

## BERICHT

Nr. 94646278/01

Datum: 11.03.2020

**Auftraggeber:** Landratsamt Ravensburg  
Friedensstraße 6  
88212 Ravensburg

**Auftrag vom:** 30.08.2018

**Inhalt des Auftrages:** Statische Berechnung von Sickerwasserrohren

**Bauort:** Deponie Gutenfurt

**Bauvorhaben:** Fortführung der Deponie

**Planung:** AU Consult GmbH  
Provinostraße 52 / Geb. A 15  
86153 Augsburg

**Bearbeiter:** Dipl.-Ing. Armin Stegner

**Telefon Nr.:** +49 911 81771-430

**Telefax Nr.:** +49 911 81771-439

**E-Mail:** [armin.stegner@lga.de](mailto:armin.stegner@lga.de)

Dieser Bericht umfasst 23 Textseiten und 1 Anlage.

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf das/die im Prüfungsbericht genannte(n) Probenmaterial/ Prüfstück.

Dieser Prüfungsbericht darf nur im vollen Wortlaut veröffentlicht werden.  
Jede Veröffentlichung in Kürzung oder Auszug bedarf der vorherigen Genehmigung durch die LGA Bautechnik GmbH.

Für die Auftragsabwicklung haben wir wesentliche Daten und Ihre Anschrift gespeichert.  
Der Datenschutz ist gewährleistet.

LGA Bautechnik GmbH  
Statik  
Tillystraße 2  
90431 Nürnberg

Tel +49 911 81771 430  
Fax +49 911 81771 439  
Mail [Armin.Stegner@lga.de](mailto:Armin.Stegner@lga.de)

Geschäftsführung: Hans-Peter  
Trinkl, Thomas Weierganz  
AG Nürnberg HRB 20586  
USt-IdNr. DE813835574

Ein Unternehmen der  
LGA Landesgewerbeanstalt  
Bayern Körperschaft des  
öffentlichen Rechts

Web [www.lga.de](http://www.lga.de)

## **1. Unterlagen**

### **1.1 Pläne**

- 1.1.1 Deponieschnitte 1-1, 3-3, 5-5, 7-7, C-C“ und „Zwischenstand Planung“, AU Consult
- 1.1.2 Plan „Darstellung der Zustandsklassen“, IB ICP
- 1.1.3 Lageplan „Skizze Punkte Rohrstatik“ mit dazugehöriger Tabelle „Bemessungsangaben zur Rohrstatik Gutenfurt,“ AU Consult zu den Überdeckungshöhen und Einwirkungen auf die einzelnen Rohrtypen vom 17.02.2020
- 1.2 Bericht Sickerwassererfassungssystem Deponie Gutenfurt, AU Consult
- 1.3 Zustandsdokumentation des Entwässerungssystems, IB ICP vom November 2016
- 1.4 ATV A127: Richtlinie für die statische Berechnung von Entwässerungskanälen und -leitungen; 3. Auflage 2000
- 1.5 ATV-M 127 Teil 1: Richtlinie für die statische Berechnung von Entwässerungsleitungen für Sickerwässer aus Deponien März 1996
- 1.6 Vorläufige Bemessungsgrundsätze für Bauteile in Deponien, Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin, November 1995
- 1.7 SKZ / TÜV - LGA Güterichtlinie Rohre, Rohrleitungsteile, Schächte und Bauteile in Deponien vom September 2013
- 1.8 G. Sonntag: Die Stabilität dünnwandiger Rohre im kohäsionslosen Kontinuum, Felsmechanik und Ingenieurgeologie Vol. 4/3, 1966, Springer Verlag
- 1.9 DIN 8062, Rohre aus weichmacherfreiem Polyvinylchlorid, Maße, Version 11.1988  
Hinweis: Das gewählte Maß für die Wanddicke weicht von der aktuellen Norm ab.
- 1.10 BÜV Empfehlung Tragende Kunststoffbauteile im Bauwesen, 08/2010

## **2. Beschreibung / Inhalt**

### **2.1 Baubeschreibung**

Auf der Deponie Gutenfurt sind als Sickerwasserleitungen verschiedene Rohrtypen eingebaut. Im Deponiebereich Gutenfurt I sind geschlitzte PVC-Rohre der Nennweiten DN (Nennweite entsprechend Innendurchmesser) 200 mm und DN 250 mm sowie Saugleitungen aus Steinzeug der Nennweite DN 100 eingebaut. Die eingebauten PVC-Rohre weisen bereichsweise Verformungen auf. Im Deponiebereich Gutenfurt II sind gelochte Steinzeugrohre der Nennweite DN 250 mm und geschlitzte PE-Rohre der Nennweite DN 250 mm eingebaut. Die eingebauten Rohre weisen bereichsweise Verformungen und Risse auf.

### **2.2 Inhalt**

Es werden Standsicherheitsnachweise mittels der Methode der Finiten Elemente für die vier Rohrtypen PVC DN 250, Steinzeug DN 250, PE DA (Außendurchmesser) 280 SDR 11 und PE DA 355 SDR 11 geführt.

Zu den Rohren liegen keine vollständigen Informationen vor. Es müssen daher Annahmen bezüglich Wanddicken und Einbau getroffen werden.

Die PVC Rohre mit Nennweite DN 250, entsprechend dem Innendurchmesser 250 mm werden mit einer Mindestwanddicke von 7,3 mm für Nenndruck PN 6 nach DIN 8062 angenommen.

Die Steinzeugrohre werden mit Nennweite DN 250 und einer Wanddicke von 34 mm angenommen (Quelle Steinzeughandbuch, Köln 1993).

Die PE Rohre werden mit Außendurchmesser 355 mm und Wanddicke 32,3 mm entsprechend SDR 11 und Außendurchmesser 280 mm und Wanddicke 25,4 mm entsprechend SDR 11 berechnet.

Die bemessungsmaßgebenden Einbauorte und Einwirkungen aus den Auflasten werden gemäß den Vorgaben in Unterlage 1.1.3 angenommen.

### 3. Einwirkungen

#### 3.1 Ständige Einwirkungen

Die ständigen Einwirkungen aus der vorhandenen Müllüberdeckung, den vorgesehenen Überdeckungen mit mineralischem Abfall und den Rekultivierungsschichten werden gemäß 1.1.3 angesetzt.

Aus den Unterlagen der Deponie wurden die folgenden Abfallwichten ermittelt:

Mittleren Wichte des gemischten Hausmülls  $\gamma_{\text{Hausmüll}} = 11,3 \text{ kN/m}^3$

Mittleren Wichte des mineralischen Abfalls  $\gamma_{\text{mineralisch}} = 15 \text{ kN/m}^3$

Mittleren Wichte der Rekultivierungsschichten  $\gamma_{\text{Reku}} = 20 \text{ kN/m}^3$

Die ständige Last wird 1,00-fach und für die nichtlinearen Stabilitätsnachweise 2,00-fach angesetzt. Nachweise mit 1,35-fachen Lasten werden nicht geführt, da sie für die Rohrrechnungen (übliche Grundlage DWA Arbeitsblatt (Unterlage 1.4) aktuell nicht implementiert sind. Aus den vorgesehenen Endhöhen ergeben sich für die Nachweise die folgenden Einwirkungen:

PE-Rohre DA 355 DK II Bereich: 560,34 kN/m<sup>2</sup>

PE-Rohre DA 355 DK I Bereich: 430,82 kN/m<sup>2</sup>

PE-Rohre DA 280 DK II Bereich: 584,86 kN/m<sup>2</sup>

PE-Rohre DA 280 DK I Bereich: 430,82 kN/m<sup>2</sup>

Stz.-Rohre DK I Bereich: 453,55 kN/m<sup>2</sup>

PVC-Rohre Gutenfurt I: 590,24 kN/m<sup>2</sup>

Diese Einwirkungen werden als zutreffend vorausgesetzt.

#### 3.2 Veränderliche Einwirkungen:

Befahren der Deponieoberfläche hat wegen der hohen Überdeckung keinen Einfluss auf die Berechnungsergebnisse.

### 3.3 Temperaturen und Medium:

Medieneinflüsse werden für alle Rohrtypen angesetzt. Die Dauertemperatur für Bereiche, in denen Hausmüll eingebaut wurde, wird mit 30° C angenommen.

## 4. Rohre und Baustoffe

Angaben zu Wanddicken der Steinzeug- und PVC-Rohre liegen nicht vor. Für die Rohre des Bestandes werden folgende Rohrgeometrien angenommen:

PVC DN 250 mit Wanddicke 7,3 mm

Steinzeugrohre DN 250 mit Wanddicke 34 mm und Scheiteldruckkraft 60 kN/m

Die Rohre sind perforiert. Dies wird durch eine Abminderung der mittragenden Breiten mit Faktor 0,90 – 0,85 für die Schlitzung der PE-Rohre - berücksichtigt.

Für die Altrohre PVC DN 250 wird als Rohrmaterial ein „üblicher“ PVC-U Werkstoff mit Langzeitkriechmodul 1750 N/mm<sup>2</sup> (Wert aus ATV A 127 1988) angenommen. Die zulässigen Spannungen werden gemäß Unterlage 1.4 angenommen. Kriechmodul und zulässige Spannungen werden für Medien- und Temperatureinflüsse nach DIN 4266 (Version Januar 1992) abgemindert.

Für die Steinzeugrohre errechnet sich aus der Scheiteldruckkraft von 60 kN/m eine Grenzspannung von 14,3 N/mm<sup>2</sup>.

Für die Altrohre PE DN 250 bzw. DA 355 und DA 280 wird als Rohrmaterial ein „üblicher“ PE-HD Werkstoff mit Langzeitkriechmodul 160 N/mm<sup>2</sup> angenommen. Die zulässigen Spannungen werden gemäß Unterlage 1.4 angenommen. Kriechmodul und zulässige Spannungen werden für Medien- und Temperatureinflüsse nach DIN 4266 abgemindert.

Dies wird als zutreffend vorausgesetzt.

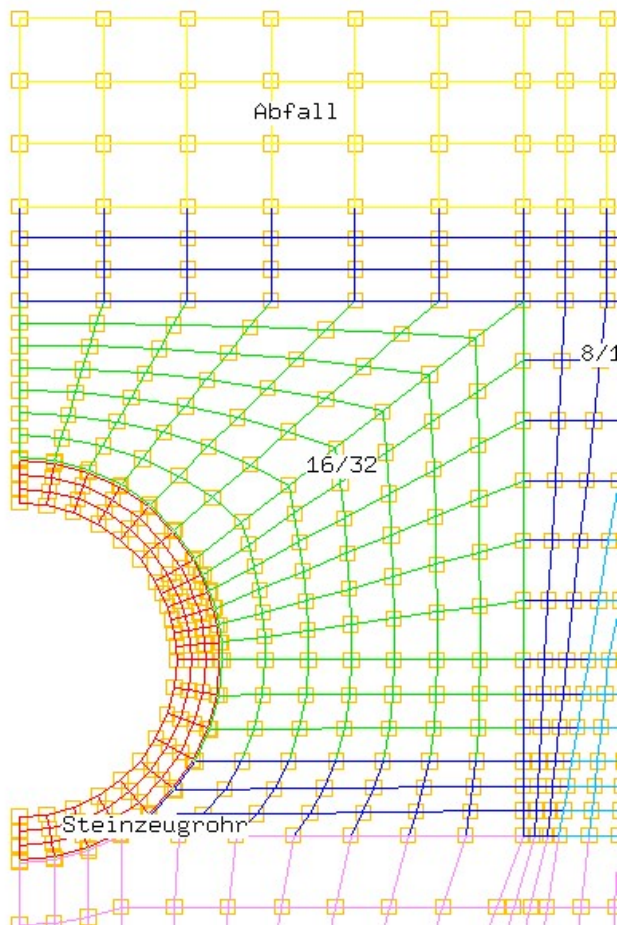


Bild 1 FEM Model Steinzeugrohre

## 5. Einbau

Es wird angenommen, dass die PVC- und Steinzeugrohre des Bestandes gemäß Bild 2 in Auflagern in Kies auf der Dichtung eingebaut wurden und mit mindestens 200 mm Kies überbaut sind.

Für die Bodenschichten werden die folgenden Elastizitätsmodule als Mindestwerte angesetzt:

	E N/mm <sup>2</sup>	$\nu$ -	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>
Kies 16/32	$\geq 40$	0,2	18
Kies 8/16	$\geq 30$	0,25	18
Auflagersplitt	$\geq 30$	0,25	18
Schutzschicht	$\geq 20$	0,3	20
Dichtung	$\geq 8$	0,4	22

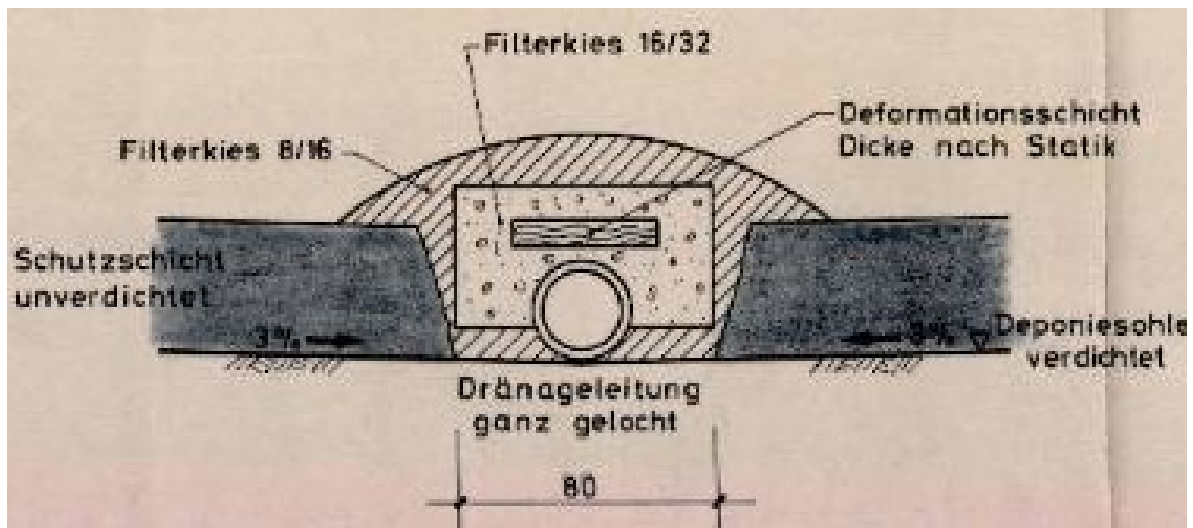


Bild 2 Einbau Steinzeug- und PVC-Rohre (aus 1.2)

Diese Werte sind Mindestwerte und werden für das Zutreffen der Berechnungsergebnisse vorausgesetzt. Sie gelten unter der maximalen Auflast.

Die Bodenkennwerte müssen im Zweifelsfall durch einen Baugrundspezialisten bestätigt werden. Eine vollflächige Einbettung aller Rohre wird vorausgesetzt.

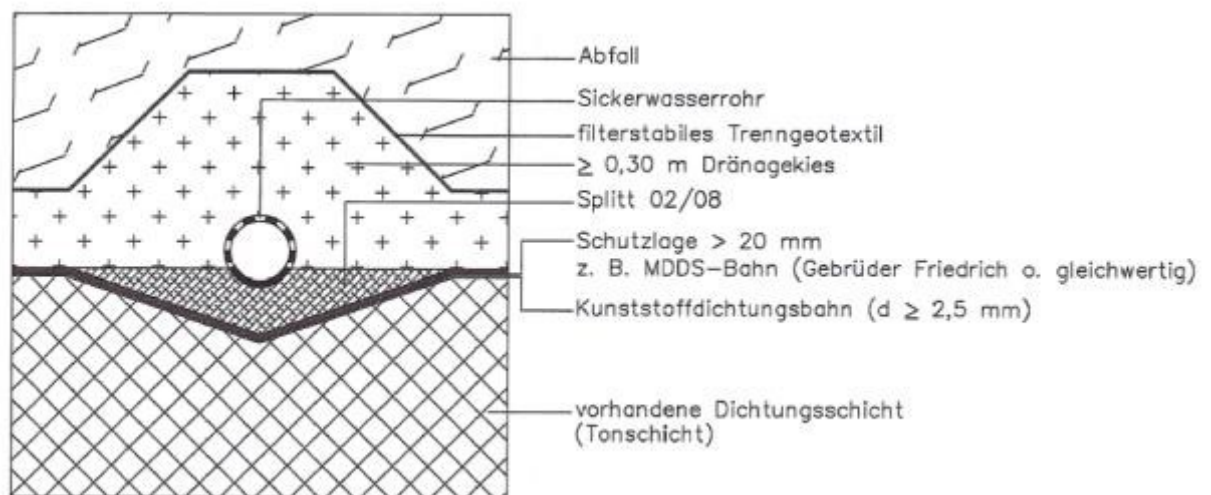


Bild 3 Einbau PE-Rohre (aus 1.2)

## 6. Berechnungen

### 6.1 FEM-Modellierung

Im mechanischen Modell erfolgt die Abbildung des Altrohres als Kreisring, der umgebende Boden wird durch Scheibenelemente diskretisiert.

Die Verbindung zwischen Rohr und Boden wird mit Hilfe von GAP/Friction-Elementen (reine Druckkraftübertragung) simuliert. Die Auflast wird durch Einzellasten auf den Knoten des oberen Modellrandes angesetzt.

Die verwendete Diskretisierung ist in Bild 1 beispielhaft für die Steinzeugrohre dargestellt, verschiedene Materialien sind farblich abgehoben. Die Modelle für PE- und PVC-Rohre sind im jeweiligen Teil des Anhangs beigefügt. Es erfolgen geometrisch nichtlineare Berechnungen, in denen die Belastung schrittweise gesteigert wird. Die Perforation der Rohre wird durch eine Abminderung der mittragenden Breite berücksichtigt. Vorhandene Risse werden nicht berücksichtigt.

### 6.2 Spannungen

Alle Werte in N/mm<sup>2</sup>

#### 6.2.1 PVC-Rohre

Die Spannungen werden unter der 1,00-fachen maximalen Auflast ermittelt:

	Horizontalspannungen	Vertikalspannungen
Druck	-23,1	-11,9
Zug	6,6	2,0

Die maximale Spannung unter 1,00-facher Last beträgt 23,1 N/mm<sup>2</sup> (Horizontalspannung).

Nachweis:  $\sigma_{\text{vorh.}} = 23,1 < \sigma_{\text{zul.}} = 0,9 * 0,85 * 50 = 38,2 \text{ N/mm}^2$

#### 6.2.2 Steinzeug-Rohre

Die Spannungen werden unter der 1,0-fachen maximalen Auflast ermittelt:

	Horizontalspannungen	Vertikalspannungen
Druck	-13,4	-17,1
Zug	12,6	10,0



Die maximale Spannung unter 1,0-facher Last beträgt 17,1 N/mm<sup>2</sup> - Vertikalspannung Druck.

Nachweis:  $\sigma_{\text{vorh.}} = 17,1 > \sigma_{\text{grenz}} = 14,3 \text{ N/mm}^2$

Die maximale Spannung beträgt 17,1 N/mm<sup>2</sup> und ist 19 % größer als die Grenzspannung.

### 6.2.3 PE-Rohre

Die Spannungen werden unter der 1,00-fachen maximalen Auflast ermittelt:

	Horizontalspannungen Vertikalspannungen	
DA 355		
Druck	-3,2	-3,9
Zug	0,54	0,22
DA 280		
Druck	-3,2	-3,8
Zug	0,56	0,21

Die maximale Spannung unter 1,0-facher Last beträgt 3,9 N/mm<sup>2</sup>.

Nachweis:  $\sigma_{\text{vorh.}} = 3,9 < \sigma_{\text{zul.}} = 14,0 * 0,85 * 0,9 / 1,5 = 7,1 \text{ N/mm}^2$

## 6.3 Verformungen

### 6.3.1 PVC-Rohre

Die Verformungen unter einfacher Last betragen 39,26 - 23,14 = 16,1 mm entsprechend 6,6 % des mittleren Durchmessers.

### 6.3.2 Steinzeugrohre

Der Nachweis ist für die Steinzeugrohre nicht maßgebend.

### 6.3.3 PE-Rohre

DA 355: Die Verformungen unter einfacher Last betragen 41,76 – 23,85 = 17,91 mm entsprechend 5,6 % des mittleren Durchmessers.

DA 280: Die Verformungen unter einfacher Last betragen  $50,6 - 36,3 = 14,3$  mm entsprechend 5,6 % des mittleren Durchmessers.

#### 6.4 Stabilitätsnachweis

##### 6.4.1 PVC Rohre

Der Stabilitätsnachweis wird nach 1.8 analytisch geführt:

Nach 1.8 ergibt sich für einen Verformungsmodul von  $E_s > 40$  N/mm<sup>2</sup> und Abminderung 0,9 für den gesamten Querschnitt  $P_k = 0,431$  N/mm<sup>2</sup> < vorh. = 0,59 N/mm<sup>2</sup>.

Es kann kein Stabilitätsnachweis für die PVC Rohre geführt werden.

Die Verformungen und Spannungen werden in den FEM Berechnungen bis zu einer maximalen rechnerischen Einwirkung aus Auflast 900 kN/m<sup>2</sup> berechnet. Die Verformungen betragen dann rechnerisch 15 % des Querschnittes. Die unter 2-facher Last zulässige Verformung von 12 % wird bei einer Auflast von ca. 850 kN/m<sup>2</sup> erreicht.

Im Anhang ist die Verformungsfigur bei Abbruch der Berechnungen beigefügt. Ein Stabilitätsversagen der dünnwandigen Rohre ist außer von der Rohrwand auch von der Bettung, die nicht exakt quantifiziert werden kann, abhängig. Stabilitätsversagen kann ohne Ankündigung durch langsam fortschreitende Verformungen auftreten.

##### 6.4.2 Steinzeug Rohre

Der Nachweis ist für die Steinzeugrohre nicht maßgebend.

##### 6.4.3 PE Rohre

Der Stabilitätsnachweis wird nach 1.8 analytisch geführt:

Nach 1.8 ergibt sich für die Rohre DA 355 für einen Verformungsmodul von  $E_s > 40$  N/mm<sup>2</sup> und Abminderung 0,85 für den gesamten Querschnitt  $P_k = 0,89$  N/mm<sup>2</sup> > vorh. = 0,56 N/mm<sup>2</sup>.

Sicherheitsfaktor:  $\gamma = 0,89 / 0,56 = 1,6$  < erf. = 2,0

Nach 1.8 ergibt sich für die Rohre DA 280 für einen Verformungsmodul von  $E_s > 40 \text{ N/mm}^2$  und Abminderung 0,85 für den gesamten Querschnitt  $P_k = 0,89 \text{ N/mm}^2 > \text{vorh.} = 0,58 \text{ N/mm}^2$ .

Sicherheitsfaktor:  $\gamma = 0,89 / 0,58 = 1,5 < \text{erf.} = 2,0$

Im DK I Bereich wird die Anforderung eingehalten:  $0,89 / 0,43 = 2,1 > \text{erf.} = 2,0$  und zudem liegt der Nachweis durch die angesetzten Abminderungen für Medium und Temperatur für eine DK I Deponie auf der sicheren Seite.

Die Verformungen und Spannungen werden in den FEM Berechnungen bis zur 2-fachen Auflast berechnet. Die Verformungen betragen dann für beide Rohrtypen rechnerisch 13 % des Querschnittes. Die unter 2-facher Last zulässige Verformung von 12 % wird leicht überschritten. Die zulässigen Spannungen unter 2-facher Last sind die Grenzspannungen, diese werden eingehalten.

## 7. Bemerkungen

- 7.1 Im Bauabschnitt Gutenfurt I, in dem PVC- und Steinzeugrohre eingebaut sind, sind Schäden an den Rohren aufgetreten. Dokumentiert sind unter anderem zahlreiche Unterbögen mit Wassereinstau. Verformungen des Untergrundes werden in unseren 2-dimensional geführten Berechnungen nicht erfasst.
- 7.2 Unsere Berechnungen wurden unter Ansatz „üblicherweise“ zu erwartender Boden- und Materialkennwerte geführt.
- 7.3 Für die PVC- und Steinzeugrohre mussten Annahmen zur Wanddicke getroffen werden. Das Zutreffen bzw. Nicht-Zutreffen dieser Annahmen kann deutliche Auswirkungen auf die Ergebnisse haben.

## 8. Ergebnis:

Die durchgeführten Berechnungen ergeben, dass die vorhandenen Rohre nur eingeschränkt für die neu vorgesehenen Überdeckungshöhen geeignet sind:


Die Spannungen der PVC-Rohre halten die zulässigen Werte ein. Die Verformungen liegen mit 6,6 % um 10 % über dem ‚üblicherweise‘ angesetzten Grenzwert von 6 % des Durchmessers, halten aber die für nichtlinear geführte Berechnungen zulässige Verformung von 9,0 % ein. Unsere Berechnungen wurden nichtlinear geführt. Im Stabilitätsnachweis werden die erforderlichen Sicherheitsbeiwerte von 2,00 nicht eingehalten.

Die Spannungen der Steinzeugrohre überschreiten die zulässigen Werte um 19 %.

Die Spannungen der PE-Rohre überschreiten die zulässigen Werte nicht. Die Verformungen liegen unter dem zulässigen Wert von 6 %. Im Stabilitätsnachweis werden die erforderlichen Sicherheitsbeiwerte von 2,00 im DK II Bereich nicht eingehalten, die Sicherheitsbeiwerte sind aber größer 1,00 (rechnerisches Versagen).

Die Berechnungsergebnisse sind bezüglich aller Bodenkennwerte und der Wanddicken der PVC- und Steinzeugrohre durch die Erfordernisse wegen fehlender Daten Annahmen zu treffen mit Unsicherheiten behaftet. Sie entsprechen im Wesentlichen den Ergebnissen der Kamerabefahrungen, so dass größenordnungsmäßig ein Zutreffen angenommen werden kann. Demgemäß bestehen Einbaubereiche in denen die Rohrbettung nicht vollständig gleichmäßig gut ausgeführt wurde. Durch die zusätzliche Auflast aus der vorgesehenen Überschüttung muss mit weiteren Schäden gerechnet werden. Dies ist für das Gesamtentwässerungskonzept und gegebenenfalls Sanierungsplanungen zu berücksichtigen.

TÜV Rheinland LGA Bautechnik GmbH  
Statik



Dieter Straußberger  
Dipl.- Ing. (FH)  
Geschäftsfeldleiter

Bearbeiter:



Armin Stegner  
Dipl.-Ing.

Verteiler:

LRA Ravensburg  
AUC

Bericht

1-fach+PDF  
PDF

Unterlagen

Anhang: Ergebnisausdrucke

Statik

Anhang Ergebnisausdrucke  
Anhang A 1 PVC Rohr

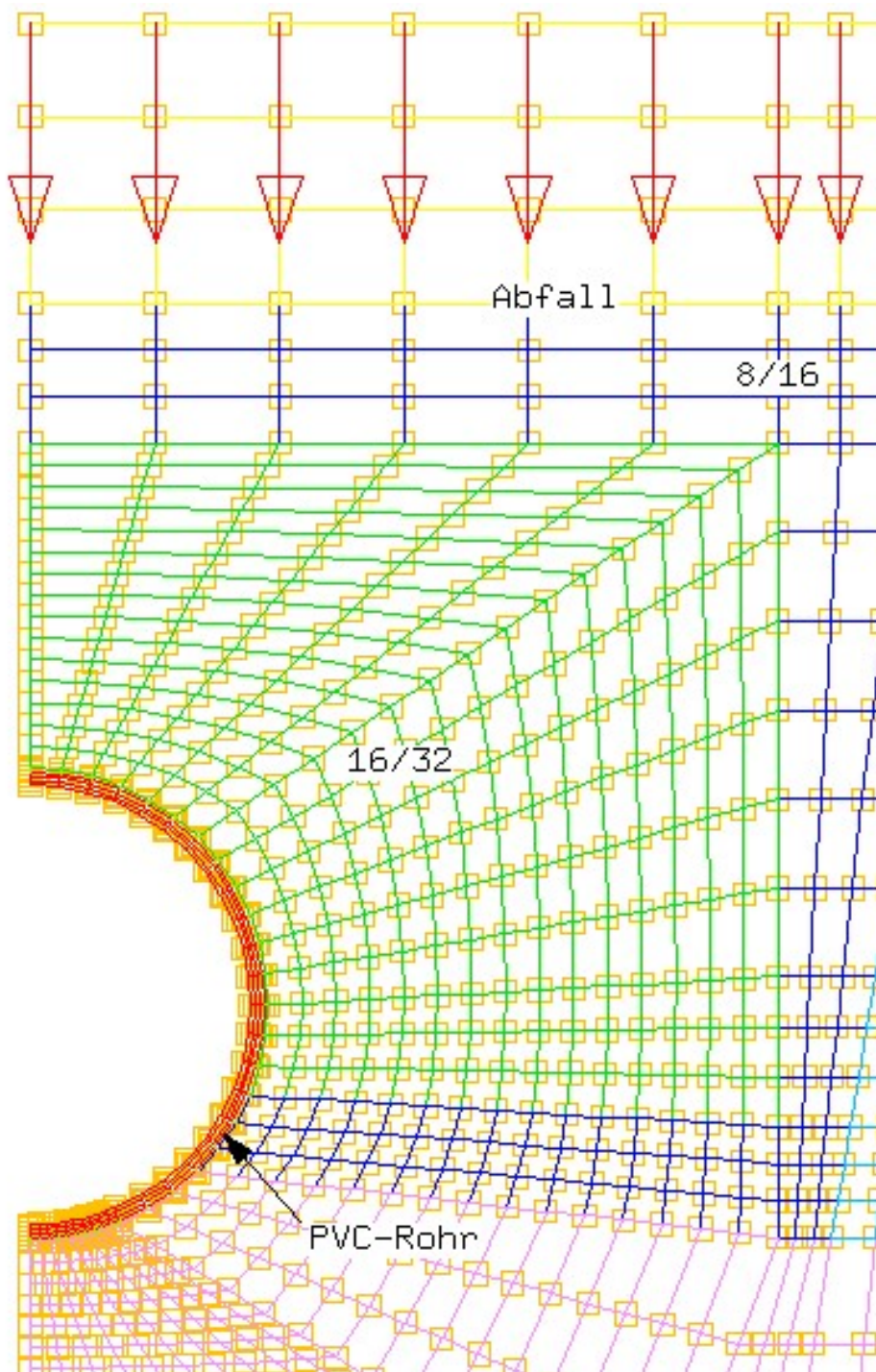


Bild A1.1 Modell PVC-Rohr

DISPLAY III - GEOMETRY MODELING SYSTEM ( 18.0.0 ) PRE/POST MODULE

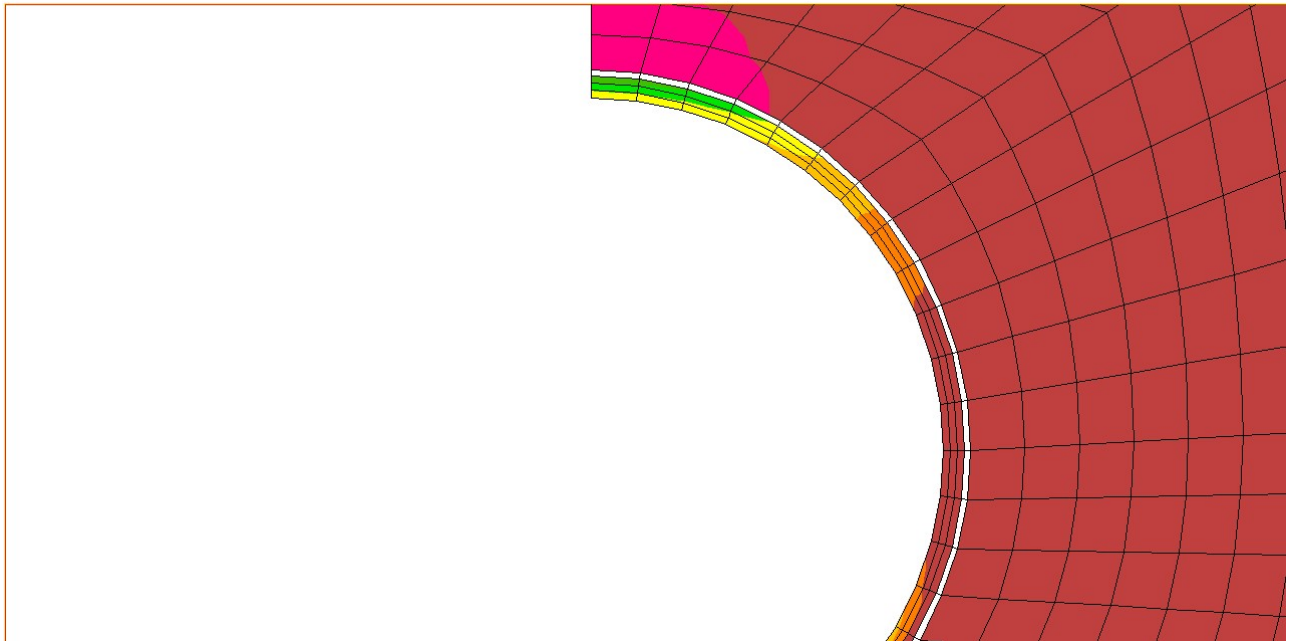


Bild A1.2      Horizontalspannung unter 1,00-facher Last

DISPLAY III - GEOMETRY MODELING SYSTEM ( 18.0.0 ) PRE/POST MODULE

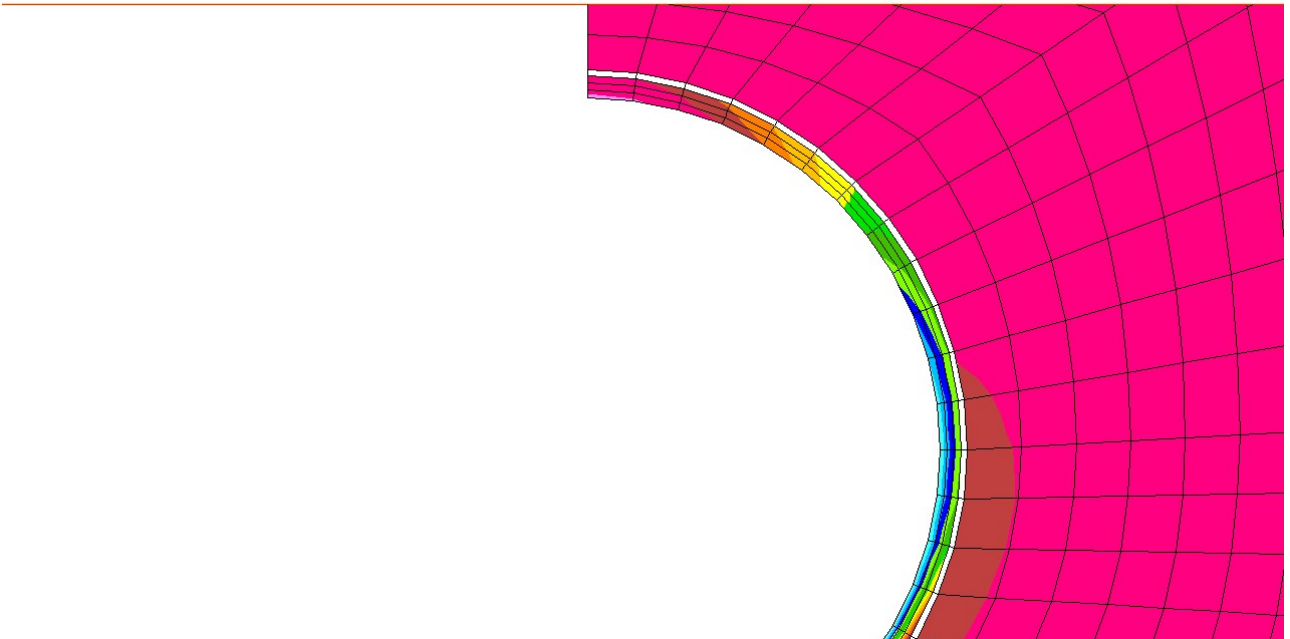


Bild A1.3      Vertikalspannung unter 1,00-facher Last



DISPLAY III - GEOMETRY MODELING SYSTEM ( 18.0.0 ) PRE/POST MODULE

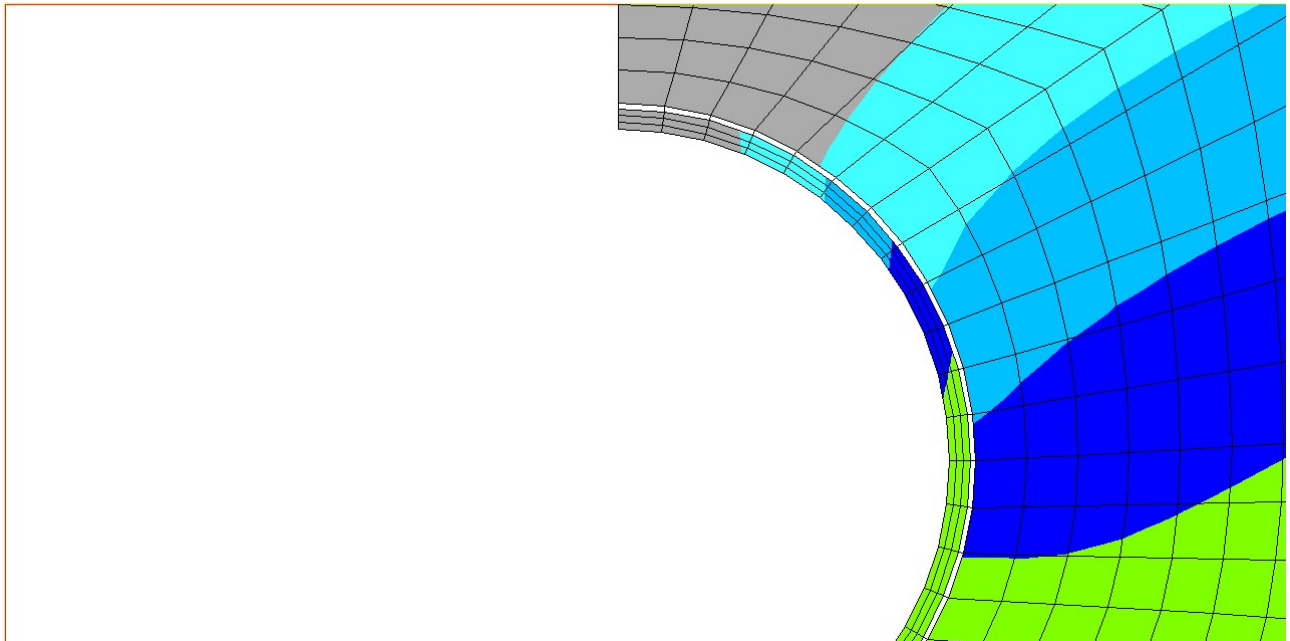


Bild A1.5 Verformung unter 1,00-facher Last

DISPLAY III - GEOMETRY MODELING SYSTEM ( 18.0.0 ) PRE/POST MODULE

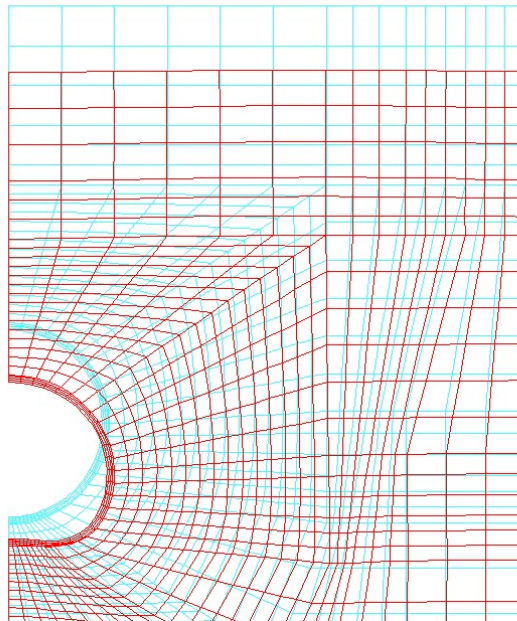


Bild A1.6 Verformungsfigur der PVC Rohre bei Abbruch der Berechnung – rechnerisch bei Faktor 0,60 entsprechend 900 kN/m<sup>2</sup>

DISPLAY III - GEOMETRY MODELING SYSTEM ( 18.0.0 ) PRE/POST MODULE

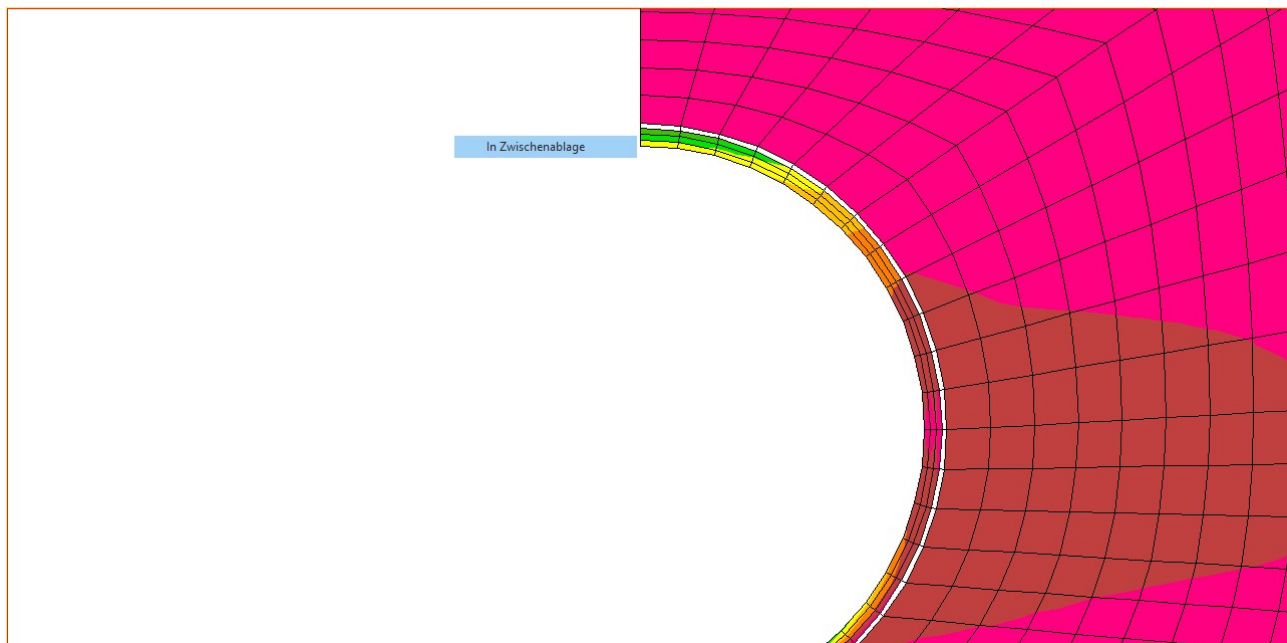


Bild A1.7 Maximale Spannungen unter aktueller Last



Anhang A 2 Steinzeugrohre

DISPLAY III - GEOMETRY MODELING SYSTEM ( 18.0.0 ) PRE/POST MODULE

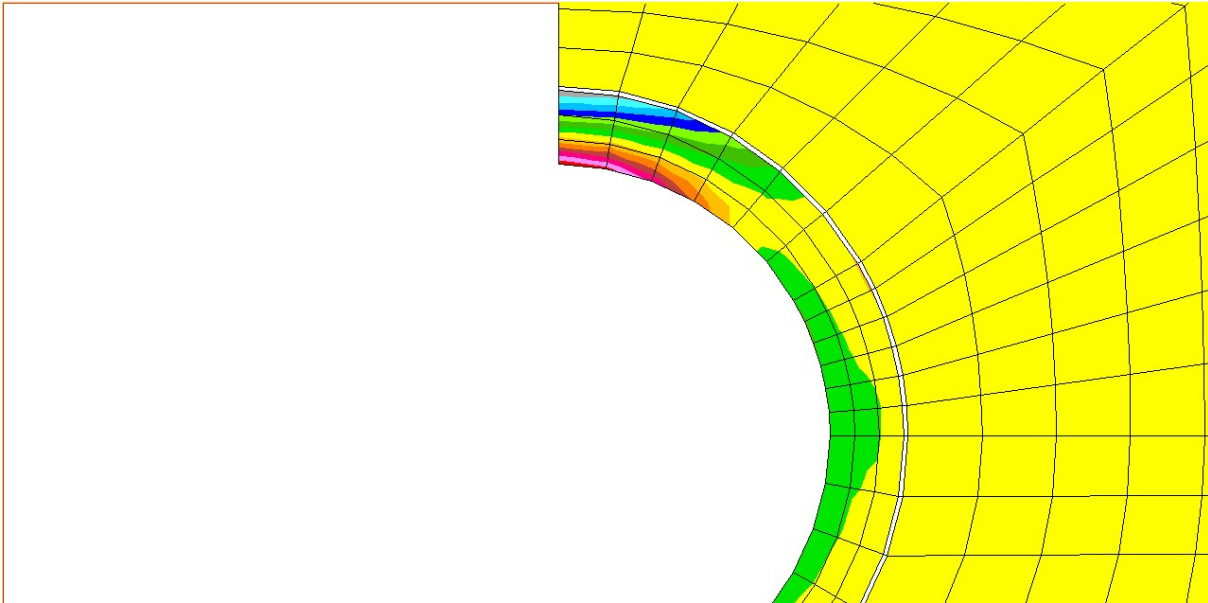


Bild A2.1 Horizontalspannung unter 1,0-facher Last

DISPLAY III - GEOMETRY MODELING SYSTEM ( 18.0.0 ) PRE/POST MODULE

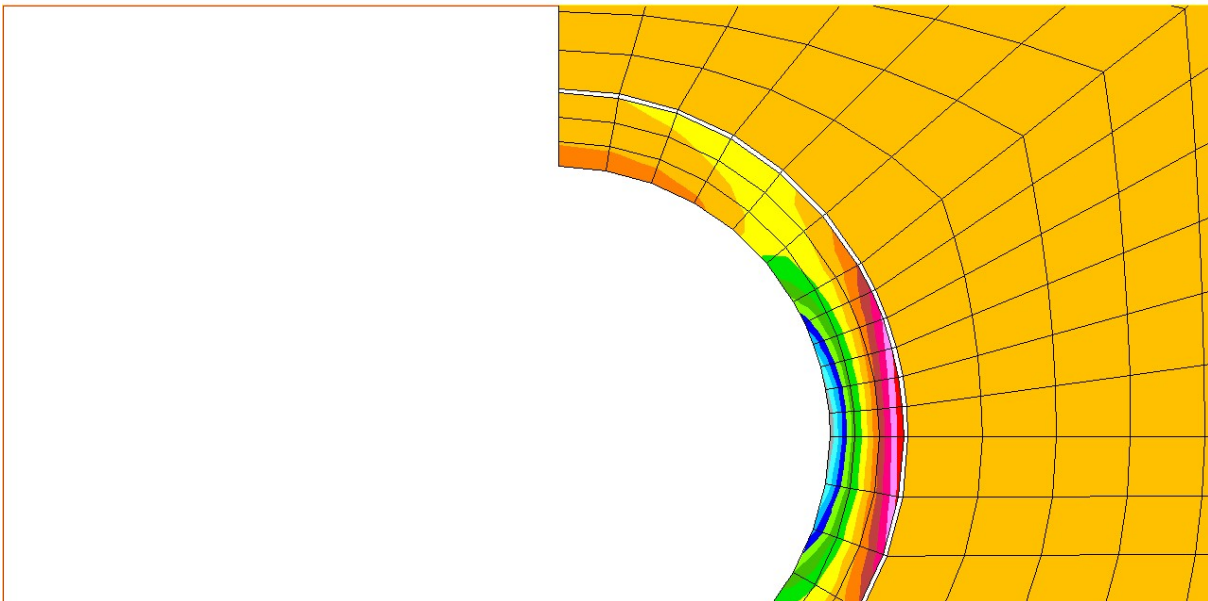


Bild A2.2 Vertikalspannung unter 1,00-facher Last

Anhang A 3 PE Rohr DA 355

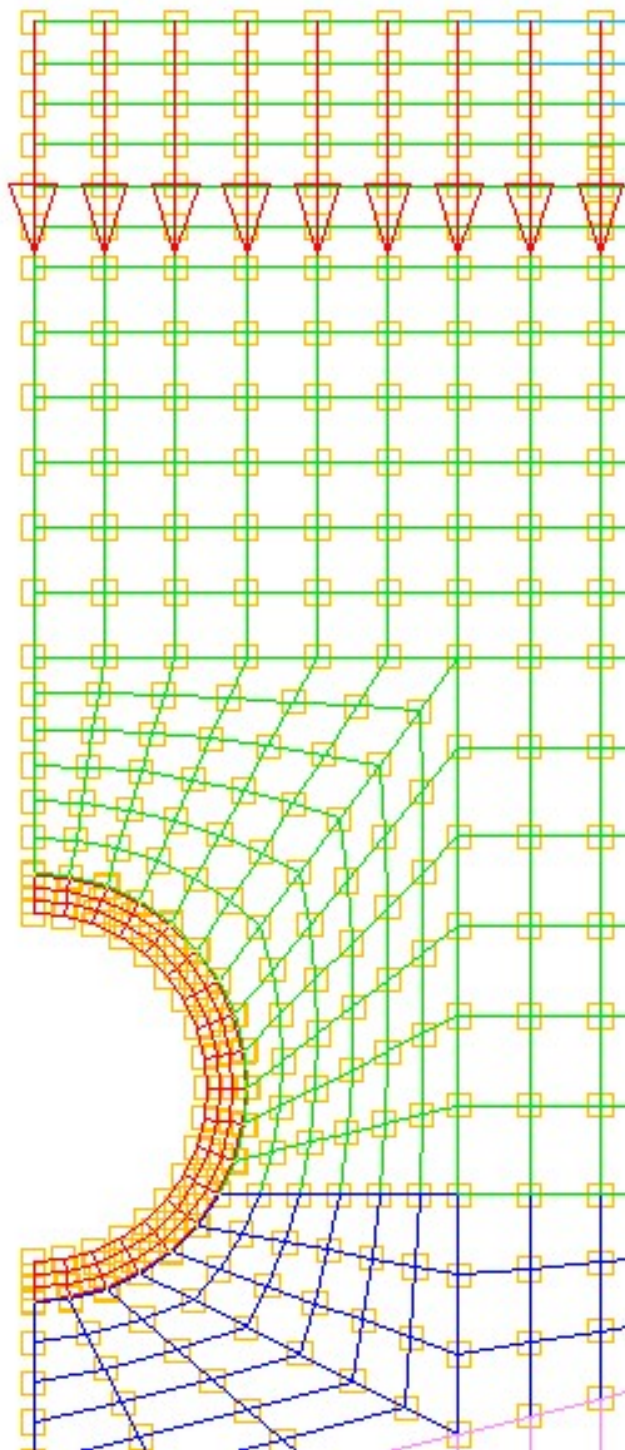


Bild A3.1 Modell PE-Rohre DA 355

DISPLAY III - GEOMETRY MODELING SYSTEM ( 18.0.0 ) PRE/POST MODULE

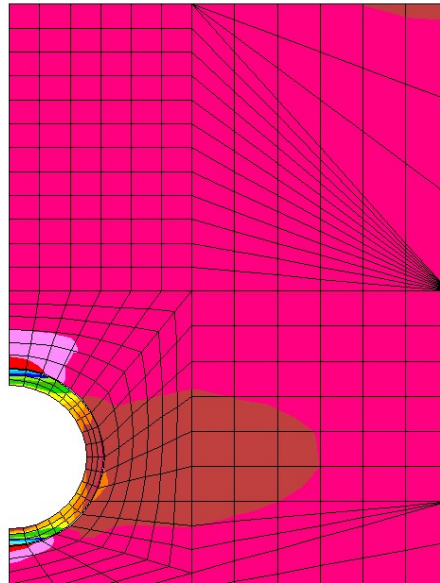


Bild A3.2 Horizontalspannung unter 1,00-facher Last

DISPLAY III - GEOMETRY MODELING SYSTEM ( 18.0.0 ) PRE/POST MODULE

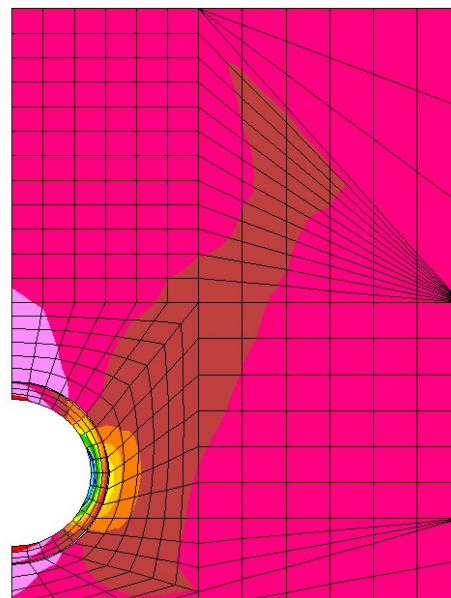


Bild A3.3 Vertikalspannung unter 1,00-facher Last

DISPLAY III - GEOMETRY MODELING SYSTEM ( 18.0.0 ) PRE/POST MODULE

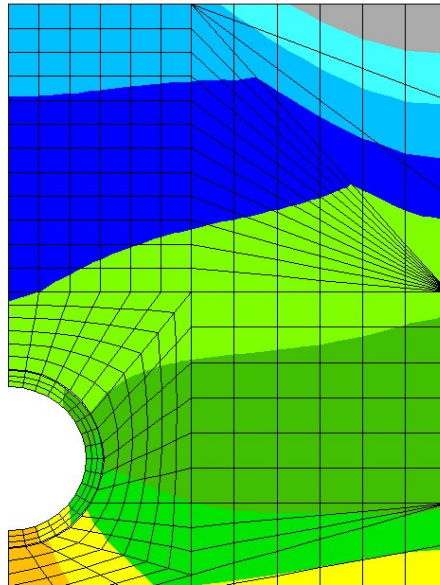


Bild A3.4 Verformung unter 1,00-facher Last

DISPLAY III - GEOMETRY MODELING SYSTEM ( 18.0.0 ) PRE/POST MODULE

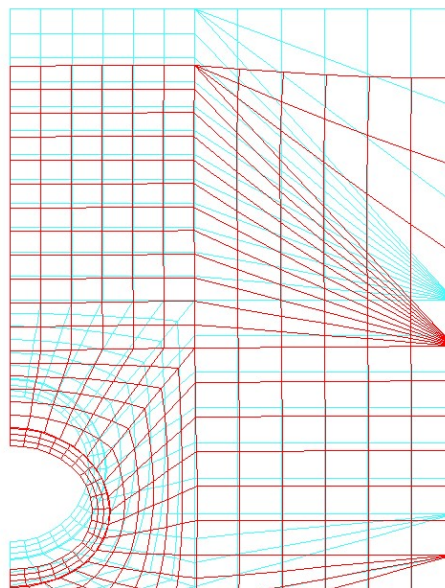


Bild A3.5 Verformungsfigur unter 2,00-facher Last

Anhang A 4 PE Rohr DA 280

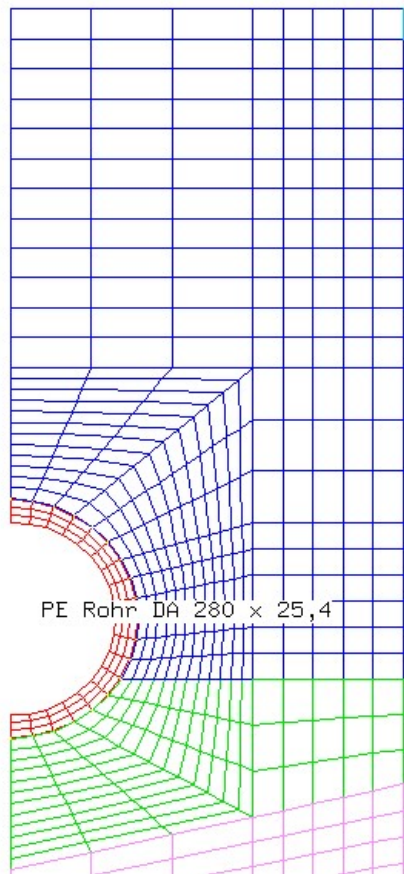


Bild A4.1 Modell PE-Rohre DA 280

DISPLAY III - GEOMETRY MODELING SYSTEM ( 18.0.0 ) PRE/POST MODULE

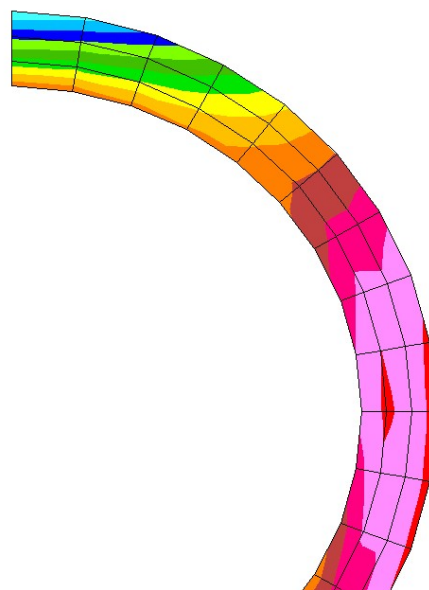


Bild A4.2 Horizontalspannung unter 1,00-facher Last



DISPLAY III - GEOMETRY MODELING SYSTEM ( 18.0.0 ) PRE/POST MODULE

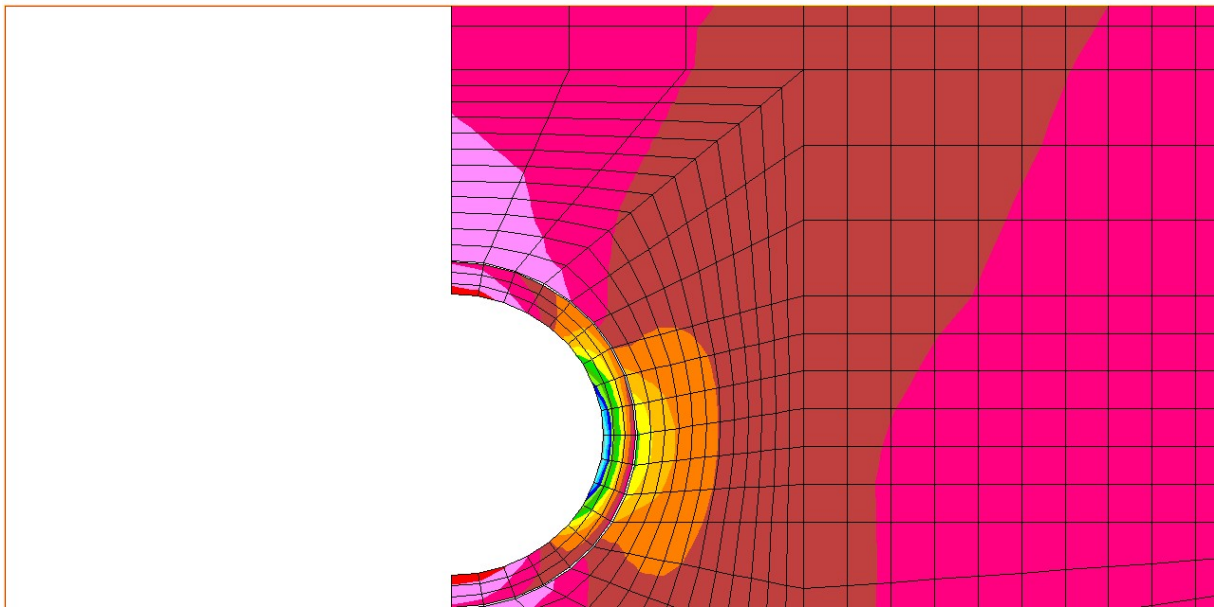


Bild A4.3 Vertikalspannung unter 1,00-facher Last

DISPLAY III - GEOMETRY MODELING SYSTEM ( 18.0.0 ) PRE/POST MODULE

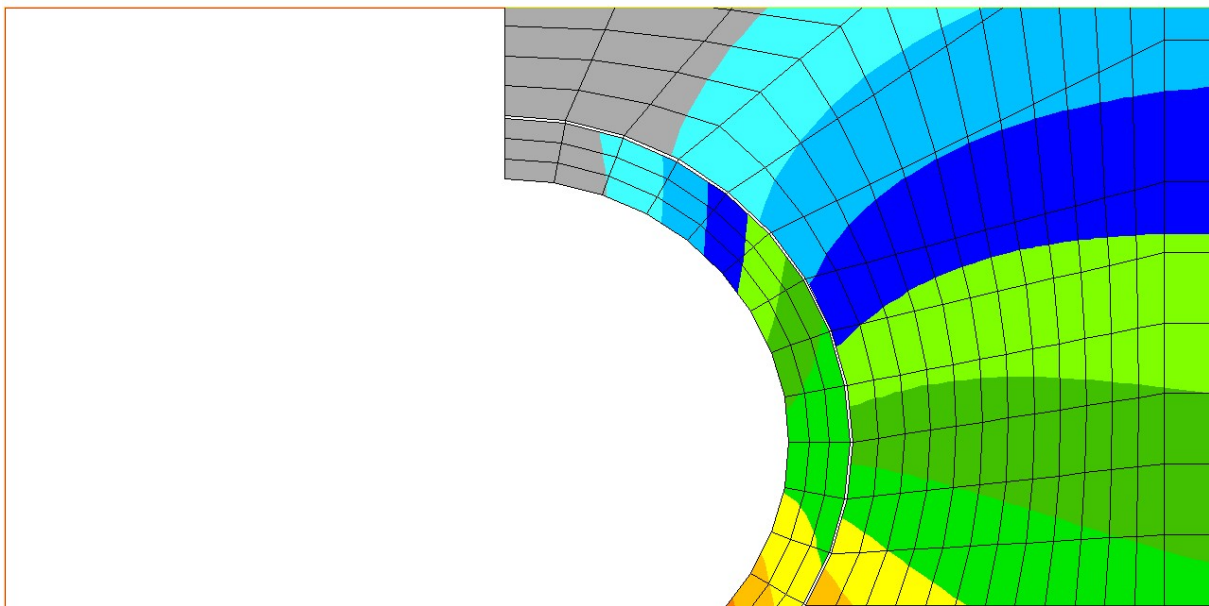


Bild A4.4 Verformung unter 1,00-facher Last

DISPLAY III - GEOMETRY MODELING SYSTEM ( 18.0.0 ) PRE/POST MODULE

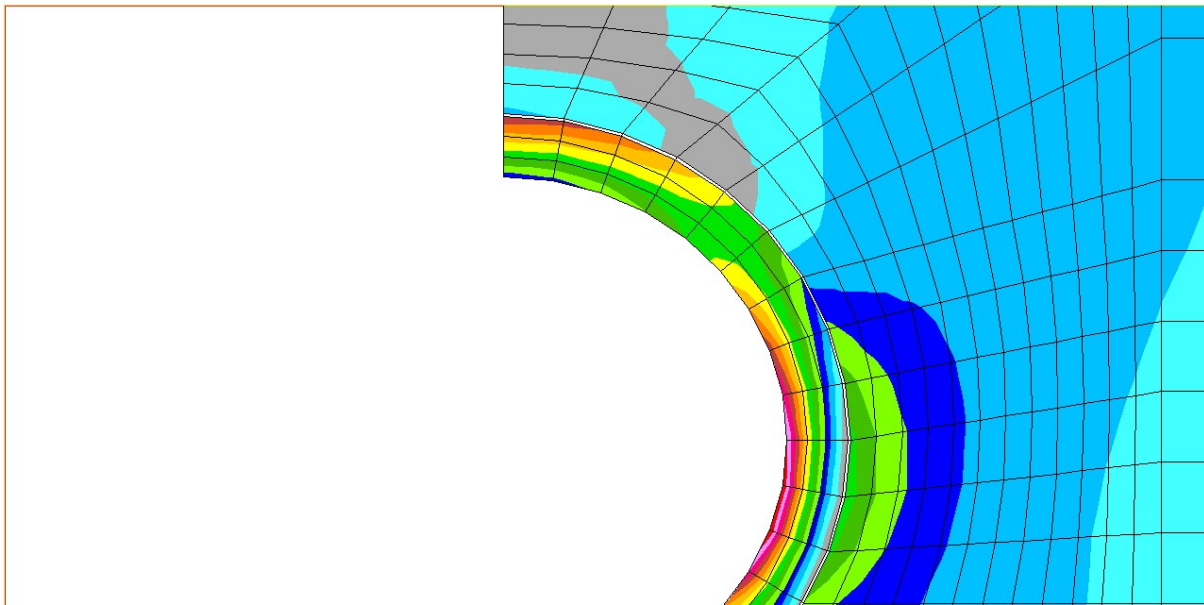


Bild A4.5

Vergleichsspannung unter 2,00-facher Last

## BERICHT

Nr. 94646278/01

Datum: 11.03.2020

**Auftraggeber:** Landratsamt Ravensburg  
Friedensstraße 6  
88212 Ravensburg

**Auftrag vom:** 30.08.2018

**Inhalt des Auftrages:** Statische Berechnung von Sickerwasserrohren

**Bauort:** Deponie Gutenfurt

**Bauvorhaben:** Fortführung der Deponie

**Planung:** AU Consult GmbH  
Provinostraße 52 / Geb. A 15  
86153 Augsburg

**Bearbeiter:** Dipl.-Ing. Armin Stegner

**Telefon Nr.:** +49 911 81771-430

**Telefax Nr.:** +49 911 81771-439

**E-Mail:** [armin.stegner@lga.de](mailto:armin.stegner@lga.de)

Dieser Bericht umfasst 23 Textseiten und 1 Anlage.

Die Prüfergebnisse beziehen sich ausschließlich auf das/die im Prüfungsbericht genannte(n) Probenmaterial/ Prüfstück.

Dieser Prüfungsbericht darf nur im vollen Wortlaut veröffentlicht werden.  
Jede Veröffentlichung in Kürzung oder Auszug bedarf der vorherigen Genehmigung durch die LGA Bautechnik GmbH.

Für die Auftragsabwicklung haben wir wesentliche Daten und Ihre Anschrift gespeichert.  
Der Datenschutz ist gewährleistet.

LGA Bautechnik GmbH  
Statik  
Tillystraße 2  
90431 Nürnberg

Tel +49 911 81771 430  
Fax +49 911 81771 439  
Mail [Armin.Stegner@lga.de](mailto:Armin.Stegner@lga.de)

Geschäftsführung: Hans-Peter  
Trinkl, Thomas Weierganz  
AG Nürnberg HRB 20586  
USt-IdNr. DE813835574

Ein Unternehmen der  
LGA Landesgewerbeanstalt  
Bayern Körperschaft des  
öffentlichen Rechts

Web [www.lga.de](http://www.lga.de)



## **1. Unterlagen**

### **1.1 Pläne**

- 1.1.1 Deponieschnitte 1-1, 3-3, 5-5, 7-7, C-C“ und „Zwischenstand Planung“, AU Consult
- 1.1.2 Plan „Darstellung der Zustandsklassen“, IB ICP
- 1.1.3 Lageplan „Skizze Punkte Rohrstatik“ mit dazugehöriger Tabelle „Bemessungsangaben zur Rohrstatik Gutenfurt,“ AU Consult zu den Überdeckungshöhen und Einwirkungen auf die einzelnen Rohrtypen vom 17.02.2020
- 1.2 Bericht Sickerwassererfassungssystem Deponie Gutenfurt, AU Consult
- 1.3 Zustandsdokumentation des Entwässerungssystems, IB ICP vom November 2016
- 1.4 ATV A127: Richtlinie für die statische Berechnung von Entwässerungskanälen und -leitungen; 3. Auflage 2000
- 1.5 ATV-M 127 Teil 1: Richtlinie für die statische Berechnung von Entwässerungsleitungen für Sickerwässer aus Deponien März 1996
- 1.6 Vorläufige Bemessungsgrundsätze für Bauteile in Deponien, Deutsches Institut für Bautechnik, Berlin, November 1995
- 1.7 SKZ / TÜV - LGA Güterichtlinie Rohre, Rohrleitungsteile, Schächte und Bauteile in Deponien vom September 2013
- 1.8 G. Sonntag: Die Stabilität dünnwandiger Rohre im kohäsionslosen Kontinuum, Felsmechanik und Ingenieurgeologie Vol. 4/3, 1966, Springer Verlag
- 1.9 DIN 8062, Rohre aus weichmacherfreiem Polyvinylchlorid, Maße, Version 11.1988  
Hinweis: Das gewählte Maß für die Wanddicke weicht von der aktuellen Norm ab.
- 1.10 BÜV Empfehlung Tragende Kunststoffbauteile im Bauwesen, 08/2010

## 2. Beschreibung / Inhalt

### 2.1 Baubeschreibung

Auf der Deponie Gutenfurt sind als Sickerwasserleitungen verschiedene Rohrtypen eingebaut. Im Deponiebereich Gutenfurt I sind geschlitzte PVC-Rohre der Nennweiten DN (Nennweite entsprechend Innendurchmesser) 200 mm und DN 250 mm sowie Saugleitungen aus Steinzeug der Nennweite DN 100 eingebaut. Die eingebauten PVC-Rohre weisen bereichsweise Verformungen auf. Im Deponiebereich Gutenfurt II sind gelochte Steinzeugrohre der Nennweite DN 250 mm und geschlitzte PE-Rohre der Nennweite DN 250 mm eingebaut. Die eingebauten Rohre weisen bereichsweise Verformungen und Risse auf.

### 2.2 Inhalt

Es werden Standsicherheitsnachweise mittels der Methode der Finiten Elemente für die vier Rohrtypen PVC DN 250, Steinzeug DN 250, PE DA (Außendurchmesser) 280 SDR 11 und PE DA 355 SDR 11 geführt.

Zu den Rohren liegen keine vollständigen Informationen vor. Es müssen daher Annahmen bezüglich Wanddicken und Einbau getroffen werden.

Die PVC Rohre mit Nennweite DN 250, entsprechend dem Innendurchmesser 250 mm werden mit einer Mindestwanddicke von 7,3 mm für Nenndruck PN 6 nach DIN 8062 angenommen.

Die Steinzeugrohre werden mit Nennweite DN 250 und einer Wanddicke von 34 mm angenommen (Quelle Steinzeughandbuch, Köln 1993).

Die PE Rohre werden mit Außendurchmesser 355 mm und Wanddicke 32,3 mm entsprechend SDR 11 und Außendurchmesser 280 mm und Wanddicke 25,4 mm entsprechend SDR 11 berechnet.

Die bemessungsmaßgebenden Einbauorte und Einwirkungen aus den Auflasten werden gemäß den Vorgaben in Unterlage 1.1.3 angenommen.

### 3. Einwirkungen

#### 3.1 Ständige Einwirkungen

Die ständigen Einwirkungen aus der vorhandenen Müllüberdeckung, den vorgesehenen Überdeckungen mit mineralischem Abfall und den Rekultivierungsschichten werden gemäß 1.1.3 angesetzt.

Aus den Unterlagen der Deponie wurden die folgenden Abfallwichten ermittelt:

Mittleren Wichte des gemischten Hausmülls  $\gamma_{\text{Hausmüll}} = 11,3 \text{ kN/m}^3$

Mittleren Wichte des mineralischen Abfalls  $\gamma_{\text{mineralisch}} = 15 \text{ kN/m}^3$

Mittleren Wichte der Rekultivierungsschichten  $\gamma_{\text{Reku}} = 20 \text{ kN/m}^3$

Die ständige Last wird 1,00-fach und für die nichtlinearen Stabilitätsnachweise 2,00-fach angesetzt. Nachweise mit 1,35-fachen Lasten werden nicht geführt, da sie für die Rohrrechnungen (übliche Grundlage DWA Arbeitsblatt (Unterlage 1.4) aktuell nicht implementiert sind. Aus den vorgesehenen Endhöhen ergeben sich für die Nachweise die folgenden Einwirkungen:

PE-Rohre DA 355 DK II Bereich: 560,34 kN/m<sup>2</sup>

PE-Rohre DA 355 DK I Bereich: 430,82 kN/m<sup>2</sup>

PE-Rohre DA 280 DK II Bereich: 584,86 kN/m<sup>2</sup>

PE-Rohre DA 280 DK I Bereich: 430,82 kN/m<sup>2</sup>

Stz.-Rohre DK I Bereich: 453,55 kN/m<sup>2</sup>

PVC-Rohre Gutenfurt I: 590,24 kN/m<sup>2</sup>

Diese Einwirkungen werden als zutreffend vorausgesetzt.

#### 3.2 Veränderliche Einwirkungen:

Befahren der Deponieoberfläche hat wegen der hohen Überdeckung keinen Einfluss auf die Berechnungsergebnisse.

### 3.3 Temperaturen und Medium:

Medieneinflüsse werden für alle Rohrtypen angesetzt. Die Dauertemperatur für Bereiche, in denen Hausmüll eingebaut wurde, wird mit 30° C angenommen.

## 4. Rohre und Baustoffe

Angaben zu Wanddicken der Steinzeug- und PVC-Rohre liegen nicht vor. Für die Rohre des Bestandes werden folgende Rohrgeometrien angenommen:

PVC DN 250 mit Wanddicke 7,3 mm

Steinzeugrohre DN 250 mit Wanddicke 34 mm und Scheiteldruckkraft 60 kN/m

Die Rohre sind perforiert. Dies wird durch eine Abminderung der mittragenden Breiten mit Faktor 0,90 – 0,85 für die Schlitzung der PE-Rohre - berücksichtigt.

Für die Altrohre PVC DN 250 wird als Rohrmaterial ein „üblicher“ PVC-U Werkstoff mit Langzeitkriechmodul 1750 N/mm<sup>2</sup> (Wert aus ATV A 127 1988) angenommen. Die zulässigen Spannungen werden gemäß Unterlage 1.4 angenommen. Kriechmodul und zulässige Spannungen werden für Medien- und Temperatureinflüsse nach DIN 4266 (Version Januar 1992) abgemindert.

Für die Steinzeugrohre errechnet sich aus der Scheiteldruckkraft von 60 kN/m eine Grenzspannung von 14,3 N/mm<sup>2</sup>.

Für die Altrohre PE DN 250 bzw. DA 355 und DA 280 wird als Rohrmaterial ein „üblicher“ PE-HD Werkstoff mit Langzeitkriechmodul 160 N/mm<sup>2</sup> angenommen. Die zulässigen Spannungen werden gemäß Unterlage 1.4 angenommen. Kriechmodul und zulässige Spannungen werden für Medien- und Temperatureinflüsse nach DIN 4266 abgemindert.

Dies wird als zutreffend vorausgesetzt.

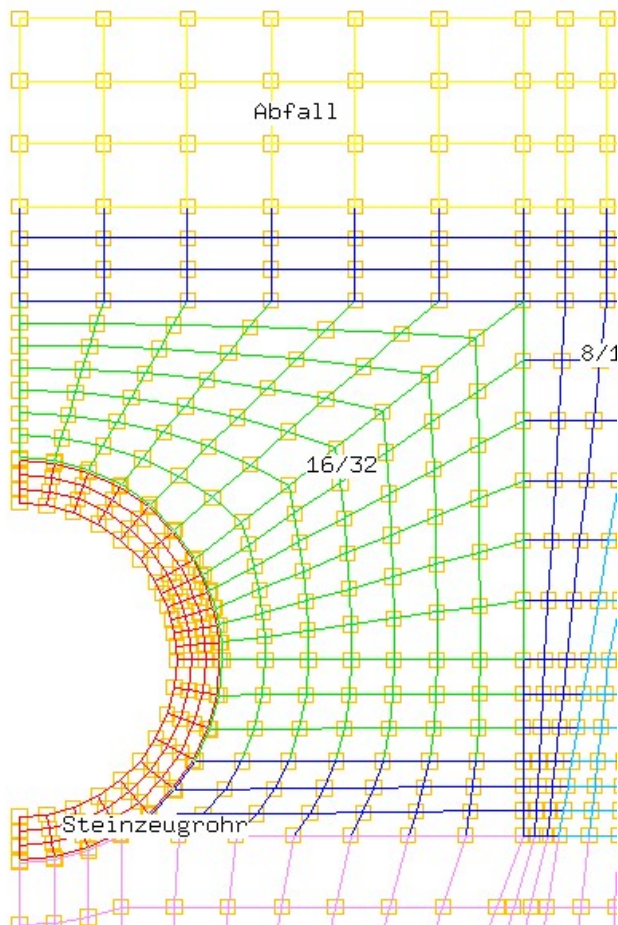


Bild 1 FEM Model Steinzeugrohr

## 5. Einbau

Es wird angenommen, dass die PVC- und Steinzeugrohre des Bestandes gemäß Bild 2 in Auflagern in Kies auf der Dichtung eingebaut wurden und mit mindestens 200 mm Kies überbaut sind.

Für die Bodenschichten werden die folgenden Elastizitätsmodule als Mindestwerte angesetzt:

	E N/mm <sup>2</sup>	$\nu$ -	$\gamma$ kN/m <sup>3</sup>
Kies 16/32	$\geq 40$	0,2	18
Kies 8/16	$\geq 30$	0,25	18
Auflagersplitt	$\geq 30$	0,25	18
Schutzschicht	$\geq 20$	0,3	20
Dichtung	$\geq 8$	0,4	22

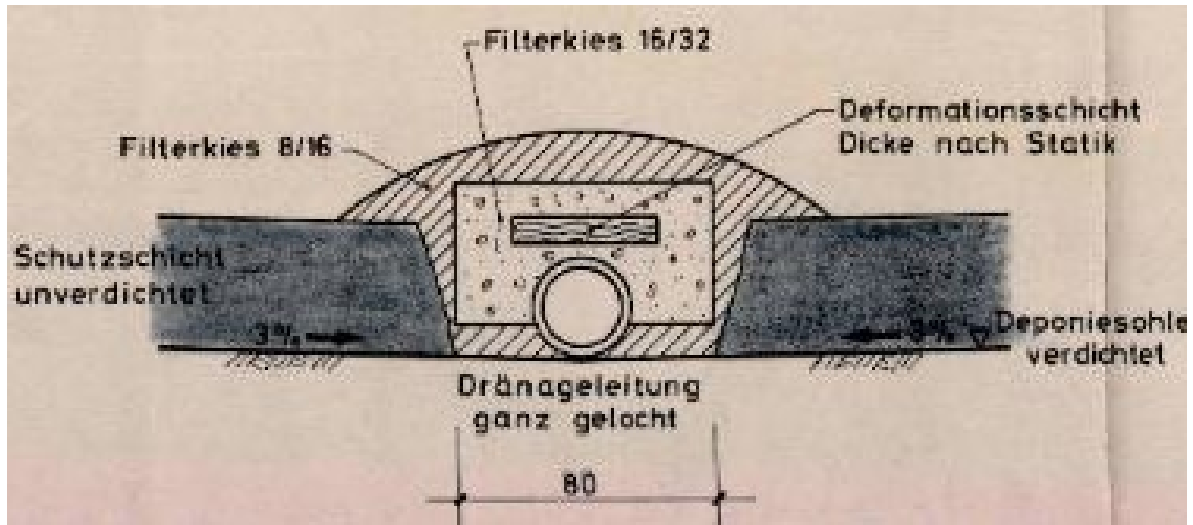


Bild 2 Einbau Steinzeug- und PVC-Rohre (aus 1.2)

Diese Werte sind Mindestwerte und werden für das Zutreffen der Berechnungsergebnisse vorausgesetzt. Sie gelten unter der maximalen Auflast.

Die Bodenkennwerte müssen im Zweifelsfall durch einen Baugrundspezialisten bestätigt werden. Eine vollflächige Einbettung aller Rohre wird vorausgesetzt.

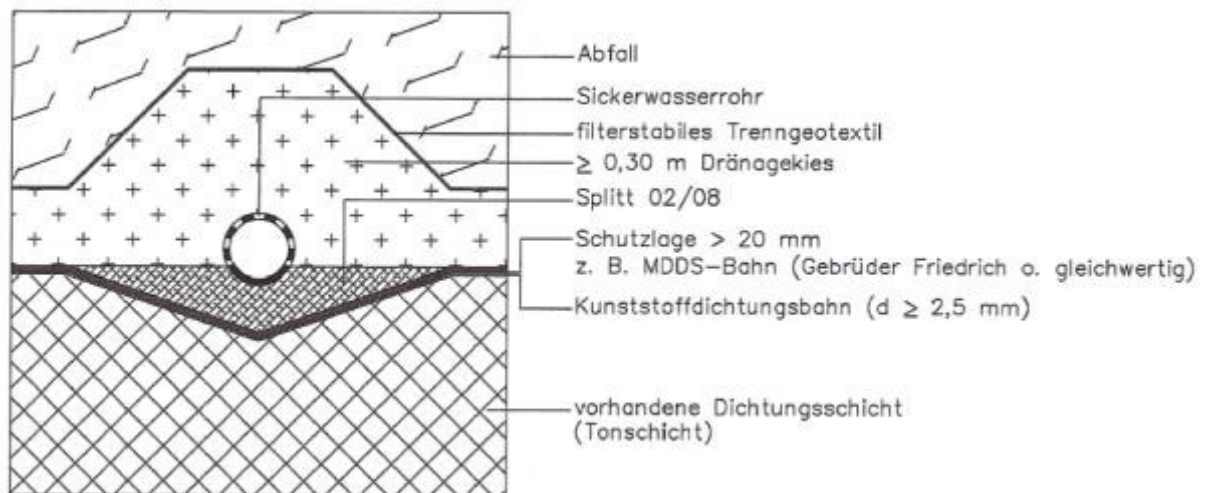


Bild 3 Einbau PE-Rohre (aus 1.2)

## 6. Berechnungen

### 6.1 FEM-Modellierung

Im mechanischen Modell erfolgt die Abbildung des Altröhres als Kreisring, der umgebende Boden wird durch Scheibenelemente diskretisiert.

Die Verbindung zwischen Rohr und Boden wird mit Hilfe von GAP/Friction-Elementen (reine Druckkraftübertragung) simuliert. Die Auflast wird durch Einzellasten auf den Knoten des oberen Modellrandes angesetzt.

Die verwendete Diskretisierung ist in Bild 1 beispielhaft für die Steinzeugrohre dargestellt, verschiedene Materialien sind farblich abgehoben. Die Modelle für PE- und PVC-Rohre sind im jeweiligen Teil des Anhangs beigefügt. Es erfolgen geometrisch nichtlineare Berechnungen, in denen die Belastung schrittweise gesteigert wird. Die Perforation der Rohre wird durch eine Abminderung der mittragenden Breite berücksichtigt. Vorhandene Risse werden nicht berücksichtigt.

### 6.2 Spannungen

Alle Werte in N/mm<sup>2</sup>

#### 6.2.1 PVC-Rohre

Die Spannungen werden unter der 1,00-fachen maximalen Auflast ermittelt:

	Horizontalspannungen	Vertikalspannungen
Druck	-23,1	-11,9
Zug	6,6	2,0

Die maximale Spannung unter 1,00-facher Last beträgt 23,1 N/mm<sup>2</sup> (Horizontalspannung).

Nachweis:  $\sigma_{\text{vorh.}} = 23,1 < \sigma_{\text{zul.}} = 0,9 * 0,85 * 50 = 38,2 \text{ N/mm}^2$

#### 6.2.2 Steinzeug-Rohre

Die Spannungen werden unter der 1,0-fachen maximalen Auflast ermittelt:

	Horizontalspannungen	Vertikalspannungen
Druck	-13,4	-17,1
Zug	12,6	10,0

Die maximale Spannung unter 1,0-facher Last beträgt 17,1 N/mm<sup>2</sup> - Vertikalspannung Druck.

Nachweis:  $\sigma_{\text{vorh.}} = 17,1 > \sigma_{\text{grenz}} = 14,3 \text{ N/mm}^2$

Die maximale Spannung beträgt 17,1 N/mm<sup>2</sup> und ist 19 % größer als die Grenzspannung.

### 6.2.3 PE-Rohre

Die Spannungen werden unter der 1,00-fachen maximalen Auflast ermittelt:

	Horizontalspannungen Vertikalspannungen	
DA 355		
Druck	-3,2	-3,9
Zug	0,54	0,22
DA 280		
Druck	-3,2	-3,8
Zug	0,56	0,21

Die maximale Spannung unter 1,0-facher Last beträgt 3,9 N/mm<sup>2</sup>.

Nachweis:  $\sigma_{\text{vorh.}} = 3,9 < \sigma_{\text{zul.}} = 14,0 * 0,85 * 0,9 / 1,5 = 7,1 \text{ N/mm}^2$

## 6.3 Verformungen

### 6.3.1 PVC-Rohre

Die Verformungen unter einfacher Last betragen 39,26 - 23,14 = 16,1 mm entsprechend 6,6 % des mittleren Durchmessers.

### 6.3.2 Steinzeugrohre

Der Nachweis ist für die Steinzeugrohre nicht maßgebend.

### 6.3.3 PE-Rohre

DA 355: Die Verformungen unter einfacher Last betragen 41,76 – 23,85 = 17,91 mm entsprechend 5,6 % des mittleren Durchmessers.



DA 280: Die Verformungen unter einfacher Last betragen  $50,6 - 36,3 = 14,3$  mm entsprechend 5,6 % des mittleren Durchmessers.

#### 6.4 Stabilitätsnachweis

##### 6.4.1 PVC Rohre

Der Stabilitätsnachweis wird nach 1.8 analytisch geführt:

Nach 1.8 ergibt sich für einen Verformungsmodul von  $E_s > 40 \text{ N/mm}^2$  und Abminderung 0,9 für den gesamten Querschnitt  $P_k = 0,431 \text{ N/mm}^2 < \text{vorh.} = 0,59 \text{ N/mm}^2$ .

Es kann kein Stabilitätsnachweis für die PVC Rohre geführt werden.

Die Verformungen und Spannungen werden in den FEM Berechnungen bis zu einer maximalen rechnerischen Einwirkung aus Auflast  $900 \text{ kN/m}^2$  berechnet. Die Verformungen betragen dann rechnerisch 15 % des Querschnittes. Die unter 2-facher Last zulässige Verformung von 12 % wird bei einer Auflast von ca.  $850 \text{ kN/m}^2$  erreicht.

Im Anhang ist die Verformungsfigur bei Abbruch der Berechnungen beigefügt. Ein Stabilitätsversagen der dünnwandigen Rohre ist außer von der Rohrwand auch von der Bettung, die nicht exakt quantifiziert werden kann, abhängig. Stabilitätsversagen kann ohne Ankündigung durch langsam fortschreitende Verformungen auftreten.

##### 6.4.2 Steinzeug Rohre

Der Nachweis ist für die Steinzeugrohre nicht maßgebend.

##### 6.4.3 PE Rohre

Der Stabilitätsnachweis wird nach 1.8 analytisch geführt:

Nach 1.8 ergibt sich für die Rohre DA 355 für einen Verformungsmodul von  $E_s > 40 \text{ N/mm}^2$  und Abminderung 0,85 für den gesamten Querschnitt  $P_k = 0,89 \text{ N/mm}^2 > \text{vorh.} = 0,56 \text{ N/mm}^2$ .

Sicherheitsfaktor:  $\gamma = 0,89 / 0,56 = 1,6 < \text{erf.} = 2,0$

Nach 1.8 ergibt sich für die Rohre DA 280 für einen Verformungsmodul von  $E_s > 40 \text{ N/mm}^2$  und Abminderung 0,85 für den gesamten Querschnitt  $P_k = 0,89 \text{ N/mm}^2 > \text{vorh.} = 0,58 \text{ N/mm}^2$ .

Sicherheitsfaktor:  $\gamma = 0,89 / 0,58 = 1,5 < \text{erf.} = 2,0$

Im DK I Bereich wird die Anforderung eingehalten:  $0,89 / 0,43 = 2,1 > \text{erf.} = 2,0$  und zudem liegt der Nachweis durch die angesetzten Abminderungen für Medium und Temperatur für eine DK I Deponie auf der sicheren Seite.

Die Verformungen und Spannungen werden in den FEM Berechnungen bis zur 2-fachen Auflast berechnet. Die Verformungen betragen dann für beide Rohrtypen rechnerisch 13 % des Querschnittes. Die unter 2-facher Last zulässige Verformung von 12 % wird leicht überschritten. Die zulässigen Spannungen unter 2-facher Last sind die Grenzspannungen, diese werden eingehalten.

## 7. Bemerkungen

- 7.1 Im Bauabschnitt Gutenfurt I, in dem PVC- und Steinzeugrohre eingebaut sind, sind Schäden an den Rohren aufgetreten. Dokumentiert sind unter anderem zahlreiche Unterbögen mit Wassereinstau. Verformungen des Untergrundes werden in unseren 2-dimensional geführten Berechnungen nicht erfasst.
- 7.2 Unsere Berechnungen wurden unter Ansatz „üblicherweise“ zu erwartender Boden- und Materialkennwerte geführt.
- 7.3 Für die PVC- und Steinzeugrohre mussten Annahmen zur Wanddicke getroffen werden. Das Zutreffen bzw. Nicht-Zutreffen dieser Annahmen kann deutliche Auswirkungen auf die Ergebnisse haben.

## 8. Ergebnis:

Die durchgeführten Berechnungen ergeben, dass die vorhandenen Rohre nur eingeschränkt für die neu vorgesehenen Überdeckungshöhen geeignet sind:


Die Spannungen der PVC-Rohre halten die zulässigen Werte ein. Die Verformungen liegen mit 6,6 % um 10 % über dem ‚üblicherweise‘ angesetzten Grenzwert von 6 % des Durchmessers, halten aber die für nichtlinear geführte Berechnungen zulässige Verformung von 9,0 % ein. Unsere Berechnungen wurden nichtlinear geführt. Im Stabilitätsnachweis werden die erforderlichen Sicherheitsbeiwerte von 2,00 nicht eingehalten.

Die Spannungen der Steinzeugrohre überschreiten die zulässigen Werte um 19 %.

Die Spannungen der PE-Rohre überschreiten die zulässigen Werte nicht. Die Verformungen liegen unter dem zulässigen Wert von 6 %. Im Stabilitätsnachweis werden die erforderlichen Sicherheitsbeiwerte von 2,00 im DK II Bereich nicht eingehalten, die Sicherheitsbeiwerte sind aber größer 1,00 (rechnerisches Versagen).

Die Berechnungsergebnisse sind bezüglich aller Bodenkennwerte und der Wanddicken der PVC- und Steinzeugrohre durch die Erfordernisse wegen fehlender Daten Annahmen zu treffen mit Unsicherheiten behaftet. Sie entsprechen im Wesentlichen den Ergebnissen der Kamerabefahrungen, so dass größenordnungsmäßig ein Zutreffen angenommen werden kann. Demgemäß bestehen Einbaubereiche in denen die Rohrbettung nicht vollständig gleichmäßig gut ausgeführt wurde. Durch die zusätzliche Auflast aus der vorgesehenen Überschüttung muss mit weiteren Schäden gerechnet werden. Dies ist für das Gesamtentwässerungskonzept und gegebenenfalls Sanierungsplanungen zu berücksichtigen.

TÜV Rheinland LGA Bautechnik GmbH  
Statik



Dieter Straußberger  
Dipl.- Ing. (FH)  
Geschäftsfeldleiter

Bearbeiter:



Armin Stegner  
Dipl.-Ing.

Verteiler:

LRA Ravensburg  
AUC

Bericht

1-fach+PDF  
PDF

Unterlagen

Anhang: Ergebnisausdrucke

Statik

Anhang Ergebnisausdrucke  
Anhang A 1 PVC Rohr

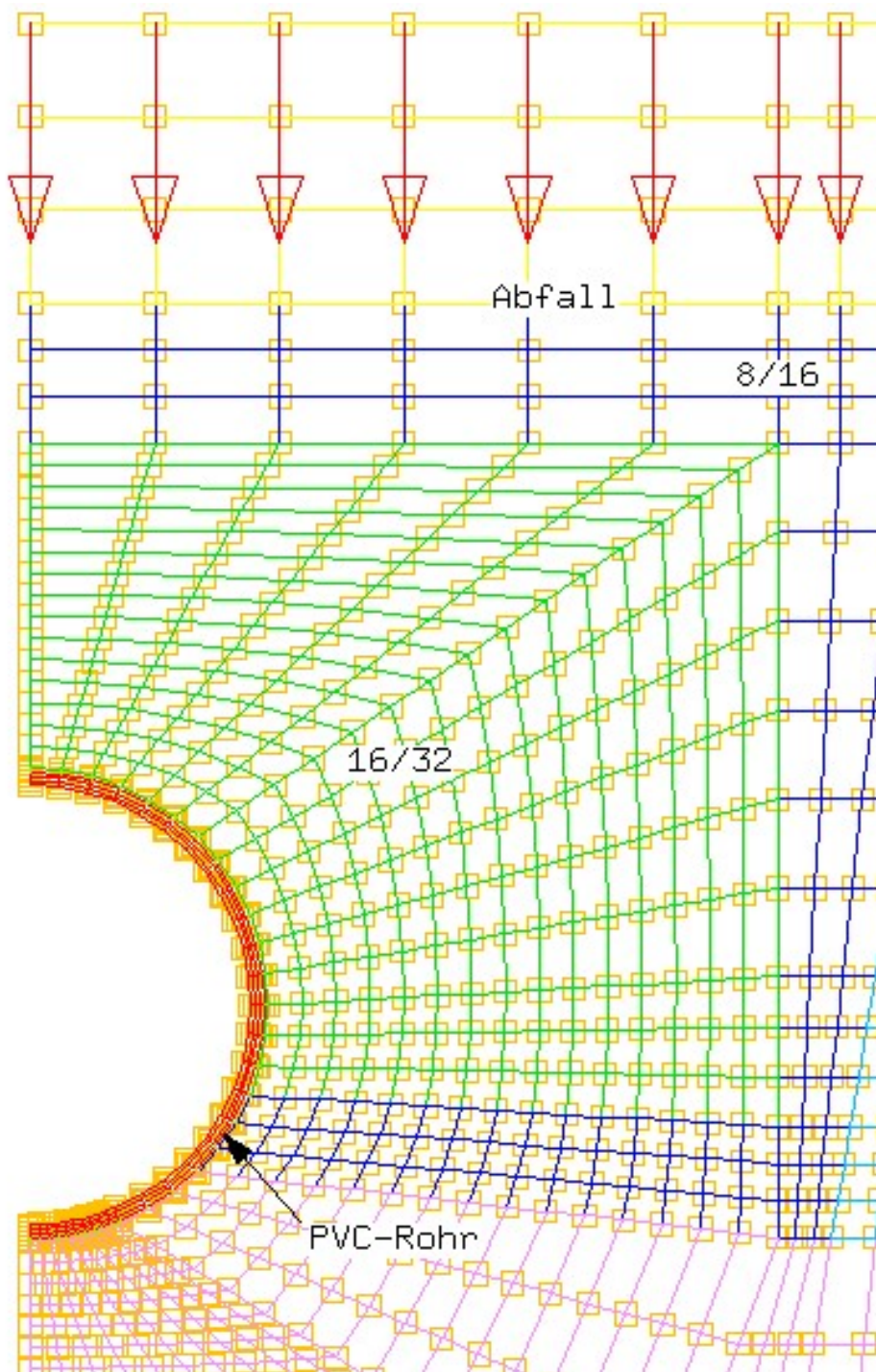


Bild A1.1 Modell PVC-Rohr

DISPLAY III - GEOMETRY MODELING SYSTEM ( 18.0.0 ) PRE/POST MODULE

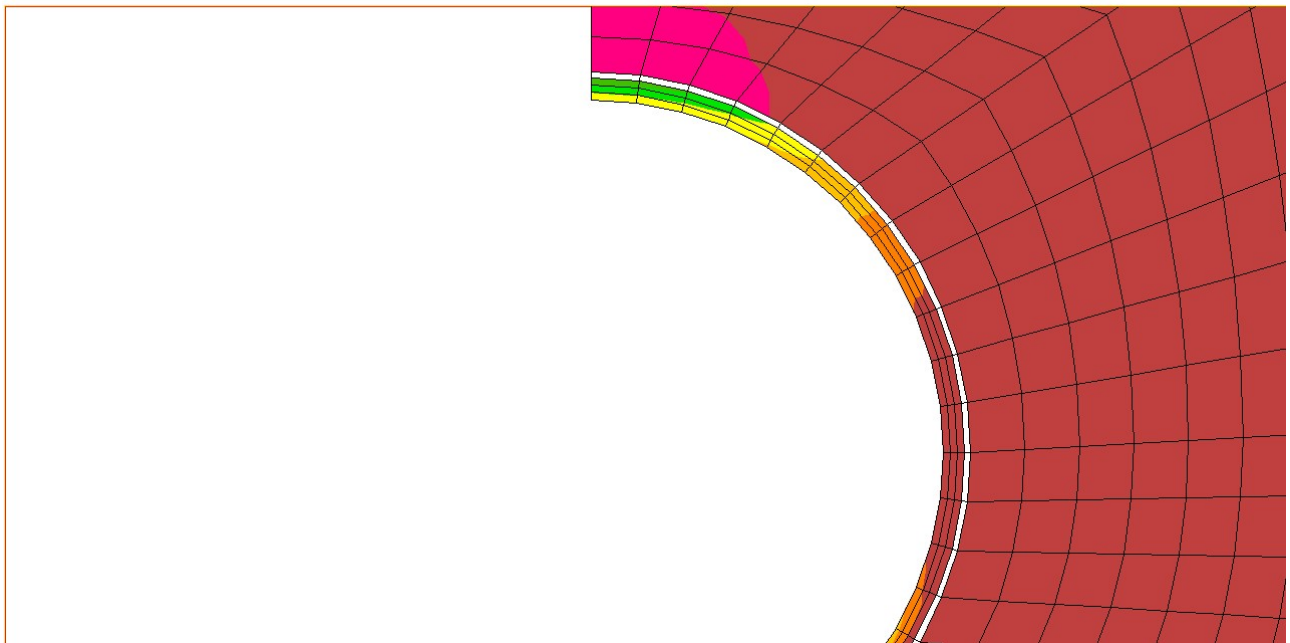


Bild A1.2      Horizontalspannung unter 1,00-facher Last

DISPLAY III - GEOMETRY MODELING SYSTEM ( 18.0.0 ) PRE/POST MODULE

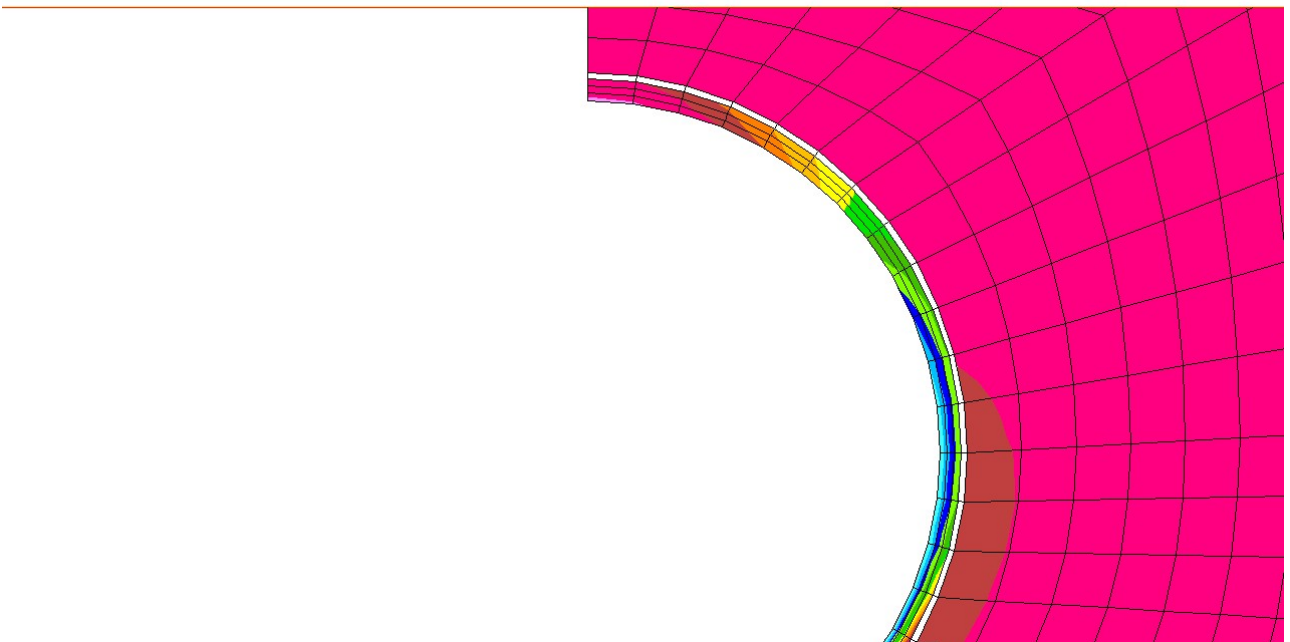


Bild A1.3      Vertikalspannung unter 1,00-facher Last



DISPLAY III - GEOMETRY MODELING SYSTEM ( 18.0.0 ) PRE/POST MODULE

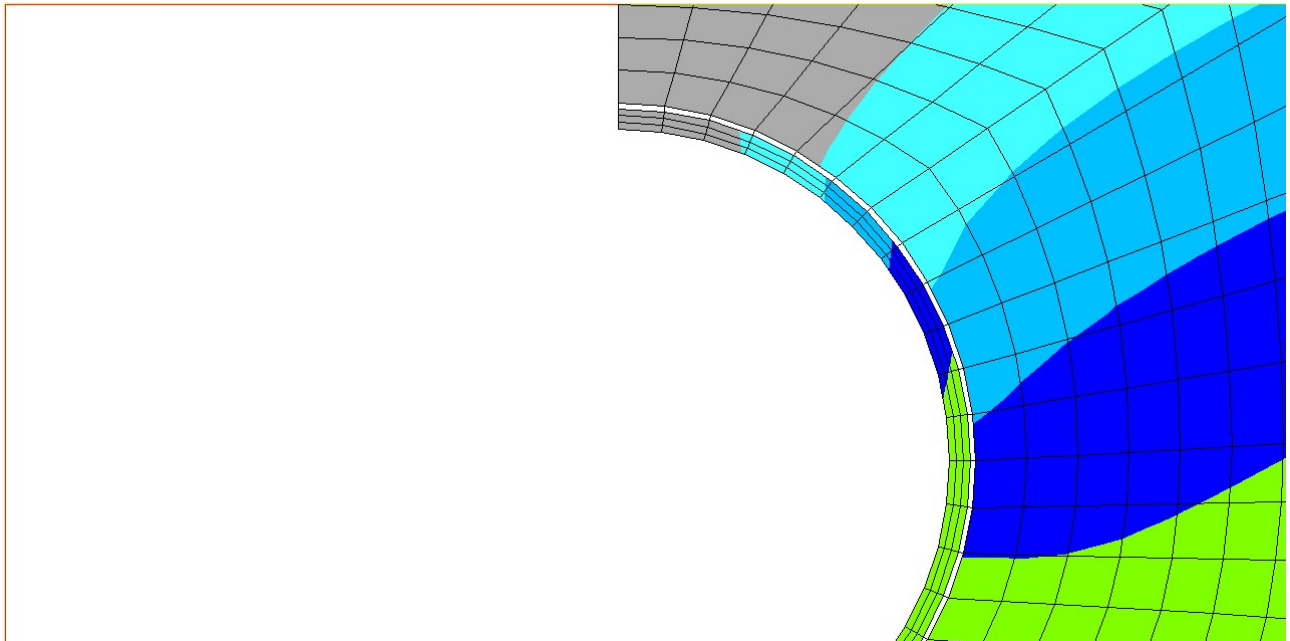


Bild A1.5 Verformung unter 1,00-facher Last

DISPLAY III - GEOMETRY MODELING SYSTEM ( 18.0.0 ) PRE/POST MODULE

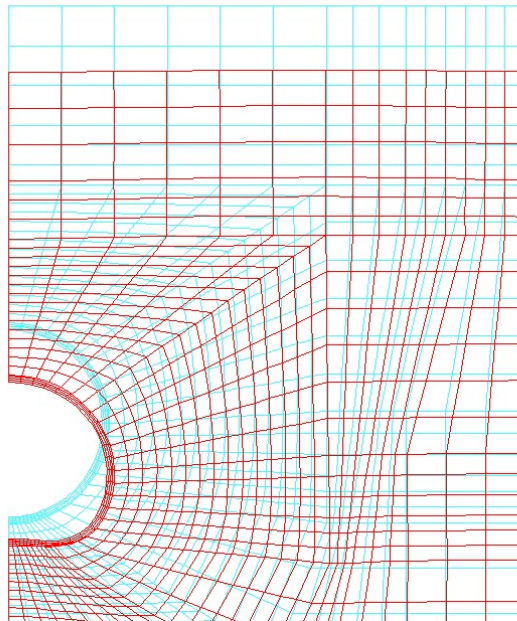


Bild A1.6 Verformungsfigur der PVC Rohre bei Abbruch der Berechnung – rechnerisch bei Faktor 0,60 entsprechend 900 kN/m<sup>2</sup>

DISPLAY III - GEOMETRY MODELING SYSTEM ( 18.0.0 ) PRE/POST MODULE

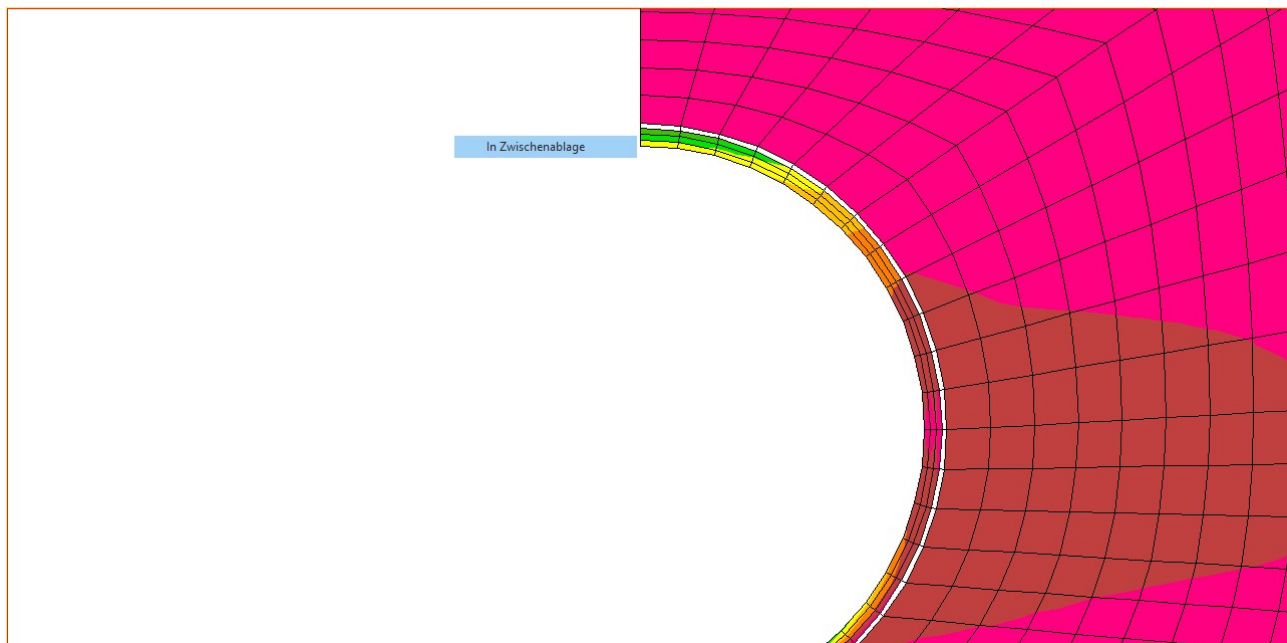


Bild A1.7 Maximale Spannungen unter aktueller Last

Anhang A 2 Steinzeugrohre

DISPLAY III - GEOMETRY MODELING SYSTEM ( 18.0.0 ) PRE/POST MODULE

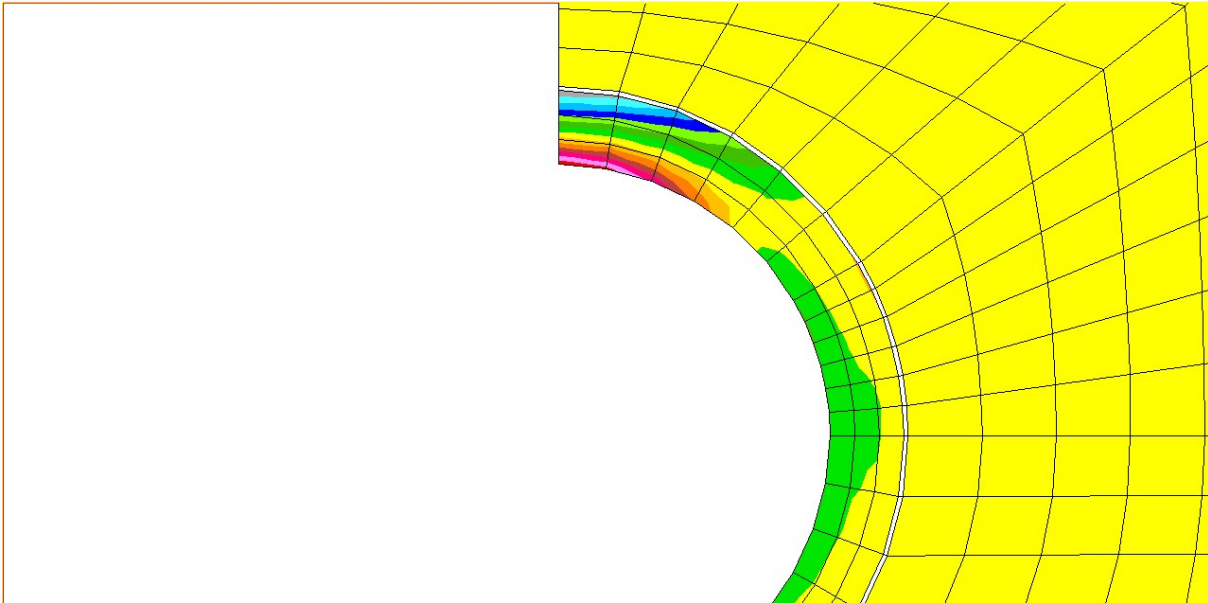


Bild A2.1 Horizontalspannung unter 1,0-facher Last

DISPLAY III - GEOMETRY MODELING SYSTEM ( 18.0.0 ) PRE/POST MODULE

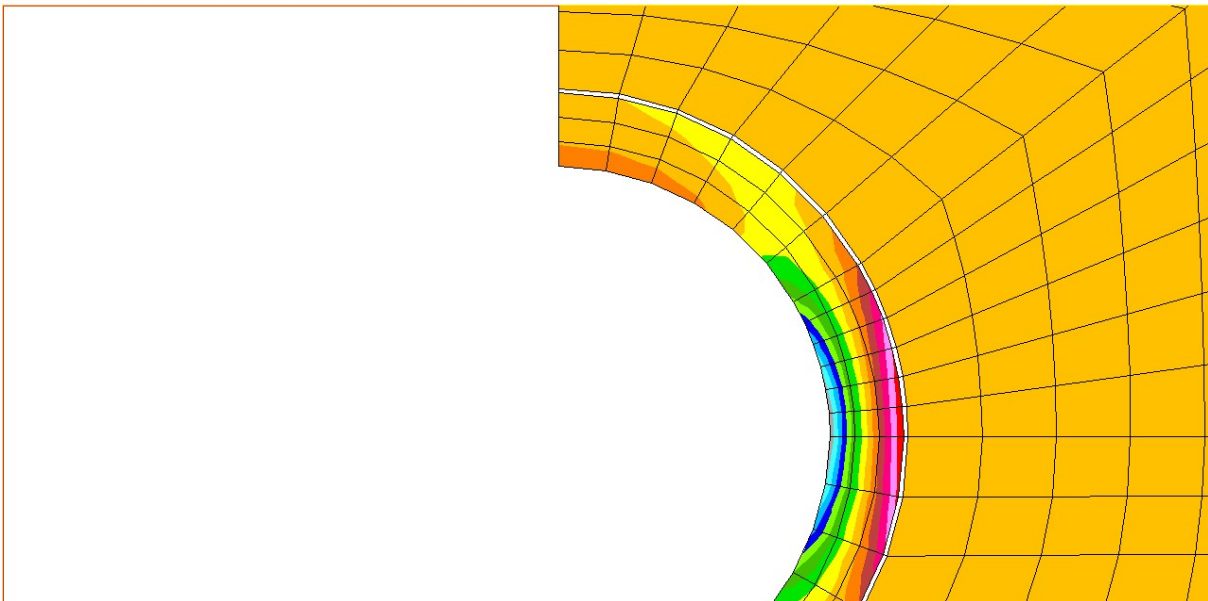


Bild A2.2 Vertikalspannung unter 1,00-facher Last



Anhang A 3 PE Rohr DA 355

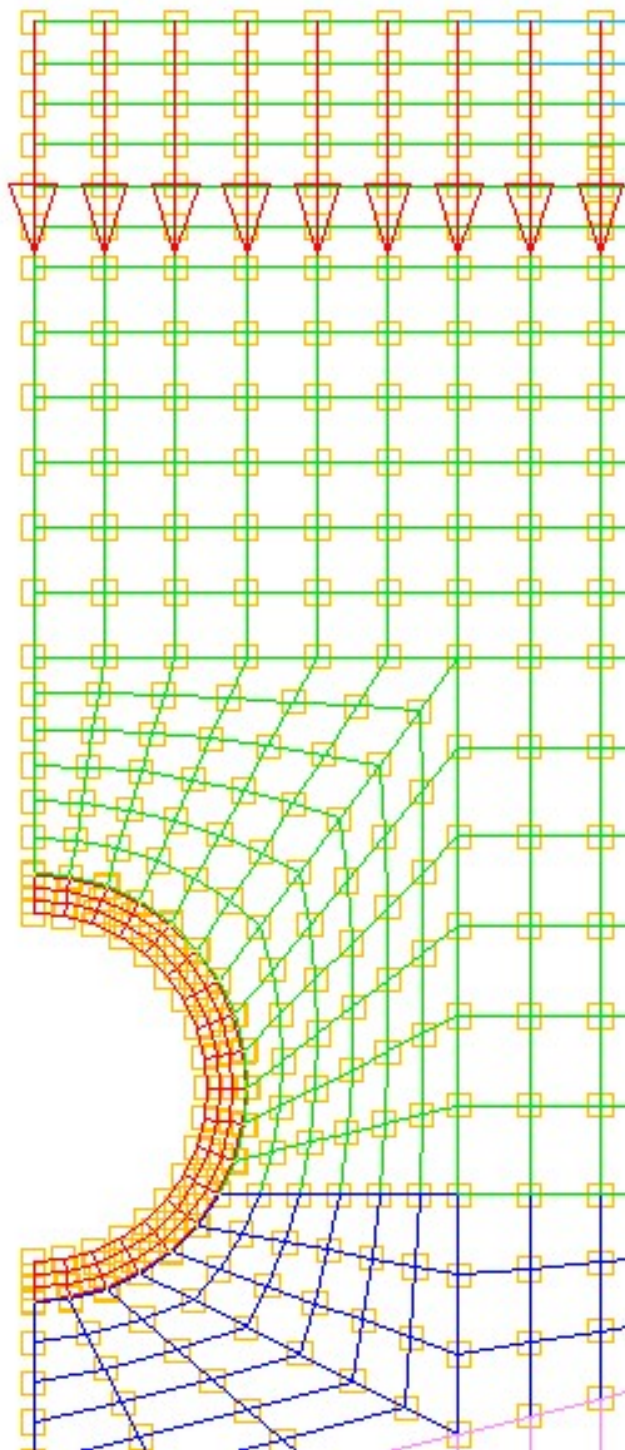


Bild A3.1 Modell PE-Rohre DA 355

DISPLAY III - GEOMETRY MODELING SYSTEM ( 18.0.0 ) PRE/POST MODULE

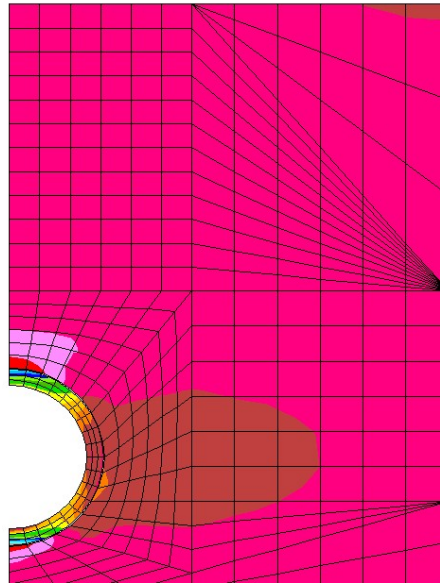


Bild A3.2 Horizontalspannung unter 1,00-facher Last

DISPLAY III - GEOMETRY MODELING SYSTEM ( 18.0.0 ) PRE/POST MODULE

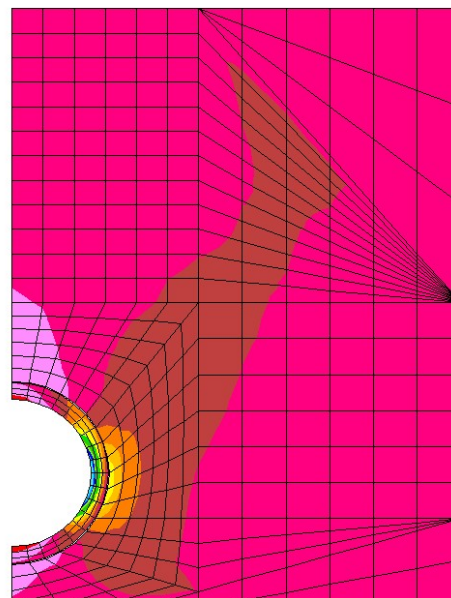


Bild A3.3 Vertikalspannung unter 1,00-facher Last

DISPLAY III - GEOMETRY MODELING SYSTEM ( 18.0.0 ) PRE/POST MODULE

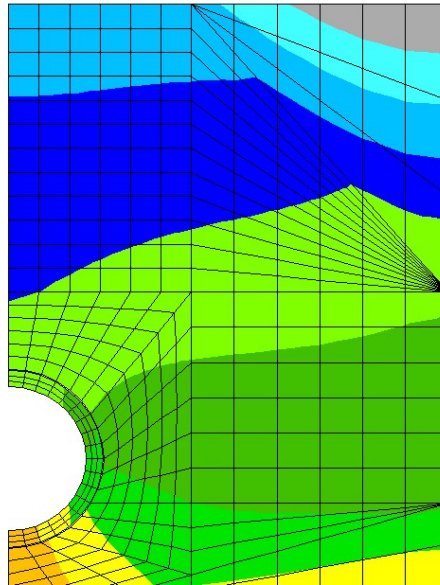


Bild A3.4      Verformung unter 1,00-facher Last

DISPLAY III - GEOMETRY MODELING SYSTEM ( 18.0.0 ) PRE/POST MODULE

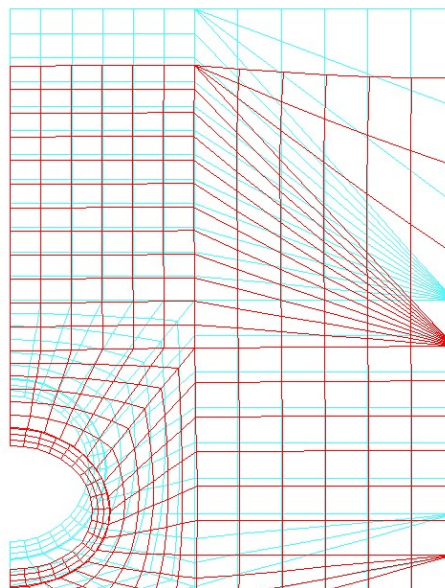


Bild A3.5      Verformungsfigur unter 2,00-facher Last

Anhang A 4 PE Rohr DA 280

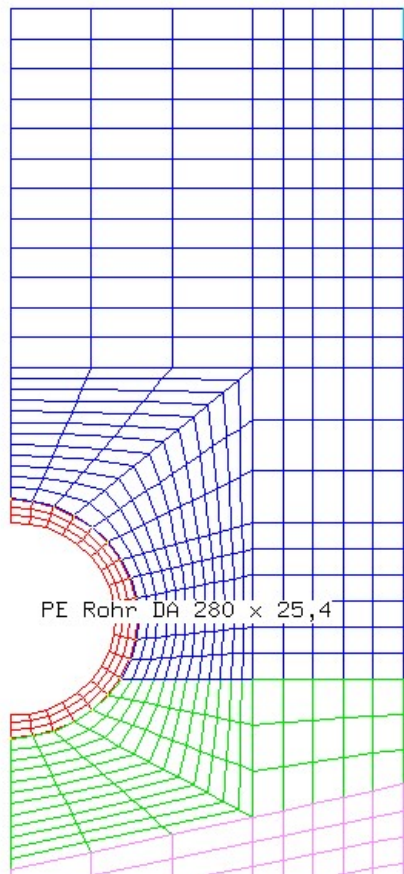


Bild A4.1 Modell PE-Rohre DA 280

DISPLAY III - GEOMETRY MODELING SYSTEM ( 18.0.0 ) PRE/POST MODULE

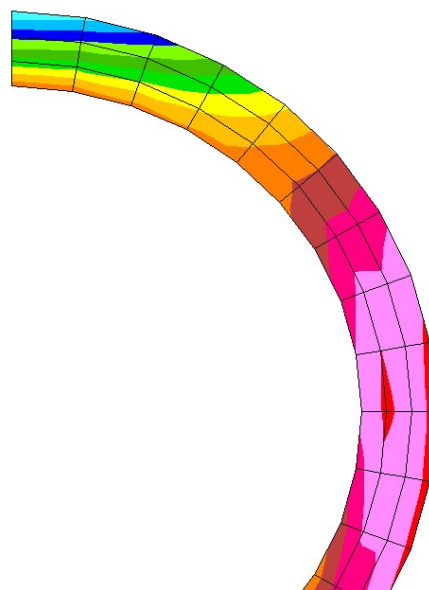


Bild A4.2 Horizontalspannung unter 1,00-facher Last

DISPLAY III - GEOMETRY MODELING SYSTEM ( 18.0.0 ) PRE/POST MODULE

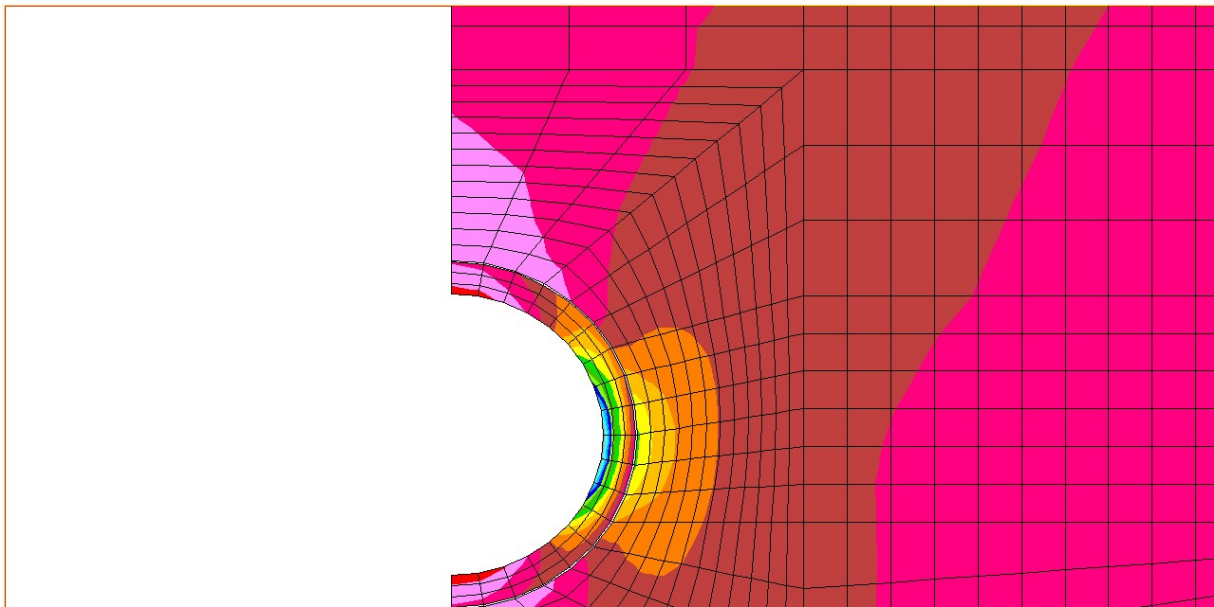


Bild A4.3 Vertikalspannung unter 1,00-facher Last

DISPLAY III - GEOMETRY MODELING SYSTEM ( 18.0.0 ) PRE/POST MODULE

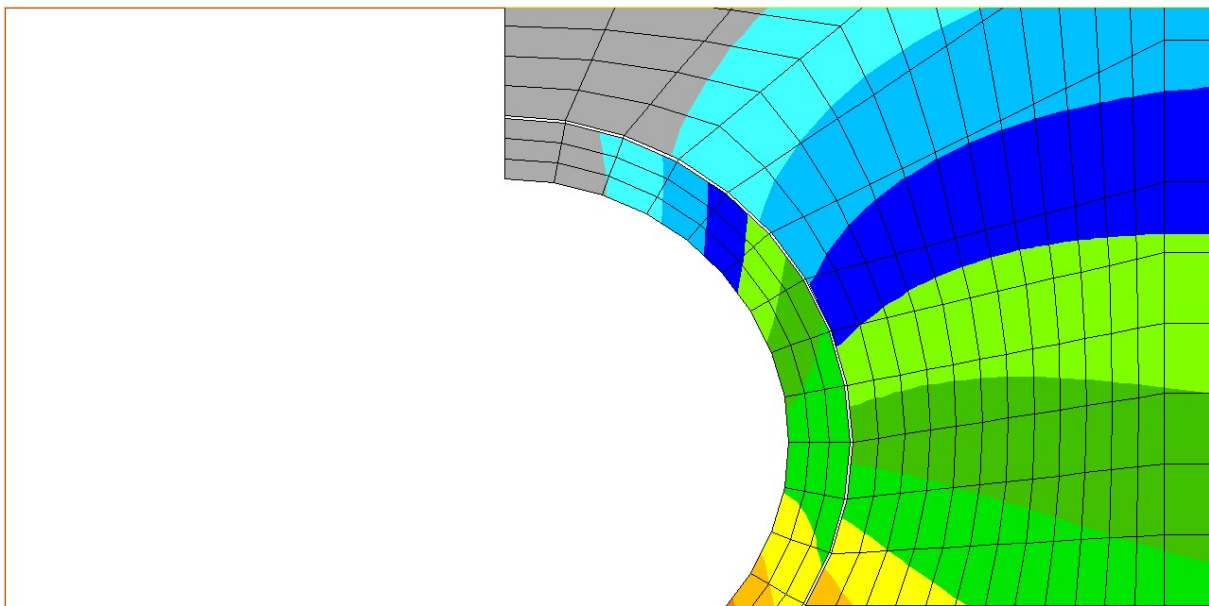


Bild A4.4 Verformung unter 1,00-facher Last



DISPLAY III - GEOMETRY MODELING SYSTEM ( 18.0.0 ) PRE/POST MODULE

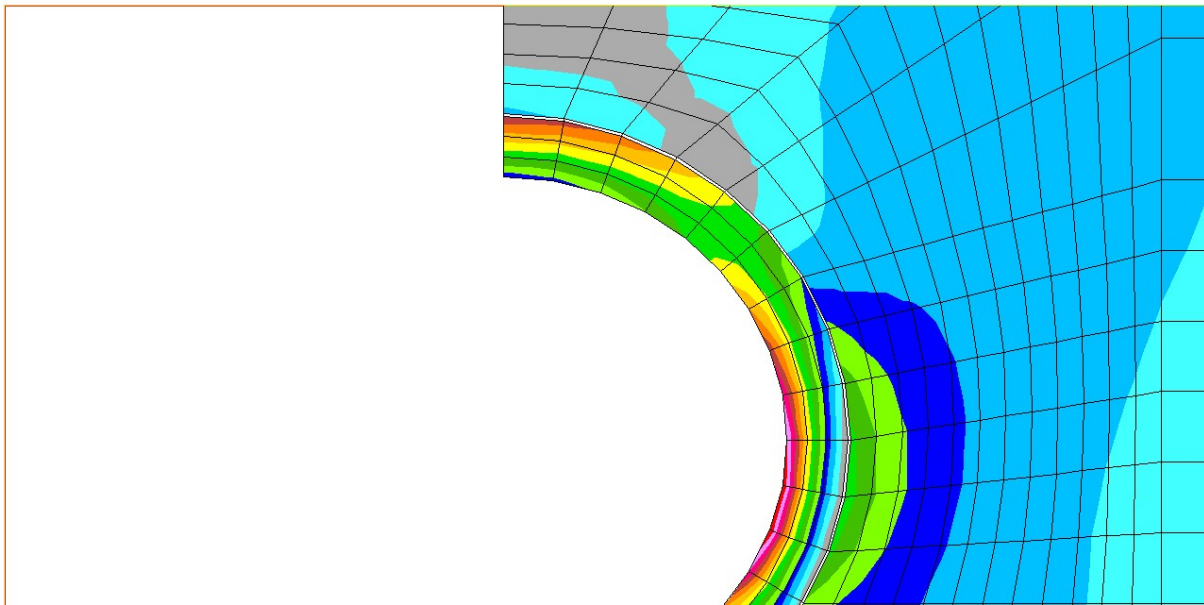


Bild A4.5

Vergleichsspannung unter 2,00-facher Last