

Statische Berechnung

Bauvorhaben: Leipzig - Sanierung des 2. nördlichen HS San Dammweg Elstermühlgraben

Detail: Sanierung eines bestehenden Kanals mit GFK-Rohren
Maulprofile B/H_i = 2540/1545 mm

Auftraggeber: Amiblu Germany GmbH
Gewerbepark 1
17039 Trollenhagen

Tragwerksplanung: IngSoft GmbH
Irrerstraße 17
90403 Nürnberg
+49 911 430 879 – 41
Vladimir.Lacmanovic@IngSoft.de

Statik-Nummer: SN 25 070 001

Aufgestellt am: 2025-05-30



ingsoft
IngSoft GmbH
Irrerstraße 17
90403 Nürnberg
Germany

Inhalt

1	Unterlagen, Literatur.....	3
2	Berechnungsgrundlagen.....	4
2.1	Rechenmodell, Belastung.....	4
2.2	Untersuchte Lastfälle (LF):.....	6
2.3	Geometrie.....	6
2.4	Baustoffe.....	6
2.5	Bodenparameter.....	7
3	Zusammenstellung der Ergebnisse.....	8
3.1	LF 1: Minimale Erdüberdeckung von 0,5 m über Rohrscheitel, LM 1 auf GOK.....	8
3.1.1	Verformungsnachweis.....	8
3.1.2	Spannungsnachweis.....	8
3.1.3	Stabilitätsnachweis.....	8
3.2	LF 2: Maximale Erdüberdeckung von 1,0 m über Rohrscheitel, LM 1 auf GOK.....	8
3.2.1	Verformungsnachweis.....	8
3.2.2	Spannungsnachweis.....	8
3.2.3	Stabilitätsnachweis.....	9
3.3	LF 3: Wasseraußendruck von 3,2 m über Rohrsohle.....	9
3.3.1	Verformungsnachweis.....	9
3.3.2	Spannungsnachweis.....	9
3.3.3	Stabilitätsnachweis.....	9
3.4	Interaktionsnachweis.....	9
3.4.1	Verformungsnachweis.....	9
3.4.2	Spannungsnachweis.....	9
3.4.3	Stabilitätsnachweis.....	10
3.5	LF 5a: Verdämmen (Bauzustand), Schritt 1 – Dämmerdruck von 0,6 m über Rohrsohle.....	10
3.5.1	Verformungsnachweis.....	10
3.5.2	Spannungsnachweis.....	10
3.5.3	Spannungsnachweis Längsspannungen.....	10
3.5.4	Stabilitätsnachweis.....	10
3.6	LF 5b: Verdämmen (Bauzustand), Schritt 2 – Dämmerdruck von 0,6 m über Rohrsohle.....	10
3.6.1	Verformungsnachweis.....	10
3.6.2	Spannungsnachweis.....	11
3.6.3	Spannungsnachweis Längsspannungen.....	11
3.6.4	Stabilitätsnachweis.....	11
3.7	LF 5c: Verdämmen (Bauzustand), Letzter Verdämmschritt – Dämmerdruck von 0,5 m über Rohrscheitel.....	11
3.7.1	Verformungsnachweis.....	11
3.7.2	Spannungsnachweis.....	11
3.7.3	Spannungsnachweis Längsspannungen.....	12
3.7.4	Stabilitätsnachweis.....	12

3.8	Ermüdungsnachweis	12
3.8.1	Spannungsnachweis	12
4	Zusammenfassung	13
4.1	Anmerkungen	13
4.2	Schlussfolgerung	13
5	Ergebnisse der FEM-Analyse	14
5.1	LF 1: Minimale Erdüberdeckung von 0,5 m über Rohrscheitel, LM 1 auf GOK	15
5.2	LF 2: Maximale Erdüberdeckung von 1,0 m über Rohrscheitel, LM 1 auf GOK	18
5.3	LF 3: Wasseraußendruck von 3,2 m über Rohrsohle	21
5.4	LF 4: Interaktionsnachweis	24
5.5	LF 5a: Schritt 1 - Dämmerhöhe ca. 0,6 m über GFK-Rohrsohle	26
5.6	LF 5 b: Schritt 2 - Dämmerhöhe ca. 1,2 m über GFK-Rohrsohle	30
5.7	LF 5c: Letzter Verdämmschritt - Dämmerhöhe ca. 0,5 m über GFK-Rohrscheitel	34
5.8	LF 6: Ermüdungsnachweis	38

1 Unterlagen, Literatur

- 1.1 Arbeitsblatt DWA-A 143-2: Sanierung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden; Juli 2015
- 1.2 ATV-DVWK-A 127: Statische Berechnung von Abwasserkanälen und -leitungen; 3. Auflage August 2000
- 1.3 E-Mail Schriftverkehr mit Herrn Schimmel, Amiblu Germany GmbH
- 1.4 Angaben zur statischen Berechnung als PDF-Datei 02-Relining-Sanierung-Inliner-A-143-2-deu-Rev05
- 1.5 Querprofil des Bestandes vom 27.11.2024, Sweco GmbH als PDF-Datei 0951-20-036_440_QP_01
- 1.6 Statische Berechnung des bestehenden Kanals vom 25.2.2022, Dr. Doll Ingenieurgesellschaft mbH als PDF-Datei 2022-011-GA-2-Nördlicher Hauptsammler-Leipzig
- 1.7 Zeichnung des GFK-Profiles als DXF-Datei Maulprofil 2540-1545 mm
- 1.8 Femap, Users Manual
- 1.9 NX Nastran Users Manual

2 Berechnungsgrundlagen

Geplant ist die Sanierung eines Kanals, siehe Abbildung 1, mit Hilfe von Kurzrohrrelining, verdämmten GFK-Rohren – Sonderprofile Bi/Hi = 2540/1545 mm. Das Altrohr wird nicht in der Berechnung statisch betrachtet. Ziel der Bemessung ist der statische Nachweis von GFK-Rohren unter der Einwirkung von Erd-, Verkehrslasten und Wasseraußendruck im Altrohrzustand III und des Dämmerdrucks im Bauzustand. Normative Grundlage für die erbrachten Nachweise basieren zum größten Teil auf das aktuelle Regelwerk DWA-A 143-2.

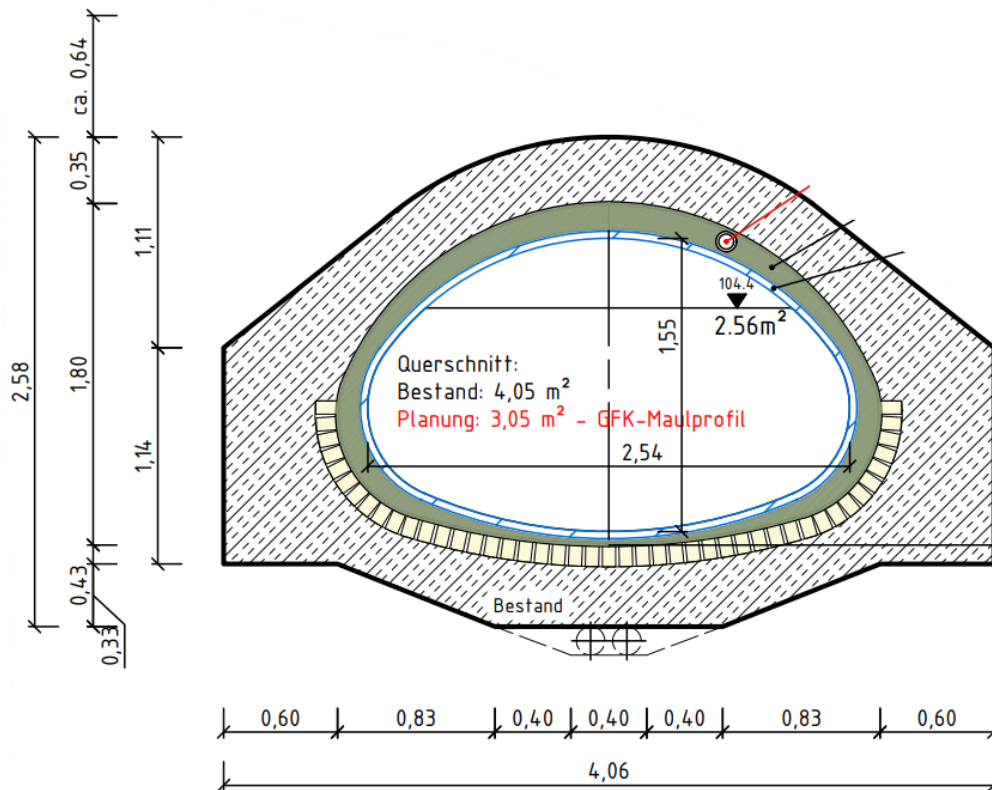


Abbildung 1: Geometrie des zu sanierenden Kanals

2.1 Rechenmodell, Belastung

Die Grundlage für die durchgeführten Berechnungen bilden räumliche FE-Modelle um die tatsächliche Geometrie abbilden zu können.

Für die statische Berechnung der **Erd- und Verkehrslasten** LF 1 und LF 2 wird das GFK-Rohr mit Hilfe von vierknotigen Schalenelementen diskretisiert. Boden, Dämmer und das Altrohr werden durch achtknotige Volumenelemente abgebildet. Die verwendeten Diskretisierungen sind in Abbildung 4 und Abbildung 9 dargestellt. Die Kontaktfläche zwischen Dämmer und GFK-Rohr wird durch nichtlinearen Kontakt – Fläche zur Fläche simuliert. Das heißt, es werden allein Druckkräfte, keine Zug- und keine Scherkräfte übertragen. Das Rohr ist längs, in Scheitel, in der Sohle und im Kämpfern gerissen. Bei der minimalen Erdüberdeckung (LF 1) beträgt der Druck in Rohrscheitelebene 141,8 kN/m² und bei der maximalen Erdüberdeckung 87,9 kN/m². Die Eigengewichtslasten werden durch Erdbeschleunigung und Zuweisung der materialspezifischen Wichte zu den entsprechenden Elementen berücksichtigt. Das Modell ist symmetrisch in Bezug auf die vertikale Ebene durch die Rohrmitte, so dass nur eine Hälfte des Systems modelliert werden muss und an der Schnittkante die Symmetrie durch entsprechende Auflagerbedingungen hergestellt wird.

Der Lastfall **Wasseraußendruck** LF 3 wird an dem in Abbildung 14 dargestellten FE-Modell untersucht. Gemäß DWA-A 143-2 wird das GFK-Rohr als starr gebettet angesetzt. Das abgebildete Modell wird mit Hilfe von vierknotigen Schalenelementen diskretisiert. Das Altrohr und der Dämmer werden durch achtknotige Volumenelemente abgebildet. Die

Kontaktfläche zwischen Dämmer und GFK-Rohr wird durch nichtlinearen Kontakt – Fläche zur Fläche simuliert. Das heißt, es werden allein Druckkräfte, keine Zug- und keine Scherkräfte übertragen. Da es sich um Wasseraußendruck alleine handelt, kann auf die Modellierung von Boden verzichtet werden. In der Sohle auf der linken Seite erfolgte der Ansatz einer lokalen Vorverformung von 10 mm nach innen. Es wird eine Spaltbildung zwischen GFK-Rohr und Altrrohr angesetzt, die 2 mm beträgt. Die Belastung durch Wasseraußendruck wird als Flächenlast auf die Rohraußenwandung aufgebracht.

Im Lastfall 4 wird der **Interaktionsnachweis** – Einfluss des Grundwassers in Kombination mit Erd- und Verkehrslasten aus LF 1 berücksichtigt. Die Erdwichte unter Grundwasserniveau wird unter Auftrieb gesetzt. Die Belastung durch Wasseraußendruck wird als Flächenlast auf die Rohraußenwandung aufgebracht.

Der Lastfall **Dämmerdruck** (Bauzustand) LF 5 ist an dreidimensionalen FE-Modellen statisch nachgewiesen. Die räumliche Modellbildung wurde gewählt, um die lokale Anordnung der Verkeilungen zwischen Rohraußenwandung und Altröhreninnenwandung berücksichtigen zu können. In der Modellbildung ist ein Rohr mit einer Länge von 3 m abgebildet. Die Rohre sind mit Hilfe von vierknotigen Schalenelementen diskretisiert. Der ausgehärtete Dämmer in letzten Verdämmschritt ist mit Hilfe von achtknotigen Volumenelementen diskretisiert. Die Belastung durch Dämmerdruck ist als Flächenlast auf die Rohraußenwandung aufgebracht. Der Verdämmvorgang **muss** lagenweise in mindestens drei Verdämmschritte, wie in der statischen Berechnung vorgegeben, erfolgen. Ein Verdämmschritt darf erst dann ausgeführt werden, wenn der im vorherigen Verdämmschritt eingebaute Dämmer ausreichend ausgehärtet ist, um als Rohrbettung zu dienen. Hier werden nur der zweite Verdämmschritt und die maximale empfohlene Dämmerhöhe in letzten Verdämmschritt als ausschlaggebend untersucht. Die Auflagerfläche in den Verkeilungspunkten ist ca. 20 x 20 cm. Weitere Verkeilungen zur Gewährleistung der Lagesicherheit sind ggf. konstruktiv anzuordnen.

Im Schritt 1 sind die Rohre an den beiden Enden gemäß Abbildung 23 lokal (Verkeilungen) druckstarr gelagert. Die Dämmerhöhe beträgt ca. 0,6 m über GFK-Rohrsohle.

Im Schritt 2 sind die Rohre an den beiden Enden gemäß Abbildung 23 und Abbildung 29 lokal (Verkeilungen) druckstarr gelagert und der ausgehärtete Dämmer aus Schritt 1 dient als zusätzliche Bettung für die Rohre. Die Dämmerhöhe beträgt ca. 1,2 m über GFK-Rohrsohle.

Im letzten Verdämmschritt dient der ausgehärtete Dämmer aus dem Schritt 2 als zusätzliche Bettung für die Rohre, siehe Abbildung 35. Die Dämmerhöhe beträgt ca. 0,5 m über GFK-Rohrscheitel.

Ein dritter Verdämmschritt sollte bis ca. 10 cm über Rohrscheitel erfolgen. Dieser Verdämmschritt wurde nicht nachgewiesen, da schon der letzte Verdämmschritt nach dem zweiten nachgewiesen wurde.

Im LF 6 ist der **Nachweis gegen Ermüden** unter nicht vorwiegend ruhender Belastung, auch Ermüdungsnachweis genannt, untersucht. Bei Straßenverkehrslasten und Erdüberdeckungen über Rohrscheitel von unter 1,5 m kann der Ermüdungsnachweis ausschlaggebend werden. Für Straßenverkehrslasten beträgt die Erforderliche Lastwechselzahl 2×10^6 . Der Ermüdungsnachweis wird durch den Vergleich des dynamischen Spannungsanteils mit der Schwingbreite des Rohres geführt. Für die Berechnung der dynamischen Spannung im Rohren wird das angepasste Modell aus LF 1 verwendet. Um nur den dynamischen Anteil infolge von Verkehrslast zu berücksichtigen ist die Materialwichte auf null gesetzt. Der umgebende Boden stellt keine Belastung sondern nur eine Bettung für die Rohre dar.

Die Nachweisführung der Lastfälle 1 bis 4 erfolgt unter Voraussetzung der Langzeitverhältnisse, der Lastfälle 5 und 6 unter Voraussetzung der Kurzzeitverhältnisse.

Da es sich um flexible Bauteile handelt, liegt ein Stabilitätsproblem vor. Es erfolgen daher geometrisch nichtlineare Berechnungen, in deren Rahmen die Lasten iterativ bis zur Bemessungs- bzw. Charakteristische Last gesteigert werden. Linear-elastisches Verhalten des Materials ist vorausgesetzt (Hookesche Gesetz gilt).

Tragfähigkeit

Nach dem Teilsicherheitskonzept, der in dem DWA-A 143-2 eingeführt ist, sind die Materialeigenschaften, E-Modul und Festigkeit durch Teilsicherheitsbeiwert γ_M der Widerstände dividiert und die Lasten mit entsprechenden Teilsicherheitsbeiwerten γ_F der Einwirkungen multipliziert. Die Stabilitätsproblematik ist hier nach DWA-A 143-2 enthalten.

Gebrauchstauglichkeit

Für den Verformungsnachweis sind die charakteristischen Materialeigenschaften und die Gebrauchslast in der Berechnung angesetzt.

2.2 Untersuchte Lastfälle (LF):

- LF 1: Minimale Erdüberdeckung von 0,5 m über Rohrscheitel, LM 1 auf GOK
- LF 2: Maximale Erdüberdeckung von 1,0 m über Rohrscheitel, LM 1 auf GOK
- LF 3: Wasseraußendruck von 3,2 m über Rohrsohle
- LF 4: Interaktionsnachweis
- LF 5: Verdämmen (Bauzustand) in Schritten
- LF 6: Ermüdungsnachweis

2.3 Geometrie

Sonderprofil	Innenbreite:	B_i	=	2540 mm
	Innenhöhe:	H_i	=	1545 mm
	Tragende Wandstärke:	s	=	40 mm

2.4 Baustoffe

Materialparameter	<i>Charakteristisch</i>			
	Langzeit-E-Modul:	E_L	=	6.250 N/mm ²
	Kurzzeit-E-Modul:	E_K	=	10.000 N/mm ²
	Langzeit-Festigkeit:	σ_{BL}	=	80 N/mm ²
	Kurzzeit-Festigkeit:	σ_{BK}	=	200 N/mm ²
	Kurzzeit-Längszugfestigkeit:	σ_{LZK}	=	25 N/mm ²
	Kurzzeit-Längsdruckfestigkeit:	σ_{LDK}	=	50 N/mm ²
	Doppelte Schwingbreite:	$2\sigma_A$	=	83,8 N/mm ²
	Querdehnzahl:	ν	=	0,3
	Materialwichte:	γ	=	17 kN/m ³
	Wichte des Dämmers:	$\gamma_{Dä}$	=	18 kN/m ³
	Wichte des Betons:	γ_B	=	24 kN/m ³
	E-Modul des Betons:	E_B	=	27.000 N/mm ²
	E-Modul des Dämmers:	$E_{Dä}$	=	5.000 N/mm ²
	Querdehnzahl Dämmen und Beton:	ν	=	0,2
Teilsicherheitsbeiwerte	<i>für Einwirkungen</i>			
	Ständige Lasten:	$\gamma_{F,S}$	=	1,35
	Veränderliche Lasten:	$\gamma_{F,V}$	=	1,50
	<i>für Materialwiderstände</i>			
	GFK-Rohr	γ_M	=	1,25
	<i>Bemessungswerte</i>			
	Langzeit-E-Modul:	$E_{L,d}$	=	5.000 N/mm ²
	Kurzzeit-E-Modul:	$E_{K,d}$	=	8.000 N/mm ²
	Langzeit-Festigkeit:	$\sigma_{BL,d}$	=	64 N/mm ²
	Kurzzeit-Festigkeit:	$\sigma_{BK,d}$	=	160 N/mm ²
	Kurzzeit-Längszugfestigkeit:	$\sigma_{LZK,d}$	=	20 N/mm ²
	Kurzzeit-Längsdruckfestigkeit:	$\sigma_{LDK,d}$	=	40 N/mm ²
	Doppelte Schwingbreite:	$2\sigma_{A,d}$	=	67 N/mm ²

Um zu günstige Auswirkung der Teilsicherheitsbeiwerte zu berücksichtigen, sind auch Fälle untersucht in dem die Teilsicherheitsbeiwerte mit 1,0 angesetzt sind. Es werden nur die Berechnungen aus maßgebenden Lastkombinationen dokumentiert.

2.5 Bodenparameter

Die Steifemodule E_S wurden mit nachfolgende Formel in die E-Module für die FE-Berechnung umgewandelt:

$$E = E_S \cdot \frac{(1-\nu_B-2\cdot\nu_B^2)}{(1-\nu_B)}$$

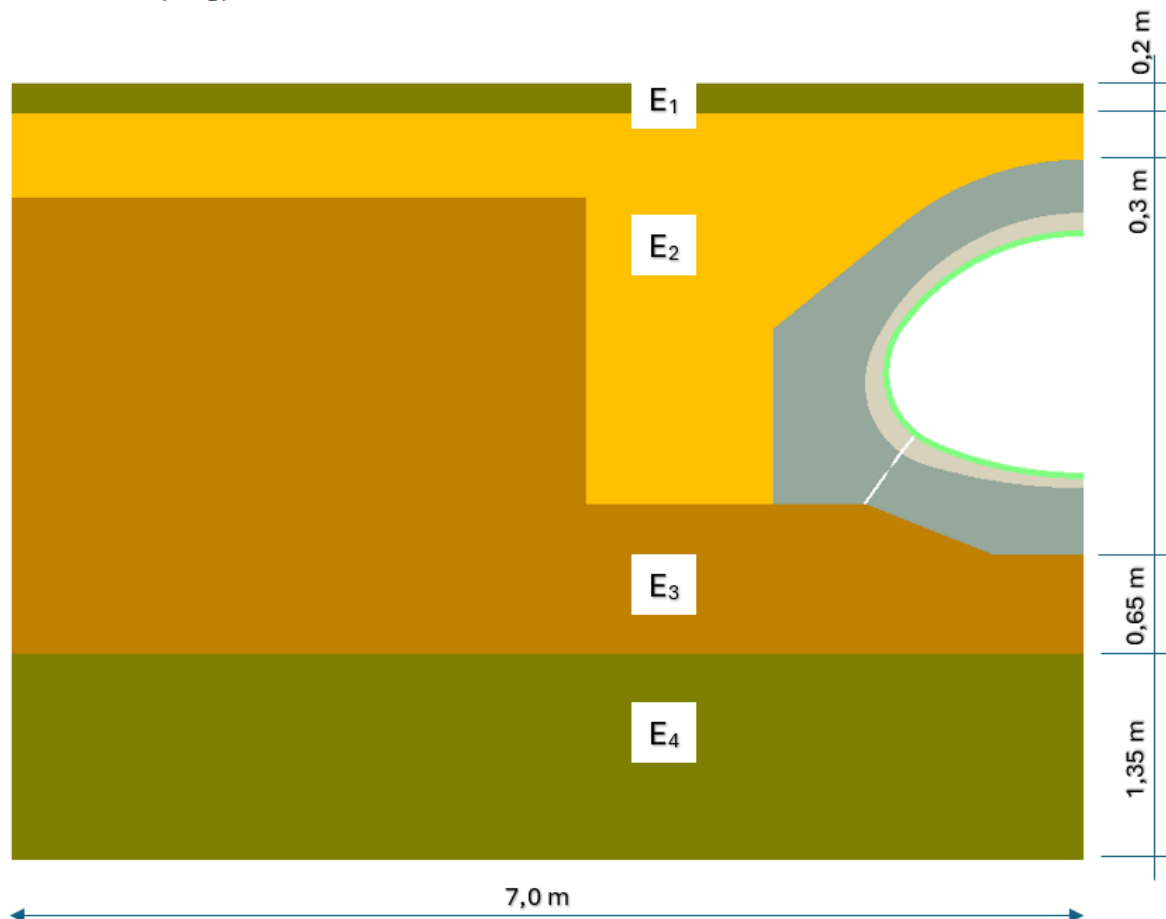


Abbildung 2: Bodeneigenschaften

<i>Schicht 1</i>	Steifemodul:	E_{S1}	=	40 N/mm ²
	Querdehnzahl:	ν	=	0,25
<i>Schicht 2</i>	Steifemodul:	E_{S1}	=	5 N/mm ²
	Querdehnzahl:	ν	=	0,35
<i>Schicht 3</i>	Steifemodul:	E_{S1}	=	10 N/mm ²
	Querdehnzahl:	ν	=	0,35
<i>Schicht 4</i>	Steifemodul:	E_{S1}	=	40 N/mm ²
	Querdehnzahl:	ν	=	0,25
	Wichte:	γ	=	20 kN/m ³
	Wichte unter Auftrieb:	γ'	=	11 kN/m ³

3 Zusammenstellung der Ergebnisse

3.1 LF 1: Minimale Erdüberdeckung von 0,5 m über Rohrscheitel, LM 1 auf GOK

3.1.1 Verformungsnachweis

Aus Abbildung 7 ergibt sich infolge der Gebrauchslast die maximale horizontale Rohrdeformation zu

$$\Delta d_h = 13,165 \times 2 = 26,33 \text{ mm} \quad \Delta d_h = 1,26 \% < \text{zul } \Delta d = 6,0 \%$$

Aus Abbildung 8 ergibt sich infolge der Gebrauchslast die maximale vertikale Rohrdeformation zu

$$\Delta d_v = 55,494 + 9,69 = 65,18 \text{ mm} \quad \Delta d_v = 3,13 \% < \text{zul } \Delta d = 6,0 \%$$

3.1.2 Spannungsnachweis

Die maximale Hauptzugspannung infolge Bemessungslast ergibt sich gemäß Abbildung 5 zu

$$\max \sigma_{Z,d} = 38,604 \text{ N/mm}^2 \quad \sigma_{Z,d} / \sigma_{BL,d} = 38,604/64 = 0,60 < 1,0$$

Die maximale Hauptdruckspannung infolge Gebrauchslast ergibt sich gemäß Abbildung 6 zu

$$\max \sigma_{D,d} = 40,005 \text{ N/mm}^2 \quad \sigma_{D,d} / \sigma_{BL,d} = 40,005/64 = 0,63 < 1,0$$

Die erforderlichen Sicherheiten gegen Spannungsversagen sind somit eingehalten.

3.1.3 Stabilitätsnachweis

Der Stabilitätsnachweis ist durch den Spannungsnachweis für die Bemessungslast und die Bemessungsmaterialparameter bereits nachgewiesen, wie in Ziffer 2 beschrieben ist.

3.2 LF 2: Maximale Erdüberdeckung von 1,0 m über Rohrscheitel, LM 1 auf GOK

3.2.1 Verformungsnachweis

Aus Abbildung 12 ergibt sich infolge der Gebrauchslast die maximale horizontale Rohrdeformation zu

$$\Delta d_h = 10,23 \times 2 = 20,46 \text{ mm} \quad \Delta d_h = 0,98 \% < \text{zul } \Delta d = 6,0 \%$$

Aus Abbildung 13 ergibt sich infolge der Gebrauchslast die maximale vertikale Rohrdeformation zu

$$\Delta d_v = 43,227 + 6,595 = 49,82 \text{ mm} \quad \Delta d_v = 2,39 \% < \text{zul } \Delta d = 6,0 \%$$

3.2.2 Spannungsnachweis

Die maximale Hauptzugspannung infolge Bemessungslast ergibt sich gemäß Abbildung 10 zu

$$\max \sigma_{Z,d} = 29,409 \text{ N/mm}^2 \quad \sigma_{Z,d} / \sigma_{BL,d} = 29,409/64 = 0,46 < 1,0$$

Die maximale Hauptdruckspannung infolge Gebrauchslast ergibt sich gemäß Abbildung 11 zu

$$\max \sigma_{D,d} = 30,444 \text{ N/mm}^2 \quad \sigma_{D,d} / \sigma_{BL,d} = 30,444/64 = 0,48 < 1,0$$

Die erforderlichen Sicherheiten gegen Spannungsversagen sind somit eingehalten.

3.2.3 Stabilitätsnachweis

Der Stabilitätsnachweis ist durch den Spannungsnachweis für die Bemessungslast und die Bemessungsmaterialparameter bereits nachgewiesen, wie in Ziffer 2 beschrieben ist.

3.3 LF 3: Wasseraußendruck von 3,2 m über Rohrsohle

3.3.1 Verformungsnachweis

Aus Abbildung 17 ergibt sich infolge der Gebrauchslast die maximale horizontale Rohrdeformation zu

$$\Delta d_h = 4,469 + 4,575 = 9,04 \text{ mm} \quad \Delta d_h = 0,43 \% < \text{zul } \Delta d = 3,0 \%$$

Aus Abbildung 18 ergibt sich infolge der Gebrauchslast die maximale vertikale Rohrdeformation zu

$$\Delta d_v = 22,047 - 2,0 = 20,05 \text{ mm} \quad \Delta d_v = 0,96 \% < \text{zul } \Delta d = 3,0 \%$$

3.3.2 Spannungsnachweis

Die maximale Hauptzugspannung infolge Bemessungslast ergibt sich gemäß Abbildung 15 zu

$$\max \sigma_{Z,d} = 13,331 \text{ N/mm}^2 \quad \sigma_{Z,d} / \sigma_{BL,d} = 13,331/64 = 0,21 < 1,0$$

Die maximale Hauptdruckspannung infolge Gebrauchslast ergibt sich gemäß Abbildung 16 zu

$$\max \sigma_{D,d} = 18,201 \text{ N/mm}^2 \quad \sigma_{D,d} / \sigma_{BL,d} = 18,201/64 = 0,28 < 1,0$$

Die erforderlichen Sicherheiten gegen Spannungsversagen sind somit eingehalten.

3.3.3 Stabilitätsnachweis

Der Stabilitätsnachweis ist durch den Spannungsnachweis für die Bemessungslast und die Bemessungsmaterialparameter bereits nachgewiesen, wie in Ziffer 2 beschrieben ist.

3.4 Interaktionsnachweis

3.4.1 Verformungsnachweis

Aus Abbildung 21 ergibt sich infolge der Gebrauchslast die maximale horizontale Rohrdeformation zu

$$\Delta d_h = 15,375 \times 2 = 30,75 \text{ mm} \quad \Delta d_h = 1,48 \% < \text{zul } \Delta d = 6,0 \%$$

Aus Abbildung 22 ergibt sich infolge der Gebrauchslast die maximale vertikale Rohrdeformation zu

$$\Delta d_v = 55,144 + 18,592 = 73,74 \text{ mm} \quad \Delta d_v = 3,54 \% < \text{zul } \Delta d = 6,0 \%$$

3.4.2 Spannungsnachweis

Die maximale Hauptzugspannung infolge Bemessungslast ergibt sich gemäß Abbildung 19 zu

$$\max \sigma_{Z,d} = 32,277 \text{ N/mm}^2 \quad \sigma_{Z,d} / \sigma_{BL,d} = 32,277/64 = 0,50 < 1,0$$

Die maximale Hauptdruckspannung infolge Gebrauchslast ergibt sich gemäß Abbildung 20 zu

$$\max \sigma_{D,d} = 36,496 \text{ N/mm}^2 \quad \sigma_{D,d} / \sigma_{BL,d} = 36,496/64 = 0,57 < 1,0$$

Die erforderlichen Sicherheiten gegen Spannungsversagen sind somit eingehalten.

3.4.3 Stabilitätsnachweis

Der Stabilitätsnachweis ist durch den Spannungsnachweis für die Bemessungslast und die Bemessungsmaterialparameter bereits nachgewiesen, wie in Ziffer 2 beschrieben ist.

3.5 LF 5a: Verdämmen (Bauzustand), Schritt 1 – Dämmerdruck von 0,6 m über Rohrsohle

3.5.1 Verformungsnachweis

Aus Abbildung 27 ergibt sich infolge der Gebrauchslast die maximale horizontale Rohrdeformation zu

$$\Delta d_h = 1,84 \times 2 = 3,68 \text{ mm} \quad \Delta d_h = 0,18 \% < \text{zul } \Delta d = 6,0 \%$$

Aus Abbildung 28 ergibt sich infolge der Gebrauchslast die maximale vertikale Rohrdeformation zu

$$\Delta d_v = 7,607 + 0,123 = 7,73 \text{ mm} \quad \Delta d_v = 0,37 \% < \text{zul } \Delta d = 6,0 \%$$

3.5.2 Spannungsnachweis

Die maximale Hauptzugspannung infolge Bemessungslast ergibt sich gemäß Abbildung 24 zu

$$\max \sigma_{Z,d} = 14,281 \text{ N/mm}^2 \quad \sigma_{Z,d} / \sigma_{BL,d} = 14,281/160 = 0,09 < 1,0$$

Die maximale Hauptdruckspannung infolge Gebrauchslast ergibt sich gemäß Abbildung 25 zu

$$\max \sigma_{D,d} = 21,102 \text{ N/mm}^2 \quad \sigma_{D,d} / \sigma_{BL,d} = 21,102/160 = 0,13 < 1,0$$

Die erforderlichen Sicherheiten gegen Spannungsversagen sind somit eingehalten.

3.5.3 Spannungsnachweis Längsspannungen

Die maximale Hauptzugspannung infolge Bemessungslast ergibt sich gemäß Abbildung 26 zu

$$\max \sigma_{Z,d} = 10,182 \text{ N/mm}^2 \quad \sigma_{Z,d} / \sigma_{BL,d} = 10,182/20 = 0,51 < 1,0$$

Die maximale Hauptdruckspannung infolge Gebrauchslast ergibt sich gemäß Abbildung 26 zu

$$\max \sigma_{D,d} = 10,659 \text{ N/mm}^2 \quad \sigma_{D,d} / \sigma_{BL,d} = 10,659/40 = 0,27 < 1,0$$

Die erforderlichen Sicherheiten gegen Spannungsversagen sind somit eingehalten.

3.5.4 Stabilitätsnachweis

Der Stabilitätsnachweis ist durch den Spannungsnachweis für die Bemessungslast und die Bemessungsmaterialparameter bereits nachgewiesen, wie in Ziffer 2 beschrieben ist.

3.6 LF 5b: Verdämmen (Bauzustand), Schritt 2 – Dämmerdruck von 0,6 m über Rohrsohle

3.6.1 Verformungsnachweis

Aus Abbildung 33 ergibt sich infolge der Gebrauchslast die maximale horizontale Rohrdeformation zu

$$\Delta d_h = 1,47 \times 2 = 2,94 \text{ mm} \quad \Delta d_h = 0,14 \% < \text{zul } \Delta d = 6,0 \%$$

Aus Abbildung 34 ergibt sich infolge der Gebrauchslast die maximale vertikale Rohrdeformation zu

$$\Delta d_v = 8,318 - 0,007 = 8,31 \text{ mm} \quad \Delta d_v = 0,40 \% < \text{zul } \Delta d = 6,0 \%$$

3.6.2 Spannungsnachweis

Die maximale Hauptzugspannung infolge Bemessungslast ergibt sich gemäß Abbildung 30 zu

$$\max \sigma_{Z,d} = 15,943 \text{ N/mm}^2 \quad \sigma_{Z,d} / \sigma_{BL,d} = 15,943/160 = 0,10 < 1,0$$

Die maximale Hauptdruckspannung infolge Gebrauchslast ergibt sich gemäß Abbildung 31 zu

$$\max \sigma_{D,d} = 26,737 \text{ N/mm}^2 \quad \sigma_{D,d} / \sigma_{BL,d} = 26,737/160 = 0,17 < 1,0$$

Die erforderlichen Sicherheiten gegen Spannungsversagen sind somit eingehalten.

3.6.3 Spannungsnachweis Längsspannungen

Die maximale Hauptzugspannung infolge Bemessungslast ergibt sich gemäß Abbildung 32 zu

$$\max \sigma_{Z,d} = 14,111 \text{ N/mm}^2 \quad \sigma_{Z,d} / \sigma_{BL,d} = 14,111/20 = 0,71 < 1,0$$

Die maximale Hauptdruckspannung infolge Gebrauchslast ergibt sich gemäß Abbildung 32 zu

$$\max \sigma_{D,d} = 14,283 \text{ N/mm}^2 \quad \sigma_{D,d} / \sigma_{BL,d} = 14,283/40 = 0,36 < 1,0$$

Die erforderlichen Sicherheiten gegen Spannungsversagen sind somit eingehalten.

3.6.4 Stabilitätsnachweis

Der Stabilitätsnachweis ist durch den Spannungsnachweis für die Bemessungslast und die Bemessungsmaterialparameter bereits nachgewiesen, wie in Ziffer 2 beschrieben ist.

3.7 LF 5c: Verdämmen (Bauzustand), Letzter Verdämmschritt – Dämmerdruck von 0,5 m über Rohrscheitel

3.7.1 Verformungsnachweis

Aus Abbildung 39 ergibt sich infolge der Gebrauchslast die maximale horizontale Rohrdeformation zu

$$\Delta d_h = 1,047 \times 2 = 2,09 \text{ mm} \quad \Delta d_h = 0,10 \% < \text{zul } \Delta d = 6,0 \%$$

Aus Abbildung 40 ergibt sich infolge der Gebrauchslast die maximale vertikale Rohrdeformation zu

$$\Delta d_v = 6,812 - 0,002 = 6,81 \text{ mm} \quad \Delta d_v = 0,33 \% < \text{zul } \Delta d = 6,0 \%$$

3.7.2 Spannungsnachweis

Die maximale Hauptzugspannung infolge Bemessungslast ergibt sich gemäß Abbildung 36 zu

$$\max \sigma_{Z,d} = 14,507 \text{ N/mm}^2 \quad \sigma_{Z,d} / \sigma_{BL,d} = 14,507/160 = 0,09 < 1,0$$

Die maximale Hauptdruckspannung infolge Gebrauchslast ergibt sich gemäß Abbildung 37 zu

$$\max \sigma_{D,d} = 23,089 \text{ N/mm}^2 \quad \sigma_{D,d} / \sigma_{BL,d} = 23,089/160 = 0,14 < 1,0$$

Die erforderlichen Sicherheiten gegen Spannungsversagen sind somit eingehalten.

3.7.3 Spannungsnachweis Längsspannungen

Die maximale Hauptzugspannung infolge Bemessungslast ergibt sich gemäß Abbildung 38 zu

$$\max \sigma_{Z,d} = 14,507 \text{ N/mm}^2 \quad \sigma_{Z,d} / \sigma_{BL,d} = 14,507/20 = 0,73 < 1,0$$

Die maximale Hauptdruckspannung infolge Gebrauchslast ergibt sich gemäß Abbildung 38 zu

$$\max \sigma_{D,d} = 14,271 \text{ N/mm}^2 \quad \sigma_{D,d} / \sigma_{BL,d} = 14,271/40 = 0,36 < 1,0$$

Die erforderlichen Sicherheiten gegen Spannungsversagen sind somit eingehalten.

3.7.4 Stabilitätsnachweis

Der Stabilitätsnachweis ist durch den Spannungsnachweis für die Bemessungslast und die Bemessungsmaterialparameter bereits nachgewiesen, wie in Ziffer 2 beschrieben ist.

3.8 Ermüdungsnachweis

3.8.1 Spannungsnachweis

Die maximale Hauptzugspannung infolge Bemessungslast ergibt sich gemäß Abbildung 41 zu

$$\max \sigma_{Z,d} = 51,276 \text{ N/mm}^2 \quad \sigma_{Z,d} / \sigma_{BL,d} = 51,276/67 = 0,76 < 1,0$$

Die maximale Hauptdruckspannung infolge Gebrauchslast ergibt sich gemäß Abbildung 42 zu

$$\max \sigma_{D,d} = 53,152 \text{ N/mm}^2 \quad \sigma_{D,d} / \sigma_{BL,d} = 53,152/67 = 0,79 < 1,0$$

Die erforderlichen Sicherheiten gegen Spannungsversagen sind somit eingehalten.

4 Zusammenfassung

In diesem Bericht wurden statische Berechnungen zur Beurteilung der Standsicherheit des GFK-Maulprofils beschrieben. Bei der Verwendung der Ergebnisse sind folgende Punkte zu beachten:

4.1 Anmerkungen

- 1 Die Annahmen im Bericht seitens des Materials können von unserer Seite nicht überprüft werden. Wir gehen davon aus, dass seitens des Herstellers die gleich bleibende und geeignete Qualität des Produktes gesichert ist.
- 2 Unsere Berechnungen gelten als Ganzes und sind in ihrer vollständigen Fassung zu verwenden. Auf Einzelergebnissen aufbauende Extrapolation bzw. Interpolation von Berechnungs- und Simulationsergebnissen liegen außerhalb unseres Leistungsumfanges und Verantwortungsbereiches.
- 3 Die Berechnungen beziehen sich auf die unter Ziffer 2.4 angegebenen Materialparameter. Die Grundlagen der Berechnung (Materialparameter, Belastungs- und Einbausituation etc.) sind für die Simulationsergebnisse verantwortlich. Bei signifikanten Abweichungen von den angenommenen Werten kann es zu Lastumlagerungen kommen, die ggf. eine erneute statische Untersuchung erforderlich machen.
- 4 Alle Berechnungen wurden an einer idealen Struktur durchgeführt. Wir gehen davon aus, dass einerseits der Hersteller ein qualitativ einwandfreies Produkt erstellt und andererseits der Bauunternehmer nochmals auf der Baustelle vor Einbau das Bauteil auf eventuelle Beschädigungen hin kontrolliert. Alle Maßnahmen und Arbeitsschritte, die zu Abweichungen von der Idealform des Bauteils und der Struktur führen, sind von allen Beteiligten zu vermeiden.
- 5 Die Klassifizierung des Altrohrs im Altrohrzustand (AZ) ist als zutreffend vorausgesetzt.
- 6 Die Lagesicherung von GFK-Rohren muss bauseits erfolgen, z.B. durch Ballastieren. Der Dämmerdruck ist möglichst symmetrisch zur vertikalen Symmetrieebene aufzubringen.
- 7 Im vorliegenden Bericht wurde nur die Tragfähigkeit der Konstruktion im statischen Zustand untersucht. Zusätzliche Lasten, die sich aus einer Beschleunigung des Systems ergeben können sind nicht Teil dieser statischen Berechnung.

4.2 Schlussfolgerung

Aufgrund der unter Ziffer 3 durchgeführten Nachweise wird bestätigt, dass das dargestellte GFK-Maulprofil in statischer Hinsicht dem Stand der Technik entspricht. Dabei gehen wir davon aus, dass die Anmerkungen aus Ziffer 4 berücksichtigt sind. Bei einer Änderung der Randbedingungen ist ein gesonderter statischer Nachweis für den Einzelfall zu führen.

5 Ergebnisse der FEM-Analyse

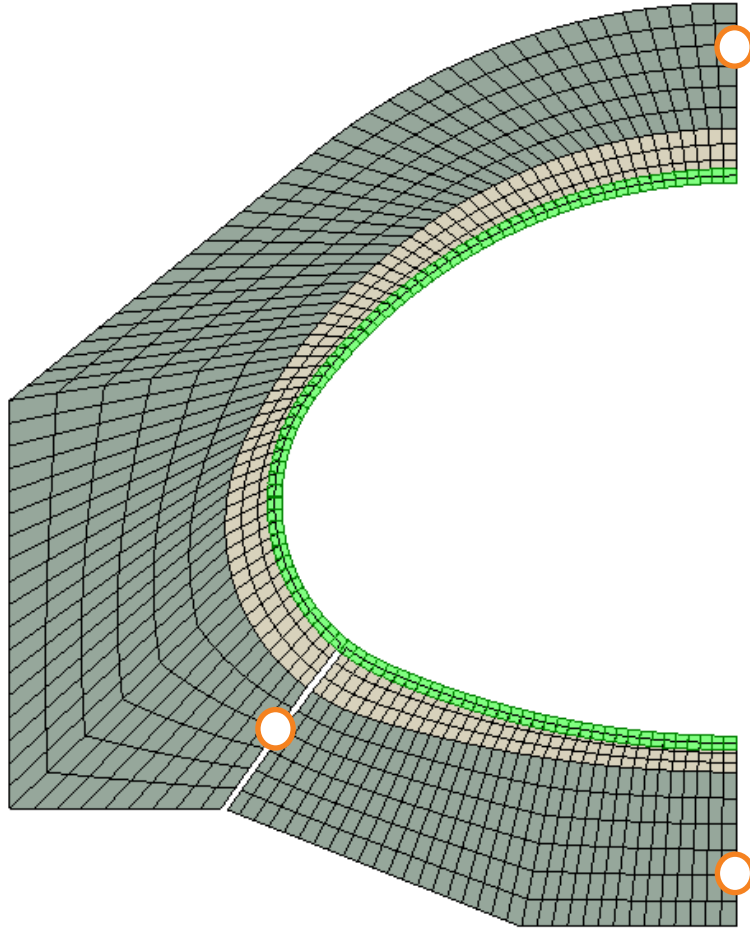


Abbildung 3: Diskretisiertes Rechenmodell – grau Altrohr, hellgrau Dämmer, grün GFK-Rohr



Gelenke (Längsrisse)

5.1 LF 1: Minimale Erdüberdeckung von 0,5 m über Rohrscheitel, LM 1 auf GOK

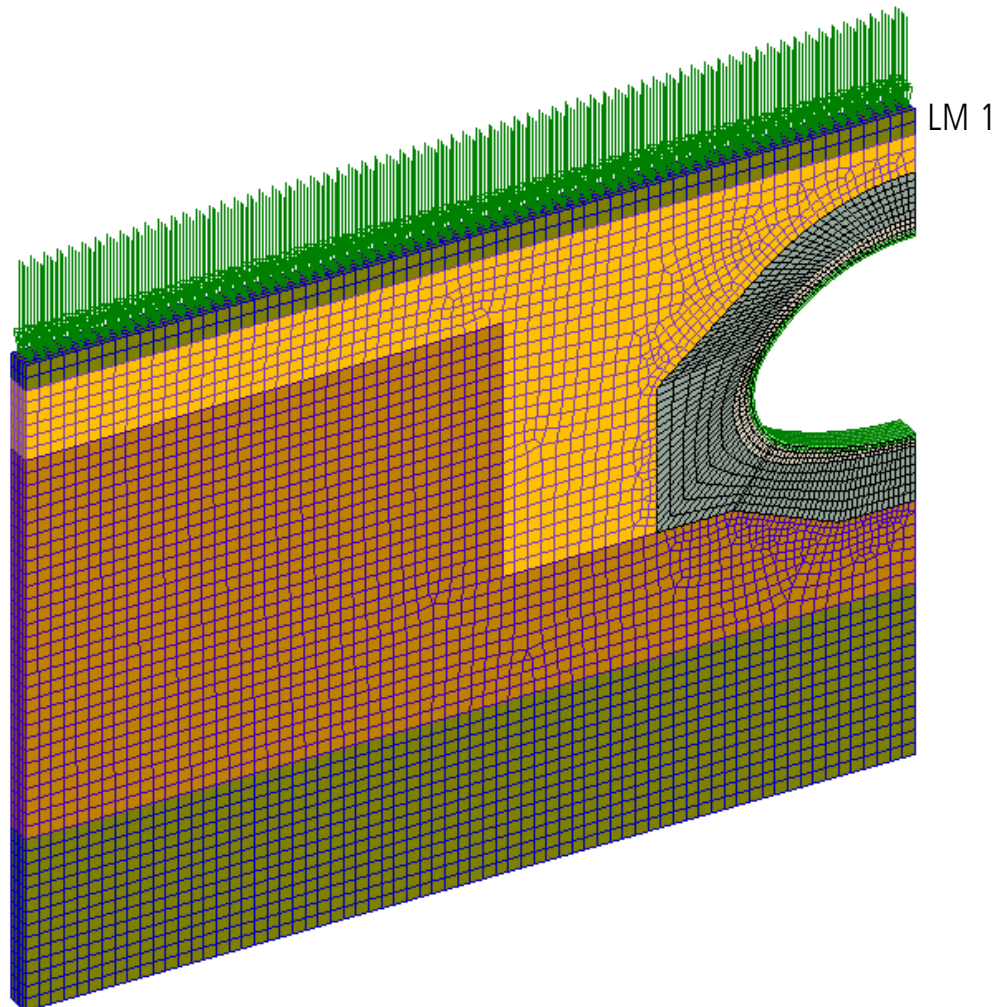


Abbildung 4: Diskretisiertes Rechenmodell

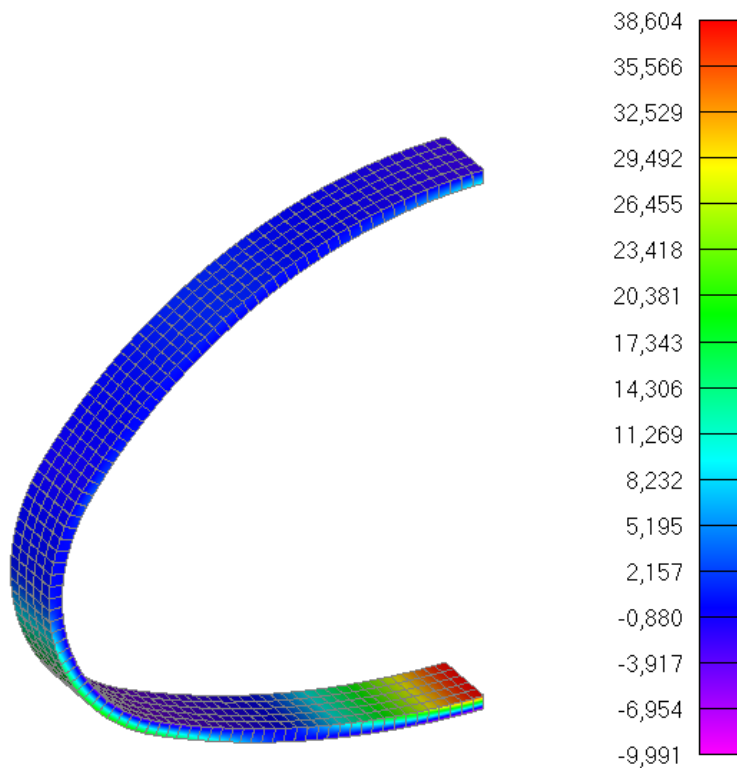


Abbildung 5: Maximale Hauptspannung [N/mm²] mit $\nu_M = 1,0$ und $\nu_E = 1,35$

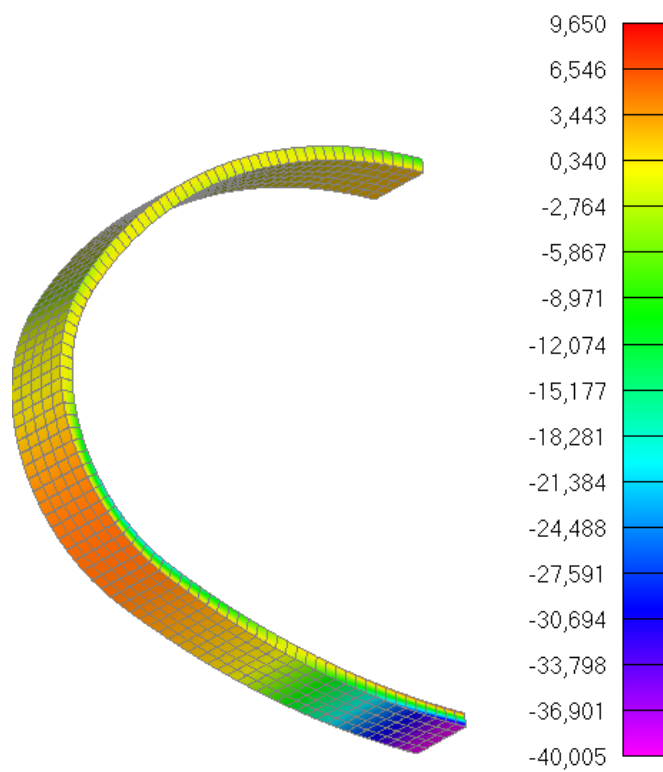


Abbildung 6: Minimale Hauptspannung [N/mm²] mit $\nu_M = 1,0$ und $\nu_E = 1,35$

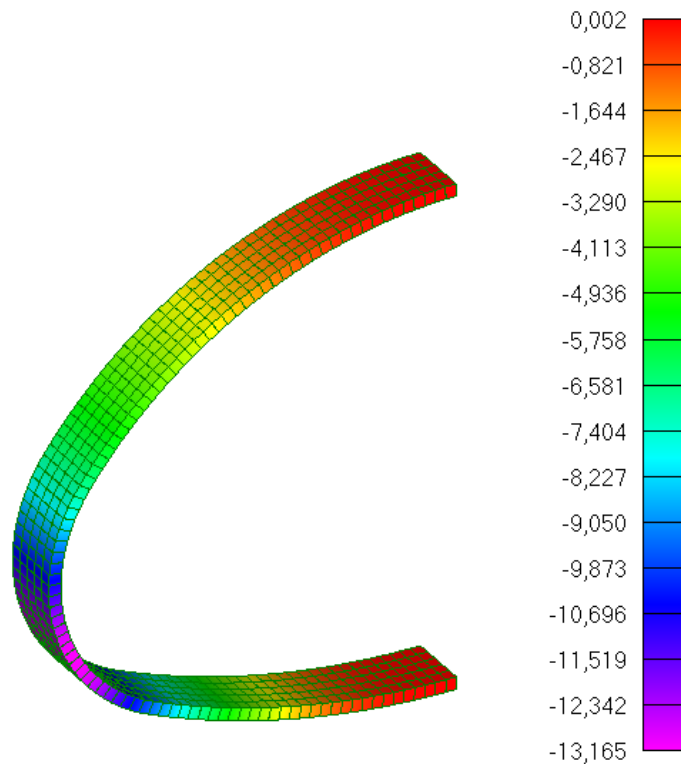


Abbildung 7: Horizontale Rohrdeformation [mm] mit $\nu_M = 1,0$ und $\nu_E = 1,0$

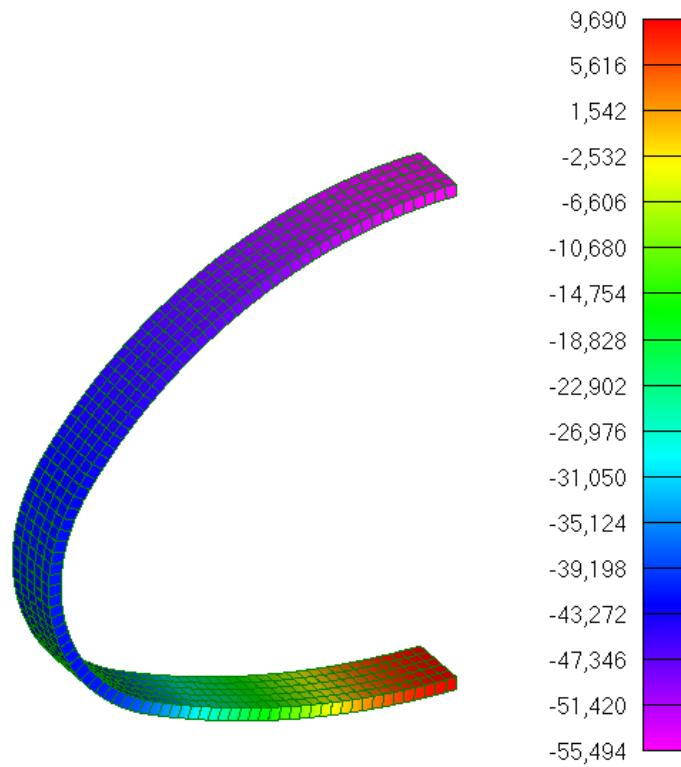


Abbildung 8: Vertikale Rohrdeformation [mm] mit $\nu_M = 1,0$ und $\nu_E = 1,0$

5.2 LF 2: Maximale Erdüberdeckung von 1,0 m über Rohrscheitel, LM 1 auf GOK

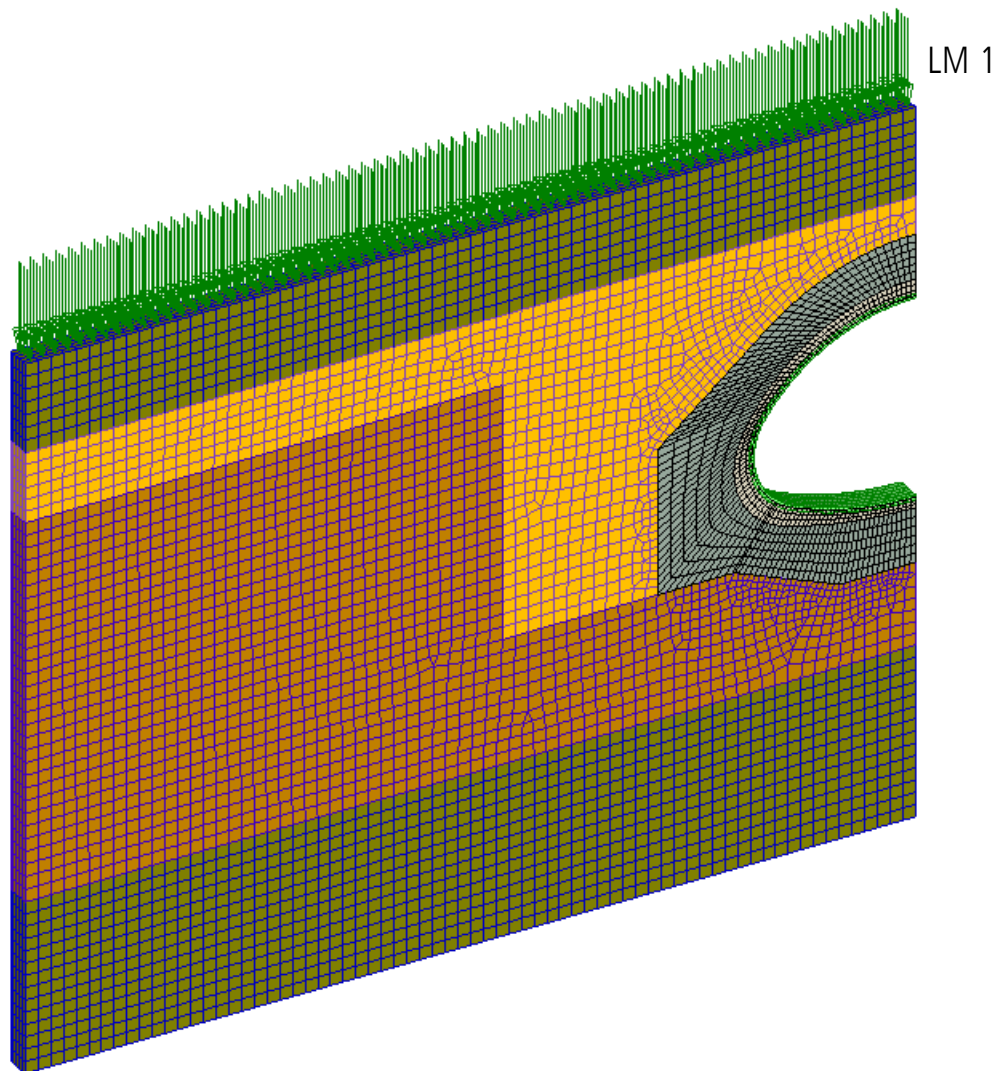


Abbildung 9: Diskretisiertes Rechenmodell

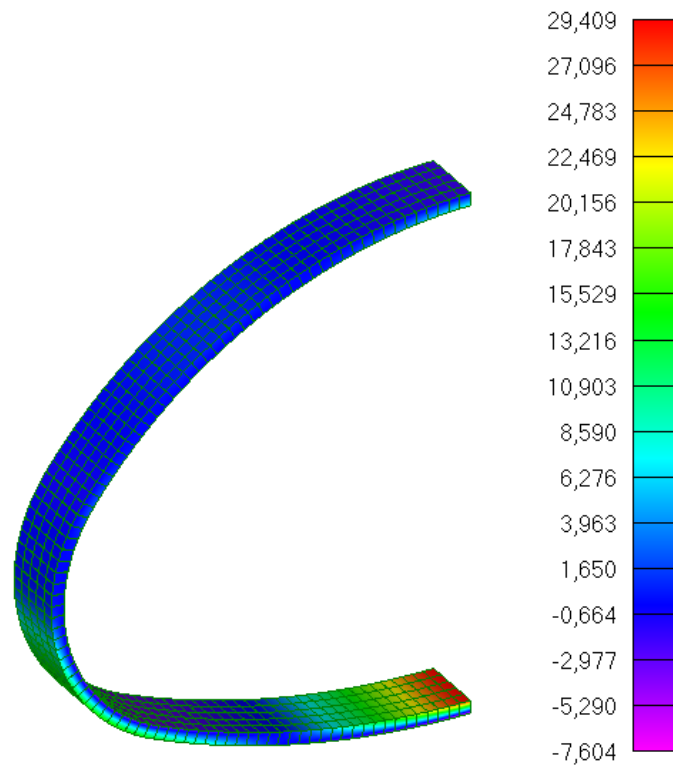


Abbildung 10: Maximale Hauptspannung [N/mm²] mit $\nu_M = 1,0$ und $\nu_E = 1,35$

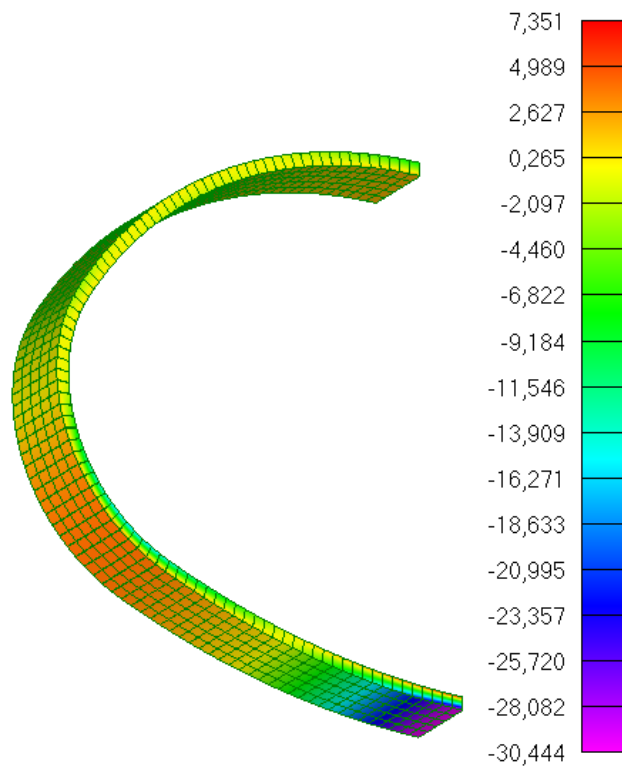


Abbildung 11: Minimale Hauptspannung [N/mm²] mit $\nu_M = 1,0$ und $\nu_E = 1,35$

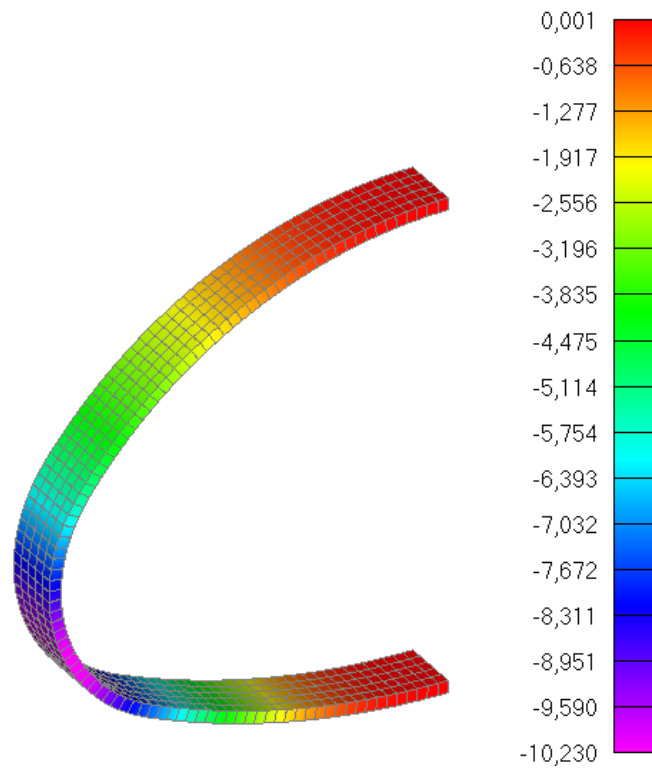


Abbildung 12: Horizontale Rohrdeformation [mm] mit $\nu_M = 1,0$ und $\nu_E = 1,0$

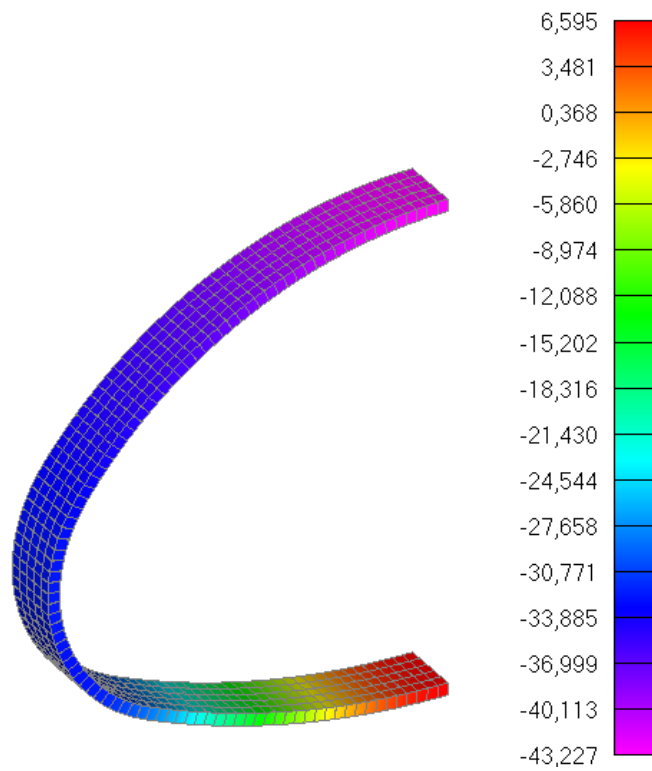


Abbildung 13: Vertikale Rohrdeformation [mm] mit $\nu_M = 1,0$ und $\nu_E = 1,0$

5.3 LF 3: Wasseraußendruck von 3,2 m über Rohrsohle

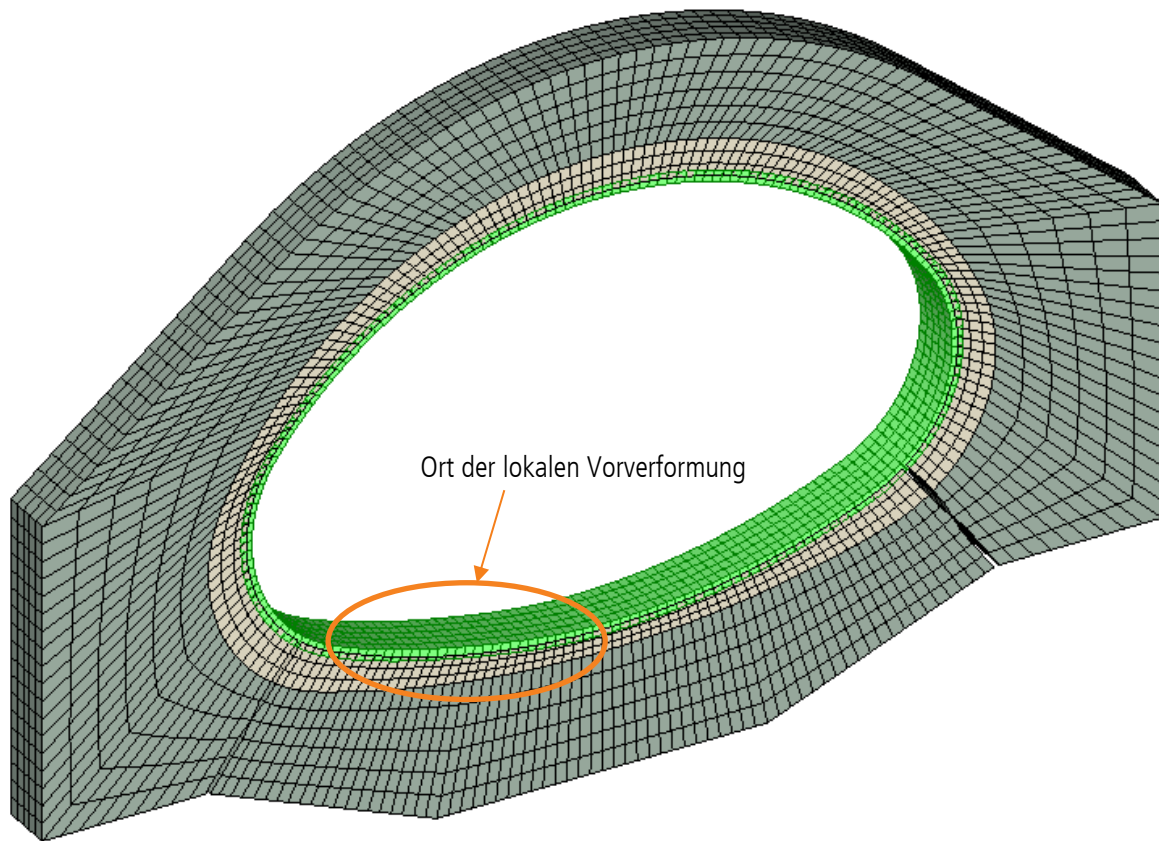


Abbildung 14: Diskretisiertes Rechenmodell

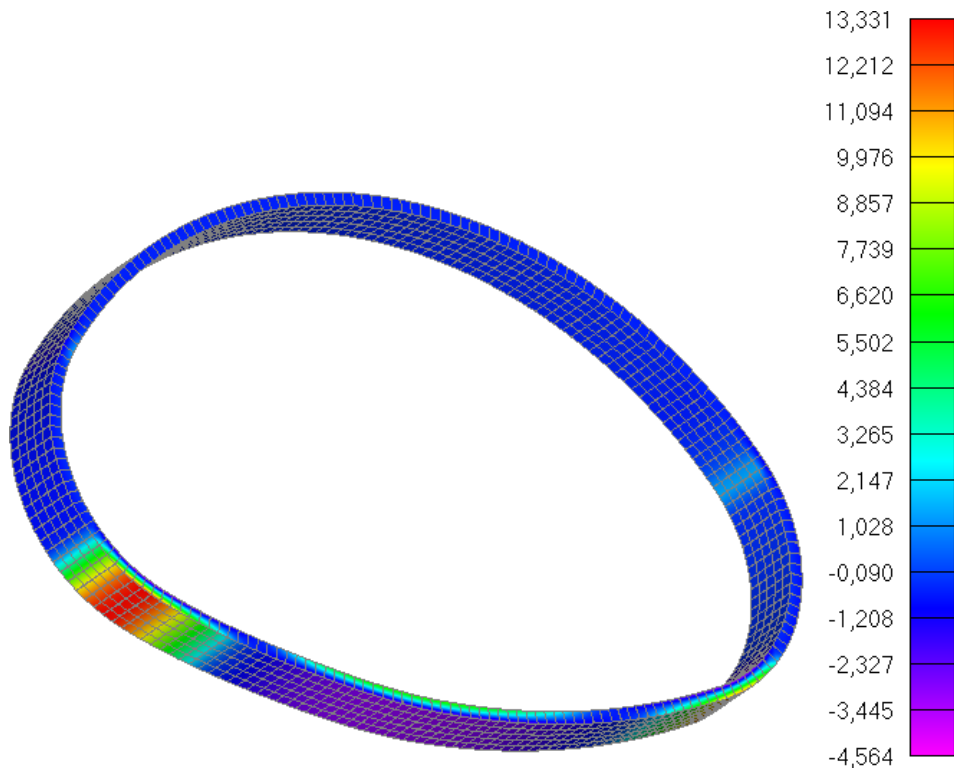


Abbildung 15: Maximale Hauptspannung [N/mm²] mit $\gamma_M = 1,0$ und $\gamma_E = 1,5$

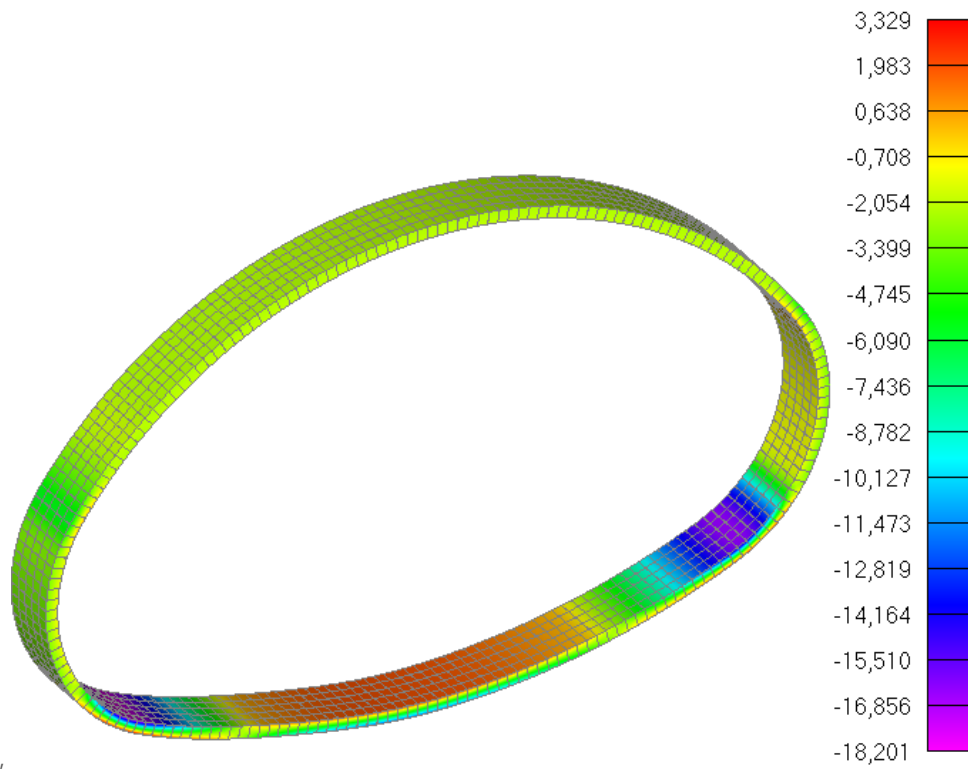


Abbildung 16: Minimale Hauptspannung [N/mm²] mit $\gamma_M = 1,0$ und $\gamma_E = 1,5$

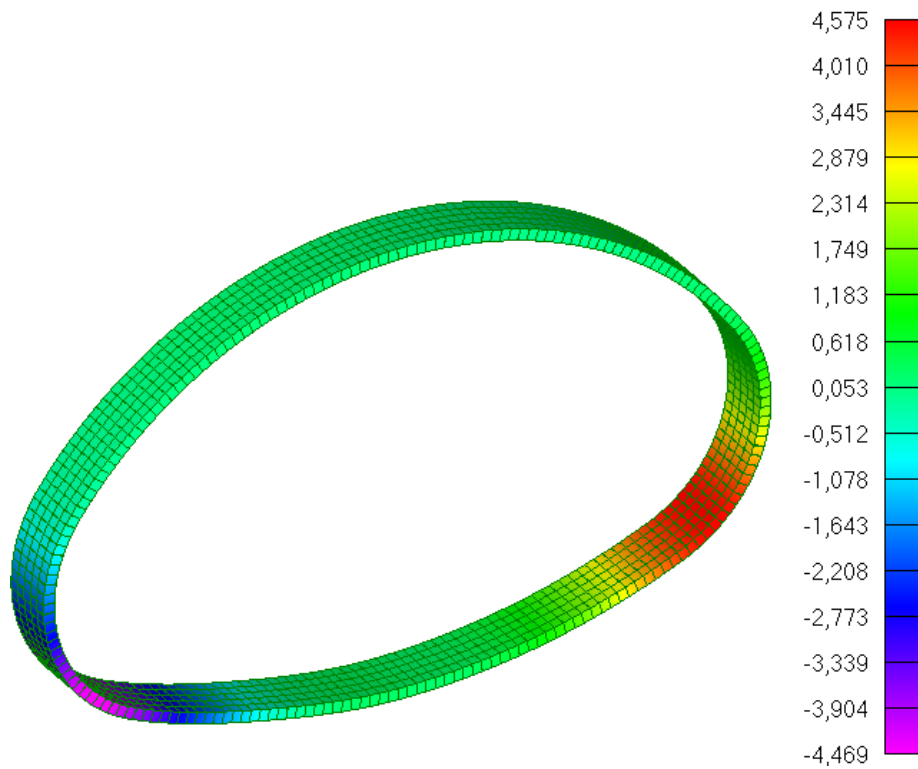


Abbildung 17: Horizontale Rohrdeformation [mm] mit $\nu_M = 1,0$ und $\nu_E = 1,0$

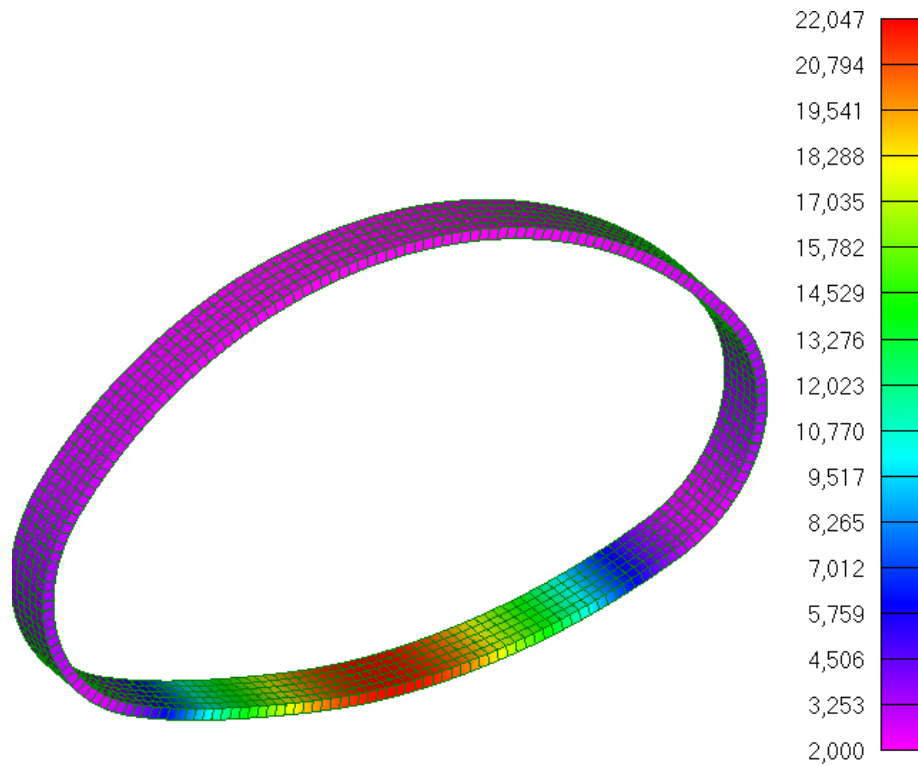


Abbildung 18: Vertikale Rohrdeformation [mm] mit $\nu_M = 1,0$ und $\nu_E = 1,0$

5.4 LF 4: Interaktionsnachweis

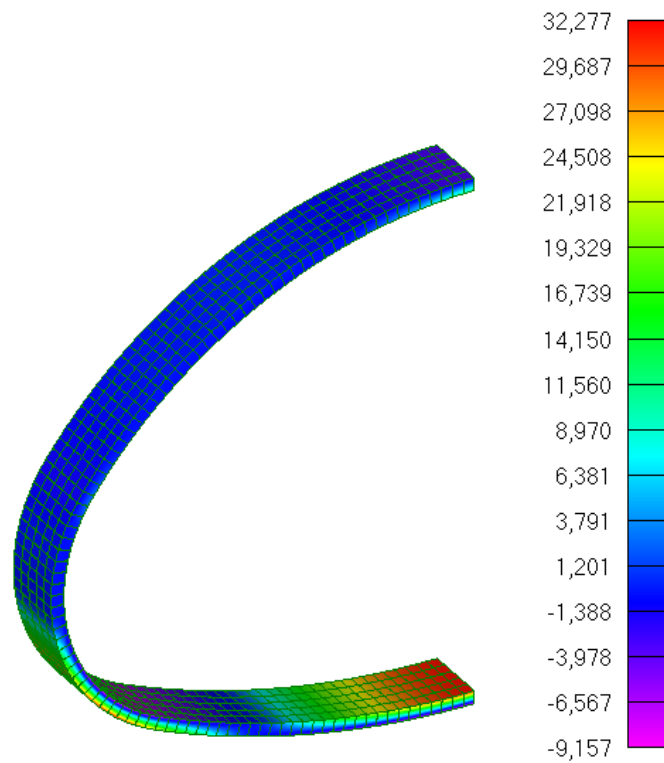


Abbildung 19: Maximale Hauptspannung [N/mm²] mit $\gamma_M = 1,0$ und $\gamma_{E,E} = 1,35$ und $\gamma_{E,W} = 1,5$

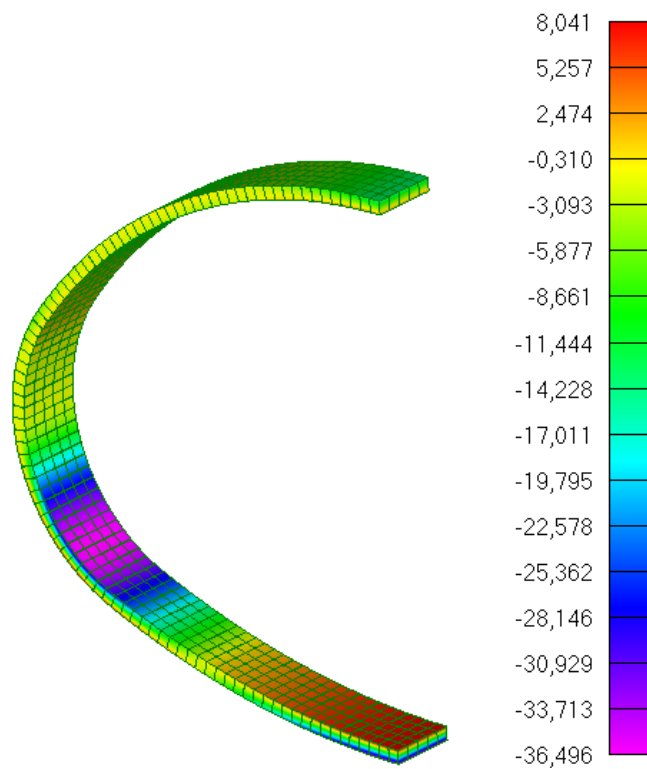


Abbildung 20: Minimale Hauptspannung [N/mm²] mit $\gamma_M = 1,0$ und $\gamma_{E,E} = 1,35$ und $\gamma_{E,W} = 1,5$

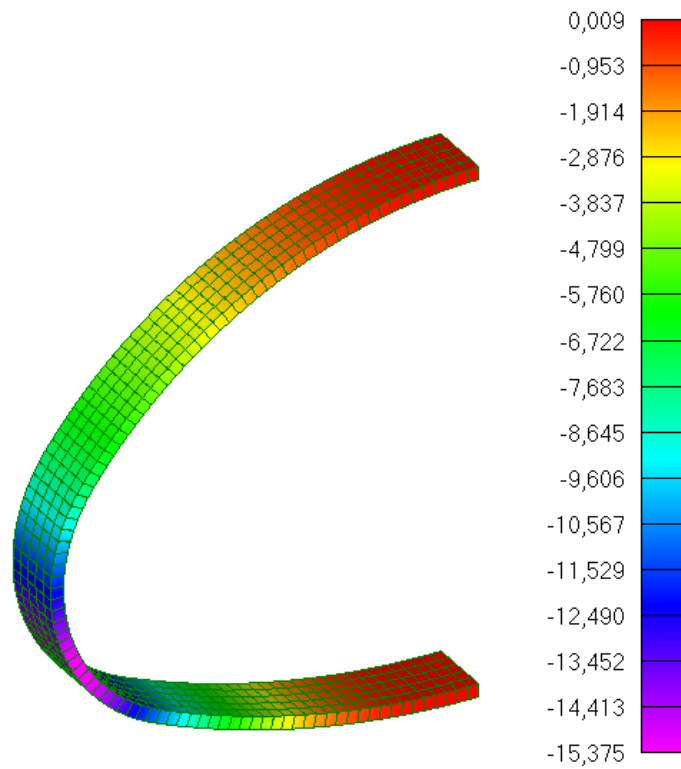


Abbildung 21: Horizontale Rohrdeformation [mm] mit $\gamma_M = 1,0$ und $\gamma_E = 1,0$

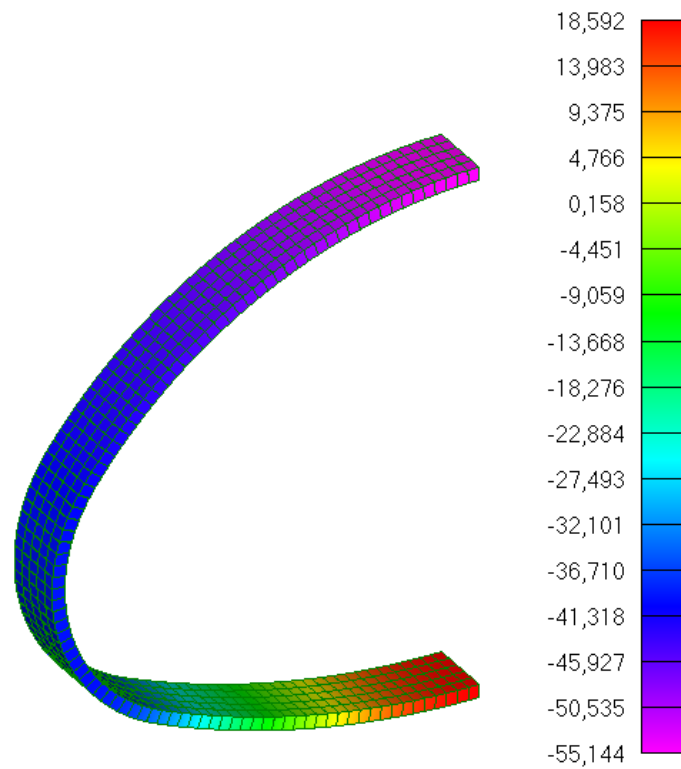


Abbildung 22: Vertikale Rohrdeformation [mm] mit $\gamma_M = 1,0$ und $\gamma_E = 1,0$

5.5 LF 5a: Schritt 1 - Dämmerhöhe ca. 0,6 m über GFK-Rohrsohle

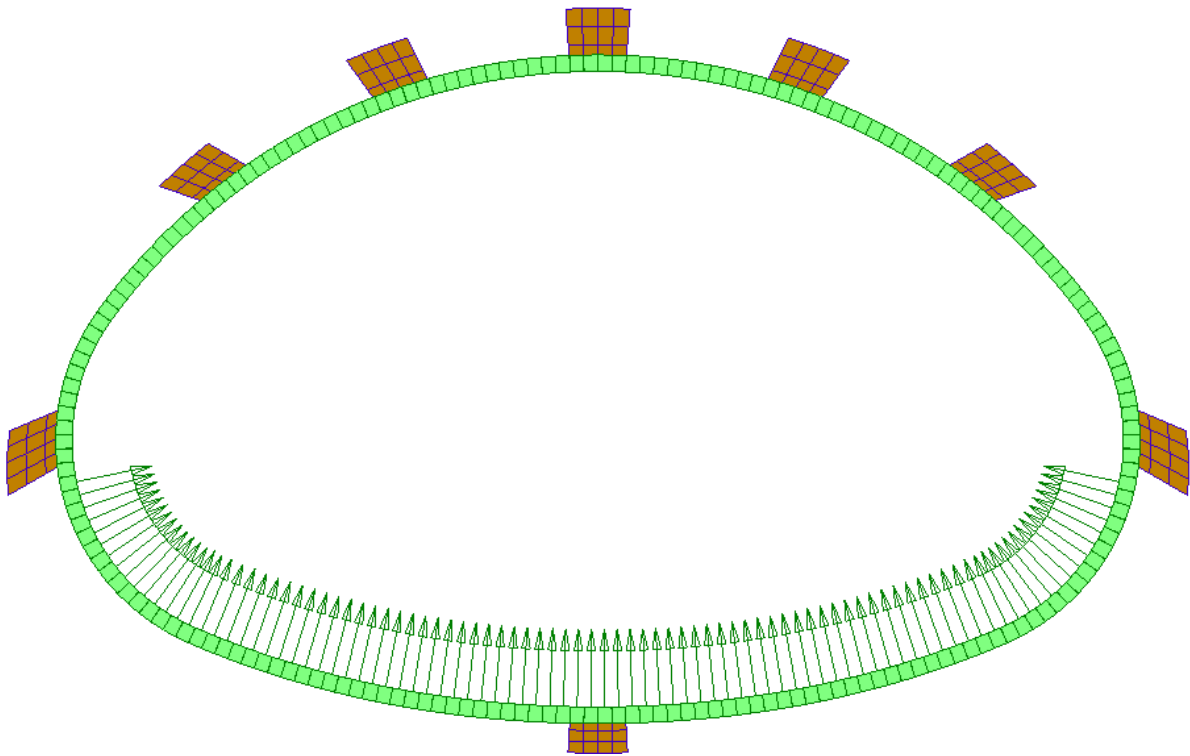


Abbildung 23: Diskretisiertes Rechenmodell – Querschnitt



Lokale Verkeilung gegen die Altrohre an den Rohrenden, Auflagerfläche ca. 20 x 20 cm

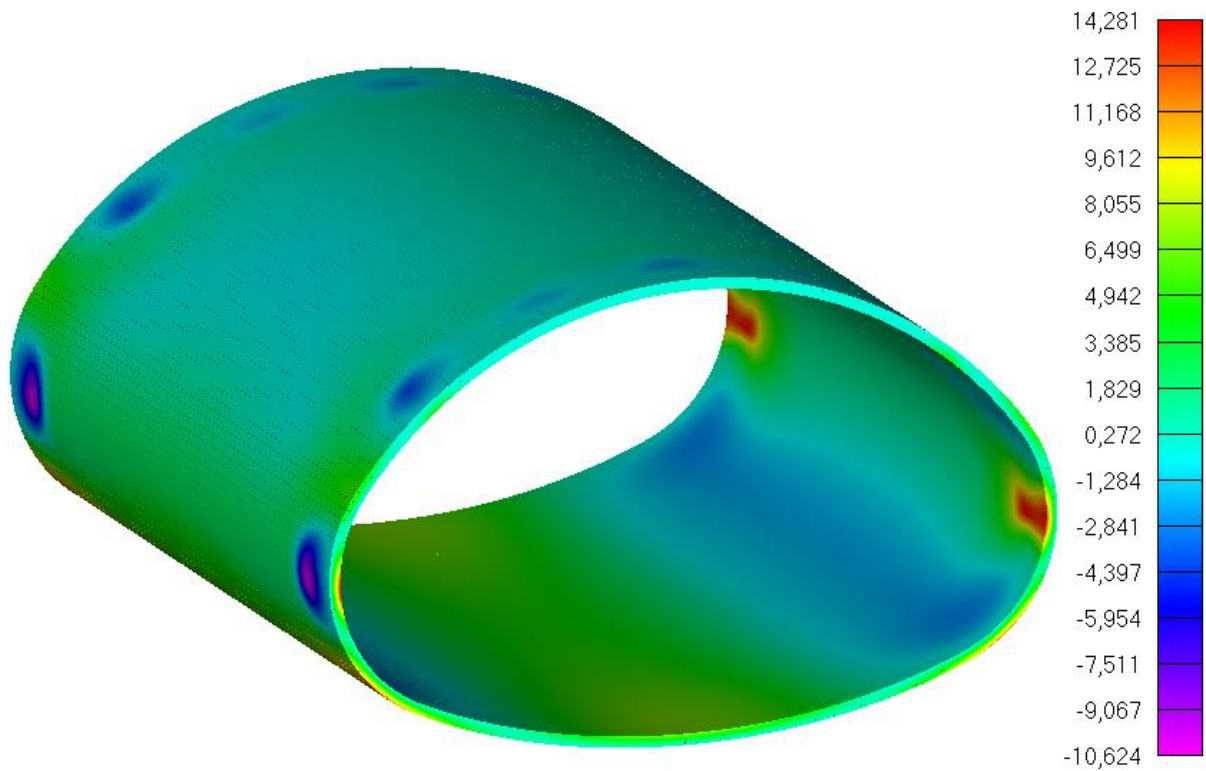


Abbildung 24: Maximale Hauptspannung [N/mm²] mit $\gamma_M = 1,25$ und $\gamma_E = 1,5$

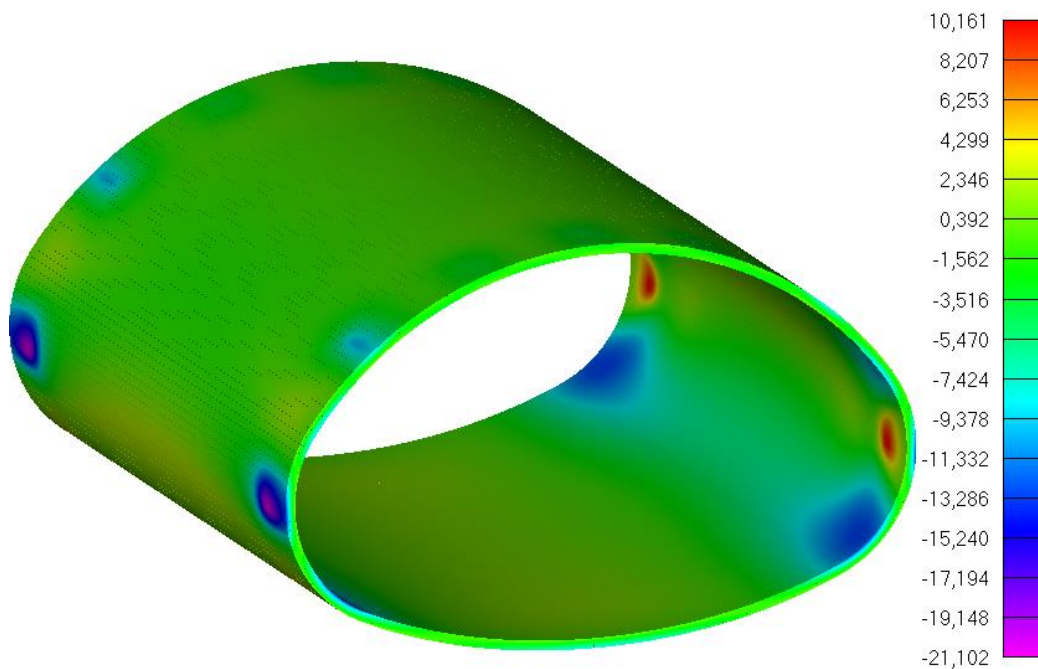


Abbildung 25: Minimale Hauptspannung [N/mm²] mit $\gamma_M = 1,25$ und $\gamma_E = 1,5$

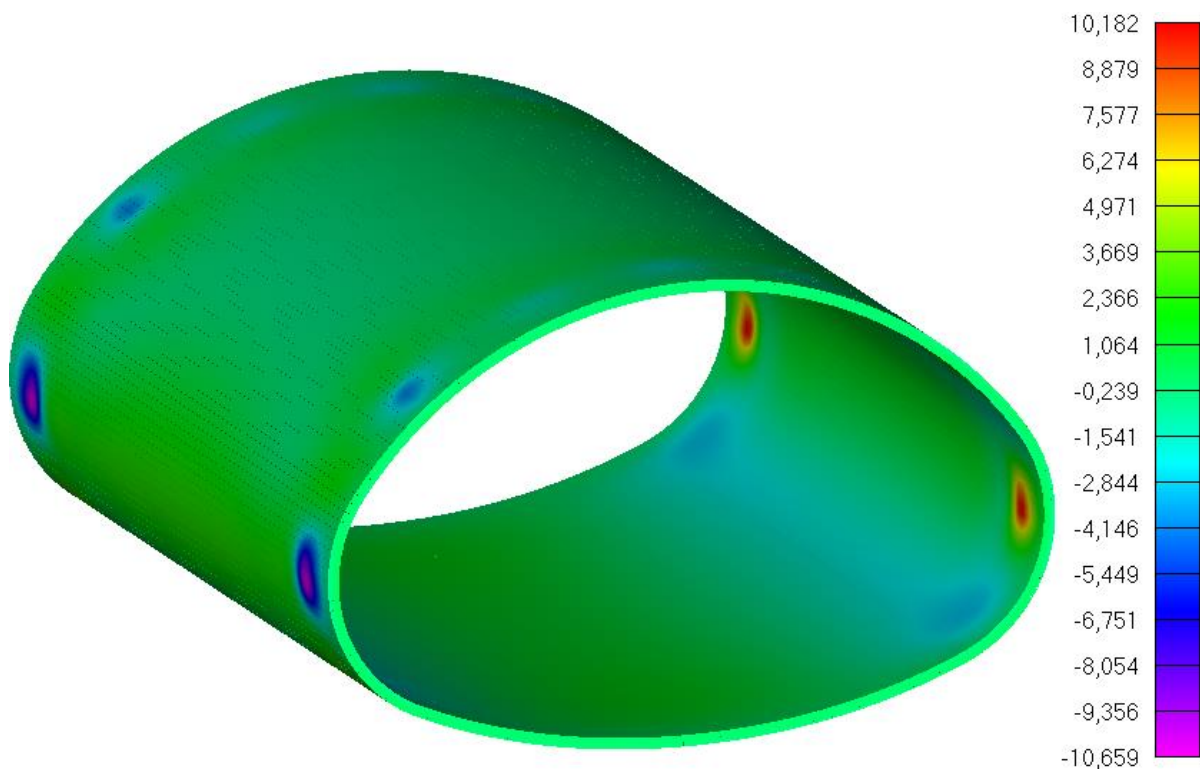


Abbildung 26: Maximale Längsspannung [N/mm²] mit $\nu_M = 1,25$ und $\nu_E = 1,5$

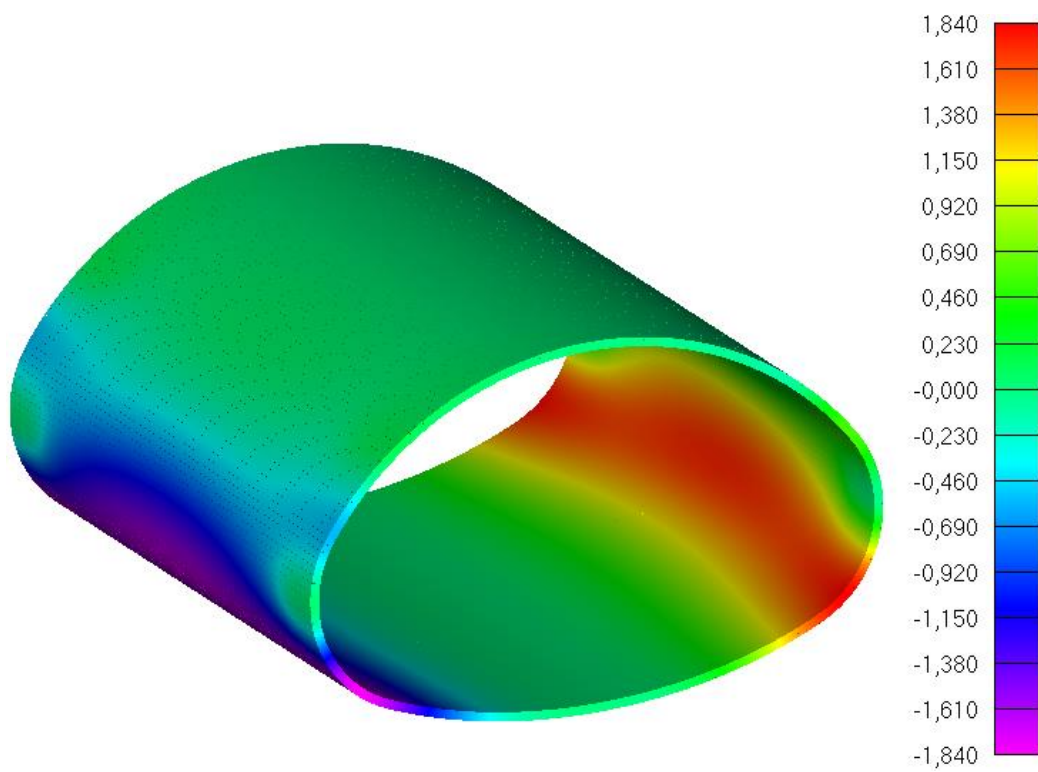


Abbildung 27: Horizontale Rohrdeformation mit $\nu_M = 1,0$ und $\nu_E = 1,0$

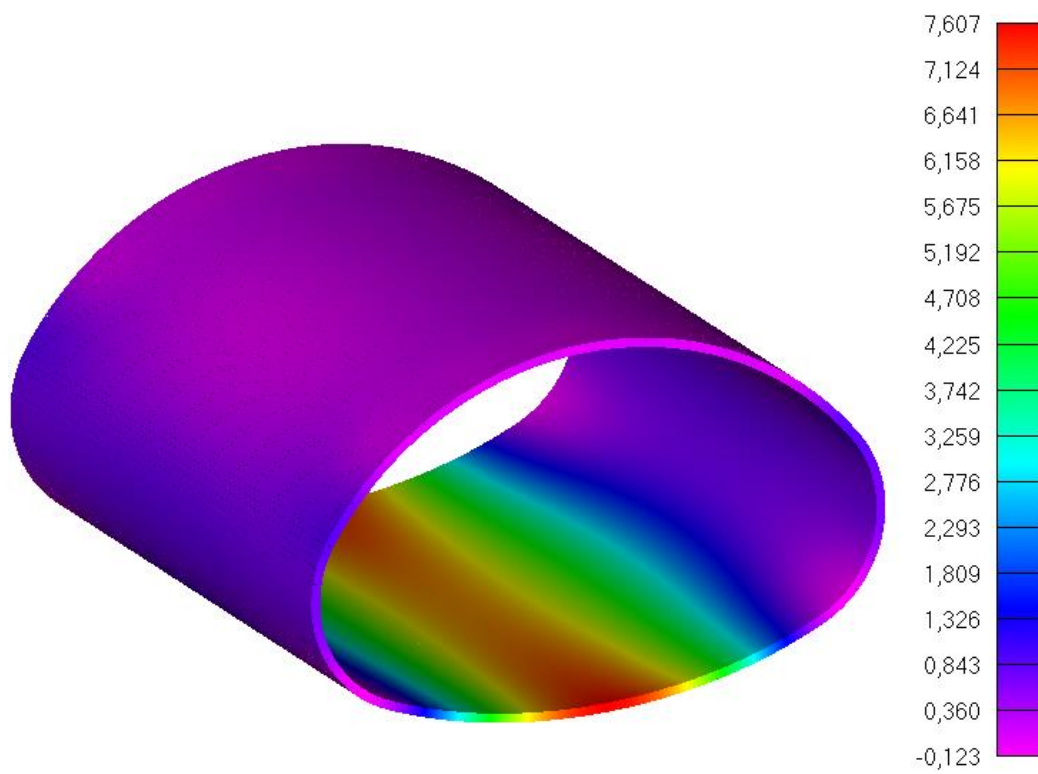


Abbildung 28: Vertikale Rohrdeformation mit $\nu_M = 1,0$ und $\nu_E = 1,0$

5.6 LF 5 b: Schritt 2 - Dämmerhöhe ca. 1,2 m über GFK-Rohrsohle

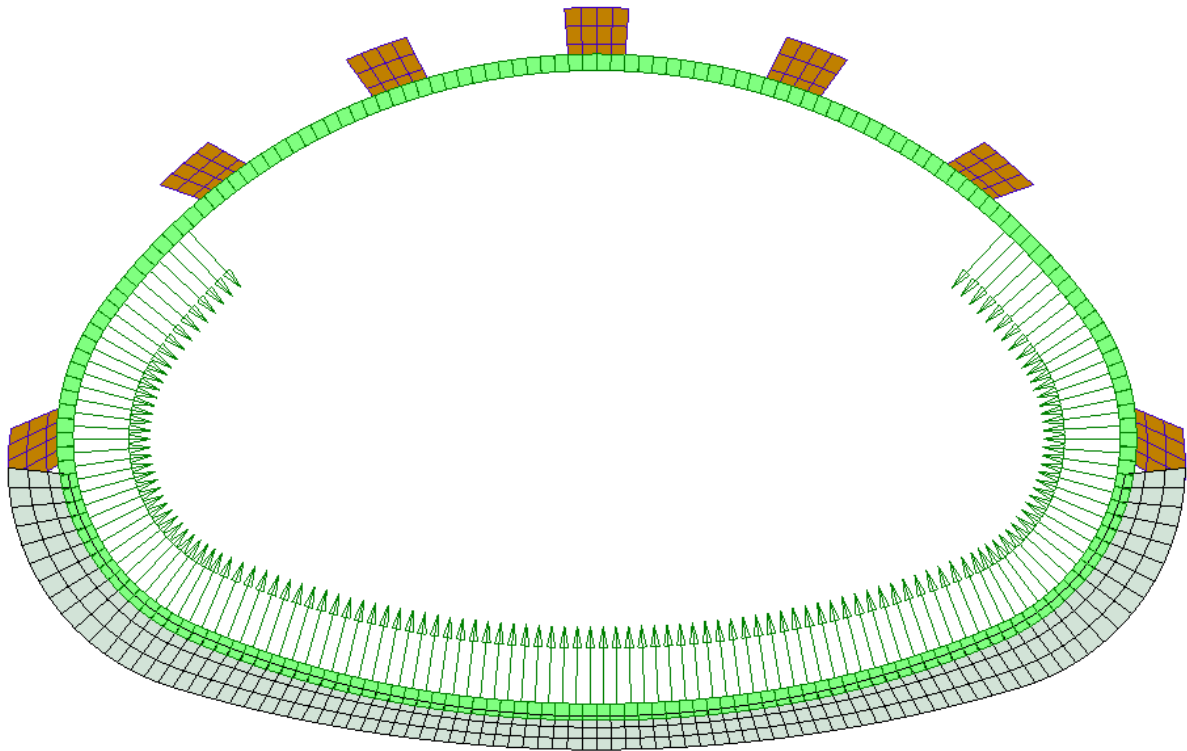
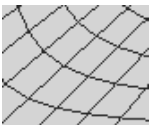


Abbildung 29: Diskretisiertes Rechenmodell – Querschnitt durch Verkeilungen



Lokale Verkeilung gegen die Altrohre an den Rohrenden, Auflagerfläche ca. 20 x 20 cm



Ausgehärteter Dämmer, Diskretisierung für das Rechenmodell

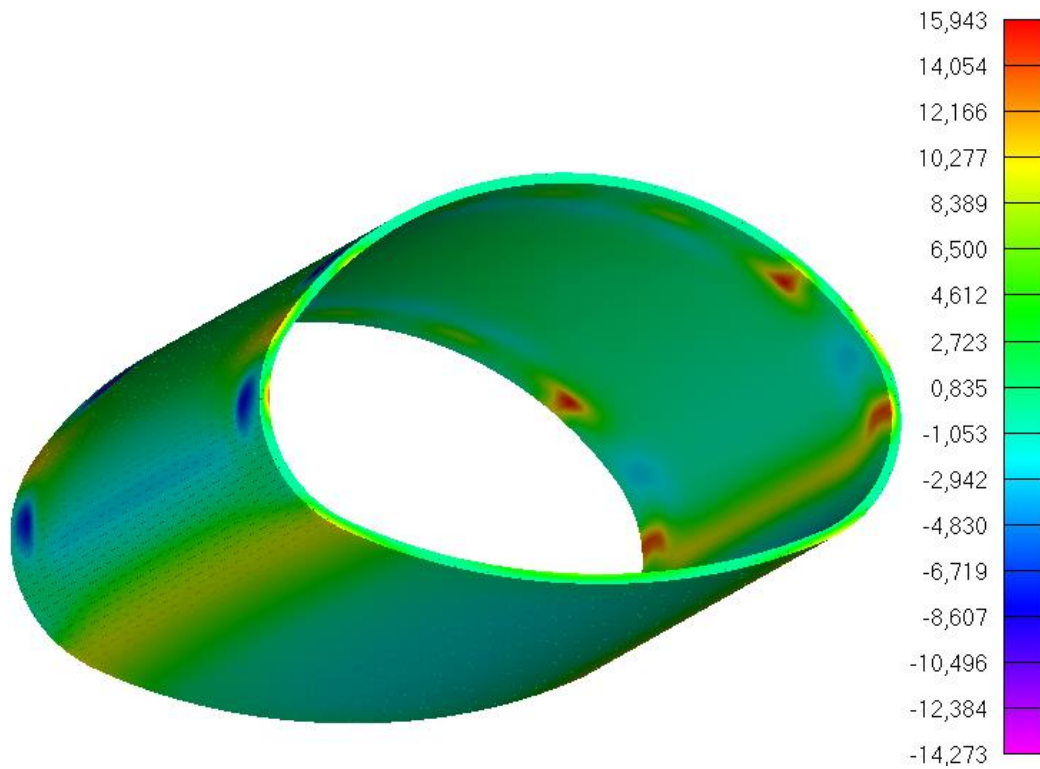


Abbildung 30: Maximale Hauptspannung [N/mm²] mit $\nu_M = 1,25$ und $\nu_E = 1,5$

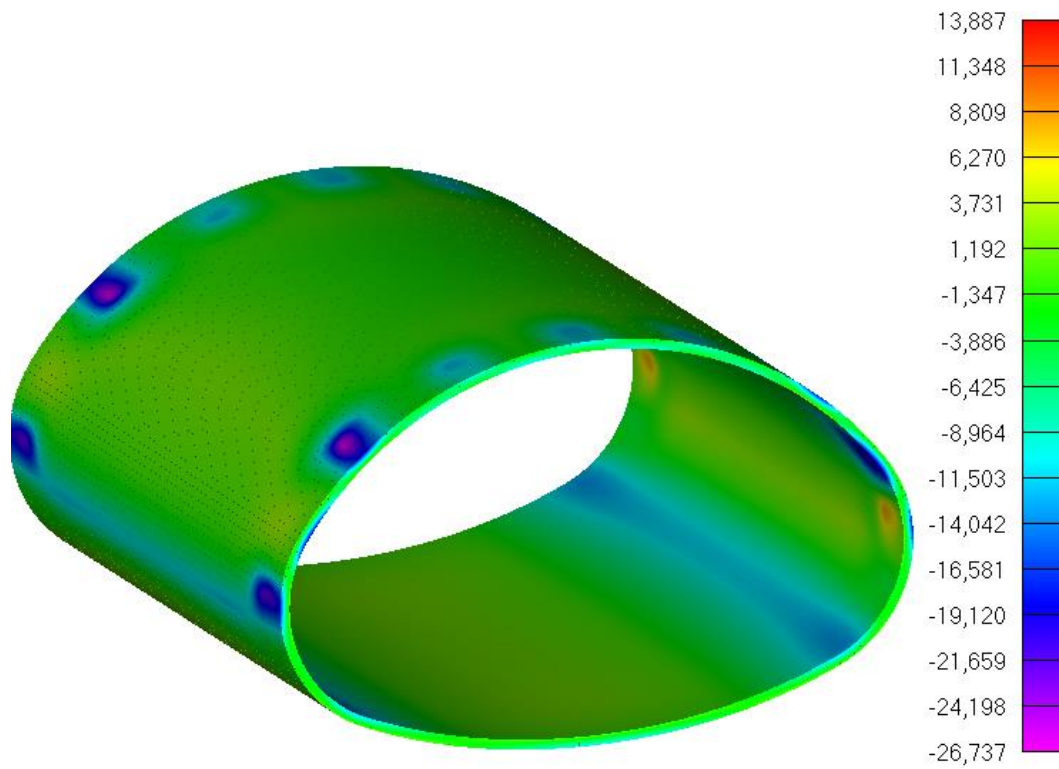


Abbildung 31: Minimale Hauptspannung [N/mm²] mit $\nu_M = 1,25$ und $\nu_E = 1,5$

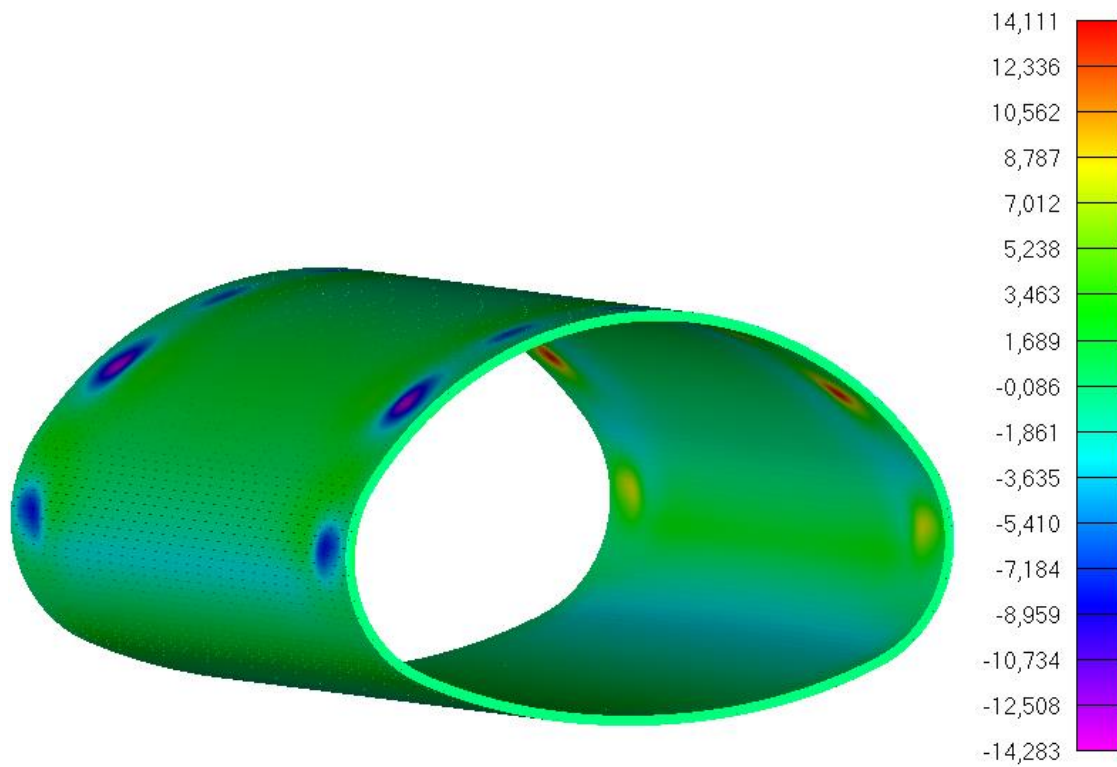


Abbildung 32: Längsspannung [N/mm²] mit $\nu_M = 1,25$ und $\nu_E = 1,5$

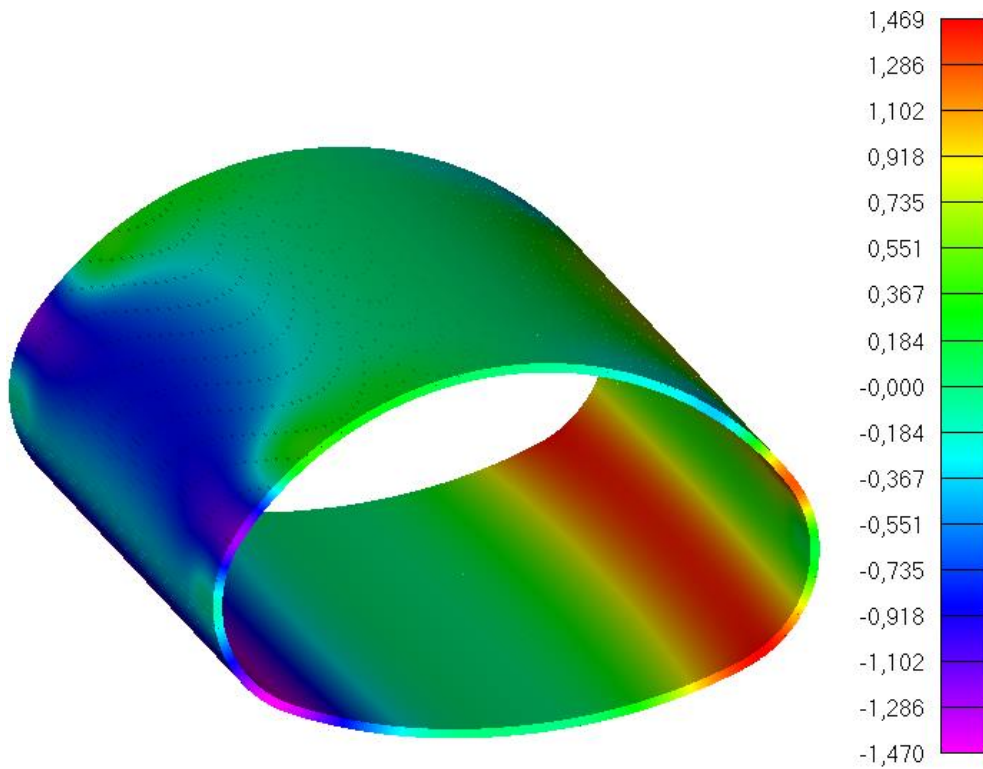


Abbildung 33: Maximale horizontale Rohrdeformation mit $\nu_M = 1,0$ und $\nu_E = 1,0$

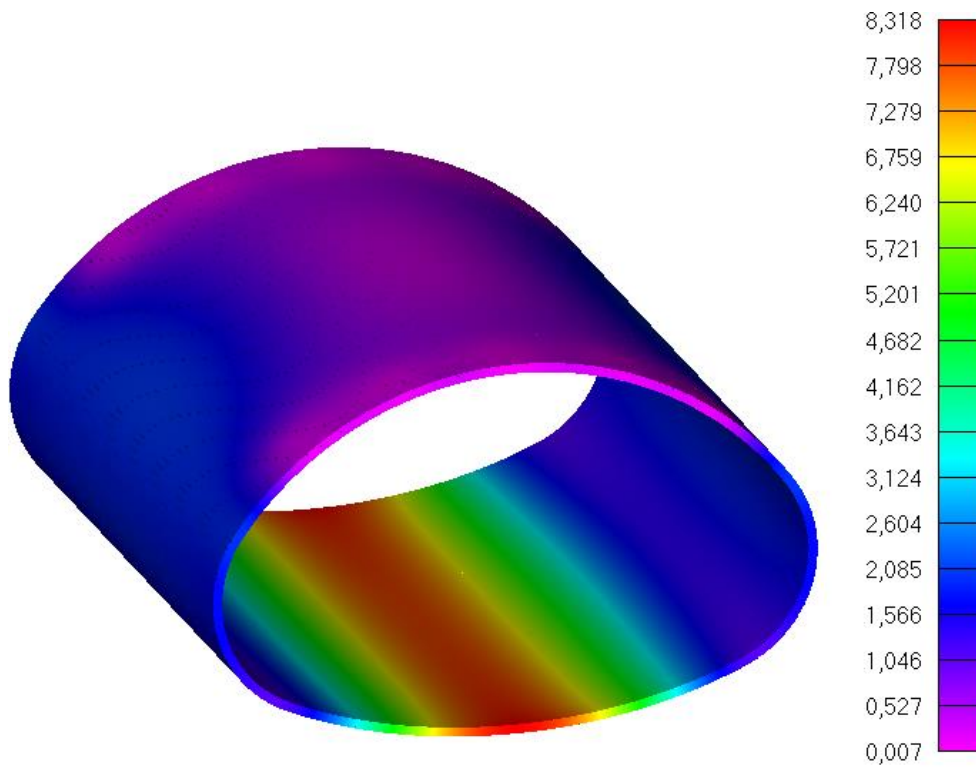


Abbildung 34: Maximale vertikale Rohrdeformation mit $\gamma_M = 1,0$ und $\gamma_E = 1,0$

5.7 LF 5c: Letzter Verdämmschritt - Dämmerhöhe ca. 0,5 m über GFK-Rohrscheitel

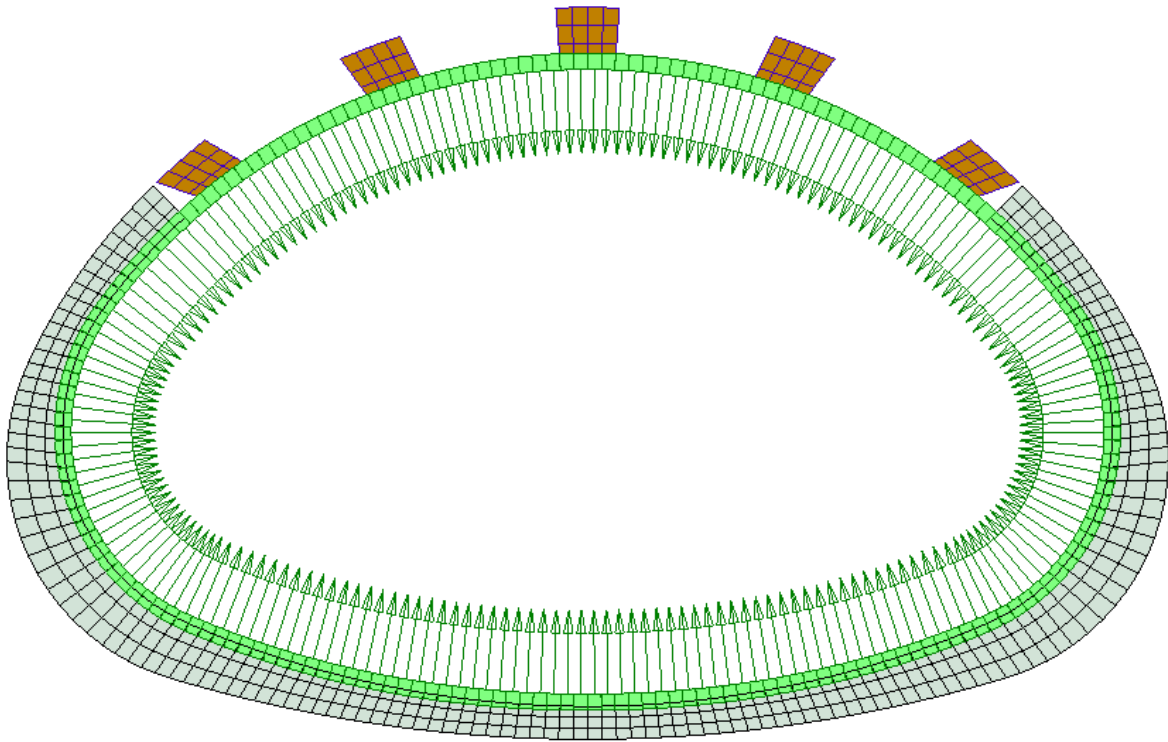


Abbildung 35: Diskretisiertes Rechenmodell

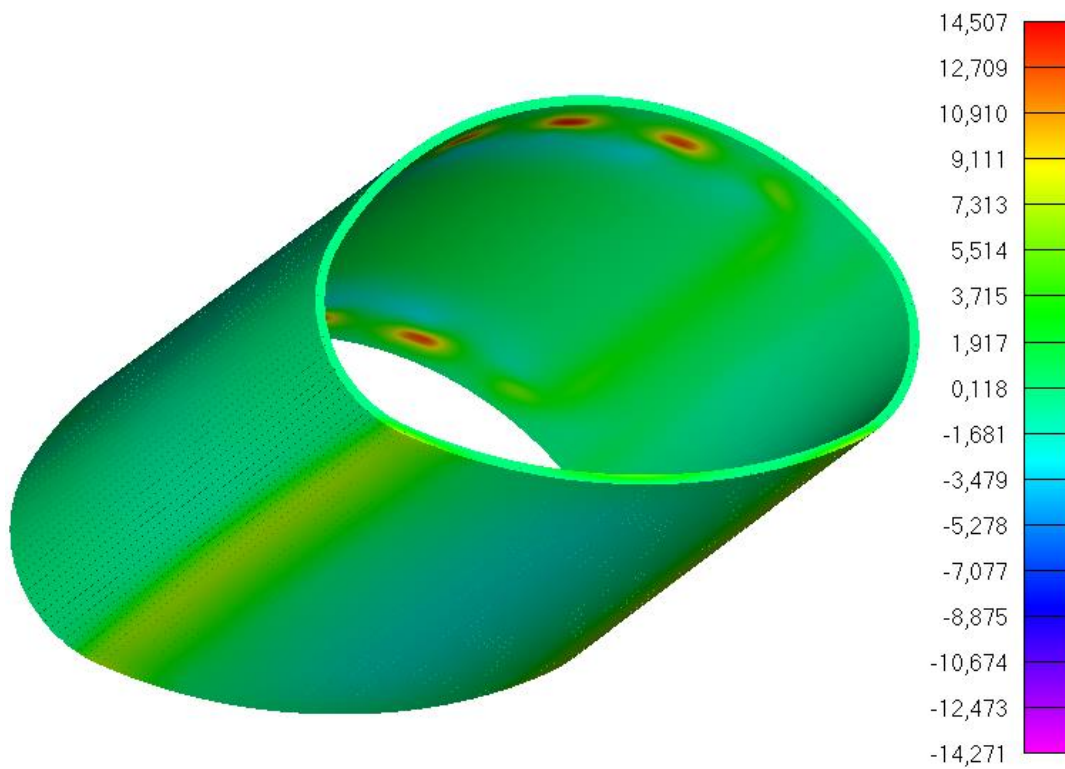


Abbildung 36: Maximale Hauptspannung [N/mm²] mit $\nu_M = 1,25$ und $\nu_E = 1,5$

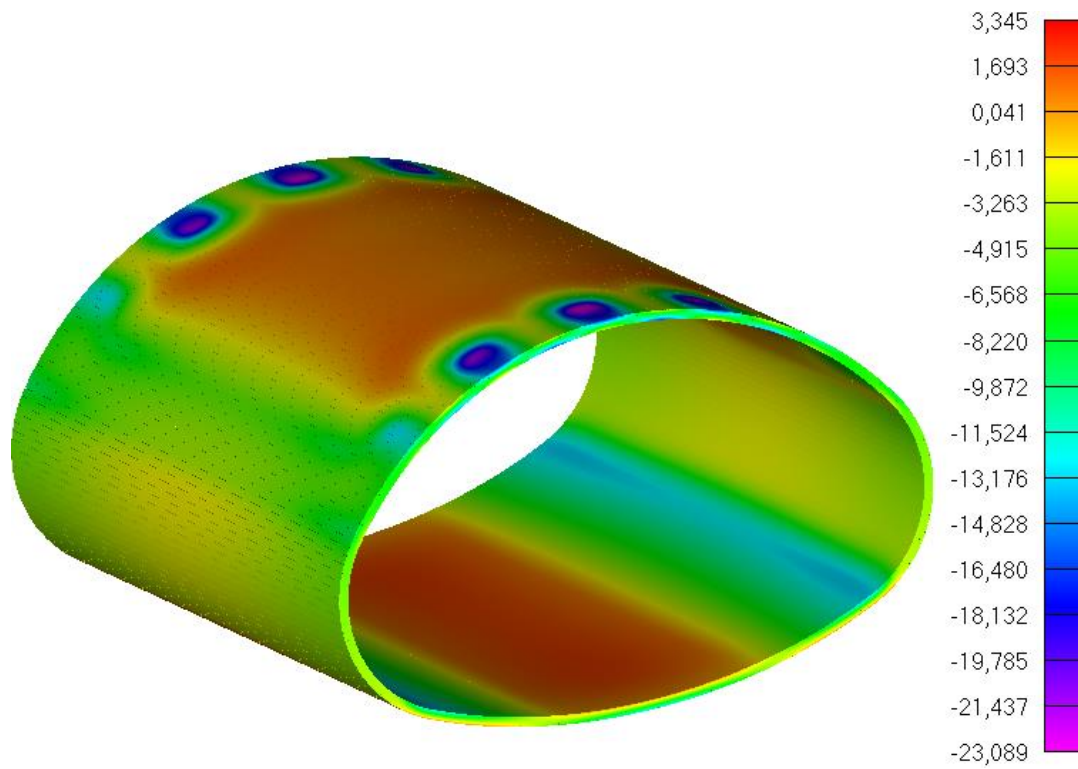


Abbildung 37: Minimale Hauptspannung [N/mm²] mit $\nu_M = 1,25$ und $\nu_E = 1,5$

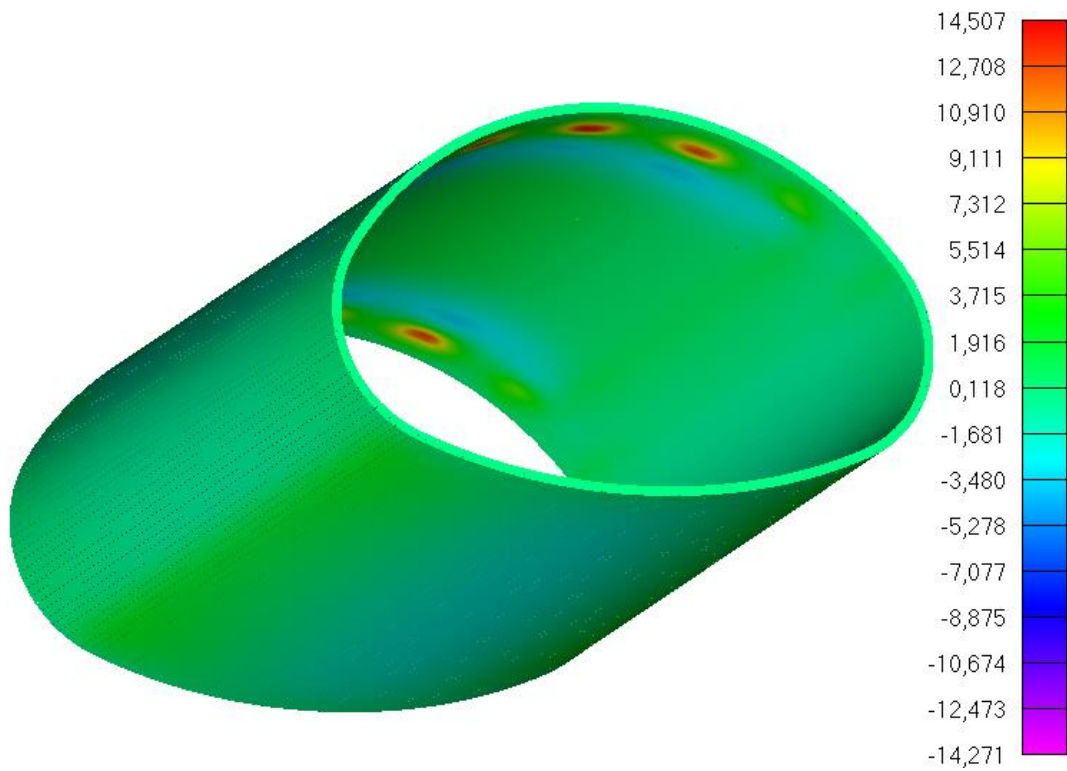


Abbildung 38: Längsspannung [N/mm²] mit $\gamma_M = 1,25$ und $\gamma_E = 1,5$

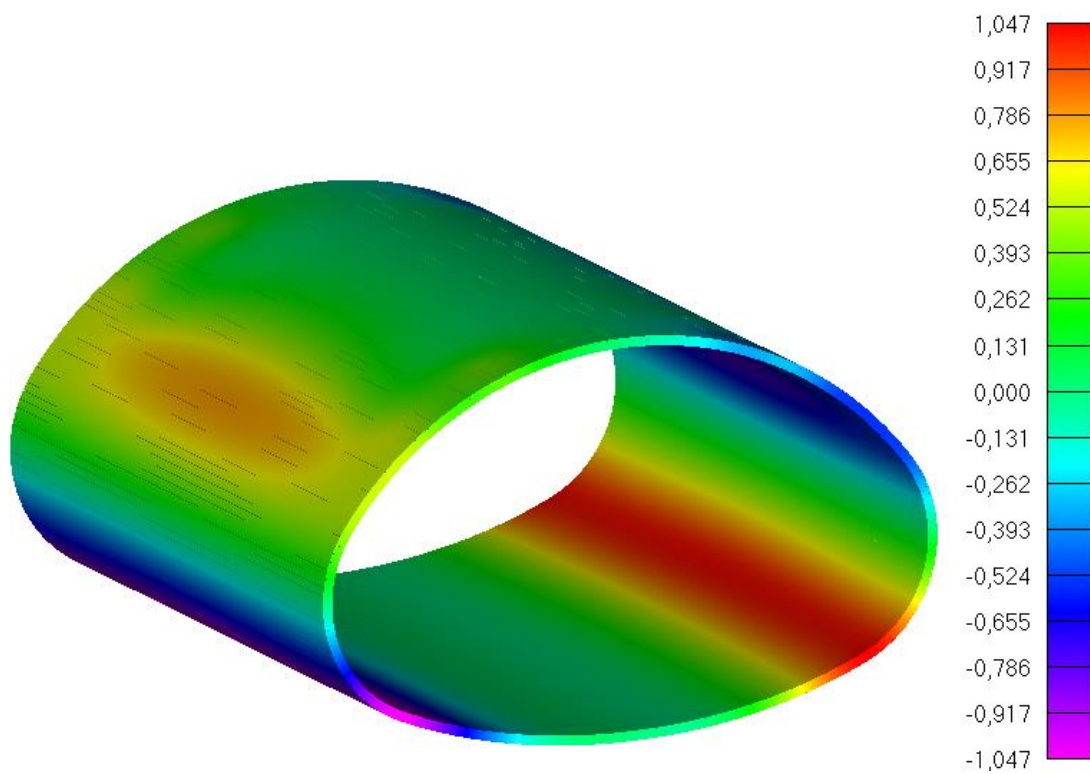


Abbildung 39: Maximale horizontale Rohrdeformation mit $\gamma_M = 1,0$ und $\gamma_E = 1,0$

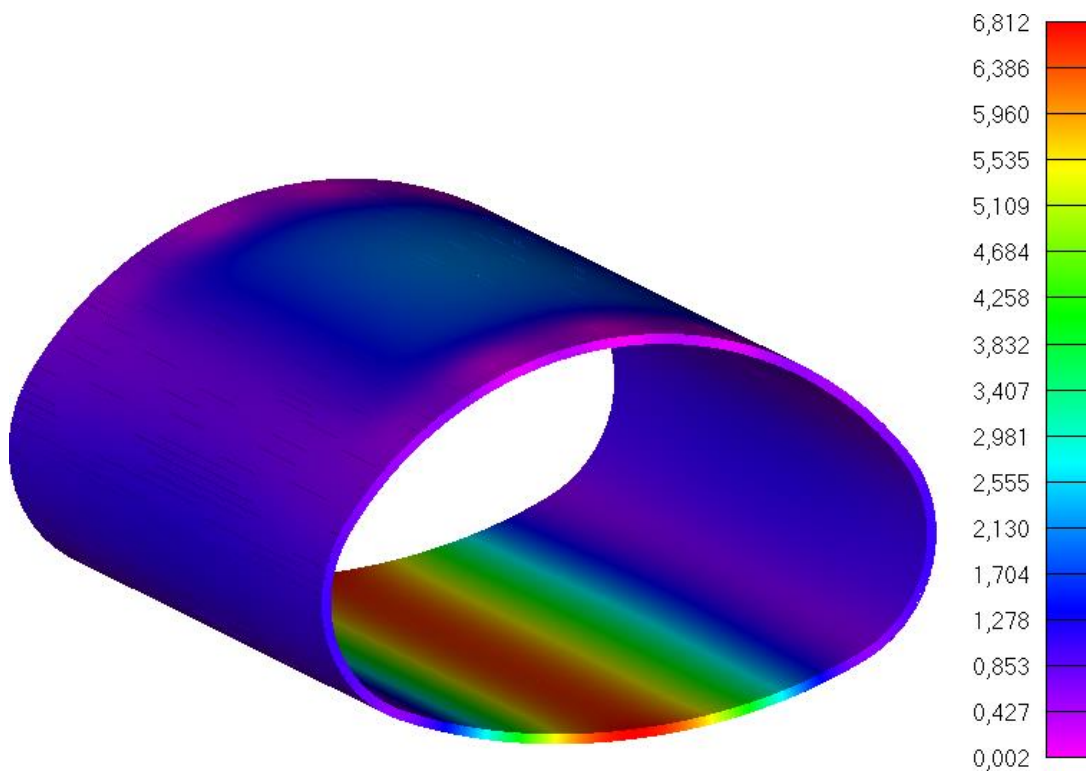


Abbildung 40: Maximale vertikale Rohrdeformation mit $\nu_M = 1,0$ und $\nu_E = 1,0$

5.8 LF 6: Ermüdungsnachweis

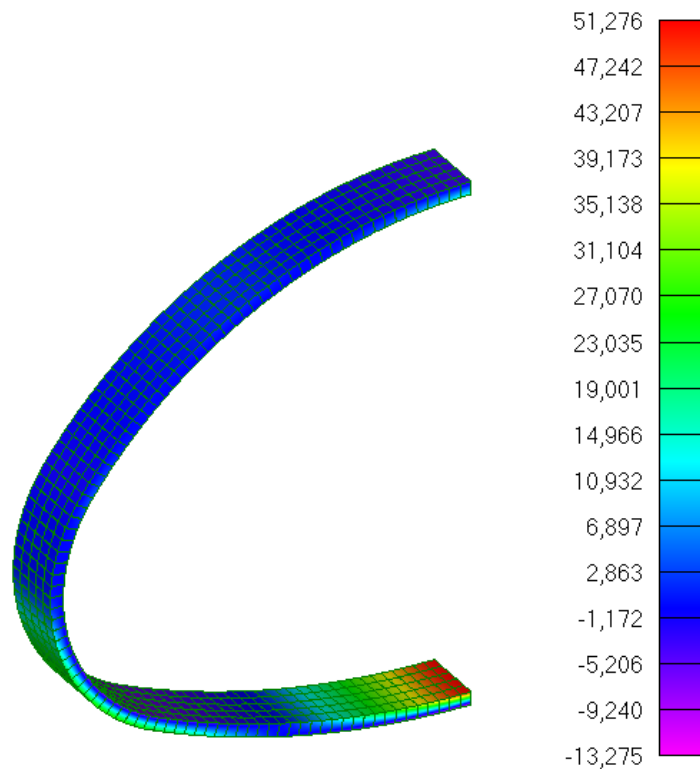


Abbildung 41: Maximale Hauptspannung [N/mm²] mit $\gamma_M = 1,0$ und $\gamma_E = 1,5$

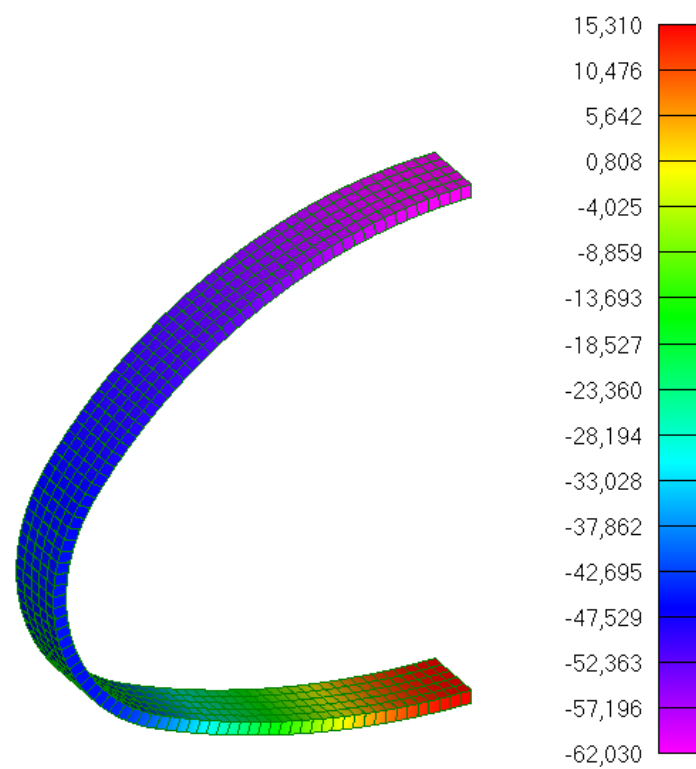


Abbildung 42: Minimale Hauptspannung [N/mm²] mit $\gamma_M = 1,0$ und $\gamma_E = 1,5$