DIPL.-ING. DR. TECHN. GERHARD KIESSELBACH
Ingenieurbüro
A-1100 Wien, Wienerbergstraße 7/7 OG
Telefon: (+43/1) 60 70 940, Telefax: (+43/1) 60 70 940 - 20, e-mail: kiesselbach@via.at

Projektstudie über die Verfüllung von Künetten

Magistrat der Stadt Wien

Magistratsabteilung 22 - Umweltschutz

ÖkoKaufWien – Arbeitsgruppe Tiefbau

Zahl: 51.99/ber01/Dr.Ki/s Wien, 1999 12 29

Betrifft: Projektstudie über die Verfüllung von Künetten

Auftraggeber: Magistrat der Stadt Wien
Magistratsabteilung 22 - Umweltschutz
Ebendorferstraße 4
A-1082 Wien

Betreuung: Dipl.-Ing. Oppenauer, MA 22 - Referat Abfallwirtschaft
Tel.: 4000 - 88266, e-mail: opp@m22.magwien.gv.at

In Zusammenarbeit mit: „ÖkoKaufWien“ – Arbeitsgruppe Tiefbau

Betreuung: Dipl.-Ing. Brezinschek, MA 29 - Brückenbau und Grundbau
Tel.: 48829/96915, e-mail: brz@m29.magwien.gv.at

Gegenstand: Im Auftrag des Magistrates der Stadt Wien, Magistratsabteilung 22 – Umweltschutz, in Zusammenarbeit mit ÖkoKaufWien - Projektgruppe für umweltgerechte Leistungen, Arbeitsgruppe Tiefbau - soll im Rahmen einer Projektstudie ein theoretisches Grundkonzept für die Verfüllung von Künetten mit sogenannten stabilisierten Verfüllmaterialien mit qualitativer Abschätzung der Konsequenzen für Rohr und Fahrbahn erstellt werden. Das Ziel der Arbeit soll sein, qualitative Informationen über die Sicherheit und Nutzungsdauer erdverlegter Ver- und Entsorgungsleitungen aber auch eine Abschätzung der Konsequenzen der neuen Verfüllmethode auf die Funktionalität und Nutzungsdauer der Fahrbahn nach dem Motto „Straße als Verkehrs- und Versorgungsschiene” zu erhalten.

Stichwörter

Künettenverfüllung - konventioneller Einbau - offene Bauweise - Künettenverdichtung - nichtkonventioneller Einbau - Stabilisierte Verfüllmaterialien - Technische Spezifikation - grabenloser Einbau - Ver- und Entsorgungsleitungen - Straßenverkehrsflächen - Straßenwiederinstandsetzung - Straßenwiederinstandsetzungsvorschriften - Belastung und Beanspruchung erdverlegter Leitungssysteme – Einheitliche Einbaurichtlinien - Abstimmung der Vorschriften, Regelwerke und Richtlinien - Planungskoordination

Kurzfassung

Im Rahmen der vorliegenden Projektstudie über die Verfüllung von Künetten für erdverlegte Leitungssysteme wurde mit Hilfe von analytischen Simulationen gezeigt, welche Konsequenzen sich für erdverlegte Leitungssysteme bei der konventionellen Verlegung in offener Bauweise nach den einschlägigen Regelwerken und Richtlinien für die jeweiligen Leitungen sowie den einschlägigen Straßenwiederinstandsetzungsvorschriften der Straßenerhalter ergeben. Insbesondere wurden die Konsequenzen der Verfüllung in der Leitungszone einschließlich der im allgemeinen vorhandenen Imperfektionen in der Umgebung der Leitungen sowie der Verdichtung in der Wiederverfüllzone betrachtet. Entgegen der üblichen Meinung können durch die Verdichtung der Künettenverfüllung relativ hohe Beanspruchungen und Verformungen in den erdverlegten Leitungen - insbesondere in Kunststoffrohren - auftreten, die weitaus größer sein können als die im Betrieb zu erwartenden Belastungen.

Weiters wurden die sogenannten stabilisierten Verfüllmaterialien betrachtet, also Verfüllmaterialien, die in flüssiger Form in den Rohrgraben eingebracht werden und anschließend relativ rasch aushärten. Diese Materialien zeigen eine Reihe technischer und wirtschaftlicher Vorteile bei der Verfüllung von Künetten, insbesondere dann, wenn die definierten Anforderungen an diese Verfüllmaterialien durch Gebrauchstauglichkeitsprüfungen sowie durch Qualitätssicherungsprüfungen entsprechend nachgewiesen werden. Hinweise auf derartige Prüfungen wurden angeführt.

Basierend auf diesem theoretischen Grundkonzept ist es notwendig, weiterführende Untersuchungen an den Verfüllmaterialien durchzuführen und Erfahrungen durch Messungen an Einbauten in Künetten zu sammeln.

Summary

In this study, concerning the backfilling of service trenches of buried pipelines, it is shown by means of analytical simulations, which consequences on buried pipelines arise from the conventional installation in trench keeping to the present technical standards and relevant rules concerning pipe-laying and road repair works. In particular the consequences resulting of the backfilling of the pipe-zone including the usually existing imperfections of the neighbourhood of the pipes, and the consequences due to compaction in the refilling-zone of the service trench are considered. Contrary to the usual assumption the compaction of the backfilling material in the service trench can cause considerable stress and deformation of buried pipelines, especially of plastic pipes, exceeding the load and stress situation to be expected during the operating phase of the pipeline.

Furthermore this study deals with so-called stabilized backfilling materials, which are installed in wet consistency in the service trench and become hardened in time. These materials offer a lot of technical and economic advantages, particularly if the demands made on these backfilling materials are proved by performance capability tests and quality assurance tests, which are described in this study in general terms.

Taking the results of this theoretical analysis as a starting point it seems to be necessary to go ahead with further investigations on backfilling materials and to gain additional experience by taking measurements on buried pipes in service trenches.

I N H A L T S Ü B E R S I C H T

1. Einleitung

2. System „Fahrbahn-Boden-Leitung”
2.1 Werkstoffe für erdverlegte Rohrleitungen
2.2 Boden- und Verfüllmaterialien
2.2.1 Konventionelle Verfüllmaterialien
2.2.2 Nichtkonventionelle Verfüllmaterialien
2.3 Fahrbahnen

3. Verlege- und Einbaumethoden für erdverlegte Leitungen
3.1 Einbau in konventioneller offener Bauweise
3.2 Einbau in nichtkonventioneller grabenloser Bauweise

4. Einwirkungen auf erdverlegten Rohrleitungen
4.1 Einwirkungen durch direkte Lasten
4.1.1 Innendruck
4.1.2 Erdlast - Einbaulast
4.1.3 Auflasten - ruhende Lasten auf der Fahrbahn
4.1.4 Verkehrslasten - bewegte Lasten auf der Fahrbahn
4.2 Einwirkungen durch indirekte Lasten
4.2.1 Rohrgrabenunebenheiten
4.2.2 Bettungsverhältnisse
4.2.3 Einbaulasten

5. Strukturverhalten erdverlegter Rohrleitungen
5.1 Beanspruchungen erdverlegter Rohrleitungen durch direkte Lasten
5.2 Beanspruchungen erdverlegter Rohrleitungen durch indirekte Lasten
5.2.1 Beanspruchungen durch Unebenheiten der Rohrgrabensohle
5.2.2 Beanspruchungen durch ungleichmäßige Rohrbettung
5.2.3 Beanspruchungen durch ungleichmäßige Einbettung

6. Strukturverhalten von Fahrbahnen

7. Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

8. Maßnahmen für eine nachhaltige Nutzung erdverlegter Leitungssysteme

9. Ausblick auf weitere zielführende Untersuchungen
9.1 Vorschlag für analytische Untersuchungen
9.2 Vorschlag für experimentelle Untersuchungen
9.3 Vorschlag für praktische Untersuchungen in Künetten

10. Zusammenfassung

11. Literatur

1. Einleitung

Zwei Begriffe haben in den letzten Jahren, im Zusammenhang mit Planung, Bau, Betrieb und Instandhaltung erdverlegter Leitungssysteme in der öffentlichen Ver- und Entsorgungswirtschaft stark an Bedeutung gewonnen, die für die technische und wirtschaftliche Beurteilung und Entscheidungsfindung maßgebend sind. Es sind dies die **Begriffe**:

Qualität und **Kosten**

Da in den meisten Fällen die Ver- und Entsorgungsunternehmen sowie die betroffenen Straßenerhalter verschiedene Unternehmen sind, bestehen vielfach auch unterschiedliche Auslegungen dieser beiden Begriffe. Während die Ver- und Entsorgungsunternehmen an einem möglichst kostengünstigen Bau der Leitungssysteme interessiert sind und die Qualität der Leitungen sowie der Verlege- und Bauarbeiten oftmals als gegeben voraussetzen, ist der Straßenerhalter, bedingt durch die Störung der Straßenkonstruktion durch den Leitungsgraben, mit nachträglichen, oft relativ teuren Sanierungsarbeiten an den Straßenverkehrsflächen konfrontiert. Aus diesem Grund scheint es notwendig, **allgemeine Betrachtungen für das gesamte System „Fahrbahn-Boden-Leitung“ anzustellen** und die Begriffe Qualität und Kosten derartig zu definieren, daß nachhaltig die erforderliche Qualität der Leitungssysteme aber auch der Straßenverkehrsflächen erhalten wird, **um eine möglichst lange Nutzungsdauer der Leitungssysteme mit geringen Gesamtkosten zu erzielen.**

Unter **Qualität** ist demnach grundsätzlich eine **einwandfreie Langzeitfunktionalität** sowohl der Leitungssysteme als auch der Straßenverkehrsflächen mit **minimalem Instandhaltungsaufwand** und **möglichst langer Nutzungsdauer** zu verstehen.

Unter **Kosten** sind **grundsätzlich die Gesamtkosten über die gesamte Nutzungsdauer**, umfassend Planung, Bau und Instandhaltung sowohl der Leitungssysteme als auch der relevanten Straßenverkehrsflächen, zu verstehen.

Die im ersten Ansatz eher widersprüchliche **Vorgabe: „Kosten senken“ und „Qualität erhöhen“ scheint** unter Zuhilfenahme der obigen Definitionen durchaus **realisierbar**, wenn einerseits die notwendigen formalen Grundlagen, wie z.B. Vorschriften, Regelwerke, Richtlinien usw. geschaffen werden und andererseits die neuen Technologien und die sogenannten nichtkonventionellen Methoden effizient ausgenützt werden.

Problematisch ist die Forderung „Kosten senken“ nur dann, wenn aus einer kurzfristigen wirtschaftlichen Überlegung heraus die Qualität der Arbeiten bei der Errichtung der

Leitungssysteme sowie der Fahrbahnwiederinstandsetzung außer acht gelassen wird und als Folge einerseits Schäden an den Leitungssystemen auftreten, die dann mit erhöhtem Aufwand saniert werden müssen und auch kostenintensive Instandhaltungsmaßnahmen für die Straßenerhalter zufolge einer mangelhaften Grabenverfüllung entstehen. Die anfänglich eingesparten Investitionskosten und die daraus resultierende mangelhafte Qualität der Arbeiten können über die Nutzungsdauer gesehen ein Vielfaches an Sanierungs- und Instandhaltungskosten erfordern. Aus diesem Grund scheint es notwendig, geeignete **Qualitäts-Kosten-Relationen** für die Errichtung erdverlegter Leitungssysteme zu **entwickeln, die effiziente Entscheidungskriterien ermöglichen**. Umfangreiche Untersuchungen haben gezeigt, daß durch die Verknüpfung von experimentellen und analytischen Untersuchungen sehr effiziente Informationen über das Strukturverhalten erdverlegter Leitungssysteme sowohl beim Bau als auch im Betrieb zu erhalten sind, die wichtige Erkenntnisse zu den Forderungen „Qualität erhöhen“ und „Kosten senken“ liefern können. Eine wesentliche Voraussetzung für die Betrachtung ist dabei die Analyse des gesamten Systems „Fahrbahn-Boden-Leitung“. Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Abstimmung der Forderungen der Straßenerhalter bei der Grabenverfüllung und der Fahrbahnwiederinstandsetzung auf die Anforderungen erdverlegter Leitungssysteme nach dem **Motto: „Die Straße als Verkehrs- und Versorgungsschiene“.**

Sowohl die Analyse von Schäden an erdverlegten Rohrleitungen, als auch der zunehmende Einsatz flexibler Rohrwerkstoffe im Vergleich zu den traditionellen starren Rohrwerkstoffen, die Verwendung neuer Verlegeverfahren und Einbaumethoden, neuer Grabenverfüllmaterialien usw. zeigen die Notwendigkeit der Betrachtungen und Entwicklungen, wie sie in den letzten Jahren im Rahmen von umfangreichen Untersuchungen [1 bis 29] durchgeführt wurden. Dabei wurde vor allem versucht, ausgehend von Meßergebnissen an erdverlegten Rohrleitungen, computerunterstützte Berechnungsmodelle in Abstimmung mit experimentellen Untersuchungen zu entwickeln, die das Strukturverhalten des Gesamtsystems „Fahrbahn-Boden-Leitung“ transparent machen und Informationen über die Zustände beim Bau und im Betrieb der Leitungen geben können. Nur mit ausreichenden Kenntnissen über das Strukturverhalten der Leitungssysteme und der Fahrbahn ist es möglich, neben den Fragen der technischen Sicherheit auch zu den Begriffen „Qualität“ und „Kosten“ effiziente Aussagen zu erhalten.

Durch den systematischen Ausbau und die Rehabilitation der öffentlichen Ver- und Entsorgungsleitungen sowie der Kommunikationssysteme hat die Bedeutung der Straße als Versorgungsschiene, neben der Funktion als Verkehrsschiene, sehr wesentlich zugenommen. Unter Versorgung sind dabei die Bereiche Gas, Fernwärme, Wasser, Strom, usw., unter Entsorgung der Bereich Abwasser und unter Kommunikation die Bereiche Telefon, Telekabel, Lichtwellenleiter, usw. zu verstehen.

Die weiteren Betrachtungen beziehen sich vorwiegend auf erdverlegte Rohrleitungen, gelten aber im allgemeinen auch für andere Leitungssysteme. Der Anwendungsbereich für erdverlegte Rohrleitungen umfaßt ohne Anspruch auf Vollständigkeit:

- hinsichtlich der Transportmedien:
  - Gas
  - Wasser
  - Abwasser
  - Fernwärme
  - Mineralöl
- hinsichtlich des Leitungstyps:
  - Transportleitungen
  - Verteilleitungen
  - Zuleitungen
- hinsichtlich der Druckstufen:
  - drucklose Leitungen
  - Niederdruckleitungen
  - Hochdruckleitungen
- hinsichtlich der Betriebsweisen:
  - kaltgehende Leitungen
  - warmgehende Leitungen

In den einschlägigen Regelwerken und Richtlinien für Ver- und Entsorgungsleitungen sind Hinweise auf den konventionellen Einbau der Leitungssysteme in offener Bauweise enthalten, die sich jedoch vorwiegend nur auf die Leitungen selbst beziehen, **es fehlen jedoch vorwiegend die erforderlichen Vorgaben für die Verfüllung und Verdichtung der Leitungsgräben im Hinblick auf die Wiederinstandsetzung der Fahrbahnen** entsprechend den Anforderungen der Straßenerhalter. Demgegenüber sind in den einschlägigen Aufgrabeordnungen bzw. Straßenwiederinstandsetzungsvorschriften der Straßenerhalter z.B. [30] Vorgaben für die Verfüllung und Verdichtung der Leitungsgräben enthalten, die sich jedoch vorwiegend nur auf die Fahrbahnen beziehen und nicht die Bedürfnisse der Leitungssysteme berücksichtigen. Die Vorgaben der Regelwerke, Richtlinien und Vorschriften für den Einbau erdverlegter Leitungssysteme sind demnach nicht abgestimmt auf das System „Fahrbahn-Boden-Leitung" sondern nur auf die jeweiligen Interessen der zuständigen Erhalter.

Die Betrachtung des Systems „Fahrbahn-Boden-Leitung" ist wesentlich im Hinblick auf die Sicherheit, Funktionalität, Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit erdverlegter Leitungssysteme bezogen auf eine Nutzungsdauer von mindestens 50 Jahren sowie die Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit der Fahrbahnkonstruktionen im Hinblick auf die erforderliche

Langzeitnutzung. Entsprechend der mechanischen Interaktion zwischen Fahrbahn, Boden und Leitung scheint es notwendig die Anforderungen der Ver- und Entsorger sowie der Straßenerhalter bestmöglich aufeinander abzustimmen, um der Forderung einer wirtschaftlichen Langzeitnutzung der Straße als Verkehrs- und Versogungsschiene zu entsprechen.

Umfangreiche Untersuchungen [1-29] über das Strukturverhalten erdverlegter Rohrleitungen haben gezeigt, daß entgegen den Ausführungen in den einschlägigen Regelwerken und Richtlinien für das Strukturverhalten erdverlegter Leitungen immer das gesamte System „Fahrbahn-Boden-Leitung" maßgebend ist und die Einwirkungen auf die Leitungen durch die Verfüllung und Verdichtung des Leitungsgrabens wesentlich höher sein können als die Einwirkungen durch den Betrieb der Leitungssysteme innerhalb der Nutzungsdauer.

Durch den Einsatz moderner computerunterstützer Simulationsmethoden läßt sich das Strukturverhalten sowohl der erdverlegten Ver- und Entsorgungssysteme als auch der Straßenkonstruktionen ausreichend gut erfassen. **Die Aufgabe besteht darin, die Wechselwirkungen zwischen den Komponenten des Systems „Fahrbahn-Boden-Leitung" sowohl aus technischer als auch aus wirtschaftlicher Sicht transparent darzustellen** und die notwendigen technischen Anforderungen sowie die Wirtschaftlichkeit sowohl für die Ver- und Entsorger als auch die Straßenerhalter aufzuzeigen. Nur durch diese Transparenz sind klare Entscheidungen möglich.

Der konventionelle Einbau erdverlegter Leitungen in offener Bauweise ist die traditionelle Methode, wie sie auch im vorigen Jahrhundert in annähernd ungeänderter Form angewendet wurde. Durch den **Einsatz** neuer Leitungswerkstoffe, neuer Verfüllmaterialien sowie die Anwendung **neuer Verlegetechnologien** haben sich in den letzten Jahren **neue Möglichkeiten für die Verlegung und den Einbau von erdverlegten Leitungen** ergeben, die unter dem Begriff nichtkonventionelle Methoden zusammengefaßt sind.

Eine Reihe von Fragen, die im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit der konventionellen Verlegung in offener Bauweise von Bedeutung sind, wie z.B. die Grabenbreite, die Verlegetiefe, die Parallelverlegung von Leitungen, die Verwendung neuer Verfüllmaterialien wie z.B. der stabilisierten Verfüllmaterialien, der Einsatz neuer Verlege- und Einbaumethoden usw. sind heute noch nicht ausreichend beantwortet. Die Behandlung dieser Fragen scheint jedoch sehr wesentlich, um einerseits die technischen Vorteile sowie die Wirtschaftlichkeit erfassen und nutzen zu können und andererseits die **Einwirkungen auf erdverlegte Ver- und Entsorgungssysteme sowie die Auswirkungen auf die Straßenkonstruktionen so gering wie möglich zu halten**.

In den letzten Jahren haben sich für die Verlegung und den Einbau erdverlegter Leitungen gewisse Trends ergeben, die im folgenden ohne Anspruch auf Vollständigkeit beispielhaft kurz angeführt sind.

- Grabenformen, Grabenabmessungen
  Die Entwicklungen in der Ver- und Entsorgungswirtschaft, vor allem bedingt durch den Kostendruck beim Bau erdverlegter Leitungen, führen zu:
  - schmalen Leitungsgräben
  - geringeren Überdeckungshöhen.

  Durch diese Maßnahmen soll vor allem der Grabenaushub verringert werden. Dadurch können zwar Kosten gespart werden, die Bettung und Einbettung der Rohre in der Leitungszone kann jedoch im allgemeinen nicht mit der in den einschlägigen Regelwerken und Richtlinien geforderten Sorgfalt erfolgen, da die Zugänglichkeit in den schmalen Rohrgräben nicht im erforderlichen Ausmaß gegeben ist. Auch geringe Überdeckungshöhen sind im Hinblick auf zukünftige Straßenbaumaßnahmen und die dadurch entstehenden Einwirkungen auf erdverlegte Leitungen problematisch.

- Verfüllmaterialien
  Für die Verfüllung von Künetten stehen grundsätzlich folgende Materialien zur Diskussion:
  - Verwendung von Austauschmaterialien, wie z.B. Sand, Kies,...
  - Wiederverwendung des Aushubmaterials
  - Verwendung von Recyclingmaterialien
  - Verwendung von stabilisierten Verfüllmaterialien

  Die Verfüllmaterialien und deren Steifigkeitseigenschaften haben wesentlichen Einfluß auf das Strukturverhalten erdverlegter Leitungen sowie das Setzungsverhalten der Grabenverfüllung im Hinblick auf die Fahrbahnoberfläche.

  Durch die zum Teil relativ hohen Kosten für die nach den einschlägigen Vorschriften, Regelwerken und Richtlinien erforderlichen Austauschmaterialien für die Grabenverfüllung gewinnen die Betrachtungen über die Wiederverwendung des Aushubmaterials sowie die Verwendung von Recyclingmaterial und stabilisierten Verfüllmaterialien zunehmend an Bedeutung. Hierbei sind vor allem die Verträglichkeit mit den Leitungen, die Umweltverträglichkeit sowie die Anforderungen der Straßenerhalter zu beachten.

- Verlegemethoden
  In den letzten Jahren sind neue Verlegemethoden für erdverlegte Leitungen aufgekommen, die zunehmend an Bedeutung gewinnen, wie z.B. grabenlose Verlegemethoden – Horizontalspülbohrverfahren, Vortriebsverfahren, usw. - sowie für Spezialanwendungen das Einpflügen von Leitungen, usw.

- Einheitliche Einbaurichtlinien für Ver- und Entsorgungsleitungen
  Betrachtungen im Rahmen von ÖVGW-Forschungsprojekten haben gezeigt, daß für die Forderungen „Qualität erhöhen“ und „Kosten senken“ einheitliche Einbaurichtlinien für erdverlegte Ver- und Entsorgungsleitungen in Abstimmung mit den Straßenerhaltern sowohl technisch als auch wirtschaftlich wesentliche Vorteile bringen könnten. Die Diskussion der Versorger mit den Straßenerhaltern diesbezüglich sollte in Österreich rasch begonnen werden.

Die bisherigen Untersuchungen haben gezeigt, daß bei der technischen und wirtschaftlichen Beurteilung erdverlegter Ver- und Entsorgungssysteme dem Einbau der Leitungen in konventioneller offener Bauweise, also der Bettung, Einbettung, Grabenverfüllung, Verdichtung usw. sehr große Bedeutung zukommt, die bisher in den einschlägigen Regelwerken nicht ausreichend berücksichtigt ist. Weiters zeigen die Untersuchungen, daß im Hinblick auf die Verdichtung der Grabenverfüllung die in den einschlägigen Regelwerken enthaltenen Kennwerte zur Charakterisierung der Boden- und Verfüllmaterialien nicht ausreichen.

Neben den Eigenschaften der Leitungskomponenten und deren Verbindungen sind für die Sicherheit und Wirtschaftlichkeit erdverlegter Leitungssysteme auch die Verfüllmaterialien und deren Einbringung in den Leitungsgraben von Bedeutung.

Die verschiedenen konventionellen Verfüllmaterialien, wie z.B. Sand, Kies, usw. zeigen zum Teil große Unterschiede in den Eigenschaften untereinander und in der Relation zu den bestehenden Böden, wobei die Gebrauchstauglichkeit der Verfüllmaterialien nur in den seltensten Fällen durch geeignete Versuche nachgewiesen ist. Die in den einschlägigen Regelwerken und Richtlinien enthaltenen Kennwerte der Verfüllmaterialien sind für die Erfassung der Auswirkungen der Verdichtung der Rohrgrabenverfüllung nicht ausreichend.

Für die Verfüllung von Künetten in offener Bauweise gewinnen die sogenannten stabilisierten Verfüllmaterialien zunehmend an Bedeutung. Für diese Materialien wurde im Auftrag des Fachverbandes Gas & Wärme eine technische Spezifikationen [27] erarbeitet, in der Anforderungen und Prüfmethoden festgelegt sind, um einerseits die Gebrauchstauglichkeit der Verfüllmaterialien nachzuweisen und andererseits die erforderliche Qualität der Verfüllmaterialien entsprechend dem Einsatzzweck und der Nutzungsdauer sicherzustellen. Basierend auf dieser

technischen Spezifikation [27], die auch als ON-Regel „ONR/FW 110A" erschienen ist, wurden bereits Prüfungen an verschiedenen stabilisierten Verfüllmaterialien durchgeführt und dabei wertvolle Erkenntnisse über die Eigenschaften dieser Materialien gewonnen.

Wie die Erfahrungen zeigen [31], bringen sogenannte stabilisierte Verfüllmaterialien – also flüssig in die Künette eingebrachte Verfüllmaterialien, die relativ rasch aushärten – eine Reihe von Vorteilen bei der Verfüllung von Künetten gegenüber den konventionellen Verfüllmaterialien sowohl aus technischer als auch aus wirtschaftlicher Sicht, wobei jedoch die entsprechenden Grundlagen in den einschlägigen Regelwerken und Richtlinien sowie allgemein gültige Anwendungskonzepte derzeit noch fehlen.

Auch in Deutschland hat man vor kurzem damit begonnen stabilisierte Verfüllmaterialien, insbesondere für den Einbau von Kunststoffmantelrohren in der Fernwärmeversorgung zu entwickeln, wobei man vor allem auch bemüht ist, das Grabenaushubmaterial entsprechend aufzubereiten und weiterzuverwenden. In Deutschland laufen diese Entwicklungen unter dem Begriff Bodenmörtel [32, 33, 34]. Einsatz finden diese Verfüllmaterialien auch bei Bauarbeiten im Bereich schutzbedürftiger Altbauten, wo die Verdichtung der Grabenverfüllung zur Schädigung der Bausubstanz führen könnte.

Für die technische und wirtschaftliche Analyse des Gesamtsystems „Fahrbahn-Boden-Leitung" sind folgende Punkte zu betrachten:

- Vorschriften, Regelwerke, Richtlinien
- Leitungselemente
- Verlegung
- Verbindungstechnik
- Verfüllmaterialien
- Einbau
- Straßenwiederinstandsetzung
- Einwirkungen beim Bau und im Betrieb
- Instandhaltung
- Nutzungsdauer

Für die Praxis ist es notwendig, die Auswirkungen der Bodeneigenschaften sowie der Einbauverhältnisse bei konventioneller Verlegung in offener Bauweise auf das Strukturverhalten der Leitungen, unter Berücksichtigung der spezifischen Eigenschaften der Leitungen sowie der zu erwartenden Belastungen, aufzuzeigen. Dies kann für erdverlegte Rohrleitungen mit Hilfe sogenannter „Rohrkennfelder" [20, 26] erfolgen. **Die Rohrkennfelder sind eine neue und effiziente Methode zur Erfassung und Darstellung des Strukturverhaltens erdverlegter Roh-**

re zufolge Einbau und Betrieb für die Anwendung in der Praxis. Neu ist insbesondere die Erfassung der Beanspruchungen und Verformungen in den Rohren durch den konventionellen Einbau nach den einschlägigen Verlege- und Einbaurichtlinien in offener Bauweise und durch die Verfüllung und Verdichtung im Rohrgraben, entsprechend den Anforderungen der Straßenerhalter.

Mit Hilfe der Rohrkennfelder wird das Strukturverhalten der Rohre in Abhängigkeit von

- den Eigenschaften der Rohre und Rohrwerkstoffe
- den Eigenschaften der Boden- und Verfüllmaterialien
- den Einbaubedingungen entsprechend den Anforderungen der Straßenerhalter
- den Belastungen auf das System „Fahrbahn-Boden-Rohr“

durch Kurvenscharen in Diagrammform dargestellt.
Die praktische Anwendung der Rohrkennfelder erfolgt derart, daß für die jeweilige Rohrdimension und den vorgegebenen Einbau- und Belastungszustand das entsprechende Rohrkennfeld aus einem Rohrkennfeldkatalog ausgewählt wird. Mit Hilfe einiger weniger charakteristischer Parameterwerte kann man aus den Rohrkennfeldern sehr einfach das Kurzzeit- und das Langzeitstrukturverhalten der Rohre aus den entsprechenden Kurven ablesen und die notwendigen technischen und wirtschaftlichen Entscheidungen treffen. Die **Rohrkennfelder bieten eine einfache und schnelle Entscheidungsgrundlage** für die Festlegung der Einbaubedingungen und der erforderlichen Einbaumaßnahmen im Hinblick auf die Sicherheit, Funktionalität, Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit erdverlegter Rohrleitungen.

Im Rahmen dieser Projektstudie soll im ersten Abschnitt ein theoretisches Grundkonzept über die Verfüllung von Künetten in offener Bauweise erstellt werden. Das Ziel dieser Arbeit soll sein, qualitative Informationen über die Sicherheit und Nutzungsdauer erdverlegter Leitungen aber auch die Konsequenzen der Verfüllmethoden auf die Funktionalität und Nutzungsdauer der Fahrbahn nach dem Motto „Straße als Verkehrs- und Versorgungsschiene” zu erhalten.

2. System „Fahrbahn-Boden-Leitung“

Umfangreiche Untersuchungen zeigen, daß das Strukturverhalten erdverlegter Leitungen nicht nur von den Eigenschaften der Leitungen sondern vor allem auch von den Bodeneigenschaften, den Verlege- und Einbaubedingungen sowie den Belastungsverhältnissen beim Einbau und im Betrieb abhängt**. Für die Beurteilung des Beanspruchungs- und Verformungszustandes erdverlegter Leitungen ist daher immer das gesamte System „Fahrbahn-Boden-Leitung“ zu betrachten.**

Der prinzipielle Aufbau des Systems „Fahrbahn-Boden-Leitung", bei konventioneller Verlegung in offener Bauweise, mit lagenweiser Einbringung und Verdichtung der Grabenverfüllung, ist in Bild 1 dargestellt.

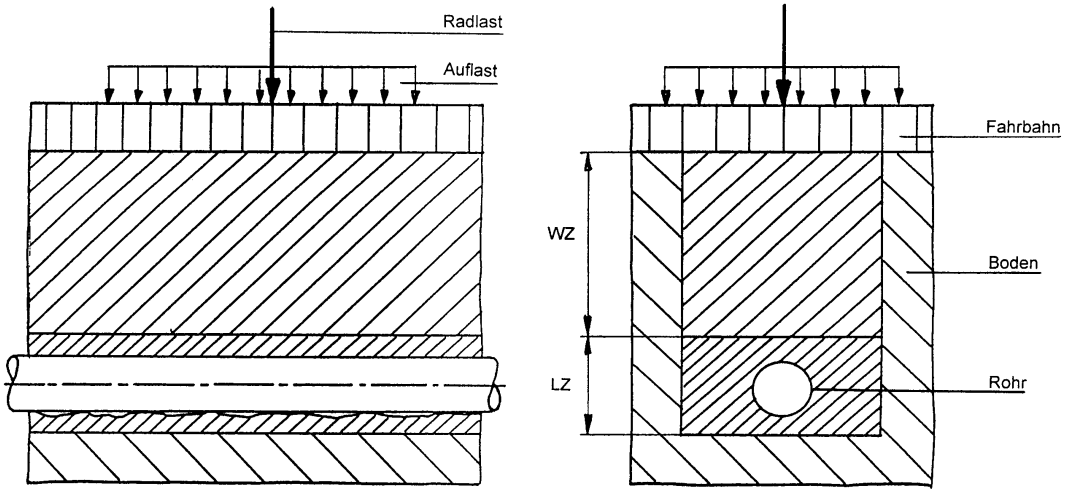


Bild 1: System „Fahrbahn-Boden-Leitung“ bei konventioneller Verlegung

Der Aufbau der Grabenverfüllung von der Grabensohle bis zur Fahrbahn unterteilt sich in die folgenden Abschnitte

- Leitungszone (LZ)
  - Sohlzone
  - Rohrzone
  - Überdeckungszone
- Wiederverfüllzone (WZ)

Die Leitungszone ist jener Bereich, der die Leitung unmittelbar umgibt und für die mechanische Interaktion zwischen Boden und Leitung verantwortlich ist. Über der Leitungszone befindet sich die Wiederverfüllzone, die bis zur Fahrbahn reicht und nach den Anforderungen der Straßenerhalter herzustellen ist.

Bild 1 ist zu entnehmen, daß der Aushub des Leitungsgrabens aus geomechanischer Sicht eine wesentliche Störung des Spannungs- und Verformungszustandes im Boden neben den Grabenwänden hervorruft. Durch die Freistellung der Grabenwände im Zuge der Herstellung des Leitungsgrabens verschwindet die horizontale Bodenspannung, da die freie Oberfläche der Grabenwände spannungsfrei ist. Die Grabenwände sowie der anschließende Boden neigen in Abhängigkeit von den geomechanischen Eigenschaften des bestehenden Bodens zu Verformungen, was sich in Setzungen, Rutschungen usw. zeigt. Aus diesem Grund sind die Grabenwände durch Pölzungen oder geeignete Grabenverbauten abzustützen.

Das System „Fahrbahn-Boden-Leitung“ bei grabenloser Verlegung ist in Bild 2 dargestellt. Im Gegensatz zur konventionellen Verlegung in offener Bauweise entsteht bei der grabenlosen Verlegung ein Mikrotunnel für die Einbringung der Leitung, der im allgemeinen nur eine lokale Störung des Bodens in unmittelbarer Umgebung des Leitungskanals bewirkt. Eine weitreichende Störung im Boden bis hin zur Fahrbahndecke ist bei den grabenlosen Verlegeverfahren im allgemeinen nicht zu erwarten. Eine ausführliche Darstellung der grabenlosen im Vergleich zur konventionellen Leitungsverlegung aus geomechanischer und leitungstechnischer Sicht ist in [8] zu finden.

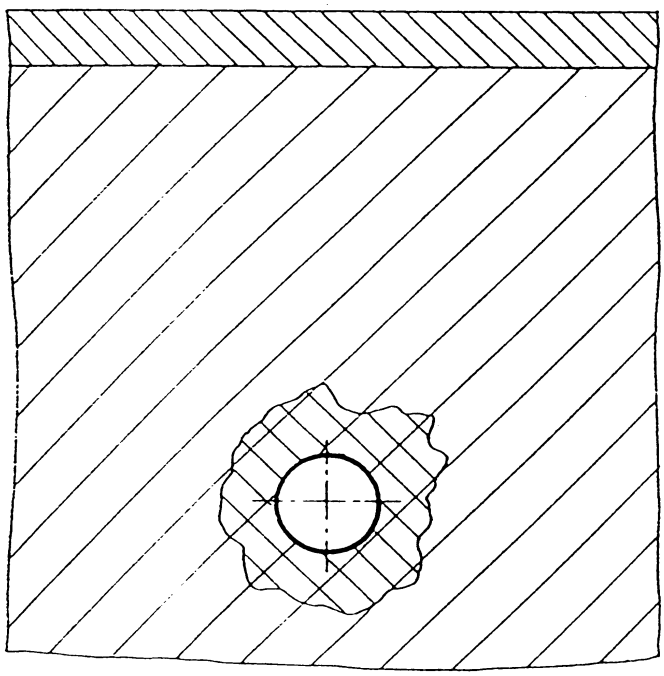


Bild 2: System „Fahrbahn-Boden-Leitung“ bei grabenloser Verlegung

2.1 Werkstoffe für erdverlegte Rohrleitungen

In Tabelle 1 sind - ohne Anspruch auf Vollständigkeit - die zur Zeit am häufigsten verwendeten Rohre bzw. Werkstoffe für erdverlegte Rohrleitungen für die Einsatzgebiete: Gas, Wasser, Abwasser, Fernwärme, usw. angegeben. In Tabelle 1 sind weiters für die jeweiligen Rohre bzw. Werkstoffe die entsprechenden Rohrverbindungen angegeben, wobei zwischen den nicht lösbaren Schweißverbindungen und den lösbaren Muffenverbindungen und Rohrkupplungen zu unterscheiden ist.

Die für die einzelnen Anwendungsbereiche heute vorwiegend eingesetzten Rohre bzw. Werkstoffe sind in Tabelle 1 mit „+“, die heute nur mehr selten verwendeten Rohre bzw. Werkstoffe mit „(+)“ und die wenig bis nicht verwendeten Rohre bzw. Werkstoffe mit „-“ gekennzeichnet.

Rohre	Gas	Wasser	Abwasser	Öl	Fernwärme	Rohrverbindung
Stahlrohre	+	(+)	(+)	+	+	Schweißverbindung
Gußrohre	(+)	+	+	-	-	Muffenverbindung
Betonrohre	-	-	+	-	-	Muffenverbindung
Steinzeugrohre	-	-	+	-	-	Muffenverbindung
AZ-Rohre	-	(+)	-	-	-	Rohrkupplung
PVC-Rohre	(+)	+	+	-	-	Muffenverbindung
PE-Rohre	+	+	+	-	-	Schweißverbindung
GF-UP-Rohre	-	+	+	-	-	Rohrkupplung

Tabelle 1: Rohre und Rohrverbindungen für erdverlegte Rohrleitungen

In der Gasversorgung haben sich in den letzten Jahren vor allem die Stahlrohre für Hoch- und Niederdruckleitungen sowie die PE-Rohre für Niederdruckleitungen durchgesetzt. Die früher vorwiegend verwendeten Gußrohre sowie auch PVC-Rohre werden heute nur mehr selten eingesetzt.

In der Wasserversorgung haben sich neben den traditionellen Gußrohren - heute in Form der duktilen Gußrohre für alle Druckstufen - in den letzten Jahren vor allem die Kunststoffrohre, wie z.B. PVC-Rohre, PE-Rohre und GF-UP-Rohre für die eher geringeren Druckstufen durchgesetzt. In bestehenden Wasserleitungsnetzen sind häufig noch AZ-Rohre anzutreffen.

In der Abwassertechnik werden die meisten heute am Markt befindlichen Rohre bzw. Werkstoffe verwendet.

Für Mineralölleitungen werden aufgrund der Druckstufen vorwiegend nur Stahlrohre verwendet.

Für Fernwärmeleitungen werden vorwiegend nur Stahlrohre verwendet. Lediglich bei geringen Drücken und relativ niedrigen Temperaturen kommen teilweise auch Kunststoffrohre zur Anwendung. In der Fernwärmeversorgung haben sich in den letzten Jahren vor allem die vorisolierten Rohre, bestehend aus dem Stahl-Mediumrohr dem PUR-Schaum zur Wärmeisolation und dem PE-Mantelrohr durchgesetzt.

Neben den Rohren sind auch die Rohrverbindungen zu den benachbarten Rohren aber auch zu den Formstücken für das Strukturverhalten sowie die Funktionalität und Zuverlässigkeit erdverlegter Rohrleitungssysteme von Bedeutung. Dies bezieht sich einerseits auf den Aufwand bei der Herstellung der Rohrverbindungen, die Prüfbarkeit der Dichtfunktion, usw. sowie andererseits auf die geometrische und mechanische Anpassungsfähigkeit des Rohrleitungssystems an die Umgebungsverhältnisse im Boden, also vor allem an die Rohrlagerung bzw. die Rohrbettung.

Für die Dichtheit der Rohrverbindungen ist natürlich auch die Funktionalität und Zuverlässigkeit der Dichtsysteme verantwortlich. War man bei der Beurteilung der Dichtsysteme in der Vergangenheit vor allem auf die Erfahrung sowie auf relativ aufwendige Versuche angewiesen, so bietet sich heute mit Hilfe computerunterstützter Simulationsmethoden die Möglichkeit, das Strukturverhalten von elastomeren Rohrdichtsystemen rechnerisch vorab zu analysieren, noch bevor die Dichtung hergestellt wird. Eine ausführliche Darstellung dieser Methode ist in [16, 17] enthalten.

Rohre und Rohrwerkstoffe für erdverlegte Rohrleitungen zeigen zum Teil wesentliche Unterschiede in den mechanischen Eigenschaften. Dies gilt insbesondere für das Beanspruchungsverhalten, das Verformungsverhalten, das Zeitstandverhalten sowie die Zeit- und Temperaturabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften innerhalb der für erdverlegte Leitungen relevanten Einsatzbereiche.

Nach dem Verformungsverhalten unterscheidet man zwischen „starren“ und „flexiblen“ Rohren, wobei sich die Bezeichnung „starre Rohre“ vor allem auf die metallischen, zementgebundenen und keramischen Rohrwerkstoffe und die Bezeichnung „flexible Rohre“ auf die Kunststoffrohre bezieht. Während bei den starren Rohren der Boden nur zur Lastübertragung auf das Rohr dient, ist bei den flexiblen Rohren die Abstützwirkung des Bodens und damit die mechanische Interaktion zwischen Boden und Rohr für das Strukturverhalten der Rohre von Bedeutung.

Der Strukturanalyse erdverlegter Rohre wird im allgemeinen ein homogener, isotroper Rohrwerkstoff mit linear-elastischem Werkstoffverhalten zugrundegelegt. Dabei handelt es sich vorwiegend um starre Rohre aus metallischen, zementgebundenen oder keramischen Werk-

stoffen mit einem relativ hohen Elastizitätsmodul, wobei die mechanischen Eigenschaften im allgemeinen von der Temperatur und der Belastungsdauer unabhängig sind.

Bei den Kunststoffrohren sind die mechanischen Eigenschaften von der Belastungsdauer und der Temperatur abhängig. Kunststoffe fallen unter die Gruppe der viskoelastischen Werkstoffe, wobei grundsätzlich zwischen den Begriffen „Kriechen“ und „Relaxieren“ zu unterscheiden ist. Kriechen bedeutet eine Zunahme der Dehnungen mit der Belastungsdauer bei konstanter Spannung. Relaxieren bedeutet eine Abnahme der Spannungen mit der Belastungsdauer bei konstanter Dehnung. Eine ausführliche Darstellung der mechanischen Eigenschaften von thermoplastischen Kunststoffrohren ist in [21, 25] zu finden.

Rohre aus duroplastischen Kunststoffen wie z.B. geschleuderte GF-UP-Rohre zeigen gleichfalls ein zeitabhängiges Werkstoffverhalten [35], wobei neben dem Schichtenaufbau der Rohrwand, die beim Rohrwanddesign festgelegten Eigenschaften in Rohrumfangs- und Rohrlängsrichtung, entsprechend dem gewählten Rohrwandaufbau, zu berücksichtigen sind. Die anisotropen mechanischen Werkstoffeigenschaften sind auf die Orientierung der Faserverstärkung der einzelnen Schichten zurückzuführen, mit deren Hilfe spezifische mechanische Eigenschaften in den entsprechenden Rohrrichtungen erzielt werden können. Für die Strukturanalyse von GF-UP-Rohren werden die Werkstoffeigenschaften, resultierend aus dem Schichtenaufbau, gemittelt über die Rohrwand angenommen.

Ausführliche Informationen über die Eigenschaften der Rohrwerkstoffe sowie die Werkstoffkennwerte für die Strukturanalyse und die Beurteilung der Beanspruchungs- und Verformungsverhältnisse in den Rohren sind den einschlägigen Produktnormen der Rohre sowie den Angaben der Rohrhersteller zu entnehmen.

2.2 Boden- und Verfüllmaterialien

Die Anforderungen an die Materialien für die Verfüllung von Leitungsgräben sind in den einschlägigen Vorschriften, Regelwerken und Richtlinien festgelegt, wobei zwischen der sogenannten Leitungszone und der Wiederverfüllzone unterschieden wird.

Bei den einschlägigen Vorschriften, Regelwerken und Richtlinien ist zu unterscheiden, ob es sich um Verlegerichtlinien für bestimmte Leitungen z.B. Gas, Fernwärme, Wasser, Abwasser, Strom, Telekommunikation usw. handelt, also um Vorschriften für die Verlegung und den Einbau der Leitungen oder um sogenannte Straßenwiederinstandsetzungsvorschriften oder Aufgrabeordnungen, also um Vorschriften, die sich auf die Verfüllung der Rohrgräben im Hinblick auf die Straßenwiederinstandsetzung beziehen. Da vom Bund, den Ländern sowie den Gemeinden teilweise unterschiedliche Vorgaben für die Verfüllung der Leitungsgräben im Hinblick auf die Straßenwiederinstandsetzung existieren, bestehen natürlich teilweise auch unterschiedliche Vorgaben für die zu verwendenden Materialien bei der Wiederverfüllung der Leitungsgräben.

Die Verfüllung von Leitungsgräben kann grundsätzlich mit dem Aushubmaterial entsprechend dem anstehenden Boden, oder durch Bodenaustausch also durch die Einbringung eines anderen Verfüllmaterials gegenüber dem bestehenden Boden erfolgen. Verfüllmaterialien für Leitungsgräben müssen geeignet sein, dauerhafte Stabilität und die Lastaufnahme der Leitungen im Boden sicherzustellen, und dürfen die Leitungen nicht beeinträchtigen.

Als Künettenverfüllmaterialien können grundsätzlich verwendet werden:

- Aushubmaterial des anstehenden Bodens in ursprünglicher oder aufbereiteter Form
- Natürliche Austauschmaterialien wie z.B. Sand, Kies
- Synthetische Austauschmaterialien wie z.B. Recyclingmaterial
- Stabilisierte Verfüllmaterialien

Für Künettenverfüllmaterialien bestehen eine Reihe von Anforderungen, die aber nur zum Teil in den einschlägigen Regelwerken und Richtlinien enthalten sind. Zu diesen Anforderungen zählen unter anderem:

- Tragfähigkeit
- Umweltverträglichkeit
- Verträglichkeit mit den Leitungen bzw. Leitungsmaterialien innerhalb der Nutzungsdauer
- Ausreichende und gleichmäßige Bettung und Einbettung der Leitungen
- Veträglichkeit zum anstehenden Boden
- Beständigkeit gegenüber Oberflächen- und Grundwasser

- Leichte Abbaubarkeit mit Krampen und Schaufel während der gesamten Nutzungsdauer der Leitungen

Die **Eignung als Künettenverfüllmaterial sollte** entsprechend den angeführten Anforderungen **durch Gebrauchstauglichkeitsprüfungen nachgewiesen werden.** Zur Zeit liegen noch sehr wenig allgemeine Vorschriften, Regelwerke und Richtlinien für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit von Künettenverfüllmaterialien aber auch für deren Qualitätssicherung vor. Lediglich für den Einbau von Fernwärme-Kunststoffmantelrohren wurde eine technische Spezifikation für stabilisierte Rohrgrabenverfüllmaterialien entwickelt, die als ON Regel ONR/FW 110A vom Österreichischen Normungsinstitut herausgegeben wird. Für die anderen Künettenverfüllmaterialien liegen keine Vorschriften für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit bzw. für die Qualitätssicherung vor.

2.2.1 Konventionelle Verfüllmaterialien

Die Beschreibung der Eigenschaften konventioneller Boden- und Verfüllmaterialien kann durch Kenngrößen erfolgen, wie sie in den einschlägigen Regelwerken und Richtlinien angegeben sind. Eine wesentliche Frage ist jedoch, welche Kennwerte die mechanischen Eigenschaften der Boden- und Verfüllmaterialien im Hinblick auf den Einbau erdverlegter Leitungen realitätsnahe beschreiben.

Ein Vergleich des in den einschlägigen Regelwerken und Richtlinien angegebenen Bodensteifemoduls als Funktion der relativen Dichte und der Bodengruppe zeigt, daß verschiedene Regelwerke und Richtlinien sowie die entsprechenden geotechnischen Versuche an den Boden- und Verfüllmaterialien zu stark divergierenden Ergebnissen führen können. Weiters stellt sich die Frage ob die relative Dichte, wie sie in den einschlägigen Regelwerken und Richtlinien angegeben ist, in der Praxis überprüft wird oder nur eine fiktive Rechengröße darstellt.

Nach den einschlägigen Regelwerken und Richtlinien werden für die Boden- und Verfüllmaterialien die Bodengruppen BG 1 bis BG 4 unterschieden, deren Klassifizierung nach den Grob- und Feinkornanteilen gemäß Tabelle 2 erfolgt:

Bodengruppe	Beschreibung nach dem Feinkornanteil bzw. der Bindigkeit
BG 1	Grobkörnige, nichtbindige Böden z.B. Kies oder Sand
BG 2	Gemischtkörnige, schwach bindige Böden mit geringem Feinkornanteil z.B. Kies oder Sand mit geringen Anteilen Schluff oder Ton
BG 3	Gemischtkörnige, bindige Böden mit hohem Feinkornanteil z.B. Kies oder Sand mit hohen Anteilen Schluff oder Ton
BG 4	Feinkörnige, bindige Böden z.B. Schluff oder Ton, leicht bis ausgeprägt plastisch

Tabelle 2: Klassifizierung der Bodengruppen BG 1 bis BG 4

Die Wichte der Boden- und Verfüllmaterialien kann generell mit $\gamma_E = 20$ kN/m^3 für alle Bodengruppen angenommen werden.

Die Beschreibung des Last-Verformungsverhaltens der Boden- und Verfüllmaterialien erfolgt im allgemeinen durch den sogenannten Steifemodul E_S. Dieser kann in horizontaler und vertikaler Richtung annähernd gleich angenommen werden.

Nach ÖNORM B 5012, Teil 1 ist der Steifemodul E_{S0} für die Bodengruppen BG 1 bis BG 4, in Abhängigkeit von der relativen Dichte D_{Pr}, für den Spannungsbereich bis $\sigma_0 = 0{,}01$ N/mm² in Tabelle 3 angegeben. Gewachsene Böden haben im allgemeinen relative Dichten im Bereich

von 90 bis 97 %. Zur Berücksichtigung von Langzeitbelastungen über einen Zeitraum von 50 Jahren ist der Steifemodul mit dem sogenannten Kriechbeiwert k_{50} nach Tabelle 3 zu multiplizieren, wobei gilt: $E_{S0,50} = E_{S0} \cdot k_{50}$.

Bodengruppe	Steifemodul E_{S0} [N/mm^2] für σ_0 = 0,01 N/mm^2						Kriechbeiwert
	Relative Dichte D_{Pr} [%]						K_{50} [-]
	85	90	92	95	97	100	
BG 1	3,8	5,3	6,0	7,2	8,2	10,0	1,0
BG 2	2,1	2,9	3,3	4,0	4,5	5,5	1,0
BG 3	1,3	1,8	2,1	2,5	2,9	3,5	0,5
BG 4	0,9	1,2	1,4	1,7	1,9	2,3	0,3

Tabelle 3: Steifemodul E_{S0} und Kriechbeiwert k_{50} der Boden- und Verfüllmaterialien

Wie Untersuchungen gezeigt haben, sind die geomechanischen Standarduntersuchungen nach bautechnischen Regelwerken nicht repräsentativ für die Bodenverhältnisse in der Leitungszone von Rohren. Es scheint erforderlich, eigene Versuchsbedingungen zur Erfassung der mechanischen Bodenkennwerte für die Berechnung erdverlegter Rohre heranzuziehen.

Neben den angeführten bodenmechanischen Kennwerten ist für die Beurteilung der Boden- und Verfüllmaterialien unter Belastungen, wie z.B. bei der Verdichtung der Rohrgrabenverfüllung, vor allem das Druck-Setzungsverhalten maßgebend. Das **Druck-Setzungsverhalten** von **Boden- und Verfüllmaterialien** wird im Kompressionsversuch ermittelt. Dabei wird die Bodenprobe in einem Behälter in axialer Richtung belastet. Die Belastung wird in Lastschritten aufgebracht und für jede Laststufe die Stauchung der Bodenprobe registriert. Im Anschluß an die Erstbelastung können Entlastungen und Wiederbelastungen der Bodenprobe durchgeführt werden. Die Auswertung der Versuchsergebnisse führt zu Druck-Setzungs-Diagrammen, wie in Bild 3 für verschiedene Boden- und Verfüllmaterialien dargestellt.

Die aus dem Kompressionsversuch gewonnenen Erkenntnisse zeigen, daß es für die Beschreibung des mechanischen Verhaltens der Boden- und Verfüllmaterialien bei der Verfüllung und Verdichtung von Rohrgräben notwendig ist, vor allem das Druck-Setzungsverhalten, also die bleibenden Verformungen der Boden- und Verfüllmaterialien unter Belastung entsprechend zu charakterisieren. Linear-elastisches Werkstoffverhalten der Boden- und Verfüllmaterialien, wie es üblicherweise in den Regelwerken angenommen wird, scheint nur für den Zustand nach dem

Einbau, also nach der Verfüllung und Verdichtung im Rohrgraben im anschließenden Betrieb der Rohre repräsentativ.

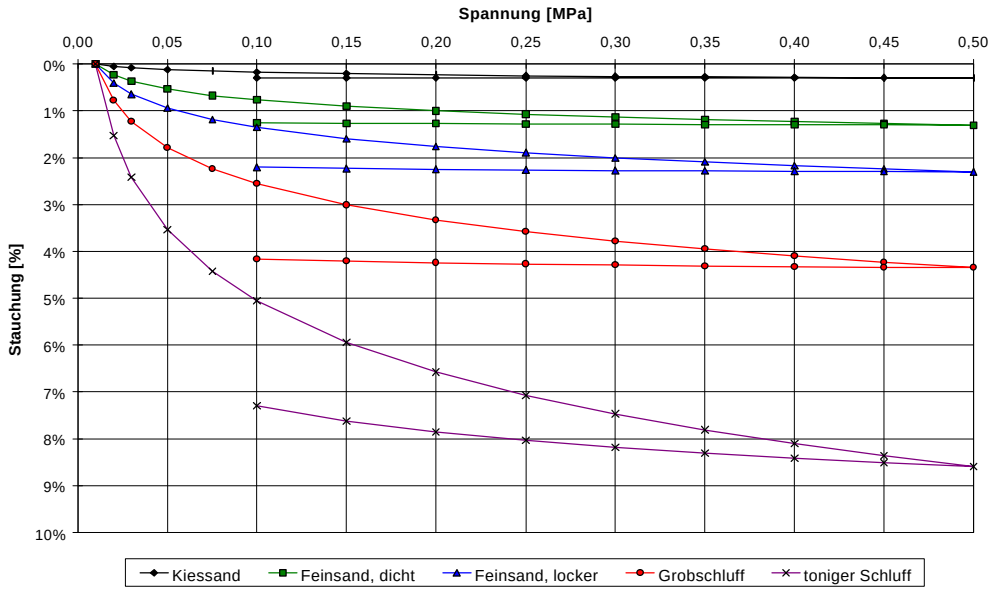


Bild 3: Druck-Setzungsverhalten verschiedener Boden- und Verfüllmaterialien

2.2.2 Nichtkonventionelle Verfüllmaterialien

Zu den nichtkonventionellen Verfüllmaterialien zählen unter anderem auch die sogenannten stabilisierten Verfüllmaterialien. Stabilisierte Verfüllmaterialien sind Verfüllmaterialien, bestehend aus einem Grundmaterial wie z.B. Sand, Kies, Schotter, Schlacke, Recyclingmaterial usw., Bindemittel, Stabilisierungsmittel und Wasser, die mit Hilfe von Fahrmischern in flüssiger Konsistenz an die Baustelle angeliefert und in den Leitungsgraben eingebracht werden.

Stabilisierte Verfüllmaterialien haben in den letzten Jahren, besonders aufgrund der guten Erfahrungen mit dem Produkt **„SSM" - stabilisierte Sandmischung** - einem Produkt und Patent der Firma Schotter- und Betonwerk Karl Schwarzl, Unterpremstetten, Steiermark stark an Bedeutung für den Einbau von erdverlegten Leitungen gewonnen. Stabilisierte Verfüllmaterialien werden natürlich auch von anderen Unternehmen, insbesondere von Transportbetonunternehmen angeboten. Wie die Erfahrungen gezeigt haben, unterscheiden sich die stabilisierten Verfüllmaterialien jedoch zum Teil wesentlich in ihren Eigenschaften. Mit der stabilisierten Sandmischung „SSM" wurden bei den Versorgungsunternehmen vorwiegend sehr gute Erfahrungen gemacht, sodaß dieses Material bisher vielfach auch als Maßstab für die Beurteilung und Ausschreibung von stabilisierten Verfüllmaterialien herangezogen wurde. Demgegenüber ist bekannt, daß mit anderen stabilisierten Verfüllmaterialien teilweise keine guten Erfahrungen gemacht wurden. Aus diesem Grund wurde im Auftrag des Fachverbandes Gas & Wärme eine technische Spezifikation erarbeitet, in der die Anforderungen im Hinblick auf den Einsatz für erdverlegte Leitungen, die Grundlagen für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit und die Prüfungen für die Qualitätssicherung festgelegt sind. Weiters soll mit Hilfe der technischen Spezifikation und den darin festgelegten Prüfungen eine Vergleichbarkeit der stabilisierten Verfüllmaterialien verschiedener Anbieter ermöglicht werden. Zusätzlich sind Prüfungen festgelegt, mit deren Hilfe jene mechanischen Kennwerte ermittelt werden können, die einerseits für die Rohrleitungsstatik erforderlich sind und andererseits zum Vergleich mit den konventionellen Verfüllmaterialien herangezogen werden können.

Das wesentliche Merkmal der stabilisierten Verfüllmaterialien besteht in der flüssigen Einbringung in den Leitungsgraben, wodurch eine gleichmäßige Bettung der Leitung in Längsrichtung und eine gleichmäßige Einbettung über den Umfang erzielt werden kann, was bei den konventionellen Verfüllmaterialien, wie z.B. Sand oder Kies im allgemeinen nicht erreicht wird.

Für den Einsatz von stabilisierten Verfüllmaterialien bei der Verfüllung von Leitungsgräben bestehen im wesentlichen folgende Anforderungen, die stichwortartig im folgenden ohne Anspruch auf Vollständigkeit kurz angeführt sind:

- **Allgemeine Anforderungen**
  - Verträglichkeit mit den Leitungen und Leitungswerkstoffen
  - Umweltverträglichkeit
  - Leichte, baustellengerechte Verarbeitbarkeit
  - Ausreichende Fließfähigkeit im Leitungsgraben
  - Gleichmäßige Bettung und Einbettung der Leitung
  - Kurzfristige Verfestigung im Hinblick auf die rasche Weiterverfüllung des Grabens
  - Verträglichkeit mit dem anstehenden Boden
  - Beständigkeit gegenüber Oberflächen- und Grundwässern
  - Ausreichende Tragfähigkeit gegen Verfüllung und Verdichtung der Wiederverfüllzone
  - Leichte, permanente Abbaubarkeit mit Krampen und Schaufel während der gesamten Nutzungsdauer des Rohrleitungssystems
  - Mindesteinsatzdauer über 50 Jahre
  - Gleichmäßige Produktqualität

- **Mechanische Anforderungen**
  - Druckfestigkeit
  - Steifigkeit
  - Reibungsbeiwert zur Leitungsoberfläche
  - Schubfestigkeit zur Leitungsoberfläche

- **Chemische Anforderungen**
  - Verträglichkeit mit den Leitungssystemen während der Nutzungsdauer
  - Beständigkeit auch unter der Einwirkung von Oberflächen- oder Grundwässern ohne Destabilisierung bzw. Änderung der geforderten Eigenschaften des stabilisierten Verfüllmaterials

- **Thermische Anforderungen**
  - Temperaturbeständigkeit im Temperaturbereich von –10 °C bis + 50 °C
  - Wärmeleitfähigkeit entsprechend jener von nichtbindigen Verfüllmaterialien

Die Anforderungen der Straßenerhalter, entsprechend den jeweiligen Wiederinstandsetzungsvorschriften für die Verfüllung von Rohrgräben sind zu beachten. Die Zustimmung der zuständigen Behörde für die Verwendung von stabilisierten Verfüllmaterialien muß vorliegen.

Stabilisierte Verfüllmaterialien bieten eine Reihe von Vorteilen gegenüber dem konventionellen Einbau mit traditionellen Verfüllmaterialien. Dies bezieht sich insbesondere auf die gleichmäßige Bettung und Einbettung der Leitungen durch die flüssige Einbringung der Grabenverfüllung,

wodurch die Einwirkungen durch die indirekten Lasten vermieden werden können. Weiterhin ist keine Verdichtung der Grabenverfüllung in der Leitungszone erforderlich, wodurch die Einbaulasten wesentlich verringert werden können. Stabilisierte Verfüllmaterialien bieten auch die Möglichkeit geringerer Grabenbreiten, wodurch Kosteneinsparungen möglich sind. Aufgrund der bisherigen Erfahrungen ist davon auszugehen, daß bei einer entsprechenden Verbreitung der stabilisierten Verfüllmaterialien und den entsprechenden Absatzmengen neben den technischen Vorteilen für das System „Fahrbahn-Boden-Leitung" wesentliche wirtschaftliche Vorteile für den Einbau erdverlegter Leitungen durch die systematische Anwendung dieser neuen Verfüllmaterialien zu erwarten sind.

Nach dem Stand der Technik sowie den nationalen und internationalen Erfahrungen sind für die Herstellung von stabilisierten Verfüllmaterialien verschiedene Methoden bekannt, die sich vor allem auf das Ausgangsmaterial beziehen. Folgende Methoden zur Herstellung der stabilisierten Verfüllmaterialien sind bekannt:

- Zentrale Herstellung von stabilisierten Verfüllmaterialien unter Verwendung bestimmter verfügbarer Ausgangsmaterialien wie z.B. Sand, Kies, usw. durch entsprechende Aufbereitung und Transport zur Baustelle mit Hilfe von Fahrmischern. Bei dieser Art der Herstellung kann man von einer annähernd gleichmäßigen Qualität ausgehen, wobei die grundsätzliche Eignung durch eine Gebrauchstauglichkeitsprüfung nachzuweisen ist. Der Nachweis der gleichbleibenden Qualität des stabilisierten Verfüllmaterials hat durch geeignete Prüfungen in bestimmten vorgegebenen Abständen zu erfolgen.

- Zentrale Herstellung von stabilisierten Verfüllmaterialien unter Verwendung geeigneter Recyclingmaterialien bzw. Gemische aus Sand, Kies und Recyclingmaterial durch entsprechende Aufbereitung und Transport zur Baustelle mit Hilfe von Fahrmischern. Bei dieser Art der Herstellung kann ebenfalls mit einer annähernd gleichbleibenden Qualität des Verfüllmaterial gerechnet werden. Die Gebrauchstauglichkeit ist durch entsprechende Prüfungen nachzuweisen. Der Nachweis der gleichbleibenden Qualität hat in bestimmten Zeitabschnitten durch geeignete Prüfungen zu erfolgen.

- Zentrale Aufbereitung des Aushubmaterials von Leitungsgräben und Transport an die Baustelle mit Hilfe von Fahrmischern. Eine gleichbleibende Qualität des stabilisierten Rohrgrabenverfüllmaterials kann nicht angenommen werden, da aufgrund des Aushubmaterials von verschiedenen Baustellen auch mit einer unterschiedlichen Qualität des Ausgangsmaterials zu rechnen ist. Die Gebrauchstauglichkeit des Verfüllmaterials kann nur in einem größeren Rahmen mit relativ großer Schwankungsbreite der Eigenschaften nachgewiesen

werden. Der Nachweis der geforderten Eigenschaften ist besonders wichtig. Die Qualitätssicherung kann nur mit häufigen Prüfungen durchgeführt werden.

- Lokale Aufbereitung des anfallenden Aushubmaterials vor Ort mit Hilfe entsprechender Einrichtungen, wobei jeweils eine individuelle Abstimmung der Aufbereitung auf die lokalen Gegebenheiten durchzuführen ist. Es kann mit keiner gleichbleibenden Qualität des stabilisierten Verfüllmaterials gerechnet werden. Der Nachweis der Gebrauchstauglichkeit ist lokal an der Baustelle relativ schwierig, gleichfalls ist der Nachweis einer gleichbleibenden Qualität problematisch.

2.3 Fahrbahnen

Hinsichtlich der Fahrbahnkonstruktion bzw. der Fahrbahnausbildung über der Wiederverfüllzone von Rohrgräben sei auf die einschlägigen Vorschriften verwiesen, wobei grundsätzlich zu unterscheiden ist zwischen:

- **Unbefestigter Fahrbahn** - also Fahrbahnen, die keine spezielle Fahrbahnausbildung besitzen, wie sie an Baustellen, bei Feldwegen und im Gelände anzutreffen sind. Die Radlast wird in diesem Fall direkt in den Halbraum, ohne lastverteilende Wirkung, eingeleitet. Die unbefestigte Fahrbahn repräsentiert die ungünstigsten Lastverhältnisse und wird daher entsprechend den einschlägigen Regelwerken der Ermittlung der Verkehrsbelastung zugrunde gelegt.

  Die unbefestigte Fahrbahn ist vor allem im Hinblick auf Straßenbaumaßnahmen zu beachten, wenn Baufahrzeuge, z.B. Schwer-Lastkraftwagen oder Raupenfahrzeuge, sich bei relativ geringer Rohrüberdeckung über der Rohrtrasse bewegen.

- **Befestigter Fahrbahn** - also Fahrbahnen mit einer speziellen Fahrbahnausbildung z.B. aus Asphalt oder Beton. Für die Belastung des Halbraumes durch eine Radlast ist hierbei die lastverteilende Wirkung der Fahrbahnplatte zu berücksichtigen. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen: biegeweicher Fahrbahn, z.B. Asphaltfahrbahn und biegesteifer Fahrbahn z.B. Betonfahrbahn.

3. Verlege- und Einbaumethoden für erdverlegte Leitungen

Die konventionelle oder auch klassische Verlege- und Einbaumethode für erdverlegte Leitungen ist die Verlegung und der Einbau in offener Bauweise. Diese Art der Verlegung fand bereits im vorigen Jahrhundert Anwendung, wenn man z.B. an die Errichtung der Gasversorgung in Wien denkt, wo Gasrohre aus Grauguß bis zu einer Nennweite DN 1200 für die sogenannten Systemrohrstränge vom Gaswerk Simmering in die Stadtmitte in offener Bauweise verlegt wurden.

Bedingt durch das Ärgernis für die Bevölkerung und insbesondere durch die Störung des zunehmenden Straßenverkehrs durch die vielen Aufgrabungen zum Ausbau und zur Rehabilitation von Ver- und Entsorgungsleitungen sowie auch aus Kostengründen wurde in den letzten Jahren eine Reihe sogenannter nichtkonventioneller Verlege- und Einbaumethoden entwickelt, wie z.B. die grabenlosen Einbaumethoden (Horizontalspülbohrverfahren, Vortriebsverfahren, usw.), das Einpflügen von Rohrleitungen usw., die unter bestimmten Voraussetzungen technische und wirtschaftliche Vorteile bei der Verlegung und beim Einbau erdverlegter Leitungen bringen können. Die Anwendung nichtkonventioneller Verlege- und Einbaumethoden hängt aber auch mit der Entwicklung neuer Rohrwerkstoffe und Rohrtechnologien zusammen, wie z.B. Kunststoffrohre, die den effizienten Einsatz der nichtkonventionellen Methoden erst möglich gemacht haben.

Neben der Verlegung und dem Einbau neuer Leitungen hat in den letzten Jahren vor allem auch die **Rehabilitation bestehender Leitungssysteme** in der öffentlichen Ver- und Entsorgungswirtschaft **sehr an Bedeutung gewonnen**. Unter Rehabilitation von Leitungen versteht man dabei die Ertüchtigung in Form von Erneuerung oder Sanierung. Die Beurteilung, ob eine Leitung aufgrund mangelnder Tragfähigkeit und/oder Funktionalität erneuert werden muß, oder auch mittels Sanierungsverfahren ertüchtigt werden kann, ist relativ schwierig, und es fehlen derzeit noch effiziente, allgemein gültige Entscheidungskriterien.

Bei den Sanierungsverfahren ist es notwendig, den Zustand der bestehenden Leitungssysteme zu erfassen und insbesondere zu klären, ob die Tragfähigkeit und/oder die Funktionalität der Leitung - z.B. die Dichtheit der Leitung - noch gegeben ist. Durch die Sanierung bestehender Leitungssysteme kann sowohl die Tragfähigkeit als auch die Funktionalität soweit verbessert bzw. werden, daß eine Auswechslung der Leitungssysteme nicht erforderlich ist. Dadurch ist es möglich, aus technischer Sicht die Aufgrabungen bestehender Straßen zu vermeiden aber auch die Wirtschaftlichkeit der Leitungssysteme bei der Rehabilitation wesentlich zu verbessern.

3.1 Einbau in konventioneller offener Bauweise

Für die Verlegung und den Einbau erdverlegter Leitungssysteme existieren material- und anwendungsspezifische Vorschriften, Regelwerke und Richtlinien, die der Planung und der Ausführung der Arbeiten im Bereich der Leitungszone zugrundegelegt werden. Daneben existieren **regional unterschiedliche Vorschriften der Straßenerhalter** in Form sogenannter Straßenwiederinstandsetzungsvorschriften, die Vorgaben über die Art der Grabenverfüllung, die Verdichtung der Grabenverfüllung sowie die Prüfungen am Planum der Verfüllzonen, usw. festlegen. **Diese Anforderungen beziehen sich im wesentlichen nur auf die Anforderungen der Straße und nicht auf die Bedürfnisse erdverlegter Leitungssysteme im Hinblick auf Sicherheit und Wirtschaftlichkeit.**

In Österreich existieren Vorschriften für die Aufgrabung und die Schließung von Leitungsgräben sowie die Wiederherstellung der Straßenkonstruktionen in den einschlägigen Wiederinstandsetzungsvorschriften und Aufgrabeordnungen der jeweiligen Straßenerhalter, den „Richtlinien und Vorschriften für den Straßenbau“ - RVS oder in den Straßensondernutzungsvereinbarungen mit den jeweiligen Straßenerhaltern.

In Deutschland existieren die „Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Aufgrabungen in Verkehrsflächen“ - ZTVA-Stb 97, die den Aufbruch der Verkehrsflächen, den Aushub und das Verfüllen von Leitungsgräben sowie die Wiederherstellung des Oberbaues der Verkehrsfläche regeln.

Anforderungen an die Verfüllung von Künetten sind demnach einerseits für den Bereich der Leitungszone in den einschlägigen Verlege- und Einbaurichtlinien für die jeweiligen Leitungen und andererseits für den Bereich der Wiederverfüllzone in den einschlägigen Aufgrabeordnungen bzw. Fahrbahnwiederinstandsetzungsvorschriften der Straßenerhalter festgelegt.

In Österreich existiert keine einheitliche Richtlinie für die Verfüllung von Künetten, in der die Anforderungen im Hinblick auf die Bedürfnisse erdverlegter Leitungen sowie der Straße, unter Berücksichtigung der Langzeitnutzung sowohl der Leitungssysteme als auch der Fahrbahn, festgelegt sind. Für jede Leitungsart existieren spezifische Verlege- und Einbaurichtlinien, also z.B. für die Verlegung von Gasrohrleitungen, von Fernwärmerohrleitungen, von Wasserrohrleitungen, Abwasserleitungen, für Strom- und Telekommunikationsleitungen usw., die von unterschiedlichen Gremien erarbeitet werden und demnach nur relativ geringfügig aufeinander abgestimmt sind, obwohl es sich um annähernd gleiche Vorgänge bei der Verlegung der Leitungen sowie der Verfüllung der Leitungsgräben handelt. Daneben existieren verschiedene **Vorschriften für die Verfüllung von Leitungsgräben sowie die Wieder-**

instandsetzung der Fahrbahnen von Seiten der Straßenerhalter von Bund, Ländern und Gemeinden.

Vorschriften für die Aufgrabung und für die Schließung der Künetten sowie für die Wiederherstellung der Straßenkonstruktion sind für den Bereich der Stadt Wien in der sogenannten „Wiederinstandsetzungsvorschrift" der Magistratsabteilung 28 festgelegt.

Im folgenden sind beispielhaft einige weitere Vorschriften, Richtlinien, Sondernutzungsverträge, Vetragsbestimmungen usw. für die Herstellung und Verfüllung von Künetten sowie die Wiederherstellung der Fahrbahn angegeben, um deutlich zu machen, welche Vielfalt diesbezüglich besteht:

- „Planungsunterlagen und technische Vorschriften für Sondernutzungsansuchen", Amt der Burgenländischen Landesregierung – Straßen- und Brückenbau
- „Rechtliche und technische Vetragsbestimmungen einschließlich Angebots- und Vergabebedingungen des NÖ Straßendienstes für Baumaßnahmen auf Landeshaupt- und Landesstraßen", Amt der NÖ Landesregierung, Gruppe Straße
- „Sondernutzungsveträge" des Amtes der NÖ Landesregierung, Abteilung Landesstraßenbau
- Richtlinien - Sondergebrauch von Bundes- und Landesstraßengrund bei Herstellung straßenfremder Einbauten; Amt der Tiroler Landesregierung, Landesbaudirektion - Straßenerhaltung
- Grabungsordnung der Stadt Linz
- Bauvorschriften allfällige Wiederherstellungs- und Aufgrabeordnungen, Post und Telekom Austria
- Richtlinien und Vorschriften für den Straßenbau (RVS) der Forschungsgesellschaft für das Verkehrs- und Straßenwesen im österreichischen Ingenieur- und Architektenverein

Die Vielfalt an Vorschriften, Regelwerken und Richtlinien führt bei der Errichtung von Ver- oder Entsorgungsleitungen, die sowohl Bundesgebiet, Landesgebiet als auch Gemeindegebiet berühren, dazu, daß unterschiedliche Vorschriften mit unterschiedlichen Anforderungen vorliegen. **Diese Vorschriftenvielfalt steht vielfach einer kostengünstigen Entwicklung von Leitungsbau- und Instandhaltungsmaßnahmen mit der erforderlichen Ausführungs- und Instandhaltungsqualität entgegen.**

Zu den für das Strukturverhalten erdverlegter Leitungen sowie das Strukturverhalten der Fahrbahn relevanten Verlege- und Einbaubedingungen zählen:

- Grabenformen (parallele Wände, geböschte Wände, Stufengraben,...)
- Abmessungen des Leitungsgrabens (Grabentiefe, Grabenbreite)

- Einbringung und Entfernung des Grabenverbaues
- Anforderungen an die Grabensohle und die Bettung
- Ausführung von Kopflöchern und Schweißgruben
- Grundwassereinfluß in der Leitungszone
- Einbringung, Lagerung und Verbindung der Leitungsteile
- Anforderungen an das Verfüllmaterial in der Leitungszone
- Verfüllung und Verdichtung der Leitungszone
- Höhe der Überdeckungszone sowie der Leitungsüberdeckung
- Anforderungen an das Verfüllmaterial in der Wiederverfüllzone
- Verfüllung und Verdichtung der Wiederverfüllzone
- Verdichtungskontrolle
- Fahrbahnwiederinstandsetzung

Für den Einbau erdverlegter Leitungen, insbesondere Rohrleitungen sind nach den einschlägigen Verlege- und Einbaurichtlinien im allgemeinen folgende Punkte zu beachten:

Die Bettung hat auf geeigneter Grabensohle zu erfolgen und ist in der Regel so auszubilden, daß Längsbiegungen und Punktlasten vermieden werden. Die Verfüllung der Leitungszone hat mit geeignetem Verfüllmaterial zu erfolgen, dessen Gebrauchstauglichkeit nachgewiesen sein sollte. Für kleine Rohrdurchmesser und schmale Leitungsgräben erfolgt die Verfüllung bis zum Planum der Überdeckungszone, wobei im allgemeinen nur eine händische Verdichtung der Verfüllung in der Leitungszone möglich ist. Auf die Verfüllung und Verdichtung im Zwickelbereich ist besonders zu achten. Bei großen Rohrdurchmessern und breiten Leitungsgräben erfolgt die Verfüllung und Verdichtung in der Leitungszone lagenweise. Die Verfüllung des Leitungsgrabens in der Wiederverfüllzone hat, in Abstimmung mit den Anforderungen der Straßenerhalter, mit geeignetem Verfüllmaterial zu erfolgen, wobei die Einbringung und Verdichtung lagenweise in Schichten von etwa 30 cm zu erfolgen hat. Die Frage der Verwendung von Bodenaustauschmaterial, Recyclingmaterial, stabilisiertem Verfüllmaterial bzw. der Wiederverwendung von Aushubmaterial ist im allgemeinen mit dem Straßenerhalter abzuklären. Die Überprüfung der Verfüllung und Verdichtung in der Wiederverfüllzone erfolgt im allgemeinen am Planum der obersten Schicht der Wiederverfüllzone durch Lastplattenversuche, wobei von den Straßenerhaltern entsprechende Werte für den Verformungsmodul vorgegeben sind.

In Bild 4 ist beispielhaft der Aufbau eines Leitungsgrabens mit den einzelnen Zonen sowie der Aufbau der Straßenkonstruktion nach den einschlägigen Wiederinstandsetzungsvorschriften für Straßenverkehrsflächen dargestellt.

Prüfungen des in der Straßenwiederinstandsetzungsvorschrift geforderten Verdichtungsgrades können am Planum der Wiederverfüllzone – Planum A) - und / oder am Unterbauplanum - Planum B) – vorgegeben sein.

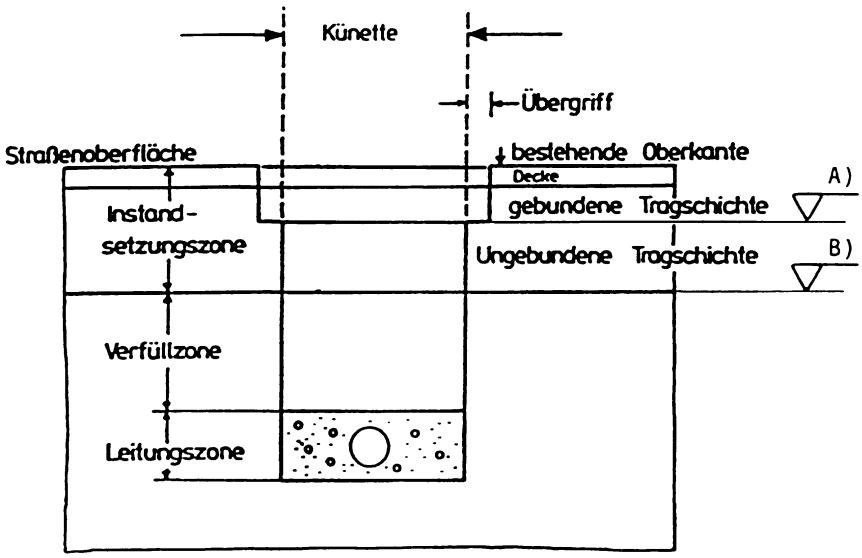


Bild 4: Rohrgrabenaufbau und Fahrbahnausbildung

Nach Bild 4 sind im folgenden beispielhaft die Anforderungen für den Verformungsmodul in bestimmten Ebenen des Rohrgrabens, zur Überprüfung der Verdichtung der Rohrgrabenverfüllung mit dem Lastplattenversuch, angegeben, wobei sich der Wert E_{V1} auf die Erstbelastung und der Wert E_{V2} auf die Wiederbelastung bezieht.

Planum A) Planum der Wiederverfüllzone

- Fahrbahn mit einer Straßenkonstruktionsdicke von mehr als 67 cm
  E_{V1} = 90 MN/m^2 bzw. 70 MN/m^2 bei $E_{V2} : E_{V1} \leq 2{,}2$
- sonstige befestigte Fahrbahn
  E_{V1} = 60 MN/m^2
- unbefestigte Fahrbahn
  E_{V1} = 35 MN/m^2 bzw. 25 MN/m^2 bei $E_{V2} : E_{V1} \leq 2{,}0$

Planum B) Unterbauplanum

- Fahrbahnen
  E_{V1} = 35 MN/m^2 bzw. 25 MN/m^2 bei $E_{V2} : E_{V1} \leq 2{,}0$

Die konventionelle Verlegung erdverlegter Leitungen in offener Bauweise stellt grundsätzlich eine Störung des Systems „Fahrbahn-Boden" dar. Die wesentlichen Schritte bei der Verlegung und dem konventionellen Einbau erdverlegter Leitungen, beginnend vom Gra-

benaushub bis zur Grabenverfüllung und Straßenwiederinstandsetzung nach den einschlägigen Regelwerken, Richtlinien und Vorschriften sind prinzipiell in den Bildern 5 bis 12 dargestellt.

Betrachtet man den ungestörten homogenen Straßenaufbau des Systems „Fahrbahn-Boden“ gemäß Bild 5, dann ist der Spannungszustand im Boden gegeben durch die vertikale Spannung σ_v zufolge des Bodeneigengewichtes sowie die horizontale Spannung σ_h entsprechend dem sogenannten Ruhedruck. Die Bettung der Fahrbahn auf dem Unterbau erfolgt gleichmäßig über die gesamte Fahrbahnbreite.

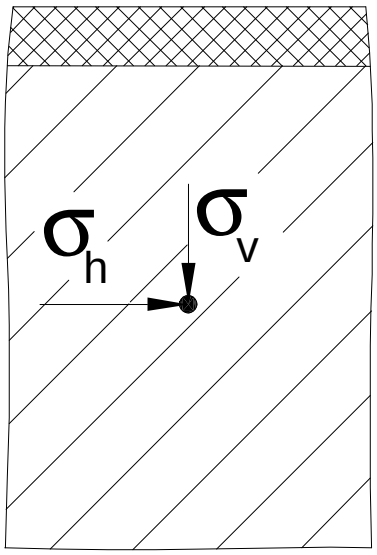


Bild 5: System „Fahrbahn – Boden“

Das Trennen der Fahrbahndecke gemäß Bild 6 vor dem Aushub des Grabens, also die Unterteilung der Fahrbahndecke in nicht biegesteif miteinander verbundene Fahrbahnabschnitte, **entspricht einer wesentlichen Änderung des Tragverhaltens der Fahrbahn**. Die auf den Unterbau gebettete Fahrbahn kann somit die Radlasten nicht mehr großflächig in den Unterbau übertragen, sondern es tritt ein geänderter Lastübertragungsmechanismus mit frei verformbaren Rändern der Fahrbahnabschnitte auf. Bedenkt man, daß die Gräben für erdverlegte Leitungen im allgemeinen unmittelbar neben einer Radspur in Straßenlängsrichtung liegen, so sind deutlich die geänderten mechanischen Einwirkungen auf den Unterbau zu erkennen.

Der **Aushub des Leitungsgrabens** gemäß Bild 7, wie er für die Verlegung und den Einbau von Leitungen üblich ist, entspricht einer Freistellung der Grabenwände in horizontaler Richtung. Dies bedeutet mechanisch, daß an der Oberfläche der Grabenwände ein spannungsfreier Zustand eintritt und der ursprünglich vorhandene horizontale Spannungszustand in einen entsprechenden **Verformungszustand der Grabenwände** übergeführt wird. Die Verformung der Rohrgrabenwände ist abhängig von der Fahrbahnausbildung, den geomechanischen Eigen-

Rohrgrabenwände ist abhängig von der Fahrbahnausbildung, den geomechanischen Eigenschaften des bestehenden Bodens sowie den einwirkenden Belastungen.

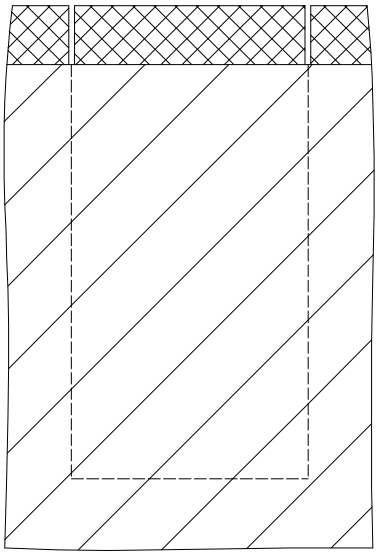


Bild 6: Trennung der Fahrbahndecke

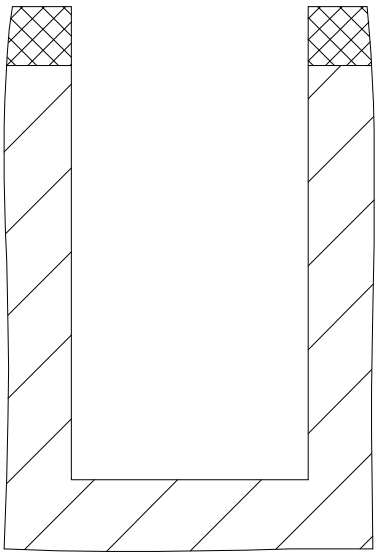


Bild 7: Grabenaushub

Die Störung des Bodens durch den Leitungsgraben kann bei unbefestigter Fahrbahn oder bei biegeweichen Fahrbahndecken unter der Einwirkung von Verkehrslasten unmittelbar neben dem Leitungsgraben zu Rißbildungen parallel zur Grabenrichtung und Abrutschungen des Bodens unter der Fahrbahndecke führen, wobei die Kriecheigenschaften des Bodens zu beachten

sind. Zur Vermeidung von Abrutschungen der Rohrgrabenwände ist es notwendig, diese durch Pölzungen gemäß Bild 8 entsprechend abzustützen oder einen Grabenverbau einzubringen.

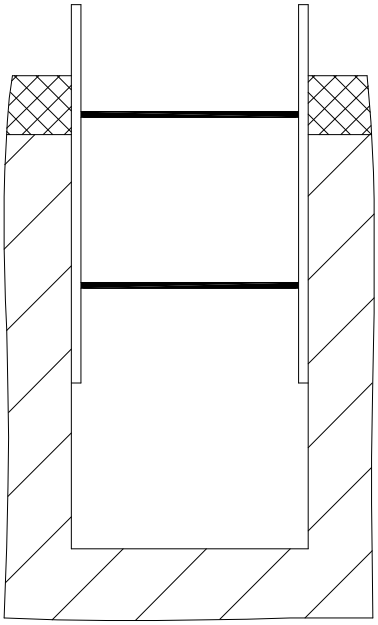


Bild 8: Pölzung, Grabenverbau

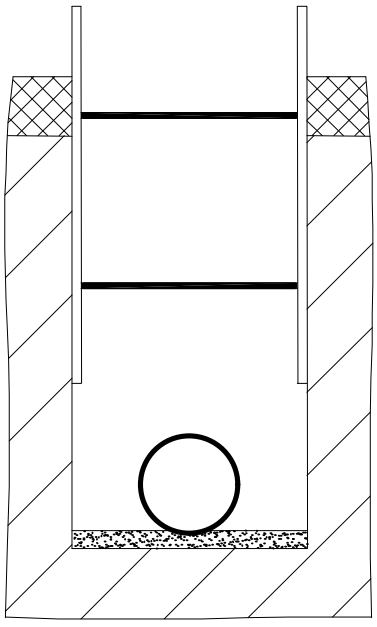


Bild 9: Grabensohle, Bettung

Die Verlege- und Einbaubedingungen für erdverlegte Leitungen bei konventioneller Verlegung in offener Bauweise sind in den einschlägigen Regelwerken und Richtlinien festgelegt. Darin wird im allgemeinen gefordert, daß die Leitung auf ihrer ganzen Länge auf einer geeigneten Bettung auf der Grabensohle bzw. Sohlzone gemäß Bild 9 aufliegt. Die Bettung ist in der Regel

so auszubilden, daß Längsbiegungen der Leitung und Punktlasten auf die Leitung vermieden werden.

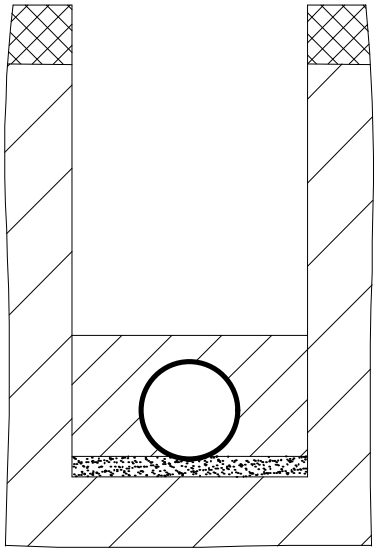


Bild 10: Verfüllung der Leitungszone, Einbettung

Die Verfüllung der Leitungszone gemäß Bild 10 hat mit geeignetem Verfüllmaterial entsprechend den einschlägigen Verlege- und Einbaurichtlinien zu erfolgen, wobei im allgemeinen gefordert ist, daß die Leitung auf der ganzen Länge mit steinfreiem Material (Sand) einzubetten ist. Für kleine Leitungsdurchmesser und schmale Gräben erfolgt die Verfüllung im allgemeinen bis zum Planum der Überdeckungszone, wobei eine Verdichtung der Verfüllung in der Leitungszone und auch im Zwickelbereich nur von Hand möglich ist bzw. im allgemeinen überhaupt nicht vorgesehen ist. Bei großen Leitungsdurchmessern und breiten Gräben erfolgt die Verfüllung und Verdichtung in der Leitungszone im allgemeinen lagenweise.

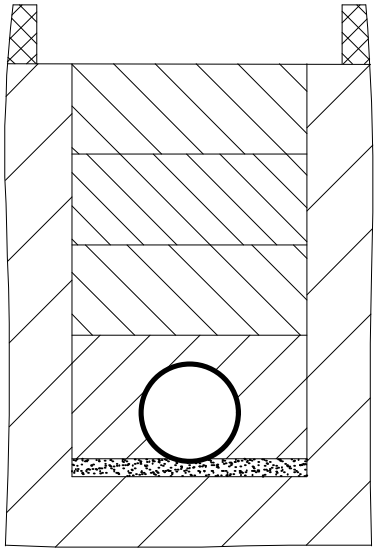


Bild 11: Verfüllung der Wiederverfüllzone

Die Verfüllung der Wiederverfüllzone hat mit geeignetem Verfüllmaterial, entsprechend den Anforderungen der Straßenerhalter zu erfolgen, wobei die Einbringung und Verdichtung lagenweisen in Schichten von etwa 30 cm gemäß Bild 11 zu erfolgen hat. Das Verfüllmaterial der Wiederverfüllzone muß so beschaffen sein, daß es die Leitung durch die Sandabdeckung hindurch nicht beschädigen kann. Eine kontrollierte Verdichtung in der Wiederverfüllzone ist nicht vorgesehen. Lediglich vom Straßenerhalter bestehen Anforderungen nach einem bestimmten Verdichtungszustand am Planum der Wiederverfüllzone, unmittelbar unter der Fahrbahndecke, der mittels Lastplattenversuchen nachzuweisen ist. Die Frage nach der Verwendung von Bodenaustauschmaterial, Recyclingmaterial, stabilisiertem Verfüllmaterial und die Wiederverwendung von Aushubmaterial ist im allgemeinen mit dem Straßenerhalter abzuklären.

Die im Zuge der Grabenverfüllung eingebrachten Austauschmaterialien haben im allgemeinen andere mechanische Eigenschaften als der bestehende Boden. Zur geomechanischen Anpassung der Grabenverfüllung an den bestehenden Boden sowie zur Vermeidung nachträglicher Setzungen der Grabenverfüllung ist es notwendig, das eingebrachte Verfüllmaterial entsprechend zu verdichten.

Die Aufgabe bei der Verdichtung besteht darin, einerseits das eingebrachte Verfüllmaterial zu homogenisieren, also die durch die lose Einbringung vorhandenen Hohlräume zu egalisieren und eine gleichmäßige Lagerungsdichte zu schaffen, und andererseits die durch den Aushub des Grabens verloren gegangene horizontale Verspannung des Bodens wiederherzustellen. Dies erfolgt im allgemeinen mit entsprechenden Verdichtungsgeräten und einem den Anforde-

rungen entsprechenden Verdichtungsaufwand. Daß dies teilweise nicht einwandfrei gelingt, ist an den vielen Straßen mit unebener Oberfläche zufolge vorangegangener Leitungsverlegungen in offener Bauweise zu erkennen. Die **Verdichtung der Grabenverfüllung darf** aber **nicht zu einer Beschädigung der verlegten Leitung führen,** was z.B. bei flexiblen Rohren besonders zu beachten ist.

Bei der Grabenverfüllung und der anschließenden Verdichtung können geomechanische Inhomogenitäten im Boden entstehen, die vor allem bei biegeweichen Fahrbahndecken langfristig, in Abhängigkeit von der Verkehrsbelastung durch **Unebenheiten der Fahrbahnoberfläche** zum Vorschein kommen. Jeder Autofahrer ist davon durch **verminderten Fahrkomfort** betroffen. Die **Unebenheiten der Fahrbahnoberfläche,** die sich langfristig bei biegeweichen Fahrbahndecken **als Folge von lokalen Setzungen des Untergrundes** ergeben, führen aber auch zu einer **erhöhten Verkehrsbelastung** der erdverlegten Leitungen, da die Unebenheiten der Fahrbahnoberfläche erhöhte Radlasten bewirken.

Die Verdichtung der eingebrachten Grabenverfüllung ist im allgemeinen auch von der Steifigkeit des bestehenden Bodens abhängig. Je geringer die Steifigkeit der bestehenden Böden ist, umso größer wird die erforderliche Verdichtungsarbeit sein, um den Verformungsmodul am Planum der Wiederverfüllzone entsprechend den Vorgaben der Straßenerhalter zu erfüllen. Bei sogenannten selbstverdichtenden Materialien, also Verfüllmaterialien mit einem sehr geringen Druck-Setzungsverhalten, und einer hohen Steifigkeit der bestehenden Böden, wird die erforderliche Verdichtungsarbeit zur Erfüllung der Anforderungen des Verformungsmoduls am Planum der Wiederverfüllzone relativ gering sein.

Die Überprüfung der Verfüllung und Verdichtung der Wiederverfüllzone erfolgt im allgemeinen am Planum der obersten Schicht der Wiederverfüllzone durch Lastplattenversuche, wobei von den Straßenerhaltern entsprechende Werte für den Verformungsmodul vorgegeben sind, die durch die Prüfungen entsprechend nachzuweisen sind.

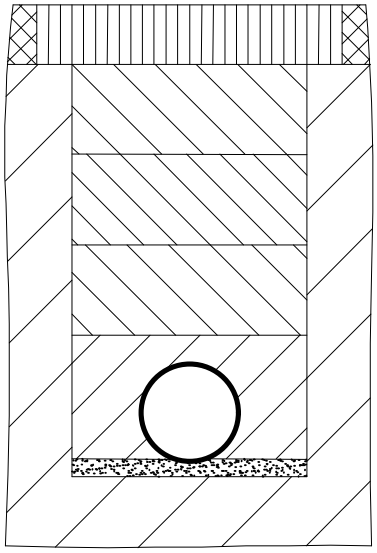


Bild 12: Fahrbahnwiederinstandsetzung

Umfangreiche analytische Simulationen und experimentelle Untersuchungen haben gezeigt, daß die **Verdichtung der Grabenverfüllung** im allgemeinen eine beträchtliche **Verspannung des Verfüllmaterials in der Leitungszone** bewirkt, wodurch **entsprechende Beanspruchungen und Verformungen der Leitungen bereits beim Einbau** eingebracht werden, **die weitaus größer sein können als die im Betrieb der Leitung zu erwartenden Belastungen.**

Messungen des Verformungszustandes erdverlegter Kunststoffrohre unmittelbar nach dem Einbau, mit lagenweiser Verfüllung und Verdichtung der Rohrgrabenverfüllung, haben gezeigt, daß Verformungen in den Rohren auftreten können, die weit über den Werten für den Belastungszustand „Erdlast“ nach den einschlägigen Regelwerken und Richtlinien liegen. Rechnerische Simulationen zeigen, daß beim Einbau der Rohre durch die Verdichtung der Grabenverfüllung, entsprechend dem Druck-Setzungsverhalten des Verfüllmaterials, eine bleibende Verspannung der Verfüllung in der Leitungszone bewirkt wird, wodurch auch ohne entsprechende Auflasten hohe, nicht reversible Verformungen der Rohre eintreten können. Der in den einschlägigen Regelwerken und Richtlinien enthaltene Begriff „Erdlast“ ist im allgemeinen nur für eine Schüttung der Grabenverfüllung gültig. Für eine ordnungsgemäße Verdichtung der eingebrachten Grabenverfüllung, entsprechend den Anforderungen der Straßenerhalter, ist eine Verdichtungslast zu berücksichtigen. Abminderungen für die Erdlast nach der Silotheorie scheinen daher im allgemeinen nicht angebracht. Für die Strukturanalyse erdverlegter Rohrleitungen scheint es vielmehr notwendig, statt der Erdlast eine entsprechende Einbaulast anzusetzen, die wesentlich größer als die Erdlast sein kann.

Die nach dem Stand der Technik übliche **Annahme gleichmäßiger Umgebungsbedingungen der Leitungen in der Leitungszone ist im allgemeinen nicht erfüllt.** Die Abweichungen der Umgebungsbedingungen für erdverlegte Leitungen von idealen, gleichmäßigen Verhältnissen werden als **Imperfektionen** bezeichnet. Diese sind im allgemeinen bereits **von der Verlegung an in der Leitungszone vorhanden oder** können **durch nachträgliche Arbeiten im Leitungsbereich** sowie durch lokale Störungen der Umgebungsbedingungen **eingebracht** werden. Bei den Imperfektionen der Umgebungsverhältnisse erdverlegter Leitungen handelt es sich im allgemeinen nicht um determinierbare Zustände, sondern vorwiegend um regellose, zufällig verteilte Verhältnisse in der Leitungszone. Die durch die **Imperfektionen der Umgebungsverhältnisse** erdverlegter Leitungen auftretenden Belastungen werden als **indirekte Lasten** bezeichnet.

3.2 Einbau in nichtkonventioneller grabenloser Bauweise

Sowohl aus technischer als auch aus wirtschaftlicher Sicht gewinnen die **Verfahren der grabenlosen Verlegung** für erdverlegte Leitungen in der Ver- und Entsorgungswirtschaft zunehmend an Bedeutung. Der Vorteil der nichtkonventionellen grabenlosen Verlegung gegenüber der konventionellen Verlegung in offener Bauweise besteht in der **unterirdischen Verlegung der Rohre ohne ausgedehnte Aufgrabungen** und damit verkehrstechnische Beeinträchtigungen und ohne wesentliche mechanische Störungen der Fahrbahndecke, des Unterbaues sowie des Bodens unter der Fahrbahn.

Das Ziel der grabenlosen Verlegung ist, eine Leitung ohne kontinuierlichen Aushub eines Rohrgrabens über die gesamte Leitungslänge unterirdisch zu verlegen. Dazu wird eine Startgrube und eine Zielgrube errichtet, zwischen denen die Leitung grabenlos verlegt wird. Dabei wird mit Hilfe spezieller Verfahren ein sogenannter Mikrotunnel im Boden geschaffen, in dem die Leitung eingebracht wird. Es gibt heute bereits eine Reihe von Verfahren z.B. das **Horizontalspülbohrverfahren,** das **Vortriebsverfahren** usw., die sich in der Praxis bewährt haben.

Die Verfahren der grabenlosen Verlegung setzen bestimmte Eigenschaften der Böden voraus. Der Boden muß bohrbar, abbaubar bzw. verdrängbar sein und darf im Verlauf der Leitungstraße keine undurchdringbaren Hindernisse aufweisen.

Bei der grabenlosen Verlegung muß sich die Leitung dem geschaffenenen Kanal über die Einziehlänge geometrisch anpassen. Da der Verlauf des Kanals in Leitungsrichtung seitlich Abweichungen aufweisen kann, besteht die Anforderung nach einer ausreichenden Flexibilität der Leitung. Die Steuerbarkeit des Verlaufes des Kanals hat den Vorteil, daß Hindernisse im Boden einfach umfahren werden können.

Eine wesentliche **Voraussetzung für die Anwendung der grabenlosen Verlegung** ist die **Vorerkundung** hinsichtlich der vorgesehenen Leitungsführung. Im allgemeinen sind dabei folgende Erhebungen durchzuführen:

- Die Erkundung bestehender Einbauten entsprechend den verfügbaren Einbautenplänen.
- Die geologische Vorerkundung zur Erfassung des Bodenaufbaues und der Bohr- bzw. Verdrängbarkeit des Bodens.
- Die geophysikalische Vorerkundung zur Erfassung vorhandener lokaler Hindernisse für den Rohrkanalvortrieb.
- Die geomechanische Vorerkundung zur Erfassung der mechanischen Bodeneigenschaften sowie der mechanischen Bodenkennwerte.

Die Vorerkundung ist für die Entscheidung zur Anwendung der grabenlosen Verlegung von besonderer Bedeutung, da nicht wie bei der konventionellen Verlegung in offener Bauweise die Verhältnisse entlang der Leitungsführung im Graben frei erkennbar sind. Beschädigungen fremder Einbauten müssen unbedingt vermieden werden. Erst nach Vorlage ausreichender Informationen über die Verhältnisse entlang der vorgesehenen Leitungstrasse kann mit der grabenlosen Verlegung begonnen werden.

Die Notwendigkeit einer grabenlosen Verlegung von Leitungen ist naheliegend, wenn man die Beeinträchtigungen beobachtet, die sich durch die Verlegung von Leitungen in offener Bauweise ergeben. Dazu zählen:

- verkehrstechnische Beeinträchtigung durch den offenen Leitungsgraben
- Zerstörung der Fahrbahndecke entlang des Leitungsgrabens
- Schädigung des Unterbaues bzw. des Bodens unter der Fahrbahndecke.

Diese Beeinträchtigungen kann man deutlich beobachten, wenn man offenen Leitungsgräben entlang geht und dabei die Straßendecke neben den Aufgrabungen und die Bodenverhältnisse betrachtet. Natürlich sind diese Erscheinungen vom Tragverhalten der Fahrbahndecke abhängig. Eine biegesteife Betonfahrbahn wird weniger Beschädigungen zeigen als eine biegeweiche Bitumen-Fahrbahn. Die offene Bauweise hat somit wesentlichen Einfluß, sowohl technisch als auch wirtschaftlich, auf die langfristige Instandhaltung des Systems „Fahrbahn-Boden".

Im folgenden sollen nicht die Verfahren der grabenlosen Verlegung beschrieben werden, hier wird auf die entsprechende Fachliteratur verwiesen. Es sollen hier vor allem einige Kriterien für erdverlegte Leitungen aus geomechanischer und leitungstechnischer Sicht betrachtet und dabei die konventionelle Verlegung in offener Bauweise der grabenlosen Verlegung gegenüber gestellt werden. Der Einfachheit halber werden im folgenden nur qualitativ die wesentlichsten Punkte der grabenlosen Verlegung aus geomechanischer Sicht betrachtet.

Das Grundprinzip der grabenlosen Verlegeverfahren besteht darin, mit Hilfe geeigneter Maßnahmen einen entsprechenden Kanal herzustellen, in dem die zu verlegende Leitung eingebracht werden kann.

Daraus leitet sich ab, daß es sich bei der Schaffung des Kanals aus geomechanischer Sicht nur um eine lokale Störung des Bodens in einer relativ kleinen Umgebung des Kanals handelt. Eine weitreichende Störung des Bodens bis zur Fahrbahndecke ist bei den grabenlosen Verlegeverfahren nicht zu erwarten.

Bei der grabenlosen Verlegung geht man davon aus, daß durch die Umgebung des grabenlos hergestellten Kanals die Verformungsmöglichkeiten der Leitung gegenüber direkten Lasten eingeschränkt sind, wobei vorausgesetzt ist, daß nach dem Einbringvorgang der Leitung diese annähernd gleichmäßig über den Umfang eingebettet ist. Die Behinderung der Verformung gegenüber den direkten Lasten erfordert vor allem eine entsprechende Abstützung der Leitung im Kämpferbereich. Diese Anforderung besteht insbesondere bei der Verlegung unter Straßenverkehrsflächen mit hoher Verkehrsbelastung und biegeweicher Fahrbahndecke, dort wo der Boden also Verformungen aufnehmen muß.

Wegen des grabenlosen Vortriebs des Kanals in Leitungsrichtung ist anzunehmen, daß ein Höhenverlauf der Kanalsohle wie bei der offenen Bauweise im allgemeinen nicht auftreten kann. Sowohl beim steuerbaren Horizontalspülbohrverfahren als auch beim Vertriebsverfahren wird sich ein annähernd kontinuierlich verlaufender Kanal ergeben, dem sich die flexiblen Leitungen entsprechend anpassen. Demnach kann davon ausgegangen werden, daß im allgemeinen die Beanspruchungen der Leitungen in Rohrlängsrichtung durch indirekte Lasten geringer sind als bei konventioneller Verlegung in offener Bauweise.

4. Einwirkungen auf erdverlegte Leitungen

Erdverlegte Leitungen unterliegen durch den umgebenden Boden bzw. durch die Verfüllung der Leitungszone grundsätzlich **mechanischen, chemischen, biologischen und thermischen Einwirkungen, die von den Leitungen aufgenommen bzw. gegen die die Leitungen geschützt werden müssen.** Umfangreiche Untersuchungen haben gezeigt, daß metallische Leitungen in städtischen Versorgungsgebieten zufolge der chemischen Einwirkungen durch den umgebenden Boden mit geeignetem Korrosionsschutz zu versehen sind. Für die weiteren Betrachtungen werden aber im Hinblick auf die Künettenverfüllung nur die mechanischen Einwirkungen auf die erdverlegten Leitungen berücksichtigt.

Befundaufnahmen und Untersuchungen im Zusammenhang mit Brüchen an erdverlegten Rohren haben gezeigt, daß zusätzlich zu den bekannten mechanischen Einwirkungen auf erdverlegte Rohrleitungen, wie sie in den einschlägigen Regelwerken angegeben sind, **offensichtlich noch weitere Belastungsmechanismen vorhanden sind.**

Betrachtet man allgemein die mechanischen Einwirkungen auf erdverlegte Rohrleitungen, so sind entsprechend dem Auftreten und der Wirkung grundsätzlich zwei Belastungsgruppen zu unterscheiden. Es sind dies einerseits die sogenannten **direkten Lasten,** die unmittelbar auf das mechanische System „Fahrbahn-Boden-Leitung“ einwirken und andererseits die sogenannten **indirekten Lasten,** als Reaktionslasten aus der erzwungenen geometrischen und mechanischen Interaktion zwischen Boden und Leitung, zufolge der Wirkung der direkten Lasten.

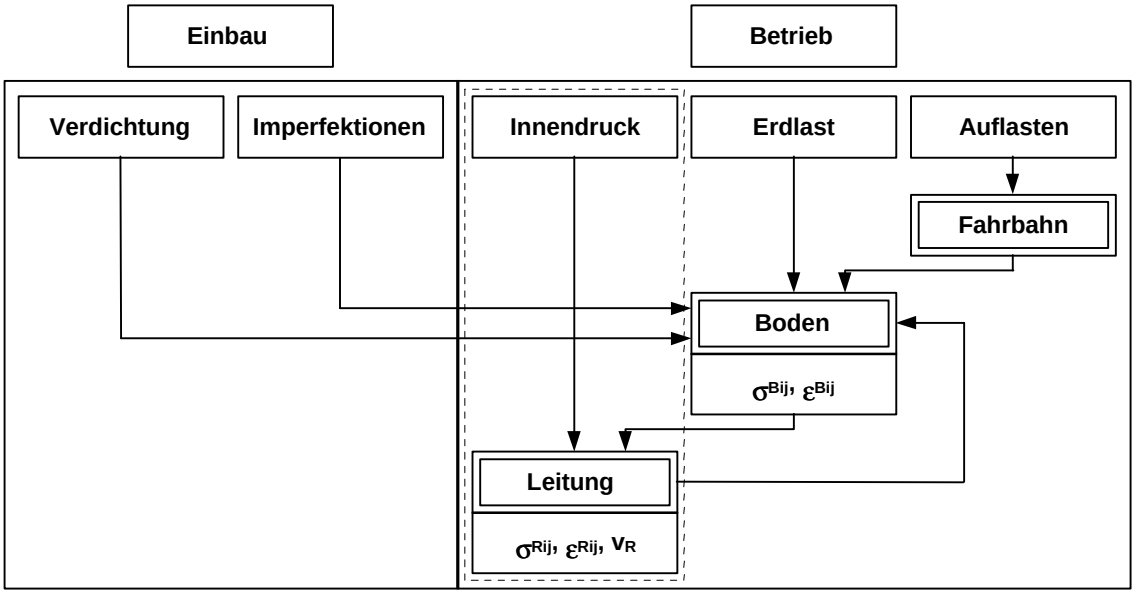


Bild 13: Einwirkungen auf das System „Fahrbahn-Boden-Leitung“ durch Einbau und Betrieb

Für die Beurteilung des Systems „Fahrbahn-Boden-Leitung“ im Hinblick auf Sicherheit, Funktionalität, Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit erdverlegter Rohrleitungssysteme innerhalb der Mindestnutzungsdauer scheint es notwendig die mechanischen Einwirkungen auf die erdverlegten Leitungen sowie die Fahrbahnkonstruktionen, entsprechend der Interaktion zwischen Fahrbahn, Boden und Leitung unter den jeweiligen Einwirkungen bei Bau, Betrieb und Instandhaltung, gemäß Bild 13, **ausreichend transparent zu machen.**

4.1 Einwirkungen durch direkte Lasten

Als "direkte Lasten" werden die unmittelbar auf das mechanische System "Fahrbahn-Boden-Leitung" einwirkenden, äußeren Lasten bezeichnet. Zu der Gruppe der direkten Lasten zählen: der Innendruck durch das Transportmedium, die Erdlast, die Auflasten auf der Fahrbahn, usw. Im folgenden sind die, für die Beanspruchungsverhältnisse in den Rohren maßgebenden direkten Lasten zusammengestellt.

4.1.1 Innendruck

Die wesentlichste Größe für die Dimensionierung von Rohrleitungen ist der Innendruck. Es können in Abhängigkeit von den Betriebsverhältnissen in der Leitung sowohl der maximal mögliche Unterdruck als auch der maximal mögliche Überdruck in der Leitung maßgebend sein. Druckstöße sind im allgemeinen zu berücksichtigen, entsprechende Hinweise sind zu beachten.

4.1.2 Erdlast - Einbaulast

Die Erdlast entspricht der Volumenlast durch das Bodengewicht über dem Rohr und wird üblicherweise als annähernd gleichmäßig verteilt angenommen. Die Überdeckungshöhen zur Ermittlung der Erdlast ergeben sich aus den spezifischen Einbaubedingungen der Rohre.

In der einschlägigen Literatur sowie den einschlägigen Regelwerken wird bei der Belastung erdverlegter Rohrleitungen durch die Erdüberschüttung unterschieden zwischen Grabenbedingungen und Dammbedingungen. Bei den Grabenbedingungen ergibt sich die Erdlast auf das Rohr modellhaft aus dem Gewicht des eingebrachten Verfüllmaterials über dem Rohrscheitel abzüglich der Reibungskräfte zwischen der Rohrgrabenverfüllung und den Rohrgrabenwänden, analog zum Schüttgutverhalten an Silowänden. Die Reibungskräfte werden dadurch erklärt,

daß sich die Rohrgrabenverfüllung stärker setzt als der vorhandene Boden jenseits der Grabenwände. Durch die Setzungen der Rohrgrabenverfüllung werden entgegen der Bodenbewegung, nach oben gerichtete Reibungskräfte angenommen, die die Rohrgrabenverfüllung mittragen und damit die Rohrleitung entlasten sollen. Inwieweit diese modellhaften Annahmen den tatsächlichen Verhältnissen entsprechen, ist nicht bekannt. Es ist zwar durchaus vorstellbar, daß an den Grabenwänden ein Reibungswiderstand auftritt, es ist jedoch fraglich, ob in dem Bereich über dem Rohr diese Reibungskräfte noch wirksam sind. Das Problem bei dieser Betrachtung scheint darin zu bestehen, daß die Verfüllung über die Rohrgrabenbreite als starres System angenommen wird und nicht die Änderungen der Verhältnisse über die Grabenbreite, entsprechend den Eigenschaften der Verfüllmaterialien, berücksichtigt werden. Für die Betrachtung der Beanspruchung von Silowänden durch das sich bewegende Schüttgut gilt grundsätzlich eine andere Fragestellung als bei der Erdlast auf Rohre.

Es sei darauf hingewiesen, daß der Begriff Erdlast eine ideale Annahme darstellt, die sich aus dem spezifischen Bodengewicht und der Überdeckungshöhe ergibt. Betrachtet man Meßergebnisse über das Strukturverhalten erdverlegter Rohrleitungen im Zuge des Einbauvorganges, also der Rohrgrabenverfüllung mit anschließender Verdichtung, so zeigt sich, daß die Belastung durch die Verdichtung, also die Einbaulast, weitaus höher als die Erdlast sein kann. Es wird daher zu überdenken sein, ob es unter Umständen notwendig ist, statt der Erdlast eine Einbaulast für die statische Berechnung erdverlegter Rohrleitungen zu berücksichtigen.

Messungen des Verformungszustandes erdverlegter Kunststoffrohre, unmittelbar nach dem Einbau mit lagenweiser Verfüllung und Verdichtung im Rohrgraben, haben gezeigt, daß Verformungen in erdverlegten Rohren auftreten können, die weit über den Werten für den Belastungszustand „Erdlast“ liegen. Simulationen zeigen, daß beim Einbau der Rohre, durch die Verdichtung der Grabenverfüllung, entsprechend dem Druck-Setzungsverhalten des Verfüllmaterials, eine bleibende Verspannung der Verfüllung in der Leitungszone bewirkt wird, wodurch auch ohne entsprechende Auflasten hohe, nichtreversible Verformungen der Rohre möglich sind.

Der Begriff Erdlast ist im allgemeinen nur für eine Schüttung der Grabenverfüllung gültig. Für die Verdichtung der eingebrachten Verfüllung, entsprechend den Anforderungen der Straßenerhalter, ist eine Verdichtungslast zu berücksichtigen. Abminderungen für die Erdlast nach der Silotheorie scheinen daher im allgemeinen nicht angebracht. Für die Strukturanalyse erdverlegter Leitungen scheint es vielmehr notwendig, statt der Erdlast eine entsprechende Einbaulast anzusetzen, die wesentlich größer als die Erdlast sein kann. Allgemein gültige Werte für Einbaulasten liegen zur Zeit noch nicht vor.

4.1.3 Auflasten - ruhende Lasten auf der Fahrbahn

Als ruhende Lasten auf der Fahrbahn, die Einfluß auf die Belastung erdverlegter Rohrleitungen besitzen können, sind beispielhaft anzuführen:

- abgestellte Fahrzeuge
- abgestellte Container und Mulden mit Bauschutt gefüllt
- abgestellte Baugeräte und Maschinen
- abgestellte Baumaterialien usw.

In den einschlägigen Regelwerken sind keine allgemein gültigen Hinweise auf die Größe ruhender Lasten auf der Fahrbahn bzw. obere Schranken für derartige Lasten zu finden. Die Lastannahmen sind entsprechend den jeweiligen Gegebenheiten zu treffen. Zu beachten ist hierbei, daß die Ausbildung der Fahrbahn einen wesentlichen Einfluß auf die Lastverteilung im Boden besitzen kann.

4.1.4 Verkehrslasten - bewegte Lasten auf der Fahrbahn

In den einschlägigen Regelwerken für die statische Berechnung erdverlegter Rohrleitungen werden für die Verkehrslasten bestimmte statische Radlasten, entsprechend den genormten Belastungsannahmen für Straßenbrücken, herangezogen und mit einem dynamischen Beiwert multipliziert. Dieser dynamische Beiwert reicht von 1, 2 für ein 600 kN-Raupenfahrzeug bis 1,5 für einen 160 kN-LKW. Die bekannten dynamischen Beiwerte lassen jedoch nicht erkennen, welchen Einfluß die Eigenschaften des Fahrzeuges, die Fahrgeschwindigkeit oder der Fahrbahnzustand besitzen. Im Rahmen umfangreicher Untersuchungen über die mechanischen Einwirkungen auf erdverlegte Rohrleitungen wurden unabhängig von den einschlägigen Regelwerken, die auf eine Fahrbahn wirkenden Verkehrslasten, in Abhängigkeit von den folgenden systemspezifischen Parametern, betrachtet:

- Fahrzeugart [PKW, LKW]
- Fahrwerkseigenschaften
- Fahrgeschwindigkeit
- Fahrbahnzustand.

Für die Beanspruchung erdverlegter Rohrleitungen sind vor allem die im Bewegungszustand des Fahrzeuges normal zur Straßenoberfläche auftretenden Verkehrslasten von Interesse. Die komplizierten Kraftverhältnisse zwischen Reifen und Fahrbahn werden mit hinreichender Genauigkeit durch eine, normal auf die Fahrbahn wirkende, äquivalente Einzelkraft, der sogenannten Radlast beschrieben. Die Radlast ist im allgemeinen keine konstante Größe, sondern

mit der Wegstrecke veränderlich. Die Radlast setzt sich zusammen aus der statischen Radlast und der dynamischen Radlast. Die statische Radlast ist jene Kraft, die im ruhenden Zustand vom Fahrzeug über das Rad auf die Straße wirkt. Im Fahrzustand sind der statischen Radlast, bedingt durch verschiedene dynamische Einwirkungen, Radlastschwankungen überlagert. Die dynamische Radlast ist also jener, um die statische Radlast schwankende Lastanteil in der Kontaktfläche Reifen gegen Fahrbahn, der im Fahrzustand des Fahrzeuges auftritt. Neben den instationären Fahrzuständen, wie sie z.B. beim Anfahren und beim Bremsen eines Fahrzeuges, bei der Kurvenfahrt oder bei Ausweichmanövern auftreten, entstehen dynamische Radlasten vor allem durch Fahrbahnunebenheiten, die das Fahrzeug, entsprechend der über die Radaufstandsfläche eingeleiteten Wegerregung, zu vertikalen Schwingungen anregen.

Bezeichnet man mit R_{stat} die statische Radlast, mit R_{dyn} die dynamische Radlast und mit R die gesamte auf die Fahrbahn wirkende Radlast, so gilt

$$R = R_{stat} + R_{dyn}$$

Mit Hilfe des sogenannten Radlaststoßfaktors r, der dem dynamischen Beiwert entspricht, läßt sich das Verhältnis der Radlast zur statischen Radlast, wie folgt, angeben

$$r = \frac{R}{R_{stat}} = 1 + \frac{R_{dyn}}{R_{stat}}$$

Für die Belastung der Fahrbahn und damit der erdverlegten Rohrleitungen sind vor allem die Werte $r > 1$ von Interesse. Für Werte $r < 0$ hebt das Rad von der Fahrbahn ab.

Zur Abschätzung, mit welchen Verkehrslasten für die Belastung erdverlegter Rohrleitungen zu rechnen ist, sind im folgenden beispielhaft die zu erwartenden maximalen Radlasten eines mittleren PKW in Bild 14 und eines schweren LKW in Bild 15, in Abhängigkeit vom Fahrbahnzustand und der Fahrgeschwindigkeit angegeben. Dem Fahrbahnzustand sind dabei die Kennwerte für einen Klassifizierungsvorschlag aufgrund von Messungen der Fahrbahnunebenheiten zugrunde gelegt. Die untersuchten Fahrzeuge wurden beispielhaft ausgewählt, ohne den Anspruch zu erheben, damit die absolut größten Radlasten angeben zu können. Die gewählten Beispiele sollten im Gegensatz zu den üblichen Angaben für Verkehrslasten aufzeigen, aus welchen Anteilen sich die Radlast zusammensetzt und von welchen Parametern sie im wesentlichen abhängt. Die entsprechenden Fahrzeugdaten sind der Literatur entnommen. Der Gültigkeitsbereich der Simulationen liegt im Bereich des Radlaststoßfaktors von $0 \leq r \leq 2$ und ist in den Bildern 14 und 15 entsprechend markiert.

Aus Bild 14 ist zu ersehen, daß für einen PKW bei einer mittleren Fahrbahngüte bis zu einer Fahrgeschwindigkeit von 70 km/h die maximalen Radlasten unter 6 kN liegen. Auch für schlechte bis sehr schlechte Fahrbahnzustände sind die zu erwartenden maximalen Radlasten klein gegen die statischen Radlasten eines LKW. Aus Bild 15 ist zu ersehen, daß für einen schweren LKW bei einer mittleren Fahrbahngüte und einer Fahrgeschwindigkeit von etwa 50 km/h die maximalen Radlasten bei etwa 120 kN liegen. Da aber jene Straßen, wo schwere LKW mit Fahrgeschwindigkeiten von 50 km/h und darüber fahren, üblicherweise relativ gute Fahrbahnzustände aufweisen, kann die Radlast von 120 kN als obere Grenze, vor allem für städtische Verhältnisse angesehen werden. Vergleicht man die maximalen Radlasten eines schweren LKW mit den maximalen Radlasten eines PKW, so liefert der LKW bei gleicher Fahrbahngüte eine etwa 20-mal größere Verkehrsbelastung als ein PKW.

Da der Straßenzustand im allgemeinen als relativ gut zu bezeichnen ist, insbesondere dort, wo Fahrgeschwindigkeiten über 50 km/h zugelassen sind, scheinen für die gegenständliche Betrachtungen nur die besseren Fahrbahnzustände von Bedeutung. Die schlechten Fahrbahnzustände sind daher in den Bildern 14 und 15 nur strichliert dargestellt. Derartige Fahrbahnzustände werden im allgemeinen nur in Ausnahmefällen vorhanden sein, könnten aber möglicherweise im Zuge von Bauarbeiten auftreten. Den Bildern 14 und 15 ist zu entnehmen, daß mit zunehmender Fahrbahngüte die maximalen Radlasten relativ rasch abklingen und daher anzunehmen ist, daß für Hauptverkehrsstraßen mit einem guten Fahrbahnzustand auch für schwere LKW die Verkehrsbelastung in vertretbaren Grenzen bleibt. Für schlechte Fahrbahnzustände, wie sie etwa bei schlechten Pflasterfahrbahnen oder schlechten unbefestigten Fahrbahnen anzutreffen sind, steigt die Radlast eines schweren LKW in Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit relativ stark an. Für derartige Fahrbahnzustände sollte die Fahrgeschwindigkeit für schwere LKW auf 10 km/h eingeschränkt werden. In dem Zusammenhang ist jedoch anzumerken, daß es sich bei den angegebenen maximalen Radlasten um Werte handelt, die nur mit geringer Wahrscheinlichkeit zu erwarten sind.

Nimmt man eine Radlast von 120 kN als obere Grenze für die zu erwartenden Radlasten durch einen schweren LKW an, so entspricht dieser Radlast ein maximaler Radlaststoßfaktor von etwa 2. Dies bedeutet, daß die zu erwartende maximale Radlast, unter Berücksichtigung der dynamischen Einflüsse, etwa der doppelten statischen Radlast entspricht. Obwohl es sich bei den Verkehrslasten um dynamische, also um zeitlich und örtlich veränderliche Lasten handelt, werden sie nach dem Stand der Technik als quasistatische Lasten angenommen.

Vergleicht man die sich aus den Untersuchungen ergebenden maximalen Radlasten mit den in den einschlägigen Regelwerken angegebenen Verkehrslasten, so ergeben sich, unter Berücksichtigung der jeweiligen Radlaststoßfaktoren, etwa gleich große maximale Radlasten, die der

statischen Berechnung erdverlegter Rohrleitungen unter Straßenverkehrsflächen zugrunde zu legen sind.

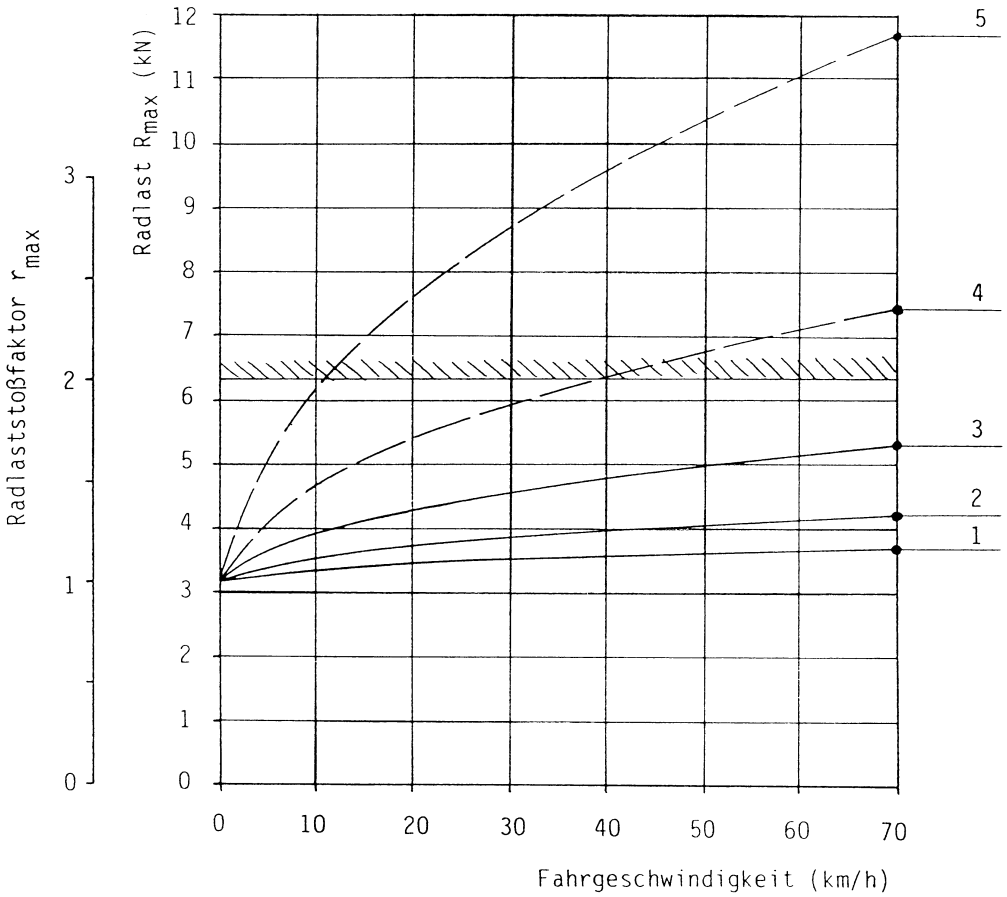


Bild 14: PKW - maximale Radlasten durch Fahrbahnunebenheiten
Fahrbahnzustand nach Klassifizierungsvorschlag
1 ... sehr gut
2 ... gut
3 ... mittel
4 ... schlecht
5 ... sehr schlecht

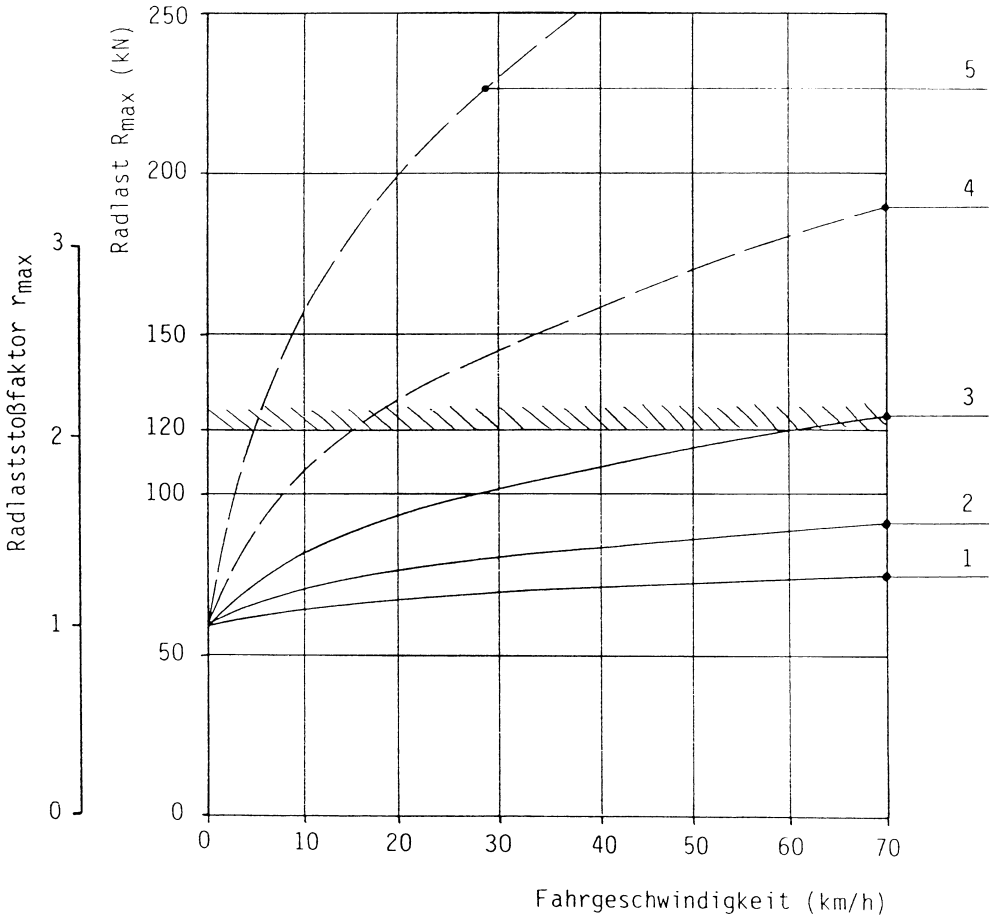


Bild 15: 38 t LKW - maximale Radlasten durch Fahrbahnunebenheiten
Fahrbahnzustand nach Klassifizierungsvorschlag
1 ... sehr gut
2 ... gut
3 ... mittel
4 ... schlecht
5 ... sehr schlecht

4.2 Einwirkungen durch indirekte Lasten

Die Belastung durch **indirekte Lasten ist die Folge der erzwungenen geometrischen und mechanischen Anpassung der Rohrleitungen an die Umgebungsverhältnisse im erdverlegten Zustand.** Dieser Anpassungsvorgang bewirkt Zwängungen, wodurch Reaktionslasten vom Boden auf die Rohre, entsprechend den mechanischen Eigenschaften der beiden Interaktionspartner Boden und Rohr, hervorgerufen werden. Diese Belastungsgruppe läßt sich zwar relativ einfach und verständlich durch Worte beschreiben, stellt aber für die Erfassung, sowohl der Einwirkungen, als auch der Auswirkungen auf erdverlegte Rohre, ein großes Problem dar. Der Grund dafür liegt darin, daß einerseits die Effekte nur im erdverlegten Zustand auftreten und dadurch nur indirekt festzustellen sind und andererseits sowohl die Einwirkungen als auch die Auswirkungen für erdverlegte Rohre in gewissen Schranken einer Zufälligkeit entlang der Rohrleitung, sowohl hinsichtlich des örtlichen Auftretens, als auch hinsichtlich der Größe unterliegen.

Nach den einschlägigen Regelwerken werden gleichmäßige Lagerungs-, Bettungs-, Einbettungs- und Belastungsbedingungen für die Rohrleitungen angenommen. Mit dieser Annahme werden ideale, determinierte Umgebungsbedingungen für erdverlegte Rohre festgelegt. Weder in der einschlägigen Literatur noch in den einschlägigen Regelwerken sind Informationen darüber zu finden, inwieweit in der Realität diese Annahmen zutreffen, bzw. ob diese Voraussetzungen mit den üblichen Verlegemethoden und Einbaurichtlinien eingehalten werden können.

Betrachtet man die Umgebungsverhältnisse erdverlegter Rohrleitungen, soweit sie erfaßbar sind, so ist zu erkennen, daß die Annahme gleichmäßiger Umgebungsbedingungen in der Leitungszone im allgemeinen nicht erfüllt ist. Weder die Rohrgrabensohle ist eben, noch sind die Bettungsverhältnisse gleichmäßig. Demnach unterliegen erdverlegte Rohrleitungen, als Folge der stets vorhandenen Abweichungen der Umgebungsbedingungen von den idealen Verhältnissen, durch die mechanische Interaktion mit dem umgebenden Boden, Zwangsbedingungen die entsprechende Reaktionslasten hervorrufen. Diese Reaktionslasten fallen in die Gruppe der sogenannten "indirekten Lasten". Der Begriff der indirekten Lasten wurde vom Autor, zur klaren Unterscheidung gegenüber den bekannten direkten Lasten, eingeführt. In den einschlägigen Regelwerken sowie der einschlägigen Literatur ist der Begriff der indirekten Lasten nicht anzutreffen.

Die Abweichungen der tatsächlichen Umgebungsbedingungen für erdverlegte Rohrleitungen im Boden von der idealen Annahme gleichmäßiger Verhältnisse werden als Imperfektionen bezeichnet. Diese sind im allgemeinen bereits von der Verlegung an in der Leitungszone vorhanden oder können durch nachträgliche Arbeiten im Rohrbereich, durch lokale

Störungen der Umgebungsbedingungen, eingebracht werden. **Bei den Imperfektionen der Umgebungsverhältnisse erdverlegter Rohrleitungen handelt es sich im allgemeinen nicht um determinierbare Zustände, sondern vorwiegend um regellose Verhältnisse in der Leitungszone.**

4.2.1 Rohrgrabenunebenheiten

Über den Ebenheitszustand von Rohrgrabensohlen sind in den einschlägigen Regelwerken sowie der einschlägigen Literatur keine Daten oder sonstige verwertbare Informationen zu finden. Im Bild 16 ist der gemessene Höhenverlauf einer etwa 44 m langen, bereits mit einem Sandbett versehenen Rohrgrabensohle dargestellt. Die Darstellung ist stark verzerrt, um den Verlauf der Unebenheiten klar hervorzuheben. Dem Bild ist zu entnehmen, daß neben dem linearen Gefälle der Rohrgrabensohle stark ausgeprägte Schwankungen im Höhenverlauf in Rohrgrabenrichtung über relativ kurze Entfernungen vorhanden sind. Aus Bild 16 ist weiters zu ersehen, daß es sich bei dem Höhenverlauf einer Rohrgrabensohle um eine regellose, zufällig verteilte Funktionen in Rohrgrabenrichtung handelt. Aus dem Höhenverlauf einer bestimmten Rohrgrabensohle läßt sich nicht auf den Höhenverlauf einer anderen Rohrgrabensohle schließen. Aus diesem Grund ist für die allgemeine Beschreibung der Unebenheiten von Rohrgrabensohlen weniger der Höhenverlauf einer einzelnen Rohrgrabensohle von Interesse, sondern vielmehr die statistischen Kenngrößen der Rohrgrabenunebenheiten.

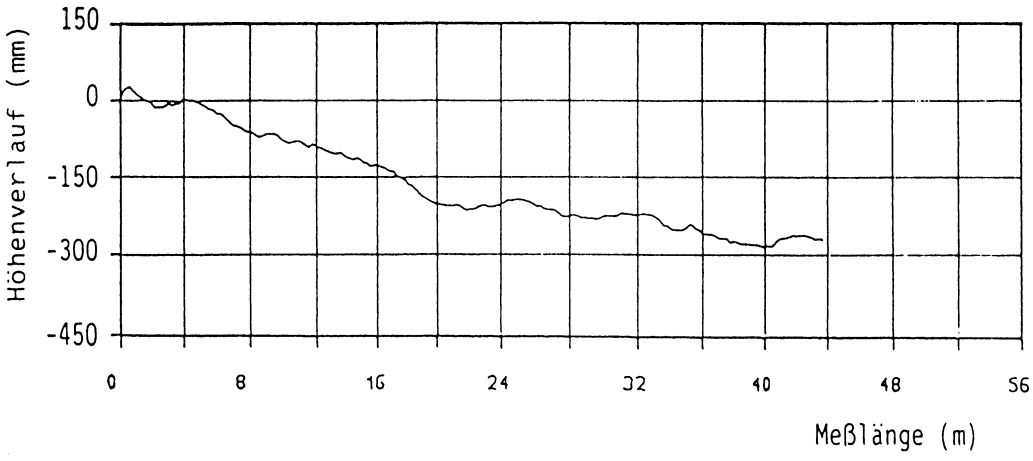


Bild 16: Gemessener Höhenverlauf einer Grabensohle mit Sandbettung

Betrachtet man den Höhenverlauf einer, nach den geltenden Verlegerichtlinien vorbereiteten Rohrgrabensohle mit freiem Auge, so sind die Unebenheiten im allgemeinen kaum zu erkennen. Die Beurteilung der Güte einer Rohrgrabensohle ohne Vermessung scheint daher kaum möglich. Die Unebenheiten von Rohrgrabensohlen wurden bei verschiedenen Aufgrabungen

sowohl nach dem Rohaushub des Rohrgrabens als auch nach der Herstellung der Sandbettung aufgenommen. Worauf die Unebenheiten im einzelnen zurückzuführen sind, ist nicht bekannt. Es ist anzunehmen, daß es sich um die üblichen Schwankungen der Arbeitsgüte bei der Herstellung des Rohrgrabens sowie der Rohrgrabensohle handelt.

Für die Ermittlung der Beanspruchungen in erdverlegten Rohrleitungen durch Unebenheiten der Rohrgrabensohle bieten sich grundsätzlich zwei Möglichkeiten an. Einerseits kann man aufgrund des gemessenen Höhenverlaufes einer Rohrgrabensohle über eine bestimmte Länge das Verhalten einer bestimmten Rohrleitung untersuchen, dann erhält man jedoch nur Aussagen, die für diese Messung und für diese Rohrleitung Gültigkeit besitzen. Andererseits kann man mit Hilfe der Methoden der Zufallsfunktionen die statistischen Kenngrößen des Höhenverlaufes von Rohrgrabensohlen als Zufallsfunktion allgemein gültig ermitteln und die daraus resultierenden Beanspruchungen in den Rohrleitungen durch Wahrscheinlichkeitsaussagen festlegen.

4.2.2 Bettungsverhältnisse

Wie Messungen gezeigt haben ist im Gegensatz zu der üblichen Annahme auch die Bettungssteifigkeit von Rohrgrabensohlen nicht gleichmäßig. Als Maß für die Bettungssteifigkeit wird die Bettungsziffer herangezogen. Die Bettungsziffer ist das Verhältnis der Flächenpressung zur Einsenkung in die Bettung in N/mm³. Die Ergebnisse der Bettungsziffermessung für den in Bild 16 dargestellten Verlauf der Rohrgrabensohle sind in Bild 17 angegeben. Bei der untersuchten Rohrgrabensohle handelt es sich um eine frisch geschüttete Sandbettung mit einem Mittelwert der Bettungsziffer von 0,025 N/mm³. Aus Bild 17 ist zu erkennen, daß die Bettungsziffer über die Rohrgrabenlänge sehr stark schwankt. Die Schwankungen reichen von 0,005 bis 0,265 N/mm³. Dem Bild 17 ist weiters zu entnehmen, daß es sich bei der Verteilung der Bettungsziffer in Rohrgrabenrichtung ebenfalls um eine Zufallsfunktion handelt.

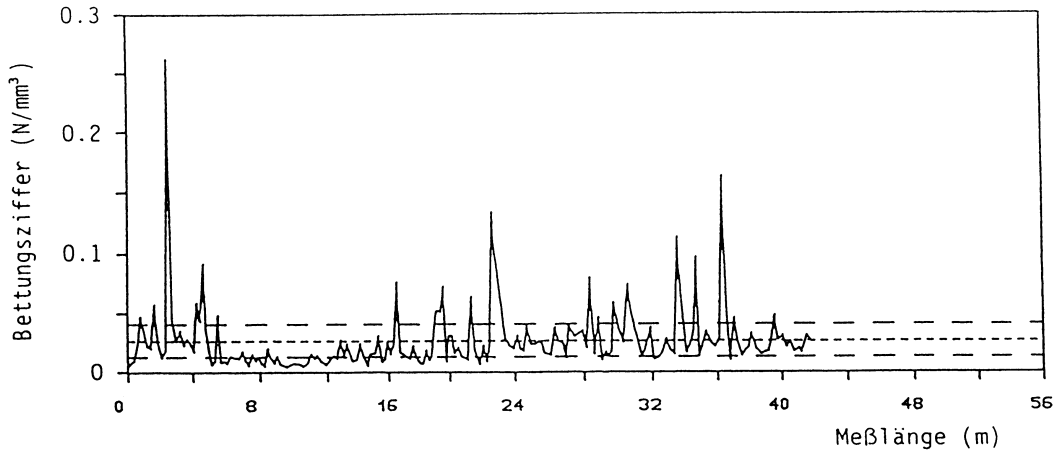


Bild 17: Gemessener Verlauf der Bettungsziffer einer Grabensohle mit Sandbettung

4.2.3 Einbaulasten

Auch die Verteilung der Erdlast durch die Rohrgrabenverfüllung sowie der sich durch die Verdichtung der Rorhrgrabenverfüllung ergebenden Einbaulast unterliegt gewissen Schwankungen entlang der Rohrleitung. Dies ist einerseits auf das Vorhandensein unterschiedlicher Verfüllmaterialien sowie unterschiedlicher Verdichtungszustände entlang der Rohrleitungen und andererseits auf unterschiedliche Fahrbahnausbildungen zurückzuführen.

5. Strukturverhalten erdverlegter Leitungen

Zur Beurteilung der Sicherheit und Wirtschaftlichkeit erdverlegter Leitungen muß das Strukturverhalten im erdverlegten Zustand innerhalb der Nutzungsdauer hinreichend genau bekannt sein. Für die Praxis ist es notwendig, vor allem die Konsequenzen der geometrischen und mechanischen Interaktion zwischen Boden und Leitung, zufolge der **Einwirkungen durch Einbau und Betrieb auf das System „Fahrbahn-Boden-Leitung“** mit einfachen Mitteln transparent zu machen. Insbesondere ist es für die Praxis notwendig, die Auswirkungen der Bodeneigenschaften sowie der Einbauverhältnisse auf das Strukturverhalten der erdverlegten Leitungen unter Berücksichtigung der spezifischen Eigenschaften der Leitungswerkstoffe sowie der zu erwartenden Belastungen aufzuzeigen.

5.1 Beanspruchungen erdverlegter Rohrleitungen durch direkte Lasten

Zur Erfassung des Strukturverhaltens erdverlegter Leitungen beim Einbau und im Betrieb sind im folgenden unter Berücksichtigung der spezifischen Eigenschaften der Komponenten des mechanischen Systems „Fahrbahn-Boden-Leitung“, der vorgegeben Einbaumaßnahmen sowie der zu erwartenden Belastungsverhältnisse die Ergebnisse analytischer Simulationen mit Hilfe der Methode der „FinitenElemente“ mit dem Finite-Elemente-Programmsystem MARC & MENTAT dargestellt. Diese Simulationen sollen einerseits das Strukturverhalten erdverlegter Leitungen bei Einbau und im Betrieb transparent machen und andererseits die Möglichkeit bieten, vorliegende Meßergebnisse an erdverlegten Kunststoffrohren realistisch zu interpretieren. Dabei soll auch aufgezeigt werden, warum unmittelbar nach dem Einbau sehr große Verformungen in den Rohren auftreten können, ohne daß dem entsprechende Lasten gegenüber stehen.

Als erster Schritt beim Einbau der Rohre und der Wiederverfüllung des Rohrgrabens erfolgt das Einbringen der Verfüllung in die Leitungszone. Anschließend wird die Wiederverfüllzone in Schichten zu je 30 cm verfüllt und jeweils am Planum verdichtet. Das Maß der Verdichtung richtet sich nach den Anforderungen der Straßenerhalter. Der prinzipielle Vorgang bei der Finite-Elemente-Simulation ist in Bild 18 dargestellt. Alle nichtlinearen Eigenschaften der Komponenten des Systems „Fahrbahn-Boden-Leitung“, soweit sie bekannt sind, sind in den Simulationen berücksichtigt, wie z.B.:

- Druck-Setzungs-Verhalten der Verfüllmaterialien
- Eigenschaften des Rohrwerkstoffes
- Kontakt- und Reibungsverhältnisse zwischen Rohr und Verfüllung in der Leitungszone

- Kontakt- und Reibungsverhältnisse zwischen der Verfüllung des Rohrgrabens und dem anstehenden Boden
- Kontaktverhältnisse zwischen den einzelnen Schichten der Wiederverfüllung
- usw.

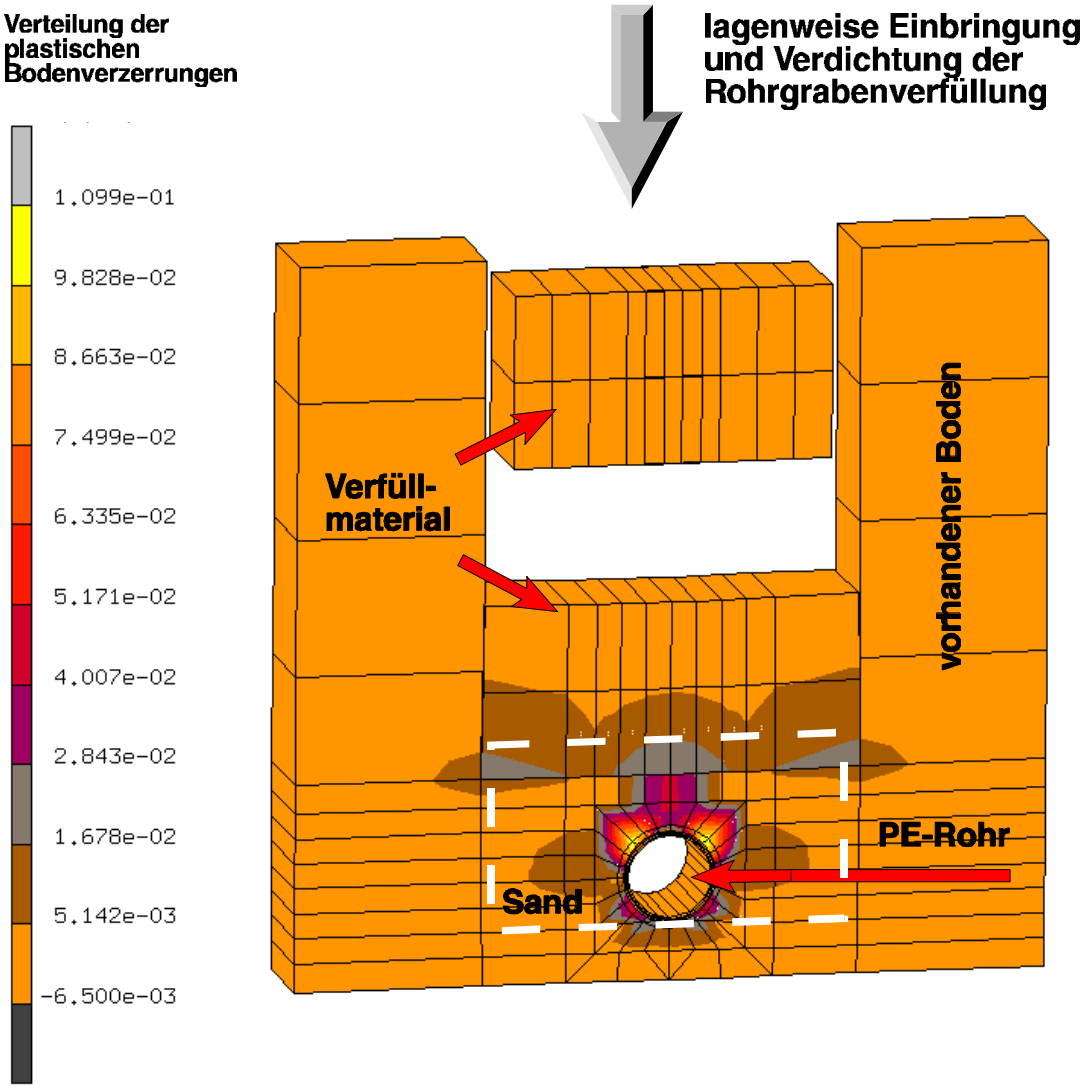


Bild 18: Finite-Elemente-Simulation

Die analytischen Simulationen des Strukturverhaltens erdverlegter Leitungen beim Einbau und im Betrieb zeigen am Beispiel von drucklosen PE-Rohren folgende Erkenntnisse:

- **Die Verdichtung der Rohrgrabenverfüllung führt zu einer Verspannung der Verfüllung in der Leitungszone und damit zu einer entsprechenden Verformung der Rohre, ohne daß dieser Verformung entsprechende aktive Lasten gegenüberstehen.** Die Verspannung der Verfüllung in der Leitungszone ist die Konsequenz des Druck-Setzungsverhaltens

des Verfüllmaterials bei Belastung bzw. Verdichtung. PE-Rohre sind aufgrund der geringen Steifigkeit offensichtlich nicht in der Lage der Verspannung der Verfüllung in der Leitungszone durch die Verdichtung mechanisch entgegenzuwirken, so daß entsprechende Verformungen im Rohr auftreten.

- Die möglichen Verformungen eines PE-Rohres durch die lagenweise Verdichtung der Wiederverfüllung des Rohrgrabens beim Einbau sind Bild 19 zu entnehmen.

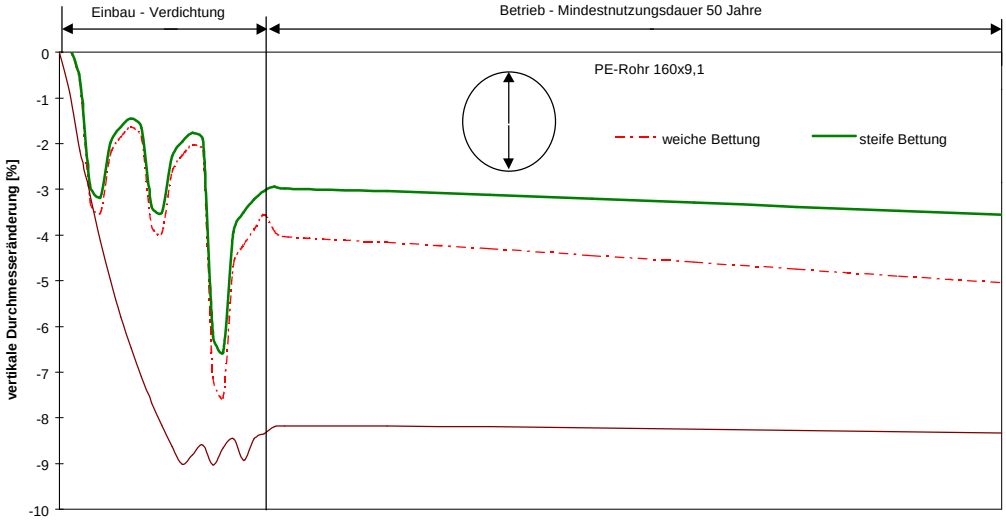


Bild 19: Verformung eines PE-Rohres beim Einbau und im Betrieb

Die dargestellten Verformungen entsprechen der vertikalen Durchmesseränderung des Rohres bei Einbau und im Betrieb, hochgerechnet auf eine Mindestnutzungsdauer von 50 Jahren. Bild 19 zeigt deutlich den Unterschied einer moderaten lagenweisen Verdichtung der eingebrachten Schichten in der Wiederverfüllzone in Vergleich zu einer extremen Verdichtung der ersten Lage der Wiederverfüllzone. Bei moderater Verdichtung der beiden ersten Schichten der Wiederverfüllzone sind die bleibenden Verformungen des Rohres auch nach stärkerer Verdichtung der obersten Schicht der Wiederverfüllzone deutlich geringer als bei einer extremen Verdichtung der ersten Lage der Wiederverfüllzone, wobei die Verdichtung der weiteren Lagen der Wiederverfüllzone bis zum Planum unter der Fahrbahn keine wesentliche Änderung mehr bringt. Bei der extremen Verdichtung der ersten Lage der Wiederverfüllzone treten beträchtliche Verspannungen der Verfüllung in der Leitungszone und damit auch beträchtliche bleibende vertikale Durchmesseränderungen im Rohr auf. Demgegenüber sind die Verformungen des Rohres über eine Mindestnutzungsdauer von 50 Jahren durch eine konstante maximale Verkehrsbelastung vernachlässigbar gering. Einen gewissen Einfluß auf das Verformungsverhalten der Rohre besitzen noch unterschiedliche Werkstoffeigenschaften sowie die Steifigkeit der Rohrbettung. Die für den Einbau erhaltenen Verformungen der Rohre entsprechen auch den Meßergebnissen an

mungen der Rohre entsprechen auch den Meßergebnissen an erdverlegten Kunststoffrohren, die zeigen, daß unmittelbar nach dem Einbau relativ hohe Verformungen der Rohre auftreten können, die mit zunehmender Nutzungsdauer nicht mehr wesentlich zunehmen. Dies ist offensichtlich auf den Einbau bzw. die Verdichtung der Rohrgrabenverfüllung zurückzuführen. Zu bemerken ist weiters, daß in den einschlägigen Regelwerken die Einwirkungen durch den Einbau nicht in dieser Form berücksichtigt sind. Die Berechnung nach den einschlägigen Regelwerken startet im allgemeinen erst an der Übergangsstelle zwischen Einbau und Betrieb, wobei nur die Erdlast und die Verkehrslast berücksichtigt werden. Bild 19 ist weiters zu entnehmen, daß die Verdichtung der Rohrgrabenverfüllung die Bewegungsmöglichkeiten des Rohres in der Leitungszone derartig einschränkt, daß größere Verformungen des Rohres und damit auch Kriecherscheinungen während der Mindestnutzungsdauer von 50 Jahren nur mehr in einem sehr geringen Maße möglich sind.

- In Bild 20 ist die Umfangsspannung in einem PE-Rohr beim Einbau und im Betrieb dargestellt. Deutlich zeigen sich analog zur vertikalen Durchmesseränderung die Spannungsspitzen in der Rohrwand sowohl bei moderater als auch extremer Verdichtung der ersten Lage der Wiederverfüllzone. Weiters zeigt sich, daß die Belastung durch den Einbau aus einem reversiblen und einem irreversiblen Anteil besteht. Der Spannungszustand in der Rohrwand durch den Einbau ist vor allem für die Beurteilung der Kurzzeit-Beanspruchung in der Rohrwand maßgebend. Bild 20 zeigt deutlich, daß die Beanspruchungen in der Rohrwand durch den Einbau wesentlich höher sind als die Beanspruchungen über eine Mindestnutzungsdauer von 50 Jahren durch z.B. eine maximale Verkehrsbelastung. Weiters ist aus Bild 20 deutlich zu erkennen, daß in der Rohrwand ein Abbau der Spannungen mit der Belastungsdauer durch Relaxieren stattfindet.

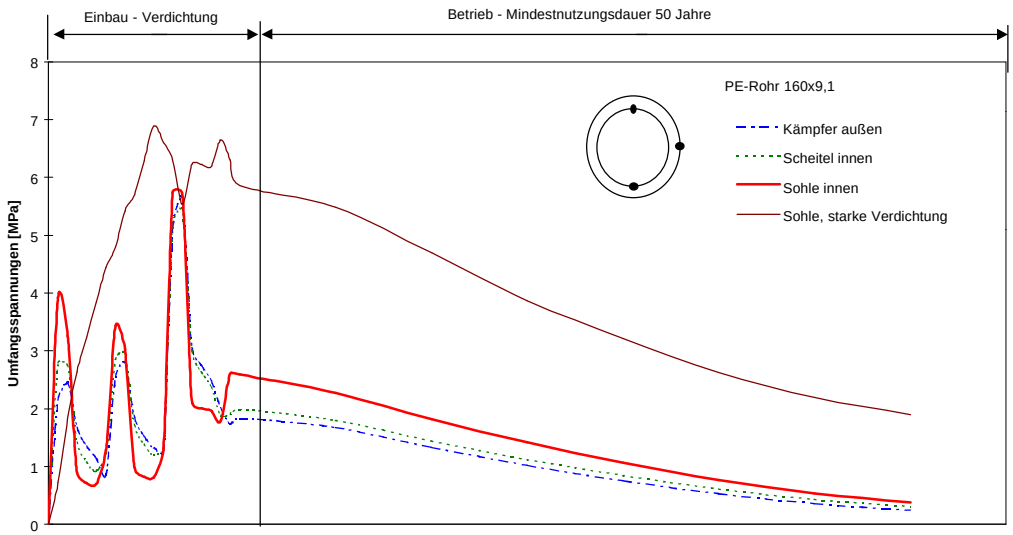


Bild 20: Umfangsspannung in einem PE-Rohr beim Einbau und im Betrieb

- Für die gegenständlichen Betrachtungen wurden gleichmäßige Belastungs- und Beanspruchungsverhältnisse in Rohrlängsrichtung angenommen. Aus der Analyse ist jedoch deutlich zu erkennen, daß bei Imperfektionen der Bettungs-, Einbettungs- und Belastungsverhältnisse in der Längsrichtung durch die Verdichtung der Rohrgrabenverfüllung beträchtliche Zusatzbeanspruchungen und Zusatzverformungen in den Rohren auftreten können, die zufolge der Verspannung in der Leitungszone nur bedingt reversibel sind.

- In Bild 21 ist die Verteilung der relativen Dichte der Verfüllung in der Leitungszone über den Rohrumfang für die lagenweise Verdichtung der einzelnen Schichten der Wiederverfüllzone dargestellt. Geht man von einer gleichmäßigen relativen Dichte über den Rohrumfang nach der Verfüllung der Leitungszone aus, so zeigen die einzelnen Verdichtungsschritte vor allem im Zwickelbereich eine Verringerung der relativen Dichte über den Rohrumfang, die auf den reversiblen Anteil der Rohrverformung zufolge der Verdichtung zurückzuführen ist. Dieser reversible Anteil führt zu einer Entlastung des Kontaktes zwischen Rohr und Verfüllung im Zwickelbereich, wodurch die relative Dichte örtlich abnimmt.

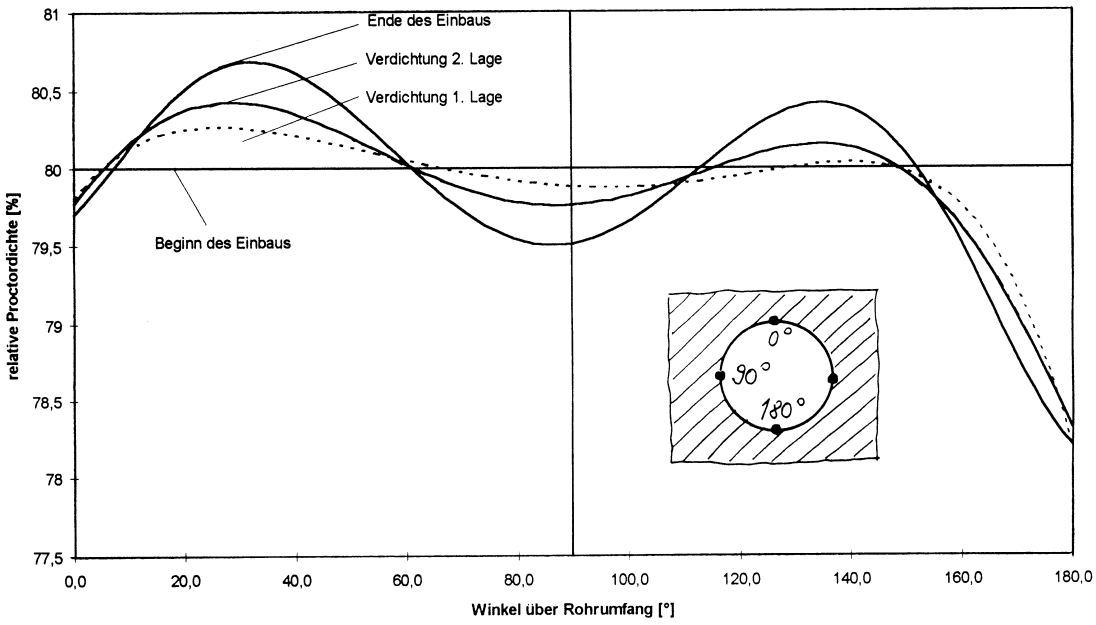


Bild 21: Relative Dichte der Verfüllung in der Leitungszone über den Rohrumfang

Im Rahmen von analytischen Simulationen wurden Parameterstudien durchgeführt, die zeigen sollten, welchen Einfluß verschiedene Parameter auf das System „Fahrbahn-Boden-Leitung“ bzw. auf das Strukturverhalten erdverlegter Rohre besitzen. Im folgenden sind die wesentlichsten Ergebnisse dieser Untersuchungen angegeben:

Die Steifigkeit des bestehenden Bodens ist nur bei der Verdichtung der Rohrgrabenverfüllung maßgebend. Ein hoher Steifemodul des bestehenden Bodens bewirkt, daß die Rohrgrabenverfüllung bei der Verdichtung seitlich nur sehr wenig ausweichen kann, wodurch bei gleichem Verdichtungsaufwand gegenüber einem geringen Steifemodul eine höhere Verdichtung der Rohrgrabenverfüllung bei geringerer Rohrverformung erreicht wird. Eine geringe Steifigkeit des bestehenden Bodens kann vor allem durch Feuchtigkeit, wie z.B. Regenwasser, Grundwasser, usw. hervorgerufen werden. Um am Planum der Wiederverfüllzone den geforderten Verformungsmodul zu erreichen, ist es bei geringer Steifigkeit des bestehenden Bodens notwendig, die Verdichtungsarbeit entsprechend zu erhöhen, wodurch die Verformung und die Beanspruchung der Rohre beim Einbau ansteigt.

Das Druck-Setzungsverhalten der Verfüllmaterialien im Zusammenhang mit der Verdichtung der Rohrgrabenverfüllung ist beim Einbau der Rohre maßgebend. Über das Druck-Setzungsverhalten der Rohrgrabenverfüllmaterialien für die Leitungs- und Wiederverfüllzone liegen jedoch im allgemeinen relativ wenig verwertbare Informationen vor. Es sollten daher die Verfüllmaterialien hinsichtlich der Druck-Setzungseigenschaften im Hinblick auf die Gebrauchstauglichkeit klassifiziert werden.

Von der Theorie des elastischen Halbraumes sowie von praktischen Erfahrungen ist bekannt, daß die Verdichtungslasten nicht unbegrenzt in den Boden wirken, sondern die Auswirkungen durch eine sogenannte „Wirktiefe“ begrenzt sind. Um die Rohrgrabenverfüllung über die gesamte Verfüllhöhe gleichmäßig verdichten zu können wird das Verfüllmaterial in Lagen von etwa 30 cm in den Rohrgraben eingebracht und verdichtet.

Im allgemeinen wird angenommen, daß sich eine hohe Steifigkeit des Bodens in der Leitungszone günstig auf die Rohrverformungen auswirkt. Die Simulationen zeigen aber, daß die hohe Steifigkeit des Bodens nur durch eine starke Verdichtung erreicht werden kann und somit im Zustand der hohen Steifigkeit bereits ein stark verformtes Rohr vorliegt.

Der Spannungs- und Verformungszustand in den Rohren zufolge des Einbaues wird in den herkömmlichen Berechnungsverfahren für erdverlegte Rohrleitungen nicht berücksichtigt. Ausgangspunkt der Berechnungen ist im allgemeinen ein undeformiertes spannungsfreies Rohr, eingebettet in einem verdichteten Boden hoher Steifigkeit. Das Erreichen einer hohen Bodensteifigkeit ist jedoch mit beträchtlichen Beanspruchungen und Verformungen der Rohre verbunden, die im allgemeinen nicht berücksichtigt werden.

Anschließend an die Verdichtung der Rohrgrabenverfüllung beim Einbau erfolgt eine Nachverdichtung infolge der Belastung durch Verkehr. Das Ausmaß der Nachverdichtung ist nur bei unbefestigten Fahrbahnen von Bedeutung, unter befestigten Fahrbahnen jedoch im allgemei-

nen sehr gering, da die Steifigkeit der Fahrbahn die Lasten verteilt und der Druck auf den Boden nur relativ gering ist.

Die Simulationen wurden für PE-Rohre, also flexible Rohre mit einer geringen Stefigkeit und einer hohen Verformbarkeit durchgeführt. Demzufolge treten durch den Einbauvorgang auch relativ hohe Verformungen in Abhängigkeit vom Grad der Verdichtung der Rohrgrabenverfüllung auf, die auch durch Messungen an erdverlegten Rohren unmittelbar nach dem Einbau nachgewiesen wurden.

Die Schwankungen in den Werkstoffeigenschaften verschiedener Rohrwerkstoffe bewirken zwar auch Schwankungen in den Beanspruchungen und Verformungen der Rohre, die jedoch nur bei extremer Verdichtung zum Ausdruck kommen und im allgemeinen vernachlässigt werden können. Die durch den Einbau der PE-Rohre auftretenden globalen Spannungen in der Rohrwand werden mit der Belastungsdauer durch Relaxation abgebaut. Inwieweit lokale Einwirkungen auf die Rohrwand z.B. durch starre Auflagerstellen und Imperfektionen der Umgebungsverhältnisse zum lokalen Versagen der Rohre führen können, ist nicht bekannt. Zur Beurteilung von lokalen Einwirkungen müßten auch mehr Informationen über das mechanische Leistungsvermögen der Rohrwerkstoffe bekannt sein.

Bei starren Rohren kann man davon ausgehen, daß die Einwirkungen durch den Einbau entsprechend hohe Beanspruchungen in der Rohrwand hervorrufen, die Verformungen der Rohre aber aufgrund der hohen Steifigkeit eher gering bleiben. Zu beachten sind die Einwirkungen durch den Einbau bzw. die Verdichtung der Rohrgrabenverfüllung aber auch für Korrosionsschutzumhüllungen.

Den Betrachtungen liegt eine **mittlere Einsatztemperatur** der PE-Rohre **während der Nutzungsdauer von 5°C** zugrunde. Tiefere Temperaturen führen zu einer Erhöhung der Steifigkeit der Rohre und damit, je nach den Bettungsbedingungen, zu einer Erhöhung der Spannungen in der Rohrwand. Temperaturen über 5°C, wie sie vor allem aufgrund hoher Umgebungstemperaturen beim Einbau der Rohre im Sommer, bei starker Sonneneinstrahlung auftreten können, führen zu einer Zunahme der Rohrverformungen. Dies ist vor allem beim Einbau der Rohre zu beachten, wenn die mechanischen Einwirkungen durch die Verdichtung der Rohrgrabenverfüllung am größten sind. Aus diesem Grund sollte man beim Einbau der Rohre vor der Verdichtung der Rohrgrabenverfüllung immer einen Temperaturausgleich abwarten, um große Verformungen der Rohre durch den Einbau zu vermeiden.

In den einschlägigen Regelwerken und Richtlinien für erdverlegte Rohrleitungen wird davon ausgegangen, daß der **Rohrzwickel** vollständig mit Verfüllmaterial gefüllt und ausreichend ver-

verdichtet ist. Die Verdichtung der Rohrgrabenverfüllung erfolgt bei kleinen Rohrdurchmessern und schmalen Rohrgräben im allgemeinen nur durch maschinelle Verdichtung am Planum der lagenweise eingebrachten Wiederverfüllung. Es stellt sich somit die Frage, wie gut die Verfüllung des Zwickels bei der Rohrgrabenverfüllung erfolgt und welchen Einfluß die Zwickelverfüllung auf das Strukturverhalten erdverlegter Rohre besitzt. Untersuchungen zeigen, daß die Umfangspannungen an der Innenseite der Rohrsohle sehr stark zunehmen, wenn die Hinterfüllung nicht ordnungsgemäß erfolgt. Eine schlechte Hinterfüllung des Rohrzwickels bewirkt auch eine größere lokale Verformung des Rohres im Bereich der Rohrsohle. Der Einfluß der Zwickelverfüllung auf das Strukturverhalten der Rohre ist relativ groß, so daß auf eine ausreichende Hinterfüllung des Zwickels beim Einbau der Rohre geachtet werden sollte.

Die Auswirkungen der Verkehrsbelastung auf das System „Fahrbahn-Boden-Rohr“ sind im allgemeinen wesentlich geringer als üblicherweise angenommen wird. Das läßt sich unter anderem dadurch erklären, daß

- die Einbaulasten im Zuge der Verdichtung der Grabenverfüllung höher sind als die Verkehrslasten,
- die Verkehrslasten auf der Fahrbahn angreifen, während die Verdichtung der Grabenverfüllung lagenweise im Leitungsgraben erfolgt
- befestigte Fahrbahnen aufgrund der Steifigkeit der Fahrbahn eine lastverteilende Wirkung auf die Wiederverfüllzone besitzen
- im Zuge der Verdichtung der Grabenverfüllung das Verfüllmaterial in der Leitungszone verspannt wird, so daß eine nachfolgende Last geringerer Größe keine zusätzliche Verdichtung bewirken kann.

Die Untersuchungen zeigen eine Abhängigkeit der Beanspruchungen und Verformungen erdverlegter Rohre von Einflußgrößen, die nicht auf Rohreigenschaften oder Belastungen zurückzuführen sind, sondern nur durch die Qualität der Verlegung beeinflußt werden.

Für die Praxis ist es notwendig, die Auswirkungen der Bodeneigenschaften sowie der Einbauverhältnisse auf das Strukturverhalten der Rohre unter Berücksichtigung der mechanischen Eigenschaften des Rohrwerkstoffes deutlich aufzuzeigen. Dies kann für bestimmte Punkte über den Rohrquerschnitt, wie z.B. Rohrscheitel, Rohrkämpfer, Rohrsohle, sowohl am Rohrinnen- als auch am Rohraußenrand relativ einfach mit Hilfe sogenannter „Rohrkennfelder“ erfolgen [20, 26]. Die Rohrkennfelder sind eine neue und effiziente Methode zur Erfassung und Darstellung des Strukturverhaltens erdverlegter Rohrleitungen.

Mit Hilfe der **Rohrkennfelder** wird das Strukturverhalten der Rohre in Abhängigkeit von den Bodeneigenschaften in der Leitungszone, den mechanischen Eigenschaften des Rohrwerkstoffes sowie den mechanischen Einwirkungen auf das System „Fahrbahn-Boden-Rohr“ für die Regeleinbauverhältnisse nach den einschlägigen Verlege- und Einbaurichtlinien durch entsprechende Kurvenscharen in Diagrammform dargestellt. Die Rohrkennfelder liefern sehr einfach und rasch Entscheidungskriterien für die technische und wirtschaftliche Beurteilung bei Einbau, Betrieb und Instandhaltung erdverlegter Rohre, wie sie für die Rohrnetzabteilungen wesentlich sind. Insbesondere ist es möglich zu entscheiden, durch welche technisch vertretbaren Maßnahmen Kosten gesenkt werden können.

Für die praktische Anwendung der Rohrkennfelder müssen einige Informationen und Daten über das mechanische System „Fahrbahn-Boden-Rohr“ bekannt sein. Die Aufbereitung der Systemdaten als Grundlage für die Anwendung der Rohrkennfelder umfaßt folgende Arbeiten:

- Beschreibung der mechanischen Eigenschaften des Rohrwerkstoffes als Funktion der Beanspruchung, der Belastungsdauer und der Temperatur
- Beschreibung der mechanischen Eigenschaften der Boden- und Verfüllmaterialien in der Leitungs- und Wiederverfüllzone bei konventioneller Verlegung im Rohrgraben
- Beschreibung der Einbauverhältnisse nach den einschlägigen Verlege- und Einbaurichtlinien bei konventioneller Verlegung im Rohrgraben sowie den Vorgaben der Straßenerhalter, insbesondere hinsichtlich der geforderten Verdichtungsgrade am Planum der Wiederverfüllzone
- Beschreibung der Lasten auf das mechanische System „Fahrbahn-Boden-Rohr“, wie z,B, Innendruck, Auflasten, usw.

Für die Beurteilung des Strukturverhaltens erdverlegter Rohre sind nach dem Stand der Technik folgende Nachweise zu führen: Spannungsnachweis, Dehnungsnachweis, Verformungsnachweis.

Die Erfahrungen mit der Berechnung sowie die Auswertung von Messungen an erdverlegten Kunststoffrohren haben gezeigt, daß für die Analyse und Beurteilung des Strukturverhaltens erdverlegter Rohre folgende Strukturwerte repräsentativ sind:

- Spannungszustand - Umfangsspannung Rohrsohle innen
  - Umfangsspannung Rohrkämpfer außen
- Dehnungszustand - Umfangsdehnung Rohrsohle innen
  - Umfangsdehnung Rohrkämpfer außen
- Verformungszustand - vertikale Durchmesseränderung

Mit diesen Strukturwerten läßt sich im allgemeinen das Strukturverhalten erdverlegter Rohre hinreichend genau beschreiben.

An der Rohrsohle innen und am Rohrkämpfer außen treten im allgemeinen durch den Einbau- und Belastungszustand der Rohre die maximalen Zugbeanspruchungen in der Rohrwand bei konventioneller Verlegung der Rohre im Rohrgraben, entsprechend den einschlägigen Verlegerichtlinien, auf. Am Rohrkämpfer innen können zwar absolut gesehen noch höhere Druckspannungen auftreten, die jedoch im allgemeinen gegenüber den Zugspannungen vernachlässigt werden.

Für die Beurteilung der beim Einbau und im Betrieb auftretenden Beanspruchungen in den Rohren sind die sich aus den Berechnungen ergebenden Werte für das Strukturverhalten den zulässigen Werten für den Rohrwerkstoff im Hinblick auf die Mindestnutzungsdauer der Rohre von 50 Jahren gegenüberzustellen.

Die Rohrkennfelder sind eine im Rahmen der Strukturanalyse erdverlegter Rohrleitungen neue, einfach zu handhabende Methode, das Strukturverhalten der Rohre in Abhängigkeit von den mechanischen Rohreigenschaften und den Bodeneigenschaften für die jeweiligen Belastungen zu erfassen.

Die Bilder 22 bis 33 zeigen beispielhaft Rohrkennfelder für die Beanspruchungs- und Verformungszustände in einem erdverlegten PE-Rohr 160 x 14,6 – SDR 11,0; PN 10 - mit 1 m Rohrüberdeckung und 10 bar Innendruck - zufolge Einbau nach den einschlägigen Verlege- und Einbaurichtlinien und im Betrieb über eine Nutzungsdauer von 50 Jahren für die im folgenden angegebenen Belastungszustände. In den Rohrkennfeldern ist das Strukturverhalten der Rohre in Abhängigkeit von den Einbau- und Belastungsverhältnissen der Rohre in Diagrammform ausgewiesen, wobei folgende Lastfälle betrachtet werden:

Lastfall 1: Einbau (E)

Einbau der Rohre nach den einschlägigen Verlege- und Einbaurichtlinien mit einer Rohrüberdeckung von 1 m und verschiedenen Verdichtungsgraden am Planum der Wiederverfüllzone, wobei folgende Verdichtungsgrade angenommen wurden:

- Verfüllung unverdichtet entsprechend einer lagenweisen Verfüllung des Rohrgrabens ohne zusätzliche Verdichtung der Rohrgrabenverfüllung
- Verfüllung und Verdichtung des Rohrgrabens in der Wiederverfüllzone lagenweise in Lagen von etwa 30 cm, wobei am Planum der Wiederverfüllzone ein Verformungsmodul E_v von 30 MPa, 60 MPa oder 90 MPa vorgegeben ist.

Lastfall 2: Einbau + Auflast (E + A)

Einbau entsprechend Lastfall 1 mit zusätzlicher Auflast auf der Fahrbahn zufolge einer Verkehrsbelastung entsprechend der vorgegebenen Verkehrslast nach den einschlägigen Regelwerken über einen Belastungszeitraum von 50 Jahren.

Lastfall 3: Einbau + Innendruck (E + P)

Einbau entsprechend Lastfall 1 mit zusätzlicher Belastung des Rohres durch einen Innendruck von 10 bar, konstant über einen Belastungszeitraum von 50 Jahren.

Lastfall 4: Einbau + Auflast + Innendruck (E + A + P)

Einbau entsprechend Lastfall 1 mit zusätzlicher Belastung durch eine Auflast auf der Fahrbahn nach Lastfall 2 und zusätzlicher Belastung des Rohres durch einen Innendruck nach Lastfall 3. Dieser Lastfall berücksichtigt die zu erwartenden maximalen Belastungen auf das mechanische System „Fahrbahn-Boden-Rohr“ nach den einschlägigen Regelwerken und Richtlinien.

Die Bilder 22 bis 25 beziehen sich auf die vertikale Durchmesseränderung des Rohres zufolge verschiedener Lastfälle in Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad der Rohrgrabenverfüllung (unverdichtet / E_v = 30 MPa / E_v = 60 MPa / E_v = 90 MPa) und die Bilder 26 bis 27 auf die vertikale Durchmesseränderung durch den Einbau für bestimmte Verdichtungsgrade (unverdichtet / E_v = 90 MPa) in Abhängigkeit von den definierten Lastfällen.

Die Bilder 28 bis 31 beziehen sich auf die Umfangsspannung an der Rohrsohle innen zufolge verschiedener Lastfälle in Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad der Rohrgrabenverfüllung (unverdichtet / E_v = 30 MPa / E_v = 60 MPa / E_v = 90 MPa) und die Bilder 32 bis 33 auf die Umfangsspannung an der Rohrsohle innen durch den Einbau für bestimmte Verdichtungsgrade (unverdichtet / E_v = 90 MPa) in Abhängigkeit von den definierten Lastfällen.

Die Werte für den Beanspruchungs- und Verformungszustand in den Rohren sind in den Rohrkennfeldern entsprechend dem zu erwartenden Steifemodul der Rohrgrabenverfüllung E_{S0} in der Leitungszone, den mechanischen Eigenschaften des Rohrwerkstoffes PE für Kurzzeitbelastung und für Langzeitbelastung, entsprechend den viskoelastischen Eigenschaften des Rohrwerkstoffes PE, dem Verdichtungsgrad der Rohrgrabenverfüllung entsprechend den einschlägigen Wiederinstandsetzungsvorschriften und den definierten Lastfällen ausgewiesen.

Die Bilder 22 bis 27 zeigen deutlich, daß das Verformungsverhalten der PE-Rohre in gewissen Bereichen sehr stark vom Bodensteifemodul, dem Kriechmodul des Rohrwerkstoffes PE, dem Verdichtungsgrad der Rohrgrabenverfüllung sowie dem Belastungszustand - Lastfall - abhängig ist. Je geringer der Bodensteifemodul und je höher der Verdichtungsgrad ist, um so größer sind

die Verformungen im PE-Rohr, da die Abstützwirkung des Bodens gegen die Rohrverformung abnimmt und sich damit durch den Verdichtungsgrad sowie die äußeren Belastungen höhere Verformungen im Rohr einstellen können.

Die Bilder 22 bis 27 zeigen weiters, daß durch das viskoelastische Verhalten des Rohrwerkstoffes die Rohrverformungen unter einer konstanten Belastung mit der Einsatzdauer zunehmen, wobei die Zunahme in gewissen Bereichen sehr stark vom Bodensteifemodul und vom Verdichtungsgrad der Rohrgrabenverfüllung abhängig ist. Wesentliche Zunahmen des Verformungsverhaltens der PE-Rohre sind vor allem bei einem Verfüllmaterial in der Leitungszone mit sehr geringem Bodensteifemodul und einem hohen Verdichtungsgrad zu erkennen. Bei Vorhandensein eines höheren Bodensteifemoduls zeigt sich, daß die viskoelastischen Eigenschaften nur mehr relativ geringen Einfluß auf das Verformungsverhalten der PE-Rohre bei Verlegung nach den einschlägigen Verlege- und Einbaurichtlinien und moderater Verdichtung der Rohrgrabenverfüllung besitzen, unter der Voraussetzung, daß keine zusätzlichen lokalen oder globalen Belastungen auftreten.

Die Bilder 28 bis 33 zeigen die Umfangsspannung an der Rohrsohle innen als Funktion des Bodensteifemoduls, des Kriechmoduls des Rohrwerkstoffes sowie für die verschiedenen Vedichtungsgrade und die verschiedenen Lastfälle. Aus den Kurven ist deutlich das Relaxationsverhalten des Rohrwerkstoffes zu erkennen. Weiters ist zu erkennen, daß die Umfangsspannungen an der Rohrsohle innen bei einer gleichmäßigen Einbettung über den Rohrumfang und einem höheren Bodensteifemodul sowohl im Kurzzeit- als auch im Langzeitverhalten in einem vertretbaren Rahmen bleiben und nur bei einem geringeren Bodensteifemodul und hohem Verdichtungsgrad im Kurzzeitverhalten relativ hohe Umfangsspannungen an der Rohrsohle zu erwarten sind.

Die Rohrkennfelder bieten einerseits die Möglichkeit, bei bekannten Kennwerten für den Boden und das Rohr in Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad der Rohrgrabenverfüllung sowie den vorgegebenen Belastungsverhältnissen, den Verformungs- und Beanspruchungszustand in den Rohren zu erfassen und andererseits bei Vorliegen von Meßdaten über die Verformung der Rohre im erdverlegten Zustand auf die Bodenverhältnisse sowie die Einbauverhältnisse rückschließen zu können. Diese Vorgangsweise erscheint von besonderer Bedeutung im Hinblick auf die Qualitätssicherung des Einbauvorganges der Rohre. Es wäre durchaus möglich, nach der Verlegung einer Rohrleitung meßtechnisch den Verformungszustand der Rohre systematisch zu erfassen und damit auf die Einbaugüte der Rohre zu schließen. Dabei handelt es sich um eine neue Methode, die im Zuge von Auswertungen vorliegender Meßdaten über den Verformungszustand erdverlegter Kunststoffrohre entwickelt wurde.

Messungen des Verformungszustandes erdverlegter PE-Rohre unmittelbar nach dem Einbau haben gezeigt, daß Verformungen auftreten können, die weit über den ausgewiesenen Werten für den Belastungszustand „Erdlast“ liegen. Da der Bodensteifemodul immer > 0 sein muß, ist davon auszugehen, daß beim Einbau der Rohre, insbesondere durch die Verdichtung, eine relativ hohe Verspannung der Rohre in der Leitungszone bewirkt wird, wodurch ohne entsprechende Auflasten sehr hohe Verformungen im Rohr möglich sind. Daraus leitet sich ab, daß der Begriff Erdlast im allgemeinen nur für die Schüttung bzw. eine geringe Verdichtung der Rohrgrabenverfüllung gültig ist, wogegen für eine starke Verdichtung der eingebrachten Rohrgrabenverfüllung in der Leitungszone, insbesondere durch eine starke Verdichtung der ersten Lage der Wiederverfüllzone entsprechend den spezifischen Eigenschaften des Verfüllmaterials eine relativ große Verdichtungslast berücksichtigt werden muß. In welcher Größenordnung sich eine derartige Verdichtungslast allgemein gesehen bewegt, ist zur Zeit noch nicht bekannt.

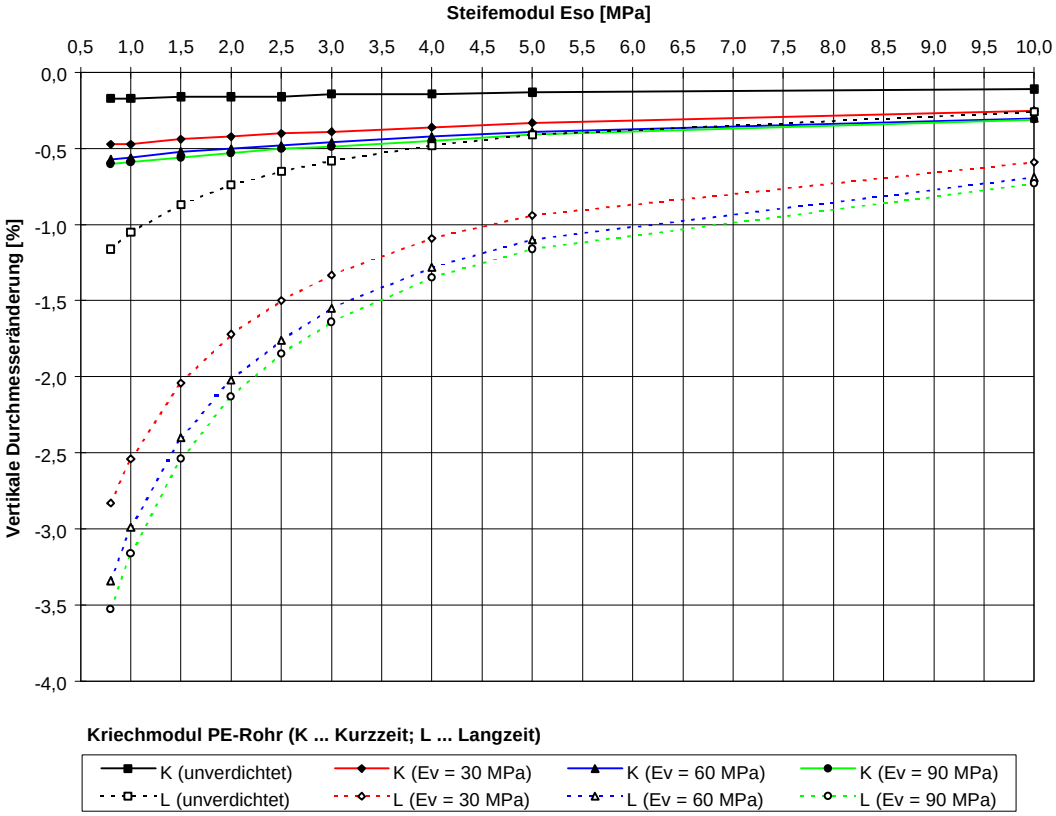


Bild 22: PE-Rohr 160 x 14,6; SDR 11,0; PN 10
Rohrüberdeckung 1 m; Innendruck 10 bar; Verkehrslast nach Norm
Lastfall: Einbau
Vertikale Durchmesseränderung in Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad

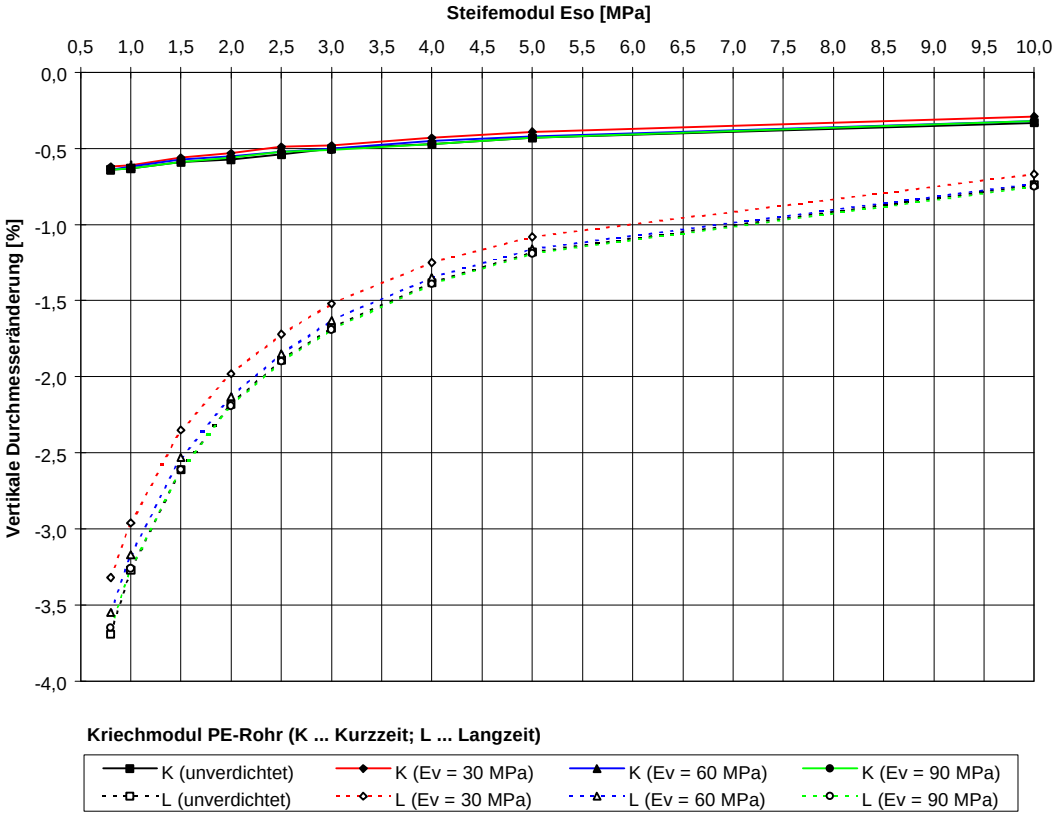


Bild 23: PE-Rohr 160 x 14,6; SDR 11,0; PN 10
Rohrüberdeckung 1 m; Innendruck 10 bar; Verkehrslast nach Norm
Lastfall: Einbau + Auflast
Vertikale Durchmesseränderung in Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad

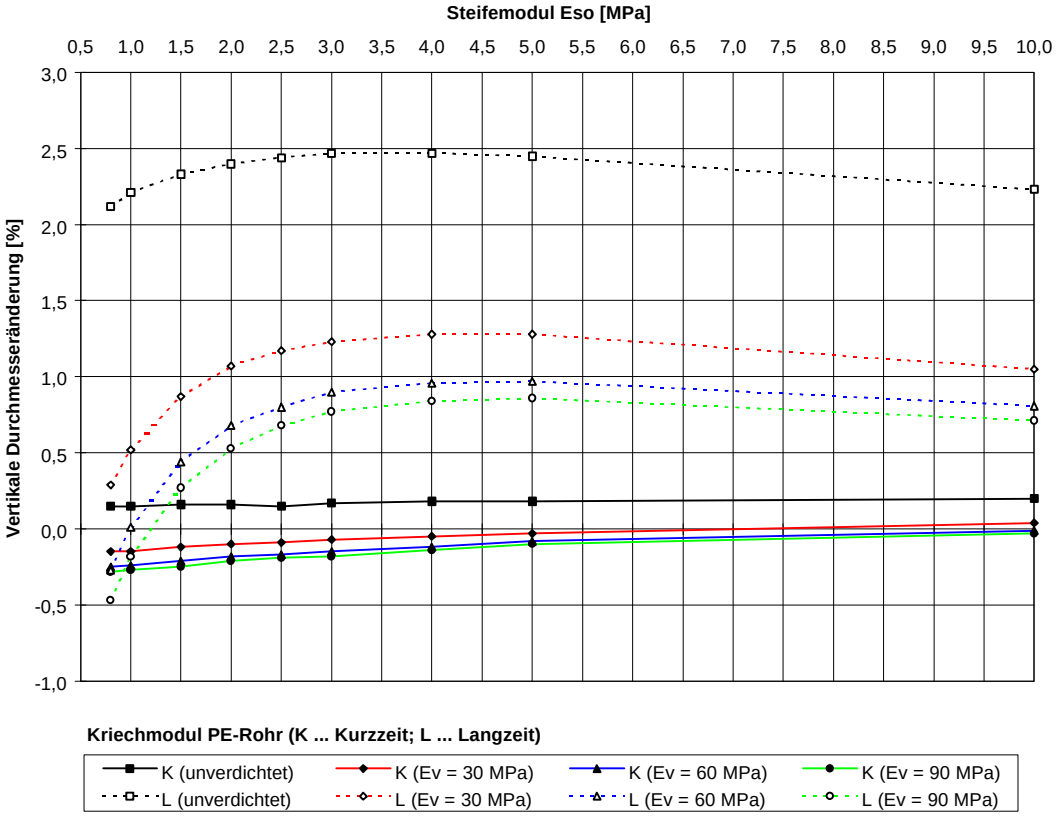


Bild 24: PE-Rohr 160 x 14,6; SDR 11,0; PN 10
Rohrüberdeckung 1 m; Innendruck 10 bar; Verkehrslast nach Norm
Lastfall: Einbau + Innendruck
Vertikale Durchmesseränderung in Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad

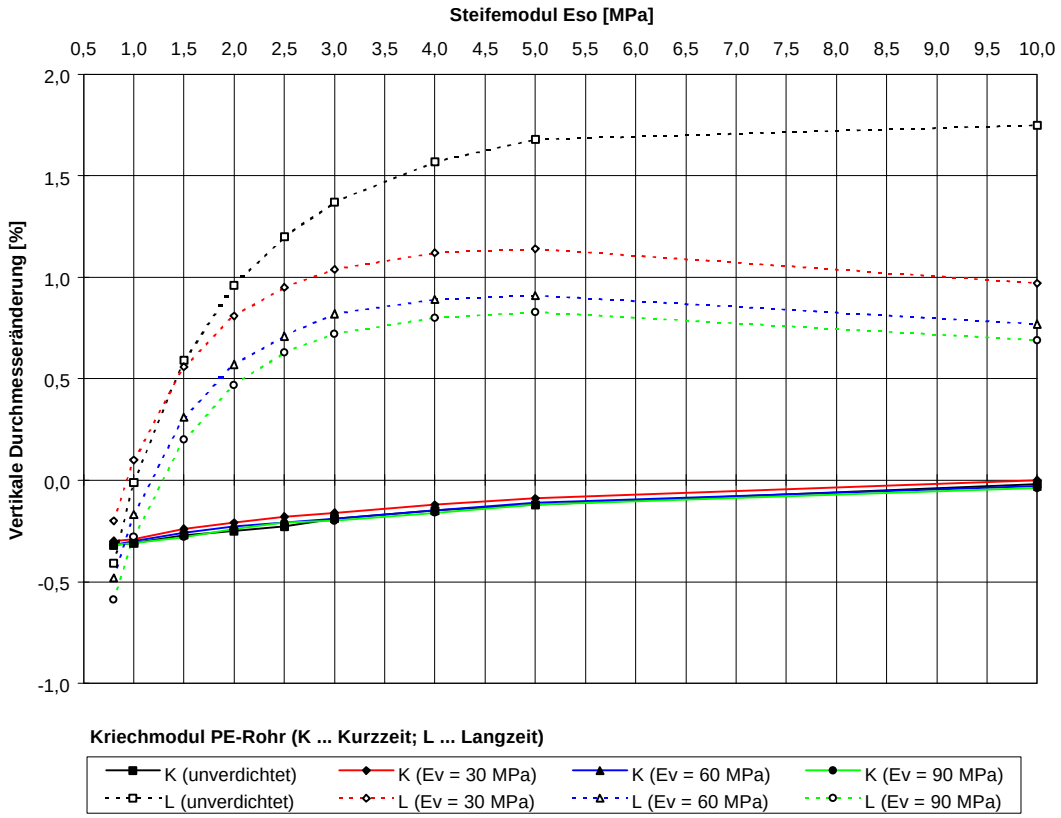


Bild 25: PE-Rohr 160 x 14,6; SDR 11,0; PN 10
Rohrüberdeckung 1 m; Innendruck 10 bar; Verkehrslast nach Norm
Lastfall: Einbau + Auflast + Innendruck
Vertikale Durchmesseränderung in Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad

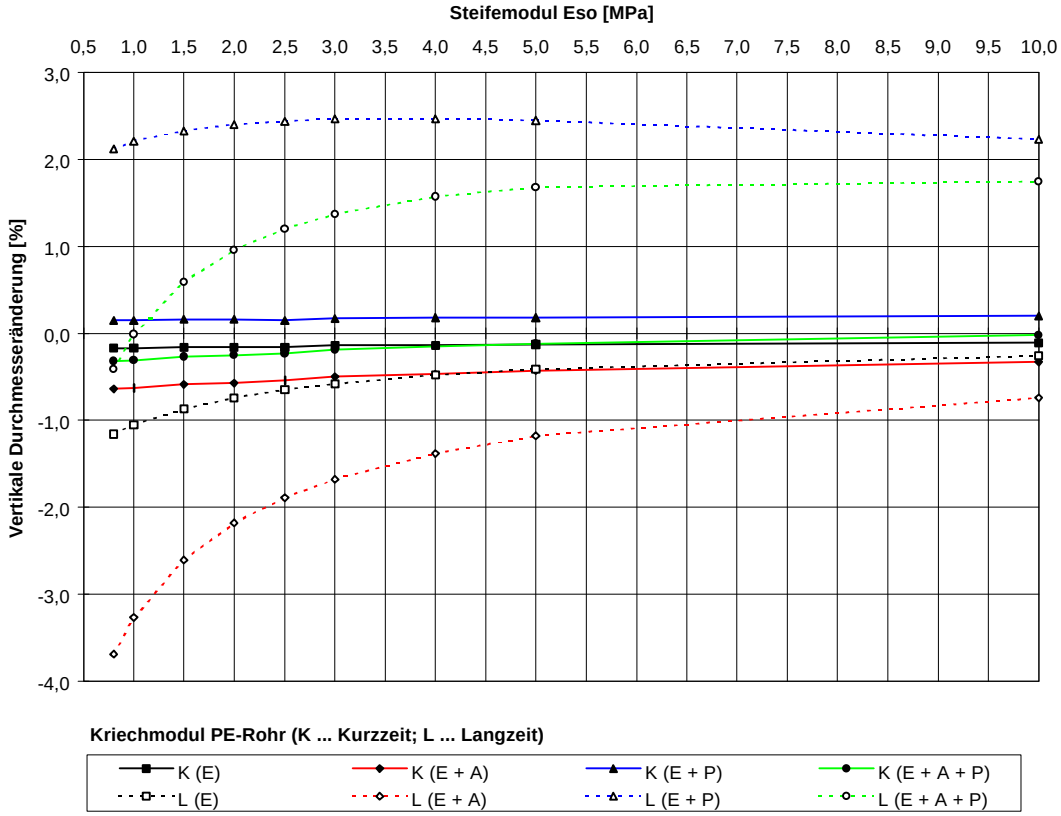


Bild 26: PE-Rohr 160 x 14,6; SDR 11,0; PN 10
Rohrüberdeckung 1 m; Innendruck 10 bar; Verkehrslast nach Norm
Verdichtungsgrad: unverdichtet
Vertikale Durchmesseränderung in Abhängigkeit vom Lastfall

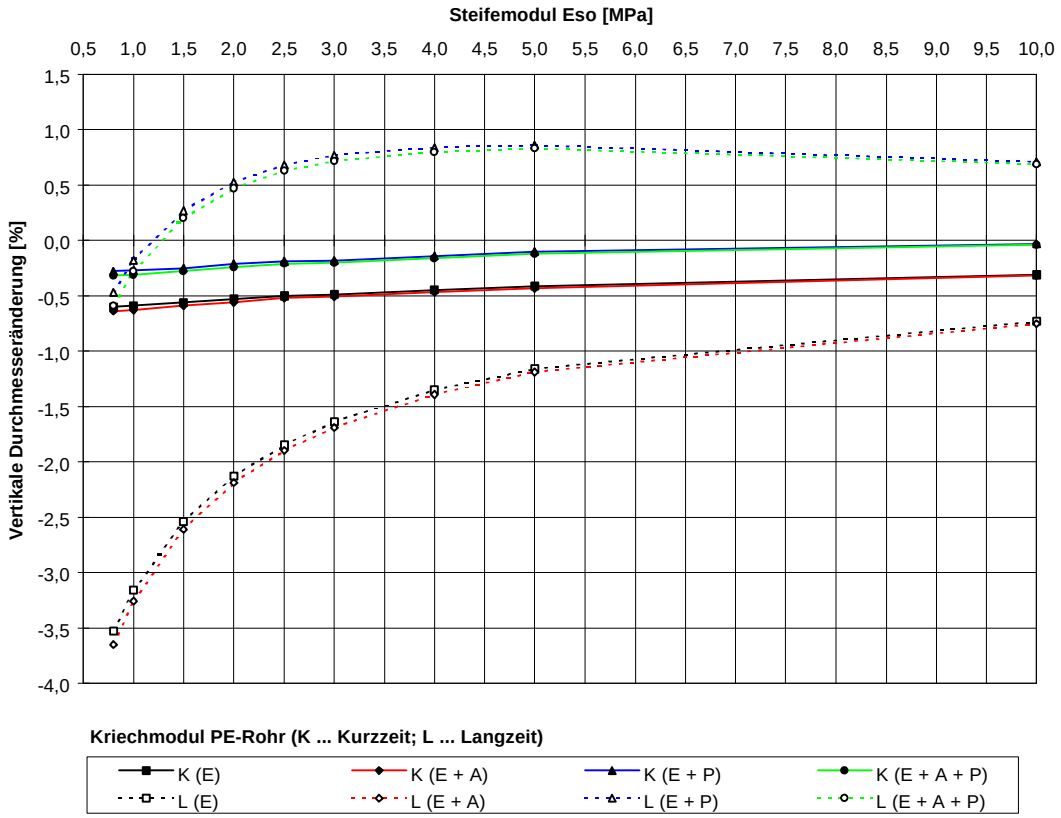


Bild 27: PE-Rohr 160 x 14,6; SDR 11,0; PN 10
Rohrüberdeckung 1 m; Innendruck 10 bar; Verkehrslast nach Norm
Verdichtungsgrad: E_v = 90 MPa
Vertikale Durchmesseränderung in Abhängigkeit vom Lastfall

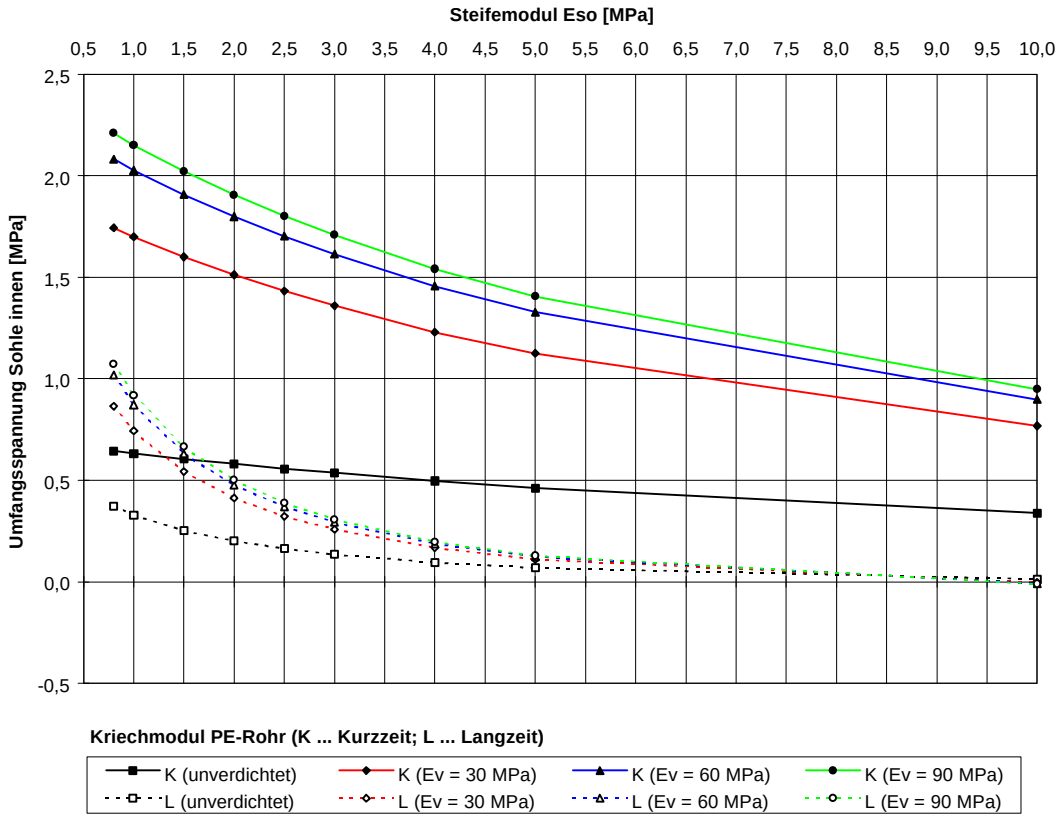


Bild 28: PE-Rohr 160 x 14,6; SDR 11,0; PN 10
Rohrüberdeckung 1 m; Innendruck 10 bar; Verkehrslast nach Norm
Lastfall: Einbau
Umfangsspannung Sohle innen in Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad

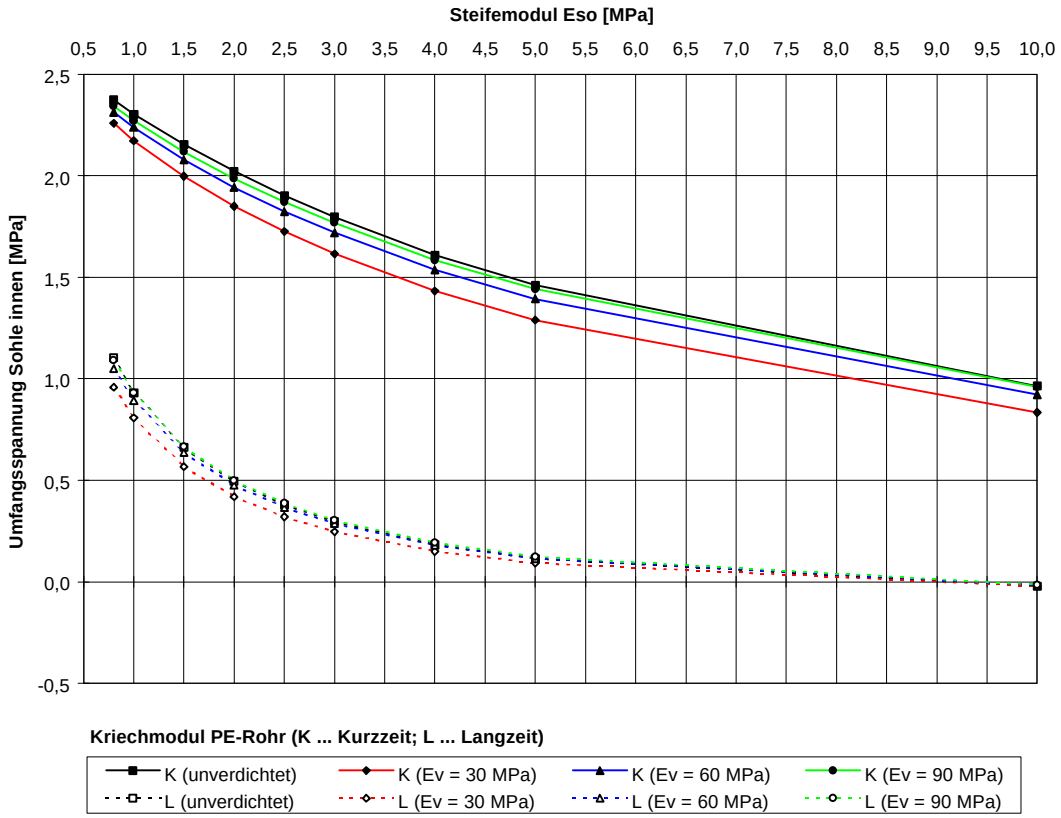


Bild 29: PE-Rohr 160 x 14,6; SDR 11,0; PN 10
Rohrüberdeckung 1 m; Innendruck 10 bar; Verkehrslast nach Norm
Lastfall: Einbau + Auflast
Umfangsspannung Sohle innen in Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad

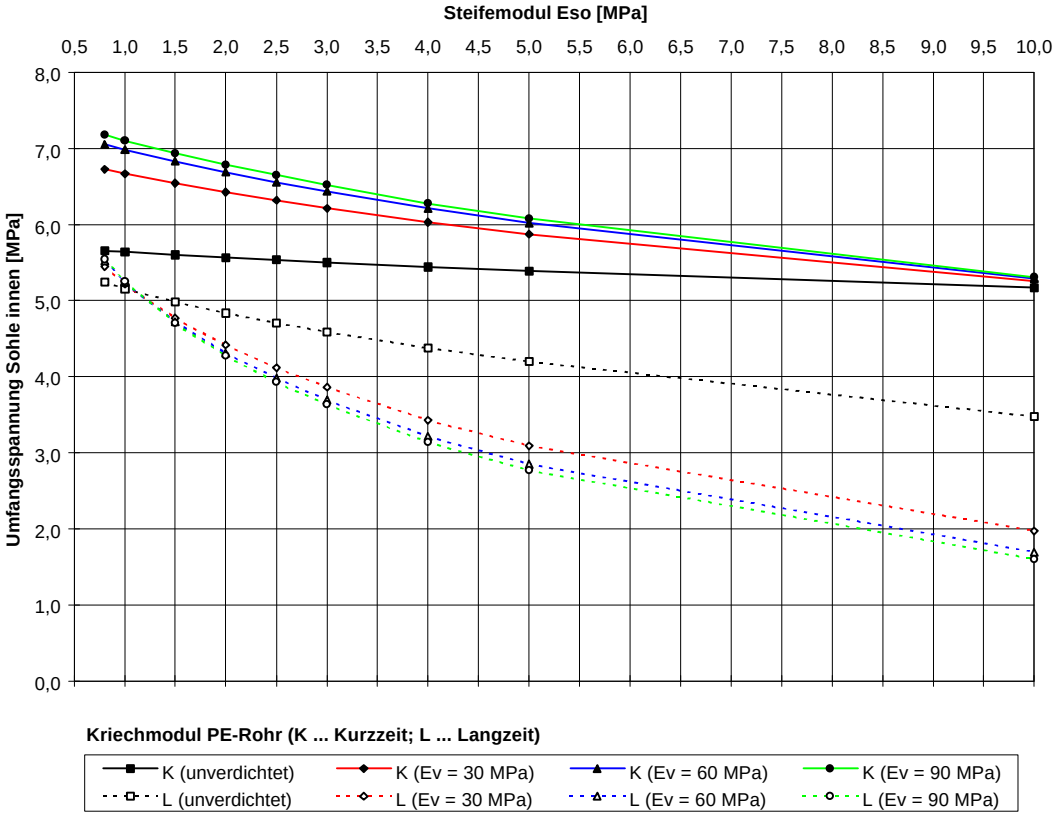


Bild 30: PE-Rohr 160 x 14,6; SDR 11,0; PN 10
Rohrüberdeckung 1 m; Innendruck 10 bar; Verkehrslast nach Norm
Lastfall: Einbau + Innendruck
Umfangsspannung Sohle innen in Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad

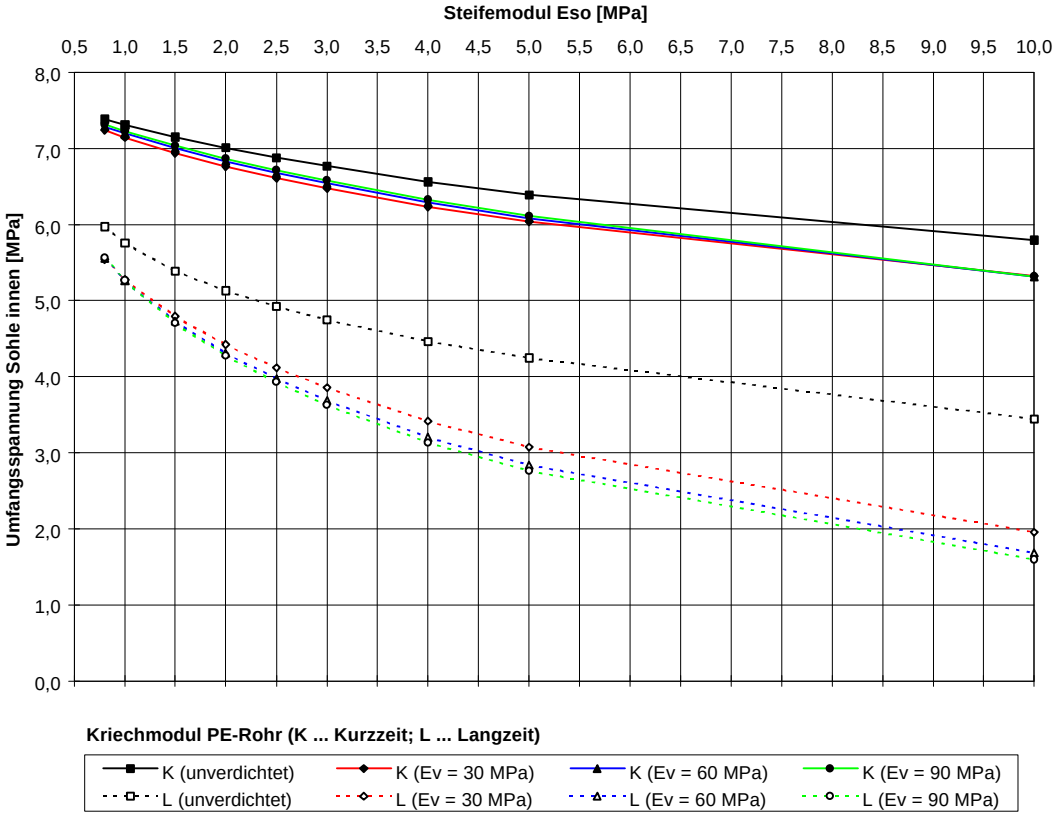


Bild 31: PE-Rohr 160 x 14,6; SDR 11,0; PN 10
Rohrüberdeckung 1 m; Innendruck 10 bar; Verkehrslast nach Norm
Lastfall: Einbau + Auflast + Innendruck
Umfangsspannung Sohle innen in Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad

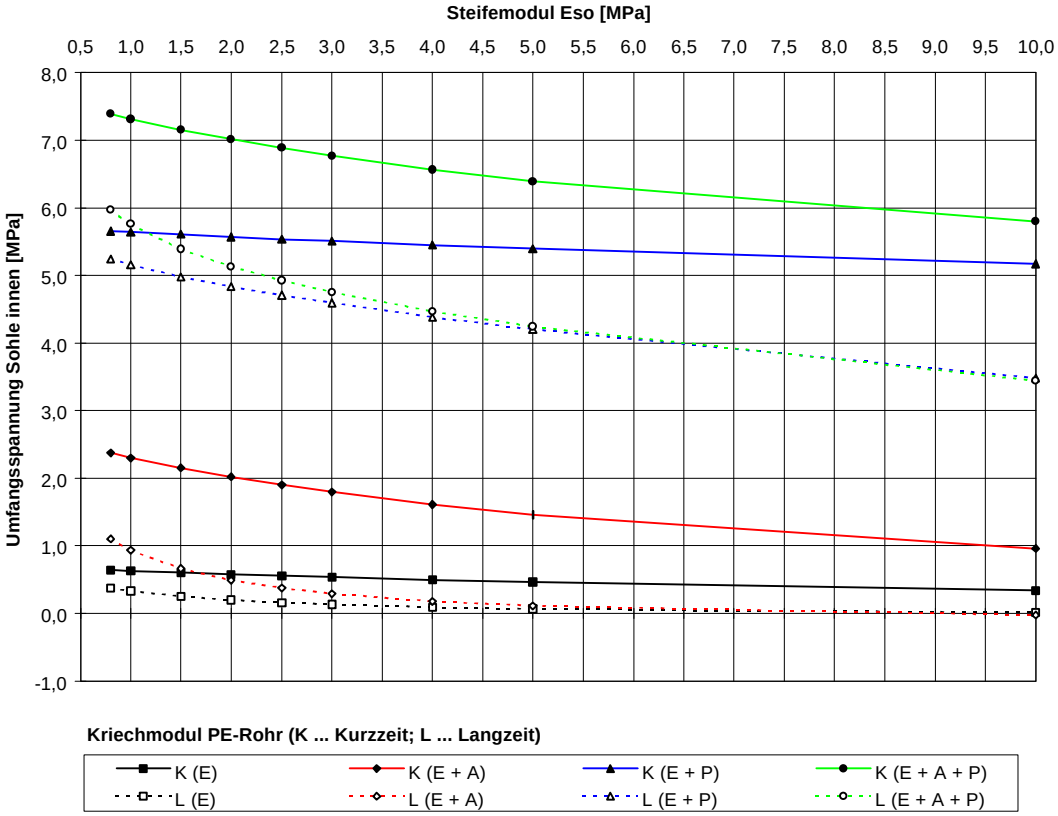


Bild 32: PE-Rohr 160 x 14,6; SDR 11,0; PN 10
Rohrüberdeckung 1 m; Innendruck 10 bar; Verkehrslast nach Norm
Verdichtungsgrad: unverdichtet
Umfangsspannung Sohle innen in Abhängigkeit vom Lastfall

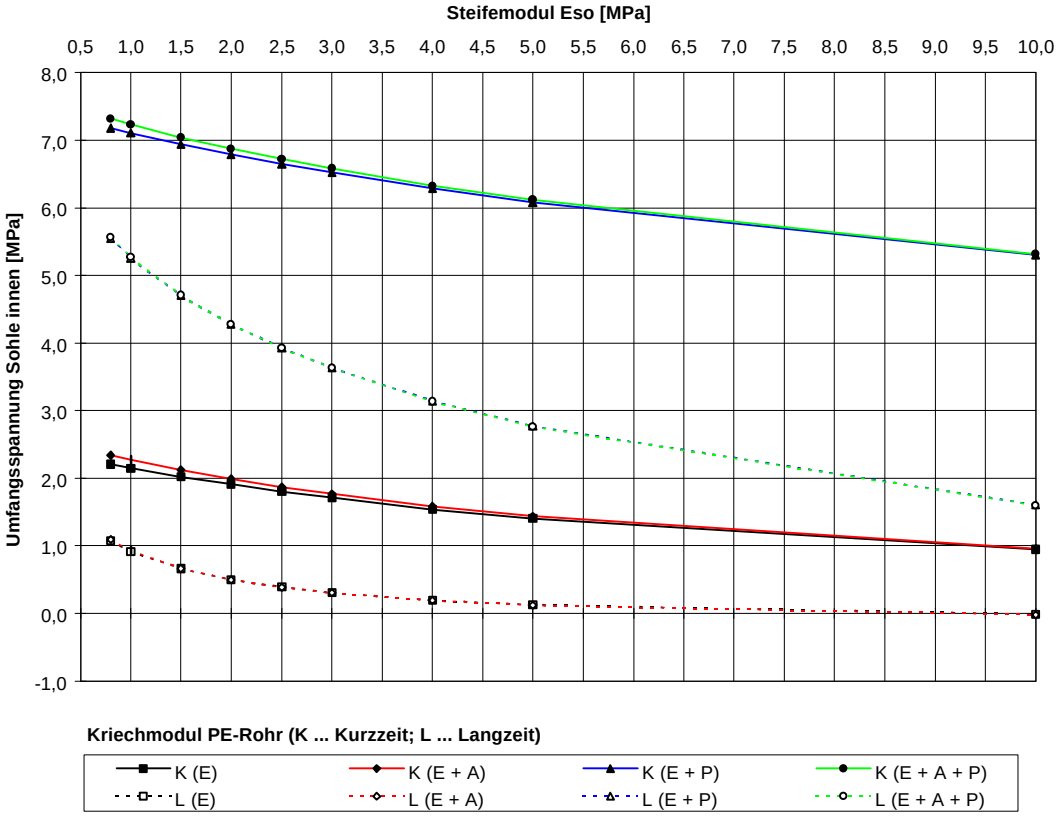


Bild 33: PE-Rohr 160 x 14,6; SDR 11,0; PN 10
Rohrüberdeckung 1 m; Innendruck 10 bar; Verkehrslast nach Norm
Verdichtungsgrad: : E_v = 90 MPa
Umfangsspannung Sohle innen in Abhängigkeit vom Lastfall

5.2 Beanspruchungen erdverlegter Rohrleitungen durch indirekte Lasten

Im folgenden werden die **Auswirkungen der indirekten Lasten auf die Beanspruchung erdverlegter Rohrleitungen** aufgezeigt. Da nur Daten über die Unebenheit von Rohrgrabensohlen sowie über den Verlauf der Bettungsziffer in Rohrgrabenrichtung vorliegen, werden nur diese Einflüsse betrachtet. Dabei wird vorausgesetzt, daß die Auflast in Rohrlängsrichtung annähernd gleichmäßig ist und ursprünglich gerade Rohre verlegt werden.

5.2.1 Beanspruchungen durch Unebenheiten der Rohrgrabensohle

Bei dem Höhenverlauf einer Rohrgrabensohle handelt es sich nach Bild 16 um eine regellose, zufällig verteilte Funktion in Rohrgrabenrichtung. Die Beschreibung von Rohrgrabenunebenheiten sowie die allgemein gültige Erfassung der Auswirkungen auf erdverlegte Rohrleitungen kann daher nur mit Hilfe der Methoden der Zufallsfunktionen erfolgen.

Analog zur Unebenheit der Rohrgrabensohle ist auch die sich ergebende Beanspruchung in einer erdverlegten Rohrleitung eine Zufallsfunktion. Demnach läßt sich nicht wie bei deterministischen Vorgängen die Beanspruchung an einer bestimmten Stelle der Rohrleitung als Funktion der Eingangsgröße klar definieren, sondern es lassen sich nur statistische Kennwerte sowie Wahrscheinlichkeitsaussagen über die durch die zufälligen Einwirkungen zu erwartenden Beanspruchungen angeben. Die Methoden der Zufallsfunktionen liefern Informationen darüber, mit welcher Eintrittswahrscheinlichkeit eine bestimmte Beanspruchung in einer erdverlegten Rohrleitung für die vorgegebenen statistischen Kennwerte von Rohrgrabenunebenheiten zu erwarten ist.

Die Frage, welche maximale Beanspruchung in einer erdverlegten Rohrleitung, durch die Einwirkung von Rohrgrabenunebenheiten aufgrund der statistischen Kennwerte dieser Imperfektion zu erwarten ist, hängt davon ab, welche Überschreitenswahrscheinlichkeit aufgrund von Sicherheitsüberlegungen zugelassen wird. Läßt man z.B. eine Überschreitenswahrscheinlichkeit von 0,3 % zu, dann entspricht die maximale Beanspruchung in der Rohrleitung einer Eintrittswahrscheinlichkeit von 99,7 %. Dies bedeutet, daß die in der erdverlegten Rohrleitung auftretenden Beanspruchungen aufgrund von Rohrgrabenunebenheiten mit einer Wahrscheinlichkeit von 99,7 % kleiner oder gleich der maximalen Beanspruchung sind.

Zur Abschätzung der Größe der zu erwartenden Biegebeanspruchungen in erdverlegten Rohrleitungen in Rohrlängsrichtung durch Unebenheiten der Rohrgrabensohle, sind im folgenden die zu erwartenden Biegemomente und Längsbiegespannungen in erdverlegten Rohrleitungen

auf der Basis der statistischen Kennwerte von Rohrgrabenunebenheiten beispielhaft angegeben. Die Berechnung der zu erwartenden Biegebeanspruchungen erfolgt in Abhängigkeit von der Bettungsziffer der Rohrbettung für Stahlrohre der Dimension DN 300, wobei den Auswertungen die normgemäßen Abmessungen zugrunde liegen. Den Auswertungen wird ein Bereich der Bettungsziffer von 0,005 N/mm³ bis 0,2 N/mm³ zugrunde gelegt. Die aus der einschlägigen Literatur entnommenen Bettungsziffern für verschiedene Bodenarten und Bodenzustände sind in Tabelle 4 zusammengestellt.

Bettungsmaterial	Bettungsziffer [N/mm³]
Lehmboden naß	0,02 ÷ 0,03
Lehmboden feucht	0,04 ÷ 0,05
Lehmboden trocken	0,06 ÷ 0,08
Lehmboden trocken hart	0,10
frisch geschütteter Sand	0,001 ÷ 0,005
verdichteter Sand	0,005 ÷ 0,05
stark verdichteter Sand	0,05 ÷ 0,10
feiner Kies mit viel feinem Sand	0,08 ÷ 0,10
mittlerer Kies mit feinem Sand	0,10 ÷ 0,12
mittlerer Kies mit grobem Sand	0,12 ÷ 0,15
grober Kies mit grobem Sand	0,15 ÷ 0,20

Tabelle 4: Bettungsziffer für verschiedene Bodenmaterialien

In Bild 34 sind die zu erwartenden Biegemomente in den erdverlegten Rohren, in Abhängigkeit von der Bettungsziffer der Rohrbettung sowie den Eintrittswahrscheinlichkeiten, angegeben. Aus dem Diagramm ist zu ersehen, daß das Biegemoment mit zunehmender Bettungsziffer relativ stark ansteigt. Je weicher die Bettung, desto geringer sind die Reaktionsmomente in den erdverlegten Rohren durch die Unebenheit der Rohrgrabensohle. Dies ist dadurch zu erklären, daß bei einer weichen Bettung die auftretenden Reaktionslasten durch Verformungen der Rohrbettung aufgenommen werden können. In Bild 35 sind die zu erwartenden Längsbiegespannungen in den erdverlegten Rohren, in Abhängigkeit von der Bettungsziffer sowie den Eintrittswahrscheinlichkeiten, dargestellt. Dem Diagramm ist zu entnehmen, daß durch die Unebenheit der Rohrgrabensohle relativ hohe Längsbiegespannungen in den erdverlegten Rohren auftreten können, die weit über den Längsbiegespannungen durch Verkehrslasten liegen. Nimmt man für die Stahlrohre den Werkstoff St 37.0 mit einer Mindeststreckgrenze von 235 N/mm² an, so ist aus den Bildern zu ersehen, daß für eine harte Bettung die zu erwartenden maximalen Längsbiegespannungen über der Streckgrenze liegen können. Für ein Sandbett mit verdichtetem Sand liegen die zu erwartenden maximalen Längsbiegespannungen etwa im Bereich der Mindeststreckgrenze des Rohrwerkstoffes. Den Diagrammen ist weiters zu entnehmen, daß Schwankungen der Bettungsziffer beträchtliche Schwankungen in den Längsbiegespannungen hervorrufen können.

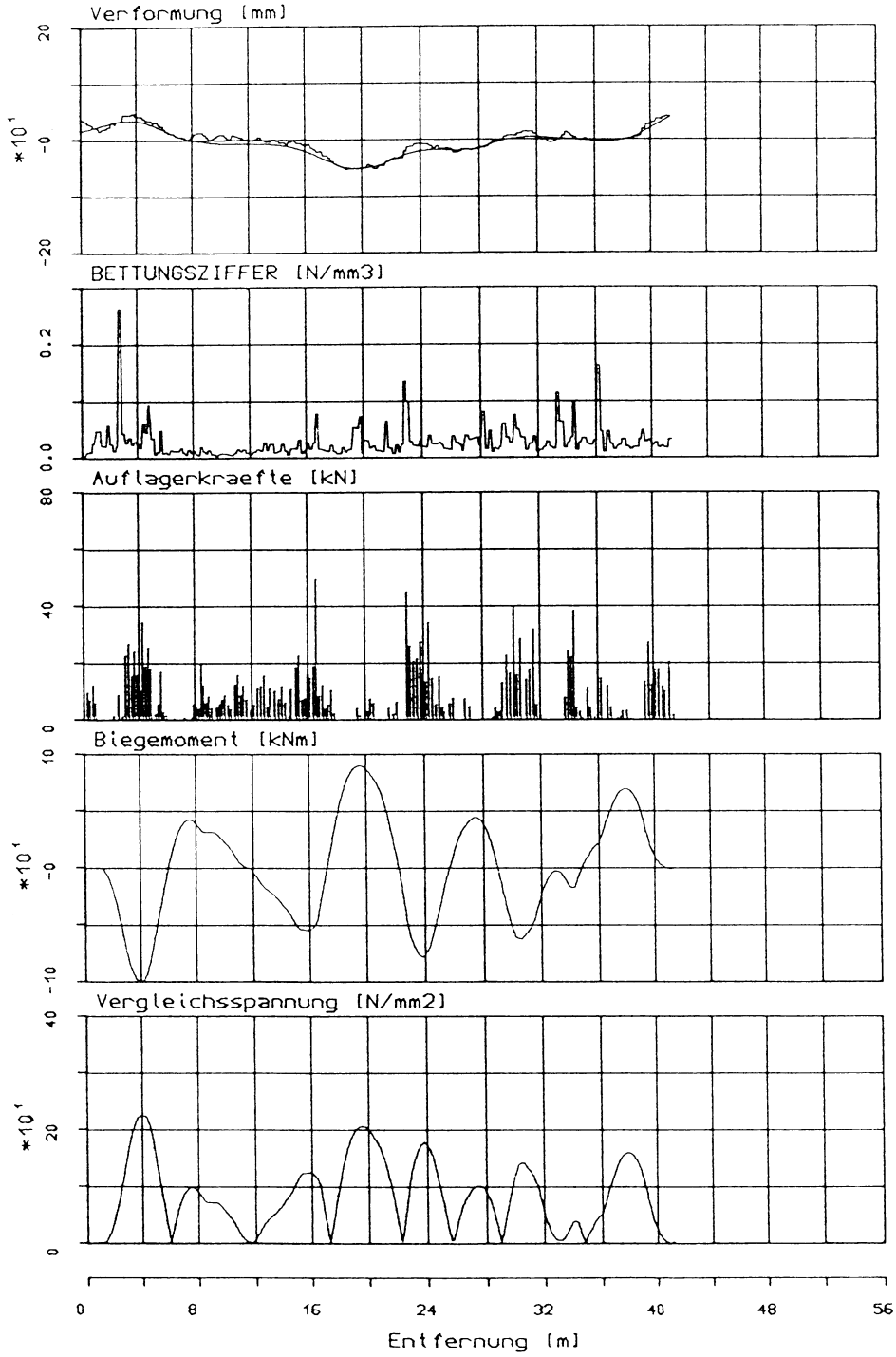


Bild 34: Stahlrohr DN 300
Biegemoment durch Unebenheiten der Rohrgrabensohle in Abhängigkeit von der Bettungsziffer und der Eintrittswahrscheinlichkeit

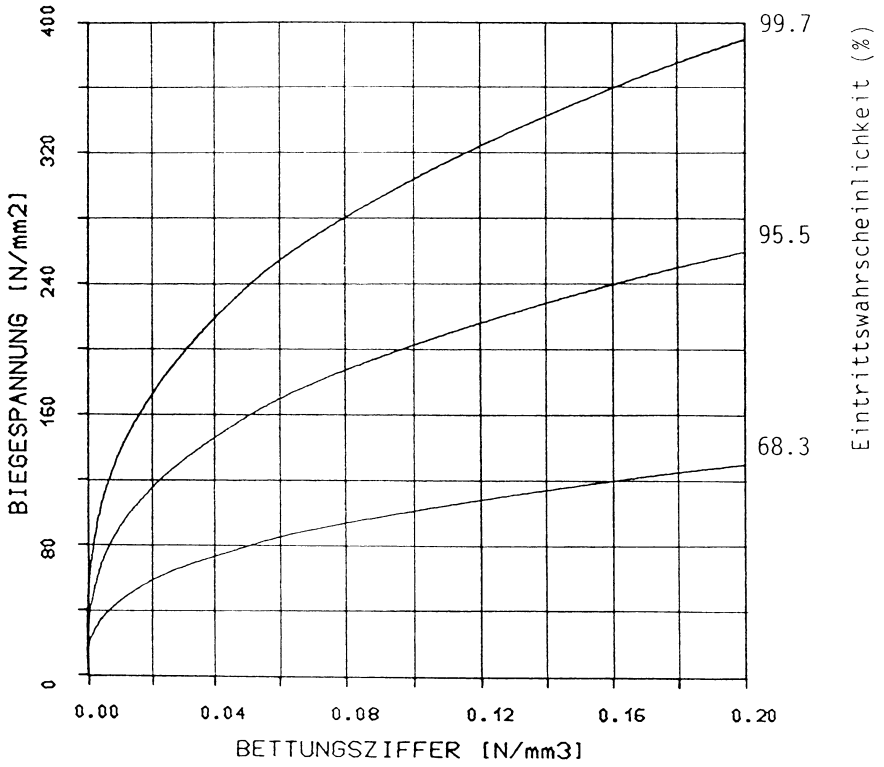


Bild 35: Stahlrohr DN 300
Längsbiegespannungen durch Unebenheiten der Rohrgrabensohle in Abhängigkeit von der Bettungsziffer und der Eintrittswahrscheinlichkeit

Im Gegensatz zu der vorhergehenden Darstellung, wo die Unebenheiten einer Rohrgrabensohle als Zufallsfunktion betrachtet und mittels statistischer Methoden die, mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit zu erwartenden, Biegebeanspruchungen in erdverlegten Rohrleitungen ermittelt wurden, wobei über die örtliche Verteilung sowie über die Größe der Beanspruchung an einer bestimmten Stelle keine Informationen zu erhalten sind, wird nun die mechanische Anpassung einer erdverlegten Rohrleitung an eine vorgegebene unebene Rohrgrabensohle betrachtet. Weiters wird der daraus resultierende Verlauf der Auflagerkraft, der Verlauf des Biegemomentes sowie der Verlauf der Vergleichsspannung über die Rohrlänge ermittelt, um vor allem qualitativ zu klären, wie sich eine erdverlegte Rohrleitung an eine unebene Rohrgrabensohle anpaßt und wie sich die mechanischen Reaktionen entlang der Rohrleitung verteilen. Hinsichtlich der Auflasten sind wieder die beiden Belastungszustände "ohne Verkehrslast" und "mit Verkehrslast" zu unterscheiden**.**

Die Berechnungen erfolgen mit Hilfe eines speziell für die Simulation von erdverlegten Rohrleitungen entwickelten Berechnungsverfahrens. Dabei wird das Strukturverhalten erdverlegter Rohrleitungen auf einer vorgegebenen Rohrgrabensohle mit einem bestimmten Unebenheitsverlauf und bestimmten Bettungsverhältnissen unter der Wirkung von Auflasten betrachtet. Bei diesem Berechnungsverfahren wird berücksichtigt, daß an jenen Stellen, wo die Durchbiegung aufgrund der zu großen Biegesteifigkeit der Rohre sich nicht der Rohrgrabenunebenheit anpassen kann, die Rohrleitung nicht auf der Rohrgrabensohle aufliegt. Der Einfachheit halber wird nicht näher auf dieses Berechnungsverfahren eingegangen, sondern es werden im folgenden nur die Ergebnisse der durchgeführten Berechnungen für bestimmte Systemkonfigurationen diskutiert.

Die Berechnungen erfolgen für ein Stahlrohr DN 300 und ein PE-Rohr 160 x 9,1 für die Belastungszustände „ohne Verkehrslast“ und „mit Verkehrslast“. Im folgenden werden nur drucklose Rohre betrachtet. Für die Rohrbettung wird annähernd eine gleichmäßige Bettungssteifigkeit mit einer mittleren Bettungsziffer von 0,025 N/mm³ in Rohrlängsrichtung angenommen. Die Ergebnisse der Berechnungen für den gemessenen Höhenverlauf der Rohrgrabensohle nach Bild 16 sind in den Bildern 36 bis 39 enthalten. In den Bildern 36 und 37 sind die Ergebnisse der Berechnungen für eine Stahlrohrleitung DN 300 und in den Bildern 38 und 39 die Ergebnisse der Berechnungen für eine PE-Rohrleitung 160 x 9,1 für die beiden Belastungszustände "ohne Verkehrslast" und "mit Verkehrslast" dargestellt. Die Berechnungen zeigen sowohl qualitativ als auch quantitativ, wie die Anpassung zwischen der Rohrleitung und der Rohrgrabensohle im erdverlegten Zustand zufolge von Unebenheiten der Rohrgrabensohle erfolgt.

Den Berechnungen ist als wesentliche Erkenntnis zu entnehmen, daß erdverlegte Rohrleitungen auf einer unebenen Rohrgrabensohle nicht gleichmäßig gelagert sind, son-

dern die Anpassung an die unebene Rohrgrabensohle nur eine stellenweise Auflagerung zuläßt. Erdverlegten Rohrleitungen liegen somit nur auf den Hochpunkten der Rohrgrabensohle auf. Zwischen den Auflagerstellen ist kein Kontakt der Rohrleitung mit der Rohrgrabensohle vorhanden. Der Abstand der Auflagerstellen hängt von der Zufälligkeit der Rohrgrabenunebenheiten sowie der Steifigkeit der Rohrbettung ab. Den Bildern ist zu entnehmen, daß sich an den Auflagerbereichen stellenweise relativ große Einsenkungen der Rohrleitungen in die Bettung ergeben. Die Größe dieser Einsenkungen ist abhängig von der Bettungssteifigkeit - je weicher die Bettung desto größer die Einsenkung - und von der Auflagerbelastung. Die Einsenkungen können stellenweise mehrere mm betragen.

Aus den Bildern ist weiters zu erkennen, daß **keine absolute Anpassung der Rohrleitungen an die Rohrgrabensohle** möglich ist. Dies läßt sich einerseits dadurch erklären, daß eine relativ steife Rohrleitung nicht in der Lage ist, sich dem Unebenheitsverlauf der Rohrgrabensohle entsprechend anzupassen und andererseits die Bettung so steif ist, daß auch bei beträchtlichen lokalen Absenkungen der Rohrleitung in die Bettung kein vollständiger Ausgleich des Unebenheitsverlaufes der Rohrgrabensohle und damit keine durchgehende Auflagerung der Rohrleitung erfolgen kann. Für eine vollständige Anpassung an den Verlauf der Rohrgrabenunebenheiten wäre ein extrem weiches Bettungsmaterial mit einer entsprechenden Schichtdicke, ähnlich einer Flüssigkeitsschicht erforderlich. Die Anpassung einer Rohrleitung an den Verlauf der Rohrgrabensohle ist natürlich auch von der Größe der einwirkenden direkten Lasten abhängig. Je größer die Auflasten, desto mehr wird die Rohrleitung an den Auflagerstellen in die Bettung gepreßt und umso eher findet eine Angleichung der Rohrsohle an den Höhenverlauf der Rohrgrabensohle statt. Dies ist deutlich aus der Gegenüberstellung der Belastungszustände "ohne Verkehrslast" und "mit Verkehrslast" zu entnehmen. Rohrleitungen mit Muffenverbindungen sowie flexible Rohrleitungen können sich viel eher dem Verlauf einer unebenen Rohrgrabensohle anpassen als starre Durchlaufsysteme wie sie etwa bei geschweißten Stahlrohrleitungen vorliegen.

Die ungleichmäßigen Rohrlagerverhältnisse zufolge der Anpassung der Rohrleitung an die Unebenheit der Rohrgrabensohle, bewirken natürlich auch eine **ungleichmäßige Auflagerlastverteilung.** Den Bildern ist zu entnehmen, daß die Auflagerlasten in Abhängigkeit von der Bettungssteifigkeit relativ stark schwanken sowohl hinsichtlich des lokalen Auftretens als auch hinsichtlich der Größe. Entsprechend der Zufälligkeit der Rohrgrabenunebenheiten ist auch der Auflagerkraftverlauf in Rohrlängsrichtung zufällig verteilt. Die ungleichmäßige Rohrlagerung bewirkt, daß die unmittelbar auf die Rohroberfläche bzw. auf die Rohrumhüllung einwirkenden Reaktionslasten gleichfalls ungleichmäßig verteilt sind. Aus den Bildern ist zu ersehen, daß die Rohroberfläche bzw. die Rohrumhüllung im Bereich der Rohrsohle stellenweise relativ große lokale Pressungen erfährt, wogegen dazwischen Bereiche existieren, wo die Rohroberfläche

völlig unbeeinträchtigt von der Rohrbettung ist. Inwieweit derartige mechanische Einwirkungen auf die Rohrumhüllung hinsichtlich des Korrosionsschutzes bzw. der Dauerhaftigkeit der Rohrumhüllung Probleme mit sich bringen können, ist zur Zeit nicht bekannt.

Die Ergebnisse der Berechnungen zum Verhalten erdverlegter Rohrleitungen auf unebener Rohrgrabensohle zeigen, daß die **Beanspruchungsverhältnisse in Rohrlängsrichtung zufolge der Rohrgrabenunebenheiten relativ stark schwanken.** Geht man davon aus, daß bei einer gleichmäßigen Rohrbettung und einer ebenen Rohrgrabensohle sowie einer gleichmäßigen Auflast auf die Rohrleitung, also bei gleichmäßigen Belastungs- und Lagerungsverhältnissen in Rohrlängsrichtung, lediglich eine konstante Absenkung der Rohrleitung und damit keine Biegebeanspruchung auftritt, so ist zu erkennen, daß zufolge der Unebenheit der Rohrgrabensohle der Biegemomentenverlauf in Rohrrichtung nicht nur beträchtlich schwankt, sondern die Biegemomente innerhalb einer geringen Wegstrecke sehr rasch aufklingen, einen Maximalwert annehmen und dann sehr rasch wieder abklingen. Dies bedeutet, daß zufolge des zufälligen Verlaufes der Rohrgrabensohle in der Rohrleitung gleichfalls zufällig verteilt über relativ kurze Rohrabschnitte sehr hohe Biegemomente auftreten. Das gleiche Verhalten wie bei den Biegemomenten gilt selbstverständlich auch für die Biegespannungen in der Rohrleitung in Rohrlängsrichtung.

Aus den Berechnungen leitet sich ab, daß die Messung des Spannungszustandes an einer bestimmten Stelle einer Rohrleitung im erdverlegten Zustand unter Umständen relativ niedrige Biegebeanspruchungen ausweisen kann, in einem unmittelbar daneben liegenden Bereich jedoch relativ hohe Beanspruchungen auftreten könnten. Dies ist einfach dadurch zu erklären, daß der Spannungszustand in der Rohrleitung, also die Auswirkung zufolge der zufällig verteilten Unebenheiten der Rohrgrabensohle gleichfalls eine Zufallsfunktion, sowohl hinsichtlich des örtlichen Auftretens, als auch hinsichtlich der Spannungsamplitude ist. Im erdverlegten Zustand läßt sich also nicht voraussagen, welcher Beanspruchungszustand an einer bestimmten Stelle der Rohrleitung vorhanden ist.

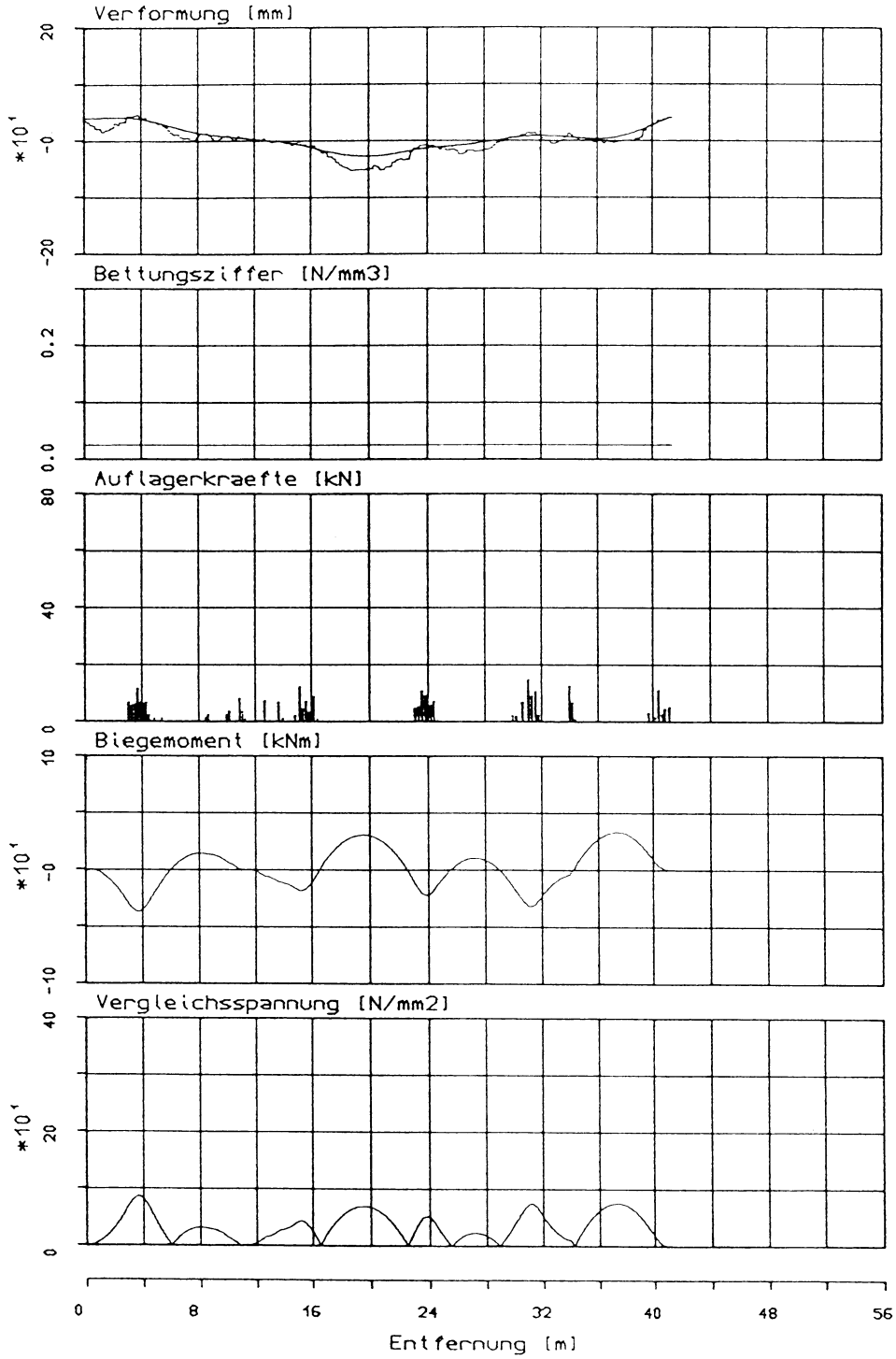


Bild 36: Stahlrohr DN 300; „ohne Verkehrslast“

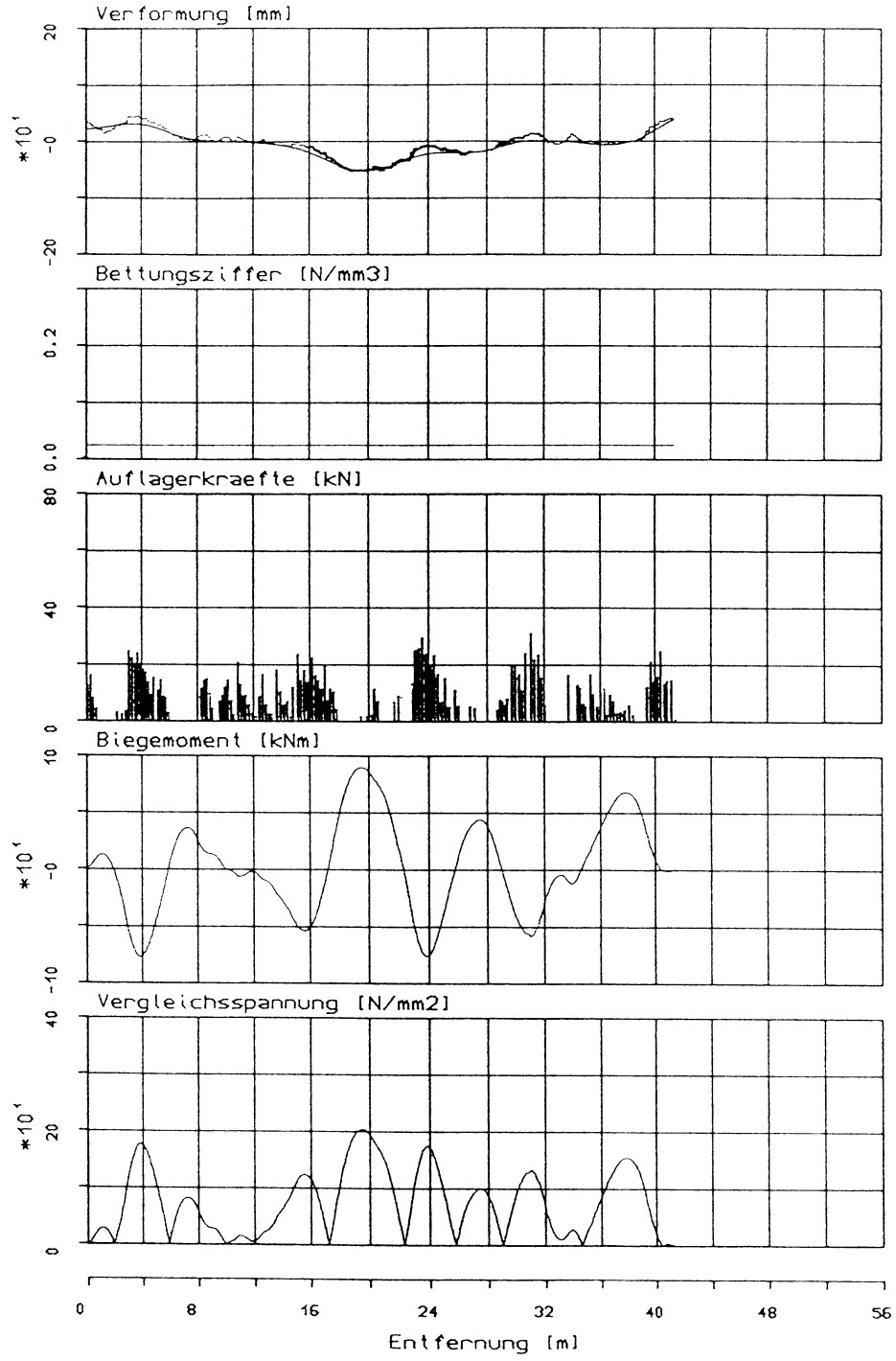


Bild 37: Stahlrohr DN 300; „mit Verkehrslast“

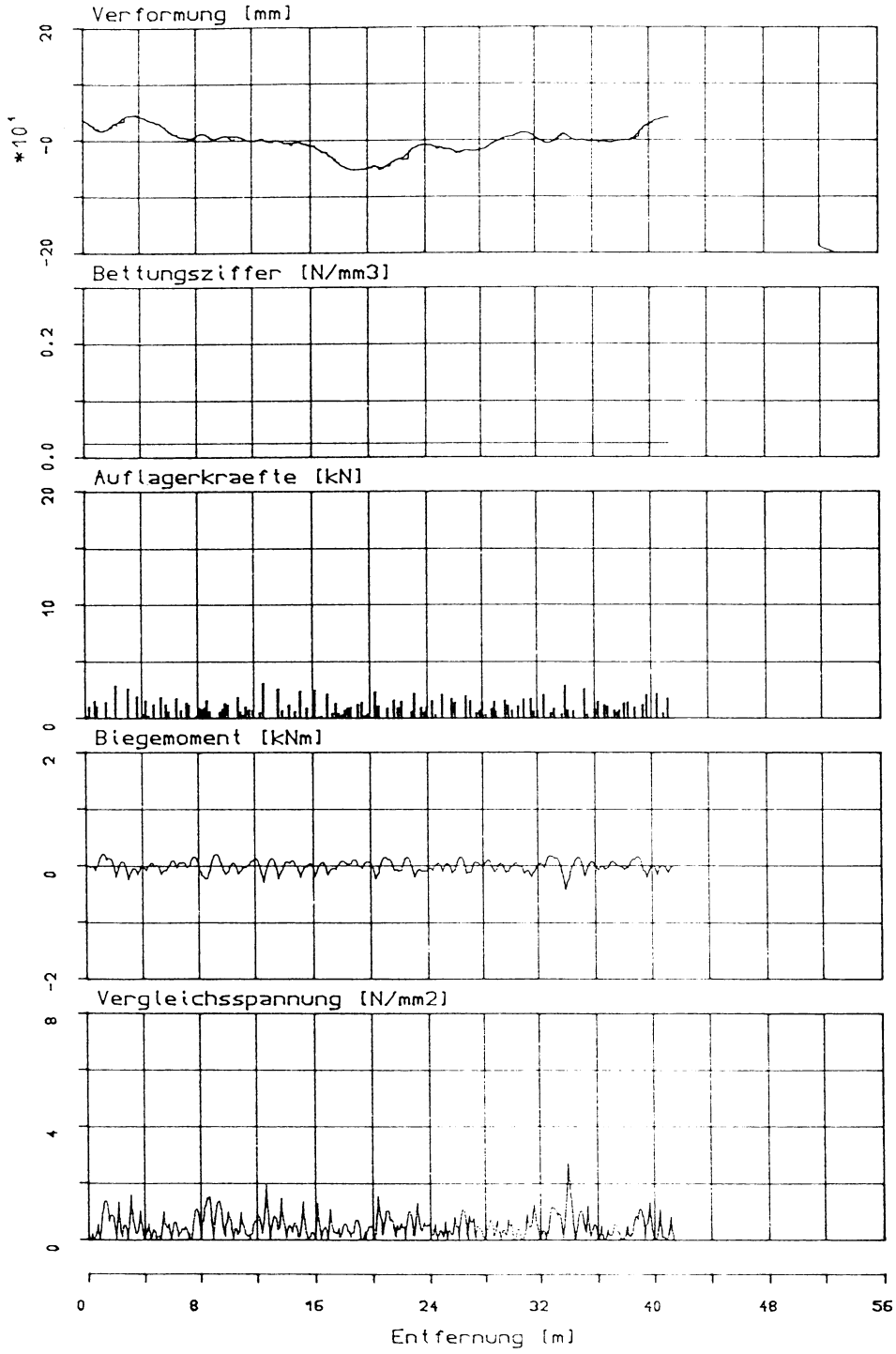


Bild 38: PE-Rohr 160 x 9,1; „ohne Verkehrslast“

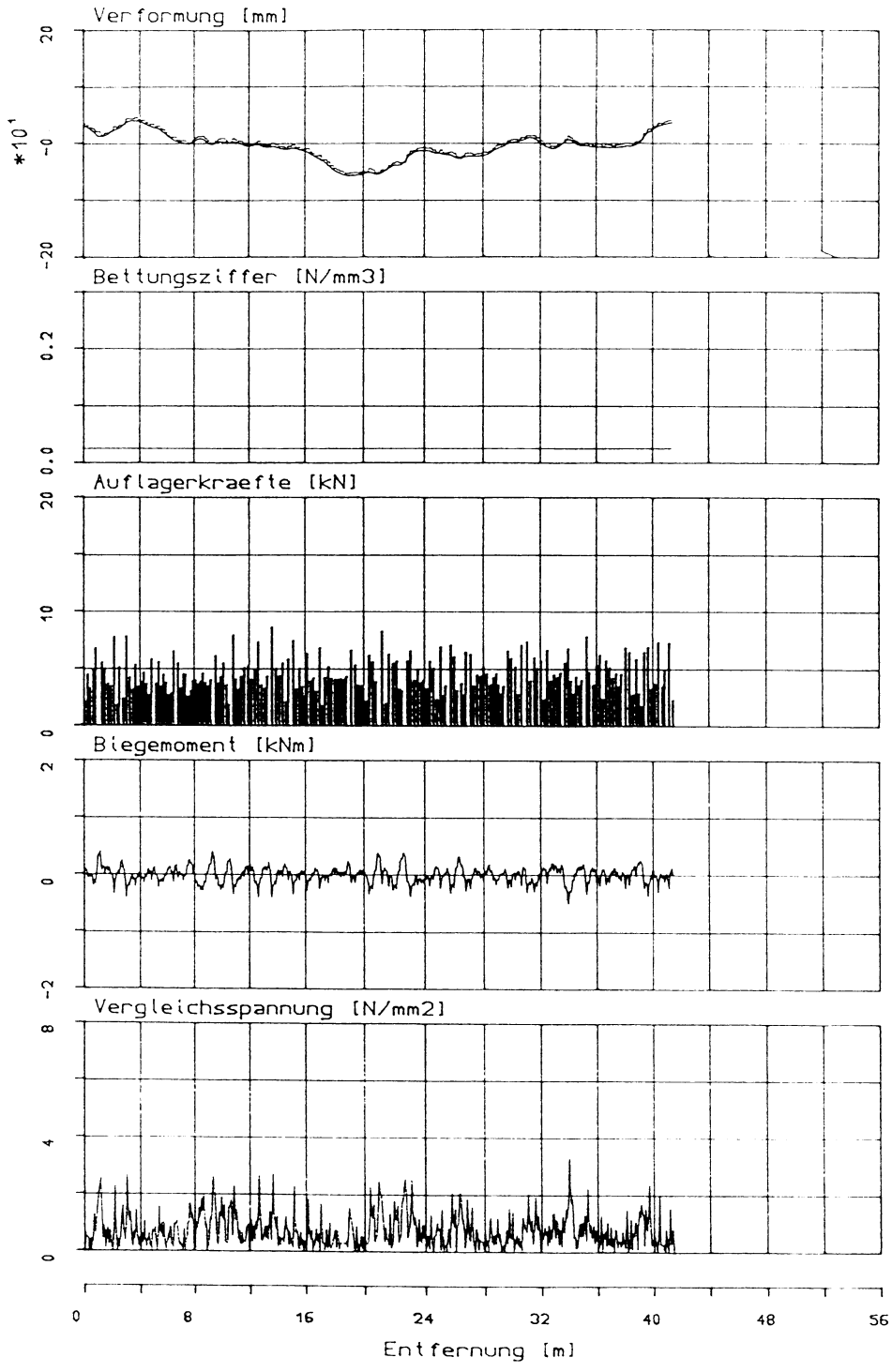


Bild 39: PE-Rohr 160 x 9,1; „mit Verkehrslast“

5.2.2 Beanspruchungen durch ungleichmäßige Rohrbettung

Wie Messungen gezeigt haben ist, im Gegensatz zu der üblichen Annahme, auch der Verlauf der Bettungssteifigkeit von Rohrgrabensohlen stellenweise sehr ungleichmäßig. Im folgenden wird der Einfluß der Bettungssteifigkeit auf das Strukturverhalten erdverlegter Rohrleitungen betrachtet. Es soll dabei gezeigt werden, welchen Einfluß eine ungleichmäßige Bettungssteifigkeit im Vergleich zu Unebenheiten der Rohrgrabensohle auf die Beanspruchung einer erdverlegten Rohrleitung besitzt. Den Betrachtungen werden die gleichen Annahmen wie im vorangegangenen Abschnitt zugrunde gelegt, die Auswertungen erfolgen für die in Bild 16 dargestellte Rohrgrabensohle, von der sowohl der gemessene Verlauf der Unebenheit als auch der gemessene Verlauf der Bettungssteifigkeit gemäß Bild 17 vorliegen. Die Berechnungen erfolgen wieder für ein Stahlrohr DN 300 und ein PE-Rohr 160 x 9,1 für die beiden Belastungszustände "ohne Verkehrslast" und "mit Verkehrslast". Die Ergebnisse sind den Bildern 40 bis 47 zu entnehmen.

In den Bildern 40 und 41 sind die Ergebnisse der Berechnungen für eine Stahlrohrleitung DN 300 und in den Bildern 44 und 45 für eine PE-Rohrleitung 160 x 9,1 für den gemessenen Verlauf der Bettungsziffer, unter der Annahme einer ebenen Rohrgrabensohle, für die beiden Belastungszustände "ohne Verkehrslast" und "mit Verkehrslast" dargestellt. Die Ergebnisse dieser Berechnungen zeigen den Einfluß der ungleichmäßigen Bettungssteifigkeit der Rohrgrabensohle. In den Bildern 42 und 43 sind die Ergebnisse der Berechnungen für eine Stahlrohrleitung DN 300 und in den Bildern 46 und 47 für eine PE-Rohrleitung 160 x 9,1 für den gemessenen Höhenverlauf sowie den gemessenen Verlauf der Bettungsziffer der Rohrgrabensohle für die Belastungszustände "ohne Verkehrslast" und "mit Verkehrslast" dargestellt. Die Ergebnisse dieser Simulationen zeigen die Überlagerung der indirekten Lasten durch die Unebenheiten der Rohrgrabensohle sowie durch die Ungleichmäßigkeit der Bettungssteifigkeit.

Den Berechnungen ist zu entnehmen, daß **indirekten Lasten durch Unebenheiten der Rohrgrabensohle im allgemeinen höhere Beanspruchungen in einer erdverlegten Rohrleitung hervorrufen als die ungleichmäßige Bettungssteifigkeit.** Lediglich für den Belastungszustand "mit Verkehrslast" sind die Spitzenwerte der Bettungsziffer bei ebener Rohrgrabensohle für die Auflagerlastverteilung bedeutsam. Die Spitzenwerte der Auflagerlasten treten dabei bei den Spitzenwerten der Bettungsziffer auf. Dabei handelt es sich um sehr steife Auflagerstellen, dies kann auf Steine, einen lokalen starren Unterbau, Ziegelunterstützungen wie sie für das Ausrichten der Rohre bei der Verlegung verwendet werden oder ähnliches zurückzuführen sein. Daraus leitet sich ab, daß **lokale, sehr steife Auflagerbereiche bei hohen Auflasten erhöhte lokale Beanspruchungen in der Rohrwand** hervorrufen können. Die Bettungssteifigkeit ist nur dort von Bedeutung, wo die Rohrleitung auf der Rohrgrabensohle voll aufliegt.

Der Verlauf der Bettungsziffer hat somit auf die Beanspruchung einer erdverlegten Rohrleitung nur dann einen Einfluß hat, wenn die Stellen hoher Bettungssteifigkeit mit den Auflagerbereichen der Rohrleitung auf der Rohrgrabensohle übereinstimmen. Aus den Bildern ist deutlich der Einfluß der Steifigkeit der Rohrbettung auf den Verlauf der Durchbiegung sowie auf den Auflagerkraftverlauf zu ersehen. Je nachgiebiger die Rohrbettung ist, desto besser ist die geometrische Anpassung der Rohrleitung und desto geringer ist die Auflagerkraft. Die ungleichmäßigen Rohrlagerungsverhältnisse zufolge der geometrischen und mechanischen Anpassung der Rohrleitung an die Unebenheit der Rohrgrabensohle sowie an die Ungleichmäßigkeit der Bettungssteifigkeit bewirken natürlich auch eine ungleichmäßige Auflagerlastverteilung. Den Bildern ist zu entnehmen, daß die Auflagerlasten in Abhängigkeit von der Bettungssteifigkeit relativ stark schwanken, sowohl hinsichtlich des lokalen Auftretens als auch hinsichtlich der Größe.

Die beispielhaft durchgeführten rechnerischen Simulationen beziehen sich auf die Vermessung einer mit einer Sandbettung versehenen Rohrgrabensohle, die für die Verlegung einer neuen Rohrleitung vorbereitet war und sollen den grundsätzlichen Einfluß der Imperfektionen auf das Strukturverhalten einer erdverlegten Rohrleitung aufzeigen. Die Bettungssteifigkeit der betrachteten Rohrgrabensohle ist, bedingt durch die frische Sandbettung, relativ gering. Es ist anzunehmen, daß die Steifigkeit älterer Rohrbettungen im allgemeinen höher ist als bei den neuen Sandbettungen.

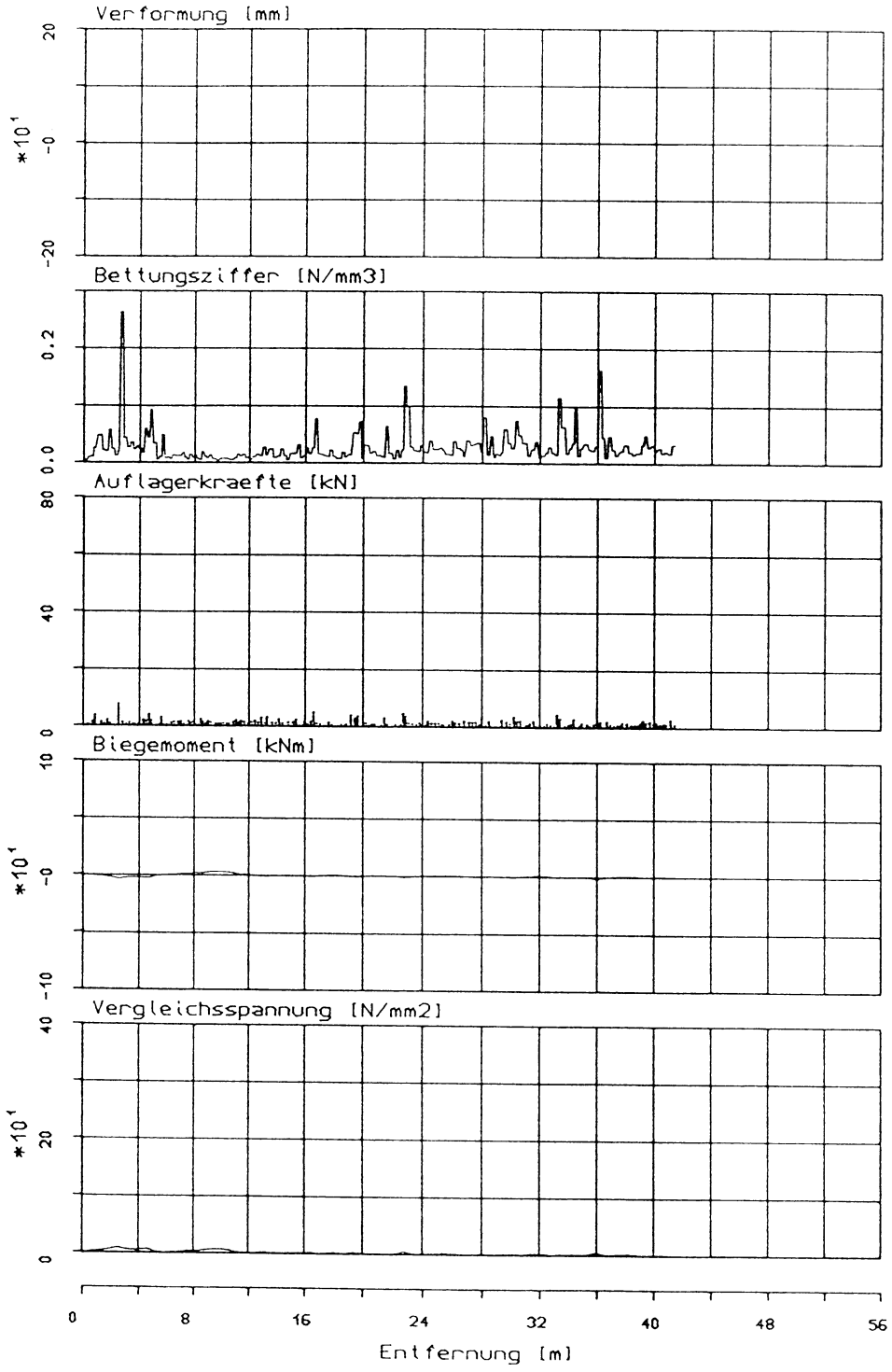


Bild 40: Stahlrohr DN 300; „ohne Verkehrslast“

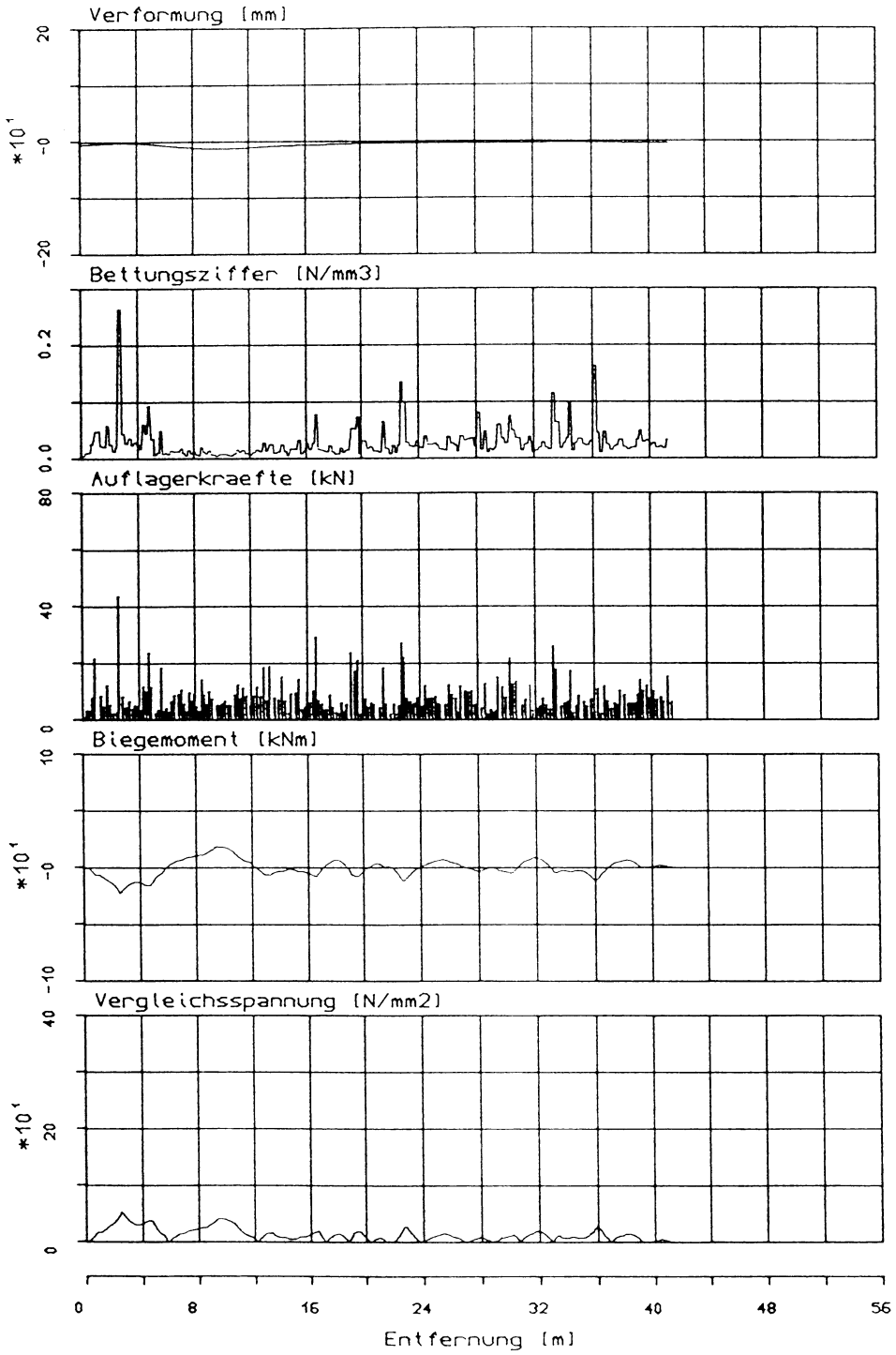


Bild 41: Stahlrohr DN 300; „mit Verkehrslast“

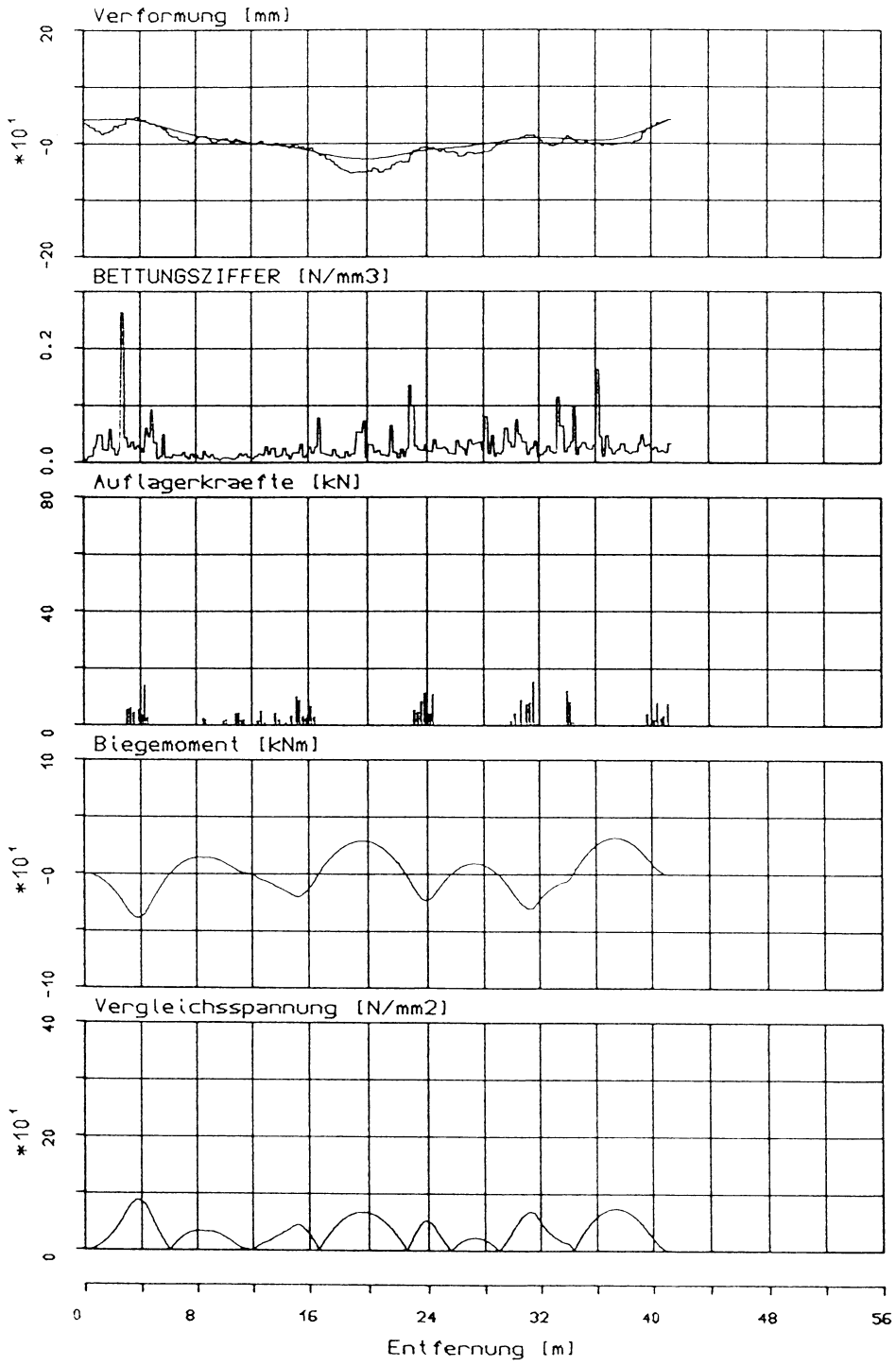


Bild 42: Stahlrohr DN 300; „ohne Verkehrslast“

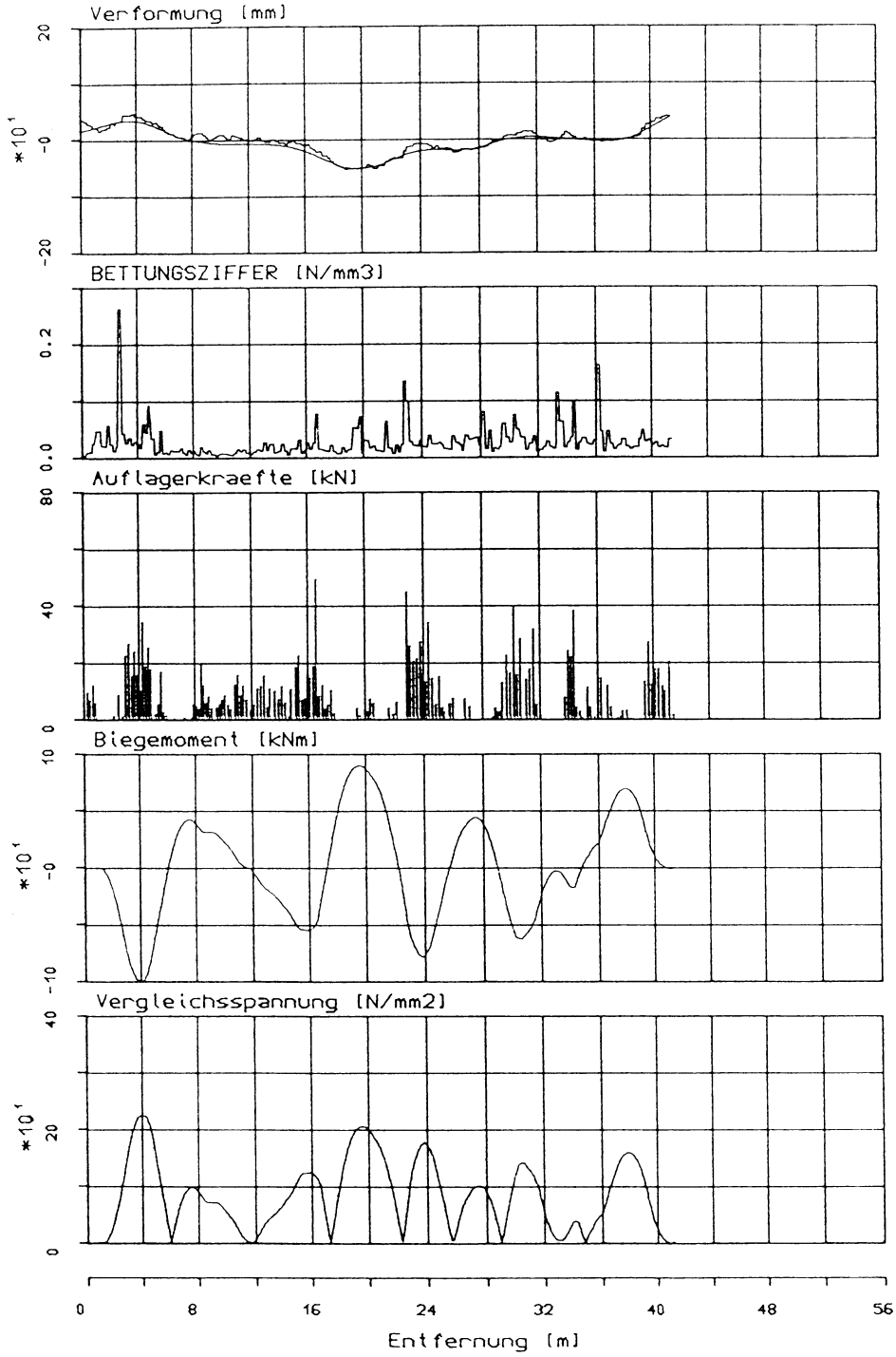


Bild 43: Stahlrohr DN 300; „mit Verkehrslast“

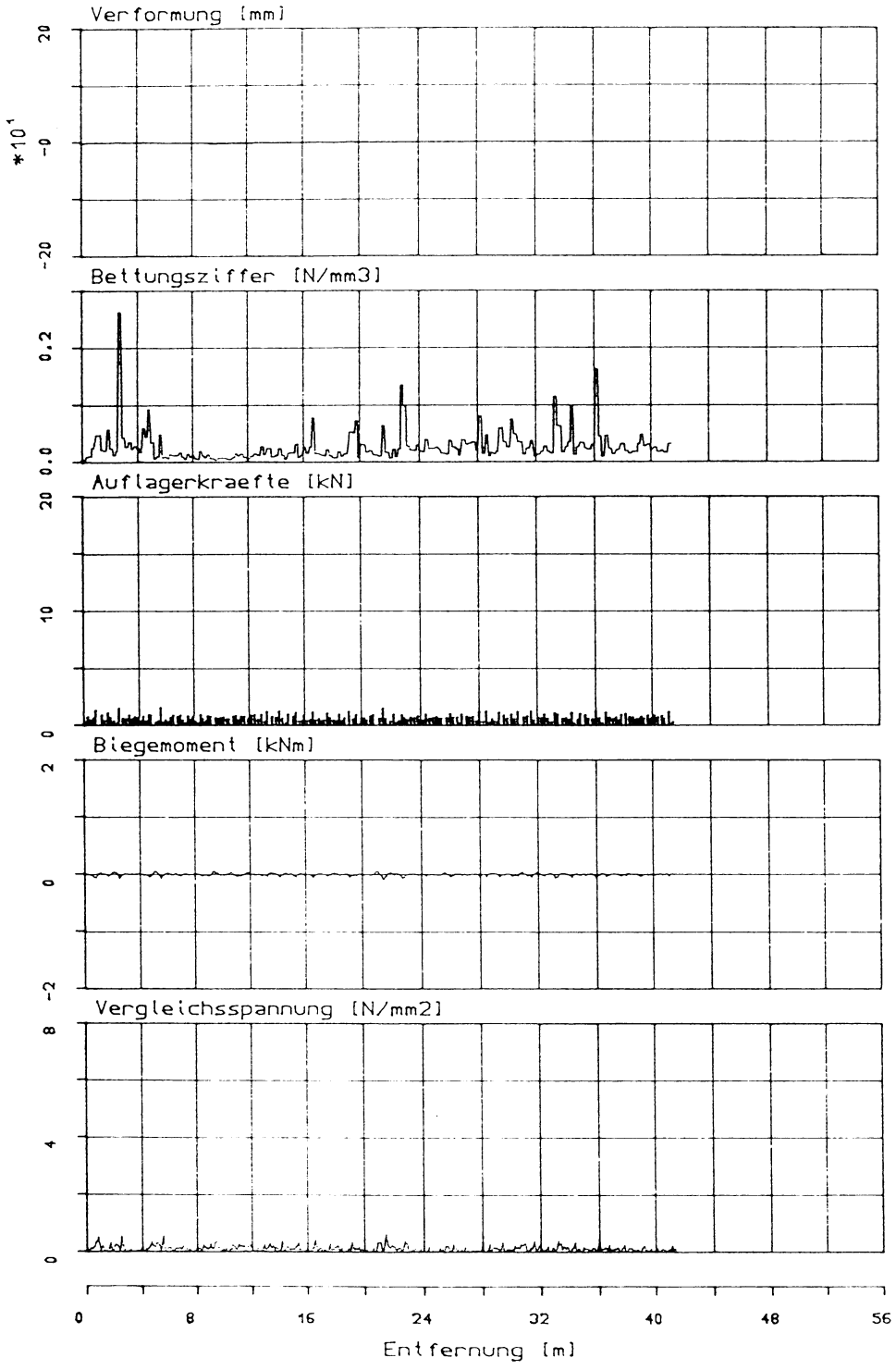


Bild 44: PE-Rohr 160 x 9,1; „ohne Verkehrslast“

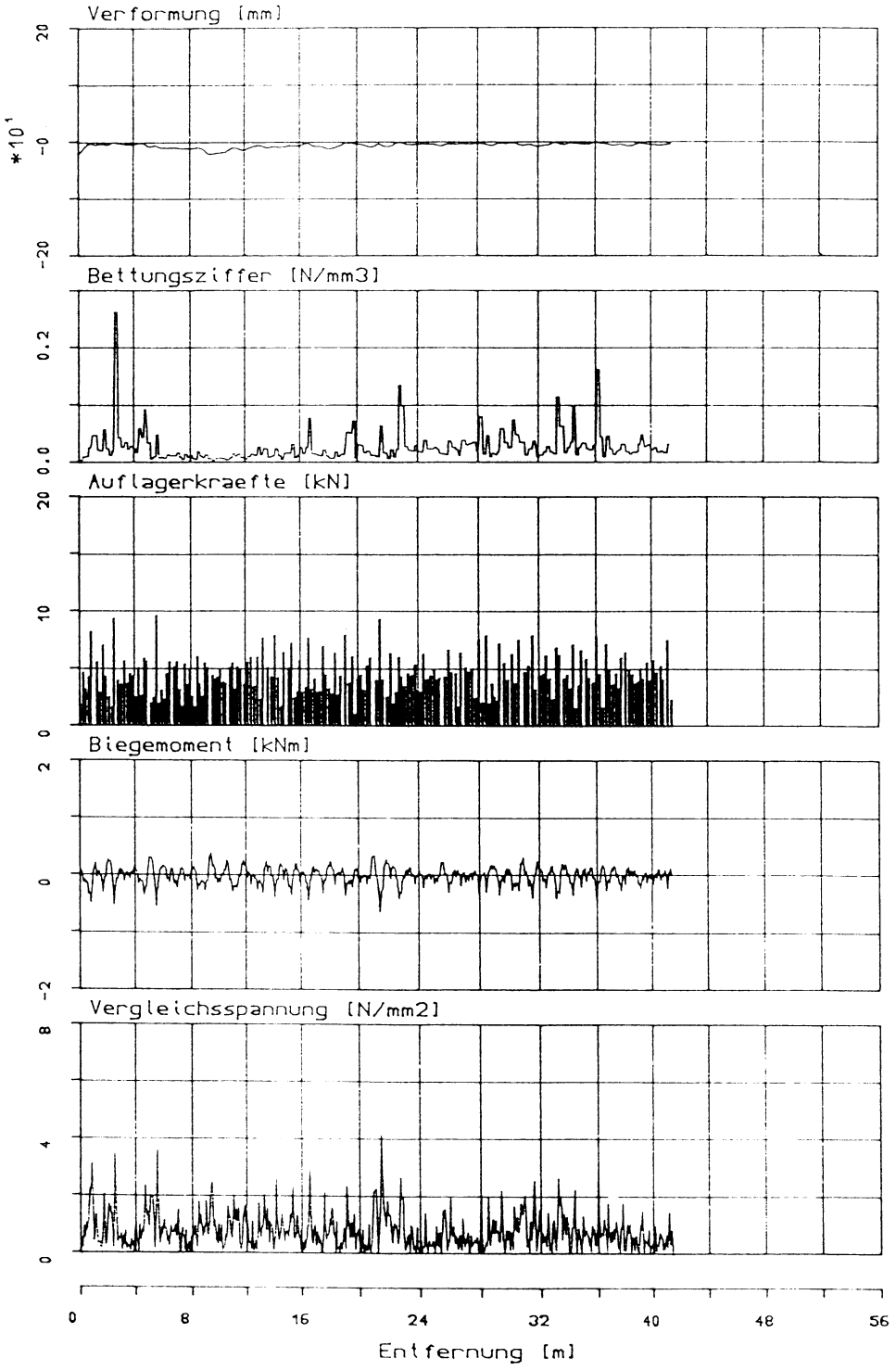


Bild 45: PE-Rohr 160 x 9,1; „mit Verkehrslast“

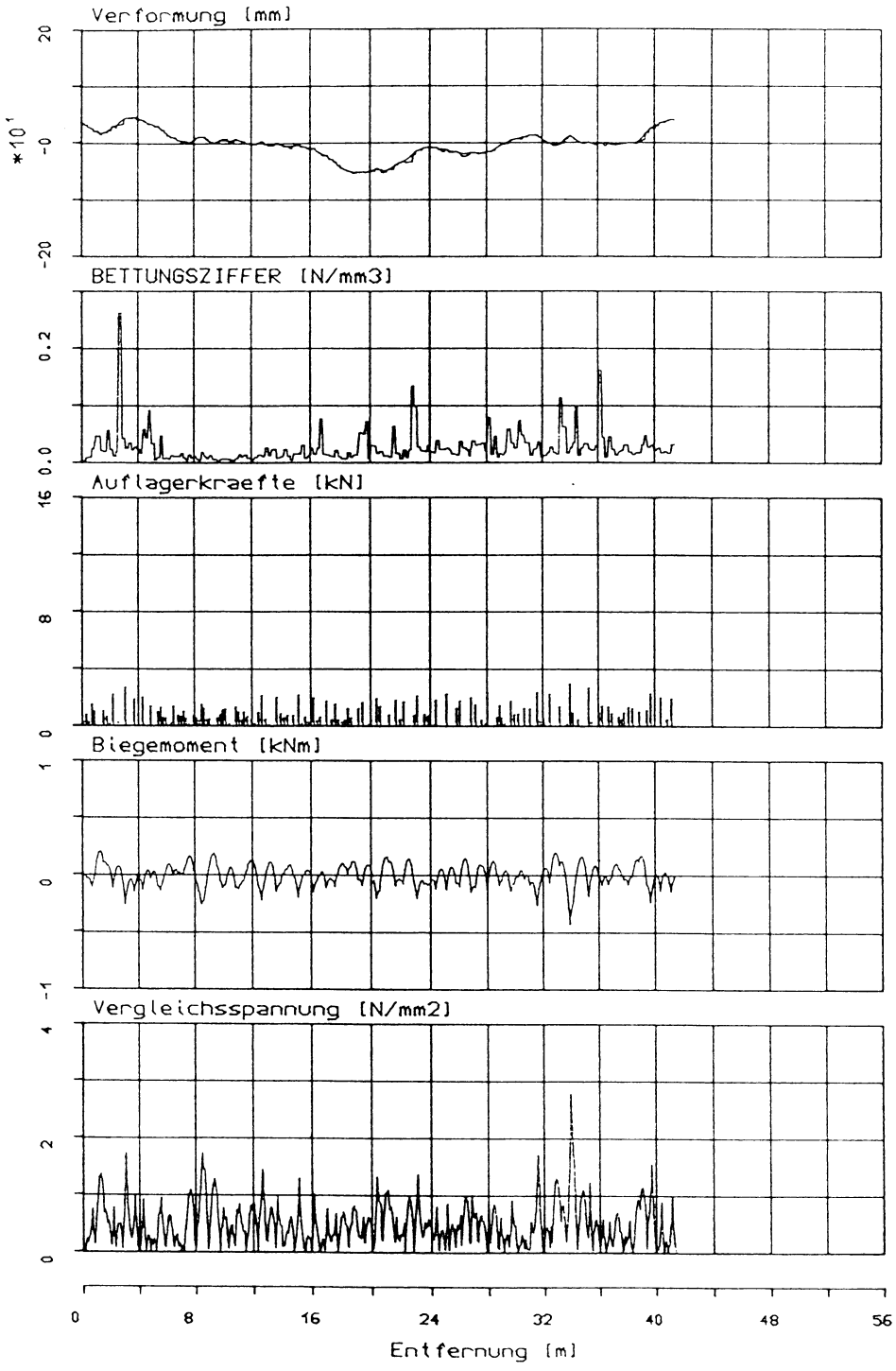


Bild 46: PE-Rohr 160 x 9,1; „ohne Verkehrslast“

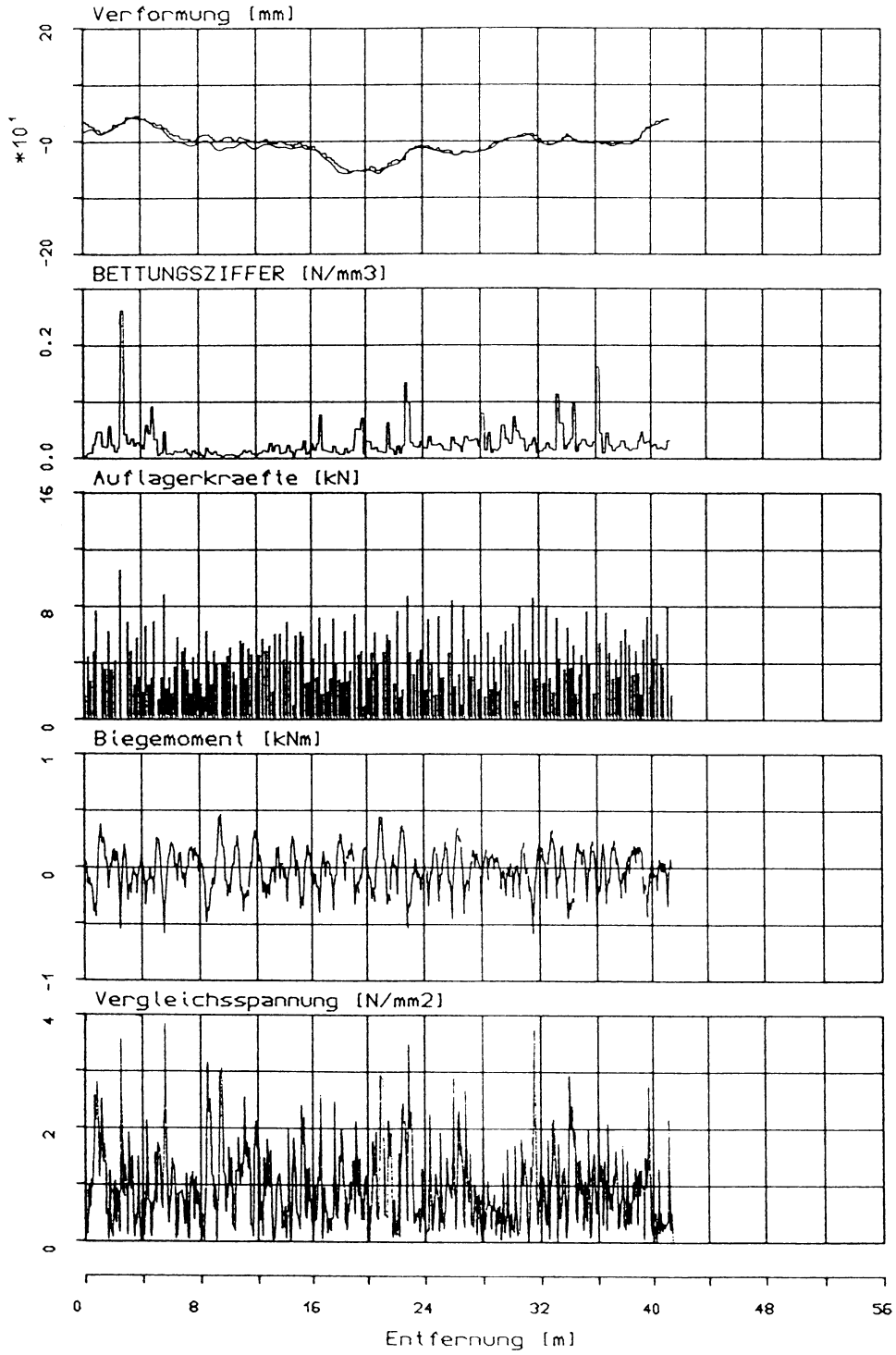


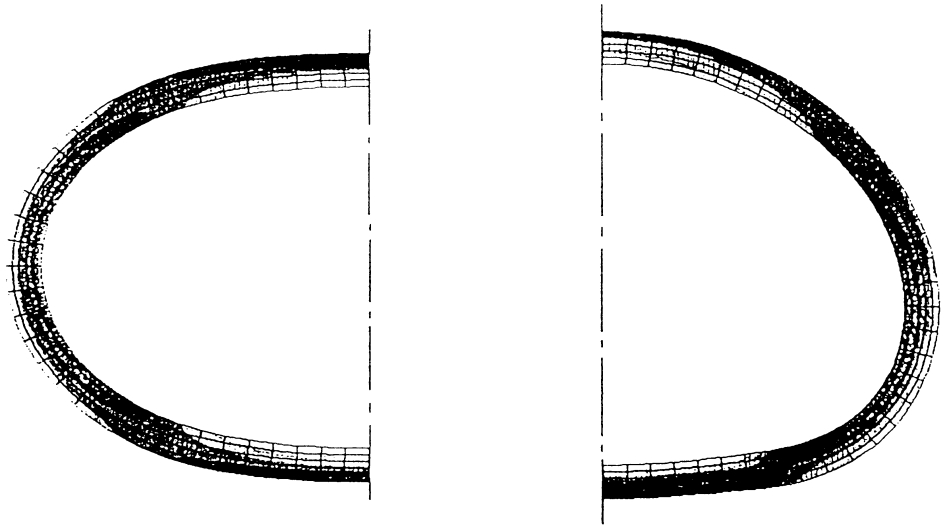
Bild 47: PE-Rohr 160 x 9,1; „mit Verkehrslast“

5.2.3 Beanspruchung durch ungleichmäßige Einbettung

Aus Messungen an erdverlegten flexiblen Rohren ist bekannt, daß mit der Einsatzdauer asymmetrische Verformungen in den Rohren in Bezug auf die Horizontalebene durch die Rohrmitte auftreten können. Derartige Effekte sind mit der üblichen Annahme perfekter Einbettungsverhältnisse über den Rohrumfang nicht zu erklären. Aus diesem Grund wurde versucht, die meßtechnisch festgestellten Effekte durch rechnerische Simulationen zumindest qualitativ zu beschreiben. Durch Finite-Elemente-Simulationen soll gezeigt werden, welchen Einfluß Imperfektionen der Einbettungsverhältnisse über den Rohrumfang auf das Verformungsverhalten erdverlegter Rohrleitungen besitzen.

Im Bild 48 ist der Verformungszustand in einem erdverlegten PE-Rohr 160 x 9,1 aufgrund von Finite-Elemente-Simulationen dargestellt. Dabei ist der Unterschied zwischen angenommenen perfekten und meßtechnisch erfaßten und rechnerisch simulierten imperfekten Einbaubedingungen aufgezeigt. Unter imperfekten Einbaubedingungen ist dabei die im allgemeinen vorhandene ungleichmäßige Verteilung der Bodensteifigkeit über den Rohrumfang zu verstehen, wobei diese insbesondere im Bereich des Rohrzwickels durch die im allgemeinen nur geringe Verdichtung des eingebrachten Verfüllmaterials, weitaus geringer ist als im Bereich des Rohrscheitels.

Die Simulationen zeigen einerseits einen Unterschied im Spannungs- und Verzerrungsverhalten zwischen Scheitel und Sohle des Rohres sowie eine Anpassung der flexiblen Rohre an die Steifigkeitsverteilung im Boden. Diese Anpassung ist signifikant für flexible Rohre. Starre Rohre besitzen eine derartig hohe Eigensteifigkeit, sodaß sie sich nicht in der Verformung den Imperfektionen im Boden anpassen können.



a) b)

Bild 48: PE-Rohr 160 x 9,1; Verformungsverhalten in Abhängigkeit von der Bodensteifigkeit über den Rohrumfang für
a) perfekte Einbettungsverhältnisse
b) imperfekte Einbettungsverhältnisse

6. Strukturverhalten von Fahrbahnen

Für die Beurteilung der Einwirkungen auf erdverlegte Rohrleitungen ist von Interesse, welche Beanspruchungen sich im Boden in der Leitungszone zufolge der Verkehrslasten auf der Fahrbahn ergeben und welche Belastungen dadurch über den Rohrumfang in das Rohr eingeleitet werden. Für diese Betrachtungen ist der Einfluß der Fahrbahnausbildung entsprechend zu berücksichtigen. Folgende Fahrbahnverhältnisse sind zu unterscheiden:

- unbefestigte Fahrbahn
- befestigte Fahrbahn
  - biegeweiche Fahrbahnplatte
  - biegesteife Fahrbahnplatte

Für unbefestigte Fahrbahnen ergeben sich die Belastungen auf erdverlegte Rohre nach den bekannten Formeln von Boussinesq für die Einzellast auf den elastischen Halbraum. Hierbei ist anzumerken, daß nach den einschlägigen Regelwerken lediglich die Vertikalspannung im Boden als Lastgröße für die Rohre berücksichtigt wird, der im Boden vorhandene horizontale Spannungszustand bleibt unberücksichtigt.

Für befestigte Fahrbahnen ergeben sich die Belastungen auf erdverlegte Rohre ausgehend von einem Verkehrslastkollektiv auf der Straßenverkehrsfläche, aus der Lastverteilung unter der gebetteten Fahrbahnplatte. Durch die Radlasten verschiedener Fahrzeuge, die sich zufällig verteilt, mit bestimmten Geschwindigkeiten auf der Fahrbahn bewegen, ergibt sich eine zeitlich und örtlich veränderliche Druckverteilung unter der Fahrbahn, deren Amplitudenverteilung, entsprechend dem Auftreten der Radlasten auf der Fahrbahn, gleichfalls zeitlich und örtlich veränderlich ist. Die Druckverteilung unter der Fahrbahn ist eine Zufallsfunktion, über die jedoch keine Informationen vorliegen. Aus diesem Grund wird die Verkehrsbelastung auf der Fahrbahn durch eine resultierende, gleichmäßige, quasistatische Druckbelastung unmittelbar auf den Boden unter der Fahrbahn ersetzt.

In Bild 49 ist die Überlagerung der Druckspannung unter der Fahrbahn durch zwei Räder einer Achse eines schweren LKW mit einer Radlast von jeweils 120 kN und einer Spurweite von 1,6 m in der Achsebene für verschiedene Fahrbahn - Bodenkombinationen dargestellt. Für eine Bitumen-Kies-Fahrbahn zeigen sich unter den Rädern deutlich ausgeprägte Spannungsspitzen, die mit zunehmender Steifigkeit der Fahrbahnbettung stärker zum Ausdruck kommen. Eine relativ gleichmäßige Lastverteilung zeigt sich hingegen unter einer Betonfahrbahn auf weicher Bettung. Bild 49 soll einen qualitativen Überblick über die Abstimmung der Fahrbahnsteifigkeit zur Steifigkeit des Unterbaues, im Hinblick auf die Einwirkungen von Verkehrslasten auf erdverlegte Rohrleitungen geben.

Als obere Schranke der Verkehrsbelastung auf erdverlegte Rohrleitungen unter befestigten Fahrbahnen wird eine gleichmäßig verteilte Druckbelastung auf den Boden unmittelbar unter der Fahrbahn festgelegt, wobei gilt:

$q_v = 0{,}01$ N/mm² ... PKW
$q_v = 0{,}10$ N/mm² ... LKW - 38t

Derart extreme Radlasten, wie sie der Druckverteilung unter der Fahrbahn zugrunde liegen, sind nur mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit zu erwarten. Die tatsächlichen Verkehrslasten werden im allgemeinen zwischen den Belastungszuständen „ohne Verkehrslast“ und „mit Verkehrslast“ schwanken und damit zufällig verteilte Druckspannungsschwankungen auf den Boden unter der Fahrbahn im Intervall von $0 \leq q_v \leq 0{,}1$ N/mm² hervorrufen. Es ist anzunehmen, daß die größte Häufigkeit der Verkehrslast im unteren Drittel des definierten Lastintervalles auftreten wird. Dies leitet sich aus der Häufigkeit der Verkehrsbelastung vor allem durch PKW-Verkehr und mittelschweren LKW-Verkehr ab, wogegen die Häufigkeit durch schweren LKW-Verkehr auf unebener Fahrbahn eher relativ gering ist.

Die Lastverteilung unter der Fahrbahn ist gemäß Bild 49 abhängig von der Biegesteifigkeit der Fahrbahn, der Fahrbahndicke sowie der Bettungssteifigkeit des Bodens unter der Fahrbahn. Je weicher die Bettung des Bodens unter der Fahrbahn ist, desto gleichmäßiger ist die Absenkung der Fahrbahn zufolge einer Radlast und desto günstiger ist die Lastverteilung unter der Fahrbahn. Je steifer die Bettung der Fahrbahn ist, desto ungünstiger ist die Lastkonzentration unter der Fahrbahn.

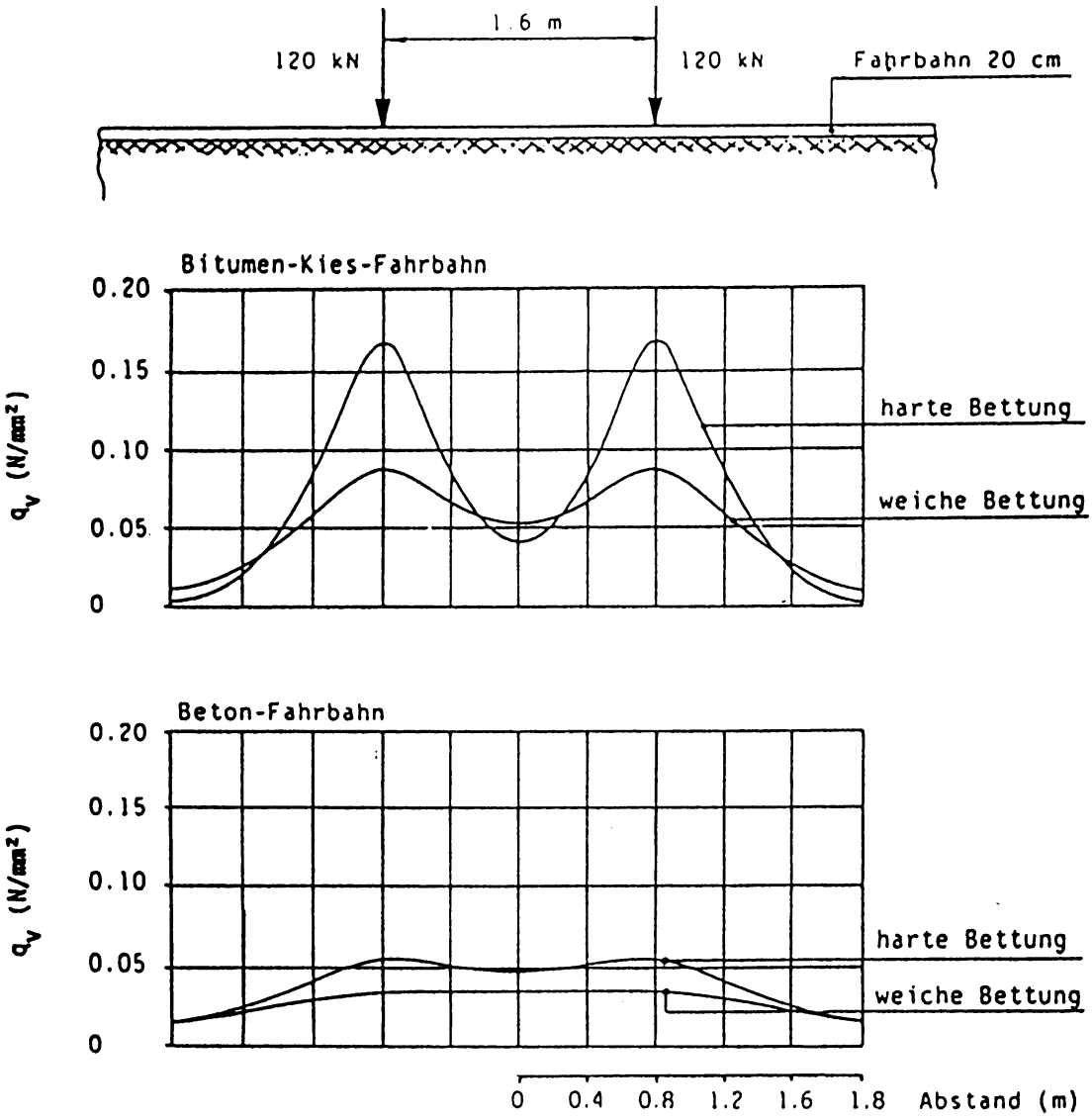


Bild 49: Radlastverteilung unter der Fahrbahn

7. Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen

Die Wirtschaftlichkeit erdverlegter Leitungssysteme ist dann gegeben, wenn es gelingt, innerhalb einer möglichst langen Nutzungsdauer die Gesamtkosten, bestehend aus Bau- und Instandhaltungskosten sowohl der Leitungssysteme als auch der Straßenverkehrsflächen so gering wie möglich zu halten. Für die Betrachtungen sollte dabei im allgemeinen eine Mindestnutzungsdauer der Leitungssysteme von 50 Jahren und der Straßenverkehrsflächen von etwa 25 Jahren zugrunde gelegt werden.

Die Betrachtungen zeigen, daß die **Wirtschaftlichkeit des Systems „Fahrbahn-Boden-Leitung**“ einerseits durch die **Investitionskosten beim Bau der Leitungssysteme einschließlich Fahrbahnwiederinstandsetzung** und andererseits vor allem auch durch die **Instandhaltungskosten** innerhalb der Nutzungsdauer sowohl für die **Leitungssysteme** als auch die **Straßenverkehrsflächen** bestimmt wird. Da jedoch die Errichtung und Instandhaltung der Leitungssysteme sowie die Instandhaltung der Straßenverkehrsflächen von unterschiedlichen Unternehmen bzw. Unternehmensbereichen mit unterschiedlichen Interessenslagen durchgeführt werden, ist eine derartige **Gesamtkostenbetrachtung** unüblich. Gerade für die Ermittlung einer relevanten Qualitäts-Kosten-Relation sowohl der Leitungssysteme als auch der Straßenverkehrsflächen scheint aber langfristig eine derartige Betrachtungsweise unumgänglich. Diese Überlegungen gelten auch im Hinblick auf die Vielzahl der heute am Markt angebotenen Produkte und Verfahren, die mit der Langzeitnutzung der Leitungssysteme und der Straßenverkehrsflächen argumentieren und somit wesentliche Entscheidungskriterien hinsichtlich Qualität und Kosten darstellen.

Die **Nutzungsdauer** sowohl der Leitungssysteme als auch der **Straßenverkehrsflächen ist bestimmt** einerseits **durch die Qualität der eingesetzten Produkte** und andererseits **durch die Qualität der Ausführung der Bauarbeiten**. Die Qualität der eingesetzten Produkte sowie die Qualität der Arbeiten ist maßgebend für die Funktionalität der Leitungssysteme aber auch der Straßenverkehrsflächen. Aus diesem Grund scheint es notwendig, für die Errichtung von Leitungssystemen nur zertifizierte Produkte und für die Ausführung der Arbeiten nur zertifizierte Personen und Unternehmen einzusetzen. In Deutschland zählt diese Vorgangsweise bereits zum Stand der Technik, wobei man davon ausgehen kann, daß zertifizierte Produkte, Personen und Unternehmen alle Anforderungen nach den Regeln der Technik erfüllen und damit die Qualität der Systeme sowie der Arbeiten als einwandfrei für den vorgegebenen Einsatzzweck angenommen werden kann. Dies ist besonders bei der Klärung und Ursachenfindung bei Schadensfällen sehr wichtig und zählt zur Spruchpraxis bei deutschen Gerichten.

In Österreich gibt es zwar **zertifizierte Produkte** für den Einsatz in erdverlegten Leitungssystemen mit dem Nachweis, daß die spezifischen Anforderungen für den spezifizierten Einsatzzweck erfüllt sind, doch die **Zertifizierung von Personen und Unternehmen** für die Errichtung von erdverlegten Leitungssystemen **steht erst am Anfang** und sollte möglichst rasch eingeführt und für die Praxis umgesetzt werden. Auch ist es notwendig, die für die Zertifizierung notwendigen Grundlagen, wie z.B. Regelwerke und Richtlinien möglichst rasch zu schaffen.

Betrachtet man die **Kosten für die Errichtung von erdverlegten Leitungssystemen** dann ergibt sich im Mittel etwa folgende Aufteilung bezogen auf die gesamten Errichtungskosten:

Material	**≈ 15%**
Verlegung	**≈ 10%**
Einbau	**≈ 50%**
Straßenwiederinstandsetzung	**≈ 25%**

Aus dieser Aufstellung ist zu ersehen, daß die Kosten für die **Herstellung funktionstüchtiger Leitungssysteme, bestehend aus den Material- und den Verlegekosten nur etwa 25%** der gesamten Errichtungskosten ausmacht, obwohl die Sicherheit und Funktionalität und damit die Nutzungsdauer der Leitungssysteme vor allem von der Qualität der Materialien sowie der Verlegung abhängig ist.

Etwa 75% der Errichtungskosten erdverlegter Leitungssysteme entfallen im allgemeinen auf **Bauarbeiten und die Straßenwiederinstandsetzung.**

Der **größte Kostenanteil** bei der Errichtung erdverlegter Leitungssysteme entfällt somit auf die **Bauarbeiten** – Herstellung des Rohrgrabens und Wiederverfüllung – **obwohl** dadurch **kein Beitrag zur Sicherheit und Funktionalität der Leitungssysteme für die Langzeitnutzung** gegeben ist.

Wie die Erfahrungen zeigen, sind viele Schadensfälle an erdverlegten Leitungssystemen, oft bereits nach sehr kurzer Einbauzeit, die Folge von Einbaufehlern und mangelhafter Ausführungsqualität bei den Bauarbeiten, obwohl in diesem Bereich die höchsten Kosten anfallen. Das Problem liegt aber auch darin, daß kaum geeignete Prüfungsmöglichkeiten für die Einbauqualität im Hinblick auf die Langzeitnutzung bestehen und man daher vor allem auf die Qualität der ausführenden Unternehmen sowie die Bauaufsicht angewiesen ist.

Die Kosten für die Errichtung von erdverlegten Leitungssystemen könnten vor allem im Bereich der Bauarbeiten reduziert werden, dies aber nicht durch den Preisdruck auf die

ausführenden Unternehmen, sondern vielmehr durch den Einsatz neuer Technologien und sogenannter nichtkonventioneller Methoden wie z.B. grabenlose Verfahren, stabilisierte Verfüllmaterialien, usw.

Für die systematische Anwendung der sogenannten nichtkonventionellen Methoden scheint es notwendig, im Hinblick auf die Begriffe „Qualität erhöhen" und „Kosten senken" entsprechende Forschungsmittel bereitzustellen, um effiziente Erkenntnisse über die Einsatzmöglichkeiten sowie die Anwendungsgrenzen der neuen Technologien zu erhalten.

Mit Hilfe von **Forschungsarbeiten** könnten, wie die bisherigen Erfahrungen zeigen, **wesentliche Beiträge zur Forderung „Qualität erhöhen"** und **„Kosten senken"** geleistet werden.

Zu beachten ist aber auch, **daß manchmal bestehende althergebrachte Vorschriften, Regelwerke und Richtlinien einer kostengünstigen und qualitativ hochwertigen Errichtung von Leitungssystemen entgegenstehen** und **viele Vorgaben** in den einschlägigen Vorschriften, Regelwerken und Richtlinien **zu hinterfragen wären, ob** diese für das System „Fahrbahn-Boden-Leitung" **in der vorliegenden Form erforderlich** sind. Hierbei sei vor allem die traditionelle Verdichtung der Grabenverfüllung angesprochen, wie sie schon seit Jahrzehnten praktiziert wird, aber - wie neueste Untersuchungen gezeigt haben - zu sehr hohen Einbaulasten führen kann, bis hin zur Schädigung insbesondere von Kunststoffrohren und Korrosionsschutzumhüllungen.

Die technischen Infrastrukturen einer Stadt, wie z.B. Ver- und Entsorgungsleitungen, Kommunikationsleitungen usw., aber auch die Verkehrswege sollen der Bevölkerung dienen und sind ein wesentlicher Beitrag zum Wohlstand der Gesellschaft. Damit diese doch relativ teuren Investitionen einerseits eine lange Nutzungsdauer haben und andererseits ohne erheblichen Instandhaltungs- und Nachrüstungsaufwand - für die Bevölkerung fast unbemerkt in erdverlegtem Zustand - existieren können, ist es notwendig, schon heute vorrausschauend für die zukünftigen Entwicklungen, die kommenden, immer größer werdenden Belastungen auf die erdverlegten Leitungssysteme, aber auch die zusätzlichen Belastungen, die nicht in den einschlägigen Regelwerken und Richtlinien angegeben sind, sowie die steigenden Anforderungen an die Funktionalität durch entsprechende Vorkehrungen und erhöhte Sicherheiten zu berücksichtigen. Je längerfristiger vorausschauend die erdverlegten Leitungssysteme dimensioniert und ausgelegt werden, desto weniger werden die Straßen aufgegraben und die Umwelt gestört. In Relation zu den oft sehr geringen Zusatzkosten für eine stärkere Dimensionierung erdverlegter Leitungen können die Kosten für eine vorzeitige Erneuerung bzw. Rehabilitation erdverlegter Leitungssysteme bei Betrachtung der Gesamtkosten wesentlich höher sein. Ein kurzfristiges

Kostendenken ist daher mit einer langfristigen Nutzungsdauer und der damit verbundenen Qualität nicht immer in Einklang zu bringen.

Die Betrachtungen zeigen, daß es notwendig ist, von politischer Seite die entsprechenden Rahmenbedingungen und die zukünftigen Strukturen für die technische Infrastruktur in Hinblick auf den zu erwartenden Entwicklungsstandard vorzugeben. Es kann nicht Sinn geben, wenn aus einem falschen kurzfristigen Kostendenken heraus die Notwendigkeit besteht, daß sich die nächste Generation bereits wieder mit der Erneuerung der erdverlegten Leitungssysteme auseinander setzen muß – und hier vor allem den Hauptteil der Kosten von etwa 75 % für die Erdarbeiten und die Straßenwiederinstandsetzung aufbringen muß, ohne daß die Funktionalität der Leitungssysteme wesentlich verbessert wird. Im Gegensatz zum Stand der Technik, wo für Leitungssysteme eine Mindestnutzungsdauer von 50 Jahren angenommen wird, sollte man die Qualität der Produkte und Arbeiten in Zukunft eher darauf abstimmen, daß eine Mindestnutzungsdauer von 100 Jahren erreicht wird. Mit einer derartigen Einstellung könnten relativ hohe zukünftige Kosten eingespart werden.

8. Maßnahmen für eine nachhaltige Nutzung erdverlegter Leitungssysteme

Grundsätzlich ist jede Aufgrabung eine wesentliche Störung des Bodens und der Straßenkonstruktion, die nach Möglichkeit zu vermeiden ist. Aus diesem Grund ist für alle Arten von erdverlegten Systemen eine möglichst lange Nutzungsdauer anzustreben. Die Frage ist nur, durch welche technischen und organisatorischen Maßnahmen es möglich ist, die Aufgrabungen für den Einbau erdverlegter Leitungssysteme auf ein Minimum zu beschränken und die Zeiträume für die Erneuerung bzw. Rehabilitation von Leitungssystemen so lang wie möglich zu halten. Daß eine sehr lange Nutzungsdauer für erdverlegte Leitungen möglich ist, zeigen die Systemrohrstränge DN 1200 der Wiener Gaswerke, die vor 1900 errichtet wurden und noch immer einwandfrei in Betrieb sind.

Im folgenden sind ohne Anspruch auf Vollständigkeit einige Maßnahmen für eine nachhaltige Nutzung von erdverlegten Leitungssystemen kurz angeführt:

- Die strategische Planung für die Errichtung und Rehabilitation von erdverlegten Leitungssystemen könnte zentral durch eine unabhängige, weisungsungebundene Stabstelle im Bereich der Stadtverwaltung erfolgen, abgestimmt mit den Einbautenträgern sowie den betroffenen Straßenerhaltern, wobei dieser Stabstelle eine wichtige Koordinierungsaufgabe zufällt.

- Für die Errichtung und Rehabilitation erdverlegter Ver- und Entsorgungsleitungen scheint es notwendig, zentral koordiniert kurz-, mittel- und langfristige Strategien, abgestimmt auf die Bedürfnisse der Straßenerhalter, zu entwickeln.

- Schaffung einer zentralen Leitungsdokumentation, die von den jeweiligen Einbautenträgern permanent nachgeführt und auch genutzt werden muß.

- Schaffung von klaren Regelungen für den Einbau und die Leitungsführung von erdverlegten Leitungssystemen für alle Einbautenträger analog zu der Regelung des Straßenverkehrs im Sinne der Straße als Verkehrs- und Versorgungsschiene.

- Schaffung einheitlicher Planungs- und Einbaurichtlinien für alle Arten erdverlegter Leitungssysteme, die sowohl Planung, Verlegung und Einbau der Leitungen festlegen als auch auf die Anforderungen der Straßenerhalter Bedacht nehmen. Dabei ist wesentlich, daß alle Bedürfnisse für das gesamte System „Fahrbahn-Boden-Leitung“ betrachtet werden.

- Überarbeitung der einschlägigen Vorschriften, Regelwerke und Richtlinien betreffend sowohl die Leitungssysteme als auch die Straßenverkehrsflächen hinsichtlich Qualität und Kosten unter Berücksichtigung von Planung, Bau, Betrieb und Instandhaltung.

- Prüfung und Anwendung der in den letzten Jahren neu auf den Markt gekommenen Technologien für erdverlegte Leitungssysteme wie z.B. grabenlose Verlegemethoden, stabilisierte Verfüllmaterialien usw. und Aufnahme der neuen sogenannten nichtkonventionellen Methoden und Materialien in die einschlägigen Vorschriften, Regelwerke und Richtlinien. Weiters sollten die nichtkonventionellen Methoden und Materialien in die einschlägigen Standardleistungsverzeichnisse aufgenommen werden.

- Einsatz von zertifizierten und zugelassenen Produkten, Personen und Unternehmen für die Errichtung und Rehabilitation erdverlegter Leitungssysteme, wobei die entsprechenden Grundlagen für die Zertifizierung von Personen und Unternehmen erst geschaffen werden müssen.

- Anwendung effizienter und kostengünstiger Verlege- und Einbauverfahren für erdverlegte Leitungssysteme, wobei insbesondere die Erfahrungen bei ausländischen Ver- und Entsorgungsunternehmen sowie auch ausländischen Straßenerhaltern einzuholen sind.

- Schaffung einer ausreichenden Transparenz über das Strukturverhalten erdverlegter Leitungssysteme sowie die Straßenwiederinstandsetzung nach Verlegung und Einbau von Leitungen in konventioneller offener Bauweise im Rahmen von Forschungsprojekten, wobei auch die entsprechenden Grundlagen für die Prüfung der verwendeten Verfüllmaterialien und Verfüllmethoden zu erarbeiten sind. Entsprechende Hinweise sind der vorliegenden Projektstudie zu entnehmen.

- Anwendung effizienter Rehabilitationsmaßnahmen für erdverlegte Leitungssysteme, wodurch aufwendige Grabungsarbeiten und Störungen der Straßenverkehrsflächen vermieden werden.

- Einführung von Gebrauchstauglichkeitsprüfungen für die verwendeten Künettenverfüllmaterialien, wobei derzeit nur für stabilisierte Verfüllmaterialien entsprechende Grundlagen vorliegen.

- Entwicklung geeigneter Methoden zum Vergleich der Qualitäts-Kosten-Relation verschiedener Einbaumethoden erdverlegter Leitungssysteme aber auch für die verschiedenen Pro-

Produkte und Materialien, die es erlauben eine nachhaltige Nutzung der Leitungssysteme zu gewährleisten.

9. Ausblick auf weitere zielführende Untersuchungen

Die vorliegende Projektstudie hat grundsätzlich die wesentlichsten Vorgänge bei der Verfüllung von Künetten, beim konventionellen Einbau erdverlegter Leitungssysteme in offener Bauweise, aufgrund theoretischer Betrachtungen mit Hilfe analytischer Simulationsmethoden in einem ersten Schritt behandelt. Es wurde aufgezeigt, welches Strukturverhalten sich für die erdverlegten Leitungssysteme sowie auch die Straßenverkehrsflächen durch die Verfüllung der Künette ableiten läßt. Dabei haben sich einige neue Erkenntnisse ergeben für die Verwendung traditioneller Verfüllmaterialien nach den einschlägigen Regelwerken und Richtlinien, aber auch für die in letzter Zeit stark aufgekommenen stabilisierten Verfüllmaterialien, die in flüssiger Form in die Künette eingebracht werden und dort relativ rasch aushärten. Die mechanischen Einwirkungen auf erdverlegte Leitungen zufolge dieser Verfüllmaterialien sind weitaus geringer als bei konventioneller Verfüllung und Verdichtung mit Hilfe der traditionellen Verfüllmaterialien. Für die stabilisierten Verfüllmaterialien lassen sich eine Reihe technischer und wirtschaftlicher Vorteile ableiten, die in Zukunft bei der Verfüllung von Künetten genützt werden sollten.

Die Untersuchungen im Rahmen der Projektstudie haben aber auch gezeigt, daß noch eine Reihe von wesentlichen Fragen offen sind, die im Hinblick auf die Anwendung der stabilisierten Verfüllmaterialien sowohl aus technischer als auch aus wirtschaftlicher Sicht geklärt werden sollten.

Aufgrund des heutigen Wissenstandes sowie der bisherigen Erfahrungen ergeben sich eine Reihe weiterer zielführender Untersuchungen im Hinblick auf die Optimierung der Verfüllung von Künetten. Diese Untersuchungen teilen sich auf in:

- Analytische Untersuchungen
- Experimentelle Untersuchungen
- Praktische Untersuchungen in Künetten

Im folgenden werden ohne Anspruch auf Vollständigkeit Vorschläge für weitere zielführende Untersuchungen kurz dargestellt im Hinblick auf die Qualität des Einbaues von Rohrleitungen sowie die Verfüllung der Künetten unter Berücksichtigung der Langzeitnutzung sowohl der Ver- und Entsorgungsleitungen sowie der Langzeitnutzung der Fahrbahnen. Wesentlich bei diesen Überlegungen ist neben den entsprechenden Informationen über das Strukturverhalten der erdverlegten Leitungen sowie der Fahrbahn bei bestimmten Grabenverfüllungen und Verfüllmethoden vor allem, welche Anforderungen an die Planung, den Bau sowie die Instandhaltung des Systems zu stellen sind, um langfristig gesehen die Kosten des Gesamtsystems zu minimieren bei entsprechender nachhaltiger Nutzung und Qualität der Ausführung der Bauwerke.

9.1 Vorschlag für analytische Untersuchungen

Aufgrund des derzeitigen Wissenstandes sollten analytische Untersuchungen folgende Arbeiten umfassen:

- Beschreibung der Eigenschaften erdverlegter Leitungen und Einbauten
- Beschreibung der Eigenschaften der Boden- und Verfüllmaterialien umfassend sowohl die konventionellen Materialien wie z.B. Sand, Kies usw. aber auch die nicht konventionellen Verfüllmaterialien wie z.B. Recyclingmaterialien oder stabilisierte Verfüllmaterialien
- Beschreibung der Einbaubedingungen erdverlegter Leitungen und Einbauten
- Systematische Entwicklung der erforderlichen Einbaumaßnahmen für die jeweiligen Einbauten durch analytische Simulationen basierend auf den bisherigen Erkenntnissen sowie den Erkenntnissen von experimentellen Untersuchungen
- Nachweise hinsichtlich der Sicherheit, Funktionalität, Zuverlässigkeit und Wirtschaftlichkeit bei Bau, Betrieb und Instandhaltung der Leitungssysteme und Einbauten sowie der Verkehrsflächen
- Erarbeitung von Regeleinbauverhältnissen für erdverlegte Versorgungssysteme für die technische Ausführung der Einbau- und Wiederinstandsetzungsarbeiten und die Kostenermittlung sowie den Kostenvergleich
- Erarbeitung der Grundlagen für einheitliche Einbaurichtlinien in Abstimmung mit den Ver- und Entsorgern sowie den Straßenerhaltern

9.2 Vorschlag für experimentelle Untersuchungen

Aufgrund des derzeitigen Wissenstandes sollten die experimentellen Untersuchungen folgende Arbeiten umfassen:

- Untersuchung der Gebrauchstauglichkeit der Boden- und Verfüllmaterialien und Klassifikation, wobei etwa 10 konventionelle Materialien und etwa 10 nichtkonventionelle Materialien zu betrachten sind
- Untersuchung von Einbaumethoden für die jeweiligen Leitungssysteme in einer Modellbox zur Erfassung der erforderlichen Kenngrößen für die analytischen Untersuchungen
- Erarbeitung von geeigneten Prüfmethoden zur Gütesicherung der Einbauarbeiten sowie der Straßenwiederinstandsetzung an der Baustelle

9.3 Vorschlag für praktische Untersuchungen in Künetten

Aufgrund des derzeitigen Wissenstandes sollten die praktischen Untersuchungen in Künetten folgende Arbeiten umfassen:

- Untersuchungen an Baustellen zur Erfassung des realen Strukturverhaltens der Komponenten des Systems „Fahrbahn-Boden-Leitung" bei Bau und Betrieb durch geeignete Meßsysteme, wobei folgende Leitungssysteme für Untersuchungen vorgeschlagen werden:
- Einbau Kabel
- Einbau Rohrleitung - seichte Lage - kaltgehend
- Einbau Rohrleitung - seichte Lage - warmgehend
- Einbau Rohrleitung - tiefe Lage
- Erarbeitung von geeigneten Prüfmethoden zur Gütesicherung der Einbauarbeiten sowie der Straßenwiederinstandsetzung an der Baustelle

10. Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Projektstudie über die Verfüllung von Künetten für erdverlegte Leitungssysteme wurde einerseits mit Hilfe von analytischen Simulationen und andererseits aufgrund der vorliegenden Erfahrungen untersucht, welche Konsequenzen sich für erdverlegte Leitungssysteme bei der konventionellen Verlegung in offener Bauweise, entsprechend den einschlägigen Regelwerken und Richtlinien für die jeweiligen Leitungen sowie den einschlägigen Straßenwiederinstandsetzungsvorschriften der Straßenerhalter, nach dem Motto „Straße als Verkehrs- und Versorgungschiene“ ergeben. Insbesondere wurden die Konsequenzen der Verfüllung in der Leitungszone, einschließlich der im allgemeinen vorhandenen Imperfektionen in der Umgebung der Leitung sowie der Verdichtung in der Wiederverfüllzone, im Hinblick auf die Nutzung sogenannter stabilisierter Verfüllmaterialien betrachtet.

Grundsätzlich läßt sich hinsichtlich der Verlegung und dem Einbau erdverlegter Leitungssysteme folgendes feststellen:

Durch den systematischen Ausbau und die Rehabilitation der öffentlichen Ver- und Entsorgungsleitungen sowie der Kommunikationssysteme hat die Bedeutung der Straße als Versorgungsschiene, neben der Funktion als Verkehrsschiene, sehr wesentlich zugenommen. Unter Versorgung sind dabei die Bereiche Gas, Fernwärme, Wasser, Strom, usw., unter Entsorgung der Bereich Abwasser und unter Kommunikation die Bereiche Telefon, Telekabel, Lichtwellenleiter, usw. zu verstehen. Diese Bedeutung wird in Zukunft durch die Liberalisierung des Energie- und Kommunikationsmarktes noch wesentlich erhöht werden, wenn zunehmend neue Leitungssysteme von neuen Anbietern benötigt werden.

Nach dem heutigen Wissensstand bietet sich für die Führung von Leitungssystemen der öffentlichen Ver- und Entsorgung sowie der Kommunikationsleitungen nur der vorhandene Boden an, wobei gegebenenfalls in Zukunft bei wesentlicher Zunahme der Anzahl der Leitungssysteme neue Einbautenstrukturen angedacht werden müssen.

Nach dem Motto „Straße als Verkehrs- und Versorgungsschiene“ wird es im Hinblick auf die zu erwartende Zunahme der Anzahl der erdverlegten Leitungssysteme notwendig sein, analog zur Regelung des Straßenverkehrs, auch den Einbau und die Führung erdverlegter Leitungen stärker systematisch zu regeln. Dies kann durch geeignete Vorschriften, Regelwerke und Richtlinien erfolgen.

Grunsätzlich ist jede Aufgrabung eine wesentliche Störung des Bodens und der Straßenkonstruktion, die nach Möglichkeit zu vermeiden ist. Aus diesem Grund ist auch für alle Arten von erdverlegten Einbauten eine möglichst lange Nutzungsdauer anzustreben. Die Frage ist nur

durch welche technischen und organisatorischen Maßnahmen es möglich ist, die Aufgrabungen für den Einbau erdverlegter Leitungssysteme auf ein Minimum zu beschränken und die Zeiträume für die Erneuerung bzw. Rehabilitation der Leitungssysteme so weit wie möglich zu verlängern.

Im Hinblick auf eine möglichst lange Nutzungsdauer sowohl der erdverlegten Leitungssysteme als auch der Straßenverkehrsflächen ist es notwendig, allgemeine Betrachtungen für das gesamte System „Fahrbahn-Boden-Leitung“ anzustellen, insbesondere im Hinblick auf die zentralen Begriffe Qualität und Kosten. Die Begriffe Qualität und Kosten sind dabei derart zu definieren, daß nachhaltig die erforderliche Qualität der Leitungssysteme aber auch der Straßenverkehrsflächen gegeben ist, um eine möglichst lange Nutzungsdauer der Leitungssysteme mit geringen Gesamtkosten zu erzielen.

Unter Qualität ist grundsätzlich eine einwandfreie Langzeitfunktionalität sowohl der Leitungssysteme als auch der Straßenverkehrsflächen mit minimalem Instandhaltungsaufwand und möglichst langer Nutzungsdauer zu verstehen.

Unter Kosten sind grundsätzlich die Gesamtkosten über die gesamte Nutzungsdauer, umfassend Planung, Bau und Instandhaltung sowohl der Leitungssysteme als auch der relevanten Straßenverkehrsflächen, zu verstehen.

Die heute vielfach in den Raum gestellte, im ersten Ansatz eher widersprüchliche Vorgabe: „Kosten senken“ und „Qualität erhöhen“ scheint unter Zuhilfenahme der obigen Definitionen durchaus realisierbar, wenn einerseits die notwendigen formalen Grundlagen, wie z.B. Vorschriften, Regelwerke, Richtlinien usw. geschaffen werden und andererseits die neuen Technologien bzw. sogenannte nichtkonventionelle Methoden effizient ausgenützt werden.

Problematisch ist die Forderung „Kosten senken“ nur dann, wenn aus einer kurzfristigen wirtschaftlichen Überlegung heraus die Qualität bei der Errichtung der Leitungssysteme sowie der Fahrbahnwiederinstandsetzung außer acht gelassen wird und als Folge einerseits Schäden an den Leitungssystemen auftreten, die dann mit erhöhtem Aufwand saniert werden müssen und auch vorzeitig kostenintensive Instandhaltungsmaßnahmen für die Straßenerhalter entstehen. Die anfänglich eingesparten Investitionskosten und die daraus resultierende mangelhafte Qualität des gesamten Systems können über die Nutzungsdauer gesehen ein Vielfaches an Sanierungs- und Instandhaltungskosten erfordern. Aus diesem Grund scheint es notwendig, geeignete Qualitäts-Kosten-Relationen für die Errichtung erdverlegter Leitungssysteme zu entwickeln, die effiziente Entscheidungskriterien für die Langzeitnutzung ermöglichen.

Aus technischer Sicht zeigen die durchgeführten Betrachtungen folgende wesentliche Erkenntnisse:

Neben den Einwirkungen auf erdverlegte Leitungen aus dem Betrieb sind für das Strukturverhalten und damit die Sicherheit und Nutzungsdauer der Leitungen vor allem die Einwirkungen durch den konventionellen Einbau in offener Bauweise unter Verwendung der traditionellen Boden- und Verfüllmaterialien bzw. die Qualität der Einbauarbeiten maßgebend, die weitaus höher sein können als die in den einschlägigen Regelwerken und Richtlinien vorgegebenen Einwirkungen.

Diese Erkenntnis wird auch durch Schadensfälle an Ver- und Entsorgungsleitungen kurz nach dem Einbau bestätigt, wo in den meisten Fällen als Ursache Einbaufehler nachgewiesen werden können. Als Ursachen ergeben sich häufig Imperfektionen der Rohrumgebung in der Leitungszone, starre Auflagerstellen, zu starke Verdichtung unmittelbar über dem Rohr, äußere mechanische Beschädigungen der Rohrwand im Zuge der Verfüllung des Leitungsgrabens, usw.

Abhilfe kann man im Hinblick auf eine ausreichende Sicherheit und Funktionalität sowie vor allem auf eine möglichst lange Nutzungsdauer der Leitung schaffen, indem diese zusätzlichen Lasten bei der Dimensionierung der Leitungen entsprechend berücksichtigt, oder entsprechend höhere Sicherheiten angesetzt werden. Auch durch geeignete Wahl der Einbaumethoden können die Beanspruchungen in den erdverlegten Leitungen reduziert werden, wie z.B. durch die Anwendung der sogenannten stabilisierten Verfüllmaterialien.

Zur Abschätzung der Einwirkungen auf erdverlegte Rohrleitungen durch den konventionellen Einbau in offener Bauweise sowie den Betrieb wurden vom Autor in den letzten Jahren sogenannte „Rohrkennfelder“ entwickelt, die das Strukturverhalten erdverlegter Rohrleitungen ausreichend transparent machen und für die Praxis als einfaches Entscheidungskriterium zur Verfügung stehen. Zur Zeit liegen diese Rohrkennfelder nur für PE-Rohre in der Gasversorgung vor, können aber auch für alle anderen Anwendungsfälle und Rohrwerkstoffe allgemein gültig erstellt werden.

Die Nachteile der konventionellen Verlegung von Leitungen in offener Bauweise, bei Verfüllung der Rohrgräben mit den traditionellen Boden- und Verfüllmaterialien, in Form von zusätzlichen Einwirkungen durch Imperfektionen in der Leitungszone, wie z.B. Unebenheiten der Grabensohle, Ungleichmäßigkeit der Bettungssteifigkeit, starre Auflagerstellen, usw. sowie die Einwirkungen durch die Verdichtung der Grabenverfüllung können durch die Anwendung der sogenannten stabilisierten Verfüllmaterialien kompensiert werden, wobei durch die flüssige Einbrin-

gung eine gleichmäßige Bettung und Einbettung der Rohre in der Leitungszone sowie auch eine verdichtungsfreie Verfüllung in der Wiederverfüllzone möglich ist.

Die stabilisierten Verfüllmaterialien müssen die in technischen Spezifikationen festgelegten Anforderungen, abgestimmt auf den jeweiligen Einsatzzweck, erfüllen, insbesondere im Hinblick auf Steifigkeit, Tragfähigkeit, Umweltverträglichkeit und eine einfache Wiederabbaubarkeit mit einfachen Werkzeugen innerhalb der Nutzungsdauer. Die Einhaltung der geforderten Eigenschaften für die Anwendung ist durch entsprechende Gebrauchstauglichkeitsprüfungen nachzuweisen und eine gleichbleibende Qualität durch die Fremd- bzw. Eigenüberwachung sicherzustellen.

Auch bei der ordnungsgemäßen Verfüllung der Wiederverfüllzone gegen den bestehenden Boden sind wesentliche Vorteile durch die flüssige Einbringung von stabilisierten Verfüllmaterialien und den sich dadurch ergebenden hydrostatischen Druck gegen die Grabenwände zu erwarten, wie erste Abschätzungen bzw. Simulationen gezeigt haben. Bezüglich der Verfüllung der Wiederverfüllzone ist es jedoch notwendig, weitere eingehende Untersuchungen durchzuführen. Durch die Art der Einbringung der stabilisierten Verfüllmaterialien in die Leitungsgräben und die rasche Aushärtung ist eine ausreichende Steifigkeit der Verfüllung mit nur geringen Setzungen zu erwarten, wodurch auch wesentliche Vorteile für die Straßenwiederinstandsetzung zu erwarten sind. Vor allem wird zu überlegen sein, ob es bei Verwendung stabilisierter Verfüllmaterialien notwendig ist, eine provisorische Straßenwiederinstandsetzung durchzuführen, oder man auf die weitaus kostengünstigere Variante einer sofortigen definitiven Straßenwiederinstandsetzung übergehen kann. Die ersten Überlegungen und Gespräche zeigen diesbezüglich positive Ansätze. Damit sind auch wesentliche Vorteile hinsichtlich einer langen Nutzungsdauer der Straßenverkehrsflächen zu erwarten. Entsprechende Untersuchungen im Rahmen von Forschungsprojekten sollten durchgeführt werden.

Die Verfüllung von Leitungsgräben mit stabilisierten Verfüllmaterialien bringt somit Vorteile hinsichtlich der mechanischen Belastung der Leitungen durch den erdverlegten Zustand sowie hinsichtlich der Sicherheit und Funktionalität und damit hinsichtlich der Nutzungsdauer sowohl der erdverlegten Leitungen als auch der Straßenverkehrsflächen.

Aus organisatorischer Sicht zeigen die durchgeführten Betrachtungen folgende wesentliche Erkenntnisse:

Für eine möglichst lange Nutzungsdauer erdverlegter Leitungssysteme und damit verbunden möglichst wenige Aufgrabungen im Bereich der Straßenverkehrsflächen muß die Stadtverwaltung die notwendigen Rahmenbedingungen und effiziente Strukturen zu schaffen. Die strategische Planung für die Errichtung und Rehabilitation von erdverlegten Leitungssystemen könnte

zentral durch eine unabhängige, weisungsungebundene Stabstelle im Bereich der Stadtverwaltung erfolgen, abgestimmt mit den Einbautenträgern sowie den betroffenen Straßenerhaltern, wobei dieser Stabstelle eine wichtige Koordinierungsaufgabe zufällt.

Für die Errichtung und Rehabilitation erdverlegter Ver- und Entsorgungsleitungen scheint es notwendig, zentral koordiniert kurz-, mittel- und langfristige Strategien, abgestimmt auf die Bedürfnisse der Straßenerhalter, zu entwickeln.

Schaffung einheitlicher Planungs- und Einbaurichtlinien für alle Arten erdverlegter Leitungssysteme, die sowohl Planung, Verlegung und Einbau der Leitungen festlegen als auch auf die Anforderungen der Straßenerhalter Bedacht nehmen. Dabei ist wesentlich, daß alle Bedürfnisse für das gesamte System „Fahrbahn-Boden-Leitung“ betrachtet werden.

Überarbeitung der einschlägigen Vorschriften, Regelwerke und Richtlinien betreffend sowohl die Leitungssysteme als auch die Straßenverkehrsflächen hinsichtlich Qualität und Kosten unter Berücksichtigung von Planung, Bau, Betrieb und Instandhaltung.

Prüfung und Anwendung der in den letzten Jahren neu auf den Markt gekommenen Technologien für erdverlegte Leitungssysteme wie z.B. grabenlose Verlegemethoden, stabilisierte Verfüllmaterialien usw. und Aufnahme der neuen sogenannten nichtkonventionellen Methoden und Materialien in die einschlägigen Vorschriften, Regelwerke und Richtlinien. Weiters sollten die nichtkonventionellen Methoden und Materialien in die einschlägigen Standardleistungsverzeichnisse aufgenommen werden.

Einsatz nur von zertifizierten und zugelassenen Produkten, Personen und Unternehmen für die Errichtung und Rehabilitation erdverlegter Leitungssysteme, wobei die entsprechenden Grundlagen für die Zertifizierung von Personen und Unternehmen erst geschaffen werden müssen.

Schaffung einer ausreichenden Transparenz über das Strukturverhalten erdverlegter Leitungssysteme sowie der Straßenverkehrsflächen nach Verlegung und Einbau von Leitungen in konventioneller offener Bauweise durch die vom Autor der Studie entwickelten und für die Praxis vorgeschlagenen Rohrkennfelder im Rahmen von Projekten, wobei auch die entsprechenden Grundlagen für die Prüfung der verwendeten Verfüllmaterialien und Verfüllmethoden zu erarbeiten sind. Entsprechende Hinweise sind der vorliegenden Projektstudie zu entnehmen.

Anwendung effizienter Rehabilitationsmaßnahmen für erdverlegte Leitungssysteme, wodurch aufwendige Grabungsarbeiten und Störungen der Straßenverkehrsflächen vermieden werden können.

Entwicklung geeigneter Methoden zum Vergleich der Qualitäts-Kosten-Relation verschiedener Einbaumethoden erdverlegter Leitungssysteme aber auch für die verschiedenen Produkte und Materialien, die es erlauben eine nachhaltige Nutzung der Leitungssysteme zu gewährleisten.

Bereitstellung ausreichender Forschungsmittel zur Klärung der offenen Fragen vor allem im Hinblick auf die erforderliche Qualität und die vertretbaren Kosten bezogen auf eine möglichst lange Nutzungsdauer der Leitungssysteme und der Straßenverkehrsflächen.

11. Literatur

[1] Kiesselbach, G.
Die Belastungs- und Beanspruchungsverhältnisse erdverlegter Gasrohrleitungen
3R international, 28 (1989), Heft 8

[2] Kiesselbach, G.
Zur Biegebeanspruchung erdverlegter Gasrohrleitungen durch Verkehrslasten
3R international, 29 (1990), Heft 5

[3] Kiesselbach, G.
Zur Biegebeanspruchung erdverlegter Rohrleitungen aufgrund von Unebenheiten der Rohrgrabensohle
3R international, 29 (1990), Heft 10

[4] Kiesselbach, G.
Korrosionswahrscheinlichkeit für erdverlegte Rohrleitungen
gww, 44 (1990), Heft 12

[5] Kiesselbach, G.
Zur Bodenaggressivität in einem städtischen Versorgungsgebiet
gwa, 71 (1991), Heft 5

[6] Kiesselbach, G.
Zur Beanspruchung erdverlegter Rohrleitungen durch direkte Lasten
3R international, 30 (1991), Heft 6/7

[7] Kiesselbach, G.
Zum Beanspruchungs- und Verformungsverhalten von erdverlegten Kunststoffrohren
gwa, 71 (1991), Heft 8

[8] Kiesselbach, G.
Die grabenlose im Vergleich zur konventionellen Leitungsverlegung aus geomechanischer und leitungstechnischer Sicht
3R international, 30 (1991), Heft 9

[9] Kiesselbach, G.
Statistisches Sicherheitskonzept für erdverlegte Rohrleitungen
gwa, 72 (1992), Heft 2

[10] Kiesselbach, G.
Neue Erkenntnisse zur Ursache und zum Auftreten von Rohrbrüchen in städtischen Versorgungsnetzen
Handbuch Wasserversorgungs- und Abwassertechnik, 4. Ausgabe 1992, Vulkan Verlag

[11] Kiesselbach, G.
Erdverlegte PE-Rohre in der Gasversorgung, Strukturverhalten infolge mechanischer Einwirkungen - Stand der Erkenntnisse des ÖVGW-Forschungsprojektes
gww, 47 (1993), Heft 5

[12] Kiesselbach, G.
Neuere Erkenntnisse zum Beanspruchungs- und Verformungsverhalten erdverlegter Rohrleitungen in der Wasserversorgung
18. Wassertechnisches Seminar; Berichte aus Wassergüte- und Abfallwirtschaft Technische Universität München 1993, Heft 115

[13] Kiesselbach, G.
Anwendung der Finite-Elemente-Methode (FEM) zur Simulation des Strukturverhaltens und der Funktionalität von Abwasserdichtsystemen
13. Jahrestagung Elastomere im Bauwesen, Bericht aus Kunststofftechnik Elastomere im Bauwesen VDI Verlag GmbH Düsseldorf 1995

[14] Kiesselbach, G.
Indirekte Lasten für erdverlegte Rohrleitungen
GUSSROHR-TECHNIK FGR 30, 1995

[15] Kiesselbach, G.
Statische Berechnung erdverlegter Rohrleitungen
Handbuch Wasserversorgungs- und Abwassertechnik, 5. Ausgabe 1995, Vulkan Verlag

[16] Kiesselbach, G.
Rechnerische Simulation des Strukturverhaltens und der Funktionalität von Abwasserdichtsystemen
Handbuch Wasserversorgungs- und Abwassertechnik, 5. Ausgabe 1995, Vulkan Verlag

[17] Kiesselbach, G.
Rechnerische Simulation von elastomeren Rohrdichtsystemen
3R international, 34 (1995), Heft 8

[18] Kiesselbach, G.
Mechanische Charakterisierung von thermoplastischen Kunststoffen als Grundlage für die nichtlineare Finite-Elemente-Analyse
MARC Benutzertreffen 1996, Berichte

[19] Kiesselbach G.
Structural Analysis of Buried GRP-Pipes
Proceedings of the Second International Conference on GRP Pipes
Abu Dhabi, Municipality 1997

[20] Kiesselbach, G.
Rohrkennfelder für erdverlegte PE-Gasrohre
3R international, 36 (1997), Heft 2/3

[21] Kiesselbach, G. und Köck, R.
Neue Gesichtspunkte bei der Dimensionierung und Berechnung von PE-Rohren
Handbuch „PE-Rohrleitungen in der Gas- und Wasserverteilung“, 1997, Vulkan-Verlag

[22] Kiesselbach, G.
Berechnung erdverlegter Rohrleitungen
Handbuch „Rohrleitungsbau“, Vulkan Verlag, 1997

[23] Kiesselbach, G.
Strukturverhalten erdverlegter Rohrleitungen zufolge Einbau und Betrieb
Handbuch Wasserversorgungs- und Abwassertechnik, 6. Ausgabe 1998, Vulkan Verlag

[24] Kiesselbach, G.
Erdverlegte PE-Rohre in der Gasversorgung, Strukturverhalten infolge mechanischer Einwirkungen
ÖVGW-Forschungsbericht, Forschung Gas, Wien 1993

[25] Lang, R.W., Pinter, G. und Pelz, G.
Viskoelastische Eigenschaften von Polyethylen für Gasrohre
ÖVGW-Forschungsbericht, Forschung Gas, Wien 1996

[26] Kiesselbach, G.
Statische Berechnung erdverlegter Gasrohrleitungen - Rohrkennfelder für PE-Rohre
ÖVGW-Forschungsbericht, Forschung Gas, Wien 1997

[27] Kiesselbach, G.
Technische Spezifikation für stabilisierte Rohrgraben-Verfüllmaterialien - SVM, für den Einbau von Fernwärme-Kunststoffmantelrohren - KMR
Studie im Auftrag des Fachverbandes Gas & Wärme, Wien 1998

[28] Kiesselbach, G.
Rohrgrabenverfüllung – neue technische und wirtschaftliche Aspekte
Rohrbau Mitteilungen, Heft 1.1998

[29] Kiesselbach, G.
Strukturanalyse von Rohrleitungssystemen infolge Einbau und Betrieb
23. Wassertechnisches Seminar; Berichte aus Wassergüte- und Abfallwirtschaft
Technische Universität München 1999, Heft 150

[30] Magistrat der Stadt Wien, Magistratsabteilung 28; Wiederinstandsetzungsvorschrift - Vorschriften für die Aufgrabung und für die Schließung der Künetten sowie für die Wiederherstellung der Straßenkonstruktion ab 1.Jänner 1996

[31] Rath, H.
Neue Methode für das Einbetten von Stahlrohren
Neue DELIWA – Zeitschrift, Heft 10/83

[32] Berger, W.
Kostengünstige und qualitätssichere Wiederverfüllung von Leitungsgräben mittels Boden – Mörtel
Bericht des Forschungsinstitutes für Tief – und Rohrleitungsbau Weimar e.V.

[33] Berger, W.
Kosten- und Beanspruchungsbeeinflussung durch den Bodenmörteleinsatz im Leitungsbau
Tagungsunterlagen Informationsveranstaltung „Neue Technologien im Rohrleitungsbau in offener und grabenloser Bauweise“
1998 Berlin

[34] Berger, W. und Buchner, U.
Anwendung von stabilisierten Verfüllmaterialien bei besonderen Einbauanforderungen
Tagungsunterlagen Rohrbau Kongreß 1999, Weimar

[35] HOBAS GRP Pipelines Textbook; HOBAS Engineering GmbH Austria 1995