Beanspruchung eingeerdeter 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

Inhaltsverzeichnis

Formelzeichen und Einheiten ..... **XII**

Zusammenfassung ..... **XVI**

Abstract ..... **XXVI**

1. Einführung **1**

1.1 Problembeschreibung ***1***

1.2 Wissensstand ***2***

1.3 Aufgabenstellung ***4***

2. Grundlagen **5**

2.1 Beschreibung der betrachteten Rohrleitungstypen ***5***

2.1.1 Graugussrohrleitungen 5

2.1.2 Stahlrohrleitungen 8

2.2 Einfluss der Umgebungsbedingungen bei axial gleichmäßiger Rohrbettung ***9***

2.3 Überlegungen zu den Auswirkungen von Setzungen bei ungleichmäßig aufgelagerten Rohrleitungen ***12***

2.4 Ansatz der Umgebungsbedingungen in der vorliegenden Aufgabenstellung ***13***

2.5 Lösungsweg ***14***

3. Zu den Setzungen infolge Bodenschrumpfung **18**

3.1 Einfluss des Bodenwassergehalts ***18***

3.1.1 Wassergehalt und Konsistenzgrenzen 18

3.1.2 Wassergehalt und Bodenvolumen 19

3.2 Schrumpfungsverhalten bei natürlichen Randbedingungen ***20***

3.3 Berichte über Feuchtegehaltsänderungen und resultierende Setzungen ***23***

3.4 Anwendung in der vorliegenden Aufgabenstellung ***26***

4. Berechnung der Rohrleitung als Biegeträger im Erdreich **28**

4.1 Modellbildung für Berechnungen mit der Finite-Element-Methode ***28***

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

4.2 Berechnung der resultierenden Querschnittsspannungen ... 36
4.2.1 Spannungen in Längsrichtung ... 37
4.2.2 Schubspannungen infolge Querkraft ... 39

5. Berechnung des druckbeanspruchten Rohrquerschnitts ... 41
5.1 Lastfall Erddruck ... 41
5.1.1 Ansatz der Belastung ... 41
5.1.2 Statische Berechnung ... 41
5.2 Lastfall Innendruck ... 53

6. Überlagerung der Lastfälle ... 54
6.1 Festigkeitshypothesen ... 54
6.1.1 Graugussrohrleitungen ... 54
6.1.2 Stahlrohrleitungen ... 55
6.2 Ansatz der Vergleichsspannungen ... 55

7. Zusammenfassende Darstellung des Berechnungsablaufs ... 58
7.1 Arbeitsschritte ... 58
7.2 Fallbeispiel ... 60

8. Parameterstudie ... 66
8.1 Quantifizierung der Einflussgrößen ... 66
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
8.2 Aufbau der Berechnungsreihen ... 77
8.3 Einfluss der Leitungseigenschaften ... 79
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
8.4 Einfluss der Bodeneigenschaften ... 93
8.4.1 Scherfestigkeit ... 93
8.4.2 Elastiztitätsmodul ... 97
8.4.3 Querdehnzahl ... 101

8.5 Einfluss weiterer Umgebungs- und Betriebsbedingungen 104
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

9. Zusammenfassung 120

Literaturverzeichnis 124

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 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.

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 aufgebrachte Linienlasten berücksichtigt.

Zur Abbildung der mechanischen Bodeneigenschaften in den FE-Modellen muss die Beziehung zwischen Spannungen σ und Verformungen ε 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 φ, die Querdehnzahl ν und der Dilatanzwinkel ψ.

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

Der Reibungswinkel φ 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 ν 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 ψ 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 Erdauflast 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 Leitungswerkstoffs. 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 spröd 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 plastischen Verhalten bis zum Erreichen der Zugfestigkeit an. Das Fließversagen bei Erreichen der Streckgrenze wird durch die infolge des aufgebrachten 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.

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 Leitungsachse 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 eingeerdete 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 betrugen 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 Scherverbunds 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.