

VIII/2 Beanspruchung von Rohrleitungen während des Einbauzustandes

Dipl.-Ing. Dr. techn. Gerhard Kiesselbach

1. Einleitung

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 Untersuchungen [1-25] und Forschungsprojekten [26-28] durchgeführt wurden. Dabei wurden, ausgehend von Messergebnissen computerunterstützte Berechnungsmodelle in Abstimmung mit experimentellen Untersuchungen entwickelt, die das Strukturverhalten des Gesamtsystems „Fahrbahn-Boden-Leitung“ transparent machen und Informationen über das Verhalten der Leitungen beim Bau und im Betrieb geben können.

In den einschlägigen Regelwerken für erdverlegte Rohrleitungen sind Hinweise auf den konventionellen Einbau von Leitungen in offener Bauweise enthalten, es fehlen jedoch Vorgaben für die Verfüllung und Verdichtung der Leitungsgräben im Hinblick auf die Wiederinstandsetzung der Fahrbahn. Demgegenüber sind in den einschlägigen Straßenwiederinstandsetzungsvorschriften Vorgaben für die Verfüllung und Verdichtung der Leitungsgräben enthalten, die sich auf die Fahrbahnen beziehen und nicht die Bedürfnisse der Leitungen berücksichtigen. Die Regelwerke für den Einbau erdverlegter Leitungen sind demnach nicht abgestimmt auf das Gesamtsystem „Fahrbahn-Boden-Leitung“, sondern nur auf die jeweiligen Interessen der zuständigen Erhalter. Für das Strukturverhalten erdverlegter Leitungen ist jedoch immer das gesamte System „Fahrbahn-Boden-Leitung“ maßgebend. Die Einwirkungen auf die Leitungen durch den konventionellen Einbau in offener Bauweise können wesentlich höher sein als die Einwirkungen durch den Betrieb der Leitungen innerhalb der Nutzungsdauer.

Neben den Eigenschaften der Leitungskomponenten und deren Verbindungen sind für die Sicherheit und Wirtschaftlichkeit erdverlegter Leitungen auch die Verfüllmaterialien und deren Einbringung in den Leitungsgraben von Bedeutung. Die verschiedenen konventionellen Verfüllmaterialien zeigen zum Teil große Unterschiede in den Eigenschaften untereinander und in Relation zu den bestehenden Böden. Die in den einschlägigen Regelwerken enthaltenen Kennwerte der Verfüllmaterialien sind für die Erfassung der Auswirkungen der Verdichtung der Rohrgrabenverfüllung nicht ausreichend.

Für die Verfüllung von Leitungsgräben gewinnen die sog. stabilisierten Verfüllmaterialien zunehmend an Bedeutung. Wie die Erfahrungen zeigen, bringen stabilisierte Verfüllmaterialien – also flüssig in den Leitungsgraben eingebrachte Verfüllmaterialien, die relativ rasch aushärten – eine Reihe von Vorteilen gegenüber den konventionellen Verfüllmaterialien sowohl aus technischer als auch aus wirtschaftlicher Sicht.

Zur Beurteilung der Sicherheit und Wirtschaftlichkeit erdverlegter Rohrleitungen müssen die Beanspruchungen in den Rohren innerhalb der Nutzungsdauer hinreichend genau bekannt sein. Für die Praxis ist es notwendig, die Auswirkungen der Verfüllmaterialien sowie der Einbauverhältnisse bei konventioneller Verlegung in offener Bauweise auf das Strukturverhalten der Rohre, unter Berücksichtigung der spezifischen Eigenschaften der Rohrwerkstoffe sowie der zu erwartenden Belastungen, aufzuzeigen. Das Beanspruchungs- und Verformungsver-

halten erdverlegter Rohrleitungen lässt sich vorweg nur durch rechnerische Analysen erfassen.

Im Zusammenhang mit den erkannten Problemen bei der Anwendung verschiedener Berechnungsmethoden für erdverlegte Rohre wurde vom Autor eine Methode für die Berechnung erdverlegter Rohrleitungen erarbeitet, die eine rasche Beurteilung und Entscheidungsfindung ermöglicht. Die Methode liefert sog. „Rohrkennfelder“ [20] zur Erfassung und Darstellung des Strukturverhaltens erdverlegter Rohre zufolge Einbau und Betrieb mittels Kurvenscharen in Diagrammform für die Anwendung in der Praxis. Neu ist die Erfassung der Einwirkungen auf die Rohre durch den konventionellen Einbau in offener Bauweise nach den einschlägigen Verlege- und Einbaurichtlinien und die Verfüllung und Verdichtung im Rohrgraben, entsprechend den Anforderungen der Straßenwiederinstandsetzungsvorschriften.

Für die praktische Anwendung werden für die jeweilige Rohrdimension und den vorgegebenen Einbau- und Belastungszustand der Rohre die entsprechenden Rohrkennfelder aus einem Rohrkennfeldkatalog ausgewählt. Mit Hilfe charakteristischer Parameterwerte kann man aus den Rohrkennfeldern das Kurzzeit- und das Langzeitstrukturverhalten der Rohre aus den entsprechenden Kurven ablesen und die notwendigen Entscheidungen über den Einbau der Rohre treffen. Die Rohrkennfelder können für folgende Entscheidungen herangezogen werden:

- Rohrauswahl
- Erforderliche Rohrscheitelüberdeckung
- Auswahl der Verfüllmaterialien
- Verfüllung und Verdichtung der Rohrgrabenverfüllung
- Überprüfung der Einbaugüte durch Messungen an den eingebauten Rohren
- Nachweis im Sinne der statischen Berechnung erdverlegter Rohrleitungen

Die Rohrkennfelder bieten einerseits die Möglichkeit die Beanspruchungen und Verformungen in den Rohren durch Einbau und Betrieb zu erfassen und andererseits bei Vorliegen von Messdaten im erdverlegten Zustand auf die Bodenverhältnisse sowie die Einbaugüte der Rohre schließen zu können.

2. Gesamtsystem „Fahrbahn-Boden-Leitung“

Der prinzipielle Aufbau des Gesamtsystems „Fahrbahn-Boden-Leitung“ bei konventioneller Verlegung in offener Bauweise ist in **Bild 1** dargestellt. Der Aufbau der Grabenverfüllung von der Grabensohle bis zur Fahrbahn unterteilt sich in die Abschnitte: Leitungszone (LZ) und 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.

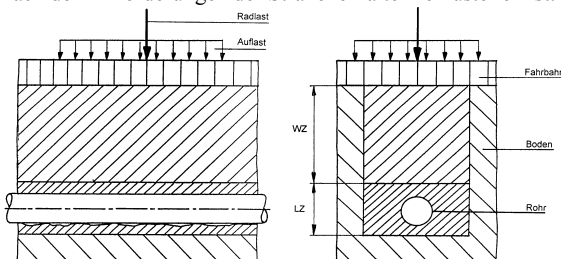


Bild 1: Gesamtsystem „Fahrbahn-Boden-Leitung“ bei konventioneller Verlegung

3. Konventioneller Leitungsbau in offener Bauweise

Für die Verlegung und den Einbau erdverlegter Leitungen in konventioneller offener Bauweise existieren material- und anwendungsspezifische Regelwerke. Daneben existieren für die Aufgrabung und die Schließung von Leitungsgräben sowie die Wiederherstellung der Straßenkonstruktionen regional unterschiedliche Vorschriften von Bund, Ländern und Gemeinden in Form sog. 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 auf die Anforderungen der Straße und nicht auf die Bedürfnisse erdverlegter Leitungssysteme im Hinblick auf Sicherheit und Wirtschaftlichkeit.

4. Rohrwerkstoffe und Rohre

Rohre und Rohrwerkstoffe für erdverlegte Rohrleitungen zeigen zum Teil wesentliche Unterschiede in den mechanischen Eigenschaften. Dies gilt insbesondere für das Beanspruchungs-, das Verformungs- und das Zeitstandverhalten sowie die Zeit- und Temperaturabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften innerhalb der für erdverlegte Leitungen relevanten Einsatzbereiche. Nach dem Verformungsverhalten unterscheidet man zwischen „starr“ und „flexibel“ 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. Ausführliche Informationen über die Eigenschaften der Rohrwerkstoffe sowie die Kennwerte 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.

5. Boden- und Verfüllmaterialien

Die Anforderungen an Verfüllmaterialien für Leitungsgräben sind teilweise in Regelwerken festgelegt. Grundsätzlich können verwendet werden:

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

Für Verfüllmaterialien bestehen Anforderungen, die nur zum Teil in den einschlägigen Regelwerken enthalten sind, dazu zählen unter anderem:

- Tragfähigkeit
- Steifigkeit
- Umweltverträglichkeit
- Verträglichkeit mit den Leitungen bzw. Leitungsmaterialien
- Verträglichkeit zum anstehenden Boden
- Beständigkeit gegenüber Oberflächen- und Grundwasser
- Abbaubarkeit mit Krampen und Schaufel während der Nutzungsdauer der Leitungen

Die Eignung als Rohrgrabenverfüllmaterial sollte grundsätzlich nachgewiesen werden. Zur Zeit liegen noch wenige Regelwerke für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit von Rohrgrabenverfüllmaterialien und für deren Qualitätssicherung vor.

5.1 Konventionelle Verfüllmaterialien

Die Beschreibung der Eigenschaften konventioneller Verfüllmaterialien erfolgt im allgemeinen nach den einschlägigen Regelwerken. Für die Beurteilung der Boden- und Verfüllmaterialien unter den Belastungen durch den Einbau, z. B. bei der Verdichtung der Rohrgrabenverfüllung, ist vor allem das Druck-Setzungsverhalten gemäß **Bild 2** bei Erstbelastung sowie bei Entlastung und Wiederbelastung maßgebend.

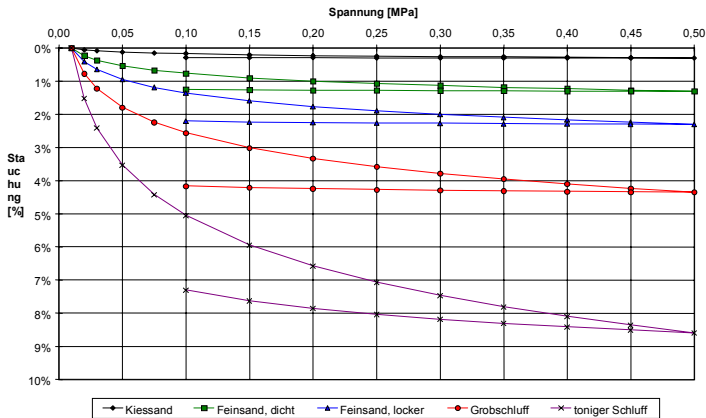


Bild 2: Druck-Setzungsverhalten verschiedener Boden- und Verfüllmaterialien

Bild 2 zeigt, dass es für die Beschreibung der mechanischen Eigenschaften der Boden- und Verfüllmaterialien bei der Verfüllung und Verdichtung von Rohrgräben notwendig ist, vor allem die bleibenden Verformungen unter Belastung 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 repräsentativ.

5.2 Nichtkonventionelle Verfüllmaterialien

Zu den nichtkonventionellen Verfüllmaterialien zählen auch die sog. stabilisierten 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 stark an Bedeutung für den Einbau erdverlegter Leitungen gewonnen. Wie die Erfahrungen zeigen, unterscheiden sich die stabilisierten Verfüllmaterialien der verschiedenen Anbieter zum Teil wesentlich in ihren Eigenschaften. Aus diesem Grund wurde in Österreich eine technische Spezifikation [29] erarbeitet, die auch als ON-Regel „ONR/FW 110A“ erschienen ist, in der Anforderungen im Hinblick auf den Einsatz für Fernwärme-Kunststoffmantelrohre sowie Grundlagen für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit und Prüfungen für die Qualitätssicherung festgelegt sind.

Stabilisierte Verfüllmaterialien bieten eine Reihe von Vorteilen gegenüber den traditionellen Verfüllmaterialien sowohl für die Leitungszone als auch die Wiederverfüllzone. Dies bezieht sich insbesondere auf die gleichmäßige Bettung und Einbettung der Rohre und die Mög-

lichkeit geringerer Grabenbreiten durch die flüssige Einbringung der Grabenverfüllung. Weiterhin ist keine Verdichtung der stabilisierten Grabenverfüllung erforderlich, wodurch die Einbaulasten wesentlich verringert werden können.

6. Verlege- und Einbauverhältnisse

Für den konventionellen Einbau erdverlegter Rohrleitungen in offener Bauweise sind die Anforderungen für die Leitungszone in den einschlägigen Verlege- und Einbaurichtlinien und die Anforderungen für die Wiederverfüllzone in den Wiederinstandsetzungsvorschriften der Straßenerhalter festgelegt. Die wesentlichen Schritte bei der Verlegung und dem konventionellen Einbau erdverlegter Rohrleitungen vom Rohrgrabenaushub bis zur Rohrgrabenverfüllung und zur Straßewiederinstandsetzung sind prinzipiell in **Bild 3** dargestellt.

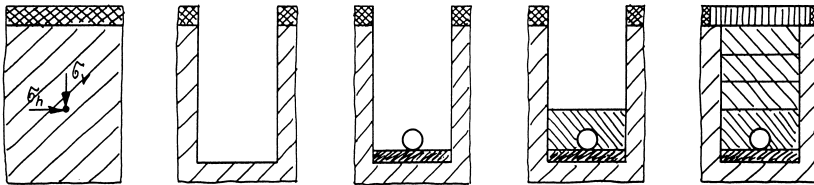


Bild 3: Verlegung und Einbau erdverlegter Rohrleitungen in offener Bauweise

Der Spannungszustand im Boden bei ungestörtem Straßenaufbau ist gegeben durch die vertikale Spannung zufolge des Bodengewichtes sowie die horizontale Spannung durch den Ruhrdruck. Der Aushub des Grabens entspricht einer Freistellung der Grabenwände in horizontaler Richtung, wodurch an den Rohrgrabenwänden ein spannungsfreier Zustand eintritt und der ursprüngliche horizontale Spannungszustand in einen entsprechenden Verformungszustand der Rohrgrabenwände übergeführt wird. Zur Vermeidung großer Verformungen der Rohrgrabenwände bzw. Rutschungen und Setzung der benachbarten Fahrbahnstreifen ist es notwendig, diese entsprechend abzustützen z. B. durch eine Pöhlung oder einen Grabenverbau.

Für die Rohrauf Lagerung auf der Grabensohle ist die Bettung so auszubilden, dass Längsbiegungen und Punktlasten vermieden werden. Die Verfüllung der Leitungszone hat mit geeignetem Verfüllmaterial zu erfolgen. Für kleine Rohrdurchmesser und schmale Gräben erfolgt die Verfüllung bis zum Planum der Leitungszone in einem Zug, wobei im Allgemeinen nur eine händische Verdichtung der Verfüllung in der Leitungszone und auch im Zwickelbereich möglich ist. Bei großen Rohrdurchmessern und breiten Gräben erfolgt die Verfüllung und Verdichtung in der Leitungszone im Allgemeinen lagenweise, wobei darauf zu achten ist, dass keine Ovalisierung der Rohre in Vertikalrichtung auftritt.

Die Verfüllung der Wiederverfüllzone hat mit geeignetem Verfüllmaterial, entsprechend den Anforderungen der Straßenerhalter, zu erfolgen, wobei die Einbringung und Verdichtung lagenweise in Schichten von etwa 30 cm zu erfolgen hat. Die im Zuge der Rohrgrabenverfüllung eingebrachten Verfüllmaterialien haben im Allgemeinen andere mechanische Eigenschaften als der ursprüngliche Boden. Zur Vermeidung nachträglicher Setzungen der Rohrgrabenverfüllung ist es notwendig, das eingebrachte Verfüllmaterial zu verdichten. Die Aufgabe bei der Verdichtung besteht darin, einerseits den Boden 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 Rohrgrabens verlorengegangene horizontale Verspannung des Bodens wiederherzustellen. Dies erfolgt im

Allgemeinen mit entsprechenden Verdichtungsgeräten und einem den Anforderungen entsprechenden Verdichtungsaufwand.

Die Verdichtung der Rohrgrabenverfüllung ist im Allgemeinen 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 sog. „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 Verdichtung in der Wiederverfüllzone erfolgt im Allgemeinen am Planum der obersten Schichte 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. Die Anforderungen für den Verformungsmodul in bestimmten Ebenen des Rohrgrabens zur Überprüfung der Verdichtung der Rohrgrabenverfüllung mit dem Lastplattenversuch sind im folgenden beispielhaft angegeben, wobei sich der Wert E_{V1} auf die Erstbelastung und der Wert E_{V2} auf die Wiederbelastung bezieht.

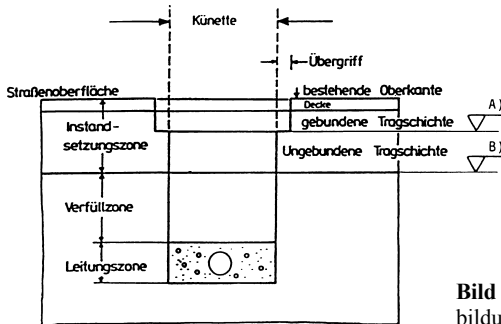


Bild 4: Rohrgrabenbau und Fahrbahnausbildung

Planum A: Planum der Wiederverfüllzone

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

7. Belastungen und Beanspruchungen in Rohrumfangsrichtung

Messungen des Verformungszustandes erdverlegter Kunststoffrohre unmittelbar nach dem Einbau, bei 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 liegen. Experimentelle und

analytische 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 eintreten können. Der in den einschlägigen Regelwerken 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, die wesentlich größer als die Erdlast sein kann.

In **Bild 5** sind prinzipiell die vertikalen Durchmesseränderungen eines Rohres unter den Einwirkungen durch den Einbau und den Betrieb aufgrund von Simulationen des Strukturverhaltens des Rohres bei lagenweiser Verfüllung und unterschiedlicher Verdichtung der Rohrgrabenverfüllung zur qualitativen Abschätzung der Einwirkungen durch den Verdichtungs Vorgang dargestellt. Das Bild zeigt, dass die lagenweise Verdichtung der Verfüllung in der Wiederverfüllzone wesentliche Verformungen in den Rohren und im bestehenden Boden hervorruft und einen beträchtlichen Einfluss hinsichtlich der Beanspruchung auf erdverlegte Rohre gegenüber den Einwirkungen im Betrieb haben kann.

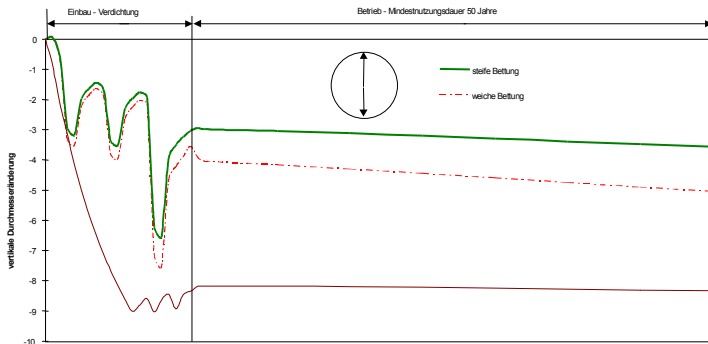


Bild 5: Verformung eines Rohres bei Einbau und im Betrieb

Für die Planung und den Bau von erdverlegten Rohrleitungen ist es notwendig, neben den Belastungen durch den Innendruck sowie den Auflasten auch die Auswirkungen der Bodeneigenschaften sowie der Einbauverhältnisse auf das Beanspruchungs- und Verformungsverhalten 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 Rohrrinnen- als auch am Rohraußenrand relativ einfach mit Hilfe der „Rohrkennfelder“ erfolgen [20]. Die Rohrkennfelder sind eine im Rahmen der Strukturanalyse erdverlegter Rohrleitungen neue, einfach zu handhabende Methode zur Erfassung und Darstellung des Beanspruchungs- und Verformungsverhaltens erdverlegter Rohre in Abhängigkeit von den mechanischen Eigenschaften der Rohre, den Verfüllmaterialien sowie den jeweiligen Belastungen. Mit Hilfe der Rohrkennfelder wird das Strukturverhalten der Rohre 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.

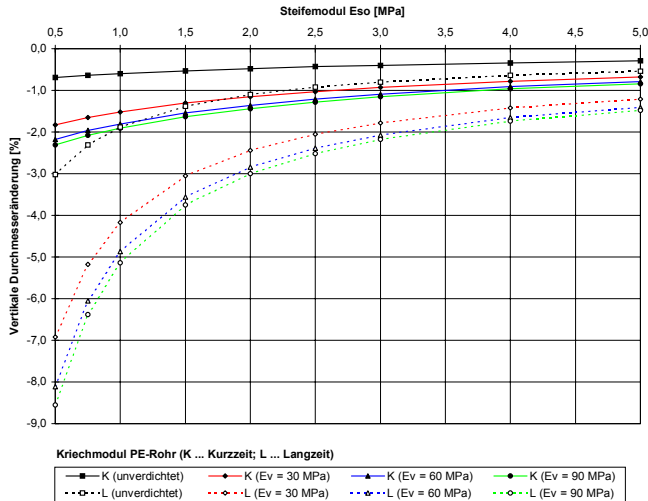


Bild 6: Vertikale Durchmesseränderung in Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad (PE-Rohr 160 x 9,1; SDR 17,6; Rohrüberdeckung: 1 m; Lastfall: Einbau)

Die **Bilder 6 und 7** zeigen beispielhaft Rohrkennfelder für die vertikale Durchmesseränderung des Rohres und die Umfangsspannung an der Rohrsohle innen für ein erdverlegtes PE-Rohr 160 x 9,1 und den Lastfall: Einbau mit 1 m Rohrüberdeckung, zufolge Einbau nach den einschlägigen Verlege- und Einbaurichtlinien, in Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad der Rohrgrabenverfüllung – unverdichtet / $E_v = 30$ MPa / $E_v = 60$ MPa / $E_v = 90$ MPa – über eine Nutzungsdauer von 50 Jahren.

Die Werte für den Beanspruchungs- und Verformungszustand der Rohre sind in den Rohrkennfeldern für den Steifemodul der unverdichteten Rohrgrabenverfüllung E_{S0} in der Leitungszone, den mechanischen Eigenschaften des Rohrwerkstoffes des Kurzzeit- und Langzeitbelastung, entsprechend den viskoelastischen Eigenschaften des Rohrwerkstoffes PE und dem Verdichtungsgrad der Rohrgrabenverfüllung am Planum der Wiederverfüllzone ausgewiesen.

Bild 6 zeigt, dass das Verformungsverhalten der PE-Rohre in gewissen Bereichen sehr stark vom Bodensteifemodul, dem Kriechmodul des Rohrwerkstoffes PE sowie dem Verdichtungsgrad der Rohrgrabenverfüllung abhängig ist. Je geringer der Bodensteifemodul und je höher der Verdichtungsgrad ist, umso größer sind die Verformungen im PE-Rohr, da die Abstützwirkung des Bodens gegen die Rohrverformung abnimmt und sich damit durch die Verdichtung höhere Verformungen im Rohr einstellen können. **Bild 6** zeigt weiterhin, dass durch das viskoelastische Verhalten des Rohrwerkstoffes PE 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 geringem Bodensteifemodul und einem hohen Verdichtungsgrad zu erkennen. Bei einem höheren Bodensteifemodul 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.

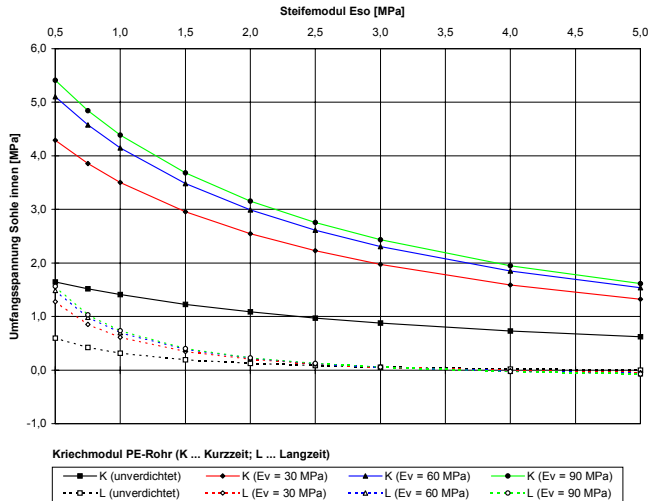


Bild 7: Umfangsspannung Sohle innen in Abhängigkeit vom Verdichtungsgrad (PE-Rohr 160 x 9,1; SDR 17,6; Rohrüberdeckung: 1 m; Lastfall: Einbau)

Bild 7 zeigt die Umfangsspannung an der Rohrsohle innen als Funktion des Bodensteifemoduls, des Kriechmoduls des Rohrwerkstoffes sowie für die verschiedenen Verdichtungsgrade. Aus den Kurven ist deutlich das Relaxationsverhalten des Rohrwerkstoffes zu erkennen. Weiterhin 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.

8. Belastungen und Beanspruchungen in Rohrlängsrichtung

Die nach dem Stand der Technik übliche Annahme gleichmäßiger Umgebungsbedingungen der Rohre in der Leitungszone ist im Allgemeinen nicht erfüllt. Die Abweichungen der Umgebungsbedingungen für erdverlegte Rohrleitungen 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 Rohrbereich sowie 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, zufällig verteilte Verhältnisse in der Leitungszone. Die durch die Imperfektionen der Umgebungsverhältnisse erdverlegter Rohrleitungen in den Rohren auftretenden Belastungen werden als indirekte Lasten bezeichnet.

Die Belastung erdverlegter Rohrleitungen durch indirekte Lasten ist die Folge der erzwungenen geometrischen und mechanischen Anpassung der Rohre an die Umgebungsverhältnisse im erdverlegten Zustand. Dieser Anpassungsvorgang bewirkt Reaktionslasten vom Boden auf die Rohre, die als indirekte Lasten bezeichnet werden. Diese Belastungsgruppe lässt sich zwar einfach beschreiben, die Erfassung sowohl der Einwirkungen als auch der Auswirkungen auf

erdverlegte Rohre ist aber relativ schwierig. Der Grund liegt darin, dass die Effekte nur indirekt festzustellen sind und sowohl die Einwirkungen, als auch die Auswirkungen auf erdverlegte Rohrleitungen in gewissen Schranken einer Zufälligkeit sowohl hinsichtlich des örtlichen Auftretens als auch hinsichtlich der Größe unterliegen. Unter die Gruppe der indirekten Lasten fallen unter anderem die Einwirkungen durch:

- Unebenheiten der Rohrgrabensohle
- Ungleichmäßigkeit der Bettungs- und Einbettungsverhältnisse
- Ungleichmäßigkeit der Einbaulasten

Die geometrische und mechanische Anpassung des Rohres an die imperfekte Rohrgrabensohle führt zu Zusatzbeanspruchungen im Rohr, die wesentlich höher sein können als die im Betrieb zu erwartenden Belastungen. Eine ausführliche Darstellung der Ein- und Auswirkungen durch indirekte Lasten auf erdverlegte Rohrleitungen ist in [3, 7, 9] enthalten.

In **Bild 8** ist der gemessene Höhenverlauf einer Rohrgrabensohle mit Sandbettung dargestellt. Deutlich ist der zufällige Charakter des Höhenverlaufes zu erkennen. Das Rohr muss sich entsprechend der Interaktion zwischen Boden und Rohr dem Höhenverlauf geometrisch und mechanisch anpassen.

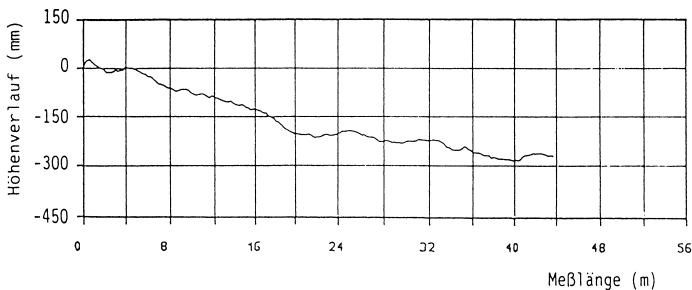


Bild 8: Gemessener Höhenverlauf einer Rohrgrabensohle

In **Bild 9** ist der gemessene Verlauf der Bettungsziffer der Rohrgrabensohle mit Sandbettung dargestellt und zeigt deutlich die ungleichmäßige Bettungssteifigkeit entlang der Rohrgrabensohle, die ebenfalls regellos, zufällig verteilt ist.

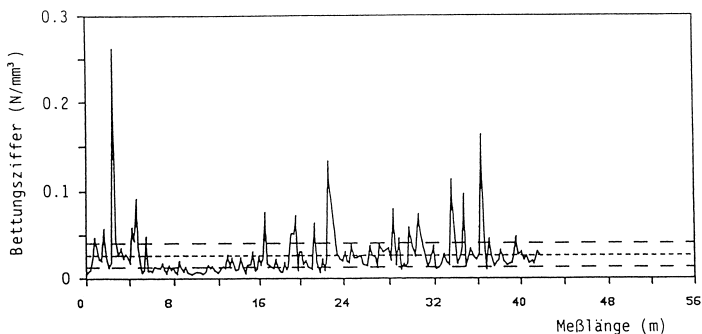


Bild 9: Gemessener Verlauf der Bettungssteifigkeit

9. Ausblick auf technische und wirtschaftliche Entwicklungen

Im Rahmen des vorliegenden Beitrages wird gezeigt, welche Konsequenzen sich für erdverlegte Leitungen bei der konventionellen Verlegung in offener Bauweise, entsprechend den einschlägigen Regelwerken sowie den Straßenwiederinstandsetzungsvorschriften der Straßenhalter, nach dem Motto „Straße als Verkehrs- und Versorgungsschiene“ ergeben. 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 Verfüllmaterialien sowie die Qualität der Einbauarbeiten maßgebend. Diese Erkenntnis wird durch Schadensfälle an Versorgungsleitungen kurz nach dem Einbau bestätigt, wo in den meisten Fällen als Ursache Einbaufehler nachgewiesen werden können. Abhilfe kann man schaffen, indem die zusätzlichen Lasten bei der Dimensionierung der Leitungen entsprechend berücksichtigt oder höhere Sicherheiten angesetzt werden. Auch durch stabilisierte Verfüllmaterialien können die Beanspruchungen in erdverlegten Leitungen reduziert werden.

Die Nachteile der konventionellen Verlegung von Leitungen in offener Bauweise mit Verdichtung der Grabenverfüllung können durch stabilisierte Verfüllmaterialien kompensiert werden, wobei durch die flüssige Einbringung eine gleichmäßige Bettung und Einbettung der Rohre in der Leitungszone sowie auch eine verdichtungsfreie Verfüllung in der Wiederverfüllzone möglich ist. Die Art der Einbringung der stabilisierten Verfüllmaterialien in die Leitungsgräben und die rasche Aushärtung lässt eine ausreichende Steifigkeit der Verfüllung mit nur geringen Setzungen und damit wesentliche Vorteile für die Straßenwiederinstandsetzung erwarten. Bei Verwendung stabilisierter Verfüllmaterialien wird es nicht notwendig sein, eine provisorische Straßenwiederinstandsetzung durchzuführen, sondern man kann auf die weitaus kostengünstigere Variante einer sofortigen definitiven Straßenwiederinstandsetzung übergehen. Damit sind auch wesentliche Vorteile hinsichtlich der Nutzungsdauer der Straßenverkehrsflächen zu erwarten. Die Verfüllung von Leitungsgräben mit stabilisierten Verfüllmaterialien bringt Vorteile hinsichtlich der 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.

10. 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.: Rohrgrabenverfüllung – neue technische und wirtschaftliche Aspekte; Rohrbau-Mitteilungen, Heft 1.1998
- [25] Kiesselbach, G.: Strukturanalyse von Rohrleitungssystemen infolge Einbau und Betrieb; 23. Wassertechnisches Seminar; Berichte aus Wassergüte- und Abfallwirtschaft, Technische Universität München 1999, Heft 150
- [26] Kiesselbach, G.: Erdverlegte PE-Rohre in der Gasversorgung, Strukturverhalten infolge mechanischer Einwirkungen; ÖVGW-Forschungsbericht, Forschung Gas, Wien 1993
- [27] Lang, R.W., Pinter, G. und Pelz, G.: Viskoelastische Eigenschaften von Polyethylen für Gasrohre; ÖVGW-Forschungsbericht, Forschung Gas, Wien 1996
- [28] Kiesselbach, G.: Statische Berechnung erdverlegter Gasrohrleitungen – Rohrkennfelder für PE-Rohre; ÖVGW-Forschungsbericht, Forschung Gas, Wien 1997

- [29] 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
- [30] Kiesselbach, G.: Überblick über den Leitungsbau in Österreich; Neue Methoden für Planung und Bau im Hinblick auf Qualität und Kosten; gwa, 80 (2000), Heft

Verfasser: Dipl.-Ing. Dr. techn. Gerhard Kiesselbach
Beratender Ingenieur
A-1100 Wien
Wienerbergstraße 7/7 OG
Telefon: 0043 1 60 70 940
Telefax: 0043 1 60 70 940 20
e-mail: kiesselbach@via.at