

Statische Tragfähigkeitsbewertung Bestandskanal

Bauvorhaben:	2. Nördlicher Hauptsammler Leipzig, Bereich Dammweg bis Elstermühlgraben
Bauort:	Leipzig
Bauherr:	Kommunale Wasserwerke Leipzig GmbH Johannissgasse 7/9 04103 Leipzig
Auftraggeber:	Sweco GmbH Tieckstraße 3 04275 Leipzig
Auftragsgegenstand:	Tragfähigkeitsbewertung des Sammlers $B_i/H_i = 2860 \text{ mm} / 1800 \text{ mm}$ (unbewehrter Beton mit Sohlverklinkerung, s. Abb. 1.1); Statische Nachberechnung für einen Bemessungsquerschnitt unter Berücksichtigung der aktuellen Einbausituation (Geometrie, Material, Baugrund, Lasten)
Unser Zeichen (AZ):	2022-011-GA
Bearbeitung:	Dr.-Ing. Heinz Doll
Erstellungsdatum:	25.02.2022

Inhalt:	1	Projektbeschreibung, Untersuchungsumfang
	2	Unterlagen, Literatur
	3	Statische Modellbildung
	3.1	Sammlerquerschnitt, Materialparameter
	3.2	Baugrundverhältnisse, Baugrundkennwerte
	3.3	Lastannahmen
	4	Statische Nachweisführung
	4.1	LF 1: Erdüberdeckung $h = 0,80$ m, Verkehrslast SLW 60 (Linienlast)
	4.2	LF 2: Erdüberdeckung $h = 0,80$ m, Verkehrslast SLW 60 (Radlast)
	4.3	LF 3: Erdüberdeckung $h = 0,80$ m, Verkehrslast SLW 60 (Radlast), GW bis GOK
	5	Zusammenfassung
		Abbildungen

1 Projektbeschreibung, Untersuchungsumfang

Die Dr. Doll Ingenieurgesellschaft mbH wurde auf Grundlage der Unterlage [6] durch die Sweco GmbH mit der statischen Berechnung des Bestandskanals unter Berücksichtigung der gegenwärtigen Einbausituation (Baugrund, Materialbeschaffenheit, Lastsituation) beauftragt. Gem. Beauftragung ist die Tragfähigkeitsbewertung für einen von Seiten des Auftraggebers angegebenen Bemessungsschnitt durchzuführen. Abb. 1.1 zeigt den Nennquerschnitt des Kanals, Abb. 1.2 die Lage des Bemessungsschnittes im Lageplan und Abb. 1.3 den in diesem Bereich gemessenen Sammlerquerschnitt. Gegenstand der vorliegenden Stellungnahme ist die Tragfähigkeitsbewertung des vorhandenen Sammlerquerschnittes mit inneren Abmessungen von $B/H_i = 2860 \text{ mm} / 1800 \text{ mm}$ (Nennquerschnitt). Die Tragkonstruktion besteht primär aus Beton (unbewehrt). Von der Sohle bis zum Kämpfer ist eine innenliegende Mauerwerksschicht angeordnet (s. Abb. 1.1). Als Grundlage für die Tragfähigkeitsbewertung wird der Bemessungsquerschnitt basierend auf dem DWA-A 143-2 (Unterlage [2]) statisch nachgewiesen. Bauwerks-, Baugrund- und Lastparameter werden gem. den in den Unterlagen [9] bis [15] für den Bereich des Bemessungsquerschnittes aufgeführten Bestandsdaten angesetzt (s. Kap. 3.1 bis 3.3). Ergänzend werden die Auswirkungen einer abgeminderten Festigkeit des Materials sowie reduzierter Wanddicken aufgezeigt (s. Kap. 5).

2 Unterlagen, Literatur

- [1] ATV-DVWK-A 127: Statische Berechnung von Abwasserkanälen und -leitungen 3. Auflage, August 2000
- [2] DWA-A 143-2: Sanierung von Entwässerungssystemen außerhalb von Gebäuden; Teil 2: Statische Berechnung zur Sanierung von Abwasserleitungen und -kanälen mit Lining- und Montageverfahren; Juli 2015
- [3] Deutsches Institut für Bautechnik: Vorläufige Bemessungsansätze für Bauteile in Depo- nien, Rohrleitungen aus PE-HD für Basisentwässerungssysteme; Fassung November 1995
- [4] Schreiben (E-Mail, Hr. Hüfner) der Sweco GmbH vom 12.01.2022 (Übermittlung von Unterlagen, Angebotsanfrage)
- [5] Schreiben (E-Mail, Hr. Hüfner) der Sweco GmbH vom 16.02.2022 (Übermittlung von Unterlagen)
- [6] Angebot Nr. 2022-02 der Dr. Doll Ingenieurgesellschaft mbH vom 17.01.2022
- [7] Auftragsschreiben (E-Mail, Hr. Hüfner) der Sweco GmbH vom 08.02.2022 (Vertrags- unterlagen)
- [8] Übersichtslageplan - Vorhabensgebiet, Zeichnung-Nr.: 200, erstellt durch die Sweco GmbH am 21.01.2021
- [9] Lageplan mit Leitungsauskünften, Blatt 1, Zeichnung-Nr.: 202, erstellt durch die Sweco GmbH am 07.12.2020
- [10] Lageplan mit Leitungsauskünften, Blatt 2, Zeichnung-Nr.: 202, erstellt durch die Sweco GmbH am 07.12.2020
- [11] Querprofil 2. Nördlicher Hauptsammler, Bestand, Vorabzug, Zeichnung-Nr.: 240, erstellt durch die Sweco GmbH am 28.01.2021
- [12] Fotos zum Kanalzustand, Datierung der Bilder vom 23.02.2021
- [13] Untersuchungsbericht, Materialuntersuchung, erstellt durch die Staupendahl & Partner GmbH am 07.09.2021
- [14] Geotechnischer Bericht, erstellt durch die FCB GmbH am 30.04.2021
- [15] Querschnitte Station 0+345,00 bis 0+515,00, Ergebnisse der Vermessung, Blatt-Nr.: 3 von 5, erstellt durch die Geokart Ingenieurvermessungsgesellschaft mbH im April 2021

3 Statische Modellbildung

Die statischen Berechnungen erfolgen mit Hilfe des FE-Programms NISA auf Grundlage des DWA-A 143-2 (Unterlage [2]). Die Nachweisführung unter Verwendung der FE-Methode wird gewählt, um die Profilform gem. Abb. 1.1 möglichst realistisch in der statischen Modellbildung berücksichtigen zu können. In der Modellgeometrie wird die Querschnittskontur gem. Abb. 1.1 mit inneren Abmessungen von $B_i = 2860 \text{ mm}$ und $H_i = 1800 \text{ mm}$ berücksichtigt. Die gemessene Querschnittsform (s. Abb. 1.3) weicht nur unerheblich von dem Nennquerschnitt ab. Der betrachtete Bemessungsquerschnitt wurde von Seiten des Auftraggebers ausgewählt.

Die diskretisierten Rechenmodelle sind in den Abbildungen 2.1, 2.2, 3.1, 3.2, 4.1 und 4.2 dargestellt. Da für den Sammlerquerschnitt (unbewehrter Beton in Kombination mit Sohlverklinkerung) keine Zugspannungsübertragung vorausgesetzt werden kann, erfolgen die statischen Berechnungen auf der Grundlage des DWA-A 143-2 (Unterlage [2]) unter Ansatz eines längsgerissenen Kanalquerschnittes. Die Diskretisierung von Kanalquerschnitt und umgebendem Baugrund erfolgt mit Hilfe von vierknotigen Scheibenelementen unter Voraussetzung eines ebenen Verzerrungszustandes. Die Bodenschichten werden durch Zuweisung der spezifischen Materialparameter zu den entsprechenden Elementen berücksichtigt (s. z.B. Abb. 2.1). In der Kontaktfläche zwischen Rohraußenwandung und Baugrund werden GAP-Elemente angeordnet. Sie übertragen allein Druck-, keine Zug- und keine Schubspannungen. Beim Auftreten von Zugkräften ergeben sich Klaffungen. Gem. DWA-A 143-2 (Unterlage [2]) erfolgt die Berücksichtigung der möglichen Längsrisssbildung (Altrohrzustand II bzw. III gem. [2]) durch die Anordnung exzentrischer Gelenke. Die Orte, an denen die Rissbildung angesetzt wird (s. z.B. Abb. 2.2), resultieren aus einer vorab durchgeführten statischen Berechnung unter Voraussetzung eines biegesteifen Kanalquerschnittes. Die Gelenke werden in den Punkten berücksichtigt, in denen sich maximale Zugspannungen ergeben. Gem. Unterlage [2] wird eine Gelenkexzentrizität von $\frac{1}{4}$ der Rohrwanddicke vorausgesetzt (s. z.B. Abb. 2.2). Durch den beschriebenen Ansatz der Längsrisssbildung werden Zugspannungen im Sammlerquerschnitt nahezu komplett abgebaut. Es wird lineares Materialverhalten (Rohr und Baugrund) vorausgesetzt. Bei der Modellierung wird die Symmetrie der Problemstellung ausgenutzt. Eigengewichtslasten werden durch Zuweisung der materialspezifischen Wichte zu den entsprechenden Elementen berücksichtigt, die Verkehrslast (SLW 60) durch eine konstante Oberflächenlast (LF 1) bzw. alternativ durch Radlasten auf GOK (LF 2 und LF 3) und die Belastung durch Wasseraußendruck (LF 3) durch eine druckhöhenabhängige Linienlast auf der Rohraußenwandung. Bei der Betrachtung von LF 3 wird für die Bodenschichten, die unterhalb des Grundwasserniveaus liegen, die Wichte unter Auftrieb berücksichtigt. Wegen der angesetzten Längsrisssbildung liegt ein verformbares Tragwerk und somit ein Stabilitätsproblem vor. Die Belastung des Systems wird daher im Rahmen geometrisch nichtlinearer Berechnungen iterativ bis zur γ_F -fachen Gebrauchslast (Teilsicherheitsbeiwerte $\gamma_{F1} = \gamma_{F2} = 1,35$; $\gamma_{F3} = 1,5$) gesteigert. Zusätzlich zu dieser auf dem Teilsicherheitskonzept beruhenden Nachweisführung erfolgt die Berechnung unter Verwendung charakteristischer Kennwerte mit einer Laststeigerung bis zur 2,2-fachen Gebrauchslast (globale Sicherheit $\gamma = 2,2$). Diese Alternativberechnung entspricht der Vorgehensweise des früheren ATV-M 127-2 bzw. des ATV-DVWK-A 127 [1]. Spannungs-, Verformungs- und Stabilitätsnachweis bilden die Kriterien für die Tragfähigkeitsbewertung des Rohrquerschnittes. Der Spannungs- und der Stabilitätsnachweis stellen Tragfähigkeitsnachweise, der Verformungsnachweis stellt einen Gebrauchsfähigkeitsnachweis dar. Da durch die in der statischen Modellbildung berücksichtigte Gelenkbildung (s.o.) ein flexibles Rohr-Boden-System entsteht, wird gem. Kap. 7.6.3 der Unterlage [2] (Einwirkung von Erd- und Verkehrslasten), analog zu den in Unterlage [1] erfassten biegeweichen Rohren, für den Verformungsnachweis eine zulässige relative Durchmesseränderung von 6,0 % angesetzt. Die Vermeidung einer klaffenden Fuge wird nicht gefordert, da die Definition des Altrohrzustandes II gem. DWA-A 143-2 (Unterlage [2]) ausdrücklich eine klaffende Fuge zulässt. Gem. dieser Unterlage liegt Altrohrzustand II dann vor, wenn sich eine Längsrisssbildung in Verbindung mit einer Ovalisierung (klaffende Fuge) eingestellt hat, das Gelenksystem jedoch in Verbindung mit dem umgebenden Baugrund noch eine ausreichende Standsicherheit aufweist.

3.1 Sammlerquerschnitt, Materialparameter

Basierend auf den Unterlagen [11, 13] werden die nachfolgenden Geometrie- und Materialparameter für die statische Modellbildung des Sammlerquerschnittes herangezogen:

Profilform:	Haubenprofil
Lichte Breite:	$B_i = 2,86 \text{ m}$ (s. Abb. 1.1)
Lichte Höhe:	$H_i = 1,80 \text{ m}$ (s. Abb. 1.1)
Material:	Beton, Sohlverklinkerung
Wanddicke:	$s_1 = 0,35 \text{ m}$ (Scheitel, Gelenk) $s_2 = 0,6 \text{ m}$ (Kämpfer, ca. 0,48 m Beton + 0,12 m Klinker) $s_3 = 0,39 \text{ m}$ (Sohle rechts, Gelenk) $s_4 = 0,43 \text{ m}$ (Sohlmitte, Gelenk, ca. 0,31 m Beton + 0,12 m Klinker)
Betonfestigkeitsklasse:	C12/15 (früher B15)
Betondruckfestigkeit (charakteristischer Wert):	$f_{ck} = 12 \text{ N/mm}^2$ $f_{ck(\alpha_{CC})} = \alpha_{CC} \cdot f_{ck} = 0,85 \cdot 12 = 10,2 \text{ N/mm}^2$ (zum Vergleich aus B 15 folgt $\beta_R = 10,5 \text{ N/mm}^2$)
Betondruckfestigkeit (Bemessungswert):	$f_{cd(\alpha_{CC})} = \alpha_{CC} \cdot f_{ck} / \gamma_M = 0,85 \cdot 12 / 1,5 = 6,8 \text{ N/mm}^2$ (zum Vergleich aus B 15 folgt $\beta_{R,d} = 10,5 / 1,5 = 7,0 \text{ N/mm}^2$)
Mauerwerksdruckfestigkeit (charakteristisch):	$f_k = 14 \text{ N/mm}^2$
E-Modul (charakteristischer Wert):	$E_k = E_{cm} = 27000 \text{ N/mm}^2$
E-Modul (Bemessungswert)	$E_d = E_{cm} / \gamma_M = 18000 \text{ N/mm}^2$
Abminderungsfaktor für Widerstände:	$\gamma_M = 1,5$
Wichte:	$\gamma = 23 \text{ kN/m}^3$

Die aufgeführte Betongüte und die hieraus resultierenden Betondruckfestigkeiten basieren auf der in Kap. 4.5 (betr. hier relevanten Schacht 24916133) der Unterlage [13] vorgenommenen Einstufung des Betons (C12/15). Da die charakteristische Mauerwerksdruckfestigkeit gem. Kap. 4.11 der Unterlage [13] über der charakteristischen Betondruckfestigkeit liegt, wird hier einheitlich die Betondruckfestigkeit angesetzt. Für den E-Modul erfolgt ebenfalls keine Differenzierung (Ansatz: E-Modul, Beton), da er für die hier zu erwartende Abweichung (Mauerwerk-Beton) erfahrungsgemäß keinen größeren Einfluss auf das Verformungsverhalten und die Schnittkräfte des Bogentragwerks hat. Ergänzend werden die Auswirkungen einer abgeminderten Festigkeit des Materials sowie reduzierter Wanddicken aufgezeigt (s. Kap. 5).

3.2 Baugrundverhältnisse, Baugrundkennwerte

Basierend auf Unterlage [14] wird die nachfolgende Baugrundsichtung als Grundlage für die statische Modellbildung angesetzt, wobei unter Berücksichtigung von Tab. 3 der Unterlage [14] sowie der Sondierung RKS 6/21 (s. Abb. 1.4 und 1.5) die nachfolgenden Baugrundparameter im Rahmen der statischen Berechnungen berücksichtigt werden:

Baugrundsicht 1:	Auffüllungen	
	Steifemodul:	$E_S = 5 \text{ N/mm}^2$
	E-Modul:	$E = 3,1 \text{ N/mm}^2$
	Querdehnzahl:	$\nu = 0,35$
	Wichte:	$\gamma/\gamma' = 20/10 \text{ kN/m}^3$
Baugrundsicht 2:	Auelehm, steif	
	Steifemodul:	$E_S = 10 \text{ N/mm}^2$
	E-Modul:	$E = 6,2 \text{ N/mm}^2$
	Querdehnzahl:	$\nu = 0,35$
	Wichte:	$\gamma/\gamma' = 20/10 \text{ kN/m}^3$
Baugrundsicht 3:	Kies / Sand	
	Steifemodul:	$E_S = 40 \text{ N/mm}^2$
	E-Modul:	$E = 33,3 \text{ N/mm}^2$
	Querdehnzahl:	$\nu = 0,25$
	Wichte:	$\gamma/\gamma' = 20/10 \text{ kN/m}^3$

Da in die FE-Berechnung E-Modul-Kennwerte eingehen, wurden in Steifemodule mit Hilfe der Gleichung

$$E = E_S \cdot \frac{(1-\nu_B-2\cdot\nu_B^2)}{(1-\nu_B)} \quad (\text{gem. Unterlage [3]})$$

in E-Module umgerechnet.

Es werden drei Bodenzonen berücksichtigt (s. z.B. Abb. 2.1). Für die obere Baugrundsicht 1 (Dicke 1,0 m) sowie die Verfüllung seitlich des Sammlers (Dicke 1,0 m) werden Auffüllungen angesetzt. Da Unterlage [14] insbesondere kein Steifigkeitskennwert für die Auffüllungen zu entnehmen ist, wird der Steifemodul und die Querdehnzahl hier basierend auf Erfahrungswerten vergleichbarer Vorhaben abgeschätzt. Die für Baugrundsicht 2 (Auelehm, steif) angesetzten Kennwerte werden basierend auf [14] berücksichtigt. In [14] wird ausgeführt, dass das Material der Kanalbettung des bestehenden Hauptsammlers in keiner der durchgeführten Sondierungen klar definiert werden konnte. Hier wird unter Berücksichtigung der RKS 6/21 (s. Abb. 1.5) davon ausgegangen, dass die Auelehmschicht bis zu 0,65 m unterhalb der Sammlersohle (Außenwandung) ansteht (s. Abb. 2.1). Es handelt sich im vorliegenden Fall um eine konservative Annahme, da sie im Vergleich zur Auflagerung auf einer steifen Schicht insbesondere zu größeren Querschnittsdeformationen (Sohlaufwölbung) führt. Unterhalb der Auelehmschicht steht gem. RKS 6/21 eine ca. 1,3 m dicke Sandschicht, darunter Kies an. Der Steifemodul der Baugrundsicht 3 wurde im Vergleich zu [14] konservativ mit $E_S = 40 \text{ N/mm}^2$ angesetzt (in [14]: $E_S = 120 \text{ N/mm}^2$), da die Sandschicht in Tab. 3 der Unterlage [14] nicht ausgewiesen ist. Für die Betrachtung der Radlasten aus SLW 60 (LF 2 und LF 3) wird oberflächennah eine Bodenschicht höherer Steifigkeit (analog Baugrundsicht 3, s. Abb. 3.1 und 4.1) angesetzt (Straße / befestigte Oberfläche).

Es wird darauf hingewiesen, dass der Ansatz der Auelehmschicht bis 0,65 m unter Außenkante Sohle unter Berücksichtigung der in Abb. 1.3 dargestellten gemessenen Querschnittskontur aus unserer Sicht einen konservativen Ansatz darstellt. Es sind keine signifikanten Querschnittsdeformationen (insbesondere keine Sohlaufwölbungen) und damit einhergehende

Längsrissbildungen dokumentiert. Dies deutet auf eine eher steife Auflagerung direkt auf der Baugrundsicht 3 bzw. auf einer Bodenaustauschschicht hin.

Der Bemessungswasserstand wird gem. [9] auf dem Niveau der GOK angesetzt.

3.3 Lastannahmen

Auf Grundlage der Unterlagen [9, 14] wird eine Überdeckungshöhe von $h = 0,8 \text{ m}$, ein Grundwasserstand bis GOK sowie die Einwirkung von Schwerlastverkehr vorausgesetzt (s. auch Abb. 1.2). Es werden drei Lastfälle betrachtet:

LF 1: Erdüberdeckung von $h = 0,8 \text{ m}$, Verkehrslast SLW 60 (Linienlast)

LF 2: Erdüberdeckung von $h = 0,8 \text{ m}$, Verkehrslast SLW 60 (Radlasten)

LF 3: Erdüberdeckung von $h = 0,8 \text{ m}$, Verkehrslast SLW 60 (Radlasten), GW bis GOK (entspricht ca. $h_{w,so} = 3,0 \text{ m}$ über Sohle)

Wegen der geringen Erdüberdeckung von $h = 0,8 \text{ m}$ über Scheitel wird die Verkehrslast alternativ als Linienlast (analog ATV-DVWK-A 127 [1]) und in Form von Radlasten auf GOK berücksichtigt (LF 1 und LF 2). Die Betrachtung der zusätzlichen Einwirkung des Grundwasseraußendruckes erfolgt allein für den ungünstigeren Fall der Radlasten (LF 3). Je Lastfall wird das globale Sicherheitskonzept gem. [1] mit einer erforderlichen Sicherheit von $\gamma = 2,2$ sowie das Teilsicherheitskonzept gem. [2] mit den Teilsicherheitsbeiwerten $\gamma_{F1} = \gamma_{F2} = 1,35$ (Eigengewicht, Straßenverkehr) und $\gamma_{F3} = 1,50$ (Wasseraußendruck) betrachtet.

4 Statische Nachweisführung

4.1 LF 1: Erdüberdeckung $h = 0,80$ m, Verkehrslast SLW 60 (Linienlast)

Verformungsnachweis

Der Verformungsnachweis wird gem. DWA-A 143-2 (Unterlage 2.2) unter Ansatz der charakteristischen Materialkennwerte geführt:

Aus Abb. 2.3 ergibt sich die unter Einwirkung der Gebrauchslast auftretende maximale Horizontalverformung des Sammlerquerschnittes zu

$$\Delta d_h = 2 \cdot 10,0 = 20,0 \text{ mm.}$$

Bezogen auf den Mittelwert aus Vertikal- und Horizontaldurchmesser (Wandungsmitte) entspricht dies einer relativen Verformung von

$$\Delta d_h = 100 \cdot 20,0 / (0,5 \cdot (3460 + 2190)) = 0,71 \text{ \%}.$$

Die zulässige Durchmesseränderung von 6 % wird somit nicht erreicht.

Aus Abb. 2.4 ergibt sich die unter Einwirkung der Gebrauchslast auftretende maximale Vertikalverformung des Sammlerquerschnittes zu

$$\Delta d_v = 31,73 - 1,98 = 29,75 \text{ mm.}$$

Bezogen auf den Mittelwert aus Vertikal- und Horizontaldurchmesser (Wandungsmitte) entspricht dies einer relativen Verformung von

$$\Delta d_v = 100 \cdot 29,75 / (0,5 \cdot (3460 + 2190)) = 1,05 \text{ \%}.$$

Die zulässige Durchmesseränderung von 6 % wird somit nicht erreicht.

Spannungsnachweis unter γ_F -facher Gebrauchslast

Die statische Berechnung ergab unter Einwirkung der γ_F -fachen Gebrauchslast die nachfolgenden zu übertragenden Gelenkdruckkräfte:

Scheitel:	N_{Scheitel}	=	166,0 kN/m
Sohle (rechts):	$N_{\text{Sohle, re}}$	=	180,8 kN/m
Sohle (mittig):	$N_{\text{Sohle, mi}}$	=	177,1 kN/m

Unter Berücksichtigung einer parabelförmigen Druckspannungsverteilung gem. Kap. 7.5.4.3 der Unterlage 2.2 ergibt sich die maximale Druckspannung (Kantenpressung) in der Sammlerwandung zu

$$\max. \sigma_D = 1,5 \cdot N / b_D.$$

$$b_D = 0,67 \cdot s \text{ (Druckzonenbreite gem. Unterlage 2.2, Tab 14)}$$

$$\begin{aligned} \text{Scheitel:} \quad & b_D = 0,67 \cdot b_D = 0,67 \cdot 350 = 234,5 \text{ mm} \\ & \max. \sigma_{D,d} = 1,5 \cdot 166,0 / 234,5 = 1,06 \text{ N/mm}^2 \\ & \max. \sigma_{D,d} / f_{cd(\alpha CC)} = 1,06 / 6,8 = 0,156 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Sohle (rechts):} \quad & b_D = 0,67 \cdot b_D = 0,67 \cdot 390 = 261,3 \text{ mm} \\ & \max. \sigma_{D,d} = 1,5 \cdot 180,8 / 261,3 = 1,04 \text{ N/mm}^2 \\ & \max. \sigma_{D,d} / f_{cd(\alpha CC)} = 1,04 / 6,8 = 0,153 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{Sohle (mittig):} \quad b_D &= 0,67 \cdot b_D = 0,67 \cdot 430 = 288,1 \text{ mm} \\ \max.\sigma_{D,d} &= 1,5 \cdot 177,1/288,1 = 0,92 \text{ N/mm}^2 \\ \max.\sigma_{D,d} / f_{cd(\alpha_{CC})} &= 0,92/6,8 = 0,136\end{aligned}$$

Die Druckspannungsnachweise sind somit unter Einwirkung der γ_F -fachen Gebrauchslast eingehalten. Die maximale vorhandene Auslastung von 15,6 % im Scheitel liegt unter der zulässigen Auslastung von 100 %.

Spannungsnachweis unter 2,2-facher Gebrauchslast

Die statische Berechnung ergab unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast die nachfolgenden zu übertragenden Gelenkdruckkräfte:

$$\begin{aligned}\text{Scheitel:} \quad N_{\text{Scheitel}} &= 248,7 \text{ kN/m} \\ \text{Sohle (rechts):} \quad N_{\text{Sohle, re}} &= 267,5 \text{ kN/m} \\ \text{Sohle (mittig):} \quad N_{\text{Sohle, mi}} &= 263,8 \text{ kN/m}\end{aligned}$$

Unter Berücksichtigung einer parabelförmigen Druckspannungsverteilung gem. Kap. 7.5.4.3 der Unterlage 2.2 ergibt sich die maximale Druckspannung (Kantenpressung) in der Sammlerwandung zu

$$\begin{aligned}\max.\sigma_D &= 1,5 \cdot N/b_D. \\ b_D &= 0,67 \cdot s \text{ (Druckzonenbreite gem. Unterlage 2.2, Tab 14)} \\ \text{Scheitel:} \quad b_D &= 0,67 \cdot b_D = 0,67 \cdot 350 = 234,5 \text{ mm} \\ \max.\sigma_D &= 1,5 \cdot 248,7/234,5 = 1,59 \text{ N/mm}^2 \\ \max.\sigma_{D,d} / f_{ck(\alpha_{CC})} &= 1,59/10,2 = 0,156 \\ \text{Sohle (rechts):} \quad b_D &= 0,67 \cdot b_D = 0,67 \cdot 390 = 261,3 \text{ mm} \\ \max.\sigma_D &= 1,5 \cdot 267,5/261,3 = 1,54 \text{ N/mm}^2 \\ \max.\sigma_D / f_{ck(\alpha_{CC}) R} &= 1,54/10,2 = 0,151 \\ \text{Sohle (mittig):} \quad b_D &= 0,67 \cdot b_D = 0,67 \cdot 430 = 288,1 \text{ mm} \\ \max.\sigma_D &= 1,5 \cdot 263,8/288,1 = 1,37 \text{ N/mm}^2 \\ \max.\sigma_D / f_{ck(\alpha_{CC})} &= 1,37/10,2 = 0,134\end{aligned}$$

Die Druckspannungsnachweise sind somit unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast eingehalten. Die maximale vorhandene Auslastung von 15,6 % im Scheitel liegt unter der zulässigen Auslastung von 100 %.

Stabilitätsnachweis

Durch die Erbringung des Spannungsnachweises unter γ_F -facher Last ist ebenfalls der Stabilitätsnachweis erbracht. Unter γ_F -fachen Lasten tritt kein elastisches Stabilitätsversagen auf. Im Rahmen der statischen Berechnung wurde zusätzlich nachgewiesen, dass auch unter Ansatz der charakteristischen Materialkennwerte bis zur 2,2-fachen Gebrauchslast die charakteristische Materialfestigkeit nicht erreicht wird und kein elastisches Durchschlagen eintritt (s. Abb. 2.6).

4.2 LF 2: Erdüberdeckung $h = 0,80$ m, Verkehrslast SLW 60 (Radlasten)

Verformungsnachweis

Der Verformungsnachweis wird gem. DWA-A 143-2 (Unterlage 2.2) unter Ansatz der charakteristischen Materialkennwerte geführt:

Aus Abb. 3.3 ergibt sich die unter Einwirkung der Gebrauchslast auftretende maximale Horizontalverformung des Sammlerquerschnittes zu

$$\Delta d_h = 2 \cdot 13,86 = 27,72 \text{ mm.}$$

Bezogen auf den Mittelwert aus Vertikal- und Horizontaldurchmesser (Wandungsmitte) entspricht dies einer relativen Verformung von

$$\Delta d_h = 100 \cdot 27,72 / (0,5 \cdot (3460 + 2190)) = 0,98 \text{ \%}.$$

Die zulässige Durchmesseränderung von 6 % wird somit nicht erreicht.

Aus Abb. 3.4 ergibt sich die unter Einwirkung der Gebrauchslast auftretende maximale Vertikalverformung des Sammlerquerschnittes zu

$$\Delta d_v = 38,32 + 3,29 = 41,61 \text{ mm.}$$

Bezogen auf den Mittelwert aus Vertikal- und Horizontaldurchmesser (Wandungsmitte) entspricht dies einer relativen Verformung von

$$\Delta d_v = 100 \cdot 41,61 / (0,5 \cdot (3460 + 2190)) = 1,47 \text{ \%}.$$

Die zulässige Durchmesseränderung von 6 % wird somit nicht erreicht.

Spannungsnachweis unter γ_F -facher Gebrauchslast

Die statische Berechnung ergab unter Einwirkung der γ_F -fachen Gebrauchslast die nachfolgenden zu übertragenden Gelenkdruckkräfte:

Scheitel:	N_{Scheitel}	=	178,9 kN/m
Sohle (rechts):	$N_{\text{Sohle, re}}$	=	142,5 kN/m
Sohle (mittig):	$N_{\text{Sohle, mi}}$	=	136,3 kN/m

Unter Berücksichtigung einer parabelförmigen Druckspannungsverteilung gem. Kap. 7.5.4.3 der Unterlage 2.2 ergibt sich die maximale Druckspannung (Kantenpressung) in der Sammlerwandung zu

$$\max. \sigma_D = 1,5 \cdot N / b_D.$$

$$b_D = 0,67 \cdot s \text{ (Druckzonenbreite gem. Unterlage 2.2, Tab 14)}$$

Scheitel:	$b_D = 0,67 \cdot b_D = 0,67 \cdot 350 = 234,5 \text{ mm}$
	$\max. \sigma_{D,d} = 1,5 \cdot 178,9 / 234,5 = 1,14 \text{ N/mm}^2$
	$\max. \sigma_{D,d} / f_{cd(\alpha_{CC})} = 1,14 / 6,8 = 0,168$

Sohle (rechts):	$b_D = 0,67 \cdot b_D = 0,67 \cdot 390 = 261,3 \text{ mm}$
	$\max. \sigma_{D,d} = 1,5 \cdot 142,5 / 261,3 = 0,82 \text{ N/mm}^2$
	$\max. \sigma_{D,d} / f_{cd(\alpha_{CC})} = 0,82 / 6,8 = 0,120$

Sohle (mittig):	$b_D = 0,67 \cdot b_D = 0,67 \cdot 430 = 288,1 \text{ mm}$
	$\max. \sigma_{D,d} = 1,5 \cdot 136,3 / 288,1 = 0,71 \text{ N/mm}^2$
	$\max. \sigma_{D,d} / f_{cd(\alpha_{CC})} = 0,71 / 6,8 = 0,104$

Die Druckspannungsnachweise sind somit unter Einwirkung der γ_F -fachen Gebrauchslast eingehalten. Die maximale vorhandene Auslastung von 16,8 % im Scheitel liegt unter der zulässigen Auslastung von 100 %.

Spannungsnachweis unter 2,2-facher Gebrauchslast

Die statische Berechnung ergab unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast die nachfolgenden zu übertragenden Gelenkdruckkräfte:

Scheitel:	N_{Scheitel}	=	297,0 kN/m
Sohle (rechts):	$N_{\text{Sohle, re}}$	=	228,6 kN/m
Sohle (mittig):	$N_{\text{Sohle, mi}}$	=	220,9 kN/m

Unter Berücksichtigung einer parabelförmigen Druckspannungsverteilung gem. Kap. 7.5.4.3 der Unterlage 2.2 ergibt sich die maximale Druckspannung (Kantenpressung) in der Sammlerwandung zu

$$\max.\sigma_D = 1,5 \cdot N/b_D.$$

$$b_D = 0,67 \cdot s \text{ (Druckzonenbreite gem. Unterlage 2.2, Tab 14)}$$

Scheitel:	$b_D = 0,67 \cdot b_D = 0,67 \cdot 350 = 234,5 \text{ mm}$
	$\max.\sigma_D = 1,5 \cdot 297,0/234,5 = 1,9 \text{ N/mm}^2$
	$\max.\sigma_{D,d} / f_{ck(\alpha_{CC})} = 1,9/10,2 = 0,186$

Sohle (rechts):	$b_D = 0,67 \cdot b_D = 0,67 \cdot 390 = 261,3 \text{ mm}$
	$\max.\sigma_D = 1,5 \cdot 228,6/261,3 = 1,31 \text{ N/mm}^2$
	$\max.\sigma_D / f_{ck(\alpha_{CC}) R} = 1,31/10,2 = 0,1291$

Sohle (mittig):	$b_D = 0,67 \cdot b_D = 0,67 \cdot 430 = 288,1 \text{ mm}$
	$\max.\sigma_D = 1,5 \cdot 220,9/288,1 = 1,15 \text{ N/mm}^2$
	$\max.\sigma_D / f_{ck(\alpha_{CC})} = 1,15/10,2 = 0,113$

Die Druckspannungsnachweise sind somit unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast eingehalten. Die maximale vorhandene Auslastung von 18,6 % im Scheitel liegt unter der zulässigen Auslastung von 100 %.

Stabilitätsnachweis

Durch die Erbringung des Spannungsnachweises unter γ_F -facher Last ist ebenfalls der Stabilitätsnachweis erbracht. Unter γ_F -fachen Lasten tritt kein elastisches Stabilitätsversagen auf. Im Rahmen der statischen Berechnung wurde zusätzlich nachgewiesen, dass auch unter Ansatz der charakteristischen Materialkennwerte bis zur 2,2-fachen Gebrauchslast die charakteristische Materialfestigkeit nicht erreicht wird und kein elastisches Durchschlagen eintritt (s. Abb. 3.6).

4.3 LF 2: Erdüberdeckung $h = 0,80$ m, Verkehrslast SLW 60 (Radlasten), GW bis GOK

Verformungsnachweis

Der Verformungsnachweis wird gem. DWA-A 143-2 (Unterlage 2.2) unter Ansatz der charakteristischen Materialkennwerte geführt:

Aus Abb. 4.3 ergibt sich die unter Einwirkung der Gebrauchslast auftretende maximale Horizontalverformung des Sammlerquerschnittes zu

$$\Delta d_h = 2 \cdot 14,90 = 29,8 \text{ mm.}$$

Bezogen auf den Mittelwert aus Vertikal- und Horizontaldurchmesser (Wandungsmitte) entspricht dies einer relativen Verformung von

$$\Delta d_h = 100 \cdot 29,80 / (0,5 \cdot (3460 + 2190)) = 1,05 \text{ \%}.$$

Die zulässige Durchmesseränderung von 6 % wird somit nicht erreicht.

Aus Abb. 4.4 ergibt sich die unter Einwirkung der Gebrauchslast auftretende maximale Vertikalverformung des Sammlerquerschnittes zu

$$\Delta d_v = 29,06 + 15,49 = 44,55 \text{ mm.}$$

Bezogen auf den Mittelwert aus Vertikal- und Horizontaldurchmesser (Wandungsmitte) entspricht dies einer relativen Verformung von

$$\Delta d_v = 100 \cdot 44,55 / (0,5 \cdot (3460 + 2190)) = 1,58 \text{ \%}.$$

Die zulässige Durchmesseränderung von 6 % wird somit nicht erreicht.

Spannungsnachweis unter γ_F -facher Gebrauchslast

Die statische Berechnung ergab unter Einwirkung der γ_F -fachen Gebrauchslast die nachfolgenden zu übertragenden Gelenkdruckkräfte:

Scheitel:	N_{Scheitel}	=	205,3 kN/m
Sohle (rechts):	$N_{\text{Sohle, re}}$	=	174,2 kN/m
Sohle (mittig):	$N_{\text{Sohle, mi}}$	=	158,8 kN/m

Unter Berücksichtigung einer parabelförmigen Druckspannungsverteilung gem. Kap. 7.5.4.3 der Unterlage 2.2 ergibt sich die maximale Druckspannung (Kantenpressung) in der Sammlerwandung zu

$$\max. \sigma_D = 1,5 \cdot N / b_D.$$

$$b_D = 0,67 \cdot s \text{ (Druckzonenbreite gem. Unterlage 2.2, Tab 14)}$$

Scheitel:	$b_D = 0,67 \cdot b_D = 0,67 \cdot 350 = 234,5 \text{ mm}$
	$\max. \sigma_{D,d} = 1,5 \cdot 205,3 / 234,5 = 1,31 \text{ N/mm}^2$
	$\max. \sigma_{D,d} / f_{cd(\alpha_{CC})} = 1,31 / 6,8 = 0,193$

Sohle (rechts):	$b_D = 0,67 \cdot b_D = 0,67 \cdot 390 = 261,3 \text{ mm}$
	$\max. \sigma_{D,d} = 1,5 \cdot 174,2 / 261,3 = 1,0 \text{ N/mm}^2$
	$\max. \sigma_{D,d} / f_{cd(\alpha_{CC})} = 1,0 / 6,8 = 0,147$

$$\begin{aligned}\text{Sohle (mittig):} \quad b_D &= 0,67 \cdot b_D = 0,67 \cdot 430 = 288,1 \text{ mm} \\ \max.\sigma_{D,d} &= 1,5 \cdot 158,8/288,1 = 0,83 \text{ N/mm}^2 \\ \max.\sigma_{D,d} / f_{cd(\alpha_{CC})} &= 0,83/6,8 = 0,122\end{aligned}$$

Die Druckspannungsnachweise sind somit unter Einwirkung der γ_F -fachen Gebrauchslast eingehalten. Die maximale vorhandene Auslastung von 19,3 % im Scheitel liegt unter der zulässigen Auslastung von 100 %.

Spannungsnachweis unter 2,2-facher Gebrauchslast

Die statische Berechnung ergab unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast die nachfolgenden zu übertragenden Gelenkdruckkräfte:

$$\begin{aligned}\text{Scheitel:} \quad N_{\text{Scheitel}} &= 317,9 \text{ kN/m} \\ \text{Sohle (rechts):} \quad N_{\text{Sohle, re}} &= 242,9 \text{ kN/m} \\ \text{Sohle (mittig):} \quad N_{\text{Sohle, mi}} &= 226,3 \text{ kN/m}\end{aligned}$$

Unter Berücksichtigung einer parabelförmigen Druckspannungsverteilung gem. Kap. 7.5.4.3 der Unterlage 2.2 ergibt sich die maximale Druckspannung (Kantenpressung) in der Sammlerwandung zu

$$\begin{aligned}\max.\sigma_D &= 1,5 \cdot N/b_D. \\ b_D &= 0,67 \cdot s \text{ (Druckzonenbreite gem. Unterlage 2.2, Tab 14)} \\ \text{Scheitel:} \quad b_D &= 0,67 \cdot b_D = 0,67 \cdot 350 = 234,5 \text{ mm} \\ \max.\sigma_D &= 1,5 \cdot 317,9/234,5 = 2,03 \text{ N/mm}^2 \\ \max.\sigma_{D,d} / f_{ck(\alpha_{CC})} &= 2,03/10,2 = 0,199 \\ \text{Sohle (rechts):} \quad b_D &= 0,67 \cdot b_D = 0,67 \cdot 390 = 261,3 \text{ mm} \\ \max.\sigma_D &= 1,5 \cdot 242,9/261,3 = 1,39 \text{ N/mm}^2 \\ \max.\sigma_D / f_{ck(\alpha_{CC}) R} &= 1,39/10,2 = 0,137 \\ \text{Sohle (mittig):} \quad b_D &= 0,67 \cdot b_D = 0,67 \cdot 430 = 288,1 \text{ mm} \\ \max.\sigma_D &= 1,5 \cdot 226,3/288,1 = 1,18 \text{ N/mm}^2 \\ \max.\sigma_D / f_{ck(\alpha_{CC})} &= 1,18/10,2 = 0,116\end{aligned}$$

Die Druckspannungsnachweise sind somit unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast eingehalten. Die maximale vorhandene Auslastung von 19,9 % im Scheitel liegt unter der zulässigen Auslastung von 100 %.

Stabilitätsnachweis

Durch die Erbringung des Spannungsnachweises unter γ_F -facher Last ist ebenfalls der Stabilitätsnachweis erbracht. Unter γ_F -fachen Lasten tritt kein elastisches Stabilitätsversagen auf. Im Rahmen der statischen Berechnung wurde zusätzlich nachgewiesen, dass auch unter Ansatz der charakteristischen Materialkennwerte bis zur 2,2-fachen Gebrauchslast die charakteristische Materialfestigkeit nicht erreicht wird und kein elastisches Durchschlagen eintritt (s. Abb. 4.6).

5 Zusammenfassung

Gegenstand der vorliegenden Stellungnahme ist die Tragfähigkeitsbewertung des 2. Nördlichen Hauptsammlers der Stadt Leipzig. Die Bewertung erfolgt gem. Beauftragung für einen Bemessungsquerschnitt (Nähe Schacht 24916133, s. Abb. 1.2). Der vorhandene Sammlerquerschnitt weist innere Abmessungen von $B_i/H_i = 2860 \text{ mm} / 1800 \text{ mm}$ (Nennquerschnitt) auf (s. Abb. 1.1). Die Tragkonstruktion besteht primär aus Beton (unbewehrt). Von der Sohle bis zum Kämpfer ist eine innenliegende Mauerwerksschicht angeordnet (s. Abb. 1.1). Als Grundlage für die Tragfähigkeitsbewertung wird der Bemessungsquerschnitt basierend auf dem DWA-A 143-2 (Unterlage [2]) statisch nachgewiesen. Bauwerks-, Baugrund- und Lastparameter werden gem. den in den Unterlagen [9] bis [15] für den Bereich des Bemessungsquerschnittes aufgeführten Bestandsdaten angesetzt (s. Kap. 3.1 bis 3.3).

Verformungsnachweis

In Tab. 1 sind die unter Einwirkung der Gebrauchslast berechneten horizontalen (Δd_h) und vertikalen (Δd_v) Durchmesseränderungen zusammengefasst. Da durch die in der statischen Modellbildung berücksichtigte Gelenkbildung (s.o.) ein flexibles Rohr-Boden-System entsteht wird gem. Kap. 7.6.3 der Unterlage [2] (Einwirkung von Erd- und Verkehrslasten, AZ III), analog zu den in Unterlage [1] erfassten biegeweichen Rohren, für den Verformungsnachweis eine zulässige relative Durchmesseränderung von 6,0 % angesetzt. Sie wird in keinem Fall erreicht bzw. überschritten (s. Tab. 1). Die erforderlichen Verformungsnachweise sind somit eingehalten.

Lastfall	Δd_h^*	Δd_v^*
LF 1: h = 0,80 m, SLW 60	0,71 % (20,0 mm)	1,05 % (29,75 mm)
LF 2: h = 0,80 m, SLW 60 (Radl.)	0,98 % (27,72 mm)	1,47 % (41,61 mm)
LF 3: h = 0,80 m, SLW 60 (Radl.), GW	1,05 % (29,8 mm)	1,58 % (44,55 mm)

* zulässige relative Durchmesseränderung: $\text{zul.}\Delta d_h = \text{zul.}\Delta d_v = 6,0 \text{ \%}$ (entspricht hier absoluter Verformung von 202,05 mm)

Tab. 1: Sammlerdeformationen unter Einwirkung der Gebrauchslast

Es wird darauf hingewiesen, dass es sich bei dem angegebenen Verformungsgrenzwert (6 % relative Durchmesseränderung) um einen normativen Grenzwert gem. den Unterlagen [1] (biegeweiche Rohre) und [2] (Az III, Erd- und Verkehrslast) handelt. Da es sich im vorliegenden Fall um eine vom Kreis abweichende Querschnittsform handelt, wird gem. Kap. 7.6.3 der Unterlage [2] der Mittelwert aus Höhe und Breite (jeweils Abstand der Wandungsmitte d. h. der Systemlinie) als Bezugswert herangezogen. Die relative Durchmesseränderung ergibt sich als Quotient der absoluten Querschnittsverformungen (in Tab. 1 in Klammern angegeben) und dem genannten Bezugswert. Dem normativ zulässigen relativen Verformungsgrenzwert von 6 % entspricht somit im vorliegenden Fall ein zulässiger absoluter Grenzwert von 169,5 mm. Im Vergleich hierzu sind die berechneten Deformationen (s. Tab. 1) als relativ gering zu bewerten. Der Verformungsnachweis stellt einen reinen Gebrauchstauglichkeitsnachweis dar. Es wird darauf hingewiesen, dass es unabhängig von den normativen Festlegungen im Einzelfall sinnvoll sein kann, von Seiten des Bauherrn andere, meist niedrigere, Grenzwerte (im Bereich des Rohrleitungsbaus z. B. zur Begrenzung der Setzung der GOK bei großen Rohrquerschnitten und geringen Überdeckungen) festzulegen.

Spannungsnachweis

In Tab. 2 sind die unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast (globales Sicherheitskonzept) berechneten Auslastungen zusammengefasst. Die Auslastung ergibt sich aus dem Quotienten der berechneten Gelenkdruckspannungen und der Materialfestigkeit. Da hier der Spannungsnachweis unter 2,2-facher Gebrauchslast geführt wird, beträgt die zulässige Auslastung 100 %. Sie wird in allen Fällen deutlich unterschritten. Es zeigt sich ferner, dass in

allen Fällen der Scheitelpunkt maßgebend für den Spannungsnachweis wird. Der Spannungsnachweis ist hier offenbar nicht das maßgebende Bemessungskriterium.

Lastfall	Auslastung*		
	Scheitel	Sohle (re)	Sohle (mi)
LF 1: h = 0,80 m, SLW 60	15,6 %	15,1 %	13,4 %
LF 2: h = 0,80 m, SLW 60 (Radl.)	18,6 %	12,9 %	11,3 %
LF 3: h = 0,80 m, SLW 60 (Radl.), GW	19,9 %	13,7 %	11,6 %

* zulässige Auslastung: 100 %

Tab. 2: Auslastungen im Spannungsnachweis unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast (globales Sicherheitskonzept)

Stabilitätsnachweis

In Tab. 3 sind die Ergebnisse des Stabilitätsnachweises zusammengefasst. Im Rahmen der durchgeführten geometrische nichtlineare Berechnungen war eine Laststeigerung bis zur erforderlichen globalen Sicherheit von $\text{erf.}\gamma = 2,2$ (2,2-fache Gebrauchslast) die Zielsetzung. In allen Fällen wurde die erforderliche Sicherheit erreicht (s. Tab. 3). Bei LF 3 ist bedingt durch den hohen Sohlwasserdruck ein deutlich überproportionaler Verformungszuwachs oberhalb der Gebrauchslast zu verzeichnen (s. im Vergleich Abb. 4.5 und 4.6). Der Querschnitt befindet sich bei LF 3 im Grenzbereich der zulässigen Auslastung (bzgl. Stabilitätsversagen).

Lastfall	Sicherheit γ_1^*
LF 1: h = 0,80 m, SLW 60	$\geq 2,2$
LF 2: h = 0,80 m, SLW 60 (Radl.)	$\geq 2,2$
LF 3: h = 0,80 m, SLW 60 (Radl.), GW	$\geq 2,2$

* Erforderliche globale Sicherheit: $\text{erf.}\gamma_1 = 2,2$

Tab. 3: Globale Sicherheit gegen elastisches Stabilitätsversagen (globales Sicherheitskonzept)

Für den hier betrachteten Bemessungsquerschnitt sind somit unter Voraussetzung der in Kap. 3 aufgeführten Berechnungsparameter die erforderlichen statischen Nachweise eingehalten. Es liegen offenbar keine Längsrissbildungen vor, woraus sich die Einstufung in Altrohrzustand I ergäbe. Da in der Berechnung jedoch keine Zugspannungsabtragung in dem Altrohrquerschnitt ansetzbar ist, ergibt sich rechnerisch die Längsrissbildung in den beschriebenen Querschnittspunkten (s. Abb. 2.2) und somit die Klassifizierung in Altrohrzustand II.

In Unterlage [13] (Bericht zur Materialuntersuchung) ist dargelegt, dass relativ viele der entnommenen Kerne nicht prüfbar waren, dass der Beton in vielen Bereichen bereits sehr tief (3 bis über 10 cm) geschädigt sei und dass die Fugen der Verklinkerung im Bereich der Wasserwechselzone bis zu 5,5 cm ausgewaschen bzw. verunreinigt seien. Ergänzend zu den vorstehenden Betrachtungen werden daher die Auswirkungen einer abgeminderten Festigkeit des Materials sowie ggf. reduzierter Wanddicken aufgezeigt. Näherungsweise lassen sich diese Auswirkungen unter Verwendung der gewonnenen Berechnungsergebnisse wie folgt abschätzen:

Die Druckfestigkeit des Materials geht linear in den Spannungsnachweis ein. In [13] wird der niedrigste gemessene Druckfestigkeitswert mit $5,8 \text{ N/mm}^2$ angegeben (betr. QP 05 bei Schacht 24916048). Unter Voraussetzung dieses Festigkeitswertes können die Auslastungen im Spannungsnachweis aus den Ergebnissen der Tab. 2 unter Berücksichtigung des Faktors $10,2 / 5,8 = 1,76$ ermittelt werden. Es ergeben sich maximale Auslastungen von 35 % (Scheitel,

LF 3), 26,6 % (Sohle, rechtes Gelenk, LF 1) bzw. von 23,6 % (Sohlmitte, LF 1). Auch sie liegen in allen Fällen noch deutlich unter der zulässigen Auslastung von 100 %.

Auch eine Reduktion der tragenden Rohrwanddicke geht näherungsweise linear in die Auslastung im Spannungsnachweis ein. Unter Ansatz einer mittleren Schwächung um 8 cm ergeben sich Erhöhungsfaktoren der Auslastung von $35/(35 - 8) = 1,3$ (Scheitel), von $39/(39 - 8) = 1,26$ (Sohle rechtes Gelenk) und von $43/(43 - 8) = 1,23$. Die Auslastungen können somit zu 25,9 % (Scheitel), 19,0 % (Sohle, rechtes Gelenk) und 16,5 % abgeschätzt werden. Die zulässige Auslastung von 100 % wird nicht erreicht.

Sofern beide Effekte (Reduktion von Festigkeit und Wanddicke) mit den genannten Ansätzen berücksichtigt werden ist das Produkt der Abminderungsfaktoren zu berücksichtigen und es ergeben sich Auslastungen von 45,5 % (Scheitel), von 33,5 % (Sohle, rechtes Gelenk) und 29,0 % (Sohlmitte). Die zulässige Auslastung von 100 % wird nicht erreicht.

Zu der Wanddickenreduktion ist anzumerken, dass diese neben der beschriebenen Erhöhung der Beanspruchungen (Spannungen) und somit der statischen Auslastungen zu einer Verschiebung der Gelenkpunkte innerhalb der Rohrwandung (nach außen hin) führt. Es ist davon auszugehen, dass dieser Effekt bei der hier betrachteten Wanddickenreduktion um 8 cm keine größeren Auswirkungen bzgl. der Rohrbeanspruchungen (Spannungen) hat. Hinsichtlich der in Tab 1 aufgeführten Verformungen ist mit einer Vergrößerung zu rechnen, die jedoch im vorliegenden Fall wegen des im Gebrauchslastzustand geringen Verformungsniveaus voraussichtlich nicht relevant wird. Die bei LF 3 infolge des Sohlwasserdruckes unter 2,2-facher Gebrauchslast resultierende Sohlaufwölbung (Abb. 4.6) deutet darauf hin, dass infolge der eingetretenen bzw. ggf. auch einer fortschreitenden Wanddickenreduktion ein Absinken des Sicherheitsniveaus im Stabilitätsnachweis unter die globale Sicherheit von $\gamma = 2,2$ eintreten kann.

Dr. Doll Ingenieurgesellschaft mbH

Dr.-Ing. Heinz Doll
Geschäftsführer



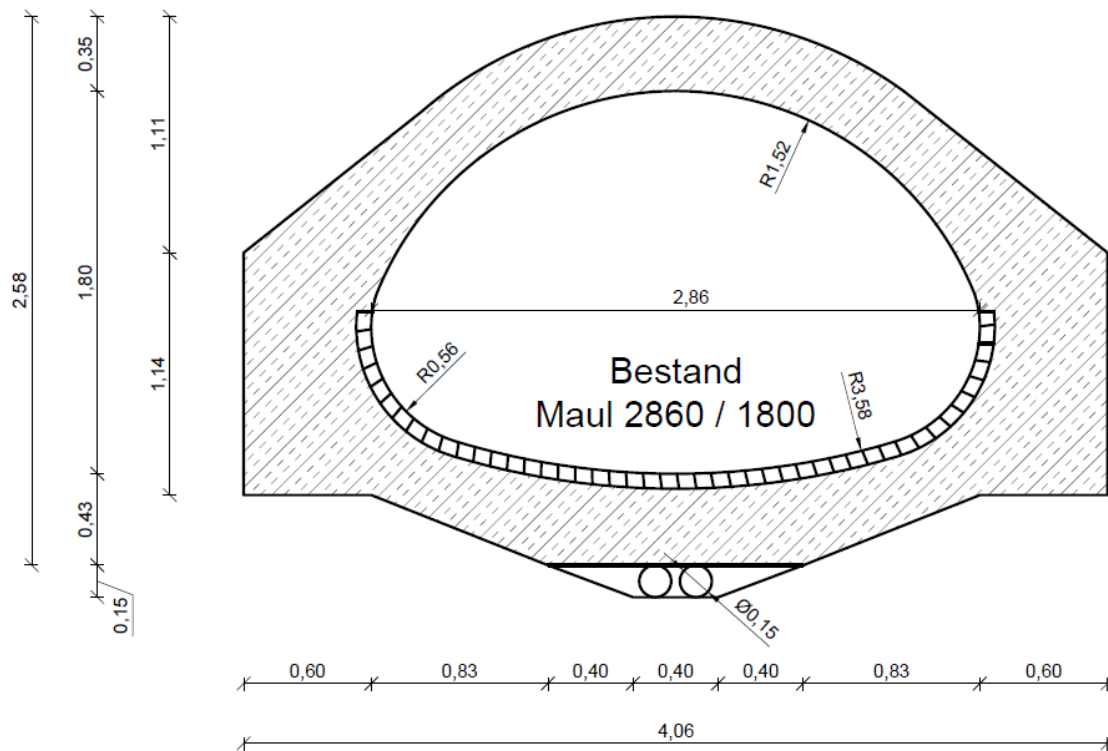


Abb. 1.1: Profilquerschnitt, entnommen aus Unterlage [10]

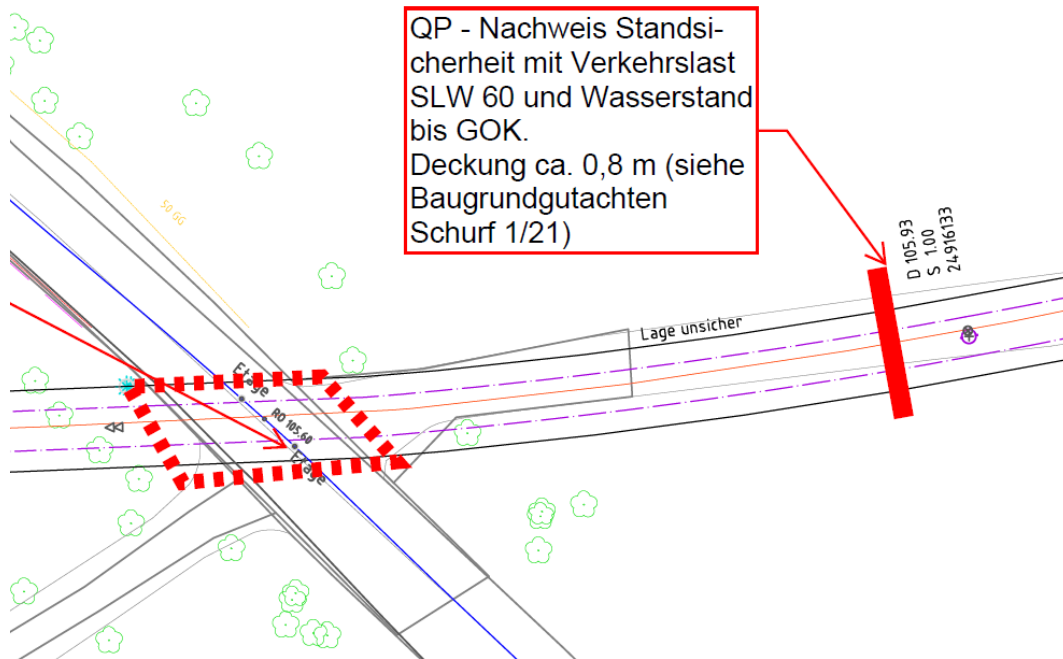


Abb. 1.2: Bemessungsquerschnitt, Ausschnitt Lageplan, entnommen aus Unterlage [8]

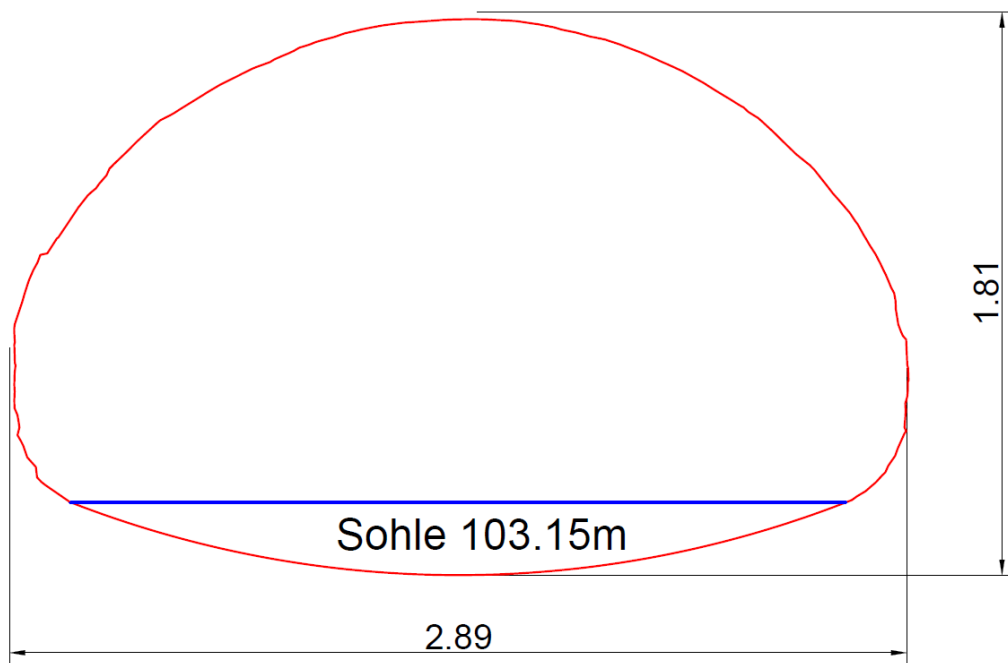


Abb. 1.3: Querschnitt 39, Ergebnis der Vermessung, Ausschnitt der Unterlage [15]

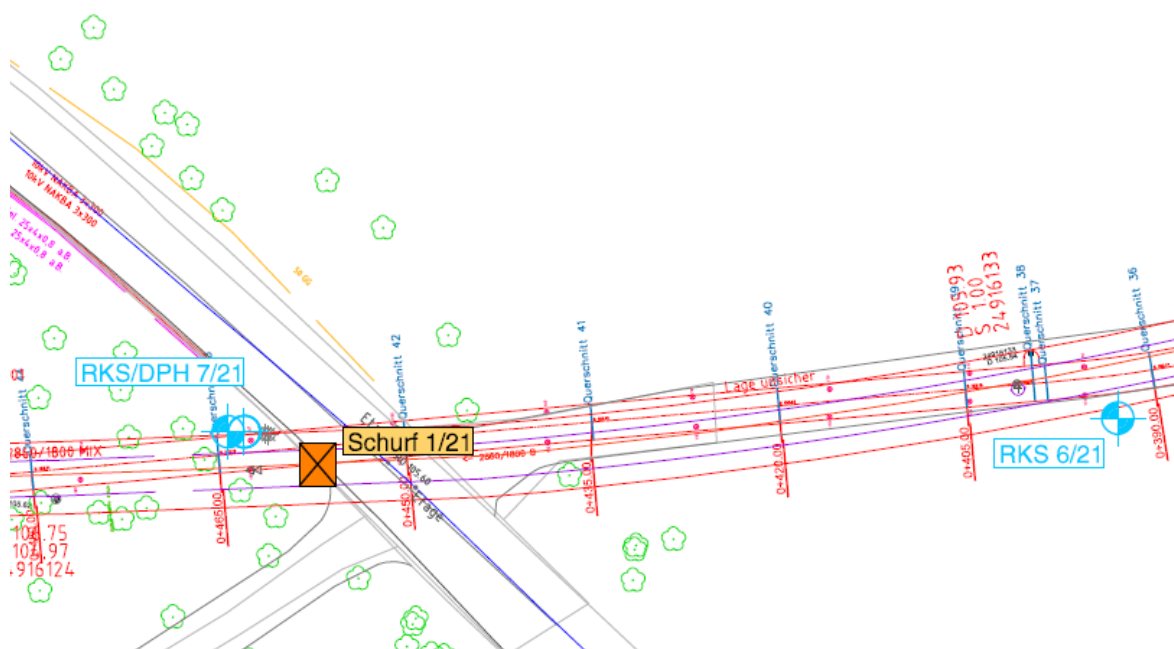


Abb. 1.4: Ausschnitt Lageplan mit den Orten geotechnischer Aufschlüsse, entnommen aus Anlage 1 der Unterlage [13]

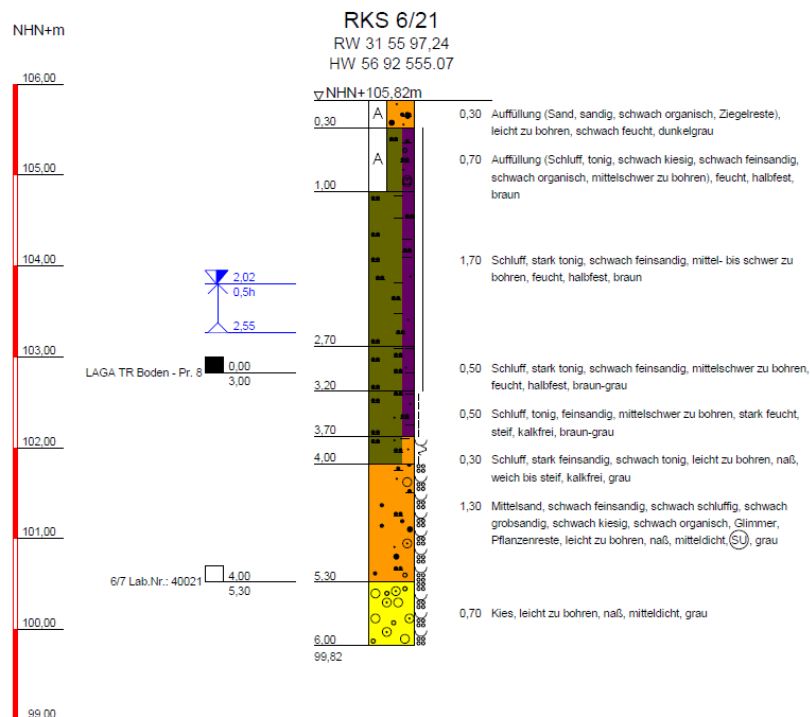


Abb. 1.5: Ergebnis der Sondierung RKS 6/21, entnommen aus Anlage 2 der Unterlage [13]



Abb. 1.6: Ergebnis der Sondierungen Schurf 1/21, entnommen aus Anlage 2 der Unterlage [13]

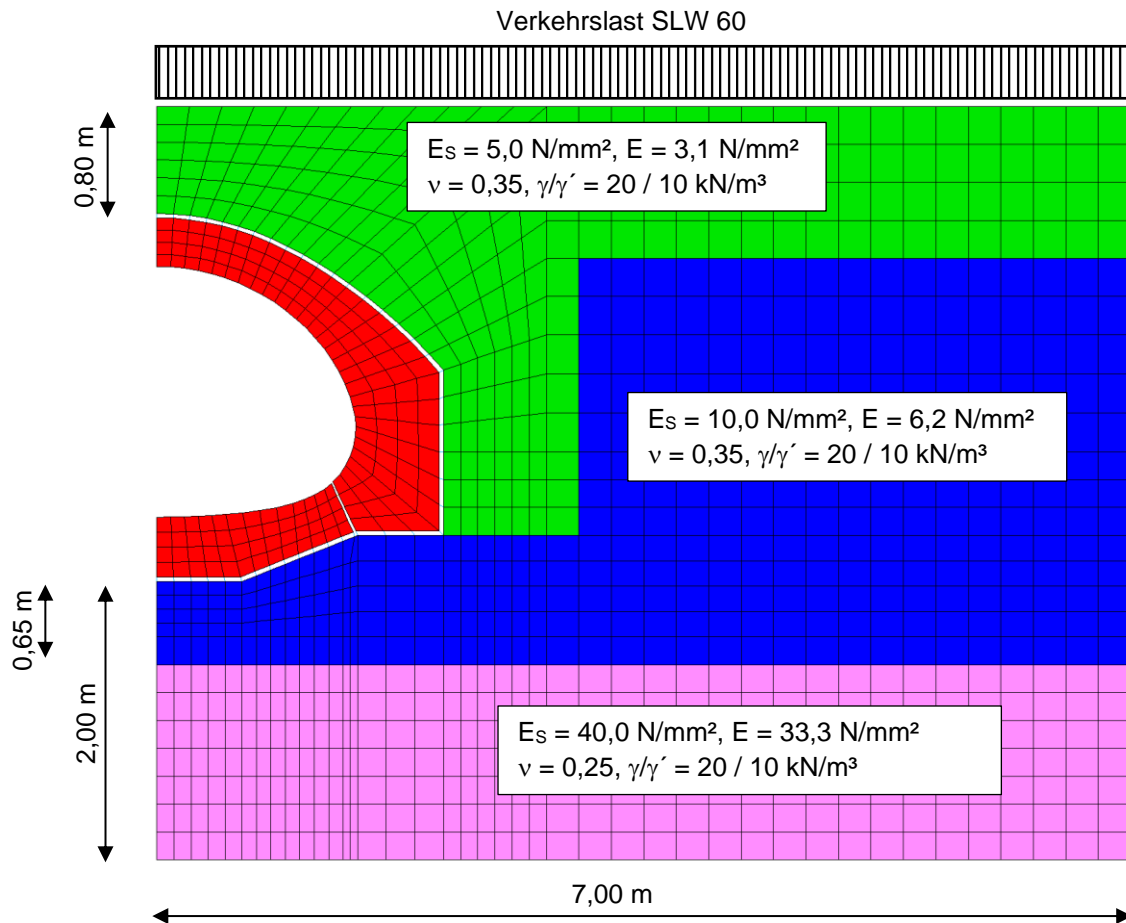


Abb. 2.1: Diskretisiertes Rechenmodell;
LF 1: Erdüberdeckung $h = 0,80 \text{ m}$, Verkehrslast SLW 60

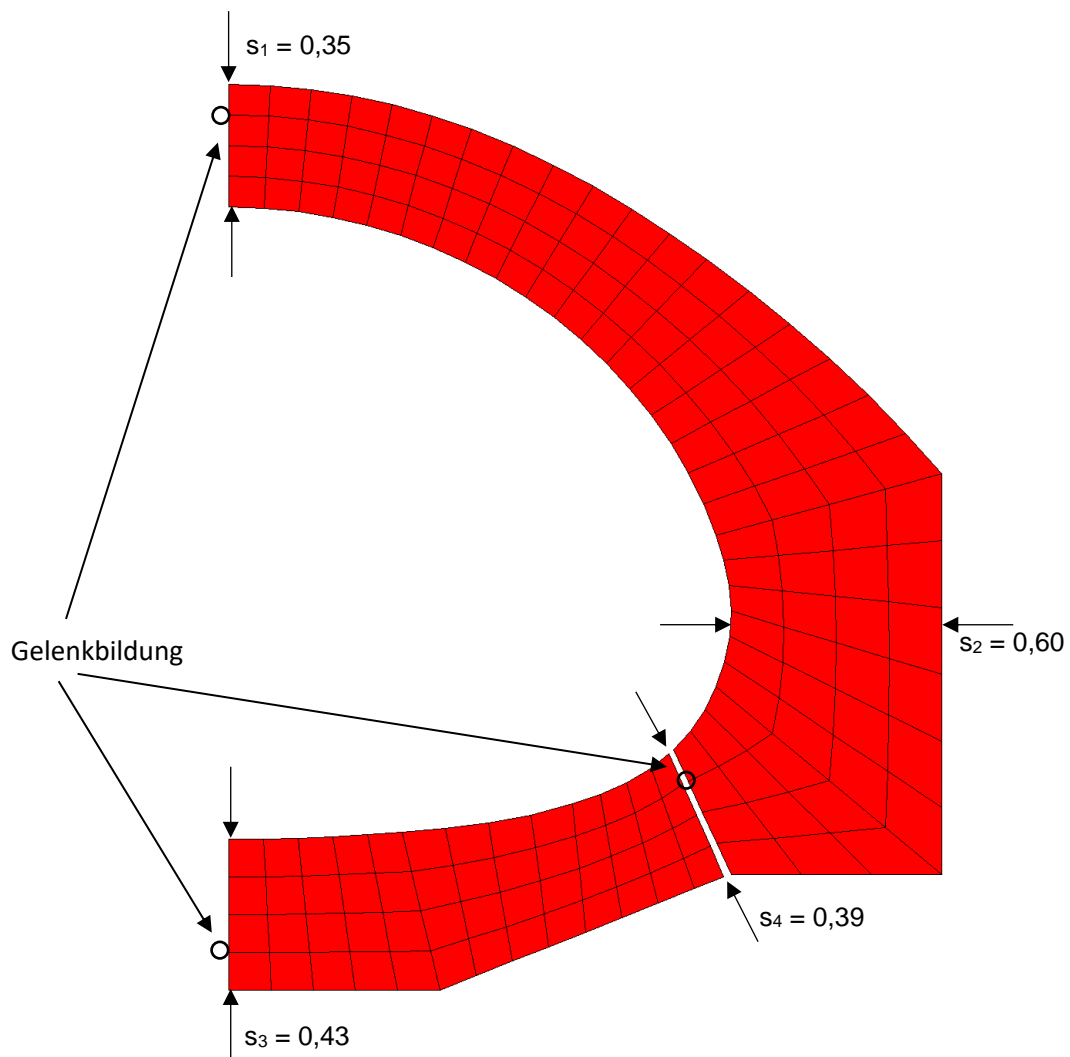


Abb. 2.2: Diskretisiertes Rechenmodell (Detail);
LF 1: Erdüberdeckung $h = 0,80$ m, Verkehrslast SLW 60

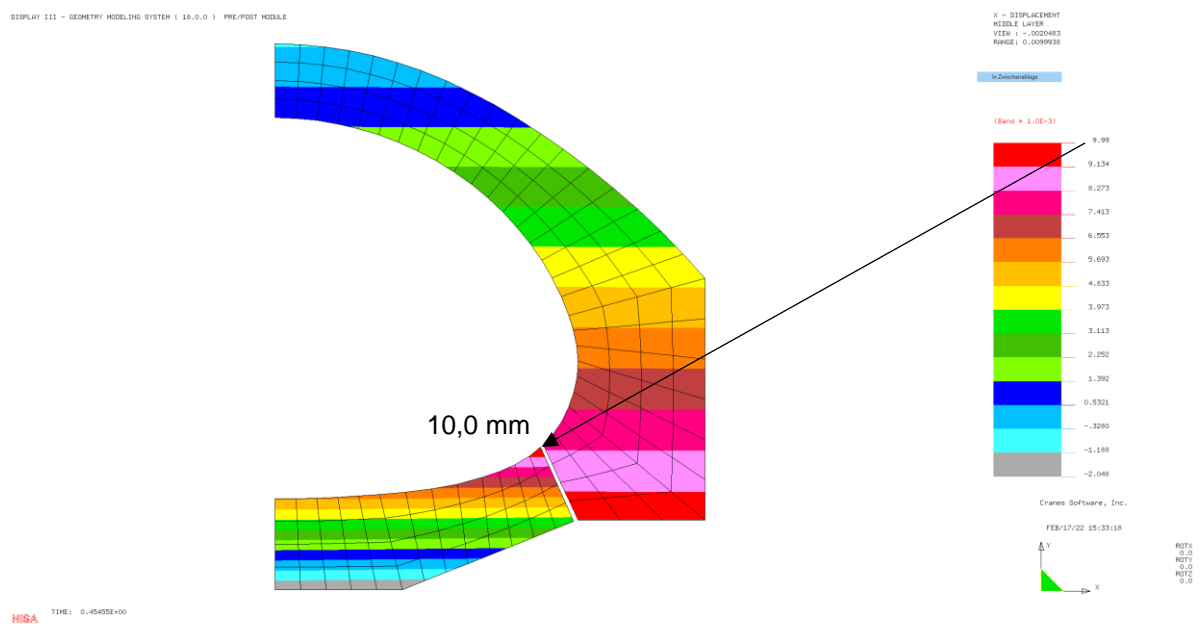


Abb. 2.3: Horizontale Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast;
LF 1: Erdüberdeckung $h = 0,80$ m, Verkehrslast SLW 60

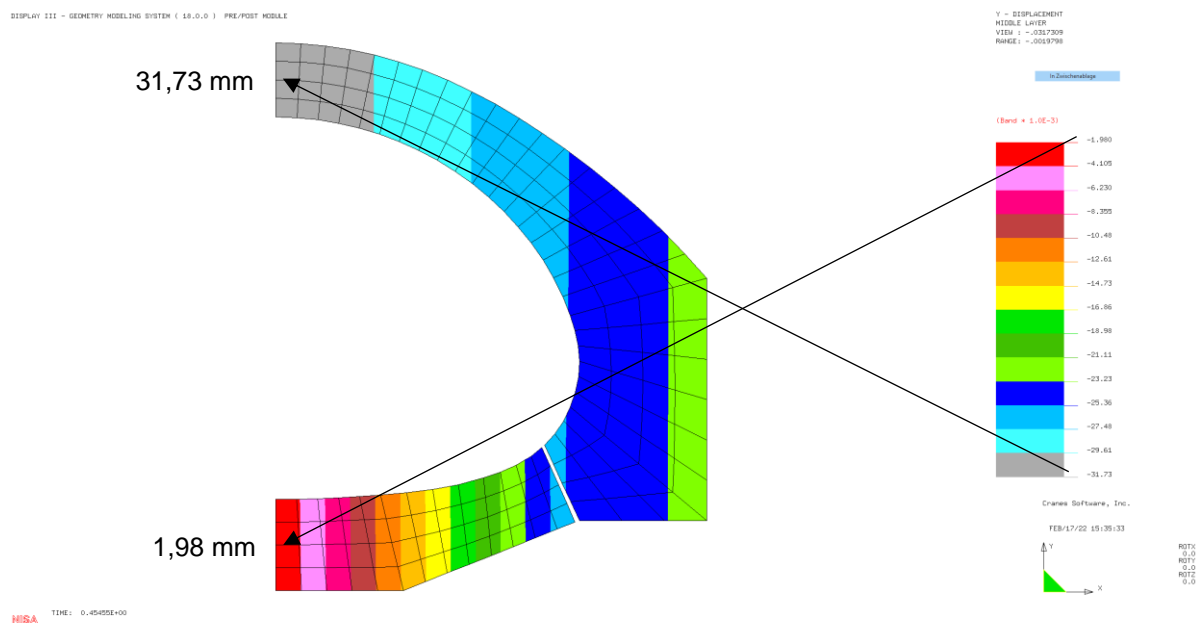


Abb. 2.4: Vertikale Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast;
LF 1: Erdüberdeckung $h = 0,80$ m, Verkehrslast SLW 60

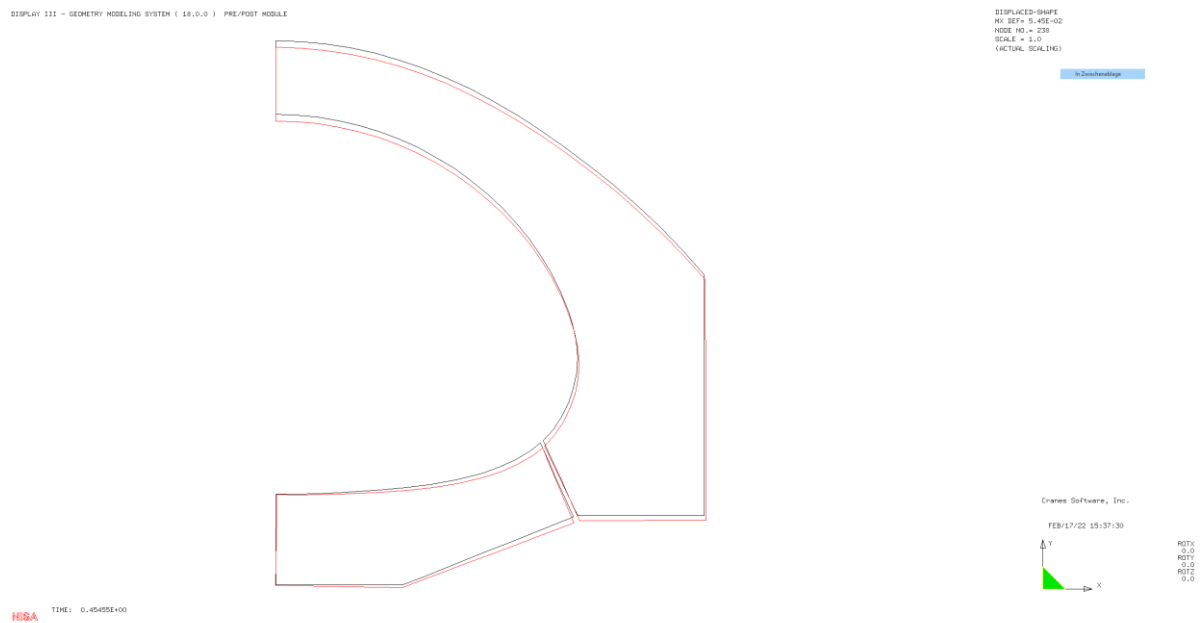


Abb. 2.5: Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast;
LF 1: Erdüberdeckung $h = 0,80$ m, Verkehrslast SLW 60

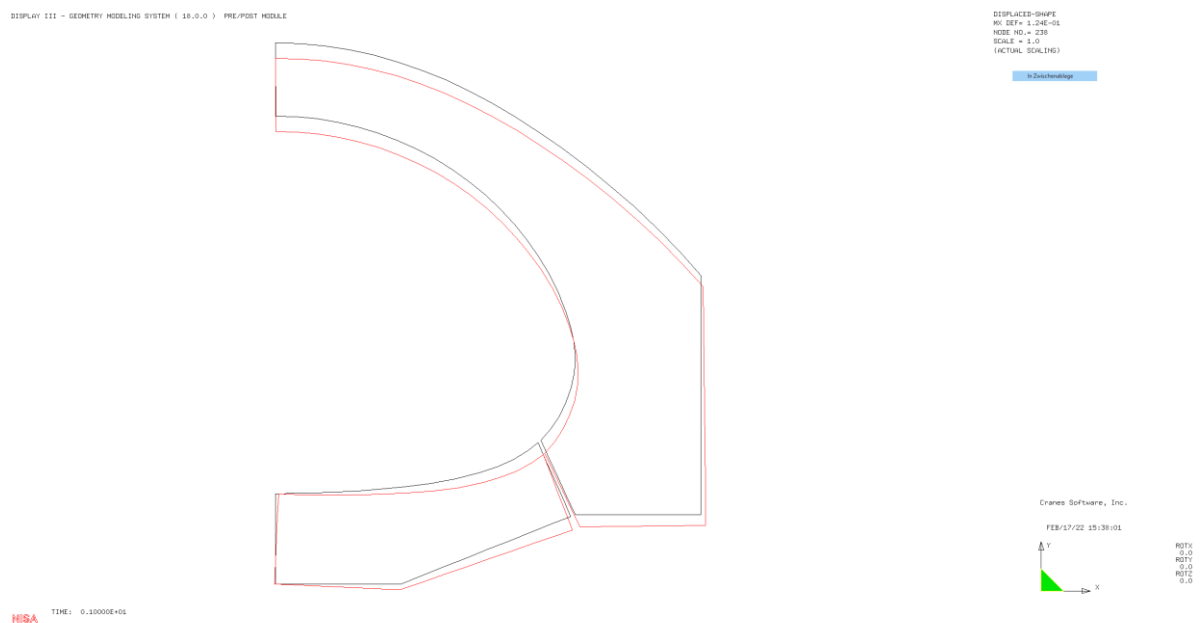


Abb. 2.6: Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast;
LF 1: Erdüberdeckung $h_1 = 0,80$ m, Verkehrslast SLW 60

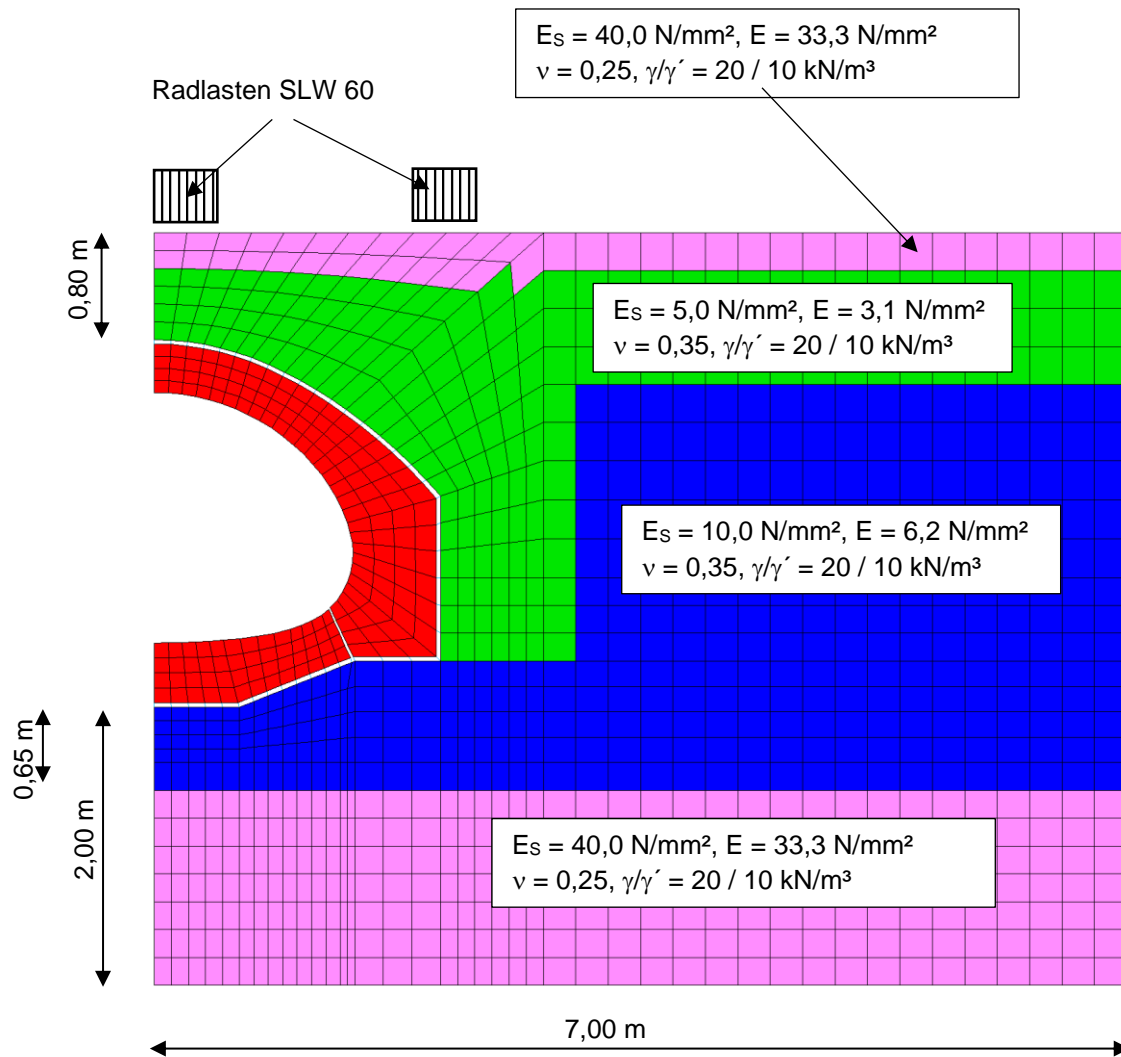


Abb. 3.1: Diskretisiertes Rechenmodell;
 LF 2: Erdüberdeckung $h = 0,80 \text{ m}$, Verkehrslast SLW 60 (Radlasten)

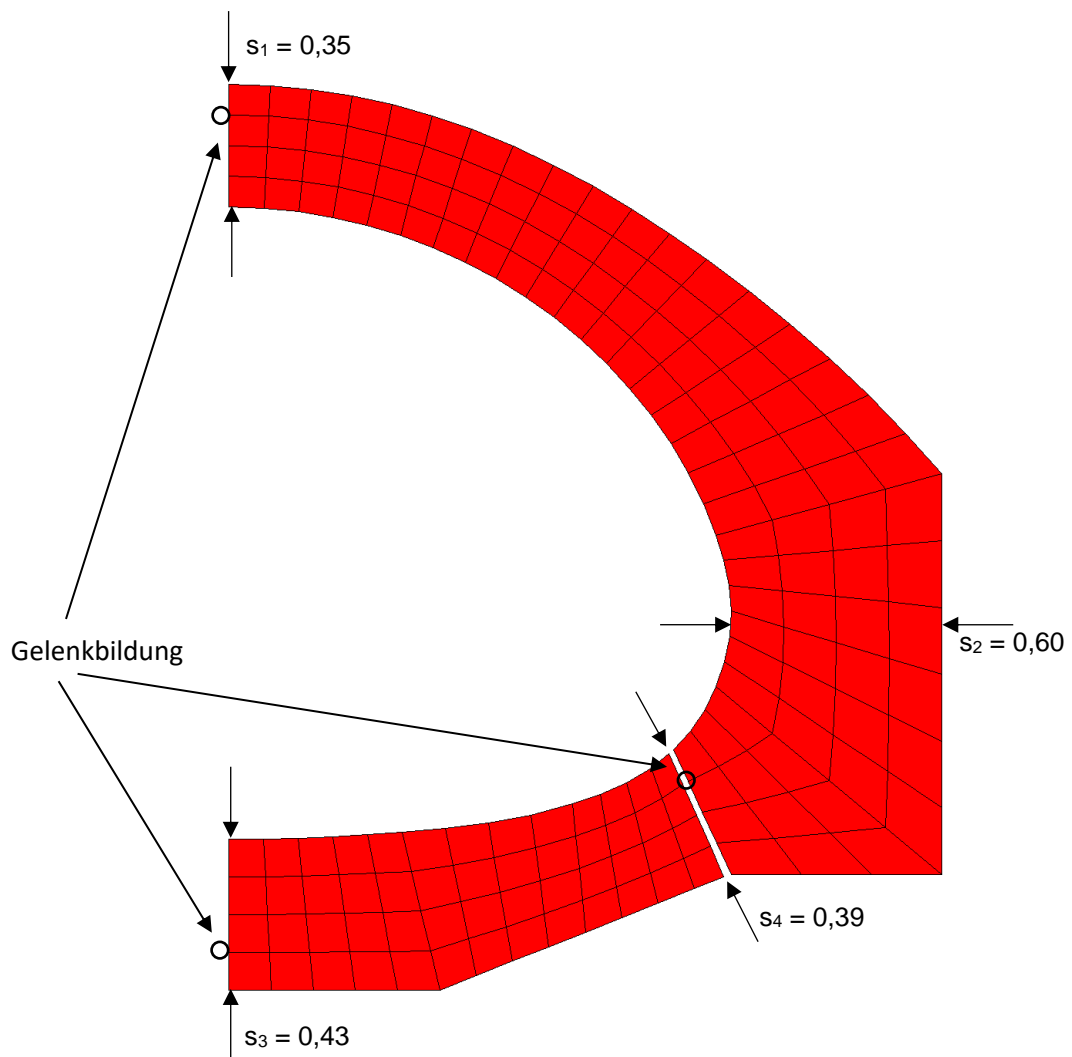


Abb. 3.2: Diskretisiertes Rechenmodell (Detail);
LF 2: Erdüberdeckung $h = 0,80$ m, Verkehrslast SLW 60 (Radlasten)

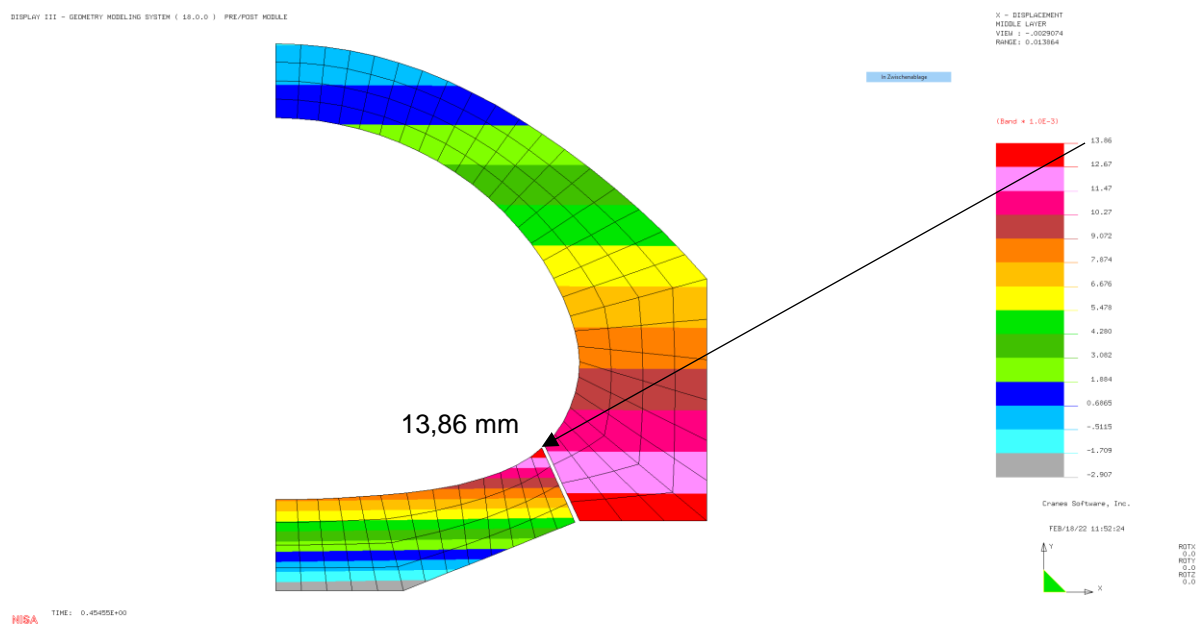


Abb. 3.3: Horizontale Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast;
LF 2: Erdüberdeckung $h = 0,80$ m, Verkehrslast SLW 60 (Radlasten)

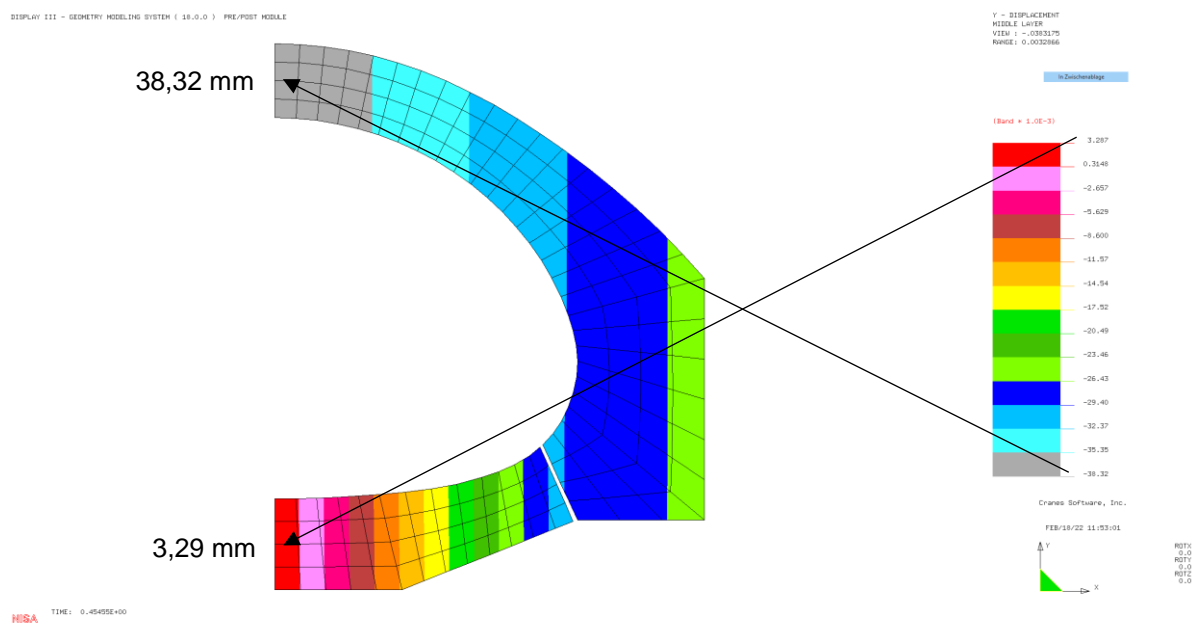


Abb. 3.4: Vertikale Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast;
LF 2: Erdüberdeckung $h = 0,80$ m, Verkehrslast SLW 60 (Radlasten)

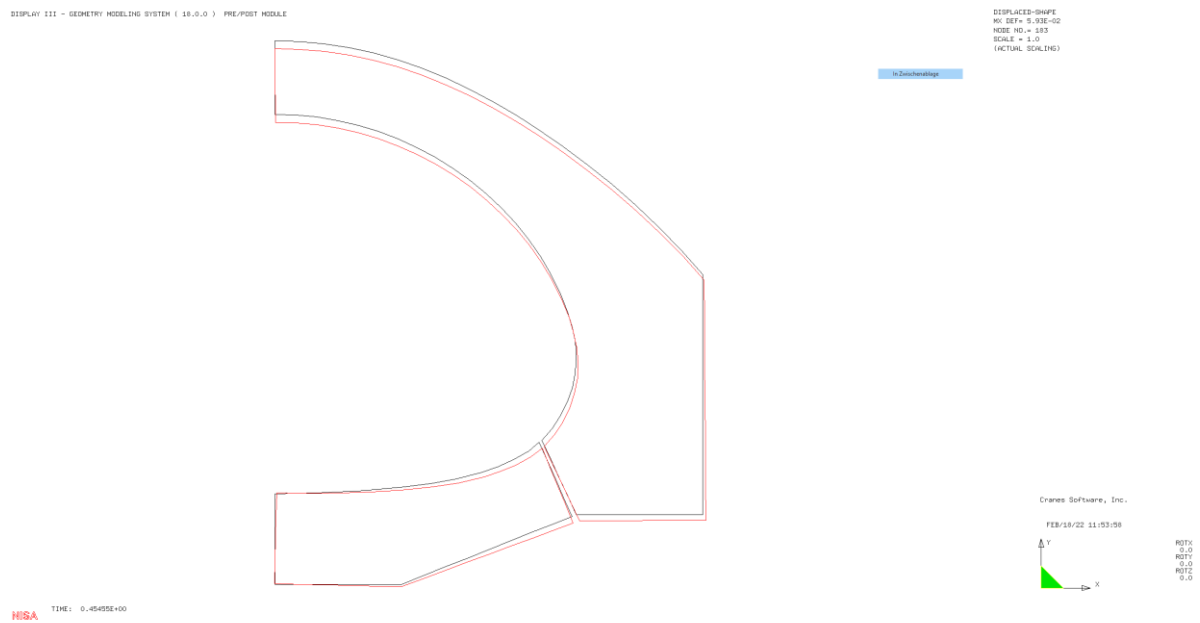


Abb. 3.5: Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast;
LF 2: Erdüberdeckung $h = 0,80$ m, Verkehrslast SLW 60 (Radlasten)

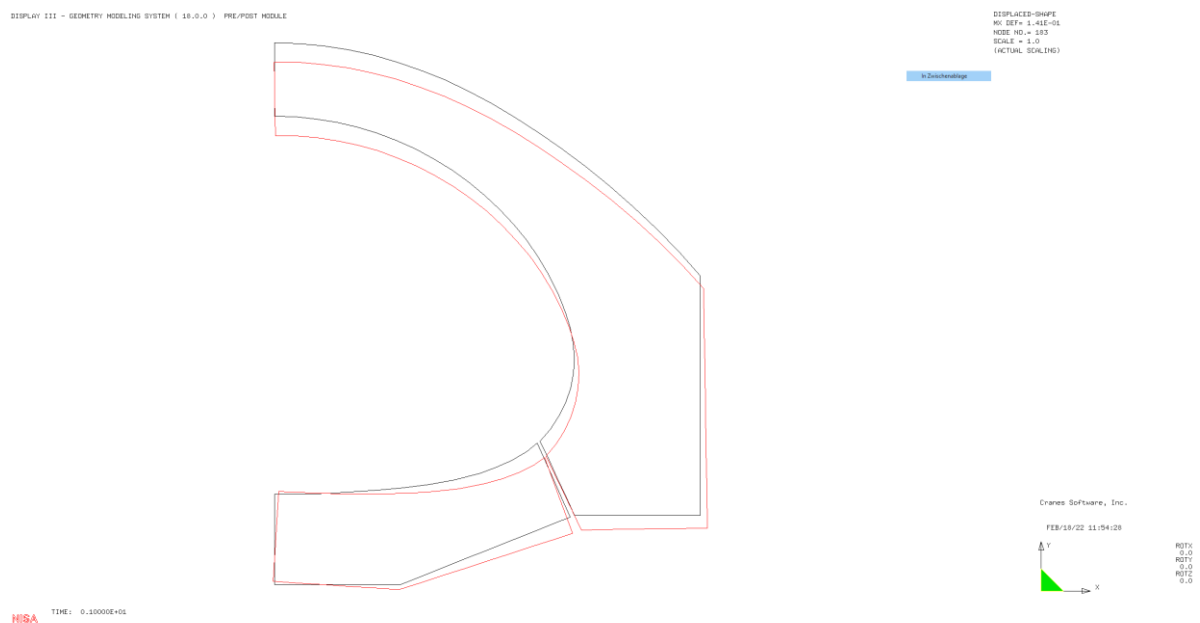


Abb. 3.6: Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast;
LF 2: Erdüberdeckung $h_1 = 0,80$ m, Verkehrslast SLW 60 (Radlasten)

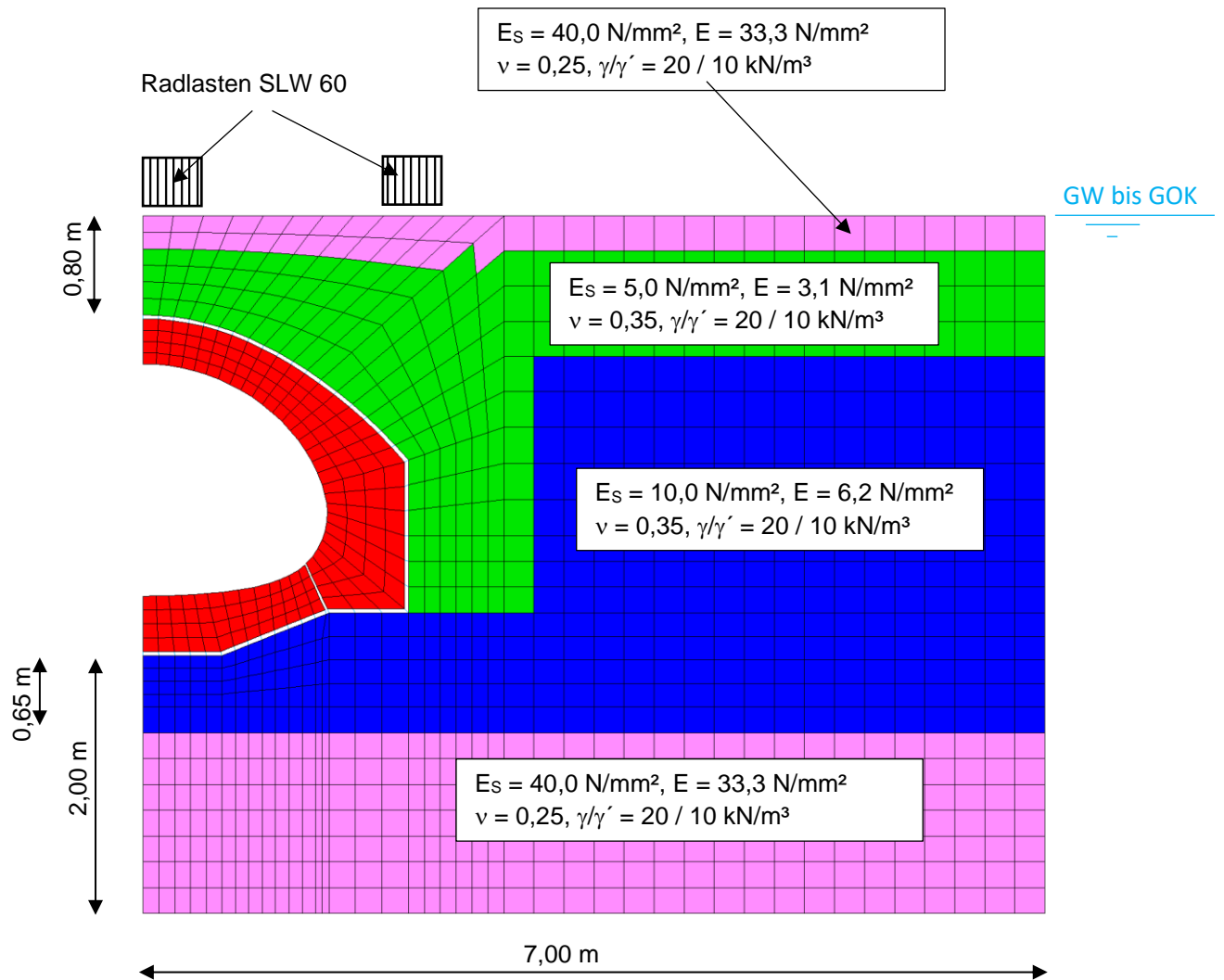


Abb. 4.1: Diskretisiertes Rechenmodell;
LF 3: Erdüberdeckung $h = 0,80 \text{ m}$, Verkehrslast SLW 60 (Radlasten),
GW bis GOK

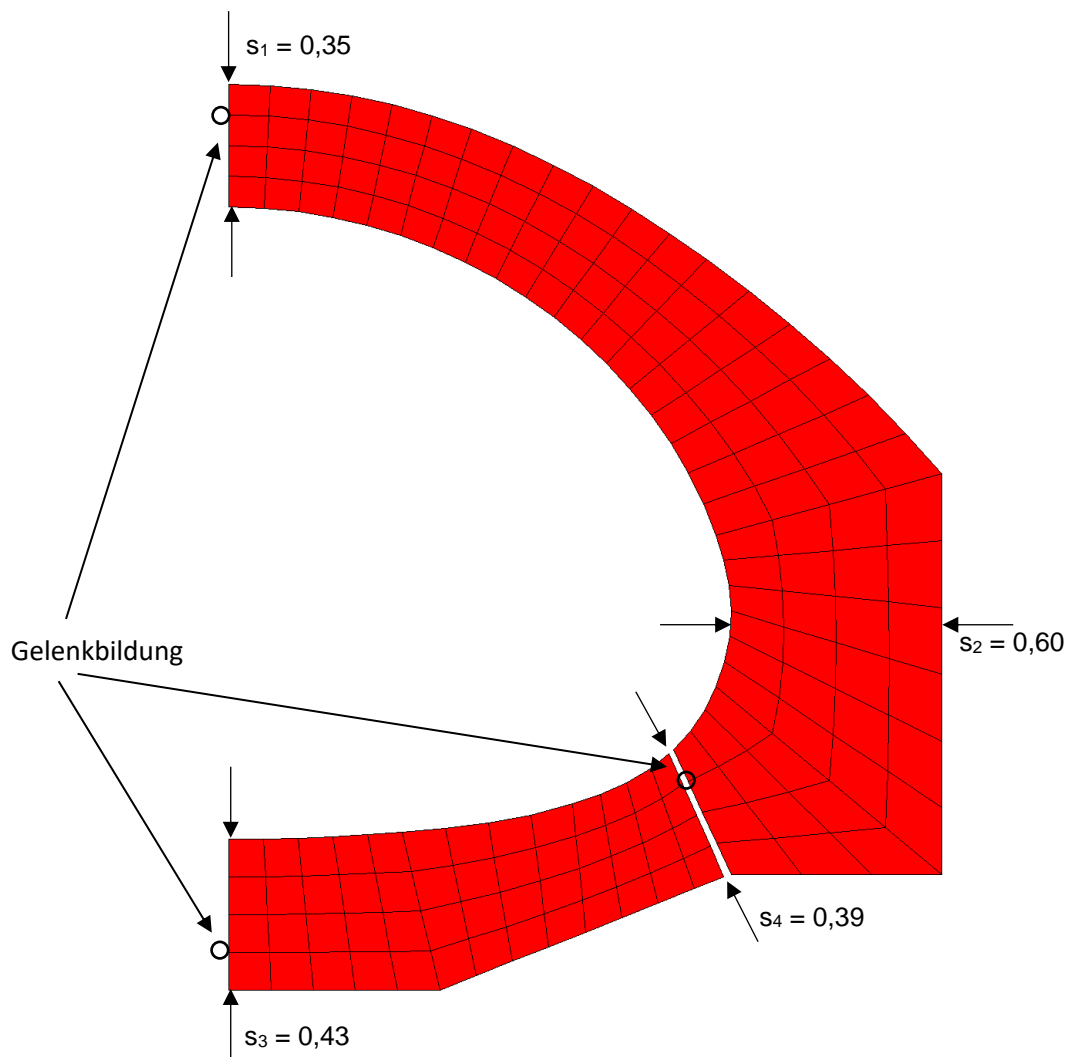


Abb. 4.2: Diskretisiertes Rechenmodell (Detail);
LF 3: Erdüberdeckung $h = 0,80$ m, Verkehrslast SLW 60 (Radlasten),
GW bis GOK

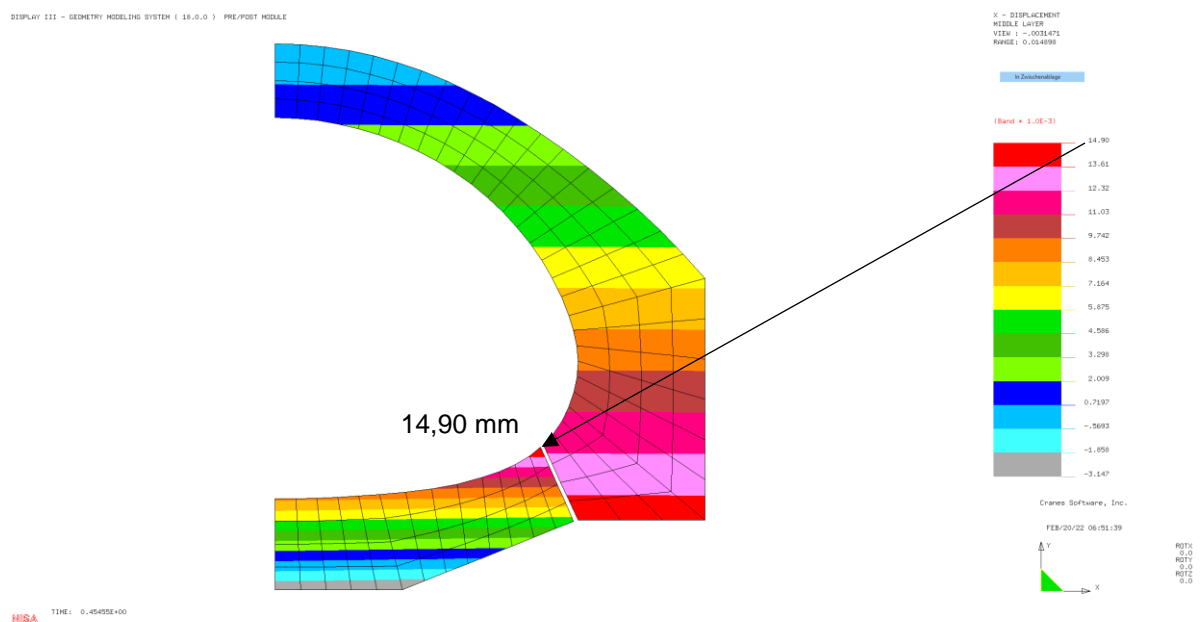


Abb. 4.3: Horizontale Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast; LF 3: Erdüberdeckung $h = 0,80$ m, Verkehrslast SLW 60 (Radlasten), GW bis GOK

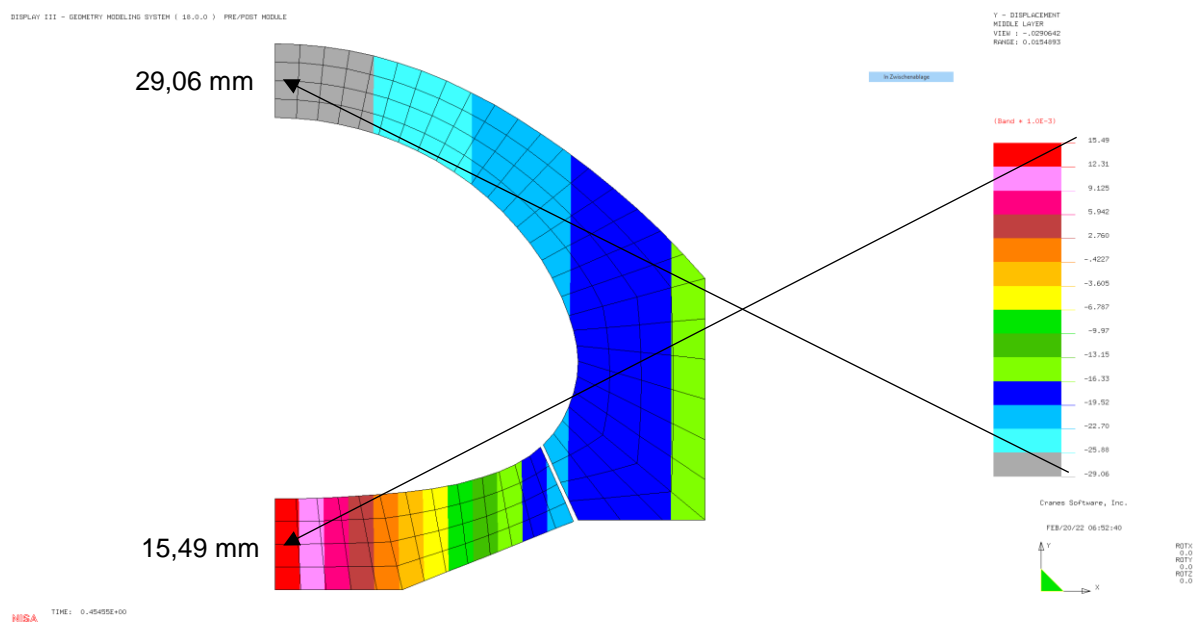


Abb. 4.4: Vertikale Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast; LF 3: Erdüberdeckung $h = 0,80$ m, Verkehrslast SLW 60 (Radlasten), GW bis GOK

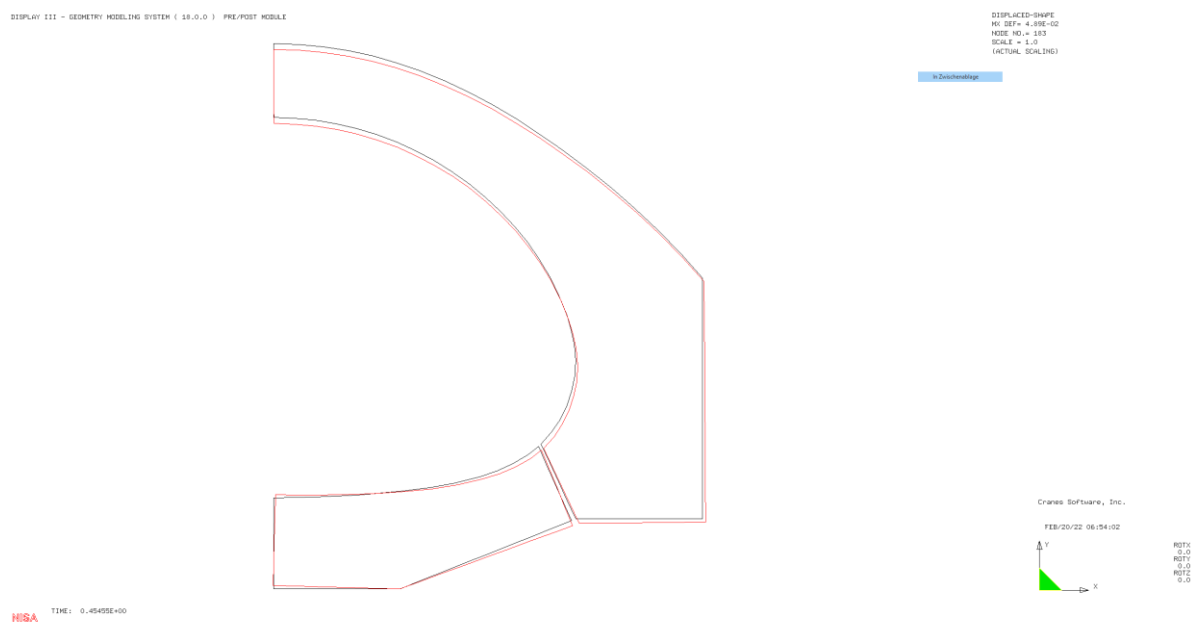


Abb. 4.5: Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der Gebrauchslast;
LF 3: Erdüberdeckung $h = 0,80$ m, Verkehrslast SLW 60 (Radlasten),
GW bis GOK

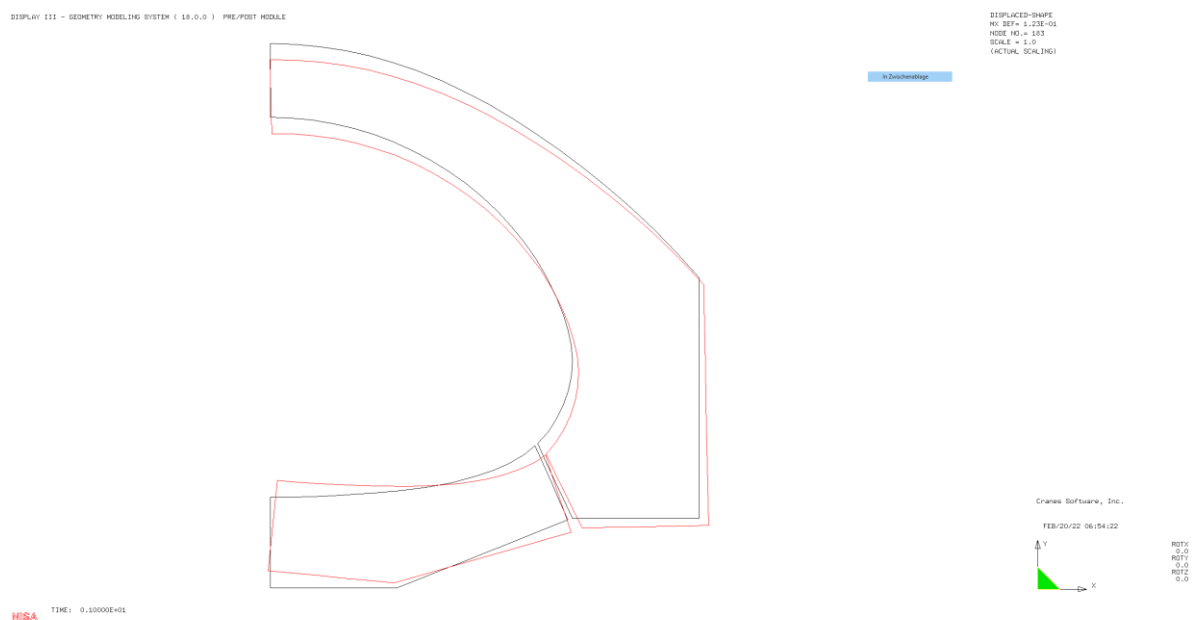


Abb. 4.6: Rohrverformungen [m] unter Einwirkung der 2,2-fachen Gebrauchslast;
LF 3: Erdüberdeckung $h_1 = 0,80$ m, Verkehrslast SLW 60 (Radlasten),
GW bis GOK