

Zusammenfassung

IGF-Nr.: 14365 N

Lebensdauer und Schädungsverlauf von PVC-U Vollwandrohren

Ein großes Anwendungsfeld für den Werkstoff PVC-U ist die Herstellung von Kanalrohren. Im einfachsten Fall treten an den erdverlegten PVC-U Rohren im Laufe der Nutzungsdauer praktisch nur statische Belastungen auf. Befindet sich das erdverlegte Rohr jedoch im Einflussbereich eines Verkehrsweges oder im Extremfall direkt darunter, so müssen bei der Dimensionierung des Rohres auch die Wirkungen von dynamischen Belastungen berücksichtigt werden. Für die Zulassung von Kunststoffkanalrohren im Einflussbereich von Gleisen beim Eisenbahn-Bundesamt wird deshalb u.a. ein dynamischer Festigkeitsnachweis für 10^8 Lastspiele gefordert. Ein experimenteller und zudem statistisch abgesicherter Lebensdauernachweis für 10^8 Lastspiele ist allerdings mit einem extrem hohen Prüfaufwand und Kosten verbunden, die insbesondere die Möglichkeiten der KMU in der Kunststoffrohrbranche überschreiten.

Das Ziel des Forschungsvorhabens besteht darin, die Lebensdauer und den Schädungsverlauf von PVC-U Vollwandrohren unter äußerer Druckschwellbelastung durch Wöhlerlinien zu beschreiben. Diese Wöhlerlinien sollen sowohl für den Werkstoff als auch für das Bauteil (Vollwandrohr) erzeugt werden, so dass die Lebensdauerdaten mit mathematischen Hilfsmitteln prinzipiell verallgemeinert werden können, d.h. auf andere Rohrkonstruktionen anwendbar sind. Außerdem soll auf der Basis eines vorhandenen FEM-Programms eine parametrisierte Eingaberoutine für den Anwendungsfall der gebetteten Rohre mit Anwendung der ermittelten Materialkennwerte aufgestellt werden. Die Berechnungsroutine bzw. ein gleichwertiger analytischer Ansatz sowie geeignete Bemessungskennwerte sollen schließlich in bestehenden Richtlinien, Normen und Arbeitsblätter einfließen.

Das Forschungsvorhaben wird in Kooperation der beiden Forschungsstellen SKZ-KFE gGmbH, Würzburg (FSt 1) und der LGA – Institut für Statik, Nürnberg (FSt 2) bearbeitet. Am SKZ werden die für den rechnerischen Nachweis benötigten Werkstoffkennwerte in statischer und dynamischer (Langzeit)belastung ermittelt. Diese werden für den Werkstoff PVC-U als Zug- und Biegeversuche und für die Validierungsmessungen am Bauteil (PVC-U Vollwandrohre) als Scheiteldruckversuche ausgeführt. Bei der LGA erfolgt die rechnerische Nachweisführung mittels FEM für den Anwendungsfall des gebetteten Rohres auf Basis der ermittelten Kennwerte. Die Berechnungsroutine wird durch die Versuchsergebnisse am Rohr verifiziert.

Untersucht werden insgesamt 8 verschiedene PVC-U Rohre von 4 verschiedenen Rohrherstellern, wodurch gewährleistet werden soll, dass eine verallgemeinerte Aussage zu PVC-U Rohren mit unterschiedlichen Dimensionen, Rezeptur und Verarbeitung getroffen werden kann. Zunächst werden alle Rohre bzw. Rohrwerkstoffe über Kurzzeitversuche in Zug- und Biegebelastung bzw. Scheiteldruckversuche am Rohr charakterisiert. Auch wird überprüft, ob eine normierte Auftragung bezüglich des

Durchmesser/Wanddickenverhältnisses SDR möglich ist, was eine weitere Aussage zur Übertragbarkeit auf andere Rohrdimensionen und Geometrien zulässt.

Für die Langzeitauslegung der Rohre auf die geforderte Lebensdauer von 50 Jahren werden statische Kriechversuche wiederum in Zug- und Biegebelastung bzw. Scheiteldruckbelastung am Rohr durchgeführt, welche zur Anpassung eines statischen Kriechgesetzes für die FEM benötigt werden.

Zur Beschreibung des Ermüdungsverhaltens werden Wöhlersuche in Zugschwell-, Biegeschwell- und Scheiteldruckschwellbelastung bei einem Lastverhältnis von $R = 0,2$ bis zu Lastspielzahlen von 10^8 durchgeführt. Dabei wird für die untersuchten PVC-U Rohrwerkstoffe im Lastspielbereich von ca. 10^6 bis 10^7 ein Einmünden in einen Dauerfestigkeitsbereich beobachtet. Dies zeigt sich gleichermaßen in Zug- und Biegeschwellbelastung. Kontrollmessungen am Rohr in Scheiteldruckschwellbelastung bestätigen dies ebenfalls. Eine Extrapolation der Wöhlerlinie auf 10^8 Lastspiele, basierend auf Messungen bis ca. $2 \cdot 10^6$ Lastspiele, wie dies sonst üblich ist, führt deshalb zu einer konservativen Auslegung und bei der Bauteilbemessung zu einer zusätzlichen Sicherheitsreserve. Bei der Auslegung durch Extrapolation wird das Rohr überdimensioniert und ein mögliches Kosteneinsparungspotenzial nicht genutzt.

Um auch Lastspielzahlen bis 10^8 realisieren zu können wurde die Prüffrequenz teilweise bis 40 Hz erhöht. Die stärkere Probenerwärmung beim Messen mit Frequenzen deutlich größer 3 Hz kann dabei zumindest teilweise durch das Messen mit kleineren Lasten kompensiert werden, ohne dass es zu einem vorzeitigen thermischen Versagen der Probe kommt. Das bedeutet, es ist durch eine Erhöhung der Prüffrequenz möglich, die Messzeiten zur Realisierung von Lastspielzahlen von 10^7 bis 10^8 deutlich zu reduzieren. Damit konnte erstmals ein experimenteller Nachweis bis 10^8 Lastspiele für PVC-U Rohrwerkstoffe erbracht werden.

In Biegung werden generell höhere Festigkeiten bestimmt als in Zugbelastung. Dies ist in erster Linie darauf zurückzuführen, dass bei der Berechnung (nach DIN EN ISO 178) ein linearer Spannungsverlauf über dem Biegequerschnitt angenommen wird, was lediglich bei kleinen Verformungen im Bereich linear-elastischen Verhaltens gegeben ist. Der Rechenwert der Biegezugfestigkeit von 90 MPa in der ATV A-127 muss für die FEM bei Anwendung einer Fließregel bei numerischen Berechnungen durch den Zugfestigkeitswert von ca. 50 MPa ersetzt werden. In der FEM werden Materialparameter geometrieunabhängig eingegeben. Daher darf nicht die Biegezugfestigkeit als Von-Mises-Spannung angegeben werden. Es wird empfohlen, dass in die ATV A-127 Zusatzbemerkungen zum Aufstellen von Statiken mit der FEM eingearbeitet werden. Diese wurden bereits als Tischvorlage im Ausschuss präsentiert.

Im Vergleich ergeben sich beim dynamischen Kriechen geringere Dehnungen als beim statischen Kriechen, da die Oberspannung nicht permanent wirkt. Das bedeutet, dass für die Langzeitauslegung gegen Verformung ein statischer Verformungsnachweis genügt bzw. auf der sicheren Seite liegend geführt werden sollte.

Allerdings ist die Festigkeit bei dynamischer Belastung geringer als bei statischer Last. Das bedeutet, dass für die Langzeitauslegung bei dynamischer Belastung Ermüdungsversuche (Wöhlerversuche) unbedingt notwendig sind.

Mit einem linear-elastisch-plastischen Stoffgesetz werden die Versuchsergebnisse durch die FEM-Berechnungen zufriedenstellend wiedergegeben. Parameterstudien bezüglich der verschiedenen Rohrarten, an denen Messungen durchgeführt wurden, sichern die Ergebnisse ab. Parameterstudien auf Basis des FEM-Modells werden

bezüglich der Lastsituation durchgeführt. Dabei stellt sich heraus, dass die Rohre direkt unter Eisenbahnverkehrslasten am meisten Last ertragen müssen.

Ein Bemessungskonzept für den Verformungsnachweis und Spannungsnachweis bei dynamischer Belastung des gebetteten Rohres wird vorgestellt und mit dynamischen und statischem Kriechmodul durchgeführt. Dabei wird festgestellt, dass der Nachweis mit dem statischen Kriechmodul auf der sicheren Seite liegt und wie im Beispiel gezeigt durchgeführt werden kann. Dabei kann der Kriechmodul iterativ in Abhängigkeit vom Spannungsniveau bestimmt werden und so eine genauere Bemessung vorgenommen werden. Dieser vereinfachte, analytische Ansatz kann in die bestehenden Richtlinien, Normen und Arbeitsblätter (ATV) eingearbeitet werden.

Eine Parameterstudie wurde mit zwei Rohrdurchmessern und den Böden G1 und G2 unter Variation der Überdeckungshöhe durchgeführt. Sie zeigt, dass das Spannungsniveau im Bereich von 5 MPa bleibt und daher die hergeleiteten Kriechgesetze zufriedenstellend anwendbar sind, denn diese bilden die Messdaten im unteren Spannungsbereich gut ab. Es zeigt sich weiterhin, dass der mit dem Kriechgesetz hergeleitete Kriechmodul, der höher ist als der in der ATV A-127 angegebene von 1500 MPa, zu kleineren Verformungen führt und daher im Vergleich zur ATV zu einer weniger konservativen Bemessung führt. Die Parameterstudien zeigen, dass der Verformungsnachweis der maßgebende Nachweis ist.

Danksagung und Bestellhinweis

Das IGF-Vorhaben 14365 N der Forschungsvereinigung FSKZ e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und –entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Wir bedanken uns für die finanzielle Unterstützung.

Die gesamten Forschungsergebnisse können einem umfangreichen Forschungsbericht entnommen werden. Dieser kann auf Anfrage beim SKZ zum Selbstkostenpreis bestellt werden. Die Rechnung wird mit dem Bericht zugeschickt.