

Inhalt

1	Unterlagen, Literatur.....	3
2	Rechenmodell, Belastung	4
3	Zusammenstellung der Ergebnisse	6
3.1	LF 1: Minimale Erdüberdeckung von 0,8 m über Rohrscheitel, Straßenverkehrslast SLW 60	6
3.1.1	Verformungsnachweis	6
3.1.2	Spannungsnachweis	6
3.1.3	Stabilitätsnachweis	6
3.2	LF 2: Maximale Erdüberdeckung von 1,6 m über Rohrscheitel, Straßenverkehrslast SLW 60.....	6
3.2.1	Verformungsnachweis	6
3.2.2	Spannungsnachweis	6
3.2.3	Stabilitätsnachweis	7
3.3	LF 3: Nachweis gegen Ermüden unter nicht vorwiegend ruhender Belastung – Ermüdungsnachweis	7
3.3.1	Dauerfestigkeitsnachweis	7
3.4	Auftriebsberechnung beim Flüssigbodeneinbau	7
4	Schlussfolgerungen	8
4.1	Anmerkungen.....	8
4.2	Zusammenfassung	8
5	Ergebnisse der FEM Analyse	9
5.1	LF 1: Minimale Erdüberdeckung von 0,8 m über Rohrscheitel, Straßenverkehrslast SLW 60	10
5.2	LF 2: Maximale Erdüberdeckung von 1,6 m über Rohrscheitel, Straßenverkehrslast SLW 60.....	14
5.3	LF 3: Nachweis gegen Ermüden unter nicht vorwiegend ruhender Belastung – Ermüdungsnachweis	18

1 Unterlagen, Literatur

- 1.1 ATV-DVWK-A 127: Statische Berechnung von Abwasserkanälen und –Leitungen; 3. Auflage August 2000
- 1.2 Angaben zur statischen Berechnung als PDF-Datei: 01-Offener-Graben-erdverlegt-A-127-deu-Rev05 (003)
- 1.3 Skizze des Profils als PDF-Datei Naunhof_Amiblu GFK Maulprofil_Vorschläge_20.02.24
- 1.4 Zeichnung des Profils als DXF-Datei Profil 1261-1092 mit Bestand
- 1.5 E-Mail Schriftverkehr vom 18.03.2025 mit Herrn Schimmel, Amiblu
- 1.6 IngSoft EasyPipe Version 3.0.1.2
- 1.7 NX Nastran – User Manual
- 1.8 Femap – User Manual

2 Rechenmodell, Belastung

Geplant ist der Einbau von erdverlegten GFK-Rohren, Maulprofil mit inneren Abmessungen von $B_i/H_i = 1261/1092$ mm. Der Einbau ist als Sanierung eines Betonkanals geplant, indem der Betonkanal in oberen Bereich abgerissen wird und das GFK-Rohr in den unteren Teil des Betonkanals positioniert wird. Der Raum zwischen dem Betonkanal und dem GFK-Rohr wird mit Flüssigboden verfüllt.

Die statischen Berechnungen erfolgen auf Grundlage des ATV-DVWK-A 127. Es erfolgt die Anwendung der FE-Methode, um die tatsächliche Geometrie der GFK-Rohre berücksichtigen zu können. Die Grundlage für die durchgeführten Berechnungen bilden räumliche FE-Modelle.

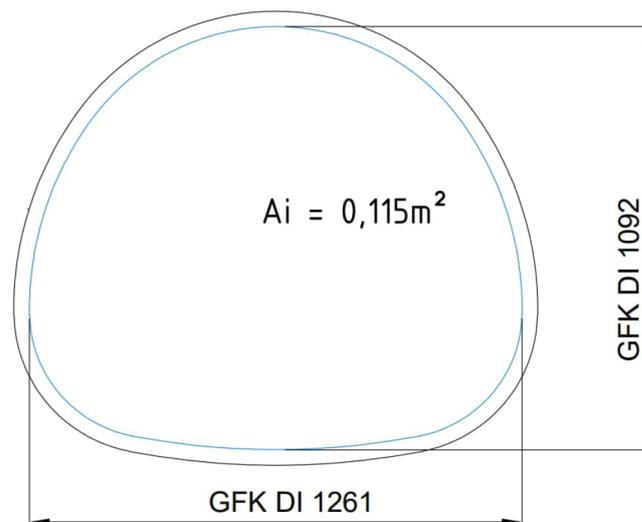


Abbildung 1: 3D Darstellung des Maulprofils, Unterlage 1.3

Für die statische Berechnung der **Erd- und Verkehrslasten** LF 1 und LF 2 sind GFK-Rohre mit Hilfe von vierknotigen Schalenelementen, Leitungszone, Überdeckung, anstehender Boden, Boden unter dem Rohr, Altkanal und Flüssigboden mit Hilfe von achtknotigen Volumenelementen diskretisiert. Die verwendete Diskretisierung ist in Abbildung 3 und dargestellt. Der Beton ist mit der Steifigkeit des Flüssigbodens berücksichtigt, was auf der sicheren Seite liegt. Die Kontaktfläche zwischen Rohr und Boden ist durch einen nichtlinearen 3-D Kontakt (Fläche auf Fläche) simuliert. D.h., es sind allein Druckkräfte, keine Zug- und keine Scherkräfte übertragen. Eigengewichtslasten sind durch Zuweisung der materialspezifischen Wichte zu den entsprechenden Elementen, die Verkehrslast infolge von SLW 60 ist durch die Anordnung einer Flächenlast auf der Modelloberfläche berücksichtigt. Bei der minimalen Erdüberdeckung beträgt die Erdspannung in Rohrscheitelhöhe infolge von SLW 60 $p_T = 62,8$ kN/m² und bei der maximalen Erdüberdeckung $p_T = 34,5$ kN/m². Der Stoßbeiwert von 1,2 ist in diesen Werten enthalten.

Grundwasser liegt unterhalb der Rohrsohle.

Im LF 3 wird 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 er 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 Rohr 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.

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. Da es sich um ein Stabilitätsproblem handelt, erfolgen geometrisch nichtlineare Berechnungen, in deren Rahmen die Lasten iterativ bis zur 2,5-fachen Gebrauchslast gesteigert sind. Die Nachweisführung der Lastfälle 1 und 2 erfolgt

unter Voraussetzung der Langzeitkennwerte und des Lastfalls 3 unter Voraussetzung der Kurzzeitkennwerte. Linear-elastisches Verhalten des Materials ist vorausgesetzt (Hookesche Gesetz gilt).

Lastfälle (LF)

- LF 1 Minimale Erdüberdeckung von 0,8 m über Rohrscheitel, Straßenverkehrslast SLW 60
- LF 2 Maximale Erdüberdeckung von 1,6 m über Rohrscheitel, Straßenverkehrslast SLW 60
- LF 3 Nachweis gegen Ermüden unter nicht vorwiegend ruhender Belastung – Ermüdungsnachweis
- LF 4 Auftriebsberechnung beim Flüssigbodeneinbau

Rohrparameter	Kurzzeit-E-Modul:	E_K	=	10.000 N/mm ²
	Langzeit-E-Modul:	E_L	=	6.250 N/mm ²
	Kurzzeit-Festigkeit:	σ_{BK}	=	180 N/mm ²
	Langzeit-Festigkeit:	σ_{BL}	=	80 N/mm ²
	Doppelte Schwingbreite:	$2\sigma_A$	=	83,8 N/mm ²
	Querdehnzahl:	ν	=	0,25
	Wichte:	γ	=	17 kN/m ³
	Tragende Wandstärke:	s	=	24 mm
Bodenkennwerte:	Anstehender Boden:	G2, D _{PR}	=	100 % ($E_3 = 20$ N/mm ²)
	Boden unter dem Rohr:	E_4	=	E_3
	Leitungszone:	G1, D _{PR}	=	95 % ($E_{20} = 16$ N/mm ² , $E_2 = 11,6$ N/mm ²)
	Überschüttung:	G1, D _{PR}	=	90 % ($E_1 = 6$ N/mm ²)
	Flüssigboden:	E_{FB}	=	20 N/mm ²
	Querdehnzahl:	ν	=	0,3
	Wichte:	γ	=	20 kN/m ³
	Wichte Flüssigboden:	γ_{FB}	=	20 kN/m ³
Grabenbreite:	$b = 2$ m			
Böschungswinkel:	$\beta = 90^\circ$			
Einbaubedingungen:	A2/B1			

Die aufgeführten Lasten, Materialkennwerte und Bodeneigenschaften entsprechen den Angaben des Auftraggebers. Die Verformungsmodul des Bodens sind nach ATV-DVWK-A 127 ermittelt und mit $(1-\nu^2)$ multipliziert um an entsprechenden Wert in FEM Programm zu kommen.

Die Rohrleitungszone wird bis zum Kämpfer bzw. bis zum Betonkanalhöhe mit Flüssigboden verfüllt.

3 Zusammenstellung der Ergebnisse

3.1 LF 1: Minimale Erdüberdeckung von 0,8 m über Rohrscheitel, Straßenverkehrslast SLW 60

3.1.1 Verformungsnachweis

Aus Abbildung 8 ergibt sich infolge der Gebrauchslast die maximale horizontale Durchmesseränderung zu

$$\Delta d_h = 2,139 \times 2 = 4,28 \text{ mm} \qquad \Delta d_h = 0,33 \% \qquad < \qquad \text{zul } \Delta d = 6,0 \%$$

Aus Abbildung 9 ergibt sich infolge der Gebrauchslast die maximale vertikale Durchmesseränderung zu

$$\Delta d_v = 8,211 - 1,037 = 7,17 \text{ mm} \qquad \Delta d_v = 0,64 \% \qquad < \qquad \text{zul } \Delta d = 6,0 \%$$

3.1.2 Spannungsnachweis

Die maximale Hauptzugspannung infolge Gebrauchslast ergibt sich gemäß Abbildung 4 zu

$$\max \sigma_z = 1,345 \text{ N/mm}^2 \qquad \gamma = 80/1,345 = 59,48 \qquad > \qquad \text{erf. } \gamma = 2,0$$

Die maximale Hauptdruckspannung infolge Gebrauchslast ergibt sich gemäß Abbildung 5 zu

$$\max \sigma_D = 5,397 \text{ N/mm}^2 \qquad \gamma = 80/5,397 = 14,82 \qquad > \qquad \text{erf. } \gamma = 2,0$$

Die erforderlichen Sicherheiten gegen Spannungsversagen sind somit eingehalten.

3.1.3 Stabilitätsnachweis

Die maximale Hauptzugspannung infolge Gebrauchslast ergibt sich gemäß Abbildung 6 zu

$$\max \sigma_z = 3,95 \text{ N/mm}^2 \qquad \gamma = 80/3,95 = 20,25 \qquad > \qquad \text{erf. } \gamma = 1,0$$

Die maximale Hauptdruckspannung infolge Gebrauchslast ergibt sich gemäß Abbildung 7 zu

$$\max \sigma_D = 13,703 \text{ N/mm}^2 \qquad \gamma = 80/13,703 = 5,84 \qquad > \qquad \text{erf. } \gamma = 1,0$$

Die Sicherheit gegen Stabilitätsversagen ist somit größer als 2,5.

3.2 LF 2: Maximale Erdüberdeckung von 1,6 m über Rohrscheitel, Straßenverkehrslast SLW 60

3.2.1 Verformungsnachweis

Aus Abbildung 15 ergibt sich infolge der Gebrauchslast die maximale horizontale Durchmesseränderung zu

$$\Delta d_h = 1,484 \times 2 = 2,97 \text{ mm} \qquad \Delta d_h = 0,23 \% \qquad < \qquad \text{zul } \Delta d = 6,0 \%$$

Aus Abbildung 16 ergibt sich infolge der Gebrauchslast die maximale vertikale Durchmesseränderung zu

$$\Delta d_v = 5,978 - 0,89 = 5,09 \text{ mm} \qquad \Delta d_v = 0,46 \% \qquad < \qquad \text{zul } \Delta d = 6,0 \%$$

3.2.2 Spannungsnachweis

Die maximale Hauptzugspannung infolge Gebrauchslast ergibt sich gemäß Abbildung 11 zu

$$\max \sigma_z = 1,046 \text{ N/mm}^2 \quad \gamma = 80/1,046 = 76,48 > \text{ erf. } \gamma = 2,0$$

Die maximale Hauptdruckspannung infolge Gebrauchslast ergibt sich gemäß Abbildung 12 zu

$$\max \sigma_D = 4,292 \text{ N/mm}^2 \quad \gamma = 80/4,292 = 18,64 > \text{ erf. } \gamma = 2,0$$

Die erforderlichen Sicherheiten gegen Spannungsversagen sind somit eingehalten.

3.2.3 Stabilitätsnachweis

Die maximale Hauptzugspannung infolge Gebrauchslast ergibt sich gemäß Abbildung 13 zu

$$\max \sigma_z = 2,778 \text{ N/mm}^2 \quad \gamma = 80/2,778 = 28,80 > \text{ erf. } \gamma = 1,0$$

Die maximale Hauptdruckspannung infolge Gebrauchslast ergibt sich gemäß Abbildung 14 zu

$$\max \sigma_D = 10,889 \text{ N/mm}^2 \quad \gamma = 80/10,889 = 7,35 > \text{ erf. } \gamma = 1,0$$

Die Sicherheit gegen Stabilitätsversagen ist somit größer als 2,5.

3.3 LF 3: Nachweis gegen Ermüden unter nicht vorwiegend ruhender Belastung – Ermüdungsnachweis

3.3.1 Dauerfestigkeitsnachweis

Die maximale Hauptzugspannung infolge Verkehrslast ergibt sich gemäß Abbildung 17 zu

$$\max \sigma_z = 2,457 \text{ N/mm}^2 \quad 83,8/2,457 = 34,11 > 1,0$$

Die maximale Hauptdruckspannung infolge Verkehrslast ergibt sich gemäß Abbildung 18 zu

$$\max \sigma_D = 5,352 \text{ N/mm}^2 \quad 83,8/5,352 = 15,66 > 1,0$$

Die erforderlichen Sicherheiten gegen Ermüdungsversagen sind somit eingehalten.

3.4 Auftriebsberechnung beim Flüssigbodeneinbau

Profilvolumen im Flüssigboden: $V = 0,715 \text{ m}^3$

Wichte des Flüssigbodens: $\gamma_{FB} = 20 \text{ kN/m}^3$

Auftrieb: $A = 0,715 \times 20 = 14,3 \text{ kN/m}$

Gewicht des GFK-Rohrs: $G_{GFK} = 3,874 \times 0,025 \times 17 = 1,65 \text{ kN/m}$

Erforderliche Sicherheit: $\gamma = 1,1$

Zusätzlich erforderliches Gewicht: $G_z = 14, \times 1,1 - 1,65 = 13,75 \text{ kN/m}$

Für die Sicherung des GFK-Rohrs während Verfüllung des Zwickels mit Flüssigboden wird ein zusätzliches Gewicht von 13,5 kN/m benötigt, was auf der Erdoberfläche einen Gewicht von 1403 kg/m entspricht.

4 Schlussfolgerungen

In diesem Bericht wurden statische Berechnungen zur Beurteilung der Standsicherheit des erdverlegten 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 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 Weiterhin beziehen sich die Berechnungen auf die angegebenen Einbau- und Überschüttungsbedingungen sowie die Bodeneigenschaften definiert in Punkt 2.
- 5 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.

4.2 Zusammenfassung

Aufgrund der unter Ziffer 3 durchgeführten Nachweise wird bestätigt, dass der dargestellte GFK-Maulprofil in statischer und konstruktiver Hinsicht dem Stand der Technik entspricht. Dabei gehen wir davon aus, dass die Anmerkungen aus Ziffer 4.1 berücksichtigt sind. Bei einer Änderung der Randbedingungen ist ein gesonderter statischer Nachweis für den Einzelfall zu führen. Insbesondere sind bei der Interpretation der Ergebnisse die Randbedingungen der Berechnungen zu beachten.

5 Ergebnisse der FEM Analyse

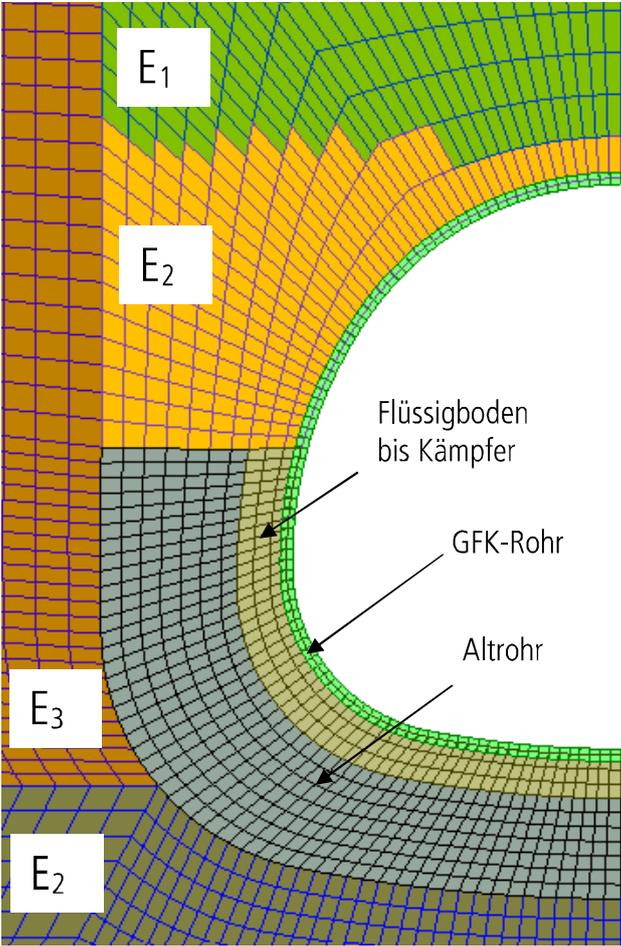


Abbildung 2: Diskretisiertes Rechenmodell - Ausschnitt

5.1 LF 1: Minimale Erdüberdeckung von 0,8 m über Rohrscheitel, Straßenverkehrslast SLW 60

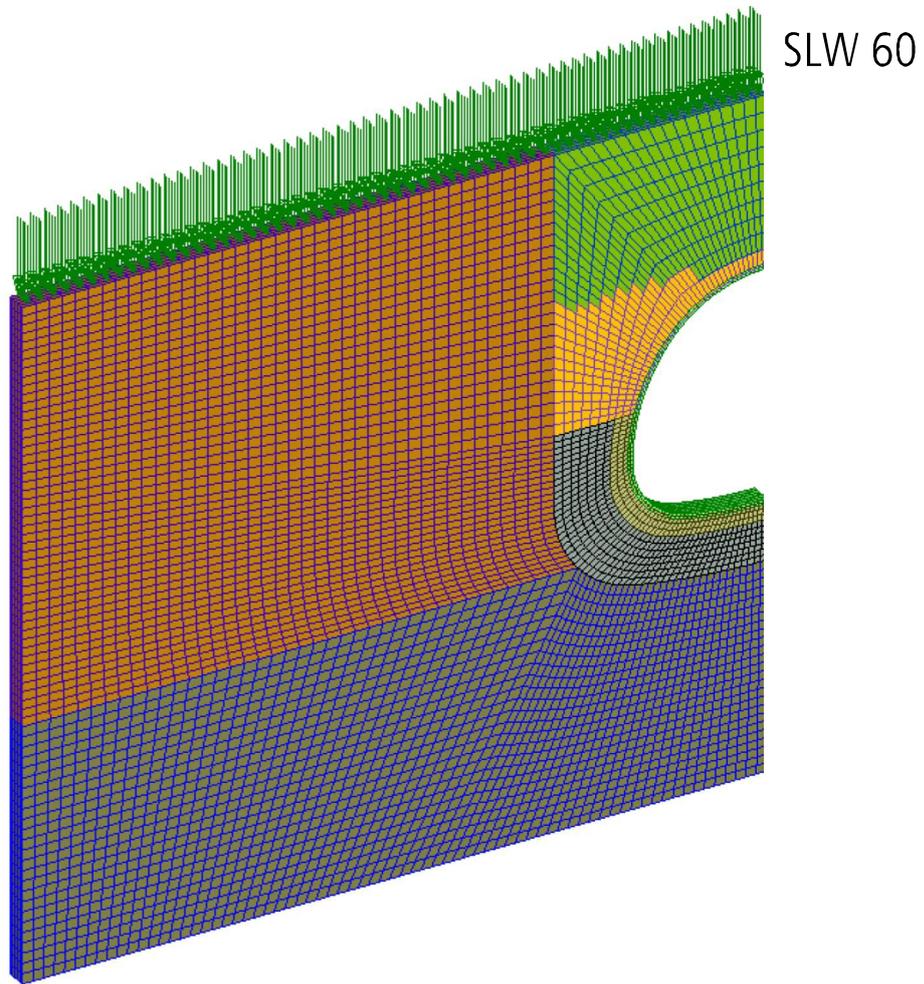


Abbildung 3: Diskretisiertes Rechenmodell

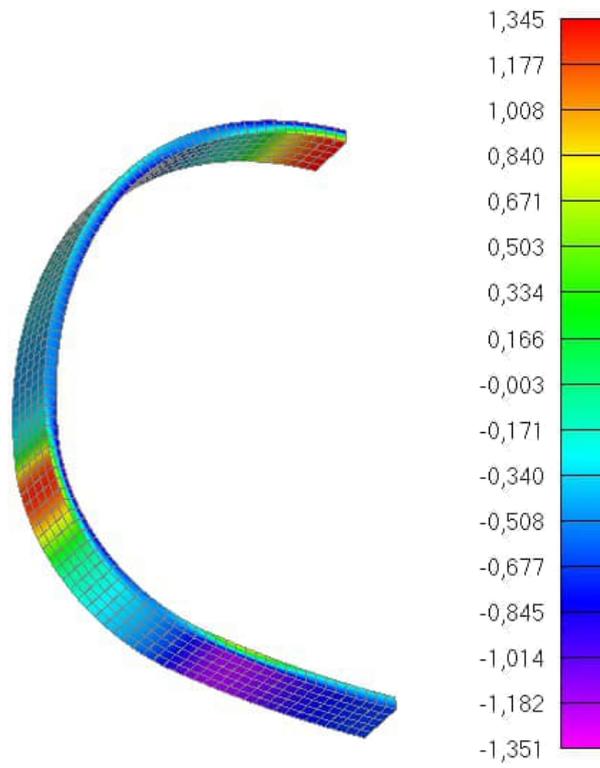


Abbildung 4: Maximale Hauptspannung [N/mm²] unter Einwirkung der Gebrauchslast

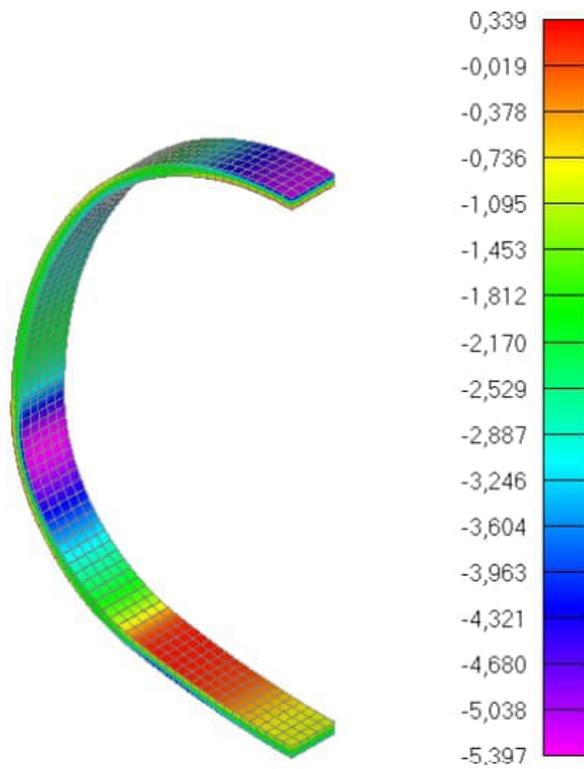


Abbildung 5: Minimale Hauptspannung [N/mm²] unter Einwirkung der Gebrauchslast

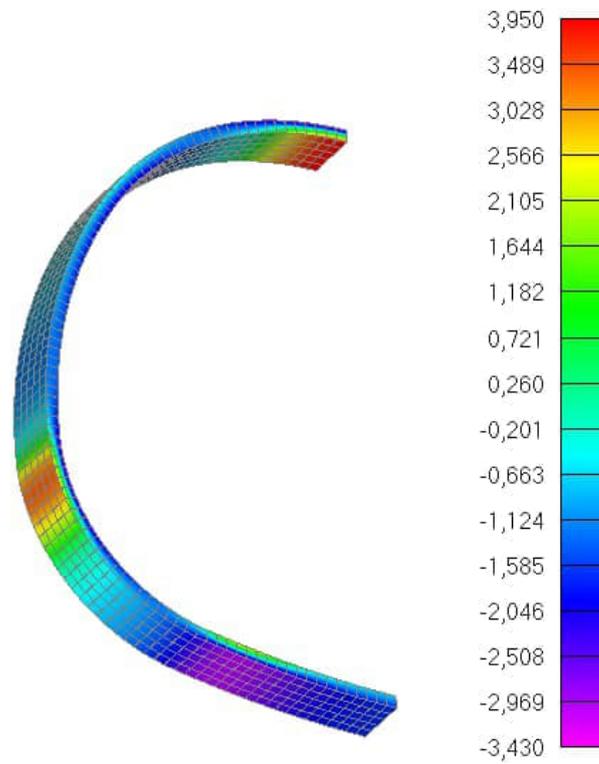


Abbildung 6: Maximale Hauptspannung [N/mm²] unter Einwirkung der 2,5-fachen Gebrauchslast

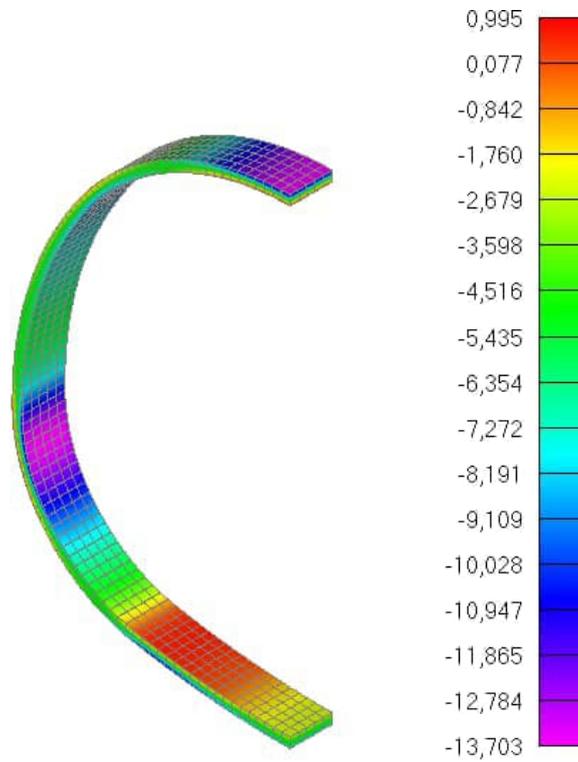


Abbildung 7: Minimale Hauptspannung [N/mm²] unter Einwirkung der 2,5-fachen Gebrauchslast

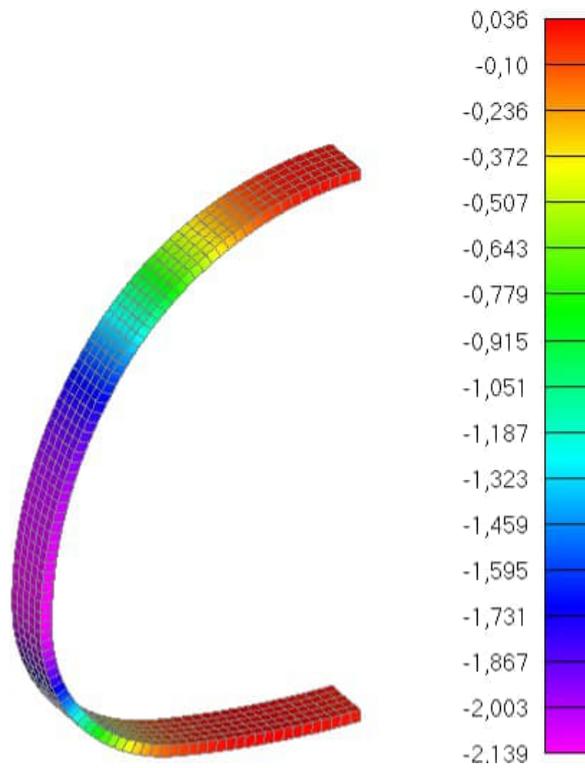


Abbildung 8: Horizontale Rohrdeformation unter Einwirkung der Gebrauchslast

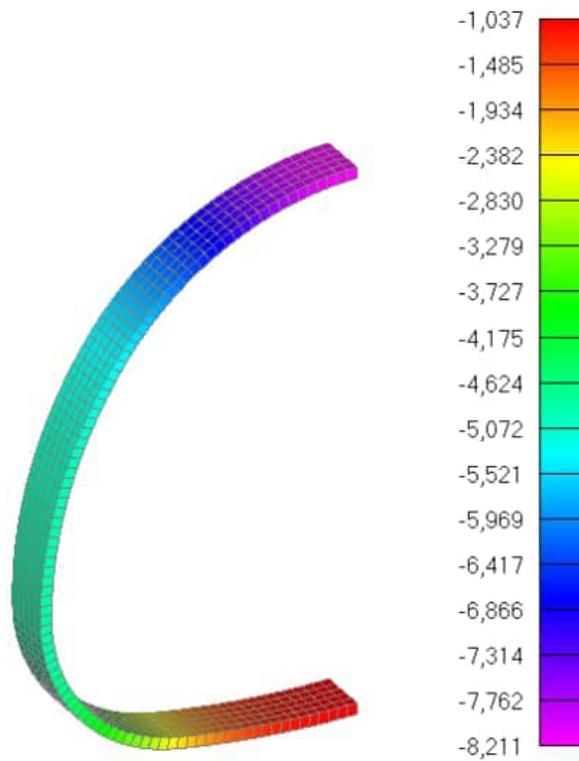


Abbildung 9: Vertikale Rohrdeformation unter Einwirkung der Gebrauchslast

5.2 LF 2: Maximale Erdüberdeckung von 1,6 m über Rohrscheitel, Straßenverkehrslast SLW 60

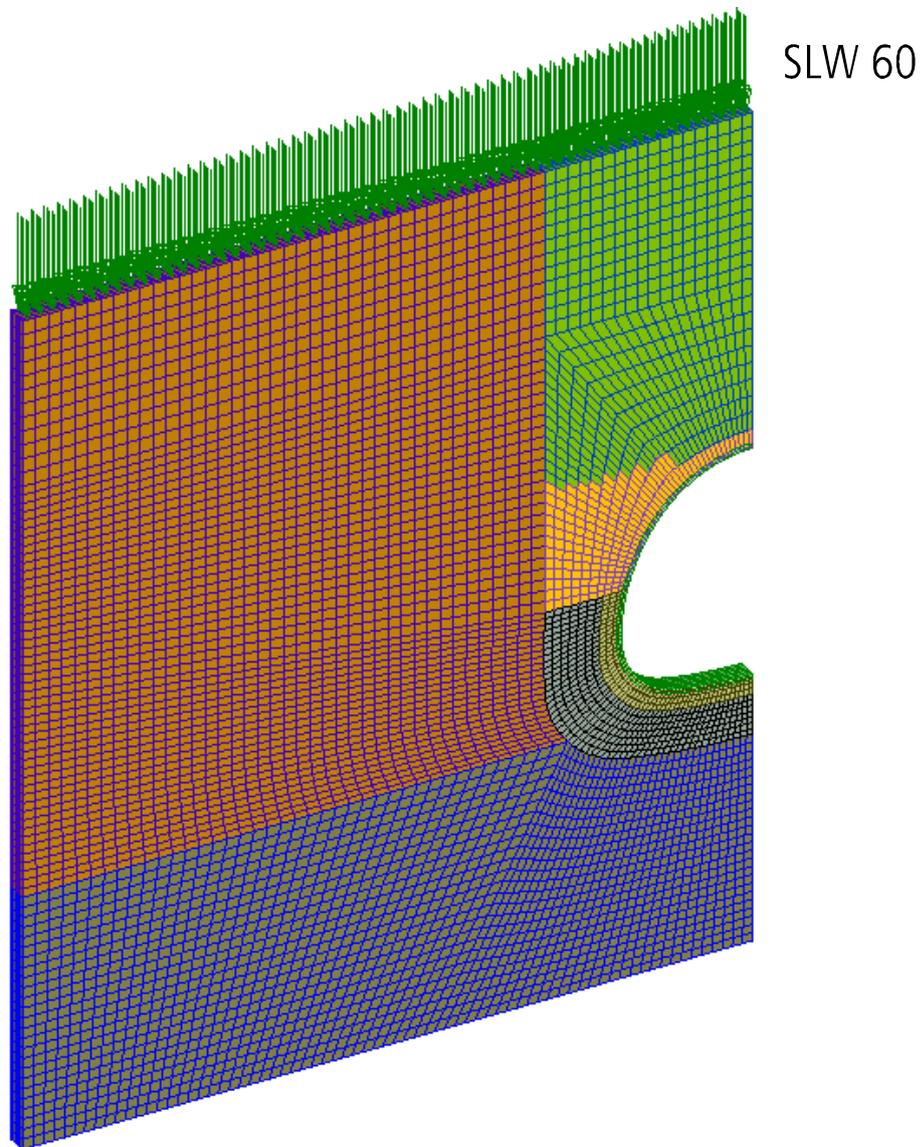


Abbildung 10: Diskretisiertes Rechenmodell

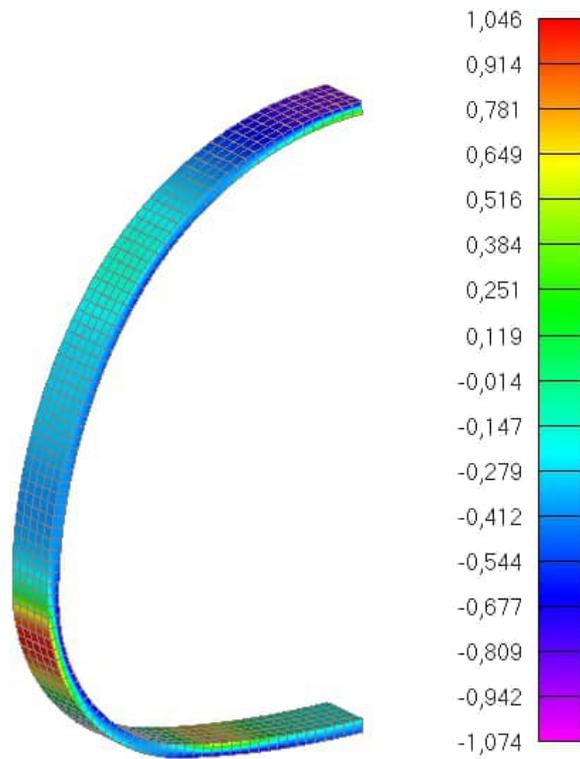


Abbildung 11: Maximale Hauptspannung [N/mm²] unter Einwirkung der Gebrauchslast

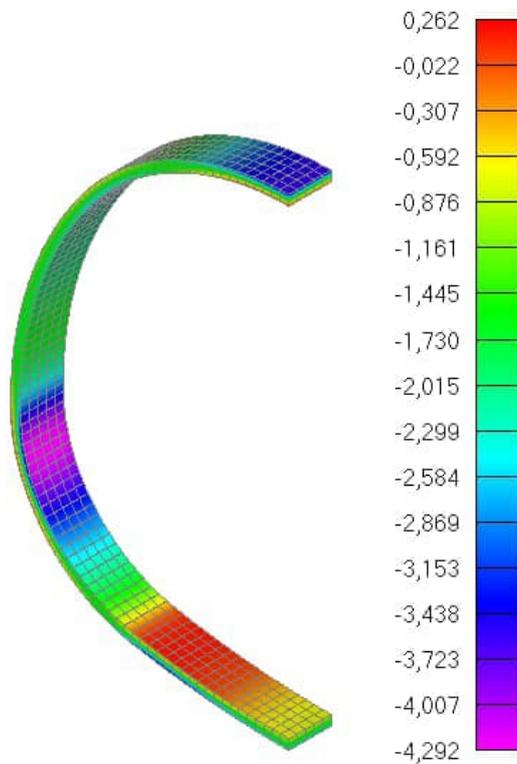


Abbildung 12: Minimale Hauptspannung [N/mm²] unter Einwirkung der Gebrauchslast

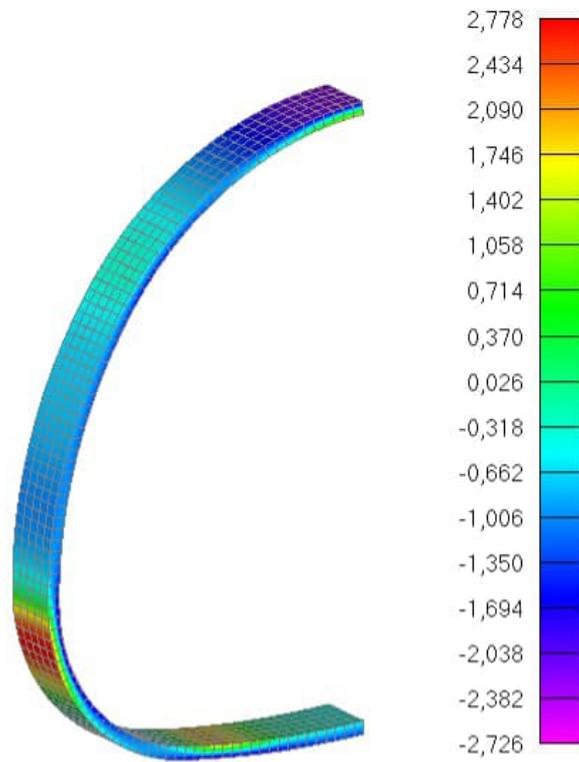


Abbildung 13: Maximale Hauptspannung [N/mm²] unter Einwirkung der 2,5-fachen Gebrauchslast

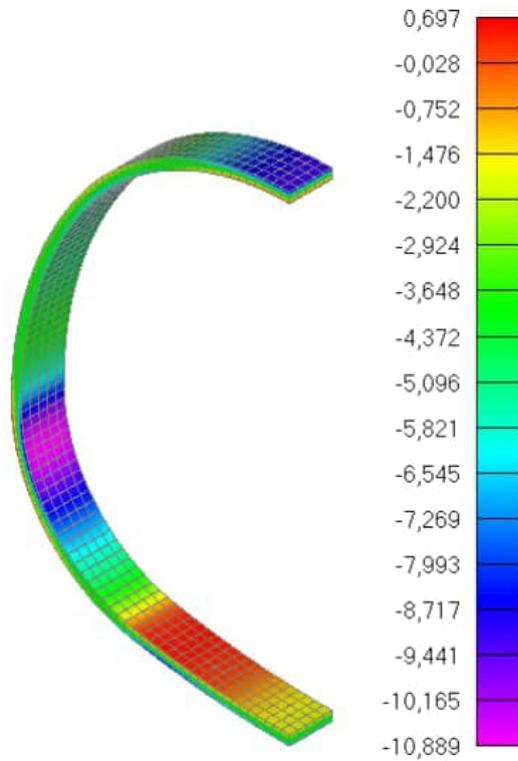


Abbildung 14: Minimale Hauptspannung [N/mm²] unter Einwirkung der 2,5-fachen Gebrauchslast

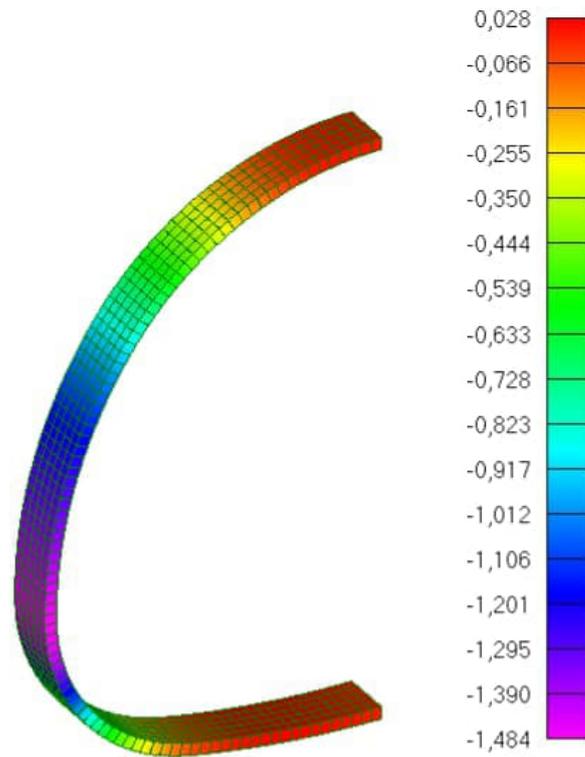


Abbildung 15: Horizontale Rohrdeformation unter Einwirkung der Gebrauchslast

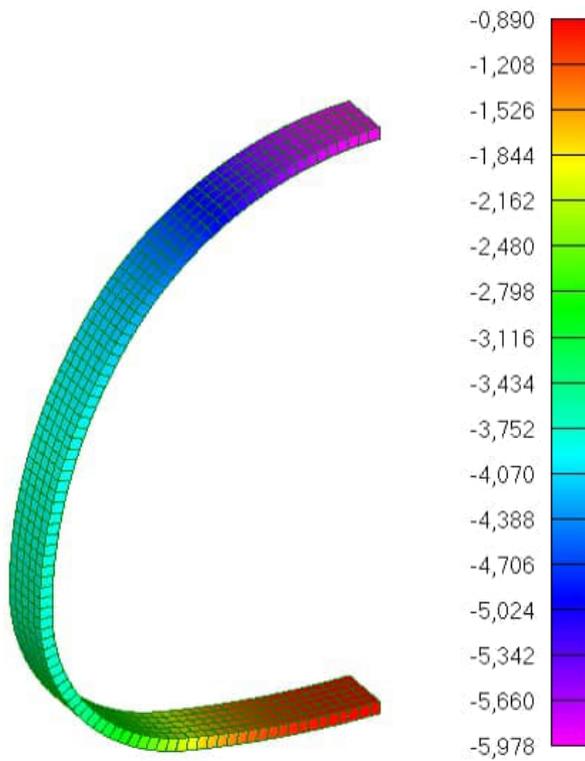


Abbildung 16: Vertikale Rohrdeformation unter Einwirkung der Gebrauchslast

5.3 LF 3: Nachweis gegen Ermüden unter nicht vorwiegend ruhender Belastung – Ermüdungsnachweis

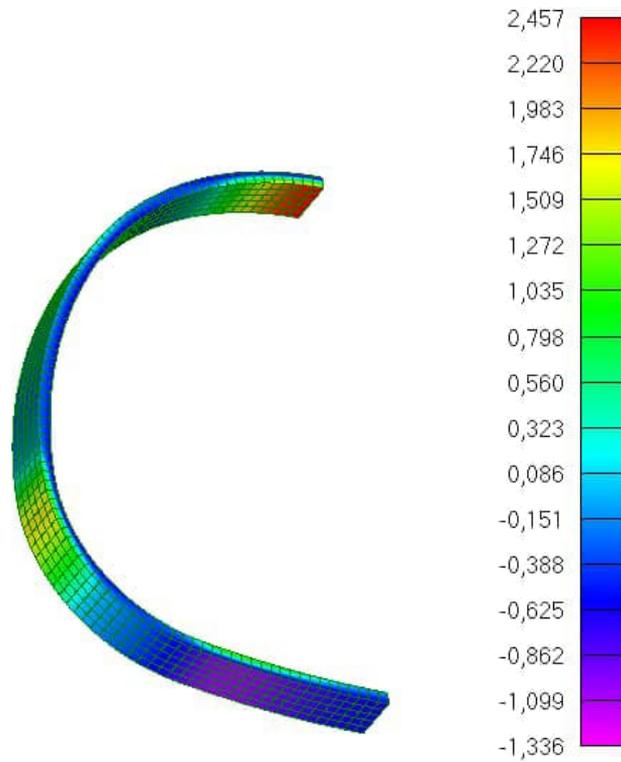


Abbildung 17: Maximale Hauptspannung [N/mm²] unter Einwirkung der Verkehrslast

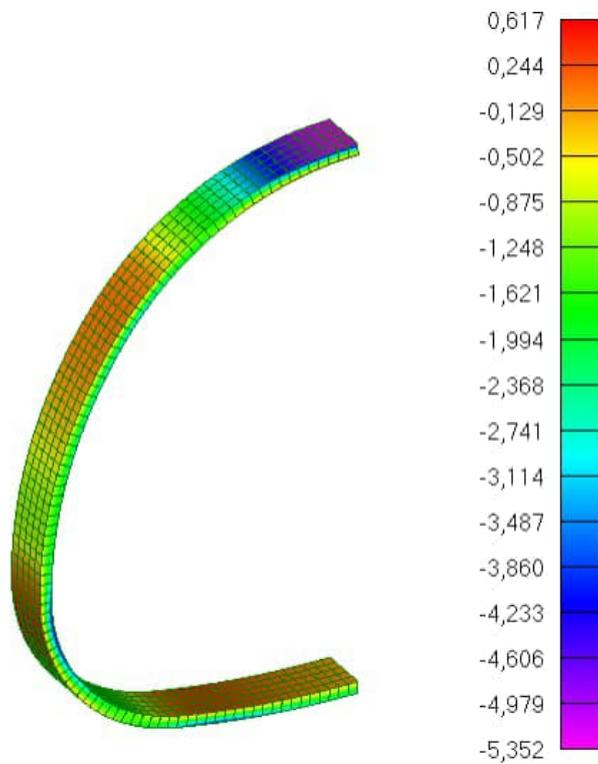


Abbildung 18: Minimale Hauptspannung [N/mm²] unter Einwirkung der Verkehrslast