

HENRY

Hydraulic Engineering Repository

Ein Service der Bundesanstalt für Wasserbau

Conference Paper, Published Version

Horlacher, Hans-Burkhard; Standfuß, Matthias

Druckwellenausbreitung in erdverlegten Rohrleitungen aus PE-HD

Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen

Zur Verfügung gestellt in Kooperation mit/Provided in Cooperation with:

Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik

Verfügbar unter/Available at: <https://hdl.handle.net/20.500.11970/103759>

Vorgeschlagene Zitierweise/Suggested citation:

Horlacher, Hans-Burkhard; Standfuß, Matthias (2008): Druckwellenausbreitung in erdverlegten Rohrleitungen aus PE-HD. In: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik (Hg.): Aktuelle Forschungen im Wasserbau 1993 - 2008. Dresdner Wasserbauliche Mitteilungen 36. Dresden: Technische Universität Dresden, Institut für Wasserbau und technische Hydromechanik. S. 82-88.

Standardnutzungsbedingungen/Terms of Use:

Die Dokumente in HENRY stehen unter der Creative Commons Lizenz CC BY 4.0, sofern keine abweichenden Nutzungsbedingungen getroffen wurden. Damit ist sowohl die kommerzielle Nutzung als auch das Teilen, die Weiterbearbeitung und Speicherung erlaubt. Das Verwenden und das Bearbeiten stehen unter der Bedingung der Namensnennung. Im Einzelfall kann eine restriktivere Lizenz gelten; dann gelten abweichend von den obigen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Documents in HENRY are made available under the Creative Commons License CC BY 4.0, if no other license is applicable. Under CC BY 4.0 commercial use and sharing, remixing, transforming, and building upon the material of the work is permitted. In some cases a different, more restrictive license may apply; if applicable the terms of the restrictive license will be binding.



Druckwellenausbreitung in erdverlegten Rohrleitungen aus PE-HD

Veranlassung

Rohre aus PE-HD sind aus der heutigen Wasserversorgung nicht mehr wegzudenken. Vor allem in kommunalen, aber auch in überörtlichen Versorgungssystemen, wird der Kunststoff immer häufiger den herkömmlichen metallischen Rohrwerkstoffen gegenüber bevorzugt. Der Erfolg des Rohrmaterials ist durch eine Vielzahl von bau- und betriebsseitigen Argumenten begründet. Exemplarisch seien hier das unproblematische Korrosionsverhalten, die geringen hydraulischen Fließwiderstände und die flexiblen Rohr- / Formstücksysteme genannt, die dem Rohrnetzbetreiber letztendlich Bau- und Betriebskostenvorteile versprechen.

Somit hat sich nunmehr ein Werkstoff auf dem Markt positioniert, dessen Materialeigenschaften von denen der klassischen Rohrwerkstoffe teils deutlich abweichen. Im Hinblick auf die Ausbreitung von Druckstößen ist sogar denkbar, dass nicht nur das Verformungsverhalten des Kunststoffrohres, sondern auch die Steifigkeit des umgebenden Erdreiches den Strömungsvorgang beeinflussen kann. Mit den durchgeführten Untersuchungen wird dieser Problematik nachgegangen.

Ausgehend von Druck- / Dehnungsuntersuchungen am Rohr wurden für die Druckwellenausbreitung relevante Materialeigenschaften der PE-HD-Rohre ermittelt. In Verbindung mit einem auf die Untersuchungsthematik angepassten Berechnungsverfahren konnten abschließend die Auswirkungen des Materialverhaltens und der Bettungsbedingungen auf die instationären Strömungsvorgänge im Rohr dargestellt werden.

Materialgesetz und Dehnungsberechnung

Klassische Werkstoffe des Rohrleitungsbaus wie Stahl, Guss oder auch Spannbeton weisen zumindest innerhalb der im Betrieb auftretenden Belastungsgrenzen ein linear elastisches Dehnungsverhalten auf. Im Gegensatz dazu folgt PE-HD einem viskoelastischen, also zeitabhängigen, Materialgesetz. Grundsätzlich kann viskoelastisches Materialverhalten durch so genannte Voigt-Kelvin-Elemente beschrieben werden, wobei für die Beschreibung eines realen Materials mehrere Voigt-Kelvin-Elemente miteinander zu kombinieren sind.

Untersuchungen anderer Autoren (u. a. Covas et al.) haben gezeigt, dass dazu eine „Reihenschaltung“ aus mindestens vier Elementen erforderlich ist. Für die hier beschriebenen Untersuchungen wurde eine Kombination von fünf Voigt-Kelvin-Elementen in Verbindung mit einem weiteren, linear-elastischen Dehnungselement zugrunde gelegt. Das Materialgesetz wird somit durch einen Satz von elf Parametern, nämlich fünf Retardationszeiten $\tau_1 \dots \tau_5$ und sechs Steifigkeiten $E_0 \dots E_5$ beschrieben.

Die Wirkungsweise dieses Materialgesetzes wird durch Abbildung 1 veranschaulicht und durch Gleichung (1) beschrieben. Unter der Einwirkung einer in $t=0$ plötzlich aufgebrachtten Einheitsspannung σ verformt sich das Dehnungselement. Der zeitliche Deformationsverlauf wird durch die Kriechfunktion J dargestellt, die der Dehnung unter einer Einheitsspannung $\sigma = 1$ entspricht:

$$J = \left[\frac{1}{E_0} + \sum_{i=1}^r \frac{1}{E_i} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_i}} \right) \right] \quad (1)$$

Es gilt:

- E_0 Steifigkeitsmodul des linear-elastischen Dehnungsanteiles
- r Anzahl der Voigt-Kelvin-Dehnungselemente i
- E_i Steifigkeitsmodul des Voigt-Kelvin-Elementes bei voller Ausdehnung ($t \rightarrow \infty$)
- t Betrachtungszeitpunkt
- τ_i Retardationszeit des Voigt-Kelvin-Elementes

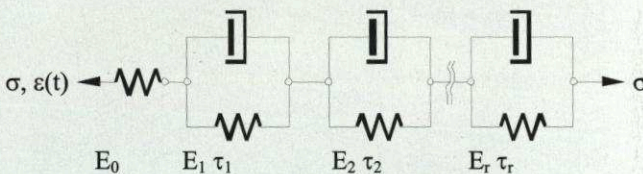


Abbildung 1 Materialgesetz der Untersuchung

Für die Berechnung der tatsächlichen Dehnung unter beliebigen, z. B. gemessenen oder berechneten, Lastverläufen wurde auf ein diskretes numerisches Verfahren zurückgegriffen, das von Covas et al. (2004) vorgeschlagen wurde. Die Rechenmethode erlaubt die schrittweise Berechnung des Dehnungszustandes zu einem beliebigen Zeitpunkt, wobei der im vorhergehenden Zeitschritt ermittelte rheologische Dehnungszustand, der unbelastete Ausgangszustand und die zwischenzeitlich eingetretenen Laständerungen in die Berechnung einfließen. Dieses Verfahren wurde sowohl zur Auswertung von Versuchen als auch im Rahmen von Druckstoßberechnungen eingesetzt. Von besonderem Vorteil sind

die vergleichsweise geringen rechentechnischen Anforderungen, da nur wenige Zahlen für die Berechnung des folgenden Zeitschrittes beibehalten werden müssen.

Experimentelle Untersuchungen

Die durchgeführten Untersuchungen hatten das Ziel, die Dehnungen der Rohrwand während und nach einer plötzlichen Änderung des Innendruckes zu erfassen, und daraus die Parameter des Materialgesetzes zu ermitteln. Es wurden sowohl erdverlegte als auch freiliegende Rohre untersucht.

Für die Untersuchungen wurde in einem Klimaraum am Hubert-Engels-Labor des Institutes für Wasserbau und Technische Hydromechanik der TU Dresden ein Versuchsstand errichtet, in dem ein ca. 2,0 m langes Rohrstück untersucht werden konnte. Der Versuchsstand wurde bei Bedarf mit Sand gefüllt und von der Erdoberfläche her über ein hydraulisches Pressensystem belastet. Dies erlaubte die Simulation verschiedener Verlegetiefen des Rohres. Mittels eines pneumatisch-hydraulischen Systems wurde ein plötzlicher Druckanstieg im Rohr generiert. Auf die Außenwand des Rohres applizierte Dehnmessstreifen ermöglichten die Erfassung der Dehnungen des Rohres. Der Innendruck wurde von einem Manometer erfasst. Letztendlich wurden die digitalisierten Messwerte mit einer Frequenz von 50 bzw. 100 Hz aufgezeichnet.

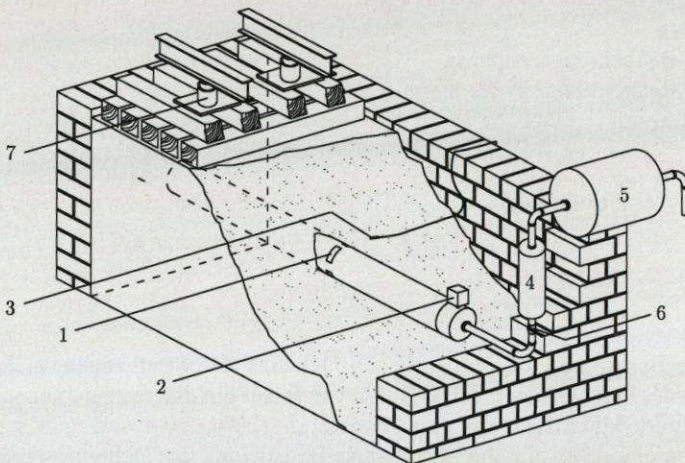


Abbildung 2 Schematische Abbildung des Versuchsstandes:

- | | |
|---------------------|---------------------|
| 1: Dehnmessstreifen | 2: Manometer |
| 3: Temperatursensor | 4: Übergabebehälter |
| 5: Windkessel | 6: Kugelhahn |
| 7: Hydraulikpresse | |

Durch die Aufstellung des Versuchsstandes im Klimaraum konnten die Temperaturverhältnisse in Grenzen zwischen ca. 7°C und 17°C kontrolliert werden, so dass der nicht zu vernachlässigende Einfluss des Temperaturzustandes berücksichtigt und gesteuert werden konnte. Weiterhin erlaubten die Laborverhältnisse auch eine ausreichend lange Ruhezeit zwischen zwei Versuchen, in denen sich die eingetragenen Verformungen praktisch vollständig zurückbilden konnten.

Bestimmung der Kriechfunktionen

Aus den aufgezeichneten Druck-/Dehnungsverläufen eines jeden Einzelversuches wurde anschließend auf die Parameter des jeweils zugrunde liegenden Materialgesetzes geschlossen. Die Problematik wurde als nichtlineares Optimierungsproblem dargestellt und mit Hilfe eines numerischen, auf dem Levenberg-Marquardt-Algorithmus basierenden Rechenverfahrens gelöst. Aus verschiedenen Gründen erwies es sich als sinnvoll, die fünf diskreten Retardationszeiten des Materialgesetzes vorab detailliert zu untersuchen und separat festzulegen. Es wurden Retardationszeiten von

$\tau_1 \dots \tau_5 = 0,05; 0,8; 3,0; 10,0$ und 25 s

gewählt. Diese Zeiten berücksichtigen bereits die geplante Verwendung der Parametersätze in den weiterführenden hydraulischen Berechnungen.

Im Rahmen des numerischen Optimierungsmodells mussten somit die verbleibenden Materialparameter $E_0 \dots E_5$ bestimmt werden. Durch das gewählte Vorgehen wurden die individuellen Randbedingungen eines jeden Versuches direkt in das zu Grunde gelegte Materialgesetz eingeschlossen und nicht separat betrachtet. Der für einen Versuch gefundene Parametersatz umfasst also Einflüsse des Rohrmaterials, der Verlegesituation und der jeweils herrschenden Temperaturrandbedingungen. Daher muss der Vergleich zweier Materialgesetze jeweils die unterschiedlichen Randbedingungen berücksichtigen.

Die gefundenen Kriechfunktionen erlauben einen ersten Vergleich des Deformationsverhaltens in den untersuchten Szenarien. Die Abbildung 3 zeigt am Beispiel des Rohres DN 225 die Beeinflussung der Kriechfunktionen durch die Umgebungstemperatur und die Verlegetiefe. Erwartungsgemäß führen niedrige Temperaturen und hohe Verlegetiefen zu geringeren Nachgiebigkeiten des Materials. Besonders deutlich wird der Effekt bei Rohren größeren Durchmessers, da diese Rohre höhere radiale Verformungen erreichen und dementsprechend größere Widerstände im Erdreich aktivieren können.

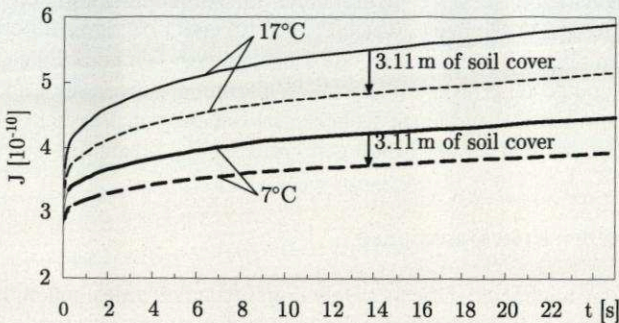


Abbildung 3 Einfluss von Erdüberdeckung und Temperatur auf die Kriechfunktionen

Instationäre Strömungsberechnungen

Die Auswirkungen der identifizierten Materialgesetze auf instationäre Strömungsvorgänge innerhalb des Rohres wurden mit Hilfe numerischer Berechnungen untersucht und veranschaulicht. Dazu wurde eine Berechnungssoftware, die auf dem Charakteristikenverfahren basiert, entwickelt. Für die Berücksichtigung des viskoelastischen Materialverhaltens musste der klassische Berechnungsalgorithmus entsprechend erweitert werden. Zur Herleitung der Gleichungen und die Erläuterung des Berechnungsalgorithmus wird auf Standfuß (2005) verwiesen.

Zunächst wurde ein von Covas et al. untersuchter Versuchsaufbau modelliert. Unter Verwendung der von dort gefundenen Materialgesetze konnte zunächst gezeigt werden, dass der aufgestellte Rechenalgorithmus in der Lage ist, reale Ereignisse mit hoher Genauigkeit nachzubilden. In einem weiteren Schritt wurden Simulationen unter Verwendung der in den eigenen Versuchen und Berechnungen ermittelten Materialgesetze durchgeführt (siehe Abbildung 4). Die Resultate zeigen, dass mit den selbst ermittelten Kriechfunktionen die gleichen hydraulischen Reaktionen berechnet werden, wie von Covas et al. (2005) gemessen haben. Somit wurde gezeigt, dass die ermittelten Kriechfunktionen grundsätzlich zutreffend und für die Verwendung im Rahmen der Druckstoßberechnungen geeignet sind.

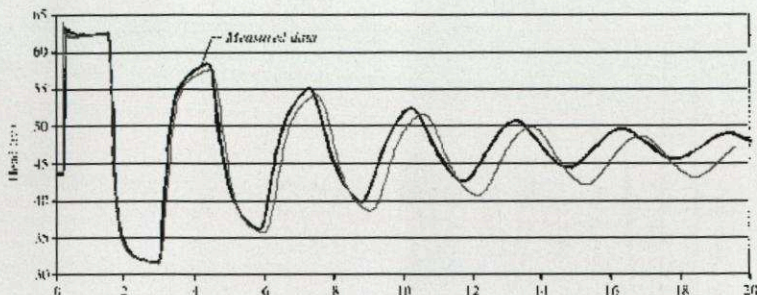


Abbildung 4 Vergleich von Mess- und Rechenwerten unter Nutzung selbst ermittelter Materialgesetze (Versuchsergebnisse Covas et al.)

In weiterführenden Berechnungen anhand eines Beispielmodells wurde der ursprünglichen Fragestellung nach den Auswirkungen der Bettungsbedingungen auf die instationäre Strömungsbildung nachgegangen. Es konnte gezeigt werden, dass solche Auswirkungen eintreten. Ein von Erdreich umgebenes Rohr setzt einer Druckänderung einen höheren Verformungswiderstand entgegen, und stellt aus hydromechanischer Sicht ein steiferes System dar. In Folge dieser Effekte muss mit höheren Ausbreitungsgeschwindigkeiten der Druckwelle und geringeren Amplitudendämpfungen der ausgelösten Druckschwingung gerechnet werden. Dies wird in Abbildung 5 deutlich. Die Beträge dieser Auswirkungen sind jedoch vergleichsweise gering und in etwa mit den Beträgen jener Effekte vergleichbar, die aus unterschiedlichen Temperaturen des Boden-Rohr-Systems resultieren.

Zusammenfassung

Aufbauend auf experimentellen Untersuchungen an eingedeten und freiliegenden Rohren konnten die Parameter der komplexen viskoelastischen Materialgesetze von PE-HD-Rohren ermittelt werden. Diese Materialgesetze fanden Eingang in numerische Druckstoßberechnungen, mit denen die Auswirkung der Bettungsverhältnisse auf instationäre Strömungen innerhalb der Rohre analysiert wurde. Dazu wurde der Berechnungsalgorithmus des klassischen Charakteristikenverfahrens so modifiziert, dass das viskoelastische Materialverhalten berücksichtigt werden konnte.

Im Ergebnis der Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass mit zunehmender Verlegetiefe und mit zunehmendem Rohrdurchmesser eine stützende Wirkung des Erdreiches auftritt, die bei instationären Fließvorgängen im Rohr zu kürzeren Wellenlaufzeiten und geringeren Dämpfungen der Wellenamplitude führt.

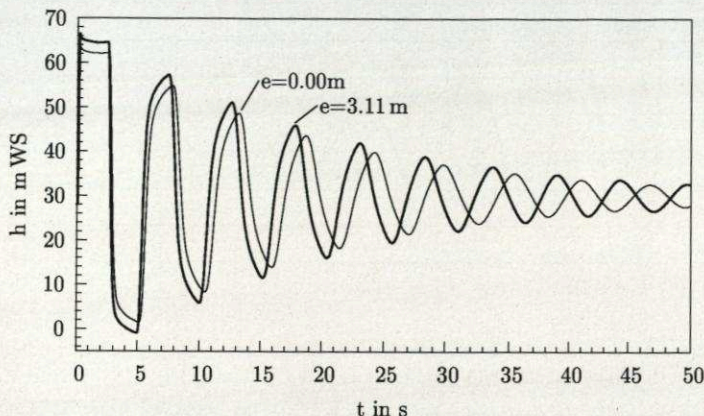


Abbildung 5 Druckverlauf nach plötzlichem Schließen des Auslaufventils an eingedetem und freiliegendem Rohr DN 225 (e: Verlegetiefe)

Literatur

Standfuß, M.: Druckwellenausbreitung in erdverlegten Rohrleitungen aus PE-HD, Dissertation, TU Dresden

Covas, D. et al.: The dynamic effect of pipe-wall viscoelasticity in hydraulic transients – part I – experimental analysis and creep characterization, Journal of hydraulic research, 2005

Covas, D. et al.: The dynamic effect of pipe-wall viscoelasticity in hydraulic transients – part II – model development, calibration and verification, Journal of hydraulic research, 2004

Kontakt

Zeitraum: 2000 – 2005
 Finanzierung: Eigenfinanzierung
 Projektleiter: Prof. Dr.-Ing. habil. Hans-B. Horlacher
 Bearbeiter: Dr.-Ing. Matthias Standfuß