

Statischer Nachweis von Polymerbeton-Vortriebsrohren, unter der Berücksichtigung der linienförmigen Auflagerung auf DSV-Säulen

Bauvorhaben:	Süderstraße, Grevenweg, Luisenweg
Bauort:	Hansestadt Hamburg
Auftraggeber:	Hamburger Stadtentwässerung AöR Billhorner Deich 2 20539 Hamburg
Auftragsgegenstand:	Statische Berechnung von Polymerbetonrohren (einzubauen im Vortriebsverfahren), die wegen einer Weichschicht linienförmig auf DSV-Säulen aufgelagert werden; exemplarisch Nachweis der Nennweiten DN 1600 und DN 800 im Endzustand
Unser Zeichen (AZ):	2026-010-10-ST
Bearbeitung:	Dr.-Ing. Heinz Doll
Erstellungsdatum:	20.08.2026

Inhalt:	1	Projektbeschreibung, Untersuchungsumfang
	2	Unterlagen, Literatur
	3	Statische Randbedingungen und Modellbildung
	3.1	Rohrquerschnitte, Rohrkennwerte
	3.2	Baugrundverhältnisse, Baugrundkennwerte
	3.3	Lastannahmen
	3.4	Einbaubedingungen
	3.5	Modellbeschreibung
	4	Statischer Nachweis der Rohrquerschnitte
	4.1	Polymerbetonrohr DN 1600, Querschnitt bei Station 0+028,50 m gem. Abb. 1.1, Variante A (b = 3,0 m)
	4.1.1	LF 1: Erdüberdeckung von h = 3,40 m
	4.1.2	LF 2: Erdüberdeckung von h = 3,40 m, Verkehrslast LM 1
	4.1.3	LF 3: Erdüberdeckung von h = 3,40 m, Verkehrslast LM 1, GW = +1,1 m NHN
	4.2	Polymerbetonrohr DN 1600, Querschnitt bei Station 0+028,50 m gem. Abb. 1.1, Variante B (b = 2,8 m)
	4.2.1	LF 1: Erdüberdeckung von h = 3,40 m
	4.2.2	LF 2: Erdüberdeckung von h = 3,40 m, Verkehrslast LM 1
	4.2.3	LF 3: Erdüberdeckung von h = 3,40 m, Verkehrslast LM 1, GW = +1,1 m NHN
	4.3	Polymerbetonrohr DN 800, Querschnitt bei Station 0+214,53 m gem. Abb. 1.12, Variante A (b = 1,8 m)
	4.3.1	LF 1: Erdüberdeckung von h = 2,32 m
	4.4	Polymerbetonrohr DN 800, Querschnitt bei Station 0+214,53 m gem. Abb. 1.12, Variante B (b = 2,72 m)
	4.4.1	LF 1: Erdüberdeckung von h = 2,32 m
	4.4.2	LF 2: Erdüberdeckung von h = 2,32 m, Verkehrslast LM 1
	4.4.3	LF 3: Erdüberdeckung von h = 2,32 m, Verkehrslast LM 1, GW = +1,1 m NHN
	4.5	Polymerbetonrohr DN 800, Querschnitt bei Station 0+214,53 m gem. Abb. 1.12, Variante C (b = 2,52 m)
	4.5.1	LF 1: Erdüberdeckung von h = 2,32 m
	4.5.2	LF 2: Erdüberdeckung von h = 2,32 m, Verkehrslast LM 1
	4.5.3	LF 3: Erdüberdeckung von h = 2,32 m, Verkehrslast LM 1, GW = +1,1 m NHN
	5	Zusammenfassung
		Abbildungen

1 Projektbeschreibung, Untersuchungsumfang

Von Seiten der Stadtentwässerung Hamburg AöR ist es gem. [4-22] geplant, im Zuge der Sielerneuerung Süderstraße, Grevenweg, Luisenweg Setzungen der im Vortriebsverfahren neu einzubauenden Polymerbetonrohre (DN 1600, DN 1400, DN 1200 und DN 800), die bedingt durch die unter der jeweiligen Rohrsohle vorhandenen Weichschichten (Klei, Mudde, Torf) zu erwarten sind, durch Bodenverbesserungsmaßnahmen weitestgehend zu unterbinden. Diese Bodenverbesserung ist vor Ausführung des jeweiligen Rohrvortriebs durch die Ausführung linienförmig unter der Rohrsohle angeordneter DSV-Säulen (s. [10-15] bzw. Abb. 1.1 bis 1.12) geplant.

Es ist die Fragestellung zu betrachten, ob und ggf. in welcher Größe die Polymerbeton-Vortriebsrohre durch die geplante Gründung auf DSV-Säulen Lasten infolge möglicher Setzungen von Weichschichten, die sich gem. [10-15] bzw. gem. Abb. 1.1 bis 1.12 im Rohreinflussbereich (insbesondere seitlich neben den Rohren und seitlich neben den DSV-Säulen) befinden, erfahren können und ob diese Lasten von den Rohrquerschnitten aufgenommen werden können.

Gem. [7] sowie gem. tel. Abstimmung mit dem Auftraggeber werden hier exemplarisch die Nennweiten DN 1600 bei Station 0+028,50 (s. Abb. 1.1) und DN 800 bei Station 0+214,53 (s. Abb. 1.12) statisch nachgewiesen. Die Breite der DSV-Säulen wird variiert, zum einen, um den Einfluss einer außerplanmäßigen horizontalen Abweichung der Rohrachse bewerten zu können (betr. beide Nennweiten), zum anderen auch um die erforderlichen statischen Nachweise einzuhalten (betr. Nennweite DN 800). Gegenstand der vorliegenden Stellungnahme ist allein der Endzustand der eingebauten Rohrleitungen. Der Bauzustand des Rohrvortriebs ist gesondert nachzuweisen.

2 Unterlagen, Literatur

- [1] DWA-A 161: Statische Berechnung von Vortriebsrohren; März 2014, korrigierte Fassung Mai 2017
- [2] ATV-DVWK-A 127: Statische Berechnung von Abwasserkanälen und -leitungen; 3. Auflage; August 2000
- [3] DWA-A 127-1: Statische Berechnung von Entwässerungsanlagen; Teil 1: Grundlagen; Dezember 2022
- [4] Schreiben (E-Mail, Hr. Gottschlich) der Hamburger Stadtentwässerung vom 08.12.2025 (Darstellung der Problemstellung, Übermittlung von Unterlagen)
- [5] Schreiben (E-Mail, Hr. Gottschlich) der Hamburger Stadtentwässerung vom 17.12.2025 (Darstellung der Profilquerschnitte mit Maßangaben, Übermittlung von Unterlagen)
- [6] Schreiben (E-Mail, Hr. Gottschlich) der Hamburger Stadtentwässerung vom 07.01.2026 (Übermittlung von Unterlagen)
- [7] Angebot Nr. 2026-01 der Dr. Doll Ingenieurgesellschaft mbH vom 14.01.2026
- [8] Schreiben (E-Mail, Hr. Gottschlich) der Hamburger Stadtentwässerung vom 17.02.2026 (Übermittlung von Unterlagen)
- [9] Schreiben (E-Mail, Hr. Gottschlich) der Hamburger Stadtentwässerung vom 13.05.2026 (Übermittlung von Unterlagen)
- [10] Lageplan, Längsschnitt, Querprofile, Anlage zum Trassenantrag, Projektnummer der Hamburger Stadtentwässerung AöR: S-04/0113, Plannummer: 01 von 06, erstellt durch die Hamburger Stadtentwässerung AöR am 03.06.2025
- [11] Lageplan, Längsschnitt, Querprofile, Anlage zum Trassenantrag, Projektnummer der Hamburger Stadtentwässerung AöR: S-04/0113, Plannummer: 02 von 06, erstellt durch die Hamburger Stadtentwässerung AöR am 03.06.2025
- [12] Lageplan, Längsschnitt, Querprofile, Anlage zum Trassenantrag, Projektnummer der Hamburger Stadtentwässerung AöR: S-04/0113, Plannummer: 03 von 06, erstellt durch die Hamburger Stadtentwässerung AöR am 03.06.2025
- [13] Lageplan, Längsschnitt, Querprofile, Anlage zum Trassenantrag, Projektnummer der Hamburger Stadtentwässerung AöR: S-04/0113, Plannummer: 04 von 06, erstellt durch die Hamburger Stadtentwässerung AöR am 11.07.2024
- [14] Lageplan, Längsschnitt, Querprofile, Anlage zum Trassenantrag, Projektnummer der Hamburger Stadtentwässerung AöR: S-04/0113, Plannummer: 05 von 06, erstellt durch die Hamburger Stadtentwässerung AöR am 03.06.2025
- [15] Lageplan, Längsschnitt, Querprofile, Anlage zum Trassenantrag, Projektnummer der Hamburger Stadtentwässerung AöR: S-04/0113, Plannummer: 06 von 06, erstellt durch die Hamburger Stadtentwässerung AöR am 02.06.2025
- [16] Konstruktionszeichnung zu POLYCRETE Vortriebsrohr – Drachenprofil mit VA-Führungsring, PRC-TK DN 800 und DN 1000, Unterlage der meyer – POLYCRETE GmbH, Datierung: 03/2021
- [17] Konstruktionszeichnung zu POLYCRETE Vortriebsrohr – Drachenprofil mit VA-Führungsring, PRC-TK DN 1000 bis DN 2000, Unterlage der meyer – POLYCRETE GmbH, Datierung: 03/2021
- [18] Datenblatt mit Angabe von Materialparametern zu POLYCRETE Vortriebsrohren, Unterlage der meyer – POLYCRETE GmbH

- [19] Statistische Auswertung zu Fremdüberwachungsprüfungen an POLYCRETE Vortriebsrohren der Jahre 2013 bis 2019
- [20] Baugrundbeurteilung und Geotechnischer Bericht, erstellt durch die Fichtner Water & Transportation GmbH am 15.09.2023
- [21] Geotechnische Stellungnahme Nr. 1 zur Sielerneuerung Süderstraße/Grevenweg/Luisenweg, erstellt durch die Fichtner Water & Transportation GmbH am 16.02.2026
- [22] Schreiben (E-Mail, Hr. Jost) der Fichtner Water & Transportation GmbH an die Hamburger Stadtentwässerung AöR (Hr. Gottschlich) vom 03.06.2026

3 Statische Randbedingungen und Modellbildung

Betrachtet werden hier exemplarisch die beiden Querschnitte der Polymerbetonrohre DN 1600 bei Station 0+028,50 (s. Abb. 1.1) und DN 800 bei Station 0+214,53 (s. Abb. 1.12). Für die Nennweiten DN 1600, DN 1400 und DN 1200 ergeben sich abgesehen von der Nennweite bzgl. der Bodenverhältnisse und Lasteinwirkungen weitestgehend vergleichbare Verhältnisse (s. Abb. 1.1 bis 1.10). Der hier betrachtete Fall den Nennweite DN 800 (Abb. 1.12) beinhaltet die Einbausituation mit der größten Dicke der Weichschicht und somit die aus statischer Sicht ungünstigsten Einbaubedingungen.

3.1 Rohrquerschnitte, Rohrkenwerte

Basierend auf den Angaben der Unterlagen [16-18] werden die nachfolgenden Rohrparameter im Rahmen der statischen Modellbildung und Nachweisführung berücksichtigt:

Material:	Polymerbeton
Kurzzeit-E-Modul:	$E_K = 23300 \text{ N/mm}^2$
Langzeit-E-Modul:	$E_L = 8200 \text{ N/mm}^2$
Kurzzeitbiegefestigkeit (Zug):	$\sigma_{BZ,K} = 16 \text{ N/mm}^2$
Langzeitbiegefestigkeit (Zug):	$\sigma_{BZ,L} = 9,4 \text{ N/mm}^2$
Kurzzeitdruckfestigkeit:	$\sigma_{D,K} = 95 \text{ N/mm}^2$
Langzeitdruckfestigkeit:	$\sigma_{D,L} = 95 \cdot 9,4/16 = 55 \text{ N/mm}^2$
Schwingbreite	$2\sigma_A = 6 \text{ N/mm}^2$
Querdehnzahl:	$\nu = 0,25$
Wichte:	$\gamma = 23 \text{ kN/m}^3$

Für die Lastfälle 2 und 3 (s. Kap. 3.4), bei denen eine Verkehrslasteinwirkung LM 1 berücksichtigt wird, erfolgt gem. Kap. 9.2 der Unterlage [2] der Ansatz von im Verhältnis der langzeitigen Erdlast p_E und der kurzzeitigen Verkehrslast p_V gewichteter Materialkennwerte $E_{gew,1}$, $\sigma_{BZ,1}$, $\sigma_{D,1}$ (betr. DN 1600) und $E_{gew,2}$, $\sigma_{BZ,2}$, $\sigma_{D,2}$ (betr. DN 800):

DN 1600:

$$E_{gew,1} = \frac{p_E \cdot E_L + p_V \cdot E_K}{p_E + p_V}$$

$$p_E = h \cdot \gamma_B$$

$$(h = 3,4 \text{ m, s. Kap. 3.4; } \gamma_B = 19 \text{ kN/m}^3, \text{ s. Kap. 3.2})$$

$$p_E = 3,4 \cdot 19 = 64,6 \text{ kN/m}^2$$

$$p_V = 1,25 \cdot 19,31 = 24,1 \text{ kN/m}^2$$

$$(\text{gem. Kap. 6.2.3.2 in [1]})$$

$$E_{gew,1} = \frac{64,6 \cdot 8200 + 24,1 \cdot 23300}{64,6 + 24,1} = 12302 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{BZ,gew,1} = \frac{p_E \cdot \sigma_{BZ,L} + p_V \cdot \sigma_{BZ,K}}{p_E + p_V}$$

$$\sigma_{BZ,gew,1} = \frac{64,6 \cdot 9,4 + 24,1 \cdot 16}{64,6 + 24,1} = 11,2 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{D,gew,1} = \frac{p_E \cdot \sigma_{D,L} + p_V \cdot \sigma_{D,K}}{p_E + p_V}$$

$$\sigma_{D,gew,1} = \frac{64,6 \cdot 55,0 + 24,1 \cdot 95,0}{64,6 + 24,1} = 65,9 \text{ N/mm}^2$$

DN 800:

$$E_{gew,2} = \frac{p_E \cdot E_L + p_V \cdot E_K}{p_E + p_V}$$

$$p_E = h \cdot \gamma_B$$

$$(h = 2,32 \text{ m, s. Kap. 3.4; } \gamma_B = 19 \text{ kN/m}^3, \text{s. Kap. 3.2})$$

$$p_E = 2,32 \cdot 19 = 44,08 \text{ kN/m}^2$$

$$p_V = 1,25 \cdot 33,95 = 42,4 \text{ kN/m}^2$$

$$(\text{gem. Kap. 6.2.3.2 in [1]})$$

$$E_{gew,2} = \frac{44,08 \cdot 8200 + 42,4 \cdot 23300}{44,08 + 42,4}$$
$$= 15603 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{BZ,gew,2} = \frac{p_E \cdot \sigma_{BZ,L} + p_V \cdot \sigma_{BZ,K}}{p_E + p_V}$$

$$\sigma_{BZ,gew,2} = \frac{44,08 \cdot 9,4 + 42,4 \cdot 16}{44,08 + 42,4}$$
$$= 12,6 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma_{D,gew,2} = \frac{p_E \cdot \sigma_{D,L} + p_V \cdot \sigma_{D,K}}{p_E + p_V}$$

$$\sigma_{D,gew,2} = \frac{44,08 \cdot 55,0 + 42,4 \cdot 95,0}{44,08 + 42,4}$$
$$= 74,6 \text{ N/mm}^2$$

Der Langzeitwert der Druckfestigkeit ist in [18] nicht aufgeführt. Er wird hier unter Ansatz der Abminderung der Biegezugfestigkeit berücksichtigt. Es wird darauf hingewiesen, dass er im Rahmen der Spannungsnachweise bei weitem nicht ausgenutzt wird (deutlicher Sicherheitsabstand im Druckspannungsnachweis).

GeometrieKennwerte DN 1600:	Innendurchmesser:	$D_i = 1600 \text{ mm}$
	Wanddicke:	$t = 170 \text{ mm}$
GeometrieKennwerte DN 1400:	Innendurchmesser:	$D_i = 1400 \text{ mm}$
	Wanddicke:	$t = 160 \text{ mm}$
GeometrieKennwerte DN 1200:	Innendurchmesser:	$D_i = 1200 \text{ mm}$
	Wanddicke:	$t = 142,5 \text{ mm}$
GeometrieKennwerte DN 800:	Innendurchmesser:	$D_i = 800 \text{ mm}$
	Wanddicke:	$t = 80 \text{ mm}$

Statisch betrachtet werden hier exemplarisch allein die Nennweiten DN 1600 und DN 800 (s. auch Kap. 1).

3.2 Baugrundverhältnisse, Baugrundkennwerte

Der Ansatz der nachfolgenden Baugrundsichtung und der zugehörigen Baugrundparameter erfolgt auf Grundlage der Unterlagen [20, 21, 22]. Es wird darauf hingewiesen, dass hier die exemplarische Betrachtung der Einbausituationen (s. auch Kap. 1) der Nennweite DN 1600 bei Station 0+028,50 (s. Abb. 1.1) und der Nennweite DN 800 bei Station 0+214,53 (s. Abb. 1.12) erfolgt.

Ansätze für den Nachweis der Nennweite DN 1600, Verhältnisse gem. Abb. 1.1:

Bodenschicht 1:	Überdeckung und anstehender Baugrund oberhalb der Weichschicht
Steifemodul:	$E_s = 15 \text{ N/mm}^2$
E-Modul:	$E = 9,3 \text{ N/mm}^2$
Querdehnzahl:	$\nu = 0,35$
Wichte:	$\gamma = 19/11 \text{ kN/m}^3$

Bodenschicht 2: Weichschicht

E-Modul: $E = 1,2 \text{ N/mm}^2$

Querdehnzahl: $\nu = 0,45$

Wichte: $\gamma = 15/5 \text{ kN/m}^3$

Anmerkung: Hier erfolgt keine Umrechnung des in [20] angegebenen Steifemoduls in einen E-Modul. An Stelle dessen werden E-Modul und Querdehnzahl derart gewählt, dass sich infolge der reinen Erdlast Setzungen der Weichschicht ergeben, die der Angabe in Kap. 5 der Unterlage [21] (ca. 10 cm) entsprechen.

Bodenschicht 3: DSV-Säulen

Steifemodul: $E_s = 40 \text{ N/mm}^2$

E-Modul: $E = 30 \text{ N/mm}^2$

Querdehnzahl: $\nu = 0,3$

Wichte: $\gamma = 15/5 \text{ kN/m}^3$

Ansätze für den Nachweis der Nennweite DN 800, Verhältnisse gem. Abb. 1.12

Bodenschicht 1: Überdeckung und anstehender Baugrund oberhalb der Weichschicht

Steifemodul: $E_s = 15 \text{ N/mm}^2$

E-Modul: $E = 9,3 \text{ N/mm}^2$

Querdehnzahl: $\nu = 0,35$

Wichte: $\gamma = 19/11 \text{ kN/m}^3$

Bodenschicht 2: Weichschicht

E-Modul: $E = 1,3 \text{ N/mm}^2$

Querdehnzahl: $\nu = 0,45$

Wichte: $\gamma = 15/5 \text{ kN/m}^3$

Anmerkung: Hier erfolgt keine Umrechnung des in [20] angegebenen Steifemoduls in einen E-Modul. An Stelle dessen werden E-Modul und Querdehnzahl derart gewählt, dass sich infolge der reinen Erdlast Setzungen der Weichschicht ergeben, die der Angabe in Kap. 5 der Unterlage [21] (ca. 20 cm) entsprechen.

Bodenschicht 3: DSV-Säulen

Steifemodul: $E_s = 40 \text{ N/mm}^2$

E-Modul: $E = 30 \text{ N/mm}^2$

Querdehnzahl: $\nu = 0,3$

Wichte: $\gamma = 15/5 \text{ kN/m}^3$

Der Bemessungswasserstand wird gem. [20] auf einem Niveau von +1,1 m NHN angesetzt. Dies entspricht einem Grundwasserstand von

$$h_{W,So} = 1,1 + 1,88 = 2,98 \text{ m über Sohle} \quad (\text{DN 1600})$$

$$h_{W,So} = 1,1 + 1,46 = 2,56 \text{ m über Sohle} \quad (\text{DN 800})$$

3.3 Lastannahmen

Die beiden Rohrquerschnitte DN 1600 und DN 800 werden für die Einwirkung von Erdlasten, einer Verkehrslast LM 1 sowie eines Grundwasserstandes auf einem Niveau von +1,1 m NHN statisch nachgewiesen. Nachfolgende Lastfälle werden betrachtet:

Polymerbetonrohr DN 1600 bei Station 0+028,50 (s. Abb. 1.1)

LF 1: Erdüberdeckung von $h = 3,4$ m

LF 2: Erdüberdeckung von $h = 3,4$ m, Schwerlastverkehr LM 1 auf GOK

LF 3: Erdüberdeckung von $h = 3,4$ m, Schwerlastverkehr LM 1 auf GOK, GW bei +1,1 m NHN

Verkehrslastansatz: LM 1

$$p_v (h = 3,4 \text{ m}) = 1,25 \cdot 19,31 = 24,1 \text{ kN/m}^2 \text{ (gem. Kap. 6.2.3.2 in [1])}$$

ermittelt für eine Rohrlänge von $l = 3,0$ m (ungünstigster Fall gem. [17])

Polymerbetonrohr DN 800 bei Station 0+214,53 (s. Abb. 1.12)

LF 1: Erdüberdeckung von $h = 2,32$ m

LF 2: Erdüberdeckung von $h = 2,32$ m, Schwerlastverkehr LM 1 auf GOK

LF 3: Erdüberdeckung von $h = 2,32$ m, Schwerlastverkehr LM 1 auf GOK,
GW bei +1,1 m NHN

Verkehrslastansatz: LM 1

$$p_v (h = 2,32 \text{ m}) = 1,25 \cdot 33,95 = 42,4 \text{ kN/m}^2 \text{ (gem. Kap. 6.2.3.2 in [1])}$$

ermittelt für eine Rohrlänge von $l = 2,0$ m (ungünstigster Fall gem. [16])

3.4 Einbaubedingungen

Die geplanten Einbaubedingungen der im Vortriebsverfahren einzubauenden Polymerbetonrohre DN 1600, DN 1400, DN 1200 und DN 800 sind in den Unterlagen [10-15] bzw. in den Abbildungen 1.1 bis 1.12 dargestellt. Demnach erfolgt vor Durchführung des jeweiligen Rohrvortriebs die Ausführung von DSV-Säulen, die eine linienförmige Auflagerung in Längsrichtung der Leitungen sowie bis Kämpferhöhe eine Bettung der Polymerbetonrohre bilden. Die Berechnungen erfolgen hier exemplarisch für die Nennweite DN 1600 (s. Abb. 1.1) und DN 800 (s. Abb. 1.12). Die nachfolgenden Varianten werden betrachtet:

Polymerbetonrohr DN 1600

Breite der DSV-Säule auf Kämpferhöhe: $b = 2 \cdot 1,50 = 3,00$ m (Variante A
gem. Abb. 1.2)

Die statischen Modellbildungen sind in den Abbildungen 2.1.1, 2.2.1 und 2.3.1 dargestellt.

Breite der DSV-Säule auf Kämpferhöhe: $b = 2 \cdot 1,40 = 2,80$ m (Variante B)

Variante B betrachtet den Fall, einer unplanmäßigen horizontalen Abweichung der Rohrachse um 0,1 m von der geplanten Lage.

Die statischen Modellbildungen sind in den Abbildungen 2.4.1, 2.5.1 und 2.6.1 dargestellt.

Polymerbetonrohr DN 800

Breite der DSV-Säule auf Kämpferhöhe: $b = 2 \cdot 0,9 = 1,80 \text{ m}$ (Variante A
gem. Abb. 1.12)

Die statische Modellbildung ist in Abb. 3.1.1 dargestellt. Der Nachweis erfolgt hier nur für LF 1, da im Spannungsnachweis keine ausreichende Sicherheit erreicht wird, erfolgt eine Vergrößerung der Breite b (s. Variante B).

Breite der DSV-Säule auf Kämpferhöhe: $b = 2 \cdot 1,36 = 2,72 \text{ m}$ (Variante B)

Variante B betrachtet den Fall, einer planmäßigen Breite der DSV-Säulen auf Kämpferhöhe von $b = 2,72 \text{ m}$.

Die statischen Modellbildungen sind in den Abbildungen 3.2.1, 3.3.1 und 3.4.1 dargestellt.

Breite der DSV-Säule auf Kämpferhöhe: $b = 2 \cdot 1,26 = 2,52 \text{ m}$ (Variante C)

Variante C betrachtet den Fall, einer unplanmäßigen horizontalen Abweichung der Rohrachse um $0,1 \text{ m}$ von der geplanten Lage.

Die statischen Modellbildungen sind in den Abbildungen 3.5.1, 3.6.1 und 3.7.1 dargestellt.

3.5 Modellbeschreibung

Die statische Nachweisführung erfolgt mit Hilfe der FE-Methode, um die Bodenschichtung und insbesondere die Auflagerung auf den DSV-Säulen zutreffend beschreiben zu können. Die nachfolgenden Modellbildungen werden untersucht:

Polymerbetonrohr DN 1600:

Variante A, $b = 3,0 \text{ m}$
LF 1 (Erdlast) s. Abb. 2.1.1
LF 2 (Erd- u. Verkehrslast) s. Abb. 2.2.1
LF 3 (Erdlast, Verkehrslast, GW) s. Abb. 2.3.1

Variante B, $b = 2,8 \text{ m}$
LF 1 (Erdlast) s. Abb. 2.4.1
LF 2 (Erd- u. Verkehrslast) s. Abb. 2.5.1
LF 3 (Erdlast, Verkehrslast, GW) s. Abb. 2.6.1

Polymerbetonrohr DN 800:

Variante A, $b = 1,8 \text{ m}$
LF 1 (Erdlast) s. Abb. 3.1.1

Variante B, $b = 2,72 \text{ m}$
LF 1 (Erdlast) s. Abb. 3.2.1
LF 2 (Erd- u. Verkehrslast) s. Abb. 3.3.1
LF 3 (Erdlast, Verkehrslast, GW) s. Abb. 3.4.1

Variante C, $b = 2,52 \text{ m}$
LF 1 (Erdlast) s. Abb. 3.5.1
LF 2 (Erd- u. Verkehrslast) s. Abb. 3.6.1
LF 3 (Erdlast, Verkehrslast, GW) s. Abb. 3.7.1

Die FE-Modellbildung wird exemplarisch für die Variante A des Polymerbetonrohres DN 1600 beschrieben. Abb. 2.1.1 zeigt die Modellbildung unter Einwirkung der Lasten aus Eigengewicht (LF 1, Erdlast). Das Polymerbetonrohr wird mit Hilfe von vierknotigen Schalenelementen (freie

Dehnung in Axialrichtung), der umgebende Baugrund mit Hilfe von vierknotigen Scheibenelementen (ebener Dehnungszustand) abgebildet. Der untere Modellrand entspricht dem unteren Niveau der Weichschicht. In der Kontaktfläche zwischen Polymerbetonrohr und Baugrund werden GAP-Elemente angeordnet. Sie übertragen allein Druck-, keine Zug- und keine Schubkräfte. Beim Auftreten von Zugkräften ergeben sich Klaffungen. Es wird lineares Materialverhalten (Rohr und Baugrund) vorausgesetzt. Bei der Modellierung wird die Symmetrie der Problemstellung ausgenutzt. Die Eigengewichtslasten werden durch Zuweisung der material-spezifischen Wichte zu den entsprechenden Elementen berücksichtigt. Abb. 2.2.1 zeigt das Modell für den Nachweis von LF 2 (Erd- und Verkehrslast. Es ist abgesehen von der zusätzlichen Verkehrslast, die in Form einer Linienlast auf der GOK aufgebracht wird, identisch zum Modell des Lastfalles 1. In der Modellbildung zu LF 3 (s. Abb. 2.3.1) erfolgt eine weitere Modifikation des Modells, indem der Wasseraußendruck als druckhöhenabhängige Linienlast auf die Rohraußenwandung aufgebracht wird und für die Bodenschichten, die unterhalb des GW-Standes liegen, die Wichte unter Auftrieb angesetzt wird. Es erfolgen geometrisch nichtlineare Berechnungen, in deren Rahmen die Belastung des Polymerbetonrohres sukzessive bis zur 2,2-fachen Gebrauchslast (globale Sicherheit $\gamma_F = 2,2$ gem. [2] für Betonrohre) gesteigert wird. Die Nachweisführung erfolgt unter Voraussetzung der Langzeitverhältnisse, wobei für die Lastfälle 2 und 3 gem. [2] im Verhältnis der langzeitigen Erdlast p_E und der kurzzeitigen Verkehrslast p_V gewichteter Materialkennwerte angesetzt werden (s. Kap. 3.1). Spannungs-, Verformungs- und Stabilitätsnachweis bilden die Kriterien für die Tragfähigkeitsbewertung des GfK-Rohres. Die statischen Modellbildungen für Variante B des Rohres DN 1600 sowie für die Varianten A bis C des Rohres DN 800 erfolgen in analoger Weise.

4 Statischer Nachweis der Rohrquerschnitte

4.1 Polymerbetonrohr DN 1600, Querschnitt bei Station 0+028,50 m gem. Abb. 1.1, Variante A (b = 3,0 m)

4.1.1 LF 1: Erdüberdeckung von h = 3,40 m

Setzung OK Weichschicht

Aus Abb. 2.1.2 ergibt sich die Setzung in dem von der Rohrleitung und den DSV-Säulen unbeeinflussten Bereich für die OK der Weichschicht zu

$$s = 10,43 \text{ mm.}$$

Der Setzungswert entspricht somit etwa dem in Kap. 5 der Unterlage [21] angegebenen Setzungswert von ca. 10 cm. Diese Übereinstimmung stellt eine Validierung der hier verwendeten Modellbildung dar.

Verformungsnachweis

Aus Abb. 2.1.5 ergibt sich die unter Einwirkung der Gebrauchslast auftretende maximale Vertikalverformung des Polymerbetonrohres zu

$$\Delta d_v = 19,35 - 16,98 = 2,39 \text{ mm.}$$

Bezogen auf den mittleren Rohrdurchmesser entspricht dies einer relativen Verformung von

$$\Delta d_{v,rel} = 100 \cdot 2,39 / (1600 + 170) = 0,14 \text{ \%}.$$

Die gem. [2] zulässige relative Durchmesseränderung von 6% (für biegeeweiche Rohre) wird also nicht erreicht.

Aus Abb. 2.1.6 ergibt sich die unter Einwirkung der Gebrauchslast auftretende maximale Horizontalverformung des Polymerbetonrohres zu

$$\Delta d_h = 2 \cdot 1,02 = 2,04 \text{ mm.}$$

Bezogen auf den mittleren Rohrdurchmesser entspricht dies einer relativen Verformung von

$$\Delta d_{h,rel} = 100 \cdot 2,04 / (1600 + 170) = 0,12 \text{ \%}.$$

Die gem. [2] zulässige relative Durchmesseränderung von 6% (für biegeeweiche Rohre) wird also nicht erreicht.

Spannungsnachweis

Aus Abb. 2.1.3 ergibt sich unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast die maximale Zugspannung im Polymerbetonrohr zu

$$\max. \sigma_{Z,d} = 5,19 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{BZ,L} = 9,4 \text{ N/mm}^2.$$

Aus Abb. 2.1.4 ergibt sich unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast die maximale Druckspannung im Polymerbetonrohr zu

$$\max. \sigma_{D,d} = 8,13 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{D,L} = 55 \text{ N/mm}^2.$$

Die erforderlichen Sicherheiten gegen Zug- und Druckspannungsversagen des Polymerbetonrohres sind somit eingehalten.

Stabilitätsnachweis

Durch die Erbringung des Spannungsnachweises unter 2,2-facher Last ist ebenfalls der Stabilitätsnachweis erbracht. Unter 2,2-fachen Lasten tritt kein elastisches Stabilitätsversagen auf.

4.1.2 LF 2: Erdüberdeckung von $h = 3,40$ m, Verkehrslast LM 1

Setzung OK Weichschicht

Aus Abb. 2.2.2 ergibt sich die Setzung in dem von der Rohrleitung und den DSV-Säulen unbeeinflussten Bereich für die OK der Weichschicht zu

$$s = 12,72 \text{ mm.}$$

Der Setzungswert erhöht sich wegen der hier zusätzlich zur Erdlast einwirkenden Verkehrslast (Schwerlastverkehr LM 1 auf GOK) im Vergleich zu Kap. 4.1.1. Er ist nicht mit dem Setzungswert von Kap. 5 der Unterlage [21] vergleichbar, da dort die alleinige Erdlasteinwirkung betrachtet wird.

Verformungsnachweis

Aus Abb. 2.2.5 ergibt sich die unter Einwirkung der Gebrauchslast auftretende maximale Vertikalverformung des Polymerbetonrohres zu

$$\Delta d_v = 22,86 - 20,84 = 2,02 \text{ mm.}$$

Bezogen auf den mittleren Rohrdurchmesser entspricht dies einer relativen Verformung von

$$\Delta d_{v,rel} = 100 \cdot 2,02 / (1600 + 170) = 0,12 \text{ \%}.$$

Die gem. [2] zulässige relative Durchmesseränderung von 6% (für biegeeweiche Rohre) wird also nicht erreicht.

Aus Abb. 2.2.6 ergibt sich die unter Einwirkung der Gebrauchslast auftretende maximale Horizontalverformung des Polymerbetonrohres zu

$$\Delta d_h = 2 \cdot 0,87 = 1,74 \text{ mm.}$$

Bezogen auf den mittleren Rohrdurchmesser entspricht dies einer relativen Verformung von

$$\Delta d_{h,rel} = 100 \cdot 1,74 / (1600 + 170) = 0,10 \text{ \%}.$$

Die gem. [2] zulässige relative Durchmesseränderung von 6% (für biegeeweiche Rohre) wird also nicht erreicht.

Spannungsnachweis

Aus Abb. 2.2.3 ergibt sich unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast die maximale Zugspannung im Polymerbetonrohr zu

$$\max. \sigma_{Z,d} = 6,32 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{BZ,gew,1} = 11,2 \text{ N/mm}^2.$$

Aus Abb. 2.2.4 ergibt sich unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast die maximale Druckspannung im Polymerbetonrohr zu

$$\max. \sigma_{D,d} = 10,13 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{D,gew,1} = 65,9 \text{ N/mm}^2.$$

Die erforderlichen Sicherheiten gegen Zug- und Druckspannungsversagen des Polymerbetonrohres sind somit eingehalten.

Stabilitätsnachweis

Durch die Erbringung des Spannungsnachweises unter 2,2-facher Last ist ebenfalls der Stabilitätsnachweis erbracht. Unter 2,2-fachen Lasten tritt kein elastisches Stabilitätsversagen auf.

4.1.3 LF 3: Erdüberdeckung von $h = 3,40$ m, Verkehrslast LM 1, GW = +1,1 m NHN

Setzung OK Weichschicht

Aus Abb. 2.3.2 ergibt sich die Setzung in dem von der Rohrleitung und den DSV-Säulen unbeeinflussten Bereich für die OK der Weichschicht zu

$$s = 9,21 \text{ mm.}$$

Dieser Setzungswert ist der Setzung von Kap. 4.1.1 wie auch von Kap. 5 der Unterlage [21] nicht vergleichbar, da hier zusätzlich zur Erdlasteinwirkung die Verkehrslasteinwirkung wie auch der Grundwasserstand über Rohrsohle (Wasseraußendruck auf Rohrwandung und Boden unter Auftrieb) berücksichtigt wird.

Verformungsnachweis

Aus Abb. 2.3.5 ergibt sich die unter Einwirkung der Gebrauchslast auftretende maximale Vertikalverformung des Polymerbetonrohres zu

$$\Delta d_v = 16,31 - 14,73 = 1,58 \text{ mm.}$$

Bezogen auf den mittleren Rohrdurchmesser entspricht dies einer relativen Verformung von

$$\Delta d_{v,rel} = 100 \cdot 1,58 / (1600 + 170) = 0,09 \text{ \%}.$$

Die gem. [2] zulässige relative Durchmesseränderung von 6% (für biegeeweiche Rohre) wird also nicht erreicht.

Aus Abb. 2.3.6 ergibt sich die unter Einwirkung der Gebrauchslast auftretende maximale Horizontalverformung des Polymerbetonrohres zu

$$\Delta d_h = 2 \cdot 0,67 = 1,34 \text{ mm.}$$

Bezogen auf den mittleren Rohrdurchmesser entspricht dies einer relativen Verformung von

$$\Delta d_{h,rel} = 100 \cdot 1,34 / (1600 + 170) = 0,08 \text{ \%}.$$

Die gem. [2] zulässige relative Durchmesseränderung von 6% (für biegeeweiche Rohre) wird also nicht erreicht.

Spannungsnachweis

Aus Abb. 2.3.3 ergibt sich unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast die maximale Zugspannung im Polymerbetonrohr zu

$$\max. \sigma_{Z,d} = 4,84 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{BZ,gew,1} = 11,2 \text{ N/mm}^2.$$

Aus Abb. 2.3.4 ergibt sich unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast die maximale Druckspannung im Polymerbetonrohr zu

$$\max. \sigma_{D,d} = 8,54 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{D,gew,1} = 65,9 \text{ N/mm}^2.$$

Die erforderlichen Sicherheiten gegen Zug- und Druckspannungsversagen des Polymerbetonrohres sind somit eingehalten.

Stabilitätsnachweis

Durch die Erbringung des Spannungsnachweises unter 2,2-facher Last ist ebenfalls der Stabilitätsnachweis erbracht. Unter 2,2-fachen Lasten tritt kein elastisches Stabilitätsversagen auf.

4.2 Polymerbetonrohr DN 1600, Querschnitt bei Station 0+028,50 m gem. Abb. 1.1, Variante B (b = 2,8 m)

4.2.1 LF 1: Erdüberdeckung von h = 3,40 m

Setzung OK Weichschicht

Aus Abb. 2.4.2 ergibt sich die Setzung in dem von der Rohrleitung und den DSV-Säulen unbeeinflussten Bereich für die OK der Weichschicht zu

$$s = 10,56 \text{ mm.}$$

Der Setzungswert entspricht somit etwa dem in Kap. 5 der Unterlage [21] angegebenen Setzungswert von ca. 10 cm. Diese Übereinstimmung stellt eine Validierung der hier verwendeten Modellbildung dar.

Verformungsnachweis

Aus Abb. 2.4.5 ergibt sich die unter Einwirkung der Gebrauchslast auftretende maximale Vertikalverformung des Polymerbetonrohres zu

$$\Delta d_v = 20,71 - 18,06 = 2,65 \text{ mm.}$$

Bezogen auf den mittleren Rohrdurchmesser entspricht dies einer relativen Verformung von

$$\Delta d_{v,rel} = 100 \cdot 2,65 / (1600 + 170) = 0,15 \text{ \%}.$$

Die gem. [2] zulässige relative Durchmesseränderung von 6% (für biegeeweiche Rohre) wird also nicht erreicht.

Aus Abb. 2.4.6 ergibt sich die unter Einwirkung der Gebrauchslast auftretende maximale Horizontalverformung des Polymerbetonrohres zu

$$\Delta d_h = 2 \cdot 1,15 = 2,30 \text{ mm.}$$

Bezogen auf den mittleren Rohrdurchmesser entspricht dies einer relativen Verformung von

$$\Delta d_{h,rel} = 100 \cdot 2,30 / (1600 + 170) = 0,13 \text{ \%}.$$

Die gem. [2] zulässige relative Durchmesseränderung von 6% (für biegeeweiche Rohre) wird also nicht erreicht.

Spannungsnachweis

Aus Abb. 2.4.3 ergibt sich unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast die maximale Zugspannung im Polymerbetonrohr zu

$$\max. \sigma_{Z,d} = 6,24 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{BZ,L} = 9,4 \text{ N/mm}^2.$$

Aus Abb. 2.4.4 ergibt sich unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast die maximale Druckspannung im Polymerbetonrohr zu

$$\max. \sigma_{D,d} = 9,01 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{D,L} = 55 \text{ N/mm}^2.$$

Die erforderlichen Sicherheiten gegen Zug- und Druckspannungsversagen des Polymerbetonrohres sind somit eingehalten.

Stabilitätsnachweis

Durch die Erbringung des Spannungsnachweises unter 2,2-facher Last ist ebenfalls der Stabilitätsnachweis erbracht. Unter 2,2-fachen Lasten tritt kein elastisches Stabilitätsversagen auf.

4.2.2 LF 2: Erdüberdeckung von $h = 3,40$ m, Verkehrslast LM 1

Setzung OK Weichschicht

Aus Abb. 2.5.2 ergibt sich die Setzung in dem von der Rohrleitung und den DSV-Säulen unbeeinflussten Bereich für die OK der Weichschicht zu

$$s = 12,94 \text{ mm.}$$

Der Setzungswert erhöht sich wegen der hier zusätzlich zur Erdlast einwirkenden Verkehrslast (Schwerlastverkehr LM 1 auf GOK) im Vergleich zu Kap. 4.2.1. Er ist nicht mit dem Setzungswert von Kap. 5 der Unterlage [21] vergleichbar, da dort die alleinige Erdlasteinwirkung betrachtet wird.

Verformungsnachweis

Aus Abb. 2.5.5 ergibt sich die unter Einwirkung der Gebrauchslast auftretende maximale Vertikalverformung des Polymerbetonrohres zu

$$\Delta d_v = 24,42 - 22,18 = 2,24 \text{ mm.}$$

Bezogen auf den mittleren Rohrdurchmesser entspricht dies einer relativen Verformung von

$$\Delta d_{v,rel} = 100 \cdot 2,24 / (1600 + 170) = 0,13 \text{ \%}.$$

Die gem. [2] zulässige relative Durchmesseränderung von 6% (für biegeeweiche Rohre) wird also nicht erreicht.

Aus Abb. 2.5.6 ergibt sich die unter Einwirkung der Gebrauchslast auftretende maximale Horizontalverformung des Polymerbetonrohres zu

$$\Delta d_h = 2 \cdot 0,99 = 1,98 \text{ mm.}$$

Bezogen auf den mittleren Rohrdurchmesser entspricht dies einer relativen Verformung von

$$\Delta d_{h,rel} = 100 \cdot 1,98 / (1600 + 170) = 0,11 \text{ \%}.$$

Die gem. [2] zulässige relative Durchmesseränderung von 6% (für biegeeweiche Rohre) wird also nicht erreicht.

Spannungsnachweis

Aus Abb. 2.5.3 ergibt sich unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast die maximale Zugspannung im Polymerbetonrohr zu

$$\max. \sigma_{Z,d} = 7,65 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{BZ,gew,1} = 11,2 \text{ N/mm}^2.$$

Aus Abb. 2.5.4 ergibt sich unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast die maximale Druckspannung im Polymerbetonrohr zu

$$\max. \sigma_{D,d} = 11,22 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{D,gew,1} = 65,9 \text{ N/mm}^2.$$

Die erforderlichen Sicherheiten gegen Zug- und Druckspannungsversagen des Polymerbetonrohres sind somit eingehalten.

Stabilitätsnachweis

Durch die Erbringung des Spannungsnachweises unter 2,2-facher Last ist ebenfalls der Stabilitätsnachweis erbracht. Unter 2,2-fachen Lasten tritt kein elastisches Stabilitätsversagen auf.

4.2.3 LF 3: Erdüberdeckung von $h = 3,40$ m, Verkehrslast LM 1, GW = +1,1 m NHN

Setzung OK Weichschicht

Aus Abb. 2.6.2 ergibt sich die Setzung in dem von der Rohrleitung und den DSV-Säulen unbeeinflussten Bereich für die OK der Weichschicht zu

$$s = 9,28 \text{ mm.}$$

Dieser Setzungswert ist der Setzung von Kap. 4.2.1 wie auch von Kap. 5 der Unterlage [21] nicht vergleichbar, da hier zusätzlich zur Erdlasteinwirkung die Verkehrslasteinwirkung wie auch der Grundwasserstand über Rohrsohle (Wasseraußendruck auf Rohrwandung und Boden unter Auftrieb) berücksichtigt wird.

Verformungsnachweis

Aus Abb. 2.6.5 ergibt sich die unter Einwirkung der Gebrauchslast auftretende maximale Vertikalverformung des Polymerbetonrohres zu

$$\Delta d_v = 16,85 - 15,12 = 1,73 \text{ mm.}$$

Bezogen auf den mittleren Rohrdurchmesser entspricht dies einer relativen Verformung von

$$\Delta d_{v,rel} = 100 \cdot 1,73 / (1600 + 170) = 0,10 \text{ \%}.$$

Die gem. [2] zulässige relative Durchmesseränderung von 6% (für biegeeweiche Rohre) wird also nicht erreicht.

Aus Abb. 2.6.6 ergibt sich die unter Einwirkung der Gebrauchslast auftretende maximale Horizontalverformung des Polymerbetonrohres zu

$$\Delta d_h = 2 \cdot 0,74 = 1,48 \text{ mm.}$$

Bezogen auf den mittleren Rohrdurchmesser entspricht dies einer relativen Verformung von

$$\Delta d_{h,rel} = 100 \cdot 1,48 / (1600 + 170) = 0,08 \text{ \%}.$$

Die gem. [2] zulässige relative Durchmesseränderung von 6% (für biegeeweiche Rohre) wird also nicht erreicht.

Spannungsnachweis

Aus Abb. 2.6.3 ergibt sich unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast die maximale Zugspannung im Polymerbetonrohr zu

$$\max. \sigma_{Z,d} = 5,62 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{BZ,gew,1} = 11,2 \text{ N/mm}^2.$$

Aus Abb. 2.6.4 ergibt sich unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast die maximale Druckspannung im Polymerbetonrohr zu

$$\max. \sigma_{D,d} = 9,34 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{D,gew,1} = 65,9 \text{ N/mm}^2.$$

Die erforderlichen Sicherheiten gegen Zug- und Druckspannungsversagen des Polymerbetonrohres sind somit eingehalten.

Stabilitätsnachweis

Durch die Erbringung des Spannungsnachweises unter 2,2-facher Last ist ebenfalls der Stabilitätsnachweis erbracht. Unter 2,2-fachen Lasten tritt kein elastisches Stabilitätsversagen auf.

4.3 Polymerbetonrohr DN 800, Querschnitt bei Station 0+214,53 m gem. Abb. 1.12, Variante A (b = 1,8 m)

4.3.1 LF 1: Erdüberdeckung von h = 2,32 m

Setzung OK Weichschicht

Aus Abb. 3.1.2 ergibt sich die Setzung in dem von der Rohrleitung und den DSV-Säulen unbeeinflussten Bereich für die OK der Weichschicht zu

$$s = 22,99 \text{ mm.}$$

Der Setzungswert entspricht somit etwa dem in Kap. 5 der Unterlage [21] angegebenen Setzungswert von ca. 20 cm. Diese Übereinstimmung stellt eine Validierung der hier verwendeten Modellbildung dar.

Verformungsnachweis

Aus Abb. 3.1.5 ergibt sich die unter Einwirkung der Gebrauchslast auftretende maximale Vertikalverformung des Polymerbetonrohres zu

$$\Delta d_v = 44,19 - 42,41 = 1,78 \text{ mm.}$$

Bezogen auf den mittleren Rohrdurchmesser entspricht dies einer relativen Verformung von

$$\Delta d_{v,rel} = 100 \cdot 1,78 / (800 + 80) = 0,20 \text{ \%}.$$

Die gem. [2] zulässige relative Durchmesseränderung von 6% (für biegeeweiche Rohre) wird also nicht erreicht.

Aus Abb. 3.1.6 ergibt sich die unter Einwirkung der Gebrauchslast auftretende maximale Horizontalverformung des Polymerbetonrohres zu

$$\Delta d_h = 2 \cdot 0,84 = 1,68 \text{ mm.}$$

Bezogen auf den mittleren Rohrdurchmesser entspricht dies einer relativen Verformung von

$$\Delta d_{h,rel} = 100 \cdot 1,68 / (800 + 80) = 0,19 \text{ \%}.$$

Die gem. [2] zulässige relative Durchmesseränderung von 6% (für biegeeweiche Rohre) wird also nicht erreicht.

Spannungsnachweis

Aus Abb. 3.1.3 ergibt sich unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast die maximale Zugspannung im Polymerbetonrohr zu

$$\max. \sigma_{Z,d} = 10,37 \text{ N/mm}^2 > \sigma_{BZ,L} = 9,4 \text{ N/mm}^2.$$

Aus Abb. 3.1.4 ergibt sich unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast die maximale Druckspannung im Polymerbetonrohr zu

$$\max.\sigma_{D,d} = 11,97 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{D,L} = 55 \text{ N/mm}^2.$$

Während die erforderliche Sicherheit gegen Druckspannungsversagen eingehalten ist, wird der Zugspannungsnachweis nicht erfüllt.

Stabilitätsnachweis

Da der Spannungsnachweis (Zugspannung) unter 2,2-facher Last nicht eingehalten ist, ist auch der Stabilitätsnachweis nicht erbracht.

4.4 Polymerbetonrohr DN 800, Querschnitt bei Station 0+214,53 m gem. Abb. 1.12, Variante B (b = 2,72 m)

4.4.1 LF 1: Erdüberdeckung von h = 2,32 m

Setzung OK Weichschicht

Aus Abb. 3.2.2 ergibt sich die Setzung in dem von der Rohrleitung und den DSV-Säulen unbeeinflussten Bereich für die OK der Weichschicht zu

$$s = 23,22 \text{ mm}.$$

Der Setzungswert entspricht somit etwa dem in Kap. 5 der Unterlage [21] angegebenen Setzungswert von ca. 20 cm. Diese Übereinstimmung stellt eine Validierung der hier verwendeten Modellbildung dar.

Verformungsnachweis

Aus Abb. 3.2.5 ergibt sich die unter Einwirkung der Gebrauchslast auftretende maximale Vertikalverformung des Polymerbetonrohres zu

$$\Delta d_v = 37,27 - 35,95 = 1,32 \text{ mm}.$$

Bezogen auf den mittleren Rohrdurchmesser entspricht dies einer relativen Verformung von

$$\Delta d_{v,rel} = 100 \cdot 1,32 / (800 + 80) = 0,15 \text{ \%}.$$

Die gem. [2] zulässige relative Durchmesseränderung von 6% (für biegeeweiche Rohre) wird also nicht erreicht.

Aus Abb. 3.2.6 ergibt sich die unter Einwirkung der Gebrauchslast auftretende maximale Horizontalverformung des Polymerbetonrohres zu

$$\Delta d_h = 2 \cdot 0,62 = 1,24 \text{ mm}.$$

Bezogen auf den mittleren Rohrdurchmesser entspricht dies einer relativen Verformung von

$$\Delta d_{h,rel} = 100 \cdot 1,24 / (800 + 80) = 0,14 \text{ \%}.$$

Die gem. [2] zulässige relative Durchmesseränderung von 6% (für biegeeweiche Rohre) wird also nicht erreicht.

Spannungsnachweis

Aus Abb. 3.2.3 ergibt sich unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast die maximale Zugspannung im Polymerbetonrohr zu

$$\max.\sigma_{Z,d} = 7,85 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{BZ,L} = 9,4 \text{ N/mm}^2.$$

Aus Abb. 3.2.4 ergibt sich unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast die maximale Druckspannung im Polymerbetonrohr zu

$$\max.\sigma_{D,d} = 9,40 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{D,L} = 55 \text{ N/mm}^2.$$

Die erforderlichen Sicherheiten gegen Zug- und Druckspannungsversagen des Polymerbetonrohres sind somit eingehalten.

Stabilitätsnachweis

Durch die Erbringung des Spannungsnachweises unter 2,2-facher Last ist ebenfalls der Stabilitätsnachweis erbracht. Unter 2,2-fachen Lasten tritt kein elastisches Stabilitätsversagen auf.

4.4.2 LF 2: Erdüberdeckung von $h = 2,32 \text{ m}$, Verkehrslast LM 1

Setzung OK Weichschicht

Aus Abb. 3.3.2 ergibt sich die Setzung in dem von der Rohrleitung und den DSV-Säulen unbeeinflussten Bereich für die OK der Weichschicht zu

$$s = 36,00 \text{ mm}.$$

Der Setzungswert erhöht sich wegen der hier zusätzlich zur Erdlast einwirkenden Verkehrslast (Schwerlastverkehr LM 1 auf GOK) im Vergleich zu Kap. 4.4.1. Er ist nicht mit dem Setzungswert von Kap. 5 der Unterlage [21] vergleichbar, da dort die alleinige Erdlasteinwirkung betrachtet wird.

Verformungsnachweis

Aus Abb. 3.3.5 ergibt sich die unter Einwirkung der Gebrauchslast auftretende maximale Vertikalverformung des Polymerbetonrohres zu

$$\Delta d_v = 51,46 - 50,33 = 1,13 \text{ mm}.$$

Bezogen auf den mittleren Rohrdurchmesser entspricht dies einer relativen Verformung von

$$\Delta d_{v,rel} = 100 \cdot 1,13 / (800 + 80) = 0,13 \text{ \%}.$$

Die gem. [2] zulässige relative Durchmesseränderung von 6% (für biegeeweiche Rohre) wird also nicht erreicht.

Aus Abb. 3.3.6 ergibt sich die unter Einwirkung der Gebrauchslast auftretende maximale Horizontalverformung des Polymerbetonrohres zu

$$\Delta d_h = 2 \cdot 0,53 = 1,06 \text{ mm}.$$

Bezogen auf den mittleren Rohrdurchmesser entspricht dies einer relativen Verformung von

$$\Delta d_{h,rel} = 100 \cdot 1,06 / (800 + 80) = 0,12 \text{ \%}.$$

Die gem. [2] zulässige relative Durchmesseränderung von 6% (für biegeeweiche Rohre) wird also nicht erreicht.

Spannungsnachweis

Aus Abb. 3.3.3 ergibt sich unter Einwirkung der 1,8-fachen Gebrauchslast die maximale Zugspannung im Polymerbetonrohr zu

$$\max.\sigma_{Z,d} = 9,60 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{BZ,gew,2} = 12,6 \text{ N/mm}^2.$$

Aus Abb. 3.3.4 ergibt sich unter Einwirkung der 1,8-fachen Gebrauchslast die maximale Druckspannung im Polymerbetonrohr zu

$$\max.\sigma_{D,d} = 12,24 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{D,gew,2} = 74,6 \text{ N/mm}^2.$$

Die erforderliche Sicherheit gegen Zug- und Druckspannungsversagen des Polymerbetonrohres wird nicht erreicht, da die 2,2-fache Gebrauchslast nicht erreicht wird. Die geringen Rohrdeformationen (s. Verformungsnachweis) zeigen jedoch, dass die Ursache hierfür nicht in einem überproportionalen Anstieg der Verformungen, die auf ein bevorstehendes Stabilitätsversagen hindeuten, sondern in numerischen Problemen in Verbindung mit der Weichschicht liegt. Die Spannungen unter 2,2-facher Gebrauchslast können daher hier wegen der geringen Rohrdeformationen durch lineare Extrapolation abgeschätzt werden:

$$\max.\sigma_{Z,d}(2,2 \text{ q}) = 9,60 \cdot 2,2/1,8 = 11,73 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{BZ,gew,2} = 12,6 \text{ N/mm}^2$$

$$\max.\sigma_{D,d}(2,2 \text{ q}) = 12,24 \cdot 2,2/1,8 = 14,96 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{D,gew,2} = 74,6 \text{ N/mm}^2$$

Die erforderlichen Sicherheiten gegen Zug- und Druckspannungsversagen des Polymerbetonrohres sind somit eingehalten.

Stabilitätsnachweis

Die erforderliche 2,2-fache Gebrauchslast wird im Rahmen der geometrisch nichtlinearen Berechnung nicht erreicht. Bereits im Spannungsnachweis wurde dargelegt, dass dies hier nicht auf ein bevorstehendes Stabilitätsversagen des Rohrquerschnittes, sondern auf numerische Probleme in Verbindung mit der Weichschicht zurückzuführen ist. So zeigen auch die in Abb. 3.3.8 dargestellten, unter 1,8-facher Gebrauchslast resultierenden Rohrdeformationen noch keinerlei kritisches Verhalten, das auf ein beginnendes Stabilitätsversagen hindeutet. Es kann somit von einer ausreichenden Sicherheit gegen Stabilitätsversagen ausgegangen werden.

4.4.3 LF 3: Erdüberdeckung von $h = 2,32 \text{ m}$, Verkehrslast LM 1, GW = +1,1 m NHN

Setzung OK Weichschicht

Aus Abb. 3.4.2 ergibt sich die Setzung in dem von der Rohrleitung und den DSV-Säulen unbeeinflussten Bereich für die OK der Weichschicht zu

$$s = 22,40 \text{ mm}.$$

Dieser Setzungswert ist der Setzung von Kap. 4.4.1 wie auch von Kap. 5 der Unterlage [21] nicht vergleichbar, da hier zusätzlich zur Erdlasteinwirkung die Verkehrslasteinwirkung wie auch der Grundwasserstand über Rohrsohle (Wasseraußendruck auf Rohrwandung und Boden unter Auftrieb) berücksichtigt wird.

Verformungsnachweis

Aus Abb. 3.4.5 ergibt sich die unter Einwirkung der Gebrauchslast auftretende maximale Vertikalverformung des Polymerbetonrohres zu

$$\Delta d_v = 33,04 - 32,23 = 0,81 \text{ mm}.$$

Bezogen auf den mittleren Rohrdurchmesser entspricht dies einer relativen Verformung von

$$\Delta d_{v,rel} = 100 \cdot 0,81 / (800 + 80) = 0,09 \text{ \%}.$$

Die gem. [2] zulässige relative Durchmesseränderung von 6% (für biegeeweiche Rohre) wird also nicht erreicht.

Aus Abb. 3.4.6 ergibt sich die unter Einwirkung der Gebrauchslast auftretende maximale Horizontalverformung des Polymerbetonrohres zu

$$\Delta d_h = 2 \cdot 0,37 = 0,74 \text{ mm.}$$

Bezogen auf den mittleren Rohrdurchmesser entspricht dies einer relativen Verformung von

$$\Delta d_{h,rel} = 100 \cdot 0,74 / (800 + 80) = 0,08 \text{ \%}.$$

Die gem. [2] zulässige relative Durchmesseränderung von 6% (für biegeeweiche Rohre) wird also nicht erreicht.

Spannungsnachweis

Aus Abb. 3.4.3 ergibt sich unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast die maximale Zugspannung im Polymerbetonrohr zu

$$\max. \sigma_{Z,d} = 7,39 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{BZ,gew,2} = 12,6 \text{ N/mm}^2.$$

Aus Abb. 3.4.4 ergibt sich unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast die maximale Druckspannung im Polymerbetonrohr zu

$$\max. \sigma_{D,d} = 10,56 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{D,gew,2} = 74,6 \text{ N/mm}^2.$$

Die erforderlichen Sicherheiten gegen Zug- und Druckspannungsversagen des Polymerbetonrohres sind somit eingehalten.

Stabilitätsnachweis

Durch die Erbringung des Spannungsnachweises unter 2,2-facher Last ist ebenfalls der Stabilitätsnachweis erbracht. Unter 2,2-fachen Lasten tritt kein elastisches Stabilitätsversagen auf.

4.5 Polymerbetonrohr DN 800, Querschnitt bei Station 0+214,53 m gem. Abb. 1.12, Variante C (b = 2,52 m)

4.5.1 LF 1: Erdüberdeckung von h = 2,32 m

Setzung OK Weichschicht

Aus Abb. 3.5.2 ergibt sich die Setzung in dem von der Rohrleitung und den DSV-Säulen unbeeinflussten Bereich für die OK der Weichschicht zu

$$s = 23,18 \text{ mm.}$$

Der Setzungswert entspricht somit etwa dem in Kap. 5 der Unterlage [21] angegebenen Setzungswert von ca. 20 cm. Diese Übereinstimmung stellt eine Validierung der hier verwendeten Modellbildung dar.

Verformungsnachweis

Aus Abb. 3.5.5 ergibt sich die unter Einwirkung der Gebrauchslast auftretende maximale Vertikalverformung des Polymerbetonrohres zu

$$\Delta d_v = 38,40 - 37,01 = 1,39 \text{ mm.}$$

Bezogen auf den mittleren Rohrdurchmesser entspricht dies einer relativen Verformung von

$$\Delta d_{v,rel} = 100 \cdot 1,39 / (800 + 80) = 0,16 \text{ \%}.$$

Die gem. [2] zulässige relative Durchmesseränderung von 6% (für biegeeweiche Rohre) wird also nicht erreicht.

Aus Abb. 3.5.6 ergibt sich die unter Einwirkung der Gebrauchslast auftretende maximale Horizontalverformung des Polymerbetonrohres zu

$$\Delta d_h = 2 \cdot 0,66 = 1,32 \text{ mm.}$$

Bezogen auf den mittleren Rohrdurchmesser entspricht dies einer relativen Verformung von

$$\Delta d_{h,rel} = 100 \cdot 1,32 / (800 + 80) = 0,15 \text{ \%}.$$

Die gem. [2] zulässige relative Durchmesseränderung von 6% (für biegeeweiche Rohre) wird also nicht erreicht.

Spannungsnachweis

Aus Abb. 3.5.3 ergibt sich unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast die maximale Zugspannung im Polymerbetonrohr zu

$$\max. \sigma_{Z,d} = 8,31 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{BZ,L} = 9,4 \text{ N/mm}^2.$$

Aus Abb. 3.5.4 ergibt sich unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast die maximale Druckspannung im Polymerbetonrohr zu

$$\max. \sigma_{D,d} = 9,87 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{D,L} = 55 \text{ N/mm}^2.$$

Die erforderlichen Sicherheiten gegen Zug- und Druckspannungsversagen des Polymerbetonrohres sind somit eingehalten.

Stabilitätsnachweis

Durch die Erbringung des Spannungsnachweises unter 2,2-facher Last ist ebenfalls der Stabilitätsnachweis erbracht. Unter 2,2-fachen Lasten tritt kein elastisches Stabilitätsversagen auf.

4.5.2 LF 2: Erdüberdeckung von h = 2,32 m, Verkehrslast LM 1

Setzung OK Weichschicht

Aus Abb. 3.6.2 ergibt sich die Setzung in dem von der Rohrleitung und den DSV-Säulen unbeeinflussten Bereich für die OK der Weichschicht zu

$$s = 35,95 \text{ mm.}$$

Der Setzungswert erhöht sich wegen der hier zusätzlich zur Erdlast einwirkenden Verkehrslast (Schwerlastverkehr LM 1 auf GOK) im Vergleich zu Kap. 4.5.1. Er ist nicht mit dem Setzungswert von Kap. 5 der Unterlage [21] vergleichbar, da dort die alleinige Erdlasteinwirkung betrachtet wird.

Verformungsnachweis

Aus Abb. 3.6.5 ergibt sich die unter Einwirkung der Gebrauchslast auftretende maximale Vertikalverformung des Polymerbetonrohres zu

$$\Delta d_v = 52,98 - 51,77 = 1,21 \text{ mm.}$$

Bezogen auf den mittleren Rohrdurchmesser entspricht dies einer relativen Verformung von

$$\Delta d_{v,rel} = 100 \cdot 1,21 / (800 + 80) = 0,14 \text{ \%}.$$

Die gem. [2] zulässige relative Durchmesseränderung von 6% (für biegeeweiche Rohre) wird also nicht erreicht.

Aus Abb. 3.6.6 ergibt sich die unter Einwirkung der Gebrauchslast auftretende maximale Horizontalverformung des Polymerbetonrohres zu

$$\Delta d_h = 2 \cdot 0,56 = 1,12 \text{ mm.}$$

Bezogen auf den mittleren Rohrdurchmesser entspricht dies einer relativen Verformung von

$$\Delta d_{h,rel} = 100 \cdot 1,12 / (800 + 80) = 0,13 \text{ \%}.$$

Die gem. [2] zulässige relative Durchmesseränderung von 6% (für biegeeweiche Rohre) wird also nicht erreicht.

Spannungsnachweis

Aus Abb. 3.6.3 ergibt sich unter Einwirkung der 1,8-fachen Gebrauchslast die maximale Zugspannung im Polymerbetonrohr zu

$$\max.\sigma_{Z,d} = 10,14 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{BZ,gew,2} = 12,6 \text{ N/mm}^2.$$

Aus Abb. 3.6.4 ergibt sich unter Einwirkung der 1,8-fachen Gebrauchslast die maximale Druckspannung im Polymerbetonrohr zu

$$\max.\sigma_{D,d} = 12,83 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{D,gew,2} = 74,6 \text{ N/mm}^2.$$

Die erforderliche Sicherheit gegen Zug- und Druckspannungsversagen des Polymerbetonrohres wird nicht erreicht, da die 2,2-fache Gebrauchslast nicht erreicht wird. Die geringen Rohrdeformationen (s. Verformungsnachweis) zeigen jedoch, dass die Ursache hierfür nicht in einem überproportionalen Anstieg der Verformungen, die auf ein bevorstehendes Stabilitätsversagen hindeuten, sondern in numerischen Problemen in Verbindung mit der Weichschicht liegt. Die Spannungen unter 2,2-facher Gebrauchslast können daher hier wegen der geringen Rohrdeformationen durch lineare Extrapolation abgeschätzt werden:

$$\max.\sigma_{Z,d}(2,2 \text{ q}) = 10,14 \cdot 2,2/1,8 = 12,39 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{BZ,gew,2} = 12,6 \text{ N/mm}^2$$

$$\max.\sigma_{D,d}(2,2 \text{ q}) = 12,83 \cdot 2,2/1,8 = 15,68 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{D,gew,2} = 74,6 \text{ N/mm}^2$$

Die erforderlichen Sicherheiten gegen Zug- und Druckspannungsversagen des Polymerbetonrohres sind somit eingehalten.

Stabilitätsnachweis

Die erforderliche 2,2-fache Gebrauchslast wird im Rahmen der geometrisch nichtlinearen Berechnung nicht erreicht. Bereits im Spannungsnachweis wurde dargelegt, dass dies hier nicht auf ein bevorstehendes Stabilitätsversagen des Rohrquerschnittes, sondern auf numerische Probleme in Verbindung mit der Weichschicht zurückzuführen ist. So zeigen auch die in Abb. 3.6.8 dargestellten, unter 1,8-facher Gebrauchslast resultierenden Rohrdeformationen noch keinerlei kritisches Verhalten, das auf ein beginnendes Stabilitätsversagen hindeutet. Es kann somit von einer ausreichenden Sicherheit gegen Stabilitätsversagen ausgegangen werden.

4.5.3 LF 3: Erdüberdeckung von $h = 2,32 \text{ m}$, Verkehrslast LM 1, GW = +1,1 m NHN

Setzung OK Weichschicht

Aus Abb. 3.7.2 ergibt sich die Setzung in dem von der Rohrleitung und den DSV-Säulen unbeeinflussten Bereich für die OK der Weichschicht zu

$$s = 22,37 \text{ mm.}$$

Dieser Setzungswert ist der Setzung von Kap. 4.5.1 wie auch von Kap. 5 der Unterlage [21] nicht vergleichbar, da hier zusätzlich zur Erdlasteinwirkung die Verkehrslasteinwirkung wie auch der Grundwasserstand über Rohrsohle (Wasseraußendruck auf Rohrwandung und Boden unter Auftrieb) berücksichtigt wird.

Verformungsnachweis

Aus Abb. 3.7.5 ergibt sich die unter Einwirkung der Gebrauchslast auftretende maximale Vertikalverformung des Polymerbetonrohres zu

$$\Delta d_v = 34,03 - 33,17 = 0,86 \text{ mm.}$$

Bezogen auf den mittleren Rohrdurchmesser entspricht dies einer relativen Verformung von

$$\Delta d_{v,rel} = 100 \cdot 0,86 / (800 + 80) = 0,10 \text{ \%}.$$

Die gem. [2] zulässige relative Durchmesseränderung von 6% (für biegeeweiche Rohre) wird also nicht erreicht.

Aus Abb. 3.7.6 ergibt sich die unter Einwirkung der Gebrauchslast auftretende maximale Horizontalverformung des Polymerbetonrohres zu

$$\Delta d_h = 2 \cdot 0,39 = 0,78 \text{ mm.}$$

Bezogen auf den mittleren Rohrdurchmesser entspricht dies einer relativen Verformung von

$$\Delta d_{h,rel} = 100 \cdot 0,78 / (800 + 80) = 0,09 \text{ \%}.$$

Die gem. [2] zulässige relative Durchmesseränderung von 6% (für biegeeweiche Rohre) wird also nicht erreicht.

Spannungsnachweis

Aus Abb. 3.7.3 ergibt sich unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast die maximale Zugspannung im Polymerbetonrohr zu

$$\max. \sigma_{Z,d} = 7,84 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{BZ,gew,2} = 12,6 \text{ N/mm}^2.$$

Aus Abb. 3.7.4 ergibt sich unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast die maximale Druckspannung im Polymerbetonrohr zu

$$\max. \sigma_{D,d} = 11,07 \text{ N/mm}^2 < \sigma_{D,gew,2} = 74,6 \text{ N/mm}^2.$$

Die erforderlichen Sicherheiten gegen Zug- und Druckspannungsversagen des Polymerbetonrohres sind somit eingehalten.

Stabilitätsnachweis

Durch die Erbringung des Spannungsnachweises unter 2,2-facher Last ist ebenfalls der Stabilitätsnachweis erbracht. Unter 2,2-fachen Lasten tritt kein elastisches Stabilitätsversagen auf.

5 Zusammenfassung

Im Zusammenhang mit der von Seiten der Stadtentwässerung Hamburg AöR geplanten Sielbaumaßnahme Süderstraße, Grevenweg, Luisenweg (Polymerbetonrohre DN 1600, DN 1400, DN 1200 und DN 800, einzubauen im Vortriebsverfahren), war die Fragestellung zu untersuchen, ob und in welcher Größe die Polymerbeton-Vortriebsrohre durch eine linienförmige Gründung auf DSV-Säulen Lasten infolge von Setzungen der seitlich neben den Rohren und seitlich neben den DSV-Säulen befindlichen Weichschichten erfahren können und ob diese Lasten von den Rohrquerschnitten aufgenommen werden können.

Die Nennweiten DN 1600 bei Station 0+028,50 (s. Abb. 1.1) und DN 800 bei Station 0+214,53 (s. Abb. 1.12) wurden hier gem. Abstimmung mit dem Auftraggeber (HSE, Hr. Gottschlich) statisch nachgewiesen. Gegenstand der vorliegenden Stellungnahme ist allein der Endzustand der eingebauten Rohrleitungen. Der Bauzustand des Rohrvortriebs ist gesondert nachzuweisen.

Für den Polymerbeton-Rohrquerschnitt DN 1600 ergab die statische Nachweisführung unter Voraussetzung der in Abb. 1.1 dargestellten Einbaubedingungen (Variante A), insbesondere der Breite der DSV-Säulen auf Kämpferhöhe von $b = 3,0 \text{ m}$ ($b/2 = 1,5 \text{ m}$), sowie der in Kap. 3 aufgeführten statischen Randbedingungen eine ausreichende Tragfähigkeit. Die erforderlichen Spannungs-, Verformungs- und Stabilitätsnachweise sind eingehalten. Aus der zusätzlichen Betrachtung (Variante B) einer reduzierten Breite von $b = 2,8 \text{ m}$ ($b/2 = 1,4 \text{ m}$), z. B. infolge einer unplanmäßigen horizontalen Abweichung der Rohrachse um $0,1 \text{ m}$, ergibt sich ebenfalls die ausreichende Standsicherheit.

Nennweite	b [m]	b/D _a [-]	t/D _a [-]	h [m]	h _{w,so} [m]	D [m]	Abb.
DN 1600	3,0	1,55	0,088	3,40	2,98	2,97	1.1
	3,0	1,55	0,088	3,19	2,85	2,97	1.2
	3,0	1,55	0,088	3,21	2,78	2,97	1.3
DN 1400	2,7	1,57	0,093	3,15	2,63	2,43	1.4
DN 1200	2,4	1,61	0,096	3,18	2,47	3,64	1.5
	2,4	1,61	0,096	3,11	2,41	2,89	1.6
	2,4	1,61	0,096	3,02	2,43	2,89	1.7
	2,4	1,61	0,096	2,77	2,35	2,83	1.8
	2,4	1,61	0,096	3,43	2,70	3,39	1.9
	2,4	1,61	0,096	3,04	2,65	4,67	1.10
DN 800	1,81	1,88	0,083	2,80	2,44	2,48	1.11
	2,72¹⁾	2,83	0,083	2,32	2,56	7,52	1.12

¹⁾ Vergrößerung der Breite der DSV-Säule auf $b = 2,72 \text{ m}$ erforderlich

Tab. 1: Geometrische Kennzahlen für die Einbausituationen gem. Abb. 1.1 bis 1.12,

- b: Breite (planmäßig) der DSV-Säulen auf Kämpferhöhe
- D_a: Rohr-Außendurchmesser
- t: Rohrwanddicke
- h: Überdeckungshöhe
- h_{w,so}: Grundwasserstand über Sohle
- D: Dicke der Weichschicht unter der Rohrsohle

Die statische Berechnung zu dem Polymerbeton-Rohrquerschnitt DN 800 (Abb. 1.12) beinhaltet den Fall der größten Dicke der Weichschicht und somit die hier ungünstigsten statischen Verhältnisse. Unter Ansatz der gem. Abb. 1.12 geplanten Einbaubedingungen (Variante A) ergibt sich im LF 1 (alleinige Einwirkung der Erdlasten) keine ausreichende Sicherheit gegen Zugspannungsversagen. Auf die Betrachtung der Lastfälle 2 und 3 wird für Variante A daher verzichtet. Eine erhöhte Breite der DSV-Säulen auf Kämpferhöhe (Variante B) von $b = 2,72 \text{ m}$

($b/2 = 1,36 \text{ m}$) führt dazu, dass die erforderlichen statischen Nachweise eingehalten werden können. Die Betrachtung der Variante C zeigt schließlich, dass sich auch infolge einer im Vergleich zu Variante B reduzierten Breite von $b = 2,52 \text{ m}$ ($b/2 = 1,26 \text{ m}$), z. B. infolge einer unplanmäßigen horizontalen Abweichung der Rohrachse um $0,1 \text{ m}$, die Einhaltung der statischen Nachweise ergibt.

Tab. 1 beinhaltet eine Zusammenstellung von geometrischen Kenndaten, die maßgeblichen Einfluss auf die statische Nachweisführung haben. Die durch Fettdruck markierten Daten beinhalten die beiden hier nachgewiesenen Fälle. Dabei handelt sich um die beiden Nennweiten mit dem kleinsten Verhältnis Wanddicke/Außendurchmesser (t/D_a). Die Rohrquerschnitte weisen somit gegenüber den Nennweiten DN 1400 und DN 1200 eine geringere Steifigkeit auf.

Für die Nennweiten DN 1600 (Einbau gem. Abb. 1.1 bis 1.3), DN 1400 (Einbau gem. Abb. 1.4), DN 1200 (Einbau gem. Abb. 1.6 bis 1.9) und DN 800 (Einbau gem. Abb. 1.11) ergeben sich abgesehen von der Nennweite bzgl. der Bodenverhältnisse und Lasteinwirkungen vergleichbare Verhältnisse. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass sich auch vergleichbare Rohrbeanspruchungen ergeben und die Standsicherheit in den genannten hier nicht nachgewiesenen Fällen (Abb. 1.2, 1.3, 1.4, 1.6-1.9, 1.11) gegeben ist.

Die Einbauverhältnisse gem. Abb. 1.5 und 1.10 der Nennweite DN 1200 weisen erhöhte Dicken der unter der Rohrsohle befindlichen Weichschicht und somit im Vergleich zu den Verhältnissen der Abb. 1.6 -1.9 ungünstigere statische Verhältnisse auf. Vergleichend wurde (ohne Dokumentation) die Nennweite DN 1600 mit $D = 4,7 \text{ m}$ (analog Abb. 1.10) betrachtet. Es ergab sich eine ausreichende Standsicherheit und keine Notwendigkeit, die Breite der DSV-Säulen zu erhöhen. Somit ist davon auszugehen, dass auch für die Fälle der Abbildungen 1.5 und 1.10 (DN 1200) die statischen Nachweise einzuhalten sind.

Dr. Doll Ingenieurgesellschaft mbH



Dr.-Ing. Heinz Doll
Geschäftsführer



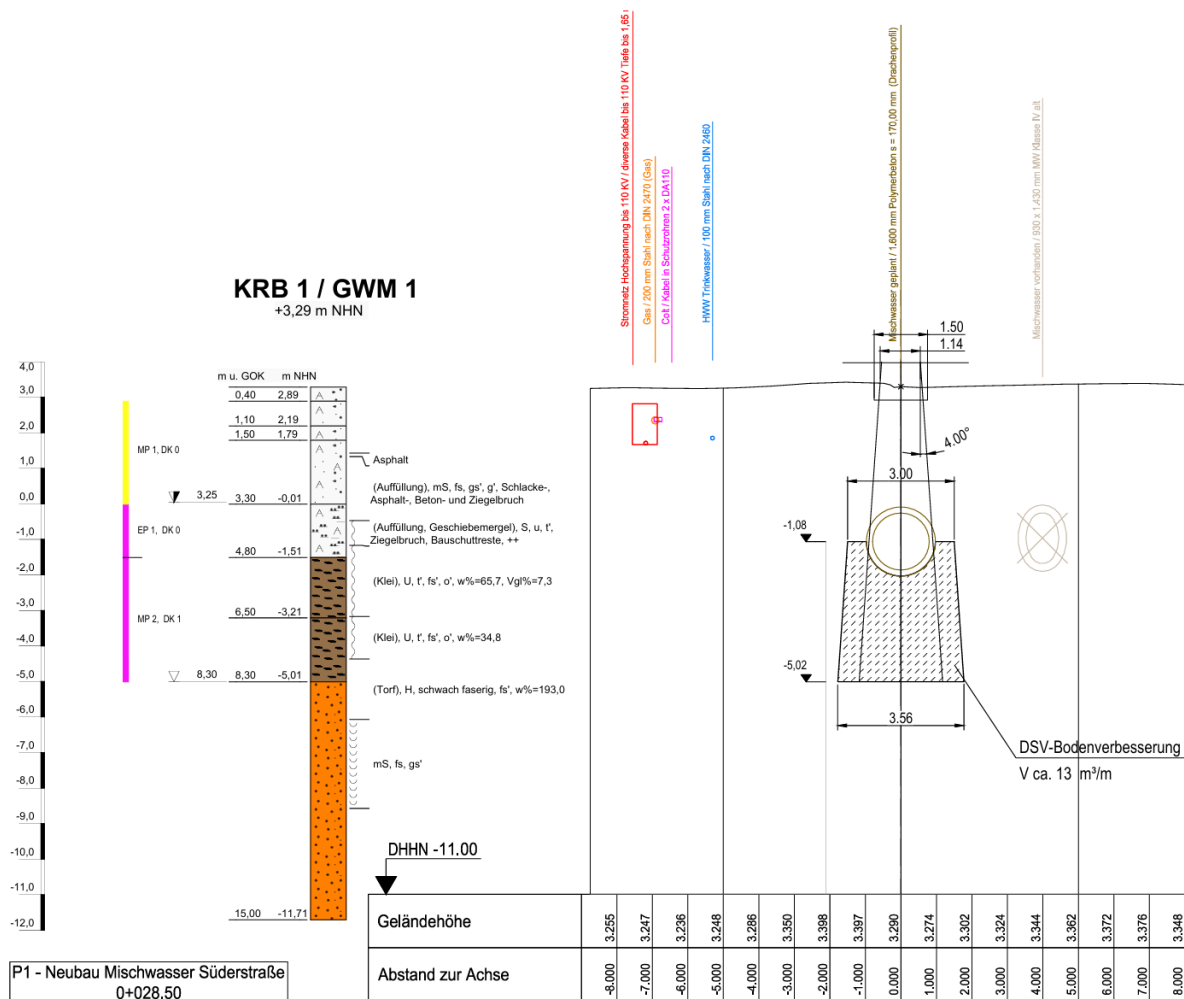


Abb. 1.1: Querschnitt bei Station 0+028,50, entnommen aus Unterlage [10]

Randbedingungen:

- Polymerbeton-Vortriebsrohr DN 1600
- Rohrwanddicke: $t = 170 \text{ mm}$
- GOK: $+3,29 \text{ m NHN}$
- Kämpferhöhe: $-1,08 \text{ m NHN}$
- Überdeckungshöhe: $h = 3,29 + 1,08 - 1,6/2 - 0,17 = 3,40 \text{ m}$
- Sohlhöhe: $So = -1,08 - 1,6/2 = -1,88 \text{ m NHN}$
- OK Weichschicht: $-1,51 \text{ m NHN}$
- UK Weichschicht: $-5,01 \text{ m NHN}$
- Dicke Weichschicht: $D_{KI} = 5,01 - 1,51 = 3,5 \text{ m}$
- UK Boderverbesserung: $-5,02 \text{ m NHN}$
- Dicke Gründungsschicht: $D_{Aufl.} = 5,02 - 1,88 - 0,17 = 2,97 \text{ m}$

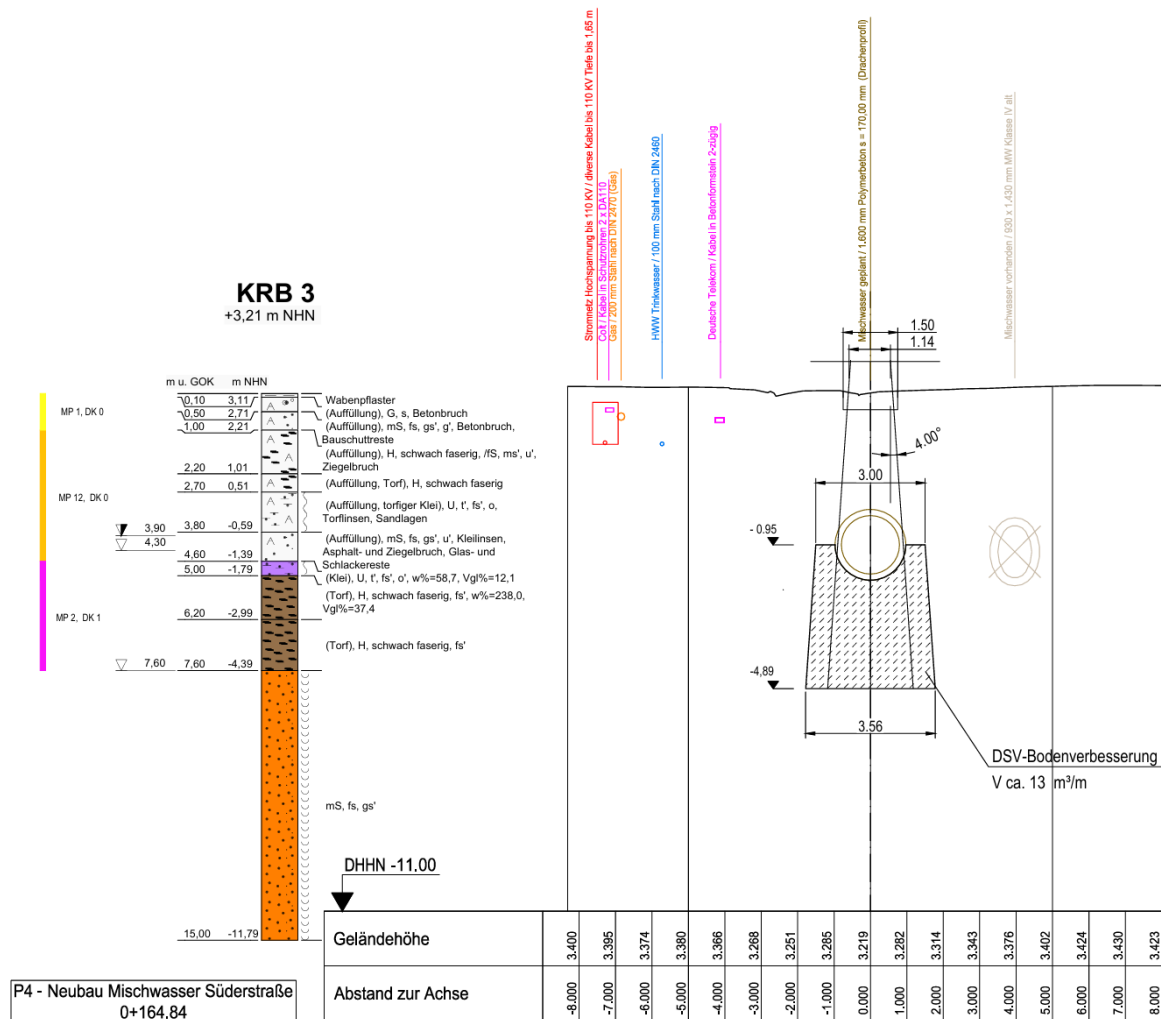


Abb. 1.2: Querschnitt bei Station 0+164,84, entnommen aus Unterlage [10]

Randbedingungen: Polymerbeton-Vortriebsrohr DN 1600
Rohrwanddicke: $t = 170 \text{ mm}$
GOK: +3,21 m NHN
Kämpferhöhe: -0,95 m NHN
Überdeckungshöhe: $h = 3,21 + 0,95 - 1,6/2 - 0,17 = 3,19 \text{ m}$
Sohlhöhe: $So = -0,95 - 1,6/2 = -1,75 \text{ m NHN}$
OK Weichschicht: -1,39 m NHN
UK Weichschicht: -4,39 m NHN
Dicke Weichschicht: $D_{Kl, To} = 4,39 - 1,39 = 3,0 \text{ m}$
UK Boderverbesserung: -4,89 m NHN
Dicke Gründungsschicht: $D_{Auf.} = 4,89 - 1,75 - 0,17 = 2,97 \text{ m}$

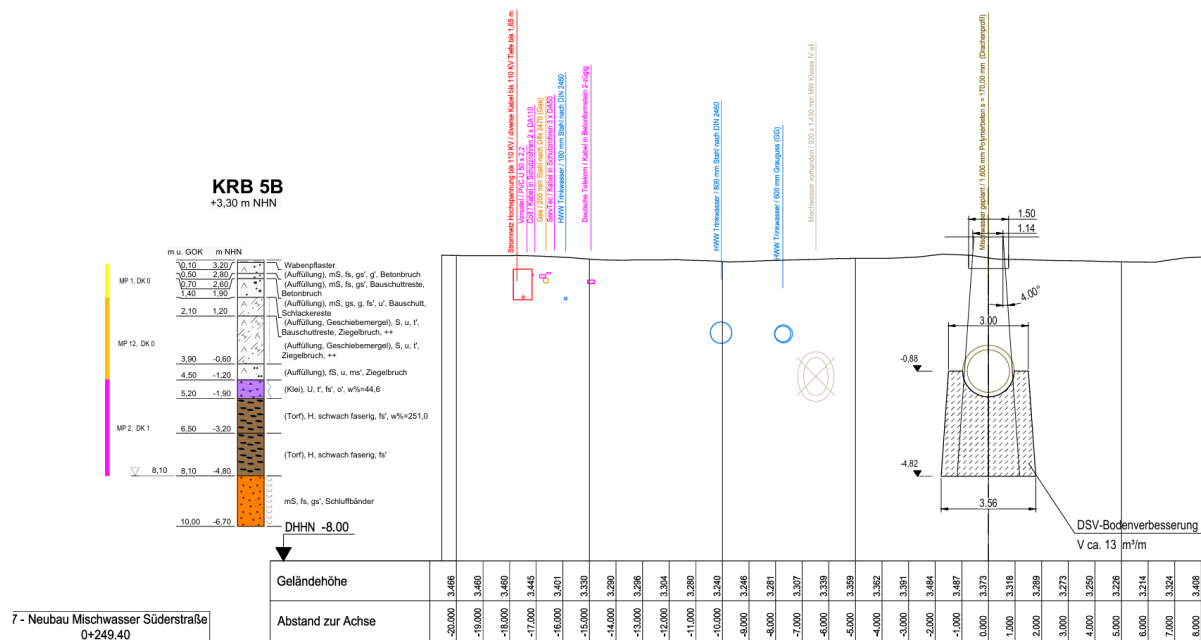
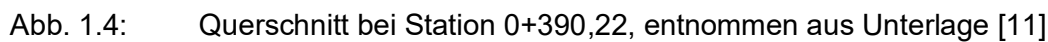


Abb. 1.3: Querschnitt bei Station 0+249,40, entnommen aus Unterlage [10]

Randbedingungen:

- Polymerbeton-Vortriebsrohr DN 1600
- Rohrwanddicke: $t = 170 \text{ mm}$
- GOK: $+3,30 \text{ m NHN}$
- Kämpferhöhe: $-0,88 \text{ m NHN}$
- Überdeckungshöhe: $h = 3,30 + 0,88 - 1,6/2 - 0,17 = 3,21 \text{ m}$
- Sohlhöhe: $So = -0,88 - 1,6/2 = -1,68 \text{ m NHN}$
- OK Weichschicht: $-1,20 \text{ m NHN}$
- UK Weichschicht: $-4,80 \text{ m NHN}$
- Dicke Weichschicht: $D_{Kl,To} = 4,80 - 1,20 = 3,6 \text{ m}$
- UK Boderverbesserung: $-4,82 \text{ m NHN}$
- Dicke Gründungsschicht: $D_{Aufl.} = 4,82 - 1,68 - 0,17 = 2,97 \text{ m}$



Randbedingungen:	Polymerbeton-Vortriebsrohr DN 1400
Rohrwanddicke:	$t = 160 \text{ mm}$
GOK:	$+3,18 \text{ m NHN}$
Kämpferhöhe:	$-0,83 \text{ m NHN}$
Überdeckungshöhe:	$h = 3,18 + 0,83 - 1,4/2 - 0,16 = 3,15 \text{ m}$
Sohlhöhe:	$S_o = -0,83 - 1,4/2 = -1,53 \text{ m NHN}$
OK Weichschicht:	$0,68 \text{ m NHN}$
UK Weichschicht:	$-4,12 \text{ m NHN}$
Dicke Weichschicht:	$D_{Kl, To} = 4,80 + 0,68 = 4,8 \text{ m}$
UK Boderverbesserung:	$-4,12 \text{ m NHN}$
Dicke Gründungsschicht:	$D_{Aufl.} = 4,12 - 1,53 - 0,16 = 2,43 \text{ m}$

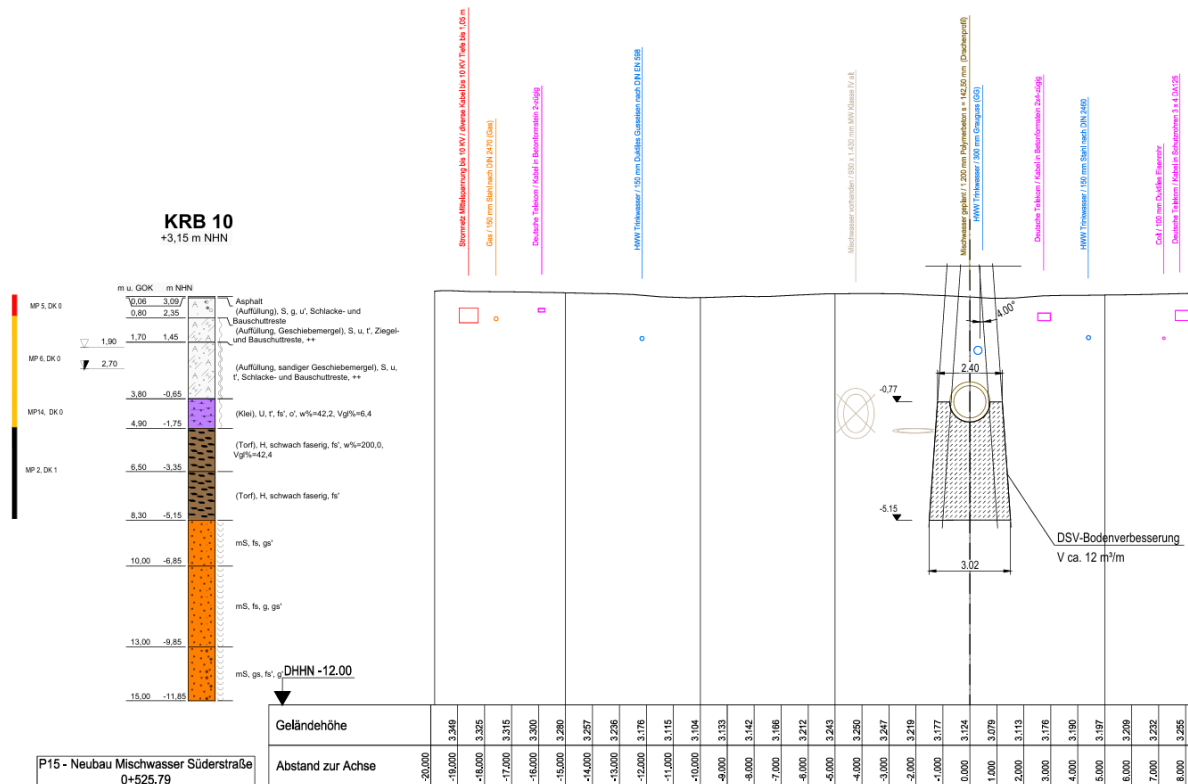


Abb. 1.5: Querschnitt bei Station 0+525,79, entnommen aus Unterlage [11]

Randbedingungen: Polymerbeton-Vortriebsrohr DN 1200
Rohrwanddicke: $t = 142,5 \text{ mm}$
GOK: $+3,15 \text{ m NHN}$
Kämpferhöhe: $-0,77 \text{ m NHN}$
Überdeckungshöhe: $h = 3,15 + 0,77 - 1,2/2 - 0,1425 = 3,18 \text{ m}$
Sohlhöhe: $So = -0,77 - 1,2/2 = -1,37 \text{ m NHN}$
OK Weichschicht: $-0,65 \text{ m NHN}$
UK Weichschicht: $-5,15 \text{ m NHN}$
Dicke Weichschicht: $D_{KI, To} = 5,15 - 0,65 = 4,5 \text{ m}$
UK Boderver-
besserung: $-5,15 \text{ m NHN}$
Dicke Gründungs-
schicht: $D_{Aufl.} = 5,15 - 1,37 - 0,1425 = 3,64 \text{ m}$

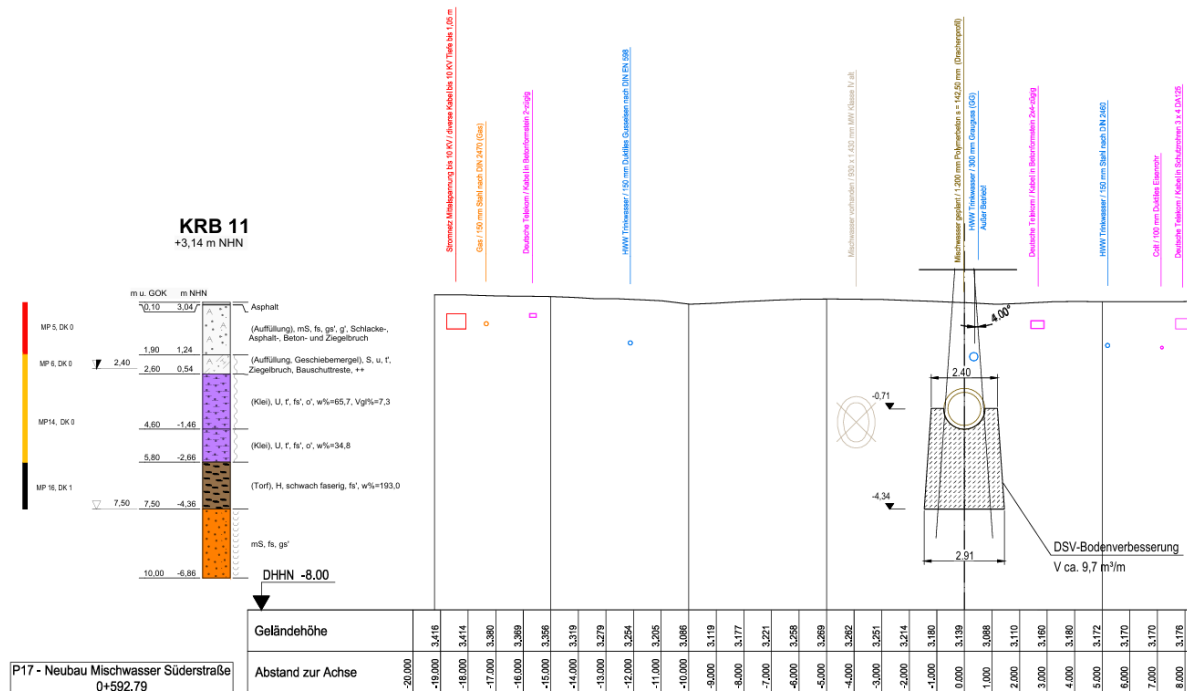


Abb. 1.6: Querschnitt bei Station 0+592,79, entnommen aus Unterlage [12]

Randbedingungen:	Polymerbeton-Vortriebsrohr DN 1200
Rohrwanddicke:	$t = 142,5 \text{ mm}$
GOK:	$+3,14 \text{ m NHN}$
Kämpferhöhe:	$-0,71 \text{ m NHN}$
Überdeckungshöhe:	$h = 3,14 + 0,71 - 1,2/2 - 0,1425 = 3,11 \text{ m}$
Sohlhöhe:	$S_o = -0,71 - 1,2/2 = -1,31 \text{ m NHN}$
OK Weichschicht:	$0,54 \text{ m NHN}$
UK Weichschicht:	$-4,36 \text{ m NHN}$
Dicke Weichschicht:	$D_{Kl,To} = 4,36 + 0,54 = 4,9 \text{ m}$
UK Boderver-	
besserung:	$-4,34 \text{ m NHN}$
Dicke Gründungs-	
schicht:	$D_{Aufl.} = 4,34 - 1,31 - 0,1425 = 2,89 \text{ m}$

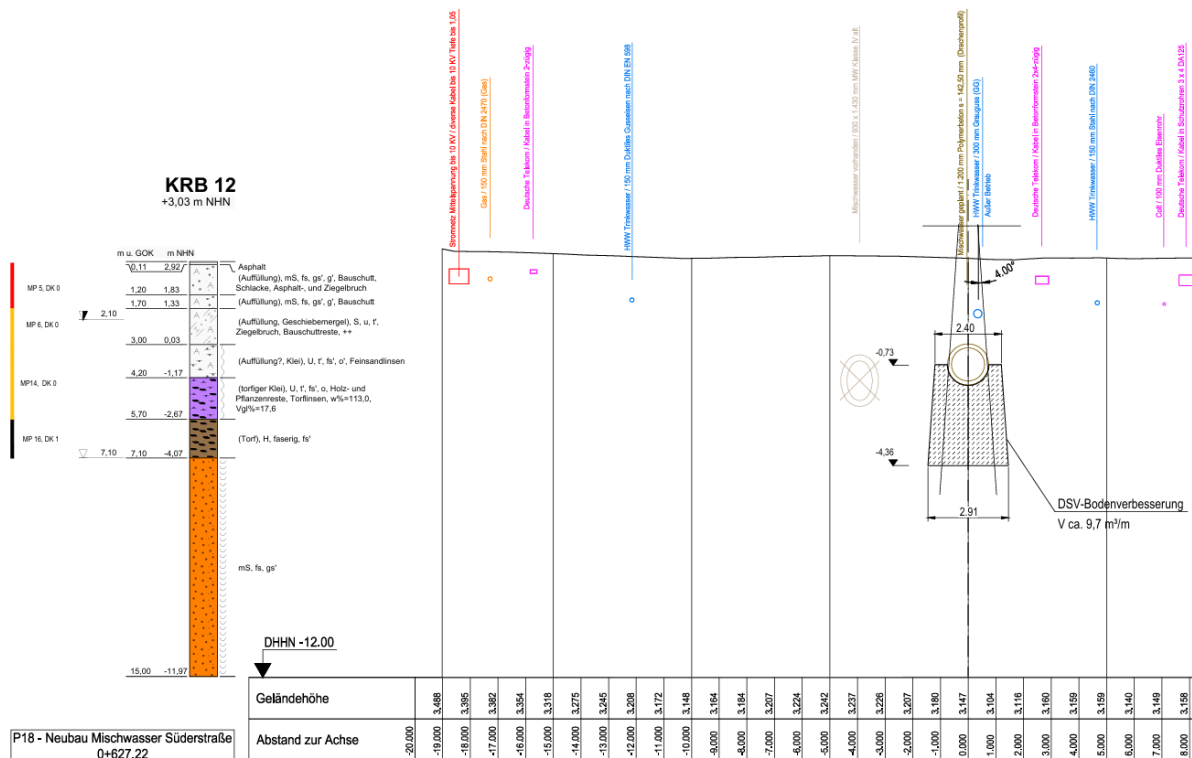


Abb. 1.7: Querschnitt bei Station 0+627,22, entnommen aus Unterlage [12]

Randbedingungen: Polymerbeton-Vortriebsrohr DN 1200
Rohrwanddicke: $t = 142,5 \text{ mm}$
GOK: +3,03 m NHN
Kämpferhöhe: -0,73 m NHN
Überdeckungshöhe: $h = 3,03 + 0,73 - 1,2/2 - 0,1425 = 3,02 \text{ m}$
Sohlhöhe: $So = -0,73 - 1,2/2 = -1,33 \text{ m NHN}$
OK Weichschicht: -1,17 m NHN
UK Weichschicht: -4,07 m NHN
Dicke Weichschicht: $D_{KI, To} = 4,07 - 1,17 = 2,9 \text{ m}$
UK Boderverbesserung: -4,36 m NHN
Dicke Gründungsschicht: $D_{Auf.} = 4,36 - 1,33 - 0,1425 = 2,89 \text{ m}$

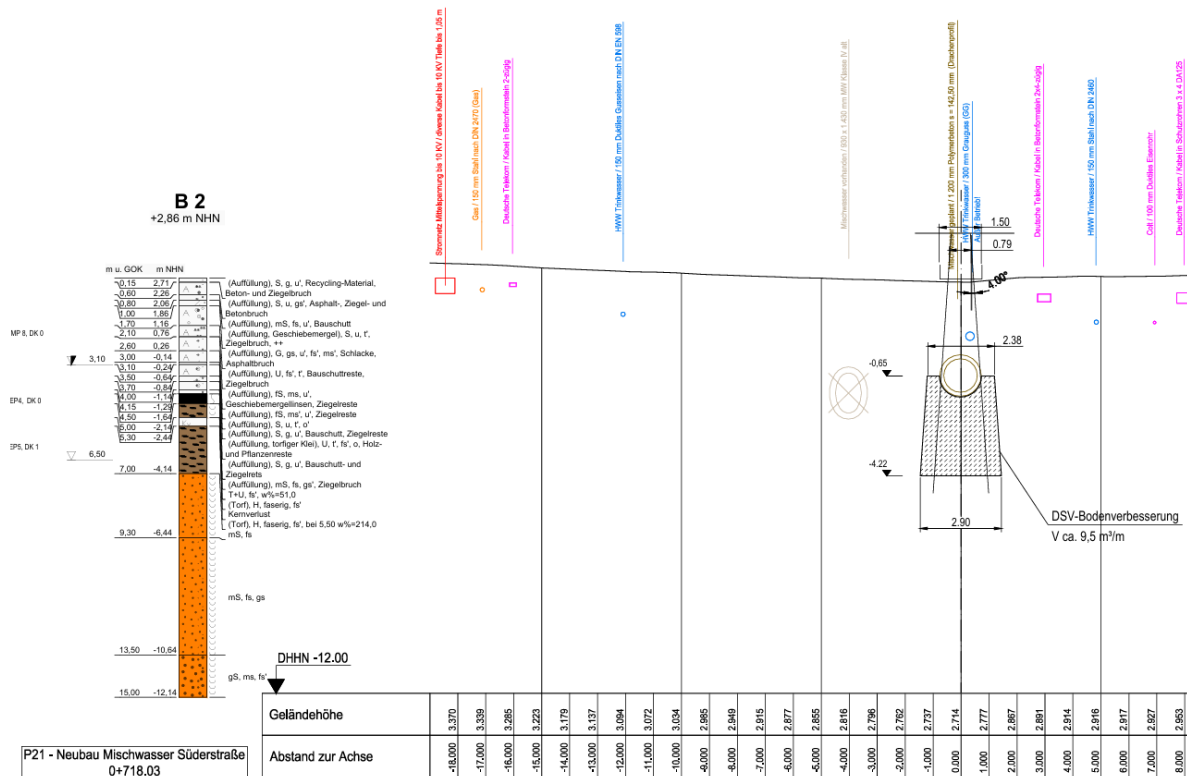


Abb. 1.8: Querschnitt bei Station 0+718,03, entnommen aus Unterlage [12]

Randbedingungen:	Polymerbeton-Vortriebsrohr DN 1200
Rohrwanddicke:	$t = 142,5 \text{ mm}$
GOK:	+2,86 m NHN
Kämpferhöhe:	-0,65 m NHN
Überdeckungshöhe:	$h = 2,86 + 0,65 - 1,2/2 - 0,1425 = 2,77 \text{ m}$
Sohlhöhe:	$So = -0,65 - 1,2/2 = -1,25 \text{ m NHN}$
OK Weichschicht:	-1,29 m NHN
UK Weichschicht:	-4,14 m NHN
Dicke Weichschicht:	$D_{Kl,To} = 4,07 - 1,29 = 2,78 \text{ m}$
UK Boderver-	
besserung:	-4,22 m NHN
Dicke Gründungs-	
schicht:	$D_{Auf.} = 4,22 - 1,25 - 0,1425 = 2,83 \text{ m}$

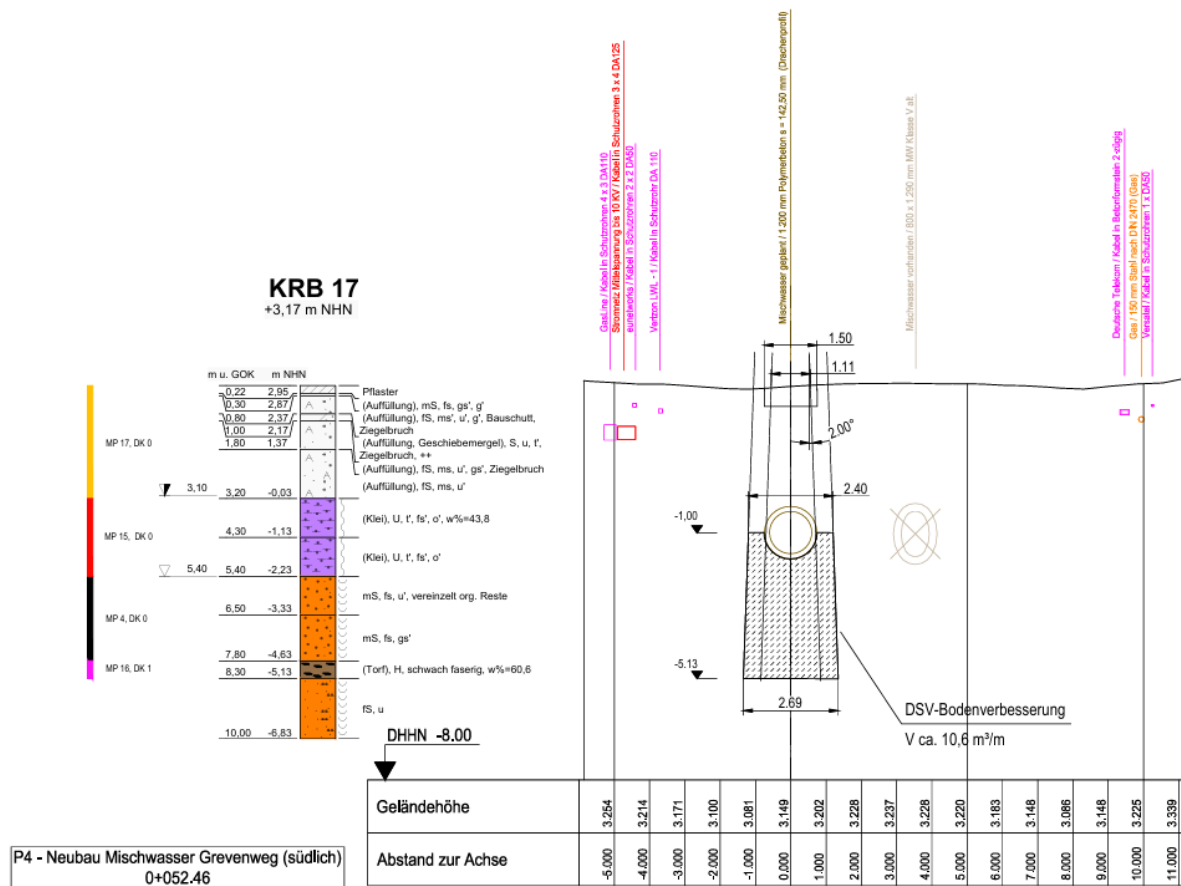


Abb. 1.9: Querschnitt bei Station 0+052,46, entnommen aus Unterlage [13]

Randbedingungen:	Polymerbeton-Vortriebsrohr DN 1200
Rohrwanddicke:	$t = 142,5 \text{ mm}$
GOK:	$+3,17 \text{ m NHN}$
Kämpferhöhe:	$-1,00 \text{ m NHN}$
Überdeckungshöhe:	$h = 3,17 + 1,00 - 1,2/2 - 0,1425 = 3,43 \text{ m}$
Sohlhöhe:	$S_o = -1,00 - 1,2/2 = -1,60 \text{ m NHN}$
OK Weichschicht A:	$-0,03 \text{ m NHN}$
UK Weichschicht A:	$-2,23 \text{ m NHN}$
OK Weichschicht B:	$-4,63 \text{ m NHN}$
UK Weichschicht B:	$-5,13 \text{ m NHN}$
Dicke Weichschicht:	$D_{\text{KI},T_o} = 2,23 - 0,03 + 5,13 - 4,63 = 2,70 \text{ m}$
UK Boderver-	
besserung:	$-5,13 \text{ m NHN}$
Dicke Gründungs-	
schicht:	$D_{\text{Aufl.}} = 5,13 - 1,60 - 0,1425 = 3,39 \text{ m}$

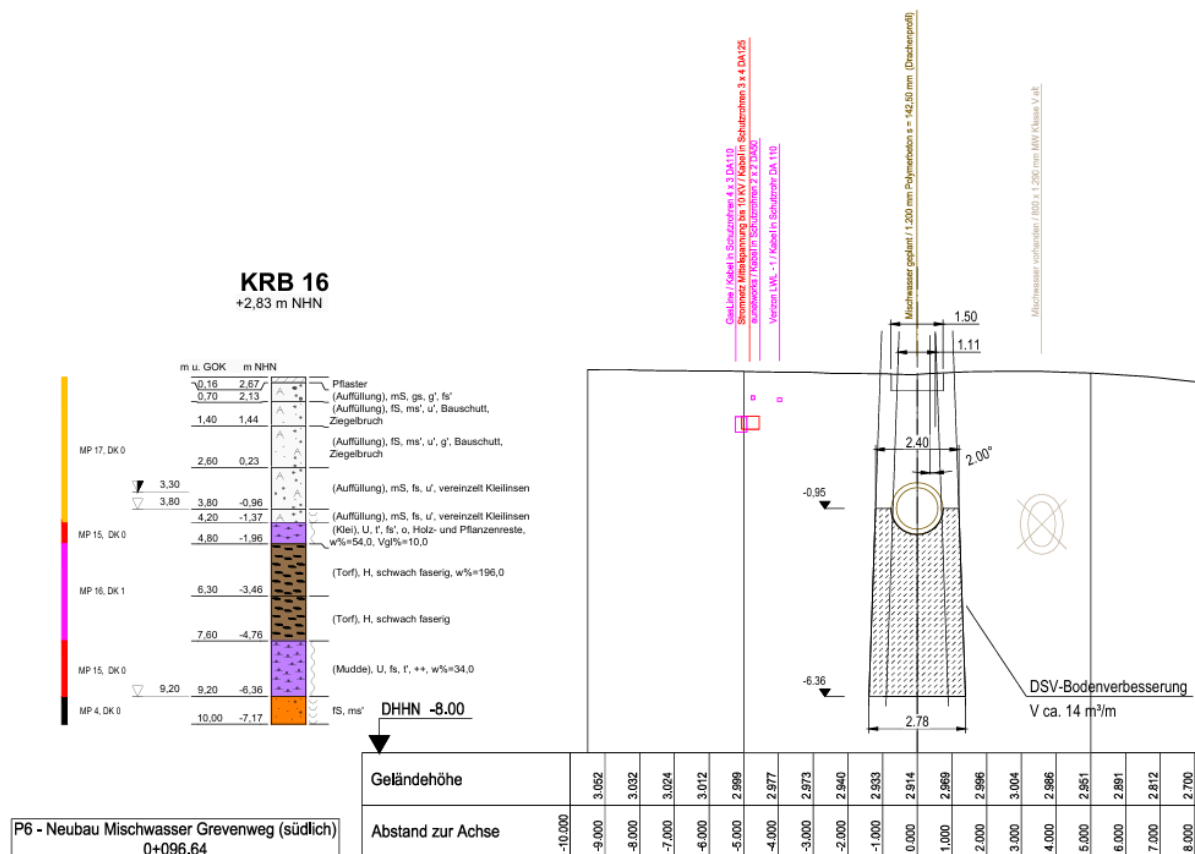


Abb. 1.10: Querschnitt bei Station 0+096,64, entnommen aus Unterlage [13]

Randbedingungen:

- Polymerbeton-Vortriebsrohr DN 1200
- Rohrwanddicke: $t = 142,5 \text{ mm}$
- GOK: $+2,83 \text{ m NHN}$
- Kämpferhöhe: $-0,95 \text{ m NHN}$
- Überdeckungshöhe: $h = 2,83 + 0,95 - 1,2/2 - 0,1425 = 3,04 \text{ m}$
- Sohlhöhe: $So = -0,95 - 1,2/2 = -1,55 \text{ m NHN}$
- OK Weichschicht: $-1,37 \text{ m NHN}$
- UK Weichschicht: $-6,36 \text{ m NHN}$
- Dicke Weichschicht: $D_{Kl, To} = 6,36 - 1,37 = 4,99 \text{ m}$
- UK Boderverbesserung: $-6,36 \text{ m NHN}$
- Dicke Gründungsschicht: $D_{Aufl.} = 6,36 - 1,55 - 0,1425 = 4,67 \text{ m}$

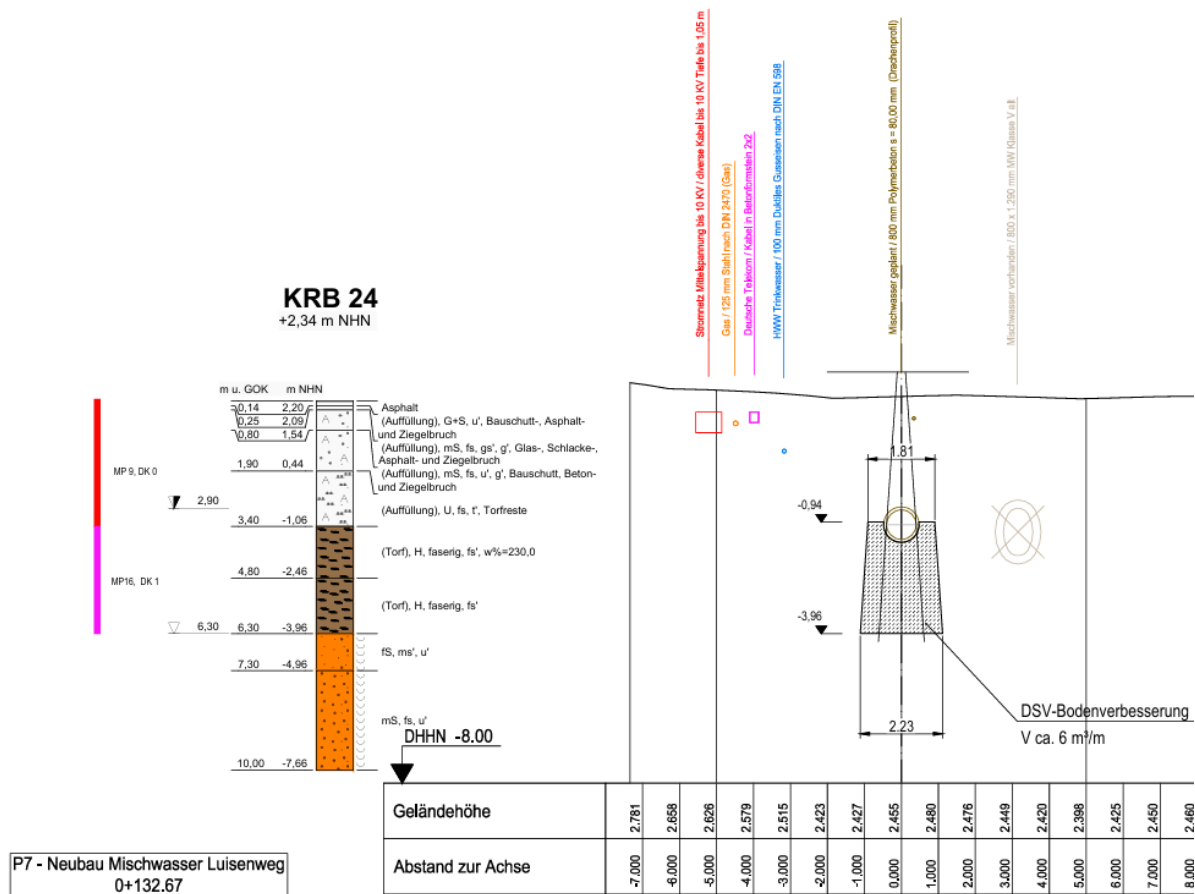


Abb. 1.11: Querschnitt bei Station 0+132,67, entnommen aus Unterlage [14]

Randbedingungen: Polymerbeton-Vortriebsrohr DN 800
 Rohrwanddicke: $t = 80 \text{ mm}$
 GOK: +2,34 m NHN
 Kämpferhöhe: -0,94 m NHN
 Überdeckungshöhe: $h = 2,34 + 0,94 - 0,8/2 - 0,08 = 2,80 \text{ m}$
 Sohlhöhe: $So = -0,94 - 0,8/2 = -1,34 \text{ m NHN}$
 OK Weichschicht: -1,06 m NHN
 UK Weichschicht: -3,96 m NHN
 Dicke Weichschicht: $D_{To} = 3,96 - 1,06 = 2,9 \text{ m}$
 UK Boderverbesserung: -3,96 m NHN
 Dicke Gründungsschicht: $D_{Auf.} = 3,96 - 1,34 - 0,08 = 2,48 \text{ m}$

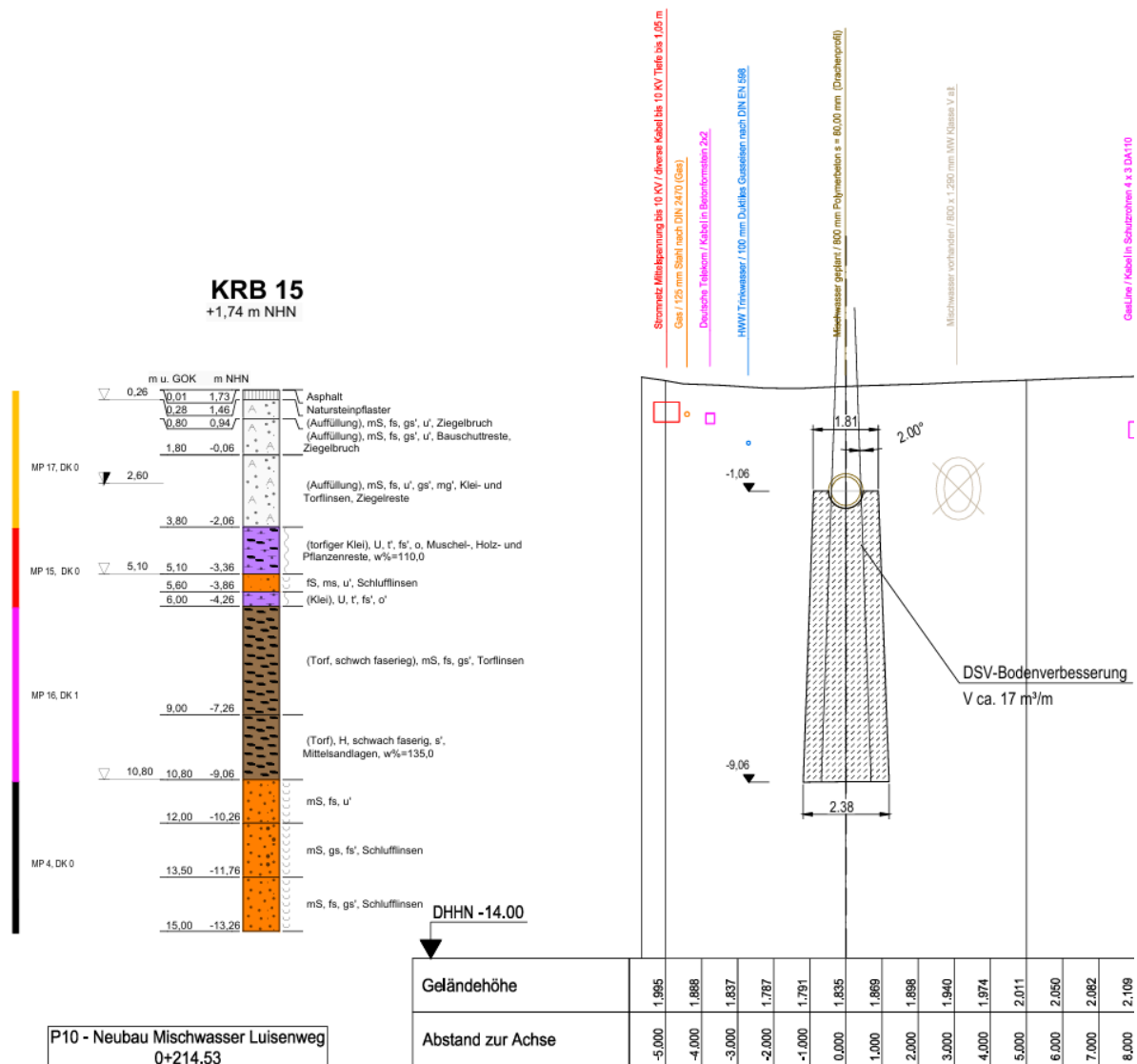


Abb. 1.12: Querschnitt bei Station 0+214,53, entnommen aus Unterlage [14]

Randbedingungen:

- Polymerbeton-Vortriebsrohr DN 800
- Rohrwanddicke: $t = 80 \text{ mm}$
- GOK: +1,74 m NHN
- Kämpferhöhe: -1,06 m NHN
- Überdeckungshöhe: $h = 1,74 + 1,06 - 0,8/2 - 0,08 = 2,32 \text{ m}$
- Sohlhöhe: $So = -1,06 - 0,8/2 = -1,46 \text{ m NHN}$
- OK Weichschicht: -2,06 m NHN
- UK Weichschicht: -9,06 m NHN
- Dicke Weichschicht: $D_{To} = 9,06 - 2,06 = 7,0 \text{ m}$
- UK Boderverbesserung: -9,06 m NHN
- Dicke Gründungsschicht: $D_{Auf.} = 9,06 - 1,46 - 0,08 = 7,52 \text{ m}$

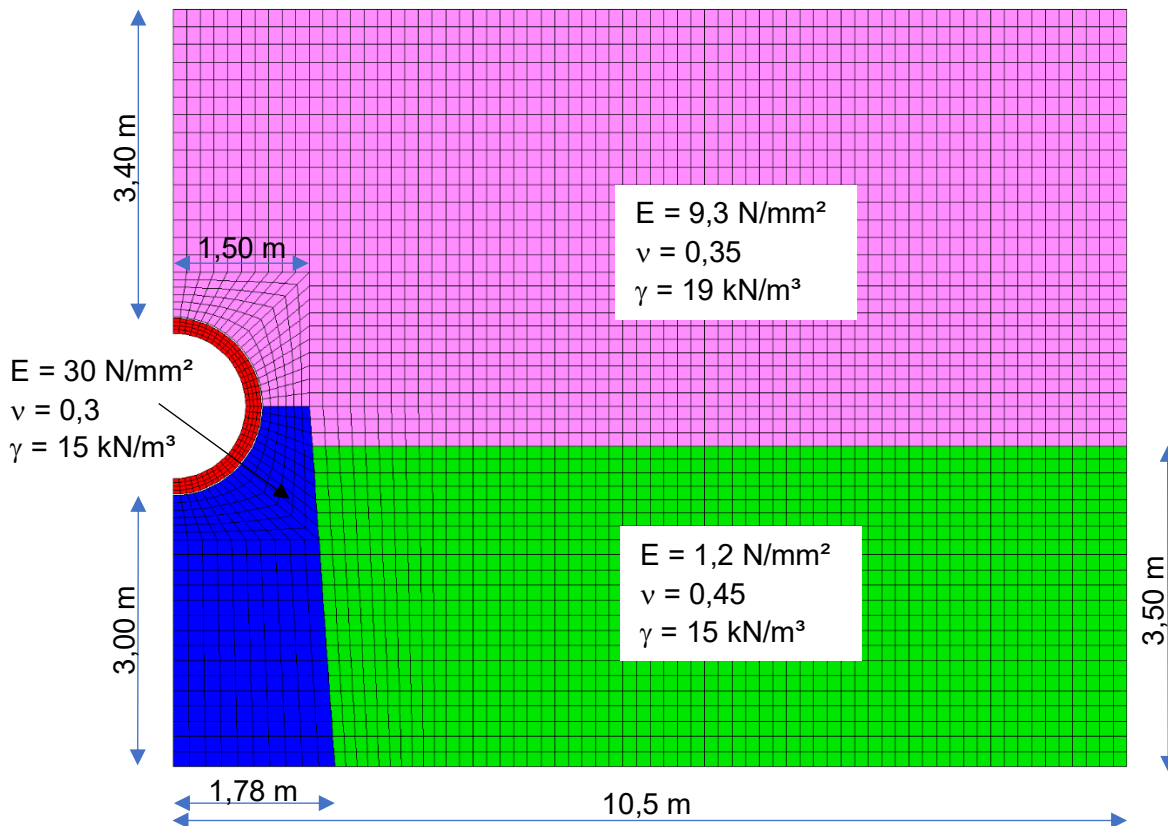


Abb. 2.1.1 Diskretisiertes Rechenmodell, Nennweite DN 1600, Variante A, LF 1: Erdlasten

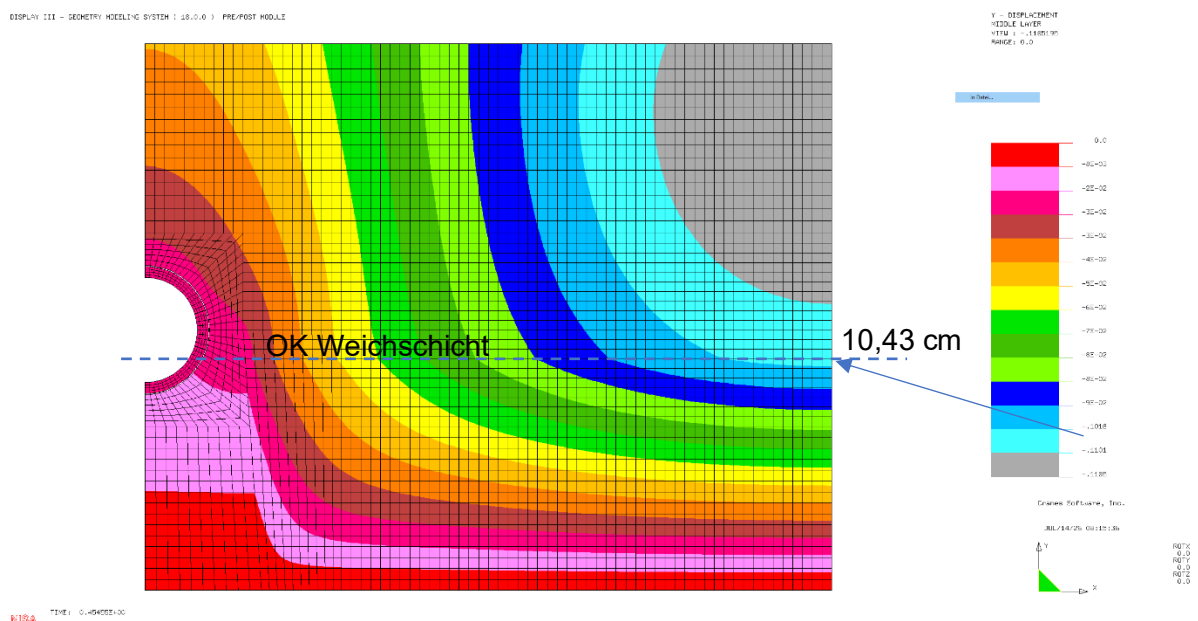
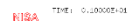
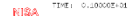


Abb. 2.1.2: Vertikale Verformungen des Modellbereiches [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast, Variante A, LF 1: Erdlasten



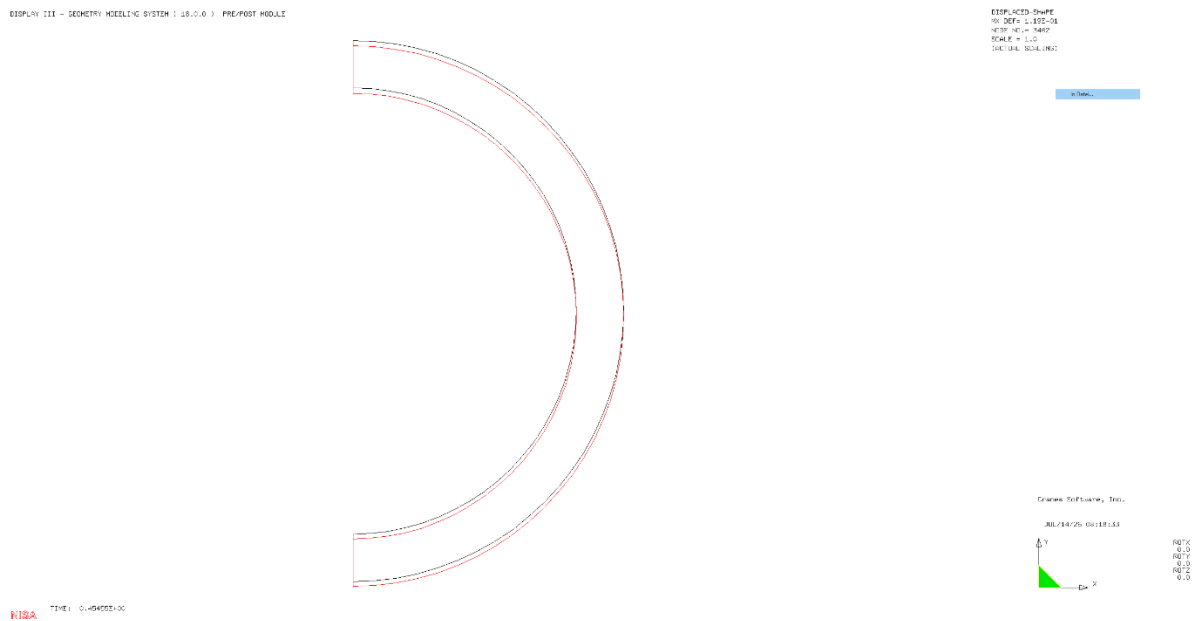


Abb. 2.1.7: Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast, Variante A, LF 1: Erdlasten

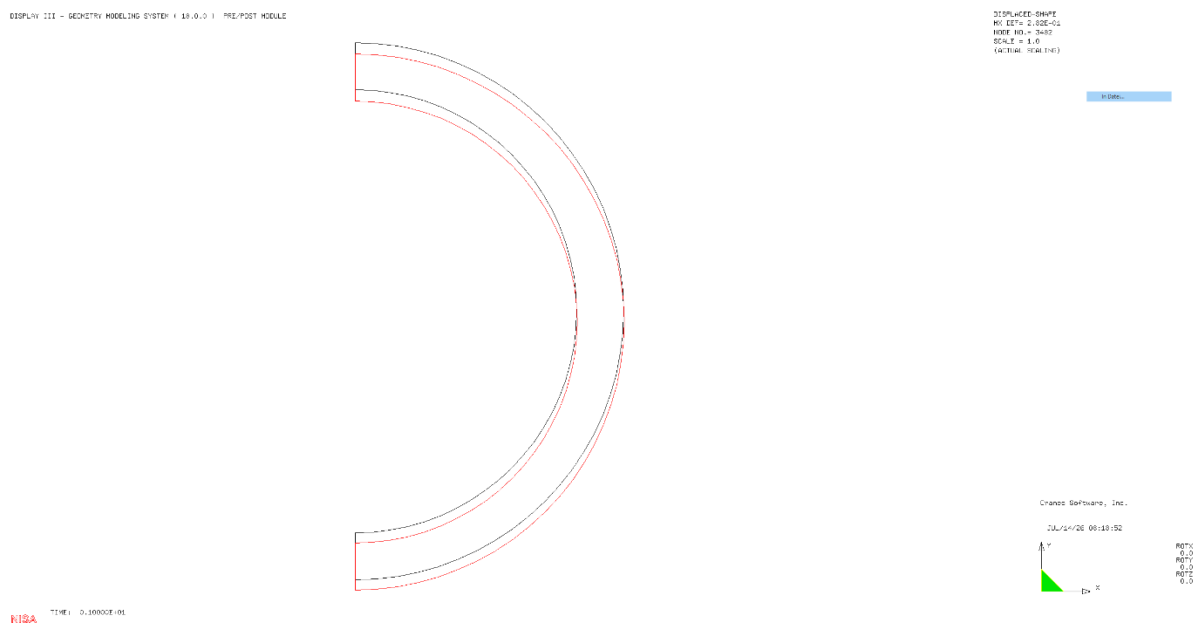


Abb. 2.1.8: Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast, Variante A, LF 1: Erdlasten

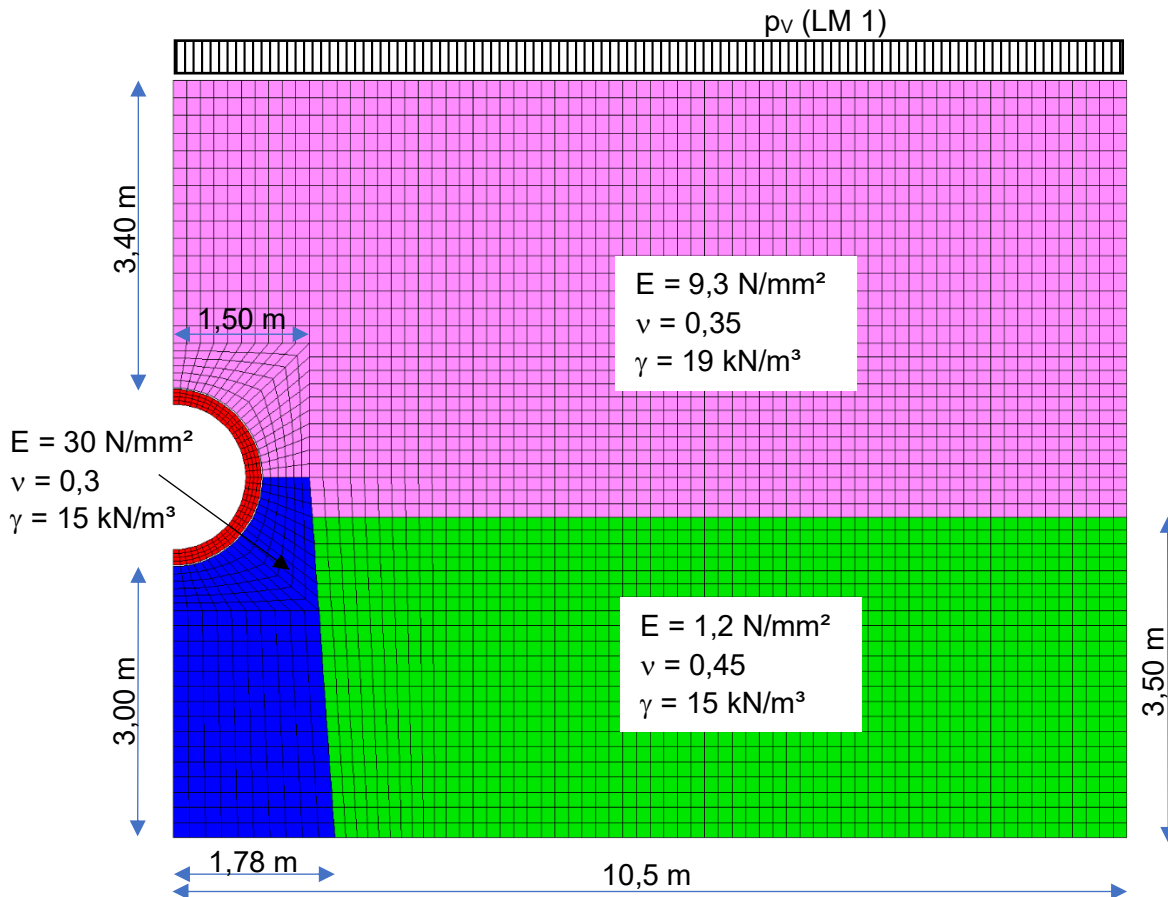


Abb. 2.2.1 Diskretisiertes Rechenmodell, Nennweite DN 1600, Variante A, LF 2: Erd- und Verkehrslast LM 1

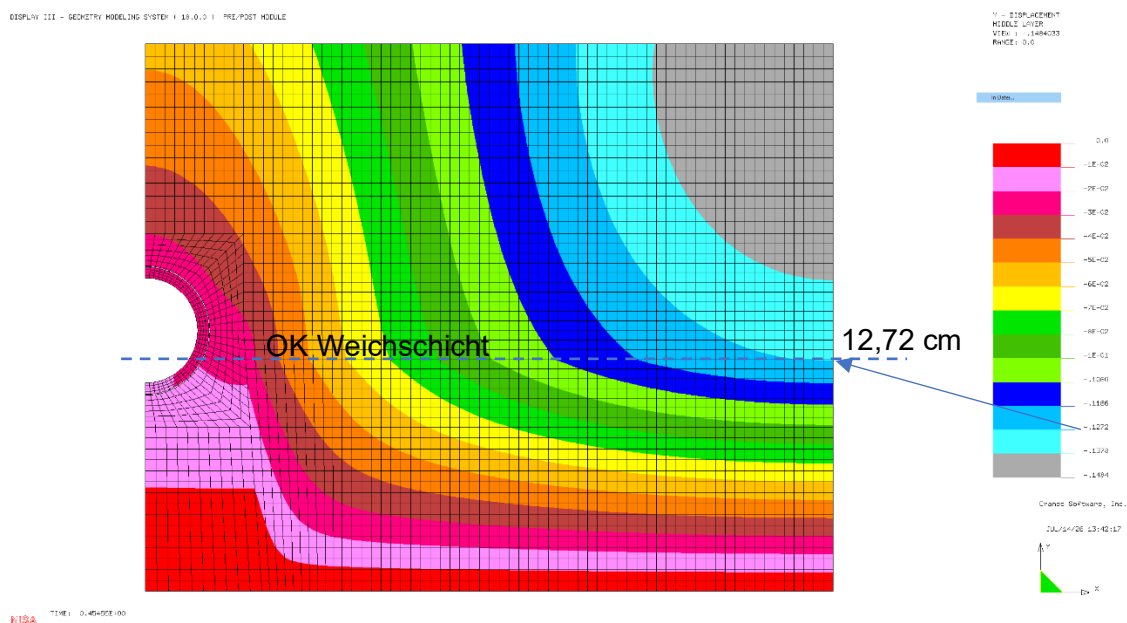


Abb. 2.2.2: Vertikale Verformungen des Modellbereiches [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast, Variante A, LF 2: Erd- und Verkehrslast LM 1

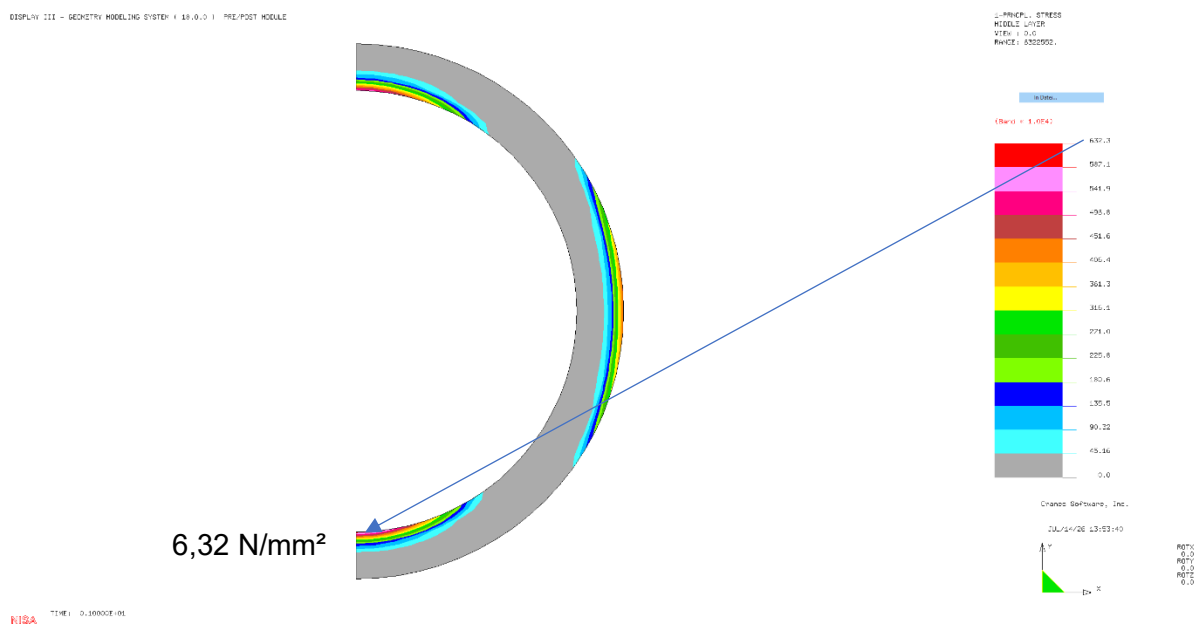


Abb. 2.2.3: 1. Hauptspannung [N/m²] unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast, Variante A, LF 2: Erd- und Verkehrslast LM 1

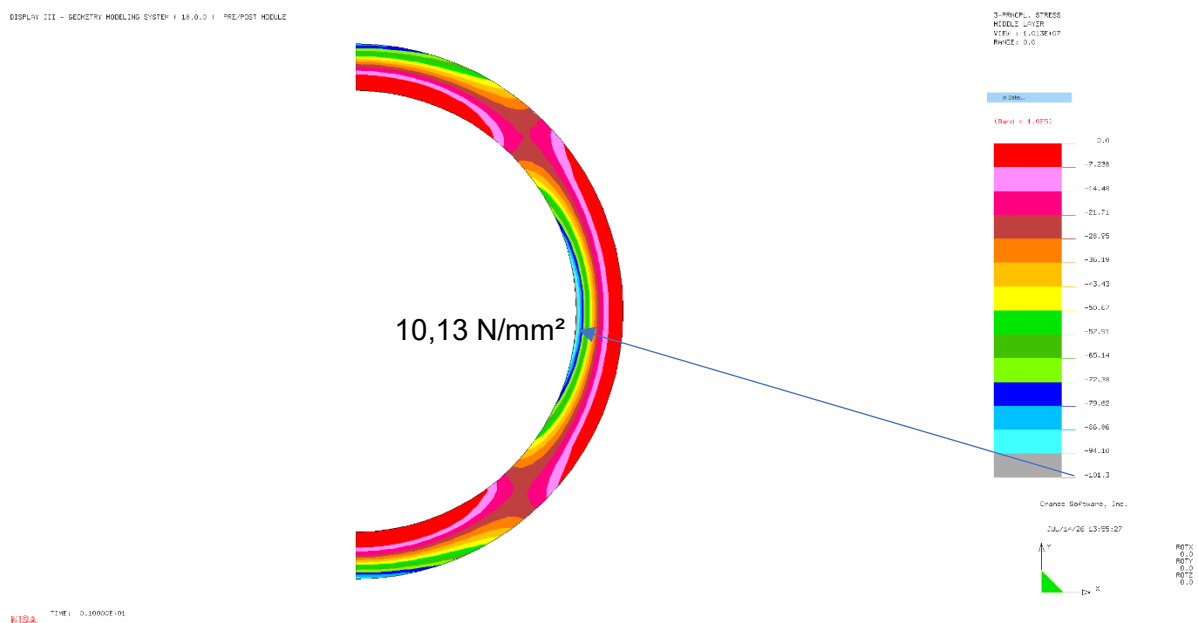


Abb. 2.2.4: 3. Hauptspannung [N/m²] unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast, Variante A, LF 2: Erd- und Verkehrslast LM 1

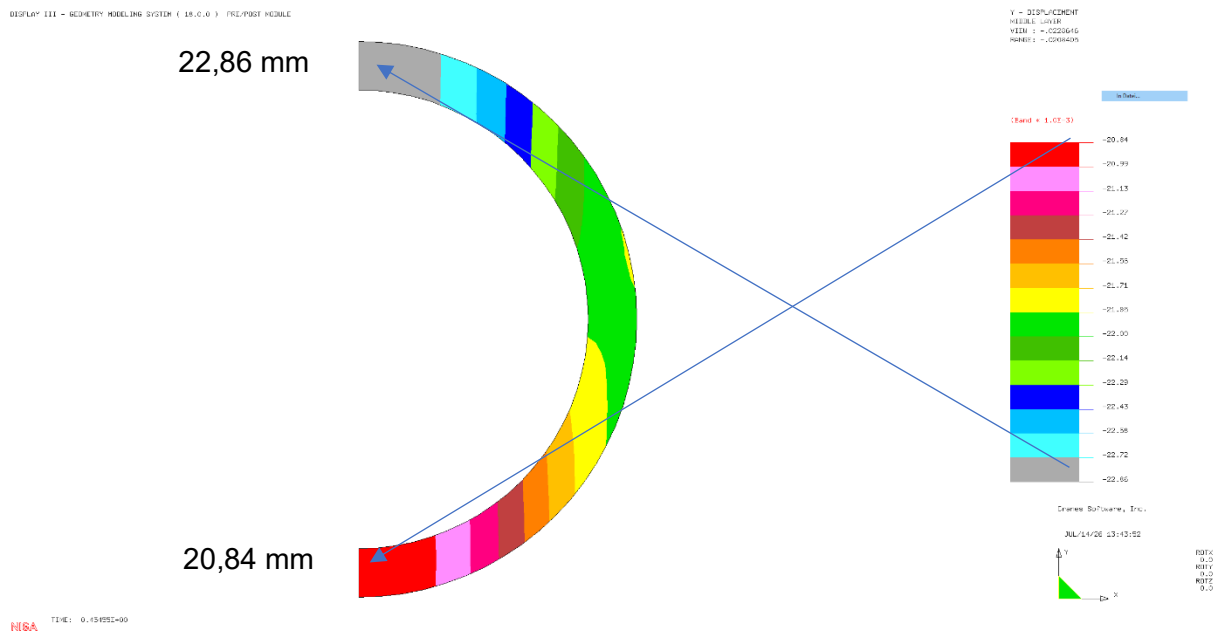


Abb. 2.2.5: Vertikale Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast, Variante A, LF 2: Erd- und Verkehrslast LM 1

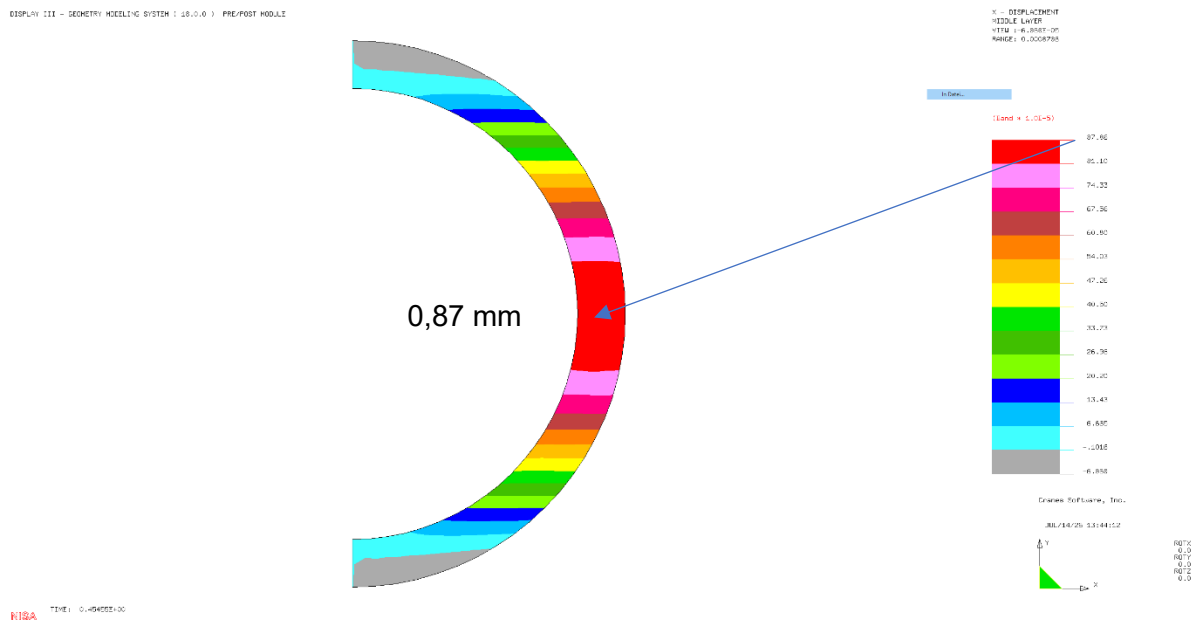


Abb. 2.2.6: Horizontale Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast, Variante A, LF 2: Erd- und Verkehrslast LM 1

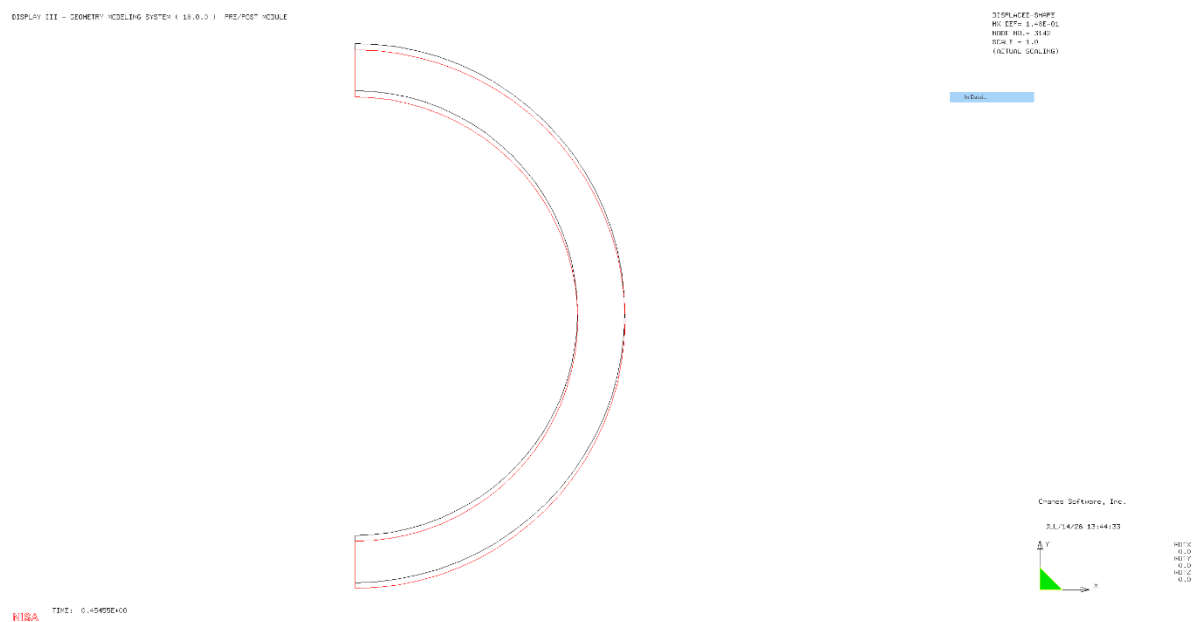


Abb. 2.2.7: Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast, Variante A, LF 2: Erd- und Verkehrslast LM 1

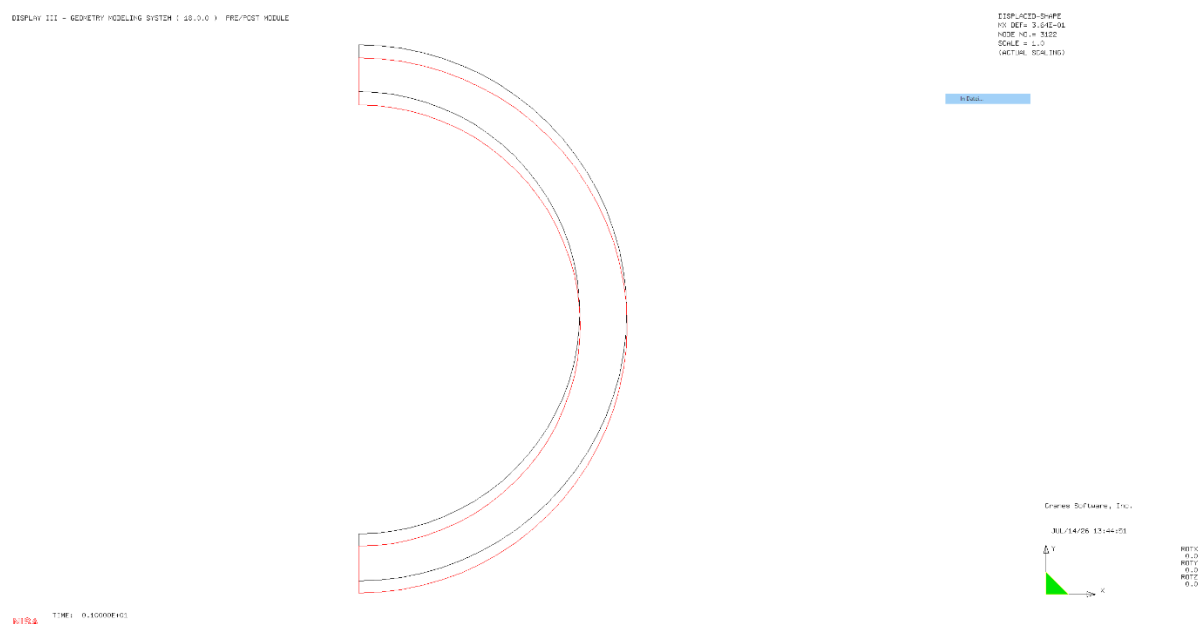


Abb. 2.2.8: Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast, Variante A, LF 2: Erd- und Verkehrslast LM 1

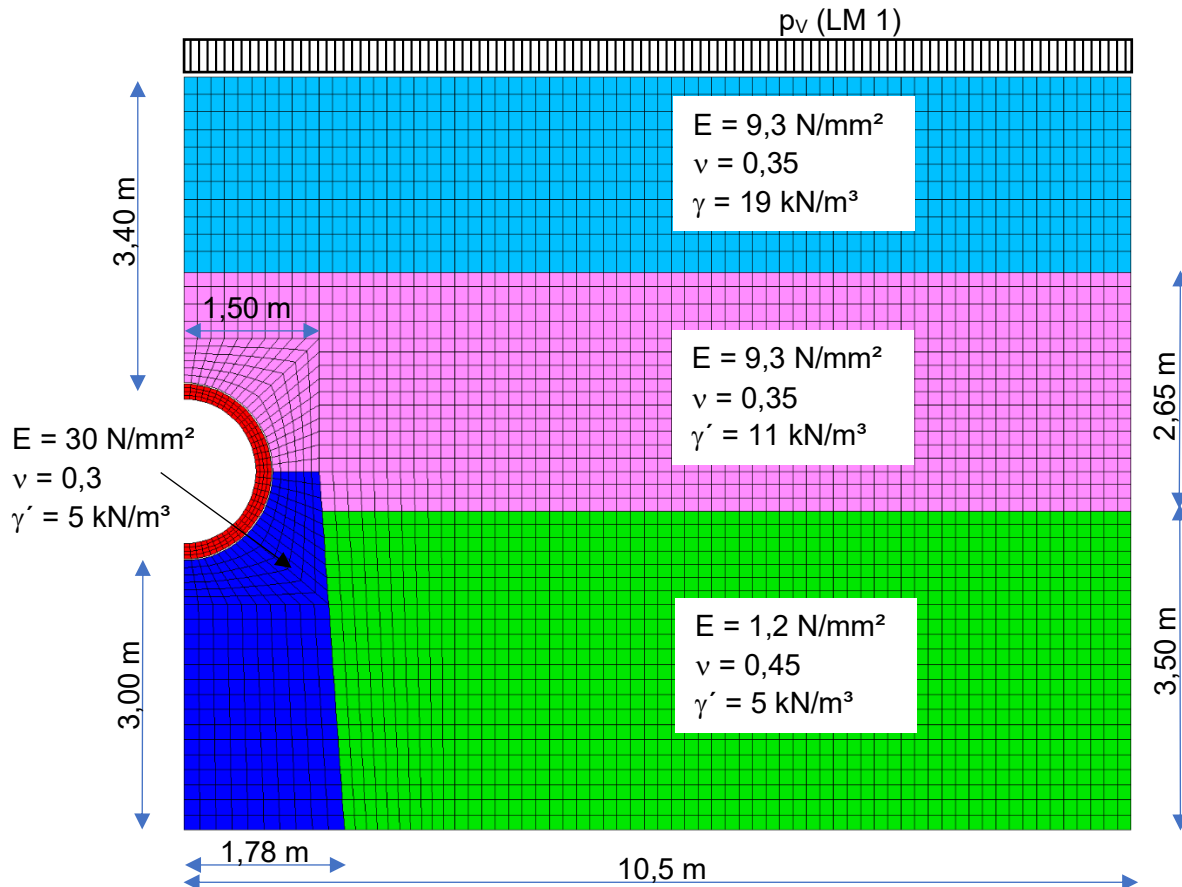


Abb. 2.3.1 Diskretisiertes Rechenmodell, Nennweite DN 1600, Variante A, LF 3: Erdlast, Verkehrslast LM 1, GW

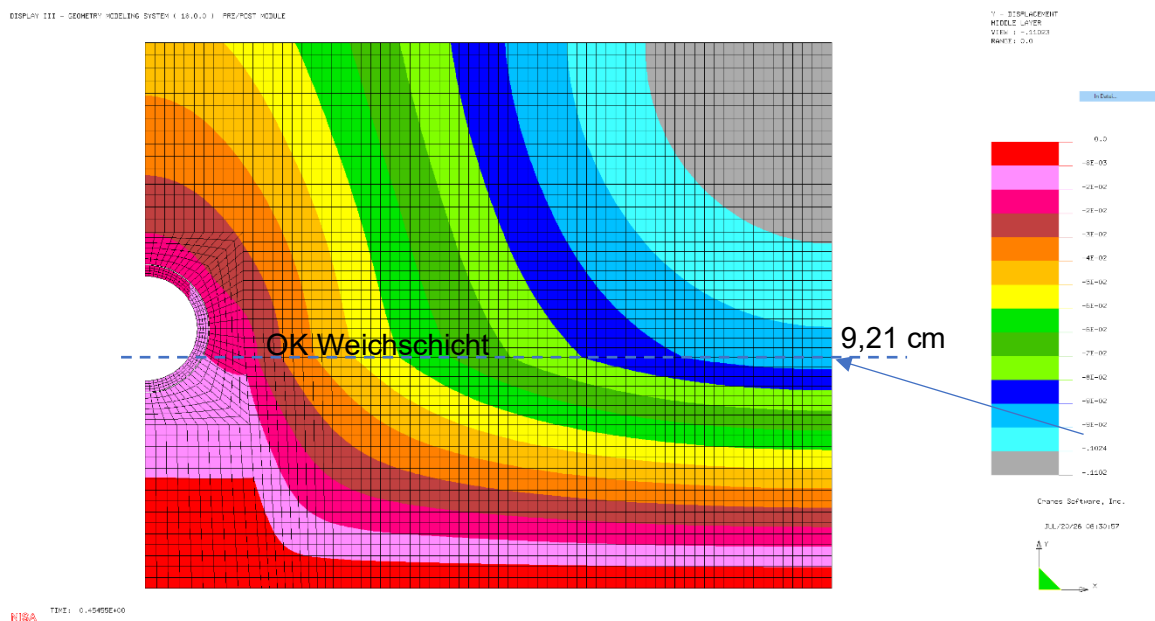
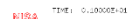
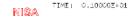


Abb. 2.3.2: Vertikale Verformungen des Modellbereiches [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast, Variante A, LF 3: Erdlast, Verkehrslast LM 1, GW



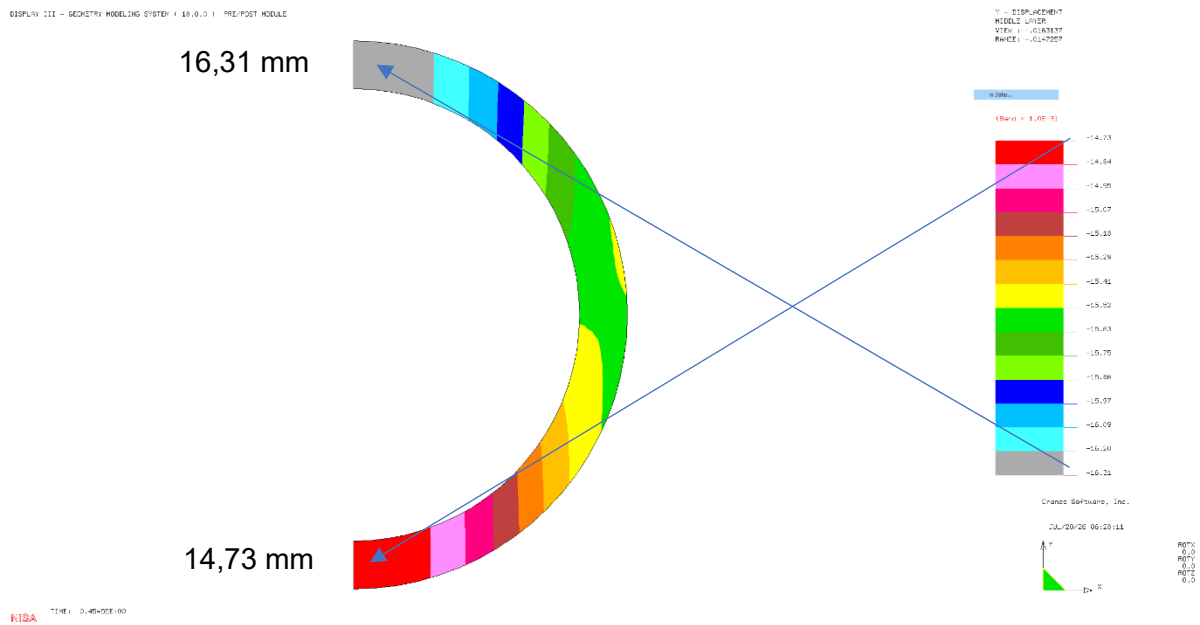


Abb. 2.3.5: Vertikale Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast, Variante A, LF 3: Erdlast, Verkehrslast LM 1, GW

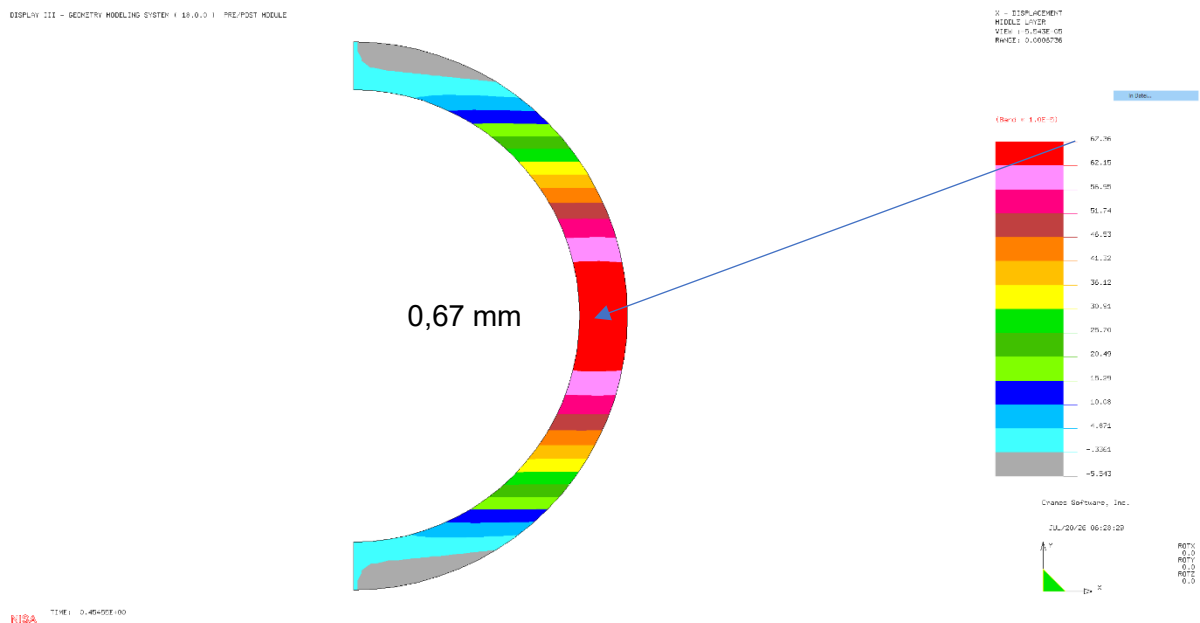


Abb. 2.3.6: Horizontale Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast, Variante A, LF 3: Erdlast, Verkehrslast LM 1, GW

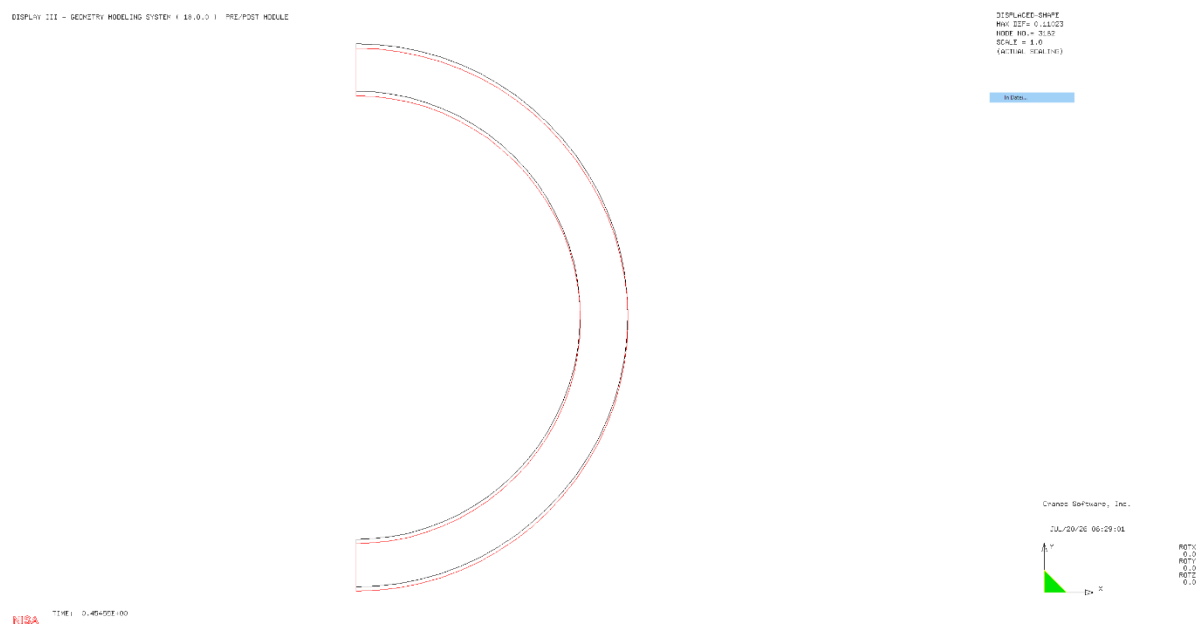


Abb. 2.3.7: Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast, Variante A, LF 3: Erdlast, Verkehrslast LM 1, GW

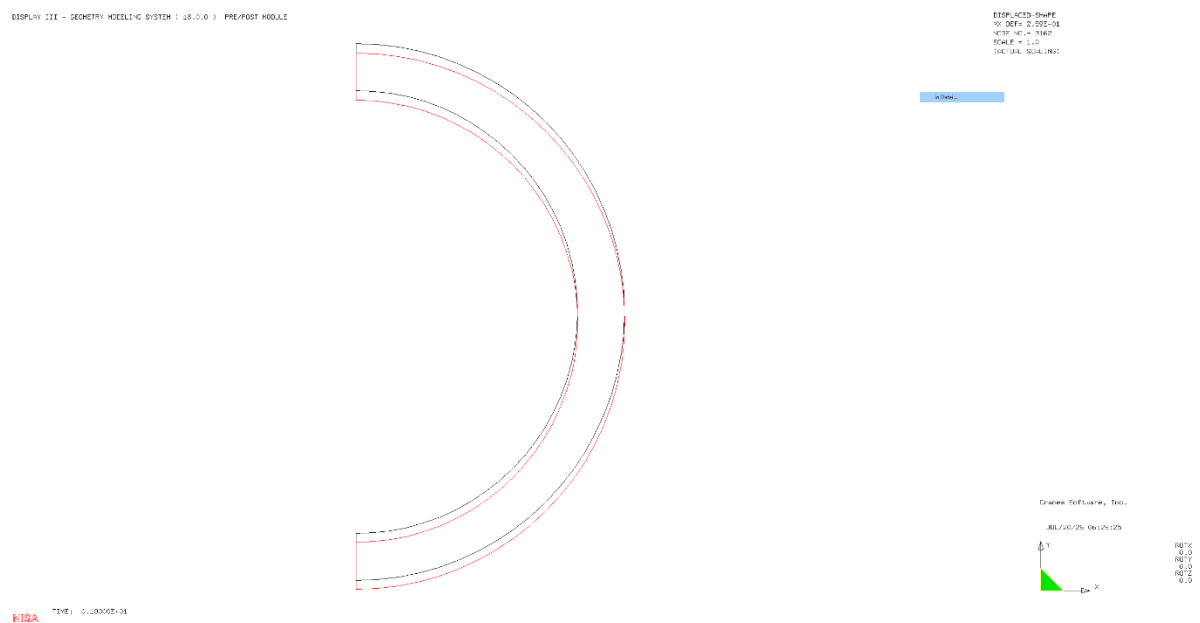


Abb. 2.3.8: Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast, Variante A, LF 3: Erdlast, Verkehrslast LM 1, GW

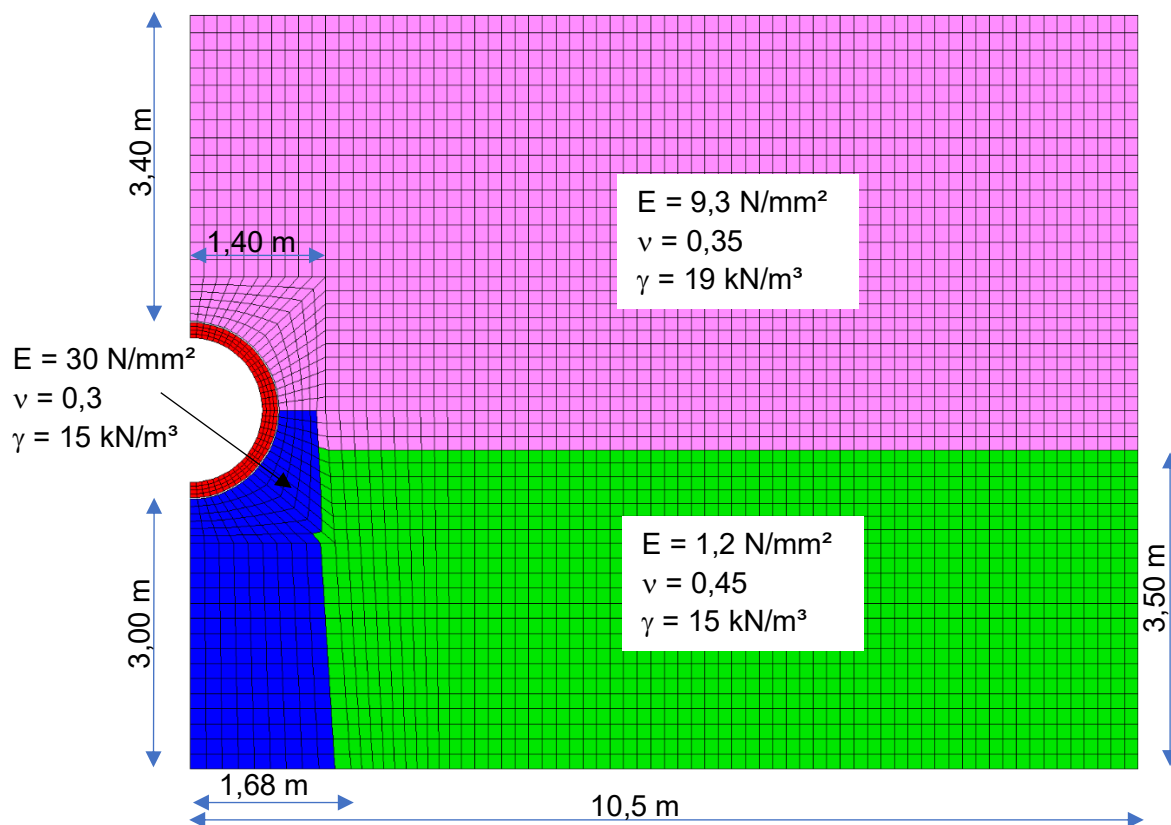


Abb. 2.4.1 Diskretisiertes Rechenmodell, Nennweite DN 1600, Variante B, LF 1: Erdlasten

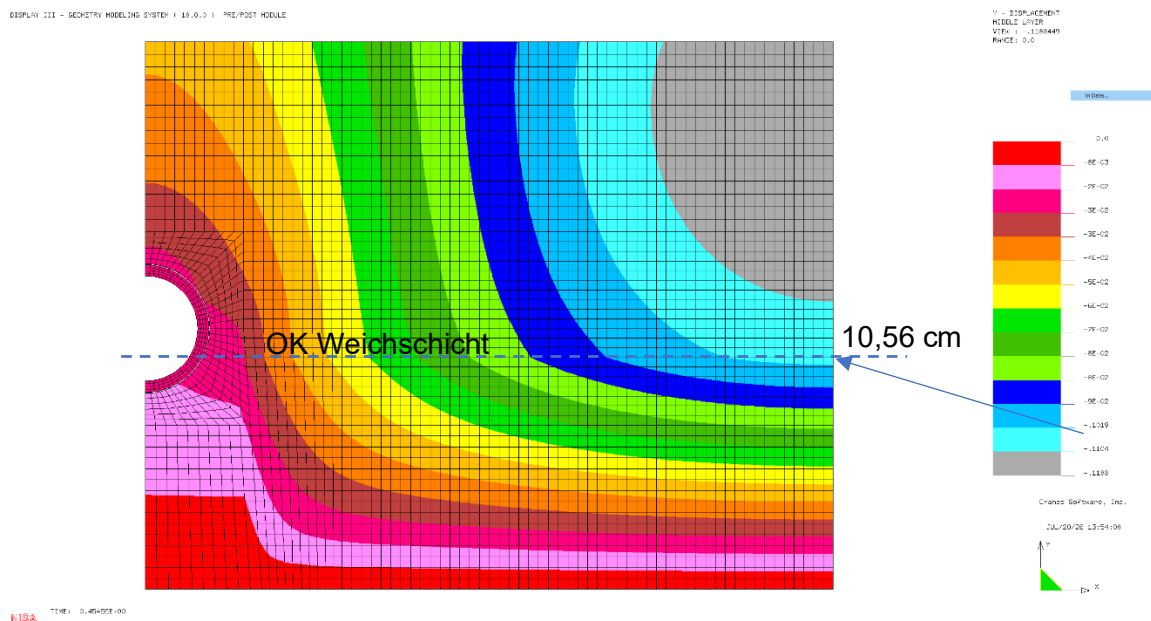


Abb. 2.4.2: Vertikale Verformungen des Modellbereiches [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast, Variante B, LF 1: Erdlasten

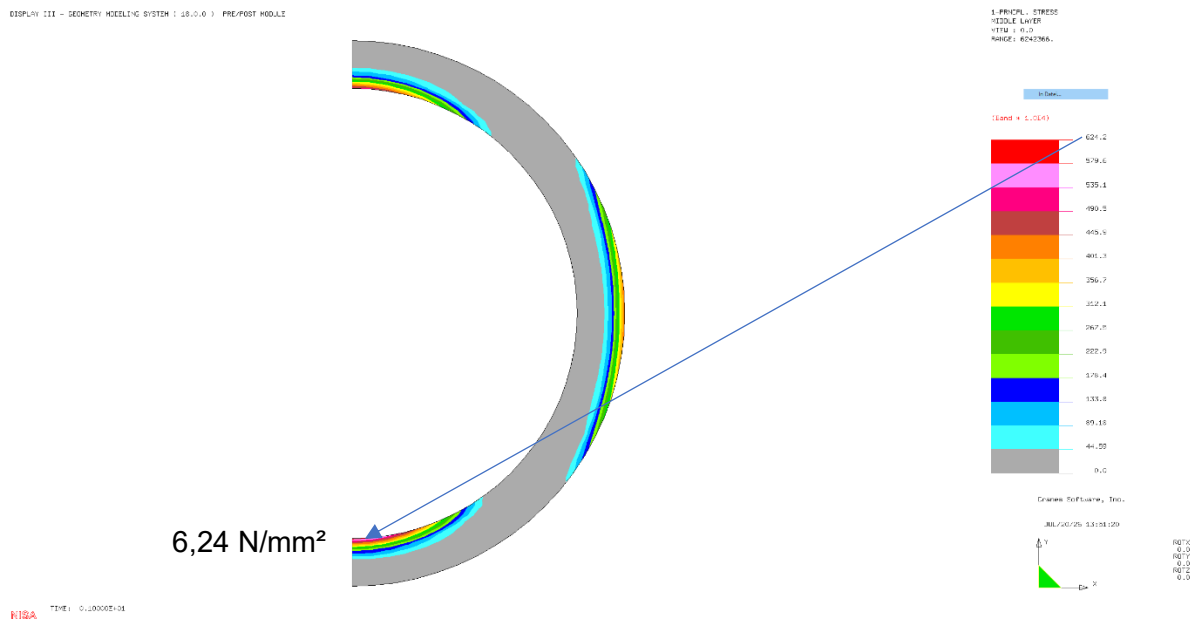


Abb. 2.4.3: 1. Hauptspannung [N/m²] unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast, Variante B, LF 1: Erdlasten

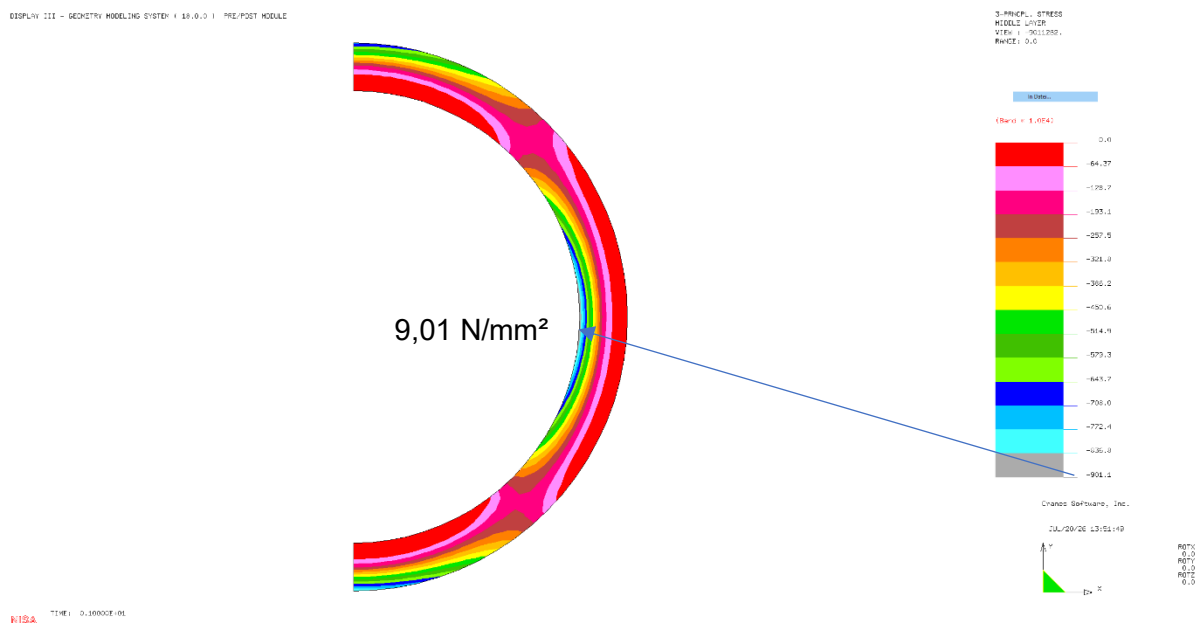


Abb. 2.4.4: 3. Hauptspannung [N/m²] unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast, Variante B, LF 1: Erdlasten

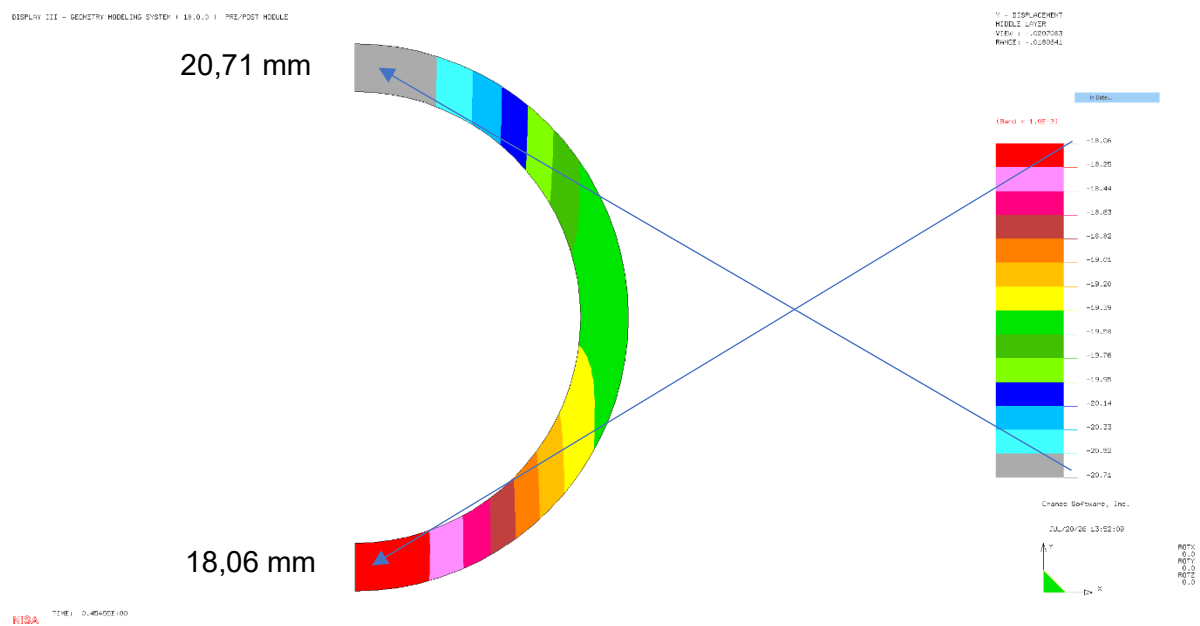


Abb. 2.4.5: Vertikale Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast, Variante B, LF 1: Erdlasten

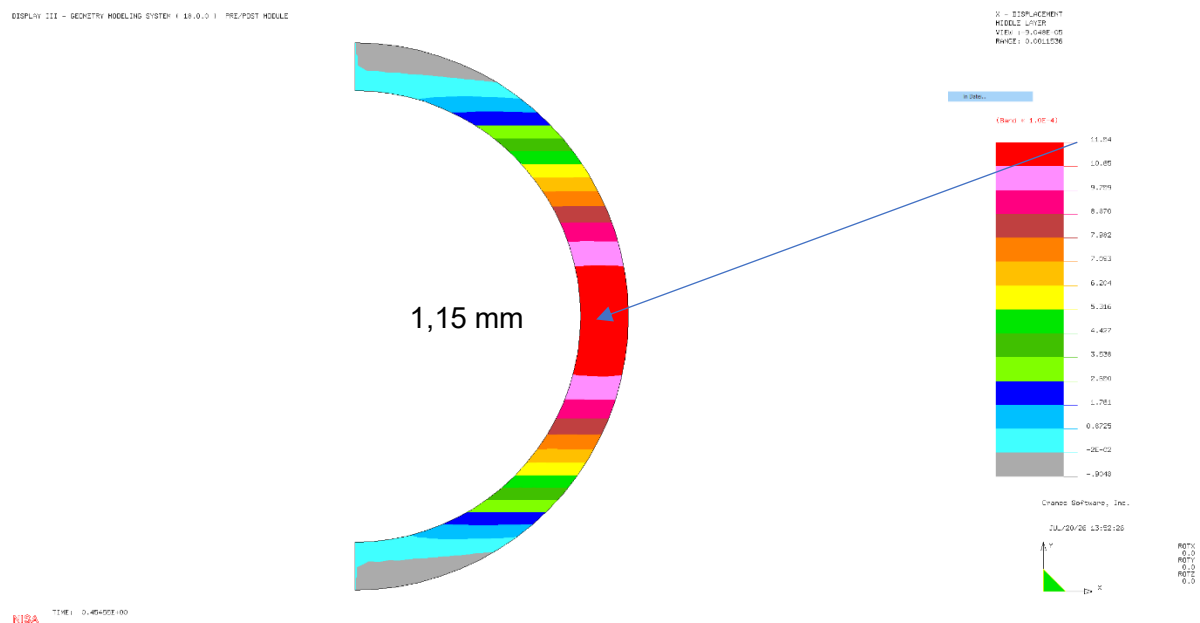


Abb. 2.4.6: Horizontale Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast, Variante B, LF 1: Erdlasten

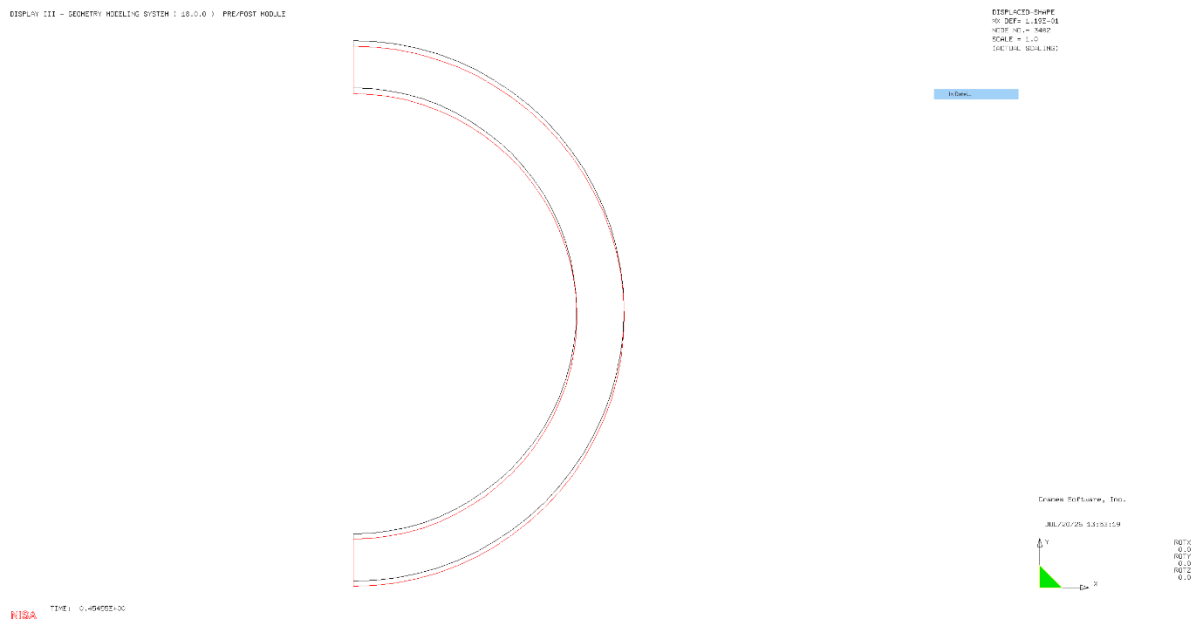


Abb. 2.4.7: Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast, Variante B, LF 1: Erdlasten

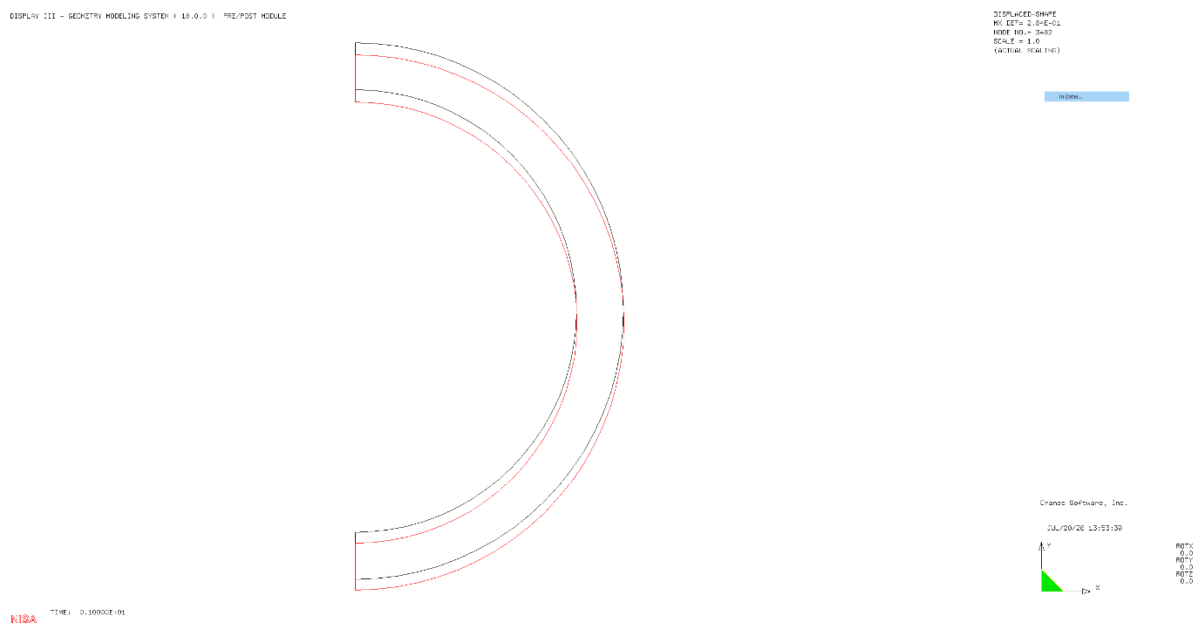


Abb. 2.4.8: Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast Variante B, LF 1: Erdlasten

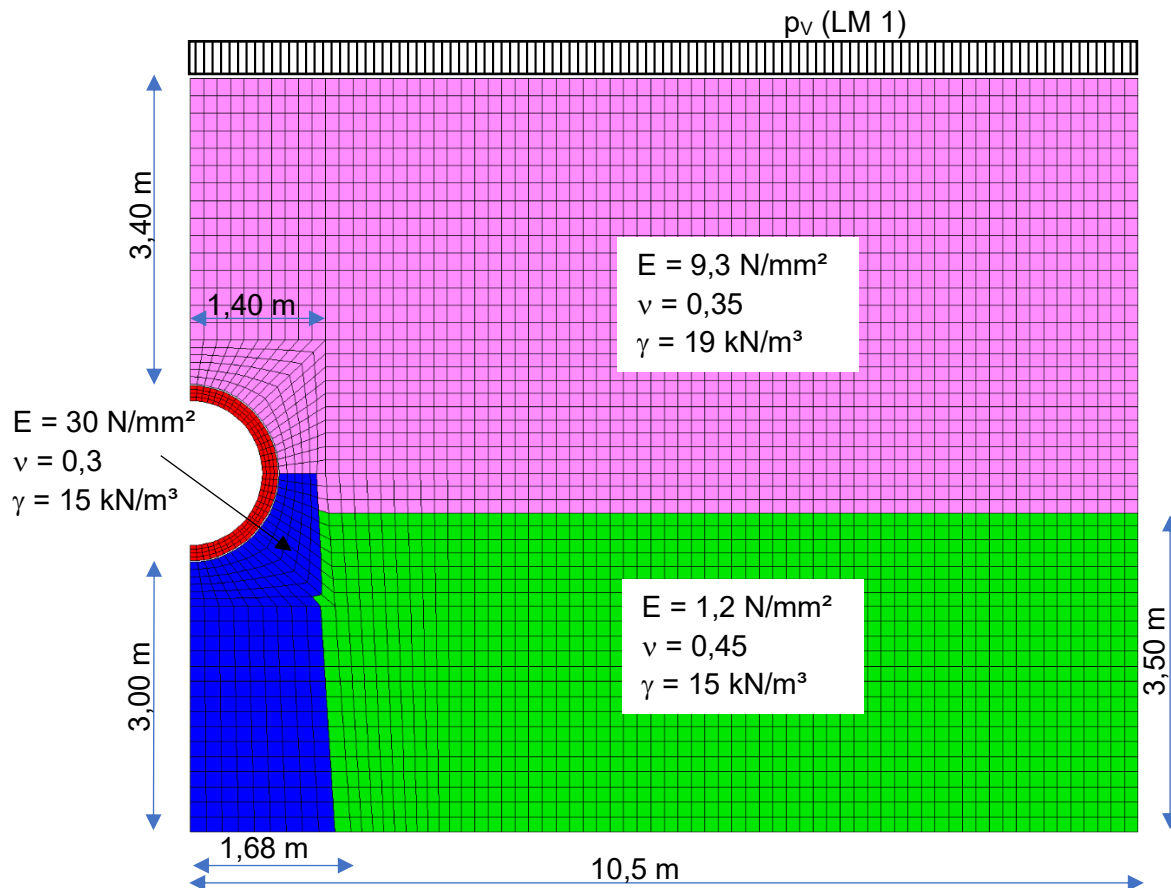


Abb. 2.5.1 Diskretisiertes Rechenmodell, Nennweite DN 1600, Variante B, LF 2: Erd- und Verkehrslast LM 1

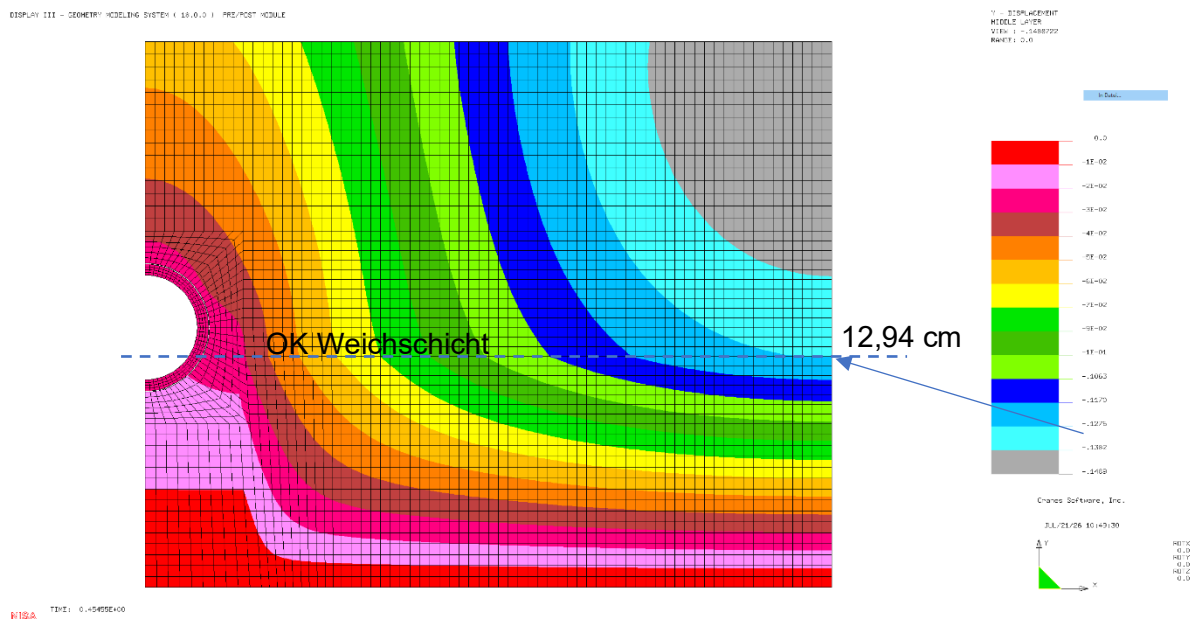


Abb. 2.5.2: Vertikale Verformungen des Modellbereiches [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast, Variante B, LF 2: Erd- und Verkehrslast LM 1

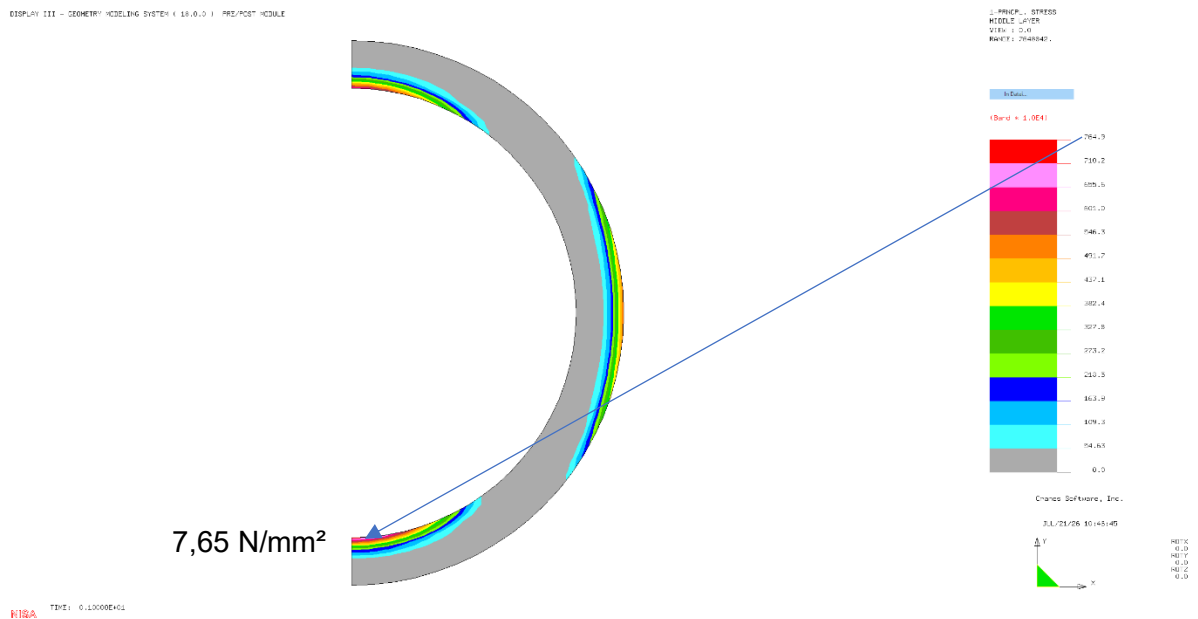


Abb. 2.5.3: 1. Hauptspannung [N/m²] unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast, Variante B, LF 2: Erd- und Verkehrslast LM 1

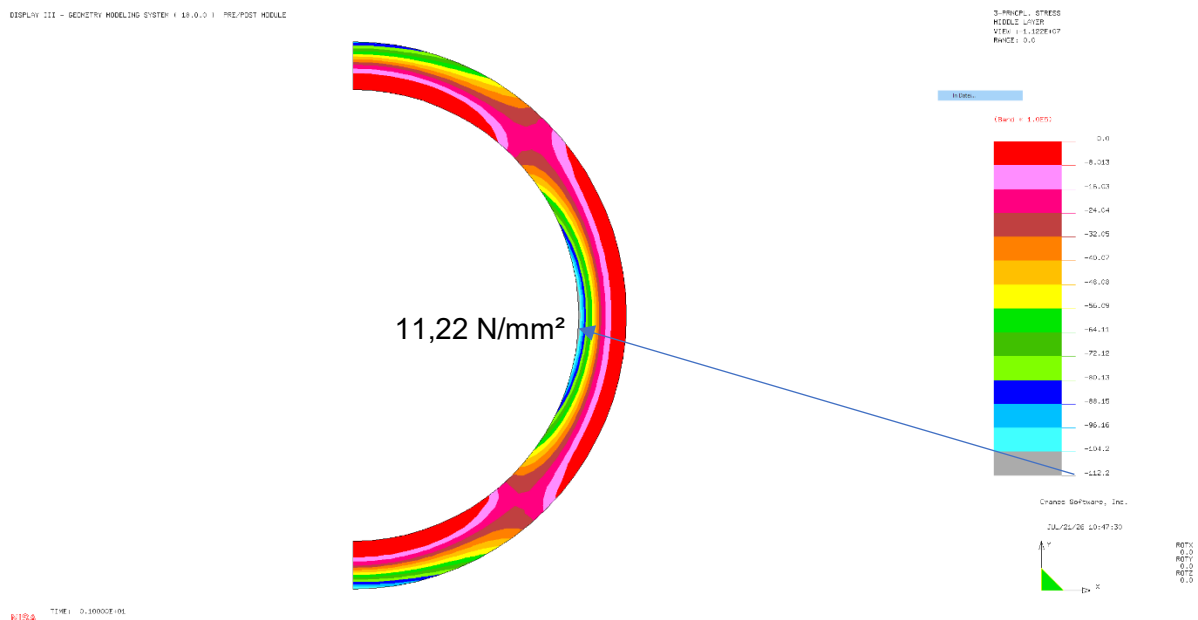


Abb. 2.5.4: 3. Hauptspannung [N/m²] unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast, Variante B, LF 2: Erd- und Verkehrslast LM 1

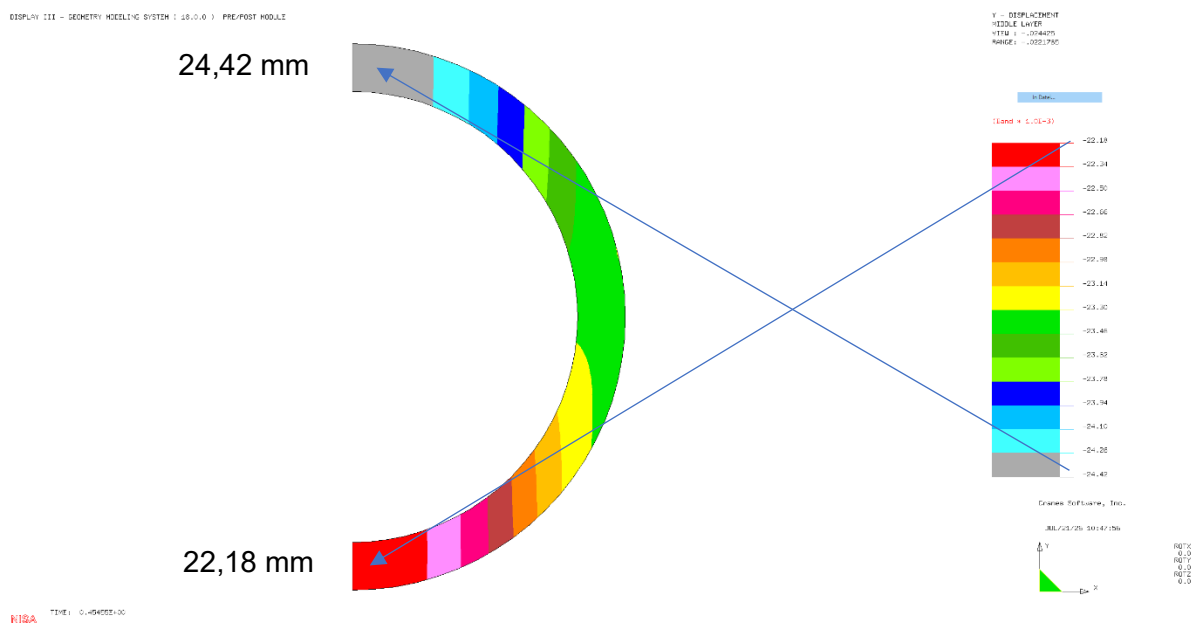


Abb. 2.5.5: Vertikale Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast, Variante B, LF 2: Erd- und Verkehrslast LM 1

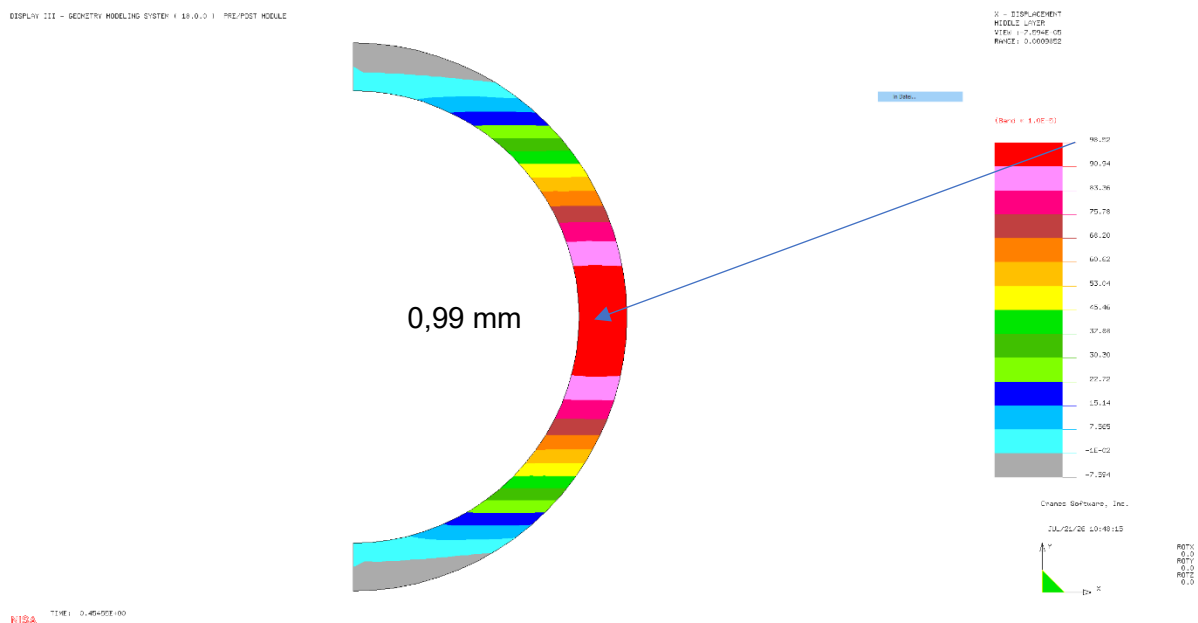


Abb. 2.5.6: Horizontale Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast, Variante B, LF 2: Erd- und Verkehrslast LM 1

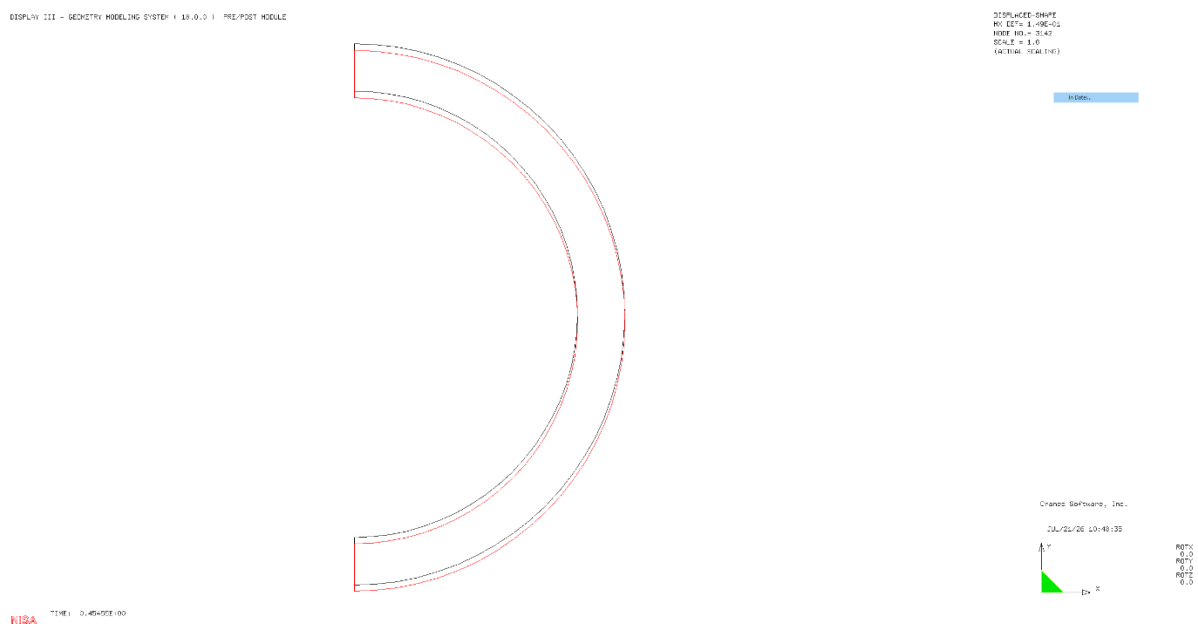


Abb. 2.5.7: Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast, Variante B, LF 2: Erd- und Verkehrslast LM 1

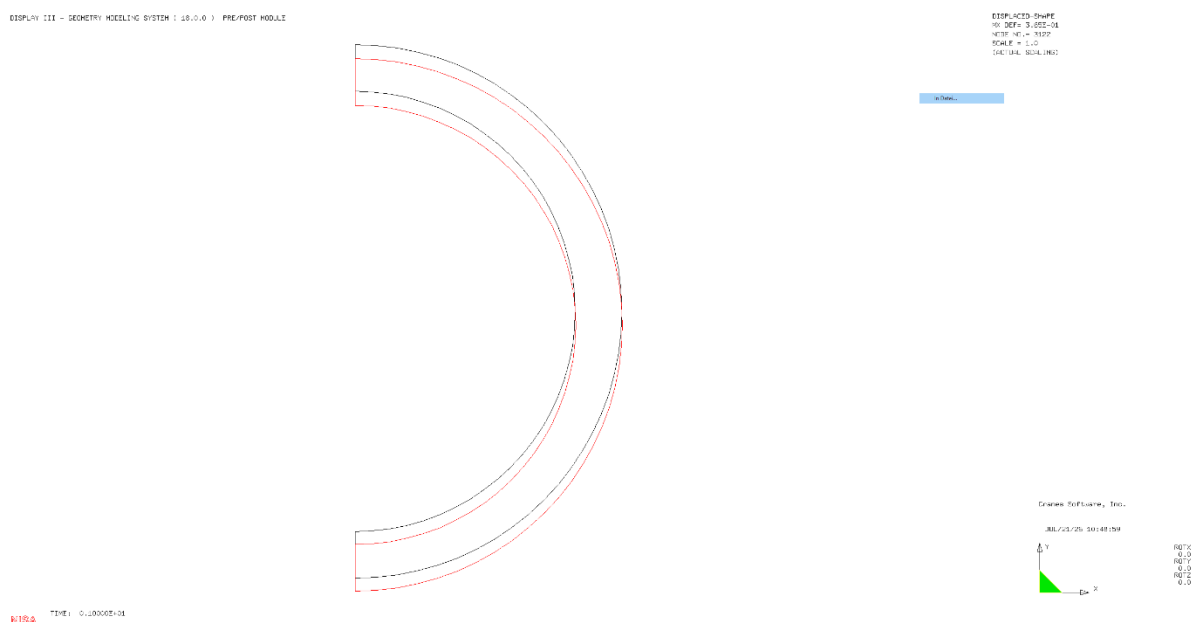


Abb. 2.5.8: Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast, Variante B, LF 2: Erd- und Verkehrslast LM 1

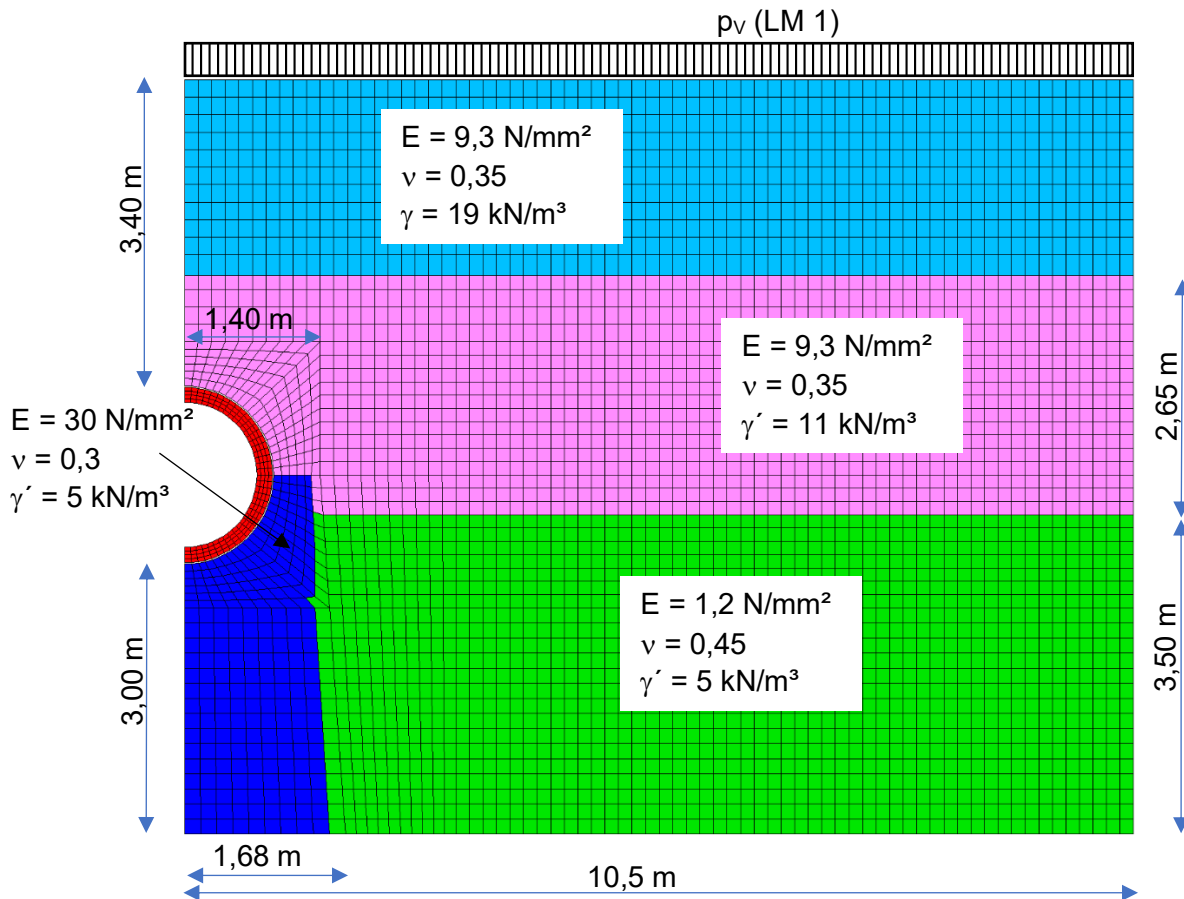


Abb. 2.6.1 Diskretisiertes Rechenmodell, Nennweite DN 1600, Variante B, LF 3: Erdlast, Verkehrslast LM 1, GW

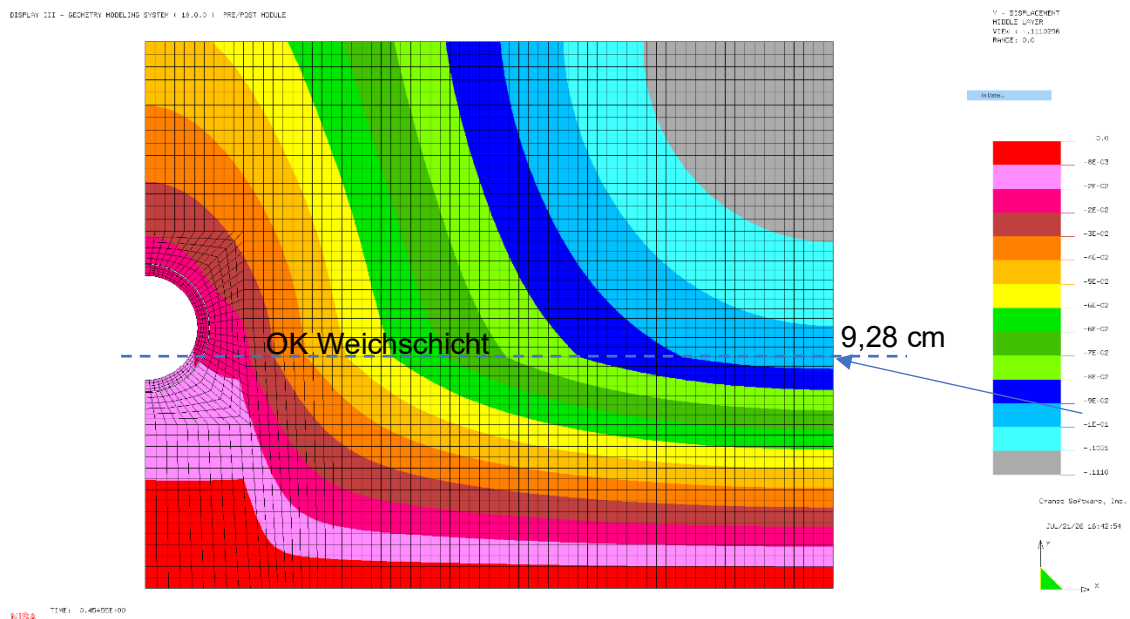


Abb. 2.6.2: Vertikale Verformungen des Modellbereiches [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast, Variante B, LF 3: Erdlast, Verkehrslast LM 1, GW

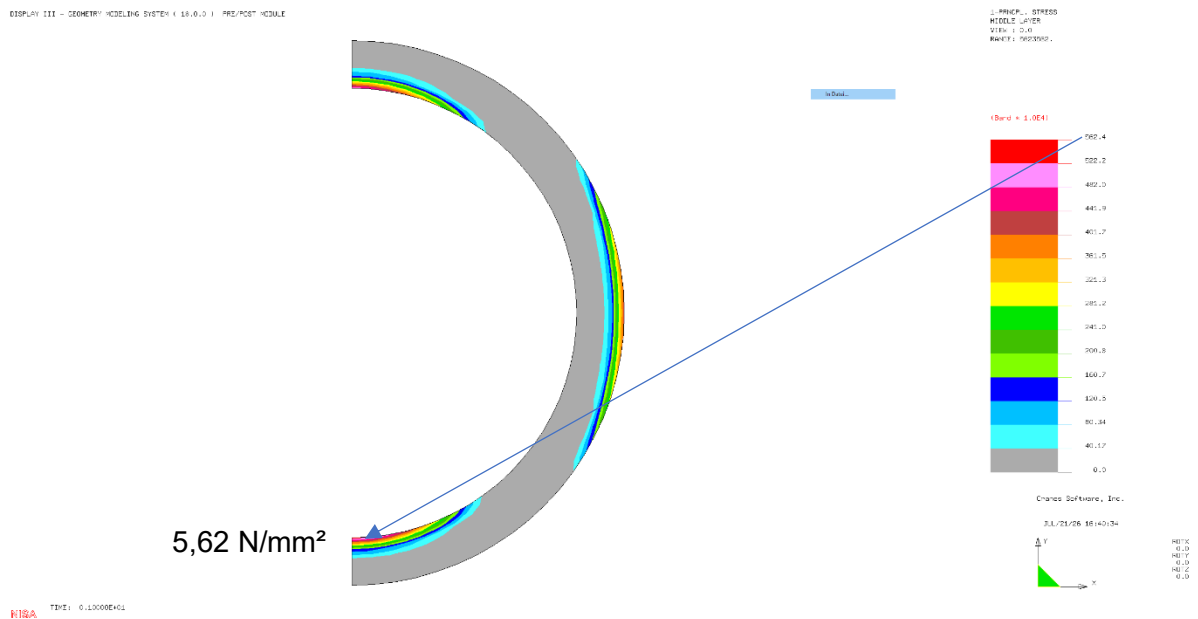


Abb. 2.6.3: 1. Hauptspannung [N/m²] unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast, Variante B, LF 3: Erdlast, Verkehrslast LM 1, GW

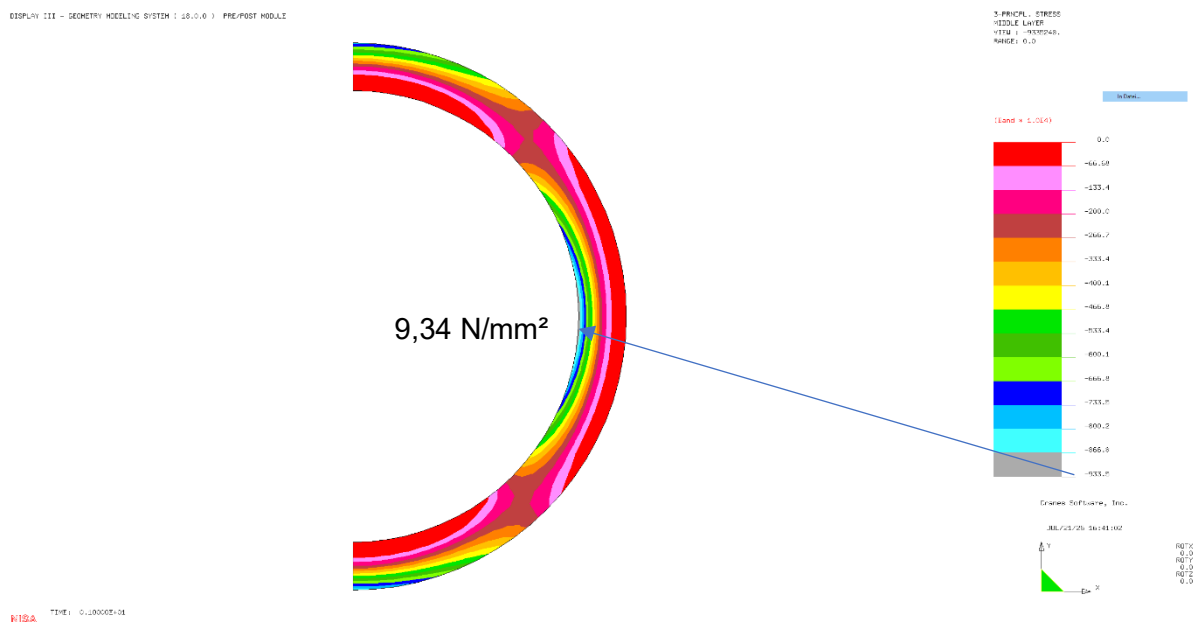


Abb. 2.6.4: 3. Hauptspannung [N/m²] unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast, Variante B, LF 3: Erdlast, Verkehrslast LM 1, GW

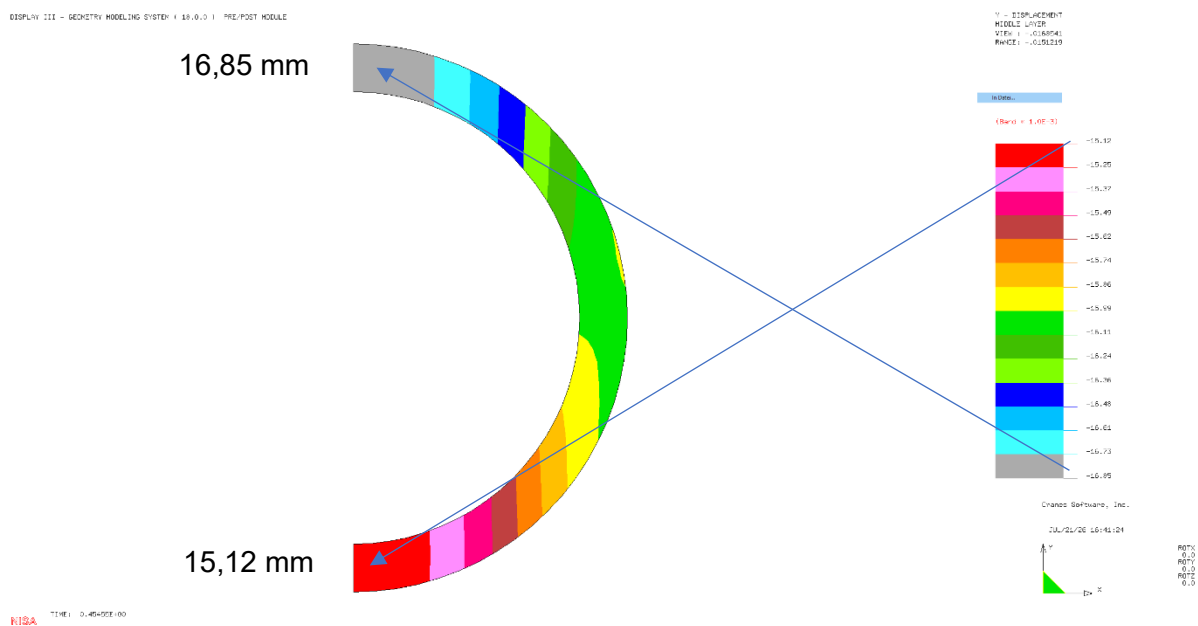


Abb. 2.6.5: Vertikale Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast, Variante B, LF 3: Erdlast, Verkehrslast LM 1, GW

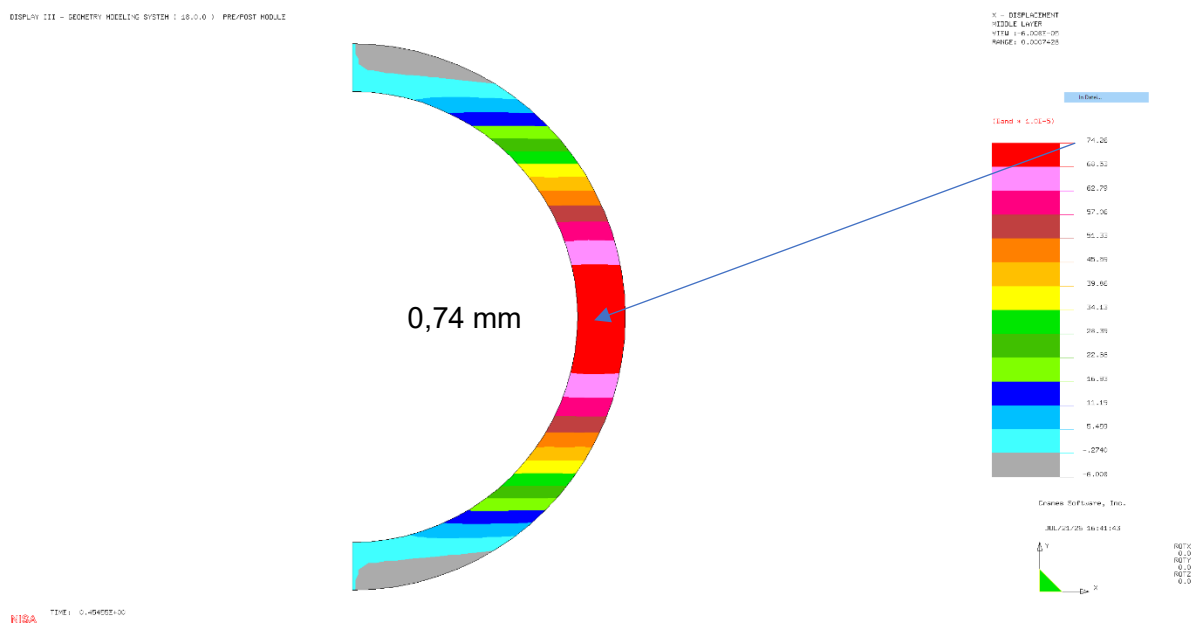


Abb. 2.6.6: Horizontale Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast, Variante B, LF 3: Erdlast, Verkehrslast LM 1, GW

Abb. 2.6.7: Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast, Variante B, LF 3: Erdlast, Verkehrslast LM 1, GW

Abb. 2.6.8: Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast, Variante B, LF 3: Erdlast, Verkehrslast LM 1, GW

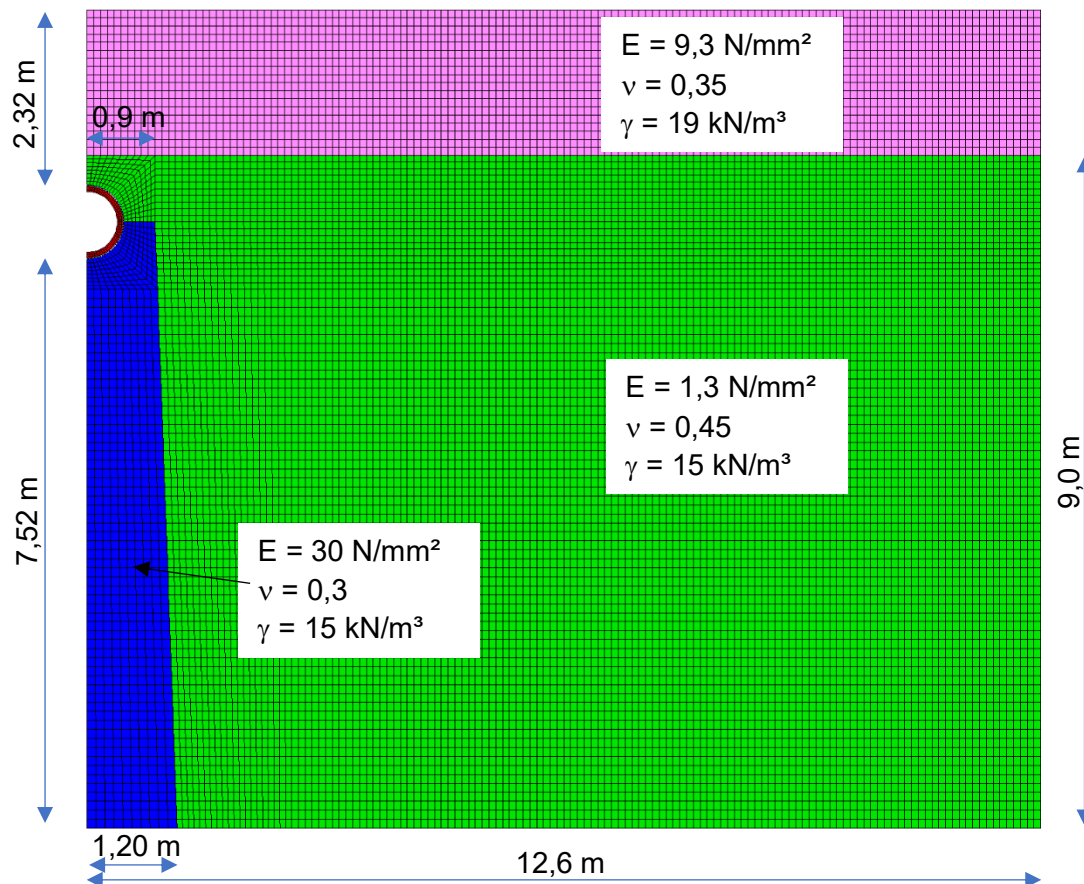


Abb. 3.1.1 Diskretisiertes Rechenmodell, Nennweite DN 800, Variante A, LF 1: Erdlasten

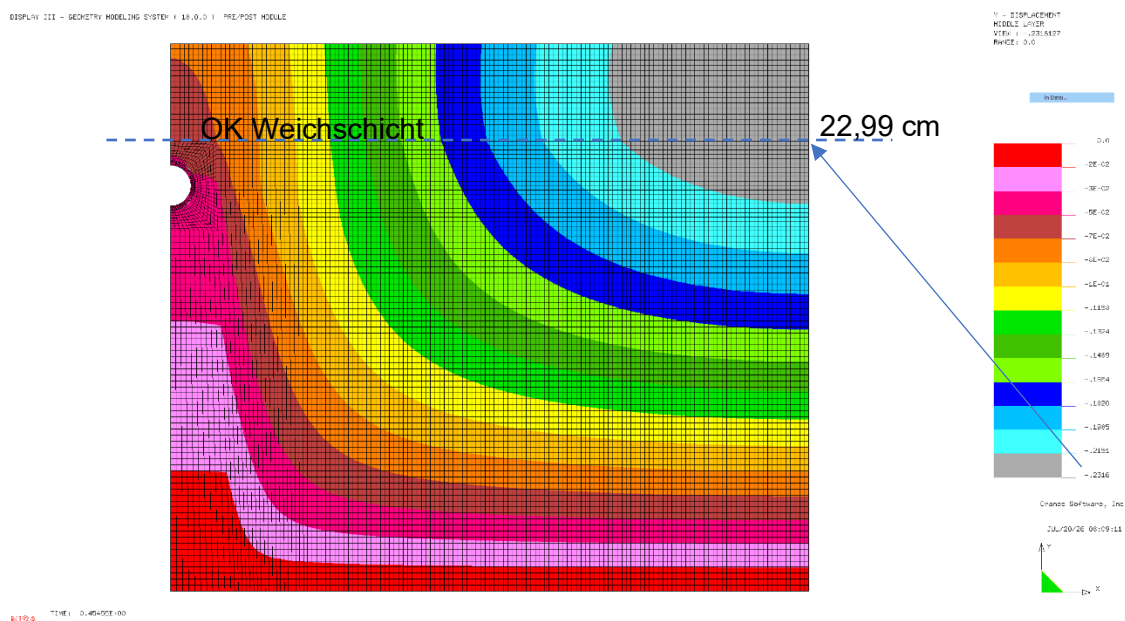


Abb. 3.1.2: Vertikale Verformungen des Modellbereiches [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast, Variante A, LF 1: Erdlasten

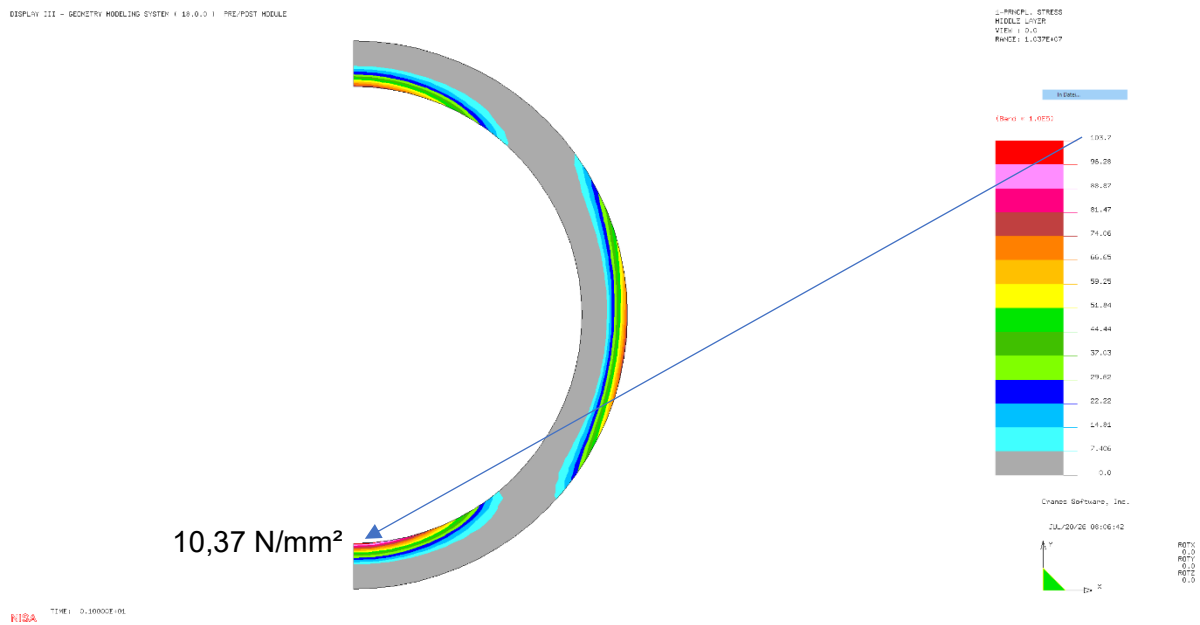


Abb. 3.1.3: 1. Hauptspannung [N/m²] unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast Variante A, LF 1: Erdlasten

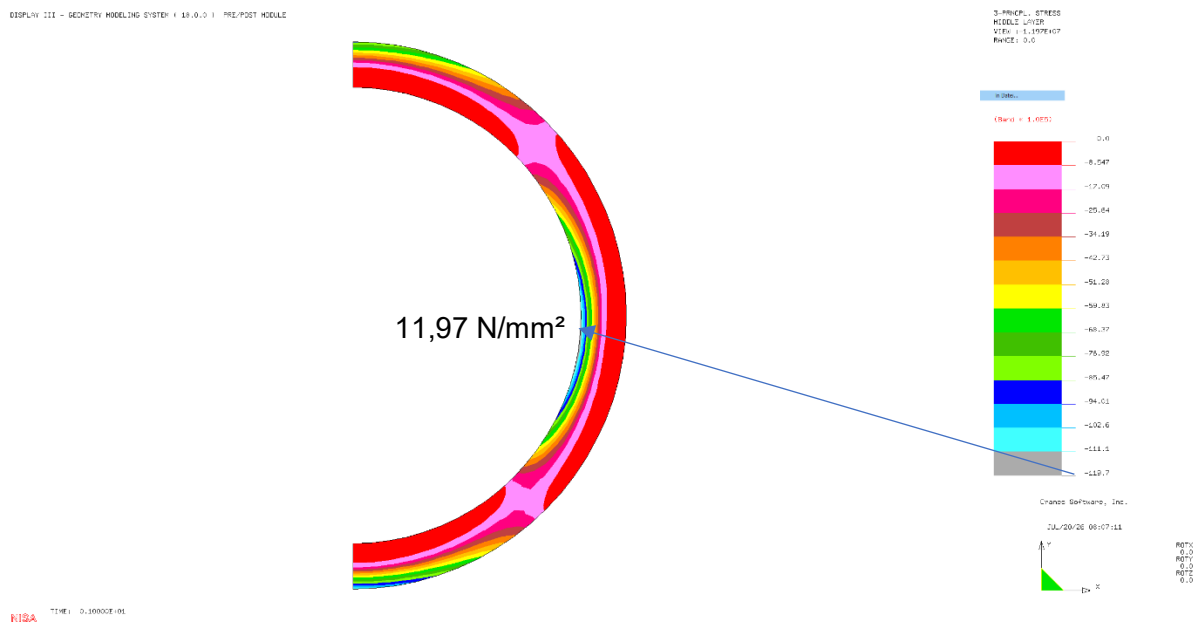


Abb. 3.1.4: 3. Hauptspannung [N/m²] unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast Variante A, LF 1: Erdlasten

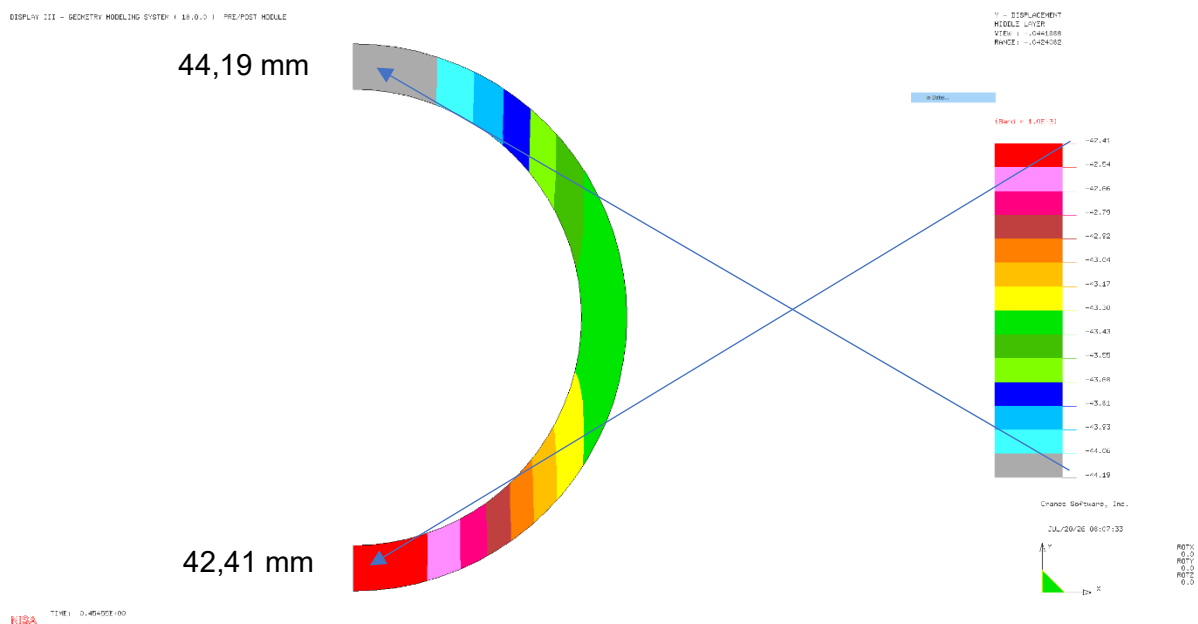


Abb. 3.1.5: Vertikale Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast Variante A, LF 1: Erdlasten

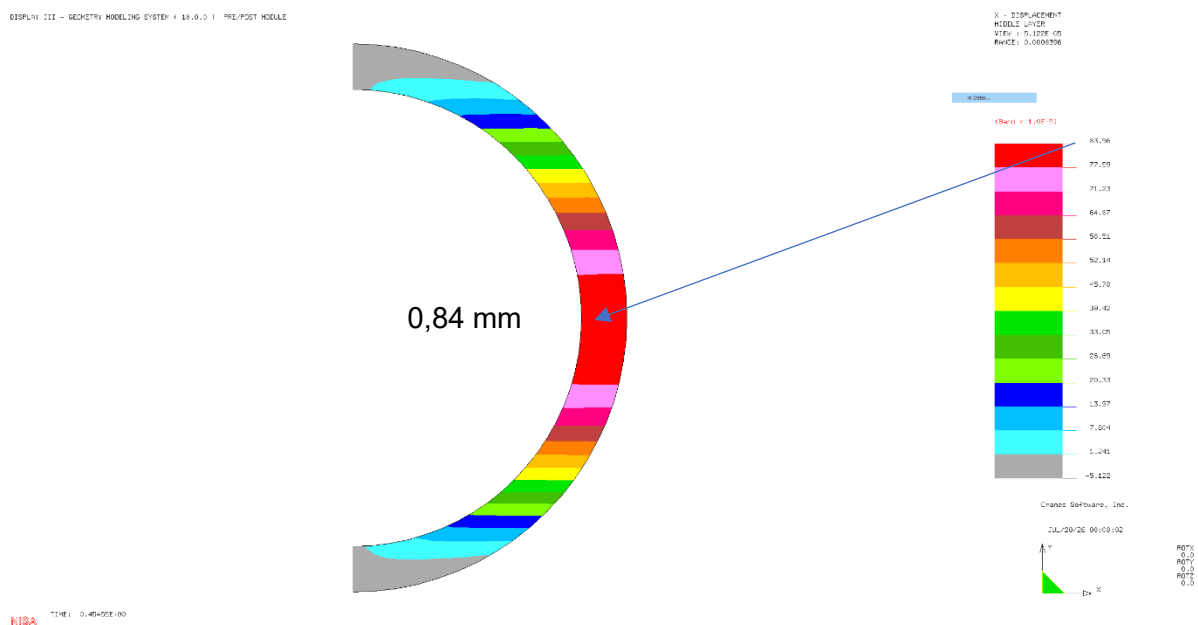


Abb. 3.1.6: Horizontale Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast Variante A, LF 1: Erdlasten

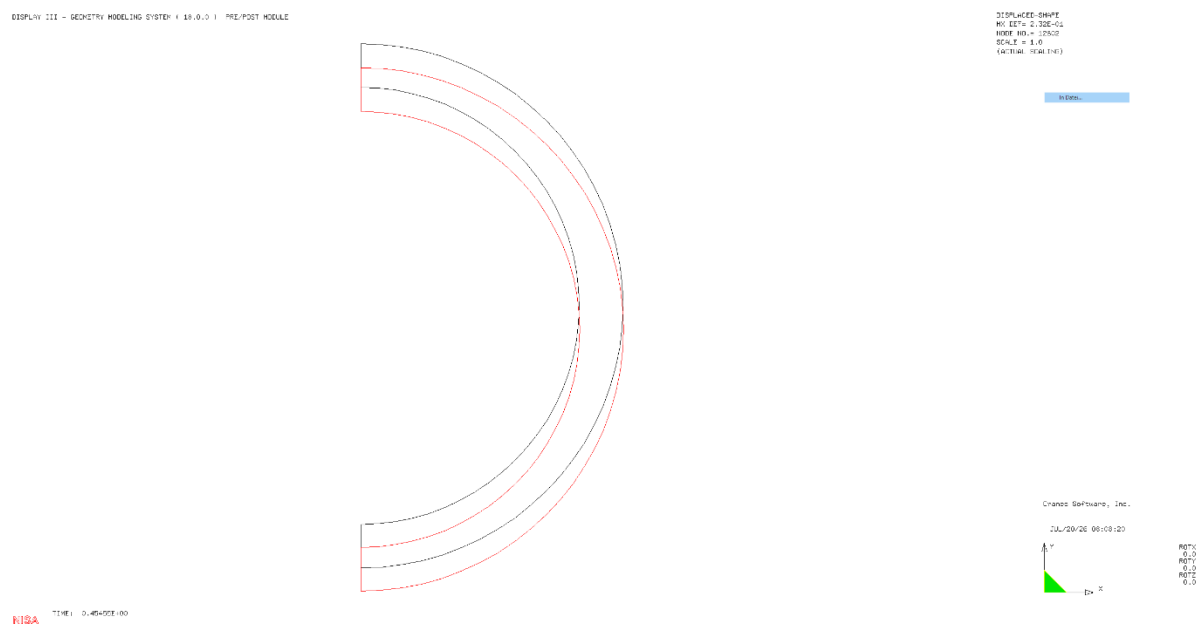


Abb. 3.1.7: Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast Variante A, LF 1: Erdlasten

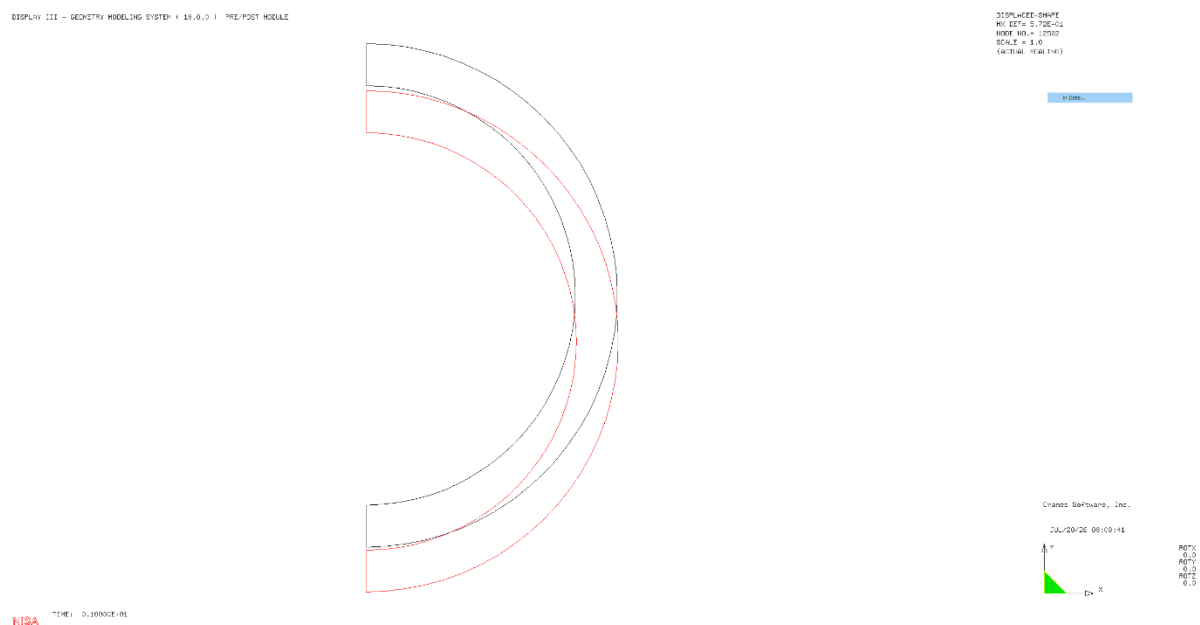


Abb. 3.1.8: Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast Variante A, LF 1: Erdlasten

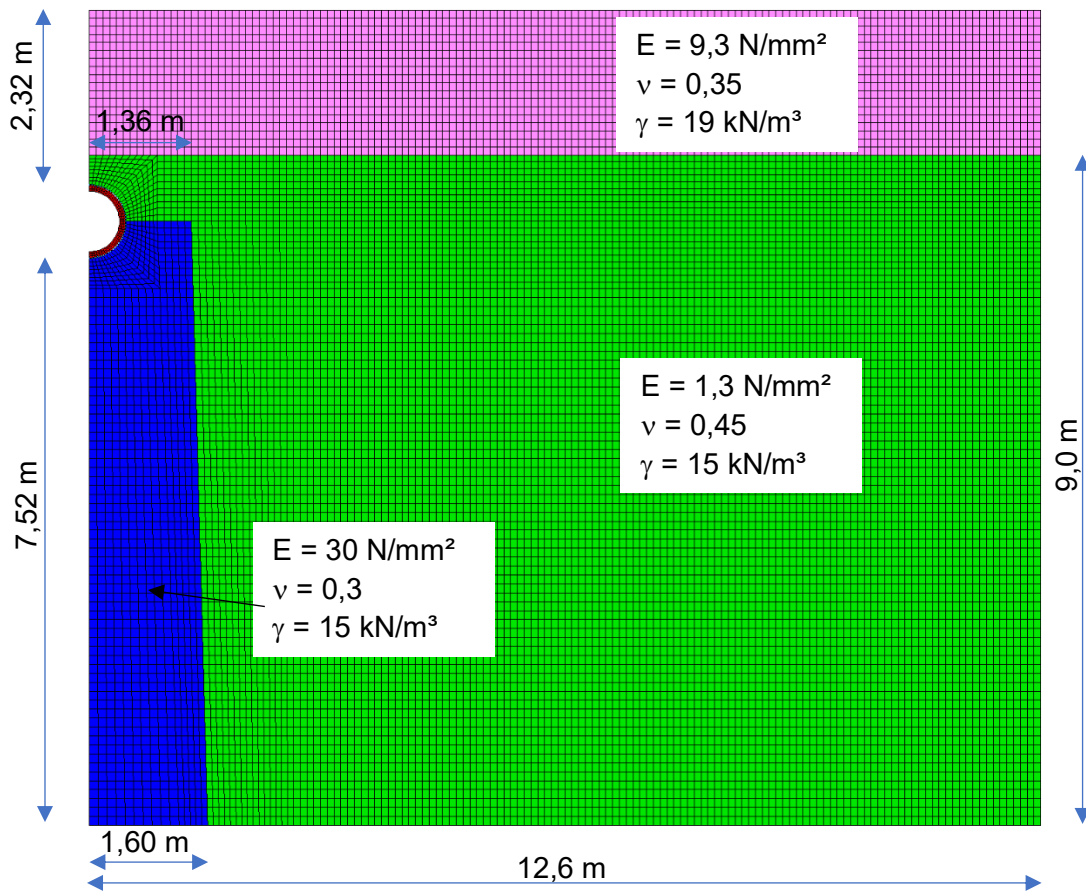


Abb. 3.2.1 Diskretisiertes Rechenmodell, Nennweite DN 800, Variante B, LF 1: Erdlasten

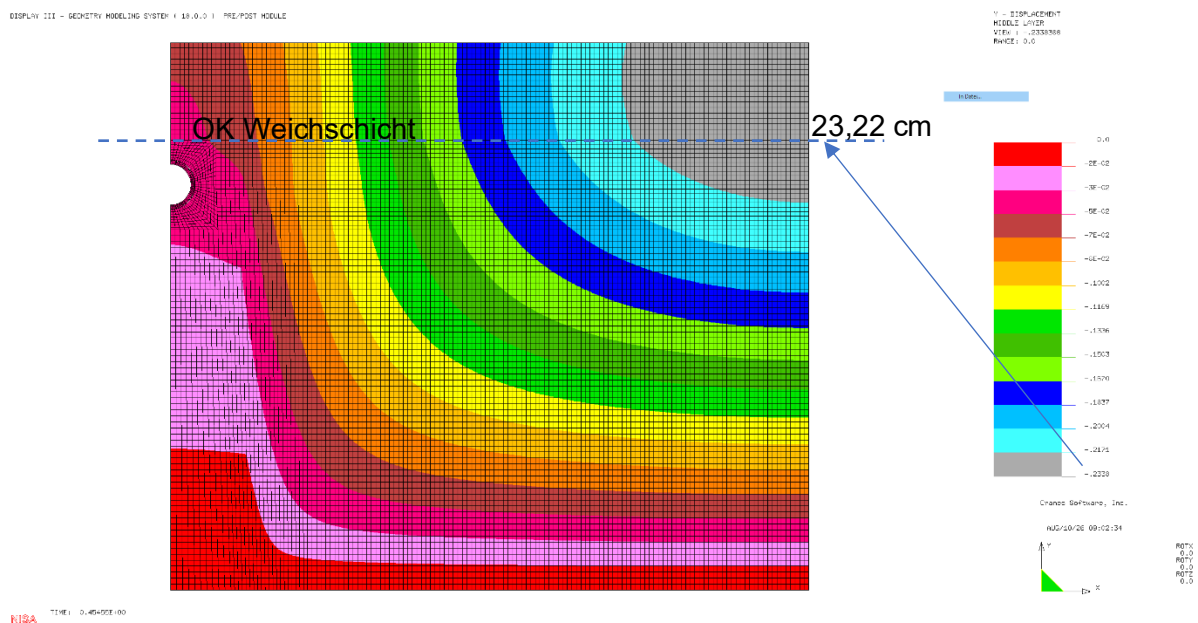


Abb. 3.2.2: Vertikale Verformungen des Modellbereiches [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast, Variante B, LF 1: Erdlasten

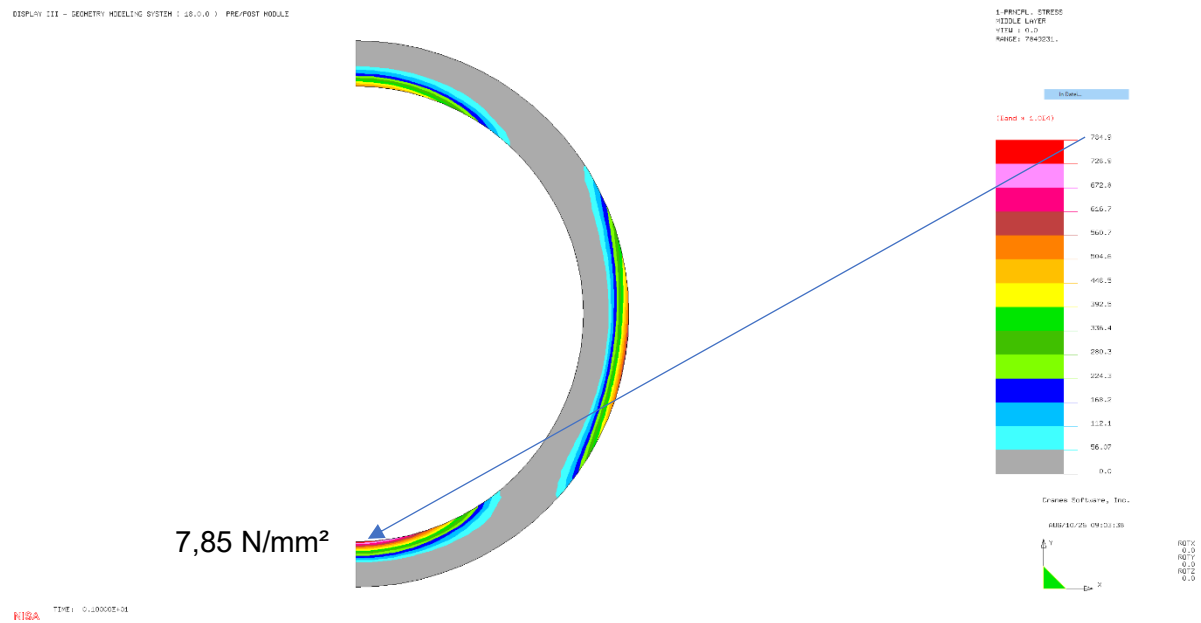


Abb. 3.2.3: 1. Hauptspannung [N/m²] unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast
Variante B, LF 1: Erdlasten

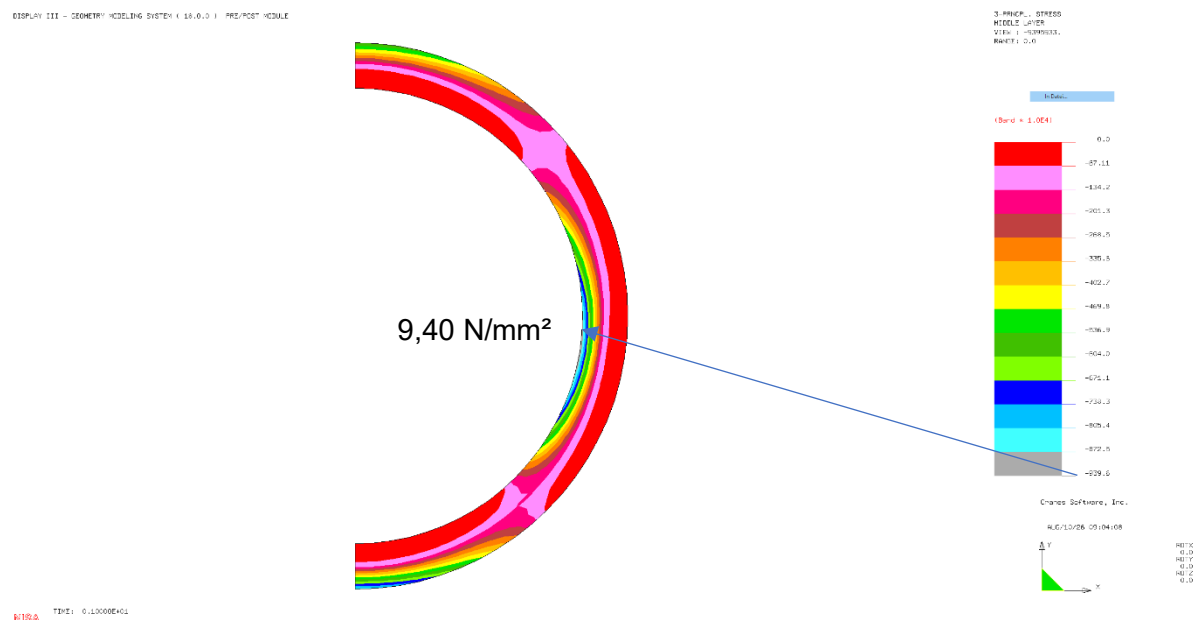


Abb. 3.2.4: 3. Hauptspannung [N/m²] unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast
Variante B, LF 1: Erdlasten

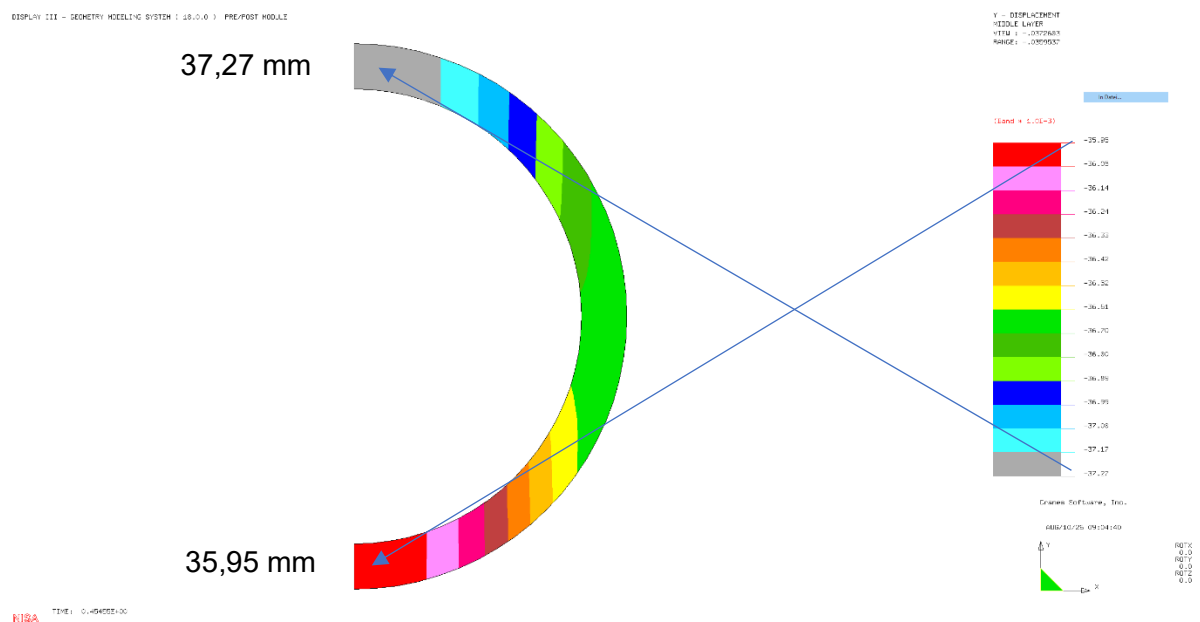


Abb. 3.2.5: Vertikale Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast Variante B, LF 1: Erdlasten

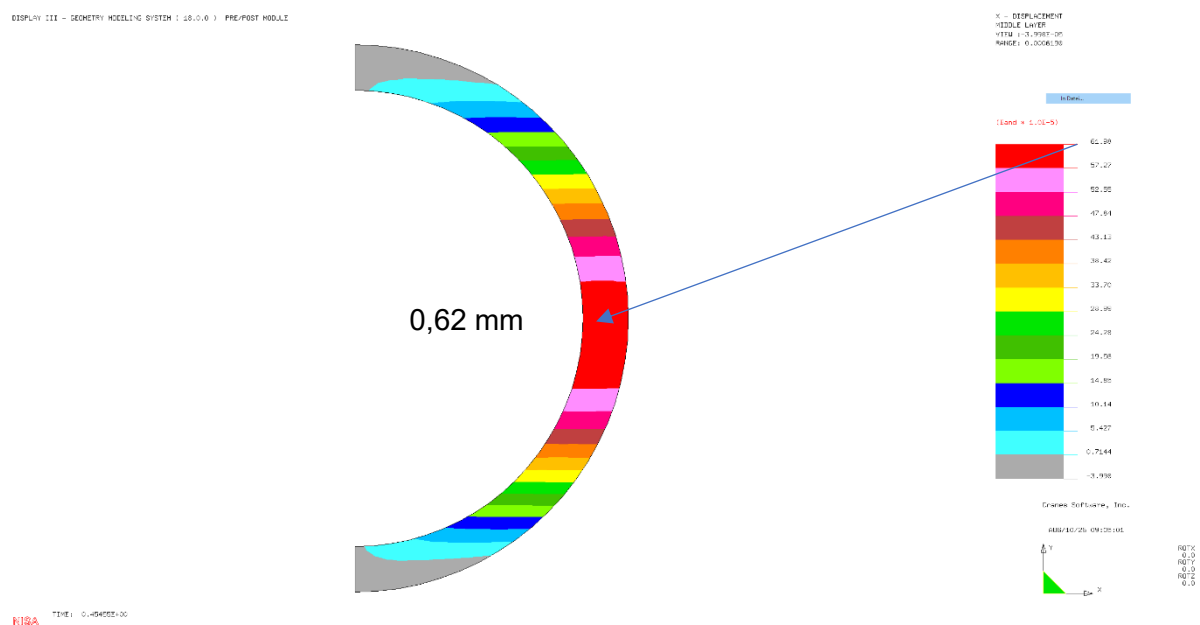


Abb. 3.2.6: Horizontale Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast Variante B, LF 1: Erdlasten

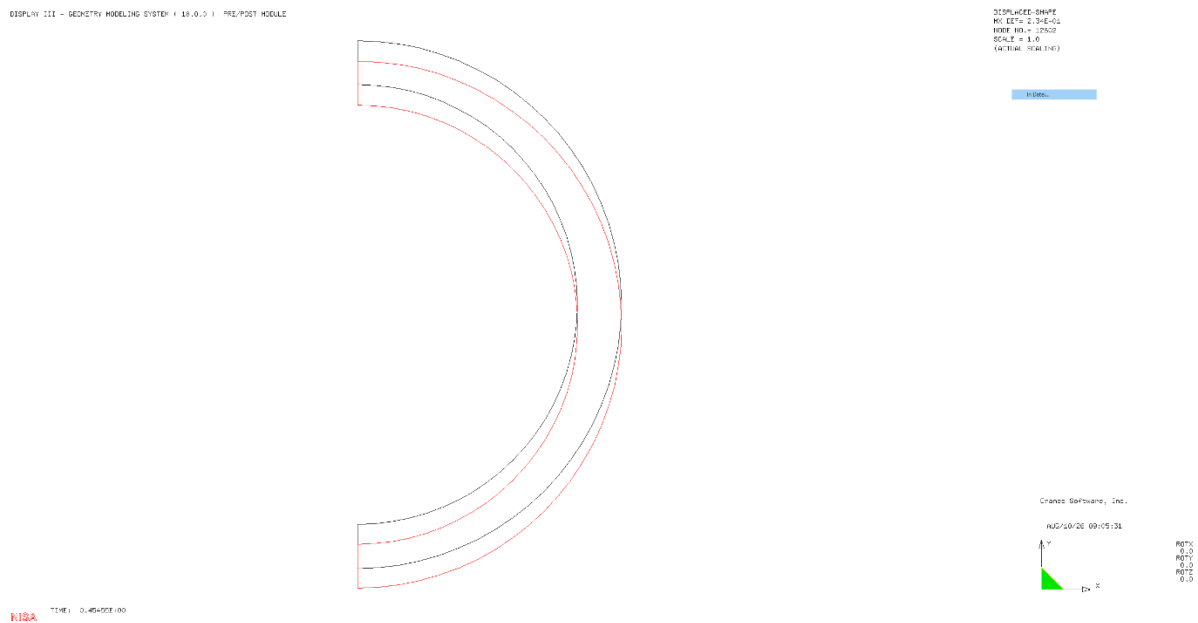


Abb. 3.2.7: Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast Variante B, LF 1: Erdlasten

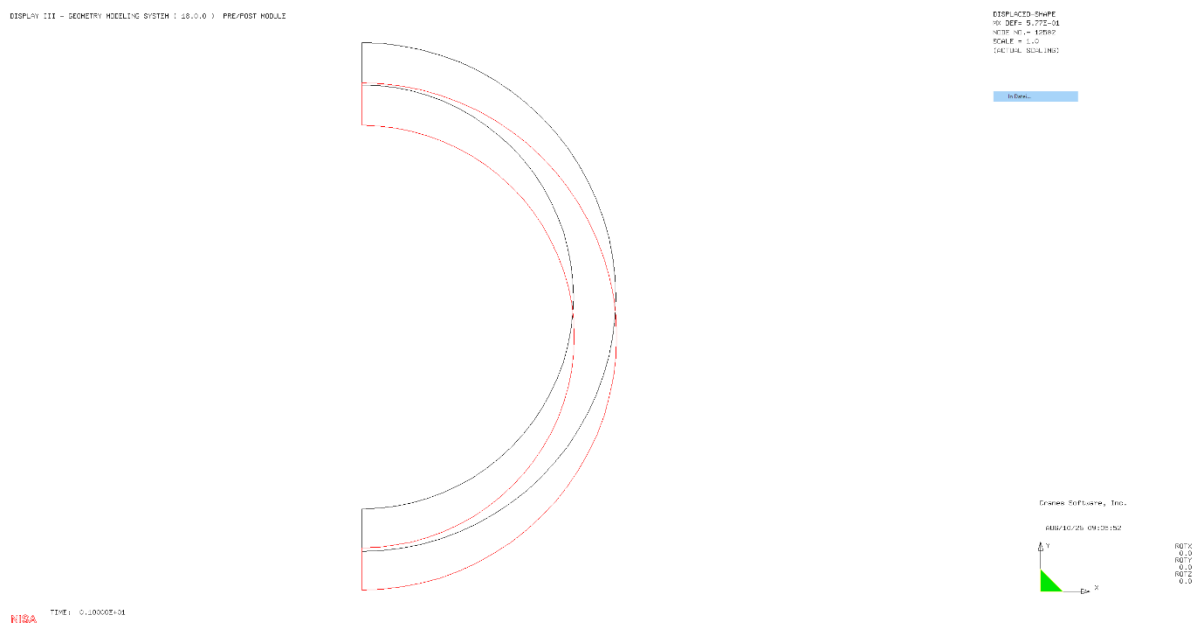


Abb. 3.2.8: Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast Variante B, LF 1: Erdlasten

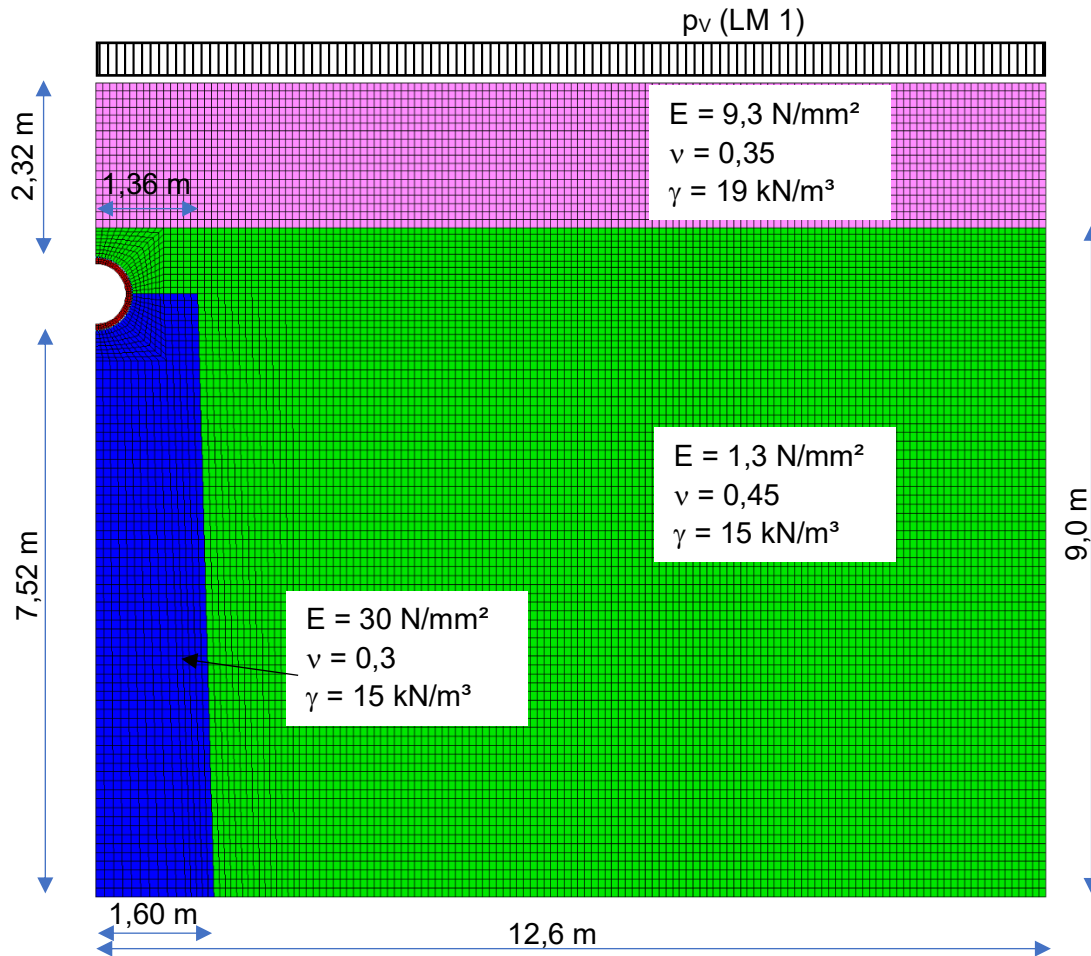


Abb. 3.3.1 Diskretisiertes Rechenmodell, Nennweite DN 800, Variante B, LF 2: Erd- und Verkehrslast LM 1

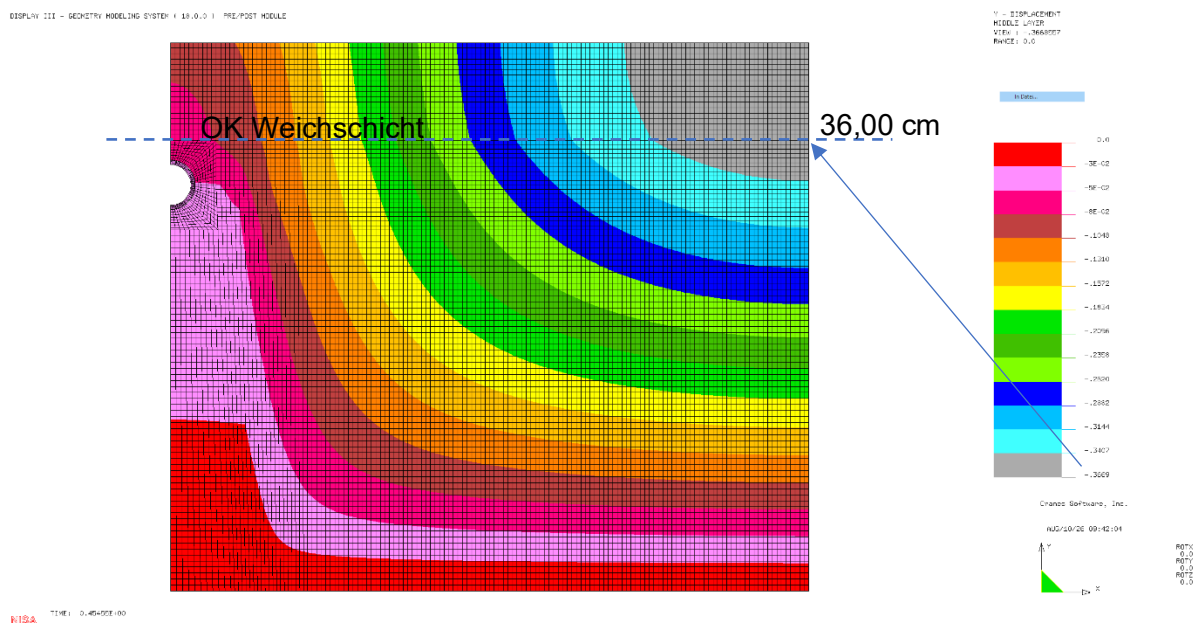


Abb. 3.3.2: Vertikale Verformungen des Modellbereiches [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast, Variante B, LF 2: Erd- und Verkehrslast LM 1

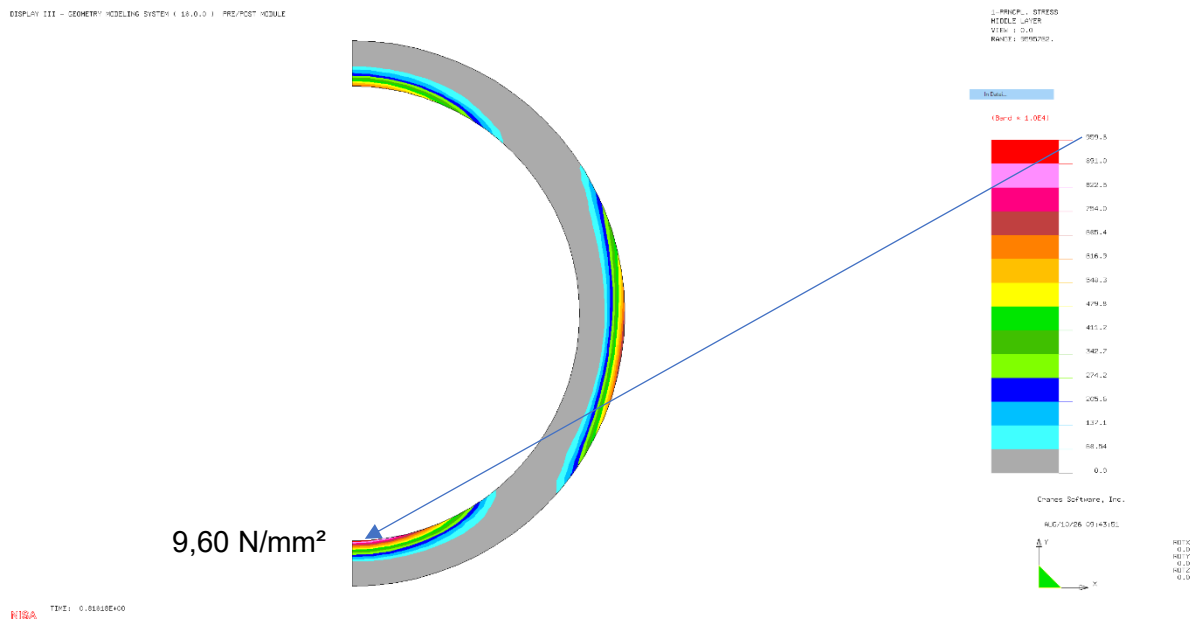


Abb. 3.3.3: 1. Hauptspannung [N/m²] unter Einwirkung der 1,8-fachen Gebrauchslast Variante B, LF 2: Erd- und Verkehrslast LM 1

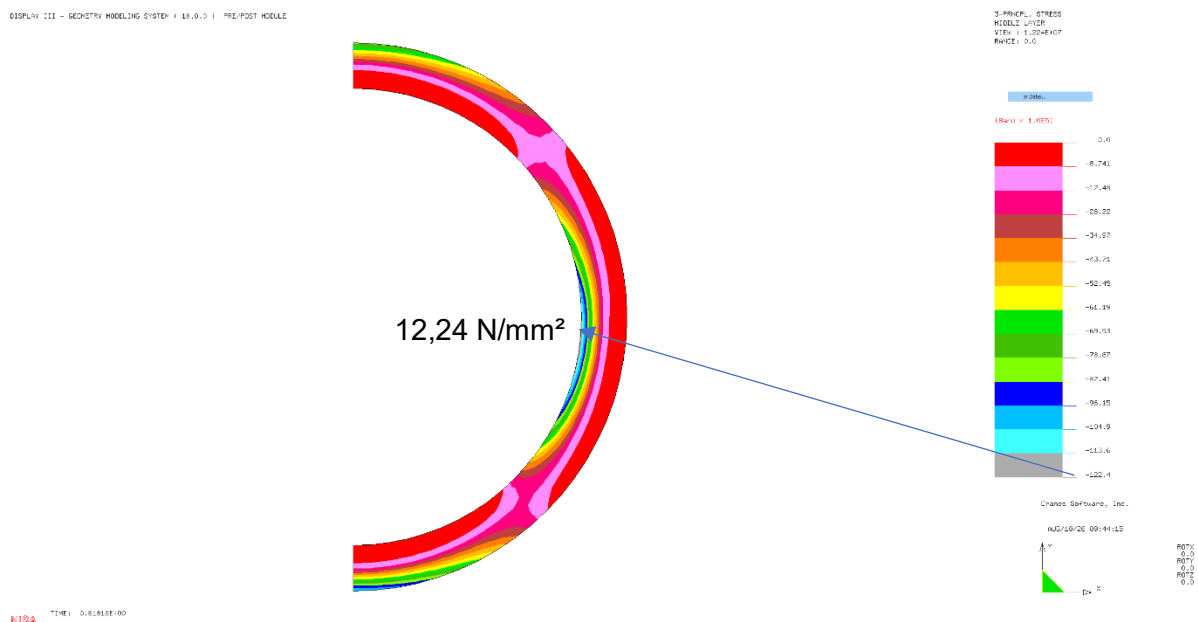


Abb. 3.3.4: 3. Hauptspannung [N/m²] unter Einwirkung der 1,8-fachen Gebrauchslast Variante B, LF 2: Erd- und Verkehrslast LM 1

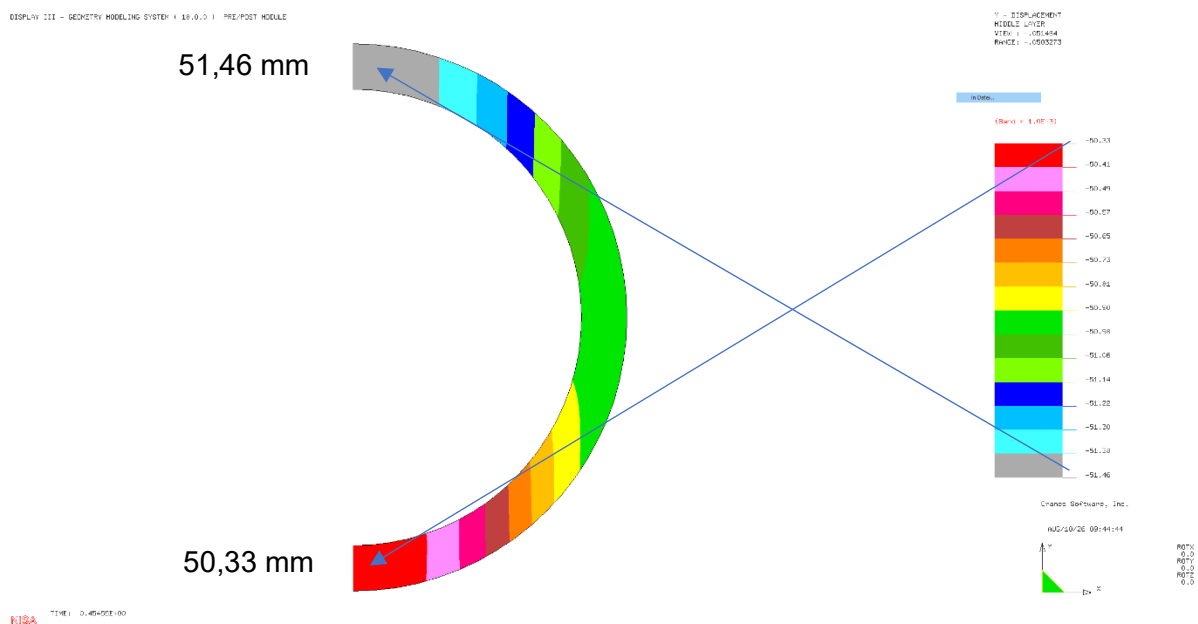


Abb. 3.3.5: Vertikale Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast Variante B, LF 2: Erd- und Verkehrslast LM 1

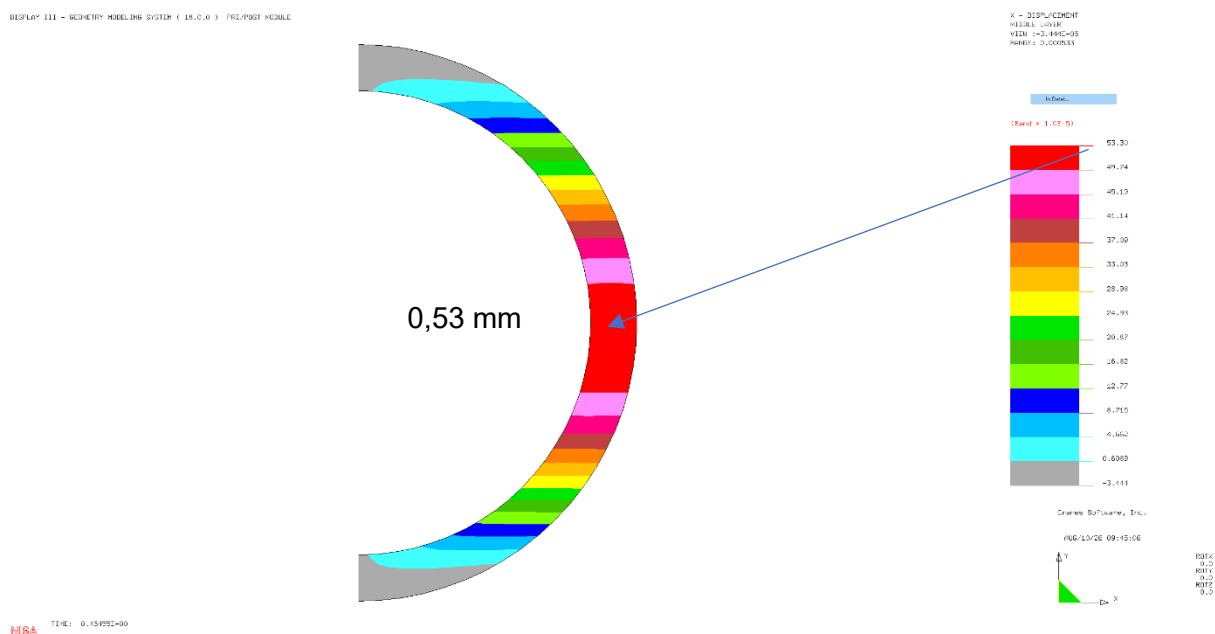


Abb. 3.3.6: Horizontale Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast Variante B, LF 2: Erd- und Verkehrslast LM 1

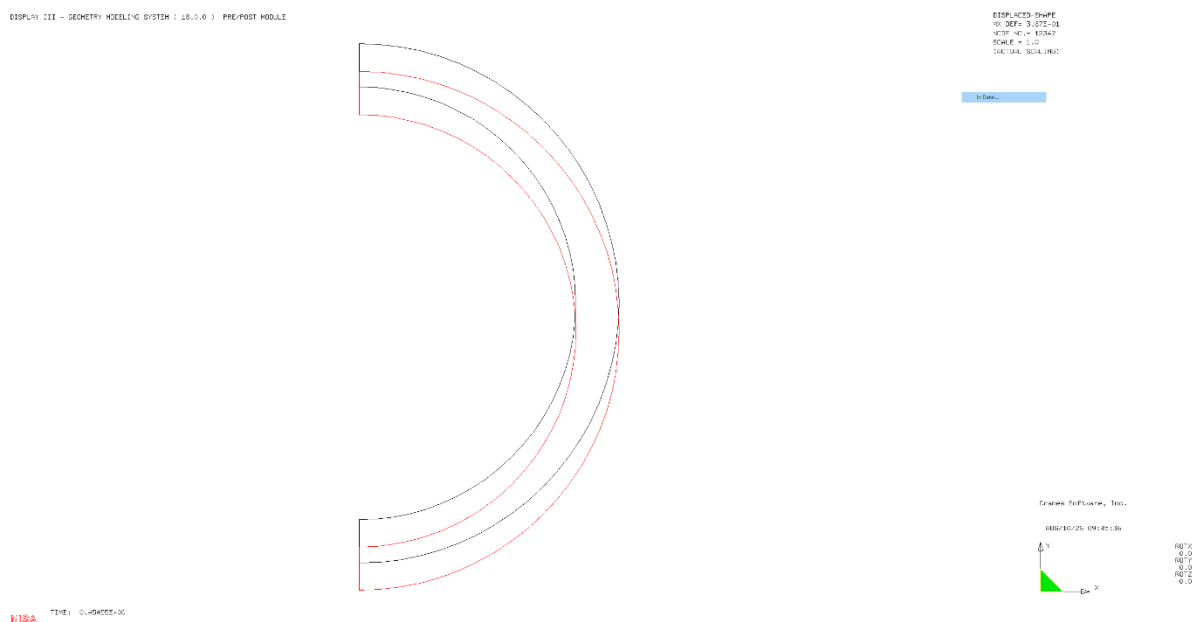


Abb. 3.3.7: Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast Variante B, LF 2: Erd- und Verkehrslast LM 1

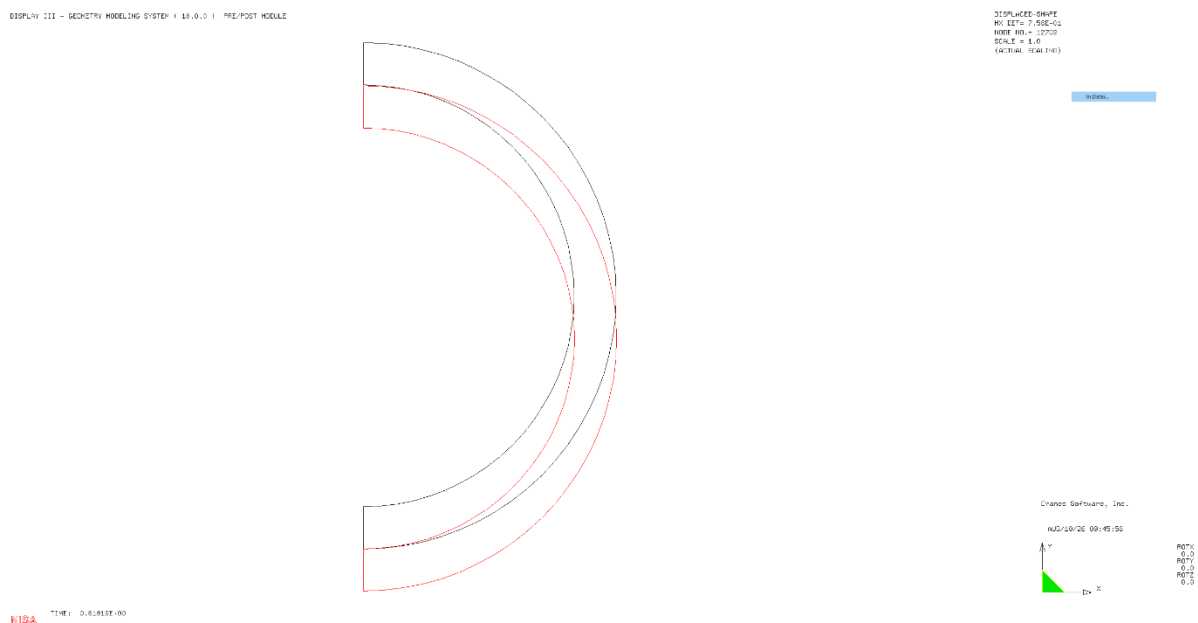


Abb. 3.3.8: Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der 1,8-fachen Gebrauchslast Variante B, LF 2: Erd- und Verkehrslast LM 1

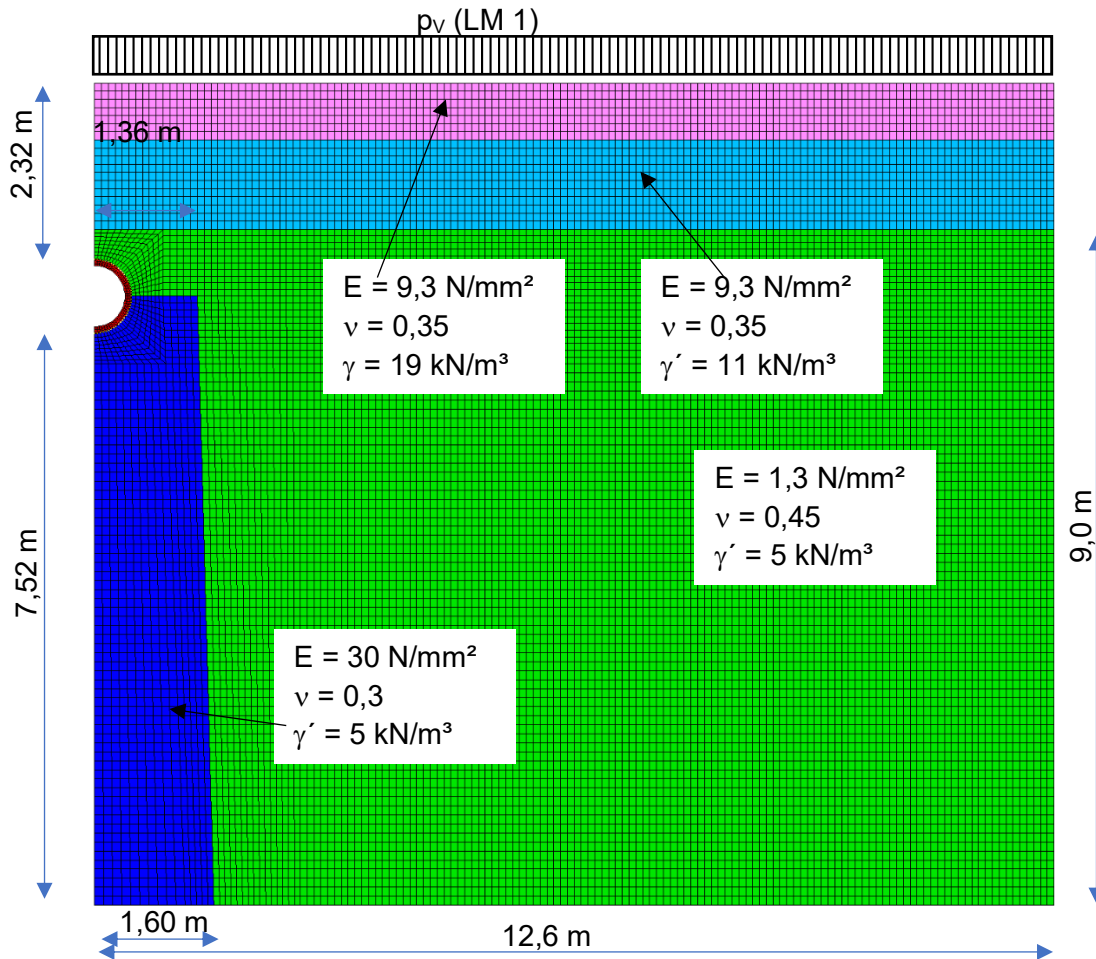


Abb. 3.4.1 Diskretisiertes Rechenmodell, Nennweite DN 800, Variante B, LF 3: Erdlast, Verkehrslast LM 1, GW

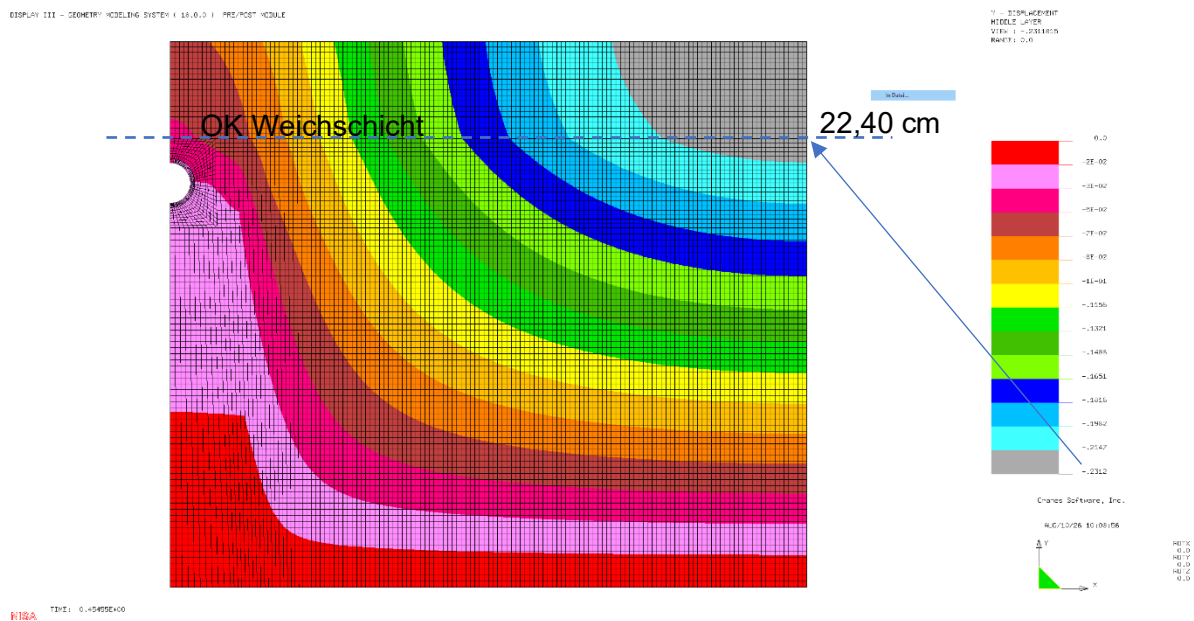


Abb. 3.4.2: Vertikale Verformungen des Modellbereiches [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast, Variante B, LF 3: Erdlast, Verkehrslast LM 1, GW

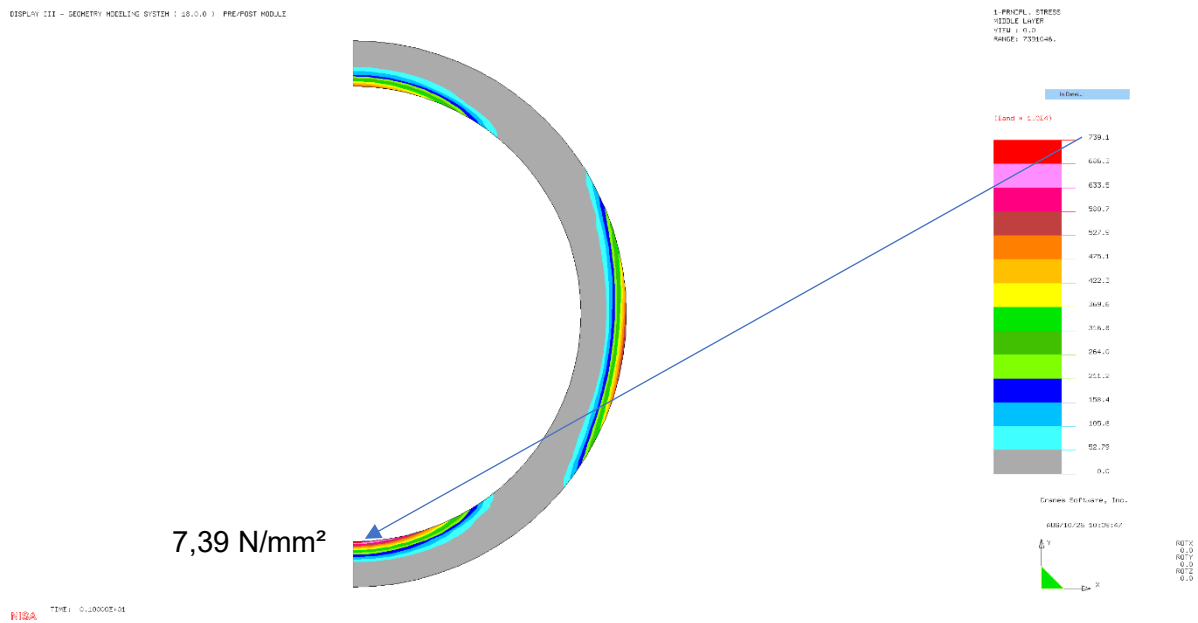


Abb. 3.4.3: 1. Hauptspannung [N/m²] unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast Variante B, LF 3: Erdlast, Verkehrslast LM 1, GW

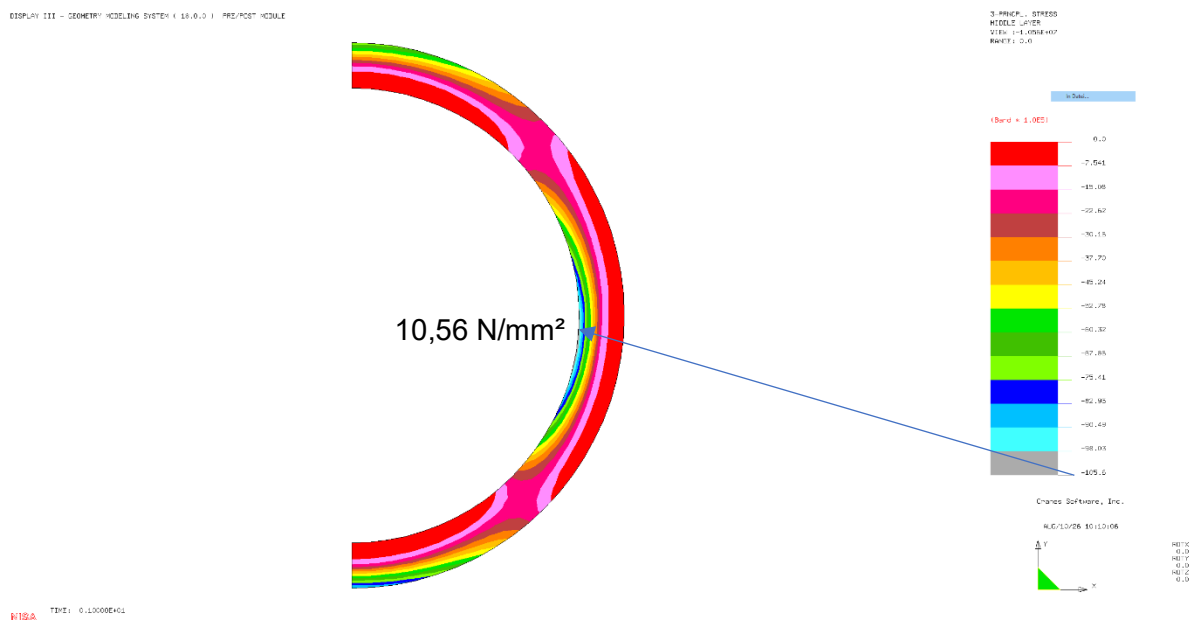


Abb. 3.4.4: 3. Hauptspannung [N/m²] unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast Variante B, LF 3: Erdlast, Verkehrslast LM 1, GW

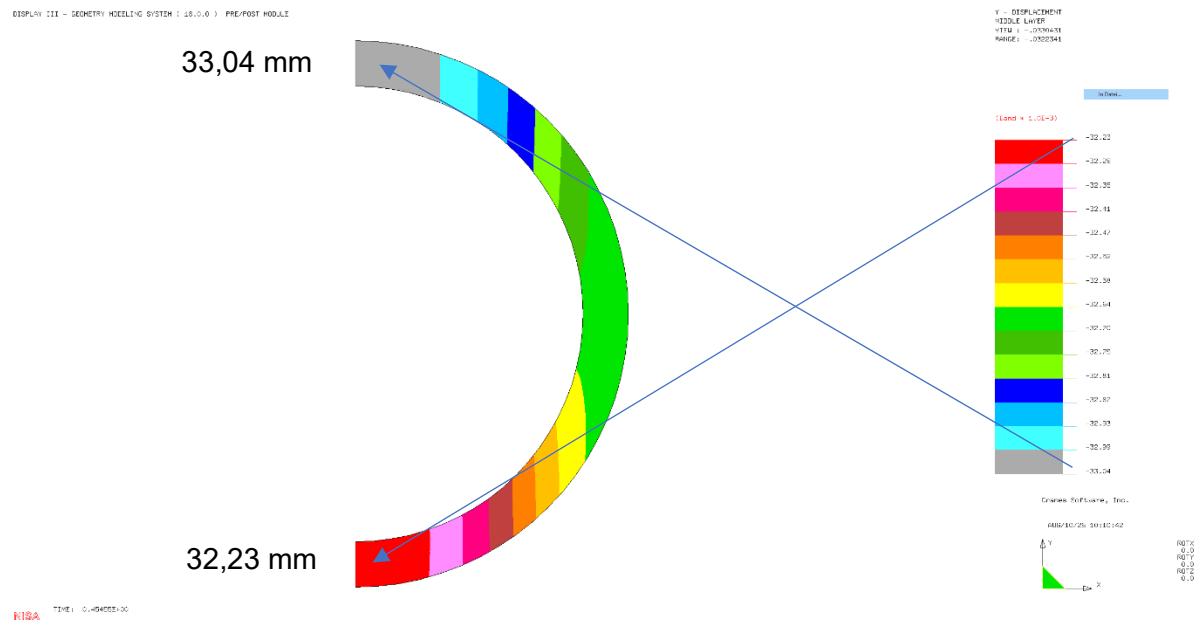


Abb. 3.4.5: Vertikale Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast
Variante B, LF 3: Erdlast, Verkehrslast LM 1, GW

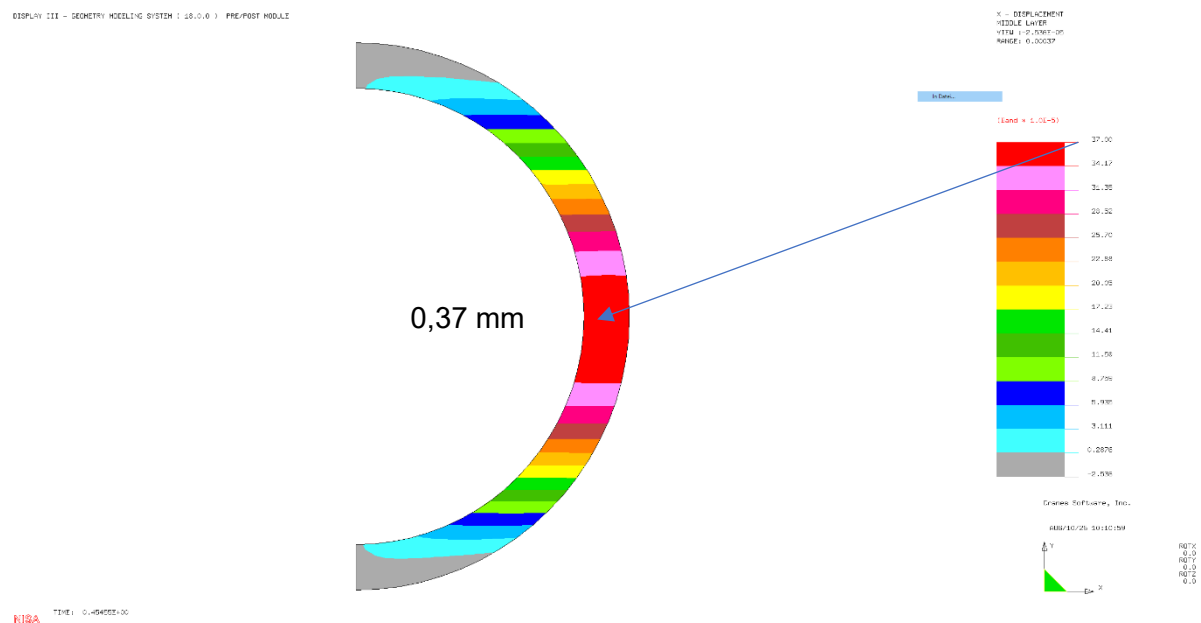


Abb. 3.4.6: Horizontale Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast
Variante B, LF 3: Erdlast, Verkehrslast LM 1, GW

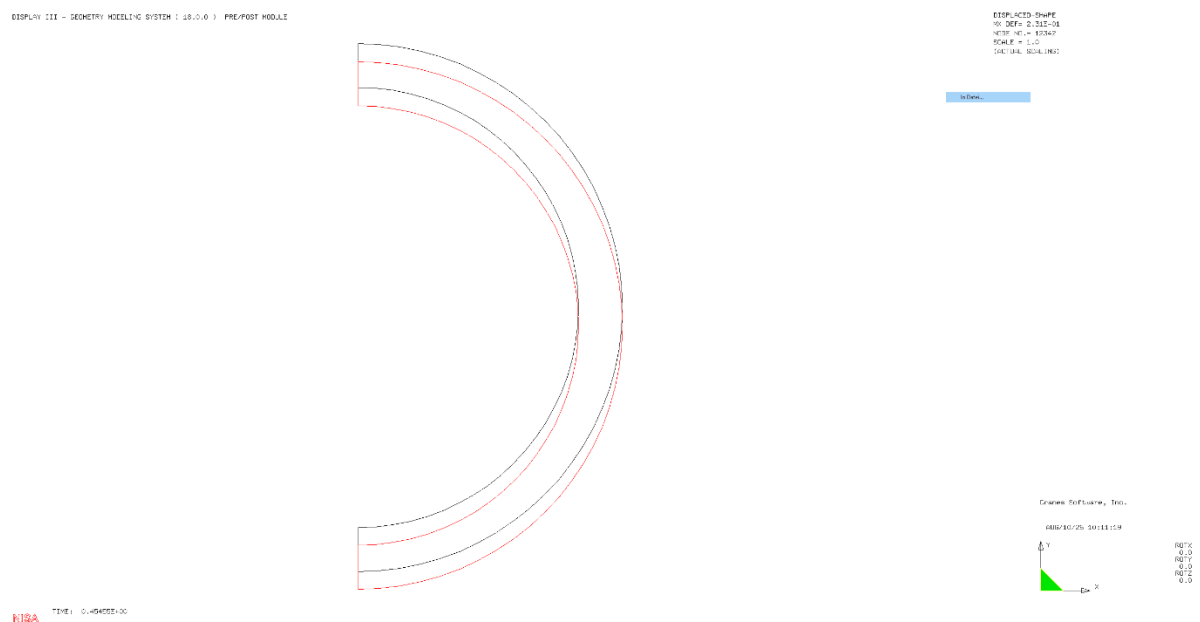


Abb. 3.4.7: Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast Variante B, LF 3: Erdlast, Verkehrslast LM 1, GW

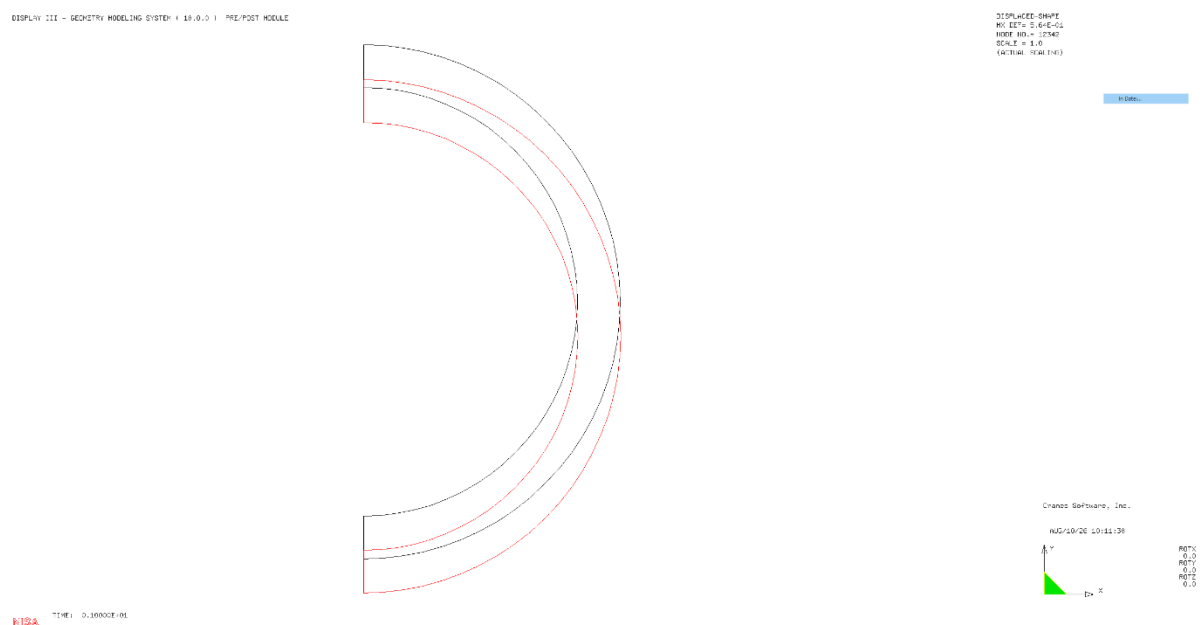


Abb. 3.4.8: Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der 1,8-fachen Gebrauchslast Variante B, LF 3: Erdlast, Verkehrslast LM 1, GW

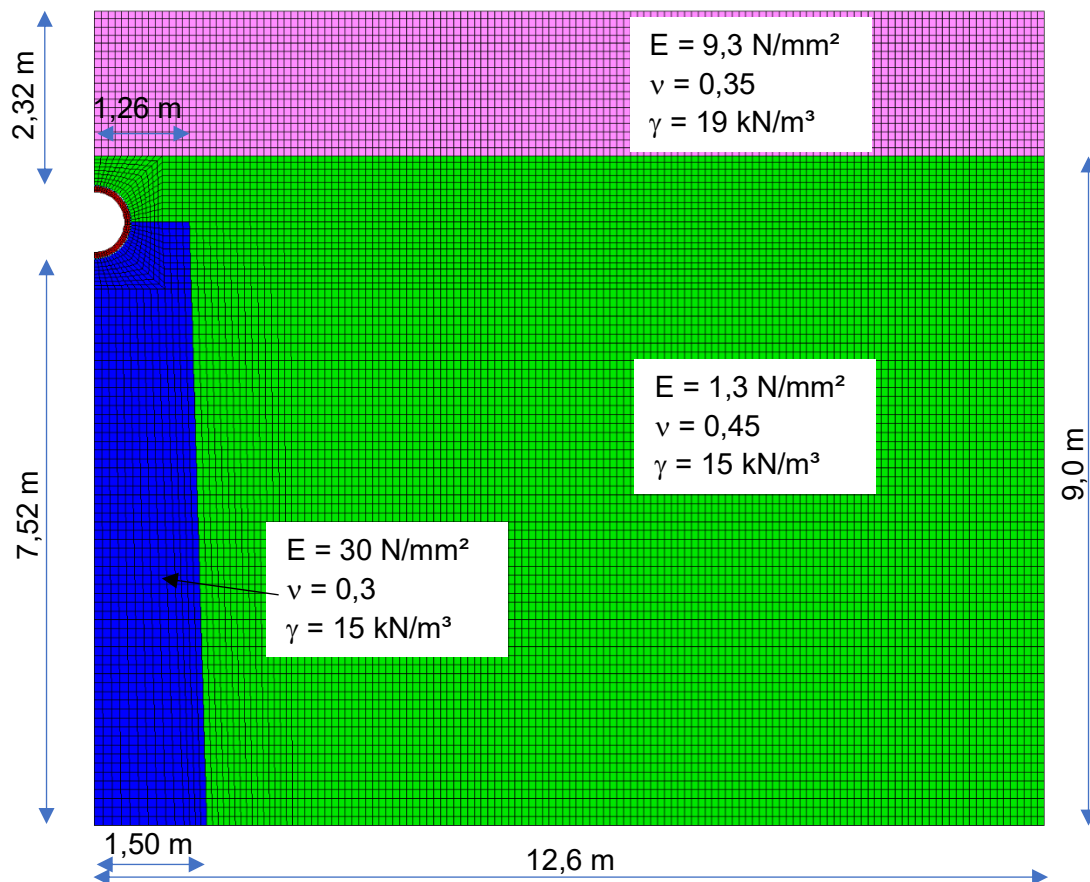


Abb. 3.5.1 Diskretisiertes Rechenmodell, Nennweite DN 800, Variante C, LF 1: Erdlasten

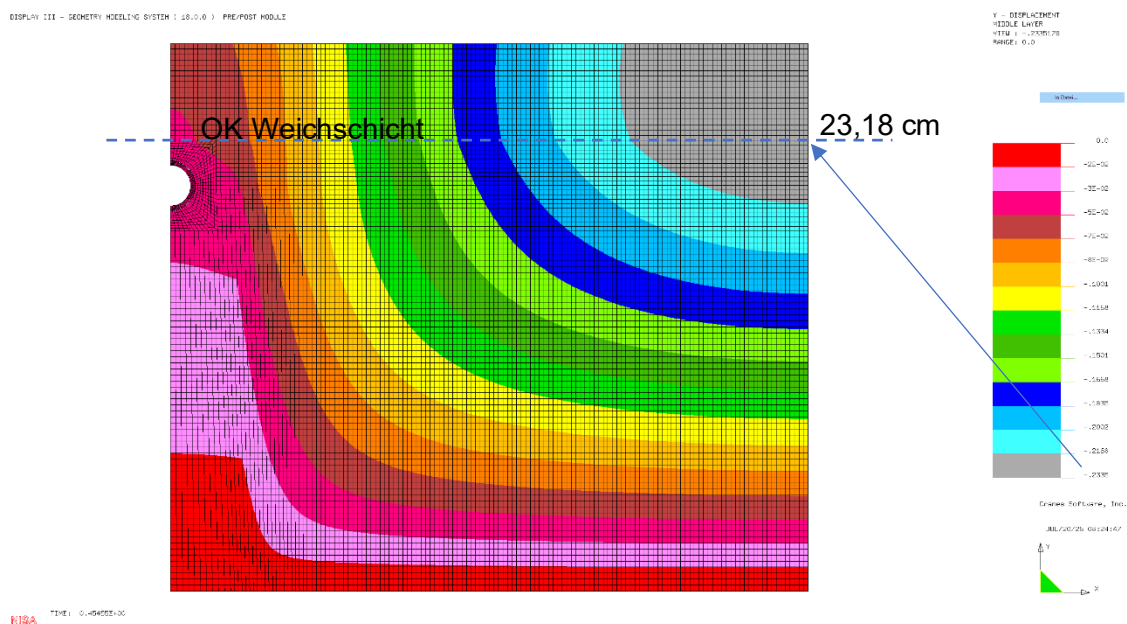


Abb. 3.5.2: Vertikale Verformungen des Modellbereiches [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast, Variante C, LF 1: Erdlasten

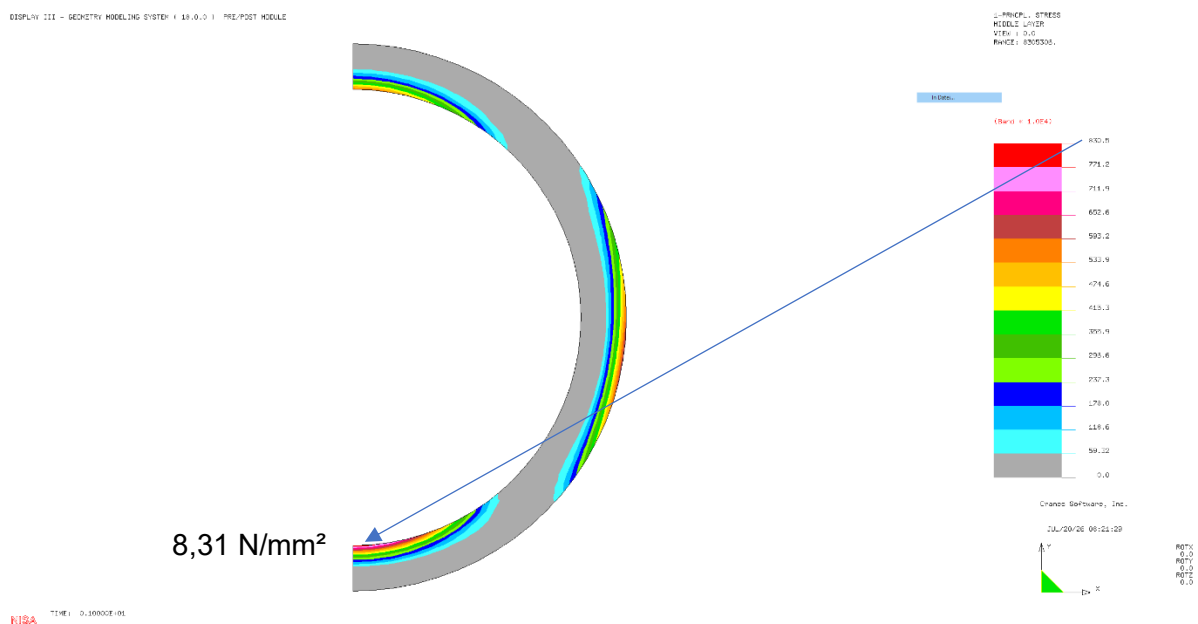


Abb. 3.5.3: 1. Hauptspannung [N/m²] unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast Variante C, LF 1: Erdlasten

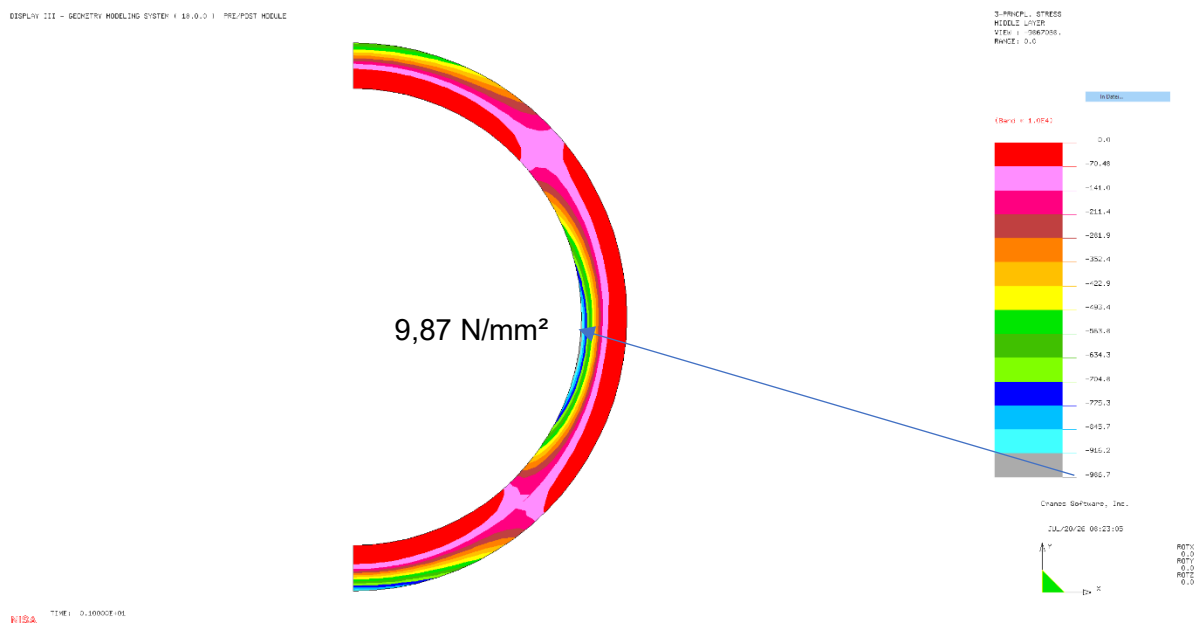


Abb. 3.5.4: 3. Hauptspannung [N/m²] unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast Variante C, LF 1: Erdlasten

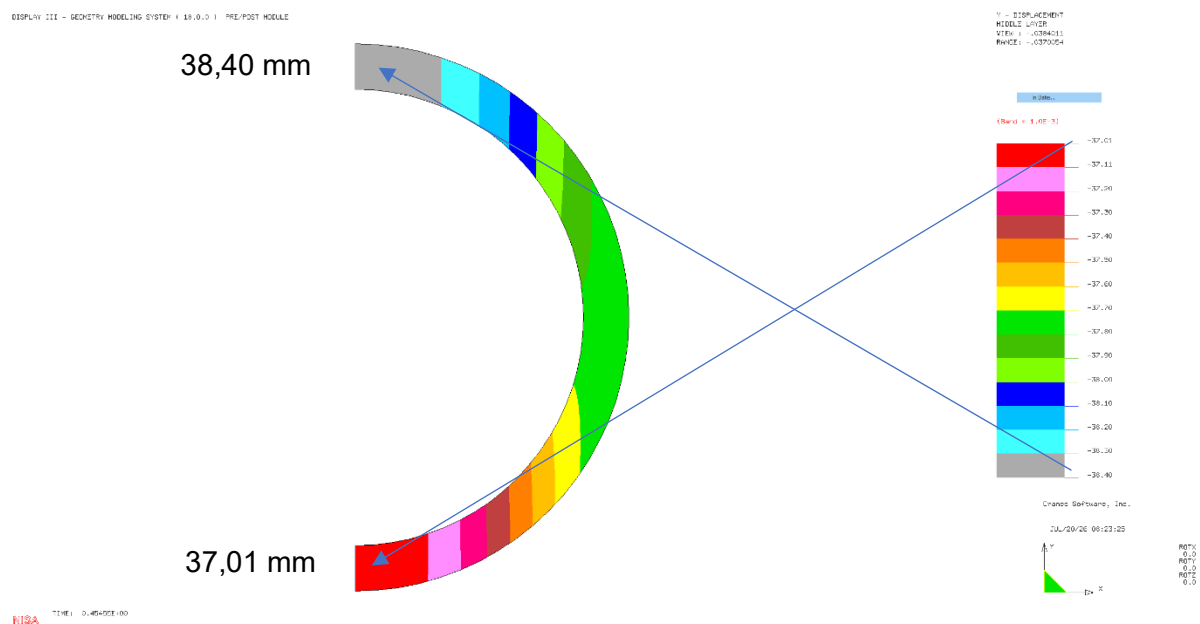


Abb. 3.5.5: Vertikale Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast Variante C, LF 1: Erdlasten

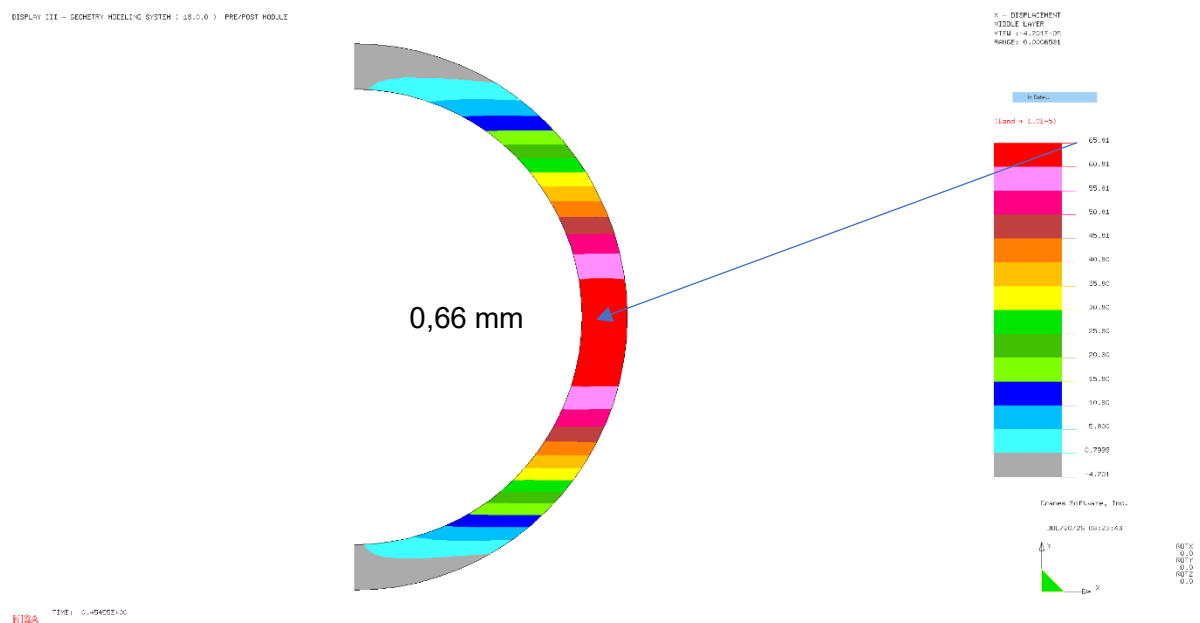


Abb. 3.5.6: Horizontale Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast Variante C, LF 1: Erdlasten

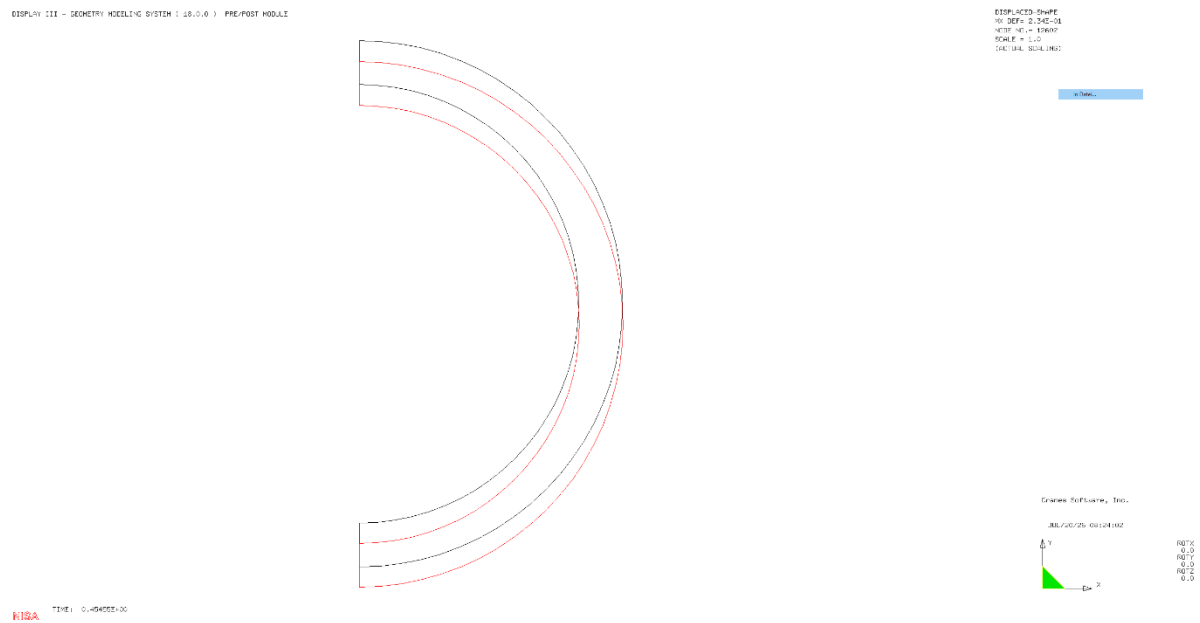


Abb. 3.5.7: Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast Variante C, LF 1: Erdlasten

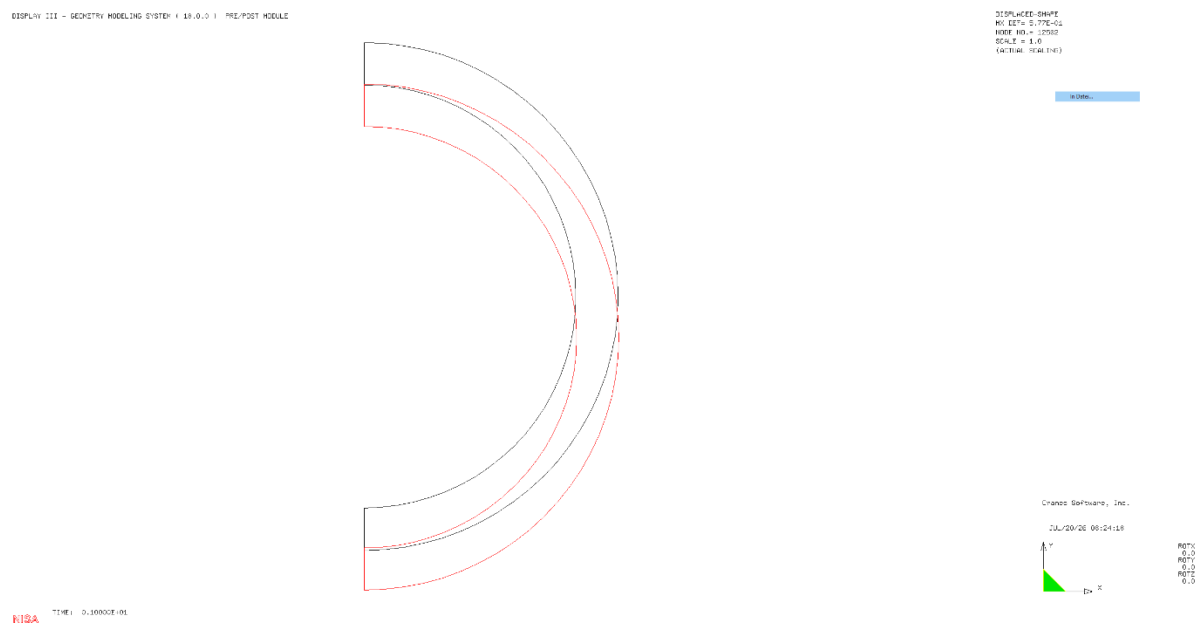


Abb. 3.5.8: Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast Variante C, LF 1: Erdlasten

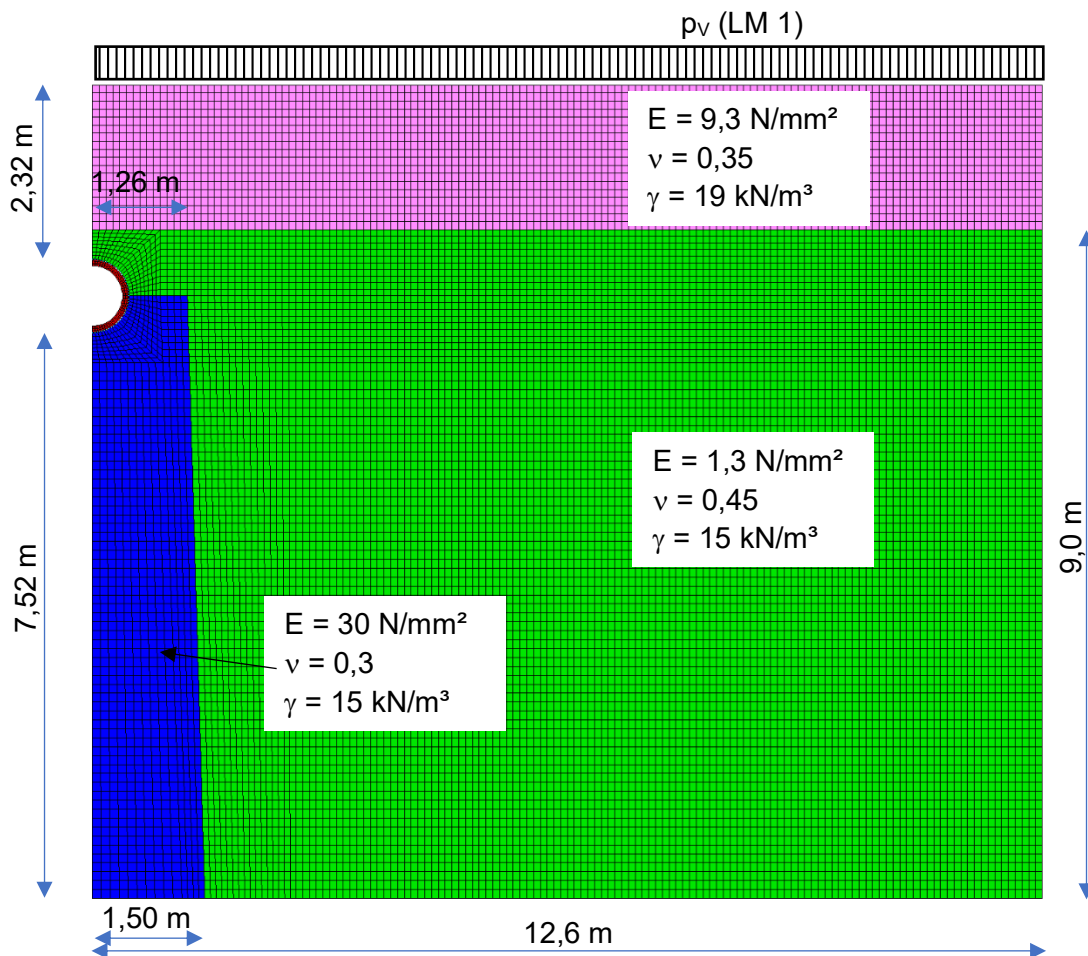


Abb. 3.6.1 Diskretisiertes Rechenmodell, Nennweite DN 800, Variante C, LF 2: Erd- und Verkehrslast LM 1

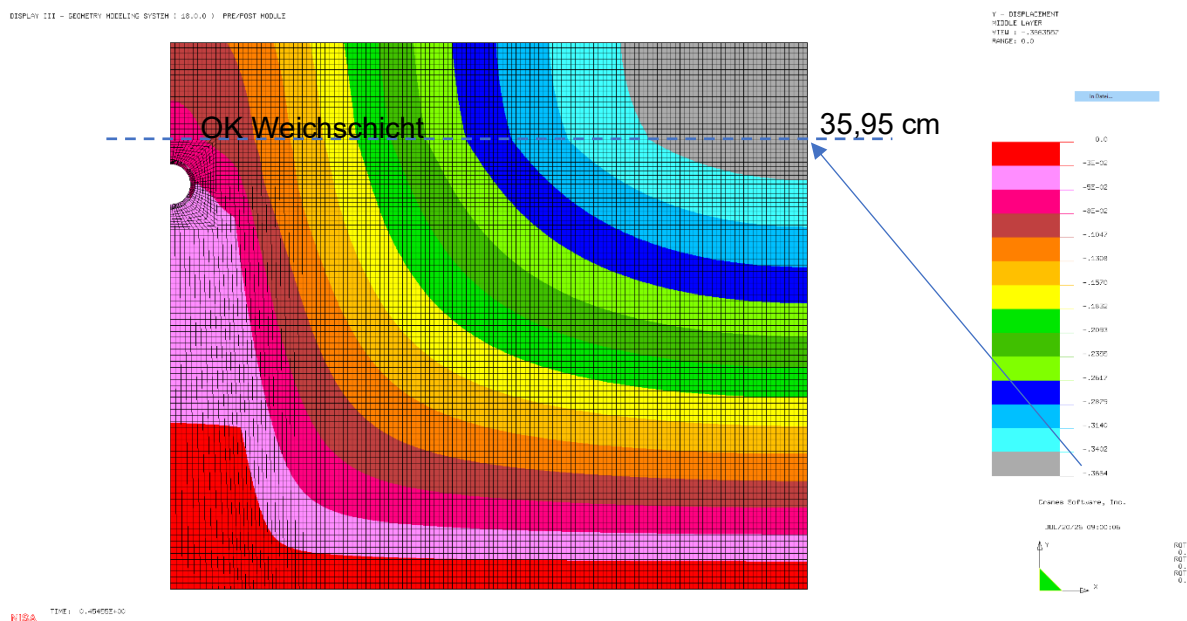


Abb. 3.6.2: Vertikale Verformungen des Modellbereiches [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast, Variante C, LF 2: Erd- und Verkehrslast LM 1

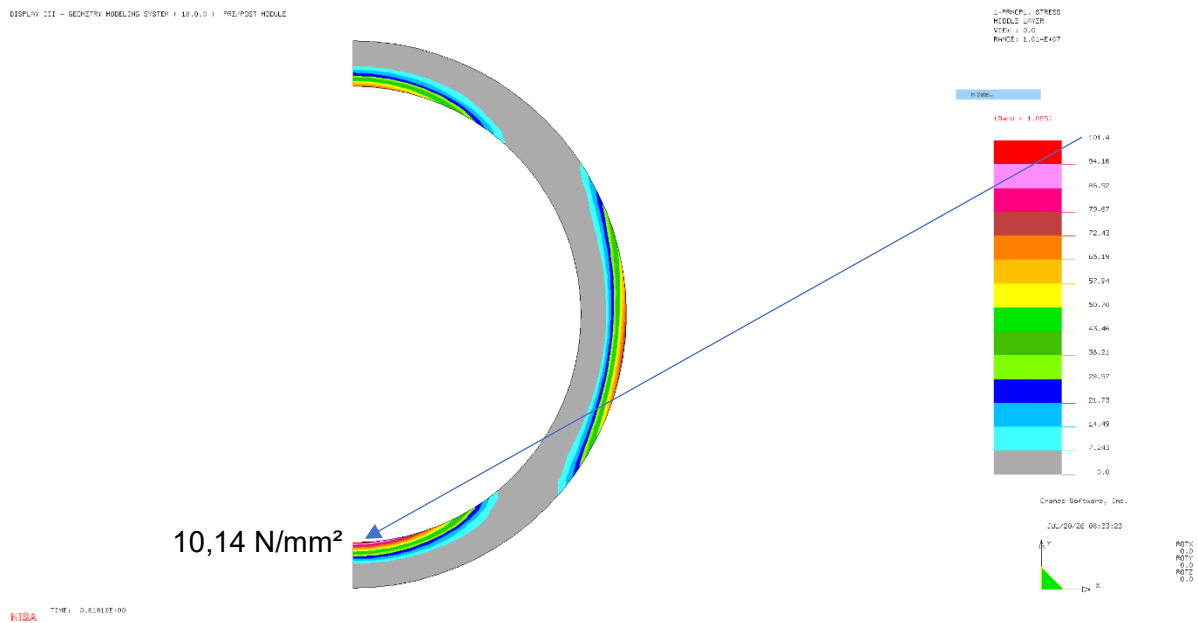


Abb. 3.6.3: 1. Hauptspannung [N/m²] unter Einwirkung der 1,8-fachen Gebrauchslast Variante C, LF 2: Erd- und Verkehrslast LM 1

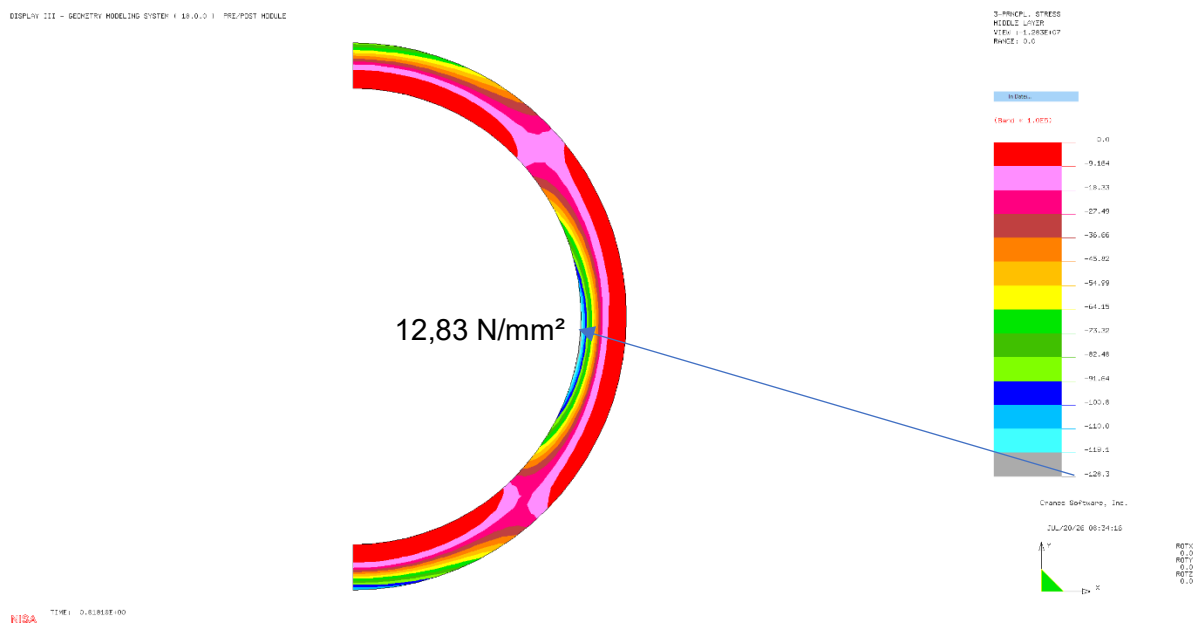


Abb. 3.6.4: 3. Hauptspannung [N/m²] unter Einwirkung der 1,8-fachen Gebrauchslast Variante C, LF 2: Erd- und Verkehrslast LM 1

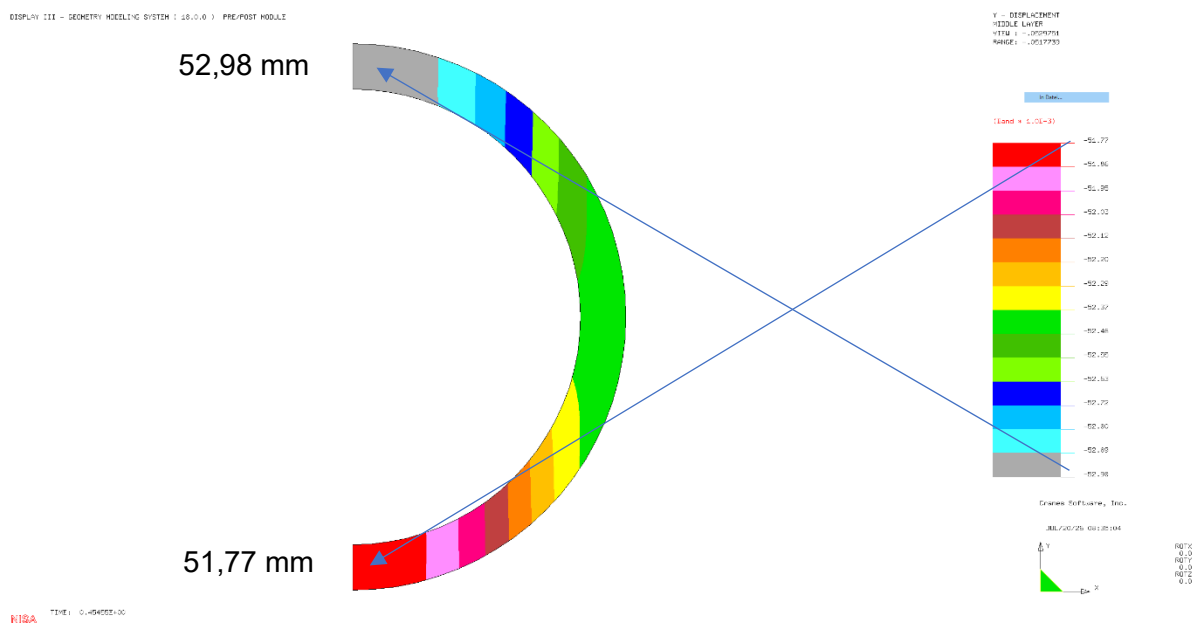


Abb. 3.6.5: Vertikale Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast Variante C, LF 2: Erd- und Verkehrslast LM 1

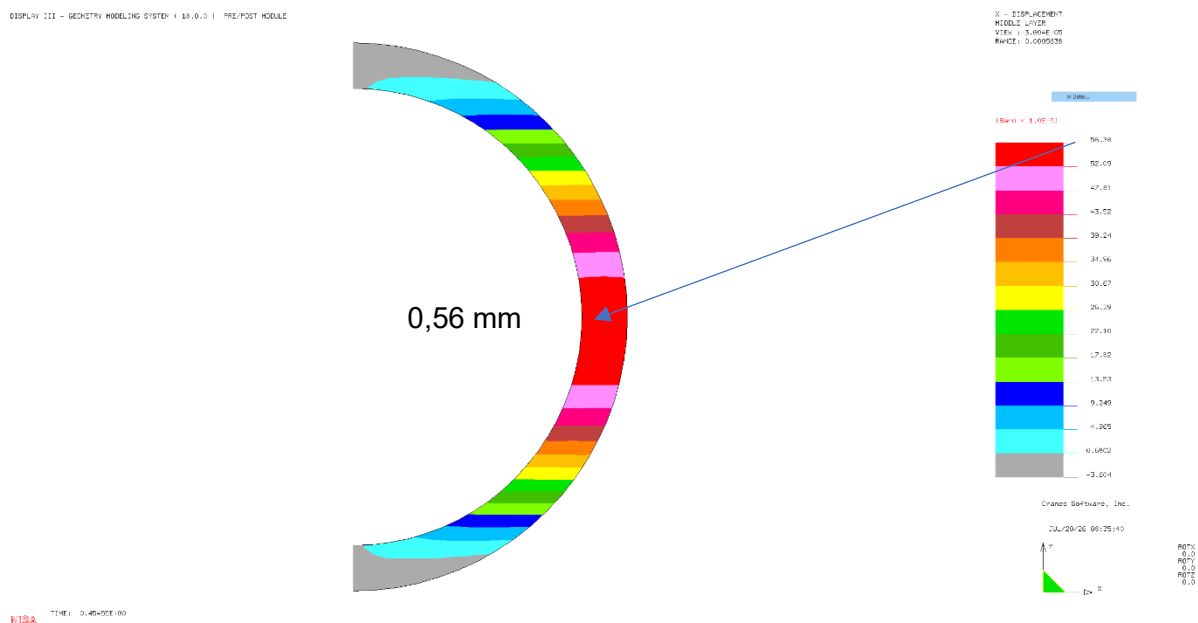


Abb. 3.6.6: Horizontale Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast Variante C, LF 2: Erd- und Verkehrslast LM 1

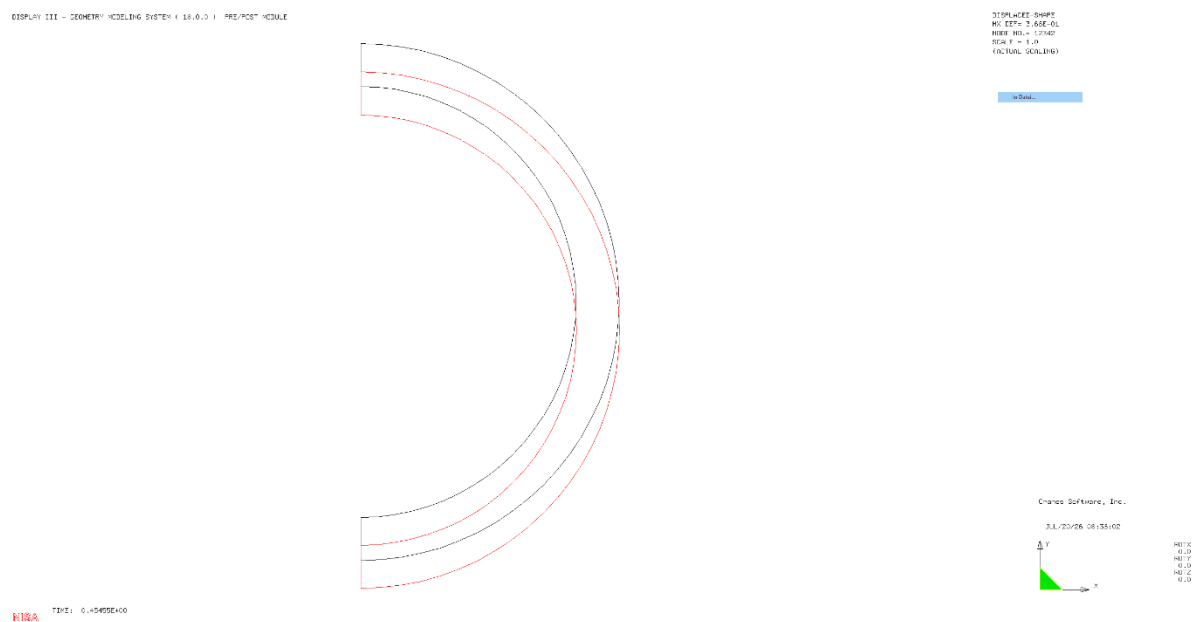


Abb. 3.6.7: Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast Variante C, LF 2: Erd- und Verkehrslast LM 1

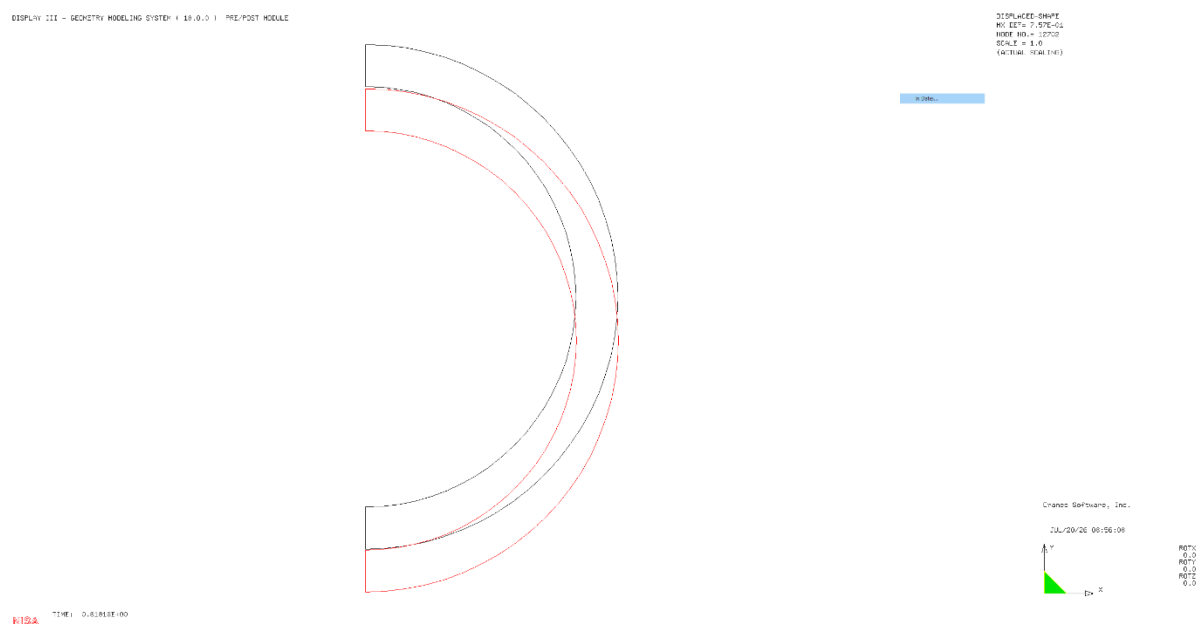


Abb. 3.6.8: Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der 1,8-fachen Gebrauchslast Variante C, LF 2: Erd- und Verkehrslast LM 1

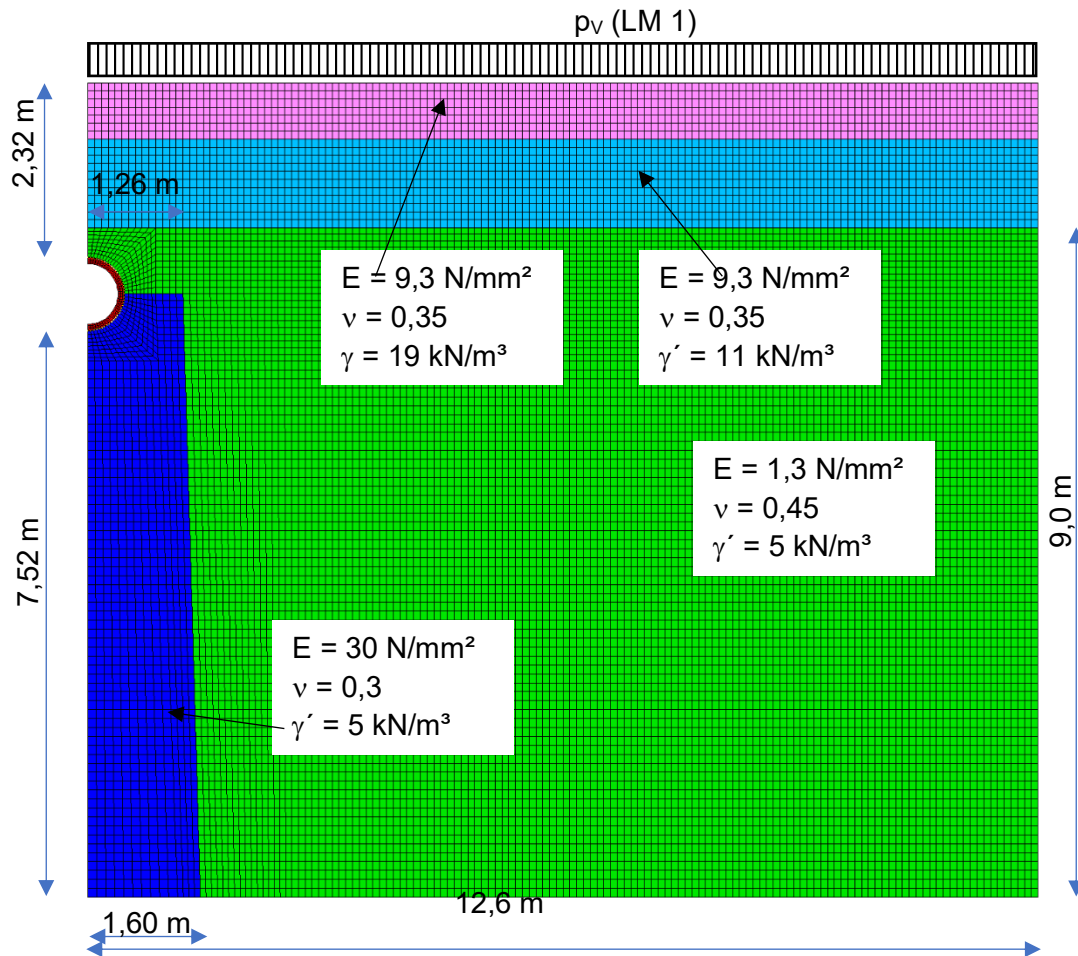


Abb. 3.7.1 Diskretisiertes Rechenmodell, Nennweite DN 800, Variante C, LF 3: Erdlast, Verkehrslast LM 1, GW

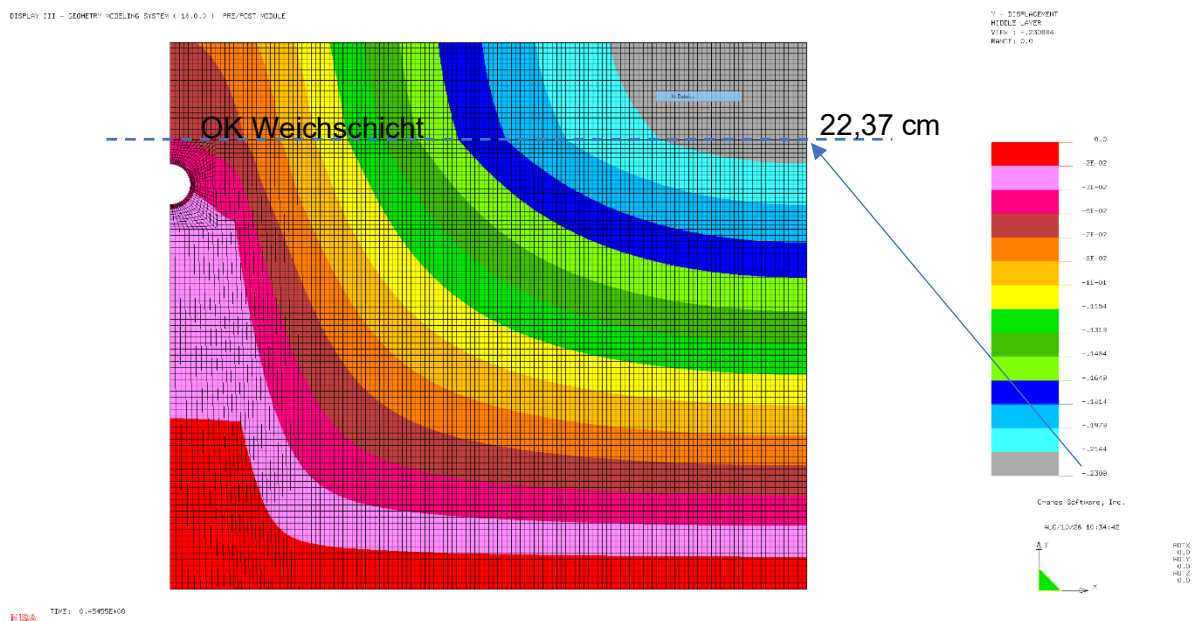


Abb. 3.7.2: Vertikale Verformungen des Modellbereiches [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast, Variante C, LF 3: Erdlast, Verkehrslast LM 1, GW

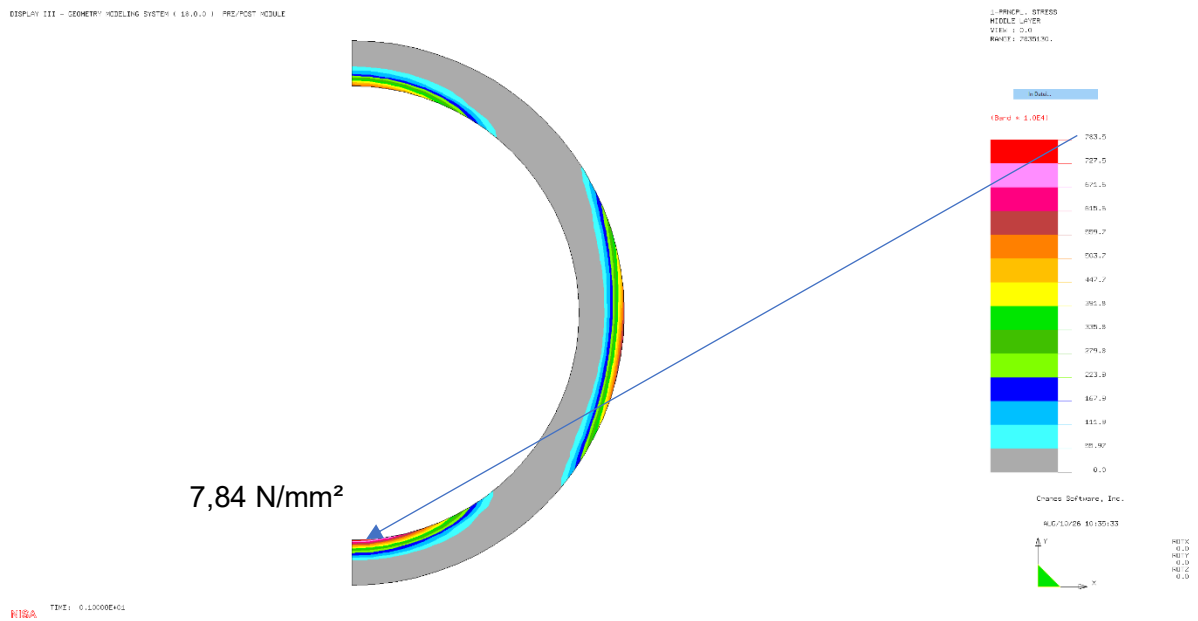


Abb. 3.7.3: 1. Hauptspannung [N/m²] unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast Variante C, LF 3: Erdlast, Verkehrslast LM 1, GW

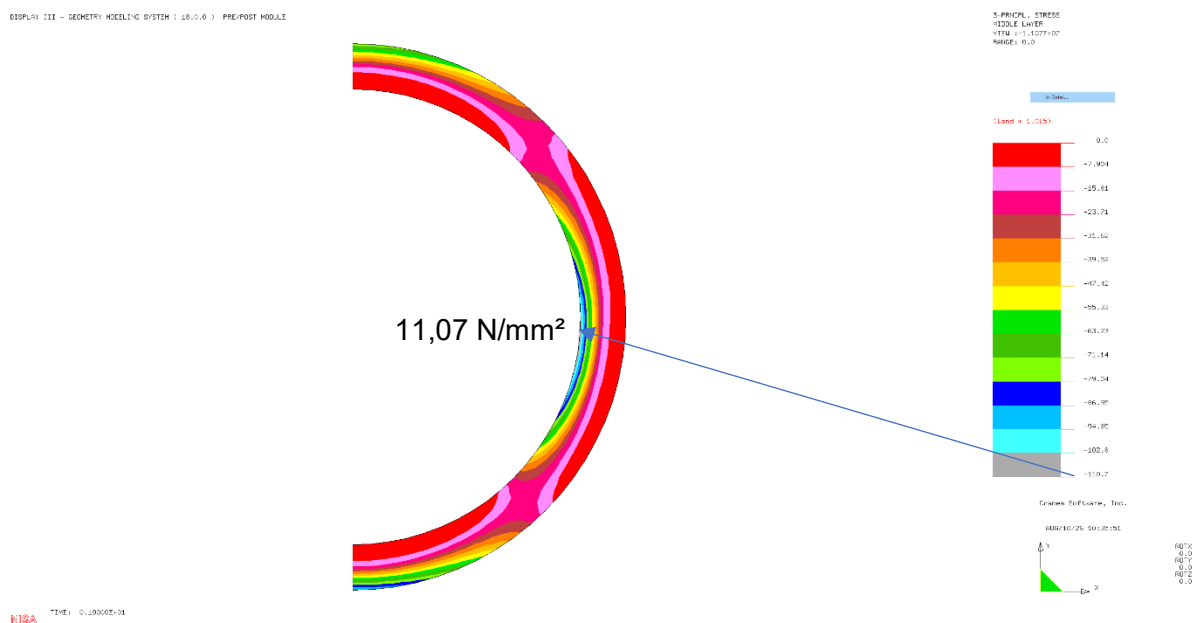


Abb. 3.7.4: 3. Hauptspannung [N/m²] unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast Variante C, LF 3: Erdlast, Verkehrslast LM 1, GW

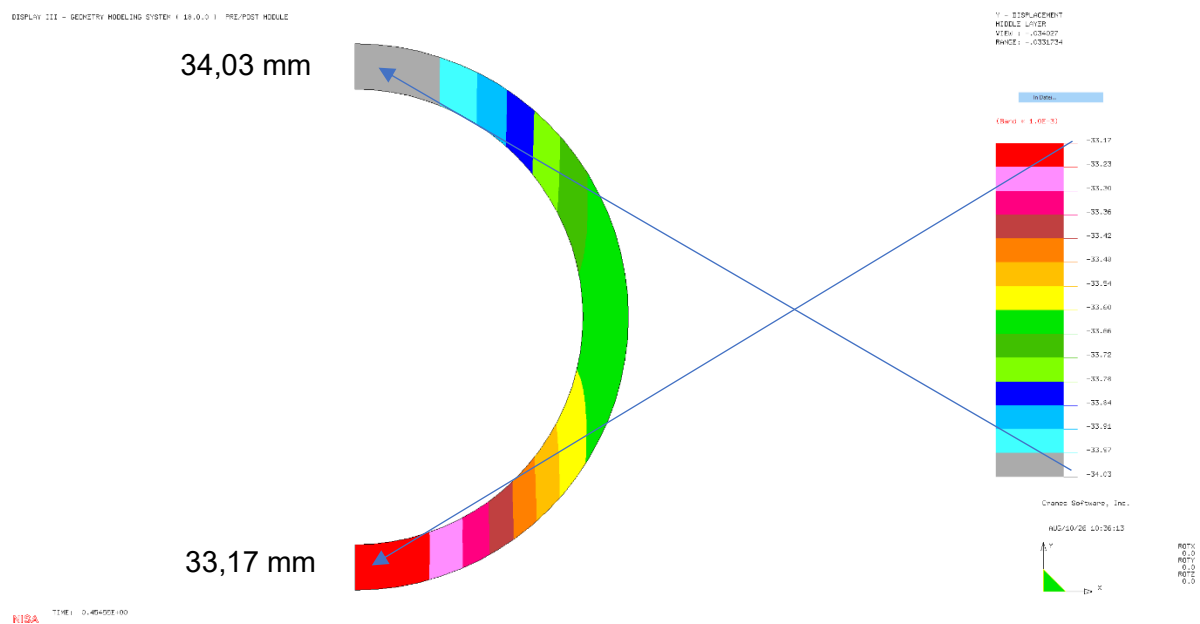


Abb. 3.7.5: Vertikale Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast Variante C, LF 3: Erdlast, Verkehrslast LM 1, GW

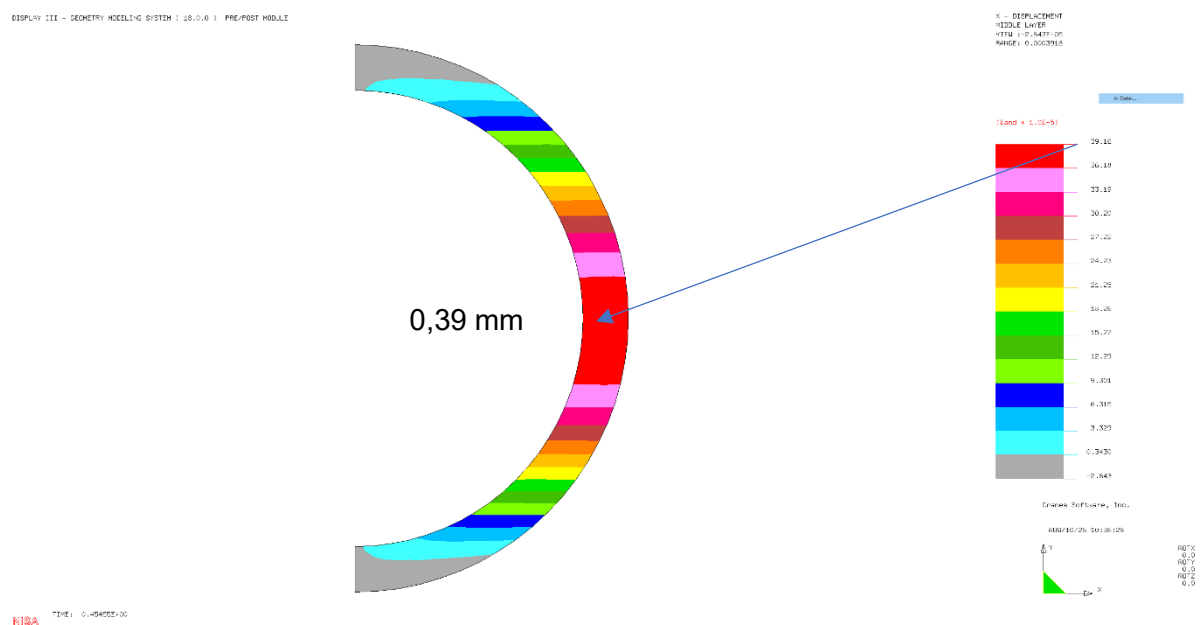


Abb. 3.7.6: Horizontale Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast Variante C, LF 3: Erdlast, Verkehrslast LM 1, GW

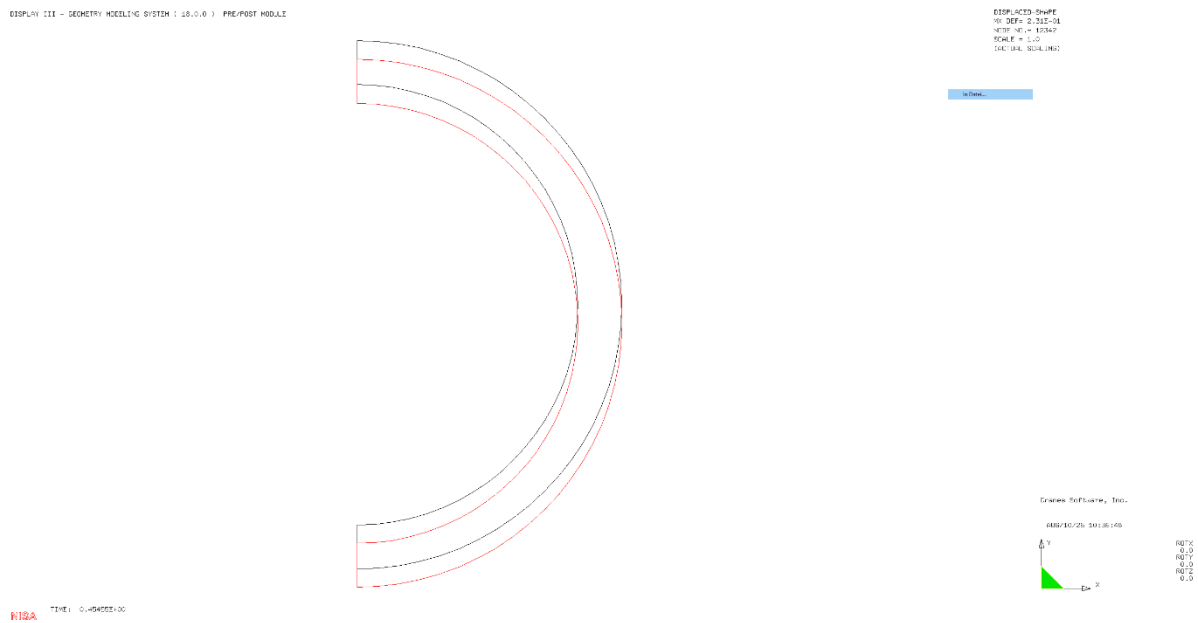


Abb. 3.7.7: Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast Variante C, LF 3: Erdlast, Verkehrslast LM 1, GW

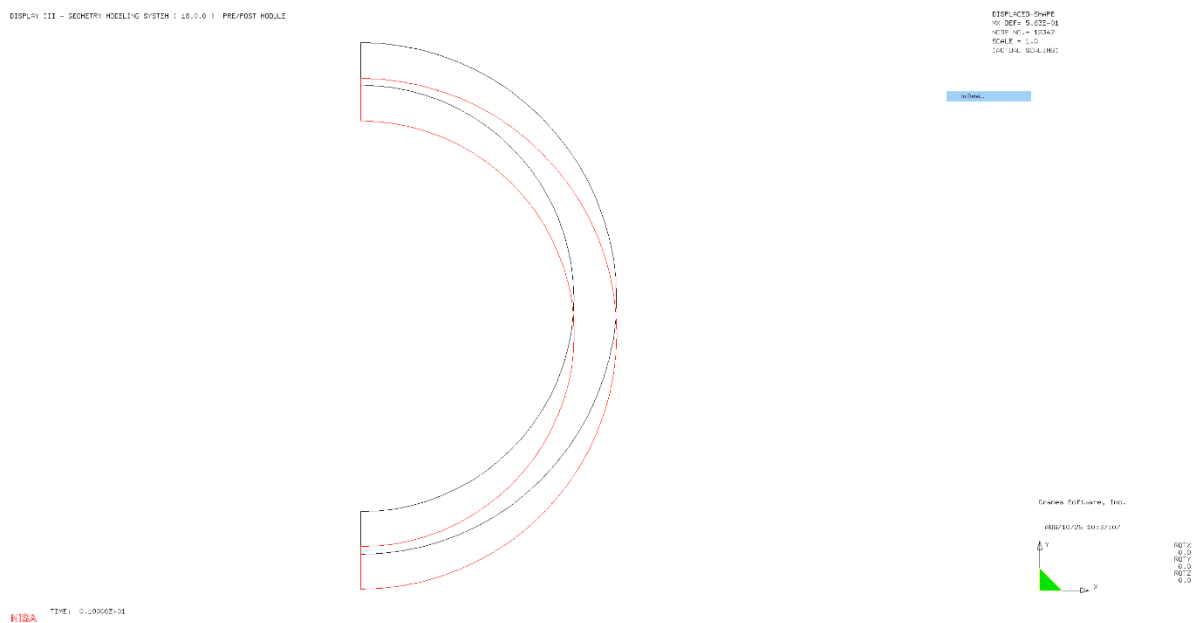


Abb. 3.7.8: Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast Variante C, LF 3: Erdlast, Verkehrslast LM 1, GW