	1,026	0,974	-25,13 275,99 /	0,43 /	-1,64 /		65	1,026	0,974	-24,66 / -15,30 /	-0,68 /	-0,56 /	
			-25,03 / 275,99 /	0,44 /	-1,63 /					-24,64 139,03 /	-0,08 /	-1,12 /	
30	1,026	0,974	-25,05 336,21 /	0,67 /	-1,85 /		66	1,026	0,974	-24,35 / 139,03 /	-0,07 /	-1,12 /	
			-24,95 / 336,21 /	0,67 /	-1,85 /					-24,33 308,82 /	0,58 /	-1,74 /	
31	1,026	0,974	-24,97 388,27 /	0,87 /	-2,04 /		67	1,026	0,974	-24,02 / 308,82 /	0,59 /	-1,73 /	
			-24,88 / 388,27 /	0,87 /	-2,04 /					-24,00 492,79 /	1,30 /	-2,40 /	
32	1,028	0,972	-24,89 436,96 /	1,06 /	-2,22 /		68	1,026	0,974	-23,65 / 492,79 /	1,30 /	-2,39 /	
			-24,79 / 436,96 /	1,07 /	-2,21 /					-23,64 689,43 /	2,06 /	-3,11 /	
33	1,030	0,970	-24,80 492,00 /	1,28 /	-2,41 /		69	1,026	0,974	-23,27 / 689,43 /	2,07 /	-3,10 /	
			-24,70 / 492,00 /	1,28 /	-2,41 /					-23,26 897,04 /	2,87 /	-3,86 /	
34	1,027	0,973	-24,71 538,92 /	1,46 /	-2,58 /		70	1,026	0,974	-22,86 / 897,04 /	2,88 /	-3,85 /	
			-24,65 / 538,92 /	1,45 /	-2,59 /					-22,85 1.113,72 /	3,71 /	-4,64 /	
35	1,023	0,977	-24,65 562,11 /	1,54 /	-2,68 /		71	1,026	0,974	-22,43 / 1.113,72 /	3,72 /	-4,63 /	
										-22,43 1.337,40 /	4,58 /	-5,45 /	

Biegelinie (x 3,10)

Kontaktspannungen Liner, Design

Normalkräfte Liner, Design

Momente Liner, Design


Spannung innen Liner, Design

Spannung außen Liner, Design


2.2.7.6 Spannungsnachweis Liner, Zwang

Fläche (Wanddicke):

A 40,00 mm²/mm

Außen

$$W_e = \frac{t_L^2}{6}$$

Widerstandsmoment, außen:

 W_e 266,67 mm³/mm

$$\alpha_{ka} = 1 - \frac{t_L}{3 \cdot r_L}$$

(90)

 Element
 Korrekturfaktor (Verformtes System)
 Normalkraft in Element
 Moment in Element

	Druck	Zug	
i	0	16	[-]
α _k	0,97	0,97	[-]
N _d	-22,47	-26,89	N/mm
M _d	1.596,56	-760,06	Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} - \alpha_{ka} \cdot \frac{M_d}{W_e}$$

(88)

Spannung in Element

 Max σ_d -6,39 2,10 N/mm²

$$f_{c,rad,L,d} = \frac{f_{c,rad,L}}{\gamma_M}$$

Zul. Spannung, Langzeit, Design:

 σ_{L,d} -55,56 55,56 N/mm²

Ausnutzung Spannungen

 U_σ 11,5 3,8 %

Der Spannungsnachweis Außen ist erfüllt.

Innen

$$W_i = \frac{t_L^2}{6}$$

Widerstandsmoment, innen:

 W_i 266,67 mm³/mm

$$\alpha_{ki} = 1 + \frac{t_L}{3 \cdot r_L}$$

(89)

Element
Korrekturfaktor (Verformtes System)
Normalkraft in Element
Moment in Element

	Druck	Zug	
i	15	71	[-]
α_k	1,03	1,03	[-]
N_d	-26,90	-22,47	N/mm
M_d	-760,06	1.596,56	Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} + \alpha_{ki} \cdot \frac{M_d}{W_i}$$

(87)

Spannung in Element

	Druck	Zug	
Max σ_d	-3,60	5,58	N/mm ²

$$f_{c,rad,L,d} = \frac{f_{c,rad,L}}{\gamma_M}$$

Zul. Spannung, Langzeit, Design:

	Druck	Zug	
$\sigma_{L,d}$	-55,56	55,56	N/mm ²

Ausnutzung Spannungen

	Druck	Zug	
U_σ	6,5	10,0	%

Der Spannungsnachweis Innen ist erfüllt.

Die Spannungen liegen im zulässigen Bereich.

Tabellen

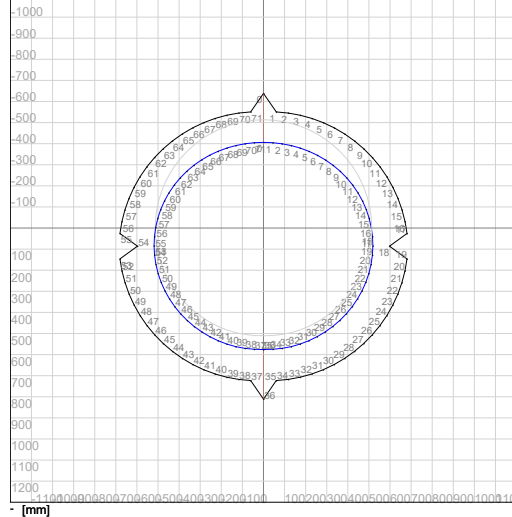
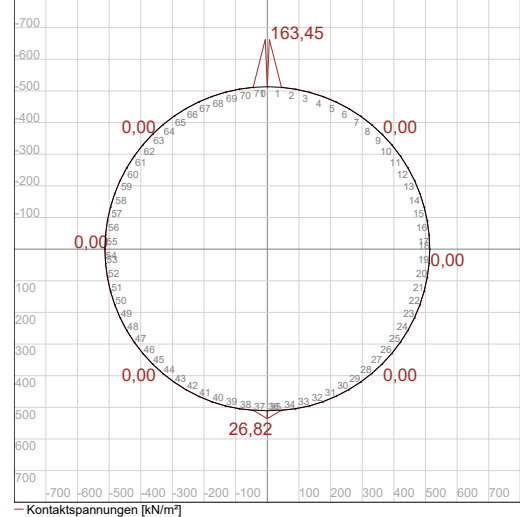
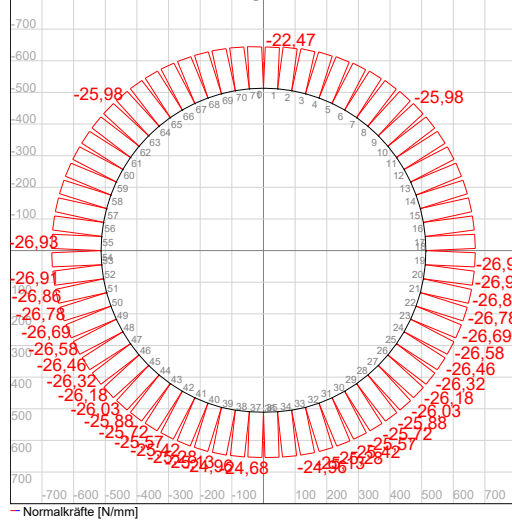
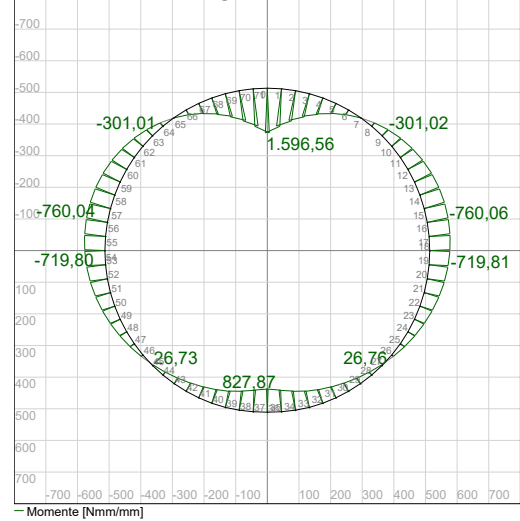
Element	α ki [-]	α ka [-]	N [N/mm] l/r	M [Nmm/m] l/r	σ i [N/mm²] l/r	σ a [N/mm²] l/r	Element	α ki [-]	α ka [-]	N [N/mm] l/r	M [Nmm/m] l/r	σ i [N/mm²] l/r	σ a [N/mm²] l/r
0	1,026	0,974	-22,47 / 1.596,56 / -22,47 1.336,74 /	5,58 / 4,57 /	-6,39 / -5,44 /		36	1,020	0,980	-24,68 / 827,87 / -24,68 768,36 /	2,55 / 2,32 /	-3,66 / -3,44 /	
1	1,026	0,974	-22,96 1.084,58 / -23,43 / 1.084,58 /	3,60 / 3,59 /	-4,54 / -4,55 /		37	1,023	0,977	-24,79 685,15 / -24,96 / 685,15 /	2,01 / 2,01 /	-3,12 / -3,13 /	
2	1,026	0,974	-23,44 842,34 / -23,89 / 842,34 /	2,65 / 2,64 /	-3,66 / -3,67 /		38	1,027	0,973	-24,95 594,17 / -25,13 / 594,17 /	1,66 / 1,67 /	-2,79 / -2,79 /	
3	1,026	0,974	-23,90 612,09 / -24,31 / 612,09 /	1,76 / 1,75 /	-2,83 / -2,84 /		39	1,030	0,970	-25,12 510,38 / -25,28 / 510,38 /	1,34 / 1,33 /	-2,48 / -2,49 /	
4	1,026	0,974	-24,33 395,69 / -24,71 / 395,69 /	0,91 / 0,90 /	-2,05 / -2,06 /		40	1,028	0,972	-25,40 424,37 / -25,42 / 424,37 /	1,00 / 1,00 /	-2,18 / -2,19 /	
5	1,026	0,974	-24,73 194,85 / -25,08 / 194,85 /	0,13 / 0,12 /	-1,33 / -1,34 /		41	1,026	0,974	-25,40 331,56 / -25,57 / 331,56 /	0,64 / 0,64 /	-1,85 / -1,85 /	
6	1,026	0,974	-25,10 11,01 / -25,44 / 11,01 /	-0,59 / -1,23 /	-0,67 / -0,68 /		42	1,026	0,974	-25,55 233,34 / -25,70 / 233,34 /	0,26 / 0,25 /	-1,49 / -1,50 /	
7	1,026	0,974	-25,44 -154,61 / -25,71 / -154,61 /	-1,23 / -1,24 /	-0,07 / -0,08 /		43	1,026	0,974	-25,70 131,19 / -25,88 / 131,19 /	-0,14 / -0,14 /	-1,12 / -1,13 /	
8	1,026	0,974	-25,74 -301,02 / -25,98 / -301,02 /	-1,80 / -1,81 /	0,46 / 0,45 /		44	1,026	0,974	-25,85 26,73 / -26,03 / 26,73 /	-0,54 / -0,55 /	-0,74 / -0,75 /	
9	1,026	0,974	-26,01 -427,51 / -26,21 / -427,51 /	-2,30 / -2,30 /	0,91 / 0,91 /		45	1,026	0,974	-26,00 -78,32 / -26,18 / -78,32 /	-0,95 / -0,96 /	-0,36 / -0,37 /	
10	1,026	0,974	-26,25 -533,62 / -26,41 / -533,62 /	-2,71 / -2,71 /	1,29 / 1,29 /		46	1,026	0,974	-26,15 -182,17 / -26,32 / -182,17 /	-1,35 / -1,36 /	0,01 / 0,01 /	
11	1,026	0,974	-26,45 -619,13 / -26,57 / -619,13 /	-3,04 / -3,05 /	1,60 / 1,60 /		47	1,026	0,974	-26,29 -282,97 / -26,46 / -282,97 /	-1,75 / -1,75 /	0,38 / 0,37 /	
12	1,026	0,974	-26,61 -684,10 / -26,70 / -684,10 /	-3,30 / -3,30 /	1,83 / 1,83 /		48	1,026	0,974	-26,42 -378,85 / -26,58 / -378,85 /	-2,12 / -2,12 /	0,72 / 0,72 /	
13	1,026	0,974	-26,74 -728,85 / -26,79 / -728,85 /	-3,47 / -3,47 /	1,99 / 1,99 /		49	1,026	0,974	-26,54 -467,92 / -26,69 / -467,92 /	-2,46 / -2,47 /	1,05 / 1,04 /	
14	1,026	0,974	-26,83 -753,91 / -26,86 / -753,91 /	-3,57 / -3,57 /	2,08 / 2,08 /		50	1,026	0,974	-26,65 -548,32 / -26,78 / -548,32 /	-2,78 / -2,78 /	1,34 / 1,33 /	
15	1,026	0,974	-26,90 -760,06 / -26,89 / -760,06 /	-3,60 / -3,60 /	2,10 / 2,10 /		51	1,026	0,974	-26,74 -618,24 / -26,86 / -618,24 /	-3,05 / -3,05 /	1,59 / 1,59 /	
16	1,026	0,974	-26,93 -748,30 / -26,89 / -748,30 /	-3,55 / -3,55 /	2,06 / 2,06 /		52	1,026	0,974	-26,81 -675,95 / -26,91 / -675,95 /	-3,27 / -3,27 /	1,80 / 1,80 /	
17	1,026	0,974	-26,93 -719,81 / -26,86 / -719,81 /	-3,44 / -3,44 /	1,96 / 1,96 /		53	1,026	0,974	-26,86 -719,80 / -26,93 / -719,80 /	-3,44 / -3,44 /	1,96 / 1,96 /	
18	1,026	0,974	-26,91 -675,96 / -26,81 / -675,96 /	-3,27 / -3,27 /	1,80 / 1,80 /		54	1,026	0,974	-26,89 -748,28 / -26,93 / -748,28 /	-3,55 / -3,55 /	2,06 / 2,06 /	
19	1,026	0,974	-26,86 -618,24 / -26,74 / -618,24 /	-3,05 / -3,05 /	1,59 / 1,59 /		55	1,026	0,974	-26,89 -760,04 / -26,90 / -760,04 /	-3,60 / -3,60 /	2,10 / 2,10 /	
20	1,026	0,974	-26,78 -548,31 / -26,65 / -548,31 /	-2,78 / -2,78 /	1,33 / 1,34 /		56	1,026	0,974	-26,86 -753,88 / -26,83 / -753,88 /	-3,57 / -3,57 /	2,08 / 2,08 /	
21	1,026	0,974	-26,69 -467,90 / -26,54 / -467,90 /	-2,47 / -2,46 /	1,04 / 1,05 /		57	1,026	0,974	-26,79 -728,82 / -26,74 / -728,82 /	-3,47 / -3,47 /	1,99 / 1,99 /	
22	1,026	0,974	-26,58 -378,82 / -26,42 / -378,82 /	-2,12 / -2,12 /	0,72 / 0,72 /		58	1,026	0,974	-26,70 -684,07 / -26,61 / -684,07 /	-3,30 / -3,30 /	1,83 / 1,83 /	
23	1,026	0,974	-26,46 -282,94 / -26,29 / -282,94 /	-1,75 / -1,75 /	0,37 / 0,38 /		59	1,026	0,974	-26,57 -619,10 / -26,45 / -619,10 /	-3,05 / -3,04 /	1,60 / 1,60 /	
24	1,026	0,974	-26,32 -182,14 / -26,15 / -182,14 /	-1,36 / -1,35 /	0,01 / 0,01 /		60	1,026	0,974	-26,41 -533,59 / -26,25 / -533,59 /	-2,71 / -2,71 /	1,29 / 1,29 /	
25	1,026	0,974	-26,18 -78,29 / -26,00 / -78,29 /	-0,96 / -0,95 /	-0,37 / -0,36 /		61	1,026	0,974	-26,21 -427,49 / -26,01 / -427,49 /	-2,30 / -2,30 /	0,91 / 0,91 /	
26	1,026	0,974	-26,03 26,76 / -25,85 / 26,76 /	-0,55 / -0,54 /	-0,75 / -0,74 /		62	1,026	0,974	-25,98 -301,01 / -25,74 / -301,01 /	-1,81 / -1,80 /	0,45 / 0,46 /	
27	1,026	0,974	-25,88 131,22 / -25,70 / 131,22 /	-0,14 / -0,14 /	-1,13 / -1,12 /		63	1,026	0,974	-25,71 -154,60 / -25,44 / -154,60 /	-1,24 / -1,23 /	-0,08 / -0,07 /	
28	1,026	0,974	-25,72 233,37 / -25,55 / 233,37 /	0,25 / 0,26 /	-1,50 / -1,49 /		64	1,026	0,974	-25,41 11,01 / -25,10 / 11,01 /	-0,59 / -0,59 /	-0,68 / -0,67 /	
29	1,026	0,974	-25,57 331,59 / -25,40 / 331,59 /	0,64 / 0,64 /	-1,85 / -1,85 /		65	1,026	0,974	-25,08 194,85 / -24,73 / 194,85 /	0,12 / 0,13 /	-1,34 / -1,33 /	
30	1,026	0,974	-25,42 424,40 / -25,26 / 424,40 /	1,00 / 1,00 /	-2,19 / -2,18 /		66	1,026	0,974	-24,71 395,69 / -24,33 / 395,69 /	0,90 / 0,91 /	-2,06 / -2,05 /	
31	1,026	0,974	-25,28 510,41 / -25,12 / 510,41 /	1,33 / 1,34 /	-2,50 / -2,49 /		67	1,026	0,974	-24,31 612,08 / -23,90 / 612,08 /	1,75 / 1,76 /	-2,84 / -2,83 /	
32	1,028	0,972	-25,13 594,18 / -24,95 / 594,18 /	1,66 / 1,67 /	-2,80 / -2,78 /		68	1,026	0,974	-23,89 842,34 / -23,44 / 842,34 /	2,64 / 2,65 /	-3,67 / -3,66 /	
33	1,030	0,970	-24,96 685,16 / -24,79 / 685,16 /	2,02 / 2,02 /	-3,12 / -3,12 /		69	1,026	0,974	-22,96 1.084,58 / -22,96 / 1.084,58 /	3,59 / 3,60 /	-4,55 / -4,54 /	
34	1,027	0,973	-24,79 768,37 / -24,68 / 768,37 /	2,34 / 2,33 /	-3,42 / -3,43 /		70	1,026	0,974	-22,96 1.336,73 / -22,47 / 1.336,73 /	4,57 / 4,58 /	-5,46 / -5,44 /	
35	1,023	0,977	-24,68 827,87 / -24,68 827,87 /	2,56 / 2,56 /	-3,65 / -3,65 /		71	1,026	0,974	-22,47 1.596,56 / -22,47 1.596,56 /	5,58 / 5,58 /	-6,39 / -6,39 /	

Bauteil: SAN-03 - GFK Sanierung Hauptsammler Ost
MA-250346

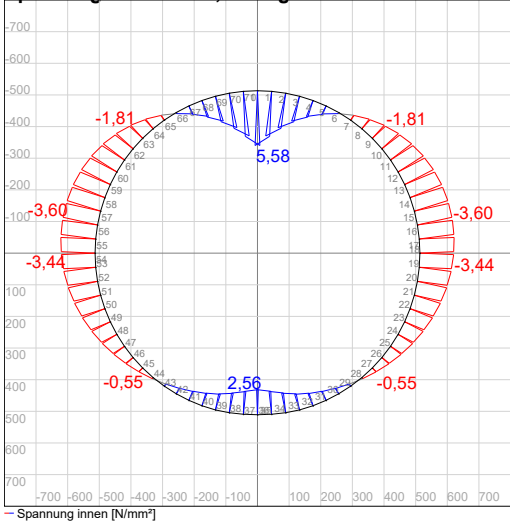
Seite: D-47

Kapitel / Vorgang: D - Nachweise
01.1 815 / 1570 t = 40 / Bereich Eisenbahnlasten

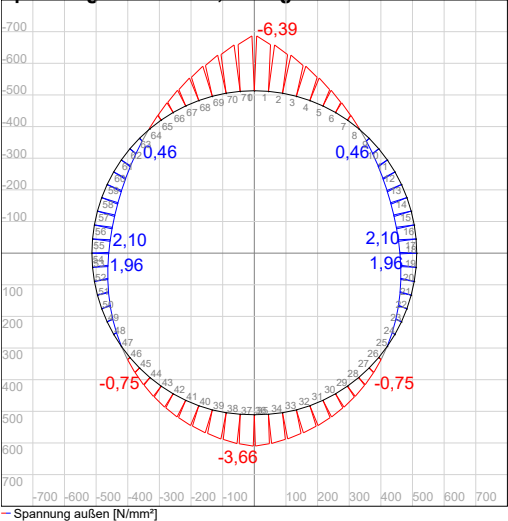
Archiv-Nr.

Biegelinie (x 3,38)

Kontaktspannungen Liner, Zwang

Normalkräfte Liner, Zwang

Momente Liner, Zwang


Spannung innen Liner, Zwang



Spannung außen Liner, Zwang



2.2.7.7 Altrohrspannungen Kämpfer

Vertikale Gesamtlast, Design:
Wanddicke Altrohr:
Außendurchmesser Altrohr Kämpfer:
Bezogene Gelenkringexzentrizität:

q _{v,d}	148,89	kN/m²
t _R	250,00	mm
da _{AR,k}	1.566,67	mm
e _{G/t}	35,00	%

$$b_D = \frac{8 \cdot t_R}{3} \cdot (0,50 - e_G/t) \tag{101}$$

Druckzonenbreite:	b _D	100,00	mm
-------------------	----------------	--------	----

$$N_{K,d} = -q_{v,d} (1 + \omega_{GR,v}) \cdot \frac{da_{AR,k}}{2}$$

Druckkraft im Kämpfer:	N _{K,d}	-116,63	N/mm
------------------------	------------------	---------	------

$$\sigma_d = \frac{N_{K,d}}{b_D} \cdot 1,50 \tag{100}$$

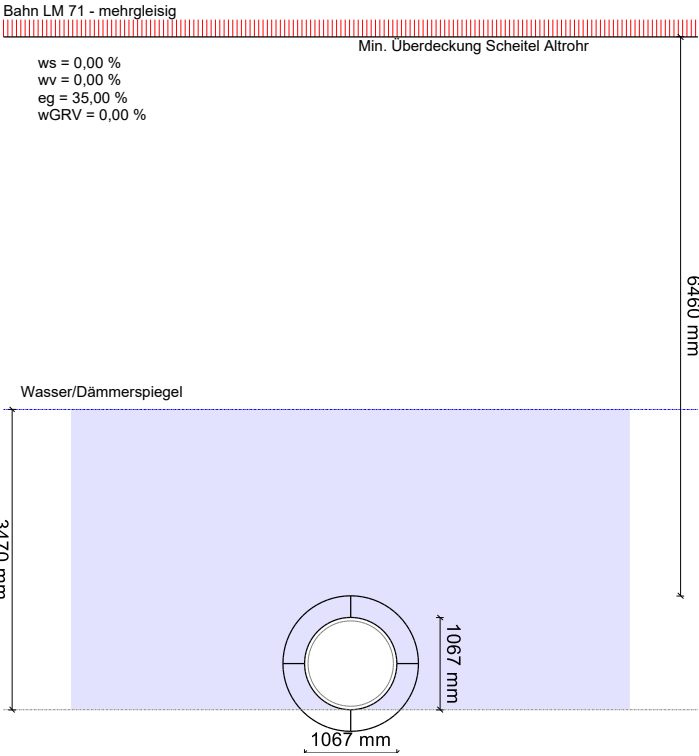
Spannung in der Druckzone:	σ _d	-1,75	N/mm²
Zul. Druckfestigkeit, Langzeit:	f _{c,rad,L}	5,00	N/mm²

$$U_{\sigma D,AR} = \frac{-1 \cdot \sigma_d}{f_{c,rad,L}} \tag{102}$$

Ausnutzung Druckspannungen AR Kämpfer:	U _{σD,AR}	35,0	%
--	--------------------	------	---

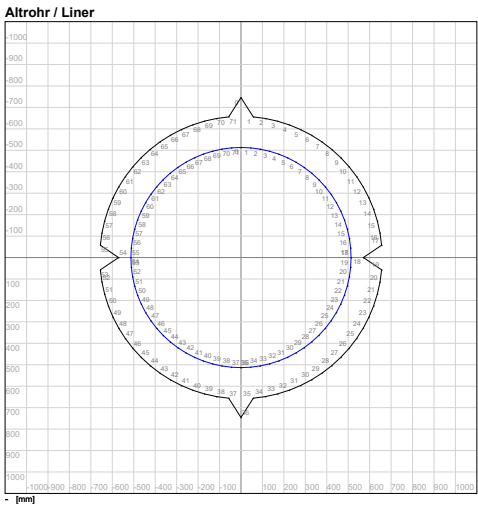
Der Spannungsnachweis für Kämpferspannungen im Altrohr ist erfüllt.

2.2.8 Lastfall 04 [Ersatzkreis] AZ III - hW 3,47 m + h 6,46 m + ws 0,0 % + ww 0,0 %, Langzeit



2.2.8.1 Geometrie diskretisiertes System

Skizze



Bauteil:	SAN-03 - GFK Sanierung Hauptsammler Ost MA-250346
Kapitel / Vorgang:	D - Nachweise 01.1 815 / 1570 t = 40 / Bereich Eisenbahnlasten

Seite:	D-50
Archiv-Nr.	

Wanddicke Liner: t_L 40,00 mm
Wanddicke Altrrohr: t_R 250,00 mm

Berechnete Punkte

Element	Altrrohr X [mm]	Altrrohr Y [mm]	Liner X [mm]	Liner Y [mm]	Liner r [mm]	Element	Altrrohr X [mm]	Altrrohr Y [mm]	Liner X [mm]	Liner Y [mm]	Liner r [mm]
0	0,0	-745,8	0,0	-513,3	513,3	18	570,8	0,0	513,3	0,0	513,3
1	57,4	-655,8	44,7	-511,4	513,3	19	655,8	57,4	511,4	44,7	513,3
2	114,3	-648,3	89,1	-505,5	513,3	20	648,3	114,3	505,5	89,1	513,3
3	170,4	-635,9	132,9	-495,8	513,3	21	635,9	170,4	495,8	132,9	513,3
4	225,2	-618,6	175,6	-482,4	513,3	22	618,6	225,2	482,4	175,6	513,3
5	278,2	-596,7	216,9	-465,2	513,3	23	596,7	278,2	465,2	216,9	513,3
6	329,2	-570,1	256,7	-444,6	513,3	24	570,1	329,2	444,6	256,7	513,3
7	377,6	-539,3	294,4	-420,5	513,3	25	539,3	377,6	420,5	294,4	513,3
8	423,2	-504,3	330,0	-393,2	513,3	26	504,3	423,2	393,2	330,0	513,3
9	465,5	-465,5	363,0	-363,0	513,3	27	465,5	465,5	363,0	363,0	513,3
10	504,3	-423,2	393,2	-330,0	513,3	28	423,2	504,3	330,0	393,2	513,3
11	539,3	-377,6	420,5	-294,4	513,3	29	377,6	539,3	294,4	420,5	513,3
12	570,1	-329,2	444,6	-256,7	513,3	30	329,2	570,1	256,7	444,6	513,3
13	596,7	-278,2	465,2	-216,9	513,3	31	278,2	596,7	216,9	465,2	513,3
14	618,6	-225,2	482,4	-175,6	513,3	32	225,2	618,6	175,6	482,4	513,3
15	635,9	-170,4	495,8	-132,9	513,3	33	170,4	635,9	132,9	495,8	513,3
16	648,3	-114,3	505,5	-89,1	513,3	34	114,3	648,3	89,1	505,5	513,3
17	655,8	-57,4	511,4	-44,7	513,3	35	57,4	655,8	44,7	511,4	513,3
18	570,8	0,0	513,3	0,0	513,3	36	0,0	745,8	0,0	513,3	513,3

Lokale Vorverformung: ω_V 0,00 %
Lokale Vorverformung absolut: w_V 0,00 mm

Gelenkringverformung: $\omega_{GR,V}$ 0,00 %
Gelenkringverformung absolut, einseitig: $w_{GR,V}$ 0,00 mm
Ringspalt: ω_S 0,00 %
Spaltweite absolut (als konst. Ringspalt): w_S 0,00 mm

Mittlerer Radius Liner: $r_{L,m}$ 513,33 mm

2.2.8.2 Erdlasten und Verkehrslasten

Wichte Boden, unter Auftrieb: γ_B' 10,00 kN/m³
Wichte Boden, trocken: γ_B 20,00 kN/m³
Min. Überdeckung Scheitel Altrrohr: h_{min} 6,46 m
Wasser/Dämmerspiegel: h_w 3,47 m
Wanddicke Altrrohr: t_R 250,00 mm
Vertikale Lichte Höhe Altrrohr: $d_{AR,iv}$ 1.066,67 mm

$$h'_w = h_w - t_R - d_{AR,iv}$$

Höhe Wasserspiegel über Altrrohrscheitel: h'_w 2,15 m

$$p_E = \gamma_B \cdot (h_{min} - h'_w) + \gamma_B' \cdot h'_w \quad (74)$$

Vertikale Erdlast: p_E 107,67 kN/m²

$$r_{AR,a} = t_R + \frac{d_{AR,iv}}{2}$$

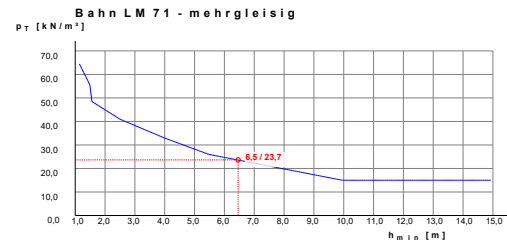
Höhe Scheitel bis Kämpfer Altrrohr: $r_{AR,a}$ 783,33 mm

$$h'_{wk} = r_{AR,a}$$

Höhe Wasserspiegel Altrrohrkämpfer bis Altrrohrscheitel: h'_{wk} 0,78 m

$$p_{E,K} = p_E + \gamma_B \cdot (r_{AR,a} - h'_{wk}) + \gamma_B' \cdot h'_{wk}$$

Vertikale Erdlast bis Kämpfer: $p_{E,K}$ 115,50 kN/m²



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

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

Stoßbeiwert: Φ_2 1,67 [-]

$$\text{red } \Phi_2 = \Phi_2 - 0,1 \cdot (h_{\ddot{u}} - 1,0) \geq 1 \quad (22)$$

Stoßbeiwert reduziert: $\text{red } \Phi_2$ 1,12 [-]
 Anpassungsfaktor α_{Qi} LM71 (DIN EN 1991-2): $\alpha_{Qi,LM71}$ 1,00 [-]
 Einfache Bodenspannung aus Verkehr: p 23,65 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 26,59 kN/m²

Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Kämpferhöhe (ohne φ): p_K 21,74 kN/m²
 Erdruckbeiwert (Einbettung): K_2 0,100 [-]

$$p_{T,h} = (0,50 \cdot (\text{red } \Phi_2 - 1) + 1) \cdot p_K \cdot K_2 \cdot \alpha_{Qi,LM71} \quad \text{A 161 (23b)}$$

Horizontale Bodenspannung aus Verkehr: $p_{T,h}$ 2,31 kN/m²

Vertikale Verkehrslast: p_V 26,59 kN/m²

$$p_{V,d} = p_V \cdot Y_{T,sup}$$

Vertikale Verkehrslast, Design: $p_{V,d}$ 39,88 kN/m²
 Zusätzliche Flächenlast: p_0 0,0 kN/m²

Konzentrationsfaktor über Rohr: λ_R 0,75 [-]

$$q_v = \lambda_R \cdot (p_E + p_0) + p_V$$

Vertikale Gesamtlast: q_v 107,34 kN/m²

$$q_{v,d} = \lambda_R \cdot (p_E + p_0) \cdot Y_{B,sup} + p_{V,d}$$

Vertikale Gesamtlast, Design: $q_{v,d}$ 148,89 kN/m²
 E-Modul: E_2 8,00 N/mm²

$$S_{Bh} = 0,80 \cdot E_2 \quad (60)$$

Horizontale Bettungssteifigkeit: S_{Bh} 6,400 N/mm²
 Erdruckbeiwert (Einbettung): K_2 0,100 [-]

$$\lambda_B = \frac{4 - \lambda_R}{3} \quad \text{A 127 (6.07)}$$

Konzentrationsfaktor Boden: λ_B 1,083 [-]

Höhe Wasserspiegel Altrohrkämpfer bis Altrohrscheitel: h'_{wk} 0,78 m

$$r_{AR,a} = t_R + d_{AR,iv}/2$$

$$r_{AR,a} = t_R + \frac{d_{AR,iv}}{2}$$

Höhe Scheitel bis Kämpfer Altrohr:

 $r_{AR,a}$ 783,33 mm

$$q_{h,E} = K_2 \cdot \lambda_B \cdot p_{E,K}$$

Horizontale Erdlast:

 $q_{h,E}$ 12,51 kN/m²

Horizontale Verkehrslast:

 $q_{h,V}$ 2,31 kN/m²

$$q_h = q_{h,V} + q_{h,E}$$

Horizontale Gesamtlast:

 q_h 14,82 kN/m²

$$q_{h,d} = q_{h,V} \cdot 1,50 + q_{h,E} \cdot 1,35$$

(75)

Designwert Horizontale Gesamtlast:

 $q_{h,d}$ 20,35 kN/m²

$$K_2' = \frac{q_{h,d}}{q_{v,d}}$$

(77)

Rechnerischer Erddruckbeiwert:

 K_2' 0,137 [-]

2.2.8.3 Verformungsnachweis Liner, Gebrauchslast

$$d_v = d_{aL}$$

Relevanter Durchmesser für prozentuale Verformung:	d_v	1.066,67	mm
Spaltweite absolut (als konst. Ringspalt):	w_s	0,00	mm
Lokale Vorverformung absolut:	w_v	0,00	mm
Gelenkringverformung absolut, einseitig:	$w_{GR,v}$	0,00	mm
Elastische Verformung absolut, vertikal:	$w_{el,v,E1}$	-8,09	mm
Elastische Verformung absolut, vertikal:	$w_{el,v}$	8,09	mm
Zulässige Verformung elastisch absolut:	$zul\ w_{el}$	10,00	mm

Die errechnete absolute elastische Verformung ist kleiner als die von der Deutschen Bahn AG festgelegten 10 mm.

$$\delta_{v,el} = \frac{w_{el,v}}{d_v}$$

Elastische Verformung relativ:	$\delta_{v,el}$	0,76	%
Zulässige Verformung elastisch:	$zul\ \delta_{v,el}$	2,00	%

Die errechnete elastische Verformung ist kleiner als die zulässige Verformung.

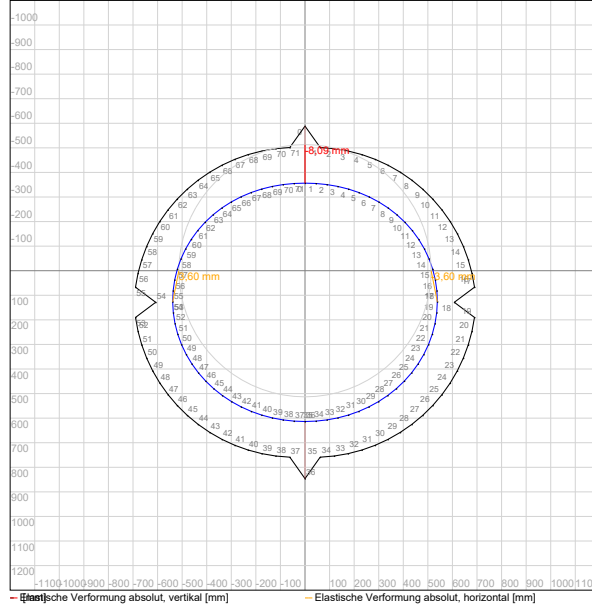
$$w = w_{el,v} + w_{GR,v} \cdot 2 + w_v$$

Gesamte Durchmesseränderung:	w	8,09	mm
------------------------------	-----	------	----

$$\delta_v = \frac{w}{d_v}$$

Relative Gesamtverformung:	δ_v	0,76	%
Anhaltswert Gesamtverformung:	$\delta_{v,A}$	10,00	%

Elastische Verformung absolut, horizontal:	$w_{el,h,E1}$	-3,60	mm
Elastische Verformung absolut, horizontal:	$w_{el,h,E2}$	3,60	mm
Elastische Verformung absolut, horizontal:	$w_{el,h}$	7,21	mm

Gebrauchslast (x 7,0)


2.2.8.4 Bodeninteraktion (Gebrauchslast)

$$CB = \frac{E_2}{\frac{da_{AR,k}}{2}} \cdot 0,80$$

Bettungsziffer, Scheitel:

CB 8.170,21 kN/m³

$$CB = \frac{E}{r_{aR}} \cdot 0,80$$

Innerer Reibungswinkel:

φ' 20,00 °

$$K_p = \tan (45^\circ + \varphi'/2)^2$$

(62)

Beiwert:

K_p 2,04 [-]
p_E 107,67 kN/m²

Vertikale Erdlast:

$$q_{h,max} = 0,75 \cdot K_p \cdot \lambda_B \cdot p_E$$

(61)

Grenzwert q_h im Scheitel (informativ):

q_{h,max} 178,42 kN/m²

Vertikale Erdlast bis Kämpfer:

p_{E,K} 115,50 kN/m²

$$q_{h,max,K} = 0,75 \cdot K_p \cdot \lambda_B \cdot p_{E,K}$$

(61)

Grenzwert q_h im Kämpfer:

q_{h,max,K} 191,40 kN/m²

Der Wert wird im Kämpfer abgelesen.

Horizontale Gesamtlast:

q_h 14,82 kN/m²

Seitlicher Bettungsreaktionsdruck:

q_h^{*} 42,92 kN/m²

$$q_h + q_h^* = q_h^* + q_h$$

Summe horizontale Kräfte:

q_h + q_h^{*} 57,74 kN/m²

$$q_{h,max,K} \geq q_h + q_h^*$$

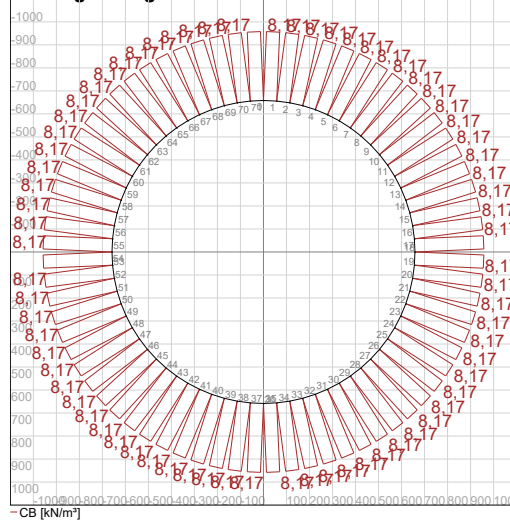
$$U_{maxqh} = \frac{q_h + q_h^*}{q_{h,max,K}}$$

Ausnutzung max qh:

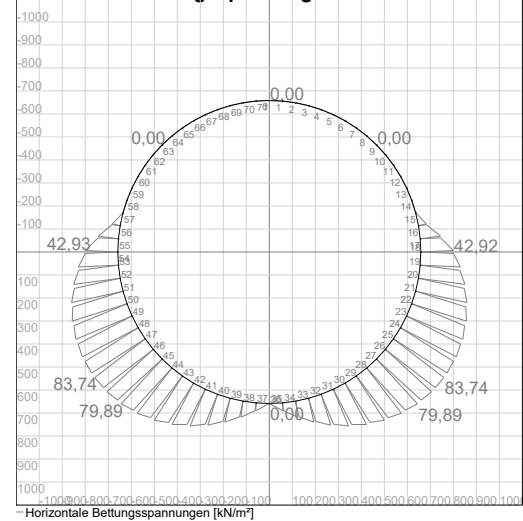
Für die Interaktion Boden-Rohrsystem wurde der elastische Ansatz verwendet. Die Bettung des Rohres wurde um den gesamten Umfang als konstant angenommen. Damit ergibt sich eine Dreiecksförmige Verteilung der Bodenspannungen, deren Maximalwert auf 75% des passiven Erddrucks begrenzt ist.

$$U_{maxqh} = 30,2 \%$$

Bettungssteifigkeit



Horizontale Bettungsspannungen



Die horizontale Kraft aus Bettungsreaktionsdruck und seitlichem Druck im Kämpfer liegt unterhalb des Grenzwertes.

2.2.8.5 Stabilitätsnachweis (Designwerte)

Der maßgebende Nachweis der Stabilität erfolgt über die im Abschnitt 7.6.4.2 (DWA-A 143-2) zugelassene (genauere) Variante einer Berechnung nach Theorie II. Ordnung unter Berücksichtigung der Vorverformungen und der Spaltbildung. Hierbei wird numerisch überprüft, ob ein elastisches Stabilitätsversagen (Beulen) unter gamma-facher Last eintritt. Darüber hinaus wird geprüft, ob die bei dieser Berechnung ermittelten Spannungen die vorgegeben maximalen Grenzspannungen für Zug und Druck mit einfacher Sicherheit nicht überschreiten.

Nachweis entfällt.

Spannungsnachweis Liner, Design

Fläche (Wanddicke): A 40,00 mm²/mm

Außen

$$W_e = \frac{t_L^2}{6}$$

Widerstandsmoment, außen: W_e 266,67 mm³/mm

$$\alpha_{ka} = 1 - \frac{t_L}{3 \cdot r_L} \quad (90)$$

Element	i	Druck	Zug	
Korrekturfaktor (Verformtes System)	α_k	71	55	[-]
Normalkraft in Element	N_d	0,97	0,97	[-]
Moment in Element	M_d	-22,47	-27,09	N/mm
		1.709,17	-833,75	Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} - \alpha_{ka} \cdot \frac{M_d}{W_e} \quad (88)$$

Spannung in Element Max σ_d -6,80 2,37 N/mm²

$$f_{c,rad,L,d} = \frac{f_{c,rad,L}}{Y_M}$$

Zul. Spannung, Langzeit, Design: $\sigma_{L,d}$ -55,56 55,56 N/mm²

Ausnutzung Spannungen U_σ 12,2 4,3 %

Der Spannungsnachweis Außen ist erfüllt.

Innen

$$W_i = \frac{t_L^2}{6}$$

Widerstandsmoment, innen: W_i 266,67 mm³/mm

$$\alpha_{ki} = 1 + \frac{t_L}{3 \cdot r_L} \quad (89)$$

Element	i	Druck	Zug	
Korrekturfaktor (Verformtes System)	α_k	56	0	[-]
Normalkraft in Element	N_d	1,03	1,03	[-]
Moment in Element	M_d	-27,10	-22,47	N/mm
		-833,75	1.709,17	Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} + \alpha_{ki} \cdot \frac{M_d}{W_i} \tag{87}$$

Spannung in Element	Max σ_d	-3,89	6,01	N/mm ²
---------------------	----------------	-------	------	-------------------

$$f_{c,rad,L,d} = \frac{f_{c,rad,L}}{\gamma_M}$$

Zul. Spannung, Langzeit, Design:	$\sigma_{L,d}$	-55,56	55,56	N/mm ²
----------------------------------	----------------	--------	-------	-------------------

Ausnutzung Spannungen	U_σ	7,0	10,8	%
-----------------------	------------	-----	------	---

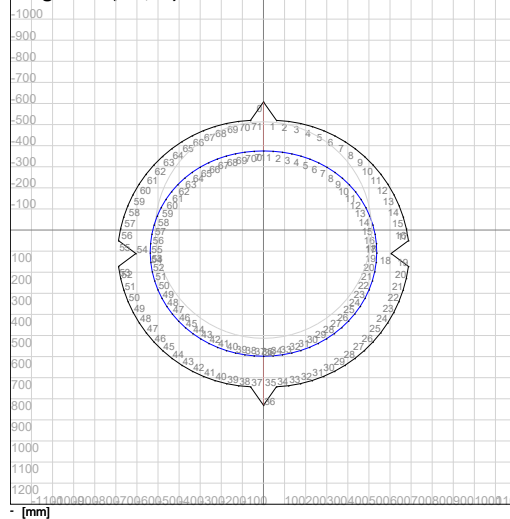
Der Spannungsnachweis Innen ist erfüllt.

Die Spannungen liegen im zulässigen Bereich.

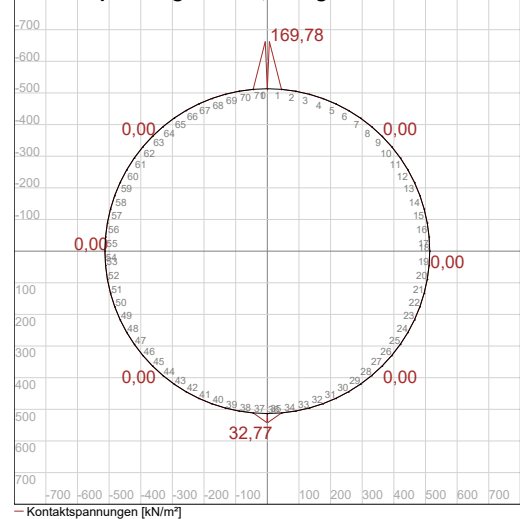
Tabellen

Element	α ki [-]	α ka [-]	N l/r	M [Nmm/m] l/r	σ i [N/mm²] l/r	σ a [N/mm²] l/r	Element	α ki [-]	α ka [-]	N l/r	M [Nmm/m] l/r	σ i [N/mm²] l/r	σ a [N/mm²] l/r
0	1,026	0,974	-22,47 / 1.709,17 /	-22,47 1.438,38 /	6,01 / 4,97	-6,80 / -5,82	36	1,026	0,974	-24,79 / 881,22 /	-24,79 822,44 /	2,77 / 2,54	-3,84 / -3,62
1	1,026	0,974	-22,98 / 1.438,38 /	-22,98 1.173,86 /	4,96 / 3,94	-5,83 / -4,86	37	1,026	0,974	-24,91 / 822,44 /	-24,91 751,98 /	2,54 / 2,27	-3,63 / -3,37
2	1,026	0,974	-23,47 / 1.173,86 /	-23,48 918,13 /	3,93 / 2,95	-4,87 / -3,94	38	1,026	0,974	-25,04 / 751,98 /	-25,04 670,70 /	2,27 / 1,95	-3,37 / -3,08
3	1,026	0,974	-23,94 / 918,13 /	-23,96 673,53 /	2,93 / 1,99	-3,95 / -3,06	39	1,026	0,974	-25,19 / 670,70 /	-25,19 579,67 /	1,95 / 1,60	-3,08 / -2,75
4	1,026	0,974	-24,39 / 673,53 /	-24,40 442,25 /	1,98 / 1,09	-3,07 / -2,23	40	1,026	0,974	-25,34 / 579,67 /	-25,34 480,12 /	1,60 / 1,21	-2,75 / -2,39
5	1,026	0,974	-24,80 / 442,25 /	-24,82 226,28 /	1,08 / 0,25	-2,24 / -1,45	41	1,026	0,974	-25,50 / 480,12 /	-25,50 373,46 /	1,21 / 0,80	-2,39 / -2,00
6	1,026	0,974	-25,19 / 226,28 /	-25,21 27,37 /	0,24 / -0,52	-1,46 / -0,73	42	1,026	0,974	-25,66 / 373,46 /	-25,66 261,26 /	0,80 / 0,36	-2,01 / -1,60
7	1,026	0,974	-25,54 / 27,37 /	-25,56 -152,95 /	-0,53 / -1,23	-0,74 / -0,08	43	1,026	0,974	-25,83 / 261,26 /	-25,83 145,23 /	0,36 / -0,09	-1,60 / -1,18
8	1,026	0,974	-25,85 / -152,95 /	-25,88 -313,42 /	-1,23 / -1,85	-0,09 / 0,50	44	1,026	0,974	-26,00 / 145,23 /	-25,97 27,20 /	-0,09 / -0,54	-1,18 / -0,75
9	1,026	0,974	-26,14 / -313,42 /	-26,17 -453,06 /	-1,86 / -2,40	0,49 / 1,00	45	1,026	0,974	-26,17 / 27,20 /	-26,14 -90,90 /	-0,55 / -1,00	-0,75 / -0,32
10	1,026	0,974	-26,38 / -453,06 /	-26,41 -571,15 /	-2,40 / -2,86	1,00 / 1,43	46	1,026	0,974	-26,33 / -90,90 /	-26,30 -207,07 /	-1,01 / -1,45	-0,33 / 0,10
11	1,026	0,974	-26,59 / -571,15 /	-26,62 -667,28 /	-2,86 / -3,23	1,42 / 1,77	47	1,026	0,974	-26,49 / -207,07 /	-26,45 -319,27 /	-1,46 / -1,89	0,09 / 0,50
12	1,026	0,974	-26,76 / -667,28 /	-26,80 -741,31 /	-3,24 / -3,52	1,77 / 2,04	48	1,026	0,974	-26,63 / -319,27 /	-26,60 -425,40 /	-1,89 / -2,30	0,50 / 0,89
13	1,026	0,974	-26,89 / -741,31 /	-26,93 -793,40 /	-3,52 / -3,73	2,04 / 2,22	49	1,026	0,974	-26,77 / -425,40 /	-26,73 -523,42 /	-2,31 / -2,68	0,88 / 1,24
14	1,026	0,974	-26,99 / -793,40 /	-27,03 -823,98 /	-3,73 / -3,85	2,22 / 2,33	50	1,026	0,974	-26,88 / -523,42 /	-26,84 -611,28 /	-2,69 / -3,02	1,24 / 1,56
15	1,026	0,974	-27,06 / -823,98 /	-27,10 -833,74 /	-3,85 / -3,89	2,33 / 2,37	51	1,026	0,974	-26,98 / -611,28 /	-26,94 -687,03 /	-3,03 / -3,32	1,56 / 1,84
16	1,026	0,974	-27,09 / -833,74 /	-27,13 -823,65 /	-3,89 / -3,85	2,37 / 2,33	52	1,026	0,974	-27,06 / -687,03 /	-27,02 -748,81 /	-3,32 / -3,56	1,83 / 2,06
17	1,026	0,974	-27,10 / -823,65 /	-27,14 -794,87 /	-3,85 / -3,74	2,33 / 2,22	53	1,026	0,974	-27,11 / -748,81 /	-27,07 -794,87 /	-3,56 / -3,73	2,06 / 2,23
18	1,026	0,974	-27,14 / -794,87 /	-27,17 -748,81 /	-3,74 / -3,56	2,22 / 2,06	54	1,026	0,974	-27,14 / -794,87 /	-27,10 -823,65 /	-3,74 / -3,85	2,22 / 2,33
19	1,026	0,974	-27,02 / -748,81 /	-27,06 -687,03 /	-3,56 / -3,32	2,06 / 1,83	55	1,026	0,974	-27,13 / -823,65 /	-27,09 -833,75 /	-3,85 / -3,89	2,33 / 2,37
20	1,026	0,974	-26,94 / -687,03 /	-26,98 -611,28 /	-3,32 / -3,03	1,84 / 1,56	56	1,026	0,974	-27,10 / -833,75 /	-27,06 -823,98 /	-3,89 / -3,85	2,37 / 2,33
21	1,026	0,974	-26,98 / -611,28 /	-26,88 -523,42 /	-3,02 / -2,69	1,56 / 1,24	57	1,026	0,974	-27,03 / -823,98 /	-26,99 -793,41 /	-3,85 / -3,73	2,33 / 2,22
22	1,026	0,974	-26,73 / -523,42 /	-26,77 -425,41 /	-2,68 / -2,31	1,24 / 0,88	58	1,026	0,974	-26,93 / -793,41 /	-26,89 -741,32 /	-3,73 / -3,52	2,22 / 2,04
23	1,026	0,974	-26,60 / -425,41 /	-26,63 -319,27 /	-2,30 / -1,89	0,88 / 0,50	59	1,026	0,974	-26,80 / -741,32 /	-26,76 -667,29 /	-3,52 / -3,24	2,04 / 1,77
24	1,026	0,974	-26,45 / -319,27 /	-26,49 -207,08 /	-1,89 / -1,46	0,50 / 0,09	60	1,026	0,974	-26,62 / -667,29 /	-26,59 -571,16 /	-3,23 / -2,86	1,77 / 1,42
25	1,026	0,974	-26,30 / -207,08 /	-26,33 -90,91 /	-1,45 / -1,01	0,10 / -0,33	61	1,026	0,974	-26,41 / -571,16 /	-26,38 -453,06 /	-2,86 / -2,40	1,43 / 1,00
26	1,026	0,974	-26,14 / -90,91 /	-26,17 27,20 /	-1,00 / -0,55	-0,32 / -0,75	62	1,026	0,974	-26,17 / -453,06 /	-26,14 -313,43 /	-0,75 / -1,86	1,00 / 0,49
27	1,026	0,974	-25,97 / 27,20 /	-26,00 145,23 /	-0,54 / -0,09	-0,75 / -1,18	63	1,026	0,974	-25,88 / -313,43 /	-25,85 -152,95 /	-1,85 / -1,23	0,50 / -0,09
28	1,026	0,974	-25,81 / 145,23 /	-25,83 261,25 /	-0,09 / 0,36	-1,18 / -1,60	64	1,026	0,974	-25,56 / -152,95 /	-25,54 27,37 /	-1,23 / -0,53	-0,08 / -0,74
29	1,026	0,974	-25,64 / 261,25 /	-25,66 373,45 /	0,36 / 0,80	-1,60 / -2,01	65	1,026	0,974	-25,21 / 27,37 /	-25,19 226,28 /	-0,52 / 0,24	-0,73 / -1,46
30	1,026	0,974	-25,48 / 373,45 /	-25,50 480,11 /	0,80 / 1,21	-2,00 / -2,39	66	1,026	0,974	-24,82 / 226,28 /	-24,80 442,25 /	0,25 / 1,08	-1,45 / -2,24
31	1,026	0,974	-25,32 / 480,11 /	-25,34 579,66 /	1,21 / 1,60	-2,39 / -2,75	67	1,026	0,974	-24,40 / 442,25 /	-24,39 673,53 /	1,09 / 1,98	-2,23 / -3,07
32	1,026	0,974	-25,17 / 579,66 /	-25,19 670,70 /	1,60 / 1,95	-2,75 / -3,08	68	1,026	0,974	-23,96 / 673,53 /	-23,94 918,13 /	1,99 / 2,93	-3,06 / -3,95
33	1,026	0,974	-25,03 / 670,70 /	-25,04 751,97 /	1,95 / 2,27	-3,08 / -3,37	69	1,026	0,974	-23,48 / 918,13 /	-23,47 1.173,87 /	2,95 / 3,93	-3,94 / -4,87
34	1,026	0,974	-24,91 / 751,97 /	-24,91 822,44 /	2,27 / 2,54	-3,37 / -3,63	70	1,026	0,974	-22,98 / 1.173,87 /	-22,98 1.438,38 /	3,94 / 4,96	-4,86 / -5,83
35	1,026	0,974	-24,79 / 822,44 /	-24,79 881,22 /	2,54 / 2,77	-3,62 / -3,84	71	1,026	0,974	-22,47 / 1.438,38 /	-22,47 1.709,17 /	4,97 / 6,01	-5,82 / -6,80

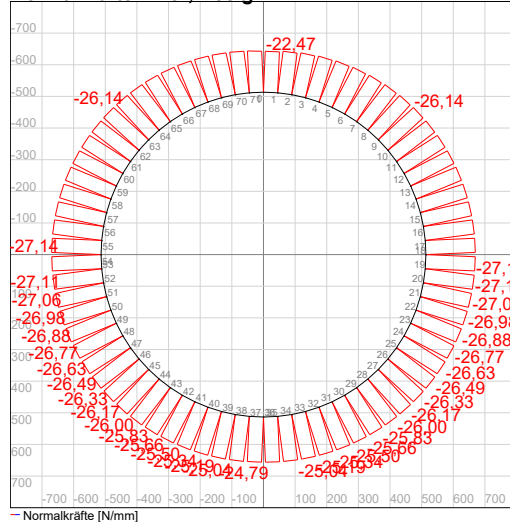
Biegelinie (x 4,37)



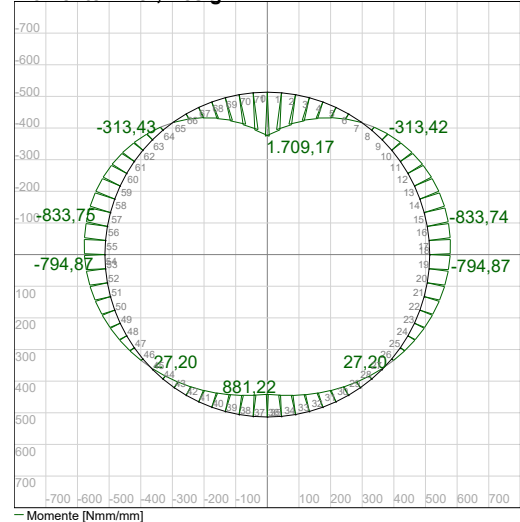
Kontaktspannungen Liner, Design

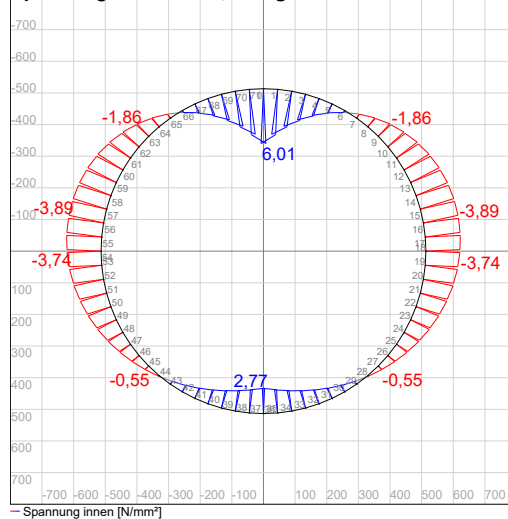
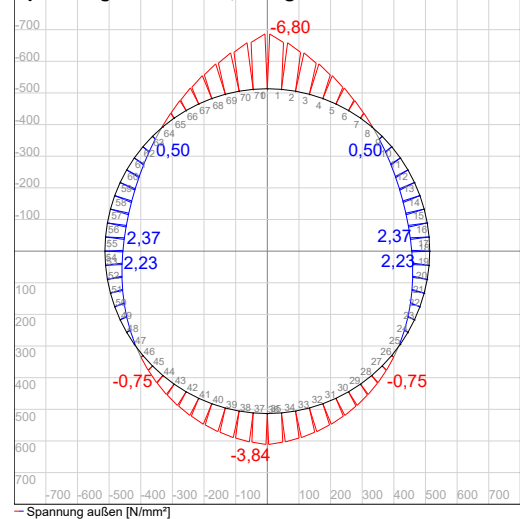


Normalkräfte Liner, Design



Momente Liner, Design



Spannung innen Liner, Design

Spannung außen Liner, Design


2.2.8.6 Spannungsnachweis Liner, Zwang

Fläche (Wanddicke):

A 40,00 mm²/mm

Außen

$$W_e = \frac{t_L^2}{6}$$

Widerstandsmoment, außen:

 W_e 266,67 mm³/mm

$$\alpha_{ka} = 1 - \frac{t_L}{3 \cdot r_L}$$

(90)

 Element
 Korrekturfaktor (Verformtes System)
 Normalkraft in Element
 Moment in Element

	Druck	Zug	
i	0	15	[-]
α _k	0,97	0,97	[-]
N _d	-22,51	-28,19	N/mm
M _d	2.067,46	-1.029,60	Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} - \alpha_{ka} \cdot \frac{M_d}{W_e}$$

(88)

Spannung in Element

 Max σ_d -8,11 3,06 N/mm²

$$f_{c,rad,L,d} = \frac{f_{c,rad,L}}{\gamma_M}$$

Zul. Spannung, Langzeit, Design:

 σ_{L,d} -55,56 55,56 N/mm²

Ausnutzung Spannungen

 U_σ 14,6 5,5 %

Der Spannungsnachweis Außen ist erfüllt.

Innen

$$W_i = \frac{t_L^2}{6}$$

Widerstandsmoment, innen:

 W_i 266,67 mm³/mm

$$\alpha_{ki} = 1 + \frac{t_L}{3 \cdot r_L}$$

(89)

Element
Korrekturfaktor (Verformtes System)
Normalkraft in Element
Moment in Element

	Druck	Zug	
i	16	71	[-]
α_k	1,03	1,03	[-]
N_d	-28,20	-22,51	N/mm
M_d	-1.029,60	2.067,46	Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} + \alpha_{ki} \cdot \frac{M_d}{W_i}$$

(87)

Spannung in Element

 $\text{Max } \sigma_d$ -4,67 7,39 N/mm²

$$f_{c,rad,L,d} = \frac{f_{c,rad,L}}{\gamma_M}$$

Zul. Spannung, Langzeit, Design:

 $\sigma_{L,d}$ -55,56 55,56 N/mm²

Ausnutzung Spannungen

 U_σ 8,4 13,3 %

Der Spannungsnachweis Innen ist erfüllt.

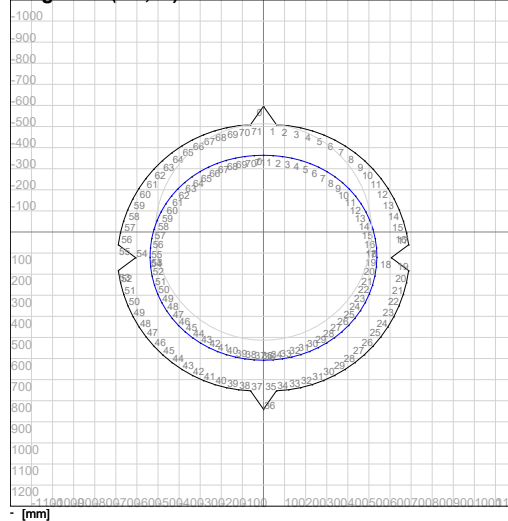
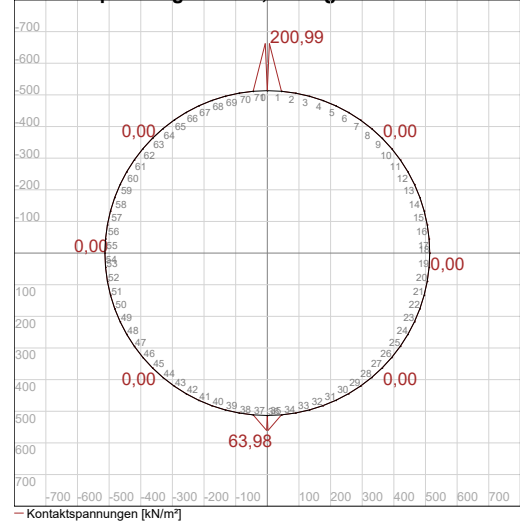
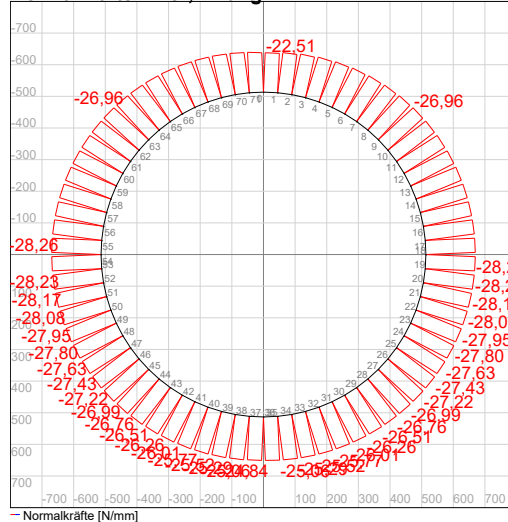
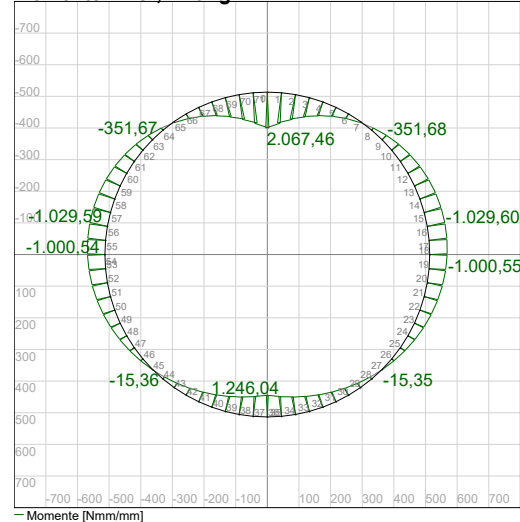
Die Spannungen liegen im zulässigen Bereich.

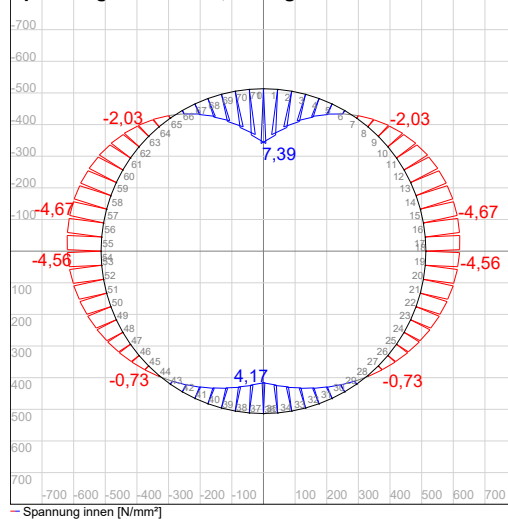
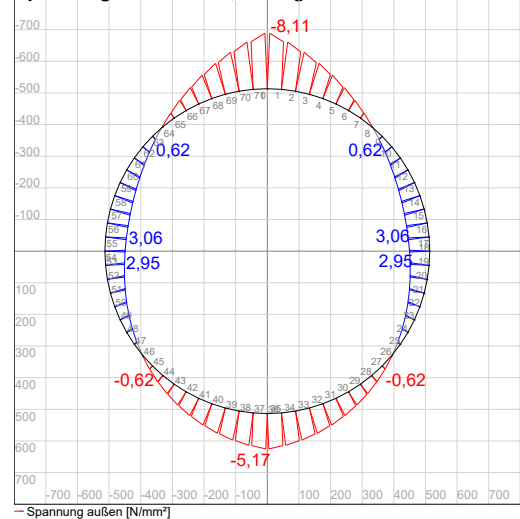
Tabellen

Element	α ki [-]	α ka [-]	N l/r	M [Nmm/m] l/r	σ i [N/mm²] l/r	σ a [N/mm²] l/r	Element	α ki [-]	α ka [-]	N l/r	M [Nmm/m] l/r	σ i [N/mm²] l/r	σ a [N/mm²] l/r
0	1,026	0,974	-22,51 / 2.067,46 /	7,39 /	-8,11 /		36	1,026	0,974	-24,84 / 1.246,04 /	4,17 /	-5,17 /	
			-22,52 1.746,82	6,16	-6,94					-24,84 1.137,07	3,75	-4,77	
1	1,026	0,974	-23,13 / 1.746,82 /	6,14 /	-6,96 /		37	1,026	0,974	-25,06 / 1.137,07 /	3,75 /	-4,78 /	
			-23,13 1.433,28	4,94	-5,81					-25,06 1.016,70	3,29	-4,34	
2	1,026	0,974	-23,72 / 1.433,28 /	4,92 /	-5,83 /		38	1,026	0,974	-25,29 / 1.016,70 /	3,28 /	-4,35 /	
			-23,72 1.129,62	3,75	-4,72					-25,28 886,24	2,78	-3,87	
3	1,026	0,974	-24,28 / 1.129,62 /	3,74 /	-4,73 /		39	1,026	0,974	-25,52 / 886,24 /	2,77 /	-3,88 /	
			-24,29 838,46	2,62	-3,67					-25,51 747,15	2,24	-3,37	
4	1,026	0,974	-24,82 / 838,46 /	2,61 /	-3,68 /		40	1,026	0,974	-25,77 / 747,15 /	2,23 /	-3,37 /	
			-24,83 562,25	1,54	-2,67					-25,75 601,07	1,67	-2,84	
5	1,026	0,974	-25,32 / 562,25 /	1,53 /	-2,69 /		41	1,026	0,974	-26,01 / 601,07 /	1,66 /	-2,85 /	
			-25,34 303,23	0,53	-1,74					-25,99 449,79	1,08	-2,29	
6	1,026	0,974	-25,79 / 303,23 /	0,52 /	-1,75 /		42	1,026	0,974	-26,26 / 449,79 /	1,07 /	-2,30 /	
			-25,81 63,43	-0,40	-0,88					-26,24 295,25	0,48	-1,73	
7	1,026	0,974	-26,22 / 63,43 /	-0,41 /	-0,89 /		43	1,026	0,974	-26,51 / 295,25 /	0,47 /	-1,74 /	
			-26,25 -155,37	-1,25	-0,09					-26,49 139,48	-0,13	-1,17	
8	1,026	0,974	-26,61 / -155,37 /	-1,26 /	-0,10 /		44	1,026	0,974	-26,76 / 139,48 /	-0,13 /	-1,18 /	
			-26,64 -351,68	-2,02	0,62					-26,73 -15,36	-0,73	-0,61	
9	1,026	0,974	-26,96 / -351,68 /	-2,03 /	0,61 /		45	1,026	0,974	-26,99 / -15,36 /	-0,73 /	-0,62 /	
			-26,99 -524,24	-2,69	1,24					-26,96 -167,08	-1,32	-0,06	
10	1,026	0,974	-27,27 / -524,24 /	-2,70 /	1,23 /		46	1,026	0,974	-27,22 / -167,08 /	-1,32 /	-0,07 /	
			-27,30 -672,13	-3,27	1,77					-27,19 -313,39	-1,89	0,47	
11	1,026	0,974	-27,53 / -672,13 /	-3,27 /	1,77 /		47	1,026	0,974	-27,43 / -313,39 /	-1,89 /	0,46 /	
			-27,57 -794,70	-3,75	2,21					-27,40 -452,03	-2,42	0,97	
12	1,026	0,974	-27,75 / -794,70 /	-3,75 /	2,21 /		48	1,026	0,974	-27,63 / -452,03 /	-2,43 /	0,96 /	
			-27,79 -891,61	-4,13	2,56					-27,59 -580,74	-2,92	1,43	
13	1,026	0,974	-27,93 / -891,61 /	-4,13 /	2,56 /		49	1,026	0,974	-27,80 / -580,74 /	-2,93 /	1,43 /	
			-27,97 -962,84	-4,40	2,82					-27,76 -697,28	-3,38	1,85	
14	1,026	0,974	-28,06 / -962,84 /	-4,41 /	2,82 /		50	1,026	0,974	-27,95 / -697,28 /	-3,38 /	1,85 /	
			-28,10 -1.008,65	-4,58	2,98					-27,91 -799,51	-3,77	2,22	
15	1,026	0,974	-28,15 / -1.008,65	-4,58 /	2,98 /		51	1,026	0,974	-28,08 / -799,51 /	-3,78 /	2,22 /	
			-28,19 /	-4,67	3,06					-28,04 -885,38	-4,11	2,53	
			-1.029,60										
16	1,026	0,974	-28,20 / -1.029,60	-4,67 /	3,06 /		52	1,026	0,974	-28,17 / -885,38 /	-4,11 /	2,53 /	
			-28,25 /	-4,66	3,04					-28,13 -952,97	-4,37	2,78	
			-1.026,54										
17	1,026	0,974	-28,21 / -1.026,54	-4,65 /	3,04 /		53	1,026	0,974	-28,23 / -952,97 /	-4,37 /	2,78 /	
			-28,26 /	-4,56	2,95					-28,19 -1.000,54	-4,55	2,95	
			-1.000,55										
18	1,026	0,974	-28,19 / -1.000,55	-4,55 /	2,95 /		54	1,026	0,974	-28,26 / -1.000,54	-4,56 /	2,95 /	
			-28,23 / -952,97	-4,37	2,78					-28,21 /	-4,65	3,04	
										-1.026,53			
19	1,026	0,974	-28,13 / -952,97 /	-4,37 /	2,78 /		55	1,026	0,974	-28,25 / -1.026,53	-4,66 /	3,04 /	
			-28,17 -885,38	-4,11	2,53					-28,20 /	-4,67	3,06	
										-1.029,59			
20	1,026	0,974	-28,04 / -885,38 /	-4,11 /	2,53 /		56	1,026	0,974	-28,19 / -1.029,59	-4,67 /	3,06 /	
			-28,08 -799,51	-3,78	2,22					-28,15 /	-4,58	2,98	
										-1.008,64			
21	1,026	0,974	-27,91 / -799,51 /	-3,77 /	2,22 /		57	1,026	0,974	-28,10 / -1.008,64	-4,58 /	2,98 /	
			-27,95 -697,28	-3,38	1,85					-28,06 / -962,83	-4,41	2,82	
22	1,026	0,974	-27,76 / -697,28 /	-3,38 /	1,85 /		58	1,026	0,974	-27,97 / -962,83 /	-4,40 /	2,82 /	
			-27,80 -580,73	-2,93	1,43					-27,93 -891,60	-4,13	2,56	
23	1,026	0,974	-27,59 / -580,73 /	-2,92 /	1,43 /		59	1,026	0,974	-27,79 / -891,60 /	-4,13 /	2,56 /	
			-27,63 -452,03	-2,43	0,96					-27,75 -794,69	-3,75	2,21	
24	1,026	0,974	-27,40 / -452,03 /	-2,42 /	0,97 /		60	1,026	0,974	-27,57 / -794,69 /	-3,75 /	2,21 /	
			-27,43 -313,38	-1,89	0,46					-27,53 -672,12	-3,27	1,77	
25	1,026	0,974	-27,19 / -313,38 /	-1,89 /	0,46 /		61	1,026	0,974	-27,30 / -672,12 /	-3,27 /	1,77 /	
			-27,22 -167,06	-1,32	-0,07					-27,27 -524,24	-2,70	1,23	
26	1,026	0,974	-26,96 / -167,06 /	-1,32 /	-0,06 /		62	1,026	0,974	-26,99 / -524,24 /	-2,69 /	1,24 /	
			-26,99 -15,35	-0,73	-0,62					-26,96 -351,67	-2,03	0,61	
27	1,026	0,974	-26,73 / -15,35 /	-0,73 /	-0,61 /		63	1,026	0,974	-26,64 / -351,67 /	-2,02 /	0,62 /	
			-26,76 139,49	-0,13	-1,18					-26,61 -155,37	-1,26	-0,10	
28	1,026	0,974	-26,49 / 139,49 /	-0,13 /	-1,17 /		64	1,026	0,974	-26,25 / -155,37 /	-1,25 /	-0,09 /	
			-26,51 295,26	0,47	-1,74					-26,22 63,43	-0,41	-0,89	
29	1,026	0,974	-26,24 / 295,26 /	0,48 /	-1,73 /		65	1,026	0,974	-25,81 / 63,43 /	-0,40 /	-0,88 /	
			-26,26 449,81	1,07	-2,30					-25,79 303,23	0,52	-1,75	
30	1,026	0,974	-25,99 / 449,81 /	1,08 /	-2,29 /		66	1,026	0,974	-25,34 / 303,23 /	0,53 /	-1,74 /	
			-26,01 601,08	1,66	-2,85					-25,32 562,25	1,53	-2,69	
31	1,026	0,974	-25,75 / 601,08 /	1,67 /	-2,84 /		67	1,026	0,974	-24,83 / 562,25 /	1,54 /	-2,67 /	
			-25,77 747,16	2,23	-3,37					-24,82 838,46	2,61	-3,68	
32	1,026	0,974	-25,51 / 747,16 /	2,24 /	-3,37 /		68	1,026	0,974	-24,29 / 838,46 /	2,62 /	-3,67 /	
			-25,52 886,25	2,77	-3,88					-24,28 1.129,61	3,74	-4,73	
33	1,026	0,974	-25,28 / 886,25 /	2,78 /	-3,87 /		69	1,026	0,974	-23,72 / 1.129,61 /	3,75 /	-4,72 /	
			-25,29 1.016,71	3,28	-4,35					-23,72 1.433,27	4,92	-5,83	

34	1,026	0,974	-25,05 / 1.016,71 /	3,29 /	-4,34 /
35	1,026	0,974	-25,06 / 1.137,07 /	3,75 /	-4,78 /
			-24,84 / 1.137,07 /	3,75 /	-4,77 /
			-24,84 / 1.246,04	4,17	-5,17

70	1,026	0,974	-23,13 / 1.433,27 /	4,94 /	-5,81 /
71	1,026	0,974	-23,13 / 1.746,81 /	6,14 /	-6,96 /
			-22,52 / 1.746,81 /	6,16 /	-6,94 /
			-22,51 / 2.067,46	7,39	-8,11

Biegelinie (x 4,80)

Kontaktspannungen Liner, Zwang

Normalkräfte Liner, Zwang

Momente Liner, Zwang


Spannung innen Liner, Zwang

Spannung außen Liner, Zwang


2.2.8.7 Altrohrspannungen Kämpfer

Vertikale Gesamtlast, Design:

Wanddicke Altrohr:

Außendurchmesser Altrohr Kämpfer:

Bezogene Gelenkringexzentrizität:

$$b_D = \frac{8 \cdot t_R}{3} \cdot (0,50 - e_G/t) \quad (101)$$

Druckzonenbreite:

$$N_{K,d} = -q_{v,d} (1 + \omega_{GR,v}) \cdot \frac{d_{AR,k}}{2}$$

Druckkraft im Kämpfer:

$$\sigma_d = \frac{N_{K,d}}{b_D} \cdot 1,50 \quad (100)$$

Spannung in der Druckzone:

Zul. Druckfestigkeit, Langzeit:

$$U_{\sigma D,AR} = \frac{-1 \cdot \sigma_d}{f_{c,rad,L}} \quad (102)$$

Ausnutzung Druckspannungen AR Kämpfer:

$q_{v,d}$	148,89	kN/m²
t_R	250,00	mm
$d_{AR,k}$	1.566,67	mm
e_G/t	35,00	%

b_D	100,00	mm
-------	--------	----

$N_{K,d}$	-116,63	N/mm
-----------	---------	------

σ_d	-1,75	N/mm²
$f_{c,rad,L}$	5,00	N/mm²

$U_{\sigma D,AR}$	35,0	%
-------------------	------	---

Der Spannungsnachweis für Kämpferspannungen im Altrohr ist erfüllt.

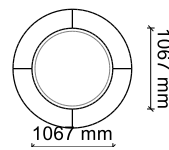
2.2.9 Lastfall 05 [Ersatzkreis] AZ III - hW 0,00 m + h 7,70 m + ws 0,0 % + ww 0,0 %, Langzeit

Bahn LM 71 - mehrgleisig

 ws = 0,00 %
 ww = 0,00 %
 eg = 35,00 %
 wGRV = 0,00 %

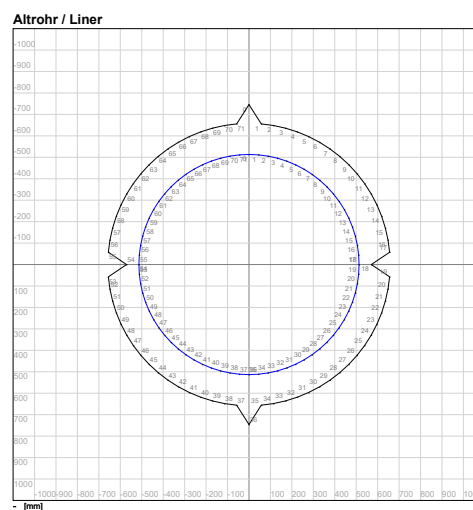
Max. Überdeckung Scheitel Altrrohr

7700 mm



2.2.9.1 Geometrie diskretisiertes System

Skizze



IngSoft EasyPipe 3.1.0.0 - 01.03.2026 - 22:30:28

66

Bauteil: SAN-03 - GFK Sanierung Hauptsammler Ost
 MA-250346

Seite:
 D-66

Kapitel / Vorgang: D - Nachweise
 01.1 815 / 1570 t = 40 / Bereich Eisenbahnlasten

Archiv-Nr.

Wanddicke Liner: t_L 40,00 mm
Wanddicke Altrohr: t_R 250,00 mm

Berechnete Punkte

Element	Altrohr X [mm]	Altrohr Y [mm]	Liner X [mm]	Liner Y [mm]	Liner r [mm]	Element	Altrohr X [mm]	Altrohr Y [mm]	Liner X [mm]	Liner Y [mm]	Liner r [mm]
0	0,0	-745,8	0,0	-513,3	513,3	18	570,8	0,0	513,3	0,0	513,3
1	57,4	-655,8	44,7	-511,4	513,3	19	655,8	57,4	511,4	44,7	513,3
2	114,3	-648,3	89,1	-505,5	513,3	20	648,3	114,3	505,5	89,1	513,3
3	170,4	-635,9	132,9	-495,8	513,3	21	635,9	170,4	495,8	132,9	513,3
4	225,2	-618,6	175,6	-482,4	513,3	22	618,6	225,2	482,4	175,6	513,3
5	278,2	-596,7	216,9	-465,2	513,3	23	596,7	278,2	465,2	216,9	513,3
6	329,2	-570,1	256,7	-444,6	513,3	24	570,1	329,2	444,6	256,7	513,3
7	377,6	-539,3	294,4	-420,5	513,3	25	539,3	377,6	420,5	294,4	513,3
8	423,2	-504,3	330,0	-393,2	513,3	26	504,3	423,2	393,2	330,0	513,3
9	465,5	-465,5	363,0	-363,0	513,3	27	465,5	465,5	363,0	363,0	513,3
10	504,3	-423,2	393,2	-330,0	513,3	28	423,2	504,3	330,0	393,2	513,3
11	539,3	-377,6	420,5	-294,4	513,3	29	377,6	539,3	294,4	420,5	513,3
12	570,1	-329,2	444,6	-256,7	513,3	30	329,2	570,1	256,7	444,6	513,3
13	596,7	-278,2	465,2	-216,9	513,3	31	278,2	596,7	216,9	465,2	513,3
14	618,6	-225,2	482,4	-175,6	513,3	32	225,2	618,6	175,6	482,4	513,3
15	635,9	-170,4	495,8	-132,9	513,3	33	170,4	635,9	132,9	495,8	513,3
16	648,3	-114,3	505,5	-89,1	513,3	34	114,3	648,3	89,1	505,5	513,3
17	655,8	-57,4	511,4	-44,7	513,3	35	57,4	655,8	44,7	511,4	513,3
18	570,8	0,0	513,3	0,0	513,3	36	0,0	745,8	0,0	513,3	513,3

Lokale Vorverformung: ω_V 0,00 %
Lokale Vorverformung absolut: w_V 0,00 mm

Gelenkringverformung: $\omega_{GR,V}$ 0,00 %
Gelenkringverformung absolut, einseitig: $w_{GR,V}$ 0,00 mm
Ringspalt: ω_S 0,00 %
Spaltweite absolut (als konst. Ringspalt): w_S 0,00 mm

Mittlerer Radius Liner: $r_{L,m}$ 513,33 mm

2.2.9.2 Erdlasten und Verkehrslasten

Wichte Boden, unter Auftrieb: γ_B' 10,00 kN/m³
Wichte Boden, trocken: γ_B 20,00 kN/m³
Max. Überdeckung Scheitel Altrohr: h_{max} 7,70 m
Wasser/Dämmerspiegel: h_w 0,00 m
Wanddicke Altrohr: t_R 250,00 mm
Vertikale Lichte Höhe Altrohr: $d_{AR,iv}$ 1.066,67 mm

$$h'_w = h_w - t_R - d_{AR,iv}$$

Höhe Wasserspiegel über Altrohrrscheitel: h'_w 0,00 m
 $p_E = \gamma_B \cdot (h_{max} - h'_w) + \gamma_B' \cdot h'_w$ (74)

Vertikale Erdlast: p_E 154,00 kN/m²

$$r_{AR,a} = t_R + \frac{d_{AR,iv}}{2}$$

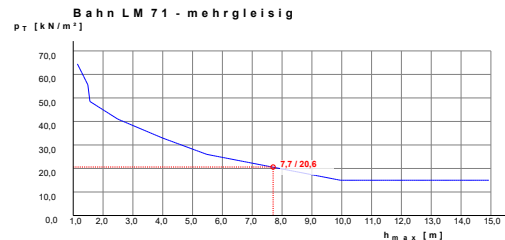
Höhe Scheitel bis Kämpfer Altrohr: $r_{AR,a}$ 783,33 mm

$$h'_{wk} = h_w - d_{AR,iv} - t_R + r_{AR,a}$$

Höhe Wasserspiegel Altrohrkämpfer bis Altrohrrscheitel: h'_{wk} 0,00 m

$$p_{E,K} = p_E + \gamma_B \cdot (r_{AR,a} - h'_{wk}) + \gamma_B' \cdot h'_{wk}$$

Vertikale Erdlast bis Kämpfer: $p_{E,K}$ 169,67 kN/m²



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

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

Stoßbeiwert: Φ_2 1,67 [-]

$$\text{red } \Phi_2 = \Phi_2 - 0,1 \cdot (h_{\ddot{u}} - 1,0) \geq 1 \quad (22)$$

Stoßbeiwert reduziert: $\text{red } \Phi_2$ 1,00 [-]
 Anpassungsfaktor α_{Qi} LM71 (DIN EN 1991-2): $\alpha_{Qi,LM71}$ 1,00 [-]
 Einfache Bodenspannung aus Verkehr: p 20,62 kN/m²

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

Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Scheitelhöhe: p_T 20,62 kN/m²

Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Kämpferhöhe (ohne φ): p_K 18,71 kN/m²
 Erdruckbeiwert (Einbettung): K_2 0,100 [-]

$$p_{T,h} = (0,50 \cdot (\text{red } \Phi_2 - 1) + 1) \cdot p_K \cdot K_2 \cdot \alpha_{Qi,LM71} \quad A 161 (23b)$$

Horizontale Bodenspannung aus Verkehr: $p_{T,h}$ 1,87 kN/m²

Vertikale Verkehrslast: p_V 20,62 kN/m²

$$p_{V,d} = p_V \cdot Y_{T,sup}$$

Vertikale Verkehrslast, Design: $p_{V,d}$ 30,93 kN/m²
 Zusätzliche Flächenlast: p_0 0,0 kN/m²

Konzentrationsfaktor über Rohr: λ_R 0,75 [-]

$$q_v = \lambda_R \cdot (p_E + p_0) + p_V$$

Vertikale Gesamtlast: q_v 136,12 kN/m²

$$q_{v,d} = \lambda_R \cdot (p_E + p_0) \cdot Y_{B,sup} + p_{V,d}$$

Vertikale Gesamtlast, Design: $q_{v,d}$ 186,86 kN/m²
 E-Modul: E_2 8,00 N/mm²

$$S_{Bh} = 0,80 \cdot E_2 \quad (60)$$

Horizontale Bettungssteifigkeit: S_{Bh} 6,400 N/mm²
 Erdruckbeiwert (Einbettung): K_2 0,100 [-]

$$\lambda_B = \frac{4 - \lambda_R}{3} \quad A 127 (6.07)$$

Konzentrationsfaktor Boden: λ_B 1,083 [-]

Höhe Wasserspiegel Altrohrkämpfer bis Altrohrscheitel: h'_{wk} 0,00 m

$$r_{AR,a} = t_R + d_{AR,iv}/2$$

$$r_{AR,a} = t_R + \frac{d_{AR,iv}}{2}$$

Höhe Scheitel bis Kämpfer Altrohr:

 $r_{AR,a}$ 783,33 mm

$$q_{h,E} = K_2 \cdot \lambda_B \cdot p_{E,K}$$

Horizontale Erdlast:

 $q_{h,E}$ 18,38 kN/m²

Horizontale Verkehrslast:

 $q_{h,V}$ 1,87 kN/m²

$$q_h = q_{h,V} + q_{h,E}$$

Horizontale Gesamtlast:

 q_h 20,25 kN/m²

$$q_{h,d} = q_{h,V} \cdot 1,50 + q_{h,E} \cdot 1,35$$

(75)

Designwert Horizontale Gesamtlast:

 $q_{h,d}$ 27,62 kN/m²

$$K_2' = \frac{q_{h,d}}{q_{v,d}}$$

(77)

Rechnerischer Erddruckbeiwert:

 K_2' 0,148 [-]

2.2.9.3 Verformungsnachweis Liner, Gebrauchslast

$$d_v = d_{aL}$$

Relevanter Durchmesser für prozentuale Verformung: d_v 1.066,67 mm

Spaltweite absolut (als konst. Ringspalt): w_s 0,00 mm

Lokale Vorverformung absolut: w_v 0,00 mm

Gelenkringverformung absolut, einseitig: $w_{GR,v}$ 0,00 mm

Elastische Verformung absolut, vertikal: $w_{el,v,E1}$ -10,10 mm

Elastische Verformung absolut, vertikal: $w_{el,v}$ 10,10 mm

Zulässige Verformung elastisch absolut: $zul\ w_{el}$ 10,00 mm

Die errechnete absolute elastische Verformung ist größer als die von der Deutschen Bahn AG festgelegten 10 mm!

$$\delta_{v,el} = \frac{w_{el,v}}{d_v}$$

Elastische Verformung relativ: $\delta_{v,el}$ 0,95 %

Zulässige Verformung elastisch: $zul\ \delta_{v,el}$ 2,00 %

Die errechnete elastische Verformung ist kleiner als die zulässige Verformung.

$$w = w_{el,v} + w_{GR,v} \cdot 2 + w_v$$

Gesamte Durchmesseränderung: w 10,10 mm

$$\delta_v = \frac{w}{d_v}$$

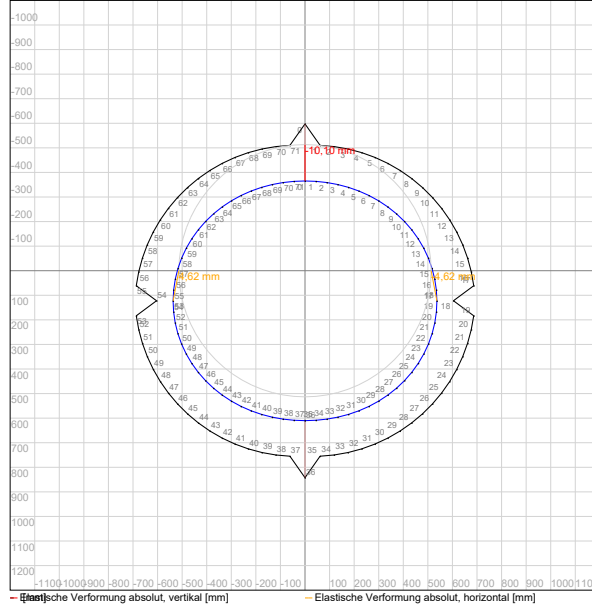
Relative Gesamtverformung: δ_v 0,95 %

Anhaltswert Gesamtverformung: $\delta_{v,A}$ 10,00 %

Elastische Verformung absolut, horizontal: $w_{el,h,E1}$ -4,62 mm

Elastische Verformung absolut, horizontal: $w_{el,h,E2}$ 4,62 mm

Elastische Verformung absolut, horizontal: $w_{el,h}$ 9,24 mm

Gebrauchslast (x 5,1)


2.2.9.4 Bodeninteraktion (Gebrauchslast)

$$CB = \frac{E_2}{\frac{da_{AR,k}}{2}} \cdot 0,80$$

Bettungsziffer, Scheitel:

CB 8.170,21 kN/m³

$$CB = \frac{E}{r_{aR}} \cdot 0,80$$

Innerer Reibungswinkel:

φ' 20,00 °

$$K_p = \tan (45^\circ + \varphi'/2)^2$$

(62)

Beiwert:

K_p 2,04 [-]
 p_E 154,00 kN/m²

Vertikale Erdlast:

$$q_{h,max} = 0,75 \cdot K_p \cdot \lambda_B \cdot p_E$$

(61)

Grenzwert q_h im Scheitel (informativ):

$q_{h,max}$ 255,21 kN/m²

Vertikale Erdlast bis Kämpfer:

$p_{E,K}$ 169,67 kN/m²

$$q_{h,max,K} = 0,75 \cdot K_p \cdot \lambda_B \cdot p_{E,K}$$

(61)

Grenzwert q_h im Kämpfer:

$q_{h,max,K}$ 281,17 kN/m²

Der Wert wird im Kämpfer abgelesen.

Horizontale Gesamtlast:

q_h 20,25 kN/m²

Seitlicher Bettungsreaktionsdruck:

q_h^* 53,63 kN/m²

$$q_h + q_h^* = q_h^* + q_h$$

Summe horizontale Kräfte:

$q_h + q_h^*$ 73,88 kN/m²

$$q_{h,max,K} \geq q_h + q_h^*$$

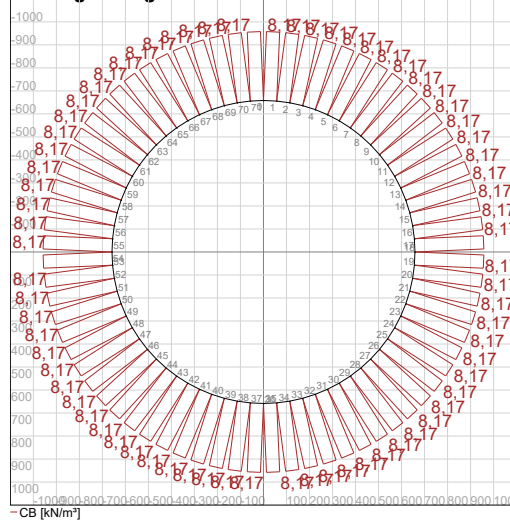
$$U_{maxqh} = \frac{q_h + q_h^*}{q_{h,max,K}}$$

Ausnutzung max qh:

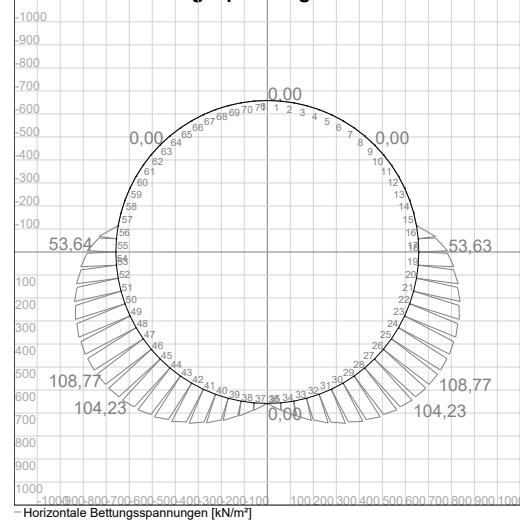
Für die Interaktion Boden-Rohrsystem wurde der elastische Ansatz verwendet. Die Bettung des Rohres wurde um den gesamten Umfang als konstant angenommen. Damit ergibt sich eine Dreiecksförmige Verteilung der Bodenspannungen, deren Maximalwert auf 75% des passiven Erddrucks begrenzt ist.

$$U_{maxqh} = 26,3 \%$$

Bettungssteifigkeit



Horizontale Bettungsspannungen



Die horizontale Kraft aus Bettungsreaktionsdruck und seitlichem Druck im Kämpfer liegt unterhalb des Grenzwertes.

2.2.9.5 Stabilitätsnachweis (Designwerte)

Der maßgebende Nachweis der Stabilität erfolgt über die im Abschnitt 7.6.4.2 (DWA-A 143-2) zugelassene (genauere) Variante einer Berechnung nach Theorie II. Ordnung unter Berücksichtigung der Vorverformungen und der Spaltbildung. Hierbei wird numerisch überprüft, ob ein elastisches Stabilitätsversagen (Beulen) unter gamma-facher Last eintritt. Darüber hinaus wird geprüft, ob die bei dieser Berechnung ermittelten Spannungen die vorgegeben maximalen Grenzspannungen für Zug und Druck mit einfacher Sicherheit nicht überschreiten.

Nachweis entfällt.

Spannungsnachweis Liner, Design

Fläche (Wanddicke): A 40,00 mm²/mm

Außen

$$W_e = \frac{t_L^2}{6}$$

Widerstandsmoment, außen: W_e 266,67 mm³/mm

$$\alpha_{ka} = 1 - \frac{t_L}{3 \cdot r_L} \quad (90)$$

Element	i	Druck	Zug	
Korrekturfaktor (Verformtes System)	α_k	35	19	[-]
Normalkraft in Element	N_d	0,97	0,97	[-]
Moment in Element	M_d	-0,50	-5,03	N/mm
		1.772,66	-953,08	Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} - \alpha_{ka} \cdot \frac{M_d}{W_e} \quad (88)$$

Spannung in Element Max σ_d -6,49 3,36 N/mm²

$$f_{c,rad,L,d} = \frac{f_{c,rad,L}}{Y_M}$$

Zul. Spannung, Langzeit, Design: $\sigma_{L,d}$ -55,56 55,56 N/mm²

Ausnutzung Spannungen U_σ 11,7 6,0 %

Der Spannungsnachweis Außen ist erfüllt.

Innen

$$W_i = \frac{t_L^2}{6}$$

Widerstandsmoment, innen: W_i 266,67 mm³/mm

$$\alpha_{ki} = 1 + \frac{t_L}{3 \cdot r_L} \quad (89)$$

Element	i	Druck	Zug	
Korrekturfaktor (Verformtes System)	α_k	18	36	[-]
Normalkraft in Element	N_d	1,03	1,03	[-]
Moment in Element	M_d	-5,04	-0,50	N/mm
		-953,08	1.772,66	Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} + \alpha_{ki} \cdot \frac{M_d}{W_i} \tag{87}$$

Spannung in Element	Max σ_d	-3,79	6,81	N/mm²
---------------------	----------------	-------	------	-------

$$f_{c,rad,L,d} = \frac{f_{c,rad,L}}{Y_M}$$

Zul. Spannung, Langzeit, Design:	$\sigma_{L,d}$	-55,56	55,56	N/mm²
----------------------------------	----------------	--------	-------	-------

Ausnutzung Spannungen	U_σ	6,8	12,3	%
-----------------------	------------	-----	------	---

Der Spannungsnachweis Innen ist erfüllt.

Die Spannungen liegen im zulässigen Bereich.

Tabellen

Element	α ki [-]	α ka [-]	N [N/mm] l/r	M [Nmm] m l/r	σ i l/r	σ a [N/mm ²] l/r	Element	α ki [-]	α ka [-]	N [N/mm] l/r	M [Nmm] m l/r	σ i l/r	σ a [N/mm ²] l/r
0	1,026	0,974	0,06 / 1.521,20 /	0,06 / 1.330,31 /	5,85 /	-5,55 /	36	1,026	0,974	-0,50 / 1.772,66 /	6,81 /	-6,49 /	-5,55 /
1	1,026	0,974	-0,31 / 1.330,31 /	-0,32 / 1.137,93 /	5,11 /	-4,87 /	37	1,026	0,974	-0,99 / 1.516,40 /	5,81 /	-5,56 /	-4,64 /
2	1,026	0,974	-0,69 / 1.137,93 /	-0,70 / 945,43 /	4,36 /	-4,17 /	38	1,026	0,974	-1,47 / 1.264,66 /	4,83 /	-4,66 /	-3,76 /
3	1,026	0,974	-1,08 / 945,43 /	-1,09 / 754,25 /	3,61 /	-3,48 /	39	1,026	0,974	-1,93 / 1.019,16 /	3,87 /	-3,77 /	-2,90 /
4	1,026	0,974	-1,46 / 754,25 /	-1,47 / 565,88 /	2,87 /	-2,79 /	40	1,026	0,974	-1,92 / 781,59 /	2,96 /	-2,91 /	-2,08 /
5	1,026	0,974	-1,83 / 565,88 /	-1,85 / 381,83 /	2,13 /	-2,11 /	41	1,026	0,974	-2,35 / 553,61 /	2,07 /	-2,09 /	-1,30 /
6	1,026	0,974	-2,20 / 381,83 /	-2,23 / 203,66 /	1,41 /	-1,45 /	42	1,026	0,974	-2,78 / 553,61 /	2,06 /	-2,09 /	-1,30 /
7	1,026	0,974	-2,56 / 203,66 /	-2,59 / 32,91 /	0,72 /	-0,81 /	43	1,026	0,974	-3,17 / 336,83 /	1,22 /	-1,31 /	-0,56 /
8	1,026	0,974	-2,91 / 32,91 /	-2,94 / -128,87 /	0,05 /	-0,19 /	44	1,026	0,974	-3,52 / 132,80 /	0,42 /	-0,57 /	0,12 /
9	1,026	0,974	-3,24 / -128,87 /	-3,27 / -280,15 /	0,05 /	-0,19 /	45	1,026	0,974	-3,50 / -57,04 /	-0,31 /	0,12 /	0,11 /
10	1,026	0,974	-3,54 / -280,15 /	-3,58 / -419,45 /	0,05 /	-0,19 /	46	1,026	0,974	-3,84 / -57,04 /	-0,32 /	0,11 /	0,75 /
11	1,026	0,974	-3,83 / -419,45 /	-3,87 / -545,36 /	0,05 /	-0,19 /	47	1,026	0,974	-3,82 / -231,35 /	-0,99 /	0,75 /	0,74 /
12	1,026	0,974	-4,09 / -545,36 /	-4,13 / -656,53 /	0,05 /	-0,19 /	48	1,026	0,974	-4,13 / -231,35 /	-0,99 /	0,74 /	1,32 /
13	1,026	0,974	-4,33 / -656,53 /	-4,36 / -751,72 /	0,05 /	-0,19 /	49	1,026	0,974	-4,10 / -388,91 /	-1,60 /	1,32 /	1,31 /
14	1,026	0,974	-4,53 / -751,72 /	-4,57 / -829,78 /	0,05 /	-0,19 /	50	1,026	0,974	-4,38 / -388,91 /	-1,61 /	1,31 /	1,82 /
15	1,026	0,974	-4,70 / -829,78 /	-4,74 / -889,73 /	0,05 /	-0,19 /	51	1,026	0,974	-4,35 / -528,65 /	-2,14 /	1,82 /	2,26 /
16	1,026	0,974	-4,84 / -889,73 /	-4,88 / -930,70 /	0,05 /	-0,19 /	52	1,026	0,974	-4,60 / -528,65 /	-2,15 /	1,82 /	2,26 /
17	1,026	0,974	-4,94 / -930,70 /	-4,98 / -951,99 /	0,05 /	-0,19 /	53	1,026	0,974	-4,56 / -649,63 /	-2,61 /	2,25 /	2,63 /
18	1,026	0,974	-5,00 / -951,99 /	-5,04 / -953,08 /	0,05 /	-0,19 /	54	1,026	0,974	-4,77 / -649,63 /	-2,62 /	2,25 /	2,63 /
19	1,026	0,974	-5,03 / -953,08 /	-5,07 / -933,61 /	0,05 /	-0,19 /	55	1,026	0,974	-4,73 / -751,11 /	-3,01 /	2,63 /	2,62 /
20	1,026	0,974	-5,07 / -933,61 /	-5,01 / -933,61 /	0,05 /	-0,19 /	56	1,026	0,974	-4,91 / -751,11 /	-3,01 /	2,62 /	2,92 /
21	1,026	0,974	-5,06 / -893,41 /	-5,06 / -893,41 /	0,05 /	-0,19 /	57	1,026	0,974	-4,87 / -832,50 /	-3,32 /	2,92 /	3,14 /
22	1,026	0,974	-4,96 / -893,41 /	-4,96 / -893,41 /	0,05 /	-0,19 /	58	1,026	0,974	-5,00 / -832,50 /	-3,33 /	2,92 /	3,14 /
23	1,026	0,974	-4,96 / -893,41 /	-4,96 / -893,41 /	0,05 /	-0,19 /	59	1,026	0,974	-4,96 / -893,39 /	-3,56 /	3,14 /	3,28 /
24	1,026	0,974	-4,96 / -893,41 /	-4,96 / -893,41 /	0,05 /	-0,19 /	60	1,026	0,974	-5,01 / -933,59 /	-3,72 /	3,28 /	3,28 /
25	1,026	0,974	-4,96 / -893,41 /	-4,96 / -893,41 /	0,05 /	-0,19 /	61	1,026	0,974	-5,07 / -933,59 /	-3,72 /	3,28 /	3,36 /
26	1,026	0,974	-4,96 / -893,41 /	-4,96 / -893,41 /	0,05 /	-0,19 /	62	1,026	0,974	-5,03 / -953,06 /	-3,79 /	3,36 /	3,36 /
27	1,026	0,974	-4,96 / -893,41 /	-4,96 / -893,41 /	0,05 /	-0,19 /	63	1,026	0,974	-5,04 / -953,06 /	-3,79 /	3,36 /	3,35 /
28	1,026	0,974	-4,96 / -893,41 /	-4,96 / -893,41 /	0,05 /	-0,19 /	64	1,026	0,974	-5,00 / -951,98 /	-3,79 /	3,35 /	3,35 /
29	1,026	0,974	-4,96 / -893,41 /	-4,96 / -893,41 /	0,05 /	-0,19 /	65	1,026	0,974	-4,98 / -951,98 /	-3,79 /	3,35 /	3,35 /
30	1,026	0,974	-4,96 / -893,41 /	-4,96 / -893,41 /	0,05 /	-0,19 /	66	1,026	0,974	-4,94 / -930,69 /	-3,70 /	3,28 /	3,28 /
31	1,026	0,974	-4,96 / -893,41 /	-4,96 / -893,41 /	0,05 /	-0,19 /	67	1,026	0,974	-4,88 / -930,69 /	-3,70 /	3,28 /	3,28 /
32	1,026	0,974	-4,96 / -893,41 /	-4,96 / -893,41 /	0,05 /	-0,19 /	68	1,026	0,974	-4,84 / -889,72 /	-3,54 /	3,13 /	3,13 /
33	1,026	0,974	-4,96 / -893,41 /	-4,96 / -893,41 /	0,05 /	-0,19 /	69	1,026	0,974	-4,74 / -889,72 /	-3,54 /	3,13 /	3,13 /
34	1,026	0,974	-4,96 / -893,41 /	-4,96 / -893,41 /	0,05 /	-0,19 /	70	1,026	0,974	-4,70 / -829,78 /	-3,31 /	2,91 /	2,91 /
35	1,026	0,974	-4,96 / -893,41 /	-4,96 / -893,41 /	0,05 /	-0,19 /	71	1,026	0,974	-4,57 / -829,78 /	-3,31 /	2,92 /	2,92 /

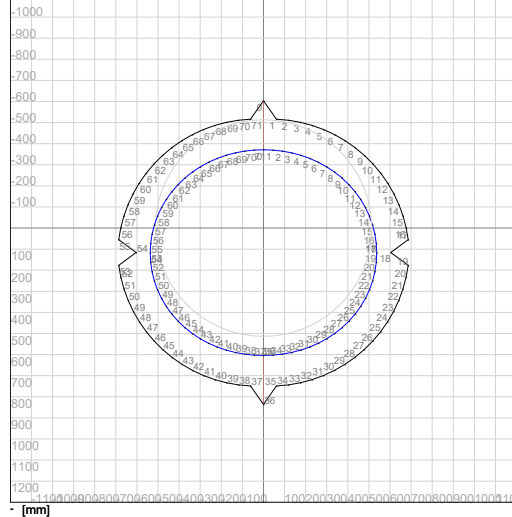
Bauteil: SAN-03 - GFK Sanierung Hauptsammler Ost
MA-250346

Seite: D-75

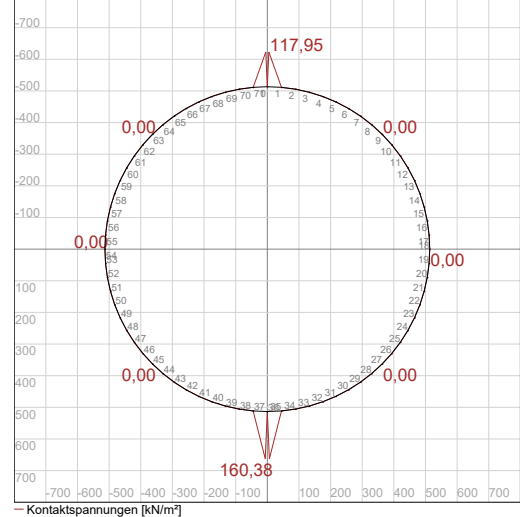
Kapitel / Vorgang: D - Nachweise
01.1 815 / 1570 t = 40 / Bereich Eisenbahnlasten

Archiv-Nr.

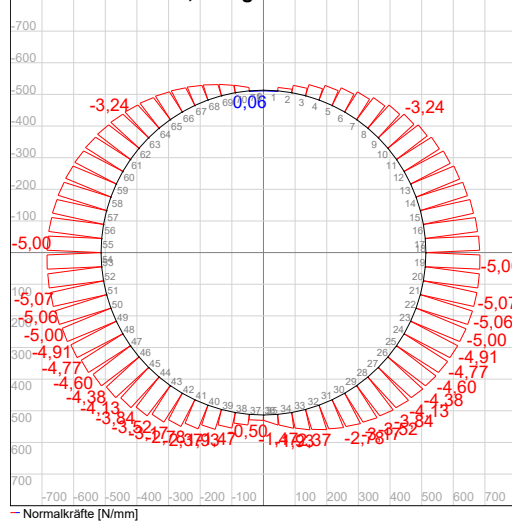
Biegelinie (x 3,50)



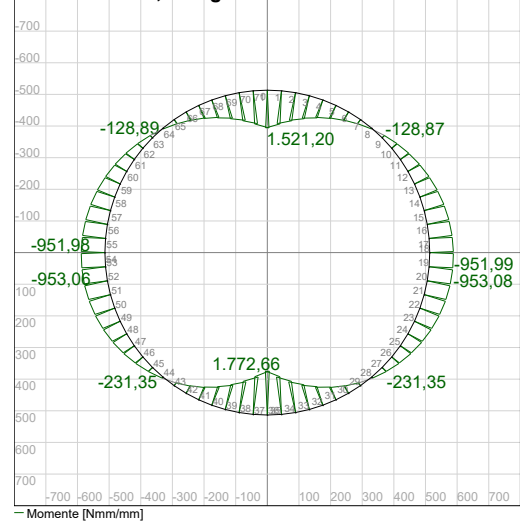
Kontaktspannungen Liner, Design

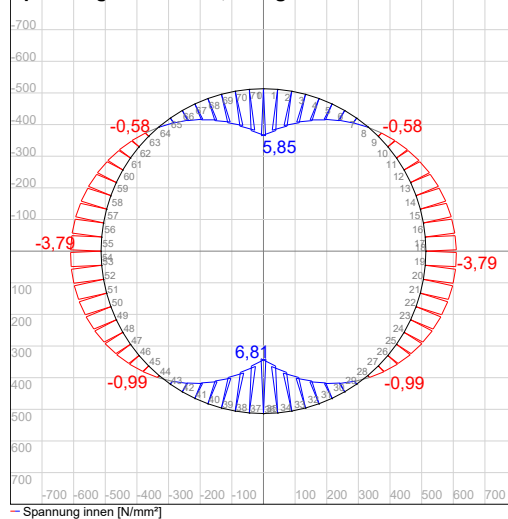
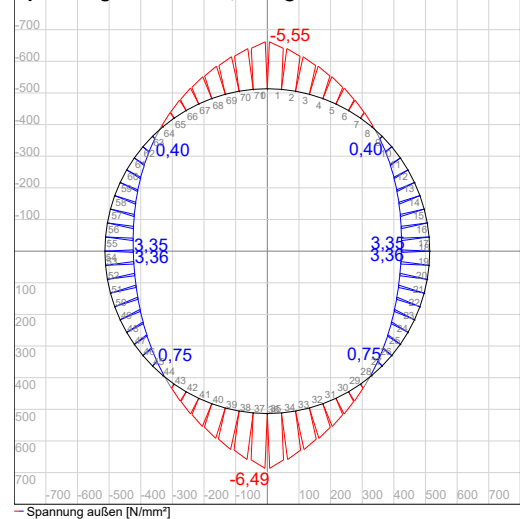


Normalkräfte Liner, Design



Momente Liner, Design



Spannung innen Liner, Design

Spannung außen Liner, Design


2.2.9.6 Spannungsnachweis Liner, Zwang

Fläche (Wanddicke):

A 40,00 mm²/mm

Außen

$$W_e = \frac{t_L^2}{6}$$

Widerstandsmoment, außen:

 W_e 266,67 mm³/mm

$$\alpha_{ka} = 1 - \frac{t_L}{3 \cdot r_L} \quad (90)$$

 Element
 Korrekturfaktor (Verformtes System)
 Normalkraft in Element
 Moment in Element

	Druck	Zug	
i	36	17	[-]
α _k	0,97	0,97	[-]
N _d	-0,56	-6,42	N/mm
M _d	2.247,16	-1.225,69	Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} - \alpha_{ka} \cdot \frac{M_d}{W_e} \quad (88)$$

Spannung in Element

 Max σ_d -8,22 4,32 N/mm²

$$f_{c,rad,L,d} = \frac{f_{c,rad,L}}{\gamma_M}$$

Zul. Spannung, Langzeit, Design:

 σ_{L,d} -55,56 55,56 N/mm²

Ausnutzung Spannungen

 U_σ 14,8 7,8 %

Der Spannungsnachweis Außen ist erfüllt.

Innen

$$W_i = \frac{t_L^2}{6}$$

Widerstandsmoment, innen:

 W_i 266,67 mm³/mm

$$\alpha_{ki} = 1 + \frac{t_L}{3 \cdot r_L}$$

(89)

Element	i	Druck	Zug	
Korrekturfaktor (Verformtes System)	α_k	18	35	[-]
Normalkraft in Element	N_d	1,03	1,03	[-]
Moment in Element	M_d	-6,44	-0,56	N/mm
		-1.225,69	2.247,16	Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} + \alpha_{ki} \cdot \frac{M_d}{W_i}$$

(87)

Spannung in Element

 $\text{Max } \sigma_d$ -4,88 8,63 N/mm²

$$f_{c,rad,L,d} = \frac{f_{c,rad,L}}{\gamma_M}$$

Zul. Spannung, Langzeit, Design:

 $\sigma_{L,d}$ -55,56 55,56 N/mm²

Ausnutzung Spannungen

 U_σ 8,8 15,5 %

Der Spannungsnachweis Innen ist erfüllt.

Die Spannungen liegen im zulässigen Bereich.

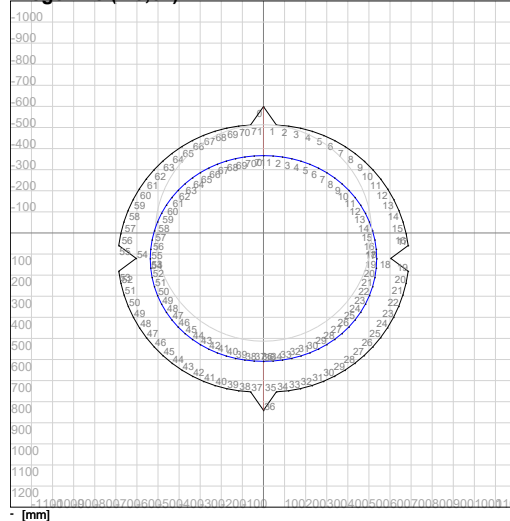
Tabellen

Element	α ki [-]	α ka [-]	N [N/mm]M l/r	σ i [N/mm ²] l/r	σ a [N/mm ²] l/r	Element	α ki [-]	α ka [-]	N [N/mm]M l/r	σ i [N/mm ²] l/r	σ a [N/mm ²] l/r
0	1,026	0,974	0,00 / 1.995,82 / 0,00 1.740,38 /	7,68 / 6,70	-7,29 / -6,36	36	1,026	0,974	-0,56 / 2.247,16 / -0,56 1.926,35	8,63 / 7,40	-8,22 / -7,05
1	1,026	0,974	-0,50 / 1.740,38 / -0,51 1.483,89	6,68 / 5,70	-6,37 / -5,43	37	1,026	0,974	-1,18 / 1.926,35 / -1,17 1.610,52	7,38 / 6,17	-7,07 / -5,91
2	1,026	0,974	-1,01 / 1.483,89 / -1,01 1.228,19	5,68 / 4,70	-5,45 / -4,51	38	1,026	0,974	-1,78 / 1.610,52 / -1,77 1.301,83	6,15 / 4,96	-5,93 / -4,80
3	1,026	0,974	-1,51 / 1.228,19 / -1,52 975,17	4,69 / 3,71	-4,52 / -3,60	39	1,026	0,974	-2,36 / 1.301,83 / -2,35 1.002,44	4,95 / 3,80	-4,81 / -3,72
4	1,026	0,974	-2,01 / 975,17 / -2,03 726,77	3,70 / 2,75	-3,61 / -2,71	40	1,026	0,974	-2,92 / 1.002,44 / -2,90 714,47	3,78 / 2,68	-3,73 / -2,68
5	1,026	0,974	-2,50 / 726,77 / -2,52 484,96	2,73 / 1,80	-2,72 / -1,83	41	1,026	0,974	-3,45 / 714,47 / -3,43 439,97	2,66 / 1,61	-2,70 / -1,69
6	1,026	0,974	-2,98 / 484,96 / -3,00 251,74	1,79 / 0,89	-1,85 / -0,99	42	1,026	0,974	-3,94 / 439,97 / -3,92 180,93	1,59 / 0,60	-1,71 / -0,76
7	1,026	0,974	-3,44 / 251,74 / -3,47 29,10	0,88 / 0,03	-1,01 / -0,19	43	1,026	0,974	-4,40 / 180,93 / -4,37 -60,78	0,59 / -0,34	-0,77 / 0,11
8	1,026	0,974	-3,88 / 29,10 / -3,91 -181,02	0,01 / -0,79	-0,20 / 0,56	44	1,026	0,974	-4,82 / -60,78 / -4,79 -283,40	-0,35 / -1,21	0,10 / 0,92
9	1,026	0,974	-4,30 / -181,02 / -4,33 -376,70	-0,80 / -1,56	0,55 / 1,27	45	1,026	0,974	-5,20 / -283,40 / -5,16 -485,34	-1,22 / -2,00	0,91 / 1,64
10	1,026	0,974	-4,69 / -376,70 / -4,72 -556,09	-1,57 / -2,26	1,26 / 1,91	46	1,026	0,974	-5,53 / -485,34 / -5,49 -665,15	-2,01 / -2,70	1,63 / 2,29
11	1,026	0,974	-5,05 / -556,09 / -5,08 -717,45	-2,27 / -2,89	1,90 / 2,49	47	1,026	0,974	-5,81 / -665,15 / -5,78 -821,57	-2,70 / -3,31	2,28 / 2,86
12	1,026	0,974	-5,37 / -717,45 / -5,41 -859,13	-2,89 / -3,44	2,49 / 3,00	48	1,026	0,974	-6,05 / -821,57 / -6,01 -953,57	-3,31 / -3,82	2,85 / 3,33
13	1,026	0,974	-5,66 / -859,13 / -5,70 -979,63	-3,45 / -3,91	3,00 / 3,44	49	1,026	0,974	-6,24 / -953,57 / -6,20 -1.060,30	-3,82 / -4,23	3,33 / 3,72
14	1,026	0,974	-5,91 / -979,63 / -5,95 -1.077,62	-3,92 / -4,29	3,43 / 3,79	50	1,026	0,974	-6,38 / -1.060,30 / -6,34 /	-4,24 / -4,55	3,71 / 4,01
15	1,026	0,974	-6,11 / -1.077,62 / -6,15 /	-4,30 / -4,59	3,78 / 4,05	51	1,026	0,974	-6,46 / -1.141,14 / -6,42 /	-4,55 / -4,76	4,01 / 4,21
16	1,026	0,974	-1.151,90 -6,27 / -1.151,90 / -6,31 /	-4,59 / -4,78	4,05 / 4,23	52	1,026	0,974	-1.195,70 -6,50 / -1.195,70 / -6,46 /	-4,76 / -4,87	4,20 / 4,31
17	1,026	0,974	-1.201,52 -6,38 / -1.201,52 / -6,42 /	-4,78 / -4,88	4,23 / 4,32	53	1,026	0,974	-1.223,86 -6,49 / -1.223,86 / -6,44 /	-4,87 / -4,88	4,31 / 4,32
18	1,026	0,974	-1.225,69 -6,44 / -1.225,69 / -6,49 /	-4,88 / -4,87	4,32 / 4,31	54	1,026	0,974	-1.225,69 -6,42 / -1.225,69 / -6,38 /	-4,88 / -4,78	4,32 / 4,23
19	1,026	0,974	-1.223,86 -6,46 / -1.223,86 / -6,50 /	-4,87 / -4,76	4,31 / 4,20	55	1,026	0,974	-1.201,52 -6,31 / -1.201,52 / -6,27 /	-4,78 / -4,59	4,23 / 4,05
20	1,026	0,974	-1.195,70 -6,42 / -1.195,70 / -6,46 /	-4,76 / -4,55	4,21 / 4,01	56	1,026	0,974	-1.151,90 -6,15 / -1.151,90 / -6,11 /	-4,59 / -4,30	4,05 / 3,78
21	1,026	0,974	-1.141,14 -6,34 / -1.141,14 / -6,38 /	-4,55 / -4,24	4,01 / 3,71	57	1,026	0,974	-1.077,62 -5,95 / -1.077,62 / -5,91 / -979,63	-4,29 / -3,92	3,79 / 3,43
22	1,026	0,974	-1.060,30 -6,20 / -1.060,30 / -6,24 / -953,57	-4,23 / -3,82	3,72 / 3,33	58	1,026	0,974	-979,63 / -5,66 -859,13 / -5,41 / -859,13 /	-3,91 / -3,45	3,44 / 3,00
23	1,026	0,974	-953,57 / -6,01 / -953,57 / -6,05 -821,57	-3,82 / -3,31	3,33 / 2,85	59	1,026	0,974	-859,13 / -5,37 -717,45 / -5,08 / -717,45 /	-3,44 / -2,89	3,00 / 2,49
24	1,026	0,974	-821,57 / -5,81 -665,15 / -5,49 / -665,15 /	-3,31 / -2,70	2,86 / 2,28	60	1,026	0,974	-717,45 / -5,05 -556,09 / -4,72 / -556,09 /	-2,89 / -2,27	2,49 / 1,90
25	1,026	0,974	-665,15 / -5,53 -485,34 / -5,16 / -485,34 /	-2,70 / -2,01	2,29 / 1,63	61	1,026	0,974	-556,09 / -4,69 -376,70 / -4,33 / -376,70 /	-2,26 / -1,57	1,91 / 1,26
26	1,026	0,974	-485,34 / -5,20 -283,40 / -4,79 / -283,40 /	-2,00 / -1,22	1,64 / 0,91	62	1,026	0,974	-376,70 / -4,30 -181,02 / -3,91 / -181,02 /	-1,56 / -0,80	1,27 / 0,55
27	1,026	0,974	-283,40 / -4,82 -60,78 / -4,37 / -60,78 /	-1,21 / -0,35	0,92 / 0,10	63	1,026	0,974	-181,02 / -3,88 29,10 / -3,47 / 29,10 /	-0,79 / 0,01	0,56 / -0,20
28	1,026	0,974	-60,78 / -4,40 180,93 / -3,92 / 180,93 /	-0,34 / 0,59	0,11 / -0,77	64	1,026	0,974	29,10 / -3,44 251,74 / -3,00 / 251,74 /	0,03 / 0,88	-0,19 / -1,01
29	1,026	0,974	180,93 / -3,94 439,97 / -3,43 / 439,97 /	0,60 / 1,59	-0,76 / -1,71	65	1,026	0,974	251,74 / -2,98 484,96 / -2,52 / 484,96 /	0,89 / 1,79	-0,99 / -1,85
30	1,026	0,974	439,97 / -3,45 714,47 / -2,90 / 714,47 /	1,61 / 2,66	-1,69 / -2,70	66	1,026	0,974	484,96 / -2,50 726,77 / -2,03 / 726,77 /	1,80 / 2,73	-1,83 / -2,72
31	1,026	0,974	714,47 / -2,92 1.002,44 / -2,35 / 1.002,44 /	2,68 / 3,78	-2,68 / -3,73	67	1,026	0,974	726,77 / -2,01 975,17 / -1,52 / 975,17 /	2,75 / 3,70	-2,71 / -3,61
32	1,026	0,974	1.002,44 / -2,36 1.301,83 / -2,36 1.301,83	3,80 / 4,95	-3,72 / -4,81	68	1,026	0,974	975,17 / -1,51 1.228,19 / -1,51 1.228,19	3,71 / 4,69	-3,60 / -4,52

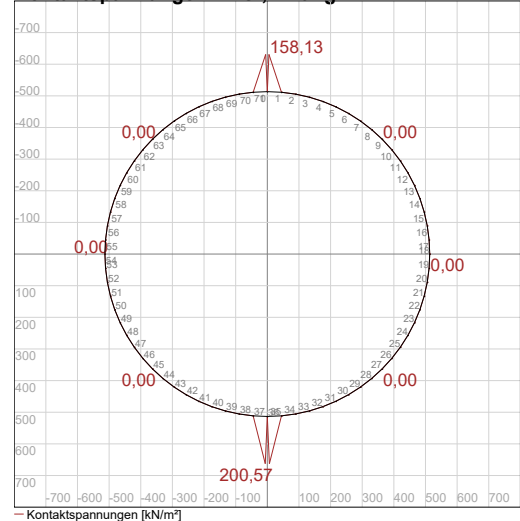
33	1,026	0,974	-1,77 / 1.301,83 /	4,96 /	-4,80 /
			-1,78 1.610,52	6,15	-5,93
34	1,026	0,974	-1,17 / 1.610,52 /	6,17 /	-5,91 /
			-1,18 1.926,35	7,38	-7,07
35	1,026	0,974	-0,56 / 1.926,35 /	7,40 /	-7,05 /
			-0,56 2.247,16	8,63	-8,22

69	1,026	0,974	-1,01 / 1.228,19 /	4,70 /	-4,51 /
			-1,01 1.483,89	5,68	-5,45
70	1,026	0,974	-0,51 / 1.483,89 /	5,70 /	-5,43 /
			-0,50 1.740,38	6,68	-6,37
71	1,026	0,974	0,00 / 1.740,38 /	6,70 /	-6,36 /
			0,00 1.995,82	7,68	-7,29

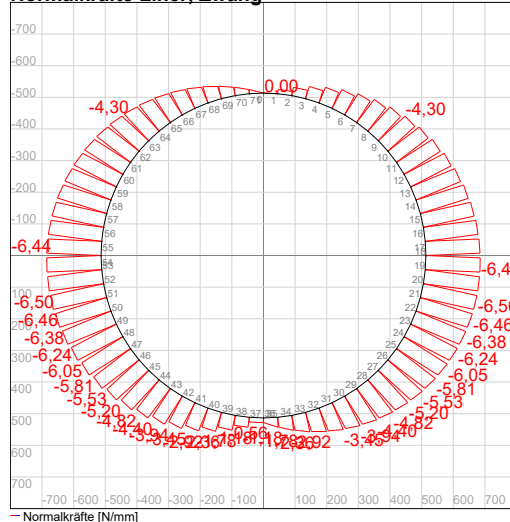
Biegelinie (x 3,64)

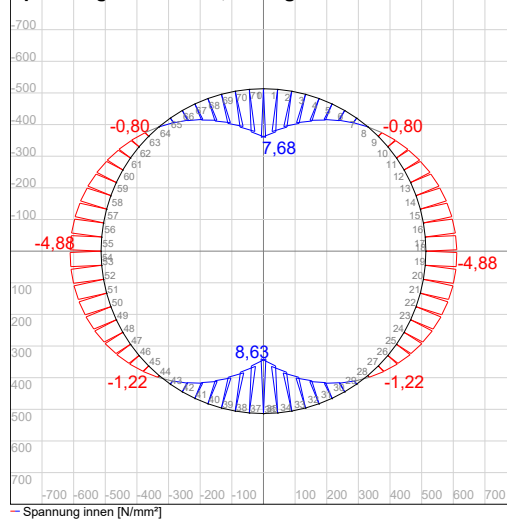
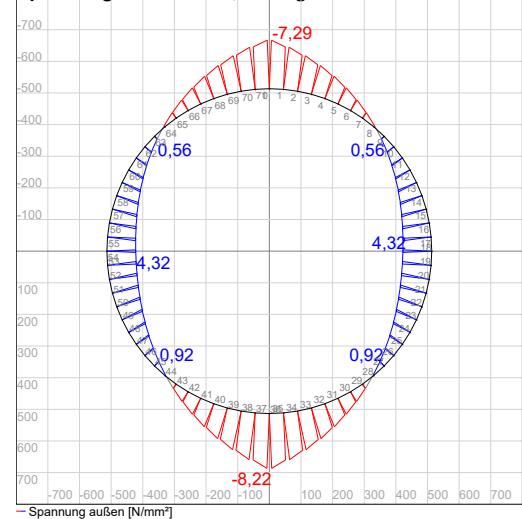


Kontaktspannungen Liner, Zwang



Normalkräfte Liner, Zwang



Spannung innen Liner, Zwang

Spannung außen Liner, Zwang


2.2.9.7 Altrohrspannungen Kämpfer

Vertikale Gesamtlast, Design:

Wanddicke Altrohr:

Außendurchmesser Altrohr Kämpfer:

Bezogene Gelenkringexzentrizität:

$q_{v,d}$	186,86	kN/m²
t_R	250,00	mm
$d_{AR,k}$	1.566,67	mm
e_G/t	35,00	%

$$b_D = \frac{8 \cdot t_R}{3} \cdot (0,50 - e_G/t) \quad (101)$$

Druckzonenbreite:

b_D	100,00	mm
-------	--------	----

$$N_{K,d} = -q_{v,d} (1 + \omega_{GR,v}) \cdot \frac{d_{AR,k}}{2}$$

Druckkraft im Kämpfer:

$N_{K,d}$	-146,37	N/mm
-----------	---------	------

$$\sigma_d = \frac{N_{K,d}}{b_D} \cdot 1,50 \quad (100)$$

Spannung in der Druckzone:

σ_d	-2,20	N/mm²
------------	-------	-------

Zul. Druckfestigkeit, Langzeit:

$f_{c,rad,L}$	5,00	N/mm²
---------------	------	-------

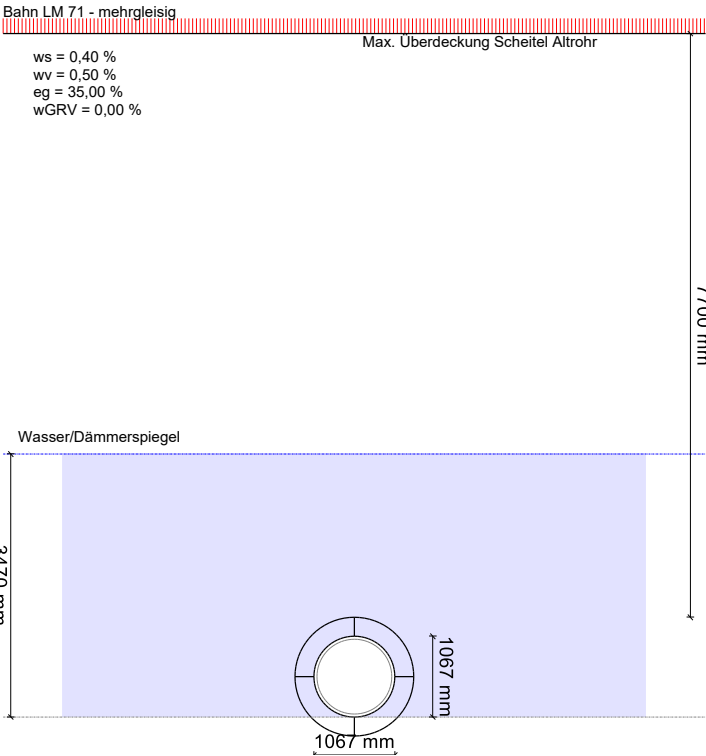
$$U_{\sigma D,AR} = \frac{-1 \cdot \sigma_d}{f_{c,rad,L}} \quad (102)$$

Ausnutzung Druckspannungen AR Kämpfer:

$U_{\sigma D,AR}$	43,9	%
-------------------	------	---

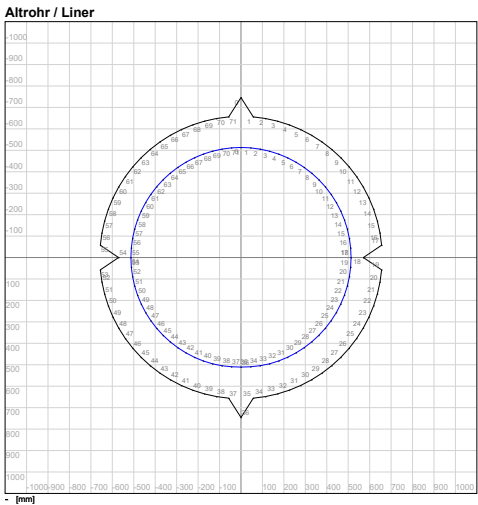
Der Spannungsnachweis für Kämpferspannungen im Altrohr ist erfüllt.

2.2.10 Lastfall 06 [Ersatzkreis] AZ III - hW 3,47 m + h 7,70 m + ws 0,4 % + wv 0,5 %, Langzeit



2.2.10.1 Geometrie diskretisiertes System

Skizze



Wanddicke Liner: t_L 40,00 mm
Wanddicke Altrohr: t_R 250,00 mm

Berechnete Punkte

Element	Altrohr X [mm]	Altrohr Y [mm]	Liner X [mm]	Liner Y [mm]	Liner r [mm]	Element	Altrohr X [mm]	Altrohr Y [mm]	Liner X [mm]	Liner Y [mm]	Liner r [mm]
0	0,0	-745,8	0,0	-513,3	513,3	18	570,8	0,0	513,3	0,0	513,3
1	57,4	-655,8	44,7	-511,4	513,3	19	655,8	57,4	511,4	44,7	513,3
2	114,3	-648,3	89,1	-505,5	513,3	20	648,3	114,3	505,5	89,1	513,3
3	170,4	-635,9	132,9	-495,8	513,3	21	635,9	170,4	495,8	132,9	513,3
4	225,2	-618,6	175,6	-482,4	513,3	22	618,6	225,2	482,4	175,6	513,3
5	278,2	-596,7	216,9	-465,2	513,3	23	596,7	278,2	465,2	216,9	513,3
6	329,2	-570,1	256,7	-444,6	513,3	24	570,1	329,2	444,6	256,7	513,3
7	377,6	-539,3	294,4	-420,5	513,3	25	539,3	377,6	420,5	294,4	513,3
8	423,2	-504,3	330,0	-393,2	513,3	26	504,3	423,2	393,2	330,0	513,3
9	465,5	-465,5	363,0	-363,0	513,3	27	465,5	465,5	363,0	363,0	513,3
10	504,3	-423,2	393,2	-330,0	513,3	28	423,2	504,3	330,0	393,2	513,3
11	539,3	-377,6	420,5	-294,4	513,3	29	377,6	539,3	294,4	420,5	513,3
12	570,1	-329,2	444,6	-256,7	513,3	30	329,2	570,1	256,7	444,6	513,3
13	596,7	-278,2	465,2	-216,9	513,3	31	278,2	596,7	216,9	465,2	513,3
14	618,6	-225,2	482,4	-175,6	513,3	32	225,2	618,6	175,6	482,4	484,7
15	635,9	-170,4	495,8	-132,9	513,3	33	170,4	635,9	132,8	495,6	439,3
16	648,3	-114,3	505,5	-89,1	513,3	34	114,3	648,3	88,9	504,4	499,4
17	655,8	-57,4	511,4	-44,7	513,3	35	57,4	655,8	44,6	509,3	589,8
18	570,8	0,0	513,3	0,0	513,3	36	0,0	745,8	0,0	510,8	671,5

Lokale Vorverformung: ω_V 0,50 %
Lokale Vorverformung absolut: w_V 2,57 mm

Gelenkringverformung: $\omega_{GR,V}$ 0,00 %
Gelenkringverformung absolut, einseitig: $w_{GR,V}$ 0,00 mm
Ringspalt: ω_S 0,40 %
Spaltweite absolut (als konst. Ringspalt): w_S 2,05 mm

Mittlerer Radius Liner: $r_{L,m}$ 513,33 mm

2.2.10.2 Erdlasten und Verkehrslasten

Wichte Boden, unter Auftrieb: γ_B' 10,00 kN/m³
Wichte Boden, trocken: γ_B 20,00 kN/m³
Max. Überdeckung Scheitel Altrohr: h_{max} 7,70 m
Wasser/Dämmerspiegel: h_w 3,47 m
Wanddicke Altrohr: t_R 250,00 mm
Vertikale Lichte Höhe Altrohr: $d_{AR,iv}$ 1.066,67 mm

$$h'_w = h_w - t_R - d_{AR,iv}$$

Höhe Wasserspiegel über Altrohrrscheitel: h'_w 2,15 m
 $p_E = \gamma_B \cdot (h_{max} - h'_w) + \gamma_B' \cdot h'_w$ (74)

Vertikale Erdlast: p_E 132,47 kN/m²

$$r_{AR,a} = t_R + \frac{d_{AR,iv}}{2}$$

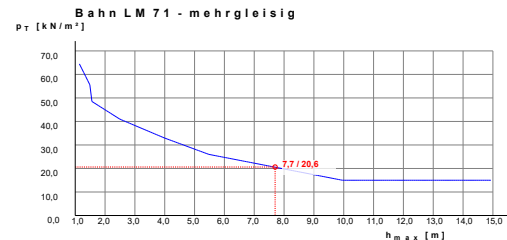
Höhe Scheitel bis Kämpfer Altrohr: $r_{AR,a}$ 783,33 mm

$$h'_{wk} = r_{AR,a}$$

Höhe Wasserspiegel Altrohrkämpfer bis Altrohrrscheitel: h'_{wk} 0,78 m

$$p_{E,K} = p_E + \gamma_B \cdot (r_{AR,a} - h'_{wk}) + \gamma_B' \cdot h'_{wk}$$

Vertikale Erdlast bis Kämpfer: $p_{E,K}$ 140,30 kN/m²



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

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

Stoßbeiwert:

$$\Phi_2 = 1,67 \quad [-]$$

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

(22)

Stoßbeiwert reduziert:

$$\text{red } \Phi_2 = 1,00 \quad [-]$$

Anpassungsfaktor α_{Qi} LM71 (DIN EN 1991-2):

$$\alpha_{Qi,LM71} = 1,00 \quad [-]$$

Einfache Bodenspannung aus Verkehr:

$$p = 20,62 \quad \text{kN/m}^2$$

$$p_T = \text{red } \Phi_2 \cdot p \cdot \alpha_{Qi,LM71}$$

A 161 (23a)

Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Scheitelhöhe:

$$p_T = 20,62 \quad \text{kN/m}^2$$

Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Kämpferhöhe (ohne φ):
Erdruckbeiwert (Einbettung):

$$p_K = 18,71 \quad \text{kN/m}^2$$

$$K_2 = 0,100 \quad [-]$$

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

A 161 (23b)

Horizontale Bodenspannung aus Verkehr:

$$p_{T,h} = 1,87 \quad \text{kN/m}^2$$

Vertikale Verkehrslast:

$$p_V = 20,62 \quad \text{kN/m}^2$$

$$p_{V,d} = p_V \cdot Y_{T,sup}$$

Vertikale Verkehrslast, Design:

$$p_{V,d} = 30,93 \quad \text{kN/m}^2$$

Zusätzliche Flächenlast:

$$p_0 = 0,0 \quad \text{kN/m}^2$$

Konzentrationsfaktor über Rohr:

$$\lambda_R = 0,75 \quad [-]$$

$$q_v = \lambda_R \cdot (p_E + p_0) + p_V$$

Vertikale Gesamtlast:

$$q_v = 119,97 \quad \text{kN/m}^2$$

$$q_{v,d} = \lambda_R \cdot (p_E + p_0) \cdot Y_{B,sup} + p_{V,d}$$

Vertikale Gesamtlast, Design:

$$q_{v,d} = 165,06 \quad \text{kN/m}^2$$

E-Modul:

$$E_2 = 8,00 \quad \text{N/mm}^2$$

$$S_{Bh} = 0,80 \cdot E_2$$

(60)

Horizontale Bettungssteifigkeit:

$$S_{Bh} = 6,400 \quad \text{N/mm}^2$$

Erdruckbeiwert (Einbettung):

$$K_2 = 0,100 \quad [-]$$

$$\lambda_B = \frac{4 - \lambda_R}{3}$$

A 127 (6.07)

Konzentrationsfaktor Boden:

$$\lambda_B = 1,083 \quad [-]$$

Höhe Wasserspiegel Altrohrkämpfer bis Altrohrscheitel:

$$h'_{wk} = 0,78 \quad \text{m}$$

$$r_{AR,a} = t_R + d_{AR,iv}/2$$

$$r_{AR,a} = t_R + \frac{d_{AR,iv}}{2}$$

Höhe Scheitel bis Kämpfer Altrohr:

 $r_{AR,a}$ 783,33 mm

$$q_{h,E} = K_2 \cdot \lambda_B \cdot p_{E,K}$$

Horizontale Erdlast:

 $q_{h,E}$ 15,20 kN/m²

Horizontale Verkehrslast:

 $q_{h,V}$ 1,87 kN/m²

$$q_h = q_{h,V} + q_{h,E}$$

Horizontale Gesamtlast:

 q_h 17,07 kN/m²

$$q_{h,d} = q_{h,V} \cdot 1,50 + q_{h,E} \cdot 1,35$$

(75)

Designwert Horizontale Gesamtlast:

 $q_{h,d}$ 23,32 kN/m²

$$K_2' = \frac{q_{h,d}}{q_{v,d}}$$

(77)

Rechnerischer Erddruckbeiwert:

 K_2' 0,141 [-]

2.2.10.3 Verformungsnachweis Liner, Gebrauchslast

$$d_v = d_{aL}$$

Relevanter Durchmesser für prozentuale Verformung: d_v 1.066,67 mm

Spaltweite absolut (als konst. Ringspalt): w_s 2,05 mm

Lokale Vorverformung absolut: w_v 2,57 mm

Gelenkringverformung absolut, einseitig: $w_{GR,v}$ 0,00 mm

Elastische Verformung absolut, vertikal: $w_{el,v}$ 5,76 mm

Zulässige Verformung elastisch absolut: $zul\ w_{el}$ 10,00 mm

Die errechnete absolute elastische Verformung ist kleiner als die von der Deutschen Bahn AG festgelegten 10 mm.

$$\delta_{v,el} = \frac{w_{el,v}}{d_v}$$

Elastische Verformung relativ: $\delta_{v,el}$ 0,54 %

Zulässige Verformung elastisch: $zul\ \delta_{v,el}$ 2,00 %

Die errechnete elastische Verformung ist kleiner als die zulässige Verformung.

$$w = w_{el,v} + w_{GR,v} \cdot 2 + w_v$$

Gesamte Durchmesseränderung: w 8,32 mm

$$\delta_v = \frac{w}{d_v}$$

Relative Gesamtverformung: δ_v 0,78 %

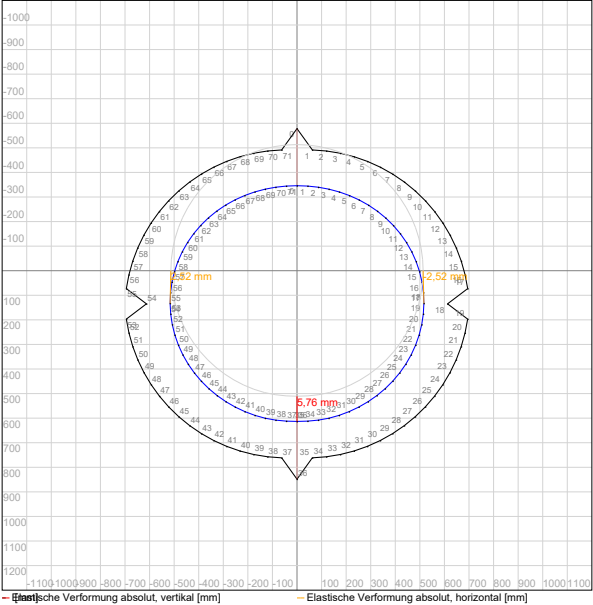
Anhaltswert Gesamtverformung: $\delta_{v,A}$ 10,00 %

Elastische Verformung absolut, horizontal: $w_{el,h,E1}$ -2,52 mm

Elastische Verformung absolut, horizontal: $w_{el,h,E2}$ 2,52 mm

Elastische Verformung absolut, horizontal: $w_{el,h}$ 5,05 mm

Gebrauchslast (x 6,6)



2.2.10.4 Bodeninteraktion (Gebrauchslast)

$$CB = \frac{E2}{\frac{da_{AR,k}}{2}} \cdot 0,80$$

Bettungsziffer, Scheitel:

CB	8.170,21	kN/m³
----	----------	-------

$$CB = \frac{E}{r_{aR}} \cdot 0,80$$

Innerer Reibungswinkel:

φ'	20,00	°
----	-------	---

$$K_p = \tan (45^\circ + \varphi'/2)^2$$

Beiwert:

K _p	2,04	[-]
p _E	132,47	kN/m²

Vertikale Erdlast:

$$q_{h,max} = 0,75 \cdot K_p \cdot \lambda_B \cdot p_E$$

(61)

Grenzwert q_h im Scheitel (informativ):

q _{h,max}	219,52	kN/m²
--------------------	--------	-------

Vertikale Erdlast bis Kämpfer:

p _{E,K}	140,30	kN/m²
------------------	--------	-------

$$q_{h,max,K} = 0,75 \cdot K_p \cdot \lambda_B \cdot p_{E,K}$$

(61)

Grenzwert q_h im Kämpfer:

q _{h,max,K}	232,50	kN/m²
----------------------	--------	-------

Der Wert wird im Kämpfer abgelesen.

Horizontale Gesamtlast:

q _h	17,07	kN/m²
----------------	-------	-------

Seitlicher Bettungsreaktionsdruck:

q _h *	52,12	kN/m²
------------------	-------	-------

$$q_h + q_{h^*} = q_{h^*} + q_h$$

Summe horizontale Kräfte:

q _h + q _h *	69,19	kN/m²
-----------------------------------	-------	-------

$$q_{h,max,K} \geq q_h + q_h^*$$

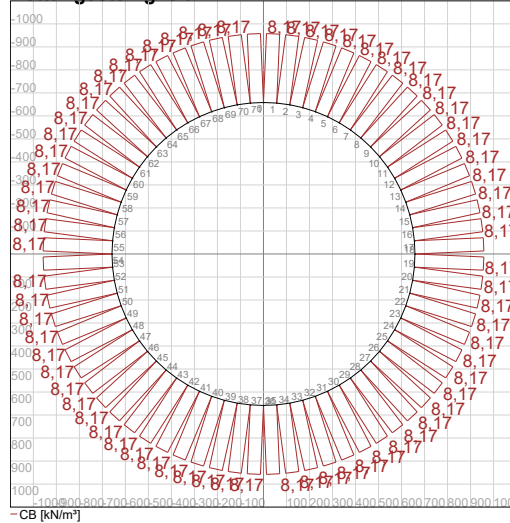
$$U_{maxqh} = \frac{q_h + q_h^*}{q_{h,max,K}}$$

Ausnutzung max qh:

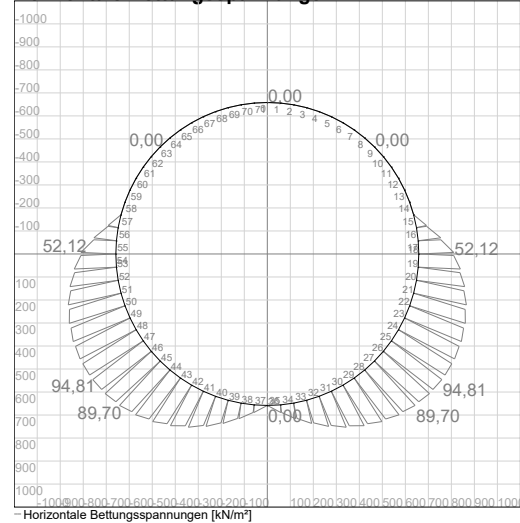
Für die Interaktion Boden-Rohrsystem wurde der elastische Ansatz verwendet. Die Bettung des Rohres wurde um den gesamten Umfang als konstant angenommen. Damit ergibt sich eine Dreiecksförmige Verteilung der Bodenspannungen, deren Maximalwert auf 75% des passiven Erddrucks begrenzt ist.

$$U_{maxqh} = 29,8 \%$$

Bettungssteifigkeit



Horizontale Bettungsspannungen



Die horizontale Kraft aus Bettungsreaktionsdruck und seitlichem Druck im Kämpfer liegt unterhalb des Grenzwertes.

2.2.10.5 Stabilitätsnachweis (Designwerte)

Der maßgebende Nachweis der Stabilität erfolgt über die im Abschnitt 7.6.4.2 (DWA-A 143-2) zugelassene (genauere) Variante einer Berechnung nach Theorie II. Ordnung unter Berücksichtigung der Vorverformungen und der Spaltbildung. Hierbei wird numerisch überprüft, ob ein elastisches Stabilitätsversagen (Beulen) unter gamma-facher Last eintritt. Darüber hinaus wird geprüft, ob die bei dieser Berechnung ermittelten Spannungen die vorgegeben maximalen Grenzspannungen für Zug und Druck mit einfacher Sicherheit nicht überschreiten.

Nachweis entfällt.

Spannungsnachweis Liner, Design

Fläche (Wanddicke): A 40,00 mm²/mm

Außen

$$W_e = \frac{t_L^2}{6}$$

Widerstandsmoment, außen: W_e 266,67 mm³/mm

$$\alpha_{ka} = 1 - \frac{t_L}{3 \cdot r_L} \quad (90)$$

Element	i	Druck	Zug	
Korrekturfaktor (Verformtes System)	α_k	71	16	[-]
Normalkraft in Element	N_d	0,97	0,97	[-]
Moment in Element	M_d	-22,44	-26,41	N/mm
		1.455,94	-687,18	Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} - \alpha_{ka} \cdot \frac{M_d}{W_e} \quad (88)$$

Spannung in Element Max σ_d -5,88 1,85 N/mm²

$$f_{c,rad,L,d} = \frac{f_{c,rad,L}}{Y_M}$$

Zul. Spannung, Langzeit, Design: $\sigma_{L,d}$ -55,56 55,56 N/mm²

Ausnutzung Spannungen U_σ 10,6 3,3 %

Der Spannungsnachweis Außen ist erfüllt.

Innen

$$W_i = \frac{t_L^2}{6}$$

Widerstandsmoment, innen: W_i 266,67 mm³/mm

$$\alpha_{ki} = 1 + \frac{t_L}{3 \cdot r_L} \quad (89)$$

Element	i	Druck	Zug	
Korrekturfaktor (Verformtes System)	α_k	15	0	[-]
Normalkraft in Element	N_d	1,03	1,03	[-]
Moment in Element	M_d	-26,42	-22,44	N/mm
		-687,18	1.455,94	Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} + \alpha_{ki} \cdot \frac{M_d}{W_i}$$
(87)

Spannung in Element	Max σ_d	-3,30	5,04	N/mm²
---------------------	----------------	-------	------	-------

$$f_{c,rad,L,d} = \frac{f_{c,rad,L}}{\gamma_M}$$

Zul. Spannung, Langzeit, Design:	$\sigma_{L,d}$	-55,56	55,56	N/mm²
----------------------------------	----------------	--------	-------	-------

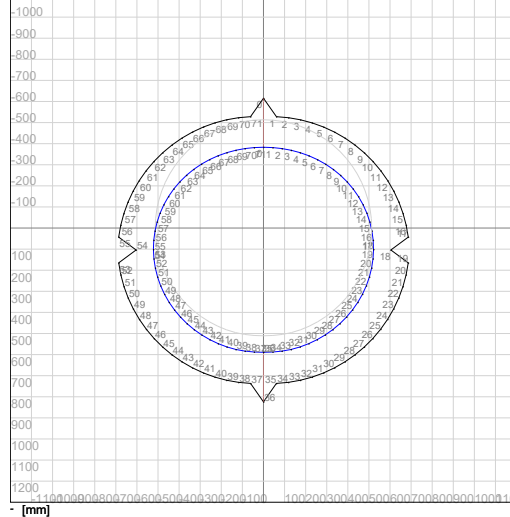
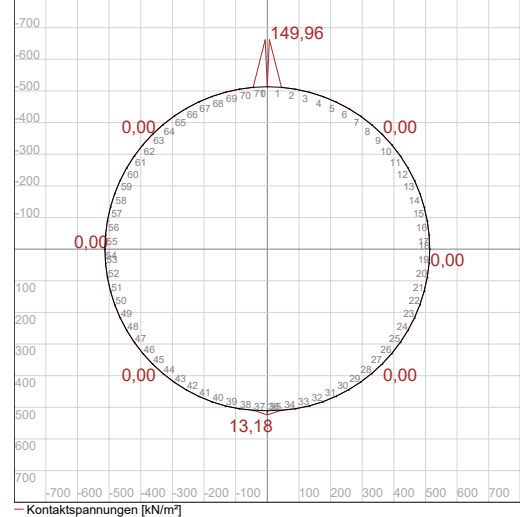
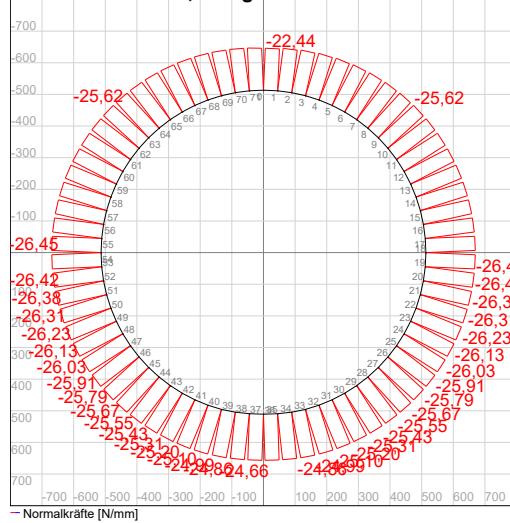
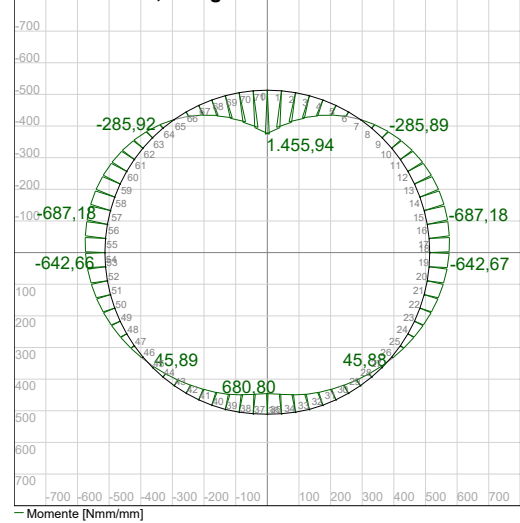
Ausnutzung Spannungen	U_σ	5,9	9,1	%
-----------------------	------------	-----	-----	---

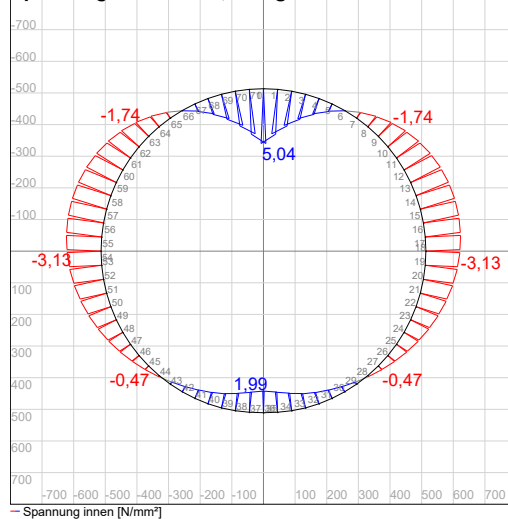
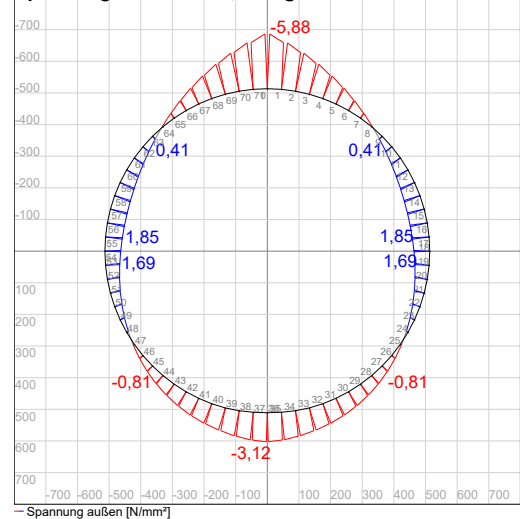
Der Spannungsnachweis Innen ist erfüllt.

Die Spannungen liegen im zulässigen Bereich.

Tabellen

Element	α ki [-]	α ka [-]	N l/r	M [Nmm/m] l/r	σ i [N/mm²] l/r	σ a [N/mm²] l/r	Element	α ki [-]	α ka [-]	N l/r	M [Nmm/m] l/r	σ i [N/mm²] l/r	σ a [N/mm²] l/r
0	1,026	0,974	-22,44 / 1.455,94 /	5,04 / -5,88 /			36	1,020	0,980	-24,66 / 680,80 /	1,99 / -3,12 /		
			-22,45 1.217,37 /	4,12 -5,01						-24,66 642,76 /	1,84 -2,98		
1	1,026	0,974	-22,90 / 1.217,37 /	4,11 / -5,02 /			37	1,023	0,977	-24,74 / 642,76 /	1,85 / -2,97 /		
			-22,90 985,55 /	3,22 -4,17						-24,74 580,67 /	1,61 -2,75		
2	1,026	0,974	-23,33 / 985,55 /	3,21 / -4,18 /			38	1,027	0,973	-24,86 / 580,67 /	1,61 / -2,74 /		
			-23,34 762,69 /	2,35 -3,37						-24,85 510,29 /	1,34 -2,48		
3	1,026	0,974	-23,74 / 762,69 /	2,34 / -3,38 /			39	1,030	0,970	-24,99 / 510,29 /	1,35 / -2,48 /		
			-23,75 550,83 /	1,53 -2,61						-24,98 446,35 /	1,10 -2,25		
4	1,026	0,974	-24,13 / 550,83 /	1,52 / -2,62 /			40	1,028	0,972	-25,10 / 446,35 /	1,09 / -2,26 /		
			-24,14 351,82 /	0,75 -1,89						-25,08 379,26 /	0,83 -2,01		
5	1,026	0,974	-24,49 / 351,82 /	0,74 / -1,90 /			41	1,026	0,974	-25,20 / 379,26 /	0,83 / -2,02 /		
			-24,50 167,34 /	0,03 -1,22						-25,18 304,35 /	0,54 -1,74		
6	1,026	0,974	-24,82 / 167,34 /	0,02 / -1,23 /			42	1,026	0,974	-25,31 / 304,35 /	0,54 / -1,74 /		
			-24,84 -1,20	-0,63 -0,62						-25,29 222,87 /	0,23 -1,45		
7	1,026	0,974	-25,12 / -1,20 /	-0,63 / -0,62 /			43	1,026	0,974	-25,43 / 222,87 /	0,22 / -1,45 /		
			-25,14 -152,59	-1,22 -0,07						-25,40 136,21 /	-0,11 -1,13		
8	1,026	0,974	-25,39 / -152,59 /	-1,22 / -0,08 /			44	1,026	0,974	-25,55 / 136,21 /	-0,11 / -1,14 /		
			-25,41 -285,89	-1,74 0,41						-25,52 45,89 /	-0,46 -0,81		
9	1,026	0,974	-25,62 / -285,89 /	-1,74 / 0,40 /			45	1,026	0,974	-25,67 / 45,89 /	-0,47 / -0,81 /		
			-25,65 -400,40	-2,18 0,82						-25,64 -46,47 /	-0,82 -0,47		
10	1,026	0,974	-25,83 / -400,40 /	-2,19 / 0,82 /			46	1,026	0,974	-25,79 / -46,47 /	-0,82 / -0,48 /		
			-25,86 -495,70	-2,55 1,16						-25,76 -139,12	-1,18 -0,14		
11	1,026	0,974	-26,00 / -495,70 /	-2,56 / 1,16 /			47	1,026	0,974	-25,91 / -139,12 /	-1,18 / -0,14 /		
			-26,04 -571,62	-2,85 1,44						-25,88 -230,27	-1,53 0,19		
12	1,026	0,974	-26,14 / -571,62 /	-2,85 / 1,43 /			48	1,026	0,974	-26,03 / -230,27 /	-1,54 / 0,19 /		
			-26,18 -628,26	-3,07 1,64						-25,99 -318,08	-1,87 0,51		
13	1,026	0,974	-26,25 / -628,26 /	-3,07 / 1,64 /			49	1,026	0,974	-26,13 / -318,08 /	-1,88 / 0,51 /		
			-26,29 -665,97	-3,22 1,78						-26,10 -400,69	-2,19 0,81		
14	1,026	0,974	-26,33 / -665,97 /	-3,22 / 1,77 /			50	1,026	0,974	-26,23 / -400,69 /	-2,20 / 0,81 /		
			-26,37 -685,33	-3,30 1,84						-26,19 -476,24	-2,49 1,08		
15	1,026	0,974	-26,38 / -685,33 /	-3,30 / 1,84 /			51	1,026	0,974	-26,31 / -476,24 /	-2,49 / 1,08 /		
			-26,42 -687,18	-3,30 1,85						-26,27 -542,90	-2,75 1,33		
16	1,026	0,974	-26,41 / -687,18 /	-3,30 / 1,85 /			52	1,026	0,974	-26,38 / -542,90 /	-2,75 / 1,32 /		
			-26,45 -672,55	-3,25 1,80						-26,33 -598,93	-2,96 1,53		
17	1,026	0,974	-26,40 / -672,55 /	-3,25 / 1,80 /			53	1,026	0,974	-26,42 / -598,93 /	-2,96 / 1,53 /		
			-26,45 -642,67	-3,13 1,69						-26,38 -642,66	-3,13 1,69		
18	1,026	0,974	-26,38 / -642,67 /	-3,13 / 1,69 /			54	1,026	0,974	-26,45 / -642,66 /	-3,13 / 1,69 /		
			-26,42 -598,95	-2,96 1,53						-26,40 -672,54	-3,25 1,80		
19	1,026	0,974	-26,33 / -598,95 /	-2,96 / 1,53 /			55	1,026	0,974	-26,45 / -672,54 /	-3,25 / 1,80 /		
			-26,38 -542,92	-2,75 1,32						-26,41 -687,18	-3,30 1,85		
20	1,026	0,974	-26,27 / -542,92 /	-2,75 / 1,33 /			56	1,026	0,974	-26,42 / -687,18 /	-3,30 / 1,85 /		
			-26,31 -476,26	-2,49 1,08						-26,38 -685,33	-3,30 1,84		
21	1,026	0,974	-26,19 / -476,26 /	-2,49 / 1,08 /			57	1,026	0,974	-26,37 / -685,33 /	-3,30 / 1,84 /		
			-26,23 -400,71	-2,20 0,81						-26,33 -665,97	-3,22 1,77		
22	1,026	0,974	-26,10 / -400,71 /	-2,19 / 0,81 /			58	1,026	0,974	-26,29 / -665,97 /	-3,22 / 1,78 /		
			-26,13 -318,10	-1,88 0,51						-26,25 -628,28	-3,07 1,64		
23	1,026	0,974	-25,99 / -318,10 /	-1,87 / 0,51 /			59	1,026	0,974	-26,18 / -628,28 /	-3,07 / 1,64 /		
			-26,03 -230,29	-1,54 0,19						-26,14 -571,64	-2,85 1,43		
24	1,026	0,974	-25,88 / -230,29 /	-1,53 / 0,19 /			60	1,026	0,974	-26,04 / -571,64 /	-2,85 / 1,44 /		
			-25,91 -139,14	-1,18 -0,14						-26,00 -495,73	-2,56 1,16		
25	1,026	0,974	-25,76 / -139,14 /	-1,18 / -0,14 /			61	1,026	0,974	-25,86 / -495,73 /	-2,55 / 1,16 /		
			-25,79 -46,48	-0,82 -0,48						-25,83 -400,43	-2,19 0,82		
26	1,026	0,974	-25,64 / -46,48 /	-0,82 / -0,47 /			62	1,026	0,974	-25,65 / -400,43 /	-2,18 / 0,82 /		
			-25,67 45,88	-0,47 -0,81						-25,62 -285,92	-1,74 0,40		
27	1,026	0,974	-25,52 / 45,88 /	-0,46 / -0,81 /			63	1,026	0,974	-25,41 / -285,92 /	-1,74 / 0,41 /		
			-25,55 136,20	-0,11 -1,14						-25,39 -152,62	-1,22 -0,08		
28	1,026	0,974	-25,40 / 136,20 /	-0,11 / -1,13 /			64	1,026	0,974	-25,14 / -152,62 /	-1,22 / -0,07 /		
			-25,43 222,87	0,22 -1,45						-25,12 -1,23	-0,63 -0,62		
29	1,026	0,974	-25,29 / 222,87 /	0,23 / -1,45 /			65	1,026	0,974	-24,84 / -1,23 /	-0,63 / -0,62 /		
			-25,31 304,35	0,54 -1,74						-24,82 167,31	0,02 -1,23		
30	1,026	0,974	-25,18 / 304,35 /	0,54 / -1,74 /			66	1,026	0,974	-24,50 / 167,31 /	0,03 / -1,22 /		
			-25,20 379,26	0,83 -2,02						-24,49 351,80	0,74 -1,90		
31	1,026	0,974	-25,08 / 379,26 /	0,83 / -2,01 /			67	1,026	0,974	-24,14 / 351,80 /	0,75 / -1,89 /		
			-25,10 446,35	1,09 -2,26						-24,13 550,81	1,52 -2,62		
32	1,028	0,972	-24,98 / 446,35 /	1,10 / -2,25 /			68	1,026	0,974	-23,75 / 550,81 /	1,53 / -2,61 /		
			-24,99 510,30	1,34 -2,49						-23,74 762,67	2,34 -3,38		
33	1,030	0,970	-24,85 / 510,30 /	1,35 / -2,48 /			69	1,026	0,974	-23,34 / 762,67 /	2,35 / -3,37 /		
			-24,86 580,67	1,62 -2,73						-23,33 985,54	3,21 -4,18		
34	1,027	0,973	-24,74 / 580,67 /	1,62 / -2,74 /			70	1,026	0,974	-22,90 / 985,54 /	3,22 / -4,17 /		
			-24,74 642,76	1,86 -2,96						-22,90 1.217,37 /	4,11 -5,02		
35	1,023	0,977	-24,66 / 642,76 /	1,85 / -2,97 /			71	1,026	0,974	-22,45 / 1.217,37 /	4,12 / -5,01 /		
			-24,66 680,80	1,99 -3,11						-22,44 1.455,94	5,04 -5,88		

Biegelinie (x 3,69)

Kontaktspannungen Liner, Design

Normalkräfte Liner, Design

Momente Liner, Design


Spannung innen Liner, Design

Spannung außen Liner, Design


2.2.10.6 Spannungsnachweis Liner, Zwang

Fläche (Wanddicke):

A 40,00 mm²/mm

Außen

$$W_e = \frac{t_L^2}{6}$$

Widerstandsmoment, außen:

 W_e 266,67 mm³/mm

$$\alpha_{ka} = 1 - \frac{t_L}{3 \cdot r_L}$$

(90)

 Element
 Korrekturfaktor (Verformtes System)
 Normalkraft in Element
 Moment in Element

	Druck	Zug	
i	0	16	[-]
α _k	0,97	0,97	[-]
N _d	-22,48	-27,31	N/mm
M _d	1.747,49	-846,62	Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} - \alpha_{ka} \cdot \frac{M_d}{W_e}$$

(88)

Spannung in Element

 Max σ_d -6,94 2,41 N/mm²

$$f_{c,rad,L,d} = \frac{f_{c,rad,L}}{\gamma_M}$$

Zul. Spannung, Langzeit, Design:

 σ_{L,d} -55,56 55,56 N/mm²

Ausnutzung Spannungen

 U_σ 12,5 4,3 %

Der Spannungsnachweis Außen ist erfüllt.

Innen

$$W_i = \frac{t_L^2}{6}$$

Widerstandsmoment, innen:

 W_i 266,67 mm³/mm

$$\alpha_{ki} = 1 + \frac{t_L}{3 \cdot r_L}$$

(89)

Element
Korrekturfaktor (Verformtes System)
Normalkraft in Element
Moment in Element

	Druck	Zug	
i	15	71	[-]
α_k	1,03	1,03	[-]
N_d	-27,32	-22,48	N/mm
M_d	-846,62	1.747,49	Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} + \alpha_{ki} \cdot \frac{M_d}{W_i}$$

(87)

Spannung in Element

	Druck	Zug	
Max σ_d	-3,94	6,16	N/mm ²

$$f_{c,rad,L,d} = \frac{f_{c,rad,L}}{\gamma_M}$$

Zul. Spannung, Langzeit, Design:

	Druck	Zug	
$\sigma_{L,d}$	-55,56	55,56	N/mm ²

Ausnutzung Spannungen

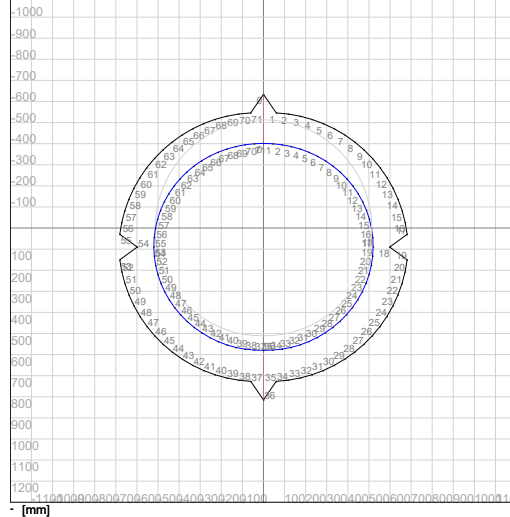
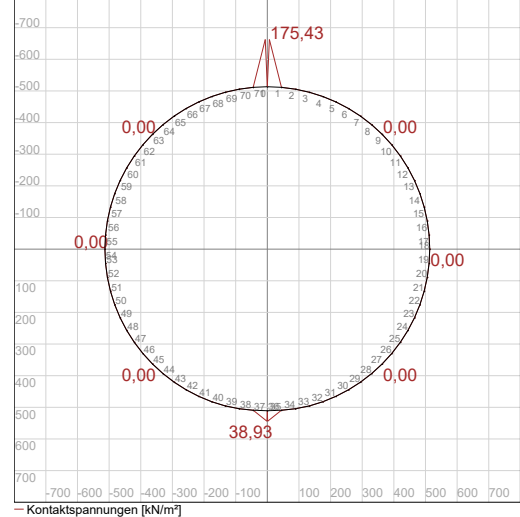
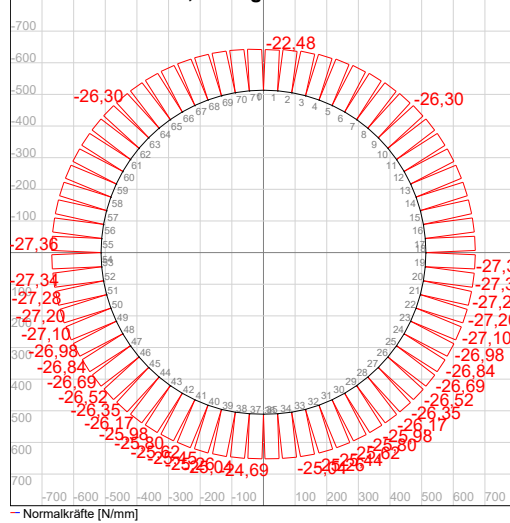
	Druck	Zug	
U_σ	7,1	11,1	%

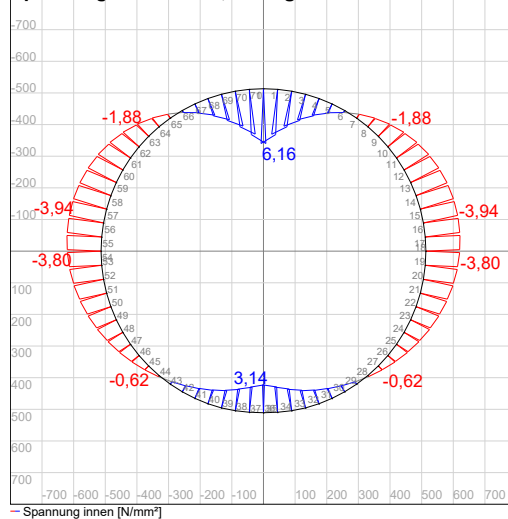
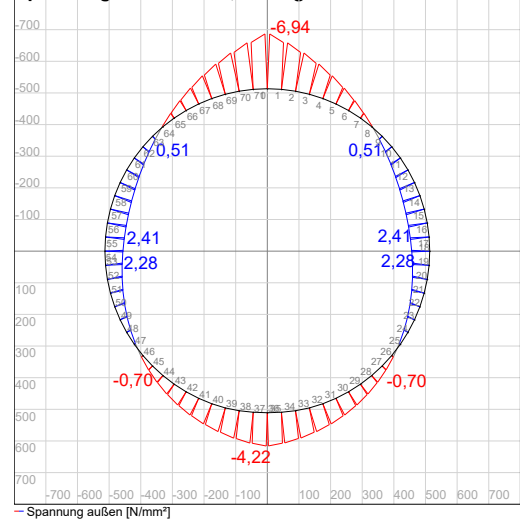
Der Spannungsnachweis Innen ist erfüllt.

Die Spannungen liegen im zulässigen Bereich.

Tabellen

Element	α ki [-]	α ka [-]	N l/r	M [Nmm/m] l/r	σ i [N/mm²] l/r	σ a [N/mm²] l/r	Element	α ki [-]	α ka [-]	N l/r	M [Nmm/m] l/r	σ i [N/mm²] l/r	σ a [N/mm²] l/r
0	1,026	0,974	-22,48 / 1.747,49 /	6,16 / -6,94 /	5,09 / -5,93		36	1,020	0,980	-24,69 / 979,05 /	3,13 / -4,22 /		
			-22,49 1.468,25 /	5,07 / -5,94 /						-24,69 900,20 /	2,83 / -3,93		
1	1,026	0,974	-23,02 / 1.196,50 /	4,03 / -4,95			37	1,023	0,977	-24,84 / 900,20 /	2,83 / -3,92 /		
			-23,02 1.196,50 /	4,03 / -4,95						-24,84 797,35 /	2,44 / -3,54		
2	1,026	0,974	-23,53 / 1.196,50 /	4,02 / -4,96 /			38	1,027	0,973	-25,04 / 797,35 /	2,44 / -3,54 /		
			-23,54 934,63 /	3,01 / -4,00						-25,03 686,65 /	2,02 / -3,13		
3	1,026	0,974	-24,01 / 934,63 /	3,00 / -4,01 /			39	1,030	0,970	-25,26 / 686,65 /	2,02 / -3,13 /		
			-24,03 684,90 /	2,03 / -3,10						-25,25 583,34 /	1,62 / -2,75		
4	1,026	0,974	-24,48 / 684,90 /	2,02 / -3,11 /			40	1,028	0,972	-25,45 / 583,34 /	1,61 / -2,76 /		
			-24,49 449,37 /	1,12 / -2,25						-25,43 478,17 /	1,21 / -2,38		
5	1,026	0,974	-24,91 / 449,37 /	1,11 / -2,26 /			41	1,026	0,974	-25,62 / 478,17 /	1,20 / -2,39 /		
			-24,93 229,91 /	0,26 / -1,46						-25,60 366,75 /	0,77 / -1,98		
6	1,026	0,974	-25,31 / 229,91 /	0,25 / -1,47 /			42	1,026	0,974	-25,80 / 366,75 /	0,77 / -1,98 /		
			-25,33 28,15 /	-0,52 / -0,74						-25,78 250,61 /	0,32 / -1,56		
7	1,026	0,974	-25,67 / 28,15 /	-0,53 / -0,74 /			43	1,026	0,974	-25,98 / 250,61 /	0,31 / -1,56 /		
			-25,70 -154,52 /	-1,24 / -0,08						-25,96 131,44 /	-0,14 / -1,13		
8	1,026	0,974	-26,00 / -154,52 /	-1,24 / -0,09 /			44	1,026	0,974	-26,17 / 131,44 /	-0,15 / -1,13 /		
			-26,03 -316,93 /	-1,87 / 0,51						-26,14 11,01 /	-0,61 / -0,69		
9	1,026	0,974	-26,30 / -316,93 /	-1,88 / 0,50 /			45	1,026	0,974	-26,35 / 11,01 /	-0,62 / -0,70 /		
			-26,33 -458,21 /	-2,42 / 1,02						-26,31 -108,81 /	-1,08 / -0,26		
10	1,026	0,974	-26,55 / -458,21 /	-2,43 / 1,01 /			46	1,026	0,974	-26,52 / -108,81 /	-1,08 / -0,27 /		
			-26,59 -577,74 /	-2,89 / 1,45						-26,49 -226,07 /	-1,53 / 0,16		
11	1,026	0,974	-26,77 / -577,74 /	-2,89 / 1,44 /			47	1,026	0,974	-26,69 / -226,07 /	-1,54 / 0,16 /		
			-26,81 -675,18 /	-3,27 / 1,80						-26,65 -338,79 /	-1,97 / 0,57		
12	1,026	0,974	-26,95 / -675,18 /	-3,27 / 1,79 /			48	1,026	0,974	-26,84 / -338,79 /	-1,97 / 0,57 /		
			-26,99 -750,47 /	-3,56 / 2,07						-26,80 -444,98 /	-2,38 / 0,96		
13	1,026	0,974	-27,10 / -750,47 /	-3,56 / 2,06 /			49	1,026	0,974	-26,98 / -444,98 /	-2,39 / 0,95 /		
			-27,14 -803,79 /	-3,77 / 2,26						-26,94 -542,65 /	-2,76 / 1,31		
14	1,026	0,974	-27,20 / -803,79 /	-3,77 / 2,26 /			50	1,026	0,974	-27,10 / -542,65 /	-2,77 / 1,30 /		
			-27,24 -835,60 /	-3,90 / 2,37						-27,06 -629,85 /	-3,10 / 1,62		
15	1,026	0,974	-27,28 / -835,60 /	-3,90 / 2,37 /			51	1,026	0,974	-27,20 / -629,85 /	-3,10 / 1,62 /		
			-27,32 -846,62 /	-3,94 / 2,41						-27,16 -704,68 /	-3,39 / 1,89		
16	1,026	0,974	-27,31 / -846,62 /	-3,94 / 2,41 /			52	1,026	0,974	-27,28 / -704,68 /	-3,39 / 1,89 /		
			-27,35 -837,79 /	-3,91 / 2,38						-27,24 -765,37 /	-3,63 / 2,11		
17	1,026	0,974	-27,32 / -837,79 /	-3,91 / 2,38 /			53	1,026	0,974	-27,34 / -765,37 /	-3,63 / 2,11 /		
			-27,36 -810,26 /	-3,80 / 2,28						-27,29 -810,24 /	-3,80 / 2,28		
18	1,026	0,974	-27,29 / -810,26 /	-3,80 / 2,28 /			54	1,026	0,974	-27,36 / -810,24 /	-3,80 / 2,28 /		
			-27,34 -765,38 /	-3,63 / 2,11						-27,32 -837,77 /	-3,91 / 2,38		
19	1,026	0,974	-27,24 / -765,38 /	-3,63 / 2,11 /			55	1,026	0,974	-27,35 / -837,77 /	-3,91 / 2,38 /		
			-27,28 -704,68 /	-3,39 / 1,89						-27,31 -846,60 /	-3,94 / 2,41		
20	1,026	0,974	-27,16 / -704,68 /	-3,39 / 1,89 /			56	1,026	0,974	-27,32 / -846,60 /	-3,94 / 2,41 /		
			-27,20 -629,83 /	-3,10 / 1,62						-27,28 -835,57 /	-3,90 / 2,37		
21	1,026	0,974	-27,06 / -629,83 /	-3,10 / 1,62 /			57	1,026	0,974	-27,24 / -835,57 /	-3,90 / 2,37 /		
			-27,10 -542,63 /	-2,77 / 1,30						-27,20 -803,75 /	-3,77 / 2,26		
22	1,026	0,974	-26,94 / -542,63 /	-2,76 / 1,31 /			58	1,026	0,974	-27,14 / -803,75 /	-3,77 / 2,26 /		
			-26,98 -444,96 /	-2,39 / 0,95						-27,10 -750,43 /	-3,56 / 2,06		
23	1,026	0,974	-26,80 / -444,96 /	-2,38 / 0,96 /			59	1,026	0,974	-26,99 / -750,43 /	-3,56 / 2,07 /		
			-26,84 -338,76 /	-1,97 / 0,57						-26,95 -675,15 /	-3,27 / 1,79		
24	1,026	0,974	-26,65 / -338,76 /	-1,97 / 0,57 /			60	1,026	0,974	-26,81 / -675,15 /	-3,27 / 1,80 /		
			-26,69 -226,03 /	-1,54 / 0,16						-26,77 -577,71 /	-2,89 / 1,44		
25	1,026	0,974	-26,49 / -226,03 /	-1,53 / 0,16 /			61	1,026	0,974	-26,59 / -577,71 /	-2,89 / 1,45 /		
			-26,52 -108,77 /	-1,08 / -0,27						-26,55 -458,18 /	-2,43 / 1,01		
26	1,026	0,974	-26,31 / -108,77 /	-1,08 / -0,26 /			62	1,026	0,974	-26,33 / -458,18 /	-2,42 / 1,02 /		
			-26,35 11,05 /	-0,62 / -0,70						-26,30 -316,90 /	-1,88 / 0,50		
27	1,026	0,974	-26,14 / 11,05 /	-0,61 / -0,69 /			63	1,026	0,974	-26,03 / -316,90 /	-1,87 / 0,51 /		
			-26,17 131,48 /	-0,15 / -1,13						-26,00 -154,50 /	-1,24 / -0,09		
28	1,026	0,974	-25,96 / 131,48 /	-0,14 / -1,13 /			64	1,026	0,974	-25,70 / -154,50 /	-1,24 / -0,08 /		
			-25,98 250,65 /	0,31 / -1,57						-25,67 28,16 /	-0,53 / -0,74		
29	1,026	0,974	-25,78 / 250,65 /	0,32 / -1,56 /			65	1,026	0,974	-25,33 / 28,16 /	-0,52 / -0,74 /		
			-25,80 366,79 /	0,77 / -1,98						-25,31 229,92 /	0,25 / -1,47		
30	1,026	0,974	-25,60 / 366,79 /	0,77 / -1,98 /			66	1,026	0,974	-24,93 / 229,92 /	0,26 / -1,46 /		
			-25,62 478,21 /	1,20 / -2,39						-24,91 449,37 /	1,11 / -2,26		
31	1,026	0,974	-25,43 / 478,21 /	1,20 / -2,38 /			67	1,026	0,974	-24,49 / 449,37 /	1,12 / -2,25 /		
			-25,44 583,37 /	1,61 / -2,77						-24,48 684,90 /	2,02 / -3,11		
32	1,028	0,972	-25,25 / 583,37 /	1,62 / -2,76 /			68	1,026	0,974	-24,03 / 684,90 /	2,03 / -3,10 /		
			-25,26 686,67 /	2,01 / -3,14						-24,01 934,62 /	3,00 / -4,01		
33	1,030	0,970	-25,03 / 686,67 /	2,03 / -3,12 /			69	1,026	0,974	-23,54 / 934,62 /	3,01 / -4,00 /		
			-25,04 797,37 /	2,45 / -3,53						-23,53 1.196,49 /	4,02 / -4,96		
34	1,027	0,973	-24,84 / 797,37 /	2,45 / -3,53 /			70	1,026	0,974	-23,02 / 1.196,49 /	4,03 / -4,95 /		
			-24,84 900,20 /	2,84 / -3,91						-23,02 1.468,25 /	5,07 / -5,94		
35	1,023	0,977	-24,69 / 900,20 /	2,83 / -3,92 /			71	1,026	0,974	-22,49 / 1.468,25 /	5,09 / -5,93 /		
			-24,69 979,05 /	3,14 / -4,21						-22,48 1.747,49 /	6,16 / -6,94		

Biegelinie (x 3,21)

Kontaktspannungen Liner, Zwang

Normalkräfte Liner, Zwang


Spannung innen Liner, Zwang

Spannung außen Liner, Zwang


2.2.10.7 Altrohrspannungen Kämpfer

Vertikale Gesamtlast, Design:

Wanddicke Altrohr:

Außendurchmesser Altrohr Kämpfer:

Bezogene Gelenkringexzentrizität:

$q_{v,d}$	165,06	kN/m²
t_R	250,00	mm
$da_{AR,k}$	1.566,67	mm
e_G/t	35,00	%

$$b_D = \frac{8 \cdot t_R}{3} \cdot (0,50 - e_G/t) \quad (101)$$

Druckzonenbreite:

b_D	100,00	mm
-------	--------	----

$$N_{K,d} = -q_{v,d} (1 + \omega_{GR,v}) \cdot \frac{da_{AR,k}}{2}$$

Druckkraft im Kämpfer:

$N_{K,d}$	-129,29	N/mm
-----------	---------	------

$$\sigma_d = \frac{N_{K,d}}{b_D} \cdot 1,50 \quad (100)$$

Spannung in der Druckzone:

σ_d	-1,94	N/mm²
------------	-------	-------

Zul. Druckfestigkeit, Langzeit:

$f_{c,rad,L}$	5,00	N/mm²
---------------	------	-------

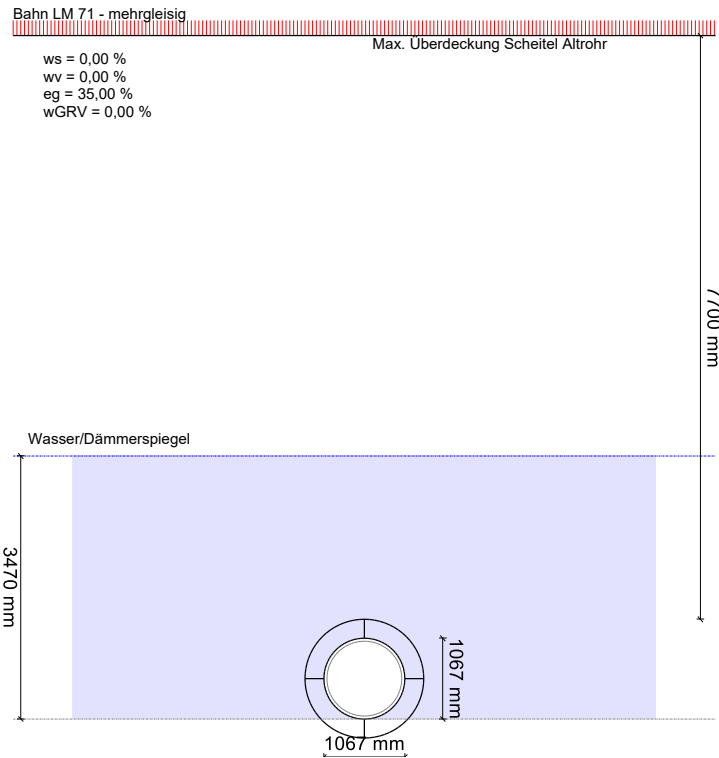
$$U_{\sigma D,AR} = \frac{-1 \cdot \sigma_d}{f_{c,rad,L}} \quad (102)$$

Ausnutzung Druckspannungen AR Kämpfer:

$U_{\sigma D,AR}$	38,8	%
-------------------	------	---

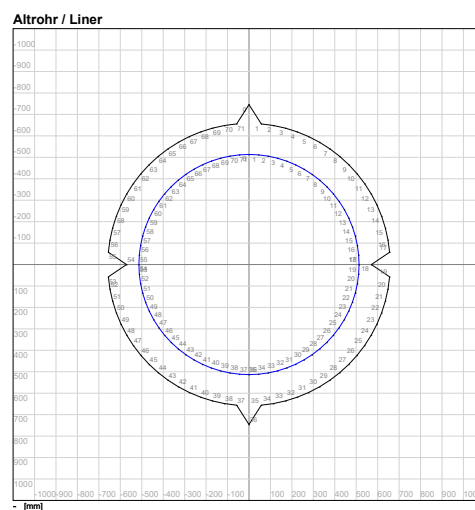
Der Spannungsnachweis für Kämpferspannungen im Altrohr ist erfüllt.

2.2.11 Lastfall 07 [Ersatzkreis] AZ III - hW 3,47 m + h 7,70 m + ws 0,0 % + wv 0,0 %, Langzeit



2.2.11.1 Geometrie diskretisiertes System

Skizze



Wanddicke Liner: t_L 40,00 mm
 Wanddicke Altrohr: t_R 250,00 mm

Berechnete Punkte

Element	Altrohr X [mm]	Altrohr Y [mm]	Liner X [mm]	Liner Y [mm]	Liner r [mm]	Element	Altrohr X [mm]	Altrohr Y [mm]	Liner X [mm]	Liner Y [mm]	Liner r [mm]
0	0,0	-745,8	0,0	-513,3	513,3	18	570,8	0,0	513,3	0,0	513,3
1	57,4	-655,8	44,7	-511,4	513,3	19	655,8	57,4	511,4	44,7	513,3
2	114,3	-648,3	89,1	-505,5	513,3	20	648,3	114,3	505,5	89,1	513,3
3	170,4	-635,9	132,9	-495,8	513,3	21	635,9	170,4	495,8	132,9	513,3
4	225,2	-618,6	175,6	-482,4	513,3	22	618,6	225,2	482,4	175,6	513,3
5	278,2	-596,7	216,9	-465,2	513,3	23	596,7	278,2	465,2	216,9	513,3
6	329,2	-570,1	256,7	-444,6	513,3	24	570,1	329,2	444,6	256,7	513,3
7	377,6	-539,3	294,4	-420,5	513,3	25	539,3	377,6	420,5	294,4	513,3
8	423,2	-504,3	330,0	-393,2	513,3	26	504,3	423,2	393,2	330,0	513,3
9	465,5	-465,5	363,0	-363,0	513,3	27	465,5	465,5	363,0	363,0	513,3
10	504,3	-423,2	393,2	-330,0	513,3	28	423,2	504,3	330,0	393,2	513,3
11	539,3	-377,6	420,5	-294,4	513,3	29	377,6	539,3	294,4	420,5	513,3
12	570,1	-329,2	444,6	-256,7	513,3	30	329,2	570,1	256,7	444,6	513,3
13	596,7	-278,2	465,2	-216,9	513,3	31	278,2	596,7	216,9	465,2	513,3
14	618,6	-225,2	482,4	-175,6	513,3	32	225,2	618,6	175,6	482,4	513,3
15	635,9	-170,4	495,8	-132,9	513,3	33	170,4	635,9	132,9	495,8	513,3
16	648,3	-114,3	505,5	-89,1	513,3	34	114,3	648,3	89,1	505,5	513,3
17	655,8	-57,4	511,4	-44,7	513,3	35	57,4	655,8	44,7	511,4	513,3
18	570,8	0,0	513,3	0,0	513,3	36	0,0	745,8	0,0	513,3	513,3

Lokale Vorverformung: ω_V 0,00 %
 Lokale Vorverformung absolut: w_V 0,00 mm

Gelenkringverformung: $\omega_{GR,V}$ 0,00 %
 Gelenkringverformung absolut, einseitig: $w_{GR,V}$ 0,00 mm
 Ringspalt: ω_S 0,00 %
 Spaltweite absolut (als konst. Ringspalt): w_S 0,00 mm

Mittlerer Radius Liner: $r_{L,m}$ 513,33 mm

2.2.11.2 Erdlasten und Verkehrslasten

Wichte Boden, unter Auftrieb: γ_B' 10,00 kN/m³
 Wichte Boden, trocken: γ_B 20,00 kN/m³
 Max. Überdeckung Scheitel Altrohr: h_{max} 7,70 m
 Wasser/Dämmerspiegel: h_w 3,47 m
 Wanddicke Altrohr: t_R 250,00 mm
 Vertikale Lichte Höhe Altrohr: $d_{AR,iv}$ 1.066,67 mm

$$h'_w = h_w - t_R - d_{AR,iv}$$

Höhe Wasserspiegel über Altrohrrscheitel: h'_w 2,15 m

$$p_E = \gamma_B \cdot (h_{max} - h'_w) + \gamma_B' \cdot h'_w \quad (74)$$

Vertikale Erdlast: p_E 132,47 kN/m²

$$r_{AR,a} = t_R + \frac{d_{AR,iv}}{2}$$

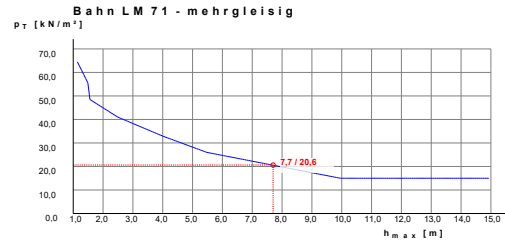
Höhe Scheitel bis Kämpfer Altrohr: $r_{AR,a}$ 783,33 mm

$$h'_{wk} = r_{AR,a}$$

Höhe Wasserspiegel Altrohrkämpfer bis Altrohrrscheitel: h'_{wk} 0,78 m

$$p_{E,K} = p_E + \gamma_B \cdot (r_{AR,a} - h'_{wk}) + \gamma_B' \cdot h'_{wk}$$

Vertikale Erdlast bis Kämpfer: $p_{E,K}$ 140,30 kN/m²



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

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

Stoßbeiwert:

$$\Phi_2 = 1,67 \quad [-]$$

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

(22)

Stoßbeiwert reduziert:

$$\text{red } \Phi_2 = 1,00 \quad [-]$$

Anpassungsfaktor α_{Qi} LM71 (DIN EN 1991-2):

$$\alpha_{Qi,LM71} = 1,00 \quad [-]$$

Einfache Bodenspannung aus Verkehr:

$$p = 20,62 \quad \text{kN/m}^2$$

$$p_T = \text{red } \Phi_2 \cdot p \cdot \alpha_{Qi,LM71}$$

A 161 (23a)

Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Scheitelhöhe:

$$p_T = 20,62 \quad \text{kN/m}^2$$

Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Kämpferhöhe (ohne φ):
Erdruckbeiwert (Einbettung):

$$p_K = 18,71 \quad \text{kN/m}^2$$

$$K_2 = 0,100 \quad [-]$$

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

A 161 (23b)

Horizontale Bodenspannung aus Verkehr:

$$p_{T,h} = 1,87 \quad \text{kN/m}^2$$

Vertikale Verkehrslast:

$$p_V = 20,62 \quad \text{kN/m}^2$$

$$p_{V,d} = p_V \cdot Y_{T,sup}$$

Vertikale Verkehrslast, Design:

$$p_{V,d} = 30,93 \quad \text{kN/m}^2$$

Zusätzliche Flächenlast:

$$p_0 = 0,0 \quad \text{kN/m}^2$$

Konzentrationsfaktor über Rohr:

$$\lambda_R = 0,75 \quad [-]$$

$$q_v = \lambda_R \cdot (p_E + p_0) + p_V$$

Vertikale Gesamtlast:

$$q_v = 119,97 \quad \text{kN/m}^2$$

$$q_{v,d} = \lambda_R \cdot (p_E + p_0) \cdot Y_{B,sup} + p_{V,d}$$

Vertikale Gesamtlast, Design:

$$q_{v,d} = 165,06 \quad \text{kN/m}^2$$

E-Modul:

$$E_2 = 8,00 \quad \text{N/mm}^2$$

$$S_{Bh} = 0,80 \cdot E_2$$

(60)

Horizontale Bettungssteifigkeit:

$$S_{Bh} = 6,400 \quad \text{N/mm}^2$$

Erdruckbeiwert (Einbettung):

$$K_2 = 0,100 \quad [-]$$

$$\lambda_B = \frac{4 - \lambda_R}{3}$$

A 127 (6.07)

Konzentrationsfaktor Boden:

$$\lambda_B = 1,083 \quad [-]$$

Höhe Wasserspiegel Altrohrkämpfer bis Altrohrscheitel:

$$h'_{wk} = 0,78 \quad \text{m}$$

$$r_{AR,a} = t_R + d_{AR,iv}/2$$

$$r_{AR,a} = t_R + \frac{d_{AR,iv}}{2}$$

Höhe Scheitel bis Kämpfer Altrohr:

 $r_{AR,a}$ 783,33 mm

$$q_{h,E} = K_2 \cdot \lambda_B \cdot p_{E,K}$$

Horizontale Erdlast:

 $q_{h,E}$ 15,20 kN/m²

Horizontale Verkehrslast:

 $q_{h,V}$ 1,87 kN/m²

$$q_h = q_{h,V} + q_{h,E}$$

Horizontale Gesamtlast:

 q_h 17,07 kN/m²

$$q_{h,d} = q_{h,V} \cdot 1,50 + q_{h,E} \cdot 1,35$$

(75)

Designwert Horizontale Gesamtlast:

 $q_{h,d}$ 23,32 kN/m²

$$K_2' = \frac{q_{h,d}}{q_{v,d}}$$

(77)

Rechnerischer Erddruckbeiwert:

 K_2' 0,141 [-]

2.2.11.3 Verformungsnachweis Liner, Gebrauchslast

$$d_v = d_{aL}$$

Relevanter Durchmesser für prozentuale Verformung:	d_v	1.066,67	mm
Spaltweite absolut (als konst. Ringspalt):	w_s	0,00	mm
Lokale Vorverformung absolut:	w_v	0,00	mm
Gelenkringverformung absolut, einseitig:	$w_{GR,v}$	0,00	mm
Elastische Verformung absolut, vertikal:	$w_{el,v,E1}$	-8,89	mm
Elastische Verformung absolut, vertikal:	$w_{el,v}$	8,89	mm
Zulässige Verformung elastisch absolut:	$zul\ w_{el}$	10,00	mm

Die errechnete absolute elastische Verformung ist kleiner als die von der Deutschen Bahn AG festgelegten 10 mm.

$$\delta_{v,el} = \frac{w_{el,v}}{d_v}$$

Elastische Verformung relativ:	$\delta_{v,el}$	0,83	%
Zulässige Verformung elastisch:	$zul\ \delta_{v,el}$	2,00	%

Die errechnete elastische Verformung ist kleiner als die zulässige Verformung.

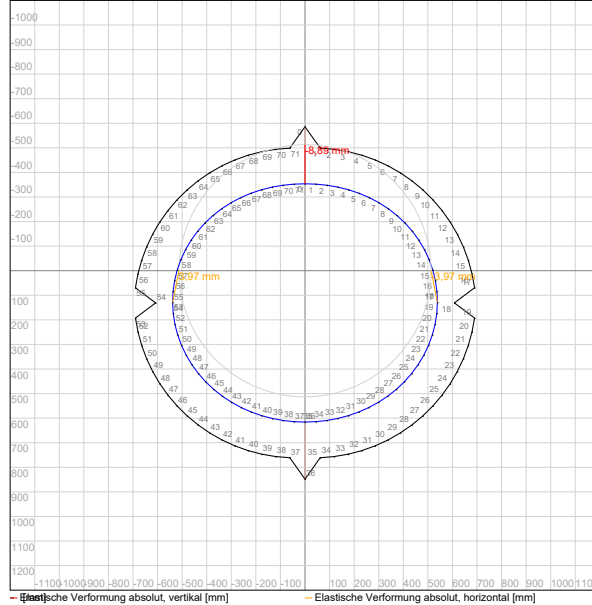
$$w = w_{el,v} + w_{GR,v} \cdot 2 + w_v$$

Gesamte Durchmesseränderung:	w	8,89	mm
------------------------------	-----	------	----

$$\delta_v = \frac{w}{d_v}$$

Relative Gesamtverformung:	δ_v	0,83	%
Anhaltswert Gesamtverformung:	$\delta_{v,A}$	10,00	%

Elastische Verformung absolut, horizontal:	$w_{el,h,E1}$	-3,97	mm
Elastische Verformung absolut, horizontal:	$w_{el,h,E2}$	3,97	mm
Elastische Verformung absolut, horizontal:	$w_{el,h}$	7,95	mm

Gebrauchslast (x 6,4)


2.2.11.4 Bodeninteraktion (Gebrauchslast)

$$CB = \frac{E_2}{da_{AR,k}} \cdot 0,80$$

Bettungsziffer, Scheitel:

CB 8.170,21 kN/m³

$$CB = \frac{E}{r_{aR}} \cdot 0,80$$

Innerer Reibungswinkel:

φ' 20,00 °

$$K_p = \tan (45^\circ + \varphi'/2)^2$$

(62)

Beiwert:

K_p 2,04 [-]
 p_E 132,47 kN/m²

Vertikale Erdlast:

$$q_{h,max} = 0,75 \cdot K_p \cdot \lambda_B \cdot p_E$$

(61)

Grenzwert q_h im Scheitel (informativ):

$q_{h,max}$ 219,52 kN/m²

Vertikale Erdlast bis Kämpfer:

$p_{E,K}$ 140,30 kN/m²

$$q_{h,max,K} = 0,75 \cdot K_p \cdot \lambda_B \cdot p_{E,K}$$

(61)

Grenzwert q_h im Kämpfer:

$q_{h,max,K}$ 232,50 kN/m²

Der Wert wird im Kämpfer abgelesen.

Horizontale Gesamtlast:

q_h 17,07 kN/m²

Seitlicher Bettungsreaktionsdruck:

q_h^* 47,17 kN/m²

$$q_h + q_h^* = q_h^* + q_h$$

Summe horizontale Kräfte:

$q_h + q_h^*$ 64,24 kN/m²

$$q_{h,max,K} \geq q_h + q_h^*$$

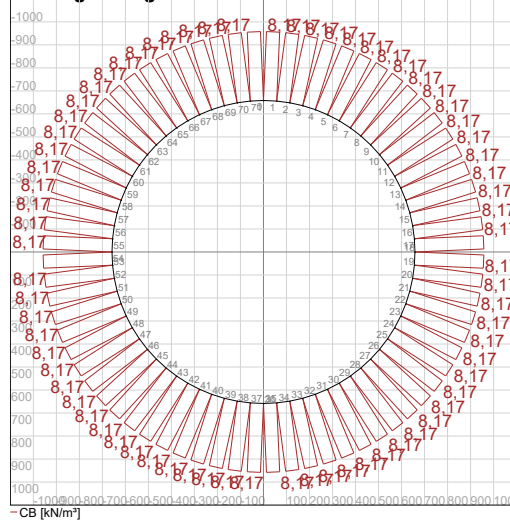
$$U_{maxqh} = \frac{q_h + q_h^*}{q_{h,max,K}}$$

Ausnutzung max qh:

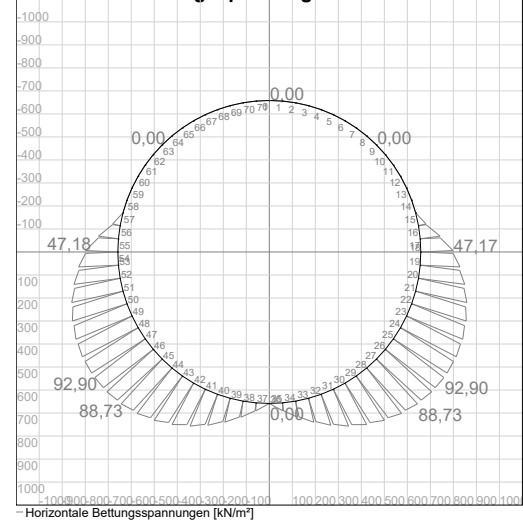
Für die Interaktion Boden-Rohrsystem wurde der elastische Ansatz verwendet. Die Bettung des Rohres wurde um den gesamten Umfang als konstant angenommen. Damit ergibt sich eine Dreiecksförmige Verteilung der Bodenspannungen, deren Maximalwert auf 75% des passiven Erddrucks begrenzt ist.

$$U_{maxqh} = 27,6 \%$$

Bettungssteifigkeit



Horizontale Bettungsspannungen



Die horizontale Kraft aus Bettungsreaktionsdruck und seitlichem Druck im Kämpfer liegt unterhalb des Grenzwertes.

2.2.11.5 Stabilitätsnachweis (Designwerte)

Der maßgebende Nachweis der Stabilität erfolgt über die im Abschnitt 7.6.4.2 (DWA-A 143-2) zugelassene (genauere) Variante einer Berechnung nach Theorie II. Ordnung unter Berücksichtigung der Vorverformungen und der Spaltbildung. Hierbei wird numerisch überprüft, ob ein elastisches Stabilitätsversagen (Beulen) unter gamma-facher Last eintritt. Darüber hinaus wird geprüft, ob die bei dieser Berechnung ermittelten Spannungen die vorgegeben maximalen Grenzspannungen für Zug und Druck mit einfacher Sicherheit nicht überschreiten.

Nachweis entfällt.

Spannungsnachweis Liner, Design

Fläche (Wanddicke): A 40,00 mm²/mm

Außen

$$W_e = \frac{t_L^2}{6}$$

Widerstandsmoment, außen: W_e 266,67 mm³/mm

$$\alpha_{ka} = 1 - \frac{t_L}{3 \cdot r_L} \quad (90)$$

Element	i	Druck	Zug	
Korrekturfaktor (Verformtes System)	α_k	71	55	[-]
Normalkraft in Element	N_d	0,97	0,97	[-]
Moment in Element	M_d	-22,48	-27,42	N/mm
		1.827,64	-902,83	Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} - \alpha_{ka} \cdot \frac{M_d}{W_e} \quad (88)$$

Spannung in Element Max σ_d -7,24 2,61 N/mm²

$$f_{c,rad,L,d} = \frac{f_{c,rad,L}}{Y_M}$$

Zul. Spannung, Langzeit, Design: $\sigma_{L,d}$ -55,56 55,56 N/mm²

Ausnutzung Spannungen U_σ 13,0 4,7 %

Der Spannungsnachweis Außen ist erfüllt.

Innen

$$W_i = \frac{t_L^2}{6}$$

Widerstandsmoment, innen: W_i 266,67 mm³/mm

$$\alpha_{ki} = 1 + \frac{t_L}{3 \cdot r_L} \quad (89)$$

Element	i	Druck	Zug	
Korrekturfaktor (Verformtes System)	α_k	56	0	[-]
Normalkraft in Element	N_d	1,03	1,03	[-]
Moment in Element	M_d	-27,42	-22,48	N/mm
		-902,83	1.827,64	Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} + \alpha_{ki} \cdot \frac{M_d}{W_i}$$
(87)

Spannung in Element	Max σ_d	-4,16	6,47	N/mm²
---------------------	----------------	-------	------	-------

$$f_{c,rad,L,d} = \frac{f_{c,rad,L}}{\gamma_M}$$

Zul. Spannung, Langzeit, Design:	$\sigma_{L,d}$	-55,56	55,56	N/mm²
----------------------------------	----------------	--------	-------	-------

Ausnutzung Spannungen	U_σ	7,5	11,6	%
-----------------------	------------	-----	------	---

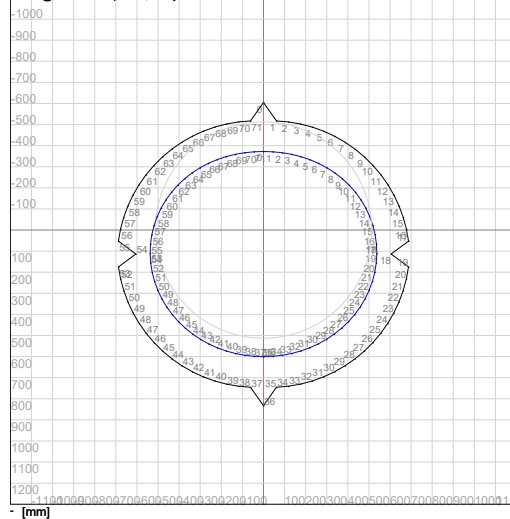
Der Spannungsnachweis Innen ist erfüllt.

Die Spannungen liegen im zulässigen Bereich.

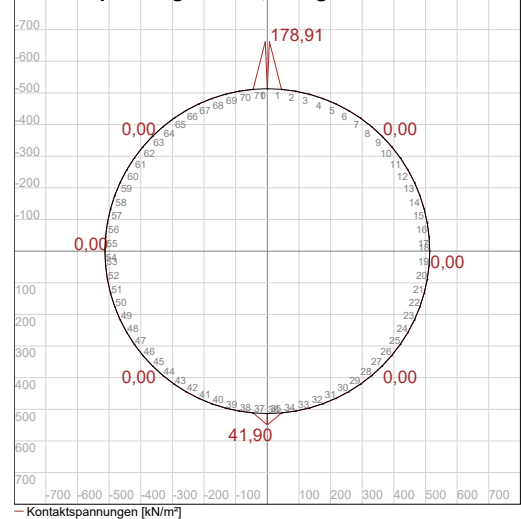
Tabellen

Element	α ki [-]	α ka [-]	N l/r	M [Nmm/m] l/r	σ i [N/mm²] l/r	σ a [N/mm²] l/r	Element	α ki [-]	α ka [-]	N l/r	M [Nmm/m] l/r	σ i [N/mm²] l/r	σ a [N/mm²] l/r
0	1,026	0,974	-22,48 / 1.827,64 /	6,47 /	-7,24 /		36	1,026	0,974	-24,81 / 999,73 /	3,23 /	-4,27 /	
			-22,48 1.542,01 /	5,37 /	-6,19 /					-24,81 926,08 /	2,94 /	-4,00 /	
1	1,026	0,974	-23,02 / 1.542,01 /	5,36 /	-6,21 /		37	1,026	0,974	-24,96 / 926,08 /	2,94 /	-4,01 /	
			-23,03 1.262,38 /	4,28 /	-5,19 /					-24,95 840,48 /	2,61 /	-3,69 /	
2	1,026	0,974	-23,54 / 1.262,38 /	4,27 /	-5,20 /		38	1,026	0,974	-25,11 / 840,48 /	2,61 /	-3,70 /	
			-23,55 991,43 /	3,23 /	-4,21 /					-25,11 743,95 /	2,23 /	-3,34 /	
3	1,026	0,974	-24,04 / 991,43 /	3,21 /	-4,22 /		39	1,026	0,974	-25,28 / 743,95 /	2,23 /	-3,35 /	
			-24,05 731,64 /	2,21 /	-3,27 /					-25,27 637,70 /	1,82 /	-2,96 /	
4	1,026	0,974	-24,51 / 731,64 /	2,20 /	-3,29 /		40	1,026	0,974	-25,46 / 637,70 /	1,82 /	-2,97 /	
			-24,53 485,35 /	1,25 /	-2,39 /					-25,45 523,13 /	1,38 /	-2,55 /	
5	1,026	0,974	-24,95 / 485,35 /	1,24 /	-2,40 /		41	1,026	0,974	-25,65 / 523,13 /	1,37 /	-2,55 /	
			-24,97 254,70 /	0,36 /	-1,55 /					-25,63 401,80 /	0,91 /	-2,11 /	
6	1,026	0,974	-25,36 / 254,70 /	0,35 /	-1,56 /		42	1,026	0,974	-25,84 / 401,80 /	0,90 /	-2,11 /	
			-25,39 41,60 /	-0,47 /	-0,79 /					-25,82 275,43 /	0,41 /	-1,65 /	
7	1,026	0,974	-25,74 / 41,60 /	-0,48 /	-0,80 /		43	1,026	0,974	-26,03 / 275,43 /	0,41 /	-1,66 /	
			-25,76 -152,29 /	-1,23 /	-0,09 /					-26,00 145,87 /	-0,09 /	-1,18 /	
8	1,026	0,974	-26,08 / -152,29 /	-1,24 /	-0,10 /		44	1,026	0,974	-26,22 / 145,87 /	-0,09 /	-1,19 /	
			-26,10 -325,54 /	-1,91 /	0,54 /					-26,19 15,11 /	-0,60 /	-0,71 /	
9	1,026	0,974	-26,38 / -325,54 /	-1,91 /	0,53 /		45	1,026	0,974	-26,41 / 15,11 /	-0,60 /	-0,72 /	
			-26,41 -477,03 /	-2,50 /	1,08 /					-26,38 -114,81 /	-1,10 /	-0,24 /	
10	1,026	0,974	-26,64 / -477,03 /	-2,50 /	1,08 /		46	1,026	0,974	-26,59 / -114,81 /	-1,11 /	-0,25 /	
			-26,67 -605,92 /	-3,00 /	1,55 /					-26,56 -241,75 /	-1,59 /	0,22 /	
11	1,026	0,974	-26,86 / -605,92 /	-3,00 /	1,54 /		47	1,026	0,974	-26,76 / -241,75 /	-1,60 /	0,21 /	
			-26,90 -711,67 /	-3,41 /	1,93 /					-26,73 -363,53 /	-2,07 /	0,66 /	
12	1,026	0,974	-27,05 / -711,67 /	-3,41 /	1,92 /		48	1,026	0,974	-26,93 / -363,53 /	-2,07 /	0,65 /	
			-27,09 -794,03 /	-3,73 /	2,22 /					-26,89 -477,98 /	-2,51 /	1,07 /	
13	1,026	0,974	-27,20 / -794,03 /	-3,73 /	2,22 /		49	1,026	0,974	-27,07 / -477,98 /	-2,52 /	1,07 /	
			-27,23 -853,06 /	-3,96 /	2,43 /					-27,03 -582,94 /	-2,92 /	1,45 /	
14	1,026	0,974	-27,31 / -853,06 /	-3,96 /	2,43 /		50	1,026	0,974	-27,20 / -582,94 /	-2,92 /	1,45 /	
			-27,35 -889,11 /	-4,10 /	2,56 /					-27,16 -676,30 /	-3,28 /	1,79 /	
15	1,026	0,974	-27,38 / -889,11 /	-4,11 /	2,56 /		51	1,026	0,974	-27,30 / -676,30 /	-3,28 /	1,79 /	
			-27,42 -902,82 /	-4,16 /	2,61 /					-27,26 -756,03 /	-3,59 /	2,08 /	
16	1,026	0,974	-27,42 / -902,82 /	-4,16 /	2,61 /		52	1,026	0,974	-27,38 / -756,03 /	-3,59 /	2,08 /	
			-27,46 -895,10 /	-4,13 /	2,58 /					-27,34 -820,22 /	-3,84 /	2,31 /	
17	1,026	0,974	-27,42 / -895,10 /	-4,13 /	2,58 /		53	1,026	0,974	-27,44 / -820,22 /	-3,84 /	2,31 /	
			-27,47 -867,11 /	-4,02 /	2,48 /					-27,40 -867,11 /	-4,02 /	2,48 /	
18	1,026	0,974	-27,40 / -867,11 /	-4,02 /	2,48 /		54	1,026	0,974	-27,47 / -867,11 /	-4,02 /	2,48 /	
			-27,44 -820,22 /	-3,84 /	2,31 /					-27,42 -895,11 /	-4,13 /	2,58 /	
19	1,026	0,974	-27,34 / -820,22 /	-3,84 /	2,31 /		55	1,026	0,974	-27,46 / -895,11 /	-4,13 /	2,58 /	
			-27,38 -756,03 /	-3,59 /	2,08 /					-27,42 -902,83 /	-4,16 /	2,61 /	
20	1,026	0,974	-27,26 / -756,03 /	-3,59 /	2,08 /		56	1,026	0,974	-27,42 / -902,83 /	-4,16 /	2,61 /	
			-27,30 -676,30 /	-3,28 /	1,79 /					-27,38 -889,12 /	-4,11 /	2,56 /	
21	1,026	0,974	-27,16 / -676,30 /	-3,28 /	1,79 /		57	1,026	0,974	-27,35 / -889,12 /	-4,10 /	2,56 /	
			-27,20 -582,94 /	-2,92 /	1,45 /					-27,31 -853,06 /	-3,96 /	2,43 /	
22	1,026	0,974	-27,03 / -582,94 /	-2,92 /	1,45 /		58	1,026	0,974	-27,23 / -853,06 /	-3,96 /	2,44 /	
			-27,07 -477,99 /	-2,52 /	1,07 /					-27,20 -794,03 /	-3,73 /	2,22 /	
23	1,026	0,974	-26,89 / -477,99 /	-2,51 /	1,07 /		59	1,026	0,974	-27,09 / -794,03 /	-3,73 /	2,22 /	
			-26,93 -363,54 /	-2,07 /	0,65 /					-27,05 -711,68 /	-3,41 /	1,92 /	
24	1,026	0,974	-26,73 / -363,54 /	-2,07 /	0,66 /		60	1,026	0,974	-26,90 / -711,68 /	-3,41 /	1,93 /	
			-26,76 -241,75 /	-1,60 /	0,21 /					-26,86 -605,93 /	-3,00 /	1,54 /	
25	1,026	0,974	-26,56 / -241,75 /	-1,59 /	0,22 /		61	1,026	0,974	-26,67 / -605,93 /	-3,00 /	1,55 /	
			-26,59 -114,82 /	-1,11 /	-0,25 /					-26,64 -477,04 /	-2,50 /	1,08 /	
26	1,026	0,974	-26,38 / -114,82 /	-1,10 /	-0,24 /		62	1,026	0,974	-26,41 / -477,04 /	-2,50 /	1,08 /	
			-26,41 15,10 /	-0,60 /	-0,72 /					-26,38 -325,54 /	-1,91 /	0,53 /	
27	1,026	0,974	-26,19 / 15,10 /	-0,60 /	-0,71 /		63	1,026	0,974	-26,10 / -325,54 /	-1,91 /	0,54 /	
			-26,22 145,86 /	-0,09 /	-1,19 /					-26,08 -152,29 /	-1,24 /	-0,10 /	
28	1,026	0,974	-26,00 / 145,86 /	-0,09 /	-1,18 /		64	1,026	0,974	-25,76 / -152,29 /	-1,23 /	-0,09 /	
			-26,03 275,42 /	0,41 /	-1,66 /					-25,74 41,60 /	-0,48 /	-0,80 /	
29	1,026	0,974	-25,82 / 275,42 /	0,41 /	-1,65 /		65	1,026	0,974	-25,39 / 41,60 /	-0,47 /	-0,79 /	
			-25,84 401,79 /	0,90 /	-2,11 /					-25,36 254,70 /	0,35 /	-1,56 /	
30	1,026	0,974	-25,63 / 401,79 /	0,91 /	-2,11 /		66	1,026	0,974	-24,97 / 254,70 /	0,36 /	-1,55 /	
			-25,65 523,12 /	1,37 /	-2,55 /					-24,95 485,35 /	1,24 /	-2,40 /	
31	1,026	0,974	-25,45 / 523,12 /	1,38 /	-2,55 /		67	1,026	0,974	-24,53 / 485,35 /	1,25 /	-2,39 /	
			-25,46 637,69 /	1,82 /	-2,97 /					-24,51 731,64 /	2,20 /	-3,29 /	
32	1,026	0,974	-25,27 / 637,69 /	1,82 /	-2,96 /		68	1,026	0,974	-24,05 / 731,64 /	2,21 /	-3,27 /	
			-25,28 743,95 /	2,23 /	-3,35 /					-24,04 991,43 /	3,21 /	-4,22 /	
33	1,026	0,974	-25,11 / 743,95 /	2,23 /	-3,34 /		69	1,026	0,974	-23,55 / 991,43 /	3,23 /	-4,21 /	
			-25,11 840,48 /	2,61 /	-3,70 /					-23,54 1.262,39 /	4,27 /	-5,20 /	
34	1,026	0,974	-24,95 / 840,48 /	2,61 /	-3,69 /		70	1,026	0,974	-23,03 / 1.262,39 /	4,28 /	-5,19 /	
			-24,96 926,08 /	2,94 /	-4,01 /					-23,02 1.542,01 /	5,36 /	-6,21 /	
35	1,026	0,974	-24,81 / 926,08 /	2,94 /	-4,00 /		71	1,026	0,974	-22,48 / 1.542,01 /	5,37 /	-6,19 /	
			-24,81 999,73 /	3,23 /	-4,27 /					-22,48 1.827,64 /	6,47 /	-7,24 /	

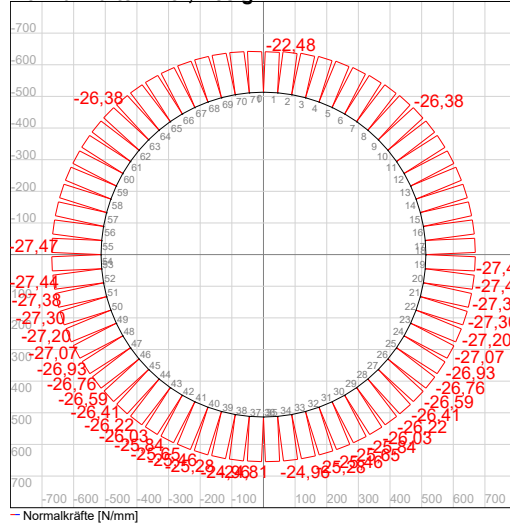
Biegelinie (x 4,04)



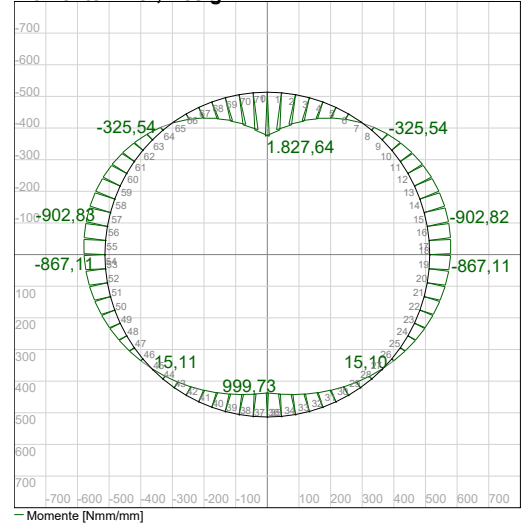
Kontaktspannungen Liner, Design

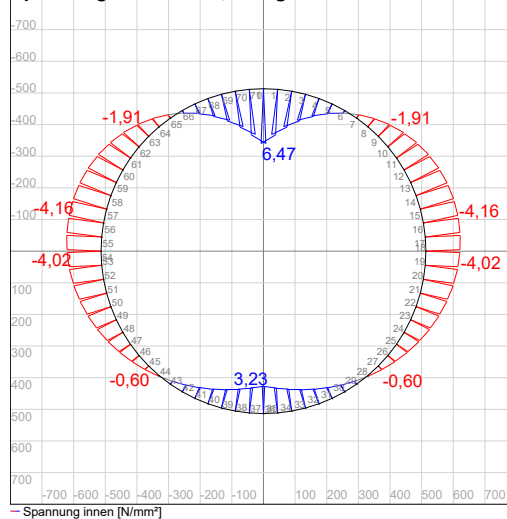
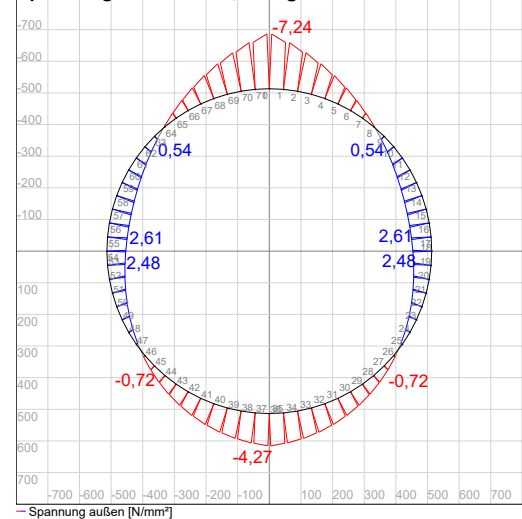


Normalkräfte Liner, Design



Momente Liner, Design



Spannung innen Liner, Design

Spannung außen Liner, Design


2.2.11.6 Spannungsnachweis Liner, Zwang

Fläche (Wanddicke):

A 40,00 mm²/mm

Außen

$$W_e = \frac{t_L^2}{6}$$

Widerstandsmoment, außen:

 W_e 266,67 mm³/mm

$$\alpha_{ka} = 1 - \frac{t_L}{3 \cdot r_L}$$

(90)

 Element
 Korrekturfaktor (Verformtes System)
 Normalkraft in Element
 Moment in Element

	Druck	Zug	
i	0	15	[-]
α _k	0,97	0,97	[-]
N _d	-22,53	-28,61	N/mm
M _d	2.218,31	-1.116,44	Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} - \alpha_{ka} \cdot \frac{M_d}{W_e}$$

(88)

Spannung in Element

 Max σ_d -8,67 3,36 N/mm²

$$f_{c,rad,L,d} = \frac{f_{c,rad,L}}{\gamma_M}$$

Zul. Spannung, Langzeit, Design:

 σ_{L,d} -55,56 55,56 N/mm²

Ausnutzung Spannungen

 U_σ 15,6 6,1 %

Der Spannungsnachweis Außen ist erfüllt.

Innen

$$W_i = \frac{t_L^2}{6}$$

Widerstandsmoment, innen:

 W_i 266,67 mm³/mm

$$\alpha_{ki} = 1 + \frac{t_L}{3 \cdot r_L}$$

(89)

Element	i	Druck	Zug	
Korrekturfaktor (Verformtes System)	α_k	16	71	[-]
Normalkraft in Element	N_d	1,03	1,03	[-]
Moment in Element	M_d	-28,67	-22,53	N/mm
		-1.116,33	2.218,31	Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} + \alpha_{ki} \cdot \frac{M_d}{W_i}$$

(87)

Spannung in Element

 $\text{Max } \sigma_d$ -5,01 7,97 N/mm²

$$f_{c,rad,L,d} = \frac{f_{c,rad,L}}{\gamma_M}$$

Zul. Spannung, Langzeit, Design:

 $\sigma_{L,d}$ -55,56 55,56 N/mm²

Ausnutzung Spannungen

 U_σ 9,0 14,3 %

Der Spannungsnachweis Innen ist erfüllt.

Die Spannungen liegen im zulässigen Bereich.

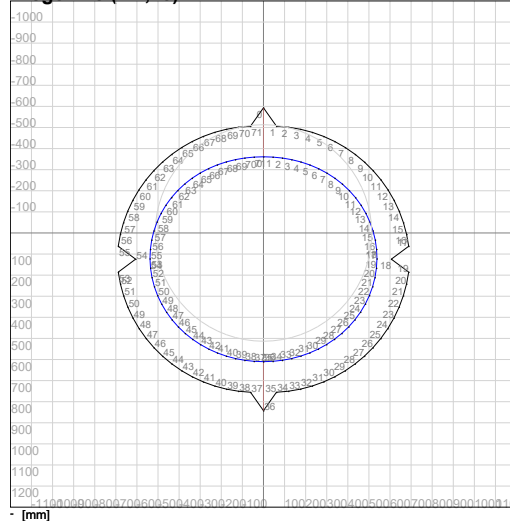
Tabellen

Element	α ki [-]	α ka [-]	N l/r	M [N/mm] l/r	σ i [N/mm²] l/r	σ a [N/mm²] l/r	Element	α ki [-]	α ka [-]	N l/r	M [N/mm] l/r	σ i [N/mm²] l/r	σ a [N/mm²] l/r
0	1,026	0,974	-22,53 / 2.218,31 /	7,97 /	-8,67 /		36	1,026	0,974	-24,86 / 1.396,92 /	4,75 /	-5,72 /	
			-22,53 1.878,35 /	6,66 /	-7,42 /					-24,86 1.268,62 /	4,26 /	-5,26 /	
1	1,026	0,974	-23,18 / 1.878,35 /	5,37 /	-6,22 /		37	1,026	0,974	-25,11 / 1.268,62 /	4,25 /	-5,26 /	
			-23,19 1.545,30 /	5,35 /	-6,24 /					-25,11 1.128,71 /	3,71 /	-4,75 /	
2	1,026	0,974	-23,81 / 1.545,30 /	4,11 /	-5,06 /		38	1,026	0,974	-25,38 / 1.128,71 /	3,71 /	-4,76 /	
			-23,82 1.222,09 /	4,09 /	-5,07 /					-25,37 978,66 /	3,13 /	-4,21 /	
3	1,026	0,974	-24,41 / 1.222,09 /	2,90 /	-3,94 /		39	1,026	0,974	-25,65 / 978,66 /	3,12 /	-4,22 /	
			-24,42 911,52 /	2,88 /	-3,95 /					-25,64 820,13 /	2,51 /	-3,64 /	
4	1,026	0,974	-24,98 / 911,52 /	1,75 /	-2,88 /		40	1,026	0,974	-25,93 / 820,13 /	1,87 /	-3,04 /	
			-25,00 616,21 /	1,73 /	-2,89 /					-25,91 654,95 /	1,86 /	-3,05 /	
5	1,026	0,974	-25,52 / 616,21 /	0,66 /	-1,88 /		41	1,026	0,974	-26,21 / 654,95 /	1,21 /	-2,43 /	
			-25,54 338,59 /	0,65 /	-1,89 /					-26,19 485,07 /	1,20 /	-2,43 /	
6	1,026	0,974	-26,02 / 338,59 /	-0,34 /	-0,95 /		42	1,026	0,974	-26,49 / 485,07 /	0,53 /	-1,81 /	
			-26,04 80,86 /	-1,26 /	-0,10 /					-26,47 312,62 /	0,53 /	-1,81 /	
7	1,026	0,974	-26,48 / 80,86 /	-1,27 /	-0,11 /		43	1,026	0,974	-26,77 / 312,62 /	-0,14 /	-1,19 /	
			-26,51 -155,02 /	-2,09 /	0,67 /					-26,75 139,81 /	-0,14 /	-1,19 /	
8	1,026	0,974	-26,90 / -155,02 /	-2,10 /	0,66 /		44	1,026	0,974	-27,05 / 139,81 /	-0,80 /	-0,57 /	
			-26,93 -367,37 /	-2,82 /	1,34 /					-27,02 -31,04 /	-1,44 /	0,04 /	
9	1,026	0,974	-27,28 / -367,37 /	-2,82 /	1,34 /		45	1,026	0,974	-27,31 / -31,04 /	-1,45 /	0,03 /	
			-27,31 -554,79 /	-3,45 /	1,92 /					-27,28 -197,57 /	-2,06 /	0,62 /	
10	1,026	0,974	-27,61 / -554,79 /	-3,45 /	1,92 /		46	1,026	0,974	-27,56 / -197,57 /	-2,07 /	0,61 /	
			-27,64 -716,18 /	-3,97 /	2,41 /					-27,53 -357,35 /	-2,65 /	1,16 /	
11	1,026	0,974	-27,89 / -716,18 /	-3,98 /	2,40 /		47	1,026	0,974	-27,79 / -357,35 /	-3,19 /	1,66 /	
			-27,93 -850,75 /	-4,39 /	2,80 /					-27,76 -507,98 /	-3,19 /	1,66 /	
12	1,026	0,974	-28,13 / -850,75 /	-4,71 /	3,08 /		48	1,026	0,974	-28,01 / -507,98 /	-3,68 /	2,12 /	
			-28,17 -958,05 /	-4,71 /	3,08 /					-27,97 -647,05 /	-3,68 /	2,12 /	
13	1,026	0,974	-28,32 / -958,05 /	-4,91 /	3,27 /		49	1,026	0,974	-28,20 / -647,05 /	-4,10 /	2,51 /	
			-28,36 -1.037,93 /	-5,01 /	3,36 /					-28,16 -772,25 /	-4,45 /	2,84 /	
14	1,026	0,974	-28,47 / -1.037,93 /	-5,01 /	3,36 /		50	1,026	0,974	-28,36 / -772,25 /	-4,73 /	3,09 /	
			-28,51 /	-5,01 /	3,36 /					-28,32 -881,31 /	-4,91 /	3,27 /	
15	1,026	0,974	-28,57 / -1.090,56 /	-5,01 /	3,36 /		51	1,026	0,974	-28,49 / -881,31 /	-5,01 /	3,36 /	
			-28,61 /	-5,01 /	3,36 /					-28,45 -972,13 /	-5,01 /	3,36 /	
16	1,026	0,974	-28,63 / -1.116,44 /	-5,01 /	3,36 /		52	1,026	0,974	-28,59 / -972,13 /	-5,01 /	3,36 /	
			-28,67 /	-5,01 /	3,36 /					-28,55 -1.042,72 /	-5,01 /	3,36 /	
17	1,026	0,974	-28,64 / -1.116,33 /	-5,01 /	3,36 /		53	1,026	0,974	-28,66 / -1.042,72 /	-5,01 /	3,36 /	
			-28,68 /	-5,01 /	3,36 /					-28,62 /	-5,01 /	3,36 /	
18	1,026	0,974	-28,62 / -1.091,32 /	-4,91 /	3,27 /		54	1,026	0,974	-28,68 / -1.091,31 /	-4,91 /	3,27 /	
			-28,66 /	-4,73 /	3,09 /					-28,64 /	-4,91 /	3,27 /	
19	1,026	0,974	-28,55 / -1.042,73 /	-4,73 /	3,09 /		55	1,026	0,974	-28,67 / -1.116,32 /	-5,01 /	3,36 /	
			-28,59 / -972,13 /	-4,46 /	2,84 /					-28,63 /	-5,01 /	3,36 /	
20	1,026	0,974	-28,45 / -972,13 /	-4,45 /	2,84 /		56	1,026	0,974	-28,61 / -1.116,42 /	-5,01 /	3,36 /	
			-28,49 -881,31 /	-4,10 /	2,51 /					-28,57 /	-4,91 /	3,27 /	
21	1,026	0,974	-28,32 / -881,31 /	-4,10 /	2,51 /		57	1,026	0,974	-28,51 / -1.090,55 /	-4,91 /	3,27 /	
			-28,36 -772,24 /	-3,68 /	2,11 /					-28,47 /	-4,71 /	3,08 /	
22	1,026	0,974	-28,16 / -772,24 /	-3,68 /	2,12 /		58	1,026	0,974	-28,36 / -1.037,92 /	-4,70 /	3,08 /	
			-28,20 -647,05 /	-3,19 /	1,66 /					-28,32 / -958,04 /	-4,39 /	2,79 /	
23	1,026	0,974	-27,97 / -647,05 /	-3,19 /	1,66 /		59	1,026	0,974	-28,17 / -958,04 /	-4,39 /	2,80 /	
			-28,01 -507,96 /	-2,65 /	1,16 /					-28,13 -850,74 /	-3,98 /	2,40 /	
24	1,026	0,974	-27,76 / -507,96 /	-2,65 /	1,16 /		60	1,026	0,974	-27,93 / -850,74 /	-3,97 /	2,41 /	
			-27,79 -357,34 /	-2,07 /	0,61 /					-27,89 -716,17 /	-3,45 /	1,92 /	
25	1,026	0,974	-27,53 / -357,34 /	-2,06 /	0,62 /		61	1,026	0,974	-27,64 / -716,17 /	-3,45 /	1,92 /	
			-27,56 -197,55 /	-1,45 /	0,03 /					-27,61 -554,78 /	-2,82 /	1,34 /	
26	1,026	0,974	-27,28 / -197,55 /	-1,44 /	0,04 /		62	1,026	0,974	-27,31 / -554,78 /	-2,82 /	1,34 /	
			-27,31 -31,02 /	-0,80 /	-0,57 /					-27,28 -367,36 /	-2,10 /	0,66 /	
27	1,026	0,974	-27,02 / -31,02 /	-0,79 /	-0,56 /		63	1,026	0,974	-26,93 / -367,36 /	-2,09 /	0,67 /	
			-27,05 139,83 /	-0,14 /	-1,19 /					-26,90 -155,02 /	-1,27 /	-0,11 /	
28	1,026	0,974	-26,75 / 139,83 /	-0,13 /	-1,18 /		64	1,026	0,974	-26,51 / -155,02 /	-1,26 /	-0,10 /	
			-26,77 312,64 /	0,53 /	-1,81 /					-26,48 80,86 /	-0,35 /	-0,96 /	
29	1,026	0,974	-26,47 / 312,64 /	0,54 /	-1,80 /		65	1,026	0,974	-26,04 / 80,86 /	-0,34 /	-0,95 /	
			-26,49 485,09 /	1,20 /	-2,43 /					-26,02 338,59 /	0,65 /	-1,89 /	
30	1,026	0,974	-26,19 / 485,09 /	1,21 /	-2,43 /		66	1,026	0,974	-25,54 / 338,59 /	0,66 /	-1,88 /	
			-26,21 654,96 /	1,86 /	-3,05 /					-25,52 616,21 /	1,73 /	-2,89 /	
31	1,026	0,974	-25,91 / 654,96 /	1,87 /	-3,04 /		67	1,026	0,974	-25,00 / 616,21 /	1,75 /	-2,88 /	
			-25,93 820,15 /	2,51 /	-3,64 /					-24,98 911,52 /	2,88 /	-3,95 /	
32	1,026	0,974	-25,64 / 820,15 /	2,51 /	-3,64 /		68	1,026	0,974	-24,42 / 911,52 /	2,90 /	-3,94 /	
			-25,65 978,67 /	3,12 /	-4,22 /					-24,41 1.222,09 /	4,09 /	-5,07 /	

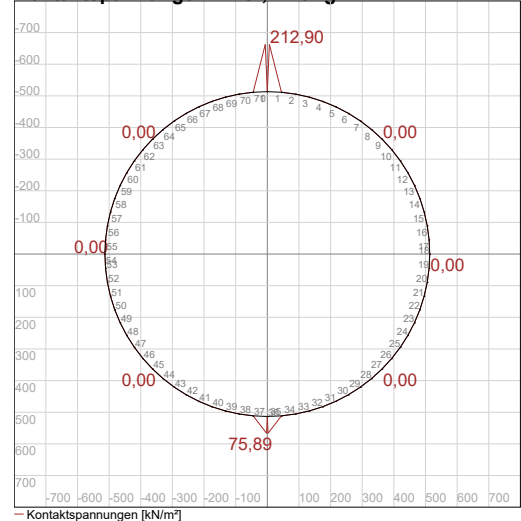
33	1,026	0,974	-25,37 / 978,67 /	3,13 /	-4,21 /
			-25,38 1.128,72 /	3,71 /	-4,76 /
34	1,026	0,974	-25,11 / 1.128,72 /	3,71 /	-4,75 /
			-25,11 1.268,62 /	4,25 /	-5,26 /
35	1,026	0,974	-24,86 / 1.268,62 /	4,26 /	-5,26 /
			-24,86 1.396,92 /	4,75 /	-5,72 /

69	1,026	0,974	-23,82 / 1.222,09 /	4,11 /	-5,06 /
			-23,81 1.545,30 /	5,35 /	-6,24 /
70	1,026	0,974	-23,19 / 1.545,30 /	5,37 /	-6,22 /
			-23,18 1.878,35 /	6,65 /	-7,44 /
71	1,026	0,974	-22,53 / 1.878,35 /	6,66 /	-7,42 /
			-22,53 2.218,31 /	7,97 /	-8,67 /

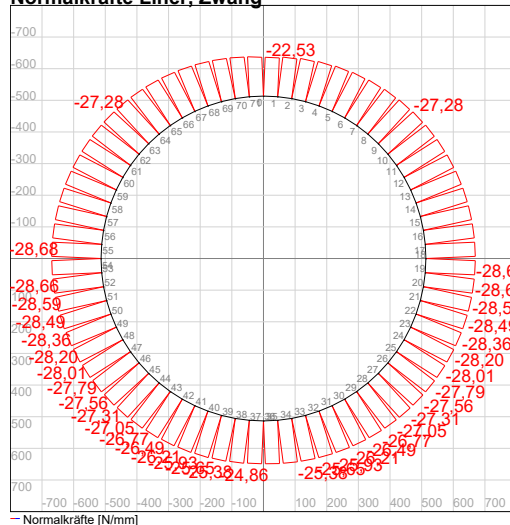
Biegelinie (x 4,43)



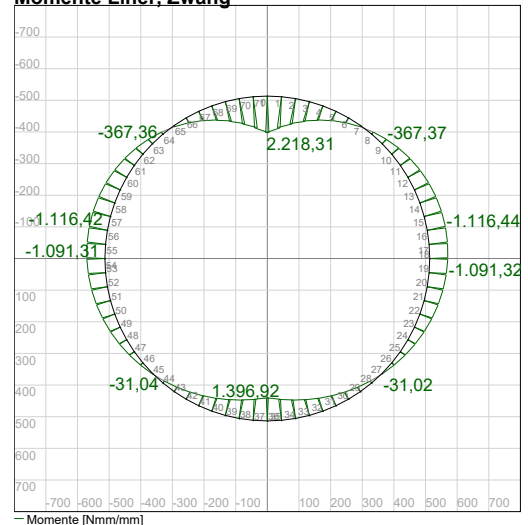
Kontaktspannungen Liner, Zwang

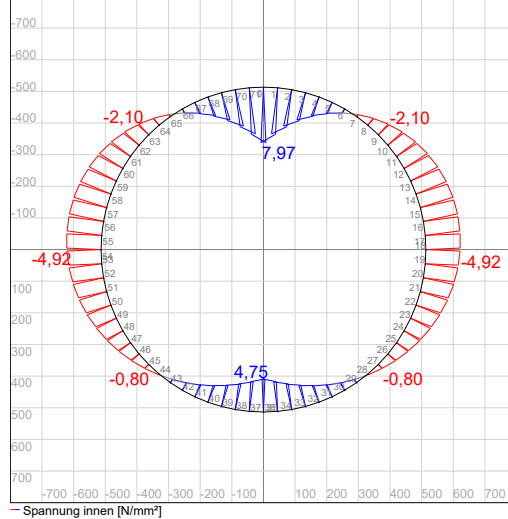
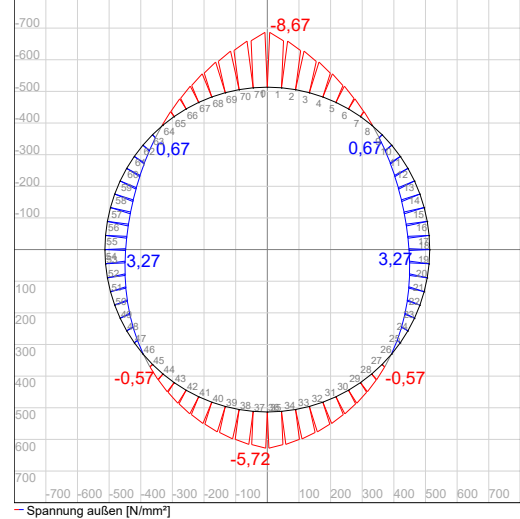


Normalkräfte Liner, Zwang



Momente Liner, Zwang



Spannung innen Liner, Zwang

Spannung außen Liner, Zwang


2.2.11.7 Altrohrspannungen Kämpfer

Vertikale Gesamtlast, Design:

Wanddicke Altrohr:

Außendurchmesser Altrohr Kämpfer:

Bezogene Gelenkringexzentrität:

$q_{v,d}$	165,06	kN/m²
t_R	250,00	mm
$d_{aAR,k}$	1.566,67	mm
e_G/t	35,00	%

$$b_D = \frac{8 \cdot t_R}{3} \cdot (0,50 - e_G/t) \quad (101)$$

Druckzonenbreite:

b_D	100,00	mm
-------	--------	----

$$N_{K,d} = -q_{v,d} (1 + \omega_{GR,v}) \cdot \frac{d_{aAR,k}}{2}$$

Druckkraft im Kämpfer:

$N_{K,d}$	-129,29	N/mm
-----------	---------	------

$$\sigma_d = \frac{N_{K,d}}{b_D} \cdot 1,50 \quad (100)$$

Spannung in der Druckzone:

σ_d	-1,94	N/mm²
------------	-------	-------

Zul. Druckfestigkeit, Langzeit:

$f_{c,rad,L}$	5,00	N/mm²
---------------	------	-------

$$U_{\sigma D,AR} = \frac{-1 \cdot \sigma_d}{f_{c,rad,L}} \quad (102)$$

Ausnutzung Druckspannungen AR Kämpfer:

$U_{\sigma D,AR}$	38,8	%
-------------------	------	---

Der Spannungsnachweis für Kämpferspannungen im Altrohr ist erfüllt.

Es konnten nicht alle geforderten statischen Nachweise erbracht werden!

Pos. 01.2

815 / 1570 t = 40 / Bereich Eisenbahnlasten

Inhaltsangabe

1 Bemerkungen	4
2 Statik nach DWA-A 143-2	5
2.1 Eingaben	5
2.1.1 Geometrie	5
2.1.2 Materialien	5
2.1.3 Lasten	6
2.2 Ergebnisse	6
2.2.1 Hinweis zum Einzelrohr-Lining	6
2.2.2 Materialkennwerte	6
2.2.2.1 Liner	6
2.2.2.2 Altrohr	6
2.2.3 Ringsteifigkeit nach ISO 7685	7
2.2.4 Hinweise zur Berechnung	7
2.2.5 Lastfall 01 AZ II - hW 3,47 m, Langzeit	8
2.2.5.1 Geometrie diskretisiertes System	9
2.2.5.2 Verformungsnachweis Liner, Gebrauchslast	9
2.2.6 Lastfall 02 [Ersatzkreis] AZ III - hW 0,00 m + h 6,46 m + ws 0,0 % + ww 0,0 %,	13
2.2.6.1 Geometrie diskretisiertes System	13
2.2.6.2 Erdlasten und Verkehrslasten	14
2.2.6.3 Verformungsnachweis Liner, Gebrauchslast	15
2.2.6.4 Bodeninteraktion (Gebrauchslast)	16
2.2.6.5 Stabilitätsnachweis (Designwerte)	17
2.2.6.6 Spannungsnachweis Liner, Zwang	19
2.2.6.7 Altrohrspannungen Kämpfer	21
2.2.7 Lastfall 03 [Ersatzkreis] AZ III - hW 3,47 m + h 6,46 m + ws 0,4 % + ww 0,5 %,	22
2.2.7.1 Geometrie diskretisiertes System	22
2.2.7.2 Erdlasten und Verkehrslasten	23
2.2.7.3 Verformungsnachweis Liner, Gebrauchslast	23
2.2.7.4 Bodeninteraktion (Gebrauchslast)	24
2.2.7.5 Stabilitätsnachweis (Designwerte)	26
2.2.7.6 Spannungsnachweis Liner, Zwang	28
2.2.7.7 Altrohrspannungen Kämpfer	30
2.2.8 Lastfall 04 [Ersatzkreis] AZ III - hW 3,47 m + h 6,46 m + ws 0,0 % + ww 0,0 %,	31
2.2.8.1 Geometrie diskretisiertes System	31
2.2.8.2 Erdlasten und Verkehrslasten	32
2.2.8.3 Verformungsnachweis Liner, Gebrauchslast	32
2.2.8.4 Bodeninteraktion (Gebrauchslast)	33
2.2.8.5 Stabilitätsnachweis (Designwerte)	35
2.2.8.6 Spannungsnachweis Liner, Zwang	37
2.2.8.7 Altrohrspannungen Kämpfer	39
2.2.9 Lastfall 05 [Ersatzkreis] AZ III - hW 0,00 m + h 7,70 m + ws 0,0 % + ww 0,0 %,	40
2.2.9.1 Geometrie diskretisiertes System	40
2.2.9.2 Erdlasten und Verkehrslasten	41
2.2.9.3 Verformungsnachweis Liner, Gebrauchslast	41
2.2.9.4 Bodeninteraktion (Gebrauchslast)	42

Bauteil: SAN-03 - GFK Sanierung Hauptsammler Ost
MA-250346

Seite:
D-114

Kapitel / Vorgang: D - Nachweise
01.2 815 / 1570 t = 40 / Bereich Eisenbahnlasten

Archiv-Nr.

2.2.9.5 Stabilitätsnachweis (Designwerte)	44
2.2.9.6 Spannungsnachweis Liner, Zwang	46
2.2.9.7 Altrohrspannungen Kämpfer	48
2.2.10 Lastfall 06 [Ersatzkreis] AZ III - hW 3,47 m + h 7,70 m + ws 0,4 % + ww 0,5 %,	49
2.2.10.1 Geometrie diskretisiertes System	49
2.2.10.2 Erdlasten und Verkehrslasten	50
2.2.10.3 Verformungsnachweis Liner, Gebrauchslast	50
2.2.10.4 Bodeninteraktion (Gebrauchslast)	51
2.2.10.5 Stabilitätsnachweis (Designwerte)	53
2.2.10.6 Spannungsnachweis Liner, Zwang	55
2.2.10.7 Altrohrspannungen Kämpfer	57
2.2.11 Lastfall 07 [Ersatzkreis] AZ III - hW 3,47 m + h 7,70 m + ws 0,0 % + ww 0,0 %,	58
2.2.11.1 Geometrie diskretisiertes System	58
2.2.11.2 Erdlasten und Verkehrslasten	59
2.2.11.3 Verformungsnachweis Liner, Gebrauchslast	59
2.2.11.4 Bodeninteraktion (Gebrauchslast)	60
2.2.11.5 Stabilitätsnachweis (Designwerte)	62
2.2.11.6 Spannungsnachweis Liner, Zwang	64
2.2.11.7 Altrohrspannungen Kämpfer	66

1 Bemerkungen

A schnitt 1 - 5

Mit dem folgenden Nacheis soll der schwach gekrümmte Kämpfer nachgewiesen werden.
Der Nachweis erfolgt daher hier für das "große" Eiprofil.

Da die seitliche Stützung für diesen Nachweis wesentlich ist, wird ungünstig mit dem geringen Steifemodul der Schlufflinse gerechnet.

Es = 5 MN/m²

Die Nachweise zur Bemessung sind eingehalten.
Der Vorformungsnachweis (elastische Einsenkung im Scheitel) ist hier rechnerisch überschritten, Dies kann jedoch außer Acht gelassen werden. Die erforderliche Steifigkeit wird am kleineren Eiprofil nachgewiesen.

2 Statik nach DWA-A 143-2

Verfahren:
Altrohrzustand:
Ausdruck Rohrsteifigkeit:
Art der Interaktion:
Nachweis Altrohr:
Nachweis Auftrieb:
Berechnungsoptionen nach Regelwerk:

Einzelrohr-Lining
AZ III
Nach ISO 7685
Überlagerung aller Lasten am System
Nein
Nein
Ja

2.1 Eingaben

2.1.1 Geometrie

Geometrie:
Lichte Breite in Kämpferhöhe:
Lichte Höhe Scheitel-Sohle:
Profilart:
Wanddicke Liner:
Gelenkringverformung:
Relative Exzentrizität der Gelenke Altrohr:

Art des Altrohres:
Tiefe Vorverformung lange Seite:
Öffnungswinkel lokale Vorverformung Sohle:
Öffnungswinkel lokale Vorverformung lange Seite:

Regeleiwerschnitt freie Eingabe
b_k 1.580,00 mm
h_s 2.370,00 mm
Vollwand
t_L 40,00 mm
w_{GRV}/r_L 0,00 %
e_{Grel} 0,35 [-]

Normales Eiprofil mit B:H = 2:3
w_v/r_L 0,50 %
2Φ 40,00 °
2Φ 36,80 °

Art des Ringspaltes:
Ringspalt (konst. Schrumpfmaß):

Konstantes Schrumpfmaß
w_s/U 0,400 %

Vollbettungsmodell:

Ja

2.1.2 Materialien

Material Altrohr:
Wanddicke Altrohr:

Definition Material:
Langzeitige Werte verwenden:
Nachweis Schubspannung führen:

Mauerwerk
SR 250,00 mm

Norm Tabelle 2/3
Ja
Nein

Wichtung der Spannungen:
Kennwerte nach Tabelle 2/3:
Eigengewicht:
Querkontraktionszahl:
Teilsicherheitsbeiwert Material:

Nein
UP-GF (Vor Ort)
γ 17,50 kN/m³
ν 0,35 [-]
γ_M 1,35 [-]

E-Modul, Langzeit
E-Modul, Kurzzeit
Zul. Druckfestigkeit, Langzeit
Zul. Druckfestigkeit, Kurzzeit
Zul. Biegezugfestigkeit, Langzeit
Zul. Biegezugfestigkeit, Kurzzeit
Zul. Zugfestigkeit, Langzeit
Zul. Zugfestigkeit, Kurzzeit

	Charakteristisch	Design	
E _{R,rad,L}	3.500,00	2.592,59	N/mm²
E _{R,rad,K}	6.000,00	4.444,44	N/mm²
f _{c,rad,L}	75,00	55,56	N/mm²
f _{c,rad,K}	130,00	96,30	N/mm²
f _{t,fl,L}	75,00	55,56	N/mm²
f _{t,fl,K}	130,00	96,30	N/mm²
f _{t,L}	n. def.	n. def.	N/mm²
f _{t,K}	n. def.	n. def.	N/mm²

Wärmedehnzahl: α_T 0,00003 1/K

2.1.3 Lasten

Wasserspiegel über Sohle Liner:	h_w	3,47	m
Gewicht Wasser:	γ_w	10,00	kN/m ³
Temperaturänderung:	ΔT	0,00	K
Max. Überdeckung Scheitel Altrohr:	h_{max}	7,70	m
Min. Überdeckung Scheitel Altrohr:	h_{min}	6,46	m
Wichte Boden manuell eingeben:	Ja		
Anzahl Überdeckungen:	2 Überdeckungshöhen		
Wichte Boden, trocken:	γ_B	20,00	kN/m ³
Wichte Boden, unter Auftrieb:	γ_B'	10,00	kN/m ³
Horizontale Verkehrslast berücksichtigen:	Ja		
Verkehrslast:	Bahn LM 71 - mehrgleisig		
Anpassungsfaktor α_{Qi} LM71 (DIN EN 1991-2):	$\alpha_{Qi,LM71}$	1,00	[-]
Abminderungsfaktor dynamische Last manuell eingeben:	Nein		
Zusätzliche Flächenlast:	p_0	0,0	kN/m ²
Altrohr vor Sanierung gerissen:	Ja		
Bodenverhalten:	Elastisch		
Direkte Eingabe E2:	Nein		
Berechnung Bettung E20:	E-Modul		
Bodengruppe Einbettung:	G4		
E-Modul Einbettung:	$E_{20,R,rad}$	5,0	N/mm ²
Teilsicherheitsbeiwert Eigengewicht:	γ_{GE}	1,35	[-]
Teilsicherheitsbeiwert Wasserdruck:	γ_w	1,50	[-]
Teilsicherheitsbeiwert Innendruck:	γ_{pi}	1,50	[-]
Teilsicherheitsbeiwert Temperatur:	γ_T	1,10	[-]
Teilsicherheitsbeiwert Erdlast:	γ_G	1,35	[-]
Teilsicherheitsbeiwert Verkehr:	γ_Q	1,50	[-]

2.2 Ergebnisse

2.2.1 Hinweis zum Einzelrohr-Lining

Die Querdehnzahl wird in der Berechnung nicht berücksichtigt, da davon ausgegangen wird, dass die einzelnen Rohre in den Muffen keinen axialen Schub übertragen.

2.2.2 Materialkennwerte

2.2.2.1 Liner

Teilsicherheitsbeiwert Material:	γ_M	1,35	[-]
Querkontraktionszahl:	ν	0,35	[-]
E-Modul, Langzeit:	$E_{R,rad,L}$	3.500,00	N/mm ²
E-Modul, Langzeit, Design:	$E_{R,rad,L,d}$	2.592,59	N/mm ²
Verwendeter E-Modul:	$E_{R,rad}$	2.592,59	N/mm ²
Zul. Druckfestigkeit, Langzeit:	$f_{c,rad,L}$	75,00	N/mm ²
Zul. Druckfestigkeit, Langzeit, Design:	$f_{c,rad,L,d}$	-55,56	N/mm ²
Zul. Biegezugfestigkeit, Langzeit:	$f_{t,fl,L}$	75,00	N/mm ²
Zul. Biegezugfestigkeit, Langzeit, Design:	$f_{t,fl,L,d}$	55,56	N/mm ²

2.2.2.2 Altrohr

Eigengewicht:	γ	22,00	kN/m ³
Teilsicherheitsbeiwert Material:	γ_M	2,20	[-]
E-Modul, Langzeit:	$E_{R,rad,L}$	8.000,00	N/mm ²
E-Modul, Langzeit, Design:	$E_{R,rad,L,d}$	3.636,36	N/mm ²
Zul. Druckfestigkeit, Langzeit:	$f_{c,rad,L}$	5,00	N/mm ²
Zul. Druckfestigkeit, Langzeit, Design:	$f_{c,rad,L,d}$	-2,27	N/mm ²

IngSoft EasyPipe 3.1.0.0 - 01.03.2026 - 22:34:45

6

Bauteil: SAN-03 - GFK Sanierung Hauptsammler Ost
MA-250346

Seite:
D-118

Kapitel / Vorgang: D - Nachweise
01.2 815 / 1570 t = 40 / Bereich Eisenbahnlasten

Archiv-Nr.

Zul. Biegezugfestigkeit, Langzeit:
Zul. Biegezugfestigkeit, Langzeit, Design:

$f_{t,fl,L}$ 0,01 N/mm²
 $f_{t,fl,L,d}$ 0,00 N/mm²

2.2.3 Ringsteifigkeit nach ISO 7685

Trägheitsmoment:
Außendurchmesser Liner:
Trägheitsabstand:
Mittlerer Radius Liner:

I 5.333,33 mm⁴/mm
 da_L 1.580,00 mm
 e 20,00 mm
 $r_{L,m}$ 770,00 mm

E-Modul:

$E_{R,rad}$ Kurzzeit 6.000,00 Langzeit 3.500,00 N/mm²

$$S_K = \frac{E_{R,rad,K} \cdot I}{r_{L,m} \cdot 2^3}$$

Ringsteifigkeit:

S 8,76 5,11 kN/m²

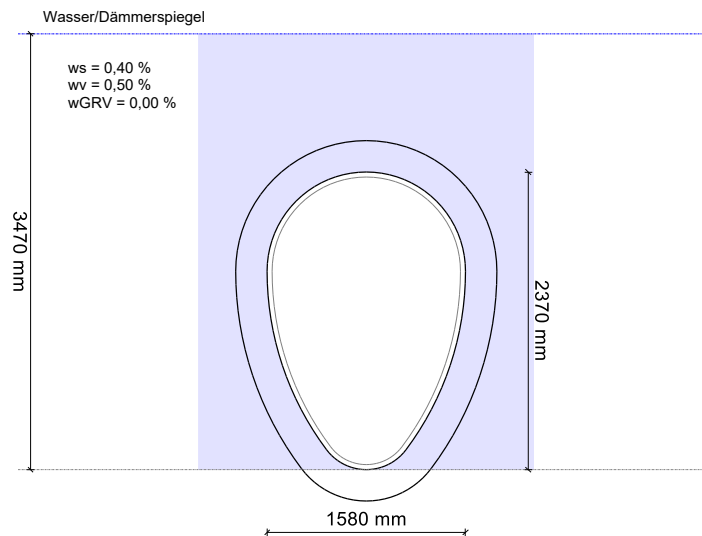
2.2.4 Hinweise zur Berechnung

[Betaversion] Der Lastfall Erd- und Verkehrslasten wird nicht mit der vorgegebenen Ei-Geometrie untersucht. Es wird mit einem Ersatzkreis gerechnet, der dem Scheitelkreis entspricht. Sollte der "Regeleiquerschnitt Freie Eingabe" gewählt sein, so wird bei Abweichungen vom Verhältnis 2/3 der größte Radius der Ellipse verwendet. Die Berechnung des AZ III erfolgt nicht mit der tatsächlichen Querschnittsgeometrie, sondern mit dem nach DWA-A 143-2, Kap. 7.8.1 zulässigen Näherungsfahren am Ersatzkreis. ACHTUNG: Insbesondere bei Kanälen im Grundwasser liegt das Ersatzkreisverfahren nicht immer auf der sicheren Seite.

Hinweise zur Berechnungsmethode: Das statische Modell und die implementierten Berechnungsalgorithmen halten sich sehr eng an den Wortlaut des DWA-A 143-2. Dieses Regelwerk lässt aber insbesondere bei Berechnungen für den Altrohrzustand III einen breiten Interpretationsspielraum und ausgeprägte Freiheiten bei der Modellbildung. Über 'Kann'- und 'Darf'-Bestimmungen werden vereinfachte Berechnungsmethoden erlaubt, die grundsätzlich auf der sicheren Seite liegen, aber in der Folge auch zu höheren Linerbeanspruchungen bzw. zu größeren Wanddicken führen. Hierzu gehören beispielsweise der vereinfachte Stabilitätsnachweis statt einer nichtlinearen Berechnung nach Theorie II. Ordnung oder die Reduzierung des Modells auf einen Viertelkreis, obwohl eine doppelte Symmetrie gar nicht gegeben ist. Der dabei erforderliche größere Rechenaufwand ermöglicht eine wirtschaftliche Bemessung. Ein direkter zahlenmäßiger Vergleich der Ergebnisse von EasyPipe mit den Resultaten aus vereinfachten Berechnungen ist deshalb nicht möglich.

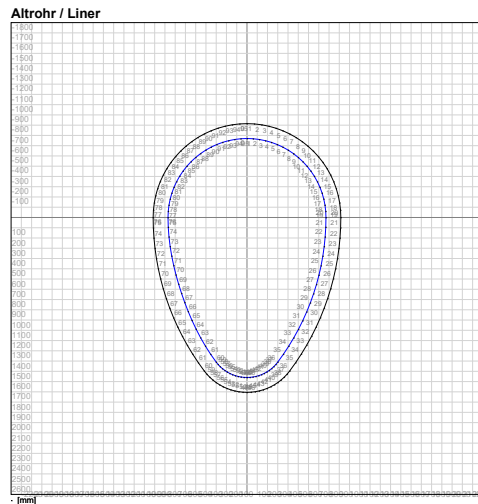
2.2.5 Lastfall 01 AZ II - hW 3,47 m, Langzeit

Grundlage für die Freie Eingabe stellt eine DIN-konforme Ei-Form dar ($H/B = 1,5$ inkl. der vorgegebenen Radien). Diese Eingabeform dient nicht zur Abbildung von z.B. überhöhten Ei-Formen. Eingeben wird dabei die Breite und Höhe des Ei-Querschnitts. Die Abweichung die sich ergibt, wenn $H <> 1,5 \times B$, wird über eine Verzerrung der y-Koordinaten abgebildet.



2.2.5.1 Geometrie diskretisiertes System

Skizze



Wanddicke Liner: t_L 40,00 mm

Die Gelenkringverformung wird analog A 143-2 als eine Erhöhung (wgrv/10) der eingegebenen örtlichen Verformung angesetzt.

Vorgegebene Werte:

Lokale Vorverformung: ω_V 0,50 %
 Gelenkringverformung: $\omega_{GR,V}$ 0,00 %

$$\omega_V = \omega_V + \omega_{GR,V}/10 = 0,50 \% + (0,00 \% / 10) \quad (\text{A 143-2 Tabelle 8})$$

Lokale Vorverformung: ω_V 0,50 %
 Lokale Vorverformung absolut: w_V 11,75 mm

Eine Berücksichtigung der Gelenkringverformung in der Geometrie liegt auf der unsicheren Seite, da durch die Aufweitung im Kämpfer das Verhältnis Höhe/Breite günstiger gegen Außendruck wird. Damit würden für den Altrohrzustand II günstigere Ergebnisse berechnet werden, als im Altrohrzustand I.

Gelenkringverformung: $\omega_{GR,V}$ 0,00 %
 Gelenkringverformung absolut, einseitig: $w_{GR,V}$ 0,00 mm

Der Einfluss der Gelenkingaufweitung auf den Ringspalt nach Gleichung DWA-A 143-2, Gl. 121 bleibt bei von Kreisform abweichenden Querschnitten unberücksichtigt, da in der Formel DWA-A 143-2, Gl. 121 die Kinematik des Kreises mit 4 exzentrischen Gelenken vorausgesetzt wird. Sie kann deshalb nicht für eine andere Querschnittsgeometrie mit anderer Kinematik angewendet werden. Dies gilt natürlich auch für den Ersatzkreis.

Ringspalt: ω_S 0,40 %
 Spaltweite absolut (als konst. Ringspalt): w_S 3,89 mm

Mittlerer Radius Liner, Kämpfer: $r_{L,m,K}$ 2.350,00 mm
 Mittlerer Radius Liner, Scheitel: $r_{L,m,S}$ 770,00 mm
 R/t Verhältnis: $r_{L,m}/t_{L,m}$ 35,05 [-]

2.2.5.2 Verformungsnachweis Liner, Gebrauchslast

Lichte Breite in Kämpferhöhe: b_k 1.580,00 mm
 Lichte Höhe Scheitel-Sohle: h_s 2.370,00 mm

Bauteil: SAN-03 - GFK Sanierung Hauptsammler Ost
 MA-250346

Seite:
 D-121

Kapitel / Vorgang: D - Nachweise
 01.2 815 / 1570 t = 40 / Bereich Eisenbahnlasten

Archiv-Nr.

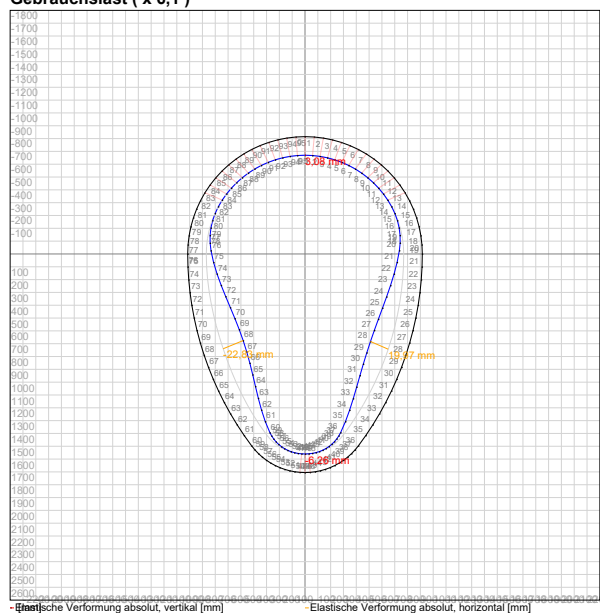
Relevanter Durchmesser für prozentuale Verformung:	d_v	1.975,00	mm
Spaltweite absolut (als konst. Ringspalt):	w_s	3,89	mm
Lokale Vorverformung absolut:	w_v	11,75	mm
Gelenkringverformung absolut, einseitig:	$w_{GR,v}$	0,00	mm
Elastische Verformung absolut, horizontal:	$w_{el,h,E1}$	19,97	mm
Elastische Verformung absolut, horizontal:	$w_{el,h,E2}$	-22,83	mm
Elastische Verformung absolut, horizontal:	$w_{el,h}$	42,80	mm
Elastische Verformung relativ:	$\delta_{v,el}$	2,17	%
Zulässige Verformung elastisch:	zul $\delta_{v,el}$	3,00	%

Die errechnete elastische Verformung ist kleiner als die zulässige Verformung.

Gesamte Durchmesseränderung:	w	54,55	mm
Relative Gesamtverformung:	δ_v	2,76	%
Anhaltswert Gesamtverformung:	$\delta_{v,A}$	10,00	%

Elastische Verformung absolut, vertikal:	$w_{el,v,E1}$	3,08	mm
Elastische Verformung absolut, vertikal:	$w_{el,v,E2}$	-6,26	mm
Elastische Verformung absolut, vertikal:	$w_{el,v}$	9,34	mm

Gebrauchslast (x 6,1)



Spannungsnachweis Liner, Design

Fläche (Wanddicke): A 40,00 mm²/mm

Außen

Widerstandsmoment, außen:

Element	i	Druck	266,67	mm ³ /mm
Korrekturfaktor (Verformtes System)	α_k	Zug	57	[-]
Normalkraft in Element	N_d		0,96	[-]
Moment in Element	M_d		-77,78	N/mm
			2.835,84	Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} - \alpha_{ka} \cdot \frac{M_d}{W_e} \quad (88)$$

Spannung in Element	Max σ_d	-12,53	9,79	N/mm ²
Zul. Spannung, Langzeit, Design:	$\sigma_{L,d}$	-55,56	55,56	N/mm ²

Ausnutzung Spannungen	U_σ	22,6	17,6	%
-----------------------	------------	------	------	---

Der Spannungsnachweis Außen ist erfüllt.

Innen

Widerstandsmoment, innen:

Element	i	Druck	266,67	mm ³ /mm
Korrekturfaktor (Verformtes System)	α_k	Zug	67	[-]
Normalkraft in Element	N_d		1,00	[-]
Moment in Element	M_d		-80,40	N/mm
			-3.262,47	Nmm/mm

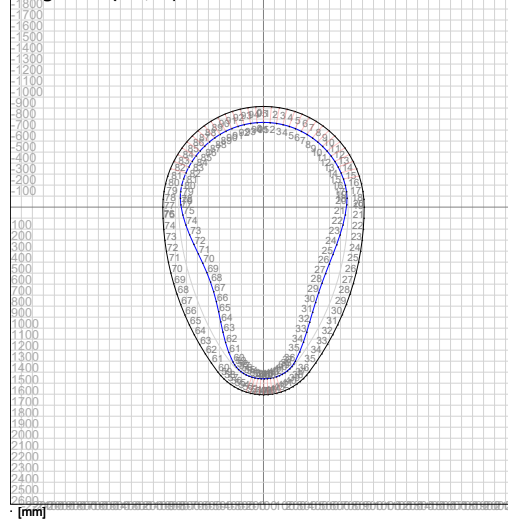
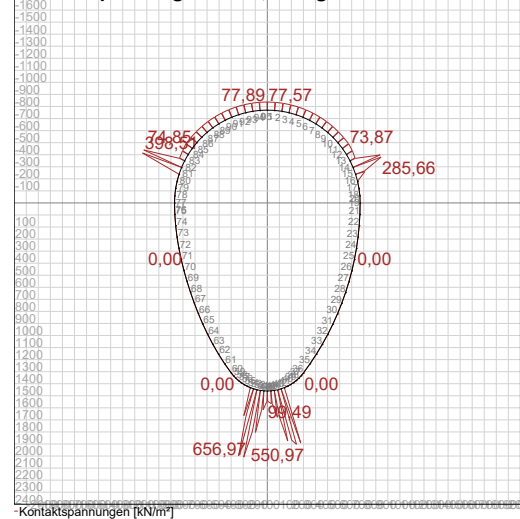
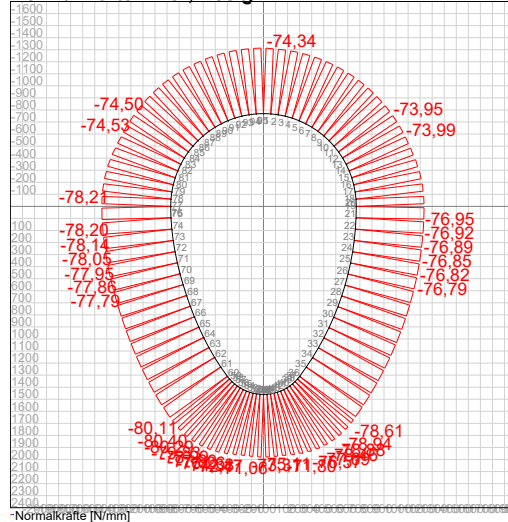
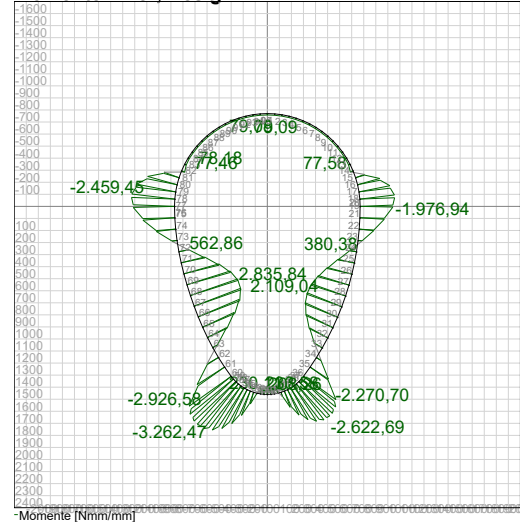
$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} + \alpha_{ki} \cdot \frac{M_d}{W_i} \quad (87)$$

Spannung in Element	Max σ_d	-14,68	8,74	N/mm ²
Zul. Spannung, Langzeit, Design:	$\sigma_{L,d}$	-55,56	55,56	N/mm ²

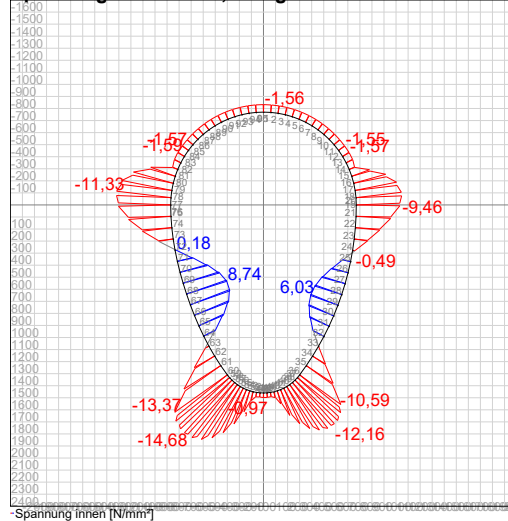
Ausnutzung Spannungen	U_σ	26,4	15,7	%
-----------------------	------------	------	------	---

Der Spannungsnachweis Innen ist erfüllt.

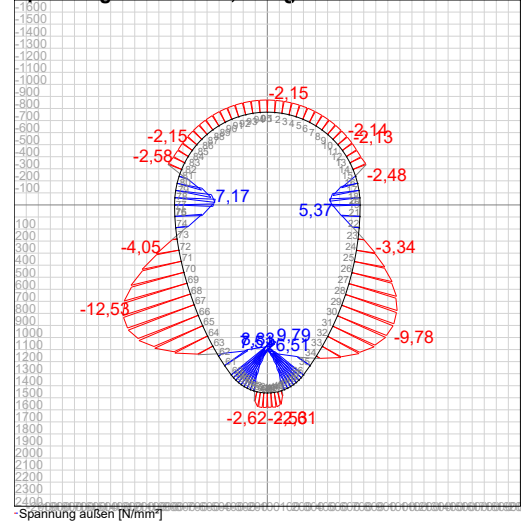
Die Spannungen liegen im zulässigen Bereich.

Biegelinie (x 4,28)

Kontaktspannungen Liner, Design

Normalkräfte Liner, Design

Momente Liner, Design


Spannung innen Liner, Design



Spannung außen Liner, Design



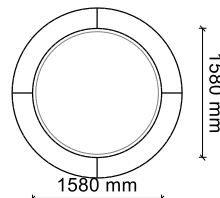
2.2.6 Lastfall 02 [Ersatzkreis] AZ III - hW 0,00 m + h 6,46 m + ws 0,0 % + ww 0,0 %, Langzeit

Bahn LM 71 - mehrgleisig

ws = 0,00 %
ww = 0,00 %
eg = 35,00 %
wGRV = 0,00 %

Min. Überdeckung Scheitel Altrohr

6460 mm



2.2.6.1 Geometrie diskretisiertes System

IngSoft EasyPipe 3.1.0.0 - 01.03.2026 - 22:34:45

13

Bauteil: SAN-03 - GFK Sanierung Hauptsammler Ost
MA-250346

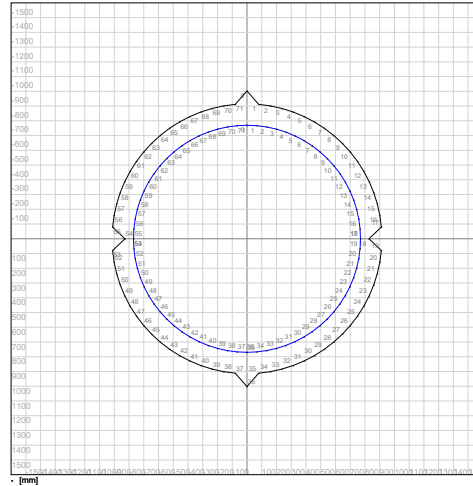
Seite: D-125

Kapitel / Vorgang: D - Nachweise
01.2 815 / 1570 t = 40 / Bereich Eisenbahnlasten

Archiv-Nr.

Skizze

Altrohr / Liner



Wanddicke Liner:	t_L	40,00	mm
Wanddicke Altrohr:	t_R	250,00	mm
Lokale Vorverformung:	ω_v	0,00	%
Lokale Vorverformung absolut:	w_v	0,00	mm
Gelenkringverformung:	$\omega_{GR,v}$	0,00	%
Gelenkringverformung absolut, einseitig:	$w_{GR,v}$	0,00	mm
Ringspalt:	ω_s	0,00	%
Spaltweite absolut (als konst. Ringspalt):	w_s	0,00	mm
Mittlerer Radius Liner:	$r_{L,m}$	770,00	mm
2.2.6.2 Erdlasten und Verkehrslasten			
Wichte Boden, unter Auftrieb:	γ_B'	10,00	kN/m ³
Wichte Boden, trocken:	γ_B	20,00	kN/m ³
Min. Überdeckung Scheitel Altrohr:	h_{min}	6,46	m
Wasser/Dämmerspiegel:	h_w	0,00	m
Wanddicke Altrohr:	t_R	250,00	mm
Vertikale Lichte Höhe Altrohr:	$d_{AR,iv}$	1.580,00	mm
Höhe Wasserspiegel über Altrohrscheitel:	h'_w	0,00	m
Vertikale Erdlast:	p_E	129,20	kN/m ²
Höhe Scheitel bis Kämpfer Altrohr:	$r_{AR,a}$	1.040,00	mm
Höhe Wasserspiegel Altrohrkämpfer bis Altrohrscheitel:	h'_{wk}	0,00	m
Vertikale Erdlast bis Kämpfer:	$p_{E,K}$	150,00	kN/m ²
Stoßbeiwert:	Φ_2	1,67	[-]
Stoßbeiwert reduziert:	$red \Phi_2$	1,12	[-]
Anpassungsfaktor α_{Qi} LM71 (DIN EN 1991-2):	$\alpha_{Qi,LM71}$	1,00	[-]
Einfache Bodenspannung aus Verkehr:	p	23,65	kN/m ²
Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Scheitelhöhe:	p_T	26,59	kN/m ²
Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Kämpferhöhe (ohne φ):	p_K	21,11	kN/m ²
Erddruckbeiwert (Einbettung):	K_2	0,100	[-]
Horizontale Bodenspannung aus Verkehr:	$p_{T,h}$	2,24	kN/m ²
Vertikale Verkehrslast:	p_v	26,59	kN/m ²
Vertikale Verkehrslast, Design:	$p_{v,d}$	39,88	kN/m ²
Zusätzliche Flächenlast:	p_0	0,0	kN/m ²

Konzentrationsfaktor über Rohr:	λ_R	0,75	[-]
Vertikale Gesamtlast:	q_v	123,49	kN/m ²
Vertikale Gesamtlast, Design:	$q_{v,d}$	170,69	kN/m ²
E-Modul:	E2	5,00	N/mm ²
Horizontale Bettungssteifigkeit:	S _{Bh}	4,000	N/mm ²
Erdruckbeiwert (Einbettung):	K ₂	0,100	[-]
Konzentrationsfaktor Boden:	λ_B	1,083	[-]

Höhe Wasserspiegel Altrohrkämpfer bis Altrohrscheitel:	h'_{wk}	0,00	m
Höhe Scheitel bis Kämpfer Altrohr:	$r_{AR,a}$	1.040,00	mm
Horizontale Erdlast:	$q_{h,E}$	16,25	kN/m ²
Horizontale Verkehrslast:	$q_{h,V}$	2,24	kN/m ²
Horizontale Gesamtlast:	q_h	18,49	kN/m ²
Designwert Horizontale Gesamtlast:	$q_{h,d}$	25,30	kN/m ²
Rechnerischer Erdruckbeiwert:	K_2'	0,148	[-]

2.2.6.3 Verformungsnachweis Liner, Gebrauchslast

Relevanter Durchmesser für prozentuale Verformung:	d_v	1.580,00	mm
Spaltweite absolut (als konst. Ringspalt):	w_s	0,00	mm
Lokale Vorverformung absolut:	w_v	0,00	mm
Gelenkringverformung absolut, einseitig:	$w_{GR,v}$	0,00	mm
Elastische Verformung absolut, vertikal:	$w_{el,v,E1}$	-31,70	mm
Elastische Verformung absolut, vertikal:	$w_{el,v}$	31,70	mm
Zulässige Verformung elastisch absolut:	$zul\ w_{el}$	10,00	mm

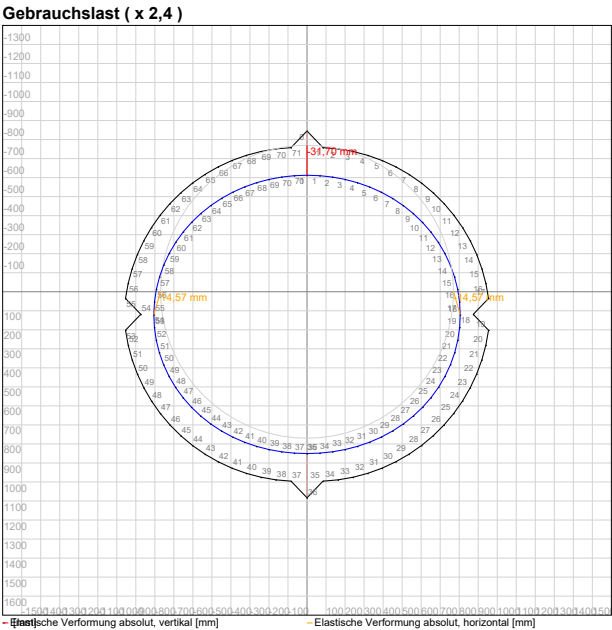
Die errechnete absolute elastische Verformung ist größer als die von der Deutschen Bahn AG festgelegten 10 mm!

Elastische Verformung relativ:	$\delta_{v,el}$	2,01	%
Zulässige Verformung elastisch:	$zul\ \delta_{v,el}$	2,00	%

Die errechnete elastische Verformung ist größer als die zulässige Verformung!

Gesamte Durchmesseränderung:	w	31,70	mm
Relative Gesamtverformung:	δ_v	2,01	%
Anhaltswert Gesamtverformung:	$\delta_{v,A}$	10,00	%

Elastische Verformung absolut, horizontal:	$w_{el,h,E1}$	-14,57	mm
Elastische Verformung absolut, horizontal:	$w_{el,h,E2}$	14,57	mm
Elastische Verformung absolut, horizontal:	$w_{el,h}$	29,13	mm



2.2.6.4 Bodeninteraktion (Gebrauchslast)

Bettungsziffer, Scheitel:	CB	3.846,15	kN/m³
Innerer Reibungswinkel:	φ'	20,00	°
Beiwert:	K _p	2,04	[-]
Vertikale Erdlast:	p _E	129,20	kN/m²
Grenzwert q _h im Scheitel (informativ):	q _{h,max}	214,11	kN/m²
Vertikale Erdlast bis Kämpfer:	p _{E,K}	150,00	kN/m²
Grenzwert q _h im Kämpfer:	q _{h,max,K}	248,58	kN/m²
Der Wert wird im Kämpfer abgelesen.			
Horizontale Gesamtlast:	q _h	18,49	kN/m²
Seitlicher Bettungsreaktionsdruck:	q _h *	73,27	kN/m²
Summe horizontale Kräfte:	q _h + q _h *	91,76	kN/m²
Ausnutzung max q _h :	U _{maxq_h}	36,9	%

Für die Interaktion Boden-Rohrsystem wurde der elastische Ansatz verwendet. Die Bettung des Rohres wurde um den gesamten Umfang als konstant angenommen. Damit ergibt sich eine Dreiecksförmige Verteilung der Bodenspannungen, deren Maximalwert auf 75% des passiven Erddrucks begrenzt ist.

Die horizontale Kraft aus Bettungsreaktionsdruck und seitlichem Druck im Kämpfer liegt unterhalb des Grenzwertes.

2.2.6.5 Stabilitätsnachweis (Designwerte)

Der maßgebende Nachweis der Stabilität erfolgt über die im Abschnitt 7.6.4.2 (DWA-A 143-2) zugelassene (genauere) Variante einer Berechnung nach Theorie II. Ordnung unter Berücksichtigung der Vorverformungen und der Spaltbildung. Hierbei wird numerisch überprüft, ob ein elastisches Stabilitätsversagen (Beulen) unter gamma-facher Last eintritt. Darüber hinaus wird geprüft, ob die bei dieser Berechnung ermittelten Spannungen die vorgegeben maximalen Grenzspannungen für Zug und Druck mit einfacher Sicherheit nicht überschreiten.

Nachweis entfällt.

Spannungsnachweis Liner, Design

Fläche (Wanddicke): A 40,00 mm²/mm

Außen

Widerstandsmoment, außen:

W_e 266,67 mm³/mm
Druck Zug

Element	i	35	17	[-]
Korrekturfaktor (Verformtes System)	α _k	0,98	0,98	[-]
Normalkraft in Element	N _d	-1,01	-4,86	N/mm
Moment in Element	M _d	2.509,02	-1.343,38	Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} - \alpha_{ka} \cdot \frac{M_d}{W_e} \quad (88)$$

Spannung in Element	Max σ _d	-9,27	4,83	N/mm²
Zul. Spannung, Langzeit, Design:	σ _{L,d}	-55,56	55,56	N/mm²

Ausnutzung Spannungen	U _σ	16,7	8,7	%
-----------------------	----------------	------	-----	---

Der Spannungsnachweis Außen ist erfüllt.

Innen

Widerstandsmoment, innen:

W_i 266,67 mm³/mm
Druck Zug

Element	i	18	36	[-]
Korrekturfaktor (Verformtes System)	α _k	1,02	1,02	[-]
Normalkraft in Element	N _d	-4,88	-1,01	N/mm
Moment in Element	M _d	-1.343,38	2.509,02	Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} + \alpha_{ki} \cdot \frac{M_d}{W_i} \quad (87)$$

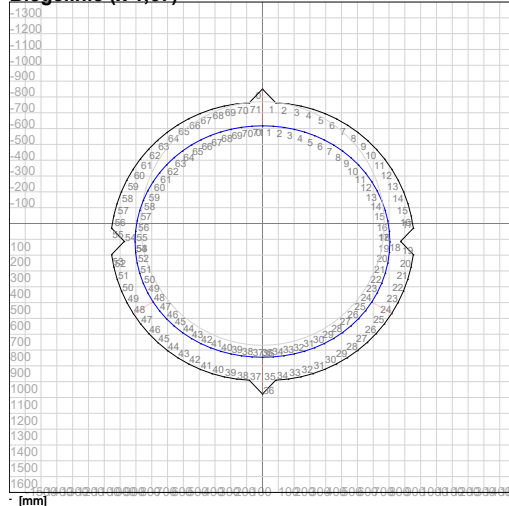
Spannung in Element	Max σ _d	-5,25	9,55	N/mm²
Zul. Spannung, Langzeit, Design:	σ _{L,d}	-55,56	55,56	N/mm²

Ausnutzung Spannungen	U _σ	9,4	17,2	%
-----------------------	----------------	-----	------	---

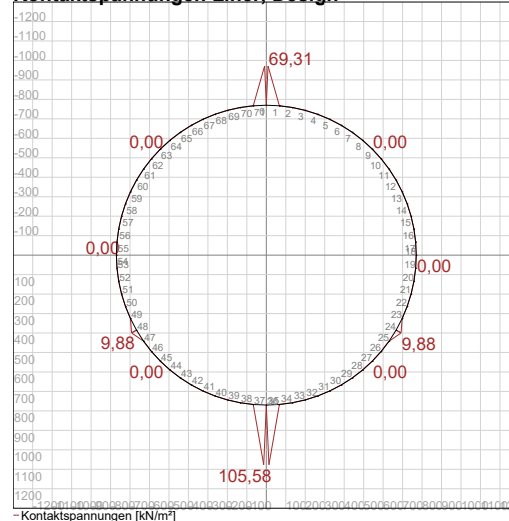
Der Spannungsnachweis Innen ist erfüllt.

Die Spannungen liegen im zulässigen Bereich.

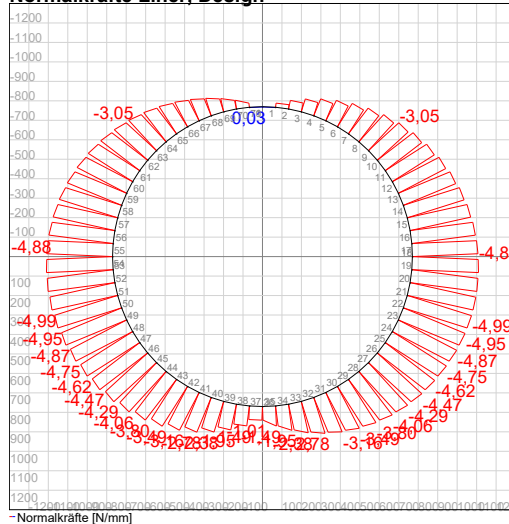
Biegelinie (x 1,67)



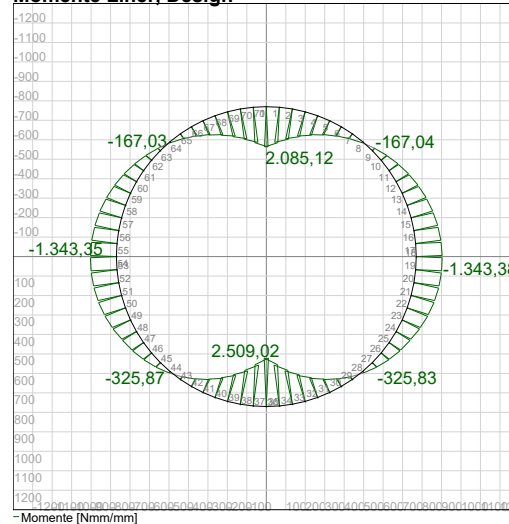
Kontaktspannungen Liner, Design



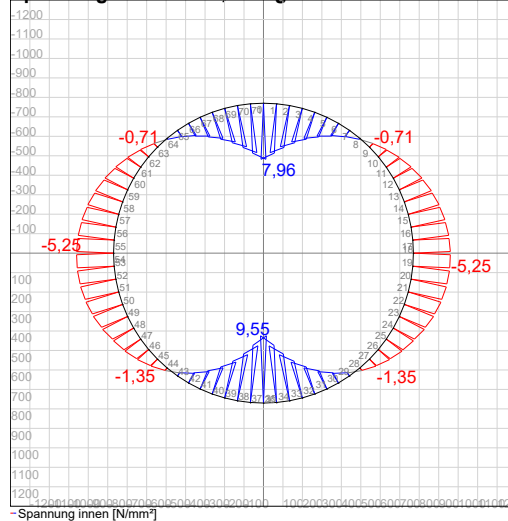
Normalkräfte Liner, Design



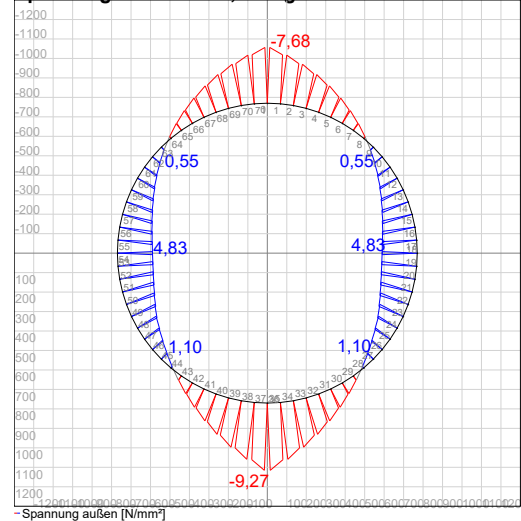
Momente Liner, Design



Spannung innen Liner, Design



Spannung außen Liner, Design



2.2.6.6 Spannungsnachweis Liner, Zwang

Fläche (Wanddicke):

A 40,00 mm²/mm

Außen

Widerstandsmoment, außen:

W_e 266,67 mm³/mm

Element

i

Druck 35

Zug 17

[-]

Korrekturfaktor (Verformtes System)

α_k

0,98 0,98

[-]

Normalkraft in Element

N_d

-0,94 -6,12

N/mm

Moment in Element

M_d

3.211,40 -1.737,86

Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} - \alpha_{ka} \cdot \frac{M_d}{W_e}$$

(88)

Spannung in Element

Max σ_d

-11,86 6,25

N/mm²

Zul. Spannung, Langzeit, Design:

σ_{L,d}

-55,56 55,56

N/mm²

Ausnutzung Spannungen

U_σ

21,3 11,3

%

Der Spannungsnachweis Außen ist erfüllt.

Innen

Widerstandsmoment, innen:

W_i 266,67 mm³/mm

Element

i

Druck 18

Zug 36

[-]

Korrekturfaktor (Verformtes System)

α_k

1,02 1,02

[-]

Normalkraft in Element

N_d

-6,15 -0,94

N/mm

Moment in Element

M_d

-1.737,86 3.211,40

Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} + \alpha_{ki} \cdot \frac{M_d}{W_i}$$

(87)

Spannung in Element

Max σ_d

-6,78 12,23

N/mm²

Zul. Spannung, Langzeit, Design:

σ_{L,d}

-55,56 55,56

N/mm²

Ausnutzung Spannungen

U_σ

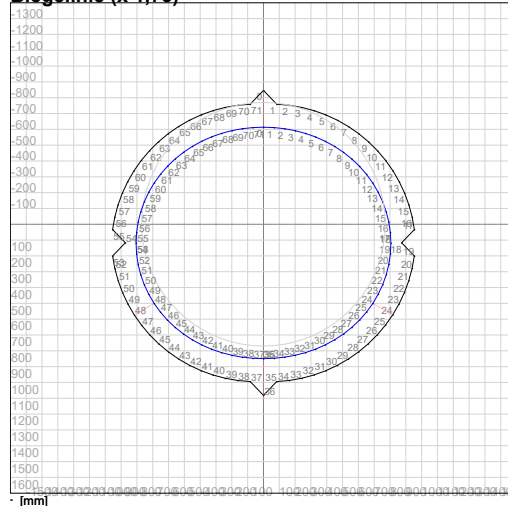
12,2 22,0

%

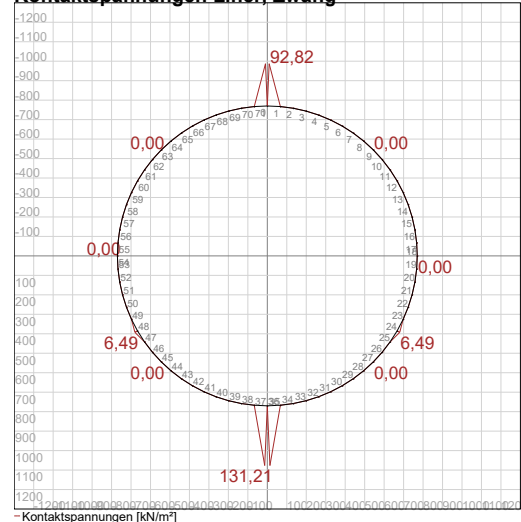
Der Spannungsnachweis Innen ist erfüllt.

Die Spannungen liegen im zulässigen Bereich.

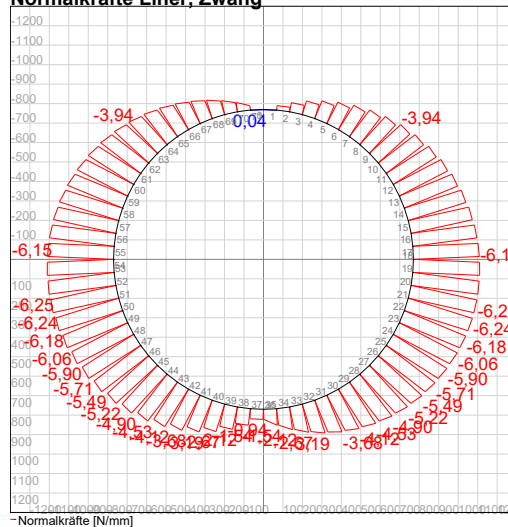
Biegelinie (x 1,73)



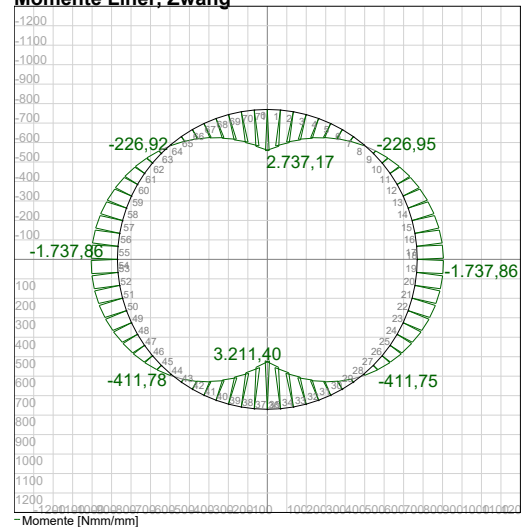
Kontaktspannungen Liner, Zwang

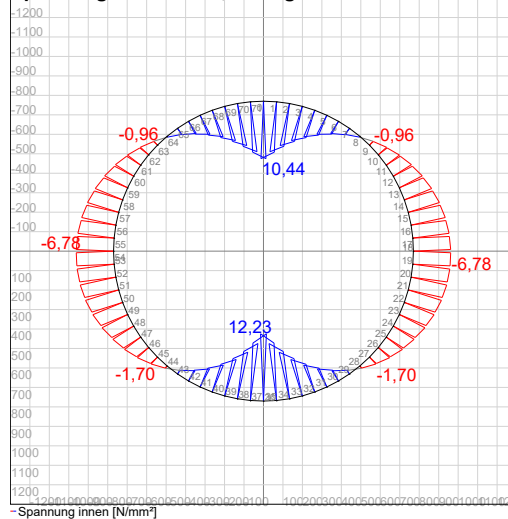
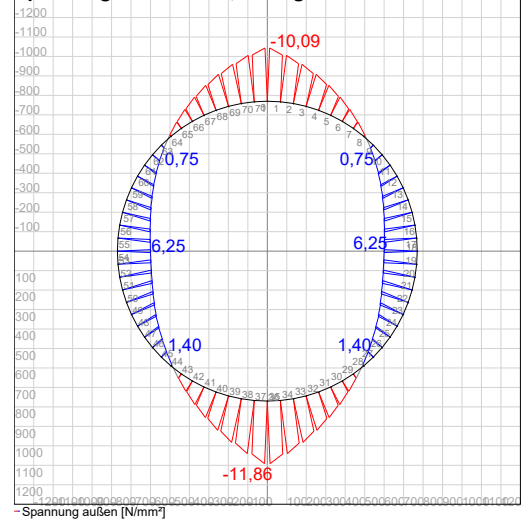


Normalkräfte Liner, Zwang



Momente Liner, Zwang



Spannung innen Liner, Zwang

Spannung außen Liner, Zwang


2.2.6.7 Altrohrspannungen Kämpfer

Vertikale Gesamtlast, Design:

Wanddicke Altrohr:

Außendurchmesser Altrohr Kämpfer:

Bezogene Gelenkringexzentrität:

Druckzonenbreite:

$q_{v,d}$	170,69	kN/m²
t_R	250,00	mm
$d_{AR,k}$	2.080,00	mm
e_G/t	35,00	%
b_D	100,00	mm

$$N_{K,d} = -q_{v,d} (1 + \omega_{GR,v}) \cdot \frac{d_{AR,k}}{2}$$

Druckkraft im Kämpfer:

Spannung in der Druckzone:

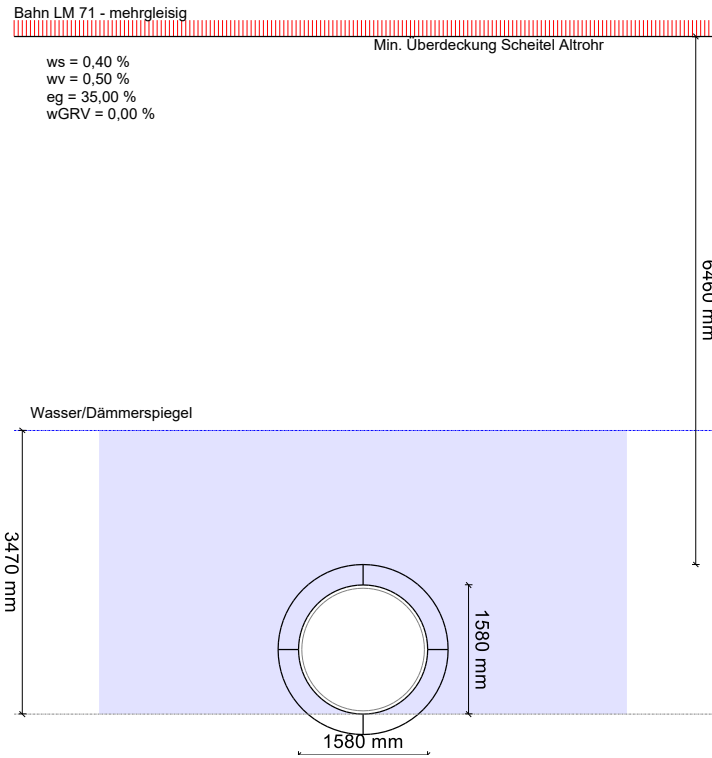
Zul. Druckfestigkeit, Langzeit:

Ausnutzung Druckspannungen AR Kämpfer:

$N_{K,d}$	-177,52	N/mm
σ_d	-2,66	N/mm²
$f_{c,rad,L}$	5,00	N/mm²
$U_{\sigma D,AR}$	53,3	%

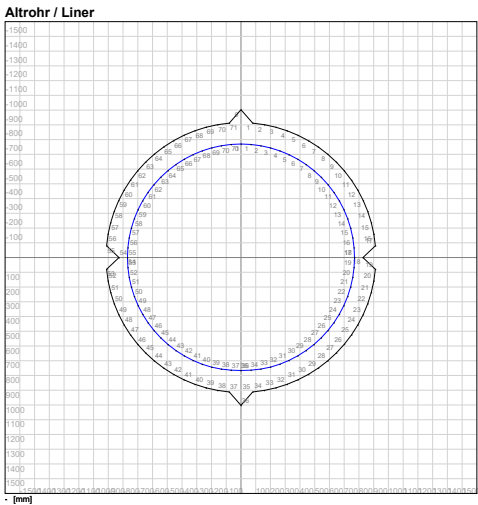
Der Spannungsnachweis für Kämpferspannungen im Altrohr ist erfüllt.

2.2.7 Lastfall 03 [Ersatzkreis] AZ III - hW 3,47 m + h 6,46 m + ws 0,4 % + ww 0,5 %, Langzeit



2.2.7.1 Geometrie diskretisiertes System

Skizze



Wanddicke Liner:	t_L	40,00	mm
Wanddicke Altrrohr:	t_R	250,00	mm
Lokale Vorverformung:	ω_v	0,50	%
Lokale Vorverformung absolut:	w_v	3,85	mm
Gelenkringverformung:	$\omega_{GR,v}$	0,00	%
Gelenkringverformung absolut, einseitig:	$w_{GR,v}$	0,00	mm
Ringspalt:	ω_s	0,40	%
Spaltweite absolut (als konst. Ringspalt):	w_s	3,08	mm
Mittlerer Radius Liner:	$r_{L,m}$	770,00	mm

2.2.7.2 Erdlasten und Verkehrslasten

Wichte Boden, unter Auftrieb:	γ_B'	10,00	kN/m ³
Wichte Boden, trocken:	γ_B	20,00	kN/m ³
Min. Überdeckung Scheitel Altrrohr:	h_{min}	6,46	m
Wasser/Dämmerspiegel:	h_w	3,47	m
Wanddicke Altrrohr:	t_R	250,00	mm
Vertikale Lichte Höhe Altrrohr:	$d_{AR,iv}$	1.580,00	mm
Höhe Wasserspiegel über Altrrohrscheitel:	h'_w	1,64	m
Vertikale Erdlast:	p_E	112,80	kN/m ²
Höhe Scheitel bis Kämpfer Altrrohr:	$r_{AR,a}$	1.040,00	mm
Höhe Wasserspiegel Altrrohrkämpfer bis Altrrohrscheitel:	h'_{wk}	1,04	m
Vertikale Erdlast bis Kämpfer:	$p_{E,K}$	123,20	kN/m ²
Stoßbeiwert:	Φ_2	1,67	[-]
Stoßbeiwert reduziert:	$red \Phi_2$	1,12	[-]
Anpassungsfaktor α_{Qi} LM71 (DIN EN 1991-2):	$\alpha_{Qi,LM71}$	1,00	[-]
Einfache Bodenspannung aus Verkehr:	p	23,65	kN/m ²
Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Scheitelhöhe:	p_T	26,59	kN/m ²
Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Kämpferhöhe (ohne φ):	p_K	21,11	kN/m ²
Erdruckbeiwert (Einbettung):	K_2	0,100	[-]
Horizontale Bodenspannung aus Verkehr:	$p_{T,h}$	2,24	kN/m ²
Vertikale Verkehrslast:	p_v	26,59	kN/m ²
Vertikale Verkehrslast, Design:	$p_{v,d}$	39,88	kN/m ²
Zusätzliche Flächenlast:	p_0	0,0	kN/m ²

Konzentrationsfaktor über Rohr:	λ_R	0,75	[-]
Vertikale Gesamtlast:	q_v	111,19	kN/m ²
Vertikale Gesamtlast, Design:	$q_{v,d}$	154,09	kN/m ²
E-Modul:	E_2	5,00	N/mm ²
Horizontale Bettungssteifigkeit:	S_{Bh}	4,000	N/mm ²
Erdruckbeiwert (Einbettung):	K_2	0,100	[-]
Konzentrationsfaktor Boden:	λ_B	1,083	[-]

Höhe Wasserspiegel Altrrohrkämpfer bis Altrrohrscheitel:	h'_{wk}	1,04	m
Höhe Scheitel bis Kämpfer Altrrohr:	$r_{AR,a}$	1.040,00	mm
Horizontale Erdlast:	$q_{h,E}$	13,35	kN/m ²
Horizontale Verkehrslast:	$q_{h,v}$	2,24	kN/m ²
Horizontale Gesamtlast:	q_h	15,59	kN/m ²
Designwert Horizontale Gesamtlast:	$q_{h,d}$	21,38	kN/m ²
Rechnerischer Erdruckbeiwert:	K_2'	0,139	[-]

2.2.7.3 Verformungsnachweis Liner, Gebrauchslast

Relevanter Durchmesser für prozentuale Verformung:	d_v	1.580,00	mm
Spaltweite absolut (als konst. Ringspalt):	w_s	3,08	mm
Lokale Vorverformung absolut:	w_v	3,85	mm
Gelenkringverformung absolut, einseitig:	$w_{GR,v}$	0,00	mm

Elastische Verformung absolut, vertikal: $w_{el,v}$ 29,46 mm
 Zulässige Verformung elastisch absolut: $zul\ w_{el}$ 10,00 mm

Die errechnete absolute elastische Verformung ist größer als die von der Deutschen Bahn AG festgelegten 10 mm!

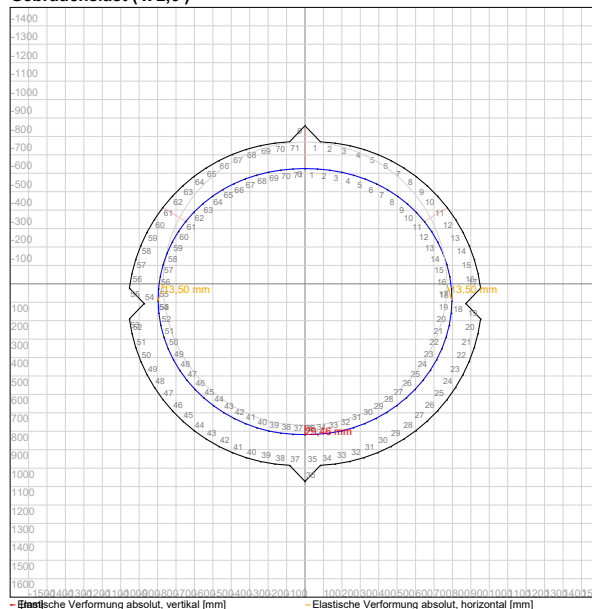
Elastische Verformung relativ: $\delta_{v,el}$ 1,86 %
 Zulässige Verformung elastisch: $zul\ \delta_{v,el}$ 2,00 %

Die errechnete elastische Verformung ist kleiner als die zulässige Verformung.

Gesamte Durchmesseränderung: w 33,31 mm
 Relative Gesamtverformung: δ_v 2,11 %
 Anhaltswert Gesamtverformung: $\delta_{v,A}$ 10,00 %

Elastische Verformung absolut, horizontal: $w_{el,h,E1}$ -13,50 mm
 Elastische Verformung absolut, horizontal: $w_{el,h,E2}$ 13,50 mm
 Elastische Verformung absolut, horizontal: $w_{el,h}$ 26,99 mm

Gebrauchslast (x 2,6)



2.2.7.4 Bodeninteraktion (Gebrauchslast)

Bettungsziffer, Scheitel: CB 3.846,15 kN/m³
 Innerer Reibungswinkel: ϕ' 20,00 °
 Beiwert: K_p 2,04 [-]
 Vertikale Erdlast: p_E 112,80 kN/m²
 Grenzwert q_h im Scheitel (informativ): $q_{h,max}$ 186,93 kN/m²

Vertikale Erdlast bis Kämpfer: $p_{E,K}$ 123,20 kN/m²
 Grenzwert q_h im Kämpfer: $q_{h,max,K}$ 204,16 kN/m²

Der Wert wird im Kämpfer abgelesen.

Horizontale Gesamtlast: q_h 15,59 kN/m²
 Seitlicher Bettungsreaktionsdruck: q_h^* 66,44 kN/m²
 Summe horizontale Kräfte: $q_h + q_h^*$ 82,03 kN/m²
 Ausnutzung max q_h : U_{maxq_h} 40,2 %

Für die Interaktion Boden-Rohrsystem wurde der elastische Ansatz verwendet. Die Bettung des Rohres wurde um den gesamten Umfang als konstant angenommen. Damit ergibt sich eine Dreiecksförmige Verteilung der Bodenspannungen, deren Maximalwert auf 75% des passiven Erddrucks begrenzt ist.

Die horizontale Kraft aus Bettungsreaktionsdruck und seitlichem Druck im Kämpfer liegt unterhalb des Grenzwertes.

2.2.7.5 Stabilitätsnachweis (Designwerte)

Der maßgebende Nachweis der Stabilität erfolgt über die im Abschnitt 7.6.4.2 (DWA-A 143-2) zugelassene (genauere) Variante einer Berechnung nach Theorie II. Ordnung unter Berücksichtigung der Vorverformungen und der Spaltbildung. Hierbei wird numerisch überprüft, ob ein elastisches Stabilitätsversagen (Beulen) unter gamma-facher Last eintritt. Darüber hinaus wird geprüft, ob die bei dieser Berechnung ermittelten Spannungen die vorgegeben maximalen Grenzspannungen für Zug und Druck mit einfacher Sicherheit nicht überschreiten.

Nachweis entfällt.

Spannungsnachweis Liner, Design

Fläche (Wanddicke): A 40,00 mm²/mm

Außen

Widerstandsmoment, außen:

W_e 266,67 mm³/mm

Element	i	Druck	Zug	
Korrekturfaktor (Verformtes System)	α _k	0,98	0,98	[-]
Normalkraft in Element	N _d	-33,14	-37,77	N/mm
Moment in Element	M _d	3.026,15	-1.557,12	Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} - \alpha_{ka} \cdot \frac{M_d}{W_e} \quad (88)$$

Spannung in Element	Max σ _d	-11,98	4,79	N/mm ²
Zul. Spannung, Langzeit, Design:	σ _{L,d}	-55,56	55,56	N/mm ²

Ausnutzung Spannungen	U _σ	21,6	8,6	%
-----------------------	----------------	------	-----	---

Der Spannungsnachweis Außen ist erfüllt.

Innen

Widerstandsmoment, innen:

W_i 266,67 mm³/mm

Element	i	Druck	Zug	
Korrekturfaktor (Verformtes System)	α _k	1,02	1,02	[-]
Normalkraft in Element	N _d	-37,78	-33,14	N/mm
Moment in Element	M _d	-1.557,12	3.026,15	Nmm/mm

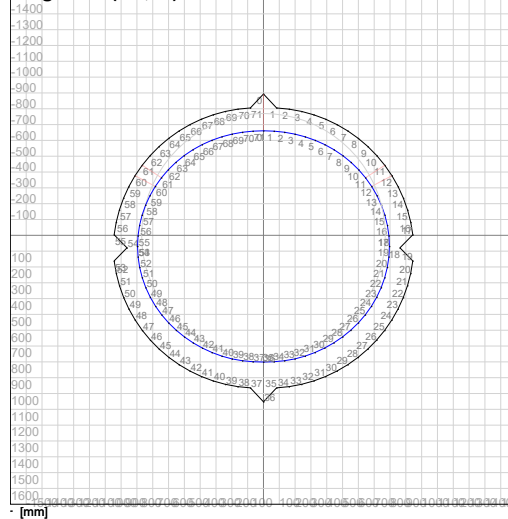
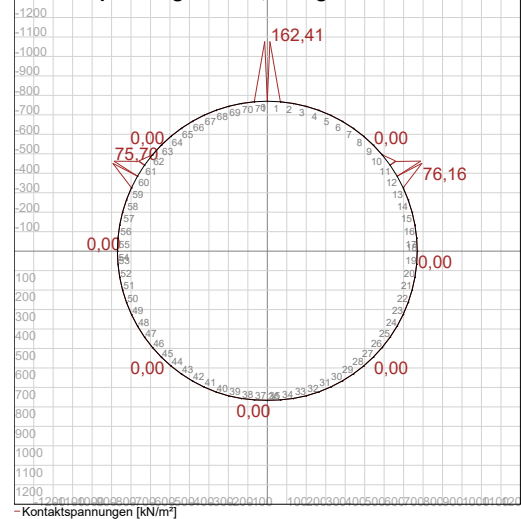
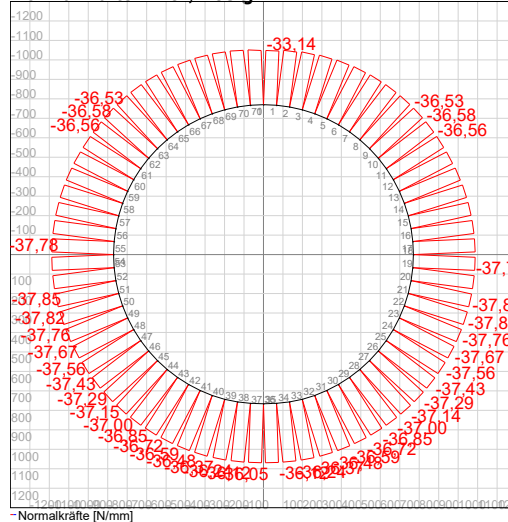
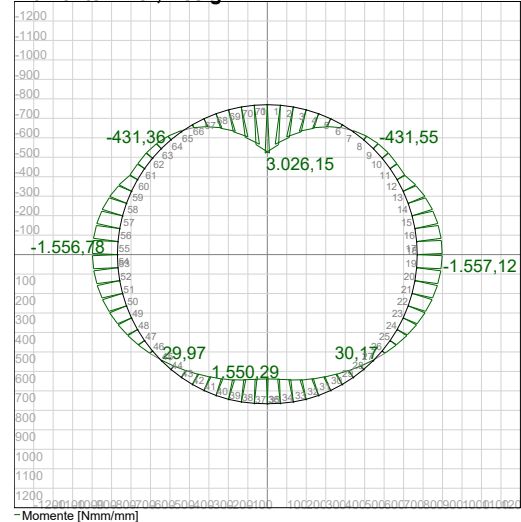
$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} + \alpha_{ki} \cdot \frac{M_d}{W_i} \quad (87)$$

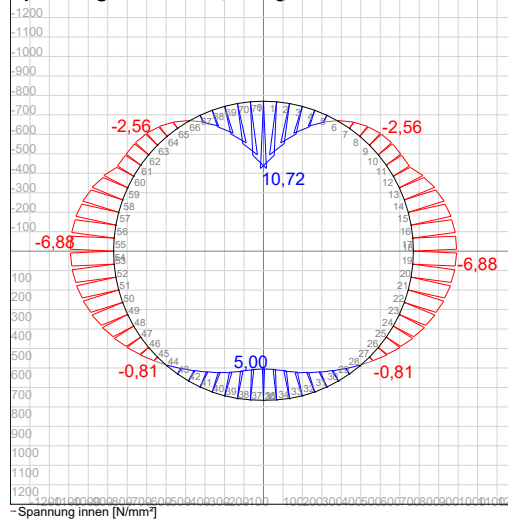
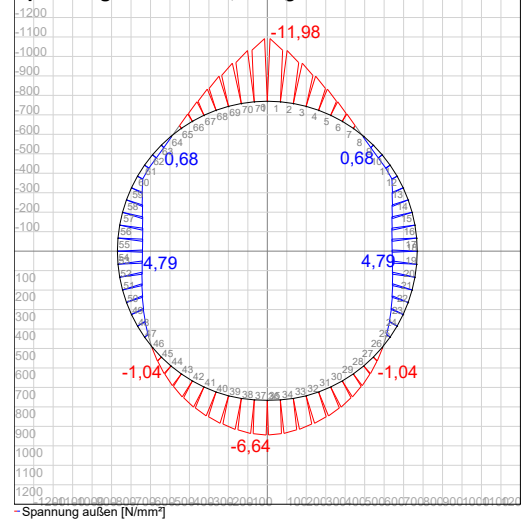
Spannung in Element	Max σ _d	-6,88	10,72	N/mm ²
Zul. Spannung, Langzeit, Design:	σ _{L,d}	-55,56	55,56	N/mm ²

Ausnutzung Spannungen	U _σ	12,4	19,3	%
-----------------------	----------------	------	------	---

Der Spannungsnachweis Innen ist erfüllt.

Die Spannungen liegen im zulässigen Bereich.

Biegelinie (x 1,40)

Kontaktspannungen Liner, Design

Normalkräfte Liner, Design

Momente Liner, Design


Spannung innen Liner, Design

Spannung außen Liner, Design


2.2.7.6 Spannungsnachweis Liner, Zwang

Fläche (Wanddicke):

A 40,00 mm²/mm

Außen

Widerstandsmoment, außen:

W_e 266,67 mm³/mm

Element

i

Druck 71

Zug 54

[-]

Korrekturfaktor (Verformtes System)

α_k

0,98

0,98

[-]

Normalkraft in Element

N_d

-31,80

-37,75

N/mm

Moment in Element

M_d

3.707,84

-1.870,62

Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} - \alpha_{ka} \cdot \frac{M_d}{W_e}$$

(88)

Spannung in Element

Max σ_d

-14,46

5,95

N/mm²

Zul. Spannung, Langzeit, Design:

σ_{L,d}

-55,56

55,56

N/mm²

Ausnutzung Spannungen

U_σ

26,0

10,7

%

Der Spannungsnachweis Außen ist erfüllt.

Innen

Widerstandsmoment, innen:

W_i 266,67 mm³/mm

Element

i

Druck 55

Zug 0

[-]

Korrekturfaktor (Verformtes System)

α_k

1,02

1,02

[-]

Normalkraft in Element

N_d

-37,78

-31,80

N/mm

Moment in Element

M_d

-1.870,62

3.707,84

Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} + \alpha_{ki} \cdot \frac{M_d}{W_i}$$

(87)

Spannung in Element

Max σ_d

-8,08

13,35

N/mm²

Zul. Spannung, Langzeit, Design:

σ_{L,d}

-55,56

55,56

N/mm²

Ausnutzung Spannungen

U_σ

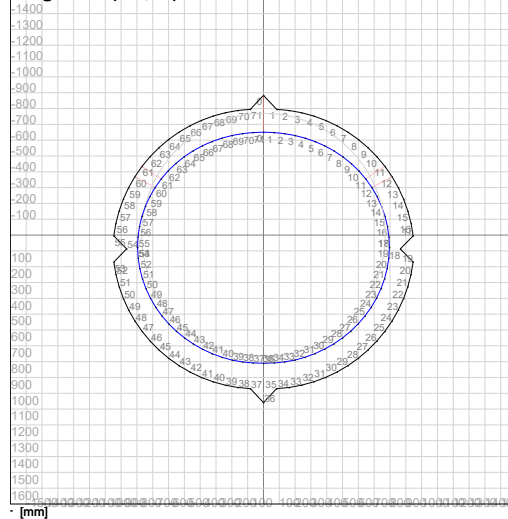
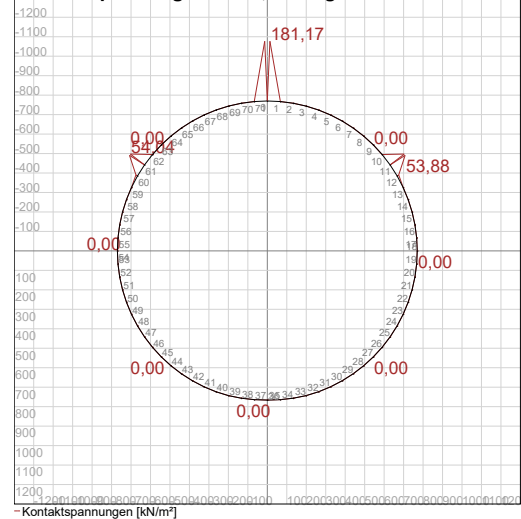
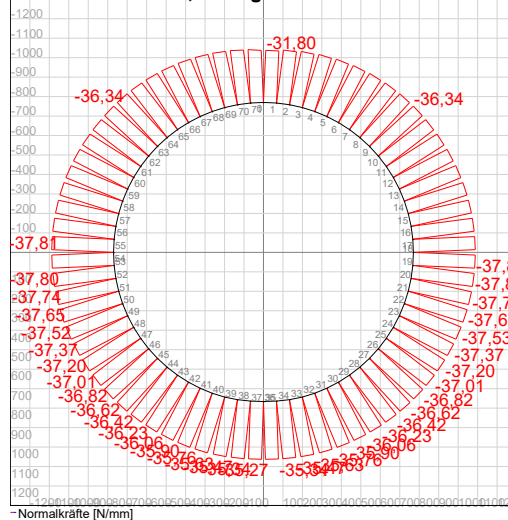
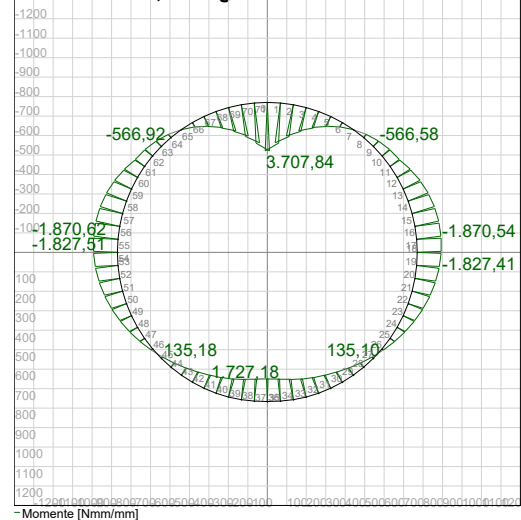
14,5

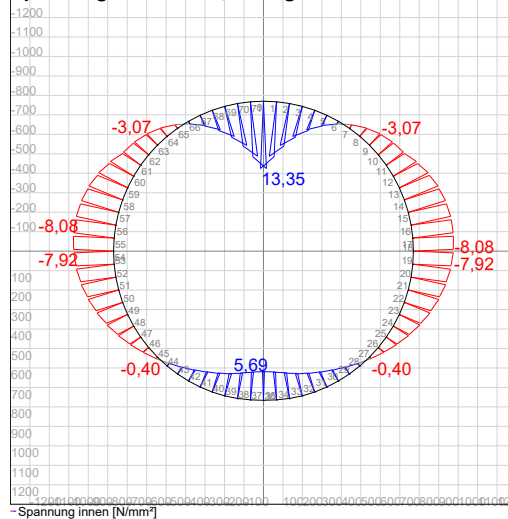
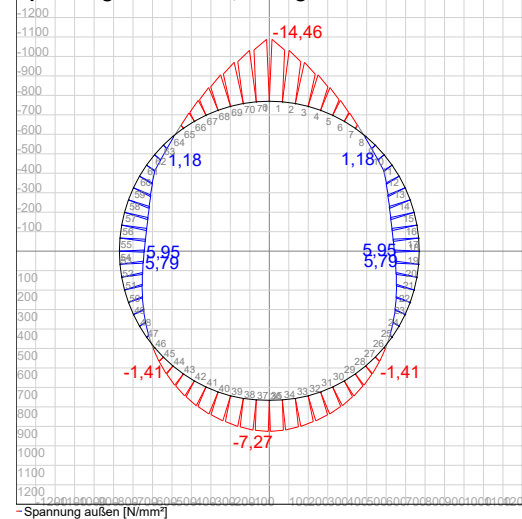
24,0

%

Der Spannungsnachweis Innen ist erfüllt.

Die Spannungen liegen im zulässigen Bereich.

Biegelinie (x 1,55)

Kontaktspannungen Liner, Zwang

Normalkräfte Liner, Zwang

Momente Liner, Zwang


Spannung innen Liner, Zwang

Spannung außen Liner, Zwang


2.2.7.7 Altrohrspannungen Kämpfer

Vertikale Gesamtlast, Design:

Wanddicke Altrohr:

Außendurchmesser Altrohr Kämpfer:

Bezogene Gelenkringexzentrizität:

Druckzonbreite:

$q_{v,d}$	154,09	kN/m ²
t_R	250,00	mm
$d_{AR,k}$	2.080,00	mm
e_G/t	35,00	%
b_D	100,00	mm

$$N_{K,d} = -q_{v,d} (1 + \omega_{GR,v}) \cdot \frac{d_{AR,k}}{2}$$

Druckkraft im Kämpfer:

Spannung in der Druckzone:

Zul. Druckfestigkeit, Langzeit:

Ausnutzung Druckspannungen AR Kämpfer:

$N_{K,d}$	-160,25	N/mm
σ_d	-2,40	N/mm ²
$f_{c,rad,L}$	5,00	N/mm ²
$U_{\sigma D,AR}$	48,1	%

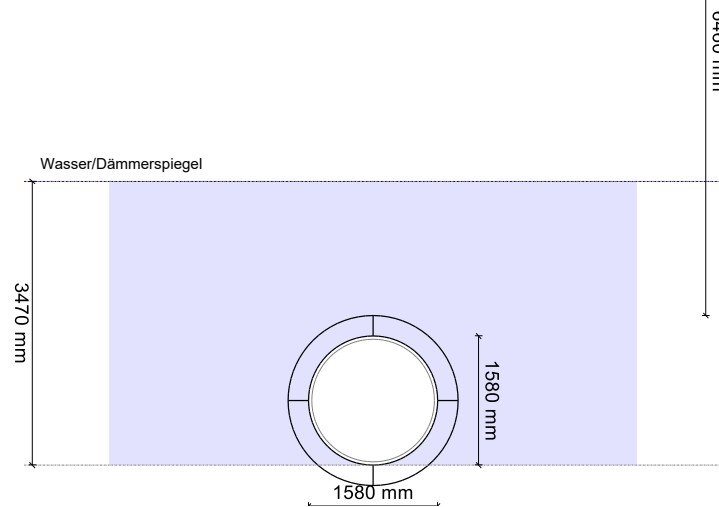
Der Spannungsnachweis für Kämpferspannungen im Altrohr ist erfüllt.

2.2.8 Lastfall 04 [Ersatzkreis] AZ III - hW 3,47 m + h 6,46 m + ws 0,0 % + ww 0,0 %, Langzeit

Bahn LM 71 - mehrgleisig

 ws = 0,00 %
 ww = 0,00 %
 eg = 35,00 %
 wGRV = 0,00 %

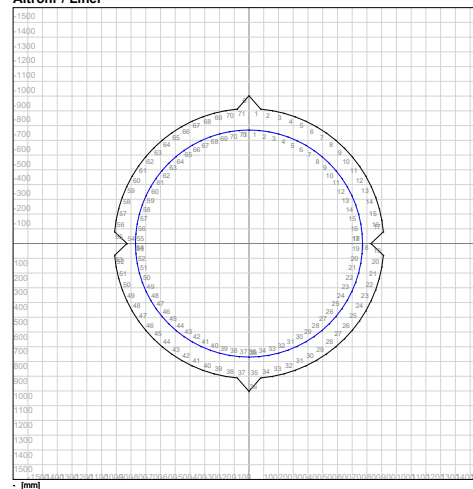
Min. Überdeckung Scheitel Altrohr



2.2.8.1 Geometrie diskretisiertes System

Skizze

Altrohr / Liner



IngSoft EasyPipe 3.1.0.0 - 01.03.2026 - 22:34:45

31

Bauteil: SAN-03 - GFK Sanierung Hauptsammler Ost
 MA-250346

Seite:
 D-143

Kapitel / Vorgang: D - Nachweise
 01.2 815 / 1570 t = 40 / Bereich Eisenbahnlasten

Archiv-Nr.

Wanddicke Liner:	t_L	40,00	mm
Wanddicke Altrrohr:	t_R	250,00	mm
Lokale Vorverformung:	ω_v	0,00	%
Lokale Vorverformung absolut:	w_v	0,00	mm
Gelenkringverformung:	$\omega_{GR,v}$	0,00	%
Gelenkringverformung absolut, einseitig:	$w_{GR,v}$	0,00	mm
Ringspalt:	ω_s	0,00	%
Spaltweite absolut (als konst. Ringspalt):	w_s	0,00	mm
Mittlerer Radius Liner:	$r_{L,m}$	770,00	mm

2.2.8.2 Erdlasten und Verkehrslasten

Wichte Boden, unter Auftrieb:	γ_B'	10,00	kN/m ³
Wichte Boden, trocken:	γ_B	20,00	kN/m ³
Min. Überdeckung Scheitel Altrrohr:	h_{min}	6,46	m
Wasser/Dämmerspiegel:	h_w	3,47	m
Wanddicke Altrrohr:	t_R	250,00	mm
Vertikale Lichte Höhe Altrrohr:	$d_{AR,iv}$	1.580,00	mm
Höhe Wasserspiegel über Altrrohrscheitel:	h'_w	1,64	m
Vertikale Erdlast:	p_E	112,80	kN/m ²
Höhe Scheitel bis Kämpfer Altrrohr:	$r_{AR,a}$	1.040,00	mm
Höhe Wasserspiegel Altrrohrkämpfer bis Altrrohrscheitel:	h'_{wk}	1,04	m
Vertikale Erdlast bis Kämpfer:	$p_{E,K}$	123,20	kN/m ²
Stoßbeiwert:	Φ_2	1,67	[-]
Stoßbeiwert reduziert:	$red \Phi_2$	1,12	[-]
Anpassungsfaktor α_{Qi} LM71 (DIN EN 1991-2):	$\alpha_{Qi,LM71}$	1,00	[-]
Einfache Bodenspannung aus Verkehr:	p	23,65	kN/m ²
Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Scheitelhöhe:	p_T	26,59	kN/m ²
Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Kämpferhöhe (ohne φ):	p_K	21,11	kN/m ²
Erdruckbeiwert (Einbettung):	K_2	0,100	[-]
Horizontale Bodenspannung aus Verkehr:	$p_{T,h}$	2,24	kN/m ²
Vertikale Verkehrslast:	p_v	26,59	kN/m ²
Vertikale Verkehrslast, Design:	$p_{v,d}$	39,88	kN/m ²
Zusätzliche Flächenlast:	p_0	0,0	kN/m ²

Konzentrationsfaktor über Rohr:	λ_R	0,75	[-]
Vertikale Gesamtlast:	q_v	111,19	kN/m ²
Vertikale Gesamtlast, Design:	$q_{v,d}$	154,09	kN/m ²
E-Modul:	E_2	5,00	N/mm ²
Horizontale Bettungssteifigkeit:	S_{Bh}	4,000	N/mm ²
Erdruckbeiwert (Einbettung):	K_2	0,100	[-]
Konzentrationsfaktor Boden:	λ_B	1,083	[-]

Höhe Wasserspiegel Altrrohrkämpfer bis Altrrohrscheitel:	h'_{wk}	1,04	m
Höhe Scheitel bis Kämpfer Altrrohr:	$r_{AR,a}$	1.040,00	mm
Horizontale Erdlast:	$q_{h,E}$	13,35	kN/m ²
Horizontale Verkehrslast:	$q_{h,v}$	2,24	kN/m ²
Horizontale Gesamtlast:	q_h	15,59	kN/m ²
Designwert Horizontale Gesamtlast:	$q_{h,d}$	21,38	kN/m ²
Rechnerischer Erdruckbeiwert:	K_2'	0,139	[-]

2.2.8.3 Verformungsnachweis Liner, Gebrauchslast

Relevanter Durchmesser für prozentuale Verformung:	d_v	1.580,00	mm
Spaltweite absolut (als konst. Ringspalt):	w_s	0,00	mm
Lokale Vorverformung absolut:	w_v	0,00	mm
Gelenkringverformung absolut, einseitig:	$w_{GR,v}$	0,00	mm
Elastische Verformung absolut, vertikal:	$w_{el,v,E1}$	-28,87	mm

Elastische Verformung absolut, vertikal:

 $w_{el,v}$ 28,87 mm

Zulässige Verformung elastisch absolut:

 $zul\ w_{el}$ 10,00 mm

Die errechnete absolute elastische Verformung ist größer als die von der Deutschen Bahn AG festgelegten 10 mm!

Elastische Verformung relativ:

 $\delta_{v,el}$ 1,83 %

Zulässige Verformung elastisch:

 $zul\ \delta_{v,el}$ 2,00 %

Die errechnete elastische Verformung ist kleiner als die zulässige Verformung.

Gesamte Durchmesseränderung:

 w 28,87 mm

Relative Gesamtverformung:

 δ_v 1,83 %

Anhaltswert Gesamtverformung:

 $\delta_{v,A}$ 10,00 %

Elastische Verformung absolut, horizontal:

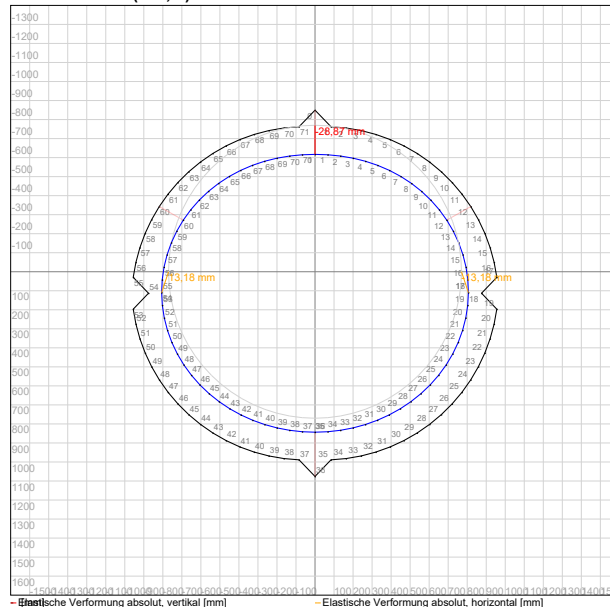
 $w_{el,h,E1}$ -13,18 mm

Elastische Verformung absolut, horizontal:

 $w_{el,h,E2}$ 13,18 mm

Elastische Verformung absolut, horizontal:

 $w_{el,h}$ 26,36 mm

Gebrauchslast (x 2,8)


2.2.8.4 Bodeninteraktion (Gebrauchslast)

Bettungsziffer, Scheitel:

 CB 3.846,15 kN/m^3

Innerer Reibungswinkel:

 ϕ' 20,00 °

Beiwert:

 K_p 2,04 [-]

Vertikale Erdlast:

 p_E 112,80 kN/m^2

Grenzwert q_h im Scheitel (informativ):

 $q_{h,max}$ 186,93 kN/m^2

Vertikale Erdlast bis Kämpfer:

 $p_{E,K}$ 123,20 kN/m^2

Grenzwert q_h im Kämpfer:

 $q_{h,max,K}$ 204,16 kN/m^2

Der Wert wird im Kämpfer abgelesen.

Horizontale Gesamtlast:

 q_h 15,59 kN/m^2

Seitlicher Bettungsreaktionsdruck:

 q_h^* 66,74 kN/m^2

Summe horizontale Kräfte:

 $q_h + q_h^*$ 82,33 kN/m^2

Ausnutzung max q_h :

 $U_{max,qh}$ 40,3 %

Für die Interaktion Boden-Rohrsystem wurde der elastische Ansatz verwendet. Die Bettung des Rohres wurde um den gesamten Umfang als konstant angenommen. Damit ergibt sich eine Dreiecksförmige Verteilung der Bodenspannungen, deren Maximalwert auf 75% des passiven Erddrucks begrenzt ist.

Die horizontale Kraft aus Bettungsreaktionsdruck und seitlichem Druck im Kämpfer liegt unterhalb des Grenzwertes.

2.2.8.5 Stabilitätsnachweis (Designwerte)

Der maßgebende Nachweis der Stabilität erfolgt über die im Abschnitt 7.6.4.2 (DWA-A 143-2) zugelassene (genauere) Variante einer Berechnung nach Theorie II. Ordnung unter Berücksichtigung der Vorverformungen und der Spaltbildung. Hierbei wird numerisch überprüft, ob ein elastisches Stabilitätsversagen (Beulen) unter gamma-facher Last eintritt. Darüber hinaus wird geprüft, ob die bei dieser Berechnung ermittelten Spannungen die vorgegeben maximalen Grenzspannungen für Zug und Druck mit einfacher Sicherheit nicht überschreiten.

Nachweis entfällt.

Spannungsnachweis Liner, Design

Fläche (Wanddicke): A 40,00 mm²/mm

Außen

Widerstandsmoment, außen:

		W_e	266,67	mm ³ /mm
		Druck	Zug	
Element	i	71	53	[-]
Korrekturfaktor (Verformtes System)	α_k	0,98	0,98	[-]
Normalkraft in Element	N_d	-33,24	-37,74	N/mm
Moment in Element	M_d	2.936,80	-1.466,52	Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} - \alpha_{ka} \cdot \frac{M_d}{W_e} \quad (88)$$

Spannung in Element	Max σ_d	-11,65	4,46	N/mm ²
Zul. Spannung, Langzeit, Design:	$\sigma_{L,d}$	-55,56	55,56	N/mm ²

Ausnutzung Spannungen	U_σ	21,0	8,0	%
-----------------------	------------	------	-----	---

Der Spannungsnachweis Außen ist erfüllt.

Innen

Widerstandsmoment, innen:

		W_i	266,67	mm ³ /mm
		Druck	Zug	
Element	i	54	0	[-]
Korrekturfaktor (Verformtes System)	α_k	1,02	1,02	[-]
Normalkraft in Element	N_d	-37,74	-33,24	N/mm
Moment in Element	M_d	-1.466,52	2.936,80	Nmm/mm

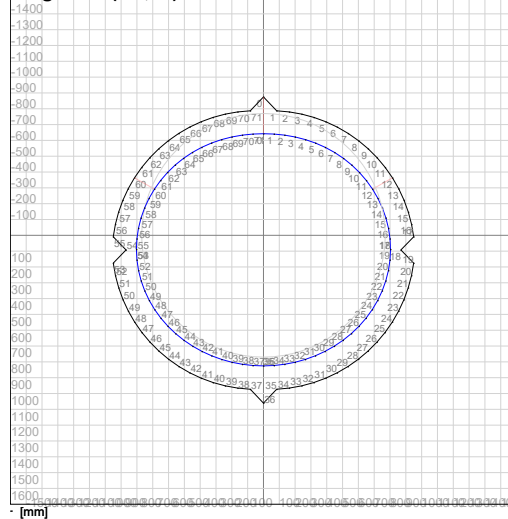
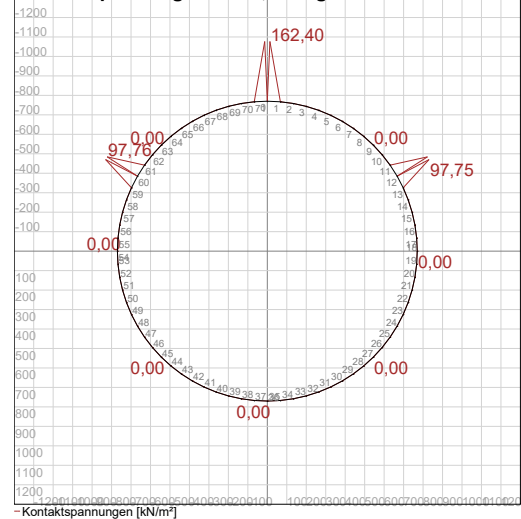
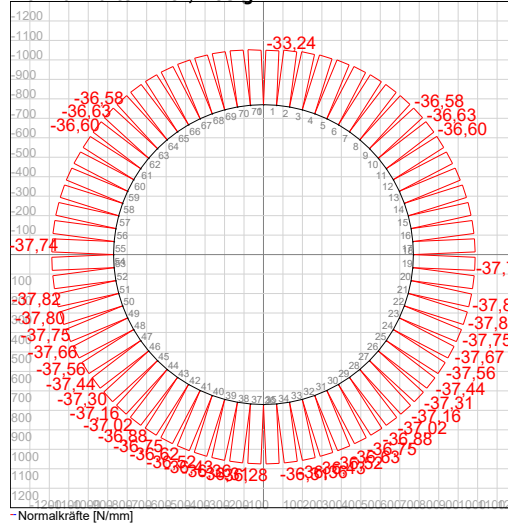
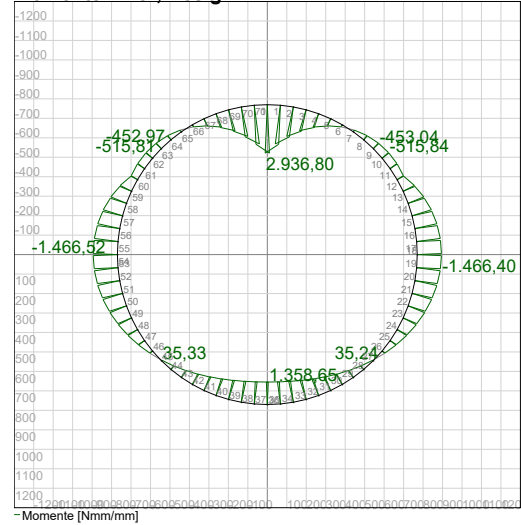
$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} + \alpha_{ki} \cdot \frac{M_d}{W_i} \quad (87)$$

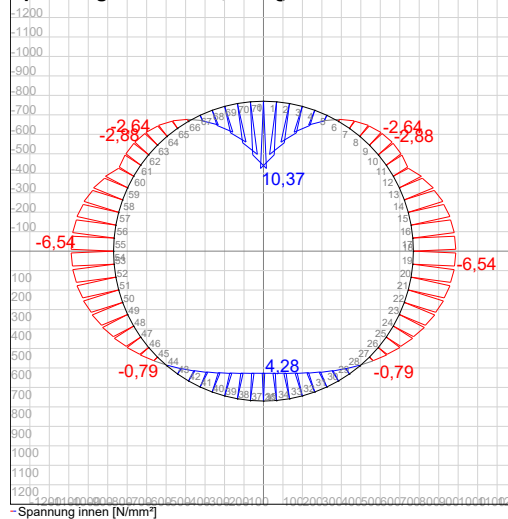
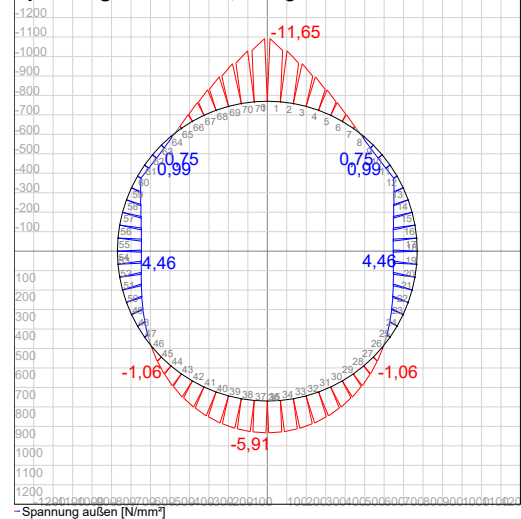
Spannung in Element	Max σ_d	-6,54	10,37	N/mm ²
Zul. Spannung, Langzeit, Design:	$\sigma_{L,d}$	-55,56	55,56	N/mm ²

Ausnutzung Spannungen	U_σ	11,8	18,7	%
-----------------------	------------	------	------	---

Der Spannungsnachweis Innen ist erfüllt.

Die Spannungen liegen im zulässigen Bereich.

Biegelinie (x 1,63)

Kontaktspannungen Liner, Design

Normalkräfte Liner, Design

Momente Liner, Design


Spannung innen Liner, Design

Spannung außen Liner, Design


2.2.8.6 Spannungsnachweis Liner, Zwang

Fläche (Wanddicke):

A 40,00 mm²/mm

Außen

Widerstandsmoment, außen:

W_e 266,67 mm³/mm

Element

i

Druck 71

Zug 55

[-]

Korrekturfaktor (Verformtes System)

α_k

0,98

0,98

[-]

Normalkraft in Element

N_d

-32,41

-38,16

N/mm

Moment in Element

M_d

3.628,88

-1.755,19

Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} - \alpha_{ka} \cdot \frac{M_d}{W_e}$$

(88)

Spannung in Element

Max σ_d

-14,18

5,51

N/mm²

Zul. Spannung, Langzeit, Design:

σ_{L,d}

-55,56

55,56

N/mm²

Ausnutzung Spannungen

U_σ

25,5

9,9

%

Der Spannungsnachweis Außen ist erfüllt.

Innen

Widerstandsmoment, innen:

W_i 266,67 mm³/mm

Element

i

Druck 54

Zug 0

[-]

Korrekturfaktor (Verformtes System)

α_k

1,02

1,02

[-]

Normalkraft in Element

N_d

-38,17

-32,41

N/mm

Moment in Element

M_d

-1.755,19

3.628,88

Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} + \alpha_{ki} \cdot \frac{M_d}{W_i}$$

(87)

Spannung in Element

Max σ_d

-7,65

13,03

N/mm²

Zul. Spannung, Langzeit, Design:

σ_{L,d}

-55,56

55,56

N/mm²

Ausnutzung Spannungen

U_σ

13,8

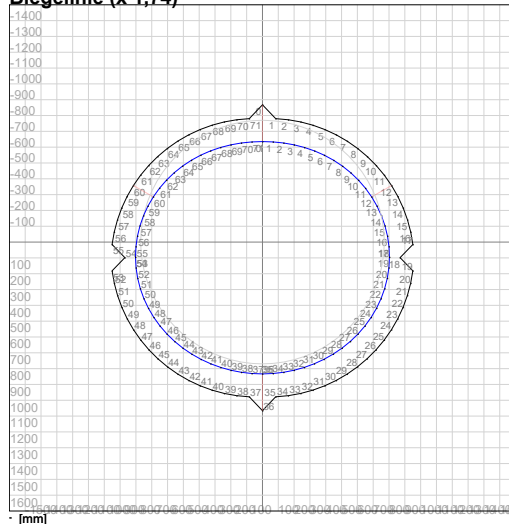
23,5

%

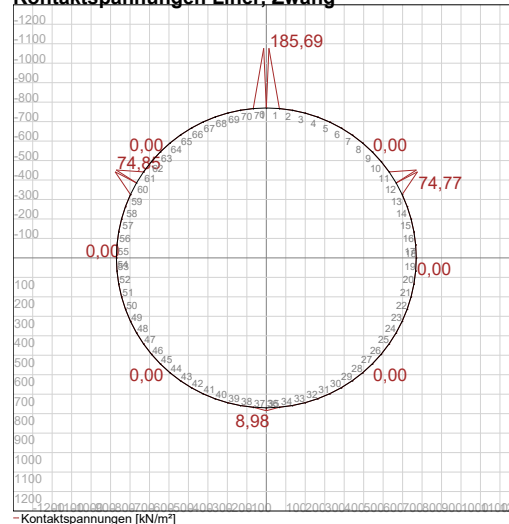
Der Spannungsnachweis Innen ist erfüllt.

Die Spannungen liegen im zulässigen Bereich.

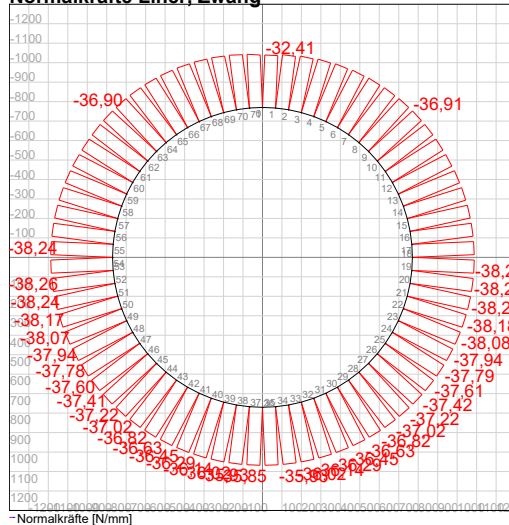
Biegelinie (x 1,74)



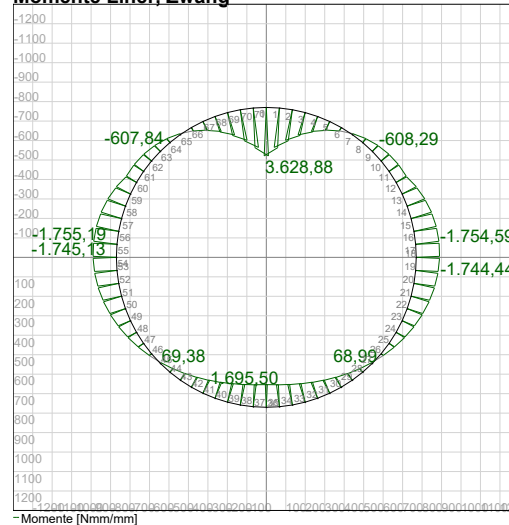
Kontaktspannungen Liner, Zwang

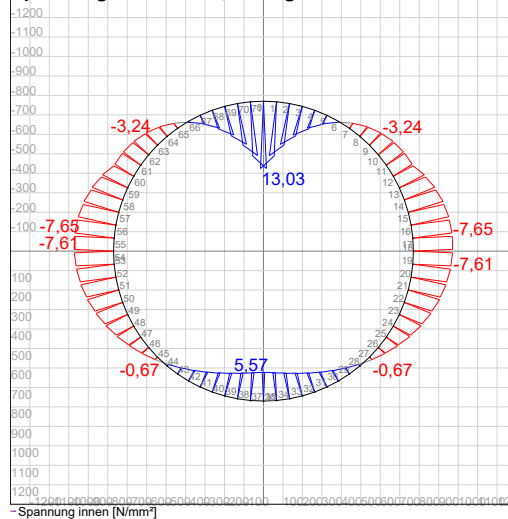
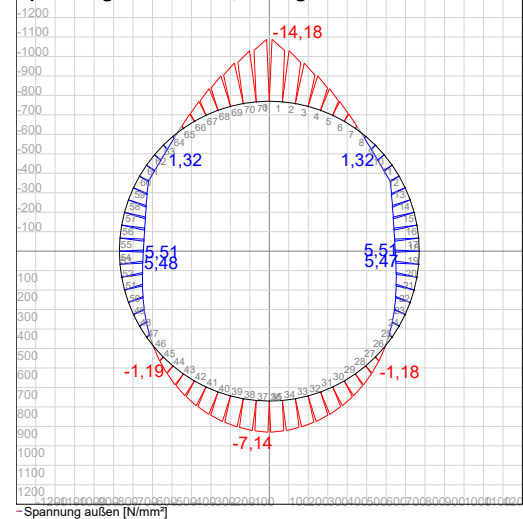


Normalkräfte Liner, Zwang



Momente Liner, Zwang



Spannung innen Liner, Zwang

Spannung außen Liner, Zwang


2.2.8.7 Altrohrspannungen Kämpfer

Vertikale Gesamtlast, Design:

Wanddicke Altrohr:

Außendurchmesser Altrohr Kämpfer:

Bezogene Gelenkringexzentrität:

Druckzonbreite:

$q_{v,d}$	154,09	kN/m²
t_R	250,00	mm
$da_{AR,k}$	2.080,00	mm
e_G/t	35,00	%
b_D	100,00	mm

$$N_{K,d} = -q_{v,d} (1 + \omega_{GR,v}) \cdot \frac{da_{AR,k}}{2}$$

Druckkraft im Kämpfer:

Spannung in der Druckzone:

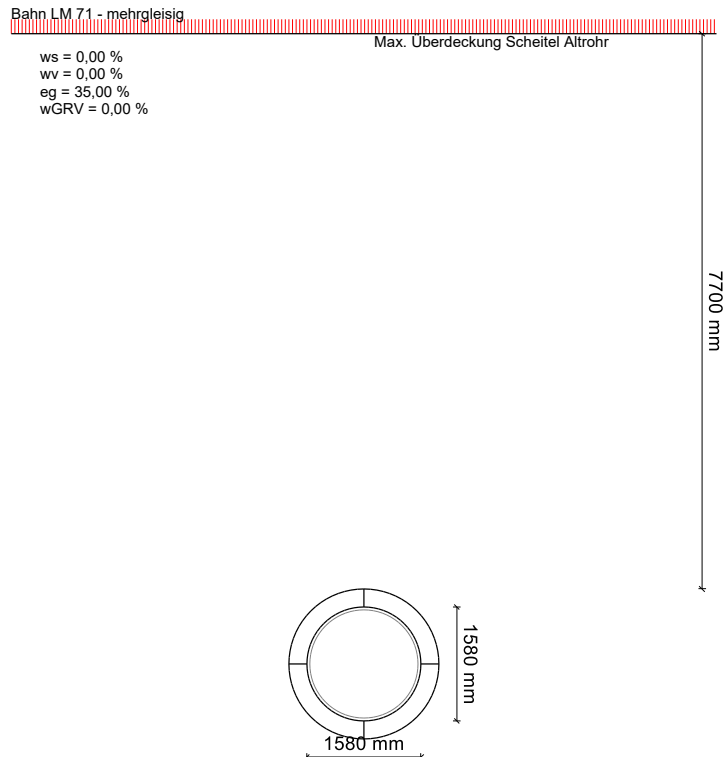
Zul. Druckfestigkeit, Langzeit:

Ausnutzung Druckspannungen AR Kämpfer:

$N_{K,d}$	-160,25	N/mm
σ_d	-2,40	N/mm²
$f_{c,rad,L}$	5,00	N/mm²
$U_{\sigma D,AR}$	48,1	%

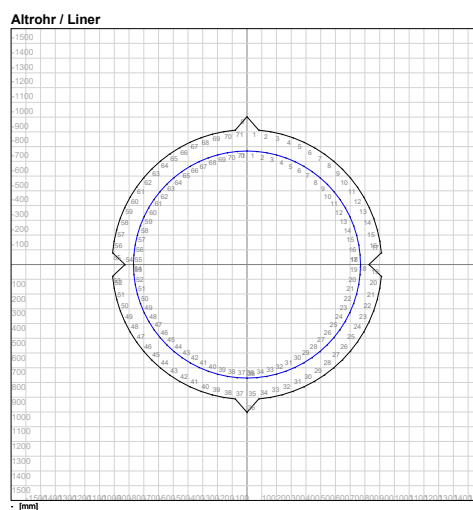
Der Spannungsnachweis für Kämpferspannungen im Altrohr ist erfüllt.

2.2.9 Lastfall 05 [Ersatzkreis] AZ III - hW 0,00 m + h 7,70 m + ws 0,0 % + vv 0,0 %, Langzeit



2.2.9.1 Geometrie diskretisiertes System

Skizze



Wanddicke Liner:	t_L	40,00	mm
Wanddicke Altrrohr:	t_R	250,00	mm
Lokale Vorverformung:	ω_v	0,00	%
Lokale Vorverformung absolut:	w_v	0,00	mm

Gelenkringverformung:	$\omega_{GR,v}$	0,00	%
Gelenkringverformung absolut, einseitig:	$w_{GR,v}$	0,00	mm
Ringspalt:	ω_s	0,00	%
Spaltweite absolut (als konst. Ringspalt):	w_s	0,00	mm

Mittlerer Radius Liner:	$r_{L,m}$	770,00	mm
-------------------------	-----------	--------	----

2.2.9.2 Erdlasten und Verkehrslasten

Wichte Boden, unter Auftrieb:	γ_B'	10,00	kN/m ³
Wichte Boden, trocken:	γ_B	20,00	kN/m ³
Max. Überdeckung Scheitel Altrrohr:	h_{max}	7,70	m
Wasser/Dämmerspiegel:	h_w	0,00	m
Wanddicke Altrrohr:	t_R	250,00	mm
Vertikale Lichte Höhe Altrrohr:	$d_{AR,iv}$	1.580,00	mm
Höhe Wasserspiegel über Altrrohrscheitel:	h'_w	0,00	m
Vertikale Erdlast:	p_E	154,00	kN/m ²
Höhe Scheitel bis Kämpfer Altrrohr:	$r_{AR,a}$	1.040,00	mm
Höhe Wasserspiegel Altrrohrkämpfer bis Altrrohrscheitel:	h'_{wk}	0,00	m
Vertikale Erdlast bis Kämpfer:	$p_{E,K}$	174,80	kN/m ²
Stoßbeiwert:	Φ_2	1,67	[-]
Stoßbeiwert reduziert:	$red \Phi_2$	1,00	[-]
Anpassungsfaktor α_{Qi} LM71 (DIN EN 1991-2):	$\alpha_{Qi,LM71}$	1,00	[-]
Einfache Bodenspannung aus Verkehr:	p	20,62	kN/m ²
Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Scheitelhöhe:	p_T	20,62	kN/m ²

Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Kämpferhöhe (ohne φ):	p_K	18,08	kN/m ²
Erdruckbeiwert (Einbettung):	K_2	0,100	[-]
Horizontale Bodenspannung aus Verkehr:	$p_{T,h}$	1,81	kN/m ²

Vertikale Verkehrslast:	p_v	20,62	kN/m ²
Vertikale Verkehrslast, Design:	$p_{v,d}$	30,93	kN/m ²
Zusätzliche Flächenlast:	p_0	0,0	kN/m ²

Konzentrationsfaktor über Rohr:	λ_R	0,75	[-]
Vertikale Gesamtlast:	q_v	136,12	kN/m ²
Vertikale Gesamtlast, Design:	$q_{v,d}$	186,86	kN/m ²
E-Modul:	E_2	5,00	N/mm ²
Horizontale Bettungssteifigkeit:	S_{Bh}	4,000	N/mm ²
Erdruckbeiwert (Einbettung):	K_2	0,100	[-]
Konzentrationsfaktor Boden:	λ_B	1,083	[-]

Höhe Wasserspiegel Altrrohrkämpfer bis Altrrohrscheitel:	h'_{wk}	0,00	m
Höhe Scheitel bis Kämpfer Altrrohr:	$r_{AR,a}$	1.040,00	mm
Horizontale Erdlast:	$q_{h,E}$	18,94	kN/m ²
Horizontale Verkehrslast:	$q_{h,v}$	1,81	kN/m ²
Horizontale Gesamtlast:	q_h	20,74	kN/m ²
Designwert Horizontale Gesamtlast:	$q_{h,d}$	28,28	kN/m ²
Rechnerischer Erdruckbeiwert:	K_2'	0,151	[-]

2.2.9.3 Verformungsnachweis Liner, Gebrauchslast

Relevanter Durchmesser für prozentuale Verformung:	d_v	1.580,00	mm
Spaltweite absolut (als konst. Ringspalt):	w_s	0,00	mm
Lokale Vorverformung absolut:	w_v	0,00	mm
Gelenkringverformung absolut, einseitig:	$w_{GR,v}$	0,00	mm
Elastische Verformung absolut, vertikal:	$w_{el,v,E1}$	-34,58	mm

Elastische Verformung absolut, vertikal: $w_{el,v}$ 34,58 mm
 Zulässige Verformung elastisch absolut: $zul\ w_{el}$ 10,00 mm

Die errechnete absolute elastische Verformung ist größer als die von der Deutschen Bahn AG festgelegten 10 mm!

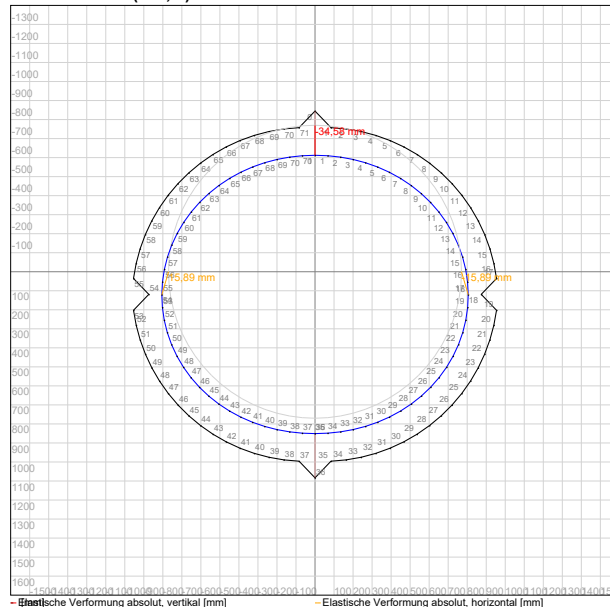
Elastische Verformung relativ: $\delta_{v,el}$ 2,19 %
 Zulässige Verformung elastisch: $zul\ \delta_{v,el}$ 2,00 %

Die errechnete elastische Verformung ist größer als die zulässige Verformung!

Gesamte Durchmesseränderung: w 34,58 mm
 Relative Gesamtverformung: δ_v 2,19 %
 Anhaltswert Gesamtverformung: $\delta_{v,A}$ 10,00 %

Elastische Verformung absolut, horizontal: $w_{el,h,E1}$ -15,89 mm
 Elastische Verformung absolut, horizontal: $w_{el,h,E2}$ 15,89 mm
 Elastische Verformung absolut, horizontal: $w_{el,h}$ 31,78 mm

Gebrauchslast (x 2,2)



2.2.9.4 Bodeninteraktion (Gebrauchslast)

Bettungsziffer, Scheitel: CB 3.846,15 kN/m³
 Innerer Reibungswinkel: φ' 20,00 °
 Beiwert: K_p 2,04 [-]
 Vertikale Erdlast: p_E 154,00 kN/m²
 Grenzwert q_h im Scheitel (informativ): $q_{h,max}$ 255,21 kN/m²

Vertikale Erdlast bis Kämpfer: $p_{E,K}$ 174,80 kN/m²
 Grenzwert q_h im Kämpfer: $q_{h,max,K}$ 289,68 kN/m²

Der Wert wird im Kämpfer abgelesen.

Horizontale Gesamtlast: q_h 20,74 kN/m²
 Seitlicher Bettungsreaktionsdruck: q_h^* 79,91 kN/m²
 Summe horizontale Kräfte: $q_h + q_h^*$ 100,66 kN/m²
 Ausnutzung max q_h : $U_{max,qh}$ 34,7 %

Für die Interaktion Boden-Rohrsystem wurde der elastische Ansatz verwendet. Die Bettung des Rohres wurde um den gesamten Umfang als konstant angenommen. Damit ergibt sich eine Dreiecksförmige Verteilung der Bodenspannungen, deren Maximalwert auf 75% des passiven Erddrucks begrenzt ist.

Die horizontale Kraft aus Bettungsreaktionsdruck und seitlichem Druck im Kämpfer liegt unterhalb des Grenzwertes.

2.2.9.5 Stabilitätsnachweis (Designwerte)

Der maßgebende Nachweis der Stabilität erfolgt über die im Abschnitt 7.6.4.2 (DWA-A 143-2) zugelassene (genauere) Variante einer Berechnung nach Theorie II. Ordnung unter Berücksichtigung der Vorverformungen und der Spaltbildung. Hierbei wird numerisch überprüft, ob ein elastisches Stabilitätsversagen (Beulen) unter gamma-facher Last eintritt. Darüber hinaus wird geprüft, ob die bei dieser Berechnung ermittelten Spannungen die vorgegeben maximalen Grenzspannungen für Zug und Druck mit einfacher Sicherheit nicht überschreiten.

Nachweis entfällt.

Spannungsnachweis Liner, Design

Fläche (Wanddicke): A 40,00 mm²/mm

Außen

Widerstandsmoment, außen:

W_e 266,67 mm³/mm
Druck Zug

Element	i	35	17	[-]
Korrekturfaktor (Verformtes System)	α _k	0,98	0,98	[-]
Normalkraft in Element	N _d	-1,00	-5,20	N/mm
Moment in Element	M _d	2.699,46	-1.453,49	Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} - \alpha_{ka} \cdot \frac{M_d}{W_e} \quad (88)$$

Spannung in Element	Max σ _d	-9,97	5,23	N/mm ²
Zul. Spannung, Langzeit, Design:	σ _{L,d}	-55,56	55,56	N/mm ²

Ausnutzung Spannungen	U _σ	18,0	9,4	%
-----------------------	----------------	------	-----	---

Der Spannungsnachweis Außen ist erfüllt.

Innen

Widerstandsmoment, innen:

W_i 266,67 mm³/mm
Druck Zug

Element	i	18	36	[-]
Korrekturfaktor (Verformtes System)	α _k	1,02	1,02	[-]
Normalkraft in Element	N _d	-5,22	-1,00	N/mm
Moment in Element	M _d	-1.453,49	2.699,46	Nmm/mm

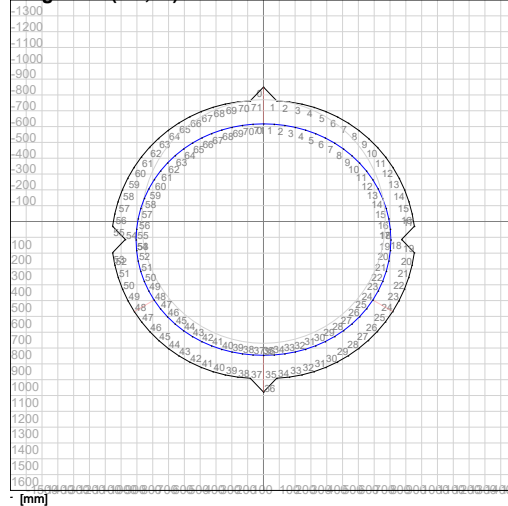
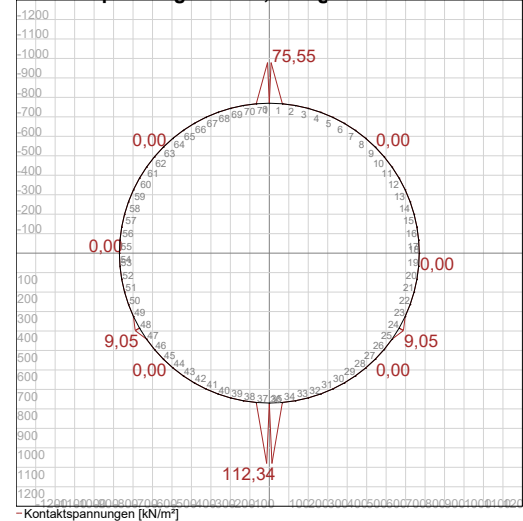
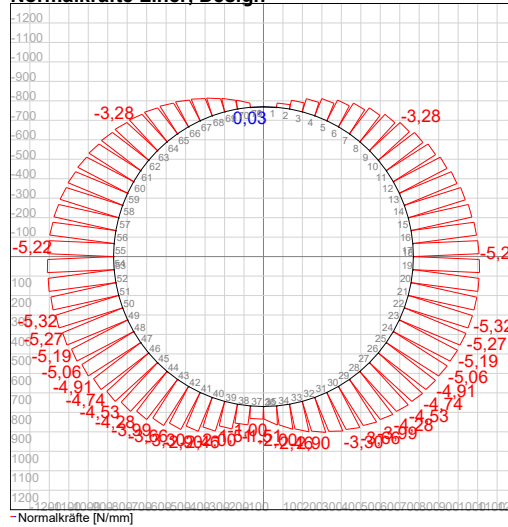
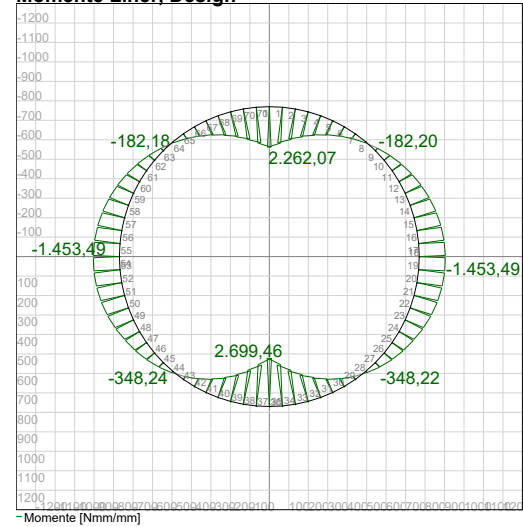
$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} + \alpha_{ki} \cdot \frac{M_d}{W_i} \quad (87)$$

Spannung in Element	Max σ _d	-5,68	10,27	N/mm ²
Zul. Spannung, Langzeit, Design:	σ _{L,d}	-55,56	55,56	N/mm ²

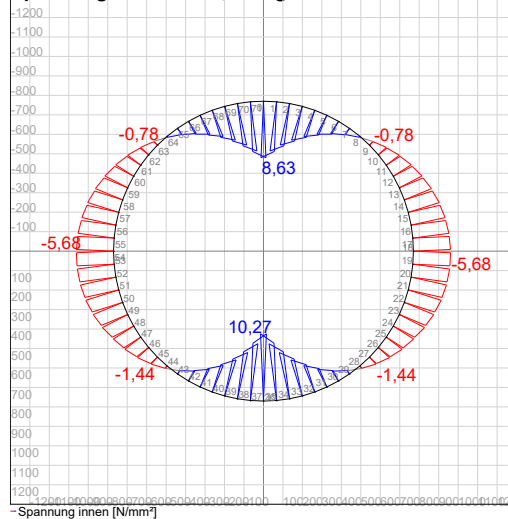
Ausnutzung Spannungen	U _σ	10,2	18,5	%
-----------------------	----------------	------	------	---

Der Spannungsnachweis Innen ist erfüllt.

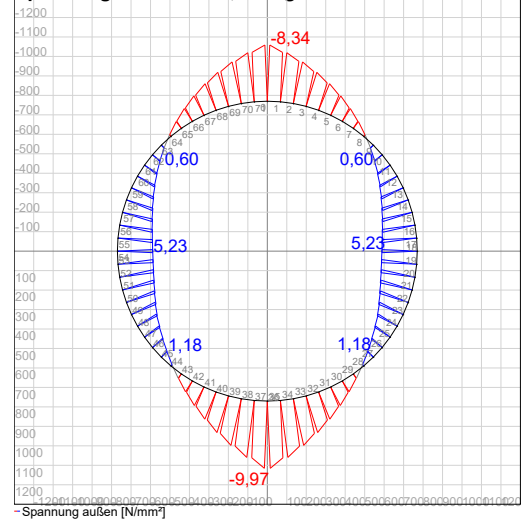
Die Spannungen liegen im zulässigen Bereich.

Biegelinie (x 1,54)

Kontaktspannungen Liner, Design

Normalkräfte Liner, Design

Momente Liner, Design


Spannung innen Liner, Design



Spannung außen Liner, Design



2.2.9.6 Spannungsnachweis Liner, Zwang

Fläche (Wanddicke):

A 40,00 mm²/mm

Außen

Widerstandsmoment, außen:

W_e 266,67 mm³/mm

Element

i

Druck 35 Zug 17

Korrekturfaktor (Verformtes System)

α_k

0,98 0,98

Normalkraft in Element

N_d

-0,92 -6,56

Moment in Element

M_d

3.459,21 -1.880,94

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} - \alpha_{ka} \cdot \frac{M_d}{W_e}$$

(88)

Spannung in Element

Max σ_d

-12,77 6,77

N/mm²

Zul. Spannung, Langzeit, Design:

$\sigma_{L,d}$

-55,56 55,56

N/mm²

Ausnutzung Spannungen

U_σ

23,0 12,2

%

Der Spannungsnachweis Außen ist erfüllt.

Innen

Widerstandsmoment, innen:

W_i 266,67 mm³/mm

Element

i

Druck 18 Zug 36

Korrekturfaktor (Verformtes System)

α_k

1,02 1,02

Normalkraft in Element

N_d

-6,59 -0,92

Moment in Element

M_d

-1.880,94 3.459,21

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} + \alpha_{ki} \cdot \frac{M_d}{W_i}$$

(87)

Spannung in Element

Max σ_d

-7,34 13,17

N/mm²

Zul. Spannung, Langzeit, Design:

$\sigma_{L,d}$

-55,56 55,56

N/mm²

Ausnutzung Spannungen

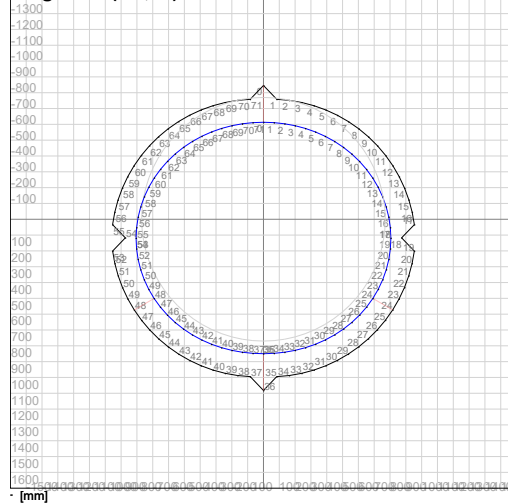
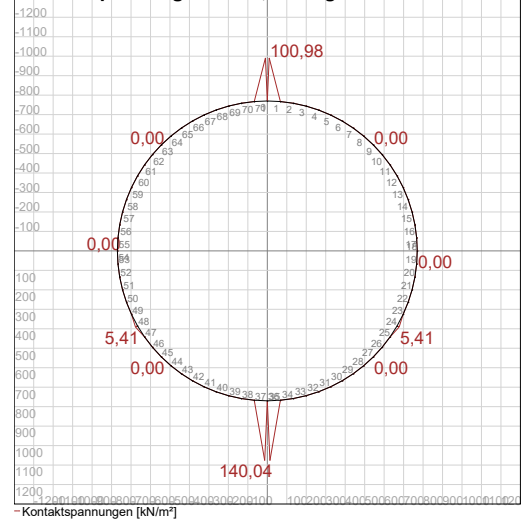
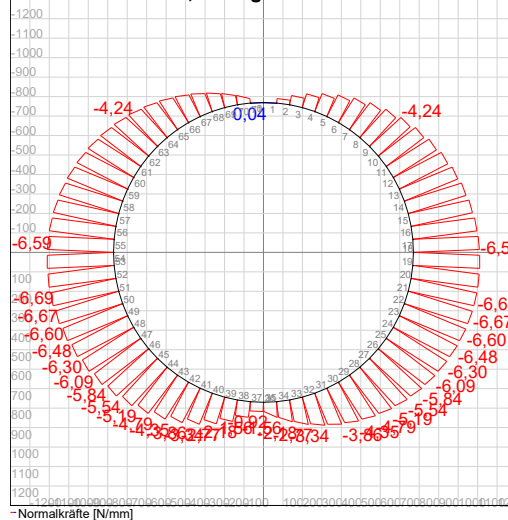
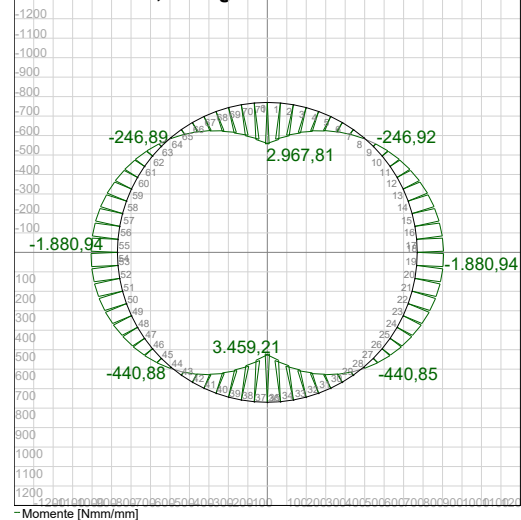
U_σ

13,2 23,7

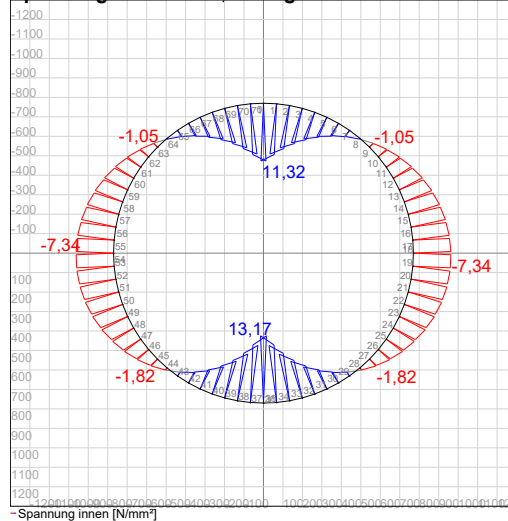
%

Der Spannungsnachweis Innen ist erfüllt.

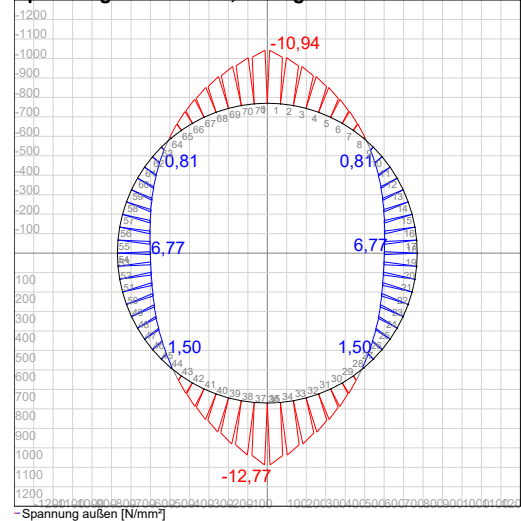
Die Spannungen liegen im zulässigen Bereich.

Biegelinie (x 1,60)

Kontaktspannungen Liner, Zwang

Normalkräfte Liner, Zwang

Momente Liner, Zwang


Spannung innen Liner, Zwang



Spannung außen Liner, Zwang



2.2.9.7 Altrohrspannungen Kämpfer

Vertikale Gesamtlast, Design:
Wanddicke Altrohr:
Außendurchmesser Altrohr Kämpfer:
Bezogene Gelenkringexzentrität:
Druckzonenbreite:

$q_{v,d}$	186,86	kN/m²
t_R	250,00	mm
$da_{AR,k}$	2.080,00	mm
$e_{G/t}$	35,00	%
b_D	100,00	mm

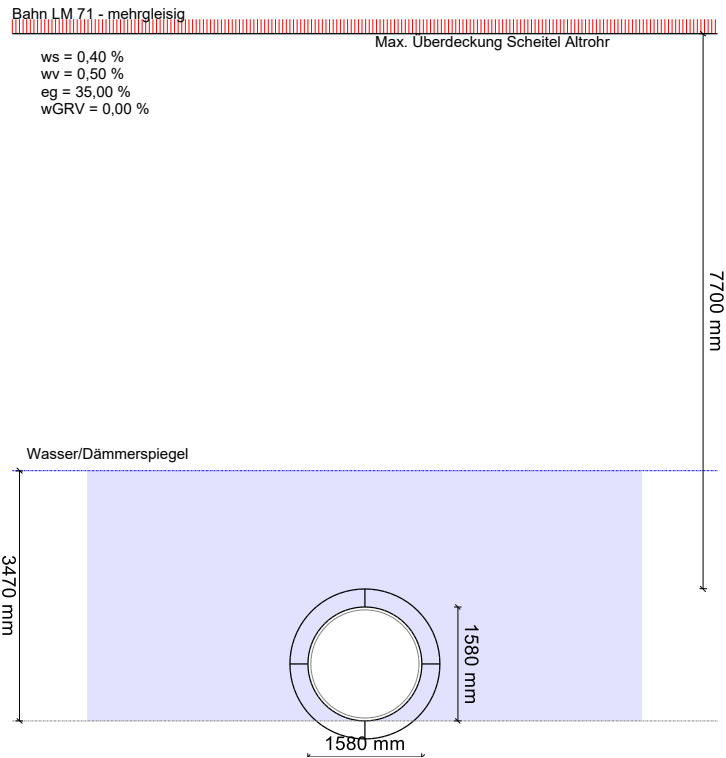
$$N_{K,d} = -q_{v,d} (1 + \omega_{GR,v}) \cdot \frac{da_{AR,k}}{2}$$

Druckkraft im Kämpfer:
Spannung in der Druckzone:
Zul. Druckfestigkeit, Langzeit:
Ausnutzung Druckspannungen AR Kämpfer:

$N_{K,d}$	-194,33	N/mm
σ_d	-2,91	N/mm²
$f_{c,rad,L}$	5,00	N/mm²
$U_{\sigma D,AR}$	58,3	%

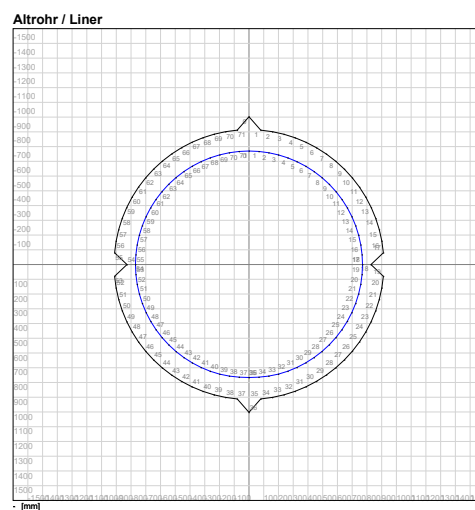
Der Spannungsnachweis für Kämpferspannungen im Altrohr ist erfüllt.

2.2.10 Lastfall 06 [Ersatzkreis] AZ III - hW 3,47 m + h 7,70 m + ws 0,4 % + wv 0,5 %, Langzeit



2.2.10.1 Geometrie diskretisiertes System

Skizze



Wanddicke Liner:	t_L	40,00	mm
Wanddicke Altrrohr:	t_R	250,00	mm
Lokale Vorverformung:	ω_v	0,50	%
Lokale Vorverformung absolut:	w_v	3,85	mm
Gelenkringverformung:	$\omega_{GR,v}$	0,00	%
Gelenkringverformung absolut, einseitig:	$w_{GR,v}$	0,00	mm
Ringspalt:	ω_s	0,40	%
Spaltweite absolut (als konst. Ringspalt):	w_s	3,08	mm
Mittlerer Radius Liner:	$r_{L,m}$	770,00	mm

2.2.10.2 Erdlasten und Verkehrslasten

Wichte Boden, unter Auftrieb:	γ_B'	10,00	kN/m ³
Wichte Boden, trocken:	γ_B	20,00	kN/m ³
Max. Überdeckung Scheitel Altrrohr:	h_{max}	7,70	m
Wasser/Dämmerspiegel:	h_w	3,47	m
Wanddicke Altrrohr:	t_R	250,00	mm
Vertikale Lichte Höhe Altrrohr:	$d_{AR,iv}$	1.580,00	mm
Höhe Wasserspiegel über Altrrohrscheitel:	h'_w	1,64	m
Vertikale Erdlast:	p_E	137,60	kN/m ²
Höhe Scheitel bis Kämpfer Altrrohr:	$r_{AR,a}$	1.040,00	mm
Höhe Wasserspiegel Altrrohrkämpfer bis Altrrohrscheitel:	h'_{wk}	1,04	m
Vertikale Erdlast bis Kämpfer:	$p_{E,K}$	148,00	kN/m ²
Stoßbeiwert:	Φ_2	1,67	[-]
Stoßbeiwert reduziert:	$red \Phi_2$	1,00	[-]
Anpassungsfaktor α_{Qi} LM71 (DIN EN 1991-2):	$\alpha_{Qi,LM71}$	1,00	[-]
Einfache Bodenspannung aus Verkehr:	p	20,62	kN/m ²
Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Scheitelhöhe:	p_T	20,62	kN/m ²
Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Kämpferhöhe (ohne φ):	p_K	18,08	kN/m ²
Erdruckbeiwert (Einbettung):	K_2	0,100	[-]
Horizontale Bodenspannung aus Verkehr:	$p_{T,h}$	1,81	kN/m ²
Vertikale Verkehrslast:	p_v	20,62	kN/m ²
Vertikale Verkehrslast, Design:	$p_{v,d}$	30,93	kN/m ²
Zusätzliche Flächenlast:	p_0	0,0	kN/m ²

Konzentrationsfaktor über Rohr:	λ_R	0,75	[-]
Vertikale Gesamtlast:	q_v	123,82	kN/m ²
Vertikale Gesamtlast, Design:	$q_{v,d}$	170,25	kN/m ²
E-Modul:	E_2	5,00	N/mm ²
Horizontale Bettungssteifigkeit:	S_{Bh}	4,000	N/mm ²
Erdruckbeiwert (Einbettung):	K_2	0,100	[-]
Konzentrationsfaktor Boden:	λ_B	1,083	[-]

Höhe Wasserspiegel Altrrohrkämpfer bis Altrrohrscheitel:	h'_{wk}	1,04	m
Höhe Scheitel bis Kämpfer Altrrohr:	$r_{AR,a}$	1.040,00	mm
Horizontale Erdlast:	$q_{h,E}$	16,03	kN/m ²
Horizontale Verkehrslast:	$q_{h,v}$	1,81	kN/m ²
Horizontale Gesamtlast:	q_h	17,84	kN/m ²
Designwert Horizontale Gesamtlast:	$q_{h,d}$	24,36	kN/m ²
Rechnerischer Erdruckbeiwert:	K_2'	0,143	[-]

2.2.10.3 Verformungsnachweis Liner, Gebrauchslast

Relevanter Durchmesser für prozentuale Verformung:	d_v	1.580,00	mm
Spaltweite absolut (als konst. Ringspalt):	w_s	3,08	mm
Lokale Vorverformung absolut:	w_v	3,85	mm
Gelenkringverformung absolut, einseitig:	$w_{GR,v}$	0,00	mm

Elastische Verformung absolut, vertikal: $w_{el,v}$ 31,83 mm
 Zulässige Verformung elastisch absolut: $zul\ w_{el}$ 10,00 mm

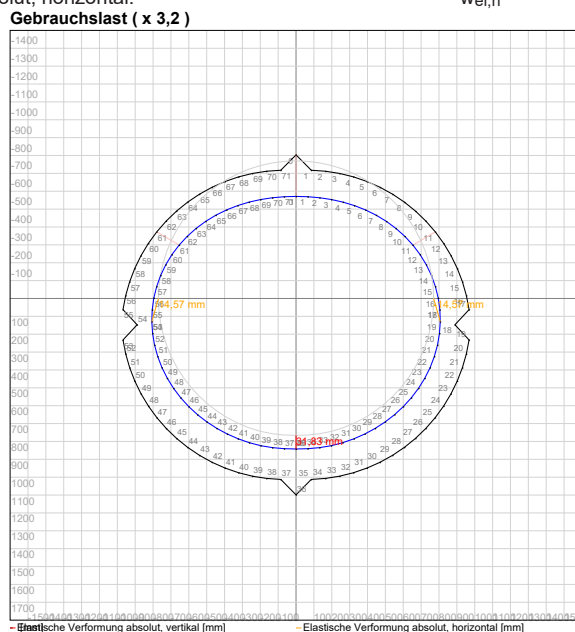
Die errechnete absolute elastische Verformung ist größer als die von der Deutschen Bahn AG festgelegten 10 mm!

Elastische Verformung relativ: $\delta_{v,el}$ 2,01 %
 Zulässige Verformung elastisch: $zul\ \delta_{v,el}$ 2,00 %

Die errechnete elastische Verformung ist größer als die zulässige Verformung!

Gesamte Durchmesseränderung: w 35,68 mm
 Relative Gesamtverformung: δ_v 2,26 %
 Anhaltswert Gesamtverformung: $\delta_{v,A}$ 10,00 %

Elastische Verformung absolut, horizontal: $w_{el,h,E1}$ -14,57 mm
 Elastische Verformung absolut, horizontal: $w_{el,h,E2}$ 14,57 mm
 Elastische Verformung absolut, horizontal: $w_{el,h}$ 29,14 mm



2.2.10.4 Bodeninteraktion (Gebrauchslast)

Bettungsziffer, Scheitel: CB 3.846,15 kN/m^3
 Innerer Reibungswinkel: φ' 20,00 °
 Beiwert: K_p 2,04 [-]
 Vertikale Erdlast: p_E 137,60 kN/m^2
 Grenzwert q_h im Scheitel (informativ): $q_{h,max}$ 228,03 kN/m^2

Vertikale Erdlast bis Kämpfer: $p_{E,K}$ 148,00 kN/m^2
 Grenzwert q_h im Kämpfer: $q_{h,max,K}$ 245,26 kN/m^2

Der Wert wird im Kämpfer abgelesen.

Horizontale Gesamtlast: q_h 17,84 kN/m^2
 Seitlicher Bettungsreaktionsdruck: q_h^* 73,32 kN/m^2
 Summe horizontale Kräfte: $q_h + q_h^*$ 91,16 kN/m^2
 Ausnutzung max q_h : $U_{max,qh}$ 37,2 %

Für die Interaktion Boden-Rohrsystem wurde der elastische Ansatz verwendet. Die Bettung des Rohres wurde um den gesamten Umfang als konstant angenommen. Damit ergibt sich eine Dreiecksförmige Verteilung der Bodenspannungen, deren Maximalwert auf 75% des passiven Erddrucks begrenzt ist.

Die horizontale Kraft aus Bettungsreaktionsdruck und seitlichem Druck im Kämpfer liegt unterhalb des Grenzwertes.

2.2.10.5 Stabilitätsnachweis (Designwerte)

Der maßgebende Nachweis der Stabilität erfolgt über die im Abschnitt 7.6.4.2 (DWA-A 143-2) zugelassene (genauere) Variante einer Berechnung nach Theorie II. Ordnung unter Berücksichtigung der Vorverformungen und der Spaltbildung. Hierbei wird numerisch überprüft, ob ein elastisches Stabilitätsversagen (Beulen) unter gamma-facher Last eintritt. Darüber hinaus wird geprüft, ob die bei dieser Berechnung ermittelten Spannungen die vorgegeben maximalen Grenzspannungen für Zug und Druck mit einfacher Sicherheit nicht überschreiten.

Nachweis entfällt.

Spannungsnachweis Liner, Design

Fläche (Wanddicke): A 40,00 mm²/mm

Außen

Widerstandsmoment, außen:

W_e 266,67 mm³/mm
Druck Zug

Element	i	71	53	[-]
Korrekturfaktor (Verformtes System)	α _k	0,98	0,98	[-]
Normalkraft in Element	N _d	-32,89	-37,76	N/mm
Moment in Element	M _d	3.227,17	-1.651,08	Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} - \alpha_{ka} \cdot \frac{M_d}{W_e} \quad (88)$$

Spannung in Element	Max σ _d	-12,71	5,14	N/mm ²
Zul. Spannung, Langzeit, Design:	σ _{L,d}	-55,56	55,56	N/mm ²

Ausnutzung Spannungen	U _σ	22,9	9,3	%
-----------------------	----------------	------	-----	---

Der Spannungsnachweis Außen ist erfüllt.

Innen

Widerstandsmoment, innen:

W_i 266,67 mm³/mm
Druck Zug

Element	i	54	0	[-]
Korrekturfaktor (Verformtes System)	α _k	1,02	1,02	[-]
Normalkraft in Element	N _d	-37,78	-32,89	N/mm
Moment in Element	M _d	-1.651,08	3.227,17	Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} + \alpha_{ki} \cdot \frac{M_d}{W_i} \quad (87)$$

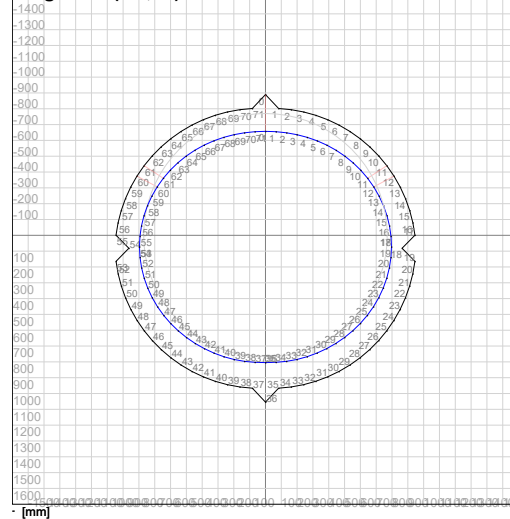
Spannung in Element	Max σ _d	-7,24	11,49	N/mm ²
Zul. Spannung, Langzeit, Design:	σ _{L,d}	-55,56	55,56	N/mm ²

Ausnutzung Spannungen	U _σ	13,0	20,7	%
-----------------------	----------------	------	------	---

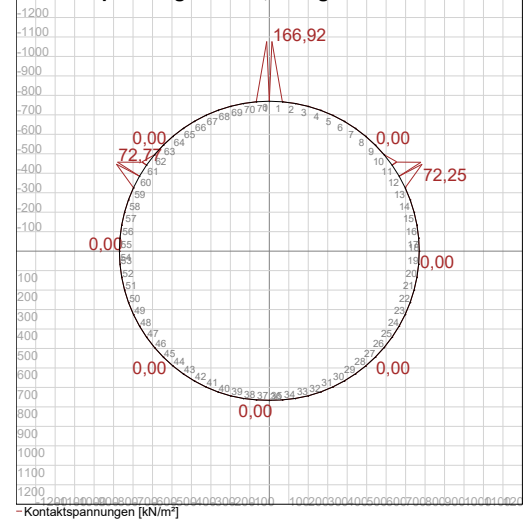
Der Spannungsnachweis Innen ist erfüllt.

Die Spannungen liegen im zulässigen Bereich.

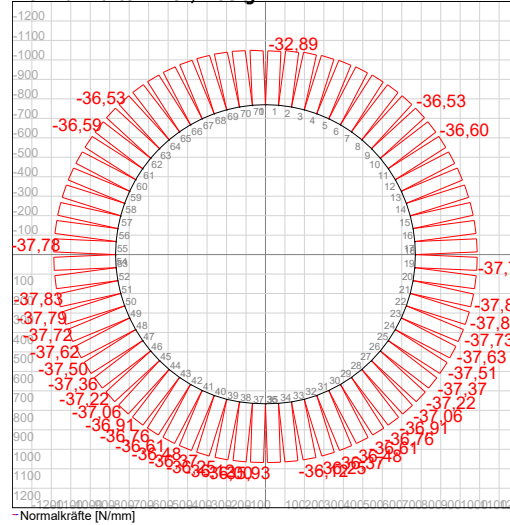
Biegelinie (x 1,31)



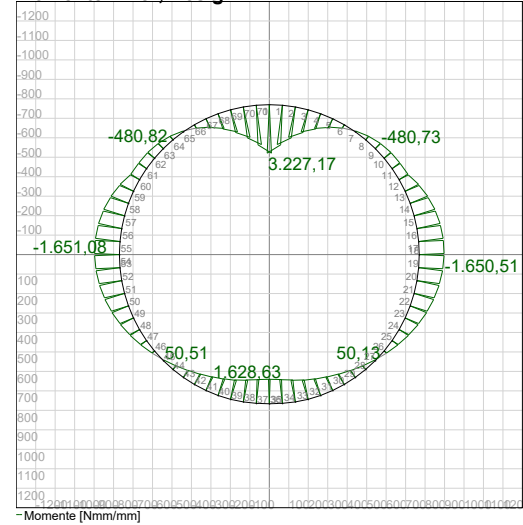
Kontaktspannungen Liner, Design

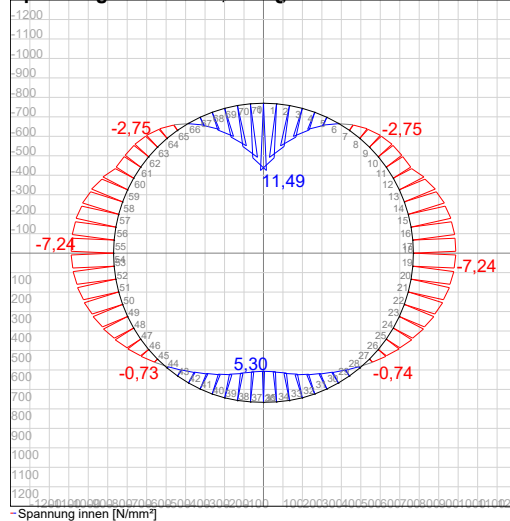
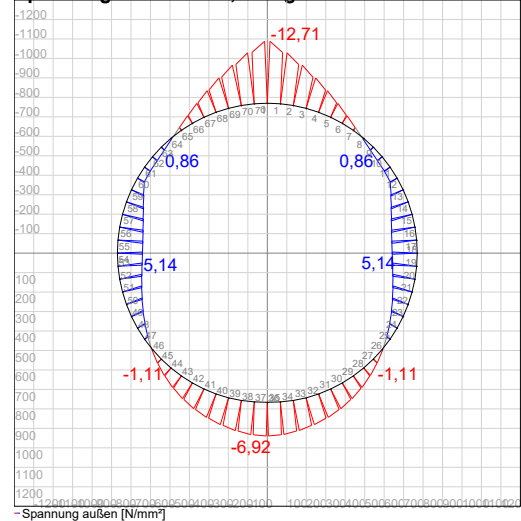


Normalkräfte Liner, Design



Momente Liner, Design



Spannung innen Liner, Design

Spannung außen Liner, Design


2.2.10.6 Spannungsnachweis Liner, Zwang

Fläche (Wanddicke):

A 40,00 mm²/mm

Außen

Widerstandsmoment, außen:

W_e 266,67 mm³/mm

Element

i

Druck 71 Zug 54 [-]

Korrekturfaktor (Verformtes System)

α_k

0,98 0,98 [-]

Normalkraft in Element

N_d

-31,43 -37,76 N/mm

Moment in Element

M_d

3.975,46 -2.000,24 Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} - \alpha_{ka} \cdot \frac{M_d}{W_e}$$

(88)

Spannung in Element

Max σ_d

-15,44 6,43 N/mm²

Zul. Spannung, Langzeit, Design:

σ_{L,d}

-55,56 55,56 N/mm²

Ausnutzung Spannungen

U_σ

27,8 11,6 %

Der Spannungsnachweis Außen ist erfüllt.

Innen

Widerstandsmoment, innen:

W_i 266,67 mm³/mm

Element

i

Druck 55 Zug 0 [-]

Korrekturfaktor (Verformtes System)

α_k

1,02 1,02 [-]

Normalkraft in Element

N_d

-37,80 -31,43 N/mm

Moment in Element

M_d

-2.000,24 3.975,46 Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} + \alpha_{ki} \cdot \frac{M_d}{W_i}$$

(87)

Spannung in Element

Max σ_d

-8,58 14,38 N/mm²

Zul. Spannung, Langzeit, Design:

σ_{L,d}

-55,56 55,56 N/mm²

Ausnutzung Spannungen

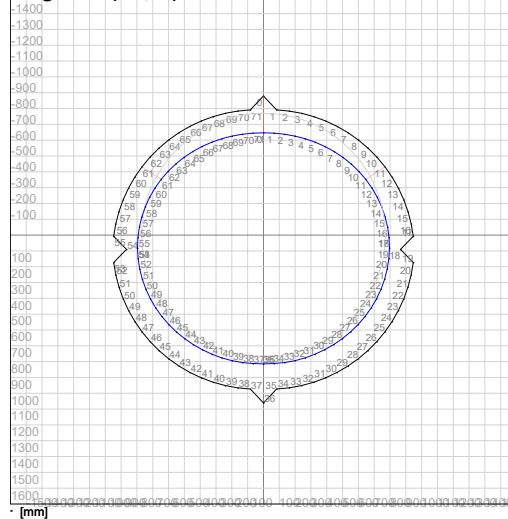
U_σ

15,4 25,9 %

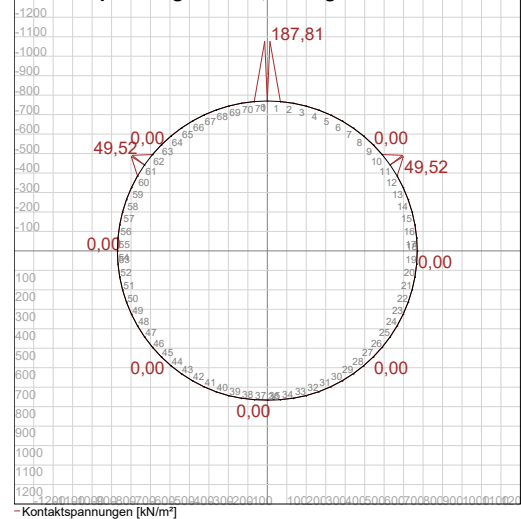
Der Spannungsnachweis Innen ist erfüllt.

Die Spannungen liegen im zulässigen Bereich.

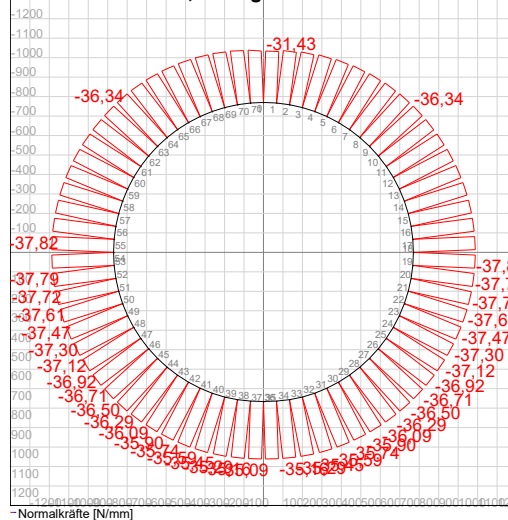
Biegelinie (x 1,45)



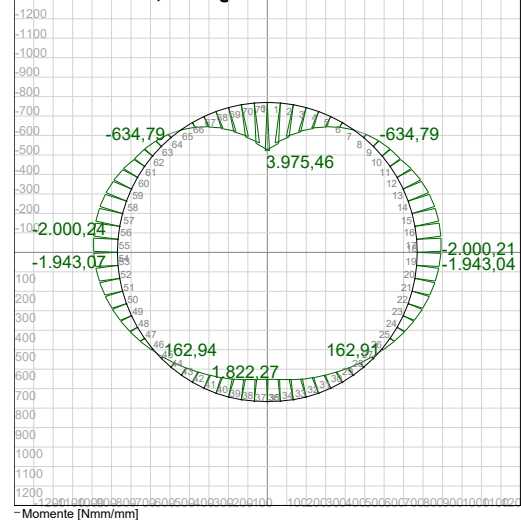
Kontaktspannungen Liner, Zwang

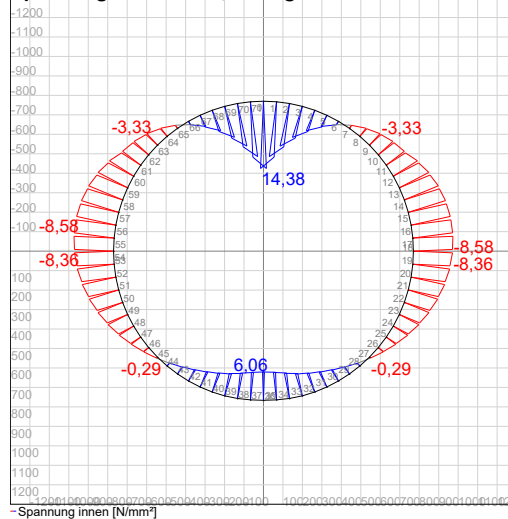
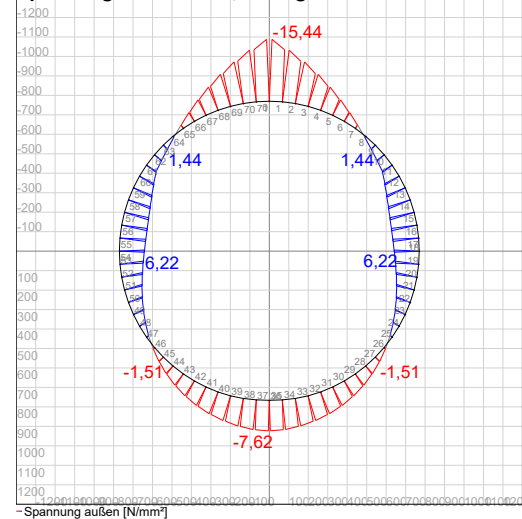


Normalkräfte Liner, Zwang



Momente Liner, Zwang



Spannung innen Liner, Zwang

Spannung außen Liner, Zwang


2.2.10.7 Altrohrspannungen Kämpfer

Vertikale Gesamtlast, Design:

Wanddicke Altrohr:

Außendurchmesser Altrohr Kämpfer:

Bezogene Gelenkringexzentrizität:

Druckzonbreite:

$q_{v,d}$	170,25	kN/m²
t_R	250,00	mm
$d_{AR,k}$	2.080,00	mm
e_G/t	35,00	%
b_D	100,00	mm

$$N_{K,d} = -q_{v,d} (1 + \omega_{GR,v}) \cdot \frac{d_{AR,k}}{2}$$

Druckkraft im Kämpfer:

Spannung in der Druckzone:

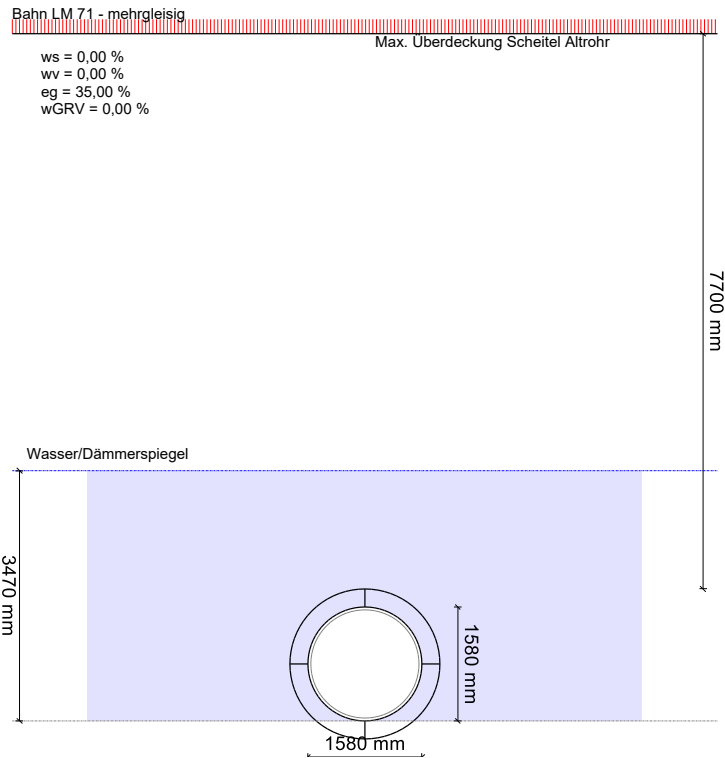
Zul. Druckfestigkeit, Langzeit:

Ausnutzung Druckspannungen AR Kämpfer:

$N_{K,d}$	-177,06	N/mm
σ_d	-2,66	N/mm²
$f_{c,rad,L}$	5,00	N/mm²
$U_{\sigma D,AR}$	53,1	%

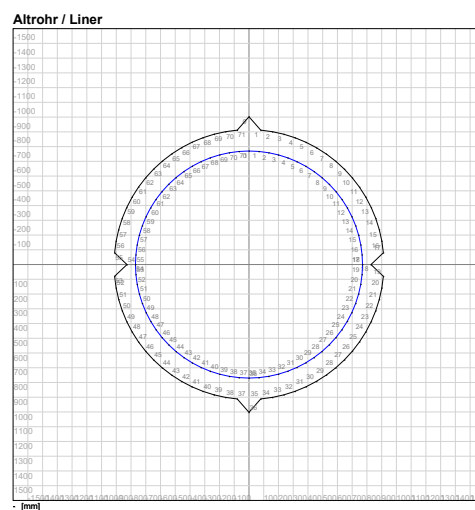
Der Spannungsnachweis für Kämpferspannungen im Altrohr ist erfüllt.

2.2.11 Lastfall 07 [Ersatzkreis] AZ III - hW 3,47 m + h 7,70 m + ws 0,0 % + wv 0,0 %, Langzeit



2.2.11.1 Geometrie diskretisiertes System

Skizze



Bauteil: SAN-03 - GFK Sanierung Hauptsammler Ost
MA-250346

Seite: D-170

Kapitel / Vorgang: D - Nachweise
01.2 815 / 1570 t = 40 / Bereich Eisenbahnlasten

Archiv-Nr.

Wanddicke Liner:	t_L	40,00	mm
Wanddicke Altrrohr:	t_R	250,00	mm
Lokale Vorverformung:	ω_v	0,00	%
Lokale Vorverformung absolut:	w_v	0,00	mm
Gelenkringverformung:	$\omega_{GR,v}$	0,00	%
Gelenkringverformung absolut, einseitig:	$w_{GR,v}$	0,00	mm
Ringspalt:	ω_s	0,00	%
Spaltweite absolut (als konst. Ringspalt):	w_s	0,00	mm
Mittlerer Radius Liner:	$r_{L,m}$	770,00	mm

2.2.11.2 Erdlasten und Verkehrslasten

Wichte Boden, unter Auftrieb:	γ_B'	10,00	kN/m ³
Wichte Boden, trocken:	γ_B	20,00	kN/m ³
Max. Überdeckung Scheitel Altrrohr:	h_{max}	7,70	m
Wasser/Dämmerspiegel:	h_w	3,47	m
Wanddicke Altrrohr:	t_R	250,00	mm
Vertikale Lichte Höhe Altrrohr:	$d_{AR,iv}$	1.580,00	mm
Höhe Wasserspiegel über Altrrohrscheitel:	h'_w	1,64	m
Vertikale Erdlast:	p_E	137,60	kN/m ²
Höhe Scheitel bis Kämpfer Altrrohr:	$r_{AR,a}$	1.040,00	mm
Höhe Wasserspiegel Altrrohrkämpfer bis Altrrohrscheitel:	h'_{wk}	1,04	m
Vertikale Erdlast bis Kämpfer:	$p_{E,K}$	148,00	kN/m ²
Stoßbeiwert:	Φ_2	1,67	[-]
Stoßbeiwert reduziert:	$red \Phi_2$	1,00	[-]
Anpassungsfaktor α_{Qi} LM71 (DIN EN 1991-2):	$\alpha_{Qi,LM71}$	1,00	[-]
Einfache Bodenspannung aus Verkehr:	p	20,62	kN/m ²
Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Scheitelhöhe:	p_T	20,62	kN/m ²
Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Kämpferhöhe (ohne φ):	p_K	18,08	kN/m ²
Erdruckbeiwert (Einbettung):	K_2	0,100	[-]
Horizontale Bodenspannung aus Verkehr:	$p_{T,h}$	1,81	kN/m ²
Vertikale Verkehrslast:	p_v	20,62	kN/m ²
Vertikale Verkehrslast, Design:	$p_{v,d}$	30,93	kN/m ²
Zusätzliche Flächenlast:	p_0	0,0	kN/m ²

Konzentrationsfaktor über Rohr:	λ_R	0,75	[-]
Vertikale Gesamtlast:	q_v	123,82	kN/m ²
Vertikale Gesamtlast, Design:	$q_{v,d}$	170,25	kN/m ²
E-Modul:	E_2	5,00	N/mm ²
Horizontale Bettungssteifigkeit:	S_{Bh}	4,000	N/mm ²
Erdruckbeiwert (Einbettung):	K_2	0,100	[-]
Konzentrationsfaktor Boden:	λ_B	1,083	[-]

Höhe Wasserspiegel Altrrohrkämpfer bis Altrrohrscheitel:	h'_{wk}	1,04	m
Höhe Scheitel bis Kämpfer Altrrohr:	$r_{AR,a}$	1.040,00	mm
Horizontale Erdlast:	$q_{h,E}$	16,03	kN/m ²
Horizontale Verkehrslast:	$q_{h,v}$	1,81	kN/m ²
Horizontale Gesamtlast:	q_h	17,84	kN/m ²
Designwert Horizontale Gesamtlast:	$q_{h,d}$	24,36	kN/m ²
Rechnerischer Erdruckbeiwert:	K_2'	0,143	[-]

2.2.11.3 Verformungsnachweis Liner, Gebrauchslast

Relevanter Durchmesser für prozentuale Verformung:	d_v	1.580,00	mm
Spaltweite absolut (als konst. Ringspalt):	w_s	0,00	mm
Lokale Vorverformung absolut:	w_v	0,00	mm
Gelenkringverformung absolut, einseitig:	$w_{GR,v}$	0,00	mm
Elastische Verformung absolut, vertikal:	$w_{el,v,E1}$	-31,81	mm

Elastische Verformung absolut, vertikal: $w_{el,v}$ 31,81 mm
 Zulässige Verformung elastisch absolut: $zul\ w_{el}$ 10,00 mm

Die errechnete absolute elastische Verformung ist größer als die von der Deutschen Bahn AG festgelegten 10 mm!

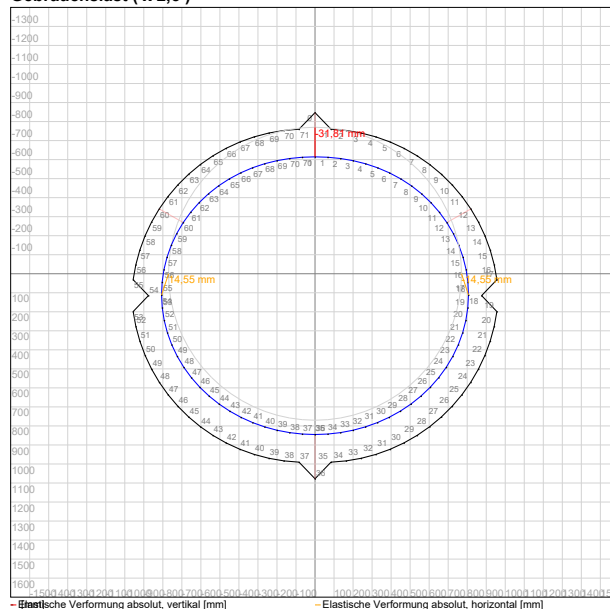
Elastische Verformung relativ: $\delta_{v,el}$ 2,01 %
 Zulässige Verformung elastisch: $zul\ \delta_{v,el}$ 2,00 %

Die errechnete elastische Verformung ist größer als die zulässige Verformung!

Gesamte Durchmesseränderung: w 31,81 mm
 Relative Gesamtverformung: δ_v 2,01 %
 Anhaltswert Gesamtverformung: $\delta_{v,A}$ 10,00 %

Elastische Verformung absolut, horizontal: $w_{el,h,E1}$ -14,55 mm
 Elastische Verformung absolut, horizontal: $w_{el,h,E2}$ 14,55 mm
 Elastische Verformung absolut, horizontal: $w_{el,h}$ 29,10 mm

Gebrauchslast (x 2,5)



2.2.11.4 Bodeninteraktion (Gebrauchslast)

Bettungsziffer, Scheitel: CB 3.846,15 kN/m^3
 Innerer Reibungswinkel: φ' 20,00 °
 Beiwert: K_p 2,04 [-]
 Vertikale Erdlast: p_E 137,60 kN/m^2
 Grenzwert q_h im Scheitel (informativ): $q_{h,max}$ 228,03 kN/m^2

Vertikale Erdlast bis Kämpfer: $p_{E,K}$ 148,00 kN/m^2
 Grenzwert q_h im Kämpfer: $q_{h,max,K}$ 245,26 kN/m^2

Der Wert wird im Kämpfer abgelesen.

Horizontale Gesamtlast: q_h 17,84 kN/m^2
 Seitlicher Bettungsreaktionsdruck: q_h^* 73,53 kN/m^2
 Summe horizontale Kräfte: $q_h + q_h^*$ 91,37 kN/m^2
 Ausnutzung max q_h : $U_{max,qh}$ 37,3 %

Für die Interaktion Boden-Rohrsystem wurde der elastische Ansatz verwendet. Die Bettung des Rohres wurde um den gesamten Umfang als konstant angenommen. Damit ergibt sich eine Dreiecksförmige Verteilung der Bodenspannungen, deren Maximalwert auf 75% des passiven Erddrucks begrenzt ist.

Die horizontale Kraft aus Bettungsreaktionsdruck und seitlichem Druck im Kämpfer liegt unterhalb des Grenzwertes.

2.2.11.5 Stabilitätsnachweis (Designwerte)

Der maßgebende Nachweis der Stabilität erfolgt über die im Abschnitt 7.6.4.2 (DWA-A 143-2) zugelassene (genauere) Variante einer Berechnung nach Theorie II. Ordnung unter Berücksichtigung der Vorverformungen und der Spaltbildung. Hierbei wird numerisch überprüft, ob ein elastisches Stabilitätsversagen (Beulen) unter gamma-facher Last eintritt. Darüber hinaus wird geprüft, ob die bei dieser Berechnung ermittelten Spannungen die vorgegeben maximalen Grenzspannungen für Zug und Druck mit einfacher Sicherheit nicht überschreiten.

Nachweis entfällt.

Spannungsnachweis Liner, Design

Fläche (Wanddicke): A 40,00 mm²/mm

Außen

Widerstandsmoment, außen:

W_e 266,67 mm³/mm

Element

i

Druck

Zug

[-]

Korrekturfaktor (Verformtes System)

α_k

0,98

0,98

[-]

Normalkraft in Element

N_d

-32,99

-37,73

N/mm

Moment in Element

M_d

3.131,07

-1.563,90

Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} - \alpha_{ka} \cdot \frac{M_d}{W_e} \quad (88)$$

Spannung in Element

Max σ_d

-12,36

4,82

N/mm²

Zul. Spannung, Langzeit, Design:

σ_{L,d}

-55,56

55,56

N/mm²

Ausnutzung Spannungen

U_σ

22,3

8,7

%

Der Spannungsnachweis Außen ist erfüllt.

Innen

Widerstandsmoment, innen:

W_i 266,67 mm³/mm

Element

i

Druck

Zug

[-]

Korrekturfaktor (Verformtes System)

α_k

1,02

1,02

[-]

Normalkraft in Element

N_d

-37,74

-32,99

N/mm

Moment in Element

M_d

-1.563,90

3.131,07

Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} + \alpha_{ki} \cdot \frac{M_d}{W_i} \quad (87)$$

Spannung in Element

Max σ_d

-6,91

11,12

N/mm²

Zul. Spannung, Langzeit, Design:

σ_{L,d}

-55,56

55,56

N/mm²

Ausnutzung Spannungen

U_σ

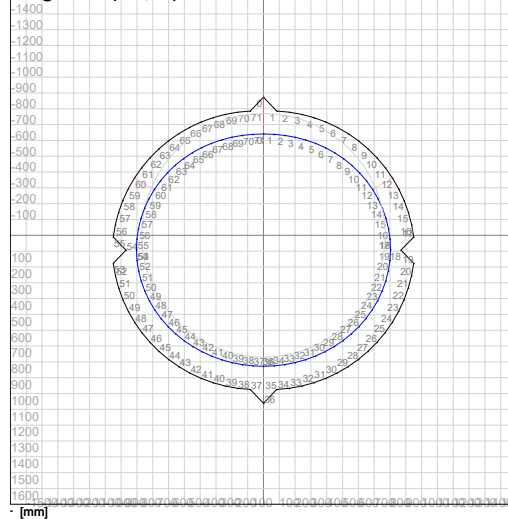
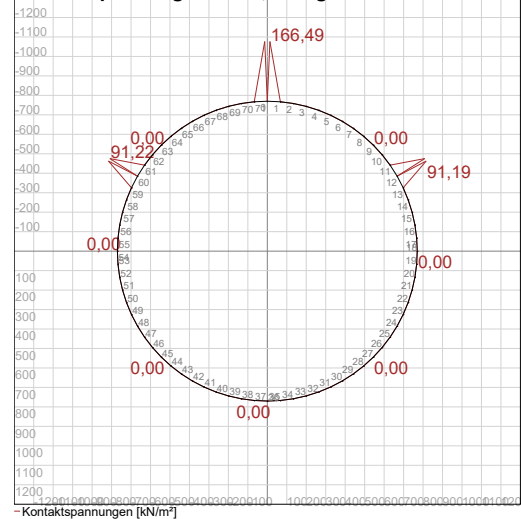
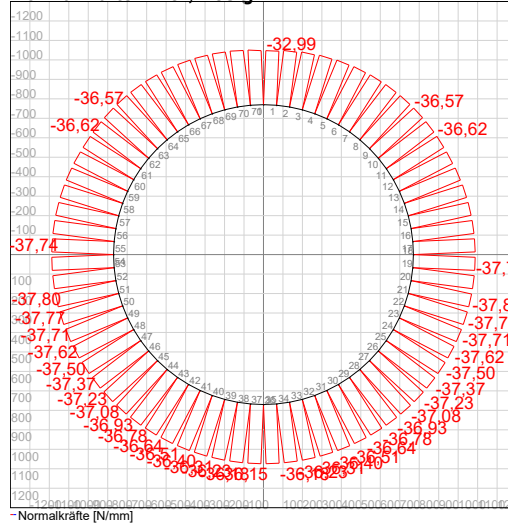
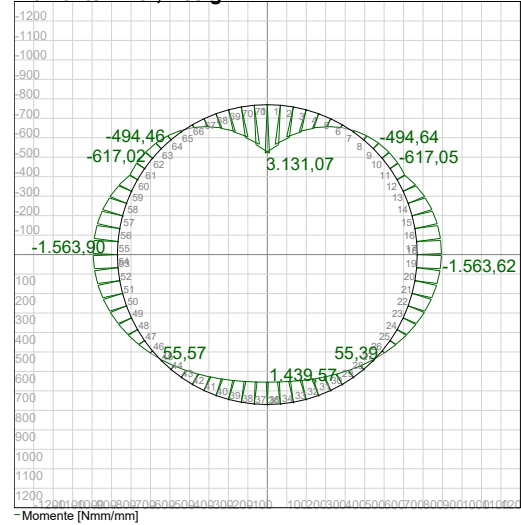
12,4

20,0

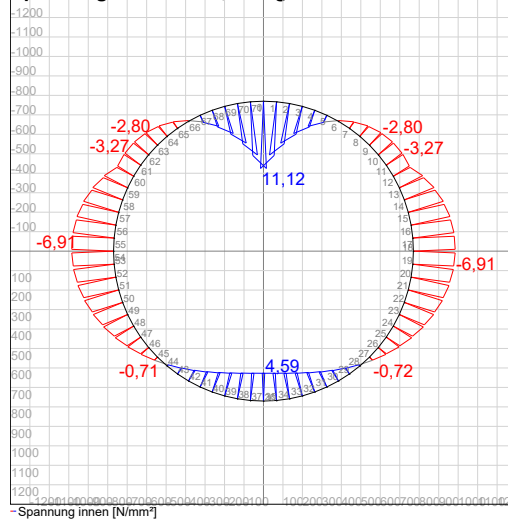
%

Der Spannungsnachweis Innen ist erfüllt.

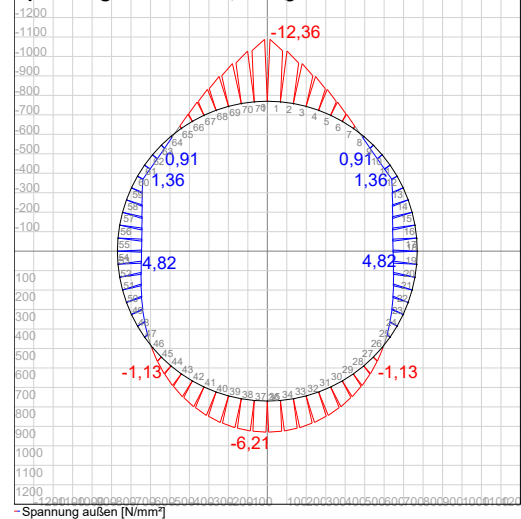
Die Spannungen liegen im zulässigen Bereich.

Biegelinie (x 1,50)

Kontaktspannungen Liner, Design

Normalkräfte Liner, Design

Momente Liner, Design


Spannung innen Liner, Design



Spannung außen Liner, Design



2.2.11.6 Spannungsnachweis Liner, Zwang

Fläche (Wanddicke):

A 40,00 mm²/mm

Außen

Widerstandsmoment, außen:

W_e 266,67 mm³/mm

Element

i

Druck 71 Zug 55 [-]

Korrekturfaktor (Verformtes System)

α_k

0,98 0,98 [-]

Normalkraft in Element

N_d

-32,31 -38,43 N/mm

Moment in Element

M_d

3.881,02 -1.910,12 Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} - \alpha_{ka} \cdot \frac{M_d}{W_e}$$

(88)

Spannung in Element

Max σ_d

-15,11 6,08 N/mm²

Zul. Spannung, Langzeit, Design:

σ_{L,d}

-55,56 55,56 N/mm²

Ausnutzung Spannungen

U_σ

27,2 10,9 %

Der Spannungsnachweis Außen ist erfüllt.

Innen

Widerstandsmoment, innen:

W_i 266,67 mm³/mm

Element

i

Druck 54 Zug 0 [-]

Korrekturfaktor (Verformtes System)

α_k

1,02 1,02 [-]

Normalkraft in Element

N_d

-38,44 -32,31 N/mm

Moment in Element

M_d

-1.910,12 3.881,02 Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} + \alpha_{ki} \cdot \frac{M_d}{W_i}$$

(87)

Spannung in Element

Max σ_d

-8,25 14,00 N/mm²

Zul. Spannung, Langzeit, Design:

σ_{L,d}

-55,56 55,56 N/mm²

Ausnutzung Spannungen

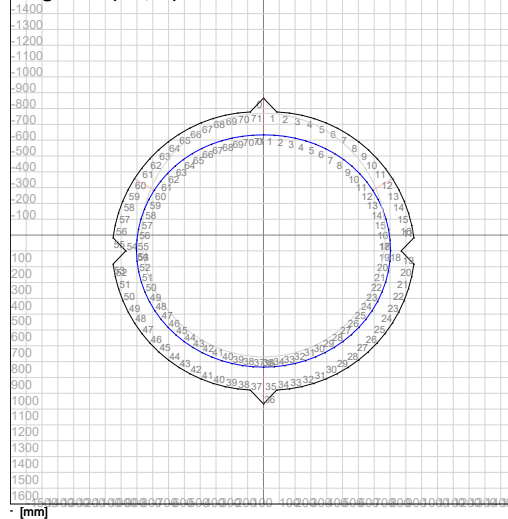
U_σ

14,8 25,2 %

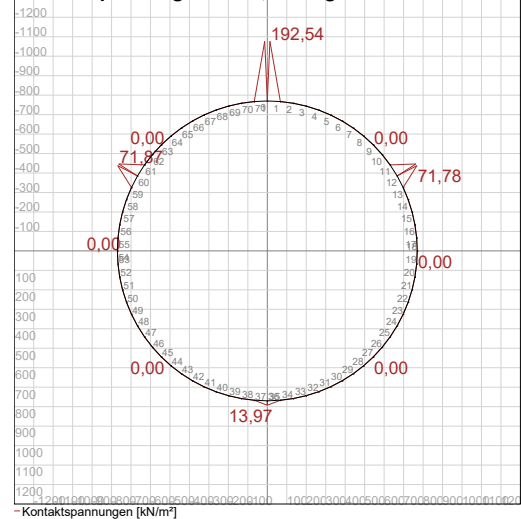
Der Spannungsnachweis Innen ist erfüllt.

Die Spannungen liegen im zulässigen Bereich.

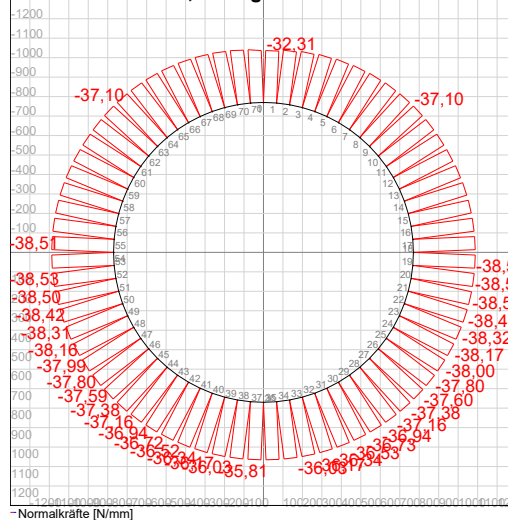
Biegelinie (x 1,60)



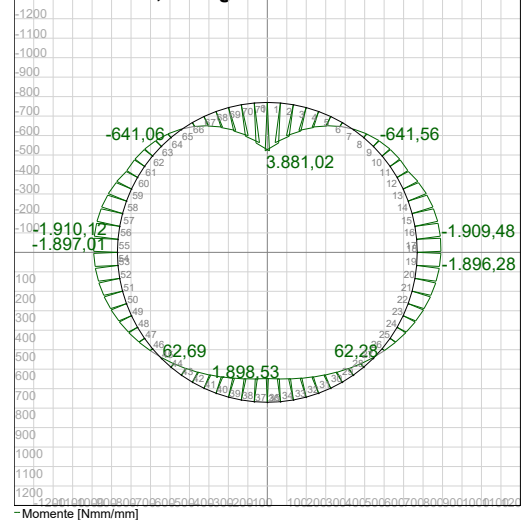
Kontaktspannungen Liner, Zwang

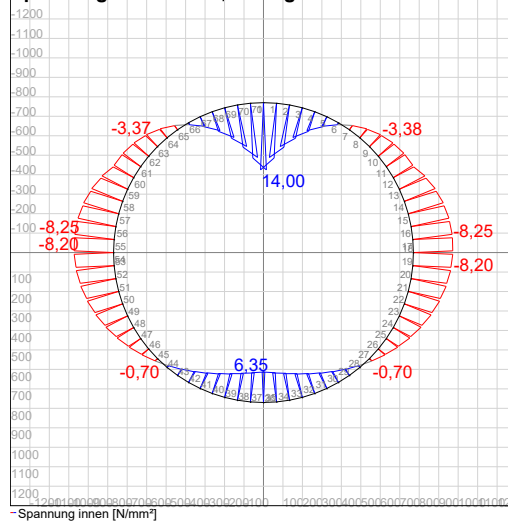
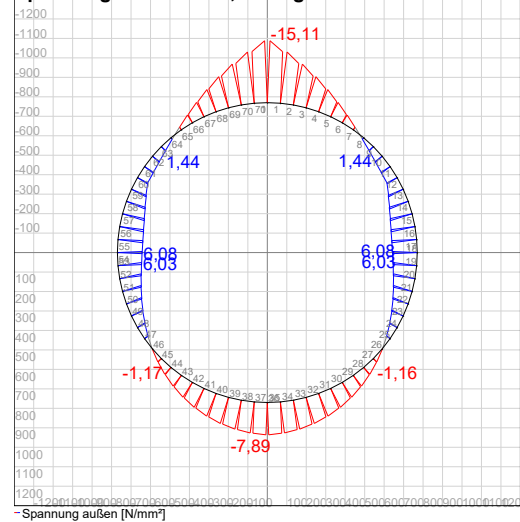


Normalkräfte Liner, Zwang



Momente Liner, Zwang



Spannung innen Liner, Zwang

Spannung außen Liner, Zwang


2.2.11.7 Altrohrspannungen Kämpfer

Vertikale Gesamtlast, Design:

Wanddicke Altrohr:

Außendurchmesser Altrohr Kämpfer:

Bezogene Gelenkringexzentrizität:

Druckzonenbreite:

$q_{v,d}$	170,25	kN/m²
t_R	250,00	mm
$d_{aAR,k}$	2.080,00	mm
e_G/t	35,00	%
b_D	100,00	mm

$$N_{K,d} = -q_{v,d} \cdot (1 + \omega_{GR,v}) \cdot \frac{d_{aAR,k}}{2}$$

Druckkraft im Kämpfer:

Spannung in der Druckzone:

Zul. Druckfestigkeit, Langzeit:

Ausnutzung Druckspannungen AR Kämpfer:

$N_{K,d}$	-177,06	N/mm
σ_d	-2,66	N/mm²
$f_{c,rad,L}$	5,00	N/mm²
$U_{\sigma D,AR}$	53,1	%

Der Spannungsnachweis für Kämpferspannungen im Altrohr ist erfüllt.

Es konnten nicht alle geforderten statischen Nachweise erbracht werden!

Pos. 02.1

815 / 1570 t = 30 / Bereich Straßenverkehr

Inhaltsangabe

1 Bemerkungen	3
2 Statik nach DWA-A 143-2	4
2.1 Eingaben	4
2.1.1 Geometrie	4
2.1.2 Materialien	4
2.1.3 Lasten	5
2.2 Ergebnisse	5
2.2.1 Hinweis zum Einzelrohr-Lining	5
2.2.2 Materialkennwerte	5
2.2.2.1 Liner	5
2.2.2.2 Altrohr	5
2.2.3 Ringsteifigkeit nach ISO 7685	5
2.2.4 Hinweise zur Berechnung	6
2.2.5 Lastfall 01 AZ II - h _{max} h _W 3,00 m, Langzeit	6
2.2.5.1 Geometrie diskretisiertes System	7
2.2.5.2 Verformungsnachweis Liner, Gebrauchslast	8
2.2.6 Lastfall 02 [Ersatzkreis] AZ III - h _W 0,00 m + h 7,25 m + ws 0,0 % + ww 0,0 %,	13
2.2.6.1 Geometrie diskretisiertes System	13
2.2.6.2 Erdlasten und Verkehrslasten	14
2.2.6.3 Verformungsnachweis Liner, Gebrauchslast	14
2.2.6.4 Bodeninteraktion (Gebrauchslast)	15
2.2.6.5 Stabilitätsnachweis (Designwerte)	16
2.2.6.6 Spannungsnachweis Liner, Zwang	18
2.2.6.7 Altrohrspannungen Kämpfer	20
2.2.7 Lastfall 03 [Ersatzkreis] AZ III - h _W 3,00 m + h 7,25 m + ws 0,4 % + ww 0,5 %,	21
2.2.7.1 Geometrie diskretisiertes System	21
2.2.7.2 Erdlasten und Verkehrslasten	22
2.2.7.3 Verformungsnachweis Liner, Gebrauchslast	22
2.2.7.4 Bodeninteraktion (Gebrauchslast)	23
2.2.7.5 Stabilitätsnachweis (Designwerte)	24
2.2.7.6 Spannungsnachweis Liner, Zwang	26
2.2.7.7 Altrohrspannungen Kämpfer	28
2.2.8 Lastfall 04 [Ersatzkreis] AZ III - h _W 3,00 m + h 7,25 m + ws 0,0 % + ww 0,0 %,	29
2.2.8.1 Geometrie diskretisiertes System	29
2.2.8.2 Erdlasten und Verkehrslasten	30
2.2.8.3 Verformungsnachweis Liner, Gebrauchslast	30
2.2.8.4 Bodeninteraktion (Gebrauchslast)	31
2.2.8.5 Stabilitätsnachweis (Designwerte)	32
2.2.8.6 Spannungsnachweis Liner, Zwang	34
2.2.8.7 Altrohrspannungen Kämpfer	36

1 Bemerkungen

Abschnitt 6

Mit dem folgenden Nacheis soll der Scheite nachgewiesen werden.
Der Nachweis erfolgt daher hier für das kleine Eiprofil.

Da in diesem Abschnitt der Boden mindestens durchgängig den besseren Steifemodul aufweist,
wird gerechnet mit:

Es = 10 MN/m²

Die Nachweise zur Bemessung und zur Verformung sind eingehalten.

2 Statik nach DWA-A 143-2

Verfahren:
Altrohrzustand:
Ausdruck Rohrsteifigkeit:
Art der Interaktion:
Nachweis Altrohr:
Nachweis Auftrieb:
Berechnungsoptionen nach Regelwerk:

Einzelrohr-Lining
AZ III
Nach ISO 7685
Überlagerung aller Lasten am System
Nein
Nein
Ja

2.1 Eingaben

2.1.1 Geometrie

Geometrie:
Lichte Breite in Kämpferhöhe:
Lichte Höhe Scheitel-Sohle:
Profilart:
Wanddicke Liner:
Gelenkringverformung:
Relative Exzentrizität der Gelenke Altrohr:

Art des Altrohres:
Tiefe Vorverformung lange Seite:
Öffnungswinkel lokale Vorverformung Sohle:
Öffnungswinkel lokale Vorverformung lange Seite:

Regeleiwerschnitt freie Eingabe
b_k 1.065,00 mm
h_s 1.600,00 mm
Vollwand
t_L 30,00 mm
w_{GRV}/r_L 0,00 %
e_{Grel} 0,35 [-]

Normales Eiprofil mit B:H = 2:3
w_v/r_L 0,50 %
2Φ 40,00 °
2Φ 36,80 °

Art des Ringspaltes:
Ringspalt (konst. Schrumpfmaß):

Konstantes Schrumpfmaß
w_s/U 0,400 %

Vollbettungsmodell:

Ja

2.1.2 Materialien

Material Altrohr:
Wanddicke Altrohr:

Definition Material:
Langzeitige Werte verwenden:
Nachweis Schubspannung führen:

Mauerwerk
SR 250,00 mm

Norm Tabelle 2/3
Ja
Nein

Wichtung der Spannungen:
Kennwerte nach Tabelle 2/3:
Eigengewicht:
Querkontraktionszahl:
Teilsicherheitsbeiwert Material:

Nein
UP-GF (Vor Ort)
γ 17,50 kN/m³
ν 0,35 [-]
γ_M 1,35 [-]

E-Modul, Langzeit
E-Modul, Kurzzeit
Zul. Druckfestigkeit, Langzeit
Zul. Druckfestigkeit, Kurzzeit
Zul. Biegezugfestigkeit, Langzeit
Zul. Biegezugfestigkeit, Kurzzeit
Zul. Zugfestigkeit, Langzeit
Zul. Zugfestigkeit, Kurzzeit

	Charakteristisch	Design	
E _{R,rad,L}	3.500,00	2.592,59	N/mm²
E _{R,rad,K}	6.000,00	4.444,44	N/mm²
f _{c,rad,L}	75,00	55,56	N/mm²
f _{c,rad,K}	130,00	96,30	N/mm²
f _{t,fl,L}	75,00	55,56	N/mm²
f _{t,fl,K}	130,00	96,30	N/mm²
f _{t,L}	n. def.	n. def.	N/mm²
f _{t,K}	n. def.	n. def.	N/mm²

Wärmedehnzahl: α_T 0,00003 1/K

2.1.3 Lasten

Wasserspiegel über Sohle Liner:	h_w	3,00	m
Gewicht Wasser:	γ_w	10,00	kN/m ³
Temperaturänderung:	ΔT	0,00	K
Max. Überdeckung Scheitel Altrohr:	h_{max}	7,25	m
Wichte Boden manuell eingeben:	Ja		
Anzahl Überdeckungen:	1 Überdeckungshöhe		
Wichte Boden, trocken:	γ_B	20,00	kN/m ³
Wichte Boden, unter Auftrieb:	γ_B'	10,00	kN/m ³
Horizontale Verkehrslast berücksichtigen:	Ja		
Verkehrslast:	Straße SLW 30		
Abminderungsfaktor dynamische Last manuell eingeben:	Nein		
Zusätzliche Flächenlast:	p_0	0,0	kN/m ²
Altrohr vor Sanierung gerissen:	Ja		
Bodenverhalten:	Elastisch		
Direkte Eingabe E2:	Nein		
Berechnung Bettung E20:	E-Modul		
Bodengruppe Einbettung:	G4		
E-Modul Einbettung:	$E_{20,R,rad}$	10,0	N/mm ²
Teilsicherheitsbeiwert Eigengewicht:	γ_{GE}	1,35	[-]
Teilsicherheitsbeiwert Wasserdruck:	γ_w	1,50	[-]
Teilsicherheitsbeiwert Innendruck:	γ_{pi}	1,50	[-]
Teilsicherheitsbeiwert Temperatur:	γ_T	1,10	[-]
Teilsicherheitsbeiwert Erdlast:	γ_G	1,35	[-]
Teilsicherheitsbeiwert Verkehr:	γ_Q	1,35	[-]

2.2 Ergebnisse

2.2.1 Hinweis zum Einzelrohr-Lining

Die Querdehnzahl wird in der Berechnung nicht berücksichtigt, da davon ausgegangen wird, dass die einzelnen Rohre in den Muffen keinen axialen Schub übertragen.

2.2.2 Materialkennwerte

2.2.2.1 Liner

Teilsicherheitsbeiwert Material:	γ_M	1,35	[-]
Querkontraktionszahl:	ν	0,35	[-]
E-Modul, Langzeit:	$E_{R,rad,L}$	3.500,00	N/mm ²
E-Modul, Langzeit, Design:	$E_{R,rad,L,d}$	2.592,59	N/mm ²
Verwendeter E-Modul:	$E_{R,rad}$	2.592,59	N/mm ²
Zul. Druckfestigkeit, Langzeit:	$f_{c,rad,L}$	75,00	N/mm ²
Zul. Druckfestigkeit, Langzeit, Design:	$f_{c,rad,L,d}$	-55,56	N/mm ²
Zul. Biegezugfestigkeit, Langzeit:	$f_{t,fl,L}$	75,00	N/mm ²
Zul. Biegezugfestigkeit, Langzeit, Design:	$f_{t,fl,L,d}$	55,56	N/mm ²

2.2.2.2 Altrohr

Eigengewicht:	γ	22,00	kN/m ³
Teilsicherheitsbeiwert Material:	γ_M	2,20	[-]
E-Modul, Langzeit:	$E_{R,rad,L}$	8.000,00	N/mm ²
E-Modul, Langzeit, Design:	$E_{R,rad,L,d}$	3.636,36	N/mm ²
Zul. Druckfestigkeit, Langzeit:	$f_{c,rad,L}$	5,00	N/mm ²
Zul. Druckfestigkeit, Langzeit, Design:	$f_{c,rad,L,d}$	-2,27	N/mm ²
Zul. Biegezugfestigkeit, Langzeit:	$f_{t,fl,L}$	0,01	N/mm ²
Zul. Biegezugfestigkeit, Langzeit, Design:	$f_{t,fl,L,d}$	0,00	N/mm ²

IngSoft EasyPipe 3.1.0.0 - 01.03.2026 - 22:48:50

5

Bauteil: SAN-03 - GFK Sanierung Hauptsammler Ost
MA-250346

Seite:
D-182

Kapitel / Vorgang: D - Nachweise
02.1 815 / 1570 t = 30 / Bereich Straßenverkehr

Archiv-Nr.

2.2.3 Ringsteifigkeit nach ISO 7685

Trägheitsmoment:	I	2.250,00	mm ⁴ /mm
Außendurchmesser Liner:	da _L	1.066,67	mm
Trägheitsabstand:	e	15,00	mm
Mittlerer Radius Liner:	r _{L,m}	518,33	mm

E-Modul:	E _{R,rad}	Kurzzeit 6.000,00	Langzeit 3.500,00	N/mm ²
----------	--------------------	----------------------	----------------------	-------------------

$$S_K = \frac{E_{R,rad,K} \cdot I}{r_{L,m} \cdot 2^3}$$

Ringsteifigkeit:	S	12,12	7,07	kN/m ²
------------------	---	-------	------	-------------------

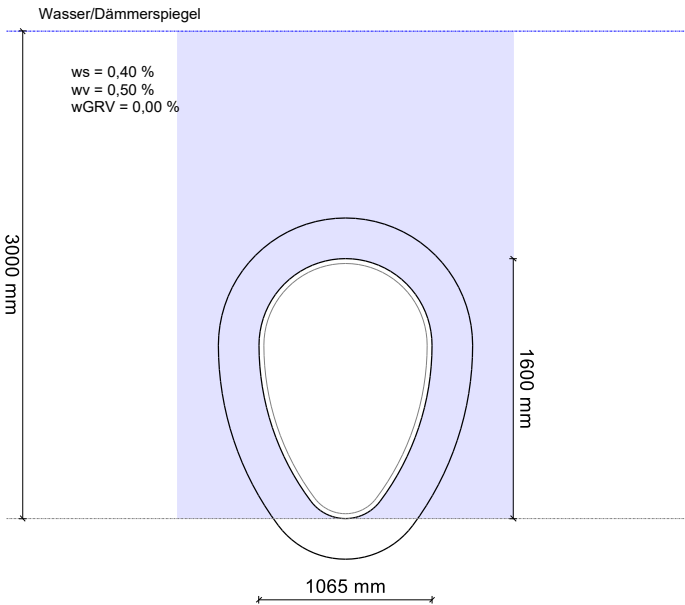
2.2.4 Hinweise zur Berechnung

[Betaversion] Der Lastfall Erd- und Verkehrslasten wird nicht mit der vorgegebenen Ei-Geometrie untersucht. Es wird mit einem Ersatzkreis gerechnet, der dem Scheitelkreis entspricht. Sollte der "Regelei Querschnitt Freie Eingabe" gewählt sein, so wird bei Abweichungen vom Verhältnis 2/3 der größte Radius der Ellipse verwendet.
Die Berechnung des AZ III erfolgt nicht mit der tatsächlichen Querschnittsgeometrie, sondern mit dem nach DWA-A 143-2, Kap. 7.8.1 zulässigen Näherungsfahren am Ersatzkreis. ACHTUNG: Insbesondere bei Kanälen im Grundwasser liegt das Ersatzkreisverfahren nicht immer auf der sicheren Seite.

Hinweise zur Berechnungsmethode: Das statische Modell und die implementierten Berechnungsalgorithmen halten sich sehr eng an den Wortlaut des DWA-A 143-2. Dieses Regelwerk lässt aber insbesondere bei Berechnungen für den Altrohrzustand III einen breiten Interpretationsspielraum und ausgeprägte Freiheiten bei der Modellbildung. Über 'Kann'- und 'Darf'-Bestimmungen werden vereinfachte Berechnungsmethoden erlaubt, die grundsätzlich auf der sicheren Seite liegen, aber in der Folge auch zu höheren Linerbeanspruchungen bzw. zu größeren Wanddicken führen. Hierzu gehören beispielsweise der vereinfachte Stabilitätsnachweis statt einer nichtlinearen Berechnung nach Theorie II. Ordnung oder die Reduzierung des Modells auf einen Viertelkreis, obwohl eine doppelte Symmetrie gar nicht gegeben ist. Der dabei erforderliche größere Rechenaufwand ermöglicht eine wirtschaftliche Bemessung. Ein direkter zahlenmäßiger Vergleich der Ergebnisse von EasyPipe mit den Resultaten aus vereinfachten Berechnungen ist deshalb nicht möglich.

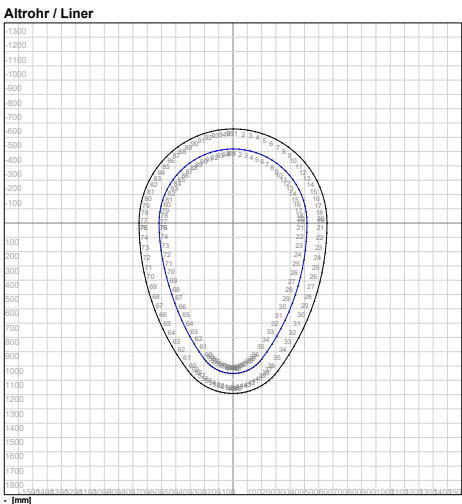
2.2.5 Lastfall 01 AZ II - hmax hW 3,00 m, Langzeit

Grundlage für die Freie Eingabe stellt eine DIN-konforme Ei-Form dar (H/B = 1,5 inkl. der vorgegebenen Radien). Diese Eingabeform dient nicht zur Abbildung von z.B. überhöhten Ei-Formen. Eingeben wird dabei die Breite und Höhe des Ei-Querschnitts. Die Abweichung die sich ergibt, wenn H <> 1,5 x B, wird über eine Verzerrung der y-Koordinaten abgebildet.



2.2.5.1 Geometrie diskretisiertes System

Skizze



Wanddicke Liner: t_L 30,00 mm
Die Gelenkringverformung wird analog A 143-2 als eine Erhöhung (wgrv/10) der eingegebenen örtlichen Verformung angesetzt.
Vorgegebene Werte:

Lokale Vorverformung: ω_v 0,50 %
 Gelenkringverformung: $\omega_{GR,v}$ 0,00 %
 $\omega_v = \omega_v + \omega_{GR,v}/10 = 0,50 \% + (0,00 \% / 10)$ (A 143-2 Tabelle 8)

Lokale Vorverformung: ω_v 0,50 %
 Lokale Vorverformung absolut: w_v 7,91 mm

Eine Berücksichtigung der Gelenkringverformung in der Geometrie liegt auf der unsicheren Seite, da durch die Aufweitung im Kämpfer das Verhältnis Höhe/Breite günstiger gegen Außendruck wird. Damit würden für den Altrohrzustand II günstigere Ergebnisse berechnet werden, als im Altrohrzustand I.

Gelenkringverformung: $\omega_{GR,v}$ 0,00 %
 Gelenkringverformung absolut, einseitig: $w_{GR,v}$ 0,00 mm

Der Einfluss der Gelenkringaufweitung auf den Ringspalt nach Gleichung DWA-A 143-2, Gl. 121 bleibt bei von Kreisform abweichenden Querschnitten unberücksichtigt, da in der Formel DWA-A 143-2, Gl. 121 die Kinematik des Kreises mit 4 exzentrischen Gelenken vorausgesetzt wird. Sie kann deshalb nicht für eine andere Querschnittsgeometrie mit anderer Kinematik angewendet werden. Dies gilt natürlich auch für den Ersatzkreis.

Ringspalt: ω_s 0,40 %
 Spaltweite absolut (als konst. Ringspalt): w_s 2,62 mm

Mittlerer Radius Liner, Kämpfer: $r_{L,m,K}$ 1.582,50 mm
 Mittlerer Radius Liner, Scheitel: $r_{L,m,S}$ 518,31 mm
 R/t Verhältnis: $r_{L,m}/t_{L,m}$ 31,50 [-]

2.2.5.2 Verformungsnachweis Liner, Gebrauchslast

Lichte Breite in Kämpferhöhe: b_k 1.065,00 mm
 Lichte Höhe Scheitel-Sohle: h_s 1.600,00 mm
 Relevanter Durchmesser für prozentuale Verformung: d_v 1.332,50 mm

Spaltweite absolut (als konst. Ringspalt): w_s 2,62 mm
 Lokale Vorverformung absolut: w_v 7,91 mm
 Gelenkringverformung absolut, einseitig: $w_{GR,v}$ 0,00 mm

Elastische Verformung absolut, horizontal: $w_{el,h,E1}$ 11,97 mm
 Elastische Verformung absolut, horizontal: $w_{el,h,E2}$ -13,08 mm

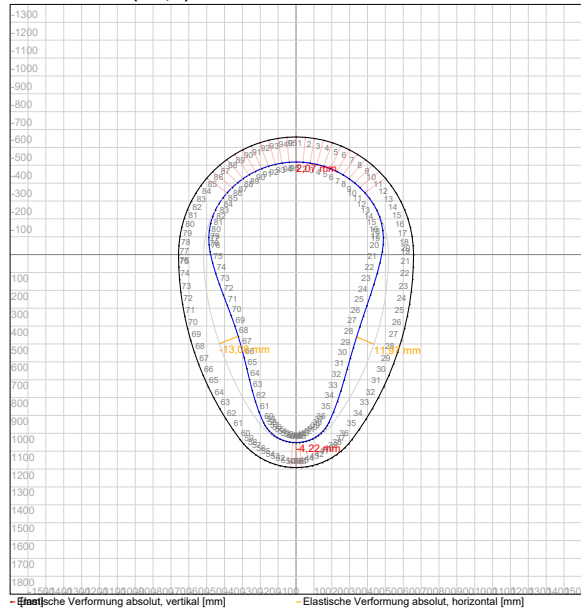
Elastische Verformung absolut, horizontal: $w_{el,h}$ 25,05 mm
 Elastische Verformung relativ: $\delta_{v,el}$ 1,88 %
 Zulässige Verformung elastisch: $zul \delta_{v,el}$ 3,00 %

Die errechnete elastische Verformung ist kleiner als die zulässige Verformung.

Gesamte Durchmesseränderung: w 32,96 mm
 Relative Gesamtverformung: δ_v 2,47 %
 Anhaltswert Gesamtverformung: $\delta_{v,A}$ 10,00 %

Elastische Verformung absolut, vertikal: $w_{el,v,E1}$ 2,07 mm
 Elastische Verformung absolut, vertikal: $w_{el,v,E2}$ -4,22 mm
 Elastische Verformung absolut, vertikal: $w_{el,v}$ 6,30 mm

Gebrauchslast (x 7,1)



Spannungsnachweis Liner, Design

Fläche (Wanddicke): A 30,00 mm²/mm

Außen

Widerstandsmoment, außen:

Element	i	Druck	150,00	mm ³ /mm
Korrekturfaktor (Verformtes System)	α_k	Zug	56	[-]
Normalkraft in Element	N_d		0,96	[-]
Moment in Element	M_d		-45,53	N/mm
			1.270,72	Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} - \alpha_{ka} \cdot \frac{M_d}{W_e} \quad (88)$$

Spannung in Element	Max σ_d	-9,89	7,74	N/mm ²
Zul. Spannung, Langzeit, Design:	$\sigma_{L,d}$	-55,56	55,56	N/mm ²

Ausnutzung Spannungen	U_σ	17,8	13,9	%
-----------------------	------------	------	------	---

Der Spannungsnachweis Außen ist erfüllt.

Innen

Widerstandsmoment, innen:

Element	i	Druck	150,00	mm ³ /mm
Korrekturfaktor (Verformtes System)	α_k	Zug	67	[-]
Normalkraft in Element	N_d		1,00	[-]
Moment in Element	M_d		-43,58	N/mm
			-1.446,92	Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} + \alpha_{ki} \cdot \frac{M_d}{W_i} \quad (87)$$

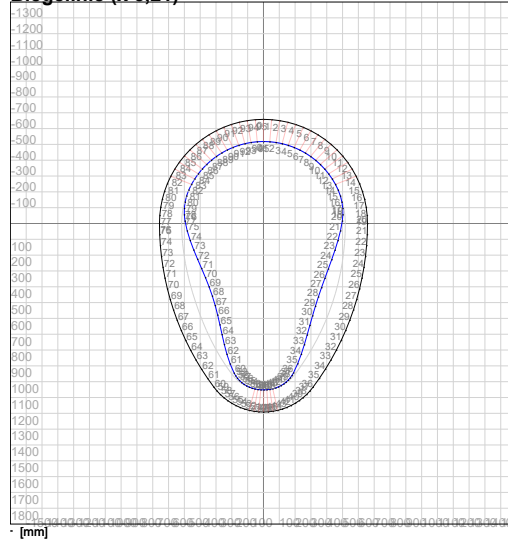
Spannung in Element	Max σ_d	-11,55	7,06	N/mm ²
Zul. Spannung, Langzeit, Design:	$\sigma_{L,d}$	-55,56	55,56	N/mm ²

Ausnutzung Spannungen	U_σ	20,8	12,7	%
-----------------------	------------	------	------	---

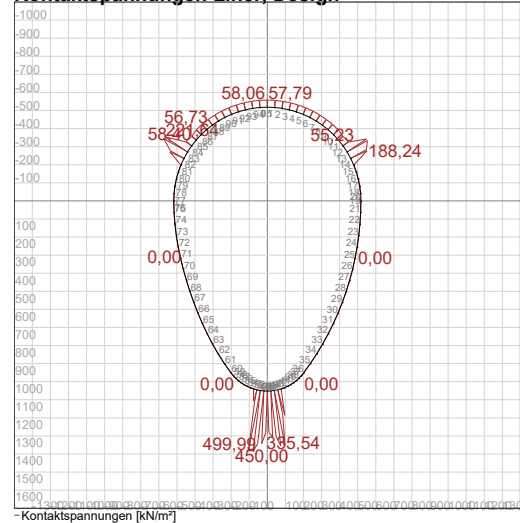
Der Spannungsnachweis Innen ist erfüllt.

Die Spannungen liegen im zulässigen Bereich.

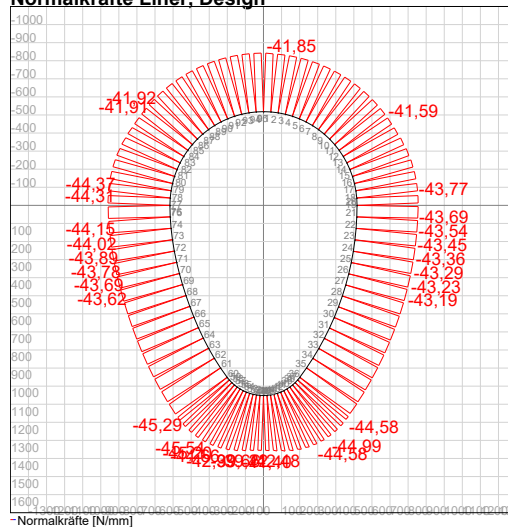
Biegelinie (x 5,21)



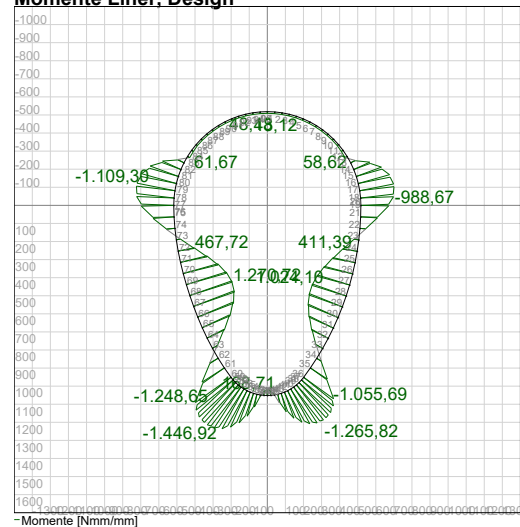
Kontaktspannungen Liner, Design

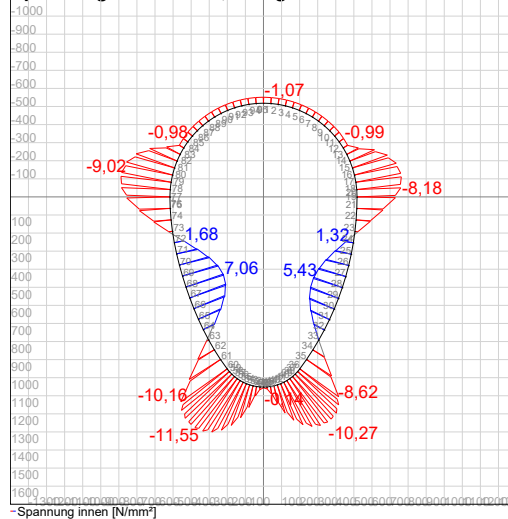
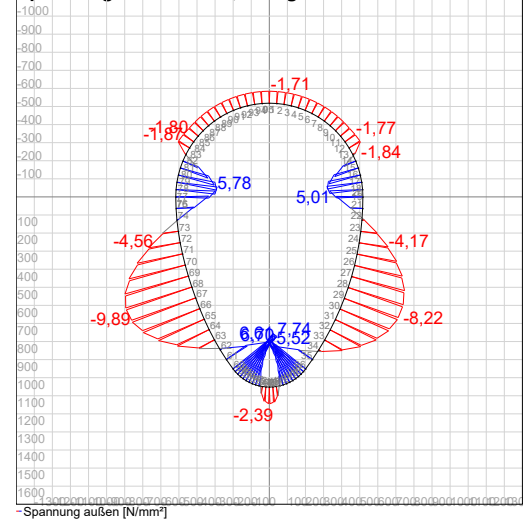


Normalkräfte Liner, Design



Momente Liner, Design



Spannung innen Liner, Design

Spannung außen Liner, Design

Bauteil: SAN-03 - GFK Sanierung Hauptsammler Ost
MA-250346

Seite:
D-189

Kapitel / Vorgang: D - Nachweise
02.1 815 / 1570 t = 30 / Bereich Straßenverkehr

Archiv-Nr.

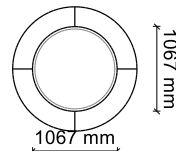
2.2.6 Lastfall 02 [Ersatzkreis] AZ III - hW 0,00 m + h 7,25 m + ws 0,0 % + ww 0,0 %, Langzeit

Straße SLW 30

 ws = 0,00 %
 ww = 0,00 %
 eg = 35,00 %
 wGRV = 0,00 %

Max. Überdeckung Scheitel Altrohr

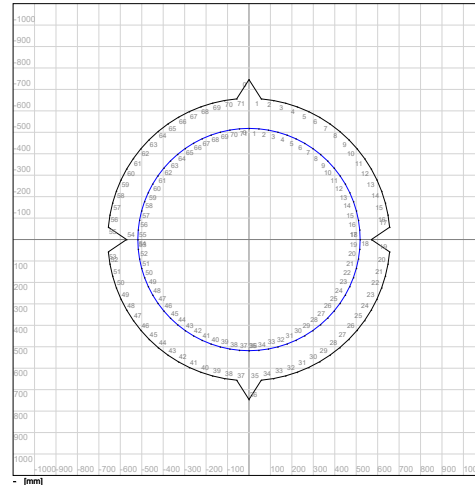
7250 mm



2.2.6.1 Geometrie diskretisiertes System

Skizze

Altrohr / Liner



IngSoft EasyPipe 3.1.0.0 - 01.03.2026 - 22:48:50

13

Bauteil: SAN-03 - GFK Sanierung Hauptsammler Ost
 MA-250346

Seite:
 D-190

Kapitel / Vorgang: D - Nachweise
 02.1 815 / 1570 t = 30 / Bereich Straßenverkehr

Archiv-Nr.

Wanddicke Liner:	t_L	30,00	mm
Wanddicke Altrohr:	t_R	250,00	mm
Lokale Vorverformung:	ω_v	0,00	%
Lokale Vorverformung absolut:	w_v	0,00	mm

Gelenkringverformung:	$\omega_{GR,v}$	0,00	%
Gelenkringverformung absolut, einseitig:	$w_{GR,v}$	0,00	mm
Ringspalt:	ω_s	0,00	%
Spaltweite absolut (als konst. Ringspalt):	w_s	0,00	mm

Mittlerer Radius Liner:	$r_{L,m}$	518,33	mm
-------------------------	-----------	--------	----

2.2.6.2 Erdlasten und Verkehrslasten

Wichte Boden, unter Auftrieb:	γ_B'	10,00	kN/m ³
Wichte Boden, trocken:	γ_B	20,00	kN/m ³
Max. Überdeckung Scheitel Altrohr:	h_{max}	7,25	m
Wasser/Dämmerspiegel:	h_w	0,00	m
Wanddicke Altrohr:	t_R	250,00	mm
Vertikale Lichte Höhe Altrohr:	$d_{AR,iv}$	1.066,67	mm
Höhe Wasserspiegel über Altrohrscheitel:	h'_w	0,00	m
Vertikale Erdlast:	p_E	145,00	kN/m ²
Höhe Scheitel bis Kämpfer Altrohr:	$r_{AR,a}$	783,33	mm
Höhe Wasserspiegel Altrohrkämpfer bis Altrohrscheitel:	h'_{wk}	0,00	m
Vertikale Erdlast bis Kämpfer:	$p_{E,K}$	160,67	kN/m ²
Einfache Bodenspannung aus Verkehr:	p	2,40	kN/m ²
Stoßbeiwert:	ϕ	1,40	[-]
Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Scheitelhöhe:	p_T	3,36	kN/m ²
Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Kämpferhöhe (mit ϕ):	p_{TK}	2,80	kN/m ²
Horizontale Bodenspannung aus Verkehr:	$p_{T,h}$	0,20	kN/m ²
Vertikale Verkehrslast:	p_v	3,36	kN/m ²
Vertikale Verkehrslast, Design:	$p_{v,d}$	4,54	kN/m ²
Zusätzliche Flächenlast:	p_0	0,0	kN/m ²

Konzentrationsfaktor über Rohr:	λ_R	0,75	[-]
Vertikale Gesamtlast:	q_v	112,11	kN/m ²
Vertikale Gesamtlast, Design:	$q_{v,d}$	151,35	kN/m ²
E-Modul:	E_2	10,00	N/mm ²
Horizontale Bettungssteifigkeit:	S_{Bh}	8,000	N/mm ²
Erddruckbeiwert (Einbettung):	K_2	0,100	[-]
Konzentrationsfaktor Boden:	λ_B	1,083	[-]

Höhe Wasserspiegel Altrohrkämpfer bis Altrohrscheitel:	h'_{wk}	0,00	m
Höhe Scheitel bis Kämpfer Altrohr:	$r_{AR,a}$	783,33	mm
Horizontale Erdlast:	$q_{h,E}$	17,41	kN/m ²
Horizontale Verkehrslast:	$q_{h,v}$	0,20	kN/m ²
Horizontale Gesamtlast:	q_h	17,61	kN/m ²
Designwert Horizontale Gesamtlast:	$q_{h,d}$	23,77	kN/m ²
Rechnerischer Erddruckbeiwert:	K_2'	0,157	[-]

2.2.6.3 Verformungsnachweis Liner, Gebrauchslast

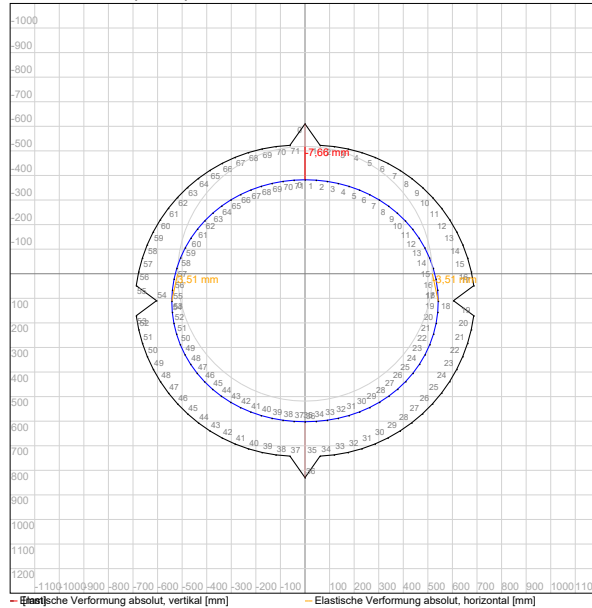
Relevanter Durchmesser für prozentuale Verformung:	d_v	1.066,67	mm
Spaltweite absolut (als konst. Ringspalt):	w_s	0,00	mm
Lokale Vorverformung absolut:	w_v	0,00	mm
Gelenkringverformung absolut, einseitig:	$w_{GR,v}$	0,00	mm
Elastische Verformung absolut, vertikal:	$w_{el,v,E1}$	-7,66	mm
Elastische Verformung absolut, vertikal:	$w_{el,v}$	7,66	mm
Elastische Verformung relativ:	$\delta_{v,el}$	0,72	%
Zulässige Verformung elastisch:	$zul \delta_{v,el}$	6,00	%

Die errechnete elastische Verformung ist kleiner als die zulässige Verformung.

Gesamte Durchmesseränderung:	w	7,66	mm
Relative Gesamtverformung:	δ_v	0,72	%
Anhaltswert Gesamtverformung:	$\delta_{v,A}$	10,00	%

Elastische Verformung absolut, horizontal:	$w_{el,h,E1}$	-3,51	mm
Elastische Verformung absolut, horizontal:	$w_{el,h,E2}$	3,51	mm
Elastische Verformung absolut, horizontal:	$w_{el,h}$	7,02	mm

Gebrauchslast (x 6,8)



2.2.6.4 Bodeninteraktion (Gebrauchslast)

Bettungsziffer, Scheitel:	CB	10.212,77	kN/m³
Innerer Reibungswinkel:	φ'	20,00	°
Beiwert:	K_p	2,04	[-]
Vertikale Erdlast:	p_E	145,00	kN/m²
Grenzwert q_h im Scheitel (informativ):	$q_{h,max}$	240,29	kN/m²

Vertikale Erdlast bis Kämpfer:	$p_{E,K}$	160,67	kN/m²
Grenzwert q_h im Kämpfer:	$q_{h,max,K}$	266,25	kN/m²

Der Wert wird im Kämpfer abgelesen.

Horizontale Gesamtlast:	q_h	17,61	kN/m²
Seitlicher Bettungsreaktionsdruck:	q_h^*	50,36	kN/m²
Summe horizontale Kräfte:	$q_h + q_h^*$	67,97	kN/m²
Ausnutzung max q_h :	$U_{max,qh}$	25,5	%

Für die Interaktion Boden-Rohrsystem wurde der elastische Ansatz verwendet. Die Bettung des Rohres wurde um den gesamten Umfang als konstant angenommen. Damit ergibt sich eine Dreiecksförmige Verteilung der Bodenspannungen, deren Maximalwert auf 75% des passiven Erddrucks begrenzt ist.

Die horizontale Kraft aus Bettungsreaktionsdruck und seitlichem Druck im Kämpfer liegt unterhalb des Grenzwertes.

2.2.6.5 Stabilitätsnachweis (Designwerte)

Der maßgebende Nachweis der Stabilität erfolgt über die im Abschnitt 7.6.4.2 (DWA-A 143-2) zugelassene (genauere) Variante einer Berechnung nach Theorie II. Ordnung unter Berücksichtigung der Vorverformungen und der Spaltbildung. Hierbei wird numerisch überprüft, ob ein elastisches Stabilitätsversagen (Beulen) unter gamma-facher Last eintritt. Darüber hinaus wird geprüft, ob die bei dieser Berechnung ermittelten Spannungen die vorgegeben maximalen Grenzspannungen für Zug und Druck mit einfacher Sicherheit nicht überschreiten.

Nachweis entfällt.

Spannungsnachweis Liner, Design

Fläche (Wanddicke): A 30,00 mm²/mm

Außen

Widerstandsmoment, außen:

W_e 150,00 mm³/mm

Element	i	Druck	Zug	
Korrekturfaktor (Verformtes System)	α_k	35	18	[-]
Normalkraft in Element	N_d	0,98	0,98	[-]
Moment in Element	M_d	-0,28	-1,54	N/mm
		595,62	-293,44	Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} - \alpha_{ka} \cdot \frac{M_d}{W_e} \quad (88)$$

Spannung in Element	Max σ_d	-3,90	1,87	N/mm²
Zul. Spannung, Langzeit, Design:	$\sigma_{L,d}$	-55,56	55,56	N/mm²

Ausnutzung Spannungen	U_σ	7,0	3,4	%
-----------------------	------------	-----	-----	---

Der Spannungsnachweis Außen ist erfüllt.

Innen

Widerstandsmoment, innen:

W_i 150,00 mm³/mm

Element	i	Druck	Zug	
Korrekturfaktor (Verformtes System)	α_k	19	36	[-]
Normalkraft in Element	N_d	1,02	1,02	[-]
Moment in Element	M_d	-1,55	-0,28	N/mm
		-293,44	595,62	Nmm/mm

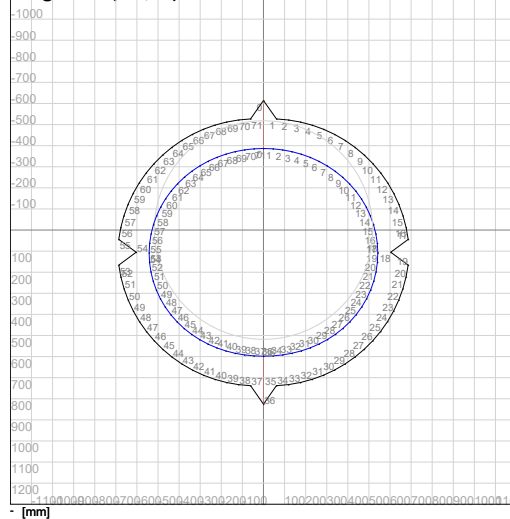
$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} + \alpha_{ki} \cdot \frac{M_d}{W_i} \quad (87)$$

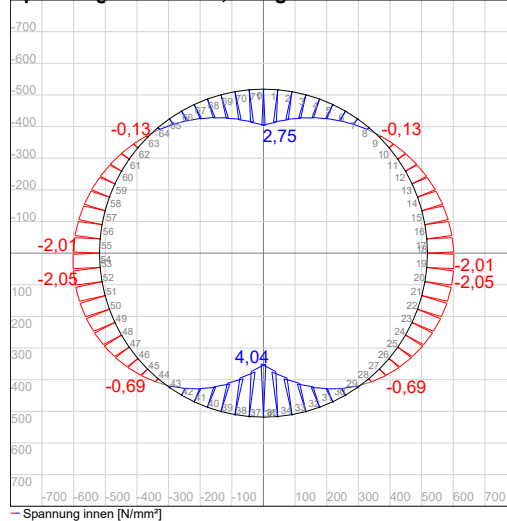
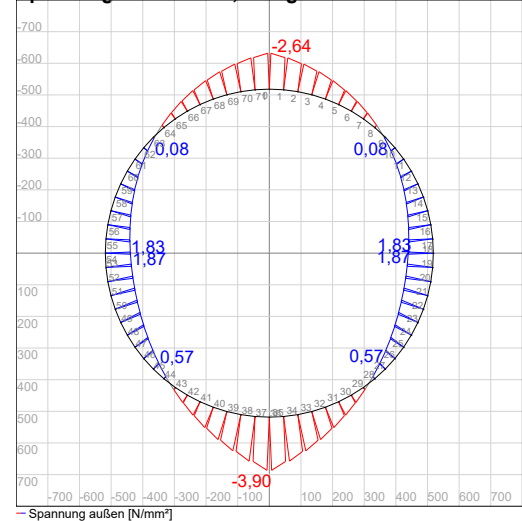
Spannung in Element	Max σ_d	-2,05	4,04	N/mm²
Zul. Spannung, Langzeit, Design:	$\sigma_{L,d}$	-55,56	55,56	N/mm²

Ausnutzung Spannungen	U_σ	3,7	7,3	%
-----------------------	------------	-----	-----	---

Der Spannungsnachweis Innen ist erfüllt.

Die Spannungen liegen im zulässigen Bereich.

Biegelinie (x 4,80)


Spannung innen Liner, Design

Spannung außen Liner, Design


2.2.6.6 Spannungsnachweis Liner, Zwang

Fläche (Wanddicke):

A 30,00 mm²/mm

Außen

Widerstandsmoment, außen:

W_e 150,00 mm³/mm

Element

i

Druck

Zug

Korrekturfaktor (Verformtes System)

α_k

0,98

0,98

Normalkraft in Element

N_d

-0,30

-2,02

Moment in Element

M_d

753,55

-383,44 Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} - \alpha_{ka} \cdot \frac{M_d}{W_e} \quad (88)$$

Spannung in Element

Max σ_d

-4,94

2,44

N/mm²

Zul. Spannung, Langzeit, Design:

σ_{L,d}

-55,56

55,56

N/mm²

Ausnutzung Spannungen

U_σ

8,9

4,4

%

Der Spannungsnachweis Außen ist erfüllt.

Innen

Widerstandsmoment, innen:

W_i 150,00 mm³/mm

Element

i

Druck

Zug

Korrekturfaktor (Verformtes System)

α_k

1,02

1,02

Normalkraft in Element

N_d

-2,02

-0,30

N/mm

Moment in Element

M_d

-383,44

753,55 Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} + \alpha_{ki} \cdot \frac{M_d}{W_i} \quad (87)$$

Spannung in Element

Max σ_d

-2,67

5,11

N/mm²

Zul. Spannung, Langzeit, Design:

σ_{L,d}

-55,56

55,56

N/mm²

Ausnutzung Spannungen

U_σ

4,8

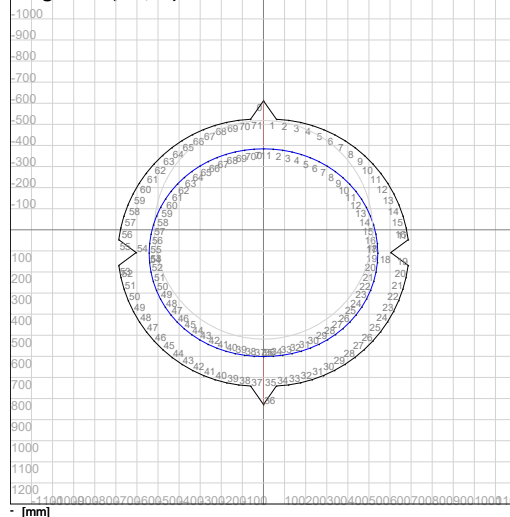
9,2

%

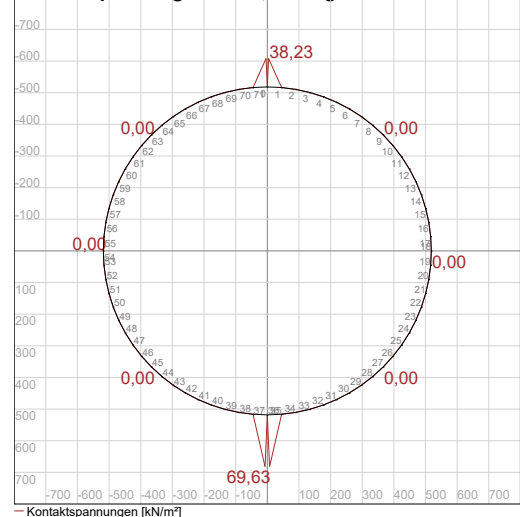
Der Spannungsnachweis Innen ist erfüllt.

Die Spannungen liegen im zulässigen Bereich.

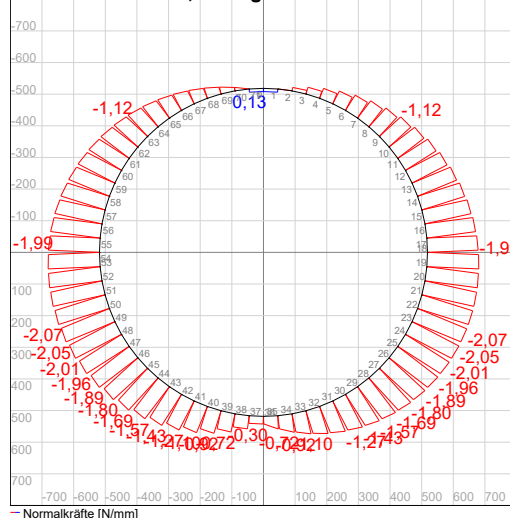
Biegelinie (x 4,93)



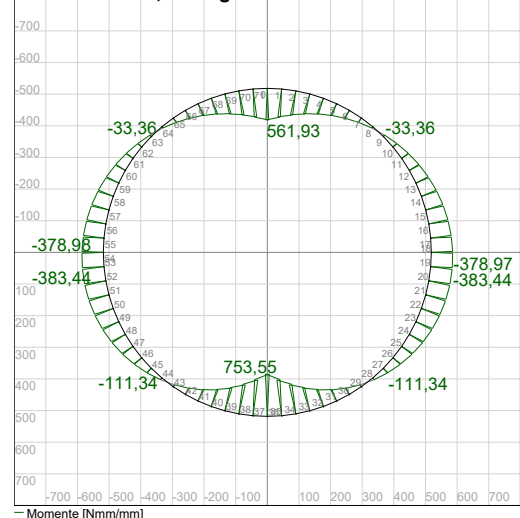
Kontaktspannungen Liner, Zwang

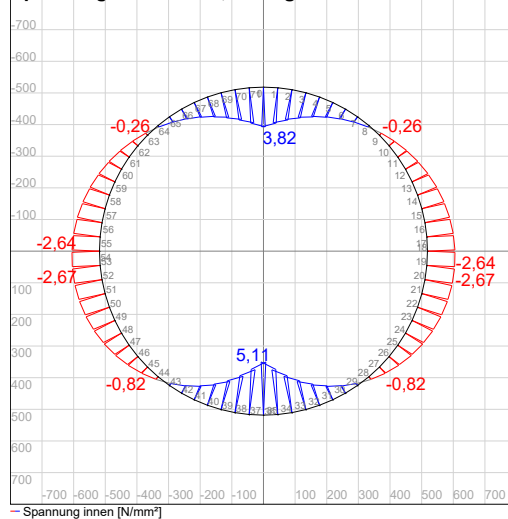
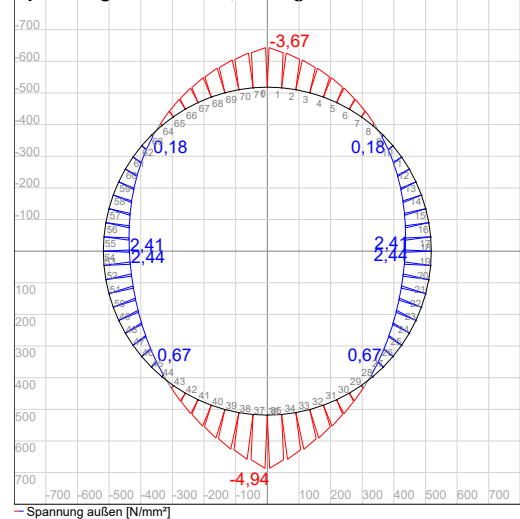


Normalkräfte Liner, Zwang



Momente Liner, Zwang



Spannung innen Liner, Zwang

Spannung außen Liner, Zwang


2.2.6.7 Altrohrspannungen Kämpfer

Vertikale Gesamtlast, Design:

Wanddicke Altrohr:

Außendurchmesser Altrohr Kämpfer:

Bezogene Gelenkringexzentrizität:

Druckzonbreite:

$q_{v,d}$	151,35	kN/m²
t_R	250,00	mm
$d_{aAR,k}$	1.566,67	mm
$e_{G/t}$	35,00	%
b_D	100,00	mm

$$N_{K,d} = -q_{v,d} (1 + \omega_{GR,v}) \cdot \frac{d_{aAR,k}}{2}$$

Druckkraft im Kämpfer:

Spannung in der Druckzone:

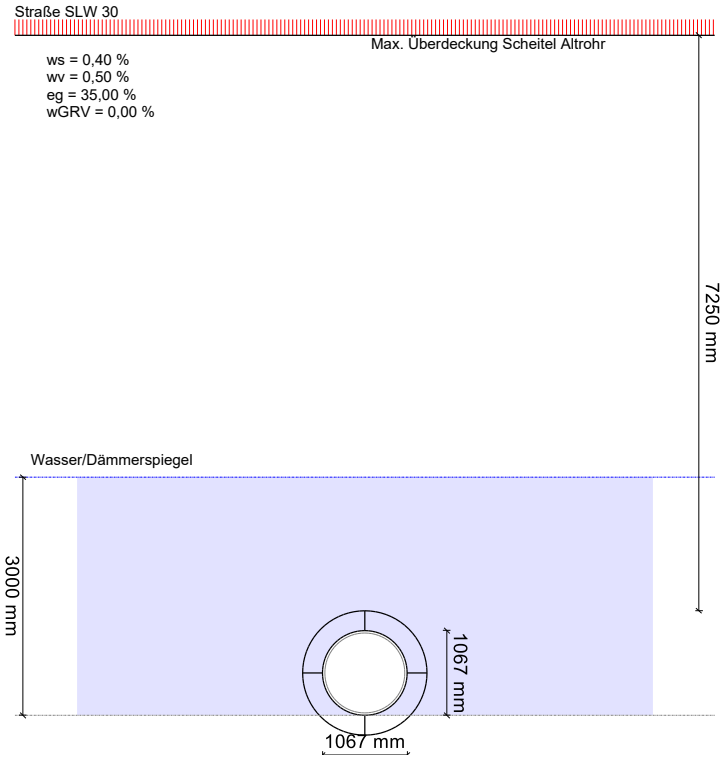
Zul. Druckfestigkeit, Langzeit:

Ausnutzung Druckspannungen AR Kämpfer:

$N_{K,d}$	-118,56	N/mm
σ_d	-1,78	N/mm²
$f_{c,rad,L}$	5,00	N/mm²
$U_{\sigma D,AR}$	35,6	%

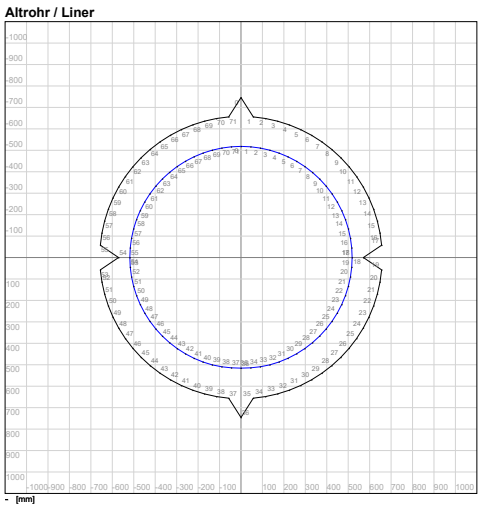
Der Spannungsnachweis für Kämpferspannungen im Altrohr ist erfüllt.

2.2.7 Lastfall 03 [Ersatzkreis] AZ III - hW 3,00 m + h 7,25 m + ws 0,4 % + ww 0,5 %, Langzeit



2.2.7.1 Geometrie diskretisiertes System

Skizze



Wanddicke Liner:	t_L	30,00	mm
Wanddicke Altrohr:	t_R	250,00	mm
Lokale Vorverformung:	ω_v	0,50	%
Lokale Vorverformung absolut:	w_v	2,59	mm
Gelenkringverformung:	$\omega_{GR,v}$	0,00	%
Gelenkringverformung absolut, einseitig:	$w_{GR,v}$	0,00	mm
Ringspalt:	ω_s	0,40	%
Spaltweite absolut (als konst. Ringspalt):	w_s	2,07	mm
Mittlerer Radius Liner:	$r_{L,m}$	518,33	mm
2.2.7.2 Erdlasten und Verkehrslasten			
Wichte Boden, unter Auftrieb:	γ_B'	10,00	kN/m ³
Wichte Boden, trocken:	γ_B	20,00	kN/m ³
Max. Überdeckung Scheitel Altrohr:	h_{max}	7,25	m
Wasser/Dämmerspiegel:	h_w	3,00	m
Wanddicke Altrohr:	t_R	250,00	mm
Vertikale Lichte Höhe Altrohr:	$d_{AR,iv}$	1.066,67	mm
Höhe Wasserspiegel über Altrohrscheitel:	h'_w	1,68	m
Vertikale Erdlast:	p_E	128,17	kN/m ²
Höhe Scheitel bis Kämpfer Altrohr:	$r_{AR,a}$	783,33	mm
Höhe Wasserspiegel Altrohrkämpfer bis Altrohrscheitel:	h'_{wk}	0,78	m
Vertikale Erdlast bis Kämpfer:	$p_{E,K}$	136,00	kN/m ²
Einfache Bodenspannung aus Verkehr:	p	2,40	kN/m ²
Stoßbeiwert:	ϕ	1,40	[-]
Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Scheitelhöhe:	p_T	3,36	kN/m ²
Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Kämpferhöhe (mit ϕ):	p_{TK}	2,80	kN/m ²
Horizontale Bodenspannung aus Verkehr:	$p_{T,h}$	0,20	kN/m ²
Vertikale Verkehrslast:	p_v	3,36	kN/m ²
Vertikale Verkehrslast, Design:	$p_{v,d}$	4,54	kN/m ²
Zusätzliche Flächenlast:	p_0	0,0	kN/m ²
Konzentrationsfaktor über Rohr:	λ_R	0,75	[-]
Vertikale Gesamtlast:	q_v	99,49	kN/m ²
Vertikale Gesamtlast, Design:	$q_{v,d}$	134,31	kN/m ²
E-Modul:	E_2	10,00	N/mm ²
Horizontale Bettungssteifigkeit:	S_{Bh}	8,000	N/mm ²
Erddruckbeiwert (Einbettung):	K_2	0,100	[-]
Konzentrationsfaktor Boden:	λ_B	1,083	[-]
Höhe Wasserspiegel Altrohrkämpfer bis Altrohrscheitel:	h'_{wk}	0,78	m
Höhe Scheitel bis Kämpfer Altrohr:	$r_{AR,a}$	783,33	mm
Horizontale Erdlast:	$q_{h,E}$	14,73	kN/m ²
Horizontale Verkehrslast:	$q_{h,v}$	0,20	kN/m ²
Horizontale Gesamtlast:	q_h	14,93	kN/m ²
Designwert Horizontale Gesamtlast:	$q_{h,d}$	20,16	kN/m ²
Rechnerischer Erddruckbeiwert:	K_2'	0,150	[-]

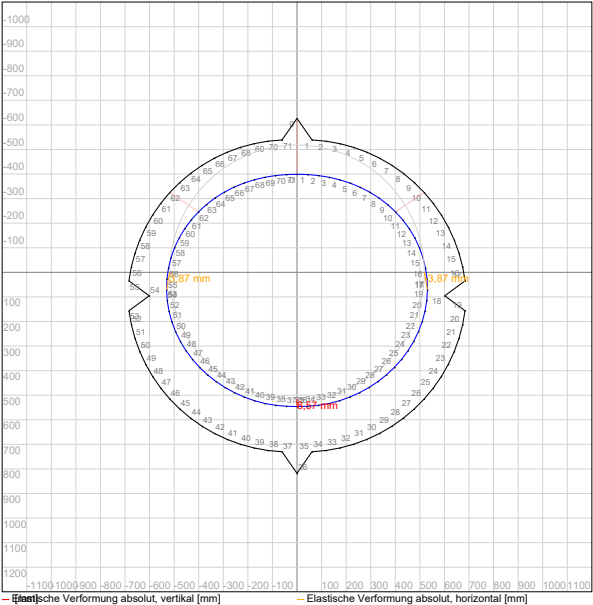
2.2.7.3 Verformungsnachweis Liner, Gebrauchslast

Relevanter Durchmesser für prozentuale Verformung:	d_v	1.066,67	mm
Spaltweite absolut (als konst. Ringspalt):	w_s	2,07	mm
Lokale Vorverformung absolut:	w_v	2,59	mm
Gelenkringverformung absolut, einseitig:	$w_{GR,v}$	0,00	mm
Elastische Verformung absolut, vertikal:	$w_{el,v}$	8,57	mm
Elastische Verformung relativ:	$\delta_{v,el}$	0,80	%
Zulässige Verformung elastisch:	$zul \delta_{v,el}$	6,00	%

Die errechnete elastische Verformung ist kleiner als die zulässige Verformung.

Gesamte Durchmesseränderung:	w	11,16	mm
Relative Gesamtverformung:	δ_v	1,05	%
Anhaltswert Gesamtverformung:	$\delta_{v,A}$	10,00	%
Elastische Verformung absolut, horizontal:	$w_{el,h,E1}$	-3,87	mm
Elastische Verformung absolut, horizontal:	$w_{el,h,E2}$	3,87	mm
Elastische Verformung absolut, horizontal:	$w_{el,h}$	7,74	mm

Gebrauchslast (x 7,0)



2.2.7.4 Bodeninteraktion (Gebrauchslast)

Bettungsziffer, Scheitel:	CB	10.212,77	kN/m³
Innerer Reibungswinkel:	ϕ'	20,00	°
Beiwert:	K_p	2,04	[-]
Vertikale Erdlast:	pE	128,17	kN/m²
Grenzwert qh im Scheitel (informativ):	$q_{h,max}$	212,40	kN/m²
Vertikale Erdlast bis Kämpfer:	pE,K	136,00	kN/m²
Grenzwert qh im Kämpfer:	$q_{h,max,K}$	225,38	kN/m²

Der Wert wird im Kämpfer abgelesen.

Horizontale Gesamtlast:	q_h	14,93	kN/m²
Seitlicher Bettungsreaktionsdruck:	q_h^*	44,43	kN/m²
Summe horizontale Kräfte:	$q_h + q_h^*$	59,36	kN/m²
Ausnutzung max qh:	$U_{max,qh}$	26,3	%

Für die Interaktion Boden-Rohrsystem wurde der elastische Ansatz verwendet. Die Bettung des Rohrs wurde um den gesamten Umfang als konstant angenommen. Damit ergibt sich eine Dreiecksförmige Verteilung der Bodenspannungen, deren Maximalwert auf 75% des passiven Erddrucks begrenzt ist.

Die horizontale Kraft aus Bettungsreaktionsdruck und seitlichem Druck im Kämpfer liegt unterhalb des Grenzwertes.

Bauteil:	SAN-03 - GFK Sanierung Hauptsammler Ost MA-250346
Kapitel / Vorgang:	D - Nachweise 02.1 815 / 1570 t = 30 / Bereich Straßenverkehr

Seite:	D-200
Archiv-Nr.	

2.2.7.5 Stabilitätsnachweis (Designwerte)

Der maßgebende Nachweis der Stabilität erfolgt über die im Abschnitt 7.6.4.2 (DWA-A 143-2) zugelassene (genauere) Variante einer Berechnung nach Theorie II. Ordnung unter Berücksichtigung der Vorverformungen und der Spaltbildung. Hierbei wird numerisch überprüft, ob ein elastisches Stabilitätsversagen (Beulen) unter gamma-facher Last eintritt. Darüber hinaus wird geprüft, ob die bei dieser Berechnung ermittelten Spannungen die vorgegeben maximalen Grenzspannungen für Zug und Druck mit einfacher Sicherheit nicht überschreiten.

Nachweis entfällt.

Spannungsnachweis Liner, Design

Fläche (Wanddicke): A 30,00 mm²/mm

Außen

Widerstandsmoment, außen:

W_e 150,00 mm³/mm

Element	i	Druck	Zug	
Korrekturfaktor (Verformtes System)	α_k	0,98	0,98	[-]
Normalkraft in Element	N_d	-20,31	-22,40	N/mm
Moment in Element	M_d	777,42	-409,31	Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} - \alpha_{ka} \cdot \frac{M_d}{W_e} \quad (88)$$

Spannung in Element	Max σ_d	-5,76	1,93	N/mm²
Zul. Spannung, Langzeit, Design:	$\sigma_{L,d}$	-55,56	55,56	N/mm²

Ausnutzung Spannungen	U_σ	10,4	3,5	%
-----------------------	------------	------	-----	---

Der Spannungsnachweis Außen ist erfüllt.

Innen

Widerstandsmoment, innen:

W_i 150,00 mm³/mm

Element	i	Druck	Zug	
Korrekturfaktor (Verformtes System)	α_k	1,02	1,02	[-]
Normalkraft in Element	N_d	-22,41	-20,31	N/mm
Moment in Element	M_d	-409,31	777,42	Nmm/mm

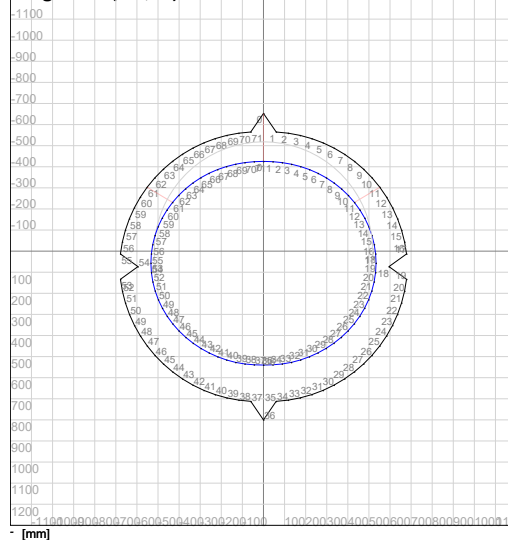
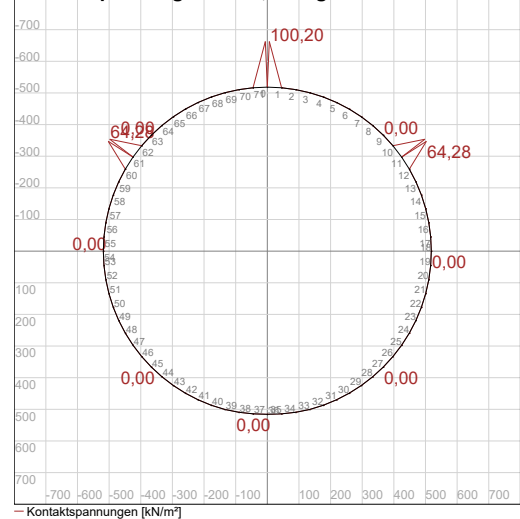
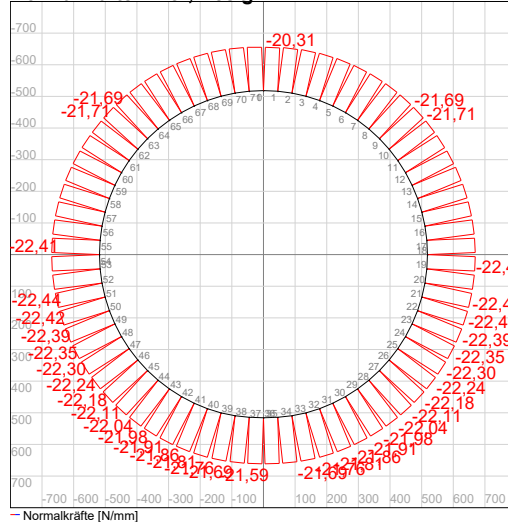
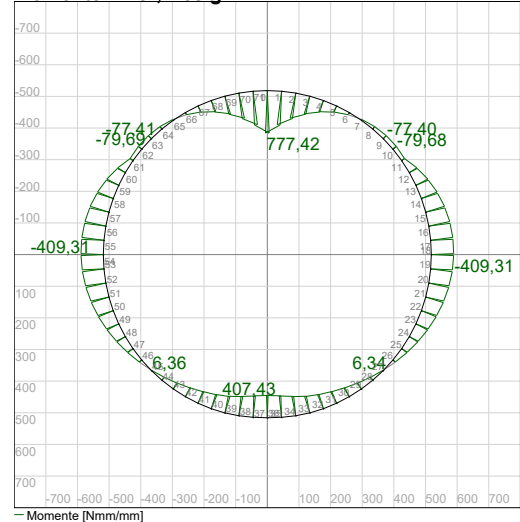
$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} + \alpha_{ki} \cdot \frac{M_d}{W_i} \quad (87)$$

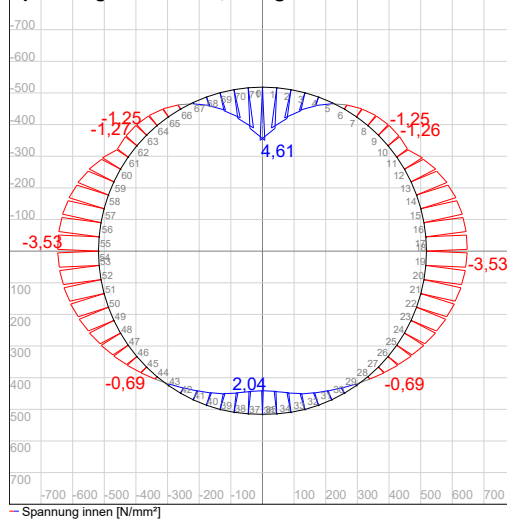
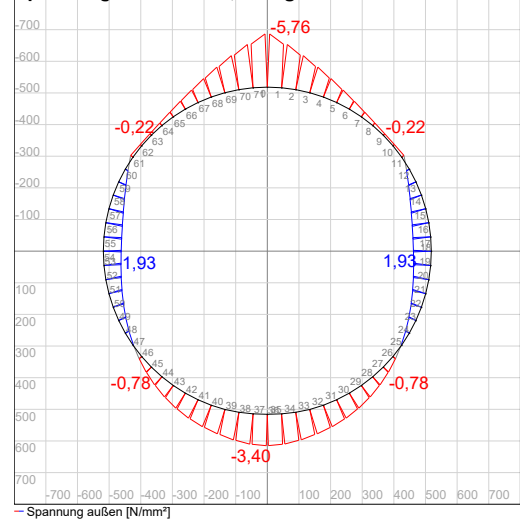
Spannung in Element	Max σ_d	-3,53	4,61	N/mm²
Zul. Spannung, Langzeit, Design:	$\sigma_{L,d}$	-55,56	55,56	N/mm²

Ausnutzung Spannungen	U_σ	6,4	8,3	%
-----------------------	------------	-----	-----	---

Der Spannungsnachweis Innen ist erfüllt.

Die Spannungen liegen im zulässigen Bereich.

Biegelinie (x 3,98)

Kontaktspannungen Liner, Design

Normalkräfte Liner, Design

Momente Liner, Design


Spannung innen Liner, Design

Spannung außen Liner, Design


2.2.7.6 Spannungsnachweis Liner, Zwang

Fläche (Wanddicke):

A 30,00 mm²/mm

Außen

Widerstandsmoment, außen:

W_e 150,00 mm³/mm

Element

i

Druck 71 Zug 54 [-]

Korrekturfaktor (Verformtes System)

α_k

0,98 0,98 [-]

Normalkraft in Element

N_d

-19,81 -22,39 N/mm

Moment in Element

M_d

970,64 -480,49 Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} - \alpha_{ka} \cdot \frac{M_d}{W_e} \quad (88)$$

Spannung in Element

Max σ_d

-7,01 2,40 N/mm²

Zul. Spannung, Langzeit, Design:

σ_{L,d}

-55,56 55,56 N/mm²

Ausnutzung Spannungen

U_σ

12,6 4,3 %

Der Spannungsnachweis Außen ist erfüllt.

Innen

Widerstandsmoment, innen:

W_i 150,00 mm³/mm

Element

i

Druck 55 Zug 0 [-]

Korrekturfaktor (Verformtes System)

α_k

1,02 1,02 [-]

Normalkraft in Element

N_d

-22,40 -19,81 N/mm

Moment in Element

M_d

-480,49 970,64 Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} + \alpha_{ki} \cdot \frac{M_d}{W_i} \quad (87)$$

Spannung in Element

Max σ_d

-4,01 5,94 N/mm²

Zul. Spannung, Langzeit, Design:

σ_{L,d}

-55,56 55,56 N/mm²

Ausnutzung Spannungen

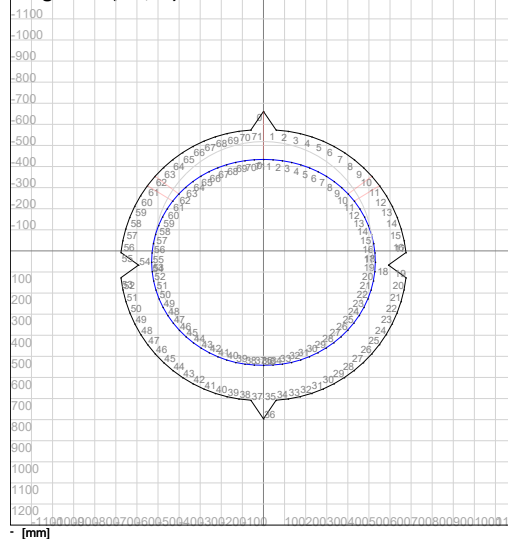
U_σ

7,2 10,7 %

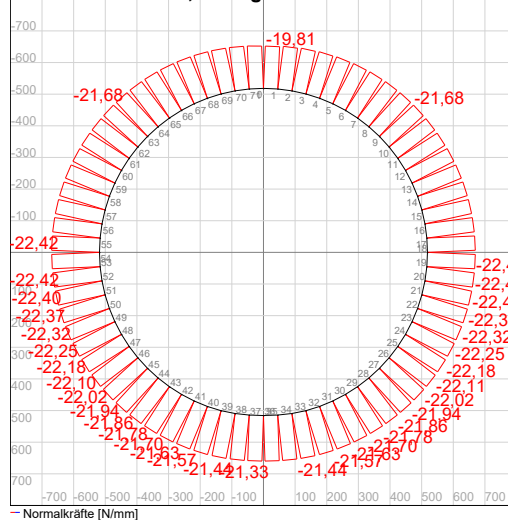
Der Spannungsnachweis Innen ist erfüllt.

Die Spannungen liegen im zulässigen Bereich.

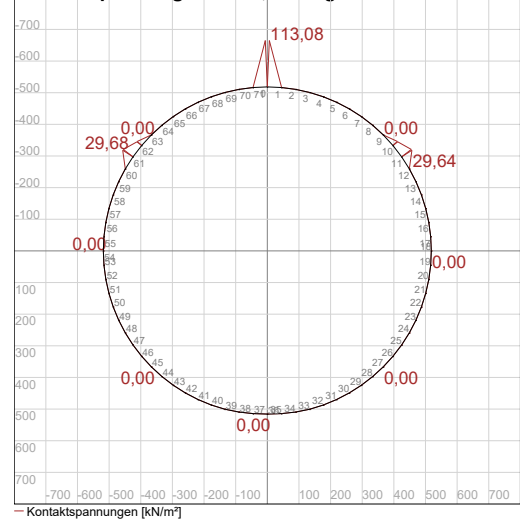
Biegelinie (x 3,65)



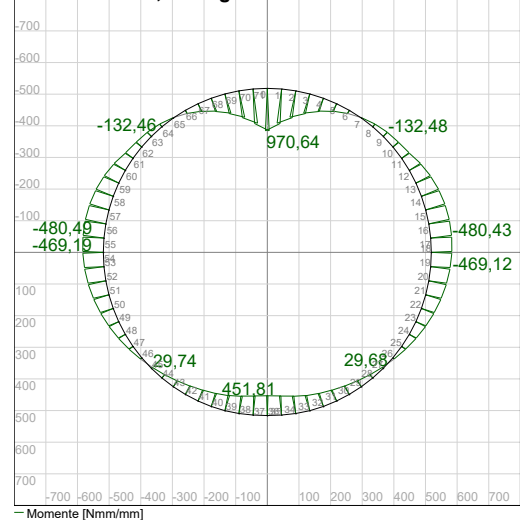
Normalkräfte Liner, Zwang

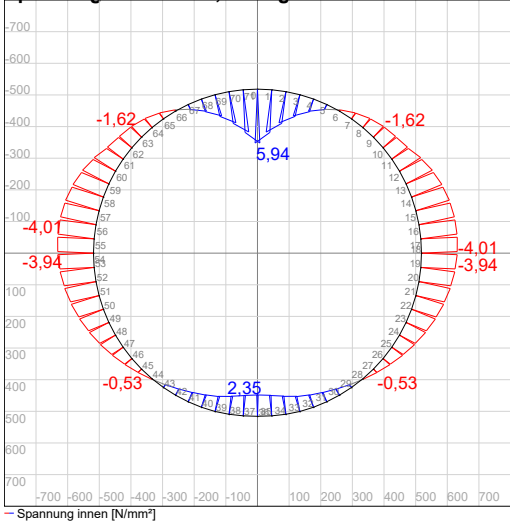
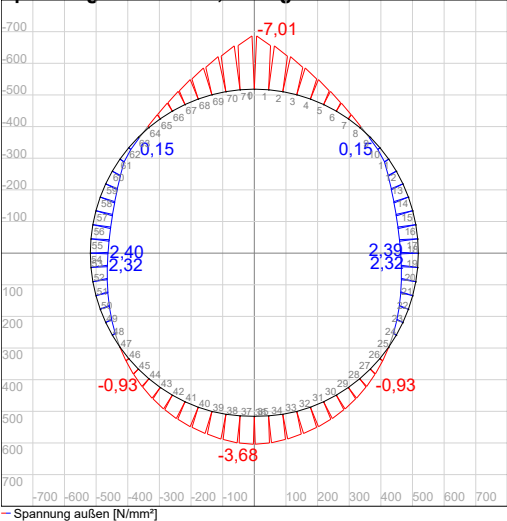


Kontaktspannungen Liner, Zwang



Momente Liner, Zwang



Spannung innen Liner, Zwang

Spannung außen Liner, Zwang


2.2.7.7 Altrohrspannungen Kämpfer

Vertikale Gesamtlast, Design:
Wanddicke Altrohr:
Außendurchmesser Altrohr Kämpfer:
Bezogene Gelenkringexzentrizität:
Druckzonenbreite:

$q_{v,d}$	134,31	kN/m ²
t_R	250,00	mm
$d_{AR,k}$	1.566,67	mm
e_G/t	35,00	%
b_D	100,00	mm

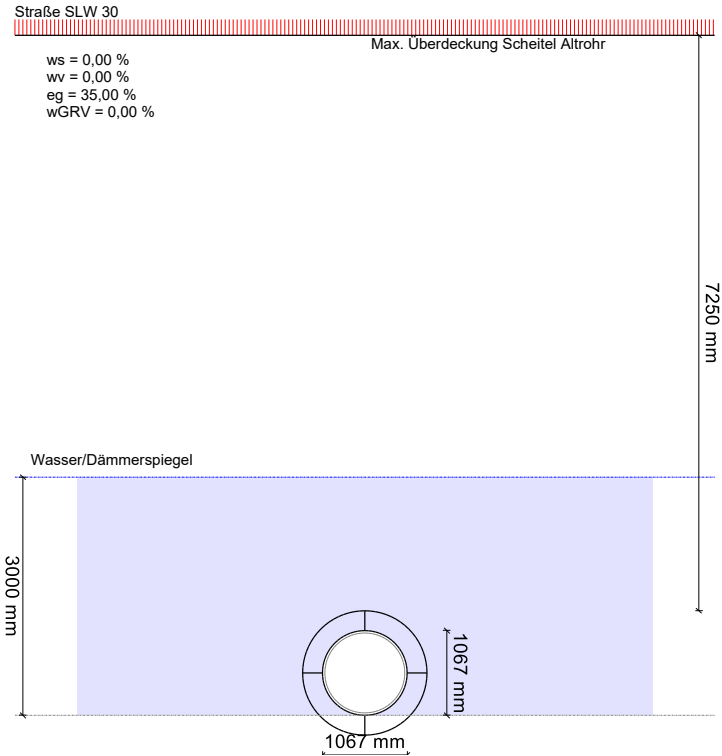
$$N_{K,d} = -q_{v,d} (1 + \omega_{GR,v}) \cdot \frac{d_{AR,k}}{2}$$

Druckkraft im Kämpfer:
Spannung in der Druckzone:
Zul. Druckfestigkeit, Langzeit:
Ausnutzung Druckspannungen AR Kämpfer:

$N_{K,d}$	-105,21	N/mm
σ_d	-1,58	N/mm ²
$f_{c,rad,L}$	5,00	N/mm ²
$U_{\sigma D,AR}$	31,6	%

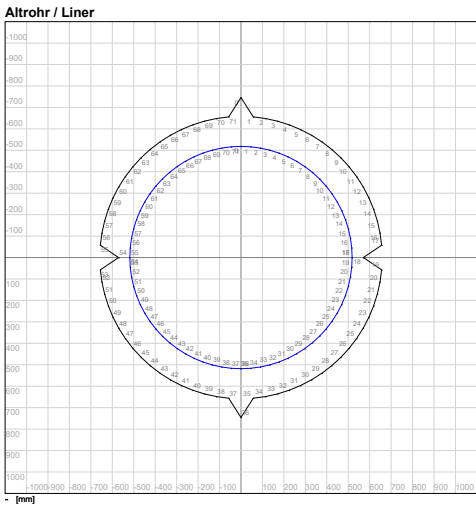
Der Spannungsnachweis für Kämpferspannungen im Altrohr ist erfüllt.

2.2.8 Lastfall 04 [Ersatzkreis] AZ III - hW 3,00 m + h 7,25 m + ws 0,0 % + ww 0,0 %, Langzeit



2.2.8.1 Geometrie diskretisiertes System

Skizze



Wanddicke Liner:	t_L	30,00	mm
Wanddicke Altrohr:	t_R	250,00	mm
Lokale Vorverformung:	ω_v	0,00	%
Lokale Vorverformung absolut:	w_v	0,00	mm
Gelenkringverformung:	$\omega_{GR,v}$	0,00	%
Gelenkringverformung absolut, einseitig:	$w_{GR,v}$	0,00	mm
Ringspalt:	ω_s	0,00	%
Spaltweite absolut (als konst. Ringspalt):	w_s	0,00	mm
Mittlerer Radius Liner:	$r_{L,m}$	518,33	mm

2.2.8.2 Erdlasten und Verkehrslasten

Wichte Boden, unter Auftrieb:	γ_B'	10,00	kN/m ³
Wichte Boden, trocken:	γ_B	20,00	kN/m ³
Max. Überdeckung Scheitel Altrohr:	h_{max}	7,25	m
Wasser/Dämmerspiegel:	h_w	3,00	m
Wanddicke Altrohr:	t_R	250,00	mm
Vertikale Lichte Höhe Altrohr:	$d_{AR,iv}$	1.066,67	mm
Höhe Wasserspiegel über Altrohrscheitel:	h'_w	1,68	m
Vertikale Erdlast:	p_E	128,17	kN/m ²
Höhe Scheitel bis Kämpfer Altrohr:	$r_{AR,a}$	783,33	mm
Höhe Wasserspiegel Altrohrkämpfer bis Altrohrscheitel:	h'_{wk}	0,78	m
Vertikale Erdlast bis Kämpfer:	$p_{E,K}$	136,00	kN/m ²
Einfache Bodenspannung aus Verkehr:	p	2,40	kN/m ²
Stoßbeiwert:	ϕ	1,40	[-]
Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Scheitelhöhe:	p_T	3,36	kN/m ²
Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Kämpferhöhe (mit ϕ):	p_{TK}	2,80	kN/m ²
Horizontale Bodenspannung aus Verkehr:	$p_{T,h}$	0,20	kN/m ²
Vertikale Verkehrslast:	p_v	3,36	kN/m ²
Vertikale Verkehrslast, Design:	$p_{v,d}$	4,54	kN/m ²
Zusätzliche Flächenlast:	p_0	0,0	kN/m ²

Konzentrationsfaktor über Rohr:	λ_R	0,75	[-]
Vertikale Gesamtlast:	q_v	99,49	kN/m ²
Vertikale Gesamtlast, Design:	$q_{v,d}$	134,31	kN/m ²
E-Modul:	E_2	10,00	N/mm ²
Horizontale Bettungssteifigkeit:	S_{Bh}	8,000	N/mm ²
Erddruckbeiwert (Einbettung):	K_2	0,100	[-]
Konzentrationsfaktor Boden:	λ_B	1,083	[-]

Höhe Wasserspiegel Altrohrkämpfer bis Altrohrscheitel:	h'_{wk}	0,78	m
Höhe Scheitel bis Kämpfer Altrohr:	$r_{AR,a}$	783,33	mm
Horizontale Erdlast:	$q_{h,E}$	14,73	kN/m ²
Horizontale Verkehrslast:	$q_{h,v}$	0,20	kN/m ²
Horizontale Gesamtlast:	q_h	14,93	kN/m ²
Designwert Horizontale Gesamtlast:	$q_{h,d}$	20,16	kN/m ²
Rechnerischer Erddruckbeiwert:	K_2'	0,150	[-]

2.2.8.3 Verformungsnachweis Liner, Gebrauchslast

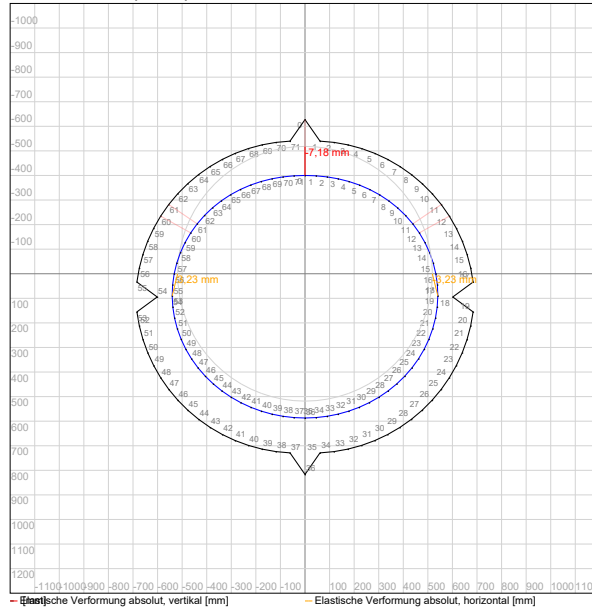
Relevanter Durchmesser für prozentuale Verformung:	d_v	1.066,67	mm
Spaltweite absolut (als konst. Ringspalt):	w_s	0,00	mm
Lokale Vorverformung absolut:	w_v	0,00	mm
Gelenkringverformung absolut, einseitig:	$w_{GR,v}$	0,00	mm
Elastische Verformung absolut, vertikal:	$w_{el,v,E1}$	-7,18	mm
Elastische Verformung absolut, vertikal:	$w_{el,v}$	7,18	mm
Elastische Verformung relativ:	$\delta_{v,el}$	0,67	%
Zulässige Verformung elastisch:	$zul \delta_{v,el}$	6,00	%

Die errechnete elastische Verformung ist kleiner als die zulässige Verformung.

Gesamte Durchmesseränderung:	w	7,18	mm
Relative Gesamtverformung:	δ_v	0,67	%
Anhaltswert Gesamtverformung:	$\delta_{v,A}$	10,00	%

Elastische Verformung absolut, horizontal:	$w_{el,h,E1}$	-3,23	mm
Elastische Verformung absolut, horizontal:	$w_{el,h,E2}$	3,23	mm
Elastische Verformung absolut, horizontal:	$w_{el,h}$	6,45	mm

Gebrauchslast (x 6,9)



2.2.8.4 Bodeninteraktion (Gebrauchslast)

Bettungsziffer, Scheitel:	CB	10.212,77	kN/m³
Innerer Reibungswinkel:	φ'	20,00	°
Beiwert:	K_p	2,04	[-]
Vertikale Erdlast:	p_E	128,17	kN/m²
Grenzwert q_h im Scheitel (informativ):	$q_{h,max}$	212,40	kN/m²

Vertikale Erdlast bis Kämpfer:	$p_{E,K}$	136,00	kN/m²
Grenzwert q_h im Kämpfer:	$q_{h,max,K}$	225,38	kN/m²

Der Wert wird im Kämpfer abgelesen.

Horizontale Gesamtlast:	q_h	14,93	kN/m²
Seitlicher Bettungsreaktionsdruck:	q_h^*	45,28	kN/m²
Summe horizontale Kräfte:	$q_h + q_h^*$	60,21	kN/m²
Ausnutzung max q_h :	$U_{max,qh}$	26,7	%

Für die Interaktion Boden-Rohrsystem wurde der elastische Ansatz verwendet. Die Bettung des Rohres wurde um den gesamten Umfang als konstant angenommen. Damit ergibt sich eine Dreiecksförmige Verteilung der Bodenspannungen, deren Maximalwert auf 75% des passiven Erddrucks begrenzt ist.

Die horizontale Kraft aus Bettungsreaktionsdruck und seitlichem Druck im Kämpfer liegt unterhalb des Grenzwertes.

2.2.8.5 Stabilitätsnachweis (Designwerte)

Der maßgebende Nachweis der Stabilität erfolgt über die im Abschnitt 7.6.4.2 (DWA-A 143-2) zugelassene (genauere) Variante einer Berechnung nach Theorie II. Ordnung unter Berücksichtigung der Vorverformungen und der Spaltbildung. Hierbei wird numerisch überprüft, ob ein elastisches Stabilitätsversagen (Beulen) unter gamma-facher Last eintritt. Darüber hinaus wird geprüft, ob die bei dieser Berechnung ermittelten Spannungen die vorgegeben maximalen Grenzspannungen für Zug und Druck mit einfacher Sicherheit nicht überschreiten.

Nachweis entfällt.

Spannungsnachweis Liner, Design

Fläche (Wanddicke): A 30,00 mm²/mm

Außen

Widerstandsmoment, außen:

W_e 150,00 mm³/mm
Druck Zug

Element	i	0	54	[-]
Korrekturfaktor (Verformtes System)	α _k	0,98	0,98	[-]
Normalkraft in Element	N _d	-20,44	-22,39	N/mm
Moment in Element	M _d	736,99	-347,91	Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} - \alpha_{ka} \cdot \frac{M_d}{W_e} \quad (88)$$

Spannung in Element	Max σ _d	-5,50	1,53	N/mm ²
Zul. Spannung, Langzeit, Design:	σ _{L,d}	-55,56	55,56	N/mm ²

Ausnutzung Spannungen	U _σ	9,9	2,8	%
-----------------------	----------------	-----	-----	---

Der Spannungsnachweis Außen ist erfüllt.

Innen

Widerstandsmoment, innen:

W_i 150,00 mm³/mm
Druck Zug

Element	i	53	71	[-]
Korrekturfaktor (Verformtes System)	α _k	1,02	1,02	[-]
Normalkraft in Element	N _d	-22,39	-20,44	N/mm
Moment in Element	M _d	-347,91	736,99	Nmm/mm

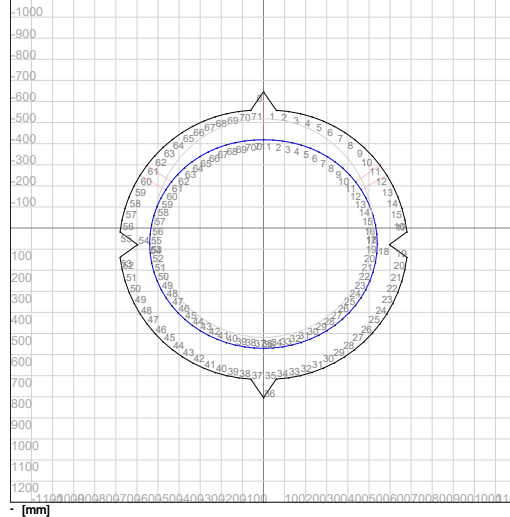
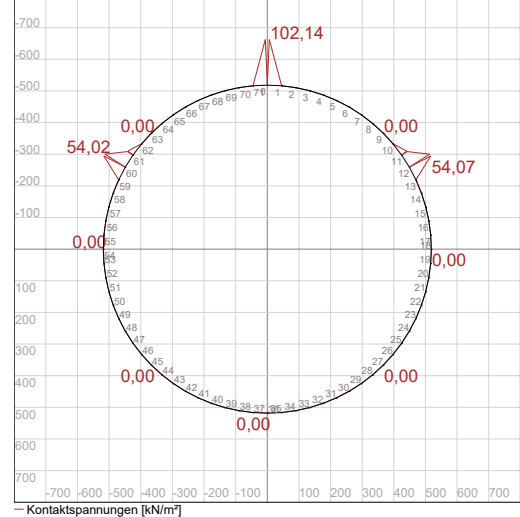
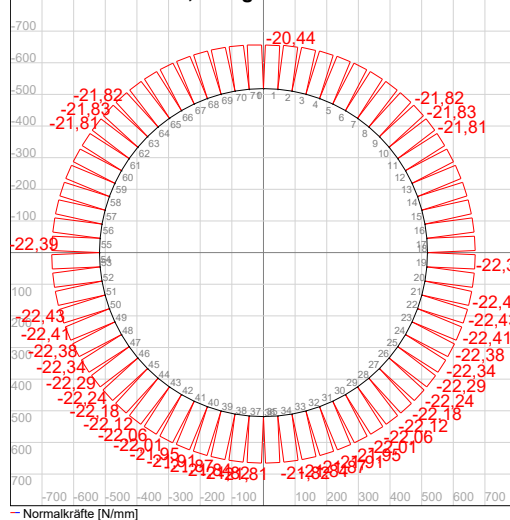
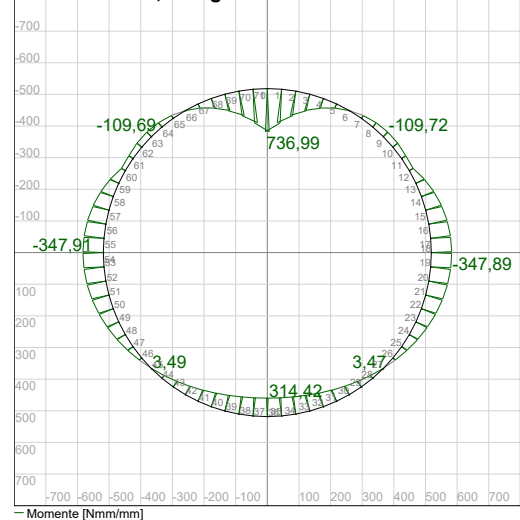
$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} + \alpha_{ki} \cdot \frac{M_d}{W_i} \quad (87)$$

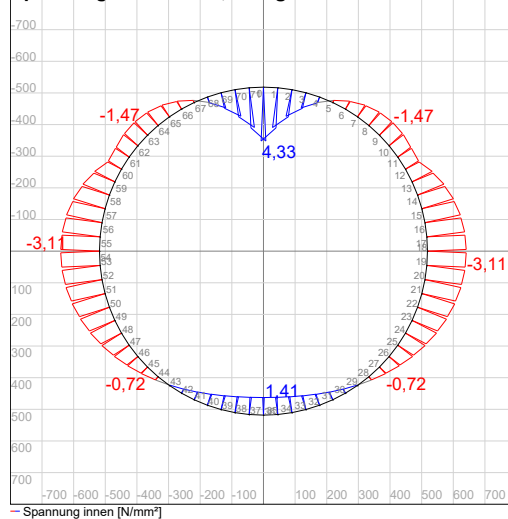
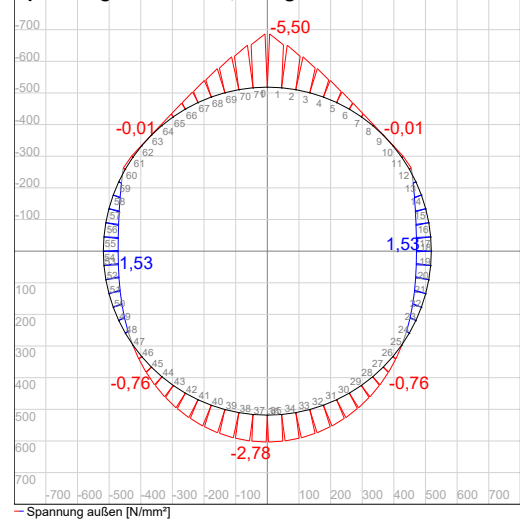
Spannung in Element	Max σ _d	-3,11	4,33	N/mm ²
Zul. Spannung, Langzeit, Design:	σ _{L,d}	-55,56	55,56	N/mm ²

Ausnutzung Spannungen	U _σ	5,6	7,8	%
-----------------------	----------------	-----	-----	---

Der Spannungsnachweis Innen ist erfüllt.

Die Spannungen liegen im zulässigen Bereich.

Biegelinie (x 4,26)

Kontaktspannungen Liner, Design

Normalkräfte Liner, Design

Momente Liner, Design


Spannung innen Liner, Design

Spannung außen Liner, Design


2.2.8.6 Spannungsnachweis Liner, Zwang

Fläche (Wanddicke):

A 30,00 mm²/mm

Außen

Widerstandsmoment, außen:

 W_e 150,00 mm³/mm

Element

i

Druck 0 55 [-]

Korrekturfaktor (Verformtes System)

 α_k

0,98 0,98 [-]

Normalkraft in Element

 N_d

-20,01 -22,36 N/mm

Moment in Element

 M_d

896,73 -411,24 Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} - \alpha_{ka} \cdot \frac{M_d}{W_e} \quad (88)$$

Spannung in Element

 Max σ_d

-6,53 1,94 N/mm²

Zul. Spannung, Langzeit, Design:

 $\sigma_{L,d}$

-55,56 55,56 N/mm²

Ausnutzung Spannungen

 U_σ

11,8 3,5 %

Der Spannungsnachweis Außen ist erfüllt.

Innen

Widerstandsmoment, innen:

 W_i 150,00 mm³/mm

Element

i

Druck 54 71 [-]

Korrekturfaktor (Verformtes System)

 α_k

1,02 1,02 [-]

Normalkraft in Element

 N_d

-22,37 -20,00 N/mm

Moment in Element

 M_d

-411,24 896,73 Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} + \alpha_{ki} \cdot \frac{M_d}{W_i} \quad (87)$$

Spannung in Element

 Max σ_d

-3,54 5,43 N/mm²

Zul. Spannung, Langzeit, Design:

 $\sigma_{L,d}$

-55,56 55,56 N/mm²

Ausnutzung Spannungen

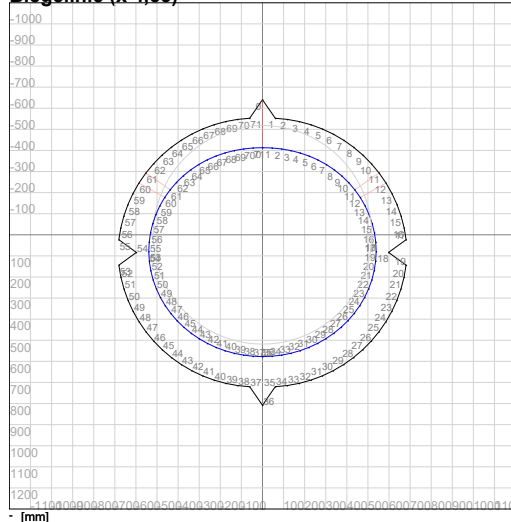
 U_σ

6,4 9,8 %

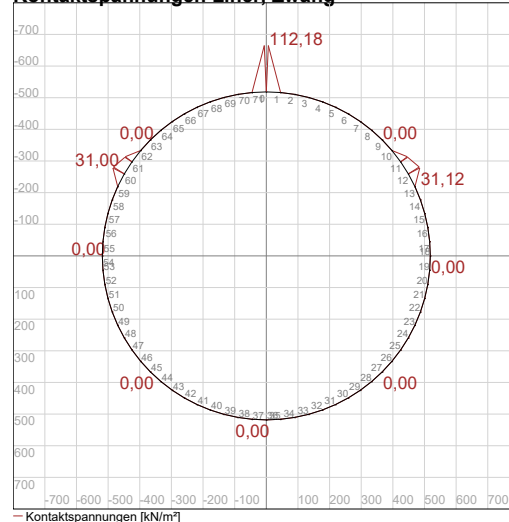
Der Spannungsnachweis Innen ist erfüllt.

Die Spannungen liegen im zulässigen Bereich.

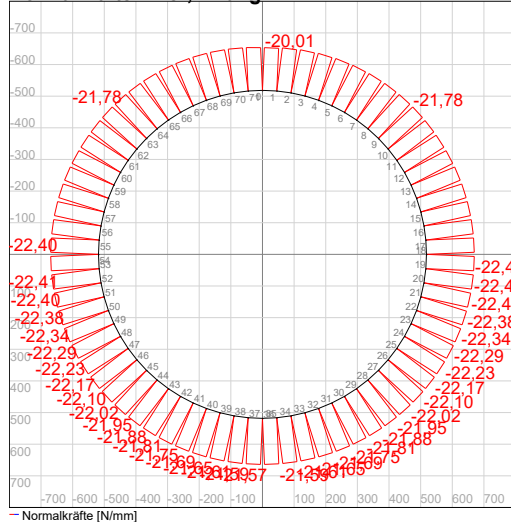
Biegelinie (x 4,53)



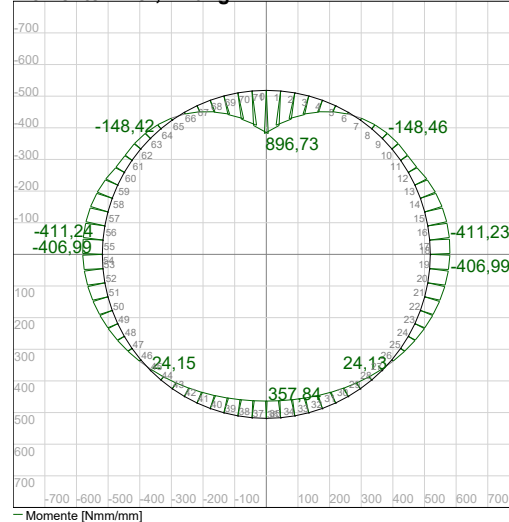
Kontaktspannungen Liner, Zwang

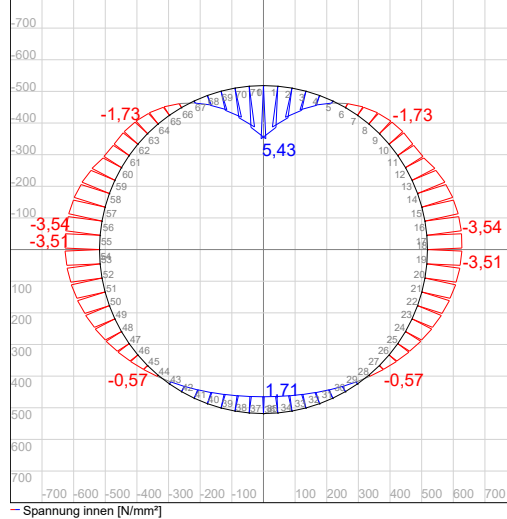
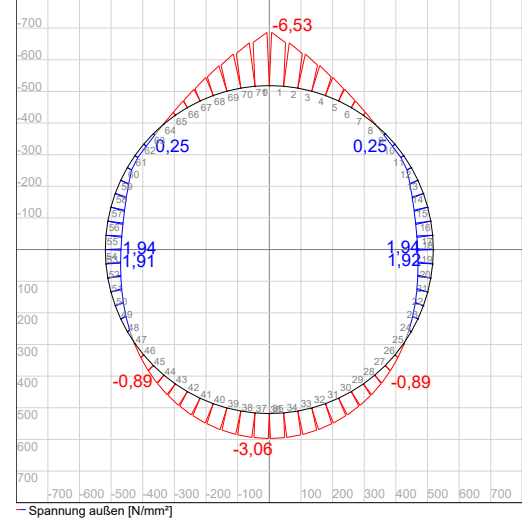


Normalkräfte Liner, Zwang



Momente Liner, Zwang



Spannung innen Liner, Zwang

Spannung außen Liner, Zwang


2.2.8.7 Altrohrspannungen Kämpfer

Vertikale Gesamtlast, Design:

Wanddicke Altrohr:

Außendurchmesser Altrohr Kämpfer:

Bezogene Gelenkringexzentrizität:

Druckzonenbreite:

$q_{v,d}$	134,31	kN/m²
t_R	250,00	mm
$d_{AR,k}$	1.566,67	mm
e_G/t	35,00	%
b_D	100,00	mm

$$N_{K,d} = -q_{v,d} (1 + \omega_{GR,v}) \cdot \frac{d_{AR,k}}{2}$$

Druckkraft im Kämpfer:

Spannung in der Druckzone:

Zul. Druckfestigkeit, Langzeit:

Ausnutzung Druckspannungen AR Kämpfer:

$N_{K,d}$	-105,21	N/mm
σ_d	-1,58	N/mm²
$f_{c,rad,L}$	5,00	N/mm²
$U_{\sigma D,AR}$	31,6	%

Der Spannungsnachweis für Kämpferspannungen im Altrohr ist erfüllt.

Alle notwendigen Nachweise sind erbracht.

Pos. 02.2

815 / 1570 t = 30 / Bereich Straßenverkehr

Inhaltsangabe

1 Bemerkungen	3
2 Statik nach DWA-A 143-2	4
2.1 Eingaben	4
2.1.1 Geometrie	4
2.1.2 Materialien	4
2.1.3 Lasten	5
2.2 Ergebnisse	5
2.2.1 Hinweis zum Einzelrohr-Lining	5
2.2.2 Materialkennwerte	5
2.2.2.1 Liner	5
2.2.2.2 Altrohr	5
2.2.3 Ringsteifigkeit nach ISO 7685	5
2.2.4 Hinweise zur Berechnung	6
2.2.5 Lastfall 01 AZ II - h _{max} h _W 3,00 m, Langzeit	6
2.2.5.1 Geometrie diskretisiertes System	7
2.2.5.2 Verformungsnachweis Liner, Gebrauchslast	8
2.2.6 Lastfall 02 [Ersatzkreis] AZ III - h _W 0,00 m + h 7,25 m + ws 0,0 % + ww 0,0 %,	13
2.2.6.1 Geometrie diskretisiertes System	13
2.2.6.2 Erdlasten und Verkehrslasten	14
2.2.6.3 Verformungsnachweis Liner, Gebrauchslast	14
2.2.6.4 Bodeninteraktion (Gebrauchslast)	15
2.2.6.5 Stabilitätsnachweis (Designwerte)	16
2.2.6.6 Spannungsnachweis Liner, Zwang	18
2.2.6.7 Altrohrspannungen Kämpfer	20
2.2.7 Lastfall 03 [Ersatzkreis] AZ III - h _W 3,00 m + h 7,25 m + ws 0,4 % + ww 0,5 %,	21
2.2.7.1 Geometrie diskretisiertes System	21
2.2.7.2 Erdlasten und Verkehrslasten	22
2.2.7.3 Verformungsnachweis Liner, Gebrauchslast	22
2.2.7.4 Bodeninteraktion (Gebrauchslast)	23
2.2.7.5 Stabilitätsnachweis (Designwerte)	24
2.2.7.6 Spannungsnachweis Liner, Zwang	26
2.2.7.7 Altrohrspannungen Kämpfer	28
2.2.8 Lastfall 04 [Ersatzkreis] AZ III - h _W 3,00 m + h 7,25 m + ws 0,0 % + ww 0,0 %,	29
2.2.8.1 Geometrie diskretisiertes System	29
2.2.8.2 Erdlasten und Verkehrslasten	30
2.2.8.3 Verformungsnachweis Liner, Gebrauchslast	30
2.2.8.4 Bodeninteraktion (Gebrauchslast)	31
2.2.8.5 Stabilitätsnachweis (Designwerte)	32
2.2.8.6 Spannungsnachweis Liner, Zwang	34
2.2.8.7 Altrohrspannungen Kämpfer	36

1 Bemerkungen

Abschnitt 6

Mit dem folgenden Nacheis soll der schwach gekrümmte Kämpfer nachgewiesen werden.
Der Nachweis erfolgt daher hier für das "große" Eiprofil.

Da in diesem Abschnitt der Boden mindestens durchgängig den besseren Steifemodul aufweist,
wird gerechnet mit:

$E_s = 10 \text{ MN/m}^2$

Die Nachweise zur Bemessung sind eingehalten.
Der Vorformungsnachweis ist ebenfalls eingehalten.

2 Statik nach DWA-A 143-2

Verfahren:
Altrohrzustand:
Ausdruck Rohrsteifigkeit:
Art der Interaktion:
Nachweis Altrohr:
Nachweis Auftrieb:
Berechnungsoptionen nach Regelwerk:

Einzelrohr-Lining
AZ III
Nach ISO 7685
Überlagerung aller Lasten am System
Nein
Nein
Ja

2.1 Eingaben

2.1.1 Geometrie

Geometrie:
Lichte Breite in Kämpferhöhe:
Lichte Höhe Scheitel-Sohle:
Profilart:
Wanddicke Liner:
Gelenkringverformung:
Relative Exzentrizität der Gelenke Altrohr:

Art des Altrohres:
Tiefe Vorverformung lange Seite:
Öffnungswinkel lokale Vorverformung Sohle:
Öffnungswinkel lokale Vorverformung lange Seite:

Regeleiwerschnitt freie Eingabe
bk 1.580,00 mm
hs 2.370,00 mm
Vollwand
tL 30,00 mm
wGRv/rL 0,00 %
eGrel 0,35 [-]

Normales Eiprofil mit B:H = 2:3
wv/rL 0,50 %
2Φ 40,00 °
2Φ 36,80 °

Art des Ringspaltes:
Ringspalt (konst. Schrumpfmaß):

Konstantes Schrumpfmaß
ws/U 0,400 %

Vollbettungsmodell:

Ja

2.1.2 Materialien

Material Altrohr:
Wanddicke Altrohr:

Definition Material:
Langzeitige Werte verwenden:
Nachweis Schubspannung führen:

Mauerwerk
SR 250,00 mm

Norm Tabelle 2/3
Ja
Nein

Wichtung der Spannungen:
Kennwerte nach Tabelle 2/3:
Eigengewicht:
Querkontraktionszahl:
Teilsicherheitsbeiwert Material:

Nein
UP-GF (Vor Ort)
γ 17,50 kN/m³
ν 0,35 [-]
γM 1,35 [-]
Charakteristisch Design

E-Modul, Langzeit
E-Modul, Kurzzeit
Zul. Druckfestigkeit, Langzeit
Zul. Druckfestigkeit, Kurzzeit
Zul. Biegezugfestigkeit, Langzeit
Zul. Biegezugfestigkeit, Kurzzeit
Zul. Zugfestigkeit, Langzeit
Zul. Zugfestigkeit, Kurzzeit

ER,rad,L	3.500,00	2.592,59	N/mm²
ER,rad,K	6.000,00	4.444,44	N/mm²
fc,rad,L	75,00	55,56	N/mm²
fc,rad,K	130,00	96,30	N/mm²
ft,fl,L	75,00	55,56	N/mm²
ft,fl,K	130,00	96,30	N/mm²
ft,L	n. def.	n. def.	N/mm²
ft,K	n. def.	n. def.	N/mm²

Wärmedehnzahl: α_T 0,00003 1/K

2.1.3 Lasten

Wasserspiegel über Sohle Liner:	h_w	3,00	m
Gewicht Wasser:	γ_w	10,00	kN/m ³
Temperaturänderung:	ΔT	0,00	K
Max. Überdeckung Scheitel Altrohr:	h_{max}	7,25	m
Wichte Boden manuell eingeben:	Ja		
Anzahl Überdeckungen:	1 Überdeckungshöhe		
Wichte Boden, trocken:	γ_B	20,00	kN/m ³
Wichte Boden, unter Auftrieb:	γ_B'	10,00	kN/m ³
Horizontale Verkehrslast berücksichtigen:	Ja		
Verkehrslast:	Straße SLW 30		
Abminderungsfaktor dynamische Last manuell eingeben:	Nein		
Zusätzliche Flächenlast:	p_0	0,0	kN/m ²
Altrohr vor Sanierung gerissen:	Ja		
Bodenverhalten:	Elastisch		
Direkte Eingabe E2:	Nein		
Berechnung Bettung E20:	E-Modul		
Bodengruppe Einbettung:	G4		
E-Modul Einbettung:	$E_{20,R,rad}$	10,0	N/mm ²
Teilsicherheitsbeiwert Eigengewicht:	γ_{GE}	1,35	[-]
Teilsicherheitsbeiwert Wasserdruck:	γ_w	1,50	[-]
Teilsicherheitsbeiwert Innendruck:	γ_{pi}	1,50	[-]
Teilsicherheitsbeiwert Temperatur:	γ_T	1,10	[-]
Teilsicherheitsbeiwert Erdlast:	γ_G	1,35	[-]
Teilsicherheitsbeiwert Verkehr:	γ_Q	1,35	[-]

2.2 Ergebnisse

2.2.1 Hinweis zum Einzelrohr-Lining

Die Querdehnzahl wird in der Berechnung nicht berücksichtigt, da davon ausgegangen wird, dass die einzelnen Rohre in den Muffen keinen axialen Schub übertragen.

2.2.2 Materialkennwerte

2.2.2.1 Liner

Teilsicherheitsbeiwert Material:	γ_M	1,35	[-]
Querkontraktionszahl:	ν	0,35	[-]
E-Modul, Langzeit:	$E_{R,rad,L}$	3.500,00	N/mm ²
E-Modul, Langzeit, Design:	$E_{R,rad,L,d}$	2.592,59	N/mm ²
Verwendeter E-Modul:	$E_{R,rad}$	2.592,59	N/mm ²
Zul. Druckfestigkeit, Langzeit:	$f_{c,rad,L}$	75,00	N/mm ²
Zul. Druckfestigkeit, Langzeit, Design:	$f_{c,rad,L,d}$	-55,56	N/mm ²
Zul. Biegezugfestigkeit, Langzeit:	$f_{t,fl,L}$	75,00	N/mm ²
Zul. Biegezugfestigkeit, Langzeit, Design:	$f_{t,fl,L,d}$	55,56	N/mm ²

2.2.2.2 Altrohr

Eigengewicht:	γ	22,00	kN/m ³
Teilsicherheitsbeiwert Material:	γ_M	2,20	[-]
E-Modul, Langzeit:	$E_{R,rad,L}$	8.000,00	N/mm ²
E-Modul, Langzeit, Design:	$E_{R,rad,L,d}$	3.636,36	N/mm ²
Zul. Druckfestigkeit, Langzeit:	$f_{c,rad,L}$	5,00	N/mm ²
Zul. Druckfestigkeit, Langzeit, Design:	$f_{c,rad,L,d}$	-2,27	N/mm ²
Zul. Biegezugfestigkeit, Langzeit:	$f_{t,fl,L}$	0,01	N/mm ²
Zul. Biegezugfestigkeit, Langzeit, Design:	$f_{t,fl,L,d}$	0,00	N/mm ²

IngSoft EasyPipe 3.1.0.0 - 01.03.2026 - 22:51:30

5

Bauteil: SAN-03 - GFK Sanierung Hauptsammler Ost
MA-250346

Seite:
D-217

Kapitel / Vorgang: D - Nachweise
02.2 815 / 1570 t = 30 / Bereich Straßenverkehr

Archiv-Nr.

2.2.3 Ringsteifigkeit nach ISO 7685

Trägheitsmoment:	I	2.250,00	mm ⁴ /mm
Außendurchmesser Liner:	da _L	1.580,00	mm
Trägheitsabstand:	e	15,00	mm
Mittlerer Radius Liner:	r _{L,m}	775,00	mm

E-Modul:	E _{R,rad}	Kurzzeit 6.000,00	Langzeit 3.500,00	N/mm ²
----------	--------------------	----------------------	----------------------	-------------------

$$S_K = \frac{E_{R,rad,K} \cdot I}{r_{L,m} \cdot 2^3}$$

Ringsteifigkeit:	S	3,63	2,11	kN/m ²
------------------	---	------	------	-------------------

2.2.4 Hinweise zur Berechnung

[Betaversion] Der Lastfall Erd- und Verkehrslasten wird nicht mit der vorgegebenen Ei-Geometrie untersucht. Es wird mit einem Ersatzkreis gerechnet, der dem Scheitelkreis entspricht. Sollte der "Regelei Querschnitt Freie Eingabe" gewählt sein, so wird bei Abweichungen vom Verhältnis 2/3 der größte Radius der Ellipse verwendet.
Die Berechnung des AZ III erfolgt nicht mit der tatsächlichen Querschnittsgeometrie, sondern mit dem nach DWA-A 143-2, Kap. 7.8.1 zulässigen Näherungsfahren am Ersatzkreis. ACHTUNG: Insbesondere bei Kanälen im Grundwasser liegt das Ersatzkreisverfahren nicht immer auf der sicheren Seite.

Hinweise zur Berechnungsmethode: Das statische Modell und die implementierten Berechnungsalgorithmen halten sich sehr eng an den Wortlaut des DWA-A 143-2. Dieses Regelwerk lässt aber insbesondere bei Berechnungen für den Altrohrzustand III einen breiten Interpretationsspielraum und ausgeprägte Freiheiten bei der Modellbildung. Über 'Kann'- und 'Darf'-Bestimmungen werden vereinfachte Berechnungsmethoden erlaubt, die grundsätzlich auf der sicheren Seite liegen, aber in der Folge auch zu höheren Linerbeanspruchungen bzw. zu größeren Wanddicken führen. Hierzu gehören beispielsweise der vereinfachte Stabilitätsnachweis statt einer nichtlinearen Berechnung nach Theorie II. Ordnung oder die Reduzierung des Modells auf einen Viertelkreis, obwohl eine doppelte Symmetrie gar nicht gegeben ist. Der dabei erforderliche größere Rechenaufwand ermöglicht eine wirtschaftliche Bemessung. Ein direkter zahlenmäßiger Vergleich der Ergebnisse von EasyPipe mit den Resultaten aus vereinfachten Berechnungen ist deshalb nicht möglich.

2.2.5 Lastfall 01 AZ II - hmax hW 3,00 m, Langzeit

Grundlage für die Freie Eingabe stellt eine DIN-konforme Ei-Form dar (H/B = 1,5 inkl. der vorgegebenen Radien). Diese Eingabeform dient nicht zur Abbildung von z.B. überhöhten Ei-Formen. Eingeben wird dabei die Breite und Höhe des Ei-Querschnitts. Die Abweichung die sich ergibt, wenn H <> 1,5 x B, wird über eine Verzerrung der y-Koordinaten abgebildet.

Wanddicke Liner: t_L 30,00 mm
Die Gelenkringverformung wird analog A 143-2 als eine Erhöhung (wgrv/10) der eingegebenen örtlichen Verformung angesetzt.
Vorgegebene Werte:

Lokale Vorverformung: ω_v 0,50 %
 Gelenkringverformung: $\omega_{GR,v}$ 0,00 %
 $\omega_v = \omega_v + \omega_{GR,v}/10 = 0,50 \% + (0,00 \% / 10)$ (A 143-2 Tabelle 8)

Lokale Vorverformung: ω_v 0,50 %
 Lokale Vorverformung absolut: w_v 11,78 mm

Eine Berücksichtigung der Gelenkringverformung in der Geometrie liegt auf der unsicheren Seite, da durch die Aufweitung im Kämpfer das Verhältnis Höhe/Breite günstiger gegen Außendruck wird. Damit würden für den Altrohrzustand II günstigere Ergebnisse berechnet werden, als im Altrohrzustand I.

Gelenkringverformung: $\omega_{GR,v}$ 0,00 %
 Gelenkringverformung absolut, einseitig: $w_{GR,v}$ 0,00 mm

Der Einfluss der Gelenkringaufweitung auf den Ringspalt nach Gleichung DWA-A 143-2, Gl. 121 bleibt bei von Kreisform abweichenden Querschnitten unberücksichtigt, da in der Formel DWA-A 143-2, Gl. 121 die Kinematik des Kreises mit 4 exzentrischen Gelenken vorausgesetzt wird. Sie kann deshalb nicht für eine andere Querschnittsgeometrie mit anderer Kinematik angewendet werden. Dies gilt natürlich auch für den Ersatzkreis.

Ringspalt: ω_s 0,40 %
 Spaltweite absolut (als konst. Ringspalt): w_s 3,91 mm

Mittlerer Radius Liner, Kämpfer: $r_{L,m,K}$ 2.355,00 mm
 Mittlerer Radius Liner, Scheitel: $r_{L,m,S}$ 775,00 mm
 R/t Verhältnis: $r_{L,m}/t_{L,m}$ 46,90 [-]

2.2.5.2 Verformungsnachweis Liner, Gebrauchslast

Lichte Breite in Kämpferhöhe: b_k 1.580,00 mm
 Lichte Höhe Scheitel-Sohle: h_s 2.370,00 mm
 Relevanter Durchmesser für prozentuale Verformung: d_v 1.975,00 mm

Spaltweite absolut (als konst. Ringspalt): w_s 3,91 mm
 Lokale Vorverformung absolut: w_v 11,78 mm
 Gelenkringverformung absolut, einseitig: $w_{GR,v}$ 0,00 mm

Elastische Verformung absolut, horizontal: $w_{el,h,E1}$ 23,01 mm
 Elastische Verformung absolut, horizontal: $w_{el,h,E2}$ -31,32 mm

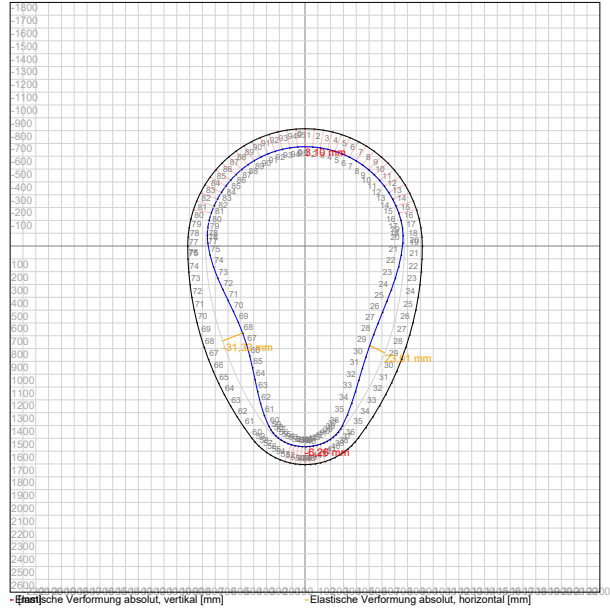
Elastische Verformung absolut, horizontal: $w_{el,h}$ 54,34 mm
 Elastische Verformung relativ: $\delta_{v,el}$ 2,75 %
 Zulässige Verformung elastisch: $zul \delta_{v,el}$ 3,00 %

Die errechnete elastische Verformung ist kleiner als die zulässige Verformung.

Gesamte Durchmesseränderung: w 66,11 mm
 Relative Gesamtverformung: δ_v 3,35 %
 Anhaltswert Gesamtverformung: $\delta_{v,A}$ 10,00 %

Elastische Verformung absolut, vertikal: $w_{el,v,E1}$ 3,10 mm
 Elastische Verformung absolut, vertikal: $w_{el,v,E2}$ -6,26 mm
 Elastische Verformung absolut, vertikal: $w_{el,v}$ 9,36 mm

Gebrauchslast (x 4,6)



Spannungsnachweis Liner, Design

Fläche (Wanddicke): A 30,00 mm²/mm

Außen

Widerstandsmoment, außen:

Element	i	Druck	150,00	mm ³ /mm
Korrekturfaktor (Verformtes System)	α_k	Zug	60	[-]
Normalkraft in Element	N_d		0,99	[-]
Moment in Element	M_d		-91,65	N/mm
			3.815,22	Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} - \alpha_{ka} \cdot \frac{M_d}{W_e} \quad (88)$$

Spannung in Element	Max σ_d	-28,39	21,13	N/mm ²
Zul. Spannung, Langzeit, Design:	$\sigma_{L,d}$	-55,56	55,56	N/mm ²

Ausnutzung Spannungen	U_σ	51,1	38,0	%
-----------------------	------------	------	------	---

Der Spannungsnachweis Außen ist erfüllt.

Innen

Widerstandsmoment, innen:

Element	i	Druck	150,00	mm ³ /mm
Korrekturfaktor (Verformtes System)	α_k	Zug	67	[-]
Normalkraft in Element	N_d		1,00	[-]
Moment in Element	M_d		-91,12	N/mm
			-3.664,94	Nmm/mm

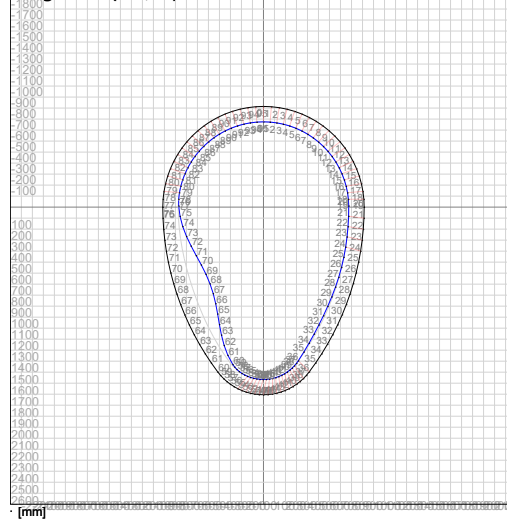
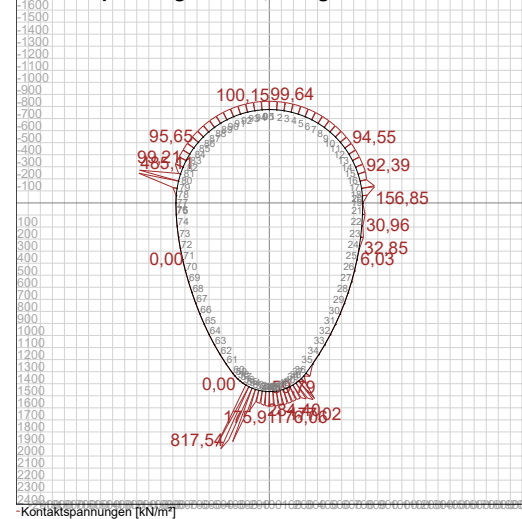
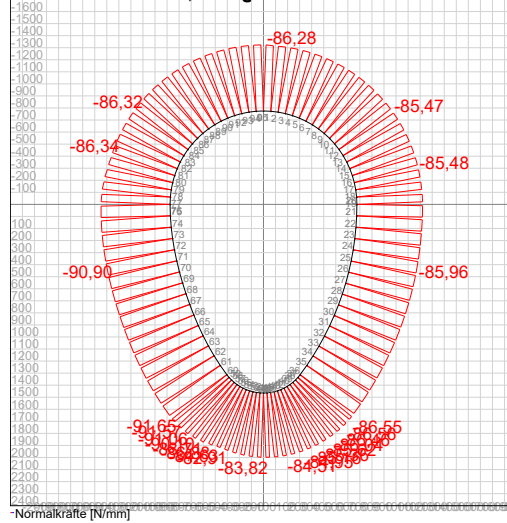
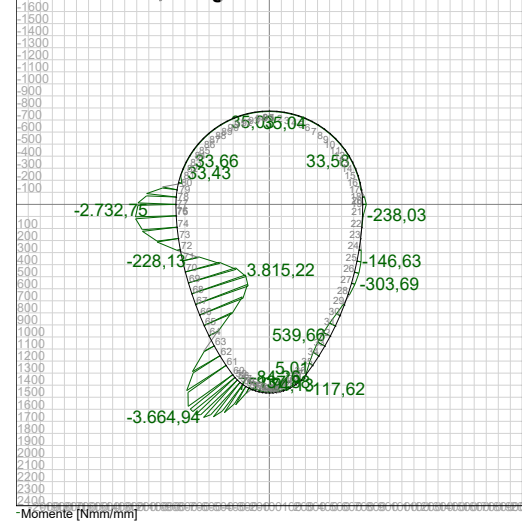
$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} + \alpha_{ki} \cdot \frac{M_d}{W_i} \quad (87)$$

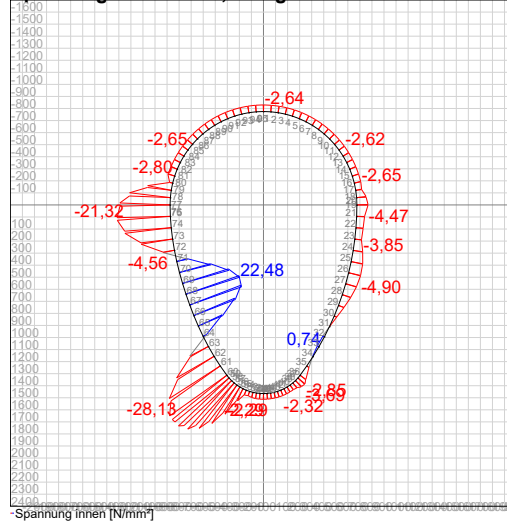
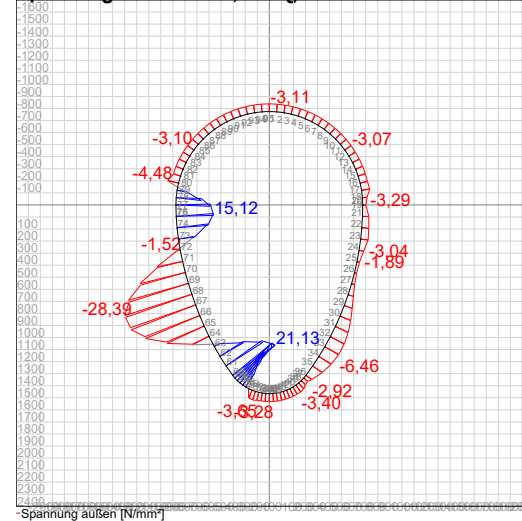
Spannung in Element	Max σ_d	-28,13	22,48	N/mm ²
Zul. Spannung, Langzeit, Design:	$\sigma_{L,d}$	-55,56	55,56	N/mm ²

Ausnutzung Spannungen	U_σ	50,6	40,5	%
-----------------------	------------	------	------	---

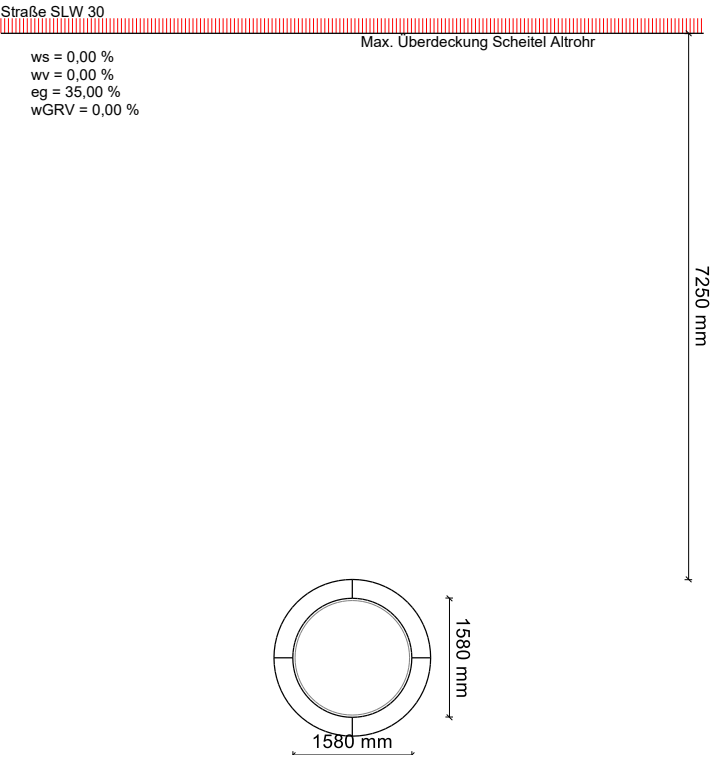
Der Spannungsnachweis Innen ist erfüllt.

Die Spannungen liegen im zulässigen Bereich.

Biegelinie (x 1,81)

Kontaktspannungen Liner, Design

Normalkräfte Liner, Design

Momente Liner, Design


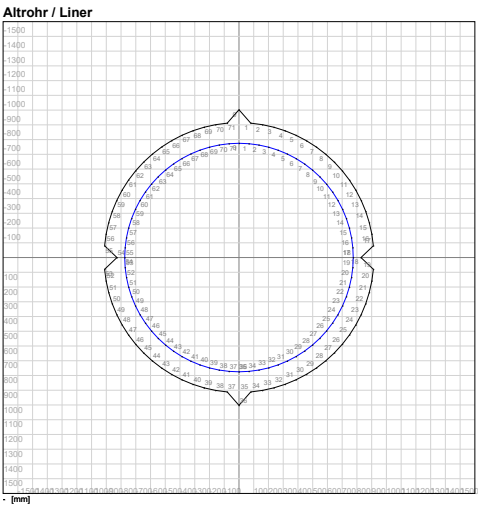
Spannung innen Liner, Design

Spannung außen Liner, Design


2.2.6 Lastfall 02 [Ersatzkreis] AZ III - hW 0,00 m + h 7,25 m + ws 0,0 % + ww 0,0 %, Langzeit



2.2.6.1 Geometrie diskretisiertes System

Skizze



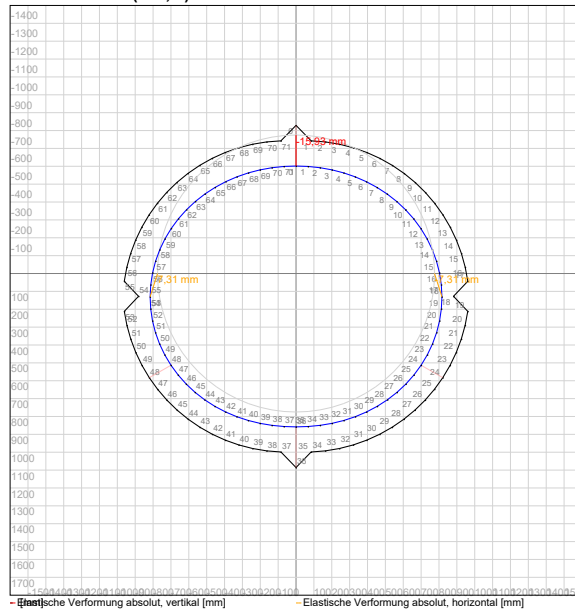
Wanddicke Liner:	t_L	30,00	mm
Wanddicke Altrrohr:	t_R	250,00	mm
Lokale Vorverformung:	ω_v	0,00	%
Lokale Vorverformung absolut:	w_v	0,00	mm
Gelenkringverformung:	$\omega_{GR,v}$	0,00	%
Gelenkringverformung absolut, einseitig:	$w_{GR,v}$	0,00	mm
Ringspalt:	ω_s	0,00	%
Spaltweite absolut (als konst. Ringspalt):	w_s	0,00	mm
Mittlerer Radius Liner:	$r_{L,m}$	775,00	mm
2.2.6.2 Erdlasten und Verkehrslasten			
Wichte Boden, unter Auftrieb:	γ_B'	10,00	kN/m ³
Wichte Boden, trocken:	γ_B	20,00	kN/m ³
Max. Überdeckung Scheitel Altrrohr:	h_{max}	7,25	m
Wasser/Dämmerspiegel:	h_w	0,00	m
Wanddicke Altrrohr:	t_R	250,00	mm
Vertikale Lichte Höhe Altrrohr:	$d_{AR,iv}$	1.580,00	mm
Höhe Wasserspiegel über Altrrohrscheitel:	h'_w	0,00	m
Vertikale Erdlast:	p_E	145,00	kN/m ²
Höhe Scheitel bis Kämpfer Altrrohr:	$r_{AR,a}$	1.040,00	mm
Höhe Wasserspiegel Altrrohrkämpfer bis Altrrohrscheitel:	h'_{wk}	0,00	m
Vertikale Erdlast bis Kämpfer:	$p_{E,K}$	165,80	kN/m ²
Einfache Bodenspannung aus Verkehr:	p	2,40	kN/m ²
Stoßbeiwert:	ϕ	1,40	[-]
Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Scheitelhöhe:	p_T	3,36	kN/m ²
Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Kämpferhöhe (mit ϕ):	p_{TK}	2,65	kN/m ²
Horizontale Bodenspannung aus Verkehr:	$p_{T,h}$	0,19	kN/m ²
Vertikale Verkehrslast:	p_v	3,36	kN/m ²
Vertikale Verkehrslast, Design:	$p_{v,d}$	4,54	kN/m ²
Zusätzliche Flächenlast:	p_0	0,0	kN/m ²
Konzentrationsfaktor über Rohr:	λ_R	0,75	[-]
Vertikale Gesamtlast:	q_v	112,11	kN/m ²
Vertikale Gesamtlast, Design:	$q_{v,d}$	151,35	kN/m ²
E-Modul:	E_2	10,00	N/mm ²
Horizontale Bettungssteifigkeit:	S_{Bh}	8,000	N/mm ²
Erddruckbeiwert (Einbettung):	K_2	0,100	[-]
Konzentrationsfaktor Boden:	λ_B	1,083	[-]
Höhe Wasserspiegel Altrrohrkämpfer bis Altrrohrscheitel:	h'_{wk}	0,00	m
Höhe Scheitel bis Kämpfer Altrrohr:	$r_{AR,a}$	1.040,00	mm
Horizontale Erdlast:	$q_{h,E}$	17,96	kN/m ²
Horizontale Verkehrslast:	$q_{h,v}$	0,19	kN/m ²
Horizontale Gesamtlast:	q_h	18,15	kN/m ²
Designwert Horizontale Gesamtlast:	$q_{h,d}$	24,50	kN/m ²
Rechnerischer Erddruckbeiwert:	K_2'	0,162	[-]
2.2.6.3 Verformungsnachweis Liner, Gebrauchslast			
Relevanter Durchmesser für prozentuale Verformung:	d_v	1.580,00	mm
Spaltweite absolut (als konst. Ringspalt):	w_s	0,00	mm
Lokale Vorverformung absolut:	w_v	0,00	mm
Gelenkringverformung absolut, einseitig:	$w_{GR,v}$	0,00	mm
Elastische Verformung absolut, vertikal:	$w_{el,v,E1}$	-15,93	mm
Elastische Verformung absolut, vertikal:	$w_{el,v}$	15,93	mm
Elastische Verformung relativ:	$\delta_{v,el}$	1,01	%
Zulässige Verformung elastisch:	$zul \delta_{v,el}$	6,00	%

Die errechnete elastische Verformung ist kleiner als die zulässige Verformung.

Gesamte Durchmesseränderung:	w	15,93	mm
Relative Gesamtverformung:	δ_v	1,01	%
Anhaltswert Gesamtverformung:	$\delta_{v,A}$	10,00	%

Elastische Verformung absolut, horizontal:	$w_{el,h,E1}$	-7,31	mm
Elastische Verformung absolut, horizontal:	$w_{el,h,E2}$	7,31	mm
Elastische Verformung absolut, horizontal:	$w_{el,h}$	14,62	mm

Gebrauchslast (x 5,7)



2.2.6.4 Bodeninteraktion (Gebrauchslast)

Bettungsziffer, Scheitel:	CB	7.692,31	kN/m³
Innerer Reibungswinkel:	φ'	20,00	°
Beiwert:	K_p	2,04	[-]
Vertikale Erdlast:	p_E	145,00	kN/m²
Grenzwert q_h im Scheitel (informativ):	$q_{h,max}$	240,29	kN/m²

Vertikale Erdlast bis Kämpfer:	$p_{E,K}$	165,80	kN/m²
Grenzwert q_h im Kämpfer:	$q_{h,max,K}$	274,76	kN/m²

Der Wert wird im Kämpfer abgelesen.

Horizontale Gesamtlast:	q_h	18,15	kN/m²
Seitlicher Bettungsreaktionsdruck:	q_h^*	72,84	kN/m²
Summe horizontale Kräfte:	$q_h + q_h^*$	90,99	kN/m²
Ausnutzung max q_h :	$U_{max,qh}$	33,1	%

Für die Interaktion Boden-Rohrsystem wurde der elastische Ansatz verwendet. Die Bettung des Rohres wurde um den gesamten Umfang als konstant angenommen. Damit ergibt sich eine Dreiecksförmige Verteilung der Bodenspannungen, deren Maximalwert auf 75% des passiven Erddrucks begrenzt ist.

Die horizontale Kraft aus Bettungsreaktionsdruck und seitlichem Druck im Kämpfer liegt unterhalb des Grenzwertes.

2.2.6.5 Stabilitätsnachweis (Designwerte)

Der maßgebende Nachweis der Stabilität erfolgt über die im Abschnitt 7.6.4.2 (DWA-A 143-2) zugelassene (genauere) Variante einer Berechnung nach Theorie II. Ordnung unter Berücksichtigung der Vorverformungen und der Spaltbildung. Hierbei wird numerisch überprüft, ob ein elastisches Stabilitätsversagen (Beulen) unter gamma-facher Last eintritt. Darüber hinaus wird geprüft, ob die bei dieser Berechnung ermittelten Spannungen die vorgegeben maximalen Grenzspannungen für Zug und Druck mit einfacher Sicherheit nicht überschreiten.

Nachweis entfällt.

Spannungsnachweis Liner, Design

Fläche (Wanddicke): A 30,00 mm²/mm

Außen

Widerstandsmoment, außen:

W_e 150,00 mm³/mm
Druck Zug

Element	i	35	53	[-]
Korrekturfaktor (Verformtes System)	α _k	0,99	0,99	[-]
Normalkraft in Element	N _d	-1,00	-1,45	N/mm
Moment in Element	M _d	579,74	-284,80	Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} - \alpha_{ka} \cdot \frac{M_d}{W_e} \quad (88)$$

Spannung in Element	Max σ _d	-3,85	1,83	N/mm²
Zul. Spannung, Langzeit, Design:	σ _{L,d}	-55,56	55,56	N/mm²

Ausnutzung Spannungen	U _σ	6,9	3,3	%
-----------------------	----------------	-----	-----	---

Der Spannungsnachweis Außen ist erfüllt.

Innen

Widerstandsmoment, innen:

W_i 150,00 mm³/mm
Druck Zug

Element	i	54	36	[-]
Korrekturfaktor (Verformtes System)	α _k	1,01	1,01	[-]
Normalkraft in Element	N _d	-1,46	-1,00	N/mm
Moment in Element	M _d	-284,80	579,74	Nmm/mm

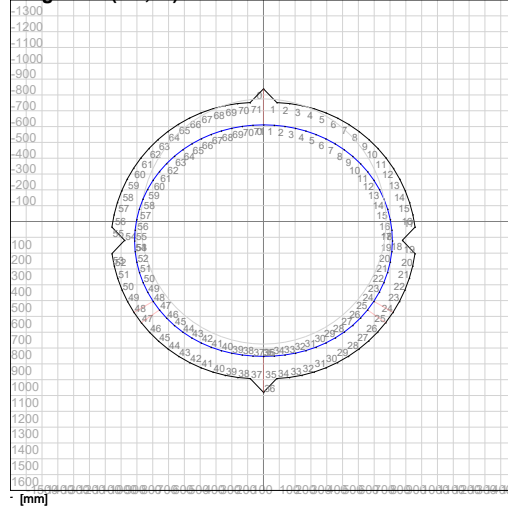
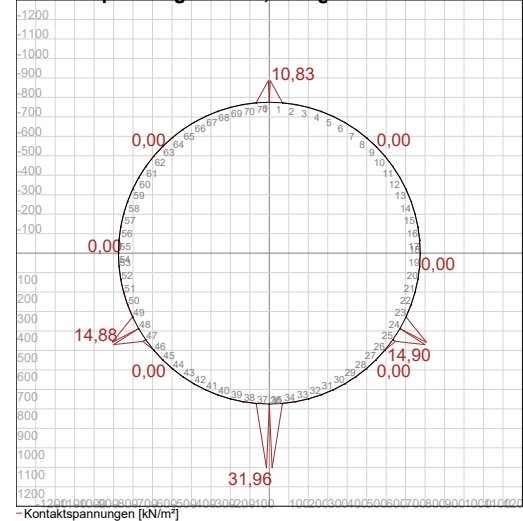
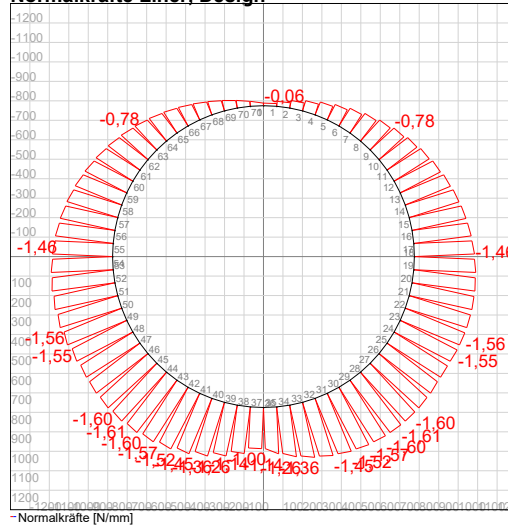
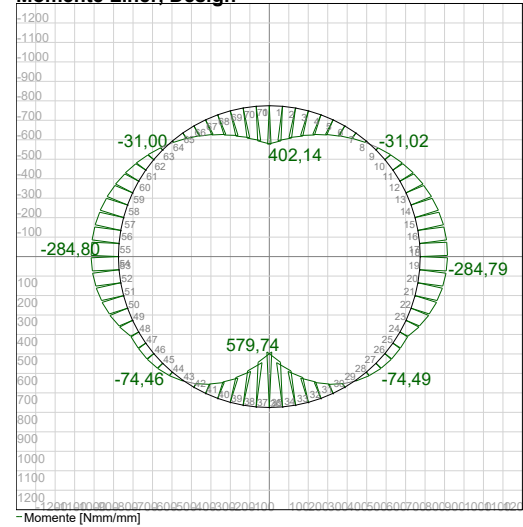
$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} + \alpha_{ki} \cdot \frac{M_d}{W_i} \quad (87)$$

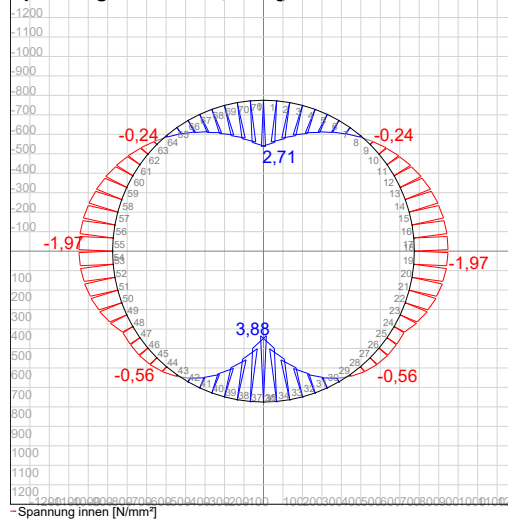
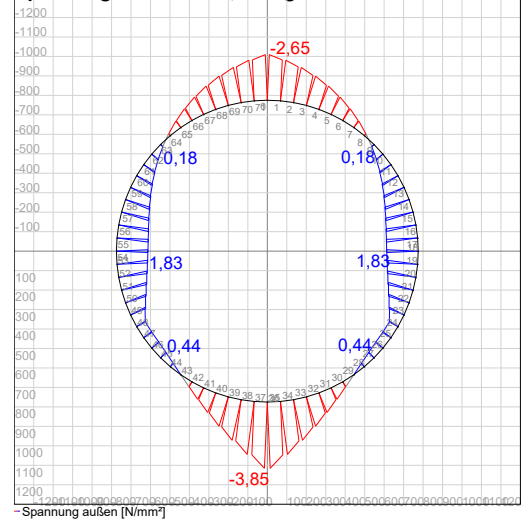
Spannung in Element	Max σ _d	-1,97	3,88	N/mm²
Zul. Spannung, Langzeit, Design:	σ _{L,d}	-55,56	55,56	N/mm²

Ausnutzung Spannungen	U _σ	3,5	7,0	%
-----------------------	----------------	-----	-----	---

Der Spannungsnachweis Innen ist erfüllt.

Die Spannungen liegen im zulässigen Bereich.

Biegelinie (x 3,90)

Kontaktspannungen Liner, Design

Normalkräfte Liner, Design

Momente Liner, Design


Spannung innen Liner, Design

Spannung außen Liner, Design


2.2.6.6 Spannungsnachweis Liner, Zwang

Fläche (Wanddicke):

A 30,00 mm²/mm

Außen

Widerstandsmoment, außen:

We 150,00 mm³/mm

Element

i

Druck

Zug

Korrekturfaktor (Verformtes System)

αk

36

53

[-]

Normalkraft in Element

Nd

0,99

0,99

[-]

Moment in Element

Md

-1,02

-1,77

N/mm

737,33

-373,60

Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} - \alpha_{ka} \cdot \frac{M_d}{W_e}$$

(88)

Spannung in Element

Max σd

-4,89

2,40

N/mm²

Zul. Spannung, Langzeit, Design:

σL,d

-55,56

55,56

N/mm²

Ausnutzung Spannungen

Uσ

8,8

4,3

%

Der Spannungsnachweis Außen ist erfüllt.

Innen

Widerstandsmoment, innen:

Wi 150,00 mm³/mm

Element

i

Druck

Zug

Korrekturfaktor (Verformtes System)

αk

54

35

[-]

Normalkraft in Element

Nd

1,01

1,01

[-]

Moment in Element

Md

-1,78

-1,02

N/mm

-373,60

737,33

Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} + \alpha_{ki} \cdot \frac{M_d}{W_i}$$

(87)

Spannung in Element

Max σd

-2,58

4,95

N/mm²

Zul. Spannung, Langzeit, Design:

σL,d

-55,56

55,56

N/mm²

Ausnutzung Spannungen

Uσ

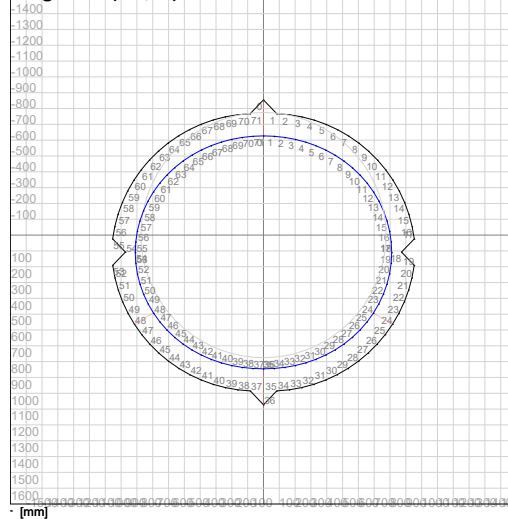
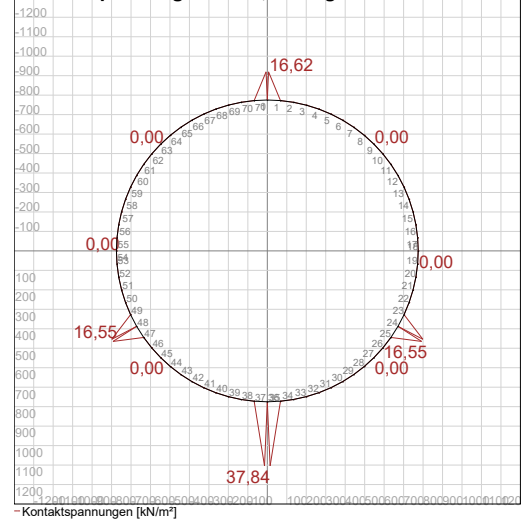
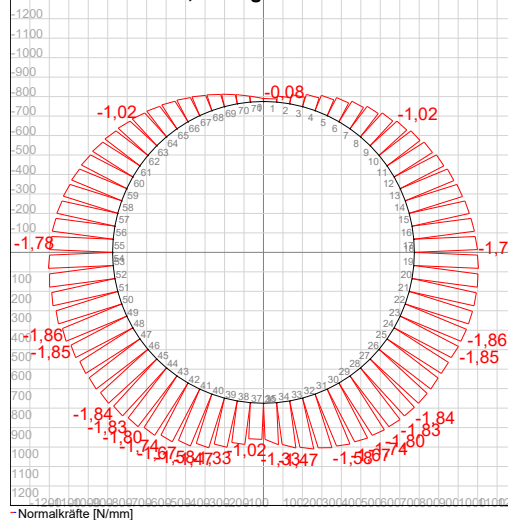
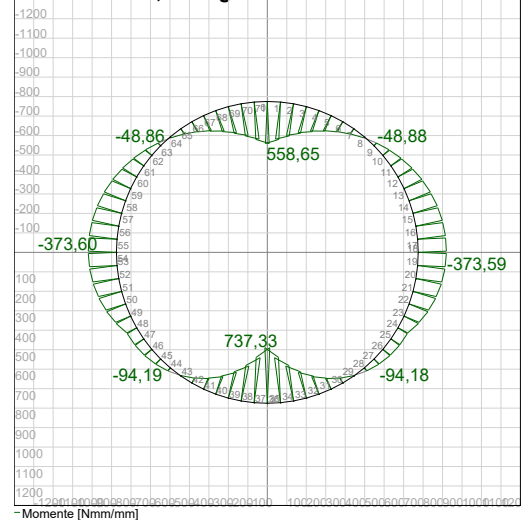
4,6

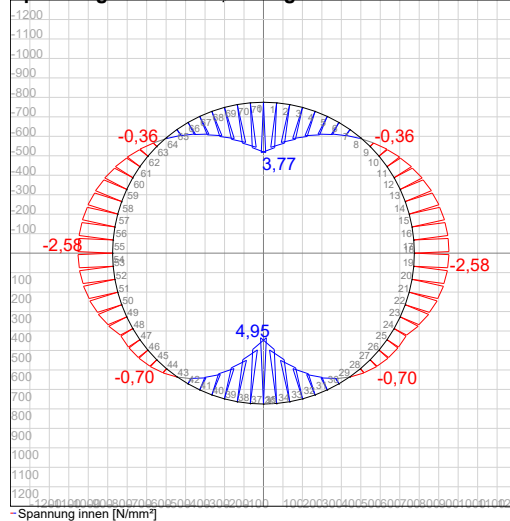
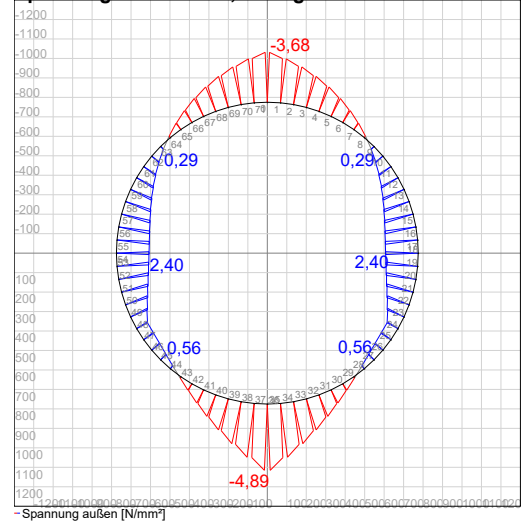
8,9

%

Der Spannungsnachweis Innen ist erfüllt.

Die Spannungen liegen im zulässigen Bereich.

Biegelinie (x 3,52)

Kontaktspannungen Liner, Zwang

Normalkräfte Liner, Zwang

Momente Liner, Zwang


Spannung innen Liner, Zwang

Spannung außen Liner, Zwang


2.2.6.7 Altrohrspannungen Kämpfer

Vertikale Gesamtlast, Design:
Wanddicke Altrohr:
Außendurchmesser Altrohr Kämpfer:
Bezogene Gelenkringexzentrität:
Druckzonenbreite:

$q_{v,d}$	151,35	kN/m ²
t_R	250,00	mm
$da_{AR,k}$	2.080,00	mm
e_G/t	35,00	%
b_D	100,00	mm

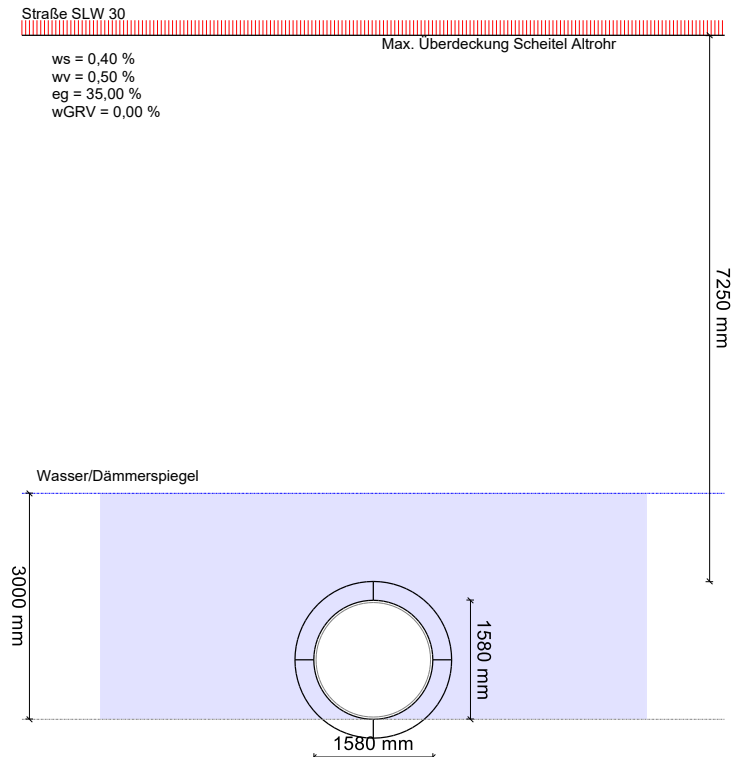
$$N_{K,d} = -q_{v,d} (1 + \omega_{GR,v}) \cdot \frac{da_{AR,k}}{2}$$

Druckkraft im Kämpfer:
Spannung in der Druckzone:
Zul. Druckfestigkeit, Langzeit:
Ausnutzung Druckspannungen AR Kämpfer:

$N_{K,d}$	-157,41	N/mm
σ_d	-2,36	N/mm ²
$f_{c,rad,L}$	5,00	N/mm ²
$U_{\sigma D,AR}$	47,2	%

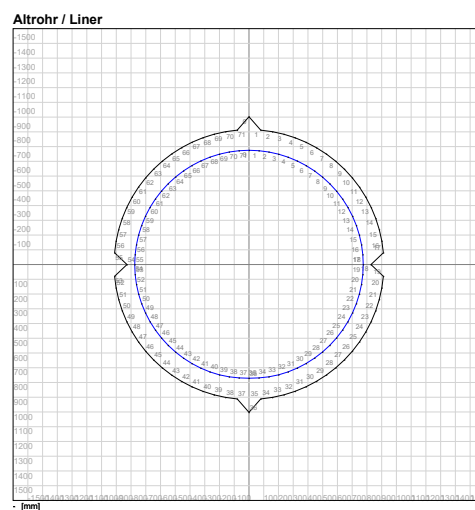
Der Spannungsnachweis für Kämpferspannungen im Altrohr ist erfüllt.

2.2.7 Lastfall 03 [Ersatzkreis] AZ III - hW 3,00 m + h 7,25 m + ws 0,4 % + ww 0,5 %, Langzeit



2.2.7.1 Geometrie diskretisiertes System

Skizze



Wanddicke Liner:	t_L	30,00	mm
Wanddicke Altrrohr:	t_R	250,00	mm
Lokale Vorverformung:	ω_v	0,50	%
Lokale Vorverformung absolut:	w_v	3,88	mm
Gelenkringverformung:	$\omega_{GR,v}$	0,00	%
Gelenkringverformung absolut, einseitig:	$w_{GR,v}$	0,00	mm
Ringspalt:	ω_s	0,40	%
Spaltweite absolut (als konst. Ringspalt):	w_s	3,10	mm
Mittlerer Radius Liner:	$r_{L,m}$	775,00	mm

2.2.7.2 Erdlasten und Verkehrslasten

Wichte Boden, unter Auftrieb:	γ_B'	10,00	kN/m ³
Wichte Boden, trocken:	γ_B	20,00	kN/m ³
Max. Überdeckung Scheitel Altrrohr:	h_{max}	7,25	m
Wasser/Dämmerspiegel:	h_w	3,00	m
Wanddicke Altrrohr:	t_R	250,00	mm
Vertikale Lichte Höhe Altrrohr:	$d_{AR,iv}$	1.580,00	mm
Höhe Wasserspiegel über Altrrohrscheitel:	h'_w	1,17	m
Vertikale Erdlast:	p_E	133,30	kN/m ²
Höhe Scheitel bis Kämpfer Altrrohr:	$r_{AR,a}$	1.040,00	mm
Höhe Wasserspiegel Altrrohrkämpfer bis Altrrohrscheitel:	h'_{wk}	1,04	m
Vertikale Erdlast bis Kämpfer:	$p_{E,K}$	143,70	kN/m ²
Einfache Bodenspannung aus Verkehr:	p	2,40	kN/m ²
Stoßbeiwert:	ϕ	1,40	[-]
Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Scheitelhöhe:	p_T	3,36	kN/m ²
Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Kämpferhöhe (mit ϕ):	p_{TK}	2,65	kN/m ²
Horizontale Bodenspannung aus Verkehr:	$p_{T,h}$	0,19	kN/m ²
Vertikale Verkehrslast:	p_v	3,36	kN/m ²
Vertikale Verkehrslast, Design:	$p_{v,d}$	4,54	kN/m ²
Zusätzliche Flächenlast:	p_0	0,0	kN/m ²

Konzentrationsfaktor über Rohr:	λ_R	0,75	[-]
Vertikale Gesamtlast:	q_v	103,34	kN/m ²
Vertikale Gesamtlast, Design:	$q_{v,d}$	139,51	kN/m ²
E-Modul:	E_2	10,00	N/mm ²
Horizontale Bettungssteifigkeit:	S_{Bh}	8,000	N/mm ²
Erddruckbeiwert (Einbettung):	K_2	0,100	[-]
Konzentrationsfaktor Boden:	λ_B	1,083	[-]
Höhe Wasserspiegel Altrrohrkämpfer bis Altrrohrscheitel:	h'_{wk}	1,04	m
Höhe Scheitel bis Kämpfer Altrrohr:	$r_{AR,a}$	1.040,00	mm
Horizontale Erdlast:	$q_{h,E}$	15,57	kN/m ²
Horizontale Verkehrslast:	$q_{h,v}$	0,19	kN/m ²
Horizontale Gesamtlast:	q_h	15,76	kN/m ²
Designwert Horizontale Gesamtlast:	$q_{h,d}$	21,27	kN/m ²
Rechnerischer Erddruckbeiwert:	K_2'	0,152	[-]

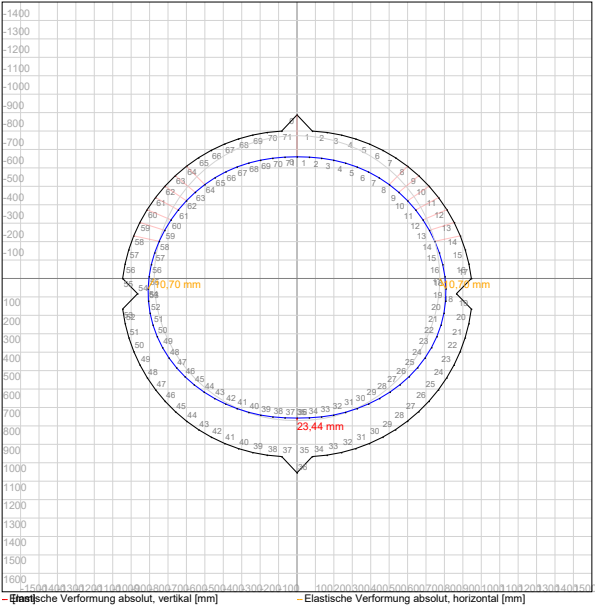
2.2.7.3 Verformungsnachweis Liner, Gebrauchslast

Relevanter Durchmesser für prozentuale Verformung:	d_v	1.580,00	mm
Spaltweite absolut (als konst. Ringspalt):	w_s	3,10	mm
Lokale Vorverformung absolut:	w_v	3,88	mm
Gelenkringverformung absolut, einseitig:	$w_{GR,v}$	0,00	mm
Elastische Verformung absolut, vertikal:	$w_{el,v}$	23,44	mm
Elastische Verformung relativ:	$\delta_{v,el}$	1,48	%
Zulässige Verformung elastisch:	$zul \delta_{v,el}$	6,00	%

Die errechnete elastische Verformung ist kleiner als die zulässige Verformung.

Gesamte Durchmesseränderung:	W	27,32	mm
Relative Gesamtverformung:	δ_v	1,73	%
Anhaltswert Gesamtverformung:	$\delta_{v,A}$	10,00	%
Elastische Verformung absolut, horizontal:	Wel,h,E1	-10,70	mm
Elastische Verformung absolut, horizontal:	Wel,h,E2	10,70	mm
Elastische Verformung absolut, horizontal:	Wel,h	21,39	mm

Gebrauchslast (x 4,3)



2.2.7.4 Bodeninteraktion (Gebrauchslast)

Bettungsziffer, Scheitel:	CB	7.692,31	kN/m³
Innerer Reibungswinkel:	ϕ'	20,00	°
Beiwert:	K_p	2,04	[-]
Vertikale Erdlast:	pE	133,30	kN/m²
Grenzwert qh im Scheitel (informativ):	qh,max	220,90	kN/m²
Vertikale Erdlast bis Kämpfer:	pE,K	143,70	kN/m²
Grenzwert qh im Kämpfer:	qh,max,K	238,14	kN/m²

Der Wert wird im Kämpfer abgelesen.

Horizontale Gesamtlast:	qh	15,76	kN/m²
Seitlicher Bettungsreaktionsdruck:	qh*	66,54	kN/m²
Summe horizontale Kräfte:	qh + qh*	82,30	kN/m²
Ausnutzung max qh:	Umaxqh	34,6	%

Für die Interaktion Boden-Rohrsystem wurde der elastische Ansatz verwendet. Die Bettung des Rohres wurde um den gesamten Umfang als konstant angenommen. Damit ergibt sich eine Dreiecksförmige Verteilung der Bodenspannungen, deren Maximalwert auf 75% des passiven Erddrucks begrenzt ist.

Die horizontale Kraft aus Bettungsreaktionsdruck und seitlichem Druck im Kämpfer liegt unterhalb des Grenzwertes.

2.2.7.5 Stabilitätsnachweis (Designwerte)

Der maßgebende Nachweis der Stabilität erfolgt über die im Abschnitt 7.6.4.2 (DWA-A 143-2) zugelassene (genauere) Variante einer Berechnung nach Theorie II. Ordnung unter Berücksichtigung der Vorverformungen und der Spaltbildung. Hierbei wird numerisch überprüft, ob ein elastisches Stabilitätsversagen (Beulen) unter gamma-facher Last eintritt. Darüber hinaus wird geprüft, ob die bei dieser Berechnung ermittelten Spannungen die vorgegeben maximalen Grenzspannungen für Zug und Druck mit einfacher Sicherheit nicht überschreiten.

Nachweis entfällt.

Spannungsnachweis Liner, Design

Fläche (Wanddicke): A 30,00 mm²/mm

Außen

Widerstandsmoment, außen:

W_e 150,00 mm³/mm

Element	i	Druck	Zug	
Korrekturfaktor (Verformtes System)	α_k	0,99	0,99	[-]
Normalkraft in Element	N_d	-31,53	-33,19	N/mm
Moment in Element	M_d	1.128,29	-515,24	Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} - \alpha_{ka} \cdot \frac{M_d}{W_e} \quad (88)$$

Spannung in Element	Max σ_d	-8,48	2,28	N/mm²
Zul. Spannung, Langzeit, Design:	$\sigma_{L,d}$	-55,56	55,56	N/mm²

Ausnutzung Spannungen	U_σ	15,3	4,1	%
-----------------------	------------	------	-----	---

Der Spannungsnachweis Außen ist erfüllt.

Innen

Widerstandsmoment, innen:

W_i 150,00 mm³/mm

Element	i	Druck	Zug	
Korrekturfaktor (Verformtes System)	α_k	1,01	1,01	[-]
Normalkraft in Element	N_d	-33,24	-31,53	N/mm
Moment in Element	M_d	-515,24	1.128,29	Nmm/mm

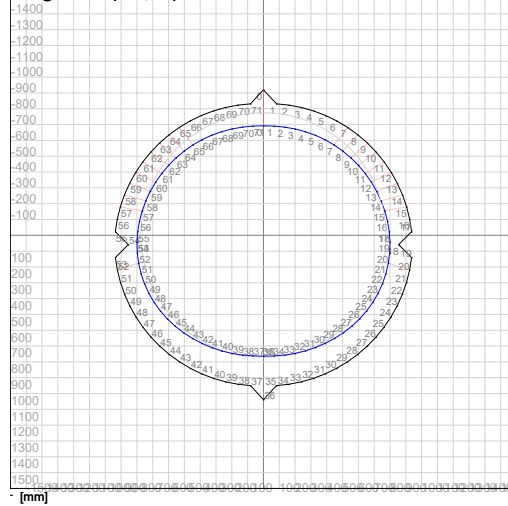
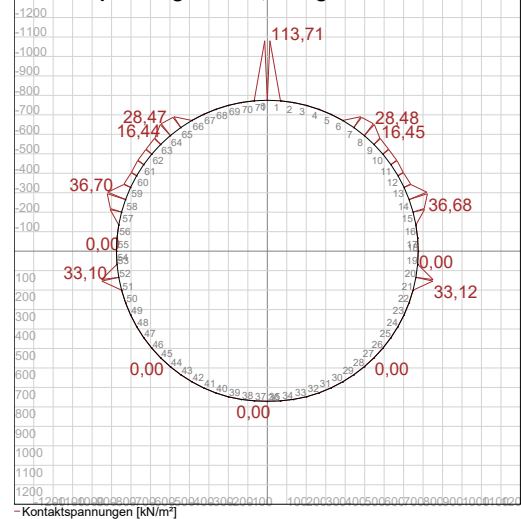
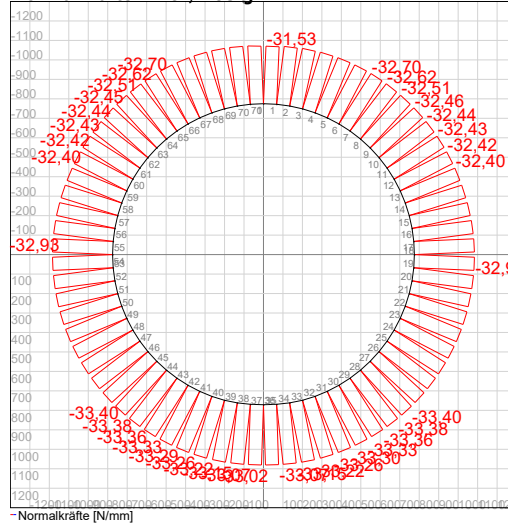
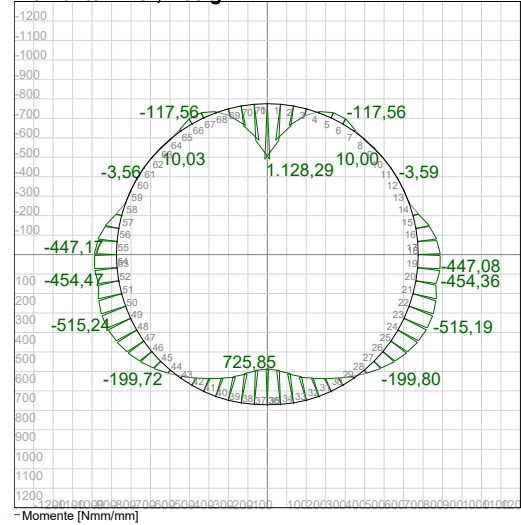
$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} + \alpha_{ki} \cdot \frac{M_d}{W_i} \quad (87)$$

Spannung in Element	Max σ_d	-4,59	6,57	N/mm²
Zul. Spannung, Langzeit, Design:	$\sigma_{L,d}$	-55,56	55,56	N/mm²

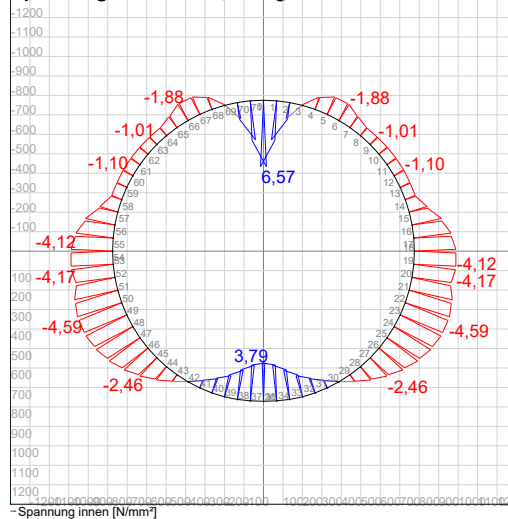
Ausnutzung Spannungen	U_σ	8,3	11,8	%
-----------------------	------------	-----	------	---

Der Spannungsnachweis Innen ist erfüllt.

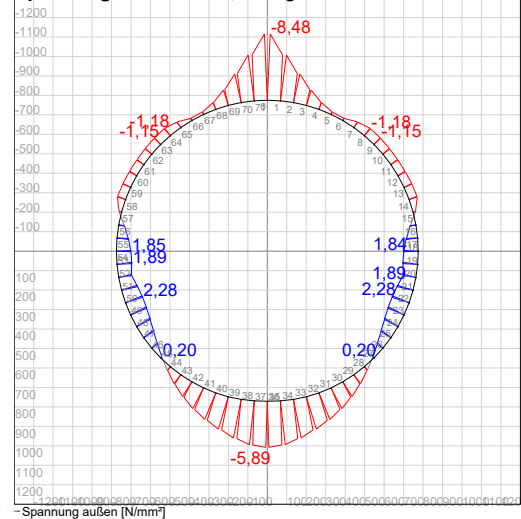
Die Spannungen liegen im zulässigen Bereich.

Biegelinie (x 2,28)

Kontaktspannungen Liner, Design

Normalkräfte Liner, Design

Momente Liner, Design


Spannung innen Liner, Design



Spannung außen Liner, Design



2.2.7.6 Spannungsnachweis Liner, Zwang

Fläche (Wanddicke):

A 30,00 mm²/mm

Außen

Widerstandsmoment, außen:

W_e 150,00 mm³/mm

Element

i

Druck 0 51 [-]

Korrekturfaktor (Verformtes System)

α_k

0,99 0,99 [-]

Normalkraft in Element

N_d

-30,77 -32,92 N/mm

Moment in Element

M_d

1.368,65 -696,57 Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} - \alpha_{ka} \cdot \frac{M_d}{W_e}$$

(88)

Spannung in Element

Max σ_d

-10,03 3,49 N/mm²

Zul. Spannung, Langzeit, Design:

$\sigma_{L,d}$

-55,56 55,56 N/mm²

Ausnutzung Spannungen

U_σ

18,1 6,3 %

Der Spannungsnachweis Außen ist erfüllt.

Innen

Widerstandsmoment, innen:

W_i 150,00 mm³/mm

Element

i

Druck 50 71 [-]

Korrekturfaktor (Verformtes System)

α_k

1,01 1,01 [-]

Normalkraft in Element

N_d

-32,95 -30,77 N/mm

Moment in Element

M_d

-696,57 1.368,65 Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} + \alpha_{ki} \cdot \frac{M_d}{W_i}$$

(87)

Spannung in Element

Max σ_d

-5,80 8,22 N/mm²

Zul. Spannung, Langzeit, Design:

$\sigma_{L,d}$

-55,56 55,56 N/mm²

Ausnutzung Spannungen

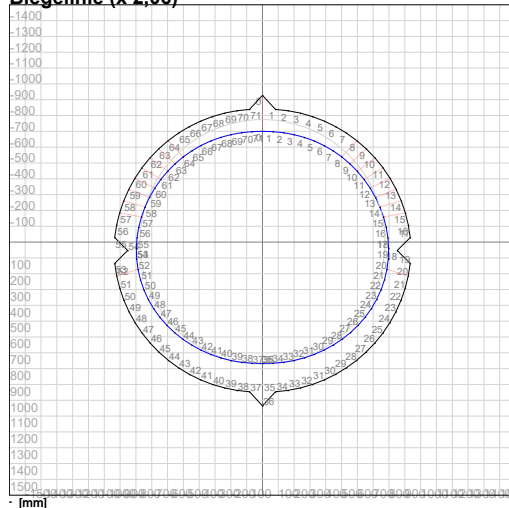
U_σ

10,4 14,8 %

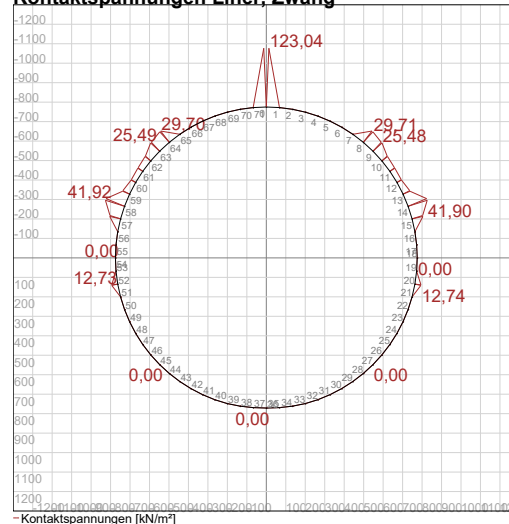
Der Spannungsnachweis Innen ist erfüllt.

Die Spannungen liegen im zulässigen Bereich.

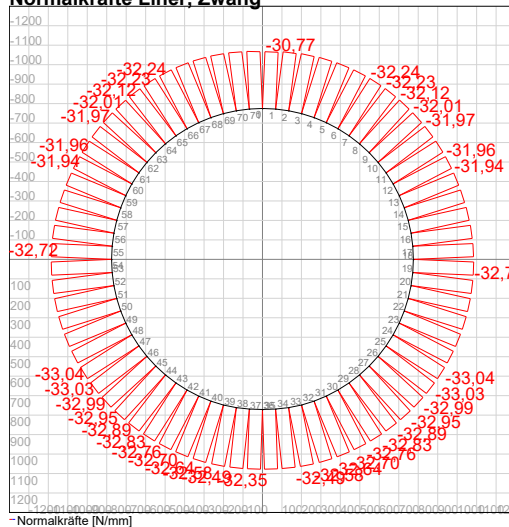
Biegelinie (x 2,06)



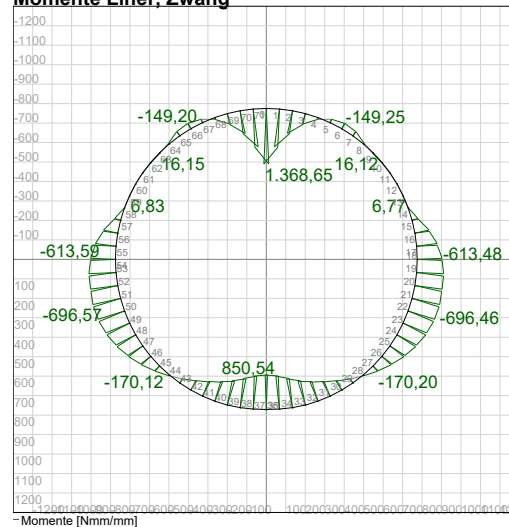
Kontaktspannungen Liner, Zwang

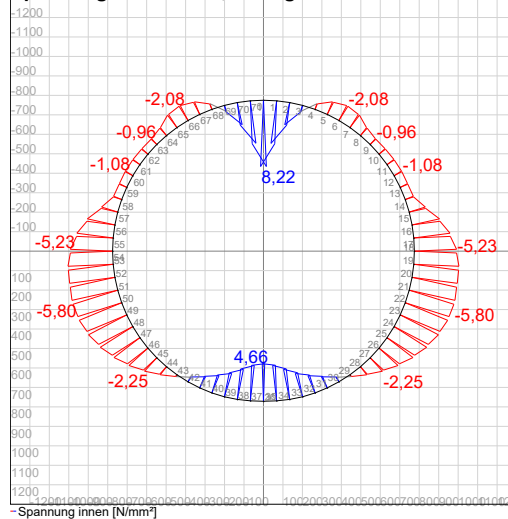
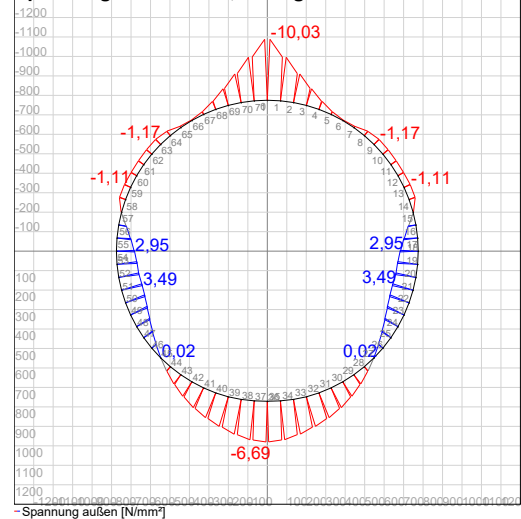


Normalkräfte Liner, Zwang



Momente Liner, Zwang



Spannung innen Liner, Zwang

Spannung außen Liner, Zwang


2.2.7.7 Altrohrspannungen Kämpfer

Vertikale Gesamtlast, Design:
 Wanddicke Altrohr:
 Außendurchmesser Altrohr Kämpfer:
 Bezogene Gelenkringexzentrizität:
 Druckzonenbreite:

$q_{v,d}$	139,51	kN/m ²
t_R	250,00	mm
$da_{AR,k}$	2.080,00	mm
e_G/t	35,00	%
b_D	100,00	mm

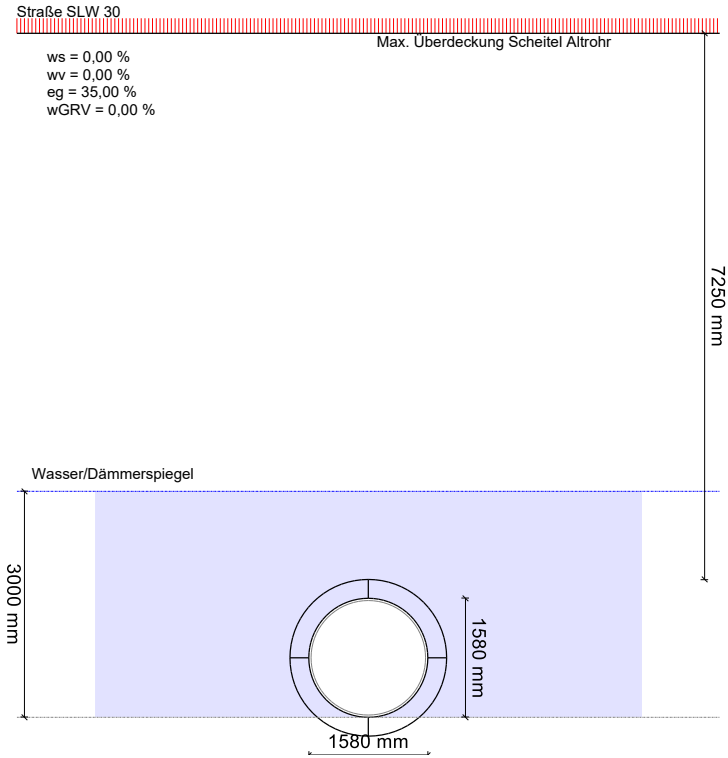
$$N_{K,d} = -q_{v,d} (1 + \omega_{GR,v}) \cdot \frac{da_{AR,k}}{2}$$

Druckkraft im Kämpfer:
 Spannung in der Druckzone:
 Zul. Druckfestigkeit, Langzeit:
 Ausnutzung Druckspannungen AR Kämpfer:

$N_{K,d}$	-145,09	N/mm
σ_d	-2,18	N/mm ²
$f_{c,rad,L}$	5,00	N/mm ²
$U_{\sigma D,AR}$	43,5	%

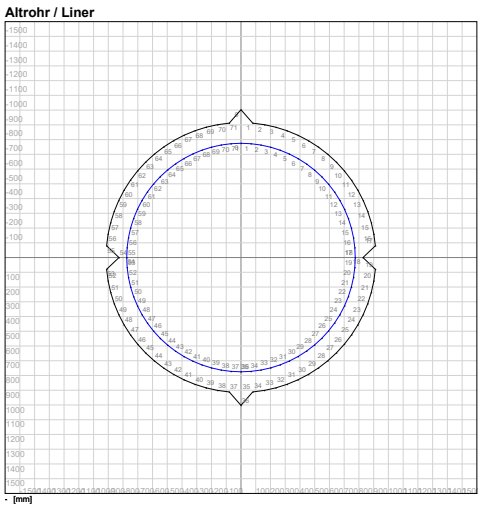
Der Spannungsnachweis für Kämpferspannungen im Altrohr ist erfüllt.

2.2.8 Lastfall 04 [Ersatzkreis] AZ III - hW 3,00 m + h 7,25 m + ws 0,0 % + vv 0,0 %, Langzeit



2.2.8.1 Geometrie diskretisiertes System

Skizze



Wanddicke Liner:	t_L	30,00	mm
Wanddicke Altrrohr:	t_R	250,00	mm
Lokale Vorverformung:	ω_v	0,00	%
Lokale Vorverformung absolut:	w_v	0,00	mm
Gelenkringverformung:	$\omega_{GR,v}$	0,00	%
Gelenkringverformung absolut, einseitig:	$w_{GR,v}$	0,00	mm
Ringspalt:	ω_s	0,00	%
Spaltweite absolut (als konst. Ringspalt):	w_s	0,00	mm
Mittlerer Radius Liner:	$r_{L,m}$	775,00	mm

2.2.8.2 Erdlasten und Verkehrslasten

Wichte Boden, unter Auftrieb:	γ_B'	10,00	kN/m ³
Wichte Boden, trocken:	γ_B	20,00	kN/m ³
Max. Überdeckung Scheitel Altrrohr:	h_{max}	7,25	m
Wasser/Dämmerspiegel:	h_w	3,00	m
Wanddicke Altrrohr:	t_R	250,00	mm
Vertikale Lichte Höhe Altrrohr:	$d_{AR,iv}$	1.580,00	mm
Höhe Wasserspiegel über Altrrohrscheitel:	h'_w	1,17	m
Vertikale Erdlast:	p_E	133,30	kN/m ²
Höhe Scheitel bis Kämpfer Altrrohr:	$r_{AR,a}$	1.040,00	mm
Höhe Wasserspiegel Altrrohrkämpfer bis Altrrohrscheitel:	h'_{wk}	1,04	m
Vertikale Erdlast bis Kämpfer:	$p_{E,K}$	143,70	kN/m ²
Einfache Bodenspannung aus Verkehr:	p	2,40	kN/m ²
Stoßbeiwert:	ϕ	1,40	[-]
Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Scheitelhöhe:	p_T	3,36	kN/m ²
Vertikale Bodenspannung aus Verkehrslast in Kämpferhöhe (mit ϕ):	p_{TK}	2,65	kN/m ²
Horizontale Bodenspannung aus Verkehr:	$p_{T,h}$	0,19	kN/m ²
Vertikale Verkehrslast:	p_v	3,36	kN/m ²
Vertikale Verkehrslast, Design:	$p_{v,d}$	4,54	kN/m ²
Zusätzliche Flächenlast:	p_0	0,0	kN/m ²

Konzentrationsfaktor über Rohr:	λ_R	0,75	[-]
Vertikale Gesamtlast:	q_v	103,34	kN/m ²
Vertikale Gesamtlast, Design:	$q_{v,d}$	139,51	kN/m ²
E-Modul:	E_2	10,00	N/mm ²
Horizontale Bettungssteifigkeit:	S_{Bh}	8,000	N/mm ²
Erddruckbeiwert (Einbettung):	K_2	0,100	[-]
Konzentrationsfaktor Boden:	λ_B	1,083	[-]

Höhe Wasserspiegel Altrrohrkämpfer bis Altrrohrscheitel:	h'_{wk}	1,04	m
Höhe Scheitel bis Kämpfer Altrrohr:	$r_{AR,a}$	1.040,00	mm
Horizontale Erdlast:	$q_{h,E}$	15,57	kN/m ²
Horizontale Verkehrslast:	$q_{h,v}$	0,19	kN/m ²
Horizontale Gesamtlast:	q_h	15,76	kN/m ²
Designwert Horizontale Gesamtlast:	$q_{h,d}$	21,27	kN/m ²
Rechnerischer Erddruckbeiwert:	K_2'	0,152	[-]

2.2.8.3 Verformungsnachweis Liner, Gebrauchslast

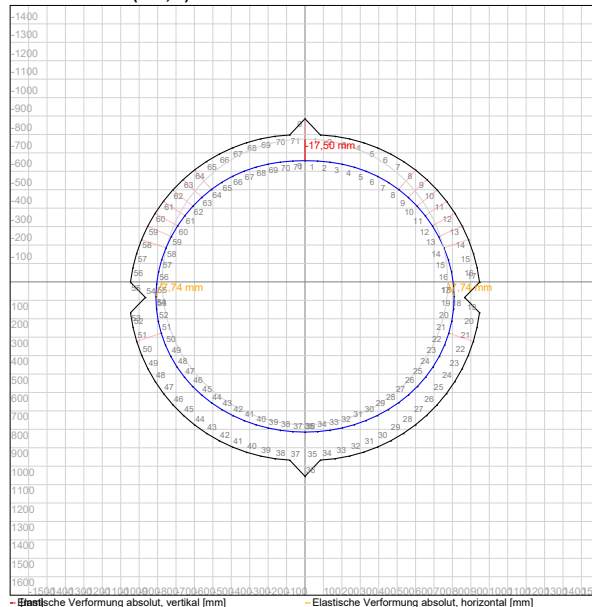
Relevanter Durchmesser für prozentuale Verformung:	d_v	1.580,00	mm
Spaltweite absolut (als konst. Ringspalt):	w_s	0,00	mm
Lokale Vorverformung absolut:	w_v	0,00	mm
Gelenkringverformung absolut, einseitig:	$w_{GR,v}$	0,00	mm
Elastische Verformung absolut, vertikal:	$w_{el,v,E1}$	-17,50	mm
Elastische Verformung absolut, vertikal:	$w_{el,v}$	17,50	mm
Elastische Verformung relativ:	$\delta_{v,el}$	1,11	%
Zulässige Verformung elastisch:	$zul \delta_{v,el}$	6,00	%

Die errechnete elastische Verformung ist kleiner als die zulässige Verformung.

Gesamte Durchmesseränderung:	w	17,50	mm
Relative Gesamtverformung:	δ_v	1,11	%
Anhaltswert Gesamtverformung:	$\delta_{v,A}$	10,00	%

Elastische Verformung absolut, horizontal:	Wel,h,E1	-7,74	mm
Elastische Verformung absolut, horizontal:	Wel,h,E2	7,74	mm
Elastische Verformung absolut, horizontal:	Wel,h	15,49	mm

Gebrauchslast (x 4,4)



2.2.8.4 Bodeninteraktion (Gebrauchslast)

Bettungsziffer, Scheitel:	CB	7.692,31	kN/m³
Innerer Reibungswinkel:	φ'	20,00	°
Beiwert:	K_p	2,04	[-]
Vertikale Erdlast:	pE	133,30	kN/m²
Grenzwert qh im Scheitel (informativ):	qh,max	220,90	kN/m²

Vertikale Erdlast bis Kämpfer:	pE,K	143,70	kN/m²
Grenzwert qh im Kämpfer:	qh,max,K	238,14	kN/m²

Der Wert wird im Kämpfer abgelesen.

Horizontale Gesamtlast:	qh	15,76	kN/m²
Seitlicher Bettungsreaktionsdruck:	qh*	67,22	kN/m²
Summe horizontale Kräfte:	qh + qh*	82,98	kN/m²
Ausnutzung max qh:	Umaxqh	34,8	%

Für die Interaktion Boden-Rohrsystem wurde der elastische Ansatz verwendet. Die Bettung des Rohres wurde um den gesamten Umfang als konstant angenommen. Damit ergibt sich eine Dreiecksförmige Verteilung der Bodenspannungen, deren Maximalwert auf 75% des passiven Erddrucks begrenzt ist.

Die horizontale Kraft aus Bettungsreaktionsdruck und seitlichem Druck im Kämpfer liegt unterhalb des Grenzwertes.

2.2.8.5 Stabilitätsnachweis (Designwerte)

Der maßgebende Nachweis der Stabilität erfolgt über die im Abschnitt 7.6.4.2 (DWA-A 143-2) zugelassene (genauere) Variante einer Berechnung nach Theorie II. Ordnung unter Berücksichtigung der Vorverformungen und der Spaltbildung. Hierbei wird numerisch überprüft, ob ein elastisches Stabilitätsversagen (Beulen) unter gamma-facher Last eintritt. Darüber hinaus wird geprüft, ob die bei dieser Berechnung ermittelten Spannungen die vorgegeben maximalen Grenzspannungen für Zug und Druck mit einfacher Sicherheit nicht überschreiten.

Nachweis entfällt.

Spannungsnachweis Liner, Design

Fläche (Wanddicke): A 30,00 mm²/mm

Außen

Widerstandsmoment, außen:

W_e 150,00 mm³/mm

Element	i	Druck	Zug	
Korrekturfaktor (Verformtes System)	α_k	0,99	0,99	[-]
Normalkraft in Element	N_d	-31,86	-33,35	N/mm
Moment in Element	M_d	1.112,30	-431,87	Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} - \alpha_{ka} \cdot \frac{M_d}{W_e} \quad (88)$$

Spannung in Element	Max σ_d	-8,38	1,73	N/mm²
Zul. Spannung, Langzeit, Design:	$\sigma_{L,d}$	-55,56	55,56	N/mm²

Ausnutzung Spannungen	U_σ	15,1	3,1	%
-----------------------	------------	------	-----	---

Der Spannungsnachweis Außen ist erfüllt.

Innen

Widerstandsmoment, innen:

W_i 150,00 mm³/mm

Element	i	Druck	Zug	
Korrekturfaktor (Verformtes System)	α_k	1,01	1,01	[-]
Normalkraft in Element	N_d	-33,37	-31,86	N/mm
Moment in Element	M_d	-431,87	1.112,30	Nmm/mm

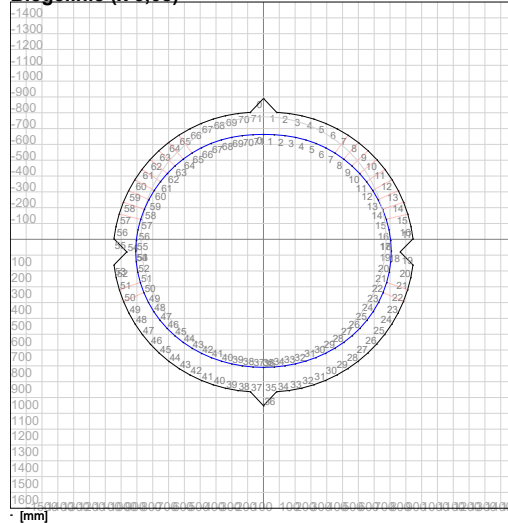
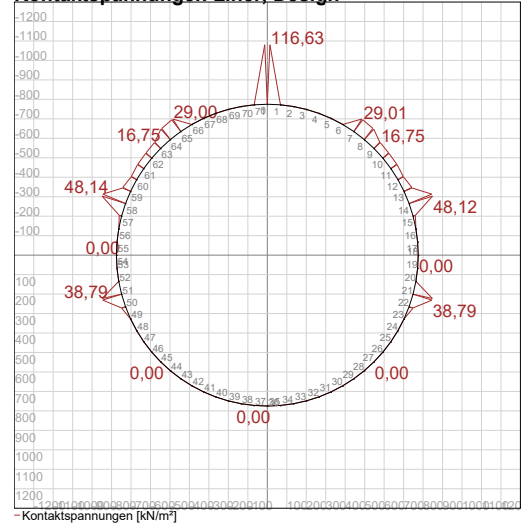
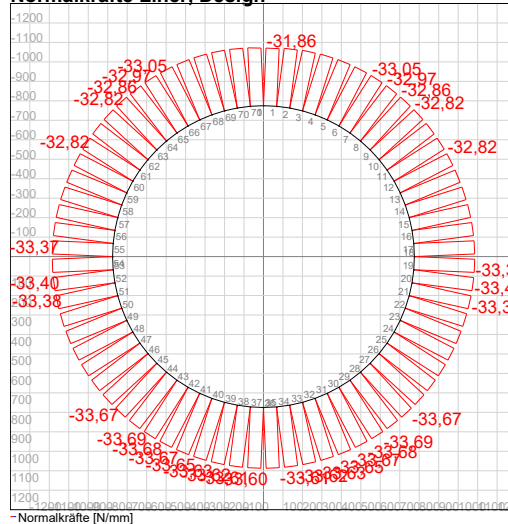
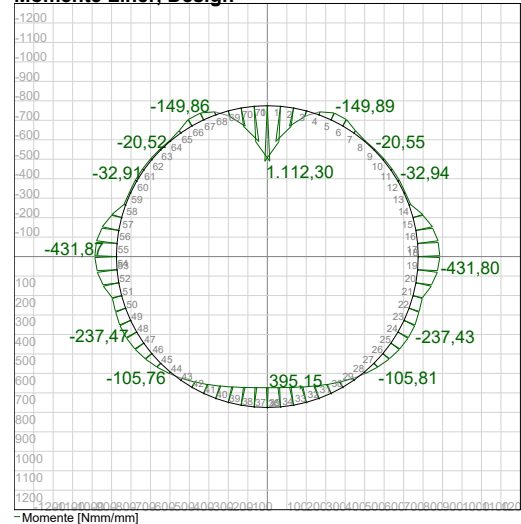
$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} + \alpha_{ki} \cdot \frac{M_d}{W_i} \quad (87)$$

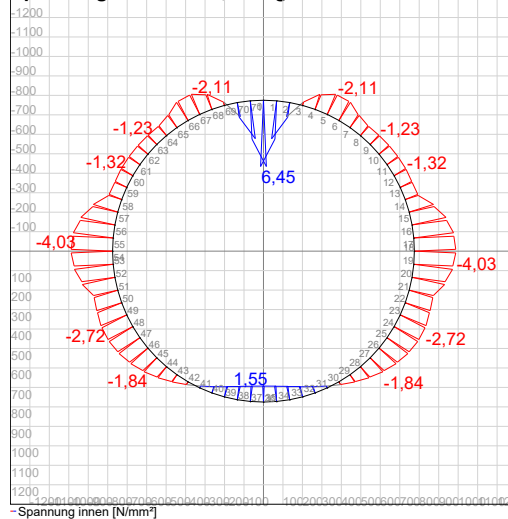
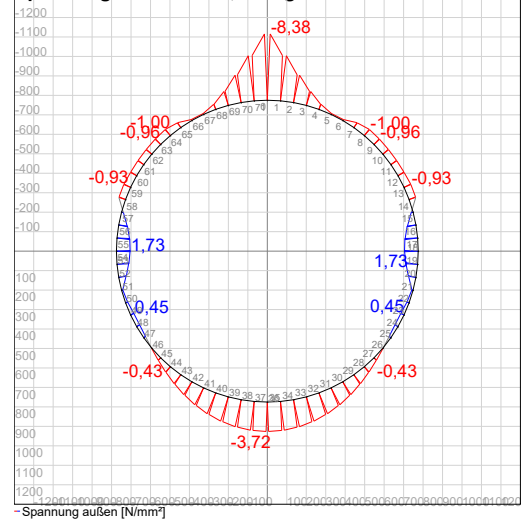
Spannung in Element	Max σ_d	-4,03	6,45	N/mm²
Zul. Spannung, Langzeit, Design:	$\sigma_{L,d}$	-55,56	55,56	N/mm²

Ausnutzung Spannungen	U_σ	7,3	11,6	%
-----------------------	------------	-----	------	---

Der Spannungsnachweis Innen ist erfüllt.

Die Spannungen liegen im zulässigen Bereich.

Biegelinie (x 3,08)

Kontaktspannungen Liner, Design

Normalkräfte Liner, Design

Momente Liner, Design


Spannung innen Liner, Design

Spannung außen Liner, Design


2.2.8.6 Spannungsnachweis Liner, Zwang

Fläche (Wanddicke):

A 30,00 mm²/mm

Außen

Widerstandsmoment, außen:

 W_e 150,00 mm³/mm

Element

i

Druck Zug 53 [-]

Korrekturfaktor (Verformtes System)

 α_k

0,99 0,99 [-]

Normalkraft in Element

 N_d

-31,26 -33,20 N/mm

Moment in Element

 M_d

1.356,32 -535,53 Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} - \alpha_{ka} \cdot \frac{M_d}{W_e}$$

(88)

Spannung in Element

 Max σ_d

-9,97 2,42 N/mm²

Zul. Spannung, Langzeit, Design:

 σ_{L,d}

-55,56 55,56 N/mm²

Ausnutzung Spannungen

 U_σ

17,9 4,4 %

Der Spannungsnachweis Außen ist erfüllt.

Innen

Widerstandsmoment, innen:

 W_i 150,00 mm³/mm

Element

i

Druck Zug 71 [-]

Korrekturfaktor (Verformtes System)

 α_k

1,01 1,01 [-]

Normalkraft in Element

 N_d

-33,21 -31,26 N/mm

Moment in Element

 M_d

-535,53 1.356,32 Nmm/mm

$$\text{Max } \sigma_d = \frac{N_d}{A} + \alpha_{ki} \cdot \frac{M_d}{W_i}$$

(87)

Spannung in Element

 Max σ_d

-4,72 8,12 N/mm²

Zul. Spannung, Langzeit, Design:

 σ_{L,d}

-55,56 55,56 N/mm²

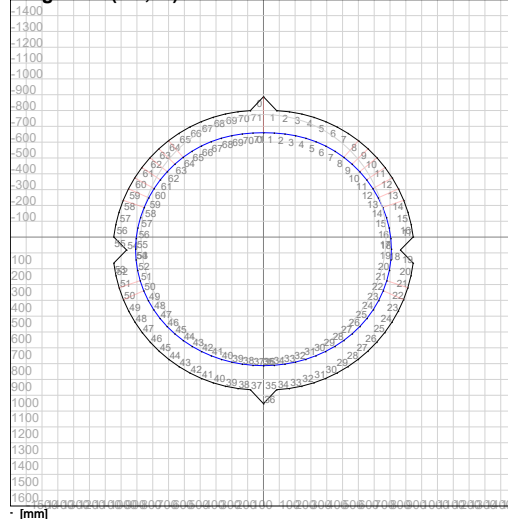
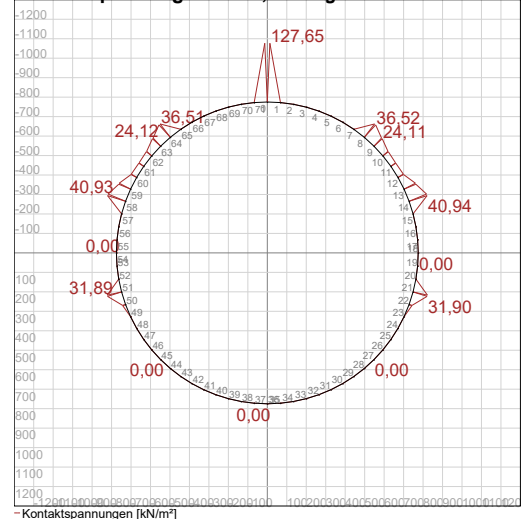
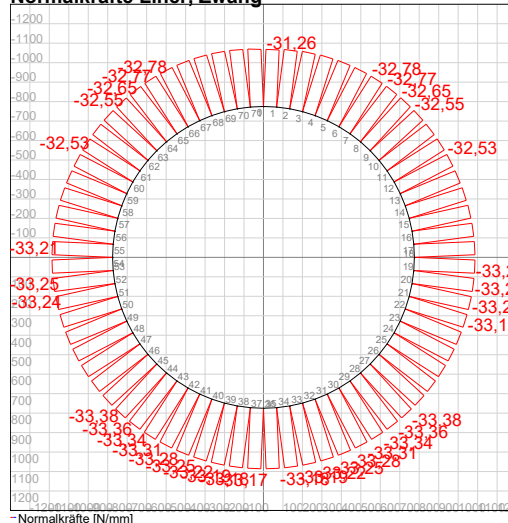
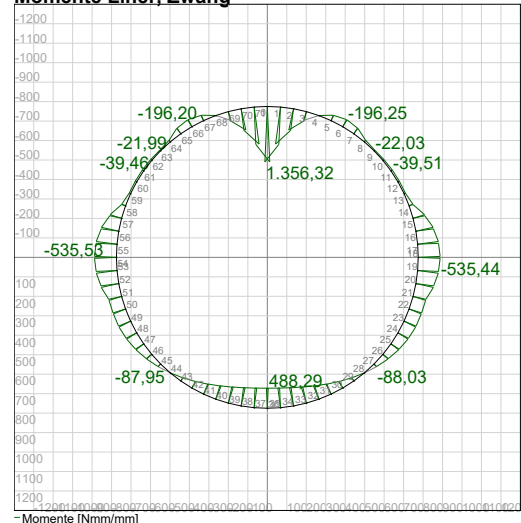
Ausnutzung Spannungen

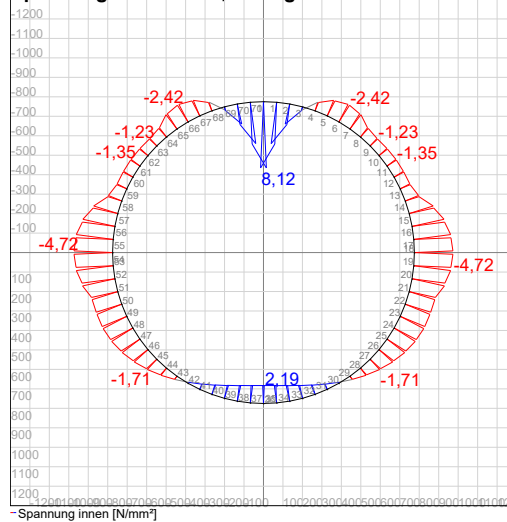
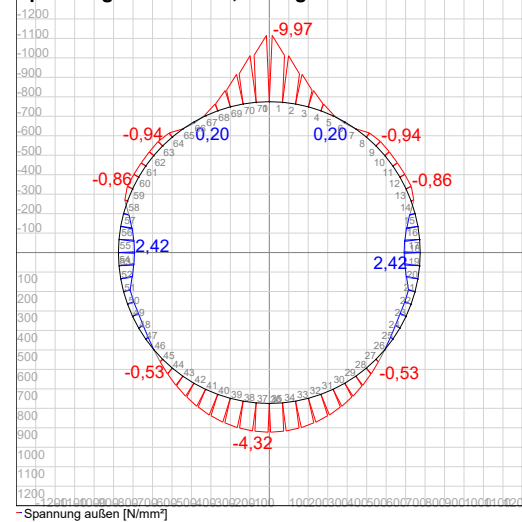
 U_σ

8,5 14,6 %

Der Spannungsnachweis Innen ist erfüllt.

Die Spannungen liegen im zulässigen Bereich.

Biegelinie (x 3,18)

Kontaktspannungen Liner, Zwang

Normalkräfte Liner, Zwang

Momente Liner, Zwang


Spannung innen Liner, Zwang

Spannung außen Liner, Zwang


2.2.8.7 Altrohrspannungen Kämpfer

Vertikale Gesamtlast, Design:

Wanddicke Altrohr:

Außendurchmesser Altrohr Kämpfer:

Bezogene Gelenkringexzentrizität:

Druckzonenbreite:

$q_{v,d}$	139,51	kN/m²
t_R	250,00	mm
$d_{AR,k}$	2.080,00	mm
e_G/t	35,00	%
b_D	100,00	mm

$$N_{K,d} = -q_{v,d} (1 + \omega_{GR,v}) \cdot \frac{d_{AR,k}}{2}$$

Druckkraft im Kämpfer:

Spannung in der Druckzone:

Zul. Druckfestigkeit, Langzeit:

Ausnutzung Druckspannungen AR Kämpfer:

$N_{K,d}$	-145,09	N/mm
σ_d	-2,18	N/mm²
$f_{c,rad,L}$	5,00	N/mm²
$U_{\sigma D,AR}$	43,5	%

Der Spannungsnachweis für Kämpferspannungen im Altrohr ist erfüllt.

Alle notwendigen Nachweise sind erbracht.