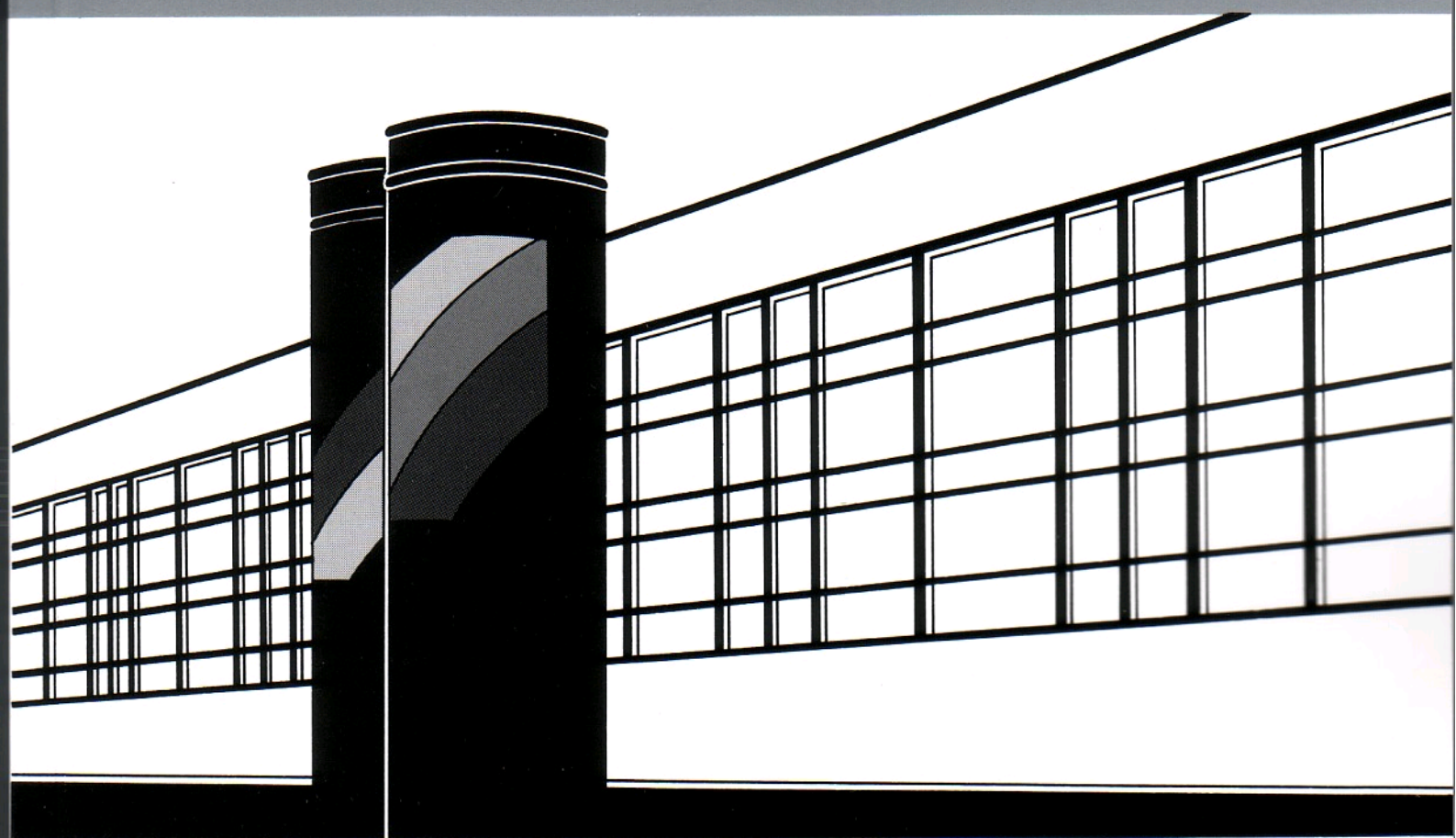


Institut für Wasserbau · Universität Stuttgart

# *Mitteilungen*



Heft 152 Markus Fischer

Beanspruchung eingeeerdeter  
Rohrleitungen infolge  
Austrocknung bindiger Böden

# **Beanspruchung eingerdeter Rohrleitungen infolge Austrocknung bindiger Böden**

Von der Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaften  
der Universität Stuttgart zur Erlangung der Würde eines  
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte Abhandlung

Vorgelegt von  
**Markus Fischer**  
aus Aalen

Hauptberichter: Prof. em. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E. h. Jürgen Giesecke  
Mitberichter: Prof. Dr.-Ing. Pieter A. Vermeer

Tag der mündlichen Prüfung: 19. Juli 2006

Institut für Wasserbau der Universität Stuttgart

2006

Heft 152 Beanspruchung eingeerdeter  
Rohrleitungen infolge  
Austrocknung bindiger Böden

von  
Dr.-Ing.  
Markus Fischer

**D93 Beanspruchung eingerdeter Rohrleitungen infolge Austrocknung  
bindiger Böden**

Titelaufnahme der Deutschen Bibliothek

Fischer, Markus:

Beanspruchung eingerdeter Rohrleitungen infolge Austrocknung  
bindiger Böden / von Markus Fischer. – Stuttgart: Inst. für Wasserbau,  
2006

(Mitteilungen / Institut für Wasserbau, Universität Stuttgart: H. 152)

Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2006

ISBN 3-933761-55-7

NE: Institut für Wasserbau <Stuttgart>: Mitteilungen

Gegen Vervielfältigung und Übersetzung bestehen keine Einwände, es wird lediglich um  
Quellenangabe gebeten.

Herausgegeben 2006 vom Eigenverlag des Instituts für Wasserbau

Druck: Sprint-Digital-Druck GmbH, Stuttgart

## **Vorwort**

### **Veranlassung**

#### **Eingeerdete Rohrleitungsnetze und Gefährdungspotential**

Rohrleitungen dienen dem Transport von strömenden Medien wie Flüssigkeiten, Gase, Dämpfe, auch von gekörnten oder pulverisierten Feststoffen in einem Flüssigkeits- oder Gasstrom. Es besteht ein integrierter Güterfluss, d. h. Transportgefäß, Transportfahrzeug und Transportweg bilden eine Einheit, nämlich die Rohrleitung. Damit wird die Transportleistung auf das technisch-wirtschaftliche Minimum beschränkt. Nur das Transportgut wird befördert.

Nachdem über viele Jahrzehnte hinweg für Fernwasserversorgungen und Wasserverteilungsnetze, dasselbe für die Gasversorgung und Abwasserentsorgung, ebenso für den Transport von Rohöl und chemischen Produkten in Fernleitungssystemen und Teilnetzen bevorzugt eingeerdete Rohrleitungen verwendet worden sind, rücken Analysen der Zustandsbewertung, der Schadensrisiken und des Erhaltungsaufwandes in den Vordergrund. Ein derartiger Handlungsbedarf ergibt sich aus einer ganzen Reihe von Schadensursachen. Vorrangig sind es die Abnutzungen, Alterungsprozesse der eingesetzten Werkstoffe, Korrosionseinwirkungen, erhöhte Belastungen durch wachsenden Schwerverkehr, schließlich zu veränderten Rohrlagerungen führende Baumaßnahmen und Bodenumlagerungen. Beeinträchtigungen der Transportvorgänge können durch Verschmutzungen aus dem Fördergut und durch einhergehende Druckverluste entstehen. Zu einer Zustandsbeschreibung eines Leitungsstranges zählen überdies die Schadenshäufigkeiten und noch aussagekräftiger die Schadensraten.

So stellt sich für den Leitungsbetrieb und für die Leitungserhaltung die Frage nach geeigneten Beurteilungskriterien, nach Datenerhebung und Zuordnung der Schadensereignisse zu den Leitungsdaten, ferner nach Nutzungsdauer, nach zeit- und zustandsabhängigen Maßnahmen sowie nach Bereitstellung erforderlicher Finanzmittel. Die Ausgangsbasis ist die Aufteilung des Rohrleitungsnetzes nach Rohrtypen, Leitungsverlegung, Standortbedingungen hinsichtlich Baugrund und äußeren Belastungen, ebenso nach dem Bauzeitpunkt.

## **Zielsetzung der Forschungsarbeit**

Die eingangs beschriebenen Schadensanalysen in Rohrleitungsnetzen der Wasser- und Gasversorgung innerhalb städtischer Siedlungs- und Industriegebiete ergeben vielfach, dass in Baugrundzonen mit bindigen Bodeneigenschaften sich im Laufe der Jahre die ursprünglich gleichmäßigen Lagerungsbedingungen eingeeerdeter Rohrleitungen verändert haben und die bei den statischen Berechnungen vorausgesetzte homogene Bettung des verlegten Leitungsstranges nicht mehr zutrifft. Durch die zunehmende Austrocknung der die Leitung umgebenden Bodenschichten und durch deren mit der Schrumpfung einsetzenden Volumenminderung kommt es zu Bodenumlagerungen, zu partiell unnachgiebigen Rohrauflagerungen und zu Biegebeanspruchungen der Rohrleitung.

So ist die Zielsetzung der vorliegenden Forschungsarbeit, eine detaillierte Untersuchung über die durch Austrocknung bindiger Böden ausgelöste erhöhte Beanspruchung hierin eingebetteter Rohrleitungen durchzuführen. Dabei stehen vor allem ältere Leitungen kleineren oder mittleren Rohrdurchmessers aus Grauguss und Stahl im Vordergrund, die im Gegensatz zu heutigen Rohrleitungsnetzen mit höherwertigen Werkstoffen stehen und Schadensbilder in größerem Umfang offenbaren. Die rechnerischen Nachweise erfassen eine Reihe von gängigen Lastfällen und sollen zu einer aufschlussreichen, praxisnahen Parameterstudie führen.

## **Zum Inhalt der Dissertation**

Der Verfasser schildert im 1. Kapitel die Problemstellung und legt den derzeitigen Wissensstand dar. Die Problematik der Schrumpfungsvorgänge bindiger Böden und der hierdurch bedingten Auswirkung auf die Statik und Gebrauchsfähigkeit von eingeeordneten Rohrnetzen wurde vor rund drei Jahrzehnten offenkundig und fand mit den Arbeiten von Kottmann eine erste Analyse, die sich auf das Wasserverteilungsnetz mit rund 1400 km Gesamtlänge im Stadtgebiet von Stuttgart mit tonigem Untergrund bezogen.

Die Häufigkeit von Leitungsbrüchen durch Rückgang der Bodenfeuchte stand in direktem Zusammenhang vom Witterungsgeschehen mit langen Trockenperioden oder harten Wintern mit Wasserentzug aus dem Rohrbett durch Eislinsenbildung bei kapillaren Saugeffekten und Elektrokinese. Ferner erwies sich die Bruchgefahr abhängig vom Rohrdurchmesser, wovon besonders die kleinen Rohrnennweiten bis zu DN 80 betroffen waren. Die Bruchstellen im Rohrstrang traten bevorzugt in unmittelbarer Nachbarschaft von unbeweglichen Rohrauflagerungen auf. Zyklische Bodenhebungen und Bodensenkungen mit erhöhter Rohrbeanspruchung zeigten sich im Bereich von im Ton- und Schluffboden tief wurzelnden Bäumen als Folge variierenden Wassertransportes.

Die auf diesen Problemkreis gerichteten Untersuchungen in Stuttgart deckten sich völlig mit weiteren Untersuchungsergebnissen in anderen deutschen Regionen und in Großbritannien. Jedoch unterblieben jegliche rechnerischen Nachweise, so dass sich hieraus die Aufgabenstellung der vorliegenden Arbeit des Doktoranden bis hin zu einer eingehenden Parameterstudie entwickelte. Letztere wurde auf alle möglichen Festpunktlagerungen von zylindrischen Rohren ausgedehnt, wie sie sich für den Belastungsfall einer starren Einspannung bei Rohreinführung in Wasserbehältern, Schieberhäusern, Hausanschlüssen mit Umfassungswänden aus Mauerwerk und Beton ergeben.

Im 2. Kapitel werden die werkstofftechnischen Eigenschaften von Grauguss- und Stahlrohrleitungen dargelegt, die sich im Laufe der letzten Jahrzehnte beträchtlich verbessert und zu einer signifikanten Reduzierung von Leitungsschäden geführt haben. Die bei Graugussleitungen vor Jahrzehnten üblich gewesenen Stemmmuffen-Verbindungen wurden durch Schraubmuffenverbindungen ersetzt, so dass sich je nach Alter des Rohrstranges unterschiedliches Verhalten in der gelenkartigen Lagerung mit Abwinklungen an den Rohrverbindungen und in der zugehörigen Biegebeanspruchung zeigt. Axialverschiebungen bis zu 14 mm wurden möglich. Seit einem Jahrhundert sind Stahlrohrleitungen im Gebrauch, die mehr und mehr kehlnahtgeschweißte Einsteckmuffen als Rohrverbindung erhielten, die als kraftschlüssig und biegesteif angesehen werden konnten.

In Anlehnung an das Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 127: „Statische Berechnung von Entwässerungskanälen und Entwässerungsleitungen“ werden für die Rohrstatik zu beachtende Wechselwirkungen zwischen Rohrleitungen, Rohrbettung im Rohrgraben, Verfüllboden und anstehenden Bodenschichten (gewachsener Boden) einschließlich der jeweiligen Einbaubedingungen (Verbautechnik) und Verdichtung der Verfüllzone (Proctordichte) erfasst. Hinzu kommen die geometrischen Daten von Rohraußendurchmesser, Grabenbreite und Auffüllhöhe sowie die äußeren Belastungen aus Bodeneigengewicht und Verkehrslasten. Schließlich spielen die Steifigkeiten von Rohr und Boden unterhalb, seitlich und oberhalb des Rohrstranges eine ausschlaggebende Rolle.

Setzungen als Folge von Bodenschumpfungen durch Austrocknung belasten eine starr eingespannte Rohrleitung als Biegeträger, wobei im Nahbereich der Rohreinspannung eine klaffende Fuge entsteht und der abbiegende Rohrstrang erst in einem gewissen Abstand wieder die nachgegebene Bettungsschicht erreicht. Hand in Hand stellen sich damit Boden- und Lastumlagerungen ein. Letztere können sich ebenso schon im Laufe der Zeit eingestellt haben, wenn sich eine ungenügende Verdichtung des Auffüllbodens, Tiefbaumaßnahmen in jüngerer Zeit in der Nachbarschaft von Rohrgräben oder erhöhte Auflasten durch Verstärkung des Straßenkörpers oder infolge gesteigerter Verkehrsbelastungen ereignet haben. Um auf der sicheren Seite in der Rohrstatik zu bleiben, verzichtete der Doktorand auf die nach der Silotheorie im Auffüllbereich durch Schubkräfte mögliche Entlastung der Rohrleitung.

Somit stützen sich die nachfolgenden statischen Berechnungen für die eingeedete, ungleichmäßiger Auflagerung ausgesetzte und dreidimensional beanspruchte Rohrleitung auf die drei Lastfälle Biegeträger im Erdreich, Erddruck auf Rohrquerschnitt und Innendruck des Rohrstranges. Deren Überlagerungen führen letztendlich über Normalkräfte, Biegemomente und Querkräfte zu den sich nach Festigkeits- bzw. Versagenshypothesen ergebenden Vergleichsspannungen.

Im 3. Kapitel folgen die Betrachtungen über den Schrumpfungsprozess bindiger Böden und über die hieraus resultierenden Setzungen. Deren Ausgangspunkte bilden die Atterberg'schen Konsistenzgrenzen, die anhand des Wassergehaltes vom flüssigen bis zum festen Zustand bindiger Böden definiert sind. Anhaltspunkte über natürliche Feuchtegehaltsänderungen, Volumenminderung und Bodensetzungen je nach Bewuchs der Bodenoberflächen und der Bodentypen werden aus der Fachliteratur gewonnen. Für die Weiterverfolgung sind theoretisch nur die Setzungsdifferenzen zwischen der Unterseite der Rohrleitung und der Graben- bzw. Auflagerohle heranzuziehen. Der Einfachheit halber soll die Gesamtsetzung von der Geländeoberfläche bis zur Auflagerebene jedoch gelten.

Im 4. Kapitel findet die FE-Methode zur Berechnung der ungleichmäßig aufgelagerten und vorwiegend als Biegeträger beanspruchten Rohrleitung innerhalb des Erdreiches gemäß Lastfall 1 Eingang. Hierzu dient das in den Niederlanden entwickelte und verifizierte Rechenprogramm PLAXIS B. V. 1998 (Version 7). Dieses erlaubt zur Bearbeitung zweidimensionaler geotechnischer Aufgabenstellungen die Einführung frei definierbarer geomechanischer Randbedingungen und zusätzlich die Abbildung von Boden- und Werkstoffeigenschaften mittels unterschiedlicher Stoffgesetze. Es ist vom Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart zur Verfügung gestellt worden. Damit werden die längs des Rohrstranges erheblichen Lastumlagerungen infolge Setzungsdifferenzen erfasst. Eine weitere FE-Berechnung wird für die Lastsituation quer zur Rohrlängsrichtung über die Verlegungstiefe aufgestellt. Die hiermit zu ermittelnden Spannungsverteilungen als Folge von Auflasten lassen sich dann im ersten FE-Modul durch zusätzlich aufgebrachte Linienlasten abbilden.

Zur Beschreibung des bodenmechanischen Verhaltens der Bodenmassen dienen die Beziehungen von Coulomb und Mohr für das Spannungs-Dehnungsverhalten, welche die Bodenparameter Elastizitätsmodul bzw. Steifemodul, Reibungswinkel, Kohäsion, Querdehnzahl und Dilatanzwinkel sowie für die Bruchbedingung die Hauptspannungen einschließen. Der Porenwasserdruck entfällt aufgrund der betrachteten Austrocknungsvorgänge. Die Beschreibung der Werkstoffeigenschaften der Grauguss- bzw. Stahlrohrleitungen erfolgt durch ein linear-elastisches Stoffgesetz.



Laut dem 5. Kapitel bieten sich für die statische Berechnung des auf Druck beanspruchten Rohrquerschnittes (Kreisringträger) infolge Lastfall 2 (Erddruck) und Lastfall 3 (Innendruck) analytische Lösungen an.

Im 6. Kapitel wird die Überlagerung der drei Lastfälle vorgenommen. Der mehrachsige Spannungszustand wird bei Rohrleitungen aus dem spröden Werkstoff Grauguss mittels der nach der Normalspannungshypothese sich ergebenden Vergleichsspannung berechnet, während bei Stahlrohrleitungen angesichts des zähen Werkstoffes die aus der Gestaltänderungshypothese resultierende Vergleichsspannung berücksichtigt wird.

Im 7. Kapitel wird der leicht nachvollziehbare Lösungsweg auf Basis eines detaillierten Flussdiagrammes für alle möglichen Varianten ausgeführter, eingeeordeter Rohrleitungen dargestellt und durch ein richtungsweisendes Fallbeispiel eindeutig belegt. Diesem die Prototypbezeichnung 00 tragenden Fallbeispiel folgen im 8. Kapitel insgesamt 25 weitere Fallbeispiele, die im Sinne einer ausgedehnten Parameterstudie 25 wirklichkeitsnahe Variationen der Eingangsgrößen mit unterschiedlichen Auswirkungen auf die Gesamtbeanspruchung von Rohrleitungsnetzen aus den Werkstoffen Grauguss und Stahl aufzeigen. Wertvolle Erkenntnisse für die Baupraxis werden hiermit erschlossen.

Angesichts der vielfach in die Jahre gekommenen Versorgungsnetze sind hieraus abzuleitende Risikoanalysen von besonderer Bedeutung. Diese zeichnen nicht zuletzt Zeitpunkt und Kostenaufwand für Sanierungs- bzw. Ersatzmaßnahmen vor.

Die im 9. Kapitel enthaltene Zusammenfassung schließt die Dissertation unter Darlegung der vorgenommenen Arbeitsschritte und der erzielten Ergebnisse ab.

### **Zusammenfassende Betrachtung**

Herr Dipl.-Ing. Markus Fischer erarbeitete eine interessante Promotionsschrift. Im Blickfeld der sich in jüngeren Jahren immer mehr herausstellenden Schadenshäufigkeit und der Schadensraten eingeeordeter Rohrleitungssysteme zur Wasser- und Gasversorgung, - diese im Stuttgarter Umfeld des beruflichen Wirkungsbereiches bei der EnBW -, ergab sich beinahe zwangsläufig, sich näher mit Ursachen und Auswirkungen derartiger Schadensfälle zu beschäftigen und schließlich eine wissenschaftliche Arbeit zu verfassen.

Durch Austrocknen bindiger Ton- und Schluffböden entstehen sukzessive Volumenminderungen und Setzungsvorgänge. Bei in diesen Bodenzonen eingeeordneten Rohrleitungen bleiben Wechselwirkungen zwischen diesen und den die Rohrschale umgebenden Bodenzonen nicht aus. Die Bodenzonen selbst gliedern sich in Bereiche unterhalb der Rohrbettung, seitlich und oberhalb des Rohrstranges. Sie sind gekennzeichnet durch unterschiedliche Steifigkeiten des gewachsenen, den Rohrgraben eingrenzenden

Bodens, der Rohreinbettung und des künstlich verdichteten Bodenmaterials zur Verfüllung des Restraumes. Hinzu treten die weiteren bodenmechanischen Eigenschaften, die Rohrsteifigkeit und die äußeren Belastungen durch Straßendecken und Verkehr.

Durch Setzungen der Grabensohle und damit des Rohrbettes infolge Schrumpfungsprozesse bindiger Böden bilden sich bei örtlichen Einspannungen von Rohrleitungen, z. B. bei Hausanschlüssen, Rohreinführung in Schieberschächte und Wasserbehälter, klaffende Fugen und zu Biegebeanspruchungen führende Hohlräume aus. Somit lassen sich für das dreidimensionale komplexe System drei Lastfälle definieren: Erdlast und ungleichmäßige Auflagerung, Erddruck und Innendruck.

Der Lösungsweg wird mittels FE-Methoden und analytischer Berechnung beschrieben. Eine größere Anzahl von Eingangsgrößen und Parametern sind mit entsprechenden Randbedingungen zu verknüpfen, um die für Rohrbeanspruchung maßgeblichen Lastumlagerungen zu erfassen.

Die Untersuchungsschritte spiegeln sich in einem leicht nachvollziehbaren Flussdiagramm wider. 26 Fallbeispiele belegen die Aussagekraft und den Wert der für die Baupraxis aufschlussreichen Erkenntnisse. Diese erleichtern wesentlich Risikoanalysen zur Abschätzung der zeitlichen Abfolge und der Kostensummen für etwa notwendige Sanierungen bestehender, in die Jahre gekommener Verteilungsnetze für die Wasser- und Gasversorgung.

Stuttgart, im Juli 2006

Jürgen Giesecke

## **Danksagung**

Die vorliegende Dissertation entstand berufsbegleitend während meiner Tätigkeit im Bereich der Grundsatzplanung für Rohrnetze bei der EnBW Regional AG. Ich möchte mich bei allen bedanken, die zum Entstehen dieser Arbeit beigetragen haben.

Herrn Prof. em. Dr.-Ing. habil. Dr.-Ing. E. h. Jürgen Giesecke, Institut für Wasserbau, gilt mein besonderer Dank für die Möglichkeit zur Promotion und für das in mich gesetzte Vertrauen, für die Übernahme des Hauptberichts und für die Ratschläge und Hinweise, die zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Pieter A. Vermeer, Institut für Geotechnik, danke ich für die Übernahme des Mitberichts und für die Bereitschaft, stets kurzfristig Zeit für mich zu finden.

Herrn PD Dr.-Ing. Walter Marx, Institut für Wasserbau, danke ich für die geführten fachlichen Diskussionen und für sein Interesse an meiner Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Winfried Hoch, EnBW Regional AG, danke ich für die fortwährende Unterstützung während der Erstellung dieser Dissertation und für die zahlreichen und sehr hilfreichen Gespräche.

Herrn Dr.-Ing. Paul-Martin Schäfer, EnBW Regional AG, danke ich ebenfalls für die Ermunterung zur Durchführung dieser Arbeit und für seine Unterstützung.

Herrn Dipl.-Ing. Alexander Zeller, EnBW Regional AG, sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Hans-Henning Schmidt, Smoltczyk & Partner GmbH, danke ich für die fachliche Diskussion bodenmechanischer Zusammenhänge im Bereich des Tief- und Straßenbaus.

Schließlich bedanke ich mich bei meinen Eltern, die mir den Weg hierher ermöglicht haben.

Stuttgart, im Juli 2006

Markus Fischer



## Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichen und Einheiten</b> .....	<b>XII</b>
<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>XVI</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>XXVI</b>
<b>1. Einführung</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 Problembeschreibung</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2 Wissensstand</b> .....	<b>2</b>
<b>1.3 Aufgabenstellung</b> .....	<b>4</b>
<b>2. Grundlagen</b> .....	<b>5</b>
<b>2.1 Beschreibung der betrachteten Rohrleitungstypen</b> .....	<b>5</b>
2.1.1 Graugussrohrleitungen .....	5
2.1.2 Stahlrohrleitungen .....	8
<b>2.2 Einfluss der Umgebungsbedingungen bei axial gleichmäßiger Rohrbettung</b> .....	<b>9</b>
<b>2.3 Überlegungen zu den Auswirkungen von Setzungen bei ungleichmäßig aufgelagerten Rohrleitungen</b> .....	<b>12</b>
<b>2.4 Ansatz der Umgebungsbedingungen in der vorliegenden Aufgabenstellung</b> .....	<b>13</b>
<b>2.5 Lösungsweg</b> .....	<b>14</b>
<b>3. Zu den Setzungen infolge Bodenschrumpfung</b> .....	<b>18</b>
<b>3.1 Einfluss des Bodenwassergehalts</b> .....	<b>18</b>
3.1.1 Wassergehalt und Konsistenzgrenzen .....	18
3.1.2 Wassergehalt und Bodenvolumen .....	19
<b>3.2 Schrumpfungsverhalten bei natürlichen Randbedingungen</b> .....	<b>20</b>
<b>3.3 Berichte über Feuchtegehaltsänderungen und resultierende Setzungen</b> .....	<b>23</b>
<b>3.4 Anwendung in der vorliegenden Aufgabenstellung</b> .....	<b>26</b>
<b>4. Berechnung der Rohrleitung als Biegeträger im Erdreich</b> .....	<b>28</b>
<b>4.1 Modellbildung für Berechnungen mit der Finite-Element-Methode</b> .....	<b>28</b>
4.1.1 Allgemeines .....	28
4.1.2 Beschreibung der Längsschnitt-Modelle .....	29
4.1.3 Beschreibung der Querschnitt-Modelle .....	31
4.1.4 Beziehungen zwischen den Längs- und Querschnitt-Modellen .....	33
4.1.5 Abbildung des Bodenverhaltens .....	33
4.1.6 Abbildung der Leitungseigenschaften .....	36

---

<b>4.2</b>	<b><i>Berechnung der resultierenden Querschnittsspannungen</i></b> .....	<b>36</b>
4.2.1	Spannungen in Längsrichtung .....	37
4.2.2	Schubspannungen infolge Querkraft .....	39
<b>5.</b>	<b>Berechnung des druckbeanspruchten Rohrquerschnitts</b> .....	<b>41</b>
<b>5.1</b>	<b><i>Lastfall Erddruck</i></b> .....	<b>41</b>
5.1.1	Ansatz der Belastung .....	41
5.1.2	Statische Berechnung.....	41
<b>5.2</b>	<b><i>Lastfall Innendruck</i></b> .....	<b>53</b>
<b>6.</b>	<b>Überlagerung der Lastfälle</b> .....	<b>54</b>
<b>6.1</b>	<b><i>Festigkeitshypothesen</i></b> .....	<b>54</b>
6.1.1	Graugussrohrleitungen.....	54
6.1.2	Stahlrohrleitungen.....	55
<b>6.2</b>	<b><i>Ansatz der Vergleichsspannungen</i></b> .....	<b>55</b>
<b>7.</b>	<b>Zusammenfassende Darstellung des Berechnungsablaufs</b> .....	<b>58</b>
<b>7.1</b>	<b><i>Arbeitsschritte</i></b> .....	<b>58</b>
<b>7.2</b>	<b><i>Fallbeispiel</i></b> .....	<b>60</b>
<b>8.</b>	<b>Parameterstudie</b> .....	<b>66</b>
<b>8.1</b>	<b><i>Quantifizierung der Einflussgrößen</i></b> .....	<b>66</b>
8.1.1	Graugussrohrleitungen.....	66
8.1.2	Stahlrohrleitungen.....	67
8.1.3	Bindige Böden .....	68
8.1.4	Verkehrswege .....	70
8.1.5	Verkehrslasten .....	72
8.1.6	Überdeckungshöhen.....	76
8.1.7	Druckstufen.....	76
<b>8.2</b>	<b><i>Aufbau der Berechnungsreihen</i></b> .....	<b>77</b>
<b>8.3</b>	<b><i>Einfluss der Leitungseigenschaften</i></b> .....	<b>79</b>
8.3.1	Graugussrohrleitungen unterschiedlicher Nennweite .....	79
8.3.2	Stahlrohrleitungen unterschiedlicher Nennweite .....	83
8.3.3	Vergleich von Grauguss- und Stahlrohrleitungen.....	88
8.3.4	Graugussrohrleitungen mit unterschiedlicher Gelenklage.....	90
<b>8.4</b>	<b><i>Einfluss der Bodeneigenschaften</i></b> .....	<b>93</b>
8.4.1	Scherfestigkeit .....	93
8.4.2	Elastizitätsmodul.....	97
8.4.3	Querdehnzahl .....	101

---

<b>8.5</b>	<b><i>Einfluss weiterer Umgebungs- und Betriebsbedingungen</i></b> .....	<b>104</b>
8.5.1	Größe der Setzung .....	104
8.5.2	Überdeckungshöhe .....	107
8.5.3	Versorgungssparte .....	110
8.5.4	Lastumlagerungen .....	112
8.5.5	Verkehrswege und Verkehrslasten .....	114
<b>9.</b>	<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>120</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>124</b>

## Formelzeichen und Einheiten

### Lateinische Buchstaben

$A$	[mm <sup>2</sup> ]	Querschnittsflächeninhalt
$D_{Pr}$	[%]	Proctordichte
$E$	[kN/mm <sup>2</sup> ]	Elastizitätsmodul des Bodens
$E_{GG}$	[kN/mm <sup>2</sup> ]	Elastizitätsmodul von Grauguss
$E_R$	[kN/mm <sup>2</sup> ]	Elastizitätsmodul eines Rohrleitungswerkstoffes
$E_{St}$	[kN/mm <sup>2</sup> ]	Elastizitätsmodul von Stahl
$EA$	[kN]	Dehnsteifigkeit
$EI$	[kNm <sup>2</sup> ]	Biegesteifigkeit
$E_v$	[kN/m <sup>2</sup> ]	Verformungsmodul
$E_{v1}$	[kN/m <sup>2</sup> ]	Verformungsmodul im Plattendruckversuch bei Erstbelastung
$E_{v2}$	[kN/m <sup>2</sup> ]	Verformungsmodul im Plattendruckversuch bei Wiederbelastung
$E_s$	[kN/m <sup>2</sup> ]	Steifemodul
$I$	[mm <sup>4</sup> ]	Flächenträgheitsmoment
$M_x$	[kNm/m]	Biegemoment in $x$ -Richtung
$M_{x-0}$	[kNm/m]	Biegemoment in $x$ -Richtung im Lastzustand
$M_{x-i}$	[kNm/m]	Biegemoment in $x$ -Richtung im Einheitszustand $i$
$M_y$	[kNm]	Biegemoment in $y$ -Richtung
$N_u$	[kN/m]	Normalkraft in Umfangsrichtung
$N_{u-0}$	[kN/m]	Normalkraft in Umfangsrichtung im Lastzustand
$N_{u-i}$	[kN/m]	Normalkraft in Umfangsrichtung im Einheitszustand $i$
$N_x$	[kN]	Normalkraft in $x$ -Richtung
$Q_{r-0}$	[kN/m]	Querkraft in radialer Richtung im Lastzustand
$Q_z$	[kN]	Querkraft in $z$ -Richtung
$Q_{z-i}$	[kN]	Querkraft in $z$ -Richtung an der Stelle $i$
$S$	[mm <sup>3</sup> ]	statisches Moment
$T$	[N/mm]	Schubfluss infolge $Q_z$
$V$	[m <sup>3</sup> ]	Volumen



$V_0$	[m <sup>3</sup> ]	Volumen eines Bodenkörpers im Ausgangszustand
$V_1$	[m <sup>3</sup> ]	Volumen eines Bodenkörpers nach der Austrocknung
$V_d$	[m <sup>3</sup> ]	Volumen eines Bodenkörpers an der Schrumpfgrenze
$V_k$	[m <sup>3</sup> ]	Volumen der Festmasse eines Bodenkörpers
$X_1$	[N]	statisch überzählige Schnittgröße
$X_2$	[N/m]	statisch überzählige Schnittgröße
$a$	[mm]	Setzung
$c$	[kN/m <sup>2</sup> ]	Kohäsion
$d_a$	[mm]	Rohraußendurchmesser
$g$	[kN/m]	längenbezogenes Gewicht einer Rohrleitung
$h$	[m]	Überdeckungshöhe
$h_0$	[cm]	Höhe eines Bodenkörpers im Ausgangszustand
$h_d$	[cm]	Höhe eines Bodenkörpers im trockenen Zustand
$h_w$	[cm]	Höhe eines Bodenkörpers mit dem Wassergehalt $w$
$i$	[-]	Fußzeiger anstelle einer Ziffer
$l$	[m]	Länge
$l_p$	[m]	begrenzte Ausdehnung einer Streifenlast
$l_M$	[m]	Länge zwischen der Einspannstelle und dem ersten Nulldurchgang des Biegemomentenverlaufs
$m_d$	[kg]	Masse einer getrockneten Bodenprobe
$m_w$	[kg]	Masse des in einer Bodenprobe enthaltenen Wassers
$p$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Innendruck
$p_0$	[kN/m <sup>2</sup> ]	Streifenlast
$p_{Rad}$	[kN/m <sup>2</sup> ]	Radlast als konzentrierte Flächenlast
$p_{Rad-S}$	[kN/m <sup>2</sup> ]	Radlast als Streifenlast
$p_v$	[kN/m <sup>2</sup> ]	Vertikalspannung in der Rohrscheitelebene
$q_{lum}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Zusatzlast im Längsschnitt-Modell infolge Lastumlagerungen
$q_h$	[N/mm <sup>2</sup> ]	horizontale Last auf den Rohrquerschnitt
$q_v$	[N/mm <sup>2</sup> ]	vertikale Last auf den Rohrquerschnitt
$s$	[mm]	Rohrwanddicke
$u$	[kN/m <sup>2</sup> ]	Porenwasserdruck

$w, w_i$	[%]	Wassergehalt
$w_L$	[%]	Fließgrenze
$w_P$	[%]	Ausrollgrenze
$w_S$	[%]	Schrumpfgrenze
$x, y, z$	[m]	karthesische Koordinaten

### **Griechische Buchstaben**

$\Delta z$	[mm]	lotrechter Abstand zur neutralen Faser eines Querschnitts
$\alpha$	[-]	Polarwinkel (Bogenmaß)
$\beta$	[-]	Hilfswinkel (Bogenmaß)
$\gamma$	[kN/m <sup>3</sup> ]	Wichte eines Bodenkörpers
$\gamma_w$	[kN/m <sup>3</sup> ]	Wichte des Wassers
$\gamma_d$	[kN/m <sup>3</sup> ]	Wichte einer getrockneten Bodenprobe
$\delta_{10}$	[1/m]	Lastwert im Kraftgrößenverfahren
$\delta_{20}$	[-]	Lastwert im Kraftgrößenverfahren
$\delta_{11}$	[1/Nm]	Flexibilität im Kraftgrößenverfahren
$\delta_{22}$	[m/N]	Flexibilität im Kraftgrößenverfahren
$\varepsilon$	[-]	Dehnung / Verformung
$\zeta$	[°]	Winkelverdrehung an einer als gelenkig idealisierten Muffenverbindung
$\varphi$	[°]	Reibungswinkel
$\varphi_{dyn}$	[-]	Stoßbeiwert
$\nu$	[-]	Querdehnzahl
$\sigma$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Spannung
$\sigma_m$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Zugfestigkeit
$\sigma_e$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Streckgrenze
$\sigma_u$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Umfangsspannung
$\sigma_x$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Spannung in x-Richtung
$\sigma_y$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Vergleichsspannung aus einem mehrachsigen Spannungszustand

---

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Spannungskomponenten eines Hauptachsensystems
$\sigma'$	[kN/m <sup>2</sup> ]	effektive Spannung
$\tau$	[N/mm <sup>2</sup> ] [kN/m <sup>2</sup> ]	Schubspannung / Scherfestigkeit
$\tau_{xu}$	[N/mm <sup>2</sup> ]	Schubspannung in Umfangsrichtung infolge $Q_z$
$\psi$	[°]	Dilatanzwinkel

## **Zusammenfassung**

### **Problembeschreibung**

Rohrnetze stellen meist das größte Anlagevermögen eines Versorgungsunternehmens dar. Ihr Zustand bestimmt die Zuverlässigkeit und Sicherheit der Versorgung wesentlich. Der Analyse von möglichen Schadensursachen und der Identifikation von Schwachstellen im Netz, die sich aus einem schlechten Leitungs- oder aus einem kritischen Beanspruchungszustand ergeben können, kommt aus diesen Gründen eine große Bedeutung zu. Eine dieser Schadensursachen ist die Beanspruchung von Rohrleitungen infolge der Austrocknung bindiger Böden.

Bei der statischen Berechnung erdverlegter Rohrleitungen auf Basis der einschlägigen Regelwerke wird üblicherweise von gleichmäßigen Umgebungsverhältnissen, insbesondere von einer homogenen Bettung der Leitung im Erdreich ausgegangen. Bei der Analyse von Rohrschäden an Wasser- und Gasversorgungsleitungen wird jedoch immer wieder festgestellt, dass diese Leitungen infolge einer ungleichmäßigen Stützung in Rohrlängsrichtung stellenweise erheblichen Biegebeanspruchungen unterworfen sind. Hinweise auf große Längsbiegespannungen geben etwa auftretende Rundrisse quer zur Hauptachse oder ein nach der Leitungstrennung auftretender vertikaler Versatz der gegenüberliegenden Schnittufer zueinander. Bei entsprechenden Randbedingungen kann eine wesentliche Ursache für solche Belastungen die Austrocknung bindiger Böden in Kombination mit einer örtlich unnachgiebigen Lagerung von Rohrleitungen sein.

Die hierbei wirksamen Vorgänge werden im Folgenden kurz dargestellt.

Das aus Festsubstanz und Porenraum bestehende Volumen eines bindigen Bodens ist innerhalb bestimmter Ober- und Untergrenzen abhängig von dessen Wassergehalt: Austrocknung führt zum Schrumpfen, Feuchtezunahme zum Quellen des Bodens. Trocknet ein Boden unterhalb einer Rohrleitung aus, führt dies infolge der ausgelösten Setzungsbewegungen zum Absinken dieser Leitung. Ist dieses Absinken an einer oder mehreren Stellen durch Festpunkte behindert, wird die Leitung als Träger beansprucht und somit belastet. Festpunkte, welche die Vertikalbewegung von Rohrleitungen örtlich behindern, sind insbesondere Leitungskreuzungen, Bauwerkseinführungen, Schachtbauwerke und Stellen nichtbindiger Böden sowie große Steine und Mauerwerksbestandteile. Sie sind teilweise das Resultat einer heute als nicht mehr sachgemäß erkannten Verlegeweise. Manche Arten von Festpunkten, beispielsweise Gebäudeeinführungen, sind jedoch prinzipiell nicht vermeidbar.

Die durch die beschriebenen Vorgänge ausgelösten Belastungen können bei ungünstigen Bedingungen eine Größenordnung erreichen, bei der die Beanspruchbarkeit von Rohrleitungen aus manchen Werkstoffen überschritten werden kann. Die genannten Vorgänge sind durch die Erfahrungen der Netzbetreiber, Schadensanalysen und statistische Auswertungen bekannt.

### **Bearbeitungsumfang**

In der vorliegenden Arbeit wird die Größenordnung der aufgrund der beschriebenen Vorgänge unter definierten Randbedingungen auftretenden Belastungen für Rohrleitungen älterer Baujahre aus Grauguss und Stahl rechnerisch untersucht.

Die Betrachtungen erstrecken sich dabei auf Festpunktlagerungen, bei denen eine starre Einspannung der Rohrleitung gegeben ist. Dieser Fall tritt insbesondere bei der Einführung in Bauwerke auf, etwa bei Hausanschlüssen, Wasserbehältern oder Gasdruckregelanlagen. In diesen Fällen münden die Rohrleitungen häufig horizontal in eine massive Kellerwand. Auch bei der Durchführung von Leitungen durch Schachtbauwerke ergeben sich starre Einspannungen. Für die Analyse der Biegebeanspruchung von Rohrleitungen sind die genannten Festpunkte auch deshalb von besonderer Bedeutung, weil ihr Vorhandensein aus Planwerken oder Bauskizzen bekannt ist. Gelegentlich sind Rohrleitungen auch in Mauerwerke eingespannt, deren Lage in den Planwerken teilweise ebenfalls verzeichnet ist und die unterhalb der Geländeoberfläche errichtet wurden, um die Leitungen zu fixieren.

Außer der Entwicklung der Berechnungsgrundlagen erfolgt eine Beschreibung und Quantifizierung der Einflussgrößen mit Bezug auf die in städtischen Verteilnetzen gegebenen Randbedingungen. Das Schrumpfungsverhalten bindiger Böden und eine Abschätzung des möglichen Ausmaßes der resultierenden Setzungen wird anhand von Informationen aus der Fachliteratur behandelt. Auf der Basis der genannten Grundlagen wird eine Parameterstudie durchgeführt.

### **Beschreibung der betrachteten Rohrleitungstypen**

Die Erfahrungen der Netzbetreiber bestätigen die besondere Bruchgefährdung von Graugussleitungen vor allem kleinerer Nennweiten. Rohrleitungen aus diesem Werkstoff wurden seit Beginn der Entstehung erster flächendeckender Versorgungsnetze eingesetzt und in den Bundesländern der BRD bis etwa Mitte der sechziger Jahre verlegt. Im Gebiet der ehemaligen DDR wurden sie teilweise noch bis zu Beginn der achtziger Jahre verbaut (ROSCHER 2000). Wegen der üblichen langen Nutzungsdauer von Rohrleitungen stellen Graugussleitungen immer noch den größten Anteil der in Betrieb befindlichen Wasserversorgungsleitungen (DVGW 2002). Sie sind auch im Bereich der Gasversorgung noch mit wesentlichen Anteilen an vielen Versorgungsnetzen in Betrieb und werden in den Nennweiten größer DN 150 voraussichtlich nicht kurzfristig generell rehabilitiert.

Zur Verbindung von Graugussleitungen haben insbesondere Stemm- und Schraubmuffen eine überragende Bedeutung. Bei Schraubmuffenverbindungen handelt es sich nicht um eine Schraubverbindung; der Schraubring dient lediglich zum Fixieren und Anpressen des Dichtrings. Sie sind in statischer Hinsicht als gelenkig anzusehen, sofern die Ausknickung die konstruktiv bedingten Grenzen nicht überschreitet.

In den letzten Jahrzehnten wurden Rohrleitungen aus Stahl beim Leitungsneubau im Bereich der Hausanschlusstechnik sowie bei Versorgungsleitungen mit kleineren und mittleren Nennweiten immer mehr von Leitungen aus Polyethylen (PE) verdrängt. Sie stellen in Gasversorgungsnetzen aber immer noch einen hohen Anteil des Leitungsbestands. Im Bereich der Wasserversorgung ist ihr Anteil deutlich geringer, aber nicht unerheblich. Stahlrohre werden in der kommunalen Versorgung etwa seit Beginn des letzten Jahrhunderts eingesetzt. Gegenwärtig finden sie beim Neubau von Verteilnetzen vorwiegend im Bereich höherer Drücke und größerer Dimensionen Anwendung.

Stahlrohrleitungen älterer Bauart wurden in großem Umfang mit geschweißten Einsteckmuffen ausgeführt. Durch die Verbindung von Spitze und Muffe mittels einer umlaufenden Kehlnaht entsteht eine kraftschlüssige, biegesteife Verbindung. Die statischen Eigenschaften eines solchen Leitungsabschnittes sind bei ausreichender Güte der Schweißnähte ähnlich wie bei stumpf aneinander geschweißten Rohren, wie sie im modernen Rohrleitungsbau eingesetzt werden. Ein Leitungsabschnitt aus mehreren Rohren kann daher bei globaler Betrachtung näherungsweise als ein einziges Trägerelement ohne besondere Berücksichtigung der Verbindungsstellen abgebildet werden.

### **Setzungen infolge Bodenaustrocknung**

Obwohl immer wieder über Bauwerksschäden berichtet wird, die auf das austrocknungsbedingte Schrumpfen bindiger Böden zurückgeführt werden, sind in diesem Zusammenhang quantitative Angaben über das Ausmaß der ausgelösten Setzungen selten. Gleiches gilt für Angaben zur Quantifizierung von Änderungen des Bodenwassergehalts bei natürlichen Randbedingungen als Ursache der Bodenbewegungen. Es existieren jedoch einige Veröffentlichungen, die für konkrete Einzelfälle fundierte Angaben enthalten und so Anhaltswerte für das mögliche Ausmaß von Setzungen liefern. Den in dieser Promotionsarbeit betrachteten Quellen ist gemeinsam, dass die beobachteten Wassergehaltsschwankungen auf den Wechsel von Regen- und Trockenwetterphasen zurückzuführen und nicht durch anthropogene Veränderungen (beispielsweise künstliche Grundwasserabsenkungen, wasserbauliche Maßnahmen) bedingt sind.

Die in der Fachliteratur enthaltenen quantitativen Angaben gestatten es nicht, allgemeingültige Grenzen für das mögliche Ausmaß der Schrumpfsetzungen oder für die Schwankungsbreite des Bodenwassergehalts anzugeben. Sie können aber als Anhaltswerte für die mögliche Größenordnung der Schrumpfsetzungen dienen.

Bei den in Deutschland gegebenen klimatischen Bedingungen lässt sich mit den genannten Einschränkungen das Folgende erkennen:

- Die knapp unter der Geländeoberfläche vorhandenen Schwankungen des Bodenwassergehalts nehmen mit zunehmender Bodentiefe rasch ab und sind auf einen Bereich von wenigen Metern Tiefe beschränkt. Das Ausmaß der resultierenden Setzungen reduziert sich gleichermaßen mit zunehmender Bodentiefe. Im Bereich üblicher Verlegetiefen städtischer Gas- und Wasserrohrleitungen ist bei längeren Trockenperioden noch mit relevanten Setzungserscheinungen zu rechnen.
- In der Umgebung von Bäumen ist gegenüber Bereichen ohne Baumbewuchs mit deutlich größeren Schwankungen des Bodenwassergehalts zu rechnen. Ferner setzen sich Schwankungen des Bodenwassergehalts in der Umgebung von Bäumen bis in größere Bodentiefen fort. Demzufolge sind im Umfeld von Bäumen auch ausgeprägtere Schrumpfsetzungen zu erwarten.
- Für den Bereich üblicher Verlegetiefen von städtischen Versorgungsleitungen sind Setzungen bis zu einer Größenordnung von wenigen Zentimetern dokumentiert.

### Lösungsweg

Den betrachteten Leitungswerkstoffen ist gemeinsam, dass sie in einem mehr oder weniger weiten Beanspruchungsbereich ein linear-elastisches Spannungs-Dehnungsverhalten aufweisen. Deshalb ist es möglich, den komplexen Gesamtbeanspruchungszustand in Teillastfälle aufzuteilen, die unabhängig voneinander berechnet werden können. Ausgangspunkt für die Durchführung der Berechnungen ist die Aufteilung der Gesamtbelastung in die nachfolgend genannten Lastfälle, die in unterschiedlicher Weise behandelt und anschließend überlagert werden:

- Beanspruchung der Leitung als vorwiegend biegebelasteter Träger infolge von Erdauflast sowie ungleichmäßiger Auflagerung (Lastfall 1).
- Beanspruchung des kreisringförmigen Rohrquerschnitts durch Erddruck (Lastfall 2).
- Beanspruchung des Rohrquerschnitts infolge Innendruck (Lastfall 3).

Die Berechnung des Lastfalls 1 erfolgt mit der Methode der finiten Elemente auf Basis des für geotechnische Anwendungen entwickelten Programms Plaxis, Version 7. Die Software erlaubt in der eingesetzten Version die Berechnung zweidimensionaler Probleme mit frei definierbaren geometrischen Randbedingungen und die Abbildung von Boden- und Werkstoffeigenschaften über unterschiedliche Stoffgesetze.

Die Größe und der Verlauf der Schnittgrößen entlang der Rohrleitung werden mit einem FE-Modell ermittelt, das sich über einen geeigneten Bereich entlang der Leitungslängsachse und in der Lotrechten erstreckt. Die Rohrleitung wird dabei als Träger idealisiert. Ein solches Modell mit Ausdehnung in der  $x$ - $z$ -Ebene wird nachfolgend als Längsschnitt-Modell bezeichnet.

Orthogonal zur  $x$ - $z$ -Ebene sind im Nahbereich der Einspannstelle Lastumlagerungen infolge von Setzungsdifferenzen zwischen dem Erdreich über- und neben der Rohrleitung in erheblicher Größenordnung zu erwarten. Zur Berücksichtigung dieses Sachverhalts wird den Berechnungen mit dem Längsschnitt-Modell jeweils eine weitere FE-Berechnung vorgeschaltet, aus der die Größe möglicher Lasterhöhungen infolge von Spannungsumlagerungen unter den selben Randbedingungen ermittelt werden kann. Dieses Modell ist orthogonal zum Längsschnitt-Modell orientiert und bildet die Vorgänge quer zur Leitungslängsachse über die Tiefe ab. Es wird als Querschnitt-Modell bezeichnet. Die im Querschnitt-Modell ermittelten Spannungserhöhungen werden dann im Längsschnitt-Modell durch zusätzlich aufgebraute Linienlasten berücksichtigt.

Zur Abbildung der mechanischen Bodeneigenschaften in den FE-Modellen muss die Beziehung zwischen Spannungen  $\sigma$  und Verformungen  $\varepsilon$  über ein geeignetes Stoffgesetz beschrieben werden. In der Bodenmechanik können je nach gegebener Situation und Aufgabenstellung unterschiedliche Stoffgesetze geeignet sein. Von der richtigen Auswahl hängt die erreichbare Annäherung eines Berechnungsergebnisses an die Realität ab. Für die gegebene Aufgabe erfolgt die Beschreibung des Bodenverhaltens über das Mohr-Coulomb-Modell, bei dem das Spannungs-Dehnungsverhalten des Bodens unter Druckbelastung als elastisch - ideal plastisch abgebildet wird.

Zur Charakterisierung des Bodenverhaltens dienen hierbei fünf Parameter: der Elastizitätsmodul  $E$ , die Kohäsion  $c$ , der Reibungswinkel  $\varphi$ , die Querdehnzahl  $\nu$  und der Dilatanzwinkel  $\psi$ .

Über den Elastizitätsmodul  $E$  wird die Steifigkeit des Bodens unter vertikaler Belastung im elastischen Bereich beschrieben.

Der Reibungswinkel  $\varphi$  bestimmt den Scherwiderstand, der in einer beliebigen Gleitfläche in Abhängigkeit von der auf die Scherfläche wirkenden Normalspannung mobilisiert werden kann. Die Kohäsion  $c$  beschreibt demgegenüber Haftkräfte zwischen den einzelnen Bodenteilchen, die vom vorhandenen Spannungszustand unabhängig sind. Reibungswinkel und Kohäsion bestimmen die Scherfestigkeit.

Die Querdehnzahl  $\nu$  beschreibt das Verhältnis von horizontaler Querdehnung und vertikaler Stauchung bei einaxialer vertikaler Belastung. Sie wird für die Berechnung der aus vertikalen Lasten resultierenden horizontalen Bodenspannungen verwendet.

Über den Dilatanzwinkel  $\psi$  wird eine im Falle des Scherversagens gegebenenfalls vorhandene Volumenzunahme des Bodens im Bereich der Scherfläche definiert. Von Einfluss ist die Dilatanz vor allem bei rolligen Böden mit großen Reibungswinkeln, während bindige Böden in der Regel keine oder nur eine sehr geringe Dilatanz aufweisen. Damit hat der Dilatanzwinkel für die gegebene Aufgabenstellung eine geringere Bedeutung als die anderen Modellparameter. Eine gegebenenfalls vorhandene Dilatanz bleibt unberücksichtigt.



Zur Beschreibung der Werkstoffeigenschaften für die als Träger idealisierte Rohrleitung wird sowohl für Grauguss- als auch für Stahlleitungen ein linear-elastisches Stoffgesetz zugrunde gelegt. Zur zweidimensionalen Abbildung werden die Kenngrößen der Rohrleitung in Abhängigkeit vom Außendurchmesser des Rohres auf Werte pro Längeneinheit senkrecht zur Abbildungsebene normiert.

Die Berechnung des Lastfalls 2 erfolgt auf analytischem Weg für den maximal beanspruchten Rohrquerschnitt unmittelbar neben der Einspannstelle der Rohrleitung. In diesem Bereich bildet sich unterhalb der Rohrleitung eine klaffende Fuge aus, so dass der Erdaufrost kein Bettungsreaktionsdruck gegenüber steht. Das erforderliche Kräftegleichgewicht ergibt sich unter der Einbeziehung der Querkraftschubspannungen aus Lastfall 1. Der Querschnitt der Rohrleitung kann, wie bei der statischen Berechnung eingeerdeter Rohre mit konstanter Wanddicke üblich, als Kreisringträger betrachtet werden. Das gegebene System ist dreifach statisch unbestimmt, zu dessen Berechnung eignet sich deshalb besonders das Kraftgrößenverfahren.

Lastfall 3 wird analytisch mit Hilfe der Kesselformel berechnet.

Die Aufteilung des Gesamtproblems ermöglicht es ferner, die Einflüsse aus den Lastfällen miteinander zu vergleichen. Mit Festigkeits- beziehungsweise Versagenshypothesen ist es im Anschluss möglich, an den maximal beanspruchten Stellen aus den einzelnen Spannungskomponenten aller Lastfälle Vergleichsspannungen zu berechnen, die mit den kritischen Werkstoffkennwerten für einachsige Zugbelastung verglichen werden können.

Die Auswahl einer geeigneten Festigkeitshypothese richtet sich dabei nach den mechanischen Eigenschaften des Leitungswerkstoffes. Im Bereich der Eisenwerkstoffe lassen sich grundsätzlich sprödes und zähes Werkstoffverhalten unterscheiden. Da Grauguss zu den spröden und Stahl zu den zähen Werkstoffen zählt, müssen zur Bildung der Vergleichsspannungen für beide Leitungswerkstoffe unterschiedliche Hypothesen gewählt werden.

Grauguss hat als spröde brechender Werkstoff unter Zugspannung nahezu kein plastisches Verformungsvermögen. Im Zugversuch ist das Spannungs-Dehnungs-Verhalten linear-elastisch bis zum Versagen durch Trennbruch senkrecht zur Belastungsrichtung. Die Vergleichsspannung kann über die Normalspannungshypothese berechnet werden.

Die im Rohrleitungsbau üblichen Stähle sind, wie die meisten Stähle, zähe Werkstoffe. Sie zeigen im Zugversuch ab Beginn der Lastaufbringung zunächst ein linear-elastisches Verhalten bis zum Erreichen der Streckgrenze. Bei weiterer Laststeigerung schließt sich ein ausgeprägt plastisches Verhalten bis zum Erreichen der Zugfestigkeit an. Das Fließversagen bei Erreichen der Streckgrenze wird durch die infolge des aufgebrachtten Normalspannungszustandes im Werkstoff wirksamen Schubspannungen, also infolge Gleitbruch, verursacht. Typischerweise tritt eine Abscherung unter  $45^\circ$  Neigung zur Belastungsrichtung auf. Für die Ermittlung der Versagensgefahr ist bei zähen Werkstoffen der

mehrachsige Spannungszustand maßgebend. Zur Bildung einer Vergleichsspannung ist die Gestaltänderungsenergiehypothese gut geeignet.

Das Lösungsverfahren ist auf den Bereich mit linear-elastischem Werkstoffverhalten beschränkt.

### **Parameterstudie**

Wegen der möglichen Unterschiede bei den Leitungseigenschaften, den Umgebungsbedingungen und den Belastungen existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Modellvarianten und Parameterkombinationen, so dass nicht jede Konstellation möglicher Randbedingungen berechnet werden kann. Es ist daher erforderlich, die zu berechnenden Varianten so auszuwählen, dass einerseits die Einflüsse der wichtigsten Randbedingungen erfasst und interpretiert werden können und andererseits die Anzahl der erforderlichen Einzelrechnungen in einer überschaubaren Größenordnung bleibt. Im Rahmen der Parameterstudie werden Berechnungsreihen gebildet, bei denen jeweils ein Einflussfaktor geändert wird, während die übrigen Parameter konstant bleiben.

Ausgangspunkt der Parameterstudie ist die Betrachtung einer Graugussrohrleitung der Nennweite DN 200, die als Ausgangsbasis für die meisten Berechnungsreihen dient. Folgende Einflussfaktoren werden in den Berechnungsreihen untersucht:

- Nennweite (Graugussleitungen)
- Nennweite (Stahlrohrleitungen) einschließlich einer vergleichenden Gegenüberstellung mit Graugussleitungen
- Gelenkwirkung der Rohrverbindungen
- Scherfestigkeit des Bodens
- Elastizitätsmodul des Bodens
- Querdehnzahl des Bodens
- Größe der Setzung
- Überdeckungshöhe
- Versorgungssparte
- Vorhandensein von Lastumlagerungen
- Verkehrswege und Verkehrslasten

Die wichtigsten Ergebnisse der durchgeführten Parameterstudie werden nachfolgend dargestellt. Für die Vorzeichen der Schnittgrößen im Lastfall 1 (Rohrleitung als Biegeträger) gelten dabei folgende Definitionen:

- Biegemomente  $M_y$  sind positiv, wenn sie auf der Unterseite der Rohrleitung Zugspannungen bewirken.
- Normalkräfte  $N_x$  sind positiv, wenn sie Zugspannungen bewirken.
- Querkräfte  $Q_z$  sind positiv, wenn sie am rechten Schnittufer nach unten zeigen.

Die Schnittgrößenverläufe entlang der Leitungssachse weisen bei allen betrachteten Randbedingungen die folgenden charakteristischen Merkmale auf:

- Das maximale Biegemoment ist negativ und tritt unmittelbar neben der Einspannstelle auf. Der Biegemomentenverlauf fällt dann steil ab. Nach dem ersten Nulldurchgang schließt sich ein Bereich positiver Biegebelastung an, der nach dem Erreichen eines relativen Maximums wieder abklingt. Der positiv belastete Bereich hat etwa die Form einer Halbschwingung, das Biegemoment erreicht in diesem Bereich nur einen Bruchteil des Moments an der Einspannstelle. Nach dem Erreichen des zweiten Nulldurchgangs ist die Biegebelastung praktisch abgeklungen.
- Die maximale Querkraft ist positiv und tritt ebenfalls unmittelbar an der Einspannstelle auf. Der Querkraftverlauf nimmt dann etwa linear ab. Nach dem Erreichen des Nulldurchgangs schließt sich ein kurzer Bereich mit gering ausgeprägter negativer Querkraft an.
- Normalkräfte wurden nur bei Berechnungen für eingeedete Stahlrohrleitungen mit längskraftschlüssigen Verbindungen betrachtet. Die Normalkraftbeanspruchung der Rohrleitungen und die durch sie verursachten Längsspannungen waren bei diesen Rechnungen sehr gering gegenüber den ermittelten Längsbiegespannungen.

Bei allen Berechnungen betragen die Umfangsspannungen nur einen Bruchteil der Längsspannungen. Die maximalen Vergleichsspannungen traten immer in Scheitel und Sohle an der Außenseite des Rohrquerschnitts auf. Die größte Spannungskomponente war jeweils eine Längsspannung, die am Scheitel positiv (Zug) und an der Sohle negativ (Druck) war.

Den Planunterlagen eines Versorgungsunternehmens sind in der Regel die Nennweite, der Leitungswerkstoff, die Versorgungssparte und der maximale Innendruck einer betrachteten Rohrleitung einfach zu entnehmen. Die ungefähre Verlegetiefe ist häufig ebenfalls bekannt. Eine Belastung von Rohrleitungen durch schwere Fahrzeuge kann gegebenenfalls ausgeschlossen werden, wenn der betrachtete Leitungsabschnitt in einem unbefestigten Bereich verläuft. Die Eigenschaften des anstehenden Bodens können dagegen, ebenso wie die Möglichkeit von Lastumlagerungen (Voraussetzung für deren Vorhandensein: keine Störung des Scherverbands in der Leitungsumgebung) für die praktische Anwendung in der Regel nur sehr grob abgeschätzt werden. Auch ermöglicht das vorgestellte Berechnungsverfahren nur eine grobe Näherung zu deren Berücksichtigung.

Von diesen Einflussfaktoren beeinflussen die Nennweite und die Überdeckungshöhe sowohl die Größe der Längsbiegespannungen als auch die Ausdehnung des hoch beanspruchten Bereichs wesentlich. Die praktische Erfahrung, dass Stahlleitungen gegenüber Graugussleitungen weit weniger bruchgefährdet sind, wird durch die durchgeführten Untersuchungen bestätigt.

Die Versorgungssparten Gas und Wasser unterscheiden sich im Hinblick auf die errechneten Leitungsbeanspruchungen nur geringfügig, der Innendruck spielt bei den betrachteten Druckverhältnissen gegenüber den durch Längsbiegung und Querschnittsbelastung von außen verursachten Beanspruchungen nur eine untergeordnete Rolle.

Bei Graugussleitungen der Nennweiten DN 200 und DN 400 mit einer Überdeckung von 1 m wurde die zusätzliche Belastung durch einen Schwerlastwagen SLW 30 betrachtet. In der Folge ergab sich eine erhebliche Vergrößerung der Umfangsspannungen. Die dominierenden Längsspannungen erhöhten sich aber wegen der im Vergleich zur Ausdehnung der Lastumlagerungen geringen Längenausdehnung der Radaufstandsflächen entlang der Leitungsachse nur geringfügig.

Lastumlagerungen bestimmen die Leitungsbeanspruchung wesentlich, da sie die Auflast auf der Rohrleitung um ein Vielfaches erhöhen können. Der in der Parameterstudie festgestellte teilweise deutliche Einfluss der Bodenparameter Reibungswinkel, Kohäsion und Elastizitätsmodul ist besonders auf die Beeinflussung der Größe von Lastumlagerungen durch diese Parameter zurückzuführen. Die Querdehnzahl beeinflusst die Berechnungsergebnisse nahezu nicht.

Die Absenkung des Erdreichs hat als auslösender Faktor für die betrachteten Leitungsbeanspruchungen einen wesentlichen Einfluss auf die resultierenden Spannungen und auf die Ausdehnung des hoch beanspruchten Bereichs. Der Ansatz dieser Größe ist bei konkreten Einzelfallbetrachtungen mit sehr großen Unsicherheiten verbunden. Gegebenenfalls kann aus dem Vorhandensein von Bäumen in der Nähe der Leitungstrasse auf die Möglichkeit von besonders ausgeprägten Feuchtegehaltsschwankungen geschlossen werden.

Die festgestellten Auswirkungen infolge der Änderung einzelner Einflussfaktoren ergeben sich bei der jeweils zugrunde gelegten Konstellation von Randbedingungen. Wenn die im zu betrachtenden Einzelfall gegebenen Randbedingungen erheblich von der angenommenen Konstellation abweichen, können sich die Auswirkungen der Änderung eines Einzelnen Parameters erheblich verringern oder vergrößern.

Die Betrachtungen zur möglichen Größenordnung der belastungswirksamen Setzungen sowie die Ergebnisse der durchgeführten Spannungsberechnungen zeigen, dass es nicht möglich ist, eine Versagensgefährdung von Grauguss- oder Stahlleitungen in bindigen Böden pauschal oder anhand einfach zu bestimmender Kriterien auszuschließen. Wegen der normalerweise ebenfalls nicht möglichen Abgrenzung der belastungswirksamen Setzung und den Unsicherheiten beim Ansatz der weiteren Randbedingungen kann für praktische Fallbetrachtungen auch kein präziser Spannungsnachweis zur Feststellung der Betriebssicherheit geführt werden. Die Vereinfachungen bei der Entwicklung des hier vorgestellten Berechnungsverfahrens sind ebenfalls zu berücksichtigen.

Für die Beantwortung der Frage, ob Grauguss- oder Stahlleitungen der Gas- und Wasserversorgung in bindigen Böden und in der Nähe von Einspannungen als versagensgefährdet angesehen werden müssen und deshalb kurzfristig erneuert werden sollen, sind zunächst die Betriebserfahrungen eines Rohrnetzbetreibers, möglichst gebietsweise differenziert, zu berücksichtigen. Die durchgeführte Parameterstudie gibt weitere Hinweise zum Einfluss wesentlicher Parameter, die unter Berücksichtigung der örtlichen Betriebserfahrungen für eine differenzierte Risikobewertung verwendet werden können. Auf Basis dieser Risikobewertung kann eine Entscheidung über die Notwendigkeit von Rehabilitationsmaßnahmen erfolgen und eine zeitliche Reihenfolge für die Durchführung der als erforderlich betrachteten Maßnahmen festgelegt werden.

## **Abstract**

### ***Problem description***

Pipeline networks are mostly representing the largest capital assets of a supplying company. Their current state is essentially determining the reliability and safety of the supplying systems. Therefore the analysis of possible damage causes and the identification of flaws in the pipeline networks as a result of a bad state or as a result of critical loading conditions are being of great importance. One of these damage causes is the loading of pipelines as a result of dehydrating cohesive soils.

For statically calculations of buried pipelines based on the appropriate norms, consistent surrounding conditions are assumed usually. Particularly homogenous bedding conditions are a necessary precondition. However, extensive bending loads as a result of an uneven support of pipelines in longitudinal direction are sometimes detected by damage analyses at water- and natural gas supplying systems. Hints for large longitudinal bending stresses are for example occurring cracks in transverse direction as well as vertical offsets of the cross sections on both sides of cut pipelines. At some conditions, dehydration of cohesive soils in combination with locally rigid supported or clamped pipelines can be a substantial cause for this kind of loading.

The effecting procedures at this juncture are illustrated in the following.

The volume of cohesive soils, consisting out of solid mineral and pore volume, depends on its moisture content in definite limits: decreasing moisture leads to shrinking, increasing moisture leads to swelling of the soil. Dehydration of cohesive soils below pipelines is leading to subsidence of these pipelines because of ground settlement movements. This can cause bending loads, if buried pipelines cannot follow these settlements because of an existing local clamping or support, and the pipeline is loaded like a cantilever. Fixed points, which are impeding the vertical movements of pipelines locally, are mainly pipeline crossings, building insertions, shaft buildings and areas out of non-cohesive soils as well as large stones and brickworks. Partially they are the result of a nowadays not as suitable recognised way of laying. Although some kinds of fixed points, for example building insertions, are generally not avoidable.

Loads which are caused by the described processes can reach an order of magnitude, which is exceeding the strength of pipelines out of some materials at unfavourable conditions. These processes are known by the experience of the suppliers, by damage analyses and by statistical evaluations.

### **Content**

This thesis examines the order of magnitude of occurring loads by calculation at definite conditions for pipelines of older construction types made out of cast iron and steel as a result of the described processes.

The examinations are extended on local supports, which are having a clamping effect on the pipeline. This situation is given particularly in the case of building insertions, for example at service pipes, water supply reservoirs or gas pressure reduction stations. In these cases the pipes are often leading into massive cellar walls. Rigid clampings are existing too, if pipelines are passing shaft buildings. These fixed points are of special importance for the analyses of bending loads at pipelines, because their existence is shown in plans and blueprints. Sometimes pipelines are clamped in brickworks, which were built under the site surface to fix the pipelines in a correct position, and which are drawn at plans too.

In addition to the development of the calculation basis, a description and quantification of the parameters, referring to the typical conditions at urban supplying networks, is done. The shrinking behaviour of cohesive soils and an estimation of the possible magnitude of the resulting settlements are analysed on the basis of a literature study. A parameter study, which is based on the described basics, is done afterwards.

### **Description of the examined kinds of pipelines**

The experiences of the supplying companies confirm the extended danger of breakage of cast iron pipelines especially with smaller nominal diameters. Pipelines out of this material have been established since the first area-wide supplying systems were developed. They were built up to the nineteen-sixties in the Federal Republic of Germany. At the territory of the German Democratic Republic cast iron pipelines were built part wise up to the nineteen-eighties (ROSCHER 2000). Because of the usually long period of use of pipes, they are still representing the largest share of the water supplying pipelines which are actually in use. They are also representing a considerable share of the pipelines, which are in service at natural gas supplying systems, and they are not supposed to be replaced generally in the near future if their nominal diameter is larger than 150 millimeters.

For the connection of cast iron pipes, especially lead joint sockets and screw bushings have a paramount importance. Screw bushing connections are no type of screw joint; the slide is only used for pressing on the seal ring. In statically respects, this kind of joint is representing a hinge, if the occurring angle is not larger as the design of the screw bushing allows.

For new constructions, service pipelines and supplying pipelines made out of steel with small or middle-sized diameters have been displaced more and more by pipelines made out of polyethylene during the last decades. Nevertheless they are representing a large share of the pipelines, which are in service at gas supplying systems. The share of steel pipes in water supplying systems is significant smaller, but not irrelevant. Steel pipelines are used in urban supplying networks roughly since the beginning of the last century. Nowadays they are used for building new pipelines, especially if the pipelines have larger diameters or if they are intended to be used with high inner pressure.

Steel pipelines in former times have been built in large amounts with welded bushings. As a result of connecting the spigot end and the bushing with a circular fillet weld, a force-fit and bending resistant connection is created. The statically properties of such a kind of pipeline sector are, in the case of a sufficient quality of the welding, similar with spigot welded connections, like they are used in modern pipeline constructions. For this reason, a pipeline sector made out of several pipes can be represented roughly by one singular cantilever element without special consideration of the joints.

### **Settlements as a result of soil dehydration**

Although there are occasional reports about damages on buildings, which are caused by decreasing water content in cohesive soils, quantified details about the magnitude of the caused settlements are rare. The same fact is valid for details about the magnitude of changes of soil water content at natural conditions as a cause for soil movements. However there are existing some publications, which are contenting well founded details for distinct cases and which can be used to get some hints about the possible magnitude of settlements. The utilized sources mentioned in this thesis have in common, that the documented fluctuations of water content are caused by changes of rainfall and dry periods and are not the result of anthropogenic changes (for example lowering of groundwater, measurements of hydraulic engineering).

The contented details in relevant literature are not permitting to establish universal valid thresholds about the possible magnitude of settlements as a result of shrinking or about the magnitude of water content changes. However they are useful as clues about the possible magnitude of settlements because of shrinking.

For climatic conditions, which are existing in Germany, the literature study shows the following:

- The existing changes of soil moisture nearby the site surface are decreasing with increasing depth rapidly, and they are limited of an area, witch extends its self a few meters in depth. The magnitude of the resulting settlements is reducing its self in the same way with increasing depth. At common pipeline depths of urban natural gas- and water supplying systems, relevant settlements can be occurring during longer periods with dry weather.



- In the area nearby trees, larger changes of water content have to be expected in comparison with areas without tree vegetation cover. In addition, changes of soil moisture content are exceeding their selves in areas nearby trees up to larger depths. As a result, increased settlements have to be expected in the areas around trees.
- At depths which are corresponding with the usual covering depths of pipelines in urban supplying systems, settlements up to a magnitude of a few centimeters are documented.

### **Solution approach**

The considered materials have in common, that they show a linear-elastic stress and strain relation in a more or less large range of loading. Therefore it is possible to divide the complex total state of stress into different partially load cases, which can be calculated separately. Basis for the calculation scheme is the division of the total loading state into three load cases, which can be treated separately in a different way, and which are superposed afterwards. These load cases are:

- Pipeline considered as a cantilever structure, predominantly with axial bending moments as a result of earth load in combination with uneven bedding conditions (load case 1).
- Earth load pressure on the cross section of the pipe (load case 2).
- Internal pressure on the cross section of the pipe (load case 3).

The calculation of load case 1 is done with the method of finite elements based on the finite element program Plaxis, release 7, which was developed for geotechnical problems. In the used release, the software allows the calculation of two dimensional problems with free definable geometric conditions and the consideration of soil and material properties by different material models.

The quantity and curves of the stress resultants along the longitudinal pipeline axes are calculated with a finite element model, that extends its self in a suitable area along the horizontal direction and the vertical direction. The pipeline is considered as a cantilever. This kind of model, which extends its self in the  $x$ - $z$ -plane, is called as longitudinal model in the following.

Perpendicular to the  $x$ - $z$ -plane, redistributions of soil stresses as a result of the differences of the settlements between the soil above and beside the pipeline, have to be expected in a considerable dimension. To take this fact into account, another finite element calculation, which is orientated perpendicular to the  $x$ - $z$ -plane, is executed before to calculate the magnitude of load increase as a result of stress redistributions at the same conditions. This model is orientated perpendicular to the longitudinal model and takes the situation in the  $y$ - $z$ -plane into account. It is called as cross section model. The increase of stresses, which is calculated by the cross section model, is considered by added linear distributed loads in the longitudinal model.

For depicting the mechanical soil properties in the finite element models, the relationship between stresses and strains has to be described by a suitable material model. Depending on the given situation and demands, different material models can be suitable in soil mechanics. The possible approximation between calculation results and reality depends on the correct choice of the material model. The Mohr-Coulomb-model is used for the description of soil behavior in the calculations of this thesis. The Mohr-Coulomb-model is depicting stress and strain behavior under pressure loading as elastic – perfect plastic.

Five parameters are used for the characterization of the soil behavior: the Young's modulus  $E$ , the cohesion  $c$ , the friction angle  $\varphi$ , the Poisson's ratio  $\nu$  and the dilatancy angle  $\psi$ .

The Young's modulus  $E$  is describing the stiffness of the soil at vertical loading in the elastic range.

The friction angle  $\varphi$  is determining the shear resistance, which can be mobilized in any shear surface in dependence of the stresses normal to this surface. The cohesion  $c$  is describing the forces between the single particles which are independent of the stress state. Friction angle and cohesion are the decisive for the shear strength.

The Poisson's ratio  $\nu$  is describing the relation between horizontal lateral strain and vertical compression strain under single vertical loading. The Poisson's ratio is used for the calculation of horizontal soil stresses as a result of vertical loads.

The dilatancy angle  $\psi$  is describing the volume increase of the soil volume nearby the shear surface, if necessary. The dilatancy has particularly importance in the case of non-cohesive soils with large friction angles. Cohesive soils tend to show no dilatancy. So, at the given problem, the angle of dilatancy has a smaller meaning than the other model parameters. A maybe existing dilatancy is not taken into account.

For the characterization of the material behavior of the pipeline, which is idealized as a cantilever, a linear-elastic material model is used for pipelines made out of cast iron and steel. The parameters of the pipeline have to be applied per length perpendicular to the x-z-plane.

The calculation of load case 2 is realised by analytical calculations for the maximum loaded cross section directly beneath the clamping of the pipeline. In this area, a gap is occurring under the pipe as a result of the settlements. This means that there is no bedding reaction pressure towards the soil load. The necessary equilibrium of loads is resulting by consideration of shear stresses out of load case 1. The cross section of the pipeline can be considered as a ring insert, like it is usual at statically calculations of buried pipes with a constant ring thickness. The given system is three times statically indefinite. Therefore the calculation can be done with the force method in a suitable way.

Load case 3 is calculated analytically.

The division of the total load further allows the comparison of the influences of the different load cases. By the use of strength hypotheses, it is possible to calculate the comparison stresses afterwards by using the distinct stresses out of the different load cases. The calculated values of the comparison stresses can be compared with the critical stress values for single axial tension load.

The choice of a suitable failure hypothesis is depending on the mechanical properties of the material. Generally the behavior of iron materials can be distinguished into ductile and brittle. Because cast iron has a brittle behavior and steel has a ductile behavior, different hypotheses have to be chosen for both of these materials.

Cast iron as a brittle material shows nearly no plastic strain behavior. The stress and strain behavior is linear-elastic, until failure because of rupture occurs at the tensile test. The comparison stress can be calculated with the normal stress hypotheses.

The usual kinds of steel in pipeline construction are, as well as most kinds of steel in general, ductile materials. At tensile tests they are showing a linear-elastic behavior from the beginning of the loading until they are reaching their elastic limit. At continuing load increase, a distinct behavior is adjoining until the tensile strength is reached. After overstepping the tensile strength, the failure is caused by the shear stresses which are a result of the existing normal loading. So the failure occurs as slip breakage. Typically the sliding surface is occurring at 45° inclination. For the determination of the failure risk, the multiaxial stress state is decisive for ductile materials. The hypothesis of distortion energy is suitable for the calculation of the comparison stresses.

The applied solution method is limited for linear-elastic behavior.

### **Parameter study**

Because of the possible differences of the pipeline properties, of the surrounding conditions and of the loading, a large number of different model variants and parameter combinations is existing. Therefore not any constellation of possible conditions can be calculated. So it is necessary to join the calculated variants in a way that allows to take the influences of the main border conditions into account on one hand, and to limit the number of calculations on a containable value on the other hand. Within the bounds of the parameter study calculation rows are formed, of which one chosen parameter is changed while the others are remaining constantly.

Starting point of the parameter study is the examination of a cast iron pipeline with a nominal diameter of 200 millimeters, which is the basis for the most calculation rows. The following parameters are examined in the calculation rows:

- Diameter (cast iron pipelines)
- Diameter (steel pipelines) including a comparison with cast iron pipelines
- Hinge effect of the pipe joints
- Shear strength of the soil
- Young's modulus of the soil
- Poisson's ratio of the soil
- Value of the settlement
- Covering depth
- Sector of the supplying system
- Existence of load redistributions
- Traffic routes and life loads

The most important results of the carried out parameter study are presented afterwards. The signs of the stress resultants are having the following definition:

- Bending moments are positive, if they cause tension stresses at the bottom of the pipeline.
- Normal forces are positive, if they cause tension stresses.
- Shear forces are positive, if their direction is downwards.

The curves of the stress resultants along the pipeline axes are showing the following features in all examined and calculated cases:

- The maximum bending moment is negative and occurs directly beneath the clamping. The curve of the bending force is decreasing rapidly with increasing distance to the clamping. After the curve is passing the zero value the first time, a sector with positive bending load is adjoining, which is decreasing after reaching a relative maximum. The positive area has roughly the geometry of a half oscillation and the bending moment is only arising up to a fraction of the moment directly beneath the clamping in this area. After passing the zero value the second time, the bending load is nearly subsided.
- The maximum shear force is negative and occurs beneath the clamping, too. The curve of the shear force is decreasing roughly linear with increasing distance to the clamping. After the curve is passing the zero value a short sector with small negative shear force is adjoining.
- Normal forces have been considered for embedded steel pipelines with rigid joints only. The calculated normal forces as well as caused normal stresses are very small compared with the resulting bending stresses in all calculations.

The circumferential stresses have been amounting only a fraction of the axial stresses at all calculations. The highest comparative stresses have been occurring at the pipe crown and at the pipe base in every case. The largest stress component has always been an axial stress with positive value at the crown (tension) and a negative value at the base (compression).

The plans of the suppliers are normally contenting the nominal diameters, the pipe material, the sector of supplying and the maximum internal pressure, so that this information is available easily. The approximately covering depth is also known in most cases. The loading by heavy vehicles can be excluded often, if the focused pipeline sector was built outside of traffic roads. But normally the properties of the existing soil as well as the possibility of load redistributions (precondition for their existence: no disturbances of the soil body) can be approximated only very rough. In addition, the presented calculation method allows only a rough approximation to consider the load redistributions.

The nominal diameter and the covering depth are having a considerable influence for the magnitude of longitudinal bending stresses as well as for the extension of the highly loaded sector. The practical experience, that steel pipelines are having a much lower risk of cracking failure in comparison with cast iron pipelines, is confirmed by the carried out examinations.

The supplying sectors natural gas and water are showing minimal differences at the calculated pipeline loadings. For the pressure values which have been examined, internal pressure has a minor importance compared with the loadings which are caused by longitudinal bending forces, and compared with the outside loading of the cross section.

Calculations with an additional loading by a heavy vehicle of the kind SLW 30 have been executed with cast iron pipelines with a covering depth of 1 m and with nominal diameters of 200 millimeters and 400 millimeters. The result was a considerable enlargement of the circumferential stresses. But the dominating longitudinal stresses were increasing only minimal because of the small longitudinal extension of the wheel footprints, compared with the extension of the soil redistributions.

Load redistributions are of considerable importance for the loading of the pipelines, because they can multiply the vertical load on the pipeline many times. The recognized part wise distinct influence of the soil parameters friction angle, cohesion and Young's modulus is mainly a result of the influence of these parameters on the load distributions. The Poisson's ratio has nearly no effect on the calculation results.

The settlements of the soil as an activating factor for the examined pipeline loads are having a considerable influence on the resulting stresses and on the extension of the highly loaded sector. The quantification of this value is of a distinct uncertainty in specific practical cases. Sometimes the existence of trees nearby the pipeline route can be a sign of particularly large range of moisture content.

The recognized effects as a result of the executed parameter variations are occurring for the special constellation of conditions and parameters in each case. The effects on the calculated solutions after changing the value of a single parameter can increase or decrease, if the conditions in specific cases are differing from the conditions which are fixed in the calculations.

The examination of the possible range of the magnitude of settlements, as well as the results of the executed stress calculations, are showing that it is not possible to exclude the risk of failure of cast iron and steel pipelines in cohesive soils in general by the use of criteria which are easy to quantify. Because of the impossibility to quantify the value of subsidence, and the insecurity at the quantification of the other parameters, the practical analyses of given situations does not allow a precise stress calculation to exclude the risk of failure. Additionally the simplifications at the development of the calculation method have to be taken into account, too.

To clarify, if cast iron and steel pipelines of natural gas or water distribution systems in cohesive soils and beneath clappings have to be assessed as failure endangered and therefore have to be rehabilitated, the regionally differentiated experiences of the suppliers have to be taken into account. The executed parameter study contents hints about the influence of important parameters, which can be used for a sophisticated risk analyses in consideration of the regional operation experiences. On the basis of this risk analysis, decisions about the necessity of rehabilitation measures are possible and a timetable for the execution of the identified rehabilitation needs can be arranged.

# 1. Einführung

## 1.1 Problembeschreibung

Die unterirdischen Rohrleitungen der städtischen Gas- und Wasserversorgungsnetze weisen in der Regel eine lange Nutzungsdauer auf. Sie unterliegen während ihrer Betriebsdauer aber der Alterung und werden durch äußere Einflüsse in wechselndem Umfang belastet. Das resultierende Betriebsverhalten der Rohrleitungen unterscheidet sich im Hinblick auf typische Schadensmechanismen und -bilder in Abhängigkeit vom Leitungswerkstoff sowie von weiteren Konstruktionsmerkmalen wie der Verbindungstechnik oder der Art eines gegebenenfalls vorhandenen Korrosionsschutzes. Hohe Anteile am Leitungsbestand von älteren Versorgungsnetzen haben insbesondere Rohrleitungen aus Grauguss und Stahl. Die Rehabilitationsprogramme der Versorgungsunternehmen betreffen diese Leitungswerkstoffe deshalb in großem Umfang. So ist bei Graugussleitungen neben Schäden durch undichte Verbindungen bei erhöhter Beanspruchung häufig die Neigung zu Rohrbrüchen erkennbar. Der Leitungswerkstoff kann durch Spongiose korrodieren, wodurch die Belastbarkeit des Rohres im Lauf der Zeit reduziert werden kann. Bei älteren Stahlrohrleitungen sind häufig Schäden und Querschnittsschwächungen durch Korrosion sowie teilweise auch schadhafte Rohrverbindungen zu beobachten. Zudem war in früherer Zeit die Stahl-Herstellung nach dem Thomas-Verfahren verbreitet. Die so hergestellten Stähle können mit zunehmendem Alter zur Versprödung neigen, weshalb bei Leitungen aus diesem Werkstoff auch eine alterungsbedingte Reduzierung der Beanspruchbarkeit möglich sein kann.

Rohrnetze stellen meist das größte Anlagevermögen eines Versorgungsunternehmens dar. Ihr Zustand bestimmt die Zuverlässigkeit und Sicherheit der Versorgung wesentlich. Der Analyse von möglichen Schadensursachen und der Identifikation von Schwachstellen im Netz, die sich aus einem schlechten Leitungs- oder aus einem kritischen Beanspruchungszustand ergeben können, kommt aus diesem Grund eine große Bedeutung zu. Eine dieser Schadensursachen ist die Beanspruchung von Rohrleitungen infolge der Austrocknung bindiger Böden.

Bei der statischen Berechnung erdverlegter Rohrleitungen auf Basis der einschlägigen Regelwerke wird üblicherweise von gleichmäßigen Umgebungsverhältnissen, insbesondere von einer homogenen Bettung der Leitung im Erdreich ausgegangen. Bei der Analyse von Rohrschäden an Wasser- und Gasversorgungsleitungen wird jedoch immer wieder festgestellt, dass diese Leitungen infolge einer ungleichmäßigen Stützung in Rohrlängsrichtung stellenweise erheblichen Biegebeanspruchungen unterworfen sind. Hinweise auf große Längsbiegespannungen geben etwa auftretende Rundrisse quer zur Hauptachse oder ein nach der Leitungstrennung auftretender vertikaler Versatz der gegenüberliegenden Schnittufer zueinander. Bei entsprechenden Randbedingungen kann eine wesentliche Ursache für solche Belastungen die Austrocknung bindiger Böden in Kombination mit einer örtlich unnachgiebigen Lagerung von Rohrleitungen sein.

Die hierbei wirksamen Vorgänge werden im Folgenden kurz dargestellt.

Das aus Festsubstanz und Porenraum bestehende Volumen eines bindigen Bodens ist innerhalb bestimmter Ober- und Untergrenzen abhängig von dessen Wassergehalt: Austrocknung führt zum Schrumpfen, Feuchtezunahme zum Quellen des Bodens. Trocknet ein Boden unterhalb einer Rohrleitung aus, führt dies infolge der ausgelösten Setzungsbewegungen zum Absinken dieser Leitung. Ist dieses Absinken an einer oder mehreren Stellen durch Festpunkte behindert, wird die Leitung als Träger beansprucht und somit belastet. Festpunkte, welche die Vertikalbewegung von Rohrleitungen örtlich behindern, sind insbesondere Leitungskreuzungen, Bauwerkseinführungen, Schachtbauwerke und Stellen nichtbindiger Böden sowie große Steine und Mauerwerksbestandteile. Sie sind teilweise das Resultat einer heute als nicht mehr sachgemäß erkannten Verlegeweise. Manche Arten von Festpunkten, beispielsweise Gebäudeeinführungen, sind jedoch prinzipiell nicht vermeidbar.

Die durch die beschriebenen Vorgänge ausgelösten Belastungen können bei ungünstigen Bedingungen eine Größenordnung erreichen, bei der die Beanspruchbarkeit von Rohrleitungen aus manchen Werkstoffen überschritten werden kann.

## **1.2 Wissensstand**

Die Austrocknung bindiger Böden als Ursache für eine wesentliche Belastung von Rohrleitungen in Versorgungsnetzen wurde von KOTTMANN (1978) identifiziert.

An den während der Untersuchungen von KOTTMANN (1978) in Betrieb befindlichen Graugussleitungen des überwiegend in tonigen Böden verlegten Stuttgarter Wasserverteilnetzes mit einer Gesamtlänge von circa 1400 km konnten signifikant erhöhte Rohrbruchzahlen in Perioden stärkerer Bodenaustrocknung nachgewiesen werden.

Als weitere im Hinblick auf das Bruchgeschehen wesentliche Erkenntnisse wurden festgestellt:

- Ein hoher Grundwasserstand schützt vor Rohrbrüchen, da Grundwasser der Austrocknung des Bodens in niederschlagsfreien Perioden entgegen wirkt.
- Rohrleitungen brechen bevorzugt in der unmittelbaren Nähe von unbeweglichen Auflagern.
- Die Bruchgefahr ist je nach Bodenart sehr verschieden.
- Die Bruchgefahr ist wesentlich abhängig von der Nennweite DN; sie ist bei kleinen Nennweiten hoch und nimmt mit größer werdenden Nennweiten rapide ab. Besonders bruchgefährdet sind Graugussleitungen bis DN 80.



Verringerungen des Bodenwassergehalts in einem Umfang, der zu einer signifikanten Häufung von Rohrbrüchen führen kann, sind nach KOTTMANN (1978) auf folgende Ursachen zurückzuführen:

- Austrocknung allein bedingt durch jahreszeitliche Klimaschwankungen. In warmen und besonders trockenen Perioden bewirkt vor allem die Verdunstung eine von oben nach unten hin fortschreitende Abnahme der Bodenfeuchtigkeit bis in Tiefen von deutlich mehr als einem Meter.
- Das Gefrieren frostschiebender Böden im Winter. Als frostschiebend werden Böden bezeichnet, die ihr Volumen während des Gefriervorgangs durch Eislinsenbildung stark vergrößern. Dabei wird dem Erdkörper in der Frostzone bei der Bildung von Eislinsen Porenwasser entzogen. Infolge des so entstehenden Feuchtigkeitsgefälles wird Wasser auch aus tieferen Bodenschichten angesaugt, wobei der Transport durch Elektrokinese und kapillares Saugen geschieht (JUMIKIS 1968). Dies führt zu einem Austrocknen des Bodens auch deutlich unterhalb der Frostzone.

Die gewonnenen Erkenntnisse ergaben sich im Wesentlichen aus dem Vergleich von monatlichen Rohrbruchhäufigkeiten, Witterungsbedingungen und Bodenfeuchtheitsmessungen sowie durch Betrachtung der Feuchtetransportvorgänge in bindigen Böden, ergänzt um die Auswertung von Erfahrungsberichten zum Bruchgeschehen in Deutschland. Der Einfluss von Bäumen auf die Austrocknung des Erdreichs wurde nicht mitbetrachtet.

In Großbritannien berichtete OWEN (1984) in einer im Auftrag von British Gas erstellten Studie über die Belastung von Rohrleitungen in Versorgungsnetzen durch die Austrocknung von tonigen Böden. Ohne Bezug auf die Arbeit von KOTTMANN (1978) wurde auch hier das Schrumpfen von Tonböden als Ursache vieler Versagensfälle in Versorgungsnetzen angesehen. Um den besonderen Einfluss der Vegetation auf die Bodenfeuchte zu erfassen, wurden im Rahmen von Feldversuchen die jahreszeitlichen Bodenhebungen und -senkungen sowie Temperatur- und Feuchtegehaltsschwankungen im Bereich üblicher Verlegetiefen in der Umgebung von Bäumen gemessen und ausgewertet. Die in diesem Zeitraum aufgetretenen Rohrbrüche an den in der Nähe befindlichen Gasversorgungsnetzen wurden ebenfalls erhoben.

Die Hauptergebnisse der Arbeit von OWEN (1984) sind:

- Eine Hauptursache für zyklische Bodenhebungen und -senkungen ist die Austrocknung von Tonböden im Bereich von Pflanzen bei entsprechender Witterung. Von wesentlichem Einfluss sind dabei vor allem tiefwurzelnde Bäume.
- Erhöhte Bruchraten treten insbesondere auf, wenn die Bodenfeuchte gegen Ende des Sommers unter das Minimum des Vorjahres sinkt.
- Nicht so ausgeprägt ist ein Anstieg der Rohrbrüche, wenn gegen Spätherbst oder Frühwinter die Bodenfeuchte ihren Maximalwert erreicht.

Eine Differenzierung des Bruchgeschehens nach Nennweite, Werkstoff, Baujahr oder anderen Kriterien für eine geeignete Beschreibung der betroffenen Leitungen erfolgte dabei nicht.

Obwohl in Veröffentlichungen, die sich mit Schadensursachen bei Rohrnetzen beschäftigen, immer wieder auf die Erkenntnisse von KOTTMANN (1978) Bezug genommen wird, wurden realitätsnahe Berechnungen der auftretenden Belastungen nach Kenntnis des Verfassers bisher nirgends veröffentlicht.

### 1.3 Aufgabenstellung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, die Belastung von Rohrleitungen aufgrund der Austrocknung bindiger Böden unter Einbeziehung der wesentlichen Randbedingungen für praktisch bedeutsame Fälle rechnerisch zu erfassen und wesentliche Einflussfaktoren im Rahmen einer Parameterstudie zu bewerten. Angestrebt wird damit eine Abschätzung der Größenordnung der unter definierten Randbedingungen ausgelösten maximalen Spannungen, die Bewertung des Einflusses der wesentlichen für die Belastung maßgeblichen Faktoren sowie eine Abgrenzung der in der Nähe von Festpunkten potenziell gefährdeten Leitungslängen.

Bei modernen Leitungswerkstoffen und Bauweisen werden in Verbindung mit den beschriebenen Vorgängen keine Schäden in signifikantem Umfang mehr festgestellt. Die Betrachtungen dieser Arbeit konzentrieren sich deshalb auf Leitungen älterer Baujahre aus Grauguss und Stahl in kleineren und mittleren Nennweiten. Beiden Leitungswerkstoffen ist gemeinsam, dass sie in einem mehr oder weniger weiten Beanspruchungsbereich ein linear-elastisches Spannungs-Dehnungsverhalten aufweisen. Deshalb ist es möglich, den komplexen Gesamtbeanspruchungszustand in Teillastfälle aufzuteilen, die unabhängig voneinander berechnet werden können.

Im Rahmen von Kapitel 2 (Grundlagen) erfolgt zunächst eine Beschreibung der zu betrachtenden Leitungstypen sowie der Umgebungsbedingungen bei städtischen Rohrnetzen. Weiter werden einige grundlegende Betrachtungen zum System Boden-Rohrleitung durchgeführt, bevor die weitere Vorgehensweise beschrieben und ein geeigneter Lösungsweg festgelegt wird.

Die Betrachtungen dieser Arbeit erstrecken sich dabei auf Festpunktlagerungen, bei denen eine starre Einspannung der Rohrleitung gegeben ist. Dieser Fall tritt insbesondere bei der Einführung in Bauwerke auf, etwa bei Hausanschlüssen, Wasserbehältern oder Gasdruckregelanlagen. In diesen Fällen münden die Rohrleitungen häufig horizontal in eine massive Kellerwand. Auch bei der Durchführung von Leitungen durch Schachtbauwerke ergeben sich starre Einspannungen. Für die Analyse der Biegebeanspruchung von Rohrleitungen sind die genannten Festpunkte auch deshalb von besonderer Bedeutung, weil ihr Vorhandensein aus Planwerken oder Bauskizzen bekannt ist. Gelegentlich sind Rohrleitungen auch in Mauerwerke eingespannt, die unterhalb der Geländeoberfläche errichtet wurden, um die Leitungen zu fixieren und deren Lage in den Planwerken teilweise ebenfalls verzeichnet ist.

## 2. Grundlagen

### 2.1 Beschreibung der betrachteten Rohrleitungstypen

#### 2.1.1 Graugussrohrleitungen

Die Erfahrungen der Netzbetreiber bestätigen die besondere Bruchgefährdung von Graugussleitungen vor allem kleinerer Nennweiten. Auf dieser Tatsache gründet eine auf Veranlassung des Bund-Länderausschusses „Gaswirtschaft“ entwickelte Empfehlung zum Rückbau von Graugussleitungen bis DN 150 in Gasrohrnetzen (DVGW 2000). Die vorgesehenen Rehabilitationszeiträume bewegen sich im Bereich weniger Jahre und sind vom Anteil dieser Leitungen an der Gesamtlänge der Verteilnetze des jeweiligen Netzbetreibers abhängig.

Graugussleitungen wurden seit Beginn der Entstehung erster flächendeckender Versorgungsnetze eingesetzt und in den Bundesländern der BRD bis etwa Mitte der sechziger Jahre verlegt. Im Gebiet der ehemaligen DDR wurden sie teilweise noch bis zu Beginn der achtziger Jahre verbaut (ROSCHER 2000). Wegen der üblichen langen Nutzungsdauer von Rohrleitungen stellen Graugussleitungen immer noch den größten Anteil der in Betrieb befindlichen Wasserversorgungsleitungen (DVGW 2002). Sie sind auch im Bereich der Gasversorgung noch mit wesentlichen Anteilen an vielen Versorgungsnetzen in Betrieb und werden in den Nennweiten größer DN 150 voraussichtlich nicht kurzfristig generell rehabilitiert. Der Nennweitenbereich der früher hergestellten Graugussleitungen umfasst alle in Verteilnetzen üblichen Größenbereiche bis hinab zu DN 40, gängig waren jedoch Nennweiten ab DN 80 (PARDUN 1950). Während es sich bei den gegen Ende des 19. und Anfang des 20. Jahrhunderts verlegten Gussrohren noch um im Sandgussverfahren hergestellte Rohre handelt, wurden die etwa ab 1930 verlegten Gussrohrleitungen in der Regel im Schleudergussverfahren, mit dem eine höhere Bauteilfestigkeit erreicht werden konnte, hergestellt (ROSCHER 2000). Die gegenwärtig noch im Einsatz befindlichen Gussrohre wurden zum überwiegenden Teil im Schleuderverfahren gefertigt.

Ab etwa 1956 wurden Rohre aus duktilem Gusseisen produziert, durch welche die Graugussrohre in den Folgejahren beim Leitungsneubau weitgehend verdrängt wurden. Die Unterschiede im mechanischen Verhalten der beiden Gusseisenwerkstoffe werden durch die Form und Verteilung des im Leitungswerkstoff elementar ausgeschiedenen Graphits bestimmt (GIESECKE 1999). Das bei Grauguss in Lamellenform eingelagerte Graphit bewirkt bei mechanischer Belastung eines Bauteils eine innere Kerbwirkung an den Spitzen der Graphitlamellen, die eine Reduzierung der Festigkeit und ein beinahe verformungsloses Bruchverhalten (Spröbruchverhalten) zur Folge hat. Im Gegensatz dazu verursacht das bei duktilem Gusseisen kugelförmig eingelagerte Graphit keine Kerbwirkung, wodurch sich verbesserte Festigkeitseigenschaften sowie eine begrenzte Verformbarkeit (Duktilität) ergeben. Duktile Gussrohre weisen eine Bruchdehnung von mindestens 10 % auf. Die

Betriebserfahrungen der Netzbetreiber bestätigen die zu erwartende geringe Bruchanfälligkeit von Rohrleitungen aus duktilem Gusseisen.

Für die Verbindung von Graugussrohren haben insbesondere die in Bild 2-1 dargestellten Stemm- und Schraubmuffen eine überragende Bedeutung. Seit Beginn des Aufbaus zentraler Versorgungsnetze war zunächst die Verstemmung der Muffen gängig, bis 1931 Schraubmuffenverbindungen auf den Markt kamen, durch welche die Stemmuffentechnik in den Folgejahren weitestgehend verdrängt wurde (FACHGEMEINSCHAFT GUSSEISERNE ROHRE 1983). Schraubmuffen wurden bis zum Ende der Verwendung von Graugussrohren eingesetzt. Die Eigenschaften beider Muffentypen sind in Bezug auf die vorliegende Problemstellung besonders im Hinblick auf ihr Verhalten bei der Biegebeanspruchung von Rohrleitungsabschnitten interessant.

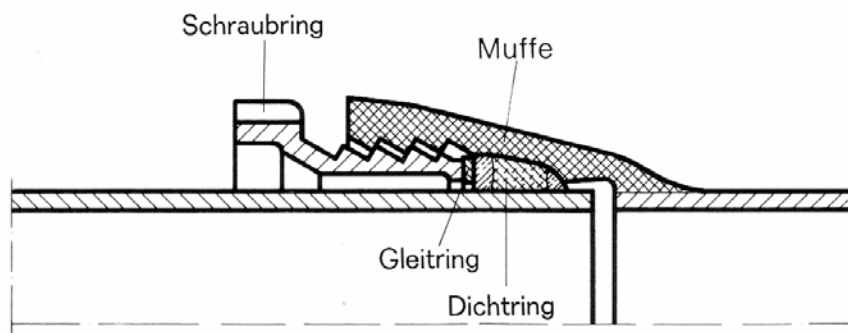


Bild 2-1-a: Schraubmuffenverbindung (FACHGEMEINSCHAFT GUSSEISERNE ROHRE 1983)

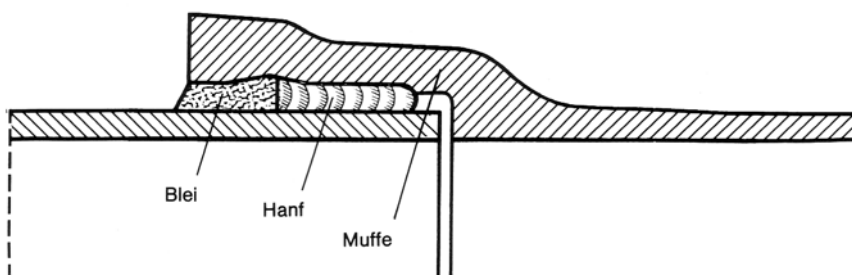


Bild 2-1-b: Stemmuffenverbindung (FACHGEMEINSCHAFT GUSSEISERNE ROHRE 1983)

Stemmuffen wurden abgedichtet, indem zunächst ein Dichtstoff in den Muffengrund eingebracht und der Muffenspalt anschließend mit einem Vorsatzstoff nach außen hin abgeschlossen wurde. Als Dichtstoff wurden meist Stricke aus Hanf oder anderen organischen Faserstoffen, beispielsweise Holzwolle, verwendet. Bei der Errichtung von Gasleitungen wurden sie mit Bitumen oder Teer getränkt, um eine verbesserte Dichtwirkung zu erzielen.

Als Vorsatzstoff wurde in der Regel Blei verwendet, das eingegossen oder kalt eingebracht und anschließend verstemmt wurde. Nach der Verstemmung ist die Verbindung nicht mehr frei beweglich.

Die dauerhafte Betriebssicherheit von Stemmmuffen hängt sehr stark von den Umgebungs- und Betriebsbedingungen der Rohrleitung sowie von der Qualität der Bauausführung ab. Generell werden bei dieser Art der Verbindung aber relativ häufig Undichtigkeiten festgestellt. Sie sind zum einen auf den Verlust der Funktionsfähigkeit der Dichtstoffe durch Verrottung infolge chemischer und biologischer Prozesse (ROSCHER 2000), bei Erdgasleitungen auch auf die Austrocknung des getränkten und im Verarbeitungszustand gequollenen Hanfs (KOTTMANN 1966), zurückzuführen. Zum anderen werden oft auch Austriebe des Vorsatzstoffes aus der Muffe festgestellt. Diese können durch eine mangelhafte Verstemmung während des Einbaus sowie in Wasserversorgungsnetzen auch durch Druckstöße bedingt sein. Des Weiteren werden Austriebe des Vorsatzstoffes auch durch Bodenbewegungen, die entlang der Leitungsachse ungleichmäßig verlaufen, verursacht (ROSCHER 2000). Diese Art von Bodenbewegung liegt auch in der zu betrachtenden Problemstellung vor. Infolge der aus den Bodenbewegungen resultierenden Längsbiegespannungen kann an der Verbindungsstelle zweier Rohre eine Abwinklung auftreten, die auf Muffenaustriebe und Kriechbewegungen des im Vergleich zum Rohrwerkstoff relativ gut verformbaren Bleis zurückzuführen ist. Bei höheren Längsbiegebeanspruchungen der Rohrleitung ergibt sich so eine begrenzte Gelenkwirkung an der Verbindungsstelle zweier Rohre, die allerdings zur Beschädigung der Verbindung, insbesondere zu Undichtigkeiten, führen kann. Stemmmuffenverbindungen sind nicht zugfest, auch wenn sich durch den Reibungsverbund zwischen Verstemmung und Rohrbeziehungsweise Muffenwand in geringem Umfang Zugkräfte übertragen lassen. Längsverschiebungen können ebenfalls nur in geringem Umfang aufgenommen werden.

Bei Schraubmuffenverbindungen handelt es sich nicht um eine Schraubverbindung; der Schraubring dient lediglich zum Fixieren und Anpressen des Dichtrings. Solche Verbindungen sind in der Standardausführung (so genannte „Union-Schraubmuffe“) konstruktiv so ausgelegt, dass sie Abwinklungen bis zu  $3^\circ$  ermöglichen und axiale Verschiebungen bis zu 14 mm aufnehmen können (PARDUN 1950). Sie sind in statischer Hinsicht als gelenkig anzusehen, sofern die Ausknickung die konstruktiv bedingten Grenzen nicht überschreitet. Bei den für Graugussleitungen eingesetzten Schraubmuffen besteht der Dichtring in der Regel aus Elastomeren. Bei älteren Verbindungen kamen überwiegend Rollgummidichtringe zum Einsatz.

Neben den thermoelastischen Eigenschaften der Dichtringe ist ihr Alterungsverhalten von besonderer Bedeutung, für das insbesondere die Einwirkungen von Licht, Sauerstoff und Wärme eine große Rolle spielen. Bei Gasversorgungsleitungen können die Dichtringe ferner dem Einfluss von kondensierbaren Kohlenwasserstoffverbindungen ausgesetzt sein, die je nach Herkunft des verteilten Erdgases in mehr oder weniger großen Anteilen im Erdgas enthalten sind. Manche dieser Verbindungen können auf Dichtringe eine quellende Wirkung

ausüben, die zu einer erheblichen Beanspruchung führen kann (FACHGEMEINSCHAFT GUSSEISERNE ROHRE 1983). Das Alterungsverhalten der Elastomerdichtungen wird demnach sehr stark von der jeweiligen Produktbeschaffenheit und den Umgebungs- und Betriebsbedingungen abhängig sein. Allerdings gelten Schraubmuffenverbindungen im Bereich der Gas- und Wasserverteilnetze auch bei älteren Versorgungsleitungen als zuverlässig. Beobachtungen über statistisch signifikante Häufungen von Undichtheiten oder den Verlust der Gelenkwirkung infolge zerstörter oder infolge ihres Alters nicht mehr funktionsfähiger Elastomer-Dichtringe wurden bisher nicht veröffentlicht. Dies kann darauf zurückzuführen sein, dass die Dichtelemente in eingerdeten Rohrleitungen vor Lichteinfluss (UV-Strahlung) und in begrenztem Umfang auch vor Sauerstoffzutritt geschützt sind. Sie unterliegen in der Regel auch nur begrenzten Temperaturschwankungen und sind insbesondere keiner Hitzeeinwirkung ausgesetzt.

### **2.1.2 *Stahlrohrleitungen***

In den letzten Jahrzehnten wurden Rohrleitungen aus Stahl beim Leitungsneubau im Bereich der Hausanschlusstechnik sowie bei Versorgungsleitungen mit kleineren und mittleren Nennweiten immer mehr von Leitungen aus Polyethylen (PE) verdrängt. Sie stellen in Gasversorgungsnetzen aber immer noch einen hohen Anteil des Leitungsbestands. Im Bereich der Wasserversorgung ist ihr Anteil deutlich geringer, aber nicht unerheblich. Stahlrohre werden in der kommunalen Versorgung etwa seit Beginn des letzten Jahrhunderts eingesetzt. Gegenwärtig finden sie beim Neubau von Verteilnetzen vorwiegend im Bereich höherer Drücke und größerer Dimensionen Anwendung.

Querbrüche oder –risse werden auch bei Stahlrohrleitungen registriert, verglichen mit den korrosionsbedingten Schäden allerdings nur in geringem Umfang. Die vor allem bei Leitungen mit Muffenverbindungen manchmal festgestellten Verbindungsschäden werden durch eine mangelhafte Ausführung der Verbindungen schon in der Bauphase begünstigt, deren Versagen nach jahrzehntelangem störungsfreien Betrieb wird aber vermutlich teilweise auch durch zusätzliche Belastungen infolge von Bodenbewegungen ausgelöst. Der Bereich gängiger Nennweiten erstreckt sich bei Versorgungsleitungen von DN 50 bis DN 400, Hausanschlussleitungen aus Stahl wurden bis hinab zu DN 40 verlegt.

Stahlrohrleitungen älterer Bauart wurden in großem Umfang mit geschweißten Einsteckmuffen ausgeführt (Bild 2-2). Durch die Verbindung von Spitzende und Muffe mittels einer umlaufenden Kehlnaht entsteht eine kraftschlüssige, biegesteife Verbindung. Die statischen Eigenschaften eines solchen Leitungsabschnittes sind bei ausreichender Güte der Schweißnähte ähnlich wie bei stumpf aneinander geschweißten Rohren, wie sie im modernen Rohrleitungsbau eingesetzt werden. Ein Leitungsabschnitt aus mehreren Rohren kann daher bei globaler Betrachtung näherungsweise als ein einziges Trägerelement ohne besondere Berücksichtigung der Verbindungsstellen abgebildet werden.

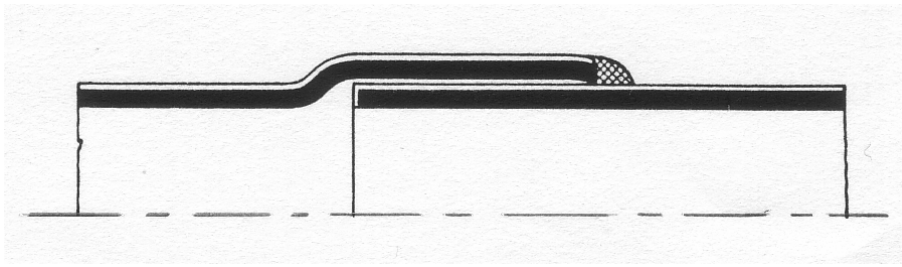


Bild 2-2: Kehlnahtgeschweißte Einsteckmuffe (WESTDEUTSCHE MANNESMANNRÖHREN AKTIENGESELLSCHAFT 1950)

## 2.2 Einfluss der Umgebungsbedingungen bei axial gleichmäßiger Rohrbettung

Bei in offener Bauweise verlegten Rohrleitungen werden statische Berechnungen üblicherweise nach den Empfehlungen des Arbeitsblattes ATV-DVWK-A 127 „Statische Berechnung von Abwasserkanälen und –leitungen“ durchgeführt, dessen Inhalte dem aktuellen Wissensstand in der Rohrstatik entsprechen und das zwischenzeitlich in dritter Auflage vorliegt (ATV-DVWK 2000). Die Anwendung des Arbeitsblattes wird im Bedarfsfall auch vom DVGW im Merkblatt GW 312 für die statische Berechnung von Versorgungsleitungen empfohlen (DVGW 1990). Kennzeichnend für das enthaltene Berechnungsverfahren ist eine breite Anwendbarkeit für unterschiedliche Rohrsteifigkeiten, Bodenverhältnisse, Einbau- und Überschüttungsbedingungen. Dennoch gibt es wesentliche Einschränkungen für den zulässigen Einsatzbereich. Insbesondere wird für die Anwendbarkeit vorausgesetzt, dass alle Belastungen und Reaktionen über die Rohrlänge gleichmäßig verteilt sind. Ferner muss der Einbau der Rohrleitungen nach den in DIN EN 1610 (1997) genannten Anforderungen an die Bettung der Rohre und an die Verfüllung der Leitungszone erfolgen.

Beide Anforderungen sind bei der im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit zu betrachtenden Problemstellung in grober Weise nicht erfüllt, so dass keine Grundlage für die Anwendung des Berechnungsverfahrens gegeben ist. Das Arbeitsblatt beschreibt aber einige elementare Zusammenhänge über die Einflüsse auf die Belastung von Rohrleitungen, die unabhängig vom zulässigen Anwendungsbereich des Berechnungsverfahrens von Bedeutung sind und die deshalb nachfolgend dargestellt werden. Dabei werden die Ausführungen auf die qualitative Erläuterung der Sachverhalte ohne die Angabe der im Einzelnen erforderlichen Berechnungsschritte und Lösungsgleichungen beschränkt.

Die Belastung von eingedeten Rohrleitungen wird nicht nur bestimmt von der Wichte und Höhe des überdeckenden Bodens sowie von gegebenenfalls zusätzlich vorhandenen Auflasten, sondern auch von den vorhandenen Umgebungsbedingungen und den Wechselwirkungen zwischen Rohr und Boden. Zur Beschreibung dieser Zusammenhänge werden die in Bild 2-3 dargestellten Bodenzonen voneinander unterschieden.

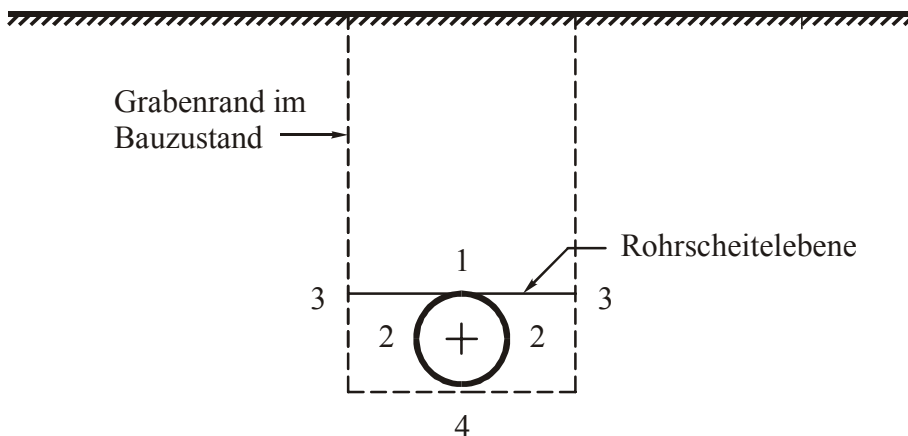


Bild 2-3: Bodenzonen nach ATV-DVWK-A 127

Für die Ermittlung der Belastung des Rohrquerschnitts im Einbauzustand sind besonders die folgenden Effekte von Bedeutung:

- In der Verfüllzone (Zone 1) können sich nach der Silotheorie Spannungsumlagerungen zum gewachsenen Erdreich (Zone 3) hin ergeben, welche die auf die Rohrscheitelebene wirkende Belastung gegebenenfalls abmindern.
- Die in der Rohrscheitelebene wirksame Belastung verteilt sich wegen der im Allgemeinen unterschiedlichen Steifigkeit der Rohrleitung und des Bodens neben dem Rohr (Zone 2) ungleichmäßig über die Grabenbreite.

Die Silotheorie geht von der Annahme aus, dass durch Setzungen des Erdreichs in der Verfüllzone, die beim Einbringen und Verdichten des Bodens während des Verfüllvorgangs entstehen, Scherkräfte entlang der Grabenwände der Baugrube hervorgerufen werden. Durch diese Scherkräfte wird ein Teil der Gewichtskräfte des Erdkörpers in der Verfüllzone, die in der Modellvorstellung idealisiert als homogen angenommen wird, auf das umgebende Erdreich umgelagert (Bild 2-4). Die auf die Rohrscheitelebene wirkenden Vertikalspannungen werden im Bereich des Rohrgrabens dadurch verringert.

Grundsätzliche Voraussetzungen für das Zustandekommen einer Silowirkung sind:

- Die Grabenwände müssen auf Dauer erhalten bleiben.
- Der Boden der Grabenverfüllung muss einen kleineren Verformungsmodul als der Boden neben dem Graben aufweisen.
- Die Grabenverfüllung muss eine Proctordichte  $D_{Pr} \geq 90\%$  aufweisen.
- Die technische Ausführung der Rohrgrabenverfüllung sowie die eingesetzte Verbautechnik müssen einen ausreichenden Verbund zwischen der Verfüllzone und den Grabenwänden gewährleisten.

Die Größenordnung der Silowirkung ist abhängig von der Geometrie des Rohrgrabens (Höhe und Breite), der Art der Grabenverfüllung (Verdichtung und Verbautechnik) und den Eigenschaften des in der Verfüllzone eingebrachten Bodens.



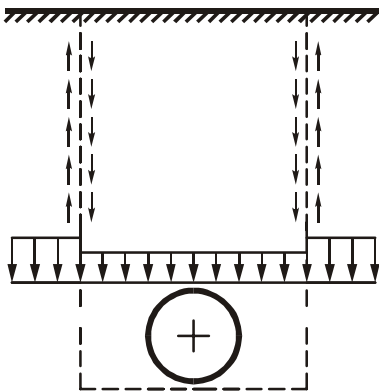


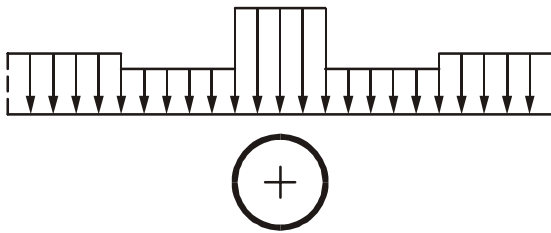
Bild 2-4: Spannungsumlagerungen nach der Silotheorie

Lastumlagerungen in der Rohrscheitelebene treten grundsätzlich immer auf, wenn die vertikale Steifigkeit im Bereich über dem Rohr von der vertikalen Steifigkeit des Bodens neben dem Rohr (Zone 2) abweicht. In diesem Zusammenhang ist das Verhalten biegeweicher Rohre vom Verhalten biegesteifer Rohre zu unterscheiden. Bei biegesteifen Rohren ruft die Belastung keine wesentlichen Verformungen hervor. Demgegenüber verformen sich biegeweiche Rohre unter Last. In Folge der vertikalen Belastung ergibt sich eine Vergrößerung der Rohrbreite, die im Boden einen Bettungsreaktionsdruck mobilisiert (passiver Erddruck), der eine stützende Wirkung auf den Rohrquerschnitt hat. Die Steifigkeit der Rohrleitung wird so auch in vertikaler Richtung von den Bodeneigenschaften in der Leitungszone abhängig. Die Steifigkeitsunterschiede wirken sich auf die Lastverteilung in der Rohrscheitelebene folgendermaßen aus:

- Wenn der eingebettete Rohrquerschnitt eine höhere Steifigkeit als der umgebende Boden aufweist, ergibt sich eine Lastkonzentration (-erhöhung) über dem Rohr. Der Bereich neben dem Rohr wird entlastet.
- Wenn der eingebettete Rohrquerschnitt eine geringere Steifigkeit als der umgebende Boden aufweist, ergibt sich eine Lastreduzierung (-abnahme) über dem Rohr. Der Bereich neben dem Rohr wird belastet.

Die Größenordnung der Lastumlagerungen ist abhängig von den Eigenschaften der Rohrleitung, ihrer Ausladung, der Geometrie des Rohrgrabens und den mechanischen Eigenschaften des Bodens in der Leitungszone sowie auch in den übrigen in Bild 2-3 dargestellten Zonen. Zu berücksichtigen sind ebenfalls die Gestaltung der Rohrbettung in der Leitungszone und die Art der Grabenverfüllung, die von dem eingesetzten Verdichtungsverfahren sowie von der Art des Grabenverbau und dessen Entfernung abhängig ist. Bei breiten Gräben oder Dammschüttungen erstrecken sich die Lastumlagerungen in der Breite etwa über den vierfachen Rohrdurchmesser. Sie sind in Bild 2-5 in idealisierter Form dargestellt.

a) Rohrquerschnitt biegesteif:



b) Rohrquerschnitt biegeweich:

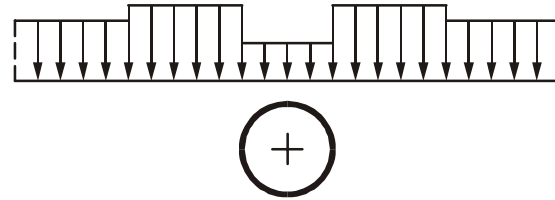


Bild 2-5: Umlagerung der Bodenspannungen

### 2.3 Überlegungen zu den Auswirkungen von Setzungen bei ungleichmäßig aufgelagerten Rohrleitungen

Wenn aufgrund von Bodenschumpfungen Setzungen des Erdreichs auftreten, wird eine starr eingespannte Rohrleitung als Biegeträger belastet. Im Nahbereich der Einspannung ist dann mit der Ausbildung einer klaffenden Fuge zu rechnen, da die Biegelinie der Rohrleitung das nach unten verschobene Niveau der Bettungsschicht erst in einem gewissen Abstand wieder erreichen kann. Die Setzungsbewegungen finden dabei weiträumig statt, sind also nicht auf den Bereich der Leitungs- und Verfüllzone beschränkt. Eine örtlich durch einen Festpunkt fixierte Rohrleitung kann in Abhängigkeit von ihrem Biegeverhalten das durch die Setzung nach unten verschobene Niveau der Rohrbettung erst in einiger Entfernung zu diesem Festpunkt erreichen. Der Sachverhalt ist in den Bildern 2-6 und 2-7 skizziert, wobei die Setzungsbewegungen in Analogie zu Kapitel 2.2 für die Rohrscheitelebene dargestellt werden. Die Setzungen der Rohrscheitelebene entsprechen dabei den für die Längsbiegebelastung ursächlichen Setzungen in der Ebene der Leitungssohle.

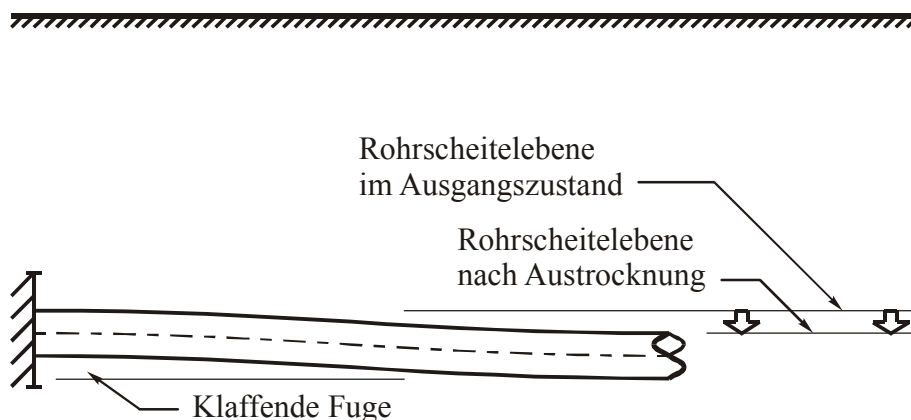


Bild 2-6: Idealisierte Darstellung der Setzung auf Höhe des Rohrscheitels (x-z-Ebene)

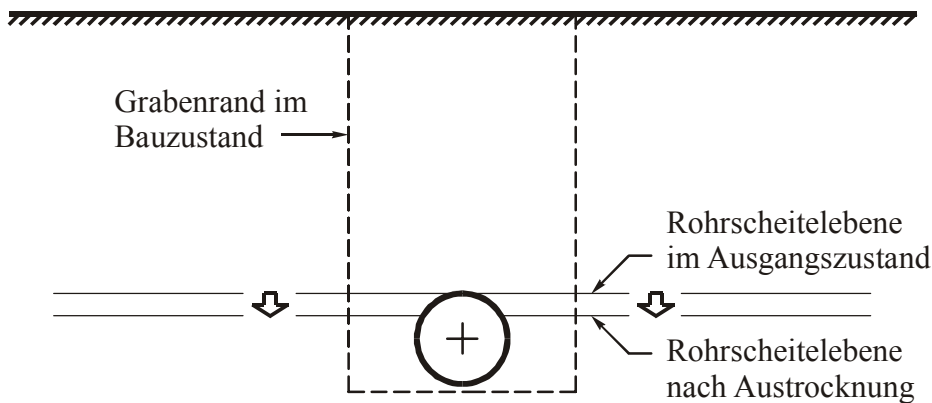


Bild 2-7: Idealisierte Darstellung der Setzung auf Höhe des Rohrscheitels für einen Querschnitt neben dem Festpunkt (y-z-Ebene)

Das Erdreich über der Rohrleitung kann den Abwärtsbewegungen des Bodens neben dem Rohr nicht zwanglos folgen. Deshalb muss davon ausgegangen werden, dass sich, wie in Kapitel 2.2 für den Fall von biegesteifen Rohrquerschnitten ausgeführt, in Folge der Setzungsdifferenzen Lasten auf den Erdkörper über der Rohrleitung umlagern. Im Gegensatz zu der im Rahmen des Arbeitsblattes ATV-DVWK-A 127 (2000) betrachteten Situation sind diese Lastumlagerungen unabhängig vom Steifigkeitsverhältnis des Rohrquerschnitts zum Boden in der Verfüllzone; sie hängen vielmehr vom Ausmaß der Setzungen infolge der Bodenschrumpfung ab. Wie die Untersuchung der möglichen Größenordnung der Schrumpfsetzungen noch zeigen wird, können diese in ungünstigen Fällen im Bereich mehrerer Zentimeter liegen, so dass bei entsprechenden Randbedingungen Lastumlagerungen in erheblichem Umfang zu erwarten sind.

#### 2.4 Ansatz der Umgebungsbedingungen in der vorliegenden Aufgabenstellung

Bei der Betrachtung in Betrieb befindlicher Grauguss- und Stahlmuffenrohrleitungen sind Informationen über konkrete Einbaubedingungen, wie etwa Verbautechnik, Grabenbreite oder Verdichtung der Verfüllzone, in der Regel nicht mehr verfügbar. Im Bereich städtischer Verteilnetze liegen zudem häufig gestörte Bodenverhältnisse vor, da der Bereich der Verkehrsflächen für die gesamte Ver- und Entsorgungsinfrastruktur genutzt wird, wobei sich die Baumaßnahmen für die einzelnen Sparten entsprechend der Entwicklung des Versorgungsgebiets und des Infrastrukturbestands über längere Zeiträume verteilen. Die derzeit gültigen Anforderungen an die Verdichtung der Leitungs- und Verfüllzone sind zudem auch das Resultat aus beobachteten Straßen- und Leitungsschäden infolge der ungenügenden Güte der früheren Baugrubenverfüllungen. Es muss daher davon ausgegangen werden, dass die bei der Verlegung von Leitungen älterer Baujahre vorgenommene Wiederverfüllung des Rohrgrabens nicht den gegenwärtig üblichen Standards entspricht.

Wenn eine Erhöhung der Tragfähigkeit von Stadtstraßen erforderlich ist, wird vielfach zunächst ein Abtrag der ursprünglichen Trag- und Deckschichten über die gesamte Straßenbreite vorgenommen, um die Straßenkonstruktion anschließend neu aufzubauen. Bei

bereits früher verlegten Versorgungsleitungen existieren im Bereich ihrer Überdeckung dann keine Einflüsse aus den Tiefbaumaßnahmen zur Leitungsverlegung mehr.

Infolge dieser bei städtischen Versorgungsnetzen häufig gegebenen Randbedingungen ist nicht zu erwarten, dass die bei entsprechenden Baugruben- und Verfüllbedingungen während der Bauphase gegebenenfalls entstandenen Spannungsumlagerungen vom Verfüllbereich zum gewachsenen Boden hin Bestand haben. Eine Entlastung der Rohrscheitelebene nach der Silotheorie wird daher im Rahmen dieser Arbeit durchgängig nicht zum Ansatz gebracht. Durch die in Kapitel 2.3 beschriebenen Schrumpfsetzungen entfällt auch die Abhängigkeit der Rohrscheitelbelastung vom Steifigkeitsverhältnis von Rohrquerschnitt und Boden in der Leitungszone.

Aus diesen Gründen und wegen der in praktischen Fällen schlechten Nachvollziehbarkeit der genauen Einbaubedingungen wird für die Durchführung der geplanten Berechnungen auf eine Aufteilung der Leitungsumgebung in unterschiedliche Bodenzonen weitgehend verzichtet. Da Versorgungsleitungen zu einem großen Anteil im Bereich von befestigten Flächen verlaufen, werden allerdings die deutlich abweichenden Eigenschaften von Verkehrswegen in die Betrachtungen mit einbezogen. Zur Abgrenzung des Straßenkörpers von den anstehenden bindigen Böden erfolgt dann eine Aufteilung des Untersuchungsraums.

## **2.5 Lösungsweg**

Die Berechnung der ungleichmäßig aufgelagerten und im Erdreich befindlichen Rohrleitung stellt ein dreidimensionales Problem dar, das sich einer rein analytischen Lösung entzieht. Der gesamte Beanspruchungszustand kann auf die folgenden drei Lastfälle zurückgeführt werden:

- Lastfall 1: Beanspruchung der Leitung als eingespannter und ungleichmäßig gelagerter Träger unter überwiegender Biegebelastung.
- Lastfall 2: Beanspruchung des kreisringförmigen Rohrquerschnitts durch Erddruck.
- Lastfall 3: Beanspruchung des Rohrquerschnitts infolge Innendruck.

Wie in Bild 2-8 dargestellt, werden die Lastfälle entsprechend der Orientierung der Belastung und der resultierenden Schnittgrößen zweidimensional dargestellt und behandelt.

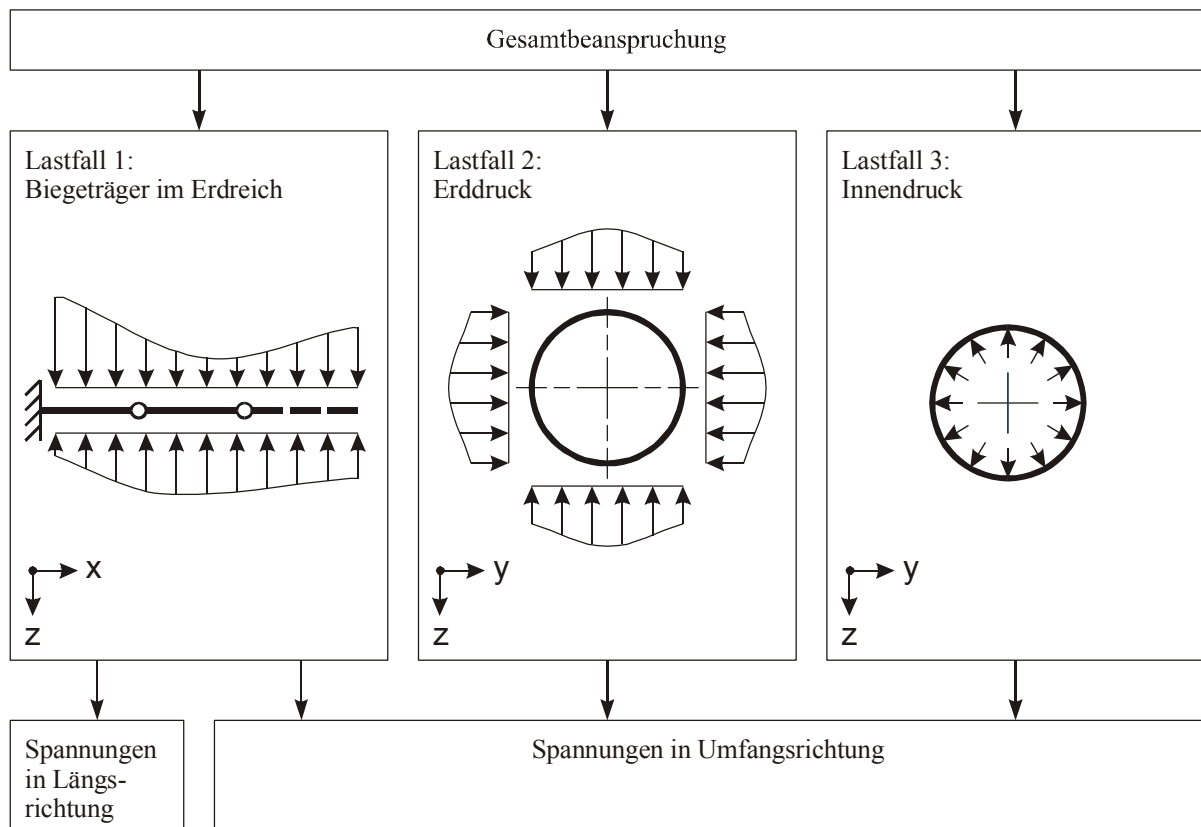


Bild 2-8: Aufteilung der Gesamtbelastung in Lastfälle

Die genannten Lastfälle können grundlegend wie folgt charakterisiert werden:

- Die im Lastfall 1 betrachteten Leitungsbeanspruchungen und Wechselwirkungen zwischen Rohrleitung und Erdreich sind komplex und entziehen sich einer analytisch geschlossenen Lösung. Deshalb erfolgt die Berechnung dieses Lastfalls auf numerischem Weg, mit der Methode der finiten Elemente (FEM). Graugussrohrleitungen mit Schraub- oder Stemmmuffenverbindungen werden als Gelenkträger idealisiert abgebildet. Zur Berücksichtigung der in Folge der Tragwirkung der Rohrleitung im Nahbereich von Festpunkten vorhandenen Lastumlagerungen (orthogonal zur Betrachtungsebene) sind besondere Überlegungen erforderlich, die im Zuge der Modellbildung für diesen Lastfall diskutiert werden. Neben Biegemomenten  $M_y$  und Normalkräften  $N_x$  wirken entlang der Leitungsachse wegen der ungleichmäßigen Bettungsverhältnisse auch Querkräfte  $Q_z$ . Aus den über das FE-Modell ermittelten Schnittgrößen ergeben sich im Leitungsquerschnitt Zug- und Druckspannungen  $\sigma_x$  in Längsrichtung aus Biegung und Normalkraft sowie Querkraftschubspannungen  $\tau_{xz}$ , die in Umfangsrichtung wirken. Die genannten Spannungen können aus den Schnittgrößen auf analytischem Weg berechnet werden.

- Im Lastfall 2 ist zu beachten, dass bei der Betrachtung eines freigeschnittenen Rohrquerschnitts (Betrachtung in der  $y$ - $z$ -Ebene) in der Nähe der Einspannung die Erdauflast und der Bettungsreaktionsdruck nicht miteinander im Gleichgewicht stehen. Im Bereich der klaffenden Fuge entfällt der Bettungsreaktionsdruck ganz. Das Kräftegleichgewicht am betrachteten Querschnitt erhält man unter Einbeziehung der Querkraftschubspannungen aus Lastfall 1, die dem Schubfluss entsprechend verteilt sind. Da die Berechnung des zweidimensional betrachteten und nach Bild 2-8 belasteten Kreisrings im FE-Modell nur bei äußerem Kräftegleichgewicht möglich wäre, werden die Spannungsberechnungen für diesen Lastfall auf analytischem Weg durchgeführt. Die anzusetzenden Beanspruchungen des Lastfalls 2 sind abhängig von der Entfernung des Querschnitts zur Einspannstelle. Es wird deshalb nur der Querschnitt betrachtet, der nach den Ergebnissen des Lastfalls 1 maximal beansprucht wird.
- Die im Lastfall 3 ausgelösten Spannungen können auf einfache Weise analytisch ermittelt werden.

Die Aufteilung des Gesamtproblems ermöglicht es ferner, die Einflüsse aus den Lastfällen miteinander zu vergleichen. Mit Festigkeits- beziehungsweise Versagenshypothesen ist es im Anschluss möglich, an den maximal beanspruchten Stellen aus den einzelnen Spannungskomponenten aller Lastfälle Vergleichsspannungen zu berechnen, die mit den kritischen Werkstoffkennwerten für einachsige Zugbelastung verglichen werden können. Die Auswahl einer geeigneten Festigkeitshypothese richtet sich dabei nach den mechanischen Eigenschaften des Leitungswerkstoffs. Das Lösungsverfahren ist auf den Bereich mit linear-elastischem Werkstoffverhalten beschränkt.

Die Bearbeitung der Aufgabenstellung erfolgt im Weiteren in den nachstehend aufgeführten Teilschritten:

- Betrachtung des Schrumpfungsverhaltens bindiger Böden und quantitative Abschätzung des möglichen Ausmaßes der resultierenden Setzungen anhand von Informationen aus der Fachliteratur (Kapitel 3).
- Erstellen von geeigneten FE-Modellen zur Berechnung des Lastfalls 1 (Leitung als Biegeträger im Erdreich) auf Basis des zur Verfügung stehenden Programms. Festlegung der für die Modellgeometrie benötigten Randbedingungen. Angabe der Gleichungen zur Berechnung der Spannungen infolge der für diesen Lastfall ermittelten Schnittgrößen (Kapitel 4).
- Entwicklung von analytischen Lösungen zur Berechnung des druckbeanspruchten Rohrquerschnitts für die Lastfälle 2 (Erddruck) und 3 (Innendruck) (Kapitel 5).
- Formulierung geeigneter Festigkeitshypothesen. Anwendung der für die einzelnen Lastfälle entwickelten Lösungsgleichungen zur Bildung von Vergleichsspannungen (Kapitel 6).
- Zusammenfassende Darstellung des gesamten Berechnungsschemas mit ausführlich dokumentiertem Fallbeispiel (Kapitel 7).

- Quantifizierung aller weiteren für die Durchführung der Parameterstudie erforderlichen Eingangsgrößen. Neben den Eigenschaften der Leitungen selbst und den Innendruckverhältnissen sind dies insbesondere die Eigenschaften des umgebenden Erdreichs sowie des über der Leitung gegebenenfalls vorhandenen befestigten Aufbaus von Straßen und Wegen. Durchführung der Parameterstudie, Auswertung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen (Kapitel 9).
- Zusammenfassung der vorliegenden Arbeit und der wesentlichen Ergebnisse (Kapitel 10).

### 3. Zu den Setzungen infolge Bodenschrumpfung

#### 3.1 Einfluss des Bodenwassergehalts

##### 3.1.1 Wassergehalt und Konsistenzgrenzen

Die mechanischen Eigenschaften eines bindigen Bodens hängen von dessen Konsistenz (Zustandsform) ab, wobei die Konsistenz vom aktuellen Wassergehalt  $w$  des Bodens bestimmt wird. Grundsätzlich können die Zustandsformen flüssig, plastisch (bildsam), halbfest und fest unterschieden werden, die sich in dieser Reihenfolge bei abnehmendem Wassergehalt ergeben. Der plastische Bereich kann weiter in die Zustandsformen breiig, weich und steif unterteilt werden (Bild 3-1).

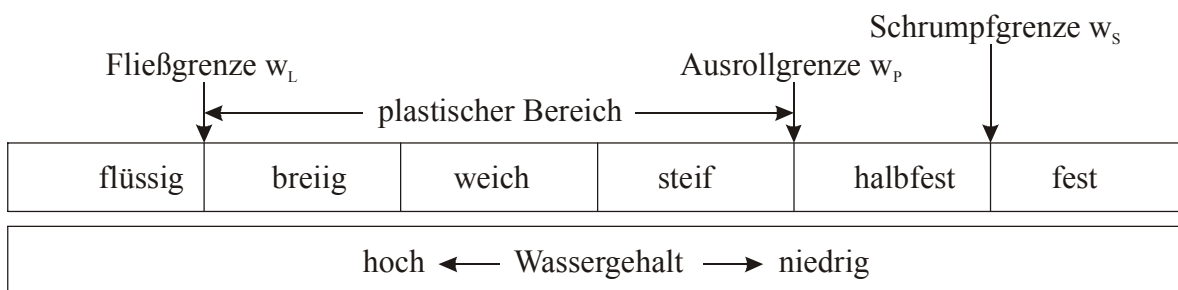


Bild 3-1: Konsistenzgrenzen

Die Grenzen an den Übergängen der einzelnen Phasen gehen auf ATTERBERG zurück und sind wie folgt definiert:

- Die Fließgrenze  $w_L$  gibt den Wassergehalt am Übergang von der flüssigen zur bildsamen Zustandsform an.
- Die Ausrollgrenze  $w_p$  gibt den Wassergehalt am Übergang von der bildsamen zur halbfesten Zustandsform an.
- Die Schrumpfgrenze  $w_s$  gibt den Wassergehalt am Übergang von der halbfesten zur festen Zustandsform an.

Die Bestimmung der Konsistenzgrenzen mit Laborversuchen wird für die Fließgrenze sowie die Ausrollgrenze in DIN 18122-1 (1997) und für die Schrumpfgrenze in DIN 18122-2 (2000) behandelt. Die Konsistenzbereiche sind anschaulich in DIN 4022, Teil 1 (1987) definiert, in der die Ermittlung der Zustandsform mit einfachen Feldversuchen vorgesehen ist. Die in dieser Norm festgelegten Definitionen enthält Tabelle 3-1.



Tabelle 3-1: Zustandsformen nach DIN 4022, Teil 1 (1987)

<b><i>Konsistenz</i></b>	<b><i>Eigenschaften</i></b>
breiig	Boden quillt beim Pressen in der Faust zwischen den Fingern hindurch.
weich	Boden lässt sich leicht kneten.
steif	Boden lässt sich schwer kneten, kann aber in der Hand zu 3 mm dicken Röllchen ausgerollt werden, ohne zu reißen oder zu zerbröckeln.
halbfest	Boden bröckelt und reißt beim Versuch, ihn zu 3 mm dicken Röllchen auszurollen, kann aber erneut zu einem Klumpen geformt werden.
fest	Boden lässt sich nicht kneten, sondern nur zerbrechen, ein nochmaliges Zusammenballen der Einzelteile ist nicht möglich. Meist helles Aussehen.

### **3.1.2 Wassergehalt und Bodenvolumen**

Böden (Lockergesteine) können als Dreiphasenstoffe beschrieben werden, deren Volumen sich aus festen, flüssigen und gasförmigen Anteilen zusammensetzt. Die Festsubstanz besteht vorwiegend aus einem Haufwerk von Mineralen beziehungsweise deren Verwitterungsprodukten, wobei die einzelnen Bodenteilchen bei bindigen Böden sehr klein und nicht mehr mit bloßem Auge einzeln erkennbar sind. Sie weisen meist eine plättchen- oder stabförmige Gestalt auf. Der nicht mit Festsubstanz ausgefüllte Anteil des Bodenvolumens, also der Porenanteil, wird von Wasser (flüssige Phase) oder von Luft (gasförmige Phase) eingenommen.

Trocknet eine Bodenprobe mit hohem Anfangswassergehalt aus, so geht die Abnahme des Wassergehalts bis zum Erreichen der Schrumpfgrenze  $w_S$  mit einer Abnahme des Bodenvolumens einher. Die Schrumpfgrenze kennzeichnet den Wassergehalt, bei dem der Porenanteil des Bodenvolumens gerade noch vollständig mit Wasser gefüllt ist. Bis zum Erreichen der Schrumpfgrenze ist der Boden also vollkommen wassergesättigt, die Austrocknung bewirkt eine Verringerung des Porenanteils im Boden. In diesem Bereich nimmt das Volumen des Bodens genau um die Menge des verdunsteten Wassers ab. Erst unterhalb der Schrumpfgrenze findet bei weiter sinkendem Wassergehalt nahezu keine Volumenänderung mehr statt, siehe Bild 3-2. Der Porenraum bleibt in diesem Bereich konstant, bei einem weiteren Rückgang des Wassergehalts tritt Luft in den Bodenkörper ein.

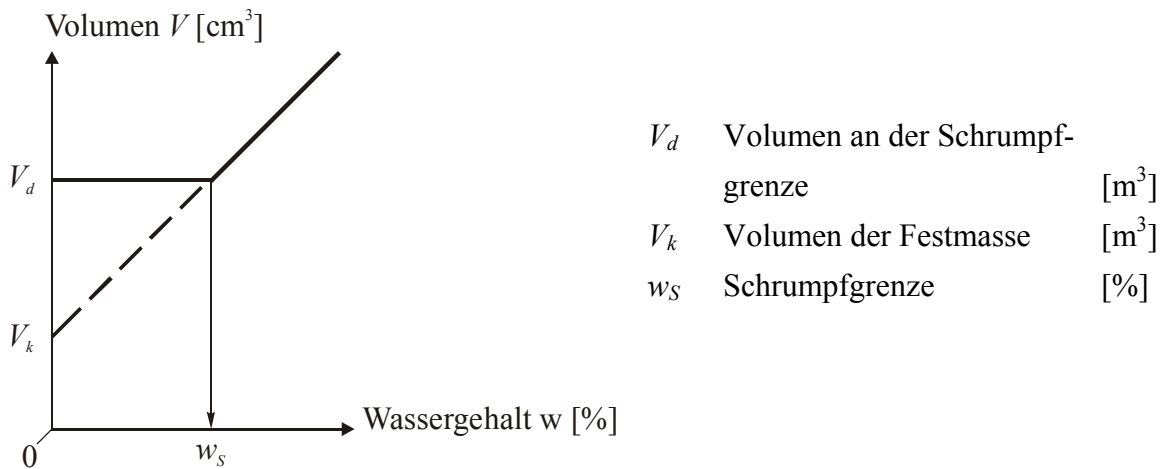


Bild 3-2: Abhängigkeit des Bodenvolumens vom Wassergehalt

Die beschriebene Modellvorstellung gibt das reale Bodenverhalten in vereinfachter Form wieder, beschreibt es für praktische Anwendungen aber mit ausreichender Genauigkeit.

Unter Laborbedingungen schrumpft eine würfelförmige Bodenprobe bei Austrocknung in den drei Achsrichtungen gleichmäßig. Wird im Laborversuch nur die Änderung der Probenhöhe oder der Probenlänge gemessen, so wird die ermittelte einseitige Verkürzung als lineare Schrumpfung der Probe bezeichnet.

### 3.2 Schrumpfvverhalten bei natürlichen Randbedingungen

Veranlasst durch Setzungsschäden an Hochbauten nach längeren Trockenperioden wurde das lastunabhängige Setzungsverhalten bindiger Böden bei Austrocknung in mehreren Abhandlungen untersucht. Für die Beschreibung der Art des Schrumpfvverhaltens und der Auswirkungen bei natürlichen Bedingungen sind die Forschungsarbeiten von KRABBE (1958) und PLACZEK (1982) von besonderer Bedeutung. Die vor dem Hintergrund der gegebenen Aufgabenstellung wesentlichen Inhalte und Aussagen der Arbeiten werden nachfolgend kurz wiedergegeben.

KRABBE (1958) geht für die Betrachtung des realen Schrumpfvverhaltens in der Natur von folgenden Überlegungen aus: Eine großflächige bindige Bodenschicht mit einer Mächtigkeit, die weitaus kleiner als die Ausdehnung in den horizontalen Achsen ist, müsste bei allseitiger Kantenverkürzung große Gleitbewegungen gegenüber ihrer Unterlage ausführen können, die infolge der Reibungswiderstände aber nicht möglich sind. In Richtung der horizontalen Achsen treten deshalb bei fortschreitender Schrumpfung Zugspannungen auf. Solange diese die Größe der Bruchspannung noch nicht erreichen, kann sich die Bodenschicht nur in der Vertikalen verkürzen.

In diesem Zustand ergibt sich die aus der Volumenänderung resultierende Setzung zu:

$$a = \frac{V_0 - V_1}{V_0} \cdot h_0 \quad (3-1)$$

$a$	Setzung	[mm]
$V_0$	Volumen eines Bodenkörpers im Ausgangszustand	[m <sup>3</sup> ]
$V_1$	Volumen eines Bodenkörpers nach der Austrocknung	[m <sup>3</sup> ]
$h_0$	Höhe eines Bodenkörpers im Ausgangszustand	[m]

Erst nach dem Überschreiten der Bruchspannung wird der Zusammenhalt des Bodens von senkrechten Rissen unterbrochen. Die Risse unterteilen die Grundfläche des Bodens, so dass sich die einzelnen Bodenelemente in ihren Abmessungen wesentlich weniger unterscheiden und der Boden fortan dreiaxial schrumpft. Dabei beträgt die Schrumpfung entlang jeder Richtung ungefähr ein Drittel der Volumenschrumpfung. Die resultierende Setzung ist demnach näherungsweise:

$$a \approx \frac{1}{3} \cdot \frac{V_0 - V_1}{V_0} \cdot h_0 \quad (3-2)$$

Dieses prinzipielle Verhalten wurde von KRABBE (1958) im Labor nachgewiesen, indem das Schrumpfen mehrerer gestörter Bodenproben aus dem Raum Hannover ausgewertet wurde. Die Böden wurden dabei in Holzkästen mit einer quadratischen und innenseitig mit Sandpapier belegten Grundfläche mit zirka 50 cm Seitenlänge und 7,5 cm Höhe eingebracht und langsam getrocknet. Das beobachtete prinzipielle Schrumpfverhalten zeigt Bild 3-3.

Der Wassergehalt, bei dem der Übergang vom einaxialen zum dreiaxialen Schrumpfen erfolgt, ist dabei keine konstante Größe, sondern hängt von den jeweiligen Bodeneigenschaften ab. Aus der Wassergehaltsänderung kann die Volumenschrumpfung wie folgt berechnet werden:

$$V_0 - V_1 = (w_1 - w_2) \cdot \frac{\gamma_d}{\gamma_w} \quad w_1 > w_2 > w_s \quad (3-3)$$

$w_i$	Wassergehalt	[%]
$\gamma_d$	Wichte einer getrockneten Bodenprobe	[kN/m <sup>3</sup> ]
$\gamma_w$	Wichte des Wassers	[kN/m <sup>3</sup> ]

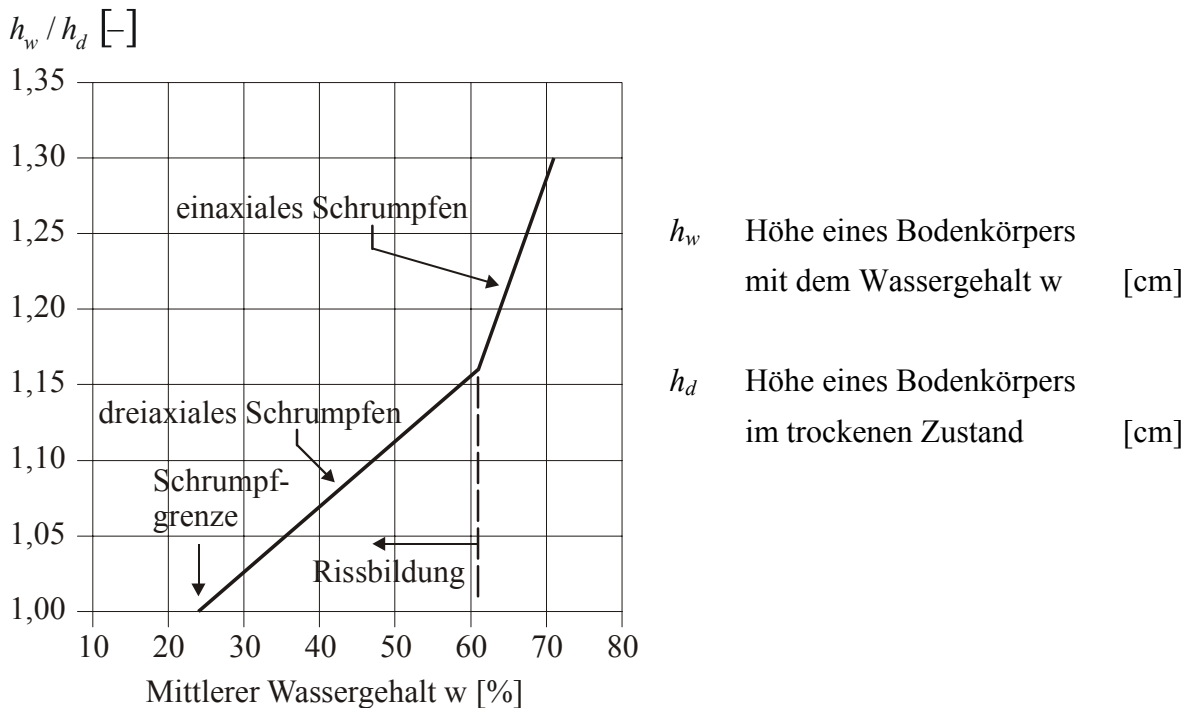


Bild 3-3: Einaxiales und dreiaxiales Schrumpfen einer flächenhaften Bodenschicht nach KRABBE (1958), Bodenprobe aus Hannover-Wülfel

Der Wassergehalt ist definiert als das Verhältnis der Masse des enthaltenen Wassers  $m_w$  zur Masse  $m_d$  der Festsubstanz:

$$w = \frac{m_w}{m_d} \quad (3-4)$$

$w$  Wassergehalt [%]

$m_w$  Masse des in einer Bodenprobe enthaltenen Wassers [kg]

$m_d$  Masse einer getrockneten Bodenprobe [kg]

Die Gültigkeit der Gleichung ist auf Wassergehaltsschwankungen oberhalb der Schrumpfgrenze beschränkt.

Im Rahmen seiner Untersuchungen hat KRABBE (1958) die Eigenschaften von 145 bindigen Bodenproben aus dem Großraum Hannover im Labor bestimmt und tabellarisch angegeben. Die Auswertung der Tabelle ergibt für die größte Trockendichte einen Wert von  $\gamma_d = 20,6 \text{ kN/m}^3$  und für die geringste Trockendichte den Wert  $\gamma_d = 11,8 \text{ kN/m}^3$ . KRABBE (1958) empfiehlt, für überschlägige Berechnungen von  $\gamma_d = 18 \text{ kN/m}^3$  auszugehen. Die Schwankungsbreite der Schrumpfgrenze liegt bei den untersuchten Bodenproben im Bereich von  $w_S = 12\%$  bis  $w_S = 35\%$ .

PLACZEK (1982) betrachtete das Schrumpfen von Tonböden unter Randbedingungen, welche die Verhältnisse in der Natur verbessert abbilden. Im Labor untersuchte er das Verhalten von Tonproben bei Austrocknung in Probenzylindern, die so beschaffen waren, dass die Austrocknung der Böden nur durch Verdunstung nach oben erfolgen konnte. Die Trocknung erfolgte weiter bei kontrollierten klimatischen Bedingungen, so dass Versuchsreihen mit unterschiedlichen Temperaturen und unterschiedlicher Luftfeuchte durchgeführt werden konnten, wobei die Schwankungsbreite dieser Parameter am mitteleuropäischen Festlandsklima orientiert war. Schließlich waren alle Proben mit Deckschichten unterschiedlicher Kapillarität und Mächtigkeit sowie mit unterschiedlichem Anfangswassergehalt versehen. Die Austrocknung der Bodenprobe erfolgte bei diesen Randbedingungen langsam. Die Versuchsdauern waren nicht einheitlich, sie betragen aber meist mehrere Wochen, teilweise einige Monate. Die Bodenproben wurden aus einer Tongrube in der Nähe Düsseldorfs entnommen; sie wurden so aufbereitet, dass sie wassergesättigt waren und mit Wassergehalten zwischen  $w = 36 \%$  und  $w = 40 \%$  in die Probenzylinder eingebracht werden konnten. Für die Versuche wurden zwei unterschiedlich große Zylinder verwendet, so dass die Proben Abmessungen von 19 cm (Durchmesser) und 10 cm (Höhe ohne Deckschicht) beziehungsweise 48 cm (Durchmesser) und 20 cm (Höhe ohne Deckschicht) aufwiesen. Da sich bei diesen Randbedingungen keine gleichmäßige Änderung des Bodenwassergehalts über die Tiefe der Bodenprobe einstellt, kann aus den Versuchen keine direkte Beziehung zwischen Wassergehaltsabnahme und Schrumpfmäß hergestellt werden. Der Wassergehalt wurde während der Versuchsdauer in regelmäßigen Zeitabständen an Kleinstproben bestimmt, die den Probenzylindern entnommen wurden. Die in den Versuchen an einzelnen Messpunkten innerhalb der Tonproben maximal aufgetretene Wassergehaltsabnahme betrug etwa 6 % gegenüber dem Ausgangswassergehalt, die maximal festgestellte Setzung der gesamten Probe betrug etwa 2,5 % der Probenausgangshöhe.

Von besonderer Bedeutung ist, dass bei der Betrachtung der Bodenproben durchweg weder Schrumpfrisse noch Ablösungen des Bodens von den Innenrändern der Probenzylinder festgestellt wurden. Die Volumenverringerungen führten zu einem rein linearen Schrumpfen, also nur zu einer Verringerung der Probenhöhe. PLACZEK (1982) geht deshalb davon aus, dass die Schwindverformungen bei den in Mitteleuropa üblichen klimatischen Verhältnissen unterhalb von Deckschichten in der Regel ohne Rissbildung und damit durchweg einaxial ablaufen.

### **3.3 Berichte über Feuchtegehaltsänderungen und resultierende Setzungen**

Obwohl immer wieder über Bauwerksschäden berichtet wird, die auf das austrocknungsbedingte Schrumpfen bindiger Böden zurückgeführt werden, sind in diesem Zusammenhang quantitative Angaben über das Ausmaß der ausgelösten Setzungen selten. Gleiches gilt für Angaben zur Quantifizierung von Änderungen des Bodenwassergehalts bei natürlichen Randbedingungen als Ursache der Bodenbewegungen. Es existieren jedoch einige Veröffentlichungen, die für konkrete Einzelfälle fundierte Angaben enthalten und so Anhaltswerte für das mögliche Ausmaß von Setzungen liefern. Den nachfolgend aufgeführten

Quellen ist gemeinsam, dass die beobachteten Wassergehaltsschwankungen auf den Wechsel von Regen- und Trockenwetterphasen zurückzuführen und nicht durch anthropogene Veränderungen (z. B. künstliche Grundwasserabsenkungen, wasserbauliche Maßnahmen) bedingt sind.

Veranlasst durch eine große Zahl von Gebäudeschäden im Südosten Englands betrachteten COOLING (1946) beziehungsweise COOLING / WARD (1948) die klimatisch bedingten jahreszeitlichen Wassergehaltsschwankungen von Tonböden in der Nähe Londons. Berichtet wurde über Schwindsetzungen in Trockenwetterphasen und Quellhebungen bei wieder einsetzenden Niederschlägen. In unmittelbarer Nähe der Oberfläche stellte COOLING (1946) Wassergehaltsschwankungen von etwa 10 % bis 15 % fest, die mit zunehmender Bodentiefe schnell abnahmen. Ab ca. 1,8 m Tiefe waren Schwankungen nahezu nicht mehr feststellbar. Weiter wurde über den Einfluss des Wurzelwerks von Pflanzen auf den Wasserhaushalt des Bodens berichtet, wobei vornehmlich in der Umgebung von Bäumen besonders ausgeprägte Schrumpfssetzungen auftreten können. COOLING (1948) gibt nach der Untersuchung etlicher Schadensfälle an, dass Schrumpfssetzungen im Nahbereich der Bäume bei ungewöhnlich langen Trockenzeiten bis zu 10 cm betragen können, während Werte von 3 cm bis 5 cm gängig sind. WARD (1948) nennt in diesem Zusammenhang Werte von 2 bis 5 cm. Im Hinblick auf die Schwankungen des Wassergehalts durch den Wasserbedarf der Bäume wurde jeweils eine Tiefenwirkung von 3,5 m festgestellt.

KRABBE (1958) untersuchte die Übertragbarkeit der in England ermittelten Werte auf deutsche Verhältnisse durch Vergleich der bei COOLING (1946) angegebenen jährlichen Niederschlagshöhen und deren Schwankungsbreite mit Vergleichswerten mehrerer Städte in Niedersachsen. Er geht wegen der festgestellten Ähnlichkeit der klimatischen Randbedingungen von einer näherungsweisen Übertragbarkeit der in England gemessenen Werte auch auf deutsche Verhältnisse aus und empfiehlt, Schrumpfbewegungen von 3 bis 5 cm auch in Deutschland anzusetzen. Auf der Grundlage einiger Angaben aus verschiedenen Quellen gibt Krabbe den horizontalen Einflussbereich von Bäumen mit bis zu 18 m, im Falle von Baumreihen sogar mit bis zu 30 m an.

In Garston (England) wurden im Sommer 1949 Setzungsmessungen an Platten, die in unterschiedlichen Bodentiefen eingebettet waren, durchgeführt. Die Setzungen ergaben sich ebenfalls nicht durch Änderungen des Lastzustands, sondern nur durch die Austrocknung des Bodens während einer längeren Trockenperiode (BUILDING RESEARCH STATION 1949). Aus den Messergebnissen ermittelte KRABBE (1958) die in Tabelle 3-2 angegebenen maximalen Absenkungen der Bodenplatten.

Tabelle 3-2: Setzungsmessungen infolge Austrocknung in Garston (England) nach KRABBE (1958)

<i>Bodentiefe</i>	<i>Gemessene Setzung</i>
0,3 m	30 mm
0,6 m	17 mm
0,9 m	11 mm
1,2 m	4 mm

Im Zuge der in Kapitel 1.2 beschriebenen Analyse der Rohrbruchhäufigkeiten im Raum Stuttgart stellte KOTTMANN (1978) die Ergebnisse von Bodenfeuchtheitsmessungen aus den Jahren 1961 bis 1963 sowie von 1970 bis 1974 in Form von Jahresganglinien dar. Die Messungen wurden im freien Feld und in bindigem Boden bei Stuttgart-Hohenheim sowohl unter bewachsener als auch unter unbewachsener Geländeoberfläche in unterschiedlichen Tiefen durchgeführt. Dabei wurden die Messwerte an Bodenproben bestimmt, die mit unterschiedlicher Häufigkeit, mindestens jedoch einmal monatlich, entnommen wurden. Lediglich in den Wintermonaten fehlen Messwerte teils über mehrere Monate ganz. Die aus den Ganglinien erkennbaren Maximal- und Minimalwerte der Bodenfeuchte sowie die resultierende Schwankungsbreite sind tiefenabhängig in Tabelle 3-3 angegeben. Für Tiefen unter 1 m und für die Jahre 1970 bis 1974 existieren nur Angaben über Messungen unter befestigter Oberfläche. Die maximalen Schwankungen resultieren auch aus Spitzen besonders hoher Bodenfeuchtigkeit, wobei diese nur für sehr kurze Zeiträume auftraten.

Tabelle 3-3: Auswertung der bei KOTTMANN (1978) abgebildeten Jahresganglinien der Bodenfeuchte über den gesamten Betrachtungszeitraum

<i>Bodentiefe</i>	<i>Maximale Bodenfeuchte</i>	<i>Minimale Bodenfeuchte</i>	<i>Differenz</i>
<b><i>Messungen unter bewachsener Oberfläche (1961-1963 und 1970-1974):</i></b>			
0,5 m	41 %	19 %	22 %
1 m	43 %	28 %	15 %
1,5 m	43 %	39 %	4 %
2 m	43 %	38 %	5 %
<b><i>Messungen unter nicht bewachsener Oberfläche (nur 1961 bis 1963):</i></b>			
0,5 m	35 %	29 %	6 %
1 m	37 %	31 %	6 %

PRINZ (1974) berichtet von Schrumpfsetzungen und Quellhebungen, die in den Jahren 1973 und 1974 bei Gießen im freien Feld gemessen wurden. Erfasst wurden Setzungen und Hebungen von Polygonsteinen an zwei Messpunkten, die 80 cm tief einbetoniert waren. Die während der Messdauer von Mai 1973 bis August 1974 ermittelten maximalen Schrumpfsetzungen betragen 26 und 29 mm. Zu berücksichtigen ist, dass in etwa 6 bis 8 m Entfernung zu den in leichter Hanglage befindlichen Messpunkten einige Obstbäume standen, so dass eine Beeinflussung des Bodenwassergehalts durch die Bäume anzunehmen ist.

### 3.4 Anwendung in der vorliegenden Aufgabenstellung

Wie aus Gleichung (3-3) zu erkennen ist, hängt das Ausmaß der Volumenschumpfung von der Reduzierung des Wassergehalts und von der Trockenwichte des Bodens (maßgebend für das Verhältnis  $\gamma_d / \gamma_w$ , da  $\gamma_w = 10 \text{ kN/m}^3 = \text{konstant}$ ) ab. Das Ausmaß der natürlichen Wassergehaltsschwankungen wird dabei von den klimatischen Randbedingungen sowie von den örtlichen Gegebenheiten bestimmt. Die in Kapitel 3.3 aufgeführten quantitativen Angaben gestatten es deshalb nicht, allgemeingültige Grenzen für das mögliche Ausmaß von Schrumpfsetzungen oder für die Schwankungsbreite des Bodenwassergehalts anzugeben. Sie können aber, wie in Kapitel 3.3 eingangs erwähnt, als Anhaltswerte für die mögliche Größenordnung der Schrumpfsetzungen dienen. Die wiedergegebenen Beobachtungen lassen mit den genannten Einschränkungen das Folgende erkennen:

- Die knapp unter der Geländeoberfläche vorhandenen Schwankungen des Bodenwassergehalts nehmen mit zunehmender Bodentiefe rasch ab und sind auf einen Bereich von wenigen Metern Tiefe beschränkt. Das Ausmaß der resultierenden Setzungen reduziert sich gleichermaßen mit zunehmender Bodentiefe. Im Bereich üblicher Verlegetiefen städtischer Gas- und Wasserrohrleitungen ist bei längeren Trockenperioden noch mit relevanten Setzungserscheinungen zu rechnen.
- In der Umgebung von Bäumen ist gegenüber Bereichen ohne Baumbewuchs mit deutlich größeren Schwankungen des Bodenwassergehalts zu rechnen. Ferner setzen sich Schwankungen des Bodenwassergehalts in der Umgebung von Bäumen bis in größere Bodentiefen fort. Demzufolge sind im Umfeld von Bäumen auch ausgeprägtere Schrumpfsetzungen zu erwarten.
- Für den Bereich üblicher Verlegetiefen von städtischen Versorgungsleitungen sind Setzungen bis zu einer Größenordnung von wenigen Zentimetern dokumentiert.
- Die Schwankungsbreite des Bodenwassergehalts liegt, mit Ausnahme des Bereichs unmittelbar unter der Geländeoberfläche, oberhalb üblicher Werte für die Schrumpfgrenze.

Die von PLACZEK (1982) formulierte Annahme, dass unterhalb der Oberflächendeckschicht bei natürlich ausgelösten Wassergehaltsschwankungen die resultierende Volumenreduktion in der Regel zu einem rein lotrechten Schrumpfen führt, wird auch im Rahmen dieser Promotionsarbeit vorausgesetzt. Da sich unter diesen Bedingungen keine Schrumpfrisse bilden, kann der betrachtete Untersuchungsraum durchgängig als Kontinuum (elastisch isotroper Halbraum) angesehen werden. Diese bisher stillschweigend als erfüllt



vorausgesetzte Annahme ist die Grundlage für die Anwendbarkeit der in der Bodenmechanik üblichen Berechnungsverfahren. Auch im Arbeitsblatt ATV-DVWK-A 127 (2000) zur statischen Berechnung eingerdeter Rohrleitungen, dessen Anwendungsbereich sich auch auf bindige Böden (Bodengruppe G 4) erstreckt, sind keine Einschränkungen im Hinblick auf eine gestörte Kraftübertragung infolge der Bildung von Schrumpfrissen enthalten.

Zu beachten ist, dass für die Beanspruchung aufgelagerter Rohrleitungen nicht die gesamte durch die Austrocknung ausgelöste Setzung, sondern nur die Bodenschumpfung zwischen der Rohrleitung und der Sohle des als Festpunkt wirkenden Bauwerks maßgebend ist. Schrumpfvorgänge unterhalb der Bauwerkssohle brauchen nicht zum Ansatz gebracht werden, da das Gesamtsystem aus Leitung und Bauwerk der ausgelösten Absenkung zwanglos folgen kann. Bild 3-4 zeigt diesen Sachverhalt beispielhaft.

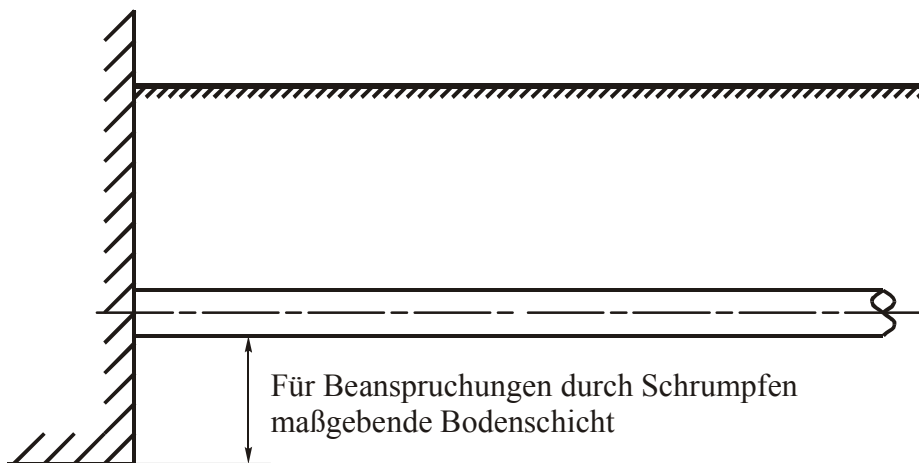


Bild 3-4: Belastungswirksamer Anteil der Setzung

Diese Einschränkung kann bei Einzelfallbetrachtungen ausgenutzt werden, wenn die Höhendifferenz zwischen Leitung und Bauwerkssohle gering ist und die Leitung mit relativ geringer Überdeckung verlegt wurde. Da die Feuchtegehaltsschwankungen mit zunehmender Entfernung von der Geländeoberfläche rasch geringer werden, kann aber bei üblichen Verlegetiefen und größeren Höhendifferenzen zwischen Leitung und Bauwerkssohle die vermutete Gesamtsetzung des Erdreichs auf der Ebene der Rohrleitungssohle näherungsweise vollständig zum Ansatz gebracht werden.

## **4. Berechnung der Rohrleitung als Biegeträger im Erdreich**

### **4.1 Modellbildung für Berechnungen mit der Finite-Element-Methode**

#### **4.1.1 Allgemeines**

Die Berechnung der ungleichmäßig aufgelagerten und vorwiegend als Biegeträger beanspruchten Rohrleitung im Erdreich (Lastfall 1) erfolgt mit der Methode der finiten Elemente (FEM). Verwendet wird hierfür das Programm Plaxis, Version 7, das für die Bearbeitung geotechnischer Probleme entwickelt und verifiziert wurde (PLAXIS B. V. 1998). Die Software erlaubt in der eingesetzten Version die Berechnung zweidimensionaler Probleme mit frei definierbaren geometrischen Randbedingungen und die Abbildung von Boden- und Werkstoffeigenschaften über unterschiedliche Stoffgesetze. Für die Durchführung dieser Arbeit wurde das Programm freundlicherweise vom Institut für Geotechnik der Universität Stuttgart zur Verfügung gestellt.

Die Größe und der Verlauf der Schnittgrößen Biegemoment, Normalkraft und Querkraft entlang der Rohrleitung können jeweils mit einem FE-Modell ermittelt werden, das sich über einen geeigneten Bereich entlang der Längsachse und in der Lotrechten erstreckt. Die Rohrleitung wird dabei als Balken idealisiert. Ein solches Modell mit Ausdehnung in der  $x$ - $z$ -Ebene wird im Folgenden als Längsschnitt-Modell bezeichnet.

Wie in Kapitel 2.3 ausgeführt wurde, sind orthogonal zur  $x$ - $z$ -Ebene Lastumlagerungen infolge von Setzungsdifferenzen in erheblicher Größenordnung zu erwarten. Zur Berücksichtigung dieses Sachverhalts wird den Berechnungen mit dem Längsschnitt-Modell jeweils eine weitere FE-Berechnung vorgeschaltet, aus der die Größe möglicher Lasterhöhungen infolge von Spannungsumlagerungen unter den selben Randbedingungen ermittelt werden kann. Dieses Modell ist orthogonal zum Längsschnitt-Modell orientiert und bildet die Vorgänge quer zur Leitungslängsachse über die Tiefe ab. Es wird im Weiteren als Querschnitt-Modell bezeichnet. Die im Querschnitt-Modell ermittelten Spannungserhöhungen werden dann im Längsschnitt-Modell durch zusätzlich aufgebraute Linienlasten berücksichtigt.

#### 4.1.2 Beschreibung der Längsschnitt-Modelle

Die Systemgeometrie für ein Längsschnitt-Modell zeigt beispielhaft Bild 4-1.

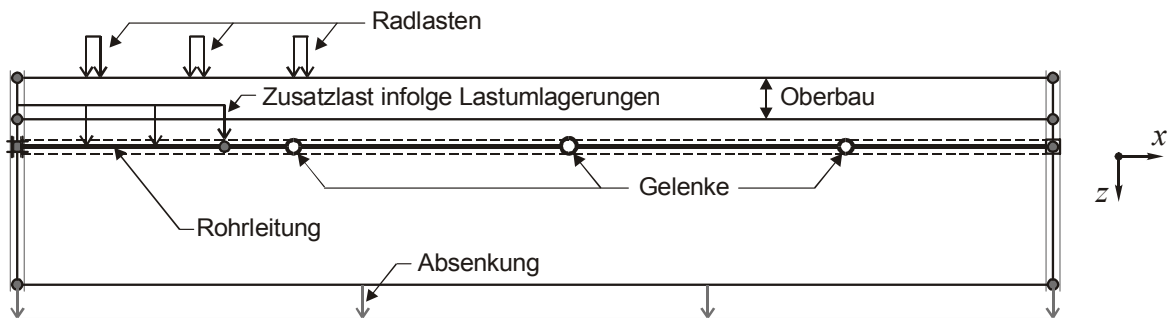


Bild 4-1: Beispiel für ein Längsschnitt-Modell

Nachfolgend werden diejenigen Randbedingungen und Vorgaben definiert, die für die Erstellung der Geometrie der Längsschnitt-Modelle zugrunde gelegt werden:

- Die Betrachtung erfolgt am halben System, wobei durch den linken Systemrand die Symmetrielinie des realen Systems gegeben ist. Die Rohrleitung ist auf dieser Seite starr eingespannt.
- Die Absenkung des Erdreichs infolge der Bodenaustrocknung wird als vorgegebene Vertikalverschiebung entlang des unteren Systemrandes aufgebracht. Die Verschiebung wirkt damit gleichmäßig auf das gesamte Erdreich unterhalb der Leitungssohle. An der Rohrleitung selbst greifen auf diese Weise keine Zwangsverformungen an, die Durchbiegung der Leitung kann sich dem Einfluss der veränderten Lagerungsbedingungen und der Steifigkeit der Rohre entsprechend ausbilden.
- Um das lastabhängige Verhalten der Bettung in Bereichen mit erhöhten Vertikalspannungen mit berücksichtigen zu können, erstreckt sich der gewählte Modellbereich jeweils bis zu 2 m unterhalb der Rohrleitung.
- Der betrachtete Ausschnitt des Erdreichs wird an den lotrechten Systemrändern durch Gleitlager so abgebildet, dass Vertikalbewegungen ungehindert möglich, Horizontalbewegungen aber ausgeschlossen sind. Am linken Systemrand ergibt sich diese Bedingung aus der Symmetrie des Gesamtsystems; am rechten Systemrand sind infolge der Entfernung zum Lagerpunkt der Rohrleitung keine Horizontalbewegungen vorhanden.
- Alle Berechnungen werden mit einer einheitlichen Betrachtungslänge von 12 m durchgeführt. Vorabrechnungen haben gezeigt, dass nach dieser Länge auch bei ungünstigen Parameterkombinationen die Biegebeanspruchung annähernd abgeklungen ist.
- Für die Berechnung von Rohrleitungen, die unterhalb von befestigten Verkehrsflächen verlaufen, wird eine Unterteilung des oberhalb der Leitung befindlichen Erdreichs in zwei Bodenschichten vorgenommen, denen unterschiedliche mechanische Eigenschaften

zugewiesen werden können. Der oberen Bodenschicht werden die typischen Eigenschaften eines Verkehrswege-Oberbaus zugewiesen.

- Leitungen, die im Bereich von Straßen oder Gehwegen verlaufen, werden neben den ständig wirkenden Lasten auch durch Verkehrslasten, vor allem durch Fahrzeuge, beansprucht. Radlasten werden gegebenenfalls auf der Geländeoberfläche aufgebracht, siehe Bild 4-1. Der Ansatz eines geeigneten Lastbilds sowie der Lastgröße wird in Kapitel 8 behandelt.
- An den Grenzflächen zwischen Rohrleitung und Boden können neben den senkrecht zur Leitungsoberfläche wirkenden Normalspannungen auch Schubspannungen in Richtung der Längsachse der Rohrleitung übertragen werden. Der zwischen Rohrleitung und Boden vorhandene Scherverbund ist aber geringer als innerhalb des ungestörten Erdreichs. Entlang der Grenzfläche werden die wirksamen Bodenparameter Reibungswinkel und Kohäsion daher halbiert.
- Für die Berechnung von Graugussleitungen werden entsprechend den Überlegungen von Kapitel 2.1.1 gelenkige Rohrverbindungen angenommen. Es ist im FE-Modell nicht möglich, die Abwinkelung  $\zeta$  am Gelenk entsprechend der konstruktiven Grenzen der Muffen auf  $\zeta = 3^\circ$  zu begrenzen. Das ermittelte Winkelmaß wird für jede Rechnung geprüft.

Der von Plaxis verwendete Netzgenerator teilt den Untersuchungsraum in Dreieckselemente auf, wobei für die Netzfeinheit und Anzahl der Knoten pro Element unterschiedliche Einstellungen möglich sind. Das generierte Netz kann zudem bereichsweise verfeinert werden.

Bei den Längsschnitt-Modellen werden zur Netzgenerierung einheitlich Dreieckselemente mit 6 Knoten und die Netzeinstellung „fine“ gewählt, die eine Aufteilung des Untersuchungsraums in zirka 500 Elemente bewirkt. Eine gebietsweise Verfeinerung des Netzes wird nicht durchgeführt. Bild 4-2 zeigt ein Längsschnitt-Modell mit generiertem FE-Netz.

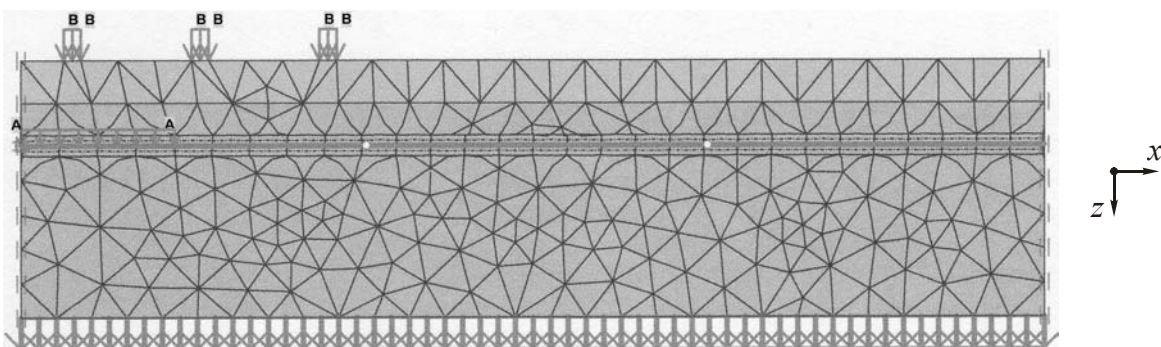


Bild 4-2: Längsschnitt-Modell mit generiertem FE-Netz

Die Durchführung der Berechnungen erfolgt wegen der bereichsweise großen Verformungsgradienten mit aktualisierter Netzgeometrie (Einstellung „updated mesh analysis“), so dass der Einfluss von Verschiebungen der Netzknoten auf die Gleichgewichtsbedingungen in der Lösungsprozedur berücksichtigt wird.

#### 4.1.3 Beschreibung der Querschnitt-Modelle

Bild 4-3 zeigt beispielhaft die Systemgeometrie für ein Querschnitt-Modell.

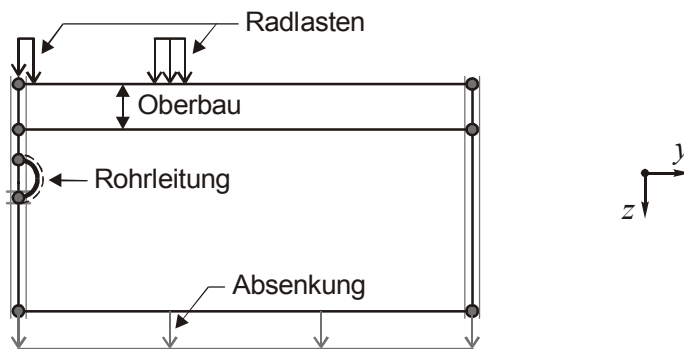


Bild 4-3: Beispiel für ein Querschnitt-Modell

Die in der Realität gegebene Lagefixierung des Rohrquerschnitts durch den Schubspannungsverlauf im dreidimensionalen Rohrleitungskörper kann im zweidimensionalen Querschnitt-Modell nicht abgebildet werden. Der Rohrquerschnitt wird deshalb durch virtuelle Auflager an Rohrscheitel und -sohle fixiert. Die Spannungsverteilung im Erdreich wird hierdurch nicht verändert. Der sich ergebende Schnittgrößenverlauf entlang des Kreisrings (Lastfall 2) wird jedoch unzulässig beeinflusst, weshalb die Schnittgrößen nicht aus der FE-Berechnung entnommen werden können. Die Schnittgrößenberechnung erfolgt daher in einem weiteren Schritt analytisch.

Für die Erstellung der Geometrie aller Querschnitt-Modelle werden in teilweiser Übereinstimmung mit den Längsschnitt-Modellen außerdem folgende Randbedingungen vorgegeben:

- Die Betrachtung erfolgt am halben System, wobei durch den linken Systemrand die Symmetrielinie des realen Systems gegeben ist.
- Der betrachtete Untersuchungsraum wird in Abhängigkeit von der Nennweite der Rohrleitung begrenzt: Die Modellbreite beträgt  $20 \cdot DN$ , in der Tiefe erstreckt sich das Modell bis  $4 \cdot DN$  unterhalb der Rohrsohle.
- Die Absenkung des Erdreichs infolge der Bodenaustrocknung wird als vorgegebene Vertikalverschiebung entlang des unteren Systemrandes aufgebracht.

- Der betrachtete Ausschnitt des Erdreichs wird an den lotrechten Systemrändern durch Gleitlager so abgebildet, dass Vertikalbewegungen ungehindert möglich, Horizontalbewegungen aber ausgeschlossen sind.
- Verkehrswege und Verkehrslasten werden in gleicher Weise wie im Längsschnitt-Modell berücksichtigt.
- Der an der Grenzfläche zwischen Rohrleitung und Boden vorhandene Scherverbund ist geringer als innerhalb des ungestörten Erdreichs. Entlang der Grenzfläche werden die wirksamen Bodenparameter Reibungswinkel und Kohäsion daher halbiert.
- Der Leitungsquerschnitt selbst wird als nahezu biegesteif abgebildet.

Bei den Querschnitt-Modellen werden als Ausgangsbasis zur Netzgenerierung einheitlich Dreieckselemente mit 6 Knoten und die Netzeinstellung „medium“ gewählt, die eine Aufteilung des Untersuchungsraums in zirka 250 Elemente bewirkt. Da sich im Nahbereich der Rohrleitungen sehr große Spannungs- und Verschiebungsgradienten ergeben, wird die Netzfeinheit gebietsweise mehrfach erhöht: Der linke Modellbereich wird bis zu einer Entfernung von  $4 \cdot DN$  zum linken Systemrand zweifach verfeinert, die Umgebung der Rohrleitung wird bis zu einer Entfernung von  $1 \cdot DN$  zu Scheitel, Kämpfer und Sohle der Rohrleitung vierfach verfeinert. Nach der Durchführung der Netzverfeinerungen besteht der Untersuchungsraum aus etwa 2000 Elementen. Bild 4-4 zeigt ein Modell mit generiertem FE-Netz.

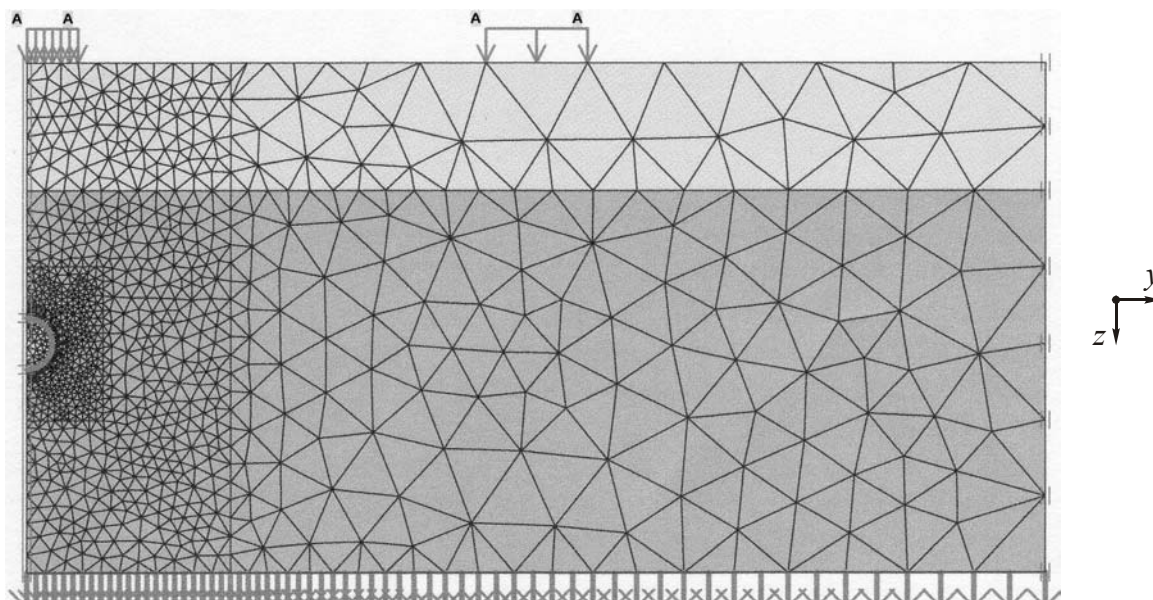


Bild 4-4: Querschnitt-Modell mit generiertem FE-Netz

Wie bei den Längsschnitt-Modellen werden die Berechnungen mit aktualisierter Netzgeometrie durchgeführt.

#### 4.1.4 *Beziehungen zwischen den Längs- und Querschnitt-Modellen*

Die Absenkung des Erdreichs wird im Längsschnitt-Modell und im zugehörigen Querschnitt-Modell jeweils in der selben Größe aufgebracht. Betrachtet werden im Querschnitt-Modell damit die Verhältnisse am Rohrquerschnitt unmittelbar neben dem Auflager, also in der bei  $x = 0$  lokalisierten  $y$ - $z$ -Ebene.

Die mit dem Querschnitt-Modell für die Rohrscheitelebene berechnete mittlere Spannungserhöhung über dem Rohrquerschnitt wird im Längsschnitt-Modell als konstante Linienlast aufgebracht. Die Linienlast beginnt bei  $x = 0$  und erstreckt sich über die gesamte Länge der klaffenden Fuge. Diese Länge ist anfangs unbekannt, sie wird iterativ ermittelt.

Dabei wird vernachlässigt, dass sich der Biegelinie der Rohrleitung entsprechend mit zunehmender Entfernung von der Einspannstelle geringere Setzungsdifferenzen zwischen dem Erdreich über und neben der Leitung einstellen und die Größe der Lastumlagerungen allmählich reduziert wird. Im Hinblick auf die zu errechnende Belastung der Rohrleitung liegt man mit dem konstanten Ansatz der Linienlast auf der sicheren Seite.

Sofern Verkehrslasten zu berücksichtigen sind, wird die Spannungsberechnung mit dem Querschnitt-Modell in zwei Stufen durchgeführt. Zuerst erfolgt eine Berechnung ohne Fahrzeuglasten. Die so ermittelte Zusatzlast zur Berücksichtigung von Lastumlagerungen wird in der beschriebenen Weise in das zugehörige Längsschnitt-Modell übernommen. In einer zweiten Berechnungsstufe werden zusätzlich Fahrzeuglasten angesetzt. Die dann ermittelte Belastung des Rohrquerschnitts dient zur Bestimmung der vertikalen Bodenspannungen in der Rohrscheitelebene für die Berechnung der Ringschnittgrößen in Lastfall 2. Diese zweistufige Vorgehensweise ist erforderlich, damit die Fahrzeuglasten im Längsschnitt-Modell nicht doppelt berücksichtigt werden.

#### 4.1.5 *Abbildung des Bodenverhaltens*

Zur Abbildung der mechanischen Bodeneigenschaften muss die Beziehung zwischen Spannungen  $\sigma$  und Verformungen  $\varepsilon$  über ein geeignetes Stoffgesetz beschrieben werden. In der Bodenmechanik können je nach gegebener Situation und Aufgabenstellung unterschiedliche Stoffgesetze geeignet sein. Von der richtigen Auswahl hängt die erreichbare Annäherung eines Berechnungsergebnisses an die Realität ab. Entsprechend unterstützt Plaxis mehrere Möglichkeiten zur Modellierung des Bodenverhaltens mit Stoffgesetzen.

Für die gegebene Aufgabe ist die Beschreibung des Bodenverhaltens über das Mohr-Coulomb-Modell, bei dem das Spannungs-Dehnungsverhalten des Bodens unter Druckbelastung als elastisch - ideal plastisch abgebildet wird, am geeignetsten. Zur Charakterisierung des Bodenverhaltens dienen hierbei fünf Parameter: der Elastizitätsmodul  $E$ , die Kohäsion  $c$ , der Reibungswinkel  $\varphi$ , die Querdehnzahl  $\nu$  und der Dilatanzwinkel  $\psi$  (PLAXIS B. V. 1998).

Über den Elastizitätsmodul  $E$  wird die Steifigkeit des Bodens unter vertikaler Belastung im elastischen Bereich beschrieben, siehe Bild 4-5.

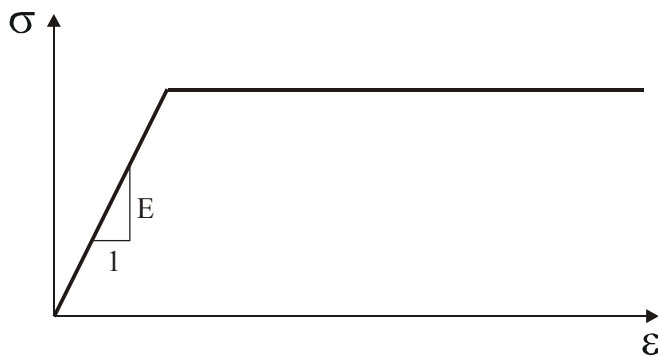


Bild 4-5: Elastisch - ideal plastische Spannungs-Dehnungsbeziehung

Der Reibungswinkel bestimmt den Scherwiderstand, der in einer beliebigen Gleitfläche in Abhängigkeit von der auf die Scherfläche wirkenden Normalspannung mobilisiert werden kann. Die Kohäsion beschreibt demgegenüber Haftkräfte zwischen den einzelnen Bodenteilchen, die vom vorhandenen Spannungszustand unabhängig sind.

Im Grenzzustand, d. h. bei beginnendem Scherbruch, besteht zwischen der gesamten Scherfestigkeit  $\tau$ , der Normalspannung  $\sigma$  und der Kohäsion  $c$  die von Coulomb formulierte Beziehung:

$$\tau = c + \sigma \cdot \tan \varphi \quad (4-1)$$

$\tau$	Scherfestigkeit	[kN/m <sup>2</sup> ]
$c$	Kohäsion	[kN/m <sup>2</sup> ]
$\sigma$	Spannung	[kN/m <sup>2</sup> ]
$\varphi$	Reibungswinkel	[°]

Nach Mohr gilt für die zugehörigen Hauptspannungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_3$ :

$$\sigma_1 - \sigma_3 = 2 \cdot c \cdot \cos \varphi + (\sigma_1 + \sigma_3) \cdot \sin \varphi \quad (4-2)$$

$\sigma_1$	größte Hauptspannung	[kN/m <sup>2</sup> ]
$\sigma_3$	kleinste Hauptspannung	[kN/m <sup>2</sup> ]

Wie Bild 4-6 zeigt, ist durch den Term  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  der Durchmesser der Mohrschen Bruchkreise gegeben. Gleichung (4-1) beschreibt die Tangente an die möglichen Hauptspannungskreise des Bruchzustands. Der Mohr-Coulombschen Bruchbedingung entsprechend wird über den Reibungswinkel und die Kohäsion auch diejenige Hauptspannungsdifferenz definiert, ab deren Überschreitung das Bodenverhalten von elastisch in ideal plastisch übergeht (Bruchzustand).



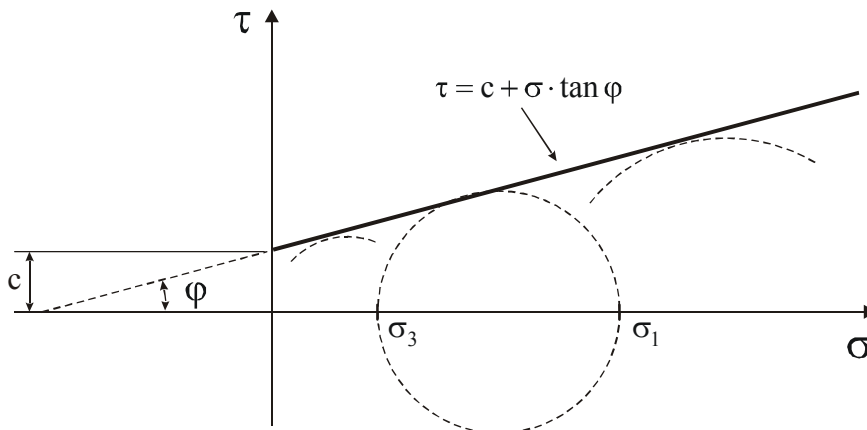


Bild 4-6: Mohrsche Darstellung der Scherfestigkeit

Die Querdehnzahl  $\nu$  beschreibt das Verhältnis von horizontaler Querdehnung und vertikaler Stauchung bei einaxialer vertikaler Belastung. Sie wird für die Berechnung der aus vertikalen Lasten resultierenden horizontalen Bodenspannungen verwendet. Allerdings werden die Horizontalspannungen infolge des Bodeneigengewichts im Ausgangsspannungszustand von Plaxis nicht über die Querdehnzahl, sondern aus dem Reibungswinkel berechnet.

Über den Dilatanzwinkel  $\psi$  wird eine im Falle des Scherversagens gegebenenfalls vorhandene Volumenzunahme des Bodens im Bereich der Scherfläche definiert. Die Dilatanz ergibt sich aus der bei der Verschiebung von Bodenteilchen relativ zueinander ausgelösten Umlagerung der Teilchen und einer damit einhergehenden Abnahme der Lagerungsdichte. Durch den Einfluss der Dilatanz kann der Widerstand eines dicht gelagerten Bodens gegen Abscherung erhöht werden. Von Einfluss ist die Dilatanz vor allem bei rolligen Böden mit großen Reibungswinkeln, während bindige Böden in der Regel keine oder nur eine sehr geringe Dilatanz aufweisen. Damit hat der Dilatanzwinkel für die gegebene Aufgabenstellung eine geringere Bedeutung als die anderen Modellparameter. Da im Rahmen der Parameterstudie ohnehin der Einfluss unterschiedlicher Scherfestigkeiten anhand der Variation des Reibungswinkels betrachtet wird, bleibt eine gegebenenfalls vorhandene Dilatanz unberücksichtigt.

Im allgemeinen Fall muss für die Durchführung der Spannungsberechnungen noch der Einfluss des Porenwasserdrucks berücksichtigt werden, da die gesamte aufgrund der vorhandenen Lasten vertikal auf den Boden wirkende totale Spannung  $\sigma$  teilweise vom Korngerüst des Bodens und teilweise vom Porenwasser aufgenommen wird. Dabei wird der um den Porenwasserdruck  $u$  verminderte Anteil der totalen Spannung als effektive Spannung  $\sigma'$  bezeichnet, und es besteht die Beziehung:

$$\sigma' = \sigma - u \quad (4-3)$$

$\sigma'$	effektive Spannung	[kN/m <sup>2</sup> ]
$u$	Porenwasserdruck	[kN/m <sup>2</sup> ]

Da sich bei den betrachteten Situationen die Belastung aber infolge der Austrocknung des Bodens über einen längeren Zeitraum hinweg entwickelt, können keine Spannungen durch Porenwasser aufgenommen werden und es genügt, die totalen Spannungen zu berechnen, da diese mit den effektiven Spannungen identisch sind.

Die für den vorliegenden Problemkreis wesentlichen Bodeneigenschaften können über die im Mohr-Coulomb-Modell verwendeten Parameter abgebildet werden. Plaxis bietet alternativ auch höherwertige Stoffgesetze, mit denen das Bodenverhalten im Hinblick auf manche Anwendungen genauer erfasst werden kann, an. Diese Modelle benötigen jedoch weitere Eingangsgrößen und können nur sinnvoll eingesetzt werden, wenn für die konkrete Betrachtung einzelner Projekte detaillierte Baugrundinformationen durch Laborversuche erhoben werden. Für die Bearbeitung der vorliegenden Aufgabenstellung eignen sich die erweiterten Stoffgesetze deshalb nicht.

#### **4.1.6 Abbildung der Leitungseigenschaften**

Zur Beschreibung der Werkstoffeigenschaften der als Träger idealisierten Rohrleitung wird sowohl für Grauguss- als auch für Stahlleitungen ein linear-elastisches Stoffgesetz zugrunde gelegt. Entsprechend werden zur Charakterisierung des Bauteilverhaltens die Biegesteifigkeit  $EI$  und die Dehnsteifigkeit  $EA$  benötigt. Beide Kenngrößen lassen sich aus dem Elastizitätsmodul  $E_R$  des Werkstoffes und den Querschnittsabmessungen, ausgedrückt durch den Außendurchmesser  $d_a$  und die Wanddicke  $s$ , bestimmen. Ferner wird dem Träger ein spezifisches Gewicht zugeordnet, das im Falle von Gasleitungen dem Leitungseigengewicht entspricht und zur Betrachtung von Wasserleitungen noch mit dem Gewicht der Wasserfüllung überlagert wird. Für die zweidimensionale Abbildung werden die Kenngrößen der Rohrleitung in Abhängigkeit vom Außendurchmesser des Rohres auf Werte pro Längeneinheit senkrecht zur Abbildungsebene normiert.

#### **4.2 Berechnung der resultierenden Querschnittsspannungen**

Für die Vorzeichen der mit Plaxis berechneten Schnittgrößen im Lastfall 1 (Rohrleitung als Biegeträger) gelten folgende Definitionen:

- Biegemomente  $M_y$  sind positiv, wenn sie auf der Unterseite der Rohrleitung Zugspannungen bewirken.
- Normalkräfte  $N_x$  sind positiv, wenn sie Zugspannungen bewirken.
- Querkkräfte  $Q_z$  sind positiv, wenn sie am rechten Schnittufer nach unten zeigen.

Die nach der Ausführung der Berechnungen mit dem Längsschnitt-Modell von Plaxis ausgegebenen Schnittgrößen müssen vor der Durchführung der Schnittgrößenberechnungen auf die gegebene Breite der Rohrleitung (Rohraußendurchmesser) bezogen werden.

### 4.2.1 Spannungen in Längsrichtung

Die an einer beliebigen Stelle des Rohrquerschnitts (Kreisring) wirksamen Längsspannungen  $\sigma_x$  aus Biegemoment  $M_y$  und Normalkraft  $N_x$  hängen vom lotrechten Abstand  $\Delta z$  dieser Stelle zur horizontalen Schwerachse im Kämpfer des Querschnitts ab:

$$\sigma_x = \frac{N_x}{A} + \frac{M_y}{I} \cdot \Delta z \quad (4-4)$$

$\sigma_x$	Spannung in x-Richtung	[N/mm <sup>2</sup> ]
$N_x$	Normalkraft in x-Richtung	[kN]
$A$	Querschnittsflächeninhalt	[mm <sup>2</sup> ]
$M_y$	Biegemoment in y-Richtung	[kNm]
$I$	Flächenträgheitsmoment	[mm <sup>4</sup> ]
$\Delta z$	lotrechter Abstand zur neutralen Faser	[mm]

Mit der Querschnittsfläche

$$A = \frac{\pi}{4} \cdot (d_a^2 - (d_a - 2 \cdot s)^2) \quad (4-5)$$

$d_a$	Rohraußendurchmesser	[mm]
$s$	Rohrwanddicke	[mm]

und dem Flächenträgheitsmoment  $I$  des Kreisrings

$$I \approx \pi \cdot \left( \frac{d_a - s}{2} \right)^3 \cdot s \quad (4-6)$$

ergibt sich für die Längsspannungen  $\sigma_x$ :

$$\sigma_x = \frac{4}{\pi \cdot (d_a^2 - (d_a - 2 \cdot s)^2)} \cdot N_x + \frac{\Delta z}{\pi \cdot \left( \frac{d_a - s}{2} \right)^3 \cdot s} \cdot M_y \quad (4-7)$$

Für die weiteren Betrachtungen ist es zweckmäßig, Polarkoordinaten zu verwenden. Gemäß der Definition in Bild 4-7 erfolgt die Winkelzählung vom Rohrscheitel aus.

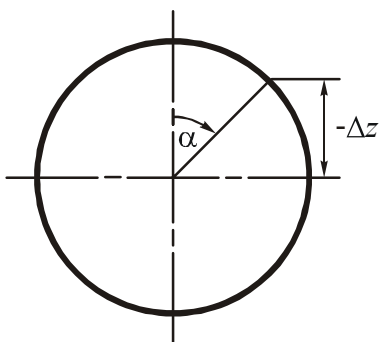


Bild 4-7: Koordinatendefinition

Für eine beliebige Stelle auf der Außenseite des Kreisrings besteht zwischen  $\Delta z$  und dem Polarwinkel  $\alpha$  Beziehung:

$$\Delta z = -\frac{d_a}{2} \cdot \cos \alpha \quad (4-8)$$

$\alpha$  Polarwinkel [-]

Für eine beliebige Stelle auf der Innenseite des Kreisrings lautet die Beziehung zwischen  $\Delta z$  und dem Polarwinkel  $\alpha$ :

$$\Delta z = -\frac{d_a - 2 \cdot s}{2} \cdot \cos \alpha \quad (4-9)$$

In Polarkoordinaten ergeben sich die resultierenden Längsspannungen  $\sigma_x$  für einen beliebigen Punkt auf der Außenseite des Kreisrings aus den Gleichungen (4-7) und (4-8) zu:

$$\sigma_x = \frac{4}{\pi \cdot (d_a^2 - (d_a - 2 \cdot s)^2)} \cdot N_x - \frac{d_a \cdot \cos \alpha}{2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_a - s}{2}\right)^3} \cdot M_y \quad (4-10)$$

Für eine beliebige Stelle an der Innenseite des Kreisrings ergeben sich die resultierenden Längsspannungen  $\sigma_x$  aus den Gleichungen (4-7) und (4-9) zu:

$$\sigma_x = \frac{4}{\pi \cdot (d_a^2 - (d_a - 2 \cdot s)^2)} \cdot N_x - \frac{(d_a - 2 \cdot s) \cdot \cos \alpha}{2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_a - s}{2}\right)^3} \cdot M_y \quad (4-11)$$

#### 4.2.2 Schubspannungen infolge Querkraft

Zur Berechnung der Schubspannungsverteilung über den Kreisring werden die für dünnwandige Querschnitte üblichen Näherungsannahmen getroffen:

- Die Schubspannungen verlaufen entlang des gesamten Querschnitts immer in Richtung der Profilmittellinie.
- Die Schubspannungen sind konstant über die Wanddicke verteilt.

Aufgrund der Symmetrieeigenschaften des vorliegenden Kreisringquerschnitts gilt des Weiteren:

- Der Schubmittelpunkt, also der Angriffspunkt der Querkraft, ist identisch mit dem Schwerpunkt.
- An Scheitel und Sohle des Rohrquerschnitts muss der Schubfluss den Wert Null annehmen.

Für die Schubspannungen  $\tau_{xu}$  eines Querschnitts besteht die Beziehung:

$$\tau_{xu} = \frac{Q_z}{I \cdot s} \cdot S \quad (4-12)$$

$\tau_{xu}$	Schubspannung in Umfangsrichtung	[N/mm <sup>2</sup> ]
$Q_z$	Querkraft in z-Richtung	[kN]
$S$	statisches Moment des Rohrquerschnitts	[mm <sup>3</sup> ]

Das von der Stelle  $\alpha$  abhängige statische Moment  $S$  ergibt sich aus der Integration des Produkts aus dem Flächeninhalt einer infinitesimal kleinen Teilfläche des Kreisrings und dem Abstand dieser Fläche zur horizontalen Schwerachse über den Bereich von 0 bis  $\alpha$ :

$$S = \int_0^\alpha \frac{d_a - s}{2} \cdot \cos \alpha \cdot s \cdot \frac{d_a - s}{2} \cdot d\alpha \quad (4-13)$$

Nach der Durchführung der Integration ergibt sich

$$S = \left( \frac{d_a - s}{2} \right)^2 \cdot s \cdot [\sin \alpha]_0^\alpha \quad (4-14)$$

und nach dem Einsetzen der Integrationsgrenzen erhält man:

$$S = \left( \frac{d_a - s}{2} \right)^2 \cdot s \cdot \sin \alpha \quad (4-15)$$

Die Schubspannungen an einer beliebigen Stelle  $\alpha$  des Kreisrings ergeben sich nach dem Einsetzen der Gleichungen (4-6) und (4-15) in Gleichung (4-12) zu:

$$\tau_{xu} = \frac{\sin \alpha}{\pi \cdot \frac{d_a - s}{2} \cdot s} \cdot Q_z \quad (4-16)$$

Werden die bei  $\alpha$  über die Wanddicke verteilten Schubspannungen zusammengefasst, erhält man den Schubfluss  $T$ :

$$T = \tau_{xu} \cdot s = \frac{\sin \alpha}{\pi \cdot \frac{d_a - s}{2}} \cdot Q_z \quad (4-17)$$

$T$  Schubfluss im Rohrquerschnitt [N/mm]

Wie aus Gleichung (4-17) zu erkennen ist, hat  $T$  im Scheitel und in der Sohle des Leitungsquerschnitts den Wert null und ist im Kämpfer maximal.

## 5. Berechnung des druckbeanspruchten Rohrquerschnitts

### 5.1 Lastfall Erddruck

#### 5.1.1 Ansatz der Belastung

Die Belastung der Rohrleitung durch Erddruck in der Querschnittsebene (Lastfall 2) hängt von der Position des zu betrachtenden Querschnitts entlang der Längsachse der Rohrleitung ab. Die maximalen Auflasten ergeben sich für den neben der Einspannstelle bei  $x = 0$  befindlichen Querschnitt; sie werden über das Querschnitt-FE-Modell ermittelt.

Wegen der im Nahbereich der Einspannung vorhandenen klaffenden Fuge entsteht im Bereich der Leitungssohle kein Bettungsreaktionsdruck. Aus den Spannungsverhältnissen im Querschnitt-Modell wird weiter zu entnehmen sein, dass die Belastung des Kreisrings näherungsweise durch das in Bild 5-1 dargestellte Lastbild abgebildet werden kann.

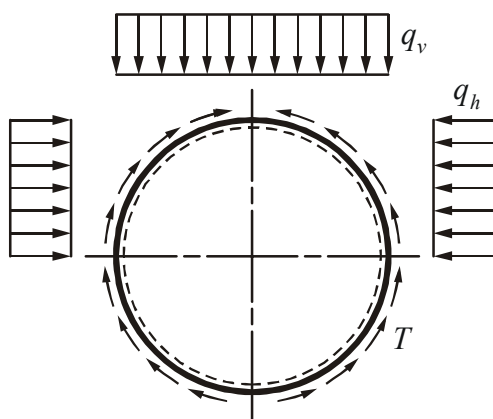


Bild 5-1: Lastbild

#### 5.1.2 Statische Berechnung

Der Querschnitt der Rohrleitung kann, wie bei der statischen Berechnung eingerdeter Rohre mit konstanter Wanddicke üblich, als Kreisringträger betrachtet werden. Das gegebene System ist dreifach statisch unbestimmt, zu dessen Berechnung eignet sich deshalb besonders das Kraftgrößenverfahren. Für gängige Last- und Lagerungsbedingungen sind in der Fachliteratur Lösungen beschrieben, beispielsweise bei GIESECKE / MOSONYI (2005) oder bei STURMATH (1988). Da die bei der vorliegenden Problemstellung gegebene Belastung in ihrem Verlauf nicht den gängigen Lastbildern entspricht, kann aber nicht auf die für Standardfälle veröffentlichten Lösungsgleichungen und -tabellen zurückgegriffen werden. Im Folgenden wird deshalb eine der konkreten Aufgabe entsprechende Schnittgrößenberechnung durchgeführt.

Durch Freischneiden des Kreisrings im Scheitel werden die statisch überzähligen Schnittgrößen  $X_1$  bis  $X_3$  ausgelöst, siehe Bild 5-2. Sie werden zweckmäßigerweise im elastischen Schwerpunkt des Systems angesetzt, wozu die Schnittufer gedanklich über zwei biegesteife, nicht von außen belastete Stäbe mit dem Kreisschwerpunkt verbunden werden. Auf diese Weise lassen sich die statisch Überzähligen ohne Lösung einer Gleichungsmatrix aus jeweils einer Lösungsgleichung berechnen. Das so erzeugte Grundsystem ist statisch bestimmt.

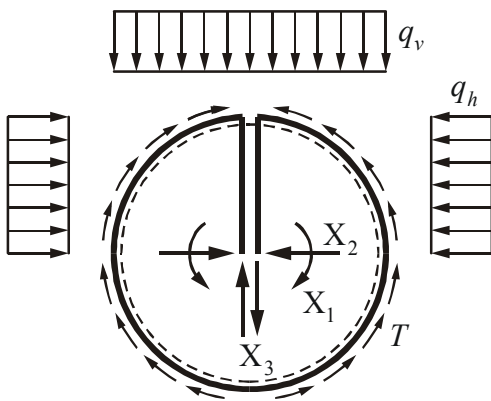


Bild 5-2: Statisch bestimmtes Grundsystem mit den statisch Überzähligen

Wegen der Symmetrie von Querschnitt und Belastung ist die Querkraft  $X_3 = 0$  und die Zahl der statisch Überzähligen reduziert sich auf zwei. Ferner genügt im Weiteren die Betrachtung des halben Systems (Bereich  $0 \leq \alpha \leq \pi$ ). Die gestrichelte Faser verläuft auf der Kreisinnenseite, so dass Biegemomente als positiv definiert sind, wenn sie auf der inneren Rohrwand Zugspannungen bewirken.

Für die einzelnen Belastungsfälle (Lastzustand,  $X_1 = 1$ ,  $X_2 = 1$ ) wird zunächst der Verlauf der Schnittgrößen über den Kreisring berechnet. Im Lastzustand werden die statisch Überzähligen zu null gesetzt, auf das Grundsystem wirken nur die äußeren Lasten.

Für die Formulierung des Kräftegleichgewichts am Kreisring wird zunächst eine Aufteilung der Gesamtbelastung des Lastfalls 2 in die folgenden Teillastfälle vorgenommen:

- Teillastfall A: nur vertikale Belastung  $q_v$
- Teillastfall B: nur horizontale Belastung  $q_h$
- Teillastfall C: nur Schubfluss  $T$ .

Wegen der Unstetigkeit der Belastung bei  $\alpha = \pi/2$  ist in den Teillastfällen A und B eine bereichsweise getrennte Schnittgrößenberechnung erforderlich.

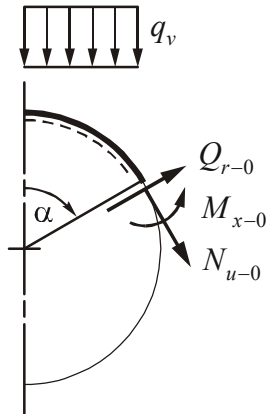
Die in den Systemskizzen zu den Teillastfällen mit aufgetragenen Querkräfte  $Q_{r-0}$  werden, wie in der Rohrstatik üblich, bei den Berechnungen nicht weiter berücksichtigt, da die durch sie verursachten Schubspannungen vernachlässigt werden können. Begründet ist dies neben der Höhe der Querkraftschubspannungen auch durch die Schubspannungsverteilung, die ihr



Maximum in der Mitte der Rohrwand erreicht und in den Randbereichen, die für den Spannungsnachweis infolge der anderen Schnittgrößen maßgeblich sind, gegen null geht.

Bild 5-3 zeigt die Schnittkräfte des Teillastfalls A.

Bereich  $0 \leq \alpha \leq \pi/2$ :



Bereich  $\pi/2 \leq \alpha \leq \pi$ :

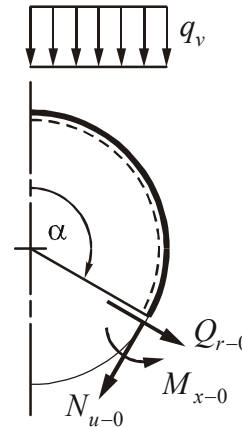


Bild 5-3: Schnittkräfte im Teillastfall A des Lastzustands

Aus dem Kräftegleichgewicht ergeben sich die Schnittkräfte im Bereich  $0 \leq \alpha \leq \pi/2$  zu:

$$M_{x-0} = \left( \frac{d_a - s}{2} \right)^2 \cdot \left[ -\frac{1}{2} \cdot q_v \cdot \sin^2 \alpha \right] \quad (5-1)$$

$M_{x-0}$  Biegemoment in x-Richtung im Lastzustand [kNm/m]

$q_v$  vertikale Last auf den Rohrquerschnitt [N/mm<sup>2</sup>]

$$N_{u-0} = \frac{d_a - s}{2} \cdot \left[ -q_v \cdot \sin^2 \alpha \right] \quad (5-2)$$

$N_{u-0}$  Normalkraft in Umfangsrichtung im Lastzustand [kN/mm]

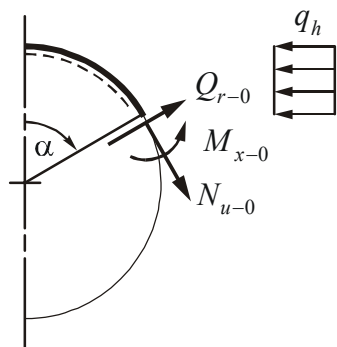
und im Bereich  $\pi/2 \leq \alpha \leq \pi$  zu:

$$M_{x-0} = \left( \frac{d_a - s}{2} \right)^2 \cdot \left[ -q_v \cdot \left( \sin \alpha - \frac{1}{2} \right) \right] \quad (5-3)$$

$$N_{u-0} = \frac{d_a - s}{2} \cdot (-q_v \cdot \sin \alpha) \quad (5-4)$$

Bild 5-4 zeigt die Schnittkräfte des Teillastfalls B.

Bereich  $0 \leq \alpha \leq \pi/2$ :



Bereich  $\pi/2 \leq \alpha \leq \pi$ :

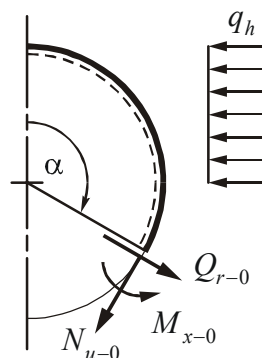


Bild 5-4: Schnittkräfte im Teillastfall B des Lastzustands

Aus dem Kräftegleichgewicht ergeben sich die Schnittkräfte im Bereich  $0 \leq \alpha \leq \pi/2$  zu:

$$M_{x-0} = \left( \frac{d_a - s}{2} \right)^2 \cdot \left[ \frac{1}{2} \cdot q_h \cdot (-\cos^2 \alpha + 2 \cdot \cos \alpha - 1) \right] \quad (5-5)$$

$q_h$  horizontale Last auf den Rohrquerschnitt [N/mm<sup>2</sup>]

$$N_{u-0} = \frac{d_a - s}{2} \cdot \left[ -q_h \cdot (\cos^2 \alpha - \cos \alpha) \right] \quad (5-6)$$

und im Bereich  $\pi/2 \leq \alpha \leq \pi$  zu:

$$M_{x-0} = \left( \frac{d_a - s}{2} \right)^2 \cdot \left[ \frac{1}{2} q_h \cdot (2 \cdot \cos \alpha - 1) \right] \quad (5-7)$$

$$N_{u-0} = \frac{d_a - s}{2} \cdot (q_h \cdot \cos \alpha) \quad (5-8)$$

Im Teillastfall C muss vor der Bestimmung der durch den Schubfluss verursachten Ringschnittkräfte noch die Beziehung zwischen der Auflast  $q_v$  und der Größe des auftretenden Schubflusses  $T$  beschrieben werden. Hierzu wird das Kräftegleichgewicht am Rohrquerschnitt in vertikaler Richtung nach Bild 5-5 betrachtet.

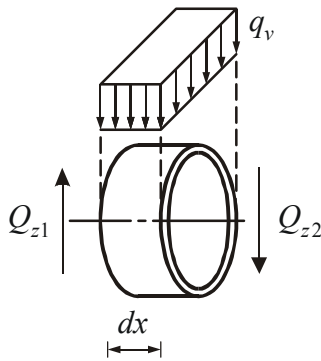


Bild 5-5: Kräftegleichgewicht in vertikaler Richtung am freigeschnittenen Rohrabschnitt

Entlang der Längsachse der Rohrleitung ändert sich die Größe der Querkraft über einen infinitesimalen Leitungsabschnitt der Länge  $dx$  in Abhängigkeit von der Auflast  $q_v$ :

$$Q_{z1} - Q_{z2} = q_v \cdot dx \cdot d_a \quad (5-9)$$

Die Beziehung zwischen Querkraft und Schubfluss wurde bereits in Kapitel 4.2 behandelt. Gleichung (4-17) dient dabei zur Berechnung der Schubspannungen aus der absoluten Größe der Querkraft. Zur Berechnung des Kräftegleichgewichts am Kreisring muss anstelle der absoluten Querkraft die Querkraftänderung nach Gleichung (5-9) verwendet werden. Zur weiteren Berechnung des Teillastfalls ist es ferner zweckmäßig, zur Angabe des Wirkungsortes anstelle des Winkels  $\alpha$  den Hilfswinkel  $\beta$  nach Bild 5-6 zu verwenden. Der Schubfluss berechnet sich damit in Anlehnung an Gleichung (4-17) zu:

$$T = \frac{\sin \beta}{\pi \cdot \frac{d_a - s}{2}} \cdot q_v \cdot dx \cdot d_a \quad (5-10)$$

$\beta$  Hilfswinkel

[-]

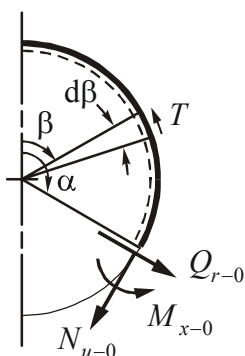


Bild 5-6: Schnittkräfte und Hilfswinkel im Teillastfall C des Lastzustands

Durch Einsetzen von Gleichung (5-9) in (5-10) und anschließender Termumformung erhält man für den Schubfluss an einer beliebigen Stelle des Kreisrings im Teillastfall C:

$$T = \frac{2 \cdot q_v}{\pi} \cdot \sin \beta \quad (5-11)$$

An der Stelle  $\beta$  wird mit einer infinitesimalen Winkeländerung  $d\beta$  der infinitesimale Anteil  $dT$  des Schubflusses beschrieben:

$$dT = \frac{2 \cdot q_v}{\pi} \cdot \frac{d_a - s}{2} \cdot \sin \beta \, d\beta \quad (5-12)$$

An der Stelle  $\alpha$  ergeben sich die Schnittgrößen infolge des Schubflusses zu:

$$M_{x-0} = \int_0^\alpha -\frac{d_a - s}{2} (1 - \cos(\alpha - \beta)) \, dT \quad (5-13)$$

$$N_{u-0} = \int_0^\alpha \cos(\alpha - \beta) \, dT \quad (5-14)$$

Durch Einsetzen der Gleichung (5-12) in die Gleichungen (5-13) beziehungsweise (5-14) erhält man:

$$M_{x-0} = - \int_0^\alpha \frac{2 \cdot q_v}{\pi} \cdot \left( \frac{d_a - s}{2} \right)^2 \cdot \sin \beta \cdot (1 - \cos(\alpha - \beta)) \, d\beta \quad (5-15)$$

$$N_{u-0} = \int_0^\alpha \frac{2 \cdot q_v}{\pi} \cdot \frac{d_a - s}{2} \cdot \sin \beta \cdot \cos(\alpha - \beta) d\beta \quad (5-16)$$

Nach Durchführung der Integration erhält man die Gleichungen:

$$M_{x-0} = -\frac{2 \cdot q_v}{\pi} \cdot \left(\frac{d_a - s}{2}\right)^2 \cdot \left[ -[\cos \beta]_0^\alpha - \cos \alpha \cdot \left[\frac{\sin^2 \beta}{2}\right]_0^\alpha - \sin \alpha \cdot \left[\frac{\beta}{2} - \frac{\sin(2 \cdot \beta)}{4}\right]_0^\alpha \right] \quad (5-17)$$

$$N_{u-0} = \frac{2 \cdot q_v}{\pi} \cdot \frac{d_a - s}{2} \cdot \left[ \cos \alpha \cdot \left[\frac{\sin^2 \beta}{2}\right]_0^\alpha + \sin \alpha \cdot \left[\frac{\beta}{2} - \frac{\sin(2 \cdot \beta)}{4}\right]_0^\alpha \right] \quad (5-18)$$

Einsetzen der Integrationsgrenzen und Termumformung führt auf die Lösungsgleichungen für die Schnittgrößen im Teillastfall C:

$$M_{x-0} = \left(\frac{d_a - s}{2}\right)^2 \cdot \left[ \frac{1}{\pi} \cdot q_v \cdot (\alpha \cdot \sin \alpha + 2 \cdot \cos \alpha - 2) \right] \quad (5-19)$$

$$N_{u-0} = \frac{d_a - s}{2} \cdot \left[ \frac{1}{\pi} \cdot q_v \cdot \alpha \cdot \sin \alpha \right] \quad (5-20)$$

Durch die Überlagerung der Teillastfälle A bis C erhält man für den gesamten Lastzustand im Bereich  $0 \leq \alpha \leq \pi/2$ :

$$M_{x-0} = \left(\frac{d_a - s}{2}\right)^2 \cdot \left[ q_v \cdot \left( -\frac{1}{2} \sin^2 \alpha + \frac{\alpha}{\pi} \sin \alpha + \frac{2}{\pi} \cos \alpha - \frac{2}{\pi} \right) + q_h \cdot \left( -\frac{1}{2} \cos^2 \alpha + \cos \alpha - \frac{1}{2} \right) \right] \quad (5-21)$$

$$N_{u-0} = \frac{d_a - s}{2} \cdot \left[ q_v \cdot \left( -\sin^2 \alpha + \frac{\alpha}{\pi} \cdot \sin \alpha \right) + q_h \cdot \left( -\cos^2 \alpha + \cos \alpha \right) \right] \quad (5-22)$$

und im Bereich  $\pi/2 \leq \alpha \leq \pi$ :

$$M_{x-0} = \left(\frac{d_a - s}{2}\right)^2 \cdot \left[ q_v \cdot \left( \frac{\alpha}{\pi} \sin \alpha - \sin \alpha + \frac{2}{\pi} \cdot \cos \alpha - \frac{2}{\pi} + \frac{1}{2} \right) + q_h \cdot \left( \cos \alpha - \frac{1}{2} \right) \right] \quad (5-23)$$

$$N_{u-0} = \frac{d_a - s}{2} \cdot \left[ q_v \cdot \left( \frac{\alpha}{\pi} \sin \alpha - \sin \alpha \right) + q_h \cdot (\cos \alpha) \right] \quad (5-24)$$

Bei der Berechnung der Einheitszustände werden die Verteilungen der Schnittgrößen infolge der noch unbekanntem statisch Überzähligen ermittelt, indem diese am Grundsystem jeweils einzeln als Einheitslast aufgebracht werden.

Für  $X_1 = 1$  ergeben sich die Schnittkräfte zu:

$$M_{x-1} = 1 \quad (5-25)$$

$M_{x-i}$  Moment in x-Richtung im Einheitszustand i [kNm/m]

$$N_{u-1} = 0 \quad (5-26)$$

$N_{u-i}$  Normalkraft in Umfangsrichtung im Einheitszustand i [kN/m]

und für  $X_2 = 1$  zu:

$$M_{x-2} = \frac{d_a - s}{2} \cdot \cos \alpha \quad (5-27)$$

$$N_{u-2} = \cos \alpha \quad (5-28)$$

Aus der elastischen Formänderungsarbeit des Biegemoments lassen sich die Verschiebungen  $\delta$  an den beim Freischneiden erzeugten Schnittufern bestimmen (Lastwerte und Systemflexibilitäten). Die Einflüsse der Normal- und Querkräfte sind dabei vernachlässigbar und werden nicht berücksichtigt.

In Folge von  $X_1$  berechnet sich der Lastwert  $\delta_{10}$  zu:

$$\delta_{10} = \frac{1}{EI} \cdot \int_0^{2\pi} M_{x-1} \cdot M_{x-0} \cdot \frac{d_a - s}{2} d\alpha \quad (5-29)$$

$EI$  Biegesteifigkeit [kNm<sup>2</sup>]

Mit den zuvor berechneten Momenten ergibt sich:

$$\begin{aligned} \delta_{10} = & 2 \cdot \frac{1}{EI} \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left( \frac{d_a - s}{2} \right)^3 \cdot \left[ q_v \cdot \left( -\frac{1}{2} \cdot \sin^2 \alpha + \frac{\alpha}{\pi} \cdot \sin \alpha + \frac{2}{\pi} \cdot \cos \alpha - \frac{2}{\pi} \right) \right. \\ & + q_h \cdot \left( -\frac{1}{2} \cos^2 \alpha + \cos \alpha - \frac{1}{2} \right) \left. \right] d\alpha + 2 \cdot \frac{1}{EI} \cdot \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \left( \frac{d_a - s}{2} \right)^3 \cdot \left[ q_v \cdot \left( \frac{\alpha}{\pi} \cdot \sin \alpha - \sin \alpha \right. \right. \\ & + \frac{2}{\pi} \cdot \cos \alpha - \frac{2}{\pi} + \frac{1}{2} \left. \right) + q_h \cdot \left( \cos \alpha - \frac{1}{2} \right) \left. \right] d\alpha \end{aligned} \quad (5-30)$$

und nach Durchführung der Integration erhält man:

$$\begin{aligned} \delta_{10} = & 2 \cdot \frac{1}{EI} \cdot \left( \frac{d_a - s}{2} \right)^3 \cdot \left[ q_v \left[ -\frac{1}{2} \cdot \left[ \frac{\alpha}{2} - \frac{\sin(2 \cdot \alpha)}{4} \right]_0^{\frac{\pi}{2}} + \frac{1}{\pi} \cdot [\sin \alpha - \alpha \cdot \cos \alpha]_0^{\frac{\pi}{2}} \right. \right. \\ & + \frac{2}{\pi} \cdot [\sin \alpha]_0^{\frac{\pi}{2}} - \frac{2}{\pi} \cdot [\alpha]_0^{\frac{\pi}{2}} + \frac{1}{\pi} \cdot [\sin \alpha - \alpha \cdot \cos \alpha]_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} - [-\cos \alpha]_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} + \frac{2}{\pi} \cdot [\sin \alpha]_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \\ & - \frac{2}{\pi} \cdot [\alpha]_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} + \frac{1}{2} \cdot [\alpha]_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \left. \right] + q_h \cdot \left[ -\frac{1}{2} \cdot \left[ \frac{\alpha}{2} + \frac{\sin(2 \cdot \alpha)}{4} \right]_0^{\frac{\pi}{2}} + [\sin \alpha]_0^{\frac{\pi}{2}} - \frac{1}{2} \cdot [\alpha]_0^{\frac{\pi}{2}} \right. \\ & \left. \left. + [\sin \alpha]_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} - \frac{1}{2} \cdot [\alpha]_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \right] \right] \end{aligned} \quad (5-31)$$

Durch Einsetzen der Integrationsgrenzen und Termumformung erhält man die Lösungsgleichung:

$$\delta_{10} = \frac{1}{EI} \cdot \left( \frac{d_a - s}{2} \right)^3 \cdot \left[ q_v \cdot \left( \frac{\pi}{4} - 4 \right) + q_h \cdot \left( -\frac{5 \cdot \pi}{4} \right) \right] \quad (5-32)$$

In Folge von  $X_2$  berechnet sich der Lastwert  $\delta_{20}$  zu:

$$\delta_{20} = \frac{1}{EI} \cdot \int_0^{2 \cdot \pi} M_{x-2} \cdot M_{x-0} \cdot \frac{d_a - s}{2} d\alpha \quad (5-33)$$

Mit den zuvor berechneten Momenten ergibt sich:

$$\begin{aligned}
 \delta_{20} = & 2 \cdot \frac{1}{EI} \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} \left( \frac{d_a - s}{2} \right)^4 \cdot \left[ q_v \cdot \left( -\frac{1}{2} \cdot \sin^2 \alpha \cdot \cos \alpha + \frac{\alpha}{\pi} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha + \frac{2}{\pi} \cdot \cos^2 \alpha \right. \right. \\
 & \left. \left. - \frac{2}{\pi} \cdot \cos \alpha \right) + q_h \cdot \left( -\frac{1}{2} \cdot \cos^3 \alpha + \cos^2 \alpha - \frac{1}{2} \cdot \cos \alpha \right) \right] d\alpha \\
 & + 2 \cdot \frac{1}{EI} \cdot \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \left( \frac{d_a - s}{2} \right)^4 \cdot \left[ q_v \cdot \left( \frac{\alpha}{\pi} \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha - \sin \alpha \cdot \cos \alpha + \frac{2}{\pi} \cdot \cos^2 \alpha \right. \right. \\
 & \left. \left. - \frac{2}{\pi} \cdot \cos \alpha + \frac{1}{2} \cdot \cos \alpha \right) + q_h \cdot \left( \cos^2 \alpha - \frac{1}{2} \cdot \cos \alpha \right) \right] d\alpha
 \end{aligned} \tag{5-34}$$

und nach Durchführung der Integration erhält man:

$$\begin{aligned}
 \delta_{20} = & 2 \cdot \frac{1}{EI} \cdot \left( \frac{d_a - s}{2} \right)^4 \cdot \left[ q_v \left[ -\frac{1}{2} \cdot \left[ \frac{\sin^3 \alpha}{3} \right]_0^{\frac{\pi}{2}} + \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ \frac{\sin(2 \cdot \alpha)}{4} - \frac{\alpha \cdot \cos(2 \cdot \alpha)}{2} \right]_0^{\frac{\pi}{2}} \right. \right. \\
 & \left. \left. + \frac{2}{\pi} \cdot \left[ \frac{\alpha}{2} + \frac{\sin(2 \cdot \alpha)}{4} \right]_0^{\frac{\pi}{2}} - \frac{2}{\pi} \cdot [\sin \alpha]_0^{\frac{\pi}{2}} \right] + q_h \cdot \left[ -\frac{1}{2} \cdot \left[ \sin \alpha - \frac{\sin^3 \alpha}{3} \right]_0^{\frac{\pi}{2}} \right. \right. \\
 & \left. \left. + \left[ \frac{\alpha}{2} + \frac{\sin(2 \cdot \alpha)}{4} \right]_0^{\frac{\pi}{2}} - \frac{1}{2} \cdot [\sin \alpha]_0^{\frac{\pi}{2}} \right] + q_v \left[ \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ \frac{\sin(2 \cdot \alpha)}{4} - \frac{\alpha \cdot \cos(2 \cdot \alpha)}{2} \right]_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \right. \right. \\
 & \left. \left. - \left[ \frac{\sin^2 \alpha}{2} \right]_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} + \frac{2}{\pi} \cdot \left[ \frac{\alpha}{2} + \frac{\sin(2 \cdot \alpha)}{4} \right]_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} - \frac{2}{\pi} \cdot [\sin \alpha]_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} + \frac{1}{2} \cdot [\sin \alpha]_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \right] \right. \\
 & \left. + q_h \cdot \left[ \left[ \frac{\alpha}{2} + \frac{\sin(2 \cdot \alpha)}{4} \right]_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} - \frac{1}{2} \cdot [\sin \alpha]_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \right] \right]
 \end{aligned} \tag{5-35}$$

Durch Einsetzen der Integrationsgrenzen und Termumformung führt dies auf die Lösungsgleichung:

$$\delta_{20} = \frac{1}{EI} \cdot \left( \frac{d_a - s}{2} \right)^4 \cdot \left[ q_v \left( \frac{7}{6} \right) + q_h \left( \pi - \frac{2}{3} \right) \right] \tag{5-36}$$



Für den Einheitszustand berechnet sich die Flexibilität infolge  $X_1$  zu:

$$\delta_{11} = \frac{1}{EI} \cdot \int_0^{2\pi} M_{x-1}^2 \cdot \frac{d_a - s}{2} d\alpha \quad (5-37)$$

Nach Einsetzen der Gleichung (5-25) und anschließender Integration ergibt sich:

$$\delta_{11} = 2 \cdot \frac{1}{EI} \cdot \frac{d_a - s}{2} \cdot \pi \quad (5-38)$$

Die Flexibilität infolge  $X_2$  berechnet sich zu:

$$\delta_{22} = \frac{1}{EI} \cdot \int_0^{2\pi} M_{x-2}^2 \cdot \frac{d_a - s}{2} d\alpha \quad (5-39)$$

Nach Einsetzen der Gleichung (5-27) und anschließender Integration ergibt sich:

$$\delta_{22} = \frac{1}{EI} \cdot \left( \frac{d_a - s}{2} \right)^3 \cdot \pi \quad (5-40)$$

Null- und Einheitszustand sind über Verträglichkeitsbedingungen gekoppelt, aus denen sich die Größe der statisch Unbestimmten  $X_1$  und  $X_2$  berechnen lässt:

$$X_1 = -\frac{\delta_{10}}{\delta_{11}} \quad (5-41)$$

$X_1$  statisch überzählige Schnittgröße [N]

$$X_2 = -\frac{\delta_{20}}{\delta_{22}} \quad (5-42)$$

$X_2$  statisch überzählige Schnittgröße [N/m]

Mit den Gleichungen für die Lastwerte und Flexibilitäten ergibt sich dann:

$$X_1 = \left( \frac{d_a - s}{2} \right)^2 \cdot \left[ q_v \cdot \left( \frac{2}{\pi} - \frac{1}{8} \right) + q_h \cdot \left( \frac{5}{8} \right) \right] \quad (5-43)$$

$$X_2 = \frac{d_a - s}{2} \cdot \left[ q_v \cdot \left( -\frac{7}{6 \cdot \pi} \right) + q_h \cdot \left( \frac{2}{3 \cdot \pi} - 1 \right) \right] \quad (5-44)$$

Die endgültigen Schnittkräfte ergeben sich aus der Überlagerung der Lastzustände zu:

$$M_x = M_{x-0} + X_1 \cdot M_{x-1} + X_2 \cdot M_{x-2} \quad (5-45)$$

$$N_u = N_{u-0} + X_1 \cdot N_{u-1} + X_2 \cdot N_{u-2} \quad (5-46)$$

Dies ergibt im Bereich  $0 \leq \alpha \leq \pi/2$ :

$$M_x = \left( \frac{d_a - s}{2} \right)^2 \cdot \left[ q_v \cdot \left( -\frac{1}{2} \cdot \sin^2 \alpha + \frac{\alpha}{\pi} \cdot \sin \alpha + \frac{5}{6 \cdot \pi} \cdot \cos \alpha - \frac{1}{8} \right) + q_h \cdot \left( -\frac{1}{2} \cdot \cos^2 \alpha + \frac{2}{3 \cdot \pi} \cdot \cos \alpha + \frac{1}{8} \right) \right] \quad (5-47)$$

$M_x$  Moment in x-Richtung [Nm/m]

$$N_u = \frac{d_a - s}{2} \cdot \left[ q_v \cdot \left( -\sin^2 \alpha + \frac{\alpha}{\pi} \cdot \sin \alpha - \frac{7}{6 \cdot \pi} \cdot \cos \alpha \right) + q_h \cdot \left( -\cos^2 \alpha + \frac{2}{3 \cdot \pi} \cdot \cos \alpha \right) \right] \quad (5-48)$$

$N_u$  Normalkraft in Umfangsrichtung [N/m]

und im Bereich  $\pi/2 \leq \alpha \leq \pi$ :

$$M_x = \left( \frac{d_a - s}{2} \right)^2 \cdot \left[ q_v \cdot \left( \frac{\alpha}{\pi} \cdot \sin \alpha - \sin \alpha + \frac{5}{6 \cdot \pi} \cdot \cos \alpha + \frac{3}{8} \right) + q_h \cdot \left( \frac{2}{3 \cdot \pi} \cdot \cos \alpha + \frac{1}{8} \right) \right] \quad (5-49)$$

$$N_u = \frac{d_a - s}{2} \cdot \left[ q_v \cdot \left( \frac{\alpha}{\pi} \cdot \sin \alpha - \sin \alpha - \frac{7}{6 \cdot \pi} \cdot \cos \alpha \right) + q_h \cdot \left( \frac{2}{3 \cdot \pi} \cdot \cos \alpha \right) \right] \quad (5-50)$$

Die maximalen Umfangsspannungen  $\sigma_u$  infolge Biegemoment und Normalkraft treten an den Rändern der Rohrwand auf. Sie berechnen sich zu:

$$\sigma_u = \frac{1}{s} \cdot N_u \pm \frac{6}{s^2} \cdot M_x \quad (5-51)$$

$\sigma_u$  Spannung in Umfangsrichtung [N/mm<sup>2</sup>]

Der Term zur Berücksichtigung des Biegemoments geht dabei mit positivem Vorzeichen ein, wenn die Spannungsberechnung für die Innenseite des Kreisrings erfolgt. Zur Berechnung der Umfangsspannungen entlang der äußeren Randfaser gilt das negative Vorzeichen.

Für die Umfangsspannungen ergibt sich als Lösungsgleichung für den Bereich  $0 \leq \alpha \leq \pi/2$ :

$$\begin{aligned} \sigma_u = & \frac{1}{s} \cdot \frac{d_a - s}{2} \cdot \left[ q_v \cdot \left( -\sin^2 \alpha + \frac{\alpha}{\pi} \cdot \sin \alpha - \frac{7}{6 \cdot \pi} \cdot \cos \alpha \right) + q_h \cdot \left( -\cos^2 \alpha + \frac{2}{3 \cdot \pi} \cdot \cos \alpha \right) \right] \\ & \pm \frac{6}{s^2} \cdot \left( \frac{d_a - s}{2} \right)^2 \cdot \left[ q_v \cdot \left( -\frac{1}{2} \cdot \sin^2 \alpha + \frac{\alpha}{\pi} \cdot \sin \alpha + \frac{5}{6 \cdot \pi} \cdot \cos \alpha - \frac{1}{8} \right) \right. \\ & \left. + q_h \cdot \left( -\frac{1}{2} \cdot \cos^2 \alpha + \frac{2}{3 \cdot \pi} \cdot \cos \alpha + \frac{1}{8} \right) \right] \end{aligned} \quad (5-52)$$

und als Lösungsgleichung für den Bereich  $\pi/2 \leq \alpha \leq \pi$ :

$$\begin{aligned} \sigma_u = & \frac{1}{s} \cdot \frac{d_a - s}{2} \cdot \left[ q_v \cdot \left( \frac{\alpha}{\pi} \cdot \sin \alpha - \sin \alpha - \frac{7}{6 \cdot \pi} \cdot \cos \alpha \right) + q_h \cdot \frac{2}{3 \cdot \pi} \cdot \cos \alpha \right] \\ & \pm \frac{6}{s^2} \cdot \left( \frac{d_a - s}{2} \right)^2 \cdot \left[ q_v \cdot \left( \frac{\alpha}{\pi} \cdot \sin \alpha - \sin \alpha + \frac{5}{6 \cdot \pi} \cdot \cos \alpha + \frac{3}{8} \right) + q_h \cdot \left( \frac{2}{3 \cdot \pi} \cdot \cos \alpha + \frac{1}{8} \right) \right] \end{aligned} \quad (5-53)$$

## 5.2 Lastfall Innendruck

Die im Lastfall 3 durch den Innendruck  $p$  ausgelösten Spannungen sind hauptsächlich Umfangsspannungen in Richtung der Profilmittellinie; sie können mit der Kesselformel (5-54) für dünnwandige Rohre berechnet werden:

$$\sigma_u = \frac{p}{s} \cdot \left( \frac{d_a - 2 \cdot s}{2} \right) \quad (5-54)$$

$p$  Innendruck [N/mm<sup>2</sup>]

Die Gleichung kann vereinfacht werden zu:

$$\sigma_u = p \cdot \left( \frac{d_a}{2 \cdot s} - 1 \right) \quad (5-55)$$

Die Spannungen sind gleichmäßig über den Querschnittsumfang verteilt.

## 6. Überlagerung der Lastfälle

### 6.1 Festigkeitshypothesen

Die Auswahl, Herleitung und Anwendung von Festigkeitshypothesen wird in der Fachliteratur vielfach behandelt. Die nachfolgenden Begründungen zu deren Ansatz bei den betrachteten Leitungswerkstoffen erfolgen insbesondere in Anlehnung an ISSLER / RUOSS / HÄFELE (1997).

Mit Hilfe der Festigkeitshypothesen kann aus einem mehrachsigen Spannungszustand ein einzelner Spannungswert, die Vergleichsspannung  $\sigma_v$ , berechnet werden. Diese Vergleichsspannung ist bei zutreffender Auswahl der Festigkeitshypothese dem mehrachsigen Spannungszustand im Hinblick auf die Beanspruchung des Werkstoffs äquivalent. Ermöglicht wird so ein Vergleich mit den im einachsigen Zugversuch ermittelten Kennwerten des Werkstoffs. Festigkeitshypothesen müssen auf das Werkstoffverhalten bei kritischer Beanspruchung abgestimmt sein. Im Bereich der Eisenwerkstoffe lassen sich grundsätzlich sprödes und zähes Werkstoffverhalten unterscheiden. Da Grauguss zu den spröden und Stahl zu den zähen Werkstoffen zählt, müssen zur Bildung der Vergleichsspannungen für beide Leitungswerkstoffe unterschiedliche Hypothesen gewählt werden.

Wie aus den Kapiteln 4 und 5 hervorgeht, ist für die Bildung der Vergleichsspannung ein zweidimensionaler Spannungszustand zu betrachten, der aus den Komponenten Längsspannung  $\sigma_x$ , Umfangsspannung  $\sigma_u$  und Schubspannung  $\tau_{xu}$  besteht. Im Scheitel und in der Sohle des Rohrquerschnitts sind allerdings keine Schubspannungen vorhanden. Deshalb können die Festigkeitshypothesen für diese Stellen in der vereinfachten Hauptachsenform mit den Hauptspannungsbezeichnungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_2$  formuliert werden, die im Folgenden ergänzend zur allgemeinen zweidimensionalen Formulierung mit angegeben wird. In der Hauptspannungsform werden die Längs- und Umfangsspannungen den Hauptspannungen für die praktische Berechnung stets so zugeordnet, dass  $\sigma_1 > \sigma_2$  gilt.

#### 6.1.1 Graugussrohrleitungen

Grauguss hat als spröde brechender Werkstoff unter Zugspannung nahezu kein plastisches Verformungsvermögen. Im Zugversuch ist das Spannungs-Dehnungs-Verhalten linear-elastisch bis zum Versagen durch Trennbruch senkrecht zur Belastungsrichtung.

Die Vergleichsspannung kann über die Normalspannungshypothese berechnet werden. Sie lautet bei beliebiger zweiachsiger Beanspruchung:

$$\sigma_v = \frac{\sigma_x + \sigma_u}{2} + \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_u}{2}\right)^2 + \tau_{xu}^2} \quad (6-1)$$

$\sigma_v$  Vergleichsspannung

[N/mm<sup>2</sup>]

In einem Hauptachsensystem ist nach der Normalspannungshypothese nur die größte Zugspannung maßgebend. Für die Ermittlung der Vergleichsspannung gilt:

$$\sigma_v = \sigma_I \quad , \quad \sigma_I > 0 \quad (6-2)$$

Im Druckversuch stellt sich bei genügend großer Belastung Versagen durch Schiebungsbruch ungefähr unter 45° zur Belastungsrichtung ein. Die Druckbruchfestigkeit beträgt dabei ein Vielfaches der Zugfestigkeit. Bei überwiegender Biegebeanspruchung, wie sie in der vorliegenden Problemstellung gegeben ist, sind zur Beurteilung der Versagensgefahr deshalb die Bereiche mit maximalen Zugspannungen maßgebend.

### 6.1.2 *Stahlrohrleitungen*

Die im Rohrleitungsbau üblichen Stähle sind, wie die meisten Stähle, zähe Werkstoffe. Sie zeigen im Zugversuch ab Beginn der Lastaufbringung zunächst ein linear-elastisches Verhalten bis zum Erreichen der Streckgrenze  $\sigma_e$ . Bei weiterer Laststeigerung schließt sich ein ausgeprägt plastisches Verhalten bis zum Erreichen der Zugfestigkeit  $\sigma_m$  an. Das Fließversagen bei Erreichen der Streckgrenze wird durch die infolge des aufgebrachtten Normalspannungszustandes im Werkstoff wirksamen Schubspannungen, also infolge Gleitbruch, verursacht. Typischerweise tritt eine Abscherung unter 45° Neigung zur Belastungsrichtung auf. Für die Ermittlung der Versagensgefahr ist bei zähen Werkstoffen der mehrachsige Spannungszustand maßgebend.

Zur Bildung einer Vergleichsspannung ist die Gestaltänderungsenergiehypothese gut geeignet. Sie lautet bei beliebiger zweiachsiger Beanspruchung:

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_x^2 + \sigma_u^2 - \sigma_x \cdot \sigma_u + 3 \cdot \tau_{xu}^2} \quad (6-3)$$

Für ein Hauptachsensystem kann sie wie folgt formuliert werden:

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_I^2 + \sigma_2^2 - \sigma_I \cdot \sigma_2} \quad (6-4)$$

In Druckversuchen zeigt sich für die meisten Stähle, dass die Druckfließgrenze bei etwas größeren Spannungen als die Streckgrenze im Zugversuch liegt.

## 6.2 *Ansatz der Vergleichsspannungen*

Die Bildung der Vergleichsspannungen erfolgt, wie bei Spannungsnachweisen in der Rohrstatik üblich, für Scheitel, Kämpfer und Sohle des Rohrquerschnitts. Die Lösungsgleichungen zur Berechnung der Umfangs-, Längs- und Schubspannungen für diese Stellen werden nachfolgend aufgeführt. Wegen der zu erwartenden hohen Längsbiegebelastung ist zu vermuten, dass die maximalen Spannungen im Scheitel und in der Sohle der Rohrleitung auftreten.

An der Außenseite des Rohrscheitels ergibt sich nach Gleichung (4-10) für die Längsspannung:

$$\sigma_x = \frac{4}{\pi \cdot (d_a^2 - (d_a - 2 \cdot s)^2)} \cdot N_x - \frac{d_a}{2 \cdot \pi \cdot s \cdot \left(\frac{d_a - s}{2}\right)^3} \cdot M_y \quad (6-5)$$

und nach Gleichung (5-52) für die Umfangsspannung:

$$\begin{aligned} \sigma_u = & \frac{1}{s} \cdot \frac{d_a - s}{2} \cdot \left[ q_v \cdot \left(-\frac{7}{6 \cdot \pi}\right) + q_h \cdot \left(\frac{2}{3 \cdot \pi} - 1\right) \right] - \frac{6}{s^2} \cdot \left(\frac{d_a - s}{2}\right)^2 \cdot \left[ q_v \cdot \left(\frac{5}{6 \cdot \pi} - \frac{1}{8}\right) \right. \\ & \left. + q_h \cdot \left(\frac{2}{3 \cdot \pi} - \frac{3}{8}\right) \right] + \left(\frac{d_a}{2 \cdot s} - 1\right) \cdot p \end{aligned} \quad (6-6)$$

An der Innenseite des Rohrscheitels ergibt sich nach Gleichung (4-11) für die Längsspannung:

$$\sigma_x = \frac{4}{\pi \cdot (d_a^2 - (d_a - 2 \cdot s)^2)} \cdot N_x - \frac{(d_a - 2 \cdot s)}{2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_a - s}{2}\right)^3 \cdot s} \cdot M_y \quad (6-7)$$

und nach Gleichung (5-52) für die Umfangsspannung:

$$\begin{aligned} \sigma_u = & \frac{1}{s} \cdot \frac{d_a - s}{2} \cdot \left[ q_v \cdot \left(-\frac{7}{6 \cdot \pi}\right) + q_h \cdot \left(\frac{2}{3 \cdot \pi} - 1\right) \right] + \frac{6}{s^2} \cdot \left(\frac{d_a - s}{2}\right)^2 \cdot \left[ q_v \cdot \left(\frac{5}{6 \cdot \pi} - \frac{1}{8}\right) \right. \\ & \left. + q_h \cdot \left(\frac{2}{3 \cdot \pi} - \frac{3}{8}\right) \right] + \left(\frac{d_a}{2 \cdot s} - 1\right) \cdot p \end{aligned} \quad (6-8)$$

Die Schubspannung beträgt im Scheitel über die gesamte Wanddicke  $\tau_{xu} = 0$ .

Im Kämpfer des Rohrquerschnitts sind die Längsspannungen über die Wanddicke konstant. Sie lauten nach Gleichung (4-10):

$$\sigma_x = \frac{4}{\pi \cdot (d_a^2 - (d_a - 2 \cdot s)^2)} \cdot N_x \quad (6-9)$$

Die Umfangsspannungen ergeben sich nach Gleichung (5-52) an der Kämpferaußenseite zu:

$$\sigma_u = \frac{1}{s} \cdot \frac{d_a - s}{2} \cdot q_v \cdot \left(-\frac{1}{2}\right) - \frac{6}{s^2} \cdot \left(\frac{d_a - s}{2}\right)^2 \cdot \left[ q_v \cdot \left(-\frac{1}{8}\right) + q_h \cdot \left(\frac{1}{8}\right) \right] + \left(\frac{d_a}{2 \cdot s} - 1\right) \cdot p \quad (6-10)$$

und an der Kämpferinnenseite nach Gleichung (5-52) zu:

$$\sigma_u = \frac{1}{s} \cdot \frac{d_a - s}{2} \cdot q_v \cdot \left(-\frac{1}{2}\right) + \frac{6}{s^2} \cdot \left(\frac{d_a - s}{2}\right)^2 \cdot \left[ q_v \cdot \left(-\frac{1}{8}\right) + q_h \cdot \left(\frac{1}{8}\right) \right] + \left(\frac{d_a}{2 \cdot s} - 1\right) \cdot p \quad (6-11)$$

Die Schubspannungen betragen nach Gleichung (4-16) an jeder Stelle des Kämpfers:

$$\tau_{xu} = \frac{1}{\pi \cdot s \cdot \frac{d_a - s}{2}} \cdot Q_z \quad (6-12)$$

An der Außenseite der Rohrsohle ergibt sich nach Gleichung (4-10) für die Längsspannung:

$$\sigma_x = \frac{4}{\pi \cdot (d_a^2 - (d_a - 2 \cdot s)^2)} \cdot N_x + \frac{d_a}{2 \cdot \pi \cdot s \cdot \left(\frac{d_a - s}{2}\right)^3} \cdot M_y \quad (6-13)$$

und nach Gleichung (5-53) für die Umfangsspannung:

$$\begin{aligned} \sigma_u = \frac{1}{s} \cdot \frac{d_a - s}{2} \cdot \left[ q_v \cdot \left(\frac{7}{6 \cdot \pi}\right) + q_h \cdot \left(-\frac{2}{3 \cdot \pi}\right) \right] - \frac{6}{s^2} \cdot \left(\frac{d_a - s}{2}\right)^2 \cdot \left[ q_v \cdot \left(-\frac{5}{6 \cdot \pi} + \frac{3}{8}\right) \right. \\ \left. + q_h \cdot \left(-\frac{2}{3 \cdot \pi} + \frac{1}{8}\right) \right] + \left(\frac{d_a}{2 \cdot s} - 1\right) \cdot p \end{aligned} \quad (6-14)$$

An der Innenseite der Rohrsohle ergibt sich nach Gleichung (4-11) für die Längsspannung:

$$\sigma_x = \frac{4}{\pi \cdot (d_a^2 - (d_a - 2 \cdot s)^2)} \cdot N_x + \frac{(d_a - 2 \cdot s)}{2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{d_a - s}{2}\right)^3 \cdot s} \cdot M_y \quad (6-15)$$

und nach Gleichung (5-53) für die Umfangsspannung:

$$\begin{aligned} \sigma_u = \frac{1}{s} \cdot \frac{d_a - s}{2} \cdot \left[ q_v \cdot \left(\frac{7}{6 \cdot \pi}\right) + q_h \cdot \left(-\frac{2}{3 \cdot \pi}\right) \right] + \frac{6}{s^2} \cdot \left(\frac{d_a - s}{2}\right)^2 \cdot \left[ q_v \cdot \left(-\frac{5}{6 \cdot \pi} + \frac{3}{8}\right) \right. \\ \left. + q_h \cdot \left(-\frac{2}{3 \cdot \pi} + \frac{1}{8}\right) \right] + \left(\frac{d_a}{2 \cdot s} - 1\right) \cdot p \end{aligned} \quad (6-16)$$

Die Schubspannung beträgt in der Sohle über die gesamte Wanddicke  $\tau_{xu} = 0$ .

## 7. Zusammenfassende Darstellung des Berechnungsablaufs

### 7.1 Arbeitsschritte

Der Lösungsweg zur Berechnung eines konkreten Einzelfalls umfasst die in Bild 7-1 genannten Arbeitsschritte. Die zugehörigen Gleichungen enthält Tabelle 7-1.

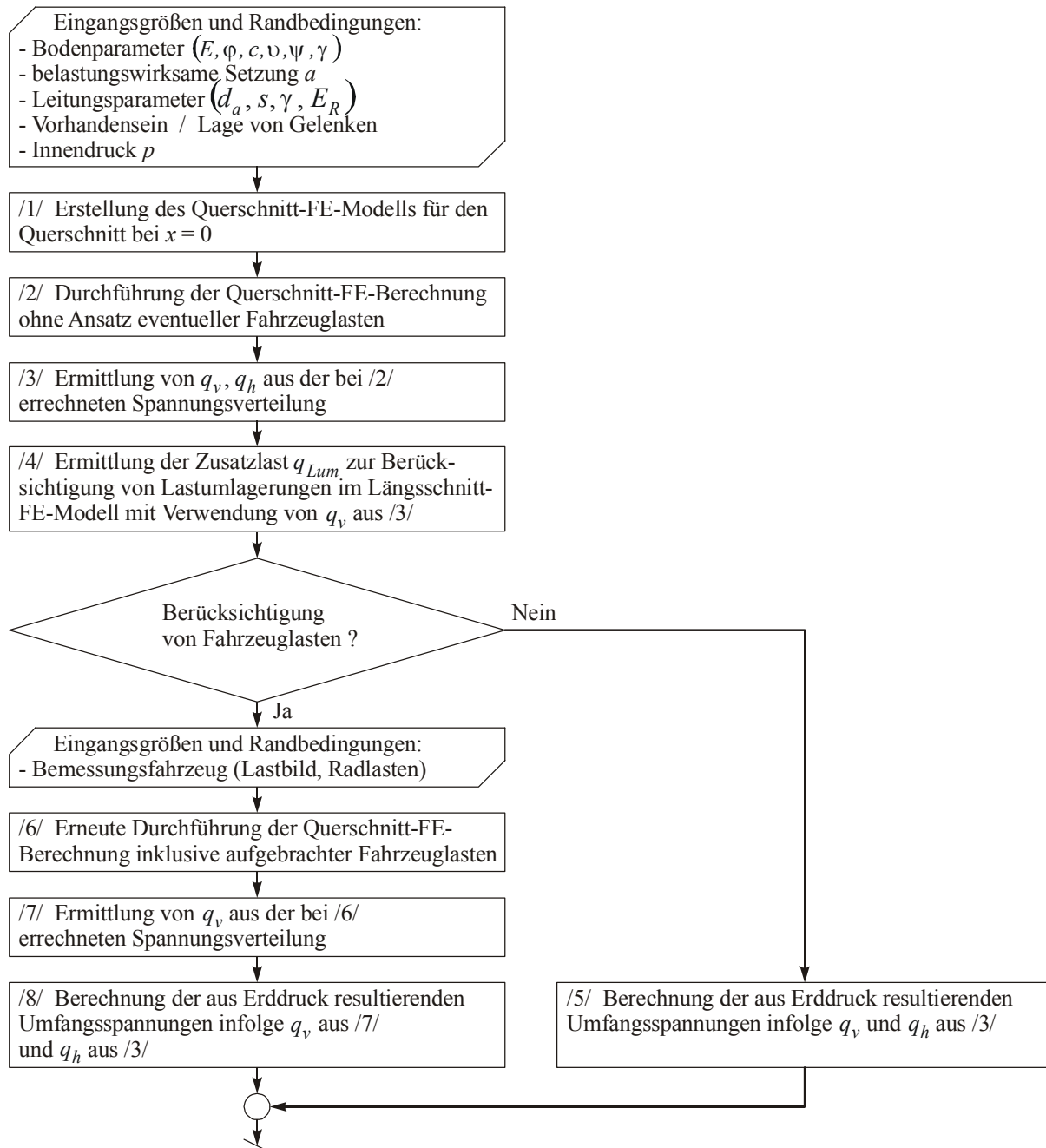


Bild 7-1a: Übersicht über den Berechnungsablauf



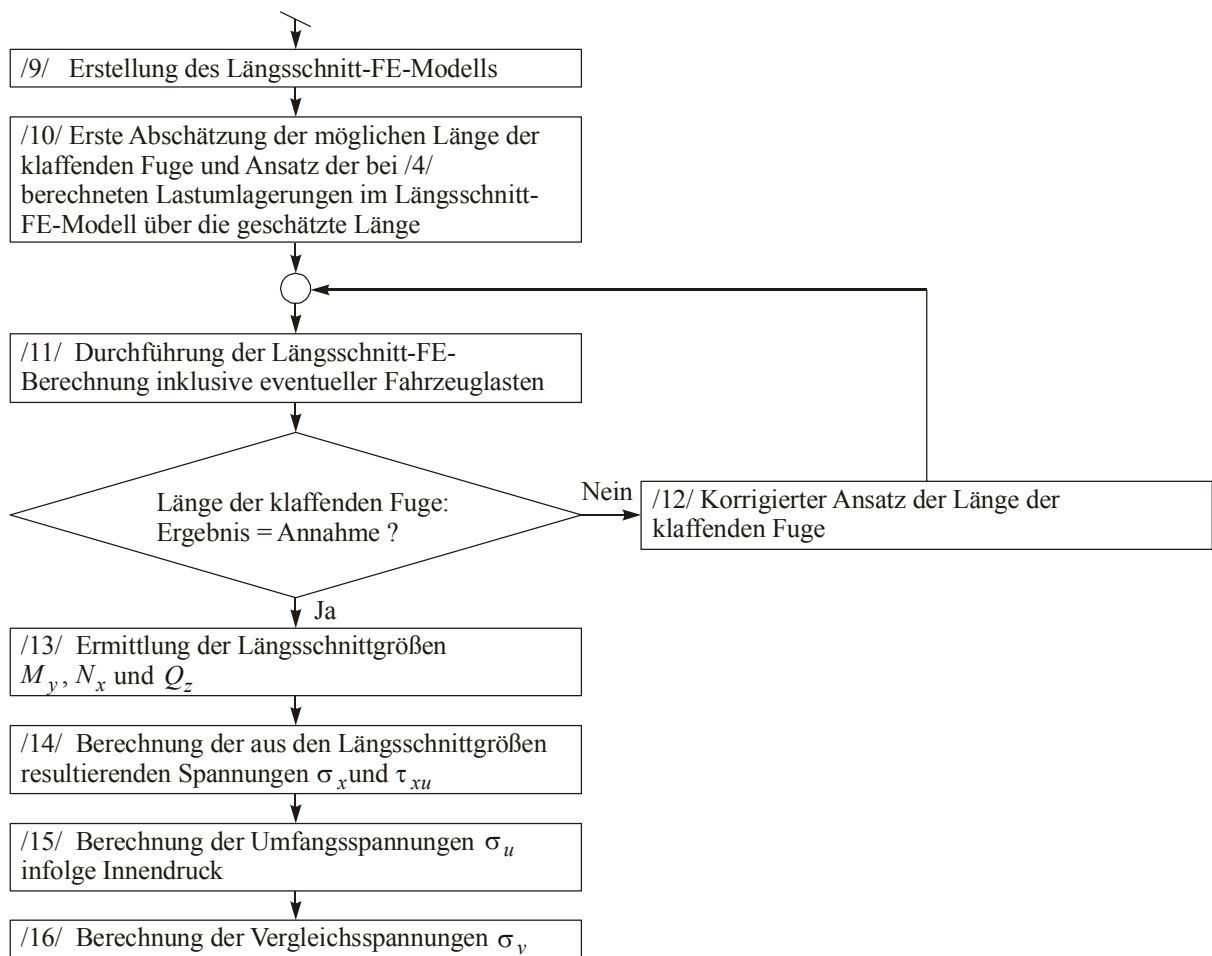


Bild 7-1b: Übersicht über den Berechnungsablauf

Die Spannungsberechnungen der laufenden Nummern /5/, /8/, /14/ und /16/ in Bild 7-1 beziehen sich jeweils auf die Außen- und Innenseiten von Scheitel, Kämpfer und Sohle des Rohrquerschnitts neben der Einspannstelle ( $x = 0$ ).

Tabelle 7-1: Zuordnung der Gleichungen zu den in Bild 7-1 dargestellten Berechnungsschritten

<i>Laufende Nr. nach Bild 7-1</i>	<i>Zugehörige Gleichungen</i>
/5/ und /8/	$\sigma_u$ / Scheitel außen: (6-6) $\sigma_u$ / Scheitel innen: (6-8) $\sigma_u$ / Kämpfer außen: (6-10) $\sigma_u$ / Kämpfer innen: (6-11) $\sigma_u$ / Sohle außen: (6-14) $\sigma_u$ / Sohle innen: (6-16)
/14/	$\sigma_x$ / Scheitel außen: (6-5) $\sigma_x$ / Scheitel innen: (6-7) $\sigma_x$ / Kämpfer: (6-9) $\tau_{xu}$ / Kämpfer: (6-12) $\sigma_x$ / Sohle außen: (6-13) $\sigma_x$ / Sohle innen: (6-15)
/15/	$\sigma_u$ / konstant: (5-55)
/16/	$\sigma_v$ / Leitungen aus GG: (6-1) / (6-2) $\sigma_v$ / Leitungen aus St: (6-3) / (6-4)

## 7.2 Fallbeispiel

Für das als Fall 00 bezeichnete nachfolgende Berechnungsbeispiel werden die folgenden Randbedingungen und Parameter angenommen:

- Rohrleitung DN 200 aus Grauguss (GG):  $d_a = 222$  mm,  $s = 10$  mm,  $g = 0,51$  kN/m,  $E_{GG} = 150$  kN/mm<sup>2</sup>,  $R_m = 180$  N/mm<sup>2</sup>
- Rohrverbindungen: gelenkig in 4 m Abstand, erstmals bei  $x = 4$  m
- Überdeckung:  $h = 1,0$  m
- Bodeneigenschaften:  $E = 20$  MN/m<sup>2</sup>,  $\varphi = 25^\circ$ ,  $c = 20$  kN/m<sup>2</sup>,  $\gamma = 20$  kN/m<sup>3</sup>,  $\nu = 0,4$
- keine Verkehrslasten / kein Verkehrswegebau / kein Innendruck

Zur Bestimmung der Spannungsumlagerungen in der  $y$ - $z$ -Ebene wird zunächst das Querschnitt-FE-Modell wie in Kapitel 4 beschrieben erstellt und die Berechnung durchgeführt (Arbeitsschritte /1/ und /2/ nach Bild 7-1). Bild 7-2 zeigt die Verteilung der errechneten mittleren Hauptspannungen in der Umgebung der Rohrleitung, wobei der wiedergegebene Bildausschnitt für eine anschauliche Darstellung auf den Nahbereich der Leitung bis 1 m Entfernung zur lotrechten Symmetrieachse des Systems begrenzt wurde.

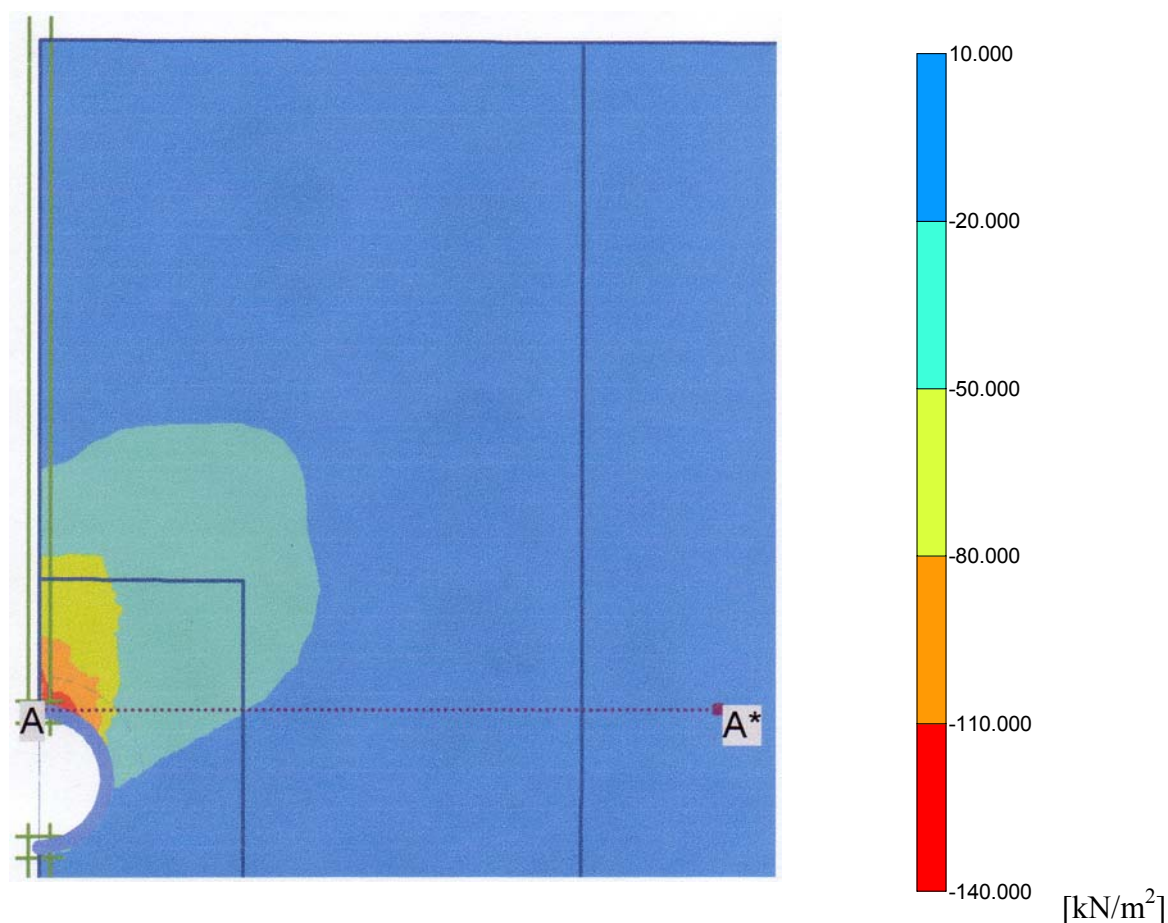


Bild 7-2: Spannungskonzentration über dem Rohrquerschnitt im Querschnitt-Modell (Darstellung der mittleren Hauptspannungen)

Zu erkennen ist eine sehr stark ausgeprägte Erhöhung der Spannungen über dem Rohr, die den wesentlichen Einfluss von Lastumlagerungen in der Querschnitt-Ebene bestätigt.

Für die Belastung des Rohrquerschnitts entsprechend Bild 5-1 können aus den vertikalen Bodenspannungen in der Rohrscheitelebene sowie aus den zwischen Rohrscheitel und Kämpfer wirkenden horizontalen Bodenspannungen folgende Lasten ermittelt werden (Arbeitsschritt /3/):

$$q_v = 0,17 \text{ N/mm}^2$$

$$q_h = 0,06 \text{ N/mm}^2$$

Für das Längsschnitt-Modell werden die Lastumlagerungen mit der Zusatzlast  $q_{Lum}$  berücksichtigt, indem  $q_v$  um das Eigengewicht der Überdeckung reduziert wird (Arbeitsschritt /4/):

$$q_{Lum} = 0,15 \text{ N/mm}^2$$

Die ermittelten Lastgrößen  $q_v$  und  $q_{Lum}$  ermöglichen die Berechnung der Umfangsspannungen (Arbeitsschritt /5/). Diese ergeben sich an der Außenseite des Rohrscheitels nach Gleichung (6-6) zu:

$$\sigma_u = -11 \text{ N/mm}^2$$

und an der Innenseite des Rohrscheitels nach Gleichung (6-8) zu:

$$\sigma_u = 8 \text{ N/mm}^2$$

Die Umfangsspannungen an der Außenseite des Rohrkämpfers ergeben sich nach Gleichung (6-10) zu:

$$\sigma_u = 8 \text{ N/mm}^2$$

und an der Innenseite des Rohrkämpfers nach Gleichung (6-11) zu:

$$\sigma_u = -10 \text{ N/mm}^2$$

Die Umfangsspannungen an der Außenseite der Rohrsohle ergeben sich nach Gleichung (6-14) zu:

$$\sigma_u = -9 \text{ N/mm}^2$$

und an der Innenseite der Rohrsohle nach Gleichung (6-16) zu:

$$\sigma_u = 10 \text{ N/mm}^2$$

Bild 7-3 zeigt das zur Ermittlung der Längsschnittgrößen der Rohrleitung erstellte Längsschnitt-Modell (Arbeitsschritt /9/). Die Zusatzlast  $q_{Lum}$  wird über die zunächst geschätzte Länge A-A nach Bild 7-3 aufgebracht (Arbeitsschritt /10/). Durch wiederholte Ausführung der Berechnungen und Korrektur der Länge A-A nach dem Vergleich mit der jeweils ermittelten Ausdehnung der klaffenden Fuge erhält man die richtige Länge A-A = 2,5 m (Arbeitsschritte /11/ und /12/).

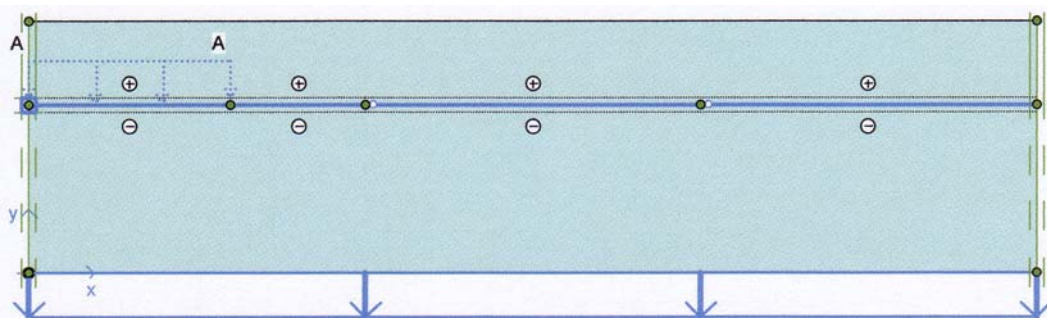


Bild 7-3: Geometrie des Längsschnitt-Modells

In Bild 7-4 sind die mit dem Längsschnitt-Modell errechneten und auf die reale Breite der Leitung bezogenen Schnittgrößen dargestellt. Normalkräfte werden im gegebenen Fall wegen der bei Graugussleitungen als nicht längskraftschlüssig angenommenen Muffenverbindungen nicht berücksichtigt. Bild 7-5 zeigt die zugehörige Biegelinie.

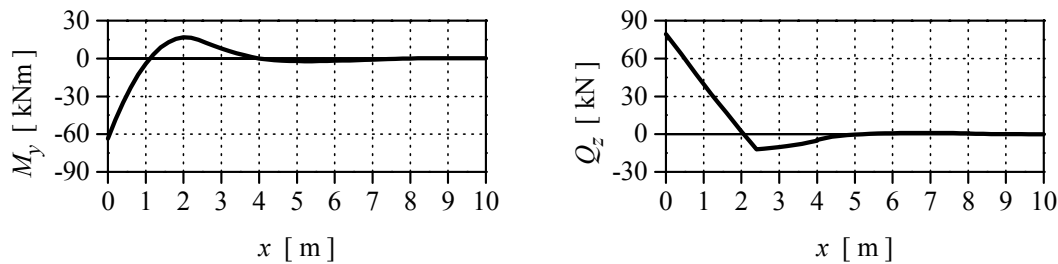


Bild 7-4: Schnittgrößenverlauf entlang der Leitungslängsachse

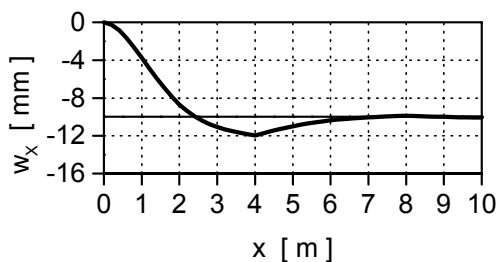


Bild 7-5: Biegelinie entlang der Leitungslängsachse

Aus Bild 7-4 kann entnommen werden, dass die maximalen Querschnittsbeanspruchungen wie erwartet bei  $x = 0$  auftreten.

Als Schnittkräfte für diesen Querschnitt ergeben sich:

$$M_y = -63,6 \text{ kNm}$$

$$Q_z = 79,4 \text{ kNm}$$

Die für  $x = 0$  ermittelten Schnittgrößen  $M_y$  und  $Q_z$  ermöglichen die Berechnung der Längs- und Schubspannungen (Arbeitsschritt /14/).

Die Längsspannungen an der Außenseite des Rohrscheitels ergeben sich nach Gleichung (6-5) zu:

$$\sigma_x = 189 \text{ N/mm}^2$$

und an der Innenseite des Rohrscheitels nach Gleichung (6-7) zu:

$$\sigma_x = 172 \text{ N/mm}^2$$

Im Kämpferbereich sind die Längsspannungen null.

Die Längsspannungen an der Außenseite der Rohrsohle ergeben sich nach Gleichung (6-13) zu:

$$\sigma_x = -189 \text{ N/mm}^2$$

und an der Innenseite der Rohrsohle nach Gleichung (6-15) zu:

$$\sigma_x = 172 \text{ N/mm}^2$$

Die Kämpferschubspannungen infolge  $Q_z$  ergeben sich nach Gleichung (6-12) zu:

$$\tau_{xu} = -24 \text{ N/mm}^2$$

Da keine Innendruckbelastung angesetzt wurde, entfällt Arbeitsschritt /15/.

Damit stehen alle Spannungskomponenten, die zur Berechnung der Vergleichsspannungen benötigt werden, zur Verfügung. Da für Graugussleitungen die Normalspannungshypothese zur Anwendung kommt und im Scheitel und in der Sohle ein Hauptachsensystem gegeben ist, entsprechen die Vergleichsspannungen an diesen Stellen den maximalen Zugspannungen. Sie werden als Arbeitsschritt /16/ ermittelt und lauten für die Außen- / Innenseite des Scheitels:

$$\sigma_v = 189 \text{ N/mm}^2 / \sigma_v = 172 \text{ N/mm}^2$$

sowie für die Außen- / Innenseite der Sohle:

$$\sigma_v = 0 \text{ N/mm}^2 / \sigma_v = 10 \text{ N/mm}^2$$

Nach Gleichung (6-12) ergibt sich für die berechnete Kämpfer-Vergleichsspannung:

$$\sigma_v = -24 \text{ N/mm}^2$$

Wie zu erkennen ist, ergibt sich die maximale Vergleichsspannung an der Außenseite des Rohrscheitels. Sie liegt an dieser Stelle geringfügig über der Zugfestigkeit des Leitungswerkstoffes. Eine zusammenfassende Übersicht über die wesentlichen Informationen zu Fall 00 enthält Tabelle 7-2.

Tabelle 7-2: Übersicht zu Fall 00

<b>Fallbeschreibung</b>			
Rohrleitung / Versorgungssparte:	DN 200 / GG / Gas		
Rohrverbindungen:	gelenkig in 4 m Abstand, erstmals bei $x = 4$ m		
Überdeckung:	$h = 1,0$ m (homogen)		
Verkehrslasten:	keine		
<b>Eingangsparameter</b>			
Leitung:	$d_a = 222$ mm, $s = 10$ mm, $g = 0,51$ kN/m, $E_{GG} = 150$ kN/mm <sup>2</sup> , $\sigma_m = 180$ N/mm <sup>2</sup>		
Boden:	$E = 20$ MN/m <sup>2</sup> , $\varphi = 25^\circ$ , $c = 20$ kN/m <sup>2</sup> , $\gamma = 20$ kN/m <sup>3</sup> , $\nu = 0,4$		
Oberbau:	keiner		
Setzung:	$a = 10$ mm		
Innendruck:	$p = 0$ bar		
<b>Ergebnisse: Erddruck auf den Rohrquerschnitt</b>			
$q_v = 0,17$ N/mm <sup>2</sup> , $q_h = 0,06$ N/mm <sup>2</sup>			
<b>Ergebnisse: Längsschnittgrößen und Biegelinie der Rohrleitung</b>			
	<p>Abwinklung am ersten Gelenk: <math>\zeta &lt; 0,1^\circ</math></p> <p>Schnittgrößen bei <math>x = 0</math> m: <math>M_y = -63,6</math> kNm <math>Q_z = 79,4</math> kN</p>		
<b>Ergebnisse: Spannungskomponenten und Vergleichsspannungen bei <math>x = 0</math> m</b>			
Scheitel außen:	$\sigma_x = 189$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = -11$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 189$ N/mm <sup>2</sup>
Scheitel innen:	$\sigma_x = 172$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 8$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 172$ N/mm <sup>2</sup>
Sohle außen:	$\sigma_x = -189$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = -9$ N/mm <sup>2</sup>	-
Sohle innen:	$\sigma_x = -172$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 10$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 10$ N/mm <sup>2</sup>

## 8. Parameterstudie

### 8.1 Quantifizierung der Einflussgrößen

Vor der Durchführung der Parameterstudie werden in Kapitel 8.1 zunächst die möglichen Größenordnungen der jeweiligen Eingangsgrößen betrachtet und die in den vorgesehenen Berechnungsreihen verwendeten Parameter festgelegt.

#### 8.1.1 Graugussrohrleitungen

##### 8.1.1.1 Querschnittsabmessungen

Da Grauguss als Leitungswerkstoff etwa seit Anfang der siebziger Jahre nicht mehr im Einsatz ist, sind die erforderlichen Eigenschaften beziehungsweise Lieferbedingungen solcher Leitungen nicht mehr Bestandteil der aktuellen Normen. Die nachfolgend zugrunde gelegten Parameter für diese Leitungsart entsprechen dem Stand der Normung von 1950.

DIN 2431 „Gusseiserne Muffendruckrohre (Schleudergussrohre)“ (1938) legte Rohrdurchmesser und Wanddicken in Abhängigkeit von Nennweite und Betriebsdruck gemäß Tabelle 8-1 fest. Für kommunale Rohrnetze waren nach dieser Norm Rohre mit einem zulässigen Betriebsdruck von  $p = 10 \text{ kg/cm}^2$  (= 10 bar) geeignet. Nach DIN 2401 „Druckstufen“ (1936) waren diese Rohre für Flüssigkeiten, Gase und Dämpfe bis  $120^\circ \text{ C}$  zugelassen, d. h. sowohl für Gas- als auch für Wasserleitungen geeignet.

Tabelle 8-1: Abmessungen und Gewichte für gusseiserne Muffendruckrohre für bis zu 10 bar Betriebsdruck nach DIN 2431 (1938)

<i>Nennweite DN</i>	<i>Außendurchmesser <math>d_a</math> [mm]</i>	<i>Wanddicke <math>s</math> [mm]</i>	<i>Rohrgewicht <math>g</math> [kN/m]</i>
100	118	8	0,22
200	222	10	0,51
300	326	11,5	0,87
400	429	13	1,3

##### 8.1.1.2 Werkstoffeigenschaften

In DIN 2420 (1938) „Gusseiserne Rohre und Formstücke; Technische Lieferbedingungen“, vorgesehen für Gas- und Wasserleitungen, wurden für Schleudergussrohre Mindestwerte für die Zugfestigkeit von  $\sigma_m = 20 \text{ kg/mm}^2$  ( $\sigma_m = 200 \text{ N/mm}^2$ ; für Rohre aus Metallschleuderformen) beziehungsweise  $\sigma_m = 18 \text{ kg/mm}^2$  ( $\sigma_m = 180 \text{ N/mm}^2$ ; für Rohre aus Sandschleuderformen) gefordert. Die Prüfung muss dabei im einachsigen Zugversuch an Probestäben erfolgen. Anforderungen oder Kennwerte bezüglich des Elastizitätsmoduls sind



in den genannten Normen nicht enthalten. Nach KOTTMANN (1989) schwankt der Elastizitätsmodul etwa im Bereich von  $E_{GG} = 84 \text{ kN/mm}^2$  bis  $E_{GG} = 154 \text{ kN/mm}^2$ . Für die Parameterstudie werden folgende Kenngrößen verwendet:

- Zugfestigkeit:  $\sigma_m = 180 \text{ N/mm}^2$
- Elastizitätsmodul:  $E_{GG} = 150 \text{ kN/mm}^2$

### 8.1.1.3 Rohrlängen

Für den Abstand der Verbindungen zueinander sind die Lieferlängen der Rohre maßgebend. Nach (PARDUN 1950) betrug die übliche Baulänge für Graugussrohre im betrachteten Nennweitenbereich 4 m bis 5 m. In der Parameterstudie wird einheitlich eine Leitungslänge von 4 m angesetzt.

## 8.1.2 **Stahlrohrleitungen**

### 8.1.2.1 Querschnittsabmessungen

Seit der Einführung flächendeckender Versorgungsnetze gab es immer wieder Änderungen in den normativen Vorgaben bezüglich der Eigenschaften von Stahlrohrleitungen. Sie wurden durch die technische Entwicklung geprägt und betreffen die Geometrie der Rohrreihen, insbesondere die Wanddicken, die Verbindungstechnik, den passiven Korrosionsschutz sowie die zulässigen Einsatzbereiche und die Werkstoffeigenschaften. Im Bereich der Wasser- und Gasversorgung sind ferner nahtlose Stahlrohre von geschweißten Stahlrohren zu unterscheiden, da die genormten Rohrreihen jeweils unterschiedliche Wandstärken vorsehen.

Zur Durchführung der Parameterstudien werden die Eigenschaften der nahtlosen Stahlrohre entsprechend dem Stand der Normung nach Beendigung des zweiten Weltkriegs angesetzt, da in den folgenden Wiederaufbaujahren große Netzlängen mit Stahlrohrleitungen realisiert wurden, die zu großen Teilen auch gegenwärtig noch in Betrieb sind. Die Anforderungen an die Rohre waren in DIN 2460 (1942) enthalten, wobei für die in Verteilnetzen üblichen Drücke und Nennweiten für Gas- und Wasserrohrleitungen dieselben Anforderungen gestellt wurden.

Tabelle 8-2: Abmessungen und Gewichte für nahtlose Stahlmuffenrohre (Gas und Wasser) nach DIN 2460 (1942)

<i>Nennweite DN</i>	<i>Außendurchmesser <math>d_a</math> [mm]</i>	<i>Wanddicke s [mm]</i>	<i>Rohrgewicht g [kN/m]</i>
100	108	4	0,125
200	211	5,5	0,325
300	321	7	0,620
400	419	9,5	1,070

### 8.1.2.2 Werkstoffeigenschaften

Nach DIN 2460 (1942) wurde als Rohrwerkstoff Flusstahl St 00.29 eingesetzt, bei dem gemäß DIN 1629 (1932) keine Gewährleistung für die Einhaltung bestimmter Festigkeitsgrenzen übernommen wurde. Nach DIN 2460 (1942) kann dennoch mit einer Festigkeit von  $\sigma_m = 350 \text{ N/mm}^2$  gerechnet werden. Zur Streckgrenze  $\sigma_e$  und zum Elastizitätsmodul  $E_{St}$  finden sich in den genannten Normen keine Aussagen. Für die Parameterstudien wird deshalb von einem Streckgrenzenverhältnis von  $\sigma_e / \sigma_m = 0,6$  ausgegangen, dass nach VON HAGEN / ZIMNIK (1995) für weiche Rohrstähe als Orientierungswert angenommen werden kann.

Für die Parameterstudie werden folgende Kenngrößen verwendet:

- Streckgrenze:  $\sigma_e = 0,6 \sigma_m = 210 \text{ N/mm}^2$
- Zugfestigkeit:  $\sigma_m = 350 \text{ N/mm}^2$
- Elastizitätsmodul:  $E_{St} = 210 \text{ kN/mm}^2$

### 8.1.3 **Bindige Böden**

Zur Abschätzung des Einflusses der in Kapitel 4 aufgeführten Modellparameter bei den betrachteten Vorgängen werden in den Berechnungen unterschiedliche Werte der wichtigsten Bodenkenngrößen zum Ansatz gebracht. Im Folgenden erfolgt eine Abgrenzung der möglichen Wertebereiche anhand von veröffentlichten Anhaltswerten aus der Fachliteratur.

Die für die Scherfestigkeit maßgebenden Parameter Reibungswinkel und Kohäsion werden dabei nicht unabhängig voneinander variiert, sondern gemeinsam betrachtet. Auf eine Variation der Bodenwichte wird verzichtet, in den Parameterstudien wird einheitlich ein Wert von  $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$  angesetzt. Dieser Ansatz erfolgt auch bei Berechnungen nach ATV-A 127 (2000) durchgängig für alle standardisierten Bodengruppen. Des Weiteren weisen bindige Böden in der Regel keine Dilatanz auf (PLAXIS B. V. 1998).

#### 8.1.3.1 Reibungswinkel und Kohäsion

Anhaltswerte für charakteristische Bodenkenngrößen sind in DIN 1055-2 (2003) „Einwirkungen auf Tragwerke – Bodenkenngrößen“ oder in SCHNEIDER BAUTABELLEN (2002) enthalten. Die für Tonböden genannten Wertebereiche sind in Tabelle 8-3 wiedergegeben.

Tabelle 8-3: Anhaltswerte für charakteristische Bodenkenngrößen

<b>Bodengruppe nach DIN 18196</b>	<b>Wertebereiche nach DIN 1055-2</b>		<b>Wertebereiche nach SCHNEIDER BAUTABELLEN</b>	
	$\varphi$ [°]	c [kN/m <sup>2</sup> ]	$\varphi$ [°]	c [kN/m <sup>2</sup> ]
TL	22,5 - 30	0 – 15	28 - 35	10 - 35
TM	17,5 – 27,5	5 – 20	25 - 30	15 - 45
TA	15 - 25	5 – 25	17 - 27	20 - 60

Reibungswinkel und Kohäsion verhalten sich gegenläufig, Böden mit größeren Reibungswinkeln weisen also meist eine geringere Kohäsion auf. Zur Durchführung der Parameterstudien werden die folgenden Kenngrößen für die Scherfestigkeit verwendet:

- $\varphi = 25^\circ$ ,  $c = 20 \text{ kN/m}^2$  (Standard)
- $\varphi = 20^\circ$ ,  $c = 30 \text{ kN/m}^2$
- $\varphi = 30^\circ$ ,  $c = 10 \text{ kN/m}^2$

#### 8.1.3.2 Elastizitätsmodul

Mit dem Elastizitätsmodul  $E$  wird die Stauchung unter einer Druckbelastung bei unbehinderter Querdehnung beschrieben. Der mögliche E-Modul von Böden variiert in einer sehr großen Bandbreite und ist außer von der Bodenart selbst insbesondere abhängig vom jeweiligen Spannungszustand und der Belastungsgeschichte.

Bei geotechnischen Aufgabenstellungen werden die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen von Böden meist nicht durch den E-Modul angegeben, sondern erfassen die Verformungseigenschaften unter Last über den im Bereich des Grundbaus gebräuchlicheren Steifemodul  $E_S$ . Der Steifemodul beschreibt die Stauchung infolge einer Druckbelastung bei völlig behinderter Seitendehnung, wie sie an Bodenproben mit dem Oedometer-Versuch ermittelt werden kann.

Die in der Fachliteratur als Anhaltswerte genannten Steifemoduln können in Abhängigkeit von der Querdehnzahl in den Elastizitätsmodul überführt werden. Zwischen den beiden Kenngrößen besteht die Beziehung (SCHMIDT 1996):

$$E = E_S \cdot \frac{(1+\nu) \cdot (1-2 \cdot \nu)}{(1-\nu)} \quad (8-1)$$

$E$	Elastizitätsmodul	[kN/m <sup>2</sup> ]
$E_S$	Steifemodul	[kN/m <sup>2</sup> ]
$\nu$	Querdehnzahl	[kN/m <sup>2</sup> ]

Bei (SCHMIDT 1996) sind als charakteristische Werte für Ton-, Lehm- und Schluffböden Steifemoduln von  $E_S = 1 \text{ MN/m}^2$  bis  $E_S = 100 \text{ MN/m}^2$  angegeben. Bei einer Querdehnzahl von  $\nu = 0,4$  ergibt dies nach Gleichung (8-1) für den E-Modul einen Wertebereich von etwa  $E = 0,5 \text{ MN/m}^2$  bis  $E = 47 \text{ MN/m}^2$  (zur Größe der Querdehnzahl siehe Ziffer 8.1.3.3).

Zur Durchführung der Parameterstudien werden die folgenden Werte für den Elastizitätsmodul verwendet:

- $E = 20 \text{ MN/m}^2$  (Standard)
- $E = 10 \text{ MN/m}^2$
- $E = 40 \text{ MN/m}^2$

#### 8.1.3.3 Querdehnzahl

Nach SCHMIDT (1996) liegen die Querdehnzahlen für Ton etwa im Bereich von  $\nu = 0,35$  bis  $\nu = 0,45$ .

Zur Durchführung der Parameterstudien werden die folgenden Werte für den Elastizitätsmodul verwendet:

- $\nu = 0,40$  (Standard)
- $\nu = 0,35$
- $\nu = 0,45$

#### 8.1.4 **Verkehrswege**

Versorgungs- und Anschlussleitungen verlaufen nicht nur in unbefestigten Bereichen, sondern häufig auch unterhalb von befestigten Flächen, vor allem im Bereich von Verkehrsweegen mit bituminöser Decke. Der Oberbau der Verkehrswege erstreckt sich meist über einen erheblichen Teil des Überdeckungsbereichs oberhalb der Rohrleitung. Die zum Frostschutz eingebauten Tragschichten bestehen aus rolligen Mineralstoffen. Sie weisen in der Regel deutlich andere mechanische Eigenschaften als der anstehende bindige Boden auf.

Um das Verhalten der Frostschutzschicht von Verkehrsweegen bei Setzungsdifferenzen des Erdreichs näherungsweise abzubilden, wird bei entsprechenden Berechnungen der gesamte Straßenaufbau im FE-Modell vereinfacht durch einen zum anstehenden Boden abgegrenzten

homogenen Straßenkörper erfasst, dem die Eigenschaften einer typischen Frostschutzschicht zugewiesen werden. Die bituminösen Binder- bzw. Deckschichten werden nicht gesondert abgebildet. Diese Vereinfachung kann getroffen werden, da solche Schichten in der Regel relativ dünn und oberflächennah gelegen sind.

Während die Eigenschaften des anstehenden Bodens in der Parameterstudie variiert werden sollen, werden im Folgenden zur Abbildung der Verkehrswege konstante Kenngrößen festgelegt. Wie bei Bodenkörpern mit bindigen Böden wird eine Wichte von  $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$  angesetzt. Eine gegebenenfalls vorhandene Dilatanz bleibt unberücksichtigt ( $\psi = 0$ ).

#### 8.1.4.1 Reibungswinkel und Kohäsion

Die rolligen Böden der Frostschutzschichten weisen in der Regel keine Kohäsion auf. Zur Gewährleistung stabiler Rechenprozeduren wird aber eine geringe Kohäsion von  $c = 1 \text{ kN/m}^2$  angesetzt.

Nach DIN 1055-2 (2003) ergeben sich für die zum Einsatz in Frostschutzschichten geeigneten Bodengruppen GE, SE, GI, SW und SI Reibungswinkel von  $\varphi = 30^\circ$  bis  $\varphi = 40^\circ$ . Bei SCHNEIDER BAUTABELLEN (2002) werden für die nichtbindigen Bodengruppen GE, GW, GI, GU, GT, SE, SW und SI Reibungswinkel von  $\varphi = 32^\circ$  bis  $\varphi = 45^\circ$  genannt.

Für die Parameterstudie wird der Verkehrswege-Oberbau mit einem Reibungswinkel von  $\varphi = 40^\circ$  angesetzt.

#### 8.1.4.2 Elastizitätsmodul

Im Bereich des Straßenbaus wird anstelle des E-Moduls häufig der Verformungsmodul  $E_V$  verwendet, mit dem die Setzungen infolge einer begrenzten Flächenlast auf elastisch isotropem Halbraum beschrieben werden.

Zwischen Elastizitäts- und Verformungsmodul besteht die Beziehung:

$$E = E_V \cdot (1 - \nu^2) \quad (8-2)$$

$$E_V \quad \text{Verformungsmodul} \quad [\text{N/mm}^2]$$

Da der Verformungsmodul häufig auf Baustellen über den Plattendruckversuch nach DIN 18134 (2001) ermittelt wird, sind insbesondere in den Regelwerken des Verkehrswegebbaus Angaben zu den erforderlichen Verformungsmoduln  $E_{V1}$  und  $E_{V2}$  enthalten, die mit dem genannten Versuch bestimmt werden, wobei das Verhältnis der beiden Moduln Aufschluss über die bereits erreichte Güte der Bodenverdichtung gibt. Für die gegebene Aufgabe wird zur Abgrenzung eines wahrscheinlichen Wertebereichs für den E-Modul nach Gleichung (8-2) jeweils der bei wiederholter Messung ermittelte  $E_{V2}$ -Modul verwendet.

Für die ungebundenen Tragschichten des Oberbaus von Straßen werden nach RStO (2001) je nach Bauklasse auf der Frostschutz- oder Schottertragschicht  $EV_2$ -Moduln von  $EV_2 = 100 \text{ MN/m}^2$  bis  $EV_2 = 150 \text{ MN/m}^2$  gefordert (Radwege:  $EV_2 = 80 \text{ MN/m}^2$ ). Bei einer Querdehnzahl von  $\nu = 0,3$  (siehe unter Ziffer 8.1.4.3) entspricht dieser Wert nach Gleichung (8-2) einem E-Modul von  $E = 91 \text{ MN/m}^2$  bis  $E = 137 \text{ MN/m}^2$ , für Radwege von  $E = 73 \text{ MN/m}^2$ .

Die derzeit gültigen Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO; 2001) fordern bei Straßen mit bituminöser Decke für das Planum unabhängig von der Bauklasse einen  $EV_2$ -Wert von mindestens  $EV_2 = 45 \text{ MN/m}^2$ . Wiederum nach Gleichung (8-2) ergibt sich mit  $\nu = 0,3$  ein E-Modul von etwa  $E = 38 \text{ MN/m}^2$ .

Für die Parameterstudie wird der Verkehrswege-Oberbau mit einem Elastizitätsmodul von  $E = 120 \text{ MN/m}^2$  angesetzt. Dem unterhalb des Verkehrswege-Oberbaus anstehenden Boden wird ein Elastizitätsmodul von  $E = 40 \text{ MN/m}^2$  zugewiesen.

#### 8.1.4.3 Querdehnzahl

Anhaltswerte für den Schwankungsbereich von Querdehnzahlen gibt SCHMIDT (1996) für Sand an. Genannt werden Querdehnzahlen von  $\nu = 0,25$  bis  $\nu = 0,35$ . In der Parameterstudie wird für den Verkehrswege-Oberbau eine Querdehnzahl von  $\nu = 0,30$  angesetzt.

#### 8.1.5 **Verkehrslasten**

Von besonderer Bedeutung für die Abschätzung der maximal auftretenden Beanspruchungen der Rohrleitung sind schwere LKW. Für sie sind in DIN 1072 (1988) zur Bemessung von Straßen und Wegbrücken maximale Radlasten, Radaufstandsflächen und Abmessungen definiert. Zur Betrachtung des Einflusses von Fahrzeuglasten im Rahmen der gegebenen Aufgabenstellung werden mit den FE-Modellen Berechnungen durchgeführt, bei denen die Belastung durch einen Schwerlastwagen SLW 30 nach Bild 8-1 angesetzt wird. Dessen Anwendung als Bemessungsfahrzeug ist nach DIN 1072 (1988) zur Auslegung von Brücken der Klasse 30/30 vorgesehen, die im Straßennetz wiederum den Kreis-, Land-, Stadt- und Wirtschaftswegen zugeordnet sind.

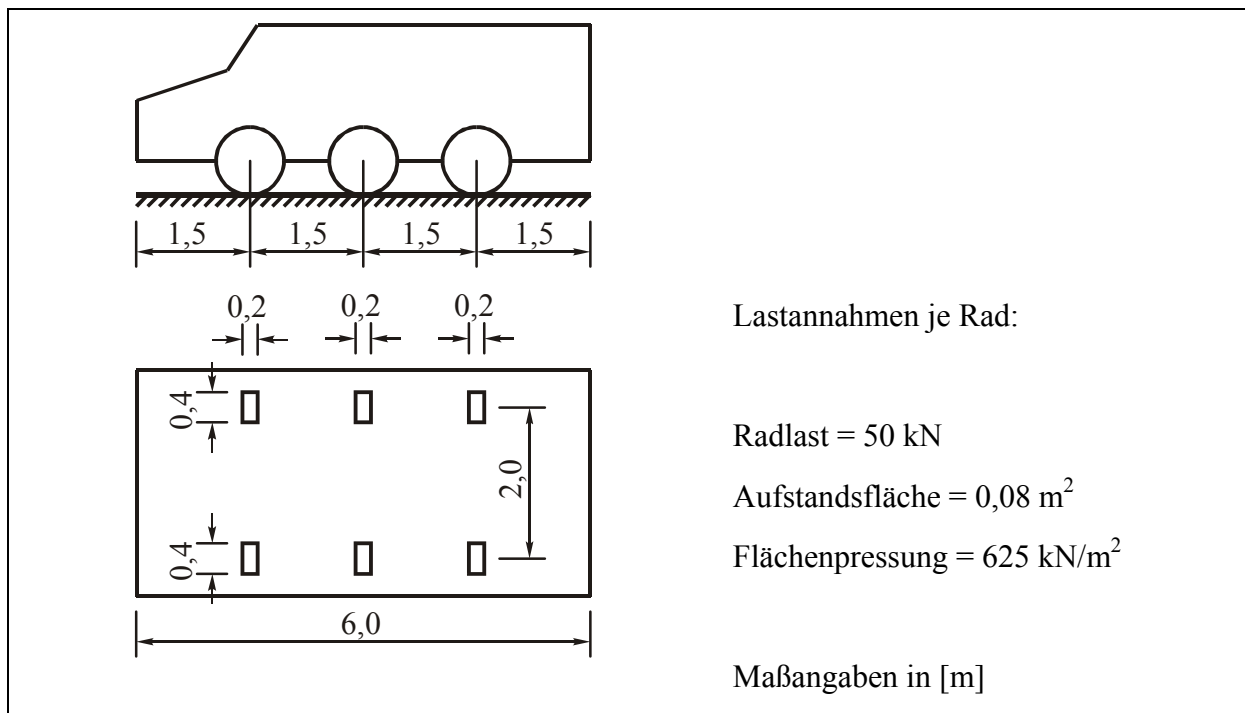


Bild 8-1: Lastbild eines SLW 30 nach DIN 1072 (1988)

Zur Erfassung der durch den SLW 30 verursachten Beanspruchungen wird das Lastbild nach DIN 1072 (1988) auf der Geländeoberfläche so angesetzt, dass eine Radreihe über der Leitungshauptachse angeordnet ist, siehe Bild 8-2. Im Längsschnitt-Modell wirkt damit die maximale Anzahl von Radlasten eines Fahrzeugs auf die Rohrleitung. In der hierzu orthogonalen Betrachtungsebene im Querschnitt-Modell wird das Lastbild für eine Fahrzeugachse angesetzt.

In Abhängigkeit von den Verkehrsverhältnissen sind die von den Fahrzeugen auf die Fahrbahn übertragenen Radlasten zufällig verteilt (KIESSELBACH 1990). Die exakte Position des Lastbilds im Längsschnitt-Modell, bei der die maximale Biegebeanspruchung der Rohrleitung auftritt, ist nicht bekannt. Eine besonders große Beanspruchung der Leitung wird sich aber ergeben, wenn die Fahrzeuglasten überwiegend in dem Bereich angeordnet sind, in dem sich bei Setzungen der Leitungssohle eine klaffende Fuge ausbildet.

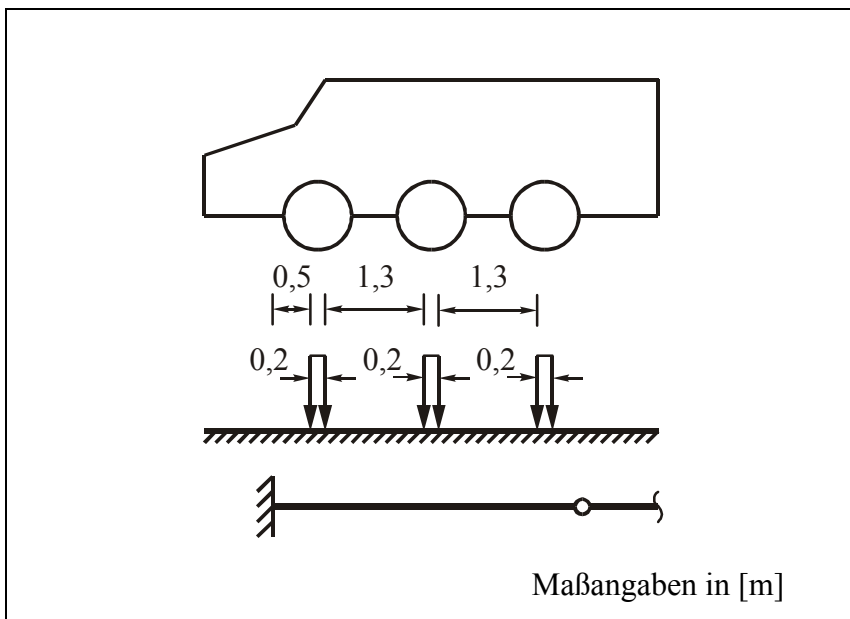


Bild 8-2: Radlasten im FE-Modell

Die Spannungen infolge konzentrierter Flächenlasten, wie sie auch Radlasten darstellen, verteilen sich mit zunehmender Tiefe, wobei überschlägig eine Spannungsausbreitung von 2:1 (horizontal / vertikal) angenommen werden kann. Die Radlasten werden im Rahmen der Parameterstudie deshalb so angeordnet, dass die erste Fahrzeugachse einen horizontalen Abstand von 0,5 m zur Einspannstelle der Rohrleitung aufweist. Damit erstreckt sich der Einfluss der Radlasten in der Rohrscheitelebene bei einer Überdeckungshöhe von 1 m bis zur Einspannstelle. Es ergibt sich die in Bild 8-2 dargestellte Laststellung. Die Position der Radreihe wird dabei als mittig über der Längsachse angenommen. Bei den betrachteten Nennweiten bis DN 400 erstreckt sich die Radbreite des SLW 30 mit 0,4 m mindestens über die volle Rohrbreite.

ATV A 127 (2000) sieht zur Berücksichtigung der dynamischen Effekte von Fahrzeuglasten noch die Erhöhung der resultierenden Vertikalspannungen in der Rohrscheitelebene durch einen Stoßbeiwert  $\varphi_{dyn}$  vor, der für einen SLW 30 mit  $\varphi_{dyn} = 1,4$  angegeben ist.

In den zweidimensionalen FE-Modellen werden Radlasten als Streifenlasten berücksichtigt. Bei vollem Ansatz der Flächenpressungen infolge der konzentrierten Rad-Flächenlasten in den Streifenlasten des jeweiligen FE-Modells würde man die auf das Rohr übertragenen Belastungen erheblich überschätzen, da die Lastverteilung senkrecht zur Betrachtungsebene nicht erfasst würde. Die nach DIN 1072 (1988) anzusetzenden Werte werden deshalb korrigiert. Verwendet wird hierzu der überschlägige Ansatz zur Berechnung von Spannungen im Boden infolge begrenzter Flächenlasten nach ATV-DVWK-A 127 (2000), der in SCHNEIDER BAUTABELLEN (2002) für zweidimensionale Anwendungsfälle angegeben wird. Demnach können die Spannungen  $p_v$  in der Höhe des Rohrscheitels auf Grund einer



Streifenlast  $p_0$  innerhalb des Druckausbreitungsbereichs 2:1 durch folgenden Berechnungsansatz verringert werden:

$$p_v = p_0 \cdot \frac{l_p}{l_p + h} \quad (8-3)$$

$p_v$	Vertikalspannung in der Rohrscheitelebene	[kN/m <sup>2</sup> ]
$p_0$	Streifenlast	[kN/m <sup>2</sup> ]
$l_p$	begrenzte Ausdehnung der Streifenlast	[m]
$h$	Überdeckungshöhe	[m]

Zur Korrektur der Radlasten im FE-Modell wird die Verringerung der Bodenspannungen in der Rohrscheitelebene nach Gleichung (8-3) auf die Beziehung von konzentrierter Flächenlast (Radlast nach DIN 1072 (1988)) zu Streifenlast (in den FE-Modellen) an der Geländeoberfläche angewendet. Ebenso wird der Stoßbeiwert zur Lasterhöhung infolge dynamischer Einflüsse zur Berechnung dieser Streifenlast verwendet. Für die FE-Modelle berechnen sich demnach die Streifenlasten  $p_{Rad-S}$  zu:

$$p_{Rad-S} = \varphi_{dyn} \cdot p_{Rad} \cdot \frac{l_p}{l_p + h} \quad (8-4)$$

$p_{Rad-S}$	Radlast als Streifenlast	[kN/m <sup>2</sup> ]
$\varphi_{dyn}$	Stoßbeiwert	[-]
$p_{Rad}$	Radlast als konzentrierte Flächenlast	[kN/m <sup>2</sup> ]

Mit den Konstanten  $\varphi_{dyn} = 1,4$  und  $p_{Rad} = 625 \text{ kN/m}^2$  sowie der gewählten Überdeckung von  $h = 1 \text{ m}$  ergeben sich die nachfolgend angegebenen korrigierten Radlasten  $p_{Rad-S}$ .

Für das Querschnitt-Modell ergibt sich mit  $l_p = 0,2 \text{ m}$ :

$$p_{Rad-S} = 1,4 \cdot 625 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot \frac{0,2 \text{ m}}{0,2 \text{ m} + 1 \text{ m}} = 146 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad (8-5)$$

und für das Längsschnitt-Modell ergibt sich mit  $l_p = 0,4 \text{ m}$ :

$$p_{Rad-S} = 1,4 \cdot 625 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \cdot \frac{0,4 \text{ m}}{0,4 \text{ m} + 1 \text{ m}} = 250 \frac{\text{kN}}{\text{m}^2} \quad (8-6)$$

### 8.1.6 Überdeckungshöhen

Für anzustrebende Überdeckungen in Ortsversorgungsnetzen existiert eine Reihe von derzeit gültigen Normen und Richtlinien. Nach DVGW W 400-1 (2004) werden für Leitungen des Wasserrohrnetzes Überdeckungen von 1,0 m bis 1,8 m und für Leitungen des Gasrohrnetzes Überdeckungen von 0,6 m bis 1,3 m empfohlen. DIN 1998 (1978) sieht für Leitungen in öffentlichen Flächen Regelüberdeckungen von 1,0 m bis 1,8 m für die Sparte Wasser und 0,6 m bis 1,0 m für die Sparte Gas vor. Für Gas-Hausanschlussleitungen ist nach DVGW G 459/I (1998) eine Mindestüberdeckung von 0,5 m erforderlich. Auch früher verlegte Leitungen weisen meist ähnliche Tiefenlagen auf, allerdings sind auch tiefer als 1,8 m liegende Leitungen nicht selten. In der Parameterstudie werden Berechnungen mit unterschiedlichen Überdeckungshöhen von 0,5 m, 1 m (Standard) und 2 m durchgeführt.

### 8.1.7 Druckstufen

Wegen der einfachen Bestimmbarkeit der Umfangsspannungen infolge Innendruck werden diese zur Abschätzung ihres Einflusses vorab berechnet.

Im Bereich der Gasverteilung werden üblicherweise folgende Druckbereiche unterschieden (CERBE 1999):

- Niederdruck:  $p \leq 100$  mbar
- Mitteldruck:  $100 \text{ mbar} < p \leq 1$  bar
- Hochdruck:  $p > 1$  bar

Praktisch relevant ist insbesondere noch eine Druckobergrenze von 4 bar, da im DVGW-Regelwerk die sicherheitstechnischen Anforderungen für die Ausführung und den Betrieb der Versorgungsanlagen für Drücke oberhalb von 4 bar erheblich erhöht sind.

Da Graugussleitungen in dieser Versorgungssparte im Wesentlichen nur noch in Niederdrucknetzen in Betrieb sind, wird im Folgenden für diese Fallkombination von einer Druckobergrenze von  $p = 100$  mbar ausgegangen. Für Stahlrohrleitungen wird eine Druckobergrenze von  $p = 4$  bar angesetzt, da Verteilnetze in der Regel nicht für höhere Drücke geplant und ausgelegt werden.

Im Bereich der Wasserversorgung werden Ortsverteilnetze baulich in der Regel für maximale Betriebsdrücke bis  $p = 10$  bar ausgeführt (DVGW W 400-1). Im Gegensatz zu Gasversorgungsnetzen, bei denen wegen der hohen Kompressibilität von Erdgas nicht mit Druckstößen in relevanter Größe gerechnet werden muss, ist bei Wasserversorgungsnetzen eine Reserve von 2 bar zur Aufnahme von Druckstößen berücksichtigt.

Tabelle 8-4 zeigt die aufgrund der genannten Obergrenzen für den maximalen Druck nach Gleichung 5-55 berechneten Umfangsspannungen.

Tabelle 8-4: Berechnete Umfangsspannungen infolge Innendruck

Nennweite DN	Umfangsspannungen $\sigma_u$ infolge Innendruck [N/mm <sup>2</sup> ]			
	GG-Leitungen (Rohre nach DIN 2431 (1938))		St-Leitungen (Rohre nach DIN 2460 (1942))	
	Gas $p = 0,1 \text{ bar}$	Wasser $p = 10 \text{ bar}$	Gas $p = 4 \text{ bar}$	Wasser $p = 10 \text{ bar}$
50	-	-	3,3	-
80	~ 0 (0,05)	5,1	4,6	11,4
100	~ 0 (0,06)	6,4	5,0	12,5
200	~ 0 (0,10)	10,1	7,3	18,2
300	~ 0 (0,13)	13,2	8,8	21,9
400	~ 0 (0,16)	15,5	8,4	21,1

Wie zu erkennen ist, entstehen bei den betrachteten Bedingungen Zugspannungen, die maximal etwa 10 % der Streckgrenze von Stahl bzw. der Zugfestigkeit von Grauguss betragen. Um eine zusätzliche Differenzierung der Parameterstudien nach unterschiedlichen Betriebsdrücken zu vermeiden, wird für die Durchführung der Berechnungen einheitlich der in Tabelle 8-4 angegebene Druck für die jeweilige Versorgungssparte angesetzt, wobei die für einen Betriebsdruck von  $p = 0,1 \text{ bar}$  errechneten Spannungen wegen ihrer geringen Größe nicht berücksichtigt werden.

## 8.2 Aufbau der Berechnungsreihen

Wegen der möglichen Unterschiede bei den Leitungseigenschaften, den Umgebungsbedingungen und den Belastungen existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Modellvarianten und Parameterkombinationen, so dass nicht jede Konstellation möglicher Randbedingungen einzeln berechnet werden kann. Es ist daher erforderlich, die zu berechnenden Varianten so auszuwählen, dass einerseits die Einflüsse der wichtigsten Randbedingungen erfasst und interpretiert werden können und andererseits die Anzahl der erforderlichen Einzelrechnungen in einer überschaubaren Größenordnung bleibt.

Im Rahmen der Parameterstudie werden Berechnungsreihen gebildet, bei denen jeweils ein Einflussfaktor geändert wird, während die übrigen Parameter konstant bleiben. Die in Fall 00 angenommenen Parameter wurden so gewählt, dass sie innerhalb der in Kapitel 8.1 festgelegten Bandbreite liegen und gängige Verhältnisse widerspiegeln. Den in der jeweiligen Berechnungsreihe nicht variierten Parametern werden deshalb in den meisten Fällen die in Fall 00 verwendeten Werte zugewiesen. Die jeweiligen Randbedingungen und Hauptergebnisse der Einzelrechnungen werden in Tabellenform dargestellt. Der Aufbau entspricht dabei Tabelle 7-2, in der Fall 00 zusammenfassend beschrieben ist. Soweit

sinnvoll, werden die in Fall 00 ermittelten Ergebnisse bei der Auswertung der Berechnungsreihen ebenfalls mit einbezogen.

Für die Auswertung einer Berechnungsreihe werden insbesondere die in den Einzelrechnungen ermittelten Vergleichsspannungen  $\sigma_v$  an den Stellen der maximalen Beanspruchung miteinander verglichen.

Daneben wird auch die Ausdehnung des hoch beanspruchten und gegebenenfalls versagensgefährdeten Bereichs betrachtet, die für praktische Risikoanalysen ebenfalls von Interesse sein kann. Wenn die Rohrleitung entlang ihrer Längsachse eine konstante Beanspruchbarkeit aufweist, wird ein Versagen gegebenenfalls an der Stelle der höchsten Beanspruchung, also unmittelbar an der Einspannstelle erfolgen. Rohrleitungen können an einzelnen Stellen aber auch reduziert beanspruchbar sein. Gründe hierfür können z. B. Querschnittsschwächungen infolge von Korrosionsschäden sein, aber auch eine verringerte Belastbarkeit im Bereich der Schweißmuffenverbindungen, da die Schweißnähte bei älteren Leitungen nicht immer in hoher Güte ausgeführt wurden. Vorrangig betreffen die genannten Faktoren Rohrleitungen älterer Bauweise aus Stahl. Nach einer Abschätzung des hoch beanspruchten Bereichs kann beurteilt werden, ob überhaupt Verbindungsstellen in diesem Bereich vorhanden sind. Das Vorhandensein von befestigten Oberflächen über Gasleitungen, die im Falle von Leckagen ein Entweichen des ausströmenden Gases in die Atmosphäre behindern, kann bei Risikoanalysen ebenfalls Berücksichtigung finden.

Da die kritischen Spannungen vorrangig auf die Längsbiegebelastung der Leitung zurückgehen, wird vom Verfasser vorgeschlagen, den Bereich zwischen der Einspannung der Leitung und dem rechnerischen Erreichen des ersten Nulldurchgangs im Verlauf des Biegemoments als potentiell versagensgefährdet anzusehen. Dieser Bereich der Länge  $l_M$  wird bei den Auswertungen der Berechnungsreihen deshalb ebenfalls mitbetrachtet.

### 8.3 Einfluss der Leitungseigenschaften

#### 8.3.1 Graugussrohrleitungen unterschiedlicher Nennweite

Um den Einfluss der Nennweite DN bei Graugussrohrleitungen zu betrachten, werden die Berechnungsergebnisse für Leitungen DN 100 (Fall 01), DN 200 (Fall 00), DN 300 (Fall 02) und DN 400 (Fall 03) miteinander verglichen. Die Rechnungen sind in den Tabellen 8-5 bis 8-7 beschrieben (für Fall 00 siehe Tabelle 7-2 in Kapitel 7.2). Bild 8-3 zeigt die errechneten Werte für die Vergleichsspannung  $\sigma_v$  im Rohrscheitel und für die Länge  $l_M$  zwischen der Einspannstelle und dem ersten Nulldurchgang des Biegemomentenverlaufs.

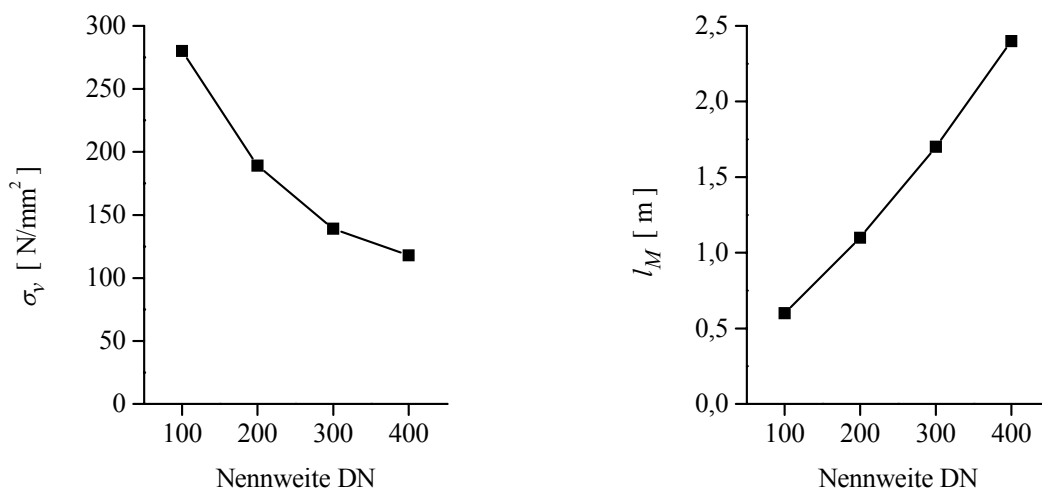


Bild 8-3: Einfluss der Nennweite DN bei Graugussleitungen

Mit zunehmender Nennweite ergeben sich geringere Spannungen  $\sigma_v$ . Die Abnahme der Spannungen bei größeren Nennweiten resultiert aus der größeren Querschnittsfläche und dem größeren Abstand von Scheitel und Sohle zum Querschnittsschwerpunkt. Außerdem führt eine höhere Querschnittsbreite zu einer Verringerung des vertikalen Erddrucks  $q_v$ , da sich die Lastumlagerungen über dem Rohrquerschnitt auf eine größere Breite verteilen. Diese Einflüsse überwiegen gegenüber dem Einfluss der mit zunehmender Nennweite größer werdenden Wirkungsbreite des vertikalen Erddrucks deutlich.

Das mit steigender Nennweite größer werdende Biegebestandsmoment des Rohrquerschnitts führt zu einer Vergrößerung der Länge der klaffenden Fuge, also der Länge des nicht aufgelagerten Bereichs. In der Folge vergrößert sich auch der durch die Längsschnittgrößen belastete Leitungsabschnitt. Die Abschnittslänge  $l_M$  zwischen der Einspannstelle und dem ersten Nulldurchgang des Biegemomentenverlaufs verändert sich etwa im gleichen Verhältnis wie die Länge der klaffenden Fuge.

Tabelle 8-5: Übersicht zu Fall 01 (Variation von DN)

<b>Fallbeschreibung</b>			
Rohrleitung / Versorgungssparte: <b>DN 100 / GG / Gas</b>			
Rohrverbindungen:	gelenkig in 4 m Abstand, erstmals bei $x = 4$ m		
Überdeckung:	$h = 1,0$ m (homogen)		
Verkehrslasten:	keine		
<b>Eingangsparameter</b>			
Leitung:	$d_a = 118$ mm, $s = 8$ mm, $g = 0,22$ kN/m, $E_{GG} = 150$ kN/mm <sup>2</sup> , $\sigma_m = 180$ N/mm <sup>2</sup>		
Boden:	$E = 20$ MN/m <sup>2</sup> , $\varphi = 25^\circ$ , $c = 20$ kN/m <sup>2</sup> , $\gamma = 20$ kN/m <sup>3</sup> , $\nu = 0,4$		
Oberbau:	keiner		
Setzung:	$a = 10$ mm		
Innendruck:	$p = 0$ bar		
<b>Ergebnisse: Erddruck auf den Rohrquerschnitt</b>			
$q_v = 0,28$ N/mm <sup>2</sup> , $q_h = 0,09$ N/mm <sup>2</sup>			
<b>Ergebnisse: Längsschnittgrößen und Biegelinie der Rohrleitung</b>			
	<p>Abwinklung am ersten Gelenk: <math>\zeta = 0,3^\circ</math></p> <p>Schnittgrößen bei <math>x = 0</math> m: <math>M_y = -19,8</math> kNm <math>Q_z = 42,0</math> kN</p>		
<b>Ergebnisse: Vergleichsspannungen bei <math>x = 0</math> m</b>			
Scheitel außen:	$\sigma_x = 279$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = -8$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 279$ N/mm <sup>2</sup>
Scheitel innen:	$\sigma_x = 241$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 6$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 241$ N/mm <sup>2</sup>
Sohle außen:	$\sigma_x = -279$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = -6$ N/mm <sup>2</sup>	-
Sohle innen:	$\sigma_x = -241$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 7$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 7$ N/mm <sup>2</sup>

Tabelle 8-6: Übersicht zu Fall 02 (Variation von DN)

<b>Fallbeschreibung</b>			
Rohrleitung / Versorgungssparte: <b>DN 300</b> / GG / Gas			
Rohrverbindungen:	gelenkig in 4 m Abstand, erstmals bei $x = 4$ m		
Überdeckung:	$h = 1,0$ m (homogen)		
Verkehrslasten:	keine		
<b>Eingangsparameter</b>			
Leitung:	$d_a = 326$ mm, $s = 11,5$ mm, $g = 0,87$ kN/m, $E_{GG} = 150$ kN/mm <sup>2</sup> , $\sigma_m = 180$ N/mm <sup>2</sup>		
Boden:	$E = 20$ MN/m <sup>2</sup> , $\varphi = 25^\circ$ , $c = 20$ kN/m <sup>2</sup> , $\gamma = 20$ kN/m <sup>3</sup> , $\nu = 0,4$		
Oberbau:	keiner		
Setzung:	$a = 10$ mm		
Innendruck:	$p = 0$ bar		
<b>Ergebnisse: Erddruck auf den Rohrquerschnitt / Schnittgrößen bei <math>x = 0</math> m</b>			
$q_v = 0,12$ N/mm <sup>2</sup> , $q_h = 0,05$ N/mm <sup>2</sup>			
<b>Ergebnisse: Längsschnittgrößen und Biegelinie der Rohrleitung</b>			
	<p>Abwinklung am ersten Gelenk: <math>\zeta &lt; 0,1^\circ</math></p> <p>Schnittgrößen bei <math>x = 0</math> m: <math>M_y = -120</math> kNm <math>Q_z = 106</math> kN</p>		
<b>Ergebnisse: Vergleichsspannungen bei <math>x = 0</math> m</b>			
Scheitel außen:	$\sigma_x = 139$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = -11$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 139$ N/mm <sup>2</sup>
Scheitel innen:	$\sigma_x = 129$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 9$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 129$ N/mm <sup>2</sup>
Sohle außen:	$\sigma_x = -139$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = -9$ N/mm <sup>2</sup>	-
Sohle innen:	$\sigma_x = -129$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 10$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 10$ N/mm <sup>2</sup>

Tabelle 8-7: Übersicht zu Fall 03 (Variation von DN)

<b>Fallbeschreibung</b>			
Rohrleitung / Versorgungssparte: <b>DN 400</b> / GG / Gas			
Rohrverbindungen:	gelenkig in 4 m Abstand, erstmals bei $x = 4$ m		
Überdeckung:	$h = 1,0$ m (homogen)		
Verkehrslasten:	keine		
<b>Eingangsparameter</b>			
Leitung:	$d_a = 429$ mm, $s = 13,0$ mm, $g = 1,30$ kN/m, $E_{GG} = 150$ kN/mm <sup>2</sup> , $\sigma_m = 180$ N/mm <sup>2</sup>		
Boden:	$E = 20$ MN/m <sup>2</sup> , $\varphi = 25^\circ$ , $c = 20$ kN/m <sup>2</sup> , $\gamma = 20$ kN/m <sup>3</sup> , $\nu = 0,4$		
Oberbau:	keiner		
Setzung:	$a = 10$ mm		
Innendruck:	$p = 0$ bar		
<b>Ergebnisse: Erddruck auf den Rohrquerschnitt / Schnittgrößen bei <math>x = 0</math> m</b>			
$q_v = 0,10$ N/mm <sup>2</sup> , $q_h = 0,04$ N/mm <sup>2</sup>			
<b>Ergebnisse: Längsschnittgrößen und Biegelinie der Rohrleitung</b>			
	<p>Abwinklung am ersten Gelenk: <math>\zeta = 0,5^\circ</math></p> <p>Schnittgrößen bei <math>x = 0</math> m: <math>M_y = -203</math> kNm <math>Q_z = 138</math> kN</p>		
<b>Ergebnisse: Vergleichsspannungen bei <math>x = 0</math> m</b>			
Scheitel außen:	$\sigma_x = 118$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = -13$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 118$ N/mm <sup>2</sup>
Scheitel innen:	$\sigma_x = 111$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 10$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 111$ N/mm <sup>2</sup>
Sohle außen:	$\sigma_x = -118$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = -11$ N/mm <sup>2</sup>	-
Sohle innen:	$\sigma_x = -111$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 12$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 12$ N/mm <sup>2</sup>



### 8.3.2 *Stahlrohrleitungen unterschiedlicher Nennweite*

Um den Einfluss der Nennweite DN bei Stahlrohrleitungen zu betrachten, werden die Berechnungsergebnisse für Leitungen DN 100 (Fall 04), DN 200 (Fall 05), DN 300 (Fall 06) und DN 400 (Fall 07) miteinander verglichen. Die Rechnungen sind in den Tabellen 8-8 bis 8-11 beschrieben. Bild 8-4 zeigt die errechneten Werte für die Vergleichsspannung  $\sigma_v$  im Rohrscheitel und für die Länge  $l_M$  zwischen der Einspannstelle und dem ersten Nulldurchgang des Biegemomentenverlaufs.

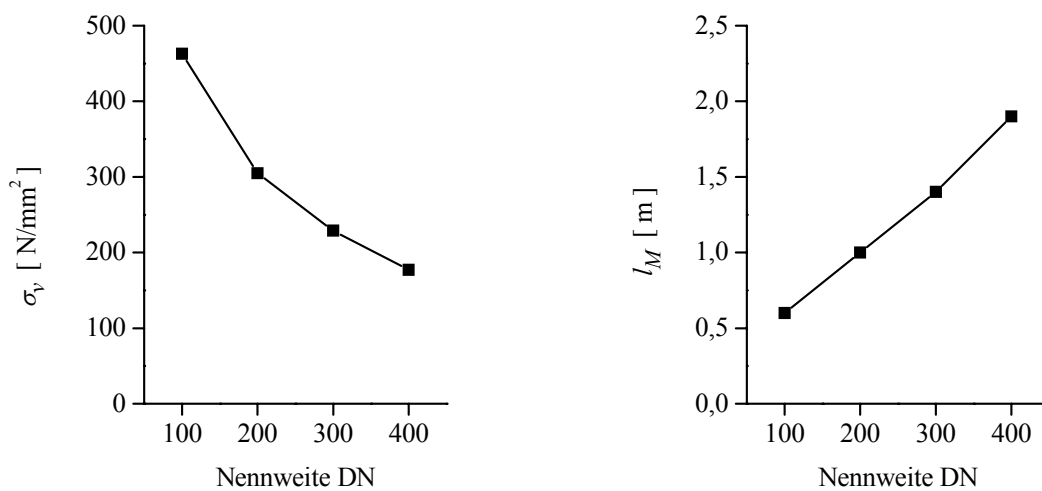


Bild 8-4: Einfluss der Nennweite DN bei Stahlleitungen

Der zu beobachtende Einfluss der Nennweite auf die Größe der Vergleichsspannungen  $\sigma_v$  sowie die Länge  $l_M$  zwischen der Einspannstelle und dem ersten Nulldurchgang des Biegemomentenverlaufs entspricht etwa den für Graugussleitungen ausgeführten Beobachtungen.

Tabelle 8-8: Übersicht zu Fall 04 (Variation von DN)

<b>Fallbeschreibung</b>			
Rohrleitung / Versorgungssparte: <b>DN 100 / St / Gas</b>			
Rohrverbindungen:	starr		
Überdeckung:	$h = 1,0$ m (homogen)		
Verkehrslasten:	keine		
<b>Eingangsparameter</b>			
Leitung:	$d_a = 108$ mm, $s = 4,0$ mm, $g = 0,125$ kN/m, $E_{St} = 210$ kN/mm <sup>2</sup> , $\sigma_e = 210$ N/mm <sup>2</sup> , $\sigma_m = 350$ N/mm <sup>2</sup>		
Boden:	$E = 20$ MN/m <sup>2</sup> , $\varphi = 25^\circ$ , $c = 20$ kN/m <sup>2</sup> , $\gamma = 20$ kN/m <sup>3</sup> , $\nu = 0,40$		
Oberbau:	keiner		
Setzung:	$a = 10$ mm		
Innendruck:	$p = 0$ bar		
<b>Ergebnisse: Erddruck auf den Rohrquerschnitt / Schnittgrößen bei <math>x = 0</math> m</b>			
$q_v = 0,28$ N/mm <sup>2</sup> , $q_h = 0,09$ N/mm <sup>2</sup> / $M_y = -14,8$ kNm, $N_x = 0,798$ kN, $Q_z = 35,0$ kN			
<b>Ergebnisse: Längsschnittgrößen und Biegelinie der Rohrleitung</b>			
<b>Ergebnisse: Vergleichsspannungen bei <math>x = 0</math> m</b>			
Scheitel außen:	$\sigma_x = 453$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = -27$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 467$ N/mm <sup>2</sup>
Scheitel innen:	$\sigma_x = 419$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 23$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 409$ N/mm <sup>2</sup>
Sohle außen:	$\sigma_x = -452$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = -22$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 441$ N/mm <sup>2</sup>
Sohle innen:	$\sigma_x = -418$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 24$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 431$ N/mm <sup>2</sup>

Tabelle 8-9: Übersicht zu Fall 05 (Variation von DN)

<b>Fallbeschreibung</b>			
Rohrleitung / Versorgungssparte: <b>DN 200 / St / Gas</b>			
Rohrverbindungen:	starr		
Überdeckung:	$h = 1,0$ m (homogen)		
Verkehrslasten:	keine		
<b>Eingangsparameter</b>			
Leitung:	$d_a = 211$ mm, $s = 5,5$ mm, $g = 0,325$ kN/m, $E_{St} = 210$ kN/mm <sup>2</sup> , $\sigma_e = 210$ N/mm <sup>2</sup> , $\sigma_m = 350$ N/mm <sup>2</sup>		
Boden:	$E = 20$ MN/m <sup>2</sup> , $\varphi = 25^\circ$ , $c = 20$ kN/m <sup>2</sup> , $\gamma = 20$ kN/m <sup>3</sup> , $\nu = 0,40$		
Oberbau:	keiner		
Setzung:	$a = 10$ mm		
Innendruck:	$p = 0$ bar		
<b>Ergebnisse: Erddruck auf den Rohrquerschnitt / Schnittgrößen bei <math>x = 0</math> m</b>			
$q_v = 0,17$ N/mm <sup>2</sup> , $q_h = 0,06$ N/mm <sup>2</sup> / $M_y = -52,0$ kNm, $N_x = -0,973$ kN, $Q_z = 70,4$ kN			
<b>Ergebnisse: Längsschnittgrößen und Biegelinie der Rohrleitung</b>			
<b>Ergebnisse: Vergleichsspannungen bei <math>x = 0</math> m</b>			
Scheitel außen:	$\sigma_x = 292$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = -32$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 309$ N/mm <sup>2</sup>
Scheitel innen:	$\sigma_x = 277$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 27$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 265$ N/mm <sup>2</sup>
Sohle außen:	$\sigma_x = -293$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = -27$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 280$ N/mm <sup>2</sup>
Sohle innen:	$\sigma_x = -278$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 29$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 293$ N/mm <sup>2</sup>

Tabelle 8-10: Übersicht zu Fall 06 (Variation von DN)

<b>Fallbeschreibung</b>			
Rohrleitung / Versorgungssparte: <b>DN 300 / St / Gas</b>			
Rohrverbindungen:	starr		
Überdeckung:	$h = 1,0$ m (homogen)		
Verkehrslasten:	keine		
<b>Eingangsparameter</b>			
Leitung:	$d_a = 321$ mm, $s = 7,0$ mm, $g = 0,620$ kN/m, $E_{St} = 210$ kN/mm <sup>2</sup> , $\sigma_e = 210$ N/mm <sup>2</sup> , $\sigma_m = 350$ N/mm <sup>2</sup>		
Boden:	$E = 20$ MN/m <sup>2</sup> , $\varphi = 25^\circ$ , $c = 20$ kN/m <sup>2</sup> , $\gamma = 20$ kN/m <sup>3</sup> , $\nu = 0,40$		
Oberbau:	keiner		
Setzung:	$a = 10$ mm		
Innendruck:	$p = 0$ bar		
<b>Ergebnisse: Erddruck auf den Rohrquerschnitt / Schnittgrößen bei <math>x = 0</math> m</b>			
$q_v = 0,12$ N/mm <sup>2</sup> , $q_h = 0,05$ N/mm <sup>2</sup> / $M_y = -116$ kNm, $N_x = -2,61$ kN, $Q_z = 109$ kN			
<b>Ergebnisse: Längsschnittgrößen und Biegelinie der Rohrleitung</b>			
<b>Ergebnisse: Vergleichsspannungen bei <math>x = 0</math> m</b>			
Scheitel außen:	$\sigma_x = 218$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = -28$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 234$ N/mm <sup>2</sup>
Scheitel innen:	$\sigma_x = 209$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 24$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 198$ N/mm <sup>2</sup>
Sohle außen:	$\sigma_x = -219$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = -26$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 207$ N/mm <sup>2</sup>
Sohle innen:	$\sigma_x = -210$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 27$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 225$ N/mm <sup>2</sup>

Tabelle 8-11: Übersicht zu Fall 07 (Variation von DN)

<b>Fallbeschreibung</b>			
Rohrleitung / Versorgungssparte: <b>DN 400 / St / Gas</b>			
Rohrverbindungen:	starr		
Überdeckung:	$h = 1,0$ m (homogen)		
Verkehrslasten:	keine		
<b>Eingangsparameter</b>			
Leitung:	$d_a = 419$ mm, $s = 9,5$ mm, $g = 1,07$ kN/m, $E = 210$ kN/mm <sup>2</sup> , $\sigma_e = 210$ N/mm <sup>2</sup> , $\sigma_m = 350$ N/mm <sup>2</sup>		
Boden:	$E = 20$ MN/m <sup>2</sup> , $\varphi = 25^\circ$ , $c = 20$ kN/m <sup>2</sup> , $\gamma = 20$ kN/m <sup>3</sup> , $\nu = 0,40$		
Oberbau:	keiner		
Setzung:	$a = 10$ mm		
Innendruck:	$p = 0$ bar		
<b>Ergebnisse: Erddruck auf den Rohrquerschnitt / Schnittgrößen bei <math>x = 0</math> m</b>			
$q_v = 0,10$ N/mm <sup>2</sup> , $q_h = 0,04$ N/mm <sup>2</sup> / $M_y = -210$ kNm, $N_x = -4,26$ kN, $Q_z = 153$ kN			
<b>Ergebnisse: Längsschnittgrößen und Biegelinie der Rohrleitung</b>			
<b>Ergebnisse: Vergleichsspannungen bei <math>x = 0</math> m</b>			
Scheitel außen:	$\sigma_x = 171$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = -22$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 184$ N/mm <sup>2</sup>
Scheitel innen:	$\sigma_x = 164$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 19$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 155$ N/mm <sup>2</sup>
Sohle außen:	$\sigma_x = -172$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = -20$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 163$ N/mm <sup>2</sup>
Sohle innen:	$\sigma_x = -164$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 21$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 176$ N/mm <sup>2</sup>

### 8.3.3 Vergleich von Grauguss- und Stahlrohrleitungen

Die Betrachtung der Fälle 00 bis 07 ermöglicht eine vergleichende Gegenüberstellung der Beanspruchungen von Grauguss- und Stahlleitungen bei den für diese Fallberechnungen einheitlich angenommenen Randbedingungen. Bild 8-5 zeigt eine Gegenüberstellung der errechneten Vergleichsspannungen aus den Fallrechnungen 00 bis 07 sowie eine Gegenüberstellung der Länge  $l_M$  zwischen der Einspannstelle und dem ersten Nulldurchgang des Biegemomentenverlaufs.

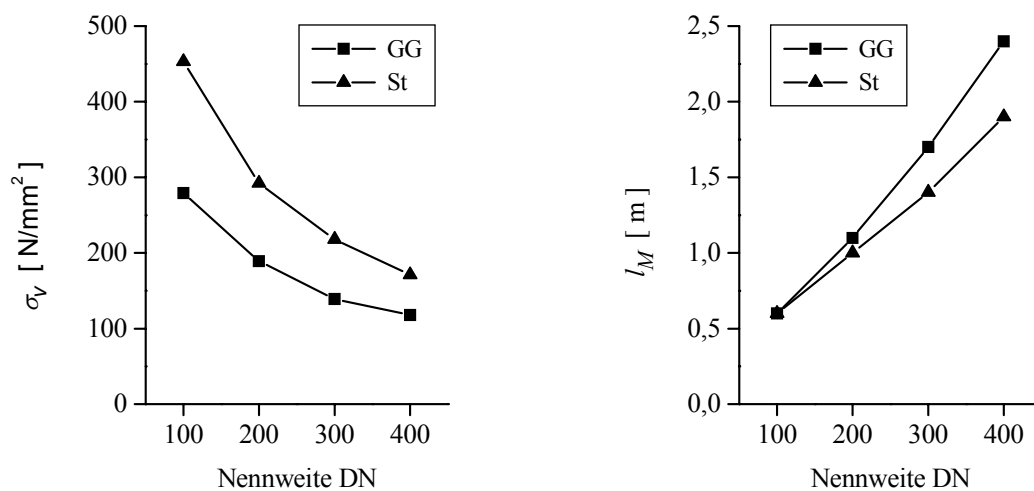


Bild 8-5: Vergleichende Betrachtung der Leitungswerkstoffe

Die errechneten Vergleichsspannungen liegen bei Stahlrohrleitungen höher als bei Graugussleitungen. Die Abschnittslänge  $l_M$  zwischen der Einspannstelle und dem ersten Nulldurchgang des Biegemomentenverlaufs ist für Leitungen DN 100 bei Grauguss- und Stahlleitungen gleich groß. Allerdings nimmt  $l_M$  mit größer werdenden Nennweiten bei Graugussleitungen etwas stärker zu als bei Stahlleitungen.

Für eine im Hinblick auf eine mögliche Gefährdung der Leitungen sinnvolle Beurteilung der Beanspruchung müssen dabei die unterschiedlichen Kennwerte für die Zugfestigkeit der Werkstoffe mit berücksichtigt werden. Der Vergleich des Beanspruchungszustands erfolgt deshalb über das Verhältnis der errechneten Vergleichsspannung  $\sigma_v$  zur Zugfestigkeit  $R_m$  des Leitungswerkstoffs. Bild 8-6 zeigt die entsprechenden Verhältniswerte.

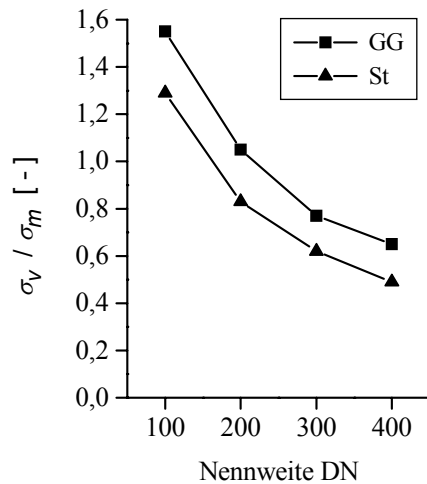


Bild 8-6: Gegenüberstellung der Vergleichsspannungen und Zugfestigkeiten

Kritische Verhältniswerte von  $\sigma_v / R_m > 1$  ergeben die Berechnungen für Graugussleitungen der Nennweiten DN 100 und DN 200, bei Stahlleitungen für DN 100. Das Verhältnis von maximaler Vergleichsspannung zur Zugfestigkeit ( $\sigma_v / R_m$ ) ist für alle betrachteten Nennweiten bei Stahlleitungen niedriger als bei Graugussleitungen. Gegenüber Graugussleitungen haben Stahlleitungen im Hinblick auf die Betriebssicherheit zusätzlich den Vorteil, dass sich die bei Verformungslastfällen auftretenden Beanspruchungen durch die plastische Verformbarkeit des Werkstoffs in begrenztem Umfang reduzieren. Dieser Effekt wird bei den durchgeführten Berechnungen nicht berücksichtigt. Die Versagensgefahr bei Stahlleitungen ist bei allen betrachteten Nennweiten entsprechend geringer.

### 8.3.4 Graugussrohrleitungen mit unterschiedlicher Gelenklage

Um den Einfluss der Gelenke zu betrachten, werden die Berechnungsergebnisse für Leitungen miteinander verglichen, bei denen das erste Gelenk bei  $x = 2$  m (Fall 08) beziehungsweise bei  $x = 4$  m (Fall 00) angeordnet ist. Ergänzend wird eine Vergleichsrechnung durchgeführt, bei der die Rohrleitung als durchgängig starr angenommen wird (Fall 09). Die Länge eines einzelnen Rohrstücks und damit der Abstand zwischen zwei Gelenken bleibt mit 4 m konstant. Die Rechnungen zu Fall 08 bis Fall 09 sind in den Tabellen 8-12 und 8-13 beschrieben. Bild 8-7 zeigt die errechneten Werte für die Vergleichsspannung  $\sigma_v$  im Rohrscheitel und für die Länge  $l_M$  zwischen der Einspannstelle und dem ersten Nulldurchgang des Biegemomentenverlaufs.

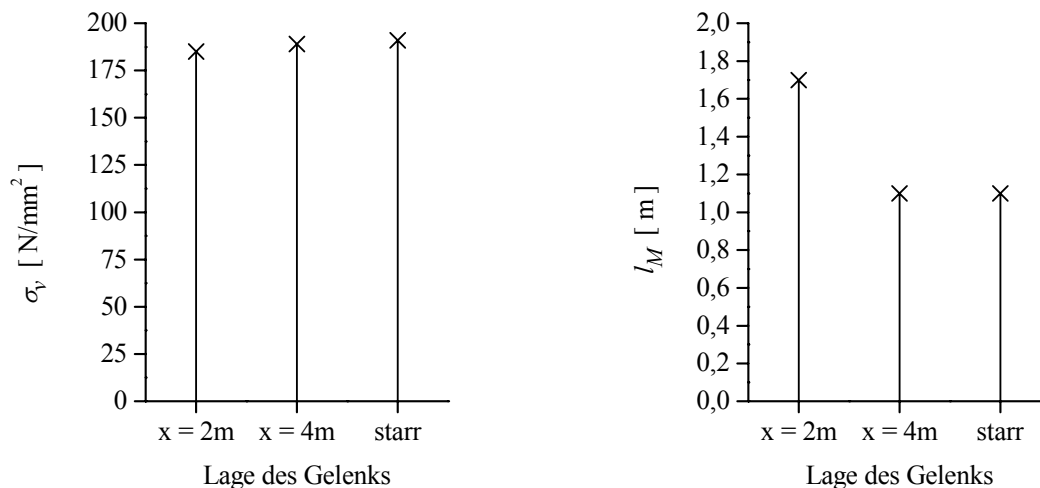


Bild 8-7: Einfluss der Gelenklage

Durch die unterschiedliche Anordnung der Gelenke wird die resultierende maximale Spannung im Leitungsquerschnitt nur geringfügig beeinflusst. Für die Gelenklagen  $x = 2$  m und  $x = 4$  m sowie bei starrer Leitungsausführung zeigt sich nur ein geringer Einfluss auf die maximale Vergleichsspannung im Rohrscheitel. Allerdings wird der Schnittgrößenverlauf durch die Anordnung des Gelenks bei  $x = 2$  m erheblich beeinflusst, da das Gelenk an dieser Stelle einen Nulldurchgang im Verlauf des Biegemoments erzwingt. Die Leitungsbeanspruchung nimmt bei dieser Gelenklage rascher ab.

Die Anordnung der Gelenke beeinflusst den Verlauf der Vertikalverschiebung der Leitungsachse erheblich. Neben den Schnittgrößen wird mit der Gelenklage auch die Länge der klaffenden Fuge verändert, sofern die Entfernung des Gelenks von der Einspannstelle nicht zu groß wird.



Tabelle 8-12: Übersicht zu Fall 08 (Variation der Gelenkwirkung von Rohrverbindungen)

<b>Fallbeschreibung</b>		
Rohrleitung / Versorgungssparte:	DN 200 / GG / Gas	
Rohrverbindungen:	<b>gelenkig in 4 m Abstand, erstmals bei <math>x = 2</math> m</b>	
Überdeckung:	$h = 1,0$ m (homogen)	
Verkehrslasten:	keine	
<b>Eingangsparameter</b>		
Leitung:	$d_a = 222$ mm, $s = 10$ mm, $g = 0,51$ kN/m, $E_{GG} = 150$ kN/mm <sup>2</sup> , $\sigma_m = 180$ N/mm <sup>2</sup>	
Boden:	$E = 20$ MN/m <sup>2</sup> , $\varphi = 25^\circ$ , $c = 20$ kN/m <sup>2</sup> , $\gamma = 20$ kN/m <sup>3</sup> , $\nu = 0,40$	
Oberbau:	keiner	
Setzung:	$a = 10$ mm	
Innendruck:	$p = 0$ bar	
<b>Ergebnisse: Erddruck auf den Rohrquerschnitt</b>		
$q_v = 0,17$ N/mm <sup>2</sup> , $q_h = 0,06$ N/mm <sup>2</sup>		
<b>Ergebnisse: Längsschnittgrößen und Biegelinie der Rohrleitung</b>		
	<p>Abwinklung am ersten Gelenk: <math>\zeta &lt; 0,1^\circ</math></p> <p>Schnittgrößen bei <math>x = 0</math> m: <math>M_y = -62,5</math> kNm <math>Q_z = 70,7</math> kN</p>	
<b>Ergebnisse: Vergleichsspannungen bei <math>x = 0</math> m</b>		
Scheitel außen:	$\sigma_x = 185$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = -11$ N/mm <sup>2</sup> $\sigma_v = 185$ N/mm <sup>2</sup>
Scheitel innen:	$\sigma_x = 169$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 8$ N/mm <sup>2</sup> $\sigma_v = 169$ N/mm <sup>2</sup>
Sohle außen:	$\sigma_x = -185$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = -9$ N/mm <sup>2</sup> -
Sohle innen:	$\sigma_x = -169$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 10$ N/mm <sup>2</sup> $\sigma_v = 10$ N/mm <sup>2</sup>

Tabelle 8-13: Übersicht zu Fall 09 (Variation der Gelenkwirkung von Rohrverbindungen)

<b>Fallbeschreibung</b>		
Rohrleitung / Versorgungssparte: DN 200 / GG / Gas		
Rohrverbindungen: <b>starr</b>		
Überdeckung: $h = 1,0$ m (homogen)		
Verkehrslasten: keine		
<b>Eingangsparameter</b>		
Leitung: $d_a = 222$ mm, $s = 10$ mm, $g = 0,51$ kN/m, $E_{GG} = 150$ kN/mm <sup>2</sup> , $\sigma_m = 180$ N/mm <sup>2</sup>		
Boden: $E = 20$ MN/m <sup>2</sup> , $\varphi = 25^\circ$ , $c = 20$ kN/m <sup>2</sup> , $\gamma = 20$ kN/m <sup>3</sup> , $\nu = 0,40$		
Oberbau: keiner		
Setzung: $a = 10$ mm		
Innendruck: $p = 0$ bar		
<b>Ergebnisse: Erddruck auf den Rohrquerschnitt</b>		
$q_v = 0,17$ N/mm <sup>2</sup> , $q_h = 0,06$ N/mm <sup>2</sup>		
<b>Ergebnisse: Längsschnittgrößen und Biegelinie der Rohrleitung</b>		
	Schnittgrößen bei $x = 0$ m: $M_y = -64,6$ kNm $Q_z = 80,6$ kN	
<b>Ergebnisse: Vergleichsspannungen bei <math>x = 0</math> m</b>		
Scheitel außen: $\sigma_x = 192$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = -11$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 192$ N/mm <sup>2</sup>
Scheitel innen: $\sigma_x = 174$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 8$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 174$ N/mm <sup>2</sup>
Sohle außen: $\sigma_x = -192$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = -9$ N/mm <sup>2</sup>	-
Sohle innen: $\sigma_x = -174$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 10$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 10$ N/mm <sup>2</sup>

## 8.4 Einfluss der Bodeneigenschaften

### 8.4.1 Scherfestigkeit

Um den Einfluss der Scherfestigkeit zu betrachten, werden die Berechnungsergebnisse für Böden mit  $\varphi = 20^\circ$ ,  $c = 30 \text{ kN/m}^2$  (Fall 10),  $\varphi = 25^\circ$ ,  $c = 20 \text{ kN/m}^2$  (Fall 00) sowie  $\varphi = 30^\circ$ ,  $c = 10 \text{ kN/m}^2$  (Fall 11) miteinander verglichen. Die Rechnungen sind für Fall 10 in Tabelle 8-14 und für Fall 11 in Tabelle 8-15 beschrieben. Bild 8-8 zeigt die errechneten Werte für die Vergleichsspannung  $\sigma_v$  im Rohrscheitel und für die Länge  $l_M$  zwischen der Einspannstelle und dem ersten Nulldurchgang des Biegemomentenverlaufs.

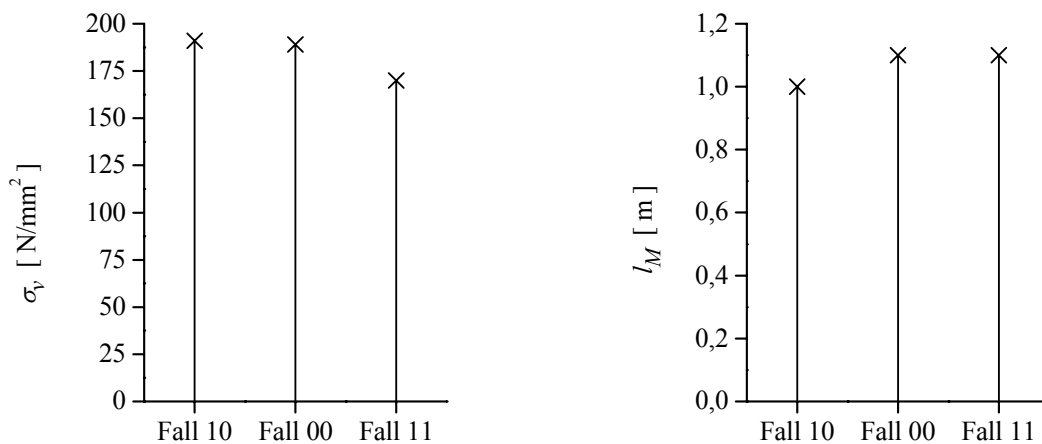


Bild 8-8: Einfluss der Festigkeitskennwerte des Bodens

Sowohl höhere Reibungswinkel als auch höhere Kohäsionswerte führen jeweils zu einer größeren Scherfestigkeit und ermöglichen damit auch Lastumlagerungen in größerem Umfang. Allerdings ist der Anteil der Kohäsion an der Scherfestigkeit unabhängig vom Spannungszustand, während der vom Reibungswinkel bestimmte Anteil der Scherfestigkeit vom jeweiligen Spannungszustand abhängig und damit nicht konstant im betrachteten Untersuchungsraum ist.

Bei der in den betrachteten Fallrechnungen gegenläufig angesetzten Veränderung der Scherfestigkeitsparameter wirkt sich die Erhöhung des Reibungswinkels um jeweils  $5^\circ$  etwas geringer aus als die Abnahme der Kohäsion um jeweils  $10 \text{ kN/m}^2$ . Infolge dessen verringert sich die Auflast auf den Rohrquerschnitt und damit Beanspruchung der Leitung in der Reihenfolge Fall 10 – Fall 00 – Fall 11 geringfügig.

Eine höhere Auflast auf den Rohrquerschnitt führt zu einer stärker abfallenden Biegelinie der Leitungslängsachse und damit zu einer Verringerung der Länge der klaffenden Fuge. In der Folge nimmt auch die Länge  $l_M$  zwischen der Einspannstelle und dem ersten Nulldurchgang des Biegemomentenverlaufs entsprechend ab.

Tabelle 8-14: Übersicht zu Fall 10 (Variation der Scherfestigkeit)

<b>Fallbeschreibung</b>		
Rohrleitung / Versorgungssparte: DN 200 / GG / Gas		
Rohrverbindungen: gelenkig in 4 m Abstand, erstmals bei $x = 4$ m		
Überdeckung: $h = 1,0$ m (homogen)		
Verkehrslasten: keine		
Eingangsparameter		
Leitung: $d_a = 222$ mm, $s = 10$ mm, $g = 0,51$ kN/m, $E_{GG} = 100$ kN/mm <sup>2</sup> , $\sigma_m = 180$ N/mm <sup>2</sup>		
Boden: $E = 20$ MN/m <sup>2</sup> , $\varphi = 20^\circ$ , $c = 30$ kN/m <sup>2</sup> , $\gamma = 20$ kN/m <sup>3</sup> , $\nu = 0,40$		
Oberbau: keiner		
Setzung: $a = 10$ mm		
Innendruck: $p = 0$ bar		
<b>Ergebnisse: Erddruck auf den Rohrquerschnitt</b>		
$q_v = 0,18$ N/mm <sup>2</sup> , $q_h = 0,07$ N/mm <sup>2</sup>		
<b>Ergebnisse: Längsschnittgrößen und Biegelinie der Rohrleitung</b>		
	<p>Abwinklung am ersten Gelenk: <math>\zeta &lt; 0,1^\circ</math></p> <p>Schnittgrößen bei <math>x = 0</math> m: <math>M_y = -64,6</math> kNm <math>Q_z = 82,2</math> kN</p>	
<b>Ergebnisse: Vergleichsspannungen bei <math>x = 0</math> m</b>		
Scheitel außen: $\sigma_x = 192$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = -11$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 192$ N/mm <sup>2</sup>
Scheitel innen: $\sigma_x = 174$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 8$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 174$ N/mm <sup>2</sup>
Sohle außen: $\sigma_x = -192$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = -9$ N/mm <sup>2</sup>	-
Sohle innen: $\sigma_x = -174$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 10$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 10$ N/mm <sup>2</sup>

Tabelle 8-15: Übersicht zu Fall 11 (Variation der Scherfestigkeit)

<b>Fallbeschreibung</b>		
Rohrleitung / Versorgungssparte: DN 200 / GG / Gas		
Rohrverbindungen: gelenkig in 4 m Abstand, erstmals bei $x = 4$ m		
Überdeckung: $h = 1,0$ m (homogen)		
Verkehrslasten: keine		
<b>Eingangsparameter</b>		
Leitung: $d_a = 222$ mm, $s = 10$ mm, $g = 0,51$ kN/m, $E_{GG} = 150$ kN/mm <sup>2</sup> , $\sigma_m = 180$ N/mm <sup>2</sup>		
Boden: $E = 20$ MN/m <sup>2</sup> , $\varphi = 30^\circ$ , $c = 10$ kN/m <sup>2</sup> , $\gamma = 20$ kN/m <sup>3</sup> , $\nu = 0,40$		
Oberbau: keiner		
Setzung: $a = 10$ mm		
Innendruck: $p = 0$ bar		
<b>Ergebnisse: Erddruck auf den Rohrquerschnitt</b>		
$q_v = 0,14$ N/mm <sup>2</sup> , $q_h = 0,04$ N/mm <sup>2</sup>		
<b>Ergebnisse: Längsschnittgrößen und Biegelinie der Rohrleitung</b>		
	<p>Abwinklung am ersten Gelenk: <math>\zeta &lt; 0,1^\circ</math></p> <p>Schnittgrößen bei <math>x = 0</math> m: <math>M_y = -57,3</math> kNm <math>Q_z = 68,4</math> kN</p>	
<b>Ergebnisse: Vergleichsspannungen bei <math>x = 0</math> m</b>		
Scheitel außen: $\sigma_x = 170$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = -10$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 170$ N/mm <sup>2</sup>
Scheitel innen: $\sigma_x = 155$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 8$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 155$ N/mm <sup>2</sup>
Sohle außen: $\sigma_x = -170$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = -8$ N/mm <sup>2</sup>	-
Sohle innen: $\sigma_x = -155$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 8$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 8$ N/mm <sup>2</sup>

### 8.4.2 Elastizitätsmodul

Um den Einfluss des Elastizitätsmoduls  $E$  zu betrachten, werden die Berechnungsergebnisse für Böden mit  $E = 10 \text{ MN/m}^2$  (Fall 12), mit  $E = 20 \text{ MN/m}^2$  (Fall 00) und mit  $E = 40 \text{ MN/m}^2$  (Fall 13) miteinander verglichen. Die Rechnungen sind für Fall 12 in Tabelle 8-16 und für Fall 13 in Tabelle 8-17 beschrieben. Bild 8-9 zeigt die errechneten Werte für die Vergleichsspannung  $\sigma_v$  im Rohrscheitel und für die Länge  $l_M$  zwischen der Einspannstelle und dem ersten Nulldurchgang des Biegemomentenverlaufs.

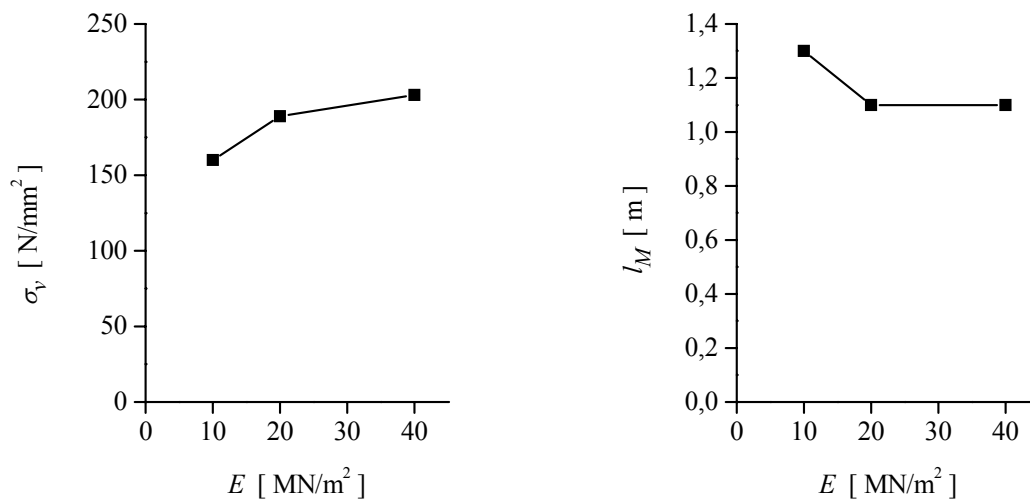


Bild 8-9: Einfluss des Elastizitätsmoduls des Bodens

Mit zunehmendem Elastizitätsmodul vergrößern sich die Vergleichsspannungen  $\sigma_v$  erheblich. Vor allem bei einer Erhöhung von  $E = 10 \text{ MN/m}^2$  auf  $E = 20 \text{ MN/m}^2$  ist die Spannungserhöhung deutlich ausgeprägt, während die Auswirkungen einer weiteren Erhöhung des E-Moduls auf  $E = 40 \text{ MN/m}^2$  deutlich geringer sind. Die Betrachtung der Spannungsverteilung im  $y$ - $z$ -Modell zeigt, dass dabei besonders der Elastizitätsmodul im Bereich oberhalb des Rohrquerschnitts maßgebend ist. Unter dem Einfluss beginnender Lastumlagerungen zu diesem Bereich hin entstehen auch Lastsetzungen im Boden über dem Rohr, die bei einem geringen E-Modul größer ausfallen. Die Lastsetzungen über dem Rohr verringern die Setzungsdifferenzen gegenüber den Bereichen seitlich der Rohrleitung, was zu einer Reduzierung der Lastumlagerungen und damit zu einer geringeren Gesamtbelastung des Rohrquerschnitts führt.

Eine höhere Belastung des Rohrquerschnitts führt zu einer stärker abfallenden Biegelinie der Leitungslängsachse und damit zu einer Verringerung der klaffenden Fuge. In der Folge verringert sich auch Länge  $l_M$  zwischen der Einspannstelle und dem ersten Nulldurchgang des Biegemomentenverlaufs entsprechend.



Tabelle 8-16: Übersicht zu Fall 12 (Variation des Elastizitätsmoduls)

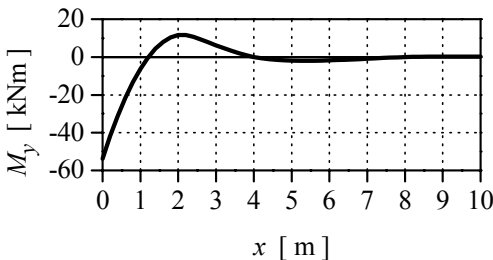
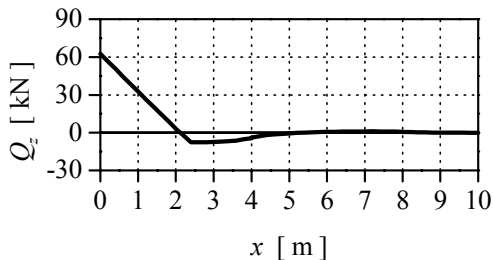
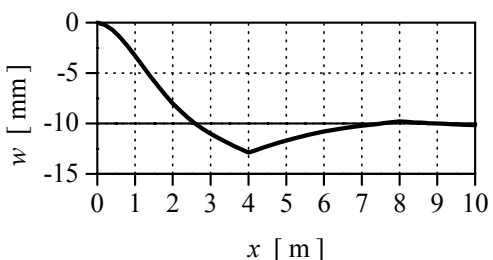
<b>Fallbeschreibung</b>			
Rohrleitung / Versorgungssparte:	DN 200 / GG / Gas		
Rohrverbindungen:	gelenkig in 4 m Abstand, erstmals bei $x = 4$ m		
Überdeckung:	$h = 1,0$ m (homogen)		
Verkehrslasten:	keine		
<b>Eingangsparameter</b>			
Leitung:	$d_a = 222$ mm, $s = 10$ mm, $g = 0,51$ kN/m, $E_{GG} = 150$ kN/mm <sup>2</sup> , $\sigma_m = 180$ N/mm <sup>2</sup>		
Boden:	$E = 10$ MN/m <sup>2</sup> , $\varphi = 25^\circ$ , $c = 20$ kN/m <sup>2</sup> , $\gamma = 20$ kN/m <sup>3</sup> , $\nu = 0,4$		
Oberbau:	keiner		
Setzung:	$a = 10$ mm		
Innendruck:	$p = 0$ bar		
<b>Ergebnisse: Erddruck auf den Rohrquerschnitt</b>			
$q_v = 0,13$ N/mm <sup>2</sup> , $q_h = 0,05$ N/mm <sup>2</sup>			
<b>Ergebnisse: Längsschnittgrößen und Biegelinie der Rohrleitung</b>			
			
	<p>Abwinklung am ersten Gelenk: <math>\zeta &lt; 0,1^\circ</math></p> <p>Schnittgrößen bei <math>x = 0</math> m: <math>M_y = -53,8</math> kNm <math>Q_z = 62,5</math> kN</p>		
<b>Ergebnisse: Vergleichsspannungen bei <math>x = 0</math> m</b>			
Scheitel außen:	$\sigma_x = 160$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = -8$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 160$ N/mm <sup>2</sup>
Scheitel innen:	$\sigma_x = 145$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 6$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 145$ N/mm <sup>2</sup>
Sohle außen:	$\sigma_x = -160$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = -6$ N/mm <sup>2</sup>	-
Sohle innen:	$\sigma_x = -145$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 7$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 7$ N/mm <sup>2</sup>

Tabelle 8-17: Übersicht zu Fall 13 (Variation des Elastizitätsmoduls)

<b>Fallbeschreibung</b>		
Rohrleitung / Versorgungssparte: DN 200 / GG / Gas		
Rohrverbindungen: gelenkig in 4 m Abstand, erstmals bei $x = 4$ m		
Überdeckung: $h = 1,0$ m (homogen)		
Verkehrslasten: keine		
<b>Eingangsparameter</b>		
Leitung: $d_a = 222$ mm, $s = 10$ mm, $g = 0,51$ kN/m, $E_{GG} = 150$ kN/mm <sup>2</sup> , $\sigma_m = 180$ N/mm <sup>2</sup>		
Boden: $E = 40$ MN/m <sup>2</sup> , $\varphi = 25^\circ$ , $c = 20$ kN/m <sup>2</sup> , $\gamma = 20$ kN/m <sup>3</sup> , $\nu = 0,4$		
Oberbau: keiner		
Setzung: $a = 10$ mm		
Innendruck: $p = 0$ bar		
<b>Ergebnisse: Erddruck auf den Rohrquerschnitt</b>		
$q_v = 0,20$ N/mm <sup>2</sup> , $q_h = 0,06$ N/mm <sup>2</sup>		
<b>Ergebnisse: Längsschnittgrößen und Biegelinie der Rohrleitung</b>		
	<p>Abwinklung am ersten Gelenk: <math>\zeta &lt; 0,1^\circ</math></p> <p>Schnittgrößen bei <math>x = 0</math> m: <math>M_y = -68,4</math> kNm <math>Q_z = 90,5</math> kN</p>	
<b>Ergebnisse: Vergleichsspannungen bei <math>x = 0</math> m</b>		
Scheitel außen: $\sigma_x = 203$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = -14$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 203$ N/mm <sup>2</sup>
Scheitel innen: $\sigma_x = 185$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 11$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 185$ N/mm <sup>2</sup>
Sohle außen: $\sigma_x = -203$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = -11$ N/mm <sup>2</sup>	-
Sohle innen: $\sigma_x = -185$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 12$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 12$ N/mm <sup>2</sup>

### 8.4.3 Querdehnzahl

Um den Einfluss der Querdehnzahl  $\nu$  zu betrachten, werden die Berechnungsergebnisse für Böden mit  $\nu = 0,35$  (Fall 14),  $\nu = 0,4$  (Fall 00) und  $\nu = 0,45$  (Fall 15) miteinander verglichen. Die Rechnungen sind für Fall 14 in Tabelle 8-18 und für Fall 15 in Tabelle 8-19 beschrieben. Bild 8-10 zeigt die errechneten Werte für die Vergleichsspannung  $\sigma_v$  im Rohrscheitel und für die Länge  $l_M$  zwischen der Einspannstelle und dem ersten Nulldurchgang des Biegemomentenverlaufs.

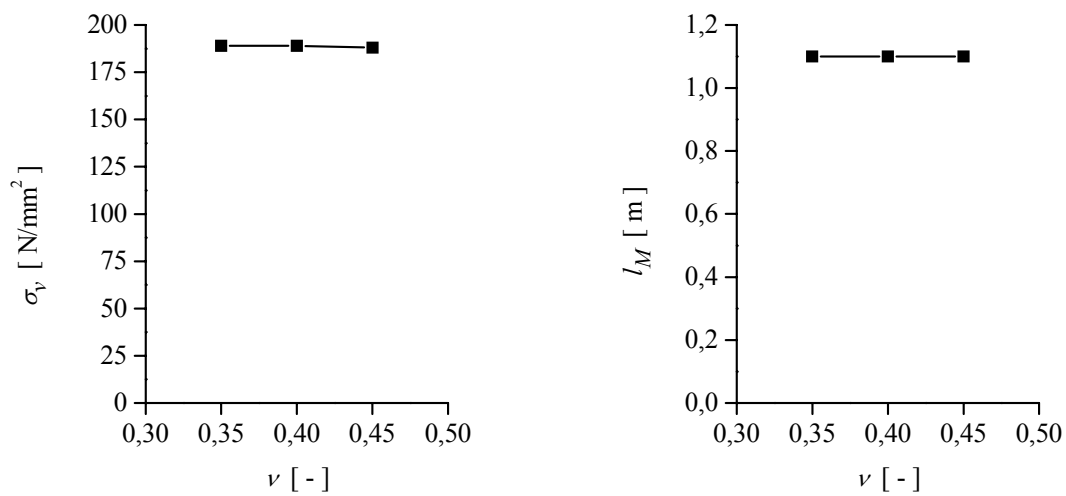


Bild 8-10: Einfluss der Querdehnzahl des Bodens

Es ist nahezu kein Einfluss der Querdehnzahl feststellbar.

Tabelle 8-18: Übersicht zu Fall 14 (Variation der Querdehnzahl)

<b>Fallbeschreibung</b>		
Rohrleitung / Versorgungssparte: DN 200 / GG / Gas		
Rohrverbindungen: gelenkig in 4 m Abstand, erstmals bei $x = 4$ m		
Überdeckung: $h = 1,0$ m (homogen)		
Verkehrslasten: keine		
<b>Eingangsparameter</b>		
Leitung: $d_a = 222$ mm, $s = 10$ mm, $g = 0,51$ kN/m, $E_{GG} = 150$ kN/mm <sup>2</sup> , $\sigma_m = 180$ N/mm <sup>2</sup>		
Boden: $E = 20$ MN/m <sup>2</sup> , $\varphi = 25^\circ$ , $c = 20$ kN/m <sup>2</sup> , $\gamma = 20$ kN/m <sup>3</sup> , $\nu = 0,35$		
Oberbau: keiner		
Setzung: $a = 10$ mm		
Innendruck: $p = 0$ bar		
<b>Ergebnisse: Erddruck auf den Rohrquerschnitt</b>		
$q_v = 0,17$ N/mm <sup>2</sup> , $q_h = 0,06$ N/mm <sup>2</sup>		
<b>Ergebnisse: Längsschnittgrößen und Biegelinie der Rohrleitung</b>		
	<p>Abwinklung am ersten Gelenk: <math>\zeta &lt; 0,1^\circ</math></p> <p>Schnittgrößen bei <math>x = 0</math> m: <math>M_y = -63,6</math> kNm <math>Q_z = 79,5</math> kN</p>	
<b>Ergebnisse: Vergleichsspannungen bei <math>x = 0</math> m</b>		
Scheitel außen: $\sigma_x = 189$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = -11$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 189$ N/mm <sup>2</sup>
Scheitel innen: $\sigma_x = 172$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 8$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 172$ N/mm <sup>2</sup>
Sohle außen: $\sigma_x = -189$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = -9$ N/mm <sup>2</sup>	-
Sohle innen: $\sigma_x = -172$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 10$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 10$ N/mm <sup>2</sup>

Tabelle 8-19: Übersicht zu Fall 15 (Variation der Querdehnzahl)

<b>Fallbeschreibung</b>			
Rohrleitung / Versorgungssparte:	DN 200 / GG / Gas		
Rohrverbindungen:	gelenkig in 4 m Abstand, erstmals bei $x = 4$ m		
Überdeckung:	$h = 1,0$ m (homogen)		
Verkehrslasten:	keine		
<b>Eingangsparameter</b>			
Leitung:	$d_a = 222$ mm, $s = 10$ mm, $g = 0,51$ kN/m, $E_{GG} = 150$ kN/mm <sup>2</sup> , $\sigma_m = 180$ N/mm <sup>2</sup>		
Boden:	$E = 20$ MN/m <sup>2</sup> , $\varphi = 25^\circ$ , $c = 20$ kN/m <sup>2</sup> , $\gamma = 20$ kN/m <sup>3</sup> , $\nu = 0,45$		
Oberbau:	keiner		
Setzung:	$a = 10$ mm		
Innendruck:	$p = 0$ bar		
<b>Ergebnisse: Erddruck auf den Rohrquerschnitt</b>			
$q_v = 0,17$ N/mm <sup>2</sup> , $q_h = 0,06$ N/mm <sup>2</sup>			
<b>Ergebnisse: Längsschnittgrößen und Biegelinie der Rohrleitung</b>			
	<p>Abwinklung am ersten Gelenk:  <math>\zeta &lt; 0,1^\circ</math></p> <p>Schnittgrößen bei <math>x = 0</math> m:  <math>M_y = -63,6</math> kNm  <math>Q_z = 79,6</math> kN</p>		
<b>Ergebnisse: Vergleichsspannungen bei <math>x = 0</math> m</b>			
Scheitel außen:	$\sigma_x = 189$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = -11$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 189$ N/mm <sup>2</sup>
Scheitel innen:	$\sigma_x = 172$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 8$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 172$ N/mm <sup>2</sup>
Sohle außen:	$\sigma_x = -189$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = -9$ N/mm <sup>2</sup>	-
Sohle innen:	$\sigma_x = -172$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 10$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 10$ N/mm <sup>2</sup>

## 8.5 Einfluss weiterer Umgebungs- und Betriebsbedingungen

### 8.5.1 Größe der Setzung

Um den Einfluss der Setzung  $a$  zu betrachten, werden die Berechnungsergebnisse für Absenkungen von  $a = 0,5$  cm (Fall 16),  $a = 1$  cm (Fall 00) und  $a = 2$  cm (Fall 17) miteinander verglichen. Die Rechnungen sind für Fall 16 in Tabelle 8-20 und für Fall 17 in Tabelle 8-21 beschrieben. Bild 8-11 zeigt die errechneten Werte für die Vergleichsspannung  $\sigma_v$  im Rohrscheitel und die Länge  $l_M$  zwischen der Einspannstelle und dem ersten Nulldurchgang des Biegemomentenverlaufs.

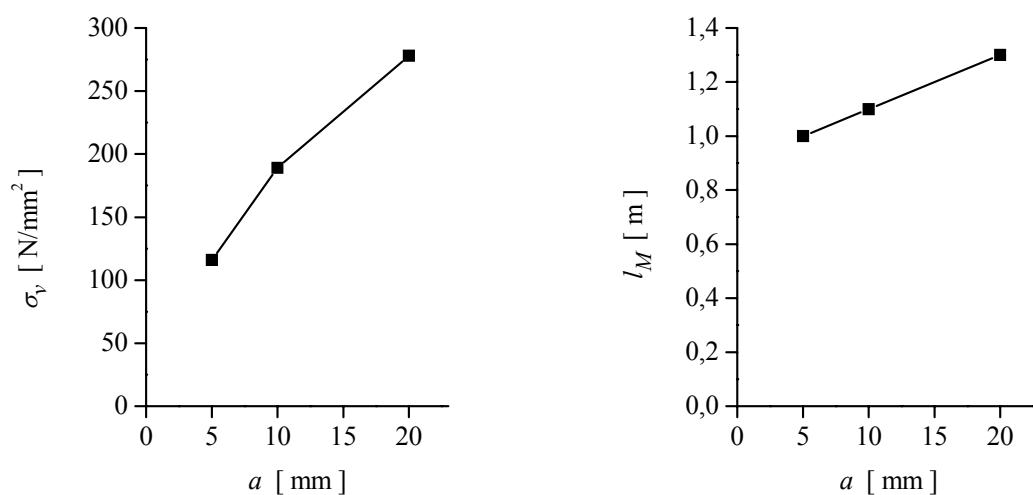


Bild 8-11: Einfluss der belastungswirksamen Setzung  $a$

Der maßgebliche Einfluss der Absenkung des Bodens als Belastungsursache auf die Größe der Leitungsbeanspruchung und auf die Ausdehnung des beanspruchten Bereichs ist deutlich erkennbar. Im betrachteten Wertebereich ergibt sich mit zunehmender Setzung  $a$  ein deutlicher Anstieg der Vergleichsspannung.

Die Länge der klaffenden Fuge erhöht sich mit zunehmender Setzung etwa linear. Sie wird von zwei gegenläufigen Effekten bestimmt. Während sich bei größer werdenden Setzungen die Belastung der Rohrleitung erhöht und die Biegelinie damit schneller abfällt, ist andererseits zum Erreichen der Bettung eine größere Vertikalverschiebung der Biegelinie erforderlich. Die Abschnittslänge  $l_M$  zwischen der Einspannstelle und dem ersten Nulldurchgang des Biegemomentenverlaufs verändert sich etwa im gleichen Verhältnis wie die Länge der klaffenden Fuge.

Tabelle 8-20: Übersicht zu Fall 16 (Variation der belastungswirksamen Setzung)

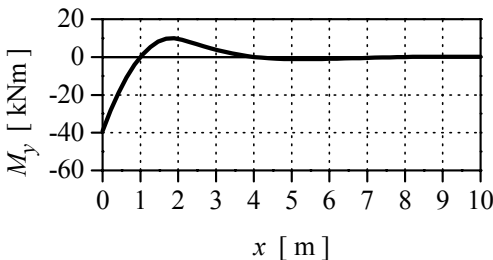
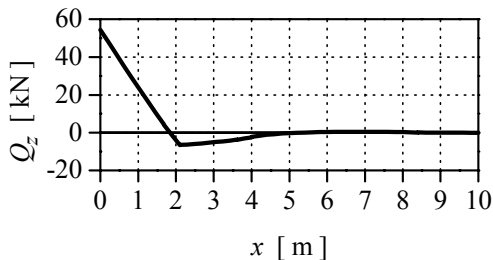
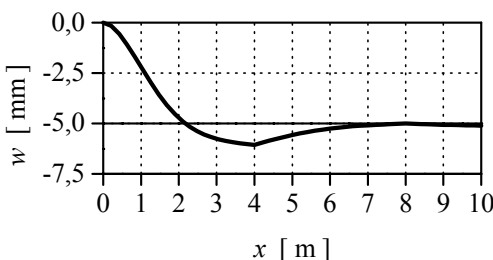
<b>Fallbeschreibung</b>		
Rohrleitung / Versorgungssparte:	DN 200 / GG / Gas	
Rohrverbindungen:	gelenkig in 4 m Abstand, erstmals bei $x = 4$ m	
Überdeckung:	$h = 1,0$ m (homogen)	
Verkehrslasten:	keine	
<b>Eingangsparameter</b>		
Leitung:	$d_a = 222$ mm, $s = 10$ mm, $g = 0,51$ kN/m, $E_{GG} = 150$ kN/mm <sup>2</sup> , $\sigma_m = 180$ N/mm <sup>2</sup>	
Boden:	$E = 20$ MN/m <sup>2</sup> , $\varphi = 25^\circ$ , $c = 20$ kN/m <sup>2</sup> , $\gamma = 20$ kN/m <sup>3</sup> , $\nu = 0,40$	
Oberbau:	keiner	
Setzung:	<b><math>a = 5</math> mm</b>	
Innendruck:	$p = 0$ bar	
<b>Ergebnisse: Erddruck auf den Rohrquerschnitt</b>		
$q_v = 0,13$ N/mm <sup>2</sup> , $q_h = 0,04$ N/mm <sup>2</sup>		
<b>Ergebnisse: Längsschnittgrößen und Biegelinie der Rohrleitung</b>		
		
	<p>Abwinklung am ersten Gelenk: <math>\zeta &lt; 0,1^\circ</math></p> <p>Schnittgrößen bei <math>x = 0</math> m: <math>M_y = -39,1</math> kNm <math>Q_z = 54,4</math> kN</p>	
<b>Ergebnisse: Vergleichsspannungen bei <math>x = 0</math> m</b>		
Scheitel außen:	$\sigma_x = 116$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = -9$ N/mm <sup>2</sup> $\sigma_v = 116$ N/mm <sup>2</sup>
Scheitel innen:	$\sigma_x = 106$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 7$ N/mm <sup>2</sup> $\sigma_v = 106$ N/mm <sup>2</sup>
Sohle außen:	$\sigma_x = -116$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = -7$ N/mm <sup>2</sup> -
Sohle innen:	$\sigma_x = -106$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 8$ N/mm <sup>2</sup> $\sigma_v = 8$ N/mm <sup>2</sup>

Tabelle 8-21: Übersicht zu Fall 17 (Variation der belastungswirksamen Setzung)

<b>Fallbeschreibung</b>		
Rohrleitung / Versorgungssparte: DN 200 / GG / Gas		
Rohrverbindungen: gelenkig in 4 m Abstand, erstmals bei $x = 4$ m		
Überdeckung: $h = 1,0$ m (homogen)		
Verkehrslasten: keine		
<b>Eingangsparameter</b>		
Leitung: $d_a = 222$ mm, $s = 10$ mm, $g = 0,51$ kN/m, $E_{GG} = 150$ kN/mm <sup>2</sup> , $\sigma_m = 180$ N/mm <sup>2</sup>		
Boden: $E = 20$ MN/m <sup>2</sup> , $\varphi = 25^\circ$ , $c = 20$ kN/m <sup>2</sup> , $\gamma = 20$ kN/m <sup>3</sup> , $\nu = 0,40$		
Oberbau: keiner		
Setzung: <b><math>a = 20</math> mm</b>		
Innendruck: $p = 0$ bar		
<b>Ergebnisse: Erddruck auf den Rohrquerschnitt</b>		
$q_v = 0,19$ N/mm <sup>2</sup> , $q_h = 0,06$ N/mm <sup>2</sup>		
<b>Ergebnisse: Längsschnittgrößen und Biegelinie der Rohrleitung</b>		
	<p>Abwinklung am ersten Gelenk: <math>\zeta = 0,6^\circ</math></p> <p>Schnittgrößen bei <math>x = 0</math> m: <math>M_y = -93,8</math> kNm <math>Q_z = 101</math> kN</p>	
<b>Ergebnisse: Vergleichsspannungen bei <math>x = 0</math> m</b>		
Scheitel außen: $\sigma_x = 278$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = -13$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 278$ N/mm <sup>2</sup>
Scheitel innen: $\sigma_x = 253$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 10$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 253$ N/mm <sup>2</sup>
Sohle außen: $\sigma_x = -278$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = -10$ N/mm <sup>2</sup>	-
Sohle innen: $\sigma_x = -253$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 11$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 11$ N/mm <sup>2</sup>



### 8.5.2 Überdeckungshöhe

Um den Einfluss der Überdeckungshöhe  $h$  zu betrachten, werden die Berechnungsergebnisse für Überdeckungen von  $h = 0,5$  m (Fall 18),  $h = 1,0$  m (Fall 00) und  $h = 2,0$  m (Fall 19) miteinander verglichen. Die Rechnungen sind für Fall 18 in Tabelle 8-22 und für Fall 19 in Tabelle 8-23 beschrieben. Bild 8-12 zeigt die errechneten Werte für die Vergleichsspannung  $\sigma_v$  im Rohrscheitel und die Länge  $l_M$  zwischen der Einspannstelle und dem ersten Nulldurchgang des Biegemomentenverlaufs.

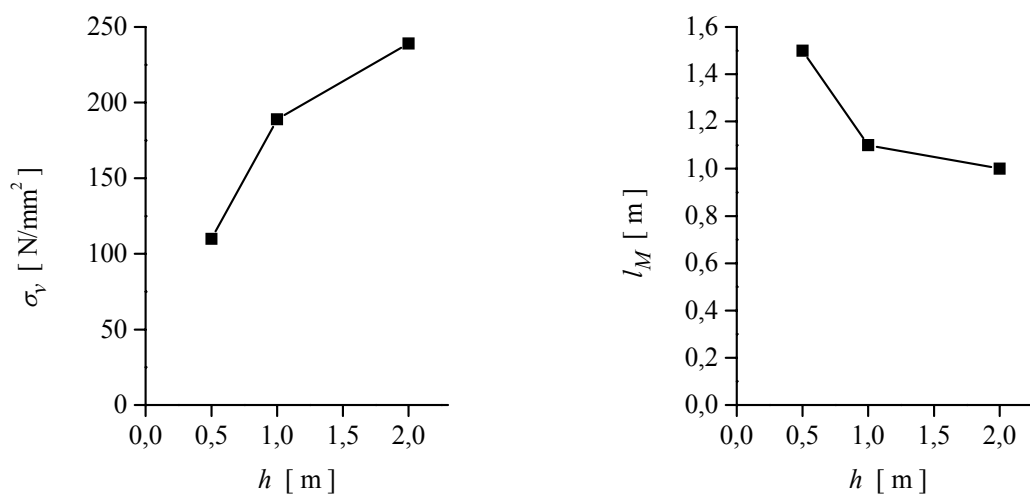


Bild 8-12: Einfluss der Überdeckungshöhe  $h$

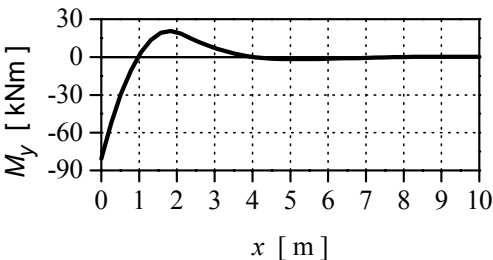
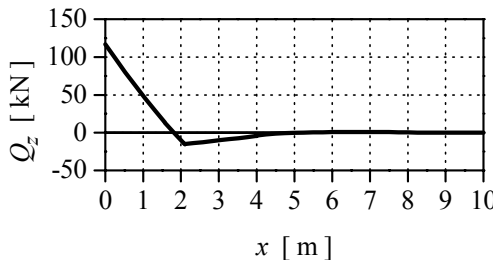
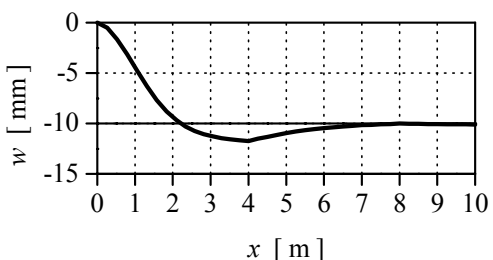
Mit zunehmender Überdeckungshöhe vergrößern sich die Vergleichsspannungen  $\sigma_v$  deutlich. Ursachen hierfür sind zum einen die Erhöhung des Gesamtgewichts des direkt über der Leitung anstehenden Bodenkörpers sowie auch die Vergrößerung des Bereichs, in dem Lastumlagerungen von der Leitungsumgebung zum Boden über der Leitung hin möglich sind.

Eine höhere Belastung des Rohrquerschnitts führt zu einer stärker abfallenden Biegelinie der Leitungslängsachse und damit zu einer Verringerung der klaffenden Fuge. In der Folge verringert sich auch Länge  $l_M$  zwischen der Einspannstelle und dem ersten Nulldurchgang des Biegemomentenverlaufs entsprechend.

Tabelle 8-22: Übersicht zu Fall 18 (Variation der Überdeckungshöhe)

<b>Fallbeschreibung</b>		
Rohrleitung / Versorgungssparte: DN 200 / GG / Gas		
Rohrverbindungen: gelenkig in 4 m Abstand, erstmals bei $x = 4$ m		
Überdeckung: <b><math>h = 0,5</math> m</b> (homogen)		
Verkehrslasten: keine		
<b>Eingangsparameter</b>		
Leitung: $d_a = 222$ mm, $s = 10$ mm, $g = 0,51$ kN/m, $E_{GG} = 150$ kN/mm <sup>2</sup> , $\sigma_m = 180$ N/mm <sup>2</sup>		
Boden: $E = 20$ MN/m <sup>2</sup> , $\varphi = 25^\circ$ , $c = 20$ kN/m <sup>2</sup> , $\gamma = 20$ kN/m <sup>3</sup> , $\nu = 0,4$		
Oberbau: keiner		
Setzung: $a = 10$ mm		
Innendruck: $p = 0$ bar		
<b>Ergebnisse: Erddruck auf den Rohrquerschnitt</b>		
$q_v = 0,06$ N/mm <sup>2</sup> , $q_h = 0,05$ N/mm <sup>2</sup>		
<b>Ergebnisse: Längsschnittgrößen und Biegelinie der Rohrleitung</b>		
	<p>Abwinklung am ersten Gelenk: <math>\zeta = 0,3^\circ</math></p> <p>Schnittgrößen bei <math>x = 0</math> m: <math>M_y = -37,1</math> kNm <math>Q_z = 35,5</math> kN</p>	
<b>Ergebnisse: Vergleichsspannungen bei <math>x = 0</math> m</b>		
Scheitel außen: $\sigma_x = 110$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = -1$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 110$ N/mm <sup>2</sup>
Scheitel innen: $\sigma_x = 100$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 0$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 100$ N/mm <sup>2</sup>
Sohle außen: $\sigma_x = -110$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = -1$ N/mm <sup>2</sup>	-
Sohle innen: $\sigma_x = -100$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 2$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 2$ N/mm <sup>2</sup>

Tabelle 8-23: Übersicht zu Fall 19 (Variation der Überdeckungshöhe)

<b>Fallbeschreibung</b>		
Rohrleitung / Versorgungssparte:	DN 200 / GG / Gas	
Rohrverbindungen:	gelenkig in 4 m Abstand, erstmals bei $x = 4$ m	
Überdeckung:	$h = 2,0$ m (homogen)	
Verkehrslasten:	keine	
<b>Eingangsparameter</b>		
Leitung:	$d_a = 222$ mm, $s = 10$ mm, $g = 0,51$ kN/m, $E_{GG} = 150$ kN/mm <sup>2</sup> , $\sigma_m = 180$ N/mm <sup>2</sup>	
Boden:	$E = 20$ MN/m <sup>2</sup> , $\varphi = 25^\circ$ , $c = 20$ kN/m <sup>2</sup> , $\gamma = 20$ kN/m <sup>3</sup> , $\nu = 0,4$	
Oberbau:	keiner	
Setzung:	$a = 10$ mm	
Innendruck:	$p = 0$ bar	
<b>Ergebnisse: Erddruck auf den Rohrquerschnitt</b>		
$q_v = 0,28$ N/mm <sup>2</sup> , $q_h = 0,09$ N/mm <sup>2</sup>		
<b>Ergebnisse: Längsschnittgrößen und Biegelinie der Rohrleitung</b>		
		
	Abwinklung am ersten Gelenk: $\zeta < 0,1^\circ$ Schnittgrößen bei $x = 0$ m: $M_y = -80,6$ kNm $Q_z = 117$ kN	
<b>Ergebnisse: Vergleichsspannungen bei <math>x = 0</math> m</b>		
Scheitel außen:	$\sigma_x = 239$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = -18$ N/mm <sup>2</sup> $\sigma_v = 239$ N/mm <sup>2</sup>
Scheitel innen:	$\sigma_x = 218$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 15$ N/mm <sup>2</sup> $\sigma_v = 218$ N/mm <sup>2</sup>
Sohle außen:	$\sigma_x = -239$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = -15$ N/mm <sup>2</sup> -
Sohle innen:	$\sigma_x = -218$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 16$ N/mm <sup>2</sup> $\sigma_v = 16$ N/mm <sup>2</sup>

### 8.5.3 Versorgungssparte

Um den Einfluss der Versorgungssparte beispielhaft zu betrachten, werden die Berechnungsergebnisse für die Gasversorgungsleitung in Fall 00 mit den Berechnungsergebnissen für eine wassergefüllte Leitung mit den selben übrigen Randbedingungen (Fall 20) miteinander verglichen. Die Wasserversorgungsleitung wird zusätzlich durch Innendruck beansprucht und weist infolge der Wasserfüllung ein höheres längenbezogenes Gewicht  $g$  auf.

Die Rechnung für Fall 20 ist in Tabelle 8-24 beschrieben. Bild 8-13 zeigt die errechneten Werte für die Vergleichsspannung  $\sigma_v$  im Rohrscheitel und die Länge  $l_M$  zwischen der Einspannstelle und dem ersten Nulldurchgang des Biegemomentenverlaufs.

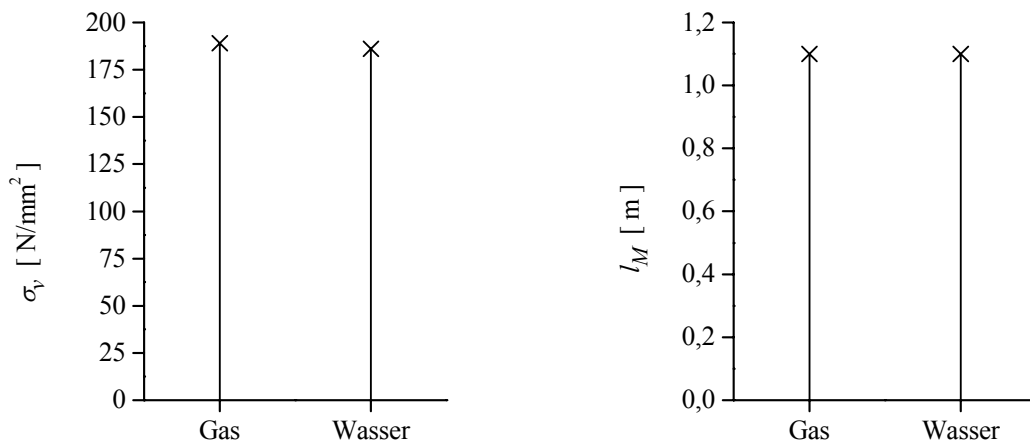


Bild 8-13: Einfluss der Versorgungssparte

Der Einfluss der Versorgungssparte ist gering. Bei gleicher Belastung der Rohrscheitelebene fällt die Biegelinie der wassergefüllten Rohrleitung etwas schneller ab, die klaffende Fuge und die Länge  $l_M$  zwischen der Einspannstelle und dem ersten Nulldurchgang des Biegemomentenverlaufs verringern sich entsprechend. Da sich die Entfernung zwischen Einspannstelle und stützender Bettungsreaktionskraft verringert, reduziert sich auch die Vergleichsspannung an der Einspannstelle geringfügig.

In Folge des zusätzlichen Innendrucks in Fall 20 verändern sich die Umfangsspannungen gegenüber Fall 00 deutlich. Sie bleiben aber gegenüber den Längsspannungen gering und haben bei Graugussleitungen wegen der Annahmen der Normalspannungshypothese keinen Einfluss auf die maximale Vergleichsspannung.

Tabelle 8-24: Übersicht zu Fall 20 (Variation der Versorgungssparte)

<b>Fallbeschreibung</b>		
Rohrleitung / Versorgungssparte: DN 200 / GG / Wasser		
Rohrverbindungen: gelenkig in 4 m Abstand, erstmals bei $x = 4$ m		
Überdeckung: $h = 1,0$ m (homogen)		
Verkehrslasten: keine		
<b>Eingangsparameter</b>		
Leitung: $d_a = 222$ mm, $s = 10$ mm, $g = 0,51$ kN/m, $E_{GG} = 150$ kN/mm <sup>2</sup> , $\sigma_m = 180$ N/mm <sup>2</sup>		
Boden: $E = 20$ MN/m <sup>2</sup> , $\varphi = 25^\circ$ , $c = 20$ kN/m <sup>2</sup> , $\gamma = 20$ kN/m <sup>3</sup> , $\nu = 0,40$		
Oberbau: keiner		
Setzung: $a = 10$ mm		
Innendruck: $p = 10$ bar		
<b>Ergebnisse: Erddruck auf den Rohrquerschnitt</b>		
$q_v = 0,17$ N/mm <sup>2</sup> , $q_h = 0,06$ N/mm <sup>2</sup>		
<b>Ergebnisse: Längsschnittgrößen und Biegelinie der Rohrleitung</b>		
	<p>Abwinklung am ersten Gelenk: <math>\zeta &lt; 0,1^\circ</math></p> <p>Schnittgrößen bei <math>x = 0</math> m: <math>M_y = -62,6</math> kNm <math>Q_z = 78,8</math> kN</p>	
<b>Ergebnisse: Vergleichsspannungen bei <math>x = 0</math> m</b>		
Scheitel außen: $\sigma_x = 186$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = -1$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 186$ N/mm <sup>2</sup>
Scheitel innen: $\sigma_x = 169$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 18$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 169$ N/mm <sup>2</sup>
Sohle außen: $\sigma_x = -186$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 2$ N/mm <sup>2</sup>	-
Sohle innen: $\sigma_x = -169$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 20$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 20$ N/mm <sup>2</sup>

### 8.5.4 Lastumlagerungen

Um den Einfluss von Lastumlagerungen beispielhaft zu betrachten, werden die Berechnungsergebnisse von Fall 21, bei dem keine Lastumlagerungen angesetzt werden, mit den Ergebnissen von Fall 00 verglichen. Alle übrigen Randbedingungen sind in beiden Fällen gleich. Die Rechnung für Fall 21 ist in Tabelle 8-25 beschrieben. Bild 8-14 zeigt die errechneten Werte für die Vergleichsspannung  $\sigma_v$  im Rohrscheitel und die Länge  $l_M$  zwischen der Einspannstelle und dem ersten Nulldurchgang des Biegemomentenverlaufs.

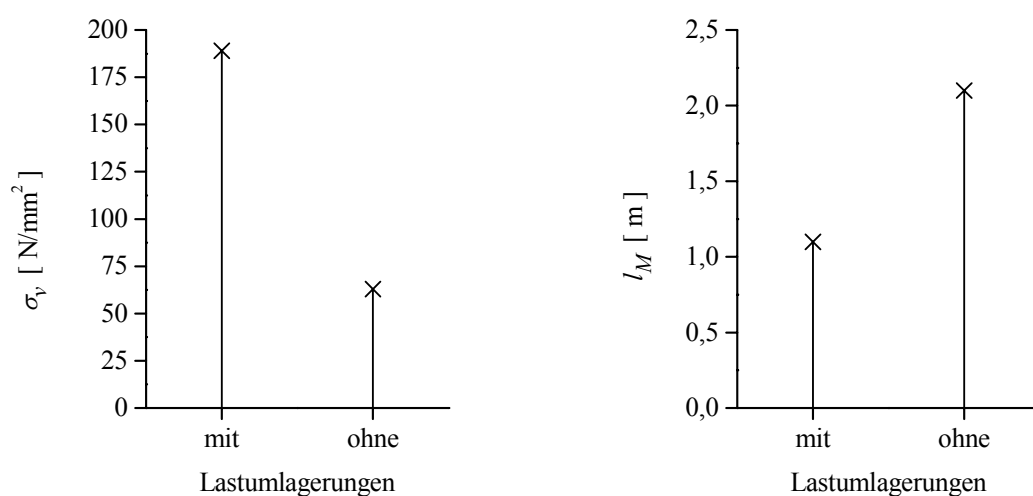


Bild 8-14: Einfluss der Lastumlagerungen

Wie zu erkennen ist, haben die Lastumlagerungen einen wesentlichen Einfluss sowohl auf die resultierenden Vergleichsspannungen als auch auf die Länge der klaffenden Fuge. Ursache hierfür ist, dass in der Nähe der Einspannstelle die Auflast auf den Rohrquerschnitt infolge der Lastumlagerungen gegenüber der reinen Belastung durch das Gewicht des Bodenkörpers über dem Rohr um ein Vielfaches erhöht wird.

Die bei Fall 00 gegenüber Fall 21 weit höhere Belastung des Rohrquerschnitts führt zu einer stärker abfallenden Biegelinie der Leitungslängsachse und damit zu einer Verringerung der klaffenden Fuge sowie der Länge  $l_M$  zwischen der Einspannstelle und dem ersten Nulldurchgang des Biegemomentenverlaufs.

Tabelle 8-25: Übersicht zu Fall 21 (Ansatz ohne Lastumlagerungen)

<b>Fallbeschreibung</b>		
Rohrleitung / Versorgungssparte: DN 200 / GG / Gas		
Rohrverbindungen: gelenkig in 4 m Abstand, erstmals bei $x = 4$ m		
Überdeckung: $h = 1,0$ m (homogen)		
Weitere Merkmale: <b>keine Lastumlagerungen</b>		
<b>Eingangsparameter</b>		
Leitung: $d_a = 222$ mm, $s = 10$ mm, $g = 0,51$ kN/m, $E_{GG} = 150$ kN/mm <sup>2</sup> , $\sigma_m = 180$ N/mm <sup>2</sup>		
Boden: $E = 20$ MN/m <sup>2</sup> , $\varphi = 25^\circ$ , $c = 20$ kN/m <sup>2</sup> , $\gamma = 20$ kN/m <sup>3</sup> , $\nu = 0,40$		
Oberbau: keiner		
Setzung: $a = 10$ mm		
Innendruck: $p = 0$ bar		
<b>Ergebnisse: Erddruck auf den Rohrquerschnitt</b>		
$q_v = 0,02$ N/mm <sup>2</sup> , $q_h = 0,01$ N/mm <sup>2</sup>		
<b>Ergebnisse: Längsschnittgrößen und Biegelinie der Rohrleitung</b>		
	<p>Abwinklung am ersten Gelenk: <math>\zeta = 0,3^\circ</math></p> <p>Schnittgrößen bei <math>x = 0</math> m: <math>M_y = -21,4</math> kNm <math>Q_z = 15,7</math> kN</p>	
<b>Ergebnisse: Vergleichsspannungen bei <math>x = 0</math> m</b>		
Scheitel außen: $\sigma_x = 63$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = -1$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 63$ N/mm <sup>2</sup>
Scheitel innen: $\sigma_x = 58$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 1$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 58$ N/mm <sup>2</sup>
Sohle außen: $\sigma_x = -63$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = -1$ N/mm <sup>2</sup>	-
Sohle innen: $\sigma_x = -58$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 1$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 1$ N/mm <sup>2</sup>

### 8.5.5 Verkehrswege und Verkehrslasten

Der Einfluss von Fahrzeuglasten wird im Folgenden für Graugussleitungen der Nennweiten DN 200 und DN 400 betrachtet. Hierzu wird in den FE-Modellen bei einer Überdeckung von 1 m zunächst ein Verkehrswege-Oberbau mit  $h_S = 0,5$  m Mächtigkeit eingefügt. Für den anstehenden Boden werden die Parameter aus Fall 09 verwendet, da bei diesem Fall ein für das Planum unterhalb des Oberbaus nach (RStO 2001) ausreichend großer Elastizitätsmodul angesetzt wurde. Die zugrunde gelegte Setzung infolge Austrocknung beträgt jeweils 5 mm.

Als Vergleichsgrundlage werden die Berechnungen zunächst ohne Fahrzeuglasten durchgeführt. Fall 22 in Tabelle 8-26 beschreibt die Berechnung für eine Leitung DN 200, Fall 24 in Tabelle 8-28 die Berechnung einer Leitung DN 400. In den Fällen 23 (Tabelle 8-27, Leitung DN 200) und 25 (Tabelle 8-29, Leitung DN 400) wird jeweils zusätzlich die Belastung durch einen LKW SLW 30 aufgebracht. Bild 4-2 zeigt das verwendete Längsschnitt-Modell.

Bild 8-15 zeigt die errechneten Werte für die Zugspannung  $\sigma_x$  im Rohrscheitel und für die Länge  $l_M$  zwischen der Einspannstelle und dem ersten Nulldurchgang des Biegemomentenverlaufs für eine Leitung DN 200. In Bild 8-16 sind dieselben Werte für eine Leitung DN 400 dargestellt.

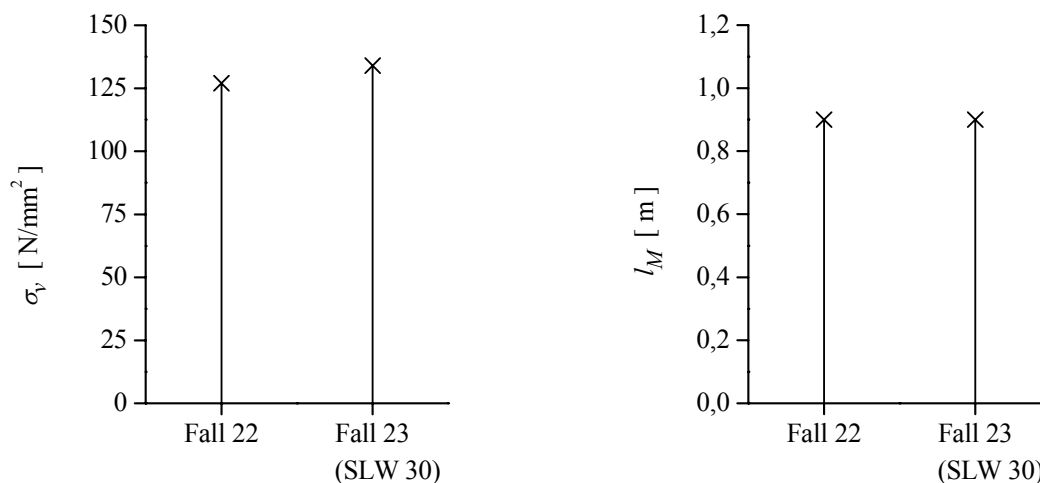


Bild 8-15: Einfluss von Verkehrslasten bei einer Leitung DN 200



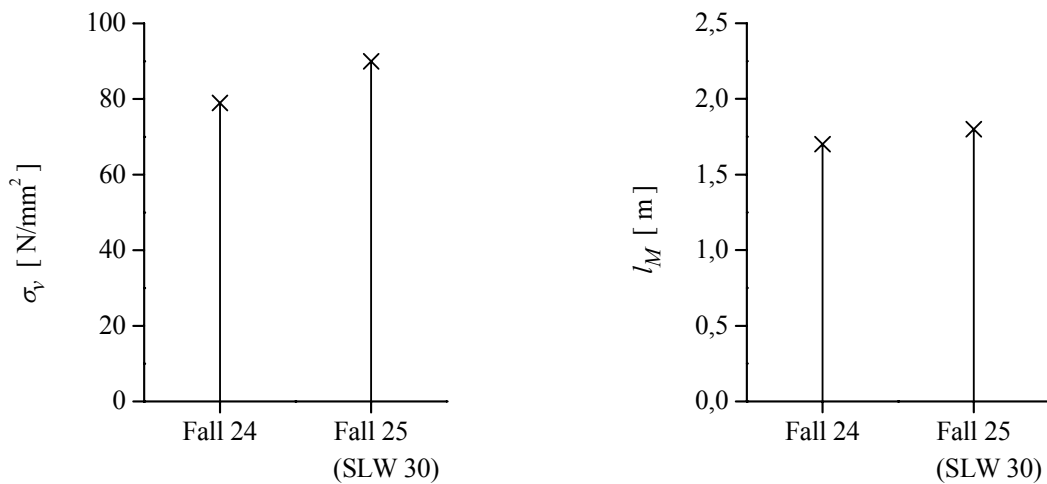


Bild 8-16: Einfluss von Verkehrslasten bei einer Leitung DN 400

Die Belastung durch einen LKW SLW 30 führt in den Fällen 23 und 25 zu erheblich erhöhten Vertikallasten über dem Rohrscheitel und in der Folge zu einer wesentlichen Vergrößerung der Umfangsspannungen gegenüber den Vergleichsrechnungen ohne Fahrzeuglasten. Bei der Leitung DN 200 erhöhen sich die Umfangsspannungen durch die zusätzlichen Fahrzeuglasten um etwa die Hälfte, bei der Leitung DN 400 ergibt sich näherungsweise eine Verdoppelung der Umfangsspannungen.

Die Längsspannungen erhöhen sich bei zusätzlich aufgebrachtene Fahrzeuglasten merklich, aber weitaus geringer als die Umfangsspannungen. Der relativ begrenzte Einfluss des SLW 30 auf die Längsspannungen ist darauf zurückzuführen, dass die an der Geländeoberfläche wirkenden Radlasten mit  $250 \text{ kN/m}^2$  zwar hoch sind, aber nur über eine Länge von jeweils 0,2 m (pro Fahrzeugachse im Längsschnitt-Modell) wirken. Dabei befindet sich nur eine Fahrzeugachse über dem ungebetteten Bereich der Leitung (klaffende Fuge). Demgegenüber erstreckt sich die über der Rohrleitung aufgebrachte Zusatzlast zur Berücksichtigung von Lastumlagerungen mit  $150 \text{ kN/m}^2$  über die gesamte Länge der klaffenden Fuge. Der auch ohne Fahrzeuglasten vorhandene Einfluss von Lastumlagerungen überwiegt im Hinblick auf die Längsbiegebelastung der Rohrleitung deshalb deutlich.

Da die Umfangsspannungen deutlich geringer als die Längsspannungen bleiben, wird die Vergleichsspannung bei Graugussleitungen nur von den Längsspannungen beeinflusst.

Die Länge der klaffenden Fuge und damit auch die Länge  $l_M$  zwischen der Einspannstelle und dem ersten Nulldurchgang des Biegemomentenverlaufs ändert sich nur geringfügig.

Tabelle 8-26: Übersicht zu Fall 22 (Leitung DN 200 im Straßenraum ohne Verkehrslast)

<b>Fallbeschreibung</b>		
Rohrleitung / Versorgungssparte: DN 200 / GG / Gas		
Rohrverbindungen: gelenkig in 4 m Abstand, erstmals bei $x = 4$ m		
Überdeckung: $h = 1,0$ m, davon 0,5 m Oberbau		
Verkehrslasten: keine		
<b>Eingangsparameter</b>		
Leitung: $d_a = 222$ mm, $s = 10$ mm, $g = 0,51$ kN/m, $E_{GG} = 150$ kN/mm <sup>2</sup> , $\sigma_m = 180$ N/mm <sup>2</sup>		
Boden: $E = 40$ MN/m <sup>2</sup> , $\varphi = 25^\circ$ , $c = 20$ kN/m <sup>2</sup> , $\gamma = 20$ kN/m <sup>3</sup> , $\nu = 0,4$		
Oberbau: $E = 120$ MN/m <sup>2</sup> , $\varphi = 40^\circ$ , $c = 1$ kN/m <sup>2</sup> , $\gamma = 20$ kN/m <sup>3</sup> , $\nu = 0,3$		
Setzung: $a = 5$ mm		
Innendruck: $p = 0$ bar		
<b>Ergebnisse: Erddruck auf den Rohrquerschnitt</b>		
$q_v = 0,15$ N/mm <sup>2</sup> , $q_h = 0,05$ N/mm <sup>2</sup>		
<b>Ergebnisse: Längsschnittgrößen und Biegelinie der Rohrleitung</b>		
	Abwinklung am ersten Gelenk: $\zeta = 0,3^\circ$ Schnittgrößen bei $x = 0$ m: $M_y = -39,0$ kNm $Q_z = 58,3$ kN	
<b>Ergebnisse: Vergleichsspannungen bei <math>x = 0</math> m</b>		
Scheitel außen: $\sigma_x = 127$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = -10$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 127$ N/mm <sup>2</sup>
Scheitel innen: $\sigma_x = 115$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 8$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 125$ N/mm <sup>2</sup>
Sohle außen: $\sigma_x = -127$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = -8$ N/mm <sup>2</sup>	-
Sohle innen: $\sigma_x = -115$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 9$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 9$ N/mm <sup>2</sup>

Tabelle 8-27: Übersicht zu Fall 23 (Leitung DN 200 im Straßenraum mit Verkehrslast)

<b>Fallbeschreibung</b>			
Rohrleitung / Versorgungssparte:	DN 200 / GG / Gas		
Rohrverbindungen:	gelenkig in 4 m Abstand, erstmals bei $x = 4$ m		
Überdeckung:	$h = 1,0$ m, davon 0,5 m Oberbau		
Verkehrslasten:	<b>SLW 30</b>		
<b>Eingangsparameter</b>			
Leitung:	$d_a = 222$ mm, $s = 10$ mm, $g = 0,51$ kN/m, $E_{GG} = 150$ kN/mm <sup>2</sup> , $\sigma_m = 180$ N/mm <sup>2</sup>		
Boden:	$E = 40$ MN/m <sup>2</sup> , $\varphi = 25^\circ$ , $c = 20$ kN/m <sup>2</sup> , $\gamma = 20$ kN/m <sup>3</sup> , $\nu = 0,4$		
Oberbau:	$E = 120$ MN/m <sup>2</sup> , $\varphi = 40^\circ$ , $c = 1$ kN/m <sup>2</sup> , $\gamma = 20$ kN/m <sup>3</sup> , $\nu = 0,3$		
Setzung:	$a = 5$ mm		
Innendruck:	$p = 0$ bar		
<b>Ergebnisse: Erddruck auf den Rohrquerschnitt</b>			
$q_v = 0,20$ N/mm <sup>2</sup> , $q_h = 0,05$ N/mm <sup>2</sup>			
<b>Ergebnisse: Längsschnittgrößen und Biegelinie der Rohrleitung</b>			
	Abwinklung am ersten Gelenk: $\zeta < 0,1^\circ$ Schnittgrößen bei $x = 0$ m: $M_y = -45,3$ kNm $Q_z = 68,1$ kN		
<b>Ergebnisse: Vergleichsspannungen bei <math>x = 0</math> m</b>			
Scheitel außen:	$\sigma_x = 134$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = -15$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 134$ N/mm <sup>2</sup>
Scheitel innen:	$\sigma_x = 122$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 12$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 122$ N/mm <sup>2</sup>
Sohle außen:	$\sigma_x = -134$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = -11$ N/mm <sup>2</sup>	-
Sohle innen:	$\sigma_x = -122$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 13$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 13$ N/mm <sup>2</sup>

Tabelle 8-28: Übersicht zu Fall 24 (Leitung DN 400 im Straßenraum ohne Verkehrslast)

<b>Fallbeschreibung</b>			
Rohrleitung / Versorgungssparte: DN 400 / GG / Gas			
Rohrverbindungen:	gelenkig in 4 m Abstand, erstmals bei $x = 4$ m		
Überdeckung:	$h = 1,0$ m, davon 0,5 m Oberbau		
Verkehrslasten:	keine		
<b>Eingangsparameter</b>			
Leitung:	$d_a = 429$ mm, $s = 13,0$ mm, $g = 1,30$ kN/m, $E_{GG} = 150$ kN/mm <sup>2</sup> , $\sigma_m = 180$ N/mm <sup>2</sup>		
Boden:	$E = 40$ MN/m <sup>2</sup> , $\varphi = 25^\circ$ , $c = 20$ kN/m <sup>2</sup> , $\gamma = 20$ kN/m <sup>3</sup> , $\nu = 0,4$		
Oberbau:	$E = 120$ MN/m <sup>2</sup> , $\varphi = 40^\circ$ , $c = 1$ kN/m <sup>2</sup> , $\gamma = 20$ kN/m <sup>3</sup> , $\nu = 0,3$		
Setzung:	$a = 5$ mm		
Innendruck:	$p = 0$ bar		
<b>Ergebnisse: Erddruck auf den Rohrquerschnitt</b>			
$q_v = 0,09$ N/mm <sup>2</sup> , $q_h = 0,05$ N/mm <sup>2</sup>			
<b>Ergebnisse: Längsschnittgrößen und Biegelinie der Rohrleitung</b>			
	<p>Abwinklung am ersten Gelenk: <math>\zeta &lt; 0,1^\circ</math></p> <p>Schnittgrößen bei <math>x = 0</math> m: <math>M_y = -135</math> kNm <math>Q_z = 111</math> kN</p>		
<b>Ergebnisse: Vergleichsspannungen bei <math>x = 0</math> m</b>			
Scheitel außen:	$\sigma_x = 79$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = -8$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 79$ N/mm <sup>2</sup>
Scheitel innen:	$\sigma_x = 74$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 6$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 74$ N/mm <sup>2</sup>
Sohle außen:	$\sigma_x = -79$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = -8$ N/mm <sup>2</sup>	-
Sohle innen:	$\sigma_x = -74$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 9$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 9$ N/mm <sup>2</sup>

Tabelle 8-29: Übersicht zu Fall 25 (Leitung DN 400 im Straßenraum mit Verkehrslast)

<b>Fallbeschreibung</b>			
Rohrleitung / Versorgungssparte:	DN 400 / GG / Gas		
Rohrverbindungen:	gelenkig in 4 m Abstand, erstmals bei $x = 4$ m		
Überdeckung:	$h = 1,0$ m, davon 0,5 m Oberbau		
Verkehrslasten:	<b>SLW 30</b>		
<b>Eingangsparameter</b>			
Leitung:	$d_a = 429$ mm, $s = 13,0$ mm, $g = 1,30$ kN/m, $E_{GG} = 150$ kN/mm <sup>2</sup> , $\sigma_m = 180$ N/mm <sup>2</sup>		
Boden:	$E = 40$ MN/m <sup>2</sup> , $\varphi = 25^\circ$ , $c = 20$ kN/m <sup>2</sup> , $\gamma = 20$ kN/m <sup>3</sup> , $\nu = 0,4$		
Oberbau:	$E = 120$ MN/m <sup>2</sup> , $\varphi = 40^\circ$ , $c = 1$ kN/m <sup>2</sup> , $\gamma = 20$ kN/m <sup>3</sup> , $\nu = 0,3$		
Setzung:	$a = 5$ mm		
Innendruck:	$p = 0$ bar		
<b>Ergebnisse: Erddruck auf den Rohrquerschnitt</b>			
$q_v = 0,13$ N/mm <sup>2</sup> , $q_h = 0,05$ N/mm <sup>2</sup>			
<b>Ergebnisse: Längsschnittgrößen und Biegelinie der Rohrleitung</b>			
	<p>Abwinklung am ersten Gelenk: <math>\zeta = 0,6^\circ</math></p> <p>Schnittgrößen bei <math>x = 0</math> m: <math>M_y = -154</math> kNm <math>Q_z = 135</math> kN</p>		
<b>Ergebnisse: Vergleichsspannungen bei <math>x = 0</math> m</b>			
Scheitel außen:	$\sigma_x = 90$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = -17$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 90$ N/mm <sup>2</sup>
Scheitel innen:	$\sigma_x = 84$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 14$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 84$ N/mm <sup>2</sup>
Sohle außen:	$\sigma_x = -90$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = -15$ N/mm <sup>2</sup>	-
Sohle innen:	$\sigma_x = -84$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_u = 16$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_v = 16$ N/mm <sup>2</sup>

## 9. Zusammenfassung

In niederschlagsfreien Perioden sowie bei starkem Bodenfrost können Böden bis in Bereiche unterhalb der üblichen Verlegetiefen von Versorgungsleitungen austrocknen. Bei bindigen Böden führt die Reduzierung des Bodenwassergehalts zu einer Verringerung des Bodenvolumens, wodurch Setzungenbewegungen im Erdreich ausgelöst werden können. Wenn eingeerdete Rohrleitungen diesen Setzungenbewegungen infolge einer örtlichen Einspannung oder Auflagerung nicht zwanglos folgen können, werden sie als Biegeträger belastet. Bei ungünstigen Bedingungen kann dabei die Beanspruchbarkeit mancher Leitungsarten überschritten werden. Die genannten Vorgänge sind durch die Erfahrungen der Netzbetreiber, Schadensanalysen und statistische Auswertungen bekannt.

In der vorliegenden Arbeit wird die Größenordnung der unter definierten Randbedingungen auftretenden Belastungen für Rohrleitungen aus Grauguss und Stahl rechnerisch untersucht. Ausgangspunkt ist die Aufteilung der Gesamtbelastung in die nachfolgend genannten Lastfälle, die in unterschiedlicher Weise behandelt und anschließend überlagert werden:

- Beanspruchung der Leitung als vorwiegend biegebelasteter Träger infolge von Erdauflast sowie ungleichmäßiger Auflagerung (Lastfall 1).
- Beanspruchung des kreisringförmigen Rohrquerschnitts durch Erddruck (Lastfall 2).
- Beanspruchung des Rohrquerschnitts infolge Innendruck (Lastfall 3).

Die Berechnung des Lastfalls 1 erfolgt mit der Methode der finiten Elemente auf Basis des für geotechnische Anwendungen entwickelten Programms Plaxis, Version 7. Die Größe und der Verlauf der Schnittgrößen entlang der Rohrleitung werden mit einem Modell ermittelt, das sich über einen geeigneten Bereich entlang der Längsachse und in der Lotrechten erstreckt. Zur näherungsweisen Berücksichtigung von Lastumlagerungen infolge von Setzungsdifferenzen im Erdreich, die sich senkrecht zur Betrachtungsebene ausbilden, wird jeweils eine weitere FE-Berechnung vorgeschaltet.

Die Berechnung des Lastfalls 2 erfolgt auf analytischem Weg für den maximal beanspruchten Rohrquerschnitt unmittelbar neben der Einspannstelle der Rohrleitung. In diesem Bereich bildet sich unterhalb der Rohrleitung eine klaffende Fuge aus, so dass der Erdauflast kein Bettungsreaktionsdruck gegenüber steht. Das erforderliche Kräftegleichgewicht ergibt sich unter der Einbeziehung der Querkraftschubspannungen aus Lastfall 1.

Lastfall 3 wird analytisch mit Hilfe der Kesselformel berechnet.

Außer der Entwicklung der Berechnungsgrundlagen erfolgt in der vorliegenden Arbeit eine Betrachtung und Quantifizierung der Einflussgrößen mit Bezug auf die in städtischen Verteilnetzen gegebenen Randbedingungen. Auf dieser Basis werden die Auswirkungen der Einflussfaktoren im Rahmen einer Parameterstudie untersucht, deren wichtigste Ergebnisse nachfolgend dargestellt werden.

Die Schnittgrößenverläufe entlang der Leitungssachse weisen bei allen betrachteten Randbedingungen die folgenden charakteristischen Merkmale auf:

- Das maximale Biegemoment ist negativ und tritt unmittelbar neben der Einspannstelle auf. Der Biegemomentenverlauf fällt dann steil ab. Nach dem ersten Nulldurchgang schließt sich ein Bereich positiver Biegebelastung an, der nach dem Erreichen eines relativen Maximums wieder abklingt. Der positiv belastete Bereich hat etwa die Form einer Halbschwingung, das Biegemoment erreicht in diesem Bereich nur einen Bruchteil des Moments an der Einspannstelle. Nach dem Erreichen des zweiten Nulldurchgangs ist die Biegebelastung praktisch abgeklungen.
- Die maximale Querkraft ist positiv und tritt ebenfalls unmittelbar an der Einspannstelle auf. Der Querkraftverlauf nimmt dann etwa linear ab. Nach dem Erreichen des Nulldurchgangs schließt sich ein kurzer Bereich mit gering ausgeprägter negativer Querkraft an.
- Normalkräfte wurden nur bei Berechnungen für eingeedete Stahlrohrleitungen mit längskraftschlüssigen Verbindungen betrachtet. Die Normalkraftbeanspruchung der Rohrleitungen und die durch sie verursachten Längsspannungen waren bei diesen Rechnungen sehr gering gegenüber den ermittelten Längsbiegespannungen.

Bei allen Berechnungen betragen die Umfangsspannungen nur einen Bruchteil der Längsspannungen. Die maximalen Vergleichsspannungen traten immer in Scheitel und Sohle an der Außenseite des Rohrquerschnitts auf. Die größte Spannungskomponente war jeweils eine Längsspannung, die am Scheitel positiv (Zug) und an der Sohle negativ (Druck) war.

Den Planunterlagen eines Versorgungsunternehmens sind in der Regel die Nennweite, der Leitungswerkstoff, die Versorgungssparte und der maximale Innendruck einer betrachteten Rohrleitung einfach zu entnehmen. Die ungefähre Verlegetiefe ist häufig ebenfalls bekannt. Eine Belastung von Rohrleitungen durch schwere Fahrzeuge kann gegebenenfalls ausgeschlossen werden, wenn der betrachtete Leitungsabschnitt in einem unbefestigten Bereich verläuft. Die Eigenschaften des anstehenden Bodens können dagegen, ebenso wie die Möglichkeit von Lastumlagerungen (Voraussetzung für deren Vorhandensein: keine Störung des Scherverbands in der Leitungsumgebung) für die praktische Anwendung in der Regel nur sehr grob abgeschätzt werden. Auch ermöglicht das vorgestellte Berechnungsverfahren nur eine grobe Näherung zu deren Berücksichtigung.

Von diesen Einflussfaktoren beeinflussen die Nennweite und die Überdeckungshöhe sowohl die Größe der Längsbiegespannungen als auch die Ausdehnung des hoch beanspruchten Bereichs wesentlich. Die praktische Erfahrung, dass Stahlleitungen gegenüber Graugussleitungen weit weniger bruchgefährdet sind, wird durch die durchgeführten Untersuchungen bestätigt.

Die Versorgungssparten Gas und Wasser unterscheiden sich im Hinblick auf die errechneten Leitungsbeanspruchungen nur geringfügig, der Innendruck spielt bei den betrachteten Druckverhältnissen gegenüber den durch Längsbiegung und Querschnittsbelastung von außen verursachten Beanspruchungen nur eine untergeordnete Rolle.

Bei Graugussleitungen der Nennweiten DN 200 und DN 400 mit einer Überdeckung von 1 m wurde die zusätzliche Belastung durch einen Schwerlastwagen SLW 30 betrachtet. In der Folge ergab sich eine erhebliche Vergrößerung der Umfangsspannungen. Die dominierenden Längsspannungen erhöhten sich aber wegen der im Vergleich zur Ausdehnung der Lastumlagerungen geringen Längenausdehnung der Radaufstandsflächen entlang der Leitungssachse nur geringfügig.

Lastumlagerungen bestimmen die Leitungsbeanspruchung wesentlich, da sie die Auflast auf der Rohrleitung um ein Vielfaches erhöhen können. Der in den Parameterstudien festgestellte teilweise deutliche Einfluss der Bodenparameter Reibungswinkel, Kohäsion und Elastizitätsmodul ist besonders auf die Beeinflussung der Größe von Lastumlagerungen durch diese Parameter zurückzuführen. Die Querdehnzahl beeinflusst die Berechnungsergebnisse nahezu nicht.

Die Absenkung des Erdreichs hat als auslösender Faktor für die betrachteten Leitungsbeanspruchungen einen wesentlichen Einfluss auf die resultierenden Leitungsbeanspruchungen und auf die Ausdehnung des hoch beanspruchten Bereichs. Der Ansatz dieser Größe ist bei konkreten Einzelfallbetrachtungen mit sehr großen Unsicherheiten verbunden. Gegebenenfalls kann aus dem Vorhandensein von Bäumen in der Nähe der Leitungstrasse auf die Möglichkeit von besonders ausgeprägten Feuchtegehaltsschwankungen geschlossen werden.

Die festgestellten Auswirkungen infolge der Änderung einzelner Einflussfaktoren ergeben sich bei der jeweils zugrunde gelegten Konstellation von Randbedingungen. Wenn die im zu betrachtenden Einzelfall gegebenen Randbedingungen erheblich von der angenommenen Konstellation abweichen, können sich die Auswirkungen der Änderung eines Einzelnen Parameters erheblich verringern oder vergrößern.

Die Betrachtungen zur möglichen Größenordnung der belastungswirksamen Setzungen sowie die Ergebnisse der durchgeführten Spannungsberechnungen zeigen, dass es nicht möglich ist, eine Versagensgefährdung von Grauguss- oder Stahlleitungen in bindigen Böden pauschal oder anhand einfach zu bestimmender Kriterien auszuschließen. Wegen der normalerweise ebenfalls nicht möglichen Abgrenzung der belastungswirksamen Setzung  $a$  und den Unsicherheiten beim Ansatz der weiteren Randbedingungen kann für praktische Fallbetrachtungen auch kein präziser Spannungsnachweis zur Feststellung der Betriebssicherheit geführt werden. Die Vereinfachungen bei der Entwicklung des hier vorgestellten Berechnungsverfahrens sind ebenfalls zu berücksichtigen.



Für die Beantwortung der Frage, ob Grauguss- oder Stahlleitungen der Gas- und Wasserversorgung in bindigen Böden und in der Nähe von Einspannungen als versagensgefährdet angesehen werden müssen und deshalb kurzfristig erneuert werden sollen, sind zunächst die Betriebserfahrungen eines Rohrnetzbetreibers, möglichst gebietsweise differenziert, zu berücksichtigen. Die durchgeführte Parameterstudie gibt weitere Hinweise zum Einfluss wesentlicher Parameter, die unter Berücksichtigung der örtlichen Betriebserfahrungen für eine differenzierte Risikobewertung verwendet werden können. Auf Basis dieser Risikobewertung kann eine Entscheidung über die Notwendigkeit von Rehabilitationsmaßnahmen erfolgen und eine zeitliche Reihenfolge für die Durchführung der als erforderlich betrachteten Maßnahmen festgelegt werden.

## Literaturverzeichnis

### Abkürzungen

ATV-DVWK: Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V.

DVGW: Deutsche Vereinigung des Gas- und Wasserfaches e. V.

### Literatur

**Building Research Station (1949):** House foundations on shrinkable clays (wiedergegeben in KRABBE, W. (1958))

**Cerbe, G. (1999):** Grundlagen der Gastechnik. 5. Auflage. München, Wien: Carl Hanser Verlag

**Cooling, L. F. (1946):** Some foundation troubles with small houses (wiedergegeben in KRABBE, W. (1958))

**Cooling, L. F.; Ward, W. H. (1948):** Some examples of foundation movements due to causes other than structural loads. Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (June 21 to 30), Band 2, Rotterdam (wiedergegeben in KRABBE, W. (1958))

**DVGW (Hrsg.) (2000):** Informationsschreiben an die Neckarwerke Stuttgart AG zur Rehabilitation von Graugussleitungen vom 01.02.2000

**DVGW (Hrsg.) (2002):** Wasser-Information Nr. 65: Schadensstatistik Wasser

**Fachgemeinschaft Gusseiserne Rohre (Hrsg.) (1983):** Handbuch Gussrohrtechnik. Bonn: Universitäts-Buchdruckerei

**Giesecke, J.; Mosonyi, E. (2005):** Wasserkraftanlagen – Planung, Bau und Betrieb. 4. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag

**Giesecke, J. (1999):** Vorlesungsumdrucke über Rohrleitungen – Statik und Ausführung. Lehrstuhl für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Universität Stuttgart

**Issler, L.; Ruoff, H.; Häfele, P. (1997):** Festigkeitslehre – Grundlagen. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag

- Jumikis, A. (1968):** Beitrag zur Untersuchung des gefrierenden Wassernachschubs in einem gefrierenden Boden und Beurteilung der Ergebnisse. Dissertation. Institut für Wasserwirtschaft, Grundbau und Wasserbau der Universität Stuttgart
- Kiesselbach, G. (1990):** Zur Biegebeanspruchung erdverlegter Gasrohrleitungen durch Verkehrslasten. In: 3R international, Heft 5
- Kottmann, A. (1966):** Bau- und Betriebserfahrungen im Ortsverteilungsnetz bei der Verwendung von gusseisernen Rohren. In: gwf - gas / erdgas, Heft 6
- Kottmann, A. (1978):** Über die Ursachen von Rohrbrüchen in Versorgungsleitungen. Dissertation. Universität Stuttgart
- Kottmann, A. (1989):** Rohre und Rohrwerkstoffe, ihre umfassende Anwendung in der Wasserversorgungstechnik. In: Handbuch Wasserversorgungs- und Abwassertechnik. 3. Ausgabe. Essen: Vulkan-Verlag
- Krabbe, W. (1958):** Über die Schrumpfung bindiger Böden. Dissertation. In: Mitteilungen der Hannoverschen Versuchsanstalt für Grundbau und Wasserbau, Franzius-Institut der Technischen Hochschule Hannover
- Owen, R. C. (1984):** Vegetation and Seasonal ground movement effects on buried mains. Presented at 3<sup>rd</sup> international conference on ground movements and structures, Cardiff, 9 – 12 July 1984. Engineering research station, British Gas
- Pardun, C. (1950):** Gusseiserne Druckrohre für Gas- und Wasserleitungen. Essen: Verlag W. Girardet
- Placzek, D. (1982):** Untersuchungen über das Schwindverhalten bindiger Böden bei Trocknung unter natürlichen Randbedingungen. Dissertation. Universität Essen - GHS
- Plaxis B. V. (Hrsg.) (1998):** Reference Manual Plaxis, Version 7 for Windows 95/NT.
- Prinz, H. (1974):** Gebäudeschäden in Tonböden infolge Austrocknung. In: Vorträge der Baugrundtagung 1974 in Frankfurt / Main-Höchst, Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau e.V.
- Roscher, H. (2000):** Sanierung städtischer Wasserversorgungsnetze. Berlin: Verlag Bauwesen
- Schmidt, H. (1996):** Grundlagen der Geotechnik. Stuttgart: B. G. Teubner

**Schneider, K.-J. (Hrsg.) (2002):** Bautabellen für Ingenieure. 15. Auflage. Düsseldorf: Werner Verlag

**von Hagen, I.; Zimnik, W. (1995):** Rohrstähle. In: Stahlrohr Handbuch. 12. Auflage. Essen: Vulkan-Verlag

**Sturmath, R. (1988):** Statik geschlossener Kreisringbauteile. Düsseldorf: VDI-Verlag GmbH

**Westdeutsche Mannesmannröhren Aktiengesellschaft (Hrsg.) (1950):** Mannesmannrohre für Gas und Wasser. Düsseldorf

### **Normen und Richtlinien**

**ATV-DVWK-A 127 (2000):** Statische Berechnung von Entwässerungskanälen und -leitungen, Arbeitsblatt, 3. Auflage

**DIN 1055-2 (2003):** Einwirkungen auf Tragwerke - Bodenkenngrößen

**DIN 1072 (1988):** Lastannahmen für Straßen- und Wegbrücken

**DIN 1629 (1932):** Nahtlose Flusstahlrohre – Technische Lieferbedingungen

**DIN 1998 (1978):** Unterbringung von Leitungen und Anlagen in öffentlichen Flächen

**DIN 2401 (1936):** Druckstufen- Nenndruck - Betriebsdruck - Probedruck

**DIN 2420 (1938):** Gußeiserne Rohre und Formstücke, Technische Lieferbedingungen

**DIN 2431 (1938):** Gußeiserne Muffendruckrohre (Schleudergussrohre)

**DIN 2460 (1942):** Nahtlose Stahlmuffenrohre

**DIN 4022, Teil 1 (1987):** Benennen und Beschreiben von Boden und Fels; Schichtenverzeichnis für Bohrungen ohne durchgehende Gewinnung von gekernten Proben im Boden und im Fels

**DIN 18122-1 (1997):** Baugrund, Untersuchungen von Bodenproben - Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen) - Teil 1: Bestimmung der Fließ- und Ausrollgrenze

**DIN 18122-2 (2000):** Baugrund, Untersuchungen von Bodenproben - Zustandsgrenzen (Konsistenzgrenzen) - Teil 2: Bestimmung der Schrumpfgrenze

**DIN 18134 (2001):** Baugrund; Versuche und Versuchsgeräte - Plattendruckversuch

***DIN 18196 (1988):*** Erd- und Grundbau; Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke

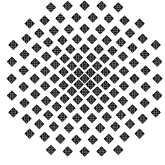
***DIN EN 1610 (1997):*** Verlegung und Prüfung von Abwasserleitungen und –kanälen

***DVGW G 459/I (1998):*** Gas-Hausanschlüsse für Betriebsdrücke bis 4 bar – Planung und Errichtung, Technische Regel

***DVGW GW 312 (1990):*** Statische Berechnung von Vortriebsrohren, Merkblatt

***DVGW W 400-1 (2004):*** Technische Regeln Wasserverteilungsanlagen (TRWV), Teil 1: Planung, Technische Regel

***(RStO) (2001):*** Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen.



## Institut für Wasserbau Universität Stuttgart

Pfaffenwaldring 61  
70569 Stuttgart (Vaihingen)  
Telefon (0711) 685 - 64717/64741/64752/64679  
Telefax (0711) 685 - 67020 o. 64746 o. 64681  
E-Mail: [iws@iws.uni-stuttgart.de](mailto:iws@iws.uni-stuttgart.de)  
<http://www.iws.uni-stuttgart.de>

### Direktoren

Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. András Bárdossy  
Prof. Dr.-Ing. Rainer Helmig  
Prof. Dr.-Ing. Silke Wieprecht

### Vorstand (Stand 31.08.2006)

Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. A. Bárdossy  
Prof. Dr.-Ing. R. Helmig  
Prof. Dr.-Ing. S. Wieprecht  
Prof. Dr.-Ing. habil. B. Westrich  
Jürgen Braun, PhD  
Dr.-Ing. H. Class  
Dr.-Ing. A. Färber  
Dr.-Ing. H.-P. Koschitzky  
PD Dr.-Ing. W. Marx

### Emeriti

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Jürgen Giesecke  
Prof. Dr.h.c. Dr.-Ing. E.h. Helmut Kobus, Ph.D.

### Lehrstuhl für Wasserbau und Wassermengenwirtschaft

Leiter: Prof. Dr.-Ing. Silke Wieprecht  
Stellv.: PD Dr.-Ing. Walter Marx, AOR

### Lehrstuhl für Hydrologie und Geohydrologie

Leiter: Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. András Bárdossy  
Stellv.: Dr.-Ing. Arne Färber

### Lehrstuhl für Hydromechanik und Hydrosystemmodellierung

Leiter: Prof. Dr.-Ing. Rainer Helmig  
Stellv.: Dr.-Ing. Holger Class, AOR

### VEGAS, Versuchseinrichtung zur Grundwasser- und Altlastensanierung

Leitung: Jürgen Braun, PhD  
Dr.-Ing. Hans-Peter Koschitzky, AD

### Versuchsanstalt

Leiter: apl. Prof. Dr.-Ing. Bernhard Westrich

## Verzeichnis der Mitteilungshefte

- 1 Röhnisch, Arthur: *Die Bemühungen um eine Wasserbauliche Versuchsanstalt an der Technischen Hochschule Stuttgart,*  
und  
Fattah Abouleid, Abdel: *Beitrag zur Berechnung einer in lockeren Sand gerammten, zweifach verankerten Spundwand,* 1963
- 2 Marotz, Günter: *Beitrag zur Frage der Standfestigkeit von dichten Asphaltbelägen im Großwasserbau,* 1964
- 3 Gurr, Siegfried: *Beitrag zur Berechnung zusammengesetzter ebener Flächentragwerke unter besonderer Berücksichtigung ebener Stauwände, mit Hilfe von Randwert- und Lastwertmatrizen,* 1965
- 4 Plica, Peter: *Ein Beitrag zur Anwendung von Schalenkonstruktionen im Stahlwasserbau,*  
und Petrikat, Kurt: *Möglichkeiten und Grenzen des wasserbaulichen Versuchswesens,* 1966

- 5 Plate, Erich: *Beitrag zur Bestimmung der Windgeschwindigkeitsverteilung in der durch eine Wand gestörten bodennahen Luftschicht, und*  
Röhnisch, Arthur; Marotz, Günter: *Neue Baustoffe und Bauausführungen für den Schutz der Böschungen und der Sohle von Kanälen, Flüssen und Häfen; Gestehungskosten und jeweilige Vorteile, sowie Unny, T.E.: Schwingungsuntersuchungen am Kegelstrahlschieber, 1967*
- 6 Seiler, Erich: *Die Ermittlung des Anlagenwertes der bundeseigenen Binnenschiffahrtsstraßen und Talsperren und des Anteils der Binnenschiffahrt an diesem Wert, 1967*
- 7 *Sonderheft anlässlich des 65. Geburtstages von Prof. Arthur Röhnisch mit Beiträgen von*  
Benk, Dieter; Breitling, J.; Gurr, Siegfried; Haberhauer, Robert; Honekamp, Hermann; Kuz, Klaus Dieter; Marotz, Günter; Mayer-Vorfelder, Hans-Jörg; Miller, Rudolf; Plate, Erich J.; Radomski, Helge; Schwarz, Helmut; Vollmer, Ernst; Wildenhahn, Eberhard; 1967
- 8 Jumikis, Alfred: *Beitrag zur experimentellen Untersuchung des Wassernachschubs in einem gefrierenden Boden und die Beurteilung der Ergebnisse, 1968*
- 9 Marotz, Günter: *Technische Grundlagen einer Wasserspeicherung im natürlichen Untergrund, 1968*
- 10 Radomski, Helge: *Untersuchungen über den Einfluß der Querschnittsform wellenförmiger Spundwände auf die statischen und rammtechnischen Eigenschaften, 1968*
- 11 Schwarz, Helmut: *Die Grenztragfähigkeit des Baugrundes bei Einwirkung vertikal gezogener Ankerplatten als zweidimensionales Bruchproblem, 1969*
- 12 Erbel, Klaus: *Ein Beitrag zur Untersuchung der Metamorphose von Mittelgebirgsschneedecken unter besonderer Berücksichtigung eines Verfahrens zur Bestimmung der thermischen Schneequalität, 1969*
- 13 Westhaus, Karl-Heinz: *Der Strukturwandel in der Binnenschiffahrt und sein Einfluß auf den Ausbau der Binnenschiffskanäle, 1969*
- 14 Mayer-Vorfelder, Hans-Jörg: *Ein Beitrag zur Berechnung des Erdwiderstandes unter Ansatz der logarithmischen Spirale als Gleitflächenfunktion, 1970*
- 15 Schulz, Manfred: *Berechnung des räumlichen Erddruckes auf die Wandung kreiszylindrischer Körper, 1970*
- 16 Mobasseri, Manoutschehr: *Die Rippenstützmauer. Konstruktion und Grenzen ihrer Standsicherheit, 1970*
- 17 Benk, Dieter: *Ein Beitrag zum Betrieb und zur Bemessung von Hochwasserrückhaltebecken, 1970*

- 18 Gál, Attila: *Bestimmung der mitschwingenden Wassermasse bei überströmten Fischbauchklappen mit kreiszylindrischem Staublech*, 1971, vergriffen
- 19 Kuz, Klaus Dieter: *Ein Beitrag zur Frage des Einsetzens von Kavitationserscheinungen in einer Düsenströmung bei Berücksichtigung der im Wasser gelösten Gase*, 1971, vergriffen
- 20 Schaak, Hartmut: *Verteilleitungen von Wasserkraftanlagen*, 1971
- 21 *Sonderheft zur Eröffnung der neuen Versuchsanstalt des Instituts für Wasserbau der Universität Stuttgart mit Beiträgen von*  
Brombach, Hansjörg; Dirksen, Wolfram; Gál, Attila; Gerlach, Reinhard; Giesecke, Jürgen; Holthoff, Franz-Josef; Kuz, Klaus Dieter; Marotz, Günter; Minor, Hans-Erwin; Petrikat, Kurt; Röhnisch, Arthur; Rueff, Helge; Schwarz, Helmut; Vollmer, Ernst; Wildenhahn, Eberhard; 1972
- 22 Wang, Chung-su: *Ein Beitrag zur Berechnung der Schwingungen an Kegelstrahlschiebern*, 1972
- 23 Mayer-Vorfelder, Hans-Jörg: *Erdwiderstandsbeiwerte nach dem Ohde-Variationsverfahren*, 1972
- 24 Minor, Hans-Erwin: *Beitrag zur Bestimmung der Schwingungsanfachungsfunktionen überströmter Stauklappen*, 1972, vergriffen
- 25 Brombach, Hansjörg: *Untersuchung strömungsmechanischer Elemente (Fluidik) und die Möglichkeit der Anwendung von Wirbelkammerelementen im Wasserbau*, 1972, vergriffen
- 26 Wildenhahn, Eberhard: *Beitrag zur Berechnung von Horizontalfilterbrunnen*, 1972
- 27 Steinlein, Helmut: *Die Eliminierung der Schwebstoffe aus Flußwasser zum Zweck der unterirdischen Wasserspeicherung, gezeigt am Beispiel der Iller*, 1972
- 28 Holthoff, Franz Josef: *Die Überwindung großer Hubhöhen in der Binnenschifffahrt durch Schwimmerhebewerke*, 1973
- 29 Röder, Karl: *Einwirkungen aus Baugrundbewegungen auf trog- und kastenförmige Konstruktionen des Wasser- und Tunnelbaues*, 1973
- 30 Kretschmer, Heinz: *Die Bemessung von Bogenstaumauern in Abhängigkeit von der Talform*, 1973
- 31 Honekamp, Hermann: *Beitrag zur Berechnung der Montage von Unterwasserpipelines*, 1973
- 32 Giesecke, Jürgen: *Die Wirbelkammertriode als neuartiges Steuerorgan im Wasserbau*, und Brombach, Hansjörg: *Entwicklung, Bauformen, Wirkungsweise und Steuereigenschaften von Wirbelkammerverstärkern*, 1974



- 33 Rueff, Helge: *Untersuchung der schwingungserregenden Kräfte an zwei hintereinander angeordneten Tiefschützen unter besonderer Berücksichtigung von Kavitation*, 1974
- 34 Röhnisch, Arthur: *Einpreßversuche mit Zementmörtel für Spannbeton - Vergleich der Ergebnisse von Modellversuchen mit Ausführungen in Hüllwellrohren*, 1975
- 35 *Sonderheft anlässlich des 65. Geburtstages von Prof. Dr.-Ing. Kurt Petrikat mit Beiträgen von:* Brombach, Hansjörg; Erbel, Klaus; Flinspach, Dieter; Fischer jr., Richard; Gál, Attila; Gerlach, Reinhard; Giesecke, Jürgen; Haberhauer, Robert; Hafner Edzard; Hausenblas, Bernhard; Horlacher, Hans-Burkhard; Hutarew, Andreas; Knoll, Manfred; Krummet, Ralph; Marotz, Günter; Merkle, Theodor; Miller, Christoph; Minor, Hans-Erwin; Neumayer, Hans; Rao, Syamala; Rath, Paul; Rueff, Helge; Ruppert, Jürgen; Schwarz, Wolfgang; Topal-Gökceli, Mehmet; Vollmer, Ernst; Wang, Chung-su; Weber, Hans-Georg; 1975
- 36 Berger, Jochum: *Beitrag zur Berechnung des Spannungszustandes in rotationssymmetrisch belasteten Kugelschalen veränderlicher Wandstärke unter Gas- und Flüssigkeitsdruck durch Integration schwach singulärer Differentialgleichungen*, 1975
- 37 Dirksen, Wolfram: *Berechnung instationärer Abflußvorgänge in gestauten Gerinnen mittels Differenzenverfahren und die Anwendung auf Hochwasserrückhaltebecken*, 1976
- 38 Horlacher, Hans-Burkhard: *Berechnung instationärer Temperatur- und Wärmespannungsfelder in langen mehrschichtigen Hohlzylindern*, 1976
- 39 Hafner, Edzard: *Untersuchung der hydrodynamischen Kräfte auf Baukörper im Tiefwasserbereich des Meeres*, 1977, ISBN 3-921694-39-6
- 40 Ruppert, Jürgen: *Über den Axialwirbelkammerverstärker für den Einsatz im Wasserbau*, 1977, ISBN 3-921694-40-X
- 41 Hutarew, Andreas: *Beitrag zur Beeinflußbarkeit des Sauerstoffgehalts in Fließgewässern an Abstürzen und Wehren*, 1977, ISBN 3-921694-41-8, vergriffen
- 42 Miller, Christoph: *Ein Beitrag zur Bestimmung der schwingungserregenden Kräfte an unterströmten Wehren*, 1977, ISBN 3-921694-42-6
- 43 Schwarz, Wolfgang: *Druckstoßberechnung unter Berücksichtigung der Radial- und Längsverschiebungen der Rohrwandung*, 1978, ISBN 3-921694-43-4
- 44 Kinzelbach, Wolfgang: *Numerische Untersuchungen über den optimalen Einsatz variabler Kühlsysteme einer Kraftwerkskette am Beispiel Oberrhein*, 1978, ISBN 3-921694-44-2
- 45 Barczewski, Baldur: *Neue Meßmethoden für Wasser-Luftgemische und deren Anwendung auf zweiphasige Auftriebsstrahlen*, 1979, ISBN 3-921694-45-0

- 46 Neumayer, Hans: *Untersuchung der Strömungsvorgänge in radialen Wirbelkammerverstärkern*, 1979, ISBN 3-921694-46-9
- 47 Elalfy, Youssef-Elhassan: *Untersuchung der Strömungsvorgänge in Wirbelkammerdiolen und -drosseln*, 1979, ISBN 3-921694-47-7
- 48 Brombach, Hansjörg: *Automatisierung der Bewirtschaftung von Wasserspeichern*, 1981, ISBN 3-921694-48-5
- 49 Geldner, Peter: *Deterministische und stochastische Methoden zur Bestimmung der Selbstdichtung von Gewässern*, 1981, ISBN 3-921694-49-3, vergriffen
- 50 Mehlhorn, Hans: *Temperaturveränderungen im Grundwasser durch Brauchwassereinleitungen*, 1982, ISBN 3-921694-50-7, vergriffen
- 51 Hafner, Edzard: *Rohrleitungen und Behälter im Meer*, 1983, ISBN 3-921694-51-5
- 52 Rinnert, Bernd: *Hydrodynamische Dispersion in porösen Medien: Einfluß von Dichteunterschieden auf die Vertikalvermischung in horizontaler Strömung*, 1983, ISBN 3-921694-52-3, vergriffen
- 53 Lindner, Wulf: *Steuerung von Grundwasserentnahmen unter Einhaltung ökologischer Kriterien*, 1983, ISBN 3-921694-53-1, vergriffen
- 54 Herr, Michael; Herzer, Jörg; Kinzelbach, Wolfgang; Kobus, Helmut; Rinnert, Bernd: *Methoden zur rechnerischen Erfassung und hydraulischen Sanierung von Grundwasserkontaminationen*, 1983, ISBN 3-921694-54-X
- 55 Schmitt, Paul: *Wege zur Automatisierung der Niederschlagsermittlung*, 1984, ISBN 3-921694-55-8, vergriffen
- 56 Müller, Peter: *Transport und selektive Sedimentation von Schwebstoffen bei gestau tem Abfluß*, 1985, ISBN 3-921694-56-6
- 57 El-Qawasmeh, Fuad: *Möglichkeiten und Grenzen der Tropfbewässerung unter besonderer Berücksichtigung der Verstopfungsanfälligkeit der Tropfelemente*, 1985, ISBN 3-921694-57-4, vergriffen
- 58 Kirchenbaur, Klaus: *Mikroprozessorgesteuerte Erfassung instationärer Druckfelder am Beispiel seegangbelasteter Baukörper*, 1985, ISBN 3-921694-58-2
- 59 Kobus, Helmut (Hrsg.): *Modellierung des großräumigen Wärme- und Schadstofftransports im Grundwasser*, Tätigkeitsbericht 1984/85 (DFG-Forschergruppe an den Universitäten Hohenheim, Karlsruhe und Stuttgart), 1985, ISBN 3-921694-59-0, vergriffen
- 60 Spitz, Karlheinz: *Dispersion in porösen Medien: Einfluß von Inhomogenitäten und Dichteunterschieden*, 1985, ISBN 3-921694-60-4, vergriffen

- 61 Kobus, Helmut: *An Introduction to Air-Water Flows in Hydraulics*, 1985, ISBN 3-921694-61-2
- 62 Kaleris, Vassilios: *Erfassung des Austausches von Oberflächen- und Grundwasser in horizontalebenen Grundwassermodellen*, 1986, ISBN 3-921694-62-0
- 63 Herr, Michael: *Grundlagen der hydraulischen Sanierung verunreinigter Porengrundwasserleiter*, 1987, ISBN 3-921694-63-9
- 64 Marx, Walter: *Berechnung von Temperatur und Spannung in Massenbeton infolge Hydratation*, 1987, ISBN 3-921694-64-7
- 65 Koschitzky, Hans-Peter: *Dimensionierungskonzept für Sohlbelüfter in Schußrinnen zur Vermeidung von Kavitationsschäden*, 1987, ISBN 3-921694-65-5
- 66 Kobus, Helmut (Hrsg.): *Modellierung des großräumigen Wärme- und Schadstofftransports im Grundwasser*, Tätigkeitsbericht 1986/87 (DFG-Forschergruppe an den Universitäten Hohenheim, Karlsruhe und Stuttgart) 1987, ISBN 3-921694-66-3
- 67 Söll, Thomas: *Berechnungsverfahren zur Abschätzung anthropogener Temperaturanomalien im Grundwasser*, 1988, ISBN 3-921694-67-1
- 68 Dittrich, Andreas; Westrich, Bernd: *Bodenseeufererosion, Bestandsaufnahme und Bewertung*, 1988, ISBN 3-921694-68-X, vergriffen
- 69 Huwe, Bernd; van der Ploeg, Rienk R.: *Modelle zur Simulation des Stickstoffhaushaltes von Standorten mit unterschiedlicher landwirtschaftlicher Nutzung*, 1988, ISBN 3-921694-69-8, vergriffen
- 70 Stephan, Karl: *Integration elliptischer Funktionen*, 1988, ISBN 3-921694-70-1
- 71 Kobus, Helmut; Zilliox, Lothaire (Hrsg.): *Nitratbelastung des Grundwassers, Auswirkungen der Landwirtschaft auf die Grundwasser- und Rohwasserbeschaffenheit und Maßnahmen zum Schutz des Grundwassers*. Vorträge des deutsch-französischen Kolloquiums am 6. Oktober 1988, Universitäten Stuttgart und Louis Pasteur Strasbourg (Vorträge in deutsch oder französisch, Kurzfassungen zweisprachig), 1988, ISBN 3-921694-71-X
- 72 Soyeaux, Renald: *Unterströmung von Stauanlagen auf klüftigem Untergrund unter Berücksichtigung laminarer und turbulenter Fließzustände*, 1991, ISBN 3-921694-72-8
- 73 Kohane, Roberto: *Berechnungsmethoden für Hochwasserabfluß in Fließgewässern mit überströmten Vorländern*, 1991, ISBN 3-921694-73-6
- 74 Hassinger, Reinhard: *Beitrag zur Hydraulik und Bemessung von Blocksteinrampen in flexibler Bauweise*, 1991, ISBN 3-921694-74-4, vergriffen
- 75 Schäfer, Gerhard: *Einfluß von Schichtenstrukturen und lokalen Einlagerungen auf die Längsdispersion in Porengrundwasserleitern*, 1991, ISBN 3-921694-75-2

- 76 Giesecke, Jürgen: *Vorträge, Wasserwirtschaft in stark besiedelten Regionen; Umweltforschung mit Schwerpunkt Wasserwirtschaft*, 1991, ISBN 3-921694-76-0
- 77 Huwe, Bernd: *Deterministische und stochastische Ansätze zur Modellierung des Stickstoffhaushalts landwirtschaftlich genutzter Flächen auf unterschiedlichem Skalenniveau*, 1992, ISBN 3-921694-77-9, vergriffen
- 78 Rommel, Michael: *Verwendung von Kluftdaten zur realitätsnahen Generierung von Kluftnetzen mit anschließender laminar-turbulenter Strömungsberechnung*, 1993, ISBN 3-92 1694-78-7
- 79 Marschall, Paul: *Die Ermittlung lokaler Stofffrachten im Grundwasser mit Hilfe von Einbohrloch-Meßverfahren*, 1993, ISBN 3-921694-79-5, vergriffen
- 80 Ptak, Thomas: *Stofftransport in heterogenen Porenaquiferen: Felduntersuchungen und stochastische Modellierung*, 1993, ISBN 3-921694-80-9, vergriffen
- 81 Haakh, Frieder: *Transientes Strömungsverhalten in Wirbelkammern*, 1993, ISBN 3-921694-81-7
- 82 Kobus, Helmut; Cirpka, Olaf; Barczewski, Baldur; Koschitzky, Hans-Peter: *Versucheinrichtung zur Grundwasser und Altlastensanierung VEGAS, Konzeption und Programmrahmen*, 1993, ISBN 3-921694-82-5
- 83 Zang, Weidong: *Optimaler Echtzeit-Betrieb eines Speichers mit aktueller Abflußregenerierung*, 1994, ISBN 3-921694-83-3, vergriffen
- 84 Franke, Hans-Jörg: *Stochastische Modellierung eines flächenhaften Stoffeintrages und Transports in Grundwasser am Beispiel der Pflanzenschutzmittelproblematik*, 1995, ISBN 3-921694-84-1
- 85 Lang, Ulrich: *Simulation regionaler Strömungs- und Transportvorgänge in Karstaquiferen mit Hilfe des Doppelkontinuum-Ansatzes: Methodenentwicklung und Parameteridentifikation*, 1995, ISBN 3-921694-85-X, vergriffen
- 86 Helmig, Rainer: *Einführung in die Numerischen Methoden der Hydromechanik*, 1996, ISBN 3-921694-86-8, vergriffen
- 87 Cirpka, Olaf: *CONTRACT: A Numerical Tool for Contaminant Transport and Chemical Transformations - Theory and Program Documentation -*, 1996, ISBN 3-921694-87-6
- 88 Haberlandt, Uwe: *Stochastische Synthese und Regionalisierung des Niederschlages für Schmutzfrachtberechnungen*, 1996, ISBN 3-921694-88-4
- 89 Croisé, Jean: *Extraktion von flüchtigen Chemikalien aus natürlichen Lockergesteinen mittels erzwungener Luftströmung*, 1996, ISBN 3-921694-89-2, vergriffen

- 90 Jorde, Klaus: *Ökologisch begründete, dynamische Mindestwasserregelungen bei Ausleitungskraftwerken*, 1997, ISBN 3-921694-90-6, vergriffen
- 91 Helmig, Rainer: *Gekoppelte Strömungs- und Transportprozesse im Untergrund - Ein Beitrag zur Hydrosystemmodellierung*-, 1998, ISBN 3-921694-91-4
- 92 Emmert, Martin: *Numerische Modellierung nichtisothermer Gas-Wasser Systeme in porösen Medien*, 1997, ISBN 3-921694-92-2
- 93 Kern, Ulrich: *Transport von Schweb- und Schadstoffen in staugeregelten Fließgewässern am Beispiel des Neckars*, 1997, ISBN 3-921694-93-0, vergriffen
- 94 Förster, Georg: *Druckstoßdämpfung durch große Luftblasen in Hochpunkten von Rohrleitungen* 1997, ISBN 3-921694-94-9
- 95 Cirpka, Olaf: *Numerische Methoden zur Simulation des reaktiven Mehrkomponententransports im Grundwasser*, 1997, ISBN 3-921694-95-7, vergriffen
- 96 Färber, Arne: *Wärmetransport in der ungesättigten Bodenzone: Entwicklung einer thermischen In-situ-Sanierungstechnologie*, 1997, ISBN 3-921694-96-5
- 97 Betz, Christoph: *Wasserdampfdestillation von Schadstoffen im porösen Medium: Entwicklung einer thermischen In-situ-Sanierungstechnologie*, 1998, ISBN 3-921694-97-3
- 98 Xu, Yichun: *Numerical Modeling of Suspended Sediment Transport in Rivers*, 1998, ISBN 3-921694-98-1, vergriffen
- 99 Wüst, Wolfgang: *Geochemische Untersuchungen zur Sanierung CKW-kontaminierter Aquifere mit Fe(0)-Reaktionswänden*, 2000, ISBN 3-933761-02-2
- 100 Sheta, Hussam: *Simulation von Mehrphasenvorgängen in porösen Medien unter Einbeziehung von Hysterese-Effekten*, 2000, ISBN 3-933761-03-4
- 101 Ayros, Edwin: *Regionalisierung extremer Abflüsse auf der Grundlage statistischer Verfahren*, 2000, ISBN 3-933761-04-2, vergriffen
- 102 Huber, Ralf: *Compositional Multiphase Flow and Transport in Heterogeneous Porous Media*, 2000, ISBN 3-933761-05-0
- 103 Braun, Christopherus: *Ein Upscaling-Verfahren für Mehrphasenströmungen in porösen Medien*, 2000, ISBN 3-933761-06-9
- 104 Hofmann, Bernd: *Entwicklung eines rechnergestützten Managementsystems zur Beurteilung von Grundwasserschadensfällen*, 2000, ISBN 3-933761-07-7
- 105 Class, Holger: *Theorie und numerische Modellierung nichtisothermer Mehrphasenprozesse in NAPL-kontaminierten porösen Medien*, 2001, ISBN 3-933761-08-5

- 106 Schmidt, Reinhard: *Wasserdampf- und Heißluftinjektion zur thermischen Sanierung kontaminierter Standorte*, 2001, ISBN 3-933761-09-3
- 107 Reinhold Josef.: *Schadstoffextraktion mit hydraulischen Sanierungsverfahren unter Anwendung von grenzflächenaktiven Stoffen*, 2001, ISBN 3-933761-10-7
- 108 Schneider, Matthias: *Habitat- und Abflussmodellierung für Fließgewässer mit unscharfen Berechnungsansätzen*, 2001, ISBN 3-933761-11-5
- 109 Rathgeb, Andreas: *Hydrodynamische Bemessungsgrundlagen für Lockerdeckwerke an überströmbaren Erddämmen*, 2001, ISBN 3-933761-12-3
- 110 Lang, Stefan: *Parallele numerische Simulation instationärer Probleme mit adaptiven Methoden auf unstrukturierten Gittern*, 2001, ISBN 3-933761-13-1
- 111 Appt, Jochen; Stumpp Simone: *Die Bodensee-Messkampagne 2001, IWS/CWR Lake Constance Measurement Program 2001*, 2002, ISBN 3-933761-14-X
- 112 Heimerl, Stephan: *Systematische Beurteilung von Wasserkraftprojekten*, 2002, ISBN 3-933761-15-8
- 113 Iqbal, Amin: *On the Management and Salinity Control of Drip Irrigation*, 2002, ISBN 3-933761-16-6
- 114 Silberhorn-Hemminger, Annette: *Modellierung von Kluftaquifersystemen: Geostatistische Analyse und deterministisch-stochastische Kluftgenerierung*, 2002, ISBN 3-933761-17-4
- 115 Winkler, Angela: *Prozesse des Wärme- und Stofftransports bei der In-situ-Sanierung mit festen Wärmequellen*, 2003, ISBN 3-933761-18-2
- 116 Marx, Walter: *Wasserkraft, Bewässerung, Umwelt - Planungs- und Bewertungsschwerpunkte der Wasserbewirtschaftung*, 2003, ISBN 3-933761-19-0
- 117 Hinkelmann, Reinhard: *Efficient Numerical Methods and Information-Processing Techniques in Environment Water*, 2003, ISBN 3-933761-20-4
- 118 Samaniego-Eguiguren, Luis Eduardo: *Hydrological Consequences of Land Use / Land Cover and Climatic Changes in Mesoscale Catchments*, 2003, ISBN 3-933761-21-2
- 119 Neunhäuserer, Lina: *Diskretisierungsansätze zur Modellierung von Strömungs- und Transportprozessen in geklüftet-porösen Medien*, 2003, ISBN 3-933761-22-0
- 120 Paul, Maren: *Simulation of Two-Phase Flow in Heterogeneous Poros Media with Adaptive Methods*, 2003, ISBN 3-933761-23-9
- 121 Ehret, Uwe: *Rainfall and Flood Nowcasting in Small Catchments using Weather Radar*, 2003, ISBN 3-933761-24-7

- 122 Haag, Ingo: *Der Sauerstoffhaushalt staugeregelter Flüsse am Beispiel des Neckars - Analysen, Experimente, Simulationen* -, 2003, ISBN 3-933761-25-5
- 123 Appt, Jochen: *Analysis of Basin-Scale Internal Waves in Upper Lake Constance*, 2003, ISBN 3-933761-26-3
- 124 Hrsg.: Schrenk, Volker; Batereau, Katrin; Barczewski, Baldur; Weber, Karolin und Koschitzky, Hans-Peter: *Symposium Ressource Fläche und VEGAS - Statuskolloquium 2003, 30. September und 1. Oktober 2003*, 2003, ISBN 3-933761-27-1
- 125 Omar Khalil Ouda: *Optimisation of Agricultural Water Use: A Decision Support System for the Gaza Strip*, 2003, ISBN 3-933761-28-0
- 126 Batereau, Katrin: *Sensorbasierte Bodenluftmessung zur Vor-Ort-Erkundung von Schadensherden im Untergrund*, 2004, ISBN 3-933761-29-8
- 127 Witt, Oliver: *Erosionsstabilität von Gewässersedimenten mit Auswirkung auf den Stofftransport bei Hochwasser am Beispiel ausgewählter Stauhaltungen des Oberrheins*, 2004, ISBN 3-933761-30-1
- 128 Jakobs, Hartmut: *Simulation nicht-isothermer Gas-Wasser-Prozesse in komplexen Kluft-Matrix-Systemen*, 2004, ISBN 3-933761-31-X
- 129 Li, Chen-Chien: *Deterministisch-stochastisches Berechnungskonzept zur Beurteilung der Auswirkungen erosiver Hochwasserereignisse in Flusstauhaltungen*, 2004, ISBN 3-933761-32-8
- 130 Reichenberger, Volker; Helmig, Rainer; Jakobs, Hartmut; Bastian, Peter; Niessner, Jennifer: *Complex Gas-Water Processes in Discrete Fracture-Matrix Systems: Upscaling, Mass-Conservative Discretization and Efficient Multilevel Solution*, 2004, ISBN 3-933761-33-6
- 131 Hrsg.: Barczewski, Baldur; Koschitzky, Hans-Peter; Weber, Karolin; Wege, Ralf: *VEGAS - Statuskolloquium 2004*, Tagungsband zur Veranstaltung am 05. Oktober 2004 an der Universität Stuttgart, Campus Stuttgart-Vaihingen, 2004, ISBN 3-933761-34-4
- 132 Asie, Kemal Jabir: *Finite Volume Models for Multiphase Multicomponent Flow through Porous Media*. 2005, ISBN 3-933761-35-2
- 133 Jacoub, George: *Development of a 2-D Numerical Module for Particulate Contaminant Transport in Flood Retention Reservoirs and Impounded Rivers*, 2004, ISBN 3-933761-36-0
- 134 Nowak, Wolfgang: *Geostatistical Methods for the Identification of Flow and Transport Parameters in the Subsurface*, 2005, ISBN 3-933761-37-9
- 135 Süß, Mia: *Analysis of the influence of structures and boundaries on flow and transport processes in fractured porous media*, 2005, ISBN 3-933761-38-7

- 136 Jose, Surabhin Chackiath: *Experimental Investigations on Longitudinal Dispersive Mixing in Heterogeneous Aquifers*, 2005, ISBN: 3-933761-39-5
- 137 Filiz, Fulya: *Linking Large-Scale Meteorological Conditions to Floods in Mesoscale Catchments*, 2005, ISBN 3-933761-40-9
- 138 Qin, Minghao: *Wirklichkeitsnahe und recheneffiziente Ermittlung von Temperatur und Spannungen bei großen RCC-Staumauern*, 2005, ISBN 3-933761-41-7
- 139 Kobayashi, Kenichiro: *Optimization Methods for Multiphase Systems in the Subsurface - Application to Methane Migration in Coal Mining Areas*, 2005, ISBN 3-933761-42-5
- 140 Rahman, Md. Arifur: *Experimental Investigations on Transverse Dispersive Mixing in Heterogeneous Porous Media*, 2005, ISBN 3-933761-43-3
- 141 Schrenk, Volker: *Ökobilanzen zur Bewertung von Altlastensanierungsmaßnahmen*, 2005, ISBN 3-933761-44-1
- 142 Hundecha, Hirpa Yeshewatesfa: *Regionalization of Parameters of a Conceptual Rainfall-Runoff Model*, 2005, ISBN: 3-933761-45-X
- 143 Wege, Ralf: *Untersuchungs- und Überwachungsmethoden für die Beurteilung natürlicher Selbstreinigungsprozesse im Grundwasser*, 2005, ISBN 3-933761-46-8
- 144 Breiting, Thomas: *Techniken und Methoden der Hydroinformatik - Modellierung von komplexen Hydrosystemen im Untergrund*, 2006, 3-933761-47-6
- 145 Hrsg.: Braun, Jürgen; Koschitzky, Hans-Peter; Müller, Martin: *Ressource Untergrund: 10 Jahre VEGAS: Forschung und Technologieentwicklung zum Schutz von Grundwasser und Boden*, Tagungsband zur Veranstaltung am 28. und 29. September 2005 an der Universität Stuttgart, Campus Stuttgart-Vaihingen, 2005, ISBN 3-933761-48-4
- 146 Rojanschi, Vlad: *Abflusskonzentration in mesoskaligen Einzugsgebieten unter Berücksichtigung des Sickerraumes*, 2006, ISBN 3-933761-49-2
- 147 Winkler, Nina Simone: *Optimierung der Steuerung von Hochwasserrückhaltebeckensystemen*, 2006, ISBN 3-933761-50-6
- 148 Wolf, Jens: *Räumlich differenzierte Modellierung der Grundwasserströmung alluvialer Aquifere für mesoskalige Einzugsgebiete*, 2006, ISBN: 3-933761-51-4
- 149 Kohler, Beate: *Externe Effekte der Laufwasserkraftnutzung*, 2006, ISBN: 3-933761-52-2
- 150 Hrsg.: Braun, Jürgen; Koschitzky, Hans-Peter; Stuhmann, Matthias: *VEGAS-Statuskolloquium 2006*, Tagungsband zur Veranstaltung am 28. September 2006 an der Universität Stuttgart, Campus Stuttgart-Vaihingen,, 2006, ISBN: 3-933761-53-0



151 Niessner, Jennifer: *Multi-Scale Modeling of Multi-Phase - Multi-Component Processes in Heterogeneous Porous Media*, 2006, ISBN: 3-933761-54-9

152 Fischer, Markus: *Beanspruchung eingeeerdeter Rohrleitungen infolge Austrocknung bindiger Böden*, 2006, ISBN: 3-933761-55-7

Die Mitteilungshefte ab dem Jahr 2005 stehen auch als pdf-Datei über die Homepage des Instituts: [www.iws.uni-stuttgart.de](http://www.iws.uni-stuttgart.de) zur Verfügung.

ISSN 0343-1150